

# 芝浦機械技報

SHIBAURA MACHINE  
ENGINEERING REVIEW

Jan. 2023

Vol. 29

特集

エネルギー・  
環境



■ 巻頭言	2	巻頭言
■ 特別記事	3	高みへ
	5	産業機械の電動化と今後の展望
	9	SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS THROUGH CSR ACTIVITIES
■ 技術論文	11	Controlled degradation of commercial resin for meltblown nonwoven fabric sheet production
	24	自動車用精密部品の超精密加工を支える機上測定
	29	厚肉球状黒鉛鋳鉄のX線CTによる3次元黒鉛組織観察
	35	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
	40	ロボットの自律化ー持続可能性から生存可能性への変革段階において
	■ 技術報告	46
50		ダイカストマシンの省エネルギー化
55		二軸混練押出機のDXに向けた取り組み
60		グリース潤滑方式高速スピンドルの開発
64		超硬合金の直彫り切削による消費エネルギーの低減
68		制御機器開発における省エネへの取り組み
72		スカラロボット開発における環境負荷削減へのアプローチ
77		Injection Molding Machine upgradation from Induction to energy efficient servo system
■ 新製品ニュース		79
	81	ダイカストマシンDC400R2の紹介
	84	門形5軸複合加工機ハイエンドモデルMP-2620(U)の紹介
	86	超精密非球面加工機の高速回転ワーク主軸 紹介
	88	TCminiシリーズ 温調PLC TC11-03の紹介
	89	ロボットコントローラ TS5000-EMSの紹介
	■ シリーズ	91
■ コラム	49	子どもからの学び
	63	VRゲームでの体験
	71	失敗から学んだ事
	76	五感を生かせ！海外での加工技術支援
	83	言語処理と国際化
■ 受賞・特許ニュース	99	特許・講演・執筆・受賞
	104	受賞トピックス
	106	特許紹介
■ 講評	110	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

この技報も第29号を発刊することとなり、より多くのステークホルダーの皆様へ、当社の技術開発の成果をご覧いただけることを期待しております。

当社は「サステナビリティ基本方針」を制定し、継続的な社会の実現と企業価値向上を目指していくことを公表いたしました。それを受けて、今回は「エネルギー・環境」というテーマで、近年注目されている内容を中心に掲載しています。

当社は現在、2020年2月に事業構造改革を主とした「経営改革プラン」を発表し、全社をあげて強力に推進しているところです。その中で、今までの事業部制を廃止してそれぞれのマーケットにスピードを持って対応できるカンパニー制へと大きな組織変更を行いました。更に次世代に必要な商品開発、全社のDX戦略等を全体最適で研究開発が行われるよう技術の統括部門としてR&Dセンターを創設いたしました。

グローバルな視点でメガトレンドに対応するためにR&Dセンターがリーダ的な活動、統制を行っています。

成形機、工作機械、制御機械の3カンパニーはそれぞれ個別の商品開発を行っていますが、R&Dセンターでは全社統一の技術方針として、今までの大量生産、大量消費の時代から、「グローバル製造業が直面するメガトレンドに卓越した技術革新で応え、社会的課題の解決と企業価値向上を両立する」ことを基本方針として技術開発を進めているところです。

近年、世界の環境変化に伴い、お客様のニーズが大きく変わってきています。コロナ禍で人々の行動意識に変化がおり、更にロシアによるウクライナ侵攻がエネルギーやハイテク産業に大きな影響を与えています。

地政学的にも先進国と新興国での社会的課題が顕在化して製造業を取り巻く環境も大きく変化をしています。

一方、地球の温暖化や環境問題も待った無しの状況となりクリーンエネルギー、省エネ、環境負荷低減、自動化や無人化の

推進などSDGs対応が求められ、更に企業活動としてESGが重要視される中で、当社も的確に応えられる技術開発や体制を作っておくということが大変重要であると認識しています。

この技報には、当社事業・製品において「エネルギー・環境」に対する付加価値を高める技術や機能開発の成果の一部がまとめられています。

成形機カンパニーでは、自動車等での射出成形機の発泡成形技術による軽量化、ダイカストマシンでの省エネ、新商品に関して報告がされています。押出成形機は高能率素材への取り組みも強化しており、今回はDXに向けた取り組みが紹介されています。押出成形機では、特に「エネルギー・環境」への貢献として大きく注目されているリチウムイオンバッテリーのセパレータ製造装置において、フルライン対応が可能なメーカーは世界的にも当社だけです。競争力を発揮して事業の柱となると共に社会に貢献できる製品であると考えています。

工作機械カンパニーはエネルギー・インフラ産業に強い大型工作機械の複合化を紹介し、自動化・省人化に欠かせないセンサー類やレンズなど光学部品の精密加工が可能な超精密工作機械での消費エネルギーの低減などを紹介しています。

また、制御機械カンパニーが注力しているロボット事業の中でも環境負荷低減へのアプローチ、コントローラの紹介がされています。

これら社会的課題に対して、具体的に生産性や高機能化、差別化等、お客様がそれぞれの市場で勝つための付加価値を提供できる技術、製品の詳細を紹介しています。

当社の技術の変遷と、今後への取り組みをご覧いただける情報誌として皆様へ是非ご一読いただき、少しでも皆様のお役に立つことができれば幸いです。



代表取締役会長

飯村 幸生

## 前書

当社の創業者、藤島亀太郎氏の言葉に「ユーザーニーズを先取りする技術開発と基礎研究を怠るな」とある。ともすれば安きに流れる技術者を窘め、「パイオニア精神・開発魂を忘れるな」と言っている。

開発には、「研究開発」「要素開発」「製品開発」などがある。

開発は通常左から右へと進んで行くが、左へ行くほど直近のビジネスへの寄与度は低いが将来への布石のためにパイオニア精神を持って海図の無い海原へと帆を進めるイメージである。

また右へ行くほどビジネスに直結し開発魂を持ってこれを達成し、顧客の満足を得て会社の利益に貢献することにより事業継続の源とする開発である。

経営の観点からすると、各開発にどのようにリソースを注入するかに心を砕く。

最近、よく「両利きの経営」という経営論を目にする。両利きとは「知の探索」と「知の深化」の両立を言う。

「知の探索」は海図の無い海原へ帆を進め、新しい事業を生み出せと言っている。

「知の深化」は既存事業を深堀し利益を最大化し「知の探索」への投資に躊躇すると言っている。

変化の激しい時代である。ゲームチェンジに遭遇しないよう小職を含む経営者・管理者諸氏及び技術者諸氏は「知の探索」×「知の深化」の最大化を常に心がけなければならない。

## 『筋の悪さは死んでも治らない』話し

37年ほど前のことになる。当時小職は射出成形機技術部の生産設計者であったが米国への駐在を命じられる。

駐在のミッションは「米国のサービスマン」とのことで、上司曰く「自分がどれだけ酷い設計をしているか客先で体感してこい。」とのこと。この駐在経験によって、設計者であったというだけの根拠の希薄な自尊心が打ち碎かれる共に、「会社の看板を背負っているという自負心」に目覚める。都合7年ほどの駐在経験は小職にとって揺籃の庭であったと思う。朝から晩まで米国西部地域の機械を修理して回ったが、明確な故障は別として客先が感じる機械の微妙な違和感はほぼ全て機械の不具合である。「これで暫く様子を見てください。」などと言って客先を離れる輩は敗北宣言しているのに近い。「起きていることはすべて正しい。」と学んだ。

駐在当時に思い出深いトラブルがある。射出成形機の最重要部品と言って過言では無いスクリュのトラブルである。

スクリュとは軸に螺旋の堰が巻かれており、バレルと言われるヒータが巻かれた筒の中で回転する。

ねじポンプを想像すると分かり易い。スクリュ長さはL/D=18～28と用途によって変わるが、螺旋の根元からペレットと言われる固形の粒状樹脂を投入し加熱しながらスクリュを回転させる。スクリュはペレットを前に送りながら後退し、外部加熱とせん断発熱により螺旋の先端ではペレットが完全に熔融され、その後所定の位置まで後退した(計量した)スクリュは前進し金型に熔融樹脂を射出し成形品を作る。バレル内の樹脂の状態は非ニュートン流体であるから、正しい設計はなかなか難しい。

このスクリュ(Φ100)が某客先で著しく齧るのである。客先は高密度ポリエチレンで、「蓋つきバケツ」の高速成形を行っていたが8秒以内で計量を完了する必要がある。それが成形開始から半日で齧り、スクリュのクロムメッキが樹脂に混ざりキラキラとバケツを飾る。小職らはスクリュをバレルから抜き、スクリュの損傷を簡易的にmm単位で修正し、バレル内面を簡易

ホーニング装置で応急処置し再度スクリュを投入し生産に入る。

そうするとまたスクリュが齧り、同じ修正作業を繰り返す。

24時間体制で対応するも客先は納得しない。

日本に報告するが「スクリュ芯はでているか」「温度をもっと上げろ」などと役に立たない。

当方から「異常な側圧によって齧りが発生しており、熔融プロセス改善が必要」との報告をするも日本から空輸で次々と送られてくる開発中のスクリュは見たとたん『筋が悪い』と直感するものであり結果も直感の通りとなる。小手先の改善枠から抜け出すことができない。日本から上司が2名入れ替わり来米するも解決策を提案できず「様子を見てください。」などと言って日本に帰国してしまう。

米国の上司と相談し、米国のスクリュメーカーと専用スクリュを共同開発することとし固体層と液体層を物理的に長いスパンで分離し熔融効率を改善するスクリュを試作することとした。

完成スクリュを見たとたん『筋が良い』と直感し、結果は手品のように齧らない高密度ポリエチレン用高可塑化スクリュが誕生する。開発や設計の恐ろしいほどの可能性をつくづく実感した。

駐在から帰国後、同じΦ100のスクリュ用バレルに石英ガラスを5か所はめ込み高速度カメラで、米国産スクリュと旧スクリュの熔融プロセスの違いを観察すると明らかに熔融プロセスが異なる。

旧スクリュでは熔融樹脂中に未熔融樹脂が大きく浮遊する『ブレイクアップ』が発生しているのに対し米国産スクリュでは著しくそれが改善され異常な側圧も発生しない。

この技術や知見は当社にとって新しいものではなかった。隣の押出成形機事業部では常識の技術であった。

技術者諸氏よ『井の中の蛙』になっていないか、『ワイガヤ』を忘れてはいないか、低い目標を設定してはいないか今一度胸に手を当てて考えては如何か？高みを目指そう！

#### ミケランジェロの格言

『最大の危機は、目標が高すぎて失敗することではなく、低すぎる目標を達成することだ。』

# 産業機械の電動化と今後の展望



上席常務執行役員

小池 純

## 1 はじめに

2022年の夏は、世界中で酷暑、森林火災、洪水被害、渇水などが発生し、多くの人々が犠牲になった。地球温暖化による異常気象と言われるが、今やこれが普通の状態と言われ始めている。そこで、温暖化対策であるCO<sub>2</sub>削減・脱炭素への取組は、地球上全人類の最優先課題となっている。

そのような状況下、自動車業界では内燃機関から電気自動車への切り替えが加速度的に進んでいる。自動車業界で「CASE」に示される100年に一度の大変革が起きている中でのE(Electric)が、電池の進化と共に、航続距離や寿命の問題を克服しつつあり、ゼロエミッションを唱える市場に拡大している。今はウクライナ問題の影響によるエネルギー供給問題から火力発電回帰の動きはあるものの、今後は、再生可能エネルギーを生む発電の広がりと共に、モビリティの電動化は拡大していくと考えられる。

芝浦機械では、工作機械、射出成形機、ダイカストマシン、押出成形機などの産業機械を生産している。その産業機械は、自動車のような移動式ではないため、過去より電力を駆動源としてきた。しかし、射出成形機とダイカストマシンは、型締力や射出力に大きな荷重が必要なため、制御伝達媒体に油圧を採用し、効率面で損失が大きく電力消費に影響していた。

一方、工作機械では制御精度を上げるためにNC化が進んだ。当社では1977年に当時の(株)東芝よりNC事業の移管を受け、それ以来、自社内でサーボ制御技術を磨いてきた。その蓄積により、コントローラの制御性と共に、サーボモータやサーボ駆動システムについて、ハード・ソフトの両面で当社のコア技術として確立し、より高精度に進化させるための開発を継続している。

そのような中で、サーボモータの大型化や、ボールねじなど

の直動部品の進化により、1990年代に射出成形機の電動化が進んだ。これは、消費電力の削減だけではなく、成形条件の再現性が良い長所が評価され、小型射出成形機より油圧式から電動式へ移行していった。しかし、当時の全電動式射出成形機は非力と言われ、特に保圧を長時間かけなければならない厚肉成形品では成形できないケースも多く、現実的に射出工程で仕様最高速度と仕様最高圧力の両立が難しいとされた。当社では、仕様に合わせたサーボモータの最適設計や高速域でトルクを伸ばすサーボ制御などを取り入れ、最高速度と最高圧力を両立させた全電動式射出成形機を実現し提供してきている。

その後、現在では超大型の領域に至る型締力2500トンまでの全電動式射出成形機をシリーズ展開している。射出成形機では、海外メーカーが廉価な油圧機を展開しているが、近年は脱炭素に取り組むユーザーより、超大型レンジまで全電動式射出成形を望む声が増えている。また、エンジンなどのアルミ部品を鋳造するダイカストマシンでも、対環境性に応える製品を開発している。本稿では、超大型まで展開する射出成形機・ダイカストマシンの対環境性について、「電動化」をキーワードに、その効果と展望について紹介する。

## 2 全電動式射出成形機の省エネ性

従来長く油圧式であった射出成形機では、「油圧式」と、その駆動源である三相誘導電動機をサーボモータに置き代えた「油圧サーボ式」と、各駆動アクチュエータを全て電動駆動にした「全電動式」がある。油圧式では、三相誘導電動機の効率、油圧ポンプ効率、配管圧損、油圧バルブなどを介する油圧回路内損失などが発生する。「油圧サーボ式」では駆動源をサーボモータとすることで、仕事をしていない時に油圧ポンプを停止させる、或いは減速させることができ、これらの損失を減少させること

ができる。これに対して「全電動式」は、駆動機構であるサーボモータ、ベアリング、ボールねじの効率がよく、消費電力を大幅に削減することが可能となっている。

図1に、小型機から超大型機までの油圧式と全電動式における消費電力の比較、図2に型締力1300tにおける油圧サーボ式も含めた消費電力の比較を示す。

ここに示すように、成形条件によっても異なるが、油圧式と全電動式では約60～70%以上の消費電力削減につながり、油圧サーボ式と比較しても約40%の消費電力削減となる。その上、全電動式では作動油や、冷却水(作動油冷却)も不要となる他、工場内空調設備の負荷低減にもつながる。

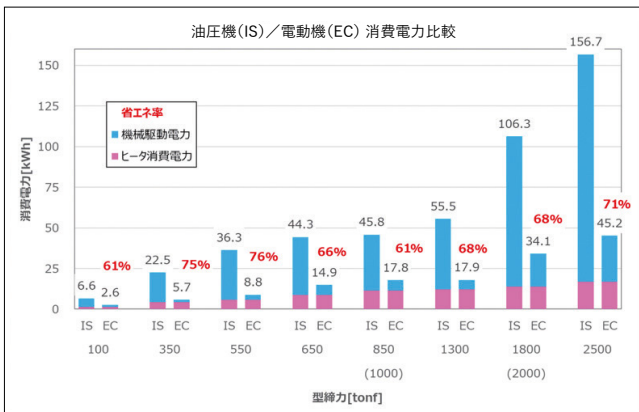


図1. 油圧式と全電動式の消費電力比較

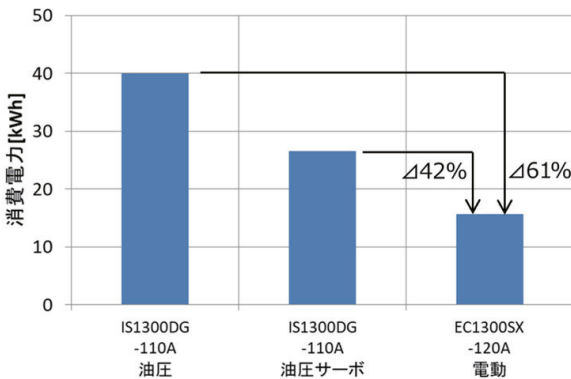


図2. 各駆動方式の消費電力比較

ここで、1300tにおける消費電力の削減効果をCO<sub>2</sub>換算すると、油圧式から電動式に置き換えることで年間69.1tのCO<sub>2</sub>削減を図ることができる。(図3)

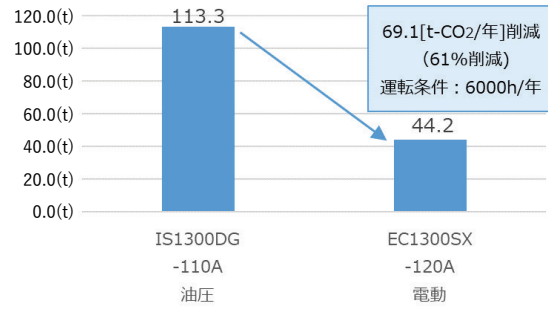


図3. 年間CO<sub>2</sub>排出量比較[t-CO<sub>2</sub>/年]  
※消費電力量1kWhでCO<sub>2</sub>が0.472kg発生として算出

### 3 全電動式射出成形機の制御性

もともと、サーボモータの語源は英語の Servant から来ていると言われる。指令に忠実に仕事をするため、全電動式は、消費電力以外にも、その制御精度の高さ、繰り返し安定性にメリットがある(図4)。油圧式では、油温の変化による粘度変化や作動油のリーク、作動油の圧縮性などが動作バラツキにつながる。

	油圧式	電動式
分布率(%)	0.1430	0.1051
標準偏差	0.0119	0.0092

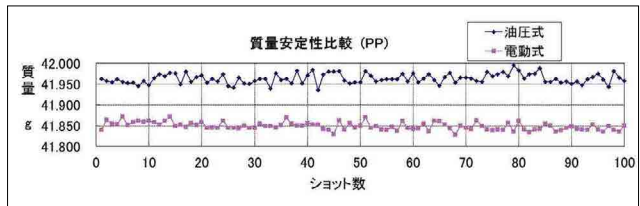


図4. 油圧式と全電動式の成形品重量バラツキ比較

また、サーボ駆動の制御性の良さを活かして最新鋭コントローラ INJECTVISOR-V70 には、付加価値の高い成形品を安定して生産することのできる様々な特殊制御を装備している。

表1に代表的な制御例を示す。

区分	制御名	目的
射出	ナチュラルバック	低圧定量充填でバリ、ショット、製品バラツキを解消
	プラストロール	樹脂密度の均一化と充填樹脂量の精密化による充填量の安定化
	DST-Fill	ロット差異などによる樹脂の変化を検知し、成形条件の自動変更を行うことで成形品質を維持
型締	プレストロール	型締力を多段階制御する精密圧縮制御により、成形品の内部応力を低減する
	精密コアバック	射出充填後に金型を僅かに開く精密なコアバック動作により発泡成形の高品質/安定化と高発泡倍率を実現

表1 INJECTVISOR-V70の成形制御例

### 4 ダイカストマシンの電動化

2000年代になるとダイカストマシンでも、全電動式の開発が成された。しかし、現在に至るまでに全電動式は評価されず普及していない。溶融材料の固化の速いアルミを成形するダイ

カスタマシンでは、アルミ溶湯を瞬時に型内に射出する必要がある。そのため、射出速度は7~10m/sと一般的な射出成形機の約50倍の速度に対応し、最高速度まで数ミリ秒の間に到達する加速度が必要である。この瞬発力には、電動式では技術的にもコスト的にも実現は難しい。そのため、射出装置の駆動には油圧アクチュエータを用いている。

近年、当社ではダイカストマシンの生産性の向上と消費電力削減を目的に、型開閉駆動を電動化した電動型締ダイカストマシンを小型から超大型までラインアップしている。その特徴としては、ハイサイクル、省スペース、省メンテナンスである。電動型締装置は、その制御性の良さより高加速度動作をショックレスに実現する。また、再現性が良いため条件を極限まで詰めることが可能で、低速領域をミニマイズして設定することができ、サイクル短縮につながる。(図5)

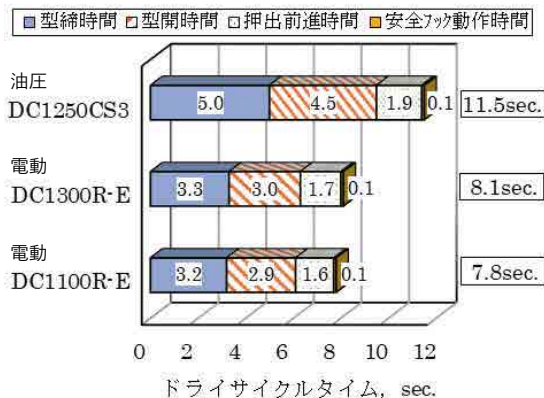


図5. DC1100/1300R-Eのドライサイクルタイム

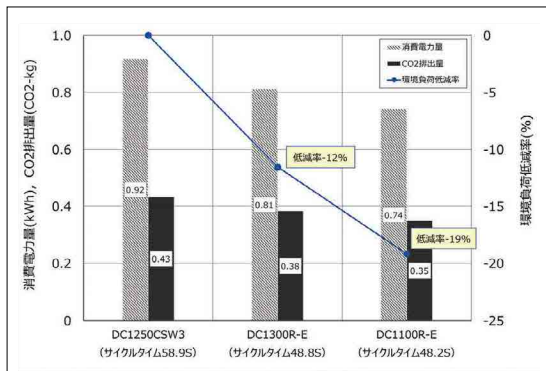


図6. 1サイクル当たりの消費電力量とCO<sub>2</sub>排出量  
※消費電力量1kWhでCO<sub>2</sub>が0.472kg発生として算出

図6に1300トンにおける油圧式と電動型締装置の消費電力とCO<sub>2</sub>削減量を示す。給湯時間を6秒、スプレー時間を18秒、製品取出時間を5秒、押出ストロークを100mm、ダイタイマを10秒に設定した条件である。電動型締装置によって、型開閉動作と中子動作のラップ動作が可能となりサイクルタイムの短縮が図れ、1サイクル当たりの環境負荷試算として従来油圧トルグ機に対し、DC1300R-Eは約12%、DC1100R-Eは約

19%の低減が見込まれる。

ダイカストマシンの電動化において当社は、現在、中子装置や押出装置について、力の必要な離型時のみ油圧を使い基本駆動を電動化したハイブリッド中子装置、ハイブリッド押出装置の開発を進めている。これにより、更なるハイサイクル化、作動油使用量の削減が可能となり、生産性に優れた対環境性ダイカストマシンを提供していく。

## 5 今後の展望 ~新たな価値の提供~

近年、SDGsへの取組は、全世界の共通テーマとなっている。産業機械メーカーとしてSDGsに貢献するために、省エネ・不良率削減・生産性を上げる自動化・システム化、負荷労働の代役など、対環境技術や過重労働を防ぐ高生産性技術を手掛ける。近年、人手不足の課題もあり、この課題へのアプローチは更に重要になっている。

ここまで述べてきたように、産業機械の電動化は、省エネ、省メンテナンス、ハイサイクルなど、生産性やCO<sub>2</sub>削減に効果的に寄与してきた。今後は、IoTやAI技術を活用することにより、更なる進化を目指している。欧州では、INDUSTRY4.0への取り組みが活発であるが、今後生産性を上げるためには、様々なデータを活かすDX(デジタルトランスフォーメーション)により新たな付加価値を生み出すことが可能となる。

当社では、IoTの目的に関して4つの方針を掲げている。

- ① 人材不足を補う生産向上(自動化・知能化)
- ② 突発的な機械停止の予防(予知保全・計画保守)
- ③ 品質向上・安定化(AI活用の分析・結果の反映)
- ④ 分散する生産拠点への対応(一元管理・監視)

ここで、特に電動化メリットを活かせるのが、①自動化・知能化、②予知保全、③AI活用である。自動車の「CASE」に例えると、C(Connected)とA(Autonomous)にあたる。指令に対して忠実に正確な働きをする電動化は、高精度な上にトルクや速度などの稼働状況の可視化が容易に可能なためである。

- ① 人材不足を補う生産性向上

近年、特に3Kに関わる仕事への従事希望者は少ない。また、固定費を抑え生産性を上げることは、ユーザにとっての重要課題である。そこで、射出成形機やダイカストマシンなどの機械単体だけでなく、前後工程を含めた自動化や一括管理が求められる。当社では、そのためのシステムエンジニアリングに力を入れている。

一例として図7に近年、自動車の軽量化で注目される複合材のスタンピングシステムを紹介する。



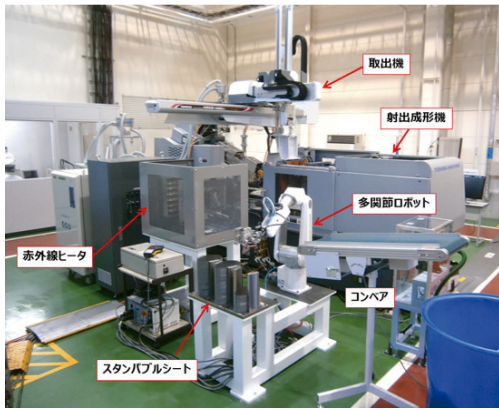


図7. GFRPシートスタンピングシステム

ここで、一連の動作制御、正確な状態監視などに、電動化のメリットは大きい。

### ② 突発的な機械停止の予防(予知保全・計画保守)

自動化システムを採用した場合に、ライン途中のどこかで突発的な故障が起こるとライン全体が停止することになる。在庫を減らす努力を行う中で、ライン停止は致命的な事故である。そこで、機械を止めないためには予知保全が重要である。

電動式射出成形機では、機械の稼働状況の変化を掴むことが従来の油圧式に比較しても容易にできる。例えばボールねじやベアリングの剥離による摺動摩擦の増加はサーボモータのトルクの変化となって現れる。また、サーボ電源やサーボアンプの累積負荷も電圧・電流より検知することが可能である。これは、電気部品などの寿命予測に有益な情報となる。言い換えると、サーボモータの状態を検知し続けることで、ボールねじの状態変化や、サーボアンプなどの寿命検知が可能である。そこで、各部品が壊れる前に予兆として変化を捉え、スペアパーツに交換することで突発的な事故を未然に防ぐことが可能となる。量産中における変化の閾値などの課題を追求し、機械周辺に設けた各センサー(振動センサー、温度センサー、AEセンサーなど)からのデータ活用も合わせて、トータルシステムの予知保全につなげていく。

### ③ 品質向上・安定化(AI活用の分析・結果の反映)

ユーザーにとって目指すべき生産は不良ゼロとすることである。射出成形機・ダイカストマシン共に、多種の品質データを記録しているが、良品条件との複数データにまたがる相関を捉えることは難しかった。しかし、AIなどの分析技術の進化により、良品生産時の品質データより、多種データの組み合わせの中で、どのような組み合わせ時の良品率が高いか割り出すことが可能となっている。将来は、最も良品を生み出す条件になるように機械自身が成形条件を補正していく自律制御が目標である。それには、ショット毎の品質データ群とアウトプットと

しての製品の良否結果を結び付けることも必要になる。そのためには①でも示したシステムエンジニアリングによる省人化につながる自動検査技術も重要な役割を担う。そして、良品データ群との分析を通じて機械の自律制御を実現し、ユーザーにとっての不良ゼロに貢献していきたいと考える。当社が射出成形機に採用しているDST-Fill(ダイナミック・セルフ・チューニング)制御(表1)は、成形条件補正に対するアプローチの一つとなっている。品質データの正確性や自動化技術の連動など、電動化は、益々重要なファクターとなっていく。

## 6 おわりに

現在の脱炭素への取組、国連の掲げるSDGsへの貢献のために、自動車産業を筆頭に電動化が重要な位置を占めている。産業機械では過去より電動化は進められてきたが、省エネ視点だけではなく、生産性の向上においても重要な役割を果たしてきた。今後はDXと合わせて更なる進化を見通すことができ、それが、ユーザーへの貢献、地球環境への貢献に繋がると信じ、開発を加速させていく所存である。

# SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS THROUGH CSR ACTIVITIES



**B. Ramesh**

Head - Human Resource & Administration  
SHIBAURA MACHINE INDIA PRIVATE LIMITED

Shibaura Machine India(SMI) is a frontrunner to cater to the Sustainable Development Goals through its Corporate Social Responsibility (CSR) activities.

Under the CSR rules mandated by The Companies Act, 2013, SMI has constructed class rooms in nearby government schools and water tank for Chembarambakkam Village. As per rule, CSR amount can also be deposited in Prime Minister/Chief Minister Relief fund. Instead SMI took the option of spending on social developments allowed as per the rule.

The classroom construction process begins with receipt of approval request from the School Head Master along with Parents Teacher's Association's request. SMI then proceeds with obtaining approvals from all relevant Government authorities and the construction of classrooms begins through an authorized contractor.



Classroom building at Chembarambakkam



Classroom building at Nanganallur

The construction process is monitored regularly and the fully constructed classroom is handed over to the school management. By this, SMI has achieved SDG Goal No.2 – Quality Education & Goal No.9 – Industry, Innovation & Infrastructure.

A water tank of capacity 60,000 litres was constructed by SMI at Chembarambakkam village which is towards achieving the SDG goal 6 – Clean water & sanitation. About 100 families are being benefited.



Water Tank inauguration at Chembarambakkam



Food packets distribution for poor & needy people

In addition to the CSR activities, SMI is also serving 50 packets of food prepared for employees to the needy people in the nearby areas for the past 145 days, which is aimed towards SDG Goal 2 – Zero hunger.

## Shibaura Machine BTP (Basic Training Provider) :-Our endeavour

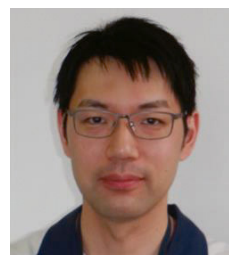


BTP was established in 2014 after obtaining permission from Government to help the down trodden students in the society who cannot pursue higher education because of their poor family background. After 1 year of class room training and 1 year of on job training, students have to write an exam conducted by central

government. Once qualified, they are given Certificate from government and are employable as machinist or fitter. As on date about 100 students trained in the trade machinist and fitter. From this year onwards fitter trade is being changed to Injection Moulding Machine operator trade. This would help customer to employ them in their workshop. SMI plan to absorb some of the machinist trade students after passing the examination, to operate high precision Machining centre.

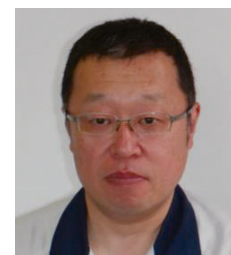
# Controlled degradation of commercial resin for meltblown nonwoven fabric sheet production

This article was reprinted from the academic paper, *Polymers* 2021, 13 (22), 3892. Manufacturing meltblown nonwoven fabrics requires special grades of resin with very low viscosity, which are not dealt with so much on market and cost quite high compared to the standard grades. We propose a high-shear rate processing method that can quickly and easily produce such low-viscosity resin from the commercial one without using organic peroxides. In this method, we apply high-shear stress to molten resin by using a high-shear extruder, which is a single screw extruder with high screw rotation speed, and the resin is thermally decomposed of its shear-induced heat which is quickly generated. We found that polypropylene with a value of melt flow rate over a thousand, which was required for the meltblown process, was produced from the standard grade with the high-shear extruder at the screw rotation speed of  $3600 \text{ min}^{-1}$  and the barrel temperature over  $300^\circ\text{C}$ . Using the degraded polypropylene, a meltblown nonwoven fabric sheet was successfully fabricated. We also developed a numerical simulator of the high-shear extruder which can handle a wide range of the screw rotation speed and barrel temperature by the Nusselt number modulated with the operational conditions. The experimental values of the zero-shear viscosity and temperature at the exit of the extruder agreed well with the simulation results. Our high-shear rate processing method will enable us to quickly and easily produce various meltblown nonwoven fabric sheets at low costs.



**Yuya SASAI**

Metal & Plastics Industrial Machine Company,  
Extrusion Machine Engineering Department



**Yoshio IIZUKA**

Metal & Plastics Industrial Machine Company,  
Extrusion Machine Engineering Department



**Kaho OSADA**

Metal & Plastics Industrial Machine Company,  
Extrusion Machine Engineering Department

**collective writing :**

**Kentaro TAKI**

School of Mechanical Engineering,  
Kanazawa University

## 1 Introduction

Meltblown nonwoven fabrics are widely used as filtration media, medical fabrics, sound-absorbing and cushioning materials, and so on. Fine fibers are produced by pumping molten resin through a die with tiny holes whose size is of the order of 0.1 mm, thus low viscosity grades of resin with quite a high value of melt flow rate (MFR) are chosen as the raw materials [1]. For polypropylene (PP), the value of MFR around a thousand is required for the meltblown process. For example, low-viscosity PP with MFR of 1550 g/10 min at  $230^\circ\text{C}$  was used for investigating unstable behavior of melt-blowing process [2]. However, such special grades of resin are not dealt with so much on market and they cost quite high compared to the standard grades. It could be useful and economical that those special grades of resin are controllably produced from the commercial ones which are always available anywhere at low costs.

One of the methods, which is well known, is to degrade resin by using organic peroxides. In this method, a resin and an organic peroxide are compounded by a twin-screw extruder and the peroxide radicals chemically decompose the polymers during the mixing process. Numerical simulation of the peroxide-induced degradation was also developed so far. The molecular weight loss and change in viscosity of PP in a modular self-wiping corotating twin-screw extruder was studied by coupling a global one-dimensional flow model of the twin-screw extrusion process with kinetic equations of the evolution of molecular mass in the peroxide-induced degradation of PP [3]. To evaluate the viscosity reduction, the relationship between the molecular weight and the rheological parameters, which were given in [4], were used. However, it is generally hard to treat such highly reactive additives and to control the degradation. The molecular weight distribution of PP during the peroxide-induced degradation in a continuous stirred tank reactor

was calculated and it was argued that imperfect mixing of the peroxide with PP could lead to a broadening of the molecular weight distribution [5]. The broadening of the molecular weight distribution was explained by spatially inhomogeneous degradation which occurred around the peroxide particles because of the fast dissociation reaction and relatively slow diffusion of the peroxide [6]. Recent developments of the modeling of the reactive extrusion were summarized in [7]. In addition, due to residues that are caused by the decomposition with peroxides, the degraded resins by this method are not suitable for medical and hygiene products. Moreover, organic peroxides are specified as hazardous materials which must be carefully treated and stored.

Here, we propose another method without using peroxides, which we call a high-shear rate processing method. To date, the high-shear rate processing was mainly applied to the compounding of immiscible polymers and the dispersion of inorganic fillers in a polymer matrix. A high-shear processed poly(vinylidene fluoride) (PVDF)/polyamide11 (PA11) blend was studied and it was shown that PA11 could be dispersed in the PVDF phase with a domain size of several tens of nanometers by using a high-shear extruder [8]. The rotational speed of the extruder was  $1200 \text{ min}^{-1}$ . Unmodified multiwalled carbon nanotubes (CNT) were compounded with poly(styrene-*b*-butadiene-*co*-butylene-*b*-styrene) (SBBS) using a high-shear extruder and the dispersion of CNTs was greatly improved upon increasing the exerted shear rate and a homogeneous dispersion was successfully achieved with the screw rotation speed of  $2000 \text{ min}^{-1}$  [9]. The structures and properties of polycarbonate (PC)/poly(methyl methacrylate) (PMMA) blends fabricated using their high-shear extruder were investigated and it was shown that nanostructured PC/PMMA blends with high transparency and improved mechanical properties were obtained at the screw rotation speed of  $2250 \text{ min}^{-1}$  [10]. On the other hand, a reduction of mechanical properties of compounds with the high-shear rate processing was also reported. The effect of high-shear rate processing on the compatibilization of high impact PP/ethylene propylene rubber/high density polyethylene (PP/EPR)/PE blends was investigated by using a co-rotating twin-screw high shear extruder and a decrease of the size of PE core encapsulated by EPR shell was observed when increasing the screw rotation speed from  $300$  to  $600 \text{ min}^{-1}$  [11]. However, as the screw speed was increased to  $800 \text{ min}^{-1}$  and  $1200 \text{ min}^{-1}$ , a noticeable reduction of the mechanical properties of (PP/EPR)/PE blends was found due to the thermal

degradation. Polyamide 6(PA6)/PP blends were produced by a high-shear rotational processing machine and PA6/PP alloy fabricated under the screw rotation speed of  $3000 \text{ min}^{-1}$  with a mixing time of  $30 \text{ s}$  showed considerably lower breaking strain and yield strength than that of neat PA6, which was caused by the reduction of the molecular weight due to the high-shear rotation [12].

In this paper, we positively use the ability of the degradation with the high-shear rate processing to fabricate the low-viscosity polymers without using peroxides. Our high-shear extruder is a type of single screw extruder with a maximum rotational speed of  $3600 \text{ min}^{-1}$ . Similar to a twin-screw extruder, the screw is composed of multiple screw elements so that we can realize different screw configurations. We apply high-shear stress to molten resin by using a single screw extruder with high screw rotation speed. The molten resin is thermally decomposed of its own shear-induced heat. Of course, we could decompose resin only by heat conduction from the barrel with high temperature, but it costs much time to heat or cool the barrels. Furthermore, there is usually an upper limit of barrel temperature which is not so high. Our method utilizes the shear-induced heat which is quickly generated in the bulk of resin and makes the resin at a higher temperature than the barrel temperature. In addition, as the major operating condition to adjust the degradation is only the screw rotational speed, different grades of resin are quickly and easily available. With the screw rotational speed of  $3600 \text{ min}^{-1}$  and the barrel temperature over  $300^\circ\text{C}$ , we have produced low-viscosity PP with a value of MFR over a thousand from standard grades of PP which are commercially available. The meltblown nonwoven fabric sheet which is made of the degraded PP has been also produced. To our best knowledge, this is the first example to fabricate the low-viscosity PP for the meltblown process with the high-shear rate processing without using any peroxides.

We have also developed a numerical simulator which can predict the zero-shear viscosity of the degraded resin during the high-shear rate processing. The simulation of thermal degradation in a modular corotating twin-screw extruder was firstly developed in [13]. They calculated the molecular weight loss of PP along the screw axis by coupling a two dimensional flow model with the kinetic equations of the thermal degradation. Since the maximum screw rotation speed of their study was  $300 \text{ min}^{-1}$ , the effect of the shear-induced heat was considered to be small. Thermal and mechanical degradation of polystyrene in an ultra-high speed twin-screw extruder and the predictions of the molecular weight loss

were studied [14]. However, the viscosity reduction due to the molecular weight loss during the extrusion process and the back reactions to the physical quantities such as pressure and temperature were not considered. In our simulation, we used the simplest kinetic equation of the viscosity reduction and coupled it with a one dimensional non-Newtonian flow model in a single screw extruder. Our kinetic model of viscosity reduction could be easily derived by assuming that a resin was composed of linear polymers and thermal decomposition of polymers followed the random scission process. The model took the similar form to the kinetic equation of MFR described in [15], however we determined the order of reaction of the kinetic equation for the zero-shear viscosity theoretically. Residence time distributions (RTD) of PP in a high-shear twin-screw extruder was measured by an on-line UV fluorescence device, and they found that deviations between the experimental results and the simulation results of RTD were observed at a high screw speed more than  $800 \text{ min}^{-1}$  and a small flow rate less than  $4 \text{ kg/h}$  [16]. They also found that at a high screw speed of  $1200 \text{ min}^{-1}$  and a barrel temperature of  $200^\circ\text{C}$ , the calculated exit temperature overestimated the experimental result by around  $30^\circ\text{C}$ . They concluded that this difference occurred because the dependence of the heat transfer coefficient on the screw speed was not treated and the resin was not cooled by the barrel in the simulation [16]. Therefore, we decided to evaluate the global Nusselt number by solving a one dimensional transient heat conduction equation in the case of the simple shear flow. The calculated Nusselt number was dependent on the operational conditions such as the screw rotation speed and the barrel temperature. We found that our simulation results agreed well with the experimental results for the degradation using the high-shear extruder. To our best knowledge, no one simulates and investigates the viscosity reduction in the high-shear extruder over the screw rotation speed of  $2000 \text{ min}^{-1}$ .

## 2 Introduction

### 2.1 Flow in a Single Screw Extruder

We review a one dimensional non-Newtonian fluid flow model in a single screw extruder. We assume that the flow is steady-state and fully developed. Since the ratio of inner diameter to outer diameter of screw is close to one, the channel curvature of the screw is negligible. The SI units are implicitly assumed in this section. The nomenclature and the definition of symbols are summarized in the Appendix A.

### 2.1.1 Screw

Fig. 1 shows an unwound geometry of a single screw extruder. The screw is modeled by a rectangular channel with a height  $H$  and a width  $W$ , and the barrel is modeled by a moving flat plate covering the screw channel. The velocity of the plate is  $V = \pi DN$ , where  $D$  is the inner diameter of the barrel and  $N$  is the screw rotational speed.

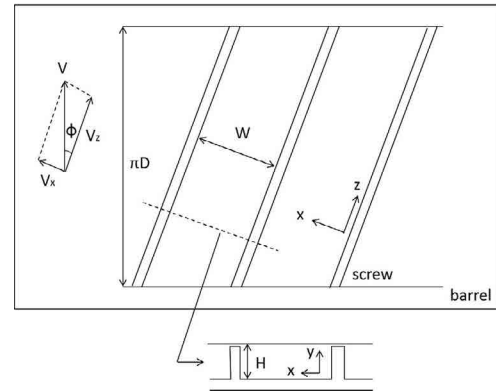


Fig. 1 Geometry of unwound screw and barrel in screw extruder.

We only consider one dimensional flow in the down-channel direction  $z$ . In the case of shallow and wide channels, the velocity component of fluid  $v^z$  can be approximated as a function only of the channel depth direction  $y$ . Then, the equation of continuity becomes trivial.

The equation of motion is

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( \eta \frac{\partial v^z}{\partial y} \right) = \frac{\partial p}{\partial z}, \quad (1)$$

where  $p$  is the pressure and  $\eta$  is the viscosity of the fluid. The boundary conditions are

$$v^z|_{y=0} = 0, \quad v^z|_{y=H} = V \cos \phi \equiv V^z, \quad (2)$$

where  $\phi$  is the screw angle. When the fluid is fully filled in the screw, the pressure gradient has a finite value, which we denote by  $\alpha$ . Since the fluid velocity  $v^z$  is a function of the pressure gradient,  $\alpha$  is determined by the equality for the flow rate,

$$Q = W \int_0^H dy v^z(\alpha). \quad (3)$$

When the fluid is partially filled in the screw, the pressure gradient vanishes. Thus, from Eq.(1), the flow in the partially filled region is represented by the simple shear flow with

$$v^z = V^z y / H. \quad (4)$$

The fill ratio is defined by

$$f = \frac{Q}{W \int_0^H dy v^z}. \quad (5)$$

The viscosity of molten resin is generically a function of shear rate  $\dot{\gamma} = |\partial v^z / \partial y|$ . In this paper, we adopt the Cross model:

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + (\eta_0 \dot{\gamma} / \tau_*)^{1-n}}, \quad (6)$$

where  $\eta_0$ ,  $\tau_*$ , and  $n$  are the model parameters. In the case of non-

isothermal problems, the zero-shear viscosity  $\eta_0$  depends on the temperature  $T$ . We assume that  $\eta_0$  follows the Arrhenius law:

$$\eta_0 = \eta_r \exp\left(T_* \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r}\right)\right), \quad (7)$$

where  $T_*$  is the model parameter and  $\eta_r$  is the zero-shear viscosity at the reference temperature  $T_r$ .

The energy equation is

$$\rho C_p v^z \frac{\partial T}{\partial z} = -\frac{\partial q}{\partial y} + \eta \dot{\gamma}^2, \quad (8)$$

where  $\rho$ ,  $C_p$  are the melt density and the heat capacity of the fluid, respectively, and

$$q = -\kappa \frac{\partial T}{\partial y}, \quad (9)$$

is the heat flux, where  $\kappa$  is the thermal conductivity of the fluid. The initial condition is

$$T|_{z=0} = T_i, \quad (10)$$

where  $T_i$  is the initial temperature. The boundary conditions are

$$q|_{y=0} = 0, \quad (11)$$

$$T|_{y=H} = T_b, \quad (12)$$

where  $T_b$  is the barrel temperature.

Integrating the energy equation over  $y$  by part and using Eq.(1), we obtain

$$\rho C_p Q \frac{\partial T}{\partial z} = -fWq|_{y=H} + fWV^z \tau|_{y=H} - Q \frac{\partial p}{\partial z}, \quad (13)$$

where  $\tau = \eta \partial v^z / \partial y$  is the shear stress. Strictly speaking, the temperature in Eq.(13) is the average temperature which is defined by

$$\bar{T} = \frac{\int_0^H dy v^z T}{\int_0^H dy v^z}, \quad (14)$$

as described in [17]. The second and last terms of the right hand side in Eq.(13) come from the shear-induced heat generation. The first term of the right hand side in Eq.(13) represents the heat conduction of the fluid to the barrel and usually modeled in one dimensional problems by

$$q|_{y=H} = \frac{\kappa Nu}{2H} (T - T_b), \quad (15)$$

where  $Nu$  is the Nusselt number.

In the experiments of the high-shear rate processing, the screw rotational speed and the barrel temperature are chosen in a wide range of values. Thus, we can not set the Nusselt number as a constant value in all experiments. To estimate the Nusselt number for each experiment, we numerically solve the energy equation Eq.(8) with the boundary conditions Eqs.(11) and (12) in the case of the simple shear flow with a homogeneous initial temperature Eq.(10), and the distributions of temperature and heat current in the  $y$  and  $z$  directions are calculated. Then, the local Nusselt number [17]

is obtained by

$$Nu_z = \frac{2Hq(z)|_{y=H}}{\kappa(\bar{T}(z) - T_b)}. \quad (16)$$

In our simulation, we use the average Nusselt number,

$$Nu = \frac{1}{L_p} \int_0^{L_p} dz Nu_z, \quad (17)$$

where  $L_p$  is the path length of the screw.

### 2.1.2 | Die

In our experiments, a circular die was used. The equation of motion is

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \eta \frac{\partial v^z}{\partial r} \right) = \frac{\partial p}{\partial z}, \quad (18)$$

where  $r$ ,  $z$  are the radial and axial coordinates, respectively. The boundary conditions are

$$\frac{\partial v^z}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, \quad v^z \Big|_{r=R} = 0, \quad (19)$$

where  $R$  is the radius of the die. As in the previous subsection, the pressure gradient  $\partial p / \partial z \equiv \alpha$  is determined by the equality for the flow rate,

$$Q = 2\pi \int_0^R dr (rv^z(\alpha)). \quad (20)$$

The energy equation is

$$\rho C_p Q \frac{\partial T}{\partial z} = -2\pi R q|_{r=R} - Q \frac{\partial p}{\partial z}, \quad (21)$$

where

$$q|_{r=R} = \frac{\kappa Nu}{2R} (T - T_w), \quad (22)$$

is the heat flux at the wall of cylinder and  $T_w$  is the temperature of the die. For the Nusselt number, we use the average Nusselt number for the case of power-law fluid,

$$Nu = 1.615 \left( \frac{(3+1/n)\rho C_p Q}{\pi \kappa l} \right)^{1/3}, \quad (23)$$

where  $l$  is the length of the die.

## 2.2 | Model of Viscosity Reduction

For a large rotational speed and a high barrel temperature, shear heating and heat conduction become so large that polymers are thermally decomposed. Although the complete kinetic equations of the thermal decomposition of polymers were described in [13], here we consider the simplest model. We assume that a resin is composed of linear polymers and thermal decomposition of polymers follows the random scission process.

A polymer is modeled by a long chain with  $\mathcal{N}$  number of nodes, which represent the backbone carbon atoms [18]. The number of polymers with  $\mathcal{N}$  number of nodes is denoted by  $n_{\mathcal{N}}$ . Then, the number of all bonds in the polymers is given by  $\sum_{\mathcal{N}=1}^{\infty} (\mathcal{N}-1)n_{\mathcal{N}}$ . If breaks of the bonds follow the first order reaction with a reaction rate  $k$  and the repolymerization does not occur, we find

$$\frac{d}{dt} \left( \sum_{\mathcal{N}=1}^{\infty} (\mathcal{N}-1)n_{\mathcal{N}} \right) = -k \sum_{\mathcal{N}=1}^{\infty} (\mathcal{N}-1)n_{\mathcal{N}} \quad (24)$$

where  $t$  is time. The reaction rate follows the Arrhenius law,

$$k = Ae^{-\frac{E}{R_g T}}, \quad (25)$$

where  $A$  is the frequency factor,  $E$  is the activation energy, and  $R_g$  is the gas constant. The number of all nodes in the resin,  $\sum_{\mathcal{N}=1}^{\infty} \mathcal{N} \bar{n}_{\mathcal{N}}$ , does not change in time if the amount of evaporation of polymers is neglected. Since the number average degree of polymerization is defined by

$$\bar{\mathcal{N}} = \frac{\sum_{\mathcal{N}=1}^{\infty} \mathcal{N} \bar{n}_{\mathcal{N}}}{\sum_{\mathcal{N}=1}^{\infty} \bar{n}_{\mathcal{N}}}, \quad (26)$$

we obtain

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{1}{\bar{\mathcal{N}}} \right) = k \left( 1 - \frac{1}{\bar{\mathcal{N}}} \right), \quad (27)$$

which was described in [19]. For large  $\bar{\mathcal{N}}$ , this formula becomes

$$\frac{d\bar{\mathcal{N}}}{dt} = -k\bar{\mathcal{N}}^2. \quad (28)$$

Since the zero-shear viscosity is empirically proportional to  $\bar{\mathcal{N}}^{3.4}$ , we find

$$\frac{d\eta_r}{dt} \approx -k\eta_r^{1.3}, \quad (29)$$

where the proportionality was absorbed into  $A$ .

In [15], a semi-empirical kinetic model of the peroxide-induced degradation for a value of MFR,

$$\frac{d[MFR]}{dt} = K[MFR]^a,$$

was introduced, where  $K$  is the reaction constant and  $a$  is the order of reaction. This expression is essentially the same as Eq.(29) because the MFR is proportional to some power of the zero-shear viscosity. However, we estimated the order of reaction from  $\eta_r \propto \bar{\mathcal{N}}^{3.4}$  without experiments. As a result, the model parameters for the viscosity reduction were reduced.

The time derivative is replaced by the material derivative, thus in the steady-state case, we find

$$\frac{\partial \eta_r}{\partial z} = -\frac{fSk}{Q} \eta_r^{1.3}, \quad (30)$$

where  $S$  is the cross-sectional area of the screw channel or die.

### 2.3 Numerical Calculation

Fig. 2 shows the flowchart of our numerical calculation. Our goal is to obtain pressure  $p$ , temperature  $T$ , and zero-shear viscosity at a reference temperature  $\eta_r$  for all axial positions of the extruder when an initial temperature  $T_i$  and an initial zero-shear viscosity at a reference temperature  $\eta_{ri}$  are given. From now on, we denote  $z$  as the axial coordinate of the extruder.

Firstly, we evaluate the Nusselt number of the screw Eq.(17). Next, we give initial guesses for temperature and zero-shear viscosity at the exit of the extruder  $z = z_f$ . The pressure at  $z = z_f$  is the atmospheric pressure, which is set to zero. The distributions of  $p$ ,  $T$ , and  $\eta_r$  along

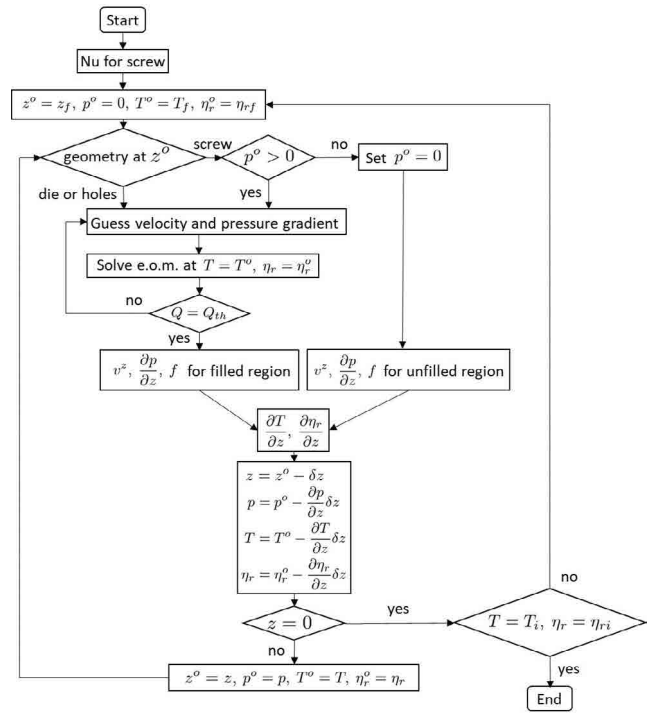


Fig. 2 Flowchart of numerical calculation. The  $Q_{th}$  is defined by the right hand side of Eq.(3) or Eq.(20)

the axial direction are calculated in reverse order from the values at  $z = z_f$ .

If a geometry at an axial position  $z = z^0$  is a cylinder, we solve the equations Eqs.(18) and (20) by an iterative method with appropriate initial guesses for velocity  $v^z = \hat{v}^z$  and pressure gradient  $\partial p/\partial z = \hat{a}$ . We choose  $\hat{v}^z$  and  $\hat{a}$  to the analytic solutions in the case of power-law fluid. If a geometry at  $z = z^0$  is a screw and the pressure  $p^0$  is positive, the screw is fully filled with resin. The Eqs.(1) and (3) are solved in the same way as the case of cylinder. If  $p^0 \leq 0$ , the screw is partially filled with resin and  $p^0$  is reset to zero. In the unfilled regions, the velocity is given by Eq.(4) and the pressure gradient vanishes. We used the finite volume method to solve Eqs.(1) and (18).

Then, the temperature gradient  $\partial T/\partial z$  and the gradient for the zero-shear viscosity  $\partial \eta_r/\partial z$  at  $z = z^0$  are evaluated by using Eqs.(13) and (30). Then, the pressure, temperature, and zero-shear viscosity at  $z^0 - \delta z$  are calculated, where  $\delta z$  is a size of discretization for  $z$  axis. Repeating the calculations, we obtain  $p$ ,  $T$ ,  $\eta_r$  at  $z = 0$ . The temperature and zero-shear viscosity at the exit are updated iteratively so that the calculated values of the temperature and zero-shear viscosity at  $z = 0$  are close enough to  $T_i$  and  $\eta_{ri}$ . After the iterative calculations, we obtain  $p$ ,  $T$ ,  $\eta_r$  for all  $z$  which satisfy the initial conditions.



