マルチインジェクションダイカストマシンによる鋳造

東芝機械株式会社　○久保木　勲　久保田正光
辻　眞　横手　広周
中村　輝直

Die Casting with Multi-Stage Injection

TOSHIBA MACHINE CO., LTD.
TOKYO, JAPAN

Isao Kuboki　Shoukou Kubota
Makoto Tsuji　Hironori Yokote
Terunao Nakamura

Abstract:

As we reported on the previous paper [1], die casting machine with super-high-speed injection can help improve the internal quality of die-castings by dispersing and squeezing the porosity in the casting. On this paper we try to investigate as to how far we can expect to die cast thin-walled parts by utilizing the super-high-speed-injection, in response to the trend of reevaluating die castings over plastics under the growing concern about material recycling and the environmental protection.

1．まえがき

ダイカスト製品は高い寸法精度ときれいな鋳肌、優れた量産性によって、自動車部品を中心に幅広く利用されてきたが、今後さらにダイカストの品質を高め、製品設計の可能性を広げていくためには、優れた金型技術と鋳造技術に加えて、高性能なダイカストマシンが必要になってくる。

超高速射出ダイカストマシンによって、内部品質の向上が計れることはすでに報告したが[1]、むしろこのような射出性能は薄肉製品やＭｇ合金の鋳造に向いていると言われている。このことは最近の環境問題に対する配慮から、リサイクルの困難なプラスチックに代わって、リサイクル性に優れたダイカスト部品を使用しようという動きにも応えるものである。

本研究はこのような観点から、ダイカストマシンの射出性能が薄肉製品の鋳造をどこまで可能にするか、対象製品を想定した金型を試作し、超高速射出のダイカストマシンを用いて、ＡｌとＭｇ両方の合金で鋳造テストを行い、その特性を明らかにしようとしたものである。

2．ダイカストマシンの鋳造能力

ダイカストマシンの鋳造能力は、その型締力を用いて表すのが一般的であるが、マシンの型締部は物理的には大きなウエイトを占めるものの、単に金型を締付ける能力であり、成形能力そのものではない。このことは特に薄肉製品の場合やＭｇ製品の場合等問題になり、マシン射出部の性能の方が鋳造能力（成形能力）として重要になってくる。

具体的に薄肉製品が必要とするマシンの成形能力とはどのようなものであろうか、以下に検討していく。

2．1　射出率と製品特性

ダイカストにおける薄肉製品に対しては、凝固時間が短いため射出速度を高くしなければならず、また製品が大きければ流動長についても考慮しなければならない。これらの特性を一つの値で表すには溶湯の流量Ｑを用いるのが便利である。なぜなら、溶湯の流速に関してはスリーブ内（マシンの射出速度）、ゲート部（ゲート速度）と場所によって変化し、その関係もプランジャスリーブ径によって変わってしまうが、溶湯の流量に関しては、場所にもスリーブ径にも関係な

