

# 芝浦機械技報

SHIBAURA MACHINE  
ENGINEERING REVIEW

Apr. 2024

Vol. 30

特集

労働生産性  
向上



■ 巻頭言	2	巻頭言
■ 特別記事	3	労働生産性向上への取り組み
■ 技術論文	6	Real-Time Monitoring of Pellet Plastication in a Full-Flight Screw and Kneading Disk Elements of a Co-Rotating Self-Wiping Twin-Screw Extruder by Acoustic Emission (AE) Sensing
	18	Slurry Conditions for Reaction-Induced Slurry-Assisted Grinding of Optical Glass Lens
	25	従属アーキテクチャ 自律ロボットのための新しい制御構造
	35	きさげ作業におけるあたり模様の抽出と評価用AIモデルの開発
	40	半導体パッケージ配線形成プロセス all dry化に向けた 中真空PVDによる界面制御技術の開発
■ 技術報告	45	環境に配慮したダイカスト技術の製法検証
	51	透明樹脂成形における不良発生原因の究明
	56	シート・フィルム製造装置の自動化への取り組み
	60	5軸割出加工における工具刃先位置測定
	63	技能レス研削加工のための要素技術の紹介
	66	ロジロボシリーズによる物流ラインの構築
	70	協働ロボット安全システム「Dual Safety Core」の開発
	74	精密加工機械部品の高効率生産プロセス開発
	■ 新製品ニュース	78
80		超大型電動射出成形機EC3000SXIII
83		テーブル形横中ぐりフライス盤BTH ストレッチ仕様の開発
86		ポリゴンミラー加工機UFG-150D(PV)の紹介
88		TCminiシリーズ TC11-02 の紹介
89		スカラロボットTHE800/THE1000の紹介
■ シリーズ		91
■ コラム	50	単軸押出機のHUMスクリュ開発の思い出
	55	私にとってのやりがい
	100	未知への挑戦から学ぶ
■ 受賞・特許ニュース	101	特許・講演・執筆・受賞
	106	受賞トピックス
	107	特許紹介
■ 講評	111	講評



代表取締役社長  
最高経営責任者  
最高執行責任者  
社長執行役員

## 坂元 繁友

当社にとりまして製造メーカーとしての技術開発、蓄積は大変重要な資産であり事業の本質にあたります。この第30号技報にて、我々の技術開発の状況や成果をステークホルダーの皆様にご紹介し、弊社への期待や安心を持っていただけたならば大変うれしく思います。

今回の技報のテーマは「労働生産性向上」です。弊社が開発、商品化してきた生産性にかかわる事例をご紹介します。是非ご一読いただきますようお願いいたします。

弊社は「経営改革プラン」という中期経営計画を実行しており、今年度はその最終年度となります。売上高1350億円、営業利益率8.0%、ROE8.5%を目標に全社を挙げて取り組んでいます。事業構造の改革、投資の推進等の施策を経営的には進めていますが、その柱となるものが商品力、技術力であり各カンパニーの経営目標を達成する源泉となります。

現在、我々製造メーカーを取り巻く環境は時代と共に大きく変わり、マーケット、お客様から求められるものも多様化、さらに高品質、高効率化が求められています。特にAIやDXの活用は近年スピードが加速しており、製造装置の概念を変えてしまう程の技術革新が進んでいます。また、単一商品のご提供ではなくシステムエンジニアリングを駆使して前後工程も含めたソリューション提案も重要となってきます。

例えば、自動車産業は内燃機関からEVへ進出し、レシプロエンジンやトランスミッションを持った構造から、モータ、電池といった構造に変化してきています。部品点数も一体化成形等で大幅に削減、生産性も格段にあげることが求められます。

それらを実現するためには、今までの技術の改良だけでは対応できなくなり、新たな分野の技術開発、ハード面だけでなくソフトによる付加価値の高度化を実現できることが重要になってきます。

我々も常に最先端の技術をご提供できるように、R&Dセンターを中心に技術の習得、レベルアップを目指していきます。過去を振り返ってみますと、我々は、その時代に求められるものを提供し続けてきました。戦時の大型工作機械、復興時の繊維機械、高度経済成長時の鉄鋼用工作機械、自動車の部品製造装置等大きなマーケットの生産の一役を担ってまいりました。今後はエネルギーや蓄電、軽量化、リサイクルが成長していく市場であり、それらに対応可能な装置をしっかりとご提供できるよう、技術を維持、発展させていかなければならないと考えています。

今回の「労働生産性向上」というテーマは、単に原価を下げることだけでなく、SDGsいわゆる社会の持続可能性に直結するものであり、いかに少ないエネルギーで効率良く生産できるか、人や自然に優しいものか、生産された物のリサイクルがしっかり組み込まれているかが重要になります。この部分についても弊社は全社を挙げて取り組んでまいります。

最後に、コロナが収束し人の往来もグローバルに活性化しています。一方でロシアのウクライナ侵攻、パレスチナ問題など戦争も多発して地政学の観点から不安定な状況も続いています。中国と米国のサプライチェーンの争奪戦も繰り広げられています。

その中でステークホルダーの皆様が、安定的に事業を継続され競争力を高められるよう、継続的に基礎技術を磨き、新商品の開発を行い、常にお客様のご要求に対応しお役に立てるよう努力して参りたいと思っております。

本第30号技報にてその一端をご紹介します。幸いです。

# 労働生産性向上への取り組み

## Efforts to improve labor productivity

### 制御機械カンパニー カンパニー長 常務執行役員 伊藤 雅文



## 1. はじめに

日本の人口は2008年の1億2,808万人をピークに減少に転じ、2060年には9,000万人を割り込むとも言われており、高齢化率も40%近い水準になると予測されている。この少子高齢化の急速な進展により生産年齢人口も減少の一途を辿っている中、労働生産性の向上は急務かつ継続的課題となっている。これまで世界経済を牽引してきた中国等の後進国でさえ同様の傾向であり、世界的な人手不足は共通の課題となっている。

芝浦機械グループが提供する機械・装置・システムが稼働する生産の現場においても労働生産性の向上は不可欠であり、製品・機能・サービスの付加価値により現場の効率改善への寄与度が大きなウェイトを占めてきている。

制御機械カンパニーは、長年にわたり当社内の各製品の制御装置開発を担当する部門として、自動化（ファクトリーオートメーション）に関わる各要素の研究開発を担い、技術保有に努めてきた歴史を持つ。その技術を活かして、内販のみならず、独自商品の外販展開で、世の中の多岐に渡るニーズに応えながら 手軽に生産の自動化が実現出来るソリューションを提供し、多くのお客様の生産性向上に貢献してきたと自負している。時代と共にソリューションの手法は変化しており、ハードウェアのみならず（DXに代表される）ソフト面でも様々なニーズが生まれ、また価値の多様化により、環境に配慮した製品の創出もまた、喫緊の課題の一つと言える。当カンパニーは、大きく3つのセグメントで外販事業を展開している。コントローラやサーボユニット等を開発・販売するコンポーネント部門、ロボット部門、FA装置全般を扱うシステムエンジニアリング部門で構成される。本稿では労働生産性向上を目的に開発・販売してきた幾つかの事例と、今後の取組みについて、各セグメント別に紹介する。

## 2. 労働生産性向上に寄与する取組事例

### 2.1.1 コンポーネント

日本市場において、当社は他社に先駆けて1980年にサーボシステム「BSサーボ」の開発・販売を開始した。BSは「Brushless Synchronous」の略であり、Velconicの商標で発売当初より多くのお客様にご採用いただいていた。開発当初のVLTTシリーズはアナログサーボであったが、1991年にデジタルサーボEシリーズを開発し、パラメータなどの設定をハードからソフトへ移行させることにより、ユーザの使いやすさが飛躍的に向上した。以来、

IGBTのデバイスの登場に伴う小型化やCPUの性能向上により更なる進化を経て、現在のシリーズに至っており、生産性向上に寄与してきた。BSサーボの特長としてモータのセンサにはレゾルバを用いており、低故障率と耐振動性を含む耐環境性能に優れる特長を生かして、織機やばね機械、ねじ締め装置など過酷な環境下での動作が求められる産業機械向けに数多く採用されてきた。その中から、特異な適用事例として以下3件について記す。

(1) JRC製ドライブシミュレータ用大型XYステージ：

55kWサーボ76軸・最大出力2100kW、他リモート

I/O、各種モジュールの合計98軸で構成されている。

重量物の大きさとそれを動かす要求運動性能により、非常に大きな力が必要であり、当社サーボアンプの最も大きな出力が可能な55kW用アンプを使用してもX軸は12軸、Y軸は64軸の同期制御が必要となった。制御盤だけで38面あり、装置全長45m片側に25面が並ぶ。マスターPLCからの入出力信号は基本的にはLANケーブルの数珠繋ぎだけで済むため、敷設の際の省力化やノイズによる不定期な誤動作の可能性も非常に低い。また、試運転時間の短縮を実現し、運転後の多くのモニタ情報の伝達も可能としたことで、メンテナンス性の向上に大きく寄与している。

(2) H3ロケット用新型移動発射台運搬台車（重量物

1460トン）：

走行軸12軸、操舵軸28軸 合計40軸で1台の搬送装置を構成している。ロケットの搬送は、各軸同期による安定した走行が必要である。従来は格納庫内への最後の位置決めは手動操作で行っていたが、サーボ適用により自動で±25mmの位置決め精度で格納可能となった。

参考：<https://www.rocket.jaxa.jp/rocket/h3/groundEquipment.html>

（移動発射台運搬車（ドリー））

(3) 自動織機への適用：

織機開口枠の制御にサーボモータを適用した。

サーボを適用することで、開口枠の動作パターンを操作パネルから自在に設定できるようになり、エンドユーザの布の段取り替え時間と労力を大幅に削減することができた。また開口動作カーブを稼働中にも設定・変更可能であるため、品質と生産性の両立を果たすことができた。



Fig.1 自動織機((株)豊田自動織機 JAT910)

## 2.1.2 ロボット

当社は、1980年初頭のスカラロボット創生当初より事業を継続しており、スカラロボットを販売する企業として「草分け的存在」である。1981年に東芝名古屋工場の扇風機組立ラインに導入、1982年は東芝深谷工場プリント基板異形部品実装ラインにも採用され、まずは社内コースで適用技術を磨き上げ、現在の商品ベースが創られてきた。垂直多関節型も同じく80年代にPUMAロボット開発からスタートし、1996年に東芝機械（現芝浦機械）に事業移管されると、2000年を皮切りに半導体・液晶搬送ロボットを次々に開発・商品化して、生産現場の需要に応じてきた。2010年代後半から、環境対応型商品ECP（エコ・プロダクト）創出の機運が高まり、新商品はCO<sub>2</sub>排出量を旧製品に対し30%削減目標で開発・商品化している。

SCARA Robot THE1000 "CO<sub>2</sub> reduction" from TH1050A

Manufacturing	0.052 t	Reduction rate <b>31.8%</b>
Operation	2.46 t	
Disposal	-0.03 t	
Total	2.48 t	

### CO<sub>2</sub> reduction comparison

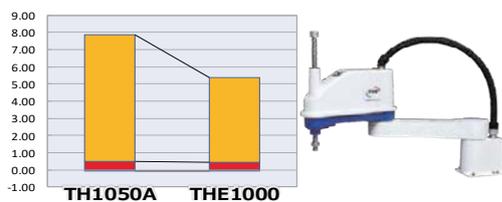


Fig.2 ECP 商品化の事例 THE1000(2022年上市商品)

## 2.1.3 システム

システムエンジニアリング部門では、これまで、主に産業用ロボットを活用した自動化システムを提供し、お客様の省力化、省人化による生産性向上に貢献してきた。以下に射出成形機、加工機の自動化システム事例を紹介する。

### (1) インサート成形自動化システム：

ハイサイクル成形において、インサート品を金型にセットする作業は、単純かつ危険を伴う。そこで、インサート品の整列作業を高速・高精度な自社製スカラロボットでインサート品を投入、成形品の取出し作業を自由度の高い自社製垂直多関節ロボットで自動化した。これにより、危険作業からの解放と2名の省人化を実現した。

### (2) 射出成形機後工程自動化システム：

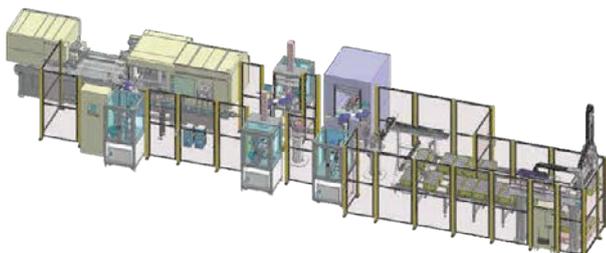


Fig.3 射出成形機後工程自動化システム

複数の成形品の取出しから、インサート金具の圧入、成形品の接合、検査、箱詰め、箱のストックまでの後工程を

全自動化したシステムである。各工程装置間を3台の垂直多関節ロボットで搬送し、箱詰めを直交ロボットで行っている。3名以上の省人化と品質安定性の向上を実現した。

### (3) 加工機ローディング自動化システム：

工作機械への素材の供給と切削物の取出し作業を自動化したシステムである。垂直多関節ロボットを中央に、2台の加工機と2台のストッカをそれぞれ対向に配置することで、省スペースかつ、ストック数増加による加工機の高稼働率化を実現した。その結果、夜間作業の無人化につながり、生産性を飛躍的に向上させることができた。

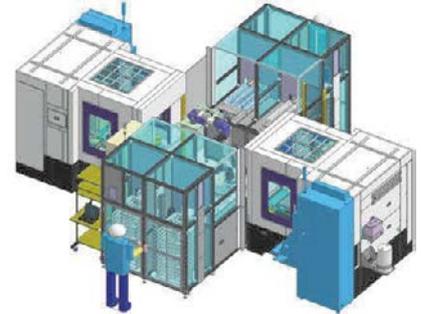


Fig.4 加工機自動化システム

## 3. 今後の取組みと将来の展望

### 3.1.1 コンポーネント

精度・効率・耐久性に優れたサーボアンプ・サーボモータの開発を継続していくことで、お客様の生産性向上に貢献し、省エネルギー効果により、コストの削減と環境負荷軽減を実現していく。

また、IoT技術との融合が重要となってくるため、サーボアンプ・コントローラなどの各コンポーネントにセンサや通信機能を統合することで、リアルタイムのデータ収集や遠隔モニタリングを可能とする。これらにより、故障の早期発見やメンテナンスの効率化が図られ、お客様装置の稼働率が向上する。

上記を実現する一つの手段として、現在Webサーバ機能の開発を進めている。加えて、人工知能(AI)を活用していくことで、最適な制御パラメータの自動設定ができるようになり、従来よりも短時間で高品質な製品を生産することを可能にしていく。

労働生産性向上のための製品開発においては、制御性能向上、IoT技術の活用、人工知能の導入など、多岐にわたる取組みが必要となってくるが、これらの取組みを通して、お客様の装置の効率化と競争力強化に貢献していく。

### 3.1.2 ロボット

MBDや3D-CAE技術の発達により、ロボットのモデルが仮想空間で精密な機械シミュレーションを行うまでになり、開発速度が過去とは比較にならない程向上している。

こうした状況を踏まえ当社は、既存のロボット（スカラ型、垂直多関節型、直交型等）の更なる高機能化に加え、積年の課題であった「ヒトの作業スペースで自動化を実現する」双腕協働ロボットの開発を加速している。昨今の世

界的なエネルギーコスト上昇による原価（固定費）上昇は、製造業の新たな設備投資意欲を減退させる一因になっているが、本年上市の双腕協働ロボットは、人が従来作業していたスペースに設置され自動化されたとしても作業場所の拡張を最小限に抑えることが出来ることを特長としている。工場を増設（固定費上昇）したくないが自動化はしたい、という昨今のニーズに応える商品として開発を継続している。

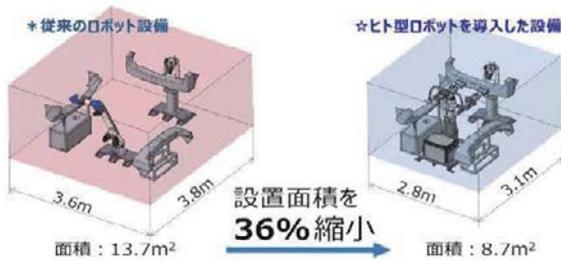


Fig.5 省スペース設置の事例 ヒト型双腕ロボ(2023年上市)

また、ロボットのDXとサイバーセキュリティについて述べておきたい。ロボットに要求される性能は年々変化を遂げ、アーム自身の性能ではなく、精密なバーチャルモデル(=アバター)を用意する事が必須要件となる。精密なシミュレーションは、単に導入前確認のみならず、仮想ロボットにセンサを配置、そのフィードバックからフォールト・トレラント(加速を調整する等経年変化に順応して自律的に運転を調整する)機能をバーチャルで検証する等の技術開発が加速していく。企業はESGの観点からも、ムダな資源消費を極力抑えるために、精密なロボットアバターは必需品となるだろう。また、汎用ネットワークにロボットが繋がる事が当たり前の現在、近年はサイバー攻撃の“ステルス化”が進んでおり、顧客の財産となる生産プログラムやデータをいかに安全に担保するか、サイバーセキュリティ技術を内蔵したハードウェアの開発にも注目が集まっている。既にセキュリティ機能を内在したチップも出現しており、その適用も今後の商品開発には欠かせないものとなるであろう。

### 3.1.3 システム

今後進む少子高齢化に伴う労働人口の減少に加え、生産性向上、品質向上、コスト削減、安全性向上などを実現するための自動化、省力化、省人化、人と機械の共存などのニーズがさらに高まると推測する。当社が持つ最新のロボットや制御技術、および社内外の様々なハード・ソフトをインテグレートして、お客様の多様なニーズに応える生産システムを実現していくことが更に必要となる。

労働環境の変化への対応に直面している物流関連と大変革期を迎えている自動車関連の最新の事例を以下に記す。

#### (1) デパレタイズ、段ボール開梱装置

工場の生産物流や物流倉庫では、人手による作業が中心である。例えば、食品の物流倉庫では、カッターを使った多種多様な段ボール箱の開封作業を労働集約的に行ってお

り、作業現場は過酷かつ切創の危険が伴う。そこで、作業負荷低減を図るべく、段ボール箱開梱装置を提案している。封函テープの切断工程、フラップと呼ばれる4面の蓋の切断工程から成り、内容物を傷つけずに開封し取り出しやすくしている。センシング技術とロボット制御技術の組み合わせにより、品種の事前登録作業不要で多種多様な箱の混流に対応している。

さらに、デパレタイズ装置と組み合わせることで、積み降ろし作業からの一連の作業を自動化できる。

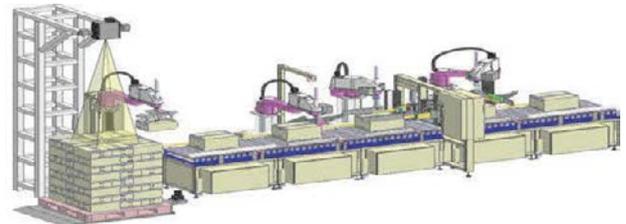


Fig.6 段ボール開梱システム

#### (2) 複合成形システム

自動車のEV化、省燃費化に伴い軽量高剛性な新素材への置き換えが進んでいる。当社では、熱可塑性CFRP(炭素繊維強化プラスチック)をはじめとした複合材の成形工程の自動化に取り組んでいる。ストックされた素材の加熱とプレス工程を多関節ロボットで搬送するには、加熱後の不定形な素材を、高速かつ正確にプレス型に投入する必要があるため、素材搬送に特殊ハンドを用いて、成形システムの高品質・高生産性を実現している。

当社では、このような大型案件においても、お客様それぞれのご要望に対して最適な提案を行い、設計、製作、および



Fig.7 複合成形システム

現地での試運転立上げまで、トータルで手掛けている。

また、IoTを活用した各工程の状態監視、品質データ収集、トレーサビリティ情報の一元管理システムはお客様の品質管理や生産の効率化に貢献している。

## 4. おわりに

生産性向上につながるいくつかの事例を紹介してきた。あらゆる業界、分野において、自動化・省人化のニーズは今後ますます高まることが想定される。当社が持つ既存の商材のみならず、あらゆるハードやソフトをインテグレートするアジャスト技能・制御技術・DXでつなぎ、システム提案する中で、お客様が持つ様々な課題や多様なニーズに向き合うことが重要と考える。労働生産性向上および品質向上に向けて引き続き貢献できるよう研究・開発を継続し、新たなテーマに挑戦し続けていく所存である。

# Real-Time Monitoring of Pellet Plastication in a Full-Flight Screw and Kneading Disk Elements of a Co-Rotating Self-Wiping Twin-Screw Extruder by Acoustic Emission (AE) Sensing

Tsukasa Kida <sup>1</sup>, Masatoshi Ohara <sup>2</sup>, Keigo Inamori <sup>1</sup>, Shogo Nagasawa <sup>1</sup>, Shin-ichi Kihara <sup>3</sup> and Kentaro Taki <sup>4,\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Natural System, Graduate School of Natural Science, Kanazawa University, Kanazawa, 920-1192, Japan; tks19970614@gmail.com (T.K.); inamori.keigo.lab@gmail.com (K.I.); ngsy1717@gmail.com (S.N.)

<sup>2</sup> Shibaura Machine, Numazu, 410-8510, Japan; ohara.masatoshi@shibaura-m.com

<sup>3</sup> Graduate School of Advanced Science and Engineering, Hiroshima University, Higashihiroshima, 739-8527, Japan; snkihara@hiroshima-u.ac.jp

<sup>4</sup> School of Frontier Engineering, Kanazawa University, Kanazawa, 920-1192, Japan

\* Correspondence: taki@se.kanazawa-u.ac.jp; Tel.: +81-76-264-6257

The plastication of pellets in a co-rotating twin-screw extruder is a significant concern for product homogeneity and stability in the plastic industry. We developed a sensing technology for pellet plastication in a plastication and melting zone in a self-wiping co-rotating twin-screw extruder. The collapse of the solid part of the pellets emits an elastic wave as an acoustic emission (AE) that is measured on the kneading section of the twin-screw extruder using homo polypropylene pellets. The recorded power of the AE signal was used as an indicator of the molten volume fraction (MVF) in the range of zero (fully solid) to unity (fully melted). MVF decreased with increasing feed rate monotonically in the range of 2–9 kg/h at a screw rotation speed of 150 rotations per minute (rpm) because of the reduction in the residence time of pellets in the extruder. However, the increase in feed rate from 9 to 23 kg/h at 150 rpm resulted in an increase in the MVF as the friction and compaction of pellets caused their melting. The AE sensor could elucidate the pellet's plastication phenomena caused by friction, compaction of pellets, and melt removal in the twin-screw extruder.

**Keywords:** pellet plastication; acoustic emission; melt removal; twin-screw extrusion

## 1. Introduction

Co-rotating self-wiping twin-screw extruder is a continuous polymer processing machine and one of the most widely used screw extruders in the polymer processing industry. It produces pellets, sheets, films, and other plastic products efficiently. The twin-screw extruder transports, plasticates, and melts pellets of plastic resin. When pellets of thermoplastic resin are fed to the twin-screw extruder, the heat transfer from the barrel of the extruder, friction, and adiabatic compression of pellets result in plastication and melting of pellets. [1] If the pellets do not plasticate well in the plastication zone, mixing with additives in the subsequent compounding zone becomes incomplete. Plastication and melting in polymer processing machines are critical elementary steps because they are often the rate-controlling steps that consume 70–80% of the total processing energy input [1]. Additionally, during the melting of polymer blends, a major part of the blend morphology is established [1].

The plastication and melting of pellets in a co-rotating twin-screw extruder have been studied mainly by building mathematical models and performing numerical simulations of the plastication zone over the past three decades [2–4]. These models assume that melting occurs primarily by the viscous energy dissipation during the flow of suspensions of solid polymer particulates in melts, with the evolution of melting decreasing the particulate size [1]. Other studies discussed plastic energy deformation via compressive experiments on molded disks of several materials [5–7]. Zhu et al. investigated single pellet deformation using finite element analysis and reported that mechanical energy is converted to heat in this process [8]. The mathematical models and numerical simulations were evaluated by the limited experimental results. Despite the extensive research, studies on real-time monitoring in the plastication zone are limited [9].

Real-time monitoring can raise the alarm and eventually stop the line when the pellet plastication is insufficient. It readily provides the state of pellet

plastication and helps understand the phenomenon. However, the resin temperature and pressure sensors are too fragile to be used in the solid pellets and plastication zones as the solid pellets may collide with the sensors and damage them. Hence, a new type of sensor for resin plastication monitoring is demanded.

In this study, we focused on acoustic emission (AE). AE originates from the transient stress waves that are generated by crack growths and many other kinds of material degradation and deterioration. [10] AE can be applied for monitoring mechanical behaviors of various materials: carbon/epoxy composites [11], glass fiber reinforced polypropylene [12], high-density polyethylene/polypropylene blends [13], natural fiber composites [14], carbon fiber reinforced plastic [15], degraded polypropylene [16], polypropylene/cement [17], etc. Recently, machine learning technology has been applied to the pattern recognition of the AE signal to determine the extent of the damage [18,19].

According to the previous studies on applying AE sensing to various materials, we can expect that collapsing resin pellets in the kneading screw elements emit the AE signal in the extruder.

The AE sensor comprises a piezoelectric transducer and detects ultrasound waves as the AE signal. The ultrasonic wave receiver and transmitter have been applied to the extruders in polymer processing to evaluate the density of polymer melt and the composition of polymer blends [20]. Previous studies have measured the density of molten resin that can be applied to the analysis of plastication in the twin-screw extruder. However, the change in density cannot be directly explained by the change in plastication. The AE signal depends on physical incidents, such as elastic deformation, destruction, and failure of materials, which are directly related to pellet plastication.

Here, a measurement technique to monitor pellet plastication in the extruder using an AE sensor was developed. The effects of screw speed, flow rate, and plastication of polypropylene pellets in the twin-screw extruder were investigated. The experimentally obtained data were discussed with the suggested mechanism previously reported by Gogos et al. [1].

## 2. Materials and Methods

### 2.1 Materials

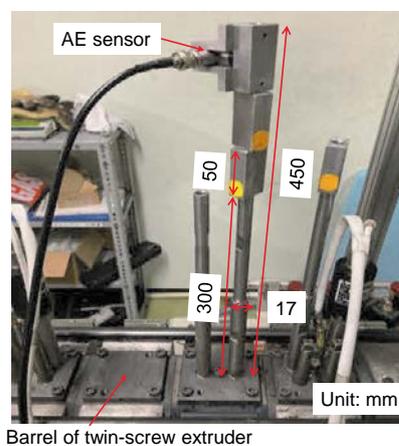
A homo polypropylene (PP, F-704NP) with a melt flow rate (MFR) of 7.0 g/10-min was acquired from Prime Polymer, Minato City, Tokyo, Japan. The resin was used as received. The parameters of the Cross model fitted to the complex viscosity are shown in the Appendix. The melting temperature was measured using a differential scanning calorimeter (DSC-8500, PerkinElmer, Waltham, MA, USA) with a heating rate of 10 °C/min under 20 mL/min flow of nitrogen. The

DSC was calibrated with the Indium standard. The melting temperature was 164 °C

### 2.2 AE Sensor

An AE sensor (FAEN-S601, FIRST AE), a built-in amplifier, a 2nd amplifier (EDGE NODE DISCOVERY SEG), and a data acquisition A/D converter (NI DAQ cDAQ-9171 and NI-9775, National Instruments) were connected sequentially. In-house LabVIEW® software was used to collect and record the AE data. The data acquisition speed was 250 kHz, and the sampling period was 0.2 s.

The AE sensor was attached to a waveguide with a diameter of 17 mm and a length of 300 mm screwed on the barrel of the twin-screw extruder, as shown in Figure 1, to avoid any heat damage to the AE sensor. Three metal blocks, 50 mm in length, were attached to the waveguide. The distance between the barrel surface and the AE sensor was 450 mm. A certain amount of grease (EchoZ+, ECHO ultrasonics) was applied between the AE sensor and the waveguide to reduce the transmission loss. To attach the AE sensor securely to the waveguide without damaging the AE sensor, the same fixing torque (0.35 N·m) should be maintained for every measurement when the AE sensor was fixed on the waveguide. A wind fan was used to continuously cool the sensor.



**Figure 1.** Image of the AE sensor, waveguide, and barrel of the twin-screw extruder.

### 2.3 Screw Configuration

A co-rotating self-wiping twin-screw extruder (nominal screw diameter 26 mm indicated in Figure 2, screw length to diameter ratio, L/D is 64, TEM-26SX) was used. The screw consists of various screw elements, i.e., a piece of the screw. The order of the screw element can be changed to build a desired screw configuration. We used three different screw configurations (A), (B), and (C) to study the plastication in the twin-screw extruder. The order of screw element's code of screw

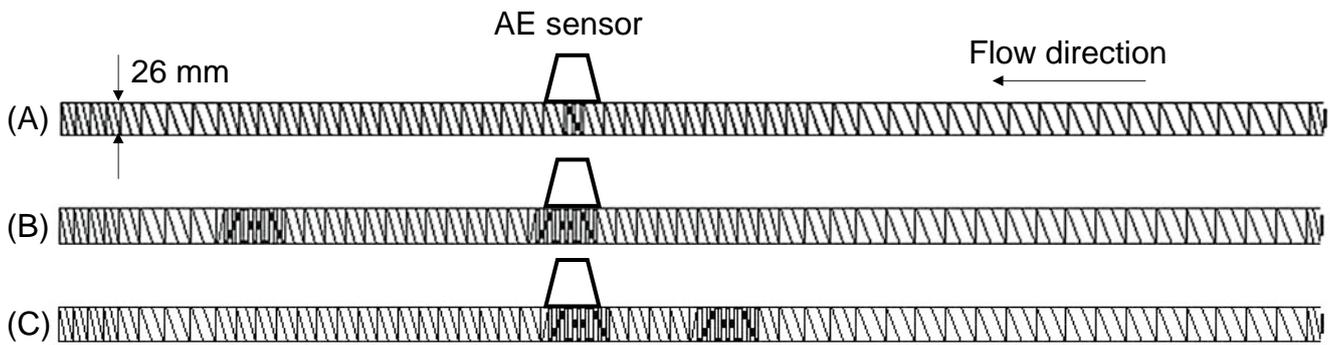


Figure 2. Screw configurations of (A–C) of the co-rotating twin-screw extruder

configurations in the SHIBAURA MACHINE catalog is available in the Appendix.

Configuration (A): It is a simple screw configuration in which one kneading disk element is at 977.5 mm from the feed, and the others are full-flight screw elements, as shown in Figure 2A. The AE sensor was attached above the five-disk forward kneading element. A barrel temperature of 30 °C was used to identify the AE signal of collapsing solid pellets, while that of 195 °C with a short distance of screw heated at 150 °C immediately downstream of the feed port was used to confirm that the molten resin does not emit the AE signal. It should be noted that the barrel temperature of 195 °C was higher than the melting temperature of the sample PP. The examined screw rotation speed and feed rate were 50 screw rotations per minute (rpm) and 2.0 kg/h, respectively.

Configuration (B): The screw configuration (B) was built to understand the effects of feed rate and screw speed on the plastication phenomena in a full-flight screw, as shown in Figure 2B. The five-disk forward, neutral, and backward kneading elements of 27 mm in length located at 965 mm from the feeding port collapse the partially solid pellets that emit the AE signal. The AE signal was used to understand pellet plastication in upstream full-flight screw elements. The barrel temperature was 195 °C at regions away from four full-flight screw elements in front of the feed port. Thus, the melting zone was located at 965 mm from the feeding port. The screw rotation speed increased as follows: 30, 50, 100, 125, 150, 200, and 250 rpm. The feed rate increased as follows: 2.0, 4.0, 6.0, 12, 18, and 23 kg/h. The interval of the measurement was approximately 3 min. Measurements of 12 kg/h at 30 rpm and 18 and 23 kg/h at 30 and 50 rpm were not performed because the pellets were not fed to the feed port continuously.

Two series of experiments were performed. In the 1st series, the screw rotation speed was increased while the feed rate was maintained constant. Subsequently, the process was examined at a higher feed rate from low to high screw rotation speed. In the 2nd series, the feed rate was increased while the screw rotation speed was maintained constant.

In addition, to collect the AE signal of fully solid pellets for the normalization of the AE signal, the barrel temperature was set equal to the melting temperature at 164 °C.

Configuration (C): The screw configuration (C) was considered to understand the effect of kneading disk elements on the plastication phenomena, as shown in Figure 2C. The five-disk forward, neutral, and backward kneading elements were replaced with full-flight screws. The pellets were plasticized in the replaced kneading disk zone. The AE signal was measured at the downstream kneading zone. The AE signal is possibly generated in the upstream and downstream kneading zones. As the distance between them is set sufficiently long, the AE sensor does not interfere with the AE signal from the upstream kneading zone.

## 2.4 Residence Time Measurement

The mean residence time of the solid pellets on the full-flight screw was measured as follows. The screw configuration was as same as the upstream configuration from the AE sensor of (B) in Figure 2. The detailed configuration is shown in Table A2 in the Appendix.

The barrel temperature was set to a room temperature of 30 °C. The pellets were fed to the rotating twin screws alone, consisting of full-flight screw elements and no kneading disk elements. The exit of the extruder was open, and no die was attached to it. This operation does not collapse and melt the pellets. The pellets were only transported to the exit of the extruder by the rotation of screws.

In the measurement operation, the rotating screws and the feeder of pellets were abruptly stopped when the mass flow rate reached a steady state of the desired value. The screws were rotated again to transport the remaining pellets in the barrel when the feeder stopped. All the pellets in the barrel were collected, and the mass ( $m_p$ ) was measured. The mean residence time per meter was calculated as follows:

$$\bar{\tau} = \frac{m_p}{Q_m L_m} \quad (1)$$

	Residence Time per Meter (s/m)	Screw Rotation Speed (rpm)			
		50	100	150	250
Feed rate (kg/h)	2	43.1	22.9	14.3	10.8
	4	44.8	23.6	15.8	10.8
	6	46.5	23.5	15.7	9.8
	9	53.2	24.4	16.6	10.5
	12	60.1	23.5	16.7	10.5
	18	76.5	26.4	16.6	10.2
	23	- *	31.7	17.6	10.6

\* Feed neck occurred. Screw configuration was the “Residence time meas.” in Table A2.

**Table 1.** Residence time per unit meter of solid pellets transported on the full-flight screws at 30 °C.

where  $m_p$  (kg) is the remained mass of pellets in the barrel when the screws stopped,  $Q_m$  (kg/s) is the pellets’ mass flow rate in the feeder, and  $L_m$  (m) is the measured barrel distance, which is 0.918 m from feed to head.

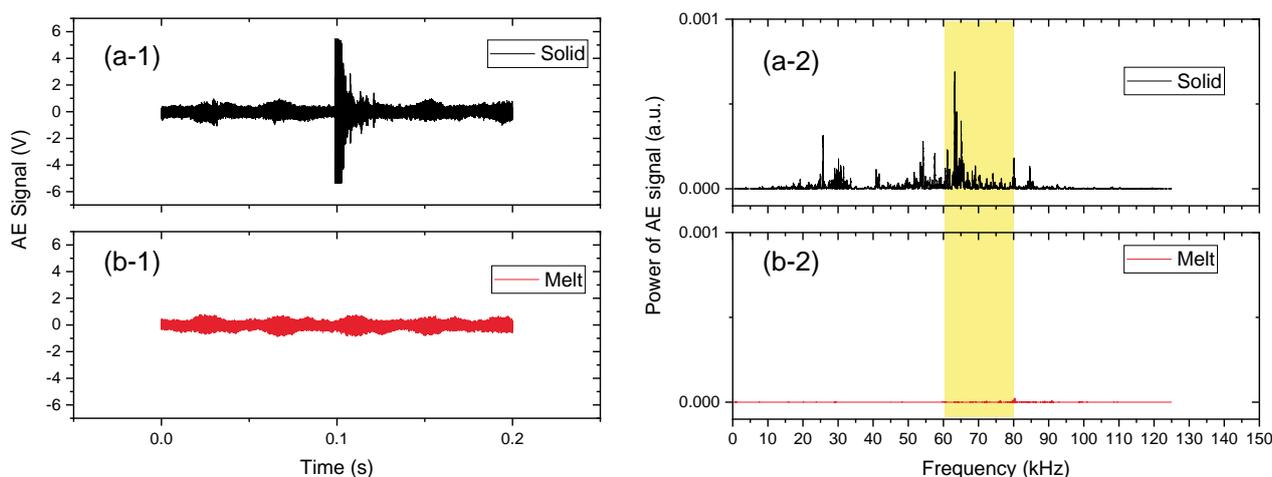
The screw rotation speed was changed from 50 to 250 rpm with 50 rpm intervals. The feed rate was increased as follows: 2, 4, 6, 9, 12, 18, and 23 kg/h. The residence time per meter ranges from 9.8–76.5 s/m. The results are summarized in Table 1, and the dependences on the screw rotation speed and the feed rate are plotted.

### 2.5 Signal Processing

Extrusion of pellets at a barrel temperature of 30 °C produced collapsed pellets in the screw configuration (A) at the screw rotation speed and feed rate of 50 rpm and 2.0 kg/h, respectively. The pellets collapsed between the barrel and screws. The pellets were fully

melted, and a clear molten strand was obtained at the exit of the die at the barrel temperature of 195 °C at the same screw rotation speed and feed rates at 30 °C.

A typical time domain and the fast Fourier-transformed AE signals obtained at the barrel temperatures of 30 °C and 195 °C are shown in Figure 3. A strong signal was captured at 0.1 s at 30 °C while no distinct signal was observed at 195 °C in the full range of the time-space. The frequency domain signal indicates that the peaks in the range of 60–80 kHz originated from the AE signals of the collapsing pellets. The signals in the range of 20–60 kHz were superimposed with those of the other phenomena, such as the open-and-close solenoid valves, metal contacting screw and barrel, and other un-clarified noises. Thus, the signals in 60–80 kHz were used in this study as the AE signal of collapsing pellets.



**Figure 3.** Time domain AE signals at a barrel temperature of (a-1) 30 °C and (b-1) 195 °C. Power of AE signals in frequency domains at (a-2) 30 °C and (b-2) 195 °C. The screw rotation speed and feed rate were 50 rpm and 2.0 kg/h, respectively.

## 2.6 Molten Volume Fraction (MVF) from AE

A model of AE signal generation, as illustrated in Figure 4, indicates that the AE signal is proportional to the residual solid part of pellets. The recorded time domain signal was processed by the 60–80 kHz bandpass filter. The square of the time domain signal was accumulated during the measurement time of 210 s. Then, the accumulated signal was divided by the number of pellets passed through under the AE sensor for 210 s, which can be calculated by the mass flow rate, measurement time, and average mass of one piece of pellet.

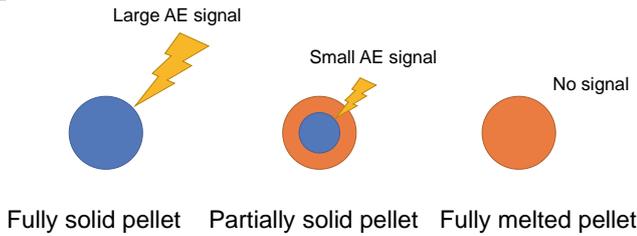


Figure 4. Model of AE signal generation.

Finally, the MVF,  $\chi_p$ , is calculated as follows:

$$\chi_p = 1 - \frac{S(T_b, Q, N_s)}{S(T_m, 2 \text{ kg/h}, 250 \text{ rpm})} \quad (2)$$

where  $S(T_b, Q, N_s)$  is the accumulated signal per pellet.  $S(T_m, 2 \text{ kg/h}, 250 \text{ rpm})$  is the reference signal. We could not use the data at room temperature, i.e., at 30 °C, because the pellets could not pass through the three kneading disks, and the motor's torque increased the specification value. The pellets extruded at  $T_m$  (164 °C), 2 kg/h, and 250 rpm seemed almost solid and did not stagnate in the kneading disk elements. The further increase in feed rate and/or screw rotation speed caused the torque-over. When the only kneading disk, such as

in the case of screw configuration (A), was used, the torque-over did not occur. However, some solid pellets passed through the one-kneading disk zone without collapsing. Hence, we placed three kneading disks to ensure all the pellets collapsed in the kneading zone.

## 3. Results and Discussion

### 3.1 Visual Observation of Partially Molten State Pellets on Rotating Screws

Figure 5a shows the effect of screw rotation speed on pellet plastication. The full-flight screws in an open barrel immediately upstream of the kneading disk under the AE sensor were observed. The characteristic aspects of melting resin varied with the screw rotation speed. The structural aspects of melting pellets in a co-rotating twin-screw extruder were described by Gogos et al. [21–23]. They found seven different states and described their characteristics and definitions. The observed structural state was mentioned following their definition in the parentheses. The clear molten resin on the pushing side of the full-flight screw was observed at 30 and 50 rpm (melt film). The partially melted pellets and clear molten resin were observed at 100 rpm (melt-rich suspension). The partially molten white pellets and their blocks were observed at 150 and 200 rpm (clustered structures). Almost solid pellets rolling on the flight screws were observed at 250 rpm (individual particles).

Figure 5b shows the MVF for each screw rotation speed. The MVF decreases with increasing screw rotation speed. Compared with the images in Figure 5a, the dropping of MVF corresponds to the solid pellet appearance clearly beyond 100 rpm. The MVF can be used to evaluate pellet plastication quantitatively.

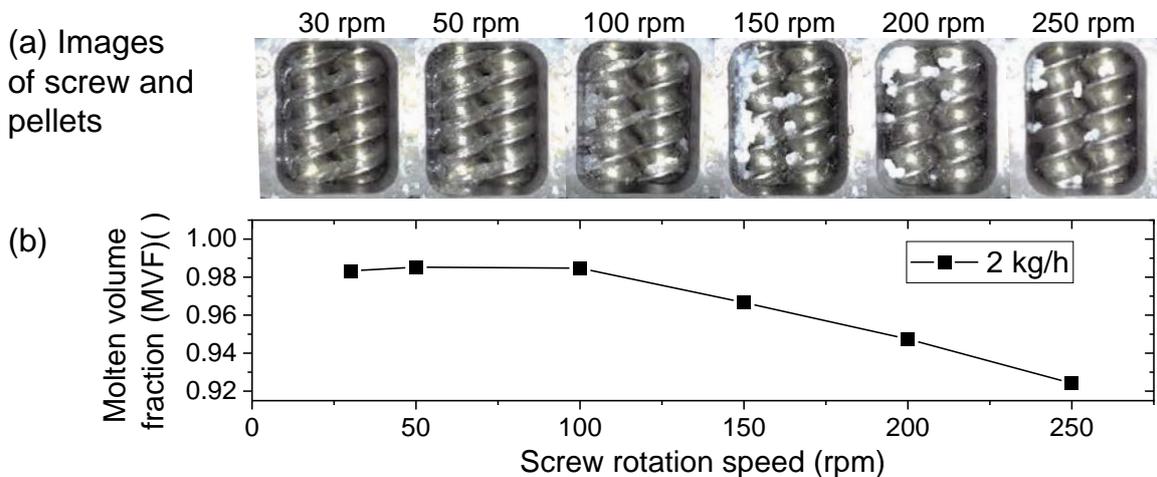
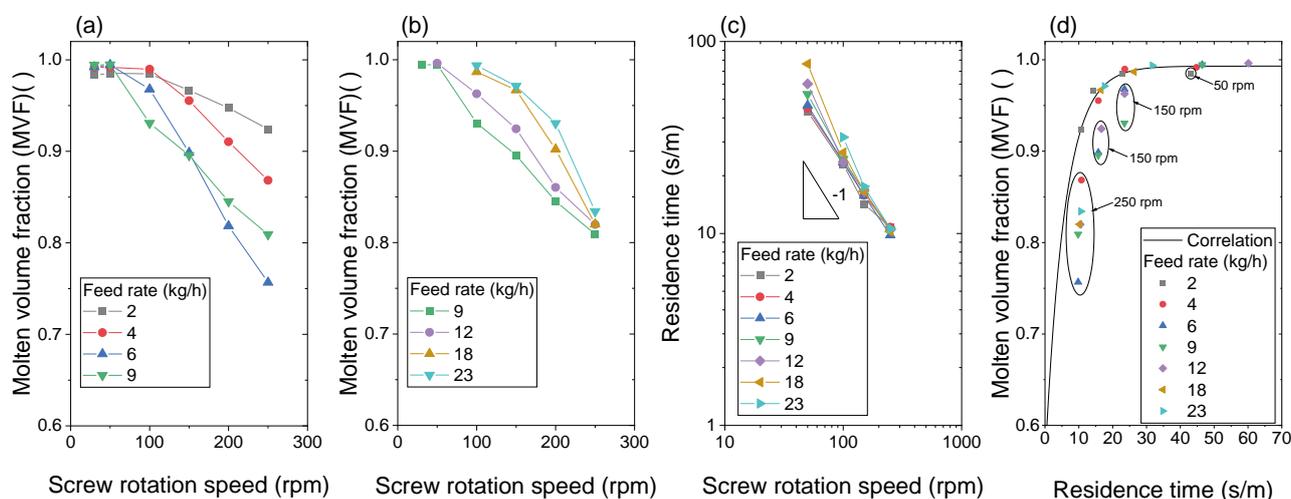


Figure 5. Effect of screw rotation speed on the molten volume fraction (MVF). (a) Visual observation and (b) MVF. The screw configuration was (B). The feed rate was 2 kg/h. The barrel temperature was 195 °C. The videos of the visual observations are available in the Supplementary Materials.

**Table 2.** Summary of molten volume fraction (MVF) dependence on increasing screw rotation speed at constant feed rates: 1st series\*.

MVF ( )	Screw rotation speed (rpm)	Feed Rate (kg/h)						
		2	4	6	9	12	18	23
30		0.98	0.99	0.99	0.99	-	-	-
50		0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	-	-
100		0.98	0.99	0.97	0.93	0.96	0.99	0.99
150		0.97	0.96	0.90	0.90	0.92	0.97	0.97
250		0.95	0.91	0.82	0.85	0.86	0.90	0.93
		0.92	0.87	0.76	0.81	0.82	0.82	0.83

\* Screw configuration was (B).



**Figure 6.** Effect of increase in the screw rotation speed on the molten volume fraction (MVF). The feed rate of (a) 2–9 kg/h, (b) 9–23 kg/h, and (c) residence time per meter of solid pellets in full-flight screws. The residence time was measured for the solid pellets at 30 °C. (d) Relationship between the residence time and molten volume fraction (MVF). The screw configuration was (B)

### 3.2 Effect of Increase in Screw Rotation Speed on Plastication at a Constant Feed Rate

Table 2 and Figure 6a,b show the effect of screw rotation speed on the MVF at a constant feed rate. The MVF for every feed rate decreased with the screw rotation speed. Figure 6c shows the residence time per meter of solid pellets estimated by Equation (1). The residence time per meter monotonically decreased with increasing screw rotation speed. The slopes of the low feed rate are close to -1, indicating that the residence time per meter is proportional to the reciprocal of screw rotation speed. The majority of pellets were transported by the drag force of flight screws. The plots of high feed rate, e.g., 12, 18, and 23 kg/h, in slow-screw rotation speed, deviate from the slope of -1 because the holdup

of pellets occurred at the high feed rate and slow-screw rotational speed.

Figure 6d shows the relationship between the MVF and residence time per meter. Overall, the long residence time resulted in high MVF. Therefore, solid pellets must receive heat from the barrel and screws to melt. Hence, the longer the residence time per meter (more than 25–30 s/m in the polymer), the more heat the pellets received, and pellet plastication advanced. However, there are several plots enclosed by circles that deviate from the overall trends. To segregate them, an empirical equation, Equation (3) was fitted to the plots except for the enclosed ones:

**Table 3.** Summary of molten volume fraction (MVF) dependence on increasing feed rate at a constant screw rotation speed: 2nd series \*.

MVF ( )	Screw rotation speed (rpm)	Feed Rate (kg/h)						
		2	4	6	9	12	18	23
	30	0.99	0.99	0.99	1.00	-	-	-
	50	0.96	0.98	0.99	1.00	1.00	-	-
	100	0.98	0.99	0.96	0.91	0.94	0.98	0.99
	150	0.95	0.96	0.92	0.87	0.89	0.94	0.96
	200	0.93	0.91	0.83	0.81	0.80	0.84	0.90
	250	0.88	0.85	0.76	0.76	0.75	0.72	0.78

\* Resin is PP-MMFR, and the screw configuration is (B).

$$\alpha = A_1 \exp(-x/t_1) + y_0 \quad (3)$$

where the parameters of Equation (3) were determined by fitting to the experimental data except the data plots enclosed by circles.  $A_1 = -0.434$ ,  $t_1 = 5.79239$  (s/m),  $y_0 = 0.99309$ . The plots on the correlation line and deviated plots indicate that our definition of MVF of Equation (2) is less sensitive to lower MVF and high solid content. Further study is required for the appropriate definition of MVF.

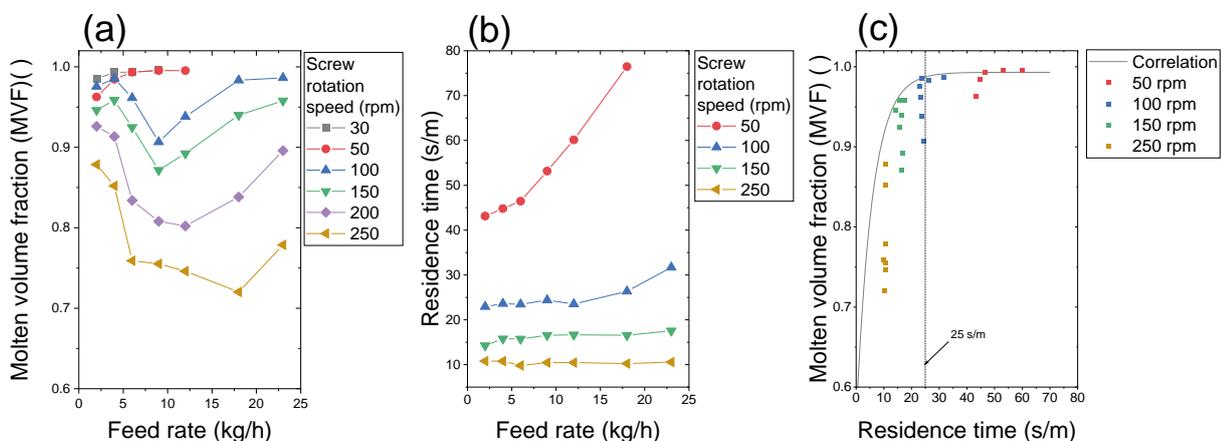
### 3.3 Effect of Increase in Feed Rate on Plastication at Constant Screw Speed

Table 3 and Figure 7a show the effect of feed rate on the MVF at constant screw rotation speed. The MVF decreased at a lower feed rate and turned to increase at higher feed rates for a screw rotation speed higher than 100 rpm. A minimum MVF for each screw rotation speed existed. The feed rate of the minimum MVF

shifted to a high feed rate with increasing screw rotation speed. MVF increased monotonically for the cases of 30 and 50 rpm.

Figure 7b shows the effect of feed rate on the residence time per meter. The residence time per meter of each screw rotation speed against the feed rate had no peak. The residence time per meter increased with the feed rate, and its slope depended on the screw rotation speed. A monotonical increase in the residence time per meter above 25–30 s/m anticipates the advance of pellet plastication.

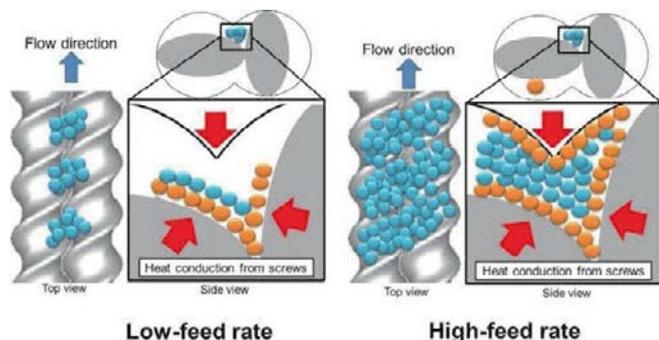
Interestingly, the MVF curves at 50 rpm and those at 100 rpm are different in Figure 7a. The MVF at 100 rpm dropped significantly at 5 and 7 kg/h. The pellets received substantial heat from the barrel at 30 and 50 rpm due to the long residence time. At more than 100 rpm, the residence time was not sufficient to melt the crystalline phase of polypropylene. Thus, the MVF dropped with an increase in the feed rate. Semicrystalline polymer requires heat to reduce the viscosity of the amorphous phase as well as to melt the crystalline phase.



**Figure 7.** Effect of feed rate on (a) the molten volume fraction (MVF) and (b) the residence time of pellets. The residence time was measured for the solid pellets at 30 °C. The screw configuration was (B). (c) Relationship between the MVF and the residence time per meter. The correlation line was drawn using the parameters and Equation (3).

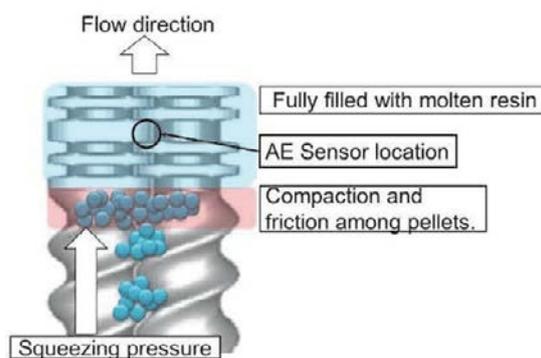
Figure 7c shows the relationship between the MVF and the residence time per meter. The correlation line was drawn by the parameters of Equation (3). The MVF lower than 25 s/m deviated from the correlation line. It indicates that additional shear heating occurred in the starved situation by screw rotation and increased the MVF gradually.

Figure 8 illustrates the accumulation of pellets in the valley of the full-flight screw zone of twin screws. An increase in the feed rate accumulates the pellets between the barrel and screws. The heat conduction rate of the blue-colored pellets in the side view is lower than that of the orange-colored pellets because the heat conducts through the orange-colored pellets. The amount of received heat per pellet at a high feed rate is lower than that at a low feed rate. Thus, the decrease in MVF was caused by the decrease in the amount of heat per pellet with the increase in feed rate.



**Figure 8.** Comparison of the accumulation of pellets in the valley of twin screws in the full-flight screw zone between low feed and high feed rates at a constant screw rotation.

Figure 9 illustrates the holdup of pellets by the kneading disk just below the AE sensor in twin screws. The increase in feed rate causes the holdup of pellets just in the zone before the kneading disk element. The friction and compaction of pellets produce heat, which melts themselves in the zone [23]. Thus, the higher feed rate increased the holdup, friction, and compaction of pellets in the zone. It melts and transforms pellets to increase the MVF at further high feed rates.



**Figure 9.** Holdup of pellets by the kneading disk in the twin-screw extruder.

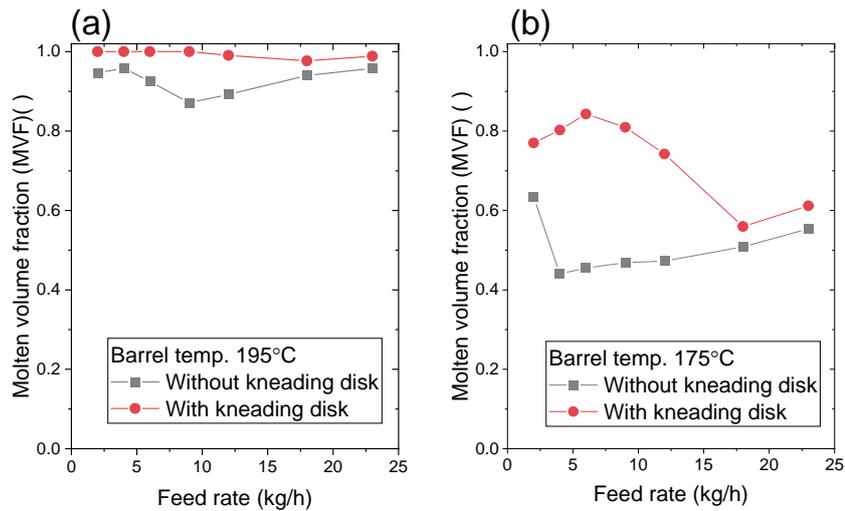
### 3.4 Effect of Kneading Disk

The effect of the kneading disk was investigated by replacing the full-flight screw with the kneading disk (configuration (C)). Figure 10a shows that the MVF with the kneading disk is 1.0–9.0 kg/h. Further increase in feed rate slightly decreased the MVF to 0.98. The MVF without the kneading disk (configuration (A)) was lower than that with a kneading disk. The kneading disk facilitated the plastication of pellets efficiently. Figure 10b shows the MVF at a barrel temperature of 175 °C. As expected, the MVF drastically decreases and changes nonlinearly with the feed rate, as observed in Figure 7a. The kneading disk does not always plasticate pellets completely.

## 4. Conclusions

Plastication of semicrystalline resin pellets in a twin-screw extruder was investigated using the newly developed AE sensing system, which detects the elastic wave and prevents the collapse of the partially melted pellets in the twin extruder. The MVF based on the power of the AE signal per pellet was defined. The feed rate and screw rotation speed affected the MVF nonlinearly. The residence time, accumulation of pellets, friction between pellets, and compaction play significant roles in plastication. Their contribution changes according to the feed rate. Moreover, the kneading disk efficiently enhanced the plastication independent of the feed rate. The compaction of pellets in the kneading disk zone is a significant factor in plastication.

Measurement of plastication using AE sensing has several advantages. The AE sensor does not contact an object directly. The AE sensing can be applied to severe situations in pressure transducers and will detect abnormal plastication via a sudden increase in the AE signal.



**Figure 10.** Effect of kneading disk on the molten volume fraction (MVF). The screw rotation speed is 150 rpm. The barrel temperatures were (a) 195 °C and (b) 175 °C, respectively. The screw configuration of “with kneading disk” was (C) and that of “without kneading disk” was (B).

The AE sensing and investigation of plastication still have some limitations. Our AE sensing data support the previously proposed plastication mechanism. However, further quantitative analysis with mathematical models, such as finite and discrete element methods, is required. Moreover, plastication is followed by mixing additives, resin, and glass fibers in a typical extrusion process. Therefore, it is necessary to identify and categorize problems arising from mixed signals of glass fiber breakage, inorganic particles, and the blending of different viscoelastic materials.

**Supplementary Materials:** The following supporting information can be downloaded at: [www.mdpi.com/xxx/2kgh100rpm.mp4](http://www.mdpi.com/xxx/2kgh100rpm.mp4), [2kgh150rpm.mp4](http://www.mdpi.com/xxx/2kgh150rpm.mp4), [2kgh200rpm.mp4](http://www.mdpi.com/xxx/2kgh200rpm.mp4), [2kgh250rpm.mp4](http://www.mdpi.com/xxx/2kgh250rpm.mp4), [2kgh30rpm.mp4](http://www.mdpi.com/xxx/2kgh30rpm.mp4), [2kgh50rpm.mp4](http://www.mdpi.com/xxx/2kgh50rpm.mp4).

**Author Contributions:** Conceptualization, K.T. and M.O.; methodology, T.K.; software, T.K.; validation, K.I. and S.N.; formal analysis, K.T.; investigation, T.K.; resources, T.K.; data curation, T.K.; writing—original draft preparation, T.K.; writing—review and editing, K.T.; visualization, T.K.; supervision, S.-i.K.; project administration, K.T.; funding acquisition, M.O. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

**Funding:** This study was supported by SHIBAURA MACHINE, Japan. Part of the research was supported by a CREST Grant-in Aid (JPMJCR21L3) from the Japan Science and Technology Agency (JST).

**Institutional Review Board Statement:** Not applicable.

**Data Availability Statement:** Data are available in a publicly accessible repository.

**Acknowledgments:** The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results

**Conflicts of Interest:** The sponsors had no role in the design, execution, interpretation, or writing of the study.

## Appendix

The equations of the temperature-dependent Cross model are shown in Equations (A1) and (A2):

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left( \frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau^*} \right)^{(1-n)}} \quad (\text{A1})$$

$$\eta_0 = B \exp \left( \frac{T_b}{T_r} \right) \quad (\text{A2})$$

Where  $\eta$  is the temperature-dependent viscosity;  $\dot{\gamma}$  is the shear strain rate; and  $n$ ,  $B$ ,  $\tau^*$ , and  $T_b$  are fitting parameters, which are shown in Table A1. These parameters are determined based on the temperature-dependent experimental data of complex viscosity following the Cox–Merz rule because the resins are all linear polymers. The shear viscosity can be calculated at an arbitrary temperature of  $T_r$ .

**Table A1.** Cross model parameters of viscosity estimation of the polypropylene used

	$n$ (-)	$B$ (Pa·s)	$\tau^*$ (Pa)	$T_b$ (°C)
PP F-704NP	0.4212	$8.486 \times 10^{-6}$	12,360	9472.1

The order of the screw element's code from the feed to the head of screw configurations in the catalog of SHIBAURA MACHINE [24] is presented in Table A2.