## 3 Experiment

### 3.1 System

The total system of our experiments is shown in Fig. 3. Two different extruders were used, which were tandemly connected. The first one was a self-wiping co-rotating twin-screw extruder ( $L/D = 48.5$ ,  $D = 26$  mm, Shibaura Machine, Shizuoka, Japan), which was just used for melting resin. The screw configuration, the barrel temperatures and the screw rotation speeds used in the following experiments are shown in the Appendix B. The resin temperature at the exit of the twin-screw extruder was  $195^\circ\text{C}$  in all experiments. The second one was a high-shear extruder, which was a single screw extruder with a maximum rotational speed of  $3600\text{ min}^{-1}$ . The inner diameter of barrel was 48 mm. In the high-shear extruder, the resin was thermally decomposed by the shear-induced heat. The screw was composed of multiple different screw elements such as a usual twin-screw extruder. The high-shear extruder possessed a screw element with circular through-holes, which is shown in Fig. 4. The resin was dammed by the reverse flighted screw element and flowed into the through-holes. The role of this element was to make the

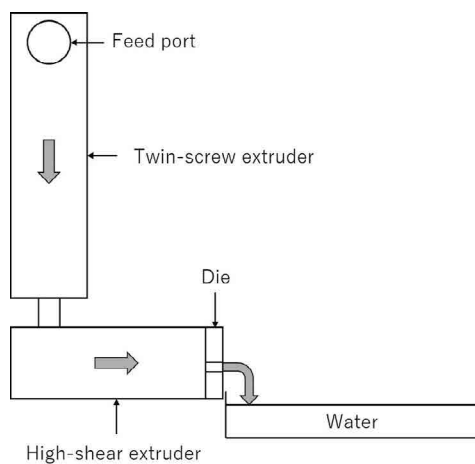


Fig. 3 Total system of our experiments. The twin-screw extruder and the high-shear extruder were connected by a circular single tube with the diameter of 10 mm and the length of 150 mm. The resin was fed from the feed port, and flows in the twin-screw extruder, followed by the high-shear extruder.

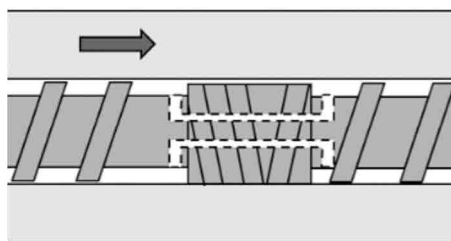


Fig. 4 Screw elements with through-holes. The arrow indicates the flow direction of resin.

fully filled region in front of the reverse flighted screw, but not to give too much shear stress to the resin to prevent the excessive degradation. The discharged resin from the die of the high-shear extruder was immediately cooled by water and dried appropriately.

### 3.2 Materials

Two different grades of homo-polypropylene (F-704NP and J107G, Prime Polymer, Tokyo, Japan) were used. The melt flow rates were 7.0 and 30 g/10min, respectively, measured in accordance with the ISO 1133:97 standard. In the following, we denote F-704NP as PP1 and J107G as PP2. To determine the parameters of the viscosity model Eqs.(6) and (7), the shear viscosity was measured by a modular compact rheometer (MCR 102, Anton Paar, Graz, Austria). The steady shear rate ranged from 0.01 to  $100\text{ s}^{-1}$  and the measurement temperatures were 190, 200, and  $210^\circ\text{C}$ . The reference temperature was set to  $200^\circ\text{C}$ . The resultant model parameters of PP1 and PP2 by curve fitting were given in Table 1. The viscosity data and curves are shown in Fig. 5 and 6.

Table 1 Parameters of Cross model for PP1 and PP2 with  $T_r = 473\text{K}$ .

Sample	$\eta_r$ [Pa·S]	$T_r$ [K]	$\tau_r$ [Pa]	$n$
PP1	$5.15 \times 10^3$	$6.87 \times 10^3$	$6.87 \times 10^3$	0.403
PP2	$9.47 \times 10^2$	$6.80 \times 10^3$	$9.26 \times 10^3$	0.324

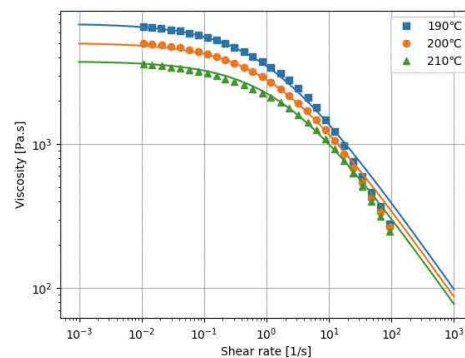


Fig. 5 Viscosity data and curves for PP1.

To determine the activation energy of PP, the Kissinger's method was used, which was reviewed in [20]. To obtain the weight loss data for thermal degradation of PP, the simultaneous thermogravimetric analyzer (STA7200, Hitachi High-Tech Science, Tokyo, Japan) was used. For samples, PP1 was used. The samples were purged with the air at a flow rate of 30 mL/min because the air was expected to exist in the high-shear extruder. Constant heating rates of 2, 4, and  $8^\circ\text{C}/\text{min}$  were used. For each case, the sample weight was approximately 10 mg. The results of the thermogravimetric analysis (TGA) are shown in Fig. 7. The temperature  $T$  at a given weight fraction of

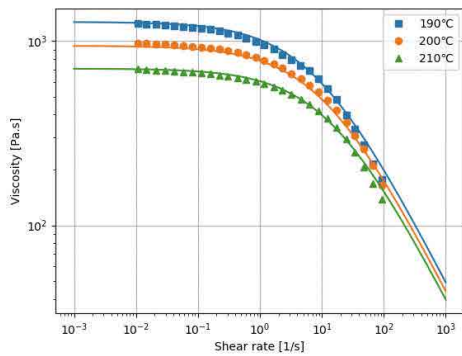


Fig. 6 Viscosity data and curves for PP2.

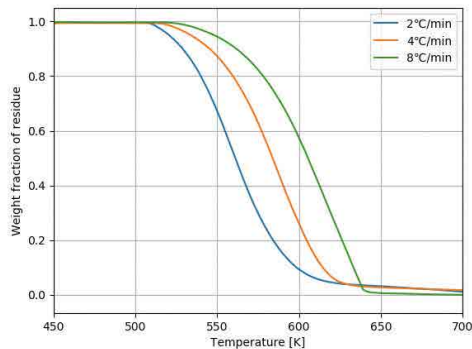


Fig. 7 TGA curves with different constant heating rates for PP1.

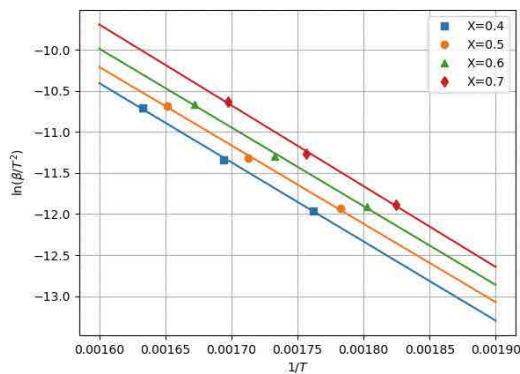


Fig. 8 Sets of data ( $1/T, \ln(\beta/T^2)$ ) at a fixed  $X$  and fitting curves.

residue  $X$  was found for each heating rate  $\beta$ . The Kissinger's method uses the following equation:

$$\ln\left(\frac{\beta}{T^2}\right) = -\frac{E}{R_g T} + const. \quad (\text{at a fixed } X), \quad (31)$$

where  $E$  [J/mol] is the activation energy and  $R_g$  is the gas constant. Fig. 8 shows the sets of data ( $1/T, \ln(\beta/T^2)$ ) and the fitting curves for  $X = 0.4, 0.5, 0.6,$  and  $0.7$ . The values of  $E$  at  $X = 0.4, 0.5, 0.6, 0.7$  were  $E = 8.006 \times 10^4, 7.930 \times 10^4, 7.964 \times 10^4, 8.175 \times 10^4$ , respectively. Thus, we obtained  $E = 80.2 \pm 0.94$  [kJ/mol]. This value will be valid because the activation energy of PP at temperatures of less than 404 to 421°C was found to be  $98.3 \pm 3.1$  kJ/mol by TGA under argon atmosphere in [20]. Our result was smaller than that of [20] because of the oxidative degradation. In the following, we set  $E = 80.2$  kJ/mol.

### 3.3 Investigation of Nusselt Number

The screw configuration of the high-shear extruder is shown in Fig. 9. The screw elements with a channel depth of 3 mm, a lead of 15 mm, and a length of 45 mm were used. The die with a diameter of 4 mm and a length of 25 mm was used. The flow rate was 4.8 kg/h. The barrel temperature was set to 195°C and 300°C. The screw rotational speeds of 100, 1000, and 2000  $\text{min}^{-1}$  were chosen. For resin, PP1 was used. The temperature of PP at the exit of the die was measured.

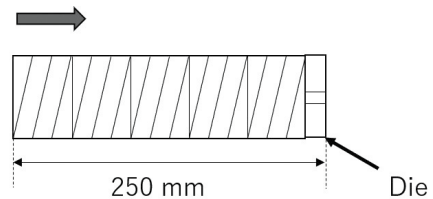


Fig. 9 Screw configuration to investigate Nusselt number. The arrow indicates the direction of flow.

### 3.4 Degradation of PP with High-Shear Extruder

#### 3.4.1 Experiment 1

The screw configuration of the high-shear extruder is shown in Fig. 10. The screw was mainly composed of screw elements with a channel depth of 3 mm, a lead of 22.5 mm, and a length of 45 mm. The last screw element had the same channel depth as the previous ones with a different lead of 15 mm and a different length of 30 mm. The shaded region in Fig. 10 represents the reverse flighted screw element with through-holes which was shown in Fig. 4. This element possessed four through-holes with a diameter of 2 mm and a length of 45 mm. The die of the high-shear extruder had the diameter of 2 mm and the length of 25 mm. The barrel temperature was set to 195°C. The flow rate was 4.8 kg/h. The screw rotational speeds of 2000, 2500, 3000, and 3600  $\text{min}^{-1}$  were used. For resin, PP1 was used. The temperature of PP was measured at the point P in Fig. 10 and the exit of the die. The zero-shear viscosity of the processed PP was measured at the reference temperature 200°C.

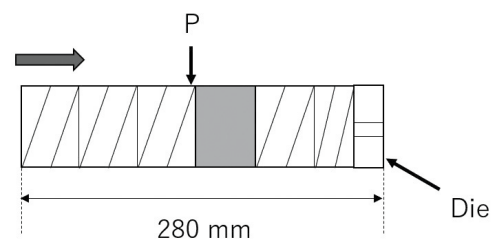


Fig. 10 Screw configuration of experiment 1. The arrow indicates the direction of flow.

### 3.4.2 | Experiment 2

The screw configuration of the high-shear extruder is shown in Fig. 11. The screw elements with a channel depth of 3 mm, a lead of 15 mm, and a length of 45 mm were used. The shaded regions were the same as that of experiment 1. The die with a diameter of 3 mm and a length of 25 mm was used. For resin, PP2 was used. The flow rate and the screw rotational speed were fixed to 10 kg/h and 3600 min<sup>-1</sup>, respectively, but the barrel temperatures were set to 300 and 350°C. The resin temperature was measured at the exit of the die. The zero-shear viscosity of the processed samples was measured at the reference temperature 200°C.

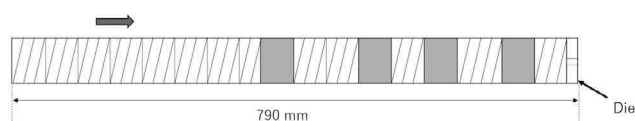


Fig. 11 Screw configuration of experiment 2. The arrow indicates the direction of flow.

## 4 Results

### 4.1 | Investigation of Nusselt Number

Table 2 shows the simulation and experimental results described in section 3.3. When the barrel temperature was raised from 195°C to 300°C with the fixed screw rotation speed of 100 min<sup>-1</sup>, the calculated Nusselt number was a little bit increased. Therefore, the calculated temperature at the exit of the high-shear extruder  $T_f$  in our simulation was also changed compared to the calculated value of  $T_f$  with  $Nu = 8.92$ , which was the Nusselt number evaluated at  $N = 100$  min<sup>-1</sup> and  $T_b = 195$ °C. With the modification of the Nusselt number, the simulation result approached the experimental result.

When the screw rotation speed was increased from 100 min<sup>-1</sup> to more than 1000 min<sup>-1</sup> with the fixed barrel temperature of 195°C, the calculated Nusselt number was largely increased. This was because a heat transfer coefficient in a forced convection depends on the

Table 2 Simulation and experimental results of the experiments described in Section 3.3. The outlet temperature is denoted by  $T_f$ . The values of  $T_f$  in parentheses were the calculated values at  $Nu = 8.92$ .

$N$ [min <sup>-1</sup> ]	$T_b$ [°C]	$Nu$	$T_f$ [°C]	
			Sim.	Exp.
100	195	8.92	216	213
100	300	10.9 (8.92)	280 (274)	290
1000	195	15.1 (8.92)	318 (328)	287
2000	195	17.2 (8.92)	375 (393)	307

fluid velocity so that the resin with a high velocity was much cooled by the barrel. As a result, the predicted values of  $T_f$  in our simulation largely decreased compared to the calculated values of  $T_f$  with  $Nu = 8.92$ . Thus, we found that our simulation surely took into account the dependence of the screw rotational speed and the barrel temperature on the Nusselt number, which was not considered in [16]. The large discrepancies of  $T_f$  between the simulations and the experiments at  $N = 1000$  and 2000 min<sup>-1</sup> were caused by the viscosity reduction due to the thermal decomposition.

### 4.2 | Degradation of PP with High-Shear Extruder

Fig. 12 shows the simulation results and experimental results of experiment 1 when the screw rotational speed was 3600 min<sup>-1</sup>. If the frequency factor  $A$  was equal to zero, the prediction of temperature at the exit of the high-shear extruder did not agree with the experimental result because the reference zero-shear viscosity  $\eta_r$  did not decrease and the shear-induced heat was overestimated. Setting  $A = 5.7 \times 10^5$ , the simulation result agreed well with the experimental results. In the following,  $A$  was fixed to this value.

The numerical values of simulation results and experimental results in experiment 1 were summarized in Table 3. For all screw rotational speeds, the predictions of  $T_p$  and  $\eta_r$  quite matched with the experimental results, but the outlet temperatures  $T_f$  in the simulation were smaller than the experimental ones. This issue will be explained later.

Fig. 13 shows the simulation results of the distributions of temperature and reference zero-shear viscosity in experiment 1. As the

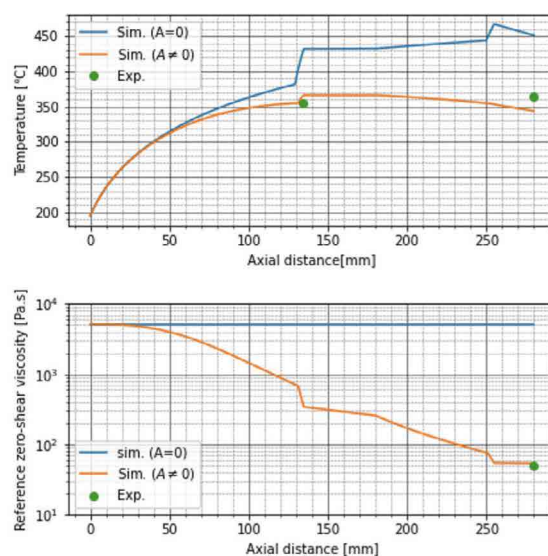


Fig. 12 Comparison of simulation results and experimental results in experiment 1 when screw rotational speed was 3600 min<sup>-1</sup>.

screw rotational speed increased, the temperature increased and the reference zero-shear viscosity decreased because of the thermal decomposition. The zero-shear viscosity greatly decreased in front of the through-holes and the die because the screw was fully filled with resin here and the maximum shear stress and the residence time became large. Inside the through-holes and the die, the degradation was suppressed because the shear stress and the residence time were small. The through-holes were not cooled or warmed, so the temperature did not change so much. However, the temperature decreased in the die because the die was kept at 195°C. After the resin was discharged from the through-holes, the temperature gradually decreased despite of the high screw rotational speeds. This is because the shear-induced heat was reduced due to the viscosity reduction in front of the through-holes and the heat conduction to the barrel became dominant. However, as we saw in Table 3, the experimental outlet temperatures were higher than those of our simulation. We do not see the reason clearly yet, however one of the possible reasons is that we treated the Nusselt number as a global value. Generally, the Nusselt number depends on the distance of the system. In our case, the Nusselt

Table 3 Simulation and experimental results of temperature at point  $P$ , denoted by  $T_p$ , outlet temperature  $T_f$ , and outlet reference zero-shear viscosity  $\eta_{rf}$  in experiment 1.

$N$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	$T_p$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]		$T_f$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]		$\eta_{rf}$ [ $\text{Pa}\cdot\text{S}$ ]	
	Sim.	Exp.	Sim.	Exp.	Sim.	Exp.
2000	337	343	322	351	162	143
2500	348	352	330	360	109	113
3000	356	346	337	364	78.6	76.1
3600	366	355	344	365	53.8	48.2

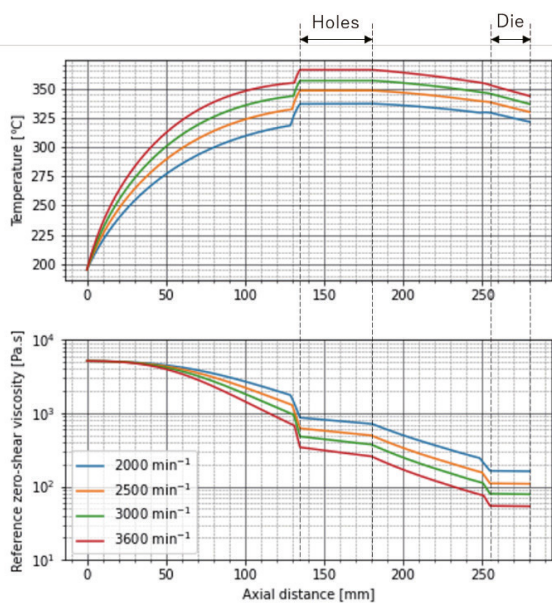


Fig. 13 Predictions of temperature distribution and distribution of reference zero-shear viscosity in experiment 1.

number around the exit of the extruder will be smaller than that around the entrance. Then, the heat conduction from the barrel after the through-holes becomes smaller and the temperature decrease in the simulation will be suppressed. However, to accommodate the local heat transfer in the simulation will be difficult because the heat conduction equation Eq.8 must be solved backwards in the axial direction. It seems to be impossible to set a good initial guess of the temperature distribution at the exit of the extruder so as to converge the calculation.

Table 4 Simulation and experimental results of outlet temperature  $T_f$ , and outlet reference zero-shear viscosity  $\eta_{rf}$  when barrel temperature  $T_b$  was 300 and 350°C in experiment 2.

$T_b$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_f$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]		$\eta_{rf}$ [ $\text{Pa}\cdot\text{S}$ ]	
	Sim.	Exp.	Sim.	Exp.
300	341	375	12.8	16.9
350	365	380	5.25	5.51

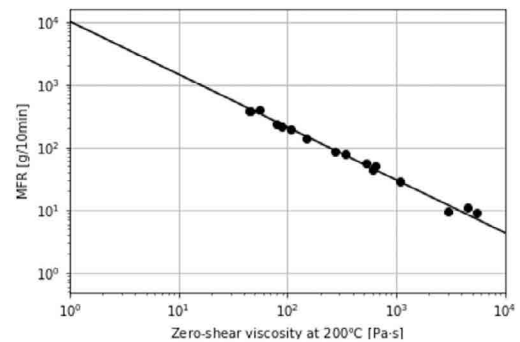


Fig. 14 Calibration curve of MFR for homo-PP.

To make PP with a value of MFR over 1000 g/10min, the experiment 2 was performed. Since a high resin temperature and a long residence time were necessary to reduce the zero-shear viscosity, the barrel temperature was changed to a value more than 300°C. The screw rotational speed was fixed to the maximum value of 3600  $\text{min}^{-1}$ . The long screw was used and four dams with the through-holes were inserted.

The simulation and the experimental results of the outlet temperature and the outlet reference zero-shear viscosity in the experiment 2 were summarized in Table 4. Although the outlet temperatures of the simulation were lower than the experimental ones as was expected from experiment 1, the simulation results of the reference zero-shear viscosity were in agreement with the experimental ones. The viscosity of both samples were too low to measure the value of MFR directly using a melt indexer. However, a logarithm of a reference zero-shear viscosity of PP was almost proportional to a logarithm of the value of MFR, so we created a

calibration curve of MFR which is shown in Fig. 14. Using this calibration curve, the values of MFR for  $T_b = 300^\circ\text{C}$  and  $350^\circ\text{C}$  were 938 g/10min and 2411 g/10min, respectively. Thus, we could produce the degraded PP with a value of MFR over 1000 g/10min using our high-shear extruder.

## 5 Conclusions

In general, to manufacture melt-blown nonwoven fabric sheets of PP, we need a low viscosity grade of PP with the value of MFR around 1000. We demonstrated that we could produce the degraded PP with the value of MFR over 1000 g/10min from the commercial PP (MFR = 30 g/10min) by the high-shear extruder without using the peroxides. To fabricate the PP with the value of MFR over 1000 g/10min, the maximum screw rotation speed of  $3600\text{ min}^{-1}$  and the barrel temperature over  $300^\circ\text{C}$  were used. From the TGA analysis shown in Fig. 7, the thermal decomposition of PP started at around  $250^\circ\text{C}$  in the air. The temperature of PP in the high-shear extruder exceeded the thermal decomposition temperature by  $100^\circ\text{C}$ . By varying the screw rotation speed from  $2000\text{ min}^{-1}$  to  $3600\text{ min}^{-1}$  with the fixed barrel temperature of  $195^\circ\text{C}$ , the outlet zero-shear viscosity decreased by around  $100\text{ Pa}\cdot\text{s}$ . This shows that the viscosity of polymers can be adjusted easily and quickly only by the screw rotation speed of the high-shear extruder.

Using the degraded PP, a meltblown nonwoven fabric sheet was really produced, which is shown in Fig. 15. The value of MFR of the degraded PP was 1148 g/10min, and the yellow index was 5.68, which was a little bit higher than that before high-shear rate processing, 3.71. As can be seen in Fig. 15, the appearance of the sheet was white enough. The feeling of touch was also good. In fact, no shot (agglomerates of polymers that are larger than fibers) was confirmed in the image of the scanning electron microscope (SEM) which is shown in Fig. 16. The average fiber diameter was  $1.6\text{ }\mu\text{m}$ .

It is interesting to apply the high-shear rate processing to fabricate low-viscosity engineering plastics for the meltblown process because those raw materials are less commonly available in market than low-viscosity PP. The meltblown nonwoven fabrics made of the engineering plastics are applied to the heat-resistant air filters, etc. However, it is challenging to degrade any engineering plastics by the high-shear extruder sufficiently because those materials are obviously hard to decompose thermally. In the high-shear extruder, the shear-induced heat becomes gradually small as the resin is



Fig. 15 Meltblown nonwoven fabric sheet which was made of degraded PP by high shear extruder. We used PP2 as the raw material because no talc was included as the additives.

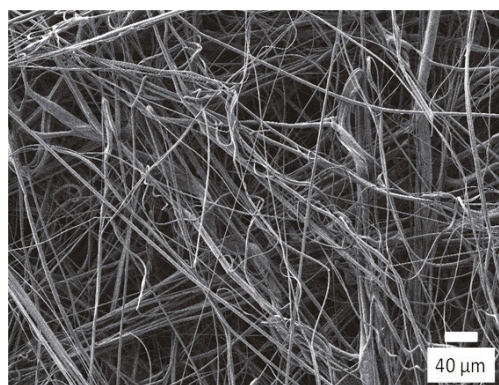


Fig. 16 SEM image of meltblown nonwoven fabric sheet in Fig. 15.

thermally decomposed because the shear stress is proportional to the viscosity. Then, the heat conduction to the barrel becomes dominant compared to the heat generation. In fact, in the simulation of the experiment 1, the resin was cooled by the barrels as we saw in Fig. 13. This will suppress the thermal decomposition of resin with a high thermal decomposition temperature. This issue might be solved by replacing the barrels to adiabatic walls.

The viscosity of the degraded PP in our experiments was too low to extrude in a strand shape. Thus, small lumps of the extruded PP were crushed and the particles, whose size was of the order of 1 mm, were obtained to be fed into the meltblown equipment. To pelletize such low-viscosity PP, we have to use an under water cutter, which is hard to manage. A low-viscosity grade of resin for the meltblown process is sometimes only available in powder forms, and feeding the powders to the meltblown equipment is awkward because powders generally tend to be cohesive and also tend to entrap air. However, if the high-shear extruder is combined tandemly

with the meltblown equipment, we can manufacture the meltblown nonwoven fabric sheets from the standard grades of resin, which are supplied in pellet form and always available anywhere at low cost. Furthermore, various meltblown nonwoven fabric sheets with different physical properties will be easily produced by changing the screw rotational speed of the high-shear extruder. We are now developing the integrated manufacturing process of meltblown nonwoven fabrics.

We also developed the simulation of the shear-induced thermal decomposition of resin in the high-shear extruder. By the nature of the high screw rotation speed and the wide range of the operational conditions, the simulation of the high-shear rate processing was not so easy. In fact, as described in [16], the heat transfer coefficient should be modulated by the screw rotation speed to predict the resin temperature at high-shear rates. Of course, we need to take into account the effect of the viscosity reduction by the thermal decomposition. In our one dimensional flow model, the global Nusselt number in the screw was estimated by solving the heat conduction equation Eq.8 in the case of the simple shear flow. We found that the Nusselt number did not change so much as the barrel temperature was increased from 195°C to 300°C, but the large deviations occurred by changing the screw rotation speed from 100 min<sup>-1</sup> to more than 1000 min<sup>-1</sup>. By coupling the flow model to the kinetic equation of the viscosity reduction, which was derived in section 2.2, we found that our simulation results agreed well with the experimental results even when the operational conditions were widely changed. The simulation predicted that the large viscosity reduction occurred in front of the dams such as the through-holes and the die because the shear stress and the residence time were expected to be large in the fully filled regions of screw. Therefore, we installed many dams in the screw to obtain the low-viscosity PP with MFR over 1000 g/10min in the experiment 2.

The numerical simulation to predict the number-average molecular weight and weight-average molecular weight under the thermal degradation in a twin-screw extruder were developed [13]. Using their kinetic equations of the molecular weights, we will be able to predict the polydispersity index during the high-shear rate processing. In the meltblown process, the polydispersity index of the raw material will affect the variance of the fiber diameters. Since the high-shear rate processing utilizes the thermal decomposition of polymers, which is the random scission process, the polydispersity index tends to be small. However, the quantitative prediction during

the high-shear rate processing is missing. It will be interesting to see how to change the polydispersity index with the screw configurations and the operational conditions of the high-shear extruder.

In our simulation, the resin temperatures at the exit of the high-shear extruder were a little lower than the experimental results. The possible reason is that the dependence of the Nusselt number on the distance in the system was not considered in our model. However, obtaining the full local Nusselt number is difficult. This is because the heat conduction equation is usually solved forwards with a homogeneous initial condition, but we have to proceed the calculations backwards to specify the unfilled regions. If the barrels of the high-shear extruder were adiabatic, consideration of the heat conduction would not be appeared.

#### Appendix A. Nomenclature and Definition of Symbols

$A$	frequency factor in the kinetic model of viscosity reduction [Pa <sup>0.3</sup> ·s <sup>-1.3</sup> ]
$C_p$	heat capacity of resin [J/(kg·K)]
$D$	inner diameter of the barrel [m]
$E$	activation energy of thermal decomposition [J/mol]
$f$	fill ratio [-]
$H$	height of the screw channel [m]
$k$	reaction rate of thermal decomposition [1/s]
$l$	length of the die [m]
$L_p$	path length of the screw [m]
$L/D$	ratio of total length of screw to inner diameter of barrel in an extruder [-]
$n$	exponent in the Cross model [-]
$n_{\mathcal{N}}$	number of polymers with $\mathcal{N}$ number of nodes [-]
$N$	screw rotational speed [1/s]
$\mathcal{N}$	number of nodes of a linear polymer [-]
$\bar{\mathcal{N}}$	number average degree of polymerization [-]
$Nu$	average Nusselt number [-]
$Nu_z$	local Nusselt number at $z$ [-]
$p$	pressure of resin [Pa]
$q$	heat flux [W/m <sup>2</sup> ]
$Q$	flow rate [m <sup>3</sup> /s]
$r$	radial coordinate of the die [m]
$R$	radius of the die [m]
$R_g$	gas constant = 8.31 J/(mol·K)
$S$	cross-sectional area of the screw channel or die [m <sup>2</sup> ]
$t$	time [s]

$T$	temperature of resin [K]
$T_b$	barrel temperature [K]
$T_f$	exit temperature of the high-shear extruder [K]
$T_r$	reference temperature [K]
$T_w$	temperature of the die [K]
$T_*$	model parameter of the zero-shear viscosity [K]
$v^z$	z-component of the fluid velocity [m/s]
$V$	velocity of the barrel with respect to an observer on the screw [m/s]
$V^z$	Z-component of $V$ [m/s]
$W$	width of the screw channel [m]
$x$	coordinate of the channel width direction of the screw [m]
$X$	weight fraction in TGA analysis [-]
$y$	coordinate of the channel depth direction of the screw [m]
$z$	coordinate for down-channel direction or axial direction of the screw [m]
$\alpha$	pressure gradient [Pa/m]
$\beta$	heating rate in TGA analysis [°C/min]
$\dot{\gamma}$	shear rate of resin [1/s]
$\eta$	non-Newtonian viscosity of resin [Pa·s]
$\eta_0$	zero-shear viscosity in the Cross model [Pa·s]
$\eta_r$	zero-shear viscosity at $T_r$ [Pa·s]
$\eta_{rf}$	value of $\eta_r$ at the exit of the high-shear extruder [Pa·s]
$\kappa$	thermal conductivity of resin [W/(m·K)]
$\rho$	melt density of resin [kg/m <sup>3</sup> ]
$\tau$	shear stress of resin [Pa]
$\tau_*$	characteristic shear stress in the Cross model [Pa]
$\phi$	screw angle [rad]

### Appendix B. Setup of Twin-Screw Extruder

The screw configuration and the barrel temperatures of the twin-screw extruder in the experiments are shown in Fig. A1. The total length was 1260 mm and the inner diameter of the barrel was 26 mm. The flow rate and the screw rotation speed used in the experiments were summarized in Table A1.

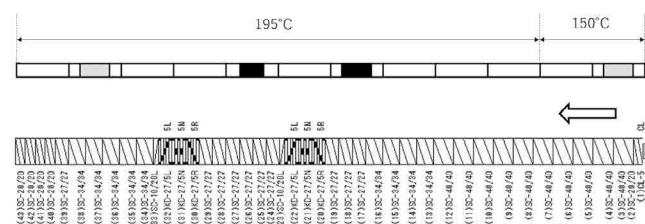


Fig. A1 Screw configuration and barrel temperature of twin-screw extruder. The arrow indicates the flow direction. Names of the screw elements are as defined in the catalog of SHIBAURA MACHINE CO., LTD.

Table A1 The flow rate  $Q$  and the screw rotation speed  $N$  of the twin-screw extruder in the experiments.

$Q$ [kg/h]	$N$ [min <sup>-1</sup> ]
4.8	80
10	100

### References

- 1) Dutton, K. C. Overview and analysis of the meltblown process and parameters. *J. Text. Apparel, Technol. Manage.*, 2009, 6, 1–25.
- 2) Takarada, W.; Hatano, S.; Kikutani, T.; Experimental and Numerical Analysis of Unstable Behavior of Melt Blowing Process. *J. Fiber Sci. Technol.*, 2020, 76, 208-216.
- 3) Berzin, F.; Vergnes, B.; Dufossé, P.; Delamare, L. Modeling of peroxide initiated controlled degradation of polypropylene in a twin screw extruder. *Polym. Eng. Sci.*, 2000, 40, 344-356.
- 4) Vergnes, B.; Berzin, F.; Peroxide-controlled Degradation of Poly(propylene): Rheological Behaviour and Process Modelling. *Macromol. Symp.*, 2000, 158, 77-90.
- 5) ledema, P. D.; Willems, C.; van Vliet, G.; Bunge, W.; Mutsers, S.; Hoefsloot, H.; Using molecular weight distributions to determine the kinetics of peroxide-induced degradation of polypropylene. *Chem. Eng. Sci.*, 2001, 56, 3659-3669.
- 6) ledema, P. D.; Remerie, K.; van der Ham, M.; Biemond, E.; Tack, J. Controlled peroxide-induced degradation of polypropylene in a twin-screw extruder: Change of molecular weight distribution under conditions controlled by micromixing. *Chem. Eng. Sci.*, 2011, 66, 5474.
- 7) Cassagnau, P.; Bounor-Legaré, V.; Vergnes, B.; Experimental and modelling aspects of the reactive extrusion process. *Mech. Ind.*, 2019, 20, 803.
- 8) Shimizu, H.; Li, Y.; Kaito, A.; Sano, H.; Formation of Nanostructured PVDF/PA11 Blends Using High-Shear Processing. *Macromolecules*, 2005, 38, 7880-7883.
- 9) Li, Y.; Shimizu, H.; High-shear processing induced homogeneous dispersion of pristine multiwalled carbon nanotubes in a thermoplastic elastomer. *Polymer*, 2007, 48, 2203-2207.
- 10) Li, Y.; Shimizu, H.; Fabrication of Nanostructured Polycarbonate/ Poly(methyl methacrylate) Blends With Improved Optical and Mechanical Properties by High-Shear Processing. *Polym. Eng. Sci.*, 2011, 51, 1437.
- 11) Louizi, M.; Massardier, V.; Cassagnau, P.; Contribution of High-shear Processing to the Compatibilization of (PP/EPR)/PE Ternary

Blends. *Macromol. Mater. Eng.*, 2014, 299, 674-688.

- 12) Ishigami, A.; Kodama, Y.; Suenaga, H.; Inoue, T.; Ito, H.; Mechanical Properties and Structure of Novel Polymer Blends and Composites Fabricated by Reactive and High-shear Rotational Processing. *Energy Procedia*, 2016, 89, 30-37.
- 13) Kim, B.; White, J. L.; Simulation of Thermal Degradation, Peroxide Induced Degradation, and Maleation of Polypropylene in a Modular Co-Rotating Twin Screw Extruder. *Polym. Eng. Sci.*, 1997, 37, 576.
- 14) Farahanchi, A.; Sobkowicz, M.J. Kinetic and process modeling of thermal and mechanical degradation in ultrahigh speed twin screw extrusion. *Polym. Degrad. Stab.* 2017, 138, 40-46.
- 15) Blancas, C.; Vargas, L.; Modeling of the industrial process of peroxide-initiated polypropylene (homopolymers) controlled degradation. *J. Macromol. Sci.*, 2001, B40, 315-326.
- 16) Fel, E.; Massardier, V.; Mélis, F.; Vergnes, B.; Cassagnau, P.; Residence Time Distribution in a High Shear Twin Screw Extruder. *Int. Polym. Proc.* 2014, 29, 71-80.
- 17) Bird, R.B.; Armstrong, R.C.; Hassager, O. *Fluid Mechanics. Dynamics of Polymeric Liquids.* 2nd ed.; John Wiley and Sons Inc: New York, NY, USA, 1987; Volume 1.
- 18) Rubinstein, M.; Colby, R.H. *Polymer Physics*; Oxford University Press Inc.: New York, NY, USA, 2003.
- 19) Suehiro, T.; O'shima, E. A kinetic study on the random scission of a polymer; *Kobunshi Ronbunshu.* 1977, 34, 241-248.
- 20) Chan, J. H.; Balke, S. T. The thermal degradation kinetics of polypropylene: Part III. Thermogravimetric analyses. *Polym. Degrad. Stab.* 1997, 57, 135-149.



# 自動車用精密部品の超精密加工を支える機上測定

なお、本内容は、公益社団法人精密工学会が発行する「精密工学会誌 第85巻 第7号 628 ページ」に掲載された技術論文を一部修正して転載したものである。



工作機械カンパニー  
工作機械技術部  
開発課

福田 将彦

## 1 はじめに

非球面レンズをはじめとして、さまざまな超精密光学部品の量産化は、光学機器・情報機器の性能向上とコスト削減に大きく寄与してきた。例えば、デジタルカメラに用いられる非球面プラスチックレンズ、光ディスクに用いられるピックアップレンズ、レーザプリンタにおける  $f\theta$  レンズ、プロジェクタやヘッドアップディスプレイにおける自由曲面ミラーなどが挙げられる。特に射出成形法で量産されるプラスチック光学部品の場合、金型の加工品質の向上が著しく、非球面レンズ用金型加工の場合、15年ほど前は加工形状精度への要求が  $0.1 \sim 0.2\mu\text{mPV}$  程度だったが、ここ数年では  $0.05\mu\text{mPV}$  程度となり、また加工面粗さも  $1\text{nmRa}$  以下が得られるようになった。

超精密光学部品は、自動車用光学製品への適用も増えつつある。低消費電力や長寿命に加えて、デザインに対する柔軟性を利用した LED 光源を用いたヘッドライトが代表例として挙げられる。ただし、要求される光学性能が滑らかな光学表面だけでなく、ロー/ハイビーム時の配光特性を満たす微小な凹凸を光学表面に形成する場合がある。



Fig. 1 超精密加工を対象とする領域

現在、おおよそ Fig. 1 に示す領域において超精密光学部品が生産されており、必要とされる加工形状と品質から、切削、研削、ミリングといった加工法が選択される。ただし、加工機および加工技術だけでは対応できない課題も多く、工具や測定器など周辺技術を含めて検討または開発が行わなければならない。その中で機上測定は、難度の高い課題に対して、市場の強い要求に基づいて開発されることが多い。

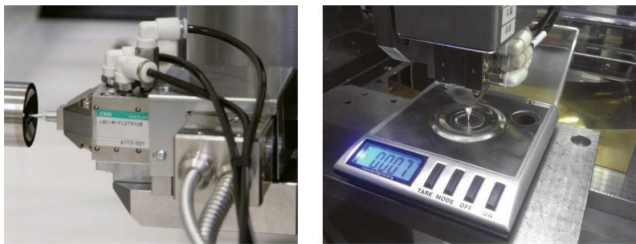
そこで本稿では、まず機上測定の基本要素を解説する。次に自動車用精密部品の超精密加工に着目し、その適用事例を紹介する。

## 2 機上測定システムの開発経緯

超精密加工において、機上測定が本格的に検討されたのは、デジタルカメラの普及により非球面レンズへの要求が高まったこととみられる。射出成形法で生産される樹脂レンズの多くは、無電解 NiP めっきを施したステンレス鋼の金型を、単結晶ダイヤモンド工具を用いて、旋削加工が行われる。比較的短時間に再現性のある加工品質を得ることができるが、量産性の観点から、加工後の形状評価を行う測定の安定性が重要であることを田中が論じている<sup>1)</sup>。しかし、十分な測定精度が得られる測定器が普及していなかったこともあり、高精度測定を目的とした機上測定の検討が行われた。ここで開発された測定プローブは、エア圧制御により測定圧を調整できる機構を備え、 $0 \sim 500\text{mgf}$  と極低圧測定を実現し、高精度測定を可能とした<sup>2)</sup>。

次に機上測定への要求が高まったのは、レーザプリンタ用  $f\theta$  レンズ金型に対する自由曲面加工が注目されたこととみられる。金型は単結晶ダイヤモンドを取り付けたフライカット工具をラスター走査により加工を行われていた。金型加工への要求精度が高く、加工に数十時間かかることもあり、ワークの取り

付け誤差によるエアカットは量産性を大きく低下させる要因となった。そのため、ワークを加工機から外すことなく形状の評価や補正を可能とする機上測定への検討が進められた。この測定では、形状の回転対称性を利用した中心を通る従来の断面走査だけではなく、金型全面を評価する必要がある。そのため、NC との高速相互通信を利用し、測定データの演算結果を走査軌跡へ反映させる機能など、システムの機能充実が図られた。



(a) 横置き型の測定プローブ (b) 縦置き型の測定プローブ

Fig. 2 機上測定用プローブ

10年ほど前には、ピックアップレンズの金型加工に対する機上測定が注目された。光学特性の観点からガラスがレンズ材料として選択され、ガラス成形法が用いられる。そのため、耐熱性がある超合金やSiCなどの高硬度材料が金型材料として用いられ、金型加工では研削加工法が選択された。一方で、高NA対応形状であることから、深い傾斜面をもちながら高い形状精度が必要とされる難度の高い金型加工が要求された。これらの理由により、ワークを外すことなく測定評価が可能な機上測定への検討が進んだ。さらに基準球を用いたスタイラス半径を補正するなど、トレーサビリティの確立が行われ、測定の正確さが向上した。

ここ4～5年では、ヘッドアップディスプレイのような比較的大型自由曲面の高精度加工に対する要求が増えてきている。この場合、加工の安定性から縦旋削の段取りを行う場合があり、従来のプローブを横置きにする測定システムでは対応できず、縦型設置の機上測定システムの開発が行われた<sup>3)</sup>。

以上のような開発の経緯を経て、現在 Fig. 2 に示す機上測定システムの提案がなされている。プローブは、①真球度が $0.1\mu\text{mPV}$ 以内に保証されたルビー球を標準としたスタイラス、②軽量化が図られたエアスライド、③極低測定力を設定する機構、④エアスライドの移動量を検出する変位計から構成されており、同図(a)に示す横置き型測定だけでなく、プローブ自重を含めて測定圧を $10\text{mgf}$ 以下に設定することにより、同図(b)に示す縦置き型測定が可能である。

### 3 機上測定の課題

超精密加工における加工形状の多様化により、機上測定に対しても新たな課題が生じている。特に、複合的に光学形状が組み合わされた金型や、レンズ周辺に幾何学的な付加形状が加わった金型、自動車部品をはじめとして、CAD定義により加工形状が提示される金型への対応である。これらは複雑であるだけでなく、形状の詳細が不明瞭なため、プローブ走査の事前定義が困難であることが多い。例えば Fig. 3 のようなモバイルレンズ用金型形状を測定する場合、中心部は数式を用いて定義される非球面形状のため、走査軌跡の正確な事前定義が可能だが、周辺部の幾何学形状部では、走査基準点の設定誤差によっては、プローブのストロークを超える移動量がスライダに生じる可能性がある。NC との高速相互通信を利用して直前の測定データから次の走査位置を指令する方法も考えられるが、データ取得から演算、NC へのバッファリングに至るプロセスを、多量のデータ点数に対して実施すると、測定時間の増大を招きやすい。一方、測定形状に対する評価においても、複雑な形状に対してサブミクロンオーダーで評価することは難しく、CAD 定義モデルなどは3次元測定器による部分測定に限られている状況となっている。

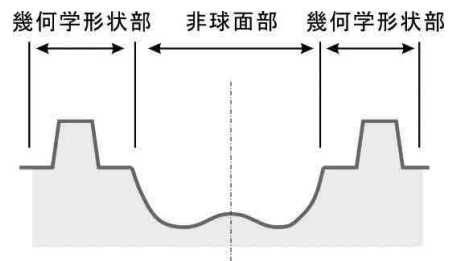
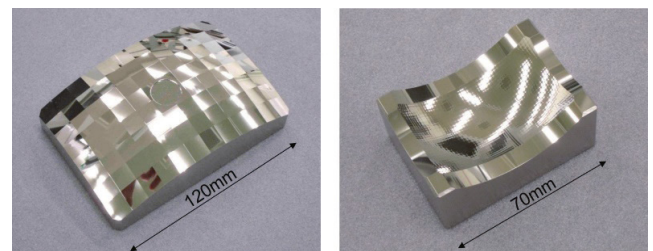


Fig. 3 周辺形状付き非球面形状金型



(a) 拡散パターン付厚肉レンズ金型 (b) マルチフレクタ金型

Fig. 4 自動車光学部品の金型加工事例

次に、自動車用精密部品に見られる複雑形状への対応である。近年著しい発展を遂げている小径エンドミルによる高速切削加工により、寸法や粗さ精度の向上が図られ、さらに空気静圧軸受やリニアモータ駆動制御に関する技術を活用した超精密立形

加工機の登場により、超精密加工に対して期待される精密金型仕上げの磨きレス化、磨きミニマム化が可能になっている<sup>4)</sup>。LED光源を採用した自動車用光学部品では、ランプユニットの小型化や高輝度化、指向性向上、意匠性の拡大など、「高品位」かつ「微細」の要求が増加し、成形用金型の磨きレス化、あるいは磨き仕上げのミニマム化の要求が大きい。Fig. 4は、超精密立形加工機による自動車光学部品金型の事例を示しており、同図(a)は、投射光を拡散させるためのフライアイパターンで構成されたヘッドランプ用拡散パターン付厚肉レンズ金型を、同図(b)は、マルチフレクタ金型の加工事例を示している。いずれも、無電解NiPめっきを施したステンレス鋼金型を、単結晶ダイヤモンド工具を用いてミリング加工を行い、10nmRaの加工品質が得られている。しかし、高い加工精度が要求されることから、人の手を介する作業が多く、省力化や自動化の検討があまりなされていない。そのため、製造コスト低減やリードタイム短縮を含めた加工精度再現性の確保には課題が多い。

## 4 CAD定義モデルへの対応

### 4.1 | サーボ走査式機上測定システム

測定プローブ走査の事前定義ができない測定形状に対して、測定面に沿ってプローブが走査するサーボ走査式機上測定システムが提案されている。このシステムでは、従来用いている極低測定力で走査可能なエアプローブを採用し、Fig. 5に示すように検出された移動量を機械本体の位置決めサーボ系にフィードバックすることにより、常にエアスライドが同じ位置に保たれるようにテーブルを移動し走査を行っている。つまり、図に示されている事例では、測定プローブが凹凸のある測定物を走査し、測定形状によってエアスライドが移動する。この移動量を変位センサが検出し、信号処理回路を経て、テーブルに動作指令を与え、エアスライドが一定位置を維持するようにテーブルを移動させる。したがって、走査軌跡の事前定義の必要がなくなり、測定物形状にかかわらず高精度測定が可能になった。

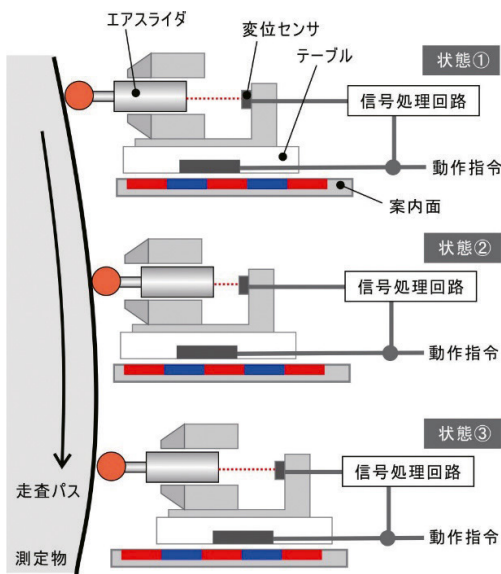
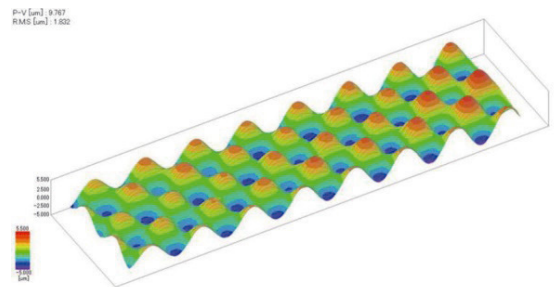
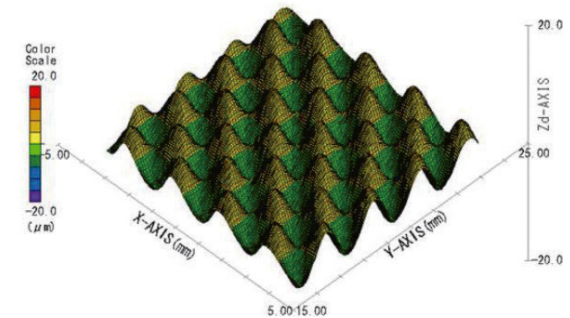


Fig. 5 サーボ走査測定プローブの動き



(a) 機上測定による形状測定結果

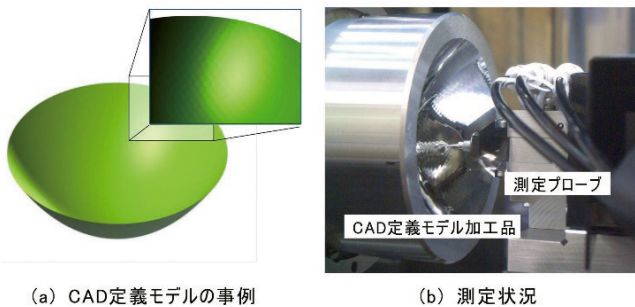


(b) 三次元測定器による測定結果

Fig. 7 サーボ走査による測定結果

### 4.2 | CAD定義モデルの測定事例

Fig. 6は自動車部品を模したCAD定義モデルと測定状況を示している。概観すると、回転対称非球面形状に近い表面の一部に微細の凹凸が分布している。しかし、形状の対称性や凹凸はPC画面上から視覚的に認識できるのみであり、詳細は不明瞭である。このような形状に対して、汎用的なCAMは、トレランスや計算精度の点から、高精度な工具軌跡の生成が困難だ



(a) CAD定義モデルの事例

(b) 測定状況

Fig. 6 CADモデルの測定状況

が、独自のアルゴリズムを用いて、加工に適した工具軌跡の生成を可能としている<sup>5)</sup>。このシステムは動的にリンクできる特徴を持っており、机上測定ソフトウェアからも必要な情報を得ることができる。そこで、このシステムを用いてCAD定義モデルの加工と同図に示す段取りで測定評価を行った。直径は約64mm、最大傾斜角は約53°となる形状に対し、単結晶ダイヤモンド工具(R=2mm)を用い、楕円振動切削法<sup>6)</sup>によって直接鏡面切削を行った。測定物形状の詳細が不明瞭にもかかわらず、サーボ走査により形状測定を実現している。Fig. 7(a)には評価結果を示しており、表面上の凹凸を認識することができる。また、Fig. 7(b)に示す高精度三次元測定器による検証から、机上測定による測定結果の妥当性が得られていることが分かった。

## 5 机上測定によるオペレータ支援

自動車用精密部品加工におけるミリング加工プロセスの多くは、CAD/CAMを用いて工具経路を算出する。工具摩耗や取り付け誤差、機械動作に起因する誤差などが加工形状精度に影響し、誤差が許容値を超える場合には工具経路の修正が求められる。しかし、微小なトレランスを設定する超精密加工では、誤差要因を特定することが難しく、かつ再計算に必要な膨大な計算時間を必要とする。したがって、前章で述べた加工形状に対して測定プローブを用いた測定評価、工具軌跡を修正するプロセスを適用することは生産性を大きく低下させる要因となる。

### 5.1 ミリング加工における机上測定と補正機能

自動化と高精度化を同時に図る手段として、Fig. 8に示すような机上測定および補正機能が提案されている。本機能では、光学ラインセンサ方式を用いた動的な工具切れ刃形状の計測を行っており、回転する切れ刃の輪郭情報を連続的に取得することにより、工具直径だけでなく、Fig. 8(a)で示すように工具切れ刃形状の詳細な誤差や圆弧切れ刃の近似半径値の取得も可能としている。さらに、加工前後の工具切れ刃形状測定結果に基づいて、Fig. 8(b)に示すように工具切れ刃摩耗状況を詳細に計測することができ、これらの情報を基に、三次元形状加工の寸法高精度化を図ることができる。

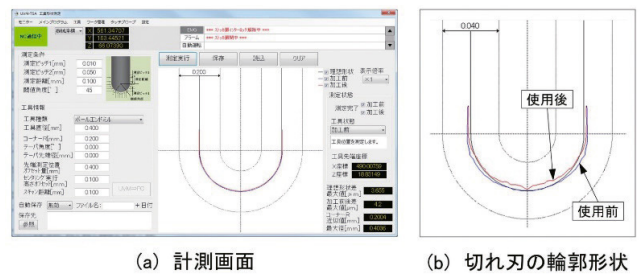


Fig. 8 工具切れ刃形状の計測事例

### 5.2 工具切れ刃形状を考慮したミリング加工事例

Fig. 9に示す熱処理がされたステンレス鋼材に対するCBN工具の事例では、カタログ記載の工具情報とワーク形状から算出された工具経路を用いて加工すると、工具切れ刃形状誤差や切削抵抗によるたわみによって数ミクロンの形状誤差が生じるが、動的な工具切れ刃形状と、想定される工具のたわみを考慮した工具軌跡を生成することにより、0.002mm以下の形状精度を得ることができた。このプロセスでは、加工点における誤差補正をベクトル表記として工具軌跡に組み込んでいるため、工具摩耗など徐々に変化する誤差要因に対しても、NC画面からコモン変数の変更により対応できるため、CAD/CAMによる再計算を必要としない。

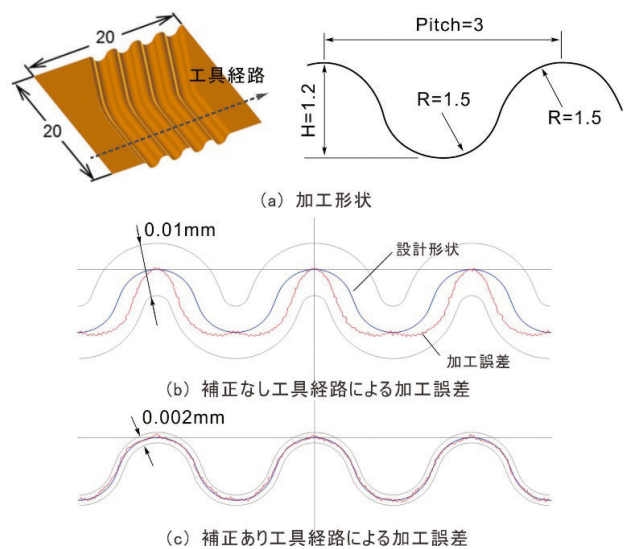


Fig. 9 工具切れ刃形状を考慮した加工事例

## 6 おわりに

超精密加工を対象とする市場は年々拡大しており、従来の視点や考え方の枠組みを超えたプロセス検討が求められている。特に自動車用精密部品は、超精密加工との関連が薄いと捉えられていたが、今後は大きく発展すると期待されている分野でもある。この中で、機上測定は、再現性のある加工品質を得る重要な要素であり、付加価値の高い商品を成立させる強いツールであると考えられる。本稿では、プローブを用いて加工後に実施する機上測定と、光学ラインセンサを用いて、加工前に工具切れ刃形状を確認する機上測定を紹介した。このように今後も新たな視点で加工およびプロセス開発が進むことを期待したい。

### 参考文献

- 1) 田中克敏：曲面・微細形状部品の超精密加工と計測，精密工学会学術講演会講演論文集，(2009) 239-240
- 2) 守安精：機上計測用小型触針式形状測定プローブの特性評価，1999年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，(1999) 330
- 3) 守安精，山形豊，森田晋也，大森整，林偉民，牧野内昭武：縦型機上計測プローブの開発(計測・制御・ロボット)，東北支部総会・講演会講演論文集，(2000) 111-112
- 4) 天野啓：超精密立形加工機による小物・精密金型の高付加価値加工，機械技術，59，1 (2011) 38-39
- 5) 土屋康二，福田将彦：CAD モデル形状への光学部品加工技術の適用，精密工学会学術講演会講演論文集，(2015) 213-214
- 6) 社本，森本，森脇：楕円振動切削加工法(第1報)，精密工学会誌，62，8 (1996) 1127-1131

# 厚肉球状黒鉛鑄鉄のX線CTによる3次元黒鉛組織観察

厚肉球状黒鉛鑄鉄には、薄肉組織には見られない様々な異常黒鉛形態が観察される。例えば、共晶凝固時間が長くなることで晶出するチャンキー黒鉛が代表的な異常黒鉛組織例であり、疲れ強さ、引張強さ、伸びを低下させることが知られている。これらの異常黒鉛組織は、光学顕微鏡による二次元断面観察では多く報告されているが、三次元組織の全体像として捉えた報告は少ない。本研究では、肉厚の異なる厚肉黒鉛鑄鉄を高分解能X線CTで撮像し、黒鉛の三次元構造を観察することにより、チャンキー黒鉛などの複雑な形状の黒鉛分布の全体像を明らかにすることを目的とする。黒鉛の三次元観察の結果、共晶凝固時間が長くなるに従って粗大な黒鉛が増し、その粗大な黒鉛の占める体積率が増すことがわかった。また、黒鉛粒径が60から67 $\mu\text{m}$ 付近よりさらに大きくなると、黒鉛形状が複雑化してくることを確認した。なお、本内容は、公益社団法人日本鑄造工学会が発行する「鑄造工学 第93巻 第10号 612ページ」に掲載された技術論文を転載したものである。



生産センター  
工機生技部  
生産技術課

藤本 亮輔

共著：

東芝 IT  
コントロールシステム(株)

富澤 雅美

東芝 IT  
コントロールシステム(株)

原 拓生

日本  
ビジュアルサイエンス(株)

滝 克彦

## 1 緒言

厚肉球状黒鉛鑄鉄の金属組織には、薄肉球状黒鉛鑄鉄では確認されない、様々な黒鉛組織が観察される。例えば厚肉化に伴い共晶凝固時間が長くなることで、大物鑄物において晶出するチャンキー黒鉛などが、代表的な黒鉛組織の例である。また、チャンキー黒鉛以外にも共晶凝固後半の最終凝固部付近には種々の低熔点元素やガス成分が濃縮され、それら元素の影響で様々な異常黒鉛形態が観察される。

一般的に、機械構造部品として用いられる球状黒鉛鑄鉄に要求される疲れ強さ、引張強さ、伸びなどの機械的性質は、異常黒鉛の生成により低下することが知られている。機械的性質には、異常黒鉛の形成領域の大きさが影響する。この異常黒鉛は複雑な形状で晶出するため、二次元断面観察ではその存在領域や全体像を把握することは難しい。特に機械構造部品においては、部品の破損原因が疲労破壊によるものであることが多い。また、疲労破壊では疲労き裂の伝播が、連続した最も弱い金属組織部の破壊によって進行するため、連続した三次元的な黒鉛の分布や形状を把握することが重要となる。これまで、鑄鉄の

黒鉛組織の二次元観察結果については多くの報告がされているが、三次元的な黒鉛の分布や形状を全体像として捉えた報告は少ない<sup>1)~3)</sup>。

一方で近年、顕微鏡の精度や画像解析技術の向上により、さまざまな素材に内在する組織を、三次元的に可視化できるようになっている<sup>1)</sup>。三次元組織観察は、二次元組織観察では予測が出来ない複雑な組織形状を把握するために用いられることが多い。これまでにシリアルセクションング 3D 顕微鏡<sup>4)</sup>や SEM、TEM 鏡<sup>5)</sup>、X線CT (X-ray Computed Tomography) と画像解析鏡<sup>1)</sup>を組合せた三次元組織観察の結果が報告されている。特に一般的に非破壊分析に広く採用されているX線CTによる観察は、黒鉛組織を広域かつ短時間で分析することが可能で、素材の良否や機械的性質の予測をするためには有効な手段である。

厚肉球状黒鉛鑄鉄においては、適切な鑄造方案、化学成分、後期接種等の溶湯処理により異常黒鉛の発生を抑制することができる。しかしながら、製造現場における様々な制限や因子が影響して、異常黒鉛が形成される場合がある。そこで本研究では、肉厚の異なる厚肉黒鉛鑄鉄を高分解能X線CTで撮像し、

黒鉛の三次元構造を観察することで、共晶凝固時間と粗大異常黒鉛発生の関係を明らかにすることを目的とする。また、チャンキー黒鉛などの異常黒鉛の有無を判定することにより、素材の良否や機械的性質の予測の可否を検討することも目標とする。

## 2 実験方法

### 2.1 試供材

供試材の化学成分を、Table 1 に示す。10t 低周波溶解炉 (50Hz) にて銑鉄、スクラップ鋼、加炭材、Fe-Si、Fe-Mn を溶解し、この元湯に対して取鍋にて球状化剤 (Fe-Si-Mg-RE (Ce+La)) を用いてサンドイッチ法による球状化処理を行った。最終目標組成は C:3.3mass% (以降 % と称する)、Si:2.7%、Mn:0.3%、P:0.03%、S:0.01%、Mg:0.04%、RE:0.02% とした。この溶湯を 3 種類の大きさの異なる鑄型に注湯した。それぞれの厚肉鑄物テストピースにおける名称と寸法は、TP-300:300×300×500mm、TP-500:500×500×500mm、TP-1500:1500×1500×400mm とした。黒鉛形状は、共晶凝固時間によって変化するため、それぞれの試験片の共晶凝固時間を測定した。TP-300 は 12ks、TP-500 は 20ks、TP-1500 は 47ks であった。それぞれの厚肉鑄物の中央部より素材を切り出し、そこから X 線 CT 観察用として、2×2×30mm の試験片を製作した。

Table 1 供試材の化学成分 (mass%)

C	Si	Mn	P	S	RE	Mg	Fe
3.5	2.7	0.3	0.03	0.01	0.02	0.04	Bal.

