

196-10/237

社外秘

# 超高速ダイカストマシンの開発と実用例

東芝機械株式会社

北村 弘

○ 辻 眞

横山 宏司

## Super High Speed Die Casting Machine ; Its Development and Practical Application

TOSHIBA MACHINE CO., LTD.  
TOKYO, JAPAN

Hiroshi Kitamura

○ Makoto Tsuji

Hiroshi Yokoyama

The defects on die castings include surface defects and internal porosity. Their countermeasures are usually changing the tooling layout, casting condition or die spraying. Now we have learned some of the defects can be improved remarkably by filling at a speed much higher than conventional injection speed. Introducing the newly developed real-time-feedback controlled super-high-speed injection and the precision ladle device in practical application.

### 1. まえがき

ダイカスト鑄造法は、量産性、寸法精度に優れていることや、美しい鑄肌面が得られるという特徴から、製品の用途が広く、幅広く採用されている。しかし、ダイカスト鑄造品は、内部品質が安定せず信頼性が低いとされ、一般的には強度・気密性があまり要求されない範囲に限られる。しかし最近では、環境問題に鑑みて自動車産業を中心に、製品の更なる軽量化、および低コスト化が叫ばれ、ダイカスト対象製品の拡大化の傾向が強くなってきた。

そこで、これらの動きに対して具体的に何が出来るかを整理すると、軽量化には製品の超薄肉化、鑄物のアルミ合金化、マグネ化があげられ、低コスト化には重要保安部品や耐圧部品のダイカスト化、複数部品の一体鑄造化、バリ取りや含浸等の後処理レス化、小型マシンによる大物製品の鑄造等があげられる。これらのニーズに対し種々の試みがなされているが、数例を除き従来の低速・高速・昇圧の3変化射出方式のダイカストマシンでは、限界があり実現化が困難とされている。そこで、これらの幅広いニーズに応えるべく開発

したのが超高速射出ダイカストマシンである。

本機は、高速応答大流量油圧サーボバルブのリアルタイムフィードバック制御を行うことで、当社従来機の2倍の10m/sec以上の射出速度能力を有し、在来鑄造法や超高速鑄造法は勿論のこと幅広い射出動作が選択できる。また、速度動作に全く影響されない増圧装置を設ける事で、安定した昇圧制御も可能としている。同時に、安定した超高速鑄造に欠かせない給湯精度を、約10倍改善した高精度給湯装置も開発した。

そこで、これらの開発内容について説明し、幾つかの実鑄造結果から超高速鑄造法の効果を紹介する。

### 2. 開発のねらい

ダイカスト鑄造法は、凝固時間内に溶湯を金型キャビティー内に充填、昇圧加圧して製品を作る製法であり、充填行程で形状を、昇圧加圧行程で内部品質を作ると言われている。実際に品質については、昇圧加圧行程である溶湯への圧力有効伝達時間が長いと、内部欠陥量が減少するという報告も有る。<sup>1)</sup>従って、短時間充填すなわち超高速射出で充填し、充填時間の短縮分、昇圧加圧時間を長くできることは、内部品質の安

定化にとっては重要である。また、超高速射出化により、巻込巣やスリーブ内で形成された凝固片が微細拡散され、組織の均一化が図られ、機械的強度、気密性が安定することも期待出来る。

図1に従来法と超高速法の巻込巣の形態を概念的に示す。充填時の両者の巣体積は、同じと仮定して巣の個数を変えている。従来法では、昇圧加圧時間が充分取れない関係で巣が完全に圧縮される前に凝固が完了し、超高速法では、より長い昇圧加圧時間で巣を完全に圧縮できることを示している。

以上、超高速法のねらいを記したが、超高速射出を実現するには、射出シリンダを急減速してバリ吹きを防止する減速技術が必要となる。そこで、短時間において超高速域に達した後、充填完了間際に急激な減速が出来る高速応答大流量油圧サーボバルブと制御装置の開発が最重要課題となる。また、安定した昇圧加圧を可能とする増圧装置も必要となってくる。

### 3. 要素開発

#### 3.1 高速応答大流量油圧サーボバルブ

ダイカストマシンで要求されるサーボバルブが、如何に高応答・大流量であるかを示すデータを、図2に示す。ダイカストマシンは、一般産業用として最も大流量を必要とし、これは射出動作において、短い区間ではあるが瞬間的に膨大な作動油を必要とすることを意味する。応答性については、流量レベルが高く制御条件が厳しい最高速応答のバルブが要求されている。

