

住友重機械技報 No. 168 2008 パワートランスミッション・コントロール特集

巻頭言

革新的開発による差別化こそが次の飛躍の必須条件

西村真司

パワートランスミッション・コントロール特集

論文・報告	ハイポイドギヤの歯当たり解析	重見貴夫, 山本 章, 牧 充, 渡邊正輝	1
	ビルトイン型ダイレクトドライブモータの開発		池上雅人 5
技術解説	精密制御用サイクロ [®] 減速機 F4C-Dシリーズの開発		梅田和良 9
	精密制御用サイクロ [®] 減速機 F1C-Eシリーズの開発		山本 章 11
	モータの高効率法規制の現状と動向		荻原勇男 13
新製品紹介	精密制御用サイクロ [®] 減速機 センターホロー形減速機		15
	精密制御用減速機 IBシリーズP100		16
	多軸サーボアンプ MD-100シリーズ		17
	パラマックス [®] 一段形減速機 SPAシリーズ		18

論文・報告

	微細転写領域における樹脂流動解析		原崎 務 19
	インプリントおよびAMOTECによる微細転写性評価	佐藤雄司, 阿部昌博, 加藤隆典	23
	局所温調技術を適用した微細転写成形法		阿部昌博 27
	くりこみ群分子動力学法の開発	市嶋大路, 大西良孝, 広瀬良太	31
	船用高効率プロペラ(NBSプロペラ)の性能	青野 健, 岩本三郎, 高井通雄	35

新製品紹介

	LEDライトシステム		39
--	------------	--	----

On Publishing Special Section of Power Transmission & Controls

Shinji NISHIMURA

Special Section of Power Transmission & Controls

T/PAPER	Tooth Contact Analysis of Hypoid Gear Takao SHIGEMI, Akira YAMAMOTO, Minoru MAKI, Masaki WATANABE	1
	Development of Built-in Type Direct Drive Motor Masato IKEGAMI	5
T/INVITATION	Development of FINE CYCLO® F4C-D Series Kazuyoshi UMEDA	9
	Development of FINE CYCLO® F1C-E Series Akira YAMAMOTO	11
	Trend of Motor Efficiency Regulations Isao OGIWARA	13
NEW PRODUCT	FINE CYCLO® Hollow Shaft Type	15
	Low Backlash Planetary Gear Reducer IB Series P100	16
	Multi-axis Servo Amplifier MD-100 Series	17
	Single Stage PARAMAX® Drives SPA Series	18

T/PAPER

	Flow Simulation of Polymer Melts for Micro-scale Transcription Tsutomu HARASAKI	19
	Pattern Transferability Evaluation by Imprint and AMOTEC Yuji SATO, Masahiro ABE, Takanori KATOH	23
	Micro/nano Molding Method by Using Local Heating System Masahiro ABE	27
	Renormalization Group Theory for Molecular Dynamics Daiji ICHISHIMA, Yoshitaka OHNISHI, Ryota HIROSE	31
	Advantages of New Blade Section Propeller Takeshi AONO, Saburo IWAMOTO, Michio TAKAI	35

NEW PRODUCT

	LEDs Pack for Electric Forklift	39
--	---------------------------------	----

パワートランスミッション・コントロール特集の発行に当たって 革新的開発による差別化こそが次の飛躍の必須条件



代表取締役
PTC事業部長 西村 眞司

住友重機械技報 168 号の『パワートランスミッション・コントロール特集』の発行に当たり、PTC(パワートランスミッション・コントロール)事業および商品の目指す姿と技術のあり方についての考えを述べたく思います。

PTC 事業は、サイクロ®減速機を中核商品として、国内においては高いシェアを維持し、商品も超大型から小型精密の領域をカバーしている変減速機、ギアモータなどのトップメーカーです。事業をこの地位に押し上げ維持している背景には、諸先輩の努力はもちろんですが、サイクロ®という商品の特性(コンパクト・強靱)および優位性が大きく寄与していると考えます。

ただし、商品のイノベーションという観点からは、その後続くものは少なく、今後の事業の成長にとって危惧を感じることも事実です。コンポーネント事業は、装置と異なり日々革新的な商品が創出されにくいですが、いったん差別化されたコンポーネントを獲得すれば、長期にわたり事業を競争優位な状態に維持できます。そういう意味で、PTC 事業にとって革新的な技術および商品をここ数年の内に開発・上市することが、次の飛躍には絶対不可欠な条件であります。特に、海外での競争には、地味であっても技術的・機能的な側面で優位な商品であることが、弱者として後発として市場に切り込んでいく必要(十分でない)条件です。

今回の技報『パワートランスミッション・コントロール特集』の中には、小型精密領域の技術および商品をはじめ制御技術(サーボ、ダイレクトドライブなど)についての紹介記事が掲載されています。当然、将来はこれらの領域での飛躍を図る必要がありますが、その一方大型領域でも構造的な変革や材料的な革新が必要であり、この分野での記事掲載が少ないのは気掛かりです。今後の PTC 事業の領域を考えるに、精密制御領域、汎用可変速領域および大型(頑強・メンテフリー)可変速領域といった、顧客の求める機能によって区分けすることが重要です。この面からも、大型で頑強・メンテフリーといった技術の再見直しが必要なのではないのでしょうか？

また、世の中の要請は、省エネルギーおよび環境保全といった技術および商品であり、今回掲載の高効率モータ規制の先を行く発想が必要です。従来 PTC 事業はモータ(電機関連)に注力したとは言いがたいのですが、ベトナム工場立上げにより電機の自前化へと舵を切り直しました。ぜひ、電機による省エネルギーおよび環境保全への寄与も心がけたいと思います。

いずれにしても、一流商品による持続的成長は、ブレない当社の信念です。前述したように、コンポーネントの差別化および強化はその事業のみならず、装置系の他事業の競争優位にも極めて重要です。コンポーネント系の技術開発および商品開発に携わる関係者の一層の奮闘をお願いするとともに、それを事業発展へとつなげる経営者としての責務を再認識して、巻頭のご挨拶といたします。

ハイポイドギヤの歯当たり解析

Tooth Contact Analysis of Hypoid Gear

●重見 貴夫* 山本 章* 牧 充** 渡邊 正輝**
 Takao SHIGEMI Akira YAMAMOTO Minoru MAKI Masaki WATANABE

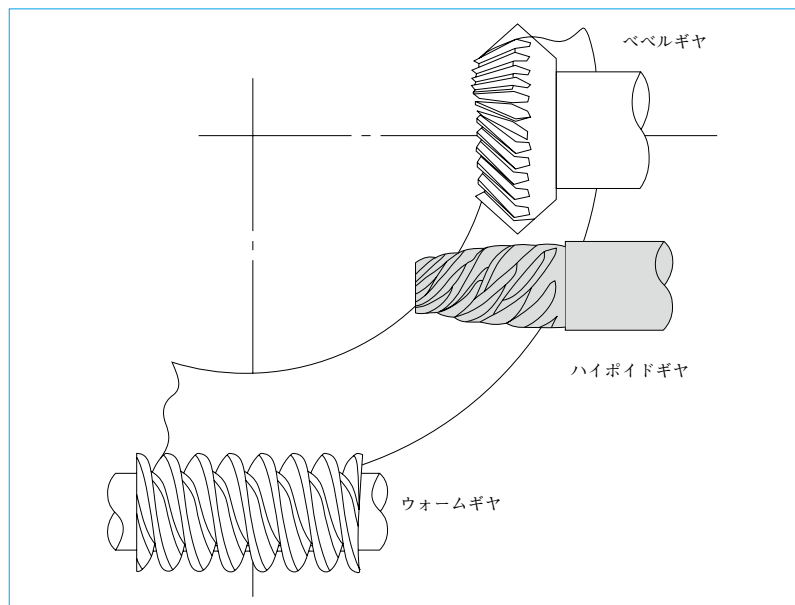


図1 直交減速方式
 Methods of right angle reduction

ハイポイドギヤの独自の歯形設計に基づく高性能な歯車を実現するには、噛み合理論から導かれる歯車歯面と、これを加工する歯切り盤、カッタで描かれる歯面を厳密に数値化した上で歯当たりを確認していく必要がある。

そこで、歯面形状データの数値化を元に、数値解析による歯当たり解析の方法および3D/CADソフトを用いた歯当たりを可視化するプログラムを開発した。この解析方法およびプログラムによれば、歯切り盤の機構およびカッタ仕様などをベクトル解析の手法で解析し、工具円錐軸をクレードル軸に対して決定できる。そして、ピニオン歯面は工具円錐とピニオン歯面との同時接触線により数値表現でき、ギヤ歯面はギヤ加工用工具円錐により数値表現できる。

実際の製品の歯当たり結果と合わせて検討したところ、歯当たり解析プログラムの妥当性を確認した。

To realize a high performance gear based on designing the unique tooth form of hypoid gears, it is necessary to specify the tooth contact by strictly numerically expressing the gear tooth surface derived from the meshing theory and the tooth surface drawn by the gear-cutting machine or the cutter, which is used to form the gear. Based on the numerically expressed tooth surface form data, we recently developed a program that visualizes the tooth-contact using a tooth-contact analysis method based on numerical analysis and using 3D/CAD software. With this analysis method and program, it is possible to analyze the mechanism of the gear-cutting machine or the cutter specifications through a vector analysis method, and determine the conical axis of the tool in relation to the cradle axis. In addition, they enable us to numerically express the pinion tooth surface based on the simultaneous contact line between the tool cone and the pinion tooth surface, and the gear tooth surface based on the tool cone for gear forming. As we compared the analysis result with the tooth contact of the real product, it has been confirmed that the tooth contact analysis program is valid.

1 まえがき

ハイポイドギヤは、図1に示す通り、べベルギヤとウォームギヤの中間に位置する機構である⁽¹⁾。利点としては、次の3点があげられる。

- (1) ベベルギヤよりも1段減速で高減速比が得られることから、コンパクト設計が可能であること。
- (2) ウォームギヤよりも効率が優れていること。
- (3) ウォームギヤ並みの静音であること。

しかし、一般的にハイポイドギヤの製作には、次の問題点がある。

- (1) ハイポイドギヤの性能は歯当りに大きく左右され、特に騒音に対する影響が大きい。
- (2) 目標とする歯当たりを得るには少しずつセッティングを変えて何度も歯切りをする必要があり、開発に時間がかかっている。
- (3) 歯車精度の測定が困難であり、歯当たりによる品質管理に頼らざるを得ない。

そこで、これらの改善に設計段階において歯当たりをシミュレートすることを検討し、3次元モデルを活用したハイポイドギヤの設計システムを構築した⁽¹⁾。これにより、従来の1/10の工数で歯当たり出しが可能となったが、より高性

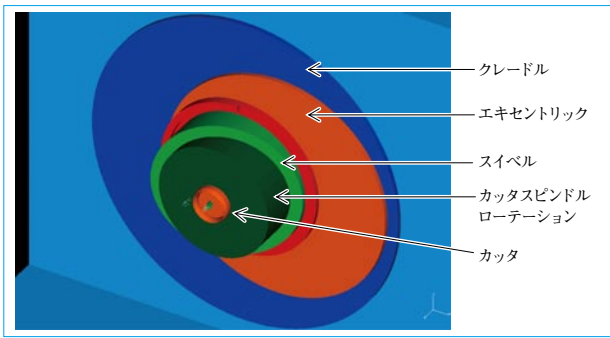


図2 グリーソン方式の歯切り盤機構の3次元表示
3D expression of Gleason generator

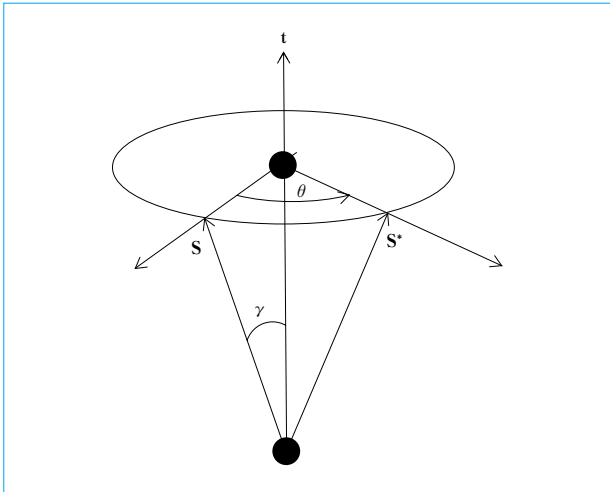


図3 単位ベクトル t まわりの単位ベクトル S の回転
Rotation of unit vector S around unit vector t

能な歯車の実現には、既存の方法により設計された歯形の歯当たりを改善および適正化するだけでは不十分であり、噛み合い理論から導かれる歯車歯面、これを加工する歯切り盤とカッタで描かれる歯面を数値化した上で歯当たりを確認していく必要がある。

そこで、本報では、グリーソン方式の歯切り盤⁽²⁾でハイポイドギヤを成形法で歯切りする場合において、歯面形状データを数値化し、それを元に数値解析により歯当たり解析する方法と、3D/CADソフトを用いてこの歯当たりを可視化するプログラムを開発した。

実際の製品の歯当たり結果と合わせて検討し、この歯当たり解析プログラムの妥当性を確認したので、その解析方法と結果をここに報告する。

2 歯当たり解析の方法

2.1 工具設定機構の解析

成形法の基本的な歯切り法は、ギヤの表裏歯面として凹凸の円錐面を与えて、そのギヤ歯面の円錐面を工具としてピニオン表裏歯面を創成歯切りする。歯当たりを適切に調整する歯切り盤の機構を利用して表裏歯面を同時に加工し、両歯面で作動状態が良好な歯当たりを得るようにする。

図2に、ハイポイドギヤ創成歯切り機構部の3次元表示を示す。図中の各々のプレートが、ある条件でリンクしており、回転することで工具円錐軸の位置および傾きを決定する。次に、簡単に説明をする。

基底部のプレートをクレードルと呼び、回転軸の中心まわ

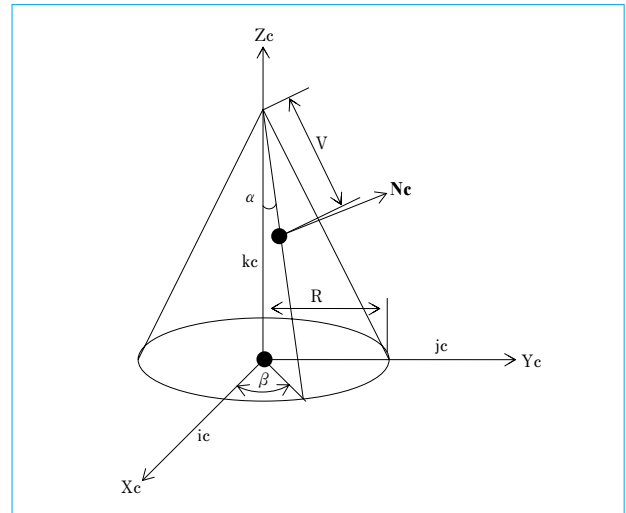


図4 工具座標により表される工具円錐
Cutter cone expressed by coordinates

りに自転する。その上に偏心したエキセントリックが乗り、クレードル上で自転する。この自転により工具円錐の中心の位置を決定する。そして、その上に15度傾いた平面を持つスイベルが乗り、かつ回転する。さらにその上に15度傾いた平面を持つカッタスピンドルローテーション(チルトとも呼ぶ)が乗り、かつ回転する。これらの回転角により工具円錐軸の傾きを決定する。この時、常にカッタの刃先平面の中心点(すなわち、工具円錐の中心の位置である)とクレードルの中心軸とは一致している。以上のように、クレードル、エキセントリックおよびスイベルとカッタスピンドルローテーションのそれぞれの関係により工具円錐軸の位置および傾きを決定する。この工具円錐面の傾きを、ベクトル解析の手法において、次式を用いて解析できる。

図3において、単位ベクトル t に角度 γ を成して交差する単位ベクトル S が t のまわりに角度 θ 回転した単位ベクトルを S^* とする。このとき、 S^* は次式のように表される。

$$S^* = (t \cdot S)t + \cos\theta(t \times S) \times t + \sin\theta(t \times S) \dots\dots\dots(1)$$

今、図2においてエキセントリック上のスイベルがスイベルアングル θ 回転した場合、エキセントリックの垂線の単位ベクトルを t とすればスイベルの垂線カッタスピンドルローテーション軸は $\gamma = 15^\circ$ として、(1)式により S^* として与えられる。また、同様にスイベルに対してカッタスピンドルローテーションがカッタローテーションアングル θ 回転した場合、スイベルの垂線を t として、カッタ軸は $\gamma = 15^\circ$ として、(1)式により S^* として与えられる。

以上の考え方により、工具円錐軸をクレードル軸に対して決定できる。

2.2 工具円錐面により創成されるピニオンおよびギヤ歯面の数値解析

図4に、工具円錐とそれに固着した工具座標を示す。工具座標により工具円錐は次式のように表される。

$$\begin{pmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v \sin \alpha \cos \beta \\ v \sin \alpha \sin \beta \\ R \cot \alpha - v \cos \alpha \end{pmatrix} \dots\dots\dots(2)$$

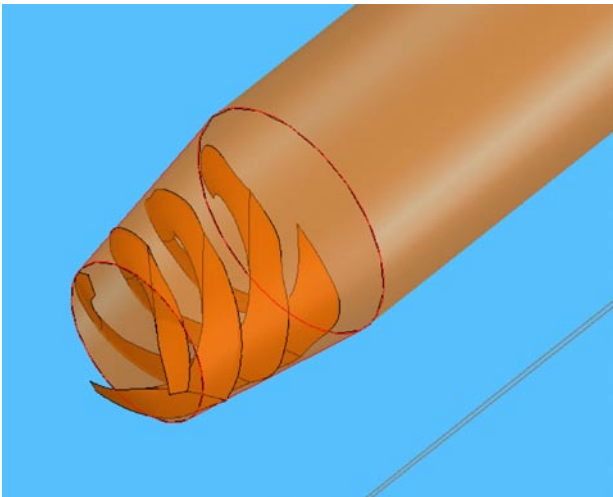


図5 計算と3D/CADによって描かれたピニオン歯面
Pinion tooth surface drawn by calculation and 3D/CAD software



図6 グリーソン方式の歯切り盤により創成歯切りされたピニオン
Pinion generated by Gleason generator

- α 工具円錐の円錐角の半角
- β 円錐の母線を指定する X_c 座標からの角度
- v 円錐頂点から任意点までの距離
- R カッタ半径

この任意点の法線ベクトル \mathbf{Nc} は、次式のように表される。

$$\mathbf{Nc} = \begin{pmatrix} \cos \alpha \cos \beta \\ \cos \alpha \sin \beta \\ \sin \beta \end{pmatrix} \dots\dots\dots(3)$$

2.1の工具設定機構の解析により与えられた加工設定値により工具円錐の座標をクレードルとともに回転する座標系で表現する。クレードルの回転速度、ねじ運動の速度およびワーク軸に設置されているピニオンブランクの回転速度との相対速度を \mathbf{W} とする。

工具の創成運動によりできる工具円錐と被創成ピニオン歯面との接触の条件は、次式のように表される。

$$\mathbf{Nc} \cdot \mathbf{W} = 0 \dots\dots\dots(4)$$

(2)式の工具円錐上で上記の接触の条件を満たす点の集合が、各クレードル回転角における工具円錐とピニオン歯面と

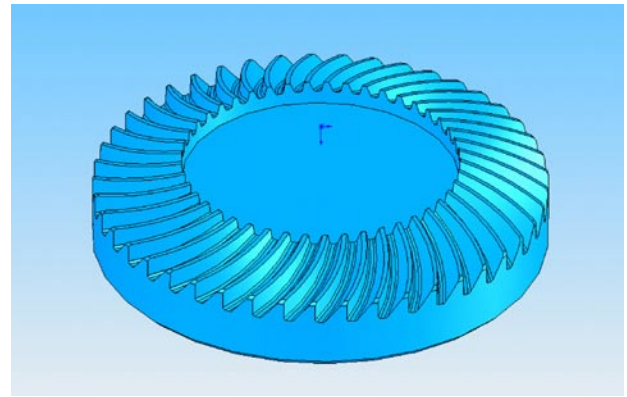


図7 3D/CADにより描かれたギヤ
Gear drawn by 3D/CAD software

の同時接触線になる。この同時接触線をピニオンとともに回転する座標系に座標変換して、ピニオン歯面上の同時接触線を求めることができる。

図5は各クレードル回転角に対応するピニオン歯面上の同時接触線の集合でピニオン歯面を数値表現し、3D/CADソフトにより描いたピニオン歯面である。図6の実際に加工したピニオン歯面に一致している。

ギヤ歯面は、ギヤ加工用円錐工具により成形歯切りされる。工具円錐仕様と加工仕様によりワーク軸に固定されたギヤ座標に各クレードル回転角における工具円錐を座標変換して、ギヤ歯面を表現できる。図7に、この方法で求めたギヤ歯面の数値を元に、3D/CADソフトにより描いたギヤ歯面を示す。

3 歯当たり解析結果

3.1 3D/CADソフトによる歯当たり解析

図8は、2.2の方法で得たピニオンとギヤ歯面の数値から得た歯当たり解析結果である。ハイポイドギヤのドライブサイド(凸歯面)を解析したものであり、横軸は歯筋方向、縦軸は歯丈方向を表している。横軸の左側はHEEL側(外径側)、右側はTOE側(小径側)であり、縦軸の上側は歯先側、下側は歯元側である。カラーコンタ表示はピニオン歯面とギヤ歯面の隙間を示しており、青色→緑色→赤色になる程、隙間が狭くなり、強い歯当たりとなることを示している。図9および図10の実機の歯当たりマークによく一致している。

表1は、実際に加工し、歯当たり解析を行ったハイポイドギヤの仕様である。

図9は、実際に加工した表1の仕様のハイポイドギヤの歯当たりマークである。図10は、実機の歯当たりマークを分かり易くスケッチしたものである。

4 今後の課題

4.1 より高性能な歯形設計手法の確立

現在までに蓄積された実機およびシミュレーションによる加工・歯当たりデータおよび歯面圧力・歯元曲げ応力・すべり速度などの計算値から、当社独自の歯車仕様計算、強度計算およびマシンセッティング計算プログラムを開発することで、ギヤモータに最適な歯車を設計することが可能となる。

4.2 歯車精度の測定と管理

3次元モデルを用いて、インボリュートギヤと同様に、歯車精度の測定および管理をすることで、間接的な管理である

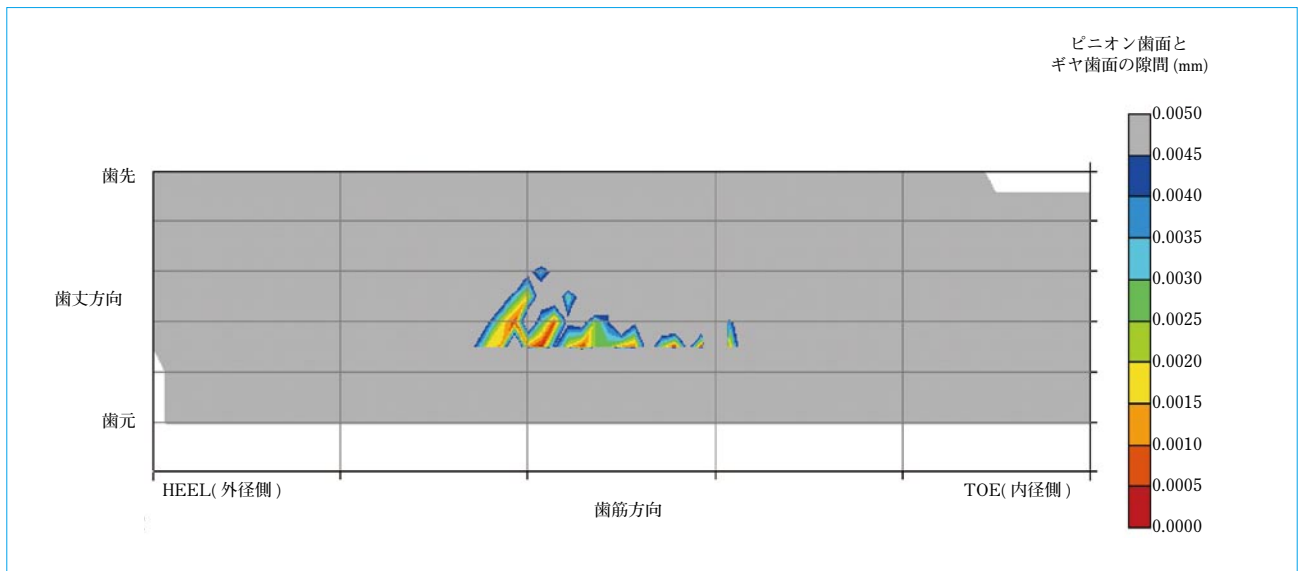


図8 3D/CADによる歯当たり解析結果
Result of tooth contact analysis by 3D/CAD software



図9 グリーソン歯切り盤により歯切りされたギヤ歯面上の歯当たりマーク
Tooth contact mark on tooth surface of gear generated by Gleason generator

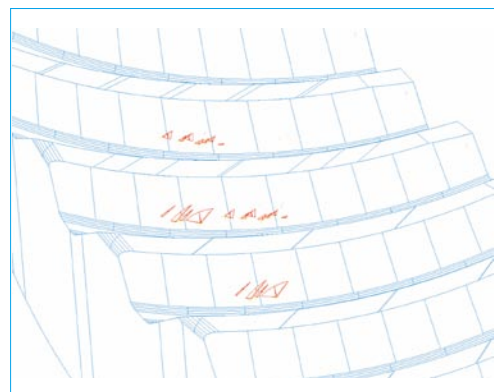


図10 ギヤの歯面上の歯当たりマークのスケッチ
Sketch of tooth contact mark on tooth surface of gear

表1 ハイポイドギヤの仕様
Dimensions of hypoid gear

	ピニオン	ギヤ
歯数	3	45
外径	—	138 mm
圧力角	20°	20°
歯幅	—	20 mm
オフセット	27 mm	—
モジュール	—	3.067

歯当たり判定よりも、より高精度な管理体制を築くことが可能となる。

4.3 負荷容量の向上

歯面形状の数値化により、より高精度な歯当たり解析ができ、特異な接触線を持つ歯形の検討が可能となる。

5 むすび

本報では、ハイポイドギヤを成形法で歯切りする場合において、歯面形状データを数値化し、それを元に数値解析および3D/CADソフトを用いる歯当たり解析方法を開発し、その効果について述べた。

- (1) グリーソン社の設計、歯当たり解析によらず、グリーソン方式のハイポイドギヤ歯切り盤を用いて、新たな高

性能ハイポイドギヤの加工を行う可能性を得た。すなわち、グリーソン方式のハイポイドギヤ歯切り盤の機構をベクトル解析の手法で解析し、工具円錐軸をクレードル軸に対して決定できる。

- (2) 工具円錐とピニオン歯面との同時接触線により、ピニオン歯面を数値表現した。この数値を元に、3D/CADソフトによりピニオン歯面を描いた。ギヤ歯面は、ギヤ加工用円錐工具により成形歯切りされる。ワーク軸に固定されたギヤ座標に各クレードル回転角における工具円錐を座標変換して、ギヤ歯面を数値表現できる。この数値を元に3D/CADソフトによりギヤ歯面を描いた。このピニオンおよびギヤ歯面形状は、実際に歯切りしたピニオンおよびギヤの形状に一致した。

(参考文献)

- (1) 重見貴夫, 山本章. 3次元モデルを用いたハイポイドギヤの設計システム. 住友重機械技報, no.156, 2002, p.5~8.
- (2) Hermann J. Stadtfeld. Gleason Bevel Gear Technology. The Gleason Works.

