

芝浦機械技報

SHIBAURA MACHINE
ENGINEERING REVIEW

Dec. 2021

Vol. 28

特集

SDGs



■ 巻頭言	2	新生「芝浦機械」
■ 特別記事	3	「前へ」
	5	新生芝浦機械のDX
■ 技術論文	9	摺動部のグリース潤滑膜最適化に関する研究
	13	真空統合型PVD+CVD成膜装置の開発 -コンバイナー方式HUD用Al-SiO-NbO系耐湿多層反射膜への適用-
	17	数値解析による二軸混練押出製造プロセスに関する研究
	21	ダイカスト工法における圧力伝播に関する研究
■ 技術報告	25	ポリオレフィン系樹脂成形用高色分散・高可塑化能力 可塑化装置の開発
	29	高機能材料創製のための押出プロセス技術最適化
	33	BTA方式深穴あけ盤DBHによる高精度加工技術の開発
	38	燃料電池(FC)スタックの高出力密度化に貢献する超精密加工技術
	43	レゾルバ多回転ABSのバッテリー長寿命化によるサーキュラー・エコノミーへの貢献
	47	デジタル技術による後継者育成～動画形式による標準書
	51	AIを用いた門形マシニングセンタにおける切削中の加工状態監視機能開発
■ 新製品ニュース	55	大型電動式射出成形機EC1800SXⅢの紹介
	57	ダイカストマシンDC1300R-Eの紹介
	59	高せん断加工装置HSE-48の紹介
	61	機械の衝突／干渉を回避するリアルタイム干渉チェック機能の紹介
	63	高精度溝入れ切断加工機USM-20B(H)の紹介
	65	TCminiシリーズ TC12シリーズの紹介
■ シリーズ 「社会を支えるモノづくり」	67	超精密加工技術の発展を支えた超精密加工機の歴史と芝浦機械の貢献
■ 受賞・特許ニュース	85	特許・講演・執筆・受賞
	90	受賞トピックス
	93	特許紹介
■ 講評	96	芝浦機械への期待

新生「芝浦機械」



代表取締役社長
最高経営責任者
最高執行責任者
社長執行役員

坂元 繁友

当社は、2017年3月に親会社であった株式会社東芝のグループから独立したことをきっかけとして、2020年4月1日に東芝機械から芝浦機械へ社名を変更し、あらたな一歩を踏み出しました。これを機に新生「芝浦機械」として更なる飛躍を目指すため中期経営計画である「経営改革プラン」、長期経営計画として「長期ビジョン2030」を策定し、大規模な構造改革に取り組んでいます。

現在、我々を取り巻く事業環境も大きく変化しており、それに伴い技術革新もめまぐるしい速度で進んでいます。我々のようなグローバルに展開している製造業が直面する「気候変動と資源不足」「人口構造の変化」「テクノロジーの進歩」等メガトレンドに対応できる技術を今まで以上に創造し続けなければなりません。そのために、当社が過去から保有する技術を発展させていくとともに、足りない部分を積極的に取り込んでいきます。当社は、このような転換期において、時代の要求と共に変化を続けてきた歴史があります。

昭和初期の日華事変による戦時の要望に応えるために、1938年12月、芝浦製作所（後の株式会社東芝）の出資によって資本金1千万円の芝浦工作機械が設立され、他社が躊躇した各種大型工作機械を次々に世に送り出したのが当社の原点です。創業当時、工場は芝浦製作所鶴見工場内におかれ、日本で最初の大型工作機械専門工場を作ろうと、関係者は並々ならぬ闘志を燃やし、米国、ドイツを駆け巡り技術の獲得、設備の導入をおこないました。

後に、軍需工場に指定され、必ずしも順調な歴史を辿ったわけではありませんが、従業員の技術教育、訓練を徹底的に行ったことにより戦争が終わった後も、多岐にわたる機械装置に活路を見出し再建へ向かっていく礎となりました。

その後も時代の要求に合わせて機械装置の開発が行われ、印刷機械、ロールグラインダー、繊維機械、親歯車ホブ盤（機械

遺産に登録）、現在の主要事業となっている射出成形機、ダイカストマシン、押出成形機など、日本の戦後および高度経済成長を支えた高性能な製造装置を多岐にわたり世に送り出し続けました。

しかし、世界の目指すところは大きく変わり、大量に物を生産して消費する経済重視の時代から、サステナビリティ、SDGsの達成、脱炭素社会の実現など、経済・環境・社会のバランスを重視する時代に移っています。

当社は事業活動を通じて、この社会的課題を解決し世界に貢献できるよう取り組みを強化しています。

具体的には、省エネ、創エネ、畜エネ、安全、生産性、LCA、食品などの開発分野に対して「モノ＋コト」の付加価値をもった製品やシステム、プロセスを創造し社会に提供することで社会的課題の解決と、当社の企業価値の向上を両立して、永続的に社会貢献を果たしていくことを目指しています。

本技報では、その一部ではありますが当社が取り組んでいる技術開発の成果をご紹介します。これらが読者のみなさまに、新生「芝浦機械」が社会・環境、ステークホルダーのみなさまに必要とされ、ともに社会に貢献する価値を創る企業をめざしていることを知っていただくきっかけになれば、我々にとっても価値のある発行となります。是非、ご一読をお願いいたします。



代表取締役会長

飯村 幸生

新しい商品を生み出す際に、開発・設計チームは大まかに「企画⇒仕様決定⇒構想設計⇒詳細設計⇒出図⇒性能検証」というプロセスを踏むが、その中でも強度評価は重要項目である。

小職は入社以来、射出成形機の技術畑に長く在籍したが30tf～3500tfの型締力が毎サイクル負荷されるため疲労破壊の取り扱いには神経を使っていた。

当時、小型機・大型射出成形機ともに型締構造は油圧直圧式であり大きな内圧容器を持っていた。小型機にとって200万サイクル／年はザラにある稼働条件の為、5年程度で10の7乗サイクルに到達することになる。応力集中部が内圧容器内部にあり最大応力値が疲労限度を超えている場合、機械出荷後5年以内に時限爆弾のごとく疲労破壊に見舞われる計算となる。応力発生の起点となる客先の金型サイズは一定ではないため、弾性限度以上の応力発生は問題外のそのまた外である。

開発時に200枚以上の歪ゲージで内圧容器外周の応力は測定するものの、容器内側面の応力実測が非常に困難な為、長く蓄積された実績・経験値に大きな安全率を掛けての設計が行われていた。

この問題を解決すべく射出成形機は1980年代初めより一部構造解析を導入し、一連の強度評価の課題に対応してきた。導入当初はドラフターで2次元作図後、メッシュを切りその膨大な点群座標結果を情報部へカードキーパンチ依頼し大型コンピュータで処理量負荷の少ない夜間に計算をかける。1モデルの結果を得るのに作図開始から出力までに約1か月を要した。拘束条件も限られておりシミュレーションと実測値も乖離していたと記憶する。

小職が初めて有限要素法に触れたのは学生時代に教授から「三節点三角形要素法による歯車の危険断面の解析」という研究課題を渡された時であるから44年ほど前になるが、自作プログラムのシミュレーション結果と歪ゲージによる測定結果が全

く合わず頭を抱えた記憶があるが、その悪夢が当社でも再現されていた。

その後、当社では3次元モデル作成とメッシュ生成機能を使用しての点群・要素データが作成可能となり、専用のコンピュータを使ったインタラクティブな解析環境も徐々に整備される。歪ゲージも応力方向を考慮せずに最大応力値を算出できる3軸歪ゲージの採用などがあり測定値精度の向上を見る。

1997年以降に導入された3次元CADは、射出成形機事業部にとって他社が油圧式から電動式への移行において大きく先行する中、いわば『背水の陣』で臨んだ電動式射出成形機の開発に絶大な効果を発揮した。3次元CADで作図したモデルをシームレスに構造解析にかけることが可能となり大幅な開発工数の短縮となった。従来のソフトで固定ダイプレートの解析を行った場合、最低80時間の工数が必要であったが、新ソフトでは8時間で解析が完了し解析工数が1／10となった。この解析時間のみの短縮効果を上市日程に換算すると1機種で2ヶ月、7機種のシリーズモデルチェンジで14ヶ月の短縮となる。

新ソフトの優れた点は、従来ソフトでは応力集中が疑われる箇所に対し設計者がメッシュの細分化を行い、補正をかける必要があったが、新ソフトではメッシュはそのまま演算の収束状況を監視しながら形状の関数を最大9次関数まで自動的に調整することにより計算精度を上げることができる。

これにより解析スキルの敷居が下がったため、限定されていた解析担当者が大幅に増員される結果となった。もちろん計算結果は、常に数百枚の3軸歪ゲージでの実測と比較し、差異を拘束条件・境界条件の適正化で見直すループを回す。材料についても鋳物材料が自動車板金の端材で製造するようになると大物鋳造材よりサンプルを取り出し実体強度を測定し、改めて球状黒鉛鋳鉄製部品の許容応力基準を見直すことも必要になる。常にデータと実測をフィードバックしあいながら両輪でモノブ

くりを行うデジタルツインの中で、動荷重の種類や特異点に対する対応など体系的にノウハウの蓄積ができる。解析ソフトが変更になってもこのループが守られていれば、品質を担保することが可能となる。

当時の電動式射出成形機の開発においては、初めてトグル機構を型締装置に採用する開発者にとって3次元CADの機構解析による動作解析や干渉解析も有効なツールであった。開発者がリンク構造を3次元CADで作成し、モーション機能を使いリンクを動作させた画像を見せられた時は感動したのを覚えている。24年も前の話となる。

当社は他社が手を出したがない特殊機・大型機を得意とする会社である。基幹産業に貢献することを使命としており、それは我々のDNAに刷り込まれている。

その象徴的な例として思い浮かぶのは「親歯車ホブ盤」である。第二次世界大戦前から構想を温め続け、戦中戦後の動乱期を挟み1953年10月に初号機となる国産初の大型精密ホブ盤HRS-500を完成させる。最終的には国内外競合他社の追従を許さない超高精度機として、日本が造船世界一を守り続けた影の主役となった。1964年4月に大河内記念技術賞を受賞し、直近では2009年にそのホブ盤の心臓部といえるマスターウォームホイールが機械遺産に認定された。

初号機に組み込まれた2代目ホイールの累積ピッチ誤差が直径3400mm（テーブル直径は5000mm）に対し49 μ m、その後ホイールの作り込みや補正の改善を重ね最終7代目ホイール（1970年）の累積ピッチ誤差は4 μ mと前人未踏の精度を打ち立てる。この誤差は沼津工場から東京駅の直径60cmの時計に向かって発射された弾丸が、文字盤内に着弾する程の正確さである。この精度実現の裏には強力な産学連携による測定技術の進歩や、切削油の開発などが大きく貢献をしている。

使命感に燃えた当社の史話には何時も胸が熱くなる。しかしながら初号機から最終性能を確立するまでに17年という長きに渡る時間を要している。

あれから半世紀未来に生きる我々は、先人の情熱を継承しつつ最新技術を活用し初号機から累積ピッチ誤差4 μ mを実現し、顧客の感動と信頼を得なければならない。

その実現にはDX（デジタルトランスフォーメーション）とデジタルツインによるモノ造りが鍵となる。3次元CADでの図面作成及び構造解析・機構解析・熱解析・振動解析・流体解析を行うのは当然のことながら、実設計とデジタル表現されたモデルを双子の関係として相関することが出来、バーチャル空間でシミュレーションすれば実設計、実製品でどうなるか解析できるというコンセプトである。

その中で、当社のノウハウとして最も重要な事は顧客のデータや実験室のデータをIoTなどで集めバーチャル空間にフィードバックさせシミュレーションの精度を上げてゆく。所謂徹底したフロントローディングを行うモデルベース・エンジニアリングまたはモデルベースデザインと言われる手法であり、アジャイルな開発環境を作ることが出来る。

各製品の開発時における不安点や急所は、設計者は漠然と又は明確に認識しているが、根拠の希薄な奇跡に一縷の望みをかけていては、痛い目に合うのみならず顧客の信頼を失うことになる。

まず、急所や不安点の徹底シミュレーションから始めては如何か。このシミュレーションの延長に、顧客とのデータを基にしたギャランティーベースの会話や加工法案に踏み込んだ信頼関係を築くことができると考える。

システム化を組み込んだ飛躍的な生産効率の改善や、脱炭素を含むLCA（ライフサイクルアセスメント）の改善など企業に求められる「旬」に対し如何に迅速かつ分かり易く対応できるかが求められている。

新生芝浦機械の DX



取締役 専務執行役員

小林 昭美

R&D センター
DX 推進プロジェクト

前原 弘之

1 はじめに

経済産業省は、我が国企業がデジタルトランスフォーメーション (DX : Digital Transformation) を加速するため、企業のとるべきアクションと政府の対応策の検討を行い、2020年12月28日にその中間報告を『DX レポート 2』¹⁾として公表した。2018年9月には『DX レポート～IT システム「2025年の崖」の克服と DX の本格的な展開～』²⁾を公表し、DX 推進施策を展開してきた。そこから3年近くが経過する中で、新型コロナの世界的流行などにより、企業を取り巻く環境の不確実性は確実に高まっている³⁾。2018年に発表された『DX レポート』では、将来の成長・競争力強化のためにデジタル技術を活用した新たなビジネスモデルの創出を推進するには DX が必要不可欠であると理解しているものの実現を阻む課題として以下の3つが指摘された。

- 1) 既存システムが事業部門ごとに構築されているため、全社横断的なデータ活用ができていない
- 2) 既存システムが標準システムに過剰なアドオンやカスタマイズをして構築されているため、複雑化・ブラックボックス化している
- 3) データ活用を実現するための既存システムの改修やデータ活用のための業務の見直し要求に対する現場の抵抗が大きいとして、この課題を克服できない場合、DX を実現できないだけでなく、2025年以降大きな経済損失が生じる可能性があることを「2025年の崖」として記し、DX を実現するために必要なこととして次の2点をあげている。

- 1) 既存システムのブラックボックス状態を解消し、データをフル活用できる状態にする
- 2) デジタル技術を導入し、デジタルネイティブ世代の人材が中心となり、新ビジネス創出とグローバル展開を進める

欧米のプラットフォーマーがデジタルデータをフル活用したビジネスを進める中で日本のデータ活用への取組みが遅れた場合、デジタル競争の敗者になってしまうという強い危機感がこのレポートから読み取れる。

我々を取り巻く製造業の DX が語られる場合、IoT や AI などのテクノロジーによる生産現場の効率化や生産性の向上が中心となるが、本質はそこではなく、「モノ」を製造・提供して、顧客から対価を得る」という考え方から「顧客の経験価値を高めるために、「モノ」に加え、サービスの要素としての「コト」を提供し、顧客とともに価値づくりを行う」という考え方にビジネスモデルをシフトすることとされている⁴⁾。

こうした動きの中で、2020年4月に商号を東芝機械から『芝浦機械』に変更し、新たに長期ビジョンを掲げた。当社が目指す DX について以下に紹介する。

2 芝浦機械のDXへの取組み

2.1 | 長期ビジョンとR&Dセンターのミッション

当社は2020年2月4日付で「長期ビジョン 2030 (ありたい姿)」として『グローバル製造業が直面するメガトレンドに卓越した技術革新で応え、社会的課題の解決と企業価値向上を両立する』を掲げた。今後は、「モノ+コト」の付加価値という技術革新 (プロセスとノウハウの収益化、自前主義の脱却と M&A

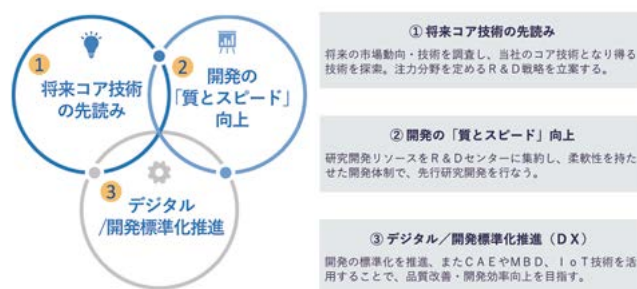


Fig. 1 R&Dセンターのミッション

強化)でメガトレンド(気候変動と資源不足、人口構造の変化、テクノロジーの進歩など)に依っていく。

そして、そこに向けた経営改革プランのひとつが、技術開発のコアとなる「R & Dセンター」の創設である。R & Dセンターは、Fig.1の3つをミッションとして、ソフト/ハードの両面で当社の技術開発を牽引していく。

2.2 | 『SHIBAURA DX』について

R & Dセンターのミッションのひとつは、当社モノづくりのDX戦略である『SHIBAURA DX』実現に向けた「デジタル/開発標準化推進」である。

DXでは何よりもデジタル化されたデータが重要である。あらゆるもののデータを取得し、蓄積されたデータを共有、分析してシミュレーション結果を活用することで、現実世界(リアル)に実在しているものをデジタル空間(バーチャル)に再現できる(デジタルツイン)。デジタルデータであれば、匠の技が再現されたバーチャル空間さえも実現可能である(デジタルトリプレット)。設計だけでなく製造や保守などのあらゆるシーンでシミュレーションが可能となり、今までにない商品を創り出してお客様の新しい価値が生まれる、それが『SHIBAURA DX』の目指す姿である。



Fig. 2 モノづくりの『SHIBAURA DX』

2.3 | R&Dセンターが目指す『技術のDX』

当社のあるべき姿は、「繋がる機械でインデント(単品生産)ニーズに柔軟に素早く対応できるメーカーを目指す」ことで

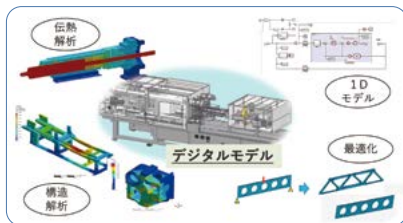


Fig. 5 MBD全体像(上図)と取組み概要(右図)



Fig. 4 デジタル情報で実現するモノづくり

あり、R & Dセンターでは、インデント機を収益の柱にするために、「インデント性の高い製品の究極のモノづくり」を構築し、「設計段階で高い製品完成度」、「高効率生産」、「高付加価値のインデント機の短納期化」を実現することにより、世界の製造業のメガトレンドに応える企業集団へ変革することを目指している。そのための取組みが、Fig.3に示す「商品力向上のためのDX」と「生産性向上のためのDX」の2つの変革である。

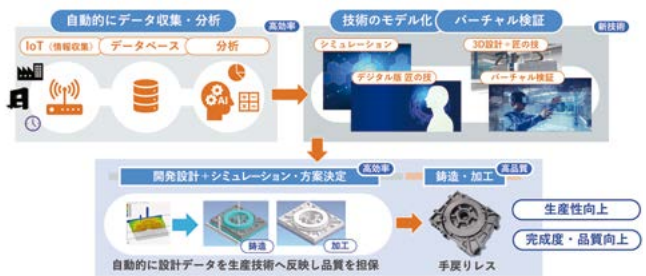


Fig. 3 SHIBAURA DXによる変革

2.3.1 | 変革1:商品力向上のためのDX

変革1のポイントは、「開発・設計プロセスのデジタル化」である。

全工程にわたり分析できる3Dモデルのデジタルデータであれば、インデント機要望に対しても社内外の情報を連携し、図面をつくらなくても機械性能、コスト、納期がタイムリーに把握でき、企画、製造、販売、サービスへの対応も可能となる。同じ仕事も短時間で終わり、お客様の新しい価値を生み出すこ



とに注力することで、時間と対価を獲得できる。

その手法が MBD (モデルベース開発) である。3D デジタルデータによるモデル化、徹底したシミュレーションで境界条件自動化、機械全体 FEM 解析、強度・機構・伝熱などの連成解析に取組み、試作レスを目指す。(Fig.5)

2.3.2 | 変革2:生産性向上のためのDX

変革 2 のポイントは、「業務プロセスのデジタル化」である。

全工程にわたり活用できるデジタルデータとするためには、高い生産性のモノづくりインフラにおける情報のデジタル化と包括的なデータ(ベース)管理が必須である。データをスレッド(糸)のようにつなぎ、上流工程で作成したデータを下流で活用する(デジタルスレッド)。

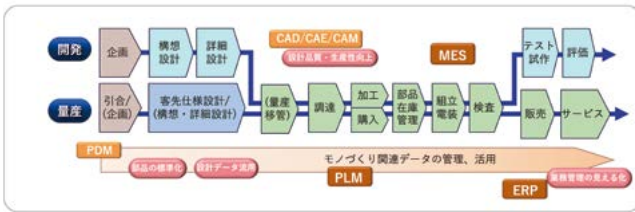


Fig. 6 デジタルスレッド

2.3.3 | SHIBAURA Virtual Lab

そして、「コトづくり」の拠点として、ショールームを備えた SHIBAURA Virtual Lab を相模工場内に創設する予定である。『SHIBAURA DX』実現に向け、最先端の環境を備えた研究開発の拠点として、リモートワークや産学連携、IoT/AI 活用のための創造オフィスとして、お客様とともに新しい価値をつくる価値共創の拠点としての役割を担っていきたい。

3 持続可能な未来と『SHIBAURA DX』

3.1 | DXはSDGsにどう関わるのか？

「DX」以上にビジネスにおけるキーワードとしての存在感を増しているのが「SDGs」である。

サステナブルな社会に向けて SDGs に取組むことは公益に貢献することであるが、効率化の結果としてのコスト削減やお客様への価値提供の対価としての利益で事業を継続させる必要があり、「DX」の実現がその手段にもなる。したがって、DX が SDGs にどう関わるのか、あるいは関わるべきなのか、DX 推進に際しては、単に最新の技術を導入するだけでなく何をどのように変革したいのかという目的も一層問われてくる。

持続可能な社会の実現に向けた目標を定めた SDGs 達成のために、DX が果たす役割は大きいと言える。

3.2 | 脱炭素・SDGs課題解決への貢献

地球規模の持続可能性が問われ始め、世の中が時間軸の長さをも自分の人生以上の将来・未来へと意識しだしたことで顧客の価値基準も変わってきている。企業がサステナビリティの実現に取り組む意義は益々増大している。

芝浦機械のサステナビリティの方向性を Fig.7 に、また、取り組みの全体イメージを Fig.8 に示す。

Fig. 7 芝浦機械のサステナビリティ



Fig. 8 SDGs取組みの全体像イメージ



Fig. 9 将来を見据えたモノづくりを目指して

そして、将来を見据えたモノづくりを目指して、SDGs を起点に社会課題を解決する開発に取り組んでいく。(Fig.9)
 詳細については弊社ホームページを参照願いたい。

4 おわりに

以上、芝浦機械の DX の取組み概要と、SDGs への貢献の視点から紹介したが、本技報にて具体的な取組みの一端について報告する。これらが読者の新生芝浦機械に対する理解の一助になり、お客様の価値創造につながると共に、お客様の視点からのアドバイスをいただければ幸いである。

DX は、「デジタル技術やデータの活用によって、企業の製品・サービスやビジネスモデルを変革すること」であるが、一企業の枠を超えたいわゆるエコシステムを創出してバリューチェーンを改革することでマーケット構造そのものを変えたり、社会課題の解決、すなわちサステナブル社会への変革につながりうる可能性を秘めている。DX を実現しつつ、これからも芝浦機械は社会課題の解決に貢献していく所存である。

参考文献

- 1) <https://www.meti.go.jp/press/2020/12/20201228004/20201228004.html>
- 2) https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/digital_transformation/20180907_report.html
- 3) 福本 勲, 『「DX レポート 2」を解説。“2025 年の崖” から 2

年、国内企業の現状とこれからは?』, ビジネス + IT (SB クリエイティブ) 連載: 第 4 次産業革命のビジネス実務論, (2021/01/19)

- 4) 出典: 『デジタルファースト・ソサエティ』, 日刊工業新聞社, (2019) - 福本 勲, 鍋野 敬一郎, 幸坂 知樹

摺動部のグリース潤滑膜最適化に関する研究

本研究では、EHL理論における無次元中央膜厚の式を基本とし、グリース潤滑膜厚及び粘度の温度依存性の補正式を加えることで、摺動部分の潤滑膜厚が予測できることを確認した。また、本理論に基づき膜厚比を計算することで、特定の金属材料、面圧、速度範囲において、安定した潤滑膜が得られる潤滑剤や表面粗さの条件を明らかにした。これにより従来摺動部分に使用していなかった球状黒鉛鋳鉄等の金属材料を使用できる可能性が確認できた。



R&D センター
研究開発部 第二開発課

小沼 裕之

1 はじめに

当社が製造している機械は産業機械で、その機能を発揮するために回転や直進等の摺動する部分を有している。そこには損傷が発生しにくい銅合金を使用し、油やグリースで潤滑をしている。また、当社製品は大型のものが多く、主要構造部に使用する材料は自社生産が可能かつ、強度と靱性を持った球状黒鉛鋳鉄の使用割合が高い。

近年の動向として、SDGsを掲げ環境負荷対策に取り組んでおり、企業活動を行なう中でも環境負荷を考慮した製品を世に送り出すことが使命となっている。その中で、潤滑剤の使用量低減や、低環境負荷材料を使用する等の対応が重要である。ここで、銅合金と鋳鉄の環境負荷原単位のうち物量ベースCO₂の排出原単位を見た場合、前者は4.49tonに対し後者は3.49tonと少なく、鋳鉄の場合自社生産を行なっていることから、部品輸送時に排出されるCO₂削減にもメリットがあると考えられる。

従来、摺動部分の設計では、面圧やPV値の荷重を中心とした評価を行っていたが、潤滑状態による摺動性を評価することにより、潤滑剤の低減や鋳鉄を採用できる可能性がある。本研究においては、摺動部の潤滑膜厚さの予測方法を弾性流体潤滑理論 (ElastoHydrodynamic Lubrication theory, 以下 EHL理論) と実験によって潤滑剤の最適化、材料の変更の可能性を確認する。

2 EHL理論

2.1 油潤滑

EHL理論については、様々な研究が行われ確立した理論であり、かつ各種文献に記載があるため、詳細の説明は割愛する。潤滑剤の粘性を考慮した Reynolds の流体潤滑理論を元に接触面の弾性変形を伴う油膜厚さを計算する理論であり、狭い接触面積に負荷が集中する場合の潤滑状態を検討するのに向いている。

摩耗試験における摺動箇所はミクロの視点で見ると点接触なので、基本式として Hamrock-Dowson の式と呼ばれる点接触による無次元中央膜厚の式(1)を用いる

$$H_c = 2.69G^{0.53}U^{0.67}W^{-0.067} [1 - 0.61 \exp(-0.73k)] \quad (1)$$

式中の G, U, W はそれぞれ材料因子、速度因子、荷重因子であり、k は接触楕円の楕円率を示し、G, U, W は

$$G = \alpha E'$$

$$U = \eta_0 u / E' R$$

$$W = w / E' R$$

α : 圧力粘度係数

E' : 等価弾性係数

η_0 : 常圧基油粘度

u : 潤滑剤流速

R : 軸方向等価曲率半径

w : 法線方向荷重

で表される。これは潤滑剤が油の場合であり、グリースの場合を次節にて説明する。

2.1 | グリース潤滑

グリースにおける潤滑膜厚に関しては実測値からの回帰式(2)が示されている¹⁾。

$$H_g / H_{oil} = (1 + m^n M')^{0.67} \quad (2)$$

H_g : グリースの無次元膜厚

H_{oil} : (1)式で求めた基油の無次元膜厚

ここで

$$M' = k_2 / k_1 (u / h_{oil})^{n-1}$$

$$m = (1 + M' / n) / (1 + M')$$

また、以下はグリースの物性である

k_1 : 基油粘度

k_2 : 塑性粘度

n : べき乗指数

h_{oil} : 中央膜厚

これらを用いて、摺動部の潤滑膜厚を求める。

3 | 実験

3.1 | 実験装置

3.1.1 | 膜厚測定試験

グリースの膜厚測定については、光干渉法による EHL 油膜厚さ測定機を用いた (Fig.1)。これはグリースを塗布したガラスディスクの表面に鋼球を押し付け回転させ、そこで生じる潤滑膜厚さを測定する方法である。また回転速度を変化させ、各速度における潤滑膜厚を測定した。

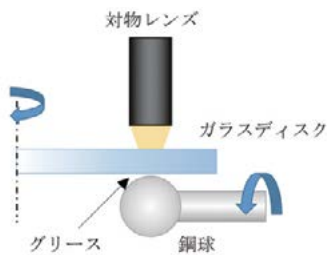


Fig. 1 EHL油膜厚さ測定機

3.1.2 | 摩耗試験

金属材料の摺り特性を確認するために、ピンオンディスク摺り試験機を用いた。模式図を Fig.2 に示す。本装置はエアシリンダによりピン試験片をディスク試験片に押し付け、ディスク試験片を回転させる。同装置により、材料の摺り特性としてピン試験片の把持部分に設けられた、変位計、ロードセルにより、動作時の摩耗量、摩擦力の計測を行なった。また熱電対によりピン試験片の温度測定も同時に行なった。

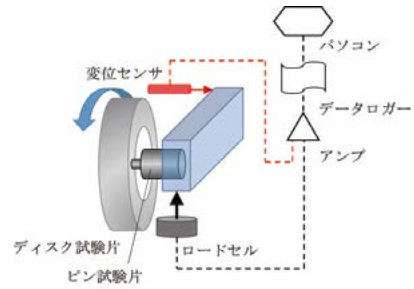


Fig. 2 ピンオンディスク摺り試験機模式図

3.2 | 膜厚測定

3.2.1 | 膜厚測定条件

膜厚の測定にはクロムコーティングしたシリコンガラスディスクと軸受鋼製の鋼球を用いた。また最大面圧が 0.55GPa となるよう設定し、転がり速度は 0.002m/s ~ 1.0m/s の範囲で変化させた。また使用するグリースは増ちょう剤がリチウム系、ウレア系のものを使用し潤滑膜厚を測定した。

3.2.2 | 測定結果

膜厚測定結果と式 (1) (2) より求められた理論膜厚の比と転がり速度の関係及び速度による理論膜厚の変化イメージを Fig.3 に示す。

これを見ると、0.02m/s 以上の転がり速度においては測定した EHL 膜厚と理論膜厚の比が 1 付近であることから、測定膜厚と理論膜厚がほぼ同じであると言える。しかし、0.01m/s 以下においては、測定された膜厚と理論膜厚の比が 1 以上を示しており、実膜厚は理論膜厚よりも厚くなる傾向を示しており、低速域における理論膜厚を再度検討する必要があると言える。

3.3 | 摩耗試験

3.3.1 | 摩耗試験条件

試験には調質を施したクロムモリブデン鋼 (SCM440) のディスク試験片と、球状黒鉛鋳鉄 (以下 FCD450) 及び銅合金 (以下 CAC304) のピン試験片を用いた。

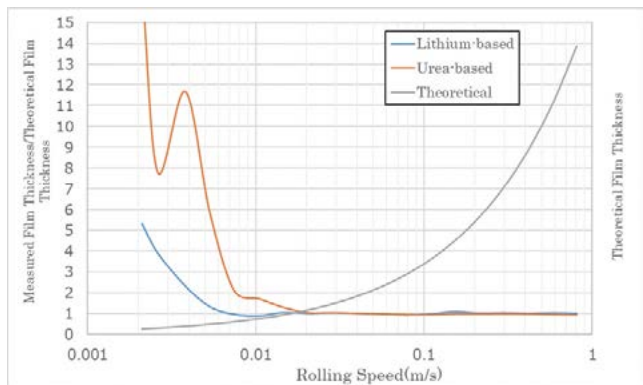


Fig. 3 膜厚測定結果

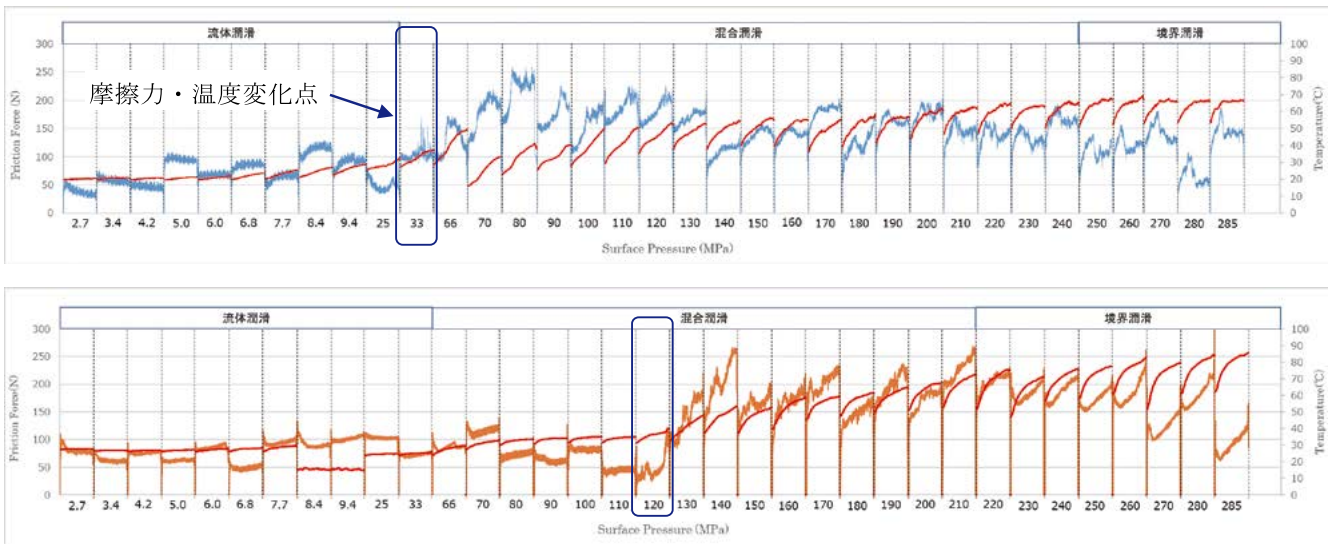


Fig. 4 摩耗試験測定結果(CAC304,上), Fig. 5 摩耗試験測定結果(FCD450,下)

また、ディスク試験片の回転速度は 180min^{-1} とし、空圧シリンダにより押付力を変化させ面圧を $2.7\text{MPa} \sim 280\text{MPa}$ の範囲で段階的に面圧を変化させた。

また、潤滑剤としてリチウム系のグリースをディスク試験片に塗布した。また、各面圧条件における潤滑状態を均一化させるために、面圧条件を変更する毎にディスク試験片にグリースの塗布を行なった。

今回の研究においては、金属どうしの摩耗の進行度合いを見る訳では無く、摩耗や凝着を発生させないことが重要であるため、摩擦力 (Friction Force) 及び温度 (Temperature) の計測を行なった。(Fig.2)

3.3.2 | 測定結果

CAC304 並びに FCD450 による測定結果を Fig.4、Fig5 に示す。両材料共に、低い面圧では摩擦力と温度は安定しているが、CAC304 は面圧 25MPa の後半、FCD450 は面圧 120MPa より、摩擦力が大きく乱れ、それに伴ない温度上昇も高くなっている。この時の FCD450 試験片の SEM 観察結果を Fig.6 に示す。これを見ると、ピン試験片では表面に露出している球状黒鉛の欠落や削り取られた様な筋状痕が見られ、接触によるアプレシブ

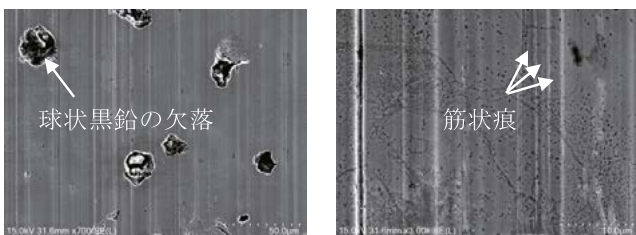


Fig. 6 ピン試験片表面観察(左:700倍,右:3000倍)

摩耗が発生していると考えられる。

測定データより摩擦力の乱れや温度上昇は CAC304 の方が FCD450 よりも低い面圧で発生している。試験中においては面圧が上がるに伴い、金属の接触音や振動等は FCD450 の方が大きくなった。

4 考察

4.1 | グリース膜厚

転がり速度 0.01m/s 以下における、理論膜厚と測定した EHL 膜厚の乖離については、粘度の変化とグリース増ちょうざいの堆積による効果が考えられる。

先の Hamrock-Dowson の粘性式(1)とグリースの回帰式(2)では粘度は一定として扱っている。つまり、グリースの基油はニュートン流体として考えていることになる。グリースの粘度は高せん断速度においては基油のそれに近づくことが知られており、せん断速度の増加に伴ない粘度が変化する非ニュートン流体であると言える。

非ニュートン流体の粘度変化については Carreau-Yasuda の粘性式(3)によって求めることができる。

$$\eta_{\infty} = (\eta_0 - \eta_{\infty}) \left[1 + (\lambda \dot{\gamma})^{\alpha} \right]^{\frac{n-1}{\alpha}} \quad (3)$$

- η_0 : 零せん断粘度
- η_{∞} : 無限せん断粘度
- $\dot{\gamma}$: せん断速度
- α : 圧力粘度係数
- λ : 時定数

前出の膜厚測定結果の理論膜厚に式(3)を適用する (Fig.7)

5 まとめ

本研究を通じて以下のことが判明した。

- a) EHL 理論を基本としたグリース潤滑膜厚さ及び粘度の温度補正式による潤滑状態の想定が可能であることを確認した。
- b) 設計段階で膜厚比による評価が有効であること、表面粗さを決定する設計基準が明らかとなった。
- c) 摺動する箇所の速度によっては、ウレア系グリースが膜厚形成の点から有効である。
- d) 産業機械の摺動部に球状黒鉛鋳鉄等の材料が適用できる可能性を確認した。残された課題は表面粗さ毎の材料使用限界を摺動部の PV 値という視点で確認をおこなっていく。

参考文献

- 1) 河内健、市村亮輔、吉原径孝、董大明、木村好次 グリースのソフト EHL における膜厚とトラクション トライボロジスト 第 61 巻 第 12 号(2016)

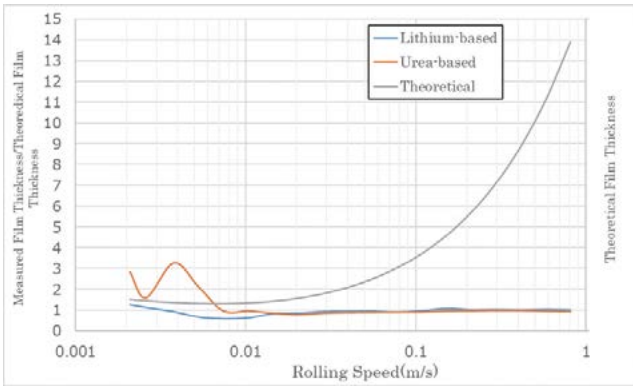


Fig. 7 膜厚測定結果(非ニュートン流体補正)

ウレア系グリースにおいては、低速度領域での EHL 膜厚と理論膜厚の比は 1 に近づいているものの 1 以上になっている。これは接触部へグリース増ちょう剤が堆積によるものと考えられ、ウレア系のグリースは EHL 膜が薄くなる低速域で厚い膜厚を形成することを示している。

4.2 | 摩耗試験

摩耗試験の結果から各条件での膜厚比を指標とした潤滑状態を確認する。一般的に膜厚比は理論膜厚とそれぞれの面が持つ二乗平均粗さの合成粗さの標準偏差の比で表される(4)。

$$\Lambda = h_{\min} / \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (4)$$

合成粗さが標準偏差であることから粗さの突起高さは 3 (3 シグマ) 以下であり、 $\Lambda > 3$ では 2 平面は潤滑膜で完全に分離されており、これを流体潤滑と呼ぶ。 $\Lambda < 1$ では 2 平面の金属がほぼ 100% 干渉していることを示し、これを境界潤滑と呼ぶ。また、その間を混合潤滑と呼ぶ。

Fig.4、Fig.5 に示す試験結果の中に、膜厚比から推定した潤滑状態を記載している。なお、ここでの理論膜厚の計算には Waslter-ASTM 式を用いた粘度の温度補正もおこなっている。CAC304、FCD450 共に流体潤滑の領域においては、摩擦力は安定した挙動を示しており、両表面が接触を開始する混合潤滑の領域で、摩擦力の乱れと温度上昇が発生していることが解る。このことから、膜厚比を設計段階で確認し、必要な表面粗さを決定することが重要と言える。

CAC304 は FCD450 に比べ、低い面圧で摩擦力の変動が発生している。面圧が上昇しても接触音や振動に変化は無かったことから、摩耗が進行しても齧りに至りにくいと考えられる。

真空統合型 PVD+CVD 成膜装置の開発 -コンバイナー方式HUD用Al-SiO-NbO系耐湿多層反射膜への適用-



R&D センター
研究開発部 第一開発課
深田 和宏



R&D センター
研究開発部 第一開発課
福山 聡



R&D センター
研究開発部 第一開発課
難波 武志



R&D センター
研究開発部 第一開発課
栗原 義明



R&D センター
研究開発部 第一開発課
末木 凜太郎

1 はじめに

射出成形機による成形品は各種表面処理による加飾、機能性を付加することで最終製品が製造されている。近年は金属膜による加飾だけでなく、光学、医療バイオ、電子、自動車など多くの分野での機能膜性を付与するために欠かせない技術となっている。

当社ではターンキーシステムとして新しく成形機と連動できる真空成膜装置を開発した。一般的に真空成膜装置はタクトタイムが長く成形品のストックに起因する品質低下を招くことがある。ここでは、従来の真空成膜装置では実現できない非常に短いタクトタイムで良質な成膜を中真空領域で実現した真空統合型成膜装置の開発による光学膜への応用について報告する。

2 成膜装置

開発した真空統合型成膜装置は表面改質、重合を行うプラズマ処理ゾーンと金属膜を形成するスパッタリングゾーンを同一処理室内に配置した構造となっている。従来の真空成膜装置は処理室を長時間の排気により高い真空状態にした後にプロセスに移行するが、タクトタイムを射出成形機に連動するため、排気時間を大幅に短くした中真空領域で要求性能を満たすプロセスを実現した。この成膜装置の特長は以下に示す。

- ①処理室が2つのゾーンから構成されプラズマ処理とスパッタリングが行える**真空統合型装置**
- ②従来の真空成膜装置と比較し**圧倒的に高い生産性**が実現できる
- ③熱負荷が小さく**樹脂への成膜が可能**
- ④新構造のプラズマ電極により**高品質プラズマ重合、高効率プラズマ改質が可能**
- ⑤樹脂成形直後に樹脂から発生するガスなどに影響されず**高品質**

質な真空成膜が可能

2.1 基本原理

ここでは、プラズマ処理とスパッタリングの基本について説明する。プラズマはFig1に示すように電極間の気体に高周波電圧を印加し電子が気体分子への衝突により生成される。

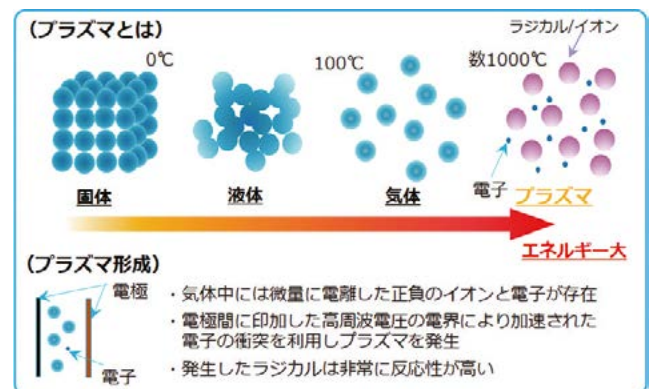


Fig. 1 プラズマ

生成されたプラズマは非常に高いエネルギーを有し、高品質重合や、表面改質が可能となる。

スパッタリングはFig2に示す通り真空チャンバー内に薄膜としてつけたい金属をターゲットとして設置し、高電圧をかけ

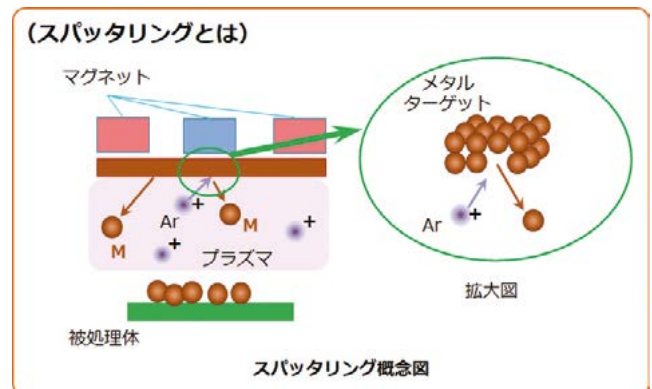


Fig. 2 スパッタリング

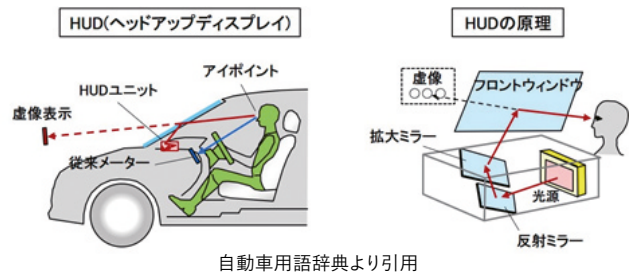
てイオン化させた希ガス元素(アルゴンなど)を衝突させ、ターゲット表面の金属原子がはじき飛ばされ、基板に到達して成膜する乾式めっき法である。

3 自動車向け光学部品への適用

当社のターンキーシステムとして HUD (Fig3)用ミラー (光学膜) に着目し、射出成形機で製造された高品質製への真空成膜装置による増反射膜を検討した。

3.1 開発背景

HUD は各国で車載義務化などの動きがあり、今後市場の拡大が期待できる。



自動車用語辞典より引用



HUD 表示例

Panasonic HPより引用

Fig. 3 ヘッドアップディスプレイ

技術的には、より多くの情報を歪なく高輝度で表示する要求があり、HUD に搭載されている 2 枚の反射ミラーの大型化、高反射率化、低歪への対応が必要となる。

HUD の反射ミラーは基板の PC (ポリカーボネート) 上に金属膜を成膜することで金属反射膜とするが、より高い反射率を得るためには屈折率の異なる膜を積層成膜する増反射膜で実現できる (Fig4)。

HUD 向けに開発した真空成膜装置は、高い生産性を実現するため、アルミニウム (Al) と酸化ニオブ (Nb₂O₅) の金属ターゲットを搭載した 2 式のマグネトロンスパッタと HMDSO を原料としたプラズマ化学気相成長 (P-CVD) による SiO_x 保護膜形成が可能なプラズマ電極から構成されるカルーセルタイプである。スパッタリングによる Al と Nb₂O₅、SiO_x 膜の積層による増反射膜、SiO_x 保護膜を真空統合処理にて高反射率で歪が少ない高品質なミラーの生産が可能となる。

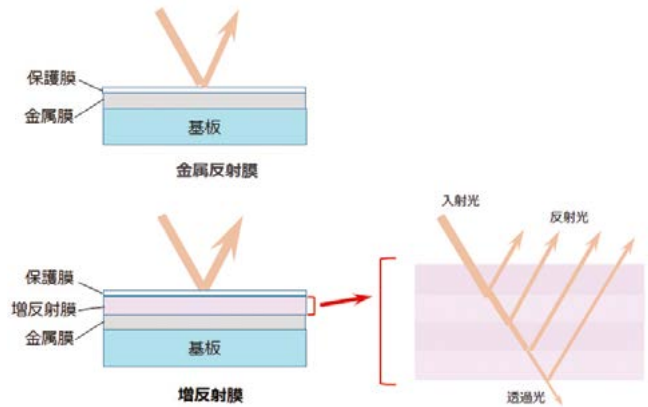


Fig. 4 増反射膜

3.2 装置(構造,仕様,特徴等)

当社では前節で提示した課題に対する解決と将来の拡張性を考慮し、下記のようなシステムを持つ真空成膜装置を開発した。

- ・マグネトロンスパッタ (2 ターゲット) + CVD を一体化した真空統合システム
- ・低屈折率膜の成膜に高密度プラズマ電極方式 CVD を採用
- ・射出成形機 - 成膜装置間の自動化を視野に入れた反転機構タイプの 2 カルーセル方式
- ・対象ワーク寸法最大 L400 × W200 × D125mm (コンバイナータイプ 18 枚搭載可能)

HUD ミラーは可視光領域で 90% 以上の反射率をもつ成膜が必要となり、一般的にはポリカーボネート成形品上に金属膜、低屈折率膜、高屈折率膜の三種類の光学薄膜を組み合わ