く同一の値をとるからである。またこの値はプラスチック射出成形機では射出率という用語で呼ばれている。以下本稿でも射出率Qと呼ぶことにする。

従来からダイカストの凝固時間 Ts(sec)は製品肉厚 t_m (mm)の2乗に比例するとされている。すなわち、

$$Ts=k\,t_m^2 \quad (k\text{は定数}) \quad \text{---------- (1)}$$

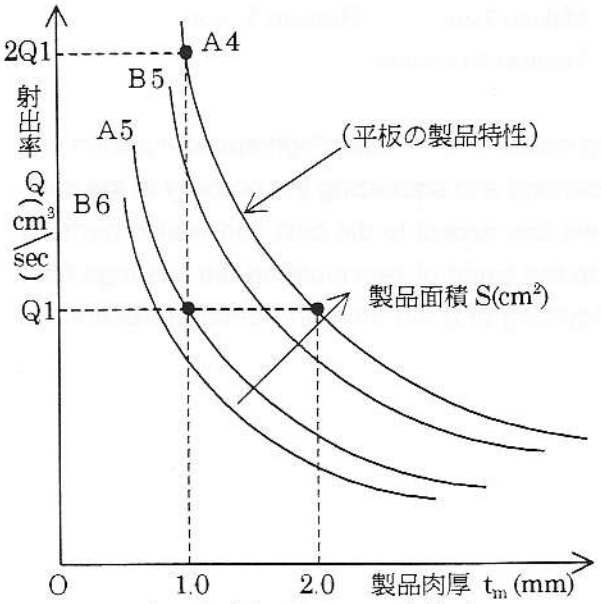
製品の体積を V(cm^3)とし、充填時間 T_f を凝固時間 Ts のたとえば半分とすると、射出率 Q(cc/s)は、

$$Q=V\div T_f=2V\div Ts=2V\div(k\,tm^2) \quad \text{------- (2)}$$

対象製品を面積 S(cm^2)の平板とすると、$V=S\,t_m/10$ で、

$$Q=0.2\,S\,t_m\div(k\,t_m^2)=0.2\,S\div(k\,t_m) \quad \text{----- (3)}$$

すなわち射出率は製品の面積に比例し、肉厚に反比例する。平板の形状をA4、B5、A5、B6の各サイズとして、Qと t_m の関係を図示すると図1が得られる。



（図1）製品肉厚と必要射出率

図1から分かるように、製品が大きければ大きいほど、肉厚は薄ければ薄いほど、射出率の値は大きくなり、成形の難しい製品ということになる。たとえば肉厚 2mm の A4 サイズは肉厚 1mm の A5 サイズと同じ射出率、同じ難しさであり、肉厚 1mm の A4 サイズは肉厚 1mm の A5 サイズの倍の射出率、倍の難しさということになる。従って本稿ではこの射出率Qをもって、製品特性を表す値とする。

定数 k についてはクボリノフの式と同根の理論式があり[2]、さまざまな値も報告されているが[3]、筆者等の経験から、k=0.02～0.04（A1合金）、

k=0.01～0.02（Mg合金）である。

2．2　金型特性

金型の特性は単純化したモデルで考えると、ゲート抵抗で代表させることができる。すなわちゲート断面積 Ag、ゲート部の流量係数 C、溶湯の密度 ρ、としたとき、射出率 Q とメタル圧力 P との関係は次の式で表される。

$$P=\rho Q^2\div(2C^2Ag^2) \quad \text{---------- (4)}$$

すなわちメタル圧力（ゲート抵抗）は射出率の2乗に比例し、ゲート断面積の2乗に反比例する。

2．3　マシン特性

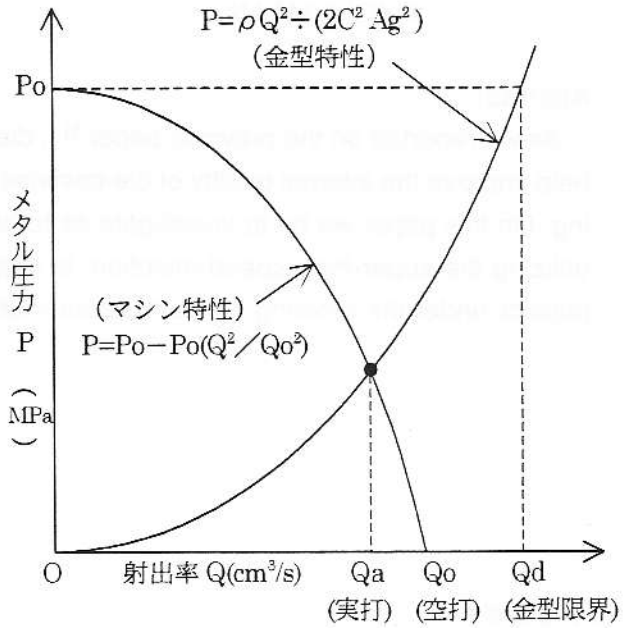
射出シリンダの特性は空打ち最高速度と充填射出力によって決まるが、これらも射出率 Q とメタル圧力 P で表すと以下のようになる。

