

# アルミダイカスト部品の高品質・低コスト化を実現する製造技術の開発（第2報）

水谷 予志生、細野 幸太、小寺 将也、新川 真人\*

## Development of manufacturing technique for aluminum die-casting due to high quality and cost reduction (II)

Yoshiki Mizutani, Kota Hosono, Masaya Kodera and Makoto Niikawa\*

長寿命なアルミダイカスト金型を開発するため、ガス窒化とショットピーニングを複合させた表面処理を検討した。ダイカスト金型材のSKD61にガス窒化、ショットピーニング、およびこれらの複合処理を施した試験片について、硬さの分布や残留応力を測定することで、それぞれの処理の効果を確認した。また、複合処理を施した試験片をアルミニウム合金溶湯に浸漬させることで耐溶損性の評価も行った。複合処理を施した試験片において、耐摩耗性、耐溶損性の向上が確認された。今後、実際のダイカスト金型に応用し、铸造性への影響、耐久性を調査することが課題である。

### 1. はじめに

自動車の燃費規制が年々厳しくなる中、車体の軽量化は自動車メーカーにとって必須の課題である。一般に、100kg 軽量化すると約 1km/L の燃費向上に繋がると言われており、部材の高強度化による薄肉化、軽量素材への変更等が行われており、さらなる研究開発も盛んに行われている<sup>1-4)</sup>。軽量素材としてはアルミあるいは樹脂が主であり、一部高級車ではオールアルミのものも市販されている。しかし、これらの軽量化対策はコストアップに繋がる場合が多く、実用化には製造コストの低減も重要な課題である。

一方、生産性の高い製造方法で知られるダイカストは、軽量金属であるアルミニウム合金を低コストで大量に生産できることから、自動車の軽量化対策に有効であると考えられる<sup>5,6)</sup>。ダイカストは、高温の金属溶湯を金型キャビティに高速・高圧で充填させ、急速に冷却・凝固させることでキャビティ形状を転写させた製品を短時間で製造するプロセスである。このダイカストに用いられる金型は、熔融金属との接触および高温高速流体の流れによる溶損、高圧の負荷、加熱と冷却の繰り返しによる熱疲労、等様々な過酷な負荷にさらされるため、定期的に補修等のメンテナンスが必要となる。生産性の向上・低コスト化には金型メンテナンス頻度を下げる事が重要であり、金型の長寿命化対策として窒化やコーティング等の表面処理技術が研究されている<sup>7-15)</sup>。しかし、これらの手法は処理費用が高額であるものが多く、費用対効果の高いプロセスが望まれている。

ダイカスト金型の表面処理として、窒化による窒化物層の生成は焼き付きの抑制や耐溶損性に効果があるとされるが、熱衝撃・熱疲労によるヒートクラックが起りやすい<sup>10-15)</sup>。一方、ショットピーニングによる圧縮応力の付与は、クラックの発生を抑えることが知られている

<sup>16, 17)</sup>。そこで、窒化とショットピーニングを組み合わせた複合表面処理を金型材に適用し、アルミダイカスト用金型として適用可能かどうか検討した。

### 2. 実験方法

#### 2. 1 複合表面処理

平面研削加工した角 20×t3mm のダイス鋼 (SKD61) に、ショットピーニング (以降 SP と略す) を行ったもの、SP 後ガス窒化 (以降窒化と略す) を行ったもの、SP+窒化+SP と複合処理を施したものを、試験片として用意した。未処理も含めた 4 種類の試験片に対し、レーザー顕微鏡 (VK9700/9710 : キーエンス (株) 製) による表面粗さ測定、断面の組織観察と窒化層の確認、マイクロビッカース硬さ試験による深さ方向の硬さ分布測定、残留応力測定 ( $\mu$ -X360s : パルステック工業 (株) 製)、X 線回折装置による表面層の構造分析を行った。

