

新素材への 対応

■ 巻頭言	2	巻頭言
■ 特別記事	3	芝浦機械のCFRTP成形技術と今後の展望
■ 技術論文	7	高せん断付加によるPP/GFの射出成形流動長の改善
	10	超精密加工機による曲面加工へのサーボ式真直度誤差補正の開発
	14	CNF複合樹脂ペレットの製造プロセス開発
	19	熔融池と造形物温度のIn-situモニタリングによる高炭素材質造形の危険温度推定
	24	IoTを用いた設備機械の予知保全について
■ 技術報告	30	AR Based Explanation of Machine Functions and Hydraulic Circuit
	35	プラスチック使用量削減を実現する発泡成形技術
	40	延伸機の自動拡張機能
	43	横中ぐり盤(BTD・BTHシリーズ)主軸熱変位補正機能の開発
	47	油静圧案内における油の発熱低減
■ 新製品ニュース	51	電動式射出成形機 EC-SX III S-Concept の紹介
	53	リモート監視システム iPAQET4.0の紹介
	55	ダイカストマシン DC850R2の紹介
	57	精密研削加工機 LG-100E(5A)の紹介
	60	TCminiシリーズ Webサーバー機能の紹介
	62	双腕協働ロボット RIDRS-H/RIDRS-S の紹介
■ シリーズ	64	芝浦機械の射出成形機
■ 受賞・特許ニュース	74	特許・社外発表(講演)・社外発表(執筆)
	80	受賞トピックス
	81	特許紹介
■ 講評	85	講評



取締役 常務執行役員
経営企画本部長
経営管理本部長
博士(工学)
技術士(機械部門)

甲斐 義章

本号の技報を手にお取りいただき、誠にありがとうございます。本技報では、「新素材への対応」をテーマとして取り上げております。本テーマは、当社だけではなくステークホルダーの皆様が今後の持続可能な成長を実現する上で極めて重要な課題であり、同時にお客様の期待に応えるために必要不可欠な取り組みでもあります。この特集が、皆様の日々の業務や研究活動の一助となれば幸いです。

現在、当社を取り巻く環境は、かつてないスピードで変化しています。気候変動問題への対応、カーボンニュートラルの実現、資源の効率的活用、そして持続可能な社会の実現といった地球規模の課題に、産業機械が果たすべき役割はますます大きくなっています。その中で、軽量化や高強度化、耐久性向上、環境負荷低減を可能にする「新素材」は、これらの課題解決に向けた大きな鍵として注目を集めています。

たとえば、炭素繊維強化プラスチック(CFRP)のような軽量で高強度の素材、次世代セラミックスや高強度アルミニウム合金、さらには環境負荷を抑えたバイオマス由来の材料やリサイクル性の高い素材など、新素材の種類や用途は日々拡大しています。これら新素材の実用化が進むことで、自動車や航空宇宙、建設、エネルギー、電子機器など、さまざまな分野での技術革新が期待されています。

その一方で、新素材を活用した製品の製造には、従来のプロセスでは対応できない課題が数多く存在しています。これらの素材を採用した製品が持続可能な形で社会に貢献するためには、製造工程全体の省エネルギー化や環境負荷低減も重要な課題となります。

当社は、「We are, まだこの世界にないモノを、つくるマシンをつくる。」ということをキャッチフレーズとして、さまざまな産業分野に向けた機械の製造を通じて、社会の発展に寄与してまいりました。当社の強みは、単に新素材を自社製品に取り入れるだけでなく、「新素材を扱って製品を作る機械」を製造できる技術力にあります。これにより、私たちは新素材の加工・製造に対応する機械を通じて、その素材が持つ可能

性を最大限に引き出し、最終製品として社会に届けるお手伝いをしています。

具体例として、「芝浦機械のCFRTP 成形技術と今後の展望」を掲載しております。そのなかでCFRTPを効率的かつ正確に成形するための専用システムをご紹介します。これらの取り組みを通じて、お客様の製品開発を支援していきたいと考えております。

また、これらの技術開発においては、当社の研究開発部門と製造部門、さらにはお客様や素材メーカー、大学・研究機関といった外部パートナーとの連携が欠かせません。本技報ではNEDOが公募しました「炭素循環社会に貢献するセルロースナノファイバー関連技術開発」に、大王製紙株式会社と共に採択され、製造プロセスの開発を進めてきました取り組みをご紹介します。こうした協力体制が成果として結実した事例も取り上げております。

「新素材への対応」は、今後ますます重要性を増すテーマであり、当社にとっても大きな開発の機会だと考えております。これらの課題に対応することが、私たちの技術力をさらに進化させる原動力となり、お客様と社会に新たな価値を提供する源泉であると考えています。当社はこれからも、「わたしたちは、世界中でお客様の価値最大化に貢献していきます。」という理念のもと、研究開発と技術革新に全力を尽くしてまいります。

最後に、本技報の発行にあたりご尽力いただいた社内外の関係者の皆様に、心より感謝申し上げます。また、本技報が皆様の業務や研究のヒントとなり、未来を共に創造していく一助となれば幸いです。これからも当社へのご支援とご指導を賜りますようお願い申し上げます。

それでは、本号の技報をどうぞお楽しみください。

芝浦機械の CFRTP 成形技術と今後の展望



専務執行役員
成形機カンパニー
副カンパニー長

石見 和久

1 はじめに

CFRP とは CF（炭素繊維）と呼ばれる高強度な繊維にプラスチックを浸み込ませた軽量かつ高強度な素材である。

その歴史は 1970 年代に釣り竿やゴルフクラブに採用されたことから始まり、その後の用途開発の結果、様々なシーンで CFRP が使われている。

従来の金属材料とは異なる性質をもった新しい素材であるため、開発初期は高級グレードや限られた用途でのみ使用されていた CFRP が、近年の脱 CO₂ の要求から航空機、自動車などへの適用をきっかけとして市場規模が拡大してきており、既に世界市場では 1 兆円以上の規模である。

例えば海外旅行は元より国内旅行でも長距離移動手段として欠かすことのできない航空機では、使われている素材は鉄やアルミといった金属ではなく CFRP が機体重量の半分を占めている。

航空機で使用するジェット燃料が高価なため、燃費向上の解決策として軽量かつ強度の高い CFRP を積極的に採用して機体の強度を維持しつつ軽量化を図っている。

航空機は SDG's の取組の一環として SAF (Sustainable Aviation Fuel: 持続可能な航空燃料) への対応も求められており、燃費向上は喫緊の課題である。

自動車についても同様に燃費改善を目的として適用が進められてきている。他にも eVTOL と呼ばれる、いわゆる「空飛ぶクルマ」にも適用が検討されている。

以上より、CFRP は今後の社会生活をステップアップさせるために必要不可欠な新素材であり、芝浦機械としても高い関心をもっている分野である。

CFRP の 1 種に熱可塑性樹脂を用いた CFRTP がある。通常 CFRP という場合は熱硬化性樹脂を使用している。航空機のようなボリュームの大きい、明確な用途が確立された CFRP に対し、CFRTP は様々な理由により、普及しているとはいえないのが実状である。

本稿では CFRTP の抱える課題と、芝浦機械の考える課題解決に向けた取組と、今後の展望を紹介する。

2 CFRP と CFRTP

2.1 CFRP の特徴と CFRTP との違い

CF にプラスチックを浸み込ませて一体化することを含浸といい、含浸させて出来た材料を CFRP (炭素繊維強化プラスチック、Carbon Fiber Reinforced Plastics) と呼ぶ。

この材料の最大の特長は軽量かつ高強度、高剛性である。広く使われている鉄系材料に比べて同一重量での強度 (重量比強度) は 10 倍もあり非常に優れた素材であると言える。強度以外にも

- ① 錆びない
- ② 熱伝導が良い
- ③ 熱膨張しない
- ④ 複雑形状の加工が容易
- ⑤ X 線を透過する

などさまざまな性質を持っている。

上記のような、従来の素材にはない素晴らしい特長を備えている一方、

- ① 素材の価格が高いこと
- ② CF を生産する時に CO₂ を多く排出すること
- ③ 部品として使う場合には新規設計が必要

などのデメリットがあり普及は限定的である。

一般的に CFRP と呼ぶ場合には含浸させるプラスチックは熱硬化性樹脂を指す場合が多く、熱可塑性樹脂を含浸させる場合は CFRTP (Carbon Fiber Reinforced Thermo Plastics: 炭素繊維強化熱可塑性プラスチック) と呼ぶ。その際、熱硬化性樹脂を用いた CFRP を意図的に区別する場合は CFRTS (Carbon Fiber Reinforced Thermo Set: 炭素繊維強化熱硬化性プラスチック) と呼ぶ。それぞれの特性を Table 1 にまとめる。

Table 1 CFRP の種類と特徴

名称	一般に CFRP と総称される	
	CFRP (CFRTS)	CFRTP
使用する樹脂	熱硬化性樹脂	熱可塑性樹脂
含浸のしやすさ	容易 (低粘度)	難しい (高粘度)
高温時の挙動	硬化する	軟化する
成形時間	長い (数十分～数日)	短い (数分)
再利用	難しい (再成形不可)	容易 (加熱して再成形)

Table 1 の通り、CFRTP は樹脂の粘度が高いため、CFRP に比べて含浸の難しさ、という欠点はあるものの、加熱すると硬化する CFRP に対して CFRTP は軟化するため以下の利点があり今後用途が拡大していくと考えられている。

- ① 成形サイクルタイムが短い (高生産性)
 - ② 再成形により別部品として使用可能 (リサイクル)
- 特に Fig. 1 に示す通り、高強度部品を生産する場合、CFRP と CFRTP の生産性の差は、片や数日、片や数分と非常に大きいものとなる。

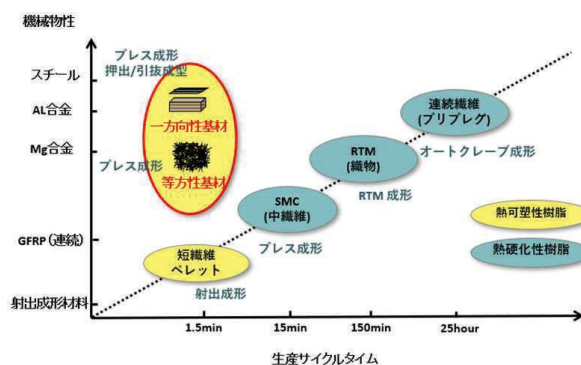


Fig. 1 CFRPの成形時間と機械物性(強度)¹⁾

時間的な優位性に加え、CFRP 成形は専用の設備（オートクレーブなど）が必要な故に参入障壁が高いのに対し、CFRTP 成形は一般的なプレス機で生産が可能というコスト的な優位性もあり参入障壁は低くなる。

芝浦機械が得意とする自動化などシステムエンジニアリングを適用することで CFRTP の生産性を向上させ、活用を場を広げることが出来ると考え開発をスタートさせた。

実サンプルを Fig. 2 に示す。CFRP はクッキー、CFRTP はチョコレートと例えられることがある。



Fig. 2 CFRTPサンプル

2.2 CFRPの主な用途

実際に CFRP が使われている分野は下記の通り。

① 航空機

航空機の重量の半分は CFRP であり、機体のモデルチェンジごとに CFRP の適用比率が高くなっている。ここまで比率が高くなった理由は、CFRP を採用することによるイニシャルコストの増加よりも、軽量化による燃費向上で得られるランニングコストの低減の方が大きなメリットと

なる為である。

SDG's への対応として割高な SAF(Sustainable Aviation Fuel: 持続可能な航空燃料) へ切り替える時にも燃費向上は効果的である。

航空機では主翼や胴体などの大きな部品だけでなく、サイズは小さいが強度が求められ部品点数が多い連結部品があり、それらは CFRP だけでなく CFRTP の適用が徐々に増加している。

② 自動車

航空機と同様に CFRP を採用することで軽量化による燃費向上が見込めるため普及の目論見があったが、あまり使われていないのが現状である。

価格が航空機に比べて自動車は相対的に安価で価格競争が厳しいことが理由であり、航空機に比べてコストダウン圧力が強く、CFRP を採用することによるコストアップの影響を吸収出来ないため、採用は高級車種に限られている。

CFRTP であれば一度使用した部品を再成形することで別の部品としてリサイクルが可能で、リサイクル回数の増加に従いコストが減少すると考えられるため、今後の展望を期待されている。

③ レジャー、スポーツ

CFRP の用途として比較的歴史が長いのがレジャーやスポーツ分野である。具体的には釣り竿、自転車のフレーム、テニスのラケットなどである。この分野は嗜好性が高いため高価であっても性能が高ければ購入してもらえることが多い。

④ 風力発電

昨今の再生可能エネルギーへの期待から風力発電の設置が進んでいる。発電効率を高めるためには風車の羽を大きくする必要があり、軽量かつ高強度である CFRP が有利であると考えられる。比強度だけでなく、錆びないという特長も長期間屋外で使用する風車の素材として適している。

2.3 CF及びCFRPの市場動向

今回対象となる素材である CF と成形品である CFRP の市場規模について昨今の動向を述べる。

2.3.1 CF(炭素繊維)の市場動向

CF は有機繊維を高温かつ無酸素雰囲気化で炭化させることで得られる。現在流通している CF は使用する原料で大きく分けて PAN 系とピッチ系の 2 種類あるが、いずれの CF も 1960 年ごろ日本で発明され、かつてはシェアの大半を日本メーカが占めていたが、近年は海外メーカのシェアが徐々に広がってきている。

2.3.2 CFRPの市場動向

CFRP の生産に関しては年々増加傾向にあり、特に使用量の多い航空機がコロナ禍での足踏みはあったものの堅調に推移している。他の用途としては再生可能エネルギーである風力発電

の風車、CNGを運搬するタンカーなどの圧力容器や空飛ぶクルマに代表される UAV (Urban Air Vehicle) が生産量を増やしている。

地域別に見ると欧米のシェアが大きく、近年は中国のシェアも拡大している一方、CF とは異なり日本のシェアは非常に小さい。

2.4 CFRP業界の課題

上記の通り CF 自体は低下傾向にあるものの日本勢のシェアが大きいのにに対し、CFRP については日本勢のシェアが非常に小さい。

原因はサプライチェーンの弱さにあると考えている。川上である CF メーカーは多いのにに対し、川中の中間基材製造装置や川下の成形装置を供給するメーカーが少ない。(Fig. 3)

CFRP の用途開発は企業単位で行われていることが多いために散発的であり、効果的なアプリケーションの開発が行えていないと言え難い。

課題の解決のため、芝浦機械は後述する CF RTP 成形プロセスを提案し、川上から川下までのメーカーをつなぐことで「CF RTP サプライチェーンの構築に貢献したい」と考えている。

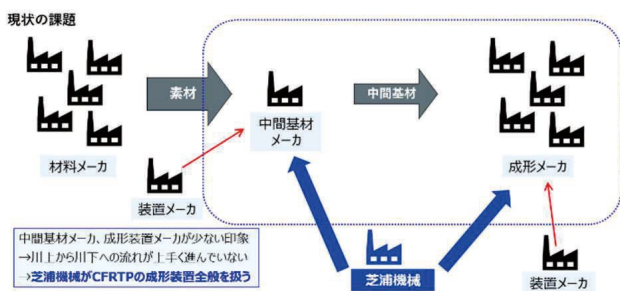


Fig. 3 CFRP サプライチェーン

3 芝浦機械のCF RTPへの取組み

3.1 芝浦機械のCF RTP成形技術

本項から芝浦機械が提案する CF RTP 成形技術について紹介していく。

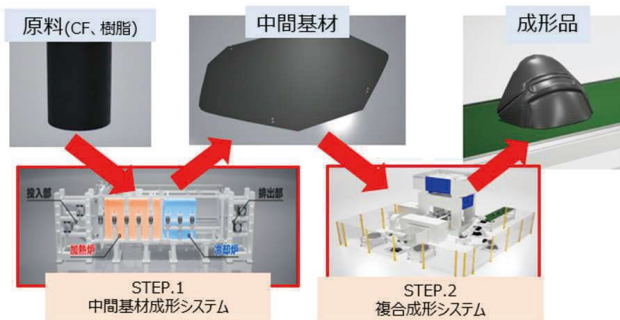


Fig. 4 CF RTP 成形プロセス全体図

Fig. 4 は CF RTP の成形プロセスの全体図である。CF と樹脂から CF RTP の部品成形には 2 つの STEP がある。

3.2 中間基材成形システム

STEP.1 は CF に熱可塑性樹脂を含浸させて CF RTP を成形する工程である。この工程でキーとなるのは粘度の高い熱可塑性樹脂を CF へ連続的に含浸させるかという点である。当社は連続的に熱を加え、プレスすることが可能なダブルベルトマシン (Fig. 5) を採用した。

具体的なプロセスは以下の通り

- ① CF と樹脂をベルトマシンに投入
- ② ベルトで搬送された樹脂が加熱され、溶融することで CF に含浸
- ③ 冷却炉で冷却固化
- ④ 排出部から CF RTP が排出

このシステムにより、CF RTP を連続的に生産することが可能となる。

ベルトマシンから排出される CF RTP は含浸しており物性も発現しているが、平板であり、最終製品である部品の形状にはなっていない。この状態の CF RTP は中間基材やプリプレグなどと呼ばれ、次のステップで部品の形状に成形されることで最終製品となる。

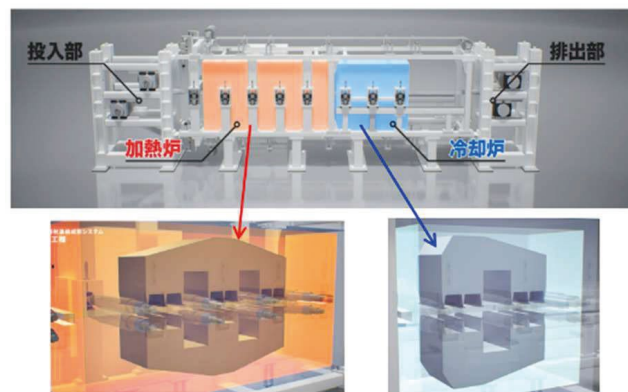


Fig. 5 ダブルベルトマシン

成形可能な中間基材はさまざまあるが、今回は最もベーシックな CF RTP を 2 種類紹介する。

- ① UD(Unidirectional/:一方向)材 (Fig. 6)

CF の帯を幅方向に並べたものに樹脂を含浸させて得た CF RTP である。繊維流れ方向の強度は非常に高いが、繊維と直行方向は樹脂のみの強度のため非常に弱い。通常は強度を高くしたい方向に複数枚の UD 材を重ねて使用する。



Fig. 6 UD材

- ② ランダム (等方) 材 (Fig. 7)

UD 材と異なり一定の長さに切断した CF をランダムに配置し、樹脂を含浸させた CF RTP である。UD 材と

比べてCFが不連続かつランダムなので、どの方向にもまんべんなく強度が発現する反面、強度の絶対値はUD材より低いが、プレス成形時の金型への追従性はUD材より優れる。

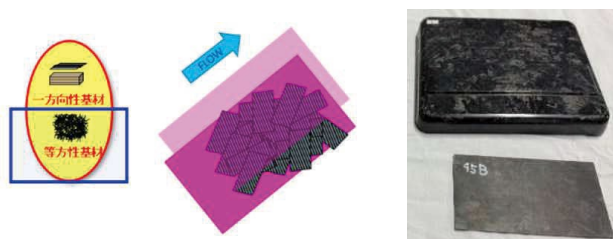


Fig. 7 ランダム材

3.3 複合成形システム

STEP.2はSTEP.1で成形した中間基材をプレス機などで部品の形状に成形する工程である。この工程では多数の部品を休みなく成形することが求められるため、芝浦機械ではロボットを用いた複合成形システム (Fig. 8) を構築している。

- ① プリプレグ (中間基材) を成形品に形状に合わせて切断しておく (別装置)
- ② ロボットがピックアップし加熱炉に投入
- ③ 加熱完了後にロボットがプレス機に投入しプレスして部品の形状に賦形する。
- ④ プレス完了後に再びロボットが成形品を取り出す。

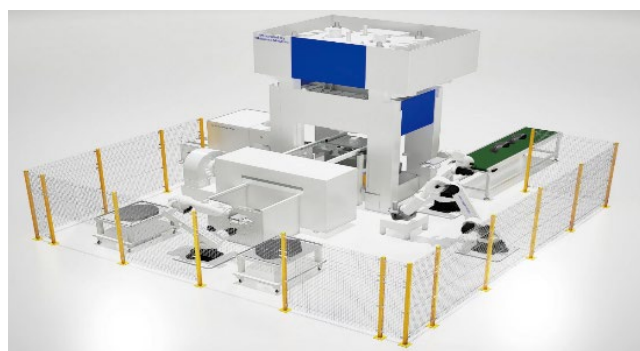


Fig. 8 CFRTP複合成形システム

上記のプロセスに加え、付加価値をつける工夫として

- ① プレス成形と同時に射出成形で補強用リブや組立用ボスを追加
- ② 2枚の板の間に発泡樹脂の充填による軽量化
- ③ プレス成形で生じたバリの除去や組立用の穴あけなどの二次加工
- ④ トレーサビリティのためのQRコードマーキングなどが可能である。

これまでのシステムエンジニアリング経験からさまざまなプロセスを盛り込んだ形で成形ラインを自動化することが可能である。

芝浦機械は、これらのSTEPにより素材から部品までをフルターンキーで対応することが可能である。

4 今後の展望

2024年9月18日～20日に東京ビッグサイトで開催されたCFRPを含めた先端材料に特化した展示会であるSAMPE Japan 先端材料技術展 2024に出展した。

中間基材成形システム、複合成形システムの動画や実際に成形サンプル (中間基材、各種部品) を展示し、多数の方に来場いただいた。

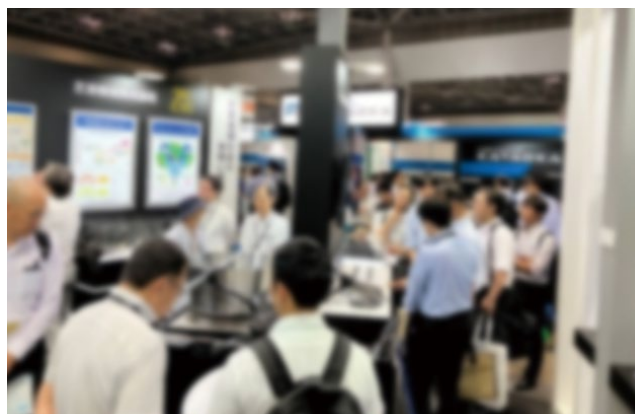


Fig. 9 SAMPE Japan 2024 芝浦機械ブース

素材から部品まで一気通貫の成形を手掛ける唯一のメーカーとして多くのお客様にご評価をいただき、優秀展示賞として運営からも表彰いただいた。

今後はお客様ごとの困りごとに対しソリューションを提供していくことでお役に立てればと考えている。

5 おわりに

CFRP および CFRTP の現状について、芝浦機械の取組を交えながら紹介した。

CFRP はカーボンニュートラル実現に向けて重要な素材であり、中でも生産性、リサイクル性に優れた CFRTP は特に注目を集めている。

CFRTP の普及に貢献するために今回紹介したシステムをより良いシステムに改善していくことが重要であると考え、今後も開発に邁進していく所存である。

参考文献

- 1) <https://www.nedo.go.jp/content/100552116.pdf> を元に作成

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

1 はじめに

近年、プラスチック製品の軽量化や化石由来原料の使用量削減に向けた取り組みなどから、薄肉射出成形の技術は重要性を増している。薄肉成形品の厚みは 1 mm 以下と言われており、非常に小さな隙間を持つ金型に溶融樹脂を流し込んで成形される。そのため、流動性の低い樹脂を金型全体に行き渡らせるには、高い充填圧力と高スペックの射出成形機が必要となる。しかし、仮に高い充填圧力を付与したとしても、樹脂圧力によって金型の隙間がわずかに開いてバリが発生したり、せん断発熱によるヤケが発生することがある。

小型の射出成形機で薄肉成形するためには、低粘度の樹脂が必要になるが、市販の樹脂ではグレードの選択範囲が限られているだけでなく、非常に高いメルトフローレイト (MFR) を持つ原料はあまり市場で取り扱われていない。

また、製品が薄くなれば必然的に強度は弱くなるため、薄さと強度を両立させるためには、何らかの補強材を導入する必要があるだろう。

以前我々は、溶融樹脂に高いせん断速度を付与することによりせん断発熱を誘起させ、樹脂を熱分解する方法(高せん断法)を提案し、汎用グレードのポリプロピレン (PP) から MFR が 1000 g/10min を超えるメルトブローン不織布用の原料を製造した¹⁾。今回我々はこの方法を用いて、市販の PP とガラスファイバー (GF) から薄肉射出成形に適した高流動性のガラス繊維強化ポリプロピレン (PP/GF) を製造した。PP/GF に高せん断を付加しているにもかかわらず、PP の低分子量化により、せん断応力による GF 折損の影響は小さく、引張強度は高せん断加工前と大きく変わらなかった。

2 実験

2.1 原料

PP は MFR が 7.0 g/10min のものを用いた。GF は繊維長 3 mm、 $L/D = 230$ のものを用いた。GF の投入量は、吐出量 20 kg/h に対して 10, 30, 40, 50, 60% の場合を実施した。本記事では、GF が 10, 30, 50% の場合の結果を紹介する。

2.2 装置

図 1 は実験で用いた装置の全体図である。二軸押出機のフィード口から投入された PP は溶融後、サイドフィードより供給される GF と混練され、PP/GF が製造される。二軸押出機の口径は 26 mm、スクリュ回転数は 250 min^{-1} 、バレル温度は 195°C 、 $L/D = 48.5$ であった。

製造された PP/GF は、高速回転するスクリュを持つ単軸押出機(高せん断押出機)に送られ、高いせん断速度が付与されて PP が熱分解される。高せん断押出機の口径は 48 mm、バレル温度は 195°C 、 $L/D = 6.25$ であった。高せん断押出機のスクリュ側面には、図 2 のように貫通穴が設けられており、その直後に逆スクリュを設けることにより、樹脂を堰き止めて高せん断を付加し、その後貫通穴に樹脂を流すことで過剰な発熱を抑える構造となっている。貫通穴の直径は 2 mm、長さは 45 mm、穴数は 4 であった。

高せん断押出機出口での樹脂は高温であるため、単軸押出機で冷却して成形しやすい状態にする。単軸押出機の口径は 50 mm、スクリュ回転数は 60 min^{-1} 、バレル温度は 195°C であった。単軸押出機のヘッド部でストランド状に成形された PP/GF は水槽で冷却後、ペレット化された。

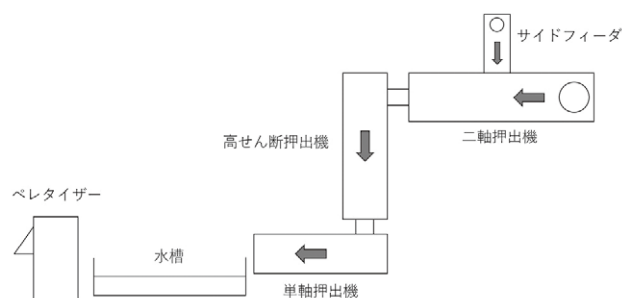


Fig. 1 装置の全体図

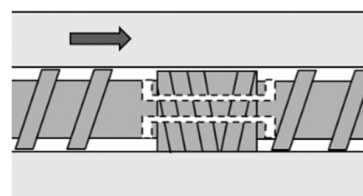


Fig. 2 貫通穴を持つスクリュエレメント。矢印は樹脂の流れを指す。破線部が貫通穴で、その直後に逆スクリュを設けることで樹脂を堰き止めることが出来る。

2.3 測定

本実験では、高せん断押出機のスクリュ回転数を 1000, 2000, 3000 min^{-1} で加工した場合と二軸押出機のみを使用した場合のスパイラルフロー長、GF 除去後の PP の分子量、引張強度・引張弾性率、および GF の繊維長を測定した。

樹脂の流動性はスパイラルフロー試験によって評価した。スパイラルフロー試験では、射出成形機で渦巻状の金型に樹脂を

流し込んだ時のサンプルの長さ(流動長)を測定する(図3)。サンプルの長さが長いほど、流動性が良いことになる。スパイラルフロー試験に使用した金型の流路断面は半径 2.38 mm の半円状であり、射出成形時の射出圧力は 99 MPa、射出速度は 40 mm/s、金型温度は 50℃であった。

PP の分子量は、高温ゲル浸透クロマトグラフを用いて測定した。GF を除去するために、PP/GF20 mg に *o*-ジクロロベンゼン 20 ml を加えて 145℃で振とう・溶解し、径 1.0 μ m の焼結フィルタで熱ろ過した。

PP/GF の引張強度・引張弾性率は、万能試験機を用いて測定した。測定は室温中で行い、試験速度は 5 mm/min であった。測定に用いたダンベル試験片の作成条件は、射出圧力 200 MPa、射出速度 25 mm/s、金型温度 40℃であった。

GF の繊維長は、PP/GF を電気炉で灰化させて PP を除去した後、粒子径分布測定装置を用いて測定した。測定された粒子の長さ(円形度)の典型的なヒストグラムは、図4のようになる。両方のグラフとも2つのピークからなり、長さが大きい方のピークは円形度が小さい方のピークに対応するため、GF の繊維であると考えられる。よって、円形度のデータを k-means 法^{注1)}によりクラスタリングして、円形度の小さなクラスターのみを取り出して、各条件の重量平均繊維長を算出した。



Fig. 3 スパイラルフロー試験の成形サンプル

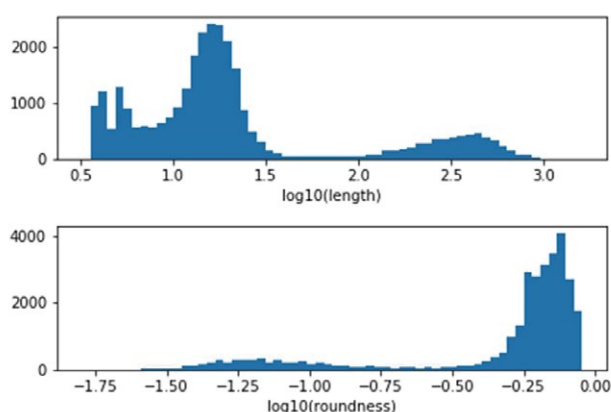


Fig. 4 粒子径分布の生データ

3 結果と考察

図5は、高せん断を付加した場合としない場合の PP/GF のスパイラルフロー長の測定結果である。GF 濃度によらず、高せん断押出機のスクリュ回転数が大きいほど、流動長が大きくなることが分かった。これは、スクリュから受けるせん

断作用により PP/GF の樹脂温度が増加して PP が熱分解し、PP/GF の粘度が減少するからである。GF 濃度が大きくなると PP/GF の粘度が増加するため、スパイラルフロー長は減少した。

表1は、高せん断加工前後の PP/GF に含まれる PP の重量平均分子量の測定結果である。スクリュ回転数が大きくなるにつれて、PP の分子量が下がっていることが確かめられた。実際、スクリュの貫通穴手前の樹脂温度は、スクリュ回転数が 3000 min⁻¹ の場合でおよそ 340℃であり、PP の熱分解温度を十分超える温度であった。同じスクリュ回転数で比べると、GF 濃度の増加に伴い、PP の分子量は下がっていた。これは GF の添加により PP/GF の粘度が増加し、せん断発熱が大きくなったためと考えられる。ただし、図5の曲線がほぼ平行であることから、流動長に影響するほど大きなものではなかった。

図6は、高せん断加工前後の PP/GF の引張強度を示したグラフである。引張強度はスクリュ回転数に大きく依存しないことが分かった。これは、せん断発熱による樹脂温度の上昇と分子量の減少により PP/GF の粘度が減少し、GF にかかるせん断応力が弱くなったことで繊維長が短くならなかったことが要因であると考えられる。引張強度は GF 濃度が 30% 付近で最も大きく、それよりも大きな GF 濃度では単調に減少した。引張弾性率に関しても、スクリュ回転数の依存性はほとんどなく、GF 濃度の増加に対して単調に増加することがわかった。

図7は、引張強度の測定に使用したダンベル試験片に含まれる GF の重量平均繊維長の測定結果である。スクリュ回転数を大きくしても、繊維長がほとんど下がっていないことが確かめられた。GF10% の場合に関しては、高回転条件の方が繊維長は長かった。GF が高濃度の場合に繊維長が短くなったのは、PP/GF の粘度が増加したためであると考えられる。

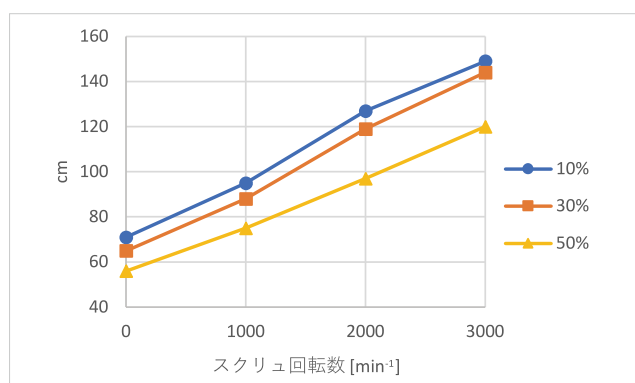


Fig. 5 PP/GF のスパイラルフロー長。回転数が 0 のデータは二軸押出機単体での実験結果。

Table 1 高せん断加工前後での PP/GF 中の PP の重量平均分子量。回転数は高せん断押出機のもの指す。回転数が 0 のデータは二軸押出機単体での実験結果。

GF 濃度 [%]	回転数 [min^{-1}]	重量平均分子量
10	0	412,000
10	1000	248,000
10	3000	159,000
30	0	392,000
30	1000	230,000
30	3000	143,000
50	1000	221,000
50	3000	128,000

4 おわりに

高せん断押出機を用いて PP/GF に高せん断を付加させることで、引張強度や引張弾性率を大きく損なわずに、流動長を向上させることが出来た。高せん断押出機のスクリュ回転数の変更で、原料の流動性をコントロールできるため、射出成形機のスペックを上げることなく、さまざまな厚さの薄肉成形品を製造できる可能性がある。また、流動性が良くなることから、金型のスプールやランナーを狭くして、製造に必要な樹脂量を削減することもできるだろう。また、本実験では PP/GF の製造にバージン材を使用した。廃 PP/GF でも力学強度を損なわずに流動性を向上できれば、リサイクルにも貢献できるだろう。今後、GF だけでなく、炭素繊維などでも同様の結果が得られるか検証したい。

現在、高せん断法を用いて流動性を向上させた PP/GF を用いて、薄肉射出成形品の製造に着手している。実際の成形では、原料の流動性だけでなく、射出成形の運転条件や金型の形状も重要であり、バリやショートが発生しない成形条件を模索している。すでに一定の厚みでの薄肉成形品の製造については成功しており、さらに薄い成形品が不良なく製造できるか検証している。

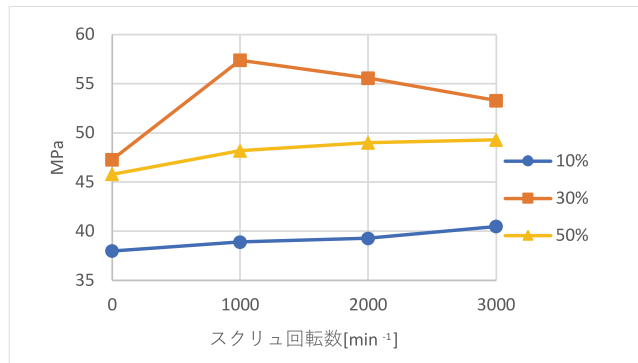


Fig. 6 PP/GF の引張強度。回転数が 0 のデータは二軸押出機単体での実験結果。

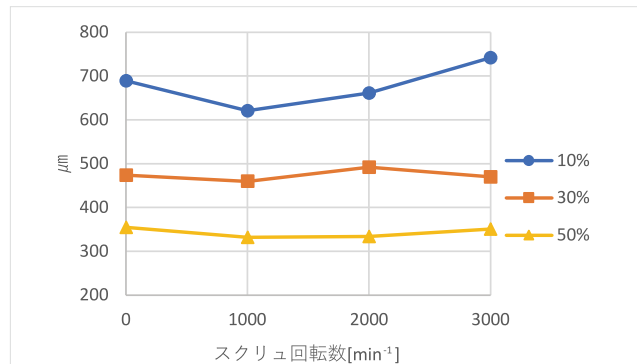


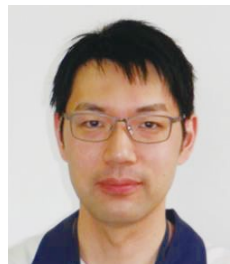
Fig. 7 ダンベル試験片中の GF の重量平均繊維長。回転数が 0 のデータは二軸押出機単体での実験結果。

注 1) k-means 法: データを k 個のクラスタ(集団)に分けるクラスタリングと呼ばれる手法の一つ。

参考文献

- 1) Sasai, Y., Iizuka, Y., Osada, K. and Taki, K.: *Polymers*, 13(22), 3892(2021)

本技術論文は、成形加工 '22(プラスチック成形加工学会)に投稿、掲載された研究成果を転載しています。



成形機カンパニー
押出技術部
営業技術課

笹井 裕也

超精密加工機による曲面加工へのサーボ式真直度誤差補正の開発

鈴木 亨 福田 将彦 秋山 貴信

真直度は、工作機械の運動性能に関する重要な要素のひとつであり、切削抵抗やびびり、凝着などの阻害要因が少ない超精密切削加工では、真直度が実切込み量として加工精度に大きな影響を与える。特に光学部品を対象とした加工では、加工表面の凹凸が要求された光学特性の誤差要因になる可能性があり、金型加工には細心の注意が払われる。

当社の超精密非球面加工機は有限型 V-V 転がり案内を採用しており、高い剛性と再現性の反面、微小うねりと呼ばれる真直度誤差が存在する。

本研究では 2 自由度リニアエンコーダを用いて真直度を遅れなく補正するシステムを検討し、同時 2 軸加工における真直度補正アルゴリズムを確立し、光学レンズを想定した曲面加工に対し、本システムによる形状の改善効果を確認した。

1 緒言

真直度は、工作機械の運動性能に関する重要な要素のひとつであり、切削抵抗やびびり、凝着などの阻害要因が少ない超精密切削加工では、真直度が実切込み量として加工精度に大きな影響を与える。特に光学部品を対象とした加工では、加工表面の凹凸が要求された光学特性の誤差要因になる可能性があり、金型加工には細心の注意が払われる。これらの課題に対し、工作機械の案内や主軸などの運動要素、加工形状誤差による工具経路を補正するプロセス技術などが多く検討され、形状や粗さの向上を達成してきた¹⁾。ただし、0.1mm から数 mm を対象とする波長領域では、ナノメートルオーダーの再現性や長期的安定性などを確保しながら真直度を改善することは難しいといわれる。

筆者らはこれまで 2 自由度リニアエンコーダを用いて真直度を遅れなく補正するシステムを検討し、平面加工や傾斜角が小さい球面加工においてその効果を確認した^{2,3)}。しかし同時 2 軸加工における合成送りの影響が大きくなると補正の効果が小さくなる課題が顕在化してきた。そこで本研究では、同時 2 軸加工における真直度補正アルゴリズムを確立し、光学レンズを想定した曲面加工に対し、本システムによる形状の改善効果を確認した。

2 実験方法

2.1 真直度誤差の検出

一般的なリニアエンコーダの場合、1 自由度の位置情報が検出可能であり、対象となる機械各軸の進行方向と、リニアエンコーダの検出方向が平行になるようにリニアエンコーダを配置し、対象軸の位置決め制御に使用する。

本稿では一般的なリニアエンコーダに変えて、Fish-bone 型 2 自由度エンコーダを使用した⁴⁾。2 自由度リニアエンコーダ

は 2 個の検出ヘッドを使うことが基本の形だが、さらに本稿では検出ヘッドを 1 個加えて 3 個使用した。以降、本稿では 3 個の検出ヘッドを使用した 2 自由度エンコーダの構成を 1.5D リニアエンコーダと呼ぶことにする。Fig. 1 のようにリニアエンコーダの出力 Pos1 と Pos2 から式 (1)(2) のように進行方向成分 X と直交方向成分 Y を検出することができる。また Pos1 と Pos3 の取付け間隔を P とすると、式 (3) のように回転成分 θ も検出することができる。

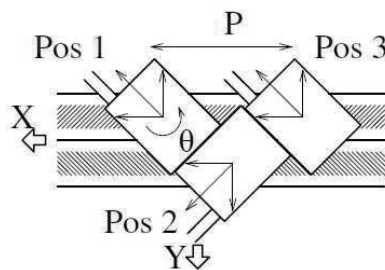


Fig. 1 Fish-bone型リニアエンコーダ

$$X = \frac{\sqrt{2}}{2} (\text{Pos1} + \text{Pos2}) \quad (1)$$

$$Y = \frac{\sqrt{2}}{2} (\text{Pos1} - \text{Pos2}) \quad (2)$$

$$\theta = \frac{\sqrt{2}}{2P} (\text{Pos3} - \text{Pos1}) \quad (3)$$

2.2 真直度誤差の補正

2.2.1 1.5Dリニアエンコーダのレイアウト

実験に用いた機械構成を Fig. 2 に示す。図に示す加工機では、工具送り軸を X、切込み軸を Z とし、X 軸と Z 軸に 1.5D リニアエンコーダを配置し、進行方向成分、直交方向成分と回転成分の検出を行った。

補正値をフィードバック系に組み込む前に、機械の真直度と 1.5D リニアエンコーダの直交方向成分の比較を行った。真直度は加工点付近に配置したストレートエッジを基準面として、

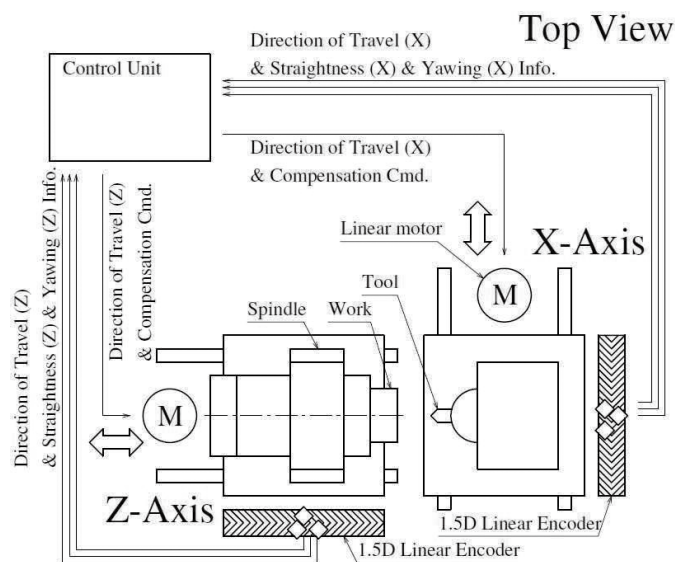


Fig. 2 システム構成

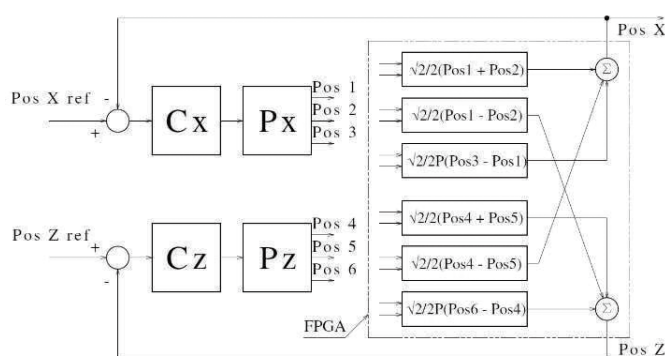


Fig. 4 制御システム

静電容量型変位センサ(CPL490、Lion Precision)により測定した。測定結果を Fig. 3 に示す。機械の真直度変位と 1.5D リニアエンコーダの直交成分の間に高い相関性が確認できる。数ナノメートルのオーダーの機械の真直度変位を 1.5D リニアエンコーダによって検出可能ながわかる。

2.2.2 直交方向成分の真直度の補正

例えば X 軸が進行方向に動作した場合、真直度の影響から僅かに Z 方向に揺れながら進むことになる。この Z 方向の偏差を 1.5D リニアエンコーダの直交方向成分として検出して、X 軸に直交する Z 軸で補正した。また、Z 軸の真直度成分も 1.5D リニアエンコーダで検出して X 軸で補正した。つまり X 軸と Z 軸が互いの真直度を補正しているシステム構成となる。