Qo=（空打最高速度）×（チップ断面積 Ap）

Po=（充填射出力）÷（チップ断面積 Ap）

$$P=Po-Po(Q^2/Qo^2) \quad \text{---------- (5)}$$

（4）式と（5）式を図示すると図2になる。ふたつの曲線の交点の射出率 Qa が実鋳造時の値であり、これが製品の必要とする射出率より大きくなければ、成形はできないということになる。



（図2）メタル圧力 P と射出率 Q の関係

また Vo=Qo÷Ap, Vd=Qd÷Ap, Va=Qa÷Ap とすれば、$(Va/Vo)^2+(Va/Vd)^2=1$（太田の式）が成り立ち、従来の解析モデルと同じ内容であることが分かる。

また図2は P-Q の線図であるが、横軸を Q の2乗で目盛ることにより、曲線を直線にすることができ、作図により交点を求める際便利である。これは $P\text{-}Q^2$ 線図として知られているものである。

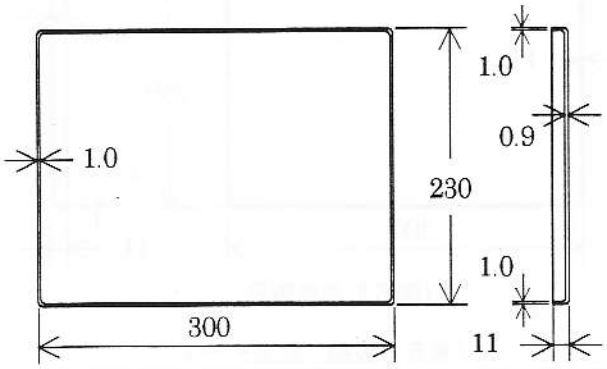
いずれにしても射出率 Qo を増大させることにより、マシンの成形能力を増大させることができることが分かる。このように大きな射出率を可能にし、なおかつ多様な調整を可能にしたマシンをマルチインジェクションダイカストマシンと名付け、薄肉製品の鋳造テストを行ったので以下に報告する。

3．鋳造テスト（1）

3．1　テスト条件

対象製品は A4 サイズのノートブックパソコンの筐

体を想定した浅い箱状の製品で、平板部の肉厚を0.9mmとし、Mg合金で鋳造を行った。（図3）



（図3）対象製品

テスト条件の詳細は下表の通りである。

（表1）製品、金型データ

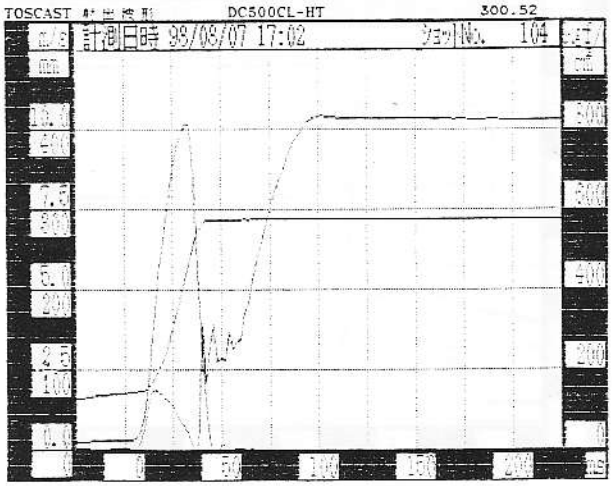
製品名	A4 ケース
材料	MDC1Z(AZ91D)
製品肉厚 t_m	0.9 mm(1 mm)
所要充填時間 T_f	0.004～0.008 sec
充填質量（製品＋ｵｰﾊﾞﾌﾛｰ）	150 g
充填体積（溶湯比重 1.7）V	88.24 cm^3
所要射出率 Q	10,893～21,786cm^3/s
ゲート断面積 Ag	2.4 cm^2

