

ダイカストの鑄造条件選定におけるPQ²線図とJ値の活用

Application of PQ² Diagram and J-Factor to Evaluate Casting Parameters for High-Pressure Die Casting Process

金内良夫*

Takao Kaneuchi

高い生産性と精度で鑄造品が成形できるダイカストプロセスは、近年の自動車をはじめとする輸送機器の軽量化にとってなくてはならない成形法のひとつである。その代表であるアルミダイカスト法はダイカストマシンを用いて高速高圧でキャビティ充填を行う方法である。

本報告では、ダイカストマシンの持つ性能を有効に使うことで溶湯充填を行うためのPQ²線図を用いた手法を示し、金型内の溶湯流を噴流項J値で評価して、鑄造品の機械的性質などに及ぼす影響を調査した結果について述べる。

The high-pressure die casting process (HPDC) is a valuable melt-forming process for producing lightweight parts, such as automotive parts, with high dimensional accuracy and productivity. This process is characterized by high speeds and high-pressure cavity-filling using an HPDC machine.

A PQ² diagram is examined to improve control of cavity-filling performance of die casting machines. The effect of metal flow velocity on mechanical properties is examined using J-factor.

① 結 言

金属の溶融成形法のうち、溶融金属を精密な金型に高速高圧で充填して凝固させ、製品を得るダイカストプロセスは、高い寸法精度、高い生産性を実現できる工法として自動車を代表とする輸送機器、家電、モバイル機器などに広く用いられている製法である。

近年、環境問題に端を発してエネルギー効率の向上が重要性を増し、特に輸送機器の分野では一層の軽量化を図るための材料置換が進んでいる。そのなかでダイカストの役割は大きく、大物から小物まで、複雑な形状をニアネットもしくはネットシェイプで、高い生産性をもって成形できる点が高く評価されている。

高速充填は本プロセスの特徴であるが、同時に金型キャビティ内のエアやガスなどを巻き込み、鑄造欠陥として製品に残存しやすいといったデメリットもよく知られるところである。

この現象はCAE (Computer Aided Engineering) によって解析的に検証することができるようになった。すなわち最近のハードウェア、ソフトウェア両面の急速な進歩により大規模モデルの解析が可能となり、実態との整合性が向上し、生産へのフィードバックも活発になっている。しかし、鑄造条件を自動的に最適化することまではできていない。ダイカストの鑄造条件の最適化はCAEのみでは不十分だと考えられる。

そこで、本報告ではダイカスト鑄造条件選定の指針と

なるパラメータを示し、PQ²線図による最適条件選定の手法を示す。

② ダイカスト鑄造条件を決める要素

ダイカストの鑄造条件の選定にあたっては、対象製品において、ロバスト性の検討を行うことが必要である。ダイカストプロセスは他の鑄造プロセスと比較して制御因子が多く、それらのばらつきの積み上げにより、良好な品質が得られる鑄造条件の範囲が狭くなることがあるため、このような事前の検討が極めて重要である。これが適正範囲内に十分制御されていれば、安定した品質で生産を続けることが可能となる。

その際、ダイカストマシンの射出油圧システムの能力、製品キャビティの溶湯流入経路の面積 (ゲート断面積)、キャビティ内を溶湯で満たすために最低限必要な時間 (充填時間)、およびゲートから噴出する溶湯の速度 (ゲート速度) の4つを適切にバランスさせる必要がある。

以下に充填時間の求め方、ダイカストマシンの射出系油圧システムの性能を示すマシンラインの決定方法、ゲート断面積を示すダイラインの定義、ゲートから噴出する溶湯の一般的な速度範囲、および溶湯の状態を示すJ値の定義をそれぞれ示す。PQ²線図による条件決定手法については3項に示す。

2.1 充填時間

ダイカスト等の溶融成形法においては、キャビティ内を溶融状態の成形材料で満たすために最低限必要な時間、

*日立金属株式会社 熊谷工場 (株式会社アルキャスト)

すなわち充填時間を守る必要がある。これを満足しない場合、充填中に材料が凝固し、充填不良が発生する。ダイカストの場合の一般的な充填時間は数10～数100 ms程度であり、他の鑄造法と比較して極めて短時間だという特徴がある。