**Table A2.** The order of screw element's code of screw configurations \*.

	A	B	C	Residence Time Meas.
<b>Feeder</b>	-	-	-	-
1	CL-3	CL-3	CL-3	CL-3
2	SC-20/20	SC-20/20	SC-20/20	SC-20/20
3	SC-40/40	SC-40/40	SC-40/40	SC-40/40
4	SC-40/40	SC-40/40	SC-40/40	SC-40/40
5	SC-40/40	SC-40/40	SC-40/40	SC-40/40
6	SC-40/40	SC-40/40	SC-40/40	SC-40/40
7	SC-40/40	SC-40/40	SC-40/40	SC-40/40
8	SC-40/40	SC-40/40	SC-40/40	SC-40/40
9	SC-40/40	SC-40/40	SC-40/40	SC-40/40
10	SC-40/40	SC-40/40	SC-40/40	SC-40/40
11	SC-40/40	SC-40/40	SC-40/40	SC-40/40
12	SC-40/40	SC-40/40	SC-40/40	SC-40/40
13	SC-40/40	SC-40/40	SC-40/40	SC-40/40
14	SC-40/40	SC-40/40	SC-40/40	SC-40/40
15	SC-40/40	SC-40/40	SC-40/40	SC-40/40
16	SC-40/40	SC-40/40	SC-40/40	SC-40/40
17	SC-40/40	SC-40/40	SC-40/40	SC-40/40
18	SC-34/34	SC-34/34	SC-34/34	SC-34/34
19	SC-34/34	SC-34/34	SC-34/34	SC-34/34
20	SC-34/34	SC-34/34	SC-34/34	SC-34/34
21	SC-27/27	SC-27/27	KD-27/5R	SC-27/27
22	SC-27/27	SC-27/27	KD-27/5N	SC-27/27
23	SC-27/27	SC-27/27	KD-27/5L	SC-27/27
24	SC-27/27	SC-27/27	SC-10/20L	SC-27/27
25	SC-27/27	SC-27/27	SC-27/27	SC-27/27
26	SC-27/27	SC-27/27	SC-27/27	SC-27/27
27	SC-27/27	SC-27/27	SC-27/27	SC-27/27
28	SC-27/27	SC-27/27	SC-27/27	SC-27/27
29	SC-27/27	SC-27/27	KD-27/5R	SC-27/27
30	KD-27/5R	KD-27/5R	KD-27/5N	Open head
31	SC-27/27	KD-27/5N	KD-27/5L	← AE sensor here
32	SC-27/27	KD-27/5L	SC-10/20L	-
33	SC-27/27	SC-10/20L	SC-27/27	-
34	SC-27/27	SC-27/27	SC-27/27	-
35	SC-27/27	SC-27/27	SC-27/27	-
36	SC-27/27	SC-27/27	SC-27/27	-

37	SC-27/27	SC-27/27	SC-27/27	-
38	SC-27/27	SC-27/27	SC-27/27	-
39	SC-27/27	SC-27/27	SC-27/27	-
40	SC-27/27	SC-27/27	SC-27/27	-
41	SC-27/27	SC-27/27	SC-27/27	-
42	SC-27/27	SC-27/27	SC-27/27	-
43	SC-27/27	SC-27/27	SC-27/27	-
44	SC-27/27	SC-27/27	SC-27/27	-
45	SC-27/27	SC-27/27	SC-27/27	-
46	SC-27/27	KD-27/5R	SC-27/27	-
47	SC-27/27	KD-27/5N	SC-27/27	-
48	SC-27/27	KD-27/5L	SC-27/27	-
49	SC-27/27	SC-10/20L	SC-27/27	-
50	SC-34/34	SC-34/34	SC-34/34	-
51	SC-34/34	SC-34/34	SC-34/34	-
52	SC-34/34	SC-34/34	SC-34/34	-
53	SC-27/27	SC-27/27	SC-27/27	-
54	SC-20/20	SC-20/20	SC-20/20	-
55	SC-20/20	SC-20/20	SC-20/20	-
56	SC-20/20	SC-20/20	SC-20/20	-
57	SC-20/20	SC-20/20	SC-20/20	-
Head	-	-	-	-

\* Screw element names do not reflect the dimensions of the screw element precisely. The exact dimension is a part of confidentiality. CL-3: 3 mm length collar, SC: Full-flight screw, KD: Kneading disk, R: Right-hand, N: Neutral, L: Left-hand configurations. For example, KD-27/5N is a neutral kneading disk of which the length and number of disks are 27 mm and 5, respectively. SC-10/20L is a full-flight reverse screw element of which length and pitch are 10 and 20, respectively.

## References

1. Tadmor, Z.T.; Gogos, C.G. *Principles of Polymer Processing*, 2nd Ed., Wiley-Interscience: Hoboken, NJ, USA, 2006; pp. 984.
2. Bawiskar, S.; White, J.L. Melting model for modular self wiping co-rotating twin screw extruders. *Polym. Eng. Sci.* **1998**, *38*, 727–740.
3. Potente, H.; Melisch, U. Theoretical and experimental investigations of the melting of pellets in co-rotating twin-screw extruders. *Int. Polym. Process.* **1996**, *11*, 101–108.
4. Vergnes, B.; Souveton, G.; Delacour, M.L.; Ainsler, A. Experimental and theoretical study of polymer melting in a co-rotating twin screw extruder. *Int. Polym. Process.* **2001**, *16*, 351–362.
5. Kim, M.H. Ph. D thesis, Department of Chemical Engineering, Stevens Institutes of Technology: Hoboken, NJ, USA, 1999.
6. Qian, B.; Gogos, C.G. The importance of plastic energy dissipation (PED) to the heating and melting of polymer particulates in intermeshing co-rotating twin-screw extruders. *Adv. Polym. Technol.* **2000**, *19*, 287–299.
7. Gogos, C.G.; Qian, B. Plastic energy dissipation during compressive deformation of individual polymer pellets and polymer particulate assemblies. *Adv. Polym. Technol.* **2002**, *21*, 287–298.
8. Zhu, L.; Narh, K.A. A simplified model for the melting of polymer pellets under compression in a twin-screw extruder. *Simulation* **2006**, *82*, 543–548.
9. Canevarolo, S.V.; Bertolino, M.K.; Pinheiro, L.A.; Palermo, V.; Piccarolo, S. The use of in-line quantitative analysis to follow polymer processing. *Macromol. Symp.* **2009**, *279*, 191–200.
10. Vahaviolos, S.J. *Acoustic Emission: Standards and Technology Update*; ASTM: West Conshohocken, PA, USA, 1999.
11. De Groot, P.J.; Wijnen, P.A.; Janssen, R.B. Real-time frequency determination of acoustic emission for different fracture mechanisms in carbon/epoxy composites. *Compos. Sci. Technol.* **1995**, *55*, 405–412.
12. Barré, S.; Benzeggagh, M.L. On the use of acoustic emission to investigate damage mechanisms in glass-fibre-reinforced polypropylene. *Compos. Sci. Technol.* **1994**, *52*, 369–376.
13. Niebergall, U.; Bohse, J.; Schürmann, B.L.; Seidler, S.; Grellmann, W. Relationship of fracture behavior and morphology in polyolefin blends. *Polym. Eng. Sci.* **1999**, *39*, 1109–1118.
14. De Rosa, I.M.; Santulli, C.; Sarasini, F. Acoustic emission for monitoring the mechanical behaviour of natural fibre composites: A literature review. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* **2009**, *40*, 1456–1469.

15. Gutkin, R.; Green, C.J.; Vangrattanachai, S.; Pinho, S.T.; Robinson, P.; Curtis, P.T. On acoustic emission for failure investigation in CFRP: Pattern recognition and peak frequency analyses. *Mech. Syst. Signal Process.* **2011**, *25*, 1393–1407.
16. da Silva, J.R.M.; Nunes, L.S.; Rabello, M.S. Use of acoustic emission in the analysis of polypropylene failure caused by photodegradation. *J. Appl. Polym. Sci.* **2019**, *136*, 46943.
17. Skalskyi, V.R.; Stankevych, O.M.; Klym, B.P.; Lisnichuk, A.E.; Velykyi, P.P. Identification of the mechanisms of fracture of cement mortar reinforced with basalt and polypropylene fibers. *Mater. Sci.* **2021**, *56*, 441–453.
18. Xu, D.; Liu, P.F.; Chen, Z.P.; Leng, J.X.; Jiao, L. Achieving robust damage mode identification of adhesive composite joints for wind turbine blade using acoustic emission and machine learning. *Compos. Struct.* **2020**, *236*, 111840.
19. Guo, F.; Li, W.; Jiang, P.; Chen, F.; Liu, Y. Deep learning approach for damage classification based on acoustic emission data in composite materials. *Materials* **2022**, *15*, 4270.
20. Coates, P.D.; Barnes, S.E.; Sibley, M.G.; Brown, E.C.; Edwards, H.G.; Scowen, I.J. In-process vibrational spectroscopy and ultrasound measurements in polymer melt extrusion. *Polymer* **2003**, *44*, 5937–5949.
21. Tadmor, Z.; Duvdevani, I.J.; Klein, I. Melting in plasticating extruders-theory and experiments. *Polym. Eng. Sci.* **1967**, *7*, 198–217.
22. Tadmor, Z.; Klein, I. *Engineering Principles of Plasticating Extrusion*; Van Nostrand Reinhold Company: New York, NY, USA, 1970.
23. Gogos, C.C.; Tadmor, Z.; Kim, M.H. Melting phenomena and mechanisms in polymer processing equipment. *Adv. Poly. Technol.* **1998**, *17*, 285–305.
24. Available online: <https://www.shibaura-machine.co.jp/en/> (accessed on 9 February 2023).



金沢大学  
大学院  
自然科学研究科  
自然システム学専攻  
Shogo Nagasawa



広島大学  
大学院  
先進理工系化学研究科  
Shin-ichi Kihara

金沢大学  
フロンティア工学  
Kentaro Taki

本技術論文は、MDPI Journal Polymers に投稿、掲載された研究成果を転載しています。  
出典：Polymers 2023,15(5),1140



金沢大学  
大学院  
自然科学研究科  
自然システム学専攻  
Tsukasa Kida

成形機カンパニー  
押出技術部  
営業技術課  
Masatoshi Ohara

金沢大学  
大学院  
自然科学研究科  
自然システム学専攻  
Keigo Inamori

# Slurry Conditions for Reaction-Induced Slurry-Assisted Grinding of Optical Glass Lens

Tappei Kawasato<sup>\*,†</sup>, Hinata Takamaru<sup>\*</sup>, Kazuhisa Hamazono<sup>\*\*</sup>, Masahiko Fukuta<sup>\*\*</sup>,  
Katsutoshi Tanaka<sup>\*\*</sup>, Yusuke Chiba<sup>\*\*\*</sup>, Mikinori Nagano<sup>\*\*\*</sup>  
Hidebumi Kato<sup>\*\*\*</sup>, and Yasubhiro Kakinuma<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>Department of System Design Engineering, Faculty of Science and Technology, Keio University  
3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama 223-8522, Japna

<sup>†</sup>Corresponding author, E-mail: kawasato@ams.sd.keio.ac.jp

<sup>\*\*</sup>Nano Processing System Division, Shibaura Machine Co., Ltd., Numazu, Japan

<sup>\*\*\*</sup>Production Headquarters, Nikon Corporation, Sagami-hara, Japan

The demand for optical glass lenses is rising owing to the increase in image resolution. Optical glass is a hard and brittle material. Thus, an efficient and precise grinding method is required for optical glass to improve lens quality and productivity. There are a few methods of producing crack-free machined surfaces; however, they provide only limited grinding efficiency. To resolve this issue, the authors' group has proposed the reaction-induced slurry-assisted (RISA) grinding method, which expands the range of ductile-regime grinding by utilizing the chemical-mechanical action of a cerium oxide slurry. In this study, the grinding performance of RISA grinding is experimentally evaluated for different pH levels. The results are compared using Tukey's test, where surface roughness is considered as the characteristic value and the pH value as the analyzed factor. The result shows that RISA grinding efficiently produces a high-quality surface when the slurry is alkaline. The adhesion of cerium oxide abrasives to the wheel in RISA grinding follows the same mechanism as slurry aggregation. In addition, adhesion is more likely to occur when the alkalization of the slurry promotes aggregation. The tank in the slurry supply unit is replaced with a rotating tank to ensure stable RISA grinding with a highly aggregable slurry while preventing aggregation. The performance evaluation shows that a high-quality surface with a surface roughness of less than 10 nm in most parts is obtained. Moreover, the critical depth of cut stably increases by a factor of 5.8.

Keywords: Ultraprecision grinding, Chemical-mechanical grinding, Optical glass

## 1. Introduction

The demand for optical glass lenses is rising owing to an increase in image resolution. However, as these lenses are hard and brittle, they are susceptible to cracks even when they are produced via ultraprecision grinding. Ductile-regime grinding has attracted attention because it can produce crack-free machined surfaces. Several methods have been developed for ductile-regime grinding, such as electrolytic in-process dressing [1] and shape-adaptive grinding [2] using a compliant grinding wheel.

In ductile-regime grinding, the maximum cutting depth of abrasive grains must be less than the critical cutting depth of a material [3], and conventional methods can only achieve a limited grinding efficiency. To resolve this issue, the authors' group has proposed a

method of expanding the range of ductile-regime grinding by supplying a cerium oxide (ceria) slurry to the grinding point. This slurry chemically reacts with a glass surface [4, 5, 6]. As this method is assisted by the grinding action of free abrasive grains that produce chemical actions, we refer to this method as reaction-induced slurry-assisted (RISA) grinding. In the present study, we examine the slurry characteristics and analyze the influence of the pH of the cerium oxide slurry and the mechanism through which the ceria abrasive grains adhere to the grinding wheel. The results are used to improve the slurry supply unit, which can perform RISA grinding in a stable manner.

## 2. Reaction-Induced Slurry-Assisted (RISA) Grinding

RISA grinding is used to expand the range of ductile-regime grinding by supplying a cerium oxide slurry to the grinding point. We have successfully performed ductile-regime grinding with BK7 at an efficiency five times larger than that of conventional methods [4] and produced a high-quality surface of quartz glass [5].

RISA grinding is a type of chemical–mechanical grinding, where a grinding method for glass using a cerium grinding wheel has been reported [7]. This approach uses fixed abrasives. In RISA grinding, only the coolant is replaced with a slurry, and a conventional resin-bond diamond grinding wheel is used. In other words, it combines free-abrasive and fixed-abrasive grinding. Micron-sized cerium oxide abrasives in the slurry are supplied to the grinding point. They are crushed to a size of several hundred nanometers and adhere to the entire surface of the diamond grinding wheel. The performance of ductile-regime grinding is significantly enhanced when the adhesion of crushed cerium oxide abrasives occurs [4].

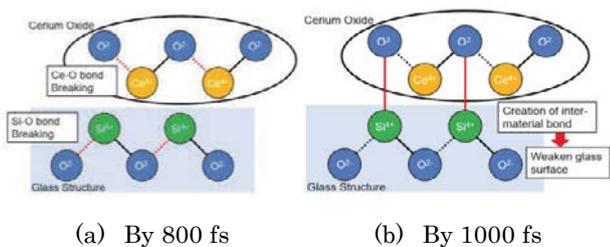


Fig. 1. Chemical reaction between cerium oxide and

The chemical reaction between cerium oxide and the glass surface has been analyzed using molecular dynamics, and it consists of the chain reaction shown in Fig. 1 [8]. The rate of the chemical reaction is of the order of nanoseconds, which is less than the time required for a cerium oxide abrasive to adhere to the wheel surface to abrade the glass surface. Thus, a model has been proposed for the RISA grinding mechanism, in which a cerium oxide abrasive that adheres to the wheel surface comes into contact with the workpiece of glass and chemically softens the surface [4, 5, 6].

However, the mechanism through which cerium oxide abrasives adhere to the diamond grinding wheel in this model has not been clarified. Furthermore, the quality of the machined surface varies depending on the production variations in the slurry [6]. Therefore, it is necessary to analyze suitable slurry characteristics for RISA grinding. With this background, the effects of the alkalinity of the slurry on RISA grinding are analyzed, and the mechanism by which the abrasives adhere to the wheel surface is discussed.

### 3. Influence of Alkalinity of Cerium Oxide Slurry on Grinding Performance

#### 3.1 Relationship between Slurry pH and Grinding Surface

Chemical actions are widely employed in the field of polishing; this is referred to as chemical–mechanical polishing. As the polishing rates of various materials vary depending on the pH of the slurry [9, 10], pH is considered to strongly affect RISA grinding, which employs chemical actions.

In this study, sodium hydroxide was prepared to vary the pH of the slurry between four values: 7, 9, 11, and 13. Cross-grinding characteristics were experimentally evaluated using a #2000 resin-bond diamond wheel (diameter: 100 mm) and BK7 optical glass with a radius of curvature of 62 mm. The same grinding conditions were used for all pH levels as shown in Table 1. Two grinding experiments were conducted for each pH level. The RISA grinding process is shown in Fig. 2.

Table 1 Experimental conditions.

Grinding Conditions	
Wheel feed rate [mm/min]	3.0
Work rotation [ $\text{min}^{-1}$ ]	30
Wheel rotation [ $\text{min}^{-1}$ ]	7000
Depth of cut [ $\mu\text{m}$ ]	0.5

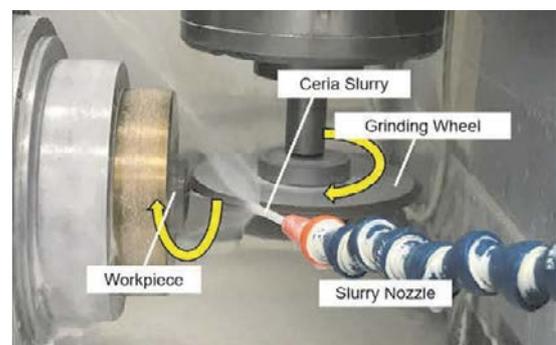
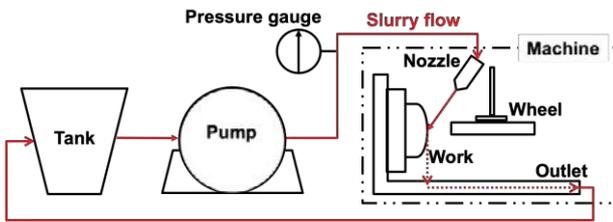


Fig. 2. RISA grinding experiment.

**Table 2** Slurry conditions.

Slurry Conditions	
pH	7, 9, 11, 13
Abrasive type	Cerium Oxide
Concentration [wt.%]	5
Abrasive size [ $\mu\text{m}$ ]	0.6~1.3 (Ave. 1.0)



**Fig. 3.** Slurry supply unit.

The slurry was produced by mixing cerium oxide abrasives with an average grain diameter of 1.0  $\mu\text{m}$  at a concentration of 5 wt.% with water, as shown in Table 2. The slurry was supplied to the grinding point by connecting a slurry circulation device to the ultraprecision grinding machine, as shown in Fig. 3. The machined surface produced by RISA grinding was evaluated in terms of surface roughness (Sa) using a white-light interference microscope.

The surface roughness of the ground surface produced using slurries with different pH values is presented in Table 3.

**Table 3** Surface roughness (Sa) of machined surface.

Slurry pH	Exp. No. 1	Exp. No. 2	Average
7	27.1 nm	29.5 nm	28.3 nm
9	16.3 nm	11.8 nm	14.0 nm
11	17.1 nm	15.5 nm	16.3 nm
13	16.5 nm	14.7 nm	15.6 nm

The obtained results were utilized to conduct multiple comparisons using Tukey’s test, with surface roughness as the characteristic value and the pH value as the analyzed factor.

Tukey’s test corrects for the family wise error rate under the partial null hypothesis and employs the honestly significant difference (HSD), which is stricter than the conventional t-test. The HSD is expressed in Eq. (1).

$$HSD_{\alpha}(\alpha) = \left(\frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n}}\right) \cdot q(a, v_e; \alpha) \dots\dots\dots(1)$$

$\alpha$  is the level of significance,  $n$  is the number of experiments repeated under identical conditions (2 in our example) and  $a$  is the number of levels of the analyzed factor (4 in our example).  $v_e$  is the degree of freedom of the error factor, which is computed as 4 for the present case using Eq. (2).

$$v_e = (n \times a - 1) - (a - 1) = (n - 1)a \dots(2)$$

$\hat{\sigma}$  is the mean square error, which is calculated by subtracting the sum of squares of the effects of the analyzed factors (given by Eq. (3)) from the sum of squares of the overall experiment (given by Eq. (4)) and dividing it by  $v_e$ .

$$S = \sum_i^4 (y_i - \bar{x})^2 \times 2 = 258.2 \dots\dots\dots(3)$$

$$T = \sum_i^8 (x_i - \bar{x})^2 = \sum_i^8 (x_i - 18.6)^2 = 273.8 \dots\dots\dots(4)$$

$x_i$  is the surface roughness obtained from a given experiment,  $\bar{x}$  is the average surface roughness obtained from all 8 experiments, and  $y_i$  is the average surface roughness for a given pH level.  $q(a, v_e; \alpha)$  is the upper bound ( $\alpha$ ) of the studentized range (q distribution) of the  $a$  level based on  $v_e$ . It shows the range (difference between maximum and minimum values) of observed values that lie within a probability of  $(1 - \alpha)$  when  $a$  observations are made with  $v_e$  degrees of freedom.

Assuming a level of significance ( $\alpha$ ) of 1%, the HSD is computed as given by Eq. (5).

$$HSD(0.01) = \sqrt{\frac{3.9}{2}} \cdot q(4, 4; 0.01) = 1.4 \times 9.2 = 12.8 \dots\dots\dots(5)$$

The effects of the different levels are compared using their averages. The average surface roughness increased as the pH changed from 9 to 13, 11, and 7. pH7 (Sa: 28.3 nm) and pH11 (Sa: 16.3 nm) were the only pairs that showed a difference larger than the HSD, and the difference between pH9 and pH11 did not exceed the HSD. Therefore, only the differences between pH7 and the other pH levels were significant, and there was no significant difference between pH9, pH11, and pH13. This indicated that the quality of the RISA grinding surface was significantly higher when the slurry was alkaline.

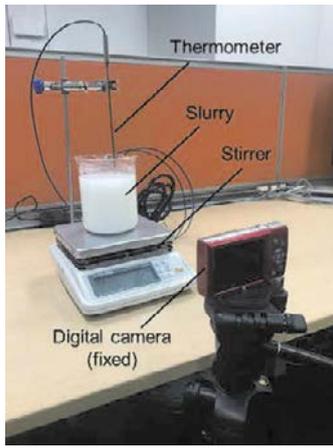


Fig. 4. Observation setup for slurry dispersion.

### 3.2 Evaluation of Dispersion of Slurry

The dispersion state of the slurry was investigated on the basis of the above experimental evaluation. The slurry was produced again under the conditions listed in Table 2, and its dispersion was observed.

As shown in Fig. 4, the dispersion state of the slurry was captured using a digital camera with fixed lighting and position. Specifically, the slurry was stirred with a stirrer for 10 min, and images were obtained immediately and 20 min after stirring.

The captured images were converted to a 256-gradation gray scale. The differences between the images obtained immediately and 20 min after stirring were displayed in color. The results are shown in Fig. 5. Blue and red indicate the regions that became brighter and darker after 20 min.

As light passes through water, the regions where the slurry concentration is reduced are displayed in blue. In the pH7 solution, the abrasive grains remained dispersed over approximately 3/4 of the beaker after 20 min.

In contrast, the dispersion region became smaller in the pH9, pH11, and pH13 solutions, among which the pH13 solution exhibited pronounced aggregation. The red line at the surface of the slurry was caused by the apparent increase in the water level due to stirring.

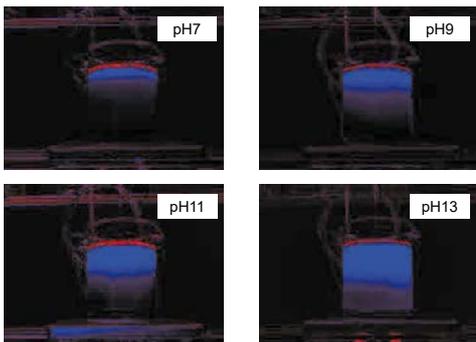
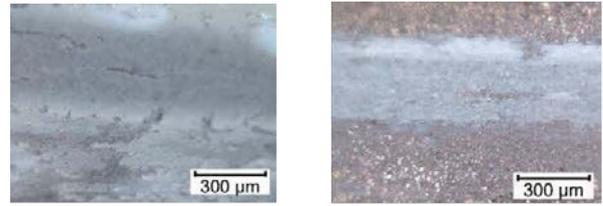


Fig. 5. Result of slurry dispersion after 20



(a) Soon after grinding (b) After wiping

Fig. 6. Wheel surface after grinding.

### 3.3 Discussion

The wheel surface was observed after RISA grinding, and the results are shown in Fig. 6. The abrasive grains remained on the wheel surface even when it was wiped with a wiper, which indicated strong adhesion. This promoted the chemical alteration caused by cerium oxide. The authors' group showed that RISA grinding increased the grinding load [11]. This was consistent with the concept of adhesion, in which the contact area of the diamond grains on the grinding wheel decreases.

Considering that RISA grinding produces the lowest quality surface when using the pH7 slurry with the highest dispersion, it was likely that the adhesion of cerium oxide to the wheel is caused by slurry aggregation and dispersion state of the slurry affect the quality of that. As the cerium oxide slurry was a colloidal solution, the Derjaguin–Landau–Verwey–Overbeek (DLVO) theory was applied. This theory explains dispersion and aggregation in colloidal solutions. In this theory, the potential ( $V_t$ ) of the force acting between two particles at distance  $D$  is expressed by Eq. (6) [12].

$$V_t(D) = V_a(D) + V_r(D) \dots \dots \dots (6)$$

$V_a$  is the energy due to the van der Waals force and  $V_r$  is the energy due to electrostatic attraction. The van der Waals potential between particles with sufficiently large diameters is expressed by Eq. (7).

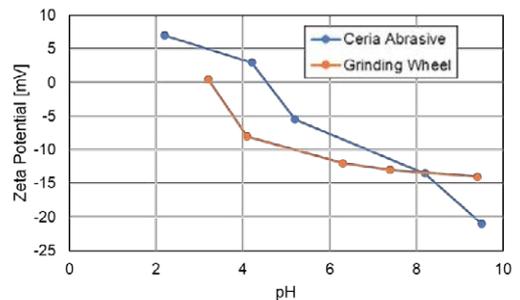


Fig. 7. Zeta potential vs. pH.

$$V_a(D) = -\frac{A}{6D} \left( \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right) \dots \dots \dots (7)$$

$R_1$  and  $R_2$  are the radius of the particles, and  $A$  is the Hamaker constant.

The energy due to electrostatic attraction,  $V_r$ , is expressed by the Hogg–Healy–Fuerstenau formula, as given by Eq. (8) [13].

$$V_r(D) = \frac{\epsilon R_1 R_2 (\psi_1^2 + \psi_2^2)}{4(R_1 + R_2)} \left\{ \frac{2\psi_1 \psi_2}{(\psi_1^2 + \psi_2^2)} \ln \left( \frac{1 + \exp(-\kappa D)}{1 - \exp(-\kappa D)} \right) + \ln(1 - \exp(-2\kappa D)) \right\} \dots \dots \dots (8)$$

This formula considers hetero-aggregation and  $\psi_1$  and  $\psi_2$  are the electric potentials of the particles.  $\epsilon$  is the dielectric constant of the solution and  $\kappa$  is the inverse Debye length.

The zeta potential is typically used as the surface potential of materials. The measured zeta potentials of the grinding wheel and cerium oxide abrasive grains are shown in Fig. 7. The potentials were negative for the pH7 and alkaline solutions. The potential of the cerium oxide abrasive was higher at pH7, the relation was reversed close to pH8; the potential of the grinding wheel was higher in alkaline solutions.

When the zeta potential of the grinding wheel was lower than that of the cerium oxide abrasive, the electrostatic repulsion between the grinding wheel and cerium oxide abrasives was expected to be lower than that between the cerium oxide abrasives, which was advantageous for adhesion. The potential between the particles in the pH9 solution was calculated, and it is shown in Fig. 8. The parameters used for the computation are listed in Table 4. As sodium hydroxide could be used to adjust the pH to 9, the Debye length was calculated assuming a concentration of  $10^{-5}$  mol/L in a 1:1 electrolyte. A Hamaker constant that was suitable for oxides in water was assumed [14, 15]. Furthermore, as the zeta potential is generally lower than the surface potential owing to electrostatic shielding, estimated surface potentials that were slightly higher than the respective zeta potentials were adopted.

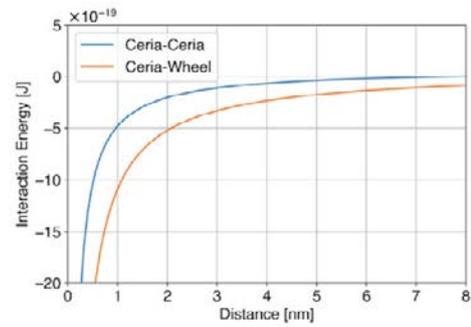


Fig. 8. Interaction energy between ceria–ceria/ceria–wheel.

Table 4 Computation parameters.

Hamaker constant	$7 \times 10^{-21}$
Ceria surface potential [mV]	-25
Wheel surface potential [mV]	-15
Debye length [nm]	96
Ceria particle size [ $\mu\text{m}$ ]	1.0

The interaction energy between cerium oxide and the grinding wheel decreased with the distance between them. In addition, it was lower than the interaction between the cerium oxide abrasives. The interaction energy was analogous to the potential energy, such that a low energy indicated a stable state. This implied that the adhesion of cerium oxide abrasives to the wheel easily occurred in the alkaline solutions.

Therefore, it was assumed that the slurry aggregation and adhesion of cerium oxide abrasives to the wheel were related. Thus, we conjectured that it was necessary to use a slurry with high aggregability to obtain sufficient RISA grinding performance.

#### 4. Proposed Grinding Device

The DLVO theory shows that the adhesion of cerium oxide abrasives to the grinding wheel is promoted by an alkaline slurry in which the aggregation of abrasive grains occurs easily. This should also increase the effect of RISA grinding to improve the surface quality. Therefore, the tank in the slurry supply unit, shown in Fig. 3, was replaced with a rotating tank, as shown in Fig. 9. This made it possible to supply a highly aggregable slurry while preventing aggregation.

RISA grinding tests were performed using the new tank under the conditions listed in Table 1. The measured surface roughness is shown in Fig. 10. A high-quality surface was obtained with a surface roughness of 10 nm or

less in most parts. A ductile-regime-machined surface was stably produced up to a distance of at least 13 mm from the center.

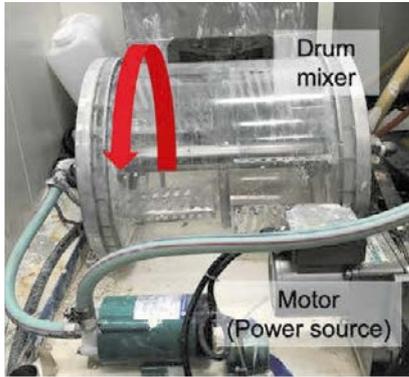


Fig. 9. Electrically driven rotating tank.

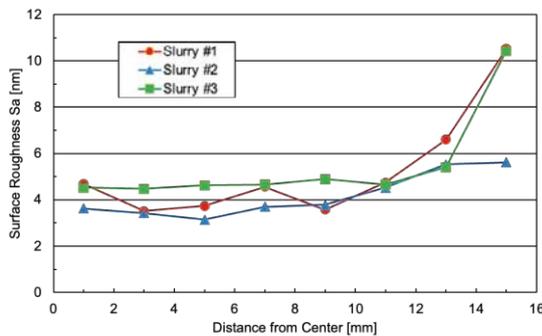


Fig. 10. Machining test results.

Sun et al. [16] proposed Eq. (9) for geometrically calculating the maximum depth of cut ( $h_m$ ) in cross grinding.

$$h_m = 2 \sqrt{\frac{R\omega \tan \phi + v}{VCr}} \sqrt{\frac{t}{D}} \dots\dots\dots (9)$$

where  $R$  is the distance from the center,  $\phi$  is the angle between the wheel's composite velocity and the center of the machined work,  $C$  is the effective abrasive density,  $r$  is the average chip width divided by depth,  $t$  is the depth of cut, and  $D$  is the grinding wheel diameter.

According to Eq. (9), the maximum depth of cut increases with the distance from the center. The maximum depth of cut calculated at a radius of 13 mm, which was the limit for achieving sufficient ductile-regime grinding, was 260 nm, which was 5.8 times larger the typical critical depth of cut of BK7 (45 nm) [3].

The above results indicated that it was possible to stably improve the surface quality of RISA grinding by introducing a slurry supply unit to adequately stir a highly aggregable slurry.

## 5. Conclusion

We propose RISA grinding to create a high-quality surface with high efficiency. The influence of the cerium oxide slurry characteristics on the grinding performance is investigated. The mechanism by which abrasive grains adhere to the grinding wheel is discussed to elucidate the mechanism of RISA grinding. The results are summarized below.

1. The surface quality of RISA grinding increases when alkaline slurries are used.
2. The adhesion of cerium oxide abrasives to the wheel, which is caused by a mechanism similar to the aggregation of the slurry, is likely to occur when a highly aggregable slurry is employed.
3. A supply unit that can adequately stir a slurry with high aggregability is necessary to fully demonstrate the ability of RISA grinding. The critical depth of cut stably increases by a factor of 5.8 when the supply unit with a rotating tank is implemented.

Note that as the adjustment of the slurry characteristics is accompanied by an increase in the amount of the electrolyte, the alkaline slurry creates a condition in which aggregation occurs more easily. More effective RISA grinding is expected to be realized by adjusting the amount of the electrolyte and pH level.

### References:

- [1] Stephenson, D.J., Sun, X. and Zervos, C. "A Study on ELID Ultra Precision Grinding of Optical Glass with Acoustic Emission," Int. J. Mach. Tools Manuf., Vol. 46, pp1053-1063, 2006.
- [2] Zhu, W., Yang, Y., Li, N.H., Axinte, D. and Beaucamp, A., "Theoretical and Experimental Investigation of Material Removal Mechanism in Compliant Shape Adaptive Grinding Process," Int. J. Mach. Tools Manuf., Vol. 142, pp76-97, 2019.
- [3] Gu, W., Yao, Z. and Li, H., "Investigation of Grinding Modes in Horizontal Surface Grinding of Optical Glass BK7," J. Mater. Process. Technol., Vol. 211, pp1629-1636, 2011.
- [4] Kakinuma, Y., Konuma, Y., Fukuta, M. and Tanaka, K., "Ultra-Precision Grinding of Optical Glass Lenses with La-Doped CeO2 Slurry," CIRP Ann. Manuf. Technol., Vol. 68, pp345-348, 2019.
- [5] Kawasato, T., Hamazono, K., Fukuta, M., Tanaka, K., Nagano, M., Kato, H. and Kakinuma, Y., "Basic Study on Reaction Induced Slurry Assisted Grinding for Quartz Glass," Proc. 23rd ISSAT, pp170-174, 2021.
- [6] Kawasato, T., Hamazono, K., Fukuta, M., Tanaka, K., Nagano, M., Kato, H. and Kakinuma, Y., "Experimental Evaluation of Reaction Induced Slurry Assisted Grinding for BK7 Optical glass," Proc. 10th LEM21, pp287-290, 2021.

[7] Zhang, Z., Cui, J., Wang, B., Wang, Z., Kang, R. and Guo, D., "A Novel Approach of Mechanical Chemical Grinding," J. Alloys Compd., Vol. 726, pp514-524, 2017.

[8] Rajendran, A., Takahashi, Y., Koyama, M., Kubo, M. and Miyamoto, A., "Tight-binding Quantum Chemical Molecular Dynamics Simulation of Mechano-Chemical Reactions During Chemical-Mechanical Polishing Process of SiO<sub>2</sub> Surface by CeO<sub>2</sub> Particle," Appl. Surf. Sci., Vol. 244, pp34-38, 2005.

[9] Guo, J., Gong, J., Shi, P., Xiao, C., Jiang, L., Chen, L. and Qian, L., "Study on the polishing mechanism of pH-dependent tribochemical removal in CMP of CaF<sub>2</sub> crystal," Tribol. Int., Vol. 150, 106370, 2020.

[10] Mu, Q., Jin, Z., Han, X., Yan, Y., Zhang, Z. and Zhou, P., "Effects of slurry pH on chemical and mechanical actions during chemical mechanical polishing of YAG," Appl. Surf. Sci., Vol. 563, 150359, 2021.

[11] Inuma, N., Chen, B., Kawasato, T. and Kakinuma, Y., "Shape error analysis in ultra-precision grinding of optical glass by using motor-current-based grinding force monitoring," 17th MSEC, 85472, 2022.

[12] Israelachvili, J.N., Oshima, H., "Intermolecular and surface forces with applications to colloidal and biological systems," Asakura Publishing ,p212, pp275-280, 2013, in Japanese.

[13] Hogg, R., Healy, T.W. and Fuerstenau, D.W., 1966, Mutual coagulation of colloidal dispersions, Trans. Faraday Soc., Vol. 62, pp1638-1651

[14] Masuda, H., "Adhesion of Powder Particles", Electrophotography The society journal, Vol. 36 (3), pp169-174, 1997, in Japanese.

[15] The Society of Powder Technology, Japan, "Terminology of dictionary of powder technology," The Nikkan Kogyo Shimbun, Tokyo, pp 267, 2000., in Japanese

[16] Sun, X., Stephenson, D.J., Ohnishi, O. and Baldwin, A., "An Investigation into Parallel and Cross Grinding of BK7 Glass," Precis Eng., Vol. 30, pp145-153, 2006.



**Mikinori Nagano**

Production Headquaeters,  
Nikon Corp.

**Hidebumi Kato**

Production Headquaeters,  
Nikon Corp.

**Yasuhiro KAKINUMA**

Professor,  
Department of System Design Engineering  
Faculty of Science and Technology,  
Keio University

本技術論文は International Journal of Automation Technology に投稿、掲載された研究成果を転載しています。出典：IJAT Vol.17 No.1 pp. 40-46



**Tappei KAWASATO**

Master student/  
Department of System Design Engineering  
Faculty of Science and Technology,  
Keio University



**Hinata TAKAMARU**

Master student/  
Department of System Design Engineering  
Faculty of Science and Technology,  
Keio University



**Kazuhisa HAMAZONO**

Machine Tools Company  
Nano Processing System Division



**Masahiko FUKUTA**

Expert/  
Machine Tools Company  
Nano Processing System Division



**Katsutoshi TANAKA**

Technical adviser/Dr.Eng.  
Machine Tools Company  
Nano Processing System Division



**Yusuke CHIBA**

Production Headquaeters,  
Nikon Corp.

# 従属アーキテクチャ — 自律ロボットのための新しい制御構造

中村 陽一郎 和田 侑也

工場内で生産を支援する作業ロボットの实用化を目的に、前号で示したコンセプトにしたがいロボットを自律化するための新しい制御アーキテクチャ：従属アーキテクチャを提案する。従属アーキテクチャは優先度付き多目標逆運動学解法を中核に、衝突回避や力制御などの機能を統合した制御構造である。AI を用いたロボットの動作をすべて学習で与えようとする研究が増える一方、本提案はマニピュレータ(腕)の目標姿勢を粗く与えさえすれば、自身や周囲との干渉を防ぎつつ腕と走行を連動させる合理的な動作を、学習なしでロボットが本能的に生成可能にする仕組みを与える。本稿では従属アーキテクチャの詳細を述べ、その特性を明らかにする試験結果を示す。

## 1. 緒言

生産現場には直接的に生産に関わる組立のような正味作業の周辺に、部品の収集と整列やキッティング、搬送といった、正味作業のお膳立てをする付随作業がある。製品や商品の出荷や保管に関連する仕分けや搬送なども、付随作業に含まれる。一般に、お膳立てされた下流の正味作業よりもお膳立てをする上流の付随作業の方が、扱う部品や半製品の種類も、保管場所もまちまちである。それらの保管の姿勢や順番なども、お膳立てで自由度が減る前の段階であるため、お膳立て後よりも多様である。したがって付随作業の自動化は正味作業より困難であり、ほとんどの現場で付随作業は人海戦術に頼っている。しかし、人手不足に伴い付随作業の自動化の要望も多いことから、われわれは付随作業を担う生産支援ロボットを開発している<sup>1)</sup>。

付随作業が上記のような特性を持つため、付随作業を実行するロボットには事実上、人と同じ設備環境で走り回り、人と同じように視覚と手を駆使して作業する能力が求められる。そのためには高度な視覚認識機能とともに、手と腕と走行または歩行を適切に連動させて、認識した物体を操作する必要がある。しかし、人のように手で物を取りやすい位置に自然に歩み寄りたり、移動しながら手を使ったりする作業を教示することは、腕や走行の停止位置を教示する従来の方法では困難である。人が勘や試行錯誤でそれを教示したとしても、その教示には多くの時間を要していた。

われわれはこの課題をロボットの自律性を高めることで解決しようとしており、前号では自律化のコンセプトと、それを実現する制御の基本的枠組みを示した<sup>1)</sup>。本稿はこの枠組みを包括した自律ロボットの制御システムの全体構造として、新たに従属アーキテクチャを提案する。

従属アーキテクチャは東京都立大学が開発した優先度付き多目標逆運動学解法<sup>2)3)</sup>を中核に、衝突回避や力制御などの機能を統合した日本発、完全独自の自律ロボットの制御構造である。近年、AI 特に深層学習を用いて、ロボットの動作をすべて膨大な量の後天的な学習で与えようとする研究が世界的に増えている<sup>4)</sup>。一方、本提案はこうした潮流とは一線を画し、腕と走行機能を備えた自律移動ロボットに手先または手の操作対象物の目標姿勢を粗く与え

えれば、自身や周囲との空間的および接触を伴う物理的な干渉を防ぎつつ走行と腕を連動させる安全かつ複雑な動作を、学習なしで自律的かつ本能的に生成可能にする仕組みを与える。本稿では従属アーキテクチャの詳細を述べたうえ、その特性を明らかにする試験結果を示す。さらに、本アーキテクチャに対する学習や AI の適用についても展望する。

なお、本稿では説明を簡略化するため、ロボットを人に例えてロボットが備えるマニピュレータを腕、ハンドを手と略記する場合がある。

## 2. 従来手法との関係

### 2.1 包摂アーキテクチャ

1980年代後半に Brooks が自律ロボットの制御構造として提案した包摂アーキテクチャ<sup>5)</sup>は、環境に関するモデルを持たないにもかかわらず、それまで不可能であった実世界での複雑な行動を可能にした、画期的な成果であった。包摂アーキテクチャにもとづく自律移動ロボットの制御システムは、Fig. 1 に示す例のように、階層構造をなす。上位層の機能は下位層の機能を包摂的あるいは包括的に利用しながら、その層に課せられた目的を達成する。Fig. 1 の例では、最下層の衝突回避機能が常時周囲との衝突を防ぎつつ、その上層の徘徊と探索機能が環境内を動き回る行動を発生する。そして、さらにその上の地図構築層が、ロボットが動き回る間に観測した情報をもとに、走行環境地図を構築する。階層の各層は常時個別に単独でも機能し、これら各層の機能の競合と協調の結果、ロボット全体での行動が定まる。各層の機能の競合と協調は、上位層が下位層

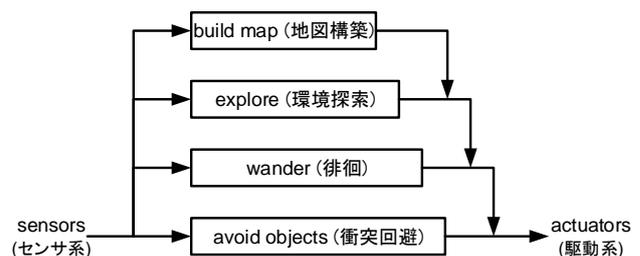


Fig. 1 包摂アーキテクチャ (文献6)をもとに作成

を流れる特定の信号の入力を抑制(Suppress)し代わりに上位層の出力信号を上書きする、あるいは信号出力を禁止(Inhibit)することで実現される。したがって、自律ロボットに特定の作業を課すためには作業に必要な各層の機能を実現したうえ、それらの優先度に応じて抑制と禁止の機構と条件を設計者が適切に設計する必要がある。しかし、この設計は必ずしも容易ではなかったため、その後包摂アーキテクチャに学習機能を組み込んだ拡張形式や、作業計画機能を追加したような複合形式が多数現れた<sup>6)</sup>。それらの成果は Brooks らが創業した iRobot 社の掃除ロボットなどで実用化されているが、そうした実用化例はマニピュレータを持たない移動ロボットにとどまっている。

## 2.2 学習アプローチ

前章で述べたように、生産の付随作業には人に近い水準の行動が求められるため、走行移動のみではなくマニピュレータと走行部との連動、しかも人に近い水準の円滑さの連動が求められる。こうした移動マニピュレーションの問題については近年、AI や機械学習を適用したアプローチが多く提案されている。たとえば、文献 7)は強化学習を適用し、衝突せずにテーブルの上の物体をつかむことができる走行部の位置を見出している。しかし、ロボットや環境の仮想モデルを構築し、そこで数万回以上のシミュレーション学習を必要としているにもかかわらず、実行している作業はテーブルの上の小さな物体をつかむだけにとどまっている。

われわれ機械屋にはこうした計算機科学的手法のみに頼る学習アプローチは無駄が多く、もったいなく見える。なぜならば、①解を探索する⇒②その解をシミュレーションや実機による試行に適用し、その解の実現が干渉や過負荷や腕の可動範囲外到達を発生しないか検証評価する⇒③評価結果を学習に反映させ①を再実行、という学習の繰り返し手順のうち、試行過程②で得られる過負荷の方向と各方向の力の値、どの関節軸が可動範囲外でボディや腕のどのあたりがどの方向にどれだけ近接しているかといった、ロボットの動きを適切な方向に的確に導く情報や、解の探索範囲を減らすのに有効な拘束条件を、学習に使わない例が多いためである。上記の強化学習も、元来は試行の成功/失敗の結果のみしか学習に使わないストイックな手法である。したがって、学習法としては強力であるが、その特徴ゆえに通常は学習に多数の試行を要するため、短時間で現場にロボットを導入するのに適した方法とは言えない。

一方、文献 8)9)では、特定の作業を人のデモンストレーションを模倣する学習による教示が扱われている。しかし、この方式で実行可能な作業は模倣させたデータの範囲に限られ、新しい環境や作業に対し探索的に作業行動を適応させていくことはできない。

われわれは現場で使われるロボットを実現しようとしているので、特定の計算機科学的手法ありきではなく、解くべき問題の特性、すなわち現場使用と短時間での現場導入

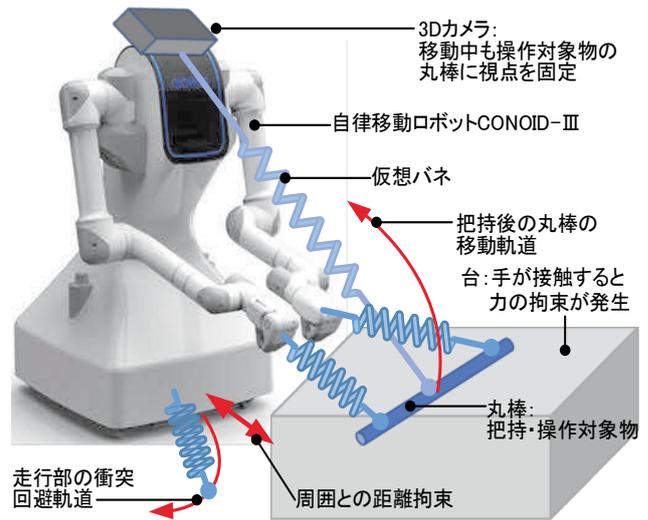


Fig. 2 従属アーキテクチャにおける自律的行動生成の原理

に適した制御や学習の枠組みを、選択または構築しなければならない。従属アーキテクチャは学習アプローチとは一線を画し、制御システムに実世界のさまざまな拘束にならう、あるいは従属する能力をもたせることで、安全で妥当な行動が、実世界でロボットをリアルタイムに動作させる過程で自律的に生成される。そこでは学習や実世界の仮想モデルやシミュレーション計算はなんら必要ない。制御工学の先進の成果にもとづくその解の自律的生成過程は、多数の仮想的なバネで拘束された剛体がある位置から動き出し、その運動がすべての拘束に対し平衡が取れる位置で自然に停止する過程に例えられる(Fig. 2)。この例においては自律移動ロボットが剛体に相当し、走行部と左右の腕、頭部のカメラそれぞれが、目標姿勢からバネで拘束される。また、剛体(=ロボット)は、このほかに周囲との距離などの拘束も受ける。こうした拘束にならうことで解の探索量を減らすという概念は、数値計算では一般的であるとともに、人間の情報処理に関する主張にも合致する<sup>10)11)</sup>。

次章では、従属アーキテクチャの詳細を説明する。

## 3. 従属アーキテクチャ

### 3.1 全体構成

Fig. 3は従属アーキテクチャの機能ブロック図である。このブロック図は、走行部に4軸、左右の各腕に6軸を持つわれわれの生産支援用自律移動ロボット、CONOID-III(第4章 Fig.8)を対象としている。

包摂アーキテクチャと異なり、従属アーキテクチャは個別の行動を明確に階層化した構造ではなく、制御工学で一般的なブロック図の構造を持つ。各ブロックの機能は他の機能と独立しているため、機能ごとの技術の更新もしやすく、ロボットの機種や形式に対する依存性も少ない。この制御構造の中核は、前号でも記したように、優先度付き多目標逆運動学計算機能である。本計算機能とそれに関わる動作優先度決定の機能を除けば、作業設定部と動作実行制御部の構成は従来の産業用ロボットとなら変わらないた

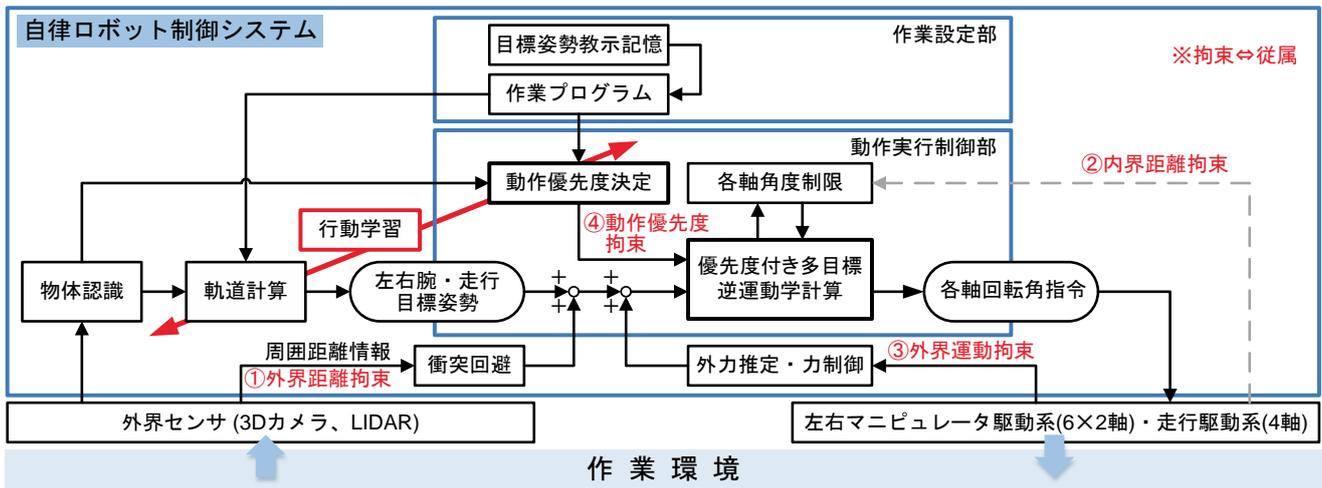


Fig. 3 従属アーキテクチャの機能ブロック図

め、この制御構造は産業用ロボットとの親和性も高い。さらに、以下の章に示す本アーキテクチャの各部協調連動の特性は、人型ロボットにこそ好適であることを申し添える。

### 3.2 行動の自律的生成の過程

前述した行動の自律的生成の過程を、Fig. 3をもとにより詳しく説明する。Fig. 3が示すように、物体認識や教示により手先または操作対象物の目標姿勢が定まると、優先度付き多目標逆運動学計算によって走行と左右の腕それぞれを駆動するモータの回転角が定まり、モータが作動する。それによる走行移動や対象物の操作を通じて、ロボットと作業環境との間には相互作用が生まれる。その相互作用の中で、ロボットは作業環境および自分自身から4つの拘束を受ける。これらの拘束にならうことが、自律的行動生成の根幹である。これら4つの拘束を順に見ていく。

まずロボットが走行すると周囲との距離関係が変わる。それに応じロボットは周囲との衝突を避けねばならない(①外界距離拘束)。次に腕が動くと、腕の各関節が可動範囲外に動こうとしたり、腕の一部がロボットのボディに接近しすぎたりすることがある。ロボットはこの自己干渉も避けなければならない(②内界距離拘束)。また、たとえばドア開けのように手が何かを持って操作しようとする、回転のみが可能なドアを開けるように、操作対象物の運動拘束に合致した操作をしなければ、手や腕に過負荷が発生する(③外界運動拘束)。さらに、優先度付き多目標逆運動学にもとづく本制御系では、左右の腕と走行部の各作動デバイスに、互いに優先関係が設定される(④動作優先度拘束)。

このように、腕と走行が作動すると4つの拘束の状態が変わるが、従属アーキテクチャでは、①外界距離拘束には衝突回避機能により走行部が衝突エラー停止を防ぐようにならう。CONOIDの衝突回避機能は、多様体の概念と超2次関数を適用した、リアルタイム処理に適した独特の方式である。②内界距離拘束には、腕の停止を走行が補う形で、腕と走行がならう。すなわち、各軸角度制限機能によって腕が可動範囲外エラーを出さないように停止すると

もに、後述する優先度付き多目標逆運動学解法の協調制御によって、腕の停止を走行が補う。③外界運動拘束に対しては、力制御機能により拘束されていない方向に手を動かす形で腕がならう。これについては、前号<sup>1)</sup>において制御の定式化と評価結果を示した、アドミッタンス制御の仕組みが該当する。④動作優先度拘束の仕組みと役割については、3.4節と3.5節で述べる。

以上のように、従属アーキテクチャは腕と走行の作動によって状態が変化する4つの拘束それぞれに対し、ならう、あるいは従属することで行動が自律的に生成される。この自律的な動作によって、ロボットは少なく粗い教示に対してもエラー停止せずに動き続けることができるうえ、さらに腕と走行を協調連動させる複雑な動作や行動ができるようになる。この協調連動機構については3.4節で述べる。

### 3.3 行動学習

作業環境との相互作用を通じ4つの拘束にならうことで自律的に生成された行動は、決して最適な行動とは言えない。前節で述べた4つの拘束にならう機構により、エラー停止には至らないものの、周囲と接近しすぎたり、操作対象物から過大な力を受けたりすることはあり得るうえ、拘束にならう結果生成された行動に対応する走行部や腕の軌道は、動作開始姿勢から目標姿勢までを最短で導く軌道にはなっていないためである。

そこで、従属アーキテクチャには、最適行動の生成、学習の機能として、過大力と周囲への過接近の発生を少ない試行回数の学習で緩和しつつ、移動軌道長をより短くする軌道最適化の仕組みが組み込まれる<sup>12)13)14)</sup>。

### 3.4 腕と走行の協調連動機構

優先度付き多目標逆運動学解法が協調連動の根幹であり、後の節で独自に同解法の理論を拡張するため、前号に引き続き同解法をはじめに示す。

まず、左右マニピュレータの手先と走行部それぞれの現在姿勢には目標姿勢との間に誤差があり、それら計18自由度の姿勢誤差ベクトルを $e(q_k)$ と表す。

$$e(q_k) = {}^d\chi - \chi(q_k) \quad (1)$$

$q$ は関節変位であり、 $k$ は逆運動学解の反復計算の反復ステップを表す。なお、ここでの定式化上は、平面内走行の3自由度も6自由度で扱っている。 ${}^d\chi$ は走行部と左右のマニピュレータの目標姿勢を集約したロボット全体の目標姿勢ベクトル、 $\chi(q_k)$ は走行部と左右のマニピュレータの現在の姿勢を集約したロボット全体の現在姿勢ベクトルである。この姿勢誤差ベクトルについては、付録の式(19)において、さらに詳細に分析する。

以上のうえで、本解法では現在姿勢と目標姿勢との間に仮想バネがあり、この仮想バネから各関節は仮想トルクを受けると考える。仮想バネ係数行列 $K \in R^{18 \times 18}$ はブロック対角行列で、各対角ブロックは左右のマニピュレータと走行部それぞれの $R^{6 \times 6}$ の仮想バネ係数対角行列である。仮想バネから各関節が受ける仮想トルクは、次式で与えられる。

$$\tau(q_k) = J^T(q_k) K e(q_k) \quad (2)$$

$J$ は基礎ヤコビ行列である。この仮想トルクからダンピングにより各関節に速度が発生すると考え、ダンピング係数行列を $D(q_k)$ とすると、反復ステップ間の時間 $\Delta t$ における関節変位の変化量は、次式で与えられる。

$$\Delta q_k = q_{k+1} - q_k = \Delta t D^{-1}(q_k) J^T(q_k) K e(q_k) \quad (3)$$

これにより関節変位の更新則が、次式で表される。

$$q_{k+1} = q_k + \Delta q_k \quad (4)$$

$D(q_k)$ については、仮想バネの弾性エネルギー

$$V_k = \frac{1}{2} e^T(q_k) K e(q_k) \quad (5)$$

を適切に減少させるよう、文献 3)にしたがい設定する。また、走行部と左右のマニピュレータとは、その目標姿勢への到達に動作優先度を付与することができる。これは仮想バネ係数行列 $K$ を構成する走行部と左右マニピュレータそれぞれの対角ブロック行列に、動作優先度を決定する係数を乗算することでなされるが、これについては次節で述べる。

このように、本解法は式(5)を評価関数とする一種の最適化問題を解く数理的な手法であり、左右のマニピュレータと走行部をそれぞれの目標位置に到達させる各制御軸の変位を一括して、目標位置到達の動作優先度に応じて計算する。そして、各軸の角度制限範囲や左右のマニピュレータと走行部の目標姿勢とその動作優先度を変えることで、マニピュレータと走行部が協調連動する多様な動作を簡単に生成させられる。特に式(2)と式(3)はこの協調連動において、非常に重要な役割を持つ。それは、仮に左右いずれかまたは両方のマニピュレータの動作優先度が高く、走行部の動作優先度がそれよりも低く設定されている場合、走行部は自らの目標姿勢到達よりもマニピュレータの目標姿勢到達を優先させて、手先の目標姿勢誤差を小さくするよ

う従属的かつ協調的に動く点である。結果的に、走行部は現在姿勢維持、すなわち移動軌道が与えられていない状態であっても、マニピュレータの手先移動に従動して動く。これは、人が教示していない走行動作が自動生成されること、しかも動作優先度が高い方のマニピュレータを協調的に捕う動作が、教示なしで生成されることを意味している。なお、動作優先度の大小関係がこれの逆であれば、マニピュレータと走行部の目標姿勢到達に対する動作の協調関係、あるいは従属関係も、逆になる。優先度付き多目標逆運動学計算手段の重要なはたらきであるこの協調連動の機構については、付録において詳述する。

### 3.5 動作優先度の設定

走行部、左マニピュレータ、右マニピュレータ、以上のロボットの作動デバイスに、動作の優先度を設定する方法について述べる。各作動デバイスに動作優先度を設定するには、仮想バネ係数行列 $K$ を構成し、走行部、左マニピュレータ、右マニピュレータに該当する各ブロック対角行列に、動作優先度係数 ${}^V\xi_k$ 、 ${}^L\xi_k$ 、 ${}^R\xi_k$ をそれぞれ乗算し、次のように置き直す。

$$K = \begin{bmatrix} K_V & 0 & 0 \\ 0 & K_L & 0 \\ 0 & 0 & K_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^V\xi_k K_V & 0 & 0 \\ 0 & {}^L\xi_k K_L & 0 \\ 0 & 0 & {}^R\xi_k K_R \end{bmatrix} \quad (6)$$

動作優先度係数はそれぞれ、文献 3)に記載されている手順にしたがい、逆運動学計算の反復回数 $k$ と式(5)で与えられる弾性エネルギー $V_k$ の減少度に応じて減衰させる。

### 3.6 関節変位制限連動の緩起動

本節と次節は、われわれ独自の理論拡張範囲である。

前節で述べた動作優先度の設定により、優先度の低い動作部が自動的に目標位置姿勢から外れ、優先度が高い動作部の動作が成立するように解が求まる。ここで、物理的な関節の可動域として設定される関節変位制限より内側に動作連動を開始させる関節変位範囲(以下、動作連動範囲)を設ける。関節変位がこの動作連動範囲に入った場合に、低優先度の仮想バネ定数 $K$ を減少させることで、優先度にもとづく連動動作が実行されるようにする。

ただし、この連動開始時には、急激な加速動作が発生する可能性がある。そこで、式(3)の中の関節ダンピング係数行列 $D_k$ の構成式に新たな制御パラメータを追加することで、緩やかに連動動作が始まるようにする。関節ダンピング係数行列 $D_k$ は式(3)において目標関節変位の算出に用いられ、各関節に発生する仮想トルク $\tau_k = J_k^T F_k$ に関節ダンピング係数 $D_k$ の逆行列を乗することで各関節変位の変化量 $\Delta q_k$ が求められる。したがって関節ダンピング係数 $D_k$ が増加すると、対応する関節が動きにくくなる。

行列 $D_k$ の構成式は、次式で与えられる<sup>15)</sup>。

$$D_k = J_k^T K J_k + T_k + \delta_k E_n + C \quad (7)$$

本式中、関節の動きにくさを調整するパラメータとして新たに追加したのが、関節ダンパ調整項  $C$  である。上記の関節の動作連動範囲に入った際に、その関節に対応する関節ダンパ調整項  $C$  の成分を増加させ、動きにくくすることで各関節角が角度制限範囲に近づきにくくする。

### 3.7 走行目標位置自動決定法

ユーザが操作対象物もしくは腕部の手先目標位置姿勢を教示し、走行部の目標位置姿勢を教示する必要がない場合、走行部の目標位置姿勢は自動的に決められることが望ましい。3.5 節に示した走行部の動作優先度の設定を低く設定することで実現可能ではあるが、常にこの機能を働かせて走行部を動かした場合、いずれかの関節が常に関節角度制限近くに位置することになり動作継続性が悪くなる。したがって、通常は下記に定める別の手法により走行部の目標位置姿勢を決め、優先度付き逆運動学解法による協調連動は最終的な動作継続手段とする。

走行部の目標位置姿勢を自動的に決める方法として、マニピュレータの可動範囲を考える。一般的にマニピュレータの可動範囲は、マニピュレータ基部と P 点と呼ばれる手首関節中心との位置関係で表される。そこで、基部  $P_{Base}$  と P 点の長さがある適切な距離  $R_C$  に保つような走行目標位置の補正量  $\Delta p_V$  を算出する。

まず、P 点を中心とする半径  $R_C$  の球を考える (Fig. 4)。この球を基部  $P_{Base}$  の高さで水平面に切り取った円の半径を  $R'_C$  とする。 $P_{Base}$  と円の中心 O との間の円弧上の点  $P_{tar}$  が  $P_{Base}$  の適切な位置となる。ここで  $P_{tar}$  と  $P_{Base}$  の差を偏差  $e = P_{tar} - P_{Base}$  とし、この偏差  $e$  を入力として仮想的なバネダンパ制御により  $P_{Base}$  を  $P_{tar}$  に近づける。ただし、腕の動きに対して走行部が細かく反応する必要はないため、偏差入力  $e$  が一定のしきい値より大きい場合に本機能が働くようにした。

$$\ddot{e} = M^{-1}(Ke - D\dot{e}) \quad (8)$$

$M$  は仮想質量である。上式より計算された補正加速度  $\ddot{e}$  をもとに、左右の腕の基部位置補正量  $\Delta p_L$ 、 $\Delta p_R$  を求め、これらを平均して走行部の位置補正量  $\Delta p_V$  とする。

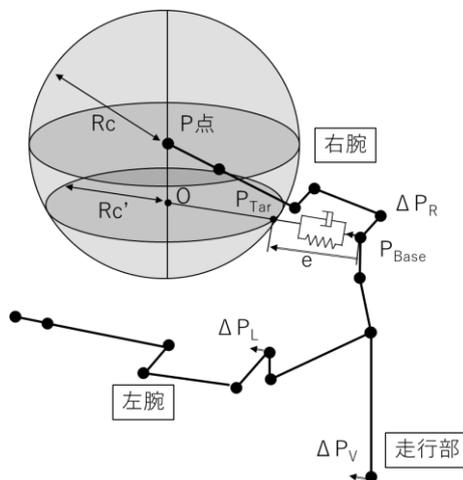


Fig. 4 走行目標位置自動決定方法

## 4. 検証評価

本章では、前章 3.4 節から 3.7 節で述べた諸機能のはたき明らかにするための検証評価の結果を示す。

### 4.1 優先度設定による多様な行動の創出の検証

まず、優先度設定の違いで CONOID の行動がどう変わるかを、ドア開け動作のシミュレーションで検証する。Fig. 5 は、シミュレーションの初期状態である。以下のシミュレーションは、ドアノブまたはドアハンドル相当部に右マニピュレータ手先を固定した状態で、CONOID がドアを開ける動作を模擬している。各図において CONOID は、各部設計寸法値に応じたスケルトンモデルで表されている。ドアハンドルをひねって CONOID がドアのロックを解除する動作は考慮しておらず、ロックは最初から解除されているものと想定する。Fig. 6(a) は、走行部の動作優先度を 1.0 に設定した場合の、シミュレーションの初期状態と終了状態における本ロボットの姿勢を表している。Fig. 6(b) は初期状態から終了状態までの、左右のマニピュレータと走行部それぞれの姿勢の変化を示している。Fig.

