

# 住友重機械技報

Sumitomo  
Heavy Industries  
Technical Review

加工システム小特集  
**No.149**

## < 加工システム小特集 >

論文・報告	プリント基板の穴開け加工法	1
	若林直木, 井手隆裕, 青木 康, 磯 圭二	
技術解説	ナノクラウニングシステム	5
	田口 滋, 山本次郎, 浜田史郎	
論文・報告	高精度レーザ加工システム用XYステージの開発	7
	牧野健一, 富田良幸, 杉峰正信	
論文・報告	両頭研削機の送り軸系の非線形シミュレーション	13
	塚原真一郎, 富田良幸	
論文・報告	成形現場向け品質管理システム iii-System	17
	広住 均	
論文・報告	電動式射出成形機の新逆流防止装置 SK制御	21
	今野政昭	
論文・報告	最新の紙・板紙抄紙機	25
	桑川博親	
新製品紹介	全電動式射出成形機 SE-Dシリーズレンズ専用機	29
新製品紹介	マイクロオプティクス成形機 NANO-Press	30
新製品紹介	全電動式縦型ロータリー射出成形機 SR100	31
新製品紹介	全電動式 2 材成形機 SE200D-CI	32

## < 論文・報告 >

放電プラズマ焼結の設計支援ソフトの開発	33
石田浩修, 森岡真一, 荒木達朗, 河野裕嗣, 堤 真司	
那覇港沈埋函の製作・積み込み	37
前田 滋, 山平喜一郎, 佐藤 隆, 河野信久	
0.1W@4K小型GM冷凍機の開発	41
丸山 徹, 池谷陽一郎, 小林 令	

## < 新製品紹介 >

減速機用防水形モータ (0.1kW ~ 2.2kW)	45
クローラクレーン SC900HD-3	46
新電気式フォークリフト FB35/40PE	47

## SPECIAL SECTION OF PROCESSING SYSTEM

T/PAPER	Drilling Process of Printed Circuit Board	1
	Naoki WAKABAYASHI , Takahiro IDE , Yasushi AOKI , Keiji ISO	
T/INVITATION	Nano Crowning System	5
	Shigeru TAGUCHI , Jiro YAMAMOTO , Shiro HAMADA	
T/PAPER	Development of Precise XY-stage System for Laser Fine-cutting System	7
	Kenichi MAKINO , Yoshiyuki TOMITA , Masanobu SUGIMINE	
T/PAPER	Simulation Approach to Nonlinearity of Nanometer Feed System in Double Grind Machine	13
	Shinichiro TSUKAHARA , Yoshiyuki TOMITA	
T/PAPER	Quality Control System(iii-System) of Molded Products	17
	Hitoshi HIROSUMI	
T/PAPER	SK-control as New Check Valve System for Electric Injectoin Molding Machine	21
	Masaaki KONNO	
T/PAPER	Latest Paper and Board Machine	25
	Hirochika KUMEKAWA	
NEW PRODUCT	Special All Electric Injection Molding Machine for Lens	29
NEW PRODUCT	Micro Optics Molding Machine NANO-Press	30
NEW PRODUCT	All Electric Rotary Injection Molding Machine SR100	31
NEW PRODUCT	All Electric Double-shot Injection Molding Machine SE200D-CI	32

## TECHNICAL PAPER

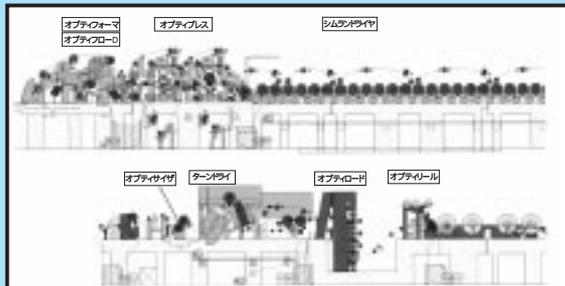
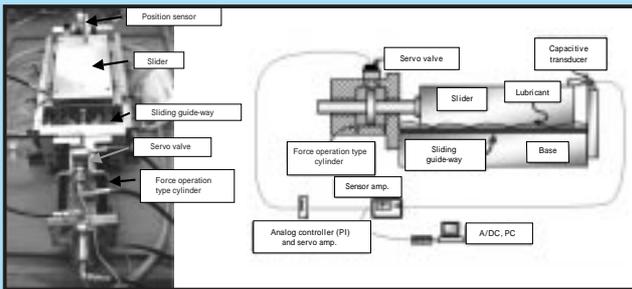
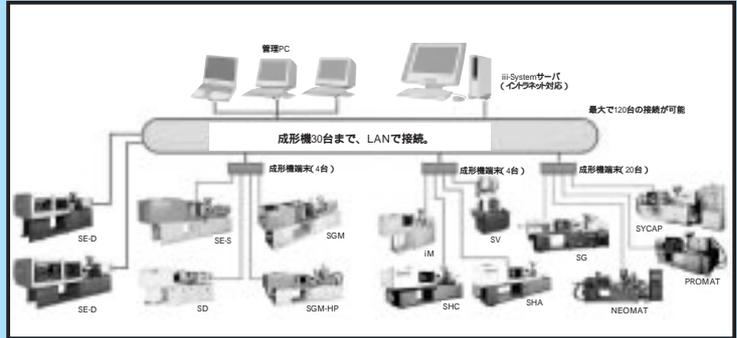
	Development of Software for Spark Plasma Sintering Die Design	33
	Hironobu ISHIDA , Shinichi MORIOKA , Tatsuro ARAKI , Yuji KOUNO , Shinji TSUTSUMI	
	Manufacture and Shipping of Naha Port Immersed Tubes	37
	Shigeru MAEDA , Kiichiro YAMAHIRA , Takashi SATOU , Nobuhisa KOONO	
	Development of 0.1W at 4K GM Cryocooler	41
	Toru MARUYAMA , Yoichiro IKEYA , Satoshi KOBAYASHI	

## NEW PRODUCTS

	Waterproof Type Induction Motor for Gear (0.1kW ~ 2.2kW)	45
	Crawler Crane SC900HD-3	46
	New Electric Powered Fork Lift Truck FB35/40PE	47



# 加工システム小特集



# プリント基板の穴開け加工法

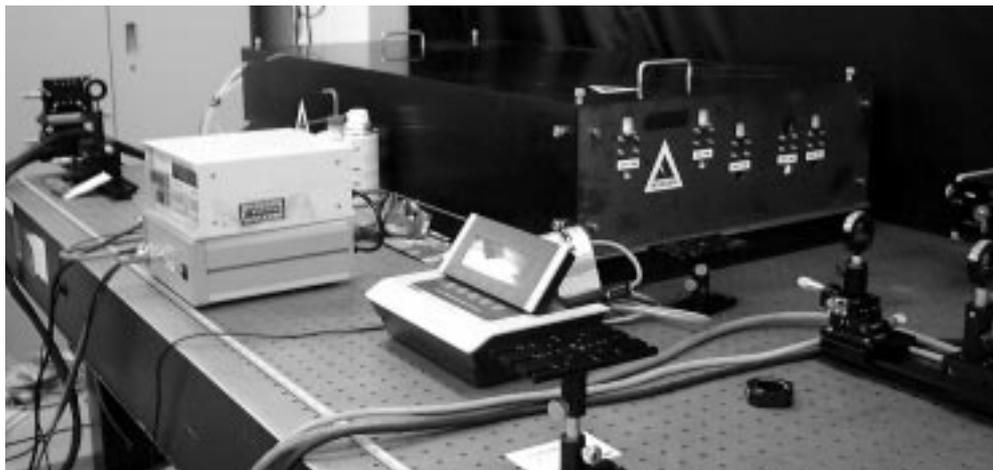
Drilling Process of Printed Circuit Board

若林直木\*  
Naoki WAKABAYASHI

井手隆裕\*  
Takahiro IDE

青木康\*  
Yasushi AOKI

磯圭二\*\*  
Keiji ISO



実験装置  
Experimental system

プリント基板の穴開け加工において、高分子層に対してほぼ透明である波長のIRレーザ光を基板に1ショット照射することで高分子層を除去加工することができる方法を開発した。本加工法をレーザドリルに適用するために、加工穴径のフルエンス依存性、照射ビーム径依存性、高分子層厚さ依存性等についてデータを蓄積するとともに、本加工法の機構解明のために行った、加工の際に生じる発光の分光分析の結果をまとめた。

この発光の特徴的な点は、高フルエンス $8.6 \text{ J/cm}^2$ で1ショット照射した際の発光スペクトル中には幾つかの鋭いピークが観察されるが、フルエンスを $1.2 \text{ J/cm}^2$ に減少させるとそのような強いピークは観察されなくなるところにある。

これらの実験結果に基づき本加工では高分子薄膜は原子や分子にまで分解することなく除去加工していると考えられ、本加工法を用いることにより、従来の薄膜除去法と比較して、1ショットで高分子層を完全に除去加工でき、 $\text{CO}_2$ レーザやUVレーザで問題となるデブリ、デラミネーション、導電層の溶融などを起こさずに加工を行えるという特長的なプロセスを提供できる可能性がある。

A new drilling technique is proposed for removing polymeric layer formed on conductive layer using IR laser light, which is absorbed not sufficiently for ablation by the polymeric layer. In this technique, a piece of polymeric film was blown off after a single shot of irradiation. To apply this technique to laser drilling processes, we have systematically measured sizes of the resulting holes, varying the fluence, the irradiation area and the thickness of a polymeric layer. We also investigated the physical aspects of this phenomenon with spectroscopic measurement of the luminescence from the samples. We observed sharp peaks in the spectrum in the case of laser beam fluence of  $8.6 \text{ J/cm}^2$  while such intense peaks could not be seen when the fluence decreased to  $1.2 \text{ J/cm}^2$ . Thus, the polymeric film was removed without violent decomposition into atomic species. Advantages of this technique are (1) the polymeric layer can be completely removed within a certain area by a single shot of laser pulse, and (2) it is possible to escape from problems such as debris, smear and delamination, which occurs when  $\text{CO}_2$  laser or UV laser is used.

## 1 まえがき

現在、携帯電話を始めとする小型電子機器は、例えば音楽や動画の送受信や再生、インターネット接続など、従来の利用目的を越えた多くの機能を有している。このような機器の急激な高機能化と従来からの小型軽量化指向により、機器の心臓部を構成するプリント基板に対しても、ビアホールの小径化・高密度化が求められている。この要求に応えられる手法として、現在レーザアブレーションが広く使われている。この加工法ではプリント基板に用いられている高分子材料が光吸収を持つ波長域のレーザ光が光源として必要であり、 $\text{CO}_2$ レーザ ( $\lambda=10.6 \mu\text{m}$ ) やYAGレーザの3倍高調波 ( $\lambda=355\text{nm}$ )

が主に使用されている。加工プロセスに対しては、スルーブットの向上だけではなく、デブリ、デラミネーション、導電層の溶融など、信頼性低下の原因となる要因を引き起こさないことも求められる。

ここでは従来のアブレーション加工と異なる新しいレーザ穴開け加工法を提案する。本加工法では高分子構成材があまり光を吸収しない透明な波長域のレーザ光を高分子側から照射することで除去加工を行うことができる。本加工は従来のUV光によるアブレーション加工、すなわち表面から1ショットごとに起こる浅いエッチングを繰返して行く機構と異なり、高分子層と導電層の界面でレーザと材料との相互作用を誘起し除去加工を行う加工法である。本加工法には、1ショット

トで加工できることによるスルーホットの向上だけでなく、CO<sub>2</sub>レーザーで問題となるデブリの問題やNd:YAGレーザーの高調波で問題となるデブリ、デラミネーション及び導電層の溶融などの問題点を回避できるメリットがある。本報では、この加工法で加工したピアホール穴径がビーム径並びにフルエンスでどの程度制御できるかを検討した結果及び、高分子層の厚さと加工可能な穴径の関係、更に加工の際に生じる蛍光を分光測定した結果から進めた機構に関する考察を述べる。

## 2 実験方法

実験には全固体Nd:YLFレーザーを使用した。発振波長は1047nmでパルス幅15ns、パルスエネルギーは3mJである。このレーザー光を図1に示すように、2枚のレンズで所望のビーム径にし、ピンホールを通過させる。このピンホールを通過したレーザー光をプリント基板上に縮小率10又は20でイメージ転写する。すなわち基板上に集光されたレーザー光はピンホールと同じ形状でスポットサイズが使用したピンホールの径の10分の1又は20分の1となる。加工対象物であるプリント基板は最表面が高分子層であり、その下層に導電層として銅が埋め込まれている。高分子材料としてエポキシ、ベンゾシクロブテン及びポリイミドなど数種類の樹脂を用いたプリント基板について加工試験を行った。本報ではプリント基板として一般的に使われているエポキシ材を中心として考察を進める。なお、使用したエポキシ樹脂層の厚さは35 $\mu$ m~60 $\mu$ mである。また、膜厚に対する加工穴径の変化を調べるために行った測定では、エポキシ厚さ50 $\mu$ mのプリント基板をサンドペーパーで研磨し、高分子層を適宜薄くした後に加工を行い、穴径とその部分での膜の厚さを光学顕微鏡にて測定した。

本除去加工の過程で働いている機構を調べるため、多層プリント基板にIR光を照射した後に生じる発光を分光器と高感度CCDを用いて測定した。分光器のスリットの直前にプリント基板を設置し、発光の強度によりスリット間隔や感度の調整を行った。なお、分光した波長範囲は200-600nmである。

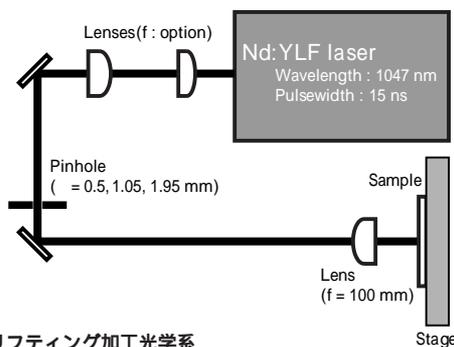
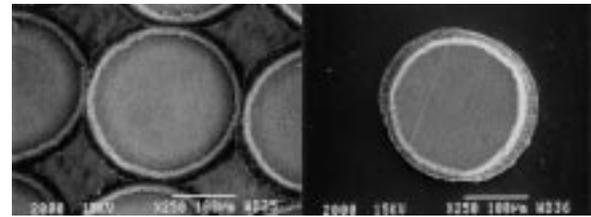


図1 リフティング加工光学系  
Schematic of optical setup for experimental processing

## 3 実験結果

穴径及び穴形状制御性について述べる。

パルスエネルギー120 $\mu$ JのNd:YLFレーザーの基本波(=1047nm)を高分子層厚さ35 $\mu$ mのプリント基板に対して、1ショット照射した後の電子顕微鏡写真(SEM写真)を図2に示す。丸く見える部分が高分子が除去された部分で、1パルスの照射で除去加工が行われていることがわかる。この加工にはバ



加工された穴形状 (a) Shape of hole  
飛び出した高分子薄膜 (b) Piece of polymeric layer

図2 IR光1ショット照射後  
SEM images after single shot of irradiation

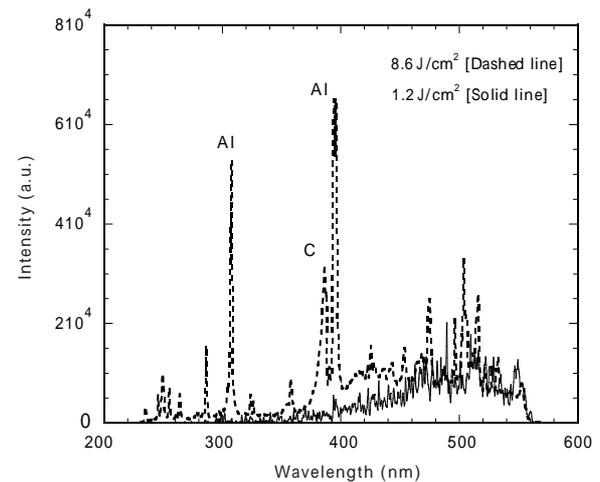


図3 発光スペクトル(点線: 8.6 J/cm<sup>2</sup>, 実線: 1.2 J/cm<sup>2</sup>)  
Emission spectra of plume  
(Dashed line: 8.6 J/cm<sup>2</sup>, Solid line: 1.2 J/cm<sup>2</sup>)

ルスエネルギーにしきい値があり、基板により異なるが、概ね100~300 $\mu$ J以上のパルスエネルギーのIR光を1ショット照射することで、穴あけ加工を行うことができる。図2に、飛び出した高分子薄膜片のSEM写真を示す。この高分子片は加工後に基板周辺で収集したものである。このように本加工法は表面から1ショットごとにエッチングして行く従来のアブレーション加工と異なる機械的なせん断が主機構として働く加工であると考えられる。

図3に、IR光照射時に観測される発光の分光測定の結果を示す。いずれもIR光1ショットで穴あけ加工を行った際の発光スペクトルであり、点線がフルエンス8.6J/cm<sup>2</sup>、実線が1.2J/cm<sup>2</sup>の結果である。フルエンス8.6J/cm<sup>2</sup>の条件では、空中に飛び出した原子・分子状の励起状態からの鋭いスペクトルを観察することができた。そこからフルエンスを下げて行くことで原子や分子の鋭いピークは相対的に小さくなり、加工可能な下限フルエンス1.2J/cm<sup>2</sup>では実線で示した発光スペクトルのように、原子や分子の明確なスペクトルが観察されなくなる。この原子・分子状の生成物はアブレーションにより生成されるものであることから、本加工法は従来のアブレーション加工と異なり、高分子材を原子や分子にまで切断することなく除去加工が可能であると考えられ、高速かつ高エネルギー効率の穴あけ加工の実現が期待できる。

本加工法はアブレーション加工と異なる機構でこれまでにほとんど報告がない。そこで、フルエンスやビーム径などのパラメータを変えた時の加工穴の形状変化を調べるために、まず照射ビーム径を固定し(195 $\mu$ m)、フルエンスを変化さ

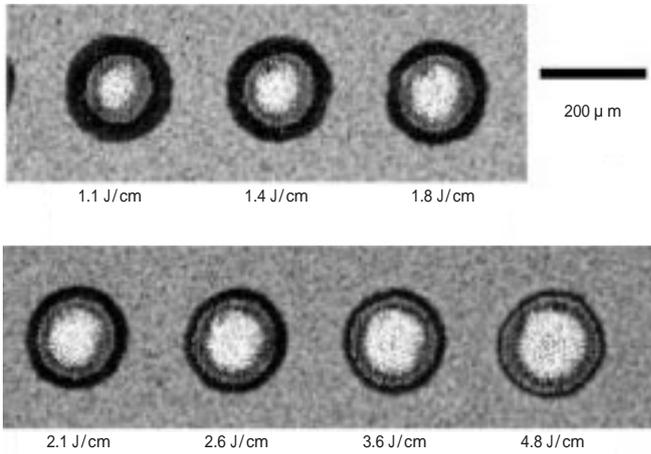


図4 フルエンスを変化させた時の加工穴の様子 (照射ビーム径195 μm)  
Results of processed holes with various fluence conditions  
(Fixed irradiation area : 195 μm)

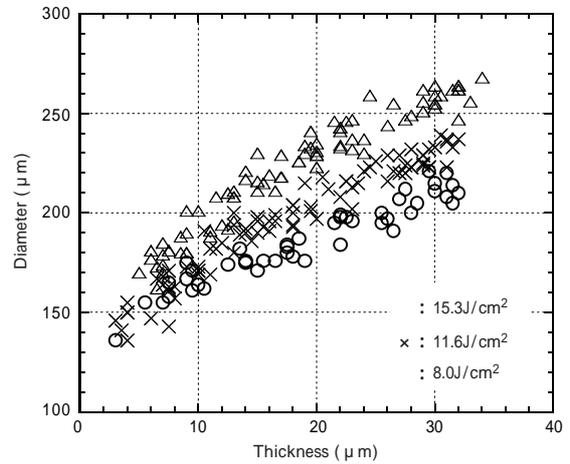


図6 膜厚と穴径の関係 (スポットサイズ : 105 μm)  
Correlation between polymeric layer thickness and hole diameter  
(Fixed irradiation area : 105 μm)

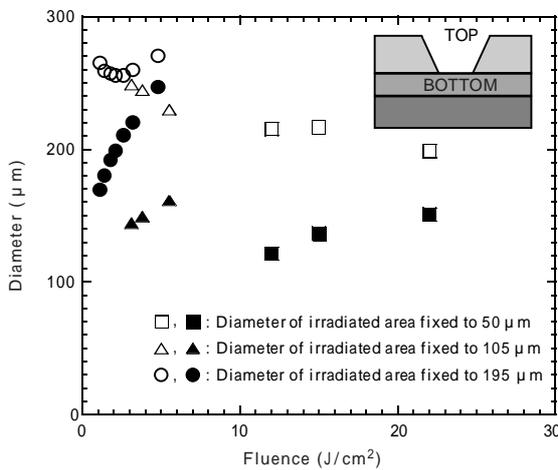


図5 穴径のフルエンス依存性(白抜きは表面での穴径, 塗りつぶしは界面における穴径)  
Hole diameter dependency on beam fluence (Filled symbols indicate diameters at bottom of polymeric layer, and hollow symbols, those at top)

せて照射試験を行った。図4にその時の穴形状の変化を示す。一番外側に黒く見える輪は、穴を真上から見た時の高分子層のテーパーを持ったへき開面であるが、フルエンスを増加させると輪の幅が狭くなり、穴のテーパー角が垂直に近づくことがわかる。また穴形状も歪みのない円形に近づいている。

図5に3つの照射ビーム径(195 μm, 105 μm, 50 μm)における、フルエンスと穴径の関係を示す。フルエンスを大きくすると高分子層/導電層の界面における穴径(Bottom)は大きくなり、高分子表面における穴径(Top)は一旦下がった後、増加に転じる傾向が見られた。いずれの照射ビーム径においてもフルエンスを増加させることで界面での穴径と表面での穴径は近づき、ピアホールのテーパー角が垂直に近づくことがわかる。このことはフルエンスによりテーパー角の調整が可能であることを示している。

図6は、ビーム径を105 μmで固定し、樹脂膜厚をサンドペーパー研削にて変化させた基板に対する加工穴径の変化を3通りのフルエンスで測定した結果である。同じフルエンス及び照射ビーム径においても膜厚が薄くなることで加工穴径が小さくなる傾向が得られた。また、フルエンスを小さくすることで加工穴が小さくなる傾向が得られた。

#### 4 考察

エポキシを始めとして、プリント基板に利用されている高分子材が光をあまり吸収しない波長である1 μm程度のIR光を1ショット照射することで、高分子材を薄膜のまま除去加工することができることを確認した。これは従来のUV光によるアブレーション加工のように照射ごとに表面から少しずつエッチングを進めて穴あけを行う加工法とは異なる機構であり、図2及び図3に示したように、除去する高分子を原子・分子レベルまで分解するものではない。この加工法では高分子材に対してほぼ透明な波長であるNd:YLFレーザー光(基本波1047nm)を用いており、レーザー光は高分子層を通り抜け、導電層との界面で高分子層の除去加工に働く駆動力を発生させていると考えられる。そこでレーザー光と材料との相互作用を考えると、銅はこの波長において反射率が非常に高く、一方高分子はこの波長域でもUV光と比して小さいながらも光吸収は零ではなく、本報告中の実験条件においても熱分解温度まで達し得る。このことから、本加工法により高分子層と導電層の界面で高分子材料の熱分解が瞬間的に誘起されていると考えられ、その時発生する圧力により照射領域近傍の高分子層は短時間で急激に持ち上げられる。この圧力によりまず界面での樹脂膜の剥離が進行するが、樹脂膜の変形に伴い高分子薄膜にせん断応力と引張応力が同時に負荷されるようになり、亀裂の生成が容易に起こり、更にはこの亀裂が表面まで進展する。このクラックの進展によりプリント基板から完全に切断された高分子薄膜は飛び出して行くが、この時の運動量は界面で発生した圧力のエネルギーから高分子層の破壊に要したエネルギーの差に相当すると考えられる。またごくわずかではあるが、余剰のエネルギーが原子・分子状高分子の運動量として持ち出される。その機構を、簡単に図7に示す。図で示すように界面上で誘起した圧力による高分子除去機構であるため、ビーム径を小さくしても、図5に示したように加工穴径はビーム径に対応した大きさではなく、加工対象のプリント基板の高分子層と導電層の密着性、高分子の機械的特性、高分子層の厚さ等に依存して決まる。つまり、あるプリント基板においてある穴径の加工が行われた場合、高

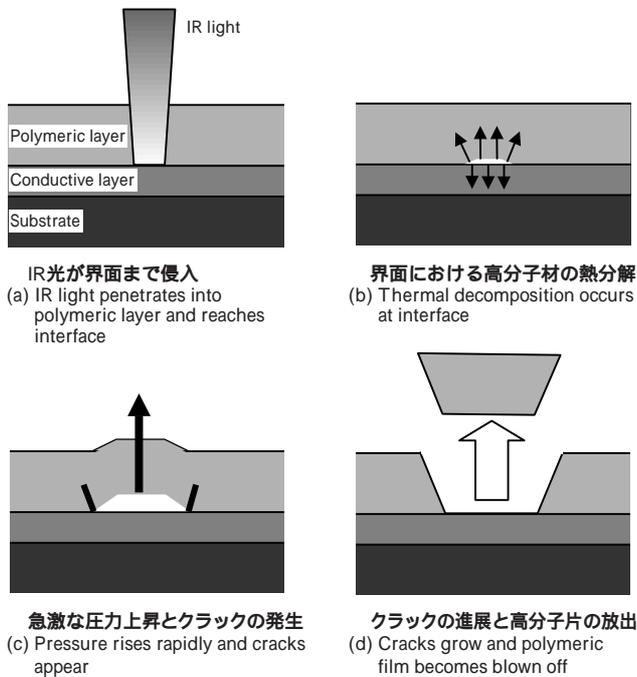


図7 IR光1ショット加工の機構  
Mechanism of IR process

分子の機械的特性や膜厚、密着性から、クラックを発生させ、表面まで進展させるのに必要な力は決まると考えられる。この力は熱分解した高分子の圧力により与えられる。この時、プリント基板の界面の密着性がその圧力よりも弱い場合、耐え得る地点まで剥離は進行してしまう。よって図5に示した様に、ある程度の加工穴径の制御は可能ではあるが、その剥離してしまう径よりも小さなビーム径で加工を行った場合は、加工穴径はビーム径に依存しなくなり、加工穴径がほぼ同じ値を示してしまうのはこのためであると考えられる。

本加工法におけるエネルギー面からの考察を加える。加工された穴径を $d$ とすると、穴底の面積は $d$ の2乗に比例するのに対し、穴の側面部分の面積は $d$ に比例する。この穴の側面部分は、本加工法でクラックが進展することにより生ずるせん断面であり、加工により新たに生成された面である。ここで外部から与えられた加工に要する変形エネルギー $U$ は次の式を満たす。

$$\frac{dU}{dc} = \frac{d}{dc} (U_s + U_p - U_E) \leq 0$$

$c$ は亀裂深さであり、 $U_s$ は亀裂の生成による表面エネルギー、 $U_p$ は塑性変形エネルギー、 $U_E$ は弾性変形エネルギーである。このように新生面の生成エネルギー $U_s$ は変形エネルギー $U$ に大きく関わっており、また表面エネルギー $U_s$ は新生面の面積に比例する。故に、加工穴径が小さくなると新生面に比べて底面積の減少率の方が大きくなるため、加工を行うにはその高分子に大きな圧力が負荷される必要がある。したがって小さな穴径の加工を行う時は、負荷する圧力を大きな穴径の時よりも相対的に大きくする必要があり、条件によっては高分子材料の破壊応力を越えてしまい、飛び出す高分子の破壊を引き起こすことが考えられる。実際にフルエンスが非

常に大きい場合、高分子片全体にクラックが入り、割れた高分子の一部が飛び出さずにプリント基板に残ることがある。本加工法でピアホール加工を行う場合には、飛び出した高分子片が破壊しないような条件で加工を行う必要があり、その意味で、照射レーザー光のフルエンスに上限のしきい値が存在することになる。

## 5 むすび

本加工法による穴あけ加工は、高分子に対してほぼ透明であるNd:YLFの基本波を用いることで界面上で高分子の熱分解を誘起し、照射領域近傍の高分子を薄膜のまま飛び出させることを特徴とする。

本加工法においては、加工される穴の形状や穴径をフルエンスとビーム径によってある程度制御できることを示した。

本加工法をピアホール加工等の樹脂膜剥離に応用した場合の特長を次に示す。

- a. 1ショット加工のため、大幅なスループットの向上が可能である。
- b. ショット数制御が不要である。
- c. 高分子を薄膜のまま除去するため、デブリが非常に少ない。
- d. 導電層の損傷の大幅な低減が可能である。

### (参考文献)

- 若林直木, 井手隆裕, 青木康, 林健一. 第48回応用物理学関係連合講演会講演予稿集, p.1125, 2001.  
Naoki Wakabayashi, Takahiro Ide, Yasushi Aoki, and Ken-ichi Hayashi. CLEO Pacific Rim 2001 Technical Digest, 2, p.290, 2001.  
若林直木, 井手隆裕, 青木康. 第62回応用物理学学会学術講演会講演予稿集, p.856, 2001.  
Thermophysical Properties of Matter. The TPRC Data Series, 1970.  
Keiko Ito, Masaharu Moriyasu, and Hiromichi Kawasumi. Journal of Photopolymer Science and Technology, 6, p.393-400, 1993.

