

技術論文



Technical Paper

ダイカスト金型のアルミ焼付き機構

若月 健*¹, 宇野 聡*², 横井直樹*³

Aluminium Soldering Generation Mechanism in Die Casting Dies

Ken Wakatsuki, Satoshi Uno, and Naoki Yokoi

Synopsis

Die casting is the most popular application for its excellent surface quality, productivity and high dimensional accuracy.

On the other hand, surface of die casting molds is damagable due to contact with molten aluminum alloys.

Main failure modes, such as soldering and heatchecking, cause reduction in capacity utilization and production capacity.

Therefore, it is important to reduce the damage in the die casting process.

In this paper, we perform soldering evaluation tests using a die casting machine.

We argued the mechanism of soldering and influence of mold's chemical compositions (Cr and Si) on the soldering phenomenon.

As a result, low Si steels or high Cr steels indicate lower releasing resistance (superior performance for soldering).

We conclude that high stability of chromium-oxide layer and high thermal conductivity affect soldering.

In addition, we conclude that mechanism of soldering is composed of four processes.

1. 緒 言

ダイカスト法は溶融したアルミニウム合金（以下、Al合金と記す）などを高速・高圧で金型内に射出し、成型する鋳造法で、生産性や寸法精度に優れていることから、自動車部品などの多くの分野で使用されている。またダイカスト製品の鋳肌は滑らかであるため、鋳肌がそのまま意匠面として使用されることも多い。一方、高温・高速のAl合金などの溶湯と接するダイカスト金型の表面は高温化や熱応力振幅による「焼付き」や「ヒートチェック」などの損傷が発生する。金型にこれらの損傷が発生すると、ダイカスト製品の寸法精度や意匠性が損なわれるだけでなく、ダイカスト製品の取り出し時における離型抵抗の増大が金型や押出しピンの破損を招き、結果として設備稼働率や生産能力が低下する。よって、

金型に発生する損傷を軽減することは特に重要である。

ダイカスト法における焼付きとは、金型や鋳抜きピンの表面に、射出されたAl合金が反応・溶着する現象である。一般的に金型表面温度が高温になるほど、焼付きは助長されるため、焼付き対策として、金型内部や表面の冷却の強化、離型剤の塗布や金型にAl合金が反応・溶着しにくい表面処理が広く行われている。

焼付き現象に関する調査として、西ら¹⁾は、Al合金組成による焼付き抑制対策について検討を行い、ADC10合金に鉄(Fe)を0.8 mass%以上、あるいはマンガン(Mn)を0.4 mass%以上添加することで焼付きが抑制されることを報告している。一方、金型材組成による焼付きの抑制対策についての報告事例は未だない。

また、佐々木ら²⁾は焼付き発生機構について調査を行い、(1) 金型表面の酸化膜や離型剤皮膜などの流失

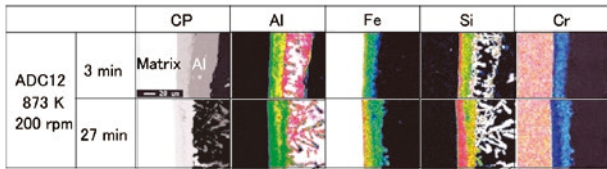
2014年4月22日受付

* 1 大同特殊鋼(株)経営企画部 (Corporate Planning Dept. Daido Steel Co., Ltd.)

* 2 大同特殊鋼(株)研究開発本部 (Daido Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

* 3 大同特殊鋼(株)特殊鋼製品本部 (Speciality Steel Business Center, Daido Steel Co., Ltd.)

が起る『付着場所の形成』段階, (2) Al合金の付着やAl合金/金型間の相互拡散による反応層生成が起る『初期付着』段階, (3)『反応層の成長』段階の三段階から成ると報告している. Fig. 1にADC12の溶湯にJIS SKD61を3分間, 27分間浸漬させた試料に対してEPMAによる元素濃度分析を行った結果を示す. 金型材(SKD61)とAl合金(ADC12)の境界に形成された反応層にはFeとアルミ(Al)だけではなくクロム(Cr), シリコン(Si)も含まれていることが分かっている. 反応層の形成には鋼材やAl合金に含まれるCr, Siが関与することが示唆されている. そこで本稿では, 過去に確立したダイカストマシンを用いた焼付き評価試験³⁾により, 焼付きに及ぼす金型の鋼材成分の影響を調査し, 焼付き発生・進展の観察を行い, 焼付き発生機構の考察を行った.



