

射出能力の有効活用による良品安定生産化の提案

東芝機械(株) 岩本典裕

1. はじめに

様々な素材材の中でも、鋳造は複雑な形状の製品を低コストで大量に製造するプロセスとして広く用いられている。その鋳造において、ひとつひとつの製品を製作するうえで最も時間を消費する工程は製品を凝固させる工程である。この凝固時間を極限まで縮めた製法がダイカスト法である。たとえば同じようなアルミ合金でも、低圧鋳造法や重力鋳造法の凝固時間は何分もかかるが、ダイカスト法なら同じ製品でもその凝固時間は数秒から数十秒で済む。その理由は、ダイカストの金型は内部冷却、スプレー、外冷などによって溶湯よりずっと低い温度に保たれているからである。このように冷却されている金型に溶融金属を充填するためには、その凝固は充填と同時に始まり極めて短時間で終了してしまう。そのためダイカストマシンには溶湯金属が凝固する前にキャビティーへ充填し加圧を完了させる射出能力が要求される、二つの工程にかかる時間の合計は0.1秒前後である。

本稿ではダイカストマシンの持つ ①加速・減速能力、②充填能力、③昇圧能力の、製品の品質に及ぼす影響について述べる。様々な金型に対して、これらの能力を最大限に引出すことが「ダイカスト製品のものづくり」に寄与すると思われる。

2. 射出シリンダーの加速・減速能力

一般的にダイカストの射出工程はスリーブが溶湯で満杯になるまで、あるいは湯先がゲートに到達するまでは低速で射出し、そこから高速に切換えてキャビティーを充填する。これは湯が冷えない内に充填を完了するためには始めから高速で射出する方がよいが、反面空気やガスの巻き込みを最小限にするためにはできるだけその高速の開始を遅らせる方がよいからである。溶湯はスリーブに注湯された瞬間から凝固を始めるが、冷却速度が速いのは主にゲートを通過してからである。そのため低速から高速への切換特性が重要であり、最終的に到達する速度の大きさだけでなくその速度に到達するための時間すなわち加速時間の大小が問題になる。加速時間の違いが充填時間や高速開始位置に影響を及ぼす例を図1及び図2に示す。