#### 2. 2 浸漬試験

$\phi$ 10×長さ 120mm で表面を鏡面加工した SKD61 に、SP+窒化と SP+窒化+SP の 2 種類の複合処理を施した試験片を作成した。未処理も含めた 3 種類の試験片を、図 1 に示す浸漬試験装置でアルミニウムダイカスト合金 (ADC12) 溶湯に所定時間浸漬させ、耐溶損性の評価試験を行った。るつぼ中のアルミ溶湯を電気炉で約

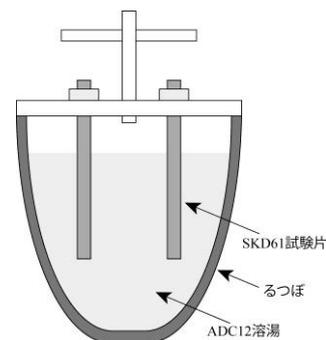


図 1 浸漬試験模式図

\* 岐阜大学 工学部・機械工学科 准教授

表1 複合表面処理試験片の表面粗さ

	Ra (μm)	Rz (μm)
未処理	0.44	3.98
SP	0.30	2.43
SP+窒化	0.31	2.36
SP+窒化+SP	0.36	2.84

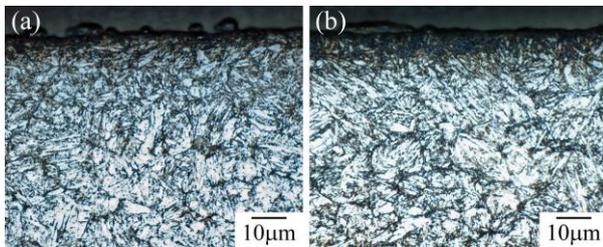


図2 表面近傍のマイクロ組織  
(a)SP+窒化、(b)SP+窒化+SP

650°Cに保持させ、SKD61 試験片を吊り下げた治具で蓋をし、浸漬保持時間を 10、20、40、80 分と変化させた。この時、試験片の先端約 20mm 程度が浸漬された。保持後取り出した試験片にはアルミ合金が付着しており、このまま切断して断面の SEM 観察と EDS による元素分析を行った。また、約 80°C程度に加熱した 30%水酸化ナトリウム水溶液に浸漬してアルミ付着物を完全に除去し、重量を量ることで溶損量を評価した。

### 3. 結果及び考察

#### 3.1 複合表面処理

各試験片の表面粗さをレーザー顕微鏡にて測定した結果、表1のように SP を行うと Ra、Rz はどちらも減少することが分かった。また、窒化後再び SP を施すと若干大きくなる傾向であった。

図2に、ガス窒化を施した SP+窒化と SP+窒化+SP の試験片の断面マイクロ組織を示す。鉄素地はいずれもマルテンサイト組織であった。最表面側では、約 10μm 以下程度の領域で黒っぽくエッチングされており、白層と呼ばれる化合物相やカモメマークは見られなかった。このことから、窒素拡散層が主であると考えられる。この断面を SEM で観察し、EPMA による窒素のマッピングを行った結果を図3に示す。SP+窒化の試験片では、図3(a)のように最表面の 1μm 以下の領域に窒化物相と思われる層が存在していた。一方、この状態にさらに SP を施した図3(c)の SP+窒化+SP の試験片では、この最表面の層がほとんど無くなっていた。また、これらの断面の窒素の分布を EPMA で分析したところ、図3(b)(d)のように 25~40μm 程度まで窒素が拡散していることが分かった。