したがって、現状の技術レベルでは、ダイカストマシンの射出制御は、難しい技術であることが分かる。

開発にあたっては、安全性、安定生産、悪環境下での使用、及びメンテナンス性を考慮して、以下の事に留意した。

- (1) 安全・安定性の重視：2方弁方式
- (2) 空打ち最大射出速度仕様：10m/sec以上
- (3) 高応答性：0→10m/secを20msec以下で応答
- (4) バルブ自体の定期メンテ不要
- (5) 作動油管理が容易で、不燃性油対応可

結果としては、バルブメーカーと共同開発した超高速射出用サーボバルブは、高応答で7000l/minの大流量を実現した。方法は、高応答で最も耐コンタミ性に優れたボイスコイル型サーボバルブをパイロット弁として使用し、大流量メイン弁としては、閉時のリーク量が少なく、原点調整が簡便で安定性のある2方弁を採用した。パイロット弁として採用したボイスコイル型サーボバルブは、内部フィルター、ノズル、オリフィスを持たない構造であり、耐コンタミ性では他のサーボバルブと比してこの構造の違いに起因する優位性を有し<sup>2)</sup>、また、水-グリコール仕様にも対応できる。サーボバルブには、多種の方式があるが、それらの特性を表1に示す。今回採用したボイスコイル方式は、他と比較して高コストではあるが、応答性、安定生産性に最も優れている。

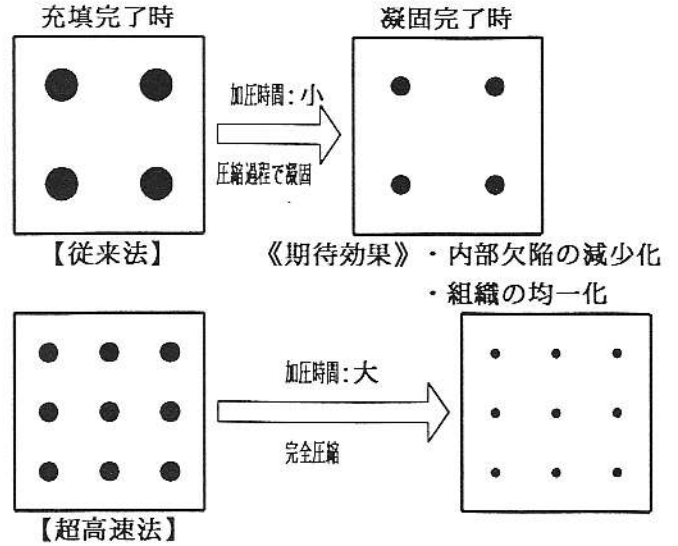


図1 従来法と超高速法の巻込巣の概念  
(単位体積あたりの巻込巣が同量とした場合)