この充填時間を計算するための計算式がいくつか提唱されているので、主なものを以下に示す。

2.1.1 F.C.Bennettの式

充填時間の計算式の一つに、F.C.Bennettの式¹⁾がある。これは1966年のNADCA (North American Die Casting Association)の会議で発表されたものであり、充填時間を

$$\text{充填時間} = (\text{製品内部の全熱量} \times \text{奪熱速度}) \dots \dots \dots (1)$$

全熱量...顕熱量および潜熱量

としてとらえたものである。奪熱速度 q は

$$q = k \cdot S (T_m - T_d) (d/2) \dots \dots \dots (2)$$

k : 溶湯の熱伝導率 S : キャビティ表面積
 T_m : 充填開始直前の溶湯温度 T_d : 金型温度
 d/2 : 肉厚中心からキャビティ面までの距離

で表される。

製品内部の全熱量も肉厚に比例するため、充填時間は製品肉厚の2乗の関数として定義できる。この式の特徴は、熱が製品の肉厚方向へ伝達することを仮定しているところであり、言い換えれば肉厚方向に温度こう配が存在することをモデル化している。

実際のダイカストではキャビティ内で流動中の溶湯は乱流状態であることが多く、特に薄肉製品の場合には肉厚方向の温度こう配は極めて小さいと考えられるため、このモデルは合理性に乏しいであろう。

以上の理由からこのモデルは、重力鑄造や低圧鑄造のような、比較的厚肉で、緩慢な溶湯速度で充填を行うプロセスの場合には適合すると考えられる。

2.1.2 NADCAの提唱する式

Bennettの式ではキャビティ内の乱流を想定していないことは前述した。J.F.Wallaceらが1968年に発表した式は、充填時間と製品肉厚は比例関係にあること、充填に影響する熱量は顕熱(状態変化を伴わない熱)のみであること、という考え方が特徴的である²⁾。

これは共晶系合金を扱うダイカストでは比較的良いモデルであったが、Flemingsらの半凝固鑄鉄の流動に関する研究により、過熱度が無い場合でも固相を含むスラリーは流動することがわかった。そのためNADCAでは、半凝固領域での流動分を補正した以下の式を提唱している(単位は原文のまま)³⁾。

$$t = k \cdot [(T_i - T_r + F \cdot Z) (T_r - T_d)] T \dots \dots \dots (3)$$

t : 充填時間 (s) k : 伝達係数 (s/mm)
 T_i : ゲート通過時の溶湯温度 ()
 T_r : 溶湯の最低流動温度 ()
 T_d : 充填直前の金型表面温度 ()
 F : 流動限界固相率 (%) Z : 単位変換係数 (/%)
 T : 製品肉厚 (mm)

ここにk値は経験によって得られた係数である。一例として

$$k = 0.0346 \text{ (s/mm)} \text{ (アルミニウム合金の場合)}$$

T_i = 649 () T_r = 570 ()
 T_d = 316 () F = 20 (%)
 Z = 3.8 (/%) T = 2.54 (mm)

とすると、充填時間は54 msと算出される。ここでk値は普遍的な値としてもさしつかえないが、その他は使用する材料や鑄造条件などによって変化するので適切な値に設定する。Z値は固相率を温度範囲に変換するための係数である。

また、F値は材料としての流動限界固相率ではなく、製品を健全に成形するための合理性を持つ値としなければならない。

流動性が求められる薄肉品の場合にはF値を小さめに、引け巣の出やすい厚肉品の場合にはF値を大きめに計算して充填時間を設定するなど、要求品質によってF値を使い分けると効果的である。

このように、(3)式は、製品形状や要求品質によってパラメータを適宜変更することにより適正な品質を得ることができるので、フィールドデータの蓄積により、はじめて十分な活用が可能となる。

2.2 マシンライン

ダイカストマシンは型締めのための機構と射出のための機構を有する。近年では型締め機構を一部電動化したものもあるが、ほとんどのダイカストマシンの射出機構は油圧シリンダーを用いている。これは溶湯充填時のプランジャー速度と高圧力を得るために最も適した動力ソースとされているからである。