【ヘッドアップディスプレイミラー用プロトタイプ機外観写真】



【増反射膜形成フロー概略図】

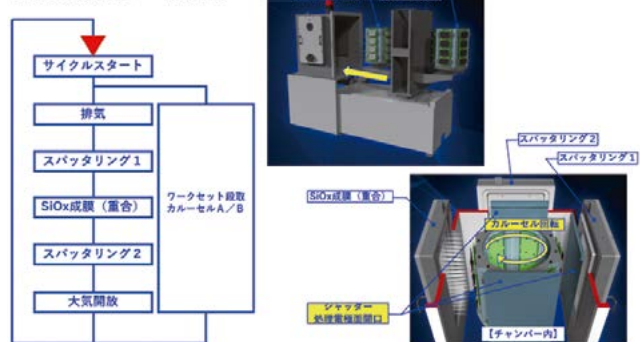


Fig. 5 HUD用真空成膜装置

せることで成立する。当社ではそれぞれ Al (DC スパッタ)、 SiO_2 (CVD)、 Nb_2O_5 (DC スパッタ) を採用した。その理由として、三種類の成膜すべてがスパッタ方式であると SiO_2 、 Nb_2O_5 は RF 方式となるため、三種類のターゲットそれぞれに電源が必要となるが、当社方式の場合 SiO_2 は CVD 成膜を採用し、 Nb_2O_5 についてはターゲット材料に DC 電源を使用できる酸素欠損 Nb_2O_5 を用いることで電源総数を減らしコストダウンに成功している。

また当装置は三種類以上の材料のみならず、新型プラズマ発生装置 CVD 方式により、 SiO_2 膜以外の成膜、 O_2 ガス、 N_2 ガス、 H_2 ガス等を使用した化学修飾も可能であり、射出成形材料の表面に化学修飾を行うことで、HUD ミラー薄膜の密着性を向上させることも可能である。

3.3 | CAEを用いた設計と改良

真空成膜装置の設計では拡散、熱、質量分率を含めた流体解析、CVD に大きく影響するプラズマ状態解析、スパッタリングではマグネットの磁場解析を駆使しプロセスに最適な効率的な装置設計を目指した。

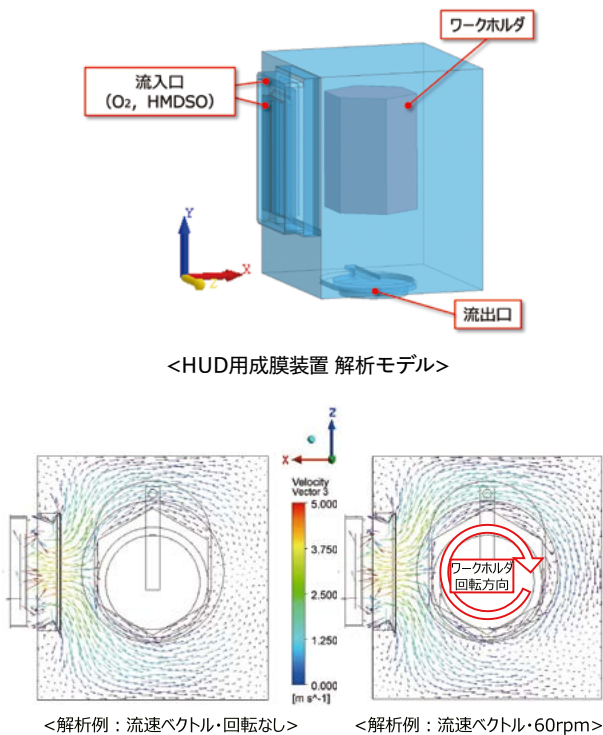


Fig. 6 チャンバー内のガス流れ解析

Fig6 にはプロセス圧力 (中真空) 条件下でカーセルの回転有無の供給ガス流れを解析した結果を示している。回転を付与することで回転なしと比較し原料ガスがカーセルの製品に効率よく供給されていることが分かる。

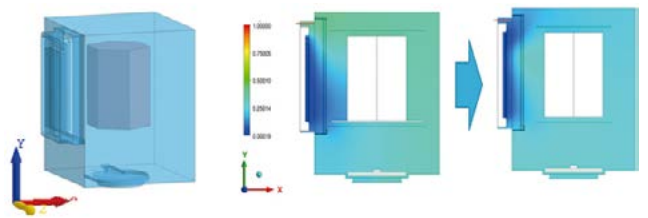


Fig. 7 CVD供給原料のチャンバー内質量分率解析

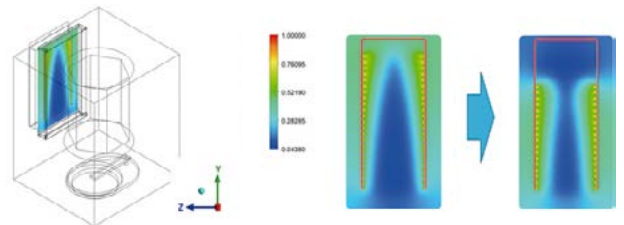


Fig. 8 CVD供給原料の供給ユニット内質量分率解析

CVD では原料とプラズマにより生成された酸素ラジカルの反応から SiO_x 膜を成膜する。目的とする良好な SiO_x を得るためには材料と反応する酸素ラジカルの質量比率の均一化が必要となる。Fig7、8 はそれぞれチャンバー内と原料供給ユニット部のガス質量分率を計算した結果である。開発初期ではカーセルに設置したサンプルに上下方向で場所による大きな反射率分布が確認された。Fig9 に示すチャンバー内の質量分率の解析では実サンプルでの分布を裏付ける結果が得られたことからチャンバー内の分布に影響を及ぼすと考えられる原料供給ユニット部の最適化を解析結果に基づき対策することで分布の改善を実現した。

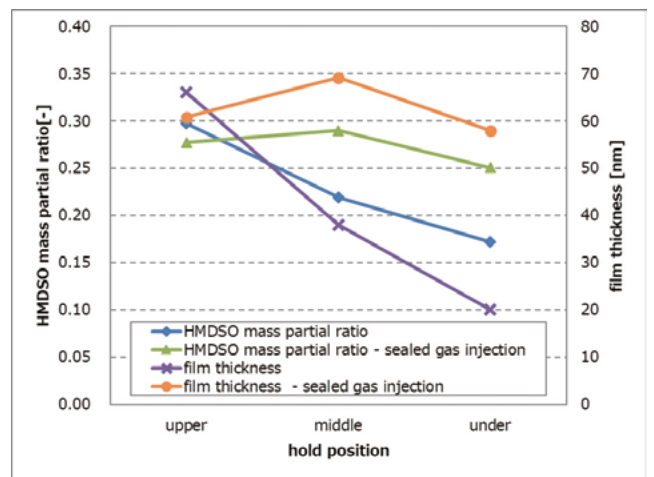


Fig. 9 SiO_2 膜厚と供給ガス質量分率の比較

3.4 | 結果 (性能評価 & 試作結果)

上記の結果により最適化した SiO_2 成膜条件でポリカーボネート基板上に HUD ミラーを製膜し、反射率を測定した。その結果を Fig10 に示す。

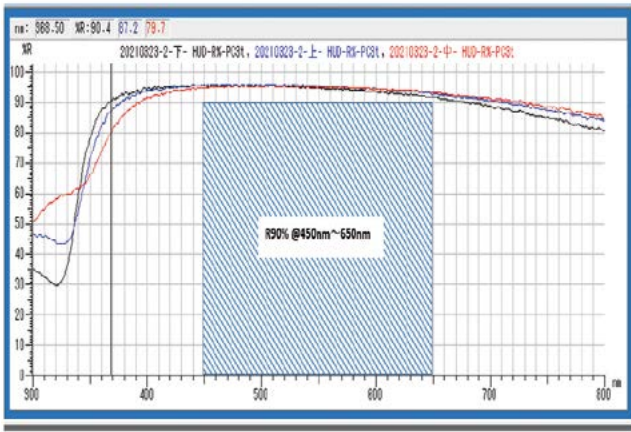


Fig. 10 HUDミラー反射率

図の横軸は波長、縦軸は反射率を示す。黒線は上段、青線は中段、赤線は下段で成膜したサンプルである。

図に示すように、カーセルの上中下段において HUD ミラーの一般的な反射率規格である 450nm ~ 650nm 間で 90% を達成している。30 バッチ同一レシピにて成膜したところ、すべてのバッチにおいて、反射率規格をクリアした。また、恒温高湿試験において、HUD ミラー薄膜の反射率は規格内に収まっており、量産基準に耐えうることが確認されている。

4 おわりに

本装置で採用したプラズマ発生装置は一般的なプラズマ発生装置と異なり、ワークにダメージが入りにくいことから、変質しやすい樹脂への成膜に対してアドバンテージがあり、高プラズマ密度であることからの厚膜 SiO₂ が短タクトで成膜できる。これらの利点により HUD ミラー成膜のみならず、AR コート、ハードコート、撥水膜等の応用が期待できる。

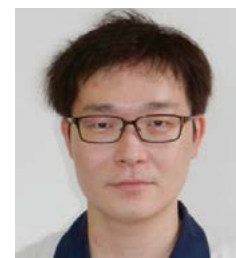
参考文献

特許番号 特許登録 第 6625728 号

発明の名称 プラズマ生成装置

数値解析による二軸混練押出製造プロセスに関する研究

エネルギー・環境に貢献する二軸混練押出機は、あらゆるプラスチック製品を製造可能とする汎用的な連続成形機である。この製造プロセスについて、数値解析を用いて現象を把握し、効率化するための研究に関する内容を報告する。なお、本内容は筆者が国立大学法人金沢大学博士後期課程を修了するにあたり、まとめた論文内容を要約したものである。



成形機カンパニー
押出技術部 営業技術課

尾原 正俊

1 はじめに

近年、プラスチックは、エネルギー・環境分野において、生産者だけでなく消費者の間でも注目度が高まっている材料である。当社の製造販売する完全噛合い型同方向回転二軸混練押出機 TEM シリーズ (以下、二軸混練押出機) は、主にこのプラスチック材料を加工、製造する成形装置である。二軸混練押出機は、スクリュを用いた成形機の中でも、混練性能と汎用性に優れた特徴を持つ。特に成形用部品であるスクリュとバレルはモジュール化されていることから、無限に近い組み合わせで装置を構成することができる。代表的なスクリュエレメントを Fig. 1 に示す。

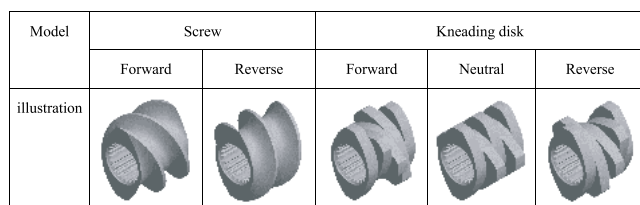


Fig. 1 スクリュエレメント

これらの特徴から二軸混練押出機は、多種多様な材料に対応できる一方で、優れた混練性能を実現するには、扱う材料と仕様に応じた構成を設計し選び出す必要がある。従来、この構成設計プロセスには、原料配合やスクリュ構成、運転条件を都度調整し、手探りで希望する製品品質に近づけるトライアルアンドエラーが用いられてきた。しかし、エネルギー・環境分野の観点から、近年の製品開発に求められる要求が高くなっており、製品品質向上や廃棄原料の低減、開発リードタイムの短縮を目的として、理論解析に基づく二軸混練押出機の構成設計プロセスの確立が望まれている。

本研究では、射出成形 CAE 分野で長年にわたって培われて

きた 2.5 次元 (2.5D) FEM について、株式会社 HASL 社協力の下、二軸混練押出機への実用的解法を提案し、実験による比較検証を行った。

2 理論

これまでの二軸混練押出機における数値解析は、スクリュの形状を因子化することで、押出機全体にわたりスクリュ軸方向に沿って平均化した充填率や圧力分布等を短い時間で計算する 1D FAN 解析と、流動樹脂を 3D で格子化または粒子化することで、部分的ではあるが詳細な物理演算を行う 3D 数値解析に限られていた。本研究では、樹脂の流れとして、粘性の影響が支配的な、薄い層内で生ずる非圧縮性 2 次元流れである Hele-Shaw 流れを仮定し、スクリュの軸方向だけでなく、円周方向の樹脂の流動状態を押出機全体に渡って効率的に計算する手法を提案する。解析で考慮する二軸混練押出機の構成概要を Fig. 2 に示す。

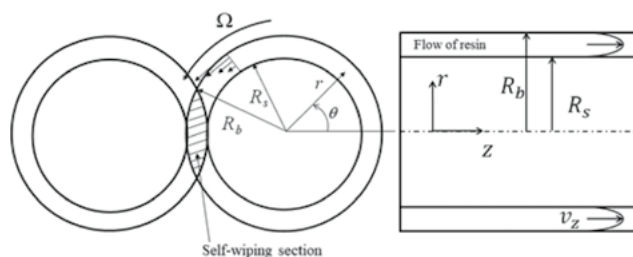


Fig. 2 二軸混練押出機における Hele-Shaw 流れ

Fig. 2 において、 r はスクリュの半径方向、 z は軸方向、 θ は回転方向であり、 R_s はスクリュ半径、 R_b はバレル半径を表す。スクリュ表面上では以下の式が成り立つ。

$$v_{\theta} = 0, v_z = 0 \text{ at } r = R_s$$

ここで、 v_{θ} と v_z はそれぞれ θ 方向と z 方向の流速である。ま

た、回転するスクリュから見たバレルの相対速度を Ω とすると、バレル表面上 R_b では以下の式が成り立つ。

$$v_\theta = R_b \Omega, v_z = 0 \text{ at } r = R_b$$

Hele-Shaw 流れを仮定しているため、 $v_r = 0$ であり、 v_θ と v_z は r のみの関数として扱うことができる。法線方向の流速が無視されることにより、計算に必要な変数の数を低減させ、計算時間を短縮している。

2.5D FEM の離散化要素は、Fig. 3 に示す二つの隣接する円柱座標としてスクリュの外径に沿って分割し、それぞれの円柱の重なる要素において、二円柱間の流れを単純接続させている。

これらにより、スクリュ軸方向だけでなく、スクリュ要素全体の円周方向の樹脂の流動状態を解析することが可能となった。

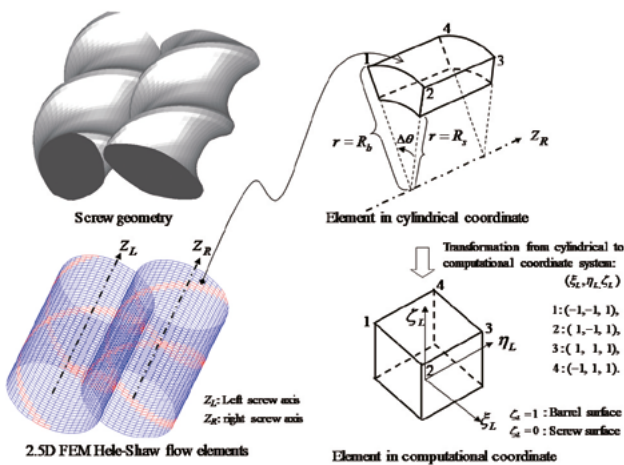


Fig. 3 二軸混練押出機における計算要素

3 実験・検証

3.1. | 樹脂圧力分布による実験検証

本解析手法による結果の妥当性について、樹脂の圧力分布測定による実験で確認した。樹脂圧力は、二軸混練押出機出口の流路形状を絞ることで樹脂を滞留させ、圧力計を用いて樹脂の流動により発生する圧力を測定した。

実験の材料にはホモポリプロピレン (F-704NP、MFR 7.0 g/10 min、プライムポリマー) を使用した。解析に用いる材料の粘弾性の測定にはレオメータ (MCR 302、Anton Paar) を使用した。測定した複素粘度データは、粘度構成方程式である Cross model を用いてフィッティングした。実験機は TEM-

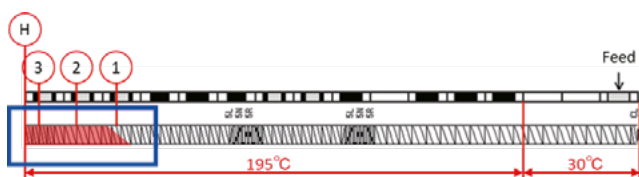


Fig. 4 装置構成

26SX (L/D=64) を使用した。Fig.4 に実験に用いたスクリュ構成と圧力計取り付け位置 (図中 1,2,3,H) を示す。

押出質量 10 kg/h、スクリュ回転速度 70 min^{-1} において、出口圧力を 5.5 MPa まで上昇させた際の結果を Fig.5 に示す。実線が解析値、各点が実験値を示す。実験値は時間平均値となるため、比較する解析値は円周方向の圧力分布を平均化した値を用いた。解析値と実験値が良好な一致を示すことを確認した。

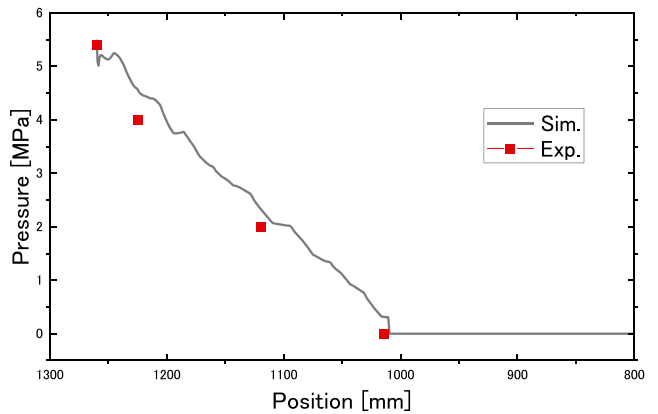


Fig. 5 実験・解析値比較結果

3.2. | 光切断法による充満率測定法

本解析手法による結果の妥当性について、樹脂の充満率測定による実験で確認した。なお、充満率とは、二軸混練押出機内の流動状態の指標の一つであり、スクリュの搬送体積に対する樹脂の存在割合を示す。充満率測定には、対象の物体の周りにレーザ光線を照射することで物体の形状を測定する光切断法を採用した。二軸混練押出機のオープンポート上にラインレーザを照射し、高速度カメラを用いることでスクリュおよび樹脂の断面形状を記録した。記録したデータを画像解析することで、スクリュの搬送体積に対する樹脂の存在割合を抽出した。Fig. 6 に二軸スクリュの断面図とシステムの配置図を示す。

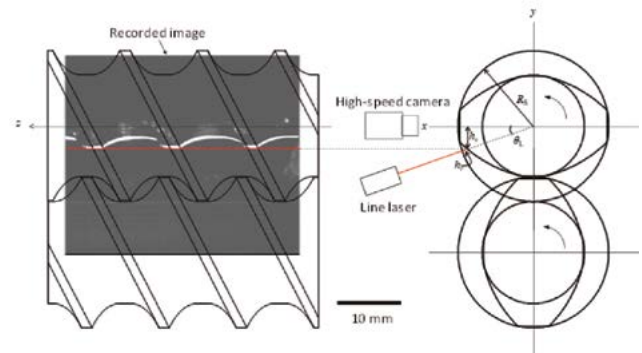


Fig. 6 システム概略図

実験材料は、樹脂圧力測定と同一のホモポリプロピレン (F-704NP) を使用した。実験機は TEM-26SX (L/D=40) を使用した。スクリュ構成と充満率測定位置を Fig. 7 に示す。

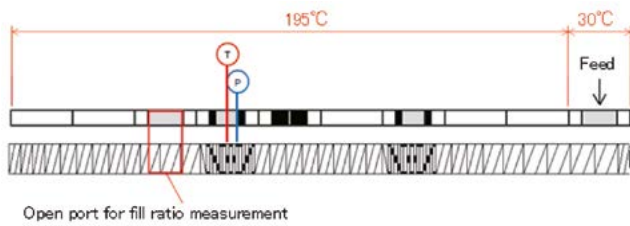


Fig. 7 装置構成

Table 1 に運転条件を示す。スクリュ回転速度は、37 から 88 min^{-1} 、原料の押出質量は、1.0 から 3.0 kg/h まで変化させた。1.0 kg/h の押出質量におけるスクリュ回転速度の影響とスクリュ回転速度 88 min^{-1} における押出質量の影響を調査する実験を行った。本稿では後者の結果のみ報告する。

Table. 1 運転条件

Screw speed [min^{-1}]	Feed rate [kg/h]
37	1.0
49	1.0
58	1.0
69	1.0
88	1.0
88	1.5
88	2.0
88	2.5
88	3.0

スクリュと樹脂表面を照射するラインレーザの形状は、MATLAB® Image Processing Toolbox® (MathWorks®) および Signal Processing Toolbox® (MathWorks®) を使用してビデオファイルから抽出した。樹脂の体積は、画像処理により抽出したライン形状からスクリュ表面のライン形状を差し引くことによって計算する。抽出したライン形状から充满状態を表現したグラフを Fig. 8 に示す。黒線がスクリュ断面形状、赤線が樹脂断面形状を示し、図中右側の黒線と赤線の間に樹脂が存在していることを表している。本結果を基に実験値と解析値を比較したグラフを Fig. 9 に示す。

本解析手法では、スクリュの樹脂流路断面における詳細な樹脂プロファイルを出力することが可能となった。それにより、Fig.9 の赤線に示すスクリュ断面上の樹脂充满状態を確認することができる。実験結果と解析結果は、よく一致しており、同一スクリュ回転速度において、押出質量の増加に伴って充满率が単調に増加することを示している。

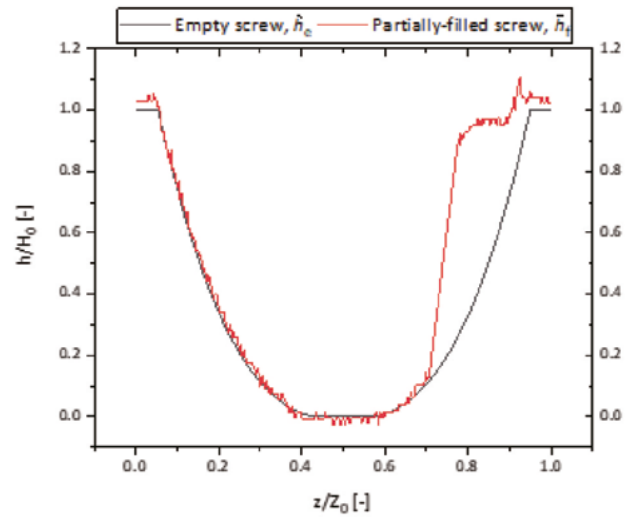


Fig. 8 光断面領域を抽出した画像処理結果 (88 min^{-1} , 1.0 kg/h)

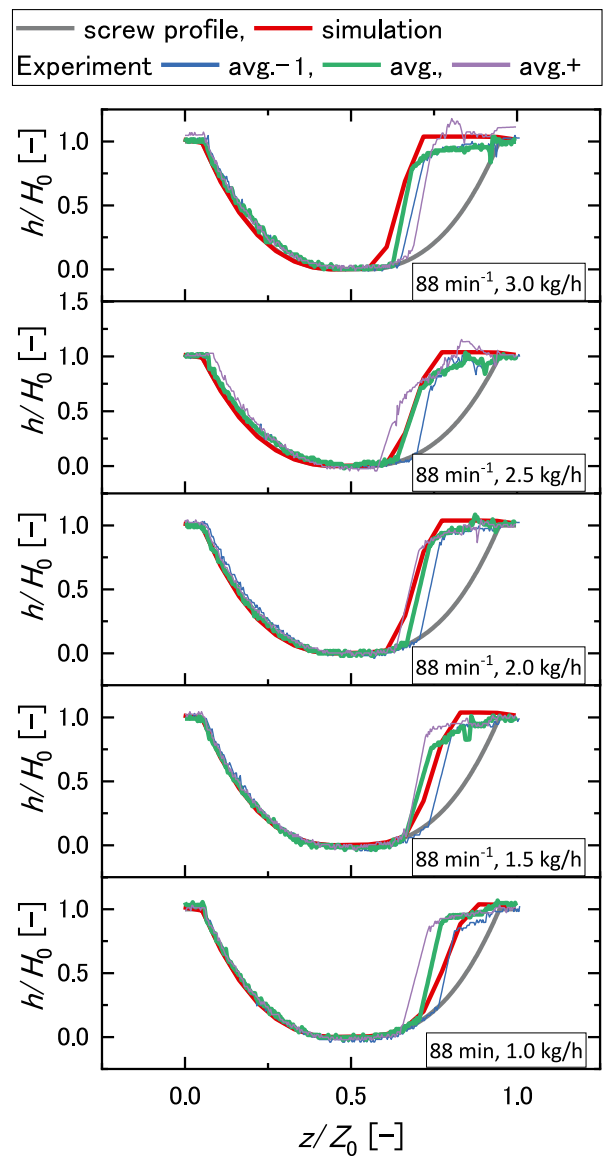


Fig. 9 実験・解析値比較結果 (スクリュ断面における樹脂充满状態)

4 結論

ラインレーザの画像処理を利用した光切断法を使用することで、二軸混練押出機の樹脂プロファイルをオンラインで測定した。測定結果は、押出質量の増加に伴い、樹脂の充填率が増加した。

Hele-Shaw 流れを用いた 2.5D FEM の数値解析により計算された樹脂圧力分布および充填率は、測定した実験データと一致した。解析手法は、二軸混練押出機における樹脂流動状態を正確に決定し、滞留時間分布、熱履歴、ひずみ履歴等による製品物性の予測を可能にした。

5 おわりに

本研究では、Hele-Shaw 流れを用いた 2.5D FEM 解析により、隣接した二円柱間の粘性流体方程式を解くことで、二軸混練押出機内部のスクリュ軸方向と円周方向における樹脂の流動状態を詳細に解析できることを確認した。このことから、より高度化する二軸混練押出機を使用した製品開発要求に対し、成形プロセス面からの装置構成設計が可能になったといえる。また、本稿ではページの都合上省略した実際の製品開発で行われている脱揮や繊維破断現象についても実験検証を行い、解析値と実験値で良好な一致を確認している。

謝辞

本研究を行うにあたり、終始御丁寧な御指導、御示唆を頂きました金沢大学理工研究域機械工学系教授、瀧健太郎先生に心よりお礼申し上げます。

本研究を進めるにあたり、解析ソフトの提供や改良に携わり、貴重なご意見を頂戴しました、株式会社 HASL 谷藤眞一郎氏、依藤大輔氏に心より感謝いたします。

参考文献

尾原正俊、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、金沢大学博士論文、2021 年

ダイカスト工法における圧力伝播に関する研究

ダイカストマシンの射出設定のひとつである鑄造圧力は、製品キャビティへ溶湯を充填完了してから最短時間で立ち上げることが一般的に理想とされている。しかし、製品キャビティに鑄造圧力を有効に伝えるためには射出設定だけでなく、溶湯や金型温度などに影響される。また実鑄造でこれらの因子をふまえた鑄造圧力の有効性を確かめることは十分でなかった。このような背景から本研究では、鑄造圧力がほかの因子とあわせて製品品質へどのように影響を与えるか明らかにすることを試みた。



R&D センター
研究開発部
企画・知的財産課
雨澤 弘機

1 はじめに

自動車業界では、地球温暖化を抑制するために自動車走行時のみならず、生産から廃棄まで含めたライフサイクルベースでCO₂排出量を削減する取り組みが加速しており、生産機械にもCO₂削減に寄与する技術がいっそう必要になっている。

ダイカストマシンでみると、機械の小型化による省エネルギー技術の発展があげられる。小型化のためには鑄造圧力を下げて鑄造できる、つまり製品の要求品質を満たせる最低限の鑄造圧力で鑄造できる低圧化の技術が必要である。しかし、鑄造圧力の設定には明確な基準がないため、経験や鑄造時の製品品質から判断することが多く、容易に下げることは困難である。よって、低圧化の技術開発を行うために、まずは鑄造圧力が製品へどのように伝播していくのか解明する必要がある。本研究では鑄造圧力の伝播解明を目的に、鑄造圧力が製品品質へ果たす役割、およびほかの因子との関連について報告する。

2 鑄造圧力の役割と製品品質について

一般に鑄造圧力の役割は、溶湯充填時に製品内部に巻き込まれたガスで形成されるガス巣と、溶湯の温度低下で生じる体積収縮で形成されるひげ巣を小さくし、製品の内部品質を向上させることにある。

一方、製品品質は鑄造圧力だけでなく、昇圧時間や高速速度、溶湯温度など様々な因子でも左右されるため、鑄造圧力が製品品質にどの程度影響するのか定量的な判断は十分でなかった。そこで品質工学に基づいた直交配列実験により、鑄造圧力がどのように製品品質に影響を与えるのか調査を行った。

3 実験

3.1 直交配列実験条件

品質工学に基づき、製品品質に影響を及ぼす可能性のある因子を取り上げ、各因子および交互作用の影響について評価した。Table 1の直交表による8因子2水準のもとに実験を行った。交互作用に取り上げる因子は鑄造圧力をベースに高速速度、昇圧時間、溶湯温度、金型温調温度、真空度、注湯時間を取り上げた。

Table 1 直交表(直交配列実験)

因子記号	A	B	C	D	E	F	G	H
水準	鑄造圧力	高速速度	高速区間	昇圧時間	溶湯温度	温調温度	真空使用	注湯速度
1	60MPa	2.0m/s	90mm	20msec	630℃	50℃	あり	5.1sec.
2	80MPa	3.0m/s	110mm	70msec	680℃	180℃	なし	1.4sec.
条件1	60MPa	2.0m/s	110mm	70msec	680℃	180℃	あり	5.1sec.
条件2	80MPa	2.0m/s	110mm	70msec	680℃	180℃	あり	1.4sec.
条件3	60MPa	2.0m/s	90mm	20msec	680℃	180℃	なし	1.4sec.
条件4	80MPa	2.0m/s	90mm	20msec	680℃	180℃	なし	5.1sec.
条件5	60MPa	3.0m/s	110mm	20msec	680℃	50℃	あり	1.4sec.
条件6	80MPa	3.0m/s	90mm	70msec	680℃	50℃	なし	1.4sec.
条件7	60MPa	3.0m/s	90mm	70msec	680℃	50℃	なし	5.1sec.
条件8	80MPa	3.0m/s	110mm	20msec	680℃	50℃	あり	5.1sec.
条件9	80MPa	2.0m/s	90mm	20msec	630℃	50℃	あり	1.4sec.
条件10	80MPa	2.0m/s	110mm	70msec	630℃	50℃	なし	5.1sec.
条件11	60MPa	2.0m/s	90mm	20msec	630℃	50℃	あり	5.1sec.
条件12	60MPa	2.0m/s	110mm	70msec	630℃	50℃	なし	1.4sec.
条件13	60MPa	3.0m/s	90mm	70msec	630℃	180℃	あり	1.4sec.
条件14	80MPa	3.0m/s	90mm	70msec	630℃	180℃	あり	5.1sec.
条件15	60MPa	3.0m/s	110mm	20msec	630℃	180℃	なし	5.1sec.
条件16	80MPa	3.0m/s	110mm	20msec	630℃	180℃	なし	1.4sec.

試験片は Fig. 1 のハーフパイプ形状であり、後述する各種センサ・品質評価の計測箇所も合わせて示す。そのほかの条件を Table 2 に、使用したダイカストマシン (DC350R-EH) の仕様を Table 3 に示す。材料は ADC12 を用いた。

マシンの射出ピストンにかかる圧力である鑄造圧力を、溶湯が充填された製品キャビティへ有効に伝えるためには、溶湯が凝固する前に加圧することが重要である。そこで、製品キャビティに溶湯温度を直接計測するために温度センサを設置した。

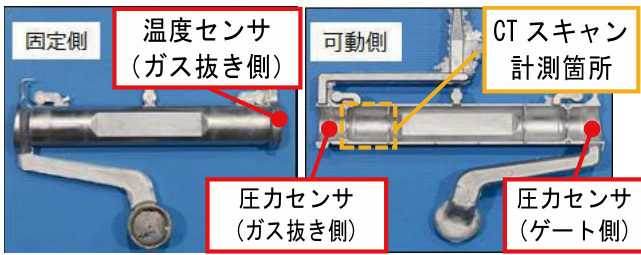


Fig. 1 試験片形状と各種計測箇所

Table. 2 金型諸条件

製品肉厚	2 mm
鑄込質量	975 g
充填質量	390 g
製品質量	200 g
ゲート断面積	1.76 cm ²
チップ径	Φ60 mm

Table. 3 マシンの仕様

最大射出力	344 kN
空打ち最大射出速度	11 m/s
型締力	3500 kN
型締機構	電動トル

温度センサには光ファイバ型放射温度計を用いた。製品キャビティの溶湯温度を測温するためには非接触で計測する必要があるため Fig. 2 の入りピンを作成し、ガラスを用いてセンサと溶湯が接触しない様に対策を行った。また、凝固過程の温度変化による圧力の変化を計測するために圧力センサも設置した。

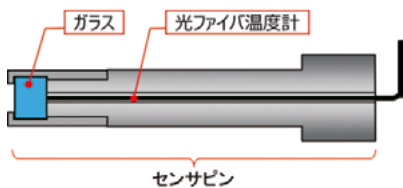


Fig. 2 温度センサピン

計測項目は型内圧力、溶湯温度のほかに射出位置、射出速度、マシン圧力を取込み、射出の状態と比較可能にした。Fig. 3 に計測波形例と計測定義を示す。なお、3.2 実験結果の型内圧力は溶湯温度の計測箇所と相対するガス抜き側のみを扱っている。

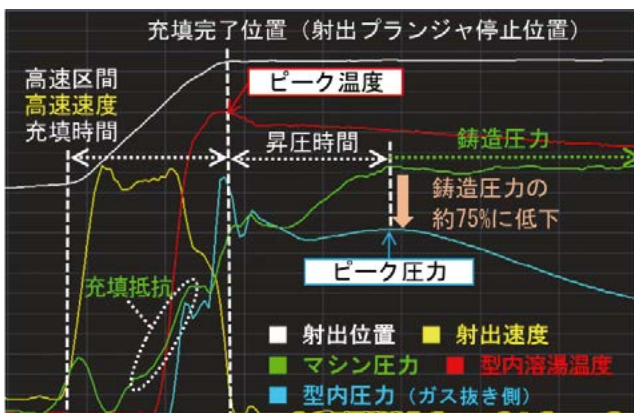


Fig. 3 計測波形例と計測定義

計測波形より、型内圧力の立ち上がり開始は製品キャビティを溶湯が充填しガス抜き側へ溶湯が通過する時の抵抗と考えら

れ、溶湯温度の検知タイミングとほぼ合致している。また、製品キャビティへ伝わるピーク圧力は鑄造圧力に対して約75%低下している。これは、温度低下による溶湯凝固が進展し圧力伝播が悪くなっているためと考察する。

各条件で5サンプルを採取し、品質評価は Fig. 1 のCTスキャン計測箇所における鑄巣割合を評価対象とした。これら結果をもとに、各因子による製品品質への影響について評価した。

3.2 | 実験結果

各条件のCTスキャナによる鑄巣割合を Fig. 4 に示す。一般にガス由来の鑄巣を減らすためには真空装置によるガス抜きが有効であり、今回の実験結果では鑄巣割合が平均で6割減少している。一方、結果が芳しくない条件3・10・12は真空なしのため、鑄巣割合はガス量に大きく左右されていると考えられる。ただし、真空ありの条件2より真空なしの条件15・16でも鑄巣割合が低いことから、真空を使用すれば必ず良好な結果を得られるとは限らないことがわかる。

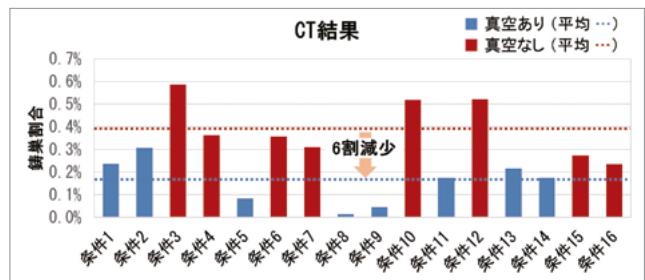


Fig. 4 鑄巣割合

型内ピーク圧力による鑄巣割合への影響について、真空設定別に分類した結果を Fig. 5 に示す。真空ありは型内ピーク圧力が高くなるにつれて鑄巣割合が減少する傾向にあるが、真空なしは相関がみられない。これは型内ピーク圧力よりもガスによる影響が大きかったためと考えられる。

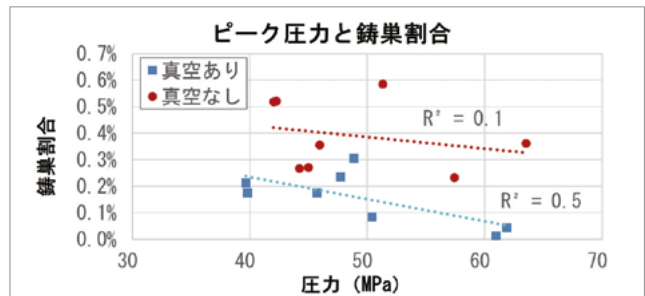


Fig. 5 ピーク圧力による鑄巣割合への影響

つぎに、鑄巣割合が真空以外にどの因子によって影響しているか確認するために、Fig. 5 の要因効果図を作成した。主効果に鑄造圧力はあがらず、高速速度・昇圧時間・真空有無・注湯時間があがる。なかでも高速速度・真空有無の効果が大きい。鑄

造圧力との交互作用が大きくなる因子は、昇圧時間・温調温度・注湯時間である。以上から鑄造圧力は単独では鑄巣割合に大きく影響せず、上記因子との交互作用により鑄巣割合へ影響していると考えられる。

ここからは、ガスによる影響を減らすために真空ありのみで評価を行った。要因効果図より、主効果・交互作用であった因子に昇圧時間がある。Fig. 7 に昇圧時間による鑄巣割合への影響を示す。昇圧時間が短いと鑄造圧力が低くてもピーク圧力を高くすることができ、鑄巣割合が減少していることがわかる。よって、昇圧時間を短くすることで鑄造圧力を下げた鑄造が可能であると考えられる。

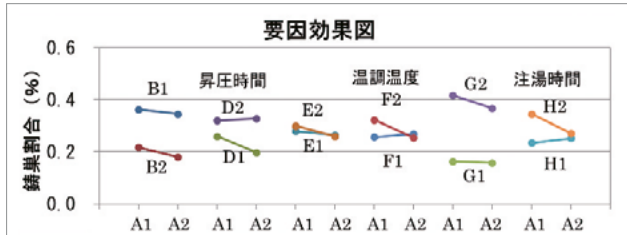
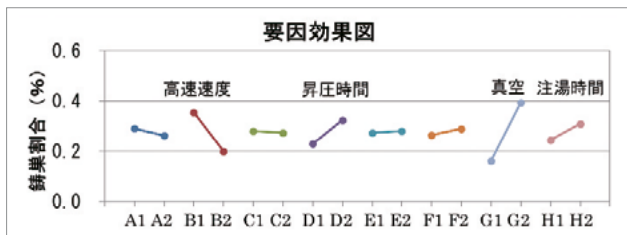


Fig. 6 要因効果図

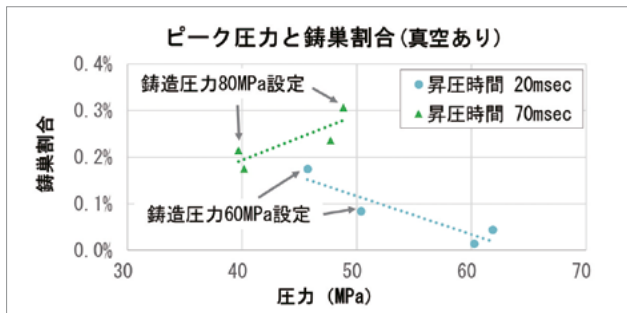


Fig. 7 昇圧時間による鑄巣割合への影響

昇圧時間のほかに、要因効果図で高速速度が主効果になっていることから、ピーク圧力を高くするためには時間が重要な要素であると考えられる。Fig. 8 に経過時間（充填時間+昇圧時間）による圧力伝達効率への影響が示す。なお、圧力伝達効率は鑄造圧力に対するピーク圧力の割合を示している。Fig. 8 より、時間が短くなるほど圧力伝達効率が上がっている。これは、Fig. 9 が示すように経過時間が短いほど溶湯温度を高く保ちピーク圧力を上げているためと考えられる。Fig. 10 にピーク温度と圧力伝達効率の関係を示す。ピーク温度が上がるにつれて効率が上がることがわかる。以上から、鑄造圧力の実効率

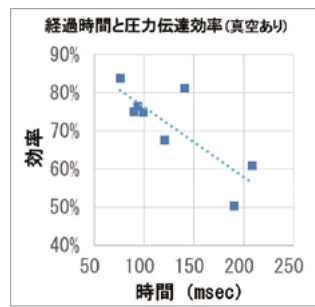


Fig. 8 経過時間による圧力伝達効率への影響

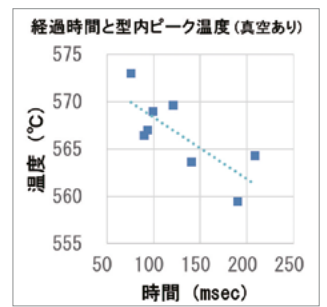


Fig. 9 経過時間による型内ピーク温度への影響

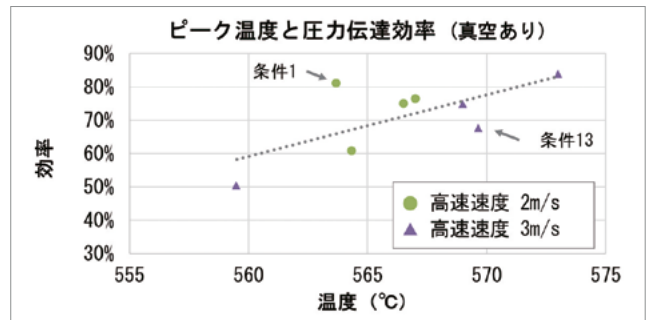


Fig. 10 ピーク温度と圧力伝達効率の関係

である圧力伝達効率を上げるためには、経過時間を短くして溶湯温度を高く保つことが重要であるとわかった。

しかし、Fig. 10 で条件 13 は条件 1 よりも速度が速い、つまり時間が短いにもかかわらず圧力伝達効率が 10% ほど低い。真空・昇圧時間・鑄造圧力の設定が同じことから、ほかの因子が影響していると考えられる。

4 考察

Fig. 11 に条件 1 と条件 13 の代表射出波形を示す。条件 13 は高速速度が速いことからピーク温度は条件 1 よりも高いものの、ピーク圧力(ガス抜き側)は条件 1 よりも低い。一方で、

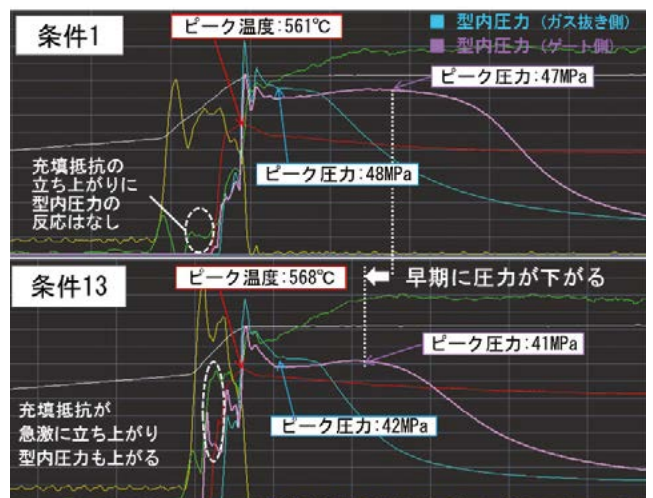


Fig. 11 条件1・13の代表射出波形

条件13は条件1よりも型内圧力（ゲート側）が充填抵抗の急激な立ち上がりと同時に反応し、増圧工程では型内圧力が早めにながっている。

一般にゲートが狭いほど充填抵抗は上がることから、高速区間の短い条件13は製品ゲート部近傍まで溶湯が低速で充填されたことで、溶湯が凝固しやすくなったと考えられる。その結果、増圧工程でゲート部が早期に凝固・閉塞して、ガス抜き側まで圧力が有効に伝達せずピーク圧力（ガス抜き側）が上がらなくなったと考察する。Fig. 12に高速区間の違いによる圧力伝達効率への影響を示す。高速区間が短いと圧力伝達効率は下がる傾向にある。これは、Fig. 13に示すようにゲート側の圧力伝達効率が低下していることから、高速区間が短いと早期にゲート閉塞するためと考えられる。

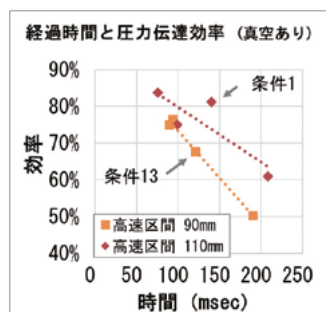


Fig. 12 高速区間による圧力伝達効率への影響1

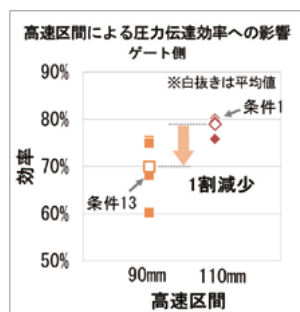


Fig. 13 高速区間による圧力伝達効率への影響2

今回は、ピーク温度は低いが圧力伝達効率は高い Fig. 10 の条件1について考察に至らなかった。次回の調査でゲート側にも温度センサを設置して、ゲート / ガス抜き側の両方で同時に計測することで、考察につながるデータを取得し、圧力伝播の解明を進めたい。

5 おわりに

- 1) 鋳造圧力は製品の内部品質に対して単独の効果は小さく、昇圧時間・溶湯温度・注湯時間との交互作用により影響を与える。
- 2) 鋳造圧力の実効値である型内ピーク圧力は、昇圧時間を短くすることで高くなり、製品の内部品質が向上する。
- 3) 鋳造圧力の実効率である圧力伝達効率は、ピーク温度が高いほど上がるが、ほか因子の影響により下がることもある。

参考文献

- 1) 相田悟ら：日本ダイカスト会議論文集(2018) JD18-3

ポリオレフィン系樹脂成形用高色分散・高可塑化能力可塑化装置の開発

ポリオレフィン系樹脂を使用した成形品は自動車用部品に多く使用され、将来も適用範囲の拡大から使用量の増加が見込まれている。一方でこの樹脂を使用した成形品は自動車1台当たりの使用量が多いことから他の樹脂を使用した成形品に比べてコストへの要求も厳しく、外観品質や強度等の物性値の担保と生産コスト削減の両立を求められている。このため射出成形機にはハイサイクル成形時における高スクリュ回転速度でも樹脂の安定可塑化を可能とする可塑化装置が必要となる。本稿ではこの要求に応えるために開発したポリオレフィン系樹脂向けの可塑化装置について報告する。



成形機カンパニー
成形機技術部 営業技術課

渡邊 隆弘

1 はじめに

自動車用部品におけるポリオレフィン系樹脂を使用した成形品は内外装品を中心に使用され、デザインの多様性と軽量化に役立ってきた。一方でコストの削減取組みについては、成形品の着色方法をコストよりも品質重視の着色ペレットからナチュラルペレットにマスターバッチを希釈して着色する方法に変更することで材料費の削減をしつつ、樹脂の可塑化に要する計量時間を短縮することでハイサイクル成形を実現し単位時間当たりの生産数を増やすことで対応してきた。しかしながら、マスターバッチによる成形品の色分散状態と計量時間の短縮はトレードオフの関係となり、計量時間を短縮することで受熱量等の不足による樹脂の可塑化不良が発生し、その結果色むら等の成形不良につながりやすい状況となる。ハイサイクル化による単位時間当たりの生産数増加による生産性の向上と高希釈率マスターバッチの色分散性向上による色むらの無い成形品の両立を図るために、ポリオレフィン系樹脂成形用可塑化装置の開発に取り組んできた。

2 課題と可塑化装置の特長

マスターバッチを使用した成形で品質上の重要課題は、最高スクリュ回転速度でも均一に溶融し分散・分配することであり、これが成形品の色むらを解消する重要な要素となる。この課題を達成するため当社標準スクリュ（以下、標準スクリュ）より高い可塑化能力で均一溶融を両立する ESB スクリュと、マスターバッチの色分散性を高めつつ、可塑化能力の低下を最小化する色分散エレメントを開発した。