図4に各試験片の深さ方向の硬さ分布を示す。未処理の試験片は焼き入れ・焼き戻しにより調質されており、500HV 程度の均一な硬さであった。これに SP を施した

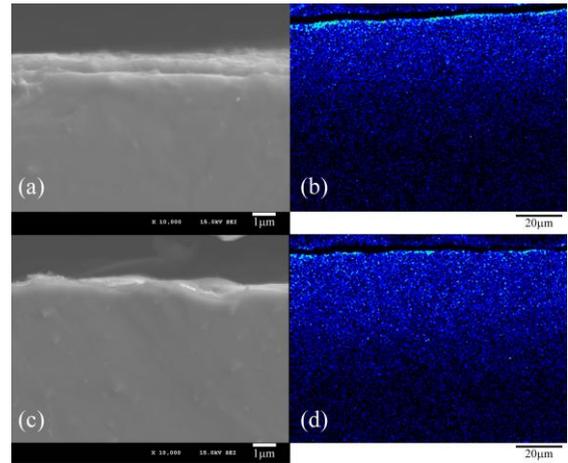


図3 表面近傍の SEM 像(左)と N マッピング(右)  
(a)(b)SP+窒化、(c)(D)SP+窒化+SP

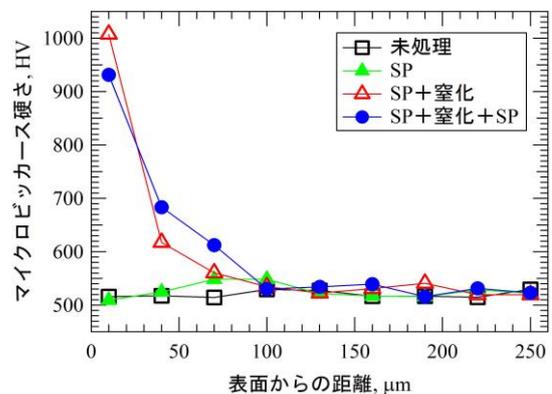


図4 深さ方向の硬さ分布

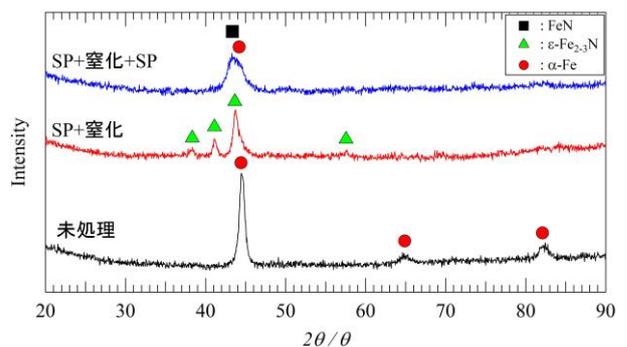


図5 最表面の XRD 図

試験片では、硬さの変化はほとんどなかった。これに窒化を施した SP+窒化と SP+窒化+SP の試験片では、表面硬度が一気に 900~1000HV まで硬化しており、内部も 50μm 程度まで母材より硬い領域が存在していた。これは図3の窒素拡散層の厚さとほぼ一致していた。

これらの最表面相を同定するため、XRD を行った結果を図5に示す。未処理の試験片ではα-Fe のピークのみであり、これに SP を施しても変化は無かった。一方、これに窒化を施した SP+窒化の試験片では、ε-Fe<sub>2.3</sub>N の

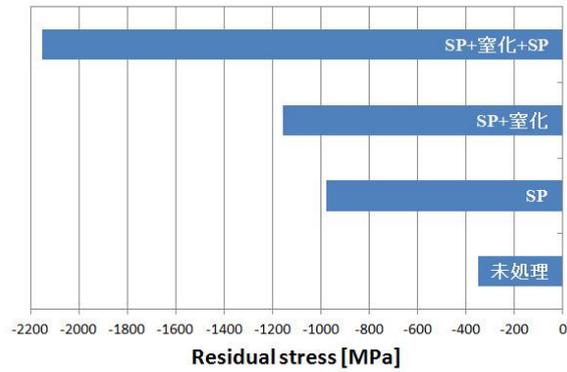


図6 試験片表面の残留応力

ピークのみと変化していた。図 3(a)の 1 $\mu$ m 以下の層は、窒化物であることが分かった。この試験片にさらに SP を施した SP+窒化+SP の試験片では、 $\epsilon$ -Fe<sub>23</sub>N のピークが消え、FeN と  $\alpha$ -Fe のブロードなピークとなった。硬くて脆い窒化層がある状態で SP を施したことで、この層の剥離が起こったと考えられる。