### 2.2 X線CTによる試験片観察

高分解能 X 線 CT としては、TOSCANER-32300μFD を使用した。本装置は、最高管電圧 230kV のマイクロフォーカス X 線発生装置であり、有効視野 200×200mm の FPD (フラットパネル X 線ディテクタ) を搭載している。球状黒鉛鑄鉄の試験片に対して最も高い分解能とするために、管電圧を 200kV、管電流を 50μA、1view あたりのサンプリング時間を 166ms とした。試験片の長手方向に 3000view/scan のコーンビームスキャンを行い、600 スライスの断層像を得た。Fig. 1 に、X 線 CT による試験片観察の概略図を示す。一連の X 線 CT 画像を読み込み、2.9×2.9×3.0μm/画 (voxel)、視野サイズ 1.74×1.74×1.80mm の領域内の黒鉛組織を三次元的に撮像した。三次元画像解析ソフトウェア (ExFact VR 2.0 + ボイド解

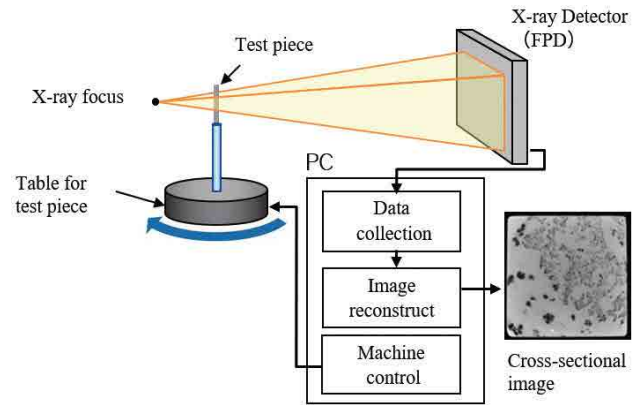


Fig. 1 X線CTによる試験片観察の概略図

析オプション) を用いて、黒鉛組織を分類及び色分けし、画像解析と三次元での可視化を行った。画像の画素数は、視野サイズの各辺あたり 600 画素とした。三次元黒鉛組織を、相当球の有効直径 (以降黒鉛粒径と称する) で 15~50μm 未満、50~100μm 未満、100~200μm 未満、200~300μm 未満、300~1000μm の 5 段階に分類した。三次元黒鉛組織から 1 視野における黒鉛の数 (n/view)、黒鉛体積および体積率を算出し、分類した黒鉛粒径ごとの黒鉛組織の分布状況について調査を行った。Fig. 2 に、黒鉛サイズが 300~1000μm の黒鉛の画像処理による形状認識例を示す。Fig. 2 において、二次元断面では不連続に見えている部分も、三次元観察において連続している場合は、一つの黒鉛組織として認識することができる。また、本装置では分解能の限界から、末端の微細黒鉛の構造まで完璧に抽出できない。このため本研究においては、同条件の画像処理で黒鉛の形状を相对比较して、黒鉛の種類を評価することとした。

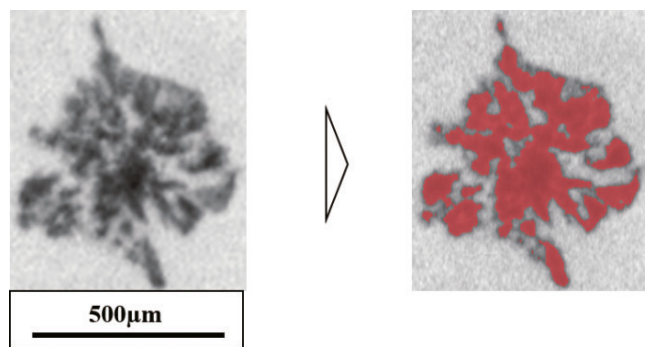


Fig. 2 画像処理による形状認識

### 3 結果及び考察

#### 3.1 X線CTによる三次元観察

Fig. 3に、中サイズのTP-500のX線CT画像から読み込んだX、Y、Zの二次元断面像を示す。Y断面の点線で囲んだ球状黒鉛組織においては、やや形状は崩れているが異常な黒鉛組織とは判定できない。しかしながら、Fig. 3の点線で囲んだ領域をX断面、Z断面で観察すると、チャンキー黒鉛であることがわかる。球状黒鉛鑄鉄の二次元での組織観察においては、機械的性質を保証するための黒鉛球状化率や黒鉛粒数及びパーライト率などを調査することが、その目的となっている。しかし、本研究のような厚肉球状黒鉛鑄鉄においては、Fig. 3のY断面の点線で囲んだ部分のように、二次元観察のみでは黒鉛組織の全体像の把握は難しく、間違った評価をする可能性がある。

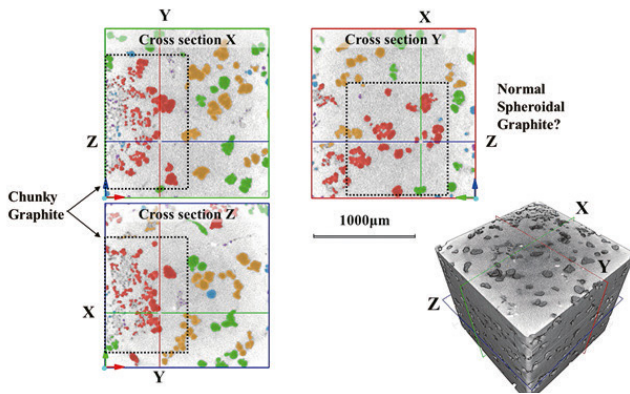


Fig. 3 異常黒鉛組織の三次元観察

Table 2に、TP-300、TP-500、TP-1500のテストピースの三次元観察によって求めたそれぞれの試験片に内在する、黒鉛粒径ごとの黒鉛粒数、黒鉛体積、黒鉛体積率を示す。肉厚が増加して共晶凝固時間が12ksから20ksに増加すると、黒鉛粒数が1041個/viewから717個/viewに減少し、47ksになるとさらに267個/viewまで減少する。これは共晶凝固時間の増加に伴って、体積が大きい黒鉛組織が増加していることに起因している。Table 2において黒鉛粒径が15～50µmの黒鉛に注目すると、TPサイズが大きくなるにつれて粒数は14.7から60.3まで増加しているが、この範囲の黒鉛粒数に占める黒鉛体積の割合は1.2%から0.4%に減少している。これまでの著者らの研究で、小型の別鑄込み試験片φ25×250mm(JIS G 5502 ノックオフ形)や100×100×500mmの試験片においては共晶凝固時間が1ks未満で、黒鉛粒径も50µm以下が主体であることが確認できている<sup>4)</sup>。このことから、共晶凝固時間が長くなるにつれて、黒鉛粒径は大きくなることが推測できる。

Table 2より、共晶凝固時間が12ksでは黒鉛粒径が50～200µmの黒鉛が主体となっており、20ksになると100µm以上が主となり、47ksになると300～1000µmが主体になることがわかる。共晶凝固時間の増加で黒鉛粒径は粗大化し、チャンキー黒鉛が発生することが報告されている<sup>7～9)</sup>。本報告の黒鉛組織についても同様に、黒鉛組織の粗大化とチャンキー黒鉛の関係が成立しており、黒鉛粒径が200～300µmの一部と300～1000µmに分類した黒鉛組織は、チャンキー黒鉛である。

Table 2 黒鉛組織の粒数および体積

Specimen name		TP-300	TP-500	TP-1500
Eutectic solidification Time (ks)		12	20	47
Nodule count (n/view)		1041	717	267
Nodule count ratio of each size (%) (n/view)	15-50 µm	14.7(153/1041)	50.3(361/717)	60.3(161/267)
	50-100	62.9(654/1041)	24.4(175/717)	20.6(55/267)
	100-200	22.2(231/1041)	21.2(152/717)	10.2(27/267)
	200-300	0.2(2/1041)	3.8(27/717)	5.2(14/267)
	300-1000	0.0(0/1041)	0.4(3/717)	3.8(10/267)
Graphite volume (mm <sup>3</sup> )		0.43	0.78	0.68
Graphite volume ratio (%)		7.9	14.4	12.6
Graphite volume ratio of each size (%)	15-50 µm	1.2(0.005/0.430)	0.9(0.007/0.780)	0.4(0.003/0.680)
	50-100	40.3(0.173/0.430)	5.2(0.406/0.780)	1.5(0.102/0.680)
	100-200	56.2(0.242/0.430)	29.3(0.229/0.780)	7.4(0.050/0.680)
	200-300	2.3(0.098/0.430)	26.1(0.203/0.780)	13.6(0.092/0.680)
	300-1000	0	38.5(0.300/0.780)	77.1(0.524/0.680)



Fig. 4 に、Table 2 で示したデータの詳細である共晶凝固時間ごとの黒鉛体積とその黒鉛粒数の関係を、対応する黒鉛粒径と合わせて示す。共晶凝固時間 12ks では、黒鉛粒径が 15 $\mu$ m ~ 200 $\mu$ m の体積比率は 97.7% を占めている。黒鉛粒径 200 $\mu$ m 以上の体積比率はわずか 2.3% で、黒鉛粒径 300 ~ 1000 $\mu$ m の黒鉛はない。

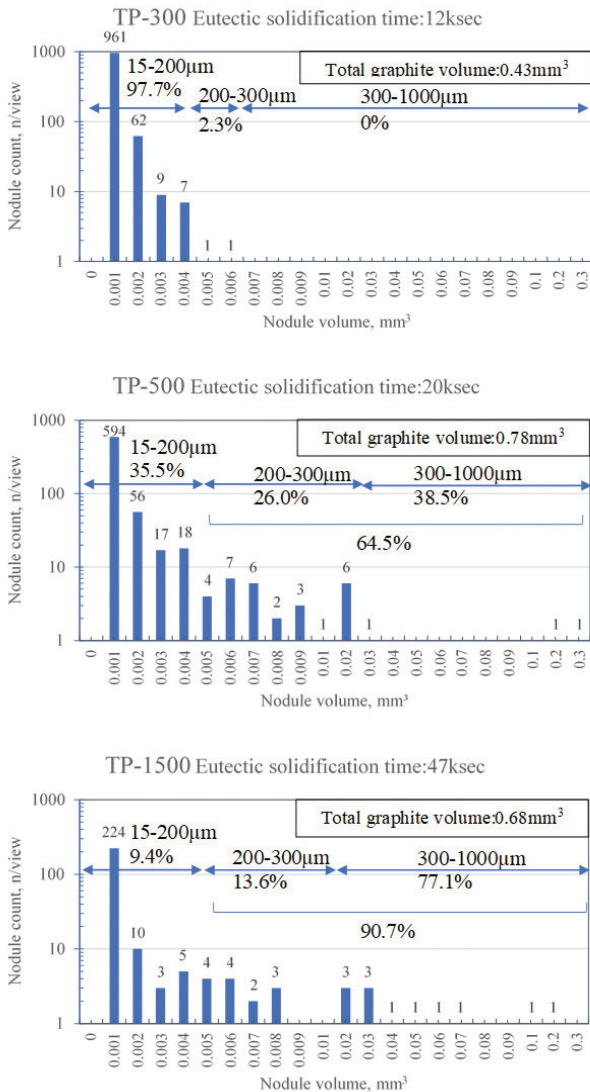


Fig. 4 共晶凝固時間と黒鉛体積分布

同様に Table 2 と Fig. 4 より、共晶凝固時間 20ks では 300 ~ 1000 $\mu$ m の粗大な黒鉛は 3 ケしかない。しかしながら、黒鉛粒径が 300 ~ 1000 $\mu$ m の体積が黒鉛全体積に占める割合は 38.5% になる。また 200 $\mu$ m 以上の黒鉛が全体積に占める割合は 64.5% にもなる。

共晶凝固時間 47ks では、300 ~ 1000 $\mu$ m の体積が黒鉛全体積に占める割合は 77.1% にもなり、200 $\mu$ m 以上は 90.7% になる。共晶凝固時間の増加に伴って、黒鉛粒径 200 $\mu$ m 以上の体積比率が 2.3%、64.5%、90.7% と増加している。このことよ

り共晶凝固時間が長くなるに従って、黒鉛の個数は少なくなり、粗大な黒鉛の占める体積が増すことがわかる。すなわち、凝固時間が長くなるほど、1 ケの粗大な黒鉛の占める体積が増すことになる。

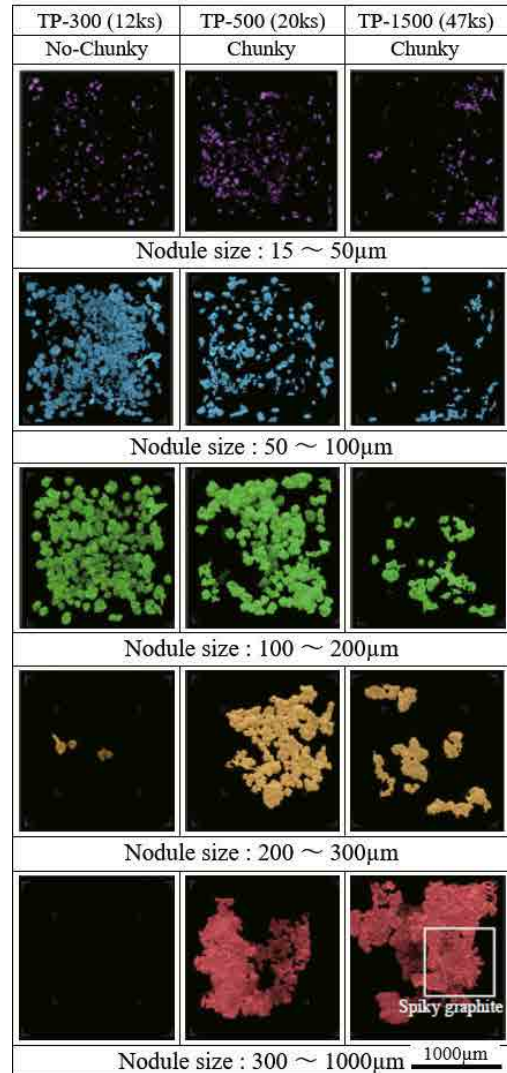


Fig. 5 黒鉛粒径ごとの三次元黒鉛組織比較

Fig. 5 に、黒鉛サイズごとに分類した三次元の黒鉛組織の画像を示す。黒鉛サイズが 15 ~ 50 $\mu$ m の小さな黒鉛は共晶凝固時間 12ks では均一に分布している。20ks や 47ks では粒径 300 から 1000 $\mu$ m の粗大黒鉛の近傍に小さな黒鉛が晶出するようになることがわかる。また、黒鉛形状は共晶凝固時間 12ks では球形状が主体だが、共晶凝固時間が 20ks や 47ks になると黒鉛は球形状ではなくなってくる。

黒鉛サイズが 50 ~ 100 $\mu$ m および 100 ~ 200 $\mu$ m では、共晶凝固時間 12ks で球形の黒鉛が主体であることが確認できる。しかしながら、共晶凝固時間が 20ks や 47ks になると球状ではない複雑形状の黒鉛が多くなることがわかる。

黒鉛粒径が 200 ~ 300 $\mu\text{m}$  および 300 ~ 1000 $\mu\text{m}$  の粗大な三次元黒鉛組織は、共晶凝固時間 12ks ではほとんど存在せず、共晶凝固時間が 20ks や 47ks になると粗大で球状でない複雑形状の黒鉛が観察されるようになる。

共晶凝固時間 47ks に見られるスパイキー黒鉛について、三次元観察した結果を Fig. 6 に示す。二次元観察画像からは、棒状の黒鉛が放射状に広がった構造と推測される。しかしながら、三次元観察による正面および左右裏側からの視野で観察した結果では、スパイキー黒鉛は片状と棒状の黒鉛形状で構成されていることがわかる。このように、二次元観察では一断面から形状を推測することしかできないが、三次元観察を行うことで正確な黒鉛の構造を把握することができる。

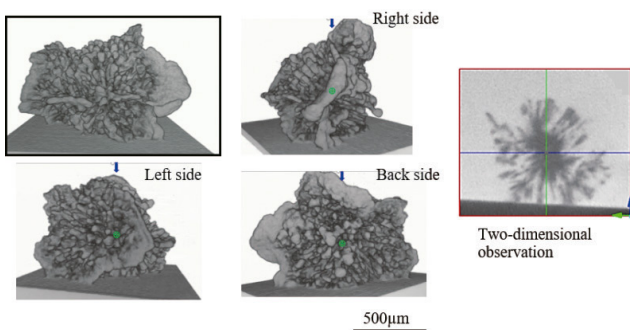
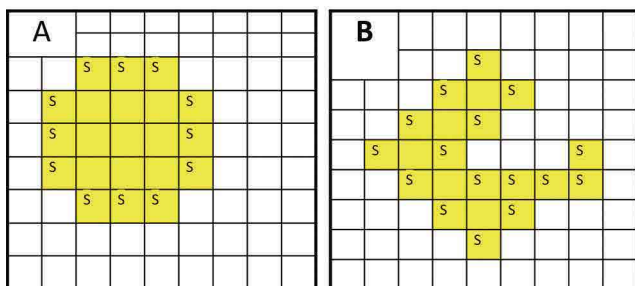


Fig. 6 スパイキー黒鉛の三次元黒鉛組織比較



	A	B
Surface_voxels	12	16
Volume_voxels	21 (12+9)	21 (16+5)
Surface/Volume ratio	0.57	0.76

Fig. 7 黒鉛形状を表す体積と表面積の関係

上記のような可視化による定性的な評価の他に、画像解析において黒鉛形状の評価に有効な手段として、体積と表面積との関係を用いることができる。Fig. 7 に立方体の三次元画素 (Voxel) で構成される形状例 A、B を示す。A に対して B は、複雑形状であることを表現している。なお、図中の A、B において、体積 (Volume\_voxels) は 21 と同じであり、表面積

(Surface\_voxels) はそれぞれ 12 と 16 で異なる。図中の「S」は背景と接している Voxel で、「S」の数は表面積に相当するものである。「S」および「S」で囲まれた Voxel を合わせた数が、Fig. 7 の表より体積を示している。A、B の表面積 (Surface\_voxels) を体積 (Volume\_voxels) で除した値 (Surface/Volume Ratio) は、複雑形状の B の方が A よりも大きくなる傾向を示す。画像解析において形状の複雑さを示す場合には、Voxel を参照することで強固な表面積相当の結果が得られることが多い。そこで Voxel を用いた形状評価手法で、共晶凝固時間ごとの黒鉛形状を評価する。

Fig. 8 に共晶凝固時間ごとの黒鉛の体積と表面積の関係を示す。図中のプロットは Voxel による黒鉛組織の表面積と体積の分布で、図中の実線は球形状の表面積と体積の関係 ( $S = 4.835V^{2/3}$ ) を示している。この実線は、理想的な球形状の曲線 (理想球形状曲線) を意味する。共晶凝固時間 12ks の黒鉛組織は、理想球形状曲線と概ね一致する球状の黒鉛が主体となっている。共晶凝固時間 20ks になると、黒鉛組織の表面積が理想球形状曲線よりも上側に分布するようになっており、体積に対して表面積が大きい、複雑形状の黒鉛組織が形成されていることを示している。共晶凝固時間 47ks になると、20ks の時よりもさらに、理想球形状曲線の上側に分布するようになっている。理想球形状休憩場曲線からの乖離の主な原因はチャンキー黒鉛やスパイキー黒鉛を含む複雑形状の黒鉛の生成によるものである。体積と表面積の関係が理想球形状曲線から上側に乖離し始める黒鉛粒径は、共晶凝固時間 12ks では 61 $\mu\text{m}$ 、20ks では 60 $\mu\text{m}$ 、47ks では 67 $\mu\text{m}$  である。このことは、今回の肉厚鋳物では 60 ~ 67 $\mu\text{m}$  以上の黒鉛粒径になると黒鉛が球形でなくなることを示している。これまでに著者らは、共晶凝固時間が 1 から 20ks までの試験片を用いた二次元組織観察で、黒鉛粒径 50 $\mu\text{m}$  以上になると球状化率が 65% ~ 75% になることを確認している<sup>6)</sup>。本報告の結果は、この結果とも概ね一致している。また、黒鉛の表面積要素数と体積要素数の関係より黒鉛の球状化状態を定量化して、チャンキー黒鉛やスパイキー黒鉛などの異常黒鉛の有無を判定して、機械的性質の評価することも可能になると考えられる。

## 4 結言

厚肉球状黒鉛鉄の高分解能 X 線 CT による三次元黒鉛組織観察を行い、以下の結論を得た。

- 1) X 線 CT による厚肉球状黒鉛鉄の三次元黒鉛組織観察によって、二次元観察では把握が難しい複雑な黒鉛の形状と分布を明らかにすることが可能であることがわかった。
- 2) 共晶凝固時間が長くなるに従って粗大な黒鉛が増加し、その粗大な黒鉛の占める体積率が増すことがわかった。
- 3) 球状黒鉛の表面積 (Surface\_voxels) と体積 (Volume\_voxels) の関係を用いることで、黒鉛粒径が 60 から 67 $\mu\text{m}$  以上になると、複雑な黒鉛形状が出現するようになった。

### 参考文献

- 1) M.Tomizawa and H.Ookado: J . JFS 85 (2013) 900
- 2) N.Shiraki, K.Tanaka, A.Sugawara, R.Fujimoto, M.Tomizawa and T.Hara: J . JFS 91 (2019) 264
- 3) K.Sumizu, H.Toda, J-Y.Buffière, J.Lachambre, K.Uesugi and M.Kobayashi: J . JFS 86 (2014) 19
- 4) R.Fujimoto, M.Nakayama, I.Uemura : Report of the 168th JFS Meeting 168 (2016) 125
- 5) T.Hara: KENBIKYO 49 (2014) 53
- 6) R.Fujimoto: Doctor al theses of Iwate university (2014)
- 7) Y.Iwabuchi, H.Narita and Y.Ichinomiya: IMONO 59 (1987) 153
- 8) S.Kiguchi, M.Shintani, Y.Sumimoto and K.Nakamura : J . JFS 72 (2000) 311
- 9) O.Tsumura: J . JFS:76 (2004) 125

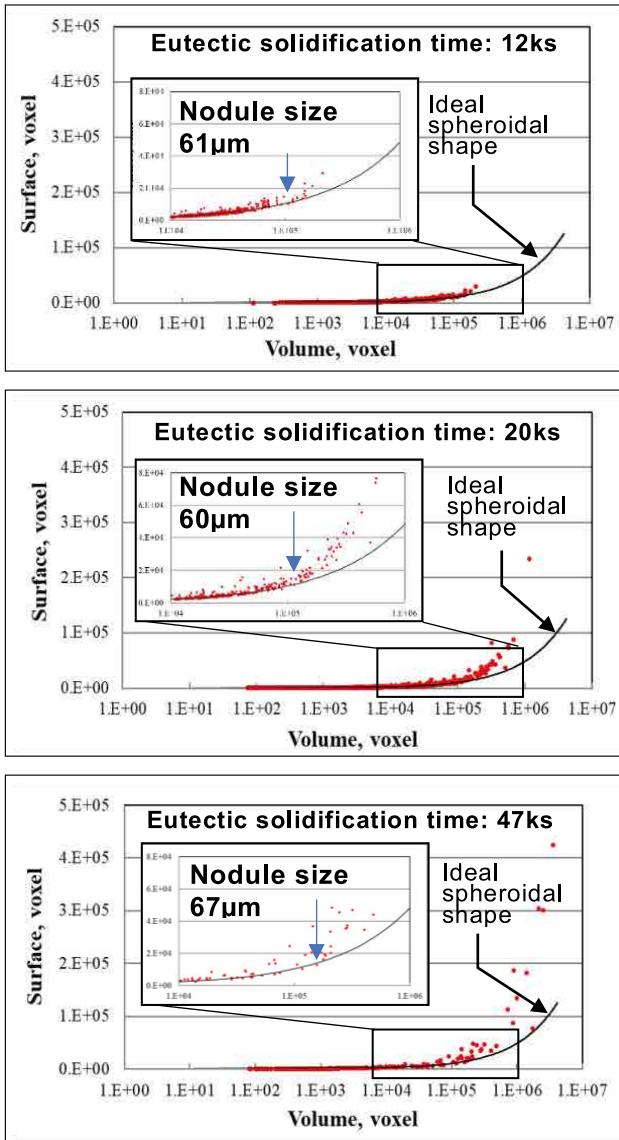


Fig. 8 各共晶凝固時間における体積と表面積の関係

# 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

既に次世代高速通信がスタートしているが、更なる高速化にむけてデータ送信技術の開発が活発である。一方、高速通信による膨大なデータの高速処理が必要となり、データセンターなどで採用される半導体パッケージ基板の高集積化の要求もある。ここでは、高集積化の実現のため必要とされる微細回路の形成に貢献できる高速成膜装置による導体層形成プロセスの開発状況について報告する。



R&D センター  
研究開発部  
第一開発課

深田 和宏



R&D センター  
研究開発部  
第一開発課

上山 浩幸

## 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。有機パッケージ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)</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。

本報告では差別化技術として銅ダイレクト成膜による密着評価、信頼性評価、セミアディティブ法による回路形成評価について紹介する。

## 2 真空成膜装置

成膜装置で採用しているプラズマ処理とスパッタリングについて説明する<sup>1)</sup>。本装置は全てのプロセスを中真空領域(100Pa $\sim$ 0.1Pa)でおこなえることが特徴である。プラズマは物質の4番目の状態といわれているが、Fig. 1 に示すように電極間の気体に高周波電圧を印加することにより電子を加速し、気体分子への衝突させることにより生成される。プラズマ内では反応性の高いラジカルが生成され、基材の表面改質や高分子材料の重合成膜が可能となる。

成膜装置で採用しているマグネトロンスパッタリングは Fig. 2 に示すように真空チャンバー内に成膜する金属(銅など)のターゲットを設置し、プラズマ中で希ガスを陽イオン化し、

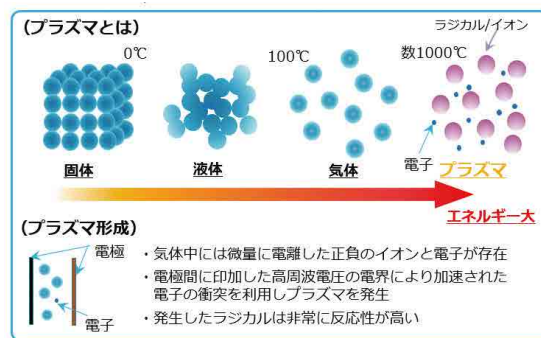


Fig. 1 プラズマ処理

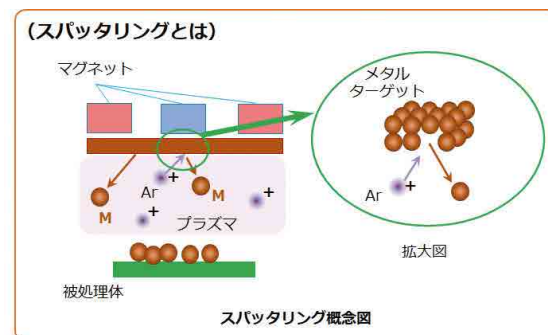


Fig. 2 スパッタリング

ターゲットに衝突させることでターゲット材料をはじき出しターゲットに対向する基板表面に成膜する方法である。

## 3 プリント配線基板への応用

### 3.1 開発背景

CPU、GPU など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導体層形成には無電解めっきが用いら

れている。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の複雑構造による物理的アンカーにより形成されることが一般的である。しかし、微細化には絶縁材表面の平滑性が必要となり無電解めっきでは基板の信頼性に大きく影響する十分な密着性が得られなくなっている。近年、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リングによる導体層形成方法の開発が進められている<sup>2)</sup>。スパッタリングによる導体層形成は無電解めっきと比較して密着原理が異なり、プラズマによる官能基の生成による化学結合が主体となるため平滑面へ高密着を実現できる。また、無電解めっきで必要とする触媒除去工程を省略できるため、後工程での歩留まり改善などのメリットもある。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二層金属構造が検討されているが、回路形成時の導体層除去のエッチング工程では密着層の除去工程が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。そこで当社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、プラズマ改質により樹脂基材と銅を化学結合させることで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。以下に、プリント基板材料への密着評価とAjinomoto Build-up Film®(ABF)積層基板上にSemi-Additive Process (SAP工法)でL/S=15/15 μmの櫛歯電極をもつ回路形成を行った結果を説明する。

### 3.2 | 装置概要

ダイレクト銅の導体層を形成する装置として高速真空表面処理成膜機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。



Fig. 3 プラズマ改質スパッタ装置

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)

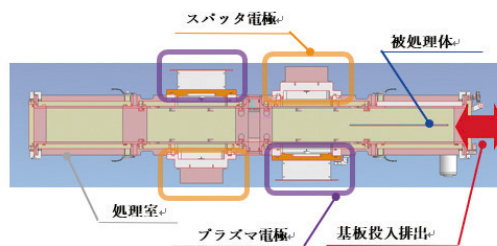


Fig. 4 装置概要

Fig. 4に示すように、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、一回の真空排気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。

Fig. 5にLPP-450での基材処理手順を記す。Fig. 5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
- A面にスパッタ処理でCuを成膜
- その後電源を切り替え、B面にプラズマ処理
- 同様にB面のスパッタ処理で、Cuを成膜
- 大気開放し、基板を取り出し

通常、真空成膜装置は0.1Pa以下の高真空域まで排気を行うが、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100Pa~0.1Paの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。

### 3.3 | プリント配線基板材料への密着評価方法

LPP-450を用いて、ダイレクト銅導体層の基材への密着評価を行った。50mm × 50mmの絶縁材に導体層を成膜し、電解めっきで厚さ30 μmの銅を増膜しアニールを行う。その後、ピール強度試験機にてめっき層と樹脂との剥離強度を測定した。Fig. 6に下記プロセスで製作したサンプル評価例と測定概略図を示す。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10mmとした。

## 【処理ステップ】

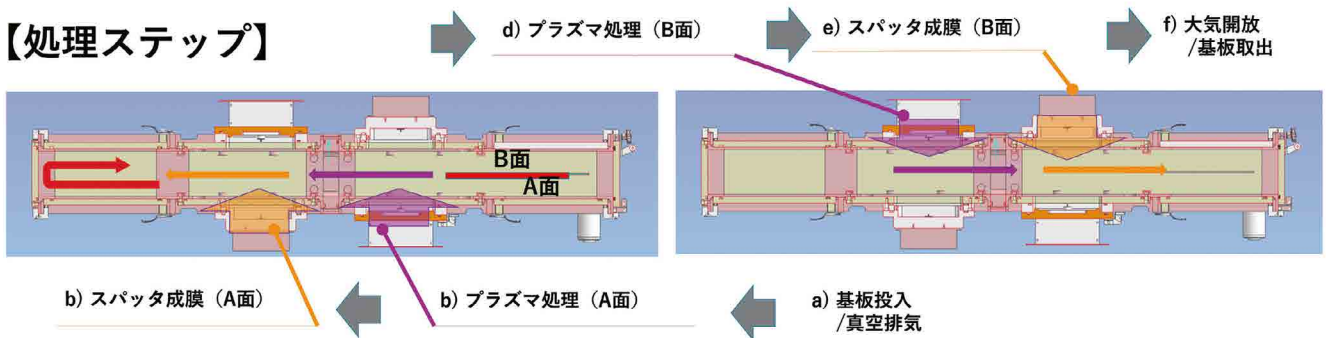


Fig. 5 処理ステップ概要



Fig. 6 ピール試験評価例と測定概略図

### 3.4 | プリント配線基板材料への密着評価結果

プリント基板材料に対し 3.3 に示す測定条件にてピール強度を測定した結果を Table 2 に示す。

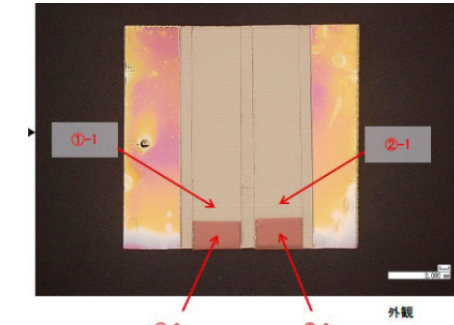
Table 2 プリント配線基板材料へのピール強度結果

材 料	ピール強度 (N/cm)	備 考
ビルドアップ基板材料 / ABF	4 ~	ABF 参考データ (GXT31)
塗布型ポリイミド	6 ~	MPI 材への適用検討
COP	6 ~	ゼオノア ZF16-100
ガラス基板	10 ~	イーグル XG
ポリイミド基材	8 ~	カプトン V

パターンニングはレジストフィルムのラミネート、露光、現像、導体層形成、電解めっき、レジスト剥離等の工程からなり、4N/cm 以上のピール強度が必要である<sup>3)</sup>。Table 2 から、ダイレクト銅導体層形成プロセスでは、次世代で採用が検討されているプリント基板材料について 4N/cm 以上のピール強度が得られており、配線パターンニング工程が可能ということがわかる。

Fig. 7 にピール強度測定後の金属剥離面分析の実体図、Fig. 8 にピール強度測定後の金属剥離面分析結果を示す。

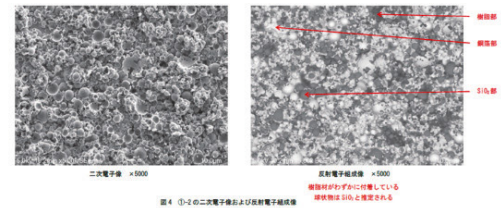
Fig. 8 に示す電子顕微鏡写真像から、金属側剥離面に樹脂の付着が観察でき、剥離面が樹脂基材内の凝集破壊であること



※基板サイズ 50mm × 50mm × 0.8mm ピール試験幅: 1cm

Fig. 7 ピール強度測定後金属剥離面分析の実体写真

#### ◆SEM観察結果 (①-2銅剥離面観察)



SEM-EDXによる定性分析結果 (×5000 視野全体)

Fig. 8 めっきシード層金属剥離後分析結果

が確認できた。また、Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX) による元素分析からも剥離面に C が多く検出されており、樹脂の凝集破壊が示唆されプラズマ処理を用いた表面改質で樹脂 - 金属界面で化学結合が生じ密着が得られていることが確認できた。

今後は表面改質の効果を確認するため、X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) による化学結合分析を行い金属 - 樹脂の密着機構を解明し、難密着材料への密着力評価を行っていく予定である。

### 3.5 | プリント配線基板への回路形成

次に ABF ビルドアップ基板上にダイレクト銅の導体層を用いた SAP (セミアディティブ法) による回路形成方法 Fig. 9 にプロセスフローを示す。FR-4 をコア材とした ABF 基板 (GXT31) に過マンガン酸によるデスマ処理を行い、オープン加熱で脱水処理を実施する。その後 LPP-450 にて ABF のプラズマ表面改質、銅スパッタリングにより導体層 (300nm) を形成した。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 Direct image 法にて露光、現像を実施、電解めっきで  $15 \mu\text{m}$  増膜し、その後アニール処理を行い、最後にシード層エッチングにて回路形成した。配線評価としては光学顕微鏡による表面観察、レーザ顕微鏡による断面形状観察を行い、その後高温恒湿下での信頼性試験 (Highly Accelerated Stress Test, HAST) 試験で電氣的信頼性を評価した。

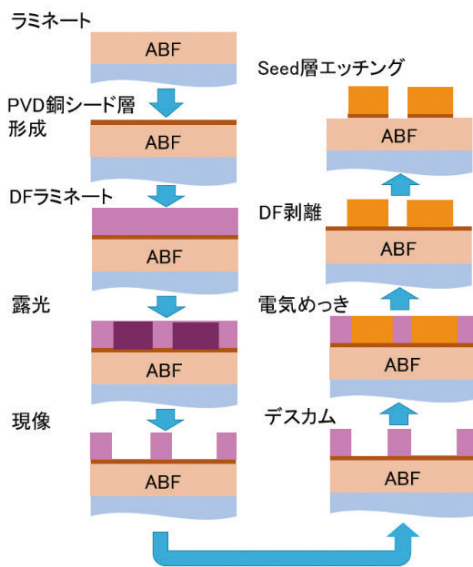


Fig. 9 プリント配線基板プロセスフロー

### 3.6 | 結果(試作結果および性能評価)

回路形成後の表面写真を Fig. 10 に、断面レーザ顕微鏡写真を Fig. 11 に示す。Fig. 10、Fig. 11 よりエッチング残渣はなく楕歯パターンが形成されていることが分かる。また Fig. 12 に  $85^\circ\text{C}$   $85\%\text{RH}$  での信頼性試験 (HAST 試験) 結果を示す。無電解めっきで導体層を形成した同一パターンのサンプルと比較した結果、当社の成膜装置で形成した導体層の絶縁抵抗は無電解めっきよりも高い絶縁抵抗を示した。以上の結果からダイレクト銅の導体層がプリント配線基板製造工法に対し適合性を持つことが示された。

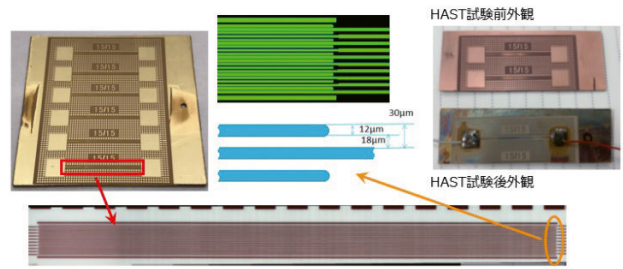


Fig. 10 シード層エッチング後外観

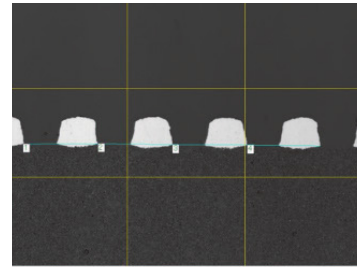


Fig. 11 配線断面形状

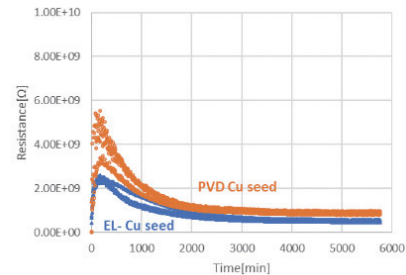


Fig. 12 HAST試験後の漏れ電流

### 3.7 | 量産基板への微細回路作成

最後に、量産サイズに近い  $290\text{mm} \times 190\text{mm}$  の ABF ビルドアップ基板上へ  $\text{LS}=5/5 \mu\text{m}$  の微細回路を形成した結果を示す。プロセスフローは Fig. 9 と同様であり、配線の電解めっきは  $5 \mu\text{m}$  増膜を行っている。

Fig. 13 に微細回路形成後の ABF 基板の实体写真を、Fig. 14 に  $\text{LS}=5/5 \mu\text{m}$  部分 SEM 画像を示す。

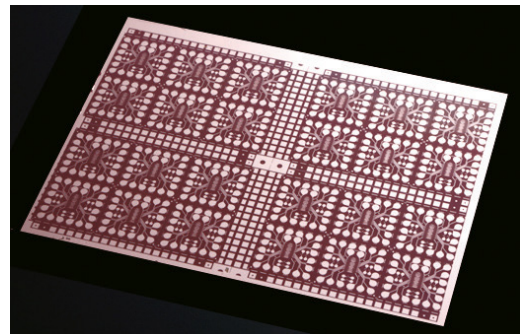


Fig. 13 ABF基板上微細回路実体写真



Fig. 14 LS=5/5 μm部分の断面SEM像

Fig. 13 に示す回路は  $3 \times 2$  の周期パターンを 4 ショットで露光している。Fig. 14 に示す LS=5/5 μm 部分の断面 SEM 写真ではエッチング残渣もなく良好な断面形状が観察できる。以上のことから当社装置で形成したダイレクト Cu 導体層は小型基板のみならず通常基板サイズにも有効であり、10 μm 以下の微細配線にも適用可能であるということが確認できた。

## 4 おわりに

高速プラズマ表面処理装置を用いて形成した銅ダイレクトでの導体層をプリント配線基板形成プロセスへ適用し、信頼性試験を行った。その結果からパッケージ基板で採用されている SAP 工法による回路形成への適合性を確認できた。将来的にはビルドアップ基板だけではなく、低損失フィルム材料、ガラス基板への展開を行っていく。

### 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) OH, Yoong, et al. Adhesion of sputter-deposited Cu/Ti film on plasma-treated polymer substrate. Thin Solid Films, 600: 90-97, 2016
- 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.



