

(論文)

# 高濃度マグネシウム添加によるアルミニウムスクラップ精製の基礎検討

山口勝弘<sup>\*1</sup> (博士(工学))・小森康平<sup>\*1</sup>・加藤謙吾<sup>\*2,\*3</sup> (博士(工学))・小野英樹<sup>\*2,\*3</sup> (博士(工学))

## Fundamental Study of Purification of Aluminum Scrap by High-Concentration Magnesium Addition

Dr. Katsuhiro YAMAGUCHI・Kohei KOMORI・Dr. Kengo KATO・Dr. Hideki ONO

### 要旨

本研究では、高濃度マグネシウム添加によるアルミニウムスクラップ中の不純物除去技術について基礎的検討を行った。アルミニウム溶湯にマグネシウムを高濃度添加し、低温で短時間保持することで、Fe、Mn、Si、Crを含む化合物が初晶として生成し、不純物濃度が低減されることを実験的に確認した。また、生成化合物の沈降を利用して上層部のみを回収する手法を適用したところ、JIS A5052合金に対してCr濃度の低い溶湯が得られた。さらに、活量係数に基づく熱力学解析により、不純物除去挙動について理論的な裏付けを与えた。これらの結果より、本手法は短時間処理で複数の不純物を同時に低減し得る可能性を有しており、アルミニウムスクラップの高品質化に向けた基盤技術として期待される。

### Abstract

This research is based on a fundamental study of impurity removal from aluminum scrap by adding high-concentration magnesium. Experiments have confirmed that adding high concentrations of magnesium to aluminum molten metal and holding it at low temperatures for a short period of time results in the formation of compounds containing Fe, Mn, Si, and Cr as primary crystals, reducing the impurity concentration. Applying a settling-based separation to recover only the upper layer has produced molten metal with low Cr content in contrast with JIS A5052 alloy. Thermodynamic analysis based on activity coefficients has supported the observed impurity-removal behavior. These results demonstrate the method's potential to simultaneously reduce multiple impurities rapidly, and to serve as a foundational technology for improving aluminum scrap quality.

### 検索用キーワード

アルミニウムスクラップ, マグネシウム添加, リサイクル, CO<sub>2</sub>排出量削減, 不純物除去, Fe除去, Si除去

まえがき = 近年、産業分野におけるCO<sub>2</sub>排出量削減の要求が高まっている。アルミニウム材料は、鋼材の約3分の1の密度であり、輸送機器の軽量化に広く利用されている<sup>1), 2)</sup>。いっぽう、アルミニウムスクラップを原料として利用することで、一次アルミニウムの使用に比べてCO<sub>2</sub>排出量を97%削減できることから<sup>3)</sup>、アルミニウムスクラップのリサイクルは重要である。

しかし、アルミニウム材料は所望の特性を得るため合金化することが多く、自動車や家電のようにほかの金属材料と複合的に使用されるため、使用後は種々の不純物元素を含んだ状態で回収される。これらの不純物の多くは精錬時にガス相やスラグ相へ移行せず、従来の溶解・ casting工程では除去が困難である<sup>4)</sup>。そのため、不純物濃度の高いアルミニウムスクラップは展伸材への利用が難しく、不純物濃度の規制の緩い鋳物やダイカスト製品へカスケードリサイクルされることが一般的である。展伸材製造におけるCO<sub>2</sub>排出量削減のために、アルミニウムスクラップの水平リサイクルあるいはアップグレードリサイクルを可能とする技術開発が求められる。

溶湯中の不純物除去方法として、偏析法や三層電解法

が知られている<sup>5)</sup>。これらは高純度アルミニウムの精製法であり、展伸材用途として低純度スクラップに適用することは難しい。鋳物やダイカスト用Al-Si合金においては、Mn添加によるFe除去法が報告されている<sup>6)~8)</sup>。これは溶湯中でAl-Si-Fe-Mn化合物を生成し分離する方法であり、展伸材用合金への適用は難しいものの、簡便かつ実用的な方法である。

