

## 技術資料

## Technical Data

## 数値解析によるダイカストの離型抵抗予測

河野正道\*<sup>1</sup>, 宇野 聡\*<sup>1</sup>, 横井直樹\*<sup>2</sup>

## Prediction and Evaluation of Ejecting Stress Distribution at Die Surface of Die-Casting through Numerical Analyses

Masamichi KAWANO, Satoshi UNO and Naoki YOKOI

## Synopsis

The equation of cast ejecting stress at a die surface was derived by considering Fe-Al compound layer formation at the boundary between SKD61 and ADC12. The activation energy  $Q$  of  $\int(\exp(-Q/R/T))dt$  was estimated at 313 kJ/mol using data of previous soldering. The equation was incorporated into MAGMASOFT, then the influences of temperature of molten ADC12, internal cooling condition of die and surface treatment on ejecting stress were evaluated. The heavier the soldering, the higher the ejecting stress. Numerical results indicated that a lower temperature of molten ADC12 and die cooling by inner water line leads to lower ejecting stress. A marked decrease of ejecting stress was observed in the case of surface treatment "AMICOAT<sup>®</sup>-D" even under the condition of higher temperature molten ADC12 with no internal water cooling of the die.

## 1. 緒 言

ダイカスト casting は、アルミ合金などの熔融金属（以下、溶湯という）を金型のキャビティ内に短時間で圧入し急速凝固させることによって、寸法精度の高い複雑形状品を高効率で製造する方法である。

ダイカスト金型のキャビティ面は、600～700℃の溶湯との接触によって450～550℃に加熱されることがある。このように高温となる部位では、鋳造品取り出し時にアルミ合金が金型に溶着して残存する「焼付き」が発生しやすい。焼付き部では、鋳造品と金型の界面にFe/Al反応層が形成されている。

焼付きは製品の表面品質や寸法精度を害するため、金型に付着したアルミ合金は除去しなければならない。そのために鋳造の一時停止を余儀なくされ、生産性が大きく低下する。また、焼付きが顕著で除去し切れない場合は金型の交換が必要となり、型費の増加を招く。以上の

理由から、焼付き回避がダイカストの重要課題となっている。鋳造方案の策定においては、焼付きやすい部位の把握と、焼付き回避策を講じておくことが求められる。

焼付きへの影響因子は、表面処理の種類、内冷回路の位置と水量、溶湯温度（以下、湯温という）や射出条件など多岐にわたる。これらの要因を鋳造の試行錯誤で適正化する試みは非効率的であるうえ、最適解を得ることも容易ではない。そこで、焼付き回避策の検討には、諸条件を系統的かつ容易に変化させられる湯流れ解析を積極利用することが多い。

湯流れ解析による焼付き回避策の検討においては、工程設計の確度を高めるため、冶金現象（拡散によるFe/Al反応層形成）に準じた指標が必要と考えられる。そこで、鋳造品を金型から取り出す際の「離型抵抗」に着目し、反応層形成との相関づけを試みた。本報では、実験で求めた離型抵抗の予測式を湯流れ解析に組み込み、焼付き評価指標としての有効性を検証する。

2017年3月7日 受付

\* 1 大同特殊鋼(株)技術開発研究所 (Corporate Research &amp; Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

\* 2 大同特殊鋼(株)渋川工場 (Shibukawa Plant, Daido Steel Co., Ltd.)