# 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

R&D センターでは NEDO( 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 ) から委託を受け、静岡大・東京都立大・東洋大と共同で、工場においてさまざまな生産活動を支援する、自律移動型の作業ロボットを開発している。本報告ではわれわれが準拠するシステムとロボットの自律性の要件定義を示すとともに、それにもとづくロボットの自律化の理念— Viability = 生存可能性の最大化—と、その理念を実装しロボットを自律化する制御の概略、さらにロボットの自律性を検証するテストの初期段階の結果を報告する。



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

## 1 はじめに

開発中の自律移動型の生産支援作業用ロボット CONOID® を、Fig. 1 に示す。このロボットは、作業対象物を操作する左右の腕 (= 多関節ロボット、マニピュレータ) と、全方位走行部を持つ。

こうした自律移動型ロボットは、AMR(Autonomous Mobile Robot) と呼ばれている。労働人口減少を背景に工作機械への工作物のセットやツーリングの供給、表面実装機のリール自動倉庫へのリール供給など、AMR が対象とする移動搬送+手作業の自動化ニーズが高まり、AGV に多関節ロボットを搭載した移動作業ロボットも販売されている。しかし、手作業の水準は、まだ搬送物の積み下ろしが中心である。ロボットには停止位置を教示するため走行停止後に腕を動かさざるを得ず、走行しながらの手作業は難しいためである。また、手 (= エンドエフェクタ) が届かず車体をずらす必要が出た場合、手間とされる多関節ロボットの教示に加え、車体走行の停止位置調整も発生する。これではセル生産の屋台での部品取り出しやコンビニでの商品補充のように、数多くの場所に手を導く必要がある作業において、教示者が望ましい車体停止位置をあちこち探る面倒が生じる。また、停止してから腕を動かすのでは作業時間も増える。

以上の現状に対し、今後は次のような AMR が求められる。

- ① 車体走行は手の動きに合わせて自律追従し、教示が不要。車体と周辺との衝突も自律回避される。
- ② 手と腕は物体の位置を変えるだけでなく、相手側と接触があり力のやりとりが発生する、高度な物体操作もできる。



Fig. 1 双腕生産支援ロボットCONOID®-III

こうした課題に対し、AI を代表する深層学習による行動学習も試みられており、作業水準も上がってきている。その一方、動作の教示と学習に時間を要すうえ、動作は教示の再現が基本で最適化には至っていない。また、認識は視覚が中心で、対象物操作に必要なかつ有効な力覚が軽視されている。産業用という観点では、人協働や安全の枠組みとの整合性も不明である。さらに、深層学習が獲得した作業知識は機種限定となる。

一方、われわれは AI のみに頼らず、AI 同様に進展がある最新のモーション制御技術を機械学習技術と融合させる手法をとる。また、現場導入の迅速化を最優先し、現場導入者の粗い教示も許容する。これらによりロボットの自律性を高め、導入が簡単でありながら、より高度な作業能力を持つ AMR を実用化する。

## 2 ロボットの自律化

### 2.1 | 自律化の意義

Autonomous(自律)という英単語は古代ギリシャ市民が立法により自らを律した史実に由来し、ギリシャ語の autos (self) と、nomos (rule or law) という、二つの語源を持つ<sup>1)</sup>。この言葉が示唆するように、自律化されたロボットには、定められた目的の達成に向け行動することに加え、人の指示がおよばない範囲を推測して補完したり、作業環境の不確定性や変化に対応して行動の戦略自体を自ら生成および修正したりする能力が期待される。ロボットや機械装置の制御系に自律性を付与するにあたっては、これらの要件をどのように定式化して、制御の枠組みに落とし込むかが課題となる。

### 2.2 | 自律性の定式化

複雑系システムの研究者である Bourguine は、数学者 Aubin が確立した Viability theory<sup>2)</sup>における生存可能領域に関する概念を拡張し、システムの自律性の要件を定式化した<sup>3)</sup>。われわれはこの要件定義にしたがう。ここで生存可能領域とは、システムが与えられた機能を安定的に実行することができる、制御系の状態空間内の領域である。Viability は端的には生存可能性という意味だが、ロボットや機械装置の場合、作業や活動の継続性、機能や運転の継続性という意味に捉える。

Bourguine は、自律システムの行動戦略に相当するダイナミクスを  $f$ 、状態を  $s$ 、生存可能領域を  $Viab$  としたとき、自律システムが機能を発現し続けその存在あるいは存在意義を保つには、常に次式が満たされることが必要であると示した。

$$\forall s \in Viab \quad f(s) \in Viab \quad (1)$$

すなわち、 $f$  を実行した結果遷移した次の状態も生存可能領域  $Viab$  に含まれ、再び  $f$  により安全に操作し得る状態であることが求められる。 $f$  は一種の仮説生成能力であるが、自律システムが扱う状態空間は広く変化もするため、 $Viab$  をすべて予見し、いかなる場合も式 (1) を満たす  $f$  を設計することは難しい。そこで、仮説的に  $f$  を生成および実行しながら環境と相互作用し、その過程を通じて  $f$  の機能を逐次的に更新、学習する。時間を  $t$ 、ダイナミクス  $f$  自体を更新するメタダイナミクスを  $g$ 、自律システムを  $Unit(g, f, s)$  と表すと、この機能更新による自律システムの環境への適応過程は、次のように記述できる<sup>3)</sup>。

$$Unit(g, f, s)(t) \rightarrow Unit(g, f + \delta f, s)(t + 1) \quad (2)$$

$\delta f$  は適応過程において自律システムが新たに獲得した機能である。 $g$  は環境に対し行動戦略を新たに生成することも含め柔軟に適応させる機能であり、システムの生存可能性を高める<sup>3)</sup>。

この適応機能こそが、前節で述べた自律性の基本特性である。

以上から、行動戦略に相当するダイナミクス  $f$  と、その適応戦略に相当するメタダイナミクス  $g$  を、どのように実現するかが自律ロボットの制御系設計の中心課題となる。現実的対応としてわれわれは人の関与を許容し、 $f$  の動作を人が教示やプログラムにより粗く指定する。そして、その動作の軌道やパラメータを、第3章で示す制御則と、機械学習により最適化する開発中の方式で作業環境に適応させ、この過程を  $g$  とする。

### 2.3 | 自律性要件の拡張

行動の適応や学習においては何らかの形で新しい動作を生成することが必要になるが、現場作業をするロボットを対象に、式 (2) で記述された自律性の要件を、次のように拡張する。

●自律ロボットの制御系の状態空間は、ロボットの生存可能領域  $Viab$  と対応する。生存可能領域外へロボットを導く動作を生成してはならず、生存可能領域外の状態に対応した動作を生成する必要はない。

現場作業をするロボットの場合、学習の試行段階においても異常停止のような形で制御状態が存在可能領域外に逸脱することは、それにより試行回数や時間とともに危険性も増すため、避けるべきである。Viability の確保は、自律ロボットの能力と安全性を矛盾なく整合させると言える。また、制御状態を生存可能領域にとどめる特性は、教示や学習を容易にする。

## 3 ロボットを自律化する制御則

CONOID の制御系下位層では、ここまで述べた自律化の理念を実現するために、以下の2つの制御則を実装している。

### 3.1 | 優先度付き多目標逆運動学解法

CONOID では、共同研究先の東京都立大の関口と武居が考案した優先度付き多目標逆運動学解法<sup>4)5)</sup>を、前記の制御系ダイナミクス  $f$  の実現機構にしている。そのブロック図を Fig. 2 に示す。

一般に逆運動学は、マニピュレータ手先の位置姿勢を与える関節変位を求める算法であり、マニピュレータと走行機構ともに、いくつかの代表的な形態に対しては解析解が存在する。一方、本解法は、関節変位に可動域制限がある条件下で仮想バネの弾性エネルギーを最小化する、繰り返し計算を伴う数値解法である。以下に定式化を要約する。簡略化し一部ではマニピュレータを腕、エンドエフェクタを手と呼ぶとともに、手先と走行部それぞれの並進位置と回転姿勢角をまとめて姿勢 (pose) と記

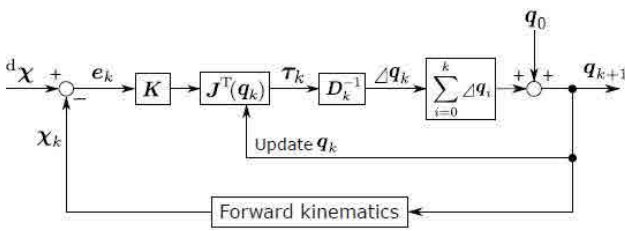


Fig. 2 優先度付き多目標逆運動学解法のブロック図<sup>4)</sup>

述し、走行部の出力軸の回転角も、腕と同じく関節変位と記す。

まず、CONOIDの左右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自由度の誤差ベクトルを、 $e(q_k)$ と表す(平面内走行の3自由度も6自由度で扱う)。 $q$ は関節変位であり、 $k$ は逆運動学解を反復計算の反復ステップを表す。そのうえで、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腕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。

$$\tau(q_k) = J^T(q_k) K e(q_k) \quad (3)$$

$J$ 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。

$$\Delta q_k = q_{k+1} - q_k = \Delta t D^{-1}(q_k) J^T(q_k) K e(q_k) \quad (4)$$

これにより関節変位の更新則が、次式で表される。

$$q_{k+1} = q_k + \Delta q_k \quad (5)$$

$D(q_k)$ については、仮想バネの弾性エネルギー

$$V_k = \frac{1}{2} e^T(q_k) K e(q_k) \quad (6)$$

を減少させるように設定する必要があり、文献<sup>5)</sup>に設定法が示されている。また、左右の腕と走行部にはその目標姿勢への到達に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  $K$ を構成する腕と走行それぞれの対角ブロックの行列に、優先度に相当する係数を乗算することでなされる<sup>5)</sup>。

このように、本解法は式(6)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、左右の腕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、目標位置到達の優先度に応じて計算する。CONOIDは全方位走行部に4軸、左右の腕に計12軸のモータ駆動軸を持つが、各軸の角度制限範囲や左右の腕と走行部の目標姿勢とその優先度を変えることで、腕と走行に多様な協調運動を創出させられる。特に式(3)と式(4)はこの協調運動において、原著文献<sup>4)5)</sup>ではマニピュレータを対象に理論説明がされていたため十分には強調さ

れていなかった、非常に重要な役割を持つ。それは、仮に腕の優先度が高く、走行の優先度が低く設定されている場合、走行は自らの目標姿勢到達よりも腕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協調的に動く、という点である。これは、優先度が乗算される仮想バネ係数行列  $K$ は対角行列であり相関項が0である一方、基礎ヤコビ行列  $J^T$ は0でない相関項を持つため、たとえば手先が目標姿勢に届かない場合、その姿勢誤差は  $J^T$ の相関項を介して式(4)の中の走行の変位量増分の計算にもおよぶからである。

このほか、この逆運動学解法には、1) ロボットの構造や駆動軸数に関わらず適用可能、2) 関節変位の可動域制限によるデッドロックを回避可能、3) 両手・両脚または走行部などに別々の目標位置を設定可能、4) それらすべてを満足する解が存在しない場合においても優先度に応じて妥協解を計算可能など、通常の逆運動学解法と異なる優れた特徴がある<sup>4)5)</sup>。これらのうち最大の特徴は、5) ある位置姿勢に対する関節変位を算出するだけでなく、近くはもちろん、遠く離れた位置姿勢に接近させる関節変位をも逐次的に算出可能な、一種の軌道生成と動作計画の能力をも併せ持つ、という点である。

したがって、本解法を備えたロボットの制御系には、上位のフィードバック制御機構とは別の下位の根源的な部分に、腕や走行部の状態をそれぞれの目標軌道に引き込む機構が備わる。これは状態空間の生存可能領域=適切な行動に相当する状態空間中の軌道またはアトラクタ<sup>注1)</sup>に、引き込み領域<sup>注2)注3)</sup>ができることに相当する。行動全体でViabilityを維持するには、このように生存可能領域に制御系の状態を引き込む仕組みが2重・3重に必要である。第4章では、こうした性質を検証する。

注1) アトラクタ:力学系の状態空間において軌道を引き付ける性質を持つ領域。注1~3はいずれも非線形力学の用語。

注2) 引き込み (entrainment): 非線形振動する要素どうしが同調する現象。状態がアトラクタに吸引される過程も広義に含む。

注3) 引き込み領域:アトラクタに吸引される力学系状態空間内の領域。Viability theoryではViability basinに相当。

### 3.2 | 外力推定にもとづくアドミッタンス制御<sup>6)</sup>

接触を伴う高度な対象物操作に不可欠な機能である。操作対象物の運動がはめ合いのように拘束されていると、マニピュレータの動きを粗く教示した場合、操作対象物は教示どおりに動くことができず、マニピュレータは過大な外力を受ける。こうした場合に外力を推定した後、この制御則で外力を緩和する。

マニピュレータの一般的な動力学方程式は、次式で表される。

$$H(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + g(\theta) + r(\dot{\theta}) = \tau_m - \tau_e \quad (7)$$

$\theta$  は関節変位で、本式左辺第1項は慣性項、第2項は遠心力・コリオリ力の項、第3項は重力項、第4項は摩擦項、右辺  $\tau_m$  はモータトルク、 $\tau_e$  は外力トルクである。比較的低速での使用を想定し慣性、遠心力・コリオリ力の影響は小さい ( $\approx 0$ ) と考え、外力トルクを次式で推定する。

$$\hat{\tau}_e = \tau_m - g(\theta) - r(\dot{\theta}) \quad (8)$$

右辺のモータトルクは検出可能であり、重力項および摩擦項はマニピュレータの物理量と駆動系の機械特性にから決まる。これらの定数はあらかじめ同定しておく。この外力トルクから、力覚センサを使わずに次式により手先外力  $F_e$  を推定する。

$$F_e = J^{-1}(\theta)\hat{\tau}_e \quad (9)$$

$J(\theta)$  は基礎ヤコビ行列を表す。推定値には不確かさが含まれるため、しきい値を超えた値を手先推定外力  $\hat{F}_e$  とする。

この手先推定外力を用いてアドミッタンス制御<sup>7)8)</sup>を行う。マニピュレータ手先に仮想的バネマスダンパ系を設定すると、求める手先目標位置補正量  $\Delta p$  は、次式のダイナミクスにしたがう。

$$\hat{F}_e = M\Delta\ddot{p} + D\Delta\dot{p} + K\Delta p \quad (10)$$

$M$  は慣性、 $D$  は粘性、 $K$  は弾性を表す。

## 4 | ドア通り抜け行動による自律性要件の検証

### 4.1 | ドア通り抜け行動の位置付け

ロボットによるドアの通り抜けは実行が難しい課題とされ、古くから現在もなお、数多く試行が続けられている<sup>9)10)11)</sup>。われわれも CONOID で他と比較可能なこの課題に取り組んでおり、現在は教示による通り抜けが可能である (Fig. 3)。この行動には手の動きに合わせた走行移動も必要なため、第1章で述べたように、従来技術では動作教示が困難なことを強調しておく。われわれが教示できるのは、別個に動く左手と右手がともにそれぞれの教示目標位置に到達するよう、走行部が前記の逆運動学解法のはたらしきにより教示なしで自律運動するからである。

先行研究に対し、本アプローチには以下の差別化点がある。

- ①作業対象、ここではドアや周囲環境のモデル化が不要。
- ②事前学習やシミュレーションにもとづく動作計画をしない。
- ③特別な作業教示用デバイスを必要としない。
- ④動作軌道の最適化機能 (行動学習機能: 開発中) を備える。
- ⑤運動拘束に対しては積極的に軌道生成や教示をせず、受動的にならわせる。
- ⑤は最重要で、軌道生成や教示が難しい接触を伴う高度な対象物操作において、それらの手間を削減できる可能性をもたらす。以下の節では、基礎的な自律性要件に相当するこの運動拘束への従動性を、ドア開け動作で検証した結果を示す。

### 4.2 | 運動拘束への手の従動性の検証

右手でドアを開ける動作を、右手がドアを開け終えた姿勢を目標 (終点) として与えドアハンドルを斜め直線状に引くよう教示し、それに対しアドミッタンス制御が過力の発生を抑

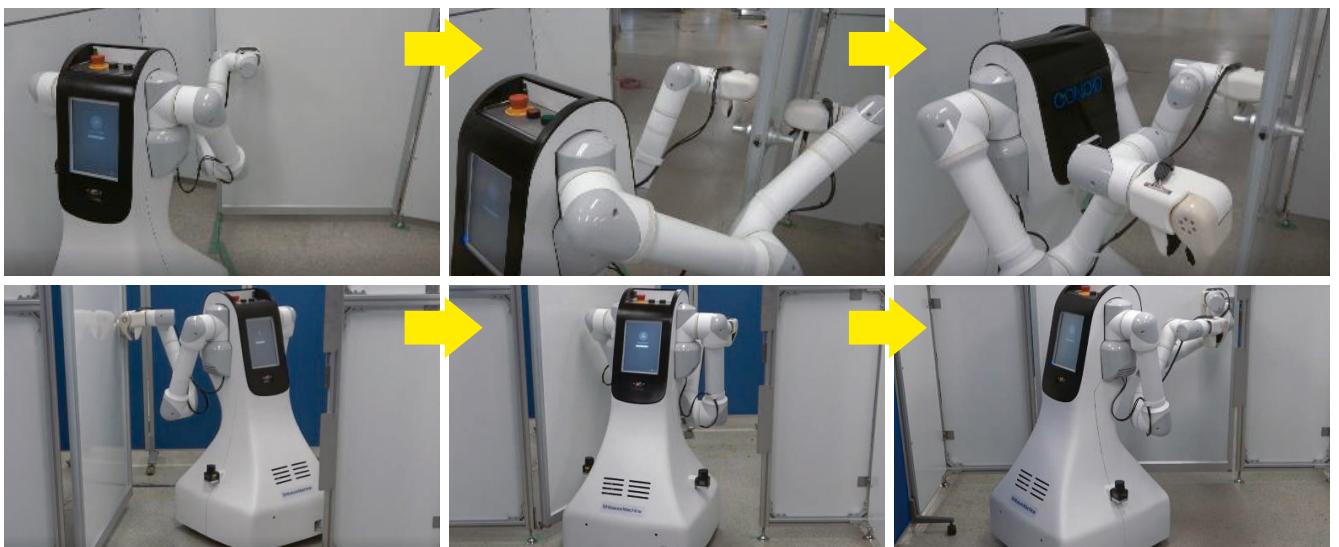


Fig. 3 CONOIDのドア通り抜け

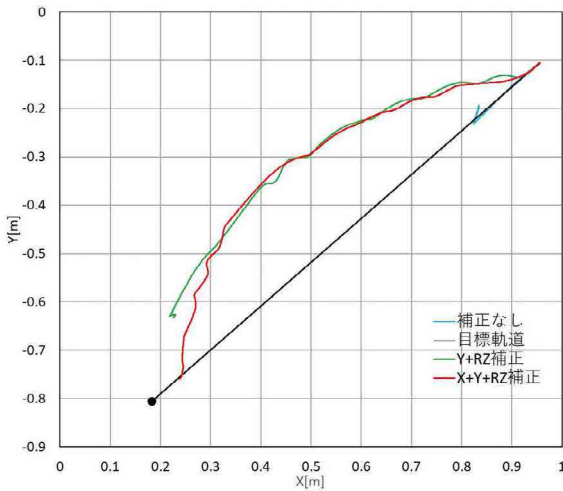


Fig. 4 ドアハンドルを移動させる右手の軌跡

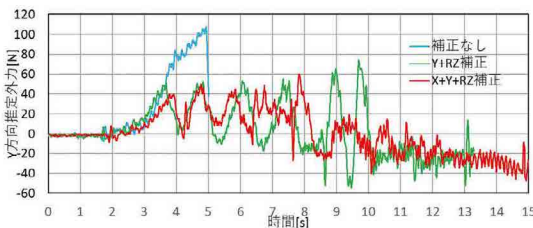


Fig. 5 アドミッタンス制御有無によるY方向推定外力の違い

えつつ円弧状の軌道に補正できるか検証した。この従動性は、粗い教示を補う自律性に相当する。同時に、アドミッタンス制御の補正有無と、補正方向の違いによる右手軌跡の変化を確認した。

まず、Fig. 4 にドアハンドルを握って移動させた右手の軌跡を示す。黒線は終点をデータで教示した目標軌道である。アドミッタンス制御の補正がない場合の右手の軌跡（水色線）は、目標軌道に沿って 0.1m ほど進んだ地点で停止している（走行部の過負荷異常停止）。次に、Y 軸と Z 軸周りの回転  $R_z$  に補正を入れた場合（緑線）、軌跡はおおむね円弧状になるが、終点の角度まではドアを開けてられていない。さらに X 方向も補正することで、終点相当角度までドアを開けられている（赤線）。

一方、Fig. 5 は、Fig. 4 の右手移動軌跡に対応する、右手の Y 方向外力推定値を表している。まずアドミッタンス制御の補正がない場合は、5s 付近の走行部過負荷異常停止部で、100N に達する過大電力を検出している。この過大電力が走行部に異常停止の原因となる過負荷を与えたと考えられる。一方、補正を X、Y、 $R_z$  の 3 方向に加えた場合の外力推定値がもっとも小さく（赤線）、おおむね  $\pm 50N$  以下に抑えられている。ドアを斜めに引いて開けるという粗い動作教示に対し、右手の動きはドアの回転運動拘束にならない、円弧軌道に引き込まれていることがわかる。

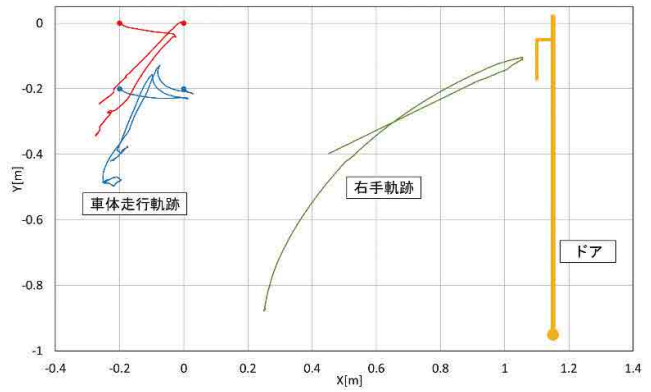


Fig. 6 異なる動作開始位置からの走行軌跡

### 4.3 | 運動拘束への走行の従動性の検証

互いに 0.2m 離れた異なる車体位置 4 地点からドアハンドルを握りドアを開く右手の教示動作を開始し、ドアの回転拘束に従動する右手に対し、異なる初期位置から自律連動し始めた走行も、一定の軌跡に収れんするかどうかを確認する。これは、教示がなくても走行が一定の軌道に引き込まれる自律性に相当する。

Fig. 6 はその結果で、ドアハンドルを握る右手の軌跡（1 例、緑線）と、それに自律連動する車体の走行軌跡 4 例（赤・青線）を表している。後者を見ると、X と Y 各方向に 0.2m 離れた位置から移動し始めた車体は最終的に X 方向は約 0.05m、Y 方向は約 0.24m の広がりを持ち停止している。この広がりが小さいほど、操作対象物（ドア）に対して、教示者が操作開始に最適な位置を探す労力も小さくなる。また、次のドア開口部通り抜け動作初期における状態の振れ幅が小さくなり、動作の教示や学習をそれ以前の動作履歴によらず始められる。しかし、今回の結果では Y 方向の広がりが縮小していない。これは、3.1 節で述べた逆運動学計算において手の優先度を高くする一方、手に自律連動させる走行の優先度を低くするため、走行位置の解の範囲が絞られていないからと考えられる。走行自律連動は軌道最適化と合わせ継続検討中であり、そこでこの一種の矛盾を解決する。

### 4.4 | 自律性要件に関する考察

Fig. 6 において  $x=0, y=0$  (赤) および  $x=0, y=-0.2$  (青) から移動を開始した 2 つの車体走行軌跡をみると、車体はいったんグラフ右側のドアに向け前進してから、グラフ左下に移動している。これは、ドアハンドルに手を伸ばしても届かない位置からドア開け動作を開始した場合でも、右手先がドアハンドルに到達するよう、走行が教示レスで右腕に自律連動しているからである。また、 $y=-0.2$  から移動を開始した 2 つの車体走行軌跡（青）をみると、ともに  $x=0$  付近からグラフ左上に少し動いてからグラフ左下に移動している。これも右

手のドアを開ける動きを成立させるように、走行が右腕に自律連動しているからである。

このように、右手がドアハンドルを握り、その後ドアを開ける際の走行移動については、優先度付き多目標逆運動学解法のはたらきにより、プログラムや教示をしていない動作が生成されている。前節までに述べた運動拘束に従動して粗い教示を補うはたらきと合わせて、CONOIDの制御系は、基礎的な自律性を備えていると判断できる。

一方、CONOIDは従来の方式で作業を教示した場合と比べ、教示時間を1/10にすることを目標にしている。本例ドア通り抜けのように、従来式では教示自体が困難な作業もあり定量比較が難しいものの、主観的、体感的には現状はまだ1/2程度の段階である。これは、目標姿勢や途中姿勢の教示量は減っているものの、アドミッタンス制御や走行自律連動の条件設定が残っているためである。現在これらの自動決定にも取り組んでおり、結果については機会を改めて報告する。

## 5 おわりに

開発中の自律移動型作業ロボット CONOID に関し Viability (= 生存可能性) を最大にする自律化の理念を述べ、初期段階の自律性の検証結果を示した。このような自律性を核にわれわれは、従来の産業用ロボットと同じ万能位置決め装置の位置づけではなく、特定の作業の実行プログラムをあらかじめ組み込んだ作業用ロボットとして、CONOID を製品化する。そのため今後、顧客の現場において対象作業の実証テストを実施する。

Viability は命に関連する語意ゆえに、Sustainability よりも主体性や切迫性が強い。多分野にまたがるシステム論である Viability theory は気候変動や資源管理の解析にも適用されており、式 (1) と (2) は、人の行動にもあてはまる。人は環境状態が自らの生存可能領域に収まる範囲で行動し、生存を脅かす危険があれば、行動様式を改めるべきである。

われわれ機械装置メーカーにおいては、製品運用面の Viability、すなわち作業や生産の継続性を高めることが顧客に安定操業による生産性向上や廃棄物量低減をもたらし、その製品の付加価値向上につながる。それが市場におけるわれわれの製品の Viability、すなわち製品寿命を延ばし、さらにわれわれ製造企業の Viability も向上させる。この考え方のもと、信頼をもとに製品を製造販売し安定的に収益を得る当社既存のダイナミクス  $f$  に加え、われわれの取り組みがそのダイナミクスを独創により環境変化に適応させるメタダイナミクス  $g$  となるよう、本ロボット開発を進めていく。

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。

### 参考文献

- 1) L. Steels, When are robots intelligent autonomous agents?, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol.15 (1995), pp.3-9.
- 2) J.P. Aubin, A.M. Bayen, P.S. Pierre, *Viability Theory: New Directions*, 2nd ed. (2011), Springer.
- 3) P. Bourgine and F. J. Varela, *Toward a Practice of Autonomous Systems*, F. J. Varela and P. Bourgine, eds., *Toward a Practice of Autonomous Systems* (1992), pp.xi-xvii, A Bradford Book, MIT Press.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 西村, 清水, 武居, 和田, 中村, 外力推定を用いたモバイルマニピュレータによるドア開け, *ロボティクス・メカトロニクス講演会 2022 講演論文集* (2022), 1A1-A07.
- 7) 武居, 野畑, 藤本, 安定した接触を実現するアドミッタンス制御手法, *日本ロボット学会誌*, vol.26, no.6 (2008), pp.635-642.
- 8) 神永, 人型ロボットの制御とアクチュエータ, *日本ロボット学会誌*, vol.36, no.2 (2018), pp.128-133.
- 9) 水谷, 油田, タスクオリエンテッドアプローチによる自律移動マニピュレータの研究, *日本ロボット学会誌*, vol.17, no.6 (1999), pp.865-875.
- 10) Y. Karayiannidis et al., An Adaptive Control Approach for Opening Doors and Drawers under Uncertainties, *IEEE Transactions on Robotics* 32(1) (2016), pp.1-15.
- 11) 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).

# 成形品機能・性能向上のための発泡成形技術の探求

発泡成形は主に自動車内装部品の軽量化や、軽量化に伴う材料費低減を目的として既に実用化されているが、発泡層による断熱性、防音性といった付加的な機能・性能の向上を製品設計に応用しようとする取り組みの拡大に伴い、改めて注目されている。当社は以前より発泡成形技術の開発に取り組んでおり、主に化学発泡材を用いた発泡セルの微細化・均一化、寸法安定性をはじめとする成形品品質向上のための技術開発を進めてきた。また、近年ではリサイクル性の向上や、更なる高発泡倍率化が期待される物理発泡成形にも取り組んでおり、大型物理発泡成形品を自動車部品へ適用するための技術開発を進めている。本稿では、当社が開発した高精度コアバック成形技術、及び物理発泡成形の特徴について報告する。



成形機カンパニー  
成形機技術部 営業技術課

田中 郁朗

## 1 はじめに

現在、地球温暖化という課題に直面し、脱炭素社会（カーボンニュートラル）の実現やSDGsへの取り組みが活発化している。自動車業界では、DX（デジタルトランスフォーメーション）が進んでおり、次世代トレンドであるCASEに注目が集まっている。CASEは、C(Connected)、A(Autonomous)、S(Shared & Service)、E(Electric)の頭文字を組み合わせた言葉である。Electricでは、電動化においてバッテリーの質量が増加していることから、航続距離向上のための軽量化や、車内空調の省エネ化のために断熱性も求められている。加えて、断熱性は自動車以外の業界も含めSDGsの観点から消費エネルギー削減のために注目されている。Connectedでは、センサを用いて自動車の状態や周囲の交通状況などの様々な情報を収集し安全で快適な移動手段を提供するだけでなく、音楽や映像などのエンターテインメントを楽しむための手段としても期待されている。したがって、室内の音が反響しないための吸音性や、エンジン音やモータ音など外部からの音を室内に通さないための防音性が求められている。これらの成形品に求められる機能・性能を向上するための一つの方法として発泡成形が挙げられる。発泡成形には化学発泡と物理発泡の2種類があり、化学発泡成形品はベースとなる樹脂材料に熱分解型発泡剤を添加するため、発泡剤の種類によっては産業廃棄物として処理しなければならないのに対し、物理発泡成形品は窒素ガスや炭酸ガスを発泡剤としているため再利用可能な点が生産・消費の観点で有利である。また、物理発泡は供給するガス圧力を高めることで化学発泡よりも高い発泡倍率を得られることから、当社においても物理発泡成形の技術開発を進めている。この度、当社

が開発した高精度コアバック制御を用いて大型物理発泡成形品の成形を実施し、性能を評価したので報告する。

## 2 高精度コアバック制御の特徴

先にも述べた通り、SDGsの課題解決に向けて、軽量化や断熱性、防音性等の機能を持つ自動車部品の開発が進められている。この課題に対して有効な射出成形技術としてコアバック動作を用いた発泡成形がある。この成形法は、キャビティ容積が小さい状態で樹脂を充填後、移動ダイ後退動作（コアバック）を行い、キャビティ容積を拡大して発泡セルの生成・成長を促すことでソリッド成形品に対して内部に発泡層を有する成形品を得る方法である。しかしながら、この手法ではコアバック完了時の金型開き量のばらつきやコアバック動作の挙動変化により、成形品の厚さ寸法や発泡状態にばらつきが生じる。このため、安定した品質の発泡成形品を得るために、型締装置の構造による金型開き量の変動要因の撲滅や、コアバック動作制御の最適化によって高品質な発泡状態を安定して維持することが必要となる。当社では、これらの課題を解決するため高精度コアバック制御を開発した。ここで高精度コアバック制御の特徴を紹介する。

型締装置の構造による金型開き量の変動要因として、トグル機構（リンク部）のクリアランスによるコアバック完了位置のばらつきがあり、発泡不良の原因となることがある（Fig. 1a）。このばらつきをクリアランスカウンタ装置（特許第6608168号）によってコアバック動作の制御不感帯を排除（Fig. 2）し、コアバック完了時の金型開き量ばらつきの最小化が可能である（Fig. 3）。実際のコアバック動作が制御上の理論値に近い挙動

となる事で、コアバック動作の繰り返し安定性を高めることができ、安定して良好な発泡状態を成形可能である (Fig. 1b)。加えて、実際の成形では機械精度や摩耗等の経時的変化や温度変動等の外乱により金型開き量の設定値と実開き量の間に差が生じる。経時的変化に伴う微小誤差はリニアスケールによって (Fig. 3)、また温度変動等の外乱に伴う型厚の変化は実型締力の変動値から算出することによって (Fig. 4) それぞれ実開き量を補正し、経時的変化や温度変動等の外乱による影響を抑制し高精度な繰り返し安定性を得ることができる。

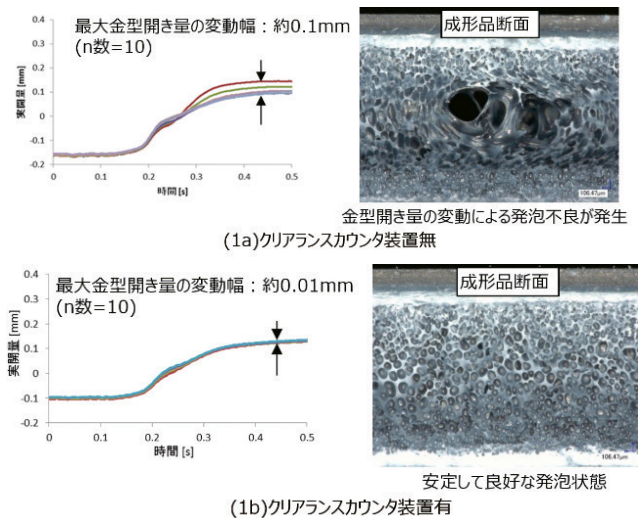


Fig. 1 クリアランスカウンタ装置の有無による金型開き量の変動幅比較

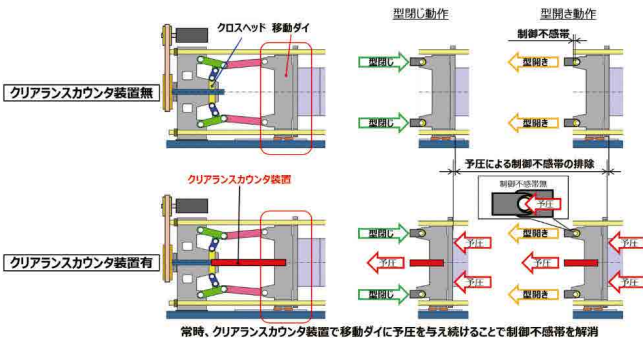


Fig. 2 クリアランスカウンタ装置の動作イメージ比較

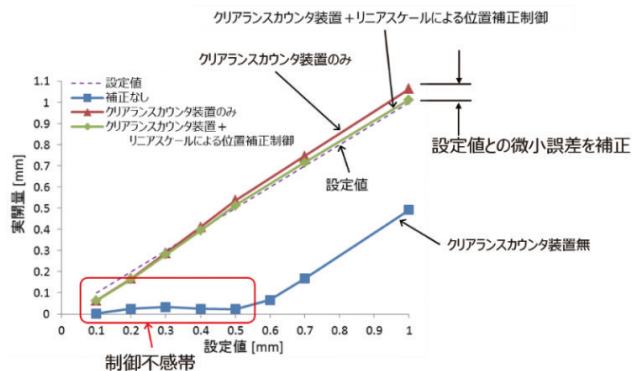


Fig. 3 移動ダイ位置補正制御

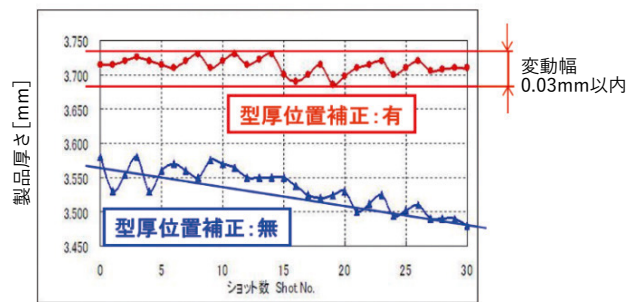


Fig. 4 実型締力検出による型厚位置補正制御

また、トルグ機構を有する型締装置は、その機構特性上、型開閉速度が曲線的なパターンとなる。そのため、発泡セルの成長速度に合ったコアバック速度の条件設定には慣れや経験を要する。移動ダイ一定速度制御 (特許第 5872668 号) ではクロスヘッドの速度パターンを曲線的に制御し、コアバック速度を一定速度制御することで発泡セルの成長速度とコアバック速度を同調させている (Fig. 5)。これにより均一な発泡層の形成が可能になると共に条件設定が容易になった。さらに、微細な発泡セルの生成に高速圧抜きが有効であることから、従来制御に対して応答性を向上させ、設定したコアバック速度に達する時間を 64% 短縮している。

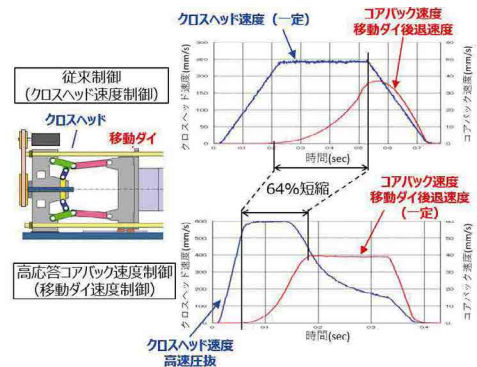


Fig. 5 移動ダイ一定速度制御の動作イメージ

### 3 大型物理発泡成形品への適用

自動車部品における物理発泡成形品への取り組みとして、自動車部品の開発・製造メーカーである三恵技研工業 (株) と、可塑化装置の設計・製造メーカーである (株) 日本油機と共に、マクセル (株) と京都大学が開発した「RIC-FOAM® ※」を応用し、高発泡倍率の大型成形品を実現する物理発泡成形技術を開発した。本取り組みでは、スクリュ径  $\phi$  80 以上の可塑化装置による発泡倍率 5 倍以上の達成を目標に掲げている。この度、当社の型締力 1300ton の超大型電動式射出成形機 EC1300SX III を用い、高精度コアバック制御を含む物理発泡成形技術により



大型成形品 (Fig. 6) を成形し、発泡倍率 5 倍 (板厚 9.0mm) を達成した。



成形品	ドアモジュール
使用樹脂	PP
発泡剤	N2
縦	450mm
横	550mm
金型キャビティ厚	1.8mm

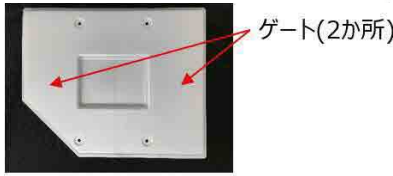


Fig. 6 EC1300SXIIIと大型成形品

大型成形品においてはゲート部から充填末端部までの流動長が延びることによってゲート付近と充填末端部の温度差が大きくなり、成形品全体が発泡に適した温度となる時間が短くなる。コアバック開始タイミングが早く、発泡層の熔融樹脂温度が高い場合には破泡が発生し、逆にコアバック開始タイミングが遅く、発泡層の熔融樹脂温度が低い場合には発泡不足による板厚の減少が発生する。そのため、発泡に適した温度範囲に熔融樹脂温度が低下したタイミングでコアバックを開始させる必要がある。実成形において熔融樹脂温度を発泡に適した温度範囲に収めるには、コアバック遅延時間によりコアバック開始タイミングを調整する。今回使用した大型成形品において、破泡が発生したコアバック条件 (Fig. 7a) に対して、コアバック開始タイミングを 0.6 秒遅くすると、発泡不足が発生することを確認した (Fig. 7b)。そこで Fig. 8 に示すように、コアバック開始タイミングを発泡層が発泡に適切な温度範囲に収まるように調整することにより、均一な板厚の成形品を取得できた (Fig. 9)。

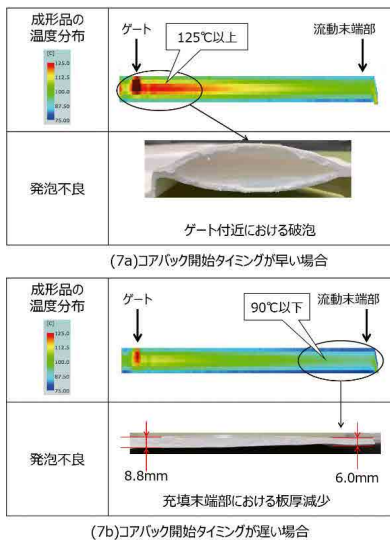


Fig. 7 コアバック開始タイミングの違いによる発泡不良

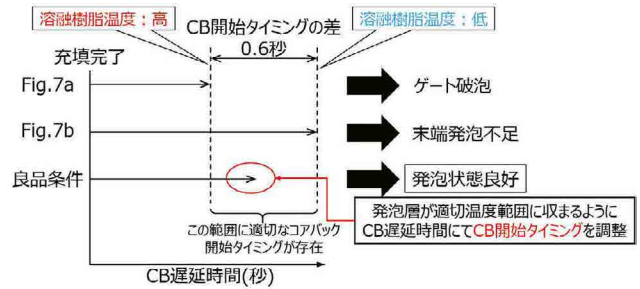


Fig. 8 コアバック開始タイミングの調整イメージ



Fig. 9 成形品断面

これらの結果から、今回の成形品よりもサイズが大きくなればなるほど、ゲート付近と充填末端部の温度差がより大きくなり、発泡に適した温度となる時間も短くなるため、0.1 秒単位でコアバック開始タイミングを調整する必要がある。発泡不良のない成形品を得るためにはこの非常に狭い時間領域でコアバックを開始する必要がある。コアバックの高応答性及び繰り返し安定性が重要となる。この点において電動式射出成形機はサーボモータ駆動による高精度な応答性と繰り返し安定性が特徴であり、高精度コアバック制御と組み合わせることで大型物理発泡成形品における安定成形を実現することができる。

#### 4 物理発泡成形品の性能評価

物理発泡成形品が持つ断熱性の評価のため、熱伝導率測定を実施した。測定は市販の断熱材であるポリエチレンフォームを基準とし、ポリエチレンフォーム、コアバック無 (ガス無)、コアバック無 (ガス有)、発泡倍率 3 倍、発泡倍率 5 倍の計 5 種類のサンプルに対して実施した (Fig. 10)。ポリエチレンフォームの次に断熱性の高い成形品は、発泡倍率 5 倍のサンプルであり、発泡倍率 3 倍の結果と合わせて発泡倍率の増加に伴い断熱性が向上している。このことから、高発泡倍率化に伴う発泡層の増加が断熱性向上に有効であることがわかる。今回は断熱性のみの性能評価であるが、防音性についても効果が期待できると考えられる。

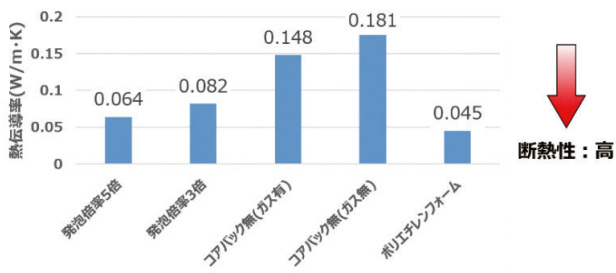


Fig. 10 熱伝導率の測定結果

## 5 まとめ

今回、超大型電動射出成形機 EC1300SX III を用いた高精度コアバック制御を含む物理発泡成形技術により、大型成形品の高発泡倍率化を実現し、良好な成形品を得るためにはコアバックの高応答性及び繰り返し安定性が重要であることがわかった。また、高発泡倍率化によりポリエチレンフォームに近い断熱特性を得られることから、発泡成形は機能付加に対しても貢献できると考えられる。

発泡成形が実用化されてから既に 20 年以上が経っているが、その成形技術の進歩により高発泡倍率化が進み、成形品に機能・性能を付加することができる新たな方法として今後も期待される成形法である。当社においては発泡成形が秘める可能性を最大限に引き出し、より付加価値の高い成形品を実現するための成形技術開発に取り組み、お客様や社会に貢献していく所存である。

※「RIC-FOAM®」とは、射出発泡成形技術「Resilient & Innovative Cellular Foam」の略を表します。「RIC-FOAM®」はマクセル株式会社の登録商標です。



## 子どもからの学び



成形機カンパニー  
成形機技術部 生産設計課

**山崎 悠生**

大学生の頃、私は子どもと関わるボランティアに参加していた。その中で私は子どもたちと一緒に段ボールを使い、大きな船を製作する時間があった。子どもたちはどうしたらリアルを追求できるのかを考え、やりたいアイデアを私に幾度となく提案してきた。実際にそのアイデアのお陰もあり立派な船が完成した。私はそんなやってみたいことを無我夢中で伝え行動する子どもたちの姿を見てきた。

大学を卒業し芝浦機械に入社、ハーフナットの耐久試験を行なった時。その試験では、なかなか自動運転をかけることができないという実験機の不具合があった。不具合の際には、型締力が運転開始時と比べて上昇し型締力異常が

発生、実験機が停止するということが起きていた。私は定期的に駆動部の温度やサイクル速度、型締力などを事細かに記入した。記入したこともあり、何故不具合が起きるのか、どうしたら自動運転をかけられるのか、私は自分なりに考えることができた。

ボールねじ部の温度が上昇していたことから、膨張によって型締力が上がっていると考えた私は、温度が上昇している箇所を冷すような機構を考えたことで型締力異常を止めることができた。この時私は、どのようにしたら解決できるのかを考え提案し実行に移すということに楽しさを感じ、問題を解決したときには大きな達成感を覚えていた。

子どもと大人は立場、責任等異なることは多くある。しかしそこで考えたことを抑え込むのではなく、子どもから得た「考えたことを実際に行動に移す力」を大事にして、仕事をしていきたいと考えている。

# ダイカストマシンの省エネルギー化

## 概要

ダイカストは自動車業界で広く採用されている製法である。自動車業界ではカーボンニュートラルの動きが活発になってきており、ダイカストシステムもその動向に対応していく必要がある。本稿ではダイカストマシンおよびその周辺機器について、カーボンニュートラルにつながる省エネルギーアイテムを紹介する。



芝浦機械(株)  
成形機カンパニー  
成形機技術部 生産設計課

豊島 俊昭

## 1 はじめに

ダイカストは寸法精度の優れた鋳物をハイサイクルで大量生産可能な製法であり、適した強度とリサイクル性の良い材料が選定されているため、自動車産業を中心としてさまざまな分野に採用されている。昨今の世界的なカーボンニュートラル実現の動きの中、自動車産業においても工場単位でのカーボンニュートラルを目指している状況である。そのため、ダイカストの生産設備においてもカーボンニュートラルを目指す必要がある。温室効果ガスの排出量から吸収量と除去量を差し引いた合計をゼロにする、というのがカーボンニュートラルの意味するところであるが、本稿においてはダイカストの生産設備において排出量を出来るだけ少なくするという視点でいくつかの省エネルギーアイテムについて紹介する。

## 2 省エネルギー化の考え方

ダイカストでは高出力、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、Fig. 1 に示すような様々なエネルギー損失がある。

また、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。そこで、ダイカストの工程において、油圧と電動を効果的に使用する方式を検討した。すなわち、油圧駆動は高出力、高応答性が必要な射出、押出・中子の離型の瞬間に限定し、その他の例えば型開閉などは電動駆動とするというものである。

このような観点から3～6項にて各アイテムについて説明する。

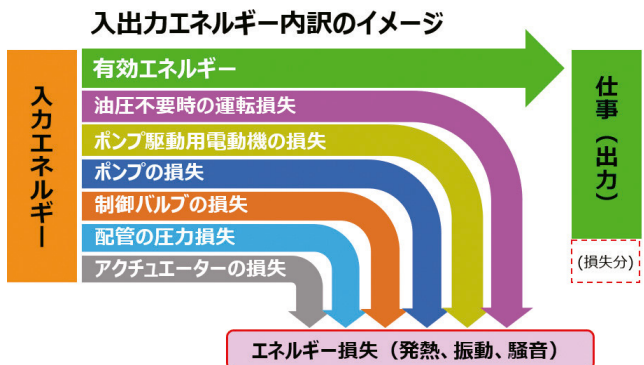


Fig. 1 油圧における入出力エネルギー内訳(イメージ)

## 3 電動型締ダイカストマシン<sup>1)</sup>

ダイカストが金属材料の加工方法として選ばれる理由の一つに、卓越した生産性の高さが挙げられる。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鋳造システム条件で決まり、ダイカストマシン動作のみで決まるものではないものの、ダイカストマシンメーカーとして、ドライサイクルタイムの短縮を追求することが重要と考えている。



Fig. 2 DC1300R-E ダイカストマシン

当社では、2015年から中小型機の電動トグル式型締のダイカストマシンをリリースしており、そこで得られたノウ

ハウを大型機に展開した DC1100R-E (型締力 11,000kN) と DC1300R-E (型締力 13,000kN) を 2020 年に開発した。Fig. 2 に DC1300R-E の外観を示す。本開発のコンセプトは以下 3 点である。

- ①サイクルタイムの削減・・・電動トグル型締機構を採用することで型開閉スピード、他工程とのラップ動作により従来の油圧トグル型締機と比較し、圧倒的な生産性を実現。
- ②省スペース・・・型締トグル部の新設計により、従来機と比較して大幅な省スペース(占有面積の削減)を実現。
- ③省メンテナンス・・・電動機構により作動油漏れの極小化、メンテナンス性に優れた新制御装置 TOSCAST-999 を搭載。

まず、ハイサイクルについて、DC1100/1300R-E のドライサイクルタイムを Fig. 3 に示す。機種比較として、型締力 12500kN の油圧トグル機である DC1250CS3 を対象機とした。電動トグル型締機構によって型締・型開時間が大幅に短縮され、DC1250CS3 油圧型締機に対し約 30% 以上のサイクルタイム短縮となっている。また、全体サイクルタイムを短縮しようと試みた場合、射出部で使用しているアキュムレータへの作動油充填時間がネックとなるケースが多い。そのため、本機では作動油圧源のポンプ駆動用モータを大容量化、さらに高圧ラインの油吐出量を増大し、従来の油圧トグル機よりもアキュムレータへの作動油充填時間を短縮している。これにより製品 1 個当たりの消費電力を低減させている。

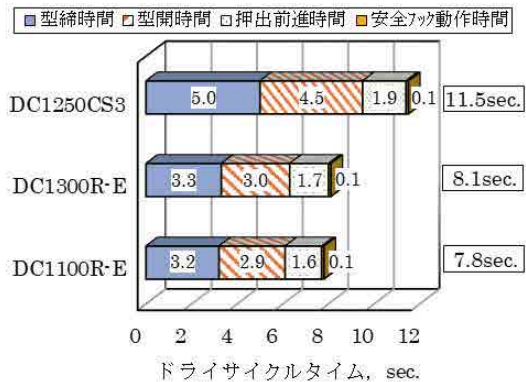


Fig. 3 DC1100/1300R-E のドライサイクルタイム

サイクルタイムの短縮を図っていくと、金型温度が上昇し易くなり溶湯の流動性や鑄造圧力伝播の向上が期待出来る反面、金型焼付きや割れ発生等の懸念がある。そのため、金型冷却方策を中心とした総合的な対応が重要になると考えられる。

次にスペースに関して説明する。ダイカストマシンに取付可能な金型サイズはダイカストマシンのダイプレート寸法に依存する。DC1300R-E のダイプレート寸法は、従来の油圧

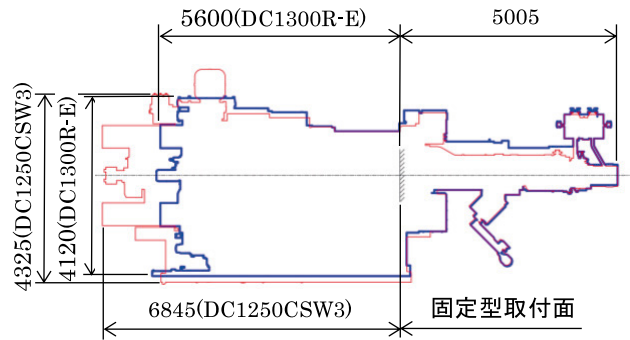


Fig. 4 DC1300R-E と DC1250CSW3 のスペース比較

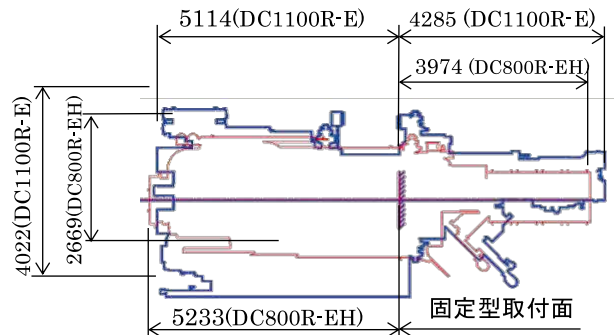


Fig. 5 DC1100R-E と DC800R-EH のスペース比較

型締ワイドプラテン機である DC1250CSW3 と同等サイズとなっている。一方、DC1300R-E と DC1250CSW3 における占有スペース(平面上の投影)を比較すると、Fig. 4 に示すように DC1300R-E は DC1250CSW3 よりもマシン全長が短縮され(オプション仕様は含まず)、省スペースとなっている。削減されたスペースの有効活用やマシン更新時にダイカストラインのレイアウトを再考可能となる。同様に DC1100R-E と DC800R-EH のスペース比較を Fig. 5 に示す。全長に関してはほぼ同サイズとなっているため、現在 800t を設置している場所に更新設備として設置し、今までよりも利益率の高い大型製品に対応することを視野に入れている。

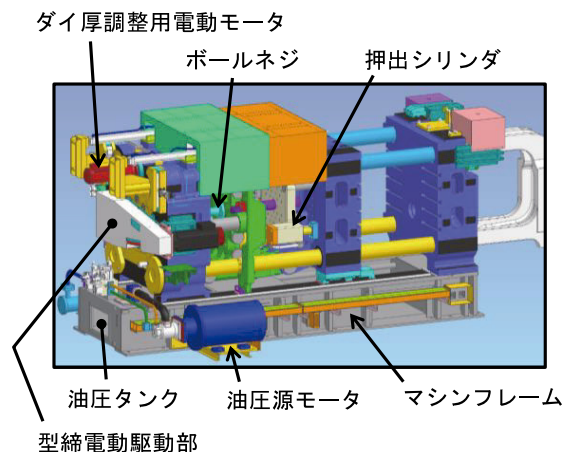


Fig. 6 DC1100R-E 型締部の外形図

Fig. 6 に DC1100R-E 型締部の外形図を示す。電動型締部の主要部品は中小型機の電動型締機と同様に、サーボモータ、プーリ、タイミングベルト、ボールねじで構成している。ボールねじをトグル部内に配置し、さらに作動油量の低減より、油圧タンクのサイズがコンパクト化され、フレーム油圧タンク部周辺へのアクセス性やメンテナンス作業性が改善された。

また、本機では、従来の制御装置 TOSCAST-888 の機能を更に進化させた TOSCAST-999 を搭載している。モニタ画面サイズの大型化(15 インチ→19 インチ)や 2 画面構成化、射出波形表示数の増加(5 本→8 本)など、操作性や視認性が向上している。Fig. 7 に TOSCAST-999 モニタ画面の一例を示す。2 画面構成のため、上部画面にリアルタイムな射出波形を、下部画面に射出設定を同時表示させることが可能となっている。射出波形形状の表示結果を見ながら射出設定を変更可能なため画面の切り替え作業を省くことが出来る。その他、集中管理機能の拡張や電磁弁の動作回数カウントによる交換タイミングの管理機能を搭載し、保全性を高めている。

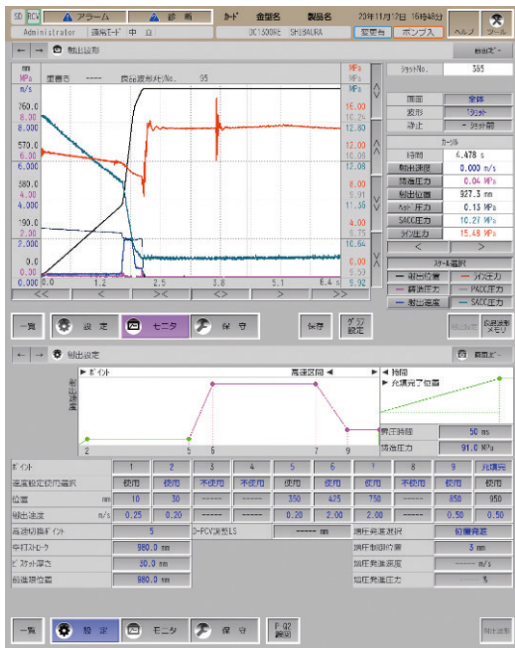


Fig. 7 TOSCAST-999 モニタ画面の一例 (上部画面:射出波形、下部画面:射出設定)

最後に省エネルギーについて本機では、電動トグル型締機構及び油圧系統の見直しにより、油圧トグル機に対して環境負荷の低減化を図っている。Fig. 8 にダイカストマシンにおける 1 サイクル当たりの消費電力量と CO2 排出量を示す。なお、給湯時間を 6 秒、スプレー時間を 18 秒、製品取出時間を 5 秒、押出ストロークを 100mm、ダイタイマを 10 秒に設定した条件である。電動トグル型締によって、型開閉動作と中子動作の

ラップ動作が可能となりサイクルタイムの短縮が図れる。1 サイクル当たりの環境負荷試算として従来油圧トグル機に対し、DC1300R-E は約 12%、DC1100R-E は約 19% の低減が見込まれる。また、ダイカストマシンのサイクルタイム短縮によって、周辺設備全体の動作タイミングが見直され、更なる環境負荷低減が期待出来る。

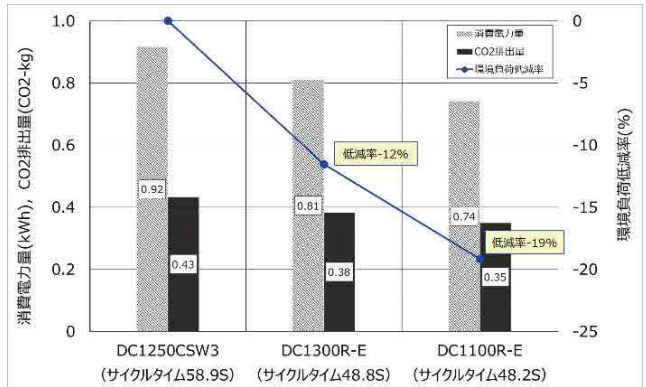


Fig. 8 1サイクル当たりの消費電力量とCO<sub>2</sub>排出量※消費電力量 1kWh でCO<sub>2</sub> が 0.472kg 発生として算出

## 4 ハイブリッド中子装置

中子は離型時のみ高出力が必要で、その他の工程は基本的に高出力を必要としない。そこで、離型時のみ油圧駆動、その他の工程は電動駆動としたものが、ハイブリッド中子装置である。Fig. 9 に示すように、基本構造はサーボモータ、プーリ、タイミングベルト、ボールねじで構成し、中子後退初動時に使用する油圧シリンダを具備している。中子前進時は油圧を使用せず電動駆動のみで動作、製品凝固後の製品から中子を離型する際は油圧駆動を使用し、離型後は電動駆動へ切り替わる装置となっている。Fig. 10 に 1650t クラス金型の既存油圧シリンダから転換したハイブリッド中子駆動装置の外観を示す。中子系統毎に油圧ホース(中子後退側ポートのみ)を中子ポートに接続し、電気配線を電気 BOX (コンセント)に接続して使用する。

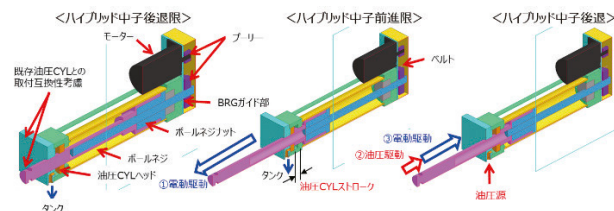


Fig. 9 ハイブリッド中子装置の動作説明

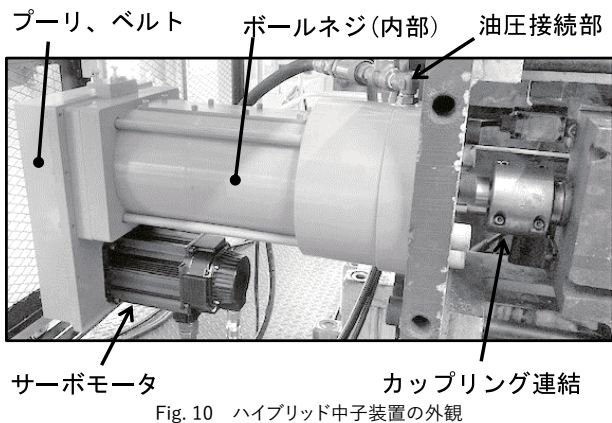


Fig. 10 ハイブリッド中子装置の外観

Fig. 11 に油圧中子シリンダとハイブリッド中子装置の往復動作した際の作動油使用量を比較した一例を示す。なお、油圧中子シリンダ条件はロッド径が 52mm、ヘッド径が 150mm、中子ストロークが 110mm である。また、ハイブリッド中子装置の油圧ストロークは 20mm とした。油圧中子シリンダでの作動油使用量は 3.65L、ハイブリッド中子装置での作動油使用量は 0.32L となり低減率が 91% であった。