展伸材用アルミニウム合金における不純物低減の方法として、5000系(Al-Mg系)合金で使用されるMgを高濃度に添加する手法が検討されている<sup>9)~11)</sup>。Mgを高濃度添加し低温保持することでFe、Mn、Siを含む化合物が液相中に初晶として生成し、これに伴い液相中の溶質濃度が低下することが示されている。本手法は、溶湯処理後に得られる高Mg濃度合金を5000系アルミニウム合金の原料としてそのまま使用できるため、Mg除去工程を必要としない利点がある。しかしFe、Mn、Si以外の元素については除去挙動が確認されておらず、また産業的な適用に向けては、スケールアップ時の溶湯処理方法ならびに保持時間の最適化が課題である。そこで本研究では、Mg添加による不純物除去法の実用性を評価する

\*1 技術開発本部 材料研究所 \*2 国立大学法人富山大学 都市デザイン学部 材料デザイン工学科 \*3 国立大学法人富山大学 先進アルミニウム国際研究センター

ため、種々の不純物元素への適用、および短時間保持での除去可能性を評価した。また、清浄な溶湯を得るため生成化合物の分離を試みた。

## 1. 実験方法

種々の不純物元素に対する除去可能性の検討、および短時間保持での評価は1.1節の実験、清浄な溶湯を得るための生成化合物の分離は1.2節の実験で実施した。実験条件を表1に示す。

### 1.1 Al-Mg合金溶湯の静置保持による不純物挙動調査 (実験1～実験10)

内径55 mm、高さ120 mmの黒鉛るつぽにアルミニウム地金および各種中間合金 (Al-M合金, M = Fe, Mn, Si, Cr) を入れ、約973 Kで溶解した後、マグネシウム地金を添加した。総重量は120 gとし、組成はMg 20～40 mass%, 元素M 1 mass%, 残部をアルミニウムとした。以降、mass%を%と略記する。試料はArガス気流下で773～913 Kにて10～35 min保持した後、炉から取り出し、Arガスを吹き付けて空冷した。試料は縦方向に切断し、デジタルマイクロスコープおよび走査型電子顕微鏡 (SEM) により観察した。組成分析は、不純物除去後の成分を評価するため化合物が集積した領域を避け、ICP発光分光分析により実施した。

### 1.2 上層回収法による不純物化合物の分離 (実験11～実験13)

内径 (開口部) 150 mm、内径 (底部) 60 mm、深さ250 mmの黒鉛るつぽにアルミニウム地金および各種中間合金 (Al-M合金, M = Cr, Cu, Ti, Be) をJIS A5052組成となるように入れた。抵抗炉にて約1,000 Kで溶解後、マグネシウム地金を添加し溶湯量を5.0～5.4 kgとした。なお、溶湯の酸化状態を調べるため、実験12は酸化防止のためのBeを不添加とした。溶湯は所定温度で10 min保持した後、残湯が0.5 kgとなるように空のるつぽへ注湯した。ここで、沈殿した不純物化合物が流

出ないように上層部のみ回収するように静かに実施した。注湯されたるつぽ内の溶湯を治具で攪拌 (かくはん) し、サンプリングを実施した。残湯はるつぽに残したまま室温で放冷した。成分分析は固体発光分析により行った。

## 2. 実験結果

### 2.1 Mg添加による不純物低減と上層回収の有効性

表1に示した分析結果のとおり、実験1～10において、配合組成と比較して不純物元素の濃度は低減した。アルミニウム合金の溶解する973 Kにおけるアルミニウム中の溶解度は、状態図よりFeが1.8%<sup>12)</sup>、Mnが3.6%<sup>13)</sup>、Siが21%<sup>14)</sup>、Crが0.68%<sup>15)</sup>である。本結果は、Mgを高濃度添加して低温で保持することでFe, Mn, Si, Crの溶解度が低下したことを示している。以上の結果から、Mg添加による不純物除去は実用的な保持時間でも有効であることが分かった。

