

令和 4 年 6 月 3 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K04802

研究課題名(和文) 表面酸化によるアルミニウム鋳鉄の耐アルミニウム合金溶湯溶損性向上機構

研究課題名(英文) Mechanism of Improvement in Erosion Resistance of Aluminum Cast Iron to Aluminum Alloy Melt by Surface Oxidization

研究代表者

浅野 和典 (Asano, Kazunori)

近畿大学・理工学部・教授

研究者番号：50268471

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：アルミニウム鋳鉄を大気中で加熱処理することで表面に酸化物層を生成し、アルミニウム合金溶湯に対してその耐溶損性を著しく向上させることが明らかとなった。溶湯中の主要元素のうち、Mgはその含有量が鋳鉄の溶損挙動に与える影響が大きく、Mgを含まない場合が溶損までの時間が最も長くなることがわかった。また溶湯中のFe含有量と溶湯中に浸漬・攪拌した加熱処理鋳鉄試料の溶損時間の間に明確な関係は認められないことがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

アルミニウム含有鋳鉄を溶製し、これを加熱処理することで表面に酸化物層を生成させたアルミニウム鋳鉄試料を作製した。これが優れた耐アルミニウム合金溶湯溶損性を持つことを明らかにした。これにより、低コストで優れた耐溶損性を持つ金型材料を開発するための知見が得られた。本試料がアルミニウム合金溶湯に対して安定であることは、従来ダイカストを始めとする金型鑄造において懸念されてきた、溶湯の金型表面への焼付き抑制も期待できる。これによりJISダイカスト用アルミニウム合金に焼付き防止のために通常添加される鉄の量を減らすことができ、アルミニウム合金鋳物自体の機械的特性、特にじん性向上にも寄与できると考える。

研究成果の概要(英文)：Oxides layer was formed on the aluminum cast iron specimens by heat-treatment at atmosphere. The formation of the layer drastically improved the erosion resistance of the cast irons against aluminum alloy melt. Magnesium, which is typical alloy element of cast aluminum alloy, showed significant effects on the resistance of cast irons; time to erosion was the longest when the alloy melt did not contain magnesium. Relationship between the iron content in the alloy melt and erosion resistance of the cast iron was not clearly shown.

研究分野：金属材料工学、鑄造工学

キーワード：鋳鉄 アルミニウム 溶損 酸化物層 金型

1. 研究開始当初の背景

アルミニウム (Al) 合金鋳造用の金型は、長期間使用するうちに Al 合金溶湯の流動によって溶損が発生するため、その寿命 (耐溶損性) 向上が求められている。従来、金型の耐溶損性向上の手段として、表面被覆法などが用いられてきたが、高コストであることに加え、皮膜が損傷・消失した際の耐溶損性や補修の煩雑さなどが課題である。金型基材自体の耐溶損性を向上させるために Cr や Mo、V などの合金化も行われているが、これら元素は高価である。これらのことから、安価な材料・プロセスによる耐溶損性金型材料の開発が望まれている。鋳鉄に Al を添加し、大気中で加熱して表面にアルミナ (Al₂O₃) を生成させることで、低コストで鋳鉄の耐溶損性向上が期待できるものの、これについて調べた報告はほとんど見られない。

2. 研究の目的

本研究では、Al 鋳鉄に加熱処理を行い、その耐溶損性に及ぼす Al 含有量や加熱処理条件、Al 合金溶湯組成の影響を明らかにすることで、低コストで耐溶損性に優れた Al 合金鋳造用の金型材料を開発するための指針を得ることを目的とする。

3. 研究の方法

黒鉛るつぼ中に鋳鉄原料を入れ、高周波誘導炉を用いて溶解し、1723 K で砂型および化学組成分析用金型に鋳造した。鋳鉄試料の組成は 3.2 mass% C、2.0 mass% Si とし、Al 量は 1 ~ 7 mass% と変化させた。