また、ダイカストマシンは高い速度を確保するためのアキュムレータ(蓄圧器)を有するが、射出シリンダーに流入する作動油流量(プランジャー速度に比例)とアキュムレータ圧力(溶湯充填時の圧力に比例)との間には所定の関係がある。この関係を図示したものがマシンラインである。図1にPQ²線図上に表したマシンラインの例を示す。

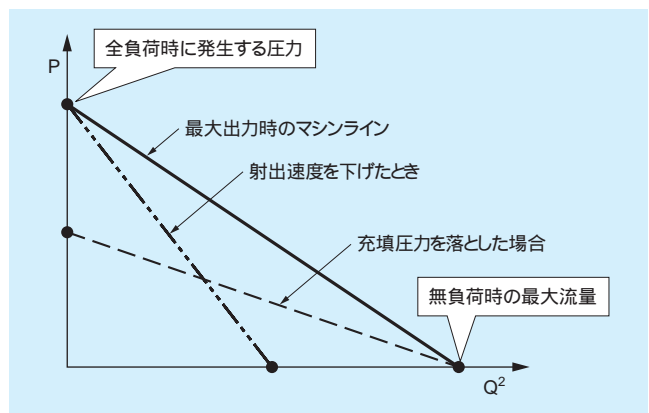


図1 PQ²線図におけるマシンラインの例
 Fig. 1 Example of machine line on PQ² diagram.

この図で縦軸（P軸）はプランジャー表面に発生する圧力、横軸（Q²軸）はプランジャーが単位時間あたりに移動させることのできる溶湯流量を表す。同じプランジャー速度でもプランジャー径が変わればP値は変化することになる。流量は2乗値で示すからマシンラインやダイライン（詳細は次項）を直線で表すことができる。このように表された図はPQ²線図と呼ばれる。

通常、製品ごとにアキュムレータ内圧力で溶湯充填時の圧力を、また、絞り弁（流量制御弁）で充填時の作動油流量すなわち射出速度を変化させて鑄造を行う。そのためマシンラインは製品ごとに变化する。しかし図1中に実線で示してある最大出力時のマシンラインはマシン固有のものであり、それ以上の出力を出すことは理論上不可能である。

図1中で、最大出力時のマシンラインのP軸切片は充填時にプランジャーチップにより発生しうる最大の圧力を、また、Q²軸切片はプランジャーが出しうる最高速度における、単位時間あたりの溶湯流量を表す。絞り弁によって射出シリンダー内への作動油流量を制限すると、プランジャーの出しうる最大の溶湯流量は低下するので、図に示すようにQ²切片が变化する。アキュムレータ内圧を低下させて充填圧力を低下させた場合は、マシンラインのP軸切片が变化する。プランジャー径を変更した場合には、両軸の切片が同時に变化する。

このように、最大出力時のマシンラインの範囲であれば、マシンラインは变化させることができる。これはプランジャー径の変更によっても実現できる。したがってプランジャー径、マシンの設定は、充填条件を決定するために重要な意味をもつ。

2.3 ダイライン

図1で示したPQ²線図に、金型のゲート断面積を表すダイラインを加えて図2に示す。この直線は原点を通る直線で表され、その傾きはゲート断面積の逆数に比例する。

圧力や流量を適正に調整した状態のマシンラインとダイラインとの交点をプロセスポイントという。

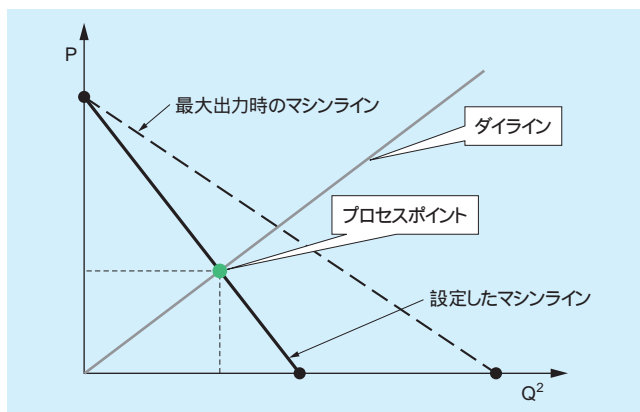


図2 PQ²線図上のダイラインの例
Fig. 2 Example of PQ² diagram with die line.