溶湯の上層部を回収する工程を行った実験11～13においても同様にCr濃度が狙い組成より低下した。またMg濃度が高く保持温度の低い実験13が最も低いCr濃度となった。本結果より、溶湯を分取することでCr濃度の低い溶湯を分離回収できることが示された。

### 2.2 化合物生成挙動と酸化抑制効果の観察

図1に実験2 (Al-30% Mg-1% Fe) の断面観察結果を示す。観察位置は円柱中央付近の縦断面である。図1 (a) はデジタルマイクロスコープ像であり、下部に化合物が確認できた。図1 (b) および (c) は、それぞれ試料上部および下部のBSE像である。白色部はAl-Fe化合物であり、Shinomiyaらの研究<sup>9)</sup>より平衡相のAl<sub>3</sub>Fe (Al<sub>13</sub>Fe<sub>4</sub>, 密度3.84 × 10<sup>3</sup> kg/m<sup>3</sup><sup>16)</sup>) と推定される。試料下部にはAl-Fe化合物が多く存在しているのに対し、試料上部にはほとんど見られない。これはAl-Fe化合物の密度は溶融アルミニウム (973 Kにおいて2.37 × 10<sup>3</sup> kg/m<sup>3</sup><sup>17)</sup>) より大きいので、液相中で初晶として生成したあと沈降

表1 実験条件 (ターゲット元素, 配合組成, 重量, 温度) と実験結果のまとめ

Table 1 Summary of experimental conditions (Target elements, Formulated composition, Weight, Temperature) and corresponding results

Experiment No.	Element M	Formulated composition	Weight (kg)	Holding time (min)	Temperature (K)	Experimental concentration (mass%)	
						Mg	M
1	Fe	Al-20% Mg-1% Fe	0.12	35	833	22	0.29
2	Fe	Al-30% Mg-1% Fe	0.12	25	833	32	0.08
3	Fe	Al-40% Mg-1% Fe	0.12	10	823	43	0.02
4	Fe	Al-30% Mg-1% Fe	0.12	15	913	39	0.79
5	Mn	Al-20% Mg-1% Mn	0.12	25	823	19	0.32
6	Mn	Al-30% Mg-1% Mn	0.12	21	873	36	0.50
7	Si	Al-20% Mg-1% Si	0.12	30	823	19	0.44
8	Si	Al-30% Mg-1% Si	0.12	20	873	26	0.24
9	Cr	Al-20% Mg-1% Cr	0.12	20	823	21	0.03
10	Cr	Al-30% Mg-1% Cr	0.12	20	873	31	0.02
11	Cr	Al-10% Mg-0.19% Cr-0.05% Cu -0.03% Ti-0.004% Be	5.4	10	896	9.4	0.11
12	Cr	Al-10% Mg-0.21% Cr-0.05% Cu -0.03% Ti	5.0	10	901	10	0.13
13	Cr	Al-15% Mg-0.18% Cr-0.04% Cu -0.03% Ti-0.003% Be	5.0	10	877	15	0.08

し、下部に集積したものと考えられる。

図2に、実験1, 6, 8, 10の試料断面のデジタルマイクログラフ像を示す。実験1の像中の格子は画像連結によるものである。図2(a)では、図1と同様にAl-Fe化合物の晶出が確認されたが十分に沈殿しておらず、炉から取り出した際に振動が加わった可能性がある。図2(b), (d)は、Al-Mn, Al-Cr系と推定される化合物が沈殿していた。図2(c)では、粒状の物質が試料上部に観察された。この物質はKatoらの研究<sup>11)</sup>よりMg<sub>2</sub>Siと推定され、密度が $1.99 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ <sup>16)</sup>と熔融アルミニウムより小さいため、試料上部に浮上・集積したと考えられる。本手法を用いない場合、化合物は初晶 $\alpha$  Al相の間隙に生成するため密度差によらず断面全体に分布する。本結果は化合物が密度差に従って浮上、沈降したことから、化合物は全体が液相の状態から生成したことを示している。