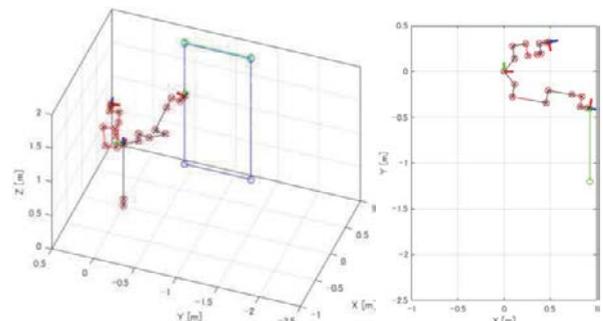


Fig. 5 (a) 3次元表示 Fig. 5 (b) 2次元表示(平面図)

Fig. 5 ドア開け動作のシミュレーションの初期状態

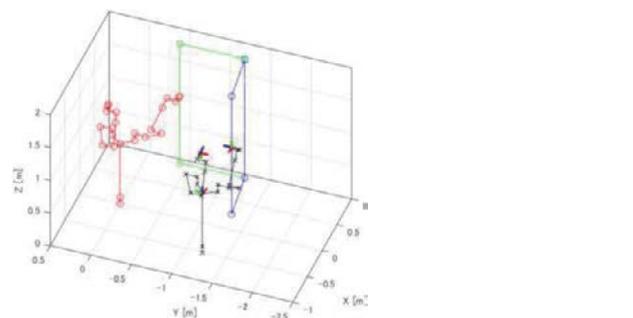


Fig. 6 (a) 3次元表示 Fig. 6 (b) 2次元表示(平面図)

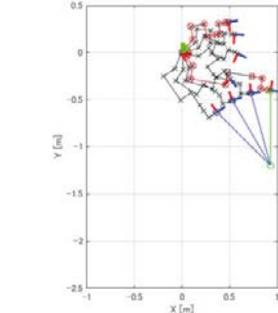


Fig. 6 (c) 2次元表示(初期動作)

Fig. 6 利己的モードでのドア開け動作シミュレーション結果

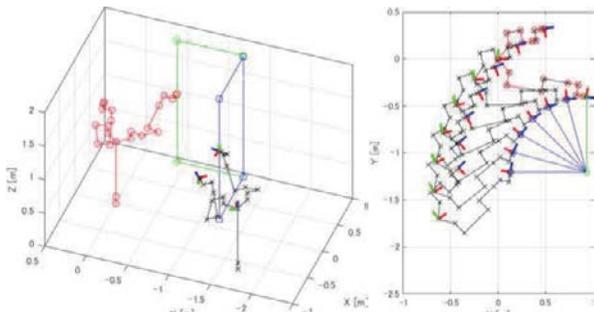


Fig. 7 (a) 3次元表示 Fig. 7 (b) 2次元表示(平面図)  
Fig. 7 利他的モードでのドア開け動作シミュレーション結果

6(a)と Fig. 6(b)を見ると、終了状態では CONOID はドア開口正面に対しやや右寄りに位置している。このロボットがドア開口を通り抜ける場合、ドア開口を自らが通り抜けやすい場所に位置していると言える。

このシミュレーションでは、初期状態に対しドアを15°ずつ開いていった各状態における、右手先の姿勢を人が教示すると仮定している。一方、走行部の姿勢は優先度付き多目標逆運動学解法により自動計算される。

Fig. 6(c)は、初期状態から走行部が動き出す直前までの、ロボットの姿勢変化を表している。初期状態からドアが45°開いた本図の状態までは、走行部は右回りに回転しているだけで、XとY方向の位置は初期状態と同じ位置を維持している。そして、本図の状態において第4リンクと第5リンクがほぼ平行になる特異姿勢を迎えるとともに、第4関節の関節角度が可動範囲の限界に達する結果、右腕手先はこれ以上動くことができなくなる。すると、この後の状態では優先度付き多目標逆運動学計算手段のはたらしにより、動作優先度が高い右手先の目標姿勢到達を助けるように、動作優先度が低い走行部がXとY方向の並進移動も開始する。その結果、Fig. 6(b)に示したように右手先はドアを開ける動作を継続し、ドアを初期状態に対し90°程度開けられていることがわかる。

Fig. 7(a)は、走行部の動作優先度を0に設定した場合の、シミュレーション初期状態と終了状態における CONOID の姿勢を表している。Fig. 7(a)は初期状態から終了状態までの、左右の腕と走行部それぞれの姿勢の変化を示している。Fig. 7(a)と Fig. 7(b)を見ると、CONOID は終了状態でドア開口正面から右側に外れた場所に位置している。この場所からは自らはドア開口を通り抜けにくい、他の人やロボットはドア開口を通り抜けやすくなっている。

このように、動作優先度の値を一つ変えるだけで、ロボットに学習なしで「おもてなし」的な行動を与えることが

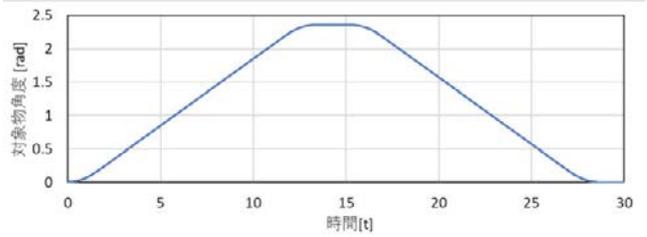


Fig. 9 段ボール箱の目標回転角度

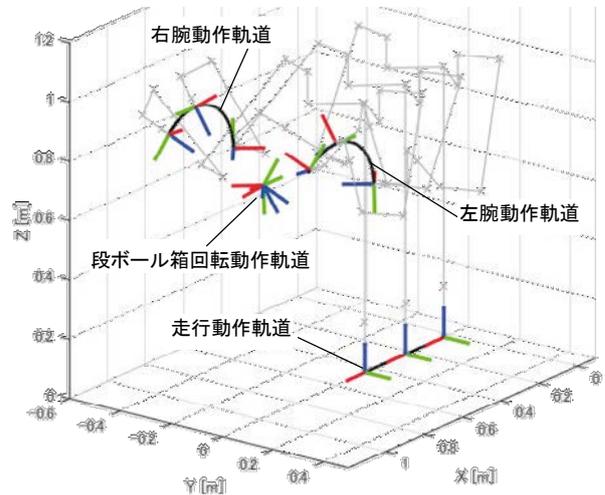


Fig. 10 各部目標位置姿勢(ひっくり返し動作前半部分)

できる。一方、状況に応じてどのような優先度を設定すればよいか、その設定法あるいは設計法が課題である。

#### 4.2 操作対象物の運動教示による協調運動

操作対象物である段ボール箱に、固定した回転軸まわりの135°の回転と、その後逆方向に同じ角度回転させて戻す運動を与えるだけで、従属アーキテクチャによってロボットの両腕と走行部が自動的に協調運動し、上記の運動を成立させる各駆動部の目標指令が創出させられるかどうかを、CONOID-IIIの実機で検証した(Fig. 8)。段ボール箱は手先に装着されたエンドエフェクタによって両腕で左右から押さえ込むように把持される。この把持位置はあらかじめ教示した対象物座標系上の位置姿勢であり、これが両腕と操作対象物との拘束条件となる。

Fig. 9に段ボール箱に操作者が与えた目標回転角度の時間変化を示す。この目標回転角度から実機で実際に計算された各動作部の目標位置姿勢を、CONOID-IIIのスケルトンモデルで表示したのが Fig. 10 である。本図からは、段ボール箱に与えた運動は固定軸まわりの回転のみであるが、両腕の手先は段ボール箱の回転軸から離れた位置に拘束さ



Fig. 8 CONOID-III実機による段ボール箱 ひっくり返し動作

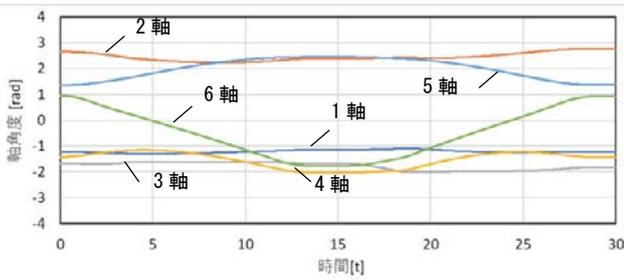


Fig. 11 左腕各軸目標角度(ひっくり返し動作)

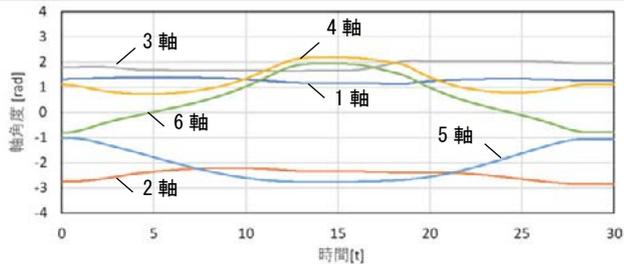


Fig. 12 右腕各軸目標角度(ひっくり返し動作)

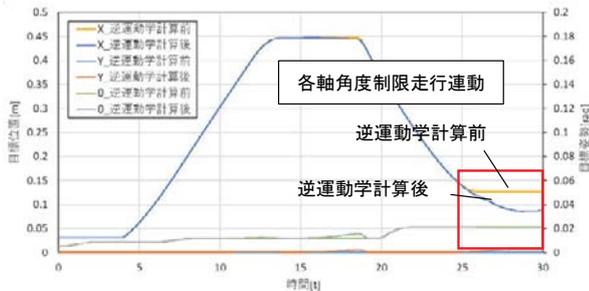


Fig. 13 優先度付き逆運動学計算前後の走行目標位置姿勢

れているため、両腕は回転に加えて円弧状に並進していることがわかる。さらに走行部と両腕の手先の距離が広がることで、3.7 節の走行位置自動決定機能により、走行部は手先に引っ張られるように前方に移動している。

これら走行部、両腕部の手先目標位置姿勢をもとに、優先度付き逆運動学解法によって両腕部の各関節目標角度 (Fig. 11, Fig. 12) と走行部の目標位置姿勢 (Fig. 13) が計算される。操作者が教示したのは段ボール箱の単なる回転運動のみであるが、すべての駆動部が複雑に連動していることがわかる。また、段ボール箱に与えた目標回転角度は運動の前半と後半とで対称で、運動終了時点で開始時点と同じ  $0^\circ$  に戻っているが (Fig. 9)、ロボットの動作における走行部の目標位置姿勢と両腕部の各関節目標角度は、動作の前半と後半で対称にはなっていない (Fig. 11~Fig. 13)。特に両腕の 1 軸と走行部の X 方向の目標位置が、前半部分と後半部分で動きが大きく異なっている。前半の動作で腕の手先位置に引っ張られるように走行部が前方に移動することで、走行部は腕の動作に適切な位置にいるため、後半の戻り動作の際には走行部の戻り量が約 50mm 小さくなり、両腕の各関節目標角度もその結果に影響されて動きが変わったと考えられる。

Fig. 13 において走行部の X 方向の目標位置 (逆運動学計算前: 黄、逆運動学計算後: 青) を比較すると、25s 以降は逆

運動学解法前後で値が更新されていることがわかる。これは両腕部の各軸目標角度が制限角度に近い場合、付録に示した優先度付き逆運動学解法の協調連動の機構によって、優先度の低い動作部である走行部がもとの目標位置姿勢から外れ、両腕の動作が成立するように目標位置姿勢が更新された結果である。また、25s 以降の両腕の各関節目標位置、走行部の目標位置姿勢を見ても、急激な加減速はなく、なめらかな目標変位の変化になっており、3.6 節で示した連動の緩起動機能が適切にはたらくしていると考えられる。

## 5. 考察

### 5.1 包摂アーキテクチャとの関係

従属アーキテクチャの構造には、行動の階層性や階層間の優先関係を決める信号接続が明確な形では存在しないことを第 2 章で述べた。一方で、Fig. 3 にある動作優先度決定機能には、ルールベースの形式で、走行に伴い周囲との衝突の危険性が生じた場合は走行の動作優先度を高め、手が物体を取りに行く動きよりも、走行が衝突を回避する動きを優先させるようなはたつきがある。このとき、ロボットの行動には階層性が現れ、階層性を生む行動間の優先関係は、動作優先度決定機能で規定されている。以上から、従属アーキテクチャは包摂アーキテクチャの拡張形式の一つと言えるであろう。

### 5.2 自律行動と行動学習

4.2 節の検証において、段ボール箱を覆してから箱の姿勢を元に戻した際、段ボール箱の姿勢変化に合わせて自律的に導かれた走行姿勢は、動作開始姿勢に戻らなかったことを述べた。これは、操作者が粗く決めた動作開始姿勢に対し、段ボール箱を覆す動作を開始するのに適した姿勢を、ロボットが自律的に見出したことを意味している。

現状、ロボットが自律生成した行動に対する学習対象は、過負荷と周囲への過接近の緩和、および移動距離を短縮するための経路点の姿勢変更のみであり、上記のような状況に対応した動作開始姿勢や目標姿勢の変更機能はない。しかしながら、このように動作開始姿勢や目標姿勢を変更できると、無駄な動きが減り動作の円滑性も向上し、わずかながらタクトやバッテリー消費量も削減できるため、なんらかの形で行動学習機能に追加すべきであると考えられる。

### 5.3 学習にもとづくアプローチとの違い

ロボットの動きを現場で調整しようとした場合、動作や性能を学習データを変えることでしか改善できないことは大きな制約である。学習データを変える方法では、動作をごくわずか部分的に、ある望ましい方向に改善することが難しい。実際に、深層学習を利用したロボットのピック・アンド・プレースの実用化システムにおいては、この制約が問題になっている。また、第 2 章で比較した従来の学習アプローチにおいて、人が学習に与えた動きが最適とは限

らない。少なくとも深層学習のような関数近似型の学習法には最適化の機能は含まれておらず、最適化の仕組みを持つ強化学習法には、多量の試行回数を必要とする問題があることは第2章で述べたとおりである。

従属アーキテクチャの場合、3.1節で述べたとおり、制御システムの全体構造は従来の産業用ロボットとほぼ同じであり、目標姿勢を変更したり、経路姿勢を変更または追加したりすることで、直接的にロボットの動作を調整できる。また、行動学習機能は自律生成された行動を最適化することができる。従属アーキテクチャはより現場指向ながらも、最新の計算機科学手法を使った研究例を上回る機能性も有する。

#### 5.4 従属アーキテクチャに対する AI や機械学習の適用

従属アーキテクチャは事前の学習やシミュレーションをいっさい使わずに、本能的にロボットの走行部や腕を円滑に連動させることを可能にする制御の枠組みである。そのように制御を知能化して制御側の低次領域を学習しなくてもよいようにしているため、学習のための資源を、物体認識や作業計画など、より高次の領域に集中させることができる。実際、静岡大学が開発した従属アーキテクチャの行動学習機能は、数回程度の試行で干渉を回避した軌道を生成することが可能である<sup>12)13)14)</sup>。

また、4.1節の動作優先度変更を扱ったシミュレーション例において、状況に応じた動作優先度の決定が課題であることを述べた。Fig. 3に示した優先度決定部は、ルールベースやニューラルネットなど、さまざまな入出力関係の写像機構で実現することが可能である。したがって、ロボットの本能的な行動ルールまたは行動規範を「開けたドアの向こうに人が見えた場合は人の通行を優先させなければならない」といった法律の条文のようなテキスト形式で記述しておき、それを生成系 AI に解釈させて各デバイスの優先度を出力させることは可能であろう。このとき、各状況においてあてはまる行動ルールは複数あり、その場合それらルールは矛盾する関係を含め互いに競合する。競合を調停する方策の決定には第2章で批判した強化学習も適用できる。そうした制御に直結しない概念的な学習はシミュレーションで実行することも可能と考えられ、そこでは計算機科学的手法や DX 的手法の活用の余地も十分にある。

最も特筆すべきことは、従属アーキテクチャが単純な指示に対して複雑な連動動作を生成可能な点である。検証評価でわれわれは、「箱を135°回転させよ」という指示のみで、その回転運動を成立させるよう、CONOIDの腕と走行部が箱の回転運動に自律連動することを見た。このことは、音声を含む言語によるあいまいな指示で作業を成立させられる可能性を示唆しており、生成系AIとの連携もしやすいと言えよう。

## 6. 結論

工場内の付随作業を担う生産支援ロボットの実用化を目的に、前号で示したロボット自律化のコンセプトと、それを実現する制御の基本的枠組みを包括する自律ロボットの制御システムの全体構造である、従属アーキテクチャを提案した。そして、少ない教示から腕と走行に協調的な運動が自動生成される最大の特徴を、検証結果を通じ示した。

現在、顧客からの要望に応じて、これまで自動化が試みられていなかったある分野における原材料の供給作業を、従属アーキテクチャを実装した CONOID で検証評価している。そこでは供給対象物の視覚姿勢認識と本稿で詳述した走行と腕の協調連動制御が、作業の自動化を成立させる基本となっている。前号でも述べたように、われわれは CONOID を従来の産業用ロボットと同じ複数分野を対象とする万能位置決め装置的位置づけではなく、特定の作業の実行プログラムをあらかじめ組み込んだ特定分野向け自律型作業ロボットとして製品化する。そのために今後、検証評価の対象作業を順次追加するとともに、ロボットを特定の顧客にエンジニアリング案件として早期にサンプル販売できるよう、開発を進める。

謝辞：本研究は、NEDO「次世代人工知能・ロボットの中核となるインテグレート技術開発/人工知能技術の適用領域を広げる研究開発/機械学習による生産支援ロボットの現場導入期間削減と多能化」の支援を受けた。同プロジェクトに共同で携わっていただいた、東京都立大学武居直行教授、静岡大学小林祐一准教授、東洋大学山田和明准教授に、深く感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 中村, 和田, ロボットの自律化—持続可能性から生存可能性への変革段階において, 芝浦機械技報, Vol.29 (2022), pp.40-45.
- 2) 関口, 武居, 仮想バネの弾性エネルギー最小化に基づいた特異姿勢・非可解な問題に対して安定な逆運動学の数値解法”, 日本ロボット学会誌, vol.36, no.9 (2018), pp.645-653.
- 3) M. Sekiguchi and N. Takesue, Fast and Robust Numerical Method for Inverse Kinematics with Prioritized Multiple Targets for Redundant Robots, *Advanced Robotics.*, vol.34, no.16 (2020), pp.1068-1078.
- 4) H. Ito, K. Yamamoto, H. Mori, T. Ogata, Efficient multitask learning with an embodied predictive model for door opening and entry with whole-body control, *Science Robotics*, 6 April, Vol 7, Issue 65 (2022).
- 5) Robust Layered Control System for a Mobile Robot, R. A. Brooks, *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol.RA-2, No.1, pp. 14-23, March 1986.
- 6) G. A. Bekey, *Autonomous Robots -From Biological Inspiration to Implementation and Control* (2017), MIT Press.

7) Robot Learning of Mobile Manipulation with Reachability Behavior Priors, S. Jauhri, J. Peters and G. Chalvatzaki, IEEE Robotics and Automation Letters, Vol.7, Issue 3, pp. 8399 - 8406, July 2022.

8) T. Welschehold, C. Dornhege, and W. Burgard, Learning mobile manipulation actions from human demonstrations, in IROS, IEEE (2017), pp.3196–3201.

9) T. Welschehold, N. Abdo, C. Dornhege, and W. Burgard, Combined task and action learning from human demonstrations for mobile manipulation applications, in IROS, IEEE (2019), pp.4317–4324.

10) 清水, 生命と場所 (1999), NTT 出版.

11) 清水, 生命知としての場の論理 (1996), 中公新書.

12) 荒井, 石村, 小林, 伊部, マニピュレータへの作業教示時間短縮のための力覚情報を用いた経路生成およびそのメタパラメータの自動調整, 第 33 回自律分散システム・シンポジウム講演論文集 (2021), 1A1-1.

13) 榊原, 小林, A. Garcia. F. J, 接触情報を用いたマニピュレータの経路生成と経路生成におけるメタパラメータの自動調整, 第 49 回知能システムシンポジウム講演論文集 (2022), ROMBUNNO.C3-3(WEB).

14) 高見, 小林, 単純な動作教示と接触情報にもとづくマニピュレータの経路生成, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2023 講演論文集 (2023), 2A1-E14.

15) 関口, 武居, 汎用性と各関節の可動性を考慮したロボット運動学の定式化手法, 日本ロボット学会誌, vol.41, No.2 (2023), pp.175-186.

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_V & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_L & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{K}_R \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_s & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{J}_{s1} & \mathbf{J}_{b1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{J}_{s2} & \mathbf{0} & \mathbf{J}_{b2} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{J}^T = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_s^T & \mathbf{J}_{s1}^T & \mathbf{J}_{s2}^T \\ \mathbf{0} & \mathbf{J}_{b1}^T & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{J}_{b2}^T \end{bmatrix} \quad (10)$$

さらに、 $\mathbf{K}$ と $\mathbf{J}$ を構成するブロック行列は、それぞれ次のように与えられる。

$$\mathbf{K}_V = \begin{bmatrix} K_{Vx} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{Vy} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{Vz} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{VRx} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_{VRy} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{VRz} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{K}_L = \begin{bmatrix} K_{Lx} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{Ly} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{Lz} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{LRx} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_{LRy} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{LRz} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\mathbf{K}_R = \begin{bmatrix} K_{Rx} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{Ry} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{Rz} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{RRx} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_{RRy} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{RRz} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\mathbf{J}_s = \begin{bmatrix} \mathbf{n}_{V0} & \mathbf{n}_{V1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{n}_{V2} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\mathbf{J}_{s1} = \begin{bmatrix} \mathbf{n}_{V0} & \mathbf{n}_{V1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{n}_{V2} \times (\mathbf{p}_L - \mathbf{p}_V) \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{n}_{V2} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\mathbf{J}_{s2} = \begin{bmatrix} \mathbf{n}_{V0} & \mathbf{n}_{V1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{n}_{V2} \times (\mathbf{p}_R - \mathbf{p}_V) \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{n}_{V2} \end{bmatrix} \quad (16)$$

ここで、 $\mathbf{n}$ は関節の回転軸ベクトル(単位角軸ベクトル)を表す。走行部における $\mathbf{n}_{V0}$ :並進 X 方向、 $\mathbf{n}_{V0}$ :並進 Y 方向、 $\mathbf{n}_{V2}$ :旋回 Z 軸周りの各回転軸ベクトルは、下記で与えられる。

$$\mathbf{n}_{V0} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{n}_{V1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{n}_{V2} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

また、 $\mathbf{p}_V$ :走行部の基準位置、 $\mathbf{p}_L$ :左マニピュレータの手先位置、 $\mathbf{p}_R$ :右マニピュレータの手先位置であり、これらは次式で与えられる。

$$\mathbf{p}_V = \begin{bmatrix} p_{Vx} \\ p_{Vy} \\ p_{Vz} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{p}_L = \begin{bmatrix} p_{Lx} \\ p_{Ly} \\ p_{Lz} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{p}_R = \begin{bmatrix} p_{Rx} \\ p_{Ry} \\ p_{Rz} \end{bmatrix} \quad (18)$$

式(1)の姿勢誤差ベクトル $\mathbf{e}$ も 1 段階詳細化して、 $\mathbf{e}_V$ :走行部の姿勢誤差、 $\mathbf{e}_L$ :左マニピュレータ手先位置の姿勢誤差、 $\mathbf{e}_R$ :右マニピュレータ手先位置の姿勢誤差、以上 3 つのベクトルに分ける。



R&D センター  
研究開発部  
第 1 開発課  
中村 陽一郎

R&D センター  
研究開発部  
第 1 開発課  
和田 侑也

### 付録

3.4 節で述べた優先度付き多目標逆運動学解法にもとづく腕の走行の協調連動の機構を、以下に詳述する。そのためにここでは式(2)を取り上げ、原著文献の定式化を、走行部と左右双腕のマニピュレータとを持つロボットを対象とするように拡張する。なお、以下の説明においては説明の冗長化を避けるため、ヤコビ行列、誤差ベクトル、ロボット全体の現在姿勢ベクトルから、 $(\mathbf{q}_k)$ の表記を省略する。

まず、式(3)の仮想バネ係数行列 $\mathbf{K}$ と基礎ヤコビ行列 $\mathbf{J}$ を、それぞれ次のように拡張する。

$$\mathbf{e} = {}^d\boldsymbol{\chi} - \boldsymbol{\chi} = \begin{bmatrix} \mathbf{e}_V \\ \mathbf{e}_L \\ \mathbf{e}_R \end{bmatrix} \quad (19)$$

以上から、式(2)は次のように拡張される。

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\tau}_V \\ \boldsymbol{\tau}_L \\ \boldsymbol{\tau}_R \end{bmatrix} = \mathbf{J}^T \mathbf{K} \mathbf{e} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_s^T & \mathbf{J}_{s1}^T & \mathbf{J}_{s2}^T \\ \mathbf{0} & \mathbf{J}_{b1}^T & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{J}_{b2}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{K}_V & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_L & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{K}_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{e}_V \\ \mathbf{e}_L \\ \mathbf{e}_R \end{bmatrix} \quad (2')$$

この式(2')の中で、まず仮想バネ係数行列 $\mathbf{K}$ を見る。式(9)と式(11)からわかるように、動作優先度が乗算されるブロック対角行列である $\mathbf{K}$ は、実際は対角行列である。したがって、走行部、左マニピュレータ、右マニピュレータの3つの作動デバイス間に、異なる作動デバイスどうし、および異なる作動デバイスの各制御自由度どうしの相関はない。

一方、式(2')の中の同じくブロック対角行列である基礎ヤコビ行列の転置行列 $\mathbf{J}^T$ を見ると、1行目の3つの転置ブロック行列は左から順に、走行部、左マニピュレータ手先、右マニピュレータ手先それぞれの3次元空間内の並進速度と回転角速度が、走行部の関節角速度に寄与する量を表している。このことから、走行部の関節角速度は、左右のマニピュレータ手先の移動速度との相関を持つことがわかる。したがって、式(2)または式(2')によると、左右のマニピュレータの姿勢誤差は、 $\mathbf{J}^T$ の相関項を介して走行部の駆動トルクと、さらに式(3)の中の走行部の変位量増分の計算にもおよぶことがわかる。このことを、さらに式(2')の中の走行部の駆動トルク $\boldsymbol{\tau}_V$ を書き下して確認する。

まず、式(14)から式(16)は、式(17)と式(18)を用いると、それぞれ以下の式(20)から式(22)に書き下すことができる。

$$\mathbf{J}_s = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{J}_s^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\mathbf{J}_s^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J}_{s1}^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -(p_{Ly} - p_{Vy}) & p_{Lx} - p_{Vx} & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\mathbf{J}_{s2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -(p_{Ry} - p_{Vy}) \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & p_{Rx} - p_{Vx} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{J}_{s2}^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -(p_{Ry} - p_{Vy}) & p_{Rx} - p_{Vx} & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

式(19)で1段階詳細化した姿勢誤差ベクトルを、さらにもう1段階書き下す。

$$\mathbf{e}_V = \begin{bmatrix} e_{Vx} \\ e_{Vy} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ e_{VRz} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{e}_L = \begin{bmatrix} e_{Lx} \\ e_{Ly} \\ e_{Lz} \\ e_{LRx} \\ e_{LRy} \\ e_{LRz} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{e}_R = \begin{bmatrix} e_{Rx} \\ e_{Ry} \\ e_{Rz} \\ e_{RRx} \\ e_{RRy} \\ e_{RRz} \end{bmatrix} \quad (23)$$

誤差ベクトル $\mathbf{e}_V$ 、 $\mathbf{e}_L$ 、 $\mathbf{e}_R$ それぞれの第1から第3までの要素はいずれも、目標姿勢に対する現姿勢との誤差のうち、X方向、Y方向、Z方向それぞれの並進成分の誤差である。また、第4から第5までの要素はいずれも、目標姿勢に対する現姿勢との誤差のうち、角度の誤差を表した角軸ベクトルのX方向、Y方向、Z方向の成分である。

以上から、式(2)の中の走行部の駆動トルク $\boldsymbol{\tau}_V$ は、次のように展開される。

$$\boldsymbol{\tau}_V = \begin{bmatrix} \tau_{Vx} \\ \tau_{Vy} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \tau_{V\theta} \end{bmatrix} = [\mathbf{J}_s^T \quad \mathbf{J}_{s1}^T \quad \mathbf{J}_{s2}^T] \begin{bmatrix} \mathbf{K}_V & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_L & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{K}_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{e}_V \\ \mathbf{e}_L \\ \mathbf{e}_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{Vx}e_{Vx} + K_{Lx}e_{Lx} + K_{Rx}e_{Rx} \\ K_{Vy}e_{Vy} + K_{Ly}e_{Ly} + K_{Ry}e_{Ry} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \mathbf{A} \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$\mathbf{A} = -K_{Lx}e_{Lx}(p_{Ly} - p_{Vy}) + K_{Ly}e_{Ly}(p_{Lx} - p_{Vx}) - K_{Rx}e_{Rx}(p_{Ry} - p_{Vy}) + K_{Ry}e_{Ry}(p_{Rx} - p_{Vx})Rz + K_{VRz}e_{VRz} + K_{LRz}e_{LRz} + K_{RRz}e_{RRz}$$

式(24)から、確かに左右マニピュレータ手先の目標姿勢に対する現姿勢との誤差が、走行部の駆動トルクに及んでいることがわかる。したがって、上記のように拡張した優先度付き多目標逆運動学解法を優先度付き多目標逆運動学計算手段に実装し、さらにこの優先度付き多目標逆運動学計算手段を組み込んだ制御装置を備えたロボットは、仮に手先目標姿勢がマニピュレータのみの動作では届かない位置にあっても、走行の補助移動によってそこに手先をより接近させることができる。

# きさげ作業におけるあたり模様の抽出と評価用 AI モデルの開発

星谷 拓 富永 昌登

先進国では人口減少や高齢化による生産年齢人口の減少が進み、生産現場の人手不足が問題となっている。特に「きさげ作業」では定性評価が多く、技術の継承が困難となる懸念がある。本研究では、AI を活用して定性評価を定量評価に置き換えるアプローチを提案し、あたり模様抽出 AI とあたり模様評価 AI の 2 つのモデルを作成した結果、高い性能のモデルを作成することができた。しかし、あたり模様評価 AI の適合率向上に課題があることがわかった。これは学習データのラベル情報の不完全性が原因と考えられる。今後はクラスタリング手法を取り入れてラベル情報を改善し、適合率の向上を目指す報告をする。

## 1. 研究背景

昨今、多くの先進国では人口の減少や高齢化が進展しており、これに伴い生産年齢人口の減少が加速している。この状況は、特に熟練作業員の引退や人手不足から、技術の適切な継承が行われないことが問題を引き起こしている。国内の生産現場においても、既に人手不足により作業の属人化が進み、技術力の衰退へと悪循環が生じている恐れがある。

生産現場においては、加工工程や検査工程において、五感に基づいた定性的な評価が未だに数多く存在する。このような評価は、現代のデジタル化が進む社会においても必要とされているが、定性評価では作業員によって評価基準に差が生じる可能性があり、品質のバラツキの原因となることがある。したがって、定性評価を定量評価に置き換えることで評価基準が明確となるため、品質の均一化を図ることができる。

特に先進国では、生産年齢人口の減少が予測される中、生産現場では省人化が求められている。省人化を実現するためには自動化が必要不可欠とされているが、その前段階としてデジタル化が重要となる。しかし、定性的な評価が多く残る現状では、人の判断を介す必要があるため、完全なデジタル化を行うことが出来ず、効果的な自動化が行えない可能性がある。

本論文では、このような課題に対処するため、定性評価を定量評価に置き換える必要性を一例により提起する。具体的には、AI を活用し、きさげ作業で行われている定性評価をデジタル化し、定量的な評価手法を導入する一例を紹介する。きさげ作業とは、表面に小さい溝やくぼみを作り摺動性を向上させるための切削作業である。定性評価のデジタル化により、デジタル化の推進や自動化の実現に向けた基盤を構築し、定性評価によるバラツキの軽減や効率的な生産プロセスの確立を図り、生産現場の品質向上と生産性の向上を期待する。

## 2. 目的

本研究ではきさげ作業において、きさげ加工面の撮影データからあたり模様の抽出を行う AI と、評価を行う AI を作成することで、定性評価を定量評価に置き換えることを目的とする。

## 3. 方法

きさげ作業では、作業の評価方法として見た目での定性評価が行われている。実際のきさげ作業を行った部材のあたり模様を Fig. 1 に示す。



Fig. 1 定性評価時の模様例

Fig. 1 は実際の加工面から 1inch 四方であたり模様を抽出した画像である。作業員はこのあたり模様から得られる情報をもとにきさげ作業の良し悪しを評価している。そのため定量評価を行うためには、Fig. 1 の様な、あたり模様のご良好度合いを数値化する必要がある。

本研究では、あたり模様の評価を AI で行うため 2 つの AI を使用した。

### 3.1 あたり模様抽出 AI

1 つ目の AI はあたり模様抽出 AI である。画像を取り扱う AI において、撮影環境の影響を大きく受けることは珍しくない。対策としては、様々な環境条件のもと、大量のデータを準備することがあげられるが、現実的な作業ではないと言える。そのため、汎用性の向上を測るためあたり模様の抽出を行い、2 値画像を生成する AI の作成を行った。2 値画像の生成には画像の領域分類に有効な深層学習の 1 つである U-net<sup>1)</sup>をベースにあたり模様抽出モデルの構築を行った。U-net の簡易的な構造を Fig. 2 に示す。

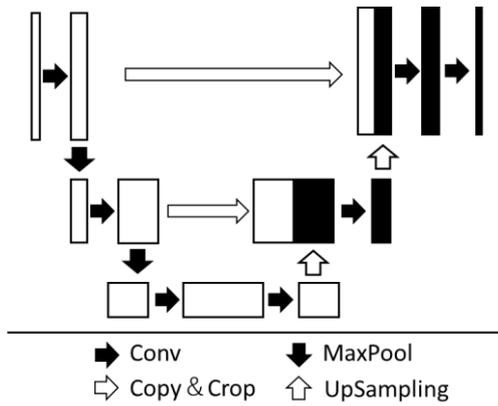


Fig. 2 U-net のモデル構造

Fig. 2 のように、U-net は畳み込み層<sup>2)</sup>を持った自己符号化器<sup>3)</sup>となっている。通常の自己符号化器との違いは、エンコーダ部の畳み込み情報をデコーダ部に入力する構造である。これにより従来よりも細かい領域分類が可能となった。U-net は一般的に教師ありでの学習が行われている。本研究で使用した教師データの一例を Fig. 3 に示す。

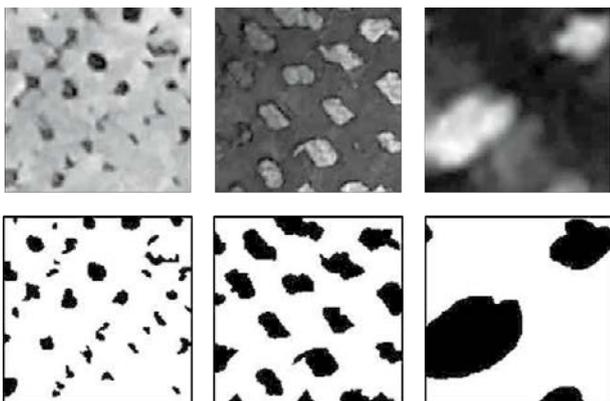


Fig. 3 模様抽出 AI の教師データ

Fig. 3 の上段が Fig. 1 で示したようなあたり模様画像をグレースケールに変換した入力画像、下段が入力画像からあたり模様部分を黒、その他を白としてアノテーションを行った教師画像である。グレースケールに変換した理由は、前述した撮影環境の影響を低減させる目的と、あたり模様抽出においては RGB 情報は必要ないと判断したためである。また、入力画像は特殊な撮影システムを使用せず汎用品のタブレットに付属するカメラを用いて撮影を行った。これはコスト的メリットと作業員への負荷低減のためである。あたり模様抽出 AI モデルの学習条件を Table 1 に示す。

Table 1 模様抽出 AI の学習条件

入力データ形状	(128,128,1)
出力データ形状	(128,128,2)
活性化関数(中間層)	LeakyReLU <sup>4)</sup> 【alpha:0.01】
活性化関数(出力層)	Softmax
損失関数	Categorical Crossentropy
最適化手法	Adam <sup>5)</sup> 【学習率: 0.001】

Table 1 の出力データ形状が(128,128,2)となっているが、これは Fig. 3 の教師画像を One-Hot 表現に変換したデータを用いて学習を行うためである。

### 3.2 あたり模様評価 AI

2 つ目の AI は前節で抽出したあたり模様の評価を行う AI である。あたり模様抽出を行い、2 値化されたあたり模様画像を評価 AI の入力データとした。評価 AI は、畳み込み層と全結合層を組み合わせた構造とした。Fig. 4 に本研究で使用したモデル構造の簡略図を示す。

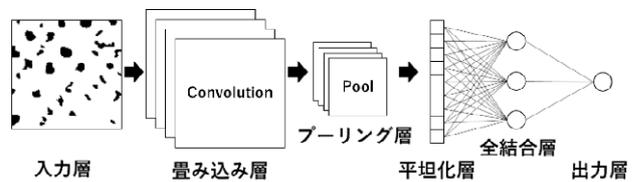


Fig. 4 CNN のモデル構造

Fig. 4 の出力層では、入力されたあたり模様の良否判定結果が数値として出力される。これにより、入力されたあたり模様の良否を定量的に評価することが可能となる。

評価 AI の学習条件を Table 2 に示す。

Table 2 模様評価 AI の学習条件

入力データ形状	(128,128,1)
出力データ形状	(1)
活性化関数(畳み込み層)	LeakyReLU 【alpha:0.01】
活性化関数(全結合層)	ReLU
活性化関数(出力層)	Sigmoid
損失関数	Binary Crossentropy
最適化手法	Adam 【学習率:0.001】

## 4. 結果

### 4.1 あたり模様抽出 AI

学習させたモデルの正答率を Table 3 に出力結果を Fig. 5 に示す。また本論文で使用する評価データはすべて学習時に使用していないデータを用いる。

Table 3 学習データと検証データの正答率

学習データ	0.9975
検証データ	0.9911

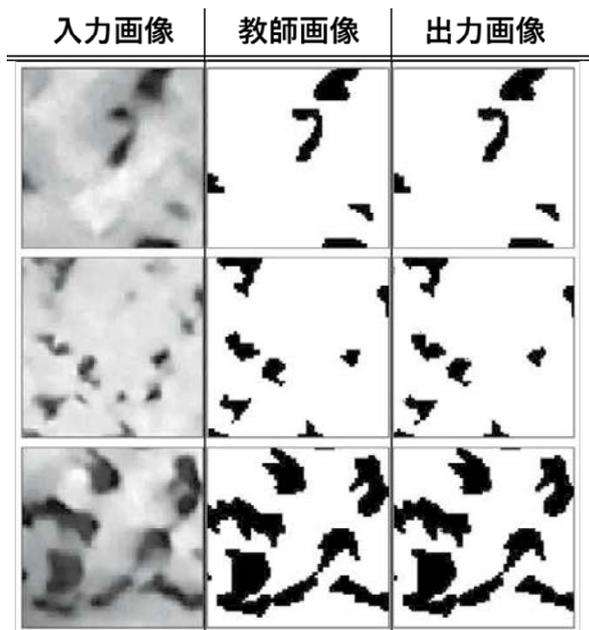


Fig. 5 AI による模様の抽出結果

Fig. 5 では、左から入力画像、教師画像、出力画像を示す。あたり模様抽出 AI は入力画像から教師画像と同等の出力を行うように学習を行う。Fig. 5 からわかるように、教師画像と出力画像に大きな差異が見られないことがわかる。Table 3 より、検証データの正答率も高く出ているため、あたり模様抽出についてはかなり高精度なモデルが作成できたといえる。また正答率だけではピクセル単位のズレを評価できないため、モデル評価の指標としてセグメンテーションタスクの評価指標の一つである平均 IoU を使用する。IoU とは、正解領域と予測領域の重なり具合を表す値であり、平均 IoU は複数のクラスに対して IoU を計算し、平均した値である。平均 IoU をの算出を行う式を式(1)に示す。n は分類するクラス数とする。

$$\text{平均IoU} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|A_i \cap B_i|}{|A_i \cup B_i|} \quad (1)$$

式(1)より、検証データの平均 IoU は 0.9888 であることがわかった。一般的に IoU は 1 に近いほど精度が高く、

0.5 以上は精度の良いモデルとされている。そのため、正答率、平均 IoU の値から、あたり模様のズレも少ない有用なモデルが作成できたといえる。

### 4.2 あたり模様評価 AI

あたり模様評価 AI は画像の 2 値分類を取り扱うため、学習させたモデルの正答率を Table 4 に示す。

Table 4 学習データと検証データの正答率

学習データ	0.9243
検証データ	0.8733

Table 4 より、正答率では学習データ、検証データ共に 80% 以上の性能であることがわかる。次に、二値分類や多値分類のモデルの性能評価によく使用される混同行列を Table 5 に示す。混同行列はモデルの予測結果と真のターゲット（正解ラベル）との一致・不一致の数を示す行列であり、モデルがどのクラスをどれだけ正確に予測できたか、誤分類の傾向などの評価を行うことが出来る。

Table 5 混同行列

	予測の良好	予測の不良
真の良好	TP 114	FN 8
真の不良	FP 20	TN 79

Table 5 より、さらにモデルの性能評価を行うため適合率、再現率を算出する。適合率の算出式を式(2)に、再現率の算出式を式(3)に示す。また算出した適合率と再現率を Table 6 にまとめる。

適合率：

$$\frac{TP}{TP + FP} \quad (2)$$

再現率：

$$\frac{TP}{TP + FN} \quad (3)$$

Table 6 適合率と再現率

適合率	0.8507
再現率	0.9344

Table 6 より、良好と予測されたあたり模様の中に、実際に良好だったあたり模様が約 85%、実際に良好だったデータの中で、正しく予測されたあたり模様の割合が約 93%であることがわかる。これは AI が良好なあたり模様と予測したデータのうち、実際は不良なあたり模様が約 15%含まれており、良好なあたり模様の約 7%は不良なあたり模様として予測してしまうことを示している。

次に ROC 曲線と AUC<sup>6)</sup>を用いて評価を行う。ROC 曲線と ACU は適合率と再現率を使用して分類モデルの性能を評価するための指標として使用されている。あたり模様評価 AI の ROC 曲線と AUC を Fig. 6 に示す。

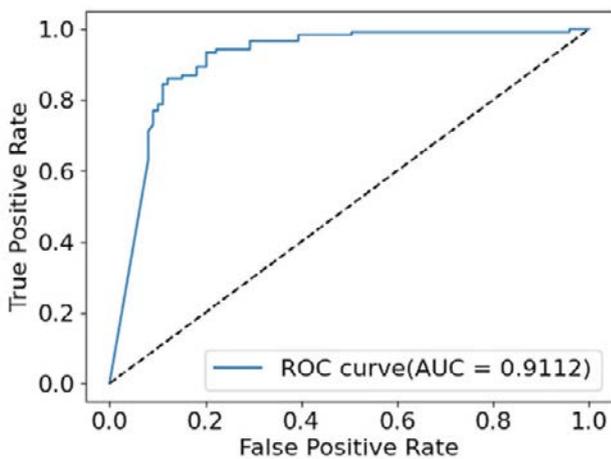


Fig. 6 ROC 曲線と AUC

Fig. 6 より AUC の値は 0.9112 であることがわかる。一般的に AUC は 1 に近いほどモデルの性能が高いと言えることから、あたり模様評価 AI についても有用性のあるモデルの作成が行えたといえる。

### 4.3 適合率向上への課題

本研究では、あたり模様抽出 AI とあたり模様評価 AI の作成を行った。各 AI ともに、評価指標からみれば性能の高い AI モデルの作成ができたといえる。しかし、あたり模様評価 AI においては、品質保証を考慮した際に、適合率の約 85%という数字は決して高い数字とはいえない。前述した通り、AI が良品と判別したうちの約 15%は不良である可能性があるため、適合率は 100%に近い水準を保持するべきである。

今回、適合率が高い水準の性能を得られなかった要因として学習データのラベル情報が最適ではなかったこと、学習データが不足していたことなどの可能性が考えられる。しかし、本研究ではデータ取得量の削減を目的として、少量のデータから汎用性の高い AI モデルを作成するためにあたり模様抽出 AI の作成を行った。そのため、今回はラベル情報が最適ではなかった可能性に焦点を当て考察を行う。

本研究では、あたり模様評価 AI の学習の際に、あたり模様抽出 AI の出力結果と、良好・不良のラベルを紐づけて学習させている。ラベルは定性評価を基準とした判別

のもとに人の手で作成しているため、ラベル情報に不備があった場合、AI モデルの精度が向上しない可能性がある。また、ラベルは良好・不良の 2 値で作成しているため、良好と不良の間の判別が不得意になり得る可能性が考えられる。人が定性的な評価を行う場合、0.0 か 1.0 で評価を行うのではなく、0.8 や 0.2 といった”どちらかと言えば”といった感覚で評価を行う場合がある。今回のラベルに関しては、この曖昧表現の情報付けを行っていないため、あたり模様が持つ特徴とラベルの関係を正確にとらえることが出来なかったのではないかと考えられる。これは Table 4 の正答率からもわかるように、学習データと検証データの正答率に差が生じていることから、検証用データには 2 値では分類が難しいデータが含まれていたと考えられる。また Fig. 7 にあたり模様評価 AI の学習曲線を示す。

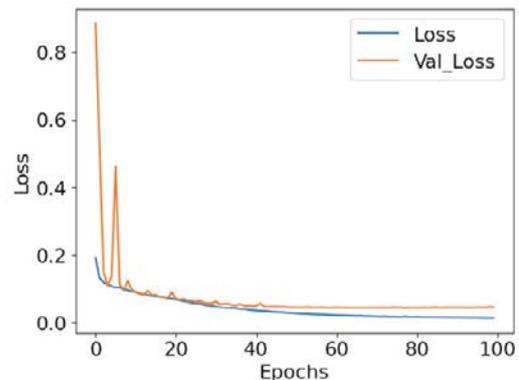


Fig. 7 模様評価 AI の学習曲線

あたり模様評価 AI の検証では、Fig. 7 の 38 エポック時の学習モデルを使用しているため、モデル自体に過学習の兆候はみられないことがわかる。したがって、ラベルデータの不完全性が要因である可能性は十分に高いといえる。

ラベル情報の不完全性については、クラスタリング手法を用いてあたり模様のグルーピングを行い、クラスごとにラベルの値を調整することで解決できると考える。例えば、ラベルを付ける際に 100%良好と言い切れるあたり模様と 100%不良と言い切れるあたり模様からの特徴空間での距離に応じてラベル情報にペナルティを設けることで、曖昧なデータに対しても AI が定量的な評価が行える可能性があるため、引き続き研究を進める。

## 5. まとめ

本研究ではきさげ作業において、きさげ加工面の撮影データからあたり模様抽出を行う AI とあたり模様評価を行う AI の高性能なモデルを作成することができた。しかし、AI を活用し、品質を向上させるためには、より高精度なモデルが必要となるため、引き続き改良を続けていく。AI の活用により、生産現場においては品質の向上と生産

性の向上が期待される。今後はデジタル技術の進化を活用し、さらなる革新的なアプローチを探求することで、産業界に新たな価値を提供することを目指していく。

## 参考文献

- 1) O. Ronneberger, P. Fischer, and T. Brox, "U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation," arXiv:1505.04597 [cs.CV], 18 May 2015.
- 2) Yann LeCun, Bernard Boser, John S. Denker, Donnie Henderson, Richard E. Howard, Wayne Hubbard, Lawrence D. Jackel, Handwritten Digit Recognition with a Back-Propagation Network, Proceedings of the IEEE, Vol. 86, No. 11 (November 1998), pp.2278-2324.
- 3) Vincent, Pascal, et al., Extracting and Composing Robust Features with Denoising Autoencoders, Proceedings of the 25th International Conference on Machine Learning (ICML-2008), 2008.
- 4) Maas, Andrew L., Awni Y. Hannun, and Andrew Y. Ng, Rectifier Nonlinearities Improve Neural Network Acoustic Models, Proceedings of the 30th International Conference on Machine Learning (ICML-13), 2013., pp.3-11.
- 5) Diederik p. Kingma & Jimmy Lei Ba, ADAM: A METHOD FOR STOCHASTIC OPTIMIZATION, 3rd International Conference for Learning Representations, San Diego, 2015
- 6) James A. Hanley, Barbara J. McNeil, The meaning and use of the area under a receiver operating characteristic (ROC) curve, Radiology, Vol. 143, No. 1 (April 1982), pp. 29-36.