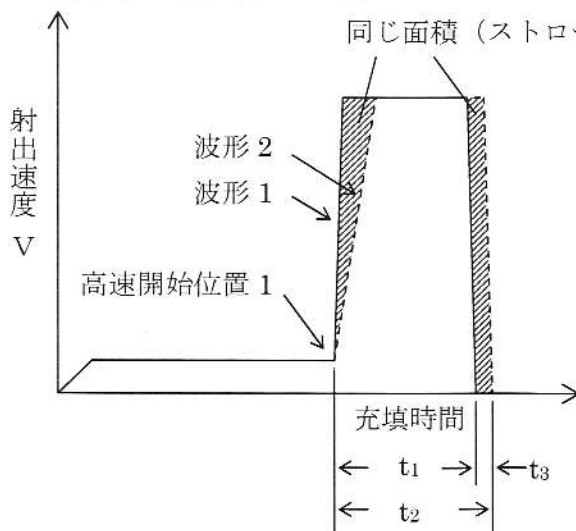


図1. 加速時間と充填時間

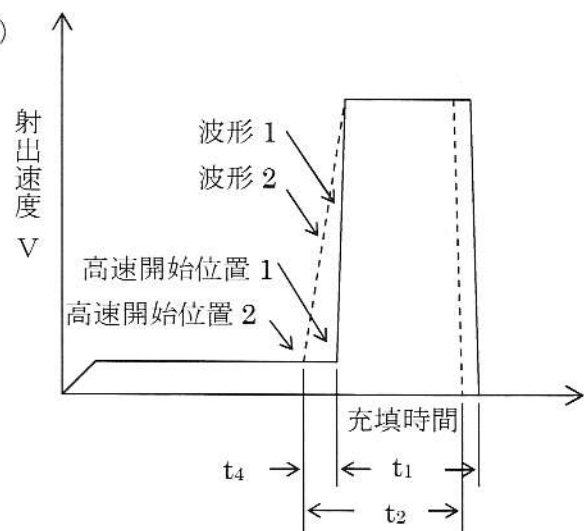


図2. 加速時間と高速開始位置

図1において、波形2では加速に時間がかかり充填時間が t_3 だけ長くかかっている。また図2においては、ゲート通過開始時の速度を波形1と同じにするため、あらかじめ早く高速に切換えた例であるが、結果としてその分(低速速度 $\times t_4$)だけ低速区間が短くなり代わりに高速区間が長くなり、空気やガスの巻き込みが増えていると考えられる。このように高速射出への加速時間は高速の速度と同様重要であることが分かる。当社のサーボバルブを使用したモデル(超高速射出・サーボ制御射出マシン)では0→5m/sへの加速時間が従来モデルの20msecから5msecへと向上している。

以上は射出シリンダーの加速能力であるが、射出シリンダーの減速能力も同じように重要である。充填完了時点では射出シリンダーへ流入する作動油からピストンさらにはプランジャーチップまでの運動質量が一瞬にして停止するため大きな衝撃を発生させる。このうち油圧作動油の急停止による

水撃作用（油圧サージ）の圧力上昇 ΔP_1 は、射出速度を 3m/s とすると理論的には以下のように計算される。

$$\Delta P_1 = (\text{作動油の密度}) \times (\text{作動油内の音速}) \times (\text{作動油の流速}) \\ \approx 1.05 \times 10^3 \times 1425 \times 3.0 = 4.49 \times 10^6 \text{ (Pa)} = 4.49 \text{ (MPa)}$$

この計算式は一般式であり、最近の当社モデルではこの水撃作用（油圧サージ）を極力少なくさせるべく油圧回路を工夫し本条件においては 1 / 7 以下に低減させている。

この圧力をチップ径 $\phi 70$ として溶湯圧力に換算すると、

$$\Delta P_2 = \Delta P_1 \times (\text{射出ピストン断面積}) \div (\text{チップ断面積}) \\ = 4.49 \times (0.125 \div 0.07)^2 = 14.3 \text{ (MPa)}$$

これに対して、射出ピストンからプランジャーチップまでの質量が停止することによって発生する力（慣性サージ）は以下の式で計算される。

$$\Delta F = (\text{運動物体の質量}) \times (\text{速度}) \div (\text{停止時間}) \\ = 70.7 \times 3.0 \div 0.005 = 42420 \text{ (N)}$$

チップ径 $\phi 70$ として溶湯圧力に換算すると、

$$\Delta P_3 = \Delta F \div (\text{チップ断面積}) \\ = 42420 \div (0.07^2 \times 3.14 \div 4) = 1.10 \times 10^7 \text{ (Pa)} = 11.0 \text{ (MPa)} \text{ となり、}$$

ΔP_3 は ΔP_2 と同等または油圧回路によって値が大きいことが分かる。

いずれにしてもこのような衝撃が次の 4 項に述べるようなバリ発生の原因となる。射出シリンダーを減速制御すればこのような衝撃とバリの発生を防ぐことができるが、ゆっくり減速したのでは充填時間が延びてしまうので、短時間で減速する能力が必要になる。

3. ダイカストマシンの充填能力

ダイカスト casting は、溶湯金属が凝固する前にキャビティーへ充填し加圧を完了させる必要がある。

キャビティーの容積を C（製品の体積 + オーバーフローの体積）、充填時間を t とすると

溶湯金属の瞬間的な流量 Q を表すと

$$Q = C \div t$$

この Q はプラスチックの射出成型においては射出率と呼ばれている値と同じである。

ここで製品体積を単純に製品面積 S × 製品肉厚 T とおき、オーバーフローの体積を無視すると、Q は次のようになる。

$$Q = S \times T \div t$$

一方製品の凝固時間は肉厚の二乗に比例すると考えられるから、充填時間も肉厚の二乗に比例すると考えると、Q は以下のようになる。

$$Q = S \times T \div t = S \times T \div (k_f T^2) = S \div (k_f T) = k_f^{-1} (S \div T) \quad (k_f \text{ は定数})$$