省エネルギーに関しては他のアイテムと併せて 7 項にて説明する。

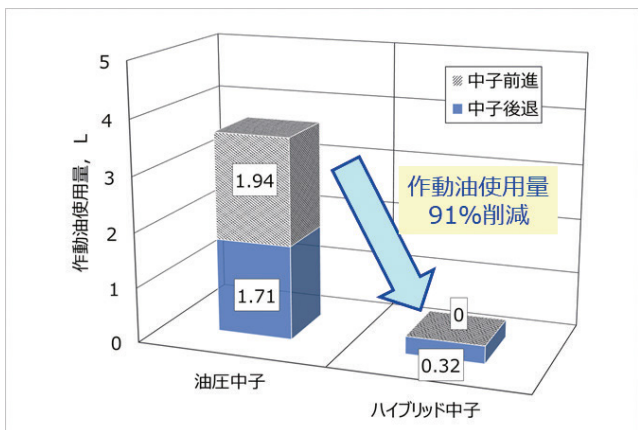


Fig. 11 ハイブリッド中子装置の作動油使用量

## 5 ハイブリッド押出装置

ハイブリッド中子装置と同じような考えは押出装置でも可能である。Fig. 12 にハイブリッド押出装置の動作説明を示す。高出力の必要な押出の離型時のみ油圧駆動を使用し、その他の工程は型開閉用のサーボモータを利用し、電動駆動としたものである。まず、①の型締状態から、電動で型を開き②の状態になる。そこで、押出シリンダ(押出プレート)はリンクハウジングがストッパになり、その位置よりも型開き側には動けない状態となる。そこで、③に示すように油圧で 10mm 程度押出(離型)をする。その後は④に示すように電動で押出限まで動作さ

せる。③④の状態では押出シリンダは動かず、移動ダイプレートが型開き側に動くことにより、押出動作が可能になる。最後に⑤で押出板ロック機構により、押出シリンダハウジングにロックした状態で型締めを行うことにより、押出シリンダに戻る。Fig. 13 に押出シリンダの構造を示す。これにより、押出力は従来の油圧機と同じ力が得られる一方、作動油の量を削減することが可能になる。100mm ストローク中の 10mm を油圧で押出(離型)すると仮定した場合、1 サイクルの作動油使用量は Fig. 14 に示すように 9.77L が 0.41L となり、96% の削減が見込まれる。

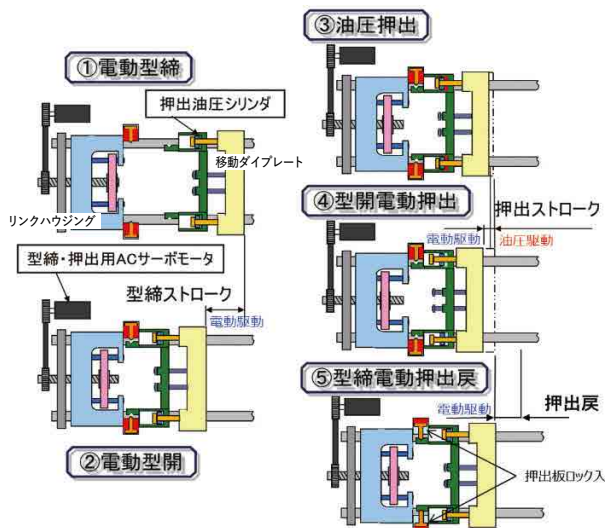


Fig. 12 ハイブリッド押出装置の動作説明

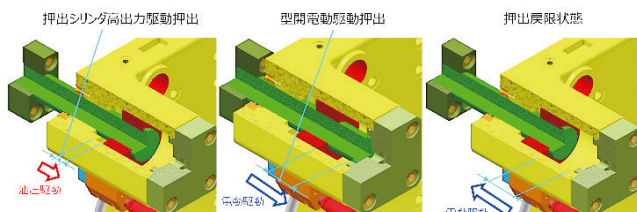


Fig. 13 ハイブリッド押出装置の構造

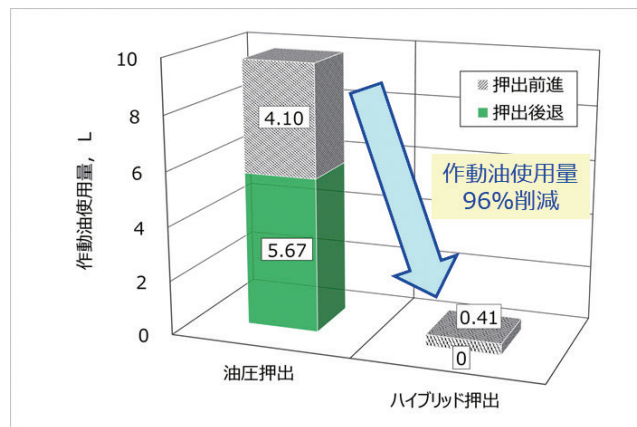


Fig. 14 ハイブリッド押出装置の作動油使用量

## 6 省エネルギー射出装置

射出装置は高出力、高応答性が要求されることから現時点ではアキュムレータを使用した油圧駆動がベストと考えるが、低速射出区間などの低出力域では高圧に充填したアキュムレータの油を無駄に使用しているともいえる。そこで、低出力域においては射出シリンダのロッド側の油をヘッド側に戻す、いわゆるランアラウンド回路を構成し、溶湯をキャビティに充填する高出力域ではメータアウト回路とする方式が考えられる。Fig. 15にその考え方と油圧回路を示す。C2G17というチェックバルブがランアラウンド切り替えバルブであり、射出シリンダの圧力により自動的に切り替るようになっている。ランアラウンド回路を構成することにより従来の回路よりも作動油を25～30%減らすことが可能となる。

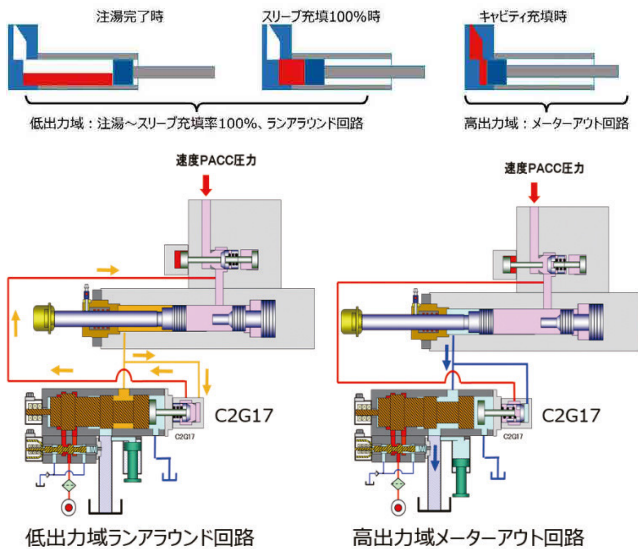
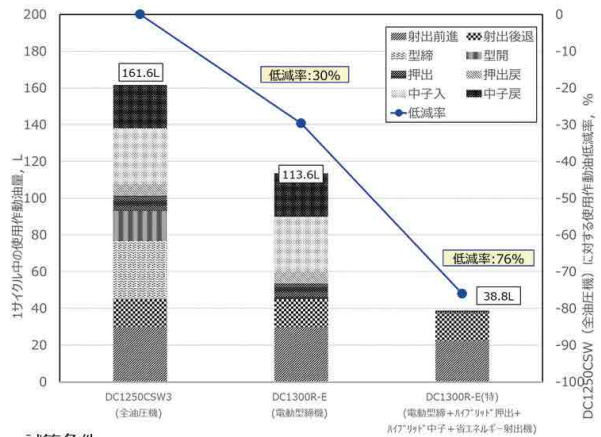


Fig. 15 省エネルギー射出装置の考え方と油圧回路

## 7 まとめ

4項～6項で説明したアイテムを電動ダイカストマシンDC1300R-Eに搭載した場合の作動油削減効果、消費電力低減効果について、ある条件の下での試算結果をFig. 16、17にそれぞれ示す。

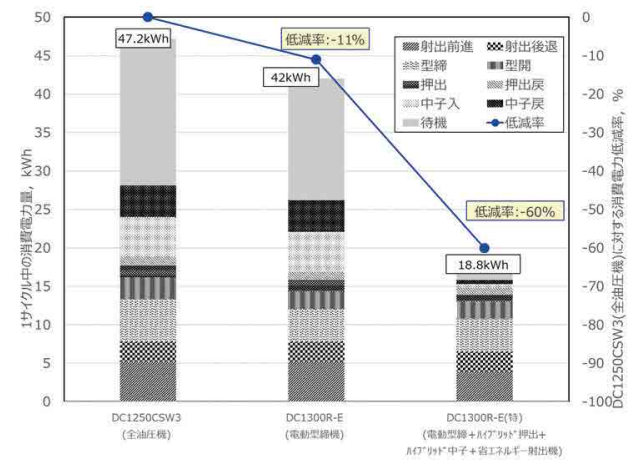
右側の棒グラフが4項～6項のアイテムを搭載したものであり、左側の油圧機に対して、作動油量は76%の低減、電力量は60%の低減となり、大幅な省エネルギー効果が見込まれる。



試算条件

- 射出低出力域でのランアラウンド回路により、溶湯スリーブ充填率50%
- 押出STは仕様150mmフルSTとし、ハイブリッド押出は10mmで離型
- 中子は4系統仕様で、ハイブリッド中子は10mmで離型

Fig. 16 省エネルギーアイテム作動油削減効果(試算値)



試算条件

- 油圧源モータの平均負荷率が80%、その内40%は待機電力、60%が高圧作動油として各仕事に変換し、作動油量に応じて60%の電力量を割振り
- 型締電動・HV押出・HV中子の消費電力は、電気/油圧の力率を考慮
- 型開閉駆動によるHV押出時のモータ負荷は50%で動作
- 省エネ射出機の油圧源はACサーボモータ仕様で算出

Fig. 17 省エネルギーアイテム消費電力低減効果(試算値)

## 8 最後に

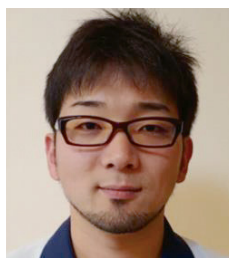
世界的な脱炭素の流れの中で、ダイカスト生産システムでの省エネルギーアイテムの一部を紹介した。現段階では構想あるいは試作段階のものも含まれるが、これらの開発を進め、ダイカストが今後も社会の中で地位を築き、貢献出来るように努める所存である。

参考文献

- 1) 富岡 智: 会報ダイカスト No.154、P53、(2021)

# 二軸混練押出機のDXに向けた取り組み

近年、デジタルトランスフォーメーション（以下、DX）への対応は、顧客や社会のニーズを基とした企業を取り巻く激しい環境の変化に追従し、競争上の優位性を確立するために必要不可欠となっている。プラスチック業界においてもDXへの対応を求める声が高まっており、当社も二軸混練押出機のDXに向けてセンシング技術の向上に努めている。本稿執筆にあたり、二軸混練押出機のパレルに各種センサを取付け、押出機内部の挙動を測定し、数値化した。本稿では二軸混練押出機のセンシング方法とデータの活用について報告する。



成形機カンパニー  
押出技術部  
押出技術課

荻野 陽介



成形機カンパニー  
押出技術部  
営業技術課

前川 泰浩

## 1 はじめに

現在、プラスチックは食品の包装や、医療機器・電化製品・自動車・エネルギー・環境などといった幅広い分野において活用されており、これらのプラスチック材料（以下、樹脂）の多くは押出機によって製造されている。当社が製造販売する完全噛合い型同方向回転二軸混練押出機 TEM シリーズ（以下、二軸混練押出機）は、主にコンパウンド（複合樹脂ペレット造粒）や反応押出、シート・フィルム成形などに用いられている。

二軸混練押出機は、パレル内部で回転する2本のスクリュによるせん断作用とパレルヒータからの伝熱により、樹脂を熔融可塑性・混練・押出する機能を有している。Fig. 1 に示すように、パレルとスクリュは用途に応じて構成が変更できるようセグメント式となっている。また、スクリュ回転速度やパレル温度、投入する樹脂の量などの運転条件は調整可能な範囲が広く、使用者がプロセスの許容範囲内で自由に設定できる。これらにより、樹脂それぞれの特性に合わせた運転が可能となるため、プラスチック業界の幅広いニーズに応えることができる。

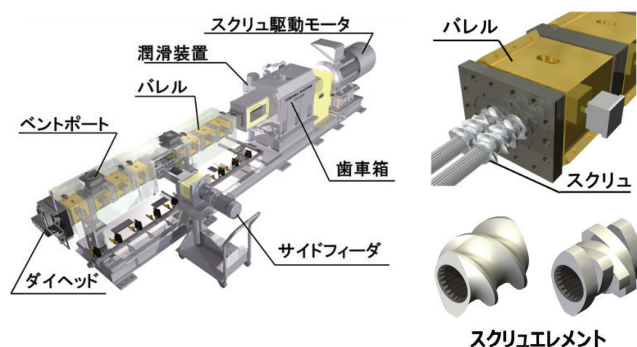


Fig. 1 同方向回転二軸混練押出機(左) パレルとスクリュ(右)

## 2 背景

当社は複数の二軸混練押出機を所有しており、お客様より依頼を受けた場合や検証が必要な場合に成形テストを実施している。取り扱う樹脂は成形プロセスによってさまざまであるため、都度、パレル・スクリュ構成の検討を行い、要求に沿った最適な運転条件を模索している。特に、スクリュ構成についてはセグメント式が故に無限に近い組合せとなるため、各成形プロセスに対し最適な構成を見出すことは非常に難しい。

これまでは、要求品質を満足するためトライ＆エラーを繰り返すテスト対応をしてきたが、近年はお客様の負担を低減するために、テスト回数の最小化・テスト原料の使用量削減などが求められている。限られた時間と原料の中で効率的に成形プロセスを最適化できるシステムの確立が急務となっている。

## 3 二軸混練押出機の成形テスト

テストの計画段階では、使用する樹脂の形態や特性と、テストの目的を鑑みてスクリュの構成を選定する。この時の構成は当社が積み重ねてきたデータベースを活用することもあれば、テストの担当者が一から構成を検討する場合もある。代表的なスクリュエレメントの特徴を Table 1 に示す。

Table 1 スクリューエレメントの特徴

形状					
形状	Screw-R 右捻れ	Screw-L 左捻れ	Disk-R 右捻れ	Disk-N 捻れ無	Disk-L 左捻れ
搬送能力	前進	逆戻	前進	搬送能力無	逆戻
充填率	最低	最高	低	高	高
滞留時間	最短	最長	短	長	長
せん断作用	Screw及びDiskの組み合わせにより大きく変化する				



スクリュエメントの形状と機能は多種多様であるが、大別として、樹脂を搬送するフルフライトスクリュ（以下、SC）と、混練するニーディングディスク（以下、KD）の2種類に分類できる。成形運転中の押出機内部はブラックボックスが故に、内部を通過する樹脂の状態を把握することが難しい。テスト担当者は、押出機内部で起こる樹脂の熔融可塑化・混練・押出までの変化をイメージしてスクリュ構成に落とし込む。スクリュ構成に対応したバレル構成を立案し、必要な付属機器を配置することで二軸混練押出機のテスト構成を決定する。さらに、成形テストの際は目の前で起こる現象を観察し、安定した連続運転が可能になるよう運転条件を調整する必要がある。

これら一連の作業は、テスト担当者の技能・経験・勘によって成り立つ部分が非常に多く、属人的になり易い。これらは成形プロセスの最適化を進める上での阻害要因となっており、長年の課題でもある。

## 4 DXに向けた取り組み

前述のとおり、これまでは二軸混練押出機を有効活用して製品の要求品質を満足させるために多くの時間と経験を必要としてきたが、当社では二軸混練押出機のDXに向けた取り組みとして、成形運転中のセンシング技術向上に努めている。直近の成果としては、押出機内部の圧力・経時変化を測定可能なアナライザシステムによる樹脂圧力分布の測定や、樹脂がせん断変形を受けた際に発生する固体のひずみエネルギー由来の弾性波 (Acoustic emission、以下 AE) を AE センサで検出することで、押出機内部の挙動を把握することが可能となった。次章にて、アナライザシステムと AE センサによるセンシング技術の概要を解説する。

## 5 二軸混練押出機のセンシング技術

### 5.1 | アナライザシステム

当社のアナライザシステムは、二軸混練押出機のパレルに圧力センサを取り付けて押出機内部の圧力を測定し、ファイバセンサでスクリュの回転周期及び角度を検出している。各センサはアンプを経由して PCI ボードへとデータを送るように構成されている。

Fig. 2 にアナライザシステムと表示画面を示す。圧力センサ・ファイバセンサから得られたそれぞれのデータを同期させて分析することで、Fig. 3 のようにスクリュ回転方向に発生する圧力の経時変化を一回転ごとに確認することができる。さらに、

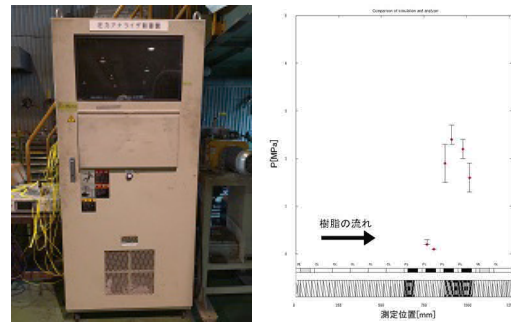


Fig. 2 アナライザシステム(左) 樹脂流れ方向 圧力分布表示画面(右)

複数のバレルに圧力センサを取り付けておくことで、樹脂の流れ方向における圧力分布をリアルタイムで確認できる。<sup>1)</sup>

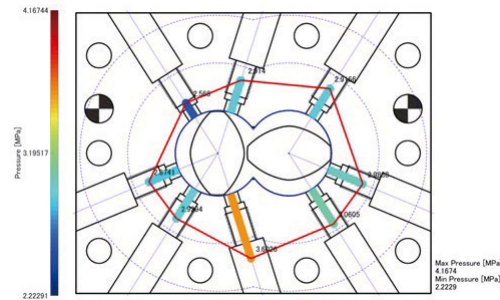


Fig. 3 回転方向における圧力の極座標グラフ<sup>1)</sup>

### 5.2 | AEセンサによるセンシング技術

二軸混練押出機に AE センサを取り付けることで成形運転中の AE 信号を連続的に計測し、押出機内部の状態を確認する手法を産学共同研究によって確立した。ペレット状の樹脂が KD によってせん断変形をうけた際の弾性波を検出することにより、従来は困難であった熔融可塑化部分の状態を把握することが可能となった。さらに、成形運転中の AE 信号をリアルタイムで FFT 解析し、該当周波数帯のみの信号強度を蓄積するシステムを構築したことで、二軸混練押出機のより高度な状態監視が可能となった。<sup>2)</sup>

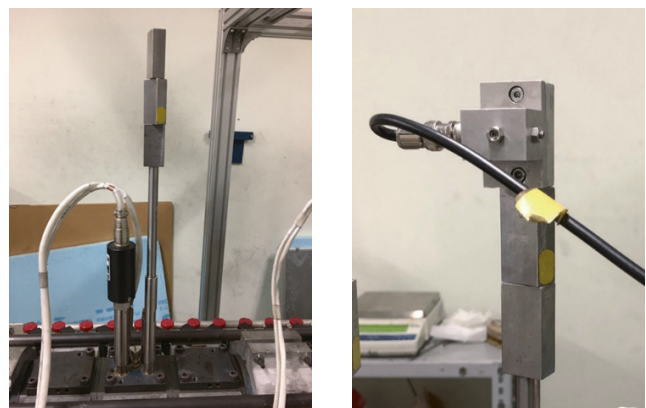


Fig. 4 バレルに AE センサを取付けた状態

また、AE センサを活用した予知保全にも取り組んでいる。二軸混練押出機の重要な構成ユニットに、歯車箱というモータからの動力を同方向に分配する特殊減速機がある。歯車箱の突発的な故障は復旧までに多額の費用と時間を要するため、お客様の生産計画に打撃を与え大きな損失となってしまう。従来、歯車箱の故障診断はお客様の日常点検や当社サービス部の定期点検に頼っていたが、歯車箱内部の歯車部品や軸受の損傷など、回転機器の故障を正確に診断するためには成形運転を停止し、歯車箱を分解して目視で確認しなければならなかった。

当社サービス部が独自に開発した歯車箱故障診断手法は、当社スタッフがお客様の生産現場へ赴き、成形運転中の歯車箱に直接 AE センサを当てて歯車箱内部から発生する AE 信号を測定・分析することで、歯車や軸受の損傷・摩耗を早期に検知することができる。これにより、成形運転を停止することなく歯車箱の予知保全が可能となり、突発的な故障の防止や顧客の計画的な設備保全に貢献している。

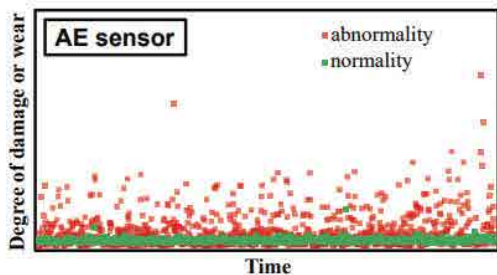


Fig. 5 歯車箱故障診断 正常時と故障時

## 6 検証

### 6.1 | 運転条件について

二軸混練押出機は押出質量（以下、Q）と、スクリュ回転速度（以下、Ns）を任意に設定可能である。Q と Ns の 2 つのパラメータを変更することで、押出機内部の樹脂に対する混練強度を調整できる。Fig. 6 にスクリュ回転速度と押出質量による混練強度の関係を示す。

一般的に、スクリュ 1 回転あたりの押出質量（以下、Q/Ns）が一定であれば、押出された樹脂の物性は同等と考えられる。Q が一定で Ns を変更する場合、Ns を増加させると混練強度は向上し、Ns を減少させれば混練強度が低下する傾向がある。

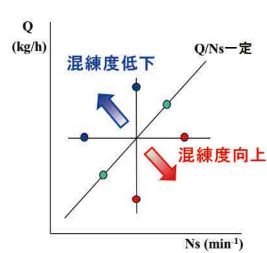


Fig. 6 混練強度関係図

Table 2 運転条件

Ns [min <sup>-1</sup> ]	Q [kg/h]	Q/Ns
559	80	0.143
650	80	0.123
777	80	0.103

### 6.2 | 検証テスト

当社の TEM-26SX を使用して、アナライザシステムと AE センシング技術の検証テストを実施した。検証テストの運転条件を Table 2 に示す。Q 一定で Ns を変更した際の樹脂流れ方向の内部圧力分布測定と、押出機の状態監視を行った。樹脂は ABS (テクノ UMG 株式会社製、TECHNO ABS 130) を使用した。バレルは 12 ブロック (L/D=48.5) の構成とし、圧力センサは No.9、No.10 バレルに 4 ヶ所取り付け、AE センサは No.7 バレルに取り付けた。(Fig. 7)

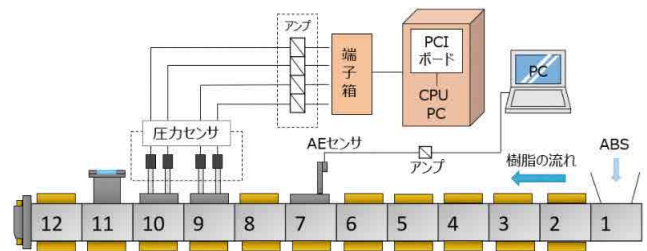


Fig. 7 検証テスト機械構成

スクリュ構成を Fig. 8 に示す。第 1 混練部に AE センサを取付け、第 2 混練部にアナライザを取付けた。

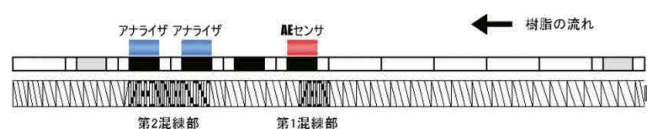


Fig. 8 検証テストスクリュ構成

### 6.3 | 圧力分布測定結果

スクリュ先端からの距離と樹脂圧力の関係を Fig. 9 に示す。Q=80kg/h 一定で、Ns を上げると押出機内部の樹脂圧力は全体的に下がる傾向が見られる。第 2 混練部入口にあたる④の位置において、Ns=559min<sup>-1</sup>では樹脂圧力 1.90MPa であったのに対し、Ns=777min<sup>-1</sup>では 0.70MPa と約 63% 減少した。また、Ns=559min<sup>-1</sup>では③の位置に圧力のピークがあるが、Ns=777min<sup>-1</sup>では②の位置がピークとなった。これらのことから、同一のスクリュ構成においても Q 一定で Ns を変更すると、混練部の KD それぞれの位置において樹脂の充満状態に変

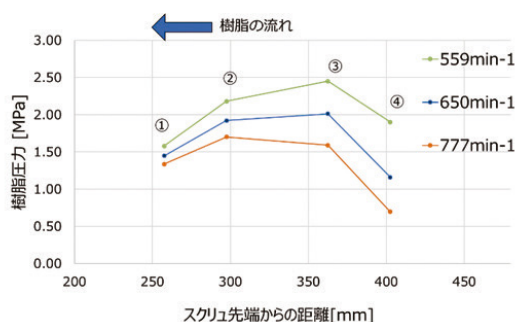


Fig. 9 押出機内部の圧力分布

化が発生すると言える。この変化を利用することで、対象条件下における混練部のKDが意図した効果を十分に発揮できているか判断しながら、運転条件を調整することが可能である。

## 6.4 | 状態監視結果

運転条件を変更した際のAE信号グラフをFig. 10に示す。このグラフは左側の $Ns=559\text{min}^{-1}$ 定常運転状態から $Ns=650\text{min}^{-1}$ へ段階的に変更する際の挙動を移動平均線で経時的に表している。グラフからは、 $Ns$ が増加するにつれて信号強度が大きくなり、それに伴い移動平均線が増加していく。 $Ns=650\text{min}^{-1}$ に達すると徐々に移動平均線は横ばいになっていく様子が確認できる。

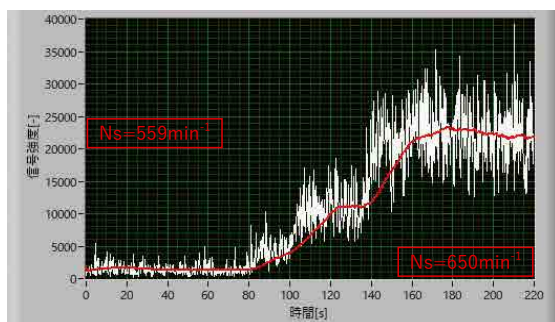


Fig. 10 条件変更時のAE信号

なお、このグラフもPC上にリアルタイム表示が可能である。例えば、成形テストで運転条件を複数設定し、連続的に変更しながらそれぞれの条件で樹脂サンプルを採取しようとする場合、定常運転に入ったことをリアルタイムで確認できるので、サンプル採取のタイミングを正確に判断することが可能となる。

## 7 おわりに

二軸混練押出機のアナライザシステムとAEセンシング技術によって得られるデータの活用により、従来は困難であった押出機内部の状況が予測できるようになった。今までは押出成形で得られた樹脂サンプルの物性が重要視され評価に使用してきたが、今後は成形運転中の押出機内部の充満状態や挙動、成形プロセスの適切さなども考慮した総合的な評価を行うことで、より効率的な検討が進められる。

そのためにも、ブラックボックスであった押出機内部の状況を客観的に把握できるようになったことは、二軸混練押出機のDXに向けた取り組みにとって大きな一歩と言える。今後も、作り手であり使い手でもある我々が蓄積された膨大なデータと比較検証を重ねることで、押出成形に関わる人々にとってユーザーフレンドリーな二軸混練押出機関連技術を創り出し、社会に貢献していく所存である。

### 参考文献

- 1) 杉山武雅:二軸混練押出機用アナライザの開発 P7,P8,P18
- 2) 尾原正俊:二軸押出機の流動に関する研究 P3,P5
- 3) Masatoshi Ohara, Shin-ichiro Tanifuji, Yuya Sasai, Takemasa Sugiyama, Sho Umemoto, Jun-ichi Murata, Isao Tsujimura, Shin-ichi Kihara, Kentaro Taki, Resin distribution along axial and circumferential directions of self-wiping co-rotating parallel twin-screw extruder. *AIChE Journal*, 2020.66(11): p. e17018.
- 4) Masatoshi Ohara, Yuya Sasai, Sho Umemoto, Yuya Obata, Takemasa Sugiyama, Shin-ichiro Tanifuji, Shin-ichi Kihara, Kentaro Taki, Experimental and Numerical Simulation Study of Devolatilization in a Self-Wiping Corotating Parallel Twin-Screw Extruder. *Polymers*, 2020. 12(11): p. 2728.
- 5) Kentaro Taki, Takemasa Sugiyama, Masatoshi Ohara, Sho Umemoto, Shin-ichiro Tanifuji, Jun-ichi Murata, Isao Tsujimura, Shin-ichi Kihara, Online Monitoring of the Degree of Fill in a Rotating Full-Flight Screw of a Corotating Twin-Screw Extruder. *AIChE Journal*, 2019. 65(1): p. 326-333.

- 6) Masatoshi Ohara, Yuya Obata, Shin-ichiro Tanifuji, Kentaro Taki, Experimental and numerical study of glass fiber attrition in molten polypropylene in D26 mm twin screw extruder based on the Hele-Shaw flow model, in 35th Annual Meeting of Polymer Processing Society. 2019, Polymer Processing Society: Izumil, Turkey.
- 7) Yuya Obata, Masatoshi Ohara, Shin-ichiro Tanifuji, Kentaro Taki, Experimental evaluation of fiber attrition behavior in twin screw extruder and prediction based on Hele-Shaw simulation. in Asian Coating Workshop 2019. 2019. Soul Natinal University.
- 8) Sho Umemoto, Yuya Obata, Masatoshi Ohara, Shin-ichiro Tanifuji, Kentaro Taki, Experimental evaluation of devolatilization behavior in twin screw extruder and prediction based on Hele-Shaw simulation. in 13TH KOREA-JAPAN SYMPOSIUM ON MATERIALS AND INTERFACES,. 2018. Busan, Korea.
- 9) Masatoshi Ohara, Takemasa Sugiyama, Sho Umemoto, Shin-ichiro Tanifuji, Kentaro Taki, EXPERIMENTAL VALIDATION OF FILL RATIO, RESIN PRESSURE, RESIN TEMPERATURE OBTAINED FROM THE 2.5D HELE-SHAW MODEL IN FLOW OF COROTATING TWIN SCREW EXTRUDER, in ANTEC 2018. 2018: Orlando.
- 10) Masatoshi Ohara, Sho Umemoto, Yuya Obata, Shin-ichiro Tanifuji, Kentaro Taki, EXPERIMENTAL VALIDATION OF NUMERICAL SIMULATIONS OF DEVOLATILIZATION IN A CO-ROTATING TWIN-SCREW EXTRUDER, in ANTEC 2019. 2019: Detroit.
- 11) 尾原正俊, 瀧健太郎, 特願 2019-123414, AE センサを用いた二軸押出機混練部における未熔融樹脂の検出, 2019
- 12) 瀧健太郎, 梅本翔, 小幡祐也, 尾原正俊, 谷藤真一郎, 二軸押出機における脱揮挙動の定量評価とシミュレーション, in 化学工学会第 84 年会, 材料界面部会, Editor. 2019: 芝浦工大豊洲キャンパス . p. H113.
- 13) 小幡祐也, 尾原正俊, 梅本翔, 谷藤真一郎, 瀧健太郎, 二軸押出機における繊維破断に樹脂の粘性が及ぼす影響, in 第 30 回プラスチック成形加工学会, 一般セッション「押出成形・混練」, Editor. 2019: タワーホール船堀 . p. F-204.
- 14) 尾原正俊, 杉山武雅, 谷藤真一郎, 瀧健太郎, Hele-Shaw 流れを仮定した 2.5D 解析法の  $\phi$  26mm 二軸押出機での検証, in 第 29 回プラスチック成形加工学会年次大会, 一般セッション「押出成形・混練・CAE」, Editor. 2018: タワーホール船堀 . p.G-201, 291-292.
- 15) 梅本翔, 小幡祐也, 尾原正俊, 谷藤真一郎, 瀧健太郎, 二軸押出機内における脱揮挙動の実験的評価と Hele-Shaw シミュレーションに基づく予測, in 成形加工シンポジウム'18, 一般セッション「押出・混練」, Editor. 2018: 浜松 . p. C-210, P-97.
- 16) 瀧健太郎, 尾原正俊, 会議・見本市だより 国際プラスチックフェア 2017, in 成形加工 . 2018, プラスチック成形加工学会 . p.160-161.
- 17) 小幡祐也, 尾原正俊, 梅本翔, 谷藤真一郎, 瀧健太郎, 二軸押出機内における繊維破断挙動の実験的評価と Hele-Shaw シミュレーションに基づく予測, in 成形加工シンポジウム'18, 一般セッション「押出・混練」, Editor. 2018: 浜松 . p. C-209, P-52.

# グリース潤滑方式高速スピンドルの開発

近年の自動車のEV化加速により、金型製品の軽量化を促進するため金型加工の高精度化と加工面質向上が要求されている。また、金型製作のリードタイムは常に10～20%低減が求められ、加工時間の短縮、後工程(磨き)時間の短縮が課題となっている。このような背景の中で、主軸、切削送り速度の高速化が求められている。一方、環境対応・省エネルギー、メンテナンスフリーであることも世の中の要求として高まっている。その要求に応えるため、潤滑油供給のためのエア消費がなく、大気中への油の飛散もない、エコの観点で他潤滑方式に優っているグリース潤滑方式を採用し、グリース潤滑方式としては、最高レベルのDmn値の高速スピンドルを開発した。



工作機械カンパニー  
工作機械技術部  
開発課

松崎 敬彦

## 1 はじめに

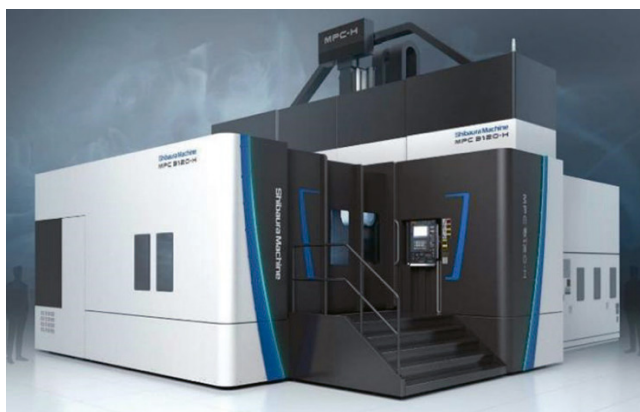


Fig. 1 MPC-H外観図

金型対応門形マシニングセンタ MPC-H(Fig. 1)シリーズの開発にあたり、金型の面質向上及び加工時間の短縮が、達成すべき目標となる。面質向上は、機械本体各部の見直し、制御的な調整作業の見直しにより実現する。また、加工時間の短縮を実現するために、高速スピンドルを搭載することが必要不可欠となってくる。高速スピンドルの開発を始めるにあたり、下記を必須項目とした。

1. アタッチメント交換方式対応
2. 仕上げ軽切削対応、最大回転速度 20,000min<sup>-1</sup>
3. 環境対応・省エネルギーに寄与し、更にメンテナンスフリーであること。
4. 主軸旋回に対応できること。

## 2 高速スピンドルの構造について

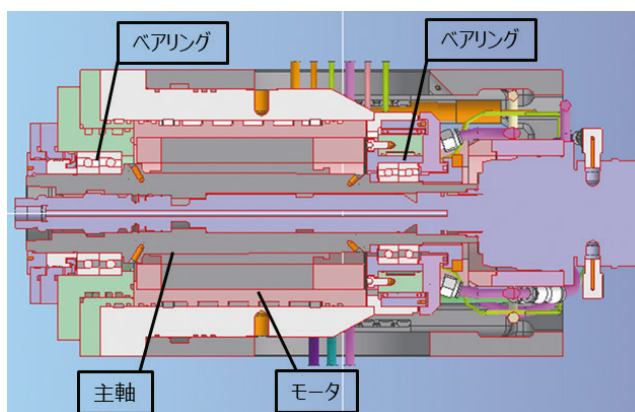


Fig. 2 スピンドル構造

今回開発した高速スピンドルは、旋回型アタッチメントにも搭載するために、出来るだけ小型化する必要がある。その為、Fig. 2のような工具脱着部を内蔵した主軸にモータを焼き嵌めし、モータで直接主軸を駆動するビルトイン駆動方式を採用する。また、計画を進めるにあたり、下記項目を重視し検討した。

1. 主軸テーパ方式
2. ベアリングの配置及び潤滑方式
3. ベアリングの予圧
4. ベアリング温度の管理

これらについて述べる。

## 2.1 | 主軸テーパ方式

一般的に、BT方式とHSK方式の採用実績が多い。今回は、主軸ユニット全体を短くでき、高速回転に適しているHSK方式を採用した。

## 2.2 | ベアリングの配置及び潤滑方式

主軸ユニットをコンパクトにするため、ベアリング組み合わせ方式は、ベアリングでモータの前後を支持するDT+DT方式とした。

次にベアリングの潤滑方法であるが、2種類の選択肢の中から選定することとした。その方法を説明する。

### 2.2.1 | オイルエア潤滑

軸受側面から給油用ノズルを用いて軸受内部に高圧エア+微細な油粒を供給する方法である。当社でもアルミ加工機などの $30,000\text{min}^{-1}$ スピンドルで採用し、実績のある方式である。連続給油された潤滑油のスムーズな排油が、潤滑時の安定性を実現するための重要なポイントとなってくるが、当社での採用実績は、アタッチメント交換のない機械に限っての採用である。そこで、今回の高速スピンドルに採用するにあたり、以下が懸念材料として考えられる。

- ①アタッチメントを切り離した時に、オイルのラインへエアが混入し、エアとミキシングしたときに正しいオイルミストの連続給油ができない。  
\*当社実績のあるオイルエア用給油装置の初期調整においては、“潤滑油に空気が含まなくなるまで排気運転を行ってください”とある。
- ②旋回式のヘッドに搭載するため、主軸姿勢が変化したときの排油の問題。排油が上手くいかないと、ベアリング内に潤滑油が滞留し、潤滑過多により、ベアリングの焼損に繋がる。
- ③オイルの飛散により工場環境(大気)汚染につながる。

### 2.2.2 | グリース潤滑

ベアリングの空間部に適切な量のグリースを充填する方式の潤滑であり、最も一般的な潤滑方法である。グリースから漏れ出たオイルが転送面に付着し、転動体と軌道面間の潤滑を行う。環境面でも前述のオイルエア潤滑のようにエアを消費することなく、大気への油の放出もない点が利点だが、複数社に調査した結果、グリース潤滑で $20,000\text{min}^{-1}$ (Dmn180万)を実現した実績に乏しい点が懸念材料である。

どちらにも懸念材料があるが、オイルエア潤滑方式は、潤滑

に対する懸念点および大気中への油の飛散等、環境負荷の問題があるため、回転速度としては最高レベルとなる難易度があるが、グリース潤滑方式を採用する。

## 2.3 | ベアリングの予圧

ベアリングには、主に剛性をあげるために予圧を与える。予圧の方式として、定位置予圧と定圧予圧があるが、高速運転時のベアリング予圧増加が無く、ベアリング発熱を抑えることが出来る定圧予圧方式を採用する。

スピンドルを運転することによりモータ温度が上昇し、主軸に伝わることにより主軸は伸びる。定圧予圧方式は、この伸びによりベアリングに過大な力が加わらないようにする構造である。

①主軸の伸びに追従して、移動がスムーズであること。

②主軸系の剛性を落とさないために接触式とすること。

が重要である。これら2つを実現するために、本開発においては、予圧荷重、スライド構造及びスライド部の嵌合、又はそれぞれの組合せなどを検討、試験した。本研究では、2種類のスライド構造を試験し、それぞれの利点欠点が見えてきたのでここで述べる。

### 2.3.1 | 予圧構造 1

Fig. 3は、予圧荷重用のバネがスライド機構の外側にある。予圧荷重は、バネ長等の寸法管理により設定する。しかしながら、バネの個体差などにより想定の前圧荷重にならない場合がある。

本方式の利点は、調整後でも、部品を2点外すだけで予圧荷重が変更可能な点であり、再調整が容易であることと、様々な予圧荷重の試験が行いやすいことである。欠点としては、スライド部からバネが遠いため、スライド部が移動しづらいことがあり、移動部を適正にスライドさせるため、組付け時の必要箇所の寸法管理が必要となる。

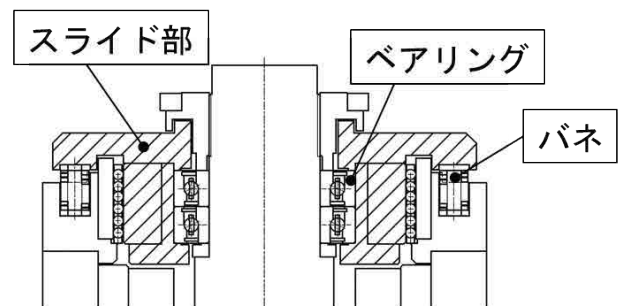


Fig. 3 定圧予圧構造 1

### 2.3.2 | 予圧構造2

Fig. 4 は、移動部の真下にバネがある。そのため、移動部の動きは良い。また、今回の開発においては、過去の当社機実績及び資料により構成要素の配置比率を検討し、配置を決定した。しかしながら、予圧荷重が狙った数値にならなかった場合の再調整が困難であるという欠点がある。

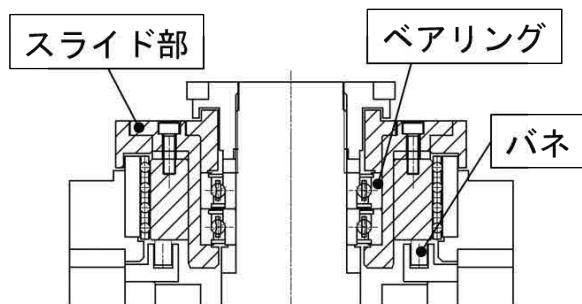


Fig. 4 定圧予圧構造2

本開発では、それぞれの方式を試験した。予圧荷重の検証を行う際は、Fig. 3 の方式で様々な条件を把握した上で、Fig. 4 の方式を最終構造としている。

### 2.4 | ベアリング温度の管理

ベアリングの冷却は、外筒冷却を採用し、ベアリング外輪側を冷却している。内輪側は、主轴の温度上昇に伴う温度上昇があるため、積極的にスピンドル内部のエア循環を行い、熱がこもらなくするとともに、ロータ温度の上昇を緩和させている。また、ベアリング内外輪温度差を極力減らすために、冷却水の経路を最適となるように検討している。それらに加えて、ベアリングに与える予圧の調整により、長時間にわたる運転でも安定した回転を保てるようにしている。

また、ベアリング温度のセンシングを行い、常に状態監視を行っている。

## 3 | 試験結果

Fig. 5 に示す水差し形状のワークを用いた加工試験を実施した。スナウト 220 (主轴最高回転速度  $8,000\text{min}^{-1}$ 、重切削も対応可) 及び高速スナウト (主轴最高回転速度  $20,000\text{min}^{-1}$ 、仕上げ軽切削対応) で加工比較した。テスト時の加工条件を、Table 1 に示す。

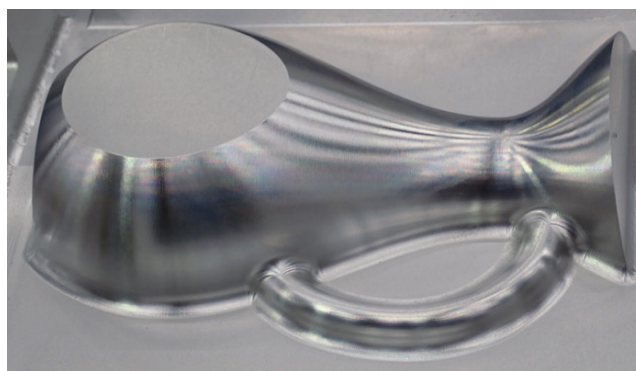


Fig. 5 形状加工ワーク

Table 1 切削条件

	主轴回転速度 ( $\text{min}^{-1}$ )	送り速度 ( $\text{mm}/\text{min}$ )	切削時間 ( $\text{min}$ )
スナウト 220	3,920	1,090	153
高速スナウト	15,000	4,170	66

目視による加工面検査では、双方とも同等の加工面となっている。本稿で述べた各調整部が機能し、仕上げ用として開発した高速スピンドルとして、十分な能力があることを確認できた。

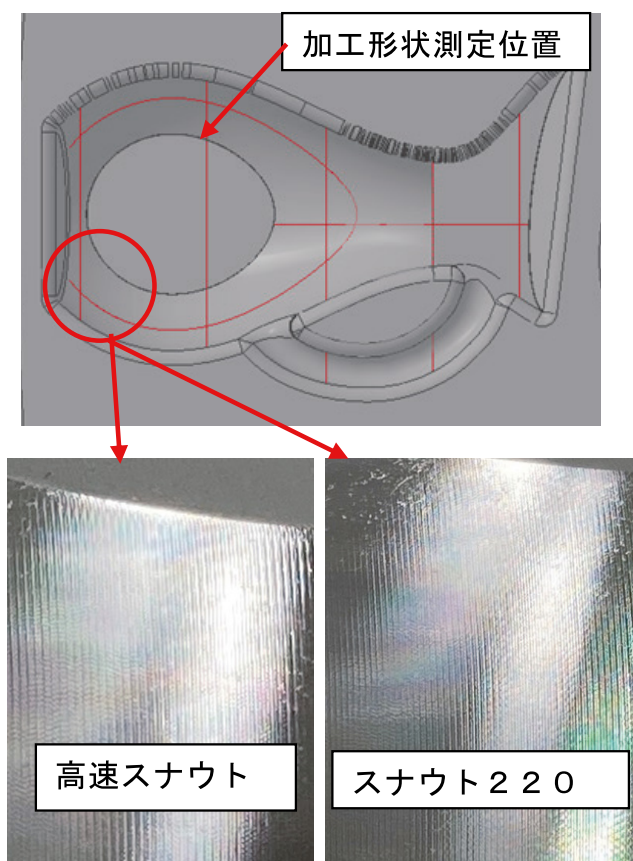


Fig. 6 加工面写真

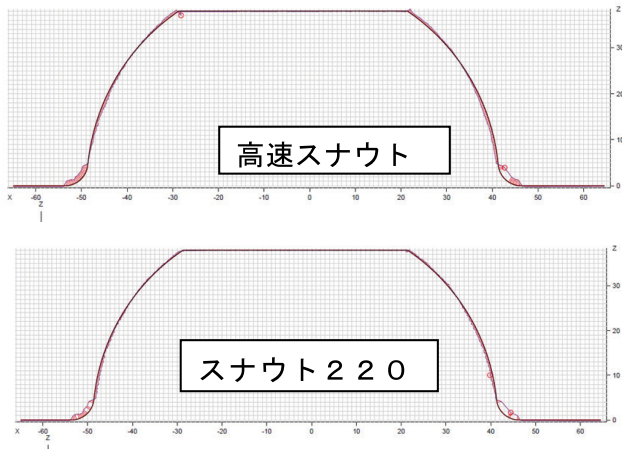


Fig. 7 加工形状測定結果

加工形状精度もモデル形状に対して、数 $\mu\text{m}$ の誤差に納まっている (Fig. 7)。

切削時間は 57% 短縮でき、これからも、高効率化への寄与が期待できる結果となった (Table 1)。

## 4 まとめ

グリース潤滑方式としては最高レベルの Dmn 値の高速スピンドルを開発した。加工テストの結果では、当初の狙い通り、加工品質が良好なまま、加工時間を 57% 短縮できた (当社テストワーク比較)。これからも様々なワークをテスト加工し、知見を集めていく。

エアを必要としない潤滑方式を採用したことにより、他社のミスト潤滑/オイルエア潤滑主軸と比較し、500NL/min のエア消費量を削減、年間 (機械平均稼働時間にて) 3,600kg の CO<sub>2</sub> 削減が見込まれる。また、オイルの飛散もないため、環境負荷低減にも寄与できると考えられる。

また、オイルエア用オイルの定期的なポンプへの供給作業が必要なくなり、メンテナンスフリーも実現できた。

## コラム

### VR ゲームでの体験



工作機械カンパニー  
工作機械技術部  
大型設計課

#### 土屋 匠

最近の私は休日になると VR ゴーグルを付けゲームを起動し、仮想空間上で友人たちと雑談やボードゲームをして過ごしています。

私がやっているのは無数に存在するワールドに行き、そこで様々なゲームをしたり、景色を見ながら雑談するといった内容のゲームです。このゲームでは自分の容姿に好きな 3D モデルを設定できます。そのためゲーム内には巨大なロボットやドラゴンがいたり、かわいい女の子が男の声ではなしかけてくることが多々あります。

ユーザーがワールドや 3D モデルをゲーム内にアップロードするには Unity® (Unity IPR ApS の登録商標) というゲームエンジンを使用しなければなりません。開発者向けのツールを使わなければいけないためゲームを楽しむための敷居が非常に高いです。しかし、驚くことにユーザー

の大半が Unity® を使用し好みのモデルをアップロードしています。私も自分好みの 3D モデルをアップロードして使用しています。

ゲーム内の会話はモデルが中心になることが多く、鏡の前に立ち自分と相手のモデルを眺めながら雑談を楽しんでいます。お互いにモデルを褒めあう文化のようなものがあります。モデルに詳しい人も多いためアップロードやエラーに関する問題は簡単に解決することが多いです。そのためこのゲームにはハードルの高く感じる作業もモチベーションを落とさずに続けられる環境が整っていると感じました。私も始めた当初はモデルのアップロードだけでも手一杯な状態でしたが、最近ではモデルに新たな機能を追加してみたり、3D モデルの自作に挑戦しています。

仕事のそれとは全く違ったまた新しい技術体験ともなり、とても楽しいので興味のある方は休日など、時間のある場合にはぜひ一度試してみるのはいかがでしょうか。私がプレイしているものは VRSNS (Virtual Reality Social Networking Service) と呼ばれるジャンルになります。



# 超硬合金の直彫り切削による消費エネルギーの低減

温室効果ガス排出の問題に伴い、各分野に省エネルギー化が求められている。製造業では、製品製作にかかる消費電力の低減が省エネルギー化につながる。一方、超硬合金は鍛造用プレス金型材として優れた特性を持つが、高い機械的強度により切削加工が難しく、従来、放電加工により金型形状が製作されてきた。しかし、放電加工は加工除去量が少なく、反転形状の電極製作を要するため、全体の製作時間は非常に長く、消費電力も大きい。近年工具の開発が進み、超硬合金の直彫り切削が可能となった。本報告では切削加工における歯車形状超硬合金製の製作時間を放電加工と比較した事例について紹介する。



工作機械カンパニー  
工作機械技術部  
開発課

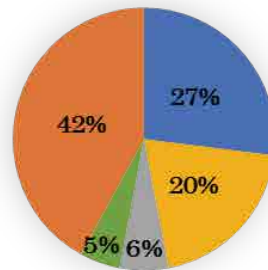
牧田 丈靖

## 1 はじめに

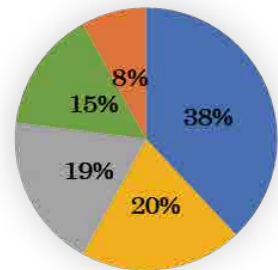
昨今、世界的に温室効果ガスの排出が問題となっており、日本でも 2050 年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにするカーボンニュートラルを目指すことが 2020 年に政府より宣言された。これに伴い、産業分野においても省エネルギー化が求められている。

Fig. 1 に 2019 年度の政府発表による日本における燃料の燃焼で発生・排出される CO<sub>2</sub> 排出量の部門別内訳を示す。これより、日本の CO<sub>2</sub> 排出量は、発電所などのエネルギー転換部門が最大で 42% である。これには、発電所などで生成した他部門に供給するための電気や熱を生成する際に排出される CO<sub>2</sub> も含まれる。ここで、発電などにより排出される CO<sub>2</sub> を生産側でなく、消費側で排出したものととして再計算すると、CO<sub>2</sub> 排出量は産業部門が 38% で最大となる。つまり、産業部門では生産工程で発生する CO<sub>2</sub> に加え、増加した 11% に相当する多くの電力や熱を消費していることがわかる。CO<sub>2</sub> 排出量は全体で 10 億 2900 万トンであり、産業部門で消費される電気や熱だけで年間 1 億トン以上排出されている。<sup>1)</sup> また様々な世界情勢の影響を受けて、日本は電力不足の危機に晒されており、産業部門に該当する製造業においても消費エネルギーの低減、特に電力の低減が求められている。製造業では、製品の製作時に使用する空調や機械によって消費される電力が主であり、各設備が一製品を製作する際に消費する電力が小さい程、工場全体の省エネルギー化につながる。

①電気・熱配分前\*1



②電気・熱配分後\*2



- 産業部門
- 業務その他部門
- エネルギー転換部門
- 運輸部門
- 家庭部門

- \*1 発電及び熱発生に伴うCO<sub>2</sub>排出を生産者側の排出量として計上
- \*2 発電及び熱発生に伴うCO<sub>2</sub>排出を各最終消費部門に配分して計上

Fig. 1 日本における CO<sub>2</sub> 排出量の部門別内訳

一方、超硬合金は高い耐摩耗性や耐熱性といった優れた特性を持ち、歯車などの鍛造用プレス金型の材料として期待されている。しかし、超硬合金は硬脆性材料に分類され、その高い機械的強度によって切削加工が難しい難削材でもある。そのため、これまでは主に電気を通す素材であれば硬さに関係なく加工できる放電加工により金型の形状が製作されてきた。しかし放電加工は、放電 1 回の加工除去量が少なく、加工に必要な反転形状の電極を製作する必要があるため、全体を通した製作時間は非常に長い。したがって、超硬合金の生産効率の改善が課題となっている。これに対して近年では工具の開発が進み、超硬合金を直彫り切削することが可能となった。

切削加工では、反転形状の電極を製作する必要がないため、製品の製作にかかる時間が短くできる。全体を通した製品の製作時間が短くなれば、生産効率が改善されるため、工場全体で