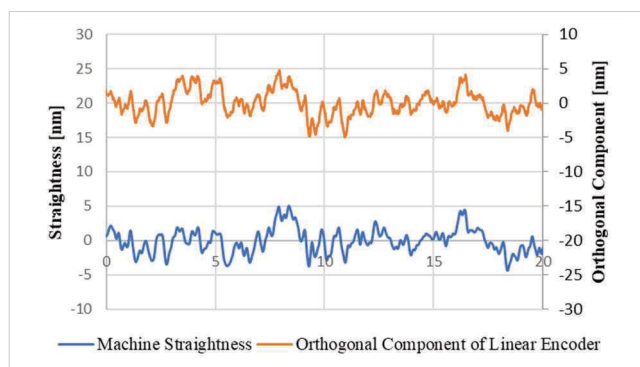


Fig. 3 真直度とエンコーダ出力の比較

2.2.3 回転成分の補正

Fig. 2 からわかるように、リニアエンコーダの検出点とワークと工具が接触する加工点は X 軸と Z 軸共に進行方向に対して平行にずれている。広く知られたアッペの原理からわかるように、この構成は測定物(加工点)と目盛(測定点)が測定方向の同一直線上にないためアッペ誤差を生じる。NC の位置制御により測定点の位置誤差が極僅かであっても、加工点は期待する位置に制御されない可能性がある。そこで本稿ではアッペ誤差の原因となっている角度を測定点における回転成分 θ として検出し、加工点における位置誤差が小さくなるように補正制御した。

2.2.4 補正回路

本補正システムは真直度を事前に測定しておき、次回以降の動作に補正值を活用するシステムではない。各軸動作中に真直度を 1.5D スケールで測定しながら補正值信号を各軸の主成分信号に合成するシステム構成である。本構成により補正值を常に更新しているため、真直度の変化が時間的に変化しても対応可能である。

各補正成分を X 軸と Z 軸に遅れなくフィードバックするためにはフィードバック信号を制御周期内で制御系に返す必要がある。P を制御対象、C を制御器としたとき、Fig. 4 のような位置制御系とした。本稿では 1.5D リニアエンコーダの信号処

理と各軸への補正入力処理は、FPGA（Field Programmable Gate Array）を使用した。FPGA は数十 MHz のクロックで並列にロジックの処理が可能のため、数十マイクロ秒オーダーの制御周期の位置制御系に対して、遅延なく補正が可能である。X 軸、Z 軸のリニアエンコーダの計 6 系統を FPGA への入力とし、処理結果の 2 系統を制御系へ出力した。FPGA からみて、6 入力 2 出力のシステム構成となる。

2.3 実験装置

真直度誤差の検出と補正の検証には、X、Z 軸に有限型 V-V 転がり案内、リニアエンコーダ、リニアモータを搭載した超精密非球面加工機（ULC-100F(S)、芝浦機械株式会社、Fig. 5）を用いた。本機をベースにして、X 軸と Z 軸に対し 1.5D リニアエンコーダを適用した。



Fig. 5 ULC-100F(S)

3 実験結果

3.1 加工条件

1.5D リニアエンコーダを適用した加工機において、X 軸と Z 軸の真直度の相互補正が正しく機能していることを確認するため、曲率半径 60mm の凹球面、加工径 ϕ 50、最大傾斜角 25° の

ワークの加工を行った。対象ワークを Fig. 6 に示し、使用した工具と加工条件の詳細を Table 1 に示す。



Fig. 6 対象ワーク

Table 1 加工条件

Spherical radius	60 [mm]
Cutting diameter	50 [mm]
Materials	Electroless Ni-P on brass
Tool	Single Crystal diamond
Tool radius	1 [mm]
Spindle speed	1,000 [mm]
Feed rate	1 [mm/min]

3.2 加工結果

加工表面の評価には、レーザー干渉計（Verifire XPZ、Ametek）を用いた。なめらかな干渉縞は良好な加工面であり、干渉縞に歪みがあったり、干渉縞を横断するようなスジがあったりする場合は、光学系にとって良好ではない加工面である。補正なしの場合と補正ありの場合の加工結果の観察画像を Fig. 7 に示す。一度にワーク全体を捉えることができなかったため、ワーク中心付近から外周にかけて、三分割して測定したデータを示す。

補正なし			
	中心付近	中間点	外周部

Fig. 7 加工結果

補正なしでは中心から外周部に向かって干渉縞を横断する無数のスジが増え、加工面が悪化していくことがわかる。ワーク外周部はXZ軸の真直度とアップ誤差起因の微小うねりが複雑に影響しあうためと考えられる。一方補正ありでは補正なしで見られたようなスジはなく、なめらかな干渉縞となっており、うねりの少ない良好な加工面となっている。これはXZ軸の真直度とアップ誤差起因の微小うねりが正しく補正されているためと考えられる。したがって、同時2軸加工においても、補正によりうねりの少ない良好な加工面が得られることがわかった。

4 結言

1.5D リニアエンコーダを超精密非球面加工機に適用し、真直度補正により加工表面が改善されることを確認した。本稿における加工以外にも、凸形状や非球面形状の実光学部品に近い旋削検証や研削加工にも適用した加工検証を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 鈴木浩文、北嶋孝之、奥山繁樹：“軸対称非球面の高精度切削に関する研究”、精密工学会誌、Vol.65、No.3、1999.
- 2) 鈴木亨、福田将彦：超精密加工機におけるサーボ式真直度誤差補正の検討、精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集、(2023) 219.
- 3) Yan Wei, Shinya Morita, Masahiko Fukuta, Toru Suzuki, Takanobu Akiyama, Yutaka Yamagata, Takuya Hosobata: Real-time Motion Error Compensation in Optical Surface Fabrication Using a 2-DOF Linear Encoder, euspen, (2024)
- 4) HEIDENHAIN：“半導体デジタルイベント”，<https://semiconductor.heidenhain.com/ja> 2024.06.09 アクセス



工作機械カンパニー
工作機械技術部
精密設計課

鈴木 亨



工作機械カンパニー
工作機械技術部

福田 将彦



工作機械カンパニー
工作機械技術部
加工開発課

秋山 貴信

CNF 複合樹脂ペレットの製造プロセス開発

大石 真伸

2020 年 NEDO が公募した「炭素循環社会に貢献するセルロースナノファイバー関連技術開発」(以下、本プロジェクト)に、大王製紙株式会社(以下、大王製紙)と共に採択され、製造プロセスの開発を進めてきた。セルロースナノファイバー(以下 CNF)は軽量かつ鋼鉄の 5 倍の引張強度を有する植物由来の新素材であり、製品の軽量化や石油由来樹脂の使用量低減につながるため、様々な業界で用途展開が期待されている。一方、CNF 複合樹脂製品の活用の最も大きな障害は、高い製造コストであり、低コスト化が求められている。また、樹脂温度低減による着色抑制・凝集抑制や繊維の分散改善など、品質についても更なる改善が必要である。大王製紙は原料改質を担当、芝浦機械では押出機関連のプロセス開発(フィード、混練、脱揮、造粒、冷却)を担当し、改良・改善を重ねることで、高濃度マスターバッチペレットの製造に成功、目標の押出質量を達成することができた。この結果を基にパイロット機を設計・製作し、大王製紙に納入後、各市場に評価用サンプルペレットを出荷している。以下は 2020 年 10 月～2023 年 2 月までの開発経過について要約したものである。但し、期間終了後も更なる原料改質やプロセスの改善に継続して取り組んでいる。

1 はじめに

CNF はセルロースを主体としたナノ材料であり、軽量、高強度、低線熱膨張、チキソ性、透明性、ガスバリア性などの特徴を有している。また、植物由来の素材のため、我が国に豊富に存在する森林資源を活用できることや、環境負荷低減に貢献する環境配慮型の材料であることから SDGs にも謳われるエネルギー問題の解決や、炭素循環社会の実現に有効なカーボンニュートラルな素材として注目されている。CNF の稀有な特性により広範な用途への利用が期待されおり、特に軽量、高強度の特性を活かし、樹脂と複合化することで自動車や家電などの構造用材料への活用が期待されている。

10 年ほど前より、CNF は注目されているが、未だに本格的に社会実装が進んでいない。その理由としては CNF が高価であり、樹脂使用ユーザーに需要が広がらないためである。コスト高になる理由の一つとして CNF と樹脂との複合化の工程において生産性が上がらないことがある。そこで、CNF メーカーでもある大王製紙と押出機メーカーである弊社が本プロジェクトに参画し、原料の改質と、複合化技術の改善に両社で取り組むことになった。

2 開発する技術について

2.1 プロジェクトの概要

大別して以下の 4 つの開発項目²⁾に取り組んだ。

- ① 安価な薬液を用いたパルプを変性する技術
- ② 部分的に CNF 化する程度まで解繊する技術
- ③ CNF の凝集を防止する乾燥技術
- ④ 二軸押出機によるスケール UP 可能な条件で複合樹脂を製造する技術

①②③は大王製紙が、④は大王製紙と弊社が担当した。原料から CNF 複合樹脂ペレットまでを一貫製造することで、従来の製法よりも製造コストと CO₂ を大幅に削減できると考えた。大王製紙より大量の CNF の供給を受け、弊社実験場で試作を行い、その結果について原料改質や製造プロセスへのフィードバックを継続した。最終的に開発した技術をベースにパイロット設備を設計、製作し、大王製紙の三島工場(愛媛県)へ納入した。

2.2 CNF 複合樹脂ペレット製造プロセス

大王製紙の持つ抄紙技術を駆使、紙に連続的に薬液を塗工、含浸し、加熱環境下で樹脂と親和性を持つように化学変性させた。その後、水中で解繊させ、最終物性に適合するファイン率(繊維長 0.2mm 以下の割合)になるよう調整、セルロース繊維を部分的に CNF 化した後、乾燥させた。得られたセルロースと樹脂の複合化に二軸混練押出機を使用した。CNF 濃度は当初 55% であったが、研究過程で 67% まで高濃度化することに成功した。



Fig. 1 CNF 複合樹脂ペレット¹⁾

このような高濃度マスターバッチを製造することにより、輸送コストの削減や、エンドユーザーにおいては、各製品の性能に見合う希釈を自在に行うことができるメリットがある。この開発では、CNF 濃度 10% に希釈したペレットで製品評価を

行った。67%の高濃度CNF複合樹脂をエンドユーザーは10%程度まで希釈して射出成形等で2次加工製品を製造する。

Fig. 2 にプロセスフローを示す。



Fig. 2 プロセスフロー¹⁾

2.3 混練の難しさ

植物由来である親水性のCNFを石油由来である疎水性の樹脂の中に均一に分散させることは非常に難しい。これを改善するためには、セルロース繊維を化学変性し、樹脂との親和性を向上させる必要があった。

また、樹脂複合化の工程においては、二軸混練押出機を用いて、CNFと樹脂を加熱、混練する必要があるが、CNFの比率が高いため、持ち込み水分を効率的に除去しつつ、水の沸点よりも高い融点を持つ樹脂との分散を両立させることが大きな課題である。

2.4 生産性の改善と軽量化の効果

設備能力は二軸混練押出機 TEM-48 サイズの一般的な処理能力である250kg/hを目標とした。これは、従来技術の約5倍に当たり、生産のネックである混練工程の生産性を改善することにより、製造コストの削減を図ると共に、ニートPPベース比で1.6倍の曲げ弾性率を目標とした。

最終製品はガラス繊維強化樹脂相当の強度を確保することで製品の軽量化や、プラスチック使用量の削減を見込む。

3 実験装置

3.1 弊社プラスチック実験場の二軸混練押出機

以下の二軸混練押出機を使用した。

TEM-26DS

TEM-26SX

TEM-48SX

小型機のTEM-26でパレル構成、スクリュ構成、運転条件を見出し、導入するパイロット機と同サイズのTEM-48でスケールUPの確認と運転調整を行った。

下流装置（冷却、造粒装置）は、テスト目的に合わせて適宜変更した。



Fig. 3 TEM-26SXテスト装置（一例）



Fig. 4 TEM-48SXテスト装置（一例）

3.2 二軸混練押出機TEM-DS,SXシリーズの特徴

Fig. 5 に各シリーズのスクリュ形状（断面形状）の違いを示す。SX（標準深溝タイプ）はスクリュ谷径が大きく、フライト頂部の幅が広いいため、樹脂に対して強力なせん断作用と分散を付与することができる。それに対してDS（超深溝タイプ）はパレルとスクリュの空間ボリュームが大きく、フライト頂部が狭いことからせん断作用がマイルドで、樹脂に対して高い搬送性と低温混練が期待できる。原料が、非常に嵩高く（嵩密度が小さい）、SX機では押出機内に効率よく原料を喰い込ませることができないと考え、搬送ボリュームの大きいDS機による検討から着手した。

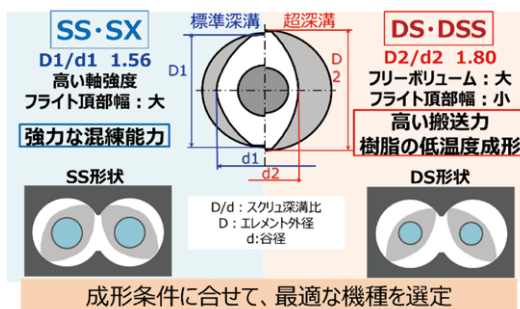


Fig. 5 TEM-DS,SXのスクリュ形状の違い

Fig. 6 に各シリーズの混練能力と押出質量（生産量）のイメージを示す。ここに示す性能は、原料形態や運転条件にも左右される。今回の原料は、セルロースの比率が半分以上のため、通常の熱可塑性樹脂同士の混練や少量の副資材との混練とは異なり、高トルク運転になる可能性がある。その時には、SX機に移行することとした。

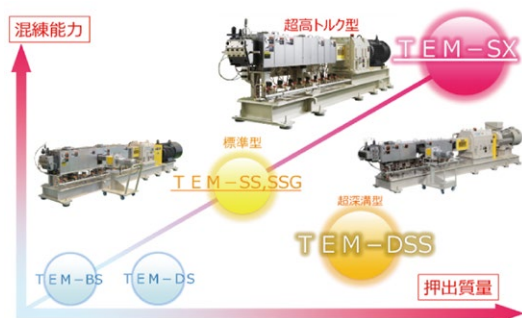


Fig. 6 TEM各シリーズの性能比較(イメージ)

4 テスト方法

4.1 フィード律則改善について

当初、超深溝機 TEM-26DS でテストに着手したが、原料嵩密度が $0.1\text{g}/\text{cm}^3$ と非常に小さく、結果的にオーバーフローが発生した。次に、フィード部に特殊フィードスクリュを用いて搬送能力を強化、フィードバレルを大口径ロング型に変更、更には途中からサイドフィードも実施したが、それでも $12\text{kg}/\text{h}$ から $30\text{kg}/\text{h}$ にするのが限界であった。TEM-48 サイズで $250\text{kg}/\text{h}$ を目指すには、TEM-26 で約 $60\text{kg}/\text{h}$ が必要だが、半量しか達成できなかった。

$$250\text{kg}/\text{h} \times (26/48)^{2.3} \approx 61\text{kg}/\text{h}$$

そこで、大王製紙に原料の改質を依頼、嵩密度を $0.1\text{g}/\text{cm}^3$ から $0.5\text{g}/\text{cm}^3$ まで高めていただいた結果、最終的に $60\text{kg}/\text{h}$ を達成することができた。しかし、ベントポートから原料の吹き出しがあり、安定運転が困難であること、フィード箇所が2ヵ所必要なため、設備コストが増加するなどの問題が顕在化した。

4.2 ベントUP律則改善について³⁾

通常の熱可塑性樹脂のコンパウンドで脱揮をする場合、上面が開いているベントバレルに楔型のブロックを取付て揮発分を抜く方法を用いる。機内の樹脂は、そのブロックにより抑え込まれ、盛り上がりや飛び出しが抑制される。Fig. 7 にトップベントポートの構造を示す。

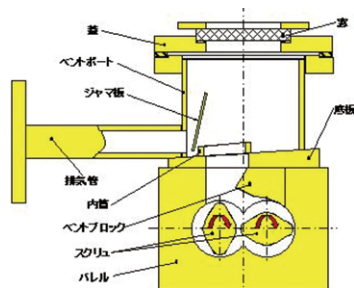


Fig. 7 トップベントポートの構造

原料に多量の水分が含まれているため、加熱やせん断作用により気化した水蒸気がベント口より勢よく排出された。その時に原料も水蒸気に同伴され、機内から噴出してしまいう現象が発生した(フレークUP)。事前に水分を分離できれば良いが、CNF 自体の凝集が予想されるだけでなく、上流設備を含め、乾燥設備や消費エネルギーなどのトータル製造コストが増加する可能性がある。

対策として固形分を機内に押し戻しながらガス分のみを除去する機能を持つサイドベントスタッファを採用した。Fig. 8 にテスト時の状況、Fig. 9 に機能、構造を示す。

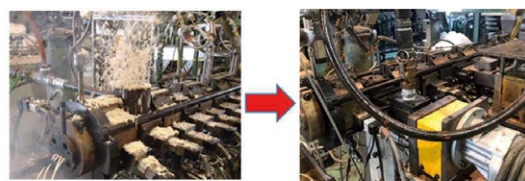


Fig. 8 ベントの改善

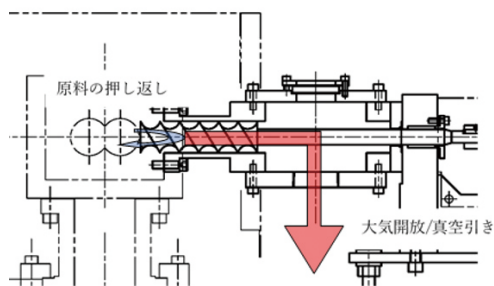


Fig. 9 サイドベントスタッファの機能

また、フィード口への水蒸気の戻りを最小限にするため、スクリュ構成を最適化するとともに、オープンベント部(大気開放部)にもサイドベントスタッファを配置した。第一混練部では完全熔融させず、水蒸気がフィード口に戻らない様できるだけ下流側へ送る。Fig. 10 に示すようにサイドベントスタッファは2台設置し、前段のベントスタッファは大気開放、後段のベントスタッファは真空引きした。CNF が高濃度で配合されていること、および多量の水分が存在することより、押出機内の上流部では樹脂との纏まりが弱く脆い状態のため、水蒸気の噴出によってフレークUPした。ニーディングディスク(以下KD)^{注1)}とベントスタッファの位置の調整が安定運転上、非常に重要となる。



Fig. 10 サイドベントスタッファとスクリュ構成

前段のサイドベントスタッファ部は、樹脂がほぼ未熔融であるので、真空引きすると水蒸気の他に樹脂も吸入してしまうため真空引きはせず、大気開放で水蒸気を機外に排出する。大気開放でも十分に水蒸気は排出可能であった。

後段のベントスタッファ部は、樹脂が第二ニーディングディスクゾーンを通過することで溶融が進んでいるため、真空引きしても問題はなく、最終製品のペレットの密度の向上にも繋がっている。

4.3 トルク律則改善について

当初、TEM-26DS でテストを行っていたが、原料の嵩密度の改善を行ったことより、 $60\text{kg}/\text{h}$ を達成した。但し、トルクが90%を越えたため、定常運転は不可と判断した。その

ため、許容トルクが38%向上している超高トルク機の TEM-26SX,48SX を適用することで、結果的に許容トルク範囲内の運転を可能にすることができた。

4.4 造粒および冷却改善について⁴⁾

コールドカット(ノズル→冷却装置→ペレタイザ)方式では、CNF が高濃度なため、押出機から吐出されるストランド^{注2)}は脆く、通常のストランドカッターで引き取ると、冷却水槽中で切れてしまう。冷却水槽の代わりにコンベアを使用した、ストランド切れは完全には収まらず、安定した連続造粒が困難であった。

また、本原料は、造粒後に速やかに冷却しないと、自熱により炭化が進み、焦げてしまう。このように変色し、色相が悪化するとユーザーが染色する際に制限が出てしまう。

ホットカット(ダイフェースカット)方式では、押出機先端にホットカッターを取付、押出機から出てきた樹脂を回転刃によって即座にカットしペレット化する。その後流水と共に遠心脱水機で急冷、および脱水することで、連続的に効率よく安定した造粒が可能となった。

4.5 ノズルについて⁴⁾

混練後の複合樹脂は、流動性が悪く、樹脂温度も上がりやすいため、4.4 項の対策の他に、ノズルの内部流路についても検討した。流動時にできるだけ原料に過剰なせん断力が作用しないようスムーズに吐出できる流路とした。Fig. 11 にバレルからノズル内部の流路形状変化を示す。

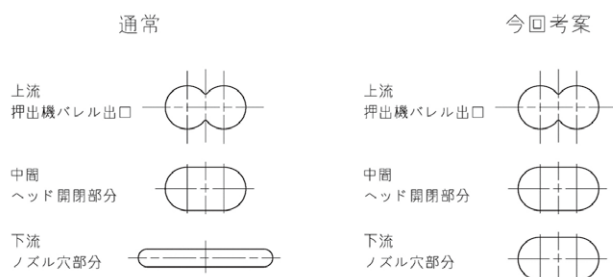


Fig. 11 バレルからノズルの内部流路断面形状

通常の流路は、二軸混練押出機特有の二つ目穴形状から小判型に形状変化する。その後、一列または二列の出口穴に向かい流路が絞られ断面積が漸減する。新たに考案した流路は、二軸混練押出機特有の二つ目穴から小判型までは同形状であるが、そこから流路は絞らず出口まで同一形状とし、吐出穴は多列の千鳥配列とした (Fig. 12 参照)

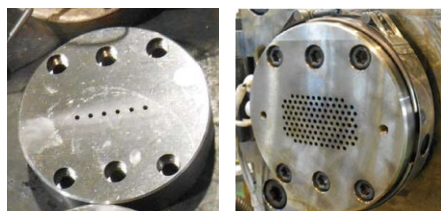


Fig. 12 一列ノズルと多段ノズル

この樹脂の特性上、吐出した直後にストランド同士が融着し

づらいことから本ノズルにて安定造粒が可能であった。

また、本ノズルは流路断面積が大きいいため、中央部と壁面部付近では、樹脂の吐出速度(吐出量分布)が異なる。二軸混練押出機では、二本のスクリュ軸中心付近を流れる樹脂の温度は高い傾向にあるため、粘度低下により流動し易く吐出量が多くなるが、壁面近くは流動抵抗により樹脂が出にくい。この対策として穴のランド長(穴の長さ)を中央部>壁面部のように意図的に変化を持たせることにより、吐出分布を調整し、最終的に出口での吐出状態を均一化することができた。また、穴数を増加できたことで、カッターの回転速度を落すことにも貢献し、ペレット形状の改善につながった。Fig. 13 に多段ノズルにて吐出状況が安定化した様子を示す。

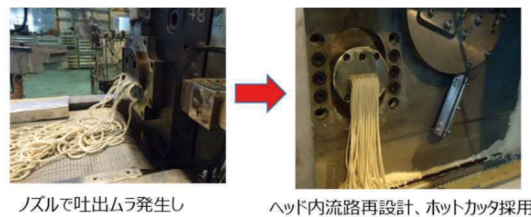


Fig. 13 ノズルからの吐出状況

5 テスト結果

5.1 テストの変遷

Table 1 テスト変遷

テスト機	原料 炭比量	投入 方法	ペント	冷却方法	カット方法	スクリュ構成	主な結果
TEM-26DS	改善前	トップ/ サイド	トップペント	水槽	ストランドカット (水槽)	特殊KD多用	30kg/h フィードネック
TEM-26DS	改善後	トップ/ サイド	トップペント	水槽	ストランドカット (水槽)	混練部極小化	60kg/h フレイクUP
TEM-26SX	改善後	トップ	ベントスタッフ (3台)	水槽	ホットカット	KD使用	60kg/h 5Xトルク利用
TEM-48SX	改善後	トップ	ベントスタッフ (3台)	コンベア (水/エア)	ストランドカット	第1KD最適化	250kg/h 短時間
TEM-48SX	改善後	トップ	ベントスタッフ (2台)	遠心脱水機 (水冷)	ホットカット	KD最適化 ペントとの位置	250kg/h 樹脂温高い
TEM-48SX	改善後	トップ	ベントスタッフ (2台)	遠心脱水機 (水冷)	ホットカット 穴数増大	KD最適化 ペントとの位置	250kg/h Fine率影響

Table 1 にテストの変遷を示す。各テストで抽出した律則条件を改善すべく原料の改質や装置の改良を実施した。単なる熱可塑性樹脂とは異なり、CNF 高濃度配合のため TEM-26 から TEM-48 へのスケール UP は困難であった。吐出量、スクリュ回転速度、スクリュ構成は、通常的なスケール UP 通りでは再現できず、改めて TEM-48SX で運転条件を探索し、250kg/h の安定運転(フィードネック無し、フレイク UP 無し)を達成することができた。

5.2 サンプル評価

Fig. 14 に 67%CNF 濃度の複合ペレットとそのペレットを PP で 10% 希釈した物のプレスフィルムを示す。

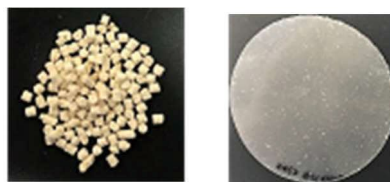


Fig. 14 67%濃度ペレットと10%希釈フィルム²⁾

曲げ弾性率は 2.4 GPa 以上であり、目標であったニート PP の 1.6 倍を達成した。詳細は Table 2 に示す。

Table 2 物性評価²⁾

試験項目	単位	試験方法	二一トPP	CNF複合樹脂 10%希釈品
CNF配合率	wt%	-	0	10
密度	Kg/m ³	JIS K7112	0.90	0.94
曲げ弾性率	GPa	JIS K7171	1.5	2.4
曲げ強度	MPa	JIS K7171	54.0	68.3
引張破壊応力	MPa	JIS K7161	17.5	36.6
引張破壊ひずみ	%	JIS K7162	78.0	13.5
メルトフローレート	g/10min	JIS K7210	4.1	2.9
シャルピー衝撃値	kJ/m ²	JIS K7111	1.8	2.9

また、CNF 複合樹脂の利点と評されているリサイクル性についても評価を実施した²⁾。ペレット作成後、射出成形⇒物性評価⇒粉碎⇒射出成形を5回繰り返したところ、当初の曲げ弾性率、曲げ強度に低下が見られないことを確認した。この試験において、徐々に着色する傾向は見られたが、リサイクル性に優れることが確認できた。

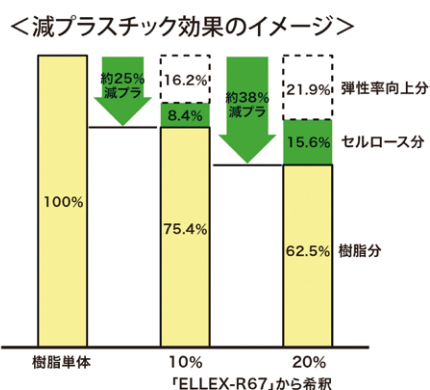


Fig. 15 減プラスチック効果のイメージ¹⁾

Fig. 15 に 67%CNF 複合樹脂を 10%,20% に希釈した場合のプラスチック使用量のイメージを示す。このグラフより弾性率向上分の薄肉化による軽量化分と、セルロースと樹脂の置き換え分に相当する樹脂の使用量を削減できることが分かる。

5.3 システムフロー

テストを繰り返し実施して、最終的に完成したシステムフローを Fig. 16 に示す。

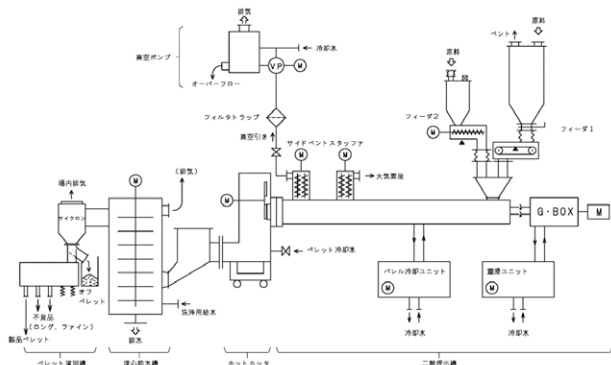


Fig. 16 システムフロー³⁾⁴⁾

6 まとめ

CNFが注目され始め10年ほどが経過している。産官学で研究が進められ、CNFの稀有な性質を有効活用できることが報告されている。CNF 複合樹脂材料は、徐々に製品利用が進んでいるが、安定した品質のCNF 複合樹脂材料の量産化は難しく、高コストで社会実装の足かせになっている。本プロジェクトでは、原料、装置を同時進行で検討することができ、量産化に道筋をつけることができた。2022年には、大王製紙にパイロット機(TEM-48SX)を導入し、量産試作した高濃度マスターバッチ「ELLEX-R67」の、ユーザー評価を行っている。2025年には商用プラント用押出機(年産2,000トン)も納入する予定である¹⁾。今後も更なる改善、最適化を図りながら開発を継続する。

注1) ニーディングディスク：楕円型のディスクの回転方向位相をずらして配置することで、ディスク間の流れの分断により混練を行なう。

注2) スtrand: 溶融された樹脂材料を穴から押し出した細長い pasta 形状の樹脂。

参考文献

- 1) 大王製紙株式会社 ホームページ
セルロースナノファイバー (CNF)
- 2) NEDO「炭素循環社会に貢献するセルロースナノファイバー
関連技術開発」事業原簿【公開】Ⅲ -2-1-5-1 ～ 62
- 3) 特許第 7431297 号、スクリュ機械及び混練方法
(芝浦機械 大石、安倍、岡本)
- 4) 特願 2023-024521、樹脂ベレット製造装置
(芝浦機械 大石、安倍、岡本)

この成果は、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)の助成事業(JPNP20009)の結果得られたものです。



成形機カンパニー
押出技術部
押出技術課

大石 真伸

溶融池と造形物温度の In-situ モニタリングによる 高炭素材質造形の危険温度推定

竹内 将人 青木 稔尚 横山 真之 金井 貴勲 井口 瑤介

金属積層造形、いわゆる金属 3D プリンタの一方式である DED (Directed Energy Deposition) 方式は既存部への形状付加、異種材造形による部材の高機能化 (耐摩耗性、耐食性向上)、部品の補修を得意としている。DED では SKD61 に代表される高炭素材質造形において内部にブローホールが発生しやすいという課題がある。本研究ではブローホール発生にはある温度以上で造形を継続すると、発生リスクが上昇する危険温度が存在すると仮説を立て、造形中の溶融池観察および温度状態の In-situ モニタリングからその存在を明らかにした。また、危険温度を回避するよう造形を行うことでブローホール発生の抑制に至った。

1 緒言

積層造形は 3D モデルを起点とした工法であり、従来の製造法では実現が困難であった複雑形状の創製が可能である。積層造形には多様な方式があるが、当社では DED (Directed Energy Deposition) 方式の技術開発を行っている。Fig. 1 に DED 方式の原理を示す。熱源であるレーザー光を局所的に照射することで基材を溶融し、それにより形成された溶融池に対し金属粉末を投入することでビードを造形する。基材上に造形されたビードが基本単位となり、並べることで面を形成、層を重ねることで 3 次元形状が形成される。DED は狙った箇所に造形を行うことが出来るため、「既存部への形状付加」、「異種材造形による部材の高機能化」、「部品の補修造形」を得意としている。

一方で DED プロセスは金属の溶融凝固現象が繰り返されながら造形が行われていくため、完成した造形物は非常に複雑な温度状態を経ており、所望の品質を確保するまでのトライ & エラーが課題となっている。

同課題に対し、溶融池状態をモニタリングし、形状や温度といった情報を基にレーザー出力を FB 制御する閉ループ系の制御機能開発が活発に行われている¹⁾²⁾³⁾。同機能により、造形形状や金属組織の安定化が実現されており、DED の実用化加速に期待を寄せるものとなっている。

しかしながら、その多くの報告において対象としている造形材質は SUS316L などの低炭素材質であり、同機能が高炭素材質で発生しやすいブローホールの抑制に寄与したという事例はまだ無い。

過去の造形事例として高炭素材質である熱間ダイス鋼 SKD61 の造形に取組んだ事例を Fig. 2 に示す。図中の上方向に積層をしているが、断面内にブローホールが多く発生している。b) を見るとブローホールは造形ビード界面内に存在しており、溶融池内で発生後、凝固の際に内包されたことが推察される。したがって、ブローホール発生を検知した瞬間にはすでに凝固が始まっている可能性があるため、先の閉ループ系制御

機能がどこまで追従し、ブローホール抑制に効果を示すかは未知数である。

ブローホール発生原因は材質由来の炭素と雰囲気中の酸素による炭酸ガス生成が典型的であると提唱されている⁴⁾。このことから、高炭素材質の造形ではブローホール発生リスクが本質的に造形中に介在することになる。

ところで、Fig. 2 を改めて観察すると、下層領域は緻密な組織が形成されているが、上層に向かうにつれてブローホールが増加していることが分かる。一般的に造形を行う際は造形効率を上げるため、無駄な動作とレーザーが OFF する時間を極力、短縮することが望ましい。したがって、効率を求めると造形物にレーザーが照射されている時間が長くなり、放熱量が十分でないで積層が上層に進むにつれて熱が蓄積され過熱状態になってしまう。

以上を鑑みると、高炭素材質の造形では、ある温度以上で造形が継続されるとブローホール発生リスクが上昇する危険温度が存在すると考えられる。

そこで、本研究では高炭素材質造形における危険温度の存在を明らかにすることを目的とし、可視光カメラと赤外線カメラによって In-situ モニタリングを行い、それぞれの画像からブローホールの発生と造形温度の関係を紐づけた。

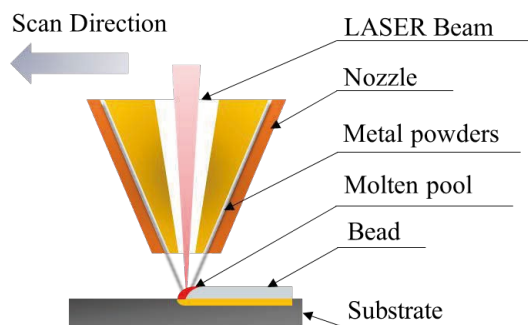
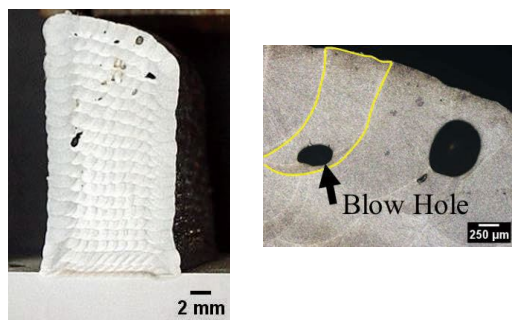


Fig. 1 DED方式の原理



a) 造形断面像 b) 拡大像

Fig. 2 SKD61造形事例

2 実験方法

2.1 実験体系

Fig. 3 に実験体系図を示す。造形には当社の DED 装置である ZK-Series を使用した。図中の座標系は装置の機械座標系を示す。造形形状は 30 [mm] 長さのビードを層毎に Y 方向に往復走査させ、Z 方向に 0.33 [mm] 間隔で 80 層、積層する壁形状とした。基材と装置テーブルとの間に空間を設け、断熱材を設置し、基材からテーブル面への熱伝導を遮断している。

ヘッドに取付けた可視光カメラはレーザと同軸方向 (Z 方向) から溶融池を撮像し、ブローホールの有無をモニタリングする。赤外線カメラは X 軸方向から熱画像を撮像し、造形中の温度状態をモニタリングする。各カメラの撮影タイミングと装置の造形動作タイミングを正確に合わせるため、NC と PC を通信によって連携させている。

造形材質は SKD61、基材材質は SUS304 とした。Table 1 に SKD61 の化学成分、Table 2 に造形条件を示す。

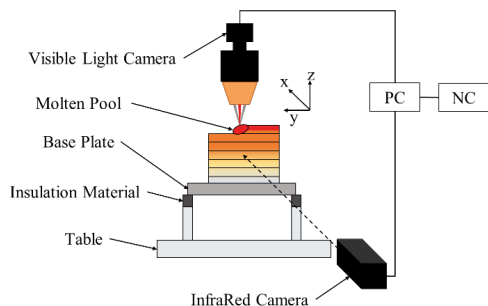


Fig. 3 実験体系図

Table 1 SKD61化学成分 [wt%]

C	Si	Mn	P	S	Cr
0.36	0.81	0.39	0.008	0.005	5.23
Mo	V	O	N	Fe	
1.25	1.01	0.029	0.026	Bal.	

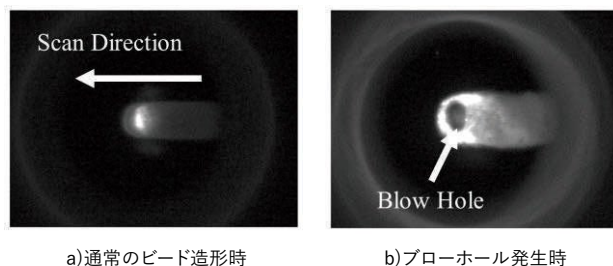
Table 2 造形条件

レーザ出力 : P [W]	走査速度 : v [mm/s]	粉体供給量 : dm/dt [g/sec]
900	10	0.0617

2.2 可視光カメラによる溶融池撮像とブローホール検知

可視光カメラによる溶融池撮像について説明する。DED では溶融池周辺部に発光輝度の高いレーザ生成プラズマが発生するため、プラズマ発光を避ける工夫が必要となる。DED とは異なるがアーク溶接の溶融池可視化でよく使用されている 640 ± 5 [nm] の波長のみを透過するバンドパスフィルタを可視光カメラに装着したところ、プラズマ発光が抑えられた良好な溶融池像が撮像可能となった。

事前に検証した造形中の溶融池像例を Fig. 4 に示す。a) は正常なビードを造形している際の溶融池像であり、b) はブローホールが発生した瞬間である。溶融池撮像がブローホール検知に有効であることがわかる。



a) 通常のビード造形時 b) ブローホール発生時

Fig. 4 溶融池像例

2.3 赤外線カメラによる熱画像の撮像

赤外線カメラによる熱画像の撮像について説明する。赤外線カメラは造形物表面から発する熱輻射光を感知し、熱画像を撮像する。造形中の環境はレーザ照射によるヒューム (金属蒸気) の発生、未溶融の金属粉末による周囲光の乱反射など熱画像に対する外乱要素が懸念される。これら外乱要素に対し、感度が低い SWIR (Short Wavelength InfraRed: 短波赤外) 領域の波長を観測波長とするため、赤外線カメラに波長 1,550 ± 5 [nm] のバンドパスフィルタを装着した。

熱画像から温度を取得するには SKD61 造形表面の放射率: ϵ_w [-]、画像の輝度: I_d [-] と測定温度: T_w [°C] の関係性を把握しておく必要がある。方法の詳細については割愛するが、放射率が既知である黒体塗料塗布による放射率推定⁵⁾、黒体炉による校正⁵⁾を行った結果、カメラの露光時間: $\Delta t = 1$ [ms] の条件において、 $\epsilon_w = 0.89$ [-]、 $I_d = 1 \sim 255$ [-] が $T_w = 390 \sim 820$ [°C] に相当するという結果を得た。Fig. 5 に壁造形時の熱画像例を示す。造形により高温になっている $T_w = 390 \sim 820$ [°C] の温度を有する領域のみ表示されており、周囲状態が映り込んでいないことが分かる。

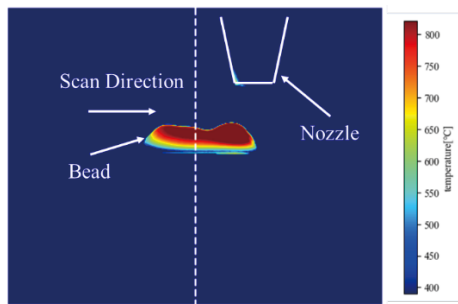


Fig. 5 熱画像例

2.4 代表温度の定義

熱画像から取得する代表温度の定義を説明する。1章で述べたように高温状態での造形がブローホール発生リスクを上昇させると考えると、ある造形層： n [Layer] の代表温度： T_n [°C] はビード内の評価位置を溶融池が通過する直前の温度と定義できる。Fig. 6 に熱画像と代表温度の例を示す。評価位置はビードの中央部とした。測定可能な温度が $T_w = 390 \sim 820$ [°C] なので、層によっては T_n [°C] が測定できない。そこで、評価位置を溶融池が通過した後は一次遅れ系で降温が進行すると仮定し、有効な温度測定値から各層の熱時定数： τ_n [sec] を求め、下記の式(1)から T_n [°C] を推定することとした。

$$T_n = (T_m - T_r) \exp\left(-\frac{1}{\tau_n} t\right) + T_r \quad (1)$$

ここで、 $T_m = 1,540$ [°C] : SKD61 の融点、 $T_r = 25$ [°C] : 室温である。ある層： n [Layer] の T_n [°C] はグラフ中に示した点となり、以降、 T_{n+1} 、 T_{n+2} [°C] と続いていく。

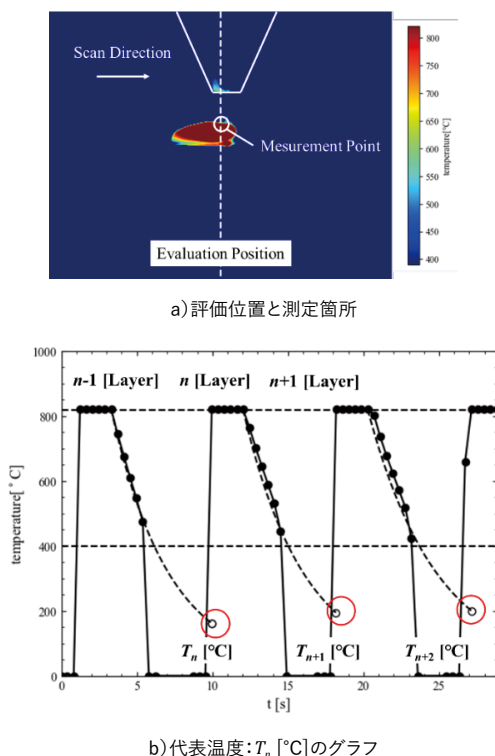


Fig. 6 熱画像例

3 結果と考察

3.1 壁造形時のブローホール発生、危険温度

2章で示した実験方法および測定方法に基づき、各層の造形終了後に5 [sec]の待機時間を設け、80 [Layer]の壁造形を行った。待機時間を設けた理由は2.4節で述べた降温時の有効温度測定値を取得するためである。造形中の溶融池モニタリングから20 [Layer]にて最初のブローホール発生が検知され、以降の層でも断続的にブローホール発生が検知された。Fig. 7に造形サンプルをビード中央部で切断、研磨した断面観察像を示す。ブローホールが断面内に発生していることが確認できる。

Fig. 8に各層 [Layer] における T_n [°C] の推移をグラフとして示す。20 [Layer] における T_n [°C] は約 296 [°C] であったことからブローホール発生の危険温度： T_c は約 296 [°C] であると分かった。

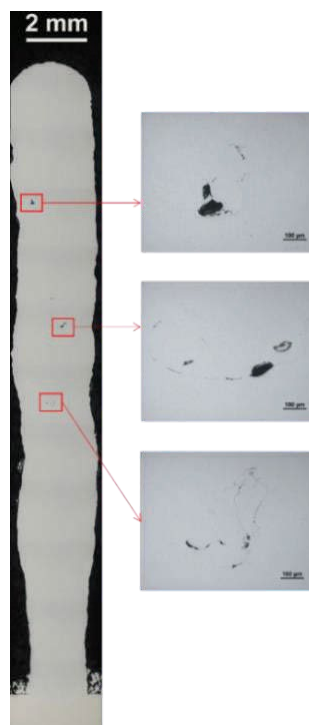


Fig. 7 造形サンプル断面観察像

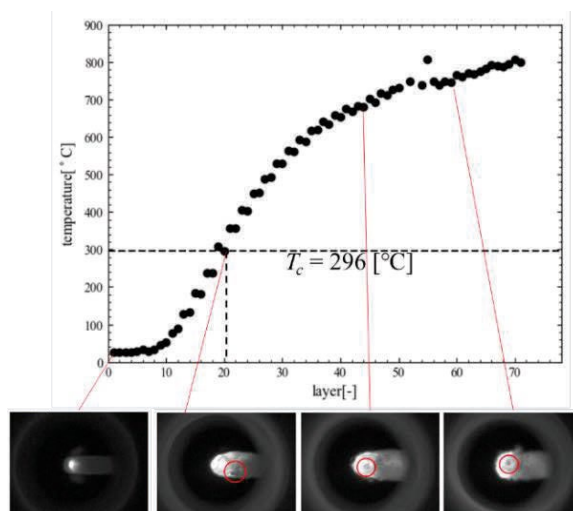


Fig. 8 各層 [Layer] における T_n [°C] の推移

3.2 冷却時間を設定した造形

$T_c [^{\circ}\text{C}] = 296 [^{\circ}\text{C}]$ という結果を得たことから、造形中の各層における $T_n [^{\circ}\text{C}]$ が $T_c [^{\circ}\text{C}]$ を超えないように造形することでブローホール発生は抑制されることが期待される。そこで各層の造形終了後に冷却時間: $t_{c,n} [\text{sec}]$ を設け、 $T_n [^{\circ}\text{C}]$ の上昇を抑えるを試みた。 $t_{c,n} [\text{sec}]$ の設定は 2.4 節で求めた $\tau_n [\text{sec}]$ と式 (1) を基にすると次式で求められる。

$$t_{c,n} = -\tau_n \cdot \ln \left(\frac{T_n - 0.8T_c}{T_m - T_r} \right) \quad (2)$$

式 (2) は $T_n [^{\circ}\text{C}]$ が $T_c [^{\circ}\text{C}]$ の 0.8 倍を超えないために必要とされる各層の冷却時間: $t_{c,n} [\text{sec}]$ を意味する。 $T_c [^{\circ}\text{C}]$ を 0.8 倍している理由は安全率を見込んでのことである。

造形条件と形状は変更せず、各層の造形終了時に $t_{c,n} [\text{sec}]$ のみ設定し、造形を行った。Fig. 9 に各層 [Layer] における $T_n [^{\circ}\text{C}]$ の推移をグラフとして示す。比較のため Fig. 8 で示したデータも合わせている。Fig. 9 を見ると、冷却時間を設けた造形では全層に渡って $T_n [^{\circ}\text{C}]$ が $0.8T_c [^{\circ}\text{C}]$ を超えていないことが確認できる。また、造形中の溶融池モニタリングにおいてもブローホール発生は認められなかった。

Fig. 10 に冷却時間を設定した造形サンプルのビード中央部、断面観察像を示す。ブローホールが発生していないことが確認できる。

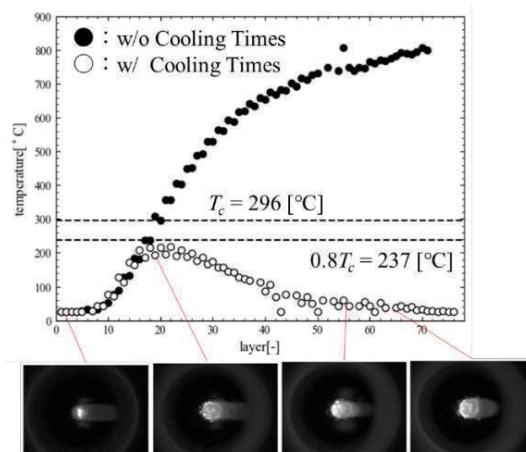


Fig. 9 冷却時間を設定した造形の各層における $T_n [^{\circ}\text{C}]$ の推移



Fig. 10 冷却時間を設定した造形サンプル断面観察像

4 結言

本研究では高炭素材質造形においてブローホール発生リスクが高まる危険温度の存在を明らかにすることを目的とし、In-situ モニタリングによる検証を行ったところ、以下の結果を得た。

- 壁形状造形において 20 [Layer] で最初のブローホールが溶融池モニタリングにより検知された
- ブローホール発生の危険温度: $T_c [^{\circ}\text{C}]$ は $296 [^{\circ}\text{C}]$ であった
- ビード中央部を評価位置とし、溶融池通過直前の温度: $T_n [^{\circ}\text{C}]$ が $T_c [^{\circ}\text{C}]$ を超えないよう冷却時間: $t_{c,n} [\text{sec}]$ を設定した結果、ブローホールの発生は認められなかった

以上、ブローホール発生には危険温度: $T_c [^{\circ}\text{C}]$ が存在することが明らかとなった。また、危険温度: $T_c [^{\circ}\text{C}]$ に到達しないよう造形を行うことでブローホール発生が抑制可能であることを示した。これは造形方案の設計に新たな知見を与える成果であると言える。

今後の課題として、危険温度の存在を理論的な側面から裏付け、他の材質にも展開していくことが挙げられる。

参考文献

- 1) Ziyad Smoqi, et al, Closed-loop control of meltpool temperature in directed energy deposition, Materials & Design, Vol.215, 2022, p.110508.
- 2) L. Miao, F. Xing and Y. Chai, Closed Loop Control of Melt Pool Width in Laser Directed Energy Deposition Process Based on PSO-LQR, IEEE Access, Vol.11, 2023, pp.78170-78181.
- 3) Akbari, M., Kovacevic, R., Closed loop control of melt pool width in robotized laser powder-directed energy deposition process, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.104, 2019, pp. 2887-2898.
- 4) 大井 利継, 藤岡 稔, 鋳鉄のガス溶接におけるブローホールの生成とその防止について, 鋳物, 50 巻, 5 号, 1978, pp.287-292.
- 5) 中村 元, 放射温度計の正しい使い方, 公益社団法人日本電熱学会 主催講習会 「計測技術 ～理論から最新研究まで～」, 2018, pp.1-20.
- 6) Errico, V., et al, Coaxial Monitoring of AISI 316L Thin Walls Fabricated by Direct Metal Laser Deposition,

Materials, 2021, p.673.