(1) 高可塑化能力・均一溶融対応 ESB スクリュ

ESB スクリュは標準スクリュに比べてスクリュ有効長を延長した (Fig.1)。延長分はコンプレッションゾーンの領域拡大に活用し、かつコンプレッションゾーンの途中からメータリングゾーンに掛けてロングサブフライトデザインを設けることで、この領域で十分な熱量を与え溶融潜熱の大きいポリオレフィン系樹脂の均一溶融性を確保した。これにより標準スクリュより高いスクリュ回転速度での計量が可能となり、高い可塑化能力を達成している。

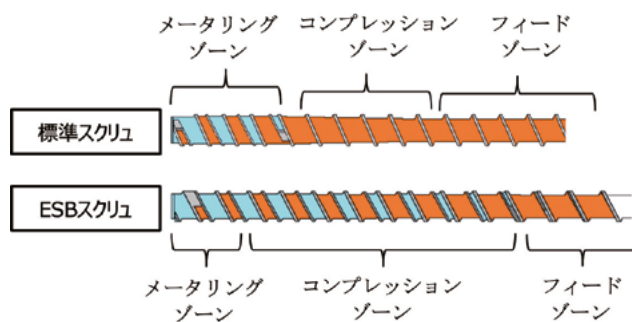


Fig.1 標準スクリュとESBスクリュ

スクリュ径 $\Phi 60\text{mm}$ と $\Phi 115\text{mm}$ の標準スクリュと ESB スクリュによるポリプロピレンの可塑化能力比較を Fig.2 に示す。標準スクリュに対して ESB スクリュは $\Phi 60\text{mm}$ で 114% 増加し、 $\Phi 115\text{mm}$ で 67% 増加した。

テスト条件

- ・樹脂: 日本ポリプロ ポリプロピレン JP5GA
- ・スクリュ回転速度:
 $\Phi 60$ 標準スクリュ 220min^{-1} ESB スクリュ 320min^{-1}
 $\Phi 115$ 標準スクリュ 110min^{-1} ESB スクリュ 138min^{-1}
- ・ソーク比^(注) 1:2 ・背圧: 3MPa ・計量ストローク: 2.5D

注: ソーク比は1サイクル時間の計量と計量以外の時間比率

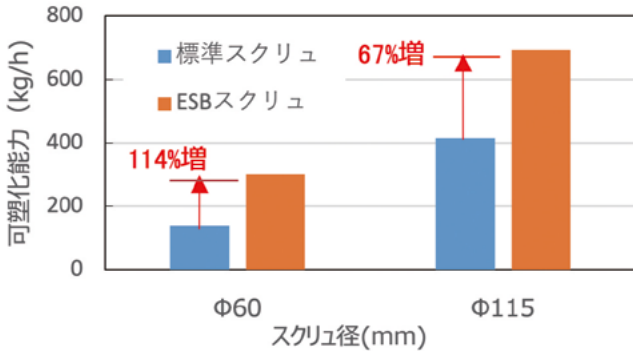


Fig. 2 スクリュ別 ポリプロピレンの可塑性能力

各スクリュの均一溶解性を確認するため、Φ115mmの標準スクリュとESBスクリュでポリプロピレンのパージ時の樹脂圧変動幅を測定した。(Fig.3, Fig.4)

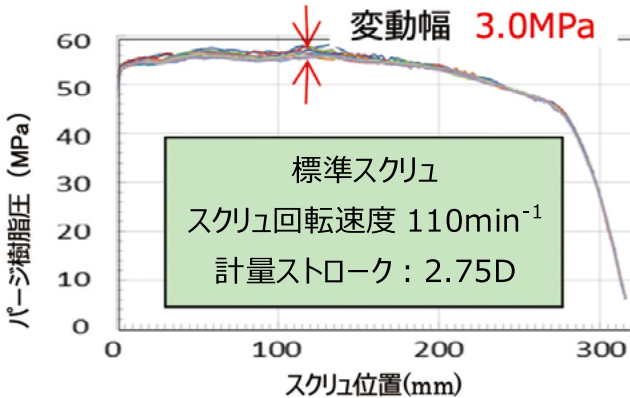


Fig. 3 Φ115mm標準スクリュのパージ時樹脂圧

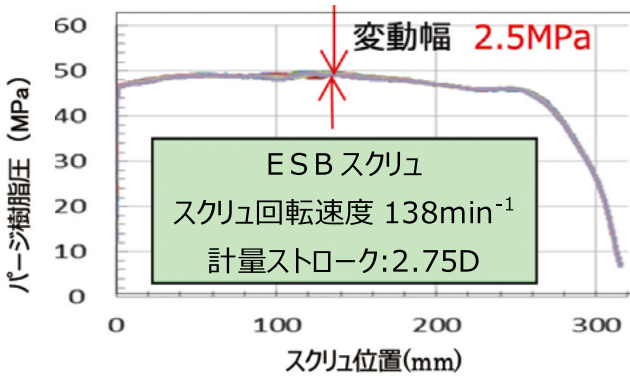


Fig. 4 Φ115mm ESBスクリュのパージ時樹脂圧

この樹脂圧変動は計量時の未溶解樹脂の混入や樹脂粘度の変化により発生するため、その変動幅が小さいほど計量した樹脂が均一な溶解状態であることを示している。

標準スクリュでは可塑性能力415kg/h時の樹脂圧変動幅が最大3.0MPaとなったが、ESBスクリュでは可塑性能力693kg/h時の同変動幅が最大2.5MPaとなり、標準スクリュに比べ1.6倍以上の可塑性能力値を達成しながらより均一な溶解状態となっていることを確認した。

(2)色分散エレメント クロスリングの効果

マスターバッチによる着色成形において、材料費削減のために高価なマスターバッチを高希釈率で成形する場合、マスターバッチの不均一な分散が、成形品表面に明確な色むらとして現れやすい。この不良は計量時間を短くする高スクリュ回転速度、低背圧条件下でより発生しやすい状況となる。

色分散性の向上には、従来からスクリュ先端にFig.5に示すようなユニメルトリングを取り付ける方法やノズル内に分散機能を設けたミキシングノズルと呼ばれる特殊ノズルを使用する方法があるが、ユニメルトリングはスクリュチップ手前で熔融樹脂の流路を絞るため、可塑性能力の低下をもたらす計量時間が長くなることで成形サイクルが増加してしまう。ミキシングノズルは可塑性能力を維持するものの、樹脂替え、色替え時にオープンノズル以上の廃棄樹脂量が必要となり、色替え作業に要する作業時間の増加や、ノズル部で圧力損失が発生し金型への充填に使用できる圧力が低下するなど、いずれも生産性を低下させる要因となる。

この課題を解決するために、ユニメルトリングのデザインを見直し可塑性能力の低下を最小化しつつ、ミキシングノズル並みの色分散性を達成するクロスリングを開発した(Fig.5)。

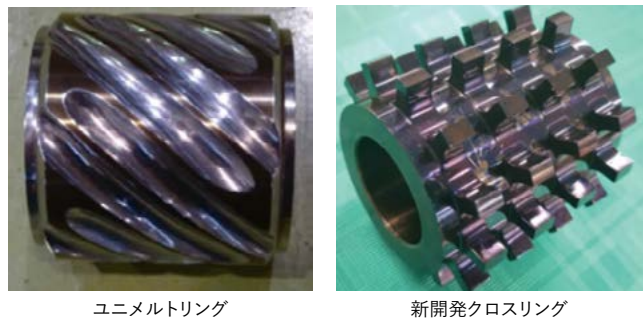


Fig. 5 色分散エレメント

以下の仕様で背圧の違いが色分散性に与える影響を比較するため、以下のテスト条件で得たデータを Fig.6 に示す。

- ・仕様 1: ESB スクリュ
- ・仕様 2: ESB スクリュ + ユニメルトリング
- ・仕様 3: ESB スクリュ + クロスリング

テスト条件: スクリュ径: Φ60mm

成形品: 書類ケース

成形品質量: 450g

樹脂: 日本ポリプロ ポリプロピレン JP5GA

マスターバッチ: 1wt% (ベージュ)

成形サイクル: 60s スクリュ回転速度: 320min⁻¹

背圧: 3MPa, 7MPa, 10MPa, 15MPa

	背圧[MPa]			
	3	7	10	15
仕様1				
仕様2				
仕様3				

Fig. 6 色分散性の比較

Fig.6 は各仕様における成形品の色分散の状態を示しており、色むらが少ないほど色分散性が良い結果を示している。全ての仕様で背圧が高いほど色分散性が向上するが、ESB スクリュ (仕様1) では背圧 15MPa でも色分散不良が確認された。一方、ESB スクリュ+ユニメルトリング (仕様2) と ESB スクリュ+クロスリング (仕様3) はどちらも背圧 10MPa 以上で色分散性は同等であり、また色分散状態も良好であった。(Fig.6 赤枠内)

次に、Fig.6 で得られたデータから色分散性の数値評価(縦軸)と可塑化能力(横軸)を背圧設定ごとに Fig.7 に示す。参考のため標準スクリュ (仕様4) も併記する。

テスト条件: スクリュ径Φ60mm

スクリュ回転速度 ESB スクリュ 320min⁻¹
標準スクリュ 220min⁻¹

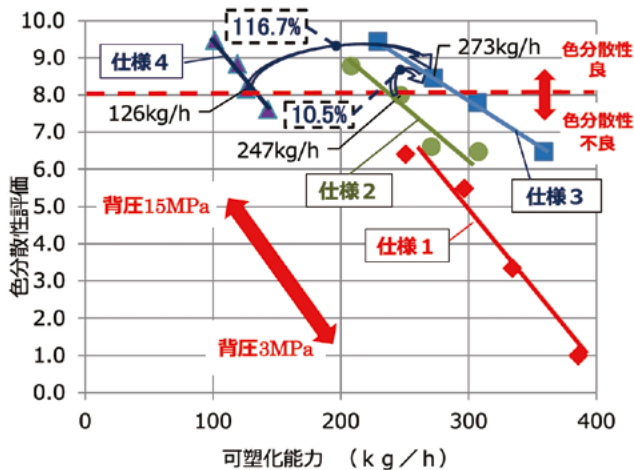


Fig. 7 色分散性と可塑化能力比較

Fig.7 の色分散性評価は当社が開発した色分散性の評価方法による点数で、8.0 以上で良好な色分散性となる。ESB スクリュ (仕様1) は全ての背圧設定で他仕様と比較し可塑化能力は高いが色分散性は背圧 15MPa でも不良となる。ESB スクリュ+ユニメルトリング仕様 (仕様2) と ESB スクリュ+クロスリング

仕様 (仕様3) は背圧 10MPa で色分散性良好で、可塑化能力はそれぞれ 247kg/h と 273kg/h となり、クロスリング仕様 (仕様3) はユニメルトリング仕様 (仕様2) と比較して 10.5% 増加する。標準スクリュ (仕様4) は背圧 7MPa で色分散性良好であるが、可塑化能力は 126kg/h であり、ESB スクリュ+クロスリング仕様 (仕様3) は標準スクリュと比較して可塑化能力が 116.7% 増加する。

この結果をもとに、仕様ごとの可塑化能力を計量時間に置き換えた事例を Fig.8 に示す。

条件: スクリュ径Φ60mm

スクリュ回転速度 ESB スクリュ 320min⁻¹
標準スクリュ 215min⁻¹
ショット質量 450g
成形サイクル 60s
背圧 ESB スクリュ 10MPa
標準スクリュ 7MPa

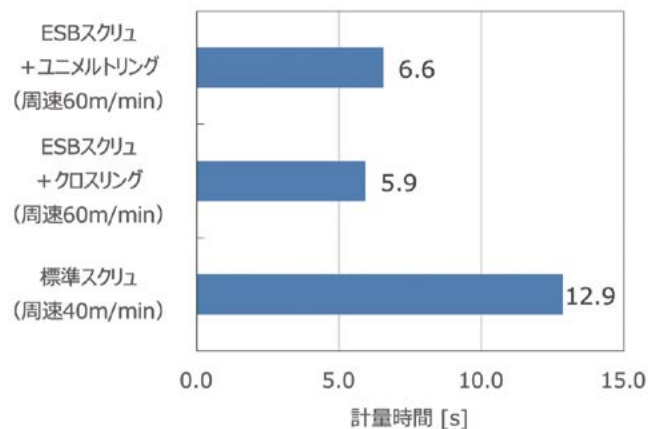


Fig. 8 計量時間比較

ESB スクリュ+クロスリング (仕様3) を装着した場合は 5.9s となり、標準スクリュの 12.9s に対して計量時間が 7.0s 短縮される。計量時間の短縮により、冷却時間が 12.9s 未満の場合はサイクル時間の短縮も可能となり、ハイサイクル化による単位時間当たりの生産数増加に貢献するとともに、一般的にオープンノズル仕様でマスターバッチの含有率が 2~3wt% での成形を 1wt% に高希釈化しても、良好な色分散状態で成形可能となり材料費の削減も可能となる。

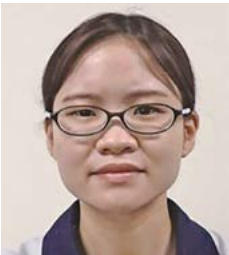
3 まとめ

今回、成形現場における生産性向上に貢献できるポリオレフィン系樹脂成形用高色分散、高可塑性能力可塑化装置の開発に関して報告した。分散エレメントは着色目的のマスターバッチ以外にも、改質、物性強化などを目的としたマスターバッチ添加の成形にも活用される重要な技術であり、品質不良による廃棄物量の削減、材料費の削減、生産性の向上などによる利益の創出だけではなく、SDGsにも掲げられている環境への負荷低減にも寄与するものと考えている。

今後も様々な樹脂、成形品に対する課題を解決するための技術開発を通して、社会に貢献していく所存である。

コラム Column

依頼を受けたときには



R&Dセンター
研究開発部 第二開発課

小川 美優

大学生の頃の話である。実験で使用する部品の製作依頼のため、図面を持って学内の機械工作室に向かった。機械工作室では、実験で使用する機器や部品の製作を行っている。部屋に入ると、工作機械がたくさん置いてあった。金属の匂いと金属音が鳴り響く部屋の中で、職員の方々はせっせと作業をしていた。職員の一に製作依頼をした。図面を見せたところ、「こういう描き方はしないよ」と教えてくださった。機械科出身でない情報科の私が作成した図面では情報

が不十分だったこともあり、図面の寸法の意味やどの程度の精度が必要か、部品の使用環境、指定した材料では加工が難しいから別の材料でも問題ないかなど、いろいろと詳しく聞いてくださった。この時、希望する部品の製作に必要な情報を把握できていなかったこともあり、自ら適切な情報を伝えられなかった。加えて、依頼を受ける側は、依頼者が何を求めているか十分に理解するため、依頼者の話をよく聞いて情報を引き出すことは欠かせないのだと思った。依頼をする際は、依頼を受ける側の視点に立ち、必要としている情報が何かをよく考えたい。反対に、依頼を受ける際は、依頼内容を正しく把握し適切な対応をできるよう心掛けたいものである。

が不十分だったこともあり、図面の寸法の意味やどの程度の精度が必要か、部品の使用環境、指定した材料では加工が難しいから別の材料でも問題ないかなど、いろいろと詳しく聞いてくださった。この時、希望する部品の製作に必要な情報を把握できていなかったこともあり、自ら適切な情報を伝えられなかった。加えて、依頼を受ける側は、依頼者が何を求めているか十分に理解するため、依頼者の話をよく聞いて情報を引き出すことは欠かせないのだと思った。依頼をする際は、依頼を受ける側の視点に立ち、必要としている情報が何かをよく考えたい。反対に、依頼を受ける際は、依頼内容を正しく把握し適切な対応をできるよう心掛けたいものである。

高機能材料創製のための押出プロセス技術最適化

プラスチック材料は成形加工性の良さや高機能かつ軽量であるなど、その長所を生かした用途が拡大する一方、海洋プラスチックごみに代表される環境負荷問題やプラスチック材料使用量削減に向けた社会動向など、プラスチック業界を取り巻く環境はより厳しくなっている。本稿ではSDGsに関連し、高機能材料創製のための押出プロセス技術の最適化と題し、我々が取り組んでいるプラスチック材料製造やバイオマス由来材料の利活用プロセス技術の最適化を環境負荷低減という視点から報告する。



成形機カンパニー
押出技術部 二軸設計課

鈴木 照三



成形機カンパニー
押出技術部 営業技術課

百地 弘

1 はじめに

世界的にプラスチックごみ問題がクローズアップされ、プラスチックストローやレジ袋の廃止・有料化など、プラスチックの利用を削減する動きが加速されるなか、炭素循環型社会の早期実現や一層の環境負荷低減が求められている。

世界的には2015年に国連サミットで採択された持続可能な開発目標（Sustainable Development Goals：SDGs）の達成に向け各国で取り組みが進められており、同様にプラスチック業界においても資源の効率的利用、環境汚染防止、資源循環に根差した3R（Reduce、Reuse、Recycle）の推進や代替材料の開発、生産工場の自動化、省人化が進められている。

一方で、プラスチックは製品の使用目的や用途にあわせて利用できる優れた材料特性を持つことから、軽量化によるCO₂削減など、環境負荷低減を担う材料として期待されている。

気候変動・地球温暖化の対策では、低炭素社会の実現に向けて電気自動車（EV）やハイブリッドカー（HEV）への切り替えが進んでいる。EVやHEVには、動力源としてリチウムイオン二次電池（LIB）が利用され、このなかで、プラスチックはセパレータフィルム用部材として使用されている。

また、枯渇資源である石油の消費を抑えるとともに、温暖化防止に寄与する材料としてバイオプラスチックが注目されており、素材の創製、適用分野の拡大と共に量産化が進められている。

このように、プラスチックや代替材料の製造に係わる押出プロセス技術は環境負荷低減に直結する部分が多い。次項以下に、高機能材料創製のための押出プロセス技術の最適化に関し、押出機ラインアップを活かしたプロセス改善事例・取組について報告する。

2 超深溝型二軸混練押出機(TEM-DS/DSS)

芝浦機械製二軸混練押出機(TEMシリーズ)は、用途・目的に合わせて異なるスクリュプロファイルやトルク性能を持つ機種を複数ラインアップしている。

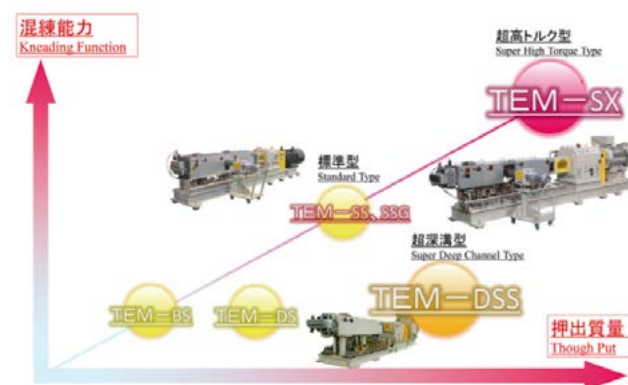


Fig. 1 二軸混練押出機TEMラインアップ

そのなかで、超深溝型“TEM-DS / DSSシリーズ”は、高トルクながらスクリュ深溝比(D/d) 1.8を採用することで、有効なせん断作用を付与できる必要最小限のフライト頂部を確保しつつ、空間容積を従来の深溝型よりも1.4倍増大した機種となっている。以下にその優位点をあげる。

・低せん断・マイルド混練性能

超深溝型と深溝型のプロファイル比較をFig.2に示す。また樹脂温度分布について、それぞれのプロファイルでシミュレーションした結果をFig.3に示す。深溝型においてフライト頂部付近で見られる局所的な温度上昇(黄色部分)を超深溝型では抑制できていることが判る。

・高喰い込み能力による高吐出化

フラフ・粉碎材・パウダなど低嵩比重原料に対して、従来の深

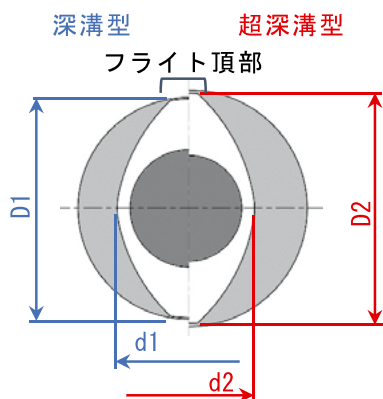


Fig. 2 プロファイル説明図

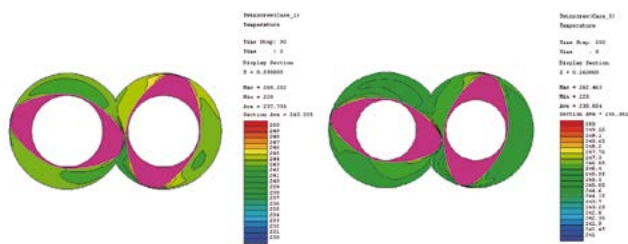


Fig. 3 プロファイルによる樹脂温度分布

溝型ではフィード限界に基づき口径選定せざるを得ないプロセスの場合でも、大きな空間容積を持つ超深溝型では、より高い原料の喰い込み性能を有するため、より小さな口径機種を選定することができる。これに伴いエネルギー消費量の低減・操作性向上などによる生産性向上を図ることができる。

・高分配混合性能・長滞留時間・脱揮性能

超深溝型は、同一芯間距離の深溝型と比較した場合、空間容積が大きくなることから同一処理量の条件下では充填率を下げられる。視点を変えると非充填空間や処理対象物の自由表面積の拡大を意味し、同一操業条件下における処理対象物の単位体積当たりの位置交換混合や表面更新作用に優れる。

また、同一条件のプロセスパラメータで比較した場合、処理対象物が機械内に滞留している時間が長くなるため(Fig.4 参

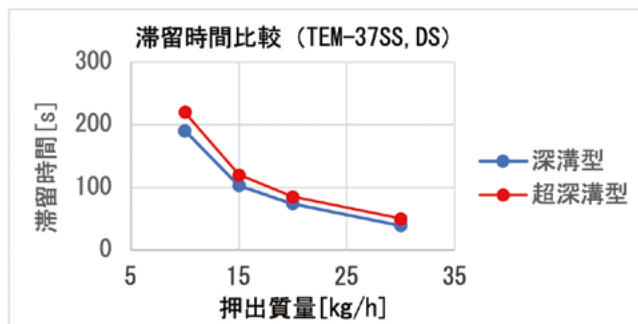


Fig. 4 滞留時間比較(原料:PP+タルク30%)

照)、化学反応を伴った熔融混練プロセス(リアクティブプロセスング)などにおいて、深溝型に比べ効果的である。そのため、従来のバッチ式生産から超深溝型の二軸混練押出機を用いた連続式へ切り替える事例も増えてきている。

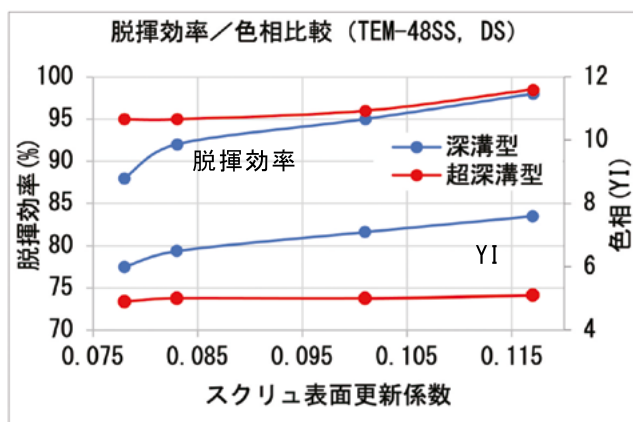


Fig. 5 脱揮効率と色相(YI)の比較

超深溝型は優れた表面更新作用と相まって、脱揮プロセスで重要となる暴露面積が、深溝型よりも大きく取れるため、揮発成分の除去分離性能が高く、低VOC材料の創製にも貢献できる。併せて、超深溝型はフライト頂部近傍の局所発熱を抑制できるため、トレードオフの関係にある脱揮性能と色相(YI)の両立にも優位性がある。Fig.5に比較検証結果を示す。

3 リサイクル

超深溝型の大きな空間容積を活かしたプロセスとして、PETボトルやフィルムの粉碎品などのリサイクル用途があげられる。なかでも各種樹脂のシート・フィルムの製造プロセスにおける、トリミングロスや二次加工時に発生する打ち抜きくず、成形不良品の粉碎品などを、ペレット化することなく直接生産ラインに戻すリサイクル利用の実績事例は最も多い。

また、二軸混練押出機と真空装置の効果的な組み合わせにより、原料の事前乾燥を省略した場合でも、加水分解などによる分子量低下や劣化を抑制できるため、低温成形性能と相まって、シート・フィルム製造への適用が急速に進んでいる。実際のシート生産現場では、粉碎原料を重量比70%以上使用している事例もあり、食品トレー、食品容器およびその蓋材などで使用されているA-PETシートはその典型的な使用例である。

これら事例の一部シートは再生トレーとして製品化され、中間層にリサイクル材を使用し、食品と接する表層にバージン樹脂を使用した多層構造を持っている。

特にPET樹脂は、高温環境下では加水分解が急速に進むため、このプロセスでは樹脂の可塑化工程において、過剰なせん

断エネルギーを与えず効率良く溶融させ、樹脂中の水分を急速脱揮することが品質を保つ上で重要となる。これらの課題は、二軸混練押出機のスクリュ構成の最適化で解決できる。

4 微多孔膜

微多孔膜は $0.01\mu\text{m} \sim 50\mu\text{m}$ 程度の微細孔を無数に有するフィルムであり、孔径や孔構造により流体や粒子の通過を制御する高機能部材である。従来用途では、紙おむつや生理用品、防護服素材などの通気用フィルムの他、光透過性や風合いの良さから電飾看板用フィルムや合成紙として紙代替などにも採用されている。最近ではリチウムイオン二次電池 (LIB) の分離膜として使用されるセパレータの需要が急増している。

急速に普及が見込まれる EV の航続距離を延ばすためには、電池の高容量化が必要不可欠であり、セパレータフィルムの更なる薄膜化が必要となるが、同時に、生産性、フィルム強度をはじめとする物性の維持向上などが課題となり、原料特性の改善や可塑化プロセスの改良が活発化している。

また、急速な電池需要の増加と価格競争に伴い、セパレータフィルム製造装置の増設と並行して、より効率的な生産を目的とした高速化、広幅化のニーズが加速しており、市場要求に対応した生産技術確立が求められている。

5 セパレータ製造装置への超深溝機の適用

セパレータフィルム製造において延伸・相分離工程が重要であるが、一方で、原料を混練する押出機プロセスもフィルム品質に大きく影響を与える。

ベース樹脂と非相溶の可塑剤 (流動パラフィン) が多量に配合される湿式セパレータフィルムの成形では、押出機を超深溝型にすることで得られる利点は大きい。特に、ベース樹脂のダメージを極小化し相分離状態における高次高分散を実現することで、薄膜化したフィルム強度の向上に寄与する。



Fig. 6 深溝型と超深溝型での混練イメージの違い

超深溝型では、空間容積が大きいため非充填空間が大きくなり、Fig.6 に示すように、攪拌しやすい状況となる。そのため、分配効果が得られやすく均質な混練を行うことが可能となる。

また、超深溝型では前述のとおり、局所的せん断発熱を低減することができる。そのため、深溝型よりも高い粘度状態を保持しながら、より低いせん断速度で効果的な混練を付与することができる。その結果、平均分子量 100 万を超える超高分子配合品セパレータ原料の均質化が可能となる。超高分子配合品と既存品によるフィルム強度の比較を Fig.7 に示す。

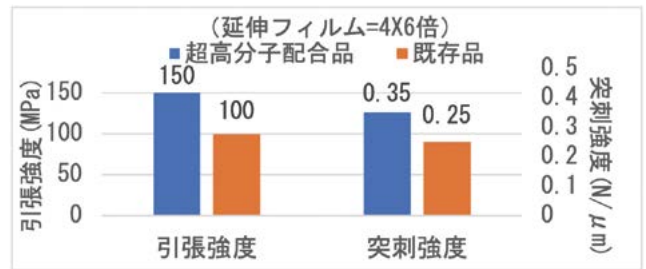


Fig. 7 超高分子配合品と既存品のフィルム強度比較

6 バイオプラスチック

バイオプラスチックとは、植物などにより再生産可能な有機物質からなるバイオマスプラスチックおよび自然界で微生物などにより分解される生分解性プラスチックの総称である。しかしながら、普及が期待される生分解性プラスチックは一般的な石油由来の汎用プラスチックに比べ、生産性が悪く、生産コストが高い。

また、成形性が悪く、熱安定性に劣るため過熱や過せん断により着色しやすい。Fig.8 にグルコース系の生分解性プラスチックを成形した際のバレル設定温度と色相の関係を示す。

色相向上させるためには、低温度成形がポイントとなるが、低いせん断速度でより有効的な混練を行う工夫が必要となる (次項でその事例を示す)。

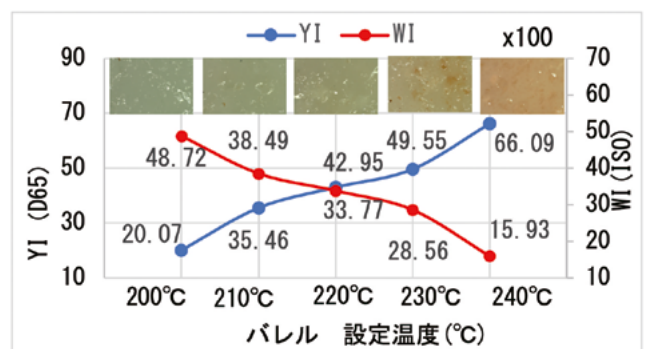


Fig. 8 成形温度と色相の関係性

7 超深溝機を用いた応用事例

当社ではABS樹脂の製造や合成ゴムの脱水乾燥などで培われた脱水成形のコア技術を保有している。この技術は親水性のバイオプラスチックの成形においても、同様に利用できる(Fig. 9に当社脱水方式を示す)。

ここで約20%水分を含む生分解性プラスチックの色相を維持しながら量産化を実現した事例を紹介する。

深溝型プロファイルを用いた標準型における成形では、残留水分過多によりベントアップやストランド切れが頻発、圧搾型では脱水性は改善されたが、圧搾後の過せん断により、色相が大きく悪化した。蒸発型を適用すると、持ち込み水分の蒸発潜熱を活用しながら段階的に水分除去できたことで良好な結果が得られた。

この結果を受け、超深溝型に展開したところ、局部発熱の抑制効果により、色相が大きく改善する傾向が見られたものの、脱水不足で処理量の増大には繋がらなかった。期待した結果が得られなかった要因は深溝型からの単純な装置構成展開であったと判断し、スクリュ構成の適正化と最適な操業条件探索により、最終的には深溝型の約1.4倍の処理能力向上を達成した。

水分量 目安	脱水 方式	装置構成
0-5%	標準型	
5-20%	蒸発型	
20%~	圧搾型	

Fig. 9 二軸混練押出機による脱水成形

8 おわりに

産業構造の変化や経済成長の成熟にともない、当社が扱う押出成形機のニーズも多様化してきている。これまでのような大容量化・高品質化という面だけではなく、環境保全や低炭素社会の実現を見据えた高機能材料創製プロセス提案が益々重要になると考えている。今後もこれらを装置メーカーの責務と捉え、事業活動を通じて持続可能な社会の発展に寄与して行きたい。

BTA 方式深穴あけ盤 DBH による高精度加工技術の開発

BTA 加工とは、Boring & Trepanning Association(ボーリング・トレパン加工)の略称で、金属加工での重要な工程の1つである深穴切削加工のことを示している。この加工方法には、高速で綺麗な深穴を掘れる(深穴加工)というメリットがある。穴加工は加工工程の最初で行う事が大半を占め、後工程ではこの穴が基準となるため、加工した穴の曲がり(倒れ)や真円度についてはそれほど高い精度が求められていなかったが、近年では工程集約や加工効率向上を目的として、最終工程における基準を外寸法基準にし、その基準に対する穴加工精度が求められる事も少なくない。本稿では BTA 方式深穴加工の概要と、工程集約を目的とした高精度深穴加工を実現するための技術について紹介する。



工作機械カンパニー
工作機械技術部
第二設計課

関 和 浩



工作機械カンパニー
工作機械製造部
第二製造課

伊 藤 健

1 はじめに

深穴加工機の世界市場は 2020 年から 2027 年にかけて年平均成長率 5.8% で成長し、同年には 2019 年比 126% まで拡大する見込みがある。また深穴工具に限っては 2020 年から年平均成長率 4.75% との予測もあり、その成長ドライバーは、電気自動車部品への注目が高まる自動車産業を筆頭に、自動化需要の高まりを受け大型でも高精度な稼働が今後ますます必要となる産業機械分野、インフラやエネルギー産業、宇宙航空・防衛などが挙げられる。深穴をより一層綺麗に精度良く加工する事が出来る様なになれば、工程集約や加工効率の改善、更には、その部品が自動車や建設機械、産業機械の駆動部に使用される事による駆動部の摩擦抵抗を減らす事に寄与し、燃費向上やエネルギー消費の抑制に貢献できるようになる。また、発電関連の部品であれば、損失が低減し効率の良い発電につながる。以下に、当社製品である BTA 方式深穴あけ盤 DBH-1015C を使用し、深穴加工の高精度化に取り組んだ内容と結果について紹介する。

2 BTA方式深穴あけ盤の概要

2.1 BTA加工とは

深穴あけとは、一般的に穴の深さが穴径の 100 ~ 200 倍の穴をあける加工である。BTA 方式はその構造上、切粉の排出、剛性、生産性という観点で非常に優れているため、高速で綺麗に穴あけ加工を行える特長があり、BTA 方式が深穴あけ加工において第一推奨とされる理由である。BTA 方式では、切削油はタンクから加工物に接したオイルプレッシャーヘッド(圧力頭)に送られ、あけられた穴とボーリング・バーの間のリング状の空間を通過して刃先に達し、切屑とともにボーリング・バーの中を通過してオイルタンクに戻る(Fig.1)。

従って切屑はあけられた穴の内面に接触しないので、穴の内面を害することがなく、非常に綺麗な加工面に仕上がる。

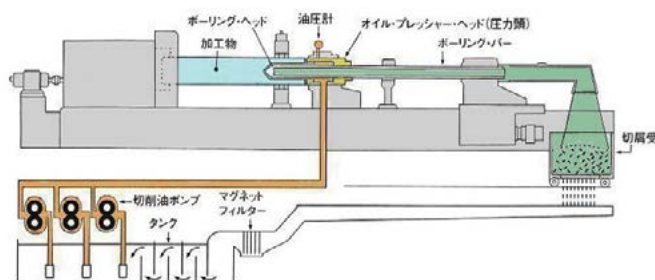


Fig. 1 BTA 方式深穴あけ盤概略説明図³⁾

2.2 | BTA加工の種類

BTA加工には、ソリッドボーリング加工、トレパニング加工、カウンタボーリング加工という3つの加工方法があり、それぞれ目的や特徴がある (Fig.2)。



Fig. 2 BTA加工の種類³⁾

2.3 | BTA加工機の種類

BTA加工の被削材としては、構造用鋼、ステンレス鋼、ブリハードン鋼、軸受鋼 (ベア鋼)、工具鋼 (炭素・合金・高速度工具鋼等)、耐蝕・耐熱合金、チタン系、アルミニウム系、銅系、樹脂系などの素材に用いることが多く、形状についても丸棒材のみではなく角棒材やブロック形状に対しても加工する事が可能である。ただし、被削材の形状により加工機の仕様と加工方法が異なるので、一般的な仕様を Fig.3 に示す。

ワーク回転+工具固定 素材形状は丸棒材、角棒材 (チャック爪成形必要) の中心穴加工に使用。 ※DBHはこのタイプ (Fig. 4)	 穴曲がり：小
ワーク回転+工具回転 素材形状は丸棒材、角棒材 (チャック爪成形必要) の中心穴加工に使用。 一般的に相対回転形と呼ばれ、他の加工機よりも穴の曲がり小さいのが特徴	 穴曲がり：最小
ワーク固定+工具回転 素材形状は問わず、多孔加工にも使用できるのが特徴 ワーク側か工具側に移動軸を備えている。 穴の曲がり大きい	 穴曲がり：大

Fig. 3 BTA加工機の種類 (株)河原 HP 参照⁴⁾



Fig. 4 BTA方式深穴あけ盤 DBH-1015C

2.4 | DBH-1015Cの主仕様

Table 1 仕様表

1	加工物の最大長さ	1500	mm	
2	加工物の最小長さ	220	mm	
3	加工物の振れ止め支持径	φ30~φ200	mm	
4	加工物の振れ止め支持最大質量	500	kg	
5	加工物の把持範囲	φ30~φ200	mm	
6	穴あけ径	ソリッドボーリング	φ12.0~φ65	mm
		トレパニング	φ50~φ100	mm
		カウンタボーリング	φ16~φ100	mm
7	穴あけ最大長さ	1500	mm	
8	圧力頭クランプ径	180	mm	
9	圧力頭クランプ長さ	285	mm	
10	圧力頭使用可能範囲	U2~U5		
11	バー振れ止め最大支持径	94	mm	
12	中ぐり台の移動距離	2980	mm	
13	主軸回転速度	100~1400	min ⁻¹	
14	中ぐり台の切削送り速度	1~1260	mm/min	
15	中ぐり台の早送り速度	4000	mm/min	
16	主軸駆動用電動機の出力	45/37	kW	
17	切削油ポンプ用電動機の出力	高圧用(7.0MPa)	7.5	kW
		中圧用(4.0MPa)	11	kW
		低圧用(1.5MPa)	11	kW
18	中ぐり台送り用電動機の出力	1.4	kW	
19	機械質量	9400	kg	

3 | 高精度深穴加工テスト

3.1 | 目標加工精度

Table 2 目標加工精度

材質	面粗度	穴あけ [mm]	加工精度 [mm]		
		径×長さ	同軸度	真円度	径バラツキ
SCM440焼準材	Rz12.5	φ40.0×700	◎0.05	○0.02	φ0.03

近年の市場要求をもとに、ソリッドボーリング加工にて、Table 2 に示す加工精度を5本連続で達成することを目標として各種検証を行った。前述のように一般的に深穴加工は最初の工程である場合が多く、求められる精度も面粗度と真直度のみであることが多い。これは、深穴加工した穴を次工程以降の基準とするためである。そのため、高送りによる高効率加工を重視するため、一般的に深穴加工精度の目安としては直径公差IT10、同軸度1mm/1000mmとされている。

3.2 | 通常加工テスト結果

現状の加工精度を確認するため、Table 3 に示す切削条件で加工テストを実施した。その加工結果を Table 4 に示す。(使用工具:後方ガイド付スローアウェイ式)

Table 3 切削条件

周速	送り	切削油量
73m/min	0.04mm/rev	55L/min

Table 4 通常加工テスト結果

	加工精度 [mm]		
	同軸度	真円度	径バラツキ
1	φ 0.070	0.014	φ 0.008
2	φ 0.095	0.015	φ 0.005
3	φ 0.020	0.018	φ 0.007

結果より、3本連続加工中1本は目標精度内に入るデータもあるが、現状の加工法では、目標精度を連続で満たすことが困難であることが明らかとなった。

3.3 | 機械各種検証

3.2 項の結果より深穴加工の同軸度に影響を及ぼす要素の検討を行った。

- ① 主軸台などのアライメント不良 (静的精度)
- ② 機械本体の剛性不足 (静的・動的)
- ③ ワークの芯出し不良
- ④ ワークの硬度ムラ (金属組織、下穴の偏肉)
- ⑤ 切削速度及び送り速度
- ⑥ 切削油剤の供給流量、圧力、温度
- ⑦ 工具の形状、材質 (チップ / ガイドパッド)

各項目について加工検証を行ったが、項目①~⑥の改善や変更では、目標精度を達成するには至らなかった。各項目の検証結果は以下の通りである。

- ① ワーク回転式の場合、ワーク回転軸に穴あけ工具が寄っていく求芯効果が得られるため、中ぐり台やバー支えのアライメントの影響は小さい。但し、主軸 (ワーク) とガイドブッシュのアライメントは直径公差に影響する。
- ② DBH-1015C は静剛性、動剛性ともに十分な能力を確保している。
- ③ ①と同様に、同軸度に与える影響は小さいが、直径公差に影響するので注意が必要である。

- ④ SCM440 の生材と比較を行ったが、有意な差は見られなかった。但し、硬度が高く組織ムラが少ないと同軸度が良くなる傾向である。
- ⑤ 送り速度が早いと同軸度は悪化する傾向である。
- ⑥ 切削油剤の流量、圧力、温度が同軸度に与える影響は見られなかった。切削油の流量を増加させるとワーク内で工具の微振動が発生することによる面精度悪化が見られた。

3.4 | 工具検証

3.3 項の内容より、加工精度への関連性が大きい項目が見出せなかったため、工具関係について検証を行った。工具については形状に関する検証と、ガイドパッド等 (Fig.5) の寸法調整に関する検証を行った。

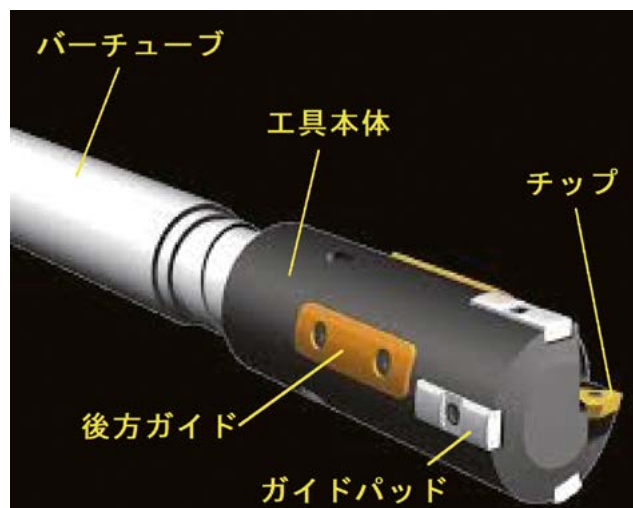


Fig. 5 工具各部の名称

3.4.1 | 工具構造の違いによる検証

3種類の工具を用い、同一加工条件による加工精度変化の検証をした。加工条件は Table 3 と同じ。

- ① 後方ガイド付スローアウェイ式工具
- ② 後方ガイド無しスローアウェイ式工具
- ③ 後方ガイド無しロウ付け工具

*①と②は同一メーカーの工具

各工具での加工結果を Table 5 に示す。

Table 5 工具検証結果

工 具	加工精度 [mm]	
	同軸度	径バラツキ
①	φ 0.205	φ 0.015
②	φ 0.580	φ 0.010
③	φ 0.350	φ 0.042

同一の切削条件であっても、工具によって加工精度が変化することが確認できた。また、Fig.6 に示すように、①と②の加工結果を比較すると、後方ガイドの有無により真直度（穴の曲がり）に違いがみられ、後方ガイドは真直度に影響を及ぼすことがわかった。

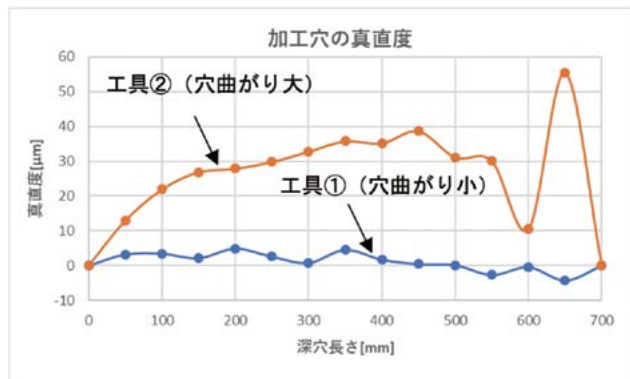


Fig. 6 後方ガイドの有無による穴真直度比較

3.4.2 | 工具調整

一般に、ガイドブッシュの内径の推奨公差は加工穴径に対しG6公差、工具径はh8公差である。そこで公差範囲内でガイドブッシュ内径に対する工具径及び後方ガイド径のクリアランスを調整し、同軸度に与える影響を検証した。検証した条件は以下のとおり。

- ① クリアランス公差範囲下限付近(クリアランス小)
- ② クリアランス公差範囲中間付近
- ③ クリアランス公差範囲上限付近(クリアランス大)

加工結果を Table 6 に示す。

Table 6 工具調整検証結果

	加工精度 [mm]	
	同軸度	径バラツキ
①	φ 0.015	φ 0.020
②	φ 0.038	φ 0.012
③	φ 0.155	φ 0.017

ガイドブッシュ内径に対する工具径及び後方ガイド径のクリアランス量が多いほど同軸度が悪くなる傾向であることが確認できた。①のようにクリアランス量を過剰に小さくすると真円度不良につながることも確認できた。

4 連続加工

検証結果を踏まえ、後方ガイド付工具のガイドブッシュ内径に対する工具径及び後方ガイド径のクリアランス量を最適調整し、連続加工試験を実施した。加工条件は Table 3 と同様である。クリアランス量を適切に管理することで目標精度を連続で達成できた。

加工結果を Table 7 に示す。

Table 7 連続加工結果

	加工精度 [mm]		
	同軸度	真円度	径バラツキ
1	φ 0.028	0.006	φ 0.009
2	φ 0.012	0.005	φ 0.007
3	φ 0.016	0.006	φ 0.006
4	φ 0.020	0.006	φ 0.006
5	φ 0.043	0.004	φ 0.007

5 考察

以上の加工検証及び結果より、深穴加工において、工具径とガイドブッシュ内径及び後方ガイド外径の寸法管理が、深穴の同軸度や真円度に影響する事が確認できた (Fig.7 赤文字部)。

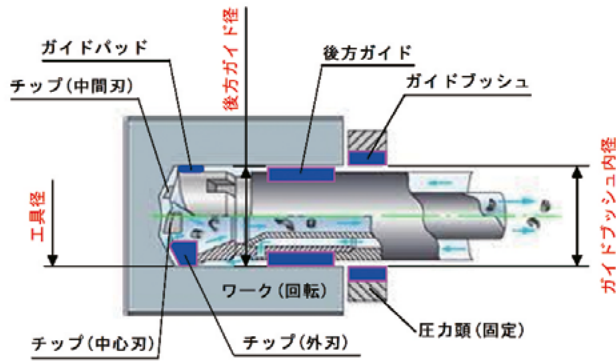


Fig. 7 加工部詳細

一般的に工具の管理及びガイドブッシュの運用についてはお客様所掌であり、その加工精度についてもお客様管理である。今後 BTA 方式深穴あけ盤にて生産性向上のために高精度に加工されることを希望するお客様に対して、今回の検証を例に、ノウハウとしての提案を行う事ができ、さらに工具メーカーとのパートナーシップにより加工機械だけでなく、深穴用工具の活用方法や最適工具の提案も行っていきたい。これら提案により加工条件の形式知化や深穴工具の品質・性能が向上し長寿命化すれば、加工品質の向上による生産工程の最適化や、不良品、消耗品等の産業廃棄物が減り、環境負荷低減にも効果が期待できると考える。

6 おわりに

本稿では、今まであまり求められていなかった深穴の加工精度について検証を行ったが、異なる材質やタイプの違う工具、また、カウンタポーリングやトレパニングと言った異なる加工方法についての検証も今後進めて行きたい。

参考文献

- 1) Reportocean.com 『深穴ボール盤市場調査レポート』
- 2) ANCA 社 2020 年 1 月『NewsLetter』
- 3) 日本ビーテーエー株式会社『深孔あけ加工』
<http://www.fukaanaake.com/btaex.html>
(参照:2021-11-18)
- 4) 株式会社河原『BTA ドリルマシンとは』
https://www.kawahara-machine.com/product/bta_index.html
(参照:2021-11-18)

燃料電池 (FC) スタックの高出力密度化に貢献する超精密加工技術

2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略としてモビリティの脱炭素化への挑戦を掲げられる中、特に燃料電池自動車への期待が高まっている。その電源部となる燃料電池スタックは実用化にむけ急速な高出力密度化が進められているが大幅な技術革新の一因として、電源ユニット内に数百枚実装されるセパレータと呼ばれる金属薄板の流路の高精度化が挙げられる。この微細セパレータ形状の高精度加工を実現するために開発された超精密加工技術の適用事例を紹介する。



工作機械カンパニー
工作機械技術部
第一開発課

栗山 邦隆

1 はじめに

2020年末に日本政府は2050年までに達成するという政策目標として、二酸化炭素をはじめとする温室効果ガスの排出量と吸収量をプラスマイナスゼロにする2050年カーボンニュートラル、脱炭素化社会の実現を目指すことを宣言した。2018年の集計では国内の二酸化炭素排出の約11億トンのうち約20パーセントが自動車によるものとされ¹⁾、これからの脱炭素化社会への適合のため大きな変革が求められる。この流れを受け、近年では電気自動車 (EV)、燃料電池自動車 (FCV) などの技術開発が急速に進んでいる。燃料電池自動車では水を燃料とし水だけが排出されるが、化石燃料を燃料とせず水素は限りなく生成可能なため多くの環境問題を解決に導く究極のクリーンモビリティとして大きな期待が寄せられている。²⁾