砂型鋳造した鋳鉄試料を加工し、耐溶損性評価のための棒状試験片 (8.0×50 mm の片端にシャフト取り付け穴加工を施したもの) を得た。試験片をマッフル炉中・大気雰囲気中で加熱処理した。この際、加熱保持温度は 973、1173 及び 1373 K、保持時間を 1、4 及び 10 h と変化させ、保持後は炉冷した。

耐溶損性評価は、まずるつぼ炉内で 973 K で溶解した Al-9Si 合金溶湯に棒状試験片を先端から 25 mm 浸漬、回転撹拌させた。試験片は 1 時間経過ごとに溶湯から取り出して浸漬部の直径を測定し、試験片直径が浸漬前に対して 10% 以上減少したら溶損したと見なした。試験片の回転速度は、実用金型部材を通過する溶湯流速を想定して 37.7 mm/s (180 rpm) とした。Al 合金の合金元素のうち、鋳鉄試験片との反応に大きな影響を及ぼすと考えられるマグネシウム (Mg) と鉄 (Fe) に注目し、含有量をそれぞれ 0 ~ 1.5 mass% Mg、0.2 ~ 1.0 mass% Fe (以下、mass% を % と略記) と変化させた。

4. 研究成果

(1) 加熱処理試料の組織

973 K で加熱処理した鋳鉄試験片の表面近傍断面の光学顕微鏡組織を図 1 に示す。1 h の加熱保持では、Al 含有量が変化しても表面の酸化物層やその直下の脱炭層の厚さに大きな違いは見られない。1% Al 含有鋳鉄 (1AL) 試験片は加熱保持時間を 10 h にすると酸化物層、脱炭層ともに厚くなるが、これに比べて Al 含有量が多い試験片のそれらは薄い。

Al 含有量が 3% 以上で酸化物層から Al の検出がより明瞭に認められるようになった。1173 K で加熱処理した場合、酸化物層と基材との境界は不明瞭で、内部へ進むにつれ酸化物が次第に減少する傾斜組成的な分布を示しており、酸化物層と基材の密着は良好と推察された (図 2)。1373 K、4 h で加熱処理した 5AL 試験片の表面近傍を旋削して得られた切りくずを粉末 X 線回折によって解析したところ、α-Fe₂O₃、Fe₃O₄、α-Al₂O₃ が検出されたことから、試験片表面近傍にはこれらの酸化物