R&D センター  
研究開発部  
デジタルツイン開発課  
星谷 拓



R&D センター  
研究開発部  
デジタルツイン開発課  
富永 昌登

# 半導体パッケージ配線形成プロセス all dry 化に向けた 中真空 PVD による界面制御技術の開発

深田 和宏

近年の世界情勢の変化に伴い、急激な情報増大が起きており、そのため半導体の特に最先端ロジック IC のさらなる高集積化、高速化が迫られている。半導体後工程は前工程の技術を展開することが必須となっており、後工程に最適化したプロセス技術、製造装置の開発が急務である。後工程の中でも、特に注目されているプロセスは電解めっきシード層成膜であり、現状の無電解めっき法では次世代微細配線プロセスに向けて限界に達している。そこで当社は中真空 PVD 装置でシード層を形成するプロセスを提案した。本稿では当社が提案する中真空 PVD 装置を中心とした次世代半導体パッケージ基板形成プロセスについて説明する。

## 1. はじめに

半導体パッケージ基板の高集積化には CPU、GPU に搭載される LSI の超微細化だけでなく、LSI を搭載する有機パッケージ基板でも数  $\mu\text{m}$  幅の微細回路形成が必要となる。有機基板回路の微細化には絶縁材の平滑表面に高い密着力を有する導体層形成が不可欠となるが、従来の Wet 工法では平滑面への密着が得られず微細回路形成が困難である。当社成膜装置は、真空統合プロセス<sup>1,2)</sup>システムを採用しており、高速タクトを実現するため中真空 (100Pa $\sim$ 0.1Pa) の環境下でプラズマによる表面改質とスパッタリングによる高密着な導体層形成を可能とした<sup>3)</sup>。

ロジック IC が搭載されたプリント配線基板はビルドアップフィルムと呼ばれる層間絶縁膜を10層以上積み重ねた多層構造となっている。各層の配線は電解めっきで形成される。現在、電解めっきに必要なシード層形成には無電解めっき<sup>4)</sup>が用いられており、無電解めっきの絶縁材料への密着は絶縁材の荒れた表面へ物理的アンカーにより形成されることがわかっている。しかし、微細化には絶縁材表面の平滑性が必要となっており、平坦な基板に対して無電解めっき処理では十分な密着性が得られない。無電解めっきの代替プロセスになる次世代パッケージ基板向けの新しい工法としてスパッタ成膜によるシード層形成方法の開発が進められている<sup>2,4,5)</sup>。スパッタリングで形成されたシード層は無電解めっきとは異なる密着方法であるため、平滑面へ高密着を実現できる。また、無電解めっきよりも工程数を短縮することができるため、後工程での歩留まり改善なども期待できる。一般的なスパッタリングによる導体層形成プロセスでは、Ti、Crなどの接着層上に銅を成膜する構造が検討されているが、回路

形成時のシード層除去工程において、CuのエッチングだけでなくTi、Cr等の密着層の除去工程が別途必要となり使用する薬品の環境負荷、安全性など問題点も多い。そこで我々は真空統合プロセス<sup>1)</sup>による導体層形成プロセスを開発し、O<sub>2</sub>プラズマによる表面改質により樹脂と銅の化学結合を促進させることでTi、Cr等の金属密着層が不要な高密着ダイレクト銅導体層形成プロセスを実現した。このプロセスは中真空領域で処理を行うため、タクトが速く、配線プロセスにおいても触媒除去や金属密着層除去の工程が必要ないため、微細化に適しており、高速伝送特性にも有利に働くと考える。次世代プリント配線基板プロセスは可能な限り、今までのウェットプロセスをドライプロセスに行おうとしており、シード層形成だけでなく、その前工程のドライ化も必要とされている。

本報告では、上記の高密着ダイレクト銅導体層形成プロセスで次世代プリント配線基板プロセス実現するため、シード層形成の前工程をドライ化する方法を提示する。

## 2. プリント配線基板プロセス

半導体パッケージ基板製造に用いられる工程フローについて説明する。Fig.1にABFビルドアップ基板上にセミアディティブ法(SAP法)による回路形成プロセスフローを示す。FR-4をコア材としたABF基板(GXT31)に表面疎化を目的としたデスマア処理を行い、オープン加熱で脱水処理を実施する。その後中真空スパッタ装置LPP-450にてプラズマ表面改質、銅スパッタリングにより導体層(300nm)を形成、パターンニングでは、真空ラミネータでドライレジストフィルムを貼り付け露光、現像を実施、電解めっきで配線層を増膜し、その後基板とシード層の密着性を強めるためアニールを行

い、シード層エッチングをすることで回路形成完了となる。

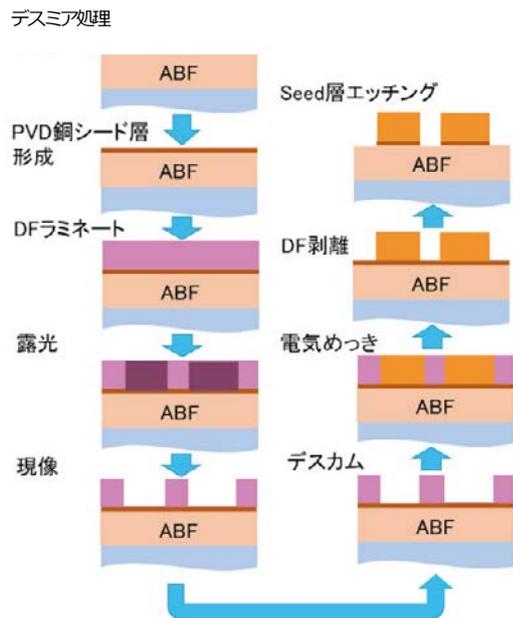


Fig.1 半導体パッケージ回路形成プロセスフロー

前報告<sup>2)</sup>ではシード層形成の前工程であるデスマリア処理工程で過マンガン酸によるウェットデスマリアを用いたが、本報告では顧客の要求を満足する次世代半導体パッケージプロセスへと近づけるため、ウェット方式ではなくドライ方式での表面疎化方法を試行し、ABF基板への密着性を確認した

### 3. 実験装置概要

#### 3.1 装置概要

ダイレクト銅の導体層を形成する装置として中真空スパッタ装置LPP-450を製作した。装置の外観図をFig.3に、装置仕様をTable 1に示す。また装置上面図をFig.4に示す。前報では、両面電極の配置が、HCDとスパッタが互いに斜向かいになるように設置していたが<sup>2)</sup>、今回装置での両面電極の配置はFig.4に示すようにHCD電極、スパッタ電極それぞれが対向になるように設置している。この設置方法により、金属成膜の時間を短縮することが可能となった。



Fig.3 中真空 PVD 装置

Table 1.装置仕様

Outer dimensions	4,200 × 2,800 × 2,100 mm
Chamber volume	450 L
Substrate size	Max 630 × 540 mm
Sputtering method	DC magnetron method
Plasma method	RF remote Type
Deposition Rate (Cu)	~35nm/sec
Film thickness uniformity	<10%(max-min)/(2XAvg)
Tact time	240sec (standard process)

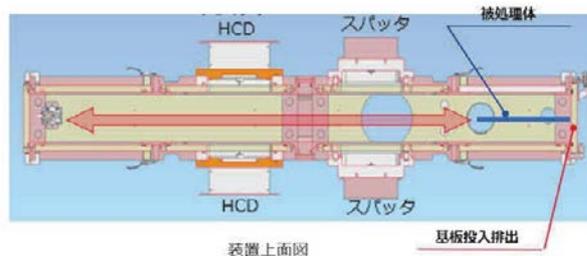


Fig.4 装置概要

中真空スパッタ装置 LPP-450 プラズマ電極とスパッタ電極をそれぞれ二台持つ構成となっており、一回の真空処理で基材の両面への改質、成膜ができることが特徴である。以下に LPP-450 での基材処理手順を記す。Fig.4 の下側を最初に処理する A 面、上側を二回目に処理する B 面とした。

- 基板投入後、プロセス可能圧力 0.1Pa まで真空排気
- A 面にプラズマ処理して改質
- B 面にプラズマ処理して改質
- 同様に A、B 面へ Cu スパッタ処理
- 大気開放し、基板を取り出す

通常、真空成膜装置は高真空領域(0.1Pa~10<sup>-5</sup>Pa)まで排気を行うため、樹脂基材を対象とした真空排気では材料からのガス発生のため、高真空域を得るためには長時間を要する。しかしこのプロセスは中真空領域で処理ができるため、排気時間が大幅に短縮でき一回あたりの処理は最短 240sec で完了する。本装置で処理可能な基板サイズはプリント配線板の業界規格の最大サイズ 640mm×530mm まで可能である。

### 3.2 ドライ方式のデスマミア検討

ドライ方式のデスマミアプロセスについて検討した。方式としては UV 光照射方式、熱アシストプラズマ方式、マイクロ波プラズマ方式の三種類を検討したところ、熱履歴の少ないマイクロ波プラズマ方式において密着性が良好との結果を得たため、マイクロ波プラズマ方式にターゲットを絞ることとした。

マイクロ波プラズマ方式で ABF 基板のデスマミアをした後の表面電子顕微鏡像を Fig.5 に示す。Fig.5 から、表面に無数のフィラーが発生していることがわかる。このフィラーは ABF に含まれている SiO<sub>2</sub> フィラーであり、この状態のままスパッタ処理をすると樹脂表面との密着を阻害する。通常は純水による超音波洗浄によりフィラーを除去するが、純水洗浄を行うと次工程に進めるには乾燥工程が必要となるため、長い工程タクトが要求される。

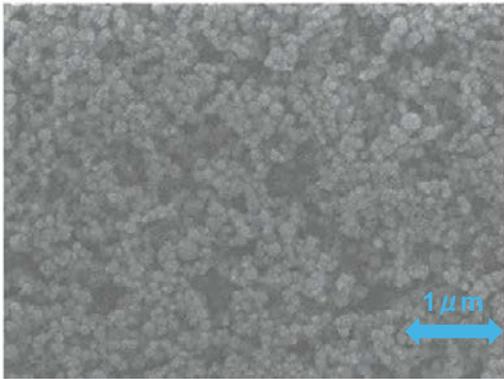


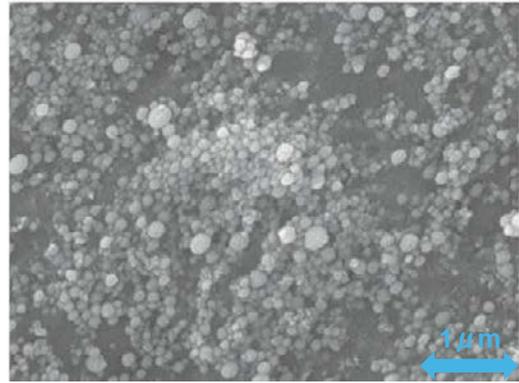
Fig.5 プラズマデスマミア処理後 ABF 表面

当社は乾式のフィラー除去プロセスとしてドライアイスブラストに着目した。ドライアイスブラストの概要を Fig.6 に示す。ドライアイスブラストは直径数 μm のドライアイス圧縮空気にて基板に衝突させ表面を洗浄する方式であり、物理的なエネルギーを使用するため、今回のような微細物を除去するのに適している。

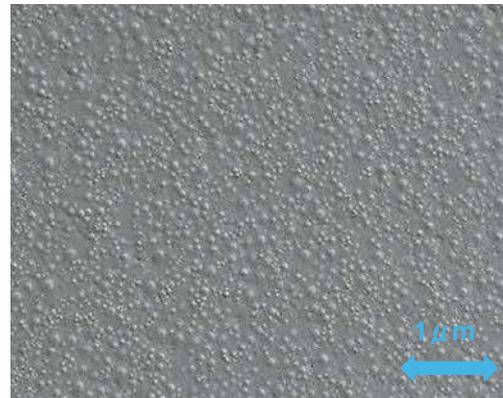


Fig.6 ドライアイスブラスト概要

プラズマデスマミア後にドライアイスブラスト処理を行った結果を Fig.7 に示す。



(a)弱条件



(b)強条件

Fig.7 ドライアイスブラスト後表面 SEM 像

Fig.7 からドライアイスブラストをかけるとことで表面に残存するフィラーが減少していき、ブラスト条件を強くすることで表面からフィラーが完全に除去できることが確認できた。

### 3.3 ドライアイスブラスト後基板への密着評価結果

ドライアイスブラストにて表面のフィラー除去が可能ながことが判明したので、めっき・ピール試験による密着性評価を行った。Fig.8 に下記プロセスで製作したサンプルの評価した例を示す。□50mm の表面上に LLP-450 でプラズマ処理、スパッタ成膜によるシード層成膜を実施した後、電解めっきで厚さ 25 μm の Cu 膜を形成した。その後アニールを行い、ピール強度試験機にて剥離強度を測定した。測定条件は引っ張り角度 90° ピール試験、引っ張り速度 50mm/min、試験幅は 1cm とした。



(a) 評価例 (b) 測定概略図  
Fig.8 ピール試験評価例と測定概略図

また、ドライアイスブラスト処理傾向を把握するために、変位パラメータとして、ブラストのノズル圧力と、ステージ移動速度の二つを設定した。ステージ移動速度のピール強度依存性を Fig.9、ブラストのノズル圧力のピール強度依存性を Fig.10 に示す。

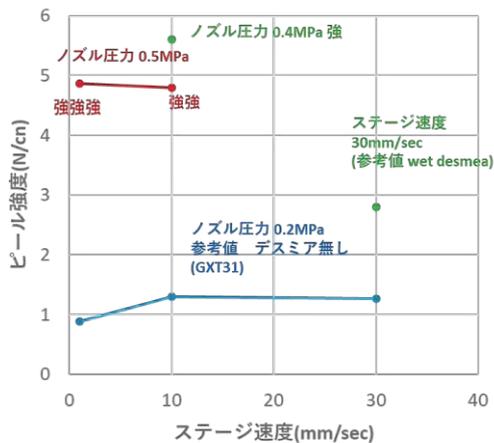


Fig.9 ステージ移動速度のピール強度依存性

Fig.9 からステージ移動速度とピール強度には関係性は見られない。

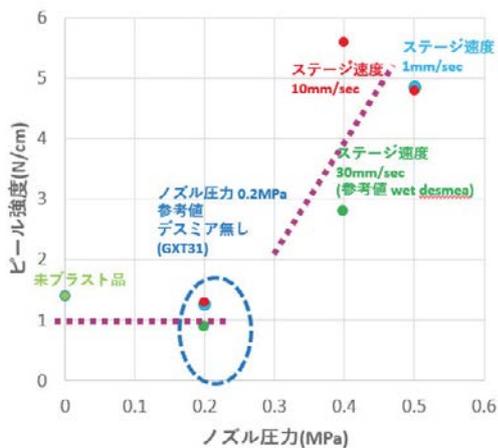


Fig.10 ノズル圧力とのピール強度依存性

Fig.10 からブラストのノズル圧力とピール強度において、ノ

ズル圧力が 0.2MPa を境にしてピール強度が上昇することを確認した。パターンニングに必要な密着力は 4N/cm 以上であるので、ドライアイスブラストの条件が 0.4MPa 以上であれば、プラズマデスマリア+ドライアイスブラストプロセスは、次世代半導体パッケージ工法に対して、実用に耐えるものであるといえる。

### 3.4 ルースフィラー除去モデル

Fig.11、Fig.12 にドライアイスブラストによるフィラー除去により密着性が向上したモデルを示した。

通常のフィラー除去方法(純水による超音波洗浄等)の場合は Fig.11 のようにプラズマ処理後に表面に発生したフィラーを取り除くことができるが、樹脂と絡まりあったフィラーは除去することができない。そのため、樹脂-Cu シード層で十分な密着性が得られない。



Fig.11 従来方法によるフィラー除去により密着性が向上したメカニズム



Fig.12 ドライアイスブラストによるフィラー除去により密着性が向上するメカニズム

対して、ドライアイスブラスト処理を行ったものは、Fig.12 のように樹脂に絡み合ったフィラーをブラストの圧力で樹脂ごと除去できるため、樹脂むき出しの界面を作ることができ、樹脂-Cu 界面で十分な密着性が得られると考えられる。

## 4. おわりに

中真空PVDによる導体層を用いた次世代プリント配線基板形成プロセスを提案し、重要評価項目である密着強度試験を行った。プラズマデスマリア後にドライアイスブラスト処理を入れることで密着性が大きく向上した。Next stepとしては今回提示したオールドライプリント配線プロセスにより配線を形成し、電気特性評価を行う予定である。

## 参考文献

- 1) 深田, 福山, 難波, 栗原, 末木, 真空統合型PVD+CVD成膜装置の開発-コンバイナー方式HUD用Al-SiO-NbO系耐湿多層反射膜への適用- 芝浦機械技報vol.28 13-16,2021
- 2) 深田, 上山, 高速プラズマ表面改質装置の次世代プリント配線基板回路形成プロセスへの適用- 芝浦機械技報vol.29 35-39,2021
- 3) SUN, Jiang-Yan, et al. Adhesion study between electroless seed layers and build-up dielectric film substrates. Journal of The Electrochemical Society., 160.3: D107, 2013.
- 4) OH, Yoong, et al. Adhesion of sputter-deposited Cu/Ti film on plasma-treated polymer substrate. Thin Solid Films, 600: 90-97, 2016
- 5) T. Goto, et al, “Adhesion Characteristics of Magnetron-Sputter-Deposited Copper on Smooth Cycloolefin for Realizing Wiring with High-Frequency Signal Propagation”, Transaction of The Japan Institute of Electronics Packaging, Vol. 1, No. 12, pp.12-19



R&D センター  
研究開発部  
第1開発課  
深田 和宏

現在、ダイカストを多く採用する自動車の軽量化ニーズに加え、製造工程を含む環境負荷低減化の取組みや価格競争力がより一層求められている。ダイカストのサイクルタイムは、金型や周辺装置といったライン全体の製造条件で決まるものの、ダイカストマシンの動作時間の短縮も非常に重要である。

そこで、ダイカストマシンの型締部を油圧方式から電動方式に選定することでハイサイクル化を実現し、それに伴う環境負荷低減技術を取入れた製法と従来製法の品質比較を行い<sup>1)</sup>、その有効性を確認したので紹介する。

## 1. 省エネルギー化の考え方

ダイカストマシンの主な出力要素は、①型締力、②射出力、③押出力の三つが基本である。これら三つは、高出力かつ高応答性を必要とすることから、ダイカストマシンは油圧駆動が主流である。油圧はコンパクトで高出力、高応答性が得られる一方で、作動油の管理不足や油漏れによるトラブルもある。これに対して、電動駆動は繰り返し安定性とエネルギー効率に優れるが、油圧と同等の出力、応答性を求めると大型化してコストが高くなる、もしくは現在の要素技術では到達困難な領域もある。このような利点、課題を認識した取り組みの中で、本稿では電動型締に着目した内容について報告する。

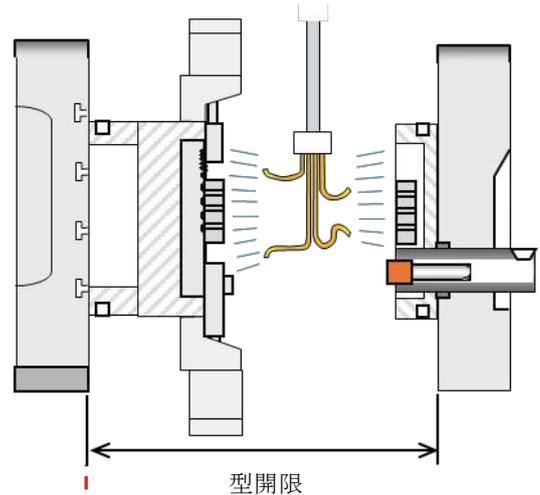
## 2. 省エネルギー化の考え方

Table 1 に電動型締ダイカストマシンの特徴を示す。型締動作を油圧駆動から電動駆動に転換されることで、型開閉時におけるエネルギー効率の改善や繰り返し精度の向上、サイクルタイムの短縮化が期待される。また、利点の一つである停止精度を活用した型開閉中間停止動作を使用することが可能となる。

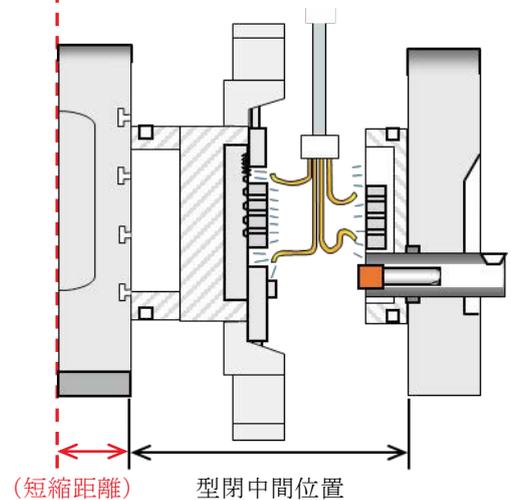
Table 1 電動型締ダイカストマシンの特徴

利点	<ul style="list-style-type: none"> <li>・省エネルギー効果がある</li> <li>・繰り返し精度が良い</li> <li>・型開閉動作が速い</li> <li>・型開閉中間停止が可能</li> </ul>
現状の課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>・予備品の在庫保有が必要 (電気品の長納期対応)</li> <li>・アンプ用の制御盤が必要 (盤設置のレイアウト対応)</li> </ul>

Fig. 1 (a) に型開限で離型剤を金型へ塗布する一般的なスプレー塗布時の概略図を示す。スプレーカセットノズル先端部から金型表面までの距離が一定以上離れて塗布している。一方、Fig. 1 (b) の電動型締を利用した型閉中間スプレー塗布は、可動型(移動ダイプレート)をスプレーノズル付近まで型寄せし、スプレー塗布をすることで離型剤の使用量削減や離型剤飛散防止に有効である。



(a) 一般的なスプレー塗布



(b) 電動型締利用した型閉中間スプレー塗布

Fig. 1 スプレー時の離型剤塗布動作

## 3. ダイカストによる検証方法

Fig. 2 に比較検証に使用したダイカストマシン(稼働開始から7年経過)を示す。最大型締力は3500kN、型締機構が電動駆動(Fig. 3.a)もしくは油圧駆動(Fig. 3.b)に選択可能な構造となっており、射出動作と押出動作は油圧駆動を採用したダイカストマシンである。



Fig. 2 型締力 3500kN ダイカストマシン  
(サーボ油圧源、増圧 ACC 仕様)



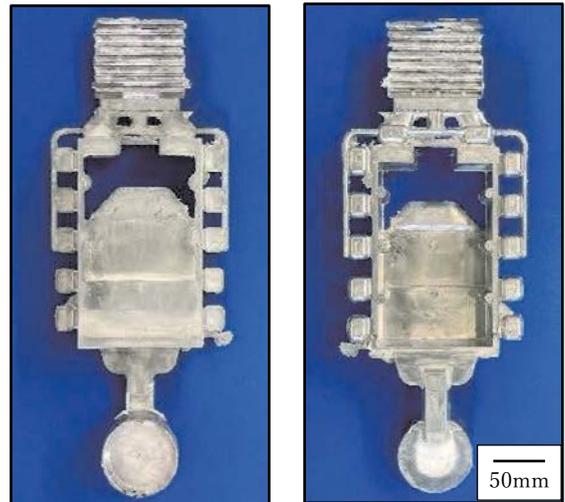
(a) 電動型締仕様



(b) 油圧型締仕様

Fig. 3 型締駆動部の選択

スプレー装置は、エア駆動による直動式で 30 本ノズルのスプレーカセットを使用して毎ショット、日本黒鉛工業株式会社製アルダイス OE-SF 離型剤をキャビティに塗布した。離型剤の塗布量は、離型剤が通過する固定配管の外周部にクランプ式流量計を取付けて計測した。製品取出しは搬出装置を使用し、全自動サイクルでダイカストを行った。実験前には、ダイカストマシン油圧タンク内の作動油を抜き取り、タンク内を清掃後、新油にて行った。使用した作動油は、株式会社 MORESCO 製ハイドール HAW-K (水・グリコール系作動油) である。対象製品は Fig. 4 のカバー形状とし、Table 2 に金型条件、Table 3 にダイカストの諸条件を示す。ダイカスト材は保持炉内で Ar バブリング処理後の清浄な AD.12 溶湯を用いて、保持炉内の溶湯温度を 670℃、スリーブ注湯口への鑄込温度を 660℃とした。ダイカスト品の品質については、製品の一部分を CT 解析による鑄物内部の鑄巣体積率で評価し、ダイカスト生産による環境負荷調査は油圧型締仕様と電動型締仕様の 1 サイクル全自動モード中に消費した電力量をそれぞれ計測し、比較検討した。また、押出時の製品離型抵抗力を調査するため、押出シリンダのヘッド側とロッド側にそれぞれ圧力センサを取付けて作動圧力を同時に計測した。



固定型側

可動型側

Fig. 4 製品形状

Table 2 金型条件

金型厚さ	411 mm
平均肉厚	2.0 mm
鑄込重量	1.1 kg
充填重量	0.9 kg
製品重量	0.7 kg
ゲート断面積	2.34 cm <sup>2</sup>
チップ径	φ70 mm

Table 3 鑄造条件

射出低速速度	0.2 m/s
射出高速速度	3.0 m/s
射出減速速度	1.0 m/s
鑄造圧力	85.5 MPa
昇圧時間	18 ms
増圧保持時間	3.0 sec.
射出追従限位置	345 mm
型締力	100 %
型開閉速度	100 %
ダイタイマ (キュアリング)	6.0 sec.
押出ストローク	20 mm
押出前後速度	100 %

## 4. 消費電力量と CO<sub>2</sub> 排出量

Fig. 5 に実铸造における全自動 1 サイクル当たりの消費電力量と CO<sub>2</sub> 排出量を示す。なお、CO<sub>2</sub> 排出量は消費電力量 1kWh で CO<sub>2</sub> が 0.472kg 発生すると仮定し算出した。ダイカストマシンに付帯した各自動機の動作時間は、給湯時間が 2.1 sec.、スプレー時間（離型剤塗布とエアブロー含む）が 9.5 sec.、製品取出時間が 4.8 sec. に調整した条件である。1 サイクル当たりの環境負荷試算として油圧型縮機に対し、電動型縮機は約 19%低減が確認された。さらに、電動型縮によって、サイクルタイムが 2 sec.短縮出来るため、周辺設備全体の動作タイミングを見直すことで更なる環境負荷低減が期待出来ると考えられる。

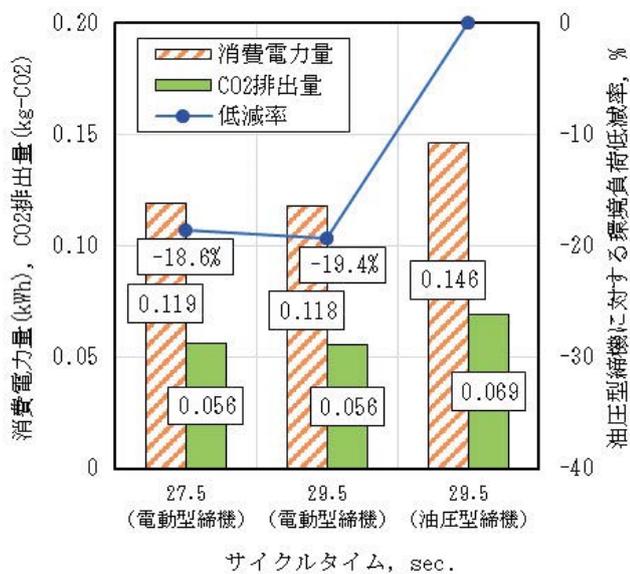


Fig. 5 実铸造における全自動 1 サイクルの消費電力量と CO<sub>2</sub> 排出量  
(※消費電力量 1kWh で CO<sub>2</sub> が 0.472kg 発生として算出)

## 5. 製品品質に及ぼす型縮駆動方式の影響

製品品質の評価は、Fig. 6 に示す製品の最終充填部側半分を CT 解析によって内部の鑄巣率（鑄巣体積と製品体積の割合）で行った。Fig. 7 に電動型縮機と油圧型縮機でダイカストした CT 解析による鑄巣率を示す。また、CT 画像も併せて示し、CT 画像製品内部に観られる鑄巣をサイズ毎にカラーマッピングして区別している。今回のダイカスト条件では、最終充填部やボス中央部の厚肉部に鑄巣が比較的多く観察された。また、溶湯状態や金型、射出設定を比較

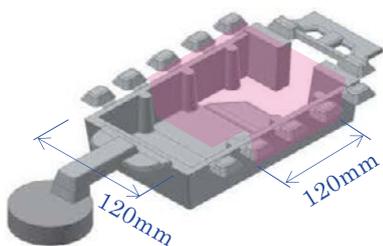


Fig. 6 製品の CT 解析部位

的同条件にしたため、型縮駆動方式の違いによって鑄巣の発生状況に違いが認められなかった。

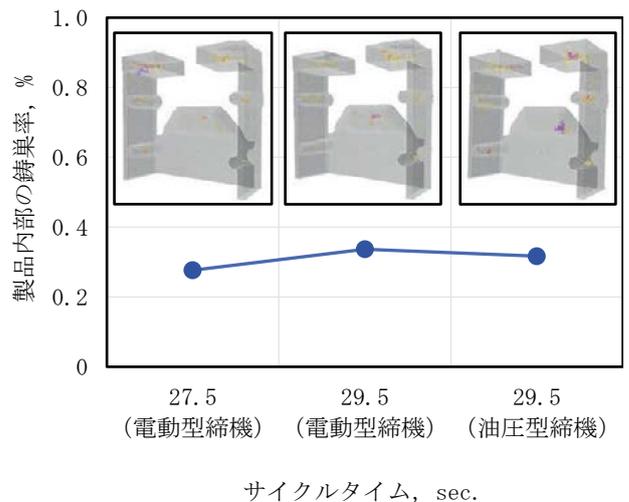


Fig. 7 CT 解析による製品内の鑄巣率

## 6. 離型力に及ぼす離型剤塗布量の影響

Fig. 8 にスプレーの離型剤塗布時間を 0.5sec.、スプレー圧力（離型剤圧力）を 0.5MPa、エア圧力を 0.4MPa（離型剤塗布量：72mL）に設定した押出圧力ならびに離型力の計測波形例を示す。押出シリンダのヘッド側とロッド側の各圧力を計測し、押出シリンダの受圧面積に基づいて正味の押出力を算出した。さらに、算出した押出力をドライサイクル（空打ち）における押出摺動抵抗力のピーク値（今回は金型温度 250℃で約 3kN）で差し引いて離型力（次式）を求めた。

$$\text{離型力} = \text{実铸造時の押出カードライ時の押出力}$$

製品が金型から押し出されてから押出シリンダのロッド側の圧力が上昇すると共に、離型力のピーク値が現れる。この初動時付近のピーク値を離型力と称す<sup>2)</sup>。

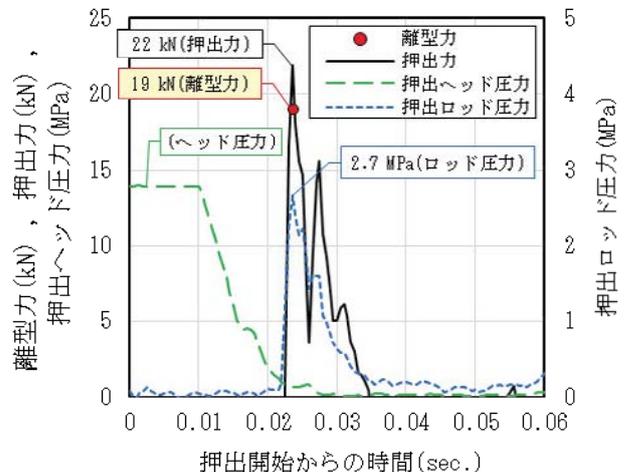


Fig. 8 押出圧力ならびに離型力の計測波形例

Fig. 9 に一般的なスプレー塗布時（型開限での離型剤塗布）の離型力に及ぼす離型剤塗布量の影響を示す。なお、スプレーノズル先端から可動型キャビティ面までの距離（スプレー距離）は 150mm、スプレー圧力は 0.5MPa の条件である。離型剤塗布量の減少に伴い離型力が増加する傾向となり、キャビティ面上の離型剤付着量が製品離型力に起因していると考えられる。

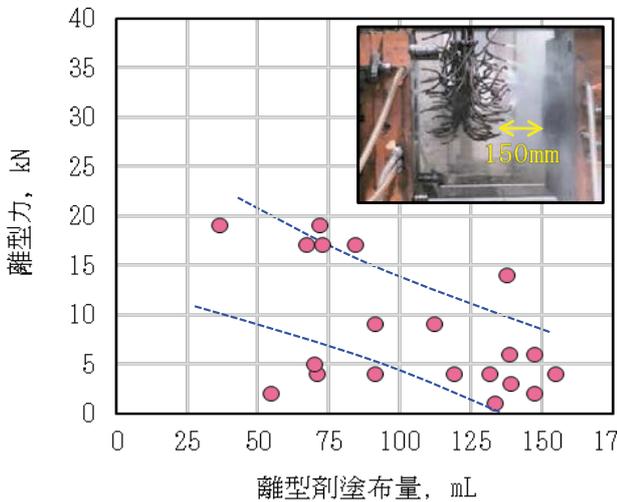


Fig. 9 スプレー距離 150mm 時の離型力に及ぼす離型剤塗布量の影響

Fig. 10 に電動型締を利用した型閉中間スプレー塗布時の離型力に及ぼす離型剤塗布量の影響を示す。なお、スプレーノズル先端から可動型キャビティ面までの距離は 30mm、スプレー圧力は 0.25MPa の条件である。離型剤塗布量の減少に伴い離型力も減少する傾向となり、Fig. 9 の一般的なスプレー塗布時の結果と相反するものとなった。そのため、他手法による再現テストを実施したため、その結果を後章で述べる。

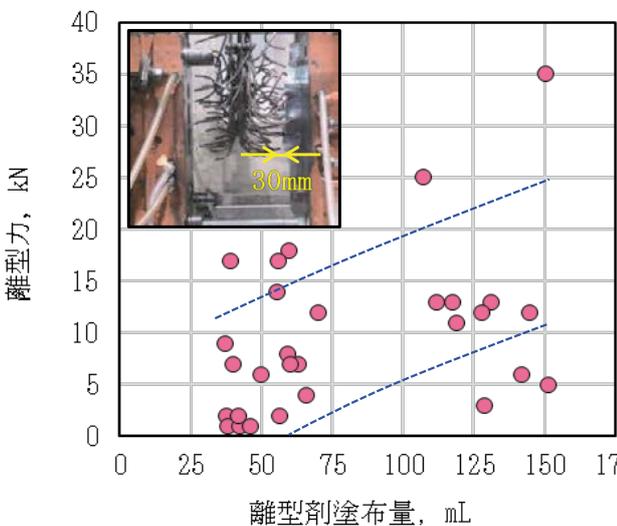


Fig. 10 スプレー距離 30mm 時の離型力に及ぼす離型剤塗布量の影響

Fig. 11 に離型力に及ぼすスプレー圧力（離型剤塗布圧力）の影響を示す。離型剤塗布量は、一般的なスプレー塗布時（スプレー距離が 150mm）と型閉中間スプレー塗布時（スプレー距離が 30mm）の検証範囲内において、それぞれの離型力が比較的減少した条件である。スプレー距離に関わらず、スプレー圧力を高くすることで離型力が減少する傾向となった。今回の離型剤吐出ノズル形状を含むスプレー方式は、生産において塗布量の他にスプレー圧力の管理も重要だと考えられる。

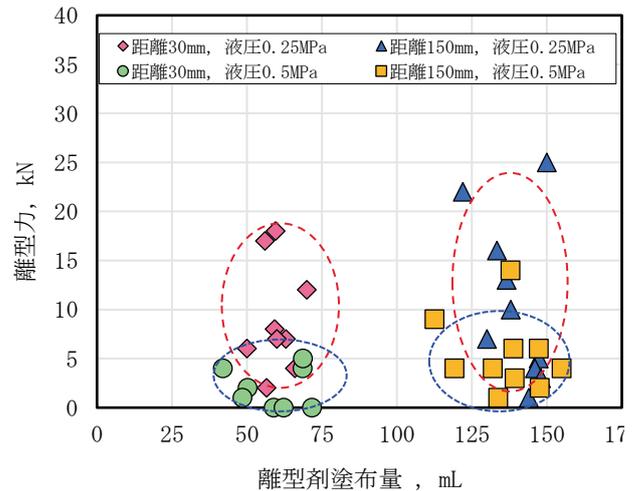


Fig. 11 離型力に及ぼすスプレー圧力の影響

Fig. 12 は離型剤塗布量と金型表面温度及び製品内部の鋳巣率との関係である。金型表面温度は型閉動作開始直前の可動型キャビティ表面をサーモカメラで計測した。今回の離型剤塗布量範囲では、ばらつきがあるものの金型表面温度や製品内の鋳巣率に影響を及ぼさないことが確認された。

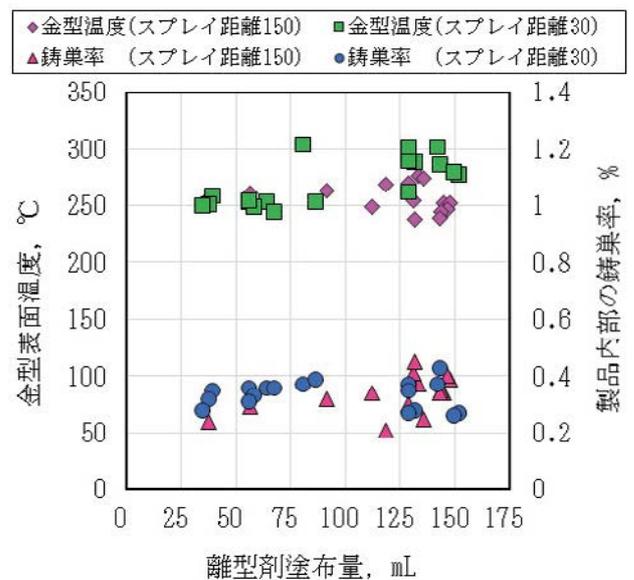


Fig. 12 離型剤塗布量と金型表面温度及び製品内部の鋳巣率の関係

## 7. 試験装置による離型力計測

先の Fig. 10 で示した結果の再現テストとして、株式会社メックインターナショナル製 Lub テスターU (離型剤性能評価試験装置) を用いて、離型剤塗布量と離型力の関係を調査した。この方法は、離型剤を塗布した鉄板上に円筒形状のリング鋳型を設置し、円筒型内に溶湯を注湯し、凝固後にロードセルにて引張荷重を計測し、離型抵抗力を算出するものである。Table 4 に離型剤塗布条件を示す。溶湯は 650℃保持の ADC12 材を使用し、離型剤塗布前後の鉄板温度を計測した。

Fig. 13 に離型抵抗力に及ぼす離型剤塗布量の影響を示す。離型剤の塗布量が少なくなるにつれ、注湯前の鉄板温度が高くなる傾向となったが、離型抵抗力は減少傾向となった。そのため、本装置による離型力計測結果と Fig. 10 のダイカスト検証結果が同様な傾向を示すことが確認された。

Table 4 Lub テスターU の離型剤塗布条件

鉄板サイズ	200×200×30 mm
鉄板温度	150 °C (離型剤塗布前)
離型剤圧力	0.12 MPa
エア圧力	0.2 MPa
塗布時間	0.5 sec. , 1.0 sec. , 3.0 sec.
塗布距離	100 mm , 200 mm
塗布角度	90° (面直)
スプレーガン	山口技研製 YCD-35 型
離型剤	三和油化工業製サンバリュール Z

離型抵抗力 (距離100mm)
  離型抵抗力 (距離200mm)

鉄板温度 (距離100mm)
  鉄板温度 (距離200mm)

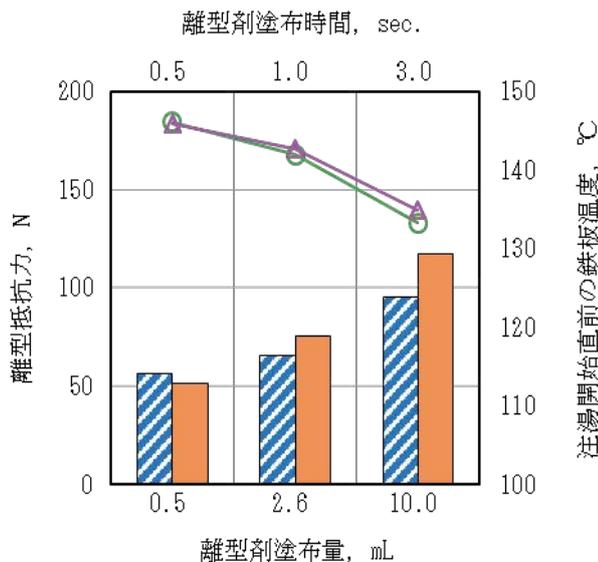
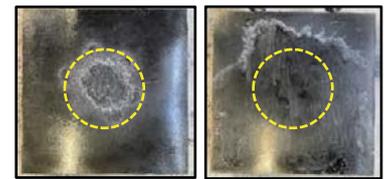


Fig. 13 離型抵抗力に及ぼす離型剤塗布量の影響

Fig. 14 に離型剤塗布後の鉄板上に離型剤模様を示す。(a) 塗布量 0.5ml では、リングをセットする中央部に離型

剤模様が残っているが、(b)塗布量 10ml の場合は、離型剤が外周方向へシフトする模様となった。離型剤を多く塗布しても、実際の鉄板上に付着される離型剤塗膜形成層が少なかったと考えられる<sup>3), 4)</sup>。



(a) 塗布量:0.5ml (b) 塗布量:10ml

Fig. 14 鉄板上の離型剤模様

## 8. まとめ

環境負荷低減要素を取り入れた製法と従来製法における環境と品質の双方について比較検討を行い、以下の結果が得られた。

型締力 3500kN ダイカストマシンの型締機構を油圧駆動から電動駆動に転換することで約 19%の環境負荷低減になることが確認された。また、サイクルタイムは約 6%短縮 (2 sec.短縮)した。

製品内部の鋳巣状況は、型開閉動作時の駆動方式に影響されない。

製品離型力はスプレーの塗布条件によって変化し、電動型締による型寄せスプレー塗布は離型剤使用量の削減とサイクルタイム短縮に有効であり (Fig. 15)、環境に配慮した製法である。

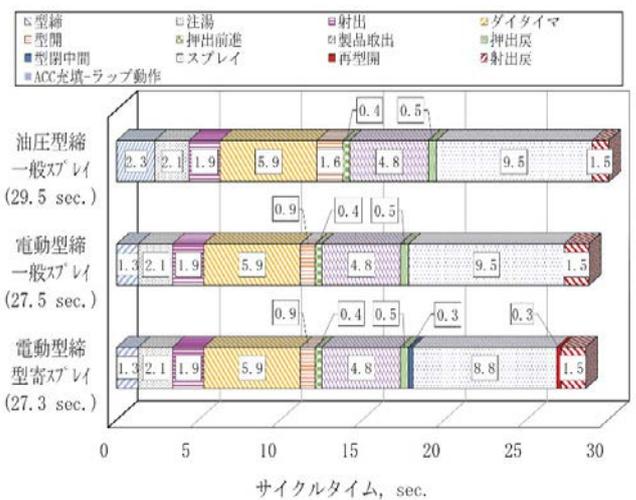


Fig. 15 各製法の 1 サイクルタイム比較

### 参考文献

- 1) 富岡智, 相田悟, 豊島俊昭: 日本ダイカスト会議論文集, JD22-21 (2022) 127
- 2) 志賀紀雄: ダイカストの離型に関する調査研究, 531 (1999) 55
- 3) 西直美: ダイカストを考える, ダイカスト新聞社 (2010) 171
- 4) 井澤龍介, 外川浩司, 大平博文, 小林正尚, 山口勇: 日本ダイカスト会議論文集, JD04-15, (2004) 77



成形機カンパニー  
成形機技術部  
生産設計課  
富岡 智



## 単軸押出機の HUM スクリュ開発の思い出



芝浦機械株式会社  
OB

### 清水 禎二

優れていて大幅な押出量の増大が達成できました。

思ってもいない成果は悩みの種であったシリンダとスクリュの耐カジリ性が大幅にあがるという効果が得られたことです。

HUM スクリュとはハイユニメルトスクリュの略でユニメルト付スクリュの性能をアップしたものです。

開発にあたってはスクリュのコンプレッション部におけるシリンダ内部圧力を電磁オシログラフにより記録し圧力波形を比較した結果 HUM スクリュの圧力安定性が

これらの特徴をユーザに PR し、納入したあるユーザからは生産性があがったとして感謝され特別に夕食に招待されたことも忘れられない思い出となっています。

押出機生命であるスクリュについては先人の技術的データの積み重ねのお陰でスケールアップ理論など有効であることを知り得ました。今後も AI など最新技術を利用してのシミュレーション技術の向上を目指してほしいと思います。継続は力なり！

## 透明樹脂成形における不良発生原因の究明

横尾 大輔

透明樹脂の成形では他の不透明な樹脂成形に比べ成形品内部まで見ることができることから表面に出ない成形品内部に発生する不良が問題となり、不良品となってしまいます。この透明樹脂成形で不良を出しにくい射出成形機の開発は生産性の向上に重要である。本報では透明樹脂成形の一つである PMMA の成形における不良の発生原因の究明を目的とし、成形不良が発生する条件と、その時にバレル内でどのような現象が起きているのかを調査した成果を報告する。また、本研究は東京大学生産技術研究所の未来志向射出成形技術社会連携研究部門での取り組みの中で行われたものである。

## 1. はじめに

近年、自動車産業は急速な変化と革新の時期を迎えている。自動車の軽量化、内装の高意匠化、自動運転技術の向上による車載センサの増加、車載ディスプレイの大型化など自動車における透明樹脂の使用率は増加が予測されており、透明樹脂成形の需要は今後ますます増加することが予想される。

透明樹脂の成形では他の不透明な樹脂成形に比べ成形品内部まで見えることから、表面に出ない成形品内部に発生する不良が問題となり、不良品となってしまいます。とりわけ光学製品に使用される樹脂成形品では内部の微量な異物の混入や色彩変化であってもその機能を損ねてしまう。そのため透明樹脂成形における良品の品質ハードルは高く、生産現場では少しでも不良率を下げ、生産性を上げるために厳密な材料管理や成形条件の最適化など様々な取り組みが行われている。

このことから品質ハードルが高い透明樹脂成形に応じることのできる射出成形機の開発は今後、より重要になっていくと考えられる。

本報では透明樹脂の一つである PMMA 樹脂成形の不良発生原因の究明を目的として、特に樹脂の可塑化時に発生していると考えられる成形不良を対象に、不良の発生する条件・原因をバレル内可視化解析等により調査した結果について報告する。

## 2. PMMA 樹脂成形で発生する不良・課題

PMMA 樹脂成形で発生する不良としては、一般的な成形不良である黒条 (Fig. 1) や異物の混入などが挙げられる。この他にも透明樹脂成形に特有の不良として暗所で強い光を差し込んだ際にしか認識できない白スジ (Fig. 2) が確認されている。また、成形品に発生する不良以外にも透明樹脂の中でもとりわけ PMMA 成形では計量中に極端なスクリュ回転トルクの低下とスクリュ後退速度の失速が発生し、結果として計量時間ひいてはサイクルタイムが安定しない現象が確認されている。



Fig. 1 黒条



Fig. 2 白スジ

検証の結果から、これらの成形不良は計量が安定しない条件で多く発生することが分かっており、その条件はサイクルタイムが長く、計量ストロークが長い成形条件、いわゆる厚肉レンズを成形するような条件であることが分かった。そのため実験ではサイクルタイムと計量ストロークに着目し成形条件を定めることとした。

## 3. 実験方法

実験では東京大学生産技術研究所殿にご協力いただき、同研究所所有の可視化バレルを用いて行った。実験装置の諸元を Table. 1、Fig. 3 に示す。この可視化バレルは、各部をガラスインサート構造とすることで、ブラックボックスであるバレル内の樹脂熔融過程を観察できる装置である。各観察窓 (A~F) の範囲をそれぞれ撮影できる位置に高速カメラを固定し、計量開始～計量完了までの樹脂熔融過程の撮影を行った。また、観察窓のガラスが射出圧力に耐えられない恐れがあるため、金型は使用せず低速での射出を行った。実験条件を Table. 2 に示す。

Table. 1 実験装置

スクリュ直径	36 mm
フライトピッチ	36 mm
スクリュ溝深さ	供給部：2 mm 計量部：5.5 mm

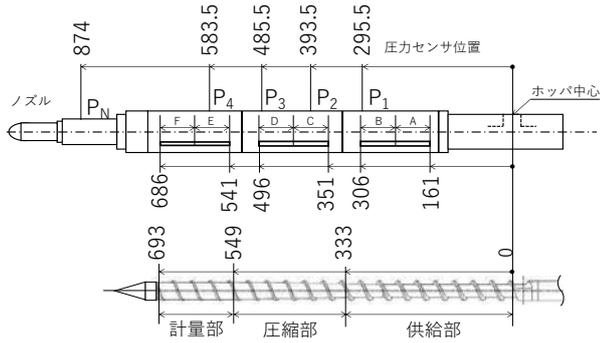


Fig. 3 可視化窓、圧力センサ、スクリュの位置関係

Table. 2 実験条件

樹脂	PMMA
スクリュ回転数	50 min <sup>-1</sup>
背圧	15 MPa
バレル温度	供給部：230 °C 圧縮部：240 °C 計量部：240 °C
サイクルタイム	60 s, 240 s
計量ストローク	36 mm, 90 mm, 144mm

計量可塑化過程は非定常現象であるため、現象の時間的な変化を解りやすく捉えることのできる解析手法が必要となる。そのため本研究では実験で得られた動画より積層疑似展開画像を作成した。積層疑似展開画像は撮影した動画から任意の時間間隔ごとに Fig. 4 の右図の赤枠で囲われたスリット状の範囲を切り取り、Fig. 4 の左図のように積み上げることでバレル内の経時変化を一目で把握することができる手法である。

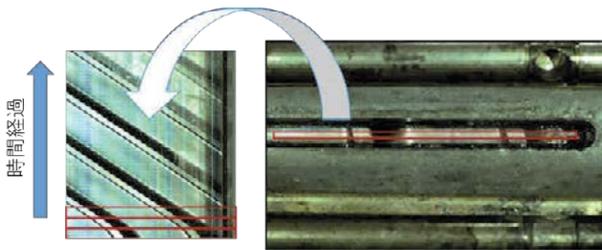


Fig. 4 積層疑似展開画像

また、Fig. 3 の P<sub>2</sub>、P<sub>3</sub>、P<sub>4</sub>、P<sub>N</sub> の位置に圧力センサを設置し、バレル内の圧力変化についても計測を行った。P<sub>1</sub> の位置にも圧力センサを設置することは可能であるが、未溶融樹脂が擦れることにより破損する恐れがあるため、P<sub>1</sub> の位置には圧力センサを設置しなかった。

#### 4. 実験結果・考察

サイクル 240 s、計量ストローク 90 mm の条件における計量開始から計量完了までの観察窓 A~D の積層疑似展開画像を Fig. 5 に示す。ただし、Fig. 5 の A~D の画像はそれぞれ別ショットを撮影したものであり、隣同士の画像で観察される現象は必ずしも連続していない。また、Fig. 6 に計量中の各スクリュ位置における軸方向の圧力分布、Fig. 7 に計量中のスクリュ位置と計量トルクの関係、Fig. 8 に計量中のスクリュ位置とスクリュ後退速度の関係を示す。

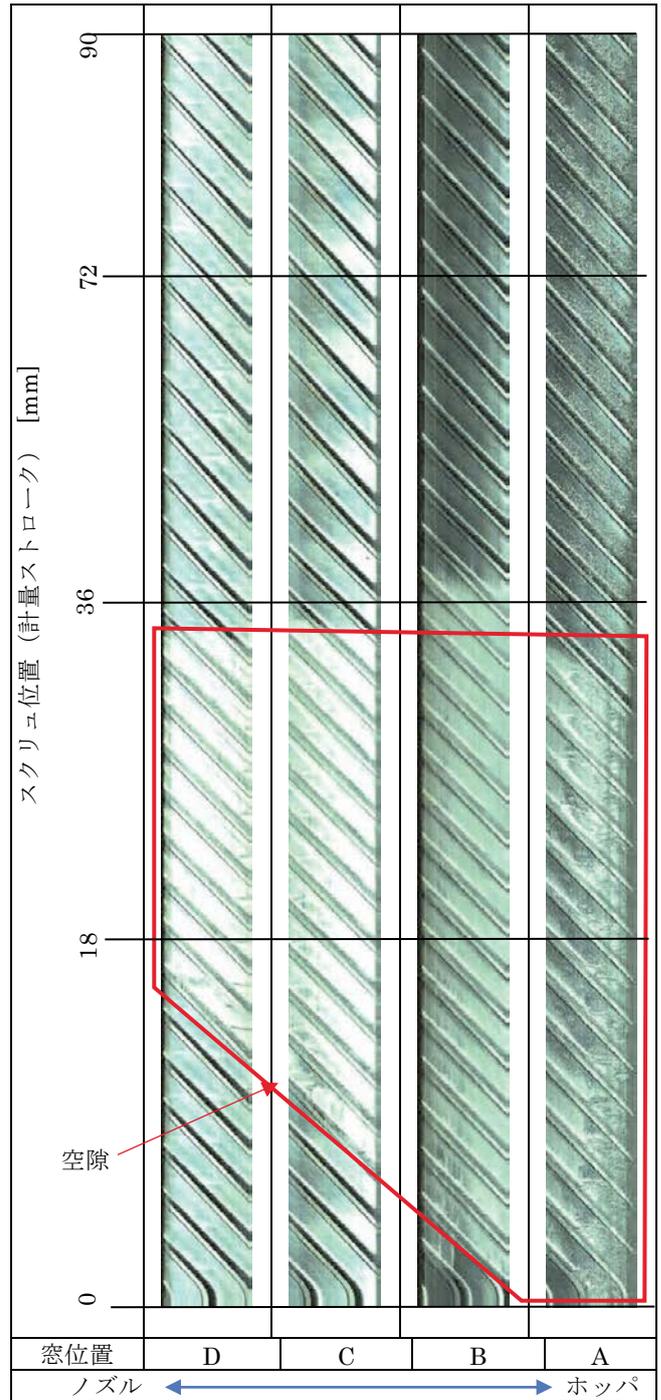


Fig. 5 バレル内可視化画像

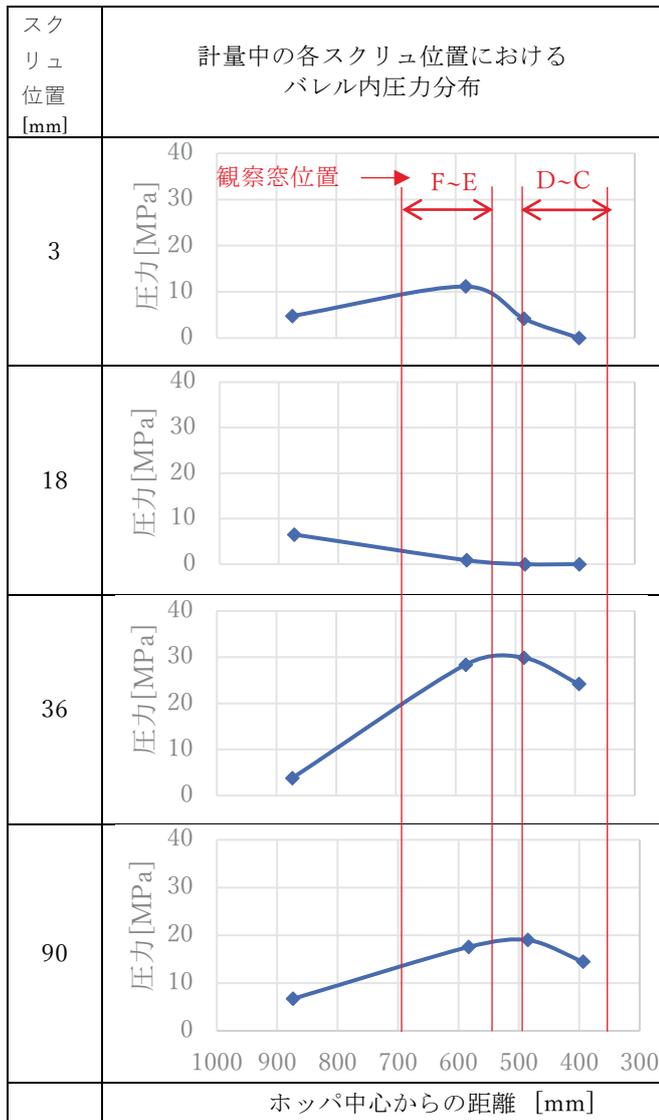


Fig. 6 計量中の各スクリュ位置におけるバレル内圧力分布

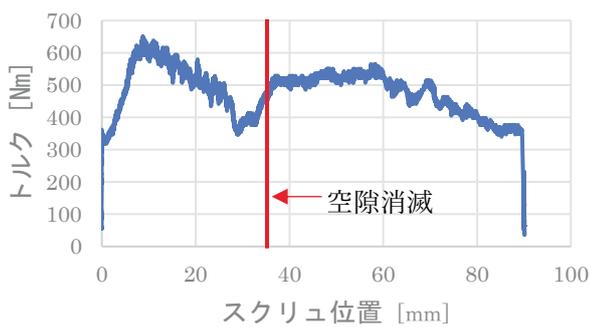


Fig. 7 計量中のスクリュ回転トルク

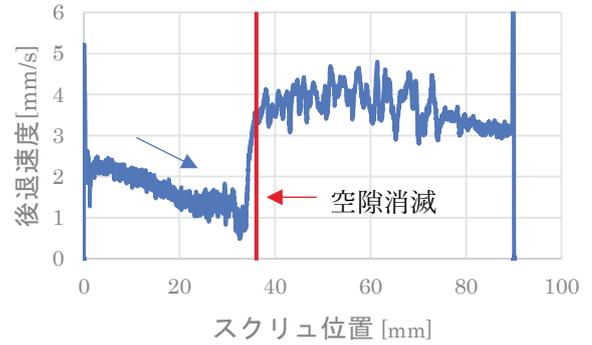


Fig. 8 計量中のスクリュ後退速度

Fig. 5 のバレル内可視化画像において、計量開始直後より観察窓 A の樹脂溶融開始位置から、白い領域がノズル方向に広がっていき、最終的に観察窓 A~D に渡る非常に広い領域に至るまで拡大後、スクリュ位置 36 mm まで計量したところで消失しているのが分かる。また、Fig. 6 で白い領域が発生しているタイミングに対応するグラフ（スクリュ位置 3mm、18mm）においてはバレル内の圧力はホッパに近い領域では上昇しておらず、白い領域の消滅（スクリュ位置 36mm）とほぼ同時に圧力が増加している。このことから白い領域は空隙（あるいは密度が疎の状態）であると考えられる。バレル内に樹脂が充満していない空隙ができることで光の乱反射が起こり、画像内で白く観察されたものと考えられる。

また、Fig. 7、8より空隙が発生・拡大するタイミングでスクリュ回転トルクの低下とスクリュ後退速度の失速が起こっており、空隙の消滅とともにスクリュ回転トルクとスクリュ後退速度が上昇している。これは空隙が発生し一時的にバレル内に空に近い状態になることでスクリュが空回りした結果、発生していると考えられる。

この空隙は本研究で確認されたほど広範囲ではないものの龍野氏<sup>1)</sup>の研究で確認されている空隙と同様の現象であると考えられ、空隙はバレル内でメルトプラグギング現象 (Fig. 9) により引き起こされたと考えられる。メルトプラグギング現象は計量完了後の待機時間にバレル内面からの伝熱によりペレットのバレル内面と接する表層のみが溶融されることでバレル内面との間にメルトフィルムが形成され、このメルトフィルムが潤滑剤の役割を果たし、ペレットとバレルがスリップし、スクリュとペレットが供回りすることでペレットが輸送されなくなる現象である。

この現象は程度の差があるものの今回の PMMA を使用し実験した全ての条件で発生した。各条件の空隙の発生時間と発生範囲を Table. 3 に示す。

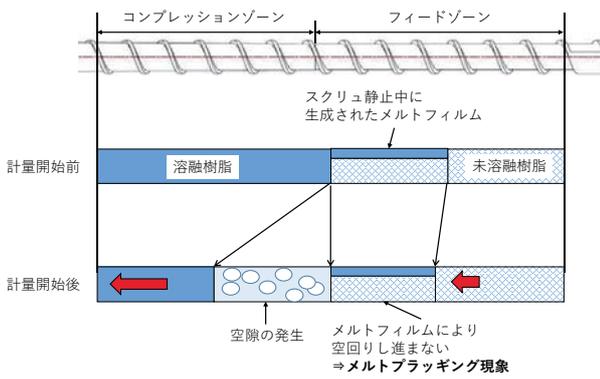


Fig. 9 メルトブラッキング現象による空隙の発生

Table. 3 各条件の空隙発生状態

条件	空隙発生時間[s]	空隙が観測された観察窓
サイクルタイム 240 s 計量ストローク 90 mm	17	A~D
サイクルタイム 60 s 計量ストローク 90 mm	2	A~B
サイクルタイム 240 s 計量ストローク 144 mm	16	A~D
サイクルタイム 240 s 計量ストローク 36 mm	11.5	A~B

範囲に大きな影響を与えていることがわかる。これは待機時間が長くなることでバレル内面と接触し表層のみが溶融する樹脂の範囲が拡大するためであると考えられる。

また、計量ストロークが 90 mm、144 mm では空隙の状態はほぼ変わらないものの、36 mm の条件では空隙の発生時間が若干ではあるが短くなっていた（空隙の範囲については計量ストローク 36 mm の条件では溶融開始位置が観察窓外であり、空隙の全体を観察することができなかったため単純な比較はできなかった）。これは計量ストロークが短いと、溶融開始位置がよりホッパ側に近くなることに関係していると考えられる。計量ストロークが短い場合、ホッパ中心位置から空隙までの距離が比較的近く、ホッパからのスクリュ回転により新たに供給・輸送される樹脂が滑っている領域を押し流すのがより早くなるため早期に空隙が解消すると考えられる。(Fig.10)

これら実験結果と、2章で述べたように PMMA の成形では長サイクルタイム、長計量ストロークの成形条件で不良が発生しやすいこととの関係性から、PMMA の成形不良は空隙が原因であると考えられる。以下にそのメカニズムについて考察する。

- ① メルトブラッキングによりバレル内に空隙が発生
- ↓
- ② 一時的にバレル内の圧力が減少し、樹脂から可燃性である MMA (メタクリル酸メチル) ガスが発生
- ↓
- ③ 空隙消滅時の気体の断熱圧縮により瞬間的に温度が急上昇
- ↓
- ④ 温度上昇により発火する場合は黒条発生。発火せず溶融樹脂中に残留する場合は白スジ発生

## 5. おわりに

透明樹脂の一つである PMMA 樹脂成形において、可視化バレルを用いて不良の発生原因を可視解析した本研究により、以下の知見が得られた。

- ① PMMA 成形の特定の条件下において計量時バレル内には広範囲に渡って空隙が発生する
- ② 空隙は樹脂の溶融開始位置からノズル側へ拡大する
- ③ 空隙はメルトブラッキング現象により発生しているものと考えられ、特に長サイクル、長計量ストロークの成形条件で発生しやすい
- ④ バレル内に発生する空隙が PMMA 成形で発生する黒条、白スジの原因であると考えられる

また、本報では紹介していないが本研究の結果を用いてスクリュ形状の最適化を行うことにより空隙を抑制できる実験結果が得られており、PMMA 樹脂成形に最適な可塑化装置の商品化と、透明樹脂成形に最適な成形機仕様の提案を進めている。

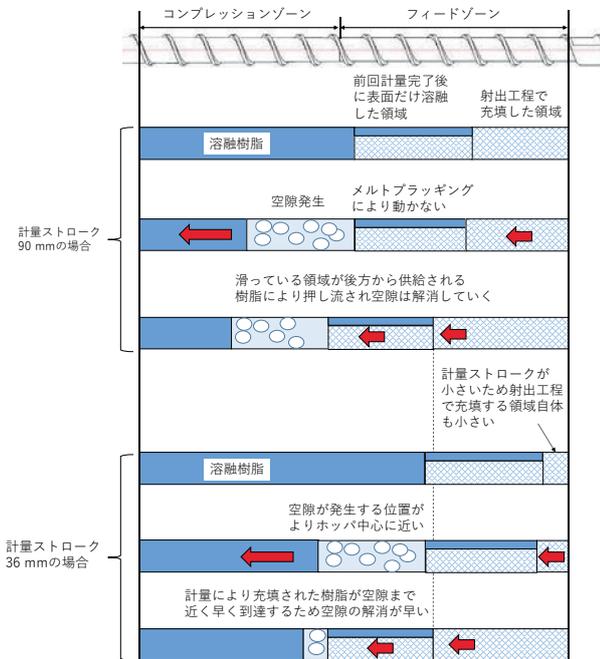


Fig. 10 計量ストロークの違いによる空隙解消までの早さの違い

Table. 3 の結果より、サイクルタイム 60 s の条件では空隙の発生が完全には無くならないものの大幅に抑制されており、サイクルタイム (= 待機時間) が空隙の発生時間と

### 謝辞

本研究は東京大学生産技術研究所の未来志向射出成形技術社会連携研究部門の中での取り組みであり、東京大学生産技術研究所の龍野様ならびに YOKOI Lab 代表の横井様には実験装置の使用並びに実験結果のまとめ、考察において多大なご支援をいただきましたことを心よりお礼申し上げます。

### 参考文献

- 1) 龍野道宏、可視化加熱シリンダによる計量可塑化過程の画像解析 第2報 各種樹脂の可塑化過程、成形加工 第13巻 第2号 (2001)、P126



成型機カンパニー  
成型機技術部  
営業技術課  
横尾 大輔



### 私にとってのやりがい



成型機カンパニー押出技術部  
装置技術課

### 富樫 直人

標準と言う概念がないので、入社当初から現在まで慣れないというのが正直な気持ちです。近年では安全、省力化への配慮から自動化のご要望が増えており、直近ではフィルム通紙作業の自動化機能を有する装置立上げのため、三ヶ月間の

入社して十数年経ってみて、押出事業の強みは“何でもやってみる”だと感じています。

押出の案件は、お客様ごとに製品用途（セパレータや食品容器など）、製品幅、生産速度、付帯設備など、オーダーメイドでの対応となります。

海外対応をしていました。現地では装置の改造からシーケンスの見直し、負荷運転確認と一発勝負の新技術確立には苦労を要しましたが、携わるお客様や身内のたくさんの協力でなんとか検収まで漕ぎ着けることができました。新しい技術に携われる機会が多いというのは技術者にとって、やりがいのある環境だと感じています。

現在の主力であるBSF製造装置も、あるお客様から経験の無い相談から始まった事だと聞いており、小さな“何でもやってみる”姿勢が今の大きな事業に繋がっているものと感じています。これからもお客様からのご要望に応えられるよう、視野を広げて、技術向上に努めていきたい所存です。

# シート・フィルム製造装置の自動化への取り組み

加藤 拓朗

巻頭言

特別記事

技術論文

技術報告

新製品ニュース

シリーズ

受賞・特許ニュース

講評

シート・フィルム成形装置は、押出機、T ダイ、ポリシング機、延伸機、巻取機などの複数のユニットで構成されており、各ユニットの運転にはそれぞれ異なる技能が必要である。特に各ユニットの立ち上げや運転条件の設定は、オペレータの技量や経験に委ねられているため属人化しやすい。そのため誰でも短時間で生産運転を開始できるようにすることや、誤操作防止、技能伝承、安全面の強化などを目的とした自動化・省力化の要求が高まっている。本稿では立ち上げ作業の自動化技術と、成形運転までの条件調整の自動化・省力化の特徴を紹介する。

## 1. はじめに

製造現場では熟練者の退職による人材不足や、技能伝承が出来ていないことが問題となっている。一方で市場からは高品質と高生産性が求められているが、経験の浅いオペレータでは熟練者と同等の生産運転は困難である。また、シート・フィルム製造装置は高温部や回転部が多いため、安全性向上も要求されている。これら状況の対策として自動化・省力化の要求が高まっている。

シート・フィルム製造装置を自動化・省力化することにより、人材不足や技能伝承への対応、成形プロセスの標準化による品質安定や誤操作によるトラブルの低減、オペレータの安全の確保などが期待されている。

当社ではこのような要求に応えるべく、シート・フィルム製造装置の自動化・省力化に対応する技術の開発に取り組んでいる。

## 2. シート・フィルム製造装置の概要

押出成形を用いたシート・フィルム製造装置(Fig. 1)は、押出機により樹脂を溶融し、T ダイで幅方向に広げてシート状に吐出し、ポリシング機・キャスト機のロールにより冷却・固化する。

成形したシートをさらに延伸する用途では、縦延伸機（シート流れ方向の延伸）、横延伸機（シート幅方向の延伸）、もしくは同時二軸延伸機（縦・横方向同時に延伸）を通し、巻取機で最終製品を巻き取ることで延伸フィルムを製造する。