*CP:Compositional image

Fig. 1. Element distribution of reaction layer in Al melting test.

2. 試験方法

2. 1 供試材

JIS SKD61を基本鋼種としてCrとSiの添加量を変化させたTable 1に示す組成の合金を, 真空高周波誘導炉で溶解後, 鋳造した. 鋳造した鋼塊を1373~1473 Kに加熱してφ30 mmの丸棒に鍛造した後, 機械加工により試験片を作製した. 試験片は真空中で1303 Kに加熱, 3.6 ksの保持後に, 加圧窒素ガスによる衝風焼入れを行った. その後, 853~883 Kの温度で2~3回焼戻しを行い, 硬さを43 HRCに調質した.

Table 1. Test alloys.

unit: mass%			
Steel	C	Si	Cr
A	0.4	1.0	5.2
B	0.4	0.1	0.9
C	0.4	0.1	5.2
D	0.4	0.1	8.0

+0.4Mn, 1.2Mo, 0.8V

2. 2 金型形状

Fig. 2に示す金型(SKD61製, 43 HRC)に試験片となる鋳抜きピンを取付けた. 早期に焼付きを発生させるため, 射出された溶湯が高温のまま衝突するように湯口付近に鋳抜きピンが配置されている. 鋳抜きピンの先端形状はφ8 mm, 長さ10 mm, 抜き勾配を1.5°とした. アルミニウム鋳造品の取り出し時の離型抵抗が鋳抜きピンに対する焼付き程度を定量評価できるものと考え, 押出しピンにはロードセルを取り付け離型抵抗を測定した.

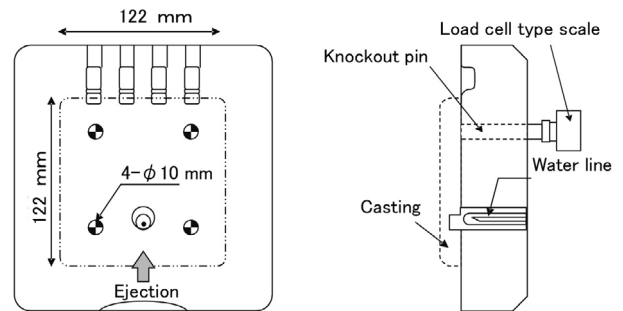


Fig. 2. Schematic geometry of test die.

2. 3 装置および鋳造条件

装置には, 東芝機械(株)製のDC-135JTダイカストマシンを用いた. 型締力は135 ton, 押出し力は最大7.8 tonである. Al合金を溶解するための電気加熱式黒鉛つぼ炉には, 溶解容量300 kg, 常用最高温度993 Kを用いた. 鋳造条件をTable 2に示す. Al合金は一般的に用いられているADC12, 離型剤には(株)MORESCO製の白色系離型剤であるグラフェースMS-10を用いた.

Table 2. Casting conditions.

Items	Conditions	Note	
Al-alloy	ADC12		
Molten metal temperature	973 K		
Cast weight	600±15 g		
Ejection velocity	Low	200 mm/s	
	High	1600 mm/s	
Cast pressure	65 MPa		
1 cycle	Cycle time	28 s	
	Solidification time	8 s	
	Air 1	0.5 s	Air pressure 0.5 MPa
	Spray	3.0 s	
	Air 2	1.5 s	
Water Cooling	Temperature	298 K	
	Volume flux	0.66 m ³ /h	

2. 4 評価方法

押しピンに取り付けたロードセルによりショット毎の離型抵抗を測定した。10, 30, 100, 300 ショット鑄造後の鑄抜きピンは、外観撮影、横断面で切断し光学顕微鏡組織観察、および EPMA による元素濃度分布測定を実施した。