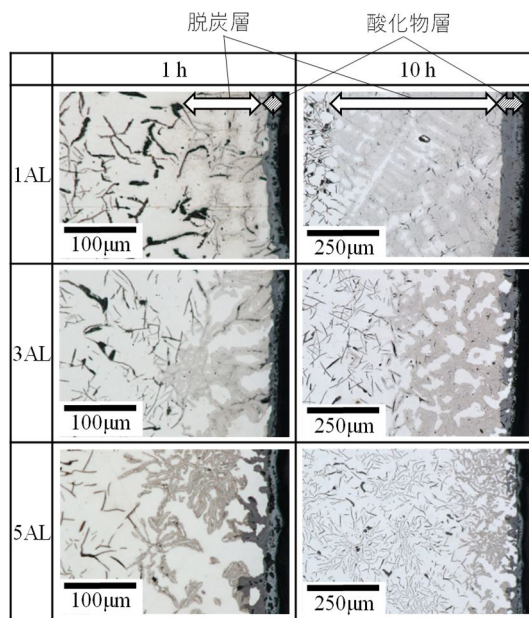


図1 鋳鉄試料 (973 K で加熱処理) 表面近傍の断面組織

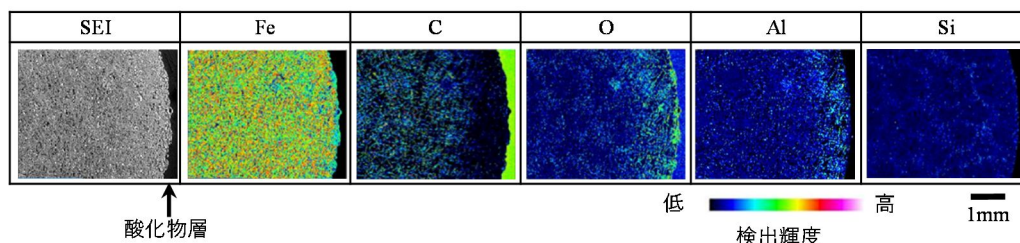


図2 加熱処理した鋳鉄試料 (3AL 1173 K - 10 h) の表面近傍の切断面における SEM 像及び X 線像

が混在していると判断した。加熱保持温度を 1373 K に上昇させると、酸化物層と基材との界面近傍に空隙が見られたことから、酸化物層の密着強度は高くないと推察された。

鑄造性や酸化物層の密着性を考慮し、本研究では Al 含有量は 3%、1173 K-10 h の加熱処理条件が最適であると判断し、以降は主に本条件で作製したものの耐溶損性評価結果を示す。

(2) 試料の耐溶損性

Mg 含有量の異なる Al-9Si-0.2Fe 合金溶湯に浸漬・攪拌保持し、Mg 含有量と溶損時間との関係をまとめたものを図 3 に示す。Mg を含まない合金溶湯に浸漬させた場合に溶損時間が最も長く (49 h) なった。Mg 含有量の増加とともに溶損時間は短くなり、0.75% 付近で溶損時間が最短となり、それ以上 Mg 含有量が増加すると溶損時間は再び長くなった。加熱処理しない Al 無添加試験片 (FC) 及び 3AL 試験片を AC4A 合金 (Mg 含有量 0.5%) 溶湯に浸漬・攪拌保持した場合の溶損時間も同図中に示したが、Al 添加と加熱処理による耐溶損性向上の効果は明らかである。

試験片を AC4A (Al-9Si-0.5Mg-0.2Fe) 合金溶湯へ 9 h 浸漬・攪拌保持後に取り出し、水酸化ナトリウム水溶液で試験片表面に付着した合金を除去して観察した外観を図 4 に示す。図 3 でも示したように、この浸漬時間では試験片は溶損に至っていない。ここでは、比較のために加熱処理直後の試験片も示している (図 4(a))。浸漬していた箇所は変色しているものの、形状の変化は見られない (図 4(a))。この試験片を Mg 含有量の異なる合金溶湯に浸漬・攪拌保持後、溶損時間に達する前に取り出し、合金が付着した状態で断面を SEM 観察および面分析を行った結果、0.75% Mg を含む溶湯を用いた場合は $MgAl_2O_4$ が、0.9% Mg を含む溶湯の場合は $MgAl_2O_4$ と MgO が混在することが示唆された。

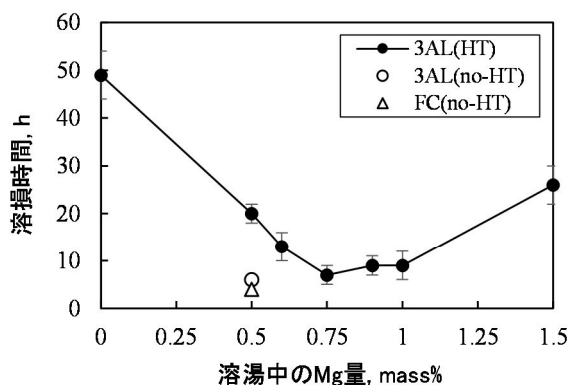


図3 鑄鉄試料の耐溶損性に及ぼすAl合金溶湯中のMg量の影響 (HT:1173 Kで10時間加熱処理)