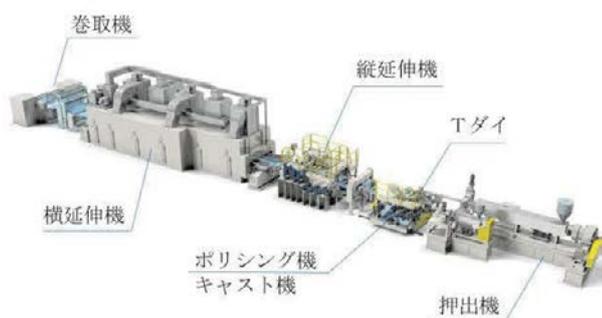


Fig. 1 シート・フィルム製造装置

## 3. シート・フィルム成形の通紙工程における課題と解決方法

押出成形によるシート・フィルム成形は、連続成形のため生産性が高いことが利点である。しかし、生産運転の立ち上げ時には各ユニットにシート・フィルムを通す通紙工程があり、多くの人手が必要になること、時間を要することが課題である。本項では、最近開発を進めた T ダイ～ポリシング機間の自動通紙や横延伸機への通紙技術、巻取機の自動化・省力化について紹介する。

### 3.1 T ダイ～ポリシング機

通紙工程の最初に、オペレータは T ダイから吐出される溶融樹脂をポリシング機のロールの間に通すが、この作業は 200℃以上の高温の溶融樹脂を取り扱い、かつ回転する高温ロールに近づいて作業するため、安全性の向上が期待されている。また通常は手や棒などで樹脂を通すか、ロープ、ガイドフィルムを使用して、T ダイから吐出された溶融樹脂を通紙している。しかし、ガイドフィルムやロープで通紙する場合、ロールの汚れや傷が製品フィルムに転写される可能性がある。

これらの対策のため、自動通紙のニーズはあったが、以下の二つの理由により実現が困難であった。一つは溶融樹脂の切断が困難なことである。ハサミやカッターは固化したシート・フィルムの切断は容易であるが、溶融樹脂の切断は困難である。そのため、溶融樹脂に適した切断方法の確立が必要である。二つ目に、溶融樹脂のハンドリングである。形状の定まらない溶融樹脂を掴み、冷却しながらロールの間を搬送する方法の確立が必要である。

当社では T ダイから吐出された樹脂を自動で切断し、キャリアに溶融樹脂を貼り付け、ロール間をキャリアにより通紙する技術を開発した。(Fig.2) (特許出願中)

当社小型テスト設備において開発を進めているが、対象の樹脂が限定されるため、順次対象樹脂範囲を広げていく予定である。溶融樹脂の取り扱いについては、後述する油圧サーボシステムの自動隙間調整機能を活用することにより通紙直後のロール隙間調整も自動化することが可能でシートの状態を早く安定させることが可能である。

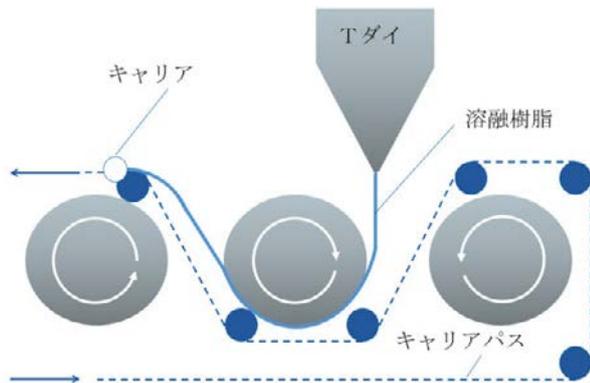


Fig. 2 ポリシング機 通紙方法モデル図

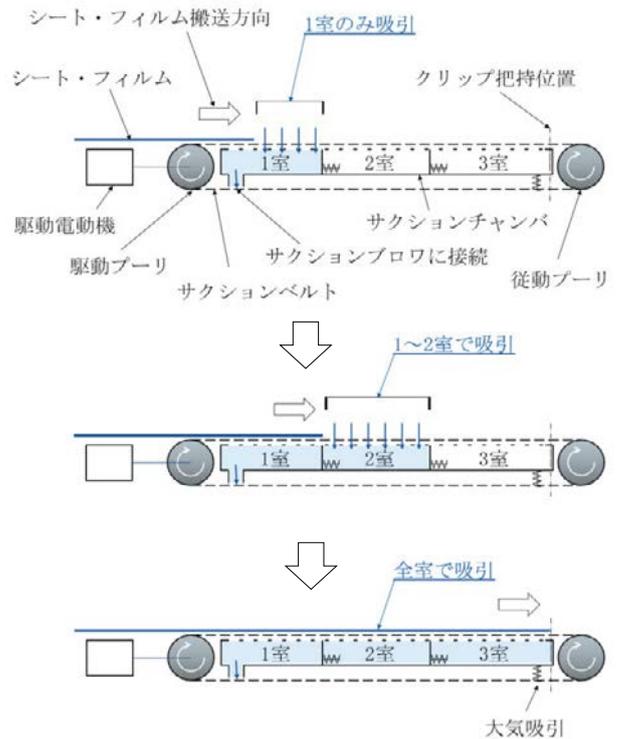


Fig. 4 サクシオンベルトフィーダ 構造図

### 3.2 横延伸機

横延伸機は入口にシート・フィルムのガイドロールがあり、その奥に横延伸機クリップへのシート・フィルム把持位置がある。ガイドロール側の手前から高速で走行するクリップに通紙作業するため、オペレータとクリップの接触を防止する等の安全性の確保が必要である。

当社では横延伸機入口部に Fig.3 に示すサクシオンベルトフィーダを設けることで、危険個所にオペレータの手を近づけることなく横延伸機への通紙を可能とした。

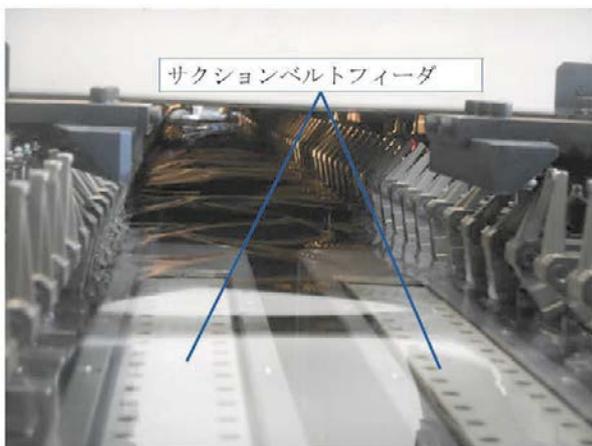


Fig. 3 当社テスト機 横延伸機 サクシオンベルトフィーダ

サクシオンベルトフィーダは、Fig.4 に示すように分割したサクシオンチャンバ間においてリリース弁を介して連結する構造を採用し、フィルム先端の搬送位置に応じて吸引範囲が変化することで、全長に渡りシート・フィルムを安定して吸着し搬送することを可能としている。(特許第6212512号)

### 3.3 巻取機

従来の巻取機は巻き替えのみ自動で、後工程は人手に頼ることが多かった。

最近ではエアシャフトと紙管の自動装着や、移動台車により巻き玉を搬送し自動倉庫へ入庫するところまで自動化するなどシート・フィルム製造装置全体の自動化・省力化が進んでいる。

以上の通紙技術により、立ち上げ時のオペレータの人数を最小限にすることが期待できる。また、突発的なトラブルにより、シート・フィルム製造装置が一時停止した場合にも、限られた人数で安全な再立ち上げが可能になり、トラブルによる生産計画への影響を最小にすることが期待できる。

## 4. 成形条件調整における課題と解決方法

通紙後は成形速度を上げ、成形条件を調整して製品取りを開始する。調整するユニットが多いため、オペレータの技量の差により調整完了までの時間や、原料のロスに大きな差が出やすい。

以下に当社の自動調整及びオペレータの支援機能を紹介する。

### 4.1 押出機 自動立ち上げ

押出機にはフィーダ、注入ポンプ、ギヤポンプなどが複数台付随するケースがある。従来、立ち上げ時には各ユニットの運転条件をリアルタイムで確認し、パラメータを変更しながら運転していた。そのため、立ち上げ時間や原料のロスオペレータの熟練度に依存し、大きな差が出ていた。

当社最新のプロセスコントローラ EXTVISOR-VIの自動立ち上げシステムでは、各ユニットのパラメータを事前登録し、レシピ化することによりボタン一つで生産条件まで設定変更が可能になり、立ち上げ時間の削減、立ち上げ操作の標準化、操作のミス削減が可能になった。(Fig.5)

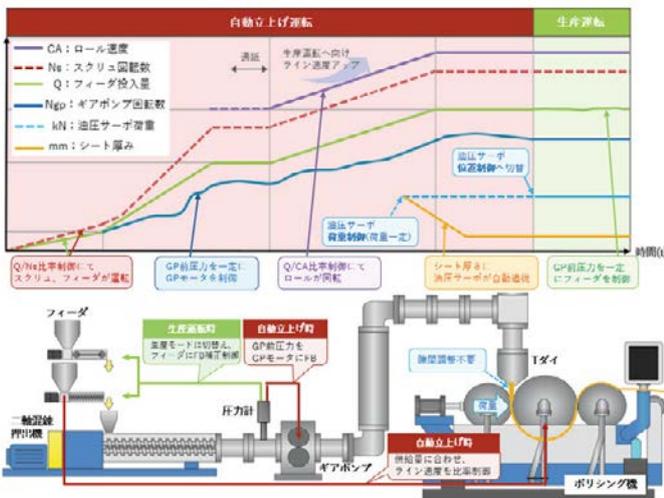


Fig. 5 自動立ち上げ

### 4.2 自動ダイ

自動ダイはかねてから当社が提案してきた自動化・省力化の技術である。

フィルムの厚さを均一にするため、Tダイの調整ボルトを回しリップ隙間を調整するが、幅広Tダイでは調整ボルトの数が多く、厚さ調整はオペレータの技量や経験により調整時間に大きな差が出る。

当社の自動Tダイは手動による粗調整後、インライン厚さ計の測定値を自動ダイにフィードバックし、ヒートボルトの熱膨張によりTダイのリップ隙間を調整することでフィルム厚さを調整する。手動による粗調整はオペレーションガイドを参考にすることにより、容易に短時間で調整することが可能である。

### 4.3 油圧サーボ

油圧サーボは、自動ダイと同じく当社が提案してきた自動化・省力化の技術である。

従来ロール隙間はロール両端の軸受間に設けたクサビを移動することで調整していた。この隙間は0.01mm単位での微調整が要求されるが、クサビを移動させるネジのバックラッシュやクサビの摩擦によるスティックスリップのため、熟練オペレータでも難しい作業である。シート・フィルムの厚みを変更する度に、困難なロール隙間の微調整が必要であった。また、クサビ方式では油圧シリンダによる押付荷重をシートとクサビの両方で受けているため、樹脂に直接かかる荷重を計測することができず、シート・フィルムにかかる荷重の管理という概念はなかった。

当社では、ロール隙間の調整機構として油圧サーボ式ロール隙間調整システムを開発し採用している。(Fig. 6)

このシステムは油圧シリンダに高精度の位置センサを搭載し、双方向ポンプをサーボモータで駆動することにより高精度なロール隙間の制御が可能である。クサビがないために摩擦によるスティックスリップが無くなり再現性に優れている。クサビ方式の調整は感覚的であったが、油圧サーボシステムではロール隙間はタッチパネルにより数値で設定するため、定量的に管理することが可能となった。(Fig. 7)

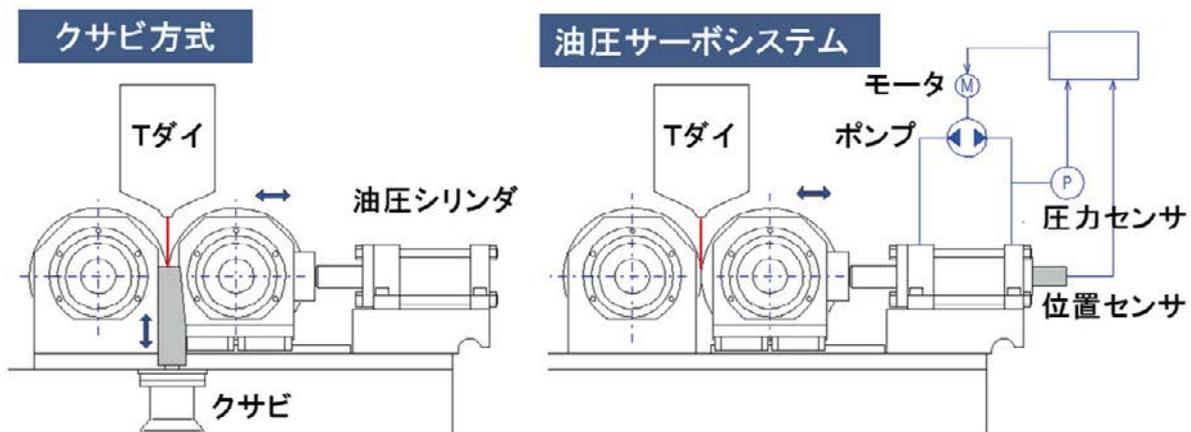


Fig. 6 クサビ方式と油圧サーボシステムの比較

さらに、クサビが不要になったため油圧シリンダのヘッド側に設けた圧力センサによりシートにかかる荷重を正確に計測することができるようになった。荷重を一定に制御し隙間が変化する荷重制御に切り替えることが可能で、ロールの押付荷重を一定に維持し、シート厚みの変化に応じてロール隙間を自動的に追従させることが可能である。



Fig. 7 油圧サーボシステムの操作画面

この機能により、シート・フィルムの厚み条件変更の度に行っていたロール隙間の微調整を自動化することが出来る。(特許第 4698334 号、他) ロール隙間と同様、荷重はタッチパネルにより数値で設定するため、定量的な管理が可能である。

## 5. おわりに

本稿ではシート・フィルム製造装置の自動化・省力化について紹介してきた。時間と原料のロス削減、誤操作によるトラブル低減、人材不足、技能伝承、安全性の向上などの課題に対して当社が提案する自動化・省力化技術は有効であると確信している。

今後もシート・フィルム製造装置関連の開発を進め、社会に貢献する所存である。

### 参考文献

- 1) 山口, 押出成形におけるオペレータ支援機能と自動化, 東芝機械技報, Vol.27 (2019), pp.12-15.
- 2) 経済産業省 厚生労働省 文部科学省, 2023 年版ものづくり白書 (令和 4 年度 ものづくり基盤技術の振興施策), 2023 年 6 月, pp.29



成型機カンパニー  
押出技術部  
装置技術課  
加藤 拓朗

# 5 軸割出加工における工具刃先位置測定

樋口 庸介

巻頭言

特別記事

技術論文

技術報告

新製品ニュース

シリーズ

受賞・特許ニュース

講評

5 軸割出加工など工具姿勢を変えて加工する場合、姿勢変更後の工具刃先（加工点）位置は幾何学計算により求めることが一般的である。しかし長時間加工や経年変化により計算に用いるパラメータが正しくなくなる場合がある。一方、工具刃先位置を非接触計測装置などで直接測定することが出来れば、測定の瞬間に含まれている様々な誤差量をまとめて補正することが出来る。今回は任意の角度姿勢にある工具の刃先位置を測定するプロセスと生じる誤差要因について報告する。

## 1. はじめに

5 軸割出加工は、2 軸の回転軸を任意の角度に位置決めした状態で、残りの直交 3 軸を制御して行われる加工方法である。従来の 3 軸加工機の操作に近いため、同時 5 軸加工（加工時に 5 軸全てを制御する）に比べて取組みやすく、段取り作業の削減や 3 軸機よりも工具長を短く出来るなど、多くのメリットがある加工方法である。

しかし、回転軸により加工面を割出すことで、座標変換やオフセットが必ず生じることになる。その場合、CNC が持つ座標回転機能を利用する、もしくはプログラムによりオフセット量を計算して座標系に適用する方法が一般的である。ところがこれらの計算には、あらかじめ測定された機械回転軸の位置誤差を参照する計算項が存在する。これらの各種誤差量は機械の経年変化や、加工中の温度変化により変化することが知られており、加工前の自動測定などの誤差量調整を行うことで各社が対策を行っている。

一方工作機には、工具を装着する部分、アタッチメントを交換して工具軸を特定の角度に変える機能を持つものがある。加工対象次第では異なる種類のアタッチメントを使い分けて加工を行うこともある。しかし、アタッチメント毎の寸法差を正確に管理できなければ、加工した面に意図しない段差を生み出すこととなる。

このような問題を解決するために、非接触式の工具測定装置を応用し、オフセットの必要な工具の先端の 3 次元位置を特定し、補正する手法を提案する。工具の刃先位置を直接検出することが出来れば、その工具を装着している主軸やアタッチメント、機械構造物に生じる変位も含めた誤差量を把握することが出来る。今回の報告では、刃先位置の測定プロセスと対処が必要な誤差要因について報告する。

## 2. 測定器の特徴と装置構成、測定方法

### 2.1 測定器の特徴

本報告で使用している非接触式の工具測定装置は、大昭和精機製ダイナラインである。T 字状に配置した 2 本の線状の CMOS 撮像素子（Fig.1）が最大の特徴である。以下、取扱説明書にならい、横線の素子を「X 軸センサ」、縦線の素子を「Z 軸センサ」、これら線状の撮像素子を「ラインセンサ」と呼称する。ラインセンサは LED 光源からの投光により工具が落とす“影”を検知して工具の有無を判定する。ラインセンサが持つ測定機能は以下の 3 つである。

それぞれの測定機能は X 軸、Z 軸センサで別個に機能する。

- ① SKIP 信号出力
- ② スキャン測定（撮像素子による精密測定）
- ③ 焦点値測定（工具のピント合わせ）

SKIP 信号とは工具がラインセンサを遮った瞬間に工作機へ出力される信号であり、NC 工作機にはこの信号を受け取った時点の座標を記録して停止する機能を備えている。

### 2.2 装置構成

当社がラインナップしている工作機の中では、5 軸割出加工が可能な機種として 5 軸ヘッドを装備した門形加工機があげられる。本報告では 5 軸ヘッドアタッチメントへ交換可能な門形マシニングセンター MPC-H を対象として装置構成と検証を行った。

MPC-H の 5 軸ヘッドは回転 2 軸(B・C 軸)をもつ、主軸頭旋回型のアタッチメントである。この B/C 軸による工具姿勢の変化に追従させるため、測定装置側にも回転軸（以下 CT 軸）を設けた構成とした（Fig.2）。この CT 軸により、測定器から見た工具先端のアプローチ方向を一定に制御する。また座標回転を適用すれば、測定器から見て常に同じ方向の移動指令により測定を行うことが出来る。

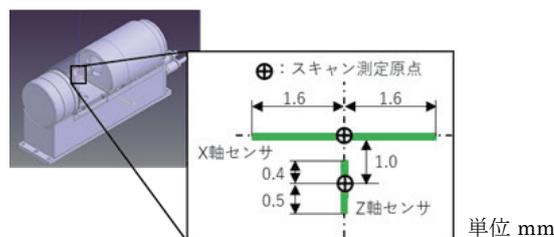


Fig. 1 測定範囲

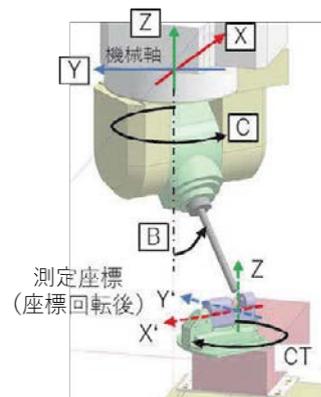


Fig. 2 5 軸ヘッドと測定装置の旋回軸

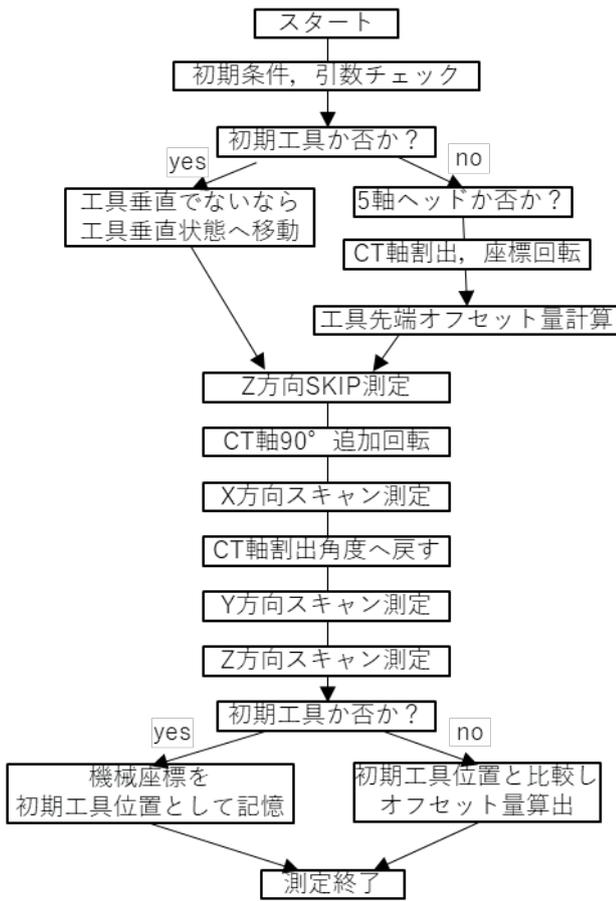


Fig. 3 測定フロー

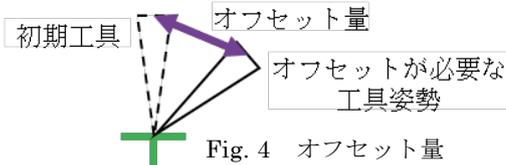


Fig. 4 オフセット量

### 2.3 測定方法

測定動作の実行には、工作機に様々な指令を与える G コード機能と、演算や条件分岐を指令するカスタムマクロ機能を利用して測定プログラムを記述し実行した。主な測定フローを Fig. 3 に示す。

オフセット量の基準となる初期工具は工具垂直状態を想定している。例えば 5 軸ヘッドの工具垂直状態 (B0.C0.) を初期工具として、ラインセンサと工具先端を一致させた時の機械座標を記憶させる。次に B/C 軸を任意の工具角度に移動させてから、同様にラインセンサと工具先端を一致させた時の機械座標を取得すると、B/C 軸移動による工具先端のオフセット量が算出される (Fig.4)。

## 3. 検証と考察

### 3.1 検証方法と結果

測定して得られたオフセット量を検証するために、実際に加工を行い評価する。5 軸ヘッドの B/C 軸を変更して加工した面の相対位置、加工面段差を評価する方法が適当として以下の検証加工を行った。検証結果の目標は、同一方

向を向いて加工された面の段差が、基準とした面に対して  $\pm 5 \mu\text{m}$  以内 (全体の段差が  $10 \mu\text{m}$  以内) に収まることと設定した。

加工手順

- ① 工具 1 へ交換
- ② 基準面 (Fig.5 赤色部) を B0C0 姿勢で加工する
- ③ BC 軸角度を変えて工具先端位置を測定
- ④ 指定の部位を平面加工
- ⑤ ③~④を繰り返す
- ⑥ 工具 2 へ交換し、③~④を繰り返す

加工条件

工具 1 :  $\phi 12$  ボールエンドミル

工具 2 :  $\phi 8$  ボールエンドミル+

S8000, F1500, 切込  $0.1 \text{ mm}$ , 加工時 AICC2

加工角度 : B0,5,10,15 C0,90,180,-90

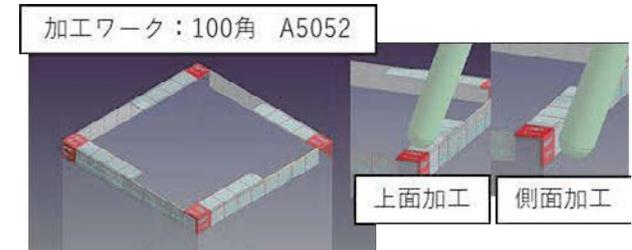


Fig. 5 検証加工ワーク

加工面段差の測定は、主軸にタッチポイントを装着し機上にて測定した。検証加工の結果の一例をまとめると以下の様になった。

Table 1 検証加工結果 1 (CT 軸回転誤差補正なし)

単位  $\mu\text{m}$

	目標	上面	+X 側面	+Y 側面	-X 側面	-Y 側面
max.	$5 \geq$	10	3	0	9	5
min.	$\geq -5$	-4	-11	-6	0	-2
$\Delta$	$10 \geq$	14	14	6	9	7

上面方向の最大  $10 \mu\text{m}$  は、何回かの検証加工を通し、生じた箇所に再現性が見られないこと、また常にプラスの値として現れることから、工具先端位置測定前に工具に付着した切粉が原因と考えられる。側面の結果にはある一定のパターンが観察されるため、次に説明する誤差が原因として、検証を進めることとした。

### 3.2 CT 軸回転誤差の原因と対策

加工結果を精査すると、工具先端位置測定時の CT 軸角度と加工段差の関係性が予想された。そのため、CT 軸回転とラインセンサの位置関係を調査した (Fig.6)。CT 軸の回転中心とラインセンサの中心を機械的に調整して一致させるのは難しいため、CT 軸回転中心~ラインセンサまでの誤差量を記録し、2 次元座標回転計算を行って任意の CT 角度の時のラインセンサ位置を算出していた。

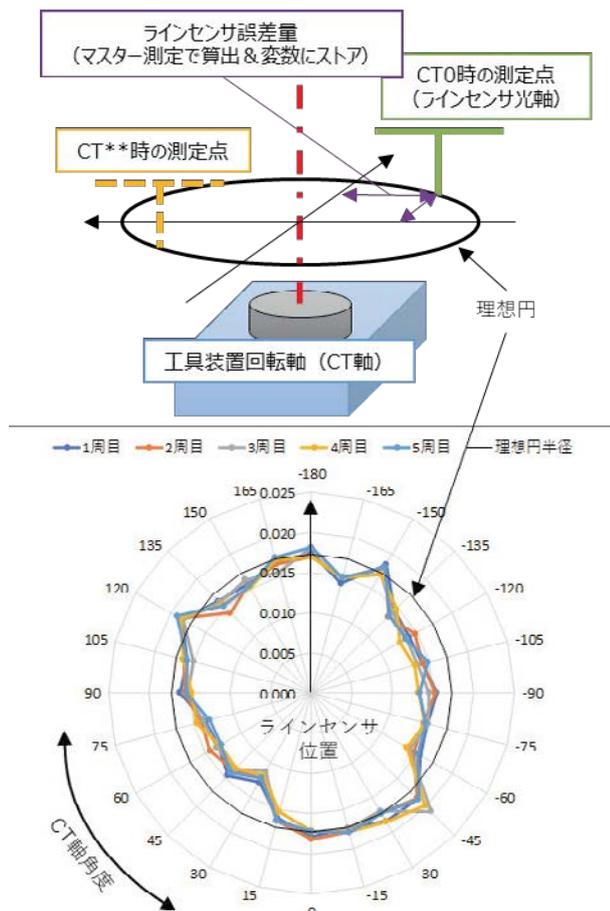


Fig. 6 ラインセンサの理想的な旋回軌跡と実際の旋回軌跡

しかし実際にラインセンサの位置を測定すると、補正計算の上で想定していたような理想的な軌跡を描いておらず、回転角度により数  $\mu\text{m}$  程度の誤差が発生することが判明した。この誤差を CT 軸回転誤差として、原因の調査のため以下の検証を行った。

- ① 構成部品を再調整して組立誤差に由来するものか調査する。
- ② 回転テーブルの上面振れを調査し、測定部（ラインセンサ）への影響を調査する。

①について、測定装置の構成部品を再研磨し平行度などの調整を行った後、再度 CT 軸回転誤差を測定した。しかし調整後も調整前と同様の誤差傾向が確認されたため、組立誤差による影響は小さいと考えられる。

②について、測定器を回転させる機構として三共製作所製ローラドライブをユニット品として購入し、装置に組み込んでいる。回転による回転テーブル上面の振れを測定すると  $\pm 1 \mu\text{m}$  であり、現実的に考えると購入部品として十分な精度である。しかし、回転テーブル上面から測定部であるラインセンサまでの高さ寸法を考慮して計算すると、測定部では振れが数  $\mu\text{m}$  程度に拡大することが判明した。

①②の結果から、回転テーブル上面からラインセンサまでの高さ寸法により、上面振れの影響が拡大していることが CT 軸回転誤差の原因と考えられる。

誤差原因が回転機構に由来していることが分かったが、誤差を 0 に近づけられるような回転機構の購入もしくは製作は、費用の面から見ても現実的でない。一方、CT 軸誤差を数回測定すると、誤差の大きさと発生角度には再現性が確認できた。このことから、CT 軸角度と誤差量のデータテーブルを機械に記憶させ、オフセット計算時に適用するプログラムを追加することで、CT 軸回転誤差への対策とした。

### 3.3 CT 軸回転誤差補正後の結果

CT 軸回転誤差を補正するためのデータテーブルを設定し、補正効果を 3.1 と同様の検証加工によって評価した。数回の加工結果を精査すると、3.1 と比較して加工段差が抑制できていることが確認された。CT 軸回転誤差補正を適用した結果の一例をまとめたものを Table 2 に示す。

Table 2 検証加工結果 2 (CT 軸回転誤差補正あり)  
単位  $\mu\text{m}$

	目標	上面	+X 側面	+Y 側面	-X 側面	-Y 側面
max.	$5 \geq$	3	3	4	4	3
min.	$\geq -5$	-4	0	0	0	-1
$\Delta$	$10 \geq$	7	3	4	4	4

CT 軸回転誤差を補正するデータテーブルの適用によって、全ての面で検証目標を達成出来た。

## 4. まとめ

3.3 にて検証目標を達成したことで、非接触式工具測定装置を用いた刃先位置測定による補正を、実用に足る精度で行えることが証明出来た。また、測定装置の回転軸 CT 軸に生じる誤差への対処方法として、補正データテーブルの有効性を示すことが出来た。

## 参考文献

- 1) 大昭和精機株式会社「光学ラインセンサ方式工具測定器 ダイナライン」製品紹介 HP : [https://www.big-daishowa.co.jp/products/product\\_detail.cgi?\\_rid=101](https://www.big-daishowa.co.jp/products/product_detail.cgi?_rid=101)



R&D センター  
研究開発部  
第 2 開発課  
樋口 庸介

# 技能レス研削加工のための要素技術の紹介

児玉 尋太郎、福田 将彦

超精密金型の加工工程において、作業者の技能によって品質に差が出やすい段取りに着目し、ワーク芯出しおよび砥石のアタリ確認の自動化技術の検討を行った。芯出しでは、CNC、測定プローブ、ハンマリングを行うピエゾアクチュエータを制御し、作業者の技能に依存しない動作を可能とした。アタリ確認では、ワーク接触時のスピンドル挙動を高速高精度に分析、砥石接触位置を算出することにより、熟練作業者の感覚に依存しない過切込みの防止やエアカット低減を可能とした。さらに両機能は、計測および解析をインプロセスで行うことにより、粗面や不完全円に対する芯出しや自由曲面へのアタリ確認など拡張性を持ったシステムとした。

## 1. はじめに

1980年代より開発および商品化が進んだ超精密加工機は、2000年以降になるとリニアモータ駆動技術などを用いて1ナノメートルの位置決め精度が可能となり、サブナノメートルの粗さや数十ナノメートルの形状精度が得られるようになった。これらの技術はスマートフォン搭載レンズ用金型をはじめとする光学部品用金型加工に適用されるようになったが、商品ライフサイクルが短く、常に高機能化が求められている。したがって、高度な加工技術や熟練された機械操作を必要とし、技能育成や人材不足といった課題が指摘されている。

車載用レンズ金型の研削加工の場合、少量多品種の形状に対し高精度加工が求められることから、段取り技能も重視されている。まず、市販のチャックシステムでは十分なワークの取り付け精度が得られないため、手動の芯出し作業が求められることが多い。高い熟練度を有する作業であれば、短時間の芯出しが可能だが、作業によっては、多くの時間を必要とし、要求された位置に調整できない場合もある。次工程では砥石のアタリ確認を行う。微粒砥石を用いた研削加工ではサブマイクロメートルの切込みのため、AEセンサなどでは接触検知が困難であり、目視による接触確認においても、作業者の熟練度により確認時間の増大や接触負荷による砥石損傷のリスクが発生する。

そこで、本稿ではネック工程となるワーク芯出し作業とアタリ確認に着目し、作業者を支援する技能レス技術について検討した結果を報告する。

## 2. ワークの自動芯出し

### 2.1 従来の芯出しと課題

レンズ用金型加工の場合、回転対称形状のため旋削構成を用いた加工が行われる。したがって、加工前にはワーク外径を基準としワークスピンドルの回転中心と一致させる芯出しが必要となる。作業者が行う手順としては、スピンドル端面にある平面上のチャックに真空引き（真空チャック）によりワークを保持し、ダイヤルゲージ等を用いワー

クを回転させながら外径の振れを確認し、ハンマで適切な位置に打撃を加えることによりワークをずらし、芯振れ誤差を許容値内に抑える方法が用いられている。芯振れ誤差の許容値は、一般的な金型では2~3 $\mu\text{m}$ 程度、高精度が要求される光学部品金型では0.1~0.2 $\mu\text{m}$ となる。この作業を短時間に完了させることができる熟練作業者は加工需要に対し大きく不足しており、経験不足の作業であっても安定したワーク芯出しが可能な技能レス機能が求められている。

### 2.2 システムの構成

この課題を解決するため、自動ワーク芯出し装置を開発

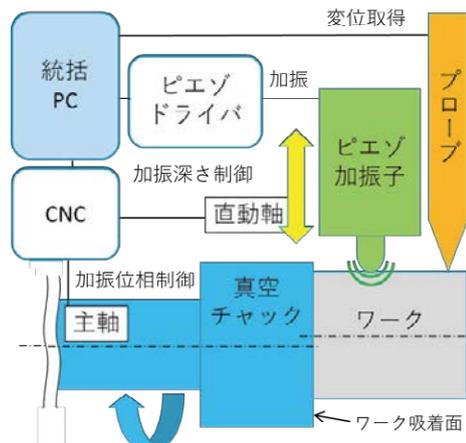


Fig. 1 自動芯出しシステムの構成

した。このシステム構成を Fig.1、動作試験中の装置外観を Fig.2 に示す。

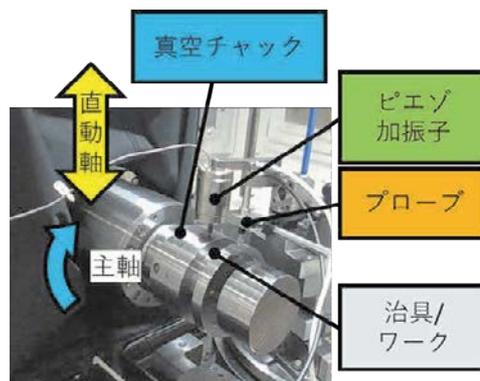


Fig. 2 装置外観

本装置は、ワークスピンドルに回転位置決め機能をもつ CNC 旋盤構成となっており、ワークに打撃を加えるピエゾアクチュエータと、ワーク芯振れを測定するプローブにより構成される。また PC によりワーク芯出し工程を統括し、CNC と通信し必要な軸移動指示を行う。約 5kg のワークを用いて行った動作試験では、初期芯振れ量 130 $\mu\text{m}$  から運転時間 4 分 20 秒にて残留芯振れ量 1.4 $\mu\text{m}$  (粗さは除く) を達成している。従来の芯出し機構では、機械直動軸を直接真空チャック上のワークに押し付け、誤差を修正する方向にワークを移動させる。そのため、

- ①ワークが滑り始めるまでは静摩擦によりサーボアンプに大きな負荷がかかる
- ②一度滑り始めるとより摩擦力の小さい動摩擦領域に遷移し大きな距離を一度に滑る
- ③直動軸からの力が失われて、静摩擦領域に戻る

この繰り返しが起き、直動軸の移動量をワークの移動量と等しくすることはできず精度のよい位置合わせは難しい。

そこで、本システムは、ピエゾアクチュエータを用いた加振を Fig.3 に示した手順に沿って行うことで、30 $\mu\text{m}$  程度の短ストロークながら衝撃力を効率よくワークに伝達する。つまり、静摩擦領域でのワーク移動を最小限とし、動摩擦領域において小さな負荷でワークを移動させることができる。しかしながら、直動軸の移動量とワークの移動量の不一致はなお残るため、ワーク芯振れ残留量のすべてを一度に修正するのではなく、修正結果を測定しながら分割して修正を加えている。

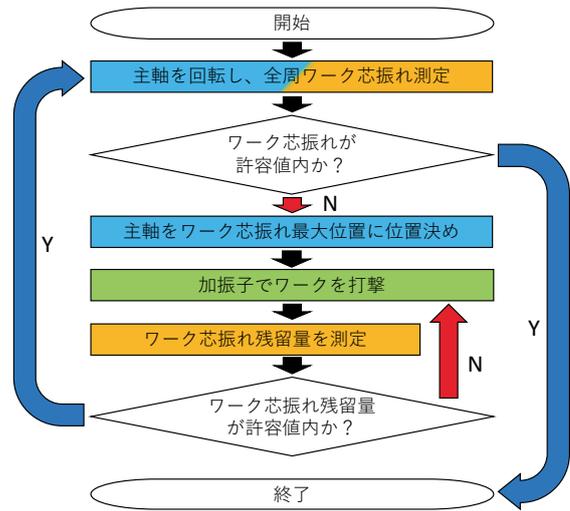


Fig. 3 システム動作フロー

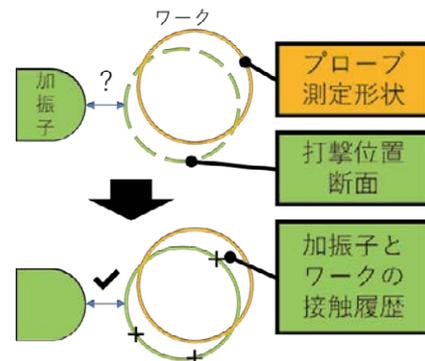


Fig. 4 理想断面形状の検出

### 2.3 芯出し精度向上の取り組み

本システムにおける芯出し精度向上の取り組みとしては以下が挙げられる。

#### ①測定位置と打撃位置の校正

ワーク芯振れ残留量を測定しながらワーク芯振れ修正を行っていくことや、機械全体の構成・ストロークの制限の都合上、本装置のプローブと加振子は主軸角度方向には同位相上にあるが、主軸軸方向にはオフセットして配置されている。この配置においては、プローブで測定するワーク断面と加振子で打撃するワーク断面とは相異なる。よって、ワークの同軸度や円筒度の影響を受け、主軸角度により加振子と打撃位置の距離が変動する。この対策として、加振子によるワーク打撃において、ワークに加振子が接触した際の主軸角度 (加振位相)、直動軸位置 (加振深さ) の値ペアを保存する。3 種類以上の値ペアが保存されている試行においては、Fig.4 の通りワークと加振子の接触履歴を用いて打撃位置のワーク断面を算出し、加振子とワークの接触する加振深さを予測できるようになる。よって、ワーク芯振れ残留量が数  $\mu\text{m}$  以下の場合であっても芯振れ修正量が超過する可能性を減ずる効果がある。

#### ②ワーク表面形状成分の除去

測定部断面が真円である理想的なワークを考えれば、その芯振れ測定結果は横軸に主軸角度、縦軸に芯振れ量をと

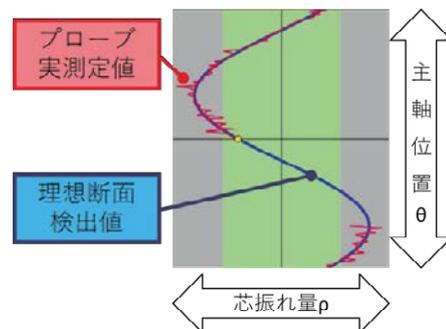


Fig. 5 プローブ測定断面と打撃断面との差異

$$\rho_{ideal} = \alpha \cos(\theta - \beta) \quad (1)$$

り正弦曲線となり(1)式が成り立つ。 $\rho$ は主軸角度によるワーク芯振れ量測定値、 $\theta$ は主軸角度 ( $0 \leq \theta \leq 2\pi, [\text{rad}]$ )、 $\alpha$ はワーク芯振れ最大量、 $\beta$ はワーク芯振れが最大となる主軸角度 ( $0 \leq \beta \leq 2\pi, [\text{rad}]$ ) をそれぞれ表す。

現実にはワークは固有の表面形状 (うねり、粗さ) を持つため、これが誤差成分として現れる。これを  $\theta$  の関数  $f(\theta)$  とすれば、

$$\rho_{real} = \alpha \cos(\theta - \beta) + f(\theta) \quad (2)$$

よって、十分な  $\theta$  サンプルング点数をもって  $\rho_{real}$  の母集団

を定義すれば、残差 $f(\theta)$ の2乗の和が最小になるように、 $\alpha$ と $\beta$ をパラメータとする関数フィッティングを計算できる。組み立て工程において、鏡筒との干渉を回避するために測定断面に一部切り欠きがあるDカットのように、一部の $\theta$ に対してプローブ測定が行えない場合であってもこの手法を適用できる。

本システムでは、この手法を用いて図5のように「ワークの表面成分を除去した真円と見做せる理想断面形状」を検出している。

### 3. ワークの自動アタリ確認

#### 3.1 従来のアタリ確認と課題

光学レンズ用金型では、直径10mm以下の小型形状かつ#3000以上の微粒砥石を用いられることが多い。さらに加工形状が曲面であることから、砥石が最初に接触する

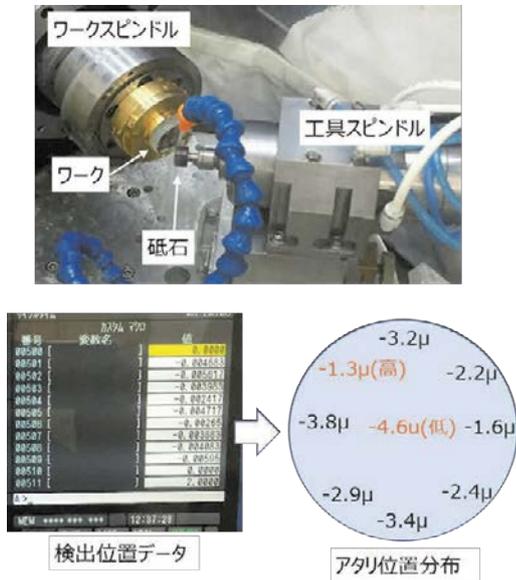


Fig. 6 自動アタリ確認システム構成

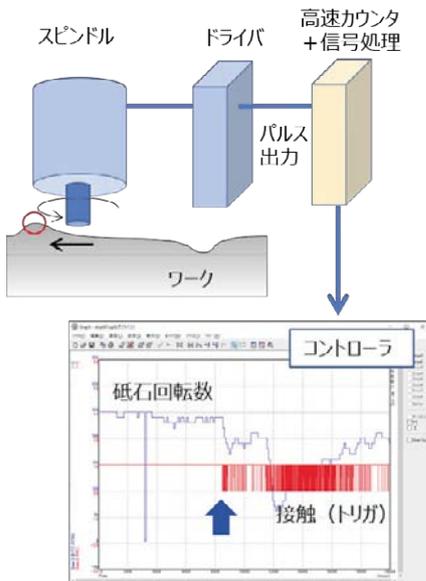


Fig. 7 自由曲面形状のアタリ確認事例

加工開始点を適切に設定することは加工効率や良好な加工品質を得るうえで重要な段取り作業となる。砥石の接触にはAEセンサなどが知られているが、サブマイクロメータの切込みとなるため十分な接触信号が得られず、砥石を手動で回転させながらスピンドルのわずかな挙動変化を目視で捉え接触の判断を行っている。したがって、作業者の熟練度によっては、十分な認識ができず確認時間の増大や接触負荷による砥石損傷のリスクが発生する。

#### 3.2 システム構成

超精密加工機に搭載される工具スピンドルでは、高品質な加工面を得るため、空気静圧軸受を採用し高精度な回転数制御が可能なモータおよびドライバから構成される。Fig.6に示す本システムでは、通常より低い回転数を維持したスピンドルにおいて、回転数制御に用いるパルス信号を検出し接触時の高速検出を可能とした。また、この信号は高速スキップ動作に取り込むことにより、砥石の接近、アタリ検出、回避動作を固定サイクルとして確立し任意位置のアタリ確認の自動化を可能とした。

#### 3.3 自由曲面形状への展開

加工における工具走査パスは、当社独自ソフトウェアを用いて生成される。工具の軌跡やワークとの接触位置などの情報も取得できることから、自由曲面上の砥石接触位置を算出することも可能である。つまり、自由曲面形状における理論位置をあらかじめ登録することにより、複数箇所のアタリ確認を自動で確認することが可能である。図7はアタリ位置の検出事例を示しており、最も高い位置と低い位置が判別でき、最小限のエアカットとなる加工開始点と、全面的加工に必要な総切込み量を自動で認識することができる。

### 4. おわりに

本稿では、研削加工時の段取りに着目した技能レス技術について紹介した。今後も加工品質の高度化が進む一方、人材不足、技能伝承は継続した課題として求められると考えられる。これらに対し、加工機の特性を活かした技能レス技術を提案しお客様への貢献を進めていきたいと考えている。



工作機械カンパニー  
工作機械技術部  
加工開発課  
児玉 尋太郎



工作機械カンパニー  
工作機械技術部  
福田 将彦

製造業における工場内物流の現場では、人手による作業が中心である。荷物の積み入れ、積み降ろし作業は、重量物を持ち運ぶ重労働であり、受入れ後の開梱作業は、カッターで手を切創するなど怪我をする恐れがある。当社では、これら作業の自動化をすべく、ロジスティクス現場に対応したロボットシステム、ロジロボシリーズを商品化した。荷物の積み入れ、積み降ろし作業に対応したパレタイズシステム：ロジロボ SP と、荷物の開梱作業に対応した開梱システム：ロジロボ TC/FC の 2 機種に分類される。両者とも、新型スカラロボット THE1000/TS5000 を採用することで高い信頼性を有し、作業環境に配慮した設計により、省スペース性、多品種への対応、高いユーザビリティ性を実現している。本稿ではロジロボシリーズ 2 機種について紹介する。

## 1. はじめに

製造業における工場の生産ラインでは FA 化、自動化が進む一方、生産物流の現場での、原材料や部品の受入れ作業、生産ラインへの供給、完成した製品の出荷作業は、スペースが狭い、荷物の種類が多岐にわたる等の理由で、人手による作業が中心となっている。たとえば、荷物の積み入れ、積み降ろし作業は、重量物を持ち運ぶ重労働であり、また、受入れ後の開梱作業では、カッターによる開封を繰り返し、注意力散漫になり手を切創するなど怪我をする恐れがある。さらに、昨今の労働力不足に加え、感染症対策としての非接触、非対面型への転換ニーズの高まりを受け、このような生産物流での過酷な作業の自動化、ロボット化が強く求められている<sup>1)</sup>。そこで当社では、ロジスティクス現場に対応した自社製ロボットシステム、ロジロボシリーズを新たに商品化した。荷物の積み入れ、積み降ろし作業に対応したパレタイズシステム：ロジロボ SP と、荷物の開梱作業に対応した開梱システム：ロジロボ TC/FC の 2 機種に分類される。以下にロジロボ SP の基本構造、特長、および導入効果を述べ、ロジロボ TC/FC の基本構造、特長、および導入効果を説明する。

## 2. パレタイズロボット ロジロボ SP

### 2.1 基本構造とパレタイズ動作手順

Fig.1 にロジロボ SP(SCARA robot type Palletizing system)の外観を示す。ロジロボ SP は、昇降する直交ロボットにスカラロボットを搭載した昇降付スカラロボットと、パレットを搭載する電動式の薄型回転台から構成される。ロボットと薄型回転台とは、パレットが部分的に届く位置関係に配置されている。

直交ロボットには COMPO ARM BE60G を、スカラロボットには THE1000 を採用した。自社製品で高い信頼性を有し、最新機種を採用することで、最大可搬重量 20kg(ハンド除く)を実現している。厚生労働省の職場における腰痛予防対策指針では、女性の持ち運べる荷物の重量を体重の 24%以下かつ 20kg 未満とされ、実際現場で運ばれている荷物の重量を充分カバーできる搭載能力となっている。

積み置き範囲としては、標準的なパレットサイズ□1,100mm×1 枚を想定しているが、オプション仕様にて、

パレット 2 枚や特殊パレットにも対応できる。

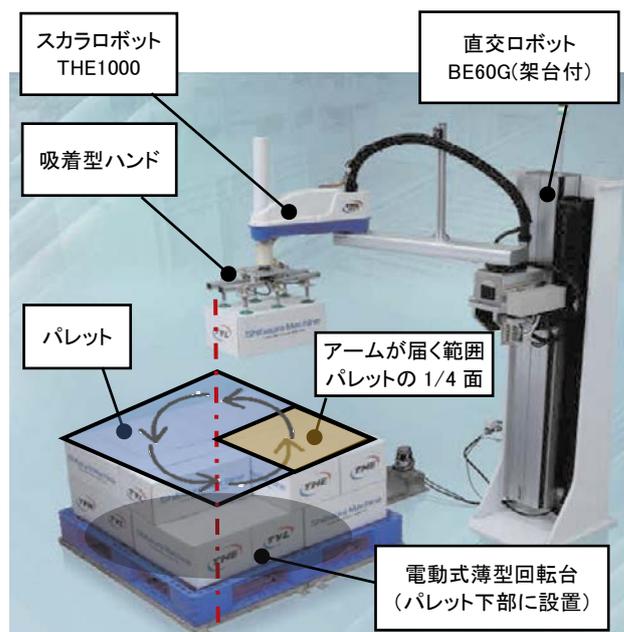


Fig. 1 ロジロボ SP 外観

ハンドには Fig.2 に示すような吸着型を採用している。ブランジャを介した吸盤 6 か所で荷物の天面を把持することで、多少変形した荷物や、荷物同士の隙間の狭い積み付けでも、安定して搬送することができる。

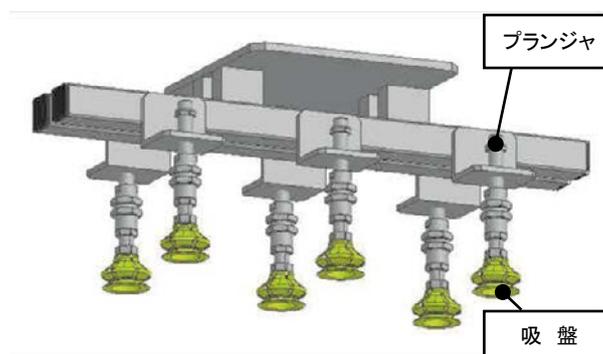


Fig. 2 ロジロボ SP ハンド構造

Fig.3 を用いて積み上げ動作手順を説明する。まず空のパレットに、ロボットアームの届く範囲に荷物を積み、1/4 積んだ時点で、回転台によりパレットが 90 度回転する。再度 1/4 積んだ後、パレットが 90 度回転する。一定量積んだら 90 度回る、これを繰り返してパレットに荷物



Fig. 3 積み上げ動作手順

を積み上げる。なお、デパレタイズも逆の手順でパレットから箱を積みおろす。

## 2.2 特長、および導入効果

ロジロボ SP は、先述したユニークな構造とすることで優れた特長を有し、生産物流の現場に導入した際、さまざまな導入効果が期待できる。

### ① 省スペース化

ロジロボ SP は、先述した昇降付スカラロボットと電動式回転台とを組み合わせた構造により、リーチ 1,000mm で標準的なパレットサイズ□1,100mm に対応できる。このため設置スペースは 2,200mm×2,500mm 程度である。一方、従来型の 4～6 軸の垂直多関節パレタイズロボットは、リーチが 2,000mm 以上であることから、設置スペースは概算で 2,500mm×5,000mm 程度必要であると想定される。Fig.4 に両者の比較を示す。ロジロボ SP は従来型の半分以下の設置スペースで済み、大幅な省スペース化を実現している。

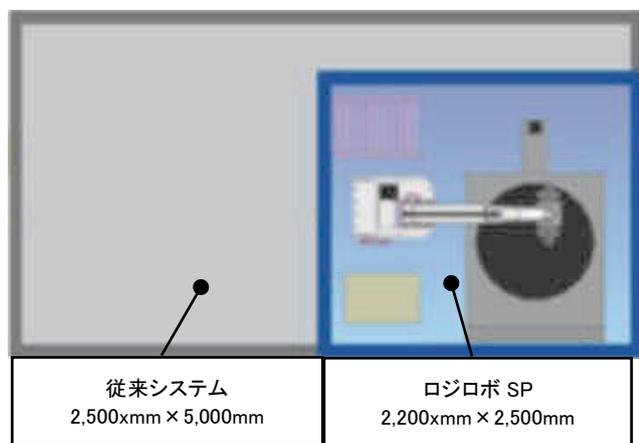


Fig. 4 設置スペース比較

### ② 高い処理能力

ロジロボ SP は、スカラロボットにより高速で旋回動作するため、1 サイクル（荷物を把持してから、次の荷物を把持するまでの動作）を最短 10sec 程度で搬送する。また、外部インターフェースを活用して、フィードコンベアへの荷物の有無やロボットハンドの把持状態など、インターロック制御を構築することで、既存ラインとフレキシブルに同調できる。

### ③ 多品種対応

ロジロボ SP は、サイズや重量の異なる荷物の品種や、

積み付けパターンと呼ばれる、パレットに荷物を積む際の並べ方を事前に登録できる。Fig.5 に代表的な積み付けパターンを示す。運用時には、タッチパネル画面で品種や積み付けパターンを選択すれば、自動でパレタイズ運転を行う。また、吸着型ハンドは可変ピッチ構造としており、吸盤の間隔を適切に設計すれば、品種ごとにハンド交換や調整作業が不要である。

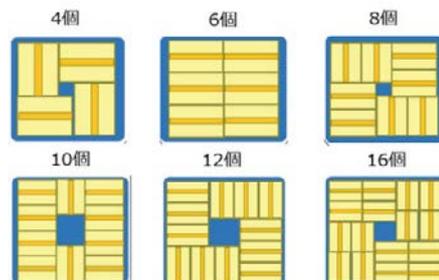


Fig. 5 代表的な積み付けパターン

### ④ ユーザビリティ

ロジロボ SP は、タッチパネルでの簡易な操作性に加え、パレット交換作業の容易化にも配慮している。

Fig.6 に自社製の電動式薄型回転台を示す。回転テーブルへの伝達機構や荷重の支持構造をコンパクトに設計した結果、最大搭載重量 800kg、回転台の高さを 35mm にまで薄型化を実現した。これにオプション仕様のスロープを設置することで、非力な作業員でもハンドリフトを使って容易にパレットを交換できる。

また、電動式回転台の周囲に障害物がないため、パレット交換のアクセス方向を自由に選択可能である。これにより、現場の設置レイアウトに応じた最適な作業動線を構築できる。

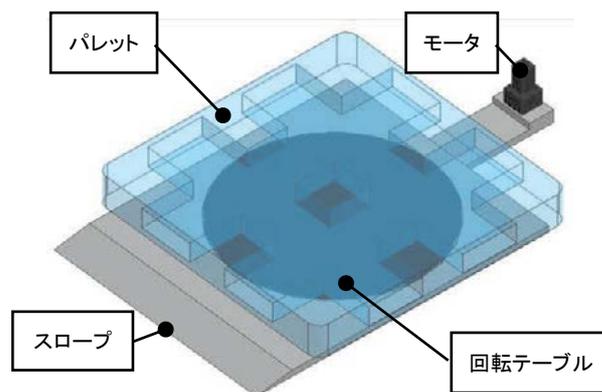


Fig. 6 電動式薄型回転台

## 3. 開梱ロボット ロジロボ TC/FC

### 3.1 基本構造と開梱動作手順

Fig.7 にロジロボ TC/FC(Tape cutting system/Flap cutting system)の外観を示す。ロジロボ TC/FC は、コンベア進行方向に、刃を装着したスカラロボット THE1000 を 3 台配置している。開梱動作の手順としては、コンベアを流れる段ボール箱を、天面のテープ、外フラップ(外蓋)、内フラップ(内蓋)の順に開封する。

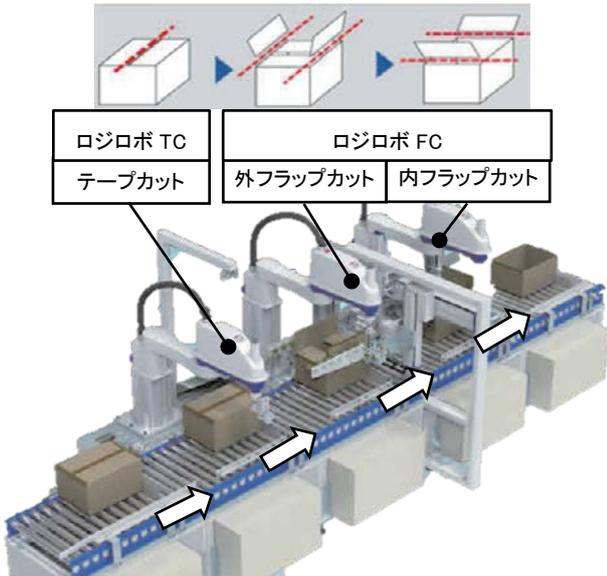


Fig. 7 ロジロボ TC/FC 外観

① ロジロボ TC

ロジロボ TC は、Fig.8 に示すように、鉛直方向にカッターを持ったスカラロボットが、段ボール箱の天面のH貼りやI 貼りテープをカットするユニットである。



Fig. 8 テープカット

② ロジロボ FC

ロジロボ FC は、ロジロボ TC にてテープカットした後、段ボール箱の外側、内側のフラップ（蓋）をカットするユニットである。外フラップカットの手順を Fig.9 に示す。

①吸着型ハンドでフラップを把持し、②フラップ折り込み中心方向に回転し、蓋を開けた状態にして、③水平方向にカッターを持ったスカラロボットが、フラップの内側を往復してカット、④スカラロボットがフラップを吸着して、シュートに廃棄する。なお、内フラップカットも同様の手順で行う。

特に小型の箱（最小：L250mm×D230mm×H100mm）では、蓋を開けた状態でのフラップ周辺は非常に狭い。スカラロボットやカッターのコンパクトな構造を生かして、フラップ間 200mm 強の狭小スペースでのカット動作を実現している。

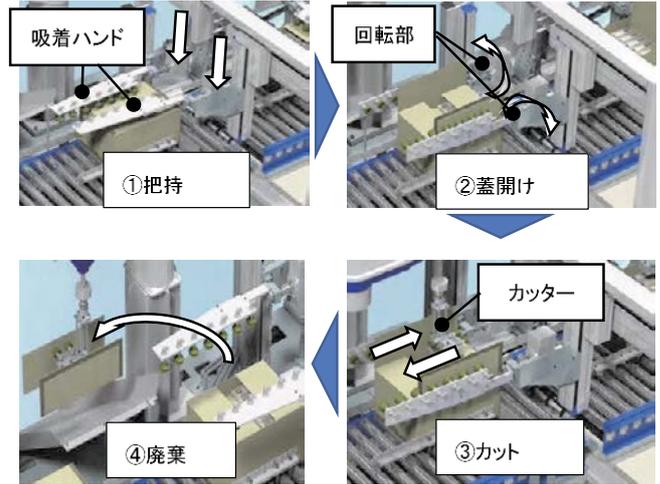


Fig. 9 外フラップカット手順

3.2 特長、および導入効果

ロジロボ TC/FC は、以下に示すような特長を持ち、さまざまな導入効果が期待できる。

① 内容物への配慮

ロジロボ TC は、箱に刃入れせず、テープをカットするため、切込量を浅く設定できる。テープカット用カッターの基本構造を Fig.10 に示す。

箱の厚さは、薄いBフルートで 3mm に対し、テープの厚さは、厚手のガムテープでも 0.3mm 程度である。カッターの刃先の出代は、箱の凹凸面への追従性を考慮しても、箱の厚さに対して十分小さく調整でき、刃先が箱の内部に貫通する恐れがない。

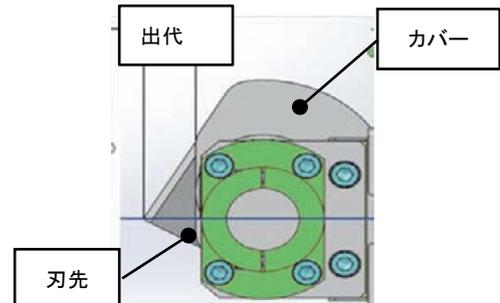


Fig. 10 カッター基本構造

一方、ロジロボ FC は、Fig.9 の②で蓋を開けた状態にして、Fig.9 の③で直立したフラップの内側から折り込み部をカットする。刃先が箱の内部に侵入しない。

このように、ロジロボ TC/FC において、段ボール箱の内容物へダメージを与える懸念がなく、最終製品の品質を最大限配慮した設計となっている。

② 次工程の省人化・省力化

ロジロボ FC は、Fig.9 の③でフラップカット後、Fig.9 の④で廃棄を行うことで、蓋の無い状態で次工程に流す。

段ボール箱を倉庫や工場内の保管用ラックに直接陳列することができるため、次工程のピッキング作業での省人化・省力化につながる。

③ 省スペース化

ロジロボ TC/FC は、先述の Fig.7 に示すように、コンベアとスカラロボットとを並行に配置することで、幅方向を小型化している。また、既存のコンベアラインに直接連結できる構造とすることで、長手方向に接続用のユニット追加が不要である。

装置の小型化によって、省スペース化を実現している。

④ 多品種・混載対応

ロジロボ TC/FC は、供給されるすべての段ボール箱のサイズを計測している。テープカット前に、レーザー変位計により箱サイズを計測し、各スカラロボットのコントローラに計測データを送り、ロボットのカット軌跡を内部計算する仕組みである。

都度サイズ計測、データ共有、補正を行うことで、幅広い箱のサイズ、およびランダム流しに対応している。

⑤ ユーザビリティ

ロジロボ TC/FC は、タッチパネルでの簡易な操作性に加え、先述した箱の多品種・混流対応により、煩わしい初期設定や段替え作業が不要である。

3.3 刃の長寿命化への取り組み

ロジロボ TC/FC を導入しても、刃の寿命が短い場合、作業者が高頻度で刃を交換することになり、自動化の効果は限定的である。費用対効果の観点からも、耐久性の高い刃を設計することが望まれる。

そこで、刃の長寿命化への取り組みとして、工具鋼製の刃と特殊合金製の刃で、同じ条件の下、段ボール箱をカットし続け、耐久性の比較検証を行った。Fig.11 に箱のカット切断性を、Fig.12 に刃の摩耗状態を示す。工具鋼製の刃では、約 0.5km カットした段階で、刃の切込不足によるカット不良が発生し、刃の摩耗の進行が確認された。一方、特殊合金製の刃では、7km 以上カットしても、カット不良が発生せず、刃の摩耗もほぼ確認できなかった。

この結果から、特殊合金製の刃を採用し、その寿命は、公称値 7km としている。

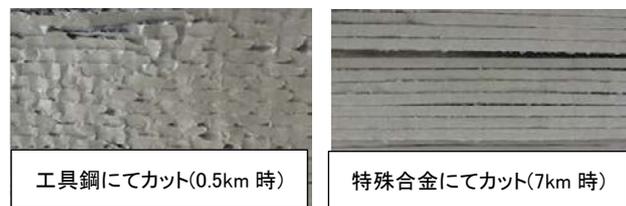


Fig. 11 箱のカット性の比較写真

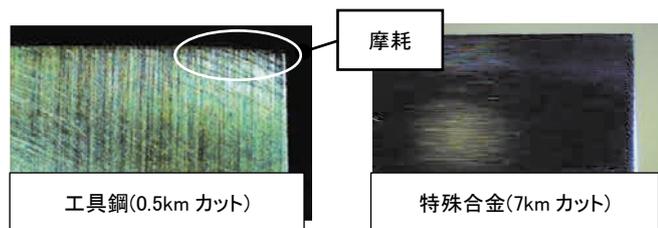


Fig. 12 刃の摩耗の比較写真(拡大)

4. ロジロボシリーズ組み合わせ例

ロジロボ SP にビジョンシステムを搭載し、パレット上の箱の位置やサイズを自動認識することで、デパレタイズへの対応が可能である。次工程にロジロボ TC/FC を組み合わせ、連動させることで、より広範囲における自動化に対応できる。Fig.13 にロジロボ SP (デパレタイズ対応) とロジロボ TC/FC の組み合わせ例を示す。

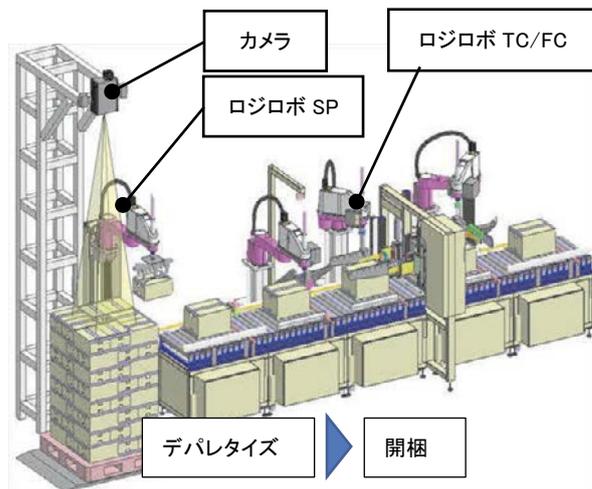


Fig. 13 ロジロボシリーズ組み合わせ例

5. まとめ

自社製スカラロボット THE1000 を採用したロジロボ SP、ロジロボ TC/FC について、基本構造、特長、および導入効果を説明した。ロジロボシリーズを生産物流現場に導入することで、自動化、省人化が実現され、労働生産性の向上が期待できる。

参考文献

1)国土交通省, I. 総合物流施策大綱策定の意義, 総合物流施策大綱 (2021 年度~2025 年度), pp.1-3.