## 2. 反応層形成を考慮した 離型抵抗の数式化

### 2. 1 活性化エネルギー

焼付いた金型の表面における元素分布を Fig. 1 に示す。金型 SKD61 の Fe と 鋳造品 ADC12 の Al を 主成分とする反応層が糊の役割を果たし、金型と鋳造品を接着している。反応層中には Si や Mn や Cr など存在する。

一般に、拡散に支配されて生成する相の厚さは、保持時間の平方根に比例して増加する放物線則に従う。そこで、焼付きの原因である Fe/Al 反応層に関して、本報では以下2点の仮定を置く。

$$\textcircled{1} X = \sqrt{t \cdot (D_0 \cdot \exp(-Q/R/T))}$$

② 焼付き開始時の X の値  $X_c$  は t と T によらず共通

ここで、X は Fe/Al 反応層の厚さ、t は接触時間、 $D_0$  は定数、Q は反応層形成の見かけの活性化エネルギー、R は気体定数、T は絶対温度である。 $X_c$  の値が不明な条件下でも、仮定①②から次式が導かれる。

$$t_A \cdot \exp(-Q/R/T_A) = t_B \cdot \exp(-Q/R/T_B)$$

すなわち、接触時間と温度を変化させて焼付きの有無を評価すれば Q が得られる。

SKD61 と ADC12 の固体同士を接触させた実験結果<sup>1)</sup>から、焼付きが発生する t と T の広範な組合せに対して Q を算出すれば、Table 1 に示す通り平均値 313 kJ/mol であった。Q のばらつきは 10 % 程度と小さく、仮定①②には大きな誤りが無かったと考えられる。

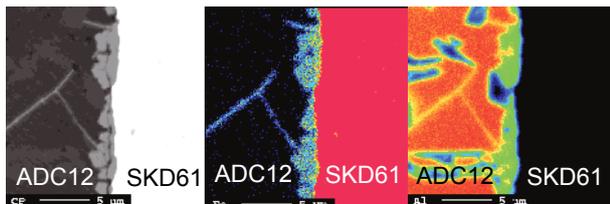


Fig. 1. Distribution of Fe and Al at soldering part.  
Fe/Al compound layer is observed.

Table 1. Estimated activation energy Q for Fe/Al compound layer formation. Previous soldering data<sup>1)</sup> of SKD61 and ADC12 was used.

$t_A$ / s	$T_A$ / K	$t_B$ / s	$T_B$ / K	Q / kJ / mol	average
100	786.9	1000	754.1	346.2	312.7
100	786.9	10000	721.4	331.7	
100	786.9	100000	686.9	310.3	
1000	754.1	10000	721.4	318.3	
1000	754.1	100000	686.9	295.0	
10000	721.4	100000	686.9	274.8	

SKD61 と ADC12 の組合せで得られた  $Q = 313 \text{ kJ/mol}$  は、純 Fe と純 Al の固体同士を接触させた場合の Fe/Al 反応層の厚さから得られた  $Q = 226 \text{ kJ/mol}$ <sup>2)</sup> に対し 1.4 倍と大きい。純 Fe に対して SKD61 は炭化物が多く、純 Al よりも ADC12 は高 Mn である。鋼中の炭化物は反応層形成による溶損を遅らせ<sup>3)</sup>、Al 合金中の Mn は焼付きを軽減する<sup>4)</sup>。以上より、SKD61/ADC12 と純 Fe/ 純 Al で Q に差を生じた大きな要因として、化学成分による反応性の違いが示唆される。

### 2. 2 離型抵抗 F の定量評価

型締め力 135 ton の東芝機械(株)製 DC-135JT ダイカストマシンを用い、鋳抜きピン部の離型抵抗 F を評価した。実験条件を Fig. 2 と Table 2 に示す。SKD61 の鋳抜きピンは直径が 8 mm あるいは 16 mm で、意匠面から 10 mm 突き出している。射出は、この突き出したピン部を直撃するようにおこなわれる。焼付き部の最表面温度を正確に推定するため、鋳抜きピン湯口側の表面下 1 mm 位置に熱電対を装入した。

鋳造材は ADC12 である。湯温、離型剤の塗布時間、鋳抜きピンの内冷強度を制御して熱電対位置の最高到達温度を 390 ~ 500 °C で変化させた。

離型抵抗 F MPa は、押し出しピン背部のロードセルで計測した離型力 P N を鋳抜きピンの表面積で除して求める。P と F の差異を Fig. 3 に示す。P は直径の大きい鋳抜きピンの方が高く、焼付きにおよぼす形状の影響を顕著に受ける。一方、F では鋳抜きピンの直径によらず焼付きの程度を一義的に評価できた。面圧である F を用いることによって、ADC12 の強度との比較も可能になる。

