

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4報）

水谷予志生*、小寺将也*、新川真人†

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

MIZUTANI Yoshiki*, KODERA Masaya* and NIKAWA Makoto†

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施したダイス鋼（SKD61）について、アルミニウム合金（ADC12）溶湯への浸漬による加熱と水溶性離型剤のスプレーによる冷却を繰り返す熱疲労試験を行った。繰り返し回数が少ないことから熱疲労によるヒートクラックの発生までは確認できなかったが、ショットピーニング後ガス窒化－ショットピーニングと複合処理をした場合に、表面に酸化皮膜の形成が確認された。今回の繰り返す試験回数内では、熱影響による硬さの低下はほとんど起こらなかった。アルミと接触する面に酸化皮膜が形成されることで、耐溶損性や熱伝達特性にも影響が出ると考えられる。ただし、実際のダイカストでの使用時にも形成されるかどうかは不明であり、今後ダイカスト実験での評価が必要である。

1. はじめに

地球温暖化等の環境問題への関心が高まるにつれ、世界的に様々な規制が強化されてきている。自動車においては、欧米・中国等の国々で排ガス規制が年々厳しくなり、燃費向上のため車体の軽量化に関する研究開発が盛んに行われている¹⁻⁴⁾。これまでは、鉄鋼材料の高強度化（ハイテン化）による薄肉化が大きく寄与したが、もはや限界に近いところまでできていると言われている。さらなる軽量化を行うため、部材の軽量素材への転換が注目され、アルミ化あるいは樹脂化するための研究開発が行われ、実用化もされつつある。しかし、これら軽量部材は素材自体のコストが鉄鋼材料よりも遙かに高いため、製造技術の向上によるコスト削減が普及に向けての課題となっている。

このうち、アルミニウム製部品を安価で大量生産するのに適しているダイカストでは、大型化による複数部品の一体化、高真空ダイカストによる高品質化といった技術開発により鉄鋼材料からの代替に成功した例⁵⁻⁷⁾があり、自動車の軽量化対策に有効であると考えられる。ダイカストとは、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・凝固させることで製品を短時間で製造するプロセスである。ダイカストに用いられる金型は、高温の熔融金属との接触および高速高圧流体の流れによる溶損、高圧の負荷、加熱と冷却の繰り返す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⁸⁻¹⁰⁾。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¹¹⁻¹⁶⁾。一方、ショットピーニング等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¹⁷⁻¹⁸⁾。これまでに、ショットピーニングとガス窒化をそれぞれ、あるいは組み合わせた複合表面処理を金型材（SKD61）に適用し、テストピースでの性能の評価や、アルミニウム合金溶湯との反応性を評価するための浸漬試験を行った¹⁹⁾。この結果、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。本研究では、これらの複合処理を施した金型材に、実際のダイカスト工程を模擬した熱疲労試験を行い、表面処理の違いによる金型材表面や内部への影響を調査した。

2. 実験方法

φ10×長さ 120mm の円柱状で表面を鏡面加工したダイス鋼（SKD61）試験片に、ショットピーニング（以降 SP と略す）後ガス窒化（以降単に窒化と略す）を施したものの（以降 SP+窒化と表記）と、その後さらに SP 処理を追加した 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。比較のために未処理の試験片を加えた3種類について、ダイカスト工程で金型に加わる熱履歴を模擬した繰り返す浸漬試験を行った。

図1に示す熱疲労試験装置を用いて、黒鉛るつぼで溶解させた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、上方に取り出した後、横に移動させて水溶性離型剤をスプレーし、エアブローで乾燥させた後、再び溶湯に浸漬させることを繰り返した。黒鉛るつぼ中のアルミ溶湯は電気炉で約 650℃に保持し、試験片を浸漬させる時間は 2s とした。この時、試験片の先端約 20mm 程度が浸漬された。溶湯から取り出した

