

技術資料


 Technical Data

ダイカストと溶湯浸漬による焼付きの評価

河野正道*

Evaluation of Soldering on Surface-Treated Specimens with both Actual Die Casting and Dipping Test into Molten Al Alloy

Masamichi KAWANO

Synopsis

Soldering behavior of surface coating was investigated in die casting and dipping tests. Core-pins and round bar specimens were surface treated by carbo-nitriding or PVD process. Regarding die casting, molten Al alloy of 735 °C was injected with a velocity of 54 m/s to core-pins. Lubricants used were water-based emulsion type and oiliness type. The maximum temperature 1 mm below the surface of the core-pin reached 475 °C. Water-based emulsion lubricant gave a lower temperature than the oily one. Soldering of core-pins after 18 shots of die casting was almost the same regardless of the surface coating or lubricant. An Fe/Al compound layer could not be observed at the soldering part. In the dipping test, round bar specimens were held for 30 seconds in molten Al alloy at 750 °C. Salt bath nitriding tends to be superior to PVD for anti-soldering performance. The soldering behavior in the die casting and dipping tests do not necessarily match.

1. はじめに

ダイカストの焼付きとは、金型にアルミニウム合金（以下、Al 合金という）が凝着する現象である。鋳造品の焼付き部では、金型を転写した滑らかな表面や高い寸法精度が得られない。また、広範囲に焼付いた場合には、鋳造品を金型から取り出せなくなる。以上より、ダイカストの品質維持と安定操業には焼付き回避が必須となる。

焼付きを回避するには、鋼と Al 合金の濡れや反応を活性化させなければ良い。そのための方策は、(1) 金型の表面温度を下げる、(2) 金型材と Al 合金の直接接触を防ぐ、の 2 点である。(1) には内部冷却（以下、内冷という）の適正化が有効であり、水質管理による流量の確保^{1), 2)}、高圧水の吐出³⁾、複雑な冷却回路の積層造形^{4), 5)}、などが提案されている。(2) としては、離型剤被膜⁶⁾、酸化

物や窒化物などの硬質膜を形成させる表面処理^{7), 8)}が挙げられる。

焼付きの評価には、表面処理した試験片を溶融状態の Al 合金（以下、溶湯という）に浸漬する方法（以下、溶湯浸漬という）が広く用いられる^{7), 8)}。焼付きにくさの優劣は、試験片に付着した Al 合金の量で容易に目視判断できる。溶湯浸漬によるスクリーニングを経て、実際にダイカストへ適用する表面処理膜が選定される。低コストで高効率な溶湯浸漬は、表面処理の開発や評価において重要な役割を果たしている。

本報では、表面処理膜間の焼付きにくさの順列をダイカストと溶湯浸漬で比較する。また、溶湯の流動（以下、湯流れという）や圧力の違いが焼付きに影響するかどうかを、離型剤の種類による金型温度の変化と併せて検証する。

2021年9月15日 受付

* 大同特殊鋼株式会社技術開発研究所 (Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

2. 焼付きの状態

焼付きの発生と進展は、局所的に生成した Fe/Al 反応層が合体し面積と厚さを増す過程である。この様子を Fig. 1 に示す。ADC12 の溶湯にダイス鋼 SKD61 を浸漬した例である。まず、反応層が局所的に生成し鋼に食い込む。浸漬時間の延長によって、反応層は鋼内部への浸食を深めると同時に面積を拡大し、別の部位では新たな反応層が生成する。そして、反応層同士の合体で焼付き部がさらに広がり、反応層の厚みも増す。反応層が接着剤の役割を果たし、Al 合金は強固に焼付く。

Fig. 2 に示すとおり、ダイカストで焼付いた表面処理品においても、反応層の形成は膜の消失部という局所を起点としている。金型材と溶湯の直接接触を防ぐ観点から、表面処理膜に求められる重要な性質の1つが「湯流れや鋳造品取り出しによって減耗や剥離を起こしにくいこと」である。

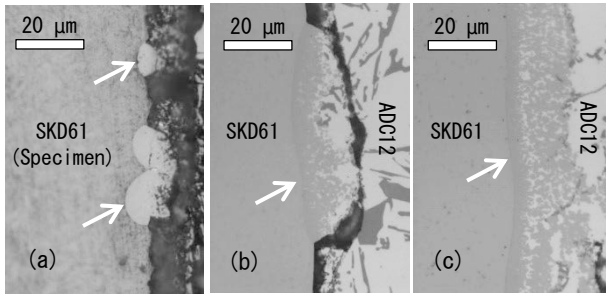


Fig. 1. Initiation of soldering observed on dipping test into molten ADC12. Non-coated specimens of SKD61 are used. Dipping time is prolonged from (a) to (c). The arrows indicate Fe/Al compound layer.