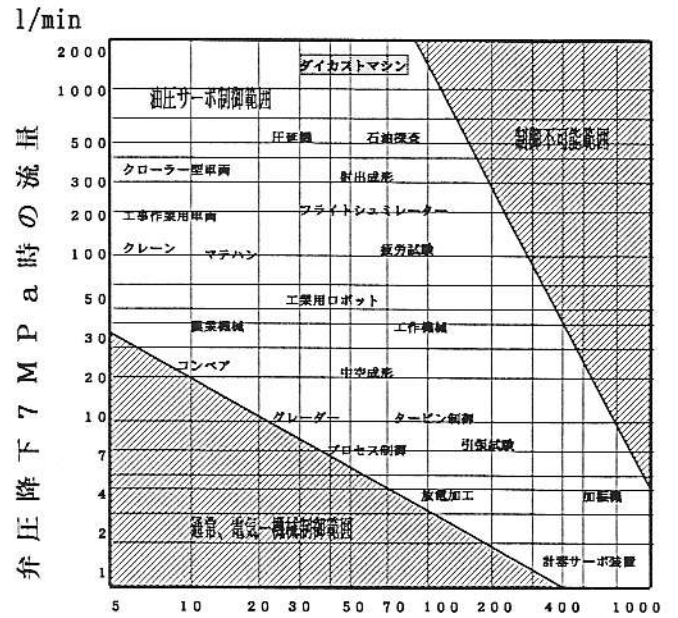


図2 産業界の代表的サーボバルブ使用状況<sup>3) 4)</sup>

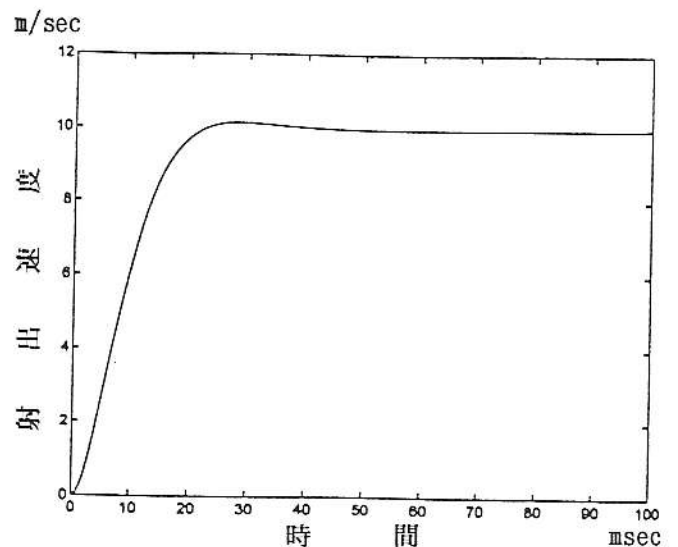


図3 射出の応答特性

図3は、本開発サーボバルブで10m/sec設定の空打ち射出時の応答性を評価するためのシミュレーション結果である。10m/secの速度指令をステップ入力した時に、約20msec後に設定速度に到達している。この結果は、ほぼ実測値と一致した。

表1 サーボ方式と特性比較

	応答性	制御性	耐ノイズ性	バルコスト
ボイスコイル方式	◎	◎	◎	△
ソルフラッパー方式	○	○	△	◎
ジェットパイプ方式	△	○	○	○
(サーボモータ方式)	△	△	◎	○

### 3.2 制御装置

本機は、ダイカストマシントータル制御装置(TOSCAS T)により一括制御されている。ここでは、射出行程制御のみについて説明する。

射出行程制御には、速度制御と圧力制御の2段階があり、前段階の速度制御は、エア混入を最少限にするスムーズな射出動作で溶湯を金型キャビティー内に極力最短時間で充填させるものである。制御装置への設定方法としては、プランジャー位置に対する速度値をポイントとして入力し、ポイント間では直線補間を行い最大10ポイントまでの入力を可能とした。

位置、速度値共にデジタル数値入力とし、簡単に速度設定波形を作成出来るようにした。これにより、自在な加速、減速が可能となり、普通法や最高10m/sの超高速法だけではなく幅広い射出動作設定が可能となった。

充填抵抗が時々刻々に変化する射出動作において、設定波形と実動作との偏差が最小となるように、プランジャー位置によるリアルタイムフィードバックを行っている。また安全性を考慮して、最終区間で必ず減速するように、10ポイント目の速度上限値を規制し、安全及び機械破損の保護をソフト的にやっている。

速度制御完了後は、後段階である圧力制御に切り換える。圧力制御は、バリ発生を押えて内部品質を高めるために増圧機構を制御するものであり、鑄造圧力と昇圧時間を前ショット計測値から学習制御をしている。

別に研究用として、充填完了からの時間に対する鑄造圧力値をポイントとして入力して、ポイント間は直線補間を行い、最大7ポイントまで入力出来る機械も開発中である。これは、リアルタイムフィードバックにより、ダイカスト金型固有のバリ吹き臨界曲線に極力漸近した最適昇圧制御を可能にするためのものである。図4に、その設定専用画面を示す。

### 3.3 高精度給湯装置

超高速鑄造において、給湯量のバラツキは安定生産および品質に非常に悪影響を及ぼす。多すぎる場合には、減速が遅れたことと同じで、大量のバリの発生を引き起こして危険である。また少ない場合には、減速が早めに効いたことと同じで、充填不良となる。