# ナノクラウニングシステム

Nano Crowning System

田口 滋\* 山本次郎\* 浜田史郎\*

Shigeru TAGUCHI

Jiro YAMAMOTO

Shiro HAMADA



ナノクラウニングシステム  
Nano crowning system

## 1 はじめに

ハードディスクドライブ（以下HDDと呼ぶ）は、コンピュータシステムの2次記憶装置として大量生産されている。HDDの主要部品である薄膜磁気ヘッドは、ヘッド部とスライダ部から構成される。このスライダは、回転する磁気メディアの気流を受けて、記録面から20nm程度浮上し、磁気メディアとヘッドの接触を避けている。このわずかな浮上を維持するために、スライダの磁気メディアと対向する面（Air Bearing Surface 以下ABS面）は、ナノメートルレベルでコントロールされた平面やトーリック面に仕上げる必要がある。しかし、通常の加工工程では、各種のひずみが残留するため、ナノメートルレベルで形状を整える修正加工（以下クラウニング加工）が必要となる。

従来、量産工程においてクラウニング加工は、歪みの測定とABS面への機械加工（ダイヤモンド工具による溝加工や研磨によるラッピング等）を繰り返し行っている。しかしこの加工は、研磨仕上げされたABS面へ追加加工しなければならず、またタクトタイムが長い等の問題がある。

本研究は、上述の問題点を解決した高精度かつ制御可能なYAGレーザーによるクラウニング加工を実現した、量産用HDD用磁気ヘッドクラウニング加工装置について報告する。

## 2 加工特性評価

### 2.1. スライダ材料

HDDスライダは、アルチック（ $Al_2O_3-TiC$ ）系セラミックスが広く利用されている。本研究においても、アルチック系セラミックスを対象とした。ワーク寸法は、約1mmのスライダが60個ほどつながった約60mm×1mm×0.3mm（長さ×幅×厚さ）とした。

### 2.2. 加工特性

スライダにYAGレーザーを1ショット照射し、形状を測定した結果、レーザー照射面が凹になるように変形した。一般にスライダはABS面を凸に加工するため、本加工を適用した場合、ABS面の反対側にレーザーを照射すればよいことになる。

図1に、加工面光学顕微鏡写真を示す。同図より、レーザー照射面は焼けたような照射痕がつく。また、この照射痕はフルエンスが高いほど濃くなるのがわかる。更に、SEM等で照射面を観察した結果、材料が除去された様子はなく、本加工はレーザー入熱による応力変化により変形しているものと推測される。

図2に、フルエンスとクラウニング量の関係を示す。同図より、フルエンスによりクラウニング量が制御可能であることがいえる。また、スライダに割れが発生する手前のフルエンスでは、クラウニング量が飽和することから、この領域を用いれば、レーザー発振器の出力変動等によるクラウニング量の変化を小さくすることができる。



フルエンス = 0.18J/mm<sup>2</sup>



フルエンス = 0.24J/mm<sup>2</sup>

図1 加工面光学顕微鏡  
Surface of slider with laser exposed

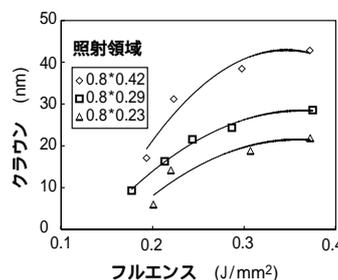


図2 加工面フルエンスとクラウニング量の関係  
Relationship between fluence and crown

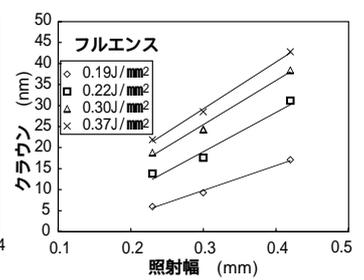


図3 照射形状とクラウニング量の関係  
（照射の縦幅：0.8mm固定）  
Relationship between pattern area and crown  
(Pattern length : 0.8mm)

次に、マスクサイズを変化することで照射サイズを変化させ、レーザを照射し、クラウニング量を測定した。図3に、照射形状とクラウニング量の関係を示す。同図より、マスクサイズによりクラウニング量を制御可能であることがわかる。量産加工では、修正量に応じてマスクサイズを変化させることで、必要な修正が可能である。

YAGレーザの他にCO<sub>2</sub>レーザ及びエキシマレーザの2種類のレーザについてもスライダに照射し、クラウニング量を測定したが、YAGレーザより大きいクラウニング量を得られなかった。

### 3 加工システム

#### 3.1. 加工の安定化

量産加工装置の開発を目的とした場合、加工の安定性、生産性が高いものでなければならない。

そこで、このクラウニング加工のばらつきについて考察すると、照射面積は結像光学系を用いることで変動を小さくすることができる。よって加工のばらつきの主な要因は、フルエンスの変化と考えられる。従って、安定した量産加工を行うために、安定したレーザ出力が得られる加工システムを設計及び製作する必要がある。

#### 3.2. レーザ発振の安定化

YAGレーザは、強力なフラッシュランプエネルギーでYAG結晶（ロッド）を励起しているのにもかかわらず、蒸留水で冷却しているにもかかわらず、ロッドが熱の影響を大きく受け、出力ビーム性状が変化する。例えば、励起効率変化による出力変化や、熱レンズ効果によるビームウエスト位置の変化などである。従って、安定した出力を得るためには、定常状態で発振し、発振器を恒温状態にする必要がある。また、励起用ランプの電流制御回路の特性からも、より安定した出力が得られる発振条件が決定される。本研究で用いたレーザでは、加工に必要なパルスエネルギーを発振する場合、約30～50Hzで最も安定した出力が得られた。

以上の結果から、量産用加工システムとしての高い生産性を確保しながら、約30～50Hzで連続発振しているパルスレーザの出力光を加工に必要なときのみ取り出せるシステムが必要となる。

#### 3.3. 加工システム

システムへの上記要求について、ガルバノスキャナによりビームの取出しを行い、更に生産性を向上するためにマスクを複数用意し、1回のビームの取出し動作で複数個のスライダを加工する方法を提案し、これを適用した量産装置を開発した。

開発した量産用YAGレーザ加工システム概要を図4に、仕様を表1に示す。本システムは、ガルバノスキャナにより、1回のレーザ取出し動作で3箇所マスクに照射する。マスクを透過したレーザビームは、結像レンズにてワーク面に投影され加工する。加工ステージは1回のガルバノスキャナ動作ごとに、ステップ&リピート動作する。

更に、同軸上の加工面観察CCDを用いた画像処理により、照射位置を補正する照射位置アライメント機能、照射エネルギーを加工ごとに計測できるエネルギーモニタを備えている。

### 4 加工結果

285個のワークを加工し、そのクラウニング量を測定した

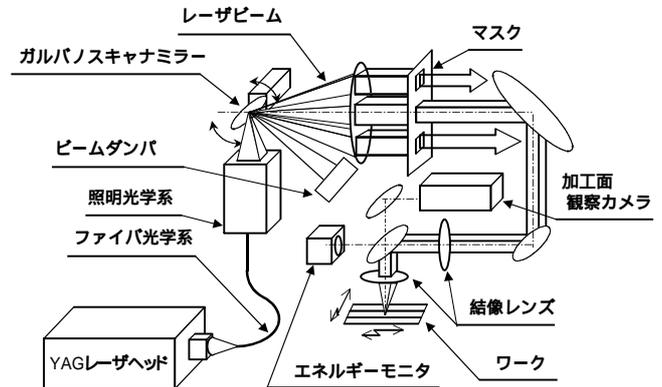


図4 加工システム  
Processing system

表1 加工システム仕様  
Specification of system

Nd: YAGレーザ	メーカー	住友重機械工業株式会社 / GSI Lumonics
	モデル	JK701H (パルスレーザ)
	レーザ媒質	Nd: YAG
	波長	1064nm
	パルス幅	0.3 ~ 20ms
	最大周波数	500Hz
	最大平均出力	550W
光学系	レンズ系	SHIオリジナル
	ファイバ	SIファイバ 600um
	縮小率	10
加工装置	メーカー	住友重機械工業株式会社
	制御	2軸NC装置

表2 クラウニング量のばらつき  
Tolerance of crown

N = 285

	クラウン (nm)	キャンバ (nm)
平均値	23.8	6.0
最大値	27.9	7.5
最小値	21.2	3.9
標準偏差	1.2	0.8

結果を表2に示す。なお、この値は、加工前のクラウニング量のばらつき及び測定誤差を含んでいる。

加工時間を測定した結果、60個のスライダがつながったバネ状ワークを40本加工した時、約10分で加工を完了した。この時間には、画像処理による、照射位置決めアライメントの時間を含む。

### 5 おわりに

産用HDD用磁気ヘッドクラウニング加工装置の開発を目的としてシステムを適用した量産加工装置を開発し、以下の結果を得た。

ガルバノスキャナ及びステップ&リピート方式による量産用クラウニング加工装置を開発した。

285サンプルを加工した結果、 $\sigma = 1.2\text{nm}$ となった。

加工実験を行った結果、2400サンプルを約10分で加工することができた。

また次世代加工装置として顧客からは、クラウニング量測定装置を搭載し、所定のクラウニング量が得られる装置を要望されている。

(参考文献)

城石芳博. 基礎講座 (ハードディスクの中の応用物理) ハードディスク装置の原理と構成. 応用物理, 第67巻, 第12号, 1998.

大竹祐吉. 市販レーザ装置活用のためのレーザの使い方と留意点. オプトロニクス社.

# 高精度レーザ加工システム用XYステージの開発

Development of Precise XY-stage System for Laser Fine-cutting System

牧野 健一\* 富田 良幸\* 杉峰 正信\*\*

Kenichi MAKINO

Yoshiyuki TOMITA

Masanobu SUGIMINE



Fig.1 Screen cut system

This paper presents a precise XY-stage system specially designed for laser fine-cutting system. Analysis of dynamic behavior of the stage system, control system design and some experimental results are described. The stage system is guided on a base plate by linear motion bearings and driven by simultaneous operation of three linear motors in the x-, y- and z-directions. The manuscript discusses the

design of control system providing precise motion accuracy, using a force disturbance observer and decoupling compensation based on analysis of stage dynamics. Experimental results indicate that the proposed servo control method successfully reduces trajectory error for some motion command.

Key words: servomechanism, linear motor, motion control, force disturbance observer

## 1 緒言

近年、電子機器分野ではパーソナルコンピュータや携帯電話等の情報通信端末製品の需要が増してきている。ICチップ等の電子部品を回路基板にはんだ付けする実装工程は、電子機器製造の重要な工程となっている。現在の実装工程でははんだペーストのスクリーン印刷法が広く用いられており、印刷用マスクには主にステンレス等の薄板金属が使用されている。従来、このメタルマスク製造にはエッチング加工が用いられてきたが、機器の小型化、需要増加にともないマスクパターン高密度化、マスク製造工程の高速化が課題となっている。このような要求に対し、小スリット幅穴の加工性およびはんだ抜け性の良さ、製造工程の簡便さといった点からレ

ーザによって印刷マスクパターンを形成するレーザ加工法が採用され始めている<sup>1)</sup>。

このようなことから著者らは、スクリーン印刷用メタルマスク精密加工に適したレーザ加工システム(スクリーンカットシステム)を開発した<sup>2)3)</sup>。本システムでは、メタルシートを形成する印刷マスクパターンに沿って走査し、加工する方式をとっている。このため高い加工精度およびスループットを得るためには、ワークを走査するXYステージの追従精度の向上が不可欠である。これらの要求を満足するため、並列駆動方式のリニアモータXYステージを開発した。

本論文では、XYステージの追従精度の向上を目的として、ステージ機構と制御系の設計法について述べる。まず、並列駆動方式のリニアモータXYステージの機械構成とxy平面内の

3 自由度系としての動力学モデルについて述べる。次に、3 自由度系としての制御系の構成および設計法、さらに外乱オブザーバ<sup>4)</sup>を用いた制御系のロバスト化、高精度化について述べる。最後に、実験結果を示し本システムの有効性について検討を行う。

## 2 XYステージの構成

### 2.1 スクリーンカットシステムの概要

開発したスクリーンカットシステムの概観を図1に示す。加工ステーションは、メタルシートの走査を行うXYステージとマシニングヘッド上のレーザ光焦点調整用Zステージとの3軸構成である。レーザ発振器より出射されたレーザ光は、光学系により鉛直方向へ曲げられ、加工位置で焦点を結ぶ。XYステージは3組のリニアモータ(X軸用1, Y軸用2)で駆動される。

### 2.2 XYステージの機械構成

XYステージの機械構成を図2に示す。可動ステージは、石定盤に対しy方向に案内される中間ステージと、中間ステージに対しx方向に案内されるトップステージで構成される。案内にはリニアベアリングガイドを用いている。中間ステージ下部には2組のリニアモータ(Y1, Y2)の可動子が配置されており、中間ステージおよびトップステージをy方向に駆動する。トップステージはXリニアモータにより、リニアベアリングを介し駆動される。また、加工位置OはXモータ駆動軸とY1, Y2モータ駆動軸の中心軸との交点に位置する。本ステージは石定盤上に固定された3組のリニアモータにより可動部を並列的に駆動する構成であり、可動ステージが偏平かつ軽量の構造にできるため高速な駆動が可能である。

駆動用リニアモータはムービングコイル型ブラシレスDCリニアモータで、それぞれ独立に電流制御されており、可動ステージに対しxy平面内3自由度の任意の並進力およびトルクを発生できる。各モータコイルはモータ内部のリニアベアリングにより案内され、その変位はモータ側面のリニアエンコーダ(ハイデンハイン社製)により0.1 μmの分解能で検出される。本ステージの基本仕様を表1にまとめる。

## 3 XYステージの動力学モデル

加工位置Oを原点とする直交座標系に対して、xy平面内3自由度運動に関する動力学モデルを導出する。モデルは、X駆動部、Y駆動部を含む中間ステージ、トップステージがばね・ダンパ要素を介し結合する集中定数系と仮定する。X駆動部はy並進と z回転の2自由度が案内機構により拘束されており、x並進の1自由度のみをもつ、中間ステージはx並進の1自由度が案内機構により拘束されており、y並進と z回転の2自由度をもつ、トップステージはxy各並進と z回転の3自由度をもつとして扱う。動力学モデルを図3に示す。

X駆動部の質量をM<sub>11</sub>、重心のx変位をx<sub>1</sub>とする。中間ステージの質量をM<sub>12</sub>、重心回りの z方向慣性モーメントをJ<sub>z12</sub>、重心のy、 z変位をy<sub>1</sub>、 z<sub>1</sub>とする。トップステージの質量をM<sub>2</sub>、重心回りの z方向慣性モーメントをJ<sub>z2</sub>、重心のx、y、 z変位をx<sub>2</sub>、y<sub>2</sub>、 z<sub>2</sub>とする。このとき、X駆動部のx並進と中間ステージのy並進、 z回転に対するX駆動部・中間ステージの慣性行列をM<sub>1</sub> = diag[M<sub>11</sub>, M<sub>12</sub>, J<sub>z12</sub>]、変位ベクトルをx<sub>1</sub> = (x<sub>1</sub>,

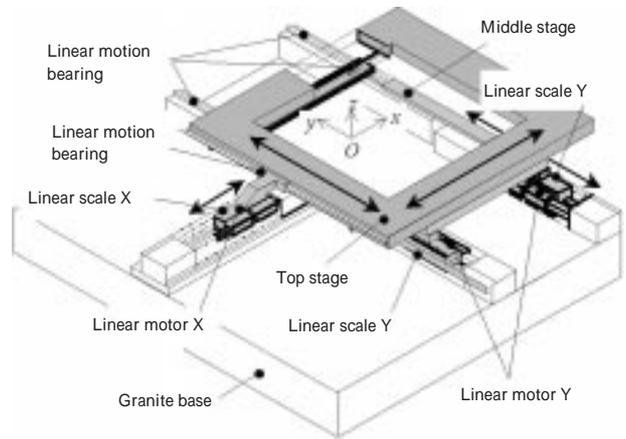


Fig.2 Mechanical structure of the XY-stage system

Table 1 Basic specifications

Travel range	600mm x 600mm
Movable stage mass	71.6kg(x), 87.3kg(y)
Maximum feed rate	50mm/s
Drive method	In-parallel linear motors
Motor type	Moving coil type linear servo motor
Maximum thrust	250N
Position sensor	Optical linear scale
Measurement resolution	0.1 μm
Bearing type	Recirculating ball type bearings

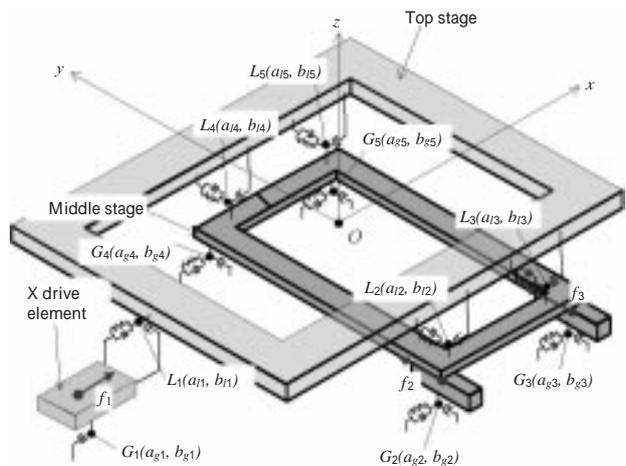


Fig.3 Simplified model of the XY-stage system

y<sub>1</sub>, z<sub>1</sub>)<sup>T</sup>、トップステージの慣性行列をM<sub>2</sub> = diag[M<sub>2</sub>, M<sub>2</sub>, J<sub>z2</sub>]、変位ベクトルをx<sub>2</sub> = (x<sub>2</sub>, y<sub>2</sub>, z<sub>2</sub>)<sup>T</sup>で定義する。また、K<sub>f</sub> = diag[K<sub>f1</sub>, K<sub>f2</sub>, K<sub>f3</sub>]をモータ推力定数行列、i = (i<sub>1</sub>, i<sub>2</sub>, i<sub>3</sub>)<sup>T</sup>をモータ電流ベクトル、f<sub>d</sub> = (f<sub>dx</sub>, f<sub>dy</sub>, f<sub>dz</sub>)<sup>T</sup>をトップステージへの外乱力ベクトルとする。

図中のG<sub>i</sub>およびL<sub>i</sub> (i = 1 ~ 5) はX駆動部・中間ステージおよびトップステージ案内機構を表す。G<sub>1</sub> ~ G<sub>3</sub>, L<sub>1</sub>はガイドブロックを各3個使用し、その他は各1個使用している。ガイドブロック1個の水平方向剛性をK<sub>h</sub>、粘性係数をD<sub>h</sub>、ラジアル方向剛性をK<sub>v</sub>、粘性係数をD<sub>v</sub>、案内方向粘性係数をD<sub>s</sub>とすると、G<sub>i</sub>およびL<sub>i</sub>のxy各方向の剛性および粘性係数は次のよう



ここで、 $K_p = \text{diag}[K_{px}, K_{py}, K_p]$ 、 $K_i = \text{diag}[K_{ix}, K_{iy}, 0]$ 、 $K_d = \text{diag}[K_{dx}, K_{dy}, 0]$ 、 $K_{vi} = \text{diag}[K_{vix}, K_{viy}, 0]$  はPI定数、 $K_{ff} = \text{diag}[K_{ffx}, K_{ffy}, 0]$  はFF定数である。制御座標系でのモータ推力指令値  $f_c$  を次式により非干渉化し、各モータへの電流目標値  $i_c = (i_{c1}, i_{c2}, i_{c3})^T$  に変換する。

$$i_c = (PK_f)^{-1} f_c \quad (7)$$

制御系のブロック線図を図5に示す。

#### 4.2 外乱オブザーバによるx-y制御系のロバスト化

前項で位置制御系の基本構成を述べたが、ステージのxおよびy方向の自由度について外乱オブザーバを用いた制御系のロバスト化と高精度化を図る。

前節の動力学モデルに基づき、ステージのxおよびy方向の自由度について考察を行う。x駆動部・中間ステージとトップステージ間の結合剛性が十分高いと仮定できる場合、xおよびy方向の自由度について制御座標系での推力指令値  $f_{rx}$ 、 $f_{ry}$  から計測変位  $x_m$ 、 $y_m$  までの伝達関数は以下のように近似できる。

$$(M_x s^2 + D_x s) x_m = f_{rx} + f_{dx} + (M_2 y_2 s^2 + 4D_3 y_2 s) \quad (8)$$

$$(M_y s^2 + D_y s) y_m = f_{ry} + f_{dy} + \{M_2 x_2 s^2 + (3D_s x_2 + 8D_h x_2 - 3D_s a_{11}) s\} \quad (9)$$

ただし、 $M_x = M_{11} + M_2$ 、 $M_y = M_{12} + M_2$ 、 $D_x = 7D_s$ 、 $D_y = 11D_s$  である。式 および式 からステージのx方向およびy方向の自由度については運動の干渉性を外乱とみなせば、その動特性は1慣性系のマス・ダンパ系で近似できる。式 および式の右辺第2項はモータ推力リップル、摩擦特性の非線形性およびステージ変位での変動といった外乱力、第3項は軸周りの回転運動の干渉性による変位外乱である。これらの外乱力は推力指令値  $f_{rx}$ 、 $f_{ry}$  と位置計測値  $x_m$ 、 $y_m$  から2次フィルタによって次式のように推定できる。

$$\hat{f}_{dx} = \frac{ob^2}{s^2 + 2 \quad ob \quad obs + \quad ob^2} \{(M_x s^2 + D_x s) x_m - f_{rx}\} \quad (10)$$

$$\hat{f}_{dy} = \frac{ab^2}{s^2 + 2 \quad ab \quad abs + \quad ab^2} \{(M_y s^2 + D_y s) y_m - f_{ry}\} \quad (11)$$

ただし、 $M_{nx}$ 、 $M_{ny}$  はxおよびy方向自由度のステージ慣性ノミナルモデル、 $D_{nx}$ 、 $D_{ny}$  はxおよびy方向自由度のステージ粘性係数ノミナルモデル、 $ob$  は2次フィルタ減衰係数、 $ab$  は2次フィルタ固有角周波数である。この外乱推定値を推力指令値にフィードフォワード補償することにより、xおよびy方

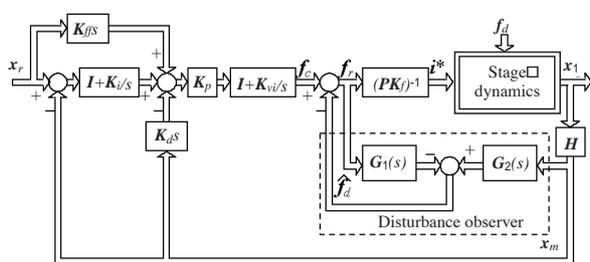


Fig.6 Block diagram of the control system

向の自由度について推力目標値  $f_c$  に対する駆動特性は次式で与えられる。

$$(M_x s^2 + D_x s) x_m = f_{cx} + \frac{s^2 + 2 \quad ob \quad obs}{s^2 + 2 \quad ob \quad obs + \quad ob^2} \{f_{dx} + (M_2 y_2 s^2 + 4D_3 y_2 s) \quad (12)$$

$$(M_y s^2 + D_y s) y_m = f_{cy} + \frac{s^2 + 2 \quad ob \quad obs}{s^2 + 2 \quad ob \quad obs + \quad ob^2} \times [f_{dy} + \{M_2 x_2 s^2 + (3D_s x_2 + 8D_h x_2 - 3D_s a_{11}) s\} \quad (13)$$

このように、外乱力は式 および式の右辺第2項の2次フィルタによって抑制され、外乱に対してロバストな制御系が得られることがわかる。以上述べたステージ制御系の制御則は次式で与えられる。

$$f_c = (I + K_{vis}^{-1}) K_p \{(I + K_{is}^{-1})(x_r - x_m) + K_{ds} x_m + K_{ffs} x_r\} \quad (14)$$

$$\hat{f}_d = G_2(s) x_m - G_1(s) f_r \quad (15)$$

$$f_r = f_c + \hat{f}_d \quad (16)$$

$$i^* = (PK_f)^{-1} f_r \quad (17)$$

$$G_1(s) = \text{diag} \left[ \frac{ob^2}{s^2 + 2 \quad ob \quad obs + \quad ob^2}, \frac{ob^2}{s^2 + 2 \quad ob \quad obs + \quad ob^2}, 0 \right]$$

$$G_2(s) = \text{diag} \left[ \frac{ob^2 (M_x s^2 + D_x s)}{s^2 + 2 \quad ob \quad obs + \quad ob^2}, \frac{ob^2 (M_y s^2 + D_y s)}{s^2 + 2 \quad ob \quad obs + \quad ob^2}, 0 \right]$$

式 では各自由度のフィードバック補償およびフィードフォワード補償の演算を行い、制御座標系での推力目標値を求める。式 により推定されるxおよびy方向の自由度についての外乱力を、式 により推力目標値にフィードフォワード補償し、式 により各モータの電流指令値に変換する。式 ~ で表される制御系のブロック線図を図6に示す。各制御パラメータは、同図をもとにMATLABによりシミュレーションを行い、最終的に実機調整により決定した。

#### 4.3 制御システム構成

制御システム構成を図7に示す。制御装置はパーソナルコンピュータ(PC/AT)、CNC制御ボード(Delta Tau社製、PMAC)、レーザコントローラおよびシーケンサで構成されている。マン・マシンインタフェースはPC/AT、レーザおよび周辺機器のコントロールはシーケンサ、XYステージおよび光焦点調整用Zステージの位置制御はCNCボードで行う。

XYステージのx-y位置制御系ではリニアエンコーダの計測値に基づき一連の制御演算を制御周期330μsで実行し、D/Aより各モータへの電流指令値を出力する。各電流アンプは電流制御帯域として1kHzを有するものを用いた。

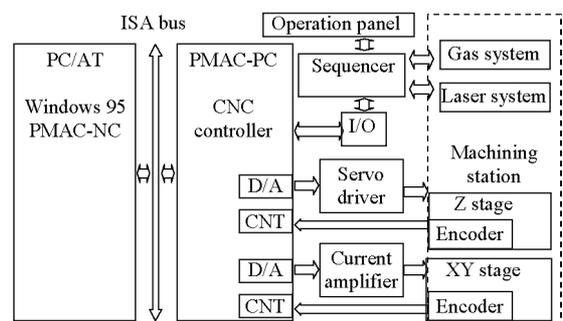


Fig.7 Control system configuration

### 5 実験結果

XYステージの追従性能を評価するため、一辺100 $\mu\text{m}$ の正方形軌跡を最大移動速度10mm/sで時計回り方向に描かせ、形状誤差を評価した。なお、計測値は制御用のリニアスケールでの計測値であり、X駆動部・中間ステージ変位である。

図8にステージ変位(0mm, 0mm)を始点としたステージ応答波形を示す。同図(a)は $\zeta$ 制御系ゲイン0, 外乱オブザーバなしの制御方式(I), 同図(b)は提案する制御方式(II)である。図9に同動作をxy平面内でプロットした結果を示す。同図(a)は制御方式(I), 同図(b)は制御方式(II)である。図8から、制御方式(I)ではx, y軸とも減速時に案内系摩擦の非線形性の影響が強く見られ、目標位置近傍で追従性が悪い。

またx, y軸の加速時に生じる $\zeta$ 軸の誤差が残留している。これに対し制御方式(II)では、外乱オブザーバの効果により目標位置近傍でも追従性能が劣化していない。また3自由度制御により、 $\zeta$ 軸の誤差は収束している。この結果を形状誤差で評価すると図9に示すように、方式(I)では正方形の隅部で2 $\mu\text{m}$ 以上内回りする結果となるが、方式(II)での内回りは1 $\mu\text{m}$ 以下である。本ステージでは、トップステージ位置により案内系摩擦の変動および可動部の $\zeta$ 軸周りイナ

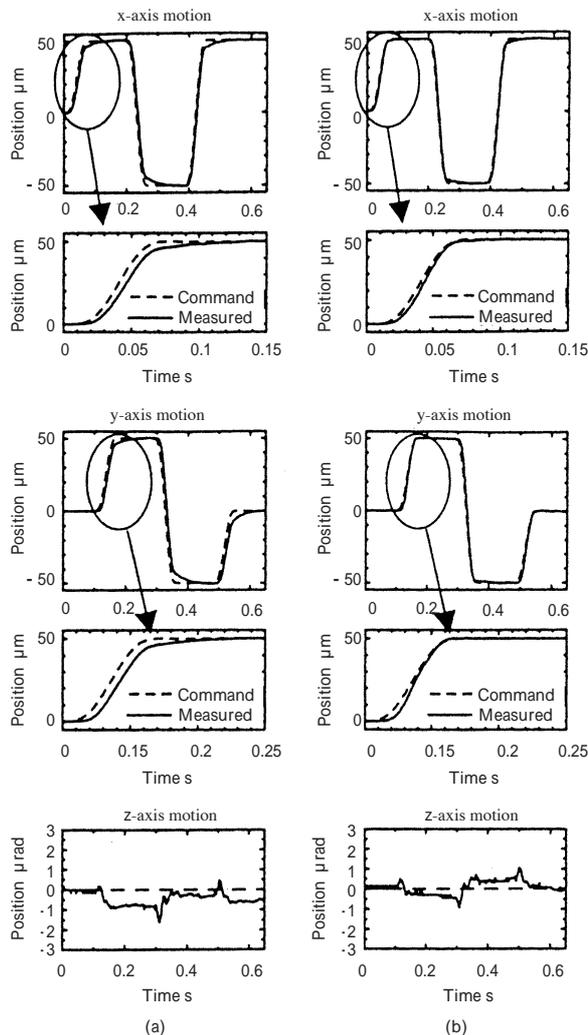


Fig.8 Response for a square motion command (Center of the aperture: x=0mm, y=0mm)