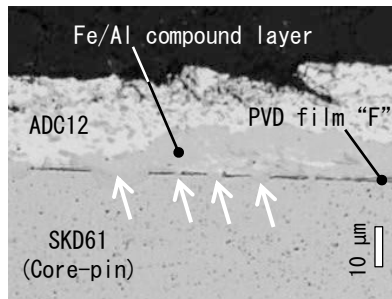


Fig. 2. Soldering observed on die-cast after 2000 shots. Coating film “F” by PVD (Physical Vapor Deposition) is locally lost as shown by arrows, and an Fe/Al compound layer is formed at exposed SKD61.

3. 実験条件

3. 1 表面処理膜

焼付きの評価に用いる表面処理膜の状態を Fig. 3 に示

す。3種類のPVD (Physical Vapor Deposition) 被膜と1種類の塩浴室化である。塩浴室化と比較し、PVD被膜はヤング率Eとピッカース硬さが高く、表面粗さRaが小さい。塩浴室化の特徴は膜が10 μmと厚いことであり、被膜は約8 μmの化合物層と2 μm程度の酸化膜からなる。PVD被膜の厚さは、塩浴室化の約半分に相当する4~6 μmである。Fig. 3の表面処理はダイカスト金型への適用例が多い市販品である。

| | Surface observed | Cut plane |
|-----------------|------------------------------------|--|
| PVD coating “A” | E=459 GPa 2956 HV Ra=0.16 μm | Coating film SKD61 |
| PVD coating “B” | E=512 GPa 2194 HV Ra=0.15 μm | Coating film SKD61 |
| PVD coating “C” | E=673 GPa 3691 HV Ra=0.17 μm | Coating film SKD61 |
| Nitriding “D” | E=166 GPa 570 HV Ra=0.43 μm | Oxide film Nitriding layer SKD61 |

Fig. 3. Four surface treatments for SKD61 of 46HRC. E and Ra mean Young’s modulus and arithmetic mean surface roughness, respectively.

3. 2 ダイカスト

芝浦機械(株)製で型締め力135 tonのマシンを用いる。鋳造条件を Table 1 に示す。溶湯の射出は、ゲートからの距離が20 mmの鋳抜きピンを直撃するようにおこなわれる。この鋳抜きピンが焼付きを評価する試験片であり、意匠面に突き出している部分の形状は直径8 mm高さ10 mmで、抜きテーパは1.5°である。

SKD61の鋳抜きピンには、金型を分解して入子の裏側から装入するタイプ(以下、一体ピンという)^{9), 10)}と、意匠面側から先端部分のみを簡単に着脱できるタイ

プ（以下、先端交換ピンという）がある。一体ピンは内冷回路と熱電対を内蔵し、溶湯の温度（以下、湯温という）や離型剤の種類が焼付き部の温度におよぼす影響を調査する。先端交換ピンには内冷や測温の機構はないが、Fig. 3の表面処理を施した。この先端交換ピンを次々に交換してゆくことで試験を効率化する。

Table 1. Conditions of die cast by machine having mold tightening force of 135 tons. The whole time of a cycle is 24.7 s and 26.3 s for lubricant “M” and “R” respectively.

| Item | Detail | |
|---------------------------|---------------------|--------------------------|
| Cast Al alloy and weight | ADC12, 600 g | |
| Molten ADC12 temperature | 640~740 °C | |
| Injection velocity | 54 m/s | |
| Pressure | 65 MPa | |
| Spray amount of lubricant | 8.1 cm ³ | Oiliness type “R” |
| | 4.4 cm ³ | Water-based emulsion “M” |
| Time in a cycle | Chill time | 12 s |
| | Spray | 2 s for “M” |
| | | 0.8 s for “R” |
| Inner cooling | Core-pin | 0 or 3 L/min |