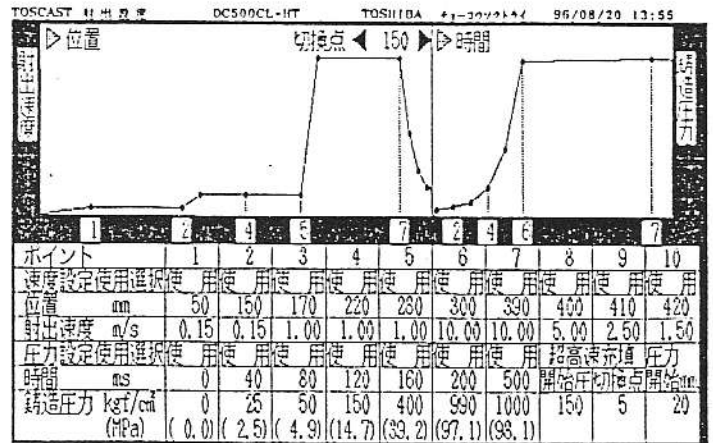


図4 超高速射出設定専用画面

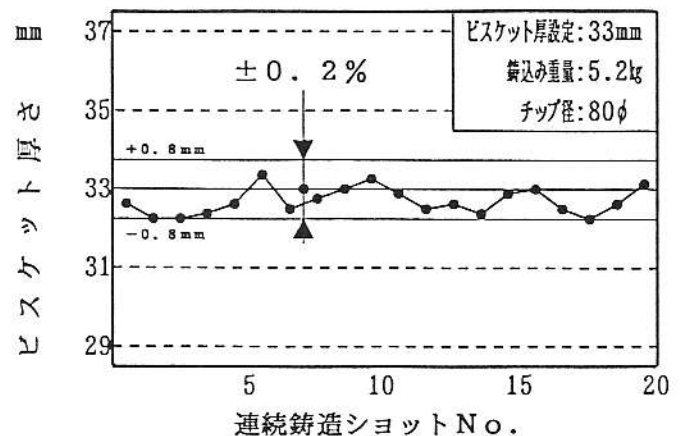


図5 高精度給湯装置のテスト結果

対策の一例として、湯先の通過を電氣的に検知できるセンサーを金型のゲート近傍に設置し、その検出位置を基準に射出設定波形をシフトする方法がある。

この方法は理に適ったものと思われたが、テストを実施した結果、以下の問題点が分かった。

- (1) センサー設置場所や検出時のプランジャー速度値によっては、湯先の波立ちによる検出誤差が大幅に生じ、給湯誤差以上の誤差となる。
- (2) 悪環境下での使用であり、センサーの断線により誤動作が起きる。
- (3) 金型段替時の脱着操作による断線が多く、特別なメンテナンスが必要である。

そこで、我々は違った観点からこの問題を解決する事とした。それは、誤差そのものを無くす事であり、絶対的に給湯量を安定させる事である。

手法としては、機械的にラドル計量角度の分解能を上げ、また大幅にラドル形状を改良した。

結果としては、実鑄造時での給湯精度が±0.2%であった。これは、当社従来機の精度が±2%であることからすると、約10倍改善されたこととなる。

図5に、その評価の一例として、高速速度6m/secで連続鑄造した時のビスケット厚さの変化を示す。

鑄造状態は、剛性の高い金型と減速制御により、バリ吹きはほとんど無い状態であった。

## 5. 射出能力

空打ち時の速度として10m/secの射出能力を持つ超高速ダイカストマシンが実現したが、実铸造では溶湯の充填抵抗を考慮した実铸造速度を算出する必要がある。そこで、マシン能力線図(P-Q<sup>2</sup>線図)を用いて、従来機との比較を行い、超高速ダイカストマシンの射出能力を、金型特性との関係を交えて検討する。

### 1) ダイカストマシンの溶湯の充填能力

スリーブ内の溶湯の充填圧力(P)と充填される溶湯の流量(Q)との関係は次式で表される。

$$P = \frac{A_s}{A_p} P_s \left(1 - \frac{Q^2}{Q_0^2}\right) \dots \textcircled{1} \text{ (従来マシン能力)}$$

A<sub>s</sub>: 射出シリンダ断面積

A<sub>p</sub>: チップ断面積 (スリーブ断面積)