ーシャの変動といった制御対象の動特性の変動が存在する。これら制御対象の変動に対する制御系のロバスト性を評価するために、同様の実験をトップステージ変位(-250mm, -250mm)を始点として行った。結果を図10および図11に示す。方式(I)ではx, y軸の減速時すなわち正方形の隅部での形状誤差が増大している。これに対し、方式(II)では形状誤差は $\pm 1\mu\text{m}$ 以下であり、トップステージ位置による制御対象の動特性変動に対してロバストな制御系となっていることがわかる。同様の評価実験をステージ可動ストローク範囲内全域で行い、制御方式(II)では形状誤差は $\pm 1\mu\text{m}$ 以下であることを確認できた。

図12に150 $\mu\text{m} \times 1.2\text{mm}$ の微細穴加工を行った結果を示す。加工ワークは厚さ150 $\mu\text{m}$ のSUS材である。同図から切断穴の直線部でのふらつき、隅部での内回りも見られず良好な加工ができ、隅部のR半径は平均レーザービーム半径 $\pm 3\mu\text{m}$ 以下であった。R半径ばらつきは、ビーム径ばらつきとステージ追従精度誤差で生じ、それらが独立であるとすると、ビーム径のばらつき5 $\mu\text{m}_{\text{m-p}}$ からトップステージ加工点での精度は $\pm 2\mu\text{m}$ 以下であることが確認できた。また、加工スループットとして4000holes/hを実現し、高速高精度な微細加工が行えた。

### 6 結 言

本論文の結論を以下にまとめる。

ステージの高い応答性を確保する一手法として、リニアモータを用いた並列駆動式XYステージの構成を示した。

ステージの3自由度動力学モデルを導出し、外乱オブザーバを含む位置制御系の設計方法について述べた。

軌跡追従性の評価実験を行った結果、ステージ可動ストローク範囲内で $\pm 2\mu\text{m}$ 以内の形状誤差であることを確認し、制御対象の動特性変動に対してロバストな制御系であることを示した。

以上の結果より、本駆動制御方式の有効性が確認された。

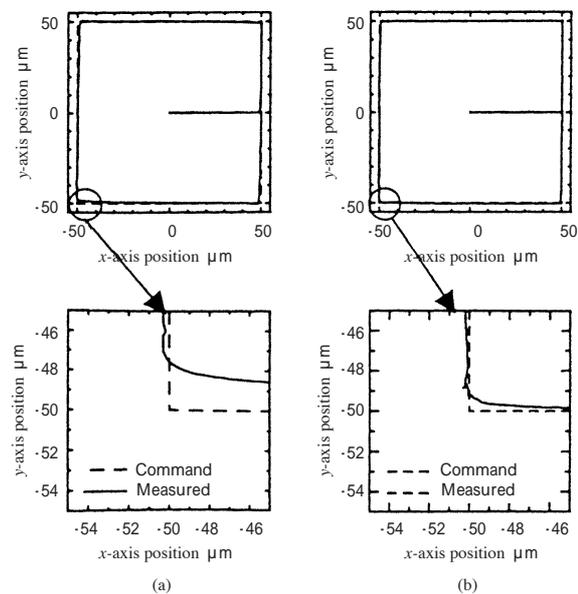


Fig.9 Trajectory profile for a square motion command (Center of the aperture: x=0mm, y=0mm)

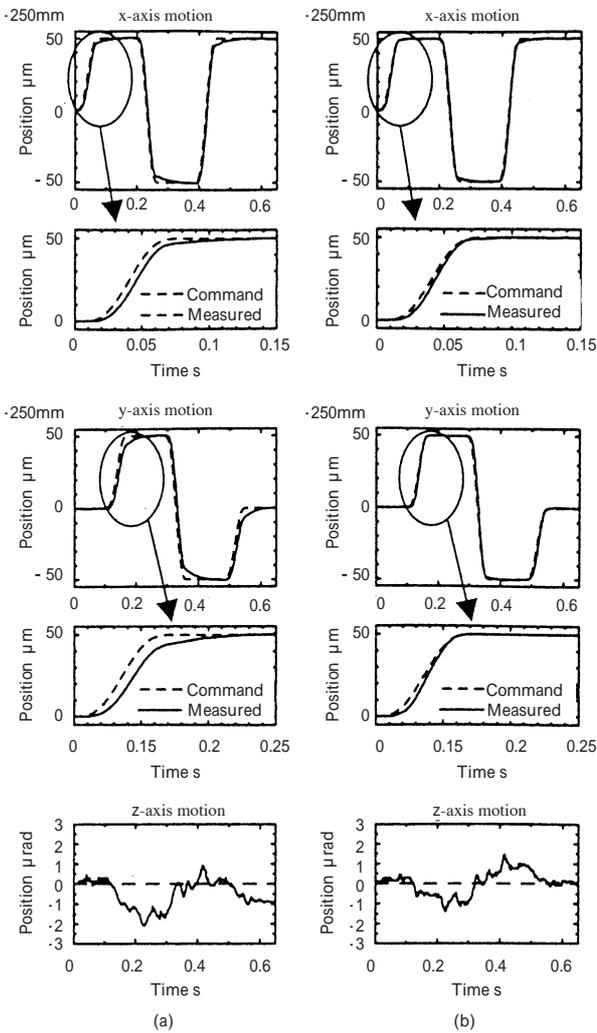


Fig.10 Trajectory profile for a square motion command (Center of the aperture: x = -250mm, y = -250mm)

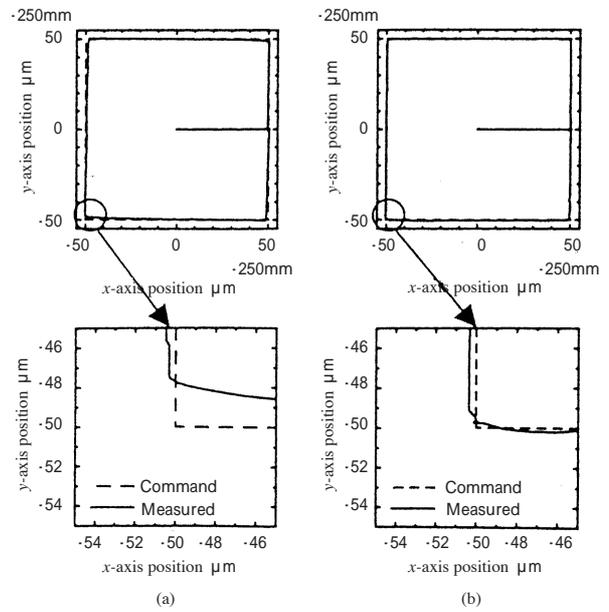


Fig.11 Trajectory profile for a square motion command (Center of the aperture: x = -250mm, y = -250mm)

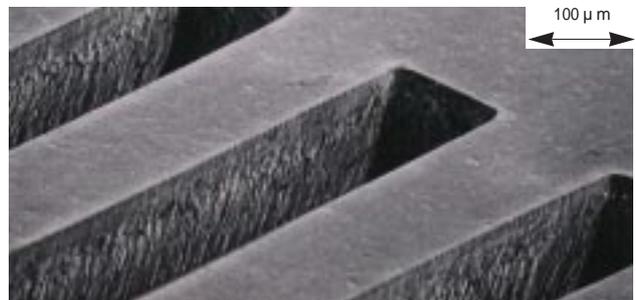


Fig.12 Photograph of apertures

(参考文献)

木村定彦ほか：YAGレーザーによるメタルマスク微細加工，表面実装技術，3，7 (1993) 76  
 杉峰正信ほか：リニアモータXYステージを用いた高精度レーザー加工システム，1997年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，(1997) 843  
 牧野健一ほか：リニアモータXYステージを用いた高精度レーザー加工システム (第2報) ステージの軌跡追従制御，1997年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，(1997) 594  
 大石潔ほか：高いステフネスを持つ直流サーボ制御系の設計法，電気学会論文誌C，107，3 (1987) 292

第23次「工作機械技術振興賞」論文賞受賞論文

(主催 財団法人工作機械技術振興財団)

本論文は精密工学会誌Vol.67 No.1(2001年)に掲載され，財団法人工作機械技術振興財団主催の第23次「工作機械技術振興賞」論文賞を受賞したものです。

今回、精密工学会の許可を得て、原文のまま本技報に転載致します。精密工学会のご好意に感謝の意を表します。

# 両頭研削機の送り軸系の非線形シミュレーション

## Simulation Approach to Nonlinearity of Nanometer Feed System in Double Grind Machine

塚原 真一郎\* 富田 良幸\*

Shinichiro TSUKAHARA

Yoshiyuki TOMITA

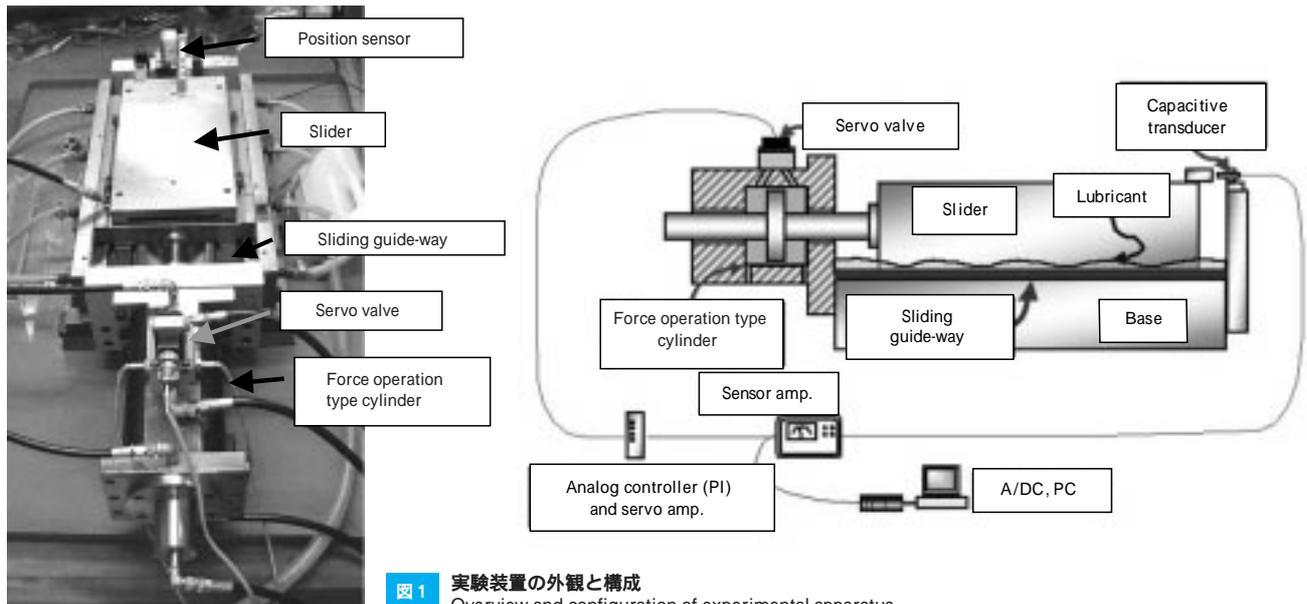


図1 実験装置の外観と構成  
Overview and configuration of experimental apparatus

当社が開発したシリコンウエハ用両頭研削装置では、ダブルV滑り案内面と高駆動力・高分解能の力操作型水シリンダを適用した新開発の位置決め機構により、高い位置決め剛性と共に工具の数10nmの高位置決め精度を実現している。

摩擦が存在する位置決め機構では、非線形な摩擦特性に起因するスティック・スリップのような不安定現象により位置決め精度が悪化する事が知られている。そこで、摩擦特性を詳細に表現している実験式を用いて開発した位置決め機構の位置決めシミュレータを構築し、位置決め特性の把握、機構や制御系の最適化を図ることとした。

本報告では、構築したシミュレータの概要と、実験装置による実験結果とシミュレーション結果の比較によってシミュレータの評価を行った結果、摩擦に起因する非線形位置決め挙動を非常に良く再現することを確認したので、これを報告する。

In the double disk grinding machine for silicon wafers developed by SHI, both the high positioning accuracy at the tip of the tool and the high positioning stiffness are realized through the newly developed positioning mechanism composed of the double-V type sliding guide-way and the force operation type hydraulic water actuator. It is generally known that on the positioning system involving the friction, the positioning accuracy deteriorates due to the unstable phenomenon such as the stick-slip caused by the nonlinear friction characteristics. So we have decided to better the understanding of the positioning characteristics and optimize the mechanisms and control method by applying the developed positioning simulator based on the precision frictional characteristic formula. The paper gives the detailed description of the newly developed simulator as well as the reproduced simulation results that describe well the non-linear positioning behavior due to the friction and show good agreement with experimental results.

## 1 まえがき

近年の半導体・光学・情報通信機器等は、多くの精密・微細な部品によって構成されており、それらの製造装置にも非常に高い寸法精度が必要となっている。このような装置における重要な構成要素となる位置決め・送り機構に対しては、サブ $\mu\text{m}$ からnmオーダの精度を必要とするものが多くを占める様になってきている。

例えばステッパの様な高速・高精度な位置決め或いはスキヤニングを行うシステムでは、空気静圧案内や転がり案内とリニアモータを組み合わせた構成を採用し、摺動抵抗を極力低減することにより、応答性と位置決め精度を確保している。

これに対して工作機械の位置決め・送り機構では、加工力

による装置への反力や高周波振動に対する高い案内剛性及び減衰性が必要であり、これらを達成するために振動減衰性の高い滑り案内を用いる例が多く見られる。しかし滑り案内の大きな非線形摺動抵抗に起因するスティックスリップ現象によって位置決め精度や応答性の向上が困難であるという問題があるため、新しい制御方式等による解決が必要と考えられる。

このような問題に対して、摺動抵抗特性のモデル化や新たな制御方式の検討を行った研究が多く見られる<sup>1)~3)</sup>。これらの中で金井らは、滑り案内の微小領域における非線形摺動特性に着目し、実験的検討によりモデル化を試みている<sup>4)</sup>。

本研究では、Siウエハ用の超精密両頭研削装置の送り軸への適用を目的とし、10nm以下の高い位置決め分解能と軸方

向の高い静・動剛性を併せ持つ位置決めシステムの開発を進めている。開発における機構・制御方法の最適化のツールとして、金井らの報告を元に、滑り案内の非線形摺動特性を考慮した位置決めシステムの動作シミュレータを構築している。本報では、実験装置による実験結果とそれに対応するシミュレーション結果との比較によってシミュレータの有効性を確認したので、これを報告する。

## 2 システム構成

実験装置の概観及び概略図を、図1に示す。また、本研究における位置決めシステムの実験装置の構成における主要構成要素を以下に説明する。

### 2.1 力操作型アクチュエータ

本開発ではアクチュエータとして、大きな推力を高い応答性、高い分解能で出力することができ、更に発熱が小さいという特徴を持つ力操作型の両ロッド型液圧シリンダを適用することとした。

一般的なシリンダは、液圧源によって発生させる圧力を密閉したシリンダ圧力室に作用させ、サーボバルブなどを用いて両圧力室の圧力をON/OFFし、圧力室への作動流体の流入流出を操作するいわゆる速度操作型である。これに対して力操作型のシリンダでは、各圧力室の一部を常に開放してリークを発生させる構造をとる。この構造により、サーボバルブの操作量に対して両圧力室の圧力差の操作が可能になるという特性を持っている。

実験装置の作動流体にはスピンドル油(ISO#46)用い、サーボバルブには約500Hzの高応答帯域で圧力-流量特性の線形性の高いMOOG社製E061-007を用いている。作動油の供給圧力4MPaにおいてシリンダ最大出力は約9kNである。

### 2.2 滑り案内

案内要素には、軸方向の高い静・動剛性及び高いダンピング特性をシステムに付加するために滑り案内を採用する。

実験装置では、スライダの鉛直方向の案内には滑り案内を適用しているが、水平方向には空気静圧案内を適用している。ベースの滑り案内面はFC250製研削仕上げである。スライダ摺動面はFC300製研削仕上げのものとターカイトを塗布しキサゲ仕上げしたものをを用いることができる構成としており、

寸法は450×30mmである。潤滑はオイルバス方式(ISO#22油圧作動油)としている。

ここで、滑り案内の微小変位領域における摺動抵抗は、図2に示すような、変位に対して非線形な特性があることが明らかにされている。このような特性は、非線形ばね特性やソフトスプリング特性などと呼ばれる。

### 2.3 システム構成

以上のような特徴を有するアクチュエータ、案内を組み合わせることで、高いダンピング性を有する滑り案内の非線形ばね特性領域内において、力操作型シリンダによって高分解能の推力を発生することにより、安定した高い位置決め分解能を得ることができるものと考えられる。

位置制御を行うための変位検出器には静電容量型変位計を適用し、コントローラにはアナログコントローラを用いており、PI制御を適用している。変位の観測は、A/Dコンバータを介して変位計の信号をPCに取り込んでいる。

また、シリンダロッドを油静圧軸受によって支持することにより、静的な状態において、滑り案内による摺動抵抗はシリンダの両圧力室の差圧から得られる駆動力と釣り合うようになっている。

## 3 シミュレータの構成

本研究におけるシミュレータは、制御系CADであるMatlabのSimulinkを用いて構築した。以下に、主要なモデルに関して説明する。

### 3.1 システム全体構成

シミュレータのシステム全体の概略構成を図3に示す。

図3中の $C_q$ 、 $C_p$ はサーボバルブの流量、圧力ゲイン、 $n$ はサーボバルブ内のフラップの固有振動数と減衰率、 $A$ はシリンダ受圧面積、 $V$ 、 $K_v$ は作動油の体積と体積弾性率、 $M$ はサドル等の運動体質量をそれぞれ表している。

図3中のの部分部分はサーボバルブの特性、の部分部分はシリンダ内における作動油の弾性特性とサドルの動特性を示している。Non-Linear Friction Modelは滑り案内の摺動特性を示しており、次項にて詳説する。

### 3.2 滑り案内の非線形特性数学モデル

Non-Linear Friction Modelは滑り案内のサブ $\mu\text{m}$ オーダの

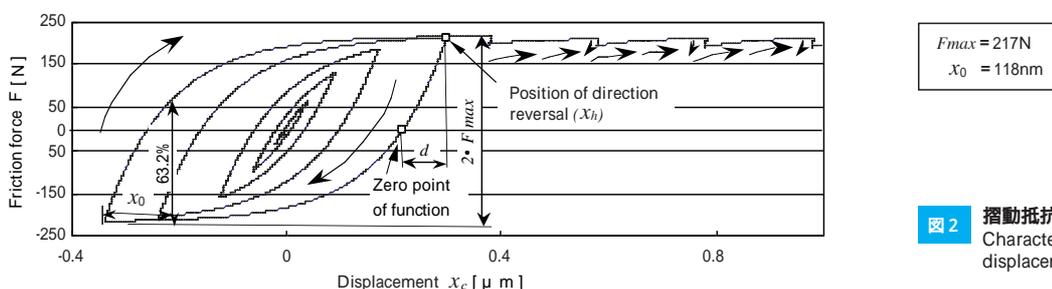


図2 摺動抵抗の変位特性  
Characteristics of frictional load against displacement

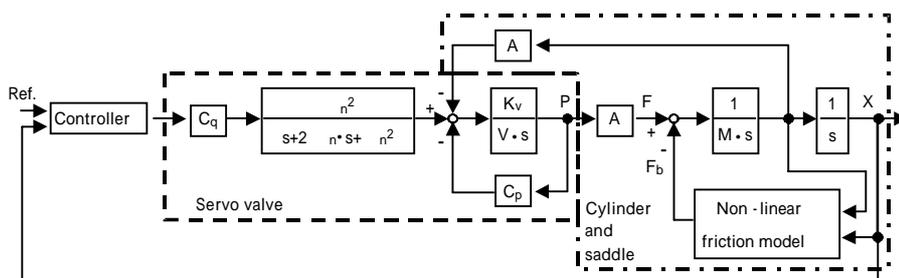


図3 シミュレータ概略構成(システム全体)  
Schematic of simulation models of whole positioning system

微小変位領域における変位 - 摺動抵抗特性のモデルであり、正負のそれぞれの移動方向に対応した特性が式に示す特性関数によって表されることが実験的に明らかになっている。このモデルでは、図2における特性曲線の傾きである摺動抵抗の等価バネ剛性が、位置決め対象の移動方向の変化や移動方向が変化する直前の位置によって変化する性質を有する。

$$F(x) = \pm F_{max} \left( 1 - 2 \cdot \exp\left(-\frac{x}{x_0}\right) \right)$$

$F$  : 摺動抵抗  $F_{max}$  : 最大摺動抵抗  
 $x$  : 運動方向変化点からの変位  $x_0$  : 過渡領域パラメータ

本研究では、式で表される非線形摺動抵抗特性を図4に示すシミュレーションモデルを用いて導入した。

このモデルでは、スライダの変位 $x_c$ と速度 $\dot{x}_c$ をモデルへの入力とし、まずスライダ速度からスライダの運動方向を判定する。次に、運動方向と変位から運動方向切り点 $x_h$ を求める。そして、切り点 $x_h$ と現在位置 $x_c$ 、ゼロ点距離 $d$ 及び運動方向を用いて、式で示した特性関数 $F(x)$ から摺動抵抗を求めている。

また、上記によって求められた現在の摺動抵抗は、逆方向の運動に対応した特性関数の逆関数 $F^{-1}(x)$ に入力され、ゼロ点距離 $d$ が求められる。 $d$ 値は、運動方向の変化の前後での特性式のゼロ点変化量を表している(図2参照)。この距離 $d$ を用いた補正により、特性式の2つの極性の連続的な切替えを再現することが可能となっている。

本実験装置では、特性関数のパラメータである最大摺動抵抗は217N、過渡領域パラメータは118nmである。

#### 4 シミュレーション結果

図5～図9に実機による実験結果とシミュレーション結果を示す。図5～図7は1stepが50nmのstep送りの状態を、図8、図9は1stepが1 $\mu$ mのstep送りの状態をそれぞれ示している。図5～図9それぞれにおいて、上図は計測点における変位の時間変化を示しており、下図はシリンダ圧力室の差圧から求めた駆動力を示している。上下の図ともに、実線が実験結果、点線がシミュレーション結果を示している。図6、

図7は図5の点線A、B部の拡大図、図9は図8の点線部を横軸に変位、縦軸に駆動力をとってプロットしたものである。図5～図9に示すstep幅である50nm、1 $\mu$ mは、摺動抵抗の特性関数の過渡領域パラメータに対して、十分に小さい、または大きい値である。このようなstep幅で連続的にstep移動する時、摺動抵抗をシステム内に有する位置決め機構は特徴的な動作を示す。実験結果とシミュレーション結果におけるこの特徴的な動作を比較することにより、シミュレータ性能を検証する。また同時に、過渡領域パラメータに対して大小両者のstep動作を評価することにより、シミュレータ性能の変位量に対する依存性の有無を検証する。

##### 4.1 微小変位時の位置決め現象

図5において、サドルは4秒までは負方向へstep移動し、その後、正方向へstep移動している。計測点変位(図5上)は、実験、シミュレーションともに50nmのstep指令に対して良く追従していることが分かる。駆動力の変化(図5下)は、最初の負方向への移動時には1stepごとに同様の変動が繰り返され、ほぼ同じ値に収束している。そして、移動方向が正方向へ変化すると、1stepごとの収束値は極性の変化も伴って大きな変化を示している。そして、移動方向変化後、8step目頃からは最初の負方向への移動と同様な1stepごとの同様な変動が繰り返されるようになっている。

図5A部を拡大した図6において、計測点変位(図6上)は、1stepごとに変位応答が急峻になり、オーバーシュートの無い状態から約20%のオーバーシュートが発生する状態にまで変化している。この時の駆動力(図6下)は、オーバーシュートの無い状態の緩やかな立ち上がりの大きな駆動力変化から、徐々に急峻な立ち上がりの変化となり、変位における大きなオーバーシュートの発生に伴って駆動力にもオーバーシュ

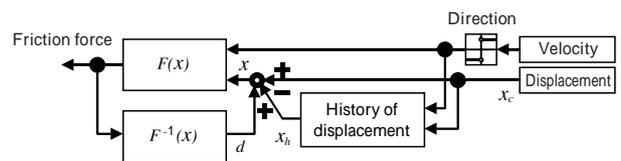


図4 非線形摺動抵抗特性のシミュレーションモデル  
 Schematic of simulation model of non-linear friction characteristics

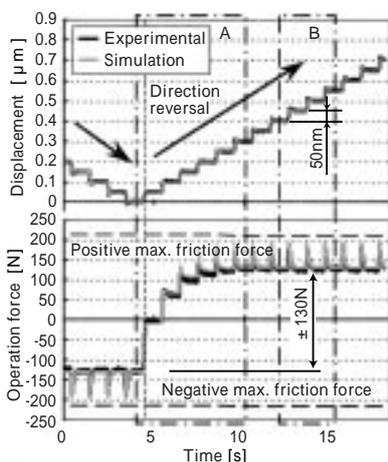


図5 50nm step移動時の変位と駆動力の変動  
 Behavior of displacement and operation force in case of 50nm step feed

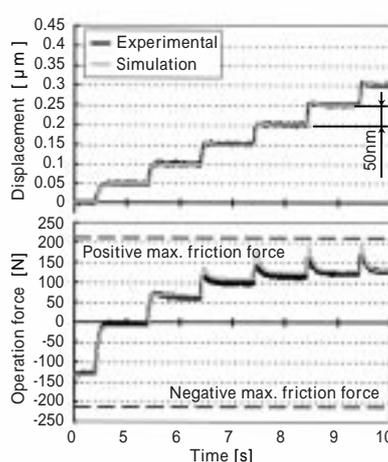


図6 50nm step移動時の変位と駆動力の変動(図5A部の拡大図)  
 Behavior of displacement and operation force in case of 50nm step feed (Enlarged view of area A in Fig. 5)

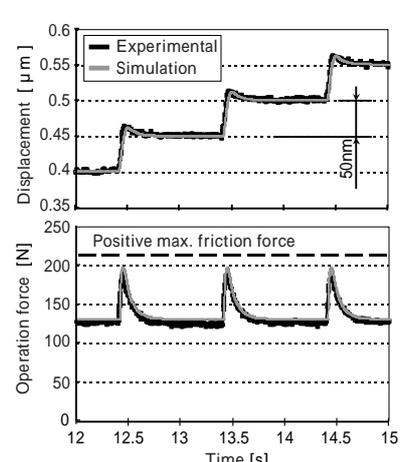


図7 50nm step移動時の変位と駆動力の変動(図5B部の拡大図)  
 Behavior of displacement and operation force in case of 50nm step feed (Enlarged view of area B in Fig. 5)

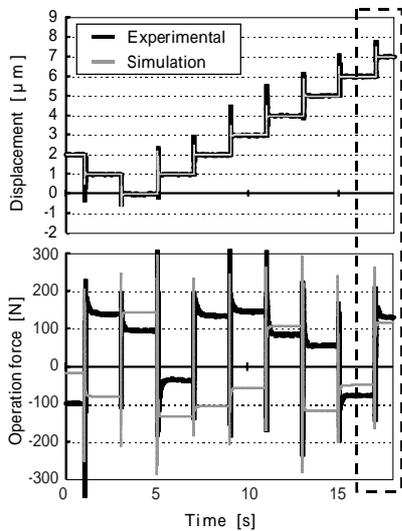


図8 1 μm step移動時の変位と駆動力の変動  
Behavior of displacement and operation force in case of 1 μm step feed

トのような現象が見られている。

図5 B部を拡大した図7において、変位応答(図7上)は、約20%のオーバーシュートを伴う急峻な応答がstepごとに繰り返されている。この時の駆動力の変化(図7下)は、step移動の発生と共に同様の大きさのインパルス状の駆動力が発生し、stepごとにほぼ同一の値に収束している。

このような現象は、等価ばね剛性が摺動抵抗の大きさ等によって変化することに起因している。この等価ばね剛性が変化すると、位置決め系全体の位置ループゲインも変化する。このため、移動方向反転後の大きな駆動力つまりは摺動抵抗の変化に伴って、位置ループゲインも大きく変化し、step移動指令に対する応答に大きな変化が現れるのである。また、駆動力が最大摺動抵抗値に近付くと摺動抵抗の等価ばね剛性は小さくなり、位置ループゲインに対する影響が低下し、stepごとに同様な応答を示すようになる。

以上のような摺動抵抗を有する位置決め機構における過渡領域パラメータ以下の領域内での位置決め動作時に特有な変位、駆動力の変動現象が、本研究において構築したシミュレータによって詳細に再現され得ることが判った。

#### 4.2 大変位時の位置決め現象

図8において、サドルは2 step負方向へ移動し、その後、正方向へstep移動している。この時の計測点変位(図8上)は、実験・シミュレーションともに数10~100%程度のオーバーシュートを伴って、各stepの指令位置に収束し、良く追従している。駆動力の変化(図8下)は、各stepで駆動力の収束値は大きく変化しており、更にstep方向の極性に関わらず、駆動力は正負両極性に収束する場が現れている。

このような現象の詳細解析として図9を見ると、step開始後、摺動特性関数に沿って大きな駆動力の変化を伴いながら変位し、指令位置に対して大きくオーバーシュートしている( )その後、オーバーシュートを補正する逆極性の摺動特性関数に沿った動作が続き、更にアンダシュートをしている( )そしてアンダシュートを補正する動作がstep開始時と同じ極性の摺動特性関数に沿って行われている。このような動作では、step開始時の駆動力で表される摺動抵抗の大きさによって摺動抵抗の等価ばね剛性が変化すると、位置決め系全体の位置ループゲインに影響を与える。よってstep開始時の摺動抵抗の大きさに依存して、オーバーシュートやアンダシュートの大き

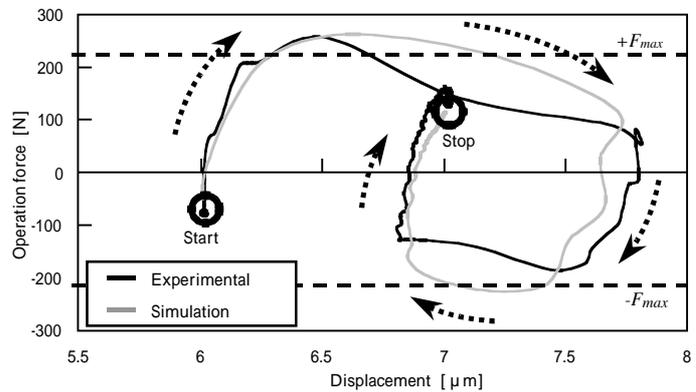


図9 1 μm step移動時の変位 - 駆動力の変動  
Behavior of operation force against displacement in case of 1 μm step motion

きさが変化し、それに伴って最終的に指令位置に収束する時点での摺動抵抗の大きさも変化する。このような現象が繰り返されることによって図8のような現象が起こっている。また、動作途中で最大摺動抵抗値よりも大きな駆動力が発生しているのは、慣性力や粘性抵抗によるものである。

以上のような摺動抵抗を有する位置決め機構における過渡領域パラメータを超える変位量の位置決め動作時に特有の変位、駆動力の変動現象が、本研究において構築したシミュレータによって詳細に再現することができた。

## 5 むすび

以上述べた結果を、下記にまとめる。

金井らが提案した滑り案内の微小変位領域における摺動負荷特性の数学モデルを適用した、超精密位置決め機構の位置決め動作シミュレータを構築した。

滑り案内を適用した位置決め機構の変位、駆動力にみられる位置決め現象を、過渡領域パラメータに対して十分大きな1 μm以上の領域から十分小さな数10nmの極微小領域までにわたって、非常に良く再現できることが確認でき、構築したシミュレータの妥当性と有効性が確認できた。

また 今後は以下の点について研究を進めていく予定である。

構築したシミュレータによって、実際の装置に適用する位置決め機構の構造、制御手法の最適化を行う。

ストライバック線図などで表されるような滑り案内の極微速変位時にみられる負性ダンピング効果のシミュレータへの適用を検討し、更なる再現精度の向上を進める。

#### (参考文献)

柴田, 岩崎, 松井. GMDHによる非線形摩擦の自立モデリングと摩擦補償. 気学会産業計測制御研究会, IIC-99-12, p.75-80, 1999.  
Seong-II Cho, In-Joong Ha. A learning Approach to Tracking in Mechanical Systems with Friction. IEEE Trans. Automatic Control, 2000, Vol.45, No.1, p.111-116.  
Young Ho Kim, Frank L. Lewis. Reinforcement Adaptive Learning Neural-Net-Based Friction Compensation Control for High Speed and Precision. IEEE Trans. Control Systems Technology. 2000, Vol.8, No.1, p.118-126.  
石川, 山口, 大塚. 転がり要素の非線形ばね特性を考慮したナノメータ精度位置決め. 2001年度精密工学会春季大会講演論文集, p.546, 2001.  
金井, 宮下, 畑井, 吉田. 運動反転を伴う微小すべり運動における摩擦負荷特性. トライボロジー会議予稿集, p.307-309, 1997.