離型剤は油性剤“R”と水溶性剤“M”を切り替えて使用する。これら2種類の離型剤も、ダイカスト金型への適用例が多い市販品である。

3. 3 溶湯浸漬

試験片は直径 10 mm、長さ 60 mmの丸棒である。Fig. 3の表面処理が施されたSKD61の試験片を湯温 750 °CのADC12に浸漬する。浸漬前に離型剤は塗布しない。そして、静止させた状態で 30 s 経過後に溶湯から引き上げる。試験片を室温まで冷却後は、付着しているADC12やノロをこする。ここで、付着物が剥離しなければ「焼付き」と判断する。焼付きでなければ付着物は容易に剥がれ、浸漬前と同じ状態の試験片表面が現れる。

なお、浸漬 30 s 時点の試験片最表面は 721 °Cに達することが、試験片内部の測温実績とFEMによる逆解析から示されている。

4. 実験結果および考察

4. 1 鋳抜きピンの温度

ショット数の増加ともなう温度推移の例を Fig. 4に示す。表面処理なしの一体ピンを用い、ゲート側の表面から深さ 1 mm 位置を熱電対で測定した。湯温・内冷・離型剤によって温度は大きく変化する。鋳抜きピンの温

度がほぼ一定となった 14~18 ショットにおける最低温度と最高温度をそれぞれ平均し、湯温や内冷と関連付けて Fig. 5 および Fig. 6 に示す。

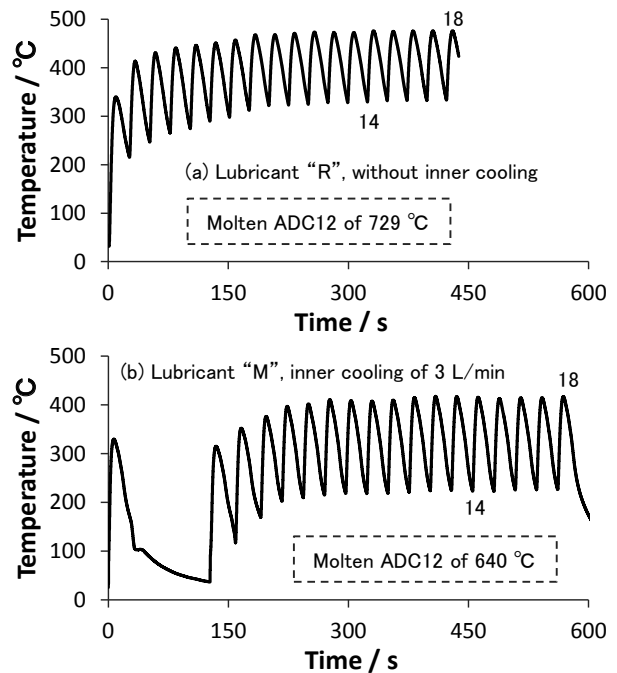


Fig. 4. Temperature transient at 1 mm below surface of non-coated core-pin. The minimum and the maximum temperature is averaged between shots 14 and 18 then given on Fig. 5 and Fig. 6.

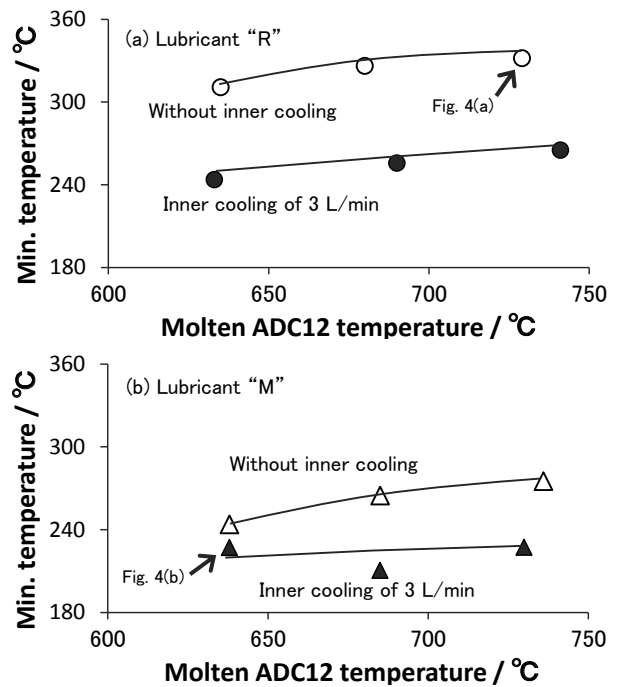


Fig. 5. The minimum temperature of non-coated core-pin related to Fig. 4. The conditions applied to coated core-pins are decided as molten temperature of 735 °C and without inner cooling.