このFCVに搭載される燃料電池、電池と名前は付いているものの実際には小型の発電機のようなもので、水素と空気中の酸素の電気化学反応によって電気を発生させる装置である。燃料電池は高分子電解質膜の両側に電極触媒が塗布された膜/電極接合体 (MEA) を空気流路と水素流路を分離して構成されたセパレータと呼ばれる薄板で挟み込んだ構造をとる。Fig.1にセルと呼ばれる一組の構造の概観図を示す。このセルを数百枚重ねて実際の燃料電池 (FC) スタックのユニットが形成される。³⁾

この燃料電池スタックは、2008年の開発初期型では1.4kW/L (最高出力90kW / 体積64L (重量108kg)) であったが、最新型では3.1kW/L (最高出力114kW / 体積37L (重量56kg)) と体積出力密度2.2倍になるなど急速な小型化・高性能化が進んでいる。⁴⁾

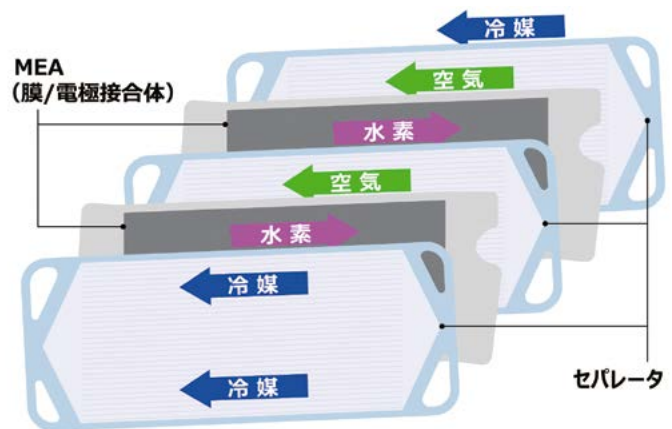


Fig.1 燃料電池スタックの単位セル構造⁵⁾

燃料電池スタックがこれほどの出力密度向上を遂げた要因としては、MEAやセパレータなどの各要素の高性能化が挙げられる。そこでセパレータには主に、(1)表面と裏面に流れる水素と空気の完全分離すること (2)流れる水素および空気に接触する表面積を大きくするために流路形状を微細複雑化すること (3)ユニット全体を高密度化するためにセルを薄板化すること、これら3点が主に求められる。ところが、従来のプレス工程では金型の加工精度が十分でないため成型されたセパレータの板厚が不均一になってしまい極端に薄い箇所が生じる事がある。最悪のケースではセパレータ板に穴が開き水素と空気が混ざる不具合が発生する。そのため燃料電池のセパレータには微細な流路形状は満足した上で板厚を均一にプレスする高精度金型が必要となる。そこで本稿では、燃料電池スタックを高性能化させるために開発された超精密流路形状加工法および精度補正方法を適用した事例について紹介する。

2 超精密立形加工機UVM

本稿では燃料電池セパレータの高精度化を実現するため超精密マシニングセンタ UVM を用いて検証を行った。UVM シリーズは、光学レンズの分野で活躍する ULG シリーズで培われたナノメートルオーダの要素技術⁶⁾を汎用加工の領域に落とし込んだ超精密マシニングセンタである。UVM のラインナップ 4 機種の外観を Fig.2 に示す。シリーズ標準機種のテーブルサイズ 450mm × 450mm の UVM-450C。大型ワーク対応のため、テーブル作業面サイズを 700mm × 700mm、最大積載質量を 400kg に拡大された UVM-700C。対環境変動強化のため構造体恒温化システムを採用し、制振および高精度位置決めのため内部構造が強化された UVM-450D。自動車用ヘッドライトなど大型ワークに対応し高い自由度を実現するため 5 軸仕様とした UVM-700E(5AD)、がある。全ての UVM シリーズには構成要素として、主軸に最高回転数 60,000min⁻¹の自社製空気静圧軸受主軸を搭載し、全直線軸には最小設定単位 10nm のリニアモータ制御を採用している。

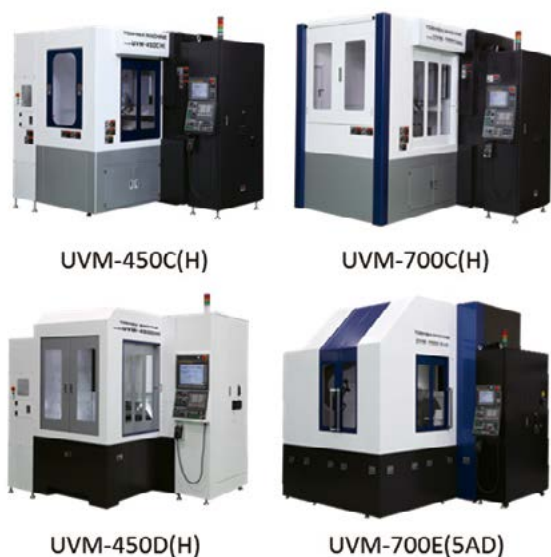


Fig. 2 超精密立形加工機 UVM シリーズ

3 UVMの構成要素技術

3.1 空気静圧軸受主軸

弊社の超精密加工機では 1970 年代より空気静圧軸受主軸を開発してきた。一方で一般的なマシニングセンタはベアリング軸受の主軸が採用され、超精密を謳われているほとんどのマシニングセンタでさえもベアリング軸受が採用されている。確か

に超精密用では軸受を超軽与圧にするなどの工夫がなされているが、ベアリングは転動体が常に内外輪と接触しているため回転した際の振動、発熱、摩耗が不可避となる。そのためベアリング主軸は空気静圧軸受と比べると ①回転精度が劣る、②高速回転時の発熱、③経年劣化が避けられない、といった望ましくない特徴がある。

UVM に採用されている空気静圧軸受は、回転軸とハウジング間に圧縮空気を供給することで主軸を軸受から浮上させ、空気静圧により保持する構造を取る。空気層が精度誤差成分を平滑化するため、回転軸や軸受の真円度及び粗さなど回転精度に悪影響を与える各部品の加工精度を越えて滑らかに回転する事が可能で振動が抑制される。Fig.3 に変位計で測定した実際の回転精度比較を示す。図中左のベアリング主軸では回転により転動体がゴロゴロと動き異常な振動誤差があるのに対して、右図の空気軸受では異常な振動誤差は見られず滑らかな軌道で回転している事が分かる。

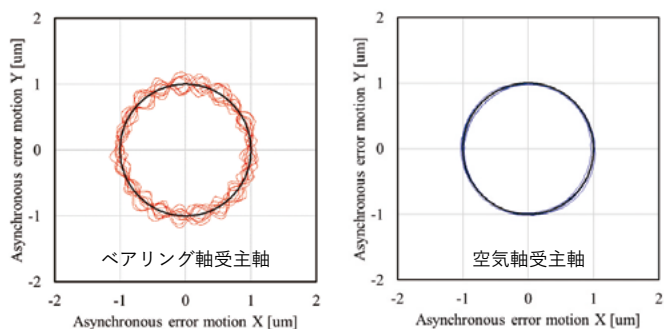


Fig. 3 ベアリング軸受と空気軸受の回転精度比較

3.2 リニアモータ駆動制御

UVM の直線軸駆動には全てコア付リニアモータが搭載されている。高剛性化が図られた案内機構には、コア付リニアモータで懸念される磁気吸引力による運動精度低下を最小化する構造が取られ、利点である高いポジションループゲインを設定が可能で、スケールフィードバック 0.5nm の制御分解能が得られている。その結果 10nm のステップも正確に制御可能なレベルにまで送り系の性能向上が図られている。

Fig.4 に工具刃先と同じ実際の加工点で測定された 10nm ステップ送りに対する応答波形を示す。波形より、刃先での位置決め誤差が抑制され、高応答で正確かつ円滑な反転動作特性が得られていることが分かり、加工面品位の改善と金型製作における磨きやバリ取りなどの手仕上げの最小化を実現している。⁷⁾

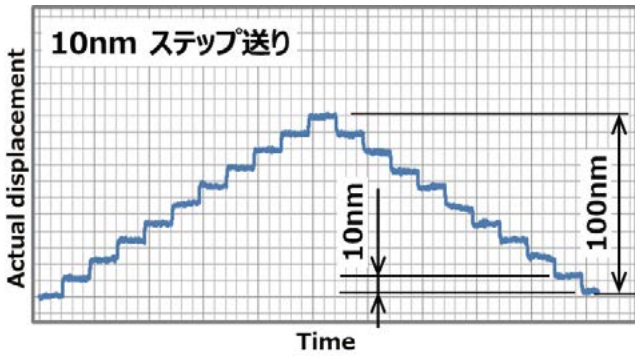


Fig. 4 UVM 加工点上の 10nm ステップ応答

4 高精度化に向けた加工技術

超精密加工における精度には主に二つの評価基準がある。カタチの正しさを表す『形状精度』と鏡面性を表す『面品位(粗さ)』になる。超精密ミリング分野では、機械そのものの位置決めを高精度化することに加えて計算精度の高い3次元CAD/CAMを用いて正しい工具経路の算出をすることで高い『形状精度』を獲得し、高速回転主轴を用いて切屑を最小化しワーク変形を抑制することで高い『面品位』を獲得してきた。しかし高い形状精度が必要とされるセパレータ金型では現状の加工技術では満足しないため、さらなる高精度化を目指しボールエンドミルの持つ精度誤差成分を補正する加工技術を開発した。

4.1 | 高精度工具形状測定器FormEye

工具測定器は従来のマシニングセンタにも設置され、回転工具の位置や径を測定し加工されてきた。UVMでもラインセンサ式の工具測定器を用いており工具輪郭形状を測定機能自体は有していた。しかしこれまでの方式では工具輪郭形状を測定した際に、ラインセンサの縦横切替時に測定器側に大きな内装誤差があるため工具45°付近で大きな段差が発生し高精度補正加工の実現に対し大きな障壁となっていた。これはセンサ構造上回避できないため工具輪郭形状がより正確に測定可能な方法への置換を検討したところ撮像式が最も適していると考えられた。しかし撮像式は、ユニットが高価で、測定時間が長くなる傾向がある。撮像式の測定が長時間化する原因としては、①画面全体の画像処理に時間を要する事、②高速回転する工具が撮影時にどの位相で回転しているか把握できないため必要な位相の写真が撮れるまで無尽蔵に撮影を続ける必要がある事、の2点になる。②については空気軸受を内製化しているため、位相認識用の回転センサをスピンドル内部に組込み高速回転中の位相を把握する事が可能で最小限の撮影枚数で測定を完結させることが可能である。さらに撮影枚数が最小化したことによ

り画像処理に要する時間も減少し高速な処理が可能となった。Fig.5にFormEye測定中の外観を示す、FormEyeは既存の工具長測定器と同じような設置と取り回しが可能で特殊な処置は不要である。Fig.6に工具輪郭形状の測定結果を示す。この測定結果より新品状態の工具でも理想的な真円形状から約4μmもの誤差がある事が分かり加工誤差に直結する。また本測定機能は加工後の摩耗などによる詳細な工具刃先の損傷経過も逐一把握でき正確な工具寿命管理が可能になる。⁸⁾



Fig. 5 FormEye 測定概観

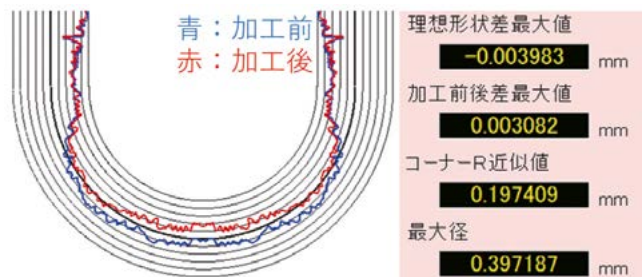


Fig. 6 工具輪郭形状測定結果

4.2 | 工具経路ベクトル補正

超精密ミリングでも加工プロセスは、①3D-CADでのモデル作成、②CAMでの加工パス生成、③実加工、④測定解析、と言った流れを取る。FormEyeにより正確な工具輪郭形状データの取得は可能となったが、現状ではどんなに計算精度の高い3次元CAD/CAMを用いたとしても工具は理想的な真円形状にしか定義することができない。そのためFig.6で示すような実際の工具輪郭形状に4 μm もの誤差がある場合、その誤差は加工ワークの形状誤差成分となりそのまま転写される。理想形状となる真円に対して工具が出っ張っていれば、加工ワークは削られ過ぎ、反対に真円よりも工具が引っ込んでいれば、加工ワークは削り残しが生じることになる。誤差補正をするために必要になるのが、どの方向にどの距離だけ逃がす、または突っ込むかの情報になる。FormEyeにより工具輪郭の凹凸情報が得られているので、あとはワーク表面上の任意の加工点において、それぞれ工具のどの位置が作用しているか特定できればよい。

そこで本課題を解決するソフトウェアとして「工具経路ベクトル補正」という誤差補正機能を開発した。工具経路ベクトル補正では、3次元CADデータを用いて工具の各接触点を特定して、どの方向に動かすかの情報を付与する。工具経路ベクトル補正の概略図をFig.7に示す。従来のプロセスでは3Dモデルに対して工具半径値を入力し算出されたNCデータを用いて加工を行う、その後の解析でNGであれば、3Dモデル修正と最適工具半径値を入力によるNCデータの再計算などで100時間近く要する事もある。さらに加工の出来が悪い場合には、この修正加工のルーチンを数回繰り返すことになり極めて大きな製作時間ロスとなる。対して工具経路ベクトル補正を用いたプロセスでは、FormEyeによる測定値に従って機械側で自動的にNCデータの座標数値が補正されるため、3Dモデル修正やNCデータ再作成不要の「CAMに戻らない誤差補正手法」となり、非加工工程による製作時間ロスを大幅に軽減する事が可能となった。

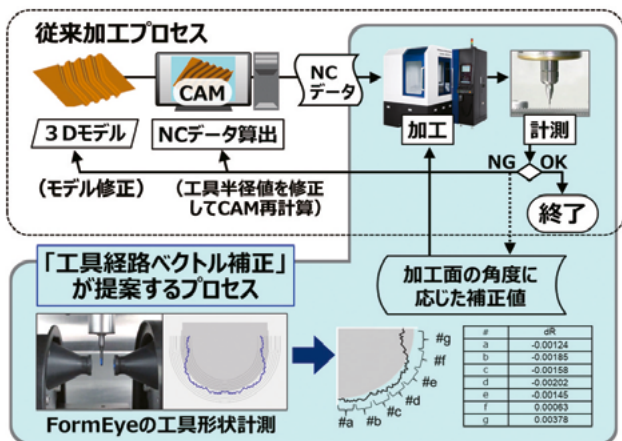


Fig. 7 工具経路ベクトル補正概略図

5 加工検証

FormEyeと工具経路ベクトル補正を用いて形状精度を向上することを目的としたセパレータ形状の加工検証を行った。加工検証用のセパレータ形状の3Dモデルと断面図をFig.8に示す。ワーク材質は金型用ステンレス鋼(HRC52)で、工具はcBNボールエンドミル(R0.5mm)を使用し、Fig.9にFormEyeの工具形状測定で得られたボールエンドミルの輪郭精度および工具補正量を示す。工具輪郭形状から計算される補正量は、工具回転中心の0°付近では補正量は最小で、外周部に行くにつれ補正量が増加し90°付近で最大補正量の2.5 μm を取っている。よって補正ナシで加工すると、形状精度は $2.5 + \alpha$ (摩擦や外乱の影響) μm になり、ワークの角度が90°の立壁に近づくにつれて工具の輪郭誤差による削り過ぎが発生すると予想される。本工具を用いて、工具経路ベクトル補正アリ/ナシによる補正効果の比較加工テストを行った。加工面断面の形状精度は、FormTalysurf PGI850A(TAYLOR HOBSON社)で測定した。Fig.10にベクトル補正ナシでの加工結果を示す。形状精度は $-3.2 \sim +0.2\mu\text{m}$ (PV:3.4 μm)と設計値から大きな誤差を発生し要求精度を満たすに至らない。ワーク表面の角度0°付近では誤差なく削られているのに対し、ワーク表面の角度が90°に近づくにつれて削り過ぎの現象が見られる。Fig.11にベクトル補正アリでの加工結果を示す。ベクトル補正アリの加工結果では、ベクトル補正ナシで見られた削り過ぎの現象は改善され、設計形状に対してほとんど誤差のない形状が得られている事が分かる。このときの形状精度は $-0.6 \sim +0.7\mu\text{m}$ (PV:1.3 μm)となっており、セパレータ金型に要求される、 $\pm 1\mu\text{m}$ 以下の形状精度が達成された。

6 おわりに

本稿では、燃料電池スタック用セパレータの形状高精度化に対応した加工技術開発の一つの事例について解説した。本件のみならず多くの工業製品は目覚ましい勢いで高性能化しており、それに伴い構成要素部品も著しい高精度化、微細化が進んでいる。そのためナノ加工技術が求められる市場は拡大していると言えるが、従来の製造工程では適合できない領域も増え、既存の枠組みを越えた生産プロセスそのものの検討が求められている。これからも新たな視点でニーズを捉え、モノづくりにおけるナノ加工技術の適用範囲の拡大に努めていきたい。

参考文献

- 1) 日本自動車工業会,「日本の自動車工業 2020」,30
- 2) 大仲英巳、トヨタにおける燃料電池自動車の開発、水素エネルギーシステム 34,2,(2009)10-17
- 3) 宮澤篤史ら、小型高出力・低コスト新型燃料電池スタックの開発、自動車技術会 40,5,(2009),1267-72
- 4) 中路宏弥ら、高性能・低コスト FC スタックの開発、生産と技術 68,2,(2016),72-75
- 5) 本田技研工業(株)ホームページ、クラリティ FuelCell
https://www.honda.co.jp/tech/auto/CLARITY/five_seater.html (参照:2021-10-18)
- 6) 芝浦機械(株)ホームページ、ULC/ULG シリーズ
https://www.shibaura-machine.co.jp/jp/product/nano/lineup/ulg_lg/ (参照:2021-4-12)
- 7) 天野啓、超精密マシニングセンタによる金型加工の高精度化・効率化技術、型技術、2021年2月号
- 8) 室伏勇、機上工具形状測定的重要性と高精度工具形状測定器 FormEye について、型技術 2021年6月号

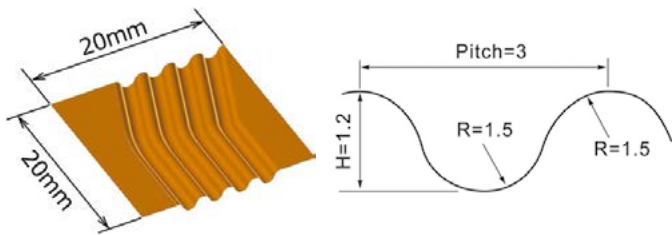


Fig. 8 加工 3D モデルと断面形状

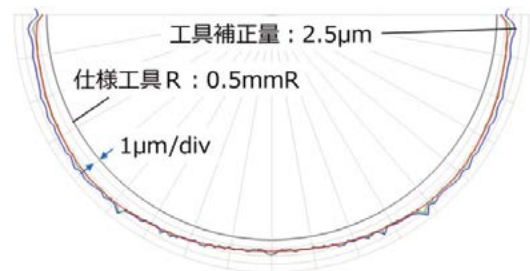


Fig. 9 工具補正量

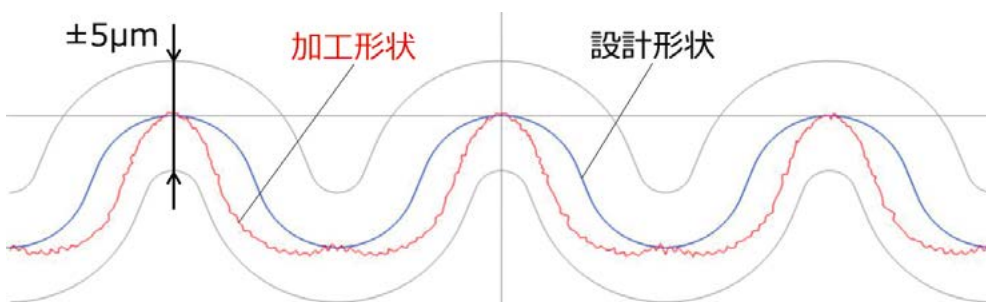


Fig. 10 ベクトル補正ナシでの断面形状精度

補正ナシ形状精度
 -3.2 ~ +0.2 μm
 (PV:3.4 μm)

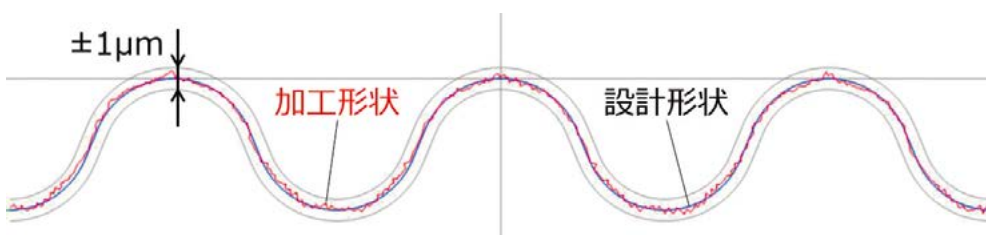


Fig. 11 ベクトル補正アリでの断面形状精度

補正アリ形状精度
 -0.6 ~ +0.7 μm
 (PV:1.3 μm)

レゾルバ多回転アブソリュートシステムのバッテリー長寿命化によるサーキュラ・エコノミへの貢献

近年、世界的な SDGs への関心の高まりは、大きな潮流となって各国において資源の有効活用やカーボンフリーへの取組みを加速している。当社 BS サーボシステムには、サーボモータの位置検出にレゾルバを適用した「レゾルバ多回転アブソリュートシステム」という絶対位置検出システムがあるが、停電時にはバッテリーで回路を駆動するため、その消費電力がバッテリーの寿命を決定する。このレゾルバ多回転 ABS システムでは、創意工夫によって省電力化を進め、バッテリーを長寿命化することでメンテナンス期間を延ばすとともに、バッテリーとして使用される一次電池の削減を目指して取り組んできた。本稿ではその取組みについて紹介する。



制御機械カンパニー
制御機械技術部
ハードウェア技術課

横川 成年



制御機械カンパニー
制御機械技術部
ハードウェア技術課

渡邊 年也

1 はじめに

昨今、SDGs への関心が高まる中、これを実現する実践的な考え方の一つである「サーキュラ・エコノミ:循環型経済」が注目されている。新たな資源や原材料の投入量を最小化し、使ったものに新たな価値を生み出し、廃棄物の発生を最小化するという循環型の経済を指す。

現在、当社の BS サーボシステムには、「レゾルバ多回転アブソリュートシステム」(以後アブソリュートを ABS と称す)という絶対位置検出システムがある。このシステムは、停電時や電源 OFF 時にはバッテリーバックアップにて、機械原点を保持している。これにより、再度電源を入れた時にも機械座標を記憶しているため、起動時に原点サーチをする必要がないというメリットがある。停電中に機械が動かされる場合も想定し、モータの動きを常に監視する回路はバッテリーによるバックアップで動作を継続するため、この消費電力がバッテリーの寿命を決める。機械稼働後のメンテナンスとして、バッテリーが寿命を迎える前に、バッテリーを交換する必要がある。このため、バッテリーは海外においても安価で入手性が良い、アルカリやリチウムの一次電池が使用されることが多い。現在、使用済みの電池は、ほとんどが廃棄されているのが実情である。一般社団法人電池工業会推定によれば、国内にて年間 4 万 9 千トンの電池が一般廃棄されており、単三電池に換算すると年間 21 億本の電池が廃棄されていることになる。リサイクルも一部業者で実施されて

いるが、リサイクルにかかる環境負荷の方が大きく、一般廃棄が妥当との見解にとどまっているため、リサイクルの拡大には至っていない。

このような中、循環型経済に貢献するための当社の取組みとして省電力による電池廃棄量の削減が挙げられる。本稿では「レゾルバ多回転 ABS システム」の消費電力低減に対するこれまでの取組みを紹介する。



Fig. 1 BSサーボシステム

2 これまでの取組み

2.1 レゾルバ多回転 ABS システムの特徴

まず、レゾルバ多回転 ABS システムについて紹介する。圧倒的な耐環境性(耐熱、耐振動、耐衝撃、長寿命)を損なうことなく、外付けセンサなしで安価に絶対位置検出システムを構築していることが、レゾルバ多回転 ABS システムの最大の長である。つまり、停電時も電源 ON 時と同様にレゾルバ本体を使用して角度と回転した回数を監視する。一般には別途磁気センサを外付けし、電子回路をセンサ部に備えることが考えられるが、電子回路をモータのセンサに加えた時点で、耐環境性能が低下するためレゾルバのメリットが大きく損なわれてしまう。センサ単体の特性に関しては当社シリアルエンコーダとの比較を Table 1 に示す。

最新の BS サーボシステム R シリーズでは、レゾルバ対応のサーボアンプとモータを選定すれば、特にオプション基板等追加せず、バッテリーの接続と一部パラメータの変更のみでレゾルバ多回転 ABS システムの構築が可能となる。

Table 1 センサ単体の特性比較

項目	レゾルバ	シリアルエンコーダ
許容回転数	10,000min ⁻¹	6,000min ⁻¹
分解能	24,000P/rev	131,072P/rev
角度誤差	8分	1分
耐振動	20G	10G
耐衝撃	100G	20G
使用周囲温度	-55 ~ 155°C	-10 ~ 85°C
最大伝送距離	120m	30m

Table 2 レゾルバ多回転 ABS システムの消費電力低減の経緯

開発ステップ	主な取組み	バッテリー寿命 ^{注1}	
		単三リチウム電池 3本並列	単三リチウム電池1本+キャパシタ
2003年Vシリーズ	・パルス励磁電力回収 ・逆励磁断線検知	単三リチウム電池 3本並列	2年
2008年Xシリーズ	・超低消費電力 CPLD 採用		4年
2012年Sシリーズ	・アナログ回路削減		4.5年
2018年Rシリーズ	・電気二重層キャパシタ追加	単三リチウム電池1本+キャパシタ	6年

注1:寿命算出条件はサーボシステムの電源を12時間ON、12時間OFFした場合

2.2 消費電力低減の経緯

2002年の開発当初から現在に至るまでの消費電力低減の経緯について Table 2 に示す。開発ステップは BS サーボシステムのシリーズ開発と併せて行われ、着実にバッテリーの寿命を延ばしてきた。開発当初は、励磁パルスのパルス幅と受信信号の S/N 比と許容される消費電力のトレードオフの中で、最適な条件を導いた。また、その中で消費電力を下げるために、パルス励磁の電力回収を実施した。その際、低消費電力化による制限の中での断線検知は困難を極めたが、逆励磁パルスを用いてこれをクリアした。その後は、モバイル情報端末に使用されるキャパシタやリチウム電池の性能向上、また超低消費電力の CPLD (Complex Programmable Logic Device) や CPU デバイスが登場し、当社もこれら製品を採用することで、さらに低消費電力化を進めた。結果としてレゾルバ多回転 ABS システムのメンテナンス期間を開発当初から3倍に伸ばすことができた。また一次電池の本数も当初の3本から1本に減らすことが可能となったため、一次電池の廃棄量を1/9に削減することができた。

2.3 | 具体的な取組み

以降は具体的な実装事例を挙げて説明する。

2.3.1 | パルス励磁の電力回収

レゾルバ励磁回路の簡略図を Fig.2 に示す。当社の励磁方式は 2 相励磁 1 相出力を採用しており、2 相励磁には、その電圧振幅と位相差 90 度の精度が検出精度に影響するため、PWM (Pulse Width Modulation) 励磁を採用している。そのため、励磁のドライブにはバストランシーバを使用する。通常電源 ON 中の角度検出は、連続的な PWM 励磁により、高精度、高分解能を実現しているが、電源 OFF 時は、低消費電力化が必要なため、間欠的なパルス励磁を実施する。Fig.3 には励磁電圧波形の例を示す。パルス励磁の場合、ドライブ S1 のパルス幅は

数 μs 、S3 はその 1/2 の幅に設定している。

レゾルバはインダクタンスが大きいので、パルス幅を広げることで、電流が増加する。その結果、ケーブル及びレゾルバ本体に電流が流れ、レゾルバからフィードバックされた信号の S/N 比は良くなるが、消費電力も多くなる。これを改善するために、励磁したエネルギーを電源に回収する機能を考案し実装している。Fig.4 はエネルギー回収の仕組みを示したものである。各 FET は Fig.2 のドライブの出力段を示している。

(A) 励磁パルスを印加する前の状態

ドライブ S1 と S3 はいずれも Low 電圧を出力しており、FET (Field Effect Transistor) は GND につながる Tr2 と Tr4 が ON、電源につながる Tr1 と Tr3 は OFF した状態である。

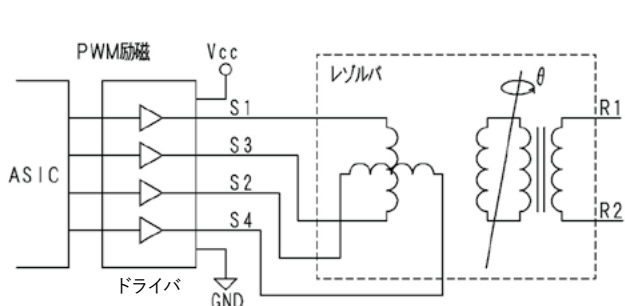


Fig. 2 レゾルバ励磁回路の簡略図

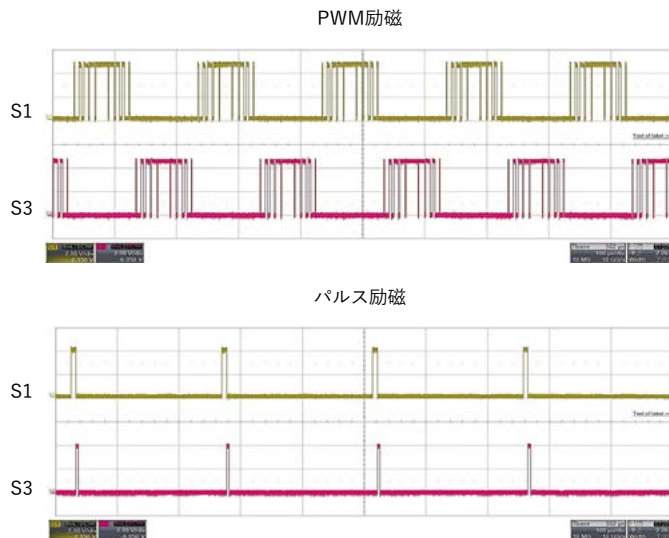


Fig. 3 PWM励磁とパルス励磁

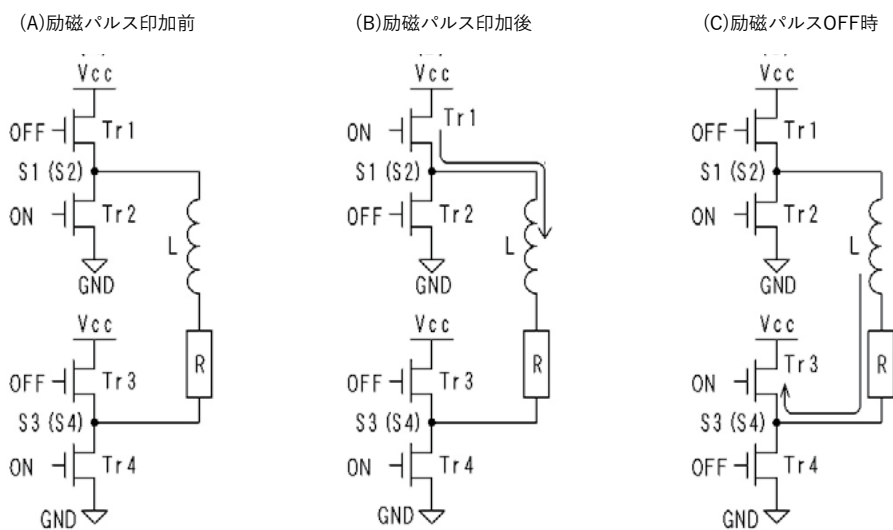


Fig. 4 励磁エネルギーの回収

(B) 励磁パルスを印加した状態

ドライバ S1 の Tr2 が OFF し、Tr1 が ON することで、High 電圧が出力されレゾルバのコイルに電圧がかかり、コイルに電流が流れ始める。この時にコイルの中には、エネルギー U、

$$U = \frac{1}{2} LI^2$$

U: エネルギー (J)
L: コイルのインダクタンス (H)
I: 電流 (A)

が貯まる。

(C) 励磁パルスを OFF するときの状態

パルス幅の時間が経過した後、ドライバ S1 を LOW 電圧にして電圧の印加を停止するが、同時にドライバ S3 を High 電圧にするために Tr4 を OFF して Tr3 を ON する。すると、(B) の状態で流れているコイルの電流は Tr3 を通って、電源に戻る。このことは、コイルのエネルギーを電源に回収したことと等しい。実際には、コイルの抵抗成分や FET の ON 抵抗などの損失は存在するものの、この回収によって励磁エネルギーの 70 ~ 80% をリサイクルすることができる。そのまま放置すれば抵抗の損失となって熱放出されるエネルギーを、リサイクルすることで、サーキュラ・エコノミを実施していると言える。

2.3.2 | 電気二重層キャパシタの適用

産業機械において、24 時間運転する場合は、年末年始や夏季休業の年間数週間を除いては常に稼働しており、停電等の電源 OFF 中のバッテリーからの電力供給は僅かなため実際のバッテリーの寿命は延びる。一方、日中は電源 ON で稼働し、夜間は電源 OFF で稼働しない場合、この夜間にバッテリーの電力が使用される。この電力をアンプ内に設けた電気二重層キャパシタから供給する。

Fig.5 に電気二重層キャパシタの適用回路と Fig.6 に実装状況の写真を示す。電源 OFF でも、キャパシタの電圧が残っている限り、バッテリーからは電力が供給されない。電気二重層キャパシタは電源 ON 中にゆっくり充電して、次の電源 OFF に備える。ただし、週末や年末年始、夏季休業の際には、数日 ~ 10 日間程度の電源 OFF の期間があるため、電池を全く使用しないという事は出来ない。しかしながら、これまでのリチウム電池 3 本並列から 1 本にまで減らし、6 年の電池寿命を実現した。開発当初より電気二重層のスーパーキャパシタは存在していたが適用は難しく、近年の耐電圧、容量増大と低コスト、小型化、回路消費電流低減により適用が可能となった。現在、一部ユーザのみ搭載しているが、今後標準的に搭載を検討していく。

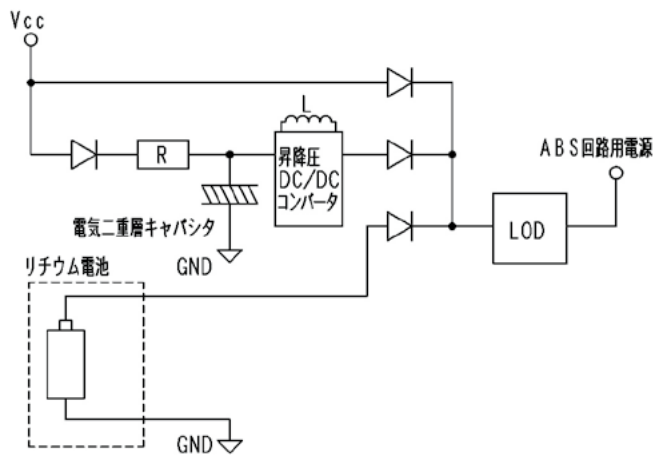


Fig. 5 電気二重層キャパシタ適用回路



Fig. 6 電気二重層キャパシタ実装基板

3 おわりに

本稿では、レゾルバ多回転 ABS システムのバッテリー長寿命化を目的とした低消費電力化の諸施策について述べてきた。たとえ単三電池のエネルギーでも創意工夫で無駄なく使用していくことで、これからもサーキュラ・エコノミに貢献できると考える。なお、断線検知他については、本稿で触れることができなかったが、いずれも特許公報で確認いただきたい。(1) ~ (3)

- (1) 特許第 4364569 号 レゾルバ信号処理装置
- (2) 特許第 4364570 号 レゾルバ信号処理装置
- (3) 特許第 4364571 号 レゾルバ信号処理装置

デジタル技術による後継者育成 ～動画形式による標準書

近年ではタブレット等のモバイル情報端末が普及しており大容量の動画データも手軽に現場で閲覧できるようになっている。当社ではタブレット端末を用いて、従来、文字（テキスト形式）を主として存在する標準書の内容を解りやすい写真や動画とともに、テキスト形式で補足説明を加えた動画形式の標準書を運用している。この標準書はテキスト形式だけでは伝わりにくいニュアンスを短時間で効率よく伝えることができ、モノづくりの現場で飛び交う専門用語も一目で認識、理解することができる。2017年よりこの動画形式の標準書(動画マニュアル)の運用を推進しており50本以上の標準が登録されている。



生産センター
工機生技部 生産技術課

藤本 亮輔

1 緒言

我が国の国内労働人口は2030年には日本の総人口の1/3が高齢者¹⁾となり、労働人口が減少して深刻な人手不足になることが予測される。2020年度においても労働人口は前年に比べて18万人の減少²⁾となっており、労働力不足は既に直面している問題である。このような中、これまで以上に多種多様な人材を労働者として受け入れる必要があり作業標準の持つ意義が重要となる。本報告のテーマはSDGsの目標4「仕事に関係する技術や能力をそなえた若者をたくさん増やす」、目標9「環境にやさしい技術や生産の方法を多く取り入れる」に関する内容である。

当社の生産センター工機生技部での課題のひとつとして若手作業担当者への技能伝承がある。現場で使われる専門用語は文字や口頭では伝わりにくいニュアンスもあり、伝承される側の理解度や習得時間にばらつきがある。また、技術伝承にはテキストで表現しにくい場合もあり、口頭による指導が重要な事もある。しかし、口頭伝達はやがて動作だけが伝承され、作業の意図が失われる場合がある。その結果、意図を失った作業は場当たりの効率面で省略されてしまい、これまで起きていなかった品質問題が起きることが懸念される。

これまで当社では作業標準を標準書による文字（テキスト形式）や口頭で若手作業担当者に伝えていた。近年では現場で使えるタブレットなどのモバイル情報端末が普及し、大容量の動画データを現場で閲覧できる。当社でもモバイル情報端末を活用し、写真や動画と、テキスト形式で説明を加えた動画形式の標準書(動画マニュアル)の運用を始めている。本報告では現場で活用される動画マニュアル作成とその効果について報告する。

2 実施方法

動画マニュアルは安全面、作業面、品質面での判定と効率面での目標作業時間を標準に規定して盛り込むことを基本的な作成ルールとしている。動画マニュアルの作成手順をFig.1に示す。撮影対象(作業対象)の選定、絵コンテの作成と修正、動画撮影、動画編集と修正の流れで行う。



Fig. 1 動画マニュアルの作成手順

2.1 絵コンテの作成

絵コンテとは各カットの画面構成を絵で示して動画マニュアル全体の流れを把握できるようにした重要な工程である。絵コンテには【作業項目(タイトル)】、【基本動作】、【必要な道具】、【動作の詳細】、【NG / OK 作業】によって構成されており、それぞれカットに必要な時間もここで検討する。Fig.2にデジタルダイヤルゲージの手入れに関する動画の絵コンテを例として示す。

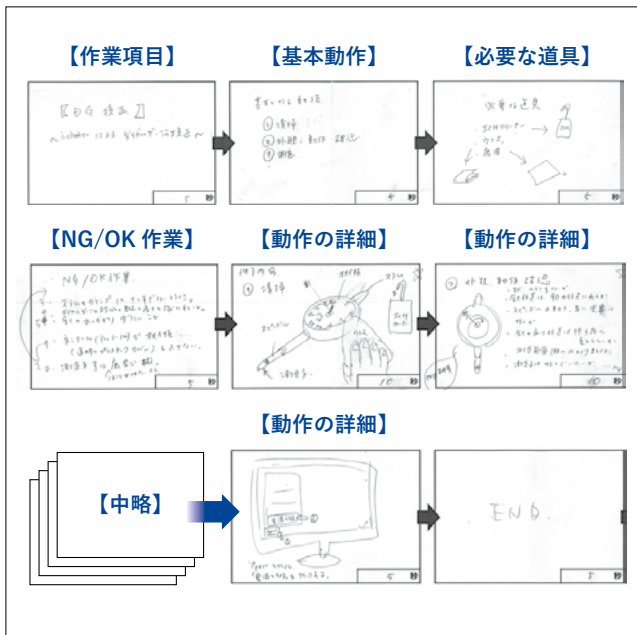


Fig. 2 絵コンテの例

【基本動作】では作業全体の操作を大まかに項目分けし、専門用語が入っている場合はその説明も盛り込む。この例では清掃、外観動作確認、測定である。【必要な道具】では作業に使用するすべての道具の写真と名称をテキストで示す。この例ではICH クリーナー、ウエス、鹿皮である。【動作の詳細】は経験が無い作業者の目線で詳細な説明を入れて作成する。【NG/OK 作業】では NG / OK 作業や NG / OK 判定基準、理想的な作業を動画で示す。ここでの NG 作業は「プラスチック透明カバーが曇り、ゲージが見えにくくなるため ICH クリーナーで拭かない」である。OK 作業は「ホコリがつかないように測定子等は鹿皮で拭く」である。【動作の詳細】ごとにこの【NG/OK 作業】の説明が入る。

この絵コンテは作業に関わるメンバー全員が参加し、絵コンテをたたき台にして修正、追加して現場で納得して使われるように作成する。

2.2 | 動画撮影

動画の撮影は絵コンテを見ながら必要な動画を短時間で撮影する。Fig.3 のように撮影には iPhone^{※1} や iPad^{※2} を使用して動画の素材を撮影する。このとき一つの作業や撮影対象に対して角度や距離を変えながらポイントとなる画像が分かりやすくなるように作業者の確認を取りながら撮像を行う。必要に応じて動画と静止画を使い分け、道具など動きのない対象の説明については静止画の方が見やすくなる。

(※1, ※2: iPhone, iPad は、Apple Inc. の商標です。)



Fig. 3 動画撮影

2.3 | 動画編集

iPhone/iPad 映像制作・編集アプリ (フォトン製 Mobile Video Creator) を使用して編集を行った。動画の編集は撮影した iPhone や iPad をそのまま使用するため現場で編集が可能である (Fig.4)。

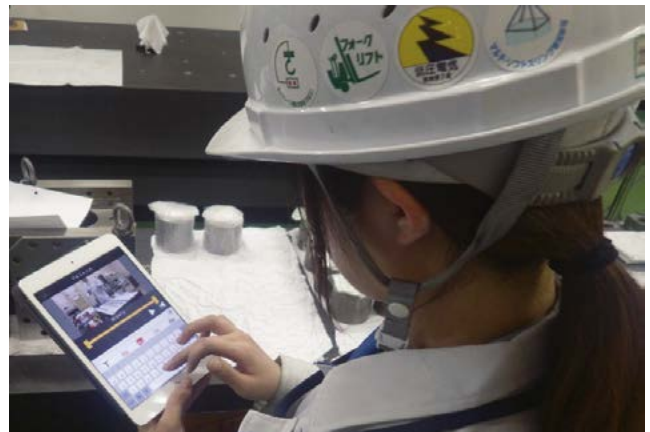


Fig. 4 動画編集

動画編集においても絵コンテを基に編集を行い、動画の総時間が3分以内になるように編集する。総時間を3分としているのは作業者が作業中でも集中して閲覧できる時間として設定している。一つの作業が長い場合は冗長にならないよう作業を分類してシーンごとに分ける。Fig.5 に絵コンテと編集動画を示す。



Fig. 5 絵コンテと編集動画

Fig.5 に示すように絵コンテに対して編集動画は良く再現されている。絵コンテで設定した通りに動画素材を撮影動画から選択し、テキストや図形を挿入する。テキストや図形の挿入時

には音楽やナレーションの音源も入れて重要なポイントを効果的に見せる。すべての編集が完了した後、プレビューで最終確認して動画を保存する。

このとき動画は処理速度と容量負荷の観点から必要最小限にする。本動画マニュアルでの動画サイズは 960 × 540 で、動画のビットレートは 4Mbps とした。ビットレートとは 1 秒間あたりデータ容量 (bits per second) のことで今回の場合 $4\text{Mbps} / 8 = 0.5\text{MB/秒}$ である。

3 実施による効果と展望

熟練作業者が標準書を使用しながら若手作業者に技能伝承を行うのは主に OJT で現場作業の中で実施される。そのため、指導する側も指導される側も必ずしも十分な指導時間が確保されているわけではない。そのため、この動画マニュアルを活用することで、現場で時間が無い中でも複数の作業者に効率よくムラ無く技能伝承が可能になった。Fig.6 に現場で作業者が動画マニュアルを視聴している様子を示す。



Fig. 6 現場での動画マニュアル視聴の様子

iPhone や iPad を使用する以前は、家庭用のビデオカメラとパソコンのビデオ編集ソフトを使用して動画マニュアルを作成していた。この時も動画マニュアル自体の評価は高かったが、作成にはおよそ 2 日を要していた。しかし iPhone/iPad 映像制作・編集アプリを使用することで、3 時間程度で制作することが可能になった。また、編集も撮影と同じ iPhone や iPad を使用しているため、その場で修正や追加ができることも制作効率の面で有効である。

品質管理は ISO9000 シリーズの「システム」をベースとして TQM (Total Quality Management) の「実行」によって達成することができる。日本科学技術連盟が ISO と TQM の関連について

てTQM活動・品質マネジメント活動のアクション項目一覧表³⁾を報告している。これによれば、全1から5ステージの中でステージ3からステージ4に「標準化」に関する記載がある。そのアクション項目には「規定類・標準類に基づく教育・訓練の全部門での徹底、規定類・標準類の確実な制定・改定、発生原因と流出原因両面からの原因追求と再発防止、目で見える管理、変更管理の実施、標準化と日常管理の浸透」と記載されている。動画マニュアルは標準に関わるこれらの項目を現場で実現するためのハードルを下げるのに有効な手段となった。

鑄造工程や加工工程には変動・突発の事象があり、現場では迅速な対応が要求される。このような時に拠り所になるのは標準作業である。すべての作業者がムラ無く同様の知識を有していることで環境変化が激しい現場で適切なOODAループ(Observe(観察)、Orient(状況判断) Decide(意思決定)、Act(行動))⁴⁾のプロセスが実行されると考えられる。

少ない人数でQCD(高品質(Quality)、低コスト(Cost)、納期遵守(Delivery)向上を実現し効率的に生産するため、生産センターでは今後もデジタル技術を活用してモノづくりのレベルアップを追求していく。

4 結言

動画マニュアルは撮影対象の選定、絵コンテの作成、動画撮影、動画編集の工程で製作される。モバイル情報端末と映像製作・編集アプリを用いることで動画の撮影から編集まで短時間で製作が可能である。現場で使用できるこの動画マニュアルを活用することで時間が無い中でも複数の作業者に効率よくムラ無く技能伝承が可能になった。ISO9000シリーズやTQMによる高いレベルの品質管理と効率的な生産を実現するためデジタル技術を活用した動画形式の標準書は現場での標準作業実行のハードルを下げる有効なツールである。

参考文献

- 1) 国立社会保障・人口問題研究所、日本の将来推計人口(2017)
- 2) 総務省統計局(2021)労働力調査(基本集計)2020年(令和2年)平均
- 3) 日本科学技術連盟(2014) TQM活動・品質マネジメント活動ステージアップガイド
- 4) 東洋経済新報社(2019)OODA LOOP, チェットリチャーズ, 原田勉(訳)

AIを用いた門形マシニングセンタにおける切削中の加工状態監視機能開発

製造業の加工業において人の感覚は重要な役割を担っている。日本には匠と呼ばれる技術を極めた職人が数多く存在するが、その技術を完全に近い状態で後世へと継承することは不可能に近い。本研究では、工作機械による切削加工を題材に、加工オペレータの感覚をもとに人工知能(AI: Artificial Intelligence)が学習を行い、その判別能力をAIで再現することを目標とした。特に加工中は音から得られる情報が多いため、本研究では音との相関性が高い加工中の3軸加速度に着目して研究を行った。その結果、現状所持しているデータにおいて、高い加工状態の判別精度を実現した。