3. 試験結果

3. 1 外観観察

各ショット数鑄造した後の鑄抜きピンの外観写真を Fig. 3, 4 に示す。Fig. 3 は Al 流速が速い湯口側、Fig. 4 は流速の遅い“反”湯口側の写真である。湯口側ではいずれの鋼種でも 10 ショット以下で焼付きが発生し、その後ショット数が進んでも Al 合金の付着量は大きく変化しなかった。一方、反湯口側では鋼種間で焼付きの程度に差があり、10 ショットでは 1 mass% の Si を添加した Steel-A のみに顕著な焼付きが生じた。ショット数の増加に伴い、Al の付着量が増加する傾向がみられたが、Cr 含有量が多いほど、また Si 含有量が少ないほど付着量は少なく、高 Cr、低 Si の Steel-D では 300 ショットにおいてもほとんど付着しなかった。

3. 2 離型抵抗の評価

焼付きを定量評価するため、離型抵抗を比較した。10, 30, 100 ショットにおける Cr 含有量、Si 含有量と離型抵抗との関係を Fig. 5, 6 に示す。Fig. 5 より、Cr 含有量の増加に伴い、離型抵抗が低下し、5 mass% 以上ではほぼ一定となることがわかった。同様に Fig. 6 より 10, 30 ショットで Si 含有量の増加に伴い、離型抵抗が増加することがわかった。

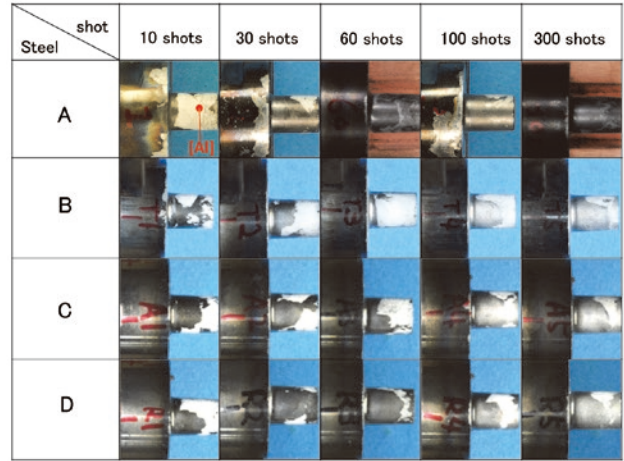


Fig. 3. Outside of test pieces after Al melting test (Sprue side).

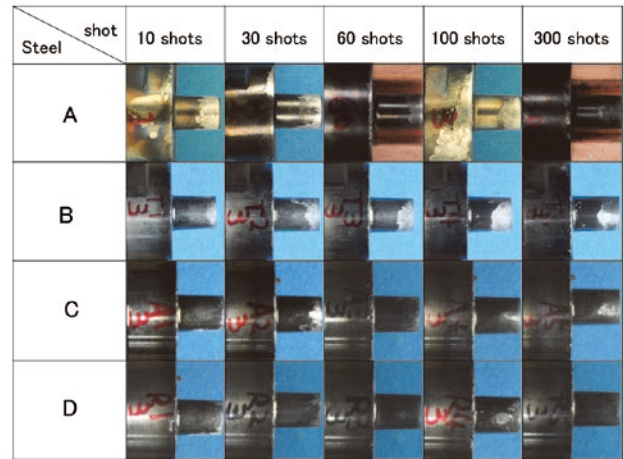


Fig. 4. Outside of test pieces after Al melting test (Opposite sprue side).

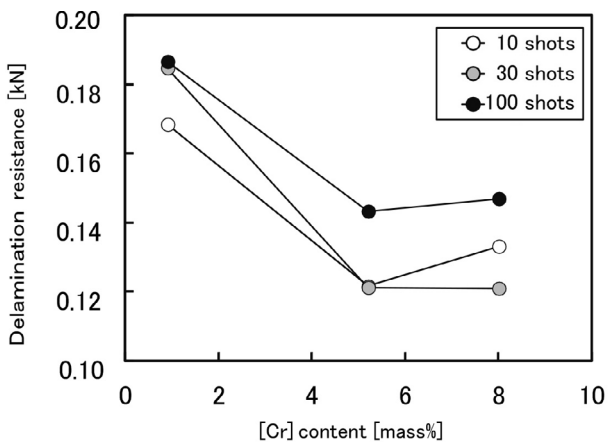


Fig. 5. Delamination resistance and [Cr] content.