制御機械カンパニー  
システムエンジニアリング部  
技術課  
佐々木 康陽

# 協働ロボット安全システム「Dual Safety Core」の開発

勝又和浩 石橋健太郎 松永渉

巻頭言

特別記事

技術論文

技術報告

新製品ニュース

シリーズ

受賞・特許ニュース

講評

本稿は ISO 10218-1 に準拠した協働ロボットの安全システム: Dual Safety Core について報告する。Dual Safety Core は安全部 (Safety Board)、センサおよび安全関連機器で構成される。特に Safety Board の信頼性は ISO 13849-1 と IEC 61508-1 から IEC 61508-7 で規定されている。これら規格に準拠した要求を実現するため、2つの CPU を持つ構造の Safety Board を開発した。

本報告の安全システムでは設計段階からシステム、ハードウェア、ソフトウェアで想定されるすべての故障について分析を行い、すべての故障を検出するように設計した。この結果、高い信頼性を有する Safety Board を実装した協働ロボット安全システム: Dual Safety Core を開発した。

## 1. はじめに

### 1.1 協働ロボットと安全システム

産業用ロボットは人が作業エリア内に入らないように安全柵を設置することが定義されている[1]。そして安全柵設置は適切な処置を施す義務があるため、産業用ロボットの設置面積はロボットの可動範囲に対して数倍の広さになることがある。

一方、協働ロボットは人とロボットが同じエリア内で作業することが定義されている。これより協働ロボットは産業用ロボットに比べ安全柵を設ける必要がないので、設置面積を低減することが期待できる。

協働ロボットは人と同じ作業エリア内で動作しているため、人に危害を加えない仕組みを持つことが強く要求される。この要求は安全システム (Safety system) により実現される。Fig. 1 は一般的な安全システムの構成である。安全システムは安全部 (Safety Board)、入力装置 (Input Devices)、センサ、スイッチ (Related Switch) で構成する。安全部は制御部 (Control) に対して直列に接続する。センサによりモーターに故障 (異常動作) が検出された時は制御部を経由せず、安全システムが電源を遮断しモーターを停止させる。また、安全関連機器 (Safety related equipment) を使用した入力装置から停止の要求があった場合も安全システムが電源を遮断しモーターを停止させる。そのため、安全システムには以下の機能が要求される。

- センサによるモーター動作の監視
- 安全関連機器による停止信号入力の監視
- モーターの停止

### 1.2 協働ロボットに要求される動作

1.1 で述べた安全システムにより非常停止 0 押し下後、電源を遮断しロボットを停止するようなシステムは容易に実現する。

協働ロボットが人と接触 (準静的接触および過渡的接触) 時、協働ロボットには力学的限界 (ロボットが人と接触する場合の圧力上限) が要求される[2]。協働ロボットは、この規格に準拠する動作をしなければならない。非常停止 0 押し下後電源遮断のみを持つ安全システムでは、自動運転で、この規格に準拠することは非常に困難である。

ロボット動作の正常と異常 (故障) はロボットの位置、速度、力 (トルク) の監視から判断する。監視中の位置、速度、力が閾値以内であれば正常、閾値外であれば異常 (故障) とする。故障と判断した場合、安全システムは人に危害を与える前に電源を遮断しロボットを停止させる。

一方で正常に動作している時、安全システムは減速、停止を適切に行う。例えば人がロボットと同じ作業エリアに入ってきた時、人とロボットが同じエリアで作業している時、ロボットが無人で動作している時のような状況に応じて適切な減速、停止を行う。

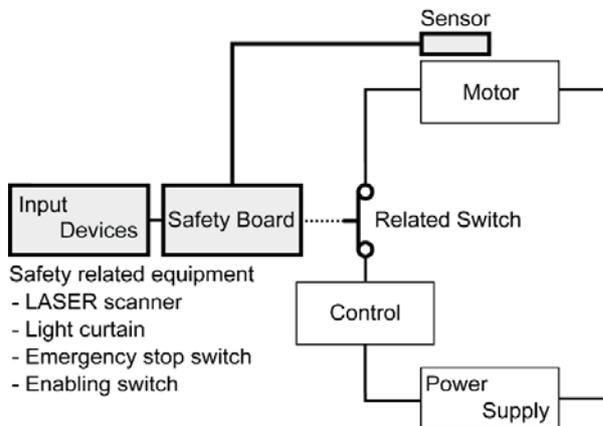


Fig. 1 Conventional Safety System

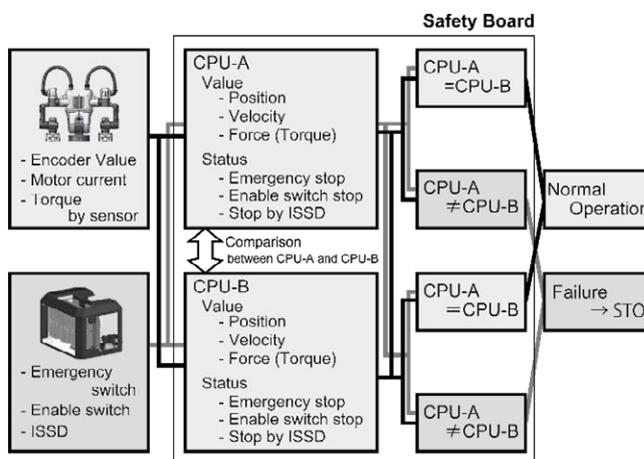


Fig. 2 Dual Safety Core

Table 1 Requirement of safety board

PFH *Note 1	$6.5 \times 10^{-7}$ [H <sup>-1</sup> ]
DC: Diagnostic Coverage	90% or more
SFF: Safe Failure Fraction	90% or more

[Note 1] Average frequency of dangerous per hour

Table 2 Safety Function

1	STO	Safe Torque OFF
2	SOS	Safe Operating Stop
3	SS1-r	Safe Stop 1 ramp monitored
4	SS2-r	Safe Stop 2 ramp monitored
5	Stop function by ISSD *Note 2	

[Note 2] Input signal switching device

正常と異常（故障）の判断に使用する閾値は一部を除き、固定値ではない。そのため位置、速度、力の閾値は常に演算する。1.1 で述べた機能に「位置・速度・力（トルク）の演算」を加えることにより、以下の動作を行う機能安全システムが実現する。

- サーボ OFF 無くロボット動作の停止 / 再開する
- 非協働動作から協働動作へ切り替わる（協働動作から非協働動作へ切り替わる）
- ロボットに異常な力が加わった時に停止する

### 1.3 Dual Safety Core

Fig. 1 に示した安全システムを構成する Safety Board は 1 枚の基板でロボットコントローラ内に実装される。この基板はロボット動作を制御するメイン基板やロボット動作を計算しモーターに電力を供給するアンプとは別に、独立したハードウェアで構成される。

Safety Board は協働ロボットを構成する部品の中で最も高い信頼性が要求される。この要求を実現するため、本開発では 2 つの CPU(CPU-A、CPU-B)による冗長構造を持つ Safety Board を開発し、同ハードウェアを用いた安全システムを Dual Safety Core (登録商標)とした。

Fig. 2 は Dual Safety Core である。Dual Safety Core はエンコーダ値、モーター電流値、センサ値からロボット各軸（関節）の位置（角度）、速度（角速度）、力（トルク）を計算する。現在開発中の Humanoid 型双腕協働ロボット

の場合、16 軸分のエンコーダ値、モーター電流値および複数の力センサ値から、各軸の位置、速度、力を演算する。これらは、同じエンコーダ値、モーター電流値、センサ値から同じ数式を用いて CPU 別 (CPU-A と CPU-B) に演算する。各結果を比較し、CPU-A と CPU-B の結果が一致する場合は正常 (Normal Operation)、不一致の場合は故障 (Failure) とする。正常の場合は動作を継続する。故障の場合はロボットを停止させる。Dual Safety Core ではこれらの演算および正常/故障判断を数ミリ秒毎、繰り返す。

Table 1 は Dual Safety Core の安全に関する仕様である。これらは ISO 13849-1:2016、IEC 61508-2:2010、IEC 61508-1~IEC 61508-7 で規定されている。PFH は故障確率である。一般的な CPU、メモリの故障確率は 1 個あたり  $1.0 \times 10^{-5}$  程である。これら CPU、メモリを使用して Safety Board を設計した場合、Table 1 に示した PFH の達成は非常に困難である。

しかしながら Fig. 2 に示す構造であれば故障確率:  $1.0 \times 10^{-5}$  程の部品を用いても、2 つの部品が同時に故障する確率 (理論値  $1.0 \times 10^{-10}$ ) として計算するため、Table 1 に示した PFH の達成が可能になる。

### 1.4 安全機能

Dual Safety Core は 16 の安全機能を持つ。Table 2 は 16 の安全機能から主な 5 つ選定した安全機能である。STO

(Servo Torque Off) と SOS (Safe Operating Stop) は停止機能である。STO はサーボ OFF で停止する。STO では動作再開は再度サーボ ON が必要になる。SOS はサーボ ON を維持して停止する。SOS での動作再開はサーボ ON 無しで実行する。SS1-r は STO で停止するための減速を行う機能である。SS2-r は SOS で停止するための減速を行う機能である。Stop function by ISSD はセーフティレーザー スキャナやライトカーテン等の外部入力機器の信号入力機能である。

通常の非常停止では鉤押下後直接電源遮断を行う。一方で、Table 2 に示す機能を組合せることにより非常停止鉤押下後、閾値監視を伴う減速を行い、SOS で停止、減速が閾値外の場合は即電源遮断に切り替わるようなロボットの動作が可能となる。

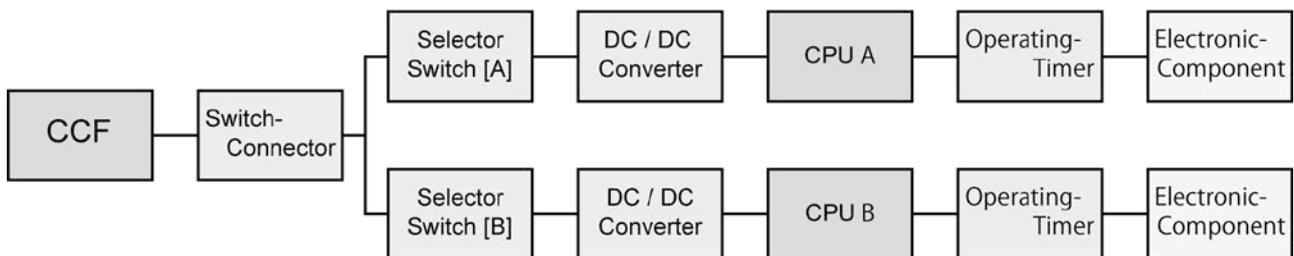


Fig. 3 Reliability Block Diagram of STO

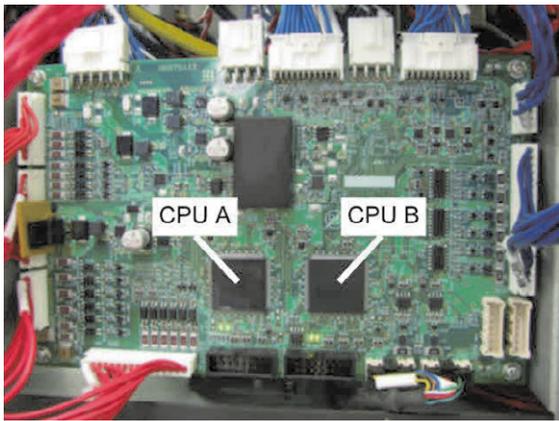


Fig. 4 Safety Board of Dual Safety Core

## 2. Dual Safety Core の設計

### 2.1 システムの安全設計

Table 1よりDC(安全側故障率)は 90%以上、SFF(危険側故障検出率)は 90%以上である。これらはシステム全体で検出できない危険側故障率が 1%未満であることを示している。

Dual Safety Core のシステム設計では始めにシステム全体の FMEA を実施した。具体的にはシステムを構成する主部品 70 種類を選定した。次に、これらの主部品が故障する原因(過電圧、過電流、ショート、断線、固着等)を部品毎に調査した。次に、これら原因により生じる故障の現象を想定し故障の検出方法を分類した。結果として想定される主な部品の全故障を検出する診断番号(エラー番号)を定義した。故障分析を設計段階に行うことにより、検出できない故障がないシステムを設計した。選定した主部品は 70 種類に及び 1 種類の部品で複数の故障原因があるため故障分析対象は 398 項目となった。

### 2.2 ハードウェアの安全設計

Dual Safety Core のハードウェアは Safety Board である。Safety Board の安全設計は高い信頼性を証明するため構成部品決定後 PFH と DC を計算した。

Dual Safety Core の設計では 12 種類の信頼性ブロック図を作成した。Fig.3はTable 2 に示した STO の信頼性ブロック図である。このブロック図は12のブロックで構成している。

PFH と DC の計算は信頼性ブロック図毎に行う。Dual Safety Core は Safety Board 上に 2 つの CPU を持つため、Selector Switch 以降は 2 系統構造となっている。

PFH 計算は Safety Board 全部品の故障確率を調査し、これらを積算する。ブロック毎(Figure 3 の CPU-A 等)の故障確率を積算後、全ブロックの故障確率を計算し、信頼性ブロック図毎の故障確率を確定する。12 の信頼性ブロック図別に故障確率を比較し、ワーストケースの故障確率を安全システムの PFH とする。

DCの計算は全部品の安全側故障検出率を調査し、これ

らの平均を計算する。信頼性ブロック図毎に平均値を計算後、12種類の信頼性ブロック図別に安全側故障検出率を比較し、ワーストケースの安全側故障検出率を安全システムの DC とする。

Fig. 3のブロック数は12、1ブロックは複数部品で構成するため同図部品総数は約500である。Dual Safety Core 全体の部品総数は約 8,000である。

Fig. 4 は Safety Board である。Fig. 4 のように CPU-A と CPU-B、2つのCPUが1つの基板内に実装されている。PFH の計算と Fig. 4 の結果より Table 1 に従った高い信頼性を実現する Safety Board を設計した。

### 2.3 ソフトウェアの安全設計

Dual Safety Core のソフトウェア設計では危険側検出率 1%以下を実現するため、ソフトウェアを構成するブロック単位で故障が検出されるように設計した。そして想定される全故障の検出評価を行った。この評価では 2.1 項で述べた診断番号(エラー番号)による故障が検出可否を評価した。故障検出評価はソフトウェアのコーディング前に実施した。

ソフトウェアコーディング後はソフトウェアを構成する関数毎に「2 回実行する」「省略する」「誤った数値を入力する」等の故障をソフトウェア上に発生させ、同故障が診断番号で検出されるようにソフトウェアの検証を行った。

Dual Safety Core の全ブロック数は76、ブロック毎に複数種の故障を発生させるため、200 以上の故障検出評価を行った。この評価の結果より、Dual Safety Core 上で動作するソフトウェアを構成する全関数は故障が発生しても2.1 項で述べた診断番号で故障が検出されることを確認した。そして同結果より、Table 1 に示した仕様を満足するソフトウェアを実現した。

## 3. 協働ロボット動作

Fig. 5は Dual Safety Core により実現する協働ロボットの動作である。Table 3は安全監視とロボット動作の関係である。Fig. 5 では 2 台のセンサ(セーフティレーザースキャナやライトカーテン)により安全距離

(Safety distance) エリアを定めている。人が安全距離エリア外にいる時、ロボットは非協働動作をする。非協働動作ではロボットの位置が監視される。一方、協働動作では位置、速度、力(トルク)が監視される。Fig. 5 (a) は人が安全距離エリア内に入った状態を示した図である。ロボットは非協働から協働動作へ遷移する。Fig. 5 (a) は SS1-r、SS2-rいずれも実施できる。SS1-r、SS2-r の切替はパラメータ設定で行う。

Fig. 5 (b) は人が協働エリア(Collaborative area)内に入った状態を示した図である。ロボットと人は同じエリア内で作業する。SS1-r を経て Fig. 5 (b) となった場合、ロボットは協働動作を続ける。

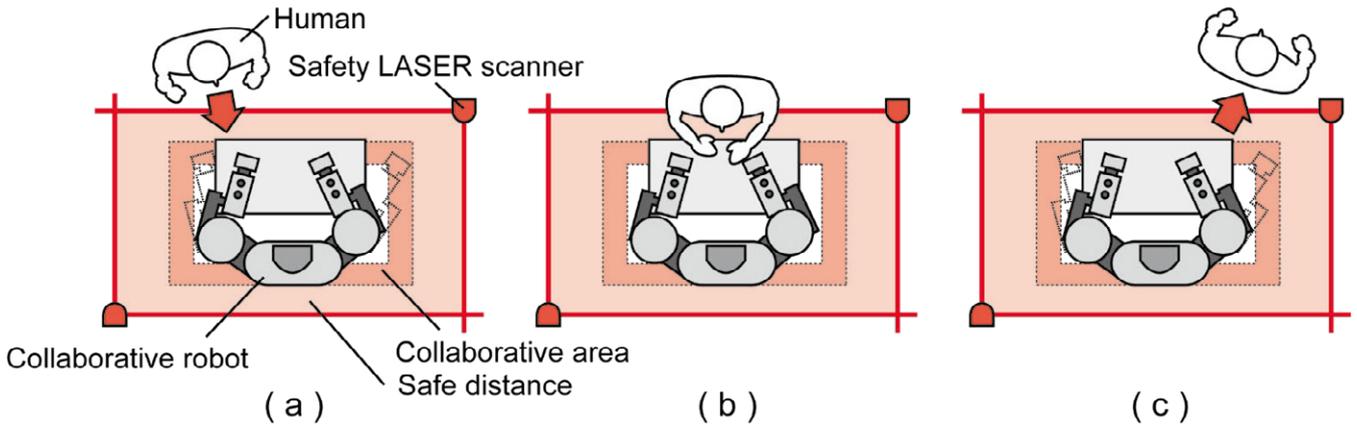


Fig. 5 Safety Motion of collaborative robot using Dual Safety Core

Table 3 Relationship between safety monitoring and robot motion

	( a )	( b )	( c )
SS1-r	Motion with non-collaborative to collaborative condition by SS1-r	Motion within collaborative condition speed	Motion with collaborative to non-collaborative condition according to SS1-r
SS2-r	Motion with non-collaborative to collaborative condition by SS2-r	SOS	Motion with Self-recovery. Motion with collaborative to non-collaborative

この時、人がロボットに接触し、閾値以上の力が加わった場合、ロボットはSTOで停止する。SS2-rを経てFig. 5 (b)となった場合、ロボットはSOSで停止する。この時、人がロボットに接触し、閾値以上の位置が変化した場合、ロボットはSTOで停止する。

Fig. 5 (c) は人が安全距離エリア外に出る状態を示した図である。Fig. 5 (b) でロボットが協働動作を行っている場合、ロボットは協働動作から非協働動作へ遷移する。Fig. 5 (b) でロボットがSOSで停止している場合、ロボットは停止から動作へ自己復帰した後、協働動作から非協働動作へ遷移する。

Fig. 5 と Table 3 に示した動作を実現することにより、ロボットは協働ロボットになる。協働ロボットは人との位置により非協働動作から協働動作、協働動作から非協働動作へ自動で遷移する。協働動作は[2]で規定される力以内で動作するため、人に重篤な危害を加えないことを担保する。

ロボットを装置に組み込む際、マシナリー規格をそのまま使用できる。Dual Safety Core を搭載したロボットは人と同じエリア内で作業を行うための安全機能を備え、Fig. 5 に示すような動作を実現する。

これらより、協働ロボットでは安全柵が不要になる。安全柵が必要な産業用ロボットの設置面積と比較すると、協働ロボットの設置面積は大幅に小さくなり、生産効率への寄与が期待できる。

### 参考文献

- [1] ISO 10218-1, Robot and robotic devices – Safety requirements for industrial robots – Part1: Robots (2011), pp.15-16
- [2] ISO/TS 15066, Robot and robotic devices – Collaborative robots (2016), pp.21-24

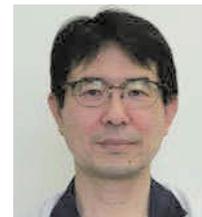
## 4. 結言

協働ロボット用安全システム: Dual Safety Core を開発した。

Dual Safety Core に搭載する Safety Board は ISO 13849-1: 2023 に準拠した PFH、IEC 61508-2:2010、IEC 61508-3:2010 に準拠した DC、SFF を有する高い信頼性を実現した。安全システムは機能安全規格 IEC 62061:2021 に適合しており、システムインテグレータ様が双腕協働ロ



制御機械カンパニー  
ロボット技術部  
ロボット制御技術課  
勝又和浩



制御機械カンパニー  
ロボット技術部  
ロボット制御技術課  
石橋健太郎



制御機械カンパニー  
ロボット技術部  
ロボット制御技術課  
松永渉

# 精密加工機械部品の高効率生産プロセス開発

杉山直希 長田昌彦 佐々木麻男 藤本亮輔

レンズ、精密金型、反射ミラーを研削、切削し精密な加工を行うには、加工機械に高い運動精度、位置決め精度、温度制御が要求される。当社の精密加工機械には構造がシンプルで高い剛性が得られる V-V ころがり案内を採用しており、これまでに微小うねりを最小化するためニードル精度の向上、案内面の仕上げ方法、ニードルの移動体への導入・排出部の形状などを追求している。この精密加工機の主要部品の製造は自社工場にて行っており、本稿では当社の精密加工機 ULG シリーズの V-V ころがり案内面仕上げに関わる鋳物素材開発から研削加工の自動化による生産性を改善した新しいプロセスについて報告する。

## 1. 緒言

近年、映像情報機器の大容量化、高精細化のニーズが高まり、それに伴い光学部品のレンズやレンズ用金型の精密加工においてもナノメートルレンジの高い精度が要求されている。当社の精密加工機においては、高い加工精度を確保するために高い運動精度、位置決め精度、温度制御によって実現しており、更なる精度向上を目指している。

この精密加工機の構造はシンプルで高い剛性が得られる V-V ころがり案内を採用しており、微小うねりを最小化するためニードル精度の向上、案内面の仕上げ方法、ニードルの移動体への導入・排出部の形状などを追求している<sup>1)</sup>。

生産センターでは当社製品の鋳物部品を社内と外部のサプライヤに生産を振り分けて、状況に応じた最適な QCD バランスで供給することを目指している。V-V ころがり案内を加工するベッドは自社製の鋳物で、精密加工機の土台となる部品である。この案内の仕上げ面には、硬さ、加工精度、面粗さの高い仕様要求があり、これらを満たしつつ生産性を高めるという課題がある。しかしながら従来の素材、加工方法では現状からの増産は困難である。

生産のネックとなっているのは「キサゲによるすり合わせ工程」である。キサゲ作業は工作機械の摺動面など高精度な平面精度が要求される面に対して加工面形状をすり合わせにより把握し、高い部分を「キサゲ」とよばれるノミ状の刃物による所望の仕上げ面を得ていく作業である<sup>2)</sup>。キサゲ作業は基準となる「マスター」の面と加工面をすり合わせ、接触している凸部である「当たり」を削る<sup>2)</sup>作業で、鋳物の硬さ不均一や前加工の加工精度が作業時間に大きく影響する。そこで、鋳物素材の改質、鋳造方案変更による硬さの均一化、キサゲ作業前工程の加工工法変更による加工精度向上と自動化により、鋳物から加工までの生産効率を改善したので報告する。

## 2. 評価方法

当社の精密加工機 ULG のベッドは自社製鋳物で、2 条の V-V ころがり案内で構成されており、「鋳物製作」、「機械加工（マシニング加工）（プレーナ加工）」、「手仕上げ（キサゲ作業）（すり合わせ）」の工程で製造される。素材の改質による V 型摺動面の硬さ均一化と機械加工工程の工法変更

による効率化を実施した。

### 2.1 鋳物材質の改善

ULG のベッドには従来から硬さと振動減衰性能を有する FC350 (JISG5501 ISO185) を採用している。C、Si、Mn、P、S の他に硬さを安定化させるため Cr、Cu、Sn を添加している。素材の改質は次のように実施した。一般的に凝固時の冷却速度が速くなると硬さが増加するが、Cr、Sn 添加は硬さに対する冷却速度の影響を大きくする。そのため、局所的な硬さの上昇を抑え必要な硬さを得るための最小量を添加した。Cu は Mn を共析セメントタイト中に濃化<sup>3)</sup>させパーライト安定化機能を補助することから硬さを確保するために Mn 量を増加させ、Cu を適量添加した。さらに均一な硬さを得るために、Fe-Si 系接種剤を取鍋での置き注ぎ法に加えて、掛け堰内に設置した接種剤によって後期接種を行い、結晶粒を微細化させた。

硬さのばらつきは冷却速度の影響を受け、製品の外部、内部の位置関係や肉厚差によって生じる。硬さの不均一を改善するため、溶湯充填完了時の温度差が最小になるように鋳造シミュレーション (ADSTEFAN 日立制御ソリューションズ製) を用いて冷し金の設置、湯道や堰の形状と配置 (溶湯の流路) 等の鋳造方案を検討した。Fig.1 には従来の鋳造方案と、冷却温度制御を行った鋳造方案の注湯完了から 5000 秒後の温度分布を示す。

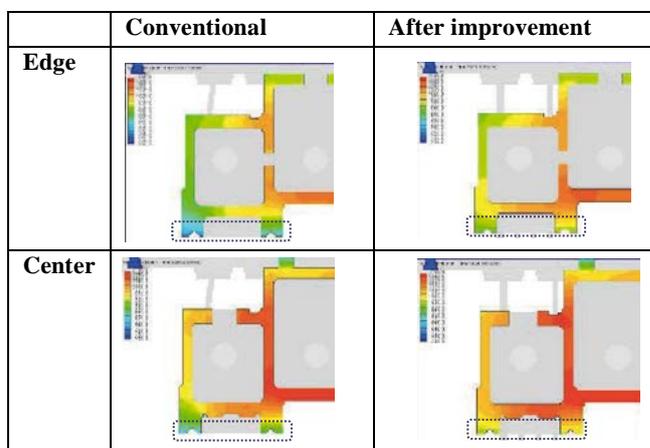


Fig.1 冷却制御による温度分布 (5000s 後)

硬さの均一性が要求される V 型摺動面の温度分布 (図中

点線枠内)を比較すると、従来の鋳造方案では端部と中央部で800~1000℃の温度分布となり、その差異は約200℃と大きい。一方、冷却温度制御を行った鋳造方案では端部と中央部で940~990℃の温度分布となり、その差異は約50℃と小さくなっている。各鋳造方案によって製造したベッドのV型摺動面の長手方向、深さ方向の硬さ(HB)を40点(Fig.2)測定し、均一性は標準偏差で評価を行った。

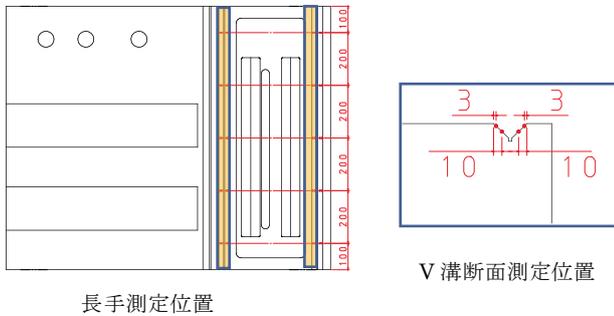


Fig.2 硬さ測定位置

## 2.2 加工方法の改善

V型摺動面は機械精度に直結する要素であるため、最終精度はキサゲによるすり合わせ作業に依存している。この工程は熟練工による超精密な手作業で長時間を要するため、製造リードタイムを長期化させる要因となっている。そこで、前工程の機械加工精度を向上させることで手仕上げ時間の短縮を試みた。機械加工は従来のプレーナ加工から研削加工への工法変更で精度を向上させ、さらに研削加工も効率化させた。研削加工実験は「研削加工精度の確認」、「研削加工の量産化」の2段階で実施、評価した。

### 2.2.1 研削加工精度の確認

研削加工精度はテストピースを製作し評価した。テストピースとV型摺動面の評価位置(ピッチ、角度、傾き)をFig.3に示す。テストピースは実際のULGベッドのV型摺動面形状を設けた部分モデルだが、冷却速度については冷却温度制御を行ったフルモデルと同等の温度分布になるようにシミュレーションを用いて鋳造方案を調整して製造した。なお、溶湯の化学成分、接種処理もフルモデルと同条件とした。

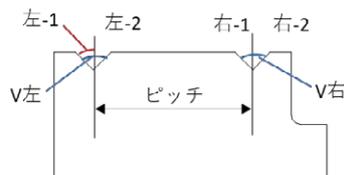


Fig.3 V型摺動面を再現したテストピース

このテストピースに対し研削加工機にて回転砥石頭(カービック5°割出)を各面毎に45°回転させ、1面ずつ研

削加工を実施した。加工後、三次元測定機(MMZ-M163012 Carl Zeiss製)にて数値評価を行った。

### 2.2.2 研削加工の量産化

「研削加工精度の確認」によるキサゲによるすり合わせ作業時間削減の実現性を確認した後、安定した精度確保と量産化の対応を図った。対象となる部品を、ベッドと同じくV型摺動面を有するテーブル等の合計4点の部品へと拡大し、ULG1台分のV型摺動面を有する部品を1度に研削加工できる専用治具を検討した。(Fig.4)

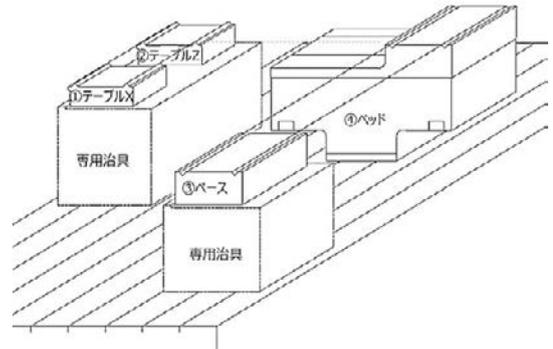


Fig.4 専用治具の外観図

## 3. 結果と考察

### 3.1 鋳物材質改善の効果と考察

硬さは従来の化学成分と鋳造方案の場合、一部にキサゲ作業の妨げとなる硬い金属組織が含まれ、硬さの標準偏差は3.2となった。化学成分を最適化し、溶湯流路、冷し金を変更した鋳造方案で鋳造した結果、標準偏差は0.5となり、機械仕様を満たす硬さで安定した均一性を実現した。なお、ULGの鋳物素材の機械的性質を保証する別鋳込み試験片(JISG5501)で引張強さは350~400MPa、硬さは240~260HBである。

ここで、Fig.2のULGベッドのシミュレーション温度分布から金属組織を推測すると、従来の鋳造方案のベッド端部では概ね1000℃以下で固体となっている。中央部の内部では1150℃付近で固相と液相が混在していると推測される。このようにULGのベッドは製品の大きさから適切な冷却温度制御を行わないと中央部が端部に比べて冷却が遅くなり、同じ製品内でも温度差が生じ易いと考えられる。この温度の分布が硬さの分布に反映され硬さの差(不均一)として製品に影響する。

Fig.5には従来の鋳造方案と冷却温度制御した鋳造方案の注湯完了から1000秒後の温度分布を示す。V型摺動面の温度について溶湯が充填された初期の冷却状態を各鋳造方案で比較した(図中点線枠)。従来の鋳造方案では摺動面の最表面は800℃以下に急冷されている。1000秒後のV型摺動面は、急冷によって部分的に初析セメンタイトが晶出した硬い金属組織(レデブライト)になっていると推測

される。また、最表面部は急冷されているが、冷却が遅い内部の温度が影響し急冷組織は一定の深さで分布せず、共晶凝固時の組織のばらつきに加えて、共析凝固時のパーライト組織のラメラ層間隔にも影響して組織のばらつきはより複雑なものになる。その結果、摺動面に硬さのばらつきが生じたと推察される。温度制御を行った鋳造方案のV型摺動面の温度は従来の鋳造方案に比べて温度が高く、1000℃付近であることから冷却速度が遅くなり、初析セメントタイトの形成が抑制され、局所的な硬さの上昇も無くなったと推測される。

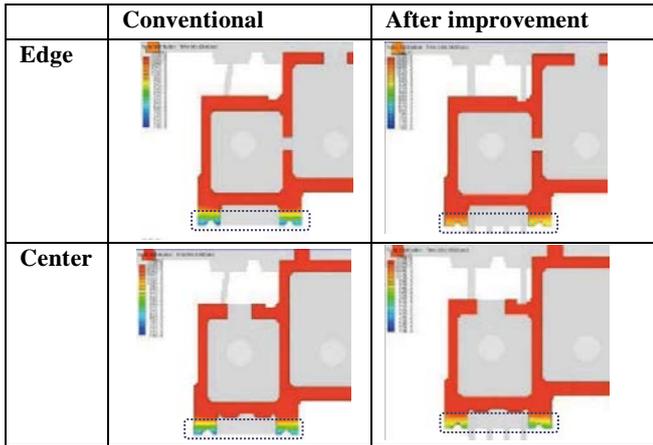


Fig.5 冷却制御による温度分布(1000s 後)

### 3.2 加工方法の改善結果

以下に加工方法の改善を行った結果を記載する。

#### 3.2.1 研削加工精度改善の効果と考察

評価結果を Table 1 に示す。左-1、左-2 については傾きが発生し、V角度右が大きくマイナスしている。総じて角度のばらつきが大きいと評価する事が出来る。この角度誤差により V 型摺動面に±5.0μm 程度の隙間が発生し、当たり付けにて良好な当たりを得る事が出来ない。角度誤差の原因として、巡回砥石頭がストロークした際のピッチング挙動が影響したと考えられる。

Table1 評価結果

項目	部位	期待値	結果
片側角度	左-1	45°	44.9930°
片側角度	左-2	45°	45.0098°
V角度左	V左	90°	90.0028°
片側角度	右-1	45°	44.9880°
片側角度	右-2	45°	44.9889°
V角度右	V右	90°	89.9776°
ピッチ	—	350±3μm	±1.5μm

加工機械の垂直面内真直度を測定した結果、約 3500mm のストローク間で M 字型の挙動を示し、最大 52μm の高

低差が確認された。巡回砥石頭の傾きに換算すると、最大で±150μm/m の傾きが発生することになる。この真直精度は、研削頭がストロークした際に生じる、自重によるたわみおよびねじれを相殺するための逆カーブの傾向付として設けられた精度<sup>4)</sup>であるが、本研削加工においては角度誤差の要因となっていることが明らかになった。

そこで機械精度修正を実施し、この傾きを抑制した。修正前後の結果を Fig.6 に示す。精度修正後のテスト研削を実施した結果、角度誤差によるV型摺動面の隙間を±1.8μm まで改善する事が可能になった。

改善後、テストピースで相手マスターと当たり付けを行いピッチと角度精度を確認した結果、全面良好な当たり面が得られ、キサゲ作業の時間削減が可能と評価した。

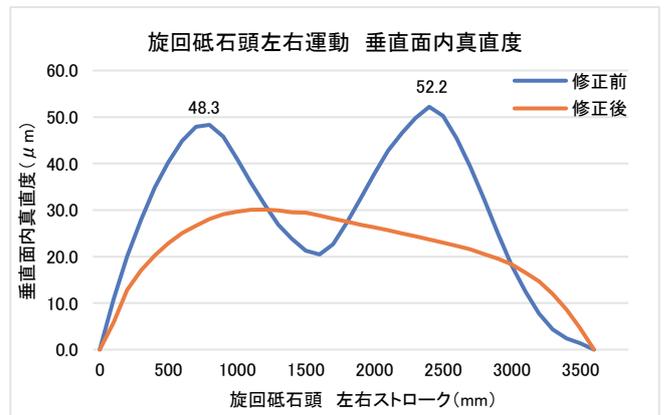


Fig.6 巡回砥石頭精度

#### 3.2.2 研削加工量産化効果と考察

専用治具化により研削ポジションが定置化され、段取り方法のばらつきによる精度低下の抑制、4つの部品の自動研削による高效率化が期待される。Fig.7 に専用治具にワークを設置した外観写真を示す。



Fig.7 専用治具の外観写真

通常の平面研削作業においては作業パレット1面につき1部品の研削加工が一般的であるが、専用治具化によって4部品の同時加工が可能になった。加えてタッチセンサ機能・自動砥石交換機能(AWC)の活用、NCプログラム連結機能の開発により、導入前は約20時間かかっていた作業が約10時間に短縮された。さらに有人作業から連続自動運転化の実現で、夜間の無人運転が可能となった。

また、ピッチ精度については毎回同じポジションでの加工（定値化）と段取り締め付け力の一定化が可能となり、要求精度の $\pm 3\mu\text{m}$ を安定して生産する事が可能となった。

### 3.3 改善効果の検証

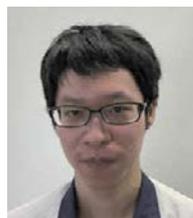
鋳物の材質改善と研削加工精度向上、研削加工量産化による改善効果として、キサゲによるすり合わせ作業の生産性が改善し、生産効率は従来比で20%増加した。また、当該研削加工機の設備稼働率も従来比で15%増加し、大幅な向上を実現した。

## 4. 結論

- 1) ULG ベッドの鋳物化学成分、鋳造方案の調整でV型摺動面の硬さ均一化を実現し、材質改善によるキサゲ作業の停滞を抑制できた。
- 2) 専用治具、タッチセンサ機能、自動砥石交換機能、NCプログラム連結によって4部品の同時研削加工が可能となり、要求精度の $\pm 3\mu\text{m}$ を満たしつつ、無人運転で加工時間を20時間から10時間に半減した。
- 3) 鋳造から加工まで一貫した生産技術を改善したことで生産のネックとなっていたキサゲ作業時間が短縮され、生産効率は従来比で20%増加した。

### 参考文献

- 1) 田中克敏：日本機械学会論文集（C編）75（2009）757
- 2) 小野里正彦：計測と制御 37（1998）7
- 3) 平塚貞人, 麻生節夫, 丸山徹：鋳造工学 89（2017）10
- 4) 相良誠：日本機械学会誌 107(2004)1024



生産センター  
工機生技部  
生産技術課  
杉山 直希



生産センター  
工機生技部  
生産技術課  
佐々木 麻男



生産センター  
工機生技部  
生産技術課  
長田 昌彦



生産センター  
工機生技部  
生産技術課  
藤本 亮輔

# ダイカストマシン—タル制御装置 TOSCAST-999

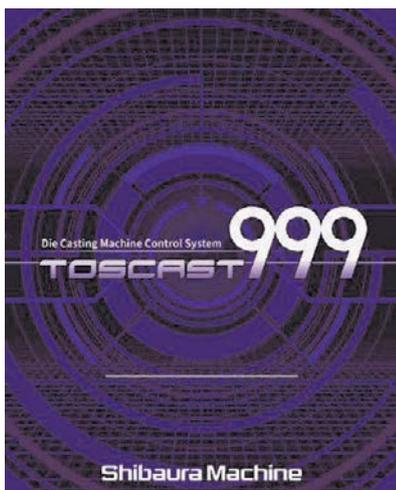


Fig. 1 ダイカストマシンと TOSCAST-999 イメージ

## 1. 概要

昨今のダイカスト業界では、従来の要求品質向上以外にも、CO<sub>2</sub>削減や国内外での人材定着性が悪化傾向にある等の様々な課題が存在する。

その為、ダイカストマシンに求められるのは性能向上だけでなく、不良率を下げる・生産の効率化等によるCO<sub>2</sub>削減や、オペレータの練度依存を少なくしていく事を併せて求められている。

それらのニーズに応えるため、今回新たなコントローラ TOSCAST-999(Fig.1)を開発したので紹介する。

## 2. 特徴

### 2.1 大画面を活かした GUI

上下 2 画面構成で表示をカスタマイズできる GUI(Graphical User Interface)とし、表示の情報量が増える・画面切換(操作)回数を減らす事でユーザビリティが向上しているほか、全体化表示を組み合わせる事も可能となっている。(Fig.2)



Fig. 2 画面構成+全体化表示

### 2.2 画面構成の見直し

TOSCAST 初代から機能を引き継ぎ、現在の TOSCAST-999 まで開発を続けてきた。技術発展により複雑な制御が可能となった事による条件設定の複雑化、仕様を引き継いでいる事による従来機能との共存など、これらの都合により現在の GUI ではユーザへ難解に感じさせてしまう状況となっている。

TOSCAST-999 ではこれをユーザ目線で見直し、画面構成は装置毎に表示項目を再配置する事で、ユーザは直感的かつスムーズな操作が行えるように改善を行った。(Fig.3)

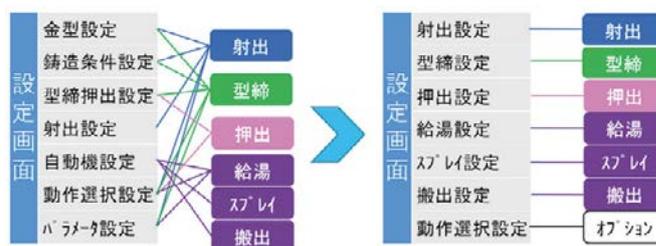


Fig. 3 画面構成の見直し

### 2.3 条件設定画面

前項でも触れたが、動作を細かくカスタマイズできるようになっている反面、条件設定が複雑である。これ自体はユーザの考えを動作に反映させる意味では重要であるが、そこまで要求が無いユーザにとってはただ難解なだけになってしまうケースも存在する。

また、ダイカスト業界独自の用語や当社独自の一般的な名称も相まって、ユーザの"慣れ"が必要である。解決方策として、設定画面のデザイン改善を行った。入力項目の名称だけでは難解であっても、動作のイメージができるように、対応した項目がどの動作に対応した項目なのか、デザインで表現した。これにより、条件設定の精度を上げる事やエンジニアの"慣れ"依存の改善になると考えている。(Fig.4)

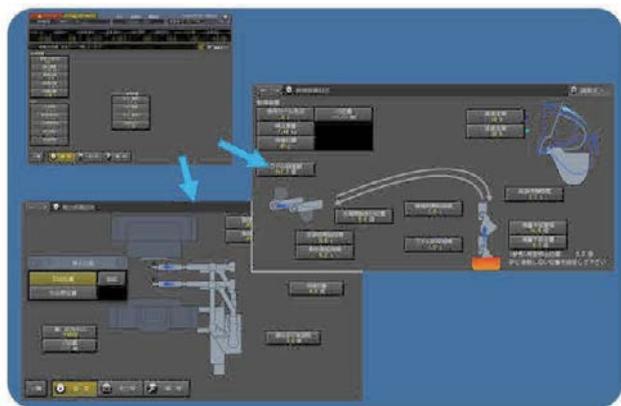


Fig. 4 条件設定画面のデザイン変更

### 2.4 ドキュメント閲覧機能

更なるユーザビリティ向上のため、画面上で取扱説明書等のドキュメント閲覧機能を追加した。これに併せて取扱説明書のボリュームアップを行い、ユーザがスムーズにマシン運用ができる工夫を盛り込んでいる。

更に、「ヘルプ機能」としてヘルプボタンからドキュメントの対象ページクイックアクセスできる機能により、問題解決までのプロセス短縮が可能となった。(Fig.5)

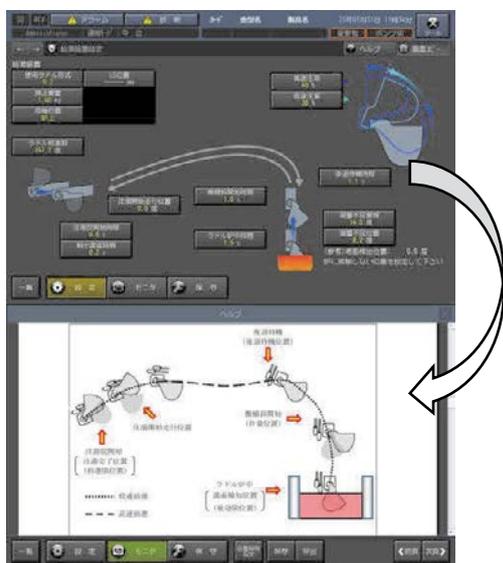


Fig. 5 ヘルプ機能

### 2.5 射出波形(品質データ)の拡張

鑄造技術の発展に伴い、「品質向上」「管理・見える化」を目的としてユーザ各社で様々な施策を行っている。製品の品質は材料や金型等の見えづらい温度変化による影響も大きく、「より厳密に管理する」方向であるように見受けられる。代表的であるのは金型内を真空にして品質を高める装置で、その真空度を品質データとして扱うものである。最近では一般的になっているのに加え、複数個所の真空度を計測する等、ユーザからの要求レベルが年々高まってきている。

従来は基本波形3本に加え、オプション2系統までの対応だったが、ユーザ要求が高まってきている事により、波形本数が不足するケースが出てきた。そのため、TOSCAST-999ではユーザの要求に答えられるよう、オプション6系統を含む20本まで拡張した。(Fig.6)

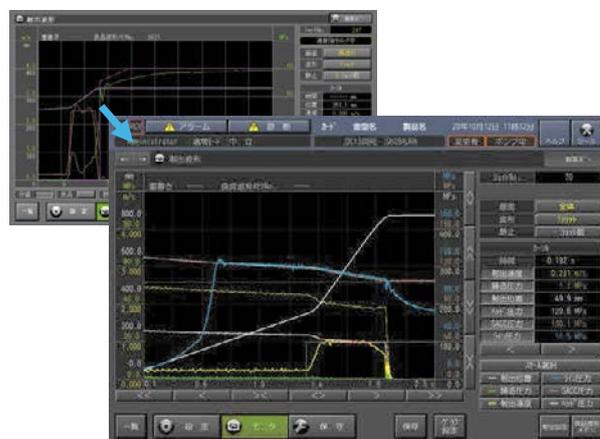


Fig. 6 波形機能拡張

## 3. おわりに

現時点で TOSCAST-999 の出荷数はまだ少なく、ユーザの評価は数社のみであるが、良い評価を頂いている。

今後は鑄造条件サポート機能や手軽に TOSCAST-999 と連動できるサーモグラフィ機能等、ユーザの生産現場に直接メリットがある機能追加を予定している。

これからも大手メーカー向けだけでなく、その他多くの中小企業へ向けた機能作りという観点も意識し、更なる機能アップを行い、ダイカスト業界へ訴求していきたい。

# 超大型電動射出成形機 EC3000SXIII



## 1. 概要

電動式射出成形機 EC-SXIII シリーズに超大型クラス 3000ton を新たに投入した。これにより小型 50ton から超大型 3000ton までのラインアップが完成した。

自動車の電動シフトが加速する昨今、EC3000SXIII は車体軽量化に伴う大型樹脂部品の需要拡大に対応する。また、EC3000SXIII のハイサイクル成形と省エネ性能は、お客様の\* LCA 評価向上に貢献する環境調和型設備である。

\*LCA : Life Cycle Assessment

## 2. 特長

EC3000SXIII は「電動トグル機 No.1 の高生産性」をコンセプトに掲げ開発を行った。主要仕様数値を、Table 1 に示す。以下に 6 つの特長を紹介する。

### ① 業界最速ドライサイクル

2009 年 EC-SX シリーズから採用している移動ダイプレートのリニアガイド支持構造を EC3000SXIII も継承している。リニアガイドの特長である「低い摺動抵抗」「直進精度の長期維持」は、移動ダイプレートと金型の重量が数十トンにもおよぶ超大型機では、その恩恵は大きい。これに当社独自のダイナミック加減速制御によるサーボモータ駆動を組み合わせることで、高速化と高精度を両立させている。生産性の向上(成形サイクルタイムの短縮)には、金型を開閉する時間(ドライサイクル)の短縮が直結する。EC3000SXIII のドライサイクルは 7.2s で業界最速である。(Fig.1) 他社電動トグル機と比較して 1.2s(14%)速く、ハイサイクル成形に対する大きなアドバンテージである。

### ② 高可塑化能力

自動車用大型樹脂部品のハイサイクルは 30~40s で行われるが、そのなかで計量時間の短縮も重要となる。型開閉と樹脂冷却工程中に計量工程(可塑化)が終わらないと、オーバーした時間はサイクルタイム増となるからである。そこで、オレフィン系樹脂のさらなる高可塑化を目指した専用スクリュ ESB を新開発した。(Fig.2) スクリュ高回転化もあわせ、可塑化能力 1050kg/h(φ150)を達成し、従来スクリュ(SDB)対し 46%向上した。

Table 1 主要仕様数値

型締装置		EC3000SXIII	
型締力	kN	29400	
タイバ間隔(H×V)	mm	2110×1810	
ダイプレート寸法(H×V)	mm	3000×2350	
型開閉ストローク	mm	1800	
デーライト	mm	3700	
最小型厚~最大型厚	mm	1000~1900	
射出装置		i215AM	i240AM
スクリュ径	mm	140	150
理論射出体積	cm <sup>3</sup>	11840	13600
最大射出圧 / 保圧	MPa	180 / 150	175 / 150
射出速度	mm/s	130	130
スクリュ回転速度	min <sup>-1</sup>	114	106
スクリュトルク	N・m	12700	17300
可塑化能力(PP+タルク)	kg/h	940	1050

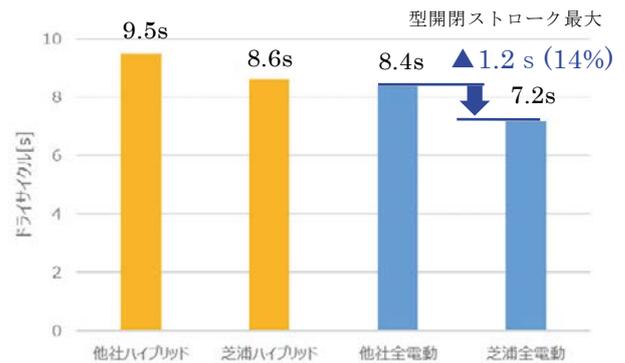


Fig. 1 ドライサイクル比較



Fig. 2 高可塑化 ESB スクリュ

これは樹脂 3kg の計量時間 4.7s 短縮に相当する。

自動車用内装部品では、無色の樹脂ペレットに着色材(マスタバッチ)を混合した成形が行われている。その色分散を良くするため、マスタバッチと樹脂を混練する構造をノズル内部に持つミキシングノズルがある。ミキシングノズルは色分散性に優れているが、樹脂流路の圧力損失により充填圧力が高くなることや、樹脂を交換する際に、内部の古い樹脂を置換しにくいデメリットもある。そこで、分散性能はそのままに、充填圧力や色替性を改善させたクロスリング(オプション)を開発した。色分散を比較した写真

を Fig.3 に示す。計量時の背圧 UP を併用することでミキシングノズルと同等の色分散性能を確認した。クロスリングはミキシングノズルに比べて充填圧力損失が 57%低下する。これは消費電力の抑制につながり、色替性の改善は樹脂交換時の廃棄樹脂削減が期待できる。

③金型交換時間の短縮

多品種少量生産では頻繁に金型を交換する必要がある。型厚の異なる金型に交換する際、トグル式型締装置の構造上 型厚調整時間が長くなる弱点があった。この弱点克服として、リンクハウジングのリニアガイド支持とサーボモータ駆動を採用することで、型厚調整時の移動速度を5倍速化した。型厚差が大きいほど改善効果は大きく、型厚差 700mm の場合、4分 34 秒(274s)短縮となる。(Fig.4)

また、コントローラ INJECTVISOR V70 に標準装備されている「INDUSTROL」は生産完了後の原料供給停止、ノズル後退、自動ページ(色替)、金型交換、成形条件変更、金型昇温、生産開始といった一連の工程を自動化する機能である。(Fig.5)これまでは特殊動作回路を成形機に追加する必要があり、費用や時間がかかっていた。この「INDUSTROL」は画面上の動作アイコンを順番に並べていくだけで、連動動作が設定できるため、お客様が段取作業の効率化を手軽に試すことができる。

④ダウンタイム短縮

EC3000SXIIIは複数の大容量サーボモータで駆動しているが、その動力源であるサーボンプもそれに応じた容量が必要になる。それらを大型アンプ1つではなく、複数の小型アンプを組み合わせる同期駆動する方式を EC3000SXIIIでは採用している。(Fig.6) 小型アンプは小型射出成形機にも採用していることから入手性も良く、突発的なアンプ故障によるダウンタイムも比較的短くできる。また、比較的安価な小型アンプに種類を統一することで、お客様が保守部品を準備しやすいメリットもある。

⑤省スペース

同クラスの電動トグル機の中では最小の機械全長(16.8m スクリュ径φ150)、全幅(4.6m)とした省スペース設計としており、工場レイアウトの自由度を向上させている。機械全長が優位な構造である複合型締装置のハイブリッド機 ED3000 と比較しても、機械全長で1mの差とコンパクトな設備となっている。

⑥クリーン環境と保守性の向上

移動ダイプレートをリニアガイドで支持することで、タイバブシュが不要になった。(Fig.7) タイバにグリス付着が無くなることで、金型や成形品へのグリスの付着が無くなることや金型点検等で作業者が成形機内部に入り込むことが多い生産現場のクリーン化に効果的である。さらに従来のスベリイタ支持では摺動部の摩耗による経年変化が

ダイプレートの平行度不良につながるため、金型へのダメージが懸念されるが、リニアガイド支持は経年変化が無いため、機械の保守性を各段に向上させた。

3. おわりに

SDGs で掲げる低炭素社会の実現に向け、射出成形の高生産性と省エネでお客様に貢献できる EC3000SXIIIを開発した。今後も世の中のニーズに応じていける射出成形機の開発を行なっていく所存である。

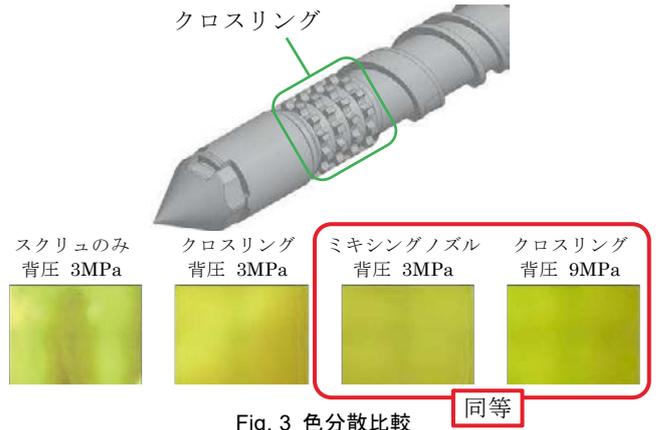


Fig. 3 色分散比較

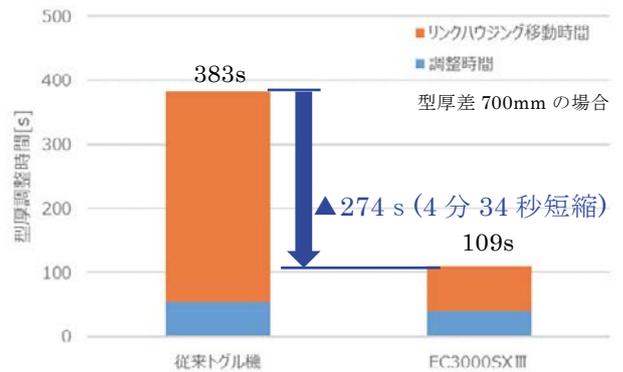


Fig. 4 型厚調整時間比較



Fig. 5 INDUSTROL 画面

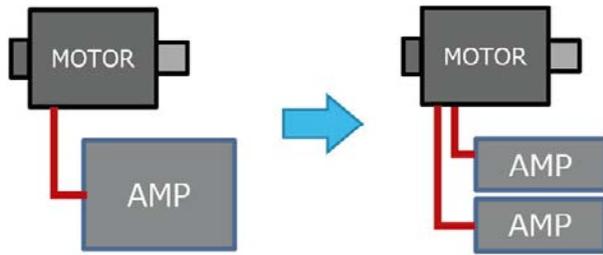


Fig. 6 サーボモーター・アンプ構成

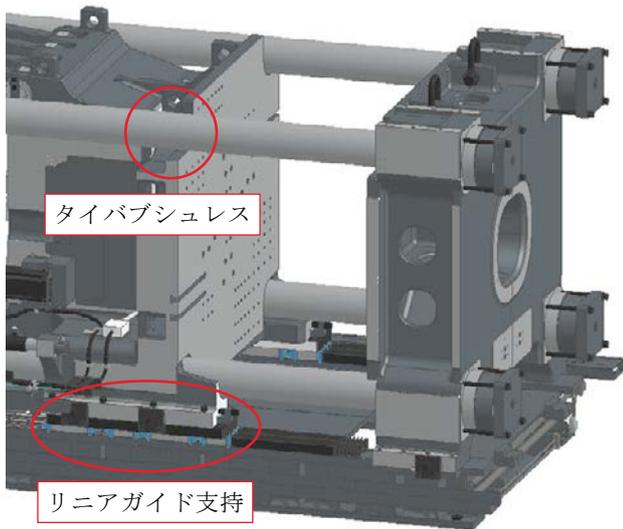


Fig. 7 タイバプシュレス構造

# テーブル形横中ぐりフライス盤 BTH ストレッチ仕様の開発

## 1. 概要（背景／開発のねらい）

風力発電メーカーが発電高効率化や CO2 排出減に向け、洋上大型風力発電設備の市場投入を開始している。2024年から12~15MW(メガワット)、2026年以降には16~20MWを量産化予定である。これにより、2035年までに全世界で30,000基の風力発電設備新設が予定されており、16MW以上は部品サイズがより大きくなり、既存機 BTD/BTH の仕様では各軸のストローク及びテーブル上積載質量が不足する。そこで、他社に先駆けて大型化するワークへの適応、および円形機市場にも対抗するために、拡張型 BTH を早期開発し、横中ぐり盤の優位性を提案する。