- 7) Ali, N., Tomesani, L., Ascari, A., et al, Fabrication of Thin Walls with and without Close Loop Control as a Function of Scan Strategy Via Direct Energy Deposition, Lasers in Manufacturing and Materials Processing, Vol.9, 2022, pp.81-101.
- 8) Müller, J., Hensel, J., Potential of thermography for the monitoring of DED-Arc processes, Weld World, 2024, pp.505-513.
- 9) 山田 善郎, 赤外線サーモグラフィ装置の放射温度計としての性能と校正, 伝熱, 54 巻, No.228, 2015, pp.15-20.
- 10) 日本機械学会, JSME テキストシリーズ 伝熱工学, 2005, pp.38-39, 丸善出版株式会社.
- 11) Silva, Régis, Jaeger, Pedro et al, Analysis of Interlayer Idle Time as a Temperature Control Technique in Additive Manufacturing of Thick Walls by Means of CMT and CMT Pulse Welding Processes, Soldagem & Inspeção, Vol.25, 2020.
- 12) Rumman, R., et al, Characterization of Al-12Si Thin-Wall Properties Fabricated with Laser Direct Energy Deposition, Sustainability, Vol.15, 2023, p.12806.



R&D センター
研究開発部
第二開発課

竹内 将人



R&D センター
研究開発部
第二開発課

青木 稔尚



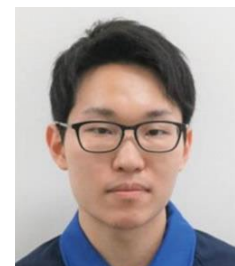
R&D センター
研究開発部
第二開発課

横山 真之



R&D センター
研究開発部
第二開発課

金井 貴勲



R&D センター
技術企画部
技術インフラ課

井口 瑤介

IoT を用いた設備機械の予知保全について

四條 弘次 富永 昌登 前原 弘之

芝浦機械では SHIBAURA-DX¹⁾ を掲げて構造改革をすすめているが、DX 実現の基本技術の 1 つである IoT に関しては、コンセプトを IoT+m²⁾ と名づけて推進している。そして、少子高齢化の進行による人手不足への対応と合わせて、機械メンテナンスの効率化も喫緊の課題として予知保全に取り組んでいる。予知保全を行うためには、「状態基準保全」(CBM: Condition Based Maintenance)が必須であるため、各種センサを用いて機械の現状値を収集し、「いつもと違う」を検出する機能が必要となる。ここでは、工作機械を例に振動センサを用いて「いつもと違う」を検出し、CBM を実現するための方法について紹介する。

1 はじめに

保全を分類すると、まず、故障が起きてからメンテナンスを行う「事後保全」と故障が起きる前に対応する「予知保全」とに大別される。

さらに、予知保全は、一定時間毎にメンテナンスを行う「時間基準保全」(TBM: Time Based Maintenance)、一定利用回数毎にメンテナンスを行う「利用基準保全」(UBM: Usage Based Maintenance)と、機械の状態を監視して、状態に応じてメンテナンスを行う「状態基準保全」(CBM: Condition Based Maintenance)に分類される。

事後保全では故障が起きてからメンテナンスを実施するため、故障や不具合が発生する都度、機械を停止することになり、生産計画に影響が出てしまう。TBM、UBM では、時間や使用回数などを目安としてメンテナンスを実施するため、実際は不具合が起きる兆候のないタイミングとなることも少なくなく、不要なタイミングでの部品交換などのメンテナンスが行われて部品代や人件費などのムダが生じる可能性がある。また、故障した部品の手配に時間がかかる場合、部品入手まで長期間に渡って機械停止させなければならない場合があり、生産計画に大きな影響を与えることもあり得る。

これに対して CBM では、機械の状態を把握してメンテナンスを行うため、不要な部品交換などを抑制でき、メンテナンス頻度の最適化やメンテナンスコストの削減が図れる。

これらのことから CBM が今後の手法として期待される。(Fig. 1 参照)

保守管理方式		作業 タイミング	保守管理のアプローチ		
保守 管理	従来	事後保守 ・機器の故障後に修理対応 ・計画外のダウンタイムにより大きな生産損失・保守予算が発生	停止中	振動 診断	潤滑 診断
	定期保守	・定期的な保守メンテナンス ・オーバーホール・部品交換 ・機器の劣化度に関わらず、計画されたスケジュールに基づき、機械を停止して診断作業実施	停止中	○	○
	今後 予知保守	・機器の状態監視により、事前に劣化を察知・対応 ・機器の状態に基づき、運転中に診断作業を実施	運転中	○	×

Fig. 1 保守方法別の効果

Fig. 2 は、交換部品手配の時期・時間と故障予知のタイミングの例となるが、早く予兆検知できるほど、機械停止時間を無くせる可能性が高くなる。

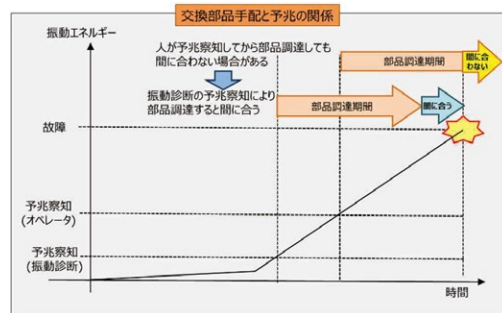


Fig. 2 交換部品手配と予兆の関係

従って、CBM によって予知保全を行うことは、操業面から、とても重要である。

以下、CBM の具体的手法について、工作機械を例に計測、分析の順で説明する。

2 計測方法

工作機械の予知保全におけるセンシングデータとしては、振動データを使用した。振動データは、運転中にも計測可能であり、その他のデータは、測定が難しいためである。また今回は、機械への実装（設置や配線）を考慮して無線通信式の振動センサを採用した。仕様を Table 1、Table 2 に示す。

Table 1 振動センサ仕様

項目		仕様
加速度センサ	測定範囲（感度）*1	±2g (3.9mg)、 ±4g (7.8mg)、 ±8g (15.6mg)、 ±16g (31.2mg)
	サンプリング周波数 *1	200Hz、400Hz、800Hz、 1600Hz、3200Hz
加速度データの 一次解析（FFT）	サンプリング点数 *1	1024、2048
	サンプリング周波数 成分数 *1	64、128、256、512
加速度データの一次解析 （最大・最小・S/N比）	監視閾値 *1	0.0g~16.0g
	測定間隔 *1	25ms、100ms、500ms、 1000ms
温度センサ	測定温度（感度）*3	-10℃~+60℃ (0.0625℃)

Table 2 振動センサ 無線仕様

項目	仕様
無線通信	
通信方式	スター型 (1:8)
通信周波数	920MHz (独自プロトコル)
送信出力 *1	最大1mW/最大10mW/最大20mW
無線転送速度 *2	100kbps (固定)
使用チャンネル *1	24ch~37ch (32chを除く)
通信距離 *2	約30m

次に、予知保全用データの計測方法として、一定条件下で機械を動作させてデータを収集する方法と、加工中に計測して収集する方法を紹介する

2.1 一定条件下でのデータ収集

工作機械を一定条件下で動作させるため、振動データを以下の手順で収集し分析を行う方法である。(Fig. 3 参照)

- 1) 振動データの収集開始と終了のトリガー情報を加えた NC パートプログラムで各軸を移動
- 2) 機械に複数取付けたセンサの情報と PLC の情報を収集し保存
- 3) 収集した振動データを分析

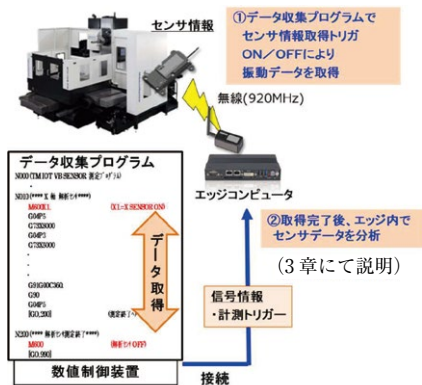


Fig. 3 データ収集事例

この方法は、計測条件を一定とすることができるため分析が容易であるという利点がある反面、加工を中断して実施する必要がある、頻繁に実施することが難しい。そのため、分析に必要な学習データが十分に揃うまで時間が必要であり、また加工を優先して計測プログラムを実行出来ず、故障の予兆を見逃す可能性があるという欠点がある。

2.2 加工中でのデータ収集

上記の欠点を解消するため、計測専用プログラムを起動すること無しに、加工にも影響を与えずに加工中に振動データを計測する方法を考案した。加工中であってもできるだけ同じ条件下での計測を行い、分析を容易にするため、早送りで一定時間以上の軸移動を行っている時のデータを取得できるようにした。

タイムチャートを Fig. 4 に示す。

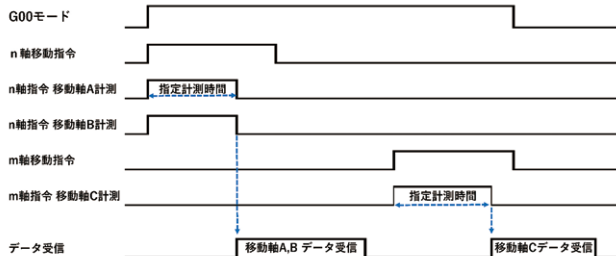


Fig. 4 タイムチャート

処理の概略フローチャートを Fig. 5 に示す。

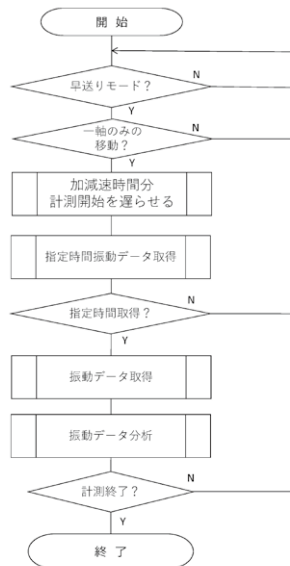


Fig. 5 フローチャート

計測専用のパートプログラムを使用してデータ収集を行う場合は、加工との兼ね合いで、1回/日程度しかデータ収集できていなかったが、本方法では、加工中にデータ収集できるため、実績として、10回/日以上でのデータ収集が可能となり、分析の効率化が図れた。

3 分析方法

分析方法について、開発時系列順に3つ紹介する。

3.1 品質工学的分析

最初の時系列振動データ分析は評価特性としてばらつきの大さを表す評価尺度である『ゼロ望目特性』のSN比を採用した手法である。

SN比は、時系列振動データ数を n として次のように計算される。

$$\text{SN比} \quad \eta = -10 \log \frac{S_T - S_m}{n - 1}$$

ここで、 S_T :全変動、 S_m :一般平均変動として、

$$S_T = y_1^2 + y_2^2 + \dots + y_n^2$$

$$S_m = \frac{1}{n} (y_1 + y_2 + \dots + y_n)^2$$

と表される。

SN 比は、振幅が小さい時は大、振幅が大きい時は小となるため、S/N 比で分析することにより、正常状態と異常状態の間には有意的な数値差が現れる。

波形というアナログ情報ではなくデジタルな数値で可視化できるため、常態からの変化判別が容易になり、より正確な予知保全が可能となる。なお、この手法では、異常判定のためには、閾値の設定は必須である。

SN 比による実際の分析事例を以下に示す。

ある機械の送り軸ギアボックスに振動センサを設置して、計測専用のパートプログラムによる計測を行っていたが、計測開始から2か月後にギアボックスに故障が発生しギアボックスの交換を行った。その交換前後の振動波形データとSN 比を Fig. 6 に示す。(センサは X, Y, Z の3方向の計測が可能)

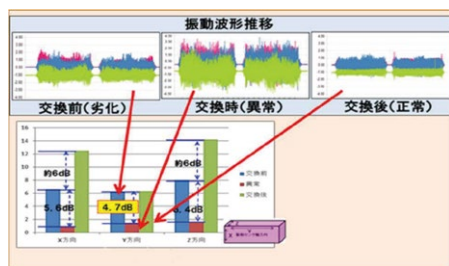


Fig. 6 SN比分析事例

SN 比の分析では、最も差異が少ない Y 方向の評価値としても交換前と交換時で 4.7dB 減少しているのが、有意な差を定量的にとらえられていることが分かる。

また、交換前後の振動データで最も変化の大きい Z 方向の振動と比較すると、SN 比で、交換 2 か月前 8.0dB ⇒ 異常発生時 1.6dB ⇒ 交換後 14dB と変化している。交換後の SN 比と交換前の SN 比を比較すると、交換前の SN 比の方が 6dB 程小さい値となっており、この時点で既に劣化が進んでいたことが分かる。逆の捉え方をすると交換後の正常な状態から今回の交換前の状態まで悪化すると、2 か月後には故障して交換が必要になる可能性が高いと言える。

このことから現在は、交換前の SN 比に達したらアラームを発報するようにシステムを構築し、異常発生 of 2 か月前には計画的な部品交換を行えるように運用中である。

3.2 機械学習による分析

SN 比分析による予知保全では、前項での説明の通り、閾値の設定が必須なので、閾値設定のために異常時データが必要となる。工作機械においては、異常発生間隔が長いので、異常時データを取得することは容易ではない。この問題を解決するため、正常データのみの機械学習による分析方法を開発した。

分析手順は、以下の通りである。(Fig. 7 参照)

- ① 機械に設置した振動センサで振動波形を計測し正常時の波形に対し機械学習を使用してモデリング
- ② モデリング完了後、計測した振動波形とモデルデータとを

閾値を用いずに異常度 (計測値となる確率の対数。確率が低いほど値が大きくなる) の違いにより、「いつもと違う」を検出して機械故障の予兆を診断

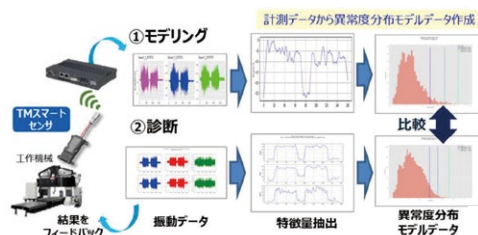


Fig. 7 機械学習分析方法

3.2.1 モデリング

モデリングでは以下のフェーズで実行する。

(Fig. 8 参照)



Fig. 8 モデリングフロー

収集したデータは、最初にクレンジングを行う。

クレンジングフェーズでは、以下を行う。

- ✓ データ欠損除去
- ✓ データ取得時間によるデータの選別

クレンジングによって、不要なデータを削除し有用なデータのみとし、次のステップとしてモデル訓練・検証を行う。

モデル訓練・検証フェーズでは、まず、どのモデルが最適かを検討した。異常検知に使われるモデルは Table 3 に示すようにいくつかある。

Table 3 モデル比較表

手法	出力変数の種類		時間依存性		学習の種類	
	隠蔽変数	連続変数	非時系列データ	時系列データ	教師あり学習	教師なし学習
ホテリング理論	×	○	○	×	×	○
混合正規分布	×	○	○	×	×	○
カーネル密度推定	×	○	○	×	×	○
k-means	○	○	○	×	×	○
主成分分析(PCA)	○	○	○	×	×	○
ナイーブベイズ(NB)	○	○	○	×	×	○
サポートベクターマシン(SVM)	○	×	○	×	○	×
1クラスSVM(OC SVM)	○	○	○	×	×	○
潜在的ディリクレ配分法	○	×	○	×	×	○
線形回帰モデル(LM)	×	○	○	×	○	×
k近傍法(kNN)	○	○	○	○	×	○
自己回帰モデル(AR)	×	○	×	○	×	○
隠れマルコフモデル(HMM)	○	○	×	○	○	○

その中で、時系列に変化するデータに対応可能なモデルは、赤枠内の3つである。各モデルの特徴を Table 4 に示す。

Table 4 モデル詳細比較表

	k近傍法(kNN)	自己回帰モデル(AR)	隠れマルコフモデル(HMM)
特徴	データ点同士の距離を計算し、異常度を判定する。一定の閾値を超えたものを異常と判定する。 	過去の履歴をもとに次の値を推定する。推定した値と実際の値のずれ具合から異常度を判定する。 	観測データの背後にある「状態」の系列を推定し、モデルを構築する。観測データの発生確率を予測し、異常判定を行う。
今回のデータとの相性	△	△	○
採用	振幅が小さくなるような異常。正常時の振動開始タイミングに追従できない可能性がある。	周期性が高いデータには適しているが、今回は完全に単一な周期でない。	観測データの特徴に応じた異常度判定が可能。日や場所によって動作が変わる今回のデータに適している。

各モデルを比較検討した結果、振幅が大きくなる場合だけでなく、振幅が小さくなるような異常も検知できる「隠れマルコフモデル(HMM)」を採用した。

HMMでは、観測データの特徴に応じた異常度判定が可能のため、まずは定常時の振動データから特徴量を抽出し、異常度分布モデルデータを作成する。(Fig. 9 参照)

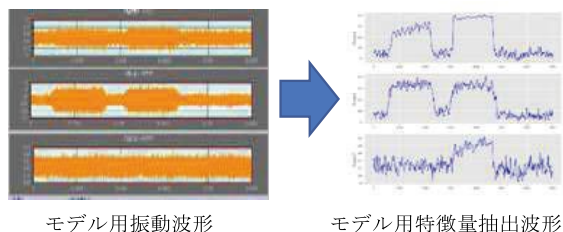


Fig. 9 特徴量抽出

3.2.2 診断

モデリングができれば、Fig. 10 に示すように、評価する振動波形から特徴量波形を抽出する。同様に異常度分布データを作成して、モデリングデータと比較し「いつもと違う」を検出し異常判定を行う。

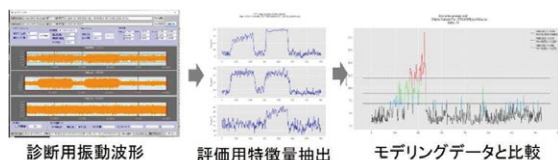


Fig. 10 診断手順

実測データでの判定例を Fig. 11 に示す。

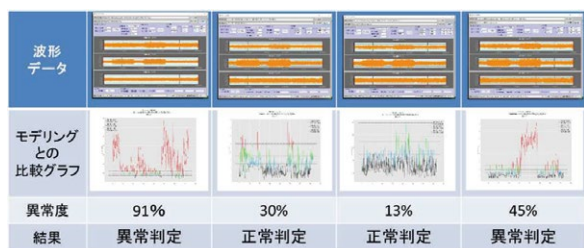


Fig. 11 実測データでの判定例

この例では、振幅が小さくなった場合と、大きくなった場合のいずれでも「いつもと違う」が検出され、異常度が大きくなり、異常判定されていることが分かる。

このように、隠れマルコフモデルを使ってモデリング、診断を行う方法では、モデリングデータとの差異が異常度として算出できるため、異常判定のための閾値を用いずとも異常判定が可能となった。

3.3 複数条件下での分析

隠れマルコフモデルによる機械学習分析により、閾値を定める問題は解決したが、工作機械では同一工具・ワーク材質等、一定の条件下での計測が必要なため、この問題を解決するための AI による分析方法を開発した。

(商品名: SEAM®)

この分析方法は、正常時に計測したデータを類似データ毎に

クラスタリングして学習データを作成し、この学習データと計測データを比較判断することにより、複数の状態を持つ計測データであっても、分析が可能である。

SEAMでは診断エンジンとして、ベクトル量子化法(VQC: Vector Quantization Clustering)を採用しており、処理の手順は以下になる。

- 1) 正常時の計測データをグループ化【学習】
- 2) 診断データとクラスタリングした学習データとの距離を計算【診断】
(この距離が「異常測度」と呼ばれる判定の指標)
- 3) 異常測度の大きさによって「正常/異常」を判断する

学習データのクラスタリングと、診断データの異常測度の関係を Fig. 12 に示す。

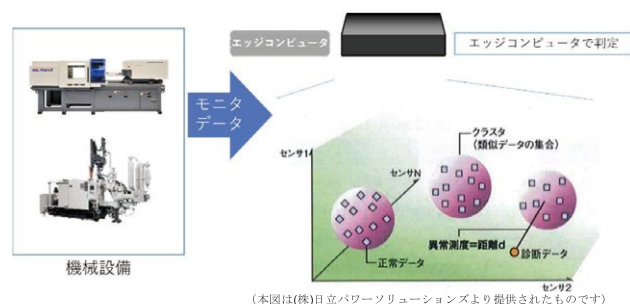


Fig. 12 SEAM分析でのクラスタリングと異常測度

SEAMによる分析例を以下に示す。連続運転中の機器の振動データであり、運転状況が時々刻々変化するので、一定条件で計測することは困難なデータである。

最初に振動データをFFT^{注1)}分析するが、FFTデータのままだではデータ個数が多すぎるため、周波数領域毎に平均化しデータを集約化している。そのグラフを Fig. 13 に示す。

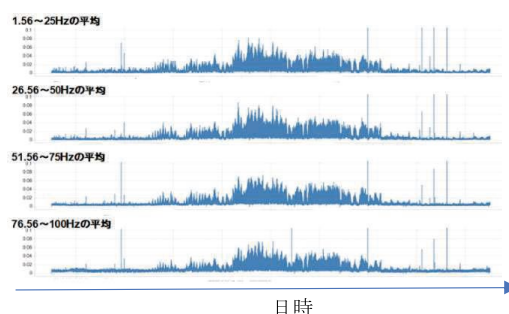


Fig. 13 FFT平均化処理

しかし、この処理を実施しても、まだFFT値の変化が大きく、FFT値自体が振動波形のような形状を有しており、このままでは分析に使えないため、移動平均を算出する処理を施して、特徴量の抽出を行った。

移動平均を取ったグラフを Fig. 14 に示す。

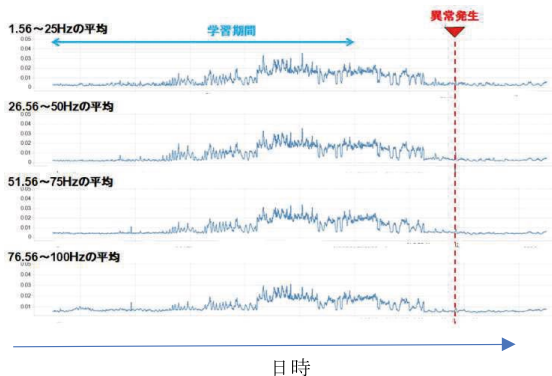


Fig. 14 移動平均処理

移動平均を取ることで、FFT 値の変化を低減でき、振動変化の傾向を掴みやすくなっていることが分かる。

この例では、実際に異常の発生が見られたので異常発生前の状態を学習し、SEAM 分析にて異常検度を算出した。

学習期間と異常発生タイミングは Fig. 14 に示す通りである。

Fig. 14 のデータから算出した異常検度と実際の異常発生タイミングの関係は、Fig. 15 に示す通りである。

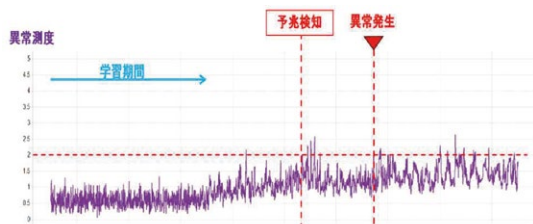


Fig. 15 異常検度と異常発生タイミング

SEAM 分析の結果、実際に異常が発生する前に異常検度データが大きくなっていることが分かる。この場合では、システム的には実際の異常発生前の 1 カ月程前に予兆検知できていた可能性がある。

別の分析例を示す。本件は同一部品の連続加工での異常検知を目的とするが、加工が多岐に渡るため状態が常に変化している。振動センサは 6 個（各センサは X,Y,Z の 3 方向の振動データを計測）あり、振動データ数が膨大となるため、分析には SN 比を使用した。

SN 比データを Fig. 16 に示す。

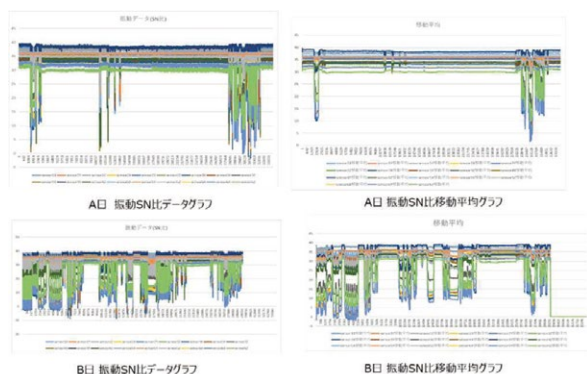


Fig. 16 SN比生データと移動平均データ

左側が SN 比時系列データ、右側が移動平均データだが、当然ながら加工によって振動が大きく異なり、SN 比分析、機械学習分析では異常検知できない。

SEAM 分析では SN 比に加えて、送り速度、主軸回転数をコントローラから取得して解析データに付加することによりクラスタリング指標として使用した。

学習では 2 週間（9 日間）のデータで正常モデルを作成し、診断では同一加工（正常と判定される期間）を 5 日間、異なる加工（異常検知されると推定される期間）を 8 日間実施してモデルを作成した。分析結果を Fig. 17 に示す。

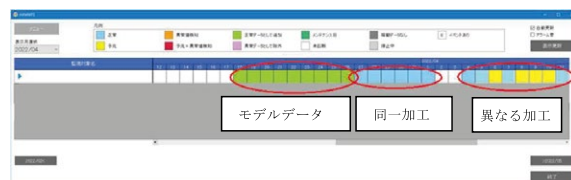


Fig. 17 SEAM分析結果

SEAM では、正常を「水色」、異常予兆を「黄色」で示すが、同一加工期間は、水色の「正常」と分析され、異なる加工期間では、黄色の「予兆」と分析された。

SEAM 分析ではデータの前処理が必要になる場合があるが、CBM として有効な分析手法であると考えられる。

4 おわりに

工作機械を例に振動データを用いた予知保全を行うための分析方法について報告した。

本報では 3 種類の分析方法を報告したが、実際にお客様に適用する場合には、対象とする機械と診断内容により、Fig. 18 に示すステップでの運用を提案している。

- ① Step1 として SN 比による分析を行い、振動データによる分析が有効かどうかを判定する。
この段階で異常時データが取得できれば SN 比による判定も有効である。(実際に社内ではこれで運用している機械もある)
- ② 異常時データが取得できない場合、Step2 として、正常時データのみで判定ができる機械学習による分析を行う。モデルデータの学習にかなりのデータ数が必要で、データ収集に時間がかかる場合があるが、正常時データのみで分析が可能な点はメリットがある。
- ③ 様々な条件により取得できるデータにばらつきが有る場合、Step3 として SEAM 分析を行う。SEAM 分析によりデータをクラスタリングして、いずれの状態とも異なる「いつもと違う」データを検出可能となる。



Fig. 18 各ステップ別予知保全分析

今後もお客様に安心して機械を使っていただけるように、AIを用いたより高精度な予知保全システムの構築を目指していきたい。

注1) FFT:Fast Fourier Transform 高速フーリエ変換。振動を時間軸から周波数軸に変換するアルゴリズムであり、音や振動の持つ波形が、どのような周波数と振幅を持つ波形の合成で成り立っているか解析することが出来る。

参考文献

- 1) 芝浦機械技報 vol.28 P5 ~ 28
- 2) 芝浦機械ホームページ 製品情報 IoT+m
url:https://www.shibaura-machine.co.jp/jp/product/iot_m/
- 3) 前原弘之: 工作機械の状態監視: IoT・AI 技術活用による分析・診断事例 (特集 IoT におけるオプトメカトロニクスの役割), 光技術コンタクト誌 2019 年 1 月号 18-23,2019

※「SEAM®」は芝浦機械の登録商標です。



R&D センター
研究開発部
デジタルツイン開発課

四條 弘次



R&D センター
研究開発部
デジタルツイン開発課

富永 昌登



R&D センター

前原 弘之

AR Based Explanation of Machine Functions and Hydraulic Circuit

M.R. Dinesh Kumar G. Sathish Kumar R. Saravanan

As technology continues to advance at a rapid pace, industries are constantly seeking innovative solutions to streamline their processes. Augmented reality (AR) has emerged as a transformative tool in various industries, bringing efficiency, accuracy and convenience to numerous applications. This content explores the optimistic potential and long-term benefits of utilizing AR in the injection molding machine installation and commissioning, machine function explanation with hydraulic circuit and service manual for critical assembly.

The integration of augmented reality holds immense potential for improving productivity, precision and overall work efficiency. This integration allows operators to access crucial data, visualize components and acquire insightful training for both customers and our engineers, all in a hands-free and immersive manner.

In the traditional method of training, a hard copy of the training material is given to the participants to help them understand the machine functions and hydraulic and electrical circuits. During the discussion, the following feedback were received.

- i. Reading the hydraulic circuit in hard copy is difficult
- ii. Interpretation of oil flow direction with respect to process is not clear
- iii. Oil flow direction identification for the parallel process is difficult
- iv. Valve identification for the particular process needs further explanation
- v. Due to the above reasons, there were requests for increasing the training period.

After receiving the feedback, we have decided to enhance the training process in digital platform with help from solution provider.

1 Training Module's Brief

The following training modules have been implemented from March 2021.

- i. Machine installation and commissioning
- ii. Machine Function Explanation with hydraulic circuit
- iii. Maintenance/Service manual for critical assemblies/parts

2 Communication Method

We have decided to implement this training module in web platform.

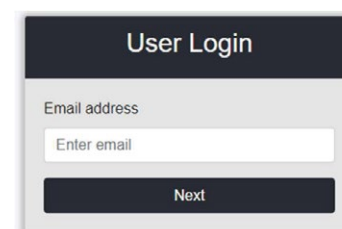
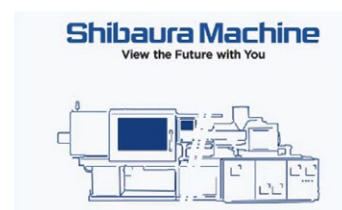


Fig. 1 Home page of training module



Fig. 2 Training module Categorization

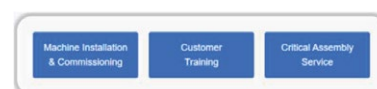


Fig. 3 Training module Sub-Categorization

3 Training Module Explanation

3.1 Machine Installation and Commissioning

Traditionally, engineers rely on manuals, drawings and circuits, often leading to ambiguity and confusion during the assembly process. However, with AR, visual representations and step-by-step instructions are superimposed onto 3D models. Engineers can use the tablet or hand held devices to visualize each component, access critical information and follow precise instructions to complete the process. This not only reduces the installation time but also minimizes errors and the need for extensive training, we have given this module to overseas customer during COVID-19 time because of travel restriction.

a. Visual Guidance: AR allows engineer to view step by step instructions overlaid on the machine (Fig. 4), guiding them through the procedures. This reduces human error and improves overall efficiency.

b. Interactive 3D Model: AR provides the ability to visualize complex machinery as an interactive 3D model. This enables technicians to understand the working of the machine more effectively, aiding in trouble shooting and maintenance tasks.



Fig. 4 Machine Installation

3.2 Machine Operation Cycle Explanation with Hydraulic Circuit (Toggle)

Incorporating augmented reality (AR) into a web portal to explain the operation of an injection molding machine with a hydraulic circuit can significantly enhance user understanding and engagement. This makes it easier for users to understand the working principles and the details of components involved. Here's how the digital translation of machine operation with hydraulic circuit explanation in a web portal work.

a. Interactive Menu: Interactive menu of a machine function helps users to access the detailed information about their

process.

b. Step-by-Step Guidance: Animations and textual instructions can guide users through the injection molding machine cycle (Fig. 5). As the cycle progresses, the system can dynamically highlight the relevant components and their actions. For example, users can see the pump pressurizing the hydraulic fluid, oil flow through the pipe to the actuators in transparent mode (Fig. 6).



Fig. 5 Complete machine cycle Menu

c. Textual Explanations: Textual explanations are included alongside the interactive 3D model. These explanations can describe the purpose, operation, and interaction of various components, such as pumps, valves, and actuators, in a hydraulic circuit. Users can read through the text to deepen their understanding of the machine's functions.

d. Animated Visualizations: Animated visualisations help demonstrate the flow of hydraulic fluid within the circuit (Fig. 7). These animations can show how the fluid is pressurized and directed through different paths. Users can observe the virtual movement of fluid to understand the circuit's operation and machine functions visually.

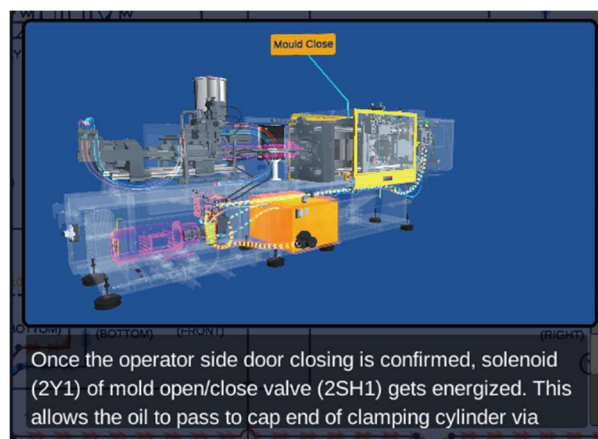


Fig. 6 Transparent mode to understand the oil flow

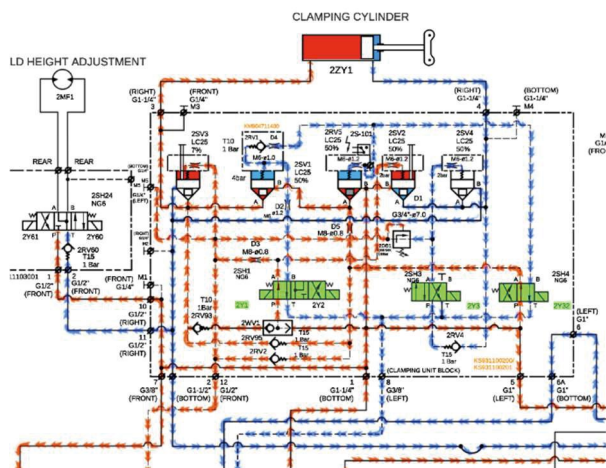


Fig. 7 Integration of Hydraulic Circuit with 3D animation to enhance the Training method.

3.3 Machine Operation Cycle Explanation with Hydraulic Circuit (RAM)

Upon completion of the toggle series explanation, we started with the RAM machine operation with a hydraulic circuit explanation. Based on the feedback from the field engineers, the following improvements were taken into account in this new RAM series hydraulic circuit explanation development.

- I. The color of the oil flow in pipes and the machine background has been improved for a better view. (Fig. 9)
- II. Oil color in tank has matched the original oil color. (Fig. 9)
- III. Hidden machine parts are shown with highlights during its operation. For e.g. Pre-fill cylinder operation highlight (Fig. 10)
- IV. Hydraulic oil flow in the circuit will start from the pump for all operations.
- V. The user can increase or decrease the hydraulic oil flow animation speed. (Fig. 11)
- VI. Melt flow in screw and barrel shown in transparent mode. (Fig. 12)
- VII. Zoom and pan options added.

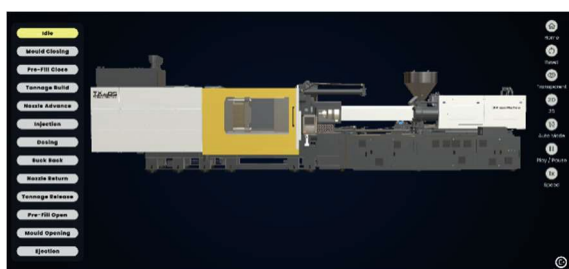


Fig. 8 Complete machine cycle Menu

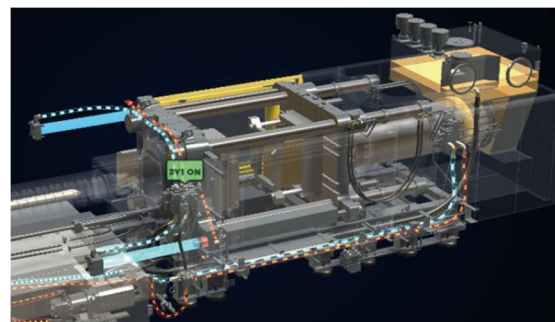


Fig. 9 Transparent mode to understand the oil flow

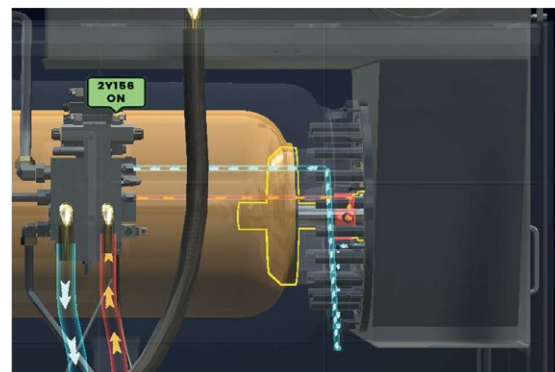


Fig. 10 Highlight of Prefill Cylinder

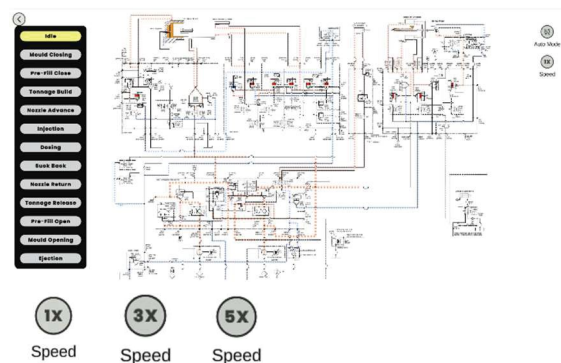


Fig. 11 Hydraulic Circuit Explanation with three speed control to understand the oil flow in a better way

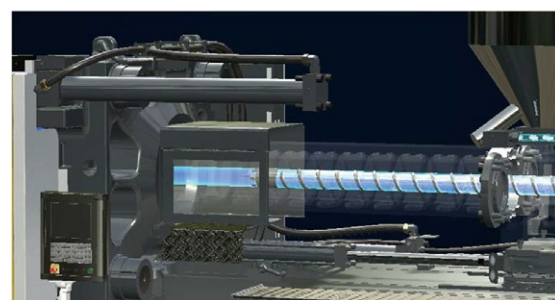


Fig. 12 Melt flow in screw and barrel shown in transparent mode

3.4 Service Manual

After the successful completion of the machine operation explanation with the hydraulic circuit, we extended the scope to include service-oriented explanations.

As an initial start-up, the following service procedures were developed by explaining the step-by-step procedure in visualization mode.

- I. Cleaning Heat Exchanger (Fig. 13)
- II. Cleaning Suction filter housing with the element (Fig. 14)
- III. Cleaning Air Breather Element (RAM machine) (Fig. 15)
- IV. Cleaning control cabinet air filter (Fig. 16)
- V. Barrel Heater Maintenance and Inspection (Fig. 17)
- VI. Ram spacer change for different Mold Height (Fig. 18)

3.4.1 Cleaning Heat Exchanger

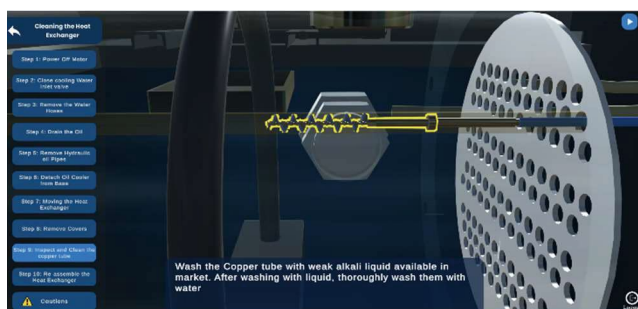


Fig. 13 Transparent view to visualize the Copper Tube

3.4.2 Cleaning Suction Filter

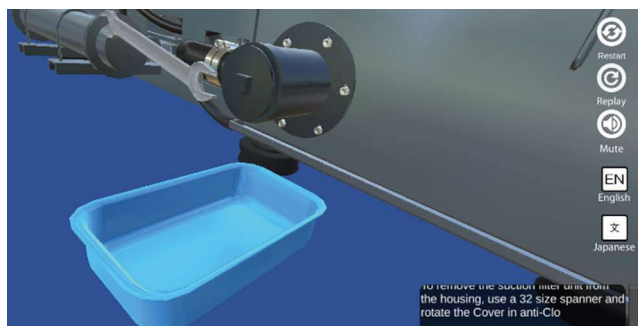


Fig. 14 Removal of Suction Filter Assembly

3.4.3 Cleaning Air Breather Element

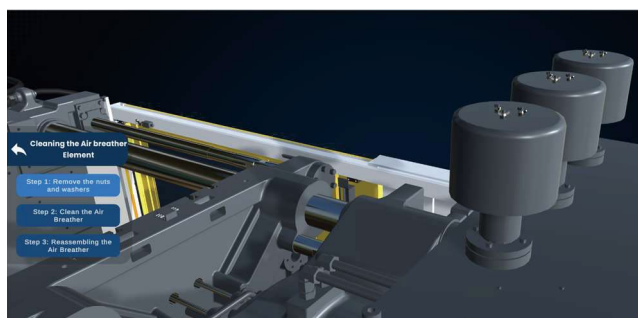


Fig. 15 Air breather cleaning

3.4.4 Cleaning Air Breather Element (Electrical Cabinet)



Fig. 16 Control cabinet air filter cleaning

3.4.5 Barrel Heater Maintenance and Inspection

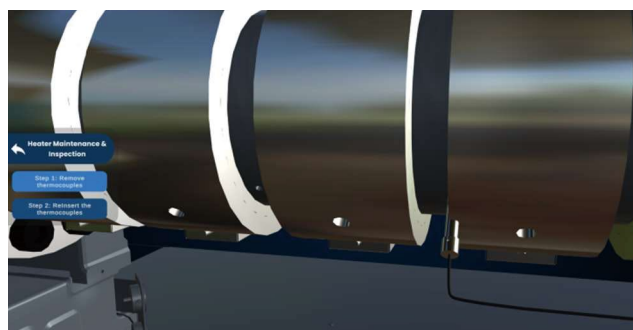


Fig. 17 Barrel maintenance

3.4.6 Ram Spacer Addition

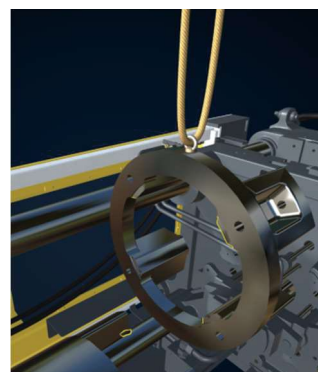


Fig. 18 Sequence of steps for ram spacer addition

4 Sample Video Link

A sample video for the above machine AR module is provided in the below link, click to experience.