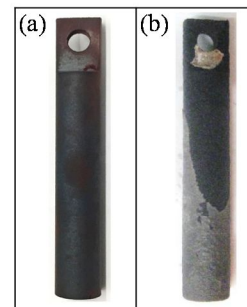
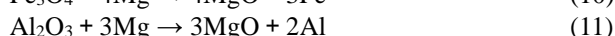
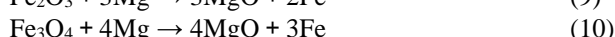
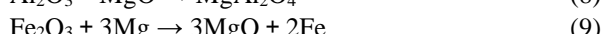
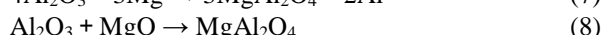
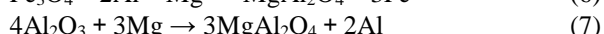
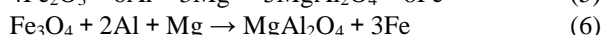
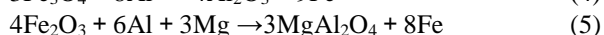
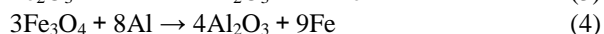
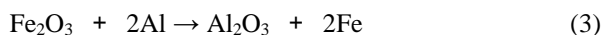


図4 加熱処理(1173 K-10 h)した3AL 試験片の外観 ((a)浸漬前、(b)Al-9Si-0.5Mg合金溶湯に9時間浸漬後に合金を除去)

Al 鑄鉄を加熱処理することで表面に複数の酸化物から成る層が形成され、鑄鉄基材と溶湯との接触を防ぎ、式 (1) (2) に示したような反応を抑制することで耐溶損性が向上する。



Al 合金溶湯に Mg が含まれない場合、酸化物層に含まれる酸化鉄 (主に Fe_2O_3 , Fe_3O_4) が溶湯と式 (3) (4) のような反応を起こすことでアルミナが生成すると考えられる。溶湯中の Mg は系の界面エネルギーを低下させるために酸化物層との界面に濃化し、Al よりも活発に反応に関与すると考えられ、式 (5) ~ (8) に示したような反応によって $MgAl_2O_4$ が生成する。溶湯中の Mg がさらに増加すると、式 (9) ~ (11) に示す反応によって $MgAl_2O_4$ に比べて緻密な MgO が生成する。これによって浸漬・攪拌過程で試料への溶湯の浸入や酸化物層のき裂・はく離が生じにくくなることで、再び溶損が生じにくくなったと考えた。



Al-9Si-0.5Mg 合金溶湯中の Fe 量と溶損時間との関係を図 5 に示す。合金溶湯中の Fe 量と鑄鉄試料の溶損時間の間に明確な関係は認められないことから、Fe は Mg のように鑄鉄試料の溶損挙動に顕著な影響を及ぼさないことがわかった。いずれの溶湯中の Fe 含有量の場合も、鑄鉄表面の酸化物層と

溶湯が反応し、 $MgAl_2O_4$ が界面に生成すること、また溶損の進行に伴い酸化物層が欠落した場所では、鑄鉄基地と溶湯の反応により Fe-Al 系及び Fe-Al-Si 系化合物が界面に生成することがわかった。本研究における耐溶損性の評価では、溶湯撈拌によって鑄鉄試験片と溶湯の間に生じるせん断応力も耐溶損性に影響を及ぼすことが推察され、これらの要因が重なることで本結果が得られたと考えた。

本研究で得られた鑄鉄試料は、軽微な溶損であれば、再度加熱処理を施すことで同様の酸化物層形成が可能である。また Al 合金ダイカストでは溶湯へ Fe を添加することで溶湯の金型への焼付きを抑制するとされているが、本鑄鉄を金型材料として用いることで焼付き低減が期待できることから、Fe 低減による Al 合金鑄物のじん性向上にも寄与できると考える。一方、Al 含有量の増加とともに鑄鉄試料の鑄造時の溶湯流動性が低下すること、引張強さが低下することも確認している。より少ない Al 量でも優れた耐溶損性を持つ鑄鉄を得ることが今後の課題と考える。