Fig. 3(b) の示す通り、焼付きが温度変化に敏感な領域が存在する。432 °C の場合に 5 MPa であった F は、14 °C 上昇すると 10 MPa へと倍増する。更に、34 °C の高温で 480 °C になると F は 20 MPa に達する。このように、金型の最高到達温度が 15 ~ 35 °C 変化するだけで、焼付きの程度に大差を生じることがある。

焼付きが発生する最表面の温度  $T_s$  は、表面下 1 mm に装入した熱電対の実測値と FEM (Finite Element Method) 解析の照合によって推定した。円柱素材の表面に加熱と冷却の熱サイクルを付与した場合の断面内温度推移を Fig. 4 に示す。焼付きに支配的な影響をおよぼすと考えられる最高温度付近では、表面下 1 mm に対して最表面は 25 °C 高温と見積もられた。以上より、Fig. 2 の熱電対で測定した値に 25 °C を加算して最表面温度  $T_s$  と扱う。

表面処理なしの場合，臨界温度とされる  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>5)</sup> より低温の  $T_s = 459\text{ }^{\circ}\text{C}$  でも焼付いたが， $T_s < 445\text{ }^{\circ}\text{C}$  では焼付きがほぼ皆無であった．また，高温であっても表面処理によって焼付きは劇的に軽減され，Al との反応性が悪い膜を金型表面に形成させる効果も再確認できた．

$T_s$  と  $\exp(-Q/R/T_s)$  の推移の一例を Fig. 5 に示す．Fig. 5(b) のグラフの面積  $S = \int (\exp(-Q/R/T_s)) dt$  が，Fe/Al 反応層の形成を考慮したパラメータとなる．面積の  $S$  は，3～13 秒における  $700\text{ K}$  以上の履歴，特に最高温度付近の推移でほぼ決まる．

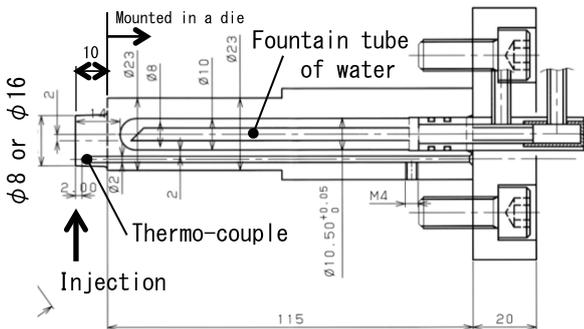


Fig. 2. Core-pin like specimen of soldering experiment on die-casting. Dimension is given in millimeters. Specimen is mounted in a die located close to the injection gate. A thermo-couple is inserted at 1 mm below the surface of the specimen.

Table 2. Conditions of die-casting.

Factors		Specifications	Notes
Al-alloy		ADC12	
Molten temperature		670~700 °C	Furnace
Cast weight		600±15 g	
Plunger motion	Early stage	0.2 m/s	
	High speed	1.6 m/s	
Cast pressure		65 MPa	
1 cycle	Total time	31~35 s	0.5 MPa
	Solidification	8 s	
	Air blow before spray	0.5 s	
	Spray	2~6 s	
	Air blow after spray	1.5 s	
Water cooling	Temperature	23 °C	Inlet
	Volume flux	0~66 m <sup>3</sup> /h	