<https://www.youtube.com/watch?v=DnXIovqQ4N8>



5 Expansion Plan

As we have received positive feedback from our Engineers and Customers, We have decided to deploy the same for Electric machine (ECi), Two platen (TP) and Auxiliary Products.



SHIBAURA MACHINE
INDIA PRIVATE LIMITED
Product Engineering

**M.R. Dinesh
Kumar**



SHIBAURA MACHINE
INDIA PRIVATE LIMITED
Research & Development
Department

**G. Sathish
Kumar**



SHIBAURA MACHINE
INDIA PRIVATE LIMITED
Product Engineering

R. Saravanan

プラスチック使用量削減を実現する発泡成形技術

林 浩之

脱炭素化やSDGsへの対応の一つである樹脂使用量削減に有効な技術の一つとして、物理発泡成形が着目されている。しかし、物理発泡成形は専用射出成形機の導入や高圧ガス保安法への準拠の必要があるため、イニシャルコストが高価になる。また、熔融樹脂に発泡剤のガスを溶解させる過程のモニタリングが難しく、発泡成形品の品質管理に課題があると言える。本報では、既存機の改造や高圧ガス保安法の適用範囲外における発泡成形の実施により、イニシャルコストを抑える対処法を提案した。さらに、センサの使用によりガス溶解過程の状態変化を定量的にモニタリングできること、また発泡成形品の品質管理に使用できる可能性が示唆されたので報告する。

1 はじめに

近年、地球温暖化の対策として、脱炭素化、SDGsへの対応が求められている。樹脂製品は安価で軽量、成形の容易性と量産性から様々な分野で使用されているため、石油由来の樹脂の使用量削減やリサイクルは社会的要求への対応として重要である。これら対応への有効な技術の一つとして発泡成形がある。

発泡成形は、発泡剤を含んだ熔融樹脂を金型キャビティ内に射出充填するとともに、気泡を発生・成長させ、冷却固化させて気泡の成長を停止した後に取り出す成形法である。この気泡の発生は、樹脂にガスが溶解している状態で急減圧させることにより、溶解しきれないガスが気泡として分離することで起こる。発泡成形の利点として、軽量化や樹脂の使用量の削減、ヒケ・ソリの低減や寸法精度の向上、必要型締力の低減などが挙げられる。

発泡成形には化学発泡成形と物理発泡成形の2種類がある。化学発泡成形品はベースの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。物理発泡成形品は窒素ガスや二酸化炭素ガスを発泡剤としているため、再利用可能な点が生産・消費観点から有利である。また、物理発泡成形は供給するガス圧力を高めることで化学発泡成形よりも高い発泡倍率を得られる。そのため近年では、リサイクルや樹脂の使用量削減の観点から、物理発泡成形が着目されている。

コスト面では、化学発泡成形は一般的な射出成形機を使用して生産ができるため、イニシャルコストは安価だが、発泡剤はベース樹脂に比べて価格が高くランニングコストが高価になる。物理発泡成形はランニングコストを低くできるが、専用機が必要になるためイニシャルコストが高価になる。そのため、物理発泡成形の普及にはイニシャルコストを抑える必要がある。

2 低圧物理発泡成形とその課題

2.1 低圧物理発泡成形

物理発泡成形の一つに、マクセル株式会社と京都大学が開発した「RIC-FOAM®」¹⁾がある。これはガスボンベから2～10MPa程度の比較的低い圧力の窒素ガスや二酸化炭素ガスを、発泡剤として射出成形機のパレル内に直接供給することから、低圧物理発泡成形と呼ばれる。低圧物理発泡成形では一定圧力のガスをパレルに常に供給しており、従来のMuCell®法に比べ、装置構成が簡易で安価な特徴がある。

低圧物理発泡成形ではFig. 1のような専用の可塑化装置を用いる。スクリュは一般的な射出成形機と違い2ゾーンに分かれており、上流側(第1ゾーン)において樹脂を可塑化し、下流側(第2ゾーン)で熔融樹脂に発泡剤であるガスを溶解させる。パレルにはスクリュの第2ゾーンに対応する位置にガス供給口を設ける。

スクリュ第2ゾーンにおけるガス溶解メカニズムは以下である。スクリュ第2ゾーンの溝体積を第1ゾーン下流側よりも大きくすることにより、スクリュ溝内に熔融樹脂の未充填領域を形成し、「飢餓状態」と呼ばれる状態を作り出す。この空間に発泡剤であるガスを注入することで、熔融樹脂とのガスが接触面から溶解し、樹脂内部に拡散していく。この飢餓状態の領域の大きさは第1ゾーンから第2ゾーンへの樹脂供給量と、第2ゾーンからスクリュ前方への樹脂移動量のバランスによって変化する。

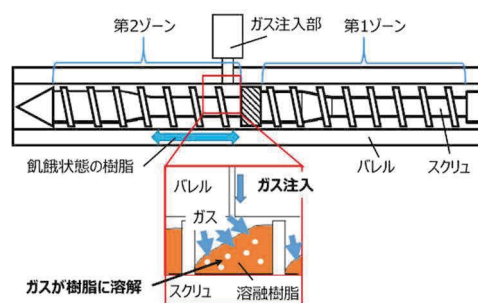


Fig. 1 低圧物理発泡専用可塑化装置

2.2 課題

低圧物理発泡成形の普及においては以下のような課題があると言える。

(1) 専用射出成形機の使用

低圧物理発泡成形仕様の射出成形機は、一般の射出成形機に比べて可塑化装置が長くなり、射出成形機の設置面積が広がる。また、可塑化装置が特殊であることから一般的な射出成形機に比べて導入コストも高くなる。

(2) 高圧ガス保安法の適用

ガスポンプを使用する場合、日本国内においては高圧ガス保安法が適用される。そのため、設備導入や変更の際には都道府県への申請や届出が必要となり、設備導入までに時間やコストがかかる。その他にも、ガスポンプ交換などのランニングコストの発生や、ガスポンプ設置場所の確保といった課題がある。

(3) ガス溶解過程の制御、モニタリング

ガス溶解量の安定化が発泡成形品品質の安定化につながるが、低圧物理発泡成形では常に一定圧力のガスを供給しているため、ガスの供給量や溶解量の制御が難しい。また、通常の射出成形機ではガス溶解過程のモニタリングができないため、発泡成形品品質の良否判定が困難である。その他にも、ガス注入部を樹脂が逆流し、ガスがバレル内に注入されないベントアップ不良の把握ができないことも課題として挙げられる。

(4) コアバック法による発泡成形品の品質

発泡成形において樹脂削減効果や軽量化効果を高めるためコアバック法が用いられる。この方法は金型を閉じ、キャビティ容積が小さい状態で樹脂を充填後、射出成形機の移動ダイ後退動作（コアバック）を行う。これにより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、内部に発泡層を有する成形品を得る方法である。コアバック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とがある。

2.3 課題への対処

これら課題を解決し低圧物理発泡成形を普及させるため、当社は以下の提案を行っている。

(1) 既存機の活用

既存機の可塑化装置のみを交換することで、比較的容易に低圧物理発泡成形へ対応できる設計を行っている。一例としてスクリュ径 60mm、L/D 20 の既存機の可塑化装置から、スクリュ、バレル等の交換のみでスクリュ径 45mm、L/D 28 の低圧物理発泡成形仕様の可塑化装置に変更し (Fig. 2)、低圧物理発泡成形へ対応する。これによる射出成形機の設置面積の変化は無い。また、後からスクリュ径 60mm の標準の可塑化装置に変更することも可能である。

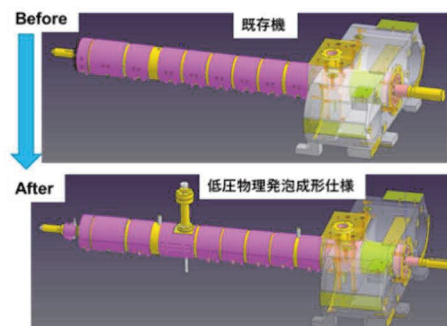


Fig. 2 可塑化装置の変更

(2) コンプレッサの使用

高圧ガス保安法の適用が除外される「コンプレッサで圧縮した 5 MPa 以下の圧縮空気」(高圧ガス保安法施行令第 2 条第 3 項)を発泡剤として使用する (Fig. 3)。コンプレッサのためランニングコストがかからず、設置場所も僅かですむ。5MPa 以下のガス圧力であるため発泡倍率は 2 倍程度であるが、化学発泡成形と同等の発泡品質が得られている。

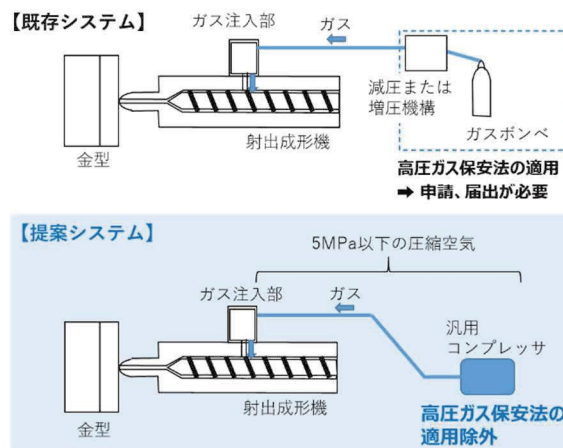


Fig. 3 低圧物理発泡成形の既存システムおよび提案システム

(3) センサを使用したガス溶解過程のモニタリング

バレルに注入されるガス流量をモニタするため、ガス供給部とガス注入部の間にガス流量計を設置する。また、バレルに注入されたガス圧力や、ガス溶解領域 (スクリュ第 2 ゾーン) の樹脂圧力を測定するため、ガス注入部直下のバレル内部に圧力センサを取り付ける。これらにより、バレルに注入されたガス量の定量化や、ベントアップ発生の把握が可能となる。

(4) 高精度コアバック制御

コアバック動作を高精度に制御するため、次の 3 つの機能を組み込んでいる。1 つ目は、射出成形機の型縮装置に搭載されたリンク機構のリンクとピンのクリアランスに起因する制御不感帯を解消する「クリアランスカウンタ装置」である。2 つ目は経時の変化や温度変動等で生じる、金型開き量の設定値と実開き量の間の誤差を補正する「型開位置補正制御」である。3 つ目は発泡セルの成長速度とコアバック速度を同調させることができる「移動ダ

「一定速度制御」である。詳細はこれまでの技報²⁾で紹介しているため参考にされたい。

3 検証

3.1 検証方法

前章に記載した「センサを使用したガス溶解過程のモニタリング」の有用性の確認および射出成形の1サイクルにおけるガス注入量の変化を把握することを目的に検証を行った。

検証に用いた射出成形機は、前章に記載のように既存機の可塑化装置のみを低圧物理発泡成形仕様に交換した。具体的には、当社の標準仕様である電動式射出成形機 EC350SX III-17A（型締力 3430kN、スクリュ径 60mm）を、バレル長さは同一のままスクリュ径を 45mm に変更することで2ゾーンを構成する長さをかせぐ。また、汎用的なコンプレッサを使用して 4.4MPa の圧縮空気を発泡剤として供給し、タルクを 20wt% 添加した PP に対して、低圧物理発泡成形を行った。

検証において、射出成形の1サイクルを射出、計量、待機の3つの工程に区分し（Fig. 4）、それぞれにおけるバレルへの圧縮空気注入量を測定した。各工程の圧縮空気注入量は、ガス流量計で測定した圧縮空気流量を、工程毎に積分することで求めた。



Fig. 4 1サイクルにおける工程の区分

また、圧縮空気の供給圧力 4.4MPa に対し、計量時の背圧を 4.4 ~ 8.3MPa の範囲で変化させた時の影響を調べた。検証の条件を Table 1 に示す。

Table 1 検証条件

樹脂	PP
発泡剤（圧縮空気）	4.4MPa
背圧	4.4, 5.3, 6.3, 7.3, 8.3MPa
サイクル時間	50.3s
射出時間	4.5s
計量時間	4.9s
待機時間	40.9s

なお、この検証では高精度コアバック制御を用いて発泡倍率を 1.8 倍とした。成形品の外観、断面および寸法を Fig. 5 に示す。

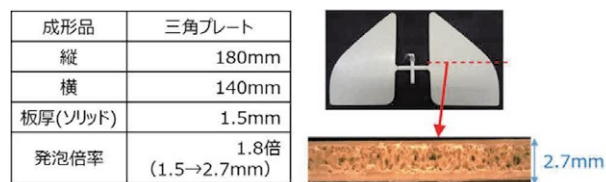


Fig. 5 検証での低圧物理発泡成形品

3.2 結果と考察

射出成形の1サイクルでの圧縮空気流量の推移を Fig. 6 に示す。最も圧縮空気流量が多いのは計量工程であることが分かる。

この時の流量を積分して求めた各工程の圧縮空気注入量を Fig. 7 に示す。計量工程で 0.12L 前後の圧縮空気が注入されているが、待機工程においても約 0.06L（全体の約 1/3）の圧縮空気が注入されていることが分かる。

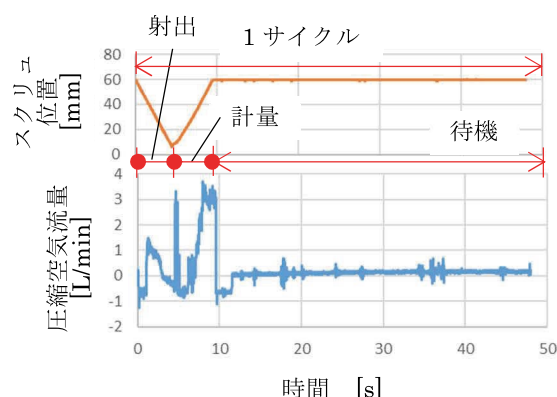


Fig. 6 圧縮空気流量とスクリュ位置の推移

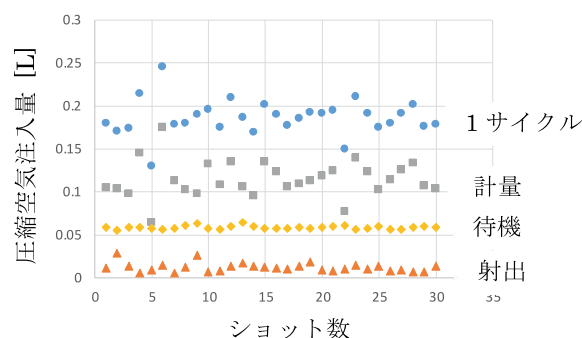


Fig. 7 各工程の圧縮空気注入量

これらの結果は、以下の要因と考察される。計量工程においてスクリュ第2ゾーンからスクリュ前方への樹脂の移動が生じるため、他の工程に比べ飢餓状態の領域が増加する。その結果、圧縮空気と接する樹脂の面積が増え、樹脂に溶解する圧縮空気の量が増加する。また、Fig. 8 のようにスクリュ回転によりスクリュ溝内には樹脂の循環流れが生じている³⁾。これにより、圧縮空気に接する樹脂表面が更新されるため、効率的に圧縮空気が溶解される。これらの要因により、計量工程において圧縮空気注入量が増加していると考えられる。

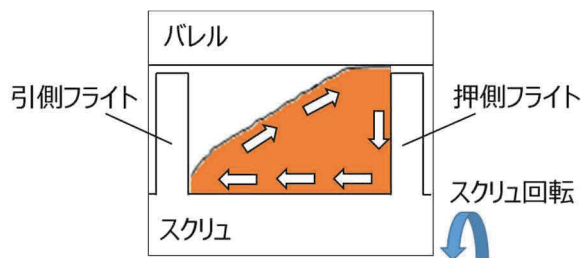


Fig. 8 スクリュ溝内の樹脂循環

また、各工程における平均流量を Table 1 および Fig. 7 から求めると、計量、待機工程でそれぞれ約 1.5, 0.1 L/min となる。待機工程の流量は計量工程の 1 割以下であり、スクリュ回転による樹脂の表面更新の効果が大きいことが示唆されるが、待機工程の結果は表面更新が無い場合でも、樹脂表面から溶解した圧縮空気が樹脂内に拡散することを示唆している。

背圧と圧縮空気注入量の関係を Fig. 9 に示す。背圧が増加すると注入量が減少する傾向である。背圧 4.4MPa では注入量が 0.57L と最も多く、これは背圧 5.3 ~ 7.3MPa の注入量約 0.3L と比べると 2 倍近く増加している。背圧 8.3MPa では注入量が 0L になり、バレルに圧縮空気が注入されていない。

背圧 4.4MPa の条件では、Fig. 10 のように成形品に大きな気泡が形成されている。背圧 4.4MPa は圧縮空気の供給圧力 (4.4MPa) と等しいことから、圧縮空気が樹脂へ溶解する前に樹脂が計量されてスクリュ前方へ移動したため、樹脂に巻き込まれた圧縮空気が大きな気泡になったと推察される。この溶解できなかった圧縮空気により、背圧 4.4MPa における注入量が増加したと考えられる。

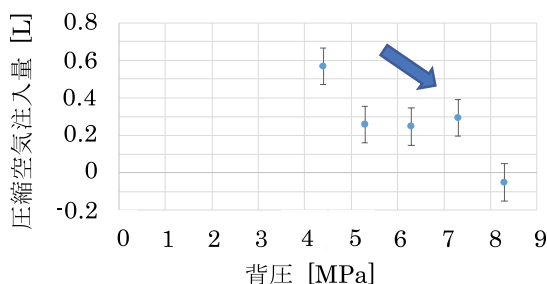


Fig. 9 背圧と圧縮空気注入量の関係

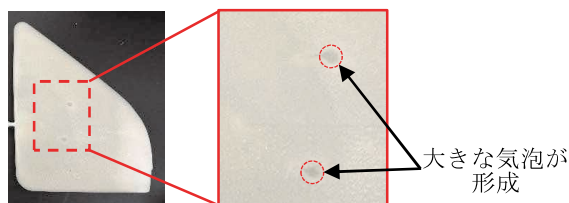


Fig. 10 背圧4.4MPaの成形品外観

Fig. 9 において、背圧 8.3MPa の条件ではバレルに圧縮空気が注入されていない。ここで、ガス注入部直下のバレル内圧力と背圧の関係を Fig. 11 に示す。背圧 8.3MPa においてバレル内圧力が圧縮空気の供給圧力 4.4MPa を上回ることから、ガス注入部を樹脂が逆流してベントアップが生じたことが示唆される。これは、背圧が高いためスクリュ第 2 ゾーンにおける飢餓

状態の領域が縮小し、ガス注入部直下まで樹脂が充満したため、と考えられる。

また、背圧 8.3MPa 以外の条件では、Fig. 11 のように供給圧力 (4.4MPa) とほぼ等しい圧力 (4.3MPa) の圧縮空気が常にバレル内に供給されていることが分かる。

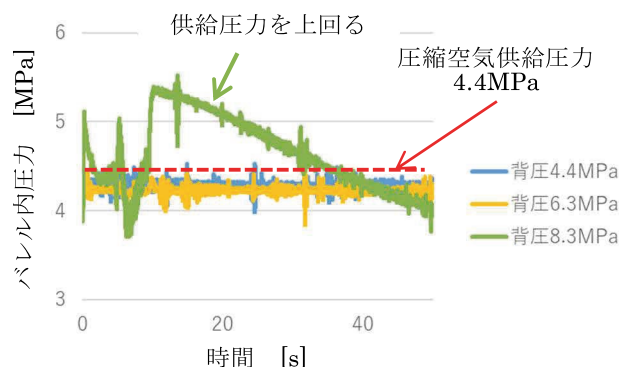


Fig. 11 ガス注入部直下のバレル内圧力推移

以上のことから、センサの使用により 1 サイクル中のガス注入量の変化を定量的に把握でき、ガス溶解過程のモニタリングが可能だと分かった。さらに、測定したデータをベントアップの発生有無の判定に使用する等により、発泡成形品の品質管理に使用できる可能性が示唆された。

また、供給ガス圧力と発泡成形品断面の変化を Fig. 12 に示す。供給するガス圧力を高めると樹脂への溶解量が増加し、発泡力が大きくなるとともに発泡セル径が微細化することが分かる。本検証の結果は、供給ガス圧力以外に計量条件がガス溶解量や発泡成形品の品質に影響することを示しており、高品質な発泡成形を実現するには計量条件の最適化も重要となる。



Fig. 12 供給ガス圧力と発泡成形品断面の変化

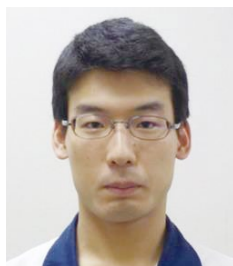
4 おわりに

低压物理発泡成形の普及において課題として挙げられる高価なイニシャルコストを抑えるための提案を行った。また、センサの使用により、通常の射出成形機では困難なガス溶解過程のモニタリングが可能であることを示した。これにより、計量条件がガス溶解量に影響することが明らかになったとともに、発泡成形品の品質管理に使用できる可能性が示唆された。これらを活用することで高品質な発泡成形が可能となり、自動車内外装部品をはじめ様々な製品への適用に貢献できると考えてい

る。今後も高品質で付加価値の高い発泡成形品の実現を、お客様とともに目指していく所存である。

参考文献

- 1) 山本、遊佐、後藤、新規低圧発泡成形技術 (RIC-FOAM) の開発、ぷらすとす (日本塑性加工学会会報誌)、1-5 (2018)、333
- 2) 田中郁朗、成形品機能・性能向上のための発泡成形技術の探求、芝浦機械技報、29 (2023)、46
- 3) 内藤、玉田、中島、上園、辻、引間、大嶋、新物理発泡射出成形技術「SOFIT」における成形安定性および発泡能力、日本製鋼所技報、70 (2019)、57



成形機カンパニー
成形機技術部
営業技術課

林 浩之

樹脂フィルム成形において横延伸機は薄膜化や引張強度等の力学特性や耐熱性の向上、配向バランス調整、内部構造の均一化など性能向上のために用いられる。最終製品の高度化に伴い、フィルムに求められる性能も高まっており、高精度の延伸や今までにない機能性を付与した新素材の延伸の需要も増している。フィルムが性能を発揮するには、樹脂ごとに延伸パターンなどの各種条件を高精度に調整する必要があり、調整時間の短縮や再現性確保の重要性が増している。本稿では、一般的な横延伸機に加えて、延伸パターンを高精度に調整が可能なシュリンクテンターや同時二軸延伸機について紹介するとともに、パターン設定を簡略化し再現性確保も容易とする自動拡張機能を紹介する。

1 はじめに

樹脂フィルムは食品の包装材やスマートフォン、テレビのモニターに使用されるなど、日常的に接する身近な存在である。その採用分野は多岐にわたり、包装用途や光学用途のほかにも電子デバイス材料、電池材料、医療用途など様々な分野で利用されている。近年の高分子材料の進歩に伴い、高機能化や今までにない機能性を付与した新素材の開発も盛んに行われており、今後一層活用分野が増えることが予測される。

樹脂フィルムの成形法としては溶融流涎法、溶融押出法などがあり、溶融押出法にはフラットダイ法、リングダイ法などがある。当社は生産速度が高く、最も一般的な製造法である溶融押出法とフラットダイ法を組み合わせた一連の装置の製造・販売を行っている。成形装置ラインの一例を Fig. 1 に示す。これらの一連の設備の中でフィルム製品に付加価値をつけるために延伸が行われることがある。延伸はフィルムを加熱しながら力を加えて伸ばす工程のことで、薄膜化されるほか、引張強度や衝撃強度等の力学特性や光学特性、耐熱性、表面性状、ガスバリア性などの性能が向上することが知られている。

延伸は機械流れ方向に行う縦延伸(MD延伸, Machine Direction)とフィルム幅方向に行う横延伸(TD延伸, Transverse Direction)があり、それぞれ縦延伸機、横延伸機と呼ばれる装置を用いて延伸を行う。また同時二軸延伸機を用いて各方向に同時に延伸を行うことも可能である。

近年は最終製品の高度化に伴い、樹脂フィルムの各種性能に関する要求も高まっており、高性能を発現するために高精度に延伸機の延伸パターン設定を行う重要性が増している。

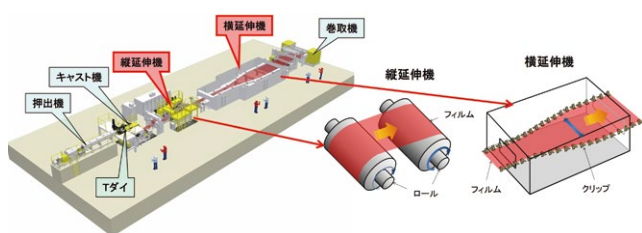


Fig. 1 フィルム成形装置

2 各種横延伸機について

2.1 横延伸機

横延伸機は、主にフィルムを把持するクリップリンク、クリップリンクが走行するレール、フィルムを加熱するためのオープン等により構成される。オープンの高さ方向の下半分を見たイメージを Fig. 2 に示す。上流工程から延伸機の入口部に搬送されてきたフィルムはクリップリンクにより把持され、レールに沿ってオープン内部へと搬送される。オープン内で延伸が可能な温度までフィルムを昇温した後、レール幅の広がる箇所をフィルムが通過することで横方向に延伸される。延伸後にレール幅を狭めることで応力緩和や物性を均一化する処理もよく行われる。また加熱温度を変えて調整を行うこともある。最後に出口部でフィルムを開放し下流工程へと引き渡す。

横延伸機のクリップリンクは一定のピッチで連結されている。このため、レール幅調整による横方向の延伸・緩和が可能であるが、縦方向に関しては調整ができないことからボーイング現象^{注1)}による配向歪や製品フィルムの縦横の性能不均一が生じて品質上の問題となる場合もある。その場合レールパターンの微調整や加熱条件の見直しを行うが、それでも改善が困難な場合は後述するシュリンクテンターや同時二軸延伸機により改善を図ることができる。

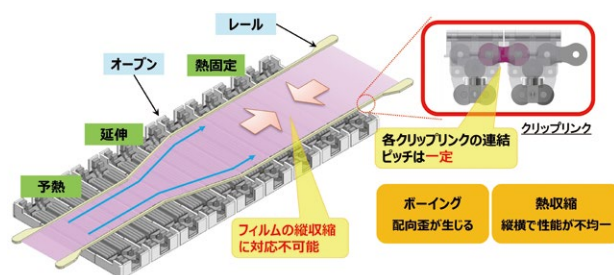


Fig. 2 横延伸機構造とクリップリンクのイメージ

2.2 シュリンクテンター

シュリンクテンターは上記の横延伸機に縦緩和機能を追加した装置である。クリップリンクに特徴があり、横延伸機用クリップリンクに支点とクリップピッチ調整アームを設けた構造となっている。アームの先端をピッチ調整レールで位置制御することでクリップピッチを狭める方向に高精度で調整可能となっている (Fig. 3)。

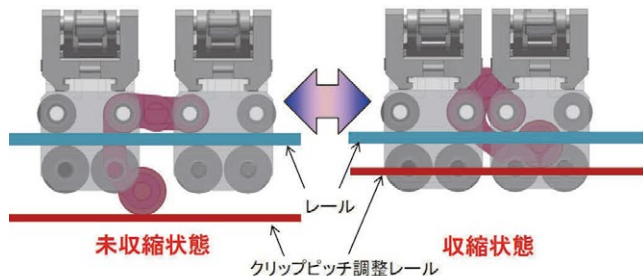


Fig. 3 シュリンクテンターのピッチ変化イメージ

これにより、例えば予熱部で前段装置による残留応力を緩和して延伸安定性を改善することや、延伸中にクリップピッチを狭めることでボーイングを抑制して幅方向の性能ムラを低減すること、また熱固定部で幅方向の緩和と同時に縦緩和も行うことで縦横の物性均一化が図れるなど、生産性向上や機能向上が可能である。

2.3 同時二軸延伸機

同時二軸延伸機はパンタグラフ方式やリニアモータ駆動方式があるが、当社はパンタグラフ方式を採用している。クリップリンクの形状の違いから、上述の装置に比べると複雑な機構を持った装置となるが、縦横任意に延伸倍率設定が可能のため配向制御を細かく行うことができ、高品質な製品フィルムを得ることができる。クリップリンクとピッチ変化のイメージを Fig. 4 に示す。

延伸パターン設定の自由度が非常に高く、Fig. 5 で示すような斜め方向への延伸や、シュリンクテンターよりも大きく縦方向に緩和させるパターンも可能である。また縦横同時に延伸することで縦横の性能均一性も改善可能である。

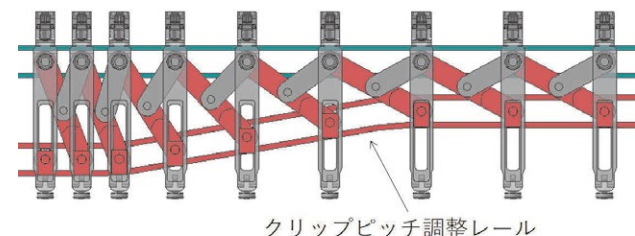


Fig. 4 同時二軸延伸機のピッチ変化イメージ

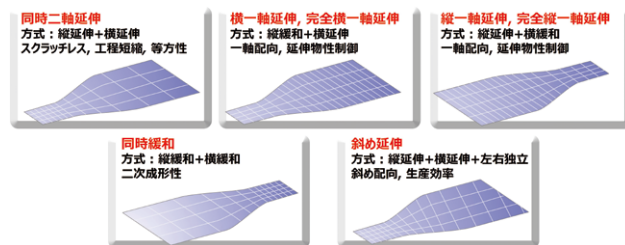


Fig. 5 同時二軸延伸機 成形パターン設定例

3 調整機構について

同時二軸延伸機を例に調整機構と動作について説明する。

調整機構断面イメージを Fig. 6 に示す。クリップリンクの軌道を規定するメインレール (以下 M レール) 上にコの字型のクリップピッチ調整レール (以下 C レール) が設置され、M レールと C レールの上にクリップリンクが搭載される。C レールにはクリップピッチ調整機構が連結されており、M レール上を Fig. 6 左右方向に動作可能となっている。M レールは台車上に搭載され回転・摺動可能な支点を介して連結されている。台車はネジを回転することで Fig. 6 左右方向に動作可能で、これによりレール幅やレール屈曲角度を変えることが可能である。

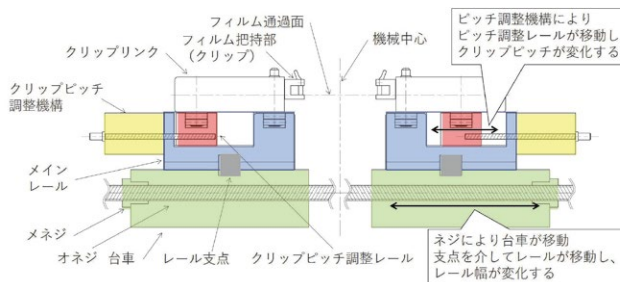


Fig. 6 調整機構イメージ 同時二軸延伸機の例

Fig. 7 に同時二軸延伸機のイメージを示す。図の左側が入口、右側が出口で、レール、調整機構、クリップリンク駆動プロセクトが複数設置されている。クリップリンクは図を省略しているが、入口から出口までフィルムを搬送した後、リターンレールを通り入口に戻る構造となっている。

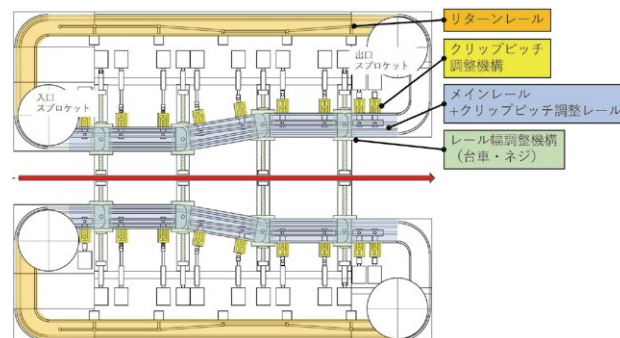


Fig. 7 同時二軸延伸機の調整機構平面イメージ

レール幅の調整を行う際には、隣り合うレールの屈曲角度がレール剛性や構造上の制限を超えないよう実施する必要がある。またクリップピッチ変更を行った場合は、フィルムを把持して走行するクリップリンクの個数が変わってくることに注意が必要で、クリップリンク数に過不足がある場合にクリップリンクとMレール、Cレールが強く接触して駆動モータトルク上昇や各部品の消耗が早くなるなどの問題が生じる可能性があるため、ピッチ調整とクリップリンク数調整を慎重に行う必要がある。

最も自由度が高い一方で複雑な装置である同時二軸延伸機の場合で説明してきたが、生産機では調整箇所が100箇所程度となることもある。手動調整の場合、調整箇所毎に少しずつ動かすことや、複数人で同時に操作するなど煩雑な作業となること多く、調整する量にもよるが複数人で1日がかりの作業となることもある。また延伸パターンの再現も困難である。

4 自動拡張機能について¹⁾²⁾

自動拡張機能は各調整軸を電動で制御し、操作パネルに入力した延伸パターンに沿って自動でレール幅とクリップピッチ、クリップリンク数を調整するものである。Fig. 8に操作パネルの参考を示す。設定した延伸パターンは保存することができ、過去パターンの再現が容易である。また機械的に異常な設定に対してはインターロックが働くため、装置を損傷させるような動作は実行されない。

同時二軸延伸機の自動拡張は装置運転状態で、

- ① 延伸パターン読み込み (TD、MD、クリップリンク数)
- ② レール位置調整動作
- ③ クリップピッチ調整動作
- ④ クリップリンク数計測

の順に行われる。

②と③の各動作は調整が必要な全軸で同時に実行される。各軸の調整量が異なる場合でも同時に動作開始・終了するように速度調整されて動作する。これによりレールの屈曲角度が緩やかに変化し機械的に安全に動作が行われる。

③の動作中にクリップピッチが変化するのに伴い、必要なクリップリンク数も変化する。リンク数が過剰な場合でも不足の場合でも、クリップリンクとレールが強く接触して各部品の負荷が増大し、場合によっては破損に至る。そのためリンク数の管理が必要になるが、当社では入口と出口駆動モータの出力トルクを監視することで適切なバランスになるよう出口駆動モータの増速、減速を自動制御するトルク比制御を行っている。そのほかの制御方法として、パターン変更中のクリップリンク数を逐一演算し、理論的な数量に応じて入口・出口駆動モータの速度を変化させる制御も考えられるが、演算が比較的複雑であること、また機械の製作誤差や昇温による熱膨張等によって、理論値との差異が生じた際に動作中の負荷が増大する懸念がある為、当社ではトルク比制御を採用し、クリップリンクが張り

すぎず弛みすぎない状態を維持することでピッチを変更可能としている。

最後に④で入口・出口に設けたセンサによってクリップリンク個数の計測を行い自動拡張が完了となる。



Fig. 8 自動拡張入力画面 当社テスト設備

調整軸毎に設定入力後運転ボタンを押すと制御が開始する

5 おわりに

本稿では、各横延伸機の紹介とともに同時二軸延伸機の自動拡張機能について紹介させて頂いた。自動拡張機能では手動で長時間・複数人で行っていた調整作業の省力化が図れるほか、高精度の成形パターンを高い再現性で実現できることから、高機能なフィルム成形に向けた機能であると考えている。

今後は更に迅速で高精度に延伸パターン設定が可能で、なおかつ成形中でも調整可能な方法について検討を進め、フィルム成形の高精度化、効率化に貢献できるよう努める所存である。

注1) ボーイング現象:二軸延伸フィルムを製造する際に、フィルムが弓なりに変形してしまう現象

参考文献

- 1) 遠矢、齊藤、渡邊、特開 2020-44691、同時二軸延伸機及び延伸システム
- 2) 遠矢、渡邊、賀茂、特開 2020-44692、同時二軸延伸機及び延伸システム



成形機カンパニー
押出技術部
装置技術課

板垣 裕太郎

横中ぐり盤(BTD・BTH シリーズ)主軸熱変位補正機能の開発

深津 将登

工作機械では主軸回転時の熱により主軸が伸び、加工面に影響を与えてしまう。特に横中ぐり盤のような主軸径が大きい機械ではこの熱変位が顕著に現れ、加工精度の悪化につながっている。本機能は横中ぐり盤を主なターゲットとし、主軸熱変位をベッド近傍温度 - 主軸ベアリング近傍温度の差および主軸回転数、の2つを引数とし推定する機能である。推定では一次遅れ式を用いて主軸回転開始及び停止時を起点として、主軸熱変位がサチュレートするまでを推定する。また、本機能は熱変位が残留した状態でNC_OFFし、その後再起動した際の熱変位量を推定する機能、推定補正計算機能も持つ。これらから算出された主軸熱変位量に合わせ、軸移動時に補正を適用する。

1 はじめに

一般に工作機械は、機械内外の温度変化によって熱変位が発生する。環境温度の変動による外部からの影響だけでなく、機械内部においても各機構部の動作により熱が発生する¹⁾。例を挙げると、テーブル移動時のボールねじの発熱、加工時における工具とワーク間の摩擦熱、そして主軸回転時における主軸ベアリングの摩擦熱などがある。これら複合的な要因によって発生した熱は、機械の姿勢変化や主軸の熱変位を引き起こす。特に加工精度に影響を与える主軸軸方向(Z軸方向)への熱変位は大きな問題であり、上記に挙げた発熱源の中でも主軸内で発生するベアリングの摩擦熱は、この問題の主要因であるといえる²⁾。よってこの発熱を抑制するため、主軸ベアリングへ供給される油はオイルコンディショナーによって温度管理されており、軸受を潤滑させるだけでなく冷却させるという役割も担っている。しかし主軸回転が高回転になればなるほど発熱は大きくなり、冷却油だけでは完全に熱を除去できずどうしても熱変位が発生してしまう³⁾。加えて横中ぐり盤のような主軸サイズが大きい機種では、この熱変位量が他機種と比較しかなり大きく、決して無視できない問題となっている。

この対策として、主軸熱変位に合わせ軸移動を行うことで変位を打ち消す方式が一般的に用いられている⁴⁾。しかしワークと接触している加工中では、主軸軸方向(Z軸方向)に現れる変位量をギャップセンサ等で測ることは不可能なため、機体各所につけられた温度センサで取得した温度データから変位量を推定し補正する方法が広く採用されている。

本稿では主軸熱変位量の大きい横中ぐり盤を主なターゲットとし、温度センサをベッド近傍および軸受ベアリング近傍の2カ所に設置し、両者の温度差を用いて補正量を計算する手法をとった。また熱変位量はコールドスタート直後だと、急激に上昇しその後サチュレートする一次遅れ変化をするため⁵⁾、本稿においてもこの一次遅れ式を採用し、補正を行った。

2 横中ぐり盤主軸熱変位補正

2.1 横中ぐり盤における姿勢変化量と主軸熱変位量の比較

前節にて、横中ぐり盤は主軸サイズが大きいいため熱変位量も大きいという内容を記述したが、実際に機械が熱影響(主軸回転熱や室温変化による機体温度変化)を受けた際はコラムの倒れといった機械の姿勢変化も発生し、その変位も主軸軸方向(Z軸方向)に現れることになる⁶⁾。本節では、補正のターゲットとしている主軸熱変位が、姿勢変化と比較してどの程度の割合を占めているかを検証した結果を記述する。

以下に、横中ぐり盤BTD-110S.R16における姿勢変化量と主軸熱変位量の比較実験結果を示す。実験は冷温かつ変温環境(10～15℃)で行った。運転はTable 3に示す回転数、時間で実施し、軸移動無しで主軸回転→回転停止を数時間ずつ行っている。回転数は500 min⁻¹刻みで運転させることで、回転数による熱変位量の違いを確認している。また、Fig. 1のように主軸先端にはダミーツールを取り付け、ギャップセンサは主軸軸方向(Z軸方向)への熱変位量と姿勢変化量を測定できるように複数設置した。各CHの測定箇所をTable 1に示す。

Table 1 各CH測定箇所

CH1	主軸頭～主軸先端
CH2	テーブル～マエ蓋
CH3	主軸頭～マエ蓋
CH4	テーブル～主軸先端

これらの各CHの測定結果を互いに差し引きすることで主軸熱変位量と姿勢変化量を計算した。また全体変位量(主軸熱変位量+姿勢変化量)、主軸熱変位量、姿勢変化量をTable 2のように定義した。

Table 2 各変位量の定義

全体変位量	CH4(テーブル~主軸先端)
主軸熱変位量	CH1、CH4-(CH2-CH3)(主軸頭~先端)
姿勢変化量	CH4-CH1、CH2-CH3(テーブル~主軸頭)

この前提のもと、Fig. 2 及び Table 4 に主軸熱変位量と姿勢変化量を比較した結果を示す。

Table 3 運転スケジュール

主軸回転数 min ⁻¹	回転時間(発熱) min	停止時間(冷却) min
1000, 1500, 2000	180	180
2500, 3000	360	360

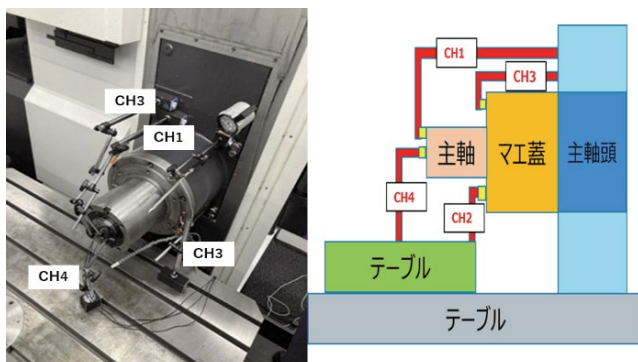


Fig. 1 ギャップセンサ取り付け写真及び測定CH模式図

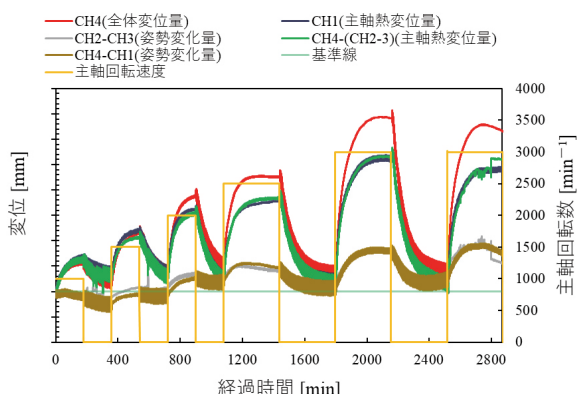


Fig. 2 主軸熱変位量と姿勢変化量

Table 4 主軸熱変位量と姿勢変化量

	全体変位量 に対する割合
全体変位量(CH4)	100%
主軸熱変位量① (CH1)	78.1%
主軸熱変位量② CH4-(CH2-CH3)	77.6%
姿勢変化量① CH4-CH1	25.2%
姿勢変化量② CH2-CH3	23.1%

これらの結果から、全体変位量に対し主軸熱変位量が75～80%ほどを占めていることが分かった。このことから横中ぐり盤では、加工中に発生する主軸軸方向(Z軸方向)変位の原因としては、主軸熱変位が支配的であることが分かった。