* 金属部

† 岐阜大学 工学部・機械工学科 准教授

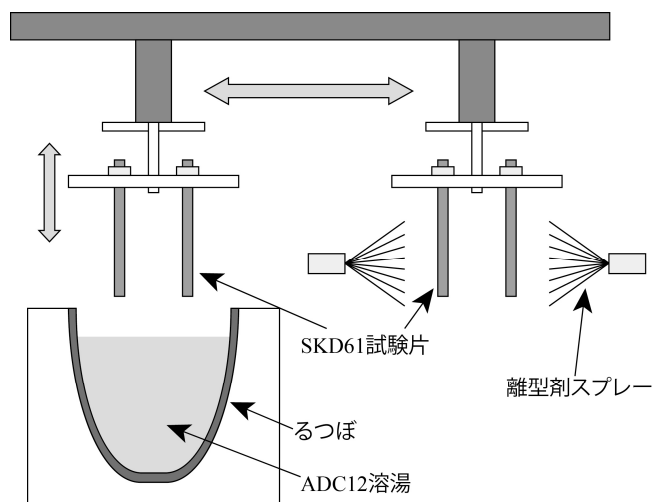


図1 熱疲労試験装置概略図

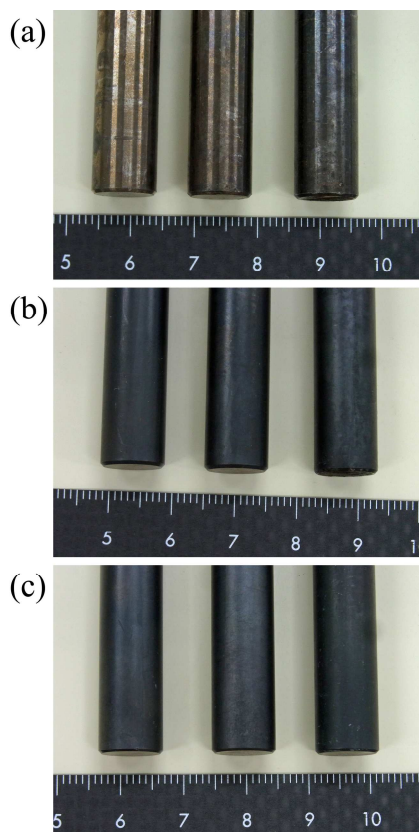


図2 水酸化ナトリウム洗浄後の各試験片外観
(a) 未処理、(b) SP+窒化、(c) SP+窒化+SP
(いずれも左から 50 回、200 回、500 回浸漬)

直後の試験片の温度を熱電対で測定すると、360～410℃程度であった。その後、水溶性離型剤のスプレーとエアブローによる乾燥後には 260～280℃程度に低下した。この一連の操作を繰り返した回数を 50, 200, 500 回と変化させて各試験片を採取した。なお、アルミ溶湯から試験片を取り出すと、アルミ合金の凝固被膜が付着してし

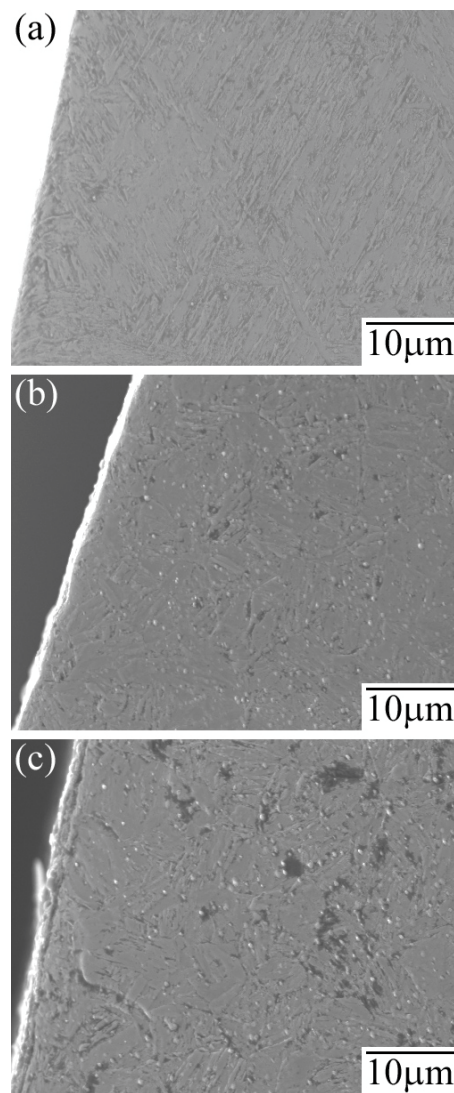


図3 500回浸漬させた試験片断面のSEM画像
(a) 未処理、(b) SP+窒化、(c) SP+窒化+SP

まうが、試験片とアルミ溶湯とを接触させる必要があるため、数回に 1 回の頻度でアルミ合金被膜を除去して実験を継続した。

得られた試験片は、表面に付着したアルミ合金を完全に除去するため、約 80℃に加熱した 30%水酸化ナトリウム水溶液に反応がなくなるまで浸漬させた(図2)。その後、浸漬部分の中央となる、端から 10mm 程度の位置で切断し、断面の観察・分析、硬さ分布測定に用いた。また、円柱状の試験片表面の構造解析は、X線回折装置(株)リガク製、SmartLab)を用いて、Cu管球、管電圧 40kV、管電流 30mA の条件で行った。試験片断面については、表面側から内部に向けてのビッカース硬さ分布を、自動硬さ測定機(丸本ストラス(株)製、デュラスキャン70)を用いて 0.05kgf の荷重で測定した。さらに、走査型電子顕微鏡(SEM)による断面観察とエネルギー分散型X線分析(EDS)による元素マッピングを行った。