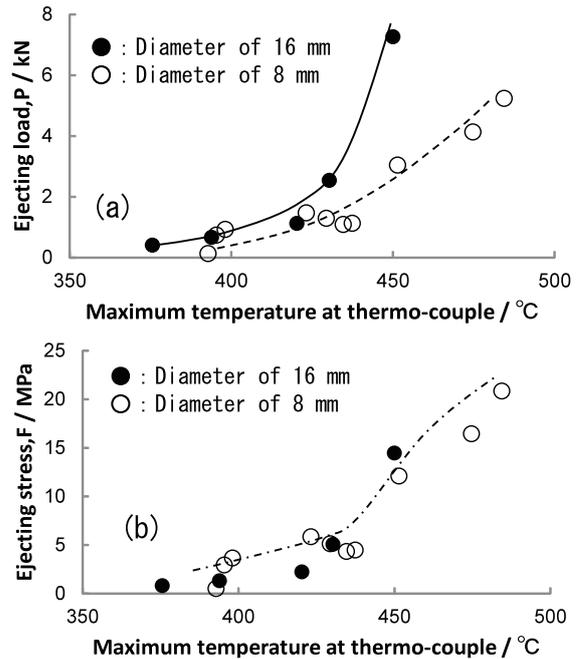


Fig. 3. Difference between (a) ejecting load P and (b) ejecting stress F. F is given by considering the surface area of core-pin then size effect is compensated.

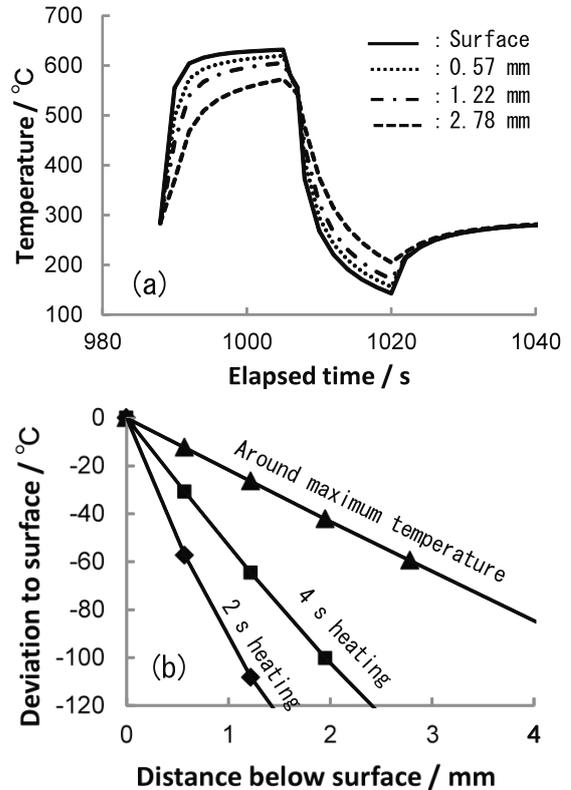


Fig. 4. Estimated temperature distribution through FE-analysis. Marked influence of (a) time and (b) depth from a surface on temperature can be seen.

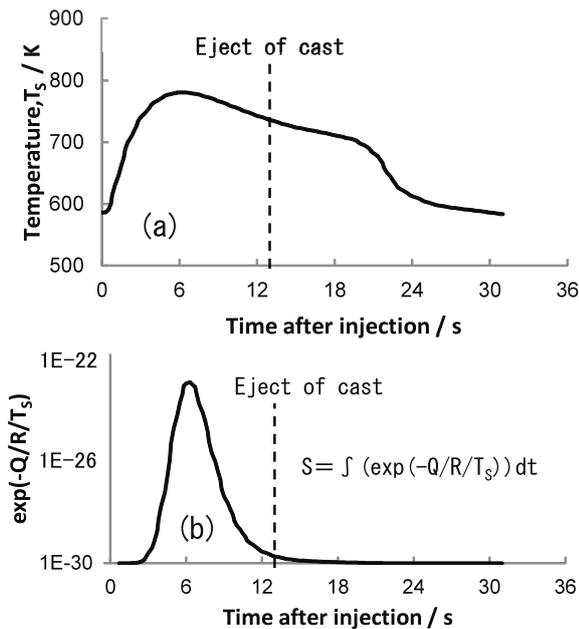


Fig. 5. Transition change of (a) surface temperature  $T_s$  and (b) soldering parameter  $S = \int(\exp(-Q/R/T_s))dt$ .

