簡易熱解析法を用いた低圧力鑄造用金型設計*

池田 準哉**・戸澤 勝利***・中村 元志***

小川 鈞****

Die designing for low pressure casting using simplified thermal analysis

UDC : 669.715 : 621.74.04 : 621.744

Junya IKEDA**, Katutoshi TOZAWA***, Motoyuki NAKAMURA***
and Hitoshi OGAWA****

A simplified thermal analysis method for dies developed by the authors was applied to production dies. The positions of cooling channels in a die were determined in this method. The die with such channels was made for production of automotive parts. The temperature profiles on the cavity surfaces agreed with those calculated with this method. Casting defects such as shrinkage were reduced with this die.

(Received September 18, 1978)

1. 緒 言

鑄型内で溶湯を先端から湯口または押湯方向に順次指向性凝固するように冷却すれば鑄造欠陥の少ない健全な鑄物を作ることができる。熱解析装置を用い、カーボン紙上でシミュレーションすることにより、比較的簡単にアルミニウム合金鑄物を指向性凝固させるような金型を作ることのできる金型熱解析法について前報¹⁾で報告した。

本報告ではこの熱解析法を用いブレーキ部品鑄造用低圧力鑄造用金型の冷却系の決定を行ない、鑄造欠陥を減少し、鑄造サイクルタイムの短縮効果を得ることができたことを述べる。

2. 実験方法

実験に用いたブレーキ部品鑄造用金型を Fig. 1 に概念図で示す。低圧力鑄造を行なうのに便利のように湯口を囲むように製品4個を配列した鑄造方案である。

Fig. 1 (A) は平面図、(B) は側面図を示す。金型寸法は、300×600×100 mm、金型材質は SKD 61 製でヒル石系の塗型剤を塗布した。

使用したアルミニウム合金は AC 2 B、鑄造温度 700

℃、加圧圧力は大気圧 + 0.2~0.3 kg/cm²、製品は4個どり3.5kgで鑄造サイクルタイムは5分である。

金型簡易熱解析手法は前報¹⁾に詳細を述べたが、大別すると次の4段階となる。

- (1) 第1段階：計算および図面上の解析
溶湯の充填、凝固方向の想定 (Fill Path Diagram)。指向性凝固させるように鑄物各部の温度設定。
シミュレート操作を行なう金型断面の選定。
熱解析計算 (キャビティ面温度、指向性凝固させるため

Fig. 1 Die design used for thermal analysis.

* 軽金属学会第50回春期大会 (51-5) にて発表した。

** 株式会社豊田中央研究所 (名古屋市)。Toyota Central Research and Development Labs., Inc. (Nagoya).
現在トヨタ自動車㈱ (豊田市)。Presently at Toyota Motor Ltd. (Toyota).

*** 株式会社豊田中央研究所 (名古屋)。Toyota Central Research and Development Labs., Inc. (Nagoya).

**** アイシン精機㈱ (刈谷市)。Aisin Seiki Co. Ltd. (Kariya).

Fig. 2 Die sections used for thermal analysis and comparison of isothermal target line and simulated line by use of calculated cavity surface temperature.

に必要な温度勾配)。

シミュレーション操作による金型冷却管 (または加熱管) の位置, 寸法の決定。

(2) 第2段階: 金型の製作

金型に実際に取付けられるように冷却系を修正し, これをもととして金型構造を決定し, 金型を製作する。

(3) 第3段階: 金型冷却系の評価

金型内各部に熱電対を取付け, 計算による金型内温度分布が実測と一致していることを確認する (一致するように冷却条件を修正する)。

(4) 第4段階: 鋳物の評価

鋳物が希望どおりの指向性凝固を行なっていることおよび鋳造不良の発生しないことの確認。

3. 実験結果

3.1 金型熱解析

金型は Fig. 1 に示すように湯口を中心とし4個の製品がそれぞれ対称となるように配置された鋳造方案であるから, 製品1個分 (金型の1/4の部分) を対象として熱解析を行なった。Fig. 2 の Die plane I は Fig. 1 (A) で左下側の製品1個分の金型部分を示す。図中には熱解

Fig. 3 Die sections used for thermal analysis and comparison of isothermal target line and simulated line by use of calculated cavity surface temperature.

Fig. 4 Time and temperature cycle for a die shot.