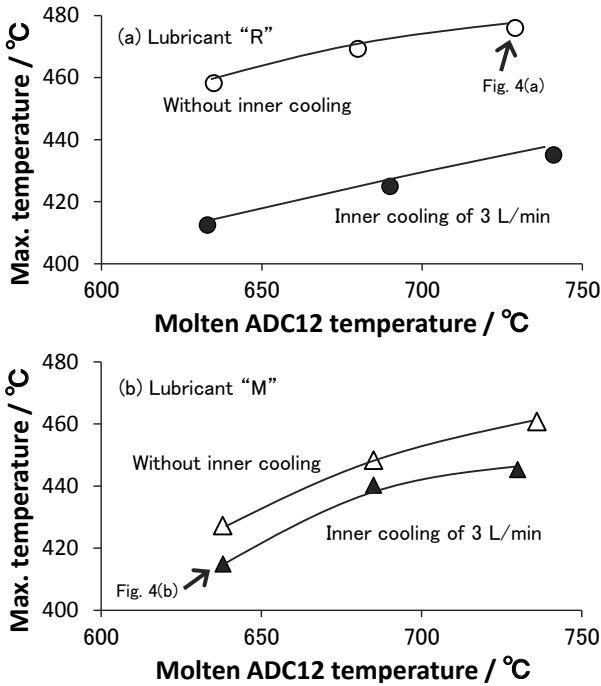


Fig. 6. The maximum temperature of non-coated core-pin related to Fig. 4. Decided conditions for coated core-pins are the same as described in Fig. 5.

鑄抜きピンの温度を下げる効果は、油性離型剤“R”よりも水溶性離型剤“M”の方が大きい。この傾向は最低温度を示した Fig. 5 において顕著であり、内冷なしの条件（白抜きデータの）では、“R”より“M”は約 60 °C 低い。水の蒸発潜熱が冷却に大きく関与することの証左といえよう。また、内冷の影響が小さいことも水溶性離型剤“M”の特徴である。最高温度を示した Fig. 6 に注目すると、内冷の有無による温度差は“R”が約 43 °C と大きいことに対し、“M”では 14 °C 程度である。

以下では、湯温 735 °C の内冷なしで表面処理膜の焼付きにくさを比較する。この条件における鑄抜きピンの温度は、油性離型剤“R”を用いた場合が 330 ~ 475 °C、水溶性離型剤“M”では 270 ~ 460 °C になることが Fig. 5 と Fig. 6 から分かる。

4. 2 ダイカストの焼付き

Fig. 3 に示した表面処理の鑄抜きピン（先端交換ピン）を用い、湯温 735 °C の鑄造を 18 ショット行った。焼付きは 4 ショット程度から観察され始め、以降は焼付きの面積が拡大した。