R&Dセンター
研究開発部
デジタルツイン開発課
星谷 拓

1 はじめに

機械加工において、加工中の状態はオペレータの視覚や聴覚といった五感の情報によって判断されている。しかしながら、感覚による判別能力は一朝一夕で身につくものではなく、莫大な経験が必要となる。本研究では、人が経験により身につけた判別能力をAIにて代替するため深層学習における教師あり多クラス分類の技術に着目した。

AIに判別能力を学習させることで、技術や経験のない加工者でも安定した加工が行えるようになり生産性が向上するとともに、雇用条件の緩和につながると考えられる。SDGsでは、“8:働きがいも経済成長も”の中で年齢・性別・移住労働者に関係なく2030年までに“完全かつ生産的な雇用”や“全ての労働者の権利を保護し、安全・安心な労働環境を促進する”ことを目標としている。よって、本研究により、高いレベルの経済生産性を確保しつつ雇用条件が緩和されることにより、上記SDGsへの貢献が可能となる。

2 データセットの概要

2.1 データセットについて

教師あり多クラス分類では、AIに与える入力データと、そのデータがどのようなデータなのかを示す教師データが必要となる。

本研究では門形マシニングセンタ(MPF-2614FS)による加工を対象とし、主軸部の側面に設置した3軸加速度センサから取得した加速度データに対して一定のデータ処理を行い、AIへの入力データとした。

2.1.1 取得データについて

加工中に得られた加速度データの一例をFig. 1に示す。Fig. 1より、加工中の加速度から、ツールの空転部(灰色部)・加工入口部(橙色部)・加工安定部(青色部)・加工出口部(緑色部)の違いを確認できる。

本研究では、まず、Fig. 1における加工安定部(青色部)のデータと安定部以外のデータ(以後、不安定データと言う)のデータセットの作成を行った。加工安定部には、加工中の判別として、①正常状態、②チッピング状態、③びびり状態の3つを割り当てたため、AIは加工中の加速度データから、④不安定データを含めた4項目のうち加工状態が何に該当するのかを判別する必要がある。

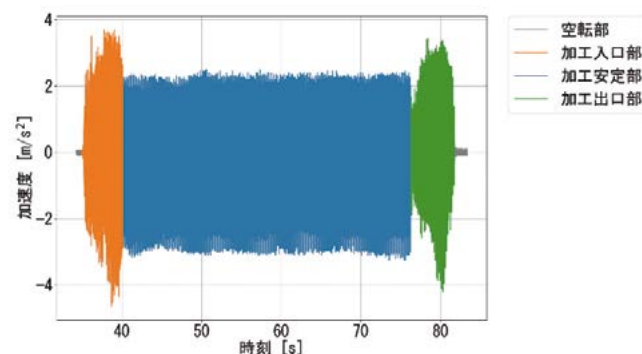


Fig. 1 加工中の加速度データ

2.1.2 データの前処理について

加速度データを分析する方法として、本研究では高速フーリエ変換(Fast Fourier Transform 以下、FFT)を使用した。今回は1秒あたりの加速度データを分析対象としたが、まず、ビンニングという作業を行った。ビンニングはある一定の区間(ビン幅)に対して区間内の代表値を算出する手法である。前述したFFTの結果(1~3.2kHz)に対して、20Hz(ビン幅)ごとに

100 区間分ビンングを行うことでデータの特徴を抽出することが可能となる。この時、1～2kHz までが分析対象となる。

今回は区間内の代表値として最大値を使用することで FFT 結果の特徴を維持することができると考えた。

なお、工作機械の工具であるフライスには、刃数・回転速度・加工方向といった複数のパラメータが存在する。また、パラメータの変動に伴い加速度の性質が変化する。AI の汎用性を追求するにあたりパラメータの変動による影響を吸収する前処理が重要になる。本研究では、前処理としてビンング・ビンング結果の合成・正規化を行った。

ビンングでは、切削時の回転速度と工具の刃数に依存する強制振動に着目することで汎用性の向上を期待した。強制振動数の算出式を式 (1) に示す。

$$\text{強制振動数 [Hz]} = \frac{\text{回転速度 [min}^{-1}\text{]}}{60 \text{ [s]}} \times \text{刃数} \quad (1)$$

式 (1) より、強制振動数を決めるのは回転速度と刃数のみであることがわかる。本研究では、刃数・回転速度・強制振動数・ビン幅のそれぞれに基準値を設定し、変動するパラメータに対応した。各基準値をまとめたものを Table 1 に示す。

Table 1 基準パラメータ

基準刃数	8 枚
基準回転速度	500 min ⁻¹
基準強制振動数	66.67 Hz
基準ビン幅	20 データ

Table 1 より、基準強制振動数は 66.67Hz であることからビン幅 20Hz でビンングを行うと 4 つ目の区間内 (61～80Hz) に強制振動数の値が格納されることがわかる。本研究では、全ての条件において 4 つ目の区間内に強制振動数が格納されるようにビン幅を調整した。

ビン幅の調整過程を以下に示す。

a) 刃数補正係数の算出

刃数補正係数とは、工具ごとに異なる刃数の違いを補正するための係数である。Table 1 より、基準刃数として 8 枚刃を設定した。刃数補正係数の算出式を式 (2) に示す。

$$\text{刃数補正係数} = \text{実際の刃数} / \text{基準刃数} \quad (2)$$

b) 回転速度補正係数の算出

加工ごとに異なる回転速度の違いを補正するための係数である。Table 1 より、基準回転速度として 500 min⁻¹ を設定した。回転速度補正係数の算出式を式 (3) に示す。

$$\text{回転速度補正係数} = \frac{\text{実際の回転速度}}{\text{基準回転速度}} \quad (3)$$

c) ビン幅補正係数の算出

式 (2)～(3) より、ビン幅を調整するための係数・回転速度補正係数の算出式を式 (4) に示す。

$$\text{ビン幅補正係} = \text{刃数補正係数} \times \text{回転速度補正係数} \quad (4)$$

d) ビン幅の調整

式 (4) を用いてビン幅の調整を行う。調整に用いた式を式 (5) に示す。

$$\text{ビン幅} = \text{基準ビン幅} \times \text{ビン幅補正係数} \quad (5)$$

以上がビン幅の調整過程となる。

本研究では、3 軸加速度を分析対象としているため各軸に対して同様の処理を行った。0～200Hz までのビンングの一例を Fig. 2 に示す。Fig. 2 における赤の破線がビン幅となり、その中の最大値が代表値となる。

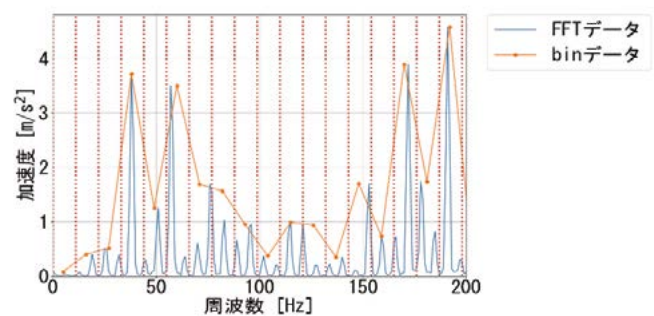


Fig. 2 FFTとビンング

2.1.3 | 切削方向の影響

加工現場で行われる切削工程は、いずれかの平面切削といった単軸のみの切削が行われるわけではない。

切削パターンを考慮してデータ収集を行うには膨大な時間が必要となることは明白である。本研究では、X軸・Y軸・Z軸のビニングデータを正規化と合成することで切削方向の影響を低減したデータを作成。これをAIで学習させることにより、汎化性の高いAIを作成することができると考えた。その過程を以下に示す。

a) 3軸ビニングデータの正規化

加工中の振動には多様性があり、それぞれが記録する最大加速度もデータによって異なる。これは、最大値の大きさの違いをAIが認識してしまう可能性があるため、汎化性を考慮した際に問題点となる。本研究では、最大加速度を全データで統一することで、この問題の解決へ繋がると考えた。正規化を行う際に使用した式を式(6)に示す。

$$\text{正規化データ } (x', y', z') = \frac{\text{各軸のビニングデータ}}{3\text{軸ビニングデータの最大値}} \quad (6)$$

このように式(6)を用いることで、最大加速度が1となる正規化データとなる。また、FFTを行った際に、振幅は絶対値を取っていることから正規化データは0~1の値で構成される。

b) 3軸正規化データの合成

本項に記述した通り、方向性の影響を低減させることは汎化性の向上につながる。本研究では、各軸の正規化データを合成することで方向性の影響を低減できると考えた。合成に用いた式を式(7)に示す。

$$\text{合成データ } (r) = \sqrt{x'^2 + y'^2 + z'^2} \quad (7)$$

また、この際に加工方向によって合成データの最大値が異なることが考えられるため、式(6)のように合成データを最大値で除することによって、合成データも0~1の値で構成されるよう正規化を行った。

以上より本研究では、正規化を行った合成データの100点を入力データとして深層学習による学習を行った。例として正常時の正規化を行った合成データのグラフをFig. 3に示す。

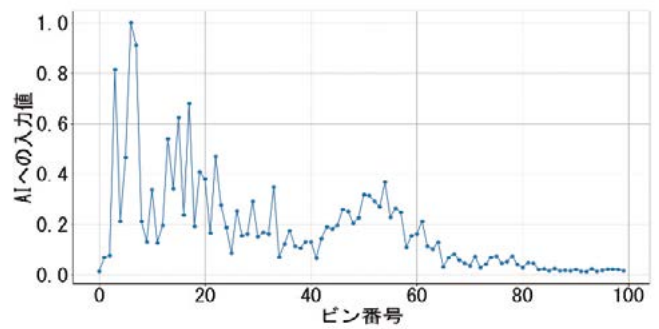


Fig. 3 合成データ

2.1.4 | 教師データについて

本節で説明した通りAIの学習には、AIに与える入力データと教師データが必要となる。まず、AIに与える入力データは2.1.3の正規化を行ったデータを使用した。次に必要なのが教師データであり、本研究では4つの加工状態を分類することを目標としたが、Fig. 1より、安定部と不安定部の教師ラベル付けは比較的容易に行うことが出来ることがわかった。安定部に関しては切削試験を行う際、加工オペレータの判断を基に安定部の教師ラベル付けを行った。

3 結果と考察

検証データを用いたAIモデルの判別結果と教師ラベルの関係をTable 2にまとめる。

Table 2の太枠内より、安定部(正常・チップング・びびり)の誤判別はすべて“不安定”であることが分かる。不安定データは現状、加速度が不安定な部分を取り扱っているが、データ処理をする上で安定時の加速度データが紛れてしまうことがある。そのため安定部の特徴も学習してしまうことが原因と考えられる。対策としてはデータ抽出の際に、安定部と不安定部の境界が曖昧な範囲をNCからの主軸ステータス等の情報と組み合わせることにより除外することで誤検知数を低減することが可能と考えられる。

4 おわりに

本研究を通して、3軸加速度データから特徴を抽出し、パラメータ影響を極小化した前処理を行ったデータを深層学習させることで加工状態を4分類することが可能であることを述べた。

しかし、今回の判別精度は現在取得済みのデータ内での検証であるため、今後より多くのデータを用いて汎化性の検証を行

う必要がある。また汎化性の検証段階でより複雑なデータ群の傾向が確認される可能性もあるため、最終的な判別精度は現状よりも低下することが考えられる等課題も残るが、知能化を進める工作機械の付加価値研究を進めていく所存である。

Table 2 判別結果

		予測結果			
		正常	チッピング	びびり	不安定
教師ラベル	正常	1657	0	0	3
	チッピング	0	905	0	1
	びびり	0	0	91	3
	不安定	14	7	3	566



私が業務から得た視点



成形機カンパニー
成形機技術部 開発技術課

熊木 広一

現在、業務としてダイカスト金型のハイブリッド中子シリンダの開発に携わっています。従来の中子シリンダは油圧のみで制御していますが、ハイブリッド中子シリンダは電動と油圧で制御するため、それに適した制御へ変更する必要があります。当初、私の中子への認識は一次元方向にしか動作しないため、単純な前後動作ができれば良いと考えていました。しかし、業務を始

めてすぐにこの認識が甘かったことがわかりました。中子には金型へ押し付ける動作があり、本中子シリンダはボールねじを用いているため、押し付け力など外部からの影響を受けた場合、位置決めに誤差が生じてしまいます。そのため、単純に前後へ動作させれば良いということではなく対策が必要なくなりました。このことから、機械の動作などの表面的なことだけでなく、機械が動いたときの力の作用や機械の特性など多様な視点で考えて、事象全体を理解することの重要性を学びました。この経験を活かしてこれからの業務を遂行してまいります。

大型電動式射出成形機 EC1800SXⅢ の紹介



1 概要

少子高齢化による労働人口減少を背景に、工場の生産性向上が急務となって久しい。一方で低炭素社会の実現に向けたエネルギー消費の抑制など、SDGsをはじめとする世界的な気運が高まっている。これらの課題解決に射出成形機として貢献できる「コト」は高生産性と省人化である。その「コト」を具現化する「モノ」として、大型電動式射出成形機 EC1800SXⅢを開発した。

2 特長

電動式射出成形機 EC-SXⅢシリーズは、移動ダイプレート支持構造にリニアガイドを採用し、業界トップクラスの高速型開閉による高生産性が特長である。

EC1800SXⅢは、その特長を継承し、更なる生産性向上を実現するため、新たに高速型厚調整仕様を特別仕様として装備した。

(1) 金型交換時間の短縮

消費者ニーズの多様化により、製品を構成する樹脂部品も多品種となり、それに伴って金型交換頻度も高まる傾向にある。その金型サイズも多種多様であり、EC1800SXⅢでは厚さ 800～1500mm の金型が搭載できる。一般的なトグル式型締装置は、型厚が異なる金型に交換する際の型厚調整速度は機構上極低速である。そのため、薄い金型から厚い金型、若しくは厚い金型から薄い金型に交換する際には、生産していない時間（非生産時間）が増え、生産効率が低下してしまう。

この問題を解決するために EC1800SXⅢでは型厚調整速度を高速化した。

型締装置の構成部品であるリンクハウジングをリニアガイド支持することで摺動抵抗を低減し、サーボモータの高速回転が

つ高精度位置決め制御により大幅な高速化と型締力の繰り返し安定性を両立させた。この型厚調整速度高速化の効果の1つとして、生産数の増加が見込める。

Fig.1 に型厚差 700mm の金型交換時間を比較する。

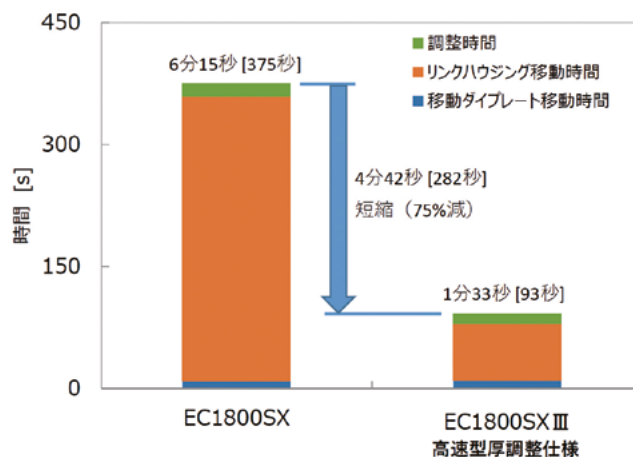


Fig. 1 金型交換時間の比較

EC1800SX と比較し、4分42秒短縮 (75%減) できる。1日当たりの金型交換回数を10回とすると、年間で172時間^{*1}の短縮となり、生産数に換算すると20,680shot^{*2}の増産が期待できる。^{*1}稼働日数220日/年 ^{*2}成形サイクル30秒

一方で金型交換が完了したら、すぐに生産開始するために、金型交換中も加熱シリンダのヒータは通電された状態で待機している。電動式射出成形機は、加熱ヒータの消費電力量の占める割合が高く、金型交換時間(待機時間)の短縮は消費電力量の削減に直結する。

Fig.2 に金型交換中の待機消費電力量を示す。

EC1800SX と比較して EC1800SXⅢでは1時間当たり1.6kWhの削減(56%減)となり、CO₂排出量に換算すると年間約0.5tonの削減が見込まれる。

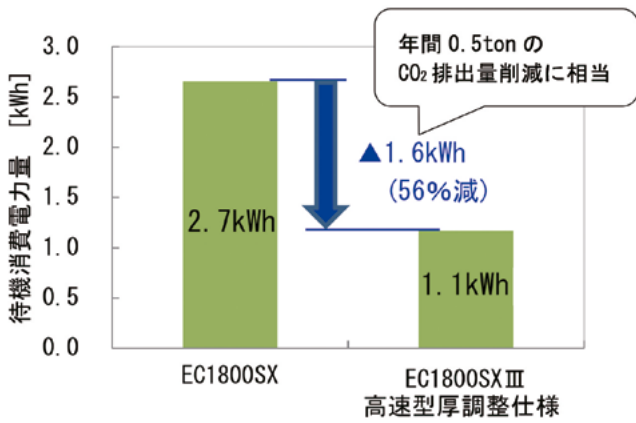


Fig. 2 金型交換中の待機消費電力量

(2) 段取り作業の自動化

成形品が変更になる度、金型交換や原料樹脂の種類や色を置き替える「段取り作業」が存在する。そこでは作業者が操作・判断をするため、人的作業ミスリスクが潜んでいる。

Fig.3 は生産工程の一部を抜粋して示したものである。

成形条件 A での生産が完了すると、次の生産（成形条件 B）の前に段取り作業（段取条件 1）が行われる。また、成形条件 B での生産完了後、段取り作業（段取条件 2）を行う。

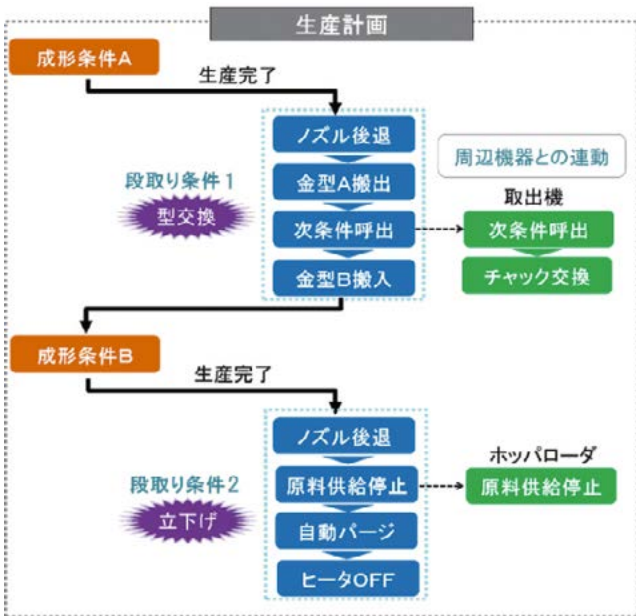


Fig. 3 生産工程の一例

これらの作業を支援するためにコントローラ「INJECTVISOR-V70」には、生産計画機能「INDUSTROL」が実装されている。Fig.4の生産計画では、複数の成形条件と段取条件の一連の動作を設定することができる。成形条件 A の生産が完了した後に段取り条件 1 が自動実行され、段取り条件 1 が完了すると成形条件 B での生産が開始される。同様に、成形条件 B の生産が完了すると、設定された段取り条件 2 が実行される。

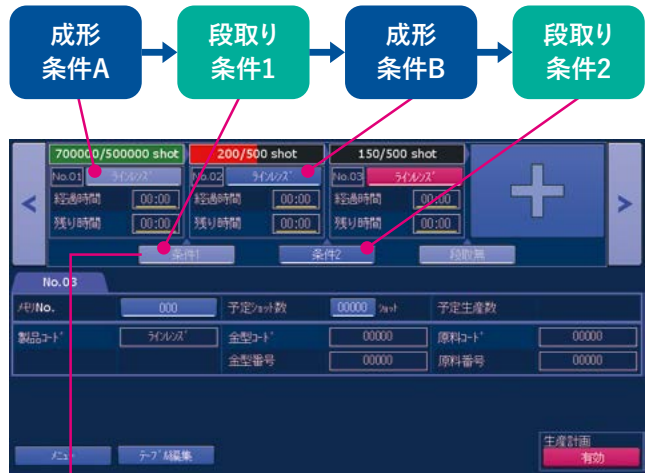


Fig. 4 生産計画



Fig. 5 段取り条件設定

Fig.5 は段取り条件設定を示す。各動作はアイコンで視覚的に表現され、動作アイコンを作業順に配置することによって作業プログラムを自由に作成できる。このように設定と確認が直感的に行えることが特長である。

成形条件の入れ替え、その前の段取り工程を作業者がプログラム設定できることは、人的作業ミスの低減、作業時間の短縮、自動実行中は他の作業ができるなどの効果が期待できる。さらに本機能は、周辺付帯機器（金型自動交換装置、オートカプラ / コネクタ）との親和性が高く、成形品切替作業の自動化、省人化にも容易に対応できる。

3 まとめ

高生産性と省人化と、SDGs で掲げる低炭素社会の実現に大きく貢献することができる EC1800SX IIIを開発した。

今後も世の中のニーズに応えていける射出成形機の開発を行なっていく所存である。

ダイカストマシン DC1300R-E の紹介



Fig. 1 DC1300R-Eの外觀

1 概要

ダイカスト casting は他の casting 法に比べて生産性が高く、その能力はダイカストマシンによるところが大きい。本稿では、生産性の向上を目指したダイカストマシン DC1300R-E を開発したので紹介する。(Fig.1)

DC1300R-E は、型開閉をサーボモータ駆動により、高速動作し、アキュムレータ(ACC)への高速充填するポンプを有した大型ハイサイクルダイカストマシンである。

制御装置には、最新の制御装置 TOSCAST-999 を搭載して、表示と操作性が向上している。

2 特長

1) 電動サーボモータ駆動のトルク機構の採用により従来機より型締時間を短縮。(Fig.2) 油圧型締に比べて高応答、精密な位置制御による安定した動作。オプションにて中子先戻、スプレイ吹付位置中間停止動作。(Fig.3) また電動型締と油圧アクチュエータの同時動作によりハイサイクルを実現。

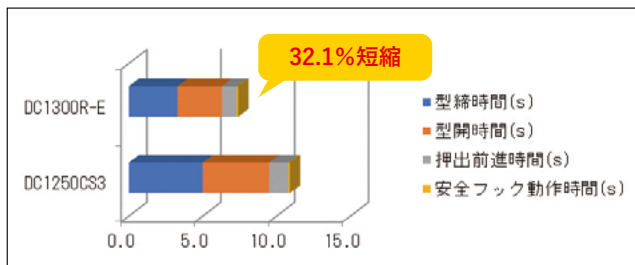
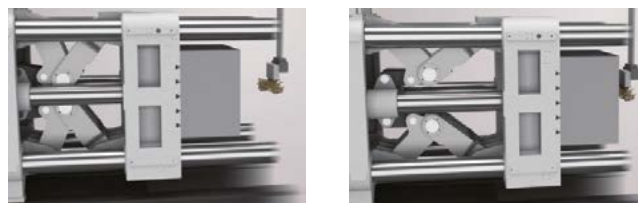


Fig. 2 サイクル比較



型開スプレイ下降位置

スプレイ吹付中間位置

Fig. 3 型開閉中間停止

2) 型締を電動化することでフレーム内タンクを小さくし、また油圧用モータレイアウトの見直しで省スペースを実現した。1サイズ小さいクラスの機械と同等のスペースに設置が可能。(Fig.4)

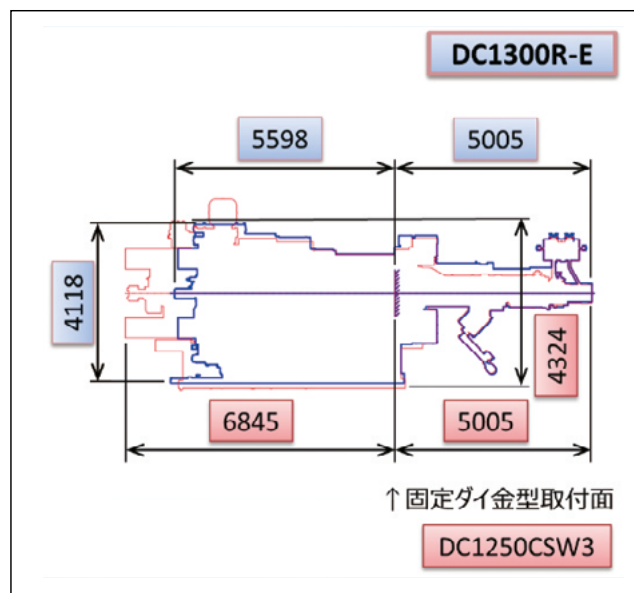


Fig. 4 省スペース

3) 油圧部の減少に伴い、油圧トラブルが減り故障時間減少、メンテナンス性 UP。
4) 大容量油圧ポンプを標準採用することで、アキュムレータ充填をはじめとした油圧動作も高速化。

- 5) 上部タイバー 2 本引抜装置を標準搭載により、金型交換をやりやすく。
- 6) 制御装置には新開発した大型画面の TOSCAST-999 を搭載したことで、操作性が大幅に向上(Fig.5)

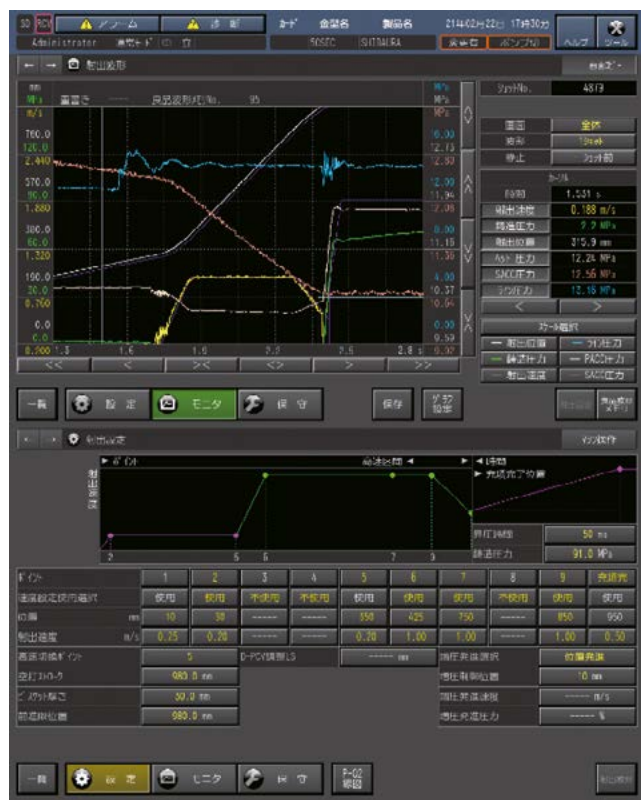


Fig. 5 コントローラTOSCAST-999

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、ペーパーレスになり作業性UP。

7)SDGs への適応

リサイクル性が高い材料のアルミニウム合金で生産するダイカストマシンのハイサイクル化技術により生産性向上し社会貢献できる。

3 仕様

Table 1 に DC1300R-E の諸元を記した。前機種である DC1250CSW3 と比較した諸元も併記している。水色に塗られている項目は DC1250CSW3 に対して性能が向上したところである。

Table 1 DC1300R-E諸元表

		単位	DC1300R-E	DC1250CSW3
型締	型締力	kN	13000	12500
	ダイプレート寸法 (タテ×ヨコ)	mm	1895×2205	1930×1800
	タイバー間隔 (タテ×ヨコ)	mm	1250×1525	1250×1120
射出	タイバー直径	mm	250	250
	金型厚さ	mm	700~1500	600~1500
	ダイストローク	mm	900	900
	最大射出力	kN	1080	1080
	増圧比		1 : 2.56	1 : 2.56
	プランジャストローク	mm	950	950
	チップ突出量	mm	400	400
	射出口位置 (機械中心より下側へ)	mm	300	300
	射出速度	m/s	0.1~9.0	0.1~9.0
	チップ首径 (標準)	mm	115	115
押出	チップ筒径 (標準チップ径)	mm	7375	7375
	鋳造筒径 (標準チップ径)	mm	1250~3215	1251~3215
	鋳造圧力 (標準チップ径)	MPa	40.4~104.0	40.5~104.0
	押出力	kN	615	616
	押出ストローク	mm	150	200
油圧	移動中子数	Set	3/4" x 2	3/4" x 2
	移動中子ポート (電磁弁1割当り)	Set	1" x 2	1" x 4
	固定中子数	Set	3/4" x 1	3/4" x 1
	固定中子ポート (電磁弁1割当り)	Set	1" x 2	1" x 2
	作動油圧	MPa	15	15
冷却水	必要作動油量	L	2100	2200
	作動油タンク容量	L	1880	1900
	ダイ冷却水入口接続管径	Rc	2"	1+1/2"
	ダイ冷却水出口接続管径	Rc	3"	3"
	オイルクーラ冷却水入口管径	Rc	1+1/2"	1"
マシンサイズ	オイルクーラ冷却水出口管径	Rc	1+1/2"	1"
	ダイ冷却調整バルブ (固定)	Rc x Set	1/2" x 10	1/2" x 20
	ダイ冷却調整バルブ (移動)	Rc x Set	1/2" x 10	1/2" x 20
	プランジャチップ冷却水調整バルブ	Rc x Set	1/2" x 1	1/2" x 1
	必要冷却水 (オイルクーラ用)	L/min	50	50
必要冷却水 (金型用)	L/min	160~240	160~240	
所要床面積 (長さ×幅)	mm	10300 x 3800	11800 x 3500	

4 効果／事例

電動型締にしたことで、

- 1) 型開中に中子戻動作が可能に。
- 2) スプレイ動作と型締動作を連動させることができ、スプレイ時間の短縮が図れる。※ OPTION
- 3) 電動サーボ制御により、スプレイノズルへ正確に近づけることが可能。

5 おわりに

DC1300R-E は稼働率と製品品質向上を目指した最新機種である。

今後ラインアップの拡充により、お客様のご要望に応じていく。

高せん断加工装置 HSE-48 の紹介

1 概要

近年、プラスチックのニーズは多様化しており、それに伴い押出機の機能も進化させていく必要がある。機能性プラスチックは、ポリマーに無機フィラーや異種ポリマーを添加して、押出機で混練することで実現されるが、混練が弱いと添加物がポリマー内でうまく分散されず、十分な機能性が発現しない。

そこで当社では、(株) HSP テクノロジーズとの共同研究により、二軸混練押出機 TEM シリーズよりも大きなせん断力を与えることが出来る高せん断加工装置 HSE-48(Fig.1)を開発したので、その特長と適用事例について紹介する。



Fig. 1 HSE-48

2 特長

HSE-48 は、樹脂を溶融するための予備混練部、樹脂に高せん断を付加するための高せん断部、計量昇圧部の3つの部分からなる。予備混練部は二軸混練押出機 TEM-26SX、計量昇圧部はバレル内径 48mm の単軸押出機を採用している。

高せん断部は、バレル内径 48mm、最高スクリュ回転速度 3600min^{-1} の単軸押出機であるが、Fig.2 のようにスクリュ側面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。

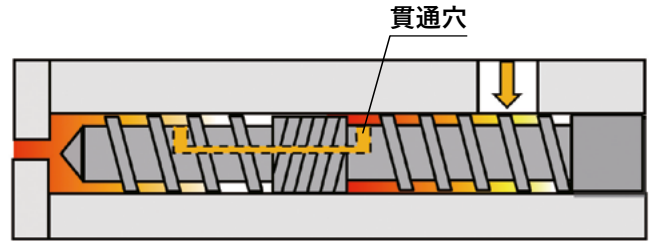


Fig. 2 高せん断部の断面図

HSE-48 はモータ、制御盤、操作パネルが1つのフレーム上に一体化されており、また Fig.3 の青矢印の方向に予備混練部が回転して収納できるようになっているため、容易に運搬できる構造となっている。予備混練部を黒矢印の方向に平行移動して高せん断部のフィード口を変更することで、高せん断部のバレル長を変更することが出来る。

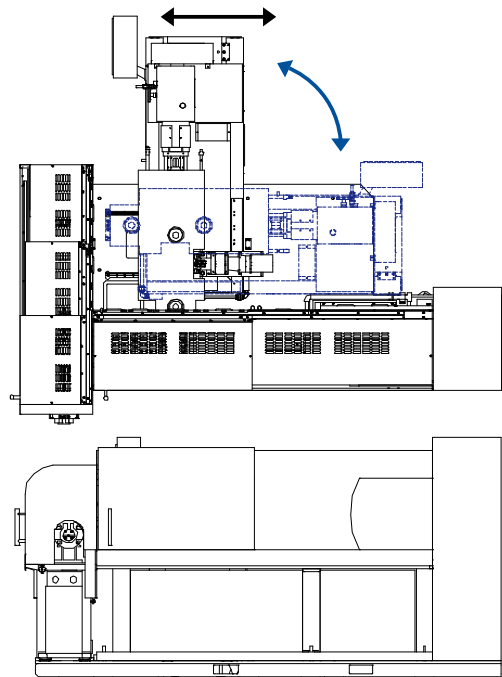


Fig. 3 稼働時(黒)と運搬時(青)

3 仕様

HSE-48 の機械仕様、外形寸法は以下のとおりである。

Table 1 機械仕様

	最高スクリュ回転速度 [min^{-1}]	モータ電力 [kW]
予備混練部	745	30
高せん断部	3600	132
計量昇圧部	207	5.5

Table 2 外形寸法と重量

縦×横×高さ [mm] (稼働時)	2980 × 3590 × 1780
縦×横×高さ [mm] (運搬時)	1910 × 3590 × 1780
重量 [kg]	4970

4 効果／事例

・高濃度リサイクルCF(以下RCF)コンパウンド材

炭素繊維(以下CF)については、高せん断加工装置開発当初より、市販CFコンパウンド材を用いた検討を行っていたが、高いせん断力で繊維が短くなり、機械的強度が低い結果であった。そこで強度向上を目的とするのではなく、高せん断力でCFをより細かくして多く充填することで母材の引張剛性を向上させることを目指した。

従来の市販CFコンパウンド材は、CF含有量30～40wt%が通常であるが、今回は40wt%以上(50～70wt%)の充填に関し検討した。CFは安価なRCFを用いた。比較として二軸押出機単体でも含有量40wt%以上充填できるか検討したが、50wt%以上になるとCFの分散斑が多く、連続してのペレット化ができなかった。高せん断加工装置を用いての検討では高せん断部スクリュの貫通孔径と数、およびスクリュ回転数の条件を変えて最適化条件を求めた。結果、Al合金以上、Mg合金レベルに近い剛性を持つ材料(CF含有量60wt%)を得ることが出来た(Fig.4)。また、ミルコスト面でも市販CFコンパウンド材より安価に製造できる可能性もあるため、本材料の市場性及び更なる物性評価(電磁波遮断性、放熱性等)を行う予定である。

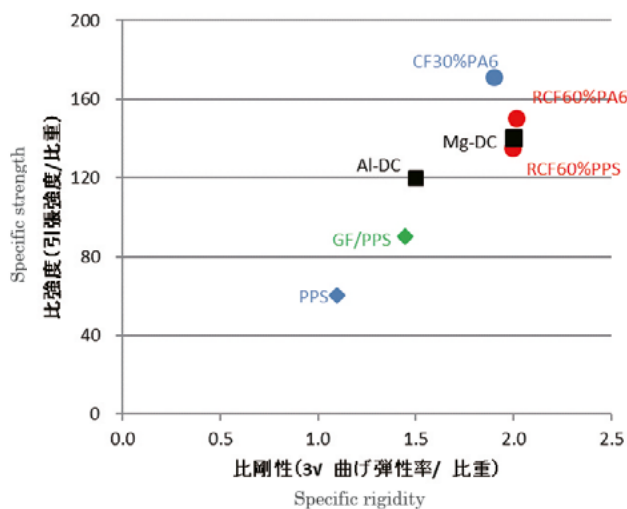


Fig. 4 高濃度RCFコンパウンド材の物性値

・汎用ポリプロピレン(PP)の低分子量化

メルトブローン不織布の製造に用いられる非常に低粘度の樹脂は、製造量が少ないため、汎用樹脂に比べて高価格で取引されている。それゆえ、汎用樹脂から分子量を低減することが出来れば、原料コストを抑えることができ、また、自由に樹脂の分子量を調節できれば、様々な物性のメルトブローン不織布を製造できる期待がある。

そこで、我々は、汎用PP(MFR 30g/10min)をHSP-48でどの程度低分子量化できるかテストした。押出量は2kg/h、高せん断部のスクリュ回転速度は3600min⁻¹、バレル温度は260°Cで、4バレル構成とした。その結果、PPのMFRは1500g/10min程度になったことが分かった。PPメルトブローン不織布製造で要求されるMFRはおおよそ1000g/10minと言われているので、その条件を十分にクリアした。

また、高せん断加工装置を用いて製造したMFR 1100g/10min程度のPPを用いて、メルトブローン不織布を実際に製造した。不織布の物性値は、目付30g/m²、平均繊維長は1.6μmであった。不織布の外観は白くてヤケもなく、しなやかな風合いで繊維は密集しており、隙間は確認されなかった。電子顕微鏡で確認しても繊維径に大きなばらつきはなく、樹脂溜りも確認されなかった。この結果より、従来品と同様の品質で低コストにメルトブローン成形が可能になることが確認された。

以上

機械の衝突／干渉を回避する リアルタイム干渉チェック機能の紹介

1 概要(背景／開発のねらい)

工作機械の衝突・干渉による被害は

- ・機械、治具、材料、工具の破損
- ・修理・再購入による費用増加
- ・ダウンタイム発生による生産効率低下

などの大損害を与える。

現状、衝突・干渉を防ぐためには、オペレータによる目視でのプログラム確認作業を行っている。しかし、オペレータの経験による感やコツに依存するところが多く、目視が不可能な場合や注意力不足、単純なミスによるヒューマンエラーが後を絶たない。そこで、オペレータの補助として衝突・干渉を未然に検知し動作を停止するリアルタイム干渉チェック機能のソフトウェア開発を行った。

これにより

- ・破損による時間やコストの損失低減
 - ・オペレータの作業時間の削減
 - ・不要な切削液や作動油の消費、電気使用量の削減
- といった効果が期待できる。

2 特長

2.1 システム構成

Fig.1 にシステム構成を示す。リアルタイム干渉チェック機能は CNC 装置と外部パソコンを LAN ケーブルでつなぎ、3次元シミュレーションを事前に行う。実際の工作機械の動きに先行した座標を用いたシミュレーションで干渉検知し、動作停止することで衝突・干渉を防止する機能である。運転モードを問わないので MDI (Manual Data Input) 運転や自動運転のみならず手動運転でも切削以外の工具干渉、機械干渉を検出し不具合を低減できる。

衝突防止ソフトウェア (CAS) は弊社中継アプリケーション Shiba CAS と株式会社 CGTech が提供する NC シミュレーションソフト VERICUT の機械干渉チェック機能のみを抜き出した VERICUT CAS から構成されている。今回自社 CNC 装置 TOSNUC と Shiba CAS の作り込みを行うことでリアルタイムに干渉チェックが行えるようにしている。

この機能を使用するには機械、治具、素材、工具の 3D 形状モデルの準備が必要である。

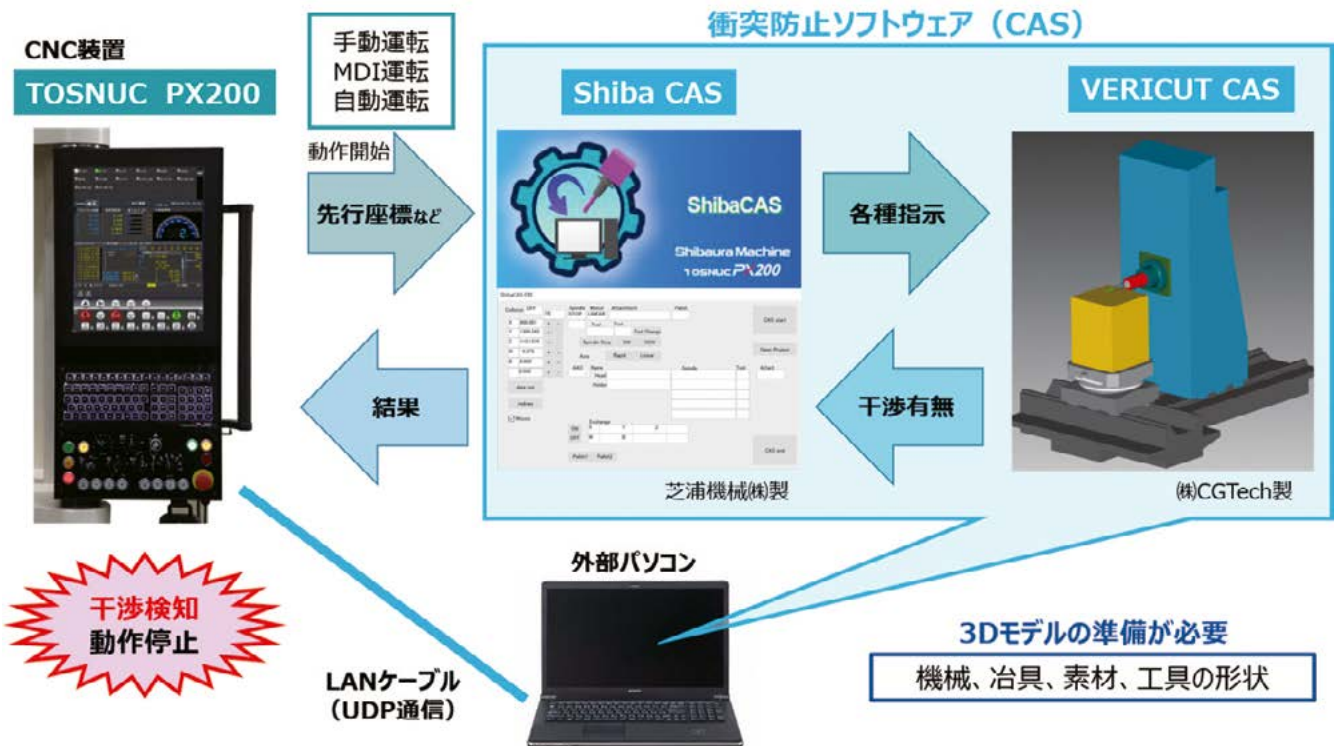


Fig. 1 システム構成

2.2 | シーケンス軸動作対応

シーケンス回路では主にアタッチメントの角度割出 (AAI : Auto Attachment Index) させる際のデータの受け渡し部分を作成している。

当社門形マシニングセンタは機種により仮想軸 (B 軸、C 軸) を持った特殊なアタッチメントを持つ。その 2 軸は通常のサーボ軸と異なり NC の主軸 C 軸制御機能により制御される。制御中の B、C 軸のデータは直接 NC から CAS へは送ることができないためシーケンス回路により決められたデータテーブルに角度データを書込み、CAS へ送信するようにしている。

また、AAI 中に干渉が確認された場合、動作途中で機械が停止してしまう。その場合復旧に複雑な操作が必要になり多くの時間を要してしまう。そこで Fig.2 に示すシーケンス軸動作フローのように本機能を実行中は動作開始前に干渉チェックを行い、干渉がない場合のみ動作させるようにシーケンス回路の変更を行っている。

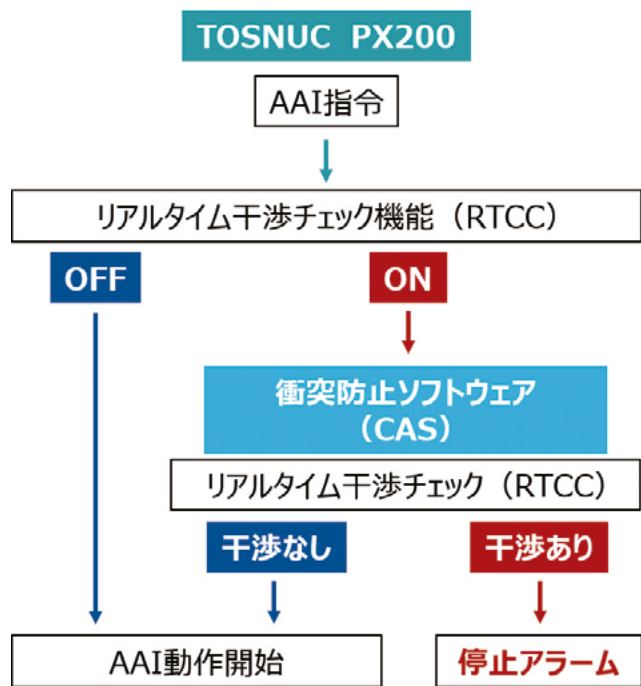


Fig. 2 シーケンス軸動作フロー

さらに CAS はシステム起動時に NC と通信を開始するとサーボ軸のデータを読み込むことはできるが主軸上の工具やアタッチメントのデータを読み込むことはできない。そのため、CAS 起動時やシステム再起動時など NC との通信を確立できた時点で主軸上の工具番号、アタッチメント番号、AAI 角度を CAS へ読み込ませるように回路作成を行っている。

3 仕様

Table 1 各種仕様

CNC装置		TOSNUC PX200
衝突防止ソフトウェア		Shiba CAS
		VERICUT CAS (ver8.2)
外部パソコン	CPU	インテル® Xeron® プロセッサ 3.5GHz以上
	メモリー	32GB以上
	HDD	M2 SSD 500GB以上
	GPU	OpenGL RX4000P 以上

※外部パソコンとVERICUT CASライセンスはお客様準備。

4 効果／事例

MDI 運転、自動運転では干渉検知された 1 ブロック手前で動作停止。手動運転では機械移動速度により干渉領域をコントロールすることで干渉前に動作停止することが可能 (感度はパラメータで変更可) である。

事例:早送り 100%;70 mm手前で停止

手動パルス発生器(早く回す);30 mm手前で停止

手動パルス発生器(遅く回す);0.1 mm台手前で停止

リアルタイム干渉チェック機能を設備することでトライ & エラーの繰り返しにより消費していた時間とエネルギーの削減にデジタルツインを活用しコスト削減と省エネルギーに貢献できる。

5 おわりに

今後、マシンロックでの加工前干渉チェックや仕上り形状に対する干渉チェック、機上計測によるワークや工具の補正值自動入力に対応する予定である。

高精度溝入れ切断加工機 USM-20B(H) の紹介

1 開発の狙い

2020年の首相所信表明にて2050年までのカーボンニュートラルが宣言されたのは記憶に新しい。脱炭素社会の実現には遠隔操作やモニタリングといったIoT技術を活用することが重要と言われているが、これには通信インフラの整備が必須となる。光通信に用いる光ファイバーは中継器や分配器にて光コネクタを用いてファイバー同士を接続しているが、ファイバー接続時の位置ズレは大きな伝達ロスとなるため、光コネクタは重要な部品であり、これには高精度なV溝加工が施されている。

また、高精度化が進む医療機器用X線CT装置、自動化が進む自動車の部品、高精細化が進む商業用インクジェットプリンタなどには、シンチレータ、パワー半導体、ピエゾといったセラミックス材料がセンサーやアクチュエータに用いられている。これらは難削材セラミックスではあるが、高精度化はもちろん、需要の高まりから加工の高効率化も求められている。

本製品は上述のような、光通信、医療、自動運転、印刷機など、持続可能な開発目標(SDGs)に向けた取り組みにおいて鍵となる部品への高精度な溝入れや切断加工をターゲットとして開発した。機械の外観をFig.1に示す。

2 特徴

1. ワーク送り軸(X軸)にV-V型動圧案内を採用

V形状の案内面はキサゲ、ミガキによる手仕上げを行い、長期間に渡って滑らか、かつ、高い真直度を確保。

2. 砥石位置決め(Y軸)にリニアモータ駆動、および特殊低ウェービングリニアガイドを採用

従来機のボールねじ駆動およびリニアガイドに比べて揺動運動を抑制。また、スケール分解能は従来機2nmに対して1nmとし、より高精度な位置決めを達成。

3. 超精密空気静圧軸受スピンドルを搭載

自社開発の高剛性空気静圧軸受スピンドルを搭載。2、3、4インチの各砥石直径に対して最適化した3種類のスピンドルが選択可能。

4. ベッドに鋳物を採用

高剛性化と長期間にわたっての安定した加工を実現。

5. タッチパネルによるオペレーション

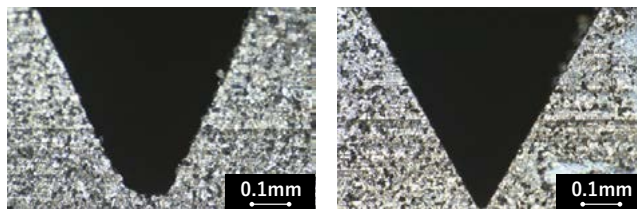
最小限の操作ボタンのみを残し、顕微鏡画面や加工プログラムの選択などはタッチパネル操作とし、加工オペレータの作業性向上と作業負荷を低減。