2.2 補正原理

1節にて示した通り、本稿の主軸熱変位補正機能では1次遅れ式を採用している。また、温度センサをベッド近傍および軸受ベアリング近傍の2カ所に設置し、両者の温度差を用いて補正量を計算している。以下に補正量 Z_k の式を示す。

$$\alpha = \Delta T_{k-1} + (\Delta T_k - \Delta T_{k-1}) \times \frac{\Delta t + T_{tem}}{\Delta t} \quad (1)$$

$$Z_k = Z_{k-1} + (\gamma \times \alpha - Z_{k-1}) \times \frac{\Delta t}{\Delta t + T_{dis}} \quad (2)$$

式(1)(2)において、補正値の計算は一定周期 Δt ごとに行われる。 ΔT はベアリング・ベッド温度差であり前周期結果の ΔT_{k-1} と現在周期結果の ΔT_k を用いる。補正量 Z_k も同様に前周期結果 Z_{k-1} を用いる。 γ は温度差を変位量に変換する係数、 T_{tem} 、 T_{dis} はそれぞれ温度差変化、変位量の時定数である。 γ 、 T_{tem} 、 T_{dis} の3つのパラメータは事前に測定し、導出した値を用いる。またこれらは回転数ごとに固有の値を用いている。 Δt は補正値計算を実行する計算周期であり、本稿では10sに設定している。この周期に従い、温度差はセンサ値を1sごとに取得したうえで10s間の平均値を最終的に ΔT_k として採用し、補正量 Z_k を求めていく。

また本稿では、熱変位が残留した状態でNC_OFFし、その後再起動した際の熱変位量を推定する機能として推定補正機能を実装している。この補正ではNC_OFF後の変位量を起動時の時間から算出し、そこから残留熱変位量を推定する。なお推定補正機能にて Z_k を算出した後は(1)(2)式を用いた計算に戻る。

3 補正シミュレート実験結果

以下に横中ぐり盤BTD-110S.R16にて実験を行い、主軸回転時の実際の主軸熱変位量とシミュレート補正量を比較した結果を記述する。

本実験ではFig. 1と同様の位置にギャップセンサを設置し、運転パターンも同一のものを採用した。温度センサはベッド近傍、主軸ベアリング近傍に設置している。結果には姿勢変化量は示さず、主軸熱変位量のみを示す。

実験は以下の環境下にて行った。

- ① 冷温下かつ変温環境下(10～15℃)
- ② 常温下かつ恒温環境下(20±1℃)

① 冷温下かつ変温環境下(10～15℃)でのシミュレート結果をFig. 3に示す。そして補正無し、補正有りそれぞれの場合での主軸最大伸び量をTable 5に示す。主軸伸びはギャップセ

ンサの電圧値変動を基に算出しているが、時間経過による治具のドリフト、室温変化による治具変形などを除した後の結果となっている。

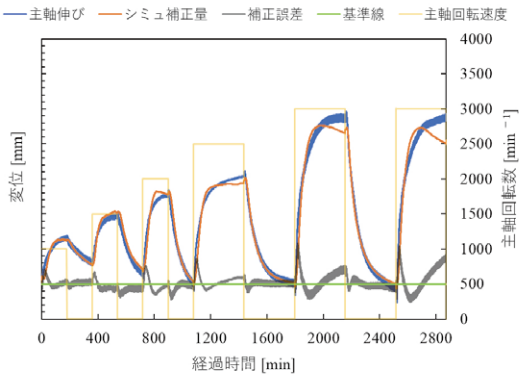


Fig. 3 変温環境下(10~15°C)でのシミュレート結果

Table 5 変温環境下(10~15°C)での補正結果

	補正効果
補正有り	▼-77%

主軸熱変位は補正無しの場合、主軸 3000 回転時に最大の熱変位が発生しており、補正後はこれが 77% 減少した。

この環境は 10 ~ 15°C という冷温下であり、主軸熱変位が大きく現れやすい環境であった。またオイルコンディショナーが室温同調制御を行っているため、かなり冷え込んだ状態からのスタートであった。そのため室温変化の影響や主軸熱変位自体が大きく、補正後最大伸び量が大きくなっている。

次に②常温下かつ恒温環境下 (20 ± 1°C) でのシミュレート結果を Fig. 4 に示す。そして補正無し、補正有りそれぞれの場合での主軸最大伸び量を Table 6 に示す。

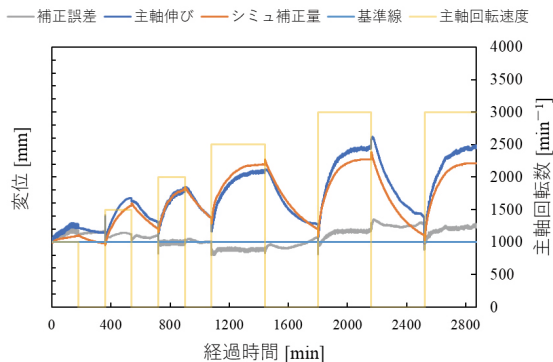


Fig. 4 恒温環境下(20±1°C)でのシミュレート結果

Table 6 恒温環境下(20±1°C)での補正結果

	補正効果
補正有り	▼-73%

こちらの実験でも、主軸熱変位が主軸 3000 回転時に最大となっており、補正によって変位は 73% 減少した。

この環境は 20 ± 1°C という恒温下であり、常温程度の室温のため主軸熱変位がやや小さくなる環境であった。また室温同調の主軸潤滑油温度制御も恒温下のため一定温度で安定しており、変温による影響を受けていない。よって、純粋な主軸熱変位のみにターゲットを絞って補正している状態であるといえる。そのため、補正後最大伸び量が小さくなっている。

4 加工検証結果

次に本補正機能を導入した実機において行った加工検証結果について記述する。対象機種は前節と同じ BTD-110S.R16 である。この検証では機能 ON/OFF で加工精度にどの程度差が出るかを検証した。

加工条件は以下のとおりである。

Table 7 加工条件

温度環境	5~15°C
使用機械	BTD-110S.R16
テスト ピース	100×115×600 mm 超々ジュラルミン A7050
使用工具	Φ12 フラットエンドミル (2 枚刃) ダイヤ
加工幅	10×50 mm
加工深さ	0.3 mm
送り速度	0.05 mm/1 刃
加工内容	端から反対までの一方向加工かつ、 30 分ごとの加工を累計 90 分実施
主軸回転数	3000 min ⁻¹
測定器具	てこ式ダイヤルゲージ 0.01 mm/1 目盛

Fig. 5 にテストピースに対する加工工程の模式図を示す。本検証では、各数字が割り振られた面毎にフラットエンドミルによる一方向加工を行い、指令加工深さ 0.3mm に対する、加工後表面のずれ量を測定した。

Fig. 6 に補正無しの加工結果、Fig. 7 に補正有りでの加工結果を示す。そして、加工深さ 0.3mm からの最大ずれをまとめたものを Table 8 に示す。

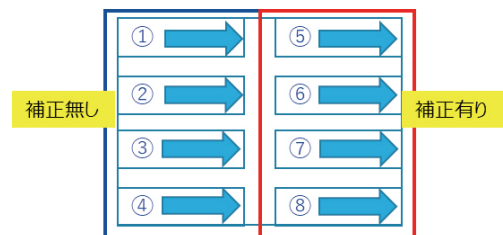


Fig. 5 加工工程模式図

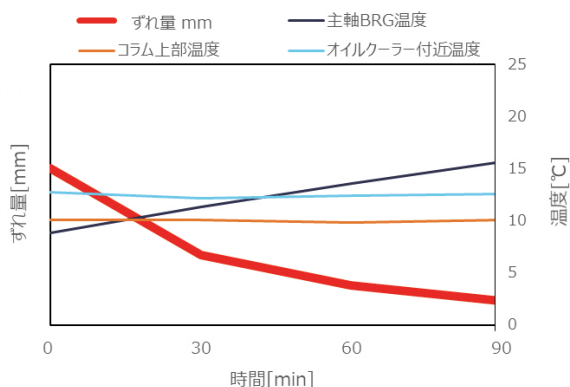


Fig. 6 補正無し加工結果

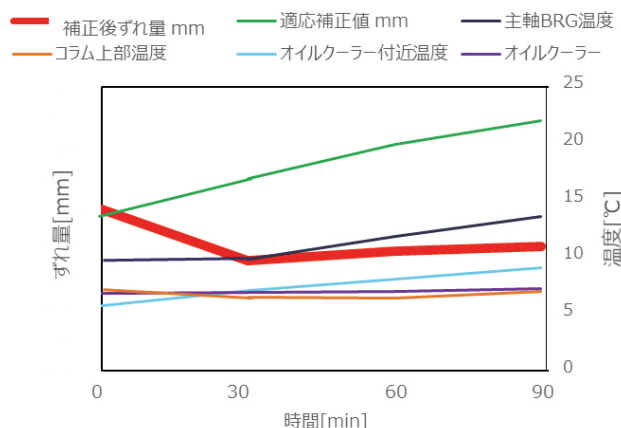


Fig. 7 補正有り加工結果

Table 8 加工検証結果

	補正効果
補正有り	▼-64%

加工検証結果は上記の通りの結果となった。本検証の環境は 5～15℃という冷温下であり、主軸熱変位が大きく表れやすい環境であった。また本補正機能は主軸熱変位のみをターゲットにしているが、加工では熱変位だけでなく機械の姿勢変化も含んだものになるため、補正有りでもずれ量が大きく出やすい状態となっている。

結果として、本環境下における補正によって変位量を 64% 低減できることを確認した。

5 おわりに

本稿では、主軸熱変位量の大きい横中ぐり盤を主なターゲットとし、一次遅れ式を採用した主軸熱変位補正機能に関する検証結果について記述した。シミュレート、加工結果ともに補正無しの場合と比較し、64～77% 熱変位を抑制できることが確認できた。

金型加工業界においては、より過酷な環境でより高い精度を要求される事も考えられるため、現状の機能をさらに発展させ、補正精度向上を図っていきたい。

参考文献

- 1) 千田治光, 佐藤礼士, 機械全体を制御する熱変位安定化技術について、第4回生産加工・工作機械部門講演会講演論文集 2002/11/22
- 2) 中村晋哉, 垣野義昭, 高速スピンドルにおける回転中の軸受予圧変化と主軸変位の解析、精密工学会誌、第58巻、第12号、P75
- 3) 千田治光, 工作機械における熱変位補償について、日本機械学会誌 2000/2 vol.103 No.975
- 4) 長島一男, 上田俊弘, 百地武, 熱と遠心力により生ずる工作機械主軸の変位とその補償方法、日本機械学会論文集 65巻 636号、P406
- 5) 千田治光, 工作機械の熱変位推定方法、公開特許公報、特開 2006-15461
- 6) 千田治光, 佐藤礼士, 森脇俊道, 量産を目的とした工作機械の主軸熱変位推定、日本機械学会論文集 70巻 698号、P171



工作機械カンパニー
工作機械技術部
加工開発課

深津 将登

油静圧案内における油の発熱低減

加藤 英則

プラスチックレンズ用金型の切削加工やガラスレンズの直接研削など、光学部品の生産に使用される超精密加工機では、加工面の微小な凹凸がレンズの性能に影響を与えるため、軸移動時に生じる数 nm 程度の微小なうねり(微小うねり)が問題視されることから、非接触な案内である油静圧案内が採用されることが多い。当社非球面加工機ではこれまで V-V 転がり案内を採用してきたが、微小うねりの抑制に対する顧客要求の高まりから、油静圧案内の非球面加工機の開発も進めている。その際に油の発熱による加工再現性の低下が問題となった。本論文では油の粘度と静圧隙間を適切に調整することで油の発熱を抑え、加工再現性を保つことができたので報告する。

1 緒言

1.1 超精密非球面加工機 ULG/C シリーズ

超精密非球面加工機 ULG/C (Fig. 1) (以下、ULG) はナノメートルオーダーの超精密加工を実現する旋盤系の切削、研削機である。ULG はその加工精度から主にプラスチックレンズ、ガラスレンズ用金型の加工やガラスレンズの直接研削など、光学部品の生産に使用されている。この ULG の超精密加工を支える要素技術の一つが V-V 転がり案内である。V-V 転がり案内は位置ループゲインを高く設定でき¹⁾、外乱に強く、位置偏差も小さいため非常に良好な面粗さを得ることができる。



Fig. 1 ULC-100F(S)とV-V転がり案内

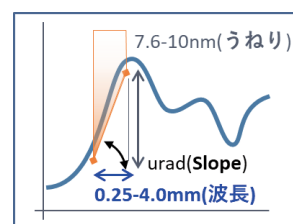


Fig. 2 V-V転がり案内の微小うねりの例

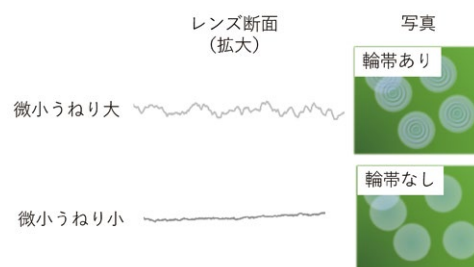


Fig. 3 画像への影響

輪帯模様は後工程の研磨で除去可能であるが、職人技や専用の研磨機が必要となり生産性を低下させるため、この微小うねりを抑制し、よりなめらかな加工面を得る必要がある。コロの高精度化や案内面仕上げの見直しによる微小うねりの改善に取り組んでいるが、V-V 転がり案内は接触式の案内のため、微小うねりを完全になくすことは困難である。

そこで現在、油静圧案内の超精密非球面加工機の開発を進めている。油静圧案内は油の圧力により移動体を浮上させる非接触の案内であり、油の平均化効果により非常になめらかな運動を実現することができる。Fig. 4 に油静圧案内の模式図を示す。

1.2 油静圧案内の超精密非球面加工の開発

一方で、近年 AR/VR 技術の発展などレンズの高機能化にともない顧客からの要求が高まる中で ULG の微小うねりが問題視されるようなアプリケーションが増えてきている。微小うねりとは Fig. 2 に示すような、軸移動時に生じる数 nm 程度のうねりのことで、これが Fig. 3 のように加工品表面に輪帯と呼ばれる微小な凹凸を残し、最終的に撮像画像にまで影響を残してしまう²⁾。

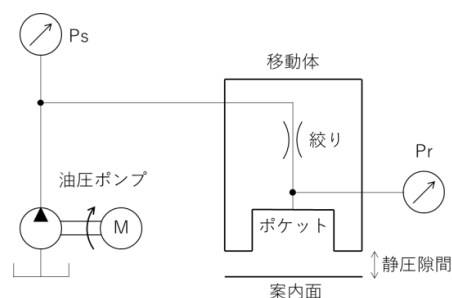


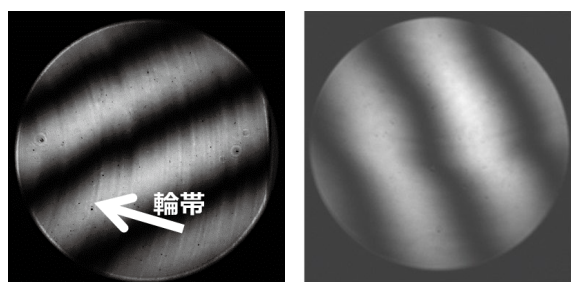
Fig. 4 油静圧案内の模式図

油静圧案内は主に油圧ポンプ、移動体、絞り、移動体に設けられた静圧ポケット、案内面により構成される。油圧ポンプから圧力 P_s で吐出された油は絞りで圧力が P_r に減少してポケットにたまり、ポケット内の圧力による反発力により移動体は案内面から浮上する。供給圧を一定とする場合、移動体と案内面の間の隙間(静圧隙間)が変化すると、絞りがあることで隙間を元に戻そうとする方向にポケット内の圧力 (P_r) が変化する。この圧力の変化が剛性として働き、案内として機能する。ポケットにたまった油は静圧隙間から流出して圧力が大気圧まで下がり、油圧ポンプのタンクに回収される。Table 1 に試作した油静圧案内の諸元を示す。

Table 1 試作した油静圧案内の諸元

項目	設計値
吐出圧力(P_s)	1.5 MPa
ポケットの圧力(P_r)	0.75 MPa
静圧隙間	15 μm
油の粘度	VG 22

Fig. 5 に V-V 転がり案内の加工機と油静圧案内の加工機で、それぞれ旋削加工した加工面を干渉計で観察した画像を示す。V-V 転がり案内による加工面には輪帯が多数観察されるが、油静圧案内による加工面には輪帯は観察されず、油静圧案内のほうが滑らかな加工面が得られていることがわかる。



(a) V-V 転がり案内 (b) 油静圧案内

Fig. 5 V-V転がり案内と油静圧案内の加工面

1.3 油静圧案内の課題

光学部品関連の加工では加工面の滑らかさだけでなく形状精度も非常に高い精度が求められる。例えばスマートフォンのカメラ用プラスチックレンズ金型の加工では $\phi 10 \text{ mm}$ 以下の小さな部品ではあるが、レンズ面の形状精度は設計値に対して形状誤差が P-V $0.05 \mu\text{m}$ 以下が求められる。

工具の輪郭精度等も影響するため、上記の精度を機械の運動精度だけで達成することは困難である。そのため、一度加工した金型の形状を測定し、誤差分を加工プログラムに反映させて補正加工をすることで形状精度を確保している。加工形状に再現性がないと補正が意味をなさないため、加工再現性が非常に重要となる。また、競合他社の油静圧案内の加工機を所有している顧客からの情報では、油静圧案内の加工機は日によって加工結果がばらつくなど加工再現性が不安定であるとの情報も得られており、開発を進めるうえで加工再現性が一つの課題となる。

2 加工再現性の検証

2.1 試作機の加工再現性

試作した油静圧案内の非球面加工機の加工再現性を検証するため、直径 9.7 mm の凹球面を加工した。同一プログラムで 2 回連続加工したワークの形状誤差を測定した結果を Fig. 6 に示す。

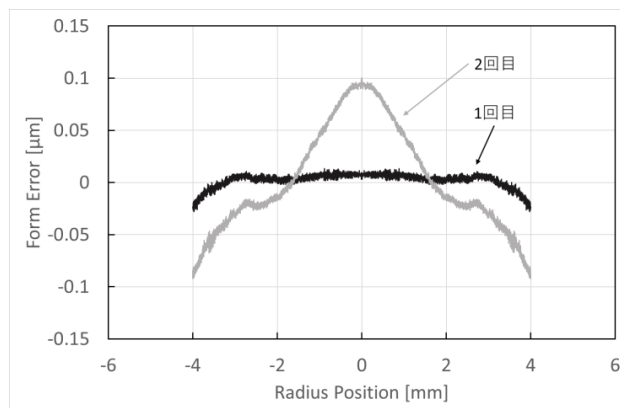


Fig. 6 加工再現性の確認

Fig. 6 からわかる通り、1 回目の形状誤差が P-V 約 $0.05 \mu\text{m}$ 、2 回目の形状誤差が P-V 約 $0.19 \mu\text{m}$ と差が $0.14 \mu\text{m}$ もあり、十分な加工再現性が得られなかった。

2.2 油の温度

加工再現性が得られない原因として静圧油の温度に着目し、静圧油の流路内の各点での温度を熱電対により測定した。測定位置の図の Fig. 7、測定結果を Table 2 に示す。

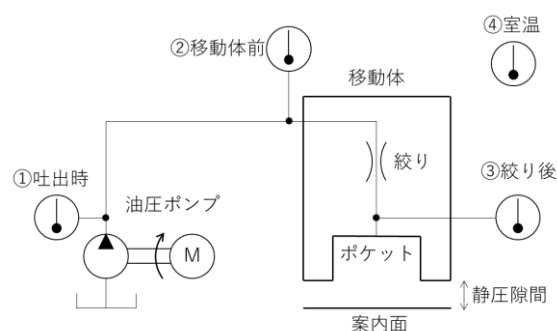


Fig. 7 油温測定位置

Table 2 各点での静圧油の温度

測定位置	温度
① 吐出時	24.0 °C
② 移動体前	23.6 °C
③ 絞り後	24.3 °C
④ 室温	23.6 °C

Table 2 より、ポンプから吐出された油は移動体内に供給されるまでに室温程度にまで温度が下がった後、移動体内で $0.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度が上昇していることが分かった。このことから、案内面は移動体側のポケット付近だけが油で温められることになるので、案内面に温度むらが生じることになり、移動体が移動する

たびに温度の分布が変化することが原因で加工再現性が得られないものと推察した。

2.3 発熱の原因と対策

油が絞りや静圧隙間を通過するとき、圧力損失により失われるエネルギーが熱に変換され発熱する³⁾。発熱量は圧力損失と流量の積に比例するため、発熱量を抑えるには油圧ポンプの吐出圧を小さくするか、絞りや静圧隙間の抵抗を大きくして流量を小さくする必要がある。吐出圧を変更すると案内の剛性に影響してしまい、絞りや隙間を変更するには設計変更の手間がかかるため、今回は油の粘度を大きくすることで、剛性などの案内面の特性に影響を与えずに流量だけを小さくして検証することにした。

2.4 効果の検証

油の粘度を VG22 から VG150 に変更して、油の温度上昇が減少し加工再現性が得られるようになるか検証した。

油の粘度を変更することで、流量は 0.45 ℓ/min から 0.06 ℓ/min に減少した。また、流路内の各点での温度を熱電対により測定した結果を Table 3 に示す。

Table 3 各点での静圧油の温度(VG150)

測定位置	温度
① 吐出時	23.2 °C
② 移動体前	23.1 °C
③ 絞り後	23.2 °C
④ 室温	23.3 °C

Table 3 より、油の粘度を大きくしたことで油の温度がほとんど上昇しなくなったことがわかる。この状態で加工再現性の検証を行った結果を Fig. 8 に示す。

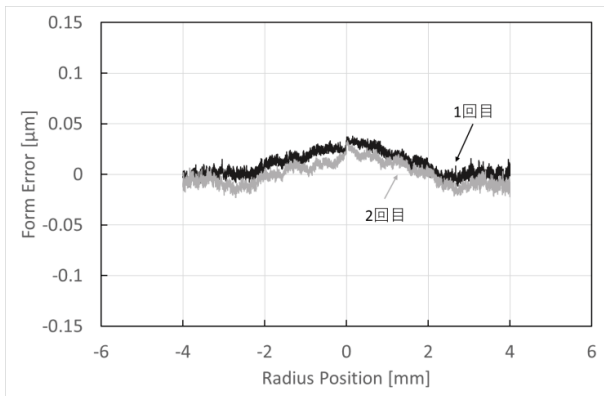


Fig. 8 加工再現性の確認(VG150)

Fig. 8 より、形状誤差の P-V 値の差が 0.01 μm 以下で傾向もほぼ同じとなっていることがわかる。以上の結果より、油の発熱を抑えることで加工再現性を得られるようになることが確認できた。

3 油の粘度と静圧隙間の最適化

油の粘度を大きくすることで流量を抑え、加工再現性を得られることは確認できたが、検証で使用した VG150 の油は粘度が大きすぎて、油を交換する際にタンクから油を抜くのに非常に時間がかかってしまうなど、メンテナンス性が悪くなってしまう問題がある。そこで、油の粘度を大きくしすぎずに流量を抑えられるように、絞りと静圧隙間の設計変更を行った。最適化後の油静圧案内の諸元を Table 4 に、温度の測定結果を Table 5 に示す。

Table 4 最適化後の油静圧案内の諸元

項目	設計値
吐出圧力(Ps)	1.5 MPa
ポケットの圧力(Pr)	0.75 MPa
静圧隙間	10 μm
油の粘度	VG 68

最適化後の油の流用は 0.16 ℓ/min であり、温度の上昇も見られない。また、最適化後に半径 60 mm の凹球面を同一プログラムで連続 7 回加工した際の形状誤差を測定した結果を Fig. 9 に示す。

Table 5 各点での静圧油の温度(最適化後)

測定位置	温度
① 吐出時	24.4 °C
② 移動体前	24.3 °C
③ 絞り後	24.3 °C
④ 室温	24.1 °C

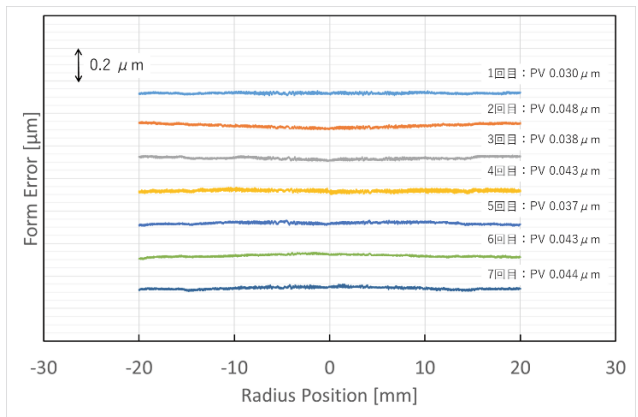


Fig. 9 最終的な加工再現性

Fig. 9 では P-V 0.05 μm 以下が連続 7 回達成できており、十分な加工再現性が得られている。また、Fig. 10 に長時間での加工再現性を検証した結果を示す。

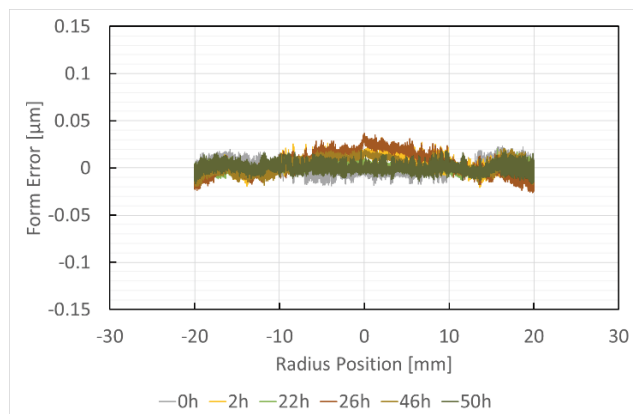


Fig. 10 最終的な加工再現性

Fig. 10 より 50 時間経過後でも形状精度は P-V $0.05 \mu\text{m}$ 以下で安定していた。以上のことから試作した油静圧案内の超精密非球面加工機は十分な加工再現性を有していると考えている。

4 結言

本稿では油静圧案内の加工機について油の流量を抑えることで流路内での油の発熱を低減した。また、油の粘度と絞りや静圧隙間を最適化することでメンテナンス性と加工の再現性を得られるようになることを確認した。

試作した油静圧案内の加工機ではこれまで切削加工による検証を進めてきたが、これまでのところ良好な結果が得られている。一方で、ULG ではガラスレンズの直接研削なども行うため、研削加工での検証が必要である。また、今回の試作機は水平 2 軸を油静圧案内とした加工機となっているが、今後は垂直軸の油静圧案内についても開発を行う予定である。

参考文献

- 1) 田中克敏、福田将彦、覚張勝治、鈴木清、植松哲太郎、超精密加工機械の高精度化の研究 第 2 報：リニアモータ駆動方式有限形 V-V ころがり案内の検討、砥粒加工学会誌、51-8、(2007)、482
- 2) 金子真也、森田晋也、山形豊、非球面レンズ輪帯ボケシミュレーションに適した加工誤差形状表現手法の検討、2019 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集、445
- 3) 光岡豊一、静圧軸受けの設計、精密機械、38-11、(1972)、966



工作機械カンパニー
工作機械技術部
精密設計課

加藤 英則

電動式射出成形機 EC-SX III S-Concept の紹介



1 概要

電動式射出成形機 EC-SX III シリーズのラインアップのうち、50ton から 350ton までの小型機において、新たに EC-SX III S-Concept としてマイナーチェンジする。

成形業界の課題である 高生産性、省人化、環境対応の3つのテーマに対する当社のソリューションを EC-SX III S-Concept シリーズとして提案し、お客様の抱える問題を解決に導いていく。

2 特長

EC-SX III S-Concept シリーズは高生産性、省人化、環境対応に貢献するソリューションをお客様に提供することを目的に開発を行った。以下に3つのソリューションについて、その一例を紹介する。

2.1 高生産性(SAVE TIME)

高生産性とクリーン環境を実現した業界最速の型締装置 Solid Clamp は、移動ダイプレートのリニアガイド支持構造によりスムーズな型開閉動作と直進安定性をもつ。当社独自のダイナミック加減速制御による、業界最速のドライサイクル^{注1)}性能は生産時間短縮に寄与する。(Fig. 1)

型締力200tクラスでの比較

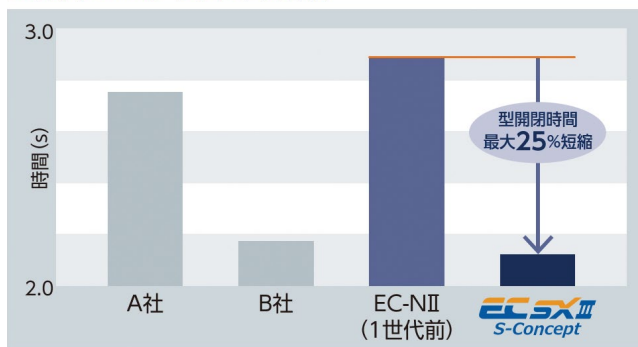


Fig. 1 ドライサイクル比較

安定した可塑化・充填を実現する射出装置 S-Cube と、スクリュ逆転制御により専用チェックリングを機械的に閉鎖する機能であるプラストロール II (Fig. 2) を用いることで、充填量の更なる安定性を実現する。また、スクリュ逆転動作後の圧縮動

作を行うことで計量樹脂密度の均一化を図り、成形品の質量変動率を改善することができる。これにより品質が安定し、歩留まりが向上する。

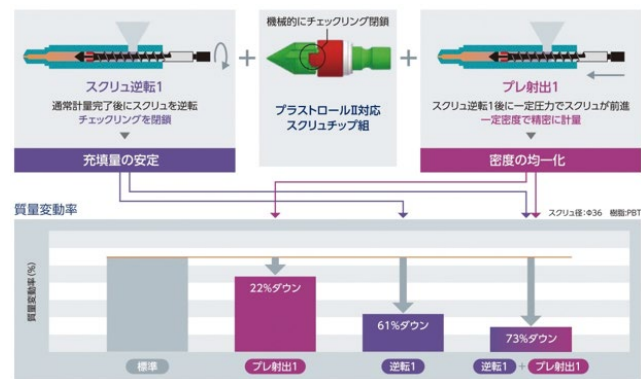


Fig. 2 プラストロールII

また、EC-SX III S-Concept シリーズは高い拡張性を持ち、プラグインによる付帯機器の制御や、各種外部センサの入力情報モニタリング・連携が可能である。成形機で情報を一元管理することで、生産の効率化を図る事ができる。

2.2 省人化(SAVE WORKFORCE)

成形機の取り扱い経験の浅い作業者を支援するため、コントローラである INJECTVISOR V70 をアップデートした。作業者が入力せずとも推奨値を設定する低圧型締力自動設定機能を新たに搭載した他、成形条件の設定に必要な要素を1画面で表示するよう画面構成を見直し、条件設定の手間を削減した。(Fig. 3)

また、新開発の金型保護機能を搭載した。型締動作トルク波形から算出した基準値を用いることで、型閉動作のみを対象としていた監視区間を型開閉動作全域に拡大した。金型保護に関する設定手順は従来比で60%削減し、経験の浅い作業者でも容易に金型保護機能を活用することができる。新金型保護機能により金型破損を未然に防ぎ、安定した生産を維持することで省人化にも寄与できる。(Fig. 4)



Fig. 3 INJECTVISOR V70画面



Fig. 4 新金型保護画面

2.3 環境対応(SAVE THE EARTH)

EC-SX III S-Concept シリーズで新開発した省エネヒータカバーは、「ヒータ電力削減による省エネ化」というお客様の要望と、樹脂換え作業時の「バレル温度を早く下げたい」という要望に応えるため、保温性と冷却性能を両立させた構造を採用した。省エネ性能向上のため密閉構造のカバーとしつつ、オプションとして冷却ファンと排気シャッターを備えた仕様も用意する。省エネヒータカバーにより当社 EC-N II シリーズ (旧世代機) と比較し、ヒータの消費電力量を 24% 削減した。(Fig. 5)

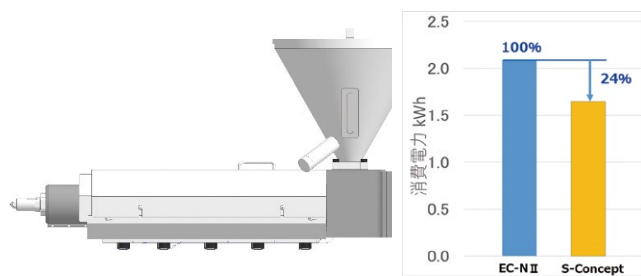


Fig. 5 省エネヒータカバー

また、コントローラ INJECTVISOR V70 は標準装備されている消費電力表示機能 (Fig. 6) により、成形機の消費電力量を手軽に確認することができるが、リモート監視システムである iPAQET4.0 とイーサネット接続することで、電力監視拡張機能 EM Plus にも対応する。EM Plus と追加電力監視モジュールを用いることで、成形機単体だけでなく、周辺機器を含めたシステム全体の消費電力量を遠隔で確認することができる。(Fig. 7) お客様が省エネ施策を検討するにあたり、現状値や改善後の実績値を容易に取得できる。

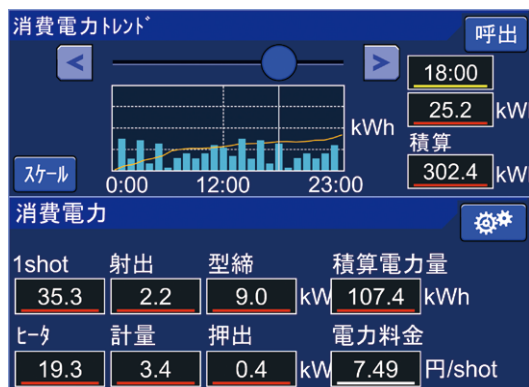


Fig. 6 消費電力画面

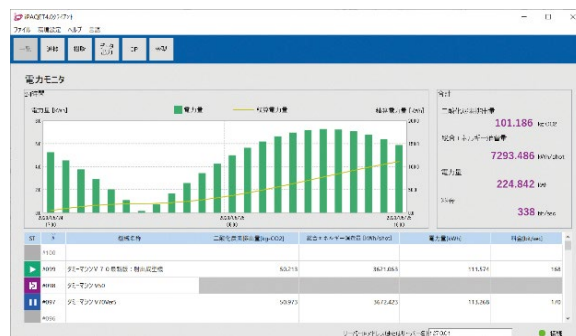


Fig. 7 EM Plusモニタリング画面

EC-SX III S-Concept シリーズの高い拡張性を活かし、新開発サブ射出装置 EC PLUS+ との組合せにより、サンドイッチ成形にも対応する。サンドイッチ成形は成形品の内側のみを別材料に置き換える成形法である。サンドイッチ成形を用いることで、製品の内側だけにリサイクル材を用いることが可能となる。(Fig. 8) リサイクル材を使用した製品の問題である外観不良を改善しつつ、リサイクル材採用を促進することで環境負荷低減に寄与できる。

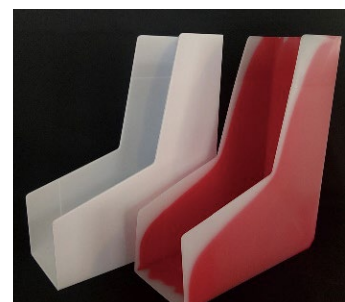
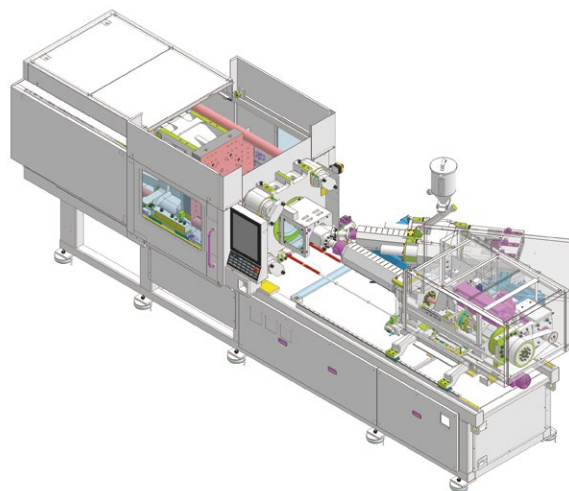


Fig. 8 サンドイッチ成形機と成形サンプル

3 おわりに

SDGs で掲げる低炭素社会の実現に向け、射出成形の高生産性と省エネでお客様に貢献できる EC-SX III S-Concept シリーズを開発した。今後も様々なニーズに応えていける射出成形機の開発を行っていく所存である。

注1) ドライサイクル：成形材料を供給せずに射出成形機を基本的な動作で空運転した場合の、1 サイクルに要する最小作動時間。

リモート監視システム iPAQET4.0 の紹介

当社は「SAVE TIME（高生産性）」「SAVE WORKFORCE（省人化）」「SAVE THE EARTH（環境対応）」を高次元で実現した新世代射出成形機をお客様に提供するため S-Concept を掲げている。リモート監視システム iPAQET4.0 は、S-Concept の一端を担う IoT ソリューションである。

1 リモート監視システム iPAQET4.0

iPAQET4.0 は、スマート工場の実現を目指し、製造現場のデジタル化を支援するソフトウェアである。当社射出成形機からデータを収集、蓄積および閲覧することが可能であり、収集できるデータには、射出成形機を動作させるための成形条件や生産実績となる品質モニタデータなどがある。収集したデータを有効活用できる機能を提供する。

新世代射出成形機だけでなく、油圧機など旧世代の当社射出成形機を接続することも可能である。(Fig. 1)

iPAQET4.0 の特徴は「標準機能」と「拡張機能」で構成が2つに分かれていることである。標準機能および拡張機能からそれぞれ厳選したものを紹介する。

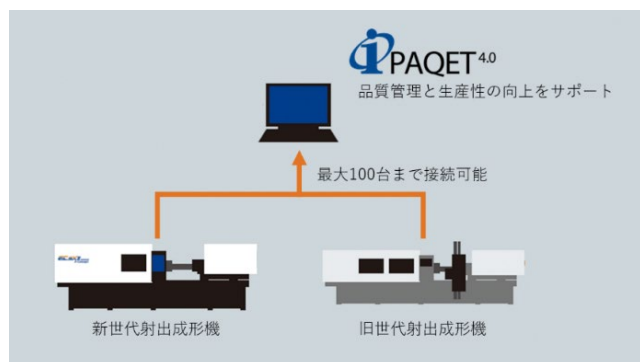


Fig. 1 iPAQET4.0概要

2 標準機能

標準機能とは、当社射出成形機から稼働状況や成形条件、品質モニタデータ、操作履歴などのログデータを収集し、閲覧を可能とする機能である。

以下に生産現場の効率化につながる iPAQET4.0 の新機能を中心に紹介する。

2.1 カスタムエクスポートレシピ

カスタムエクスポートレシピは、iPAQET4.0 で収集した成形条件データをユーザが運用している成形条件の管理フォーマットに出力する機能である。データとして保存できるため、作業者は日々の手書き作業から解放される。

ユーザは、運用している成形条件の管理フォーマットを iPAQET4.0 に取り込み、iPAQET4.0 が収集する成形条件の項目をドラッグ＆ドロップで関連付けることで、設定が完了す

る。設定が完了したデータをテンプレートとして保存することで、次回以降は設定いらずとなる。作業者は、日付や生産開始時刻を選択してエクスポートボタンをクリックすることで、必要な成形条件表をデータとして保存できる。(Fig. 2)

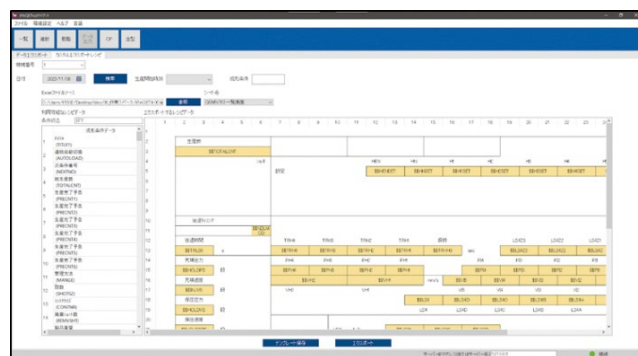


Fig. 2 カスタムエクスポートレシピ画面

2.2 PM Plus(金型保全)

PM Plus（金型保全）は、金型の保全記録を登録、管理する機能である。

ユーザは、iPAQET4.0 で金型に施した作業内容などの保全記録、画像ファイルやドキュメントファイルの登録を行うことで、金型の保全記録について詳細な情報を管理することができる。(Fig. 3)

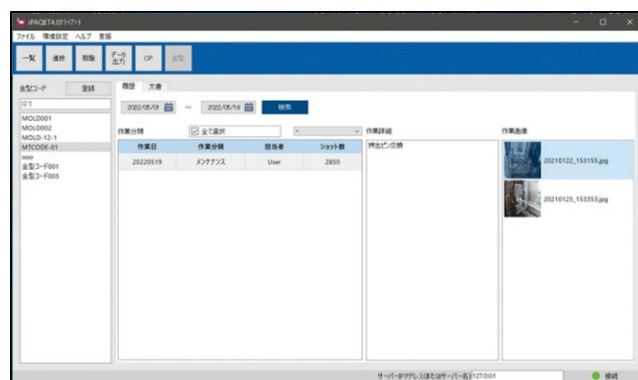


Fig. 3 PM Plus(金型保全)画面

2.3 PM Plus(押出トルク監視)

PM Plus（押出トルク監視）は、射出成形機から取得した押出モータのトルクデータで金型の状態変化を監視する機能である。

ユーザは、状態監視の基準となる基準波形の生成と基準波形に対する上下の監視幅を設定することで金型の状態を監視できる。(Fig. 4)

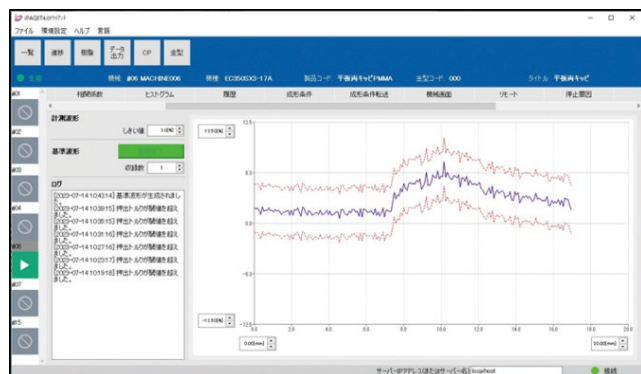


Fig. 4 PM Plus(押出トルク監視)画面

2.4 データ引継ぎ

当社は、iPAQET4.0から2世代前のiPAQET、または1世代前のiPAQET3をユーザに提供してきた。iPAQET4.0は、前述の旧世代ソフトウェアとデータ構造が異なる。

データ引継ぎは、旧世代のソフトウェアで蓄積されたデータ構造をiPAQET4.0で扱うデータ構造に変換する機能である。データ引継ぎを行うことで、過去に蓄積したデータを継続して使用することが可能になる。

ユーザは、iPAQET4.0から旧世代のソフトウェアで蓄積されたデータが保存されているディレクトリを選択し、処理実行の開始ボタンをクリックすることでデータの継続使用が可能になる。

3 拡張機能

拡張機能とは、標準機能からさらにデータの利活用を発展させた機能である。iPAQET4.0の標準機能で収集した品質モニタデータから、二次元コードの画像ファイルを生成して保存するTrace Plus、ハードウェアを追加することで、当社射出成形機からは取得できない消費電力データを収集し、閲覧可能とするEM Plusなどがある。

今後お客様のニーズにあった拡張機能を拡充させていく。

3.1 Trace Plus

Trace Plusは、生産時の品質モニタデータから二次元コードの画像ファイルを生成して保存する機能である。(Fig. 5) iPAQET4.0にラベルプリンタなどを接続することで、1ショット毎に画像ファイルを印刷することも可能である。

ユーザは、二次元コードにする項目を品質モニタデータから最大10項目まで選択することができる。また、一般的なプリンタの印刷設定と同じように設定することで、二次元コードの印刷も可能である。印刷された二次元コードをモバイル端末で読み取ることで、生産時の品質モニタデータを確認することができる。

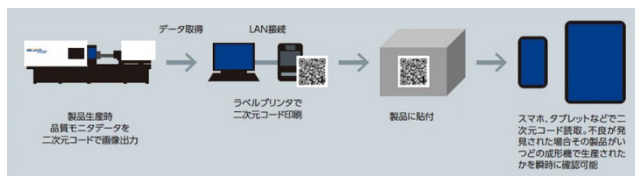


Fig. 5 Trace Plus概要

3.2 EM Plus

EM Plusは、電力測定モジュールを追加することで、成形機本体だけでなく、取出機などの周辺装置も含めたシステム全体の消費電力監視を行う機能である。(Fig. 6)

ユーザは、iPAQET4.0で電力測定モジュールの設定(ネットワーク情報、機器名称の登録など)を行うことで、成形機本体や周辺装置の消費電力量を監視することができる。さらに、二酸化炭素排出量の算出係数や電気料金の単価設定を行うことで、生産活動における二酸化炭素の排出量や電気料金の監視もできる。(Fig. 7)