（表2）ダイカストマシンデータ

型締力	4,900 kN (500 ton)
射出力	480 kN (49 ton)
充填射出力	186 kN (19 ton)
空打ち最高速度	10 m/s
プランジャチップ径	85 mm
鋳造圧力（最大増圧時）	84 MPa (860 kg/cm^2)
最大充填圧力 Po	32 Mpa (325 kg/cm^2)
最大射出率 Qo	56,745 cm^3/s

3．2　テスト結果

良品が得られた鋳造データの射出波形を図4に示す。



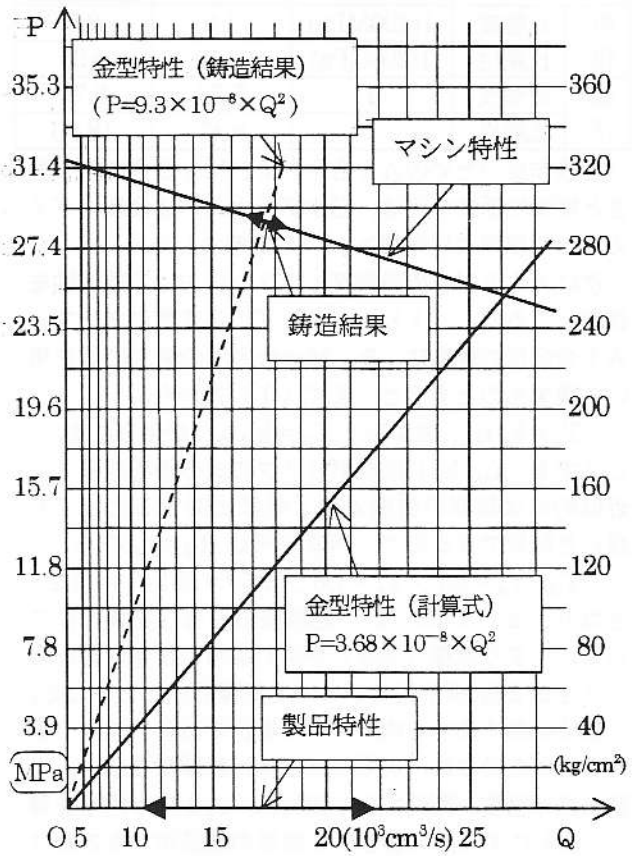
（図4）射出波形

射出波形からデータを読み取ると以下の通りである。

（表3）鋳造結果データ

ゲート前高速	10 m/s
高速区間	213 mm
製品充填時間 T_f	0.005 sec
充填ストローク	15.6 mm
製品充填射出率 Q	17,650 cm^3/s
充填抵抗 P	28～29 MPa (290～295kg/cm^2)

以上の結果を P-Q^2線図にまとめると図5になる。



（図5）P-Q^2線図

3．3　鋳造結果の分析

1）高速への切り換えは、湯がゲートに到達するかなり手前から、できるだけ速い速度にする方が良い結果が得られており、湯温低下防止の効果と考えられる。

2）充填時間 T_f と射出率 Q に関しては、良品が得られた実績値は、計算値と良く一致している。

3）メタル圧（充填抵抗）P に関しては、実験値は計算値の約 2.3～2.8 倍であった。これは今回テストしたような薄肉製品の場合、通過断面積が絞られているのはゲート部分だけではなく、製品そのものの断面積も同じように絞られているため、単純化したモデルによる計算値よりはるかに高い値になったものと考えられる。

4．Ａ１合金とＭｇ合金

Ｍｇ合金が実用金属中で最も比強度、比剛性に優れているのは周知の事実であるが、鋳造から機械加工まで取扱い上の問題点が多々あり、最終的にはその製品のコストに跳ね返ってくるため、簡単にＭｇ化するというわけにもいかない。今一度ＡｌとＭｇの薄肉製品における諸特性を比較してみる。