パラメータ  $S$  と離型抵抗  $F$  の相関を Fig. 6 に示す。表面処理なしに対し、大同 DM ソリューション(株)製の塩浴窒化の PS (Prevents Scoring and Scuffing) 処理を施すと  $F$  が約 1/3 に低下する。同じく大同 DM ソリューション(株)製の PVD 皮膜のアミコート<sup>®</sup>D では、 $F$  が PS 処理の約 1/3 となり、表面処理なしに対しては約 1/9 にまで離型抵抗が下がる。

$F$  と  $S$  の間には明瞭な正の相関が存在し、離型時の面圧は Fe/Al 反応層の厚さに強く影響されることが分かる。Table 3 に示す通り、定数の  $C1$  と  $C2$  を用いて  $F = C1 \cdot S^{C2}$  の単純な式で精度良く離型抵抗を表現できた。

### 3. 従来手法との違い

離型抵抗  $F$  の特徴は、人為的に決定される臨界条件を含まない、温度変化に敏感、アルミ合金の強度と比較可能、の3点である。従来の焼付き評価では、臨界温度<sup>5)</sup> や溶着判定基準温度<sup>6)</sup> を定め、金型表面における任意の部位がこれらの温度を越えた場合に焼付きを評価する。このような手法は属人的であり、評価部位の数や選び方によって基準が変化する。一方、金型とアルミ合金が接触している間のパラメータ  $S$  には人為的な要素が介在せず、 $S$  の値は評価部位の選定方法にも影響されない。したがって、 $F$  は従来法よりも客観的な指標と言える。

また、パラメータ  $S$  が温度を  $\exp$  項に含むため、 $F$  は従来法より温度変化に敏感である。例えば、条件 1 =

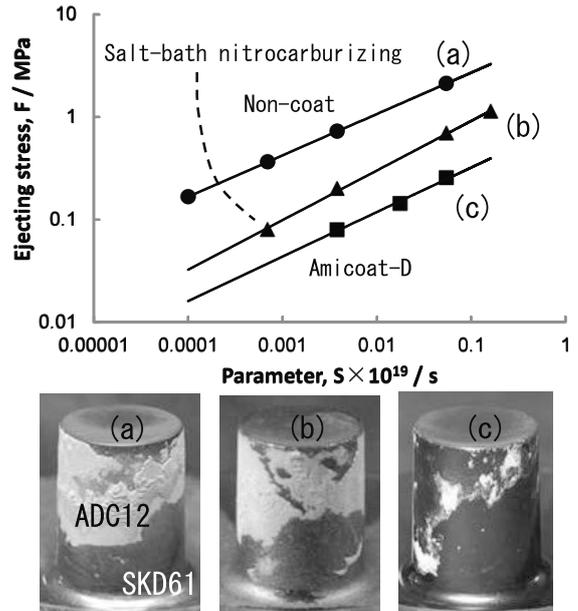


Fig. 6. Relationship between soldering parameter  $S$  and ejecting stress  $F$ .

Table 3. Linear formularization of ejecting stress  $F$  with soldering parameter  $S$ .

Surface treatment	$F / \text{MPa}$
None	$6.85 \cdot (S \cdot 10^{19})^{0.404}$
Salt-bath nitrocarburizing	$2.79 \cdot (S \cdot 10^{19})^{0.484}$
PVD (AMICOAT <sup>®</sup> -D)	$0.87 \cdot (S \cdot 10^{19})^{0.434}$

520 °C × 10 秒と条件 2 = 550 °C × 4 秒を比較すると、500 °C (773 K) 以上の面積を評価する方法<sup>5)</sup> では条件 1 = 条件 2 となる。一方、パラメータ  $S$  では条件 1 < 条件 2 となり、短時間でも高温になる方が焼付き顕著となるケースを  $F$  では判別しやすい。