P<sub>s</sub>: 射出シリンダのヘッド側圧力

Q<sub>0</sub>: 空打速度で充填される溶湯流量

P<sub>0</sub>: 射出単動シリンダによる铸造圧力

$$P_0 = \frac{A_s}{A_p} P_s$$

従来機の溶湯の充填能力が、①式で表されるとすると、超高速マシンでは、Q<sub>0</sub>が2倍になる。

従って、超高速マシンの溶湯の充填能力は、

$$P = \frac{A_s}{A_p} P_s \left(1 - \frac{Q^2}{(2Q_0)^2}\right) \textcircled{2} \text{ (超高速マシン能力)}$$

で表すことができる。

### (2) 金型の特性

金型固有の特性として、ある充填圧力(P)と、その時の限界流量(Q)との関係は次式で表される。

$$P = \frac{\gamma_m}{2gC_g^2} \frac{Q^2}{A_g^2} \dots \textcircled{3} \text{ (金型特性)}$$

γ<sub>m</sub>: 溶湯の比重

g: 重力加速度

A<sub>g</sub>: 金型のゲート面積

C<sub>g</sub>: ゲート部の流量係数

### (3) 射出能力の検討

縦軸を充填圧力(P)、横軸を充填される溶湯流量の2乗(Q<sup>2</sup>)として①、②、③式を表現すると図8の様にそれぞれ直線で表す事が出来る。①、②式の直線は各マシンの最大能力(射出バルブ開度全開時)を示し縦軸と横軸とに囲まれた領域がマシンの溶湯充填可能範囲である。従って、金型固有の特性線図③との交点のQをチップ断面積で除した値が、この金型での従来マシンおよび超高速マシンの実打最高射出速度であり、その差が超高速マシン化による射出能力の向上を示している。以上の様に本開発は、空打ち速度を増大

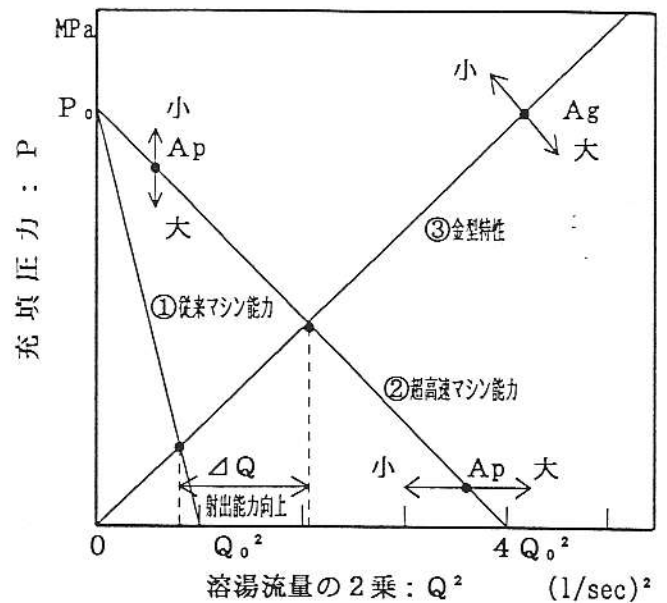


図8 マシン能力線図(P-Q<sup>2</sup>線図)の検討

させて射出能力を向上させているが、別の方法として、油圧力(ACC圧)を高くして能力向上を図ることもできる。しかし、この方法は、エネルギー消費量が多くなり、高圧であれば油洩れの増大が懸念される。

ここで、本開発機で最も効率の良い超高速射出化を実現するために、金型特性が射出速度に与える影響について検討する。金型特性には、金型ゲート面積(A<sub>g</sub>)とチップ断面積(A<sub>p</sub>)が関係しており、これらが如何に射出速度と関係しているかを個々について調べる。

まず、③式の金型ゲート面積(A<sub>g</sub>)を変えると、金型特性線図の傾きが図示の傾向で変化する。これは、同一マシン能力に於いては、ゲート面積が大きいと溶湯流量が増え、逆に小さいと溶湯流量が減少する事を意味する。