ビルトイン型ダイレクトドライブモータの開発

Development of Built-in Type Direct Drive Motor

●池上 雅人*
Masato IKEGAMI



ビルトイン型ダイレクトドライブモータ
Built-in type direct drive motor

近年、産業機械の駆動装置において、ダイレクトドライブ化が注目されている。これらの動向に対応するには、液冷構造のビルトイン型ダイレクトドライブモータ(DDモータ)と呼ばれる、低速・大トルクタイプが必要となる。そこで、今回、工作機械をターゲットに、新たに液冷構造のビルトイン型 DD モータの開発に取り組んだ。

開発したモータは、要求仕様を満たすべく、さまざまな技術(SPM 構造、最適スロットコンビネーション、集中巻線方式およびステータの樹脂モールド化など)を取り入れている。これらの技術により、高トルク化、低コギングトルク・低トルクリップル、高効率化および定格運転時の巻線温度上昇 70deg 以下を実現した。

本報では、開発した DD モータの設計技術および試作品にて検証された効果について述べる。

In recent years, driving mechanisms of industrial machinery is shifting to applying direct drive systems. To respond to these requests, market requires slow-speed high torque motor, which is called direct drive motor; "DD motor" of built-in type with liquid cooled structure. So, we have begun to develop built-in type DD motor with liquid cooled structure that targets machine tools market. To meet the requests, the developed motor has taken various technologies (Surface Permanent Magnet structure, optimum slot combination, concentrated winding, stator molding, etc). We achieved high-torque, low-cogging torque, low-torque ripple, high-efficiency, and 70deg or less of temperature rise at rated operation by the above-mentioned technologies. In this report, we describe the verified results of our DD motor design and its prototypes.

1 まえがき

近年、工作機械に代表される産業機械の駆動装置において、高速・高精度化、タクトタイム短縮および装置のコンパクト化などを狙って、従来の「サーボモータ+減速機」から「直接駆動(ダイレクトドライブ)」が注目され、活発な開発が行われている。

これに並行する形で、モータを構成する重要部品である永久磁石の性能向上が進み、永久磁石型同期モータの原理を用いた、ダイレクトドライブモータ(DDモータ)の開発と実用化が進んでいる。

当社においても、上記の動向に対応するべく、既に製品化されている IPM および SPM モータの技術を用い、精密駆動用としてビルトイン型中空 DD モータの開発を行った。

2 DD モータシリーズの概要

今回、開発を行う DD モータシリーズの定格回転数は 100 r/min で、定格トルクが 50 ~ 1200 N·m の範囲をカバーすることを考え、次の点を目標とした。

- (1) 高トルク化 最大トルク 125 ~ 3000 N·m
- (2) 低コギング化 定格トルクの 1.5% 以内 (p-p 値)
- (3) 高効率化 最適巻き線設計による銅損の抑制
- (4) 機械の温度上昇抑制 定格時巻き線温度上昇 70 deg 以下
- (5) コンパクト化 扁平化(モータ長さを短く)

表 1 に、DD モータシリーズの概略仕様を示す。モータ径の種類を少なく(型などの製造コストを抑える)しつつ、さまざまなトルクが出力可能なように基本設計を行った。

表1 DD モータシリーズのラインナップ
Specifications of DD motor series

枠番	寸法			最大トルク		定格(液冷)		定格(無冷却)	
	OD (mm)	ID (mm)	Ls (mm)	TP (N·m)	NP (r/min)	Tc (N·m)	Nc (r/min)	Tc (N·m)	Nc (r/min)
D132SSB	φ 230	φ 132	70	125	200	50	300	25	300
D132SB			90	200		80		40	
D132MB			110	275		110		55	
D132LB			140	375		150		75	
D132LLB			190	550		220		110	
D160SSB	φ 310	φ 210	70	250	100	100	150	50	150
D1606SB			90	400		160		80	
D160MB			110	560		225		112	
D160LB			140	800		320		160	
D160LLB			190	1200		480		240	
D180SSB	φ 385	φ 275	80	400	100	160	150	80	150
D180SB			100	650		260		130	
D180MB			120	900		360		180	
D180LB			150	1300		520		260	
D180LLB			200	1950		780		390	
D225SSB	φ 455	φ 310	85	600	100	240	150	120	150
D225SB			105	1000		400		200	
D225MB			125	1400		560		280	
D225LB			155	2000		800		400	
D225LLB			205	3000		1200		600	

OD ステータ外径 ID ロータ内径 Ls モータ長さ

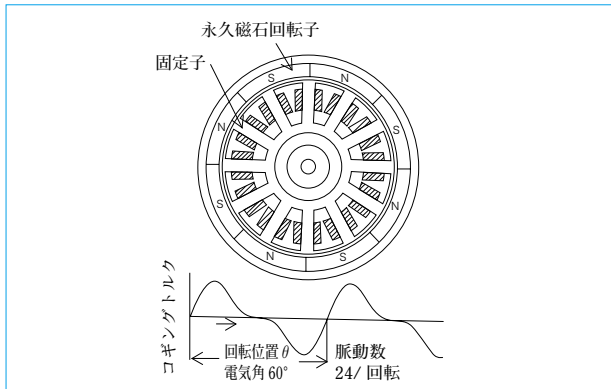


図1 コギングトルク (8極 12スロット)
Cogging torque (8 poles 12 slots)

3 コギングトルク

磁石モータでは、固定子巻線に電流を流さない状態でも永久磁石の磁束が残り、これによって永久磁石と固定子鉄心との間に脈動のトルクを発生する。これをコギングトルクと呼び、永久磁石の極数と固定子スロット数の最小公倍数の脈動を生じ、その値は脈動数に反比例する。例として、図1では極数が8で、スロット数が12であるので、1回転で24の脈動数となる。このコギングトルクが大きいと、装置の精度低下や振動・騒音の原因となる。

コギングトルク低減には、脈動数を増加させる極数とスロット数の選定、磁石磁束波形の正弦波化などが有効である。

4 導入技術

4.1 SPM ロータ構造

低速であることから、磁石が飛散する恐れがなく、かつできる限り高トルクを実現するべく、本モータではロータ構造をロータ表面に磁石を貼り付けるSPM(表面磁石型)構造を採用した。本構造では、磁石磁束を固定子巻線に有効に鎖交させることができ、IPM(磁石埋込み型)構造に比べて、応答性が高いことが大きな特長である。しかし、SPM構造は

表2 スロットコンビネーションによる特性比較
Characteristics comparison of slot combinations

極数	8	10	10	8	8
スロット数	12	12	9	9	6
基本波次数	24	60	90	72	24
コギングトルク	×	△	○	△	×
巻線係数	0.8660	0.9330	0.9452	0.9452	0.8660
有効鎖交磁束	×	△	○	○	×
コイルエンド部高さ	○	○	△	△	×
巻線コスト	△	△	△	△	○
総合	×	△	○	△	×

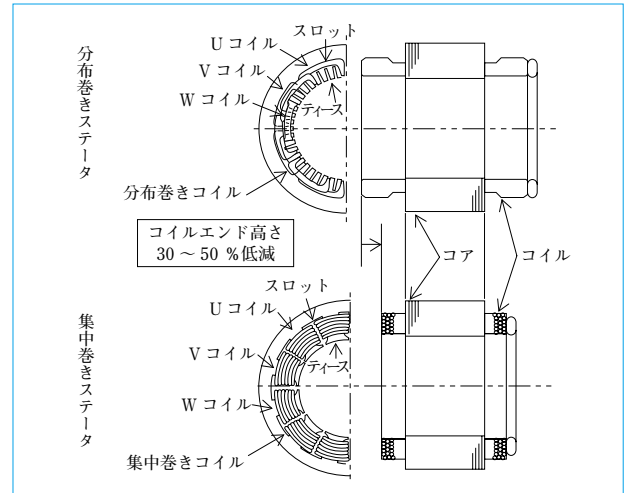


図2 分布巻きと集中巻きのコイルエンド部高さの比較
Comparison of coil end height between distributed winding and concentrated winding

IPM構造に比べると、磁気的なアンバランスの影響を受けやすく、コギングトルクが大きくなる傾向があること、ロータ表面に磁石を貼り付ける構造であることから、組付け作業時に磁石を割ってしまう恐れがある、といった欠点を持つ。

4.2 平板形状高性能磁石

高トルクを実現するべく、磁石にはネオジウム、鉄およびボロン焼結磁石を採用しており、さらに、低コストおよび共用化を図るべく、形状を平板形状とした。

しかし、磁石を平板形状にすると、磁石磁束をなめらかな正弦波状に分布させることが難しく、前項と同様にコギングトルクが大きくなる傾向がある。そこで、本モータでは、磁石の角部形状に工夫を加え、磁石磁束を正弦波状に近づける改善を行っている。

4.3 スロットコンビネーション

極数とスロット数の関係をスロットコンビネーションと呼び、モータ特性の基本波次数は、この極数とスロット数の最小公倍数で決まる。この基本波次数が大きい方がコギングトルクやトルク脈動の振幅を小さくでき、高性能となる。また、このスロットコンビネーションによって決定される巻線係数と呼ばれる主磁束の有効活用度合を示す数値が、1に近いほどより有効活用できており、モータがより高性能となる。

今回開発のDDモータのスロットコンビネーションは、極数：スロット数=10：9系列であり、ロータ1回転当たりのコギングトルクの基本波次数は90の倍数となり、他の組み合わせと比べても、その低減効果は大きい。また、巻線係数も0.9452と、次項で述べる集中巻きの組み合わせのなかでは最も大きくなる(表2)。

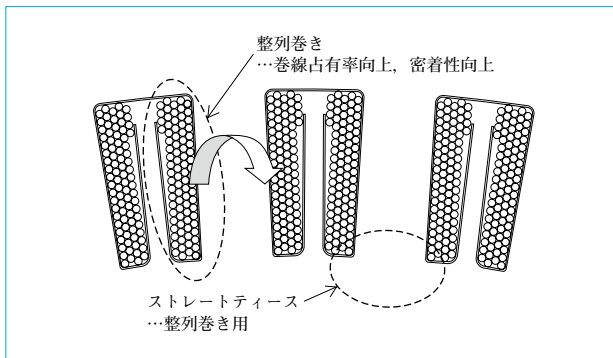


図3 整列巻きおよびステータティース
Perfect layer coil winding and stator teeth

4.4 集中巻線方式

本モータでは、モータの長さを短くでき、コンパクト化が可能な集中巻線方式を採用した。集中巻線方式は、図2の通り、導線を数個のスロットをまたいで巻く分布巻線方式に比べ隣接するスロット間で導線を巻くことから、コイルエンド部の高さを低減することができ、さらに導線長さが短くなることで巻線抵抗の低減、すなわち銅損低減および効率向上のメリットもある。また、固定子ティースに直接巻線することが可能なことから、巻線作業が容易になるというメリットもある。

その反面、分布巻線方式に比べて巻線係数が低くなり、さらにステータスキューといった性能改善策が採用困難であることからトルクなどの性能低下の影響も考えられる。スロットコンビネーションでは、巻線係数が大きくなる組み合わせを選択する必要がある。

4.5 整列巻き

集中巻線方式の導線の巻き方を乱巻きではなく整列巻きとすることでムダのない巻線形状となり、さらにコイルエンド部の高さを低減することができ、また、図3のように巻線占有率、巻線同士やステータコアとの密着性を向上させる。これにより、銅損低減や巻線からステータコアへの伝熱能力向上が図られ、巻線温度上昇を抑制することができる。

その反面、巻線作業に制約を受けることから、分割コアを用いたり、次項で述べるような特殊なスロット形状を採用する必要がある。

4.6 コア形状の最適化

本モータでは、整列巻き巻線を採用し、図3のようにステータティースの根元部をストレートにした特殊スロットとしており、さらにティース部やヨーク部の磁束飽和を考慮したFEM解析による最適化を行っている(図4)。

しかし、このようなスロット形状では、ロータ回転中のティースからティースへの磁石磁束の磁気変位が大きく、コギングトルクやトルク脈動を増加させる原因となる。

4.7 ギャップ長さ(ステータとロータの隙間)の最適化

前述の通り、本モータは、次の理由により、コギングトルクの低減が難しい。

- (1) SPM構造により、磁気的アンバランスの影響を受け易い。
- (2) 平板状磁石により、磁石磁束の正弦波化が困難である。
- (3) 特殊スロット形状(ストレートティース)により、磁石磁束の磁気変位が大きい。

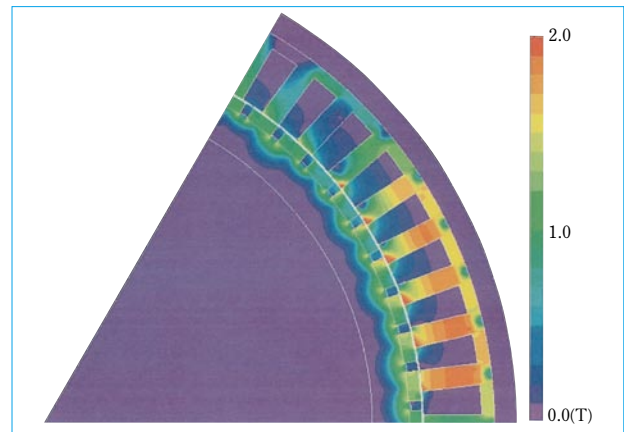


図4 FEM解析結果(磁束密度分布)
FEM analysis results (Distribution of magnetic flux density)

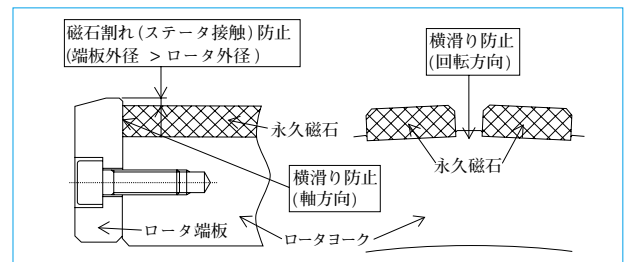


図5 磁石の保護方法
Protection method of magnets

そこで、本モータでは、モータの基本性能はほとんど低下させずに、これらの影響を緩和するべく、FEM解析によるギャップ長の最適化を行った。

4.8 ステータの樹脂モールド化

本モータでは、次の目的により、ステータの樹脂モールド化を行っている。

- (1) 熱伝導性の高い樹脂を使用することで、巻線-ステータコア-フレーム間の伝熱能力の向上を図っている。
- (2) 特殊スロット形状(ストレートティース)により、コアによる巻線の把持が困難である。そのことから、樹脂モールドにより巻線を固定させる。合わせて、通電時の巻線の振動を抑制でき、低騒音および低振動化にも効果がある。
- (3) 負荷が掛かった際、ステータが空回りしないようにするべく、フレーム焼嵌による締付け力に加えて、樹脂モールドによりステータコア-フレーム間の接着も担う。これは、当社の一般的なモータではロックピンを使用しているが、本モータではフレーム外周に液冷用冷媒路を設けていることから、使用することができないことによる。
- (4) 樹脂モールドにより冷却水や研削油などが掛かったときの耐性や耐圧性能向上を図り、ビルトイン型として使用できる構造にしている。

4.9 液冷方式

本モータでは、フレーム外周にらせん溝を設け、そこに液体の冷媒を流通させる、液冷方式を採用した。4.5および4.8にて向上された巻線-コア-フレーム間の伝熱能力と合わせ、巻線で発生した熱を効率よく冷却することができる。

4.10 ロータ端板・ロータヨーク

本モータは、ビルトインタイプであること、SPM構造で

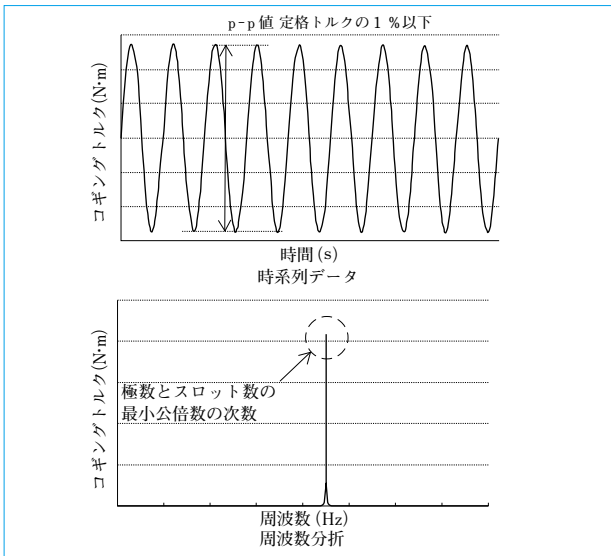


図6 FEM解析結果(コギングトルク)
FEM analysis results (Cogging torque)

あることから磁石の固定やお客様がモータを組付けの際の磁石保護に、次の対策を行っている(図5)。

- (1) 磁石の回転方向へ横滑りを防止するべく、ロータヨークの磁石貼付部を溝形状としている。
- (2) 磁石の軸方向への横滑りを防止するべく、ロータ両端に端板を配置している。
- (3) 組立時、ロータが少しでもステータ内側に入ると、磁石の吸引力により磁石貼付面がステータコアへ当たり、磁石が割れてしまう恐れがある。そこで、ロータ端板の外径をロータ外径より少し大きくすることで、磁石が直接ステータコアへ当たらないようにしている。

5 FEM解析による検証

当社では、寸法形状の最適化(コア形状および磁石形状の決定)を行う際、FEM解析による検証を行っており、コギングトルクや過負荷時におけるトルク定数(=トルク/電流)の減衰率および最大出力時の端子電圧などを確認している。本章では、解析事例として、D160LB(表1)におけるFEM解析結果を紹介する。

図6に、コギングトルクの時系列波形と周波数特性を示す。p-p値は約2.75N・mで、定格トルクの0.46%であり、目標値を満足する結果となった。また、周波数特性としては、極数とスロット数の最小公倍数の次数が支配的であった。

トルク定数減衰率(電流-トルク直線性)は約14.7%となり、また、最大出力時の端子電圧は約180Vで、電源電圧200V以下であることから、すべての運転領域(速度-トルク範囲)において、運転可能であることが分かる。

6 試作品による検証

前章で紹介したモデル(D160LB)を試作し(冒頭写真)、モータ特性の検証を行った。詳細は次に述べるが、製品としては目標を満足する結果となった。

6.1 コギングトルク

コギングトルクは、図7に示す通り、p-p値が6.8N・m、定格トルクの約1.1%であり、結果としては、目標値(1.5%以内)を満足しているが、FEM解析との誤差は定格トルク

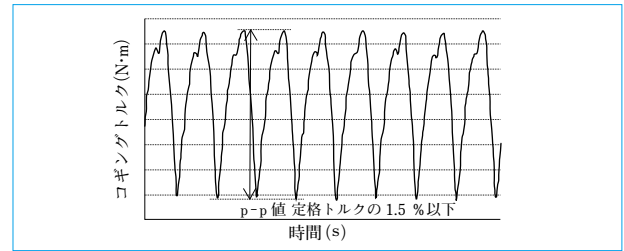


図7 評価試験結果(コギングトルク)
Evaluation test results (Cogging torque)

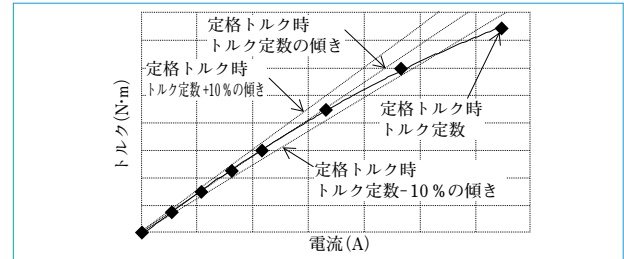


図8 評価試験結果(トルク定数減衰率)
Evaluation test results (Attenuation rate of torque constant)

比で約19%と、かなり乖離が大きかった。また、コギングトルク波形の分析の結果、スロット数と同回数の周期が表れており、これはロータの製造誤差が大きいのを意味している。つまり、FEM解析との誤差は、上記のような製造誤差をFEM解析では考慮していないことから生じたものである。

6.2 定格運転時巻線温度上昇・モータ特性

定格運転時の効率は81%、巻線温度上昇は43degとなり、目標値(70deg以下)を大きく上回る結果となった。

次に、トルク定数減衰率は、図8の傾きから約15%となり、前項のFEM解析結果と同様の結果となった。

最大出力時の端子電圧は約190Vとなり、FEM解析との誤差は約5.6%であった。

7 むすび

本報ではさまざまな技術を導入し、産業機械の直接駆動(ギャレス化)に適用するべく開発したDDモータシリーズの概要を述べた。

- (1) SPMロータ構造およびネオジウム・鉄・ボロン系高性能磁石の採用により、高トルク化を実現した。
- (2) スロットコンビネーション10極9スロット系列の採用、ギャップ長の最適化および磁石角部の最適形状化により、低コギングトルク・低トルクリップルを実現した。
- (3) スロット形状の最適化および整列巻き巻線の採用による巻線占有率の向上および巻線設計の最適化により、高効率化(銅損低減)を実現した。
- (4) ステータの樹脂モールド化により、定格運転時の巻線温度上昇70deg以下を実現した。

より多くのお客様に使用頂けるよう、今後も更なる高トルク化およびトルク脈動低減など、高性能化に積極的に取り組んでいく所存である。

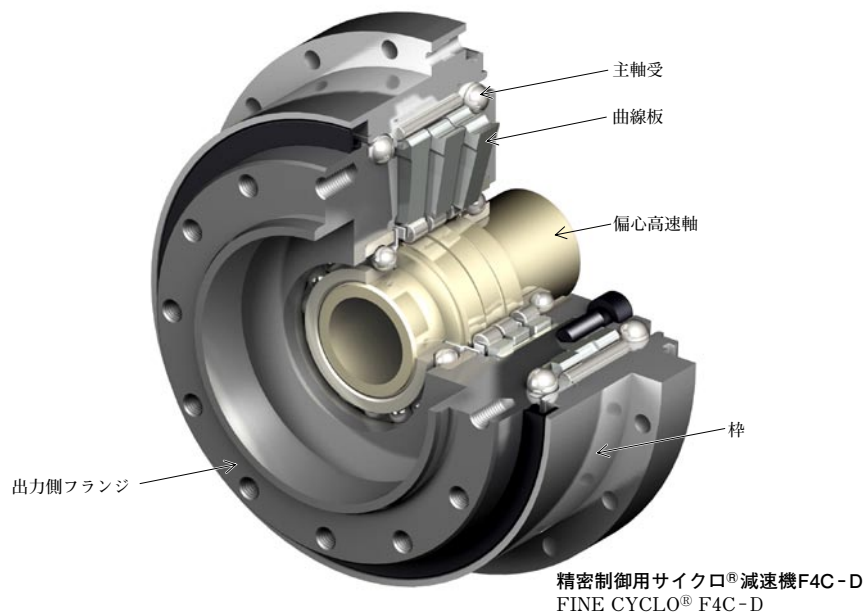
(参考文献)

- (1) 株式会社日立製作所 総合教育センター技術研修所. わかりやすい小形モータの技術. オーム社, 2002, p.11 ~ 18.
- (2) 堀洋一, 寺谷達夫, 正木良三. 自動車用モータ技術. 日刊工業新聞社, 2003, p.44 ~ 55.