6. 放電ツルイーグオプション

砥石取り付け時のブレ修正や砥石先端角度の最適化が機上で実施可能。また、加工で摩耗した砥石を再成型し、砥石を最後までムダなく使用することが可能。放電ツルイーグ事例をFig.2に示す。



Fig. 1 USM-20B(H)の外観



摩耗した砥石

放電ツルイーグ後

Fig. 2 放電ツルイーグ前後のV溝底形状

Table 1 主要仕様数値

移動量	X軸(ワーク送り)	300 mm
	Y軸(砥石位置決め)	160 mm
	Z軸(砥石高さ)	80 mm
	C軸(ワーク旋回)	無制限
最大送り速度	X軸	2400 mm/min
	Y軸	1000 mm/min
	Z軸	1000 mm/min
最小指令単位	X,Y,Z軸	0.00001 mm
スピンドル	2インチ砥石対応	4000-40000min ⁻¹
	3インチ砥石対応	3000-30000min ⁻¹
	4インチ砥石対応	2000-20000min ⁻¹

3 仕様

仕様を Table 1 に示す。

4 効果／事例

1. 低熱膨張ガラス基板へのV溝加工

低熱膨張ガラス(100×100×1mm)へ光コネクタ用のV溝加工(0.25mmピッチ×20本-10セット)を実施した。Fig.3に外観、Fig.4に累積ピッチ測定結果を示す。従来機に比べて累積ピッチ誤差は1/2と大幅に向上していることを確認した。

2. セラミックブロックへの深溝入れ加工

セラミックス材料への加工事例としてアルミナ(50×50×20mm)へ溝幅0.7mmピッチ3.7mm深さ15mmの溝加工を実施した外観をFig.5示す。通常の加工機では15mm深さの溝を1本加工するのに複数回の切込みが必要である。本加工機では15mm深さの溝を1回の切込みで実現した。

また、加工ワークが薄い場合には複数枚を重ねてまとめて切断することで、大幅な生産性向上をはかることも可能と考える。

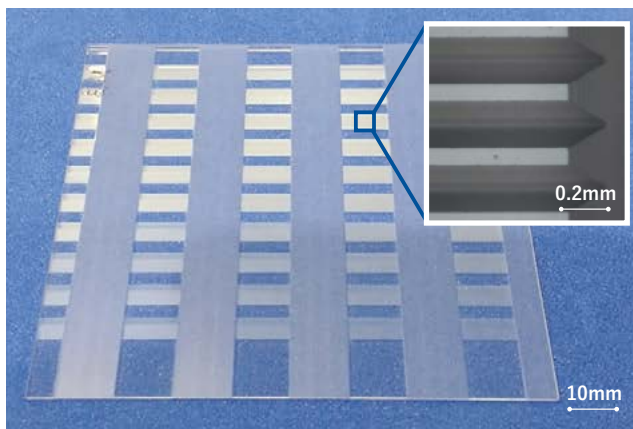


Fig. 3 低熱膨張ガラス基板V溝加工

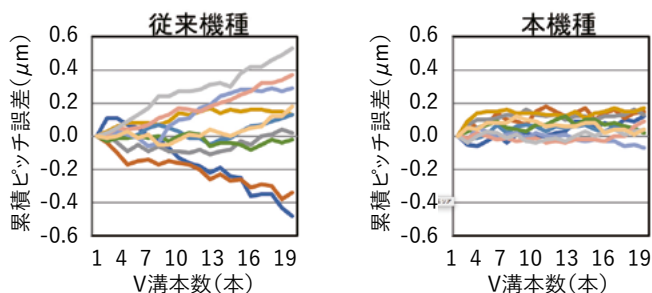


Fig. 4 V溝加工 累積ピッチ誤差測定結果

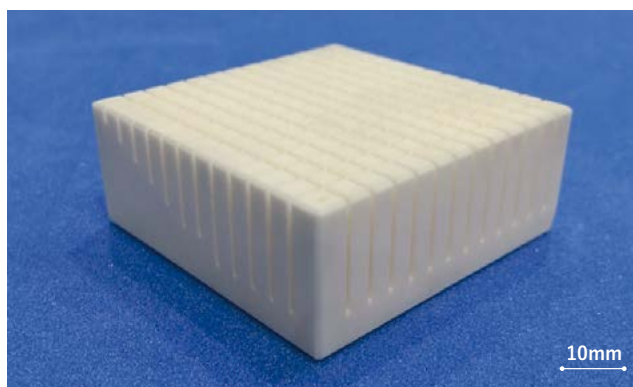


Fig. 5 アルミナブロック溝入れ

5 終わりに

今後、開発したUSM-20B(H)を活用し、SDGs達成に向けた高精度高効率加工に取り組む所存である。

TCmini シリーズ TC12 シリーズの紹介

1 概要

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

現行機種としての TC3 シリーズは空調装置、電解水装置、搾乳機などの幅広い分野に採用されてきたが、更なる市場ニーズに応えるため、最新 MCU^{注1)} を採用し、制御性能を向上させた TC12 シリーズを開発した。

TC12 シリーズの初号機「TC12-02」は、従来機種 TC3-02 の取付・機能互換を保ちながら、制御機能の高性能化を実現している。

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

2 TC12シリーズの特長

- 1) 制御性能: ラダー処理時間が従来機比 1/2
- 2) ラダープログラム容量: 従来機比 2 倍
データレジスタ容量: 従来機比 12 倍
- 3) 通信機能の強化:

CAN 通信^{注2)}: 専用 IC なしで搭載可^{注3)}

USB I/F: 専用 IC なしで搭載可^{注3)}

SD カード I/F: 専用 IC なしで搭載可^{注3)}

シリアル通信: 最大 13 点(従来機比 +10 点)

注2) CAN 通信 (Controller Area Network): Bosch 社が開発したシリアル通信プロトコル

注3) カスタマイズにより搭載可

3 仕様

Table 1 TC12シリーズの主な仕様

項目	TC12	TC3 (従来機)
処理時間(1k ワード)	5ms 以下	10ms 以下
プログラム容量	24k ワード	12k ワード
命令の種類	基本命令	16 種
	応用命令	74 種
内部リレー・タイマ	7296 点	1160 点
データレジスタ容量	3978 ワード	309 ワード
USB I/F	あり ^{※オプション}	なし
SD カード I/F	あり ^{※オプション}	なし
CAN 通信	あり ^{※オプション}	なし
シリアル通信	最大 13 点	最大 3 点
アナログ入力	12bit(最大 24 点)	10bit(最大 8 点)
アナログ出力	12bit(最大 2 点)	8bit(最大 2 点)



Fig. 1 TC12-02外観

4 効果／事例

TC12 シリーズは制御の高性能化とともに、顧客要望の多かった USB I/F、CAN 通信等の通信機能が容易なカスタマイズで対応可能となり、スマートファクトリー化を支援する製品となった。また、環境調和型製品であった従来機に対して更に部品点数も削減した。

4.1 採用事例

酪農機械: 搾乳機、生乳冷却システム

厨房機器: 電解水装置、空調装置: バイオトイレ



Fig. 2 生乳冷却システム



Fig. 3 電解水装置



Fig. 4 バイオトイレ



蔵前理科教室ふしぎ不思議
(略称くらりか)
<https://kurarika.net/>
くらりか静岡 代表

釜洞 文夫

(2008年退職)

子供たちに理科の面白さや楽しさを工作や実験を通して体験してもらおうと、大学の同窓が首都圏で始めた理科工作教室を、静岡で仲間と一緒に立ち上げました。東部地域を主な対象として、小学校、児童館、放課後児童クラブ、富士山こどもの国などで理科工作教室を開いています。

我々の活動は、①身近な材料を使った工作と実験を参加者全員が行う。②テーマの科学的な原理・法則や動作の仕組みを、プロジェクターやデモ装置を利用して分かり易く説明する。③参加児童5～6名に1名付いて、工作、実験を懇切丁寧に指導する。を基本としています。「自分で作ったものを動かしたり、観察したりする」ことが大切で、我々の教室への参加をきっかけに、理科好きになり、将来日本の科学技術を支える人材に育てほしいと願って活動しています。

メンバーは静岡県東部地区の企業OBを中心とし、12名(うち芝浦機械3名)。活動資金は、企業からの寄付、謝金等です。創設以来芝浦機械殿からご支援を受けています。感謝!!



大岡小学校 4年生 「浮沈子教室」

超精密加工技術の発展を支えた 超精密加工機の歴史と芝浦機械の貢献

本稿では、超精密加工技術の発展を支えた超精密加工機の歴史と、その中で芝浦機械が果たしてきた役割について紹介させて頂く。



工作機械カンパニー
工作機械技術部
技術顧問

田中 克敏

1 はじめに

コンピュータ、スマートフォン、インターネット、光通信は生活に溶け込み、これまで想像もできなかったほど我々の生活をスピーディで豊かに、そして便利なものにしていく。情報の出入り口として多くの家庭に光通信、パソコン、フラッシュメモリ、デジタルカメラ、スマートフォン、プリンタ、液晶モニターなどが普及し、巨大な市場を形成している。産業界においてもこれらの機器の活用なくして一日たりとも過ごせないのが実態であり、さらに、新型コロナウイルスの蔓延にともなって適用範囲が大幅に拡大している。これらの装置類に使用されている磁気ディスク基板、V溝基板、磁気ヘッド、非球面レンズ、回折格子、導光板、光学フィルム、ポリゴンミラーなどは超精密加工が関与して初めて達成できる超精密部品であり、これらの部品が装置の機能、性能、普及を左右するキーパーツとなっている¹⁾。加えて、自動車の安全運転・自動運転、セキュリティ、高速通信、4K・8K、IoTなどの普及に伴って超精密加工への要求は高度化して行くものと思われる。

これらの装置に強く求められる小型、軽量、多機能、高精度、高密度、大量生産、低価格の要求に応えるため超精密加工が活用され、発展してきた。例えば、非球面レンズに関しても収差を取り除くため1930年にシュミットプレートが発明されたが、生産技術が伴わなかったため天体望遠鏡、特殊カメラなどへの適用に留まり、NC制御による超精密加工が可能となった1980年代になって初めて一般のカメラ、CD装置など民生用機器に適用されるようになった。このように情報化社会を支えるこれらの機器の生産、発展のために超精密加工技術は不可欠なものとなった²⁾³⁾。

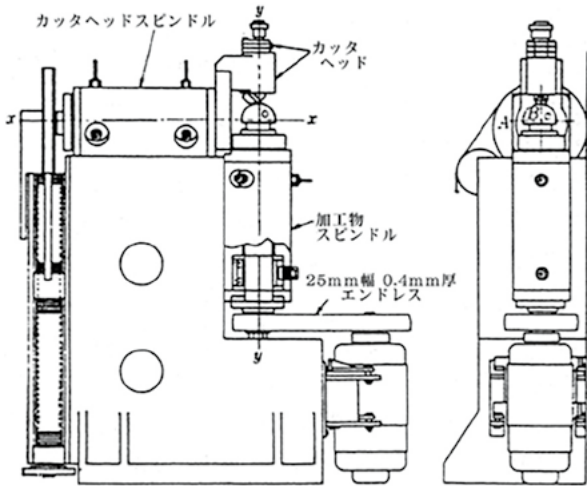
本稿では、超精密加工の技術開発の歴史的経緯と、その中で芝浦機械が果たしてきた役割について紹介させて頂く。

2 超精密加工の発展の過程

2.1 海外における超精密加工の発展の過程

超精密加工は、1950年代～1960年代の米国で軍事関連の超精密部品の加工精度向上、生産性向上を目的に職人の技能に依存するのではなく、加工機械の運動転写を対応させた超精密な母性を有する加工機械の研究開発がUnion Carbide、LLNL、Polaroid、DuPontなどで進められた。加工機械の主要な構成要素である主軸や案内などの軸受として空気静圧軸受の研究が進められ、最初の超精密加工機械として高精度な球面を加工するUltra-precision Hemisphere Turning Machine(Fig. 1)が開発された。この機械は、加工物を保持、回転させる加工物スピンドル、ダイヤモンドバイトを回転させるカッタヘッドスピンドルに空気静圧軸受が用いられた⁴⁾⁵⁾⁶⁾。

空気静圧軸受は1960年代から研究開発が進められてきたが、軸と軸受間に介在する空気の粘性が小さいことによる低摩擦に着目した高速ターボ機械、ジャイロ、内面研削盤の砥石軸、遠心分離機など高速回転を目的とした利用法であった。しかし、面粗さ、形状精度が求められる超精密加工用のスピンドルとしては高精度、高剛性、低振動が必要であり、これらを満足させることができる空気静圧スピンドルの開発が進められた。Fig. 2はFig. 1に示したDuPont1を発展させ、大型化したDuPont3に用いられたワーク主軸用の空気静圧スピンドルであり、φ400mmの球面加工を目的とした。このワーク主軸の構造は半球を対向させ、球面でラジアル方向とアキシャル方向の負荷を支持しており、軸受材料には、多孔質カーボンを使用した多孔質絞りを採用している。回転精度に関しては、測定方法が明示されていないが0.3μm以下、剛性は117.6N/μmであったとされている⁷⁾。



- 【装置構成および加工精度】
 (1)空気静圧スピンドルの振れ: 0.125 μ m
 (2)半球の形状精度: 0.6 μ m/101.6mm
 (3)面粗さ: 25 nmCLA

Fig. 1 Ultra-precision Hemisphere Turning Machine (DuPont1)⁴⁾

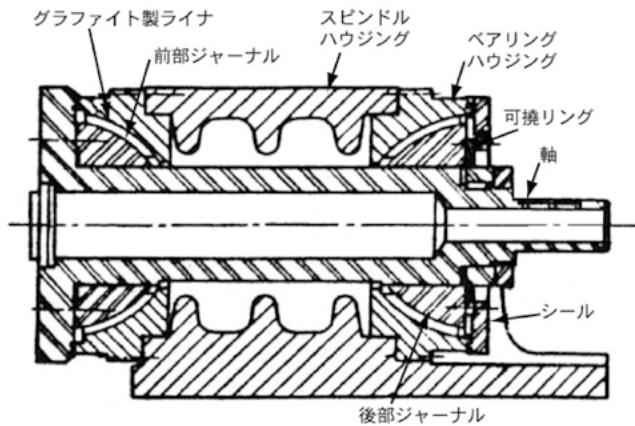


Fig. 2 多孔質型空気静圧スピンドル⁴⁾

1970年代には空気静圧スピンドル、空気静圧案内などの超精密加工用の機械要素が実用化され、これらの要素を使って運動転写による平面、円筒面、球面などの鏡面加工が実現した。しかし、数値制御の分解能は1 μ m～10 μ mであり、同時2軸制御で球面、放物面の超精密加工（サブミクロンの形状精度と鏡面）を行うことができなかった。この数値制御分解能の稚拙さを補う方法として直線運動と回転運動を組み合わせた機械的な円弧補間を併用した超精密加工機械が開発された。Fig. 3は、1978年に Battelle Pacific Northwest Laboratories で開発された直線案内2軸と2つの旋回軸を組み合わせた Omega-X Nanometer Machine Tool と名付けられた超精密加工機械であり、面粗さ 1.23nm rms、形状精度 75nm/50mm が得られている。

DESCRIPTION OF A UNIQUE MACHINE TOOL PERMITTING ACHIEVEMENT OF <math><15\text{\AA}</math> rms DIAMOND-TURNED SURFACES

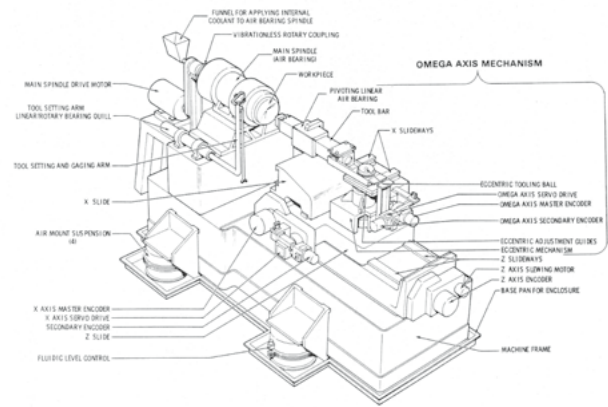


FIGURE 1. Omega-X Nanometer Machine Tool

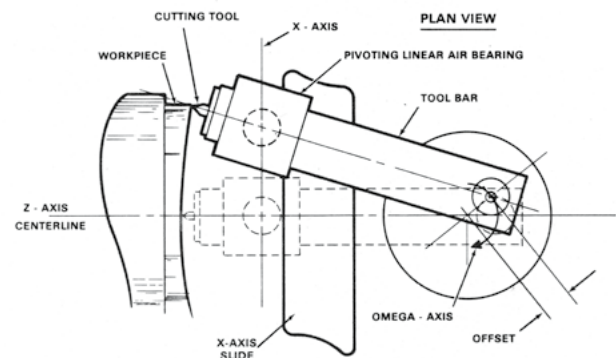
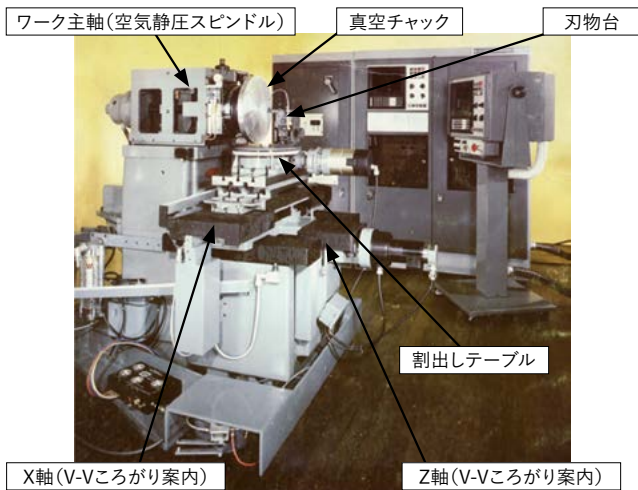


FIGURE 2. Omega-X Tool Motion

Fig. 3 Omega-X Nanometer 加工機 (1978) Battelle Pacific Northwest Laboratories⁸⁾ (空気静圧軸受のリンク構成を利用した非球面加工機)

1970年代の後半になって高分解能 NC 装置（分解能 25nm）が開発され、DuPont や LLNL などの要請に対し、超精密加工機械に関する技術を積み上げてきた Moore Special Tool 社や PNEUMO PRECISION 社で NC 制御の超精密旋盤が実現した。Fig. 4に 1975年に Moore Special Tool 社が開発した超精密 CNC 旋盤 (M-18AG) を示す。この機械は同社の治具研削盤、測定機に使用してきた V-V ころがり案内と精密送りねじの技術を利用し、ワーク主軸には Professional Instruments 社の空気静圧スピンドル、位置検出にレーザ干渉計が用いられた。構造体は鋳鉄が用いられ、さきげやラップなど優れた技能により、超精密加工機械に求められる精度まで入念に仕上げられている^{9)～12)}。



【装置構成および精度】
 (1)空気静圧スピンドル・V-Vころがり案内
 (2)制御分解能:25 nm

Fig. 4 超精密旋盤 M-18AG (1975)
 Moore Special Tool^{9) 10)}

Fig. 5 に 1977 年に PNEUMO PRECISION 社が開発した超精密 CNC 旋盤 (MSG-325) を示す。この機械は、空気静圧案内の X、Z 軸をグラナイト定盤上に T 字型に配置し、Z 軸上に空気静圧軸受のワーク主軸を載せ、レーザ干渉計を用いたフィードバックシステムを採用している^{13) 14)}。

これらの機械の出現により、数値制御による高能率な軸対称の球面、放物面、楕円面、非球面の超精密加工が可能となった。一方、欧州では 1980 年にオランダの PHILIPS 社が油静圧軸受(直線案内、ワーク主軸)と油圧サーボ送り機構、レーザフィードバックを採用した独自の超精密 CNC 旋盤を開発した (Fig. 6)。

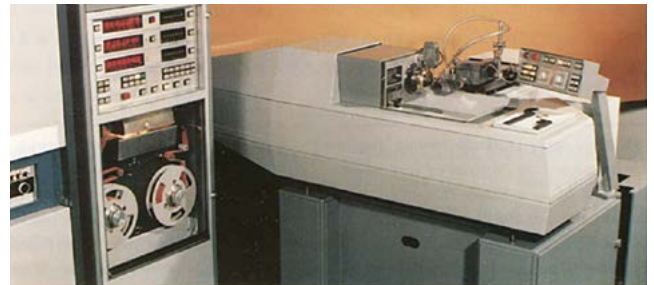


【装置構成および精度】
 (1)空気静圧スピンドル:振れ精度=0.1μm
 (2)空気静圧案内
 (3)制御分解能:25 nm

Fig. 5 超精密旋盤 MSG-325 (1977)
 PNEUMO PRECISION, INC.¹³⁾

米国での超精密加工技術開発の目的が軍事、エネルギー、宇宙開発に使用する超精密部品の精度向上、生産性向上であったの

に対し、PHILIPS 社では民生用、産業用を対象とした磁気ディスク基板、炭酸ガスレーザ用反射鏡、プラスチック非球面レンズ、プラスチック非球面レンズの射出成形用金型などを追及しており、射出成形法によるプラスチック非球面レンズの大量生産の先鞭をつけた画期的な研究開発であった¹⁵⁾。



(a)超精密CNC旋盤



(b)加工事例



(c)超精密金型により成形されたプラスチックレンズ

【装置構成および精度】
 (1)油圧サーボ・レーザフィードバック (3)加工形状精度:0.5μm
 (2)制御分解能:16 nm (4)加工面粗さ:0.02μmRy

Fig. 6 超精密CNC旋盤 COLATH (1980) PHILIPS¹⁵⁾

2.2 | 日本における超精密加工の発展の過程

1970年代の日本では欧米での活発な超精密加工の研究に刺激を受け、技術立国を目指す日本にとって必要不可欠な技術として調査研究が進められた。しかし、1970年代の日本には超精密加工を必要とする産業の萌芽がなく、大学、公的研究機関、企業の研究所での研究に留まっていた^{16) 17)}。このような状況の中で筆者らは、工作機械の高精度化、独自性のある工作機械のための基盤技術として超精密加工への取り組みを開始した。

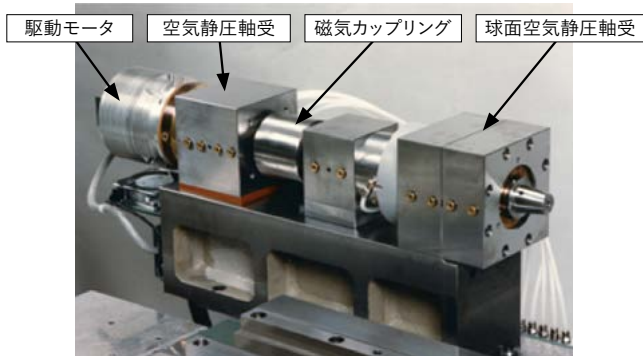
2.2.1 球面空気静圧スピンドルの開発と平面加工装置による鏡面加工

通常の加工精度に比べ、2～3桁以上の高精度(平面度、真円度、面粗さなど)が求められる超精密加工に取り組むに当たり、機械の構成要素の超精密化を図るため、重要な機械要素の一つである主軸について、1977年に(株)東芝生産技術研究所から自製方式の球面空気静圧スピンドル (Fig. 7) の技術供与を受け、製造技術を習得するとともに、大型化により剛性、負荷容量の増大を計った。Table 1 に各種球面空気静圧スピンドルの性能を示す。心振れの測定は静電容量型非接触微小変位計によるリサーチ法で行った^{18) 19) 20)}。

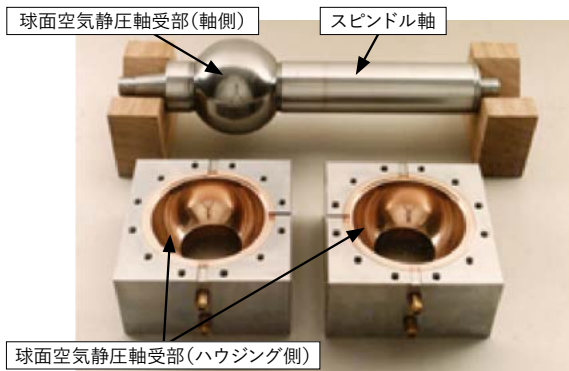
Table. 1 球面空気静圧スピンドルの仕様

主軸直径(球径) mm ^φ		60 mm ^φ	100 mm ^φ	120 mm ^φ
心振れ nm ^φ	ラジアル方向 ^φ	50 ^φ	50 ^φ	50 ^φ
	アキシャル方向 ^φ	50 ^φ	50 ^φ	50 ^φ
剛性 N/μm ^φ	ラジアル方向 ^φ	15 ^φ	50 ^φ	60 ^φ
	アキシャル方向 ^φ	30 ^φ	60 ^φ	70 ^φ
許容負荷容量 N ^φ	ラジアル方向 ^φ	90 ^φ	300 ^φ	350 ^φ
	アキシャル方向 ^φ	180 ^φ	360 ^φ	400 ^φ
回転数 min ⁻¹ ^φ	最大 ^φ	10,000 ^φ	6,000 ^φ	5,000 ^φ

φ 100mmの球面空気静圧スピンドルと新たに開発した空気静圧案内を組み合わせ、Fig. 8に示す平面加工装置を試作し、単結晶ダイヤモンドバイトを用いたフライカットでの軟質金属(アルミニウム合金、無酸素銅)の鏡面加工の研究を行った結果、平面度 0.79μm/ φ 100mm、面粗さ 20nmRz が得られた²¹⁾。



(a)スピンドルの外観



(b)スピンドルの構造

Fig. 7 球面空気静圧スピンドルと構成部品 ABS-10 (1978)¹⁸⁾

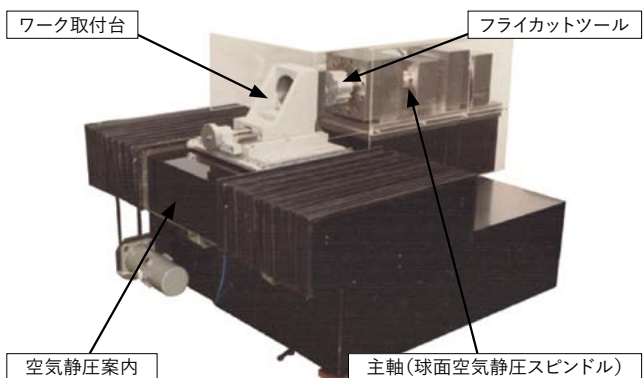
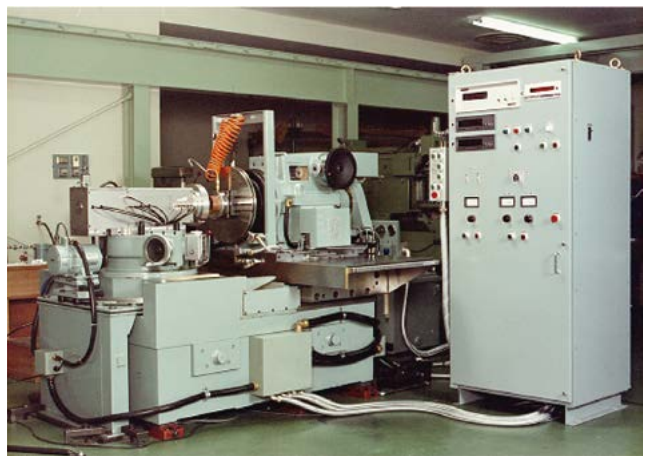


Fig. 8 平面加工装置 (1979)
フライカットによる軟質金属の鏡面加工²¹⁾

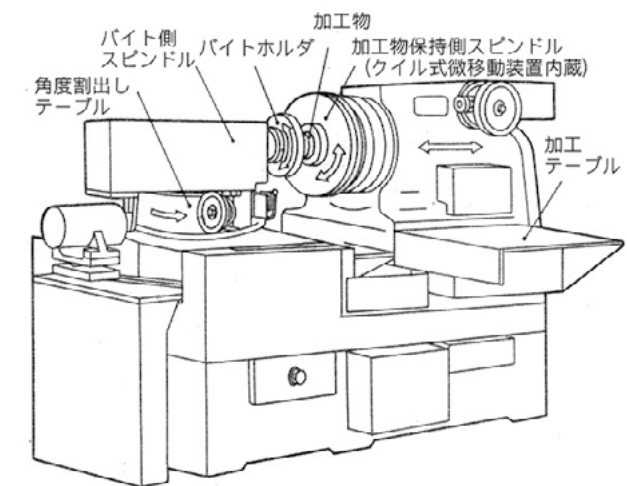
2.2.2 | 金属ミラー加工機(SPM-4)の開発

1977年から7年間にわたって研究開発が進められた通商産業省工業技術院大形プロジェクト「超高性能レーザ応用複合生産システムの研究開発」の1978年度の委託研究の一環として、同システムの高出力レーザ発生装置に切削加工された金属ミラーを供給するため Fig. 9(a) に示す金属ミラー加工機 (SPM-4) を(株)東芝 生産技術研究所と東芝機械(株)が共同で開発した^{21)~24)}。

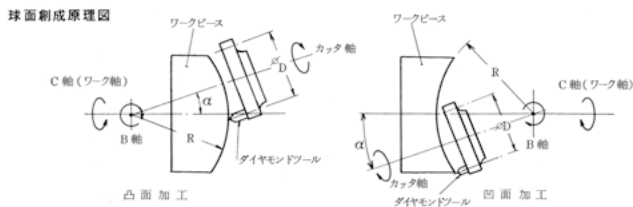
日程的な制約、当時の NC 装置の性能から、本機は球面創成法により、平面鏡、凹面鏡、凸面鏡を切削加工することとし、Fig. 9(b)に示すような構造とした。バイト側スピンドルには φ 100mm 球面空気静圧スピンドル、加工物保持側スピンドルには面板直径、加工物の質量を考慮して油静圧スピンドルとし、加工テーブルは平面鏡加工時の送り軸であるため、滑らかな送りを旨として油静圧案内とした。各スピンドルの回転、X 軸の送り駆動モータはモータ振動の影響を少なくするため機械本体から分離して設置した。加工した平面鏡の平面度は Fig. 10 に示すように 0.3 μ m/ φ 150mm が得られた。この金属ミラー加工機 (SPM-4) は 40 年以上を経過した現在も初期の性能を維持した状態で使用されている。



(a)装置の外観



(b)装置の構造



(c)球面創成原理
Fig. 9 金属ミラー加工機

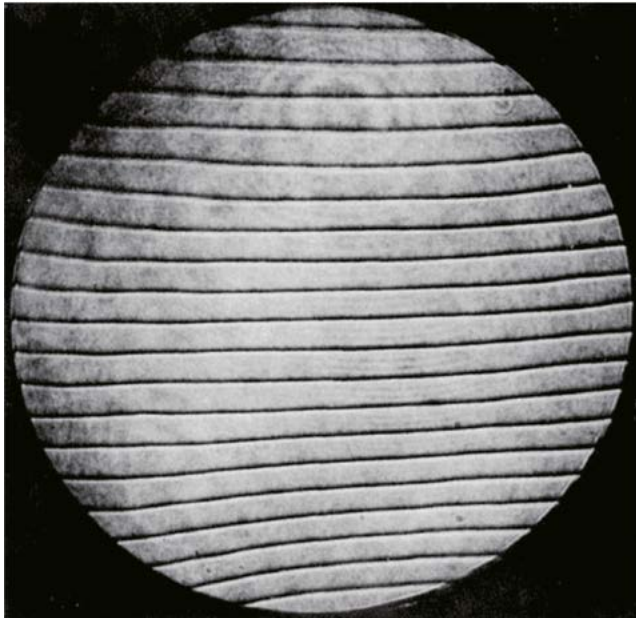


Fig. 10 金属ミラー加工機での加工結果
(平面度:0.3 μ m/ ϕ 150 mm)(λ =632 nm)^{21)~24)}

2.2.3 | ポリゴンミラー加工機の開発

1980年代に入ると超精密加工技術を必要とする複写機の感光ドラム、HDD用磁気ディスク基板(アルミニウム合金)のダイヤモンドターニング、レーザプリンタのスキヤナ用ポリゴンミラーのフライカットなど軟質金属の鏡面加工がスタートした。これまでの単結晶ダイヤモンド工具による鏡面加工はダイヤカットと呼ばれ、指輪、ネックレス、時計の文字盤、オーディオのつまみなど装飾としての鏡面を求めるものであった。一方、磁気ディスク基板やポリゴンミラーはこれに平面度、面粗さなど光学面としての幾何公差が必要になり、これらに対応できる主軸や案内、送り機構などの機械要素の超精密化、単結晶ダイヤモンド工具、材料、評価方法に関する研究開発が進められた。

その一環として、Fig. 8に示した平面加工装置によるフライカットでの鏡面加工の実績により、レーザプリンタのスキヤナ用ポリゴンミラー(回転多面鏡)への適用が検討された。これまでポリゴンミラーは角度の基準として回転テーブルなどの割出し精度の測定に用いられており、ガラスの光学研磨で製作されていた。そのため質量が大きく、高価なガラス製では大量生産が求められるスキヤナとしての用途には対応できなかった^{25)~29)}。

レーザプリンタのスキヤナとして使用されるポリゴンミラーの代表的な形状、精度をFig. 11に示す。このポリゴンミラーは高速に回転(7000~40000min⁻¹)させて使用され、また大量生産が求められる。このような要求に応えるためFig. 12(a)(b)に示すポリゴンミラー加工機が開発された。機械の構成はカット軸として ϕ 100mmの球面空気静圧スピンドル、送り軸として使用している空気静圧テーブルはFig. 12(c)に示すように、めねじが固定されている駆動テーブルと主テーブルに分割されており、この間を非接触の空気静圧継手を介して送り方向の力だけを主テーブルに作用させる構造とした。

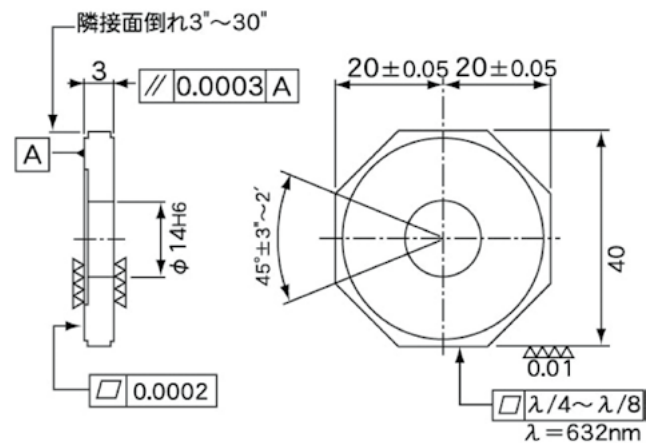
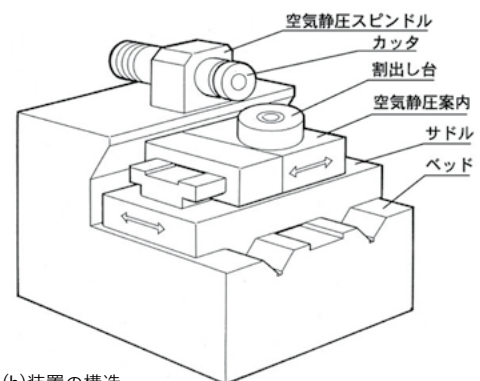


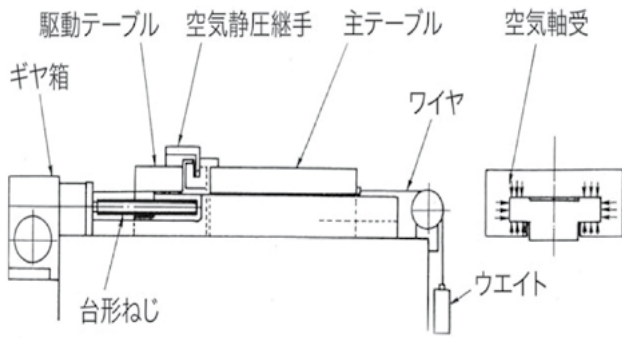
Fig. 11 ポリゴンミラーの形状と要求精度の一例



(a)装置の外観



(b)装置の構造



(c) 空気静圧継手を用いた空気静圧軸受テーブルの構造
Fig. 12 ポリゴンミラー加工機

角度割出しは、歯数360枚のカービックカップリングを用いた割出しテーブルによって行っている。ワークホルダに10～20枚の被削材を重ねてプリセットし、このワークホルダを割出しテーブルに取り付け、送り速度50～200mm/minで加工する³⁰⁾。

カッタホルダには荒削り(2本)、中仕上げ、仕上げの4本の切刃があり、4本の切刃は半径方向、軸方向にそれぞれの切込み量、送り量だけずれて配置されており、約0.1mmの仕上代に対し、一回の切削で仕上げ加工までが終わり、大量生産に対応できる方法となっている (Fig. 13)。このカッタホルダを使用してポリゴンミラーをフライカットし、5nmRzの面粗さが得られた (Fig. 14)。測定機はTaylor Hobson社の触針式超精密表面粗さ・膜厚測定機、タリステップ (Talystep) である。

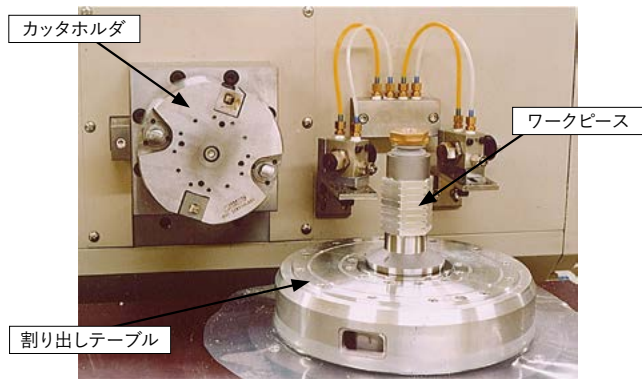


Fig. 13 カッタホルダとワークピース

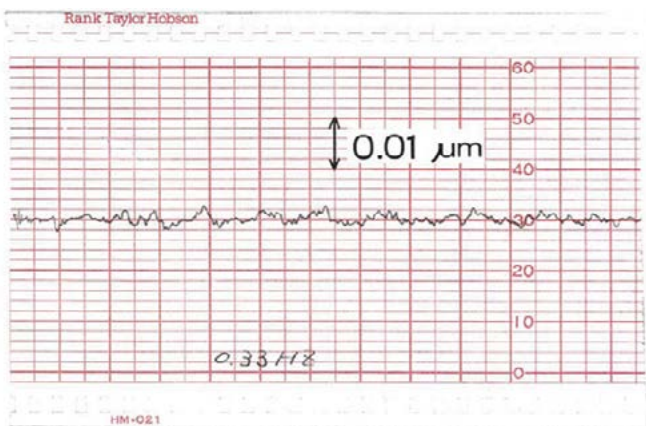


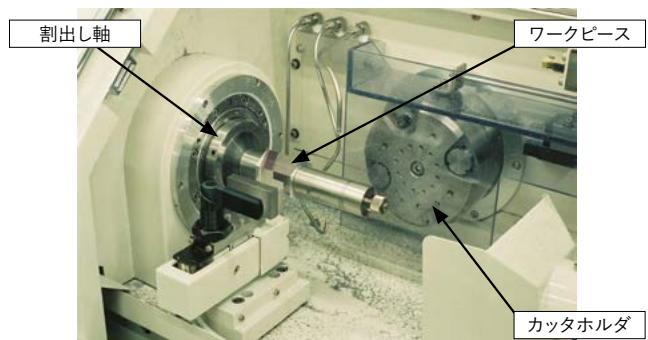
Fig. 14 フライカットによるポリゴンミラーの面粗さ

Fig. 12に示すポリゴンミラー加工機を開発以降、ポリゴンミラーの需要に対応してきたが、超精密技術の進歩に伴い新しい構造、機構を取り入れ、安定化・小型化・高能率化・コストダウンを図った Fig. 15に示すポリゴンミラー加工機に発展させた。空気静圧案内は精度・安定性を考慮して特殊V-Vすべり案内とし、V-Vすべり案内であった切込み軸はリニアガイドとして位置決め精度の向上を図った。横軸とした割出し軸はベアリング構造とし、センターでワークホルダを支持することにより、ワークの重ね枚数を増やすことを可能にし、割出し角度の検出には高分解能のエンコーダを使用している。

レーザプリンタの市場は現在も年間4000万台弱、売上高も5兆円弱を維持し、売上高では全プリンタの80%強を占めている。今後、自動車の自動運転、安全運転用のスキャナとしてのポリゴンミラーの需要も見込まれている。



(a) 装置の外観



(b) カッタホルダとワークピース

Fig. 15 小型化・高能率化・安定化を図った
ポリゴンミラー加工機 UFG-80C(P)

2.2.4 | ディスク旋盤の開発

コンピュータの記録媒体が磁気テープから磁気ディスクに移行したことから、磁気ディスク用の素材としてアルミニウム合金円板を鏡面加工するための超精密正面旋盤 (Fig. 16) を 1982 年に開発した³³⁾。

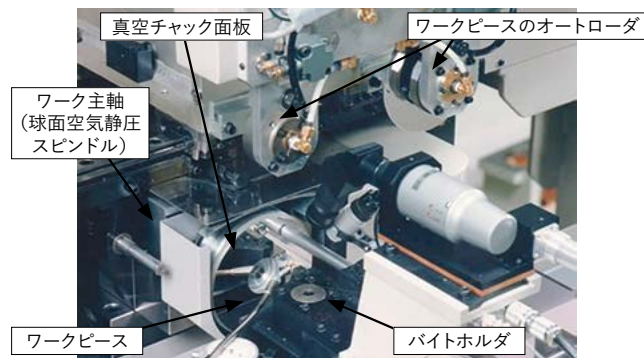
磁気ディスク基板として求められる精度は面粗さ 25nmRa、3600min⁻¹ 時の振れ 0.051mm、この時の加速度は 38.1m/sec² (1985 年当時の ANSI の規格) であり、外径 14 インチ、8 インチ、5 1/4 インチ、板厚 1.905mm ± 0.025mm の円板を高効率に加工することが求められた^{31) 32) 33)}。ただし、記録密度の増加と小型化の要求から加工機の仕様は大半が外径 5 1/4 インチ以下であった。求められる加工精度から主軸には空気静圧軸受、主軸の駆動にはモータの振動を遮断するため磁気カップリングが使用された。ディスク基板の保持は真空チャックで行われ、チャック面板の表面にはごみや切屑の挟み込みによる傷、精度不良(微小うねり)を小さくするためウレタンゴムが接着されたが、柔らかいウレタンゴムを高精度に切削することは至難の業であった。案内には空気静圧軸受を使用し、送り機構には空気静圧継手、摩擦駆動などによりテーブルに外乱を与えないような工夫がされた。

大量生産が基本の部品加工であり、切刃幅 1.5mm ~ 2.5mm の単結晶ダイヤモンドのフラットバイトで切削され、5 1/4 インチの基板で加工時間は 20sec ~ 30sec となり、鏡面加工されたディスク基板の自動着脱と搬送、板厚の計測、切屑の完全排出などが求められ、無人運転で生産された。

この磁気ディスク基板のダイヤモンドターニングも 1980 年後半にはコストの安いラップに取って代われ、10 年足らずの短い寿命であった。



(a)装置の外観



(b)自動化機構の様子
Fig. 16 自動化されたディスク旋盤³³⁾

2.2.5 | 超精密スライサの開発

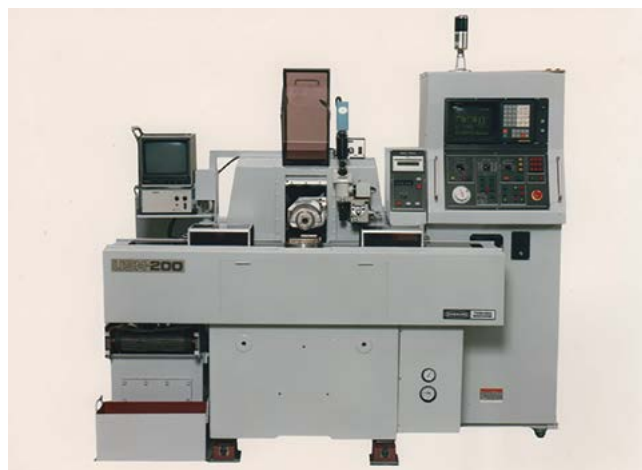
1980 年頃からビデオヘッドの需要が拡大し、単結晶フェライトの微細加工のための高精度平面研削盤が求められた。しかし、これらの加工に適した加工機がなく性能的には不満足であったが、シリコンウエハのダイシング用「ダイサー」が利用されていた。

磁気ヘッドの加工は素材である単結晶フェライトの切断、溝入れ、平面研削であり、薄刃、総形、カップ型の超微粒ダイヤモンド砥石が使用され、この間、素材の 95% が切屑となる高付加価値加工である。磁気ヘッドの需要拡大とさらに高精度化する磁気ヘッド (磁気ディスク用ヘッド、8mm ビデオヘッド) の加工に対応できる「ダイサー」よりも、高剛性・高精度の超精密平面研削盤「スライサ」が求められたことから、高付加価値商品になることを期待して開発を進めた。開発した「超精密スライサ USM-300A(NC)」は精度、性能としては高い評価を得たが価格、装置サイズ(ダイサーの 4 倍)で大量の採用には至らなかった。

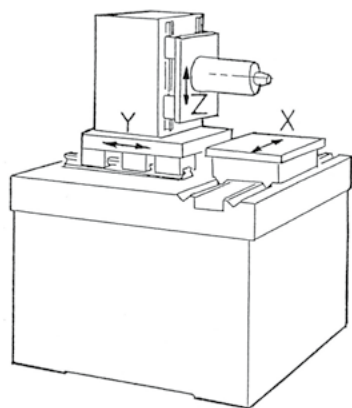
磁気ヘッドメーカーではヘッドの引合いに対し、現有の設備能力、勤務体制、外注などでの対応を検討し、対応できない場合、初めて新しい設備の導入を検討する。設備の品質と納期は絶対条件であり、ヘッドの受注が決定した場合、この条件が満足できる機械メーカーに発注し、ヘッドの生産を行う。しかし、磁気ディスクの記録密度は日進月歩であり、次のヘッドの引合いでは導入したばかりの設備が精度的に利用できず、さらに新しい設備の検討が必要になる。このような状況の中、1984 年にユーザーの要求に合った CNC 超精密スライサ「USM-200A(NC)」を開発した (Fig. 17(a)(b))。

硬脆材料であるフェライトの研削に対して砥石軸には高速・高精度で振動の少ないラジアル径 ϕ 60mm の円筒型空気静圧スピンドルが用いられて、高速回転 (12000min⁻¹) による発熱を抑えるための発熱の少ない絞りの設計、主軸に低熱膨張材料の使用、恒温水での温度制御など熱的安定性を得るための対策

を施した。Fig. 18は熱変形対策を実施した空気静圧スピンドルの一例であり、低熱膨張材料の使用、モータ部の水冷に加え、ハウジング取り付け位置の工夫をした。これは、主軸端から基準面までの距離Aと基準面からハウジング取り付け面までの距離Bを、使用している材料の線膨張係数の逆比で按分する。温度が安定した状態ではハウジング取り付け面に対し、基準面はB×ハウジング材料の線膨張係数で後方に移動し、主軸はA×主軸材料の線膨張係数で前方に移動することになり、取り付け面に対し、軸端での伸びは0とすることができる。主軸はインパー（線膨張係数 $16 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ）、ハウジングはステンレス鋼(SUS420J2 線膨張係数 $9.7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)を使用している。