図 6 に各試験片表面の残留応力を測定した結果を示す。測定は X、Y 方向とも各 2 回測定を行い、平均値をプロットしている。未処理の試験片では、方向によって残留応力値が異なっていたことから、研削加工の方向の影響を受けていると考えられる。これに SP を施すと、圧縮応力が増加した。さらに窒化を加えた SP+窒化、あるいは SP+窒化+SP でもさらに増加した。

### 3. 2 浸漬試験

複合表面処理を施した試験片および未処理の試験片を所定時間アルミ溶湯に浸漬させ、30%水酸化ナトリウム水溶液でアルミ付着物を除去した試験片の外観を図 7 に示す。未処理試験片に対し、SP と窒化を組み合わせた複合処理試験片では、表面の荒れが少なくなっているのが分かる。また、いずれの試験片でも浸漬時間が長くなると荒れが酷くなっており、アルミ溶湯による溶損・反応が進行していると考えられる。

このアルミ除去後の試験片の重量を測定し、浸漬試験前の重量との差を溶損重量として時間に対しプロットしたものを図 8 に示す。多少のバラツキはあるものの、浸漬時間が長くなると溶損重量が大きくなる傾向であった。未処理のものに対し、複合処理を施したものでは溶損重量が 1/2~1/3 程度にまで低下しており、耐溶損性が向上しているのが分かった。また、2 種類の複合処理では有意な差は見られなかった。

図 9 に、浸漬試験後アルミが付着したまま切断した断面の SEM 観察像を示す。いずれも浸漬時間が最も長い 80 分の試験片の輪切り断面であり、図中右下側の明るい領域が SKD61 素材である。図 9(a)(b)の未処理材では、SKD61 の表面から灰色の相が約 100 $\mu$ m 程度存在していた。また、この灰色の相は図 9(b)の拡大図を見ると、SKD61 の最表面側の 10 $\mu$ m 以下の領域は密であるが、