精密制御用サイクロ®減速機 F4C-Dシリーズの開発

Development of FINE CYCLO® F4C-D Series

●梅田 和良*
Kazuyoshi UMEDA



1 はじめに

少子高齢化による労働力不足、中国などとのグローバルな競争に対応するべく、ロボットによる省人化、生産性向上が期待されており、更なるロボットの高性能化が重要な課題となっている。

ロボット高性能化の一つの方向性として、コンパクト化があげられる。ロボットのコンパクト化には、ロボットの関節部に使用され動力伝達をしている減速機のコンパクト化(高トルク密度化)が重要な役割を果たしている。

当社はロボット用減速機として精密制御用サイクロ®減速機を市場投入しているが、市場の高トルク密度化の要求を受け開発を進めていたF4C-Dをこのたびシリーズとして完成させた。本シリーズでは、部品一体化技術を開発したことで、従来シリーズに対して大幅にトルク密度を向上させるとともに、高速軸の最大ホロー穴径の拡大、およびお客様部品との取付け部の設計自由度の向上を達成した。

本報では、F4C-Dシリーズの構造特長および製品特長について述べる。

2 基本構造

精密制御用サイクロ®減速機は、次の機構を有する⁽¹⁾。

- (1) 内歯車に円弧歯形および遊星歯車にエピトロコイド平行曲線を採用することで、歯先干渉がなく、多数の同時噛み合い数を持つ内接式遊星歯車機構である(図1)。
- (2) 高速で公転しながら、同時に低速で自転している遊星歯車の自転だけを円弧歯形(内ピン)で取り出す、等速度

内歯車機構である(図2)。また、内ピンはクランク軸(高速軸)中心と同心円上に配置されているので、高速軸と低速軸が同心となっている

この二つの機構を組み合わせ、内ピンにローラを装着し、転がり接触にすることで、高いギヤ効率が得られるようにした減速機である(図3)。

3 構造特長

従来品F2C-Aシリーズの構造を図4に、新製品F4C-Dシリーズの構造を図5に示す。

従来品F2C-Aシリーズでは、「出力側フランジと内ピン」、「出力側フランジと主軸受内輪」および「偏心高速軸と軸受内輪」を別々の部品として購入、または製作し、組み合わせていた。新製品F4C-Dシリーズではこれらを内製化し、設計、加工および熱処理を工夫することで一体化を達成した(図6)。

これら部品の一体化により、スペースの有効活用が可能となり、減速機の高トルク密度化を達成することが可能となった。

4 製品特長

- (1) 従来品に対して、許容ピークトルクが最大24%向上した。
- (2) 従来品に対して、許容モーメントが最大45%向上した。
- (3) 従来品に対して、高速軸の最大ホロー穴径が最大33%拡大した。
- (4) 出力側フランジと内ピンの一体化により、出力側フラ

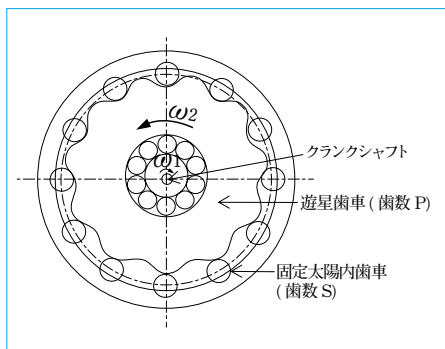


図1 内接式遊星歯車の機構
Internal planetary gearing

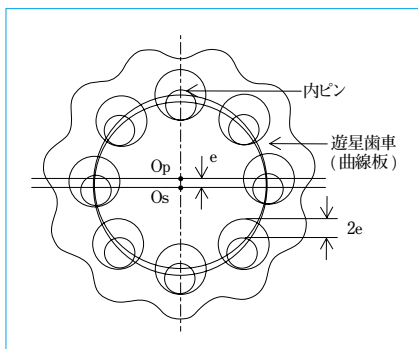


図2 等速度内歯車の機構
Constant speed internal gearing

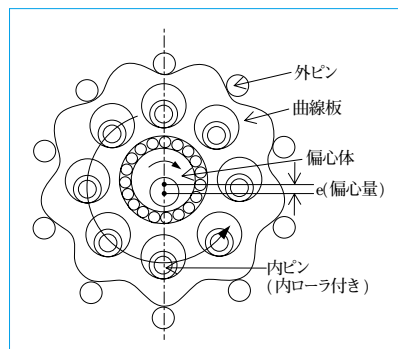


図3 サイクロ®減速機の機構
Structure of CYCLO® DRIVE

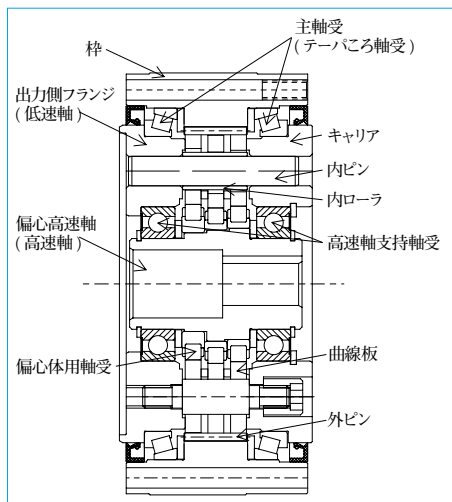


図4 F2C-Aの構造
Configuration of F2C-A

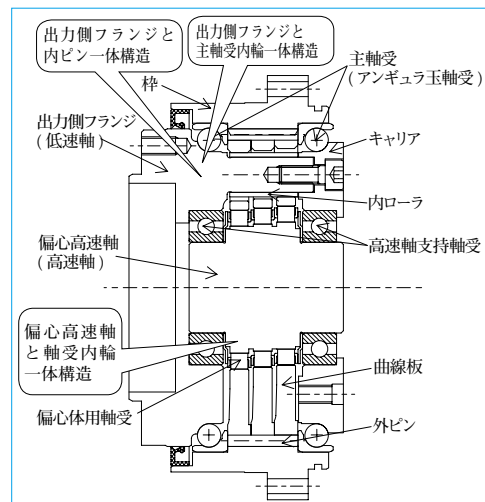


図5 F4C-Dの構造
Configuration of F4C-D



図6 一体化部品例
Example of integrated parts

表1 主要仕様⁽²⁾
Major specifications

項目	D 15		D 25			D 30			D 35			D 45		
	59比	89比	59比	89比	119比	59比	89比	119比	59比	89比	119比	59比	89比	119比
定格トルク (出力 15r/min)(N·m)	201	178	434	383	351	566	500	458	800	707	648	1565	1383	1267
許容ピークトルク (N·m)	417		883			1226			1717			3188		
瞬時許容最大トルク (N·m)	834		1766			2453			3581			6377		
許容モーメント (N·m)	883		1777			1668			1962			2943		
許容スラスト荷重 (N)	3924		3924			5199			7848			10791		
ロストモーション (arcmin)	1		1			1			1			1		
ばね定数 (N·m/arcmin)	49		112			173			220			450		
モーメント剛性 (N·m/arcmin)	510		833			1128			1472			2453		
許容最高入力回転数 (r/min)	6150		5050			4550			3950			3150		

ンジの取付けボルト穴位置の自由度が向上し、お客様部品との取付け部の設計自由度が向上した。

- (5) 出力側フランジ面がフラットなことから、この部分のシール作業が容易である。また、高速軸が減速機に支持されているので、モータと高速軸との連結が容易である。F4C-Dシリーズの主要仕様を、表1に示す。

5 おわりに

- (1) ロボット用減速機として使用される精密制御用サイクロ®減速機F4C-Dシリーズを開発した。
(2) F4C-Dシリーズは従来品に比べ、「許容ピークトルク

が最大24%向上」、「許容モーメントが最大45%向上」、「高速軸ホロー穴径が最大33%拡大」および「お客様部品との取付け部の設計自由度向上」を達成した。

(参考文献)

- (1) 山本章. サイクロ®減速機6000#シリーズの開発. 住友重機械技報, no.156, 2004.
(2) 住友重機械工業株式会社カタログ. 精密制御用サイクロ®減速機F4C-Dシリーズ. F2002-1.0.

精密制御用サイクロ[®]減速機 F1C-Eシリーズの開発

Development of FINE CYCLO[®] F1C-E Series

●山本 章*
Akira YAMAMOTO



F1C-E Series

1 はじめに

精密制御用の減速機は主としてFA関連機器の駆動装置としてサーボモータに結合され、位置制御、軌跡制御、トルク制御および速度制御などに使用される。その用途は多岐にわたっているが、特に小型化、高速化が進むロボットの関節部に組み込まれるものは、限られたスペースの中に配置されながら非常に大きな加速・減速トルクが作用し、かつ曲げモーメントも同時に負荷される厳しい条件下で使用される。

これらの減速機には、より小さな質量、体積で大きなトルクを伝達するコンパクト化要求(高トルク密度化要求)および減速機内部にケーブル類を通す大径中空貫通軸の要求が高い。また、精密制御用として高い回転精度と剛性が求められることはもちろんである。

当社の精密制御用減速機サイクロ[®]減速機においてもこの要求に対応すべく、F4C-DシリーズおよびF2C-Cシリーズを開発、商品化してきた。本報ではこれら精密制御用減速機の概要と、さらに軸方向の薄型化を図り大きな中空貫通軸を持つ新商品F1C-Eシリーズについて述べる。

2 精密制御用減速機の概要

現在市販されている精密制御用減速機には多くの種類があるが、大きくは減速機のバックラッシュ(またはロストモーション)のレベルで分類される。

精密制御用減速機の静的な状態での特性値は、出力軸トルクと出力軸ねじれ角の関係を図で表した、ヒステリシスカーブとして表現するのが一般的である(図1)。バックラッシュとは、ヒステリシスカーブから読み取れる減速機の入出力軸間に存在するガタ(図中のロストモーション)のことであり、多くは入力軸を固定した場合の出力軸の回転角度として表され、分(arcmin)単位で表示される。

一般的に歯車のバックラッシュは、加工上避けられない誤差や負荷による変形を吸収し、歯車のスムーズな回転に必要な隙間であるが、これが大きいと特にサーボを位置制御用途で使用する場合には正確な位置決めが困難となる。また、いわゆる制御上の不感帯として作用して障害を引き起こす場合がある。バックラッシュが1~3分程度のもは、主として高速の搬送装置や工作機械の一部に使用され、多くはインポリュート歯車による遊星歯車機構が用いられる。遊星歯車機構にもいくつか種類があるが、多くはクドリヤツェフの分類⁽¹⁾による2K-H型かK-H-V型が用いられる。2K-H型は減速比が10以下であれば小さい外径でコンパクトにできるが、10を超える減速比では2段減速が必要となることから軸方向に長くなる。また1段減速、2段減速とも中空貫通軸構造とするのは困難である。バックラッシュが1分以下のものは、主としてロボットなどの関節部に使用され、減速機の構造は、K-H-V型の遊星歯車機構を用いたものが一般的である。この構造は扁平な形状で高減速比を得ることが可能であり、また中空貫通軸構造にしやすい利点がある。非常に高い精度と剛性を持つ減速機であるが、その構造上、低減速比を製作することが困難なことから、減速比30-250程度のもが主体である。

3 薄型化への取組み

本報では、コンパクト化要求のなかでも特に軸方向長さの短縮に着目して開発したF1C-Eシリーズについて解説する。

F1C-Eシリーズは前述のK-H-V型遊星歯車機構を持ち、バックラッシュ1分以下で小型ハンドリングロボットを主な用途とする。その商品化に当たっては、徹底的な薄型化を目指して新規技術の開発を行った。主なものは、(1)主軸受と出力軸内歯車の一体化、(2)軸方向寸法を短縮した円筒コロ軸受の開発、および(3)入力フランジと内ピンの一体化である。

まず、(1)の主軸受にはクロスロー軸受を採用し、軸方向寸法の短縮と曲げモーメント剛性確保を図っている。さらに、このクロスロー内輪は出力軸でもある内歯車と一体化されており、薄型化へ大きく寄与している。(2)の円筒コロ軸受は偏心カムとして公転運動を与える重要部品であるが、軸方向の長さを抑えるべく軸受保持器の設計を全面的に見直しており、必要な強度確保とコンパクト化を達成している。(3)は従来別部品として製作されていた入力フランジとピンを一体化し、ピンの保持に必要なであったフランジ部の肉厚を削減している。これら新規技術を適用した薄型化により、構造面で減速機全体の剛性にどのような影響があるかの評価に、減速機全体を3Dモデル化し、その変形特性を組立状態でシミュレートした上で各部寸法を決定している(図2)。このシミュレーションによって各部の形状最適化が試作前に可

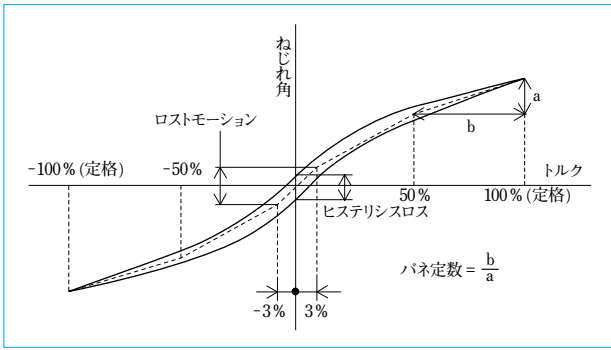


図1 ヒステリシスカーブ
Hysteresis curve

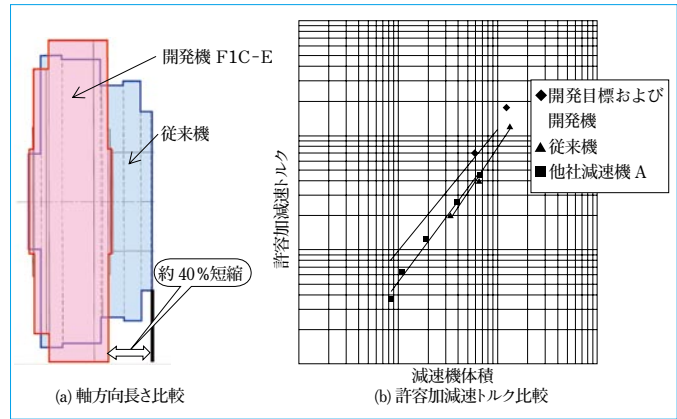


図3 開発機のトルク密度
Torque density

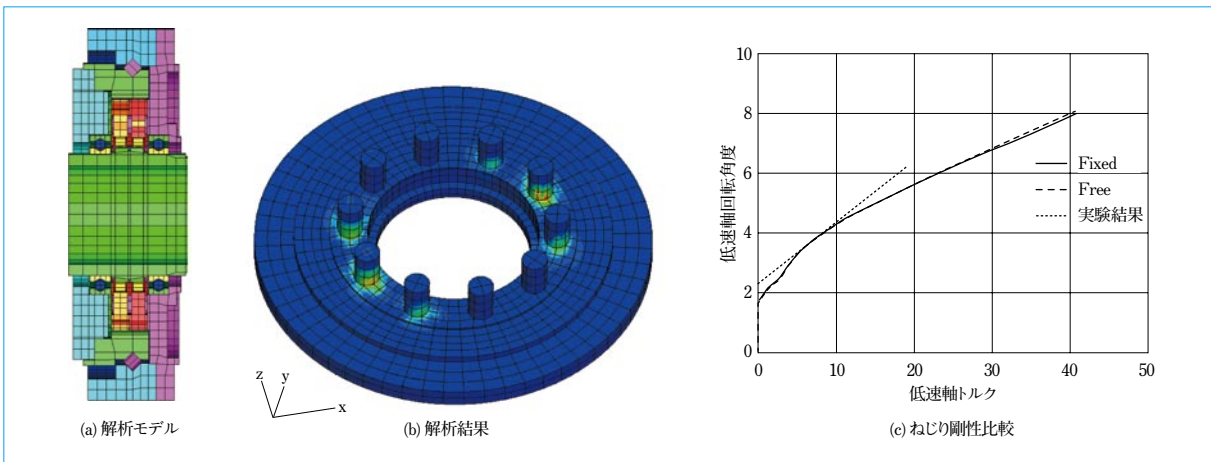


図2 解析による性能予測
Performance forecast by 3D simulation

能となり、軽量化と開発期間の短縮が図られている。これらの技術開発により F1C-E シリーズでは、ほぼ同一外径の減速機で軸方向長さを従来比約 40% 短縮しつつ許容加減速トルクを 10% 向上させている (図 3)。

4 今後の課題

次世代の産業用ロボットではさらに設置面積の削減や省エネルギー化が進み、その用途も現在主流である自動車製造ライン向けから一般機器の組立、搬送へ拡大すると予想される⁽¹⁾。次に、ロボットを中心とする精密制御用減速機の今後の課題について述べる。

サーボモータの小型化は同時に高速化をも促進し、その回転数は従来は毎分 3000 ~ 5000 回転程度であったが、現在は瞬間的に毎分 6000 回転以上のものも珍しくなくなっている。このような高速回転化に伴う発熱、温度上昇の増大に対応するべく、歯車、軸受およびシール部の表面性状改善、潤滑能力向上などによる低摩擦化技術も開発が進んでいる。また、機械装置の省エネルギー化に大きく影響する減速機の伝達効率およびランニングトルクは速度や負荷への依存性が高く、特に低速、低負荷率において伝達効率が低い傾向がある。常に加減速を繰り返すような使用方法が多いロボット用途では、省エネルギー化および制御性向上の面から、ある特定の領域だけでの効率でなく、運転領域全般にわたる高効率が求められる。特に、低速度域での低摩擦化技術の開発が期

待される。

コンパクト化、高トルク密度化の観点からは、あらかじめサーボモータと減速機を一体化したギヤモータとして構成し、ムダなカップリングを排してアクチュエータとしてのコンパクト化を目指したものもある。サーボモータと減速機を分離できることが必要な用途もあり、一概に言えないが、性能向上を追求する用途では、減速機とモータとの一体化は今後も進むものと思われる。

5 おわりに

(1) 精密制御用減速機においてコンパクト化、薄型化および大径中空貫通軸の要求が高い。K-H-V 型遊星歯車機構を用いて、これらの要求に対応した精密制御用減速機 F1C-E シリーズを開発した。

(2) 開発に当たって、複数の主要部品を一体化するとともに減速機全体を 3D モデル化し、その変形特性をシミュレートすることで形状最適化を図り、従来比 40% 軸方向寸法を短縮し許容加減速トルクを 10% 向上させた。

今後は、顧客要求の更なる満足を目指して、精密制御用減速機の性能向上と機種拡大を図る所存である。

(参考文献)

- (1) 両角宗晴. 遊星歯車と差動歯車の設計計算法. 1984.
- (2) NEDO. 技術戦略マップ(ロボット)2008.

モータの高効率法規制の現状と動向

Trend of Motor Efficiency Regulations

● 荻原 勇 男*
Isao OGIWARA



高効率モータ
Efficient motor

1 はじめに

世界で3億台のモータシステムがあり、モータの電力消費量は年間7400TWhで世界の電力消費量の40%を占めていると推定されている。ピーク負荷時には設備容量1600～2300GWeに相当し、電力消費量をCO₂排出量に換算すると4300Mt/yに相当する。モータシステムに対して高効率化による省エネルギーが着目されており、エネルギー削減を行う余地は全体で20～30%であると推定され、有望な省エネルギー対象分野となっている。

2 現在の高効率規制

2.1 日本国内の高効率規格

1997年にいわゆる「省エネ法」(エネルギーの効率的使用、無駄遣いの排除推進する総合的な法律)が制定され、同年に「工場におけるエネルギー消費量を年平均1%改善」の告示がなされている。さらに、1999年4月に「計画的な省エネ投資の推進」と「対象工場・事業所の拡大」の改正が行われ、高効率化推進の活動が行われている。

また、高効率モータ規格としては社団法人日本電機工業会より技術資料として「省エネルギーのための電動機の選定と適用、JEM-TR137」が適用されてきた。2000年7月20日に高効率モータのJIS規格「高効率低圧三相かご形誘導電動機、JIS C 4212」が制定され、現在はJISが基本規格として活用されている(図1)。規格および高効率化を推進する法はあるが、強制力はなく、高効率モータ採用の動きは小さい。

2.2 米国およびカナダの高効率法規制

1992年に米国で成立したエネルギー政策法(EPA)により1997年10月24日以降、米国で販売されるモータ、またはモータを組み込んだ製品はモータ効率値の規制対象となった。これによって、モータがエネルギー効率基準を満たさない場合は、罰則が適用されることになり、米国では強制力を持った高効率規制が行われている。(対象1HP～200HP、対象電圧230V&460V、商用電源モータ)ただし、現状では

ギヤモータなどは対象外となっている。

隣国のカナダでは、1992年にエネルギー効率条例(EER)と1995年にエネルギー効率規格(EER)がNRCanにより制定された(図2)。1995年2月3日以降に輸入されるギヤモータ・耐爆モータに規制が追加され、効率基準値を満たしていないモータ・ギヤモータに対して輸入禁止処置がとられている。これにより、ギヤモータについても高効率モータで対応することが義務づけられた。

2.3 欧州(EU地域)のモータ効率区分

ECは、各モータメーカーに対して効率区分によってモータの選定が行えるような表記方法を考案するよう勧告を行い、これに応じてCEMEP(European Committee of Manufacturers of Electrical Machines and Power Electronics 欧州のモータメーカー業界団体)は自主合意として欧州効率表記案を策定した(図3)。

効率区分は三つに分けられ、効率値が高い順にEFF1、EFF2、EFF3となる。EFF1は、高効率レベルの効率区分でJIS C 4212に対して若干高い効率値となっている。この区分がEU地域での効率規格に準じて使用されており、有力メーカーではEFF1の商品をシリーズ化するなど、高効率化要請に応じた活動をしている。ただし、米国のような強制力を持った高効率規制は行っていない。

3 今後の高効率化の動向

地球温暖化対策などの背景からモータの高効率化に注目が集まっているが、高効率モータが広く普及しているとは言い難い状況が続いている。これはモータの効率を向上する場合にモータが大型化したり、高性能な材料を使用することでコストが上昇することが大きな要因であるが、各国・地域でモータ効率の区分や規格が統一されていないことも原因としてあげられている。本章では、現在準備が進められている統一的な効率規格制定と今後の高効率規制の動向について述べる。

3.1 統一的な効率クラスの規格

高効率モータの普及の阻害要因としては、国によって効率

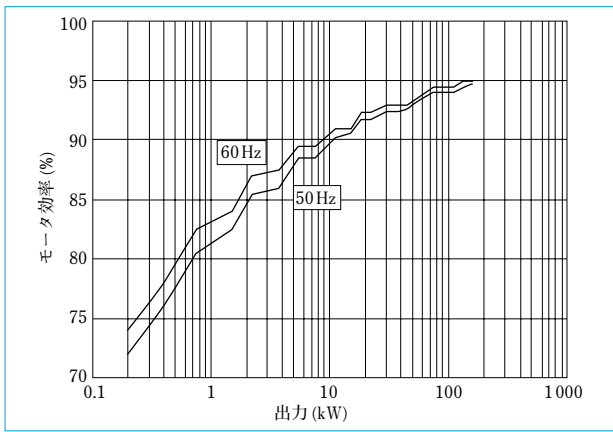


図1 JIS C 4212のモータ効率 (4極)
Motor efficiency of JIS C 4212(4 poles)

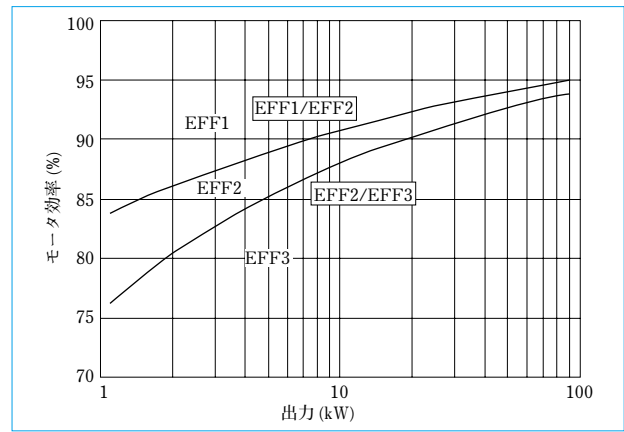


図3 CEMEPのモータ効率区分 (4極 50Hz)
Motor efficiency of CEMEP(4 poles 50 Hz)

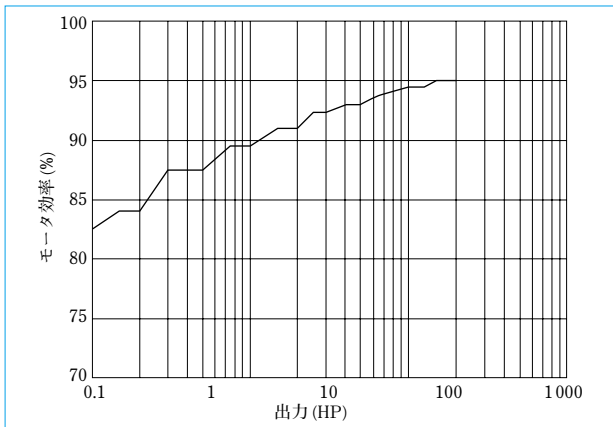


図2 EPAct, NRCANのモータ効率 (4極 60Hz)
Motor efficiency of EPAct, NRCAN(4 poles 60 Hz)

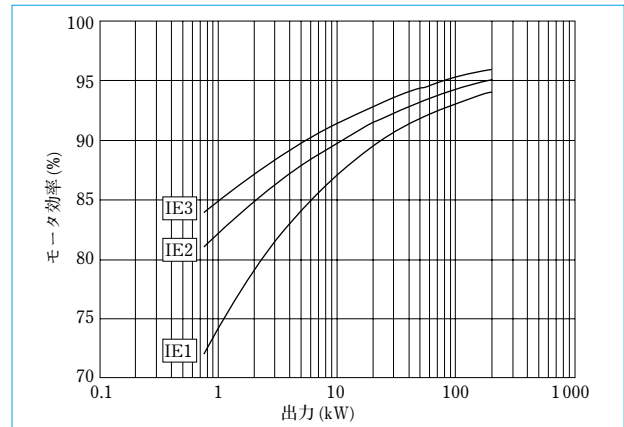


図4 IEC 60034-30のモータ効率区分 (4極 50Hz)
Motor efficiency of IEC 60034-30(4 poles 50 Hz)

値の基準と測定方法が異なること、および共通の明示(ラベル)制度がないことがあげられている。

各国で効率の基準値が異なることについては、IECで、IEC60034-30として、統一的な効率クラスの規格の策定が行われている(図4)。効率クラスは、IEコードで表示するシステムが検討されており、効率値の高い順にIE4、IE3、IE2、IE1となる予定である。IE4は新設であり、NEMA(米国電機工業会)で規定される最高効率値のNEMA Premiumを超える効率レベルに相当し、現状では参考値の扱いとなっている。IE3は高効率を超える(プレミアムと称される)レベルの効率クラスで、NEMA Premiumで規定する効率レベルに相当する。IE2は高効率レベルの効率クラスで、JIS C 4212やCEMEPの規定するEFF1に相当する。IE1は標準レベルの効率クラスで、JIS C 4210(一般用低圧三相かご形誘導電動機)やEFF2で規定する効率レベルに相当する。この新規規格は50 Hzと60 Hzの両方を対象とし、0.75 kWから370 kWまでの2、4、6極モータを範囲とする予定で、汎用モータのみではなくギヤモータおよびブレーキ付きモータなども対象となる予定である。

また効率値の明示(ラベル)については、IEコードと効率値の銘板での表示が要求される予定である。

3.2 高効率規制の動向

モータの高効率化が広く進んでいない状況であるが、地球温暖化対策や資源価格の高騰を受け、強制的な規制を実施する動向が強まっている。現在 MEPS (Minimum Energy

Performance Standard 最低エネルギー効率基準)という言葉、考え方をういて規制の準備がなされている。

効率の基準値より低いモータの製造や販売を禁止する、強制的な MEPS は先に述べた米国やカナダなどを含め、10ヶ国で行われている。この動きは今後拡大すると予想されており、EU地域ではIEC60034-30の制定後にIE2(高効率)レベルの規制を実施すると考えられている。EU地域では新規規格の対象範囲に準じる範囲を対象とする予定で、ギヤモータを含む広い範囲で規制が2011年頃の実施されると考えられている。また、日本でも同様な構想があり、2012年頃にEU地域と同様の規制が実施される可能性がある。

3.3 米国の動向

米国では2.2で述べた高効率規制に加え、2001年にNEMA Premiumが規定されるなど、モータの強制力を持つ高効率化を進めてきた。今後、NEMA Premiumレベルでの強制的なMEPSの開始が提案される予定である。

4 おわりに

- (1) 現在の高効率法規制、今後の規格策定およびMEPSの動きについて述べた。
- (2) 高効率モータの普及を目的とした規格、規制が検討されており、当社はこれらの動きに対応していく予定である。

(参考文献)

- (1) 社団法人日本電機工業会. 電機, Oct., 2007, p.14 ~ 19.