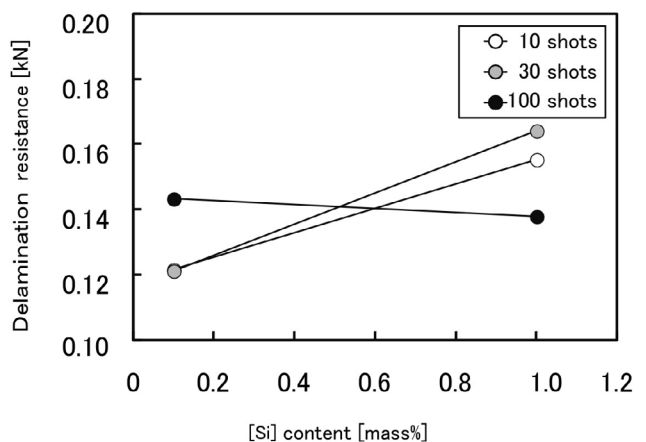


Fig. 6. Delamination resistance and [Si] content.

3. 3 元素濃度分析分析

鉄・アルミニウム反応層を確認するため試験片断面でEPMAによる元素濃度分析を行った。10ショット、100ショット鑄造後における湯口側界面の結果をFig. 7, 8に示す。Si含有量が多いSteel-AやCr含有量が5mass%以下のSteel-B, Cは10ショットでFe, Al, Cr, Siを主成分とする反応層が生成し、100ショットまでに厚く成長することがわかった。また、反応層が生じたSteel-A, B, Cの鋼材/Al合金(反応層)界面の酸素濃度に注目すると10ショット時点で界面に存在していた酸化皮膜が100ショット時点で消失しているこ

とがわかった。反応層中のSi, Cr含有量はそれぞれ7~9mass%, 1~3mass%であり、鋼材組成によらずほぼ同等組成であった。そして、Crを8mass%含有するSteel-Dは100ショット鑄造後でも反応層は確認できず、表層には薄い酸化皮膜が確認できた。

Fig. 9, 10には反湯口側界面の元素濃度分析結果を示す。10ショットではSteel-AにAl合金の付着が見られるものの、いずれの鋼種でも反応層は生成しておらず、界面または母材表面に明瞭な酸化皮膜が確認できた。この酸化被膜は100ショット鑄造後でも同様に確認でき、変化していないことがわかった。

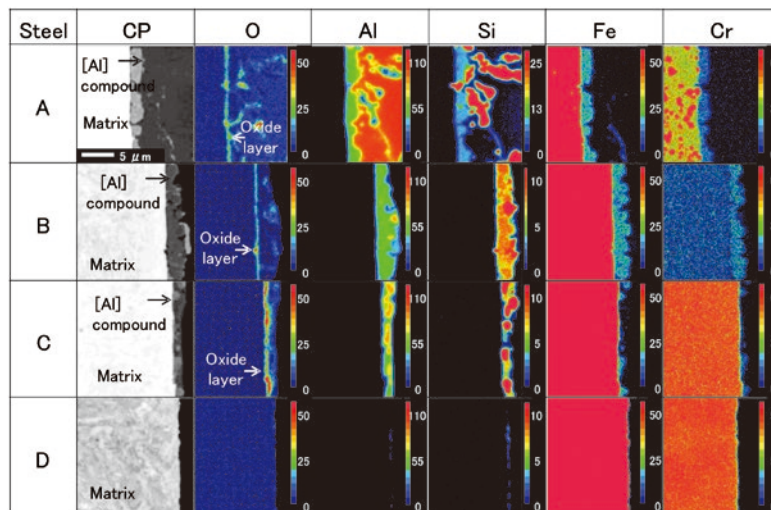


Fig. 7. EPMA analysis near surface of mold after 10 shots casting (Sprue side).