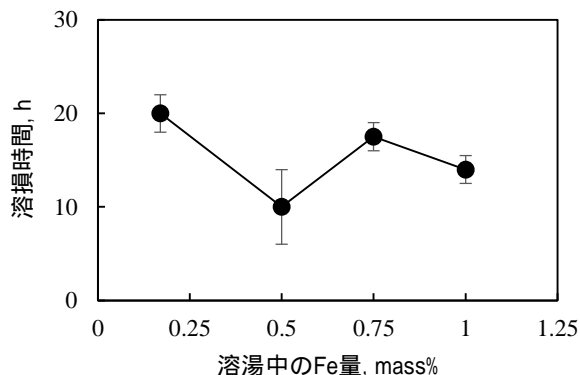


図5 3%Al鑄鉄試料(1173 K-10 h加熱処理)の耐溶損性に及ぼすAl-9Si-0.5Mg合金溶湯中のFe量の影響

<引用文献>

- 安齋 正博, 金型高品質化のための表面改質, 日刊工業新聞社, 2009, 156.
 佐藤 忠夫, 堀米 毅, 上田 幹人, CVD 法により TiB_2/TiN 二層被覆した SKD61 鋼の溶融 Al における耐浸食性, 表面技術, 51 巻, 2000, 640-645
 山本 兼司, 安永 龍哉, 佐藤 俊樹, AIP 法で形成した TiN 膜の純アルミ溶湯との反応性, 表面技術, 50 巻, 1999, 185-190
 市川 二郎, 須藤 興一, 工具鋼の Al 溶損挙動に及ぼす鋼組成の影響, 電気製鋼, 64 巻, 1993, 152-159
 特公平 03-046539
 中川 師夫, 酒井 淳次, 大河内 敬彦, 大越 斉, 溶融金属中における各種材料の溶損性, 鉄と鋼, 82 巻, 1996, 226-231
 辻川 正人, 橋本 哲, 日野 実, 川本 信, アルミニウム液相と結晶石英粒子の反応に及ぼすマグネシウムとカルシウムの影響, 鑄造工学, 75 巻, 2003, 737-742
 西 直美, 神 重傑, アルミニウム合金ダイカストの離型力に及ぼす鉄, マンガン量の影響, 鑄造工学, 70 巻, 1998, 648-654

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 浅野 和典、山田 浩士、杉村 誠司	4. 巻 94
2. 論文標題 加熱処理したアルミニウム鑄鉄の耐アルミニウム合金溶湯溶損性	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 鑄造工学	6. 最初と最後の頁 11 ~ 17
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11279/jfes.94.11	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 藤戸 謙吉 , 浅野 和典 , 渡辺 博行 , 岩崎 真也
2. 発表標題 鑄鉄の制振特性に及ぼすアルミニウムの影響
3. 学会等名 日本機械学会2021年度年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中井賢治 , 堺翔哉 , 横山隆 , 浅野和典
2. 発表標題 アルミニウム鑄鉄の応力 - ひずみ特性に及ぼす負荷様式の影響
3. 学会等名 日本実験力学学会2021年度年次講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 浅野和典 , 山田浩士 , 杉村誠司
2. 発表標題 アルミニウム添加と加熱処理による鑄鉄の耐溶損性向上
3. 学会等名 日本鑄造工学会第177回全国講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 浅野和典、山田浩士、杉村誠司
2. 発表標題 加熱処理したアルミニウム鋳鉄の耐溶損性
3. 学会等名 日本鋳造工学会 鋳鉄研究部会（招待講演）
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	藤戸 謙吉 (Fujito Kenkichi)		
研究協力者	渡辺 博行 (Watanabe Hiroyuki)		
研究協力者	岩崎 真也 (Iwasaki Masaya)		
研究協力者	山田 浩士 (Yamada Hiroshi)		
研究協力者	杉村 誠司 (Sugimura Seiji)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------