析結果も併記してあるが, 詳細は後述する。製品部を図中に示したように①-⑭の14個のセクションに分割したと考え, 各部について熱解析を行なう。

溶湯は湯口から順次①②③④⑤⑥⑦⑧⑨⑩⑪⑫⑬⑭の順に充填し, この逆の順に凝固するとすれば理想的な指向性凝固を行なうことができる。このときの各セクションに充填される溶湯温度は, 鋳造温度が 700°C , ストック中の溶湯温度低下のため①セクションが 680°C , 以後の順に $1^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ の割合で温度低下するとして決定した (鋳型中での凝固方向, 溶湯温度をどのように決めても解析者の自由であるが, あまり極端に現実と異なる想定を行なうと, 熱解析した結果の冷却系が現実の金型に取付不能ほどに複雑な形状となる。この温度は後述する(1)式の T_i に相当する)。

また冷却系を決定するシミュレーションを行なう金型断面は Fig. 2 の Die plane I に示すように湯口方向への凝固を検討する断面, Fig. 2 の Die plane II に示す金型上下面との関係を検討する断面 (Fig. 1-Y 断面), Fig. 3 に示す2個の製品間の関係を検討する断面 (Fig. 1-Z 断面) の3つの断面とすると有効であると判断した。

3.1.1 金型キャビティ面温度

Fig. 4 は注湯から鋳物離型に至る鋳造1サイクル間の金型内の温度変化を概念的に示す。注湯直前の温度

(T_{di})の金型に注湯すると、 t_1 秒で T_i まで温度が上昇し、以後離型時温度(T_e)まで t_2 秒で下り、型の清掃、離型剤塗布を行ない注湯準備完了すると再び T_{di} となる。1 铸造サイクルタイムは t_c 秒である。

金型のキャビティ面温度(T_d)は、この1 铸造サイクルタイムにおける温度変化の面積平均温度と考え、次式から計算する。

$$T_d = T_e + \frac{1/2(T_i - T_e) \times (T_1 + T_2) - 1/2(T_e - T_{di}) \times t_3}{t_c} \quad (1)$$

この実験に用いた部品は铸造サイクルタイム(t_c)が5分必要であったが、熱解析して金型冷却系を決定するにあたり铸造サイクルタイムを4分に短縮しようとした。

したがって低圧力铸造の加圧時間(t_1)105秒、鋳型内保持時間(t_2)105秒、離型および铸造準備時間(t_3)30秒の铸造条件で健全な鋳物のできる金型の製作を目標とした。

離型時の金型キャビティ面温度(T_e)は、多種の低圧力铸造用金型について実測した結果湯口に最も近いセクション(たとえばFig. 2の①セクション)において

T_e = 溶湯の凝固開始温度 - (凝固開始温度 - 凝固終了温度) 3/4

とすると近似的によく合うことを経験的に知った。

ここでは使用合金(AC 2 B 相当)の熱分析結果から

$$T_e = 632^\circ\text{C} - (632^\circ\text{C} - 520^\circ\text{C}) 3/4 \\ = 548^\circ\text{C}$$

をFig. 2のDie plane Iの①セクションの T_e とし、以後理想的な指向性凝固を行なう時の離型時の金型キャビティ面温度は、これより6°C/cm低くなるとして各セクションの T_e を決定した。注湯直前の金型キャビティ面温度(T_{di})は離型時(T_e)より10°C低い値を採用した。金型キャビティ面の注湯後の到達最高温度(T_i)は、3.1に述べたようにして求める。

これらの値を(1)式に入れると各セクションごとに金型のキャビティ面での面積平均温度(T_d)を求めることができるが、実際には溶湯と金型間のエアギャップ、塗型、離型剤の効果、金型入り部分の効果など熱伝導の不連続部分が非常に複雑で計算困難なため、経験値として低圧力铸造の場合計算して得た T_d より鋳物中央部は50°C、端部は80°Cを一律に減じた値を金型キャビティ面の面積平均温度(T_{da})として、Fig. 2中の①~⑫の各セクション部に記入してある。

Fig. 5はこのようにして計算した T_i 、 T_e 、 T_d 、 T_{di} と各セクション位置との関係を示す。

3.1.2 金型内に必要な温度勾配

Fig. 4に示した铸造サイクルで铸造が行なわれているとき、金型キャビティ面温度をFig. 5に示したように

Fig. 5 Calculated die cavity surface temperature for directional solidification.

変化させると理想的な指向性凝固を行なうことができる。

Fig. 5の関係を維持するために、各セクションごとに凝固過程で放出する熱量を必要量だけ金型に吸収するように、金型内に温度勾配をつけてやればよい。これを金型内の必要温度勾配の逆数と呼び次式で求める。

$$\Delta T / \Delta d = Q / K \cdot A \quad (2)$$

K : 金型の熱伝導率、 A : 鋳物と金型の接触面積

Q : 単位時間当りに鋳物の放出する熱量

$Q = \{\text{そのセクション部の潜熱}(\text{重量} \times \text{潜熱}) + \text{溶湯温度降下で失う熱量}(\text{比熱} \times \text{重量} \times \text{温度降下}) + \text{通過する溶湯が金型に与える熱量}(\text{比熱} \times \text{通過溶湯重量} \times \text{そのセクションでの温度降下})\} \div 1 \text{ サイクルタイムの時間}$ で求めることができる。