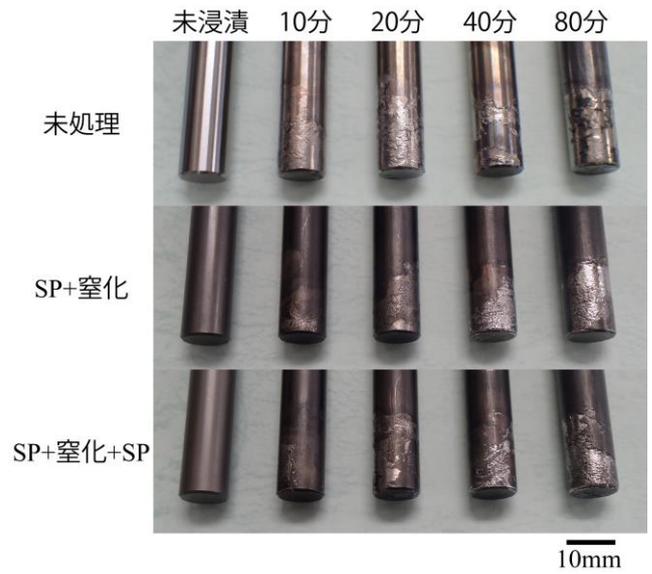


図7 アルミ付着物を除去した後の浸漬試験片外観

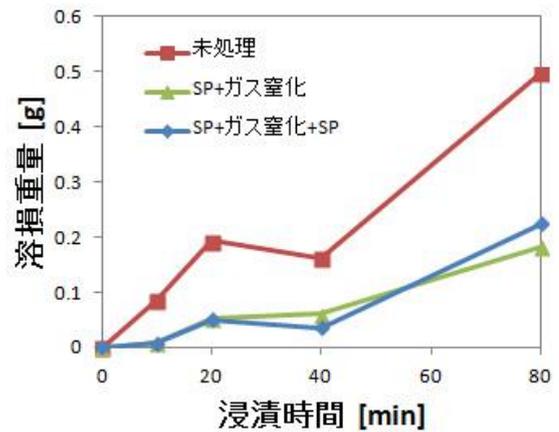


図8 浸漬時間と溶損重量の関係

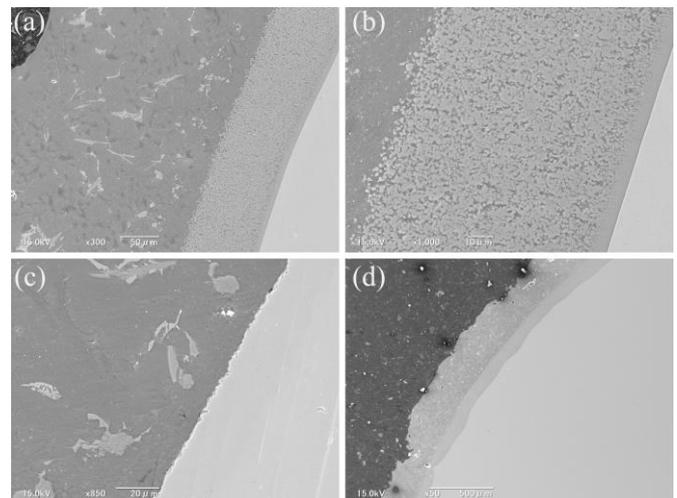


図9 浸漬試験片断面の SEM 像  
(a)(b)未処理、(c) SP+窒化、(d) SP+窒化+SP

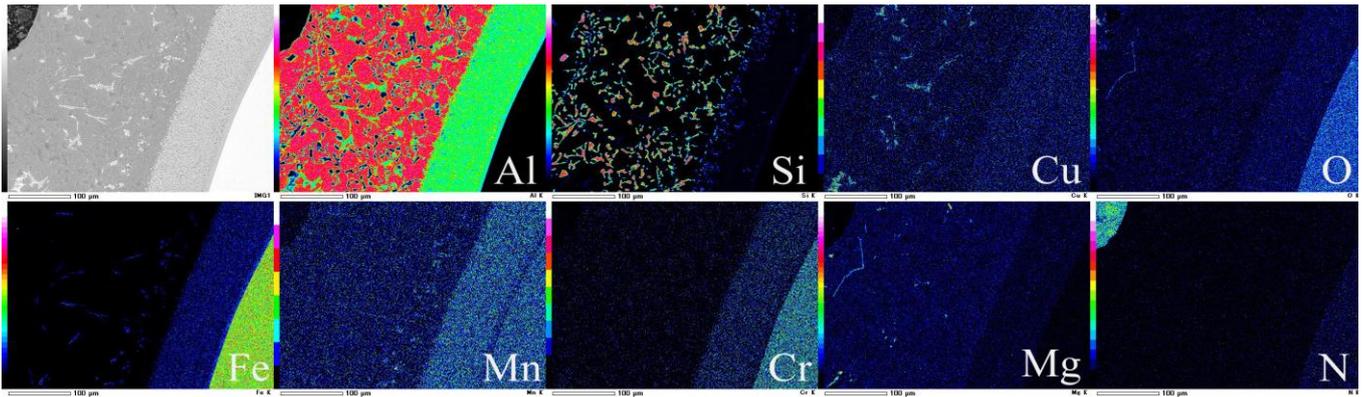


図10 未処理の浸漬試験片断面のEDS元素マッピング図

その先のアルミ側ではポーラスになっているのが分かる。これは、アルミと鉄の反応相であると考えられる。この未処理の試験片では、外周全てにほぼ均一な厚みで反応相が存在していた。一方、複合処理を施した2種類の試験片では、同様の反応相が存在する場所と存在しない場所とがあった。図9(c)はSP+窒化の試験片で、反応相がなかった箇所の拡大図を示す。SKD61の最表面にサブミクロンオーダーの薄い相が存在しているが、図9(a)(b)のような100 $\mu$ m程もある分厚い層ではなかった。また、図9(b)と比べ、SKD61の最表面に微小な凹凸があり、SPによって表面が荒らされた結果ではないかと考えられる。SP+窒化+SPとさらにSPを加えた試験片では、図9(d)に示すように、SKD61の表面がやや大きく凸凹になっていた。また、この箇所でも図9(a)(b)と同様に100 $\mu$ m程度の厚みの反応相が存在していた。