（表４）機械的性質の比較

材料		鋼	Ａｌ合金	Ｍｇ合金
比重		7.9	2.7	1.8
同一重量製品での肉厚		1	2.9	4.4
引張	比強度	1(490MPa)	1.9	2.0
	比剛性	1(206GPa)	1.0	0.95
曲げ	比強度	1	5.56	8.76
	比剛性	1	8.47	18.06

（上表作成のためのＡｌ合金およびＭｇ合金の引張強さと縦弾性係数の値は、日本ダイカスト協会編「ダイカストの標準<材料編>」[4] を参考にした。）

次にＡｌとＭｇの薄肉ダイカストにおける成形性を比較してみる。（１）～（５）式の各変数において、Ａｌ合金用の場合に $_A$ を、Ｍｇ合金用の場合に $_M$ を用いて表すものとすると、まず（１）式から、

$T_A = k_A t_A^2$ ，および　$T_M = k_M t_M^2$ が得られる。

ここで k（k_A、k_M）はクボリノフの式の誘導過程で、近似的には材料の密度 ρ の２乗に比例するとしても良いと解釈できるので、肉厚が同じ（$t_M = t_A$）なら、

$T_M / T_A = k_M / k_A = 1.8^2 / 2.7^2 = (2/3)^2 \fallingdotseq 1/2$

となり、２．１項の k の経験値の妥当性を裏付けている。つまり体積（肉厚）が同じなら、Ｍｇは射出率がＡｌの２倍、成形性において２倍難しいことになる。

以上はあくまでも肉厚が同じ場合であり、強度や剛性を保つためには、肉厚を増さなければならない。逆に曲げ強度、剛性で少し譲れば、Ａｌでも肉厚を薄く、2/3 にすればＭｇと同じ重量の製品ができるわけである。この場合の製品特性（射出率）を検討する。

（３）式において、S=一定で $t_A / t_M = 2/3$ と置くと、

$Q_A / Q_M = k_M t_M / k_A t_A = (2/3)^2 \cdot 3/2 = 2/3$

また（４）式において、C、Ag を同一とすれば、

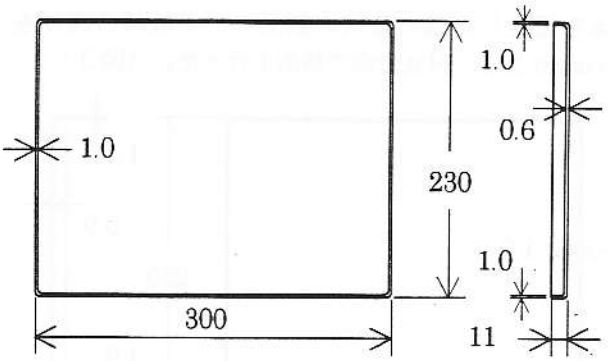
$P_A / P_M = 2.7/1.8 \cdot (Q_A / Q_M)^2 = 3/2\,(2/3)^2 = 2/3$

すなわち、重量が同じ（肉厚がＭｇの 2/3）のＡｌ製品の射出率はＭｇ製品の 2/3、メタル圧力も 2/3 である。これはエネルギー的には約半分で済むということであり、より小さいマシンで鋳造できる可能性を示している。

５．鋳造テスト（２）

５．１　テスト条件

対象製品はテスト（１）と同じ A4 ケースで、平板部の肉厚を 2/3 (0.6 mm) とし、Ａｌ合金で鋳造を行った。ダイカストマシンはマルチインジェクションの 350 トンを使用した。詳細を図６、表５、表６に示す。