(2)式から各セクションごとに求めた必要温度勾配を金型内のどの部分で比較してもよいが、ここではシミュレーション操作に便利のように、指向性凝固させるために必要な金型キャビティ面温度(T_{da})より10°C低い温度が、金型内のどの位置にあるかを比較検討の対象とした。

このために、(2)式の逆数を10倍した値をFig. 2金型部分の中に点線で示してある。鋳物を理想的に指向性凝固させるために必要な温度(T_{da})がFig. 2の製品部分の各セクションに示した値であるためには、金型内の点線の位置にそれより10°C低くなるような温度勾配を持たせればよいことになる。各セクション内の T_{da} は一定として計算してあるため、点線は製品断面と平行線と

なっているが、現実には前後のセクションと熱的な相互関係を持つため、このようにはならない。

そこで前報¹⁾に示した熱解析装置を用い、カーボン紙上で、今までに得た各セクションの T_{da} と点線のように計算して得た必要温度勾配とからシミュレーション操作により金型表面温度を求めた。Fig. 2 および Fig. 3 の金型外部にこのようにして求めた金型温度を示してある。

ただし Fig. 2 の Die plane I 金型上部は、Fig. 1 からわかるように現実には金型中心部であり、また2個の鋳物の中央部でもある。しかし、この断面は金型構造上から冷却管を通すことは不可能である。そこで Fig. 3 の断面に示したような位置に冷却管を入れたと想定すると、その冷却効果は Fig. 2, Fig. 3 に Imag として示した位置におよぼと考えられる。

したがって金型外周部が大気中に熱を放散して金型冷却効果を持つと同様に、Imag の位置でもこの断面に現われない冷却管による放熱効果があると考え、各セクションの T_{da} と点線のように得た必要温度勾配とからシミュレーション操作を行ない、金型表面温度と同様にして Imag と記した部分の温度を決定した（この温度を利用して Fig. 3 の断面図上でさらにシミュレーション操作により冷却管温度、位置を決定する）。

金型キャビティ面温度 (T_{da}) と金型表面温度（または Imag の温度）が決まると、この温度を用いてシミュレーション操作によりカーボン紙上に必要温度勾配を持つ等温線（シミュレート操作上は等電位線）を画くことができる。

Fig. 2 の中には、各セクションの T_{da} より 10°C 低い温度（点線で示してある）と一致する等温線のみ実線で示してある。

金型に冷却管を設定したとき金型内の実線で示した位置が、それぞれ対応するセクションの金型キャビティ面温度より 10°C 低くなれば、この鋳物を指向性凝固させることができる。したがってこの実線で示した等温線を計算で求めた目標等温線と称し、金型冷却条件の比較のために用いる。

3.1.3 金型冷却管位置

Fig. 2 Die plane I 上部 Imag の位置の温度が左方から順に 397°C 、 417°C 、 432°C と決まった。この断面に現われる部分には金型構造の関係で冷却管を挿入することはできないが、この部分の下側の左方から直線的に冷却管を入れ Imag の位置がこの温度になるように冷却すればよいことがわかる。

Fig. 3 の Die plane III の断面で2個の Imag 432 と示した部分の左側部分が Fig. 2 の Die plane II の上部 Imag 432 と示した部分に相当する。Fig. 3 を用いてま

Fig. 6 Die design with cooling system.

Fig. 7 Comparison of simulated isothermal line and measured $T_{da}-10^{\circ}\text{C}$ line.
(Dies: Not air cooled.)

ったく同じシミュレーション操作により冷却管が図の位置に、図の大きさに 395°C であればよいことを決定できる。この操作を繰返し、得られた結果を実際金型に取付けられるように若干修正し、Fig. 6 に示すような金型冷却系を決定し、この金型を製作した。

3.2 金型冷却系の評価

3.2.1 冷却しない金型内の温度勾配

Fig. 7 に示した金型のXおよび⊗印で示した位置（X：金型表面に直接溶接，⊗：金型内のキャビティ面より

Fig. 8 Comparison of T_{da} by conventional die or calculated die for directional solidification.

Fig. 10 Comparison of T_{da} by cooled die or calculated die for directional solidification.

Fig. 9 Comparison of simulated isothermal line and measured $T_{da}-10^{\circ}\text{C}$ line.