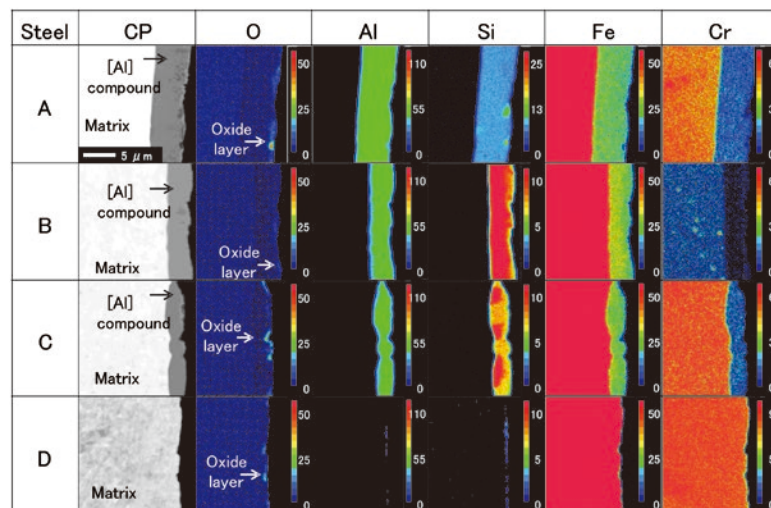


Fig. 8. EPMA analysis near surface of mold after 100 shots casting (Sprue side).

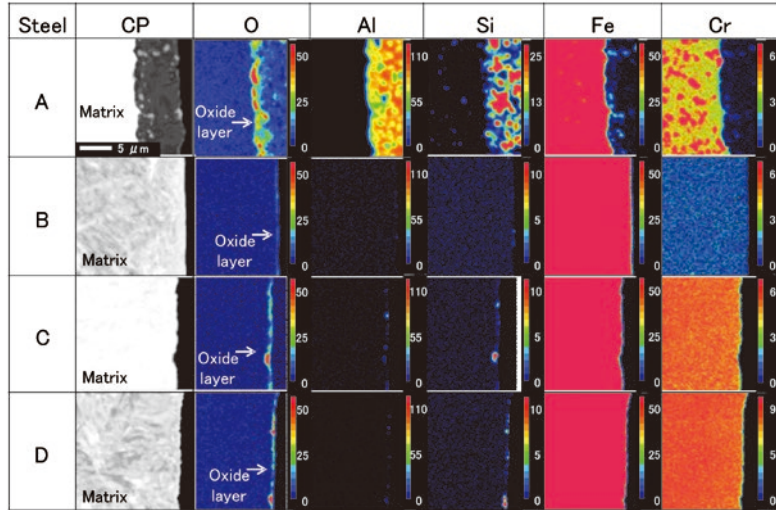


Fig. 9. EPMA analysis near surface of mold after 10 shots casting (Opposite sprue side).

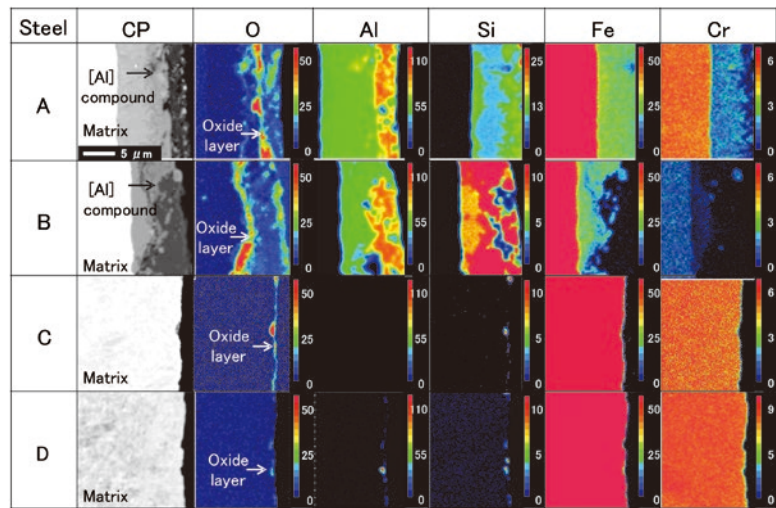


Fig. 10. EPMA analysis near surface of mold after 100 shots casting (Opposite sprue side).