未処理の試験片で観察された反応相と思われるものの成分を調べるため、EDSによる元素マッピング結果を図10に示す。約100 $\mu$ m程度の厚みの灰色の相からは、Fe、Mn、Cr等と一緒にAlも検出されており、主にAlとFeの反応相であることが確認出来た。SKD61を80分間アルミ溶湯に浸漬したことで、AlとFeの反応相が約100 $\mu$ m程度にまで成長したものと考えられる。

#### 4. まとめ

アルミダイカスト金型の長寿命化のためキャビティ面に施す表面処理技術として、ガス窒化とショットピーニング(SP)を複合させた方法を検討した。SKD61試験片にSP、SP+窒化、SP+窒化+SPと表面処理を組み合わせ、性能の評価やアルミ溶湯との浸漬試験を行ったところ、以下のことが分かった。

- ・SPにより圧縮応力が付与された。
- ・ガス窒化により、最表面に1 $\mu$ m以下の $\epsilon$ -Fe<sub>2</sub>3N層が形成され、その下部には25~40 $\mu$ m程度の窒素拡散層が存在した。
- ・SPのみでは硬さに変化はないが、ガス窒化により表面から50 $\mu$ m程度までの領域が硬化した。

- ・ガス窒化後SP処理を追加することで、窒化物層が除去され、圧縮応力がさらに増加した。
- ・アルミ溶湯との反応性を調べるため、浸漬試験を行ったところ、浸漬時間が長くなるにつれ、溶損重量が増加した。
- ・溶損量は窒化を施したSP+窒化とSP+窒化+SPの試験片で1/2~1/3程度にまで低下しており、耐溶損性が向上しているのが分かったが、この2つでは有意な差は見られなかった。
- ・未処理の試験片では、80分の浸漬でほぼ全面に約100 $\mu$ m程度の厚みのアルミと鉄の反応相が形成されたが、SP+窒化とSP+窒化+SPの試験片では一部のみであった。

#### 【謝辞】

本研究の残留応力測定にあたり、ご協力いただいたパルステック工業(株)様に深く感謝致します。

#### 【参考文献】

- 1) 神戸, 素形材, Vol.50 No.9, pp2-7, 2009
- 2) 神戸, 素形材, Vol.53 No.3, pp34-38, 2012
- 3) 千葉, 素形材, Vol.56 No.7, pp31-35, 2015
- 4) 神戸, 素形材, Vol.57 No.3, pp2-7, 2016
- 5) 青山, 鑄造工学, Vol.76 No.12, pp985-990, 2004
- 6) 浅井ら, 鑄造工学, Vol.82 No.12, pp819-826, 2010
- 7) 藤木, 表面技術, Vol.52 No.8, pp535-539, 2001
- 8) 北川ら, 電気製鋼, Vol.78 No.4, pp341-346, 2007
- 9) 西, 精密工学会誌, Vol.77 No.7, pp648-651, 2011
- 10) 川久保, 電気製鋼, Vol.49 No.1, pp50-56, 1978
- 11) 西村, 精密機械, Vol.46 No.10, pp37-43, 1980
- 12) 佐野ら, 電気加工学会誌, Vol.31 No.68, pp1-10, 1997
- 13) 日原, 電気加工学会誌, Vol.35 No.78, pp1-11, 2001
- 14) 加藤ら, 表面技術, Vol.52 No.8, pp544-547, 2001
- 15) 八代, 塑性と加工, Vol.50 No.582, pp605-609, 2009
- 16) 飯田ら, 精密工学会誌, Vol.54 No.1, pp107-111, 1988
- 17) 原田ら, 砥粒加工学会誌, Vol.51 No.3, pp161-166, 201