現行機である BTH の機械外観を Fig.1 に示す。

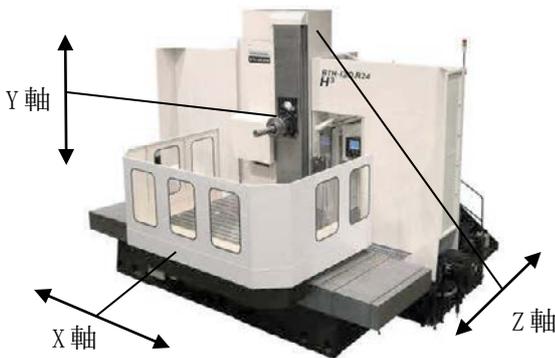


Fig. 1 BTH-130.R24

### 1.1 市場動向

Fig.2 に発電設備の市場を示す。グラフからもわかる様に、発電設備容量の増加に伴い、太陽光と風力発電設備の割合が約7割を占める。

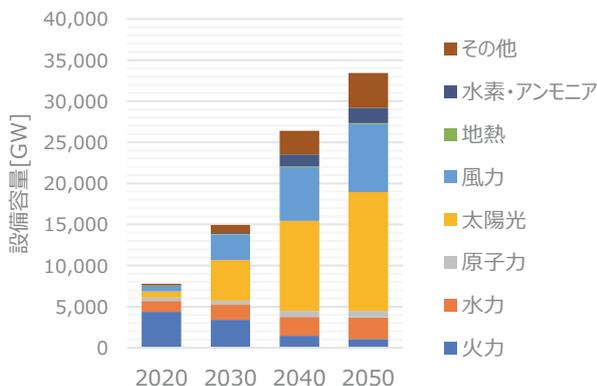


Fig. 2 電源別発電設備容量の見通し(世界)当社調べによる

さらに、2030年までの風力発電の市場規模(Fig.3)を見ると、洋上風力の市場規模が著しく成長することが想定されている。2020年から2030年にかけての発電設備増加率は、陸上風力で約2.6倍、洋上風力は約8.6倍になる見込みである。

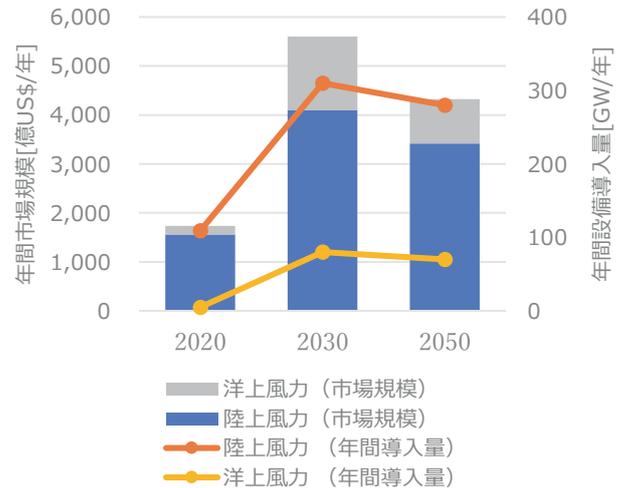


Fig. 2 風力発電設備市場規模見通し(世界)当社調べによる

### 1.2 市場分析

冒頭で述べた様に、2024年から新設が始まる12MW以上の大型設備に対して、風力発電機器関連部品の約25%を占める風車製造分野をターゲットとし、拡張型 BTH の早期開発に取り組む事にした。

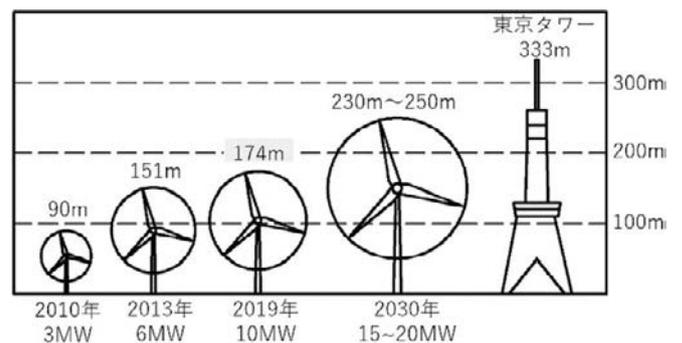


Fig. 3 洋上風車の大型化当社調べによる

## 2. 対象ワーク

設備の大型化により Fig.4 に示す増速機のサイズも大きくなり、加工機の X,Y ストロークに影響する  $\phi D$  寸法において、10MW が 1,000mm~1,200mm に対して 15MW 以上になると  $\phi 3,000$ mm を超える寸法になる。そのため競合他社のラインアップを含め、現行機の仕様ではストローク不足となる。

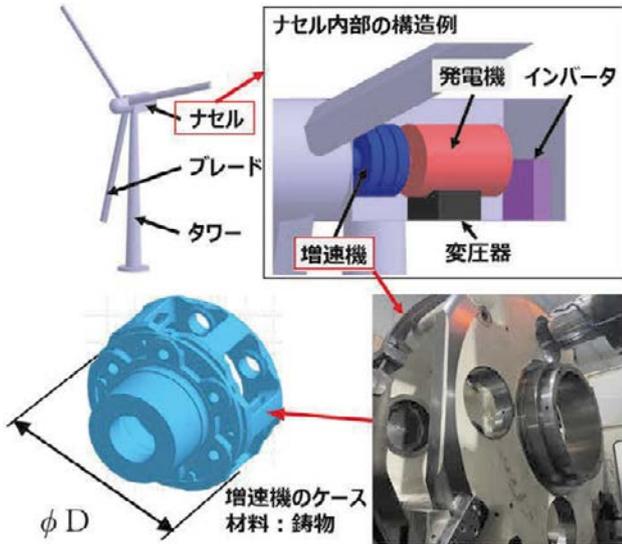


Fig. 4 対象ワーク当社調べによる

## 3. ストレッチ仕様

### 3.1 対象ワーク適合仕様と競合比較

Table1 で示すように、 $\phi 3,000$ mm を超える対象ワークに対して、機械ストローク X 軸及び Y 軸で見ると、X 軸については競合各社も 4,000mm をラインアップしているが、Y 軸については 3,000mm が最大値であり、 $\phi 3,000$ mm を超えるワークに対して加工ストロークが不足している。

Table 1 対象ワークおよび競合機の仕様比較

仕様数値		K社(国内製)	P社(海外製)	対象ワーク適合仕様
X軸ストローク	mm	4,000	4,000	4,000
Y軸ストローク	mm	3,000	2,000 3,000	3,500
Z軸ストローク	mm	2,000	2,300 2,700	2,200 (500-2,700)
テーブルサイズ	mm	2,000x2,200	2,000x2,500 2,500x3,000	2,000x2,400
積載荷重	ton	30	30	30

### 3.2 現行機とストレッチ仕様の比較

ストレッチ仕様は現行機に対して、各軸ストロークが全て拡張され、特に Y 軸ストロークは既存機に対して 1,000mm の延長となることから、高所での加工能力が要求される。要求される加工能力を達成するためには、高所切削における加工精度を高める機械剛性の確保が重要になる。なお、ここでの加工能力とは、対象ワークに要求される仕上がり寸法精度の達成であり、切削量を指すものではない。

また、機械剛性を確保するためには、横中ぐり盤の特徴でもある主軸繰り出し状態での加工を考慮した機械の設計を行う必要がある。そこで、対象ワークを想定したテストピースを作製し、類似機で高所加工の検証を行った。

Table 2 既存機との仕様比較表

仕様数値		現行機 BTH-150.R24	ストレッチ仕様 BTH-150.R24
X軸ストローク	mm	3,500	4,000
Y軸ストローク	mm	2,540	3,500
Z軸ストローク	mm	1,500	2,200
テーブルサイズ	mm	2,000x2,400	2,000x2,400
積載荷重	ton	25	30

## 4. 既存機での加工検証

### 4.1 加工テスト概要

Fig.6 で示すように、主軸を繰り出して高所大径ボーリング加工を行い、加工中の機械振動(ビビリ)を含め、加工穴の真円度、円筒度、穴ピッチ、面粗さを測定し、想定される要求精度を満たしているか検証を行った。



Fig. 5 テスト加工の様子

加工箇所：テーブル上面から 1,500mm、2,200mm、3,060mm の 3カ所

加工条件：V120m/min 送り 0.06~0.1mm/rev

被削材質：FC300 (サイズ 700×2,100×160mm)

## 4.2 加工テスト結果

大径中仕上げ、仕上げボーリングにおける高所加工は良好な結果が得られ、高所である Y3,060mm の位置での加工においてもビブリの発生が無いことを確認できた。さらに、各精度及び表面粗さにおける測定でも良好な結果が得られた。

これらの結果より、類似機と同程度の機械剛性で要求精度を満たせると判断し、機械の設計を開始した。

## 5. NC仕様

制御に関しては、最新 CNC 装置「FANUC Series 31i-B Plus」の搭載、高速 CPU の採用により、高速・高精度加工に寄与するブロック処理、マクロ演算などの能力向上を実現した。先読みブロック数はオプション選択により、従来比 200%まで拡張可能である。

また、芝浦機械独自のプログラム支援機能により、大型化する風力発電設備向けワークに対しても高精度な加工が実現できる。

## 6. 開発・生産スケジュール

2023年3月に開発提案を行い、翌4月から設計を着手した。初号機の出荷は2024年3月を目標としている。販売活動は既に開始されており、2023年8月時点で1台の受注と数社からの引合いがある。なお、今回の開発はモデルチェンジや新機種としてではなく、あくまでも現行機に対してオプション仕様の位置付けとなる。

## 7. おわりに

再生可能エネルギー由来のさらなる発電量増加に向け、大型化する洋上風力発電設備向けのワークに対応する加工機をいち早く世に出すことで、SDGsにも貢献していく。

# ポリゴンミラー加工機 UFG-150D(PV)の紹介

## 1. はじめに

ポリゴンミラーはレーザ光を走査させるための部品であり、これまでデジタル複合機、医療用装置、計測器、分析装置などに組み込まれて使用されてきた。ポリゴンミラー加工機とはミラーの各面に対して、ダイヤモンドバイトを用いた切削により鏡面加工する機械である。

近年、用途に応じて面の切削痕の方向を指定したり、単なる平面形状だけでなく滑らかな凹み形状をつけたり、車の自動運転の測距センサー(LiDAR)を含む比較的大きなポリゴンミラーを大量生産したいとの要望が増えている。しかし、当社の横型ポリゴンミラー加工機UFG-80C(P)のみでは切削痕の方向が限られている、大型ワークへの対応が難しいなどの問題がある。そこで、今回新たに従来機UFG-80C(P)に対し、回転軸を90度傾けた立形ポリゴンミラー加工機UFG-150D(PV)を開発した。Fig. 1は機械の外観、Fig. 2はポリゴンミラーの写真である。



Fig. 1 機械の外観



Fig. 2 ポリゴンミラー

## 2. 特徴

### 2.1 機械ストロークの延長および工具ホルダの大型化

大型ワークから小型ワークまで対応できるように、直線軸 X、Z 軸のストロークをそれぞれ 70mm から 200mm、85mm から 100mm に変更した。また生産性向上のために工具ホルダ直径を 125mm から 175mm に大型化し、取り付けられる工具数を最大 2 個から 4 個に増やした。

### 2.2 NC の変更

ミラー面に滑らかな凹み形状をつけたいという要望に対応するため、NC を FUNUC Series Oi MF-Plus から、より細かい指令が可能な FUNUC Series 32i-MODEL B Plus に変更し、直線軸の X、Z 軸の最小設定単位を 0.1 $\mu$ m から 0.01 $\mu$ m にした。

### 2.3 B 軸割り出し台の空気軸受化

B 軸割り出し台を従来のベアリング+ウォームギアから空気軸受+ベルトインモータに変更することで、割り出し精度の向上、長寿命化、部品点数の削減によるメンテナンス性の向上を実現した。

### 2.4 ワーク交換の自動化

ワークの自動交換装置をオプション追加することで、加工室へのワークの搬送・取り出し、加工室の切粉清掃を自動化し、大量生産・省人化に対応可能となった。(Fig. 3)

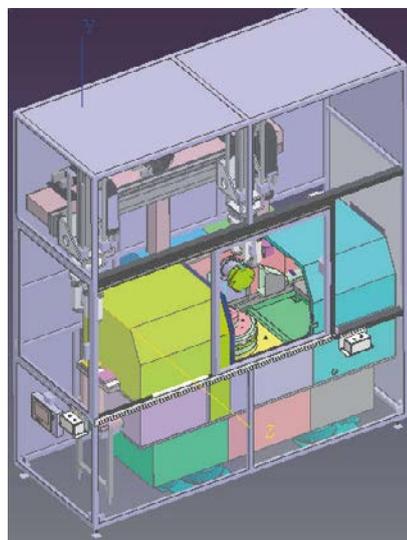


Fig. 3 ワーク自動交換装置

### 3. 仕様

主な仕様を Table 1 に示す。青字部分は従来機から変更している部分である。

Table 1 主な仕様一覧表

	UFG-150D(PV)	UFG-80C(P)
X 軸移動量 mm	200	70
Z 軸移動量 mm	100	85
B 軸移動量 deg	無制限	無制限
工具ホルダ直径 mm	175	125
X 軸送り速度 mm/min	10~1250	10~1250
Z 軸送り速度 mm/min	10~1250	10~1250
B(C)軸送り速度 deg/min	10~1250	10~1250
X 軸最小設定単位 μm	0.01	0.1
Z 軸最小設定単位 μm	0.01	0.1
B(C)軸最小設定単位 deg	0.0001	0.0001

### 4. 効果／事例

#### 4.1 大型ワークへの対応・加工効率の向上

工具ホルダの大型化と直線軸のストロークの延長により、最大 100mm×100mm の面を持つ 4 面ポリゴンミラーが加工可能になった。薄いポリゴンミラーの場合、複数枚重ねて一度に加工することで生産性を向上させるが、従来機と比較して約 1.5 倍の枚数を加工可能となった。また、立形はワークを重ねる方向と加工時の送り方向(X 軸)が直交しており、重ねる枚数を増やしても X 軸の移動距離は変わらないため加工時間が増えない利点がある。Fig. 4 に加工室内を示す。

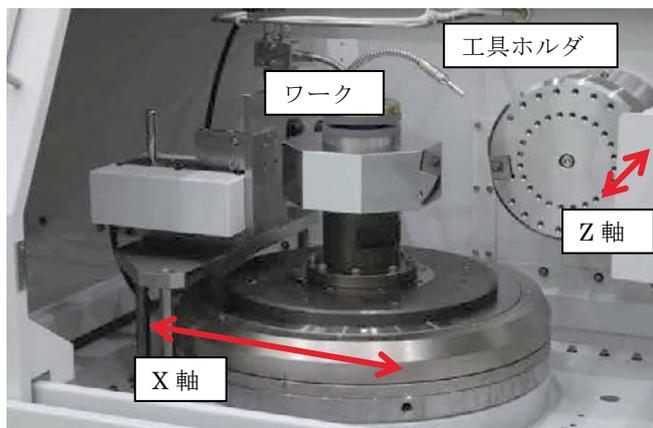


Fig. 4 加工室内

#### 4.2 凹み形状加工への対応

直線軸の最小設定単位を 0.01μm(10nm)にすることにより、平面形状だけでなく、中央部が 200nm ほど凹んだ滑らかな曲面も製作可能になった。(Fig. 5)

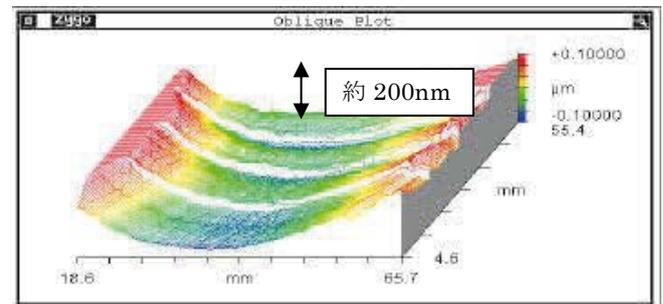


Fig. 5 曲面加工の例

#### 4.3 B 軸位置決め精度の向上

B 軸割り出し台の位置決め精度は補正前の数値で比較すると、従来機の±4 秒から±2.8 秒に向上した。

### 5. おわりに

今後、ポリゴンミラーはさらなる需要増加が見込まれるため、生産性を向上させる必要がある。そのために、主軸の高速回転化、工具ホルダの大型化、2パス加工から1パス加工に減らすための加工検証や、自動交換装置のさらなる効率化を進めることで、生産性向上に寄与していきたい。

# TCminiシリーズ TC11-02の紹介

## 1. 概要

TCmini とは、ラダー言語（PLC 言語）でプログラミングできるマイコンボードであり、顧客のニーズに合わせて最適な機能・サイズ・コストを実現できる制御装置である。

従来機 TC5-02 は産業機器、業務用機器などの幅広い分野で採用されてきたが、更なる市場ニーズに応えるため、ネットワーク機能を強化した TC11-02 を開発した。

新 MCU<sup>注1)</sup>を採用し、TC5-02 の取付け・機能の互換性を保ちながら、制御性能の大幅な向上、ネットワーク機能強化等を実現している。

注1) MCU(Micro Controller Unit): 1つの集積回路にROM やRAMなどのメモリやI/O関連など多くの周辺機能を搭載した組込用のマイクロプロセッサ

## 2. 特徴

### 2.1 制御性能向上：

ラダー演算処理時間が従来機比 1/2

### 2.2 ラダープログラム、データレジスタ容量拡大：

ラダープログラム容量：従来機比 1.3 倍

データレジスタ容量：従来機比 2 倍

### 2.3 ネットワーク機能強化：

Ethernet 通信：Modbus/TCP マスタ/スレーブ対応、  
Web サーバー機能対応<sup>注2)</sup>

CUnet 通信<sup>注3)</sup>：マスタ/スレーブ対応

注2) Web サーバー機能：

内部データをタブレットやスマートフォン、PC 等の標準ブラウザから読み書きすることができる機能

Web サーバー機能を搭載することで、外付けサーバー不要の安価なリモート監視システムの構築が可能。

タブレット端末



Fig.1 Web サーバー機能

注3) CUnet 通信：マルチマスタ型のリモート I/O ネットワーク。高耐ノイズ性、長距離対応が特徴。1つのネットワークに最大 64 台まで接続可能。

### 2.4 TC5-02 からの追加機能

アナログ入力(4-20mA/0-5V)を 2 点追加

アナログ出力(4-20mA/0-5V)を 2 点追加

シリアル通信(RS485)を 1 点追加

カレンダー機能を標準搭載

## 2.5 仕様比較

Table 1 従来機との仕様比較

項目	TC11-02	TC5-02 (従来機)
電源電圧	DC5V	DC5V
外形寸法	135 (H) × 220 (W)	135 (H) × 220 (W)
使用周囲温度	-10°C ~ 60°C	0 ~ 60°C
USB 通信 (開発用)	1 点	—
Ethernet 通信	1 点	—
CUnet 通信	1 点	—
カレンダー機能	1 点	—
シリアル通信	4 点	3 点
アナログ入力/出力	4 点/2 点	2 点/—
サーミスタ入力	4 点	4 点
汎用入出力	16 点/16 点	16 点/16 点
パネル I/F	1 点	1 点
拡張基板 I/F	1 点	1 点
処理時間	4kW で 5ms 以下	4kW で 10ms 以下
ラダープログラム容量	32k ワード*	24k ワード*
データレジスタ容量	4096 ワード*	2048 ワード*



Fig.2 TC11-02 外観

## 2.6 効果／事例

TC11-02 はラダー演算処理の高速化とともに、顧客要望の多かった Ethernet 通信、CUnet 通信等のネットワーク機能を強化し、スマートファクトリー化を支援する製品となった。

### 【採用事例】

産業機器：温水器、チルドタワー

業務用機器：業務用洗濯機、コインランドリー

## 3. おわりに

今回開発した TC11-02 は、Ethernet 等のネットワーク機能強化により適用分野を広げ、さらなる拡販を推進していく。

# スカラロボット THE800/THE1000 の紹介

## 1. 概要

組立・搬送系ロボット市場は、自動車関連、EMS、スマートフォン関連を中心に需要が拡大しており、組立・搬送工程は人による工程が多く、自動化ニーズが高い。アジアを中心にスマートフォン関連、車載バッテリー関連で大幅に市場拡大している。自動車のEV化に伴い、車載バッテリーの需要増のため、車載バッテリー搬送を想定したロボットの開発が必要である。車載バッテリーは重量があるため、現行機種種のTHLシリーズでは可搬質量を満足できない可能性があるため、最大可搬質量20kgかつ広動作範囲に対応したシリーズ拡充機であるスカラロボット「THE800/THE1000」の開発が必要であった。

## 2. 特徴

### 2.1 特長

THE800/THE1000(Fig.1)は、従来モデル THL800/THL1000と比べ、第1アームは重量がほぼ変わらず、高剛性である。第3軸(Zストローク)については、従来モデル300mmに対して、標準で420mmとすることで広範囲動作を実現している。コントローラはTS3000/TSL3000シリーズから通信機能やプログラム言語など大幅に改良されているTS5000-MSを採用した。また、TS5000-EMSと組み合わせることでCE対応も可能である。現状、CE仕様以外にキャップ仕様(Fig.2)、ジャバラ仕様(Fig.3)、天吊仕様(Fig.4)、ロボット～コントローラ間ケーブル長15m(最長)仕様に対応している。さらに、様々なオプションにも対応予定である。クリーン仕様、防塵・防滴(IP65)仕様等があり順次対応予定である。その他に、特殊仕様としてスカラロボット「THE1000」と直交ロボット「BE60J」と5軸制御用コントローラ「TS5000-MS-AD」を組み合わせた物流自動化ユニットロジロボシリーズにも対応している。



Fig. 1 THE800/THE1000 の外観



Fig. 2 THE800 キャップ仕様の外観



Fig. 3 THE800 ジャバラ仕様の外観



Fig. 4 THE800 天吊仕様の外観

## 2.2 仕様

THE800/THE1000 の仕様は Table 1 の通りである。

Table 1 THE800/THE1000 の仕様

型式		THE800	THE1000	単位
構造		水平多関節型		—
軸構成		4	4	—
アーム長	全長	800	1,000	mm
	第1アーム	350	550	mm
	第2アーム	450	450	mm
モータ 容量	第1軸	1,000		W
	第2軸	750		W
	第3軸	750		W
	第4軸	200		W
動作範囲	第1軸	±132		°
	第2軸	±152		°
	第3軸	0~420		mm
	第4軸	±360		°
最大速度 ※1	第1軸	300		°/s
	第2軸	540		°/s
	第3軸	2,200		mm/s
	第4軸	1,100		°/s
	合成	8,400	9,500	mm/s
定格可搬質量		5		kg
最大可搬質量		20		kg
許容負荷慣性モーメント		0.6		kgm <sup>2</sup>
位置繰り 返し精度 ※2	X, Y	±0.025		mm
	Z	±0.01		mm
	C	±0.01		°
本体質量		46	49	kg
ロボット~コントローラ 間ケーブル長		3.5		m
適用コントローラ		TS5000-MS TS5000-EMS (CE仕様)		

※1:動作パターン・負荷質量・負荷重心オフセットにより、最高速度・加減速度の制限がある。

※2:周囲温度・機体温度一定時の一方向繰り返し精度である。絶対位置決め精度ではない。

## 2.3 効果/事例

従来の THL800/THL1000 と比べて、THE800/THE1000 では最大合成速度が、約 1.9 倍に向上している (THE800: 約 1.95 倍、THE1000: 1.9 倍)。最大可搬質量においても 10kg から 20kg と 2 倍に向上している。物流自動化ユニットロジロボシリーズ (Fig.5) においてパレタイズ・デパレタイズユニットおよび段ボール開梱装置に THE800/THE1000 が採用されている。



Fig. 5 THE1000を適用したロジロボ SP

## 3. おわりに

THE800/THE1000 の開発によって、高速、高剛性、高軌跡精度である THE シリーズとしてアーム長 400mm ~ 1,000mm までのラインナップがそろった。

今後はオプション拡充開発、ユーザーの多様な要求に対応できるよう順次市場へ上市、展開予定である。車載バッテリーの製造工程によっては、源流工程であると IP65・銅系不可が要求されることもあり、オプションの拡充は必須である。さらなる顧客満足の最大化に努めていく。



工作機械は、世の中の様々な形ある物を構成する部品を製作するためには欠かせない機械である。一言で部品と言っても形状は様々であり、それぞれの形状に応じた工作機械が必要であり、例えば加工物（ワーク）を回転させて削る旋盤や工具を回転させて削るマシニングセンタなどがある。このように部品は工作機械で作られることが多く、ゆえにマザーマシン（母なる機械）と称され、この工作機械の加工精度により最終的に完成する製品のレベルが決まると言っても過言ではない。では、この工作機械はどの様に進化してきたのか？本稿では、社会ニーズの変遷と工作機械の進化について、限られた内容ではあるが当社の製品開発の歴史を例に紹介する。

## 1. はじめに

### 1.1 工作機械のはじまり

工作機械のはじまりには諸説ある。その内、茶碗や陶器を作るのに現在も使われている「ろくろ」が工作機械の原型と言える。「ろくろ」は回転する円盤（テーブル）の上に粘土をのせて円盤を回転させながら手で粘土を茶碗やつぼの様に丸く成形する。この「ろくろ」の利用は遠く石器時代（紀元前 6000 年～紀元前 2400 年前）に始まったとされており、この原理を利用して作られた工作機械が「旋盤」である。

更にエジプト時代（紀元前 1480 年頃）には、弓の弦に棒を巻き付け、弓を押引きすることで棒を回転させ、回転する棒で穴をあける技術「弓錐（ゆみぎり）」が使われるようになった。この原理を利用して作られたのが「ボール盤」である。

この「ろくろ」と「弓錐」の原理を合わせ、工作物に紐を巻き、その紐の先に踏み板を取付け、踏み板を踏む事で工作物を回し、回転する工作物に刃を当てて加工する「弓旋盤」がエジプト時代に登場した。

その後、暫くの間は弾力や水力などを利用した工作機械が近代の産業革命が起こるまで使われ続けた。

1769 年にワットが蒸気機関を発明したが、この発明が実用化されるためには、ウイリキンソン（イギリス）の「中ぐり盤」の発明（1775 年）を待たなければならなかった。この発明は、蒸気機関の心臓とも言えるシリンダの内面を加工するために考案され、手作業であった内面加工を機械で加工できるようにしたのである。その精度は、手作業で 1cm 以上の誤差があった真円度を 1.5mm 程度まで精度を高められ、蒸気機関の性能向上に大きく貢献したのである。

この様に加工を行うには回転運動や直線運動が使われる。さらに構造や剛性を重視する事で直線運動や回転運動の精

度・能力が向上し、より良い精度の工作機械が作られるようになった。これら要素の絶え間ない技術開発が繰り返され現在の工作機械に至っている。当社もこれを基本として様々な製品を世に送り出している。

### 1.2 芝浦機械の変遷

芝浦機械のモノづくりを説明するためには、当社の歴史を辿る必要がある。

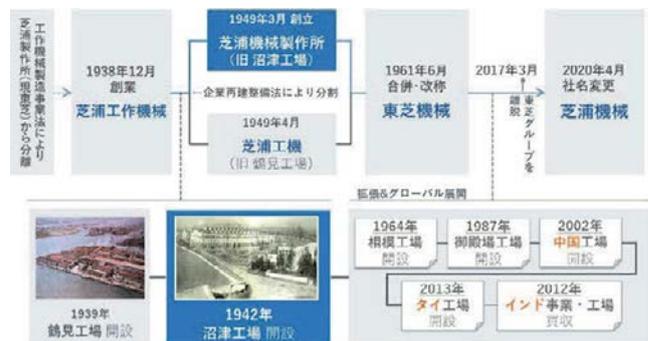


Fig 1. 芝浦機械の事業変遷

1938 年当時、軍事力強化のために施行された国の特別法である工作機械製造事業法により、軍需生産の根幹となる工作機械製造を強化支援及び規制を受ける事になり、(株) 芝浦製作所 (現 (株) 東芝) の工作機械部門が独立運営するために新会社として「芝浦工作機械株式会社」が設立された (Fig 1)。

工作機械は兵器製造に欠かせない製造装置でありこの技術が高いほど良い兵器が作れることから国の政策として分社独立に至った。そういう意味で社会のニーズと言うよりは国の方針に合わせて兵器製造用の工作機械を製造していたのである。芝浦工作機械(株)の生産初号機は、1940 年受注した、12m ライフル盤 (Fig 2) であった。

その後も社会ニーズに合わせて事業展開を進め、繊維事業、射出成型事業、ダイカスト事業、押出成形事業、精密加工事業、制御事業などを時代の流れと共に事業の設立、廃止などを続けてきている。

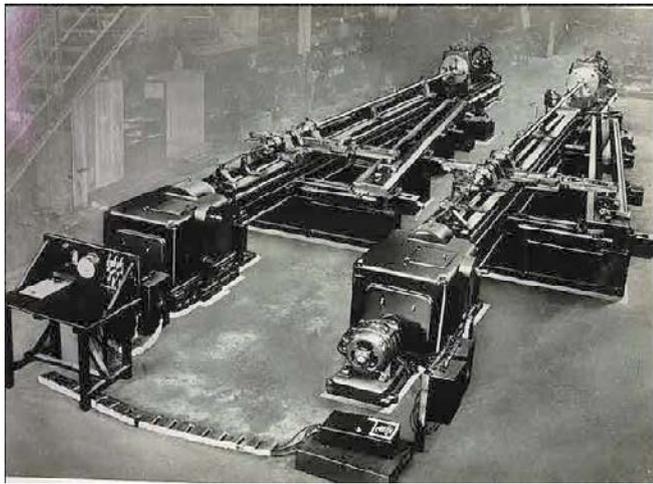


Fig 2. 1940年受注の12mライフル盤

本稿では、筆者の担当事業である工作機械事業の製品が社会ニーズの変化に応じてどのように変化し、社会に応えてきたのかを纏めた。

## 2. 日本の復興と工作機械

### 2.1 はじまり

1913年（大正2年）に日本の蒸気タービン船である「安洋丸」が洋上で立ち往生する事故が起きた。原因はタービン減速歯車の歯が不揃いであったため一つの歯に荷重が集中し、歯が欠損したのである。この事故を受け四方を海に囲まれている日本は、海外との交易が重要であり、そのための造船技術の発展は日本にとって必要な技術であることから高精度なタービン減速機の歯車を自国で作らなければならないと当時の技師であった藤島亀太郎（後の芝浦工作機械社長）は、親歯車ホブ盤の開発を心に刻んだ。

当時の社会ニーズを的確にとらえた洞察力であり、今も当社のDNAとして受け継がれている。

世界大戦中は、第1章で述べた通り軍の注文に応じた兵器製造用の工作機械を主に製造し、世に送り出していたが敗戦後、工作機械の製造が禁止されることになった。

その状況でも社会のニーズを捉え、電気冷蔵庫（Fig 3）や煙草巻上機（Fig 4）などの製造を展開し、会社を維持していた。その後、1949年1月に当時の商工省より全国工作機械4大重要工場に沼津工場が指定され、同年3月企業再整備法により沼津工場を母体に（株）芝浦機械製作所を設立し、工作機械の製造を再開したのである。

戦後の復興にあわせ、社会は大きな転換を迎えることになる。国を挙げて経済の発展に必要な、インフラの整備や貿易の活性化などを進めるには、発電設備の増設、鉄道網の構築、造船、道路整備などインフラ整備を進めることになる。そこで必要とされるのが「産業のコメ」と呼ばれた鉄である。

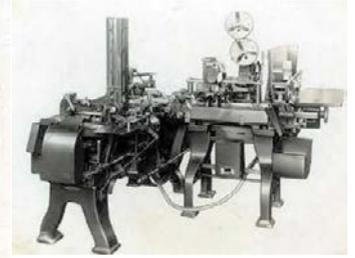


Fig 3. 電気冷蔵庫（1946年） Fig 4. 煙草巻上機（1947年）

## 2.2 日本の再出発にあわせて

「鉄は国家なり」と例えた格言に従い、1947年に政府は鉄鋼と石炭の増産に資金と資源を集中させた。

### 2.2.1 戦時中に作った工作機械

一旦戦時中に戻るが、戦時中も社会（国）のニーズに応え工作機械を生産していた。先のライフル旋盤の生産後、1940年8月に3mの立旋盤 T-30/35 を完成させ翌年には、最大振り11mの大型立旋盤を完成させている（Fig 5）。

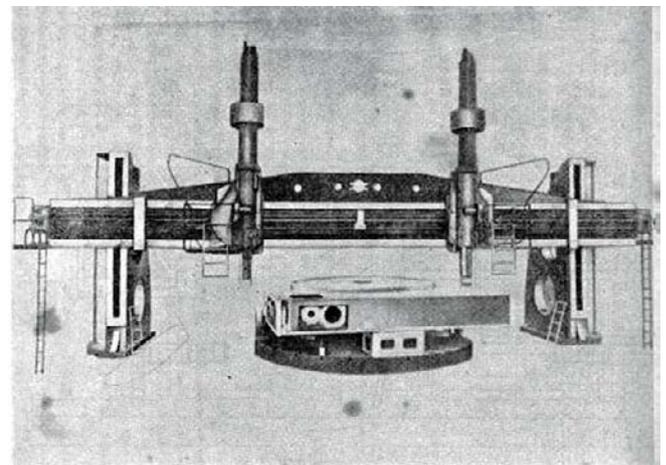


Fig 5. 11m立旋盤

両機共にテーブル主軸以外は全て手動操作であるが、驚いた事に両機共に刃物台が2頭付いている。また、同年12月には、面板付きのテーブルタイプ横中ぐり盤も完成し、横中ぐり盤の基礎を築き上げている。1942年には、平面研磨盤 KPL や立軸円テーブル形平面研磨盤 KB-8（Fig 6）と振り2m、芯間15mの大型横旋盤 DK も完成させており、

当時の砲台部品加工に活用されたのではないと思われる。

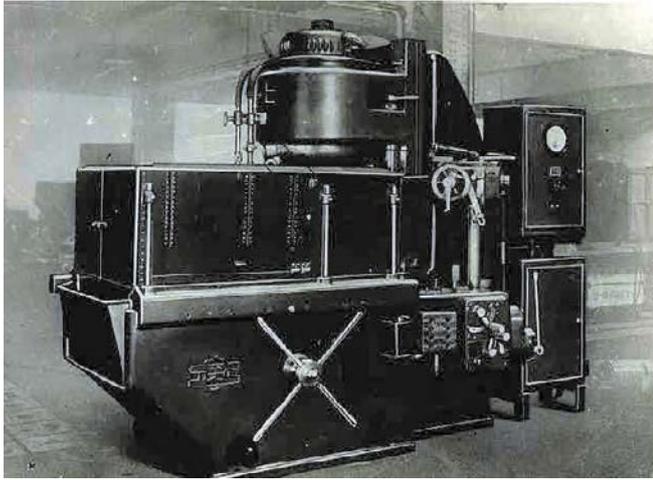


Fig 6. 平面研磨盤 KB-8

更に 1943 年には、現在の門形マシニングセンタの基本構造となる門型平削盤も完成させている (Fig 7)。

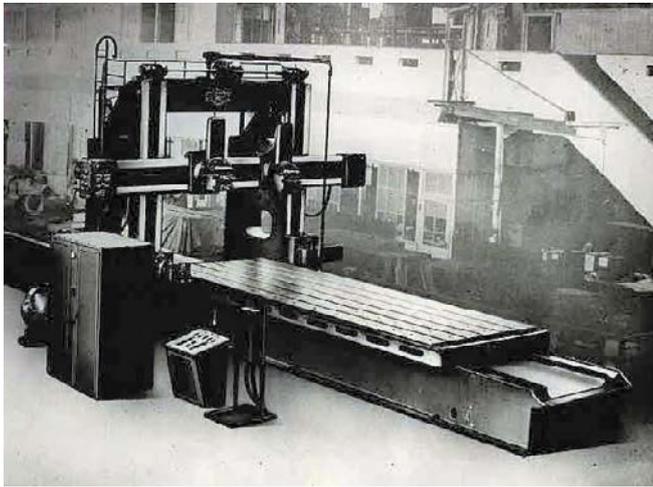


Fig 7. 門型平削番

言わば軍事に使われる大物部品加工に必要な工作機械を生産していたことが、現在当社の大型工作機械の基本になっている。

### 2.2.2 戦後の復興期

先に述べたように戦後の復興には鉄の生産が必要であった。また、同時に出版ブームが起こり紙の需要が高まった。製紙用のロールを研削する機械の需要が起こり、当社初の大型工作機械としてロール研削盤 KRP-955 を製紙向けで受注し開発を行った (Fig 8)。この開発は、戦時中にアメリカのファーレル社のロール研削盤をスケッチしたものが基であり、ファーレルに無い特徴として独自開発した鏡面仕上げを組み込んだものであり、1951年に完成した。本機完成の翌年には、製鉄用の圧延ロール用研削盤 KRP-1350 も完成させた。この2台について社内外にわたり徹底的に調査を行い、その結果をもとに設計を全面的に

変えて3号機を完成させ世界最高の精度を実証し、ジャーナリズムも大きくこれを報道した。

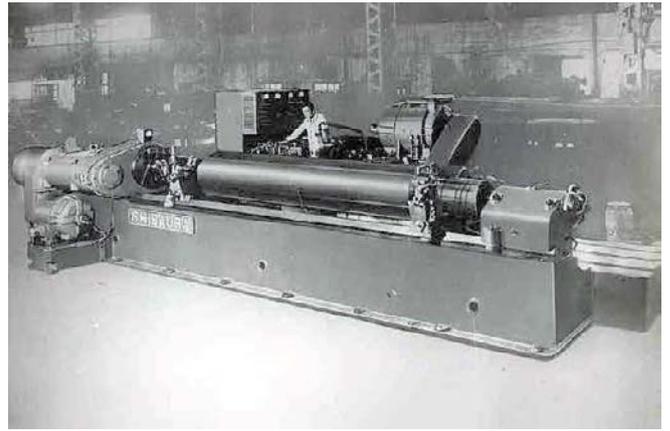


Fig 8. ロール研削盤初号機 KRP-955

造船事業にもおいても戦前より構想を抱いていた親歯車ホブ盤の開発を進め 1953年に国産初の5m親歯車ホブ盤を完成した。割出精度はCW8秒、CCW6秒で当時としては高精度の割出を実現した (Fig 9)。



Fig 9. 親歯車ホブ盤 HRS-500

また、陸上輸送として活躍していた国有鉄道についても戦争で大きな痛手を受けていた。この陸上輸送の復活整備を急務として、車両用工作機械を急いで整えることになり、1946年春に当社を含む工作機械5社が選ばれてこの政策を行う事になった。1947年10月工作機械製造許可を申請し、暮れに動輪旋盤を受注した。1948年には当社を含む

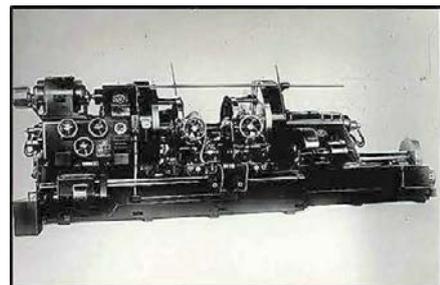


Fig 10. 戦後最初の工作機械「動輪旋盤」

4社の工場が国鉄の推挙を受け通産省から「国内重要工場」に指定された。同年に戦後最初の工作機械である動輪旋盤を完成させた。この仕事は2年ばかり続き、国内輸送の復活に貢献したのである。

### 3. 社会ニーズと工作機械

#### 3.1 高度経済成長期

戦後の復興を終え1955年頃から1973年頃まで日本は高度経済成長をむかえることになる。経済発展のため貿易が重要視され船舶の需要が増加し、それに合わせ製鉄も需要が増加した。大型船舶においては、スクリューを回すための減速機や歯車箱などの大物部品の加工が必要になり、1954年に床上型横中ぐり盤初号機BSF-26を完成し、翌年に2号機となるBSF-15Q (Fig 11) や堅ブローチ盤を生産し、第2回東京国際見本市に出展を行っている。ブローチ盤とは、歯車などにキーミズを加工 (Fig 12) する工作機械である。当社の親歯車ホブ盤で加工した船舶用の歯車にもキーミズ加工が必要であり、そのニーズに応えるために大型の堅ブローチ盤の生産を行った。また、親歯車ホブ盤も高精度加工に応える為に本機の歯車の高精度化を進めていた。



Fig 11. 大型横中ぐり盤

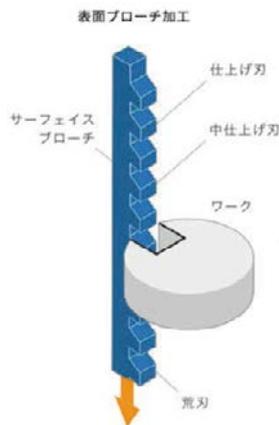


Fig 12. ブローチ加工

1955年8月に仏バルチェ社と技術提携を行い単支柱型堅タレット旋盤、大型立旋盤4種 (テーブル径800、900、1,000、1,400mm) を対象とした。1956年には同社の倣い付きオリジナル立旋盤TB-10を輸入し第3回日本国際見本市に出展した。

##### 3.1.1 自動車の量産ニーズの始まり

復興が進み始め自動車の生産についても量産化の動きが出始めた。当社は、日産自動車、日立精機と共に「トランスファマシンの研究と実施」に取り組み、1956年7月にシリンダブロック加工用トランスファマシンを完成させ日産

自動車に納入した。そしてこの取り組みは1957年4月に大河内生産賞を受賞したのである。このトランスファマシンの登場により、自動車エンジンは量産化が進められるようになった。

##### 3.1.2 NC化の始まり

戦前から戦後にかけて工作機械は、歯車やカム、送りねじ、クラッチ機構などを駆使した構造で全て手動操作であった。工作機械は、「機械を作る機械」と言われ「マザーマシン (母なる機械)」と言われている。その特徴は、工具と工作物の相対運動を位置や速度など調整し加工を行うものである。この調整を人が行っていたので「機械の癖」を熟知して加工精度を出していたと言える。機械の位置や速度の情報を数値で制御し、加工のための動作をプログラムで行う事を目的として1949年に米国空軍の要請を受けたジョン・T・パーソンズがマサチューセッツ工科大学とNC装置の共同研究を行い、1951年に世界初のNC装置、翌年に世界初のNCフライス盤を開発した。これがNC工作機械の始まりである。この開発を機に各工作機械メーカーがNC搭載工作機械の開発を開始し、当社においても1958年に (株) 東芝の支援を受けながら「数値制御自動立タレット旋盤」の開発を始め、翌年の第6回東京国際見本市に「VTN-10形数値制御タレット盤」を出展した。1959年には、今でも当社の主力機であるテーブル型横中ぐり盤BFT-11A,13Aを完成させ、その翌年にはNC装置を搭載したBFT-9(S)NCを完成させ、現在のテーブル型横フライス中ぐり盤の原型が誕生した (Fig 13)。



Fig 13. テーブル型横中ぐりフライス盤 BFT-9(S)NC

##### 3.1.3 大物部品加工のニーズに応える

NC機の開発後、1961年6月に (株) 芝浦機械製作所が芝浦工機 (株) を吸収合併し、東芝機械株式会社と商号変更した。この頃、大物部品加工のニーズが高まり、同年12月沼津工場に大型工場が落成 (完成) した。そして1962年4月に大物加工に貢献できる工作機械として、当時では

日本最大級の床上型横中ぐり盤（ラム型）BSF-32/19 が機械学会賞を受賞した。この大型工場の完成を機に当社は大物部品加工に対応するための大型工作機械の生産に注力し、重電向けに大型の立旋盤の開発を行った。1963年7月には日本製鋼所室蘭製作所（現日本製鋼所M&E）向けに国産最大級の大型立旋盤（刃物台2頭）TWI-80/120（最大加工径12m）を完成した。本機では初の本格油静圧案内を採用しており、この技術は現在の静圧案内の基本となっている（Fig 14）。大型工作機械の生産能力を向上させたことにより、日本のインフラ整備や交易力の向上に貢献し、日本の高度成長を支えたのである。

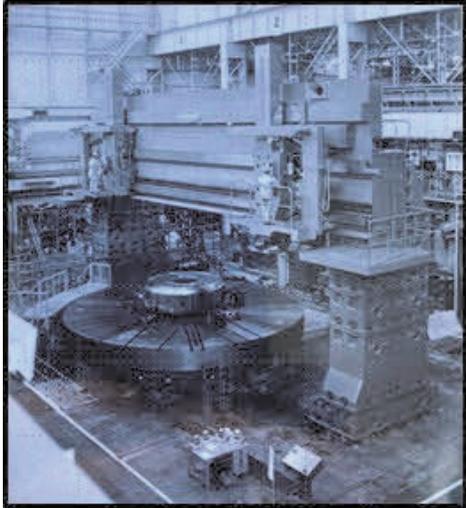


Fig 14. 大型立旋盤 TWI-80/120

大物部品加工は、造船のプロペラにも及んだ。1965年には、大型船舶用のプロペラに駆動用シャフトを組込む為のプロペラボスに大径テーパー穴や両端面、キーミゾを加工する専用機としてプロペラボス加工機 PB-32 を完成した。その翌年には神戸製鋼所殿向けにプロペラの翼面を加工する専用機 PBD-80A を完成した（Fig 15）。

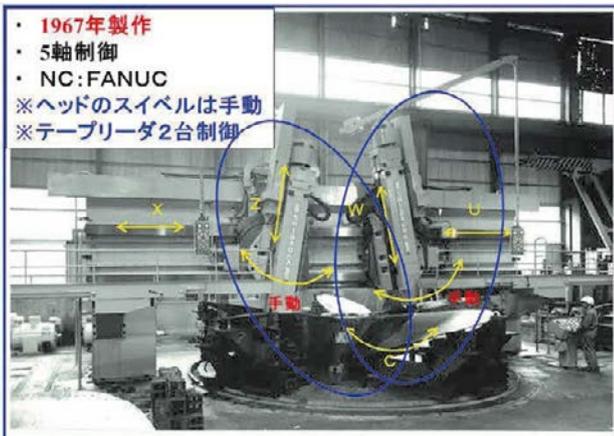


Fig 15. プロペラ翼加工専用機 PBD-80A

この翼面加工機は、主軸頭を2頭搭載し、直線4軸とテーブル回転軸1軸をNC装置で同時5軸制御を行う機械であった。それまで翼面形状の加工は、翼の曲線を当て型で形状を確認しながら手作業で行っていたが、テーブリーダ2台で5軸制御を行う事で形状加工の自動化がある程度で

きるようになったのである。その功績が評価され本機は、1968年に日刊工業新聞社十大新製品賞をいただいた。

大型工場の完成とNC装置の搭載により、様々な大型工作機械の製造ができるようになり、手動では困難な形状も加工が可能となり水力発電の水車翼や大型船舶のプロペラなどの大型専用機の開発がすすめられた。水車には水車翼加工機（NC5軸機）、水車ランナ曲面加工用大形5軸数値制御フライス盤などの大型専用機を開発すると共に重電関係などからもNC装置を搭載した床上型横中ぐり盤や大型立旋盤の要求も増え、これら大型機の生産量も増加した。

市場の要求はNC化にシフトし当社も大型機で培ったNC化の技術をロール旋盤やロール研削盤、テーブル形横中ぐり盤（横中汎用機）、汎用立旋盤などにも展開し、いよいよNC機の時代が始まった。1968年10月には、NC機で自動工具交換装置を備えた自社ブランド初のマシニングセンタMC-6Aを完成し、マシニングセンタの時代が到来したのである。

### 3.1.4 大型機の複合化と効率化

引続き重厚長大の時代は続き、重電、製鉄などに必要な大型機・専用機の需要は継続していたが、加工失敗が許されない大型機は、段取替えを行う事による失敗リスクの軽減が必要であった。旋盤加工、ミーリング加工、穴あけ加工など工程ごとに段取替えを行って加工していたが、その都度失敗リスクが生じる。この段取替えを少なくすることが大型機の大きな課題として市場から要求されるようになったのである。

このニーズに応えるため1968年2月から大型門形複合工作機械の構想を開始し、11月より設計に着手。1970年4月に大型門形複合工作機械ターンミラーTM-53/90Aを完成したのである（Fig 16）。本機は、ミーリングヘッドとターニングヘッドを搭載した旋削加工とミーリング加工を行える複合機であり、NC装置もFANUC製NC装置F260Bを2台搭載し、自動化にも対応した。

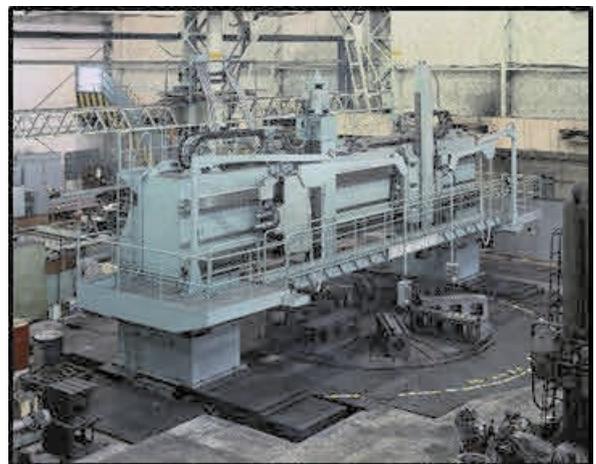


Fig 16. ターンミラーTM-53/90A

本機は大型の旋削テーブルを跨ぐように主軸頭と刃物台を搭載した門形本体が前後に移動するガントリータイプの工

作機械であった。現在工作機械の複合化が各メーカーで進められているが、当社では 50 年以上前に複合化の社会要求に応え、複合機を開発していたのである。

その後も大型機の自動化、効率化の要求に応え、1970 年 8 月にはガントリー形 NC プラノミラー MG-24/14A を完成した (Fig 17)。本機は、門幅 11m、長手 (ガントリー前後移動方向) 23m の超大型機で NC 装置 F220 を搭載した超大型の NC 工作機械である。



Fig 17. ガントリー形 NC プラノミラー MG-24/14A

この機械により大型タービンのケーシングなどの加工をプログラムで行えるようになり効率化が進んだ。

### 3.1.5 大型機の高精度化への取組

ここで一旦マザーマシンとしての当社大型工作機械の取組を紹介する。当社は、大型工作機械の生産を行っているがこれら大型工作機械は、工作機械の本体関係大物部品の加工を行っている。従って、これら工作機械の部品加工の精度が、完成する工作機械の精度に大きく影響する。このことを「工作機械の母性原理」と言う。「工作機械の母性原理」とは、「加工される部品の精度は、その部品を加工する工作機械の精度によって決まる」と言う特性のことである。では、加工した工作機械よりも高い精度が生み出せないのではないか？という疑問が生じるが、加工した部品に「キサゲ」などの調整を行う職人の技能を加えることで母性原理を超えた精度の部品を仕上げるができるのである。職人の「匠の技」は機械の精度を向上させるために今も昔も重要である。

「職人の技」以外にも機械の高精度化を行う手段として新しい構造や機構の開発も不可欠である。当社は、超大型工作機械を製造するに当たり静圧技術を磨き上げてきた。静圧技術は数十トン以上の高質量を支えることが可能であり、超大型工作機械には必要不可欠な技術である。しかしながらこの高質量を直線運動させる機構としてラック&ピニオンを採用する事が多いがバックラッシュや劣化、寿命、振動など様々な課題が存在していた。この課題を解決することで超大型工作機械の高精度化を実現することが可能になる。当社は、この課題解決のために「静圧ウォーム&ラック」機構の開発を行った。理論的な機構は設計できても

これを実現するための加工機が無いのが更なる課題となり、当社はその加工機も開発し、この新機構を実現した (Fig 18)。この開発により超大型工作機械の高精度化が実現し、大型工作機械の部品精度が向上し、高精度化ニーズに応えられるようになった。この「静圧ウォームラック機構」は、半円上のラックとウォームの組み合わせであるが、ウォームの各刃面に静圧油を供給し、ラックとウォームの間に静圧効果を生み出し、高荷重下においても安定した直線運動を実現するものである (Fig 19)。この技術は、工作機械以外の大物部品製造にも活用し、重電・造船業界の大物部品加工の高精度化にも貢献することとなった。



Fig 18. ウォームラック及びナット加工専用機 MWR-3510

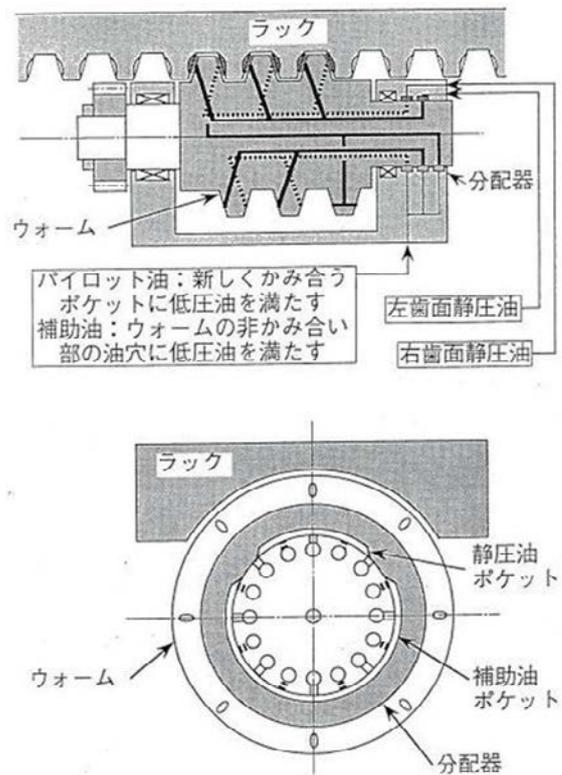


Fig 19. 静圧ウォームラック構造概要図

## 4. 社会ニーズの多様化

工作機械の NC 化が進み、加工はプログラムで行えるようになった。1960 年に当時の池田内閣で閣議決定された「国民所得倍増計画」に基づき、1964 年の東京オリンピックも開催されることから遅れていたインフラの立ち上げや工業化への誘導、自由貿易の推進、人的能力の向上と科学技術の振興、産業構造の転換により日本経済は急速に成長し、高度経済成長期を迎えた。

### 4.1 量産化と工作機械

高度成長期を迎え、工業製品の輸出の増加や家電製品や自動車などが一般家庭の購買力増加により、これらの需要に応えるため、製造業は量産化が必要となった。こうなると工作機械で加工する部品も量産対応が必須となり、ワーク（加工物）の量産加工が増加し、工作機械も自動で連続運転することが時代のニーズとなった。

この流れは当社工作機械の変遷にも表れている。まずは、立旋盤の自動化である。これまでは、ワークの加工が完了すると、その完了したワークを作業者がテーブルから取外し、テーブル上を清掃、新しいワークを段取・芯出しし加工を行っていたが、この段取時間や清掃時間がネック工程となった。そこで比較的加工時間の短いφ1m 前後のワークを対象に自動交換機能の開発が行われた。ワークをセットするパレット（テーブル）を自動交換する機能（APC：Automatic Pallet Changer）が開発されこの装置を搭載した NC 立旋盤が完成し、同じ形状ワークの連続自動加工を実現し旋削加工の量産化に貢献した（Fig 20）。

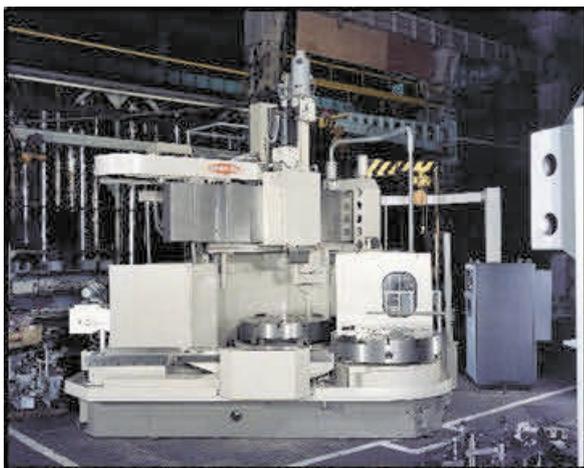


Fig 20. NC 立旋盤 TMC-13A（パレット自動交換）

更に自動化のニーズは高まり、1968 年に NC 横形マシンニングセンタに自動工具交換装置（ATC：Automatic Tool Changer）を搭載し工具交換が多い加工の自動化を行い、加工の効率化ニーズに応えた。この自動化ニーズは、汎用性の高いテーブル型横中ぐり盤にも波及し、1970 年代前半には、ATC 装置と APC 装置を搭載したテーブル型横中ぐり盤 BTN-10B を完成し、横中ぐり盤の自動化ニーズに

も応えた。これらの自動化技術は現在の工作機械の基本技術となっている。

自動車業界においてもエンジン部品の量産化を行う為に 3.1.1 項で述べたトランスファマシンのニーズが増加し、この機械も各自動車メーカーが導入を進めたのである。

### 4.2 オイルショックの到来

高度成長を順調に続けた日本だが、現在と同様に地政学的リスクが無かった訳ではなかった。

それは 1970 年代に 2 度発生した原油の供給逼迫及び原油価格の高騰である。1973 年に第四次中東戦争が勃発し、これを機に第 1 次オイルショックが始まり（～1977 年 3 月まで）、1978 年にはイラン革命を機に第 2 次オイルショックが始まった（～1983 年 3 月まで）。

この原油価格の高騰はあらゆる産業に大きなダメージを与えることになり、これを機に省エネへの取り組みがスタートしたのである。また公害問題に対する規制が強化され、省資源・省エネルギー・作業環境改善などの取組が行われるようになった。自動車業界では、1970 年初頭の米国のマスキー法案に適合するため、排出ガス規制も切実な問題となった。これにより自動車業界は「低燃費」「排ガス規制」の対応に取組み、エンジン部品の高精度化によるエネルギー損失改善、NOx 削減などの改善、自動車の軽量化によるエネルギー効率の改善などを進めたのである。この流れは、造船や建設機械なども同様に取組まれ、工作機械に対しては、高精度化、高速化が求められることになった。

### 4.3 エネルギー効率の改善と工作機械

では、工作機械に何が求められたのか？ほんの一部ではあるが造船を例に説明する。

#### 4.3.1 大型船舶のスクリュー加工

大型船舶のスクリューの大きさは直径 10m に及ぶものもある。船を航行させるには、エンジンで生み出された回転動力をスクリューに伝え、スクリューを回転させ水との抵抗により船が進む。このスクリューの形状や表面性状が悪いと振動や騒音、圧力差によるキャビテーションが発生するとエネルギー損失が生じ、船の推進に必要なエネルギーが低下してしまう。従って、スクリュー形状を出来る限り理論値に近い形状で加工することが必要である。Fig 15 で紹介したプロペラ翼専用加工機は、主軸頭を 2 頭搭載し、直線 4 軸とテーブル旋回軸 1 軸が NC 軸で同時 5 軸制御であるが、主軸頭の旋回が手動操作であった。従って、主軸頭の旋回位置を手動で決めてからプログラムによる加工を行う為に加工面に段差ができ、最終的に手仕上げを行っていた。本機と同じ軸構成に主軸先端に旋回軸を追加し、1976 年に 9 軸の機械を生産した。FANUC 製 NC 装置を搭載し、同時 9 軸加工を実現することで加工に対する手動介入を最小限に

し、高精度なプロペラ加工が出来るようになった。その結果、振動や騒音も小さくなり船のエネルギー効率が改善したのである (Fig 21)。

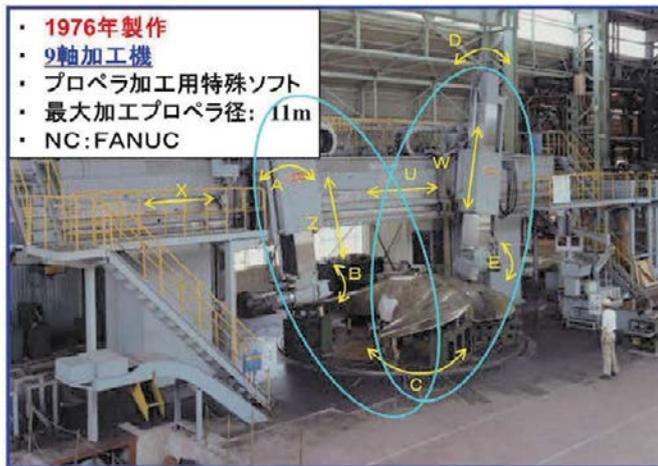


Fig 21. 同時9軸制御プロペラ翼面加工機 MBP-110

#### 4.4 自動車用金型加工の変遷

工作機械の NC 化が進んだことにより、工作機械に対する要求は、今まで以上に高速、高精度が求められるようになった。ここでは、一部分ではあるがこの要求に対して工作機械がどのように進化したのかを自動車金型加工のニーズの変遷を例に説明する。