の省エネルギー化につながる。本報告では放電および切削加工について歯車形状における超硬金型の製作時間を比較した事例について紹介する。

## 2 超硬金型の製造方法

### 2.1 | 従来の超硬金型の製造工程

従来の超硬金型の製造工程を Fig. 2 に示す。まず、製造する超硬金型が必要な機械的強度を持つように調整されたタングステンカーバイドやコバルトなどの原料を配合・混合した粉末を圧粉成形し、低温で予備焼結を行い、ある程度の硬度になるまで焼き固める。次に形状一次加工を行い、大まかな形状に加工し、製品に必要な穴を加工する。焼結して必要な機械的強度を持った超硬合金になってからは、研削加工で基準面をつくる。ここで、放電加工を行うための反転形状の電極を製作し、放電加工により超硬金型の形状二次加工を行い、研削加工により加工面を仕上げる。<sup>2,3)</sup> この時、放電加工により表層部に発生する溶融再凝固層やマイクロクラックなどの変質層を研削加工で除去する必要がある。

本報告では、放電加工を行う形状二次加工を切削加工に置き換えて比較を行う。それに伴って、その前工程で反転形状の電極を製作する切削加工の工程が不必要となる。そのため、形状二次加工を切削加工で行う際は、電極製作にかかっていた機械稼働時間による電力量を全てカットすることが可能である。

### 2.2 | 放電加工

放電加工は電気を通す素材であれば硬さに関係なく加工できるため、超硬合金や高速度工具鋼などの高い硬度を持つ材料の形状を製作するために用いられてきた。また、深くて細い溝形状など切削では困難な形状加工にも用いられる。しかし、放電加工は電気を放電し、金属を溶融させて加工するため、1回の放電で加工できる除去量が小さく加工時間が長い。またその加工方法の特性から、加工表面に変質層が発生し、面粗さの低下、亀裂などの原因となる。これらは、金型の寿命を短くしてしまうため、仕上げ加工では変質層を取り除く必要がある。変質層は数十 $\mu\text{m}$ あり、その分仕上げ加工で除去する必要があるため、次工程の仕上げ加工時間を長くする要因にもなっている。加えて、加工の際に複数個の電極を使用する場合は、必要個数の電極を製作しなければならず、その個数に応じた電極製作時間と、加工に必要な加工機と工具が別途必要になる。

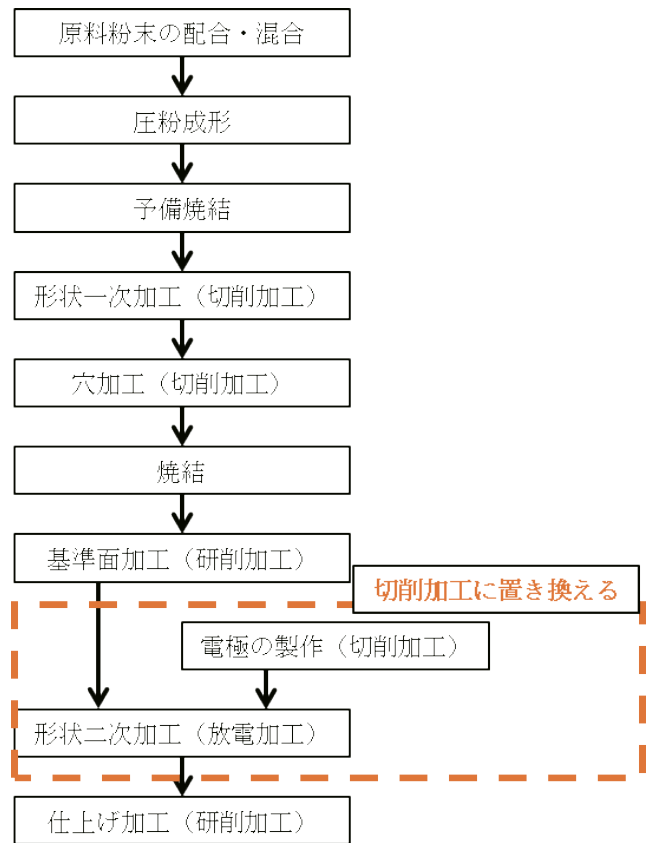


Fig. 2 超硬金型の製造工程

### 2.3 | 超硬合金の直彫り切削

前述したように、超硬合金は金型の材料として優れた特性を持つ反面、極めて切削加工が難しいとして知られていた。しかし近年では、ダイヤモンドコーティング工具や多結晶ダイヤモンド工具の開発が進み、超硬合金を容易に直彫り切削することが可能となった。このことにより、放電加工に必要な反転形状の電極を製作する必要がなく、金属を削って加工するため、加工表面に変質層が発生せず、仕上げ加工の仕上げ代を数 $\mu\text{m}$ にすることができる。これにより、形状二次加工の加工時間だけでなく、次工程の仕上げ加工の加工時間の短縮も可能である。

## 3 放電および切削における加工時間の比較

Fig. 3 に検証に用いた歯車金型の加工モデルと実加工品を示す。このような超硬金型を放電加工と切削加工によって製作する際の加工時間を富士ダイス株式会社に試算を依頼し、仕上げ代を 0.2 mm 残した形状での結果を比較した。Table 1 に歯車の諸元を示す。

放電加工における加工時間は 960 分、反転形状の電極を加工する時間は使用する 4 個で 1050 分となった。これに対して、

切削加工では加工時間 780 分となった。

消費電力の参考値として S 社のワイヤ放電加工機と当社のマシニングセンタ UVM-450D(H) を用いる。S 社のワイヤ放電加工機は総電気容量が 13 kVA である。これに対して、当社の UVM-450D(H) における実際の加工中の電気容量は 10 kVA 程度であり、付帯設備の消費電力も考慮すると、ワイヤ放電加工機とほぼ同等である。

放電加工では、電極製作と放電加工の時間の合計が 2010 分であり、切削加工の 2 倍以上の加工時間が必要である。上記よりワイヤ放電加工機とマシニングセンタの消費電力を同等とすると、消費電力は全体の加工時間に比例するため、切削加工は放電加工の 38.8 % の加工時間であることから、放電加工を切削加工に置き換えた場合、消費電力は 61.2% 低減される。よって、超硬金型の製造方法を放電加工から切削加工に置き換えることで、製造業における工場全体の生産効率の改善と、消費電力の低減の両方に貢献できると考える。

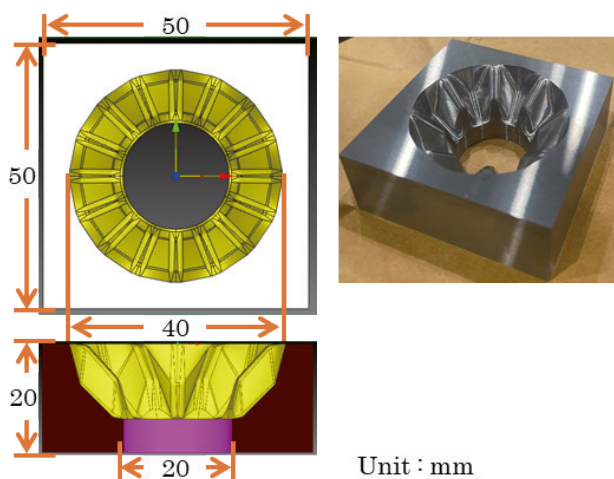


Fig. 3 歯車金型の加工モデルと実加工品

## 4 超硬金型の製造工程の集約と高精度化

### 4.1 超硬金型の仕上げ加工

前章の結果より超硬金型の製造方法を消費エネルギーの観点から見る際、放電よりも切削による金型製作の方が良好であることがわかった。しかし、前章の結果は形状二次加工についてであり、本来はこの工程の前に基準面加工、後に仕上げ加工が行われる。放電加工の場合、各工程の間にワークを取り出して、次の加工機で再段取りし加工を行わなければならない。そこで、超精密マシニングセンタ UVM を用いて基準面加工、形状二次加工、仕上げ加工を同一の機械で再段取りなく、行うことを提案する。

Table 1 歯車諸元

歯車の種類	ベベルギア
大端部直径	40 mm
小端部直径	20 mm
ピッチ円直径	30 mm
歯数	8 歯
モジュール	3.75 mm
歯先円錐角	45 deg.
歯底円錐角	45 deg.
ピッチ円錐角	45 deg.
歯先距離	13.8 mm

### 4.2 超精密マシニングセンタ UVM

近年、工業製品の高精度化が進むに伴い、歯車の 3 次元の形状精度の要求も高まってきた。この要求を実現するには高精度な加工機が必要となる。当社では、直線駆動 3 軸に高精度リニアガイドとリニアモータを採用し、10 nm の高い位置決め精度と、回転主軸に空気静圧軸受を搭載し高い回転性能を実現する超精密マシニングセンタ UVM シリーズを開発している。UVM には自社製の工具形状を高精度に測定できる「FormEye®」とその工具輪郭形状に対して加工パスを自動で 3 次元補正する工具経路ベクトル補正「VectPath」の機能を付属することが可能である。<sup>4)</sup>

Fig. 4 にこれらを用いた 3 次元形状を自動で補正するプロセスを示す。歯車のような 3 次元形状に対して、従来のマシニングセンタでは工具長と工具径の 2 点による 2 次元的な補正しか行えなかった。そのため、工具輪郭の凹凸は製品形状に転写され形状誤差となる。工具の輪郭精度は工具メーカーの努力により、1 μm 程度に向上しているが、工具摩耗や回転振れ、外乱により数 μm の形状誤差が発生する。この問題を解決するために工具 3 次元形状を補正することを考えた。従来のプロセスでは CAD/CAM により作成した加工パスを実加工し測定結果から形状の悪い部分の CAD を修正し、再度加工パスを作成していたが、この工具経路ベクトル補正機能「VectPath」は最初に生成した加工パスに工具接触角度の情報を付加し、機上で「FormEye®」により測定した工具輪郭を読み込むため、常に機械側での補正となり、摩耗による工具輪郭の変化も工具を再測定することで再補正が自動で行われる。つまり、補正の度に CAD/CAM を修正する必要がないため、補正プロセスが短縮される。この補正プロセスも全体としての作業時間を短縮するため、工場の生産性の向上につながる。このように多彩な機能を有しているため、超硬金型の切削加工を UVM が担えば、基

準面加工から仕上げ加工まで全ての工程を網羅し、さらには高精度な形状精度を実現できると考える。

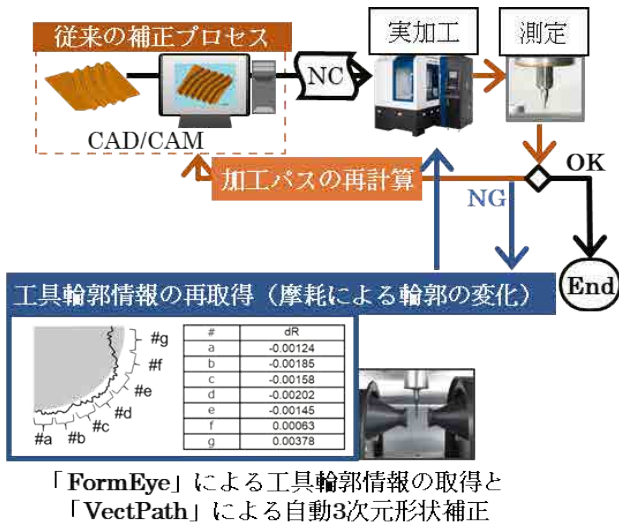


Fig. 4 UVM 自動3次元形状補正機能

## 5 おわりに

超硬金型の製造に対して、従来行われてきた放電加工を切削加工に置き換えることで加工時間を61.2%低減することができ、生産効率の改善と工場の省エネルギー化に寄与できることを示した。また、超精密マシニングセンタUVMを用いて切削加工を行うことで、基準面加工から仕上げ加工までの4工程を同じ段取りで1工程に集約することが可能である。加えて、CAD/CAMに戻らない3次元形状の自動補正プロセスにより、加工パスの再計算をせずに高精度な形状精度を実現できる、さらなる作業時間の短縮方法を提案した。

今回一例として歯車形状の超硬金型を取り上げているが、他の工業製品においても高精度化はめざましく、高精度な加工を要求される。またその中で環境問題に向き合っていかなければならない。そのため、クリーンかつ先進的な高精度加工の開発にこれからも努めていきたい。

### 参考文献

- 1) 経済産業省ホームページ、温室効果ガス排出の現状等、<https://www.env.go.jp/council/06earth/y0620-3b/mat03.pdf>、(参照:2022-7-19)
- 2) 天野啓、井上篤郎、高橋敏昭、焼入れ鋼の高精度切削加工、東芝レビュー、Vol.53、No.7、(1998)、pp.47-50
- 3) 山本桂一郎、若宮寛明、早川幸弘他、大型超硬合金金型の一貫体制製造技術の構築に関する研究、品質工学会誌、

Vol.27、No.5、(2019)、pp.35-43

4) 芝浦機械(株)ホームページ、UVMシリーズ、<https://www.shibaura-machine.co.jp/jp/product/nano/lineup/uvn/> (参照:2021-4-12)

5) 牧田丈靖、栗山邦隆、マシニングセンタにおける3次元形状補正加工の開発、2022年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集、(2022)、pp.489-490

# 制御機器開発における省エネへの取り組み

## Efforts to save energy in control equipment development

近年、世界的な SDGs への関心の高まりは、大きな潮流となり各国において資源の有効活用やカーボンフリーへの取り組みを加速している。当社の各種制御コンポーネントは制御演算あるいはアクチュエータ駆動のため電力を必要とするが、電力損失を抑えたエネルギー効率の良い製品開発や部品点数の削減などを進めてきた。本稿ではその取り組みについて紹介する。

In recent years, the growing global interest in the SDGs has become a major trend, and countries around the world are accelerating their efforts for effective use of resources and carbon-free products. Our various control components require electric power for control operations or actuator drives, and we have been developing energy-efficient products with low power loss and reducing the number of components. This paper introduces our efforts in this area.



制御機械カンパニー  
制御機械技術  
ハードウェア開発

小野 真二郎



制御機械カンパニー  
制御機械技術  
ハードウェア開発

水口 幸巳



制御機械カンパニー  
制御機械技術  
ハードウェア開発

佐藤 庄一



制御機械カンパニー  
制御機械技術  
ソフトウェア開発課

颯川 裕一

### 1 はじめに

制御機械技術部では、社内カンパニーおよび外販ユーザー向けに最適化された各種制御コンポーネント（ハードウェア、ソフトウェア、システムインテグレート）を提供することにより、お客様の商品力向上の一翼を担っている。

これまで積み重ねてきた制御技術に加え、持続可能な製造活動を維持するための重要課題として、気候変動に影響を与える温室効果ガス(CO<sub>2</sub>)排出抑制対応は急務である。

本章では、各種制御コンポーネントにおける省電力・省工数・省資源に関する取組について紹介する。

コントローラーやサーボアンプへの新世代電子デバイス（マイコン、パワーモジュールなど）の適用では、製品自体の電力損失低減のみならず、各種機能部品を高機能 IC（集積回路）パッケージに集約・部品点数削減により製造工数を削減すると共に製品重量の軽量化を図ることにより、製品ライフサイクル全体を通じた環境影響負荷低減に貢献している。

省エネをアシストするソフトウェア機能に関する取組として、機械運転時間自体を短縮する機能および機械運転時の消費電力をユーザーに明示し省エネを促す事例について紹介する。

### 2 マイコンの変更

当社コントローラーで使用しているマイコンにおいては、1997年に日立製作所より0.5 μm プロセスを用いた H8S/2144 がリリースされ、シーケンズコントローラの TC200 および TCmini TC3 シリーズのマイコンとして多くの製品に採用された。

しかし、プロセスの進歩により H8S/2144 の廃型が近づいていた 2015 年、ルネサスより 40nm プロセスを用いた RX231 がリリースされ TCmini シリーズへの採用を検討した。

処理速度、メモリ容量、通信機能等 H8S/2144 を凌駕しており、TC12 シリーズとして 2016 年より採用を開始した。

2016 年以降、TC12-10、TC12-11、TC12-12、TC12-13、TC12-01、TC12-02、TC12-0A、TC12-1D、TC12-14 へと製品展開を行ってきた。

2019 年度の H8S/2144 の出荷数は 12,576 台であった。2021 年度より全出荷数の内 4,954 台が H8S/2144 より RX231 へ切り替わった。

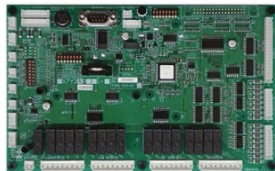


Fig. 1 TC12-01

仕様上の消費電力低減例

旧機種 TC3-01:3.35W

新機種 TC12-01:1.89W → 1.46W(44%)の低減

年間約 63MWhの消費電力量の削減

※ 18 畳用エアコン 4～5 台の通年運転に相当

@20 円 /kWh として 126 万円分。

※ TC3 から TC12 への変更は、マイコンの変更および未使用機能部品削除が主で基本機能変更はない。

### 3 ゲートアレイ(セミカスタムIC)の変更

2005 年、旧 NEC 製 CMOS-12M プロセスを採用したサーボアンプ BS-X シリーズ向けゲートアレイ (T-P0243303) を開発した。

2016 年旧 NEC 製 ASIC の廃型が始まった事をきっかけに BS-X シリーズ向け ASIC の互換品開発を検討した。2018 年より台湾メーカの CMSC により開発 (TM20242R0) を行った。

プロセスが 0.15 μm から 0.13 μm になったことや Clock gating 回路の採用により消費電力を低減することができた。

Fig. 2 に示すように、電力効率が上がり温度上昇の抑制効果も確認出来た。

結果:シミュレーション上の消費電力

※最大動作周波数において

T-P0243303:685mW

TM20242R0:240mW

→ 445mW(65%)の低減

出荷実績:

T-P0243303:2018 年度 67,941 台

TM20242R0:2022 年度 7,830 台

(置き換わり 4～6 月)

年間約 125MWh の消費電力量の削減

※ 18 畳用エアコン 8～9 台の通年運転に相当

@20 円 /kWh として 250 万円分。

※ Clock gating: フリップフロップ用クロックをデータが変化するときだけ供給するように回路を構成する

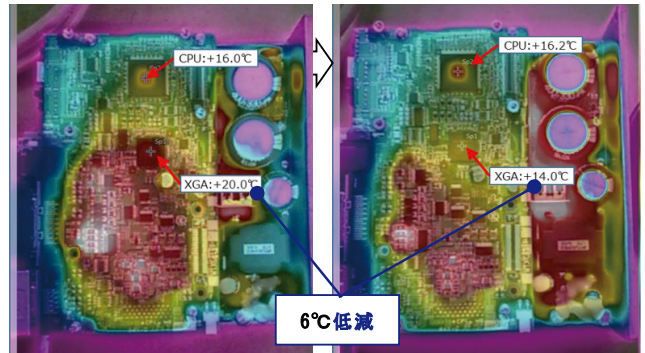


Fig. 2 温度上昇(左:現行品、右:互換品)

### 4 TCminiの部品点数削減

TCmini シリーズの熱電対回路は 2009 年より現状の回路が採用されている。当初は高精度を重視していたが、顧客の制御性向上要求に対応するためにサンプリング周期 (1ch で 400ms) の高速化が必要となった。

そこで、MAXIM 社の冷接点補償付き熱電対 - デジタルコンバータ MAX31855 を採用した。

MAX31855 は内部に冷接点回路を持ち、熱電対入力を温度データに変換しリアルデータで出力されるが、その変換時間は最短で 70ms であり、サンプリング周期の高速化が図れる。

また、複雑なアナログ切替や V-F 変換回路などが不要となり、部品点数を軽減できる。

部品点数:1ch あたり

現行回路:55(ICx4,Rx35,Cx10,PCx4,OSCx1,TRx1)

新規回路:23(ICx3,Rx12,Cx7,PCx1)

→ 32 点の部品削減、実装面積 55% 低減

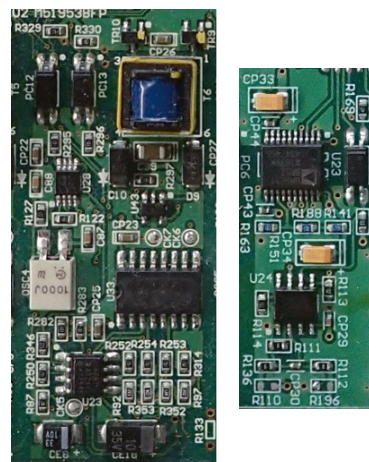


Fig. 3 熱電対入力回路比較(左:従来、右:最新)

## 5 パワーモジュールの変更

各種機械の送り軸サーボモータ用の可変速駆動装置（通称：サーボアンプ）内に搭載されるパワーモジュールは、電力変換（直流⇒交流）スイッチ機能を有している。サーボアンプ用の電力変換スイッチは、主に IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）という半導体パワー素子により構成されている。IGBT は、高速スイッチング性能と大電力処理能力を合わせ持ったパワーモジュール製品として流通しており、その省エネ性能は日々向上している。

サーボアンプのモデルチェンジに合わせ、新世代パワーモジュールを採用し機械の消費電力低減に貢献している。

Fig. 5 の例では、初期モデル（サーボアンプ AR シリーズ、IPM R シリーズ）に対し最新モデル（サーボアンプ GM シリーズ、IPM V シリーズ）では 27%（14W）の損失低減が実現されている。

サーボアンプ（GM42A）+サーボモータ（定格 6kW）連続運転にて年間 123kWh（=14W×24h×365day）消費電力量の削減見込。

定格電圧：600V  
定格電流：150A

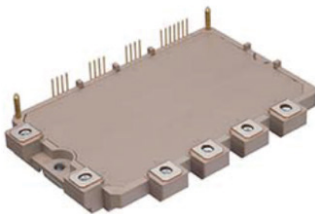


Fig. 4 パワーモジュール

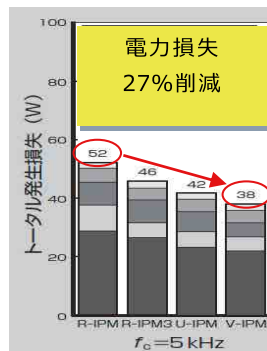


Fig. 5 電力損失低減例

以下、最新パワーモジュールを適用したサーボアンプ（GM シリーズ）および同サーボアンプ搭載機の一例である。

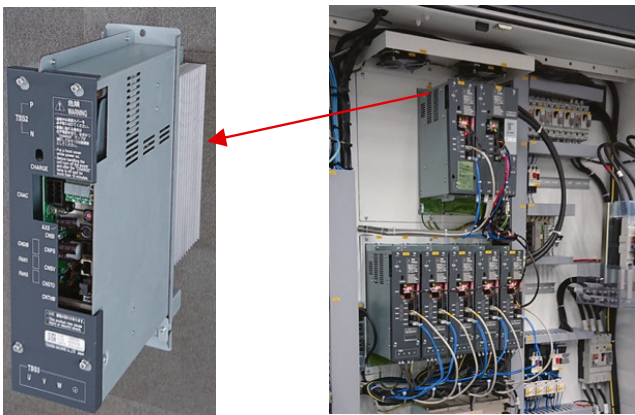


Fig. 6 サーボアンプ GM シリーズ



Fig. 7 横中ぐり盤 BTD-110S.R16

## 6 加工時間短縮による消費電力低減

当社の工作機械向け数値制御装置である TOSNUC PX200 は、金型加工機能として「CNC SHAPE」を搭載している。CNC SHAPE のアシスト機能を ON にすることで加工速度が改善し、加工時間の短縮および機械の消費電力の低減に寄与する。



Fig. 8 TOSNUC PX200

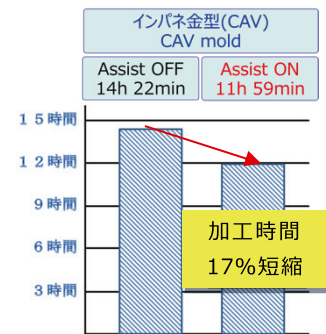


Fig. 9 金型加工時間改善例

また、最大積載量の大きい機械で軽いワークを加工する際の非効率を改善する「ワーク重量適応制御」にも取り組んでいる。ワーク重量に応じてパラメータを最適化し、加工時間の短縮および機械の消費電力低減に寄与する。Fig. 10 に MPJ-3120M にて実施した例を示す。

機械：最大積載量 15t  
ワーク：5t

加工時間  
15.8→12h  
24%短縮

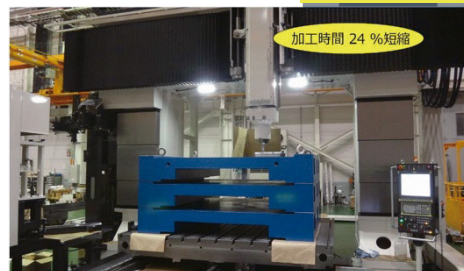


Fig. 10 MPJ-3120M における実証試験

## 7 消費電力の表示

当社の射出成形機向けプロセスコントローラでは消費電力情報を画面上に表示することにより、簡単にオペレータが消費電力を把握できる。

成形運転条件に対する消費電力変化をリアルタイムに把握することにより、省エネ運転パターンを設定を容易にしている。



Fig. 11 消費電力画面



Fig. 12 電力料金設定画面

## 8 おわりに

本稿では、各種制御コンポーネントの省電力・省工数・省資源に関する取組について述べてきた。

これからも省エネ技術が進んだ電子デバイスをタイムリーに採用することにより環境影響負荷低減に貢献できると考える。

### コラム Column

### 失敗から学んだ事



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

#### 桜井 真寿

私は客先の工場へ新規に自動化装置を納入する仕事をしています。過去に私が経験した苦い失敗についてひとつ。客先の工場に入ってきた短冊状の木材をパレットと呼ばれる荷役台から降ろして既存の加工機に投入するロボット装置でのことです。木材を扱うのは初めてのことでしたので加工対象となる材料、ワークの寸法やばらつきを事前に取り決めた上で搬送テストを行い、この条件であれば大丈夫ということで装置を作ったのですが、実際に工場に納入されるワークは取り決めた条件を大きく超えるばらつき品(ソリ、割れ、変形、木の節の露出など)が混じるものでした。

お客様側の責任範囲で問題が発生しているため装置は引き渡しされたのですが、時間が経って再度訪問した時には一時的な作動停止、チョコ停(※チョココとした停止)が多いのでその装置は使われていませんでした。

失敗の原因は、お客様自身が工場に納入されるワークへの理解が甘かったことのほかに、私の方として、木材に対する知識がなかったために一般の工業製品と同じ様な公差や精度での設計を指示していたことにもありました。

このことは、初めての業界からの引き合いに対してよくヒアリングなどを行うことの大切さを私に強く感じさせた経験となっており、それからは思い込みで動かず、必ず現場やワークを実際に確認するといったことを心がけるようにしています。私が過去経験した印象に覚えている失敗体験についてでした。



# スカラロボット開発における環境負荷削減へのアプローチ

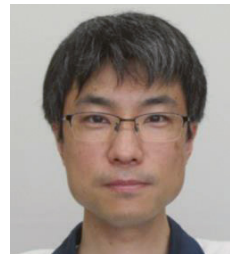
産業用ロボットに対する性能要求は年々高まっており、動作性能としてはサイクルタイムの短縮や軌跡精度の向上、それらとコストの両立が期待されている。さらには環境負荷削減の観点から、環境に配慮した製品であることも求められている。当社はこのニーズにこたえる新製品としてスカラロボット THE800/THE1000 の開発を行った。本稿では THE800/THE1000 の開発における環境負荷削減施策、1DCAE を利用した設計への取り組みを紹介し、環境負荷削減への効果について報告する。



制御機械カンパニー  
ロボット技術部  
ロボット技術課  
**木戸 克芳**



制御機械カンパニー  
ロボット技術部  
ロボット技術課  
**中井 良典**



制御機械カンパニー  
ロボット技術部  
ロボット技術課  
**雨宮 龍一**



制御機械カンパニー  
ロボット技術部  
ロボット技術課  
**流田 裕介**

## 1 はじめに

スカラロボットは水平多関節型ロボットとも呼ばれている。水平方向の3つの回転軸と垂直方向の直動軸の4自由度の機構により、平面での作業を得意とする産業用ロボットである。スカラロボットはアーム長が300mm台から1,000mmを超えるものまで多くの種類があり、様々な工程の自動化に活用されている。中でもアーム長800mm、1,000mmクラスで高可搬のものは、EV (Electric Vehicle) 車載用バッテリーの搬送作業用として市場ニーズの高いものとなっている。当社スカラロボットにおいて、アーム長800mm、1,000mmクラスの高可搬対応機種には既存のTH850A、TH1050Aがあり、必要十分な性能を有しているが、二次電池製造工程においては日進月歩で効率化が進み、更なるタクト改善の為に、ロボット本体の速度UPと軌跡精度向上が求められている。また、昨今は環境負荷削減への注目度が増し、カーボンニュートラルの観点からも、CO<sub>2</sub> 排出量削減が求められている。そこで、そのような市場要求に応えるべく新型スカラロボット THE800/THE1000 の開発を行った。

## 2 THE800/1000の開発

### 2.1 基本仕様

新機種 THE800 と従来機種 TH850A の仕様を Table 1 に示す。以降、比較の対象は THE800 と TH850A とする。

Table 1 THE800とTH850Aの仕様

型式		THE800	TH850A
制御軸数		4	4
アーム長(mm) (第1アーム+第2アーム)		800 (350+450)	850 (350+500)
動作範囲	第1軸(deg)	±132	±160
	第2軸(deg)	±152	±145
	第3軸(mm)	0⇔420	0⇔200
	第4軸(deg)	±360	±360
最大速度 *1	第1軸(deg/s)	300	300
	第2軸(deg/s)	540	420
	第3軸(mm/s)	2,200	2,050
	第4軸(deg/s)	1,100	1,200
	第1,2軸合成(mm/s)	8,400	8,130
定格可搬質量(kg)		5	5
最大可搬質量(kg)		20	20
許容負荷慣性モーメント(kg <sup>m</sup> <sup>2</sup> )		0.6	0.2
位置繰返し精度 *2	X, Y (mm)	±0.025	±0.010
	Z (mm)	±0.010	±0.010
	C (deg)	±0.010	±0.004
ロボット本体質量(kg)		46	76
コントローラ *3		TS5000-MS	TS3100

\*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返し精度である。絶対位置決め精度および軌跡精度とは異なる。  
\*3:標準仕様の型式。CE仕様などオプションは型式が異なる。

THE800 は TH850A と比較して、第3軸の標準ストロークは、昨今の顧客ニーズをとらえ200mmから420mmとした。また、より大きな搬送物を把持するために、許容慣性モーメントを0.2kg・m<sup>2</sup>から0.6kg・m<sup>2</sup>に増加させた。Fig. 1 に THE800 と TH850A の外観比較を示す。



Fig. 1 THE800とTH850Aの外観比較

## 2.2 | 環境負荷削減のアプローチ

THE800/THE1000では環境への影響を最小限にするべく開発の段階で様々な点からアプローチをした。次項より環境負荷削減に対応した設計内容について記述する。

### 2.2.1 | ベース共通化

THE800/THE1000ではベース等を従来機種であるTHE600と共通化した。共通化することで、新たな部品の製造を抑え、省資源化を実現した。Fig. 2にスカラロボット (THE800) の各部名称の図を、Fig. 3にTHE800とTHE600の図を示す。

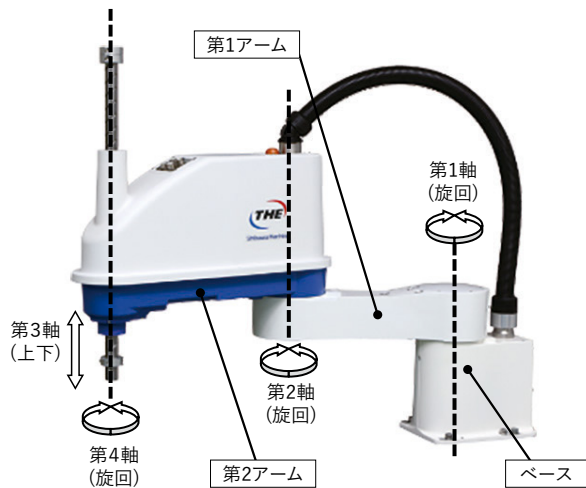


Fig. 2 スカラロボット(THE800)の各部名称

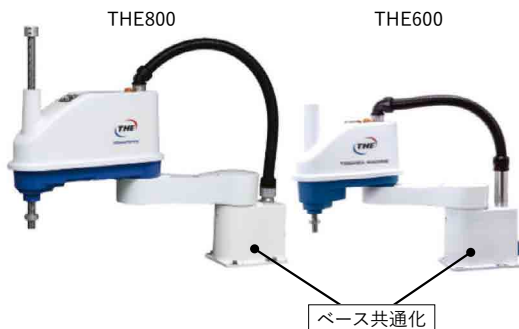


Fig. 3 THE800とTHE600のベース

### 2.2.2 | 第1アーム、第2アームの軽量化

THE800/THE1000では第1アーム、第2アームは構造解析を徹底的に行い、理想の形状を実現できる自由度の高いダイカスト製法を採用した。それにより剛性を許容値以内に保ちつつアーム質量の削減を実現した。Table 2にTHE800とTH850Aの第1アーム全体、第2アーム全体の質量を示す。

Table 2 THE800とTH850Aの第1アーム全体、第2アーム全体の質量

	THE800	TH850A
第1アーム全体の質量(kg)	8.92	12.12
第2アーム全体の質量(kg)	28.1	33.27

### 2.2.3 | 第2軸、第4軸モータ容量削減

THE800/THE1000では第2軸、第4軸の減速比変更により、TH850Aと比較し低容量のモータを採用した。Table 3にTHE800とTH850Aの第2軸、第4軸モータ容量を示す。

Table 3 THE800とTH850Aの第2軸、第4軸モータ容量

	THE800	TH850A
第2軸モータ容量(W)	750	1000
第4軸モータ容量(W)	200	750

### 2.2.4 | 部品点数の削減

THE800/THE1000では自由度の高いダイカスト品を採用したことにより、メカニカルストップ部と筐体部の一体化ができ、また、その他、ベースの一体化、板金削減等の施策より、THE800は、TH850Aの部品点数と比較すると約6%の削減を実現した。

### 2.2.5 | コントローラの更新

THE800/THE1000ではコントローラTS5000-MSを採用した。TH850Aで用いていたコントローラTS3100と比較して通信機能やプログラム言語など大幅に改良している。

環境負荷削減のアプローチとしては、コントローラの小型化により、TS3100と比較して質量35%削減した。また、接続コネクタを全て前面に配置することにより、設置面積を33%削減(ケーブル敷設含む)し、制御盤小型化と材料削減を実現した。Fig. 4にTS5000-MSの外観を示す。



Fig. 4 TS5000-MS外観

## 2.3 | 1DCAEを利用した開発DXへの取り組み

THE800/THE1000 開発では、1DCAE を取り入れた開発 DX を推進、モデルシミュレーションによる省エネ設計に取り組んだ。次項よりその手法について記述する。

### 2.3.1 | 1DCAEについて

1DCAE とは上流設計段階から適用可能な設計支援の考え方、手法、ツールのことである。今回そのツールの1つである駆動トルクシミュレーション実施により、試作品実機を製作することなく運動性能を評価出来た。

### 2.3.2 | 駆動トルクシミュレーション手順

THE800 と TH850A の第 1、2 軸合成動作の駆動トルクシミュレーションを以下の手順で行った。

#### a) シミュレーションモデルの作成

駆動トルクシミュレーションではコンポーネントと呼ばれるブロックを組み合わせ、シミュレーションモデルを作成した。Fig. 5 に THE800 のシミュレーションモデルを示す。また、Table 4 に、シミュレーションに使用したコンポーネントの入力内容を示す。

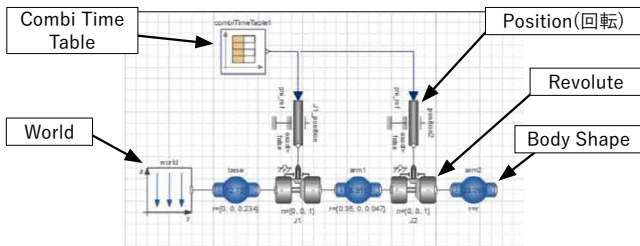


Fig. 5 THE800のシミュレーションモデル

Table 4 コンポーネントの入力内容

コンポーネント	入力内容
World	重力方向、各軸方向
Position(回転)	なし
Revolute	回転方向
Body Shape	モデルの重心位置座標、質量、慣性テンソル
Combi Time Table	時系列ごとの各軸角度データ

#### b) Body Shape 入力用パラメータの算出

Body Shape 入力用パラメータは、設計時に作成している 3D-CAD データから、ベース部、第 1 アーム部、第 2 アーム部のパーツごとに分け、モデルの重心位置座標、質量、慣性テンソルを算出した。

#### c) Combi Time Table 入力用の角度データの算出

Combi Time Table 入力用の角度データは第 1、2 軸合成動作において最大トルクが出せる条件にて算出した。Table 5 に算出条件を、Fig. 6 に THE800 の角度データをグラフ化したものを示す。

Table 5 コンポーネントの入力内容

	THE800	TH850A
第 1 軸動作範囲 (deg)	-65⇔65	-86.5⇔86.5
第 2 軸動作範囲 (deg)	-115.7⇔115.7	-130⇔130
負荷(kg)	5	

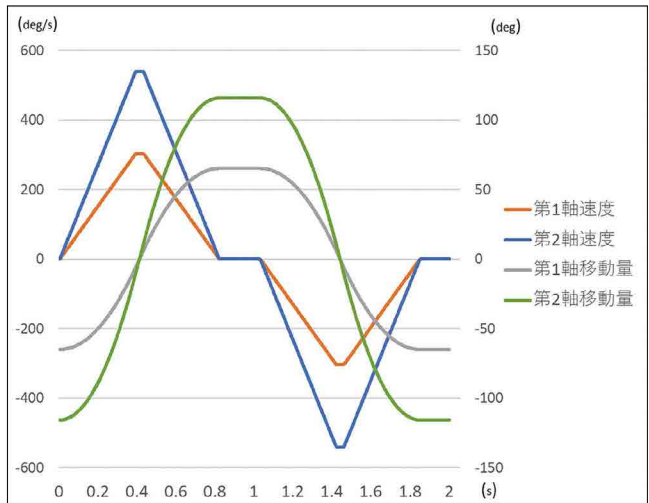


Fig. 6 THE800の角度データ

#### d) 駆動トルクシミュレーションの実施

b)、c) で算出した数値を、a) で作成したシミュレーションモデルに入力し駆動トルクシミュレーションを実施した。THE800 と TH850A の最大トルクを比較すると、第 1 軸は約 13%、第 2 軸は約 3% 抑えられることを確認できた。Fig. 7、Fig. 8 にそれぞれ THE800 と TH850A の第 1 軸、第 2 軸駆動トルクシミュレーション結果の比較のグラフを示す。Table 6 に各軸最大最小トルクを示す。

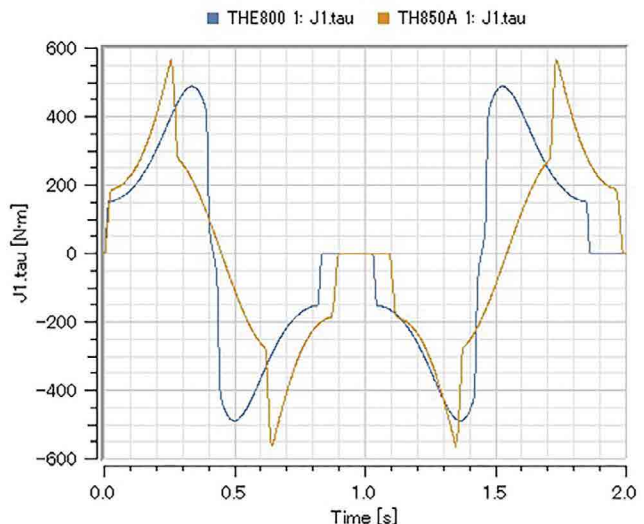


Fig. 7 THE800とTH850Aの第1軸駆動トルク

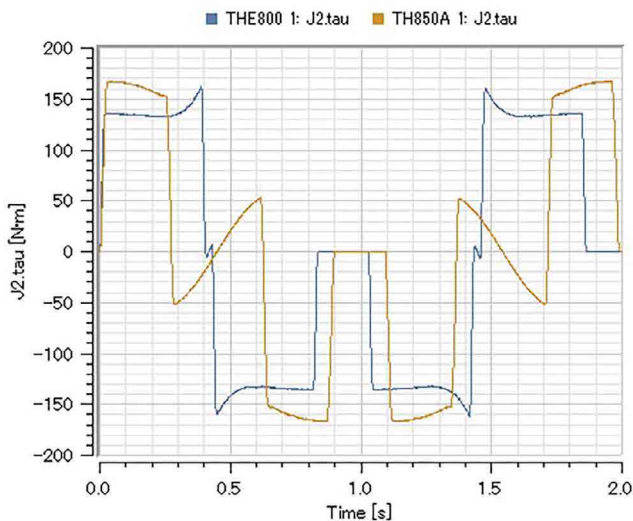


Fig. 8 THE800とTH850Aの第2軸駆動トルク

Table 6 各軸最大最小トルク

	THE800	TH850A	削減率
第1軸最大トルク [N]	489.6	567.5	13.3%
第1軸最小トルク [N]	-489.6	-565.2	13.4%
第2軸最大トルク [N]	161.9	167.3	3.2%
第2軸最小トルク [N]	-161.6	-166.9	3.2%

### 3 環境負荷削減への効果

前章で紹介した THE800/THE1000 開発における環境負荷削減施策、1DCAE を基にした開発 DX への取り組みにより、実際にどの程度環境負荷削減できたのかを THE800 と TH850A の電気消費量等を測定した結果から LCA(Life Cycle Assessment) を用いて評価した。

結果を次節より記述する。

#### 3.1 | LCAについて

LCA とは製品・サービスのライフサイクル全体又はその特定段階における環境負荷を定量的に評価する手法のことである。

今回は、予測される CO<sub>2</sub> 排出量を比較することで、削減量(改善値)を定量的に評価した。

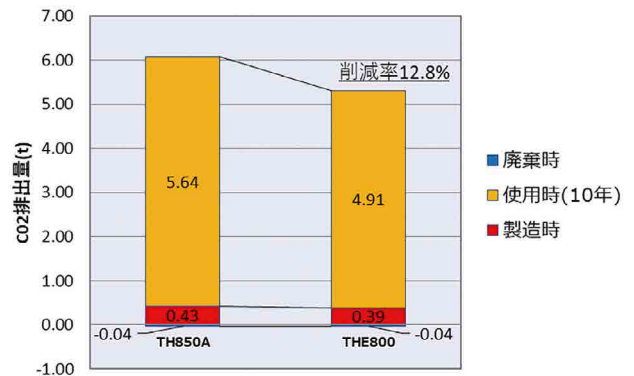
#### 3.2 | THE800とTH850AのCO<sub>2</sub>排出量比較

THE800 と TH850A の CO<sub>2</sub> 排出量比較のため、実機から測定した値を Table 7 に示す。

Table 7 THE800とTH850Aの実機測定値

	THE800	TH850A	削減率
総質量(kg)	46	76	39.5%
油類使用量(g)	192	860	77.7%
全負荷時の電気消費量(kVA)	0.74	0.85	12.9%

Table 7 の実測値から THE800 と TH850A のライフサイクルでの CO<sub>2</sub> 排出量を算出、比較すると 12.8% の削減が見込めることを確認した。Fig. 9 に THE800 と TH850A のライフサイクルでの CO<sub>2</sub> 排出量比較のグラフを示す。

Fig. 9 THE800とTH850AのライフサイクルでのCO<sub>2</sub>排出量比較

## 4 終わりに

THE800/THE1000 の開発における環境負荷削減施策、1DCAE を利用した設計への取り組みを紹介した。また、それら施策により従来機と比較して環境負荷削減が確認できた。



生産センター  
工機生技部 生産技術課

**竹田津 順次**

昨年の春から私は SMMT（タイ工場:Shibaura Machine Manufacturing Thailand）での現地調達品に対して、加工技術支援を行っている。まず、現地で直面する問題が“言葉”の壁である。日本の加工外注先にはすんなり伝わる加工用語や解釈も国外に出ると全くと言っていいほど通用しないことがある。

例えば「加工の段取り」や「バリ取り」、「振り回し加工」などがそれにあたる。そうした表現に対し言葉や2次元図面で伝えるのに労力や時間を要するわけだが、そこで唯一救いになったのが、タイの加工先で進んでいた製品の3Dモデル化である。3次元的に製品形状の情報を共有出来ること

で、“言葉”だけでは伝えにくい問題でも“視覚”をプラスされれば伝達力とスピードが飛躍的に伸びたのは言うまでもない。

新たな技術の進歩を取り込むことで、解決が進んでゆく課題も出てきている。しかし依然として課題が残されている。加工現場では、加工中の“切削音”、機械から伝わる“振動”、加工後の面の“触感”、感じとったものを作業者は加工に反映することができる。日本の熟練作業者になるとこれら様々な感覚から加工状態を見極めることも多々有るが、このような感覚について「体現・表現」することは難しい。海外の若い作業者に対して体現し難い技術面の感覚をどのように表現し伝達するのか？私がこれから直面する課題の一つである。

# Injection Molding Machine upgradation from Induction to energy efficient servo system

Shibaura Machine India has began its operations with the takeover of the plastic machinery business of Larsen & Toubro in 2012. The company manufactures advanced Injection molding machines and Auxiliary equipment since 1992. Its products cater to the needs of wide range of sectors such as automobiles, packaging, medical equipment, pipe fitting, consumer goods, electrical and agriculture.

Shibaura Machine India organized upgradation process of Injection molding machine manufactured at Shibaura Machine Japan (SMJ) as well as Shibaura machine India (SMI) from Induction system to Servo system. SMI executed more than 50 no. of machines for this retrofitment. Most of the retrofitment work was done at customer place.

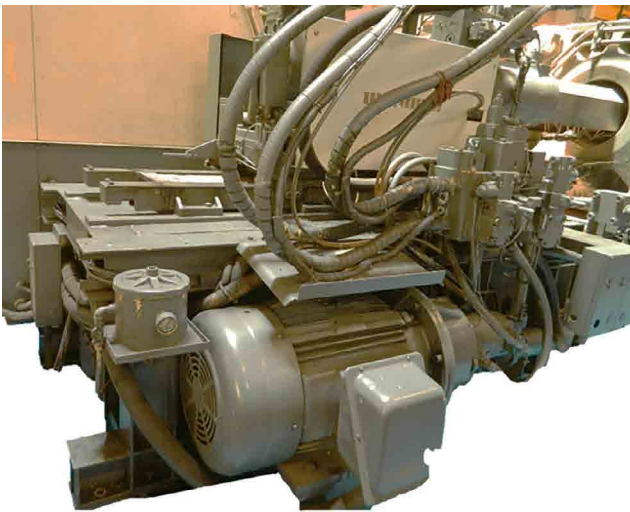


**C.Somaskandhan**  
Head-Customer Service & Application  
SHIBAURA MACHINE INDIA PRIVATE LIMITED

Customer's are benefitted with followings:

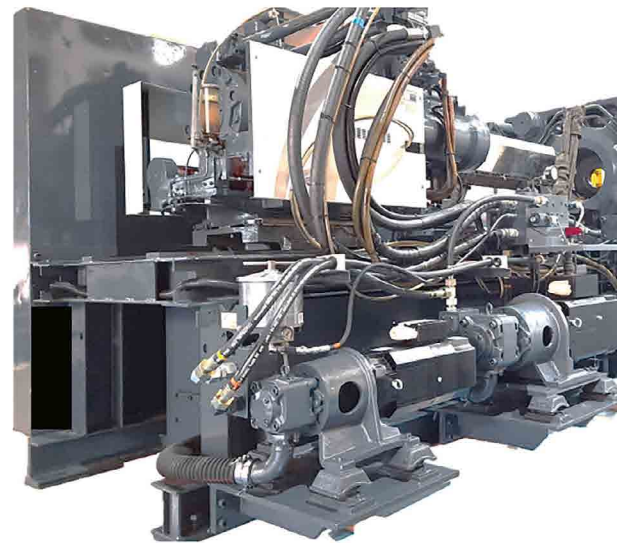
- ✚ Energy conservation: 30-40% or more in power saving
- ✚ Environmental impact on reduction in carbon footprint
- ✚ Noise level reduction from Maximum 90 dB to 80 dB
- ✚ Improvement on productivity and quality

Before retrofit



Japanese machine equipped with induction motor and binary multi-pumps

After retrofit



Field modification by using new technologies with servo motor and a single pump



Energy efficient Servo motor and pump system

Servo drive

Software

## Some of the sample of retrofitment details & its benefits as below:

Sl.no	Machine model	Year of Manufacturing	Product	Energy saving	Environment impact	Customer voice
1	1300T (SMJ)	2003	Headlamp (Automobile -Cars)	60% and 33 kWh saved	Reduction of 23 kg CO <sub>2</sub> equivalent	Highly satisfied with energy saving and technical support from SMI
2	850T (SMJ)	1993	Grill radiator (Automobile -Cars)	42% and 25 kWh saved	Reduction of 18 kg CO <sub>2</sub> equivalent	Performance of machine improved, will plan for next machine upgradation
3	200T (SMI)	2003	Writing instrument (Pen)	41% and 22 kWh saved	Reduction of 15 kg CO <sub>2</sub> equivalent	Machine performance is on par with new machine

# 電動式サブ射出ユニット EC PLUS<sup>+</sup> の紹介

## 1 概要

成形品の意匠性を高めるなどの高機能化や生産工程統合が可能な成形技術として多色多材成形が実用化されて久しい。しかし、専用金型だけでなく射出成形機も特殊な専用機が必要となる為、設備投資が割高になり、導入には障壁があった。それを回避するために、予め成形した部品を成形機にインサートして別の樹脂を追加成形する方法もあるが、工程が複雑になり生産効率が専用機に対し劣る。そこで、それらデメリットを解消することを目的として、全電動式射出成形機 EC-SX III シリーズに対し、リーズナブルにアドオン可能な電動式サブ射出ユニット EC PLUS<sup>+</sup> を開発したので、その特長を紹介する。

## 2 特長

### (1) 電動式サブ射出ユニット EC PLUS<sup>+</sup>

EC PLUS<sup>+</sup> は、成形機本体のメイン射出装置とは別に追加装備するサブ射出装置であり、メイン射出装置とは異なる樹脂材料を金型内に充填するものである。EC PLUS<sup>+</sup> の外観を Fig. 1、仕様数値を Table 1 に示す。用途を多色多材成形に特化することで、樹脂量（スクリュ径）を限定し、省スペース、コンパクト構造を目指した。その結果、汎用機の射出装置<sup>\*1</sup>の外形寸法に対し、全長 130mm 減（10% 減）幅 130mm 減（20% 減）高さ<sup>\*2</sup> 170mm 減（50% 減）を実現した。

<sup>\*1</sup>スクリュ径φ 18 <sup>\*2</sup>スクリュ中心からカバー上面までの寸法

### (2) 拡張性

EC PLUS<sup>+</sup> は、顧客納入後の標準 EC-SX III 機に対しても、比較的容易に追加できるようにモジュール構造を採用している。逆に元に戻すことも可能なので、多色多材成形の生産稼働率が変動した際にも、設備転用の柔軟性は高い。また、ユニットがコンパクトなこと、設置方向が縦 / 横いづれにも対応できる架台を用意しているため、金型の 3 方向（天面、両側面）からの充填に対応できる。(Fig. 2)

Table 1 仕様数値

	単位	選択スベック			
		φ18	φ20	φ22	φ25
スクリュ径	mm	φ18	φ20	φ22	φ25
スクリュストローク	mm	72	80	88	100
射出量	cm <sup>3</sup>	18.3	25.1	33.5	49.1
最大射出圧力	MPa	200	200	200	160
最大保圧	MPa	150	150	150	150
射出速度	mm/s	180	180	180	180
射出率	cm <sup>3</sup> /s	45.8	56.5	68.4	88.4
スクリュトルク	Nm	61.0	82.0	107.0	153.1
スクリュ回転速度	min <sup>-1</sup>	480	430	420	420
可塑化能力(PS)	kg/h	12	14	22	28
ノズルタッチ力	kN	5.8	5.8	5.8	5.8

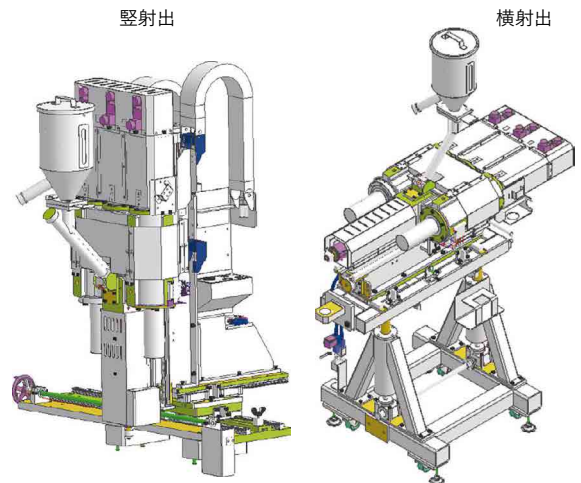


Fig. 1 EC PLUS<sup>+</sup> 外観

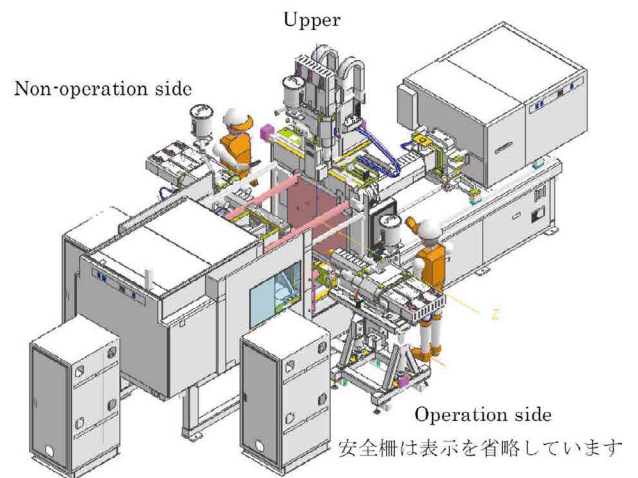


Fig. 2 EC PLUS<sup>+</sup> 設置レイアウト



さらに、金型に対し射出装置との連結構造や加工が不要なので、既存の多色多材成形用金型に容易に対応できるメリットもある。

(3) 操作性

EC-SX Ⅲシリーズでは、「INJECTVISOR V70」を搭載し、成形機本体の操作画面上で、メインとサブ両方の射出設定を並べて行うことが可能である<sup>※3</sup>。(Fig. 3) 一般的にアドオンタイプのサブ射出装置の操作画面は本体とは別に追加され、成形条件設定や生産時のモニタリングデータも独立しているため、それらを一元管理するには工夫が必要だった。本機では2つの射出装置のデータを統合管理しているため、従来のような煩わしさから解放される。Industry4.0に代表される生産設備のIoT活用では、生産データの一元管理が必須となる。それらを支援する射出成形機リモート管理システム「iPAQET」の最新バージョンでは2材成形に対応する予定である。(Fig. 4)