（図６）対象製品

（表５）製品、金型データ

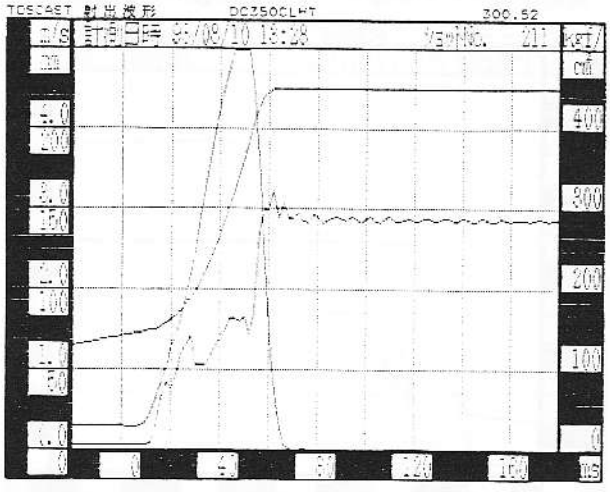
製品名	A4 ケース
材料	ADC12
製品肉厚 t_m	0.6 mm(1 mm)
所要充填時間 T_f	0.004～0.008 sec
充填質量（製品＋ｵｰﾊﾞﾌﾛｰ）	162 g
充填体積（溶湯比重 2.6）V	62.54 cm^3
所要射出率 Q	7.818～15.635 cm^3/s
ゲート断面積 Ag	2.4 cm^2

（表６）ダイカストマシンデータ

型締力	3.430 kN (350 ton)
射出力	333 kN (34 ton)
充填射出力	162 kN (16.5 ton)
空打ち最高速度	10 m/s
プランジャチップ径	70 mm
鋳造圧力（最大増圧時）	86 MPa (880 kg/cm^2)
最大充填圧力 Po	42 MPa (430 kg/cm^2)
最大射出率 Qo	38.485 cm^3/s

５．２　テスト結果

良品が得られた鋳造データの射出波形を図７に示す。今回のテストはそのままではマシンの型締力 350 トンをオーバしてしまうため、増圧を「切り」にしたうえ、アキュムレータの圧力も減圧して行った。



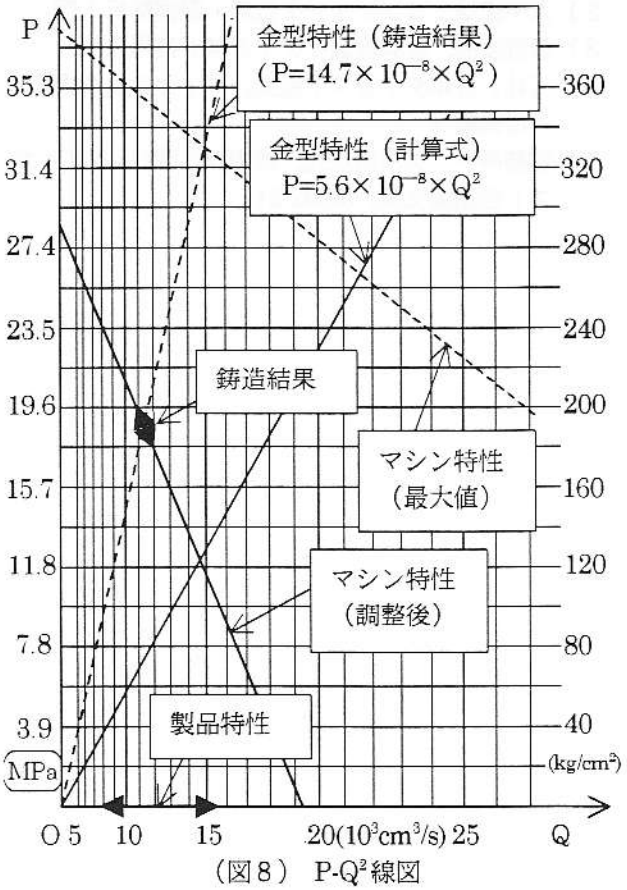
（図７）射出波形

射出波形からデータを読み取ると以下の通りである。

（表７）鋳造結果データ

ゲート前高速	5.0 m/s
高速区間	150 mm
製品充填時間 T_f	0.0055 sec
充填ストローク	16.3 mm
製品充填射出率 Q	11,410 cm^3/s
充填抵抗 P	18～20 MPa (180～200kg/cm^2)
増圧	なし（切り）
ACC 圧力	9.8 MPa (100 kg/cm^2)（減圧）
最大充填圧力 Po	28.4 MPa (290 kg/cm^2)