4. 考察

4. 1 鋼材成分の影響

Fig. 5, 6 の離型抵抗の結果から、鋼材成分は耐焼付き性に影響を及ぼしている。Cr 含有量が 5 mass% の場合 (Steel-A, C), Si 含有量の増加に伴い耐焼付き性は低下し、反応層の生成や酸化皮膜の消失が 10 ~ 30 ショット程度の早期に発生していた。Si 含有量が 0.1 mass% の場合 (Steel-B, C, D), Cr 含有量の増加に伴い 100 ショット鑄造後において反応層の厚さが減少し、8 mass% (Steel-D) では反応層が確認できなかった。表層の酸化皮膜は残存していた。これらのことから、反応層の形成や成長には鋼材表面の酸化皮膜が大きく影響すると推察される。

一般的なステンレス鋼材などでは鋼材中の Cr 量が増加すると表面に Cr_2O_3 の皮膜を形成し、12 mass% 程度まで、Cr 含有量に伴って耐食性の向上が知られている。よって、鋼材の Cr 含有量の増加に伴う耐焼付き性の向上は、表面に形成された安定な Cr_2O_3 皮膜によって Al 合金との濡れ角変化や鋼材とアルミニウム反応が阻害されると推察される。一方、Irmann⁴⁾ は炭素鋼に Si を 1 ~ 4 mass% 添加すると溶融 Al に対して高い抵抗性を示すと述べている。これは Si の添加により、 SiO_2 系の酸化被膜が形成される影響と報告している。本結果では、鋼材の Si 含有量が 1% 以下であり、かつ Si 含有量減少により耐焼付き性が向上したことから、酸化皮膜による反応の阻害とは異なるメカニズムを考える必要がある。Table 3 に各鋼種の熱伝導率を示す。SKD61 に近い鋼材において Si を 1 mass% 以下の範囲で添加した場合、Si

添加量の低下に伴い熱伝導率が上昇し、結果として、ダイカスト金型の表面温度が低下することが報告されている⁵⁾。よって、Si含有量の低下はSiO₂系の酸化被膜減少の影響よりも、熱伝導率の上昇により、試験片表面の温度が低下し、耐焼付き性が向上したと推察される。

Table 3. Thermal conductivity.
unit: W/(m·K)

Steel	Thermal conductivity (293 K)
A	23.8
B	37.1
C	30.0
D	30.5

4. 2 アルミニウム溶湯の流速の影響

アルミニウム溶湯（以下、Al溶湯と記す）の流速が速い湯口側では反応層の形成や酸化被膜の消失が早期に発生した。一方、Al溶湯の流速が遅い反湯口側では、

酸化被膜は消失しにくかった。これは溶湯の衝突により酸化被膜が機械的に損耗すると、Al合金の機械的・化学的な付着が促進されると考えられる。よって、Al溶湯の流速が速い部分（湯口近傍や流路が狭い箇所）では酸化被膜が損耗しやすく、焼付きやすいと考えられる。

4. 3 焼付き発生機構

Steel-Aの10, 30, 100ショット鋳造後のEPMAによる元素濃度分析結果の比較をFig. 11, 12に示す。Fig. 11は焼付きが発生しやすい湯口側の結果であり、鋳造数が進むにつれて反応層が成長する様子が確認できる。一方、Fig. 12に示す反湯口側の結果からは、酸化層下へAlが徐々に拡散し、反応層が厚くなっていく様子が確認できる。これらの結果から、焼付きの発生機構について、以下のように考えた(Fig. 13-A)。この発生機構は佐々木らのメカニズム²⁾にAl溶湯の流速および金型材組成Crの影響を追加したメカニズムである。

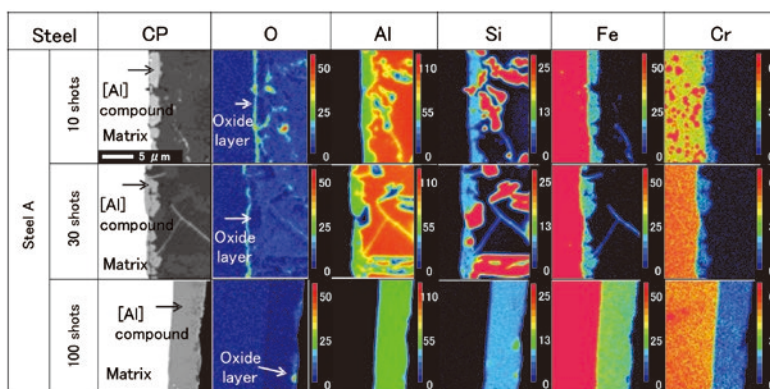


Fig. 11. EPMA analysis results of mold surface after casting (Sprue side).