## 4. 湯流れ解析による検証

### 4. 1 湯流れと金型温度

溶湯の流動と金型温度の推移を MAGMA GmbH の MAGMASOFT で見積った。金型は、高さ 7 mm の突起を 2 本有する「下駄形状」である。铸造条件は Table 2 に準じた。铸造品の概略形状は 122 mm × 122 mm × 14 mm である。解析の要素は、1 メッシュの長さが 0.6 mm 程度、総数は 15450420 である (金型が 14642420、铸造品が 808000)。9 サイクルの凝固解析で金型の温度分布を定常状態に近づけた後、1 サイクルの湯流れ解析をおこなった。熱伝達係数は、ADC12 が液体の状態と固体の状態に変化させた。この理由は、凝固収縮によって金型と铸造品の接触圧力が低下したり、隙間ができて接触伝熱でなくなることを考慮するためである。

湯温 700 °C の場合を Fig. 7 に示す。54 ~ 60 m/s で射出され湯口前の突起 1 に衝突した溶湯は、主に突起の横を通ってキャビティ奥へと侵入してゆく。射出開始 0.8 秒後に意匠面中央付近が溶湯で満たされ、充填は完了する。この時点では湯口前の湯温が 624 °C で最も高い。

金型温度の推移を Fig. 8 に示す。射出の初期においては、内部冷却の影響で湯口前が最も低温である。充填完了時には、Fig. 7 の湯温分布と対応し、湯口前が約 360 °C で最も高温になる。さらに 6 秒が経過した凝固完了直前では、突起の角部が 500 °C を超えて最高温部となる。水冷孔から遠い突起の方が温度は高い。

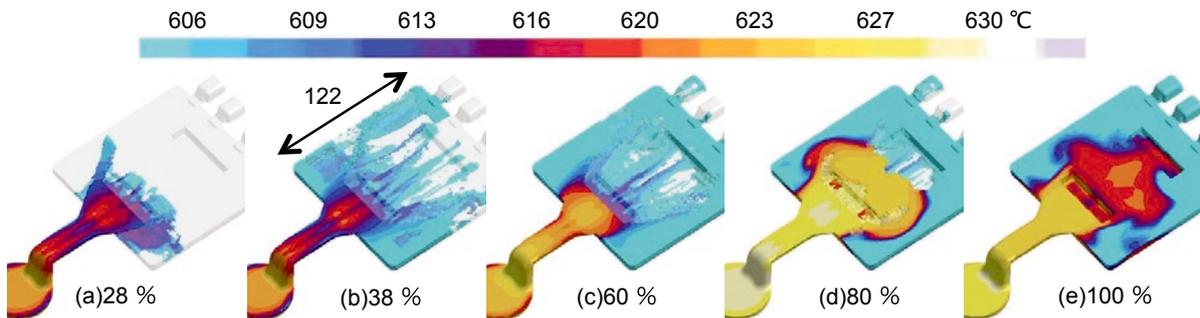


Fig. 7. Flow behavior and temperature of molten ADC12 in a cavity. Filling rate given by volume fraction represent from (a) 28 percent up to (e) 100 percent.