図3に実験12と13の実験後の残湯の上面の写真を示

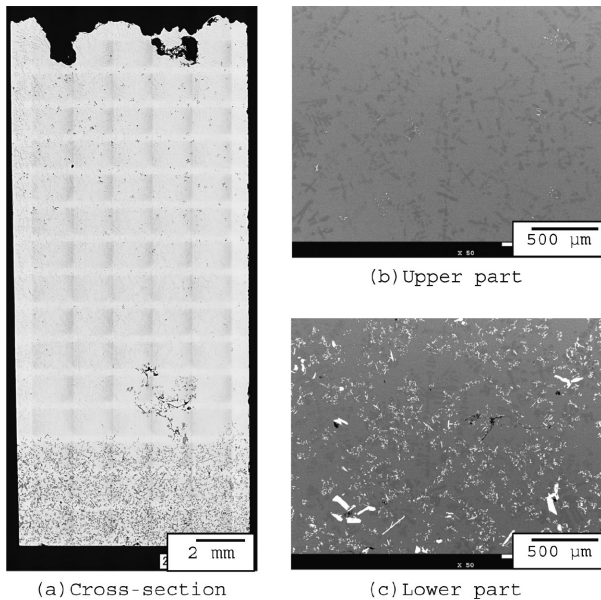


図1 実験2の試料断面 (Al-30% Mg-1% Fe 組成で833 K, 25 min 保持)  
Fig.1 Cross-section of specimen from Experiment 2 (composition: Al-30% Mg-1% Fe, held at 833 K for 25 min)

す。図3(a)はBeを添加しなかった実験12で、黒色の酸化物が表面を覆うように生成し、図3(b)の実験13はMg濃度が高くても黒色の酸化物は発生していなかった。Beの微量添加による溶湯の酸化防止効果は広く知られているが、高Mg濃度であるAl-15% Mg合金でも効果を発揮することが分かった。高Mg濃度の溶湯は酸化しやすく、残湯を再処理することを考慮すると、本手法には酸化抑制が必要でBe添加は有効な手段の一つと考えられる。

### 2.3 上層回収法による清浄溶湯の回収率評価

Al-Cr系化合物が沈殿した溶湯に対し、Cr濃度の低い

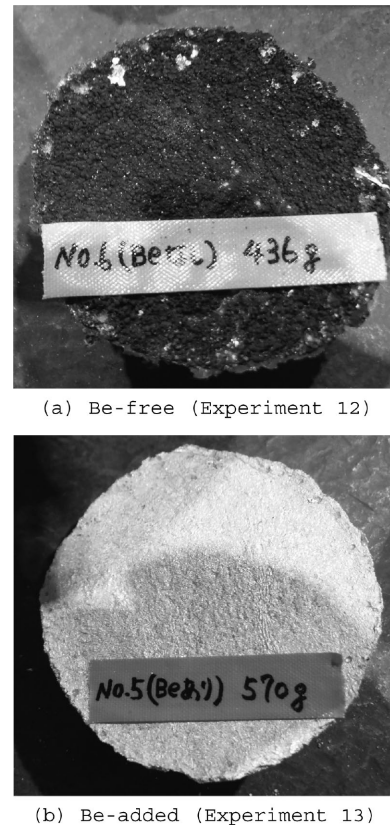


図3 実験後溶湯のBe添加有無における酸化状態の比較  
Fig.3 Comparison of the oxidation state of the remaining melt with and without Be addition