このプロセスポイントのQ²座標値に示される溶湯流量により、作動するプランジャーの速度が決まる。また、

P軸の座標値は、その速度のときに溶湯に発生する圧力（溶湯動圧）を表す。これは（4）式のベルヌーイの定理により求められる（単位は原文のまま）。

$$p = \left[(2g) \rho \frac{V_G}{C_d} \right] \dots \dots \dots (4)$$

p : 溶湯動圧 (kgf/cm²) ρ : 合金密度 (g/cm³)
g : 重力加速度 (981cm/s²)
V_G : ゲート速度 (cm/s) C_d : 流量係数

ここに、ゲート速度V_Gは

$$V_G = Q/A_G \dots \dots \dots (5)$$

Q : ゲートにおける溶湯流量 (cm³/s)
A_G : ゲート断面積 (cm²)

であるから、（5）式を（4）式に代入すると、溶湯動圧pはQ²に比例し、A_Gの2乗に反比例することがわかる。

流量係数C_dはアルミニウム合金の場合0.5が一般的に用いられているが、材料やゲートの厚さによって変化すると報告もある。

溶湯流量が少なくてもゲート速度が速い場合、例えば小さいプランジャー径を用いゲート断面積も小さい場合、（4）式により得られる溶湯動圧が大きくなり、充填抵抗が増加する。逆に大きなプランジャー径を用いゲート断面積も大きければ、溶湯流量に対して溶湯動圧が小さくなるので充填抵抗は小さくなる。一般的なアルミニウム合金ダイカストの場合、ゲート速度は25～40 m/s程度に設定することが多いため、この速度で発生する溶湯動圧の範囲内にプロセスポイントを設定することが望ましい。

2.4 溶湯の噴出状態の評価方法

ダイカストは仕上げ寸法の精度を確保するために短時間充填を行うことを特徴としている。ゲートから噴出する溶湯の状態は層流、液滴流、噴流の3つに大別されるが、この状態によって、得られる製品の品質は变化する²⁾。それぞれの噴出状態の概念を図3の模式図に示す。

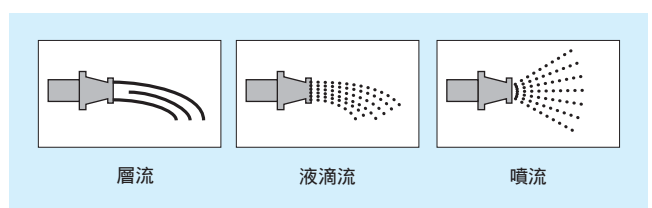


図3 噴出状態の例
Fig. 3 Schematics of discharging status.

噴出状態を示すJ値はWallaceらによって定義され、実験式（6）（CGS系）により算出される²⁾。

$$J = D \cdot \rho \cdot V_G^{1.71} \dots \dots \dots (6)$$

ここにDはゲートパラメータと呼ばれ、

$$D = A_G / (\text{ゲート幅} + \text{ゲート厚さ})$$

で表される値である。

J値の増加に伴い、層流から液滴流へと変化し、J値が

525を超えると、液滴流から噴流となり、内部も均質になると言われている¹⁾が、経験値であるためその根拠ははっきりしない。しかしゲートから噴出する溶湯の状態を定量化できるパラメータであるため、得られる品質との強い相関があると考えられる。4項でJ値と得られる特性との関係について検討する。

③ PQ²線図による条件決定手法

3.1 PQ²線図の作成と条件設定

前項にてPQ²線図を作成するために必要な充填時間、マシンライン、ダイラインについて説明した。図4にこれらをPQ²線図上に配置したものを示す。

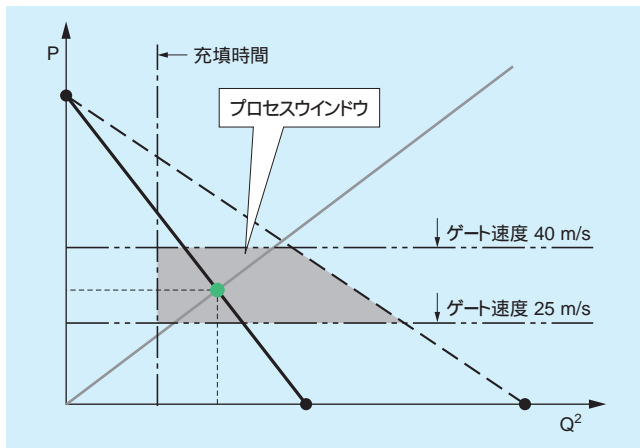


図4 完成したPQ²線図の例
Fig. 4 Example of complete PQ² diagram.