この式から、溶湯流量 Q は製品の面積と肉厚の比で決まり、充填の難易度を表していることが分かる。

つまり薄肉で面積の大きいダイカストほど、必要な Q の値が大きくなるということである。

プラスチックの射出成型においては、この射出率の値はダイカストにくらべて低いため、その充填工程は電動機あるいは容積型の油圧ポンプによって直接駆動することができる。それに対してダイカストの射出率（溶湯流量）はプラスチック射出成形の数十倍から百倍にも及ぶため、アキュムレーターを設けてその内部に蓄えたエネルギーによって射出シリンダーを駆動する必要性が生じてくる。容積型油圧ポンプの場合、その駆動速度は負荷によってあまり変化しないため、無負荷時の速度がそのまま成形時の速度とみなすこともできるが、アキュムレーターで駆動する場合にはその射出速度は圧力とともに変化し、いわゆる空打と実打の差として現れてくる。このような溶湯流量 Q と溶湯を充填する圧力 P との関係は、以下のように表される。

金型に対して、

$$P = \rho Q^2 / (2C_g^2 A_g^2) \dots\dots\dots (1)$$

上式において、 ρ : 溶湯密度、 C_g : 流量係数、 A_g : ゲート断面積。

マシンに対して、

$$P = P_1 - P_1(Q^2 / Q_1^2) \dots\dots\dots (2)$$

上式において、 P_1 は最大 casting 圧力で $P_1 = F_0 / A_0$ (F_0 : 充填射出力すなわち増圧をかけない状態で射出シリンダーが出せる力、 A_0 : チップ断面積)、 Q_1 は最大溶湯流量で $Q_1 = A_0 \times V_0$ (V_0 : 空打最大プランジャー速度)。以上の関係を 350 トンダイカストマシンを例にしてグラフで表すと図 3 のようになる。