精密制御用サイクロ[®]減速機 センターホロー形減速機

FINE CYCLO[®] Hollow Shaft Type



精密制御用減速機の市場は、自動車産業や工作機械産業などの市場拡大に牽引され、年々その規模を拡大している。自動車産業では、溶接ラインや組立ラインの自動化に多軸制御ロボットが多く使用されており、精密制御用減速機はその関節部を駆動する重要な用途に採用されている。

当社ではこの市場向けにサイクロ[®]減速機Fシリーズを供給しているが、近年ではロボットの多軸化やロボット先端に取り付ける装置の高度化に伴い、電源ケーブルやセンサケーブルの数が増え、それらを容易にかつ信頼性高く配線したいという市場要求があった。これらの要求に応じて、高剛性かつ減速機中央に大径の貫通穴を有するセンターホロー形減速機を開発した。

主要仕様

形式	中空軸タイプ
定格出力トルク	3139 N・m (出力 15 r/min 時)
減速比	87
ロストモーション	1arcmin 以下

特長

- (1) 余裕をもってお客様装置のケーブルを配線できる。サイクロ[®]減速機による高トルク密度化技術により減速機の外形はそのままに大きなセンターホロー径を実現した。コンパクトな設置でも容易な配線作業が可能となり、

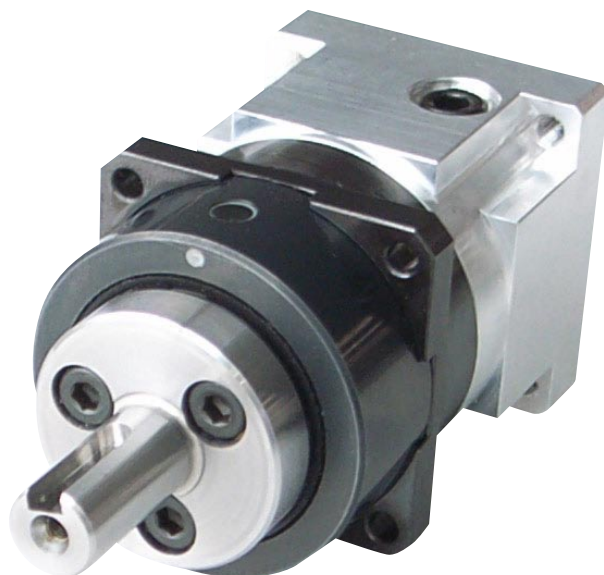
またケーブルとセンターホロー穴との干渉が少なくなり、信頼性の高い配線が可能となる。

- (2) 独自の解析技術による最適構造設計および高剛性軸受の採用により、高いねじり剛性とモーメント剛性を実現した。減速機の応答性が向上し、サーボモータと組み合わせて使用した際には高い制御性が得られる。
- (3) 本減速機は密封構造タイプに対応することも可能であり、お客様が準備する部品を最小限にすることができるシンプルデザインである。

(PTC事業部 為永 淳)

精密制御用減速機 IBシリーズP100

Low Backlash Planetary Gear Reducer IB Series P100



精密制御用減速機であるIBシリーズは、各種FA機器をはじめ、医療機器および工作機械などの各種精密位置決め制御用として、幅広く使用されている。近年の環境問題および省エネルギーへの関心の高まりから、高効率化およびコンパクト化が求められている。

それらのニーズを捉え、既存のIBシリーズP1タイプに最小枠番P100を開発した。

主要仕様

最大外形寸法	□ 40mm
バックラッシ	3 arcmin
許容出力トルク	3.5 ~ 6.9 N·m
許容加速トルク	11.5 ~ 16 N·m
減速比	3.7, 5, 9, 11, 15, 21, 33, 45 (8種類)

特長

- (1) 当社現行機種に対し、減速機内部のトルク損失を当社比較で約70%改善した。その結果、高効率を達成している。
- (2) 業界トップクラスのコンパクト性を達成している。
- (3) 各社サーボモータに対応し、取付けが簡単である。
- (4) グリース封入により、長期間メンテナンスは不要である。
- (5) フランジ形状出力軸を標準化し、据付け自由度が高い。

(PTC事業部 石塚 正幸)

多軸サーボアンプ MD-100シリーズ

Multi-axis Servo Amplifier MD-100 Series



本シリーズは、搬送ロボットや量産型産業機械への組み用に特化した多軸サーボドライバであり、当社メカトロニクス事業部との協業で開発した。容量帯は、50～400Wをラインナップした。

主要仕様

電源部

容量範囲	三相 AC170～240V 1～3kW(3容量)
定格出力電流(DC)	7A(1kW), 14A(2kW), 20A(3kW)
制御電源容量	8軸以下 DC15V/40W, DC5V/40W 16kW以下 DC15V/80W, DC5V/80W
概略寸法	1～2kW 60(W)×94(D)×185(H)mm 3kW 70(W)×94(D)×185(H)mm

ドライバ部

容量範囲	三相 AC170～240V 50～400W(4容量) (50W, 100Wは1ユニットに2軸内蔵)
定格出力電流	0.5～2.8A
電流制御方式	IGBTによるPWM方式(三相正弦波駆動)
概略寸法	30(W)×94(D)×185(H)mm

特長

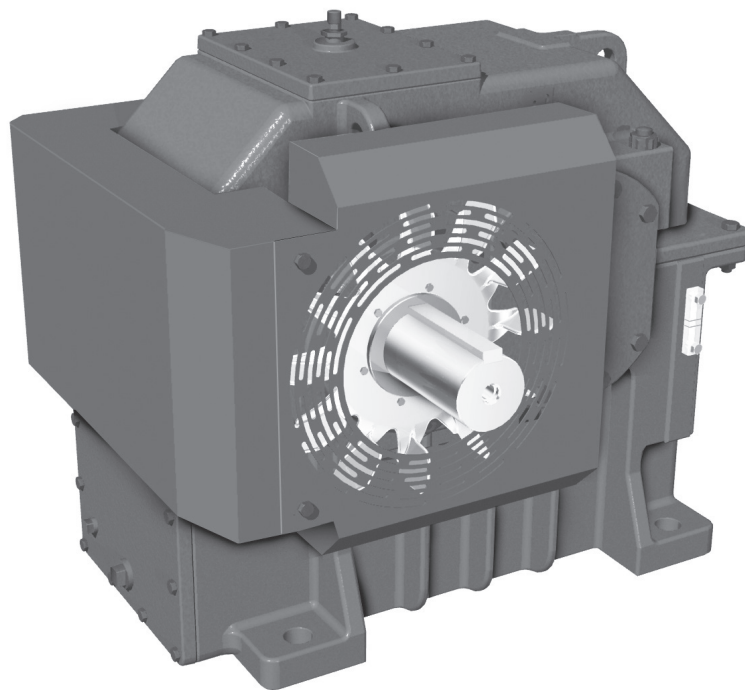
(1) 汎用製品(単軸)と比較し量産型装置への組み用に特化することで、装置の小型化および省配線化を可能とした。

- (2) 電源部とドライバ部を分離し電源回路を共有化することで、装置全体の負荷率に応じた電源容量の選定(小型化および省エネルギー)が可能である。また、モジュール構造にすることにより、各装置に最適な仕様で提供することが可能である。
- (3) 当社メカトロニクス事業部製のCPUモジュール、コントロールモジュールおよびI/Oモジュールと組み合わせることで、高速・高精度な位置決め制御が可能である。また、コントロールモジュールを装置仕様に合わせてカスタマイズすることで、トータルコストの低減、小型・省配線が可能である。
- (4) 専用の調整支援ソフトを使用することで、全軸の一括モニター、パラメータ調整が可能で、効率的なセットアップおよびメンテナンス作業が可能である。
- (5) 50W, 100Wのドライバは、1ユニット(モジュール)に2軸を内蔵することで、装置の小型化およびコストの低減が可能である。

(PTC事業部 鷹簀 勝彦 メカトロニクス事業部 木根原 慎一)

パラマックス®一段形減速機 SPAシリーズ

Single Stage PARAMAX® Drives SPA Series



一般産業用機械においては生産性の向上が要求され、高速化に低減速比の減速機が必要とされるケースが増えてきている。今回、これらの需要を受けて一段形の専用シリーズを開発した。

一段形減速機は、高速・連続運転による発熱が問題視されることが多く、また長時間の軸受寿命も要求される。当社では、ベベルヘリカル減速機の標準シリーズとしてPARAMAX®9000を有しているが、一段形に特化した設計とはなっていない。上記の一段形特有の要求仕様に対しては、構成部品のバランス上、サイズの大きな減速機を選定せざるを得ない場合が多かった。

今回開発した減速機は、これら一段形の要求仕様を満たすように専用設計したものである。まず、一段形専用ハウジングを用意することで表面積を確保し、放熱量を高め、温度上昇を抑制した。さらに、冷却装置であるクーリングコイルを取付け可能な構造とした。クーリングコイルは、従来の冷却ファンおよびオイルクーラユニットに加え、冷却方式の選択の幅を広げ、かつコストパフォーマンスにも優れたオプションである。本シリーズでは、メンテナンス性を考慮し、減速機を分解することなく、脱着可能な構造としている。軸受についても、専用ハウジングの採用で設計の自由度が広がり、大容量の軸受を選定することが可能となった。また、減速比のキザミを細かくし、従来機の倍の減速比を準備した。特に、需要の見込まれる速比帯においては、さらに多くの減速比を

オプションとして準備しており、最適な減速比の選定を可能にしている。

主要仕様

枠番	060 ~ 105 (全7サイズ, うち3サイズ先行発売)
減速比	1.25 ~ 5.0 (R20 数列, 一部 R40 数列を含む)
出力トルク	20 ~ 130 kN・m (先行発売, 20 ~ 50 kN・m)
軸形式	平行軸

特長

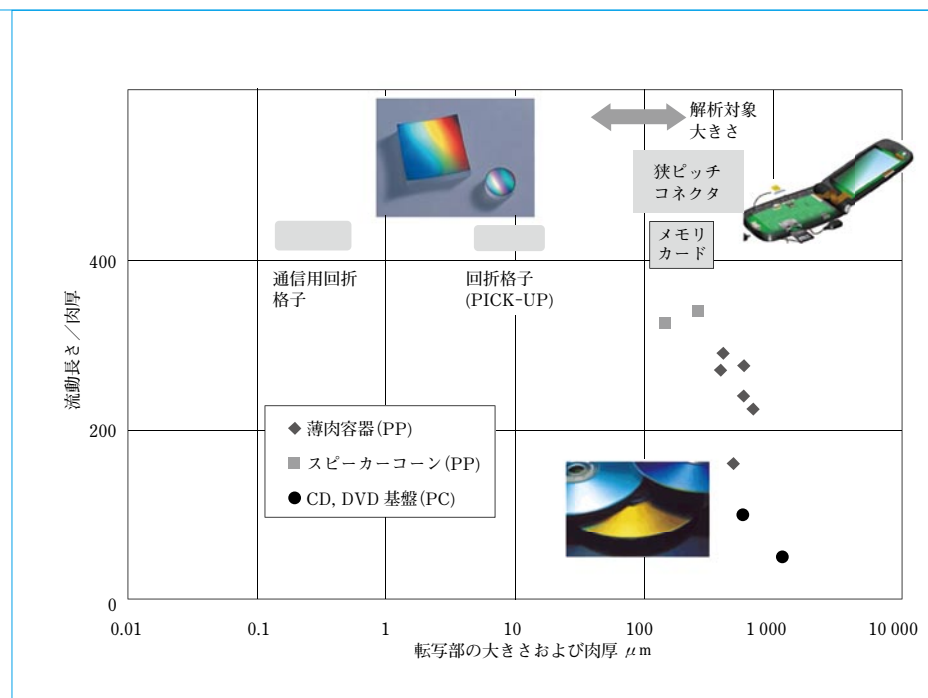
- (1) 熱定格を考慮した専用ハウジングとなっている。
- (2) クーリングファンおよびクーリングコイル (脱着式) をオプションとして準備している。
- (3) 軸受寿命は10万時間以上で設計されている。
- (4) 豊富な減速比を準備している。

(PTC事業部 山崎 泰正)

微細転写領域における樹脂流動解析

Flow Simulation of Polymer Melts for Micro-scale Transcription

●原 崎 務*
Tsutomu HARASAKI



射出成形における微細化の傾向
Trends for finer transcriptions
by injection molding

近年は射出成形によるマイクロ領域における転写加工が広く行われるようになり、それに伴い成形シミュレーションも高品質を保証する成形条件を予測するという重要な役割を担いつつある。微細転写になればなるほど、成形条件次第では熔融樹脂表面の固化層形成による充填不良が起こりやすくなる。

今回 CIP 法を用いた流動解析により、金型温度と樹脂流速が樹脂表面の冷却および固化層の発達と、その結果としての微細溝への充填に与える影響について検討した。計算結果は金型初期温度を高温に保つ、あるいは樹脂の射出速度を高速にすることが微細転写ではより望ましい、という事実と一致した。

本報では、幾つかの解析結果とともに、CIP 法の特徴についても述べる。

Nowadays, the micro-scale patterns formed by injection molding become prevalent, and, as a result, the flow simulation has been playing important role of prediction for the high qualities of transcription. Finer transcriptions require more cautious molding conditions, because of the insufficient transcription due to the formation of solidification layers on the melt surface. We have applied the flow simulations based on the CIP method for the micro-scale transcription. The effects of mold temperature and polymer velocity on the cooling of the melt surfaces and growth of the solidification layers, and, as a result, the filling up into small concaves were examined. The results of simulations which indicate high mold temperature and fast injection velocity are more desirable, coincide with the known facts in the field of production. In this paper, the results of the flow simulation and also the features of CIP method are described.

1 まえがき

よく知られているように、マイクロ/ナノ技術は近年めざましい発展を遂げ、成形加工分野においても電子部品などをはじめとしますますます微細化の傾向が進んでいる。微細な形状になればなるほど、熔融樹脂が低温の金形に接する比表面積が大きくなることから、樹脂表面がより冷却されて固化しやすくなり、充填不良も起こりやすくなる。したがって、微細領域に充填・転写を行う際には金型温度を高めに設定する、あるいは高速射出を行う⁽¹⁾など、適切な成形条件を慎重に選ぶ必要がある。この条件選定に際して、樹脂流動解析が数値実験の役目を果たすことができれば大幅なコスト削減が期

待できる。ただし、射出成形プロセスは高粘性の樹脂が熱移動を伴いながら金型内を高速で移動する現象であり、射出成形シミュレーションは数値流体解析にとっては高粘性流体の移動境界問題を解くという難題の一つであるといえる。

2 樹脂流動解析手法

2.1 数値解析手法の検討

射出成形の樹脂流動解析については、これまでさまざまな専用ソフトが開発され、実績を積み上げてきた。また一方では、数値流体解析の汎用ソフトを樹脂流動解析に適用する試みも一部では行われている。前者は通常 2.5 次元解析と呼ばれており、流れ方向は圧力勾配の方向と一致するといういわ

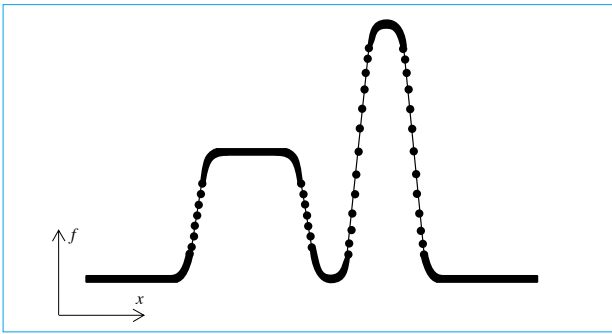


図1 1次風上差分法による矩形波の移流(計算ステップ84)
Advection of square waves by first upwind method (Computational step 84)

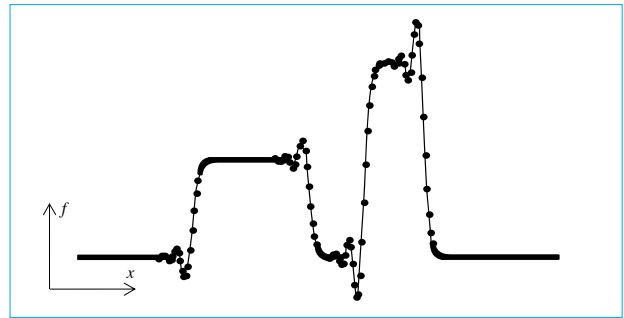


図2 Lax-Wendroff法による矩形波の移流(計算ステップ84)
Advection of square waves by Lax-Wendroff method (Computational step 84)

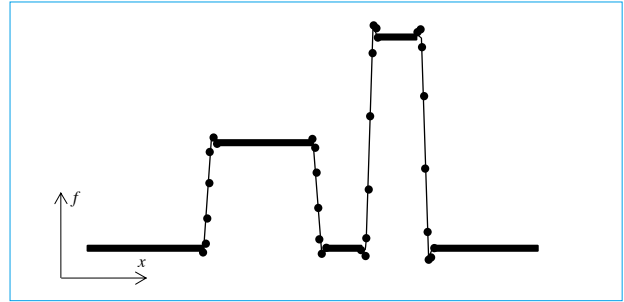


図3 CIP法による矩形波の移流(計算ステップ237)
Advection of square waves by CIP method (Computational step 237)

ゆる Hele-Shaw 流れを仮定しており⁽²⁾、高速射出時には流動に影響を及ぼす慣性力が無視されてしまう。さらに、金型内部の空気存在を無視していることも、型内残留空気が樹脂フロントの減速、ひいては表面固化層の生成に与える影響を考えると問題となる。他方、数値流体解析汎用ソフトは慣性項を残したまま流体の運動方程式を離散化して解くが、移流に伴う数値拡散の問題が避けられない。すなわち、樹脂フローフロント界面形状が計算の進行につれて次第になだらかになり、フロント位置や形状を正確にとらえることができないという問題である。また、樹脂と空気の物性値に桁違いの差(密度で3桁、粘性係数では約8桁の差)があることから、両者を一緒に解こうとすると計算が破綻する、あるいは不適切な解しか得られないことが多いので、空気との相互作用を入れずに樹脂の動きを計算しているのが実態である。

今回の数値解析においては、時々刻々変化する樹脂の熱流動と樹脂表面固化層の生成状態をとらえることが主眼であり、これには空気(気)、樹脂(液)および金型(固)間の非定常熱移動を樹脂、空気の流動と併せて同時に解くことが求められた。

2.2 CIP法の採用

解析手法について検討した結果、CIP(Cubic-Interpolated Pseudo-Particle)法⁽³⁾が最適であると判断した。CIP法の主な特長を簡単にまとめると、次のようになる。

- (1) 気体・液体・固体の統一解法である。また、物性値が大幅に異なる流体をともに計算しても安定である。
- (2) 移動境界問題において、流体界面を固定メッシュにより、しかも少ない数でシャープにとらえることができる。
- (3) セミラグランジェ法⁽⁴⁾を採用しており、移流項の時間刻み幅が CFL(Courant-Friedrichs-Lewy)条件に縛られずに大きく取れることから、計算時間が短縮できる。なお、CFL条件とは物理的な伝播距離は数値的な伝播距離を越えてはならないという制約条件であり、またセミラグランジェ法とは移流項の計算にラグランジェ法を、それ以外の項にオイラー法を用いる手法を指す。

数値解析スキームの違いが移流計算に与える影響を見るべく、(1)式で示す1次元の波動方程式を従来の1次風上差分法、2次精度であるLax-Wendroff法⁽⁵⁾、そしてCIP法により解いた。

$$\frac{\partial^2 f}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = 0 \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 $f(x, t)$: 任意の関数(ここでは矩形波とする)、 c : 伝播速度、 t : 時間、 x : 位置である。

(1)式の厳密解は(2)式で与えられ、 $f(x, t)$ は元の形を保ったまま速度 c で移流する。

$$f(x, t) = f(x - ct, 0) \quad \dots\dots\dots(2)$$

二つの矩形波の計算結果を、図1、図2および図3に示す。1次風上差分法(図1)では、数値拡散の影響が顕著で、移流につれて波の形が崩れて次第にサイン波のようになっていく。また、Lax-Wendroff法(図2)は1次風上差分法よりは数値拡散の影響は少ないが、矩形波の隅で数値振動が発生している。

一方、CIP法は物理量そのものの移流に加えて(3)式で示す物理量の微分値の移流も併せて解くことから、高次精度の移流計算が可能となる。

$$\frac{\partial f'}{\partial t} + c \frac{\partial f'}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots(3)$$

CIP法(図3)では、計算ステップ数を前二者より大幅に増やしても矩形波はほぼ原形を保ったまま移流していくことが分かる。

3 数値解析モデル

3.1 解析モデル

解析モデル形状はキャビティ高さが0.5mm、長さが2.5mmの2次元断面であり、幅、深さが各々100 μ mの矩形溝を10個並べている。キャビティ上下は金型で挟まれており、固体である金型も解析範囲に含めている。解析モデルを図4に示すが、キャビティ全体の中から今着目する溝部分を切り出して解析領域とした。また境界条件としては、入口(図4左端)は速度、または圧力境界から、出口(図4右端)は自由流出、または壁境界のなかから選ぶことができる。そして、

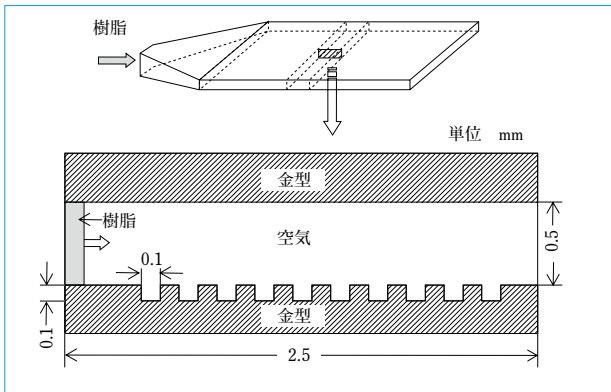


図4 数値解析モデル(上:成形品全体 下:数値解析モデル)
Simulation model (Upper:Whole product, Lower:Computational model)

出口に壁境界を用いればキャピティエンドの状態を模擬した解析が可能となる。次に示す解析結果については、入口は速度境界を、出口は解析領域の試験片全体に占める位置、および樹脂流動過程での解析であることを考慮して自由流出の境界条件とした。また、キャピティ内部には初め常温、大気圧の空気を置いた。なお、熔融高分子樹脂は非ニュートン流体として扱い、時間ステップごとに各メッシュの粘性係数は温度とひずみ速度に対応する値に更新している。

3.2 解析条件

今回の解析条件は、次に示す通りである。

- (1) 樹脂 材 料 PMMA
入口速度 1000, 5000mm/s (一様流速)
入口温度 245℃
- (2) 金型 材 料 SUS304
初期温度 30℃, 70℃
- (3) 空気 初期温度 30℃
初期圧力 大気圧

4 数値解析結果

次に、2次元の非定常解析の結果を示す。解析空間スケールが小さいにもかかわらず樹脂流速が大きいことから、時間スケールは数ミリ秒程度の範囲であり、今回の解析範囲は射出成形プロセスのうち射出および充填過程に限っている。

4.1 金型初期温度の影響

樹脂入口速度を 5000mm/s と固定し、金型初期温度を 70℃、および 30℃と変えて計算を行った。樹脂はゲート側の溝から反ゲート側へ向かって順次充填されていく。時間が経ち溝への充填状態がほぼ変わらなくなった時点での密度コンタを、それぞれ図 5(a)、図 5(b)に示す。金型初期温度が 70℃の場合、溝は樹脂(図中青色で示す)で満杯になるが、他方、30℃の場合は溝へは充填されるが途中で止まり、以降は時間が経っても充填は進まない。樹脂温度分布を見ると表面温度がガラス転移温度(今回は 115℃とした)以下まで下がり、またこの部分の樹脂流速が大幅に小さくなっていることが分かった。

4.2 樹脂入口速度の影響

金型初期温度を 70℃に固定し、樹脂入口速度を 5000、および 1000mm/s と変えて計算した。樹脂フローフロントが同位置にある時刻にて温度分布を比較したのものが、図 6(a)、図 6(b)である。樹脂速度 1000mm/s の場合は、5000mm/s

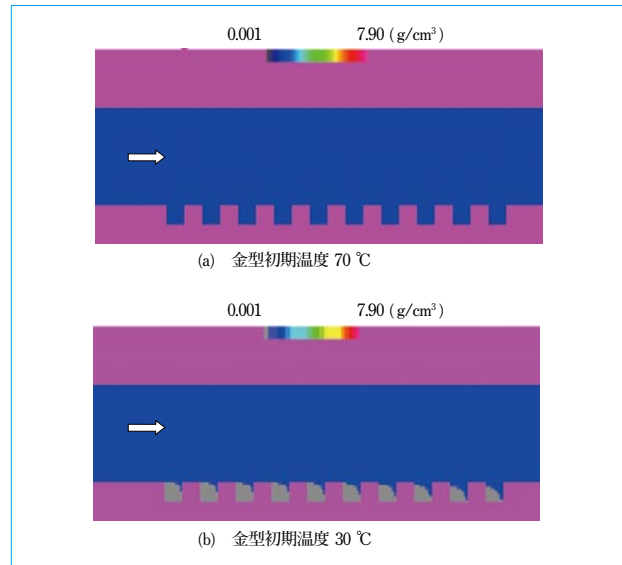


図5 密度コンタ
Density contours

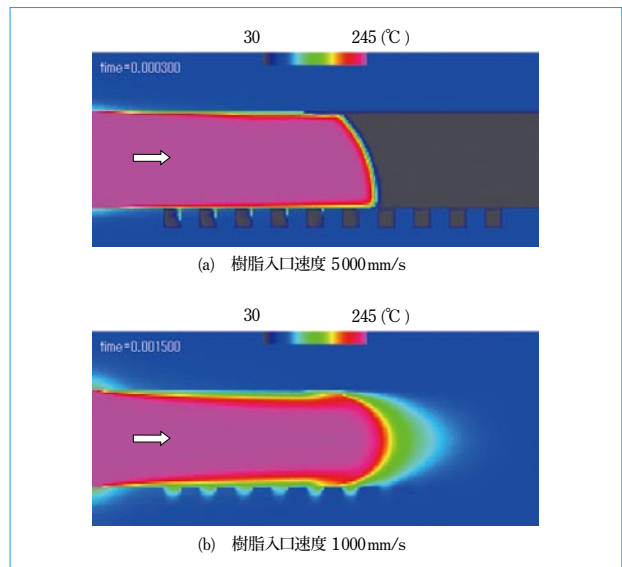


図6 温度コンタ
Temperature contours

のときよりも金型との接触時間が長いことから、樹脂温度が低い領域が表層部から中心に向かってより大きく広がっている。そして、流速 1000mm/s とすると溝内の空気は温度上昇しているが、樹脂は溝一杯まで充填されない。次に、中央(前から5番目)の溝位置でのキャピティ高さ方向の樹脂温度分布を図 7に示す。同図は樹脂入口速度を 5000, 1000mm/s と変えた場合について、樹脂がそれぞれこの温度評価ラインを通り過ぎた直後の温度を示している。キャピティ高さ中央部分では入口温度と同じ高温のまま樹脂が流れているが、金型壁面近くになると温度が急激に低下している。なお、温度が主流温度から急変化するこの部分を温度境界層と呼ぶ。流速 1000mm/s の場合は金型壁面近くの温度勾配が小さくなっており、5000mm/s の場合よりも温度境界層が発達しているのが分かる。また、樹脂入口速度の大小によらず溝のない側の金型に接する樹脂温度は溝のある側のそれよりも温度が低くなっているのは、樹脂が金型に接する時間が本解析モデル領域内では両者で2倍程度異なっていることによる。