# 成形現場向け品質管理システム iii-System

## Quality Control System(iii-System) of Molded Products

広 住 均\*  
Hitoshi HIROSUMI

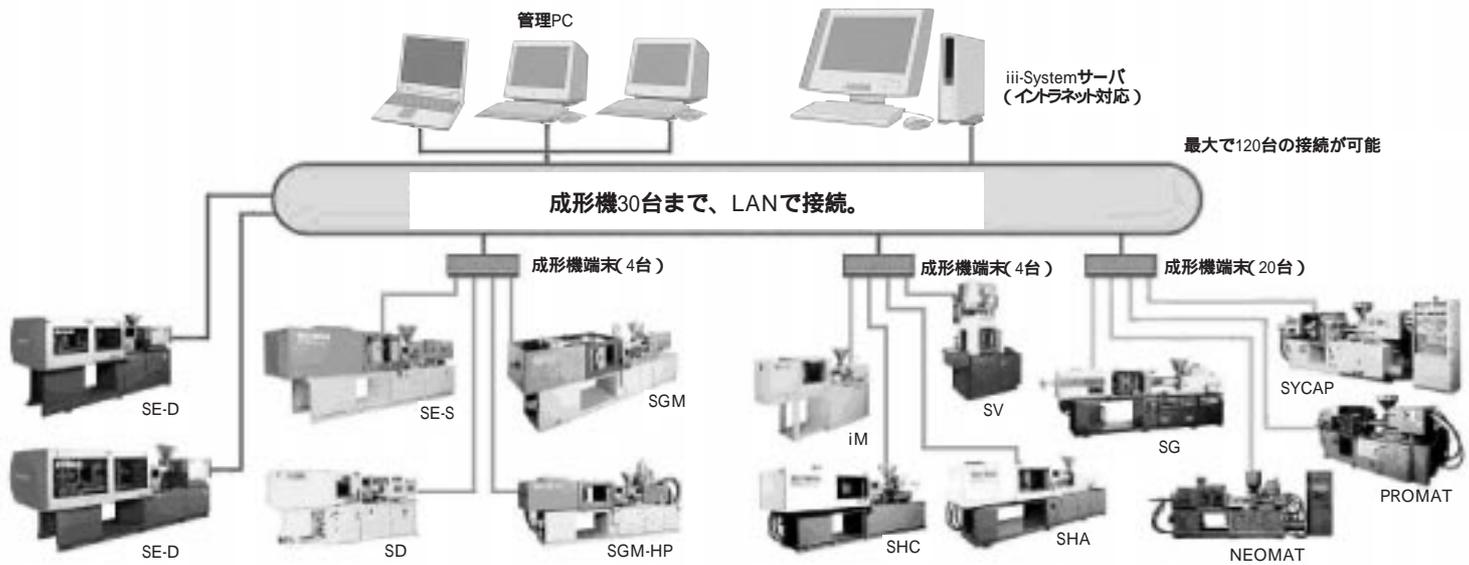


図1 iii-System  
iii-System

成形工場での利益を生み出す方法として、安い人件費で生産するため海外への進出が行われてきた。更に高付加価値製品への切替えや、在庫の最適化、最小人員化、電動成形機によるランニングコストの低減と様々な取組みが行われている。

その中で、品質管理（不良率の低減及び検査工数の削減）や生産の効率化（在庫最適化及び間接人件費の削減）といった取組みが重要な活動になっている。このような活動に利用できるシステムとして、IT技術を使った成形工場向けのシステム（iii-System）を開発し、販売を行っている。このiii-Systemは成形工場の射出成形機を最大120台を一元管理できるシステムで、大きな特徴として次の機能がある。

### 成形現場が見える。

成形機とLANで接続し、事務所からでも遠隔地からでもリアルタイムに成形現場の状況が把握できる。この機能では成形機の状態を色別に表示し、稼働率や最新情報（生産数及びサイクル時間）も見ることができる。

### 品質が見える

成形品の品質を確認する項目を毎ショット（毎成形サイクル）記録でき（450万ショット）、この品質情報と成形機での異常発生や設定変更の履歴とを24時間の時刻軸で見ることができる。

The molding industry has adopted the overseas production method to make profits at molding plants at low personnel costs. In addition, various efforts have been made including change into high value-added products, stock optimization, minimum manning and running cost reduction by the use of electric injection molding machines. Of these efforts, especially, quality control (reduction of defect rate and decrease of inspection processes) and more efficient production (stock optimization and slash of indirect personnel cost) have been the important activities. As an information system that can be used for these activities, an IT-based system (iii-System) for molding plants has been developed and sold. The iii-System is capable of centralized management of up to 120 injection-molding machines at a molding plant. Its major features are:

### 1) View mold shop floor.

The conditions of a molding plant can be monitored in real time from an office or a remote place by interconnecting molding machines via LAN. This function can display the conditions of molding machines in different colors to ensure the availability and newest information (quantity of production and cycle time) of each machine to be seen at a glance.

### 2) View molding quality .

The items of checking the quality of molded products can be recorded in each of 4.5 million shots (molding cycles), so that this quality information and the history of alarms or setting changes at each molding machine can be monitored at the time axis of 24 hours.

## 1 まえがき

プラスチック成形業界では、近年の厳しい経済状況の中グローバル化により生産拠点の海外移転や国際調達が進み、均質で安価な製品・部品が次々と輸入され、国内市場の経営環

境はますます厳しさを増している。それに加えて、多様化する市場ニーズに対応するため多品種少量生産を余儀なくされている。

そのため、更に高付加価値製品への切替えや、在庫の最適化、最小人員化及び電動成形機によるランニングコストの低

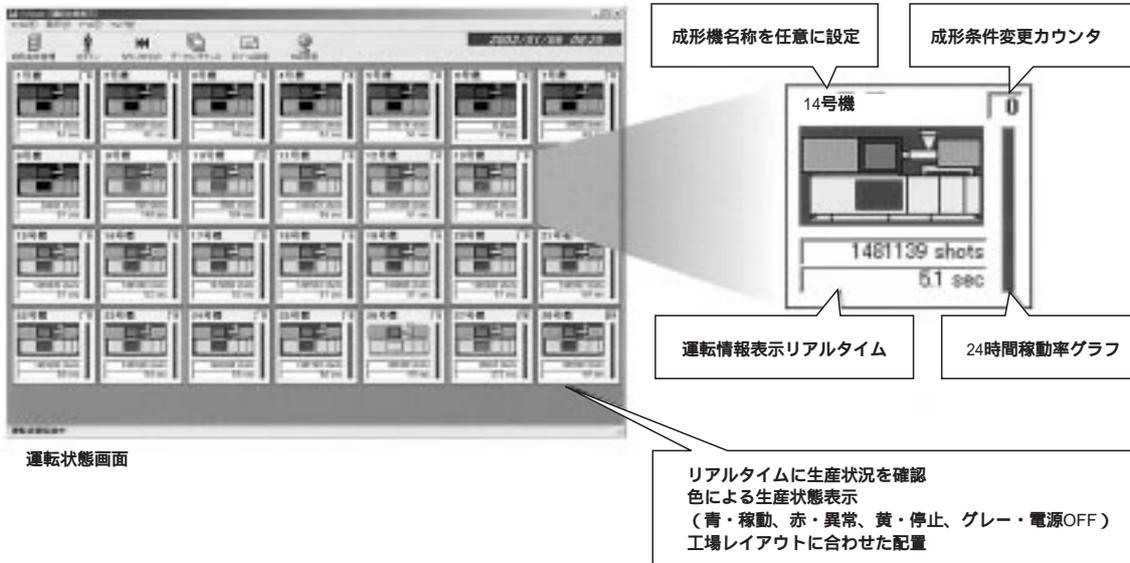


図2 成形現場が見える  
View mold shop

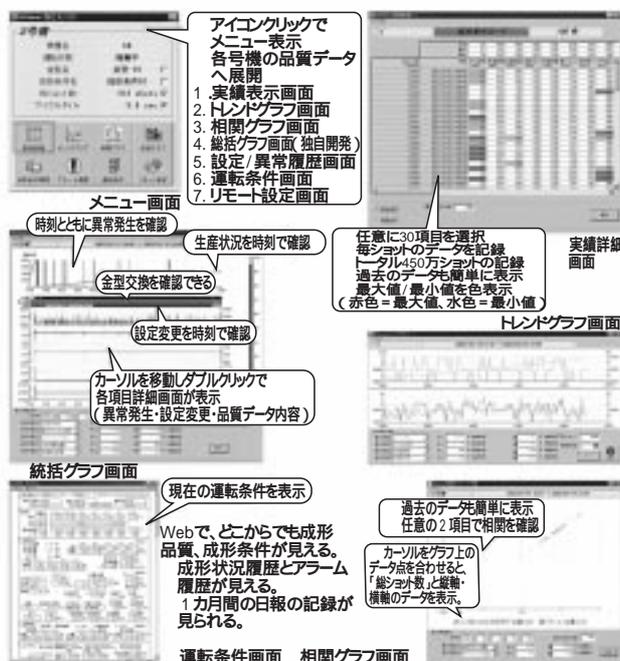


図3 品質が見える  
View molding quality

減と様々な取組みが行われている。

その中で、品質管理（不良率の低減及び検査工数の削減）や生産の効率化（在庫最適化及び間接人件費の削減）といった取組みが重要な活動になっており、IT（情報技術）を用いたシステムの導入を検討する企業が増えてきている。このような市場ニーズに応えるため、iii-System（アイキューブ・システム）を開発し、販売している。

## 2 iii-Systemの特徴

成形工場をIT化するツールとして、成形機の集中管理システムを開発した。このシステムは最大120台の成形機の情報を1台のパソコンで管理するもので、生産数、成形品質データ、成形条件、設定変更履歴及び異常履歴などを管理できる（図1）。

その特徴として、

成形現場が見える。

リアルタイムに成形機の状況が見える（図2）。サーバ1台に30台の成形機を接続でき、サーバを4台まで統合し120台までの成形機を一元管理できる。

品質が見える。

1日（24時間）の成形品質データの推移や、設定変更の有無、異常の発生状況が見える（図3）。時刻を軸に、全ての事象を一元管理でき、成形品質データの変動の原因解析や成形現場でのノウハウを見ることができ

がある。

生産管理において、生産の効率化（在庫最適化及び間接人件費の削減）は、利益を生み出す重要な課題であり、【成形現場が見える】機能により人手をかけないで必要な情報を見ることができる。

また、品質管理（不良率の低減及び検査工数の削減）は直接製品のコストを下げる効果があり、近年ではISO9001取得工場が増え、トレーサビリティの面でも品質管理は重要である。

この品質管理については従来から様々な提案が、成形機メーカーや情報関連メーカーからなされているが、自社の成形機は接続できるが他社機には接続できないものや、成形や成形機を熟知していないため必要な成形品質データの取扱いができないものなどがあり、多様化する顧客の要求に最適なシステムは少ない。

このような市場要求に対して、iii-Systemでは、前述の特徴である【成形現場が見える】及び【品質が見える】という機能に加え、前後行程の設備や周辺設備の管理用としても利用することができるようになっており、それら設備と接続するためのインタフェースを作成することで、容易に接続可能であり、接続対象設備としては、当社射出成形機のみではなく、他社機成形機や検査装置及び組立装置など工場内のラインへの展開も可能である。既に他社成形機へ接続した実績があり、高く評価されている。

### 3 iii-Systemの機能と構成

iii-Systemの機能を実現する3つの要素があり、そのブロック図を、図4に示す。

#### 3.1 データベース&サーバプログラム

データベースに蓄積されている情報の種類を、次に示す。

成形品質データ

サーバに接続された成形機の毎ショットの任意データ30項目を450万ショット記録できる。

成形機異常履歴

成形機で発生した異常の履歴を発生時刻及び解除時刻と共に記録できる。

成形条件変更履歴

オペレータの行った成形条件の変更を変更内容及び変更時刻と共に記録できる。

成形機の状態

成形機の稼働や停止、異常発生状態などの状況を記録できる。

などがあり、接続された成形機の情報を常時蓄積している。サーバプログラムはデータベースに蓄積された情報を加工し、表示するプログラムでありiii-Systemの機能の特徴付けている。

例えば、品質管理用として、成形品質情報と成形条件履歴情報、異常発生情報、成形機の状態情報が時刻を合わせた24時間のグラフに表示できる(図5)。

#### 3.2 通信プログラム

TCP/IPによる通信を行っており、専用ドライバを開発したことで様々な情報の受け渡しを実現している(図6)。

このドライバを成形機本体のコントローラに埋め込むことで、成形機をイーサネットに直接接続し、iii-Systemと接続することができる。現在発売されている当社の電動式射出成形機SE-Dでは、このイーサネット・インタフェースを標準実装しており、容易にiii-Systemと接続できる。

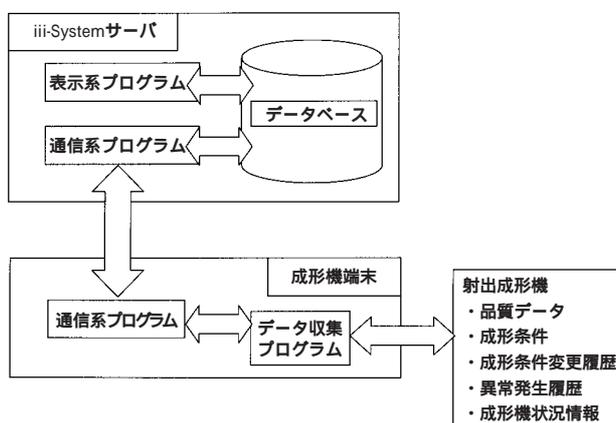


図4 iii-Systemの構成  
System configuration figure

この通信仕様の具体的な流れは、

定期通信情報の場合(成形機端末 サーバ)

定期通信とは成形機のショットごとに計測したデータ(時間、位置、圧力及び温度など)を1つのブロックとして成形機端末から送信し、サーバのデータベースに登録する情報である。

不定期通信情報の場合(成形機端末 サーバ)

不定期通信とは、成形機の異常発生情報や成形条件変更時の情報及び成形機の状態情報のことで、いつ発生するかわからない情報で、都度サーバへ情報を通信し、データベースに登録する情報である。

サーバから成形機端末へ送信される情報の場合

iii-Systemではサーバ側からのアクションにより、通信される情報がある。その一つがリモート設定用の情報で、サーバから変更できる設定である。

もう一つは成形条件で、成形機側の成形条件をサーバへアップロードしたり、サーバから成形機へダウンロードするときの情報である。

などがあり、これらの通信により、成形機多数台の情報を記録し管理している。

#### 3.3 成形機端末(現場端末)

成形機端末は射出成形機の運転状況や成形品質データを常にモニタリングし、その情報をiii-System専用の通信ドライバによりサーバへ送信する装置である。

この成形機端末は、通信手段を持たない旧型の成形機や、他社機あるいは他の設備(検査装置及び組立て機及び取出し機)とシリアル通信や信号により接続することができる。

ハードウェアとしては、射出成形機のコントローラ開発でのノウハウを生かしたFA向けの設計がなされており、ハードディスクレスにより高信頼性や高耐久性を有している。

更に、2つのCPUボードにより様々な対応が可能となっている。

シリアル通信多チャンネル対応(最大4チャンネル)

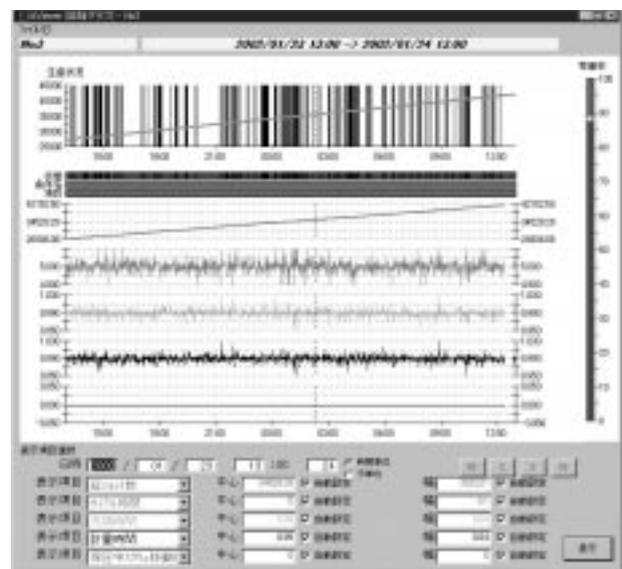


図5 総括グラフ  
General data graph view

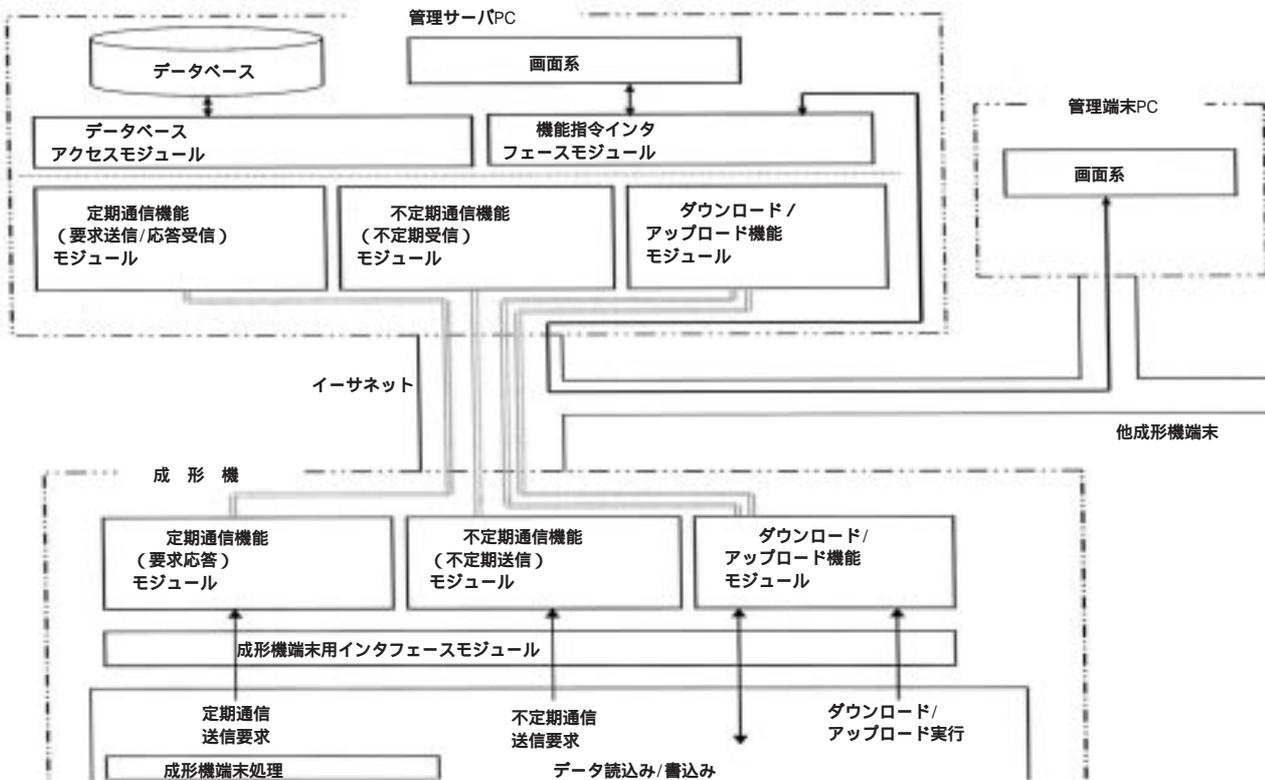


図6 通信系システムの構成  
System configuration figure of communication system

#### 信号接続による成形機20台接続

温度センサ入力やその他拡張が可能

これらの要素から構成され、成形機端末の対応により、様々な設備と接続が可能となっている。

## 4 iii-Systemの効果

### 4.1 生産管理的な効果

リアルタイムに生産状況や稼働率、不良率などの情報を見ることができ、生産計画との比較が容易である。

日報機能により、自動的に日報情報（製品別生産量、金型使用状況及び稼働率等）が蓄積され、効率化できる。

### 4.2 品質管理的な効果

成形品質データの変動が異常発生や設定変更のタイミングと比較できるため、変動の原因を解析することができる。

成形品質データの日間変動を統括グラフ（24時間グラフ 図5）により、確認することができ、また変動の原因を解析するツールとして利用できる。

日報機能により1日分の品質データをデータベースより切り出し、別のファイルとして保存できる。

このファイルを保管することで、1年前の状況を見ることも可能であり、製品出荷後のトレーサビリティとしても利用できる。

成形の安定確認をiii-Systemの品質情報表示機能で行い、後工程である検査工程を削減する試みも行われている。

### 4.3 その他の効果

iii-Systemは実際の成形現場に居なくても、成形状況や成形品質データ確認が可能のため、いろいろな効果が期待されている。

成形現場が事務所と離れている場合は、成形状況の確認に、現場へ出向く必要がなくなる。

クリーンルーム外から成形状況が確認できるため、クリーンルームへの出入りが少なくなり、効率アップとなる。などがある。

## 5 今後の展開

iii-Systemの採用で、生産管理系へ対応が必要となる場面が出てきている。この場合は、製造実行システムへの展開として専門のベンダと協業し対応を行っているが、顧客が望む効果を得るためにiii-Systemをプラットフォームにしたソリューション提案を目指す必要がある。

また、成形市場は更なるグローバル化への変化により、多種多様に顧客価値が変化すると予想され、これらの市場の変化に対応していくことも大きな課題である。

## 6 むすび

射出成形機工場の成形現場向けに、射出成形機を多人数管理できるシステムを開発し、販売を行っている。そのシステムの特徴としては、

遠隔地から成形現場の成形機の状態をリアルタイムに確認することができる。

遠隔地から成形品質データの安定性を確認でき、かつ24時間での成形安定性を把握することができる。

があり、これらの特徴により、成形現場の効率化や不良率の低減活動のツールとして利用できる。

このiii-Systemは射出成形市場だけではなく、他のFA市場へも設備とのインタフェースを変更することで対応が可能である。更にFA市場で利用価値のある製品開発を行っていく予定である。

# 電動式射出成形機の新逆流防止装置 SK制御

SK-control as New Check Valve System for Electric Injection Molding Machine

今野 政昭\*

Masaaki KONNO



SK制御外観  
Parts of SK-control

SK-control has been developed as a new check valve system for the precision plastic molding using the electric injection molding machine. SK-control is based on Sumitomo original principle and structure which are different from the conventional check valve system. The characteristic is as follows.

(1) In order to realize resin leakage free injection, SK-control closes the valve completely before injection

主力機となっている電動式射出成形機において、より高精度な成形を実現していくための差別化技術として、溶融樹脂を金型内へ充填する工程で重要となる、新しい逆流防止機構『SK制御』を開発した。『SK制御』は従来と異なる原理からなる構造と、電動式射出成形機の制御性の良さとの組み合わせにより、次の特徴を有する。

従来の逆流防止機構の問題点である、射出時の樹脂逆流のバラツキをなくすため、射出前の逆流防止を行う。

逆流防止リングの軸方向の動きをなくし、計量時のスクリュ回転で樹脂流路を開き、計量完了時点でスクリュを逆回転させ樹脂流路を閉鎖させる構造としている。

『SK制御』の発展系として、樹脂材料の密度が不安定な場合にも対応できる補正制御が可能である。

process.

- (2) The check mechanism of SK-control is rotation of check ring. The valve is opened by the screw rotation in plasticizing process, and is closed by the reverse rotation when the plasticizing process is completed.
- (3) By using SK-control, non-uniformity resin density can be compensated.