次に、②式のチップ断面積(A<sub>p</sub>)を変えていくと、ダイカストマシンの能力線図が図示の方向に移動する。

これは、金型特性線図との交点を高溶湯流量側へ移動出来る事を意味するが、A<sub>p</sub>をどの様に変えれば増減するかは、金型特性線図の傾きに依存するので一概には言えない。しかし、仕事率(P×Q)から考えると、金型特性線図とマシン能力線図の交点のPである充填圧力が(2/3)P<sub>0</sub>の時にマシンの最大能力が発揮出来る条件であり、そのようなマシン能力線図となるチップ断面積を選択すれば最大溶湯流量を得ることが出来る。従って、効率の良い超高速铸造を行う場合には、まず目標溶湯流量を定め、マシン能力線図から判断して不足していればゲート面積とチップ断面積の変更を検討すればいい。但し、検討時には下記項目も考慮する必要がある。

- 1) チップ断面積がマシン仕様範囲内である
- 2) マシン応答性を考慮した高速区間を確保する
- 3) ゲート速度とゲート部の焼付、金型の溶損の関係  
図9に、これらの検討事例を示す。

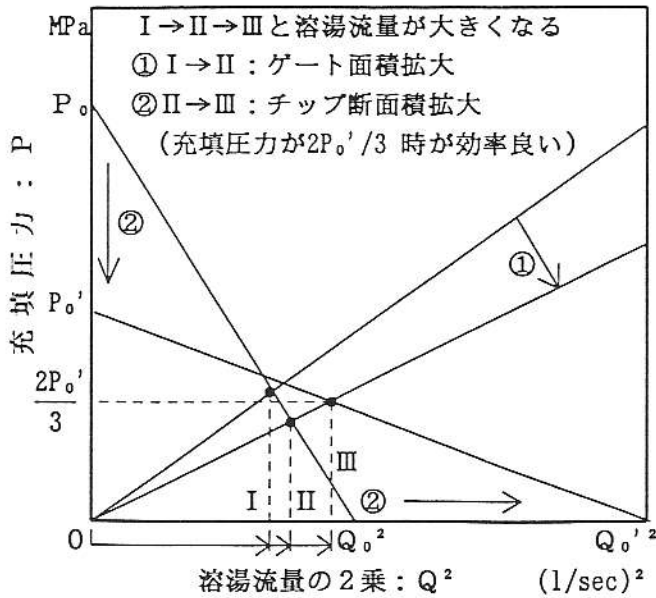


図 9 効率の良い超高速鋳造の検討

## 6. 実鋳造結果と考察

ダイカストマシンユーザー数社の御協力を得て、現状生産している約10金型について、実鋳造トライを実施した。

### 6.1 外観観察

従来法の高速射出速度 2m/s から超高速法の 6m/s までの製品外観は、ほとんどの場合、速度の上昇と共に全体的に湯じわや湯境などが減少して光沢の有る良好な鋳肌となる傾向が見られた。しかし、湯じわが、従来問題とされた部位からは無くなり、若干ではあるが問題とされていない他の部位に移動した例があった。

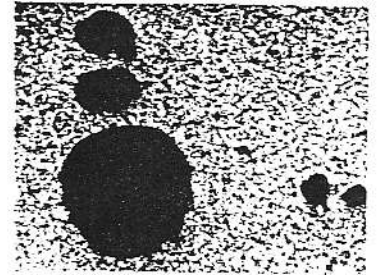
これは、射出高速化により湯流れ性が変わり、最終充填部が変化したものと思われる。従って、超高速射出化には金型方案も含めた検討が必要であると思われる。

### 6.2 マクロ組織観察

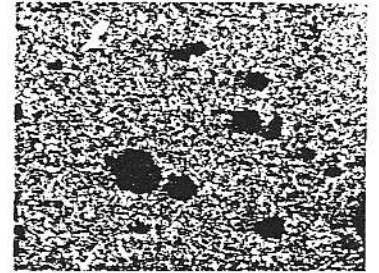
図 10 は、高速射出速度と巣の状態の関係を示すマクロ組織写真である。箇所は、昇圧加圧にとって最も悪条件箇所である最終充填部のオーバーフロー近傍である。超高速化にともない、巣の数が増加するものの個々の大きさが速度とともに小さくなり、総面積も減少している。これは、超高速時には巣が微細拡散し、短時間充填であるが故に巣の圧縮行程である昇圧加圧時間を長く取り、充分巣を圧縮出来るためであり、逆に従来速度程度では、巣が微細化出来ず、また圧縮過程において凝固が完了して完全に圧縮しきれなかったものだと思われる。従って、超高速射出化により、巣が微細拡散、圧縮され、巣の総面積が減少して、均一化した安定組織となっている。