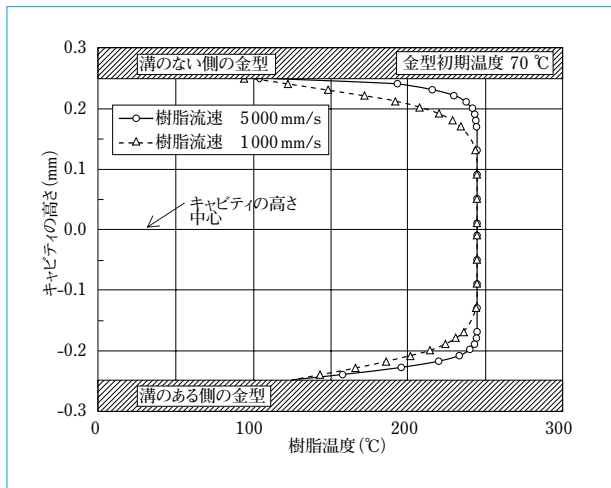


図7 キャビティ高さ方向の樹脂温度分布
Temperature profiles along height of cavity

以上の結果から、金型初期温度を高温に設定する、または樹脂を高速で射出することが、微細溝への完全充填にとって好条件であることが数値解析によっても確かめられた。

4.3 金型内部の空気の手動

溝内部の空気の手動を詳しく見ると、溝内空気は上部を流れる空気、または樹脂によって駆動されて、いわゆるキャビティ流れを生じていることが分かった。図8(a)に示すように、樹脂が溝上部に到達する前は樹脂に押されて流れる空気(図中灰色で示す)によって溝内空気は旋回するが、溝底部の空気だけは動かない。続いて、図8(b)に示すように、樹脂が溝上部に来ると空気は溝全体にわたって激しく旋回し、さらに接近した樹脂によって一部の空気が溝の外へ追い出されていくことも分かった。

5 考察

5.1 樹脂表面固化層

図6(b)に見られるように、樹脂表層における低温度領域の厚みはフローフロント先端に行くに従って大きくなっている。これは樹脂表層が金型に熱を奪われながら進んでいくことによる。今回の解析条件では、10個の溝への充填順序はゲート側(入口側)から始まり反ゲート側へ向かって進んでいく。その理由として考えられるのは、樹脂表層部が比較的高温で、低粘性であるゲート側の方がより流動性がよいことである。なお、高速射出時の微細溝への樹脂充填に関して、充填順序がゲート側から始まる事実は金型内部可視化試験結果とも一致している。

溶融樹脂のような高プラントル数流体の場合には温度境界層が薄く、固化は表層のごく一部分から始まると考えられる。そして、樹脂特有の非ニュートン粘性によって樹脂速度の変化と温度変化は互いに密接に関連していることから、ひとたび固化が始まると樹脂の流動性の悪い領域は加速度的に広がっていく。樹脂速度が表層部付近の温度分布に影響し、結果的に冷却・固化に対して少なからぬ影響を与えていることが今回の数値解析によって分かった。なお、プラントル数は流体の動粘性係数を熱拡散率で割ったもので流体の物性だけで決まる無次元量であり、流れと熱移動の関係を定める量といえる。

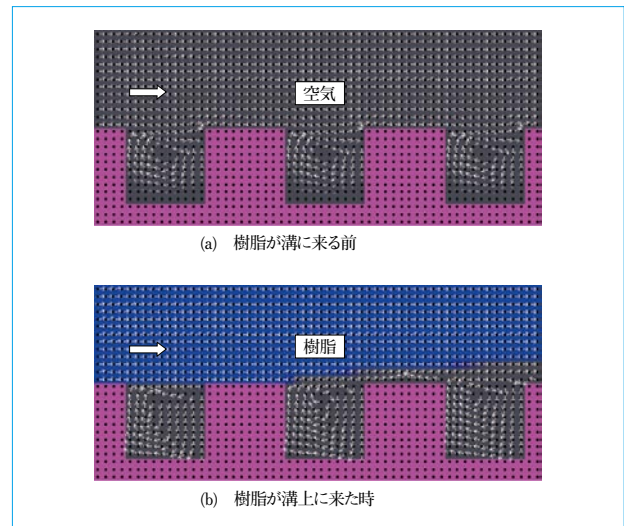


図8 速度ベクトル
Velocity vectors

5.2 樹脂フローフロント形状

図6(a)および図6(b)に示したように、樹脂入口速度の違いによってフローフロントの形状が異なっている理由としては、金型と接する樹脂の表面温度の差異が考えられる。すなわち、流速が小さい場合は金型との接触時間が長いことから、樹脂表面温度がより低下して粘性係数が大きくなる。したがって、金型に接する表層部分は減速されるが、高温の中心部分は元の速度を保持している。これにより、フローフロントは放物線に近い形状となる。他方、流速が大きい場合は、金型と接する樹脂表層部分も比較的高温に保たれることから、表層部の流速が余り減速されずに台形に近いフロント形状となる。さらに、樹脂入口速度5000mm/sの場合にフロント形状が上下で非対称になっている理由も、樹脂と金型の接触面積に上下で差があることによる。

6 むすび

- (1) 溶融樹脂の非定常熱流動を金型内空気の手動も含めてCIP法を用いて数値解析した結果、成形条件と微細溝充填の関係について実現象と一致する結果を得ることができた。
- (2) ミクロ領域で起こる高速の手動現象などのように実験が困難な現象の解明に関して、数値シミュレーションの果たす役割は、今後ますます大きくなるであろう。
- (3) 冒頭に述べたCIP法の特長を活かした解析対象としては、気・固・液の多相流、相変化のある流れ、自由境界問題、波動現象などがあげられ、今後は他分野への展開も期したい。

東京工業大学矢部孝教授および有限会社シーアイピーソフト松永栄一博士の協力に感謝の意を表す。

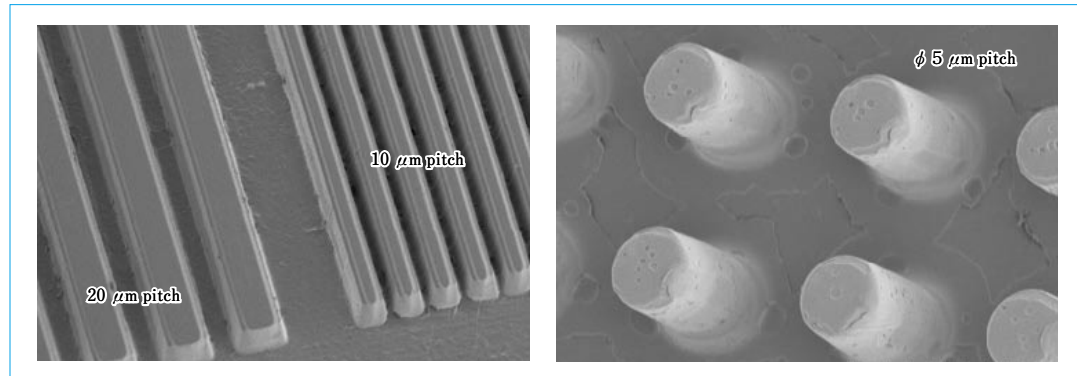
(参考文献)

- (1) 長谷川茂, 村田泰彦, 横井秀俊. 生産研究. vol.55, no.6, 2003.
- (2) 日本塑性加工学会. 流動解析-プラスチック成形. コロナ社, 2004.
- (3) 矢部孝, 内海隆行, 尾形陽一. CIP法-原子から宇宙までを解くマルチスケール解法. 森北出版, 2003.
- (4) 棚橋隆彦. CFDの基礎理論. アイピーシー, 1999.
- (5) Lax P. D., Wendroff B.. Comm. Pure Appl. Math.. vol.13, no. 217, 1960.

インプリントおよびAMOTECによる微細転写性評価

Pattern Transferability Evaluation by Imprint and AMOTEC

●佐藤 雄司* 阿部 昌博* 加藤 隆典*
Yuji SATO Masahiro ABE Takanori KATOH



微細転写形状(Line & Space(右), Dot(左))
Examples of transcription by micro/nano-molding (Right Line & Space, Left Dot)

プラスチックにおける微細転写の実現を目的として、射出成形に炭酸ガスを活用した充填成形 (AMOTEC) が現在展開されている。しかし、その微細転写の対象となるサイズはミクロンオーダーでナノオーダーへの適用には限界がある。

そこで、昨今注目されているインプリント成形技術の有効性を確認するべく、インプリント装置を試作し、放射光による LIGA プロセスで製作したミクロンサイズのスタンプを用いて、微細転写の実現性を既存装置と比較検討した。その結果、インプリント成形は、他の成形よりも転写性に優れていることが明確になった。さらに、インプリント成形における市販のスタンプを用いたナノサイズの転写評価を行うと、Line & Space 形状でピッチ 100 nm、アスペクト比 6 の転写を実現できた。

今後は、インプリントの欠点で、サイクルタイム長期化の原因となっている昇温 / 降温プロセスの短縮化を図るべく、局所温調を適用し、生産能力を改善していく。

The new molding technology called AMOTEC utilizes CO₂ for injection molding in order to achieve fine transcription on plastics. However, since the minimum size of the pattern AMOTEC can replicate is in microns, there is a limit in adopting this technology to nano-level applications. Therefore we tried to search for alternative approaches and found the press-based imprint technology can give better transcription than other methods. We have obtained the results through the comparative transcription studies, using the imprint system newly developed and the stampers with micro-scale patterns fabricated by synchrotron-radiation-based LIGA technology. In addition, combining a commercially available stamper carrying nano-scale patterns with our imprint system, we could realize pattern transfers of line and space with 100nm-pitch and aspect ratio 6. Future developments will be directed to the productivity enhancement through the application of local heating technology to shorten the heat and cool processing time, which so far has been the principal cause of the cycle elongation in the imprint technology.

1 まえがき

近年、プラスチック成形業界では、薄肉化や形状微細化の要求に対して成形技術を駆使し、生産性向上の努力がなされている。現在のプラスチック成形の主流は射出成形であるが、転写性確保には限界がある。これに対し当社は、炭酸ガスを可塑剤として作用させる AMOTEC システム⁽¹⁾の適用で、転写性向上を実現している。ただし、同成形手法は装置コストが高い、サブミクロンサイズへの対応が困難といった問題を有しており、一つの代替手法として、昨今注目されているインプリント技術の有効性も検討している。

本報では、プラスチック成形の微細転写における転写性向上を実現するべく、射出成形およびインプリントの転写性能の限界を見極め、今後の開発方針を明確にする。

2 射出成形における微細転写

射出成形の場合、AMOTEC システムを適用することによって、転写性向上が可能となる。図 1 に、AMOTEC 専用射出成形機の構成を示す。

AMOTEC においては、炭酸ガスの可塑剤効果により、熔融粘度低下とガラス転移点温度降下が可能である⁽²⁾。これまでの検討結果において、流動性向上とスキン層生成の抑制効果により転写性の向上が確認できている。図 2 に、ウェルドライン防止の効果事例を示す。ウェルドラインとは、JIS K6900⁻¹⁹⁹⁴で定義されているように、プラスチック射出成形において発生しやすい外観不良の一つで、冷却された金型内流路を溶融樹脂が分岐して流動している間に、金型流路面に接して固化したスキン層が生成し、溶融樹脂の合流部分で

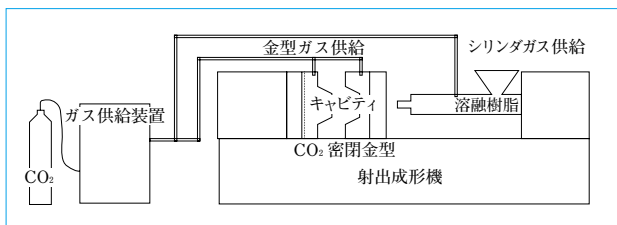


図1 AMOTEC 専用射出成形機構成
System configuration of AMOTEC injection molding machine

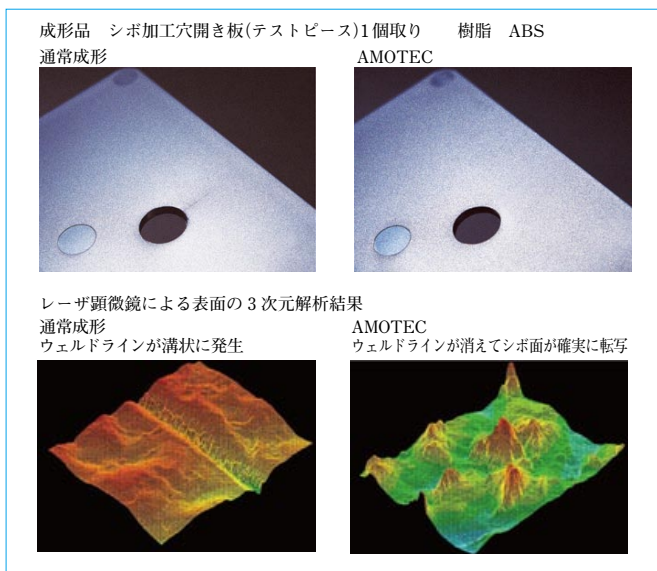


図2 ウェルドライン防止効果
Effect of weld line prevention

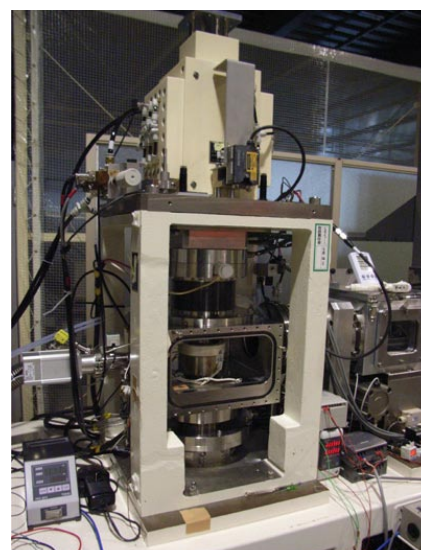
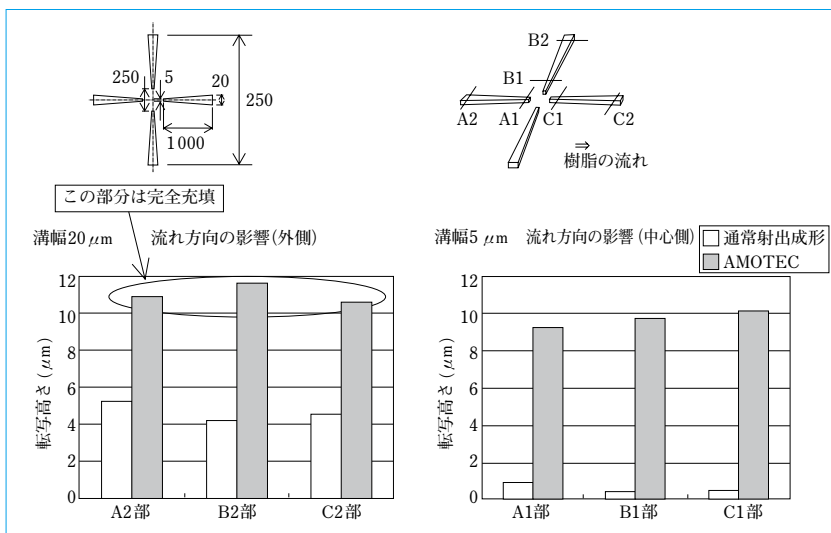


図4 インプリント機
Imprint machine

図3 十字形状転写における流動方向の影響
Influence of flow direction on transcription height for cross pattern

完全に融合せず発生する溝のことである。AMOTEC システムを使用することによって、このウェルドラインの発生を低減できる。図2では、穴開き板のウェルドライン発生に対する AMOTEC システムの効果として、上段に外観を、下段にレーザ顕微鏡による表面3次元解析結果を示してある。

さらに量産レベルでの成形検討として、AMOTEC システム適用による微細形状の転写向上実現について、次に示す。当社が開発した SR(シンクロトロン)光源 AURORA-2S⁽³⁾ を使用し、LIGA プロセスで製作したニッケル製スタンプで射出成形を行い、レーザ顕微鏡による転写高さ測定を行った。表1に、射出成形機仕様および成形条件を示す。図3に、凹型十字形状転写における流動方向の影響を示す。通常の射出

表1 射出成形機仕様と成形条件
Specifications of injection molding machine and molding conditions

成形機主仕様	項目	数値仕様	備考
	形式	SE75DU	
	射出装置モジュール	C160	
	スクリー径	φ22	AMOTEC スクリュー
	ノズル方式&サイズ	R10・φ3	
	最高射出圧力	274.0MPa	
		2800 kgf/cm ²	
	射出率	190 cm ³ /s	
	射出速度	400 mm/s	
成形機特別仕様	オプション名	備考	
	AMOTEC	AMOTEC 専用スクリュー、ガス供給装置	
	ニードル弁駆動回路		
	iii-cube 接続回路		
	SK 制御		
テスト条件			
樹脂	PC 帝人化成 AD5503	金型温度	130℃
樹脂温度	300℃	AMOTEC ガス圧力	
射出速度	200 mm/s	パレル	6MPa
サイクル	40s	キャビティ	4MPa
成形品寸法	28 × 55 × 0.8mm		

成形では、溝幅が5μmと狭い場合、または溝が流れ方向に垂直の場合、転写高さが低くなる傾向にあるが、AMOTEC システムを適用すると転写全体が良化するるので、その傾向は小さくなる。

3 インプリントにおける微細転写

インプリントでは、スタンプの温度を成形対象となる樹脂のガラス転移温度より高くなるように温度制御し、このスタンプを樹脂にプレスすることによって、樹脂を塑性変形させてスタンプ形状を転写した。その後、一定の緩和時間とプレス力を保持してから、徐々に離型温度まで冷却する。したがって、転写性確保には優れる一方、サイクルタイムが長い

表2 インプリント機仕様および成形条件
Specifications of imprint machine and molding conditions

主仕様		成形条件	
型式	高精度プレス機	樹脂	PCプレート タキロン PC1600 t = 0.5mm PMMA プレート t = 0.3mm
加圧	4段	成形温度	PC 185 ~ 215℃ PMMA 125 ~ 175℃
除圧	5段	冷却温度	PC 60℃ PMMA 50℃
押し込み最小制御量	0.1 μm	サイクル	180s
最大プレス力	1960N	成形品大きさ	20 × 20mm
平行度	± 0.1mrad		
直進度	± 1 μm		

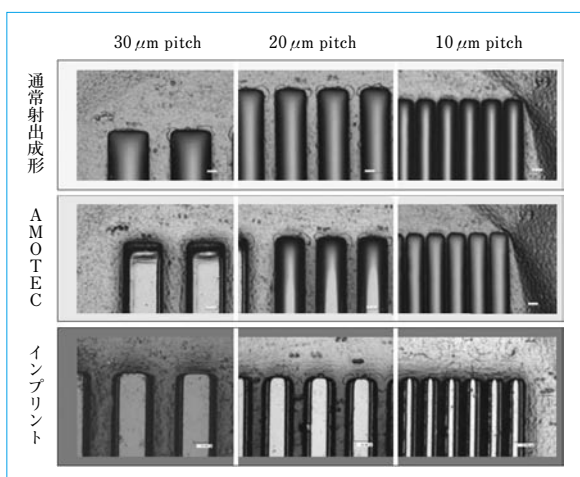


図5 L&S形状 転写状況比較(PC樹脂)
Comparison of transcription for L&S patterns (PC resin)

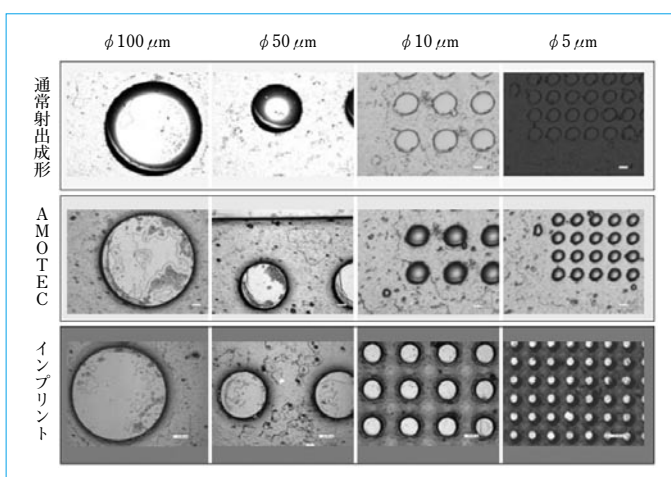


図7 Dot形状 転写状況比較(PC樹脂)
Comparison of transcription for Dot patterns (PC resin)

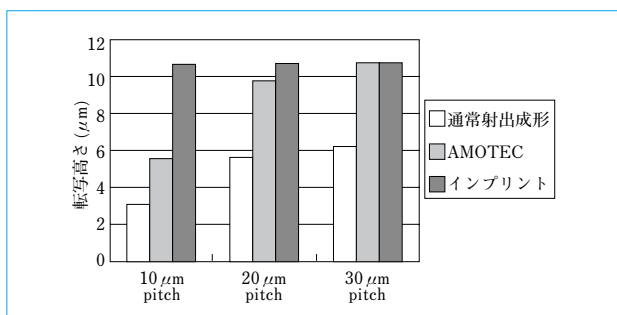


図6 L&S形状 転写高さ比較(PC樹脂)
Comparison of transcription height for L&S patterns (PC resin)

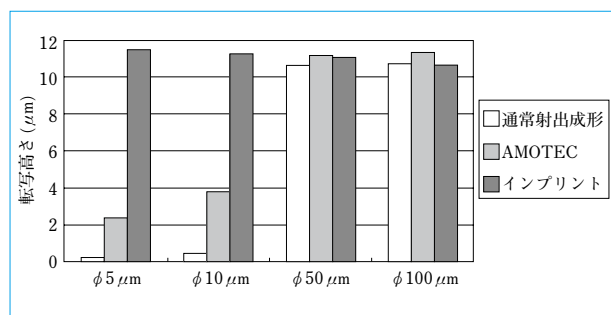


図8 Dot形状 転写高さ比較(PC樹脂)
Comparison of transcription height for Dot patterns (PC resin)

という欠点を持つ。

転写評価用に試作したインプリント機の外観を図4に、さらにインプリント機仕様および成形条件を表2に示す。

前述のスタンプの凹型(1)Line & Space (L&S) および(2)Dot形状の2種類のパターンに対して、(1)射出成形、(2)射出成形+AMOTECシステムおよび(3)インプリントによる転写結果をレーザー顕微鏡で測定し、比較評価を行った。インプリントの場合、形状ごとにスタンプを□10mmに切り出して使用した。

3.1 L&S 転写性比較

ポリカーボネート(PC)樹脂の場合、通常の射出成形では30 μmピッチでさえも完全転写は難しい。AMOTECを適用することによって転写性は向上するが、20 μmピッチについては、完全転写はできない。これに対して、インプリントは10 μmピッチ、ライン幅5 μmまで完全転写できている。この転写状況をレーザー顕微鏡で撮影して比較評価した結果を、図5に示す。

また、PC樹脂におけるL&Sの転写高さをレーザー顕微鏡で測定した結果を、図6に示す。これより次のことが確認された。

- (1) 一般的な射出成形では30 μmピッチであっても、転写高さは60%程度である。
- (2) AMOTECの使用によって、30 μmピッチは転写高さ100%を実現できる。
- (3) インプリントの場合、10 μmピッチでも転写高さ100%を実現できる。

3.2 Dot 転写性比較

図7および図8に、PC樹脂におけるDot形状での転写性の比較結果を示す。Dot形状の場合、インプリントではアスペクト比2、φ5 μmの微細なパターンの転写が可能となり、転写性確保の優位性がより明確になった。

次に、Dot形状における転写比較結果をまとめる。

- (1) 通常の射出成形ではアスペクト比0.1、φ100 μmであっても、全体の転写は完全ではない。

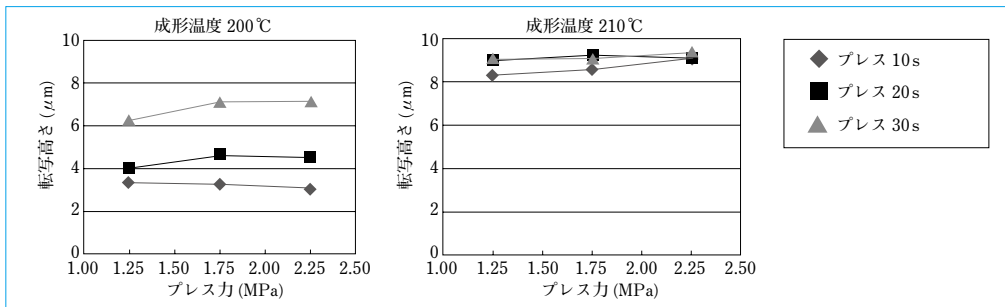


図9 転写性成形条件依存性
Molding condition dependency
of transcription height

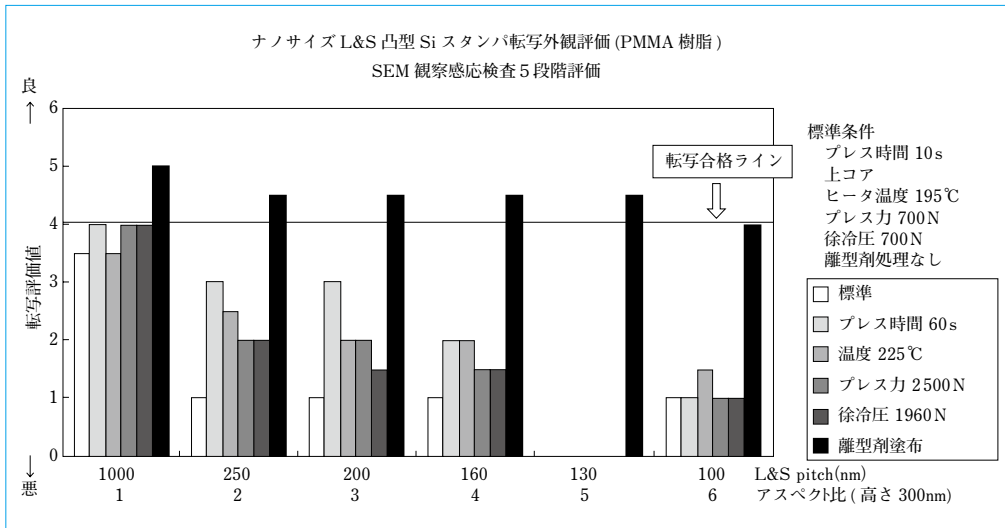


図10 インプリント成形による
ナノサイズ転写
Nano-order-size
transcription by imprint

- (2) AMOTECの使用によって、アスペクト比0.2, $\phi 50\mu\text{m}$ までは完全転写を実現できる。
- (3) インプリントの場合、アスペクト比2, $\phi 5\mu\text{m}$ でも完全転写を実現できる。