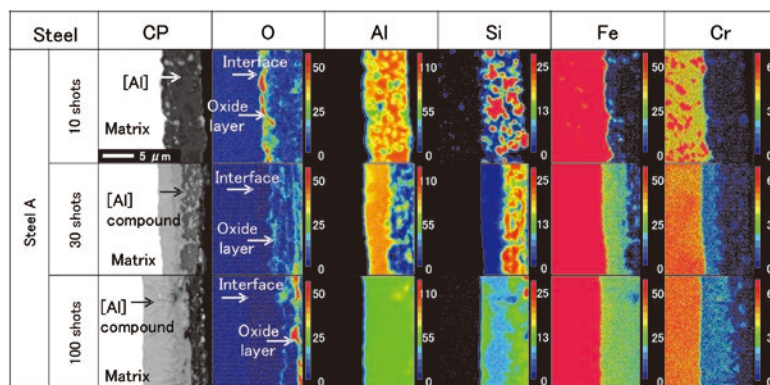


Fig. 12. EPMA analysis results of mold surface after casting (Opposite sprue side).

(a) Al合金の付着(初期付着)

Al合金の鋼材への物理的・科学的な付着は、金型温度や金型材表面の酸化被膜に大きく影響を受け、金型が低温であるほど、酸化被膜が安定(鋼材が高Cr)なほど生じにくい。また、Al溶湯の流速が速い部分では酸化被膜が機械的に損耗し、付着が助長されると考えられる。

(b) 反応層の形成

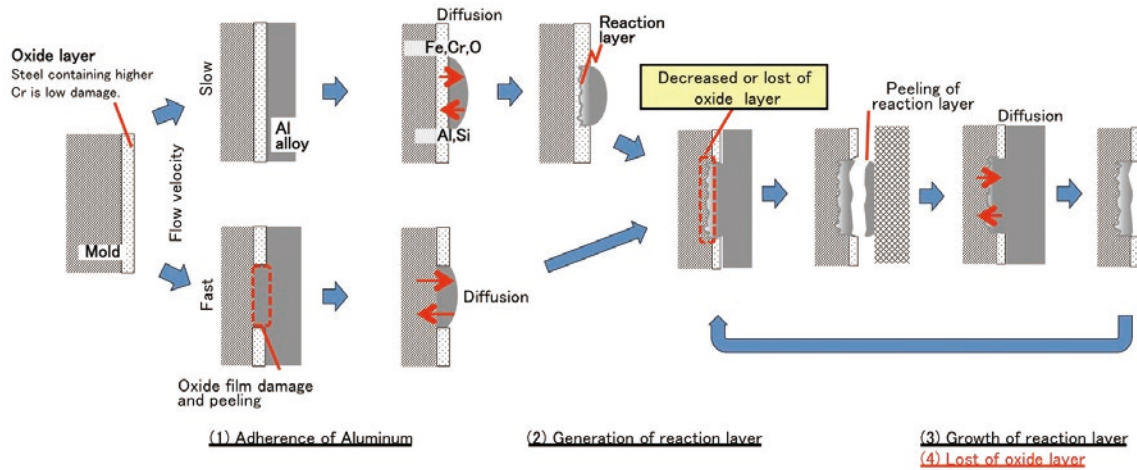
Al合金が付着すると金型材/Al合金の相互拡散がおこり、鋼材/Al合金界面の酸化皮膜の上にFe, Al, Cr, Siを主成分とした反応層が形成される。この酸化被膜が安定なほど、また鋼材の表面温度が低いほど、相互拡散が阻害されるため、反応層は生じにくいと考えられる。