これらの結果を P-Q^2線図で表すと図８になる。



（図８） P-Q^2線図

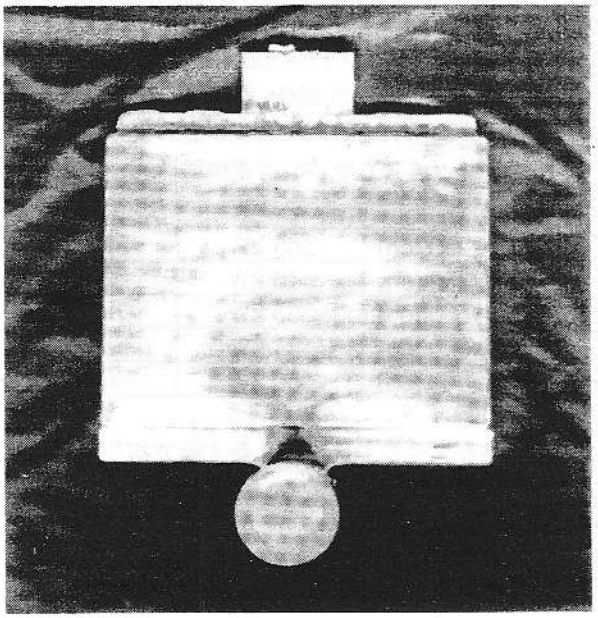
また製品の外観写真を図９に示す。

５．３　鋳造結果の分析

１）充填時間 T_fと射出率 Q に関しては、良品が得られた実績値は全体としては、計算値の範囲に入っているが、充填最終部では Q の値は計算値から外れている。（表７、図８では最終部分の値は省略してある。）

２）充填中の速度は一定ではなく、充填の最終部で減速している。これはゲート断面積 2.4 cm^2 に対して、製品部の断面積が 2.02 cm^2（テスト（１）は 2.92 cm^2）とゲートより狭くなっているため、充填するに従って抵抗が増し、減速しているものと考えられる。そのために、単純なゲート抵抗とは異なった挙動を示しているものと考えられる。

３）充填抵抗に関しては、圧力波形から正確な値を読み取るのは困難であった。したがって充填抵抗の値は、マシンの特性から算定した。その値は充填の最終部を除いて計算値の約 2.5 倍であった。



（図９）製品外観

６．考察

鋳造テスト（１）（２）とも鋳造面積から考えると、通常なら 700 トン位の型締力が必要になるところであるが、テスト（１）では 500 トンマシンで増圧時間を調整することにより、テスト（２）では 350 トンマシンで増圧を使わず、なおかつアキュムレータ圧を減圧することにより、それぞれのマシンで鋳造することができた。もちろん、ダイカストにおいては増圧特性も重要であり、薄肉部だけでなく厚肉部も有し、その部分の内部品質も問われるような製品の場合にはその条件は今回のテストとは異なってくるものと思われる。

今回の鋳造テストでも、充填行程で形状を作り、加圧行程で内部品質を作ると言われる通り、充填特性によって薄肉製品の形状作りができたわけであるが、その充填行程は溶湯の射出率 Q を用いて解析するのが便利であることも分かった。すなわち射出率は製品特性として成形の難しさを表し、金型特性はその射出率における成形時の抵抗圧力を表し、最後にマシン特性としての射出率と成形圧力の関係を決める能力が成形の可否を決定する。

具体的には上記の関係を太田の式や P-Q^2線図によって調べなければならないが、より簡単にその成形の可否を判断するには、充填中の出力（馬力）W(=P×Q)を用いるのが良い。鋳造テスト（１）、（２）における充填出力 W_M, W_Aは、表３と表７の各値からそれぞれ次のようになる。