3.3 インプリントの成形条件依存性

インプリント成形は樹脂のガラス転移点より高い温度域で発生する弾性挙動を活用して、スタンプ形状に樹脂を変形させる成形方法である。そのことから、成形条件には、材料樹脂の弾性挙動と高い相関を有する因子が重要となってくる。ここでは、成形条件として(1)成形温度、(2)プレス力および(3)プレス時間を取り上げて行った転写評価を、図9に示す。樹脂は、PCで径が $5\mu\text{m}$ の凹型のDot形状について転写評価を行った。転写高さに対する成形条件の影響について、次のことが判明した。

- (1) 成形温度は、他の条件より転写性に大きく影響する。
- (2) 成形温度が低い場合、押付け力が大きく、また押付け時間が長い方が転写性は向上する。

3.4 ナノサイズ転写

これまでのミクロンサイズの評価で最も転写性が優れているインプリント成形について、ナノサイズに対して、どのレベルまで転写が可能か評価を行った。図10に示すように、L&S形状のピッチサイズが1000nmから100nm、アスペクト比で1から6を対象にして、ミクロンサイズの時と同様に成形条件を変えながら転写性を評価した。図10に示してある転写評価値は、樹脂側のスタンプ形状の転写状態とスタンプ側の樹脂の残存状態を、総合的に5段階で感応評価した結果である。

ナノサイズの場合は、樹脂の強度が不足して、離型の際に転写状態が破壊されてしまい、成形条件だけの影響による転

写評価を正確に行うことができなかった。この状況のなかで、離型剤を塗布することによって転写後の離型が可能となり、100nmピッチ、アスペクト比6までの転写された状態も評価することができた。ミクロンサイズの場合は、樹脂とスタンプの収縮差で隙間が多少生じれば、形状サイズが大きくなることによって樹脂強度が確保され、離型剤を塗布しなくても残存摩擦抵抗よりも大きな力で離型することも可能であると考えられる。しかしながらナノサイズの場合、スタンプがシリコン製であり、樹脂もスタンプも強度が不足していることから離型を困難にしていると考えられる。

4 むすび

- (1) インプリントの転写能力は優れており、ナノサイズのL&Sで、ピッチ100nm、アスペクト比6の転写が可能である。
- (2) ナノサイズの転写の場合、転写状態を確保して離型できるようにするには、離型剤塗布が不可欠である。
- (3) 今後はインプリントに局所温調を適用し、サイクルタイム長期化の原因である、昇温/降温プロセスを短縮化し、生産能力を改善していく。

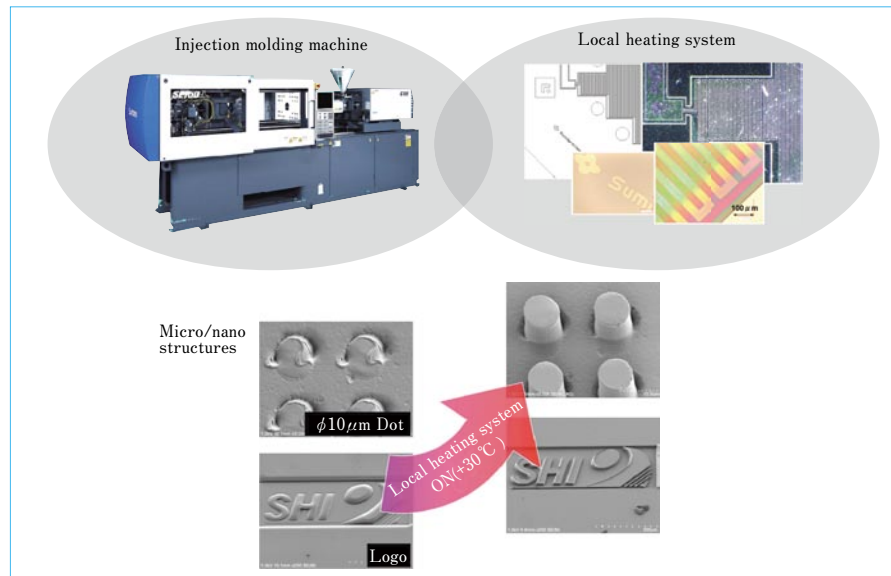
(参考文献)

- (1) 赤松雅治. 炭酸ガスを利用したAMOTEC成形技術と射出圧縮成形による微細転写. プラスチックエージ, 49(2), 2003, p.101.
- (2) 山本宏. 炭酸ガスを利用した新しい樹脂加工技術. プラスチックエージ, 47(6), 2001, p.136.
- (3) 張延平, 加藤隆典. シンクロトロン放射光を利用した微細加工. Proc. of the 2nd Symposium on Accelerator and Related Technology for Application, Tokyo, 1999.

局所温調技術を適用した微細転写成形法

Micro/nano Molding Method by Using Local Heating System

●阿部昌博*
Masahiro ABE



局所温調
Local heating system

プラスチック成形加工分野における微細転写ニーズに対応して、「局所温調」の技術開発を行った。当社が提案する局所温調とは、従来の金型全体を昇温する方式とは異なり、微細パターンの極近傍に熱源を配置し、アクティブに温調を行うことで転写性を向上させる技術である。加えて、温調するヒートマスを極小化することが可能であることから、サイクルタイムを短縮し、生産性の向上を図ることができる。

半導体プロセスを用いて製作した高パワー密度ヒータを、熱インプリント装置および射出成形機に適用し、それぞれ成形試験を行った。その結果、熱インプリント装置におけるサイクルタイムを従来の1/10に短縮することに成功した。射出成形機に搭載して得られた成形品の計測結果からは、通常成形に比べて転写高さが10倍に向上しており、局所温調の有効性が実証的に明らかとなった。

To answer the needs concerning micro/nano molding in the field of polymer processing, we have developed a technology for 'Local Heating System'. Local heating system our company proposes differs from the conventional method where the temperature of entire metal mold is raised. Our system improves the transferability by placing the heat source extremely close to the fine pattern and actively regulating the temperature. Since it is capable of minimizing the heat mass to be thermally regulated, our system shortens the cycle time and improves productivity. A high power-density heater fabricated by a semiconductor manufacturing process was applied to a thermal imprinting device, as well as an injection molding machine, and the molding tests were done respectively. As a result, in a thermal imprinting device the system succeeded in shortening the cycle time to 1/10 with regard to the conventional system. From the measurement results of the molded samples by an injection molding with local heating system, transcription height has been found out to be 10 times higher than the conventional pattern transfer.

1 まえがき

プラスチック成形加工のなかで、光学、電子部品および医療・バイオ関連などの分野においては、製品の微細化および高アスペクト比化が進んでおり、それら市場のニーズに対応して、多種多様な成形技術の研究開発が行われている。

マイクロ/ナノスケールの微細なパターンを用いた転写に関する研究が数多くなされているなかで、射出成形においては、微細領域における溶融樹脂-金型界面におけるスキン層の形成によって、成形不良や生産性の低下が発生することが懸念されている。今後、さらに加速を続ける市場の要求に応

えて、当社では微細転写ソリューションを展開し、開発を行っている。

本報では、微細転写成形に関する成果の一例として「局所温調」に関する技術開発の概要を報告する。

2 目的

導光板およびピックアップレンズに代表される光学用途向けの製品については、製品表面にマイクロ/ナノスケールの微細構造が施されており、製品に対する高付加価値化を図るべく、形状を正確に転写する技術開発が行われている。一般的に、熱可塑性樹脂を用いた成形加工においては、金型温度



図1 マイクロヒータの製作プロセス
Process flow of micro heater fabrication

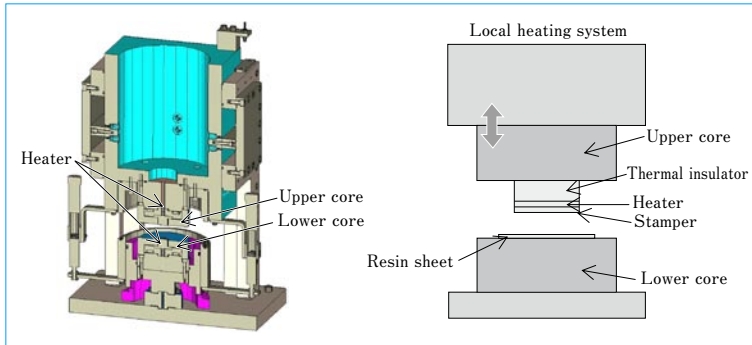


図2 試験装置の構造
Fundamental configuration of test device

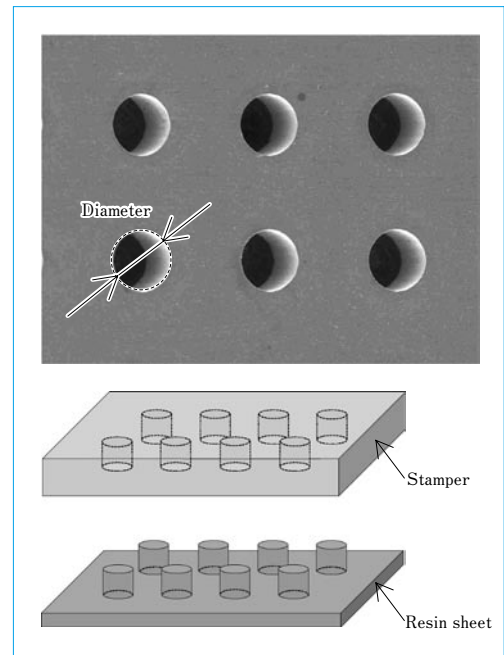


図3 スタンプ外観と成形品形状
Images of stamper and molded sample profile

を上昇させ、金型内部に流入する溶融樹脂の流動性を促進させることで転写を確保する手法が用いられる。しかし、金型温度の引上げによって、生産性に直結するサイクルタイムが長大化し、製品コストの増大を招く結果につながる。

そこで本開発では、金型全体を昇温する従来の方式とは異なり、転写性を確保したい微細パターンの近傍のみを温調し、転写性を確保しながらサイクルタイムを短縮することによって、生産性を向上させることを目的とした。

金型温調には、さまざまな加熱・冷却方式が存在し、それぞれの特長によって製品の生産に大きく貢献している。本報では、汎用性があること、経済的であることおよび保守管理が容易であることから、抵抗加熱による電気ヒータを使用して研究を行った。実験には、半導体製造プロセスを用いて製作した高パワー密度ヒータを使用し、マイクロスケールの微細パターンにおける転写性の評価を行った。

3 実験結果および考察

3.1 ヒータ製作プロセス

局所温調による効果の検証には、単位面積当たりの出力の高いヒータが必要とされた。本実験においては、リソグラフィ技術を用いて、専用のヒータを製作した。半導体製造に代表されるリソグラフィ技術は、微細な構造を比較的簡単なプロセスで製作することができ、高密度化が可能、レイアウトが任意および大量生産向き(低価格)という特長を持つ。

成形試験に使用したヒータの製作プロセスを、図1に示す。□20 mmのシリコンを基材に用いて、発熱体としてニッケルの配線を描画した。線幅は50 μ mとし、シリコンの中央□10 mmの領域にLine & Space比1:1で配線した。実装時の面精度確保と抵抗部の絶縁を目的として、ニッケル配線領域には、数ミクロンの掘込みを設け、ガラスでコーティングを施した。

3.2 熱インプリント装置への適用

製作したヒータの昇温性能を検証することを目的とし、熱

インプリント装置を使用して成形実験を行った。熱インプリントは、熱可塑性の樹脂をガラス転移点付近の温度に昇温し、加圧することによって、金型形状を転写させるプロセスであり、比較的穏やかな条件下でマイクロ/ナノスケールの微細構造を持つプラスチック製品を生産することができる。しかし、射出成形に比べると、サイクルタイムが長いことから、生産性に劣るという欠点がある。

熱インプリント装置と製作したヒータ実装のモデルを、図2に示す。当社試験機(図2)においては、コアと呼ばれる金属体を介してスタンプを昇温する方式で成形を行う。通常、微細構造を持つ製品はサイズが小さく、薄肉であるのに対して、コアのヒートマスが大きいことから、生産サイクルの大部分がそのコアの昇温と冷却に費やされることになる。微細構造を持つスタンプ近傍のみを加熱することで、ヒートマスを極小化し、昇温および冷却時間の短縮が可能となれば、生産性の向上が期待される。

成形試験はシート状のポリメタクリル酸メチル(PMMA厚み0.5 mm)を使用し、成形温度170 $^{\circ}$ C、プレス力1960 Nの条件で行った。スタンプは、当社が開発したSR(シンクロトン)光源AURORA-2S⁽¹⁾による露光を介してレジスト鑄型を作成し、さらにNi電鍍を施すLIGAプロセスによって製作した。スタンプの拡大観察結果を、図3(上)に示す。微細構造は凹形状のDotパターンとし、直径は100, 50, 10, 5 μ mの4種類を準備した。深さは一定とし、最大のアスペクト比は約2となっている。本スタンプを用いて成形を行い、シート状の樹脂に凸形状のDotパターン(円柱形状)を形成した(図3(下))。

局所温調を適用して得られた成形品の拡大観察結果を、図4に示す。直径5 μ mの円柱形状(アスペクト比約2)が観察されており、製作したヒータによって、微細構造を正確に転写できることが明らかになった。

また、局所温調による昇温および冷却特性について検討することを目的とし、成形時のスタンプ温度、コア温度および

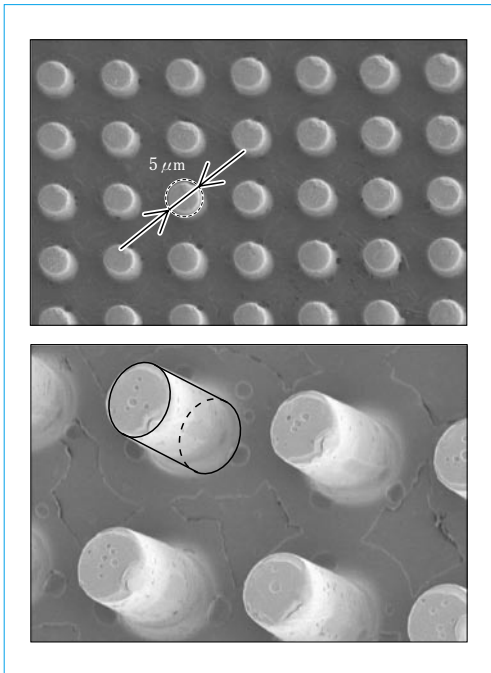


図4 成形品観察結果
Observation results of molded samples

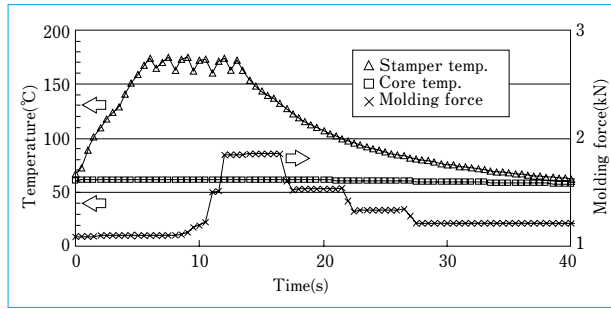


図5 スタンプ温度、コア温度およびプレス力の経時変化
Temporal profile of stamper temperature, core temperature and molding force

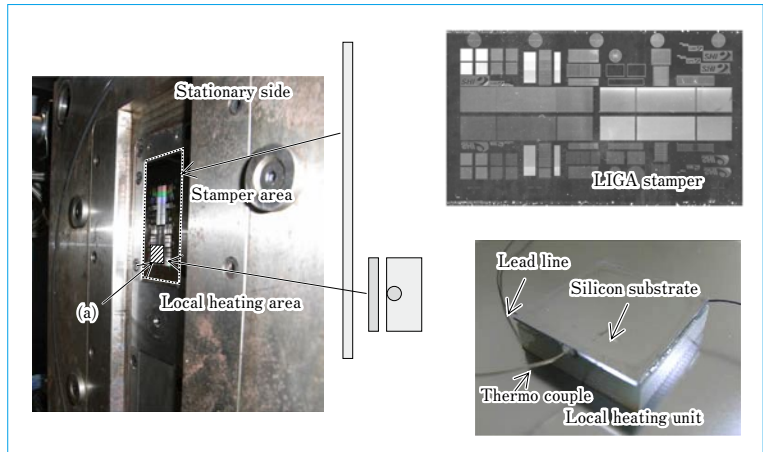


図6 試験金型、LIGA スタンプおよび局所温調ユニット
LIGA stamper, local heating unit and injection molding die set equipped with them

プレス力を計測した結果を、図5に示す。従来の加熱方式では1サイクルに5～6分の時間を要するのに対して、局所温調を適用した場合には、昇温開始から成形品離型までの時間は約30秒であり、昇温に約7秒、冷却に約20秒と、サイクルタイムの大幅な短縮に成功した。高密度に集積されたヒータを成形面の極近傍に配置したこと、加えて、コアへの伝熱を抑制する目的で、断熱材を実装したことによって、高効率にスタンプが昇温された結果と考えられる。

しかし、設定温度付近でのスタンプ温度の変動が大きく、一定温度となっていない。高密度ヒータによって小さなヒートマスの温調を行う場合には、出力値に対する応答が短時間で起こることから、現状のコントローラでは温度制御を精度良く行うことができていない。本実験における成形品観察結果からは、局所温調による成形不良は確認されていないが、樹脂材料などの各種成形条件および高い寸法精度が求められる製品に対しては、厳密な金型温度のコントロールが要求されることから、温度計測を含めた制御方式に関する検討が今後の課題となっている。

3.3 射出成形機への適用

次に、局所温調を射出成形機に適用した成形試験を行った。成形試験に使用した金型と局所温調ユニットを、図6に示す。金型の固定側にスタンプを取り付け、その背面から局所温調を行う設計として、昇温の有無による効果を検証した。キャビティ形状は28×55mmであり、局所温調ユニットは図6の(a)で示した領域に配置した。局所温調ユニットは前述の高パワー密度ヒータを使用し、φ0.15mmの熱電対を挿入している。電源供給のリード線は、干渉のないよう金

型外部に引き回す設計とした。

樹脂はポリカーボネート(PC)、樹脂温度300℃、金型温度120℃に設定して成形実験を行った。また、局所温調による昇温は、ベースとなる金型温度(120℃)から+10、20、30℃の3段階のレベルに設定した。

成形サンプルを拡大観察し、通常成形(局所温調OFF)と局所温調による昇温を行った各条件との比較をした結果を、図7に示す。直径10μmのDot形状と当社ロゴの転写結果からは、局所温調による転写性の向上が確認された。通常成形では、どちらのパターンにおいても、樹脂の充填が不十分な形状であるのに対し、局所温調による昇温を行った場合には、樹脂の充填が促進されている。特に、Dot形状においては、昇温レベルによって転写性が段階的に向上しており、+30℃の条件では、円柱頂部にシャープなエッジが確認できていることから、樹脂がスタンプ底部まで完全に充填されたことが分かる。

局所温調による昇温を行った場合には、微細パターンの極近傍に熱の供給源を配置していることから、金型-樹脂界面に形成するスキン層の成長を抑制する効果があり、樹脂の流動性が促進されると考えられる。したがって、Dot形状のように、パターン深さに対して樹脂の流入する開口部の面積が小さく、微細パターン壁面からの冷却の影響が大きく現れる場合には、局所温調が転写性向上に有効な手段となりうることが示唆された。

次に、直径の異なるDot形状の比較から、各条件における転写高さの測定を行った。転写高さは、Dot形状の底部から頂部までの高さとし(図8)、成形サンプルをレーザー顕微鏡

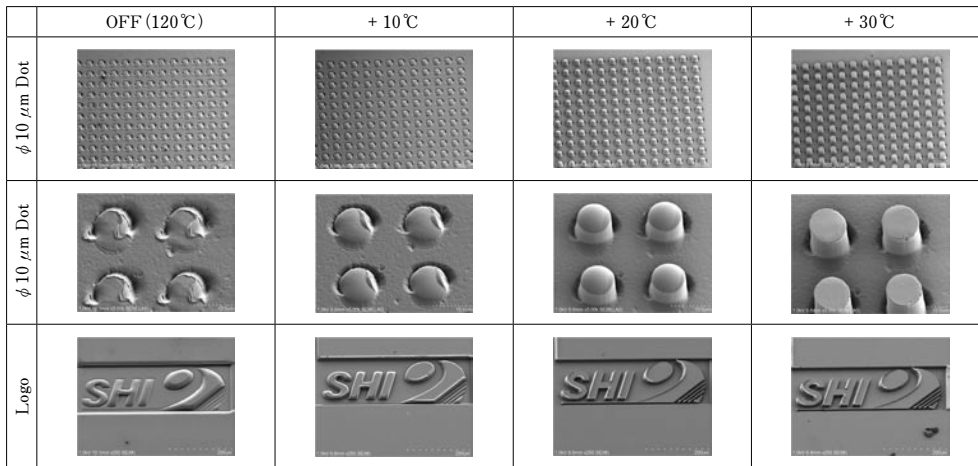


図7 成形品観察結果
Results of molded samples with different mold temperatures

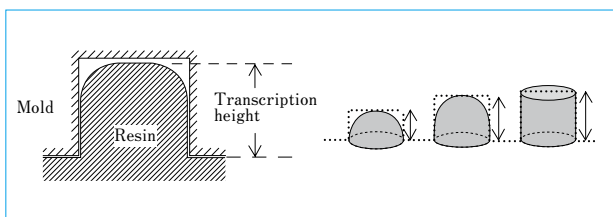


図8 成形品の転写高さ評価方法
Measurement method of transcription height for molded samples

で計測した。直径の異なる各パターンについて、通常成形および局所温調による昇温レベルによる比較を行った結果を、図9に示す。縦軸が転写高さを表しており、最大値である $9\mu\text{m}$ はスタンプの深さに相当する。通常成形時には、直径 $50\mu\text{m}$ 以下で転写が不十分となっており、径が小さくなるほど転写高さも低くなっていることが分かる。局所温調による昇温を行った場合には、転写高さが増加しており、その効果が確認できる。

直径 $50\mu\text{m}$ では昇温レベルにかかわらず、 $+10^\circ\text{C}$ の昇温であっても完全充填できているが、 $10\mu\text{m}$ 以下の径においては、昇温レベルによって、転写高さが段階的に増加する。直径 $10\mu\text{m}$ では $+30^\circ\text{C}$ の条件で完全に充填し、通常成形に比べて転写高さが約10倍に向上した。しかし、最小パターンである直径 $5\mu\text{m}$ では昇温レベルが $+30^\circ\text{C}$ においても完全充填は達成できておらず、2割程度の転写高さにとどまった。さらに昇温レベルを上げることによって、転写高さが向上すると期待されるが、今回製作したヒータでは昇温能力および耐久性が不足していたことから、今後、ヒータ容量を再設計し、検討を行う。

生産性という観点から考察すれば、局所温調による昇温によって、 $+10$ 、 20 、 30°C の各条件において、それぞれ約5、10、35秒がサイクルタイムに加算される。この時間は、金型全体を同程度昇温および冷却する場合に比較すれば、非常に短い時間であるが、局所温調による熱交換を高効率化することで、さらにサイクルタイムを短縮できると考えられる。今後は、各種製品に要求されるヒートマスに対し、高効率で昇温する設計を目指し、材料と構造の再検討、およびシミュレーションによる最適化などについて検討を行う。

当社では、微細転写に関するニーズに対応する技術の一つ

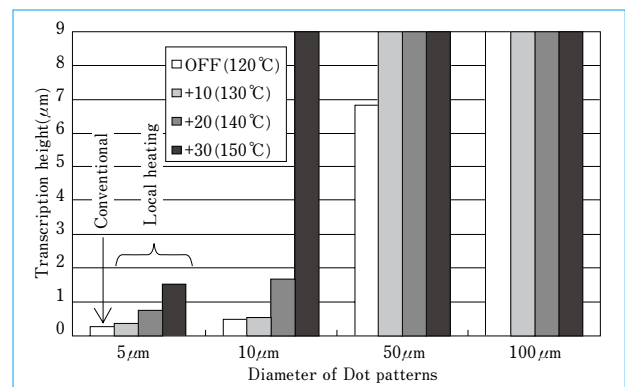


図9 転写高さ評価結果
Comparison of transcription height with various Dot patterns
(Stamper temperatures 120, 130, 140, 150℃)

として、局所温調システムを発展させ、今後も市場の要求に応えるべく開発を進めていく。

4 むすび

- (1) リソグラフィ技術を適用して製作した高パワー密度ヒータを金型に実装し、微細構造における転写性の向上と、サイクルタイム短縮による生産性の向上について検討するべく、種々の条件に対して成形実験を行った。
- (2) 熱インプリント装置に適用した場合には、スタンプ表面を短時間で温調することが可能となり、従来のサイクルタイムを1/10以下にすることに成功した。
- (3) 射出成形機に適用した場合、通常成形に比べ転写性の向上が確認された。直径 $10\mu\text{m}$ のDot形状においては、 $+30^\circ\text{C}$ の条件で転写高さが10倍に向上した。
- (4) 転写性および生産性をさらに向上させるべく、今後、設計最適化を行い、局所温調システムの高効率化を目指し、引き続き開発を進める。

(参考文献)

- (1) 張延平, 加藤隆典. シンクロトロン放射光を利用した微細加工. Proc. of the 2nd Symposium on Accelerator and Related Technology for Application, Tokyo, 1999.