巣の微細拡散化のメカニズムについては、溶湯のゲート流速あるいはゲート流量が関係しているものと思われるが、今回は確認できておらず今後の研究が必要である。

高速射出速度  
2 m/sec



4 m/sec



6 m/sec

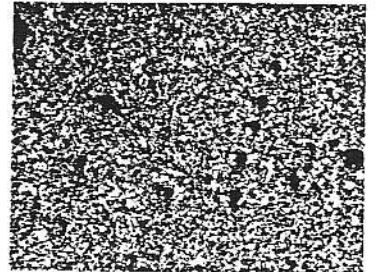


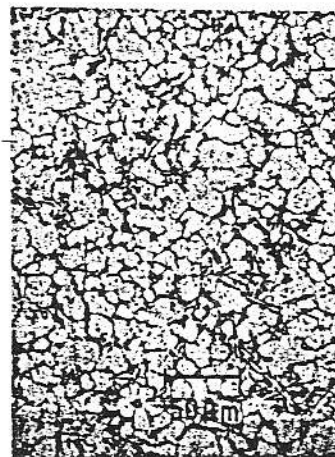
図 10 マクロ組織に及ぼす高速射出速度の影響

### 6.3 ミクロ組織観察

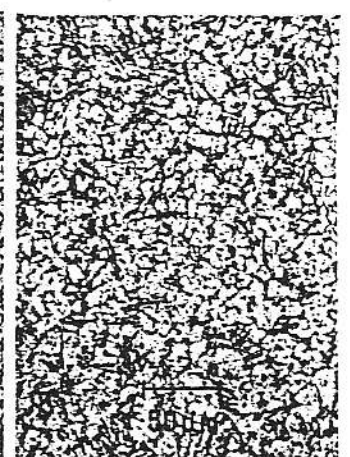
図 11 は、高速射出速度と凝固組織の関係を示したミクロ組織写真である。超高速射出の方がデンドライトセル組織が微細化している。これは、超高速射出の充填時間が従来の半分程度となり、溶湯がより高温状態でキャビティー内に充填される事や、早期の昇圧加圧で型接触状態が密となり、熱伝達率の上昇から凝固時の冷却温度勾配が若干なりとも急となり組織が微細化されたものと思われる。図 12 に、ミクロ組織の粗さ (DAS) に及ぼす高速射出速度の影響を示す。

この結果からも射出速度の高速化にともない、急冷組織となっていることが確認できる。

組織が微細であると機械的強度が優れていると言われている<sup>5)</sup>ことから、伸び、引張強さについて調査し



2 m/sec



6 m/sec

図 11 ミクロ組織に及ぼす高速射出速度の影響

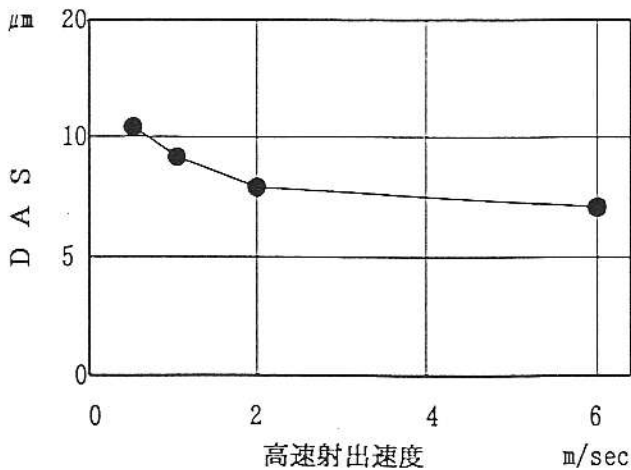


図 12 ミクロ組織の粗さ (DAS) に及ぼす高速射出速度の影響

たが、高速射出速度差の影響が認められなかった。

充填時間の短縮で得られる程度の微細化では、機械的強度の改善が期待できないものと思われる。

しかし、超高速射出機は、幅広い射出動作ができ、注湯から充填完了までの時間短縮が可能であり、より微細化のための射出条件の検討が必要である。

#### 6.4 新ニーズのトライ

複数部品の一体鋳造トライは、一例ではあるが実施した。その結果としては、高速速度 6 m/sec の条件で鋳造すると、一部分を除けばほぼ要求品質を満足することができた。今後、湯流れ性の改善と昇圧加圧条件の見直しで対応可能と思われる。