18 ショット鑄造後の鑄抜きピンの外観を Fig. 7 に示す。焼付きの面積が最も大きい箇所と、最も小さい箇所を撮影した。焼付きの程度には、表面処理膜や離型剤の

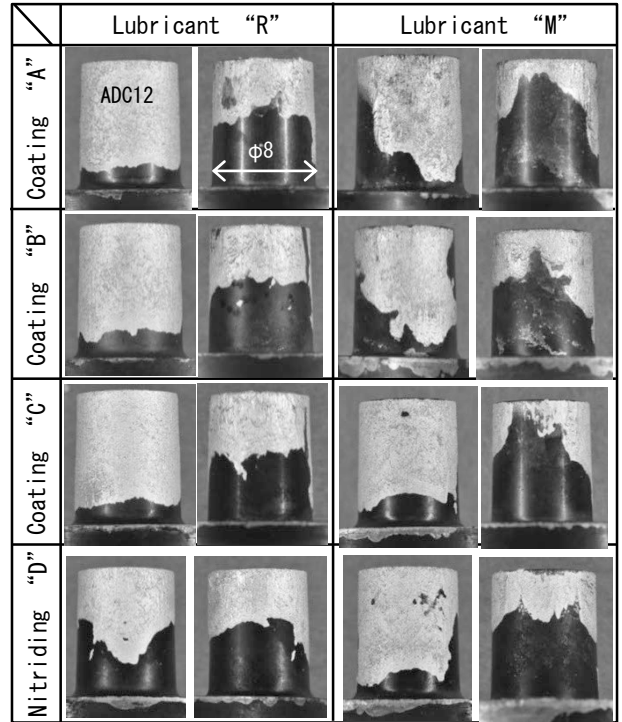


Fig. 7. Appearance of coated core-pins after 18 shots. The geometry of a pin is 8 mm diameter with 10 mm height. Severe soldered parts and the most slightly soldered part around a pin are shown.

種類による明確な差が認められない。表面状態は膜によって異なり (Fig. 3)、離型剤の種類による温度差も大きい (Fig. 5, Fig. 6) が、いずれの条件においても強固な焼付きが発生した。

焼付きが最も顕著な部位の断面を Fig. 8 に示す。矢印に挟まれた領域が表面処理膜である。Fig. 2 の場合とは異なり、表面処理膜が消失した箇所はない。このため Fe/Al 反応層も認められず、ADC12 は物理的に付着した状態である。

焼付きの発生過程は以下のように考えられる。まず、射出前の低温の表面処理膜を離型剤被膜が覆う。鋼材と溶湯の直接接触を防ぐ観点からは、望ましい状態といえる。しかし、離型剤被膜は高速の湯流れによって除去されてしまう。そして、湯温が高いため表面処理膜も高温化する。これらの結果、溶湯と表面処理膜の濡れが良くなり、接触界面の原子間力が ADC12 の強度を超えた。以上が、鋼材と溶湯が直接接触しないにもかかわらず焼付いた経緯の推測である。

湯流れによるエロージョンの様子を Fig. 9 に示す。0 ショットの状態（鑄造前, Fig. 3）と 18 ショット後を比較した。塩浴窒化に注目すると、鑄造前に 2 μm 程度であった酸化膜の厚さが、18 ショット後には約 1 μm に減

少している。一方、PVD 被膜“B”の厚さは鑄造の前後で変わらない。他2種類のPVD被膜についても同様であった。2000 HVを超える硬いPVD被膜は18ショット程度では削食されない。しかし、PVD被膜の表面を覆っていた離型剤は、塩浴室化の酸化膜を減耗させるほど高速の湯流れによって除去されたと考えられる。

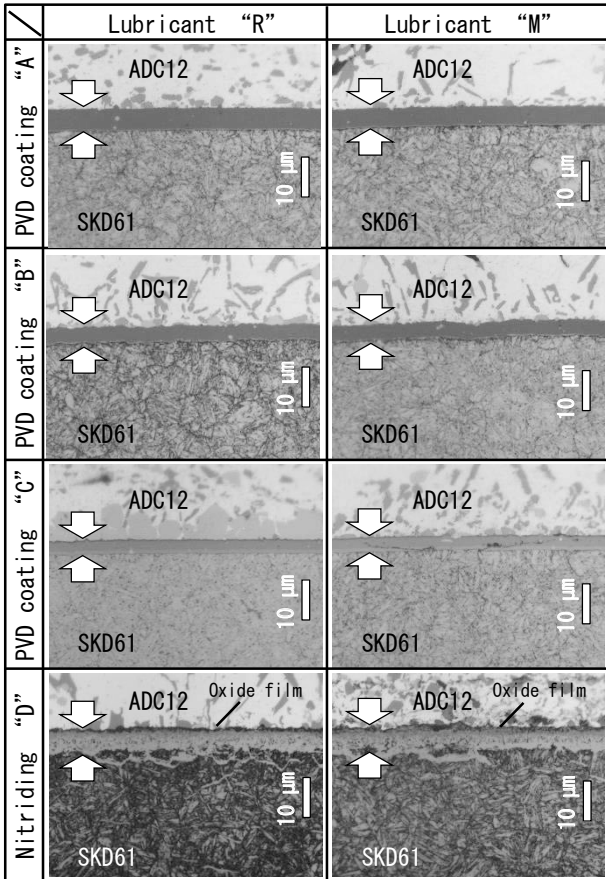


Fig. 8. Observation of cut plane at soldered part after 18 shots. An Fe/Al compound layer could not be seen.