(c) 反応層の成長

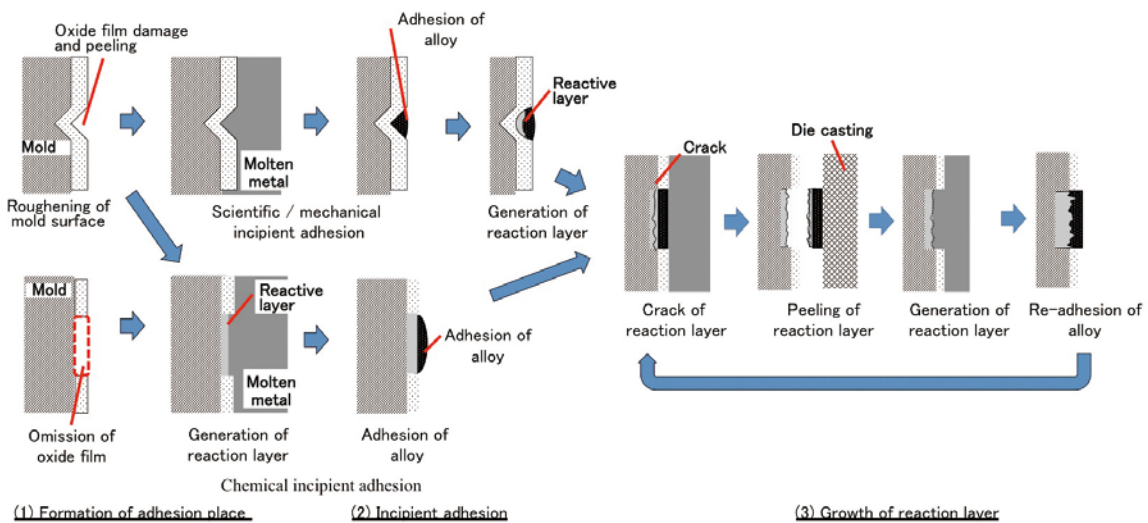
反応層の一部は離型時に脱落する。次ショット時、残存した反応層や焼付きが発生していない金型材の上にAl合金が付着する。反応層は铸造数が進むにつれて、相互拡散により厚く成長すると考えられる。

(d) 酸化被膜の拡散・消失

反応層の成長と共に、金型材/Al合金界面の酸化被膜は機械的な損耗や相互拡散により消失していく。酸化被膜が完全に消失すると、反応層は急速に成長し、安定な合金層となるため、界面の強度が増大する。これに伴って離型抵抗が増大すると考えられる。



A) Generating mechanism inferred from this experiment



B) Generation mechanism of Sasaki model

Fig. 13. Mechanism of soldering development and progression.

5. 結 言

135 ton のダイカストマシンを用いた焼付き評価試験によって、焼付きに及ぼす鋼材成分の影響を調査し、焼付き発生機構について検討した。

- (1) 金型材組成の Cr含有量が多いほど、Si含有量が少ないほど耐焼付き性は向上する。
- (2) 上記の耐焼付き性向上は、Cr含有量増加による Cr_2O_3 皮膜の形成、Si含有量低下による熱伝導率の上昇によるものと考えられる。
- (3) 焼付きは(a) Al合金の付着(初期付着)、(b) 反応層の形成、(c) 反応層の成長、(d) 酸化被膜の拡散・消失の4つの過程からなり、酸化被膜の特性が焼付きの抑制に重要な役割を果たすと考えられる。

これらのことから、従来から行われてきた金型の冷却強化、表面処理という焼付き抑制対策に加えて、金型用鋼の成分(特にCr, Si含有量)や熱伝導率に着目することで、新たな焼付きの抑制対策が立案できると考えられる。

(文 献)

- 1) 西直美: 鑄造工学, 70(1998), 9, 648.
- 2) 佐々木英一: 型技術, 16(2001), 5, 18.
- 3) 横井直樹, 河野正道, 保母誠: 型技術, 26(2011), 7, 114.
- 4) R. Irrmann: ZEITSCHRIFT FUR METALLKUNDE, 18 (1926), 121.
- 5) 河野正道: 電気製鋼, 81(2010), 41.