小型マシンによる大物製品の鋳造トライは、従来鋳造では、800トンマシンで生産していた薄肉ケース 2 製品を、鋳造圧力を下げて 2 ランク下の 500 トンの超高速射出機で、成形を可能とした。

図 13 にその製品写真の一例を示す。この製品は、高速速度 7.4 m/sec、鋳造圧力 40 MPa の条件で鋳造したものである。

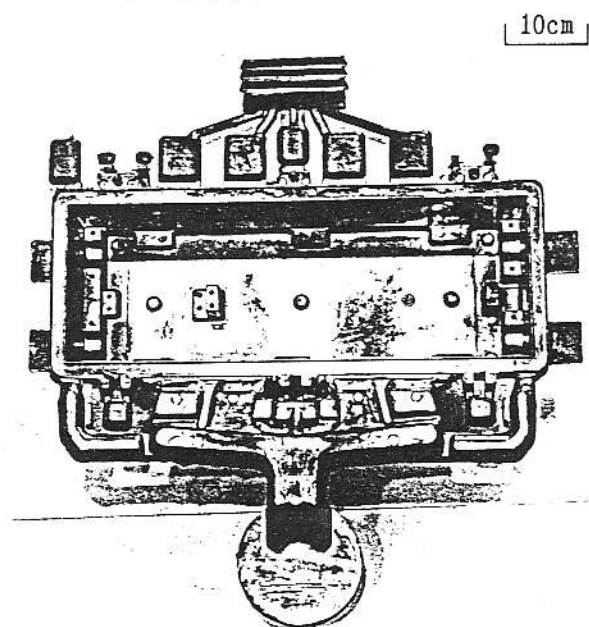


図 13 中型マシンによる大物製品の鋳造例

#### 7. 工業所有権

本開発に関連した工業所有権の国内特許出願は 8 件である。海外特許は米国 3 件、韓国 3 件、が登録済みである。

#### 8. 結言

超高速射出ダイカストマシンと高精度給湯装置の開発を行い、その有効性の評価を実鋳造トライにて実施した結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) リアルタイムフィードバックによる空打ち 10 m/sec 以上の射出能力を有する超高速射出ダイカストマシンと、給湯精度が  $\pm 0.2\%$  以下の高精度給湯装置を確立出来た。
- 2) 効率良い超高速射出化には、金型の特性に関するゲート面積とチップ断面積の検討が重要である。
- 3) 湯じわや湯境が減少するが、湯流れ性が変わる場合には金型方案の変更が必要である。
- 4) 巣が微細拡散・圧縮されて、巣の総体積が減少した均一なマクロ組織が得られた。
- 5) 凝固組織は微細化する傾向があるが、現時点では、機械的強度の改善は図れなかった。
- 6) 機械的強度の改善を考えるには、射出動作全体での時間短縮を図り、冷却温度勾配を急激にした凝固組織の微細化が必要である。
- 7) 複数部品の一体鋳造や小型マシンによる大物製品の鋳造といった新ニーズの実現化が、可能となってきた。

#### 8) 最後に

今回は、在来金型にて低速・高速・昇圧の 3 変化射出方式の高速射出条件のみを変更して鋳造を行い、上記結果を得ることができたが、本機は、在来鋳造法や超高速鋳造法だけではなく幅広い射出動作が選択可能であり、今後それらの効果を評価し、より安定したダイカスト鋳造法の技術を確認していきたいと考える。

#### 9. 参考文献

- 1) 岩堀弘昭：第 1 回ダイカストの鋳造欠陥と対策 研究会資料 (1994)
- 2) 田村博久：サーボ弁の基礎的なしくみと課題 油空圧技術 (1994) 8
- 3) 佐々木勝美：電気油圧サーボ弁の歴史と現代
- 4) 日本ムーグ (株)：カタログ NO, 100-0394J
- 5) 西直美, 佐々木英人, 平原俊之, 高橋庸輔： 鋳物 60 (1988) 777

#### 10. 謝辞

本論文を借りて、本機の開発にご支援・ご助言いただいた皆様に感謝の意を表します。また、評価のための実鋳造トライや、論文執筆にあたり資料のご提供をいただいたユーザー各社の方々に、心より御礼申し上げます。