※3 2台以上のサブ射出装置を追加するには操作画面の追加が必要

(4) 電動ロータリーテーブルとの連携

拡張ユニットは、電動式サブ射出ユニットの他、電動ロータリーテーブルが開発されている。(Fig. 5) 電動ロータリーテーブルとは、コア回転方式の多色多材成形において、可動盤に取り付けた金型を回転させる拡張ユニットである。成形機本体の射出装置で1次材を充填後、このユニットで金型を回転させ、EC PLUS<sup>+</sup>で2次材を充填する。(Fig. 6) この電動ロータリーテーブルも汎用機にアドオンすることを前提に設計されている。このように、従来であれば専用の射出成形機を設備しなければならなかった多色多材成形が比較的低コストで実現できる。

対応機種:EC100SX Ⅲ, EC230SX Ⅲ, EC350SX Ⅲ

3 おわりに

今回開発した「電動式サブ射出ユニット EC PLUS<sup>+</sup>」は、電動射出成形機の開発で培ってきた精密安定成形を実現する制御技術が標準搭載されている。今後は、それら基本技術を磨くとともに、お客様の製品開発に寄り添い、今までに無いアイデアの具現化に貢献していきたい。購入していただいた射出成形機の機能拡張をリーズナブルに提供し、お客様が手軽に高付加価値成形を実現できるよう更なる商品開発に邁進する所存である。

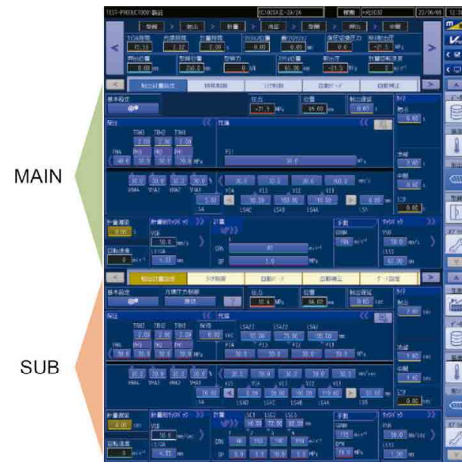


Fig. 3 INJECTVISOR V70 操作画面

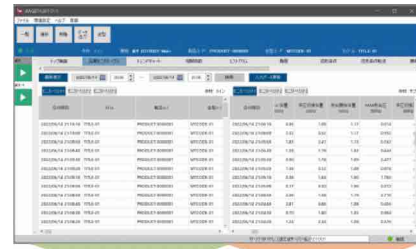


Fig. 4 iPAQET モニタリング画面

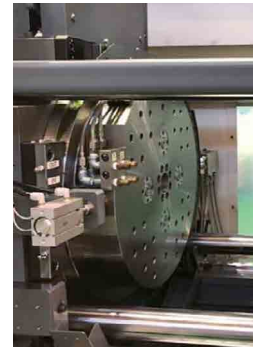


Fig. 5 電動ロータリーテーブル

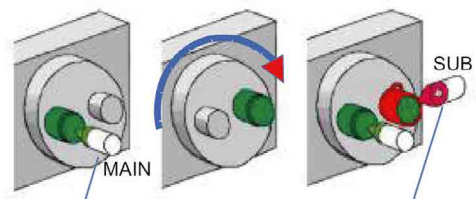


Fig. 6 コア回転方式2材成形

# ダイカストマシン DC400R2 の紹介



Fig. 1 DC400R2の外観

## 1 概要

近年、ダイカスト業界は省エネ機運の高まりにより環境負荷を低減できる設備が求められている。本稿では、電動サーボモータ駆動のトグル式型締機構やサーボモータを用いて流量や圧力を制御するサーボ油圧源を搭載可能な DC400R2 を開発したので紹介する。(Fig. 1)

## 2 特長

### 1) 電動型締による省エネ

DC400R2 の電動駆動部構造を Fig. 2 に示す。

ボールねじとサーボモータの組み合わせにより、スムーズな加減速制御が可能となり、油圧駆動に比べエネルギー損失が小さく、省エネとなる。

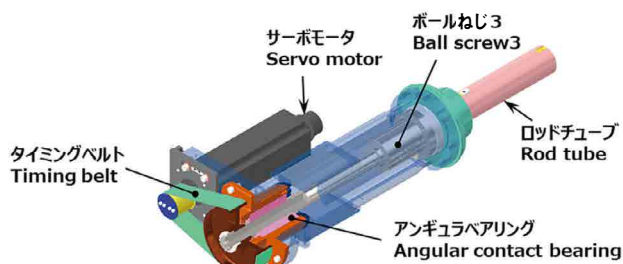


Fig. 2 電動駆動部

油圧型締と電動型締で型開閉時の消費電力と時間を比較した表を Table 1 に示す。電動型締は消費電力が少なく、サイクル短縮による生産性向上が可能となる。

Table 1 電動型締の省エネ効果

		油圧	電動	差
消費電力	(kW)	12.2	7.0	5.2
型開閉時間	(sec)	4.0	2.7	1.3

※金型取付無、速度100%での計測結果

### 2) サーボ油圧源による省エネ

標準の油圧源では油圧ポンプは一定の回転数で回転するインダクションモータで駆動し、ポンプから吐出された油は圧力流量調整弁にて圧力、流量を調整しており、その際に必要のない油をタンクに戻している。ここにエネルギーロスが発生する (Fig. 3)。

## 標準の油圧源

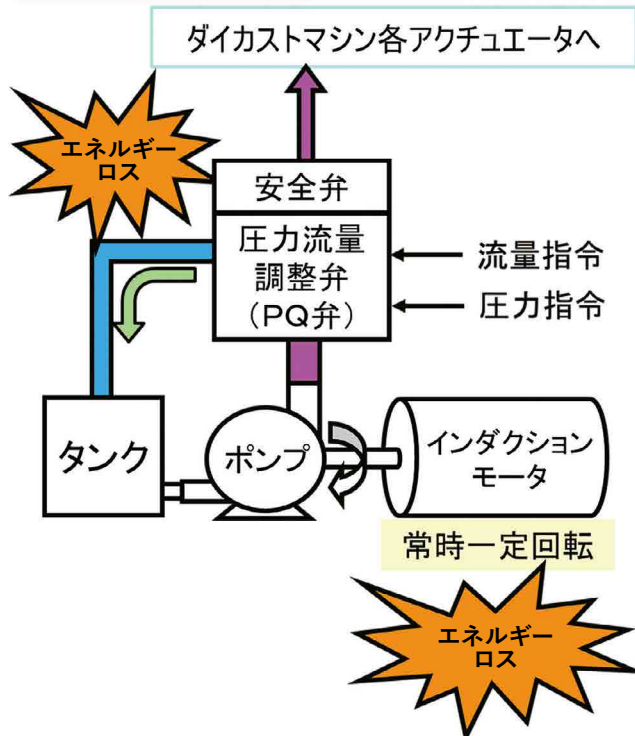


Fig. 3 標準油圧源の構成

これに対し、サーボ油圧源では油圧ポンプをサーボモータにて駆動し、モータの回転数で流量を制御し、圧力は油圧回路の圧力をサーボアンプにフィードバックして制御を行う。そのためエネルギーをロスすることなく、消費電力を低減することが可能となる (Fig. 4)。

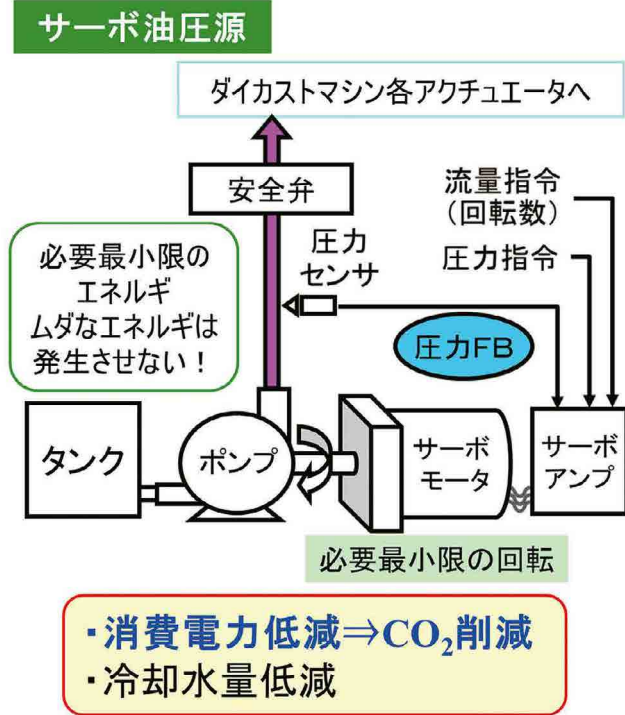


Fig. 4 サーボ油圧源の構成

標準の油圧源とサーボ油圧源の消費電力を比較した表を Table 2 に示す。サーボ油圧源を搭載することで約 34% の消費電力を削減することができる。

Table 2 サーボ油圧源の省エネ効果

消費電力 (kW)	標準油圧源	サーボ油圧源	低減率 (%)
	15.9	10.4	34.6

※サイクルタイム30(S)

### 3) 新制御装置

制御装置には新開発した大型画面の TOSCAST-999 を搭載した (Fig. 5)。大画面を活かし上下 2 画面で操作する GUI とした事により画面切替操作が減り、モニターを見ながら条件変更する、波形とラインデータを同時に表示する等が可能となり、操作性が大幅に向上している。

また、ラダープログラム回路や取扱説明書、系統図といったユーザーが必要な資料も表示させることができ、ペーパーレスによる作業性アップや環境の保全にも貢献できると考える。

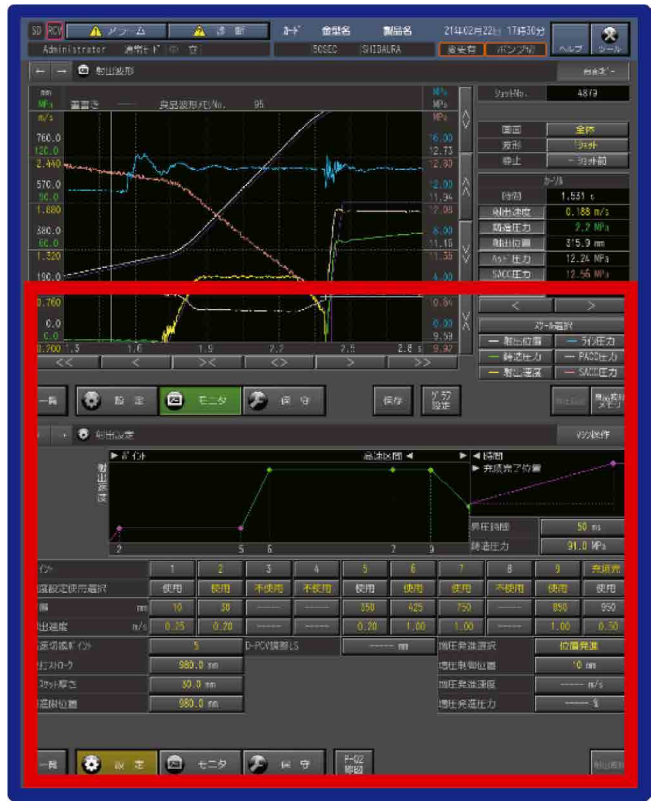


Fig. 5 コントラータTOSCAST-999

## 3 仕様

Table 3 に DC400R2 の諸元を記した。前機種である DC350R と比較し、型締力アップ(3500 ⇒ 4000(kN))、ダイプレート寸法アップ(935 × 935 ⇒ 960 × 955(mm)) により商品力が向上し、ユーザの生産性向上に寄与できると考える。

Table 3 DC400R2 諸元表

		単位	DC400R2
型締	型締力	kN	4000
	ダイプレート寸法 (タテ×ヨコ)	mm	960×955
	タイバー間隔 (タテ×ヨコ)	mm	650×650
	タイバー直径	mm	135
	金型厚さ	mm	300~700
	ダイストローク	mm	420
射出	最大射出力	kN	344
	増圧比		1 : 2.07
	プランジャストローク	mm	480
	チップ突出量	mm	265
	射出口位置 (機械中心より下側へ)	mm	150
	射出速度	m/s	0.3~6.5
押出	チップ直径 (標準)	mm	60~80
	押出力	kN	190
油圧	押出ストローク	mm	20~90
	移動中子数	Set	3/8" × 1
	移動中子ポート (電磁弁1個当り)	Set	3/4" × 2
	作動油圧	MPa	15
	必要作動油量	L	450
外形寸法	作動油タンク容量	L	480
	所要床面積 (電動型締搭載時)	mm	6335 × 2346
	機械の高さ	mm	3076

## 4 効果／事例

- 1) 電動型締の搭載による省エネ効果  
⇒消費電力低減率:約 42%
- 2) サーボ油圧源の搭載による省エネ効果  
⇒消費電力低減率:約 34%
- 3) 電動型締による生産性の向上  
⇒サイクルタイム短縮:1.3s
- 4) 型締力アップ、ダイプレート寸法アップによる  
商品力の向上、生産性の向上  
⇒ユーザ成形品の品質向上
- 5) 新制御装置による操作性の向上  
⇒大画面化による画面切替操作時間の減少、  
ユーザが必要な資料を画面に表示することによる  
作業効率の向上

## 5 おわりに

DC400R2 は省エネや生産性向上に貢献できる最新機種である。今後ラインアップの拡充により、お客様のご要望に応じていく。



### 言語処理と国際化



芝浦機械株式会社  
OB

#### 鐘本 政和

以前ロボット関係の仕事をしてきたとき、本の好きな若い技術者のW君と一緒にロンドンに出張し、休日にW君の勧めでロンドンの書店フォイルズ社へ行ってみたことがある。

フォイルズ社は1903年、公務員試験を目指していたフォイルズ兄弟が試験に失敗し、大量に所持していた受験用の教科書を手放したところ、在庫以上の注文を受けたことから店をはじめることになったという書店で、現在でも英国では最大級の書店になっている。

驚いたのは、英語教育に関する沢山の書物で占められている専用のフロアがあったことだった。海外の英国の植民地だったところは無論のこと、東南アジア諸国、中国、日本、ラテンアメリカなど、世界の色々な国向けの英語教育用の

書物がずらりと並んでいて、英語が国際語として世界中に普及するようになった理由が良く分かったような気がした。

最近、インターネットで海外の記事や論文を参照するとき、英文から日本語へ自動的に翻訳して表示されるのでも楽になっている。

これには人工知能の分野の成功例といわれている自動翻訳システムの寄与が大きいといわれている。自動翻訳ではビッグデータを活用して、この文章の次にはこのイデオロムが来ることが多いといった生起確率などを併用して、実用的な文章が組み立てられている。

コロナに関する海外の英語の論文の情報が国内の医療関係者に非常に早く伝わっているのが驚いていたが、恐らくネットを介した自動翻訳の助けもあるのだと思う。また、海外から日本に来る若い旅行者が増えているのも、スマホの自国語への自動翻訳システムを介してネットの日本の情報が簡単に入手できることも大いに役立っていると思う。

# 門形 5 軸複合加工機ハイエンドモデル MP-2620(U) の紹介

## 1 概要(背景／開発のねらい)

近年、オペレータ不足、機械設置スペース不足、大型部品の高精度化等が問題となり、段取り回数の削減が可能である複合加工機が注目されている。また、市況が脱炭素に向かう中、風力発電・水力発電・水素ガスタービン等が今後の主力産業になると考えられ、旋削と 5 軸加工が必用なワークが増えるため、5 軸複合加工機の需要が高まると予想されている。当社には、5 軸複合機として MP-U があるものの発売後 10 年以上経過しており、商品価値向上が急務である。

他社複合機には無いアタッチメント交換機能、テーブル上面全領域での加工等の優位性を継承した上、5 軸ヘッドの能力向上により他社製品との差別化を図った。

これにより

- ・スイベルヘッド (A 軸) を利用した同時 3 軸旋削加工
- ・ストローク延長によるロングツール使用可能
- ・任意角度でのアタッチメント割出し

といった効果が期待できる。

機械外観を Fig. 1 に示す。

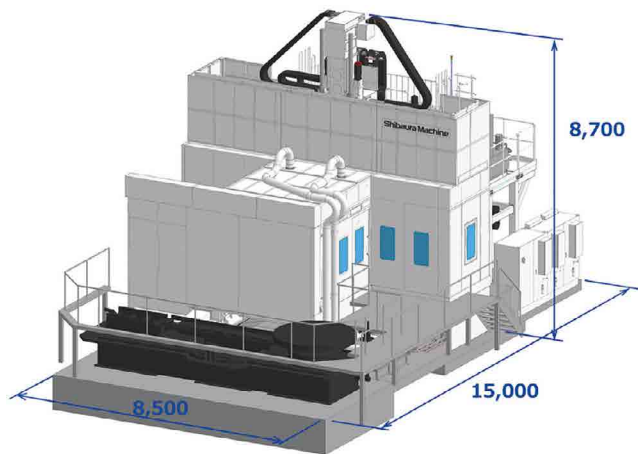


Fig. 1 MP-2620(U)の外観

## 2 特長

### 2.1 | FANUC社数値制御装置搭載

FANUC Series 30i-B Plus 採用により、従来機には無かった対話機能を追加する。また、機械衝突防止機能により、手動・自動全てのモードで機械の衝突を検知、機械の破損を未然に防ぐ。

機械本体は、ターニング主軸、CT 軸駆動機構、直線軸送り機構を新設計することで、FANUC 化に対応した。

### 2.2 | 機械ストロークの最適化

Z 軸を延長することで、ロングツール使用による軸移動範囲拡大に対応した。また、工具交換、アタッチメント交換、工具計測時のワーク退避が可能になり、使いやすさが向上する。

### 2.3 | KESSLER社5軸ヘッド搭載

KESSLER 社 5 軸ヘッド C 軸を □ 650mm ラム内に設置することで、Fig. 2 のようにスイベルヘッド (A 軸) がラム下端に配置された状態になる。本 5 軸ヘッドは、C 軸とスイベルヘッドが分離可能であるため、スイベルヘッドはアタッチメントとして着脱可能となる。

また、本 5 軸ヘッドは、従来機には無い主軸ロック機能を有している。さらに従来機より A・C 軸の軸トルク、およびクランプ能力が向上している。

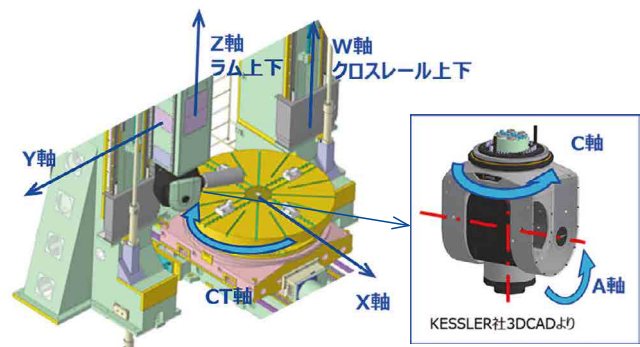


Fig. 2 機械座標系

### 2.4 | アタッチメント交換方式採用

2.3 項記載の通り、アタッチメント着脱方式を採用する。スイベルヘッド以外、KESSLER 社スナウト、水平ターニングヘッド、垂直ターニングヘッドを準備した。ターニングヘッドを使用することで、小径の内径加工が可能になる。

## 2.5 | ツールインターフェース

従来のターニングツールは、当社専用形状のため使いまわしができなかったが、本機は標準的な HSK-T タイプのツールシャフト方式を採用した。

## 2.6 | 自動工具計測装置

レーザー測定器によりミーリング工具長・工具径を計測、タッチプローブにより旋削工具刃先計測を実施する。計測ユニットは Y 軸右側ストローク端にあり、計測用途により測定機器の配置を変更する。

# 3 | 仕様

仕様を Table 1 に示す。

Table 1 主要仕様一覧

項目	主な仕様
X 軸移動量 mm	<b>3,200</b>
Y 軸移動量 mm	3,400
Z 軸移動量 mm	<b>1,500</b>
W 軸移動量 mm	2,000
CT 軸移動量	360°(連続)
A 軸移動量(Op.)	±110°
C 軸移動量(Op.)	±360°
門幅 mm	2,600
門高(5 軸ヘッド)	2,040
テーブルサイズ mm	Φ2,000
テーブル最大積載質量 kg	10,000
X,Y 軸早送り速 m/min	<b>30</b>
Z 軸早送り速度 m/min	<b>20</b>
CT 軸早送り速度 deg/min	1,080
A,C 軸早送り速度 deg/min	14,400
主軸回転速度 min <sup>-1</sup>	50~6,000
主軸最大回転力 Nm	500
主軸クランプトルク Nm	<b>1,400</b>
テーブル主軸回転速度 min <sup>-1</sup>	2~250
テーブル最大回転力 Nm	20,000
ラム角 mm	<b>650</b>
A 軸サーボモータトルク Nm	<b>2,200(S1)</b>
A 軸クランプトルク Nm	<b>7,400</b>
C 軸サーボモータトルク Nm	<b>2,500(S1)</b>
C 軸クランプトルク Nm	<b>12,500</b>

※太字：従来機から仕様変更

# 4 | 効果／事例

## 4.1 | 同時3軸旋削加工

主軸ロック機能により旋削工具を固定、A 軸を含む同時 3 軸加工により、複雑形状のワークを一つの工具で加工できるようになった。(Fig. 3)

## 4.2 | スイベルヘッドに対応した機械ストローク

X,Z 軸ストローク延長で、スイベルヘッドにロングツールを取付けた場合でも加工ストロークが十分に確保されるため、加工可能なワークが増え、使い勝手が向上した。(Fig. 4)

## 4.3 | 任意角度でのアタッチメント割出可能

従来のアタッチメント割出 (AAI) はカービックカップリングによる 1° 割出であったが、本機は C 軸でアタッチメントの位置決め実施後に C 軸クランプすることで任意割出が可能になった。(Fig. 5)

## 4.4 | NC機能

NC 装置の FANUC 化により、対話機能、機械衝突防止機能、ワーク段取り補正、主軸先端点制御、工具計測機能等の NC 機能が充実し、使い勝手が向上した。



Fig. 3 同時3軸加工



Fig. 4 ロングツール使用

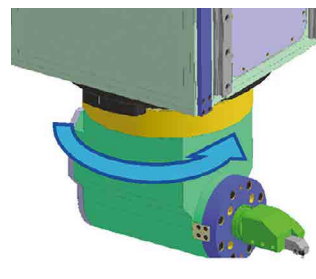


Fig. 5 アタッチメント任意割出

# 5 | おわりに

本 MP-U は、高性能・高価格帯モデルとなるが、従来機に無い新機能を実機にて検証し、販促資料を充実させることで、販売に結びつけていく予定である。

# 超精密非球面加工機の高速回転ワーク主軸 紹介

## 1 概要

超精密非球面加工機 ULG / ULC シリーズは、光学レンズ用金型の切削・研削加工、および、ガラスレンズの直接研削を主な用途とする旋盤型工作機械である。1980年代開発当初から今日まで、市場の要求に応え続けることでシェアを伸ばしてきた。

例えば、旋削加工に特化した ULC-100F(S) は、Z 軸にワーク主軸 ABC-80MP を搭載し、X 軸上の Y 軸コラムに工具を取り付け、0.1nm 制御の同時 2 軸制御を行うことで、スマートフォン搭載レンズのような複雑な非球面形状加工を可能にしている。Fig. 1 は、5 軸非球面加工機 ULG-100D(5A) の機械構成を示しており、X,Y,Z の直線 3 軸と B,C の回転 2 軸を合わせた同時 5 軸制御を可能とし、加工対象に応じて工具主軸や工具台を付け替えるなど、切削加工と研削加工を様々な段取りで実施することができる。

これら ULG / ULC シリーズのワーク主軸として搭載されている ABC-80MP は、多孔質絞リ方式を採った空気静圧軸受けとエンコーダを搭載したビルトイン誘導モータの組み合わせにより、極低振動回転と低回転ムラを実現した超精密加工に適した主軸である。しかし、高精度なだけでなく、生産性を高めるために高速回転可能なことも同時に求められている。そうした要求の中で、これまで最高  $1500 \text{ min}^{-1}$  までであった回転数を  $3000 \text{ min}^{-1}$  まで引き上げた高速回転ワーク主軸の開発を行ったので、本報にて紹介する。

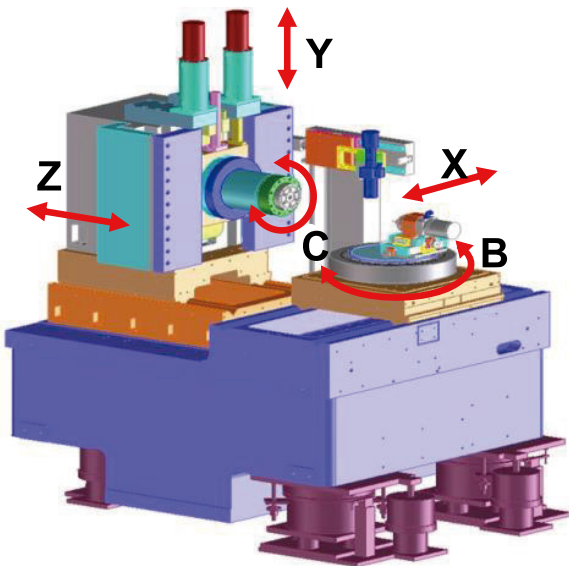


Fig. 1 ULG-100D(5A)の機械構成

## 2 特徴

空気静圧軸受けは、圧縮空気の静圧力により回転軸を浮上保持しているため、回転中の摩擦熱は、ベアリング軸受けに比べ極小である。ただし、高速回転時の軸受けすきま内では、空気のせん断抵抗により摩擦熱が発生し、主軸に伸びが生じる。この伸びは、十分な暖機運転時間によりサチュレートするが、超精密加工において、数ミクロンの伸びは致命的であり、数時間の暖機運転は、生産機会的大幅な損失である。そこで、軸受構造と冷却回路を見直すことにより、サチュレート時間の短縮を達成した。Fig. 2 では、新構造ワーク主軸の回転に伴う温度変化と伸び量を示しており、約 1 時間で伸びがサチュレートし、その量も  $1 \mu\text{m}$  以下に抑えられていることがわかる。

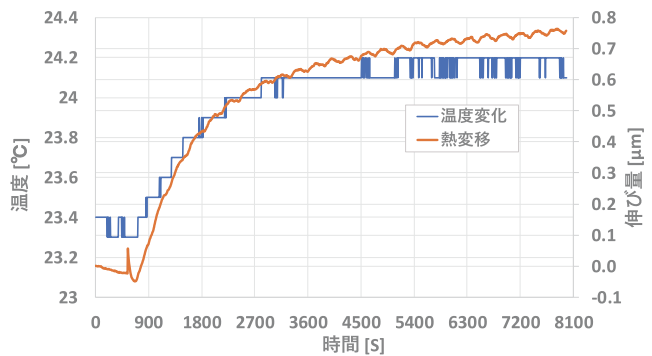


Fig. 2 新構造ワーク主軸の温度変化と伸び

## 3 効果／事例

高速化した ABC-80MP の実用事例を紹介する。

まず、4K・8K 映像を撮影するための放送用レンズや半導体露光装置の投影レンズなどには、大口径レンズが用いられているが、直径 100mm を超える大口径ワークを標準的な超精密加工機を用いて加工する場合、ワーク把持機構への負荷が大きいため、砥石サイズに制限があり適切な加工条件が得られない等、高品位な加工が困難である場合が多い。これに対し、ULG-100D(5A) では、ABC-80MP を研削主軸、B 軸 (ABC-240MP) をワーク主軸とする工法が可能だが、回転数が足りず、適切な加工条件で加工できていなかった。今回の高速回転化により、適正な回転数で加工を行うことができるようになり、標準研削主軸よりも高剛性でトルクが大きい ABC-80MP によって大口径ワークに対して安定した加工が可能となった。

次に、ULC-100F(S)は、スマートフォンカメラのレンズ用金型の仕上げ加工機として数多く導入されているが、スマートフォンの普及率増加と搭載カメラの多眼化により、レンズの生産枚数が増加しており、加工効率の向上が求められている。加工効率を上げるには、送り速度を上げることがだが、面品位を維持するため、送り速度と同時にワーク回転数も上げる必要がある。スマートフォンのカメラ用レンズ金型の場合、形状精度P-V 50 nm以下、面粗さRa 0.3 nm以下と非常に高い加工品質が要求されており、あらゆる機械要素の振動が面品位に影響する可能性がある。通常の回転域では極低振動だが、高速回転時はさまざまな要因から回転振動が発生し、加工面を悪化させるので、ワーク主軸回転数800～1000 min<sup>-1</sup>近辺での運用にとどまっている。

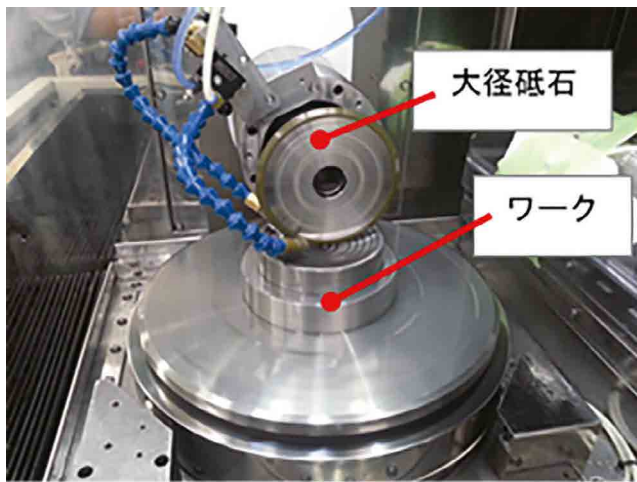


Fig. 3 大口径レンズ加工の様子

そこで、2章で述べた新構造に加え、高速回転域におけるモータやその制御パラメータの最適化を行った。効果の検証として、Z軸トルク値の比較を行った。主軸の回転振動がZ軸に伝わり刃先切込み方向であるZ軸方向を振動させることで、加工面の悪化につながっているため、Z軸のトルク値を見ることで振動の強さを評価できると考えられる。Z軸トルク値を周波数解析したスペクトログラム(改良前後)をFig. 4に示す。改良ワーク主軸では、600～800 Hz帯のピーク(横縞模様)が弱まっており、Z軸振動に影響しているワーク主軸の回転振動が低減したことを確認できる。今後、更なる最適化により、高速回転でも良好な加工面を得られる生産性の高いワーク主軸の実現を目指していく。

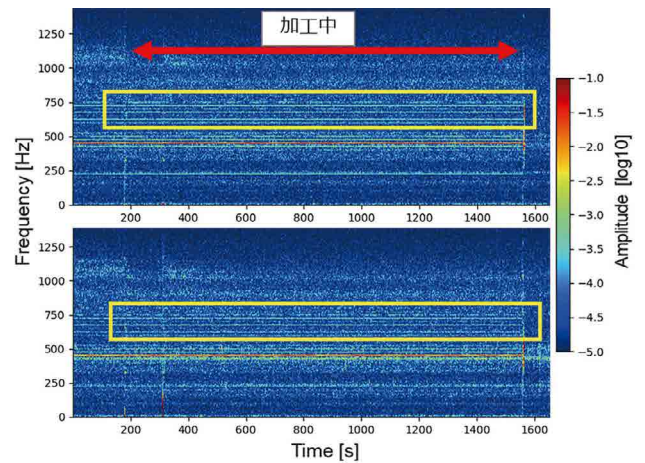


Fig. 4 3000min<sup>-1</sup>におけるスペクトログラム  
(上:改良前、下:改良後)

## 4 おわりに

ワーク主軸ABC-80MPの構造、諸条件を改良することで、ワーク主軸の高速回転化と高精度化を実現した。本ワーク主軸の適用事例を深耕し、また、更なる開発により適用範囲の拡大を目指していく。



# TCmini シリーズ 温調 PLC TC11-03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。

現行機種 TC5-03 は産業機器、食品厨房機器などの幅広い分野の「温度制御 PLC」として採用されてきたが、更なる市場ニーズに応えるため、温度制御の高性能化・機能拡張を実施した TC11-03 を開発した。

新 MCU<sup>注1)</sup> を採用し、従来機種 TC5-03 の取付・機能互換を保ちながら、制御性能の高性能化・機能拡張を実現している。

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 TC11-03の特長

- 1) 制御性能向上: ラダー処理時間が従来機比 1/2
- 2) 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 4 倍
- 3) 温度制御 (温度入力) の強化:  
サンプリング周期: 従来機比 4 倍高速化  
チャンネル毎に基準温度の読取を可能 (従来は各チャンネル共通) とし、耐ノイズ性が向上
- 4) ネットワーク機能強化: Ethernet 通信、USB 通信  
Ethernet 通信: Modbus/TCP マスタ / スレーブ対応
- 5) 機能拡張:  
従来機よりアナログ入力 (4-20mA) 3 点, アナログ出力 (4-20mA) 1 点  
シリアル通信 (RS485) 1 点、温度入力 (熱電対) 1 点が拡張可能
- 6) 実装部品の削減:  
部品削減により片面実装 (従来は両面実装)

## 3 仕様

Table 1 TC11-03主な仕様

項目	TC11-03	TC5-03 (従来機)
電源電圧	DC24V	DC24V
外形寸法 (mm)	150 (H) × 220 (W)	150 (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	—
熱電対入力	6 点	5 点
シリアル通信 (RS485)	3 点	2 点
アナログ入力/出力	4 点/2 点	1 点/1 点
汎用入力/出力	8 点/12 点	8 点/12 点
部品実装面	片面実装	両面実装
パネル I/F	1 点	1 点
処理時間	4kW で 5ms 以下	4kW で 10ms 以下
プログラム容量	32k ワード	24k ワード



Fig. 1 TC11-03 外観

## 4 効果/事例

TC11-03 は温度制御の高性能化とともに、顧客要望の多かった Ethernet 通信、USB 通信等の通信機能を強化し、スマートファクトリー化を支援する製品となった。

また、環境調和型製品であった従来機に対して更に部品点数を削減した。

### 【採用事例】

産業機器: 熱風乾燥機, 金型冷却装置

厨房機器: スチームオープン, コンベアオープン

# ロボットコントローラ TS5000-EMS の紹介

## 1 概要

当社のロボットコントローラは、2011年に現行の主力機となる TSL3000 を上市、それらの高出力版や EU 指令対応版などをシリーズ化してきた。2019年、それまでの TS3000 シリーズから通信機能やプログラム言語などを大幅に改良し、高速・高軌跡精度のスカラロボット THE600 に対応したコントローラ TS5000-MS を上市した。2021年、欧州向けに、最新の EU 指令に準拠した「TS5000-EMS」を開発した。

## 2 特長

TS5000-EMS は TS5000-MS をベースに、主に安全部の回路や部品を各種安全規格に対応するものに変更し、かつ集約する事で外形寸法増加を最小限に抑えた。また、将来的に大型機種 (THE800 / THE1000) にも対応できるモータンプ容量を確保しつつ、外付け部品無し・本体のみで<sup>(※注1)</sup> EU 指令対応を完結した。TS5000-EMS の外観を Fig. 1 に示す。



Fig. 1 TS5000-EMSの外観

TS5000-EMS の非常停止、ティーチペンダントのイネーブルスイッチや安全扉信号の処理は、安全リレーモジュールを追加することで、部品故障があったとしても、より確実にロボットを停止できる。

TS5000-EMS と、スカラロボット THE400-E/THE600-E を組み合わせて適合する EU 指令を Table 1 に、また、その安全性能を Table 2 に示す。

Table 1 TS5000-EMSが適合するEU指令

機械指令 2006/42/EC	低電圧指令 2014/35/EU	EMC 指令 2014/30/EU
EN ISO10218-1:2011 EN ISO12100:2010 EN ISO60204-1:2018 EN ISO13849-1:2015 EN ISO13850:2015	EN61800-5-1:2007 /A1:2017	EN55011 A1:2017 EN61000-6-4:2019 EN61000-6-2:2019 EN61800-3:2018 Emission: PDS of category C2 Immunity: Second environment

Table 2 TS5000-EMSの安全性能

ISO13849-1:2015 安全カテゴリー	ISO13849-1:2015 パフォーマンスレベル
カテゴリー 3	PL = d

規格対応については、第三者機関の TÜV SÜD にて TÜV マーク認証と安全規格適合証明を取得した。証明書を Fig. 2 に示す。



Fig. 2 TÜVマーク認証(左)と適合証明書(右)

また使用している全部品について RoHS2 指令への適合を確認しており、環境にも配慮した製品となっている。

KCs マーク (韓国)、TS マーク (台湾) に順次適合させ、グローバル市場での顧客要求に応えていく。

※注1: 小型コントローラ筐体の場合、外付けのフィルター等対策部品を外部に付加して対応するメーカーもある

### 3 仕様

TS5000-EMS の仕様を Table 3 に示す。

Table 3 TS5000-EMSの仕様

項目	仕様	
形式	TS5000-EMS	
制御軸数	4 軸	
サーボ方式	デジタルサーボ	
位置検出方式	アブソリュート方式	
主メモリ	コントローラ内蔵 FlashROM 容量 : 12Mbyte	
補助メモリ	SD カード (SD、SDHC) 最大容量 : 32Gbyte	
ファイル 保存数	主メモリ : 最大 512 補助メモリ : 最大 512	
最大プログラム 行数	1 プログラムあたり データ部 5000 ポイント プログラム部 5000 行	
プログラム言語	専用言語 : SCOL2	
動作命令	PTP, CP (直線, 円弧), ショートカ ット, アーチ	
速度設定	オーバーライド/速度リミット/ プログラム命令 各 1~100%	
加速度設定	プログラム命令 1~100%	
トルク制限	プログラム命令 1~100%	
座標系	ベース, ワーク, ツール座標を 設定可能	
教示装置 (オプション)	ペンダント : TP5000 PC ソフト : TSAssist	
通信機能	Ethernet 1ch (1Gbps) 無手順通信, HOST コマンド通信, 内蔵 PLC 通信等	
I/O	汎用	入力 8 点/出力 8 点
	システム	入力 13 点/出力 9 点
	ハンド	入力 8 点/出力 8 点
外形寸法 (mm)	410 (W) × 161 (H) × 350 (D)	
質量 (kg)	13	
電源	単相 AC190V~240V 50/60Hz	
オプション	・ 拡張入出力信号 (入力 21 点/ 出力 17 点) ・ フィールドバス機能 (CC-Link, EtherNet/IP, EtherC AT, PROFINET, DeviceNet, PROFIB US) ・ コンペア同期機能	
安全規格	Table 1 による	
対応する スカラロボット	THE400-E, THE600-E (THE800-E, THE1000-E 予定)	

### 4 効果・事例

現状、スカラロボットは従来型の THL シリーズが、TSL3000 シリーズとの組合せで各種アーム長 (300mm ~ 1200mm) のラインアップ完了しているが、TS5000-EMS との組合せで対応する THE-E シリーズは市場でも要求が多い 400mm, 600mm (THE400-E, THE600-E) の 2 機種を先行で上市した。THE400-E, THE600-E の外観を Fig. 3 に示す。



Fig. 3 THE400-E, THE600-Eの外観

今回、第三者機関にて安全規格適合証明を取得したことで、Sler は TÜV のサイトで当社ロボットの整合規格を一覧出来る事から、即座に採否の意思決定出来る点が大きなメリットである。多様化するグローバル市場にスピード感を持って対応できる商品として、適合機種を増やし、市場要求に沿った商品開発を継続する。

### 5 終わりに

今後は THE-E シリーズの上位アーム長ラインアップを拡充開発、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、展開する。

昨今の協働ロボットの登場により、産業用ロボットに関する顧客ニーズは、安全性をより要求する傾向が高まっている。今回の安全規格適合証明プロセスで得た知見を活かし、顧客満足 の最大化に努めていきたい。

# 芝浦機械の NC 開発の歴史



R&D センター  
シニアエキスパート

藤田 純



芝浦機械株式会社  
OB

鐘本 政和

## 1 はじめに

芝浦機械（前東芝機械）（以下当社）は、自社で NC（数値制御装置）を開発、製造している国内では数少ない工作機械メーカーの一つになっている。その理由として以下のようなことが挙げられる。

- ・当社の淵源は（株）東芝の重電部門の機械工場から発しており、設立当初から（株）東芝と深いつながりを持っていたこと、そのためにエレクトロニクス分野でも緊密な連携を保ってこれたこと。

- ・昭和 52 年、（株）東芝から NC の事業移管を受け、府中工場の NC 開発設計、製造、品質検査などに携わる技術者が沼津工場に約 2 年間滞在して、当社に NC の技術を継承する機会が得られたこと。

- ・米国の Kerney & Trecker 社と昭和 50 年、マシニングセンタの技術提携をし、NC を使った工作機械に関する利用技術が蓄積されていたこと。

- ・関連会社として東栄電機という電気制御装置製造の専門メーカーがあり、エレクトロニクス製造ラインによって NC の製造が支えられていること。

- ・このほか当時、マグネスケールを使ったハードウェア NC 装置 POSITION MASTER の開発（昭和 48 年）など、NC に先行する技術開発が行われていたこと。

- ・高性能なマイクロコンピュータが市販されて、ソフトウェアによる制御技術が飛躍的に向上したこと。

- ・当時、制御部でも通産省の助成金をもって、DEC の 12 ビットマイクロコンピュータ LSI 11 を用いた CNC の試作が行われていて、工作機械をリアルタイムで制御するソフトウェアの基本的な技術基盤が出来上がっていたこと。

当社の NC の開発には非常に多くの方々携わってきている。以下では、こうした関係者の紹介を含めて当社の NC 開発の歴史について述べたい。

## 2 (株)東芝からの NC の事業移管

まず当社の NC 事業の基盤を作るのに大きく貢献することになった昭和 52 年の（株）東芝からの NC の事業移管から話を始めたい。

### 2.1 (株)東芝のそれまでの NC 事業

（株）東芝では当時、府中工場以下のような NC を製造していた。以下 TOSNUC<sup>®1)</sup>XXX を T-XXX と記述する。

#### 1) T-420M

（株）東芝の 16 ビット・ミニコン TOSBAC40 シリーズを使った NC

#### 2) T-420P

TOSBAC40 シリーズを使ったパンチプレスメーカー向けの NC

#### 3) T-300M、L

（株）東芝製 12 ビットマイクロコンピュータを使ったマシニングセンタと旋盤用 NC

当社のマシニングセンタでは当時、T-300MX を使用していた。このうち T-420M、420P、300M の製造、試験設備が当社に事業移管され、当社の技術者にその内容が教育された。

事業移管の理由として、NC は工作機械メーカーが自社で作った方が迅速に顧客ニーズに対応でき T-300MX を使っていた当社に移管するのが適当と（株）東芝で判断したことによると思われる。

## 2.2 | 新しく開発中のNCの移管

当時、府中では松本技監のもとに、AMD社のビットスライスCPUを用いた高性能なCNCの開発が進められていた。

ビットスライスCPUを用いたのは、マイクロプログラムを用いて複雑なACサーボの計算を高速に行うことを目的としていたことによる。

この新しいNCは、表示器に当時としてはまだ珍しかったPDP表示器を用い、サーボも誘導モータの制御も可能とするなど非常に意欲的なものを目指していた。

この開発に携わっていた松本技監をはじめとするメンバーが、先遣隊として沼津工場に来て開発を始め、その3か月後にこれまでのNCの設計、製造関係者が出向してきてNC事業移管がはじめられた。

開発メンバー：松本技監

(ハードウェア)島田・大塚・長山氏

事業移管メンバー

(ソフト設計関係)中田(300)・熊谷・菊池氏(420)

(ハード設計関係)野村・博田・目黒氏

(ハード・試験関係)深見・堀場・江沢・奈良岡・小笠原・設楽氏

(製造関係)大木氏

開発メンバーの統括者 松本技監は(株)東芝のNCの開発を主導されてきた方でサーボ制御に造詣が深く、その開発態度は、私たちに深く印象付けられた。また松本技監は(株)東芝の出向者からも深く信頼されていた。

当社では昭和52年、事業部の電気制御に対応するそれまでの第一制御技術部の他に、NCの内製強化を目的とした第二制御部が新設され、飯村部長のもと、人員面でも開発・設計・試験・サービスの強化が図られた。移管されたソフトは、当社ではT-420Mは足立氏、T-300は尾崎氏、T-300PGは大芦氏に引き継がれた。



Fig. 1 T-300初出荷時(後藤氏提供)

また、ジグを使った基板単体の試験装置、出荷前にNC本体を連続的に温度試験する恒温槽などNCの出荷検査を行う装置、出荷試験の結果を経歴として残す出荷管理システムなどは、8工場に新設された電子装置課に設置され、多くの新しいメンバーがここで作業を行うようになった。

昭和53年4月24日、T-300が電子装置課から初出荷されたときの写真をFig. 1に示す。

現在では、NCの出荷関連システムは、東栄電機(株)に移管されている。

## 3 T-500MXの開発

(株)東芝のメンバーの開発したハードウェアをベースに、当社のマシニングセンタ向けのT-500MXが開発された。開発のリーダーは森本氏で、ソフトウェアはLSI 11で試作したシンプルなマルチタスクリアルタイムOSをベースに当社で開発したソフトウェアを採用した。この後、制御システム事業部ではT-500MXを中心としたライン展開を行う制御設計課(制設)と、次期NCを開発する第二制御開発課(二制開)に分かれてNCの開発を行っていった。

TOSNUC®はその後、今日まで色々なモデルが開発されてきている。モデルの年代別の変遷をFig. 2に示す。

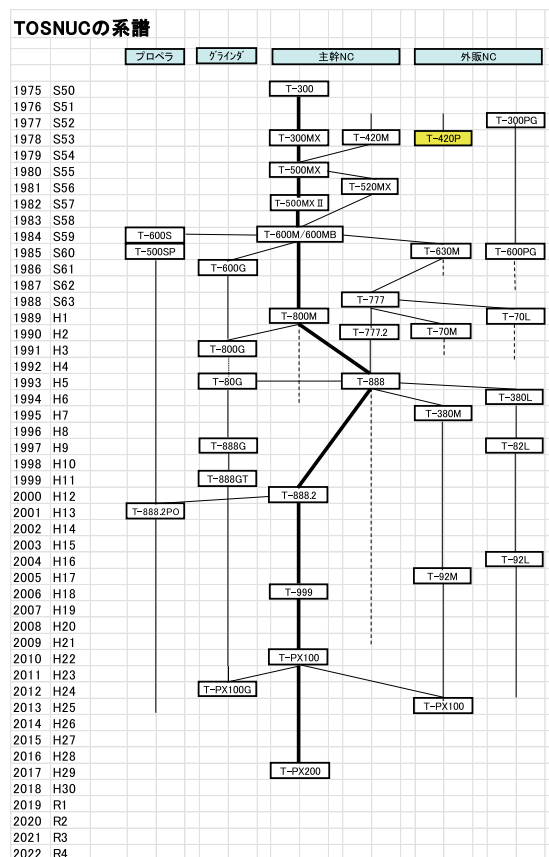


Fig. 2 TOSNUC®モデルの変遷(土屋氏提供)



これにより、大きく、取り扱いが面倒であった紙テープリーダー／パンチャが不要になった。

T-520 で使用した AC インダクションモータは構造が簡単、堅牢で良かったが、電流制御演算が複雑であり、またダイナミックブレーキに難点があった。そこで電流制御演算の負荷が少なくダイナミックブレーキが利く、永久磁石同期モータによる AC サーボを開発した。サーボ制御 CPU 基板 1 枚で 4 軸制御し、最大 3 枚で 12 軸まで制御できる。

CPU にザイログ社の Z8000 シリーズを採用した。開発されたばかりで、周辺チップの正式なマニュアルが未整備で、手書き英文コピーを頼りに開発した。

開発言語はアセンブラで、サーボの処理時間を縮めるために、命令毎の処理サイクル数をリストの右側にコメントとして記述し、実行時間の最短化を図った。

位置検出器として、ギアを介してレゾルバを 3 個組み合わせたアブソリュート位置検出器を採用した。しかし、レゾルバの位相誤差の影響が加工面に表れる問題があり、位置制御に用いるセンサはパルスエンコーダとし、アブソリュート位置検出をレゾルバで行う方式に変更した。

高速高精度加工のための制御機能として、現代制御理論を適用した予見制御を開発し、サーボの遅れによる経路誤差を従来の 1/7 程度に抑えることができたようになった。

シーケンスプログラムでサーボモータを制御するシーケンス軸の機能を開発した。これによりマガジンの制御、AAC の制御などにサーボ軸が使用できるようになった。



Fig. 6 T-600操作ペンダント

## 6 T-777(1987年)

工作機械事業部と制御システム事業部で密に協力し、工作機械営業技術課で横中ぐり盤に最適な NC の操作仕様をまとめ制御設計課で開発した NC である。ポップアップメニュー、ヘルプ機能、対話型プログラミング、手動操作ペンダントにジョイスティック採用などの特徴がある。

開発時の苦労話として、HMI は実際に操作してみないと本当の良し悪しが分からないため、作成された仕様でソフトを組み込んでも、実機で操作してやはり修正ということが多発し、HMI の開発者が嘆いていたのを記憶している。

これらの努力の結果、操作性が飛躍的に向上し、市場の評判が良くヒット作になった。

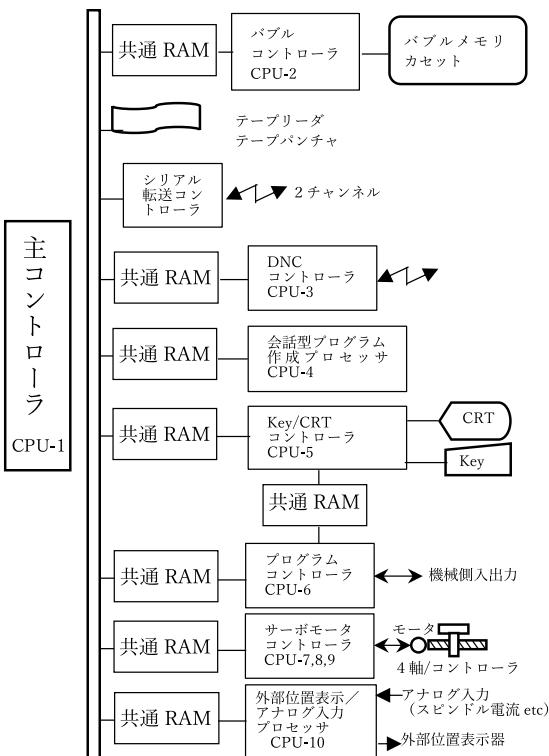


Fig. 5 T-600システム構成



Fig. 7 T-777付きBTD

## 7 T-800(1989年)

モトローラ製の32ビットCPU、MC68020およびVMEバスを採用して高速、高精度、高性能を目指したNCである。HMIに表示専用高速プロセッサを用いて、UNIX<sup>®</sup>\*2) ワークステーションを参考にマルチウィンドウシステムを開発した。ただし、マウスが使えないNCの画面では任意の重ね合わせ表示は逆に不便ということで、位置を固定したマルチウィンドウ表示になった。

標準のI/O機器として3.5(インチ)フロッピーディスクを採用し加工プログラム、パラメータなどの取り扱いが楽になった。

サーボ制御系の高性能化を目指して、位置検出器の分解能を当時としては最高の16万(pulse/rev)のアブソリュートエンコーダを採用した。これにより、位置制御分解能0.1(μm)を標準とした。

また、制御周期も当時としては最高の位置制御周期3(ms)、速度制御周期0.5(ms)とした。

当時、開発言語はアセンブラが一般的であったが、サーボ制御部の背景部およびHMI部でC言語を採用した。また、サーボの背景部タスク管理用に、wait()によりタスクを切り替えるシリアルマルチタスクOSを自作した。これはその後の自社製コントローラINJECTVISOR<sup>®</sup>\*1)、TOSCAST<sup>®</sup>\*1)などのメイン制御部或いはサーボ制御部でも使用された。

テスト機能用として、RS232Cターミナル機能、サーボグラフ表示なども開発した。

金型の高速、高精度、高品位加工向けにCNC SHAPE<sup>®</sup>\*1)機能を開発した。これについては以下に示す。

## 8 金型加工への挑戦

CNC装置で特に高度で実現が困難なものが金型の高速、高精度、高品位加工の機能である。1980年代後半、T-600付きのMPDという金型加工機が自動車メカ殿に納入された。

しかし、T-600は普通のNCであり、金型加工機では当たり前の多数プログラムブロック先読みや、ブロック間加減速の機能がなかった。このため、短線分プログラムを6000(mm/min)指令で加工すると、加工面に数珠玉模様の連続した丸い食い込みが発生した。

T-600では対症療法的なソフトウェア対策を行い、食い込みは防ぐことができたが、先読みブロック数を増やすような改造はできず、形状を認識できないため、加工面を劣化させる振動の抑制と、曲面形状で発生する半径減少誤差の抑制の両立は困

難であった。

最終的にPC上で動作するプリプロセッサを開発し、客先プログラムを読み込み、形状を認識して形状に応じた速度、加減速をつけたプログラムを出力して対応した。

この経験から、金型加工に対応したNC機能を開発する必要性を痛感し、処理性能を強化したT-800でCNC SHAPE<sup>®</sup>(形状認識予見制御)機能の開発を行った。

CNC SHAPE<sup>®</sup>機能はオプションボードで実現した。加工プログラムによりNCが分配したサンプリング周期ごとの移動量をバッファリングし、このデータを用いて形状認識する。認識した形状に応じて算出した目標速度、加減速パターンで再分配することにより、指定された精度を守る最適速度で滑らかな移動を実現することができる。多量の数値演算を短時間で行う必要があり、当時入手可能で最も高速な演算素子であったアナログ・デバイゼスのADSP21000というDSPを採用した。

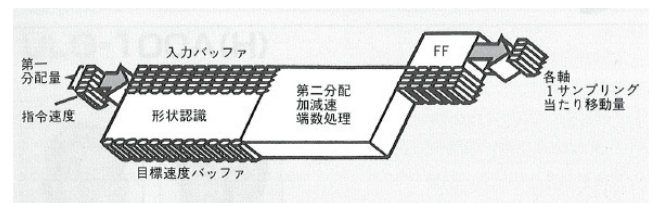


Fig. 8 CNC SHAPE基本構成イメージ

最初の引き合いで、客先の加工プログラムのブロック長が10(mm)程度で、そのまま加工すると多面体になるので、滑らかにする機能が欲しいとの要望に応じてスムージング機能を開発した。これは、指令された点を通り3次までのスプライン補間をするものである。