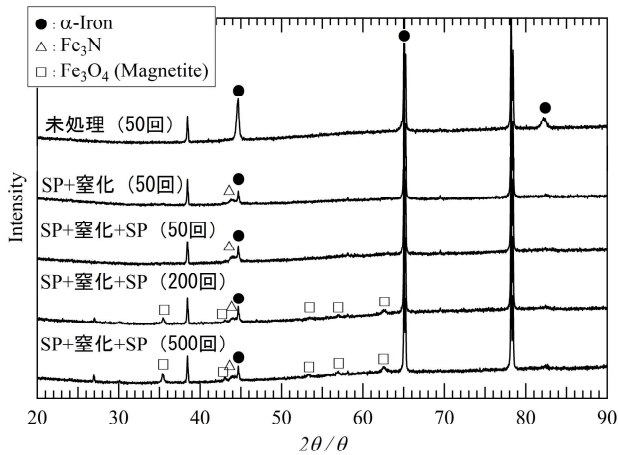


図4 各試験片表面のXRD 図

3. 結果及び考察

図3に500回繰り返し浸漬させたSKD61試験片の断面のSEM画像を示す。今回、500回の熱疲労を加えたが、試料のどこにもヒートクラック（ヒートチェック）のようなものは観察されなかった。いずれの試験片でも500回程度の繰り返し浸漬に対しては、耐ヒートクラック性があるものと考えられる。表面処理の影響を評価するには浸漬回数を増やす必要があるが、試験片にアルミ被膜が付着・堆積してしまう問題のため装置の自動化が難しく、実施することはできなかった。図3(c)のSP+窒化+SPの複合処理を施した試験片では、最表面に1~2μm程度の母材と異なる層が存在していた。

各試験片の表面構造をX線回折図（XRD図）により解析した。図4に熱疲労試験初期の50回浸漬した各試験片と、SP+窒化+SPの複合処理を施したもののについては50, 200, 500回と各段階での試験片表面のXRD図を示す。未処理およびSP+窒化の試験片では、50~500回の繰り返し浸漬ではXRDパターンに変化はなく、未処理ではα鉄が、SP+窒化ではα鉄と窒化鉄（Fe₃N）が検出された。SP+窒化+SPの試験片では、50回の浸漬ではSP+窒化と同様にα鉄と窒化鉄（Fe₃N）が検出されたただけだが、200回の浸漬から酸化鉄（Fe₃O₄）のピークも検出されるようになった。しかし、200回浸漬した試験片のSEM観察では、500回浸漬した図3(c)のような明確な層は観察されなかった。このことから、SP+窒化+SPの試験片では、アルミ溶湯への浸漬を繰り返すことで表面が酸化し、さらに繰り返すことで酸化皮膜が徐々に成長してきていることが分かった。

図5に50回浸漬したSP+窒化試験片の断面のEDSによる元素マッピング結果を示す。窒化が施されていることから、最表面側でNが多く検出されており、20~30μm程度の拡散層が存在しているのが分かった。