## 1 まえがき

近年、環境問題や省エネルギー化対応がプラスチック成形業界にも強く求められている。一方、携帯電話、デジタルカメラなどIT関連の各種製品に使用されるコネクタやレンズ、導光板といったプラスチック成形品も高精度、高品質化し、精密成形性への要求レベルも高くなってきている。これらに対応するかたちで、射出成形機は油圧駆動からサーボモータを採用した電動式射出成形機が主流となっている。電動式射出成形機は油圧機に比べ、油を使わず、クリーン、エネルギー効率が高く、低騒音である。また、ボールネジをサーボモータで直接駆動する構造とデジタル制御化により制御性が向上し、精密成形に対する十分な能力を備えている。

この精密成形の安定性に大きく影響する装置は可塑化装置で、特に樹脂を金型内へ流し込む最終工程ラインで重要となる部分が逆流防止機構である。精密安定成形を実現させるには毎ショットの金型内への溶融樹脂の充填量を安定させることが必要不可欠である。

本報では、充填量安定化を目的として、新たに開発した逆流防止機構『SK制御』の特徴と効果を報告する。

## 2 逆流防止機構の構造

### 2.1 従来の逆流防止機構

従来の逆流防止機構としては、図1に示すものが知られている。その構造はスクリュヘッド、逆流防止リング及びシールリングから構成され、スクリュの先端部に取付けられる。原理的には樹脂の流れ方向によって生じる圧力差で逆流防止

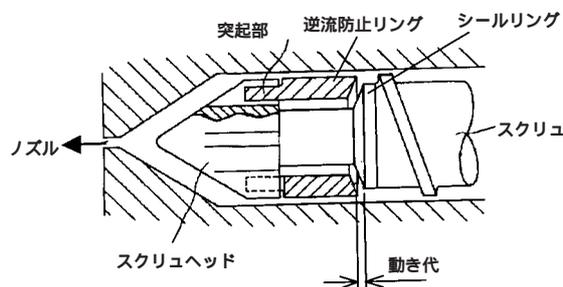


図1 従来の逆流防止機構  
Conventional check valve

リングが軸方向に移動し、樹脂流路を開閉する。具体的には計量工程中はスクリュで可塑化された熔融樹脂に押されて逆流防止リングは先端側（ノズル側）へ移動しシールリングとのシート面が開き、樹脂が通過してスクリュヘッドの先端に蓄積される。射出工程では、スクリュが前進し樹脂を押し出すので、その反力で逆流防止リングがシールリング側に移動して流路を閉鎖し、逆流が防止される。逆流防止リングの前端には突起部があり、スクリュヘッドに形成された樹脂の流通溝に組み合わされている。これにより、スクリュ回転時は逆流防止リングがスクリュ及びスクリュヘッドと一緒に回転するので共廻りタイプと呼んでいる。なお、逆流防止リングに突起部がなく、逆流防止リングがスクリュ及びスクリュヘッドと一緒に回転しないタイプもあり、こちらは非共廻りタイプと呼んでいる。

2.2 成形安定性における問題点

一般的に採用されている逆流防止機構においては、逆流防止リングが軸方向に動き代を持っており、その動きは射出速度や温度条件によって変化する樹脂の粘度特性に大きく影響され、制御されているものではない。特に、射出時には逆流防止リングがシールリングと接触するまでは、その隙間から微量な樹脂逆流が生じるので、毎回確実に同じ量が充填されているか保証することはできない。なお、樹脂の逆流は、逆流防止リングとシールリングの隙間以外に、逆流防止リング外周と加熱シリンダ内周の隙間でも生じるが、その隙間は一般的に数十マイクロオーダーであり、逆流防止リングとシールリングの隙間が数ミリオーダーであることに比べ極めて小さいので、ここでは、逆流防止リングとシールリング間で発生する樹脂の逆流に注目している。

従来の成形では、充填工程の後、保圧工程があり、スクリュヘッド先端で受ける樹脂圧を制御して、充填量の補充がされるので、高い精度が要求されない場合には、充填量の微量な変動による影響は少ない。しかし、電子部品や機構部品など精密小物成形においては、充填量が少なく、しかも、ゲート径が小さい場合が多く保圧で押し込むことができない。従って、ほとんど充填工程で精度が決まってしまう、逆流防止機構の性能が大きく影響してくる。逆流防止機構の性能が不安定であれば、過充填によるバリの発生、充填不足によるショートモールドという、成形不良として現れることになる。

これに対し、従来から図2、図3に示すようなボールチェック方式やメカバルブ方式などが提案されている。前者は逆流防止リングの替わりにボールを採用することで逆流防止の応答性を高めており、安定性は向上するが、射出工程が始まってから作動するので、原理的には変わらず、不安定要素は抱えたままである。また、ボール周辺に樹脂が滞留しやすくなり、劣化により変色や樹脂焼けなどの問題がある。一方、後者はパネを利用して弁体（ポベット）を動かし、計量工程が終了した時点で逆流防止ができるため、射出時の逆流の影響がなくなる。しかし、パネ定数と流動樹脂からの反力のバランスで弁体の動きが左右されるので、樹脂の粘性や計量条件によって、計量中の弁体の開き量や閉じるタイミングに影響を与えるものと考えられる。また、弁体とパネ部の間に軸部が摺動する部分があり、隙間が大きいと樹脂が入ってしまい、隙間を詰めると弁体の動きに影響が出てしまう問題が考

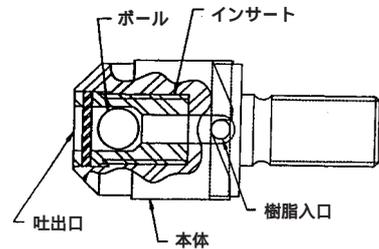


図2 ボールチェックバルブ  
Ball check valve

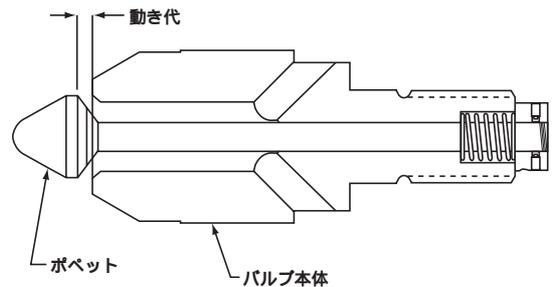


図3 メカバルブ  
Mechanical valve

えられる。

このため、逆流防止機構としては構成する部品を増やさず、できるだけシンプルに樹脂の流路を開閉できた上で、射出前に逆流防止できる機能が要求されることになる。

3 SK制御

3.1 原理、構造

逆流防止機構の充填量安定化に対する問題点を解決するため、従来とは異なる新しい原理で動作させる機構として『SK制御』を開発した。『SK制御』の原理は可塑化計量時のスクリュ回転時に樹脂流路が開き、計量完了時点でスクリュを逆転させることによって逆流防止を行うものである。従って、逆流防止リングの軸方向への動きはなく、射出前に逆流防止を行える。その構造を図4に示す。従来の逆流防止機構

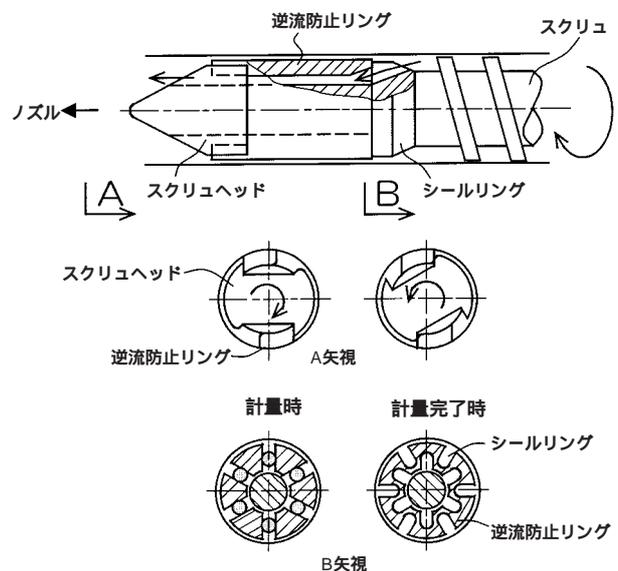


図4 SK制御の構造  
SK-control

と同様にスクリュヘッド、逆流防止リング、シールリングから構成され、逆流防止リングがスクリュ及びスクリュヘッドと一緒に回転する共廻りタイプである。逆流防止リングにはその内側のシールリング側に樹脂流路となる溝が形成される。一方のシールリング側にも外周に樹脂流路の溝が同数形成されている。逆流防止リング前端の突起部は、スクリュヘッドに形成された樹脂の流通溝に組み合わせられるが、このスクリュヘッドの流通溝は所定の角度だけ逆流防止リングの回転を許容する形状となっている。また、スクリュヘッドとシールリングは回転方向の位置決めをして組み付けるようにしてある。これにより、逆流防止リングはスクリュヘッドとシールリングに対し、相対的に許容された角度だけ回動し、その方向で逆流防止リングとシールリングの樹脂流路の溝が連通、閉鎖することになる。すなわち、可塑化計量中はスクリュの回転方向に合わせて、逆流防止リングとシールリングの樹脂流路の溝が連通し、計量完了した時点でスクリュを逆回転させると閉鎖して逆流防止を行う。可塑化計量時はスクリュが所定角度以上に十分回転することになるので、樹脂流路を開くための設定は必要ない。一方、計量完了時に樹脂流路を閉鎖するためにスクリュを所定角度以上逆回転させる設定が必要になる。電動式成形機の制御性の良さととの組合せで、このような動きが実現できる。

3.2 性能

『SK制御』の特徴である射出前の逆流防止性能について、以下に述べる。図5に、計量完了後のサックバック量と射出樹脂重量の関係を示す。サックバックは通常、計量完了後にノズル先端の樹脂圧力を低下させるために、スクリュを後退させる機能である。従来の逆流防止機構ではサックバックにより、相対的にスクリュ側から逆流防止リングとシールリングの間を通過して樹脂がスクリュヘッド先端側へ流れ込むこと

になる。同図に示すようにサックバックを増やしていくと射出樹脂重量も増加している。これに対し、『SK制御』はサックバック量による影響を受けていないことから、計量完了時に流路の閉鎖ができていていることがわかる。

4 効果事例とSK制御の展開

金型内に樹脂を完全充填しないショートショット成形では、保圧がかからないため、通常の保圧成形に比べ充填量の安定性が低くなる。図6はバーフロー金型で成形した厚さ1mmの成形品を100枚並べたものであるが、『SK制御』は従来の逆流防止機構に比べ末端部分の高さ、すなわちバーフロー長さが安定している。図7に、その重量安定性を示す。『SK制御』は重量の変動係数が1/2となっており、射出時の逆流の違いが大きく現れていることがわかる。

実際の成形では金型内に完全充填するので、上記のような性能の違いが必ずしも明確に出るものではない。しかし、『SK制御』による射出前逆流防止特性があることは、従来の逆流防止機構が抱えている不安定要素を解消でき、長期的な安定性を高くすることができる。

4.1 効果事例

ピッチ間が非常に狭い多芯数コネクタ成形において、従来の逆流防止機構では充填量のわずかな変動により、ショートとバリの問題が発生しやすい。図8に充填量の安定性を示す実績値として、射出工程におけるスクリュの最前進位置である最小クッション値の推移を示す。従来の逆流防止機構と比較し、『SK制御』はクッション安定性が約1/2となり充填量の安定性が向上している。この結果、ショートとバリによる不良を解消できている。

また、薄肉で寸法形状精度が要求されるコイルボビン成形において、形状を出すために充填時の圧力安定性が重要とな

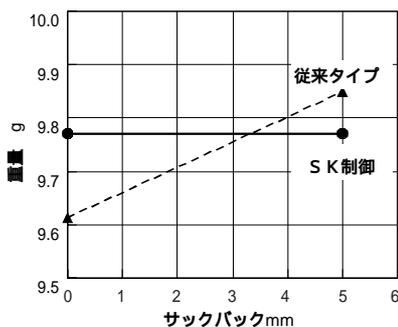


図5 サックバック量と射出樹脂重量との関係 (樹脂:GPPS)  
Relationship between pullback and injection weight (Resin:GPPS)

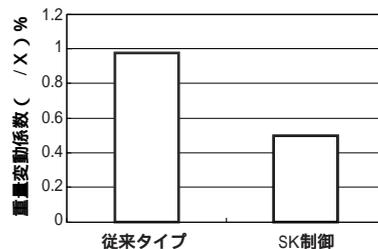


図7 バーフロー成形重量安定性  
Weight stability in case of bar flow molding

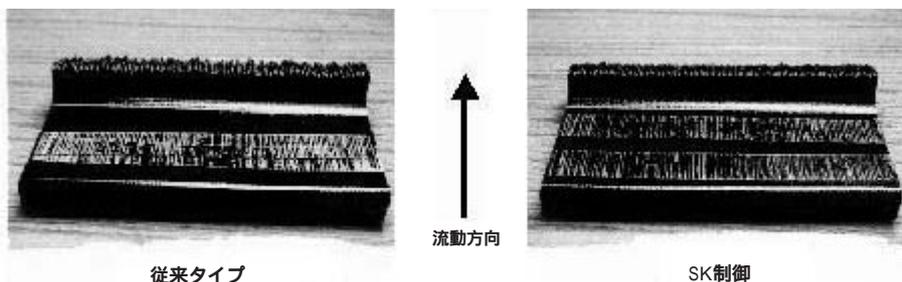


図6 バーフロー成形品 (樹脂:PC)  
Bar flow molding (Resin:PC)

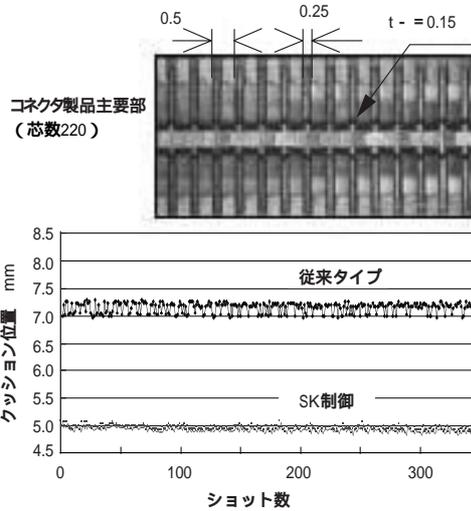


図8 コネクタ成形時の最小クッション値 (樹脂:LCP)  
Minimum cushion in case of connector molding (Resin:LCP)

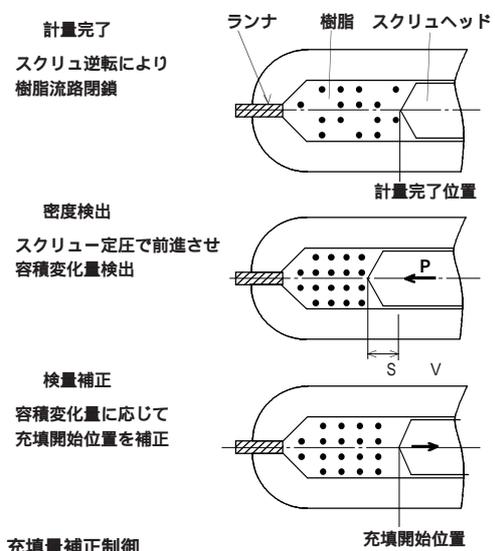


図10 充填量補正制御  
Filling quantity compensation

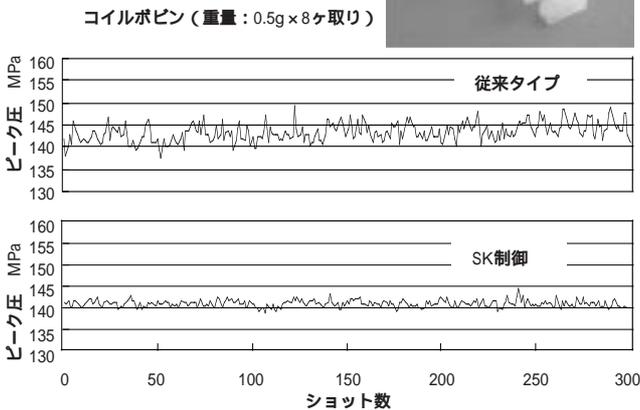
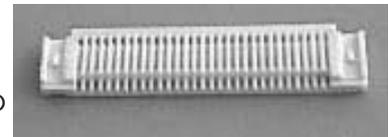


図9 コイルボビン成形時の充填ピーク圧力 (樹脂:PC)  
Filling peak pressure in case of coil bobbin molding (Resin:PC)



コネクタ 重量:0.06g×4ヶ取り)

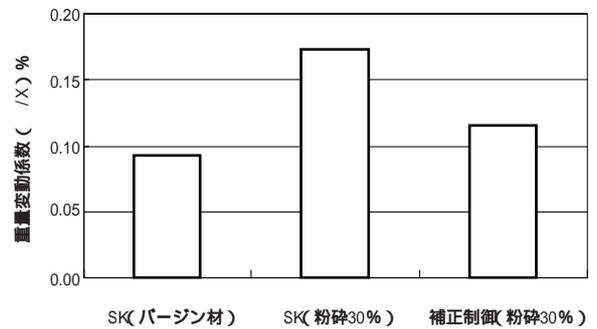


図11 粉碎機を混ぜた場合のコネクタ成形 (樹脂:LCP)  
Connector molding using granulated material (Resin:LCP)

る。図9に示すように充填時のピーク圧力のバラツキは『SK制御』により約1/2にすることができ、製品の安定化が図られている。

#### 4.2 SK制御の展開

SK制御の展開として、充填される樹脂の密度を検出し、密度に応じて充填量を補正することで、更に安定性を向上させることができる。図10に示すように型開き前にスクリュを一定圧力で前進させ、スクリュヘッド先端に計量した樹脂の容積変化量を検出し、この量が一定でなければ充填量で補正しようとするものである。例えば成形でランナなど製品にならなかった部分を粉碎してリサイクルするような場合には、粉碎材をバージン材に混ぜて成形材料にするため、密度が不安定となり、溶融密度に影響する。実際に粉碎材を30%混ぜたLCP樹脂でのコネクタ成形において、図11に示すように、補正制御を使うことで重量安定性を改善できることがわかる。今後は、コストダウンが進む中、樹脂材料の節約のためリサイクル化は増えるので、材料密度の変動への対応も必要と考える。

## 5 むすび

主力機となった電動式射出成形機の精密安定成形の性能を更に向上させるため、従来とは全く異なる原理で作動する逆流防止機構『SK制御』を新たに開発した。

従来の逆流防止機構の問題点である、射出時の樹脂逆流のバラツキをなくすため、射出前の逆流防止を行う。

流防止リングの軸方向の動きをなくし、計量時のスクリュ回転で樹脂流路を開き、計量完了時点でスクリュを逆回転させ樹脂流路を閉鎖させる構造としている。

『SK制御』の発展系として、樹脂材料の密度が不安定な場合にも対応できる補正制御が可能である。

#### (参考文献)

- 鷹薮龍一. 電動式射出成形機各社の特徴 SE-Sシリーズ. プラスチック成形技術, 第16巻, 第4号, p9~40, 1999.
- 伊澤楓一, 中村伸之, 中村吉伸, 成澤郁夫, 焼本敦利. 成形加工機械の動向. 成形加工, p369~381, 1997.
- 横井秀俊, 江本敦史, 岡 克典, 井口暢亮. 可視化加熱シリンダによるチェックリング挙動の解析. 成形加工'92, p195~198, 1992.

# 最新の紙・板紙抄紙機

Latest Paper and Board Machine

糸川博親\*

Hirochika KUMEKAWA

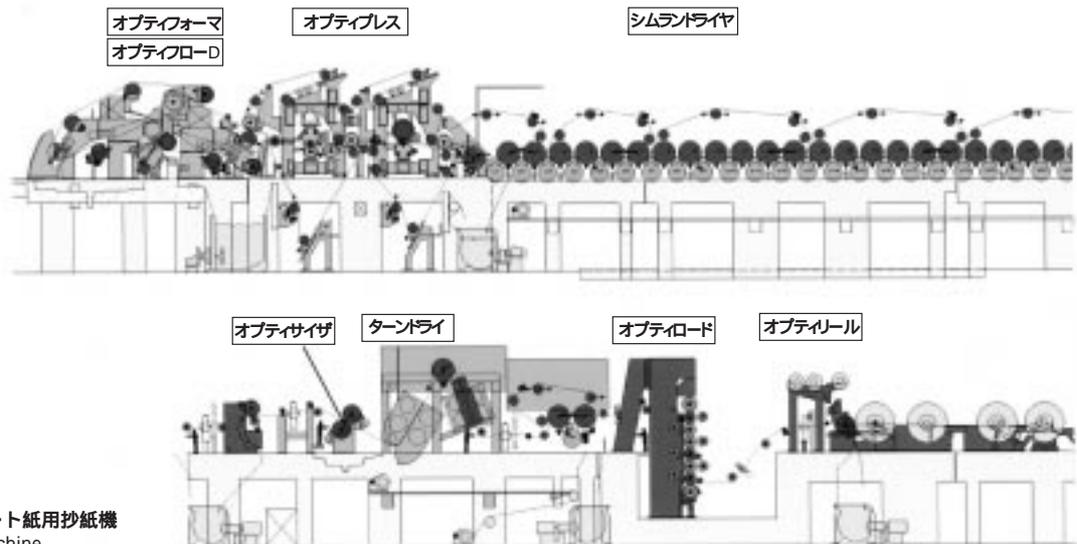


図1 最新の軽量コート紙用抄紙機  
Latest LWC machine

近年、古紙利用の促進に加えて坪量の軽量化、高速化が急速に進んだ結果、設計抄速は紙では2000 m/min、板紙でも1800 m/min が現実のものとなっている。軽量化しながらの高速化と言う難しい課題に挑戦し、新しい革新的な技術が多数生み出された結果、最新の紙・板紙用抄紙機は極めて類似したものとなってきた。加えて、プロセスの総合効率を高めるために、紙料調整の最適化、オンラインでのマシン自己診断等、周辺技術も長足の進歩を遂げている。本報では、最新の抄紙機を例に採り各セクションの新技术を紹介する。

Recently, environmental requirement forces paper making to use more recycled fibers and to save material by decreasing basis weight, which affect forming process and operating speed. Design speed of the paper machine reaches 2000 m/min and 1800 m/min for linerboard. Challenges to the high-speed operation under weaker paper forced to develop new technologies for water removal and web support, which are applied for both paper and board machine. In addition to machine development, stock preparation process and machine automation are also improved dramatically to improve overall production efficiency. Key technology of the latest development is explained in this paper.

## 1 まえがき

地球環境に対する配慮は国際的な課題となっており、製紙業界は多量の木材、水、化石燃料を消費することから、これらの消費量をいかに節約するかは古くからの重要な課題であった。伐採に見合った植林、古紙利用促進による原木使用量の削減、リサイクルによる新水使用量の削減、パルプ製造工程での廃液を燃料化することによる石油・石炭消費量の削減等古くから取り組んできた課題に加えて、坪量軽減（軽量化）による原料消費量の直接的削減も図られるようになってきた。

軽量化の流れは、生産性向上の観点から抄紙機の高速化を促し、古紙混入量の増加による濾水性の低下とあいまって既存技術とは大きく異なる製紙プロセスが誕生した。高速化の流れは日本ではあまり進展していないが、国際競争が進展する中で日本のみが例外とはなり得ず、渦中に巻き込まれるのは時間の問題と考えられる。ここに、住友・メツォ社の最新の紙・板紙抄紙機を例に採り、最新の技術について紹介する。

## 2 最新の紙・板紙抄紙機

かつて、紙は印刷適性を重視し単層・軽量につき高速、板紙は強度を重視するため多層・高坪量で低速と言われてきたが、今日ではこの定義は当てはまらなくなりつつある。板紙といえど、ライナ・中芯原紙などは軽量化が進み、100g/m<sup>2</sup>を経て将来的には70g/m<sup>2</sup>へ移行すると予測され、抄速は1300m/minを超えるものと考えられている。更に、原料として雑古紙の使用量が増え濾水性が低下することから、フォードリニアでは脱水能力が不足し、高速抄造に対応できないことがわかっている。この課題をクリアするために、紙の製紙技術が転用された結果、最新のライナ抄紙機は紙の抄紙機とほとんど同じ機種構成となってきた（図1、図2）。

次に一例として、最新の高速大型抄紙機の基本仕様を示す。

新聞用抄紙機 Stora Enso Langerbrugge mill

ワイヤ幅	11,100 mm
設計抄速	2000 m/min
坪量	45 g/m <sup>2</sup>

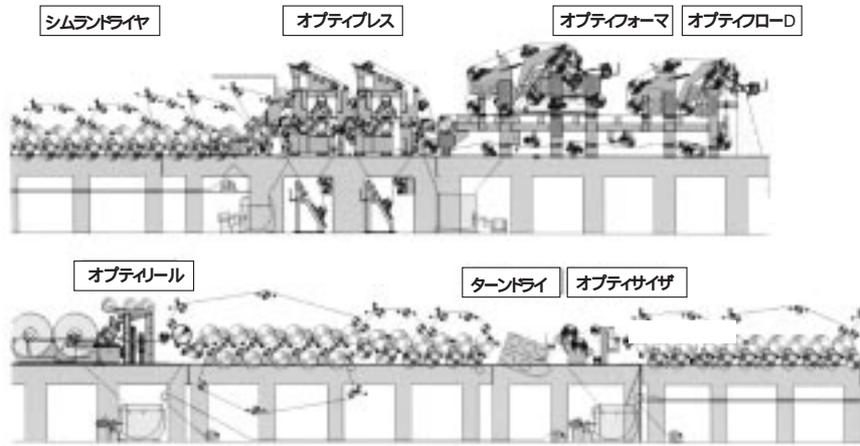


図2 最新のライナ/中芯用抄紙機  
Latest linerboard machine

ライナ/中芯用抄紙機	Papierfabrik Palm Co.
ワイヤ幅	11,000 mm
設計抄速	1800 m/min
坪量	60 ~ 150 g/m <sup>2</sup>

### 3 紙料調整 (オプティフィード)

近年、坪量の幅方向制御を改善していく中で、流れ方向の坪量変動が幅方向の制御精度に大きくかかわっていることが判明し、変動を引起す主因が紙料に関係していることが確認された。紙料は色々な原料・薬品が多種多様に混合された物で、各種成分の配合量が経時的に変動することに加え、リサイクルされるブロークと白水の量が大きく変動することがあるため、ヘッドボックスに供給される紙料の濃度やフリーネスは常に変動している。この変動を吸収するために、従来はプロセス中に大きなチェストを設置しプロセス変動を抑制する対策が取られてきた。この方式では一旦大きな変動が生じると、後流各部に影響を与え、各変動の整定時間が異なることからプロセスが安定するのに時間がかかるという問題がある。新しい紙料調整装置オプティフィードは、一例としてブロークと水を扱う工程を他のプロセスから分離し、チェストを小型化して時間遅れを減らし、更にオンライン計測結果に基き填料をフィードフォワード制御することで流れ方向の変動を抑制することに成功した。この事は抄替え時にも有効で、4 g/m<sup>2</sup>の坪量変動を5分以内で安定化させることができた(図3)。

### 4 ヘッドボックス

紙料に適切なマイクロタービュランスを与え、繊維が幅方向に均一に分散し、しかも適度な絡み合いを持った紙料を作りだし、流れ方向に真直ぐに安定して供給するのがヘッドボックスの役割である。近年では、これらに加えて坪量プロファイルの更なる改善並びにカール特性の改善等が要求され、リップによるプロファイル制御から希釈水による濃度プロファイル制御への転換、及びエッジフローによる繊維配向性制御の導入等が進んでいる。更に、ヘッドボックスとギャップフォーマの組み合わせが本格化する中で、縦横比の改善、操業条件の最適化等、新たな課題への取組みも進んでいる。

これらの技術は紙の抄紙機で開発されたが、板紙抄紙機においても要求品質の向上、高速化に伴うエアクッションヘッドボックスからハイドロリックヘッドボックスへの転換とともに、濃度プロファイル制御やエッジフロー制御の導入が進んでいる。

### 5 フォーマ

上質紙では抄速が1200 m/min、ライナや中芯原紙では1000 m/minを超えると、既存のフォードリニアやハイブリッドフォーマでは脱水能力の不足や紙品質の低下等の問題が顕在化することから、ギャップフォーマへの転換が進みつつある。一方、従来のギャップフォーマは非常に短いフォーミングゾーンで両面同時に脱水することから、リテンションの低下、層間強度の低下、地合の悪化、縦横比の悪化等の問題があり、こ

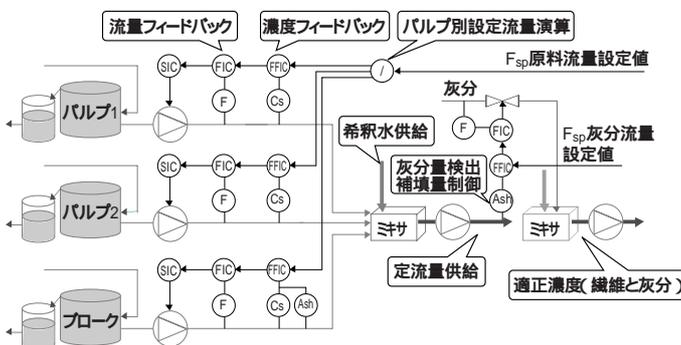


図3 紙料調整装置 オプティフィード  
Opti Feed

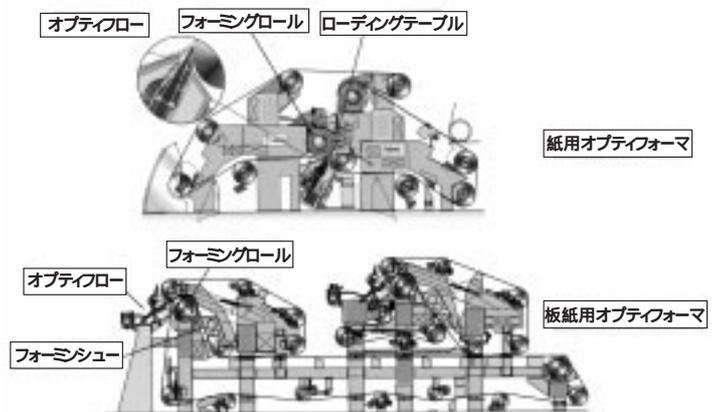


図4 紙・板紙用オプティフォーマ  
Opti Former

れらを如何に解決するかが大きな課題であった。オプティフォームはロールアンドブレード型ギャップフォームで、大径フォーミングロールの定圧脱水ゾーンで脱水能力とリテンションを確保し、後に続くシューもしくはローディングブレードで地合を改善することで従来のギャップフォームの欠点を克服している。層間強度も実用レベルを確保している他、ヘッドボックスのタービュランスレベルを調整することでハイブリッドフォーム並の縦横比を確保するとともに、優れた寸法安定性を得ている（図4）。

## 6 プレス

従来のロールニッププレスでは、高速になるとドライネスを維持するため線圧を上げてゆく必要があるが、ロール強度や加圧機構等構造上の制約があり、掛けられる線圧には上限がある。加えて、センターロールから湿紙を剥すのに要する力は抄速が速くなるほど大きくなるために、従来のプレスでは紙切れを増やさずに操業できる抄速には限界があった。日本では、3番プレスにシュープレスを採用した新聞用抄紙機でも1600 m/min程度が紙切れを増やさずに安定して操業できる限界と言われている。この制約を打破するためにオプティプレスが開発された。

オプティプレスはワイヤからピックアップした湿紙をドライヤまで2本のトランスファーサクションロールを用いて全幅で一気に通紙するもので、プレス内には断紙の要因となるセンターロールもオープンローも存在しない。僅か2個しかニップがないが2Pにシュープレスをを用いることで従来のプレスと同等以上のドライネスを得ることができ、しかも紙切れのない画期的なプレスである。今後高速抄紙機では、紙・板紙等紙種を問わず使用されていくものと考えられる（図5）。