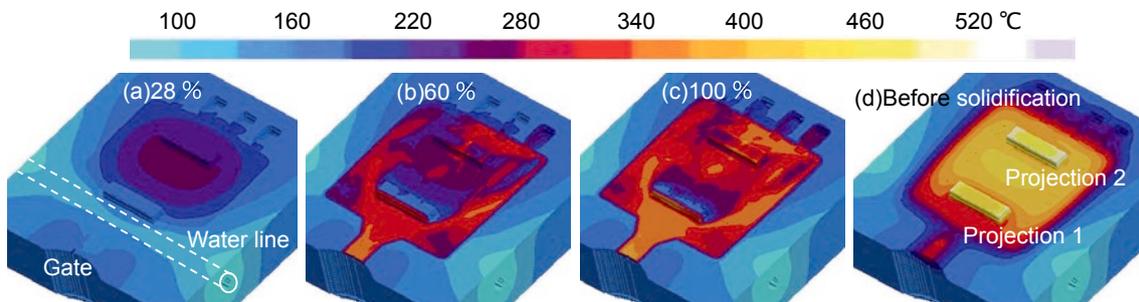


Fig. 8. Transition of die temperature. Filling rate of molten ADC12 represent (a) 28 percent up to (c) 100 percent. At 6 seconds after filling corresponds to (d) just before finish of solidification.

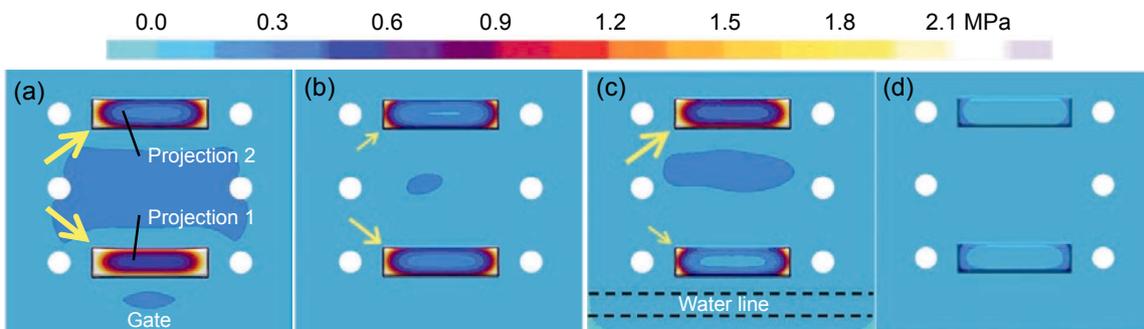


Fig. 9. Distribution of cast ejecting stress F. (a), (b), (c) and (d) represent molten ADC12 of 700 °C, molten ADC12 of 650 °C, water cooling line in a die with molten ADC12 of 700 °C and surface treatment “AMICOAT®-D” with molten ADC12 of 700 °C under the condition of no internal water cooling respectively.

## 4. 2 離型抵抗 F

Table 3 の相関式を用いて、鋳造条件や表面処理の影響を検証した。湯温、内冷、表面処理が F におよぼす影響を Fig. 9 に示す。湯温 700 °C で内冷なしの Fig. 9(a) は、金型温度が最も高くなる条件のため突起角部の F も大きい。特に、湯口側の突起 1 では  $F = 4.86 \text{ MPa}$  となり、解析 4 水準中で最大の離型抵抗を示す。凝固完了直前の Fig. 8(d) においては突起 2 の方が高温であったが、射出から凝固完了までのパラメータ S で評価すれば、突起 1 の方が焼付きが顕在化しやすいと判定された。

湯温を 650 °C に下げた Fig. 9(b) では、突起 1 の F も 3.32 MPa に低下する。また、湯温の引き下げは湯口から遠い突起 2 の F を低減する効果大きい。この理由は、溶湯がキャビティ内を流動する際、湯先の温度低下が大きいためと考えられる。

湯口前の深さ 14 mm に直径 10 mm の水冷孔を設けた Fig. 9(c) では、湯温は 700 °C と高いが突起 1 の F は 2.89 MPa まで低下する。この値は、湯温 650 °C で内冷なしの Fig. 9(b) における突起 1 より低い。内冷は F の低減に極めて有効である。ただし、水冷孔から遠い突起 2 の F は Fig. 9(a) の場合と同等であり、内冷による F の低減効果は局部的であることも分かる。

Fig. 9(d) は PVD 皮膜アミコート<sup>®</sup>D を表面処理した場合である。条件は Fig. 9(a) と同じで、湯温 700 °C で内冷なしの最も高温化する条件であるが、突起 1 でも F は 0.61 MPa と非常に小さく、ほぼ摩擦抵抗のみの離型と見なされる。