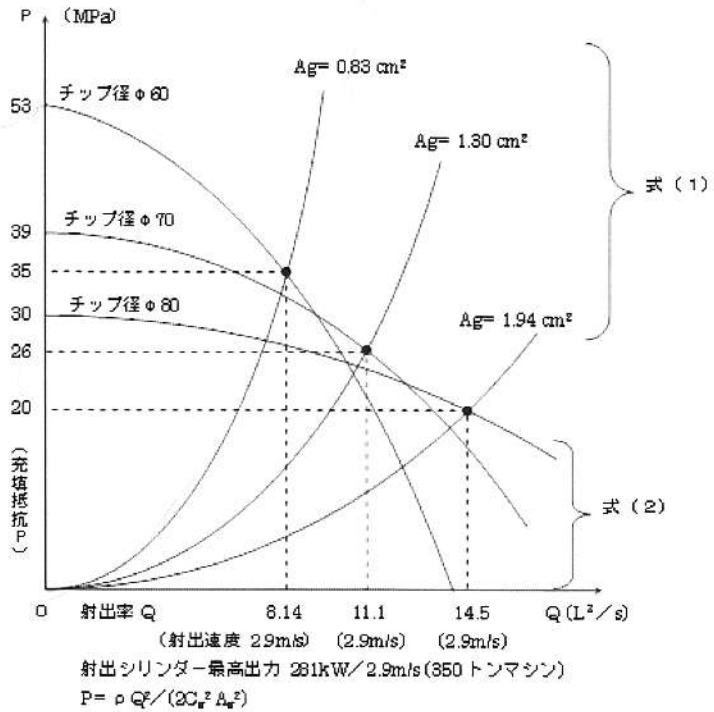


図 3. P-Q関係図

図 3 で注目すべきことは、ゲート断面積が変わるとその抵抗値が変わり、射出シリンダーのエネルギーを最も効率よく引出すことができるプランジャーチップ径の値が変化するという点である。すなわち、 $Ag=0.83 \text{ cm}^2$ に対しては $\phi 80$, $\phi 70$, $\phi 60$ の順に Q が大きくなっている。同様に $Ag=1.30 \text{ cm}^2$ に対しては $\phi 60$, $\phi 80$, $\phi 70$ の順に、 $Ag=1.94 \text{ cm}^2$ に対しては $\phi 60$, $\phi 70$, $\phi 80$ の順にそれぞれ Q が大きくなっている。プランジャーチップ径は casting 圧力やスリーブ充填率の観点から選定することが多いが、充填性能に与える影響も考慮するべきであるということを示している。この現象を理解するための手段として、自動車の速度と空気抵抗の関係を図 4 に示す。

図 3 と図 4 を比べてみると、流量あるいは車速の二乗に比例してそれぞれゲート抵抗あるいは空気抵抗が増大するという点が共通しており、ダイカストの場合は $C_d^2 Ag^2$ が大きいほど、自動車の場合は $C_d \cdot A$ が小さいほど抵抗は小さく、充填圧力あるいは駆動力が少なくて済むことが分かる。自動車の場合、ダイカストのチップ断面積に相当するのが最終減速比 (タイヤの大きさも考慮) である。同一のエンジンでも空気抵抗に合わせて最終減速比を選定することにより、効率よくその最高出力を引出すことができるわけである。

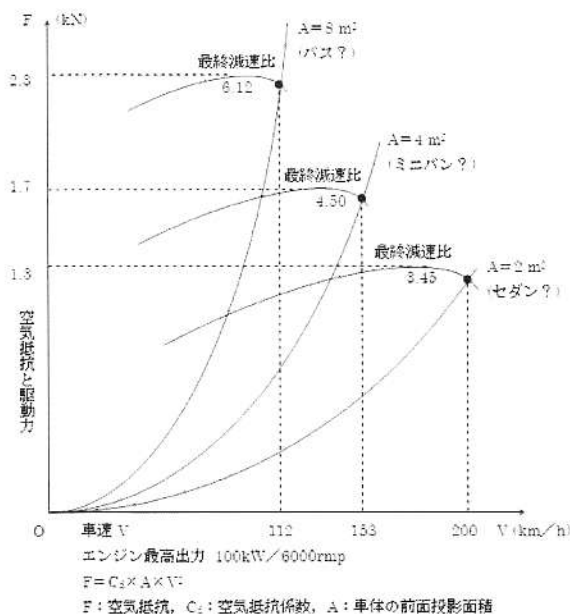


図 4. 自動車の空気抵抗と駆動力

ダイカストマシンの射出シリンダーも最高出力が増えれば充填能力が増えるわけであるが、当社のサーボバルブを使用したモデル（超高速射出・サーボ制御射出マシン）では従来モデルに対して、その最高速度を約二倍に増大させることにより最高出力を約二倍（350 トンマシンの場合で 562kW/5.8m/s）としている。アキュムレーターの圧力は変えずに油圧回路を改善することにより速度を増大させており、自動車のエンジンでいえば、排気量は増やさずに回転数を上げて最高出力を増大させるのと同じである。

このようにして増大した射出シリンダーの最高出力を有効利用するためには、プランジャーチップ径やゲート断面積の適切な選定が必要になる。このような検討を行うためには、式（1）と式（2）から得られる解、 $Q^2 = 2C_g^2 A_g^2 Q_1^2 P_1 / (\rho Q_1^2 + 2C_g^2 A_g^2 P_1)$ 及び $P = \rho Q_1^2 P_1 / (\rho Q_1^2 + 2C_g^2 A_g^2 P_1)$ の値を数値計算してもよいが、もっと簡単な方法として、 $P \cdot Q^2$ 線図を利用すれば作図によって適切なプランジャーチップ径やゲート断面積を検討することができる。