## 7 ドライヤ

ドライヤは抄速の向上とともに変化を重ねてきた高速化の歴史そのものといえる。最新の抄紙機では紙種を問わずに全群トップカンバスがブレドライヤに採用されるようになり、世界最速の新聞用抄紙機は1800 m/minを超えて運転されている。シングルカンバス化による湿紙走行の安定化に関してはブローボックスとバキュームロールによるシートサポートが多大な貢献をしている。特に1500 m/minを超える抄紙機では、シリンドラからの剥離が特に重要になることから剥離性を

強化したハイランブローボックスが開発された。シングルカンバス化のもう一つの大きな効果は通紙性の改善にあり、ロープレス通紙が可能になったことで通紙性は大幅に改善された。一方、上質紙等サイズプレスを必要とする抄紙機ではカール調整のためにアフタードライヤにダブルカンバスが必要となり、結果として高速での通紙性、断紙等の問題が残っている（図1、図2）。

現在新たな課題として、ダブルカンバスでのロープレス通紙並びにブレドライヤの乾燥能力を高める熱風乾燥装置付きロール、オプティドライの開発が進められている。

## 8 サイズプレス

上質抄紙機の抄速を上げる過程で最初に問題となったのが、サイズプレスのボイリング現象とスリップであった。これらの問題は、シムサイザにてフィルムトランスファーサイジングを行うことで解決されたが、高速化が更に進んでいく中で、サイズ後の湿紙の強度低下による断紙、ピグメント塗工によるアフタードライヤの汚れ等の問題が顕在化してきたために、サイズ後のシートサポートと乾燥を兼ねたターンドライが開発された。シムサイザでは、シーリングブレードを用いて給液のオーバーフローを取っているために、高速では液の飛散による汚れが発生し易い。そこで、塗工に必要な量のみを給液しオーバーフローを取る必要のないアプリケーションを持つオプティサイザの開発を進めている（図1、図2）。

## 9 カレンダー

近年、紙の抄紙機では印刷適性の向上を目的としてハードカレンダーからソフトカレンダーへの転換、並びに生産性の向上を目的としてオフラインカレンダーからオンラインカレンダーへの転換が進んでいる。特に新聞用紙では、ソフトカレンダー化により印刷モットルが解消されたことから、カラー印刷の品質が大幅に向上した。同じような取組みが上級印刷用紙でも行われており、今後は上級紙にもソフトカレンダーが普及していくものと考えられる。また、オンマシコート紙をソフトカレンダー掛けすることでオフラインスーパを省略することができることから生産効率は大きく改善されるが、2ニップのソフトカレンダーでは塗工量、線圧を変えても達成できるグロスには限界がある。ハンターグロスで50を超えるコート紙は4ニップ以上でカレンダー掛けをする必要があり、通常オフラインスーパが使用されてきたが、広範囲にグロスをカバーできるオプティロードが開発されたことから、オフラインプロセスを不要にできる可能性が出てきた。

オプティロードカレンダーはロール自重キャンセル機構を備え、全段で低ニップから高ニップまで線圧を変えることができ、非常に広範囲のグロスをカバーすることができる（図6）。

一方、板紙ではロールにピッチが付着するという問題があり、ソフトカレンダーは主に白板や塗工板紙に使用されている。板紙は、嵩及び剛度を重視することから、嵩を犠牲にせずにグロスを上げたいという要望があり、シューカレンダー（オプティドゥエル）が開発された。オプティドゥエルは広幅のシューでベルトを介して線圧を掛けることにより、平滑度を保ちながらソフトカレンダーよりも数パーセント高い嵩を得ることができる画期的なカレンダーである（図7）。

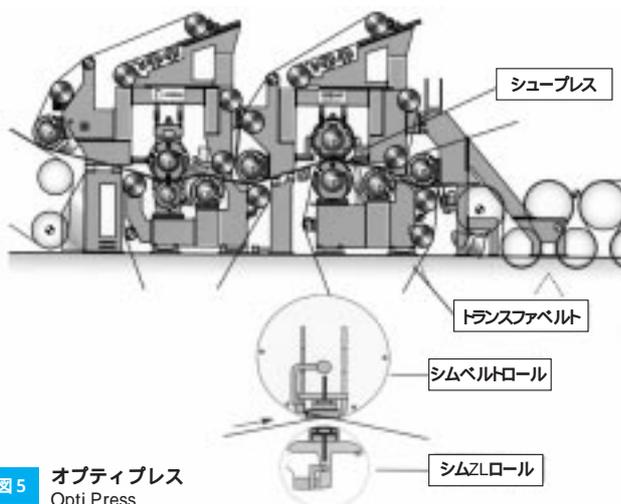


図5 オプティプレス  
Opti Press

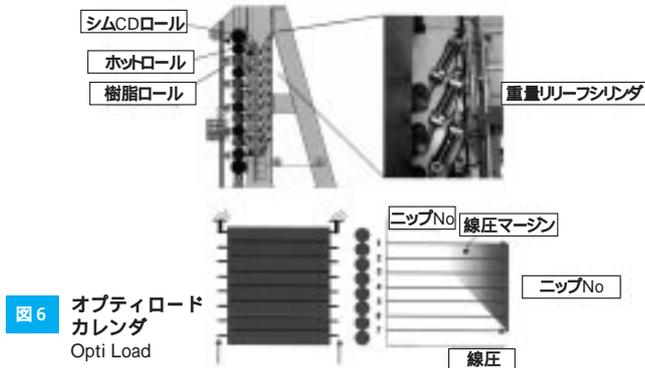


図6 オプティロード  
カレンダー  
Opti Load

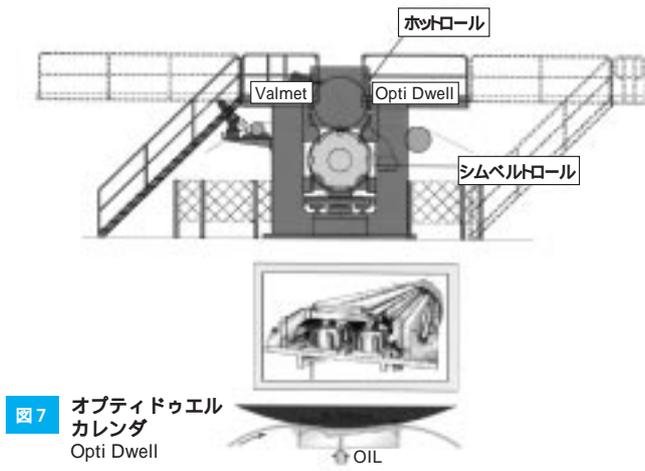


図7 オプティドゥエル  
カレンダー  
Opti Dwell

## 10 リール

抄速が速くなればなるほど、親枠の仕上効率を上げるため巻取り径が大きくなり、巻取り重量が増加する。従来のサーフェスワインディング方式では親枠と巻取り間の摩擦力で親枠を回転させるために、親枠が大きくなり重量が上がるとドラムの摩擦力で親枠を回すことに無理が生じ、下巻きにしわが入ったり、上巻きに擦傷が入ったりと色々な障害が発生する。この対策として、摩擦力に頼らずに巻取りするセンターワインディング方式のオプティリールが開発された。オプティリールはリールスプールを駆動することで、巻始めから一定な張力で紙を巻き取れるようにしたリールで、既に世界中で約60台が稼働している(図1、図2)。

## 11 トラブルシューティング

抄速が速くなればなるほど、予期せぬトラブルで抄紙機が停止した場合その損失は莫大な物となる。抄紙機には、定期的に交換するワイヤやフェルトのような抄紙用具や、定期的に修正研磨を必要とするゴム巻きロールや樹脂ロール、更に軸受など消耗品や交換部品が多数ある。従来は、これらの部品の状態をオペレータや保全スタッフが巡回監視することで確認してきたが、高速マシンではちょっとした見落としが致命傷になることから自動監視システムの必要性が高まっている。

メツォ社では最新の自動監視システムとして『センソデック6S』を開発した。本システムを使用することにより、オペレータがフェルトの寿命を推定したり、どの軸受が損傷しているかを判定したり、ロールの振動が何に起因するかを判定したりするのに必要な情報を容易に得ることができ、機械の予防保全を画期的に進めることができるようになった。『センソデック6S』は既に約20台の納入実績がある(図8)。

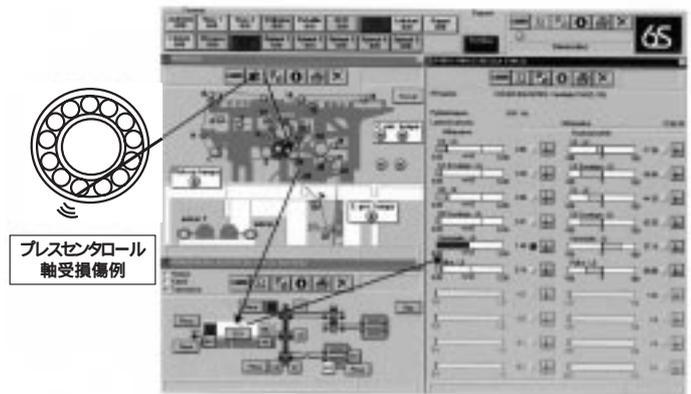


図8 故障診断装置 センソデック6S  
Sensodeck 6S

## 12 むすび

以上、紙・板紙抄紙機について最新の技術を紹介してきた。文中で述べたように、高速抄紙機においては紙でも板紙でもほとんど同じ技術が用いられていることが理解頂けたものと思う。以下に、今後の技術的展望について述べる。

地球環境に対する配慮から古紙利用並びに軽量化が促進されるとともに抄紙機の高速度が進み、紙で2000 m/min、板紙で1800 m/minの操業が現実のものとなりつつある。

古紙を多用した高速運転に対処するため、脱水能力の高いオプティフォーマの採用が進み、併せて断紙要因であるオーブンドローをなくしたオプティプレスの普及が進展する。

ブレドライヤは剥離性に優れたハイランブローボックスを備えた全群トップカンバス化が進展し、長大化を抑制するため熱風乾燥を用いた高乾燥能力のオプティドライが併用されるようになる。

全ての紙種でソフトカレンダーの利用が進展し、加えてオフマシンスーパーカレンダーの代替機としてオンマシンオプティロードが採用され、1台でソフトカレンダーからスーパーカレンダーまで幅広いカレンダーリングに対応できるようになる。

従来はオペレータや保全スタッフが巡回監視することで異常の有無を確認してきたが、高速マシンではちょっとした見落としが致命傷になることから自動監視システム『センソデック6S』が普及する。

### (参考文献)

B. Sandgren. Machine concept for high speed Liner board machine. Board technology days, p.93, 1999.  
 J. Ehrola. High speed OptiConcept line for coated woodfree paper, OptiFeed. Paper technology days, p.106-108, 2000.  
 J. Ehrola. High speed OptiConcept line for coated woodfree paper, OptiFormer. Paper technology days, p.110-112, 2000.  
 J. Ehrola. High speed OptiConcept line for coated woodfree paper, OptiDry. Paper technology days, p.115-117, 2000.  
 M. Tuomisto. Vision for calendering. Paper technology days, 1998.  
 A. Nissinen. Harvesting the quality. Paper technology days, p.153, 2000.

加工システム小特集

新製品紹介

# 全電動式射出成形機 SE-Dシリーズレンズ専用機

Special All Electric Injection Molding Machine for Lens



本機は低イナーシャ、ダイレクトドライブ機構による高応答及び高速性を特長とする全電式動射出成形機『SE-Dシリーズ』（型締力290～1760kN、全6機種）に、ピックアップレンズをはじめとする、高精度レンズ部品成形用のアプリケーション及び専用スクリュを搭載したSE-Dシリーズ専用機である。

## 主要仕様

最大型締め力 290kN 490kN（2機種）

## 特長

### 射出制御特性

新ドライブ機構により最高射出速度、最大射出馬力を従来電動式成形機の約2倍に高めると同時に速度応答性を向上させた。

射出速度の分解能を0.1mm/sとしレンズ成形に最も必要な低速域での安定化を図っている。

レンズの形状、材質ごとに異なる最適圧力の応答特性を選択できる「射出・保圧10モード」を標準装備している。

### 可塑化装置

樹脂流路の表面処理を改良し、黒点及び黄変などの発生の最少化を図っている。

光学用サブライトスクリュにより樹脂の溶融状態の均一化を図っている。

スクリュ先端に「SKシール」を採用し、SK制御を行うことにより充填量、樹脂密度の高精度化を図っている。

### エジェクタ圧縮装置

エジェクタ圧縮装置を搭載することにより、キャビティ内圧力のバランスが取れた成形を可能とし、超薄肉のレンズ成形への対応を図っている。

### 高精度型締装置、高精度ノズルタッチ装置

金型面に均一な型締力分布を与えるために、金型の中心部分を押しセンタープレス式の可動プラテンを開発し、搭載している。

プラテン通水装置を標準装備し、金型から伝達される熱影響を遮断しプラテンの熱変形防止を図っている。

型締装置の平行度を20μm以下の高精度とし、更に高精度ノズルタッチ装置を搭載することにより、上記のセンタープレス式可動プラテン、プラテン通水装置と併せレンズの面精度、寸法精度向上、金型の高寿命化を図っている。

### コントローラ

コントローラは12.1インチ、タッチパネルLCDを搭載し操作性を向上させている。

また、イーサネットインタフェースを標準装備させ、LAN接続可能とし、品質確認、状況確認、日報集計を遠隔地確認できるi・キューブシステム（生産品質管理システム）に接続容易にしている。

（プラスチック機械事業部 小坂光洋）

加工システム小特集

## 新製品紹介

## マイクロオプティクス成形機 NANO-Press

Micro Optics Molding Machine NANO-Press



当社は、光通信や光情報機器などで用いられる光学部品を成形するマイクロオプティクス成形機『NANO-Press』を開発し、発売を開始した。

本成形機は、金型内にガラス等の素材を設置し、素材の変形温度まで加熱した後に押圧して成形加工するプレス装置である。一つの工程で最終の製品形状に加工できることが特長で、小型・精密レンズなどの加工に適している。また、プレスユニットへの金型供給・排出、金型からの成形品取出し・素材設置等の作業を自動化した金型搬送ユニットを標準装備し、量産成形に対応している。

精密光学部品には高解像度の用途でプラスチック材料では対応が困難な領域があり、ここ数年デジタルカメラ用レンズ及びDVD用ピックアップレンズなどにガラス材料による光学素子の需要が拡大している。従来、ガラス製光学素子はガラス母材を研削して製作する方法が主流であったが、非球面レンズの採用や部品の極小化などにより、近年は加工精度が優れ、生産性の高いプレス成形による生産が増加している。

当社は精密光学部品のプラスチック射出成形機分野において市場で高い評価を得ており、『NANO-Press』は長年蓄積した光学分野でのノウハウを生かした高精度で生産性の高いガラスプレス成形機である。

### 主要仕様

装置構成      プレスユニット2軸 + 金型搬送ユニット

プレス制御方式   空圧駆動   圧力フィードバック制御  
 最大プレス力      980N (標準)  
 金型加熱方式      光加熱集光式  
 加熱出力           8kW  
 設定最高温度      700  
 成形雰囲気        真空又は窒素

### 特長

直圧式空圧サーボ機構によりプレス力及びプレス位置を高精度に制御する。

集光式光加熱装置と型締め機構により金型の加熱・冷却制御を最適化しており、金型内温度をフィードバックして高精度に温度を制御する。

制御装置はプラスチック射出成形機コントローラの操作性を継承している。

プレスユニットから予熱・冷却機能を分離し、複数プレスユニット構成を採用することにより高い生産性を実現している。

金型搬送ユニットを標準装備し、複数プレスユニットへの金型供給・排出、金型からの成形品取出し・硝材設置など、全ての作業を自動化している。

効率的に金型を冷却することにより窒素ガスの使用量が少なく、ランニングコストを低減できる。

金型毎に成形条件の設定が可能で、多品種少量生産にも対応できる。

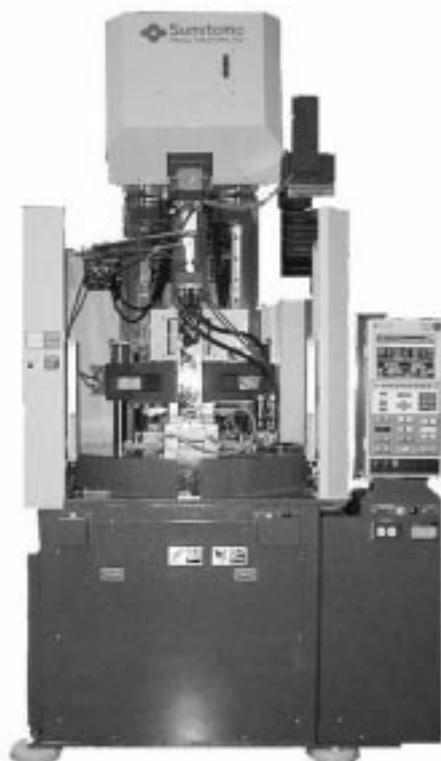
(プラスチック機械事業部 黒岩秀樹)

加工システム小特集

新製品紹介

# 全電動式縦型ロータリー射出成形機 SR100

All Electric Rotary Injection Molding Machine SR100



昨今の日本の成形業界で要求が高まってきているものは、省エネルギー化と成形品の高付加価値化である。環境問題が大きくクローズアップされる中で、生産現場での消費電力の削減が重要な課題となり、その一つの対策として射出成形機の電動化への移行には目覚ましいものがある。また、成形品の高付加価値化として、複合成形(インサート成形)へのニーズが高まってきている。

当社においては、ハイサイクル、精密成形安定性及び高信頼性を特長とした横型の電動式射出成形機SESシリーズ、及びSEDシリーズを販売しており、縦型射出成形機にも電動化へのニーズが高まってきた。これまで当社は油圧式の縦型射出成形機としてVシリーズを販売してきたが、その特長である高速射出、精密成形性能を更に向上させた電動式縦型射出成形機SVシリーズを開発した。しかしながら、インサート成形においては生産性を向上させるという課題が残っており、その対応として下金型を2面搭載できるターンテーブルを装備し、一方の金型で生産中でも他方の金型で次の生産の準備を行うことで生産効率向上を狙った電動縦型ロータリー射出成形機SR100を開発した。

本機は、180°反転式のロータリーテーブルを装備し、インサート成形等の複合成形に対応が可能で、かつ生産性、精密安定性に優れた全電動式縦型射出成形機である。

## 主要仕様

最大型締め力	980kN (100tf)
最大搭載金型サイズ	450mm × 450mm
金型厚さ	250 ~ 350mm
型開閉ストローク	280mm
最大射出速度	300mm/s
スクリュ回転速度	最大400 rpm

## 特長

縦型射出成形機において、業界トップクラスの射出性能と精密安定性を有している。

3本タイパ方式の型締装置は、広いタイパ間隔とテーブルサイズで、1クラス上の金型の搭載が可能である。

ロータリーテーブルにもサーボモータ制御を採用し、高速かつ低振動のスムーズな動作を実現している。

機械正面に光電式エリアセンサを標準装備し、作業者の安全性の確保と操作性の向上を図っている。

汎用横型成形機とのスクリュ部品の共有化により、多種多様な樹脂への対応が可能である。

市場で評価を得ている電動横型成形機と同等のオプション選択が可能である。

大型カラーLCD画面を装備した操作パネルは生産形態に応じた配置が可能で、優れた操作性を実現している。

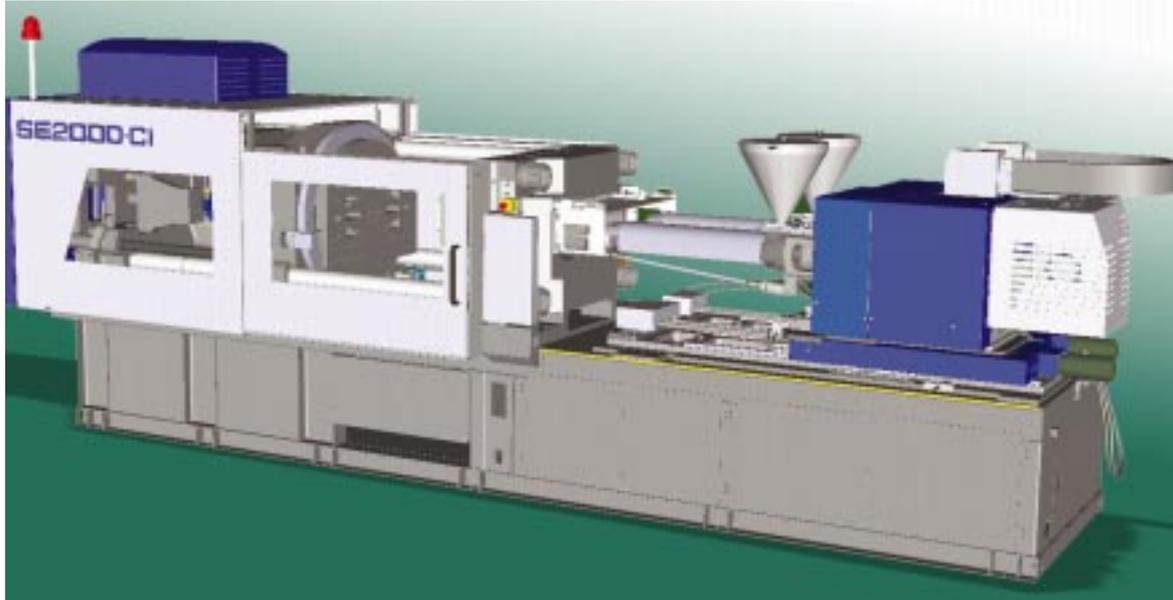
(プラスチック機械事業部 高崎和也)

加工システム小特集

## 新製品紹介

## 全電動式 2 材成形機 SE200D-CI

All Electric Double-shot Injection Molding Machine SE200D-CI



2 材射出成形機は、2 組の射出装置を持ち、複数の材料で構成される成形品を一工程で成形することができる射出成形機である。

近年、一般的な成形品は海外生産へシフトし、国内では新しい生産システム、あるいは高付加価値成形品の開発に重点が置かれてきている。その中で、2 材化・一体化による生産工程の省力化、デザイン、装飾あるいは触感、シール機能を持つ複合成形品など、高付加価値・高機能成形品への移行が加速し、高精度・高生産性を兼ね備えた 2 材機が望まれている。

当社では、全電動式成形機 SE-D シリーズの基本技術をベースに、油圧機で培った 2 材成形機の応用技術を生かし、全電動式 2 材成形機を開発した。

### 主要仕様

型締め力	1960kN (200tf)
タイバ間隔	横920mm × 縦560mm
最大型厚	560mm
最大型開閉ストローク	510mm
最大射出速度	300mm/s

### 特長

ワイドプラテンとノズルピッチ及びエジェクタピッチの可変構造により、金型精度を向上しつつコストを低減できる 1 体型金型方式と、ユーザの金型資産を生かす 2 型組合せ方式のどちらにも対応可能である。

サーボドライブ反転機構は、従来機の高い反転精度のまま、高速かつショックレスな動作を実現

し、生産性が高い。

2 つの可塑化ユニットは、成形に合わせ 2 モジュールの中から選択が可能である。

全電動化により、保守性、省エネ性が向上している。

12.1 インチ大画面タッチパネル LCD 搭載により、設定の多い 2 材成形の条件も入力が容易である。

(プラスチック機械事業部 吉野晴吾)

論文・報告

# 放電プラズマ焼結の設計支援ソフトの開発

Development of Software for Spark Plasma Sintering Die Design

石田 浩 修\* 森岡 真 一\* 荒木 達 朗\* 河野 裕 嗣\*\* 堤 真 司\*\*

Hironobu ISHIDA

Shinichi MORIOKA

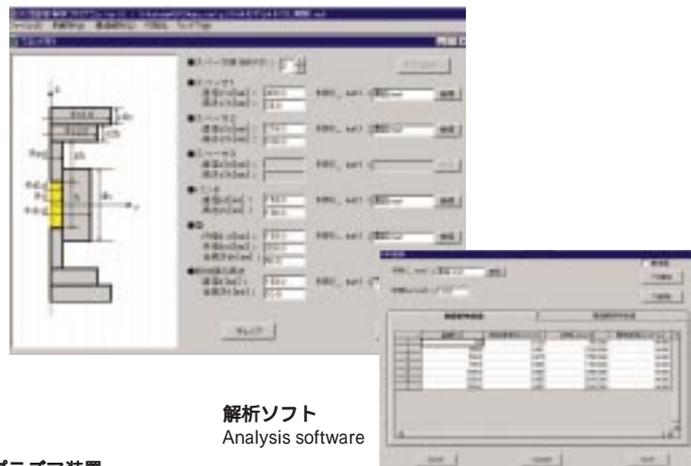
Tatsuro ARAKI

Yuji KOUNO

Shinji TSUTSUMI



500t 放電プラズマ装置  
500t spark plasma sintering machine



解析ソフト  
Analysis software

近年、粉末冶金の一つである焼結の分野に放電プラズマ焼結という新しい焼結法が注目を集めている。この放電プラズマ焼結は、型に詰めた焼結試料にパルス電流と圧力を同時に加える焼結させる方法で、難焼結材の焼結、焼結時間の短縮による生産性の向上及び熟練を要しない操作性などの利点があるとされている。

当社では、小物の焼結などの研究レベルでは広く使用されるようになっていた装置を大物の焼結を目差した生産機に発展させるべく500 t 加圧可能な装置や生産性の向上を図ったロータリー式の焼結装置を開発し、事業化を目指している。良質な焼結品を得るための必要条件は、均熱、均圧であり、本報では、均熱焼結が可能な型の設計支援のために開発したソフトの有効性を報告する。

Recently, Spark Plasma Sintering process (SPS) has attracted the attention in the field of sintering in powder metallurgy. A powder is packed into a die and is heated up by electric current under pressure. This method can sinter a material which is difficult to sinter with conventional method. This method provides good efficiency of the product and easy operation. We have developed a 500t press sintering machine and a rotary sintering machine with the aim of expanding this method from research level to product machine level. In order to make good quality products, it is desirable to sinter the powder under uniform temperature and uniform stress. We have developed a software to analyse the temperature and stress in the material under SPS process for the purpose of obtaining preferable sintering conditions. This report shows that the developed software is useful to design dies for uniform temperature sintering.