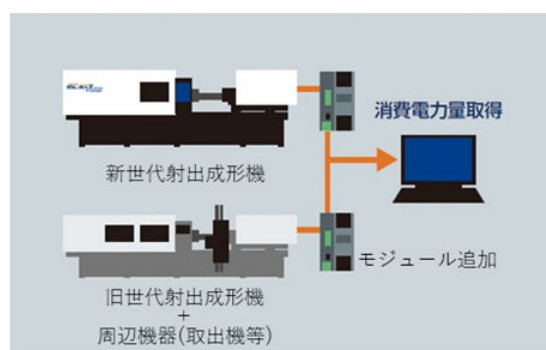


Fig. 6 EM Plus概要

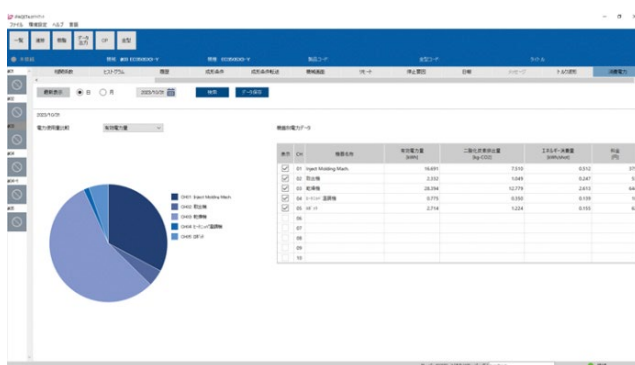


Fig. 7 消費電力監視画面

4 おわりに

リモート監視システムiPAQET4.0の一部を紹介した。iPAQET4.0は、S-Conceptの一端を担い「SAVE TIME(高生産性)」「SAVE WORKFORCE(省人化)」「SAVE THE EARTH(環境対応)」をユーザに提供することを目的としている。多様化するユーザニーズに応えるため、今後もソフトウェア開発を続けていく所存である。

※「iPAQET」は、芝浦機械株式会社の登録商標です。

ダイカストマシン DC850R2 の紹介



Fig. 1 DC850R2の外観

1 概要

近年、ダイカスト製品は大物化や薄肉化が進んでいる。それにより鑄造の難易度が上がることから、ダイカストマシンには短時間充填や短時間昇圧といった射出性能が求められている。また、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。

当社では、現行の R シリーズに対して、型締力をアップ(350t→400t、800t→850t)、昇圧時間を短縮(500t、650t、850t)、さらには新制御装置 TOSCAST-999 を搭載した R2 シリーズを開発した。本稿では、DC850R2 について紹介する。(Fig. 1)

2 特長

2.1 型締力アップによる鑄造品質向上

ダイカストにおけるバリ吹きは、製品品質だけではなく、バリ取り等の後処理が増えるなど、生産にも影響を及ぼす。発生原因の一つとして挙げられるのは、不適切な鑄造圧力設定である。鑄造圧力による型開力が型締力を上回ると金型に隙間ができ、溶融金属が流れ込んでバリが発生してしまう。そのため、製品に対し適切な鑄造圧力の設定が必要である。ここで、型締力を上げることは、バリの発生を低減させる一つの方法である。

新機種では、従来機の 800 トン機使用の既存の金型に対し、型締力の違いを活かすことができると考える。型締力を従来機に対し 6.25% アップすることにより、バリ吹きを抑える領域が拡大し、同じ条件で製品を鑄造しても、バリが吹きにくいマシンとなっている。

また、型締力をアップした分、鑄造圧力を上げることが可能となり (Fig. 2)、製品の品質向上と生産性向上に貢献できると考える。

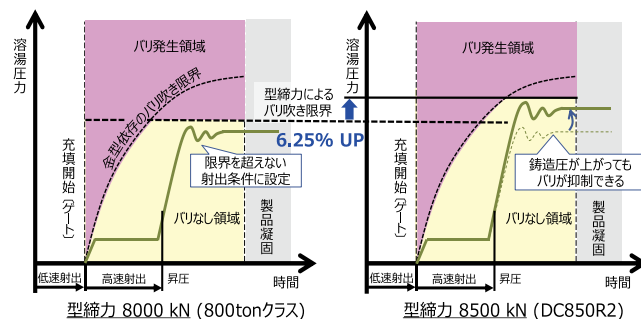


Fig. 2 型締力アップによるメリット

2.2 油圧回路改善による昇圧時間短縮

DC850R2 では、油圧回路の改善により昇圧制御用バルブの応答性を向上させることで、従来機に対して昇圧時間が 33% の短縮となった。(Fig. 3) これにより製品の内部品質の向上に貢献できる。

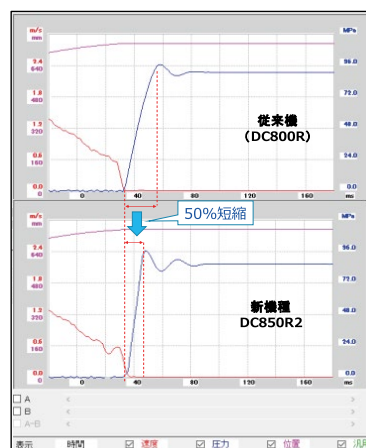


Fig. 3 昇圧波形比較

2.3 新制御装置

R2 シリーズの制御装置には新開発した TOSCAST-999 を搭載したことで、画面サイズは 19inch となっており、任意の画面を上下其々表示が可能で、モニタを確認しながら条件変更ができ、操作性が大幅に向上している (Fig. 4)。

金型温度管理を簡易にできるサーモグラフィ機能を搭載可能で、製品の品質安定化や金型トラブルの予防等に貢献できる。

また、全画面表示機能でラダー回路や取扱説明書、系統図といったユーザ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 UP や環境の保全にも貢献できると考える。

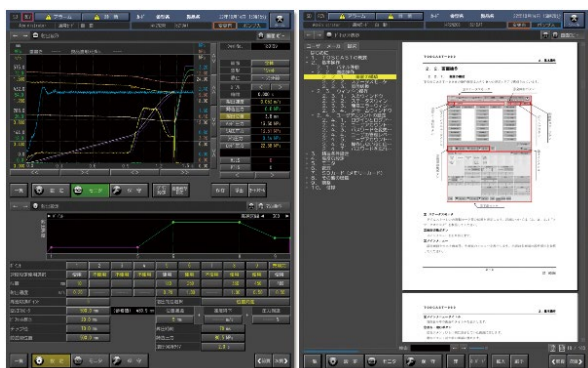


Fig. 4 TOSCAST-999の画面例

2.4 電動型締による生産性向上(R2-EM/EH)

DC850R2の電動駆動部構造をFig. 5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、サイクルタイムは1.2sの短縮、また消費電力は約10%の低減になる。

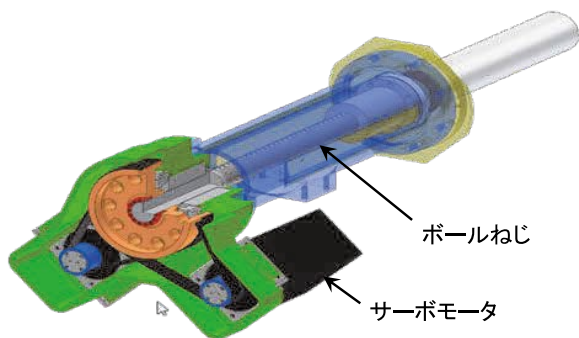


Fig. 5 電動駆動部

2.5 サーボ油圧源による省エネ

サーボ油圧源(オプション)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。(Fig. 6) 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。条件にもよるがおよそ20%の低減が得られる。

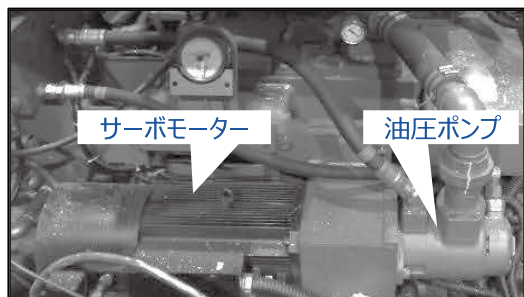


Fig. 6 サーボ油圧源の構成

3 仕様

Table 1 に DC850R2 の諸元を記す。

Table 1 仕様数値比較表

仕 様 項 目	単 位	DC850R2	DC800R
型締力	k N	8 5 0 0	8 0 0 0
タイプレート寸法 (縦×横)	mm×mm	1 4 0 0×1 4 0 0	1 4 0 0×1 4 0 0
タイバー間隔 (縦×横)	mm×mm	9 3 0×9 3 0	9 3 0×9 3 0
タイバー直径	mm	1 8 0	1 8 0
ダイストローク	mm	7 6 0	7 6 0
ダイ最大厚さ	mm	9 5 0	9 5 0
ダイ最小厚さ	mm	4 0 0	4 0 0
押出力	k N	3 7 1	3 7 1
押出ストローク	mm	1 0 ~ 1 2 5	1 0 ~ 1 2 5
射出力	k N	1 6 9 ~ 6 0 0	1 6 9 ~ 6 0 0
プランジャストローク	mm	7 5 0	7 5 0
プランジャチップ突出量	mm	3 5 0	3 5 0
増圧比		1 : 2 . 5 6	1 : 2 . 5 6
射出口位置	mm	- 2 5 0	- 2 5 0
射出速度 (水グリ油)	m / s	M : 0 . 0 3 ~ 6 . 5 H : 0 . 0 3 ~ 1 0	M : 0 . 0 3 ~ 6 . 5 H : 0 . 0 3 ~ 1 0
プランジャチップ直径	mm	8 0 ~ 1 0 0	8 0 ~ 1 0 0

4 効果／事例

- 1) 型締力 UP による商品力の向上、生産性の向上
⇒ 鋳造品の品質向上
- 2) 昇圧時間短縮による商品力の向上
⇒ 鋳造品の品質向上
- 3) 新制御装置による操作性の向上
⇒ 大画面化による画面切換操作時間の減少、
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
- 4) 電動型締による商品力の向上
⇒ サイクルタイム短縮、消費電力低減、
- 5) サーボ油圧源による省エネ率の向上
⇒ 消費電力低減

5 おわりに

DC850R2 は鋳造品の品質向上と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、お客様のご要望に依っていく。

精密研削加工機 LG-100E (5A) の紹介

昨年 10 月にリリースした精密研削加工機 LG-100E (5A) について、開発に至る背景およびその特長について紹介する。

1 はじめに

近年、光学部品分野において、スマートフォンに用いられる樹脂製レンズ市場は 2020 年以降成長が停滞しているのに対し、デジタルカメラ、自動車用カメラなどに採用されるガラスレンズ市場では、被写体を高精細に撮影可能な 4K、8K 対応光学機器の普及が後押しする形で持続的な成長を続けている。

レンズの加工工程は粗研削・芯取り・精研削・研磨の 4 つに大きく分けられ、それぞれ使用する設備も異なる。さらに、各工程では多数の段取り作業が存在するため作業担当者の熟練度によって、ベテランが数分で完了する作業が、新人では数倍以上時間がかかる場合がある。その影響で工程待ちの状況が発生し、サイクルタイムの増加が問題となっている。また、近年光学レンズを搭載する機器の高性能化にともない、自由曲面などの複雑形状のレンズ需要が増加しているため、各工程が完了するまでのサイクルタイムに顕著なバラつきが表れており、生産現場からは導入設備機に対し、工程の集約化、作業者の技能レス支援機能を要望する声が挙がっている。

芝浦機械では、これまでレンズの精研削工程を対象とした超精密非球面加工機 ULG シリーズを展開してきたが、前述の市場要求に対し、最上位機種である ULG-100D (5A) と完全互換性をもつレンズ粗研削向け精密研削加工機 LG-100E (5A) を開発した。機械の外観を Fig. 1 に示す。



Fig. 1 LG-100E (5A) の外観

2 特長

2.1 ULG-100D (5A) と完全互換性のある軸構成

直線軸はすべてリニアモータ駆動および高精度リニアガイドウェイを採用。また、ULG-100D (5A) と同等のワークサイズに対応するため、X、Y、Z 軸のストロークをそれぞれ 450mm、100mm、250mm とした。回転 2 軸には自社製空気静圧軸受を採用し、低振動な回転動作及び位置制御が可能であり、5 軸加工にも対応可能とした。

2.2 高性能 NC による高精度な 5 軸同期制御

CNC には FANUC Series 30i MODEL B Plus を採用することで高精度な軸同期制御を実現。これにより自由曲面レンズなどの複雑形状に対応可能である。

2.3 ロータリーエンコーダ搭載型工具スピンドルの採用

工具軸として採用する空気静圧軸受工具スピンドル ABC-20M は、新たにロータリーエンコーダを搭載し、最高回転数 80000min^{-1} を 1min^{-1} 単位で制御が可能である。

2.4 自社開発の技能支援機能の活用

技能支援アプリケーションを新規開発し、作業者の熟練度による作業時間のバラつきを最小限に抑えることが可能である。

2.4.1 ワーク自動芯出し機能

レンズは旋盤加工で形状を創成するため、加工段取りとして硝材を主軸に設置し、回転軸に対するレンズの芯振れ量を調整する芯出し作業を実施する。サイズにもよるが、ベテランは数秒～1 分程度で完了するのに対し、熟練度が低い作業者の場合は、許容可能な芯出し精度に調整するまで数十分以上かかっている。

ワーク自動芯出し機能のシステム構成および装置外観をそれぞれ Fig. 2、Fig. 3 に示す。

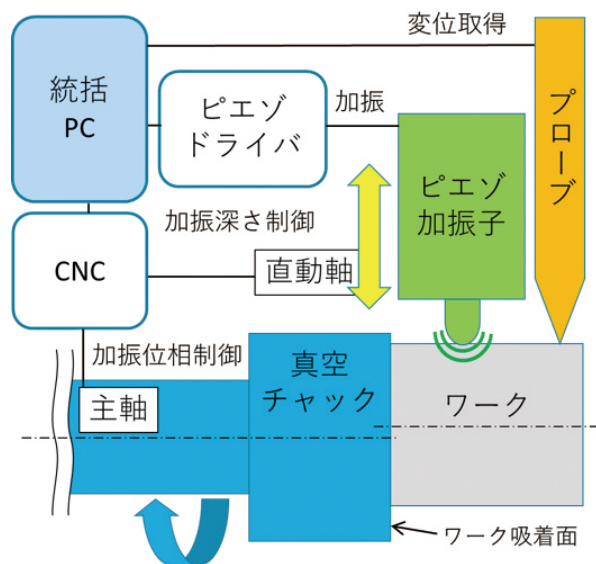


Fig. 2 自動芯出しシステム構成

本機能は、主軸の回転に対するレンズの芯振れ量をプローブで計測し、加振子でワークを打撃することで修正を行う。この機能により、作業者の能力によらず約4分程度で芯振れ量を $\pm 2\mu\text{m}$ 以下に調整することが可能である。

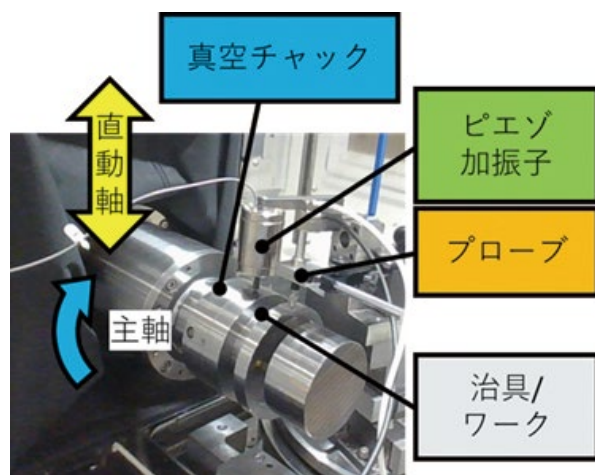


Fig. 3 装置外観

2.4.2 ワークの自動アタリ確認機能

光学レンズの研削加工では、加工形状が曲面であることから、砥石が最初に接触する加工開始点を適切に設定することは重要な作業であり、切込量超過による砥石やワーク損傷は、生産効率や加工品質に大きく影響を与えている。

砥石の接触はAEセンサを使用するのが一般的だが、サブマイクロメータの切込みに対し十分な接触信号が得られないため、現場では砥石を手で回転させ、接触時の挙動変化から接触位置を判断している。そのため、作業者の熟練度により確認時間に大きなバラつきが生じている。

自動アタリ確認機能のシステム構成および確認事例をそれぞれFig. 4、Fig. 5に示す。

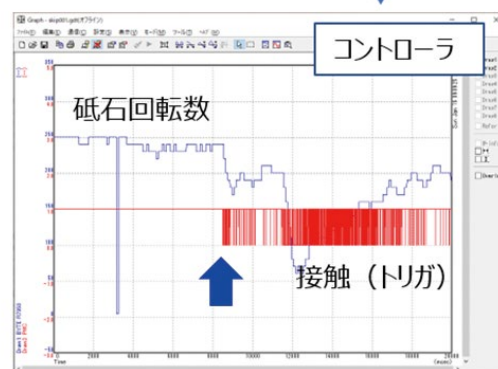
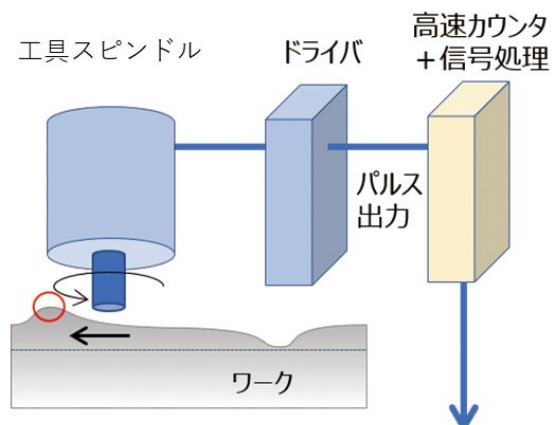


Fig. 4 自動アタリ確認機能のシステム構成

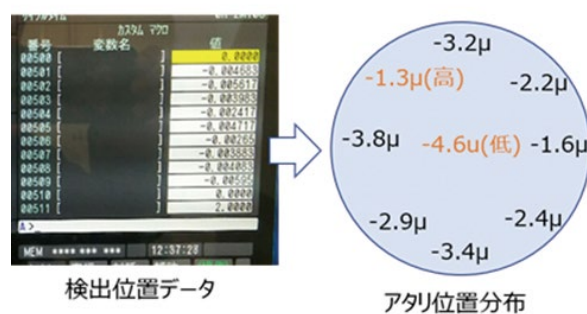


Fig. 5 本システムによる自動アタリ確認事例

本機能は、通常より低い回転数を維持した工具スピンドルにおいて、回転数制御に用いるパルス信号を検出し、接触時の高速検出を可能とした。また、この信号は高速スキップ動作に取り込むことにより、砥石の接近、アタリ検出、回避動作を固定サイクルとして確立し、任意位置のアタリ確認の自動化を可能とした。また、加工における工具走査パスの情報から、工具軌跡やワークとの理論接触位置の情報を取得することで、ワークの複数箇所でのアタリ位置の検出およびその分布を確認すること

が可能である。これらにより、加工開始点と全面の加工に必要な総切り込み量を自動で認識することが可能である。

3 仕様

主な機械仕様を Table 1 に示す。

Table 1 主要仕様数値一覧

移動量 mm	X 軸	450
	Y 軸	100
	Z 軸	250
回転軸移動量 deg	B 軸	無制限
	C 軸	無制限
最大加工送り速度 mm/min	X 軸	1000
	Y 軸	500
	Z 軸	1000
最高回転数 min ⁻¹	B 軸	300
	C 軸	2000
工具軸最高回転数 min ⁻¹	工具軸	80000
最小設定単位 nm	X, Y, Z 軸	10
	deg	B 軸 0.00001
	deg	C 軸 0.0001

4 加工事例

ガラスレンズの金型として用いられる超硬合金金型（φ10、SR3 凹球面）の研削加工を実施し、加工後の形状精度を Panasonic 製の UA3P、表面粗さを Ametek 製の Nexview NX2 で評価した。加工では工具スピンドル ABC-20M の回転数制御の効果を検証するため、回転数による研削模様の比較も行った。

金型の形状および外観を Fig. 6、研削加工の様子を Fig. 7 に示す。

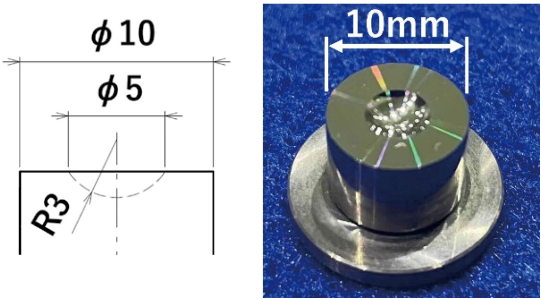


Fig. 6 金型形状および外観

形状精度測定結果を Fig. 8、表面粗さ測定結果を Fig. 9 に示す。本加工機によりレンズ金型を形状精度 1μmPV 以下、表面粗さをナノメートルオーダーで加工が可能であることを確認した。また、工具回転数を 1min⁻¹ 単位で制御することで、研削模様に起因したうねりを低減する効果を確認した。

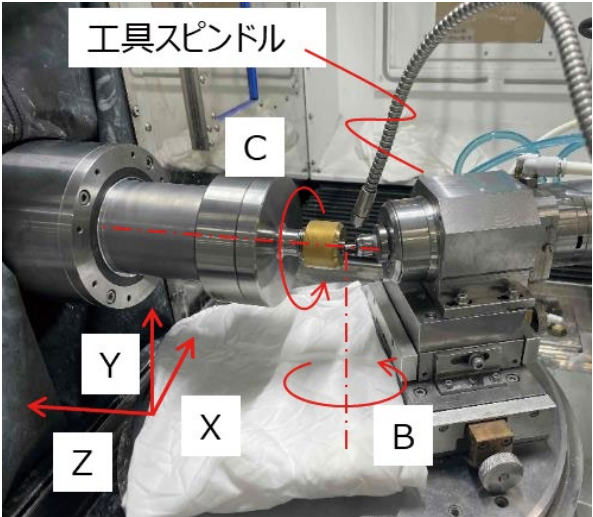


Fig. 7 研削加工の様子

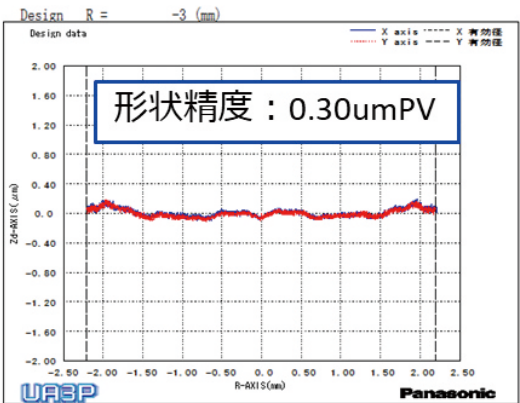


Fig. 8 形状精度測定結果(UA3P)

砥石回転数	40,000min ⁻¹	39,943min ⁻¹
表面粗さ	9.44nm	7.76nm

Fig. 9 表面粗さ測定結果(Nexview NX2)

5 おわりに

今後、少子高齢化にともなう働き手の不足により、培った技能の伝承が増々困難になることが予測される。そのような状況に対し、開発した精密研削加工機と技能支援機能を活用した加工プロセスを積極的に PR し、生産性向上に寄与していく。

TCmini シリーズ Web サーバー機能の紹介

1 概要

TCmini とは、ラダー言語でプログラミングできるボードタイプの PLC であり、お客様のニーズに合わせて最適な機能・サイズ・コストを実現することができる。

TCmini は環境機器、厨房機器、健康機器、産業機器などのコントローラとして多くの分野で採用されているが、お客様の多くは表示器とセットで使用している。

PLC 内部データを表示する専用表示器は、PLC と 1 対 1 で接続することが一般的であり、お客様ごとに表示器を開発するケースも多く、開発費やランニングコストが高くなるという課題があった。またタブレットやスマートフォンから機械のリモート監視を行いたいというニーズもあった。

今回、これらの課題解決とお客様のニーズに応えるため Web サーバー^{注1)}機能を開発し、商品化した。

注1) Web サーバー：スマートフォンやパソコン等から送られたリクエストに対して情報を返す役割を持ったソフトウェア

2 特長

お客様のシステムで Web サーバー機能を活用することにより、以下のようなメリットを享受することができる。

(1) 専用表示器レスによるコストダウン

機器毎に取り付けていた専用表示器をタブレット等に集約することで、お客様システム全体のコスト低減が可能となる。

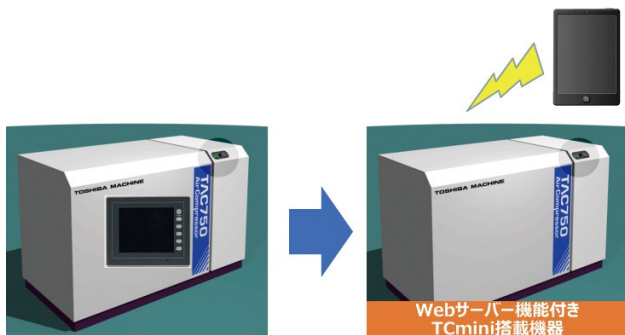


Fig. 1 専用表示器レスによるコストダウン

(2) リモート監視システムの容易な構築

外付けサーバー不要の安価なリモート監視システムの構築が可能である。PLC 内部データをタブレットやスマートフォン、パソコン等の標準ブラウザから読み書きすることで、離れた場所から機器の運転状態の確認や操作を行うことができる。

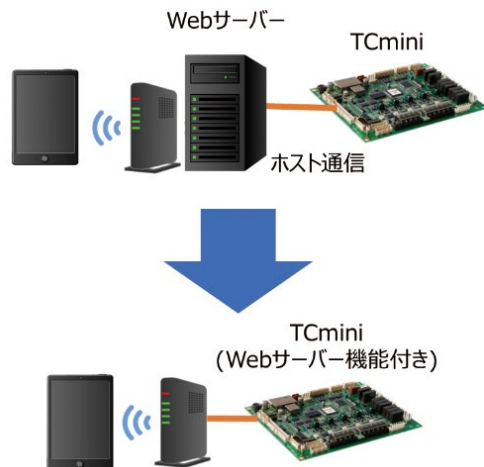


Fig. 2 リモート監視システムの容易な構築

(3) 複数機器の一括監視

同じネットワーク上にある機器であれば、ブラウザからボタン一つで接続機器の切り替えを行うことができる。

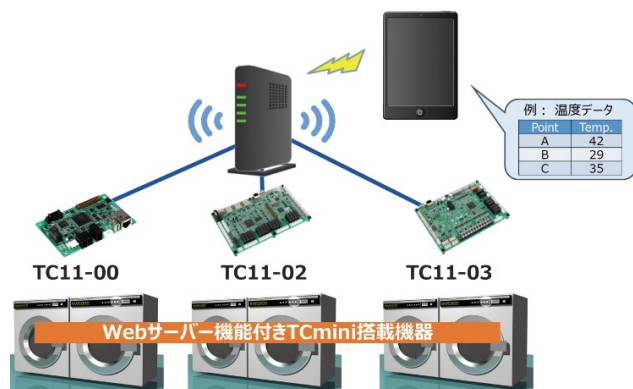


Fig. 3 複数機器の一括監視

(4) 表示画面のカスタマイズ

HTML や JavaScript を用いてプログラミングすることで画面のカスタマイズが可能である。カスタマイズすることでユーザビリティや作業効率を向上することができる。

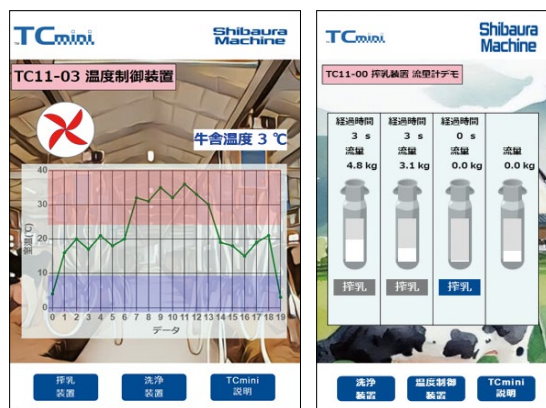


Fig. 4 表示画面のカスタマイズ

3 仕様

搭載可能 TCmini シリーズ:TC11 シリーズ

使用ポート:有線 LAN ポート

推奨ブラウザ:Google chrome, Safari, Microsoft Edge

同時接続台数:最大 3 台

データ通信間隔:最短 100ms

Ethernet 通信との併用:可能(プログラミングツール、Modbus TCP)

制御動作への影響:表示器通信と同程度

4 事例

2024 年 4 月に Web サーバー機能搭載 TC11-00 を商品化した。標準画面では、PLC 内部データの読み取り、書き込みを行うことができる。



Fig. 5 TC11-00

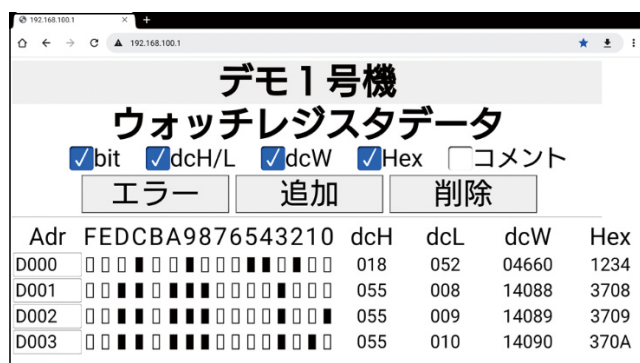


Fig. 6 Webサーバー機能付きTC11-00 標準画面

【採用事例】

産業機器:コンプレッサー

5 おわりに

今回開発した Web サーバー機能は、TCmini の可能性を広げ、お客様のシステム全体の IoT 化やコストダウンに貢献する機能である。今後、Web サーバー機能の搭載機種を増やし、TCmini のさらなる拡販を推進していく。

双腕協働ロボット RIDRS-H/RIDRS-S の紹介

1 概要

昨今の労働力の不足や人件費の高騰を背景に、人に近い動作・作業内容・作業環境での利用を想定した、人と協調・共存することを目的とした協働ロボットの需要が年々高まっている。協働ロボットは、自動車関連部品の組立・搬送・検査工程や、人が行ってきた単純作業の自動化を進める手段として、電気・電子関連、物流関連のハンドリング・装置へのロード・アンロードなど、多種多様な用途での採用が期待されている。今後も高い成長率が見込まれている協働ロボットを開発したので紹介する。

2 特徴

2.1 特長

ヒト型双腕協働ロボット RIDRS-H (Fig. 1) は、人の上半身(首を除く)と同じような片腕 7 軸と腰 2 軸の合計 16 軸を有しており、人と同じスペースで作業現場に配置できる点が特徴である。人の作業は、腰の旋回による作業領域の切り替えや、のけぞり・屈む動作で無意識にスペースを有効活用しており、RIDRS-H は、これらの人に近い動作を実現して (Fig. 2、Fig. 3)、自動化装置大型化の抑制に寄与している。

スカラ型双腕協働ロボット RIDRS-S (Fig. 4) は片腕 4 軸と腰の旋回軸の合計 9 軸を有しており、従来のスカラロボット 2 台設置では実現が難しい機械部品の両手配膳作業や、セル生産装置の小型化に対応している。

また人との協調・共存のため、トルクセンサやモータ電流値の監視等により、人との接触を検知して停止する安全機能を標準装備している。ロボットプログラミングについては、ビジュアルプログラミング (Blockly) で直感的に構造を理解することができ、専門知識がなくてもプログラミングすることが可能である (Fig. 5)。ティーチングペンダントは市販のタブレットで利用できるようにした。



Fig. 1 RIDRS-Hの外観

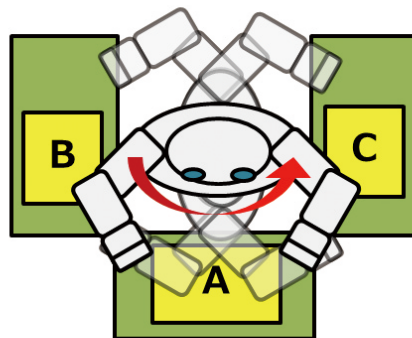


Fig. 2 腰の旋回による作業領域の切り替えイメージ

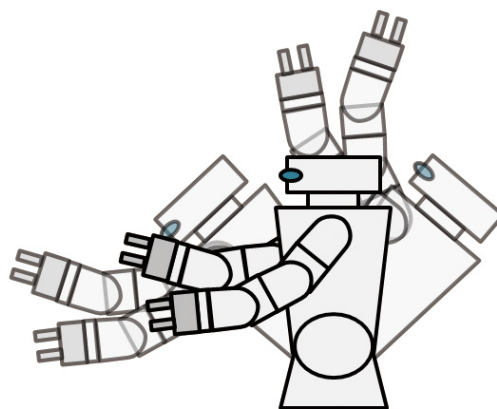


Fig. 3 のけぞり・屈み動作イメージ



Fig. 4 RIDRS-Sの外観

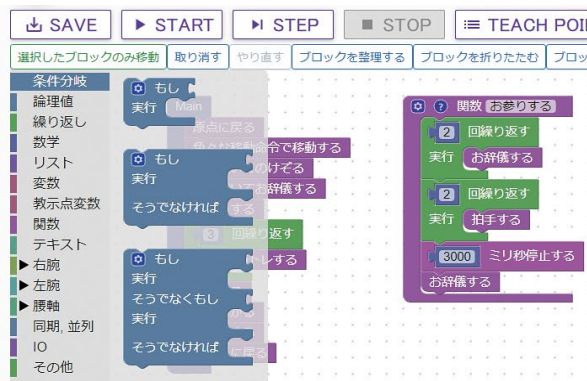


Fig. 5 ビジュアルプログラミング言語「Blockly」

2.2 仕様

双腕協働ロボット RIDRS-H/RIDRS-S の仕様は Table 1 の通りである。

Table 1 RIDRS-H/RIDRS-Sの仕様

型式		RIDRS-H	RIDRS-S	単位
軸構成		16	9	—
リーチ長（全長）		750		mm
最大動作半径		1,075	812	mm
動作範囲	JB1 軸(腰)	±170	±164	°
	JB2 軸(腰)	-60~+30	—	°
	第1 軸(R)	-90~	-140~+40	°
	第1 軸(L)	+75	-40~+140	°
	第2 軸(R)	±120	-50~+140	°
	第2 軸(L)		-140~+50	°
	第3 軸(LR)	±120 (°)	-290~0 (mm)	mm
	第4 軸(LR)	±170	±360	°
	第5 軸(LR)	-120~+100	—	°
	第6 軸(LR)	±180	—	°
	第7 軸(LR)	±90	—	°
最大速度 ※1	JB1 軸(腰)	80	187.5	°/s
	JB2 軸(腰)	80	—	°/s
	第1 軸(LR)	180	300	°/s
	第2 軸(LR)	180	300	°/s
	第3 軸(LR)	180 (°/s)	1,500 (mm/s)	mm/s
	第4 軸(LR)	180	1,500	°/s
	第5 軸(LR)	180	—	°/s
	第6 軸(LR)	220	—	°/s
	第7 軸(LR)	180	—	°/s
	合成	6,873	8,300	mm/s
定格可搬質量		1		kg
最大可搬 質量	片腕※3	6		kg
	両腕※3	10		kg
位置繰り返し精度※4		±0.05		mm
本体質量※5		279	257	kg
適用コントローラ		RIDRS-HC(ヒト) RIDRS-SC(スカラ)		—

※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：協働運転時の最大速度。準静的接触が想定される場合は最大速度 50mm/s に設定する必要がある。

※3：片腕ずつで搬送する場合でも、ロボットが把持する質量の合計は 10kg 以下とする必要がある。

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

※5：ロボット本体、コントローラ、架台の合計重量である。

2.3 効果/事例

基板検査工程への RIDRS-H 導入事例を Fig. 6 に示す。コンテナに詰めた検査前の基板を取り出し、作業台へ搬送。作業台ではビジョンカメラを使用してシリアルナンバーの確認や外観の検査等を実施し、自動検査装置へ搬送。自動検査装置では I/O や電源の通信電圧確認等の検査を実施し、合格品を検査後基板のコンテナへ、不合格品は NG 品置き場へ搬送するシステムである。本システムは占有面積が人による作業スペースと同等となっており、検査前基板・検査後基板を入れるコンテナは人による作業時と同じ物を流用している。また、基板をコンテナから取り出し、作業台へ搬送する際には、左右の腕でワークを持ちかえる動作を行い、治具レスで基板の向きの変更を可能としている。省スペースかつフレキシブルな動作により、人による作業からの置き換えを実現している。

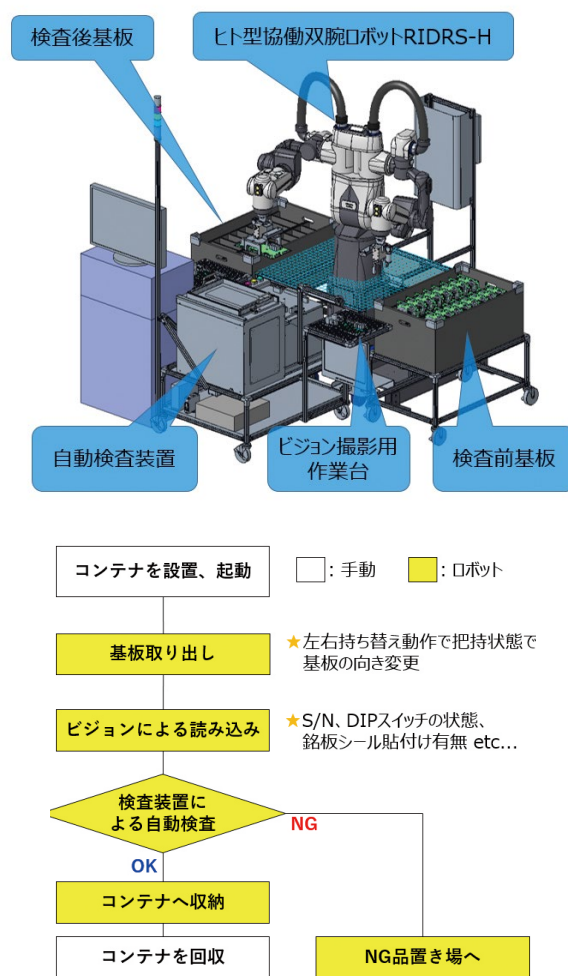


Fig. 6 RIDRS-H基板検査工程導入事例

3 おわりに

双腕協働ロボット RIDRS-H/RIDRS-S の導入によって、人の作業からの置き換えによる生産性・安全性の向上、人材活用などがもたらされ、様々な現場での利用が期待される。今後は双腕協働ロボットの技術や活用方法のブラッシュアップを行い、自動化システムの提案を推進し、さらなる顧客満足の最大化に努めていく。

芝浦機械の射出成形機

私たちの身の回りにはさまざまなプラスチック製品が数多くある。日用・雑貨品を始め、家電・自動車・医療など多くの分野で使われている。プラスチック製品を大量生産する成形方法として、「射出成形」「押出成形」「ブロー成形」など多くの工法があるが、経済産業省の統計によると“成形機械の生産量”としては、射出成形機が8割以上であり、最も大きな割合を占めている¹⁾。

射出成形は、熔融した樹脂(プラスチック)を大きな力で閉じられた金型の中に高压で射出した後に冷却・固化させて、金型を開き成形品を取り出すという工程を持った成形方法である。押出成形のような連続成形ではないが、大量生産に向けた生産設備と言える。

「中ぐり盤」が17世紀に発明された工作機械と比較すると射出成形機の歴史は非常に浅い。1872年に製造されたセルロイドのための型成形機が最初と言われている。その後、1920年代ドイツで横型の射出成形機が開発された²⁾。日本で現存する射出成形機としては、2014年に化学遺産に認定されたIsoma射出成形機で1943年に潜水艦で運ばれてきたとのことである³⁾。

芝浦機械(旧 東芝機械 以下、当社)では、1956年の初号機完成以降、70年近く、射出成形機の開発・製造・販売・サービスを行っている。本稿では、当社の射出成形機の変遷とともに、成形品質を高める上で重要な要素である、プログラム射出制御とスクリュに関する経歴について記載する。



芝浦機械エンジニアリング(株)
重機械部(技術士 機械部門)

佐藤 和人

1 初期の射出成形機

1.1 射出成形機の黎明期

当社におけるプラスチックとの関わりは、1952年に電線被覆用として押出成形機の初号機が完成してからである。(Fig. 1) その後、1955年に塩ビパイプ用押出機TSシリーズがお客様に納入された。この押出成形機の性能が非常に良かったことから、お客様より“こんな良い機械が作れる会社なら、射出成形機も作れるだろう”という製作の依頼があった。これが、当社における射出成形機開発の契機となった。

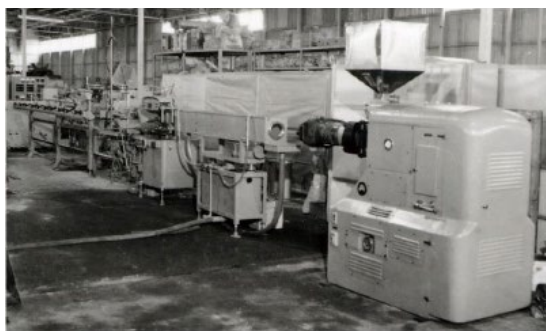


Fig. 1 押出成形機 初号機:65mm単軸機

1956年に初号機である20-450Sが完成した。初号機は、油圧式射出成形機で、型締装置は直圧式(型締力450トン)であった。金型の高速移動時のために、ブーストシリンダを内蔵していた。(Fig. 2)

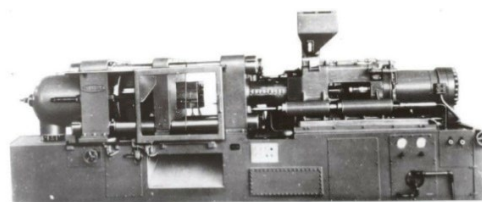


Fig. 2 射出成形機 初号機:20-450S

射出装置の機構としては、Fig. 3に示すプランジャ式と呼ばれるもので定量の樹脂を加熱筒内に送り込みプランジャで樹脂を押して加熱筒内のトービードを介して樹脂を溶解して金型内に射出する方式であった。射出量は20oz(オンス 約570g)であった。

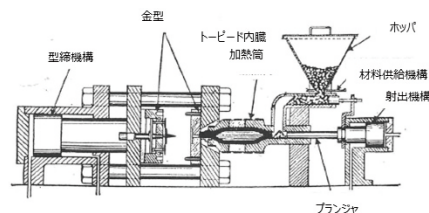


Fig. 3 プランジャ式射出成形機⁴⁾

初号機に続き、1957年には、型締装置側にプレフィルバルブ機構を組込んだ24/36-450Sを開発した。(Fig. 4)

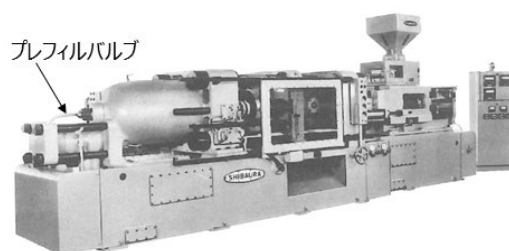


Fig. 4 24/36-450S 外観

1958年には、型締側をトグル機構とした、12/16-300T という小形機を開発した。Fig. 5に外観と構造を示す。

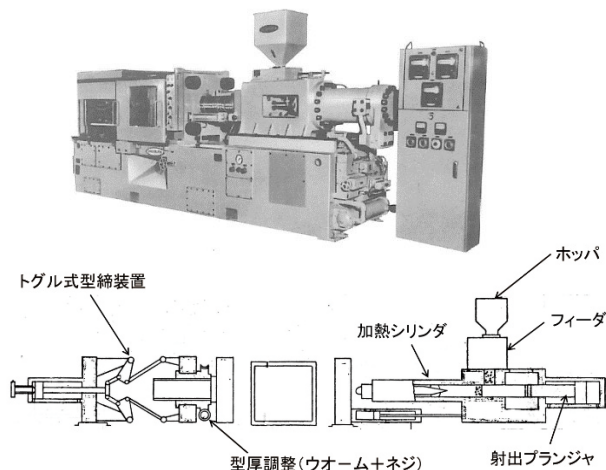


Fig. 5 12/16-300T 外観と構造

当社は、1960年バッテンフェルド社と技術提携を実施して“芝浦バッテンフェルド機”の製造・販売を1961年より開始した。(Fig. 6)この成形機は全電動式で型締側は、電動機の回転運動からトラクションバーを介したトグル機構により型開閉の往復運動に変換する構造を有し、射出側は電動機の回転運動をリンク機構でクッションプレートの往復運動に変換する構造を有していた。樹脂の溶融はスクリュ・プリプラ部で行っていた。射出の構造図をFig. 7に示す。BSM機は6機種がシリーズ化され、国内のみならず、東南アジアへも輸出され、1964年には累計販売台数1,000台に達した。