その後追加された機能の主なものは、

- (1) CAMのデータ作成における三角パッチの影響で加工面が乱れる現象の対策として「平均化機能」
- (2) CAMデータのランダムな乱れの影響を軽減する「なだらか制御」
- (3) NURBSプログラムに対応する「NURBS補間」
- (4) ポールエンドミルの加工点に応じて主軸回転数と送り速度を変更して工具摩耗を抑制し、加工能率を向上する「SF制御」
- (5) ワーク上の領域を指定してZ方向オフセット、S、Fを可変する「領域加工」
- (6) 機械の送り駆動機構の固有振動に伴う振動を広い周波数領域で抑制する「広帯域振動抑制機能」
- (7) 補間後加減速による経路誤差を抑制して加工速度を向上する「ShapeAssist」

などがある。



## 9 T-888(1994年)

操作性重視の T-777 と性能重視の T-800 の良いところを合わせて、しかもローエンド機からハイパフォーマンス機までの全てをカバーすることを目標として開発された。

ハードウェア的にはメインユニットを取り付け面積比 1/5 に小型化した。また、表示器をそれまでの CRT から 10 インチプラズマ表示器（オプションで 10 インチカラー TFT 液晶表示器）に変更し、ペンダントの軽量、薄型化を実現した。

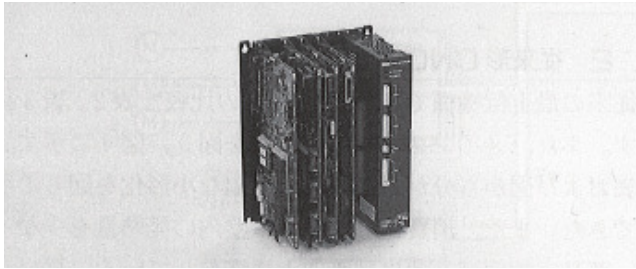


Fig. 9 T-888メインユニット

また、当社の汎用 PLC の TC200 をバス接続し、豊富な I/O 機能を取り込み、CNC の操作パネルからラダープログラムの編集や実行状態のモニタリングを可能とした。

メイン CPU の処理能力が T-800 の 2 倍以上になり、ソフトウェア処理能力が強化された。これにより、金型高速、高精度、高品位加工を行う CNC SHAPE<sup>®</sup> 機能の処理能力が向上した。

サーボ系は分解能  $2^{20}=1,048,576$  (カウント / rev) の高分解能シリアルアブソリュートエンコーダを採用した。

このほかに開発した機能の例として、UIT (ユーザインターフェイスツール) がある。汎用パソコン上で UIT 言語を用いて、NC 上でのキー処理、画面表示やデータの入出力等の処理手順を記述した UIT プログラムファイルを作成し、実行形式に変換して NC ヘロードして実行するものである。これにより、機械担当側で機械固有の NC 機能を作成することができる。

T-888 では研究所、工作機械事業部と共同でオービットポーリング機能の開発を行った。これはマシニングセンタの主軸に旋削工具を装着し、主軸の回転位置と XY 軸の円弧補間動作を同期させ、連続可変半径のポーリング加工を行うものである。この機能は特許も取得し、同業他社へのライセンス提供も行った。

T-888 は現段階で当社の CNC の中で生涯生産台数最多を記録している。



Fig. 10 T-888ペンダント

## 10 T-888.2(2000年)

従来使用していた CISC の CPU に対して、より高速で倍精度浮動小数点演算が高速で実行できる RISC の CPU を採用し、全体の開発言語を C に統一した。

また、世の中では高速シリアル通信を用いて、デジタルアンプを接続することで、アンプの分散配置、軸数拡張の容易化などがうたわれていた。この流れに沿って、T-888 のコントローラとアンプを位置指令を切り口として、高速シリアル通信で結ぶシステムを開発し T-888.2 とした。

アンプ毎に CPU を搭載し、位置、速度、電流のデジタル制御を実現した。電流制御までソフト、デジタル制御を行ったのは当社では T-888.2 が最初である。

なお、位置制御周期は 0.5(ms)、速度制御周期 0.25(ms) である。

## 11 T-999(2006年)

T-888.2 でソフトデジタル制御アンプを開発したが、この方式ではさらなる高性能化には限界が見えた。そこで、デジタル制御の良さとアナログアンプの扱いやすさを合わせた世界一の電流アンプを開発することにした。

制御性能を上げるためには無駄時間を極力短くする必要があるがソフトウェアによるサンプリング制御では無駄時間は数十 ( $\mu$ s) 程度が限界である。そこで、ハードウェアデジタル制

御を行い、コントローラの速度制御部から電流指令と電気角を受け取り、電流フィードバック読み込み時と、電圧指令出力時の電気角をアンプ側で予測することにより、電流フィードバック取得から、電圧指令出力までの無駄時間を3(μs)以下で制御できるカスタムLSIを開発した(Fig. 11 C-engine)。速度制御部と電流制御部のインターフェースは高速、非同期のシリアル通信とし、アナログアンプ並みの扱いやすさと、デジタル制御の高性能を実現した。

これにより、電流制御性能が格段に向上し、工作機械向けのサーボアンプの故障も大幅に減少した。



Fig. 11 開発した電流制御LSI C-engine

新しく統合した画面、取説ビューワなどが追加されたが、従来画面でもファクションキーがタッチパネルによる直接操作になり、操作性がかなり向上している。

高速のEthernet®通信を利用して、CGTech社のCASを搭載したPCとインターフェースすることにより、リアルタイム3次元干渉チェック機能を実現している。



Fig. 12 T-PX100操作ペンダント

## 12 T-PX100(2010年)

工場のネットワーク化が進みPC間のEthernet®<sup>\*3)</sup>での高速データ交換が当たり前になると、加工プログラムの入出力などCNCに対してもデータ通信の高速化要求が大きくなった。当たり前前にPCを使う世界に対応するためにHMIにPCを採用することとし、Windows®<sup>\*4)</sup>OSを搭載したCNCを開発した。HMIの開発言語はC#となった。メインコントロール部のOSにも市販のT-kernelを採用し、USBなどの汎用のI/Oなどに容易に対応できるようにした。

操作ペンダントをFig. 12に示す。表示画面は15インチ液晶である。

## 13 T-PX200(2017年)

スマートフォンが普及し、HMIにタッチパネルを搭載したスマートなCNCが各社から発表された。この流れに乗るために19インチ画面にタッチパネルを採用したCNCを開発した(Fig. 13)。



Fig. 13 T-PX200操作ペンダント

## 14 おわりに

当社の CNC の開発の歴史をミリング用の主要機種についてみてきた。その時点において機能、性能向上に使用可能な要素を取り入れ、操作性、運動性能、コストパフォーマンスの向上を通して、工作機械の競争力強化に貢献することを目的として進化させてきた。

さらに CNC で開発された要素は射出成形機のコントローラ INJECTVISOR<sup>®</sup>、ダイカストマシンのコントローラ TOSCAST<sup>®</sup>、押出成形機のコントローラ EXTVISOR<sup>®</sup><sup>\*1)</sup>、ロボットのコントローラなどへ適用されてきた。ハードウェア要素の共通化はもちろん、ソフトウェアでは HMI の OS、マルチウィンドウシステム、メインコントローラ OS、サーボの OS、テストターミナル、グラフ表示、伝達関数測定機能などが代表的である。

以前は、組み込みコントローラのソフトウェアは自主開発が主流であったが、近年は PC の普及、ネットワークの発達、汎用のインターフェースを持つ周辺機器、生産管理ツールの普及などにより、これらとの親和性の高いプラットフォームを利用して効率よく機能開発を行うことも重要になってきた。

また、CPU 処理速度、検出器分解能、制御周期などの基本性能は各社ほとんど同程度となり、差別化要因になりにくくなった。

このような状況を鑑みて、これからの当社の CNC をどうしていくかをよく考える必要がある。

- \* 1)「TOSNUC」「INJECTVISOR」「TOSCAST」「CNC SHAPE」「EXTVISOR」は、芝浦機械（株）の登録商標です。
- \* 2) UNIX は、米国およびその他の国におけるオープングループの登録商標です。
- \* 3)「Ethernet」は、富士フィルムビジネスイノベーションの登録商標です。
- \* 4)「Windows」は、米国 Microsoft Corporation の米国およびその他の国における登録商標です。

# 特許・社外発表（講演）・社外発表（執筆）・受賞

（令和3年度下期〔10月-3月〕、令和4年度上期〔4月-9月〕）

## 国内特許

	登録番号	発明者	発明の名称
1	6943703	大野 博司 <sup>*1</sup> , 津野 聡 <sup>*1</sup> , 佐々木 光夫 <sup>*1</sup> , 山田 智彦 <sup>*1</sup> , 塩見 康友 <sup>*1</sup> , 藤巻 晋平	ノズル、処理装置、及び積層造形装置
2	6948928	秋山 貴信, 槻田 豊, 伊谷 慎也	主軸装置および工作機械
3	6949342	笹井 裕也, 鮫島 孝文, 飯塚 佳夫, 長田 華穂, 瀧 健太郎 <sup>*2</sup>	低分子量ポリマーの製造方法、メルトブローン不織布の製造装置および製造方法
4	6953271	浅沼 伸行	成形装置
5	6957247	多田 敦司, 宮本 拓磨	工作機械および工作機械の制御方法
6	6961343	大曲 啓明, 富安 正輝, 室伏 勇	研磨装置
7	6961381	橘田 英晃	平行度調整機能付き型締装置
8	6961382	橘田 英晃	クロスヘッド傾き抑制機能付き型締装置
9	6966217	小久保 光典, 杉浦 裕喜, 藤原 茂, 橋本 有紀	転写装置および転写方法
10	6970073	小林 博之	対向主軸型工作機械用工具
11	6970730	内藤 光俊, 辻 眞, 野田 三郎 <sup>*3</sup>	ハイブリッド式中子駆動装置及び成形機
12	6974413	佐野 孝義, 田村 政嗣, 池田 佳久, 齊藤 充彦, 湯川 大地, 遠矢 良洋, 山口 智則, 萩原 拓也	セパレータフィルム製造装置及びセパレータフィルムの製造方法
13	6983609	野田 三郎 <sup>*3</sup> , 豊島 俊昭, 船場 信	給湯装置及び成形機
14	6995515	武田 勝久, 根岸 祐司	ラベル貼付装置及びラベル貼付ロボット
15	6999263	多田 敦司, 奥田 真弘, 黒岩 稔	複数のボールネジの製造方法及び工作機械
16	7040997	宮本 拓磨, 松崎 敬彦	主軸アタッチメント方向調整装置および工作機械
17	7045281	中田 光栄	バルブ、金型及びダイカストマシン
18	7055077	萩原 明彦, 芹澤 光明	パターン転写装置およびパターン転写装置の制御方法
19	7055263	渡邊 健氏, 賀茂 剛晴, 山口 智則, 富樫 直人	延伸装置及びクリップ個数調整方法
20	7057707	豊島 俊昭, 野田 三郎 <sup>*3</sup>	射出装置及び成形機
21	7058794	三田 哲也	成形機
22	7059103	池田 佳久, 芹澤 光明, 加藤 浩明	シート・フィルム延伸装置
23	7059219	池田 佳久, 佐野 孝義, 田村 政嗣, 加藤 浩明, 竹下 裕也	同時2軸延伸装置のクリップリンク機構
24	7061173	辻 眞, 豊島 俊昭, 田島 良英, 野田 三郎 <sup>*3</sup>	成形機
25	7062503	森 啓祐, 丸 達彦	型締装置、成形装置及び型締装置の制御方法
26	7062601	池田 佳久, 萩原 拓也, 板垣 裕太郎	チェーン状態検出装置及びシート・フィルム延伸装置
27	7062620	芹澤 光明	両面同形状転写装置および両面同形状転写方法
28	7063670	津野 聡 <sup>*1</sup> , 大野 博司 <sup>*1</sup> , 佐々木 光夫 <sup>*1</sup> , 山田 智彦 <sup>*1</sup> , 塩見 康友 <sup>*1</sup> , 藤巻 晋平	ノズルおよび積層造形装置
29	7064353	横山 宏司, 早川 直哉	射出装置、成形機及び品質管理プログラム
30	7072495	山内 夏輝, 小林 克憲, 洲上 智規	ロールニップ機構及び複合材料シート製造装置
31	7072623	結城 拓哉, 佐野 孝義, 田村 正嗣, 芹澤 光明, 水上 雄太	抽出乾燥装置
32	7076023	小久保 光典, 杉浦 裕喜, 藤原 茂, 橋本 有紀	転写方法
33	7077002	橘田 英晃	型締力制限機能付き型締装置、型締力制限プログラム
34	7080675	船場 信, 豊島 俊昭	射出装置及び成形機
35	7080963	辻 眞, 豊島 俊昭, 中野 敏彰, 藤岡 俊治, 野田 三郎 <sup>*3</sup>	射出装置、成形機、型付成形機及び成形方法
36	7084842	加藤 友泰	加工区画シャッタ装置

	登録番号	発明者	発明の名称
37	7089013	辻 眞, 佐々木 博成, 豊島 俊昭, 野田 三郎 <sup>*3</sup>	成形機
38	7089574	福田 将彦	加工機及び被加工物の製造方法
39	7089970	小林 昭美, 藤井 重行, 鮫島 孝文	スクリュ、押出機および混練補助エレメント
40	7090043	多田 敦司	工作機械
41	7090577	池田 佳久, 竹下 裕也, 板垣 裕太郎	シート・フィルム延伸装置及びクリップチェーンの張力調整方法
42	7092832	鈴木 照三	スクリュ機械
43	7093681	鮫島 孝文, 飯塚 佳夫, 長田 華穂	混練方法および混練物
44	7099826	小久保 光典, 杉浦 裕喜, 藤原 茂, 橋本 有紀	転写装置および転写方法
45	7101086	小久保 光典, 馬場 丘人, 後藤 利章	転写装置および転写方法
46	7102222	勝又 隆市, 北堀 雄司, 山崎 陽平	射出装置、射出成形機および射出装置の制御方法
47	7102298	勝又 隆市, 北堀 雄司, 山崎 陽平	射出装置および射出成形機
48	7105631	芹澤 光明	パターン転写装置
49	7105714	結城 拓哉	ストローク装置
50	7109318	藤田 純, 伊東 隆充	工作機械および工具異常判定方法
51	7123823	原井 春慶, 木下 征士	バレル支持装置および射出装置
52	7128071	小沼 裕之	射出成形機、射出成形システムおよび射出制御方法
53	7129943	結城 拓哉	エアナイフ
54	7130022	平林 克己, 多田 敦司	工作機械
55	7132349	室伏 勇	工具形状測定装置および工具形状測定方法
56	7132876	藤岡 俊治, 早瀬 一馬, 横山 宏司, 辻 眞, 野田 三郎 <sup>*3</sup>	射出装置及び成形機
57	7133004	辻 眞, 吉田 浩, 野田 三郎 <sup>*3</sup>	成形機用金型及び成形機
58	7133528	渡邊 健氏, 賀茂 剛晴, 山口 智則, 富樫 直人	延伸装置のクリップ移動速度計測装置及びクリップ移動速度計測方法
59	7137729	辻 眞, 中野 敏彰, 熊木 広一, 藤岡 俊治, 野田 三郎 <sup>*3</sup>	局部加圧装置及び成形機
60	7138868	波多野 好幸, 藤本 亮輔, 横山 豪志, 寺山 朗 <sup>*4</sup> , 府山 伸行 <sup>*4</sup> , 大石 郁 <sup>*4</sup>	測温センサピン及びそれを備える測温センサ
61	7139262	山岸 敬登	射出装置およびダイカストマシン
62	7141968	小沼 裕之	射出成形機

\*1 株式会社東芝 \*2 国立大学法人金沢大学 \*3 野田テクノロジー \*4 広島県

## 社外発表「講演」

	題 目	発表者代表	講演会名	主催者	講演日
1	5面加工機による最新の加工事例	相原 正美	5軸/5面加工企業向 オンラインセミナー	(株) NCネットワーク	2021/10/27
2	Experimental Evaluation of Reaction Induced Slurry Assisted Grinding for BK7 Optical Glass	川里 拓平 (慶応大学) 福田 将彦 (共著)	第10回JSME先端生産技術 に関する国際会議	(一社) 日本機械学会	2021/11/14
3	マザーマシンとしての大型門型工作機械の最新の生産性向上・高精度化技術	野中 貴之	超大型門形工作機械の技術	(公社)精密工学会 超精密位置決め 専門委員会	2021/11/19
4	成形品機能・性能向上のための発泡成形技術の探求	橘田 英晃	第3回 未来志向射出成形 技術シンポジウム	東京大学生産技術 研究所 未来志 向射出成形技術 社会連携研究部 門	2021/11/24

	題 目	発表者代表	講演会名	主催者	講演日
5	Basic Study on Reaction Induced Slurry Assisted Grinding for Quartz Glass	川里 拓平 (慶応大学) 福田 将彦 (共著)	ISSAT2021	(公社) 砥粒加工学会	2021/11/30
6	高速プラズマ表面改質成膜装置のプリント配線SAPプロセスへの適用	深田 和宏	表面改質技術の最前線	日刊工業新聞 表面改質展	2021/12/2
7	押出成形機の自動化とDX化への取り組み	上村 広樹	フィルムテック ジャパン (高機能フィルム展)	RX Japan(株) 展示会事務局	2021/12/9
8	高速タクト乾式めっき機の 次世代回路形成プロセスへの適用	深田 和宏	実装フェスタ関西2021 ポスターセッション	(一社)エレクトロ ニクス実装学会	2021/12/14
9	ビデオマニュアルを用いた技能伝承による生産現場力の強化	小川 亮輔	次世代の工場 最新技術研究会	(公社) 大阪府工業協会	2022/1/24
10	先端技術への取り組みとコロナ禍における欧州展示会への出展	長坂 圭祐	第9回学生のための講演会	(公社) 精密工学会	2022/1/31
11	ダイカストマシンにおける環境負荷低減技術のご紹介	豊島 俊昭	オンライン素形材技術セミナー カーボンニュートラルに向けたアルミニウム合金鑄造技術の取り組み	(一財) 素形材センター	2022/2/4
12	押出成形の技術動向	田村 政嗣	第30回 成形加工テキストセミナー 第4巻「先端成形加工技術I」	(一社)プラスチック成形加工学会	2022/3/2
13	フロントローディングによる省エネルギーへの取り組み	藤本 亮輔	日本鑄造協会 電気炉操業委員会	(一社) 日本鑄造協会	2022/3/9
14	システムエンジニアリング力で工場自動化を実現	佐々木 康陽	2022国際ロボット展 出展社セミナー	2022国際ロボット展 出展社セミナー	2022/3/10
15	ダイカストマシンと周辺機器	相田 悟	2022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」	(一財) 素形材センター	2022/3/11
16	マシニングセンタにおける3次元形状補正加工の開発	牧田 丈靖	2022年度精密工学会春季大会学術講演会	(公社) 精密工学会	2022/3/15
17	二軸混練【WEBセミナー】	百地 弘	二軸混練【WEBセミナー】	(株) R&D支援センター	2022/3/25
18	Meltblown nonwoven fabric sheet production	笹井 裕也	PPS-37	Polymer Processing Society	2022/4/13
19	凝固・偏析挙動の理論的検討による718合金積層造形部の割れ対策	山下 正太郎	2022年度溶接学会春季全国大会	(一社)溶接学会	2022/4/13
20	ロボティクス・メカトロニクス講演会2022 東京都立大講演論文への共著者掲載	中村 陽一郎、 和田 侑也	ロボティクス・メカトロニクス講演会2022	(一社) 日本機械学会	2022/6/1
21	IoTを用いた工作機械の予知保全取組についてのご紹介	四條 弘次	C22切削技術専門委員会	東芝エネルギーシステムズ(株)	2022/6/9
22	Application of RISA grinding method to multiple optical glasses	高丸 ひなた (慶応大学) 福田 将彦 (共著)	The 6th CIRP Conference on Surface Integrity	CIRP	2022/6/10
23	高せん断付加によるPP/GFの射出成形流動長	笹井 裕也	プラスチック成形加工学会 第33回年次大会	(一社)プラスチック成形加工学会	2022/6/15
24	二軸押出機内のペレットの溶融可塑化メカニズムの解析	尾原 正俊	プラスチック成形加工学会 第33回年次大会	(一社)プラスチック成形加工学会	2022/6/16
25	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	プラスチック成形加工学会 第33回年次大会	(一社)プラスチック成形加工学会	2022/6/16
26	芝浦機械二軸混練押出機TEMシリーズとCNF利用促進に向けた取り組み	安倍 賢次	研究会参加会員向け講演 (発足後第2回委員会)	静岡県経済産業部 産業革新局 新産業集積課(CNF活用資源活用資源循環研究会)	2022/6/28

	題 目	発表者代表	講演会名	主催者	講演日
27	芝浦機械の双腕協働ロボット	矢部 幸次	ロボットテクノロジージャパン2022 出展者ワークショップ	(株)ニュースダイジェスト社	2022/6/30
28	高速プラズマ表面改質成膜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	深田 和宏	高速プラズマ表面改質成膜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	実装フェスタ関西2022	2022/7/8
29	IoT技術の導入で変わるモノづくり現場	富永 昌登	芝浦機械のIoTプラットフォーム「machiNet」について	静岡県工業技術研究所沼津工業技術支援センター・静岡県工業技術研究所沼津センター協議会	2022/7/15
30	自硬性鋳型による鋳物の工程	藤本 亮輔	日本鋳造協会 鋳造初級講座	(一社) 日本鋳造協会	2022/7/23
31	鋳造時における金型内の調査	中田 光栄	第8回 ダイカスト研究部会	(公社) 鋳造工学会 ダイカスト研究部会	2022/7/28
32	第19回 YDEC技術講座	林 勇人	ダイカストマシンの計測と活用方法	(一社) 日本ダイカスト協会	2022/8/30
33	超精密マシニングセンタ UVMシリーズ ~ 最先端への扉を開く機能オプション群 ~	天野 啓	ABTEC2022 我が社の新技術発表会	(公社) 砥粒加工学会	2022/8/30
34	楕円振動切削によるガラス材光学部品の加工検討	福田 将彦	楕円振動切削によるガラス材光学部品の加工検討	(公社) 砥粒加工学会	2022/8/31
35	二軸混練【WEBセミナー】	百地 弘	二軸混練【WEBセミナー】	(株)情報機構	2022/8/31
36	ダイカストマシンの機能と性能	相田 悟	アルミニウム合金ダイカスト実践講座	(公社) 日本鋳造工学会東海支部	2022/9/10
37	ADC12合金における金型内の溶湯調査	相田 悟	鋳造工学会 第180回全国講演大会	(公社) 日本鋳造工学会	2022/9/27
38	中真空PVDによる導体層の形成技術	上山 浩幸	第55回IEEE EPS Japan Chapter イブニングミーティング	IEEE EPS Japan Chapter	2022/9/30

## 社外発表「執筆」

	題 目	執筆者 (筆頭のみ)	掲載誌名	発行所
1	High-precision machining of the bipolar plate mould contributes to higher power density of fuel cell	福田 将彦	CMM magazine 2021年12月号	MANCEF
2	金属3D造形機『ZK』シリーズの特徴と効果	藤巻 晋平	機械技術 2022年1月号	(株)日刊工業新聞社
3	スマートファクトリーに向けたIoTの取り組み	阿部 裕治	IoT研究部会 研究報告書 (2022年2月発行)	(公社) 日本鋳造工学会 IoT研究部会
4	高生産性と高付加価値成形を実現する「EC1800SXⅢ」の特徴	宮川 穰	プラスチックスエージ2022年2月号	プラスチックスエージ
5	ビデオマニュアルを活用した技能伝承	小川 亮輔	砥粒工学会誌 第66巻 5号	(公社) 砥粒加工学会
6	高せん断付加による樹脂の低分子量化と粘度低下シミュレーション	笹井 裕也	成形加工 2022年3月号	(一社) プラスチック成形加工学会
7	高速PVD両面成膜装置	深田 和宏	インターネフコン(2022/1/19展示会)での展示用パネル	RX Japan(株)
8	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	中村 陽一郎	2022国際ロボット展(2022/3/9~2022/3/12)展示用パネル	(株)日刊工業新聞社
9	超大型工作機械の特徴とその高度活用技術	宮本 拓磨	機械と工具(2022年5月)	日本工業出版(株)
10	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'22(2022年6月)	(一社) プラスチック成形加工学会

	題 目	執筆者 (筆頭のみ)	掲載誌名	発行所
11	芝浦機械のDXに対する取り組みと、精密加工分野での応用事例	室伏 勇	素形材2022年6月号	(一財)素形材センター
12	ダイカストマシンの省エネルギー化	豊島 俊昭	素形材2022年7月号	(一財)素形材センター
13	溶接(FSW)を取り込んだ工作機械の現状と展望	相原 正美	先端加工技術No.117(2022年6月)	(一財)先端加工機械技術振興協会
14	3次元形状の金型を高精度化する補正手法の開発	栗山 邦隆	型技術会議2022(2022年6月)	(一社)型技術協会
15	光学ガラスレンズの反応誘起スラリー援用研削法におけるスラリー条件の解析	柿沼 康弘 (慶応義塾大学) 福田 将彦 (共著)	IJAT(2023/1/17)	富士技術出版(株)
16	付加価値を高める金型3次元形状の高精度化技術	栗山 邦隆	機械技術2022年7月号	(株)日刊工業新聞社
17	高速プラズマ表面改質成膜装置のプリント配線SAPプロセスへの適用	深田 和宏	JPCA show 展示会でのパネル展示 2022/6/15~2022/6/17	JPCA show
18	楕円振動切削によるガラス材光学部品の加工	長坂 圭祐	2022年度砥粒加工学会学術講演会 論文集(2022年8月)	(公社)砥粒加工学会
19	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論文集 (2022年10月)	(一社) 日本ダイカスト協会

## 受 賞

	賞 名	賞の概要	対 象	主催団体	受賞日
1	日本機械学会第13回 生産加工・工作機械部門 『優秀講演論文表彰』 主軸速度変動によるびり 振動抑制の自動最適設計 - 変調指数に基づくびり 変動エネルギー最小化による パラメータ選択 -	生産加工・工作機械技術の向上に資するところ大として、特に優れたものに贈呈	伊東 隆充 松崎 敬彦 柿沼 康弘 <sup>*1</sup> 大和 駿太郎 <sup>*1</sup>	(一社)日本機械学会	2019/10/4
2	型技術協会賞 第32回 『技術賞』受賞 3次元形状の金型を高精度化する補正手法の開発	特に優れた貢献度の高い型技術の開発者に贈呈	栗山 邦隆 室伏 勇 土屋 康二	(一社)型技術協会	2022/6/23

\*1 (学)慶応義塾大学 \*前号掲載漏れ含む



# 受賞トピックス

## 1 日本機械学会 生産加工・工作機械部門『優秀講演論文表彰』受賞

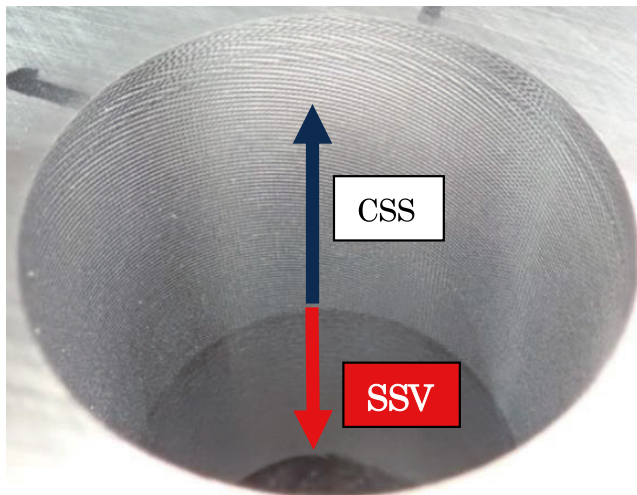
2019年10月4日

日本機械学会 第13回 生産加工・工作機械部門講演会にて論文「主軸速度変動によるびびり振動抑制の自動最適設計－変調指数に基づくびびり変動エネルギー最小化によるパラメータ選択－」を発表し『優秀講演論文表彰』を受賞しました。

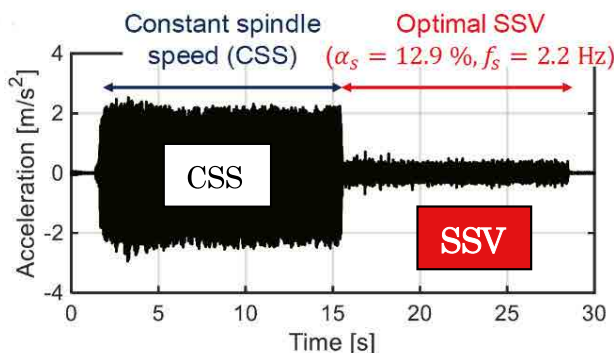
工作機械の旋削加工やボーリング加工などの低回転数領域加工では、びびり振動の効果的な抑制手法として、主軸回転数を変動させるSSV(Spindle Speed Variation)があります。主軸回転数を連続的に変動させるという主軸制御系のみで完結することができる非常に柔軟性が高い方法で、工作機械自身が自律的にプロセスを最適化する知能化システムとの親和性も極めて高い方法となります。

本研究では、SSVと無線工学における周波数変調 (FM) との相似性から、SSV変調指数を定義し、加工プロセスエネルギーの観点から、変調指数に基づくSSVの最適設計手法を提案し、『優秀講演論文表彰』受賞しました。

設計したSSVの最適パラメータ適用後、びびり振動は急峻に減衰され、びびりマークが消え、加工面品質が大幅に向上しました。



最適なSSVを適用した場合の結果



振動抑制効果



表彰状



受賞者代表

## 2 当社超精密マシニングセンタ「UVMシリーズ」に搭載の機能の開発について 型技術協会賞『技術賞』受賞

2022年6月23日

一般社団法人型技術協会より、当社の「3次元形状の金型を高精度化する補正手法の開発」（当社超精密マシニングセンタUVMのオプション機能、撮像式工具形状測定器“FormEye”と工具経路ベクトル補正機能“VectPath”の開発）が、第32回『技術賞』を受賞しました。

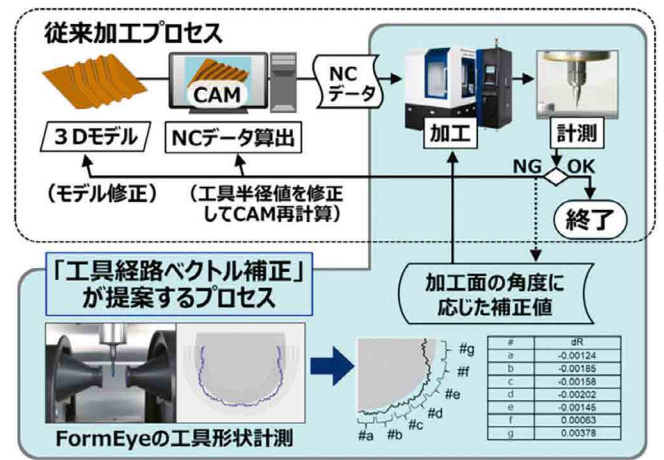
近年、工作機械の分解能はナノメートルオーダーにまで達し、そこで加工される先進デバイス部品は、より複雑化しています。しかし実際の加工現場では複雑形状の測定は困難で、精度が分からないまま加工完了とするケースも少なくありません。金型を3次元的に正しく削ることへの重要性が高まっている中で、モノづくりを次の一歩に進めるため本装置及び機能が開発されました。

このプロセスでは、(1) 工具凹凸の把握、(2) 工具寿命の最適化、(3) 3次元形状の高精度化、(4) 工具の長寿命化と本数削減、(5) CAD/CAMの効率改善、といった効果が期待できます。

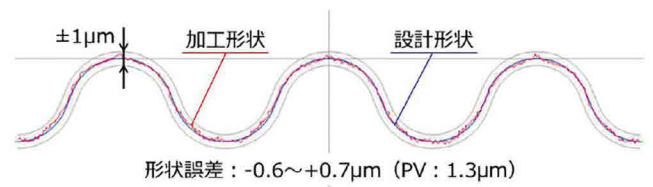
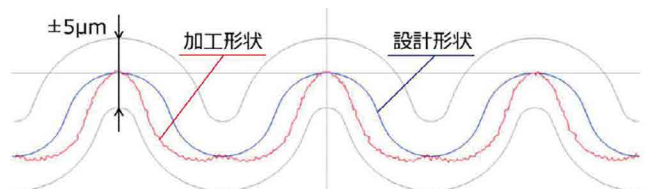
お客様の加工では、金型を精度良く全自動で補正し、工具本数も削減する、非常に便利なツールとして利用することができます。



超精密マシニングセンタ「UVMシリーズ」



工具経路ベクトル補正プロセス



加工形状精度



受賞者代表

# 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、その中からエネルギー・環境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 工具、および工作機械

特許番号:特許第5,548,530号

発明者:

加藤 孝一、澤崎 誠、杉山 晴仁、川合 康史、  
細谷 周平、飯田 正彦、加藤 康徳

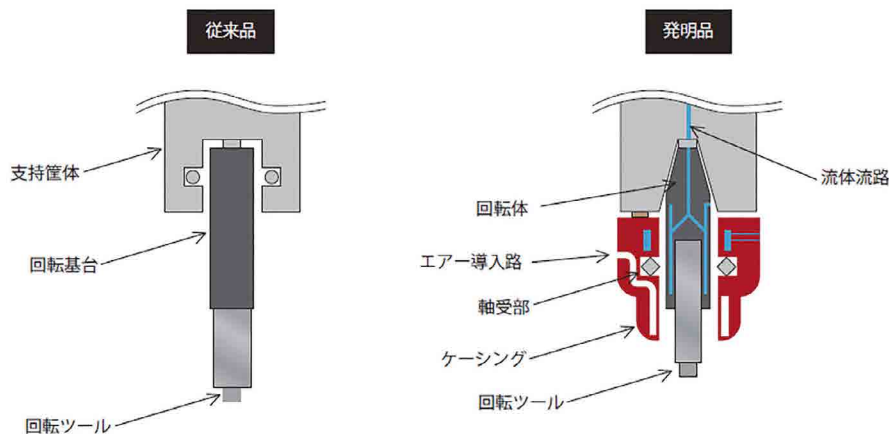
現在、製造業ではSDGsの達成や脱炭素社会の実現を目指すべく、多様な技術開発が行われています。工作機械においては、省エネルギー化や生産性向上に貢献する技術開発が行われています。

従来の工作機械に備わる保持具は、回転基台と支持筐体、およびその間にベアリングが設けられており、高荷重が付加される回転ツールの先端部と距離がありました。このため、回転ツールや保持具は高負荷の荷重を受けるため、回転ツールと回転基台との接続部で荷重の集中やこれに伴う熱変形が発生して、接続が外れたりすることがありました。よって、高荷重が負荷された場合でも、荷重の影響を低減できることが求められていました。

本特許の工具は、回転体とケーシングを備えており、これらの間にスラスト方向およびラジアル方向に対する荷重を受けることができる軸受部が設けられています。このため、ワークを加工する際に工具をワーク側に押圧するなど、工具および主軸

にスラスト方向の荷重が加わった場合でも、軸受部からフレーム側にその荷重を逃がすことができます。また、工具を回転軸に対して交差する方向に移動させるなど、工具にラジアル方向の荷重が加わった場合でも、軸受部からフレーム側にその荷重を逃がすことができます。よって、工具や主軸、およびこれら接続部に直接高荷重が加わることがなく、荷重の影響を低減することができるようになりました。

さらに、本特許の工具は、回転体やケーシングに流体流路(図中、水色)およびエアー導入路(図中、白色)が設けられています。流体による冷却は、ワーク加工時に回転ツールで発生する摩擦熱が工具の軸受部へ伝達することを抑制するため、接続部や主軸への負荷を低減させます。また、エアー導入路により工具を冷却し過ぎないように適温を保つことが可能になりました。よって、工具の性能を長期維持することや、加工効率を高められることから生産性の向上に貢献できるようになりました。



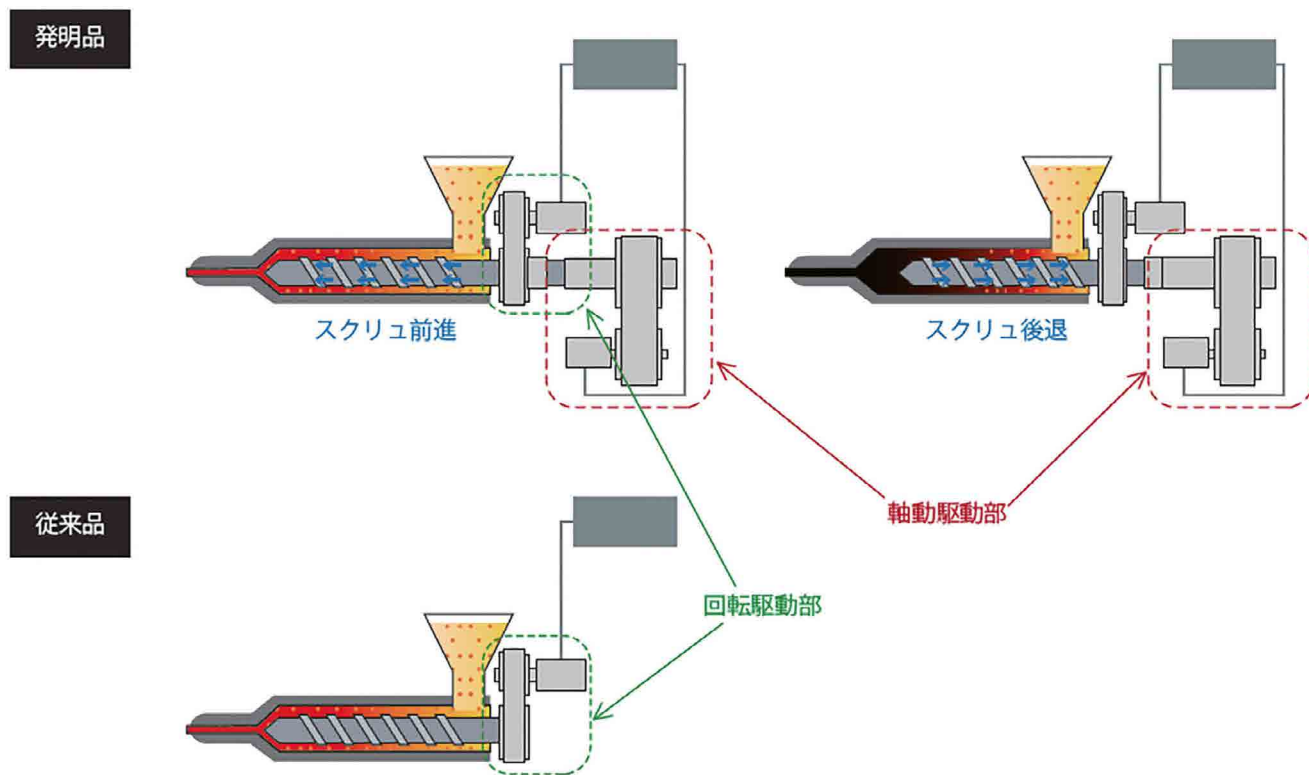
## 2 計量装置、可塑化装置、射出装置、成形装置、及び成形品の製造方法

特許番号:特許第 6,186,243 号  
発明者:徳山 晴道

現在、製造業ではSDGsの達成や脱炭素社会の実現を目指すべく、多様な技術開発が行われています。射出成形機などの成形機においては、省エネルギー化や生産性向上に貢献する技術開発が行われています。

射出装置は、内部に材料を収容するバレル、バレル内に配置されるスクリュ、スクリュを回転させる回転駆動部で構成されます。その作動時において、加熱不足や溶融不足によって材料がバレルやスクリュに密着した状態となり、スクリュの回転に対する抵抗力が増大することがあります。その結果、成形工程における材料の計量精度低下につながり、製品の品質がばらつく問題となることがあります。

本特許の射出装置は、スクリュを軸方向に動作させバレルの内側にせん断力を作用させる軸動駆動部を新たに設けたことにより、材料の密着状態を解消することが可能となりました。スクリュが材料から受ける抵抗力が所定値を超えると、スクリュの回転を停止した状態でスクリュを軸方向に前後に動かすことでせん断力が発生します。その結果、材料の密着状態は解消され、計量精度の維持が可能となり、製品品質のばらつきを抑えることで生産性の向上に貢献できるようになりました。



### 3 二軸押出機用バレルブロックおよび二軸押出機

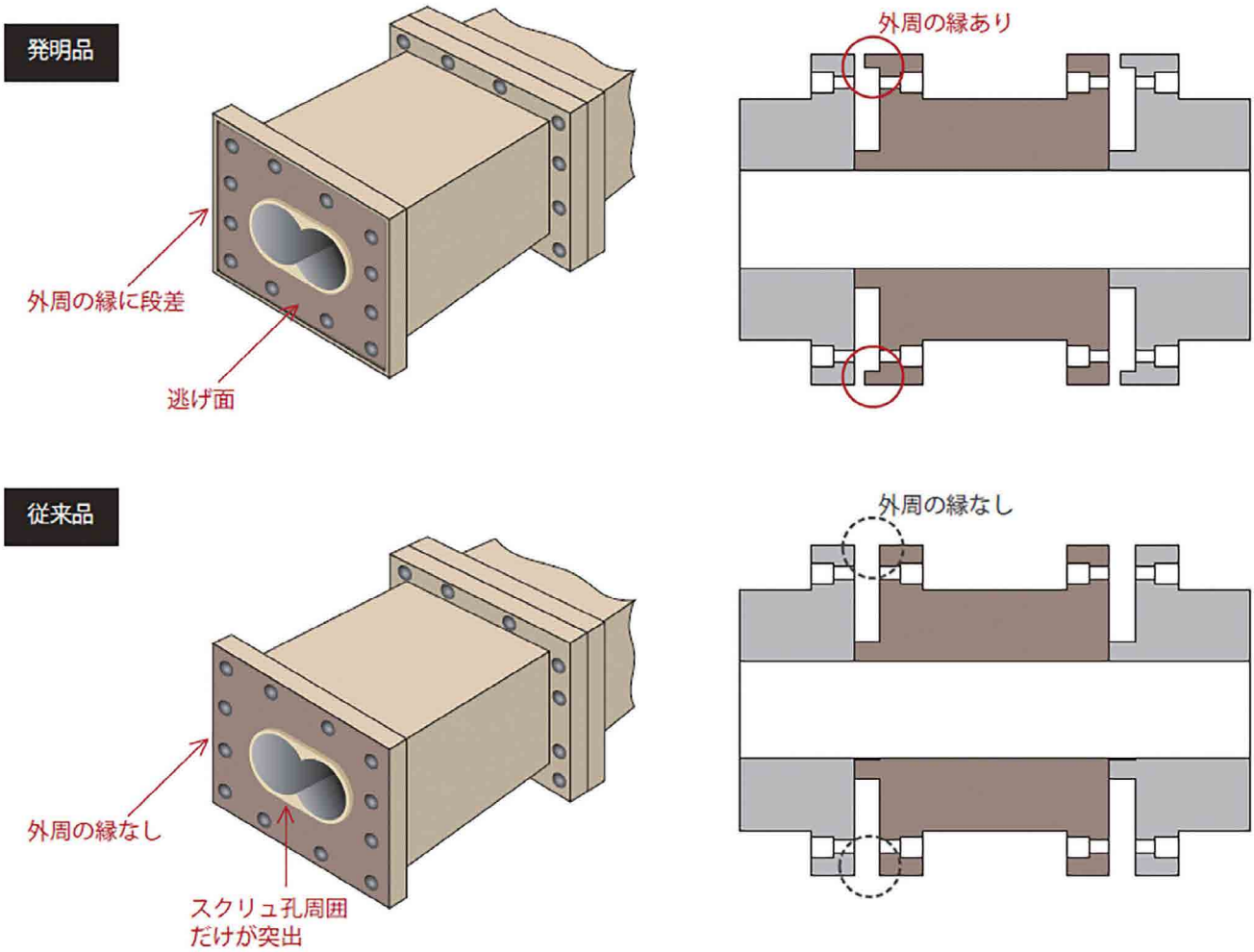
特許番号:特許第 6,348,216 号  
発明者:大石 真伸

現在、製造業では SDGs の達成や脱炭素社会の実現を目指すべく、多様な技術開発が行われています。押出機においては、作業環境の改善や生産性向上に貢献する技術開発が行われています。

従来の押出機に備わるバレルブロックは、ブロックの接合面をスクリュ孔の周囲を突出させる形状となっていました。バレルブロックを相互に接合させるとスクリュ孔の周囲が互いに密に接触するため接合部からの原料の漏出を防ぐことができました。しかし、接合の際の締結ボルトの締め込み量が一定でない場合、スクリュ孔の周囲で片当たりが生じて接触状態を均一に

維持することができず、隙間から原料が漏出してしまい、作業環境の悪化につながっていました。

本特許のバレルブロックは、片面の接合部の外周に段差のある縁が設けられているため、バレルブロックを締結ボルトで相互に接合するときに、この外周の縁が、接合部の倒れ込み量を制限しつつ、スクリュ孔周囲の接触状態を均一にすることが可能となりました。この結果、バレルブロック間からの原料の漏出を抑えることができ、作業環境の改善につながりました。



## 4 ハイブリッド式中子駆動装置及び成形機

特許番号:特許第 6,970,730 号

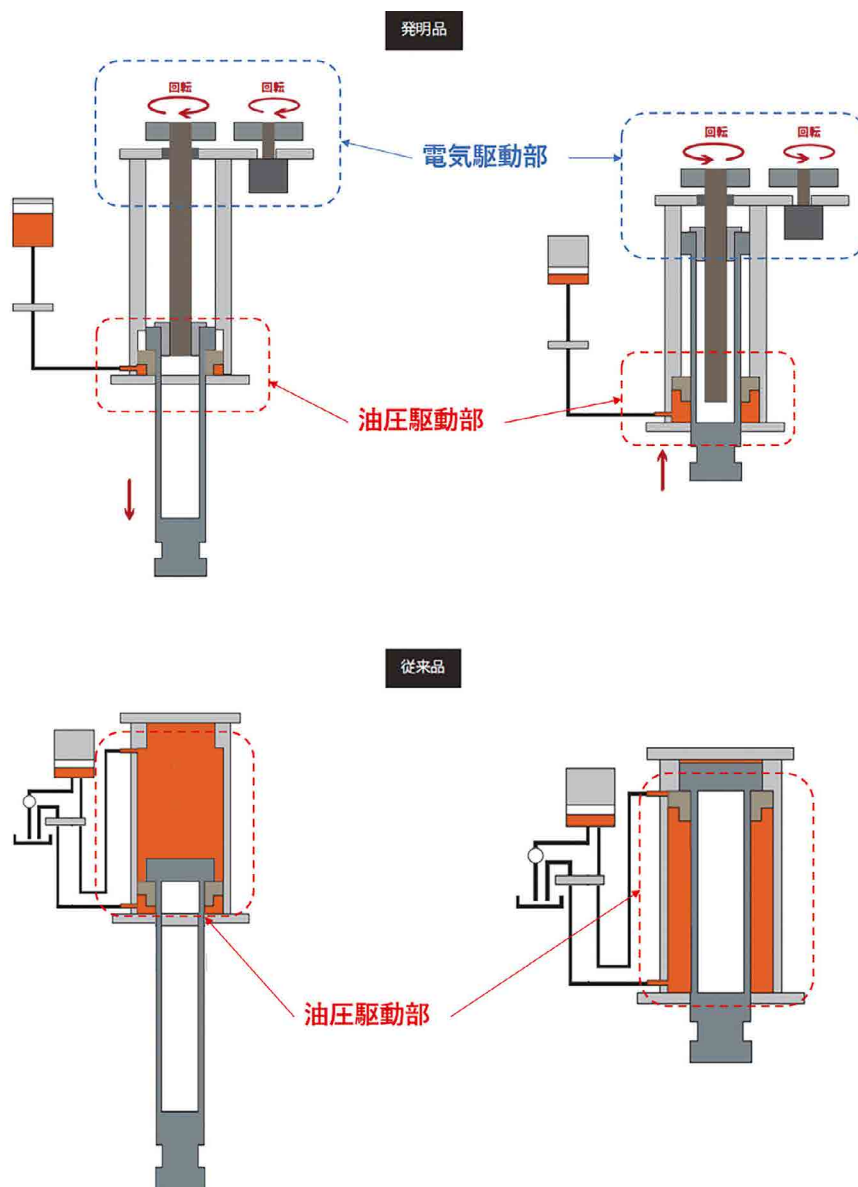
発明者:内藤 光俊、辻 眞、野田 三郎

現在、製造業ではSDGsの達成や脱炭素社会の実現を目指すべく、多様な技術開発が行われています。ダイカストマシンや射出成形機などの成形機は、溶かした材料を金型へ流し込み製品をつくります。よって、機械メーカーは成形機のほかに金型や材料を考慮した技術開発を行うことが必要になります。

従来、金型に設置する中子シリンダ装置が油圧式の場合だと、作動油量が多く、油汚れによる作業環境の悪化等の問題がありました。また、成形機の型締装置と中子駆動装置で油圧回路を共用すると、金型の開閉動作と中子の前進/後退動作を同時に行うことができませんでした。よって、成形機のサイクルタイ

ム短縮が困難となり、生産性の向上や省エネルギー化に貢献しにくい問題もありました。

本特許の装置は、少量の作動油で動作する油圧駆動部と回転モータで動作する電気駆動部からなるハイブリッド式シリンダ装置です。作動油量の削減による作業環境の改善だけでなく、油圧回路を共用することもないため、金型の開閉動作と中子の前進/後退動作を同時に行うことが可能となり、成形機のサイクルタイム短縮による生産性の向上や省エネルギー化に貢献できるようになりました。





東京大学名誉教授

**横井 秀俊**

芝浦機械（東芝機械時代を含む）と筆者との関係は今から33年前まで遡る。当時は筆者が東京大学生産技術研究所に着任直後で、新しい研究室を創設するに際し、研究者が希少だった射出成形分野に挑戦し、金型・加熱シリンダ内部を独自技術で可視化して成形現象を体系的に解明する「射出成形現象の可視化実験解析」プロジェクト（通称Vプロ）を立ち上げた。東芝機械は、Vプロの10年間、「超」を極める射出成形」プロジェクト（通称Uプロ）の23年間、直近の社会連携研究部門「未来志向射出成形技術」の5年間に、一貫して参加されてきた。可視化技術は、同社内での大口径可視化シリンダの独自開発にも生かされ、各種スクリーンでの可塑化過程と成形現象の解明に大いに活用したものと推察された。

東芝機械は、社会の変遷に柔軟に対応し、対象とする産業分野を新規に拡張しながら、我が国のモノづくりの中核を担い、その基幹製造技術と生産機械を今日まで世に供給し続けてきた。その原点は、戦後日本のモノづくりを支えた大型工作機械の製作であろう。そのDNAは今日へと受け継がれ、熔融加工としてプラスチックの射出成形機と押出加工機、金属のダイカストマシン、除去加工として大型の工作機械群から光学部品等の精密金型産業を支える超精密加工機、さらには工場全体のシステム化、無人化を推進するロボット技術や基盤制御技術など、プレス加工を除くほとんどのモノづくり産業分野に軸足を置き、最近ではAMや積層造形等の付加加工にも新たな展開を見せている。

高機能・高付加価値の加工機械を実現し続けるためには、個別要素技術の高度な改良と地道な積み上げが必須で、それらの一端は延べ27巻にわたる東芝機械技報で紹介されてきた。新生「芝浦機械」では、こうした個別の要素技術の革新に加えて、設計から製造、販売に至る全工程のデジタル化や、デジタルツインに基づくDXの推進を声高に掲げている。このDX推

進はモノづくりの工程を根底から変革する世界的な新潮流であり、モノづくりを先導する新生「芝浦機械」として、自らDXの旗手となり業界を先導する役割を担われることを期待している。

新生「芝浦機械」技報の第2号（本号）は、「エネルギー・環境」がテーマである。ダイカストマシンの省エネ化、超硬合金の型彫り加工による省エネ化、高速スピンドル開発の要素技術、環境負荷低減に向けた発泡成形技術の高度化、スカラロボット開発でのCAE活用による環境負荷低減、二軸混練押出機のDXに向けた取り組みなど、新生「芝浦機械」の中長期計画に沿った成果が公開されている。デジタル化・IoT・DXの潮流への対応に加え、コーポレート・ガバナンス・コードにサステナビリティへの取り組みが盛り込まれ、省エネ、温室効果ガス排出規制、SDGsなど、芝浦機械に課された新たな目標に応えるべく、新規の技術革新と要素技術の開発が求められている。本号には、東芝機械のDNAを受け継ぐ新生「芝浦機械」が社会や産業界に向けて発信する、新たな息吹きと覚悟を垣間見ることができる。

筆者は、加工技術で最も重要なことは加工現象を正確に把握することと理解している。加工プロセスを正確にモデル化できて初めて、CAEによる高精度な解析が可能となる。IoT技術も現象との紐づけが出来て初めて有用となる。DXのデジタルツインも同様であろう。加工プロセスの多面的な計測や可視化技術は、現象のモデル化に不可欠な要素技術で、本号でもモノづくりの原点として、当該成果が公表されていることを筆者は高く評価している。新生「芝浦機械」が、DXやIoT、SDGs等のフラッグを旗めかせ発展する中で、その両輪の片輪に、今後も物理現象の正確な理解に基づく要素技術の改良、新規加工技術の開発等を地道に継続・発展されることを期待している。









発行日：2023年1月1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		
	丸 達彦	藤巻 大助	藤井 重行	馬場 丘人
	関 和浩	落合 浩之	風間 拓朗	長田 昌彦
	武田 勝久	石井 雄介	山口 大輔	
幹事	佐藤 和人	山本 正幸	大川 貴史	雨澤 弘機
	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

〒530-0001  
大阪市北区梅田 3-4-5 毎日インテシオ 11 階  
TEL 06-6341-6181  
FAX 06-6345-2738

## 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 739-16  
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

## SHIBAURA MACHINE UK LTD.

66 Burners Lane, Kiln Farm, Milton Keynes, MK11 3HD, UNITED KINGDOM  
TEL: [44]-(0)1908-562327  
FAX: [44]-(0)1908-562348

## 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>