##### 4.4.1 自動車金型加工機の NC 化

自動車の車体や内装は、大きく分けて 3 つの金型で製作されている。1 つは、薄板鋼板を金型でプレスして製作するボディ、1 つは、射出成型機で作られる内装などのプラスチック部品、もう一つはダイカストマシンで作られるアルミ鋳物のエンジン部品などである。この部品はそれぞれ金型によって作られており、この金型は工作機械で加工して製作されている。これら鋼板ボディやプラスチック製品、アルミダイカスト製品が自動車の全体の質量に占める割合が高く、自動車の軽量化には、この金型の形状精度が重要な役割を果たしている。金型にはメス型とオス型があり、素材を金型で成形する事で量産されている。

1960 年代から 70 年代にかけて金型加工は横型又は縦型主軸の工作機械に倣い装置を付加して加工を行っていた。その後、1970 年代後半には NC 制御の横型機で粗加工を行い、仕上げ加工を門形マシニングセンタで行われるようになってきた。加工が完了した金型は、オス型とメス型を合わせてあたりを見た後、手仕上げで調整し金型を完成させている。金型の形状精度が悪いと手仕上げに時間がかかることと、その調整した金型で成形された製品の肉厚にバラツキが生じると成形品の強度ムラや質量の増加に繋がる。従って、自動車の軽量化を進めるには金型の形状を高精度に仕上げることが必要である。このころには、自動車が一家庭の需要となり、金型の需要も増加したことから金型

生産リードタイム (LT) の短縮要求も増え、その結果、金型加工時間の短縮要求が増加した。

#### 4.4.2 金型加工機の高速・高精度要求への対応

工作機械の NC 化に伴い工作機械にはサーボモータが使われるようになった。その結果、工作機械の位置決め精度は向上し、熟練作業でなくとも精度の良い加工が出来るようになった。その後、NC 装置も進化を続けることになる。当社製 NC 装置の進化については、当社技報 No.29 を一読願いたい。

少し時代は飛ぶが、1980 年代からパーソナルコンピュータ (PC) が市販化され、一般家庭でも PC を持つ時代が訪れた。

このころから工作機械に搭載される NC 装置も処理能力や速度、メモリ容量が向上し、大容量のプログラムによる加工も出来るようになってきた。

CAM による加工プログラムの生成も行われるようになると金型加工プログラムも CAM で作成されるようになり、さらに複雑で高性能な金型を製作できるようになった。このころから、NC 装置、CAM ソフト、切削工具が競うように進化を始めるようになる。当然、この進化に追従した工作機械の開発も必要になり、高速化においては、その送り構造に不可欠なボールネジやリニアガイド、BRG やサーボモータの進化が必要になり、これら製品も急速に進化した。

金型加工の高速高精度化の要求と NC 装置に進化に合わせ当社も金型加工向けに主軸回転速度  $6,000\text{min}^{-1}$  のビルトインモータ主軸を搭載した門形マシニングセンタ MPF シリーズを 1992 年に開発した (Fig 22)。

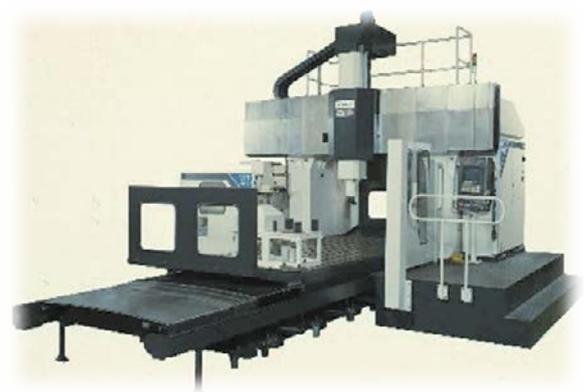


Fig 22. 門形マシニングセンタ MPF-2140A

金型加工の高精度化が進むにつれ、金型も生産効率向上のために大型化し、その大きさ及び質量に対応した金型加工機が必要となった。国内の金型加工工場の多くはスペースが狭く、大型の金型を加工する機械の導入が難しい状況であった。従って、当社は省スペースで大きな金型が加工できる工作機械が必要と考え、省スペースで大きな金型を

高速で加工する事ができる主軸回転速度  $8,000\text{min}^{-1}$  の門形マシニングセンタ MPF-C シリーズを 1994 年に開発した (Fig 23)。



Fig 23. 門形マシニングセンタ MPF-C シリーズ

本機は、6坪に入る機械で最大積載質量 10 トンのテーブル (サイズ  $1.8\text{m} \times 1.4\text{m}$ ) を搭載し、大きな金型を省スペースで、且つ高速高精度で加工できる機械として多くのお客様に好評を得ることができた。

#### 4.4.3 金型形状の複雑化への対応

1990 年後半ごろ自動車の軽量化が進むにつれ、以前は金属であったバンパーなども樹脂 (プラスチック) 化されるようになると、流線形の形状が多くなり、バンパーやインストールパネル用の金型はより深く、複雑な形状となった。また、その他自動車内装用の金型も複雑形状となり、加工プログラムのデータ量も多くなった。更に工場内の LAN 設備が一般的になり、LAN や PC、NC の通信速度の高速化対応や大容量通信対応が必要となり、各々が競うように進化を続けた。更に高速化に対応するために工作機械の主軸回転速度も向上し、競うように工具も進化した。

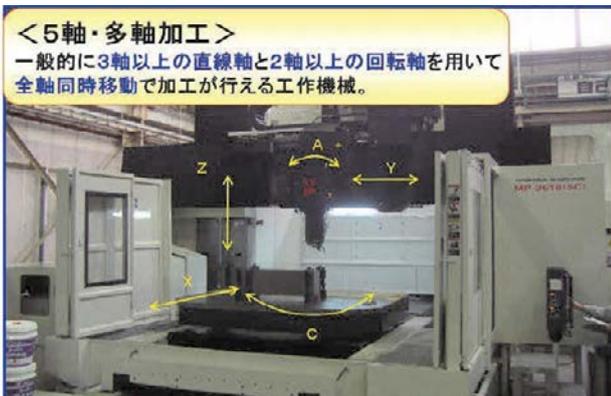


Fig 24. 高速 5 軸門形マシニングセンタ MP-(5C) シリーズ

2000 年に入ると単なる高速化だけでは、金型加工の効率化、高精度化に限界が見えてきたため、直線 3 軸、回転 2 軸の 5 軸工作機械で金型加工が行われるようになってきた。当社も大型化、複雑化する金型加工の効率化に適応し

た主軸回転速度  $12,000\text{min}^{-1}$  の高速 5 軸門形マシニングセンタ MP-(5C) シリーズを開発し好評を得た (Fig 24)。

## 5. 複合化へ

工作機械は、様々な業界で使われるマザーマシンである。社会ニーズは常に効率化、省エネ化、高精度化が基本であり、工作機械の 5 軸化だけでは、これ以上のニーズに応える事に限界があるのではないかと考えた。そこで辿り着いたのが複合化である。加工方法にはミーリング (切削)、ターニング (旋削)、グライディング (研削) など様々な加工方法がある。これらの加工方法ごとに工作機械があり、加工現場では、一つのワークを様々な工作機械を用いて製作している。この様々な加工を 1 台の機械で行うことができれば、非加工時間の削減ができ、更なる効率化ができると考え、複合加工機というカテゴリーの新たな提案を 2008 年の日本国際工作機械見本市 (JIMTOF) で行った。その機械が門形複合加工機である (Fig 25)。



Fig 25. 門形複合加工機 MP-2620U

本機は、門形機と立旋盤の要素を兼ね備え同時 5 軸加工も行える複合加工機である。主軸回転速度も  $10,000\text{min}^{-1}$  に対応し、水車やタービン翼、インペラー、風力発電部品など形状が複雑で段取替えが多い 5 軸加工と旋削加工が必要なワークを一段取りで行える工作機械である。

新たな提案と記載したが、古くから重厚長大向けに超大型の工作機械を製造してきた当社では、数百トンのワークを加工工程ごとに段取替える事は非効率として複合加工で対応していた。その技術を高速 5 軸機に盛り込んだのである。現在では、摩擦攪拌接合 (FSW: Friction Stir Welding) といった新しい接合技術と工作機械の複合化なども手掛けている。

## 6. おわりに

非常に長い工作機械の歴史を社会の変遷と共に紹介したがほんの一部である事にお詫びを申し上げる。本稿は

2008年の複合機の紹介とFSWとの複合化までを記載したが、その後の事や航空機や鉄道、宇宙、再生エネルギーとの関りなどのまだまだ紹介すべき内容があるので、これらについては別の機会に紹介したい。

工作機械は社会ニーズと共に進化を続け、社会も工作機械の進化に合わせて、要求を変えてきている。工作機械に関わってきた筆者としては、その結果が高品位な製品を世に送り豊かな生活を支えていると思えている。

現在では、サステナビリティ（持続可能性）、サーキュラーエコノミー（循環経済）、デジタル化など循環型社会の実現を目指して様々な産業が大きく変化している。自動車のEV化や自動運転化もその一つである。当社の工作機械もこの世の中の変化に追従し、更に進化を続け豊かな世に貢献し続けたい。

## コラム Column

### 未知への挑戦から学ぶ



R&Dセンター 研究開発部  
デジタルツイン開発課

#### 新藤 拓也

入社後、私はXR技術開発の担当になった。当時は社内の知見も非常に少なく、不安を感じたのを覚えている。それと同時に、新興技術の活用に伴う未知の問題や困難と向き合うことで、新たな知識を身に付け自分を成長させる大きなチャンスであるとも感じた。

私のXR初プロジェクトは、社員を対象とした当社の製品技術説明会で使用するXRアプリの開発であった。失敗は許されず、同時にこれまでにない新しい体験を提供することが

新興技術を用いた研究開発に取り組むというのは、海図のない海への航海に近い。例えばXR(Extended Reality)技術は、将来私たちの生活を変える可能性を秘めているものの、現時点ではいまだに黎明期にあるといえる。

必要であった。開発自体は大きな問題無く進んだが、本番当日、デバイスの想定以上の発熱やセンサ校正エラーによってアプリがダウンする問題が発生した。想定外の事態であったが、プロジェクト関係者の支援のもと、事態を収拾して成功を収めることができた。完璧な成功ではなかったが、私は未知の領域への挑戦とその成果がもたらす学びの価値を知ることができた。

私は未知の領域に挑戦する勇気を持つことが大事だと考えている。そのためには、自分自身の知識と技術に対する信頼感を持つこと、そして失敗を恐れず、一つ一つの事象を学びの機会と捉える思考の転換が必要である。挑戦し続け、自分なりのビジョンや見解を持つことで、新しい海図を作り上げることができる。そして、その海図は我々が未来を形成するための道しるべとなる。

# 特許・社外発表(講演)・社外発表(執筆)

## 国内特許 (2022年10月～2023年9月)

	登録番号	発明者	発明の名称
1	7146576	深瀬 泰志, 藤巻 晋平, 不破 久順, 谷垣 昇吾	積層造形装置、積層造形方法、及びプログラム
2	7150948	浅沼 伸行	成形品の成形方法
3	7152433	土屋 康二	ワークの加工方法及びワークの加工装置
4	7154183	淵上 智規, 丸山 健一	複合材料シート製造装置
5	7157588	後藤 直希, 森安 雄平, 山尾 和裕	成形機用可動足場装置
6	7157644	野田 三郎 <sup>*1</sup> , 豊島 俊昭, 中田 光栄	ダイカストマシン及び金属加熱供給装置
7	7160709	佐々木 博成	緩み止め具
8	7168706	三田 哲也	射出装置、成形機、及び成形機の制御方法
9	7168707	三田 哲也	射出装置、成形機、及び成形機の制御方法
10	7169945	土屋 康二	被加工物の加工方法および被加工物の加工機
11	7184713	藤巻 晋平, 深瀬 泰志	ノズル及び積層造形装置
12	7191605	中田 光栄	スラリー生成装置およびスラリー生成システム
13	7193666	三田 哲也	成形機
14	7194156	辻 眞, 豊島 俊昭, 田島 良英, 野田 三郎 <sup>*1</sup>	押出装置及び成形機
15	7194157	辻 眞, 豊島 俊昭, 田島 良英, 野田 三郎 <sup>*1</sup>	押出装置及び成形機
16	7194707	土屋 康二	ワークの加工方法およびワークの加工機
17	7195207	相田 悟, 野田 三郎 <sup>*1</sup>	成形機及び給湯装置
18	7202274	福山 聡, 栗原 義明, 難波 武志, 能勢 功一 <sup>*2</sup>	表面処理装置
19	7221642	小久保 光典, 馬場 丘人, 後藤 利章	転写装置
20	7221777	石橋 健太郎, 鈴木 雄太	積層造形監視システム
21	7221900	土屋 康二	コンピュータプログラム、コンピュータプログラムを用いたワークの加工方法、及びコンピュータプログラムを用いたワークの加工装置
22	7222751	松澤 周吾, 藤本 将輝, 相田 悟, 豊島 俊昭, 牧 雄一	ダイカストマシン、金型付ダイカストマシン、ダイカストマシン用制御装置及びダイカスト方法
23	7223606	藤本 将輝	成形機
24	7232151	芹澤 光明, 結城 拓哉	軸受の潤滑構造
25	7242517	竹下 裕也, 佐野 孝義, 池田 佳久, 田村 政嗣, 加藤 浩明	同時2軸延伸装置のクリップリンク機構
26	7246157	中田 光栄, 相田 悟, 豊島 俊昭	噴出装置、半凝固金属製造装置及びダイカストマシン
27	7246887	中田 光栄	ダイカストマシン
28	7250072	榎本 潤	射出成形機の良否判定システム
29	7254617	辻 眞, 林 勇人, 野田 三郎 <sup>*1</sup>	給湯装置及び成形機
30	7254618	辻 眞, 林 勇人, 野田 三郎 <sup>*1</sup>	ダイカストマシン
31	7254619	辻 眞, 林 勇人, 野田 三郎 <sup>*1</sup>	ダイカストマシン
32	7261206	秋山 貴信	加工機及び被加工物の製造方法
33	7266478	勝又 隆市, 山崎 陽平, 丸岡 宏太郎	射出成形機およびその制御方法
34	7267386	並木 和也 <sup>*3</sup> , 市川 博章 <sup>*4</sup> , 田中 郁朗	発泡成形体製造装置及び発泡成形体製造装置用スクリュ
35	7271295	石橋 健太郎	機械学習方法、情報処理装置、及びプログラム
36	7274348	奥山 浩司	溶融樹脂の流動性指標測定方法
37	7278316	藤本 亮輔, 小関 俊明	片状黒鉛鋳鉄製品及びその製造方法
38	7284665	今堀 慎太郎, 宇野 有祐, 山口 智則, 山口 恭平	Tダイ、Tダイ用パッキン、側方密閉機構、およびシート・フィルム製造装置
39	7286561	芹澤 光明, 萩原 明彦	パターン成形装置及びパターン成形方法
40	7292250	池田 佳久, 齊藤 充彦, 加藤 浩明, 板垣 裕太郎, 竹下 裕也	フィルム延伸装置
41	7294821	藤岡 俊治	射出装置およびダイカストマシン
42	7294882	鮫島 孝文, 飯塚 佳夫, 長田 華穂	再生炭素繊維を含有する成形体および成形体の製造方法
43	7295055	鈴木 亨, 山本 淑弘, 平原 直人, 藤原 茂	ガラス成形機

	登録番号	発明者	発明の名称
44	7300404	竹下 裕也, 佐野 孝義, 田村 政嗣, 池田 佳久, 加藤 浩明	同時2軸延伸装置のクリップリンク機構
45	7301192	豊島 俊昭, 野田 三郎 <sup>*1</sup>	射出装置及び成形機
46	7301563	山田 雅大, 森安 雄平, 山尾 和裕	給湯装置およびダイカストマシン
47	7307609	鈴木 和樹, 相田 悟	ダイカストマシン及び制御装置
48	7307610	鈴木 和樹	成形機及び表示装置
49	7308054	藤岡 俊治	ダイカストマシン
50	7309645	鈴木 亨, 山本 淑弘, 平原 直人, 藤原 茂	ガラス成形機および被搬送体搬送装置
51	7316412	芹澤 光明, 結城 拓哉	軸受の潤滑構造
52	7316610	鹿嶋 行雄 <sup>*5</sup> , 松浦 恵里子 <sup>*5</sup> , 小久保 光典, 田代 貴晴, 平山 秀樹 <sup>*6</sup> , 前田 哲利 <sup>*6</sup> , 定 昌史 <sup>*6</sup> , 上村 隆一郎 <sup>*7</sup> , 長田 大和 <sup>*7</sup> , 古田 寛治 <sup>*7</sup> , 岩井 武 <sup>*8</sup> , 青山 洋平 <sup>*8</sup> , 祝迫 恭 <sup>*9</sup> , 長野 丞益 <sup>*10</sup> , 渡邊 康弘 <sup>*11</sup>	深紫外LED及びその製造方法
53	7324576	中田 光栄	ダイカストマシン
54	7324598	武川 峻介	ダイカストマシンおよび成形品生産方法
55	7325312	結城 拓哉, 佐野 孝義	ガスシール構造及び抽出乾燥装置
56	7332645	室伏 勇	工具の形状異常検出装置、工具の形状異常検出方法
57	7333245	奥山 浩司	溶融樹脂の流動性指標制御方法および装置
58	7346656	中田 光栄, 小岩 正昭, 相田 悟, 富岡 智	注湯装置およびダイカストマシン
59	7349873	池田 佳久, 齊藤 充彦, 加藤 浩明, 板垣 裕太郎, 竹下 裕也	同時二軸延伸装置
60	7349971	中村 隼平, 藤田 将巨, 野木 貴之	予知保全判定装置、予知保全判定方法及びプログラム

\*1 野田テクノリサーチ \*2(株)真空プラズマ \*3 三恵技研工業(株) \*4(株)日本油機 \*5 丸文(株) \*6 国立研究開発法人理化学研究所 \*7(株)アルバック \*8 東京応化工業(株) \*9 日本タングステン(株) \*10 大日本印刷(株) \*11 DOWAホールディングス(株)

## 社外発表「講演」 (2022年10月～2023年9月)

	題目	発表者代表	講演会名	主催者	講演日
1	Improvement of Adhesion of Copper Seed Layer using Vacuum Ultraviolet Light for direct high-speed sp	遠藤 真一 (ウオ電機) 深田 和宏 (共著)	Improvement of Adhesion of Copper Seed Layer using	The electrochemical society 242nd ECS Meeting	2022/10/11
2	ナノインプリント装置の設計と開発、デバイス適用例の紹介	小久保 光典	ナノインプリントの材料設計と装置の最適化	(株)技術情報協会	2022/10/25
3	IoT+m プラットフォーム「machiNet」について	富永 昌登	電気学会東京支部静岡東部支所 Web 講演会	電気学会東京支部静岡東部支所	2022/10/28
4	二軸押出機のセンシングと連続式高せん断加工装置の紹介	尾原 正俊	成形加工学会 押出成形専門委員会	成形加工学会 押出成形専門委員会	2022/11/4
5	環境に配慮したダイカスト技術の製法検証	富岡 智	2022 日本ダイカスト 会議・展示会	(一社)日本ダイカスト協会	2022/11/12
6	超硬金型に向けた切削加工の有用性	牧田 文靖	型技術ワークショップ 2022 in ぎふ	(一社)型技術協会	2022/11/17
7	究極のスピンドルを目指して	田邊 耕平	型技術ワークショップ 2022 in ぎふ	(一社)型技術協会	2022/11/17
8	高機能フィルム製造装置～最新技術のご紹介～	天明 敬、 蘇 歩雲	2022 年高機能フィルム 業界市場と技術発展 フォーラム	北京和生豊茂信息咨询有限公司 (略称: 高機能フィルム連盟)	2022/11/28
9	二軸混練押出機 TEM シリーズのご紹介	大曾根 巧	高機能フィルム展	RX Japan (株) ・フィルムテックジャパン	2022/12/7

	題目	発表者代表	講演会名	主催者	講演日
10	高機能フィルム成形への取り組み	筒井 弘幸, 山口 恭平, 片岡 駿, 加藤 浩明, 加藤 拓朗, 板垣 裕太郎	高機能フィルム展	RX Japan(株) ・フィルムテック クジャパン	2022/12/7
11	新しい押出成形技術が創るサステナブル社会	池田 崇夫	プラスチック ジャパン 専門セミナー 有料	プラスチックジ ャパン	2022/12/8
12	高精度ガラス成形技術	山本 淑弘	砥粒加工学会 研削・研 磨盤の高度化 (GAP) 専門 委員会 第31回 研究 会 「超精密工作機械の 最新動向	砥粒加工学会 GAP(研削・ 研磨盤の高度 化)専門委員会	2022/12/22
13	マシニングセンタによる3次元形状の 高精度加工技術	栗山 邦隆	砥粒加工学会 研削・研 磨盤の高度化 (GAP) 専門 委員会 第31回 研究 会 「超精密工作機械の 最新動向	砥粒加工学会 GAP(研削・ 研磨盤の高度 化)専門委員会	2022/12/22
14	ナノインプリント装置の設計と開発, デバイス適用例の紹介	小久保 光典	ナノインプリントリソ グラフィによる微細加工 技術・プロセス評価およ び半導体・デバイス・ 光学材料への応用	(株)AndTech	2023/1/24
15	モノづくり DX の推進	前原 弘之、 徳山 晴道	第9期 設計-生産 インターフェース分科会 第3回会合	NEC ものづくり 研究グループ事 務局	2023/2/16
16	リスクアセスメント事例 AGV-シャッター 連携システムのリスクアセスメント	青野 竜二	2022年度第2回セーフテ ィアセッサ部会スキルア ップミーティング	(一社)セーフテ ィグローバル推 進機構 セーフ ティアソシエイ ツ協議会	2023/2/16
17	機械学習による生産支援ロボットの 現場導入期間削減と多能化	中村 陽一郎	NEDO NEXT AI FORUM2023	NEDO(新エネ ルギー・産業技術 総合開発機構)	2023/2/17
18	JAMP フォーラムでの社内 PDM システムの ワークフロー事例の紹介	小松 禎史、 渡部 浩介	JAMP フォーラム	アラスジャパン 合同会社	2023/2/24
19	ダイカストマシンと周辺機器	相田 悟	2023年度素形材技術研修 講座「アルミニウム ダイカストの生産技術」	(一社)素形材セ ンター	2023/3/2
20	中真空 PVD による導体層の形成技術	深田 和宏	表面技術協会 第147回 講演大会	表面技術協会	2023/3/8
21	自己符号化器を用いた切削加工の状態判別	星谷 拓	2023年度精密工学会春季 大会	(公社)精密 工学会	2023/3/14
22	DC400R2 ダイカストマシンのご紹介	相田 悟	正会員・賛助会員交流会	(一社)日本ダ イカスト 協会	2023/3/14
23	光学レンズの超精密研削における AE 信号 とサーボ電流を用いた加工面品位の評価	下堂 滉大 (慶応義塾 大学) 福田 将彦 (共著)	春季精密工学会講演会、 第29回「学生会員卒業 研究発表講演会」	(公社)精密 工学会	2023/3/14
24	工作機械の衝突時の挙動と負荷軽減処理の 効果確認	伊東 隆充	2023年度精密工学会春季 大会学術講演会	(公社)精密 工学会	2023/3/16
25	二軸混練【WEB セミナー】	前川 泰浩	二軸混練【WEB セミナー】	(株)R&D 支援センター	2023/3/30

	題目	発表者代表	講演会名	主催者	講演日
26	循環型経済へ対応し環境負荷低減に貢献する全電動式射出成型機 EC-SXⅢシリーズ	浅沼 伸行	東日本プラスチック製品工業協会 第402回理事会 賛助会員プレゼンテーション	東日本プラスチック製品工業協会	2023/4/20
27	関西高機能フィルム展、自社ブースでのロールツウロールUV転写装置及び高機能フィルムへの取り組みの紹介	平田 優樹	関西高機能フィルム展	RX Japan(株)	2023/5/17
28	関西高機能フィルム展、自社ブースでの押出機紹介	鈴木 照三	関西高機能フィルム展	RX Japan(株)	2023/5/17
29	シート・フィルム製造装置	西田 直矢	関西高機能フィルム展	RX Japan(株)	2023/5/17
30	高せん断加工装置 HSE-48 のご紹介	笹井 裕也	関西高機能フィルム展	RX Japan(株)	2023/5/17
31	サステナブル社会に貢献する新しい押出成形技術	池田 崇夫	プラスチック ジャパン 専門セミナー	プラスチック ジャパン	2023/5/19
32	Improvement of flowability of PP/GF by high-shear rate processing	笹井 裕也	PPS38	Polymer Processing Society	2023/5/25
33	超硬直彫りに必要な加工機特性とプレス金型への適用例	栗山 邦隆	硬脆材(超硬・セラミック型)の直彫り加工の最先端	(社)型技術協会	2023/5/26
34	中真空プラズマ処理/PVDによるビルドアッププリント配線基板上への微細配線形成	小久保 光典	2023年(令和5年)第2回研究会	応用物理学会 ナノ荷電粒子ビーム産学連携委員会	2023/5/26
35	自硬性鋳型による鋳物の工程	藤本 亮輔	鋳造入門講座	(一社)日本鋳造協会	2023/5/27
36	ナノインプリント装置の設計と光学材料への適用例	小久保 光典	ナノインプリントによる微細加工技術、装置の設計および光学材料への適用	(株)AndTech	2023/5/31
37	高品質・高機能フィルム成形に適した延伸技術の紹介	齊藤 充彦	プラスチック成形加工学会第34回年次大会	(一社)プラスチック成形加工学会	2023/6/22
38	高せん断付加によるPP/GFの高流動化と薄肉射出成形	笹井 裕也	プラスチック成形加工学会第34回年次大会	(一社)プラスチック成形加工学会	2023/6/22
39	プラスチックレンズ加工技術の最新動向	福田 将彦	プラスチックレンズ	(株)AndTech	2023/6/28
40	オンマシンでのツールとワークの計測	福田 将彦	次世代固定砥粒加工プロセス専門委員会 第109回研究会	(公社)砥粒加工学会	2023/6/30
41	二軸混練【WEBセミナー】	前川 泰浩	二軸混練【WEBセミナー】	(株)技術情報協会	2023/7/14
42	Improvement of flowability of PP/GF by high-shear rate processing	笹井 裕也	IPC2023	(公社)高分子学会	2023/7/20
43	アクセラレータープログラム 成果報告	雨澤 弘機	TECH BEAT Shizuoka 2023 成果報告会	静岡銀行	2023/7/21
44	段ボール開梱作業を省人化!『ロジロボ』シリーズ紹介	荒川 兼祐	2023年度第1回 ロボットシステムインテグレート向け【新商品・サービス説明会】	日本ロボットシステムインテグレート協会	2023/7/27
45	芝浦機械 企業紹介および技術紹介	福山 聡	第13回回光学素子分科会	特定非営利活動法人VCADシステム研究会	2023/7/31
46	中真空PVDによる導体層の形成技術	深田 和宏	2023年電気学会電子・情報・システム部門	(一社)電気学会C部門	2023/9/1
47	省スペースで高効率な作業を行う 双腕協働ロボット	矢部 幸次	生産支援ロボット研究会	(公社)大阪府工業協会	2023/9/6
48	超精密加工機におけるサーボ式真直度誤差補正の検討	鈴木 亨	精密工学会 秋季大会	(公社)精密工学会	2023/9/15

	題目	発表者代表	講演会名	主催者	講演日
49	埼玉ロボネット分野別研究会での NEDO プロジェクトの成果紹介	中村 陽一郎	埼玉県主催埼玉ロボネット分野別研究会 (第1回物流編)	(公社)埼玉県産業振興公社	2023/9/26
50	レーザ加工技術フォーラム -レーザ加工技術のトレンド-	谷垣 昇吾	芝浦機械がもつ AM 技術の紹介と実用化に向けた取り組み	(地独)神奈川県立産業技術総合研究所 (略称: KISTEC)	2023/9/28

## 社外発表「執筆」 (2022年10月~2023年9月)

	題目	執筆者 (筆頭のみ)	掲載誌名	発行所
1	Medium Vacuum PVD for PWB	Asan Li (伯東台湾・発表者) 深田 和宏 (パル製作)	TPCA show (パネル展示)	TPCA show
2	高速 PVD 両面成膜装置およびダイレクト銅めっきシード層形成技術	梅田 泰 (関東学院大学・発表者) 深田 和宏 (パル製作)	表面改質展 (パネル展示)	表面改質展
3	シード層形成用高速 PVD 装置	中村 伸也 (三井情報・発表者) 深田 和宏 (パル製作)	SEMICON Japan 2022 (2022年12月14日~16日 三井情報ブース内でパネル展示)	SEMICON Japan 2022
4	高せん断付加による PP/GF の射出成形流動長の改善	笹井 裕也	成形加工 2023 年 4 月号 (3月発行)	(一社)プラスチック成形加工学会
5	プラスチックレンズ加工技術の最新動向	福田 将彦	プラスチックレンズ (2023年3月)	(株)And Tech
6	環境に配慮したダイカスト技術の製法検証	富岡 智	素形材 Vol164, No3 (2023年3月)	(一財)素形材センター
7	「铸造性に関する評価方法」調査研究 サブタイトル: 溶湯の補給性の評価方法	小岩 正昭	(一社)日本ダイカスト協会 研究報告書 (2023年4月)	(一社)日本ダイカスト協会 研究開発委員会
8	Improvement of flowability of PP/GF by high-shear rate processing	笹井 裕也	IPC2023 preprint	The society of Polymer Science, Japan
9	ADC12 合金における金型内の溶湯調査	中田 光栄	ダイカスト研究部会 研究報告書	鑄造工学会ダイカスト研究部会
10	中真空 PVD 両面成膜装置技術	深田 和宏	中真空 PVD 両面成膜装置技術 (パネル展示)	JPCAshow
11	Mastercam ユーザー事例集	宇佐美 幸一、 山本 寛之	Mastercam ユーザー事例集 (2023年7月)	(株)ゼネテック
12	iCAD フォーラム 42nd 事例講演レポート	iCAD 株式会社、 宇佐美 幸一 (共著)	機械設計 (2023年8月)	(株)日刊工業新聞社
13	中真空 PVD による導体層の形成技術	深田 和宏	実装フェスタ関西 2023 (パネル展示)	実装フェスタ関西 2023
14	金属 3D 積層造形機「ZK シリーズ」と自律移動ロボットとの連携	谷垣 昇吾	機械技術 9 月臨時増刊号 (2023年8月)	(株)日刊工業新聞社
15	楕円振動切削によるガラス材光学部品の加工 (第二報)	長坂圭祐	2023 年度砥粒加工学会学術講演会論文集 (2023年9月)	(公社)砥粒加工学会

## 受賞トピックス

### 1. 公益社団法人精密工学会より『2022年度（70期）東海支部賞』を受賞

2023年3月3日、公益社団法人精密工学会東海支部の2023年度(第71期)支部総会にて、2022年度(70期)東海支部賞を受賞しました。

本賞は、精密工学会東海支部の活性化、精密工学分野の学術活動および実用化技術開発の振興の促進を目的とし、精密工学会東海支部の発展に顕著な功績を示した方に授与されるもので、精密工学会所属の正会員もしくは賛助会員(東海支部内)の2名以内に与えられるものです。

受賞者は、「事業企画委員」「春季・秋季大会学術講演会のオーガナイザー」「理事」「東海支部幹事・商議員」「静岡県東部精密技術研究会役員」等を歴任しており、精密工学会東海支部の発展に顕著な功績が認められ受賞となりました。



### 2. TECH BEAT Shizuoka 実行委員会より『TECH BEAT Shizuoka AWARD 実行委員会委員長賞』を受賞

2023年7月21日、静岡銀行が主催するTECH BEAT Shizuokaにて、TECH BEAT Shizuoka AWARD 実行委員会委員長賞を受賞しました。

TECH BEAT Shizuokaは、静岡県内企業・自治体の更なる発展のために、スタートアップ企業との共創を生み出すためのイベントになります。本賞は、静岡県内企業とスタートアップ企業との共創事例の中で、特に優れた活動を行った企業に授与されるものです。実行委員会から、先進的な社員教育プログラムを短期間で構築し、モチベーションの向上、状況の把握、強み・弱みの明確化など将来につながる成果を得た点が評価され、当社と共創した株式会社エナジードとともに受賞しました。



## 特許紹介

当社は会社方針の一つとして「知的財産権の尊重」を掲げ技術開発の成果を知的財産権によって保護するとともに、第三者の知的財産権を尊重しています。お客様に満足していただける製品、システム、サービスを提供するため技術開発に力を入れています。その結果、国内外約 1,700 件の特許権を保有していますが、その中から「労働生産性向上」に関連する特許を中心に紹介します。これらの特許はパテント・リザルト社のパテントスコアで高い評価を頂いております。

(パテントスコア：審査経過情報をもとに、個別特許の注目度をスコアリング評価する指標)

### 1. 成形機

特許番号: 特許第 7,058,794 号

発明者: 三田哲也

一般的な成形機においては、制御装置に関する情報は制御装置に固定された表示画面に表示され、操作装置に関する情報は操作装置に固定された別の表示画面に表示されます。

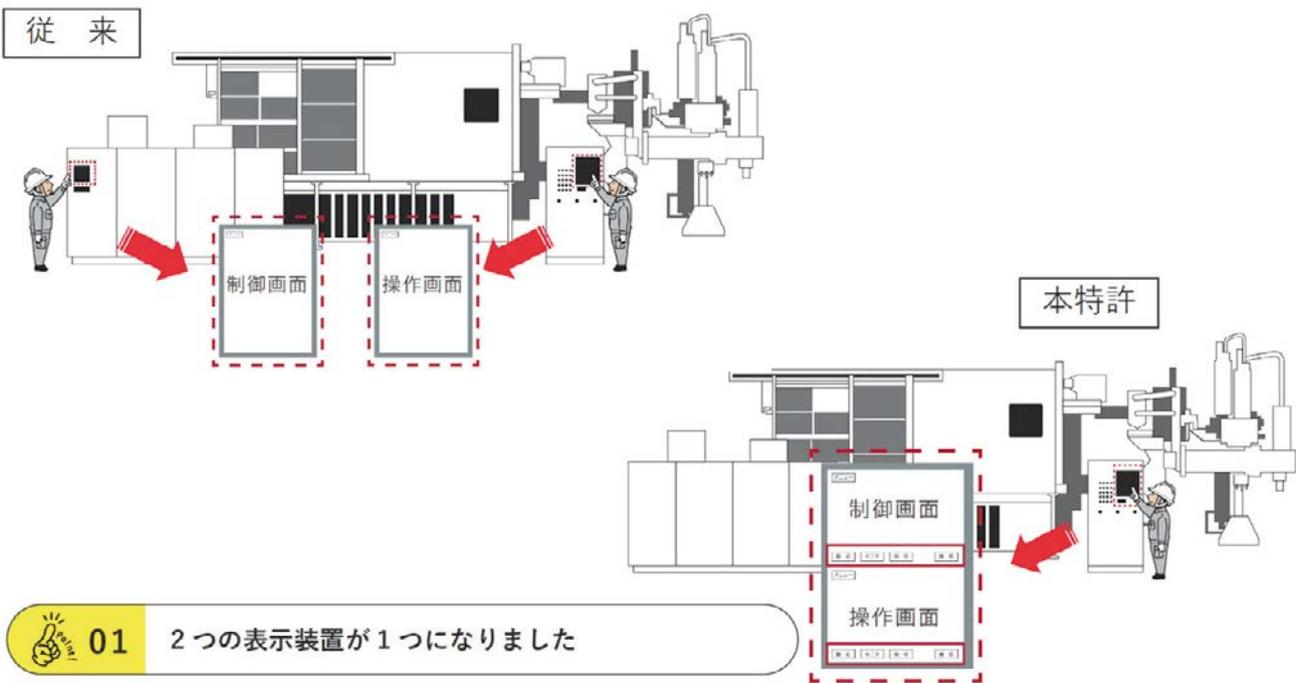
例えば、従来のダイカストマシンを運用する際、オペレータは、制御装置に固定された表示画面と操作装置に固定された別の表示画面との間を行き来する必要があり、ダイカストマシンの操作性が低下する問題が生じていました。

本特許の成形機の表示装置では、自動運転で用いられるパラメータの表示及び入力が可能な設定画面、型締装置及び射出装置の動作状態を表示するモニタ画面、自動運転の異常発生時の異常発生要因又は異常発生個所を表示する保守画面のいずれか 2 つを 1 つの画面内に表示することが可能であり、設定画面、モ

ニタ画面、保守画面のそれぞれに操作画面への切り替えボタンが表示されていることから、成形機の操作性が格段に向上しました。

さらに、次のようなユーザビリティ改善を盛り込みことでスムーズなマシン運用が可能となりました。

- ①マシンの運転モード切替に連動した操作画面の自動切替
- ②取説等のドキュメント表示(PDF)やPLCプログラムの表示機能と組合せる事で早期問題解決
- ③表示灯を画面内に配置し、ユーザ毎にデザインのカスタマイズが可能
- ④生産運転時は操作を行わない為、操作画面を閉じて他の画面を表示可能



- 01** 2つの表示装置が1つになりました
- 02** 画面内の操作ボタンにより操作が楽になりました

## 2. 転写装置および転写方法

特許番号：特許第 6,359,167 号

発明者：小久保光典、馬場丘人、後藤利章

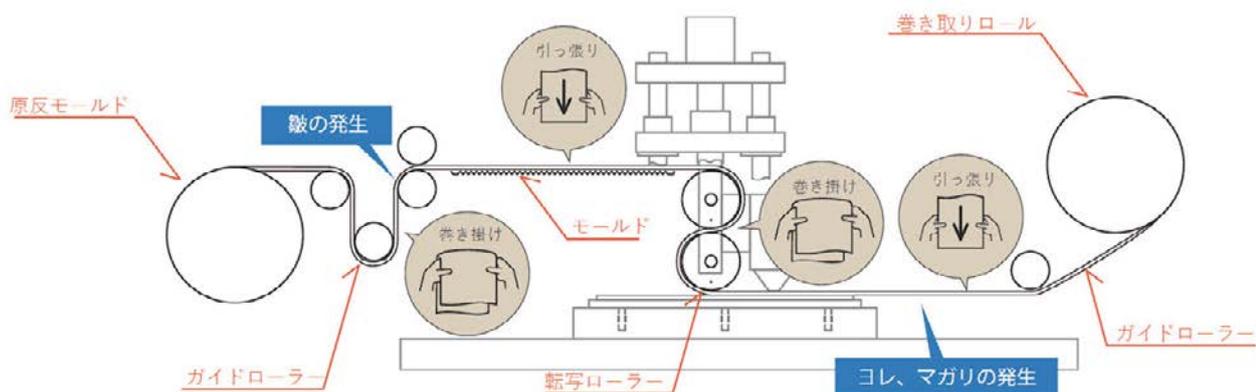
モールドに形成されている微細な転写パターンを基板に転写する転写装置では、転写に使用されるモールドが、モールド原反と巻き取りロールとの間で延伸されて設置されています。

従来の転写装置では、装置や器具等を全く使用しないで人手によりモールドをモールド原反と巻き取りロールとの間に設置し、モールドを延伸していました。そのため、モールド原反から繰り出して延出しているモールドに僅かなよじれがあったときに、モールドに皺が発生してしまう等、モールド原反と巻き

取りロールとの間でモールドを精度良く設置することが非常に難しいという問題がありました。

本特許の転写装置では、モールドをモールド原反設置部に設置した後は、巻き取りロールの近傍までガイドするモールド設置補助部によって、人手を介さず、転写ローラに巻き掛け、ガイドローラに巻き掛け、巻き取りロールまで送られるため、皺の発生をおさえつつ、モールドの正確な設置を容易にすることができるようになりました。

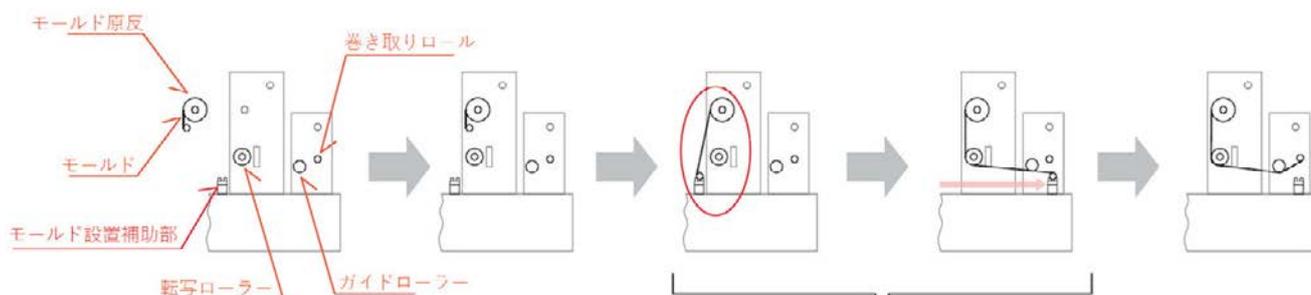
### 従来



人手によりモールドを巻き掛けたり引っ張ったりして転写装置に設置

### 本発明

- ① モールド準備
- ② モールドセット
- ③ 巻き掛け開始
- ④ 巻き掛け終了
- ⑤ モールド設置



モールドをモールド設置補助装置にセットした後はモールド設置補助装置が自動で巻き掛けを行う

 モールドを、人手を介さず、皺の発生をおさえ、正確に設置できるようになりました

### 3. 二軸押出機を用いた混練方法

特許番号：特許第 5,572,776 号

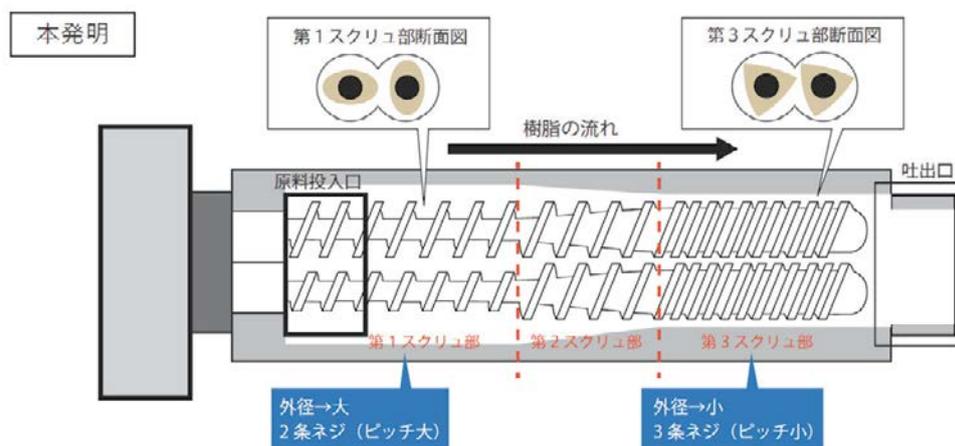
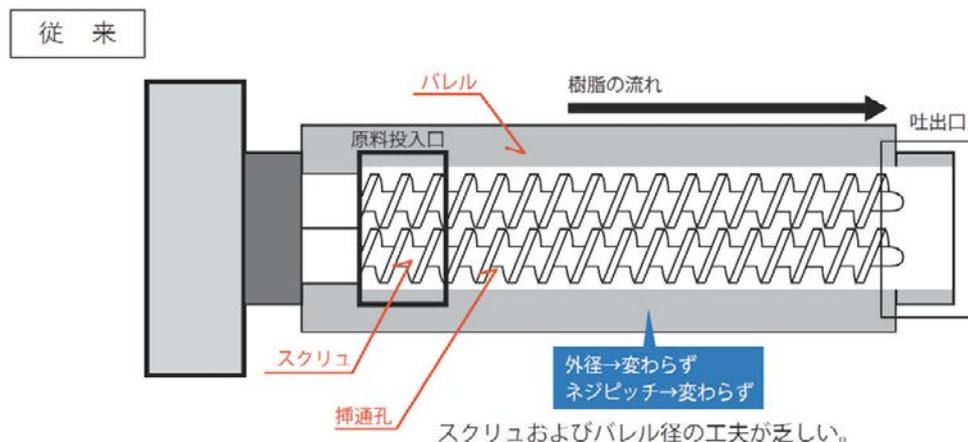
発明者：小林昭美、中沢俊貴、尾原正俊、齋藤裕之

ペレット状や粉体状の樹脂原料等の材料を混練する二軸押出機は、材料を供給する投入口と、投入口より供給された材料が通過する挿通孔と、挿通孔を通過する間に混練された材料を吐出する吐出口が設けられたバレルを備えています。このバレルの挿通孔には、一定の軸間距離を保って平行に配置され、互いに噛み合いながら同方向に回転する2本のスクリュが挿入されています。

従来、単位時間当たりの材料の処理量を高めるために、スクリュの外径に対しスクリュの谷径を小さくして、スクリュの混練容積を大きくした2条ねじの深溝スクリュとすると共に、スクリュの回転駆動力を大きくする改良が行われていました。スクリュの回転駆動力を大きくするためにはスクリュ軸の強度を強くしなければならず、高強度スプラインを形成した軸を用い

る等されてきましたが、近年、スクリュの谷径やスクリュ軸の外径は設計的に限界の値に達しつつありました。

本特許の二軸押出機は、外径が大きい2条ねじの第1スクリュ部、外径が小さい3条ねじの第3スクリュ部、およびそれらの中間にあたる第2スクリュ部で構成されたことに特徴を有しています。この特徴により、供給された樹脂原料と粉体状の充填剤の材料から混入していた空気が抜けて材料容積が小さくなくても、スクリュの回転によるせん断作用を適正に働かせることができ、混練された材料の物性の劣化と分散状態を許容範囲内に収めることができるようになりました。さらに、適切な外径/軸間距離によって単位時間当たりの材料の処理量も高くなりました。生産性の非常に優れた二軸押出機となっています。



- 01** 混練された材料の物性の劣化と分散状態を許容範囲内に収めることができました
- 02** 適切な外径 / 軸間距離によって単位時間当たりの材料の処理量も高くなりました

## 4. ハンドリング装置、ワークハンドリング方法および信号処理装置

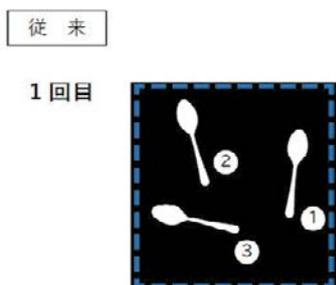
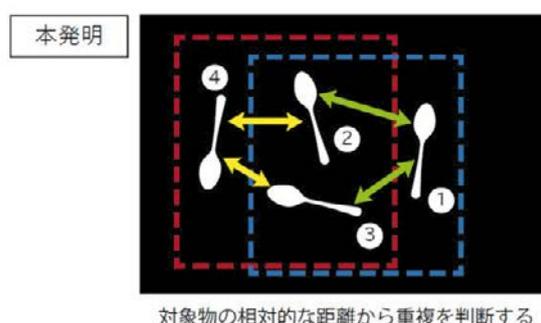
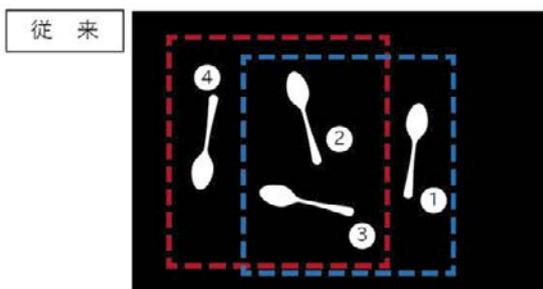
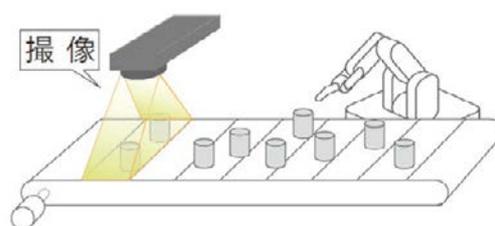
特許番号：特許第 5,198,155 号

発明者：西原泰宣

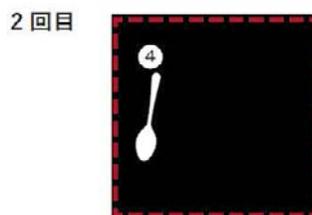
視覚センサをベルトコンベアの上流に配置して、ベルトコンベアによって搬送されている物品を検出し、視覚センサが生成した物品データを用いてロボットが物品に行う動作を制御するハンドリング装置が広く使われています。

従来のハンドリング装置では、視覚センサから送信された物品データを順次記憶してデータベースを構築し、データベースに格納されている内容に順応してロボットの動作制御を行っていました。このような物品データの扱い方では、視覚センサが連続して複数回の撮像を行ったとき、撮像した各画像に同一物品が重複して写っている部分が含まれ、この重複部分の物品データもデータベースに格納されてしまうことからロボットに無駄な動作が生じる問題がありました。

本特許のハンドリング装置では、撮像データからトラッキング範囲内の物品を抽出し、抽出した物品の位置および移動量を含む物品データを生成し、さらに物品の個数および物品データを含むトラッキングデータを生成し、ロボットの近傍のトラッキング領域における複数の物品間の相対的な距離をトラッキングデータ等より求め、その距離が所定値より短い場合、重複していると判断して他方の物品を除去するようロボットに指示することで、ロボットの無駄な動作を抑制することができるようになりました。



1回目と2回目の撮像で②と③が重複して残っている



②と③は2回目の撮像において重複除外されている

 ロボットの無駄な動作を抑制することができる



慶應義塾大学 理工学研究科  
総合デザイン工学専攻  
理工学部システムデザイン  
工学科 教授

## 柿沼 康弘

東芝機械から芝浦機械と社名を変更されてからの技報第28、29号の講評を東京大学の名誉教授でおられる樋口先生、横井先生が執筆されており、依頼を受けた際は、正直躊躇ってしまいました。しかし、これは芝浦機械へ筆者の思いを伝える良い機会とも思い、道半ばの研究者ではあるが思い切ってお引き受けした。

芝浦機械との出会いは大学4年生まで遡り、かたちは様々であり、そこから途切れることなく四半世紀にわたり一緒に研究をしている。プロセスから加工システムに至るまで、様々な研究にチャレンジする機会に恵まれ、それぞれ成果に繋げることができたのは、芝浦機械の技術協力があったからこそと感謝している。特に田中克敏氏には、学生時代から親身になって育てて頂いた。機械要素と制御を中心に研究していた筆者に、超精密加工の研究を始めるきっかけを与えて下さったのも田中氏である。ナノスケールの加工技術に興味はあったが、知識もなく足を踏み入れる勇気がなかった筆者に、田中氏は「私が教えますから」と優しく仰ってくれた。若い研究者にとってこれほど力強い言葉はなかったし、安心して新しい研究分野に飛び込むことができた。また、研究を通してこれまでに様々な作品（あえて部品ではなく作品とよびたい）を製作して頂いた。斜め45度から見ると自分の顔が映るアルミ板（微細V溝を施した鏡面アルミ板）、精度が高すぎて学生レベルでは組み立てられない研磨装置（軸と穴の公差が厳しいため）、理想的な制御を行う完全非接触精密加工機などである。私も学生たちも実物を通してその技術力を肌身で感じるとともに、ものづくりの奥深さを知り興味を抱くわけである、その点で、産学連携による学生への教育効果は極めて高い。今もなお、田中氏をはじめ芝浦機械の多くの技術者に協力して頂きながら研究を続けている。会社の垣根を超えて、若手人材を大切に育てる風土は、芝浦機械の誇るべき強みと言えるであろう。

さて、Industry 4.0が提唱されものづくりと情報化技術の融合が叫ばれてから久しい。デジタルツインに基づくサイバーフィジ

カルシステム（CPS）やデジタル変革（DX）のコンセプトが議論され、現在は、実装に向けてソフトウェアおよびハードウェアの両面における研究開発が加速している。ソフトウェアでは、プロセスと工作機械構成要素との相互作用まで含めたシミュレータや機械学習によるデータ解析、ハードウェアではセンサを組み込んだ工作機械の構成要素や自律走行ロボットに関する研究開発が盛んである。DXに関する研究開発の最終ゴールは究極の自動化であり、今回の技報第30号のテーマである「労働生産性向上」も含まれる。射出成形機の温度シミュレーション、AIによるきさげ作業の評価、自律ロボットの制御構造、フィルム製造装置の自動化と省力化、ロジスティックロボットシステム、ロボットの安全システムなどは、DXまで意識した取り組みである。

労働生産性を既存の設備を利用して向上させるのであればDXというアプローチは理にかなっている。一方で、プロセスや機械が進化すれば、それこそ飛躍的に労働生産性は向上する。今回の技報では、この観点から中真空PVD装置によるシード層形成技術、ダイカストにおける環境負荷低減技術、PMMA成形における不良発生の原因追及、工具刃先位置補正技術などが取り上げられている。批判を恐れずに言えば、既存技術を用いたDX化は改善や安全安心には貢献するのに対して、物理現象に基づく新しいプロセスや機械を生み出すことは飛躍的な革新に繋がると言えるだろう。後者は芝浦機械の得意とするところであり、これまでも超精密加工機をはじめ他に類をみないプロセスや機械を開発された経験と実績がある。この特徴を武器に、DX化と融合しながら、世の中を先導する革新的技術の研究開発を継続され、更なる発展を遂げることを期待している。





発行日：2024年4月12日

非売品：本誌記事の無断引用無断転載を禁じます。

発行人：小久保 光典

発行所：芝浦機械株式会社  
R & Dセンター 研究開発部  
神奈川県座間市ひばりが丘 4-29-1

#### 芝浦機械技報編集委員会

委員長 小久保 光典

委員	藤田 純	五十嵐 敏裕		
	飛田 英昭	水上 光義	池田 佳久	柿島 浩之
	河野 泰二	船木 崇宏	後藤 剛	武田 勝久
	石井 雄介	山口 大輔	風間 拓郎	
幹事	三田 義一	山本 正幸	大川 貴史	松田 堯之
	瀬戸 到			

## 国内拠点一覧

## 東京本社

〒100-8503  
千代田区内幸町 2-2-2 (富国生命ビル)  
TEL 03-3509-0200  
FAX 03-3509-0333

## 沼津本社

〒410-8510  
静岡県沼津市大岡 2068-3  
TEL 055-926-5141  
FAX 055-925-6501

## 東北支店

〒981-3112  
仙台市泉区八乙女 2-11-2  
TEL 022-374-6111  
FAX 022-374-6118

## 中部支店

〒465-0025  
名古屋市長東区上社 5-307  
TEL 052-702-7811  
FAX 052-702-1141

## 関西支店

〒578-0984  
東大阪市菱江3-14-8  
TEL 072-947-0402  
FAX 072-0947-0408

## 九州支店

〒812-0004  
福岡市博多区榎田 2-3-23  
(FMT 榎田ビル)  
TEL 092-451-2795  
FAX 092-474-1045

## 高崎営業所

〒370-0016  
群馬県高崎市矢島町 739-6  
TEL 027-367-2370  
FAX 027-360-5055

## 浜松営業所

〒433-8117  
静岡県浜松市中区高丘東 5-6-25  
TEL 053-436-7407  
FAX 053-436-3996

## 広島営業所

〒731-0103  
広島市安佐南区緑井 5-17-5  
TEL 082-831-7530  
FAX 082-879-7065

## 尾道営業所

〒729-0141  
広島県尾道市高須町 4778-1  
TEL 0848-56-2378  
FAX 0848-56-2377

## 沼津工場

〒410-8510  
静岡県沼津市大岡 2068-3  
TEL 055-926-5141  
FAX 055-925-6501

## 相模工場

〒252-0003  
神奈川県座間市ひばりが丘 4-29-1  
TEL 046-258-2801  
FAX 046-258-2900

## 御殿場工場

〒412-0038  
静岡県御殿場市駒門 1-120  
TEL 0550-87-3555  
FAX 0550-87-3742

## 国内関係会社一覧

## 芝浦機械エンジニアリング株式会社

〒410-0007  
静岡県沼津市西沢田 267-2  
TEL 055-921-7800  
FAX 055-921-7831  
<https://www.shibaura-machine.co.jp/smeng/>

## 東栄電機株式会社

〒411-8510  
静岡県三島市松本 131  
TEL 055-977-4111  
FAX 055-977-4110  
[http://www.toei-electric.co.jp/index\\_J.htm](http://www.toei-electric.co.jp/index_J.htm)

## 芝浦セムテック株式会社

〒410-8510  
静岡県沼津市大岡 2068-3  
TEL 055-924-3450  
FAX 055-925-6556  
<http://www.s-semtek.co.jp/>

## 芝浦産業株式会社

〒410-8510  
静岡県沼津市大岡 2068-3  
TEL 055-922-0816  
FAX 055-924-5816

## 海外主要拠点一覧

## &lt; 東アジア &gt;

## SHANGHAI SHIBAURA MACHINE CO., LTD.

4788, Jin Du Road, Xinzhuang Industry Zone, Shanghai, 201108, PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA  
TEL: [86]-(0)21-5442-0606  
FAX: [86]-(0)21-5866-2450  
SHANGHAI\*, BEIJING, TIANJIN, DALIAN, CHONGQING, NINGBO

## SHIBAURA MACHINE (SHANGHAI) CO., LTD.

4788, Jin Du Road, Xinzhuang Industry Zone, Shanghai, 201108, PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA  
TEL: [86]-(0)21-5442-5455  
FAX: [86]-(0)21-5442-5466

## SHIBAURA MACHINE (SHENZHEN) CO., LTD.

Room 608, Building 2, Animation Park, Yuehai Road, Nanhai Street, Nanshan District, Shenzhen, 518054, PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA  
TEL: [86]-(0)755-8625-0599  
FAX: [86]-(0)755-8625-0522  
SHENZHEN\*, GUANGZHOU

## SHIBAURA MACHINE TAIWAN CO., LTD.

7F, No.168, Ruiguang Road, Neihu District, Taipei City, 11491, TAIWAN  
TEL: [886]-(0)2-2659-6558  
FAX: [886]-(0)2-2659-6381

## &lt; 東南アジア &gt;

## SHIBAURA MACHINE SINGAPORE PTE. LTD.

123 Pioneer Road, Singapore 639596, SINGAPORE  
TEL: [65]-68611455  
FAX: [65]-68612023  
SINGAPORE\*, KUALA LUMPUR, PENANG

## SHIBAURA MACHINE (THAILAND) CO., LTD.

127/28 Panjathanee Tower, 23rd Floor, Nonthree Road, Khwaeng Chong Nonthree, Khet Yannawa, Bangkok 10120, THAILAND  
TEL: [66]-(0)2-681-0158 ~ 61  
FAX: [66]-(0)2-681-0162

## PT. SHIBAURA MACHINE INDONESIA

Jalan Ciputat Raya No. 1B Unit 1&2, Desa/Kelurahan Pondok Pinang, Kec. Kebayoran Lama, Kota Adm. Jakarta Selatan, Provinsi DKI Jakarta, 12310, INDONESIA  
TEL: [62]-(0)21-22761766, 22761770  
FAX: [62]-(0)21-2122761624

\*: HEAD OFFICE

## SHIBAURA MACHINE VIETNAM COMPANY LIMITED.

2nd Floor, VIT Tower, No. 519, Kim Ma Street, Ngoc Khanh Ward, Ba Dinh district, Hanoi, VIETNAM  
TEL: [84]-(0)24-2220-8700, 1  
FAX: [84]-(0)24-2220-8702  
HANOI\*, HO CHI MINH

## SHIBAURA MACHINE INDIA PRIVATE LIMITED

No. 65 (P.O. Box No. 5), Chennai-Bangalore Highway, Chembarambakkam, Poonamallee Taluk, Thiruvallur, Chennai, TN 600123, INDIA  
TEL: [91]-(0)44-2681-2000  
FAX: [91]-(0)44-2681-0303  
CHENNAI\*, DELHI, MUMBAI

## SHIBAURA MACHINE MANUFACTURING (THAILAND) CO., LTD.

7/499 Moo 6, Tambol Mabyangporn, Amphur Pluakdaeng, Rayong 21140, THAILAND  
TEL: [66]-(0)38-027313  
FAX: [66]-(0)38-027317

## &lt; 米州 &gt;

## SHIBAURA MACHINE COMPANY, AMERICA

755 Greenleaf Avenue, Elk Grove Village, IL 60007, U.S.A.  
CHICAGO\*, LOS ANGELES, CHARLOTTE, ATLANTA, ONTARIO/CANADA  
TEL: [1]-847-593-1616  
FAX: [1]-847-593-0897

## SHIBAURA MACHINE MEXICO, S.A. DE C.V.

Circuito Luxma No. 115, Poligono Industrial Milenio, C.P. 37290 Leon, Guanajuato, MEXICO  
TEL: [52]-477-101-8600

## SHIBAURA MACHINE DO BRASIL COMERCIO DE MAQUINAS LTDA.

Rua Cubatao, 86 Conjunto 1307, Vila Mariana, Sao Paulo, SP CEP 04013-000, BRASIL  
TEL: [55]-(0)11-3253-3331  
FAX: [55]-(0)11-3586-0138

## &lt; 欧州 &gt;

## SHIBAURA MACHINE EUROPE S.R.L

Via Gaudenzio Fantoli 7, Piano 2, 20138, Milano, ITALIA  
TEL: [39]-02-50041667  
FAX: [39]-02-50041668

## 芝浦機械株式会社

〒100-8503 千代田区内幸町 2-2-2 (富国生命ビル)  
TEL 03-3509-0200 FAX 03-3509-0333

〒410-8510 静岡県沼津市大岡 2068-3  
TEL 055-926-5141 FAX 055-925-6501

URL <https://www.shibaura-machine.co.jp>