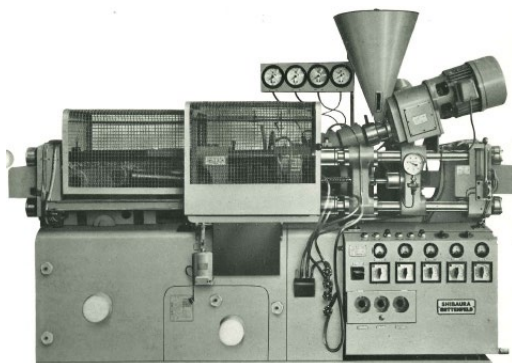


Fig. 6 バッテンフェルド機BSM40S-VP

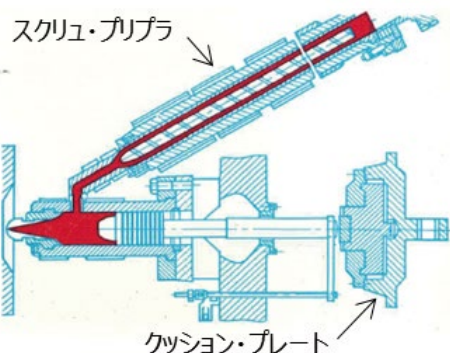


Fig. 7 BSM機の射出側構造図

BSM機の販売が行われていた頃、市場では樹脂開発が進み、加熱筒内にトービード^{注1)}を有して樹脂溶融を行っていたプランジャ式では成形ができないという問題が出てきた。欧米では、可塑化能力の向上も求められていたため、プランジャ式からインライン・スクリュ式への移行が始まっていた。しかし、当時の日本ではインライン・スクリュ方式にはなっていなかった。当社はインライン・スクリュ方式が開発されるまでの対応として、既存のプランジャ式にバッテンフェルド社のスクリュ・プリプラ装置を取付けることを実施した。Fig. 8に示す“プリプラ・プランジャ機”の60VP-450Sがそれである。

注1) トービード：細い流路を持ち、樹脂を均一に加熱溶融させる雷(トービード)形の部品

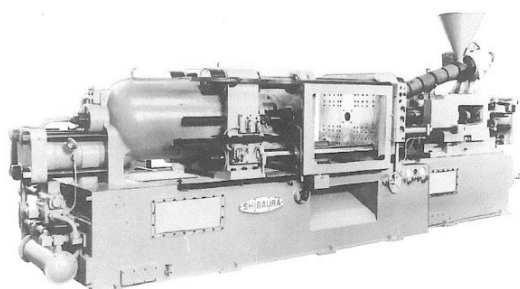


Fig. 8 プリプラ・プランジャ機 60VP-450S

1.2 インライン・スクリュ式射出成形機

1963年、“インライン・スクリュ (Inline Screw)”から命名された、ISシリーズ (IS800、IS500、IS300) が発表された。Fig. 9にIS300を示すが、型締機構は油圧の直圧式であり、射出側のスクリュ回転駆動は電動機から減速歯車を介して行われた。

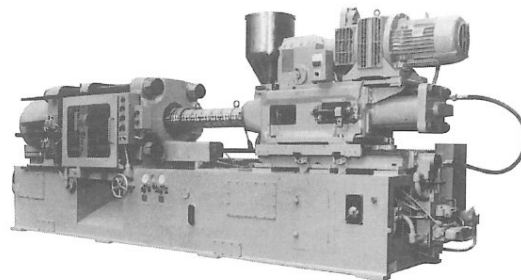


Fig. 9 インライン・スクリュ機 IS300

インライン・スクリュ式の機構をFig. 10に示す。加熱バレル内のスクリュが回転することで樹脂は溶融しながら前方へ移送され逆止弁を備えたスクリュの前方に“計量”された後に、設定量に達すると計量完了となり、次のサイクルで金型内に射出されることになる。

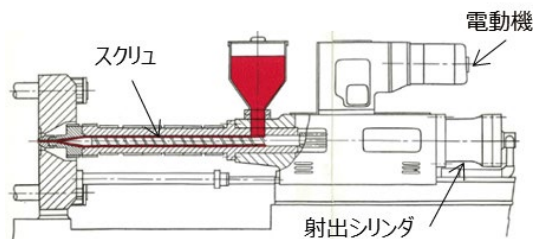


Fig. 10 インライン・スクリュ式 射出装置⁴⁾

以上が当社における射出成形機の黎明期とインライン・スクリュ式射出成形機が開発されるまでの経緯であるが、全電動式射出成形機、型締装置では直圧式その他、トグル式の開発も実施してきた。また、射出側では、プリプラ・プランジャ式の開発も行ってきた。いろいろな方式の中で自社工場にて鋳物設備と大形工作機械による部品加工が可能なことなどから、総合的な判断により IS シリーズの型締方式として、直圧式が採用された⁴⁾。

2 油圧式射出成形機 ISシリーズ

IS 機他、機種名には、型締力が記載されるが、複数の機種をまとめて表記する場合は、下表 (Table 1) のように分類している。これは、IS-G シリーズ時点での分類である。

Table 1 射出成形機の型締力による分類

分類名	型締力範囲 (トン)	参考
超精密機	30~55	IS-FP
小型機	80~220	IS-G/GN
中型機	280~550	IS-GS
大型機	650~1050	IS-GT
超大型機	1300~3500	IS-DG/DF

なお、2章では、電気式モータを“電動機”と表記とする。これは、油圧式モータとの混同を避けるためである。

2.1 油圧機IS-Aシリーズ

1967年、モデルチェンジが行われ、型締力 50 トンから 2000 トンまでのラインアップによる A シリーズが上市された。630 トン以上で型締シリンダ上部にタンクを有する、オーバーヘッドタンク式であった。(Fig. 11)

その後、IS-A シリーズは IS-AN/AM 機とモデルチェンジが行われて B シリーズに引き継がれた。



Fig. 11 オーバーヘッドタンク式のIS630AN

2.2 油圧機IS-B/Cシリーズ

IS-A シリーズのモデルチェンジ機として 1972 年、IS-B シリーズ (60 ~ 200 トン) が上市され、1975 年には 315 ~ 1250 トンがラインアップされ合計 10 機種となった。IS-B シリーズの大きな特徴は後述するプログラム射出制御装置インジェクトロール® (INJECTROL®) が搭載されたことである。また、スクリュ駆動として、電動機から油圧モータへの変更も行われた。(Fig. 12、13)

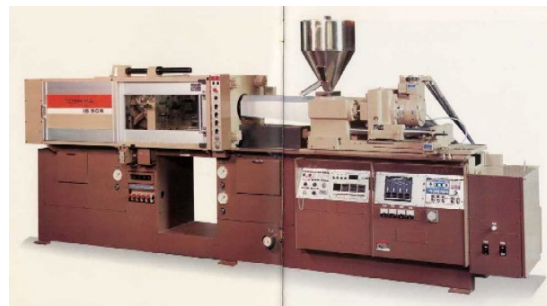


Fig. 12 小型機 IS90B



Fig. 13 プログラム射出制御装置 インジェクトロール® (INJECTROL®)

IS-B シリーズも A シリーズ同様、BN/BNII シリーズにモデルチェンジされた。また、標準仕様として成形機に求められる基本機能に絞った IS-C シリーズも並行して上市された。

2.3 油圧機IS-Eシリーズ

IS-E シリーズは 1982 年より、75 ~ 850 トンまで 10 機種が上市された。(Fig. 14) IS-C シリーズまでは大形機において、オーバーヘッドタンク式が採用されていたが、IS-E シリーズ以降、オーバーヘッドタンク式はなくなり、型締シリンダ下方他に位置することとなった。



Fig. 14 IS100Eの外観

社会的背景として、消費電力の低減が強く求められていた。この要望に応える特徴として、ハイドロマッチシステムがある。(Fig. 15)

これは、“バイナリポンプ”と“圧力マッチ回路”及び“バリエアブル油圧モータ”の装置を備えた油圧システムの総称である。まず、“バイナリポンプ”についてであるが、吐出量の異なる 3 連ポンプを搭載し、必要とされる吐出量指令に応じて、ローディングされるポンプを選択するシステムである。また、“圧力マッチ回路”は、電磁フローコントロールバルブの負荷側圧力に応じて一次側圧力が一定差圧となるようにする油圧回路である。更にスクリュ駆動用油圧モータを可変型 (バリエアブル型) とすることで消費エネルギーの最適化が図られた。このハイド

ロマッチシステムにより従来機より27%省エネになった事例をFig. 16に示す。

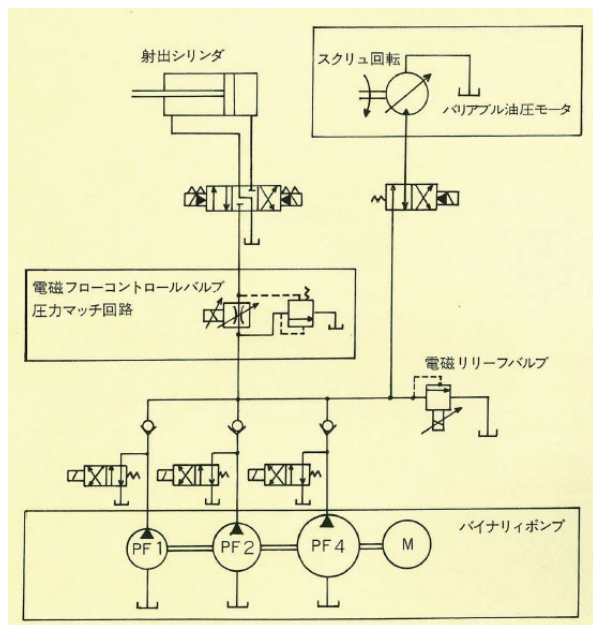


Fig. 15 ハイδροマッチシステム

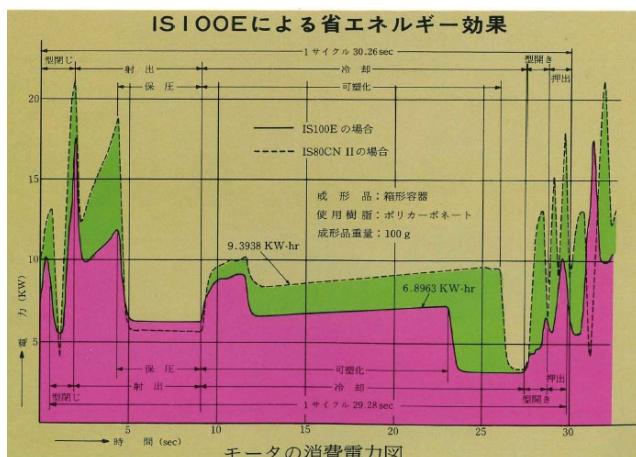


Fig. 16 従来機 (IS80CNII) との比較

IS-E シリーズの小型機 (100 ~ 220 トン) は 1987 年に IS-EN シリーズへモデルチェンジされた。IS-EN シリーズより、標準スクリュとして、“サブフライトスクリュ”が採用された。

2.4 油圧機IS-Fシリーズ

IS-F シリーズは、小型機 (100 ~ 220 トン・4 機種) が 1989 年、中大型機 (280 ~ 850 トン・6 機種) が 1991 年に上市された。(Fig. 17)

コントローラとして、液晶タッチパネルが選択可能になった他、小型機では、油圧ポンプとして2連可変ポンプ (スーパーハイブリッドポンプ) が採用された。このポンプシステムにより更なる省エネとなった。

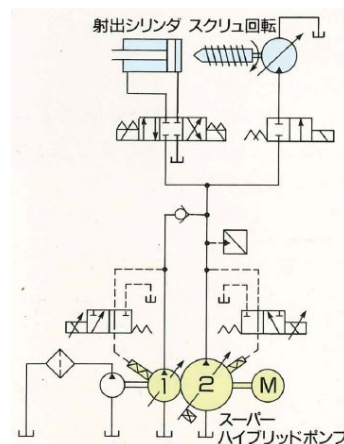
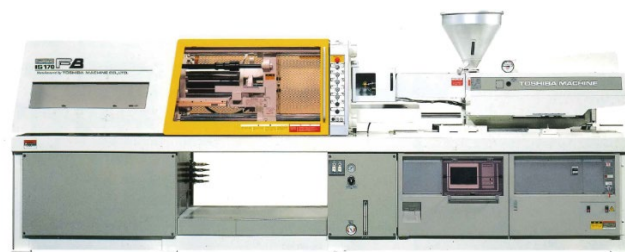


Fig. 17 上: IS170FB (液晶タッチパネル搭載機)
下: スーパーハイブリッドポンプ

2.5 油圧機IS-Gシリーズ

IS-G シリーズは、小型機 (80 ~ 220 トン・5 機種) が 1993 年、中大型機 (280 ~ 850 トン・6 機種) が 1994 年に上市された。(Fig. 18)



Fig. 18 IS80G 外観

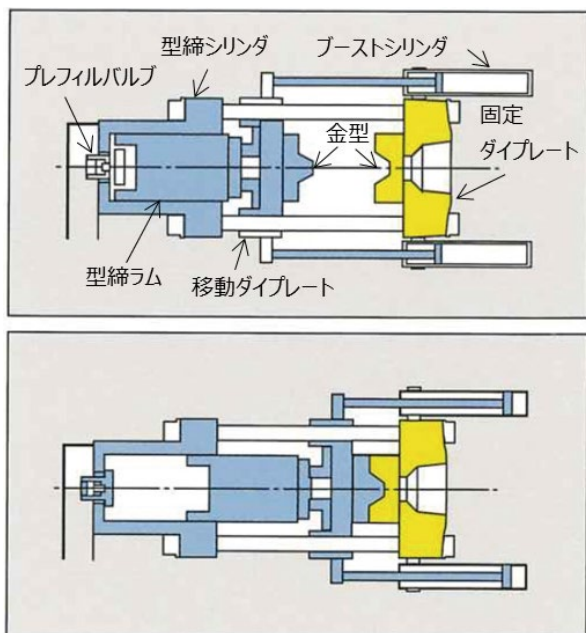
小型機 (100 ~ 220 トン・4 機種) は、1997 年に IS-GN 機へモデルチェンジされた。

IS-G 機の機械的な特徴として、中型機 (IS-GS 機) と大型機 (IS-GT 機) において従来と異なる型締機構を開発した点がある。

中型機 (IS-GS) の外観と型締機構を Fig. 19 に示す。



IS350GS 外観



IS-GS機:上側が型開 下側が型閉の状態

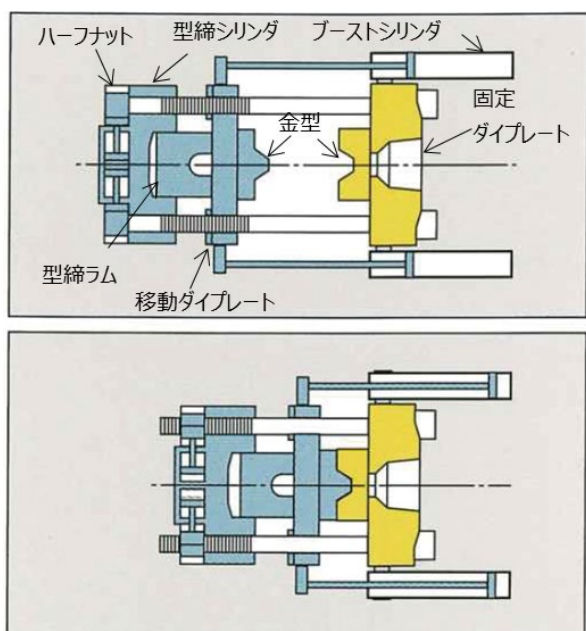
Fig. 19 IS-GS機の外観と型締機構

IS-GS 機では、固定ダイプレートに固定された、プーストシリンダで移動ダイプレートの高速移動を行い、型閉を実施した後、プレフィルバルブを閉じて高压型締を行う方式である。この機構変更によって、機械全長が約 15% 短くなった。

一方、大型機 (IS-GT 機) の外観と型締機構を Fig. 20 に示す。



IS850GT 外観



IS-GT機:上側が型開 下側が型閉の状態

Fig. 20 IS-GT機の外観と型締機構

IS-GT 機では、固定ダイプレートに固定されたプーストシリンダで移動ダイプレートの高速移動を行い、型閉を実施する工程までは GS 機と同様である。その後は、移動ダイプレートの背面側にあるハーフナットが閉じることでタイバーを挟みこむ、タイバーロック方式を採用した点が特徴である。

この方式により、機械全長は 20% 以上、短縮された。IS-G シリーズでは、IS-GN、GS、GT 機で型締圧力保持用の油圧源を必要としなくなったことから、省エネとなった。

油圧式射出成形機 (小型・中大型機) は 2022 年で日本における生産を終了したが、中型機の機構は、インドの現地法人 (SHIBAURA MACHINE INDIA PRIVATE LIMITED) で TX-GS シリーズとして受け継がれている。(Fig. 21)



Fig. 21 インドのTX450GS機 外観

3 超精密成形機 IS-Pシリーズ

3.1 IS-Pシリーズ

超精密部品の成形 (Precision Molding) をするための射出成形機として、IS-P シリーズ (16 ~ 45 トン・3 機種) が 1975 年に上市された。(Fig. 22)

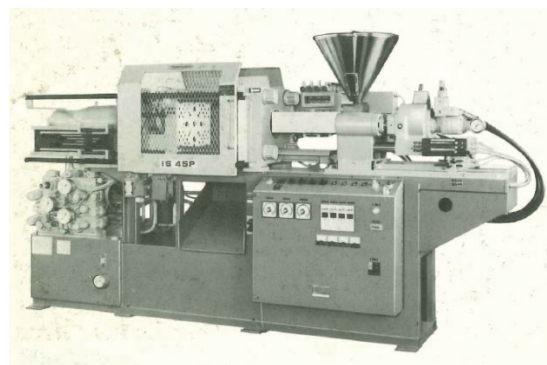


Fig. 22 IS45P 外観

型締装置の高い剛性が精密成形に向いているとアピールした。IS-P シリーズは、IS-PN シリーズにモデルチェンジされた後に IS-EP シリーズへ引き継がれた。

3.2 IS-EPシリーズとディスク機他

IS-EP シリーズは、1983 年に 10 ~ 50 トンの 3 機種がラインアップされた。(Fig. 23)

IS50EP 機をベースとして、専用機として“コンパクトディスク成形機 (IS50EPD)”や“異方性プラマグ成形用の磁場射出成形機 (IS50EPM)”が開発された。



Fig. 23 IS50EP 外観

IS-EP 機は 1987 年、IS-EPN 機(30 ～ 80 トン・3 機種)にモデルチェンジされた後、IS-FP 機となった。

IS-FP 機は 1992 年に上市された後、電動射出成形機・EC シリーズに引き継がれるまで生産された。

4 超大型成形機 IS-Dシリーズ

4.1 ダイレクト・ロック式型締装置

IS シリーズの大型機までは、直圧式型締装置が採用されているが、超大型射出成形機では、ダイレクト・ロック式の型締装置が採用されている。(Direct Lock より IS-D シリーズ)

このダイレクト・ロック式型締装置の開発は、1963 年に遡る。当時、プロトタイプ機として、800 トンのダイレクト・ロック式射出成形機 (IS800D) が開発され、納入先にて問題が無いことを確認した。その後、1965 年に、2200 トンが製作され、客先へ納入された。この IS-D シリーズは 1600 ～ 3500 トンまでの 5 機種が上市された。

その後、改良が加えられ 1976 年、IS-DN 機へモデルチェンジされた。IS-DN シリーズは 1600 ～ 3150 トンの 4 機種に加え、1979 年には、当時としては世界最大の射出成形機である、IS5000DN-400 を完成させた。型締力は 5000 トンでスクレ径は 200mm、射出量としては、23kg で機械全長は 24m、機械幅は 6.3m であった。(Fig. 24)



Fig. 24 IS5000DN-400 外観

IS-DN シリーズは更に改良が加えられ、IS-DE、IS-DF、IS-DG 機へとモデルチェンジが実施された。Fig. 25 は IS1300 DG 機である。

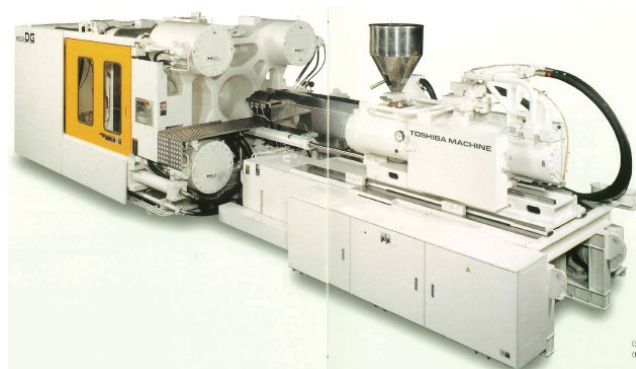


Fig. 25 IS1300DG 外観

4.2 ダイレクト・ロック式の特長

射出成形機の型締方式には大きく分類すると、トグル式、直圧式、複合型締式に大別される。ダイレクト・ロック式は複合型締式に含まれる。3つの方式の比較表を Table 2 に示す。また、型締力の発生経路を比較すると Fig. 26 のように、複合型締式が最も発生経路が短いことがわかる⁵⁾。直圧式に比べ同程度の機械全長で型締力を大きくできる利点がある。(Fig. 27) 構造は複雑にはなるが、機械全長が短くなることや作動油量が少なくなる点などから、超大型射出成形機に向いている構造と言える。

Table 2 型締方式の比較

項目	型締方式		
	トグル式	直圧式	複合型締式
動作速度	速い	トグル式に劣る	トグル式に劣る
型厚調整	面倒	容易	容易
構造	複雑	簡単	複雑
作動油量	少ない	多い	少ない

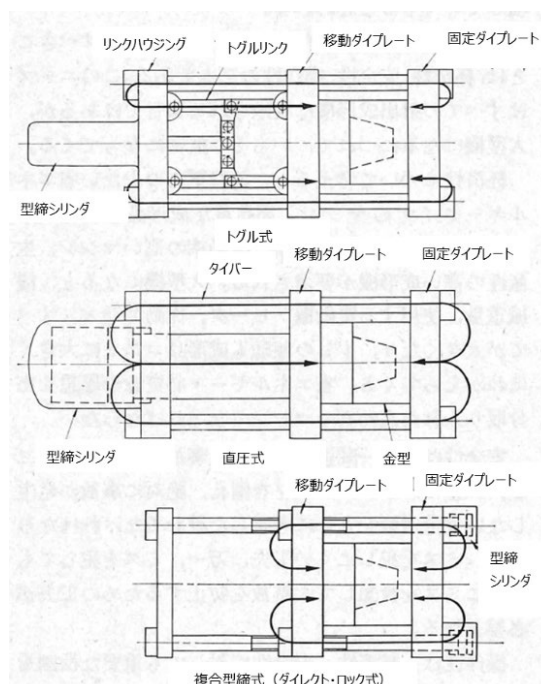


Fig. 26 型締力の発生経路比較

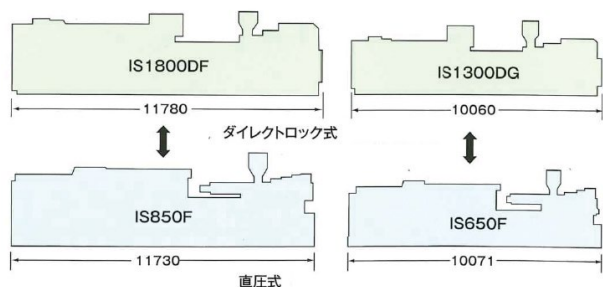
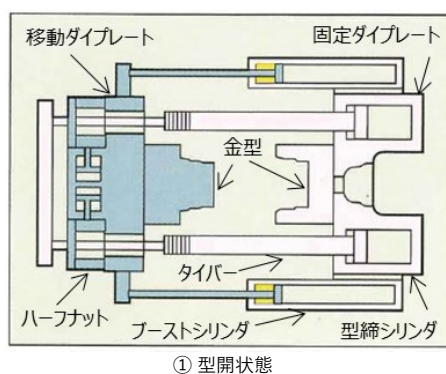


Fig. 27 直圧式との機械全長比較

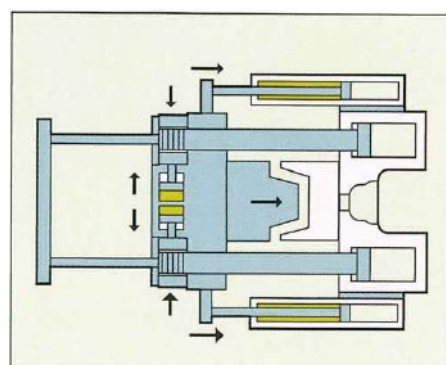
4.3 型締構造・動作

ダイレクト・ロック式型締装置の構造及び動作を Fig. 28 に示す。

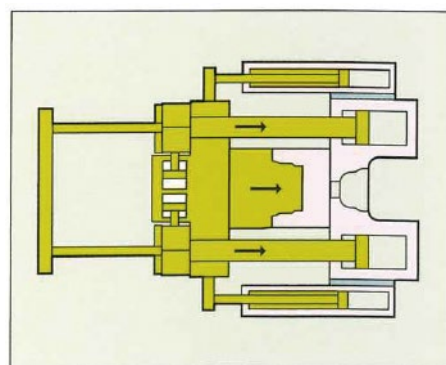
型開の状態①から、固定ダイプレートに取付けられている高速型開用のプーストシリンダで移動ダイプレートが前進動作を開始する。前進動作途中で移動ダイプレートの背面側に取付けられているハーフナットがタイバーのネジ部分に到達するとハーフナットが閉じる。この動作中も型閉じ動作は行われている②。金型が閉じられた後に固定ダイプレート内の型締シリンダで昇圧動作が行われる③。



① 型開状態



② 型閉途中でハーフナット閉じ動作



③ 型閉後 昇圧動作

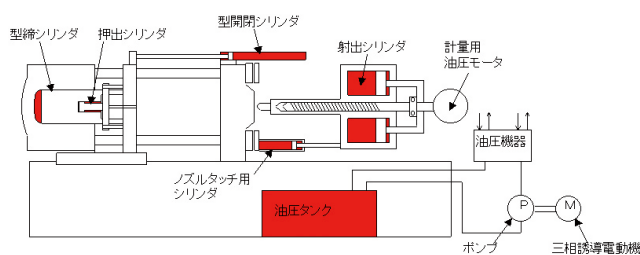
Fig. 28 型締装置の構造と動作

5 電動式射出成形機 ECシリーズ

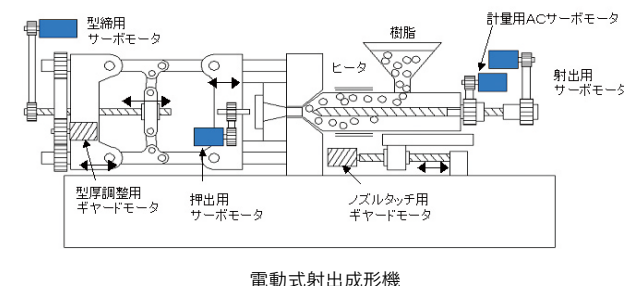
1980年代に電動式射出成形機が射出成形機メーカー他で開発・上市が始まった⁶⁾。電動式射出成形機は油圧式と比較すると以下のような特長がある。

- ① 制御の応答性が早く、繰り返し安定性に優れる。(安定)
- ② 各動作が行われている間だけサーボモータが駆動し、電力量を大幅に削減できる。(省エネ)
- ③ 作動油を使用しないため、油漏れがなく、工場を清潔に保つ。また、消防法の規制外。(クリーン)
- ④ 作動油を使用しないため、作動油を冷却するための水の使用量が大幅に削減できる。(節水)

油圧式と電動式の構造の違いを Fig. 29 に示す。



油圧式射出成形機



電動式射出成形機

Fig. 29 油圧式と電動式の射出成形機

5.1 ECシリーズの開発

当社の電動式射出成形機は1998年に上市された、EC40、60からである。シリーズの名称である“EC”は以下の基本コンセプトから命名された。

- ・ 環境負荷低減を可能にする射出成形機
(Environment Conscious)
- ・ 環境負荷低減成形品を創出する射出成形機
(Ecological Machine)
- ・ ランニングコストの低い射出成形機
(Economical Machine)

ECシリーズは5～850トンまでの11機種がラインアップされ、その後、2002年からEC-Nシリーズ(40～350トン・8機種)にモデルチェンジが実施された。2005年からは更に、20～850トンまでEC-NIIシリーズにモデルチェンジが実施された。EC100の外観を Fig. 30 に示す。



Fig. 30 EC100 外観

ECシリーズの特長として、ACサーボモータの射出応答性ととも射出保圧時の「耐力」の高さが挙げられる。また、ランニングコストの低減に寄与することを油圧機との比較でアピールした。(Fig. 31)

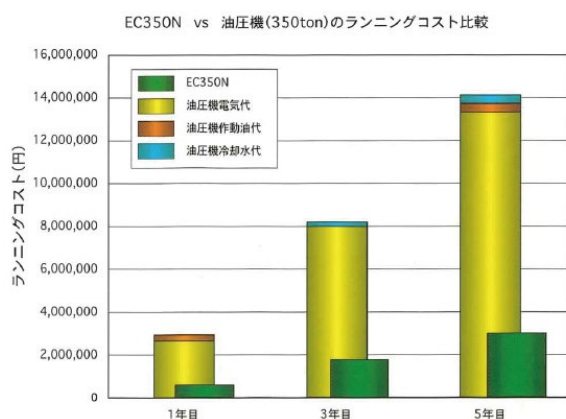


Fig. 31 油圧機とのランニングコスト比較

5.2 ECシリーズのモデルチェンジ

2009年にEC-SXシリーズが上市され、30～2000トンまでの17機種がラインアップされ、SXIIへのモデルチェンジを経て、現在、EC-SXIIIシリーズ(50～3000トン・18機種)が上市されている。(Fig. 32)



Fig. 32 EC-SXIII 外観

電動式射出成形機・EC機は初期型から現行機まで25年の遍歴があるが、この間、環境性能の向上が実施されてきた。具体的には、ドライサイクル^{注1)}：30%短縮、消費電力：13%削減が挙げられる。

注1)ドライサイクル：成形材料を供給せずに射出成形機を基本的な動作で空運転した場合の、1サイクルに要する最小作動時間。

5.3 中国他での生産

海外でEC機を生産を2003年より実施している。中国の現地法人(SHIBAURA MACHINE (SHANGHAI) CO., LTD.)で、EC-Cシリーズ(40～350トン・6機種)の生産を皮切りに、EC-Sシリーズ(30～350トン・9機種)を経て、現在はENAシリーズ(100～230トン・3機種)の生産を実施している。(Fig. 33)



Fig. 33 ENA230 外観

6 プログラム射出制御について

成形品の品質確保のために、プログラム射出制御(射出工程の速度・圧力多段制御)は現在、一般化した基本技術となっている。当社はこのプログラム射出制御へ他社に先駆けて取り組んできた。その開発の経過とともに、コントローラの遍歴について以下に記載する。

6.1 プログラム射出制御の開発

当社では、1969年にコンピュータコントロール射出成形機IS80CXを製作し、射出成形プロセスの研究を始めた。(Fig. 34)

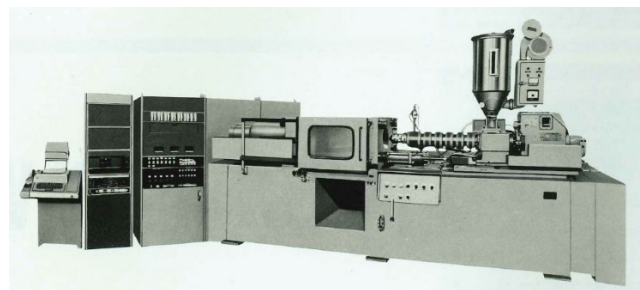


Fig. 34 IS80CX 外観

1971年、インジェクトロール®(INJECTROL®)という名称でベースモデルが完成し、展示会(JAPAN PLAS '72)で発表した。インジェクトロール®を使用することにより、「きわめてむずかしい成形品が容易にハイサイクルで、安定して成形できる」「同じ成形品が1サイズ小型の成形機で成形できる」「不良率が激減した」など、多くの実例が確認された。

開発の成果である特許が1972年に出願され、1984年に成立した。(第1247890号・射出成形機の射出工程制御方法)本特許は1992年、終了した。参考ではあるが、型締装置側の特許(第1008899号)も成立して、クランプロール®(CLAMPROL®)として製品化された。

インジェクトロール®の構成をFig. 35に示す。

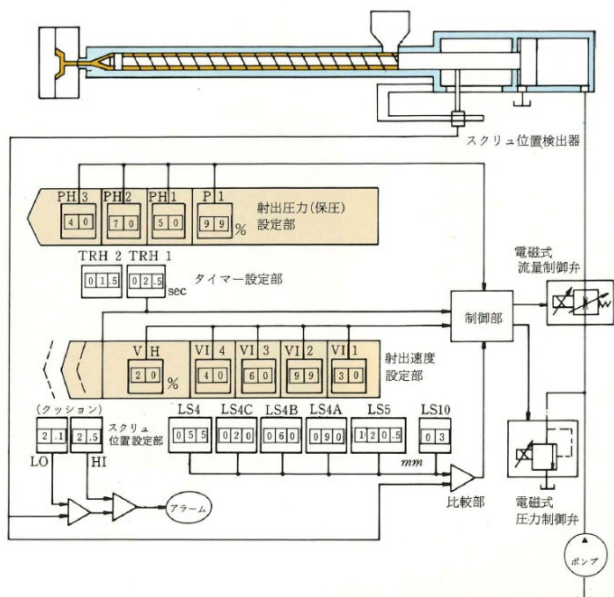


Fig. 35 インジェクトロール® 構成

また、射出速度及び保圧のプログラム制御による効果事例を Fig. 36 に示す。

●射出速度のプログラム制御による効果例

- ゲート周辺のヤケ、シルバーストリークの防止 - ゲートバランスの維持 - 樹脂流動のバランス制御 - 不良率の低減		- ノズル先端部に滞留していた樹脂が、ゲートを通する際は射出速度を下げ、ヤケやシルバーストリークの発生を防ぐ - 樹脂がすべてのゲートを通過した後は射出速度を上げ、不規則な流動によるコア割れなどを防ぐ
- 成形サイクルの短縮 - ガスヤケの防止 - 小さい型枠力で大きな成形品の成形 - 不良率の低減		- 保圧切換えの事前における射出速度の減少によって正圧で安定したバックキックが可能 - ガスヤケの発生する部分の射出速度を下げ、ガスをエアイベントより逃げやすくする
- ヒケの防止 - フローマークの防止		厚肉部や流れが分岐し合流するところでは射出速度を下げ、樹脂流動を安定して押し広げる

●保圧のプログラム制御による効果例

- 残留応力の低減による品質の向上 - ソリ、ヒケ、ウエルドなどの防止		冷却固化の進行にしたいが保圧を下げ、オーバーバックを弱く
- ヒケおよびバリ防止 - 小さな型枠力で大きな成形品の成形		充填完了後いったん保圧を下げ、スキン層がある程度形成された段階で保圧を上げる

Fig. 36 プログラム射出制御の効果例

6.2 コントローラの変遷

インジェクトロール® は、IS-B シリーズに搭載された。その後、改良が重ねられ、IS-EN シリーズでは、オプション仕様として、インジェクトバイザ® (INJECTVISOR®) が準備された。特長として、それまでの機械式デジタルスイッチからステップスイッチへの改良がある。(Fig. 37)

IS-F シリーズでは、初めてタッチ式の液晶ディスプレイ (白黒) を備えた INJECTVISOR® VL が選択可能となった。その後 IS-G シリーズでは、カラー液晶 (INJECTVISOR® V10) となった。電動式射出成形機 EC シリーズでは、INJECTVISOR® V21 からモデルチェンジが進められ、現在では、画面サイズが 19 インチとなった INJECTVISOR® V70 となっている。(Fig. 38)

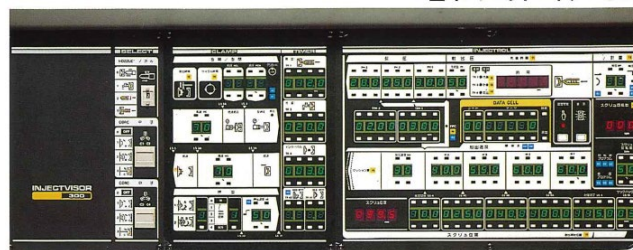
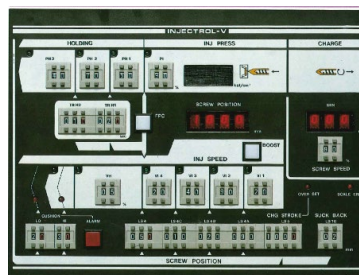


Fig. 37 上: INJECTROL®-V 下: INJECTVISOR® 300



Fig. 38 INJECTVISOR® V70

7 可塑化スクリュについて

射出成形機に使用される部品の中で成形品品質に対して大きな影響を与える要素部品として「可塑化スクリュ」がある。当社では、インライン・スクリュ式射出成形機の開発時から多種・多様な樹脂(プラスチック)に対する可塑化スクリュの開発を行ってきた。

7.1 可塑化スクリュ仕様の決定

インライン・スクリュ式射出成形機を開発する上で最も重要な決定必要事項として、可塑化スクリュのスクリュ径 (D)、長さ (L)、ストローク (S) がある。当時、欧州における傾向としては、スクリュ長さ (L) は直径 (D) の 13 倍 ($L/D=13$) でストローク (S) は 3 倍 ($S=3D$) 程度が妥当であろうとのことであった。当社では、社内に「スクリュ委員会」がつくられ、検討が実施された。エンジニアリングプラスチックなど樹脂の動向、成形

品についての業界ニーズを考慮して、コストは上がるが、 $L/D=20$ 、 $S=5D$ と決定された。 $L/D=20$ は熔融樹脂の可塑性能力と混練性の向上を考慮したもので、 $S=5D$ は最大射出量の増加に寄与した。この仕様数値は、IS シリーズで長く踏襲されることとなった。

$\phi 50\text{mm}$ スクリュを試作し当時の各種樹脂に対してテストを行い、硬質塩ビ(R-PVC)を除き、十分な可塑性性能であることが確認できた。⁴⁾

7.2 標準スクリュと専用スクリュ

IS 機は当初一条ネジであるフルフライトスクリュが標準スクリュであったが、IS-EN シリーズよりサブフライトスクリュが標準スクリュとなった。特長を Fig. 39 に示す。

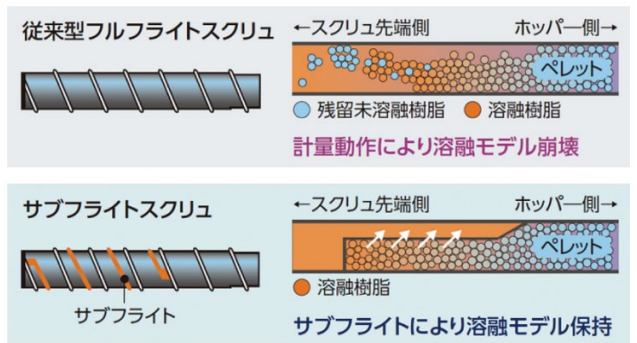


Fig. 39 フルフライトスクリュとサブフライトスクリュ

標準以外に硬質塩ビ用など特殊スクリュが選択可能になっている。また、1980 年代、米国にてオレフィン樹脂のハイサイクル成形でスクリュダメージが発生するクレームがあったことから、オレフィン系用スクリュの開発も行われた。特殊スクリュのリストを Table 3 に示す。

Table 3 特殊スクリュリスト

形式	DBG	DBC	ESB	SRB	GN4	EPS3	ETIII
目的	汎用	硬質塩ビ用	高吐出	超安定	PMMA用	安定 付着低減	汎用
特長			オレフィン系	精密成形用	黄変抑制 シルバー抑制	炭化物抑制	
スクリュ径 (mm)	22~160	25~160	60~160	22~55	22~45	22~45	22~160
成形品	OA機器 自動車部品 コネクタ	継手 建材	自動車部品 家電部品	CDケース メディカル 精密成形品	導光板 レンズ	コネクタ	自動車部品 家電部品
樹脂	難燃ABS エンブラ PP・PE	PVC	PP PE	ABS PBT	PMMA PC	PA PBT POM	PP ファイラ成形

8 おわりに

以上の変遷まとめを Table 4 に示す。現在も国内では、1 万台以上の当社製射出成形機が稼働している。射出成形機自体は汎用的な産業機械ではあるが、お客様に喜んでいただける射出成形機を作り続けてゆく。

本稿を作成する上でいろいろな資料をご提供頂きました皆様に感謝します。

参考文献

- 1) 経済産業省生産動態統計年報 機械統計編
- 2) 瀬戸正二監修、射出成形 第 8 版(1984)、P20、21、プラスチック・エージ社
- 3) 田島慶三、化学と工業、Vol.67-7, July 2014
- 4) 曾根忠利、射出成形機と出会い 57 年 プラスチックスエー ジ Sep. 2015, P109 - 113
- 5) 湯川真悟、大型化の追求とその効果 プラスチックス 1980- 5, Vol.31, No.5 P57 - 61, 98
- 6) 稲葉善治 電動サーボ式射出成形機 精密工学会誌 Vol. 66, No.10, 2000, P1528 - 1532

Table 4 当社 射出成形機の変遷まとめ

方式	機種シリーズ	1950年代	1960年代	1970年代	1980年代	1990年代	2000年代	2010年代	2020年代
油圧式	初号機：20-450S	●							
	芝浦・パッテンフェルド機(BSM)		●●						
	IS シリーズ		●●●						
	IS-A/AN/AM			●	●				
	IS-B/BN/BN II			●	●●				
	IS-C/CN/CN II			●	●●				
	IS-E/EP/EPN/EN				●	●●			
	IS-F/FX/FP				●	●●	●		
	IS-G/GN					●	●●	●	
超大型	IS-GS/GT					●	●●	●●	●
	IS-DN			●	●	●	●●	●●	●
	IS-DE				●	●	●●	●●	
	IS-DG/DF					●	●●	●●	
電動式 (大型)	EC シリーズ					●	●●	●●	
	EC-N/N II					●	●●	●●	
	EC-C						●	●●	
	EC-S/SX/SX II/SX III						●	●●	
	ED シリーズ						●	●●	●
【制御関係】									
	シーケンス制御	●							—
	プログラム射出制御			●					
	・ボリューム・デジSW他			●	●●	●			
	・タッチスクリーン式				●	●●			
【スクリュ関係】									
	フルフライトスクリュ：ET・GN		●						—
	バリアスクリュ：DBG他				●				—

特許・社外発表（講演）・社外発表（執筆）

（2023年10月～2024年9月）

国内特許

	登録番号	発明者	発明の名称
1	7365318	土屋 康二，室伏 勇	被加工物の加工方法
2	7372882	福田 将彦，田中 克敏	スラリー供給装置、 スラリー供給方法及びスラリー生成方法
3	7381262	鈴木 智博	磁極位置推定装置及び磁極位置推定方法
4	7382047	笹井 裕也，飯塚 佳夫，長田 華穂，瀧 健太郎 ^{*1}	繊維強化複合材料の製造方法
5	7387082	渡辺 勇一，水上 雄太，萩原 拓也，鈴木 哲郎	搬送装置及び搬送方法
6	7387083	渡辺 勇一，水上 雄太，萩原 拓也，鈴木 哲郎	搬送装置及び搬送方法
7	7397451	鮫島 孝文，飯塚 佳夫，長田 華穂，清水 博 ^{*2}	導電性複合材料の製造方法
8	7412695	柿沼 康弘 ^{*3} ，大和 駿太郎 ^{*3} ，伊東 隆充，藤田 純， 松崎 敬彦，澤崎 誠	工作機械、数値制御装置および振動抑制方法
9	7417503	秋山 貴信，室伏 勇	加工機、計測装置及び被加工物の製造方法
10	7419026	佐賀 千尋	数値制御装置および工作機械
11	7430504	福山 聡，栗原 義明，難波 武志，能勢 功一 ^{*4}	表面処理装置
12	7431297	大石 真伸，安倍 賢次，岡本 暢彦	スクリュ機械及び混練方法
13	7431518	風間 拓朗，内田 拓実	ロボットシステム及びロボットシステムの制御方法
14	7433026	水沼 巧治，桶 亮太	成形ロールの温度制御装置
15	7446925	江越 正大，勝又 和浩，風間 拓朗	ロボットシステム
16	7449706	熊谷 拓隆，山田 雅大，山下 知和	集塵システム
17	7470224	辻 眞，豊島 俊昭，佐々木 博成，山崎 悠生， 野田 三郎 ^{*5}	成形機
18	7472079	土屋 康二	工作機械の回転軸中心位置計測方法
19	7479910	加藤 孝一，松崎 敬彦，青木 稔尚	摩擦攪拌接合アタッチメント、摩擦攪拌接合ヘッド、 摩擦攪拌接合装置、および摩擦攪拌接合方法
20	7482675	加藤 孝一，松崎 敬彦，青木 稔尚	摩擦攪拌接合アタッチメント、摩擦攪拌接合ヘッド、 摩擦攪拌接合装置、および摩擦攪拌接合方法
21	7482723	市岡 大志，杉山 武史，加藤 孝一	工作機械
22	7483514	横山 宏司，早川 直哉	ダイカストマシン
23	7499075	屋城 正樹	ダイカストマシン
24	7504605	山口 智則，萩原 拓也，水沼 巧治	延伸フィルム製造装置
25	7507081	大石 真伸，片平 利彰	スクリュ機械
26	7510282	本田 友恒	給湯装置およびダイカストマシン
27	7510476	金子 健太郎，藤岡 俊治，三田 哲也	ダイカストマシン
28	7520755	浅沼 伸行	射出成形機の制御方法及び射出成形機
29	7520756	浅沼 伸行	発泡成形方法、発泡成形用射出成形機の制御方法及び 発泡成形用射出成形機
30	7522739	辻 眞，林 勇人，野田 三郎 ^{*5}	ダイカストマシン
31	7527092	三宅 倫弘，芹澤 光明，和田 享司	間欠塗工方法および間欠塗工装置
32	7530746	山崎 晋平，山田 大輔	ダイプレート面加工機
33	7531188	尾原 正俊，瀧 健太郎 ^{*1} ，木田 司 ^{*1}	押出成形機の異常検出装置
34	7531336	榎本 潤	射出成形機およびその制御方法
35	7538841	三田 哲也	成形機用コントローラ及び成形機
36	7553456	福山 聡，栗原 義明，難波 武志，能勢 功一 ^{*4}	表面処理装置
37	7555832	加藤 孝一，松崎 敬彦，青木 稔尚	摩擦攪拌接合アタッチメント、 摩擦攪拌接合ヘッドおよび摩擦攪拌接合装置