$P \cdot Q^2$ 線図の特長は、横軸を Q^2 の関数尺とすることにより、二次曲線を直線で表すことができるようにした点であり、意味するところは図1の $P \cdot Q$ 関係図と同じである。なお従来このような検討を行う際、溶湯流量又は射出率という用語が普及してないため、射出速度で論じることが多かったが、速度が出てチップ径が小さければ湯が回らないことを考えても分かるように、速度ではなく流量で論じるべきである。これはちょうど自動車の走行性能（エンジン性能ではない）に関しては車速で論じなければならぬのと同じで、エンジン回転数で論じているのはギヤ比を考慮しなければ必要な性能が出ているのかどうか分からないというのと同じである。 $P \cdot Q^2$ 線図の例を図5に示す。

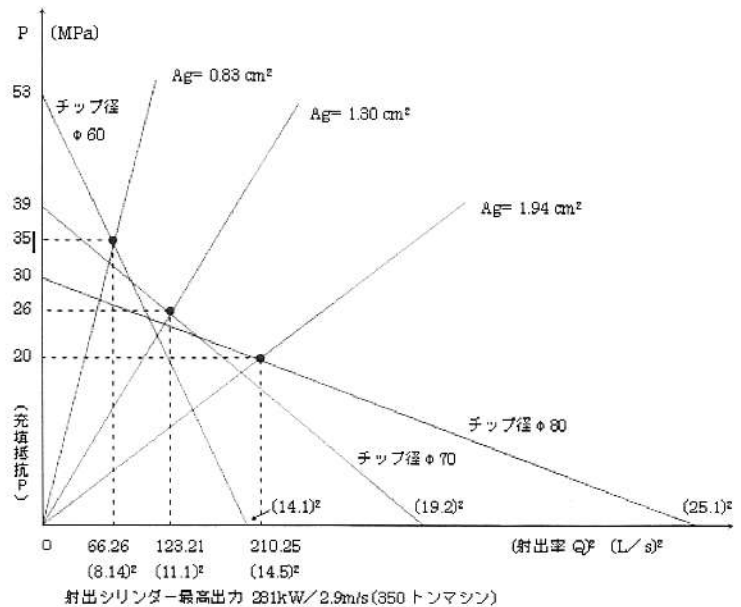


図5. $P - Q^2$ 線図

4. 射出シリンダーの昇圧能力

ダイカストでは射出した瞬間に溶湯が金型のパーティングラインから吹き出したり、あるいは金型から吹き出さなくてもキャビティー以外の本来充填すべきでない場所まで溶湯が回ってしまうことがある。これがいわゆるバリ吹き現象であり、その原因として考えられるのは、①射出によって発生する型開力が型締力を上回り、型が開いてしまうこと、あるいは、②型が開かなくても金型のエアイベント、中子摺動面、熱変形によるすきま等に溶湯が圧入されてしまうことである。

①の現象はパスカルの法則によって型開力を計算することにより容易に解析できるが、②の現象はもう少し複雑である。金型にはエアイベント、中子摺動面、熱変形によるすきま等、様々なすきまがあるが、もし水や油等の液体を充填させて加圧すれば必ずそこから漏れてしまう。ダイカストの場合、溶融金属が漏れないのは凝固しているからにほかならない。つまり溶湯が凝固する前に加圧されればバリが発生し、凝固してから加圧されればバリは発生しないわけである。

バリ発生について検討するためキャビティーの一部を拡大し、図6に示すような固相率100%の凝固層と、液相率100%の溶湯部分だけからなる単純化したモデルについて考えてみる。