$W_M = 17,650 \times 28.7 = 506,600\ Nm/s = 507\ kW$

$W_A = 11,410 \times 18.6 = 212,200\ Nm/s = 212\ kW$

つまり肉厚 0.6mm のＡ１製品が肉厚 0.9mm のＭｇ製品のほぼ半分の動力で成形できていることが分かる。

一方マシンの発生する最高出力（最大馬力）Wo は次式で計算される。

$$Wo = (2\sqrt{3}/9) \times Po \times Qo \quad \text{---------- (6)}$$

（６）式を用いて当社の 250～800 トンマシンの最高充填出力（定格値）を計算すると下表のようになる。

（表８）マシンの充填特性

型締力	標準機	ﾏﾙﾁｲﾝｼﾞｪｸｼｮﾝ
2,450 kN (250 ton)	265 kW	529 kW
3,430 kN (350 ton)	313 kW	625 kW
4,900 kN (500 ton)	365 kW	729 kW
6,370 kN (650 ton)	421 kW	841 kW
7,840 kN (800 ton)	450 kW	900 kW

上表の値が各マシンにおける最大値であり、それを上回る動力を必要とするような対象製品は充填不可能である。一方、対象製品が必要とする充填出力 W は、P を求めるために（４）式を用いれば次のようになる。

$$W = P\,Q = \rho Q^3 \div (2C^2\,Ag^2) \quad \text{---------- (7)}$$

鋳造結果は（４）式とは合わなかったが、薄肉製品の場合の応用として、①流量係数 C を小さくする、②有効ゲート断面積 Ag を小さくする、等の修正を行えば利用可能と思われる。一番望まれるのは③溶湯の流れによる摩擦抵抗と曲がりによる圧力損失等の計算式を確立することである。以上のような水力学的な修正をするにしても、（７）式によれば充填出力 W は射出率 Q の３乗に比例することが分かる。

７．まとめ

高い充填出力（馬力）を持ち、多様な調整が可能なマルチインジェクションダイカストマシンを用いて鋳造テストを行った結果、以下のことが分かった。

１）肉厚 0.6～0.9 mm の薄肉製品の場合でも、凝固時間と推奨充填時間には従来の経験式が適用できる。

２）充填抵抗に関しては、ゲート断面積と流出係数から理論式により計算される値と異なり、実験値は 2.3～2.8 倍と大きい値になった。このため薄肉製品に対する凝固流動解析技術による解明が望まれる。

３）同じ肉厚であれば、Ｍｇ製品はＡ１製品の倍の射出率と射出率の２乗に比例した高い充填圧力を必要とする。このことは、Ｍｇ合金はホットチャンバマシンの使用が可能であるが、ホットチャンバの構造に起因するメタル圧力の限界（ピストンリングによる溶湯のシール性）のため、射出率の高い製品への適用は困難と思われる。

４）Ａ１製品の肉厚を 2/3 にした場合、Ｍｇ製品と同じ重量になり、曲げの強度、剛性には劣るものの、約半分の充填動力で成形できる。

５）今回テストしたような薄肉製品の場合は、ゲート通過後の時間だけでなくゲート前の経過時間も溶湯の温度を保持するために極力短くする必要がある。このためには、給湯している時間（ショットタイムラグ）が最小限の給湯方法（たとえば電磁ポンプ給湯[5]等）が有効になってくるものと考えられ、この分野における発展が望まれる。

８．参考文献

１）北村弘、辻　真、横山宏司：'96 日本ダイカスト会議論文集、JD96-10
Kitamura, Tsuji, Yokoyama : '96 Japan Die Casting Congress Transactions, JD96-10

２）大中逸雄：コンピュータ伝熱・凝固解析入門

３）菅野友信、植原寅蔵：ダイカスト技術入門

４）（社）日本ダイカスト協会、ダイカストの標準＜材料編＞

５）加藤伸一、久保田正光、鈴木睦：'92 日本ダイカスト会議論文集、JD92-21