図6には500回浸漬したSP+窒化+SP試験片の断面のEDSによる元素マッピング結果を示す。図3(c)で見られた最表面の層には、FeとOのほか、N、Al、Si

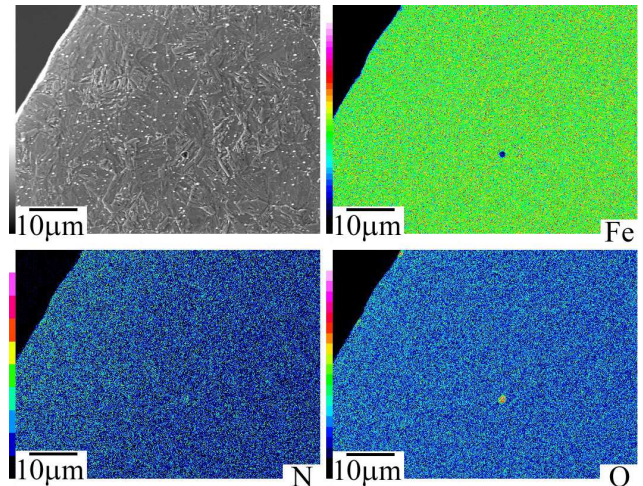


図5 50回浸漬したSP+窒化試験片断面のEDS 元素マッピング

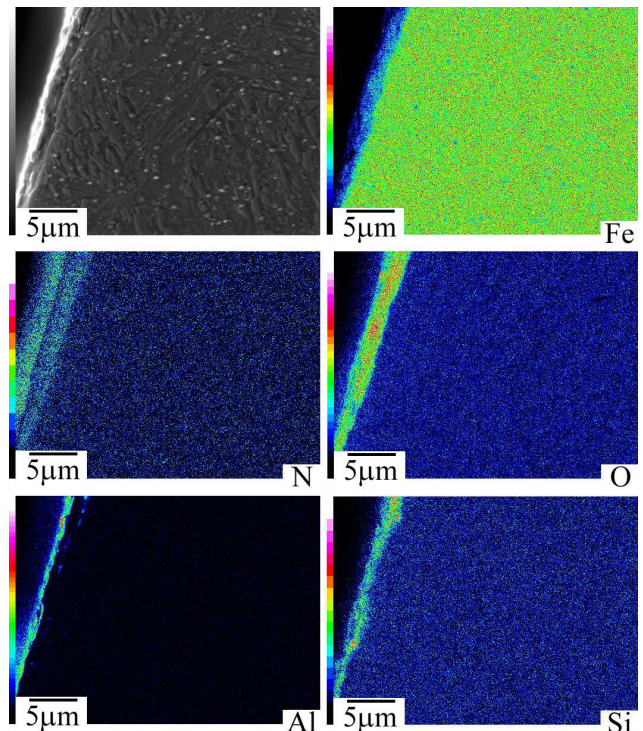


図6 500回浸漬したSP+窒化+SP試験片断面のEDS 元素マッピング

も検出された。高温のADC12溶湯と接触したことで反応したものと思われる。窒化処理後に酸化処理を施すことで最表面に酸化物層を形成させると、耐溶損性や耐食性・摩擦摩耗特性が向上するとの報告がある²⁰⁾。また、一般に酸化物は熱伝導率が低いため、表面に酸化物層が形成されると熱伝達が悪くなると考えられる。これを実際のダイカストに適用した場合、冷却が遅くなることから湯周り性が向上することが期待できるが、凝固が遅れることでサイクルタイムの増加を招いてしまう可能性がある。ただし、今回の繰り返し浸漬による熱疲労試験と実際のダイカストでは条件が異なることから、この酸化