*1 国立大学法人金沢大学、*2 株式会社HSP テクノロジーズ、*3 慶応義塾大学、*4 ㈱真空プラズマ、*5 野田テクノロジー

	登録番号	発明者	発明の名称
38	7555833	加藤 孝一, 松崎 敬彦, 青木 稔尚	摩擦攪拌接合アタッチメント、 摩擦攪拌接合ヘッド、および摩擦攪拌接合装置
39	7557416	伊谷 慎也, 田中 克敏, 三塚 晴也	工作機械及び工作機械の腐食低減方法

社外発表「講演」

	題 目	発表者代表	講演会名	主催者	講演日
1	高機能フィルム展2023 ブース内プレゼン資料	鈴木 照三	高機能フィルム展	RX Japan(株)	2023/10/4
2	シート・フィルム製造装置	杉山 淳史 土屋 匠 寺川 京佑	ファインテックジャパン	RX Japan(株)	2023/10/4
3	自社ブースでの延伸機紹介 「高機能フィルム成形への取り組み」	加藤 浩明	高機能フィルム展	RX Japan(株)	2023/10/4
4	高せん断加工装置HSE-48のご紹介	笹井 裕也	高機能フィルム展	RX Japan(株)	2023/10/4
5	ロールツウロール式UV転写装置	萩原 明彦	高機能フィルム展	RX Japan(株)	2023/10/4
6	ダイカストマシンの機能と性能	相田 悟	アルミニウム casting 講座Ⅲ	(公社) 鋳造 工学会東海支部	2023/10/6
7	最新の精密加工について	福田 将彦	MECT2023	(株) ニュース ダイジェスト社	2023/10/18
8	芝浦機械(株)における健康管理の取り組み について	矢野 恵子	芝浦機械(株)における健康 管理の取り組みについて	(学) 青洲学園 東都大学	2023/10/27
9	超精密加工に求められる精度と適用事例	福田 将彦	中国四国支部・九州支部 共催広島地方講演会	(公社) 精密 工学会	2023/11/9
10	シミュレーションにおけるベイズ推定の活用	笹井 裕也	第1回 データ駆動生産 プロセス実践講座	(大) 金沢大学 瀧研究室	2023/11/21
11	Comparison of Vacuum Ultraviolet Light Irradiation and Plasma Treatment as Pretreatment of Direct Copper Seed Layer on Cycloolefin Polymer	清水 昭宏 (ウシオ電機) 深田 和宏 (共著)	The 44th International Symposium on Dry Process	The 44th International Symposium on Dry Process Organizing Committee	2023/11/22
12	高せん断加工装置HSE-48のご紹介	笹井 裕也	IPF Japan 2023 芝浦機械 ブース内プレゼン	国際プラスチック フェア協議会	2023/11/28
13	二軸混練押出機(TEM) 最新の取組に ついて	鈴木 照三	IPF Japan 2023 芝浦機械 ブース内プレゼン	国際プラスチック フェア協議会	2023/11/28
14	環境負荷低減に対応する射出成形技術	浅沼 伸行	IPF Japan 2023 芝浦機械 ブース内プレゼン	国際プラスチック フェア協議会	2023/11/28
15	ロボット・FAコンポーネント技術とシステムエ ンジニアリング力の融合で生産性向上に貢献	板垣 章宜	食品工場の身近なSDGs! 100名限定無料セミナー	Robots Town(株)	2023/11/28
16	二軸押出機のデジタルツインに向けたセンシ ングとシミュレーション、データ解析技術の開発	尾原 正俊	成形加工学会シンポジア 2023	(一社) プラスチ ック成形加工学会	2023/11/28
17	双腕協働ロボットRIDRSシリーズ	矢部 幸次	2023国際ロボット展 出展者セミナー	(株) 日刊工業 新聞社	2023/11/29
18	二軸押出機を用いた繊維強化コンパウンド の最適混練場の研究	鈴木 照三	二軸押出機を用いた繊維 強化コンパウンドの最適混 練場の研究	(一社) プラスチ ック成形加工学会	2023/11/29
19	密着性に優れた中真空PVD導体層による 微細回路形成	深田 和宏	表面改質展2023 表面改質 技術の最前線セミナー	(株) 日刊工業 新聞社	2023/11/30
20	Prediction of fatigue limit and its variation for spheroidal graphite cast Iron in various stress	鈴木 優海 (東京都市大学) 白木 尚人 (東京都市大学)、 藤本 亮輔 (共著)	16th Asian Foundry Congress	(公社) 日本鋳造 工学会	2023/12/3

	題 目	発表者代表	講演会名	主催者	講演日
21	THE GAME CHANGER ゼロ回転エアスピンドル	福田 将彦	高精密加工技術研究会 第3回運営開発会議	(公財)科学技術 交流財団	2023/12/4
22	摩擦攪拌接合を取り込んだ工作機械の現状 と展望	相原 正美	産学官協働ローカルイノ ベーション創出事業マテリ アル・プロセス研究会第2回 マルチマテリアルWG	富山県産業 技術研究開発 センター	2023/12/8
23	有機EL光取り出し向上に向けた ナノインプリント手法による微細転写成形	小久保 光典	有機ELに関する部材開発 発光効率および耐久性向上 今後の展望	(株)技術情報 協会	2023/12/13
24	優先度つき逆運動学を用いた、協調制御に よるモバイルマニピュレータでのドア開け (東京都立大学との共同研究)	中村 陽一郎 和田 侑也	第24回計測自動制御学会 システムインテグレーション 部門講演会(SI2923)	(公社)計測 自動制御学会	2023/12/14
25	二軸混練【WEBセミナー】	前川 泰浩	二軸混練【WEBセミナー】	(株)R&D支援 センター	2023/12/19
26	押出成形技術動向	池田 佳久	第33回成形加工 テキストシリーズ講座	(一社)プラスッ ク成形加工学会	2024/1/15
27	新規事業開発やオープンイノベーションの 成功談・失敗談	大川 貴史	オープンイノベーションの 舞台裏 (新規事業開発の実情)	(株)静岡銀行 TECH BEAT Shizuoka 実行委員会 浜松いわた信用金庫	2024/2/8
28	ダイカストマシンの周辺機器	相田 悟	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	2024/2/28
29	高せん断加工装置の紹介と応用事例	笹井 裕也	(一社)プラスチック成形加 工学会 第16回ナノセルロース・ナノ カーボン複合 材料専門委員会	(一社)プラスッ ク成形加工学会 ナノセルロース・ ナノカーボン複合 材料専門委員会	2024/3/5
30	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	(一社)プラスチック成形加 工学会 第16回ナノセルロース・ナノ カーボン複合 材料専門委員会	(一社)プラスッ ク成形加工学会 ナノセルロース・ ナノカーボン複合 材料専門委員会	2024/3/5
31	MRを用いた機械設置シミュレーション 技術の開発	新藤 拓也	2024年度 精密工学会 春季大会学術講演会	(公社) 精密工学会	2024/3/12
32	きさげ作業における模様の抽出と評価用 AIモデルの開発	星谷 拓	2024年度 精密工学会 春季大会学術講演会	(公社) 精密工学会	2024/3/14
33	ダイカストマシンにおける環境負荷低減技術 のご紹介	田島 豊三	第15回環境・保全セミナー	(一社)日本 ダイカスト協会	2024/3/26
34	延伸フィルム要素技術の紹介	八木 正幸	2024中国(高郵)国际高功 能薄膜市场与技术发展高 峰论坛	Beijing Hesheng Fengmao Information Consulting Co.	2024/3/26
35	沼津工業高等専門学校非常勤講師 自己紹介および当社製品紹介	古屋 忠正	機械工学科5年 機械設計製図講義	沼津高専	2024/4/9
36	Control of the Surface Modification of Epoxy Resin by VUV-Reduction and VUV-Redox Method using Vacuum Ultraviolet Light	遠藤 真一 (ウシオ電機) 深田 和宏 (共著)	International Conference on Electronics Packaging	The Japan Institute of Electronics Packaging	2024/4/18
37	Adhesion Characteristics of Sputtered Cu Seed Layer on Cycloolefin Polymer	清水 昭宏 (ウシオ電機) 深田 和宏 (共著)	International Conference on Electronics Packaging	The Japan Institute of Electronics Packaging	2024/4/18
38	自硬性鋳型による鋳物の工程	藤本 亮輔	日本鋳造協会 鋳造入門講座	(一社) 日本鋳造協会	2024/5/18
39	精密プレス金型向けマシニングセンタ UVMにおける高精度加工技術	栗山 邦隆	INSいわて金型研究会	岩手大学	2024/5/24

	題 目	発表者代表	講演会名	主催者	講演日
40	大型鋳鉄製品の焼付き特性に及ぼす鋳型および塗型の影響	佐野 航平 二瓶 祐仁 薄木 純 藤本 亮輔	日本鋳造工学会 第183回全国講演大会	(公社) 日本鋳造工学会	2024/5/26
41	11 mW Light Power in 232 nm Far-UVC LED Assisted by Photonic Crystal and Optical Simulation	鹿嶋 行雄 (理研) 篠原 秀敏 (共著代表者) 小久保 光典	IWUMD2024	—	2024/6/5
42	Real-time Motion Error Compensation in Optical Surface Fabrication Using a 2-DOF Linear Encoder	WEI YAN (東京電機大学) 鈴木 亨 (共著)	euspen's 24th International Conference & Exhibition	euspen (The European Society for Precision Enginee and Nanotechnology)	2024/6/12
43	低粘度PPとGFの混練により製造されたPP/GFの力学特性	笹井 裕也	プラスチック成形加工学会 第35回年次大会	(一社)プラスチック成形加工学会	2024/6/20
44	環境負荷低減に対応する射出成形技術	浅沼 伸行	グリーンモーディング Webinar Week	(株)松井製作所	2024/7/2
45	進化したEC-SXⅢシリーズ S-Conceptと環境負荷低減への取組み	北堀 雄司	グリーンモーディング Webinar Week	(株)松井製作所	2024/7/3
46	「共に考え、働く」システムエンジニアリングの芝浦機械	流田 裕介 渡辺 大海	ロボットテクノロジー ジャパン2024	(株)ニュースダイジェスト社	2024/7/4
47	芝浦機械製マシニングセンタUVMが導く超精密鏡面仕上げに必要な加工機特性	栗山 邦隆	超精密鏡面仕上げ総合説明会	CGS・日進工具	2024/7/17
48	APPLYING THE MBD TO INJECTION MOLDING MACHINE	小沼 裕之	Polymer Engineering and Science International 2024	Chang Gung University (Taiwan), 東京工業大学	2024/7/23
49	超精密加工機技術紹介	槻田 豊	第15回光学素子分科会	VCADシステム研究会 光学素子分科会	2024/8/2
50	環境に配慮したダイカスト技術	中田 光栄	第23回日本ダイカストマシン工業会ダイカスト製造と設備に係る最新技術	日本ダイカストマシン工業会	2024/8/23
51	楯円振動切削装置による光学部品の加工検討(第三報)	長坂 圭祐	ABTEC2024	(公社) 砥粒加工学会	2024/8/27
52	超精密加工機による曲面加工へのサーボ式真直度誤差補正の効果検討	鈴木 亨	精密工学会秋季大会	(公社) 精密工学会	2024/9/4
53	TOF-SIMSによる銅シード層を用いたシクロオレフィンポリマーと銅めっき層の密着メカニズムの調査	清水 昭宏 (ウシオ電機) 深田 和宏 (共著)	化学工学会 第55回秋季大会	(公社) 化学工学会	2024/9/12
54	環境に配慮したダイカスト技術	中田 光栄	第6回 ダイカスト研究部会事例報告	(公社) 日本鋳造工学会	2024/9/12
55	環境負荷低減に対応する射出成形技術	浅沼 伸行	プラスチック成形加工学会 東海支部第38回講習会	(一社)プラスチック成形加工学会 東海支部	2024/9/13
56	ダイカストマシンの機能と性能	相田 悟	アルミニウム鋳造講座Ⅲ	(公社)鋳造工学会東海支部	2024/9/14
57	超精密加工の動向と加工技術	渡邊 賢太郎	最新加工技術に関する研究会	金沢工業大学	2024/9/17
58	芝浦機械における繊維強化熱可塑性プラスチック製造装置の開発動向	丸山 健一	SAMPE Japan 特別ステージ	日刊工業新聞社	2024/9/18
59	プラスチックレンズ加工技術の最新動向	福田 将彦	プラスチックレンズの成形・加工技術と材料設計・要求特性・今後の展望【Webセミナー】	(株)AndTech	2024/9/27

	題 目	発表者代表	講演会名	主催者	講演日
60	Direct Sputtered Seed Layer Formation on Low Dielectric Resin to Reduce Transmission Loss	清水 昭宏 (ウシオ電機) 深田 和宏 (共著)	IEEE International 3D Systems Integration Conference 2024	IEEE International 3D Systems Integration Conference 2024	2024/9/30

社外発表「執筆」

	題 目	執筆者 (筆頭のみ)	掲載誌名	発行所
1	特別セッションII 未来を拓く延伸技術のイノベーション	池田 佳久	成形加工第35巻第10号 (2023年9月発行)	(一社)プラスチック 成形加工学会
2	CNNを用いたツールパス抽出モデルの開発	星谷 拓	2023年度精密工学会 秋季大会学術講演会(2023年8月)	(公社)精密工学会
3	二軸押出機の混練・センシング技術	尾原 正俊	プラスチック成形加工学会 2023年11月号(2023年10月)	(一社)プラスチック 成形加工学会
4	中真空PVD&CVD装置による成膜技術	深田 和宏	国際プラスチックフェア2023(ポスター) (2023年11月28日～12月2日)	国際プラスチック フェア協議会
5	2023国際ロボット展 パネル展示およびチラシ配布	中村 陽一郎	2023国際ロボット展 (パネル展示および配付チラシ) (2023年11月29日～12月2日)	(株)日刊工業新聞社
6	密着性に優れた中真空PVD導体層による 微細回路形成	梅田 泰 (関東学院大学) 深田 和宏 (共著)	表面改質展2023 関東学院大学ブース (パネル展示) (2023年11月29日～12月1日)	(株)日刊工業新聞社
7	中真空PVDプロセスによる回路形成	深田 和宏	金属(2024年2月号)	(株)アグネ技術 センター
8	横延伸機の技術動向	齊藤 充彦	成形加工(2024年2月号)	(一社)プラスチック 成形加工学会
9	スカラロボットの活用	根岸 祐司	計測技術(通巻681号)	日本工業出版(株)
10	Improved adhesion of direct copper seed layer by medium vacuum sputtering using vacuum ultraviolet light	遠藤 真一 (ウシオ電機) 深田 和宏 (共著)	ECS Journal of Solid State Science and T (volume 13)	ECS Journal of Solid State Science and Technology
11	門形マシニングセンタMPC-Hによる高精度・高効率金型加工	杉山 武史	機械技術2024年3月号	(株)日刊工業新聞社
12	高速充填における金型内の計測	中田 光栄	素形材(2024年4月号)	(一財)素形材センター
13	溶接凝固割れ対策指針に基づくレーザメタルデポジション法を用いた718合金積層造形部の割れ対策とその有効性	山下 正太郎 (大阪大学) 竹内 将人 (共著) 谷垣 昇吾 (共著)	溶接学会論文集第42巻第1号	(一社)溶接学会
14	Comparison of vacuum ultraviolet irradiation and oxygen plasma treatment as pretreatment for copper	清水 昭宏 (ウシオ電機) 深田 和宏 (共著)	Japanese Journal of Applied Physics (DPS 2024) (2024年5月)	Japan Society of Applied Physics
15	シード層形成用中真空PVD装置	深田 和宏	JPCAshow2024伯東ブースでのポスター展示	JPCAshow
16	中真空スパッタで形成した銅シード層とシクロオレフィンポリマーフィルムの密着構造の分析	深田 和宏	実装フェスタ2024ポスターセッション	(一社)エレクトロニクス実装学会
17	直接スパッタ銅シード層と無電解銅めっきシード層を用いた 銅めっきCOP上の伝送線路の高周波伝送特性の比較	清水 昭宏 (ウシオ電機) 深田 和宏 (共著)	実装フェスタ2024ポスターセッション	(一社)エレクトロニクス実装学会

	題 目	執筆者 (筆頭のみ)	掲載誌名	発行所
18	Analysis of adhesion structure between copper seed layer formed via medium vacuum sputtering and cycloolefin polymer film	清水 昭宏 (ウシオ電機) 深田 和宏 (共著)	ISSP2024ポスターセッション	The Japan Society of Vacuum and Surface Science
19	ダイカストの型内溶湯挙動の解析	相田 悟	素形材Vol.65	(一財)素形材センター
20	微細精密加工向けマシニングセンタUVMの最新対応技術	栗山 邦隆	機械と工具(2024年7月)	日本工業出版(株)
21	等温成形装置の特徴と課題	山本 淑弘	先端加工技術(2024年No.123)	(一財)先端加工機械技術振興協会
22	APPLYING THE MBD TO INJECTION MOLDING MACHINE	小沼 裕之	Polymer Engineering and Science International講演発表内容集	Chang Gung University (Taiwan), 東京工業大学
23	超精密加工機に対する高速応答レギュレータの適用検討	福田 将彦	フルードパワーシステム(2024年Vol.55 No3)	日本フルードパワーシステム学会
24	超精密加工機による曲面加工へのサーボ式真直度誤差補正の効果検討	鈴木 亨	精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集(2024年8月)	精密工学会
25	ダイカスト製造技術の最前線	小岩 正昭	砥粒加工学会誌(2024年8月)	(公社)砥粒加工学会
26	接触情報にもとづく3次元空間における手先姿勢を考慮したマニピュレータの経路生成	笠原 佑太 (静岡大学) 中村 陽一郎 (共著) 竹下 啓嗣 (共著)	ロボティクス・メカトロニクス講演会2024講演論文集(2024年5月)	日本機械学会
27	密着性に優れた中真空PVD導体層による微細回路形成	深田 和宏	表面改質展2024 関東学院大学・千葉工大ブース (パネル展示)(2024年9月)	表面改質展・日刊工業新聞

受賞トピックス

1 「第54回機械工業デザイン賞 IDEA」にて『審査委員会特別賞』を受賞

2024年8月5日、日刊工業新聞社主催「第54回機械工業デザイン賞 IDEA」にて、「双腕協働ロボット RIDRS シリーズ (H)」が「審査委員会特別賞」を受賞しました。

「双腕協働ロボット RIDRS シリーズ (H)」は片腕7軸ずつ、腰2軸の合計16軸で構成された双腕協働ロボットです。腰軸（おじぎ動作）があるため、動作範囲を広く、人作業をそのまま

置き換えられます。

本賞は主に生産財を対象として、外観、機能、性能、色彩など様々な要素を総合的に判断して評価されるものです。

今回の受賞は、「企画力・社会性」「機能・性能・品質」「操作性・安全性・保守性・経済性」「造形・造系処理」の4つの尺度から高い評価を得ました。

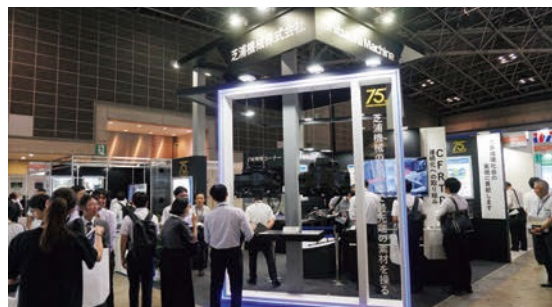


2 「SAMPE Japan 先端材料技術展 2024」にて『優秀展示賞』を受賞

2024年9月18日～9月20日に東京ビッグサイトで開催された「SAMPE Japan 先端材料技術展 2024」にて、当社の先端材料に対する取り組みが評価され、「優秀展示賞」を受賞しました。

今回の展示では、次世代モビリティ・航空宇宙業界に対してトータルで貢献する当社の技術をPRするため、熱可塑性である炭素繊維複合材料 (CFRTP) を成形する“中間材料連続成形

システム”を初出展し、射出成形機及び多関節ロボットを活用した“複合材料成形システム”にてトータルエンジニアリングをPRしました。また押出成形機のセルロースナノファイバー (CNF) に関する取り組みや (RDC) の金属3D積層造形の取り組みも紹介し、本会場の特別ステージでは、「芝浦機械における繊維強化熱可塑性プラスチック製造装置の開発動向」についての講演を行い、お客様の好評を博しました。



当社ブース全景



特別ステージでの講演



優秀展示賞トロフィー

特許紹介

1 繊維強化複合材料の製造方法

特許番号：特許第 7,382,047 号

発明者：

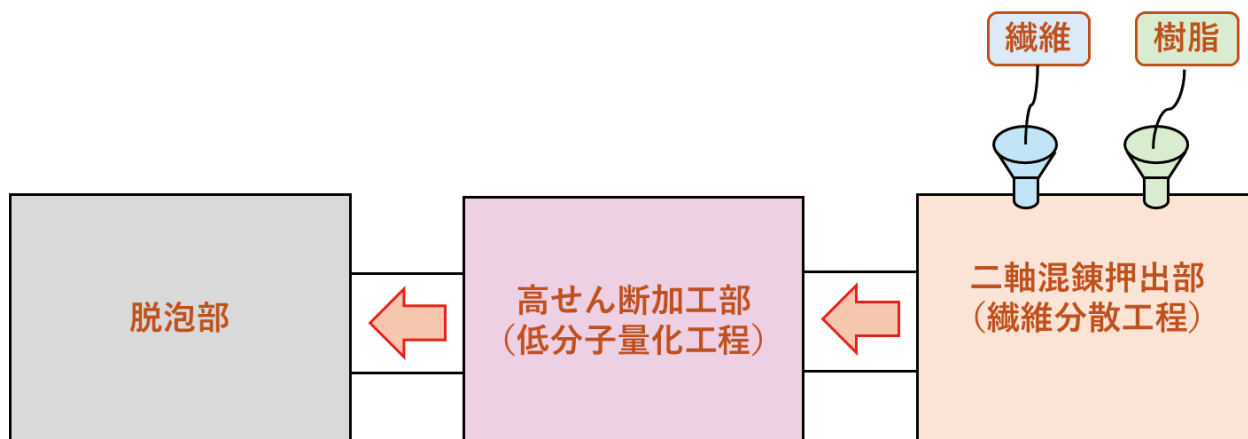
飯塚 佳夫、長田 華穂(芝浦機械)、

瀧 健太郎(国立大学法人金沢大学)

繊維強化複合材料は、樹脂に強化繊維を添加することで力学的特性を向上させることができます。しかし、通常、樹脂に繊維を添加すると粘度が高くなり、狭い流路やくぼみの多い金型への材料の充填が困難になる問題がありました。一方で、低粘度の繊維強化複合材料を製造するのは難しく、力学的特性が低下するという問題もありました。

本特許では、「繊維分散工程」と「低分子量化工程」の2つの工程を設け、繊維分散工程では、樹脂と繊維とを重量比（繊維／樹脂）2/8 以上 5/5 以下で混練して、樹脂中に繊維を分散させます。低分子量化工程では、繊維分散工程で得られた繊維分散樹脂を、内部に通路を備えたスクリュ本体を用いて低分子量化するとともにスクリュ本体の回転数を 1000rpm 以上 3200rpm 以下として繊維分散樹脂にせん断力を加えるとともに、繊維分散樹脂を通路の入口から出口へ通過させることにより、繊維強化複合材料を得る。この繊維強化複合材料による成形品は、引張強度が 53.3Mpa 以上となり、成形品の力学的特性が向上しました。

【本発明の装置概略構成】



【本発明の範囲内と範囲外の比較表】

表 1		実施例			比較例				
		1	2	3	1	2	3	4	5
原料 (重量比)	樹脂：繊維	7：3	7：3	7：3	7：3	7：3	7：3	9：1	9：1
繊維分散 工程	回転数 (rpm)	250	250	250	250	250	250	250	250
	温度 (℃)	195	195	195	195	195	195	195	195
低分子量化 工程	回転数 (rpm)	1000	2000	3000	800	800	—	2000	800
	温度 (℃)	195	195	195	195	195	—	195	195
力学的 特性	引張強度 (Mpa)	57.4	55.6	53.3	50.5	50.5	50.5	39.3	39.1

2 導電性複合材料の製造方法

特許番号:特許第 7,397,451 号

発明者:

鮫島 孝文、飯塚 佳夫、長田 華穂(芝浦機械)、

清水 博((株) HSP テクノロジーズ)

近年、樹脂に導電性を付与するために、カーボンナノチューブ (CNT) などのカーボン系の導電性フィラーが使用されています。導電性複合材料の製造方法としては、溶媒を使って樹脂と CNT を混合する方法や、高せん断流動状態を作り出して樹脂中に CNT を均一に分散させる溶融混練方法が開発されています。しかし、これらの方法では生産性が低いという問題がありました。また、樹脂組成物を連続的に生産することが難し

いという問題もありました。

本発明では、導電性フィラーと熱可塑性エラストマーの原料を混練する押出機を用いて、原料をスクリュによって混練して連続的に吐出し、スクリュは直線状の軸を中心に回転し、原料の搬送部に搬送を制限する障壁部を設けています。この障壁部の直前で原料の充満率が 100% となる原料溜まりを成形することで圧力を高め、高まった圧力によって原料をスクリュの内部通路に導入し、繰り返し混練を行います。このスクリュの回転数を 200 ～ 600rpm に設定し、通路を 4 回以上 10 回以下通過させることにより、原料の溶融とフィラーの高分散化が最適化され、導電性の高い導電性複合材料を連続的に製造できるようになりました。

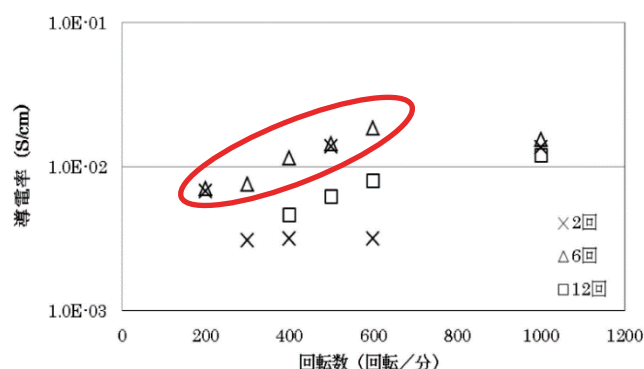
【導電性複合材料の導電率(S/cm)①】

	繰り返し回数		
回転数 (回転/分)	2 回	6 回	12 回
200	6.72E-03	7.03E-03	—
300	3.07E-03	7.57E-03	—
400	3.18E-03	1.15E-02	4.65E-03
500	1.39E-02	1.44E-02	6.25E-03
600	3.18E-03	1.85E-02	8.03E-03
1000	1.37E-02	1.54E-02	1.21E-02

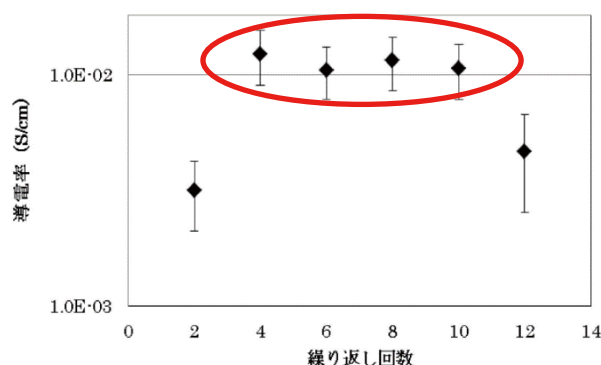
【導電性複合材料の導電率(S/cm)②】

導電率(S/cm)						
	繰り返し回数					
	2	4	6	8	10	12
平均値	3.18E-03	1.23E-02	1.05E-02	1.15E-02	1.07E-02	4.65E-03
標準偏差	1.07E-03	3.27E-03	2.65E-03	2.95E-03	2.87E-03	2.10E-03

*スクリュ回転数:400rpmに固定



【導電性複合材料の導電率(S/cm)①】



【導電性複合材料の導電率(S/cm)②】

3 再生炭素繊維を含有する成形体 および成形体の製造方法

特許番号:特許第 7,294,882 号

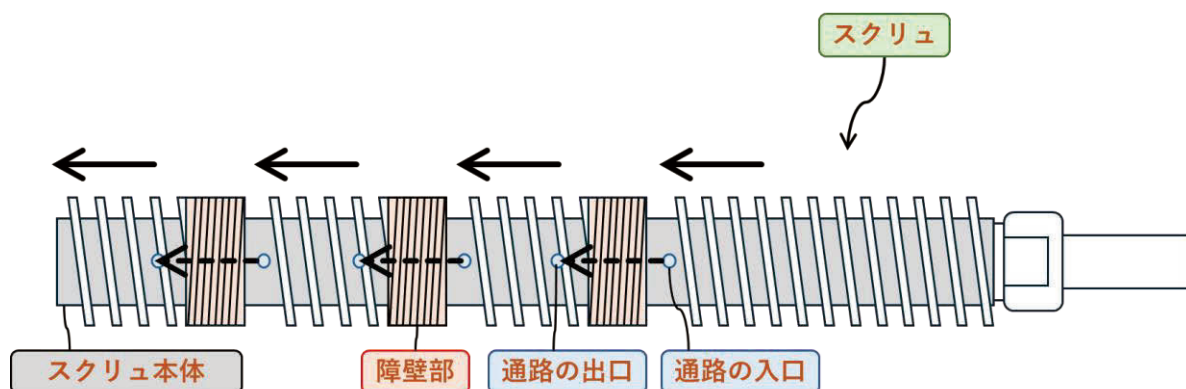
発明者:

鮫島 孝文、飯塚 佳夫、長田 華穂

炭素繊維強化材料 (CFRP) は軽量で高強度・高剛性であることから、航空機や自動車部品等に利用されています。しかし、炭素繊維は高価なため、使用済みの CFRP から再生炭素繊維を回収し、再利用することが求められています。ただし、再生炭素繊維は製造工程の影響で一般的に未使用炭素繊維と比較して機械的特性が低下するため、高濃度に配合すると複合材料の強度や弾性が低下してしまうという問題がありました。また、再生炭素繊維は複合材料中における分散性が悪いため、高濃度

の再生炭素繊維を配合することが困難でありました。

本発明では、内部に通路を備えたスクリュー本体の外周面に沿って原料を搬送する際、外周面に設けた障壁部で原料の搬送を制限し、スクリュー本体により原料にせん断力を加えるとともに、外周面に設けられた通路の入口から通路の出口へ通過させて伸長力も加えて、炭素繊維複合材料を得る。これにより、再生炭素繊維の含有量が 58 ～ 70 重量 % の高濃度で分散させることができる。この炭素繊維複合材料を射出成形機で成形すると流れ方向を MD、流れ方向に対する直角方向を TD としたとき、引張強度の比 (TD/MD) が 0.75 以上、および／または、引張弾性の比 (TD/MD) が 0.85 以上になり機械的特性の異方性が抑制され等方性に優れた成形品を得ることができるようになりました。



	PA6 含有量	RCF 含有量	CF 含有量	通路長 (mm)	通路 数	繰返 数	回転速度 (回転/分間)	引張強度 (TD/MD)	引張弾性率 (TD/MD)
実施例	40	60	—	30	4	2	200	0.87	0.90
比較例	70	—	30	30	4	2	200	0.57	0.50

PA6:ポリアミド6樹脂、RCF:再生炭素繊維、CF:未使用炭素繊維

*TEM二軸混練押出機(芝浦機械(株)製)を用いてPA6とRCFの含有率を50:50、40:60、35:65で混練したが安定的に連続製造することができなかった。

4 工作機械及び工作機械の腐食低減方法

特許番号:特許第 7,557,416 号

発明者:

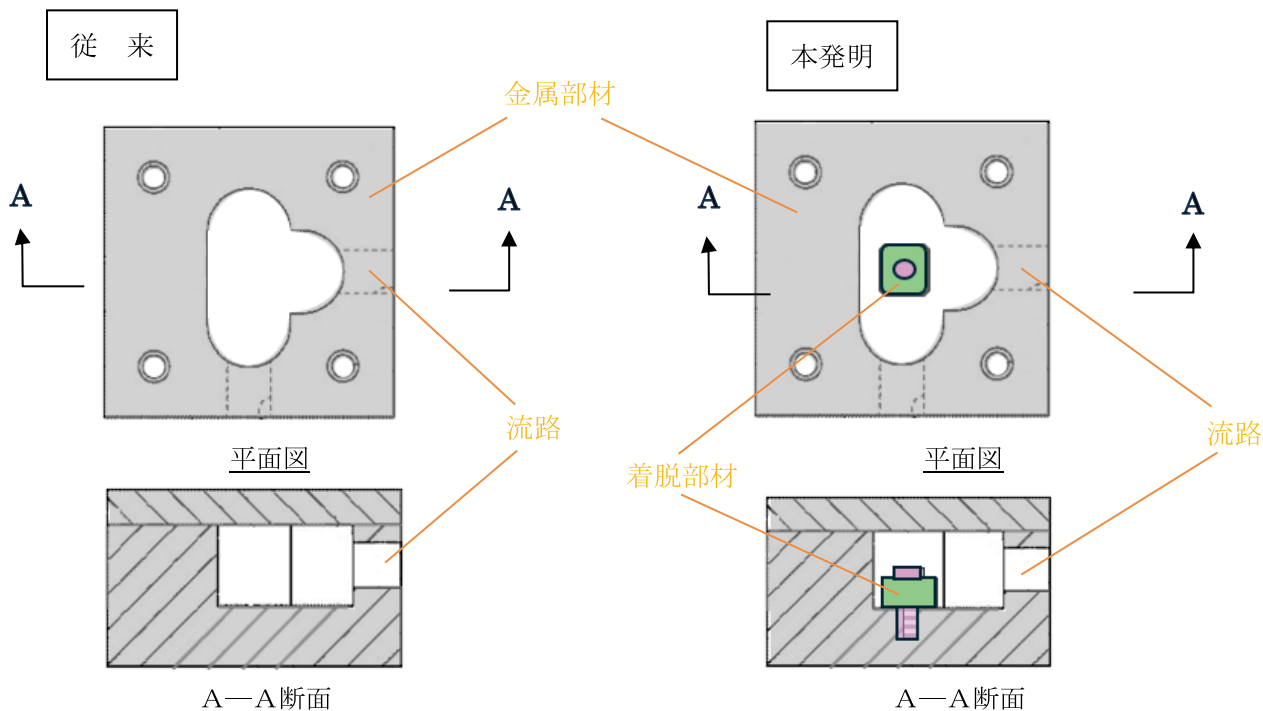
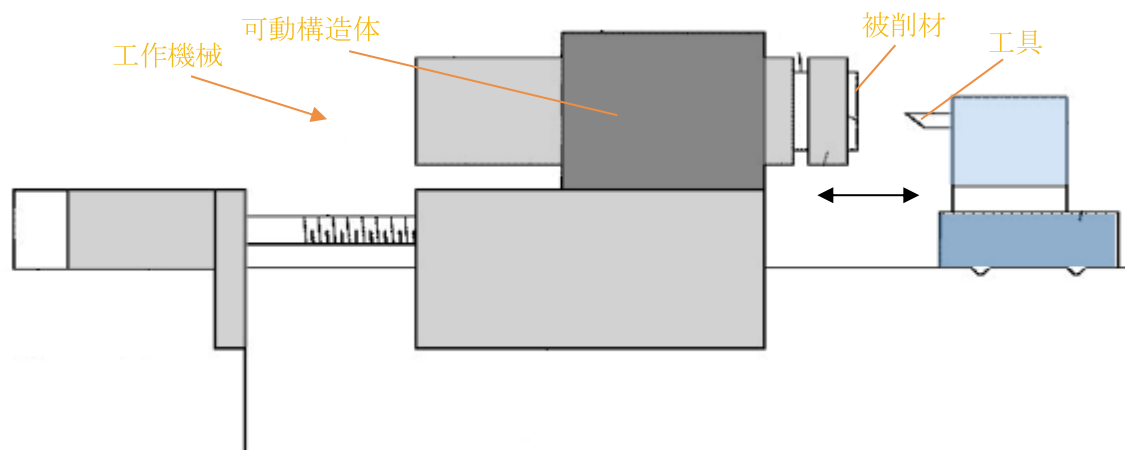
伊谷 慎也、田中 克敏、三塚 晴也

工作機械は被削材を回転させるとともに工具と被削材とを近接及び離反させるように相対移動させることにより被削材を任意の形状に加工する。可動構造体を鋳鉄からMMC (Metal Matrix Composite アルミ・SiC 複合体) にすることにより軽量化させ工作機械の制御性を向上させている。

さらに高精度化が求められる場合、可動構造体の内部に流路を形成し、流路に冷却液を流すことにより可動構造体を冷却して精度向上を図る。しかし、冷却液により流路を構成す

る MMC 構造部材の腐食を促進することがある。そのため、MMC 構造部材の腐食に起因して工作機械の寿命が短くなる懸念があった。

本発明の工作機械では、流路を構成する金属部材が MMC でできているが、流路内に露出する位置に着脱可能な着脱部材が設けられている。着脱部材は MMC のイオン化傾向よりも大きいイオン化傾向を有する金属材料でできている。これにより、着脱部材を構成する金属は相対的にイオン化傾向が大きいから、冷却液に触れたときに電子を放ちやすい。一方、金属部材の MMC は相対的にイオン化傾向が小さいから着脱部材の金属が放った電子を受け取りやすい。従って、着脱部材を犠牲にして金属部材の腐食を低減することができる。着脱部材が腐食した場合は、着脱部材を交換するだけでよいのでコストが削減される。





国立大学法人金沢大学
理工研究域
フロンティア工学系 教授
博士(工学)

瀧 健太郎

このたびは芝浦機械技報 31 号の発行おめでとうございます。本稿では、小職と芝浦機械株式会社との 10 年にわたるお付き合いについて振り返るとともに、産学共同研究の将来について述べさせていただきます。

当時の東芝機械が押出関係の研究と学会活動を強化していくにあたり、昭和電工(現レゾナック)の今泉光博氏(故人)に大学関係で若い研究者の紹介を依頼され、当時 39 歳の私を今泉氏が紹介してくださった。今泉氏は、私がまだ京都大学化学工学教室で大学院生をしていたころに、私の師匠である同教室教授の大嶋正裕先生(現京都大学副学長)のご紹介で発泡成形に関する様々なことをご教授いただいた。芝浦機械が二軸押出機について共同研究されたいとお聞きした当時は、私は押出機のことを全く知らなかったため、このときはかなり当惑したことを覚えている。化学工学分野の押出関係の研究は、今も昔も九州大学の船津和守先生(故人)の門下生が精力的に研究されてこられていて、学術的にも成熟しているように思えた。自分に何か新しいことができるのか、正直よくわからなかった。ある日、芝浦機械の小林昭美氏(現フェロー)と石見和久氏(現専務執行役員)が金沢大学を訪ねてきてくださり、押出機が様々な製品を製造するために使われていること、日本の技術力が高いことを教えていただいた。その当時、10 年後のことを考えたときに、このままでは日本に二軸押出機を研究する学者がいなくなり、研究開発をオープンに議論できる場がなくなるかもしれないと考え、あまり自信はなかったが、共同研究を始めさせていただくことにした。私は沼津高専(物質工学科)出身であるため、多くの先輩後輩が在籍している芝浦機械に親しみが持てたことも一歩踏み出すうえで大きかった。

さて、産学共同研究は、非常にマネジメントが難しい仕組みである。大学の研究者は、論文をたくさん書いて科学研究費と呼ばれる公的研究費を獲得することが研究活動として求められている。学者として生きていくためには周りの学者から尊敬されるような業績を出すべきであり、特に若い研究者は、さらに上のポストに就くために質の高い研究を行うことが求められている。ただし、この研究活動は、主に学者間での評価を基準と

して行われるため、研究内容が学者受けしやすい内向きなものになりやすい。このような大学研究者が抱えている背景を理解せずに、外注先のように産学共同研究を始めてしまうと、お互いの理想のベクトルが異なるため、プロジェクトはなかなかうまくいかない。

私の事例では、私が押出プロセスの研究について、共同研究をゼロから立ち上げることができたことが幸運であった。ゼロから立ち上げたことで、私に新しいことを学ぶ姿勢が生まれ、数多くの洞察に富む研究を始めることができた。一方で、何の実績もない私と共同研究を始めることを当時の経営陣が決断されたことについては「芝浦機械らしさ」が残っていたからではないかと思われる。

共同研究開始当初から営業技術課の山本剛裕氏と尾原正俊氏が私を担当してくださった。尾原氏はそのあと博士後期課程に入学し、「新規数値解析法の開発による二軸押出機内の樹脂充填率分布が脱揮及びガラス繊維の破断に及ぼす影響に関する研究」にて博士(工学)の学位を金沢大学より授与されている。お二方は私が知らない二軸押出機のことをいろいろと教えてくださり、現場が求めている研究についていろいろと議論することができた。二軸押出機は化学製品を製造するために使われる産業機械であるから、エンドユーザの利用を想定して、化学(パケ屋)のわかる工業高専出身の私と芝浦機械の技術者が知らないところを補い合う形で、二軸スクリュのようにうまくみ合うことができていたのではないかと考えている。これまでにさまざまな学びの機会を与えていただいた関係諸氏にこの場を借りて感謝の言葉を表したい。

最後に、世界の製造業は 18 世紀の産業革命以来の大変革を迎えている。過去の実績や経験がものすごいスピードで AI に取り込まれ、AI に問い合わせると適切な情報を取り出してきて、機械の設定や図面を書くことができるようになっている。AI が自律的に考えて機械を作り出すこともできている。人間の頭脳がなしえてきた記憶・思考・判断が AI に外部化されることで、人間のできることはどんどん増えていくことになる。芝浦機械の諸氏におかれてはぜひ AI と仲良くしながらこの大変革の荒波を乗り越えてもらいたい。

MEMO

MEMO

MEMO

MEMO

発行日：2025 年 6 月 30 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 技術企画部
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	前原 弘之	
	村上 賢治	屋城 正樹	桶 亮太	柿島 浩之
	高木 健一	渡邊 譲	井篠 勝三	佐々木 麻男
	芹澤 光明	石井 雄介	山口 大輔	
幹 事	徳山 晴道	有松 寛章	末木 凜太郎	山本 寛之

国内拠点一覧	国内関係会社一覧	海外主要拠点一覧
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	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/	* : HEAD OFFICE
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	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
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	テクノリンク株式会社 〒482-0015 愛知県岩倉市川井町浮田 30 TEL 0587-37-3137 FAX 0587-66-7566 https://www.technolink-sm.co.jp/index.html	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
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	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/	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
関西支店 〒578-0984 大阪府東大阪市菱江 3-14-8 TEL 072-947-0402 FAX 072-947-0408	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	< 米 州 > SHIBAURA MACHINE COMPANY, AMERICA 755 Greenleaf Avenue, Elk Grove Village, IL 60007, U.S.A. TEL: [1]-847-593-1616 FAX: [1]-847-593-0897 CHICAGO*, LOS ANGELES, CHARLOTTE, ATLANTA, ONTARIO/CANADA
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	浜松営業所 〒433-8117 静岡県浜松市中央区高丘東 5-6-25 TEL 053-436-7407 FAX 053-436-3996	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
高崎営業所 〒370-0016 群馬県高崎市矢島町 739-6 TEL 027-367-2370 FAX 027-360-5055	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	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
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	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	< 欧 州 > SHIBAURA MACHINE EUROPE S.R.L. Via Gaudenzio Fantoli 7, Piano 2, 20138, Milano, ITALIA TEL: [39]-02-50041667 FAX: [39]-02-50041668
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		

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>