(a)装置の外観



(b)装置の構造

【機械構造】

(1)X軸：V-Vすべり案内

(2)砥石スピンドル：円筒型空気静圧スピンドル

Fig. 17 超精密スライサUSM-200A(NC)³⁴⁾

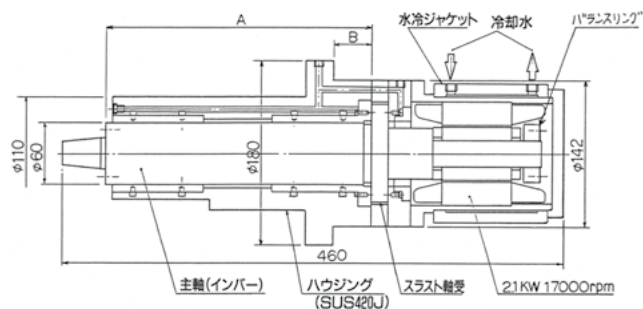


Fig. 18 超精密スライサ用円筒型空気静圧スピンドルの構造と熱対策³⁵⁾

クリーブ研削を行うX軸(テーブル)の案内は高精度、高剛性で滑らかな運動が得られるV-Vすべり案内とし、入念にきさげ仕上げ(Fig. 19)されたV-Vすべり案内のテーブル運動の真直度は $0.3\mu\text{m}/400\text{mm}$ 以下となり、高精度化に貢献した。Y軸、Z軸は位置決め軸であり、摩擦係数の小さいリニアガイドとし、指令単位 $0.1\mu\text{m}$ のスケールフィードバック方式とした。

工作機械製造の生産性向上が求められ、過酷で能率の悪い作業であるきさげ、ラップの技能が衰退していく中で超精密加工機械の製造にあたり、不可欠な技能として見直され、技能の向上、伝承、維持ができたことは大きな成果であった。



Fig. 19 きさげ作業

超精密スライサ USM-200A(NC)は多くの磁気ヘッドメーカーから高い評価を受け、機能を簡素化した4機種をシリーズに加え、1984年から1990年までの6年間に約1200台を納入することとなった。超精密スライサの成功は、日本を磁気ヘッド生産の世界の生産拠点に押し上げることに貢献し、東芝機械(株)(現在は芝浦機械(株))の社内でも超精密加工が認知され、課から部、事業部への発展の推進力になった。しかしながら、記録密度の高密度化に伴って磁気ヘッドの微細化が進行する中、ウエハプロセスを用いた薄膜ヘッドが開発され、工程短縮、微細化、高密度化への適合性から普及していった。フェライトヘッドは性能向上の努力で、ぎりぎりまで対向していたが、ある一線を越えることができず瞬時に薄膜ヘッドに市場を明け渡すことになった。

薄膜ヘッドに移行することにより、「超精密スライサ」の出番は1/10に減少し、新規の設備は期待できなくなり、1990年代前半に磁気ヘッド用「超精密スライサ」の時代は終わった。その後、「超精密スライサ」は磁気ヘッドほどの台数は期待できないが、インクジェットプリンタヘッドの溝入れ、パワー半導体用SiC基板の切断、光学材料の切断、今後は5G用V溝基板の溝入れなどでの需要が期待される。

2.2.6 空気静圧スピンドルの性能向上と高速超精密MCの開発

超精密スライサをはじめ磁気ヘッド関連の研削盤を製作することによって各種、大量の空気静圧スピンドルを製作してきた。これによって空気静圧スピンドルの高速化、高精度化、タフさなど性能が向上し、適用範囲を広げてきた。ここで、面白いアプリケーションを紹介する。

円筒型空気静圧スピンドルの対向するスラスト軸受の前後の供給空気圧を変化させることによって回転中に軸受すき間（軸受すき間は片側 $16\mu\text{m}$ ）の範囲内で主軸を前後に移動させ、 $0.1\mu\text{m}$ の精度で位置決めすることができる。カップ砥石を使用する横軸の平面研削盤で機構を簡素化する目的で制御可能な送り軸を持たず、 $3\sim 5\mu\text{m}$ の砥石の逃がしと前進位置への砥石の位置決めを、電磁弁の切り替えだけで高速に行うリトラクト機構を開発した。この機構により、高精度な案内、フィードバックスケール、NC制御が不要になった。

円筒型空気静圧スピンドルは軸受材料にカーボンを使用することで過負荷時などでの焼付きに対して強くなり、発熱対策によってラジアル径 $\phi 60\text{mm}$ のスピンドルで回転数 17000min^{-1} 、剛性はラジアル方向 $35\text{N}/\mu\text{m}$ （負荷容量： 300N ）、アキシャル方向 $60\text{N}/\mu\text{m}$ （負荷容量： 600N ）が可能となった。これまで空気静圧スピンドルは負荷の少ない鏡面加工など超精密加工を対象にしてきたが、上記の性能が確保できるのであれば小径のエンドミル加工に使用できると考え、設備機械のフライス盤に $\phi 60\text{mm}$ の円筒型空気静圧スピンドルを取り付けて切削テストを行った (Fig. 20)。



Fig. 20 空気静圧スピンドルを用いたエンドミル加工テスト

空気静圧スピンドルを使用することで高速回転が可能となり、工具材料に適合した切削速度を選ぶことができ、送り速度を速くできる、振動が少ないため工具寿命が延びる、心振れが小さいため加工面粗さが向上する、心振れが小さいため一刃当りの送り量が安定し工具寿命が延びる、切屑の排出がよく切屑に切削熱が持ち去られるため加工物の温度上昇が少ないなどの効果が期待できる。このフライス盤を用いて、回転数 12000min^{-1} 、送り速度 $493\text{mm}/\text{min}$ （使用したフライス盤の最高速度）、切込み量 5mm 、の加工条件で、 $\phi 6\text{mm}$ （二枚刃、材種 ME-10）のエンドミルを用いて、被削材 FC200 の溝加工を行った。その結果、切削力は X 方向（送り方向） 114N 、Y 方向（送り方向に直角方向） 98N 、Z 方向 28N であり、十分 $\phi 60\text{mm}$ 円筒型空気静圧スピンドルの能力の範囲内であった。心振れが小さいため X 軸方向の切削力の変動も少なく安定している (Fig. 21)。

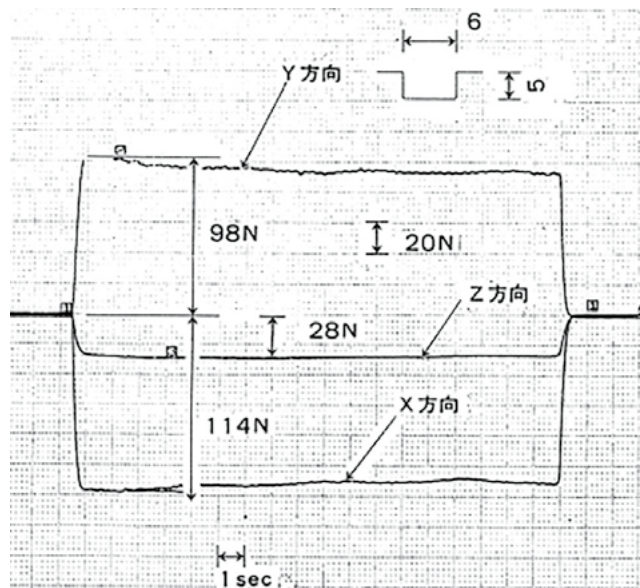


Fig. 21 空気静圧スピンドルを用いたエンドミル加工におけるX,Y,Z方向の切削力

この結果を得て、立形マシニングセンタ (JRV-40S) の主軸に $\phi 60\text{mm}$ の円筒型空気静圧スピンドルを搭載し、1992年のJIMTOFに参考出品した (Fig. 22)。当時、金型業界ではコスト削減とリードタイム短縮のため放電加工を中心としたプロセスから高速切削による直接形状加工を行う方法 (直彫り加工) が模索されていた。新潟県工業技術総合研究所の嶽岡悦雄氏は、JIMTOF に出品した本機を導入され、鍛造型など高硬度鋼の小径エンドミルを用いた直彫りの有効性 (加工時間短縮、NC加工データの簡略化、磨き行程の省略、加工精度向上) を研究し、「高速空気静圧主軸による高硬度材のエンドミル加工に関する研究」で学位を取得された³⁶⁾。

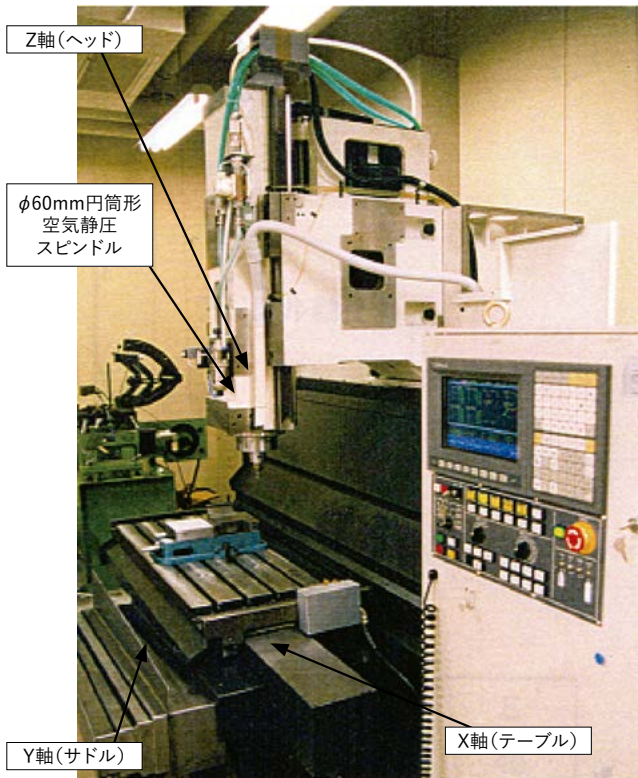


Fig. 22 空気静圧スピンドルを搭載した高速加工機 JRV-40S 新潟県工業技術総合研究所に納入

嶽岡氏により、新しい加工方法が提案されたことから、東芝機械では空気静圧スピンドルに特化した高速加工機の商品化を進め、スピンドルに関してもラジアル径 $\phi 40\text{mm}$ で 60000min^{-1} 、 $\phi 21\text{mm}$ で 80000min^{-1} とさらに高速化に対応させた。適合するアプリケーションが少なく市場はなかなか拡大しなかったがLED関連の光学部品での需要が生まれた。そこで、2008年から超精密マシニングセンタとして全直線軸リニアモータ駆動により加工精度、鏡面性の向上、ATC、各種のアタッチメントによる多様化で、機械を一新した。

近年、自動車のヘッドライトのランプ、その他の光源がハロゲンランプからLEDに代わったことによってレンズ、リフレ

クタがプラスチック化された。このことにより、金型に高精度 (形状精度と面粗さ) と複雑形状、大型化が求められるようになり、これまでのように磨きで対応できない部品が増えたことから、Fig. 23に示す5軸制御の超精密マシニングセンタを開発した。Fig. 24に、本機によって加工した自動車用ランプリフレクタ金型を示す。



Fig. 23 超精密マシニングセンタ UVM-700E(5AD) 同時5軸制御

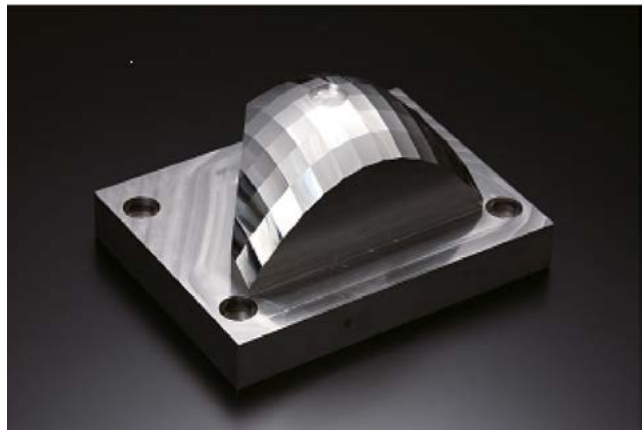


Fig. 24 自動車用ランプリフレクタ金型

2.2.7 | 超精密非球面加工機の開発と新しい市場

(1) 超精密非球面加工機開発の経緯

先に述べたように1975年～1980年にかけて欧米でNC制御の超精密旋盤が開発され、1980年のシカゴの工作機械見本市で Moore Special Tool 社の M-18AG、PNEUMO PRECISION 社の MSG-325 を見ることができ感銘を受けた。当時、日本でも既にCDのピックアップレンズの需要が生まれており、1982年に最初の超精密 CNC 旋盤 (MSG-325) が某光学メーカーに導入されている。このような背景と当社では金属ミラー加工機、ポリゴンミラー加工機で平面や球面の光学的鏡面の加工は達成できており、2軸を制御して球面や放物面、非球面の加工に発展させたいと考えるのは当然であり、1984年、M-18AG、MSG-325を凌駕することを目標に超精密非球面加工機の開発を始めた。

機械の構成は MSG-325 にならって鋳物のベースの上に T 字型に空気静圧軸受のテーブルを配置し、X 軸には刃物台を、Z 軸には主軸として球面空気静圧スピンドルを搭載、テーブルの送り機構はボールねじとインランド (INLAND) 社のサーボモータを使用し、レーザフィードバックとした。アーレン・ブラットレー (Allen Bradley) 社の制御装置を使用すると M-18AG、MSG-325 を凌駕することができないことから、今でいうパソコン NC を開発することにした。しかし、1984年当時のパソコンは信頼性がなく、100kg 近くある球面空気静圧スピンドルを空気静圧軸受のテーブル上に乗せるのには無理があり、ほとんど動かないまま廃棄する結果となった。

続いて、開発一号機での失敗を踏まえて機械の構成は同じで安定性の高いパソコンを選択し、荷重に耐えられるように空気静圧案内を大きくして2号機の開発を進めた。これにより機械は大きくなってしまったが切削まではこぎつけた。しかし、空気静圧案内の剛性不足、大気中を走るレーザビームの揺らぎなどから加工面が安定せず、客先のテスト加工を試みたが満足してもらえない結果は得られず、1号機同様失敗に終わった (Fig. 25)。



Fig. 25 二度目に試作した超精密CNC旋盤 UAG-150A(NC)

失敗の原因はバグも含め制御装置の不安定さ、工場という環境の中でフィードバックスケールとしてレーザ測長器を使用する不安定さ、空気静圧案内を使用した X、Z 軸移動体の剛性の低さ (特に偏荷重に対して) と、これに起因する案内面のかじりが主要因であった。

(2) 有限形 V-V ころがり案内の開発

空気静圧案内での失敗を受け、超精密加工機に最適な案内についての検討を始めた。当時、当社では大形工作機械で油静圧軸受の豊富な使用実績があったことから、移動質量が 4ton ある大型超精密加工機の直線案内に利用した。しかし、圧油が熱の媒体となり、油温を $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ に制御しても超精密領域での熱的な安定性を得ることができなかった。これは、案内面にポケット圧として 0.3～0.5MPa の圧油が供給されており、大気圧に開放されるときにポンプ作用で発熱するため、出口での油温を測定して機体温度より温度の低い圧油を供給するため、熱的なアンバランスを生じることになる。このような理由から、超精密非球面加工機の直線案内として油静圧軸受は不適切と考えた。

超精密加工機の案内として V-V すべり案内の超精密、高剛性、コンパクト、低コストの特長は超精密スライサで実証されたが、すべり軸受であることから摩擦係数が 0.2～0.3 と大きく微細な位置決め、低速移動はスティックスリップ現象により対応できない。Moore Special Tool 社の M-18AG は V-V 形状の案内面に、ころを並べてころがり摩擦としてこれらの欠点を解消していた。この案内方式を検討し、我々なりの改善を加え、鋳鉄のベッドとテーブルの間にニードルを入れた Fig. 26 に示す実験装置で摩擦係数、剛性、運動精度、微小うねりを評価した。その結果、摩擦係数は 0.003～0.005、剛性は空気静圧軸受に比べ 10～20 倍という結果が得られた。案内面はきさげで仕上げており、きさげの凹凸により $0.3\sim 0.5\mu\text{m}$ の微小うねりが発生したが、きさげの凹凸をハンドラップで除去することによって微小うねりが減少することがわかった。

さらに、平均化の効果と長寿命を期待して、超精密加工機の案内として小径のニードルを 5.6mm ピッチでたくさん並べることによって面圧を下げた。また、構造を簡素化して剛性を高めるため鋳鉄のベッド、テーブルに直接 V-V の案内面を設けた。鋳鉄ではあるが鋳造時に案内面の部分に冷し金を当て、案内面の硬度を Hv280 とした。

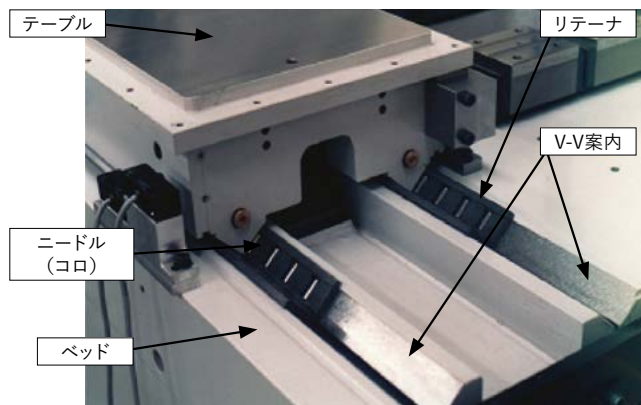


Fig. 26 有限形V-Vころがり案内の実験装置

(3) 超精密非球面加工機の新たなコンセプト

国内ではCDやカメラでの非球面レンズの需要が増え、Moore Special Tool社のM-18AG、PNEUMO PRECISION社のMSG-325を輸入して対応していた。一方、国内工作機械メーカーでは1985年当時、豊田工機(株)(現在の(株)ジェイテクト)がCNC超精密非球面加工機(AHN10)、(株)不二越が超精密非球面加工機(ASP-10)を商品化していた。遅れて1991年、当社では機械要素として有限形V-Vころがり案内、同期モータ駆動の円筒型空気静圧スピンドル、制御装置(FANUC FS15-MA、制御分解能10nm)、光学スケール(HEIDENHAIN LIP401、最小目盛10nm)など周辺機器の充実と、二度の失敗の経験を生かして新しいコンセプトの超精密非球面加工機の開発を進めた。

当社では早くから加熱プレス方式によるガラスレンズの製作方法を研究しており、赤外線ランプによる急速・均一加熱と精密な加熱・冷却温度の制御、金型の位置とプレス力の制御が可能な高精度光学ガラス素子成形装置を開発していた。樹脂成形と違ってガラスのプレス温度は400～750℃と高いため、金型材料には耐熱性のある超硬・セラミックスが使用され、加工は研削に依存せざるを得なかった。また、デジカメやカメラ付携帯電話が高性能化するに従ってガラス非球面レンズの増大が見込まれた。このような背景の中で、研削機能を中心とする超精密、高剛性、高い安定性、コンパクト、低価格をコンセプトとして、超精密非球面研削盤(ULG-100A)の開発を開始した。

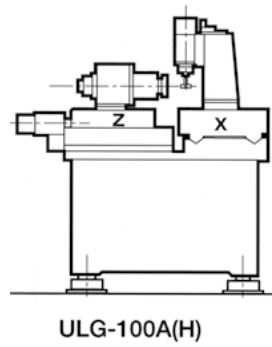
レンズ金型などの超精密加工において、加工結果には指令した加工プログラムに対し、加工条件、ワークの心出し、工具摩耗、工具形状、加工力による変形、熱変形に起因する誤差が含まれる。このため加工結果を測定し、指令値との間の誤差を補正する補正プログラムで再加工を数回繰り返し、目標値に収斂させる方法を採用した。この補正加工法は前加工と補正加工の間に機械・工具・環境が変化しないことが前提となるため、安定性の高い有限形V-Vころがり案内、高分解能ガラススケールの採

用や各所の温度管理を徹底することとした。(ちなみに超精密非球面加工機のフィードバックスケールに高分解能ガラススケールを採用したのは当社が初めてであり、その後、他社のフィードバックシステムも高分解能ガラススケールを採用することとなった。)このため、機械は剛性の高い一体構造の鋳鉄製ベッドにX、Z案内をT字型に配置して移動によるオーバーハングをなくし、移動荷重によるたわみの影響が少なくする構造とした。また、コンパクトに作ることを重視した理由は、加工対象の大半がφ100mm以下であったため機械を小さく構成することができ、コンパクトにすることによって容易に高剛性を得ることができるためである。また、恒温室の容積が小さくなり、精密な温度管理と省エネにつながるというメリットもある。さらに、本機では、剛性・負荷容量が大きい有限形V-Vころがり案内を使うことで、テーブルなど移動体を小さくすることを目指した。

カメラ、CD、DVDの開発段階では性能を満足する非球面レンズを作ることを目的として、米国から高価な超精密CNC旋盤が輸入されていた。非球面レンズの用途は、民生用のカメラ、カメラ付携帯電話(1980年代には存在しなかったがコンパクト・高性能で低価格のレンズユニットの製作が可能になったことから後年、驚異的な市場に発展した)、CD、DVDなど生産量の増大に反比例して価格低下が前提となる商品であるため、非球面レンズを製作する金型、加工機械に対しても大幅なコストダウンが求められるのは当然であった。開発機は、既存機の1/2～1/3の価格を目標にして①構造の簡素化、②スピンドル案内など確立した要素技術の活用、③高分解能スケールフィードバックシステムの採用、④有限形V-Vころがり案内の採用による油圧ユニットの排除、⑤小型化による設置面積の減少などを盛り込むことにした。

失敗の経験と技術力が向上したことで開発はスムーズに進み、一年足らずの開発期間で1992年6月に2軸制御(X、Z軸)の初号機(ULG-100A(H))(Fig. 27)が完成し、完成を待って頂いていたレンズメーカーに納入した。本機は、28年を経過した現在も超精密加工の研究用として大学で活躍している。

Fig. 27に示すようにコンパクトと操作性にこだわり、制御盤をベッドの背面に一体化した。制御盤は熱源であり、熱伝導を避けるため50mmの隙間を設けたが、機械を長時間使用すると放射熱でベッドが変形することがわかり、残念ながら別置きに制御盤に変更した。超精密スライサの経験からユーザーの要求、意見を謙虚に取り入れることが売れる機械、新機種の開発につながることを実感しており、改良を加えながら徐々に納入実績を増やしていった³⁷⁾。



(a)装置の外観 (b)装置の構造
Fig. 27 超精密非球面研削盤ULG-100A(H)の初号機

(4) 超精密加工を通して進んだ研究者の育成・支援と産学連携
1990年代の超精密非球面加工に関係した加工機械、加工技術、ソフトウェア、要素技術、制御技術、計測などは模索状態にあり、産学連携での研究がその後の発展に大きく貢献してきたと思う。

1992年11月に樋口俊郎先生から神奈川科学技術アカデミー(KAST)での超精密加工の研究の道具として、Fig. 28に示す同時4軸制御の超精密非球面加工機開発の依頼を受けた。X、Z軸は超精密非球面研削盤と同じものを使用し、Z軸上のワーク主軸にはFANUCのサーボモータをビルトインしてC軸機能を持たせ、X軸上にはY軸を配置した。有限形V-Vころがり案内はテーブルとテーブル上の質量で案内面にプリロードをかける機構であり、立形の案内には適用できない。苦肉の策としてFig. 29のように移動体を両側から挟みこみ機械的にプリロードをかける構造としたが、ワイドガイドの構造であり移動時に姿勢変化が発生し、X軸、Z軸と同様の運動精度を得ることはできなかった。後に、Y軸に対してX軸、Z軸と同じようにV-Vを配置し、空気静圧軸受の反力を利用してプリロードをかける方法に発展している。フィードバックスケールは(株)ミツトヨが分解能1nmのスケールを開発しており、これを使用することにした。樋口先生からは「これまでない機械の開発であり、リスクは有っても新しい機構や要素技術を取り込んでいきましょう。」とお言葉をいただいた。

理化学研究所の山形豊先生は、この機械を使って特殊な自由曲面の創成やソフトウェアの開発をされ、超精密加工の発展に貢献してこられた。

神戸大学の森脇俊道先生、社本英一先生(2021年現在は名古屋大学)は早くから超精密加工に取り組んでこられ、研究用の超精密非球面研削盤や鏡面加工装置、空気静圧スピンドルを導入させていただいた。社本先生は楕円振動切削法により、単結

晶ダイヤモンドバイトを用いた焼入れ鋼の超精密切削の研究を続けられ、新しい加工方法として超精密加工の適用範囲を広げ、レンズ用金型加工や自動車の照明関連の金型加工に活用されている。その後、鈴木浩文先生(現在は中部大学)も加わって超精密加工の数々のアプリケーションを開拓され、多くの技術者、研究者を輩出してきた³⁸⁾。

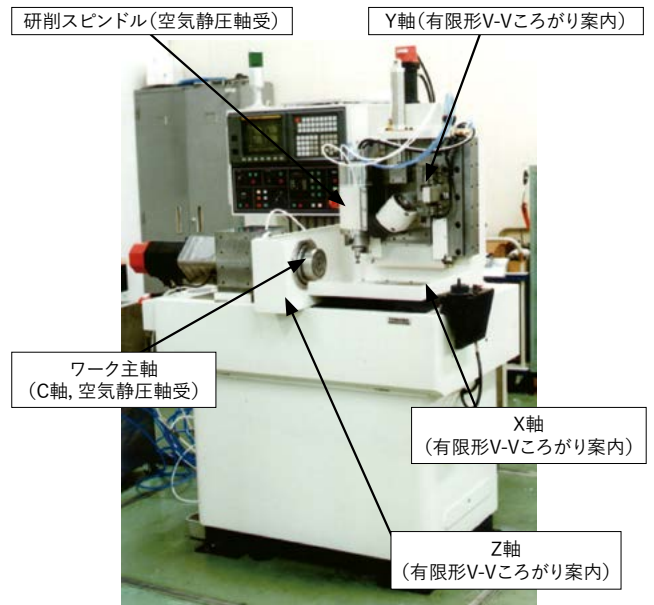


Fig. 28 KASTに納入した4軸制御の超精密非球面加工機 ULG-100A(H3)

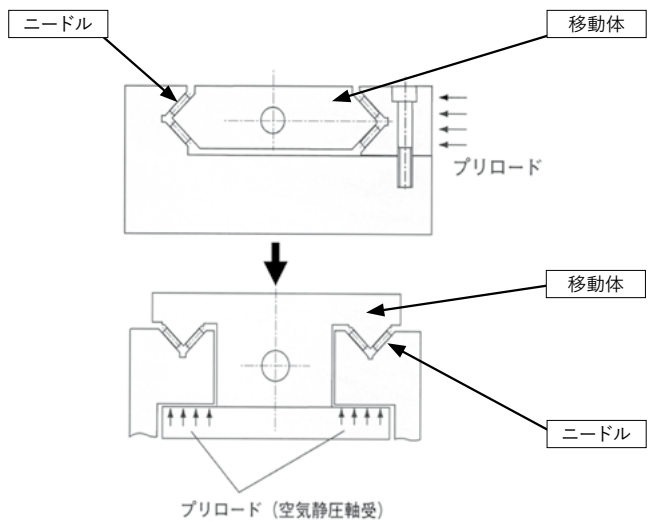


Fig. 29 Y軸案内面の構造の変化

東北大学の庄司克雄先生、厨川常元先生は超精密非球面研削盤を導入し、新しい被削材の超精密加工、機械の挙動と加工精度との関係を解明された。また、新しい研削方法として平行研削法を提唱され、この加工に特化した専用機を試作させていただいた。(Fig. 30)。東北大学の高偉先生は超精密非球面加工機を用いて端面、円筒面に大面積三次元微細パターンを創成し、5自由度の位置・姿勢検出用のサーフェースエンコーダを

研究開発されるなど、計測分野での超精密加工技術の活用を進めておられる。

このほか兵庫県立大学、熊本大学、広島大学、東洋大学、理化学研究所、福岡工業大学など大学・研究機関に、十数台の超精密非球面加工機や空気静圧スピンドルなどを納入させていただき、多くの研究者、技術者が育ち、日本機械学会、精密工学会、砥粒加工学会の学術講演会の超精密加工のセッションでは、二十数年にわたって東芝機械の超精密非球面加工機を使った数件の研究成果が発表されている。これらの大学での研究は、1990年代後半から大きく発展してきた光学部品への超精密加工技術の適用に貢献してきたと思う。

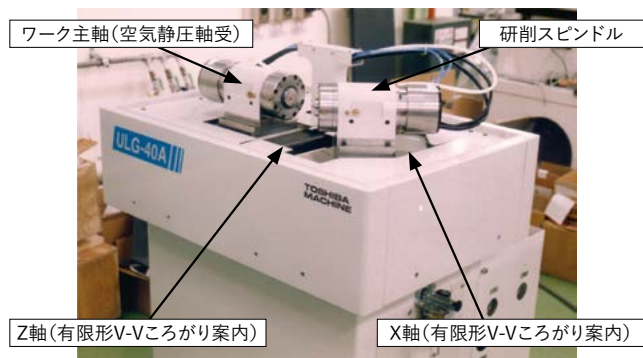
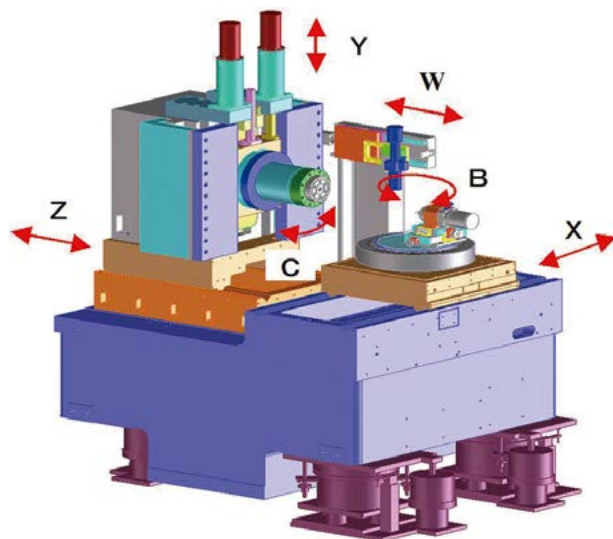


Fig. 30 非球面レンズ金型の平行研削専用の超精密非球面加工機

(5) 新たな要素技術を加え進化した超精密非球面加工機

1992年の初号機以降、ユーザから高精度化、加工対象物の変化、低価格化などの要求に応え超精密加工機の2軸制御から5軸制御までバリエーションは9機種にも拡大しており、この間の技術的な改善点について述べる。

Fig. 31は5軸制御の超精密非球面加工機 ULG-100D(5A)であり、超精密非球面加工機の中の最上位機である。また、切削加工に特化した超精密非球面加工機 ULC-100F(S)ではプログラムの指令単位を通常の1nmから0.1nmに微細化することによって滑らかな加工面が得られるようになった。Fig. 32は、この機械での0.5nmのステップ送り時の追従性の良さを示している。



(b)装置の構造
 【装置構成および精度】
 (1)X・Y・Z軸：有限形V-Vころがり案内
 (2)X・Y・Z軸駆動：コア付リニアモータ
 (3)C・B軸：空気静圧軸受
 (4)C・B軸駆動：同期モータ
 (5)制御分解能(X・Y・Z軸)：1nm
 Fig. 31 超精密非球面加工機 ULG-100D(5A)
 5 axis(X, Y, Z, C, B)

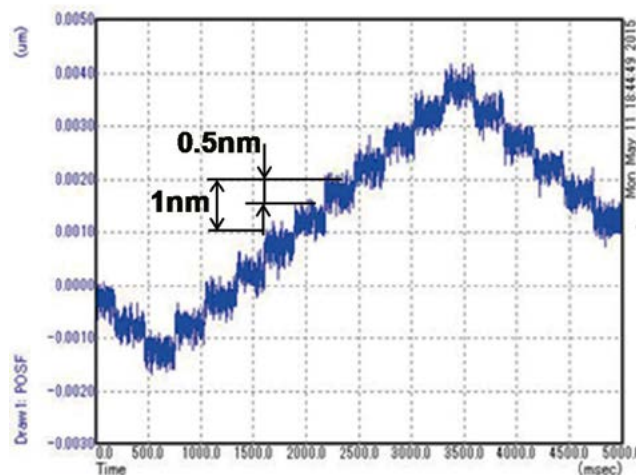


Fig. 32 0.5nmステップ送りの追従性の良さを示している



(a)装置の外観

① 進化した有限形 V-V ころがり案内

多数のランダムな切刃のある砥石を用いる研削加工では、面粗さ 20 ~ 30nmRz 程度が限界であり、有限形 V-V ころがり案内に起因する微小うねりの影響は見られないが、単結晶ダイヤモンドバイトでの切削では競合する油静圧軸受の機械に対して劣っており、ユーザからの評価でも当社はころがり案内だから「だめ」と評価されていた。そこで、移動側のニードル導入部形状を工夫することや、案内面の仕上げ方法の改善によって、微小うねりは 10nm 以下の数値が得られるようになり、切削結果でも面粗さ 2 ~ 3nmRz が容易に達成できるようになった。剛性が高く、静圧油のような熱源がなく安定性のよいことや省エネ（潤滑油を一軸当たり一日 0.4cc 供給するだけでよい）であることからユーザの評価は高い。また、有限形 V-V ころがり案内は多くの転動体で支持され、ニードル一個当りの荷重は 10N 以下となり、多くの転動体が接触しているため減衰作用が大きく、適度な接触摩擦により、Fig. 33 に示すように停止時の位置偏差量は 0.5nm と安定している³⁹⁾。

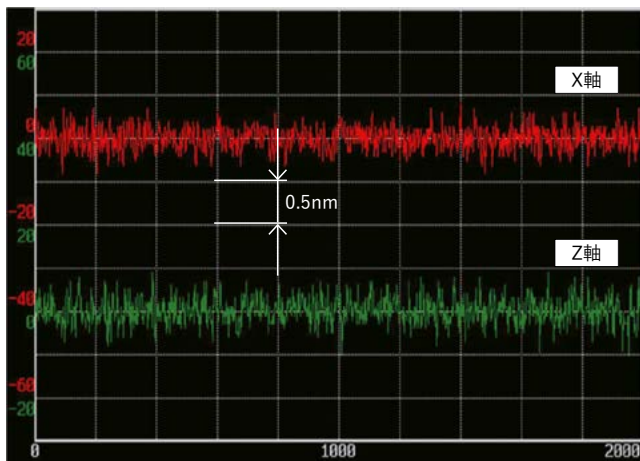


Fig. 33 X,Z軸の停止時の位置偏差量

② 多孔質絞り空気静圧スピンドルの開発

ワーク主軸に関しては、自成絞り方式の空気静圧軸受を使用してきた。自成絞り方式は軸受すき間が大きく、空気流量も多く、高速回転に対して発熱が少ない特長がある。超精密非球面加工機のワーク主軸の回転数は最大 3000rpm^{-1} であり、発熱の心配は少ない。しかし、自成絞り方式のワーク主軸で加工した鏡面には、大量の空気が配管の中を流れることによって発生する振動に起因する引き目の乱れがあり、Fig. 34 に示すように加工面の品位を損なっている。このようなことから軸受すき間を狭くし、空気流量を減少させ、軸受剛性を高めることができる多孔質絞り方式の空気静圧スピンドルを開発した (Fig. 35)。多孔質絞りには金属多孔体を使用しており、固体潤滑性のある金属で目詰まりさせた表面を空気流量が目標値になるように、機械加工で除去する方法を採用している。自成絞り方式

に比べて手間はかかるが、空気流量で 1/8、アキシャル剛性で 2.3 倍、ラジアル剛性で 1.7 倍という結果が得られた。また、ワーク主軸の心振れ (SPAM) も 2 ~ 3nm となっている。このスピンドルを使った加工結果では Fig. 36 に示すように、引き目の乱れもなく、送りピッチのバイト目ははっきりと見ることができる。さらに、ワーク主軸は C 軸機能を有しており、 0.01min^{-1} 単位の回転数指令を行うことによってスムーズな回転数の変更が可能となり、超精密加工の分野においても周速一定の加工による能率向上と加工面品位向上に貢献している⁴⁰⁾。

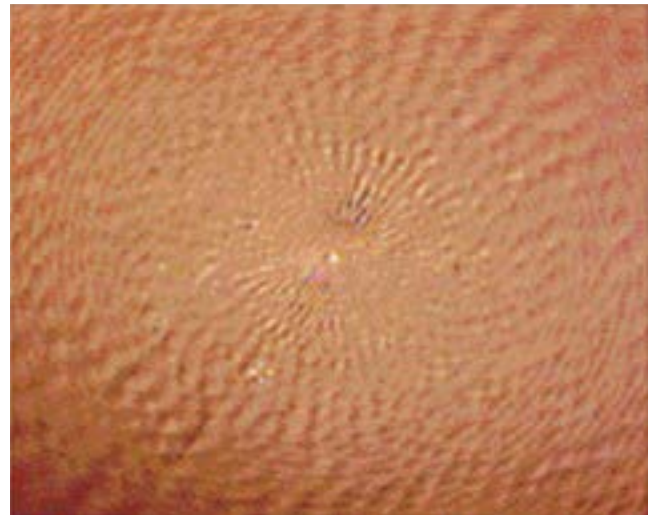


Fig. 34 自成絞り軸受けの加工面

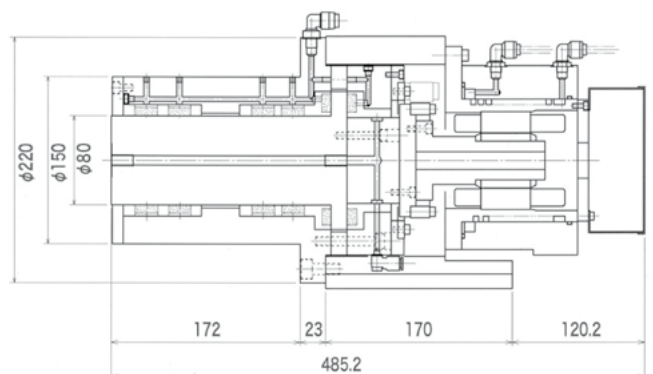


Fig. 35 多孔質絞り方式のワーク主軸

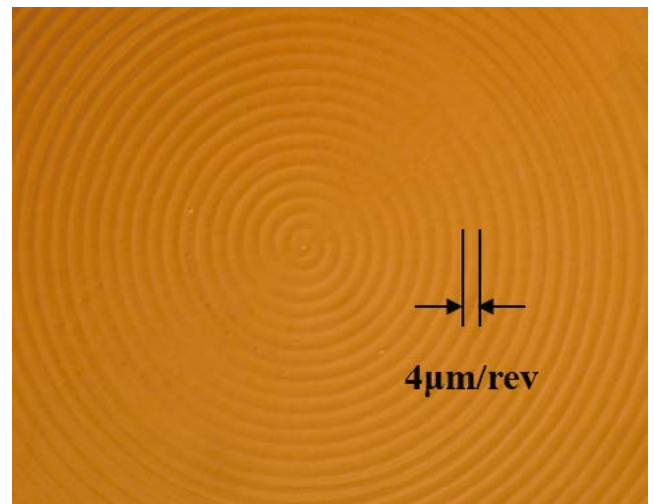


Fig. 36 多孔質絞り軸受けの加工面

③ 送り駆動系の新技術 コア付リニアモータ駆動

超精密加工機の送り機構に関しては、ACサーボモータとボールねじが使用されてきたが、ボールねじの曲がりや心違いが移動体の挙動に影響し、これを吸収するための工夫がされてきた。超精密非球面加工機には送り方向には剛性を持たせ、送り方向に直角方向には自由度を持たせた平行ばね継手を開発し、使用してきた。しかし、ボールねじ駆動はサーボモータ、カップリング、ボールねじ、ナット、平行ばね継手と多くの部品で構成されていることから送り系の剛性が低く、同時2軸加工の象限切替えの箇所ではロストモーションによる象限突起が必ず発生する。象限切替えの箇所で送りを遅くするなど加工条件の変更や、象限突起を予測して補正プログラムによる加工をしても、象限突起による食込みをなくすことができなかった。そのため、加工後に磨きで除去する以外に方法はなく、時間がかかり、形状精度を損なう原因となっていた。また、ボールねじの摩耗はロストモーションに直接影響するため3年間位の稼動でボールねじの交換が必要であった。そこで、超精密加工機の新たな送り機構として、ボールねじ駆動に比べ部品点数が少なく構造がシンプルなりニアモータの適用を検討した。

超精密加工機や軽負荷のマシニングセンタでは、コギングとマグネットの吸引力の影響を避けるため、コアレスリニアモータが採用されているが、推力が小さく、発熱が大きいという欠点がある。当社では剛性の高い鋳鉄製ベッド、有限形V-Vころがり案内の高剛性と高安定性の特長を生かし、制御装置との相性を考慮して推力が大きく（効率がよい）、発熱の少ないFANUC社製のコア付リニアモータを使用することとした。マグネットとコイルの強固な取り付け、吸引力をキャンセルさせるためマグネットを対向して配置することに加え、リニアモータとフィードバックスケールの位置と、磁力線を連続的に変化させる機構の考案、サーボシステムの機能向上、制御パラメータ調整などによって、コギングの影響を受けない送り機構を完成させた (Fig. 37)。

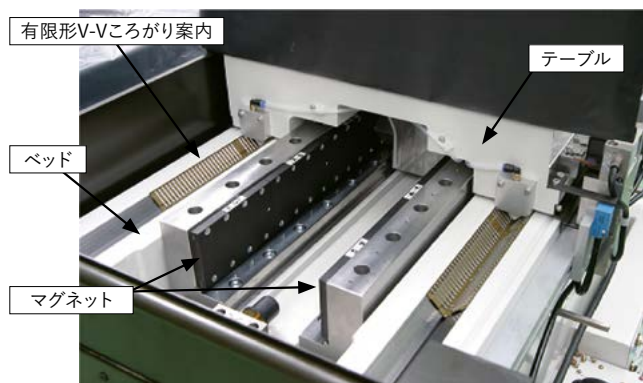


Fig. 37 リニアモータ駆動の有限形V-Vころがり案内
マグネットを対向して配置し、吸引力をキャンセル

コア付リニアモータを採用した結果、送り速度が最大1000mm/min程度である超精密非球面加工機では、コイル、案内面の冷却は行う必要がなく、省エネに貢献している。微小うねりに関しても、有限形V-Vころがり案内の高い完成度とリニアモータ駆動によって10nm以下が達成できており、移動指令に対する追従性も0.5nm以下、象限切替え時のロストモーションも見られず象限突起という言葉も過去のものになったように思う。

X軸、Z軸に用いる有限形V-Vころがり案内では、移動体の質量によってニードルにプリロードを与えているが、Fig. 38に示すようにマグネットの吸引力をプリロードとして利用することによって、移動体の質量を減少させる方法も採用している。先にFig. 29で、有限形V-Vころがり案内を縦型案内に利用するにあたって、プリロードを与える方法について述べたが、最新の機械では、構造を簡素化する、コスト低減、性能向上を図るといった目的で、空気静圧軸受に換えて、マグネットの吸引力を利用する方式も採用している。このようにコア付リニアモータの適用は超精密非球面加工機の精度、性能、安定性に大きく貢献した⁴¹⁾。

2010年以降、デジタルカメラ、スマートフォン、セキュリティカメラ、産業用カメラ、さらに車載カメラが加わったことで、膨大な非球面レンズ(ガラス、プラスチック)の需要が生まれ、当社ではこれに応えるため、超精密非球面加工機の仕様・機能(机上測定システム、0.1nm指令など)の拡充、精度向上、加工方法(楕円振動切削、周速一定制御など)・加工ソフトの開発などで対応し、これまでに1000台以上を供給して貢献してきた。

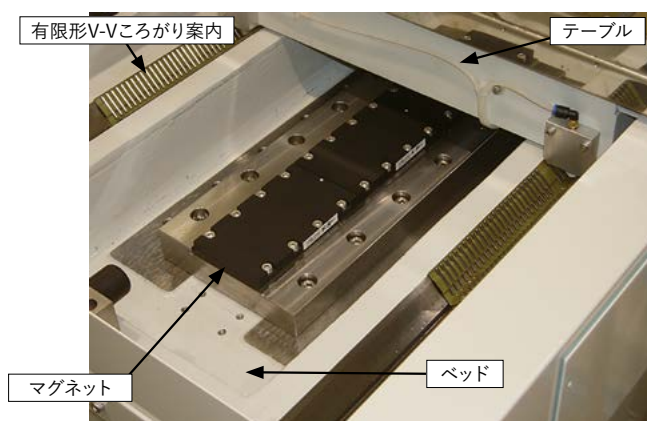


Fig. 38 リニアモータ駆動の有限形V-Vころがり案内
マグネットの吸引力をプリロードに利用

3 おわりに

工作機械の精度向上による差別化、付加価値アップを目的に1977年から超精密加工に取り組んできた。そのなかで、加工設備として高精度の工作機械(旋盤、円筒研削盤、平面研削盤、ジグボーラなど)と±0.1°Cの恒温工場建設、きさげやラップの技能のレベルアップ(三面摺り合わせ定盤の製作)、測定器として静電容量型非接触微小変位計、真円度測定器、面粗さ計、微分干渉型顕微鏡、フィゾー干渉計などを導入し、サブミクロンの精度を目指す要素技術として空気静圧スピンドル、空気静圧案内、V-V すべり案内、有限形 V-V ころがり案内の開発などに取り組んできた。

これらの要素技術の製作を通して加工技術、測定技術の向上を図り、サブミクロンの難しさを実感していった。また、従来の機械要素のレベルアップではなく、空気静圧スピンドルや空気静圧案内、有限形 V-V ころがり案内、コア付きリニアモーター駆動など全く新しい技術に挑戦したことが超精密加工に対してのブレークスルーとなった。

1977年当時の日本では超精密加工のニーズはほとんどなく、研究機関に研究用の空気静圧スピンドルを納入する程度であった。しかし、先に述べたように空気静圧スピンドルと空気静圧案内を組み合わせた実験装置で光学的鏡面が切削加工でつくれることを証明し、ポリゴンミラー、磁気ディスク基板の加工機へ、空気静圧スピンドルと V-V すべり案内の性能・精度向上が超精密スライサへ、有限形 V-V ころがり案内・コア付きリニアモーター駆動が超精密門形加工機(導光板金型加工)へ、有限形 V-V ころがり案内・コア付きリニアモーター駆動・多孔質絞り空気静圧スピンドルが超精密非球面加工機へ、超精密油静圧主軸・有限形 V-V ころがり案内・コア付きリニアモーター駆動が超精密溝入旋盤(プリズムシート用ロール加工)へとつながっていった。

これらの加工機が関与するレーザープリンタ、ハードディスクドライブ、液晶ディスプレイ、デジタルカメラ、カメラ付き携帯電話、スマートフォン、セキュリティカメラ、車載カメラ、ヘッドランプの LED 化、自動運転(LiDAR)、5G 等は1977年当時には想像もできなかった製品群であり、超精密加工技術がこれらの製品を実現させたか、または、これらの製品の要求が超精密加工技術の発展を牽引したかはさだかではないが、上記の製品に関しては製品が要求する内容に超精密加工技術が対応できた結果であると思う。

1977年の超精密加工の発足時に考えていた工作機械のレベルアップにはあまり貢献できなかったが、この40年間に全く新しい産業、製品群が生まれ、これらに関与し、貢献できたことは大きな喜びである。

参考文献

- 1) 田中克敏：情報化社会に貢献する超精密加工，砥粒加工学会誌，50,10,(2006)563.
- 2) 春本功，渡部國男：非球面レンズの製造技術，機械の研究，28,9(1976)1071.
- 3) 内藤和雄：カメラ生産における超精密技術－高精度非球面レンズの量産技術－日本機械学会誌，87,791(1984)1152.
- 4) 小林昭：最近の超精密切削技術，機械の研究，33,1(1981)97.
- 5) 宮下政和：超精密技術の海外の動向，日本機械学会誌，87,791(1984)1109.
- 6) 吉田嘉太郎，三井公之，岡崎祐一：超精密加工機とその要素，日本機械学会誌，87,791(1984)1116.
- 7) 下間頼一：海外における静圧気体軸受の展望，潤滑，15,9(1970)544.
- 8) D.M.Miller,G.H.Hauver,J.N.Culverhouse, E.N.Greenwell：DESCRIPTION OF A UNIQUE MACHINE TOOL PERMITTING ACHIEVEMENT OF<15-Årms Diamond-Turned Surfaces, SPIE Vol.163 Advances in Optical Production Technology (1979)55.
- 9) Akira KOBAYASHI：Recent Development of Ultra-Precision Diamond cutting Machines in Japan, 精密工学会「超精密ダイヤモンド切削に関する特別講演会」(1984)1.
- 10) 小林昭：超精密加工技術－歴史的発展と今後への期待－精密工学会「超精密ダイヤモンド切削に関する特別講演会」(1984)9.
- 11) J.W.Pearson：PRECISION MACHINING COMMERCIALIZATION, 精密工学会「超精密ダイヤモンド切削に関する特別講演会」(1984)31.
- 12) Floyd.E.Johnson：DIAMOND TURNING AT HONEWELL, 精密工学会「超精密ダイヤモンド切削に関する特別講演会」(1984)39.
- 13) PNEUMO PRECISION,INC Micro-Surface Generating Pneumo Model MSG-325 カタログ
- 14) P.Donald Brehm：DIAMOND MACHINING OF METAL&PLASTIC OPTICS, 精密工学会「超精密ダイヤモンド切削に関する特別講演会」(1984)23.
- 15) T.G.Gijsbers,COLATH,anumerically contolled lathe for very high precision,PHILIPS MECHNICAL REVIEW,39,9(1980).
- 16) 津和秀夫：超精密加工の現状と将来，FOP，4，8(1979)1.
- 17) 谷口紀男：超精密加工技術の発達と今後の課題－ナノテクノロジーとの関連－日本機械学会誌，87，791(1984)1101.
- 18) 田中克敏：空気軸受と超精密加工，機械の研究，34,12(1982)1304.
- 19) 住谷充夫，上田勝宣，塚田為康：開発した高精度空気軸受スピンドルの特性とその応用，精密機械，45，10(1979)1231.
- 20) 小林昭：高精度空気軸受回転軸の開発の歴史とその応用例，精密機械，45,10(1979)1159.
- 21) 東芝機械 Technical Report：超精密加工のための空気軸受と鏡面加工(1980).
- 22) 上田勝宣，住谷充夫：炭酸ガスレーザ装置用金属ミラーのダイヤモンド切削加工，東芝レビュー，40,10(1985)857.
- 23) 田中克敏：SPDT による加工，木下直治監修，ダイヤモンドツール，日経技術図書(1987)764.
- 24) 住谷充夫：平面・球面ミラー，木下直治監修，ダイヤモンドツール，日経技術図書(1987)771.
- 25) 薄木雅雄，久保正臣，牧本良夫，大野木敬：静圧機素の応用について，不二越技報，38,2(1982)49.
- 26) 日本工業規格，角度標準用多面鏡，JIS,B7432.
- 27) 南悦治：レーザプリンタ用ポリゴンミラーのダイヤモンド切削，応用機械工学，7(1985)116.
- 28) 日本軽金属技術資料，レーザスキャナーミラー(ポリゴンミラー)用特殊アルミニウム合金材料.
- 29) 田中克敏：ポリゴンミラーの鏡面加工，新マシニング・ツール事典，産業調査会(1991)629.
- 30) 田中克敏：空気静圧案内の構造，精度と応用例，応用機械工学，8(1987)110.
- 31) 越智雄二郎：超精密旋盤における主軸の設計，精密機械，45，10(1979)1182.
- 32) Bryant Symons,FINE DIAMOND TOOL LATHES, カタログ
- 33) 田中克敏：第11章 超精密旋盤，江田弘監修，超精密加工技術，トリケップス No2(1986)307.
- 34) 田中克敏：超精密スライサによる溝入れ・切断の現状，砥粒加工学会誌，46,11(2002)544.
- 35) 田中克敏，木村誠司，鈴木清，植松哲太郎：超精密加工機械の高精度化の研究－第1報：自成絞り方式空気静圧スピンドルの高性能化－砥粒加工学会誌，51,5(2007)302.
- 36) 嶽岡悦雄：高速空気静圧主軸による高硬度材のエンドミル加工に関する研究 学位論文(1998)
- 37) 田中克敏，他：超精密加工機の高精度化の研究，第3報：超精密非球面加工機の開発と性能，砥粒加工学会誌，51,9(2007)553
- 38) 鈴木浩文：非球面光学部品の超精密加工に関する研究 学位論文(1997)
- 39) 甲斐義章：超精密加工機の動特性の解析と評価に関する研究 学位論文(2015)
- 40) 関口麗，他：工具送り－被削材周速制御によるガラスレンズの超精密研削加工の高効率化 2015年度砥粒加工学会学術講演会論文集 332-337.
- 41) 田中克敏，他：超精密加工機の高精度化の研究，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.