## 1 まえがき

粉末を加圧して成形加工する方法には、外部から熱を与え焼結するホットプレス法 (HP) や熱間静水圧焼結法 (HIP)、そして今回対象としている放電プラズマ焼結法などがある。放電プラズマ焼結法は、操作性がよく、急速加熱が可能である反面、型の形状や焼結対象材の物性により試料内部の温度が均一となりにくいと、均一な焼結体を得ることが難しい場合がある。特に、大型品を目的とした生産機などでは、焼結の際の温度分布の不均一性が大きくなる。また、焼結試料が導電体か非導電体かなどの物性値の違いによっても温度分布が様々に変化する。しかし、逆に、この温度分布が生じる

という性質を利用して、傾斜機能材料など、高付加価値の焼結体を製作する試みなども行われている。そのため、均熱化を意図しようが敢えて温度分布を付けようとしようが、焼結体内部の温度分布をあらかじめ予測しておくことは、型を設計する際、必要不可欠である。しかし、放電プラズマ焼結時を対象とした型設計やプロセス設計のためのツールも得られていないのが現状である。そこで、型の設計者が、解析の詳細を気にすることなく汎用的に使用できる通電焼結における温度分布解析ソフトを開発した。

本報においては、実験結果と比較をすることにより温度分布解析ソフトの妥当性を確認し、また、設計条件、操業条件 (計算パラメータ) の違いによる温度分布の影響を観察した。

その結果、型の寸法を最適化したり、操業条件を変えることにより焼結試料内部での温度分布の均一化、省エネ化を図ることが分かった。実験装置は、当社製500t型放電プラズマ焼結装置を用いた。

## 2 温度分布解析

パルス通電焼結法での加熱方法は、通電効果で発生するジュール熱により、型及び粉体部自身が発熱し、その温度上昇に伴い粉体部の緻密化が進むことになる。解析のフローを、図1に示す。

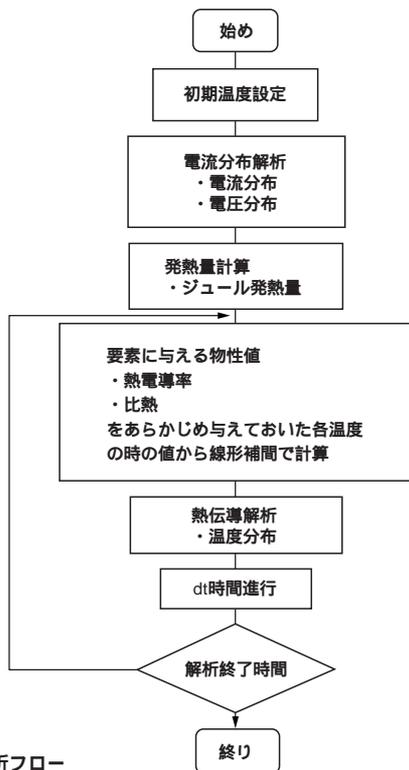


図1 解析フロー  
Flowchart of analysis

### 2.1 電流分布解析方法

電流分布計算には、以下の仮定を設定した。

パルス状直流電流である。

過渡的な電流変化による電流分布への影響は小さい。

粉体部の容積が変わることによる電流分布への影響は小さい。

パンチと型間及びパンチとスペーサ間等の接触部の電気抵抗や熱抵抗については無視する。

これらの仮定を適用することにより、定常電流は一般的に示されているように式で表わされる。

$$E = - \nabla V$$

$$\nabla \cdot (E) = 0$$

ここで、Vは電位(V)、Eは電場(V/m)、は導電率(1/m)である。式から式が得られる。

$$\nabla \cdot (E) = \nabla \cdot (- \nabla V) = 0$$

このラプラス方程式を解くことにより電位分布が得られ、式から電流分布が求められる。

$$J = \sigma E$$

得られた電流分布を基に、式から各部のジュール熱が算出される。

$$Q = J \cdot J$$

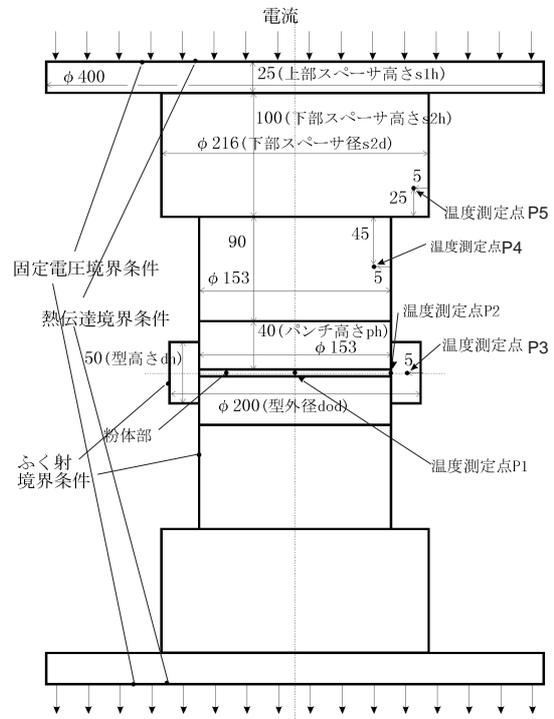


図2 焼結型構成及び境界条件  
Construction of sintering and boundary condition

図2に示すように、電流解析と非定常熱伝導解析のための境界条件は、上端スペーサ面を電流境界条件とし、下端スペーサ面を固定電圧境界条件に設定した。

### 2.2 非定常熱伝導解析

各部に発生するジュール熱、型表面からの輻射放熱及び電極側への熱伝導による放熱を考慮した非定常熱伝導解析を行う。良く知られているように熱伝導方程式は、式で表される。なお、装置内部では、真空であるため対流伝熱は考慮していない。

$$c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q - h \cdot T - \epsilon \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_0^4)$$

ここで、Tは温度、kは熱伝導率、は密度、cは比熱、Qはジュール熱、hは熱伝達係数、 $\epsilon$ 、 $\sigma$ 、 $T_0$ はそれぞれ輻射率、吸収率、ステファン・ボルツマン定数であり、tは時間である。今回の解析では、輻射率と吸収率を同じ値にしている。

図2の境界条件に示す通り、装置電極部とスペーサ部との接触部分を熱伝達境界で定義した。電極部は冷却水により冷却されている。型外周部は、輻射境界条件として定義した。

## 3 試験方法と計算条件

### 3.1 温度分布測定実験

図2に温度測定実験に用いた型、パンチ、スペーサ各部件の寸法を示し、印は、温度測定位置を表わす。型取り付け状態は上下対称とし、温度測定は、K熱電対(1.0K型熱電対インコネル、シース部：1.0×1500mm非接地型、補償導線ツイストペア5000mm SUSシールド)を用いている。焼結試料としては、導電体試料としてSUS316(日本アトマイズ加工株式会社製、平均径10.53μm)を用い、非導電体試料としては、アルミナ(大明化学工業株式会社製、平均径0.16μm)を用いている。焼結温度は、SUS316では、試料中心が1000、アルミナでは、1200付近に設定した。通電焼結装置として、当社製500t型放電プラズマ焼結装置を用いた(冒頭写真(500t放電プラズマ装置))。

### 3.2 温度分布解析条件

温度分布解析に用いた開発ソフトの概観を、(冒頭写真(解析ソフト))に示す。このソフトは、各部品寸法や部品、試料の物性値や、電流値などの作業条件を入力すると、自動的にFEMメッシュを作成し、図1に示すフローに従って計算を行う。

## 4 解析結果と考察

### 4.1 実験と計算の比較

表1に、図2で示した測定位置におけるSUS316とアルミナの場合の定常状態における温度の実験値と計算値を示す。表1のアルミナ試料中心の温度は、熱電対の問題により最後まで測定することができなかった。導電体のSUSにおいても非導電体のアルミナにおいても、実験値と計算値が定性的にも定量的にもよく合っていることが分かる。実験におけるSUSの試料中心と側面での温度差は、137で、アルミナの温度差は、前述したように熱電対の都合で残念ながら測定できなかった。また、計算における試料中心と側面での温度差は、SUS、アルミナそれぞれに96、40である。図3、図3にそれぞれSUS、アルミナの定常状態での発熱量分布を示す。SUSは、型部分のグラフィイトよりも電気伝導性が良いため、電流はSUSの内部を集中的に流れ、その結果、試料上下で発熱量が大きくなり、また、電流の経路が狭くなって電気抵抗が大きくなるパンチ部分で発熱量が大きくなっている様子が分かる。アルミナの場合は、電気抵抗の大きなパンチ部での発熱が大きいのは、SUSの場合と同じであるが、非導電体であるため、試料内部を電流が流ることができず試料側面の型の部分を電流が集中的に流れるためその部分も発熱している様子がうかがえる。図4、図4に、それぞれSUSとアルミナの温度分布の時間変化の様子を表わした。SUSの場合は、前述した通り試料の上下で大きく発熱するた

め、温度が高くないときは、比較的均一な温度分布である。しかし、温度が高くなっていくに従ってふく射による放熱の影響が大きくなっていくため型及びパンチ表面の温度が中心部分より低くなり、試料中心と側面の温度差が大きくなってしまいう結果となっている。アルミナの方は、試料側面の型の部分が大きく発熱し、その部分の温度が局部的に高くなってしまい、全体の温度が低い焼結初期においては試料中心と側面の温度差は大きいですが、全体の温度が高くなりふく射による放熱の影響が大きくなっていくに従って、型やパンチ表面からの放熱効果により、結果として温度差がSUSより低くなっている。

### 4.2 試料温度むらを少なくするための改善案 その1

(カーボンフェルトを型及びパンチ部に巻き付けてふく射放熱を抑える効果の影響評価)

前述したように、試料中心と試料側面で温度差ができてしまう原因として型及びパンチ表面での温度が非常に高温になっているため、そこでのふく射による放熱が影響していると考えられる。そこで、ふく射放熱を抑える手段として型及びパンチ部にカーボンフェルトを巻き、温度測定実験を行った。温度測定点としては、図2のP3、P4、P5の3点を取った。カーボンフェルトは、日本カーボン株式会社製GF-20-5F(厚さ5mm)を用いた。この実験では、アルミナを試料に用いた。定常状態になったときの実験及び計算における各部の測定温度は表2のようになった。ここでの計算方法は、ふく射率をカーボンフェルトを巻いてないとき使用していた0.65から0.2に変更した。その結果、表2に示したように、実験と計算値がよく合っており、このカーボンフェルトを1枚巻いた状態は、ふく射率がおよそ0.2程度とすることでモデル化できることが分かる。このふく射率0.2を用いたアルミナの計算では、試料中心と側面での温度差が40から-33となり、中心よりも側面の方が温度が高くなり、カーボンフェルトはもう少し薄くした方がよいということが予測することができた。一方、

表1 温度分布の実験と計算の比較  
Temperature distribution of examination and calculation

測定箇所	SUS316		アルミナ	
	実験	計算	実験	計算
P5	580	570	738	699
P4	821	835	1025	1057
P1	995	951	-	1243
P2	858	855	1271	1203
P3	811	823	1169	1122

単位:

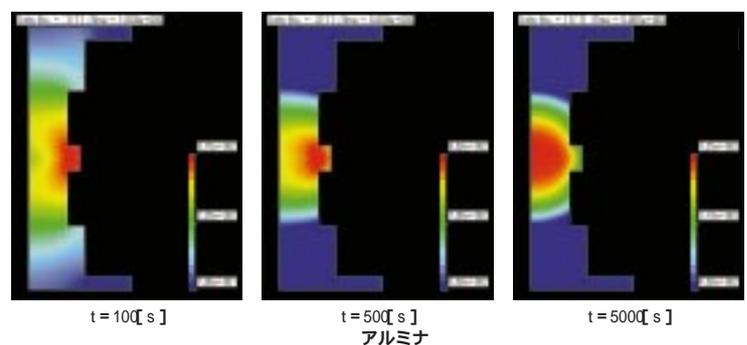
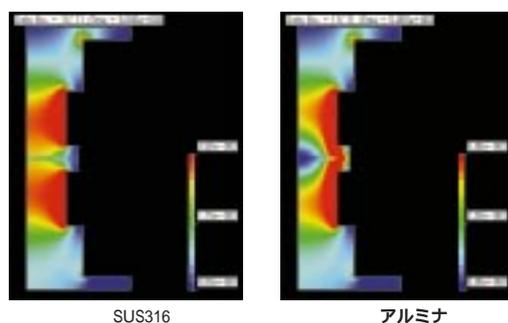
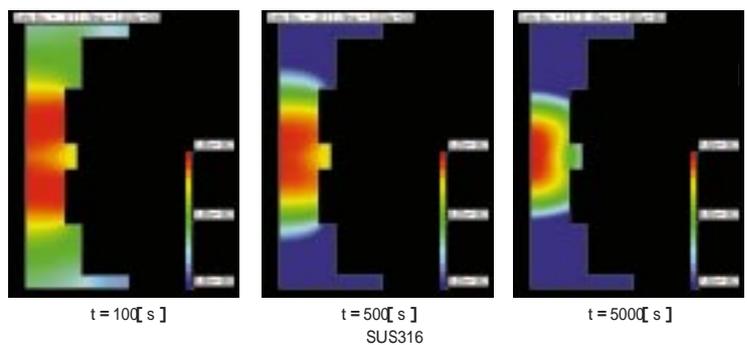


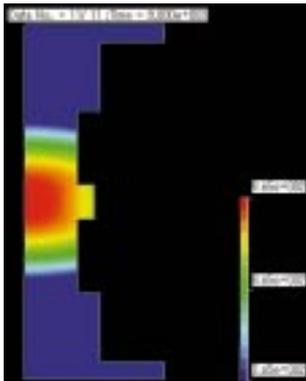
図3 発熱量 (単位: W/mm<sup>3</sup>)  
Heat generation

図4 温度変化 (単位: )  
Temperature transition

**表 2** アルミナのカーボンフェルトを巻いた場合の温度分布  
Temperature distribution of alumina in wrapping die by carbon felt

測定箇所	アルミナ	
	実験	計算
P5	654	608
P4	1028	1022
P3	1250	1220

単位：



単位：

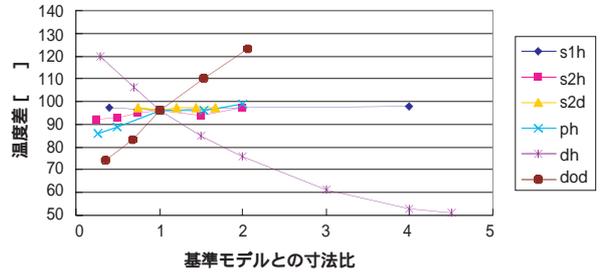
**図 5** SUS316のカーボンフェルトを巻いた場合の温度分布  
Temperature distribution of SUS316 in wrapping die by carbon felt

カーボンフェルトを 1 枚巻いた状態でのSUS316の場合の温度解析を実施してみると、温度分布が図 5 のようになり、図 4 の  $t = 5000[s]$  と比較すると、カーボンフェルトを巻くことにより試料内部での温度差が小さくなっている様子が分かる。この時の温度差は、カーボンフェルトを巻いたことにより、96 から41 に低減されることが分かった。従って、この場合は、アルミナとは逆に、更にカーボンフェルトを厚く巻けばより試料部の均熱化を図ることができると予測できる。

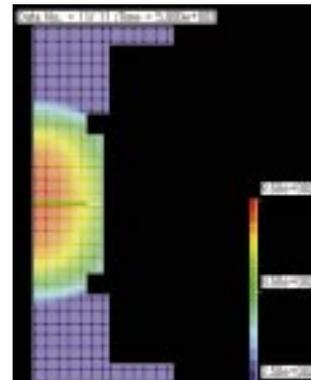
4.3 試料温度むらを少なくするための改善案 その2

(各 부품の寸法を変更して、温度差の少なくなるような型を設計)

前述した結果より、通電焼結の場合、発熱量分布が焼結試料の物性や型の形状によって大きく影響されるため、試料部分の均熱化を図るために、形状を最適なものとする方法が考えられる。そこで、ここでは、形状による影響を評価する手段として、図 2 の形状を基本形状として、型、パンチ、スペーサの高さ、径を変更する数値実験を焼結試料SUS316に対して行った。変更した各部寸法は図 2 に示したように、上部スペーサ高さs1h、下部スペーサ高さs2h、下部スペーサ径s2d、パンチ高さph、型高さdh、型外径dodとした。図 6 は横軸を基本形状に対する各寸法の比、縦軸を試料中心部と側面部の温度差とするグラフである。この図から、温度差に対する要因として、型部の高さや径が大きく関与しているのに対して、スペーサの高さやパンチの高さを変えてもあまり大きくは影響しないことがわかる。図 6 から、温度差を小さくするためには、型の高さdhを大きくし、型の外径dodを小さくすれば良いことが分かる。しかし、型の外径に関しては、小さくすると型の厚さが薄くなるため、強度計算との兼ね合いで決定されることとなる。型の高さdhを基本形状の 4 倍、すなわち200mmとしたときの温度分布を図 7 に示す。基本形状であるときの温度分布である図 4 の  $t = 5000[s]$  と比較す



**図 6** 寸法と温度差の関係  
Relationship between size and temperature difference



単位：

**図 7** 改善モデルでの温度分布  
Temperature distribution of improved model

ると、等温度線(領域)が半径方向に広がっていて、試料部温度がより均一化されていることが分かる。このとき温度差は、96 から53 に改善された。

5 むすび

今回の解析では、形状の自動最適化まで発展させてないが、最適化のアルゴリズムを解析ソフトに組み込みむことにより寸法パラメータをより多彩化し、複雑な形状を作成できるようにすることが可能である。その形状最適化を利用すれば、試料部の温度をある程度意図的に傾斜させることも可能なため機能性材料の開発において応用できるものと考えられる。

放電プラズマ焼結において、ジュール発熱による温度解析の結果が妥当であることを示した。

本報で紹介した開発ソフトを用いることにより、良好な焼結を行うために必要な温度むらの少ない型設計の支援を行うことができることを示した。

(参考文献)

M. TOKITA. Trends in Advanced SPS System and FGM Technology. NEDO International Symposium on Functionally Graded Materials, p.23-33, 1999.  
 木村博, 小林伸一. 異形ダイを用いた温度勾配制御パルス放電加圧焼結法によるTiAl/PSZ系傾斜機能材料の作製. 日本金属学会誌. 57, p.1346-1351, 1993.  
 木原茂文, 石田浩修, 森岡真一. 銅粉末のパルス通電焼結時の温度分布解析. 高松工業高等専門学校研究紀要. 37, p.35-38, 2002.  
 鷲見真一, 水谷芳樹, 増田善雄, 米谷道夫. パルス通電加圧焼結法における焼結温度の測定と推定. 東北工業技術研究所研究発表会講演要旨集. p.41-44, 1996.  
 石田浩修, 森岡真一, 荒木達朗, 河野裕嗣, 富山明秀, 木原茂文. 通電焼結法の温度分布解析. 粉体粉末冶金協会講演概要集平成13年度秋季大会. p.255, 2001.

## 論文・報告

## 那覇港沈埋函の製作・積み込み

Manufacture and Shipping of Naha Port Immersed Tubes

前田 滋\* 山平 喜一郎\* 佐藤 隆\*\* 河野 信久\*\*

Shigeru MAEDA

Kiichiro YAMAHIRA

Takashi SATOU

Nobuhisa KOONO



鋼殻積み込み完了

Completion of loading of steel plate shell



鋼殻完成

Completion of steel steel plate shell

那覇沈埋トンネルは、8 函の沈埋函で構成される延長約1.1kmの自動車専用道路である。2002年3月には、当社が受注した2号函の製作工事が竣工した。

この工事には、次のような新工法が採用された。

沈埋函の全ての部材に鋼コンクリート合成構造（フルサンドイッチ構造）を採用。

テフロン板とステンレス板を使用したスキッドアウト工法によって鋼殻を台船へ積み込み。

半潜水式台船に鋼殻を搭載し、沖縄まで曳航。

鋼殻を沈設現場近くの棧橋に係留し、水面に浮かべた状態で高流動コンクリートを打設。

定期的に函全体の三次元座標計測を行い、函体の挙動を把握。

Naha submerged tunnel is composed of the 8 immersed tubes and will run about 1.1km long as an expressway.

In March, 2002, production construction of the No.2 tubes in which our company received order was completed. For this construction, next innovative technologies were applied.

1) Steel concrete composite structure ( full sandwich structure ) was adopted in all member of the immersed tubes.

2) The steel shell was the loading on the barge by skid out method using the teflon boards and stainless steel boards.

3) The steel shell was mounted on the semi-sub barge, and it was towed to Okinawa.

4) The steel shell was moored in near pier of installation field, and high fluidity concrete was placed between steel plates in the condition floating at the water surface.

5) Three-dimensional coordinate measurement of the whole tube was carries out periodically, and the behavior of the tube body was grasped.

## 1 まえがき

那覇沈埋トンネルは空港と那覇港を結ぶことで円滑な輸送体系を強化するとともに、国道58号線の慢性的な交通渋滞解消を図る目的で計画された、沖縄県初の海底トンネルである。トンネルは港口部を横断し空港と波の上地区を8 函の沈埋函で直結する延長約1.1kmの自動車専用道路である（図1）。この事業には国内初の新工法が積極的に導入されており今後の沈埋函製作に与える影響も大きい。

今回、当社が東洋建設株式会社及び佐伯建設工業株式会社との3社の共同企業体として受注した沈埋函2号函の製作工事が竣工したので、その概要について報告する。

## 2 主要諸元

沈埋函本体(数字は発注時の値を示す)

基本寸法	(幅) 36.94m × (高さ) 3.7m × (長さ) 2.0m
鋼重	2,887tf
本体コンクリート	10,390m <sup>3</sup>
保護コンクリート	666m <sup>3</sup>
道床コンクリート	567m <sup>3</sup>

道路部

道路規格	第3種1級
設計交通量	46,100台/日(2010年度推計交通量)
車線数	片側3車線 往復6車線
設計速度	80km/h

図2に、沈埋函2号函の基本寸法を示す。

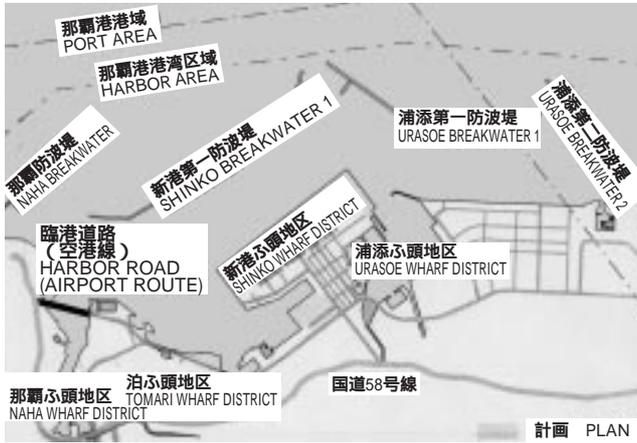


図1 臨海道路計画図  
Drawing of harbor road plan

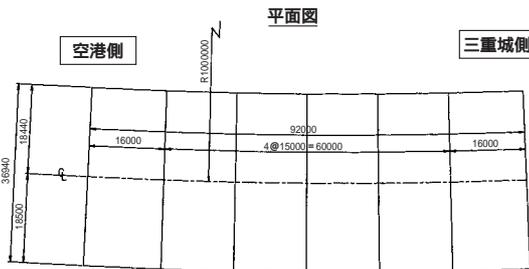
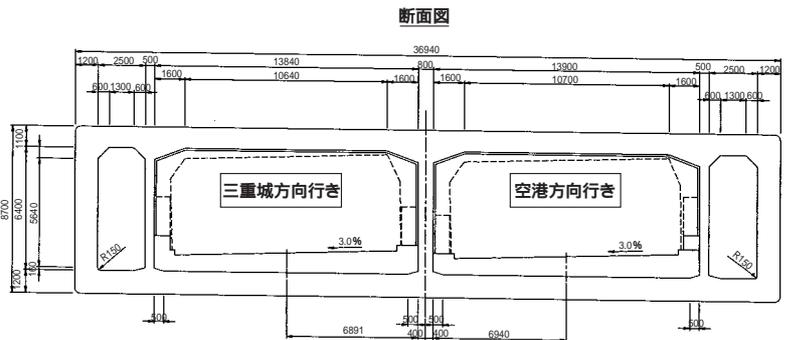


図2 基本寸法  
Principal dimension



工事項目	2000年				2001年												2002年			
	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	
鋼殻製作工																				
1次艦装品・ゴムガスケット																				
台船積込み工																				
回航工																				
鋼殻進水・係留工																				
高流動コンクリート工																				
1次艦装品・仮置き工																				
出来形計測工																				

図3 2号函製作工程  
Work schedule of production work

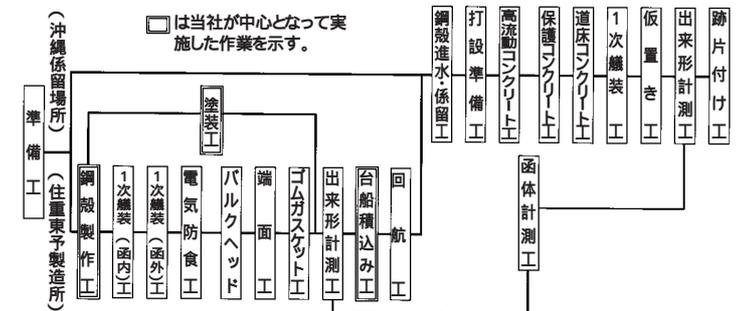


図4 2号函製作施工フロー  
Working flow of production work

### 3 本工事の特徴

本工事には、今までの沈埋函にはない下記の技術が採用されている。

鋼殻の全てに鋼コンクリート合成構造（フルサンドイッチ構造）を採用している。

台船への積込みはテフロン板を使用したスキッドアウト工法を採用している。

半潜水式台船に搭載、沖縄まで回航し、台船を沈めて鋼殻を進水させて沈埋函を引き出し曳航、係留する。

棧橋横に係留し、水面に浮かべた状態で高流動コンクリートを打設する。そのために全区画をカバーできるディストリビュータ2基を函上に設置する。

浮遊状態で高流動コンクリートを打設するため沈埋函に変形が生じることが予想される。従って定期的に函全体の座標計測を行い、函体の挙動を把握するシステムを採用している。

本工事の全体工程表を図3に、施工フローを図4に示す。

### 4 鋼殻の製作

#### 4.1 全体の精度管理

鋼殻は、当社東予製造所(愛媛県)で製作した。工場建屋内で切断、小組立されたブロックをヤードに搬出し100tf程度の大ブロックにして搭載していった。長さが92mで全体に1000Rの曲率がついた形状を製作・管理するのは容易ではなかったが、個々のブロックの製作精度を許容値の半分で管理したことにより十分な品質を確保することができた。また、大組立精度の具体的な管理方法として大ブロックのジョイント部に床書きを行い、搭載ごとにトランシットを使用してジョイント角度を計測した。

断面方向のブロックジョイントの溶接部には裏当て材の代わりにセラミックを用いることで、高流動コンクリートの流動性の向上及び天井部の外観改善を図った。

#### 4.2 鋼殻の大組立

大組立は160tクレーンを使用する作業となるが函体が大きいため最初から正規の位置で組み立てると、一部分クレー

ンのリーチが届かなくなり搭載ができない。これを避けるために、まずクレーンのリーチ範囲内で1000tf程度の中ブロックを組み立て、次にこのブロックを完成後の台船積み込みと同様の方法で移動させて正規の位置に据え付けた。これにより、大組立の全ての段階で160tクレーンが使用可能となった。

鋼殻が2重構造である本函では、ブロックをジョイントした後では部材をマンホール又は作業用開口部から搬入する以外に手段は無いため、補強材や艦装品の組み込み時期には特に注意を払った。

#### 4.3 両端面の製作精度

沈埋函は端部鋼殻に取り付けられたガスケットビームで隣接する函と接合されるため、接合部分の平面度(平坦度)がそのまま函全体の設置精度に直結し、また函の両側に設けられたこのガスケットビーム間隔が函の全長となる。従って取付けのための計測、芯出しは慎重に行い、計測は温度の影響を避けるため日の出前に実施した。その結果、取付け精度は両側とも断面全体の平面度が±3mm以内を確保することができ、全長及びその他の項目についても要求品質を満足することができた。

#### 4.4 芸予地震による影響

2001年3月に瀬戸内地方で発生した芸予地震では隣の今治市ではビルが傾き、死者が出るほどの大きな規模のものであった。製作中の鋼殻にも被害が出たのではないかと一瞬ひやりとさせられたが、幸い横方向に少し移動した程度だったの

で、直ぐに再調整して元の状態に復旧し、事なきを得た。

## 5 台船積み込み

### 5.1 積み込みの条件

鋼殻完成後に艦装を施した後、24000tf積半潜水式台船に積み込んで沖縄まで輸送した。台船積み込みの条件を次に示す。

鋼殻約3000tfの重量を大組立ヤードから台船上へ移動させる。

台船には潮の干満差と鋼殻重量による沈み込みを吸収できる、パラスト調整システムが必要である。

隣接する東予港に発着する1日2便のフェリーの出入港時には、作業を完了していなければならない。

これらの条件を満足するには2~3時間のうちに鋼殻を台船に積み込む必要があった。当初エアキャスタ(注1)やフルーズ(注2)を用いることを検討したが、いずれも時間的な制約に対処できないことが明らかになり、それらに代わる工法として、テフロン板とステンレス板を用いて摩擦力を低減させるテフロンスキッド工法を世界で始めて沈埋函の台船積み込みに適用することにした。

注1,注2とも、高圧空気を使用して対象物を浮上させ搬送するシステム。

### 5.2 摩擦力の低減

図5に示すように、岸壁で大組立した鋼殻を、ウィンチを用いて縦付係留した台船上に引き込む。ウィンチの能力を有

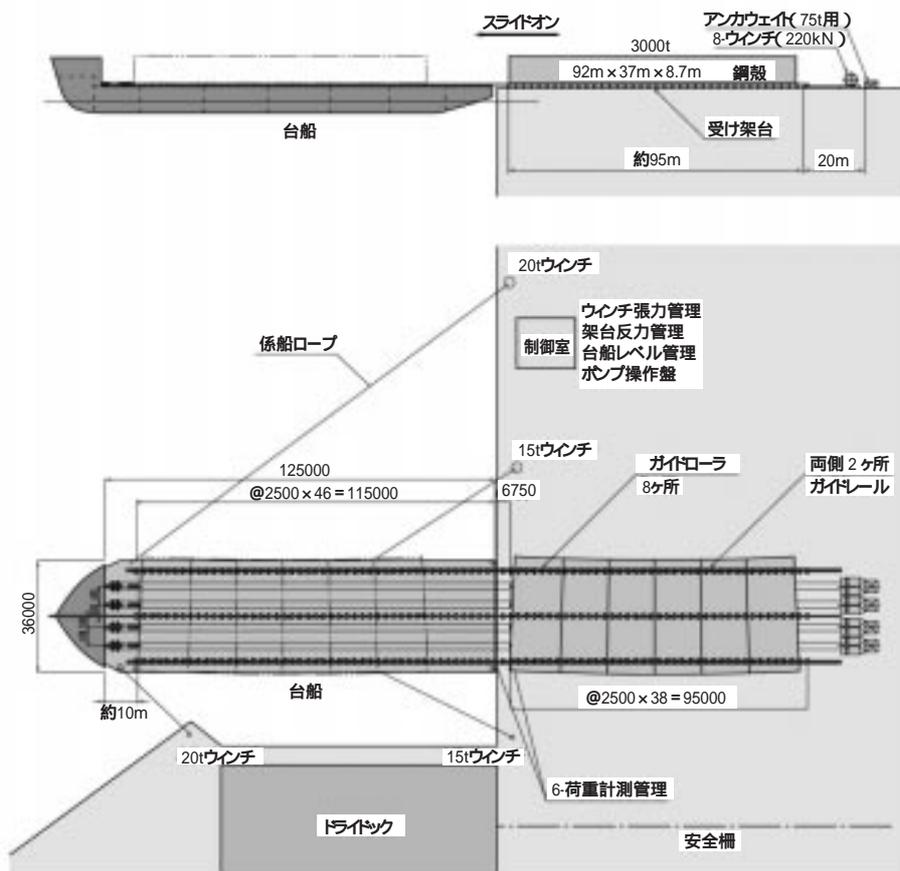


図5 台船積み込み作業一般配置図  
General arrangement view of loading onto barge

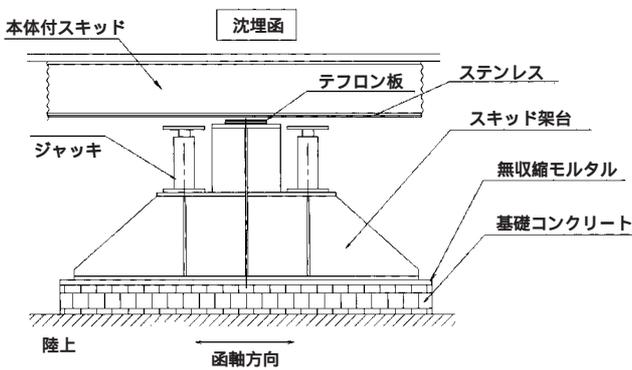


図6 スキッド架台  
Skid rail and support

効に活用するためには、鋼殻支持点における摩擦係数を極力小さくした方がよい。そこで本体側にはステンレス板、架台側にはテフロン板を用いて摩擦力の低減を図った。

テフロン板とステンレス板の間の摩擦係数は低いことが知られており、テフロン板に作用する圧縮力が大きくなっても摩擦係数はほとんど変化せず、むしろ若干低下する傾向を示すことが実験的に明らかになっている。