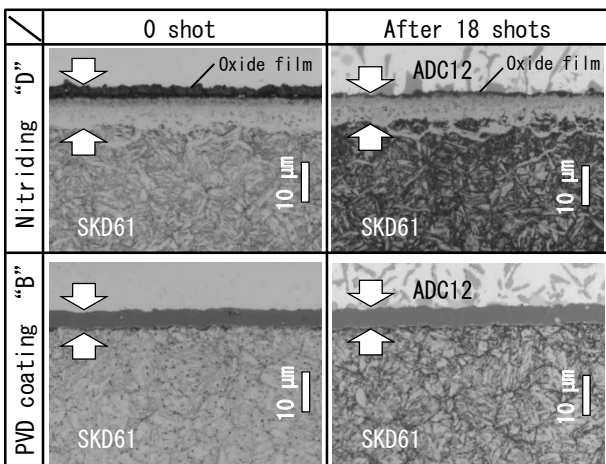


Fig. 9. Comparison of coating film between before and after casting with lubricant “R”. The thickness of the oxide film is decreased by 18 shots of casting.

4. 1節で述べたとおり、今回の鑄造条件における鑄抜きピンの最低温度（離型剤塗布時に相当）は、油性離型剤“R”を用いた場合が330℃、水溶性離型剤“M”では270℃である。これらの値は「皮膜形成の上限」とされる240℃¹¹⁾を超えている。しかし、“R”と“M”は従来の潤滑剤とは異なり、高温の金型にも弾かれずに付着することが特徴である。特に、“R”は適用可能温度が高く、今回の鑄造で計測された330℃は推奨金型温度の範囲内である¹²⁾。以上より、鑄抜きピンの最低温度は240℃を超えたが、離型剤の皮膜は形成されたと考えられる。

以下では「4種類の表面処理膜の焼付きにくさは同等」という結果が溶湯浸漬でも得られるか検証する。

4. 3 溶湯浸漬の焼付き

750℃の溶湯に30s浸漬した試験片の外観をFig. 10に示す。焼付きの面積が最も大きい箇所と、最も小さい箇所を撮影した。いずれの表面処理膜にも焼付きは発生したが、ADC12の付着量はPVD被膜“A”が最も多く、逆にPVD被膜“C”と窒化“D”は最も少ない。ダイカストの場合（Fig. 7）とは異なり、溶湯浸漬では表面処理膜による焼付きの差が大きく表れた。溶湯浸漬による表面処理膜のスクリーニングに際しては、優れた性能を示した膜がダイカストにおいても焼付きにくいとは限らない点に注意が必要である。

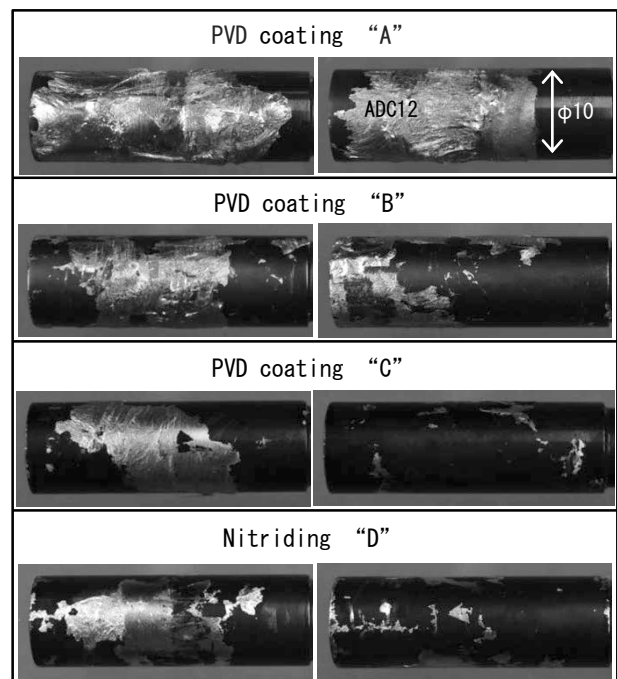


Fig. 10. Appearance of coated round bar specimens after dipping into molten ADC12. Severe soldered parts and the most slightly soldered part around a specimen are shown.