くりこみ群分子動力学法の開発

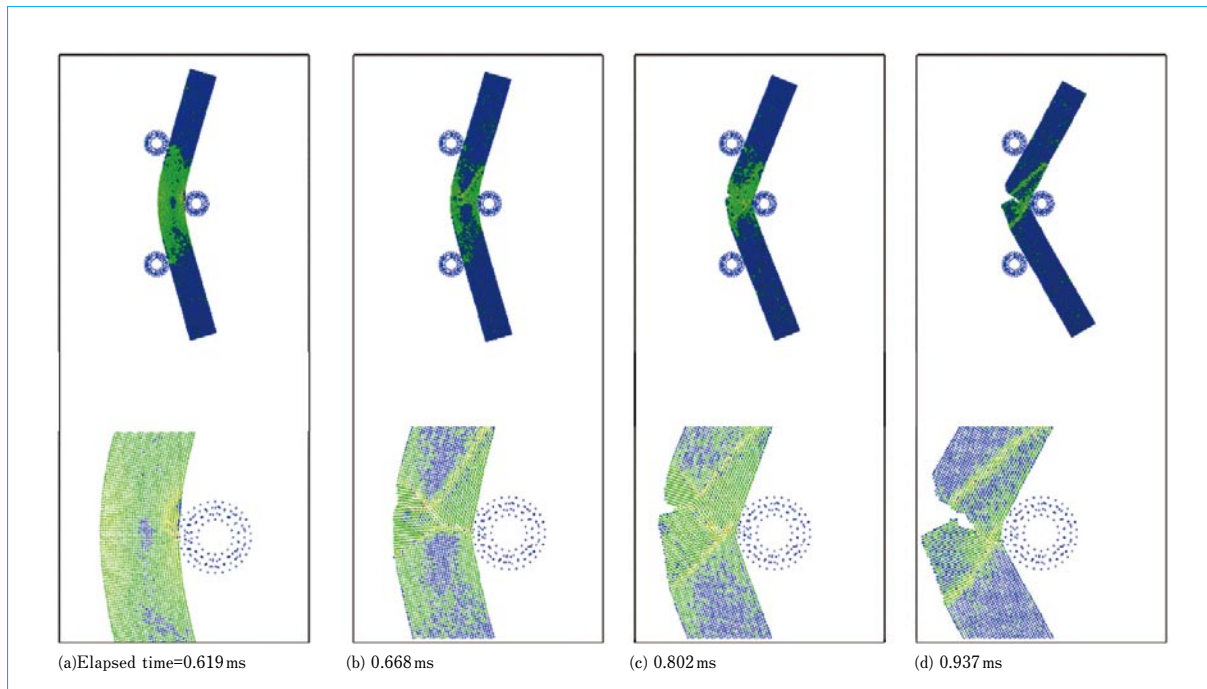
Renormalization Group Theory for Molecular Dynamics

●市嶋 大路* 大西 良孝* 広瀬 良太*

Daiji ICHISHIMA

Yoshitaka OHNISHI

Ryota HIROSE



3点曲げのシミュレーション (293 K)
Simulation of three-points bending at 293 K

我々は、マルチフィジックスやマルチスケールの現象について、計算機実験可能なくりこみ群分子動力学 (RMD) 法を開発した。

原子スケールの現象を計算機の力を借りて行う分子動力学法 (MD) は、マルチフィジックスの問題に適している。巨視的なスケールの現象に対しては、くりこみ理論を MD へ応用し計算負荷を大幅に低減した。繰り込まれた固定点ハミルトニアンは、分配関数を元に統計力学的な粗視化と再スケーリングにより導出した。

RMD 法は、原子スケールのシミュレーションから、従来の MD 法では不可能であった巨視的なスケールのシミュレーションを単一の手法で可能とした。

We developed a renormalized molecular dynamics (RMD) method that enables computer experiment of multi-physics and multi-scale phenomena. The molecular dynamics (MD) method, which uses the ability of a computer to calculate atomic-scale phenomena, is suitable for multi-physics issues. For macro-scale phenomena, we adopted the renormalization group theory for MD to substantially reduce the calculation loads. The fixed point Hamiltonians for RMD are derived directly from the partition function of MD through a coarse graining procedure and then re-scaling. The RMD method enables extensive simulations from atomic-scale calculation to macro-scale one, which was impossible with the conventional MD method.

1 まえがき

分子動力学 (Molecular Dynamics MD) 法⁽¹⁾⁽²⁾ は、古典的多粒子系の研究に広く用いられている方法である。MD 法の大きな利点は、バルク完全結晶だけでなく、表面、界面、結晶欠陥、非晶質、液体、クラスターおよび微粒子などの材料について、原子レベルの構造とその時間変化を求めることができる点にある。また、熱や電荷の伝導といった動的な現象や、平衡状態から非常に離れた系の緩和や相転移なども研究できる⁽³⁾。しかしながら、個々の粒子の運動方程式を数值的

に積分することから、現行の超高速計算機をもってしても、巨視的なスケールのシミュレーションが実現できない。

MD 法の計算効率を飛躍的に改善し、メゾスケールや連続体のスケールまで、シームレスにシミュレーション可能な手法が待望されている。粗視化された MD 法は、シームレスなシミュレーション⁽⁴⁾ が可能であるが、弾性領域に限定され、MD 法の利点が失われている。現在、構造単位を単一粒子とみなす粗視化 MD 法が主流であるが、粗視化された粒子間の相互作用を新たにモデル化する必要がある。

くりこみ理論⁽⁵⁾⁽⁶⁾ は、さまざまなサイズの現象が等しく大切な貢献をするような類の現象、例えば相転移点近傍の現象

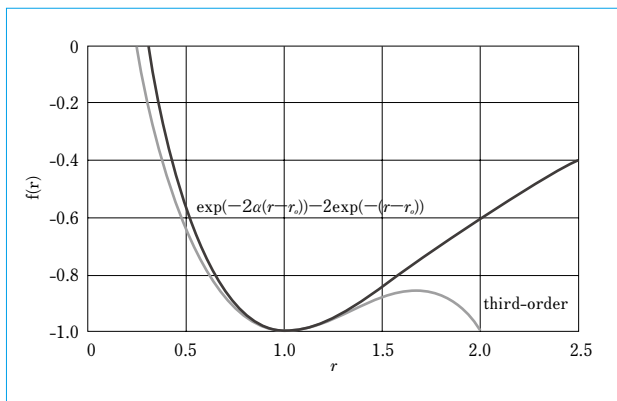


図1 原子間ポテンシャル (モースポテンシャル)
Atomic potential (Morse potential)

を解析するツールである。くりこみ理論を使えば、既に知られているミクロな性質、すなわち、ハミルトニアンからこの系のマクロな性質を予測することができる。ハミルトニアンにくりこみ群変換を行うことで、ハミルトニアンの形を不変に保ち、粒子数を桁違いに圧縮することができる。くりこみ群変換に際し、ハミルトニアンの形が不変(固定点)であるということは、繰り込まれた系の分解能は低下するが、元の系の運動と相似になることを意味する。つまり、ミクロな性質からマクロな性質を高効率に予測できることを意味する。くりこみ群変換の操作回数を調整することで、任意のスケールの現象をシミュレートすることが可能となる。

我々は、くりこみ理論⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾を使って、MDのハミルトニアンが固定点となる、くりこみ群変換⁽¹⁰⁾を導出した。そして、MD法の大きな利点を継承し、任意のサイズのシミュレーションが可能なくりこみ群分子動力学 (Renormalized Molecular Dynamics RMD)法を開発した。4例のシミュレーションを行い、RMDを検証した。ミクロな運動が起点となりマクロな破壊に至る3点曲げ試験のシミュレーション、そして転移点近傍において、さまざまなスケールの秩序が混在する溶融のシミュレーションはRMDが有効な例である。

2 分子動力学法のくりこみ

本章では、MD法で用いられるハミルトニアンのくりこみ変換則を導出する。

繰り込まれたハミルトニアンは、分配関数における積分の一部を実行し、ハミルトニアンを粗視化する。続いて、ハミルトニアンの形が不変となるように、積分変数をスケール変換することで得られる。

粒子数Nの正準集団に対する分配関数は、

$$Z(\beta) = \int d\Gamma_N \exp(-\beta H(p, q)), d\Gamma_N = \frac{1}{N! h^{3N}} \prod_{i=1}^N dp_i \cdot dq_i \equiv \frac{1}{W_N} D_N^N D_q^N, \dots (1)$$

$$H = \sum_{i=1}^N \left\{ \frac{p_i^2}{2m} + \sum_{j>i}^N \phi(q_i - q_j) \right\} \dots (2)$$

ここで、Hはハミルトニアン、 β は温度の逆数、 p_i 、 q_i は原子の運動量と座標、mは原子の質量、 ϕ は原子間ポテンシャルである。

2.1 原子間ポテンシャルの粗視化

原子間ポテンシャル ϕ (図1)を、鞍点($q = q_0$)周りで3次まで展開する。

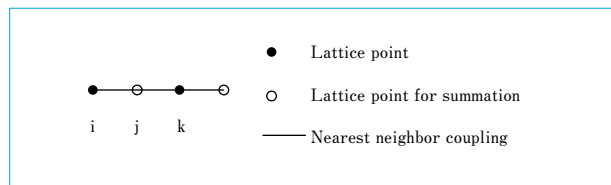


図2 1次元鎖
Linear chain

$$\phi(q_i - q_j) = \phi(q_0) + \frac{1}{2!} \phi^{(2)}(q_0)(q_i - q_j - q_0)^2 + \frac{1}{3!} \phi^{(3)}(q_0)(q_i - q_j - q_0)^3 \dots (3)$$

粒子iとkの中間に位置する粒子jを消去し、粗視化することを考える(図2)。粒子jが関与する相互作用を書き出し、粒子jの変位 $u_j(q_j = q_0 + u_j)$ 、 $\delta u_{ij} = u_i - u_j$ について積分を実行すれば、

$$\exp(-\beta \phi'(q_i - q_k)) = \int du_j \exp[-\beta \{ \phi(q_0 - \delta u_{ij}) + \phi(q_0 - \delta u_{jk}) \}]$$

$$= \sqrt{\frac{\pi/\beta}{\frac{1}{2} \phi^{(3)}(q_0) \delta u_{ik} + \phi^{(2)}(q_0)}} \exp \left[-2\beta \left\{ \phi(q_0) + \frac{1}{2!} \phi^{(2)}(q_0) \frac{\delta u_{ik}^2}{4} - \frac{1}{3!} \phi^{(3)}(q_0) \frac{\delta u_{ik}^3}{8} \right\} \right] \dots (4)$$

を得る。 $|1/2 \phi^{(3)}(q_0) \delta u_{ik}| \ll \phi^{(2)}(q_0)$ を仮定し、結果に影響しない係数を省略すれば、

$$\exp\{-\beta \phi'(q_i - q_k)\} \propto \exp\left\{-2\beta \phi\left(\frac{q_i - q_k}{2}\right)\right\} \dots (5)$$

が結論される。d次元の粗視化は、Potential Moving⁽⁸⁾の方法を用いることにより得られる。

$$\int D_q^N \exp\left(-\beta \sum_{i=1}^N \sum_{j>i}^N \phi(q_i - q_j)\right) \propto \int D_q^{N'} \exp\left(-\beta 2^d \sum_{i=1}^{N'} \sum_{k>i}^{N'} \phi\left(\frac{q_i - q_k}{2}\right)\right), \dots (6)$$

$$N' = N 2^{-d} \dots (7)$$

2.2 運動エネルギーの粗視化

i番目とi+1番目の粒子対について、重心の運動量 \mathbf{p}_k と相対の運動量 \mathbf{p}_r に分離し、相対運動についてのみ積分を実行する。この手続きは、高周波数の切断に他ならない。

粗視化の後、

$$\int D_p^N \exp\left(-\beta \sum_{i=1}^N \frac{p_i^2}{2m}\right) \propto \int D_p^{N'} \exp\left(-\beta 2^d \sum_{i=1}^{N'} \frac{p_i^2}{2m}\right), \dots (8)$$

$$N' = N 2^{-d}$$

を得る。

2.3 くりこみ群変換

以上の議論から、粗視化後の分配関数が、(6)式と(8)式から得られる。

$$Z(\beta) = \int d\Gamma_{N'} \exp\left[-\beta 2^d \sum_{i=1}^{N'} \left\{ \frac{p_i^2}{2m} + \sum_{k>i}^{N'} \phi\left(\frac{q_i - q_k}{2}\right) \right\}\right] \dots (9)$$

粗視化したハミルトニアンを元のハミルトニアン(2)式と同形とするべく、位相空間内の体積素 $d\mathbf{p} \cdot d\mathbf{q}$ が不変であるよう、変数をスケール変換する⁽¹⁰⁾。

$$\mathbf{q}' = 2^{-1} \mathbf{q}, \mathbf{p}' = 2 \mathbf{p}, \beta' = 2^d \beta \dots (10)$$

そして、原子数と質量を以下のように繰り込む⁽¹⁰⁾。

$$m' = 2^d m, N' = 2^{-d} N \dots (11)$$

くりこみ群変換(10)式と(11)式をRと書けば、くりこみ群変換されたハミルトニアン H_R は、分配関数(9)式から

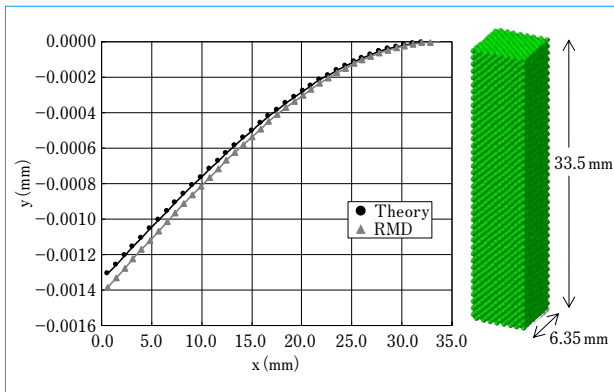


図3 片持ち梁の変位分布
Distribution of displacement for cantilever beam

$$H_n(p', q') = R(H(p, q)) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{p_i'^2}{2m} + \sum_{j>i}^N \phi(q_j' - q_i') \right] \dots\dots\dots (12)$$

となり、固定点にあることが分かる。n回のくりこみ群変換は、

$$R_n \equiv \underbrace{R \circ \dots \circ R}_n$$

であるから、 R_n は、

$$q' = 2^{-n}q, \quad p' = 2^n p, \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$m' = 2^{2n}m, \quad N' = 2^{-2n}N$$

となる。以下では、 $\alpha = 2^n$ と記す。

3 くりこみ群分子動力学法(RMD)

繰り込まれたハミルトニアン(12)式から、次の運動方程式を得る。

$$\frac{dp_i'}{dt} = -\frac{\partial}{\partial q_i'} \sum_{j>i}^N \phi(q_j' - q_i'), \quad (i=1, \dots, N) \dots\dots\dots (14)$$

$$\frac{dq_i'}{dt} = \frac{p_i'}{m'}$$

運動方程式は、シンプレクティック性を持つベルレ法⁽¹⁾により数値積分を行う。時間刻みは、質量が繰り込まれた結果、MDの時間刻みの α 倍に取ることができる。

物理量は、例えば、温度 T や応力 σ_{ij} は次のように、統計力学から求めることができる⁽²⁾。なお、繰り込まれた系を示すプライムは省略する。

$$T = \frac{2}{3Nk_B} \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} m_i v_i^2 \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^N \left(m_i v_{ix} v_{iy} - q_{ix} \frac{\partial}{\partial q_{iy}} \sum_{j>i}^N \phi(q_j - q_i) \right) \dots\dots\dots (16)$$

得られた結果は、元の系と相似であり、変換(13)式を使って元のサイズへ変換する。応力と温度は、くりこみ変換に際して不変である。

4 くりこみ群分子動力学法の検証

アルミニウム(fcc構造)に対して、4例のシミュレーションを実施した。原子間ポテンシャルは、

$$\phi(r) = \epsilon (\exp\{-2a(r-r_0)\} - 2\exp\{-a(r-r_0)\}) \quad \dots\dots\dots (17)$$

$$a = 23.5 \times 10^9 (\text{m}^{-1}), \quad \epsilon = 1.92 \times 10^{-20} (\text{J}), \quad r_0 = 0.286 \times 10^{-9} (\text{m}) \quad \dots (18)$$

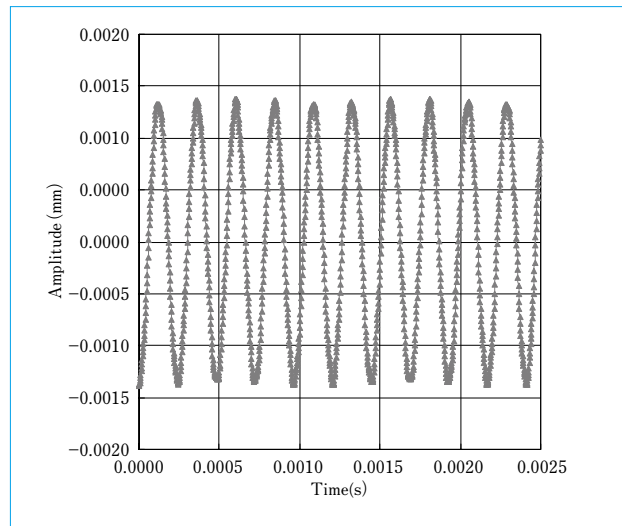


図4 片持ち梁の固有振動
Vibration of cantilever beam

で表せるモースポテンシャルを使用する⁽¹¹⁾。

4.1 片持ち梁の曲げ

長さ33.5mm、断面積6.35×6.35mmの片持ち梁を曲げたときの結果を、図3に示す。ティモシェンコの梁理論(ヤング率 $E: 7.03 \times 10^{10}$ Pa, ずれ弾性率 $G: 4.34 \times 10^{10}$ Pa)と比較した。不一致の原因は、断面積が設定値より小さいことによる。ここでは、繰り込まれた原子数 N' は10240個($\alpha = 2^3$)である。

線形領域を超えた変形も、当然可能である。(4.3参照)

4.2 片持ち梁の固有振動

次に4.1と同様な寸法の片持ち梁を振動させ、固有振動数を計測した結果を、図4に示す。RMD法による結果が、 2.61×10^4 rad/sである。固有振動数の理論値⁽¹²⁾は、 2.9×10^4 rad/sである。

4.3 3点曲げ試験

67.5×6.35mmの薄い平板に対して、3点曲げ試験のシミュレーション⁽¹³⁾を行った。両端の温度を293Kに制御した。破壊に至る過程のスナップショットを冒頭の図に、最大引張応力の最大値の時間変化を図5に示す。図5から観察されるクラック発生直前の最大引張応力(最大主応力)は、10~15GPaであり、アルミニウムの理想引張強度 $E/(2\pi) = 11$ GPaにかなり近い値を示す。ここでは、繰り込まれた原子数 N' は20480個($\alpha = 2^{20}$)である。破壊現象は、ミクロな運動が起点になり、マクロな破壊に到るものである。このようなシミュレーションは、RMD法が有効である。

現実の材料の強度は、欠陥の存在から、理想強度よりも桁違いに低い。実用へ向けて、欠陥を含む多結晶体の生成方法を確立する必要がある。

4.4 融点と潜熱の計測

アルミニウムの潜熱を計測した結果⁽¹⁰⁾を、図6に示す。底面を加熱し、温度を上昇させた。側面には、周期的境界条件を適用した。下段が16000原子のMD、中段が原子数を1/8に、上段が原子数を1/64に繰り込んだRMDの結果である。くりこみ後も、融点や潜熱がMDの結果と一致することが分かる。これは、融点近傍において、さまざまなスケールの秩序を持つ現象を、高効率にシミュレートできるこ

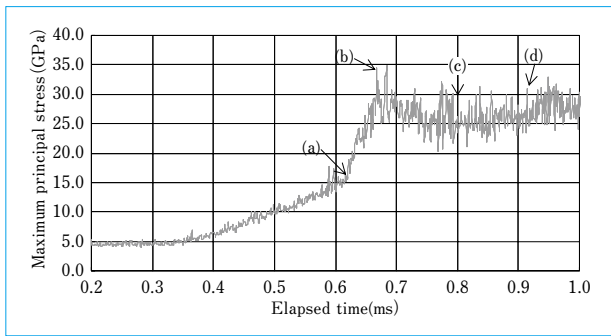


図5 最大引張応力の最大値の時間発展
Change of maximum value of maximum principal stress

とを示している。相転移を含む巨視的な現象を、容易にシミュレートできる点がRMD法の特徴である。

5 むすび

くりこみ群の手法を分子動力学(MD)に応用し、くりこみ群分子動力学(RMD)法を開発した。片持ち梁の曲げ、片持ち梁の振動、3点曲げ試験、そして溶融のシミュレーションからRMD法の正当性を確認した。次に、RMD法の利点を列記する。

- (1) 測定容易な物性値や現象から原子間ポテンシャルを決定してしまえば、実測困難な物性や未知の現象が予測できる。
- (2) MDの利点を継承し、メソスケールや巨視的なスケールの現象も高効率にシミュレートすることができる。
- (3) 連続体近似に基づく手法において問題となる、連成、接触、相転移および破壊などのモデル化が原理的に必要とされない。

今後は、さまざまなスケールや現象に対してシミュレーションを実施し、RMDの有用性を立証していく。

(参考文献)

- (1) J.M.Thijssen.Computational Physics.Cambridge University Press, 1999,p.179.
- (2) 日本機械学会編.原子・分子モデルを用いる数値シミュレーション.コロナ社,2001,p.11.
- (3) 市嶋大路,大西良孝,宗像昭彦,山西利幸.窒素エアロゾル洗浄装置の開発と分子動力学法による洗浄機構の解明.シミュレーション,vol.23,no.2,2004,p.123.
- (4) Robert E.Rudd,JeremyQ.Broughton.Coarse-grained molecular dynamics and the atomic limit of finite elements.Phys.Rev.B,vol.58,no.10,1998,p.5893-5896.
- (5) くりこみ理論の地平.数理化学,no.406,1997.
- (6) 眞隅泰三編.凝縮系の物理.別冊日経サイエンス121,1997,p.158.
- (7) Leo P.Kadanoff.STATISTICAL PHYSICS Statics,Dynamics and Renormalization.World Scientific,Sec.13.5,1999.
- (8) Leo P.Kadanoff.STATISTICAL PHYSICS Statics,Dynamics and Renormalization.World Scientific,Sec.14.4,1999.
- (9) K.HUNANG.STATISTICAL MECHANICS.John Wiley & Sons, Chap.18,1987.
- (10) 市嶋大路,大西良孝.シミュレーション方法及びプログラム.特開2006-285866.
- (11) Cotterill,R.J.M.,Doyama,M..Lattice Defect and Their Interactions. Gordon and Breach,1967.
- (12) エリ・デ・ランダウ,イエ・エム・リフシッツ.佐藤常三訳.弾性理論.東京図書,1983,p.144.
- (13) 田中弘明,島田尚一,井川直哉.単結晶シリコンにおける塑性変形

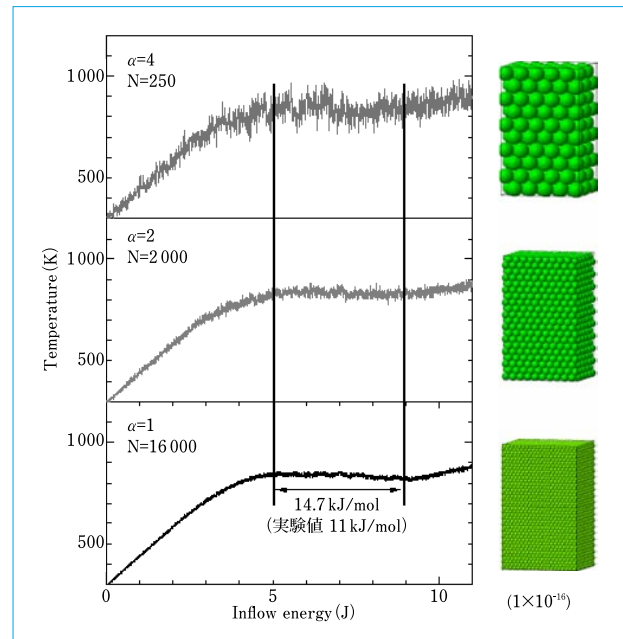


図6 アルミニウムの溶融シミュレーション ($\alpha=1,2,4$)
Simulation of melt for aluminum ($\alpha=1,2,4$)

発生とクラック生成の条件.第7回分子動力学シンポジウム講演論文集,2002,p.66.

船用高効率プロペラ(NBSプロペラ)の性能

Advantages of New Blade Section Propeller

●青野 健* 岩本 三郎* 高井 通雄*
Takeshi AONO Saburo IWAMOTO Michio TAKAI

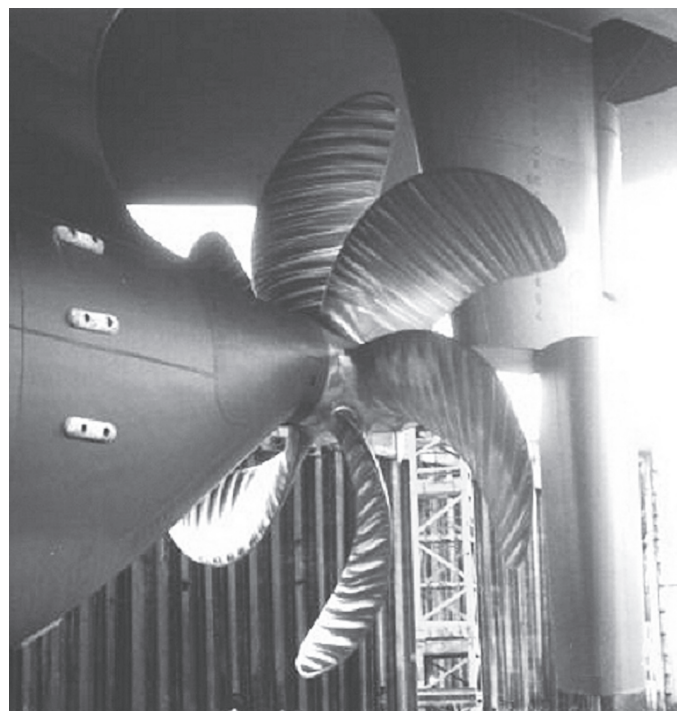


図1 NBSプロペラ
NBS propeller

NBS(New Blade Section) プロペラは、従来よりもコンパクトでありながら、高い推進効率が得られる高性能プロペラであり、住友重機械マリンエンジニアリング株式会社によって開発された。NBS プロペラの直径は同条件で設計された従来プロペラよりも約5%小さく、その重量は約20%軽くなる。NBS プロペラの採用により、次の利点を得ることができる。

それは、(1)消費燃料およびCO₂排出を削減できる、(2)振動が少なく、安全な船を供給できる、(3)船の設計自由度を増すことで商品競争力を向上できる、および(4)コスト削減のみならず資源の節約にも貢献できる、の4点である。

NBS プロペラの高い信頼性は、1999年以降の200隻を超える実船の実績によって証明されている。

NBS (New Blade Section) propeller, developed by Sumitomo Heavy Industries Marine & Engineering Co.,Ltd. is not only high propulsive performance propeller but also compact propeller. The diameter of the NBS propeller is approximately 5% smaller, and the weight is approximately 20% smaller, than conventional propellers that are designed under the same conditions. Advantages of NBS propeller are;1) Reduction of fuel oil consumption and CO₂ emission in the navigation, 2) Reduction of hull vibration, 3) Increase of design flexibility and the value of the vessel and 4) Contribution to the cost and material resources saving. The high reliability of the NBS propeller has been proven through its installation in more than 200 vessels since 1999.