図4の充填時間、ゲート速度範囲および最大出力時のマシンラインに囲まれた領域をプロセスウインドウと呼ぶ。プロセスポイントをこのウインドウ内の中央に配置すると、外乱による充填時間の変化や、トラブルによるマシンラインの変化などによる影響を最小にすることができる。

溶湯流量に対してゲート断面積が小さい場合、ダイラインの傾きが大きくなる。また、逆にゲート断面積が大きい場合にはダイラインの傾きが小さくなる。充填抵抗の大きい薄肉製品の場合、ダイラインの傾きを小さくするほうが好ましい。しかし充填抵抗を下げるためにゲート断面積を大きく設定した場合には、プランジャー速度を上げることや、プランジャー径を拡大するなどの対策が必要となる。また、過剰な傾きのダイラインにすると、金型に溶損などが発生しやすくなるので注意を要する。

3.2 適用例

図5に、PQ²線図を実際の製品に適用した例を示す。本製品は質量約4 kgであり、生産効率上、複数のマシンで鑄造を行う必要がある。しかし、それぞれのダイカストマシンはマシンサイズや射出能力・特性も異なる。したがってそれらのマシンすべての能力を評価し、必要なゲート断面積と鑄造条件を選定することが必要となる。

本例では、型締力1,000 t、1,250 t、1,350 t、1,650 tの4機種をPQ²線図で評価し、設定したそれぞれのプロセス

ウインドウのすべてが重なる範囲の中央にプロセスポイントを設定し、ダイラインを描画して必要なゲート断面積を求めた。実際、この結果は生産ラインに適用している。

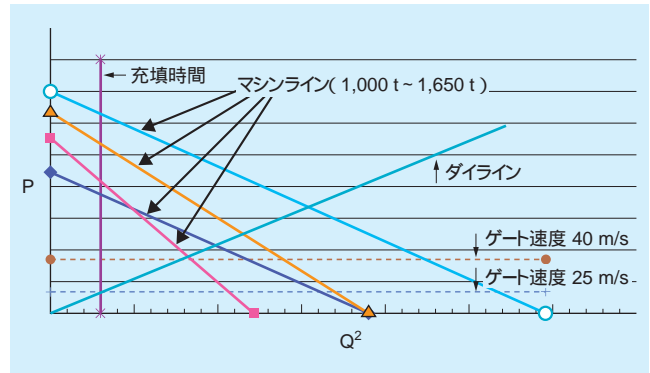


図5 製品への適用例
Fig. 5 Example of application of PQ² diagram.

④ J値と得られる特性との関係

ダイカストの鑄造条件選定には充填時間の算出が重要であるが、この方法ではゲートから噴出する溶湯の状態を考慮できない。以下に2項で述べた噴流状態を定量化するパラメータJ値について検討する。J値と製品内部の健全性との関係が把握できれば、方案設計時のゲート断面積設定、射出速度設定のための大きな指針となる。また、PQ²線図と組み合わせて条件設定を行うことにより、そのプロセスポイントで得られる材料特性の予測が可能となる。

本項では、実際の製品に対し、製品の健全性に及ぼすJ値の影響を確認した。製品の健全性を示す特性値としては、引張試験による伸びと製品内ガス量で評価した。材料は鑄物用合金であるJIS AC4A材および、ダイカスト用合金JIS ADC12材の2種類について比較検討した。

4.1 実験方法

実験に用いた装置は、横射出横型縮コールドチャンバダイカストマシンDC350CL-T (型締力3.4 MN) をベースに高真空ダイカスト法に適用できるように改造したもので、さらに金型キャビティ内減圧により溶湯をスリーブへ吸引給湯して射出できるようにした。これは製品内部の健全性に及ぼす巻き込みガスの影響を減少させることを目的としたものである。