表面処理膜間の焼付きにくさの順列がダイカストと溶湯浸漬で一致しない理由は、(1) 温度、(2) 流速、(3) 圧力の違いと考えられる。この中で、(1) は溶湯浸漬の方が高い。3. 3節と4. 1節で述べたとおり、焼付き部の最高到達温度は、溶湯浸漬の丸棒が721℃（最表面）、ダイカストの鋳抜きピンは475℃（表面から深さ1mm）である。最高温度に到達したタイミングは射出開始から約7s後（充填は既に完了）であり表層の温度勾配が大きくないこと、注湯から射出までに湯温が低下することから、鋳抜きピンの最表面が721℃を超えたとはいえない。(1) 温度だけに着目すれば、ダイカストより高温になる溶湯浸漬の方が焼付きやすいといえる。

一方、大気圧中で自然対流する溶湯への浸漬では、(2) 流速と(3) 圧力がダイカストよりも著しく小さい。ダイカストでは、ゲート出口の流速は54 m/sと大きく、キャピティ充填後の溶湯は65 MPaに加圧される（Table 1）。

以上より、焼付き部の到達温度が高くかつ離型剤を塗布しない溶湯浸漬が焼付きにくい理由は、流速と圧力がダイカストより著しく小さいためと考えられる。逆に、ダイカストが焼付きやすい理由は、高速の湯流れによって露出した活性な新生面に溶湯が高圧で接触することから、原子間力の上昇や反応層の形成が加速されるためといえる。

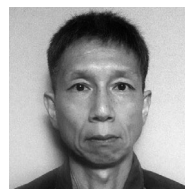
5. おわりに

アルミ合金ADC12を用いたダイカストと溶湯浸漬によって、表面処理膜の焼付きにくさを比較した。ダイカストでは、離型剤の種類が鋳抜きピンの温度におよぼす影響も評価した。得られた知見を以下に示す。

1. 鋳抜きピンの表面温度を下げる効果は、油性離型剤よりも水溶性離型剤の方が大きい。
2. ダイカストでは、離型剤や表面処理膜によらず激しく焼付いた。焼付き部の表面処理膜は消失しておらず、Fe/Al反応層も認められない。ADC12は表面処理膜に物理的に付着した状態である。
3. 鋳造前に厚さ2 μmであった塩浴窒化の酸化膜は、18ショット後には1 μmに減耗していた。高速の湯流れによるエロージョンは顕著である。一方、硬いPVD被膜の厚さには、鋳造の前後で変化が認められない。
4. 溶湯浸漬における焼付きの程度には、表面処理膜による差異が明確に現れた。
5. 焼付きにくさの順列がダイカストと溶湯浸漬で一致しなかった理由は、流速と圧力が大きく異なるためと考えられる。

(文 献)

- 1) 向川博, 樋口博, 小野英敏, 金子博志: 2004日本ダイカスト会議論文集, (2004), 25.
- 2) 古川雄一, 佐藤理通, 古倉冬彦, 植林秀悟: 2004日本ダイカスト会議論文集, (2004), 63.
- 3) 井戸信介: 型技術, 28(2013), 3, 30.
- 4) 野村康弘, 深見尚男, 小林竜之, 早藤哲典: 2016日本ダイカスト会議論文集, (2016), 35.
- 5) 木村有貴, 佐藤良輔, 鈴木将宏, 植田真広, 井川秀昭, 工藤英弘: 豊田自動織機技報, 70(2019), 83.
- 6) 前原一仁, 早藤哲典, 小林竜之: 2018日本ダイカスト会議論文集, (2018), 75.
- 7) 河田一喜, 木立徹: 2016日本ダイカスト会議論文集, (2016), 7.
- 8) 石塚はる菜, 高村宏, 渡邊陽一: 2018日本ダイカスト会議論文集, (2018), 11.
- 9) 横井直樹, 河野正道, 保母誠: 型技術者会議 2011講演論文集, (2011), 202.
- 10) 河野正道, 宇野聡, 横井直樹: 2016日本ダイカスト会議論文集, (2016), 53.
- 11) 佐々木英人: 素形材, 51(2010), 10, 29.
- 12) 株式会社青木科学研究所「ダイカスト用原液塗布型油性離型 WFR series」(<http://www.lubrolene.co.jp/industrials/wfr.html>)



河野正道