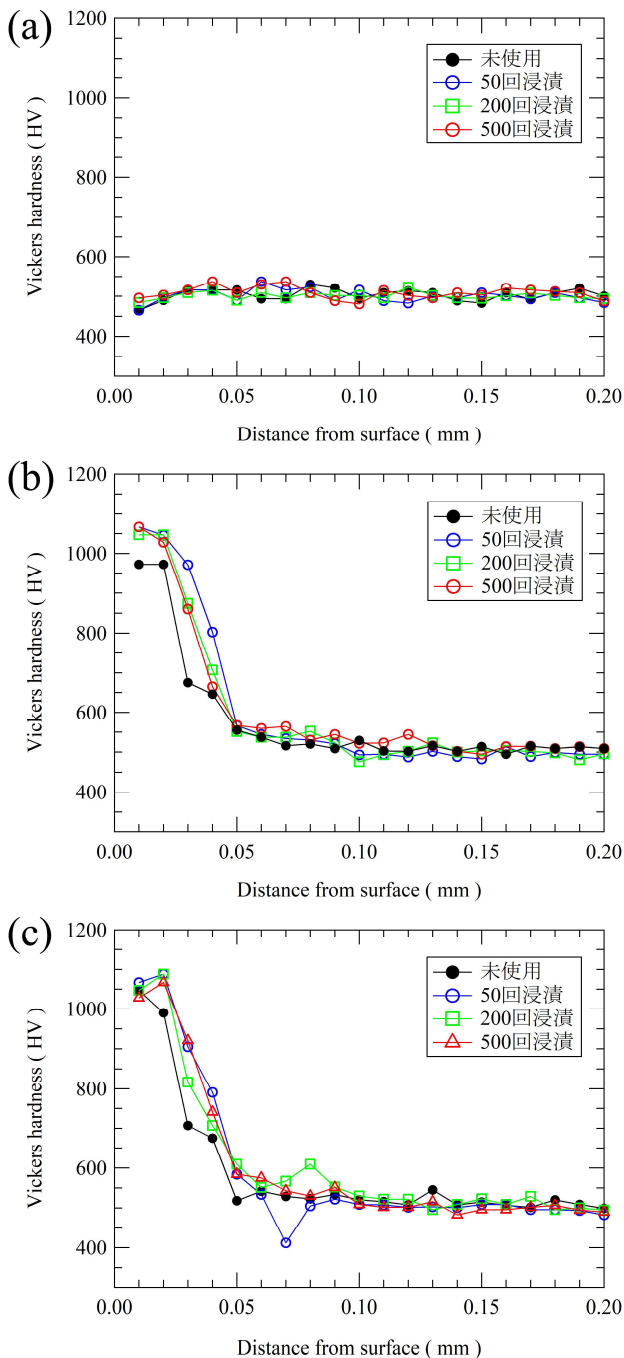


図7 各試験片の硬さ分布

(a) 未処理、(b) SP+窒化、(c) SP+窒化+SP

皮膜が同様に形成されるかどうかは不明である。今後、実際にダイカスト実験を行うことで明らかにしたい。

高温のアルミ溶湯に繰り返し浸漬させたことで、この熱により SKD61 試験片がなまされ、表面近傍の硬さが低下してしまう可能性があるのではないかと考えられた。そこで、各 SKD61 試験片の断面について、表面側から 10 μ m ごとの硬さをマイクロビッカースにより測定した。図7にその結果を示す。図7(a)の未処理材では、表面側から内部まで 500HV とほぼ均一な硬さであった。

図7(b)のSP+窒化処理材および図7(c)のSP+窒化+SP処理材では、窒化により表面の硬さが硬くなっており、1000HVを越える値となっていた。また、いずれも硬化深さは 40 μ m 程度までであり、図5のNの分布にほぼ対応していた。また、繰り返し浸漬の熱による影響はいずれの試験片でも見られず、窒化による硬化層内でもほぼ同様の硬さ分布を示していた。本研究で行った 500 回程度の浸漬では、窒化による硬化層内においても硬さに影響がほとんどないことが分かった。

4. まとめ

ショットピーニングと窒化を組み合わせた複合表面処理を施したダイス鋼 (SKD61) 試験片について、実際のダイカスト工程を模擬した熱疲労試験を最大 500 回行ったところ、以下のことが分かった。

- ・SP+窒化+SP と複合させた表面処理を施した試験片では表面に酸化皮膜が形成された。また、浸漬回数が増えるにつれ、酸化皮膜層が成長していた。

- ・窒化による硬化深さは 40 μ m 程度あり、今回の 500 回程度の熱疲労試験では硬化層内においても硬さの低下は見られなかった。

- ・酸化物層の存在は、耐溶損性や耐食性・摩擦摩耗特性・湯周りが向上する可能性があるが、実際のダイカストでの使用時にも形成されるかどうかは不明である。今後、実際にダイカスト実験を行うことで明らかにしたい。

【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) 村上ら, 日本ダイカスト会議論文集, pp217-221, 2006
- 8) 藤木, 表面技術, Vol.52 No.8, pp535-539, 2001
- 9) 北川ら, 電気製鋼, Vol.78 No.4, pp341-346, 2007
- 10) 西, 精密工学会誌, Vol.77 No.7, pp648-651, 2011
- 11) 川久保, 電気製鋼, Vol.49 No.1, pp50-56, 1978
- 12) 西村, 精密機械, Vol.46 No.10, pp37-43, 1980
- 13) 佐野ら, 電気加工学会誌, Vol.31 No.68, pp1-10, 1997
- 14) 日原, 電気加工学会誌, Vol.35 No.78, pp1-11, 2001
- 15) 八代, 塑性と加工, Vol.50 No.582, pp605-609, 2009
- 16) 加藤ら, 表面技術, Vol.52 No.8, pp544-547, 2001
- 17) 飯田ら, 精密工学会誌, Vol.54 No.1, pp107-111, 1988
- 18) 原田ら, 砥粒加工学会誌, Vol.51 No.3, pp161-166, 201
- 19) 水谷ら, 岐阜県工業技術研究所研究報告 No.6, pp19-22, 2017
- 20) 石塚ら, 日本ダイカスト会議論文集, pp1-6, 2016