1 まえがき

地球温暖化防止を目的とした二酸化炭素排出量の削減や燃料の高騰が世界共通の問題となった今日、船舶においても省エネルギー化が求められている。一方、より多くの荷物を安全かつ低コストで輸送する能力を持ち、さらに使い勝手が良く低価格で市場投入できる船は高い商品競争力を持つことから、設計者はこのような船の開発を目指してさまざまな研究を行っている。そのなかでも、船の推進装置であるプロペラ

の開発は、それ単独での性能改善が消費燃料削減に直結することから、影響力は非常に大きい。さらに、プロペラが船体とは別に製造されるので、既に船型設計が完了している船や就航船に対しても後から比較的容易に新設計を採用できるという特長がある。

NBS プロペラ⁽¹⁾(図1)は新型翼断面(New Blade Section)⁽²⁾の効果により従来よりも高い推進効率を得ることができるプロペラであり、これにより消費燃料を削減できるほか、さらに広い意味で船の商品競争力向上にも貢献する。

表1 NBSプロペラの主要目
Major specifications of typical NBS propeller

Blade section	NBS	Conventional
Diameter(m)	6.8	7.2
Pitch ratio(0.7R)	0.74	0.66
Expanded area ratio	0.43	0.47
Number of blades	4	4
Weight(%)	79	100

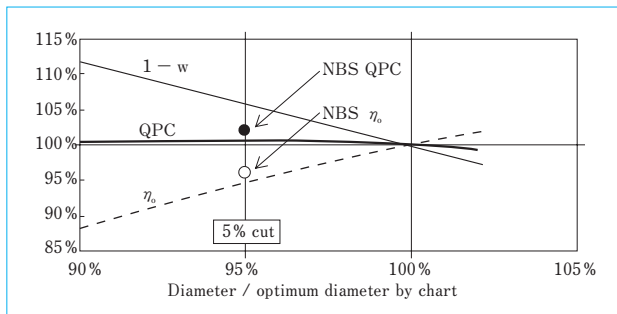


図2 直径と推進効率などの関係
Relationship between propeller diameter and QPC etc.

本報では2章でNBSプロペラの特長を、3章でNBSプロペラ採用による利点を、4章でNBSプロペラの実績について紹介する。

2 NBSプロペラの特長

2.1 NBSプロペラと従来プロペラ

表1に、代表的なNBSプロペラの主要目を同条件で設計された従来プロペラと比較して示す。この表が示す通り、NBSプロペラの大きな特長として、従来よりも小直径・高ピッチということがあげられる。プロペラ直径は船の性能を決定するうえで重要なパラメータの一つであるが、最適に設計されたNBSプロペラの直径は従来よりも約5%小さい。

NBSプロペラに採用されている新型翼断面はキャビテーション発生が抑えられ、単位面積当たりの発生スラストが大きいという特性を持っている。この断面を採用することにより、これまで小直径化の際にネックとなってきた高ピッチ化と展開面積拡大の問題を解決することができた。次節からは、このNBSプロペラの持つ性能について具体的に紹介する。

2.2 NBSプロペラの推進性能

従来からプロペラの直径は、最適な単独効率が得られる設計チャート⁽³⁾に基づいて決定されるのが一般的である。しかし、プロペラが船に装備されたときに主機の出力が推進力に変換される割合を意味する推進効率として評価すると単独効率最適で設計されたプロペラが必ずしも最大にはならず、少し小直径で最適になることが知られている⁽⁴⁾。なお、推進効率(=QPC)は次の式で定義される。

$$QPC = (1 - t) / (1 - w) \cdot \eta_R \cdot \eta_0$$

1 - t スラスト減少係数 1 - w 伴流係数
η_R プロペラ効率比 η₀ プロペラ単独効率

小直径・高ピッチという特長を持つNBSプロペラは、次の点で推進効率を高める要素を備えている。

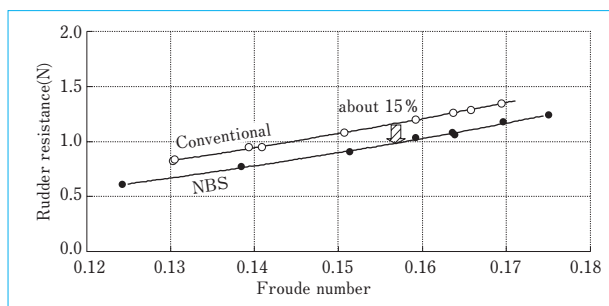


図3 プロペラによる舵抵抗の違い
Rudder resistance behind NBS and conventional propeller

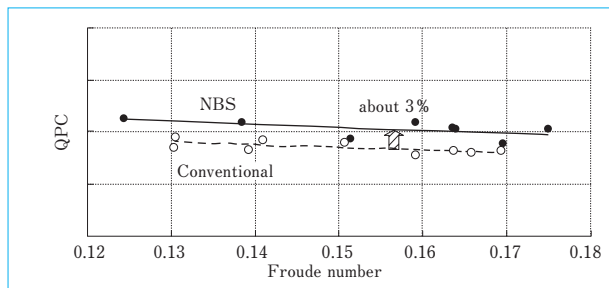


図4 推進効率の比較
Improvement in QPC by NBS propeller

- (1) 伴流係数(1 - w)の良化
- (2) 展開面積減少による単独効率(η₀)の良化
- (3) 舵抵抗の減少による(1 - t)の良化

2.2.1 伴流係数(1 - w)の良化

図2に、肥大船型で検討されたプロペラ直径と伴流係数などの関係を示す。直径と伴流係数の関係を細実線で、従来型プロペラ(MAU)における単独効率との関係を破線で、そのときの推進効率を太実線で示している。なお、この計算では後述するスラスト減少係数の良化は考慮していない。小直径になるにつれてプロペラ単独効率が悪化する一方で、伴流係数の良化がそれを上回ることから、推進効率で評価すると従来の最適直径よりも約5%小直径で良化が見られた。

2.2.2 展開面積減少による(η₀)の良化

先述の図2に、○でNBSプロペラの単独効率を、●でNBSプロペラの推進効率を示した。NBSプロペラは小面積でも十分なスラストとキャビテーション性能が得られる新型断面を採用していることから、その展開面積は従来プロペラより10~20%程度小さくなる。翼面積の減少により粘性抵抗が相対的に低減されることから、NBSプロペラは従来の翼断面で小直径するよりも効率の良いプロペラとなる。

2.2.3 舵抵抗の減少による(1 - t)の良化

プロペラと舵の干渉により、高ピッチプロペラの後流中に置かれた舵の抵抗は相対的に小さくなる⁽⁵⁾。図3は、表1で示したプロペラを同じ模型船に装着して計測された舵抵抗の比較である。この試験では、NBSプロペラの舵抵抗が従来プロペラのものよりも約15%減少していることが確認された。

この舵抵抗の成分は従来の自航試験ではスラスト減少係数の一部として解析されることから、NBSプロペラの採用によりスラスト減少係数が良化することになる。

2.2.4 NBSプロペラによる推進効率の向上

図4に、表1で示したプロペラの自航試験で得られた推

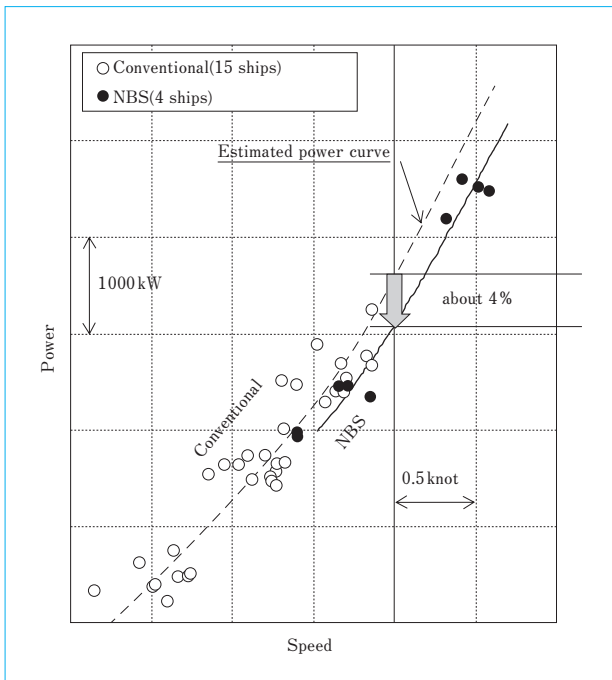


図5 試運転結果の比較(パナマックスバルクキャリア)
Comparison of sea trial results (PANAMAX BC)

進効率を示す。NBSプロペラの推進効率は従来プロペラと比較して約3% 良化した。また、船型は異なるが、図5に、同型船に装備された両プロペラの試運転での計測結果を示す。これらの結果では約4%の馬力低減、すなわち消費燃料削減が認められた。

2.3 NBSプロペラのキャビテーション性能

図6⁽⁶⁾に、同じ設計条件、同直径および同展開面積で翼断面とピッチのみが異なる2種のプロペラのキャビテーションパターンを比較して示す。この図に見られる通り、NBSプロペラに用いている新型翼断面のキャビテーション発生量は従来プロペラよりも少ない。そして、この優位性はキャビテーション条件が厳しい高速船用のプロペラにおいて非常に有効であることはもちろん、低速肥大船用のようにキャビテーション条件がそれほど厳しくないプロペラにおいても、従来プロペラと同等のキャビテーション性能を確保したうえで小直径・小展開面積化を可能にしている。

2.4 NBSプロペラによる振動軽減

図7には、表1のプロペラのキャビテーション試験で計測されたプロペラ直上での船体表面変動圧力を示す。小直径のNBSプロペラでは船体とプロペラのクリアランスが広がることから、船体振動の原因の一つである変動圧力は小さくなるが、本結果からも振動軽減効果が確認できる。

3 NBSプロペラ採用の利点

本章ではNBSプロペラによってもたらされる利点について、運航者と造船所の視点から考える。

3.1 運航者の視点

NBSプロペラの採用が船の運航者に与える利点としては、主に次のようなことが考えられる。

- (1) 消費燃料削減(満載・バラスト)
- (2) 視界の良化
- (3) 振動軽減による乗り心地向上

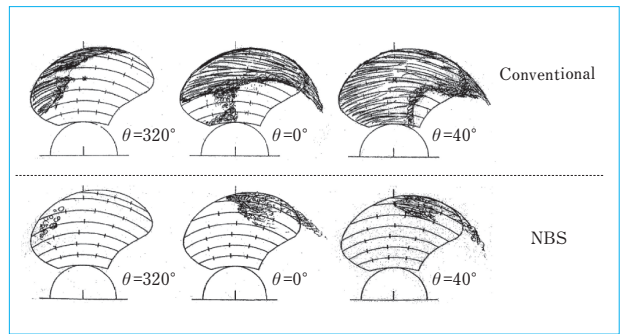


図6 キャビテーションパターンの比較
Comparison of cavitation phenomena

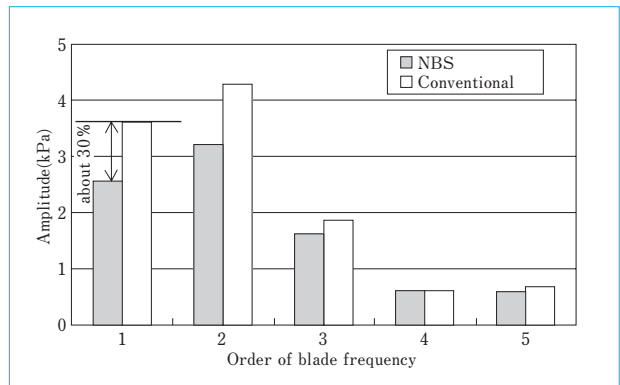


図7 船尾変動圧力の比較(アフラマックスタンカー)
Comparison of pressure fluctuations (AFRAMAX tanker)

(4) 作業性向上

通常消費燃料削減効果については2章で述べたので、ここではバラスト航海時の利点について紹介する。小直径化によりプロペラ没水に必要な船尾喫水が相対的に浅くなることから、トリムと排水量が減少して消費燃料が削減できる。この良化量は船型の影響を強く受けるものの肥大船では約3% 良化した例もあり、バラスト航海が多い船ほど効果は大きい。また、船尾トリムの減少は操船者の前方視界を広げる(ブラインドゾーンを狭くすることから衝突事故の危険性を減らすことができる。さらにバラストタンク容量の削減によりバラストポンプの運転時間を削減できるとともにバラストタンク内の塗装メンテナンスを楽にするという利点も得ることができる。

3.2 造船所の視点

NBSプロペラは消費燃料を削減するだけでなく、船全体の設計自由度を増やすことによって商品競争力向上に貢献する。もちろん従来プロペラを想定して設計された既存船でもある程度の利点の確保は可能であるが、船の基本設計の段階からNBSプロペラを想定していれば、開発目標に合わせて主要目、主機の選定および概略線図などの選択肢が広がるからである。次に、代表的な利点の例を示す。

- (1) 主機選定自由度の増加
- (2) 船尾まわり設計の自由度増加
- (3) バラストタンク小型化に伴うフリースペースの増加
- (4) プロペラ、軸系、船尾骨材および防振装置などの小型・軽量化

NBSプロペラの特長である「同じ主機条件で小直径化」を言い換えると、「従来と同じ直径で低回転化」が可能という

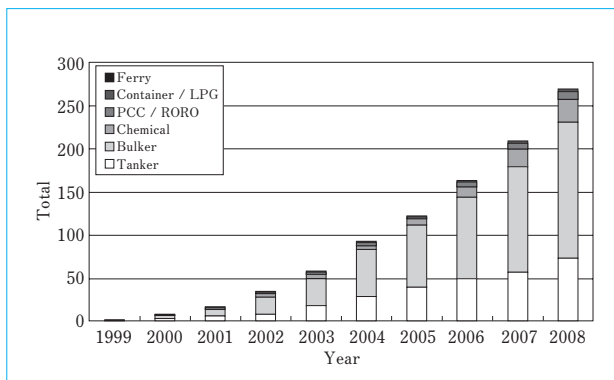


図8 NBSプロペラの採用実績
Delivery of NBS propeller

ことになる。つまり、低回転化と小直径化のトレードオフで開発目的に合わせた主機を選定しやすくなる。また小直径化はプロペラ軸心高さを下げ、船尾プロファイルの制約を緩和し、バラスタングの小型化を可能にする。これらは機関室や舵まわりの設計自由度を増加させるとともに、貨物室容積の増加あるいは船全体の小型化といったトレードオフを可能にする。浅喫水やシューピース付きの船型など、直径制限が厳しい船型にも採用しやすい。さらに、プロペラ重量が約20%軽量化されることで軸系装置類の小型化も可能になる。燃料油や鋼材資源が高騰する今日、NBSプロペラの採用はコスト面でも大きな利益をもたらすのみならず、鋼材資源などの節約にも貢献するといえる。

4 NBSプロペラの実船採用例

図8に、NBSプロペラの実績を示す。NBSプロペラは、1999年の第1船から既に200隻を超える船に採用されている。NBSプロペラと従来プロペラとの違いが翼の設計のみであることから、プロペラを装備する船であれば船型、機構および材質を問わずに採用することが可能で、必要なメンテナンスも従来と変わらない。また、プロペラ前後に装備される省エネルギー装置との相性についても基本的には従来プロペラと同等以上であると考えられており、例えば高効率のHLES舵(Sumitomo High Leading Edge Suction rudder)⁽⁷⁾とともに同型船に装備された事例では、図9に示す通り両者の効果を合わせて8%もの消費燃料削減効果が計測されている。

NBSプロペラは自社建造船だけではなくほかの造船所でも採用されており、それらが今までトラブルなく就航していることもその信頼性と高評価を証明していると考えられる。

5 むすび

従来プロペラよりも小直径、高ピッチおよび軽量という特長を持つNBSプロペラを採用することにより、

- (1) 消費燃料およびCO₂排出を削減できる。
- (2) 振動が少なく、安全な船を供給できる。
- (3) 船の設計自由度を増すことで商品競争力を向上できる。
- (4) コスト削減のみならず資源の節約にも貢献できる。

などの利点を得ることができる。

本報に示した試運転結果の一部は、北日本造船株式会社よ

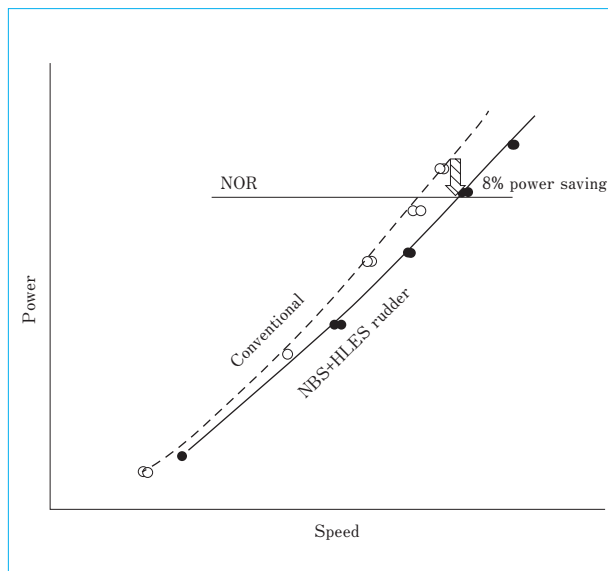


図9 試運転結果の比較(ケミカルタンカー)
Trial results (Chemical tanker)

りの提供であり、ここに感謝の意を表する。

(参考文献)

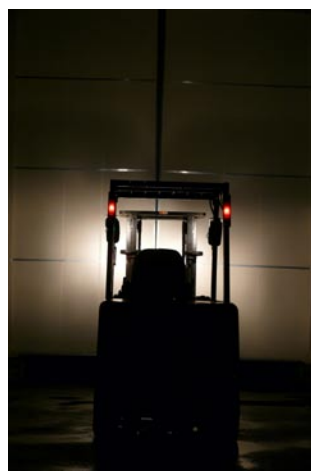
- (1) 住友重機械マリンエンジニアリング株式会社. プロペラの設計方法およびこの設計方法におけるBp-δチャートの最適値範囲変更方法. 特許第3470316号.
- (2) 青野健ほか. 新型断面を用いた小型高効率プロペラの開発. 日本船舶海洋工学会講演会論文集第一号, 2005.
- (3) 矢崎敦生. AU型プロペラ設計法に関する研究. 運研報告, 1961 ほか.
- (4) G.Patience. The Contribution of the Propeller to Energy Conservation in Ship Operation. Trans IMARE, vol. 94, 1982.
- (5) 中武一明. 自航推進性能の計算法. 船型設計のための抵抗・推進理論シンポジウム(日本造船学会), 1979.
- (6) 右近良孝ほか. トランスキャビテーション・プロペラの性能評価. 日本造船学会論文集第186号, 1999.
- (7) 住友重機械マリンエンジニアリング株式会社. 舵. 特許第3465160号.

LEDライトシステム

LEDs Pack for Electric Forklift



LED式前照灯



フィラメント式前照灯

近年、安全意識の向上とともに事故を未然に防ぐべく、運転席に着座しないと走行や荷役操作をしても動かない機能など、フォークリフトにもいろいろな安全機能が装着されはじめた。

しかし、薄暗い倉庫内および工場内の稼働において事故防止に重要な役割を担う照明には、昔ながらのフィラメントを使用した電球が使用されている。寿命が短く、頻りに電球交換をする必要が発生することから、その煩わしさから電球が切れても作業を続けることも多々あり、安全管理面で問題があった。また、電球の交換作業が発生することにより、車輦管理工数・作業効率面および費用面からも問題があった。

このことから、安全重視やトータルコスト低減を望む顧客の要望に応じて、LED式ライトをオプション設定した。

主要仕様

前照灯	DC12-48V 0.5A(48V 500Lumens)
リヤコンビライト	ブレーキランプ/後退灯/方向指示器用ランプ
	DC12V 0.4A(全点灯時)

特長

(1) 48VよりDC-DCコンバータで降圧し、LEDライトの電源とした。また、これにより電気車特有のノイズからLEDライトを保護することができた。

- (2) LEDライトの寿命は40000時間以上あり、フィラメント式に比べ最大100倍の長寿命となる。
- (3) 前照灯はフィラメント式に比べ上下方向に2倍以上照射範囲が広く、視認性のよい白い光で高積み作業時の安全性が向上する。
- (4) 長寿命からメンテナンスの必要がほとんどなく、電球交換による作業時間のロスの軽減により作業効率の向上を実現する。
- (5) LEDライトの消費電力は従来のフィラメント使用品に対して50%以下であることから、連続点灯の顧客では稼働時間が約15分(50%稼働率)伸び、省エネルギー化を実現した。

(住友ナコ マテリアル ハンドリング株式会社 林 義人)

主要営業品目

変減速機、**インバータ**

●機械式減速機：[同心軸]サイクロ減速機,サイクロギヤモーターアルタックス,精密制御用サイクロ減速機,プレストギヤモータ,コンパワー遊星歯車減速機,[平行軸]パラマックス減速機,ヘリカルバディボックス,[直交軸]パラマックス減速機,ハイボニック減速機,アステロ直交ギヤヘッド,ベベルバディボックス,ライタックス減速機,HEDCON ウォーム減速機,小形ウォーム減速機
●変速機:[機械式変速機]バイエル無段変速機,バイエル・サイクロ可変減速機,[電気式変速機]インバータ,インバータ搭載ギヤモータ,サーボドライブ,DCドライブ

サイクロ,アルタックス,コンパワー,パラマックス,パディボックス,ハイボニック減速機,アステロ,ライタックス,HEDCON,バイエルおよびバイエル・サイクロは,住友重機械工業株式会社の登録商標です。

プラスチック加工機械

●プラスチック加工機械：射出成形機,射出吹込成形機,ディスク成形機,セラミックス成形機
●フィルム加工機：押出機,フィルム製造装置,ラミネート装置
●IC 封止プレス
●ガラスプレス
●成形システム・金型：射出成形用金型,PET システム,インジェクションフロー成形システム,インモールドラベリング成形システム

レーザ加工システム

●レーザドリル装置
●レーザアニーリング装置
●YAG レーザと加工システム
●エキシマレーザと加工システム

半導体・液晶関連機器

●イオン注入装置
●放射光リング・AURORA,放射光ビームライン
●成膜装置：(液晶フラットパネル用) プラズマ薄膜形成システム
●精密位置決め装置 XY ステージ
●モーションコーポネント
●ライン駆動用制御システム
●マイクロマシン
●レーザアニーリング装置
●半導体封止装置
●ウエハ研削装置

AURORA は,住友重機械工業株式会社の登録商標です。

環境施設

●環境・エネルギー関連プラント：都市ごみ焼却施設,リサイクル施設,流動層ガス化溶融炉,産業用廃棄物処理施設
●大気関連プラント：電気集塵装置,灰処理装置,乾式脱硫・脱硝装置
●水関連プラント：上水処理施設,下水処理施設,浸出水処理施設
●産業廃水処理装置

加速器、**医療機器**、**精密機器**、**極低温機器**、**超電導磁石**

●イオン加速器：サイクロトロン,ライナック,シンクロトロン
●電子線照射装置
●医療機器：PET診断用サイクロトロン・CYPRIS,標識化合物合成装置,がん治療用陽子サイクロトロン,治療照射装置
●冷凍機：バルスチューブ冷凍機,4KGM 冷凍機,スターリング冷凍機,クライオポンプ用冷凍機,MRI 用冷凍機
●人工衛星搭載観測装置冷却システム
●超電導磁石：ヘリウムフリー超電導マグネット

CYPRIS は,住友重機械工業株式会社の登録商標です。

事業所

本社	〒 141-6025	東京都品川区大崎2丁目1番1号(ThinkPark Tower)	技術開発センター	〒 237-8555	神奈川県横須賀市夏島町19番地
関西支社	〒 541-0041	大阪市中央区北浜4丁目7番26号(住友ビル 2 号館)	技術開発センター(田 無)	〒 188-8585	東京都西東京市谷戸町2丁目1番1号
中部支社	〒 461-0005	名古屋市東区東桜1丁目10番24号(栄大野ビル)			
九州支社	〒 810-0801	福岡市博多区中洲5丁目6番20号明治安田生命福岡ビル)			
田無製造所	〒 188-8585	東京都西東京市谷戸町2丁目1番1号			
千葉製造所	〒 263-0001	千葉県稲毛区長沼原町731番地1			
横須賀製造所	〒 237-8555	神奈川県横須賀市夏島町19番地			
名古屋製造所	〒 474-8501	愛知県大府市朝日町6丁目1番地			
岡山製造所	〒 713-8501	岡山県倉敷市玉島乙島新湊 8230番地			
愛媛製造所					本号に関するお問い合わせは、技術本部技報編集事務局(電話番号は下記)宛お願い致します。
新居浜工場	〒 792-8588	愛媛県新居浜市惣開町5番2号			
西条工場	〒 799-1393	愛媛県西条市今在家1501番地			住友重機械工業株式会社のホームページ http://www.shi.co.jp/

物流・パーキングシステム

●自動倉庫システム
●高速自動仕分システム
●FMS/FA システム
●無人搬送システム
●機械式駐車場
●動く歩道

金属加工機械

●鍛圧機械：フォージングプレス,油圧プレス,フォージングロール,超高压発生装置
●工作機械,クーラント処理装置
●SPS(放電プラズマ焼結機)

運搬荷役機械

連続式アンローダ,港湾荷役クレーン(コンテナクレーン,タイヤマウント式ジブクレーン,タイヤマウント式LLC),トランスファクレーン,ジブクレーン,ゴライアスクレーン,天井クレーン,製鋼クレーン,自動クレーン,ヤード機器 (スタッカ,リクレーマ,スタッカ/リクレーマ),シップロータ,ベルトコンベアおよびコンベアシステム,リフティングマグネット装置

船舶海洋

●船舶：油槽船,撒積運搬船,鉱石運搬船,鉱油兼用船,コンテナ船,自動車運搬船,LPG船,LNG船,カーフェリー,ラッシュ船,作業船,大型洋式帆船,巡視船,他
●海洋構造物：海洋石油生産関連構造物,浮体式防災基地,浮体式海釣施設,その他海洋構造物
●海洋開発機器：各種ブイ,船用環境機器

インフラ整備関連

●橋梁：一般橋,長大橋
●海洋・港湾構造物：沈埋函,ケーソン

化学機械、**プラント**

●一般プラント：紙・パルプ製造装置,化学装置,原子力装置
●発電設備：循環流動層ボイラ
●圧力容器：リアクタ,塔,槽,熱交換器
●攪拌混合システム：マックスブレンド攪拌槽,スーパーブレンド(同心2軸型攪拌槽),バイボラック (横型2軸反応装置)
マックスブレンドおよびバイボラックは,住友重機械工業株式会社の登録商標です。

建設機械、**産業車輛**

油圧式ショベル,移動式環境保全およびリサイクル機械,杭打機,道路舗装機械,フォークリフト

タービン、**ポンプ**

蒸気タービン,プロセスポンプ

その他

航空用機器,精密鋳鍛造品,防衛装備品(各種機関銃,機関砲およびシステム)

※文章中のソフトウェア等の商標表示は、省略しております。

技報編集委員

委員	渡辺哲郎	委員	木村一博
	石塚正之		天野光昭
	平田徹		木村良幸
	梅田健太郎		江川健一
	伊藤亮平		大須賀浩幸
	西原秀司		村野賢一
	太田朝也		市原浩一
	三田秀樹		久保隆史
	川井浩生		日南敦
	池田茂		
	乃美和博	事務局	技術本部

住友重機械技報

第168号 非売品

2008年12月10日印刷 12月20日発行

発行 住友重機械工業株式会社

〒 141-6025 東京都品川区大崎2丁目1番1号 (ThinkPark Tower)

お問い合わせ電話 横須賀 046-869-2302

発行人 吉井明彦

無断転載・複製を禁ず ©