## 5. 工程検証の考え方

アルミ合金の引張強度  $Z <$  離型抵抗  $F$  では、焼付いた鋳造品が破断して金型に残存することを意味する。したがって、工程設計の必要条件は  $F < Z$  となる。鋳造品の塑性変形を防止する場合には、 $F <$  アルミ合金の耐力  $Y$ 、を満たす必要がある。取り出し時の鋳造品は 250 ~ 400 °C と推定されるが、この温度域におけるアルミ合金の  $Y$  は 40 MPa 以下、 $Z$  は 60 MPa 以下と考えられる<sup>7), 8)</sup>。あるいは、所要の表面品質を満たすことができる最大の  $F$  の値  $F_c$  を定め、 $F < F_c$ 、となる方を設計しても良い。

以上によって、鋳造条件やゲート方案、水冷孔の位置、金型材の熱伝導率、皮膜の耐熱温度、など焼付き軽減策の選定根拠を定量的に明示できる。

## 6. 結 言

ダイカスト鋳造品を金型から取り出す際の離型抵抗を、焼付きの原因である Fe/Al 反応層形成と関連づけて定式化した。構成式を湯流れ解析ソフト MAGMASOFT に組み込み、焼付き評価指標としての離型抵抗の有効性を検証した。得られた知見を以下に示す。

- SKD61 と ADC12 の固体同士が焼付く条件を示した文献値から、Fe/Al 反応層形成の見かけの活性化エネルギー  $Q = 313 \text{ kJ/mol}$  が得られた。Q の算出においては、以下 2 点の仮定を置いた。

・ 反応層厚さ  $X = \sqrt{(t \cdot (D_0 \cdot \exp(-Q/R/T_S)))}$

・ 焼付き開始時の  $X$  は  $t$  や  $T_S$  によらず共通

ここで、 $t$  は接触時間、 $D_0$  は定数、 $R$  は気体定数、 $T_S$  は金型の最表面温度である。

- Fe/Al 反応層の形成を考慮したパラメータ  $S = \int (\exp(-Q/R/T_S)) dt$  を用い、 $F = C_1 \cdot S^{C_2}$  によって離型抵抗  $F$  MPa を定式化できた。 $C_1$  と  $C_2$  は定数である。F が大きいほど、焼付きは顕著となる。
- F の分布を湯流れ解析ソフト MAGMASOFT で予測した。湯温の引き下げ、内冷回路の設置、表面処理によって F は大きく低下した。ただし、内冷の効果は局部的である。PVD 処理のアミコート<sup>®</sup>D では、湯温が高く内冷が無い条件でも F が非常に小さくなった。
- 焼付きにおよぼす表面処理や鋳造条件の影響を、F によって客観的かつ定量的に検証できる。工程設計の指標は、F が鋳造品の耐力や引張強さを超えないようにすることである。

※アミコート<sup>®</sup>/AMICOAT<sup>®</sup>は大同アミスター(株)(現 大同 DMソリューション(株))の登録商標です。

(文 献)

- 青山俊三, 下条浩: 鋳造工学会 131 回全国講演大会講演概要集(1997), 94.
- 柴田浩二, 諸住正太郎, 幸田成康: 日本金属学会誌, 30(1966), 382.
- 伊吹基宏, 尾崎公造: 電気製鋼, 76(2005), 241.
- 西直美: 鋳造工学, 70(1998), 648.
- 三中西信治, 小川裕二, 鈴木孝尚: 鋳造工学会 130 回全国講演大会講演概要集(1997), 54.
- 特開 2011-79053.
- 西田公至: 生産研究, 28(1976), 464.
- <http://www.zerocut-watanabe.co.jp/pg321.html>

この資料は、2016 日本ダイカスト会議論文集に掲載された内容を加筆修正したものである。



河野正道



宇野 聡



横井直樹