図6に設備の概略を示す。本装置の特徴は、スリーブ下部に給湯口を持ち、その直下に加熱されたマウスピースと給湯管を有し、溶湯が常にマウスピースの一部を満たすように制御されていることである。

プランジャー径は 70 mm、試験には平板形状金型 (200 × 80 × 2 mm, D = 0.2 mm) を用いた。離型剤には日本アチソン株のDeltacast333-4 (100倍希釈)、チップ潤滑剤には花野商事株のDL-520を用いた。金型は型分割面のみ真空漏れ防止のためのシールを設けており、押出部などには特にシールを施していない構造のものを用いた。射出条件は、低速射出速度(0.2 m/s)、鑄造圧力は一定(オンメタル圧34 MPa)とし、高速射出速度のみ

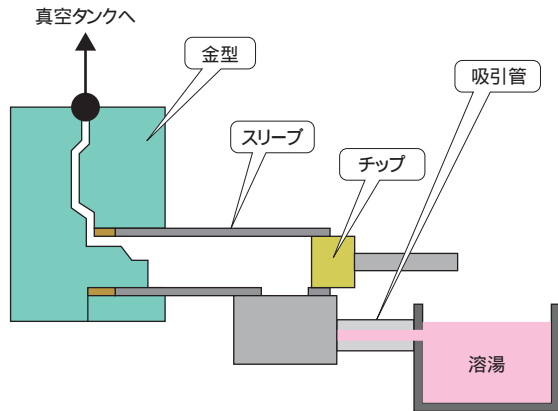


図6 実験装置の概略
Fig. 6 Schematic of die cast machine for testing.

変化させて充填時間およびゲート速度を変更した。高速射出速度はモニター装置によって計測された射出波形により、製品部充填中のプランジャー速度を求めた。

引張試験は表面と内部の健全性を同時に評価するため、鑄肌を残したままで行った。また、各材料とも試験に供したものはas cast（鑄放し）材である。

4.2 JIS AC4A材の場合

AC4A材はJISでアルミニウム鑄物用として規定されており、その代表組成はAl-9%Si-0.4%Mg-0.4%Mnである。ダイカストした場合、後述するADC12材に比べて鑄造性は劣るがじん性に優れている。最近では高真空ダイカスト法と組み合わせてサスペンションリンク、クロスメンバー、ボディフレームなどの構造部材にも適用されており、一部にはT6熱処理を施しているものもある³⁾。

日立金属でも同成分系の材料として「HALS-30D」を開発し、高真空ダイカスト法であるHIVAC-V法と組み合わせることでスノーモービル用フレーム部材や自動二輪車用シートフレームなどを生産しており、さらにアルミ展伸材との溶接を施して使用する製品も上市している⁴⁾⁵⁾⁶⁾。

図7にAC4A材をダイカストした平板試験品における、J値と伸び、製品内ガス量との関係を示す。

J値の増加に伴い伸び、ガス量ともに増加するが、250付近を境にガス量は減少に転じ、伸びはほぼ一定となる。この付近のJ値で、図3に示す液滴流の状態から噴流の状態に遷移するためと考えられる。また、100以下の場合、ガス量は低下している。これは液滴流から層流に変化しているためと考えられる。

J値200以下での伸びの低下については、この範囲の充填時間では鑄肌表面に湯じわが多数発生しており、それらの表面欠陥がき裂起点となり、伸びが低下したものと考えられる。

4.3 JIS ADC12材の場合

国内のアルミニウム合金ダイカスト製品の90%以上はADC12材が用いられている。その代表組成は1%程度のFeを含むAl-11%Si-2.5%Cuである。ほぼ共晶組成を有するために良好な流動性を持ち、Cuの含有により強度も優れる。また、Feの添加は金型への耐焼付き性の向上に効果的である。その反面、鉄系化合物の晶出によりAC4A