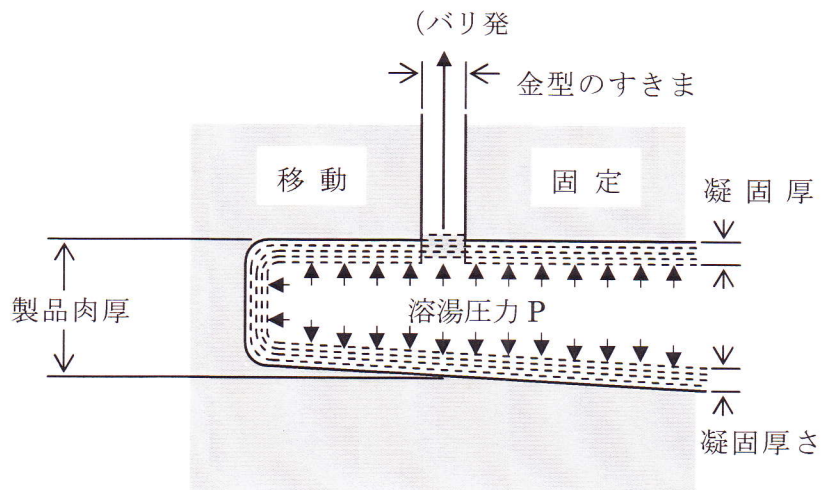


図6. バリ現象のモデル

図6において、すきま部分の凝固皮膜が溶湯圧力に基づくせん断力によって破断する限界を求めるため、凝固層の厚さ T_x 、すきまの幅 G 、奥行きを1としてせん断応力 τ を計算する。

$$\tau = P \cdot G / (2 T_x) \leq \tau_0 \dots \dots \dots (3)$$

(3) 式で τ_0 は凝固層のせん断強さであり、これを書き直すと次式になる。

$$P \leq 2 T_x \cdot \tau_0 / G \dots \dots \dots (4)$$

(4) 式から凝固皮膜が薄いほど、また金型のすきまは大きいほど限界圧力が低い、すなわちバリが発生しやすいことが説明でき、経験的に言われていることと一致する。

凝固完了時点では、両側から成長してきた凝固層が中央部でぶつかるから、次式の関係が成り立つ。

$$2 T_x = T \dots \dots \dots (5)$$

またキャビティー充填開始から、この凝固完了までの時間が製品凝固時間 t_s であり、この製品凝固時間 t_s と製品肉厚 T との関係は前述したように以下の式で表される。

$$t_s = k_s \cdot T^2 \quad (k_s \text{ は定数}) \dots \dots \dots (6)$$

書き直すと $T = \sqrt{t_s / k_s} \dots \dots \dots (7)$

ここで $t = t_s$ において上式の見方を変えると凝固層が時間と共に厚さを増していく様子を表す式と考えることもできる。すなわち、式(5)と式(7)から以下のように書くことができる。

$$T_x = (1/2) \sqrt{t / k_s} \dots \dots \dots (8)$$

さらに(8)式を(4)式に代入すると、バリ抑制の限界を表す式が得られる。

$$P \leq (\tau_0 / G) \sqrt{t / k_s} \dots \dots \dots (9)$$

(9) 式は(4)式と同様、金型のすきまが大きいほどバリが発生しやすいことを表すと同時に、その限界となる圧力はキャビティー充填開始からの経過時間の平方根に比例して増加することを示している。以上の内容に関して铸造実験を行った結果を図7に示す。