(Dies: Air cooled)

5 mm の位置に溶接) に熱電対を取付けて、鋳造中に 1 鋳造サイクルの温度変化を測定した。この実測温度から得たキャビティ各セクションおよび金型表面の T_{da} を Fig. 7 中に示してある。またこれらからシミュレーションで求めた $T_{da}-10^{\circ}\text{C}$ の等温線を各セクションに対応して実線で示してある。Fig. 2 にすでに示した計算による目標等温線を比較のため点線で示してある。指向性凝

固を行なわせるために必要な目標等温線と、冷却しない金型内の温度分布の差を矢印で示してある。特にセクション⑤⑥⑦⑧⑨に相当する部分で大きくずれていることがわかる。

Fig. 8 は理想的な指向性凝固を行なうように、計算から求めた金型キャビティ面温度 (T_{da}) と冷却しない金型で実測した温度から得た金型キャビティ面温度を比較して示す。冷却しない金型のセクション④⑤⑥⑦⑧⑨で高温側にずれており、特に⑤⑥⑦の部分で温度が変わらず、ほとんど指向性凝固の行なわれていないことがわかる。

3.2.2 冷却した金型内の温度勾配

Fig. 6 のように冷却管を設置した金型内に Fig. 7 に示したと同じ位置に熱電対を取付け、鋳造中に 1 鋳造サイクルの温度変化を測定した。

この実験温度から得たキャビティ各セクションおよび金型表面の T_{da} を **Fig. 9** に示す。またこれからシミュレーションで求めた $T_{da}-10^{\circ}\text{C}$ の等温線 (実線) は、目標等温線 (点線) に相当よく一致していることがわかる。

Fig. 10 には、計算から求めた金型キャビティ面温度と冷却した金型で実測した温度から得たキャビティ面温度とを比較して示した。計算値からややずれているが、鋳物先端から湯口方向に向かって一定割合で温度降下し、指向性凝固はしていることがわかる。

3.3 鋳物の品質評価

熱解析して得た冷却管を取付けた金型と冷却していない金型を用いて、低圧力鋳造して作ったブレーキ部品の品質を鋳物の比重分布を比較して検討した。

両方の金型について同様の鋳造条件で同じ鋳物を作ったが、前述したように鋳造サイクルタイムは冷却した金型では 4 分、冷却しない金型では 4 分で凝固完了しなか

Fig. 11 Specific gravity of castings.

ったため5分と異なっている。

熱解析に使用したセクションをさらに分割するような形で鋳物を約200個に切断し、それぞれの比重を測定し、鋳物内の比重分布図を作成した。Fig. 11にはこのようにして作った鋳物の比重分布図のうち、比較しやすいように Fig. 2 の Die plane I に相当する部分を示す。

Fig. 11 (A) は、冷却しないで金型で作った鋳物の比重分布図である。上図は上型、下図は下型に鋳造した部分に相当する。黒く塗りつぶした比重の小さい部分が、鋳物中央すなわち Fig. 7 のセクション⑥⑦⑧付近に存在することがわかる。Fig. 8 と比較しても、この部分は指向性凝固の行なわれにくい部分であることは想像できる。切断して観察するとセクション⑥と⑦の境界に大きいひけ欠陥の存在する鋳物が多かった。これらが強度不足または圧もれ不良などの製品不良となる。

Fig. 11 (A) ではこの中央部の比重の低い部分が上型より下型部分に多く、低圧力鋳造の上型より下型への指向性凝固の効果は認められる。

Fig. 11 (B) は、冷却した金型で作った鋳物の比重分布図である。全面的に比重が高い（すなわち鋳物が健全である）というわけにはいかないが、少なくとも黒く塗りつぶすほど比重の小さい部分はほとんどなく、鋳物先端は健全で湯口方向に次第に比重が小さくなるように思われる。

Fig. 9 でも指摘したように、セクション③④⑤に相当する部分付近が金型を冷却したにもかかわらず、計算値より温度が高くまだ冷却不足であったため、Fig. 11 (B)

の特に下型部でこの部分の比重が低くなった。

しかし、Fig. 11 (B) に示す程度の比重分布の場合には欠陥はほとんどなく、あっても連続していないため、著しい強度低下または圧もれ不良などの製品不良とはならない。

4. ま と め

先端から湯口方向に指向性凝固させて、鋳造欠陥のない鋳物を作るような冷却系を有する金型を作る目的で、製品4個取りの低圧力鋳造用金型を、先に提案した金型簡易熱解析法を用いて冷却系を決定して製作した。

(1) 金型簡易熱解析法による計算とシミュレーション操作により決定した金型内各部温度と、実際にその冷却系を用いて製作した金型内の温度は相当よい一致を示した。

(2) 冷却した金型と冷却しない金型では当然金型内温度分布は変わっており、比重分布図から推定した鋳物内の健全性から、冷却しない金型では目標等温線から大きく外れる部分に鋳造欠陥が多く発生し、冷却した金型では予想に近い指向性凝固の行なわれていることがわかった。

(3) 金型熱解析を行ない冷却系を決定することにより、鋳造サイクルを5分から4分に短縮することができ、かつ健全な鋳物を作ることができた。

参 考 文 献

- 1) 池田, 林, 戸沢, 中村: 軽金属, 28 (1978), 180.