図6に示すように、本体付きスキッドの下面にステンレス板 ( $t=6\text{mm}$ ) を張り、架台天端にテフロン板を設置し、それぞれの面の水平度を確保することにより、摩擦係数を低減する仕組みとした。

### 5.3 バラスト調整

架台は陸上のみならず台船上にも設置して、鋼殻が台船上の所定の位置まで移動できるようにした。鋼殻が台船上に移動した時には、鋼殻の重量分担によって台船が沈み込み、陸上及び台船上架台天端の水平度が確保できなくなるとともに、架台反力のアンバランスが生じる。従って、鋼殻荷重に対応したバラスト水を排出することによって、常に全ての架台の水平度を確保できるようにした。

また、潮位の変動に対しても給排水のバラスト調整を行うことによって、陸上と台船上架台天端のレベルを一致させた。これらのバラスト調整のため、8インチ水中ポンプ44台（排水又は給水用）を台船上に設置した。

### 5.4 計測システムと集中制御

陸上架台の水平度は、事前にレベル機を使用して繰り返し計測し、水平の保持に努めた。台船架台の水平度を確保するためには、台船の水平度や架台の反力の変化を見ながら、タイムリーなバラスト調整を行う必要がある。台船水平度は超音波式変位計で、架台反力は端部架台に設置したロードセルで常時計測し、集中制御室のモニタに表示した。ウィンチの張力に関しても、張力の不均衡や異常を早期に発見して対策を実施するために、同じモニタ上に表示した。水中ポンプの制御盤は集中制御室のすぐ隣に設置し、ポンプのオン/オフの状態に関してもモニタ上に表示した。

このようにして、上記の諸データを用いて陸上及び台船上架台のレベル度と反力状態を総合判断し、ウィンチ巻上げ指示とバラスト調整指示（何番～何番のポンプを稼働させる/させないの指示）が直ちに出せるようなシステムを開発した。

### 5.5 摩擦係数の実測と台船積込み

先に述べたように1000tの中ブロックを移動させる際本番と

同じ方法で実施して、テフロン板とステンレス板の摩擦係数等を測定し、実測によって得られた最大摩擦係数を施工計画に反映した。また、ステンレス板下面、テフロン板上面の水平精度の見直しと改善を行って本番に備えた。

2001年9月25日、社内外から大勢の見学者を迎えて、テフロンスキッド工法による初の台船積込み工を実施し、無事予定の時間内で積込みを完了することができた。台船はこの後固縛作業を施して10月2日沖縄に向けて東予港を出航した。

## 6 高流動コンクリート打設

鋼殻は5日間かけて沖縄に回航した後、港外の防波堤付近で進水、台船より引き出し、港内への曳航を経て棧橋に係留した。その後高流動コンクリートを打設するが、棧橋上のポンプ車からは距離が遠過ぎて直接目標の区画へ打設できないので、長いブームを有するディストリビュータを函上に2基設置し、高流動コンクリートを打設した。

11月と12月の2ヶ月間かけて、約10000m<sup>3</sup>のコンクリートを30回に分けて打設した。沖縄といえども冬の海の上では常に強い風が吹いているので、安全確保のためクレーン作業等については細心の注意を払って実施した。

## 7 仮置き

本体コンクリート、保護コンクリート及び道床コンクリートを打設し、艦装工事を終えた沈埋函に仮アクセスシャフト2基を搭載した。これは、海底に沈んだ後の唯一の出入り口となるものである。全ての工事が完了し沈埋函は、2002年2月27日無事棧橋横の海底に仮沈設された。今後、海底トンネル築造のために浮上するまでの間、ここで出番を待つことになる。

## 8 むすび

本報告では、当社が中心となって実施した沈埋函の製作と台船積込みを中心に記述した。

防食や防汚塗装、進水時の台風による手順変更、海面に浮遊した状態でのコンクリート打設等についても技術的なポイントは多くあるが、それらの報告は今後の機会としたい。

最後に、終始適切な指導を頂いた内閣府沖縄総合事務局三重城出張所関係者各位に、深く感謝の意を表する。

（参考文献）

沖縄総合事務局那覇港湾空港工事事務所・沈埋トンネル。

# 0.1W@4K小型GM冷凍機の開発

Development of 0.1W at 4K GM Cryocooler

丸山 徹\* 池谷 陽一郎\* 小林 令\*

Toru MARUYAMA

Yoichiro IKEYA

Satoshi KOBAYASHI



0.1W@4K GM冷凍機  
0.1W@4K GM cryocooler



ヘリウム コンプレッサ ユニット  
Helium compressor unit

本報では、当社が開発した0.1W@4K小型GM冷凍機 (SRDK-101D) について報告する。本冷凍機は、2段の冷却ステージを持ち、最低温段の冷凍能力は4.2Kで0.1Wを有する。当社の4KGM冷凍機ラインナップの中で最小の冷凍能力であるが、小型、軽量で、消費電力は最も低く抑えられている。本機は4Kを得ることができるだけでなく、単相100V商用電源に対応しているため、実験室やオフィスにある一般のコンセントをそのまま利用することができる省エネルギー小型4K冷凍機と言える。本報では、0.1W@4K GM冷凍機の商品コンセプトと基本構成を説明し、その基本性能を紹介する。

The 0.1W at 4K GM cryocooler system, SRDK-101D, is newly developed. The cryocooler produces the cooling capacity of 0.1W at 4.2K at the end (second) stage of its two cooling stages. It is the lowest cooling capacity model with the minimum power consumption among 4K GM cryocooler lineups of SHI. The cryocooler is also a user friendly model driven by commercial AC100V single phase from the wall. In this paper, design concept, basic structure and fundamental performance of the cryocooler are discussed.

## 1 まえがき

近年の理化学機器、医療機器及び半導体製造装置などの精密化、高感度化が進むにつれ、サンプルや検出器の冷却など、低温の環境はしばしば不可欠になっている。それに伴い、冷凍機に要求される事項（性能、仕様等）も多様化している。現在、当社の1W@4K GM冷凍機 (SRDK-408) はMRI市場を席巻しているが、市場の多様化に対応すべく、機種ラインナップの充実化が求められている。

多様化する市場の中で、大学・研究機関が主な顧客である物性測定等の研究・実験用途では、大掛かりな設備を必要とせず、取扱いの簡便な単相100V商用電源で運転可能な小型冷凍機が求められている。図1に示すように、他社の冷凍機では、単相100V商用電源で運転可能なものもあるが、10K程度

の温度でしか冷凍が行えず、需要の多い冷媒であるヘリウムガスの液化温度4.2Kに到達できない。一方、超伝導素子冷却など多くの装置では、4Kでの冷凍能力を必要とするが入熱はわずかであるため、冷凍能力は0.1W程度あれば充分であることが判っている。4Kで冷凍能力を持つ冷凍機としては、当社製品のRDK-205D (0.5W@4.2K) とRDK-408D (1W@4.2K) が挙げられ、冷凍能力は充分である。しかしながら、これらは駆動電源に200Vを必要とし、かつその冷凍能力から小型・軽量とは言い切れないので、ユーザーズに充分に応えられているとは言い難い。

そこで当社は、単相100V電源で運転可能な小型4KGM冷凍機の開発を数年前から着手し、昨年、0.1W@4K GM冷凍機 (型式SRDK-101D) の商品化に成功した。本報では、当製品の商品コンセプト、基本的な構成及び基本性能などについて

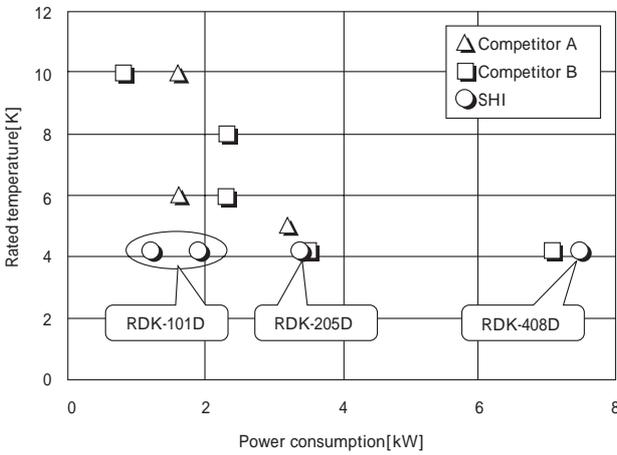


図1 実験用クライオ商品マップ  
Distribution map of products for laboratory

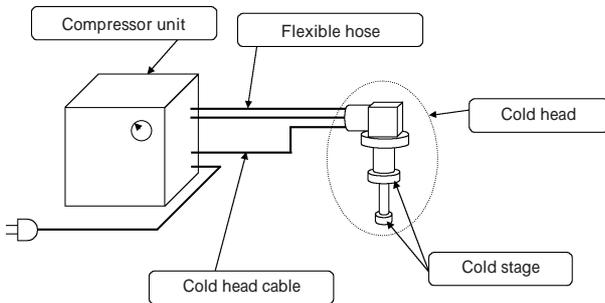


図2 0.1W @4K GM冷凍機の構成  
Composition of cryocooler

報告する。

## 2 商品コンセプトと基本構成

### 2.1 商品コンセプト

開発の着手に当たり、市場調査及び1W@4K GM冷凍機の実績を踏まえて、次の項目を開発コンセプトとした。

100V単相電源対応。

100Vの商用電源で駆動できる小型圧縮機を採用。

小型・軽量。

1W@4K GM冷凍機に比べ、コールドヘッド重量は1/2以下であること。

省電力。

消費電力が1W@4K GM冷凍機（運転周波数60Hzで8.3kW）の1/5以下であること。

冷凍能力は4.2Kで0.1W以上を確保する。

全方位取り付け可能。

取り付け方向による性能の低下は、当社の最大の特長であるスパイラルシール構造を採用し15%以下に抑える。

低コストであること。

当社現行機との部品共通化を図り、コストを低く抑える。

UL/CE規格対応。

海外でも安全に使用できるように、UL/CE規格対応とする。

### 2.2 基本構成

上記のコンセプトに基づき、開発した0.1W@4K 小型GM冷



RDK-408D RDK-205D RDK-101D

図3 現行機種及び0.1W @4K GM冷凍機  
Exterior of cryocooler

表1 0.1W @4K GM冷凍機の主要仕様  
Major specification of cryocooler

Cold head unit	Model RDK-101D
Refrigeration capacity (Vertical position)	50[Hz]1st 3.0[W]at 60[K]
	2nd 0.1[W]at 4.2[K]
Orientation	60[Hz]1st 5.0[W]at 60[K]
	2nd 0.1[W]at 4.2[K]
Weight	Free
Dimension	Approximately 7.2[kg]
Compressor unit	D130 × L226 × H442[mm]
Cooling	Model CNA-11B
Electric power (50/60Hz)	Air
Weight	AC100[V], Single phase
Demension	1.2/1.3[kW]
Accessories	Approximately 42[kg]
	W385 × D450 × H400[mm]
	10A × 3m
Flexible gas line	(Both supply and return)
Cold head cable	6[m]

凍機（型式：SRDK-101D）の基本構成を図2に示す。通常のGM冷凍機と基本構成は変わらない。作業流体はヘリウムガスで、ヘリウム圧縮機ユニット、コールドヘッド、フレキシブルホース、コールドヘッドケーブルにより構成される。外觀は図3に示すように、既に商品化されている同シリーズの1W機RDK-408D（18kg，556.5 × 293.7 × 180mm）と0.5W機RDK-205D（15kg，511.5 × 293.7 × 180mm）に比べ小型・軽量（7.2kg，442 × 226 × 130mm）である。

圧縮機ユニットは固定の高圧ガス吐出口と低圧ガス吸入口を有し、定期的な高、低圧力ガスを2本のフレキシブルホースを通じコールドヘッドに供給する。コールドヘッドは内部のロータリーバルブにより、高・低圧ガス源との接続を切り替え、周期的な圧力変動を作り出す。コールドヘッドは冷却ステージを備えた中空のシリンダと、蓄冷器を兼ねるディスプレイサにより構成される。ロータリーバルブによって作り出された圧力変動はシリンダの中で周期的に繰り返す膨張と圧縮に変換され、継続的に寒冷を発生し冷凍を行う。

SRDK-101Dの主要仕様を表1に示す。圧縮機ユニットは使用上の利便性を考慮して、水冷ではなく空冷式を採用した。その駆動電圧は単相AC100V、定格入力コールドヘッドを

接続して1.2/1.3kW (50/60Hz)である。一般の商用100V単相電源に対応しており、かつドライヤ並の低消費電力であるため、1次側の電源容量に注意すれば他の計測器と同様に手軽に利用できる。また2段階ステージの冷凍能力は0.1Wと小さく、外部からの熱侵入による影響を受けやすいため、シリンドラ長さをその直径に対して長めに設計した。

### 3 基本性能

冷凍性能が要求される仕様に満足するかどうかを確かめるために試作機を製作し、冷凍能力など基本性能を評価した。

#### 3.1 冷凍性能

基本的な冷凍能力は、運転中の冷凍機の冷却ステージにヒータにて一定の熱負荷を加え、温度平衡状態となった時に、その温度が仕様値以下となるか否かを判定することで評価される。冷却ステージが複数ある場合、各々について熱負荷を加え、各ステージの示す温度の相関図をロードマップと称して作成する。これを冷凍性能試験と呼称する。

当初、試作機の冷凍性能試験において、2段階冷却ステージの仕様は満足したが、1段階冷却ステージは2W@60Kで仕様外となった。その後、1段階ディスプレイサ内の蓄冷材に着目し、改良を加えたところ、冷凍能力が約60%改善され、仕様を満足した。図4に、改善後のロードマップを示す。図4において、横軸は1段階冷却ステージの温度、縦軸は2段階冷却ステージの温度を表している。1段階に熱負荷を0W(無負荷)、3W、2段階に0W(無負荷)、0.1Wそれぞれ加え、その時の各冷却ステージ温度をプロットしたものである。また、冷凍機運転時の電源周波数が50Hzと60Hzの場合を同時に示してある。電源周波数に依らず、1段階は60K以下、2段階は4.2K以下を維持し、仕様を満たしている。

#### 3.2 方向依存性

冷凍機は客先装置とのインタフェースによって様々な姿勢に取り付けられる。取付けの自由度は客先にて使い勝手を評価する上で、冷凍機の性能として重要な要素の一つである。当社1W冷凍機及び0.5W冷凍機は、取付け姿勢によって冷凍性能は殆ど変わらない特長を持ち、取付けは全姿勢可能であることを実現している。当社の4K冷凍機のこの特長が0.1W機でも実現可能か、冷凍機の姿勢と冷凍性能の関係を調べる

必要がある。そこで、試作機において、運転姿勢を様々に変え、各々の姿勢で冷凍性能試験を実施した。図5に、冷凍機の設置姿勢と冷凍能力低下割合との関係を示す。横軸について、0°とはコールドヘッド低温端が鉛直下向きに位置する姿勢を表し、90°、180°になるにつれ、それぞれ真横向き姿勢、鉛直上向き姿勢を意味する。縦軸は、姿勢が0°を基準とした場合の性能低下割合を表す。

これによると、135°(斜め上向き姿勢)の場合に最も性能が低下する傾向が見られるが、その割合はディスプレイサに当社独自のスパイラルシール構造を採用したことにより、1段階では5%、2段階では15%と低く抑えられた。開発コンセプトの通り、全方位取付けは可能である。

#### 3.3 消費電力特性

冷凍能力のみならず、客先において問題なく運転できるためには、想定する客先の電気設備が冷凍機の消費電力を充足することが必要である。0.1W@4K GM冷凍機は、市場要求により一般の単相100V電源コンセントより電源を取り、運転可能であることをコンセプトとしているので、消費電力がAC100Vコンセントの電気容量を超えてはならない。冷凍機は、圧縮機起動時の突入電流を除き、起動から温度平衡状態までの間(クールダウン過程、と呼称する)に消費電力、運転電流は最大となる。電源周波数が60Hzと50Hzを比較して、前者の方がそれらの数値は大きい。そこで、試作機において、60Hzにてクールダウン過程の消費電力と運転電流の関係を調べた。図6に、消費電力特性を示す。起動時の突入電流は40A以下、クールダウン中の最大電流は15A以下となっており、一般の商用100V単相電源で使用可能である。また、消費電力はクールダウン中で1.5kW以下、無負荷時の定常状態で1.3kW以下となっており、当社1W@4K GM機の1/5以下に過ぎず、低消費電力で4Kの温度環境を実現している。

#### 3.4 信頼性

冷凍機のみならず、機体性能の経時劣化の問題は、どの分野にも存在する。本機は信頼性で実績のある1W機の設計を継承しており、高い信頼性を持っているが、実験的に実証するため試作機の連続運転を実施している。未だ途中結果であるが、連続運転の時間推移を図8に示す。1段階温度は冷凍機の特長として室温の影響を強く受けるため、室温の上昇と相

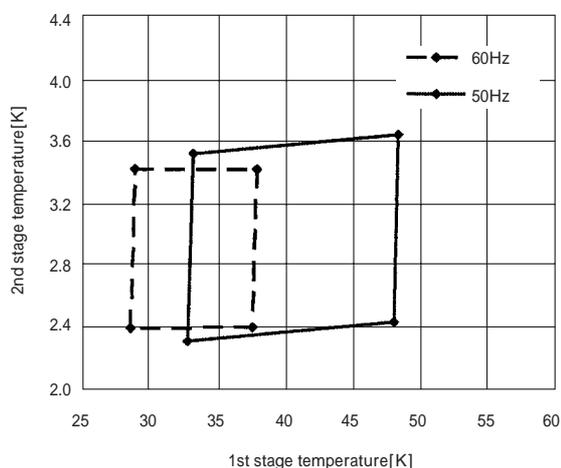


図4 冷凍性能ロードマップ  
Load map of cooling performance

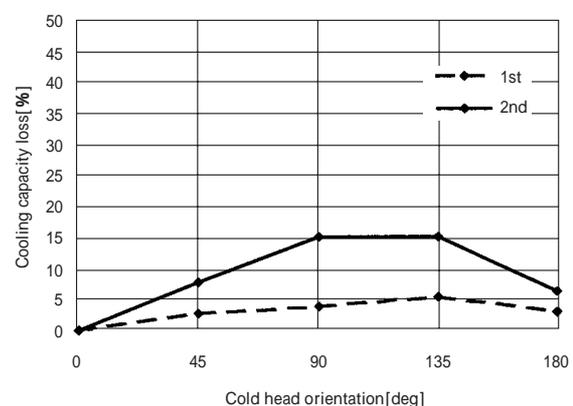


図5 冷凍性能の方向依存性 (50Hz)  
Cooling power dependence on orientation (50Hz)

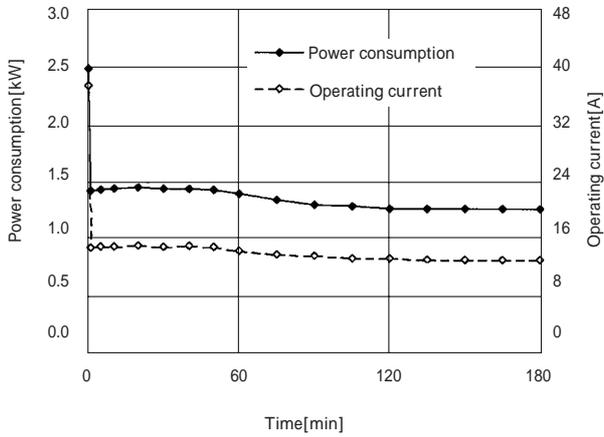


図6 消費電力特性 (60Hz)  
Power consumption (60Hz)

関があるが、大きな変化はない。また、2 段温度についても同様に大きな変化は見られていない。連続運転は現在も継続中である。

#### 4 むすび

大学、研究機関向け0.1W@4K小型GM冷凍機の開発を実施し、商品化をした。本機の特徴を以下に示す。

1 段3W@60K, 2段0.1W@4.2Kの性能を満足する。

運転電流は15A以下、消費電力は1.5kW以下であり、一般の商用100V単相電源にて運転可能である。

冷凍機重量は7.2kgと小型、軽量で、当社1W機の半分以下である。

取付け方向は自由に設定できる。

商品は2001年12月から国内外に向けて出荷されており、客先の評価は良好である。また、海外での市場拡販も視野に入れ、UL/CE規格対応機を開発中である。

(参考文献)

当社極低温装置総合カタログ, SUMITOMO CRYOCOOLERS . p.3-6, 2002.

社団法人低温工学協会, 超伝導・低温工学ハンドブック. オーム社, p.1021-1099, 1993.

渡辺康一, 長島昭. 応用熱力学例題演習. コロナ社, p.229-244, 1986.

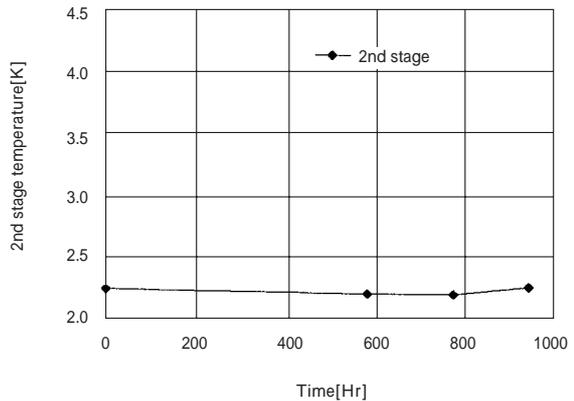
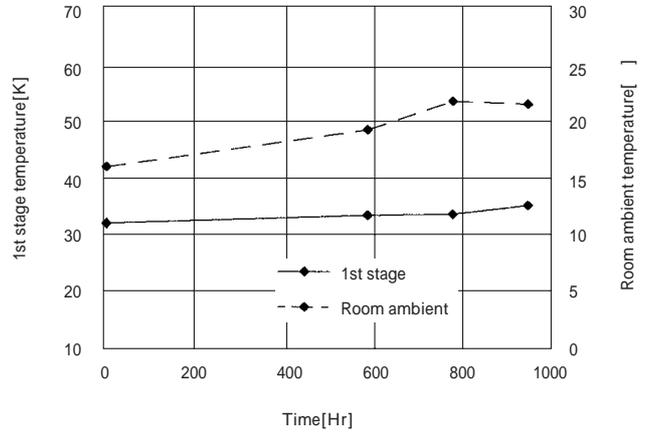


図7 連続運転状況  
Continuous operation

## 新製品紹介

## 減速機用防水形モータ(0.1kW ~ 2.2kW)

Waterproof Type Induction Motor for Gear (0.1kW ~ 2.2kW)



昨今では、HACCP（ハサップ 総合衛生管理製造過程）システムの普及により、食品工場等の安全衛生管理が必要とされる分野において、小型ギヤモータに対する防水仕様の潜在需要が高まってきている。

当社は、この市場ニーズに対応するため1999年10月に防水形（IP65）ハイボニックギヤモータ15W～90Wシリーズを発売し、市場から高い評価を受けてきている。

今回、新たにIEC規格のIP65に適合した防塵・防水構造の0.1kW～2.2kWシリーズを開発し、商品化した。

#### 主要仕様

容量 0.1kW～2.2kW 4種（容量拡張分）

保護方式 IP65

外被構造 0.1kW 全閉自冷形

0.2kW～2.2kW 全閉外扇形

電源 200V 50/60Hz 220V 60Hz

400V 50/60Hz 440V 60Hz

絶縁 B種

時間定格 連続定格

#### 特長

IEC規格のIP65に適合した防塵・防水構造とし、軸貫通部にオイルシールの採用、嵌合部にOリングの採用している。

水が飛散したり、定期的に水洗いする分野に最適であり、食品機械、洗車機及び水処理装置などに使用される。

ハイボニック減速機 及びサイクロ 減速機など、当社製各種減速機に対応している。

（PTC事業本部 太田裕登）

## 新製品紹介

## クローラクレーン SC900HD-3

Crawler Crane SC900HD-3



油圧式クローラクレーンのニューラインアップとして、PAX MAGUNAシリーズを開発し、その第一弾として最大吊上げ能力90tのSC900HD-3を2002年3月に販売を開始した。

SC900HD-3は、クラストップの仕様と性能を備えた基礎・土木専用機で、開発のコンセプトは、以下の3項目となっている。

ハイパワー、ハイラインプル及びハイスピードで作業能率をアップさせ、輸送性及び操作性に優れたクレーンである。

安全を配慮し、安全機能を充実させたクレーンである。

低騒音及び排出ガス2次規制に対応した、環境に配慮したクレーンである。

## 主要仕様

最大吊上げ能力	90.0t × 4.0m
基本ブーム長さ	12.20m
最長ブーム長さ	60.95m
ショートジブ装着可能最長ブーム長さ	54.85m
フロント・リヤドラム 巻上/下速度	100 ~ 2.0m/min
エンジン型式	三菱6D24-TLE2A ディーゼルエンジン
定格出力	235kW/2000min <sup>-1</sup>

## 特長

クラス最高出力のエンジン搭載により、ハイラインプルが必要な基礎作業にも対応できる様になっている。また、ウインチに可変容量モータを採用することで、最高ドラム速度100m/minを達成し、作業時間の短縮に大きく貢献している。減速機内蔵のワイドドラムの採用で、クラムシェル及びハンマグラブなどの作業でワイヤーロープ寿命の延長を実現している。

フットブレーキには油圧式ブレーキを採用し、クラムシェル及びハンマグラブなどの作業では、オペレータの疲労を大きく軽減している。また、従来機同様に安心して作業ができる自動ブレーキも装備している。

メッセージ表示機能付き過負荷防止装置の採用により、メッセージに従って操作することで、モーメントリミッタの設定作業の容易化を図っている。また、機械の異常を音声警報により即座に耳で確認することができ、安全性を向上させている。

逆積み可能な水平3分割カウンタウエイトの採用で、取り扱いが容易になっている。また、エクステンションブームとの相積みが可能になり、輸送性を向上させている。

従来のフロアレバー操作方式からアームチェアレバー操作方式への変更により、前方視界及び足下の広さを向上させ、楽な姿勢での操作が可能となっている。

輸送時の本体幅を3200mmのコンパクトボディとし、3200mmのトレーラ幅に収まり、輸送性が向上している。

エンジンの排出ガス2次規制と低騒音型建設機械の基準をクリアし、環境問題に充分配慮した機械になっている。

(住友重機械建機クレーン株式会社 吉本哲郎)

## 新製品紹介

## 新電気式フォークリフト FB35/40PE

New Electric Powered Fork Lift Truck FB35/40PE



近年の地球環境への関心の高まりに伴い、フォークリフトの市場においても、エンジン式車輛から、より環境負荷の小さな電気式車輛への移行が進んでいる。本機は、このような市場ニーズに応えるべく新たに開発された3.5～4.0トンシリーズの新型電気車である。

その開発コンセプトは、本機に先駆けて市場投入された、0.9～3.0t (FB09-30PE) シリーズ同様、「1日フル稼働できる、エンジン車並みのパワーと性能とを併せ持った電気車/Hyper Smart」というものである。

エンジン車からの代替需要に応えるためには、フォークリフトの基本性能である、走行・荷役性能、更に稼働時間において、エンジン車に匹敵する性能が要求される。そこで本機では、本クラスでは他社に先駆けACモータコントロールを採用し、また急速充電採用により、エンジン車の性能に迫る、機敏な走行・荷役作業と長時間稼働を実現した。

## 主要仕様

型式	53-FB35PE	53-FB40PE
最大荷重	3500kg	4000kg
走行速度 (無負荷)	18.0km/h	18.0km/h
上昇速度 (負荷)	370mm/s	350mm/s
ホイールベース	1855mm	2000mm

## 特長

ACモータコントロールの採用により、従来までの同クラス電気車をはるかに上回る走行速度、荷役速度を実現している。更に走行・荷役フィーリングに関しても、走行加速力で8段階、アクセル特性で3段階、荷役リフト/チルト速度で10段階、荷役パワーで5段階と、オペレータの好み、作業に合わせてきめ細かな設定が可能となっている。

重量の大きなバッテリーを、車体の最下部まで落とし込むDBBコンセプトを採用し、低重心設計とすることで、走行・荷役性能の向上に見合った車輛の安定性を実現している。

急速充電を使った1時間の補充充電により、消費された電力を短時間で充電し、走行・荷役作業スピードを落とすことなく、稼働時間の延長が可能となっている。

ステアリングコラムに配置した大型液晶ディスプレイ付きインパネの採用により、走行速度、バッテリー容量、現在日時等の必要情報の視認性を向上させている。更に作業管理に用いられる走行距離、各種アワメータ等についても一括表示できるようになっている。また、走行・荷役フィーリングの設定や、充電コントロール等の使い易さの向上、パスワードエントリーによるセキュリティ管理も可能となっている。

(住友ナコ マテリアル ハンドリング株式会社 佐藤朋弘)