特許・社外発表（講演）・社外発表（執筆）・受賞

国内特許(2020年1月～12月)

	登録番号	発明者	発明の名称
1	6638915	田中 克敏, 福田 将彦, 益田 大海, 加藤 友規 ^{*1} , 平川 鉄磨 ^{*1} ,	主軸ヘッド昇降装置および工作機械
2	6639798	小林 昭美, 藤井 重行, 鮫島 孝文, 清水 博 ^{*2}	押出機用スクリュ並びに押出機および押出方法
3	6639799	小林 昭美, 藤井 重行, 鮫島 孝文, 清水 博 ^{*2}	混練装置および混練方法
4	6639800	小林 昭美, 藤井 重行, 鮫島 孝文	押出機用スクリュ並びに押出機および押出方法
5	6649151	鈴木 亨, 藤原 茂, 北原 秀利, 山本 淑弘	成形装置
6	6649328	石橋 健太郎, 加藤 英則, 谷垣 昇吾, 竹内 将人, 福山 聡	レーザ加工装置、及び、レーザ加工方法
7	6665132	池田 佳久, 齊藤 充彦, 加藤 浩明, 板垣 裕太郎	シート・フィルム延伸装置
8	6667356	室伏 勇, 馬場 丘人	ガラス成形装置
9	6667358	松月 功	ガラス基板生成装置
10	6675863	豊島 俊昭	液圧バルブ、液圧装置及び成形機
11	6681714	多田 敦司, 満園 正昭, 井口 貴博	運転模擬試験装置
12	6681715	多田 敦司	運転模擬試験装置
13	6687482	豊島 俊昭, 早瀬 一馬, 野田 三郎 ^{*3}	射出装置及び成形機
14	6698199	辻 眞, 林 勇人, 野田 三郎 ^{*3}	局部加圧装置
15	6706220	福田 将彦, 土屋 康二	計算装置、加工システム、及び、加工方法
16	6709875	辻 眞, 豊島 俊昭, 野田 三郎 ^{*3}	成形機
17	6709876	辻 眞, 藤岡 俊治, 早瀬 一馬, 野田 三郎 ^{*3}	射出装置及び成形機
18	6710656	水沼 巧治, 古屋 忠正, 山口 智則	薄膜部材成形装置および薄膜部材の成形方法
19	6726528	山崎 晋平, 黒川 幸夫	固形潤滑剤供給装置
20	6727838	橘田 英晃, 佐々木 宜之, 木下 征士	可動盤、開閉装置および成形装置
21	6728150	藤本 亮輔, 本間 周平	鋳鉄溶湯処理方法
22	6730163	横山 豪志, 相田 悟	ダイカスト成形用射出プランジャおよびダイカスト成形用射出装置
23	6730178	工藤 淳一, 大沼 勇, 及川 文博, 黒川 幸夫	成形品の堰折り装置
24	6732608	伊谷 慎也, 梶田 豊	工作機械
25	6739171	澤崎 誠, 細谷 周平, 多田 敦司	摩擦攪拌接合方法
26	6740423	大上 雅康, 葛西 敏裕, 五十嵐 卓也, 近藤 明良	射出成形機
27	6745642	中田 光栄, 相田 悟, 豊島 俊昭	ダイカストマシン及び固液共存金属の成形方法
28	6746278	小林 昭美, 藤井 重行, 鮫島 孝文	押出機用スクリュ並びに押出機および押出方法
29	6746311	杉山 寛弥, 菊地 治彦, 多田 敦司	BTA 深穴加工機
30	6747884	山崎 晋平, 黒川 幸夫	固形潤滑剤供給装置
31	6758908	池田 佳久, 齊藤 充彦	フィルム延伸装置
32	6761703	室伏 勇	被測定物測定装置および被測定物測定方法
33	6764272	野田 三郎 ^{*3} , 豊島 俊昭, 早瀬 一馬	射出装置及び成形機
34	6764276	豊島 俊昭, 早瀬 一馬, 野田 三郎 ^{*3}	射出装置及び成形機
35	6765864	星川 朋之, 山田 智広	リニアモータ及びリニアスライダ
36	6768264	多田 敦司, 相良 誠, 築地 輝顕, 新井 貴雄 ^{*4} , 竹内 一弘, 角田 俊, 稲津 正人, 石井 雄介, 田中 裕也	工作機械の案内機構および工作機械
37	6771452	藤岡 俊治	射出装置、成形機及びバルブ
38	6772130	池田 佳久, 齊藤 充彦, 渡辺 勇一, 加藤 浩明	クリップ式延伸装置
39	6782161	平林 克己, 多田 敦司	工作機械

	登録番号	発明者	発明の名称
40	6784568	早瀬 一馬, 豊島 俊昭, 野田 三郎 ^{*3}	射出装置及び成形機
41	6784569	早瀬 一馬, 豊島 俊昭, 野田 三郎 ^{*3}	射出装置及び成形機
42	6784630	船場 信, 早瀬 一馬, 野田 三郎 ^{*3}	射出装置及び成形機
43	6786244	小久保 光典, 大曲 啓明	定圧加工装置
44	6787764	加藤 孝一, 相原 正美, 多田 敦司, 澤崎 誠	摩擦攪拌接合工具
45	6789864	水沼 巧治, 桶 亮太	シート・フィルム成形ロール装置、シート・フィルム製造装置、およびシート・フィルム製造方法
46	6794182	尾原 正俊, 小林 昭美	スクリュエレメントの組付補助器具
47	6797695	尾原 正俊, 松村 保隆, 小林 昭美	二軸混練装置
48	6798924	橋本 有紀, 藤原 茂, 伊谷 慎也, 三浦 真由子	成形装置および成形品成形方法
49	6802046	植松 哲平, 根岸 祐司	塗装ロボット
50	6802690	雨澤 弘機, 相田 悟, 豊島 俊昭	成形機
51	6803882	遠矢 良洋, 齊藤 充彦, 渡邊 健氏, 賀茂 剛晴, 富樫 直人	同時二軸延伸機及び延伸システム
52	6803883	遠矢 良洋, 渡邊 健氏, 賀茂 剛晴, 山口 智則, 富樫 直人	同時二軸延伸機及び延伸システム
53	6804294	秋山 貴信	空気静圧軸受装置
54	6807161	北原 秀利, 藤原 茂, 山本 淑弘, 鈴木 亨	成形装置及び成形方法
55	6812529	野木 貴之, 竹内 雄一, 中村 隼平	予知保全判定装置、予知保全判定方法及びプログラム

*1 (学)福岡工業大学 *2 (株)HSPテクノロジーズ *3 野田テクノリサーチ *4 (有)ニューリー研究所

社外発表「講演」(2020年1月～12月)

	題目	発表者代表	講演会名	主催者	講演日
1	二軸混練押出機の機械的特徴および各種混練技術	安倍 賢次	二軸混練押出機の運転条件設定とトラブルシューティング	(株)技術情報協会	2020/1/15
2	押出成形の技術動向	水沼 巧治	第26回成形加工テキストセミナー 第4巻「先端成形加工技術I」	(一社)プラスチック成形加工学会	2020/1/29
3	一步進んだ金型高精度加工技術	天野 啓	日進工具プライベートショー	日進工具(株)	2020/1/29
4	東芝機械のDXへの取組み - 顧客価値拡大を目的にIoTプラットフォームを提供し、エコシステムを組成 -	前原 弘之	デジタルファースト・ソサエティ出版記念セミナー	東芝デジタルソリューションズ(株)	2020/2/5
5	スマホ世代に向けたビデオマニュアルによる技能伝承	小川 亮輔	精密工学会主催第407回講習会	(公社)精密工学会	2020/2/14
6	Roll to Roll UV転写装置	芹澤 光明	第3回 Nano Structured Optics分科会	(一社)光融合技術協会	2020/2/21
7	ダイカストマシンと周辺機器	相田 悟	2019年度素形材技術研修講座「アルミニウムダイカストの生産技術」	(一財)素形材センター	2020/3/4
8	超微細マイクロリアクターを用いたポリマー保護金合金ナノクラスターの精密合成	田中 克敏	日本化学会第100春季年会(2020)	(公社)日本化学会	2020/3/22
9	セルロースナノファイバー強化樹脂と金属の接合におけるインサート成形条件の影響	林 浩之	プラスチック成形加工学会第31回年次大会	(一社)プラスチック成形加工学会	2020/6/24
10	高せん断付加による市販PPの低分子量化	笹井 裕也	プラスチック成形加工学会第31回年次大会	(一社)プラスチック成形加工学会	2020/6/25
11	全文検索の利用状況、3DCADデータ管理の立ち上げ準備	渡部 浩介	JAMP 第4回ユーザー会議	Japan Aras Users' Meeting Platform (略称JAMP)	2020/7/21
12	大形工作機械の技術をのぞいてみよう	相良 誠	千葉工業大学大学院特別講義	(学)千葉工業大学	2020/7/31

	題 目	発表者代表	講演会名	主催者	講演日
13	エアスピンドルを用いた超硬合金の超精密ミリング加工	牧田 丈晴	ABTEC2020	(公社)砥粒加工学会	2020/9/9~2020/9/10
14	光ファイバー型放射温度計を用いたダイカスト金型中における連続測温方法	藤本 亮輔	第176回全国講演大会【誌上講演大会】	(公社)日本鑄造工学会	2020/9/23
15	高性能フィルム成形への取組み	天明 敬	2020 中国国際塑料展	中国塑料加工工業会	2020/11/3
16	シート・フィルム製造装置	天明 敬	2020 中国国際塑料展	中国塑料加工工業会	2020/11/3
17	ダイカストマシンの技術動向	阿部 裕治	シンポジウム「ダイカスト研究会:技術の統合・最適化によるダイカスト技術の生産性向上」	(公社)日本鑄造工学会 ダイカスト研究会	2020/11/6
18	「非球面ガラスプレス加工」ガラス成形技術と応用-ガラス成形技術、ガラス成形装置、ガラス成形用金型、ガラス成形事例-	小久保 光典	「光学素子加工技術入門」	(一社)日本オプトメカトロニクス協会	2020/11/10
19	2020年第4回ナノインプリント技術研究会ウェブセミナー	芹澤 光明	2020年第4回ナノインプリント技術研究会ウェブセミナー	(公社)応用物理学会 ナノインプリント技術研究会	2020/11/27
20	超精密切削加工技術発展の経緯と将来の展望	天野 啓	型技術ワークショップ 2020 in ふじのくに	(一社)型技術協会	2020/12/3
21	工具形状測定器FormEyeの紹介と測定結果の活用方法について	室伏 勇	型技術ワークショップ 2020 in ふじのくに	(一社)型技術協会	2020/12/3
22	超精密非球面加工機による最適加工プロセスの提案	濱園 和久	型技術ワークショップ 2020 in ふじのくに	(一社)型技術協会	2020/12/3
23	超精密加工機UVMによる超硬直彫り切削への取組み	比佐 遼太	型技術ワークショップ 2020 in ふじのくに	(一社)型技術協会	2020/12/3
24	超精密加工機と加工事例	福田 将彦	第410回講習会	(公社)精密工学会	2020/12/14

社外発表「執筆」(2020年1月~12月)

	題 目	執筆者 (筆頭のみ)	掲載誌名	発行所
1	空気静圧軸受スピンドル開発例と応用製品	梶田 豊	先端加工技術 No.110	(一財)先端加工機械技術振興協会
2	若手技術者のモヤモヤ	相良 誠	将来技術研究会(略称ATOM)30周年記念誌 2020年第3号	将来技術研究会
3	機械挙動の可視化による加工プロセスの最適化	福田 将彦	砥粒加工学会誌(2020年5月)	(公社)砥粒加工学会
4	金属3D積層造形装置「ZKシリーズ」と実用化に向けた取組み	不破 久順	ツールエンジニア 2020年3月号	(株)大河出版
5	深穴加工の加工事例	伊藤 隆昌	ツールエンジニア 2020年5月号	(株)大河出版
6	厚肉球状黒鉛鋳鉄の衝撃特性に及ぼすMn含有量とCE値の影響	藤本 亮輔	鑄造工学 2020年92巻5号	(公社)日本鑄造工学会
7	薄肉成型に対する新射出システム	中野 敏彰	型技術 2020年5月号	(株)日刊工業新聞社
8	押出ピン加圧によるダイカスト製品の高品質化	中田 光栄	アルトピア 2020年6月号	カロス出版(株)
9	金型加工の効率化に役立つマシニングセンタの有効活用法	相原 正美	機械技術 2020年7月号	(株)日刊工業新聞社
10	金属3D積層造形機「ZKシリーズ」の特長および金型材への適用検討	深瀬 泰志	型技術 2020年8月号	(株)日刊工業新聞社
11	超精密加工機による金型加工の高精度化・効率化技術	天野 啓	機械技術 2020年7月号	(株)日刊工業新聞社
12	IoT技術を活用した射出成形の効率化	丸岡 宏太郎	日本プラスチック工業連盟誌「プラスチック」2020年8月号	日本工業出版(株)

	題 目	執筆者 (筆頭のみ)	掲載誌名	発行所
13	超精密加工機における 高精度機上計測技術	天野 啓	機械技術 2020年8月号	(株)日刊工業新聞社
14	Resin distribution along axial and circumferential directions of self-wiping co-rotating parallel -	尾原 正俊	AIChE Journal I, Nov. 2020. 66(11): p. e17018.	American Institute of Chemical Engineers
15	超精密切削加工技術 発展の経緯と将来の展望	天野 啓	型技術ワークショップ2020 講演論文集(2020年12月)	(一社)型技術協会
16	ロール研削盤 KWA-Dシリーズの構造の紹介	山下 直人	ツールエンジニア 2020年10月号	(株)大河出版
17	工具形状測定器FormEyeの紹介と 測定結果の活用方法について	室伏 勇	型技術 2020年12月号	(一社)型技術協会
18	超精密加工機UVMによる 超硬直彫り切削への取り組み	比佐 遼太	型技術 2020年12月号	(一社)型技術協会
19	超精密非球面加工機による 最適加工プロセスの提案	瀧園 和久	型技術 2020年12月号	(一社)型技術協会
20	既存設備のレトロフィット	佐野 利明	ツールエンジニア2020年12月号	(株)大河出版
21	超精密マシニングセンタによる金型加工の 高精度化・効率化技術	天野 啓	型技術2021年2月号	(株)日刊工業新聞社
22	コロナ時代における機械メーカーとしての貢献	小池 純	プラスチックスエージ 2021年1月号	(株) プラスチックスエージ
23	プラスチックスエージ2月号への寄稿	吉田 敦	プラスチックスエージ 2021年2月号	(株) プラスチックスエージ
24	金型加工の工程別にみた マシニングセンタの有効活用法	相原 正美	素形材 2021年2月号	(一財)素形材センター
25	汎用樹脂の低分子量化と メルトブローン不織布への応用	笹井 裕也	成形加工 2021年2月号	(一社)プラスチック 成形加工学会
26	ダイカスト工法における圧力伝播の特性調査	相田 悟	ダイカスト会議論文集 2020年	(一社) 日本ダイカスト協会
27	芝浦機械株式会社製超精密5軸加工機の特 徴と運用事例	福田 将彦	機械技術 2021年2月号	(株)日刊工業新聞社
28	厚肉球状黒鉛鋳鉄のX線CTによる3次元 黒鉛組織観察	藤本 亮輔	鋳造工学 2021年93巻10号	(公社)日本鋳造工学会

受賞(2019年6月~2021年11月)

	賞 名	賞の概要	対 象	主催団体	受賞日
1	2018年日本ダイカスト会議 『小野田賞』 合金別ダイカスト工法の特性調査	技術の研究、開発、 または業務運営上 能率向上に役立つ ものに対し贈呈	ダイカストマシン事業部 相田 悟 藤本 将輝 技術開発本部 波多野 好幸	(一社) 日本ダイカスト 協会	2019/5/23
2	第49回機械工業デザイン賞 『日本産業機械工業会賞』 超精密マシニングセンタ UVM-700E(5AD)	工業製品のデザイン 振興と発展に寄与した 製品に対し贈呈	ナノ加工システム事業部	(株) 日刊工業新聞社	2019/7/24
3	令和2年度日本鋳造工学会 『優秀論文賞』 X線CTを利用した球状 黒鉛鋳鉄の疲労限度予測	日本の鋳造に関する 学問、技術の進歩、 向上とそれに伴う鋳造 業界の発展に寄与した 論文に対し贈呈	技術開発本部 藤本 亮輔 白木 尚人 ^{*1} 田中 香帆 ^{*2} 菅原 暁 ^{*2} 富澤 雅美 ^{*3} 原 拓生 ^{*3}	(公社) 日本鋳造工学会	2020/5/25

	賞名	賞の概要	対象	主催団体	受賞日
4	第42回 応用物理学会『優秀論文賞』 High external quantum efficiency (10%) AlGaIn-based deep-ultraviolet light-emitting diodes achieved by using highly reflective photonic crystal on p-AlGaIn contact layer	応用物理学の研究において優れた業績をあげた者に対して贈呈	ナノ加工システム事業部 小久保 光典 田代 貴晴 鹿嶋 行雄 ^{*4*5} 前田 哲利 ^{*4} 松浦 恵里子 ^{*4*5} 定 昌史 ^{*4} 岩井 武 ^{*6} 森田 敏郎 ^{*6} 上村 隆一郎 ^{*7} 長田 大和 ^{*7} 高木 秀樹 ^{*8} 平山 秀樹 ^{*4}	(公社) 応用物理学会	2020/9/8
5	第10回テクノロジーイノベーション賞	インド国家政策に則し化学品・石油化学製品分野で高い功績と認められる革新的技術に対し贈呈	SHIBAURA MACHINE INDIA PRIVATE LIMITED	インド化学品肥料省 化学品・石油化学品庁	2021/2/23
6	第51回機械工業デザイン賞 『審査委員会特別賞』 ダイカストマシン DC1100R-E/ DC1300R-E	工業製品のデザイン振興と発展に寄与した製品に対し贈呈	ダイカストマシン事業部	(株) 日刊工業新聞社	2021/7/15
7	第31回 型技術協会『奨励賞』 撮像式工具形状測定装置 “FormEye”と工具経路ベクトル補正機能	型に対して特に優れた貢献度の高い技術等を発表した講演者に対し贈呈	ナノ加工システム事業部 室伏 勇	(一社)型技術協会	2021/6/17

*1 (学)東京都市大学 *2 (学)東京都市大学大学院 *3 東芝ITコントロールシステム(株)

*4 (国研)理化学研究所 *5 丸文(株) *6 東京応化工業(株) *7 (株)アルバック *8 (国研)産業技術総合研究所

受賞トピックス

1 2018年 日本ダイカスト協会『小野田賞』 受賞

2019年5月23日

一般社団法人日本ダイカスト協会主催の2018日本ダイカスト会議で発表した論文「合金別ダイカスト工法の特性調査」が『小野田賞』を受賞しました。

近年、省エネおよびEV化の流れにより自動車の軽量化への取り組みが加速的に進んでいます。この流れに伴い、軽合金を扱うダイカスト製品も構造部材や高強度部品などが多様化してきており、それらの製品にはこれまでにない特殊な合金を使用します。ダイカストで使用される一般的な材料である「ADC12合金^(※)」の研究は多く行なわれていますが、本論文では重力铸造等で使用されている鋳物用合金3種類「AC2B（ラウタル）」「AC4B（含銅シルミ



表彰状

ン)」「AC8A（ローエックス合金）」に注目し、湯流れ状況や温度変化など計測による合金の基本性能確認のほか、鋳造条件の製品に与える影響を実鋳造により調査しました。

この研究結果は、今後、鋳造用合金をダイカスト製品へ流用する可能性を示されたとして評価されました。

(※) ADC12合金：アルミダイカストとして機械的性能、被削性（切削加工のしやすさ）、鋳造性のバランスがよい合金



相田 悟



藤本 将輝

2 第49回機械工業デザイン賞 超精密マシニングセンタが『日本産業機械工業会賞』を受賞

2019年7月24日

本賞は主に生産財を対象として、外観、機能、性能、色彩などさまざま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、自動車部品の光学部品金型加工において、
 (1) 形状精度や面精度の向上、(2) 小径工具による微細加工、(3) 長時間加工対応を実現し、磨き時間の大幅短縮や表面荒さ〔10nmRa〕レベルの「磨きレス鏡面加工」を達成しており、その内容は、ナノテクノロジーを搭載し



UVM-700E(5AD)

た超精密加工機における国内唯一のメーカー製品に相応しい完成度を有している点が評価されました。



受賞者代表

3 令和2年度 日本鑄造工学会『優秀論文賞』受賞

2020年5月25日

公益社団法人日本鑄造工学会の発刊誌「鑄造工学第91巻第5号」に掲載した論文「X線CTを利用した球状黒鉛鑄鉄の疲労限度予測」が『優秀論文賞』を受賞しました。

球状黒鉛鑄鉄を用いて複雑な形状の部材を鑄造すると、各部の冷却速度が異なるため組織が不均一になりやすく、異常黒鉛組織や引け巣が発生し、疲労破壊の原因になります。そのため、鑄造後に部材評価を行う必要がありますが評価に多くの時間が必要でした。論文は球状黒鉛鑄鉄の疲労強度評価に関する

もので、X線CTと画像処理を用いて球状黒鉛鑄鉄の組織の様子から疲労限度を予測し、評価に要する期間を大幅に短縮できる技術を評価されました。



藤本 亮輔

4 第42回 応用物理学会『優秀論文賞』受賞

2020年9月8日

社会的にも深紫外光源へのニーズが高まっているなかで、広く応用物理分野にインパクト与える論文として公益社団法人応用物理学会の『優秀論文賞』を受賞いたしました。

論文名：High external quantum efficiency (10%)

AlGa_N-based deep-ultraviolet light-emitting diodes achieved by using highly reflective photonic crystal on p-AlGa_N contact layer

掲載誌：Appl. Phys. Express 11(2018)012101

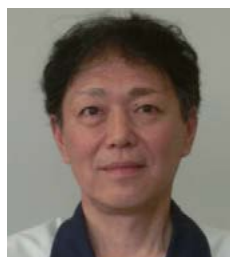
AlGa_Nを用いた深紫外波長域の発光ダイオード（LED）は、さまざまな応用が期待され近年高い関心が寄せられる一方、材料吸収の影響からこれまで光取り出し効率および外部量子効率



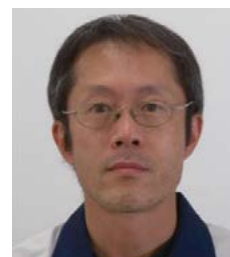
受賞メダルと賞状

が低いという問題がありました。

本論文では、この問題をLEDのp型コンタクト層に高反射率のフォトニック結晶ミラーを内装させることで解決することを提案し、高反射率のフォトニック結晶ミラーにより効率を1.8倍から2.8倍に増大した素子を作製しました。光吸収の小さい材料を使うことが難しい深紫外域において、フォトニック結晶を用いて吸収の影響を人為的に低減する方法を用い実証しており、今後の深紫外LEDの研究において重要な指針となります。



小久保 光典



田代 貴晴

5 当社インド現地法人が『10th NATIONAL AWARDS for Technology Innovation in Petrochemicals & Downstream Plastics Processing Industry』を受賞

2021年2月23日

当社インド現地法人「SHIBAURA MACHINE INDIA PRIVATE LIMITED」（射出成形機の製造および当社グループ製品販売）は、インド化学品肥料省 化学品・石油化学品庁（DCPC：Department of Chemicals and Petrochemicals）よりプラスチック加工機械分野において第10回テクノロジー・イノベーション賞を受賞しました。

本賞は、DCPCがインド国家政策に則し化学品・石油化学製品分野で高い功績と認められる革新的技術に対し授



受賞プレート

与するものであり、当社インド現地法人の「特殊複合射出成形技術の開発」が選ばれました。



受賞式の様子

6 第51回機械工業デザイン賞 ダイカストマシンが『審査委員会特別賞』を受賞

2021年7月15日

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

受賞の対象になったダイカストマシン「DC1100/1300R-E」は、(1)生産性の向上（電動サーボモータ駆動のトルク機構採用による型開閉時間の短縮）、(2)省エネルギー（電動型締機構採用によるサイクルタイム短縮で使用電力量を削減）、(3)省スペース（型締機構を電動化することで作動油量を削

減しフレーム内タンクを極小化）、(4)操作性の向上（新型コントローラの採用）の点を評価されました。



DC1100R-E

DC1300R-E



受賞者代表

7 型技術協会賞 第31回『奨励賞』受賞

2021年6月17日

一般社団法人型技術協会の主催する「型技術ワークショップ 2020 in ふじのくに」において、当社超精密マシニングセンタ「UVMシリーズ」に搭載されているオプション機能、撮像式工具形状測定装置“FormEye”と工具経路ベクトル補正機能について講演を行い、第31回『奨励賞』を受賞しました。

精密加工の分野で寸法精度の要求が厳しくなるにつれ、工具長・工具径を測定する機器・機能の開発、性能の向上が進んでおりますが、より短時

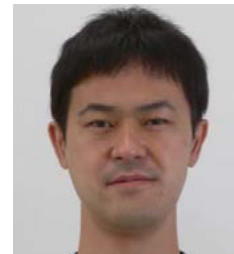


超精密マシニングセンタ「UVMシリーズ」

間かつ正確に工具形状を測定する装置のニーズの高まりに対応し、本装置及び機能が開発されました。本賞は、型に対して特に優れかつ貢献度の高い技術等を発表した講演者を毎年顕彰するものです。



表彰状



室伏 勇

特許紹介

当社は会社方針の一つとして「知的財産権の尊重」を掲げ技術開発の成果を知的財産権によって保護するとともに、第三者の知的財産権を尊重しています。お客様に満足していただける製品、システム、サービスを提供するため技術開発に力を入れています。その結果、国内外約 1,800 件の特許権を保有していますが、その中から特に SDGs に係る特許を紹介します。これらの特許はパテント・リザルト社のパテントスコアで高い評価を頂いております。(パテントスコア:審査経過情報をもとに、個別特許の注目度をスコアリング評価する指標)

1 深紫外LED及びその製造方法

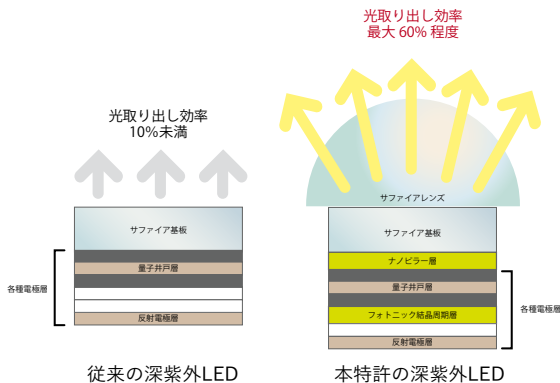
特許番号:特許第 6,230,038 号

発明者:

小久保 光典, 田代 貴晴(芝浦機械株)、
鹿嶋行雄, 松浦 恵里子(丸文株)、
平山 秀樹(国立研究開発法人理化学研究所)、
上村 隆一郎、長田 大和(株アルバック)、
森田 敏郎(東京応化工業株)

深紫外 LED は、食品、浄水、医療、家電の殺菌など幅広い用途での利用が期待されています。しかし、製品の電力変換効率は 2 ~ 3% と低く、それら用途への実用化には少なくとも 10% 以上の電力変換効率が必要になります。電力変換効率が低い主な要因は、① LED 内のコンタクト層で深紫外光が 50% 以上吸収消失すること②内部全反射により熱に変換することがあり光取出し効率が 10% 未満になることが挙げられ、電力変換効率を向上させるために光取出し効率を向上させることが求められていました。

本特許の LED は、基板の電極層などの積層順序、フォトニック結晶周期構造、ナノピラー構造、半球状レンズ等の採用の工夫により、光取出し効率が最大で 60% 程度得られるようになりました。



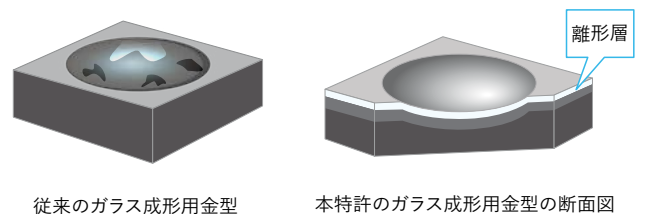
2 ガラス成形用金型

特許番号:特許第 5,376,984 号

発明者:不破 久順, 増田 淳

ガラスレンズをプレス成形によって製造するための金型は、ガラスとの反応を防ぐ離型膜が設けられています。代表的な離型膜としては、耐酸化性に優れる白金やイリジウムなどの貴金属系の合金が用いられています。しかし、このような離型膜では、硝種との組み合わせによっては離型性が悪く、短時間でガラスの融着が起こってしまうため、イリジウム-レニウム合金離型膜を形成した金型に離型剤を塗布してからガラスの成形を行ったり、成形するガラスプリフォーム側に離型のためのコーティングを施したりしていました。

本特許のガラス成形用金型は、金型内に炭素を含む離型層を設けています。この離型層に含有される炭素が離型剤と同様の働きをするため、金型及びガラスプリフォームに離型剤を塗布しなくても優れた離型性能を発揮します。通常 100 から 500 回程度の金型利用サイクルが、弊社の金型では 2000 回を超えても利用可能になりました。

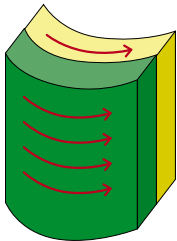


3 複合材料成形品の成形方法および装置

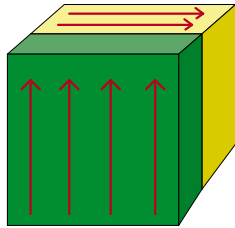
特許番号:特許第 6,522,456 号
発明者:桃野 政道, 山下 隆充

繊維強化プラスチックは、航空機や自動車などの乗り物、ユニットバスなどの住宅設備機器、最近では、ロボットやドローンなどにも使用されるようになってきました。この繊維強化プラスチックには強化繊維が樹脂の流れ方向に配向する傾向があり、成形品にそりが発生したり、特定方向の強度が弱くなるといった問題があります。それら欠点を改善するためにあらかじめ強化繊維が混入されている材料を成形時に用いてきましたが、これらの材料はもともと繊維の長さが短いことから、金型に充填した時に繊維折損が発生しやすく長い繊維が残らないために、強化繊維によるメリットを得られない問題が残っていました。

本特許の成形装置では、①連続強化繊維を投入できること②樹脂の流れの方向をそれぞれ異なるように積層出来ることから、最終の成形品には、折損せずに長い強化繊維が残るようになり、しかも第1層と第2層とで長い強化繊維の配向が互い違いとなっているので、方向に因らずに曲げ強度や弾性率などが大幅に向上した高強度の成形品を得ることができるようになりました。



従来の射出成形品



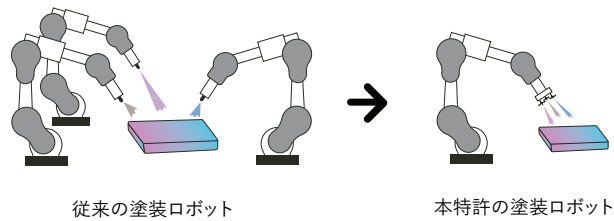
本特許の射出成形品

4 塗装用ロボットシステム

特許番号:特許第 5,437,301 号
発明者:根岸 祐司

一般的な塗装システムにおいては、例えば下塗り、中塗り、上塗りなど複数の工程ごとに、異なるロボットを配置して塗装を行っています。それゆえ、装置全体の設置面積が広がる問題がありました。また、複数のロボットで塗装を行っているため、それぞれのロボットごとに塗装作業内容を学習させる必要もありました。

本特許の塗装用ロボットシステムは、一台のロボットのアーム部に複数のスプレーガンが取り付けられており、複数の塗装工程が一台のロボットで行え、装置全体の設置面積を縮小し、学習作業を減少させることを実現しました。



従来の塗装ロボット

本特許の塗装ロボット

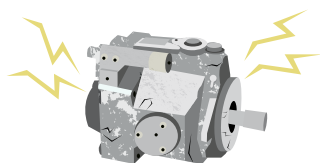
5 高強度高減衰能鑄鉄の製造方法

特許番号:特許第 6,131,322 号

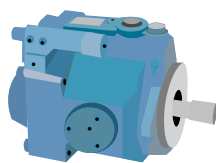
発明者:藤本 亮輔, 晴山 巧

現在、騒音は典型7公害の中でも苦情件数において上位となっています。とりわけ、都市部の建設作業騒音は大きな問題となっており、都市型建機の騒音低減は急務とされています。建設作業の低騒音化のためには、重機油圧部品の素材に振動減衰性能を持たせることが有益ですが、振動減衰性能を有する片状黒鉛鑄鉄は鑄鉄製重機油圧部品に応用するには強度が小さく、従来用いられている球状黒鉛鑄鉄に相当する強度を有する鑄鉄が求められていました。

弊社の研究開発により、特定の元素を適量加えると、鉄-アルミニウム炭化物形成と黒鉛の球状化の両方が促進されることが見出され、高強度化と低振動性を両立した高強度高減衰能鑄鉄を得ることができました。弊社の高強度高減衰能鑄鉄を用いて作られた重機油圧部品(ピストンポンプ)のケーシング(青色部分)は、壊れにくく(高強度)、静か(低振動)な作業を実現しています。



従来の鑄鉄を用いたポンプ



本特許の振動減衰性能を用いたポンプ

芝浦機械への期待



東京大学 名誉教授

樋口 俊郎

芝浦機械（東芝機械時代の話については、「東芝機械」と呼ばせていただく）と私の関係は、約50年前に始まる。東京大学工学部精密機械工学科で設計演習の授業を受けた。規模の小さな学科であったこともあり、企業から実務経験が豊富な技術者に講師をお願いしていた。東芝機械に務められていた学科の先輩にボールねじ送りの位置決めテーブルの課題で、設計製図を教えていただき、東芝機械が大型工作機械を製造していることを知った。

1991年に精密機械工学科の教授に着任した時も、東芝機械へ講師派遣を依頼しており、その後も長く続いた。1992年4月から神奈川科学技術アカデミー（KAST）で樋口「極限メカトロニクス」プロジェクトを兼務した。川崎市溝の口にあるKSPに研究室を作り、5年間で10億円の予算で研究に取り組んだ。プロジェクトの課題の一つに、静電モータの研究があり、電磁モータに匹敵する性能を有する強力静電モータの開発に成功した。そして、種々の静電モータの方式を検討するなかで、電極を加工するために数 μm のピッチの3条ねじを加工できる装置が必要となった。しかし、そのようなものは存在していなかったため、潤沢な研究費を活用し、自分たちで創ろうと思った。工業紙に、東芝機械が小型の非球面加工機を開発した記事が掲載されたのを偶然見つけた。そして、これを基礎とすれば、目的の機能を実現できる機械が出来ると直感し、設計演習の講師をお願いしていた猪熊隆彦さん（当時 取締役 営業本部長）に製作を依頼した。プロジェクトの研究室員と東芝機械との間で検討を重ね、単に微細ねじを加工するだけでなく、種々の用途の超精密加工の研究が可能になるように工夫し、4軸制御の超精密加工機を設計した。こうして出来上がった超精密加工機は種々の超精密加工の研究に活用されただけでなく、超精密加工を担う優れた人材の育成に貢献した。

KASTのプロジェクトでは、凍結試料を微小距離毎送り、回

転刃で削ることによって断面画像を逐次取得して、臓器や昆虫の3次元画像を得ることができる装置の開発を東芝機械と共同で推進した。研究の成果である3次元内部構造顕微鏡は、東芝機械から理化学研究所等の研究機関に納入された。また、この共同研究で並行して、病理検査に使う組織切片の自動作製装置の開発に成功し、東芝機械から市販された（現在は大日本精機に技術移転）。

共同研究を上手く出来たのは、東芝機械が、確かな技術と豊富な実績に基づき、確実に機能を満たす高精度で頑丈な機械を設計製作できる力を有していたからである。これは芝浦機械が有するDNAであると言える。新社名の芝浦機械は、工作機械においてのブランド名に繋がるだけでなく、東芝の起源を連想させる。資本関係では東芝からは離れたが、日本の産業の発展を支えてきた東芝の生産機械事業の継承者としての役割を期待したい。

本技術報は芝浦機械となってからの最初のものである。技術報に記載される産業界の現場からの新鮮な情報は大学等の教育機関の研究者や学生にとって貴重である。技術報を未永く刊行し、学術の進歩と工学教育に貢献していただきたい。

本技術報からも分かるように、大型機械、超精密、射出、ダイカストマシン、制御機器などの分野で特徴のある固有の技術を芝浦機械は多く有している。これらの既存の事業でのさらなる成長を目指すことに加え、これらの技術を生かす新事業の開拓が大切になる。それには、異分野の人達との交流が重要となる。本技術報は芝浦機械の有する技術を異分野の人々にも広く知ってもらいたい大切な媒体となる。専門が異なる人が理解しやすいように記述を工夫し、開発した技術の内容と魅力をより多くの人に伝えていただきたい。

発行日：2021年12月15日

非売品：本誌記事の無断引用無断転載を禁じます。

発行人：小久保 光典

発行所：芝浦機械株式会社
R & Dセンター 研究開発部
神奈川県座間市ひばりが丘 4-29-1

芝浦機械技報編集委員会

委員長 小久保 光典

委員	藤田 純	五十嵐 敏裕	隅田 敏	
	奥山 浩司	中野 敏彰	山本 剛裕	馬場 丘人
	飯田 正彦	佐藤 庄一	風間 拓朗	藤本 亮輔
	小沼 裕之	宇佐美 幸一	宇佐見 兵衛	
幹事	佐藤 和人	山本 正幸	大川 貴史	大久保 章英
	二階堂 慎一	雨澤 弘機	瀬戸 到	

国内拠点一覧

東京本社

〒100-8503
千代田区内幸町 2-2-2 (富国生命ビル)
TEL 03-3509-0200
FAX 03-3509-0333

沼津本社

〒410-8510
静岡県沼津市大岡 2068-3
TEL 055-926-5141
FAX 055-925-6501

東北支店

〒981-3112
仙台市泉区八乙女 2-11-2
TEL 022-374-6111
FAX 022-374-6118

中部支店

〒465-0025
名古屋市長東区上社 5-307
TEL 052-702-7811
FAX 052-702-1141

関西支店

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

九州支店

〒812-0004
福岡市博多区榎田 2-3-23
(FMT 榎田ビル)
TEL 092-451-2795
FAX 092-474-1045

高崎営業所

〒370-0016
群馬県高崎市矢島町 739-16
TEL 027-367-2370
FAX 027-360-5055

浜松営業所

〒433-8117
静岡県浜松市中区高丘東 5-6-25
TEL 053-436-7407
FAX 053-436-3996

広島営業所

〒731-0103
広島市安佐南区緑井 5-17-5
TEL 082-831-7530
FAX 082-879-7065

尾道営業所

〒729-0141
広島県尾道市高須町 4778-1
TEL 0848-56-2378
FAX 0848-56-2377

沼津工場

〒410-8510
静岡県沼津市大岡 2068-3
TEL 055-926-5141
FAX 055-925-6501

相模工場

〒252-0003
神奈川県座間市ひばりが丘 4-29-1
TEL 046-258-2801
FAX 046-258-2900

御殿場工場

〒412-0038
静岡県御殿場市駒門 1-120
TEL 0550-87-3555
FAX 0550-87-3742

国内関係会社一覧

芝浦機械エンジニアリング株式会社

〒410-0007
静岡県沼津市西沢田 267-2
TEL 055-921-7800
FAX 055-921-7831
https://www.shibaura-machine.co.jp/
smeng/

東栄電機株式会社

〒411-8510
静岡県三島市松本 131
TEL 055-977-4111
FAX 055-977-4110
http://www.toei-electric.co.jp/index_J.htm

株式会社不二精機製造所

〒411-8730
静岡県駿東郡長泉町下土狩 840
TEL 055-988-1001
FAX 055-988-1027
http://www.fujiseiki-machine.co.jp/

芝浦セムテック株式会社

〒410-8510
静岡県沼津市大岡 2068-3
TEL 055-924-3450
FAX 055-925-6556
http://www.s-semtek.co.jp/

芝浦産業株式会社

〒410-8510
静岡県沼津市大岡 2068-3
TEL 055-922-0816
FAX 055-924-5816

海外主要拠点一覧

< 東アジア >

SHANGHAI SHIBAURA MACHINE CO., LTD.

4788, Jin Du Road, Xinzhuang Industry Zone, Shanghai, 201108, PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA
TEL: [86]-(0)21-5442-0606
FAX: [86]-(0)21-5866-2450
SHANGHAI*, BEIJING, TIANJIN, DALIAN, CHONGQING, NINGBO

SHIBAURA MACHINE (SHANGHAI) CO., LTD.

4788, Jin Du Road, Xinzhuang Industry Zone, Shanghai, 201108, PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA
TEL: [86]-(0)21-5442-5455
FAX: [86]-(0)21-5442-5466

SHIBAURA MACHINE (SHENZHEN) CO., LTD.

Room 608, Building 2, Animation Park, Yuehai Road, Nanhai Street, Nanshan District, Shenzhen, 518054, PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA
TEL: [86]-(0)755-8625-0599
FAX: [86]-(0)755-8625-0522
SHENZHEN*, GUANGZHOU

SHIBAURA MACHINE TAIWAN CO., LTD.

7F, No.168, Ruiguang Road, Neihu District, Taipei City, 11491, TAIWAN
TEL: [886]-(0)2-2659-6558
FAX: [886]-(0)2-2659-6381

< 東南アジア >

SHIBAURA MACHINE SINGAPORE PTE. LTD.

123 Pioneer Road, Singapore 639596, SINGAPORE
TEL: [65]-68611455
FAX: [65]-68612023
SINGAPORE*, KUALA LUMPUR, PENANG

SHIBAURA MACHINE (THAILAND) CO., LTD.

127/28 Panjathanee Tower, 23rd Floor, Nonthree Road, Khwaeng Chong Nonthree, Khet Yannawa, Bangkok 10120, THAILAND
TEL: [66]-(0)2-681-0158 ~ 61
FAX: [66]-(0)2-681-0162

PT. SHIBAURA MACHINE INDONESIA

Galeri Niaga, Tanjung Barat Kav. KM.8-6. 7, JL. TB. Simatupang Kav. 81, Tanjung Barat, Jagakarsa, Jakarta Selatan, 12530, INDONESIA
TEL: [62]-(0)21-7884-8694
FAX: [62]-(0)21-7884-8689

*: HEAD OFFICE

SHIBAURA MACHINE VIETNAM COMPANY LIMITED.

2nd Floor, VIT Tower, No. 519, Kim Ma Street, Ngoc Khanh Ward, Ba Dinh district, Hanoi, VIETNAM
TEL: [84]-(0)24-2220-8700.1
FAX: [84]-(0)24-2220-8702
HANOI*, HO CHI MINH

SHIBAURA MACHINE INDIA PRIVATE LIMITED

No. 65 (P.O. Box No. 5), Chennai-Bangalore Highway, Chembarambakkam, Poonamallee Taluk, Thiruvallur, Chennai, TN 600123, INDIA
TEL: [91]-(0)44-2681-2000
FAX: [91]-(0)44-2681-0303
CHENNAI*, DELHI, MUMBAI

SHIBAURA MACHINE MANUFACTURING (THAILAND) CO., LTD.

7/499 Moo 6, Tambol Mabyangporn, Amphur Pluakdaeng, Rayong 21140, THAILAND
TEL: [66]-(0)38-027313
FAX: [66]-(0)38-027317

< 米州 >

SHIBAURA MACHINE COMPANY, AMERICA

755 Greenleaf Avenue, Elk Grove Village, IL 60007, U.S.A.
CHICAGO*, LOS ANGELES, CHARLOTTE, ATLANTA, ONTARIO/CANADA
TEL: [1]-847-593-1616
FAX: [1]-847-593-0897

SHIBAURA MACHINE MEXICO, S.A. DE C.V.

Circuito Luxma No. 115, Poligono Industrial Milenio, C.P. 37290 Leon, Guanajuato, MEXICO
TEL: [52]-477-101-8600

SHIBAURA MACHINE DO BRASIL COMERCIO DE MAQUINAS LTDA.

Rua Cubatao, 86 Conjunto 1307, Vila Mariana, Sao Paulo, SP CEP 04013-000, BRASIL
TEL: [55]-(0)11-3253-3331
FAX: [55]-(0)11-3586-0138

< 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

SHIBAURA MACHINE UK LTD.

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

芝浦機械株式会社

〒100-8503 千代田区内幸町 2-2-2 (富国生命ビル)
TEL 03-3509-0200 FAX 03-3509-0333

〒410-8510 静岡県沼津市大岡 2068-3
TEL 055-926-5141 FAX 055-925-6501

URL <https://www.shibaura-machine.co.jp>