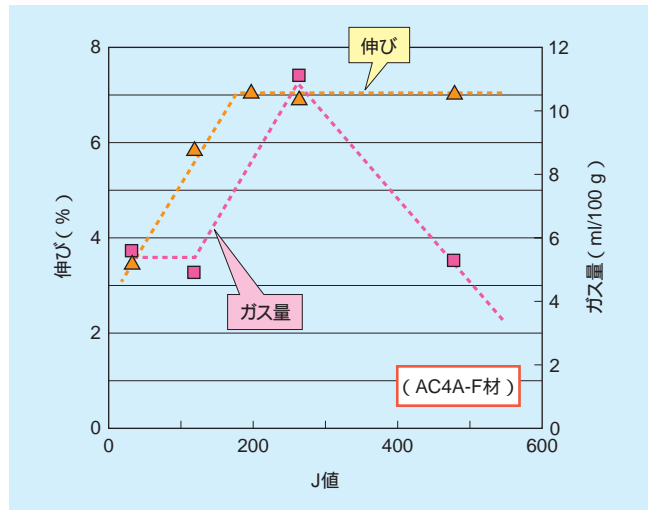


図7 J値と伸び、製品内ガス量との関係 (AC4A)
Fig. 7 Effect of J-factor on elongation and gas content (AC4A).

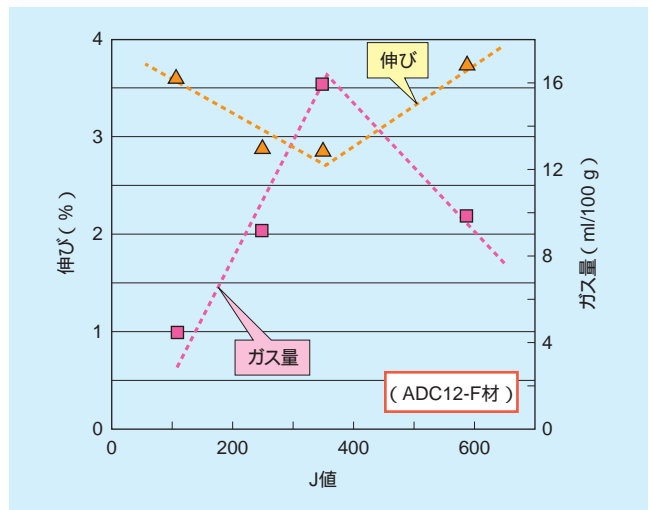


図8 J値と伸び、製品内ガス量との関係 (ADC12)
Fig. 8 Effect of J-factor on elongation and gas content (ADC12).

材ほどのじん性は期待できない。

図8に、この材料でダイカストした平板試験品における、J値と伸び、製品内ガス量との関係を示す。

J値が350程度で製品内ガス量は最大となり、伸びは最小となる。この値を境に、J値の増加に伴いガス量は減少し、伸びは増加する。また、J値が減少しても同様の傾向となる。この結果から、この合金の場合、350付近では液滴流であると考えられる。鑄造条件の選定にあたり、このJ値付近での充填条件設定は避けるべきであろう。先に述べたAC4A材とは、J値の低い側における伸びの傾向が異なる。

AC4A材の場合は亜共晶合金であり、マッシー型の凝固形態をとる傾向がある。したがって上述のように、J値の低い、すなわち充填時間の遅い状態で鑄造すると、流動性が悪化して鑄肌表面に湯じわや湯境を生じ、これらが破壊時のき裂起点となりやすいため、伸びが低下する傾

向になると説明できる。

これに対してADC12材は共晶合金であり、表皮形成型の凝固形態をとる傾向がある。そのため、鑄肌の表面状態は充填時間の影響をAC4Aほどは受けず、表皮の凝固後も肉厚中心部の流動性がある程度維持されるため、ガス類の巻き込みが比較的少ない、層流に近い状態で充填するほうが内部の健全性が向上する。そのためJ値の低下に伴ない、伸びの値が向上する傾向になると説明される。

以上の実験結果は単純形状での比較であるため、製品の成形において重要なファクターのひとつである形状因子を考慮していない。実製品では形状や適用できるゲート切断設備、あるいは切断部位の後処理方法などの制約条件も考慮する必要がある。また、本報で評価対象としていない他の製造条件などにより各種の条件が変化することも想定できる。