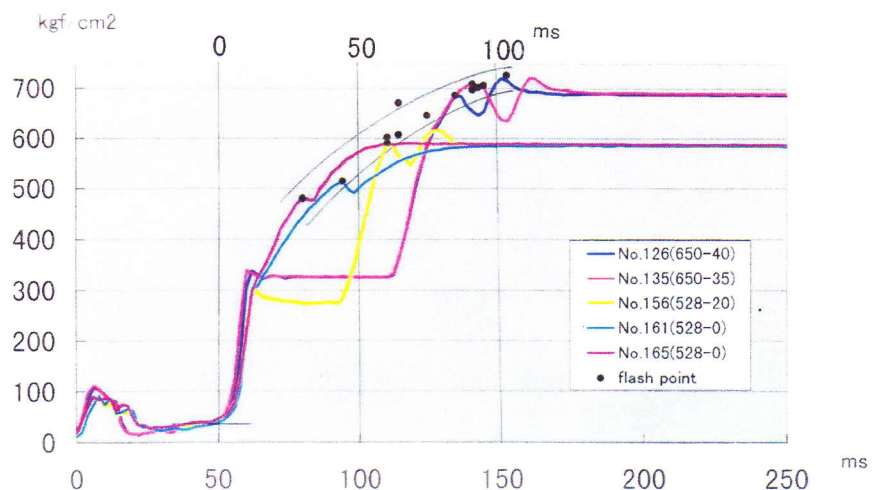


図7. 昇圧曲線とバリの発生

図7のデータは、式(9)の関係がある程度正しいことを示すものと考えられる。そこで式(9)の内容と昇圧曲線との関係を図8に示す。

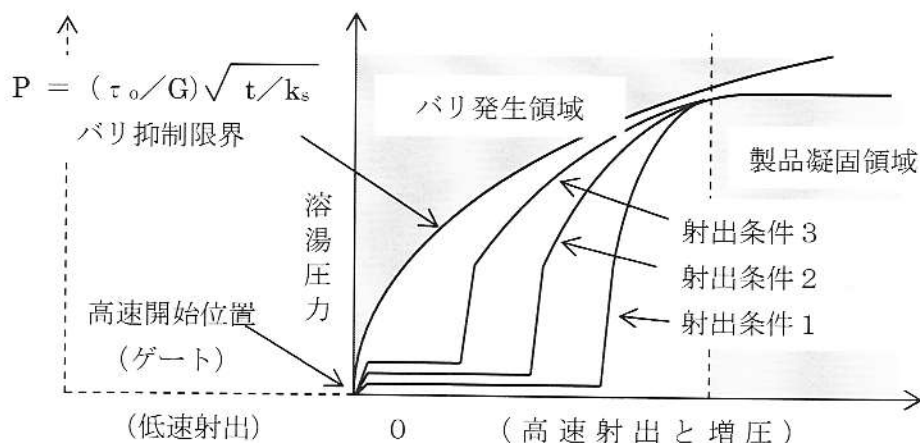


図8. バリ抑制限界と昇圧曲線

図8はバリ抑制限界とともに、異なる射出条件1, 2, 3の圧力波形を示している。射出条件1は他の条件に比べて昇圧時間そのものは短いが充填時間は一番長く、バリの抑制限界の曲線から離れている分だけ溶湯を効果的に加圧できずに製品が凝固してしまっていると考えられる。条件2ではより短時間で充填を完了し昇圧に入っている。条件3(超高速射出・マルチインジェクション)では、他の条件に比べて最も短時間で充填を完了し、速やかにバリ抑制限界に最も近い状態で昇圧し、効果的にキャビティー内を加圧し製品の品質向上に寄与しているものと考えられる。

5. まとめ

今回の解析及び実験から以下のことが明らかになった。

- 1) ダイカストの凝固時間は極めて短いため、できるだけ短時間でキャビティーを充填し加圧することが必要である。しかし、空気やガスの巻き込みを抑えつつ短時間充填を実現するためには、高速射出の速度だけでなくその加速時間も重要である。またバリの発生を抑えるためには減速特性も重要である。特に減速特性は射出時の充填完了時の衝撃(油圧と質量のインパクトサージ)を無くす事によりバリ発生防止以外に金型やチップ・スリーブの寿命を延ばす効果があることが分かって来た。
- 2) さらに、ダイカストマシンの射出能力だけでなく、ゲート断面積やプランジャーチップ径の見直しも必要である。
- 3) キャビティーを充填し効果的に加圧するためには、ダイカストマシンの昇圧特性が重要であり、バリの抑制限界の圧力曲線にできるだけ近い状態で溶湯を加圧することにより、高品質のダイカスト製品が製造できるものと考えられる。

(以上)