予測精度の向上のため、種々の製品に対してデータベースを積み重ね、製品設計にフィードバックすることが重要であろう。

4.4 鑄込み重量による差異の検証

J値と鑄造品特性との関係については前項で述べたが、製品サイズによってその傾向が異なっては実用上不便である。そこで、製品の大きさやD値を変化させて、前項と同様にJ値と伸びの関係について検討を加えた。

試験には日立金属のHIVAC-V法(1,350 t)と以下に示す専用の試験金型(2種類)を用いた。

- (A) 製品部重量2.5 kg, 肉厚3.5 mm, D = 0.3 mm
- (B) 製品部重量1.2 kg, 肉厚2.5 mm, D = 0.2 mm

鑄造材料は4.2項に示したAC4A材とした。

図9にJ値と伸びとの関係を、前項までに用いた350 t機での試験結果とあわせて示す。伸びは鑄肌面を残した

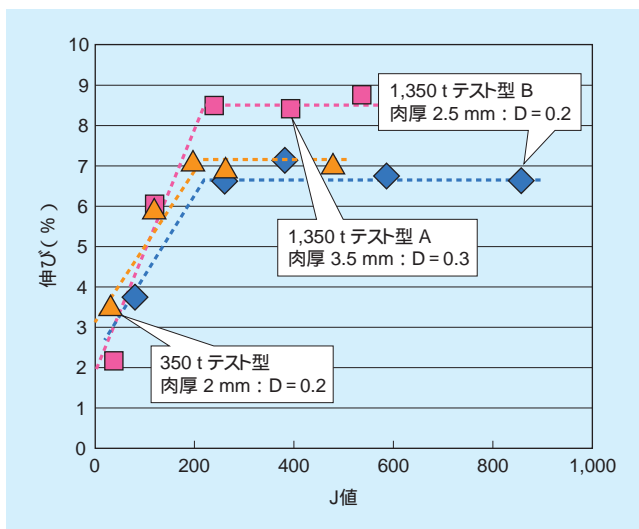


図9 J値と伸びとの関係 JIS AC4A
(350 t試験金型品, 1,350 t試験金型A品およびB品)

Fig. 9 Effect of J-factor for elongation by JIS AC4A
(350 t test product, 1,350 t test product A and test product B).

試験片による引張試験によって求めた。

いずれの場合もJ値とともに伸びは増加し、200を超えた所で一定となったことから、J値と得られる特性との関係はマシンサイズや製品重量の影響をあまり受けていない。このことは、製品特性を予測して充填条件を設定する場合に有効なパラメータであることを示している。

同様にして各種材料のデータを蓄積すれば、設計指針として極めて有効なものになるであろう。

5 結 言

本研究により以下の結論が得られた。

- 1) PQ²線図を用いて、大きさの異なるダイカストマシンに対して適用される金型のゲート断面設計手法を明確にした。
- 2) ダイカストプロセスで得られる製品の内部品質を予測するパラメータとしてJ値を適用できる可能性を見出した。
- 3) 亜共晶系アルミニウム合金であるAC4A材の場合、伸びはJ値とともに増加し、J = 250付近から一定となる。この傾向はマシンサイズや製品重量が変わっても同様である。
- 4) 共晶系アルミニウム合金であるADC12材の場合J = 350付近で製品内ガス量は最大かつ伸びは最小となり、その前後では伸び、ガス量ともに改善される傾向が見られる。

参考文献

- 1) E.A.Herman : GATING, NADCA, (1966)
- 2) Michael L.Cox et al : PQ², NADCA, (1968)
- 3) 田代ら : 2002日本ダイカスト会議論文集「アルミニウム合金サスペンション部品の開発」(JD02-37)
- 4) 日立金属技報Vol.22 : 「HIVAC-V法による溶接対応アルミダイカスト部材」, (2006) 23
- 5) 日立金属技報Vol.20 : 「HIVAC-V製二輪車用フレーム部品」, (2004) 21
- 6) 金内良夫 : 「真空ダイカストプロセスと当社における適用例」, 素形材, (2004, 2, P33-38)



金内良夫
Takao Kaneuchi
日立金属株式会社 熊谷工場
(株式会社アルキャスト)