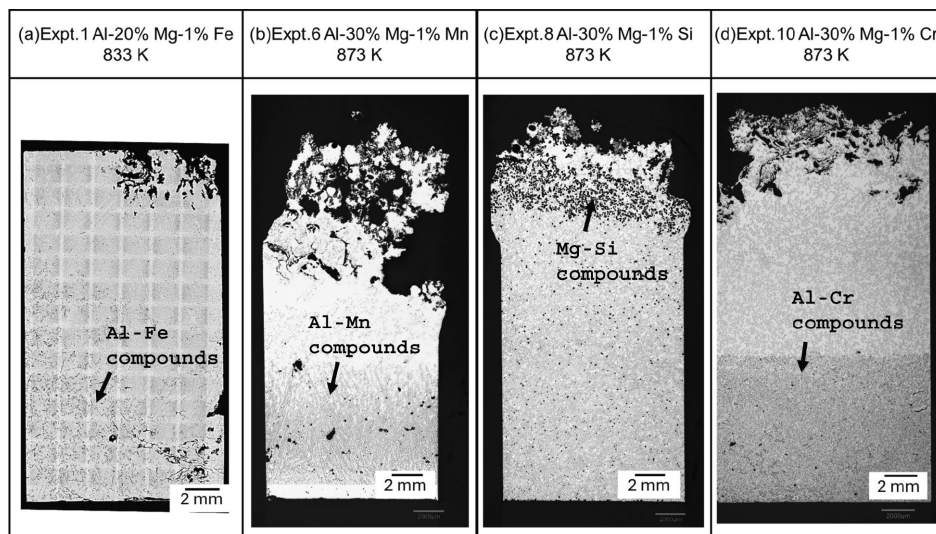


図2 試料の断面観察：(a) Al-20% Mg-1% Fe, (b) Al-30% Mg-1% Mn, (c) Al-30% Mg-1% Si, (d) Al-30% Mg-1% Cr  
Fig.2 Cross-section observations of samples, (a) Al-20% Mg-1% Fe, (b) Al-30% Mg-1% Mn, (c) Al-30% Mg-1% Si, (d) Al-30% Mg-1% Cr

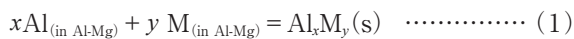
上層部を別容器に移した実験11~13において、回収率を初期重量と実験後の残留溶湯重量から算出した。結果、回収率は実験11~13がそれぞれ90%、91%、89%となった。成分分析結果からCr濃度は低下しており、本実験での清浄溶湯の回収率は90%となった。なお、本手法による回収率は化合物種や初期濃度により大きく変化すると考えられる。

### 3. 考察

#### 3.1 不純物除去機構の熱力学検討および除去可能元素の検討

本節では、Mg添加時の除去機構を理解するため、活量係数の変化に着目した熱力学的考察を行い、本手法で除去可能な不純物元素を検討した。

不純物元素Mに関して、Al-M化合物の生成反応式は式(1)で表される。式(1)が平衡状態にあるとき、各成分の活量の関係は式(2)で表される。



$$\Delta G^\circ_{(1)} = -RT \ln \frac{a_{Al_xM_y}}{a_{Al}^x a_M^y} \quad (2)$$

ここで、 $\Delta G^\circ_{(1)}$ は $Al_xM_y(s)$ の標準生成ギブズエネルギーを示し、 $a_i$ はラウール基準における元素*i*の活量、 $R$ は気体定数(J/mol·K)、 $T$ は絶対温度(K)である。元素*i*の活量は、式(3)のようにラウール基準における活量係数 $\gamma_i$ とモル分率 $N_i$ の積で表される。式(2)および式(3)から、Al-Mg溶湯中における元素Mの溶解度は式(4)で示される。

$$a_i = \gamma_i N_i \quad (3)$$

$$y \ln N_{M(in\ Al-Mg)} = \frac{\Delta G^\circ_{(1)}}{RT} + \ln a_{Al_xM_y} - x \ln a_{Al} - y \ln \gamma_{M(in\ Al-Mg)} \quad (4)$$

さて、三元系における活量係数を表現する方法としてToop式<sup>18), 19)</sup>が提案されている。Al-Mg-M系が正則溶液であり、元素Mの濃度が希薄と仮定すると、Al-Mg溶湯中の元素Mの活量係数 $\gamma^\circ_{M(in\ Al-Mg)}$ は式(5)で表される。この値は、Al-MおよびMg-M二元系における元素Mの活量係数 $\gamma^\circ_{M(in\ i)}$  ( $i=Al, Mg$ )と、Al-Mg系の過剰自由エ

ネルギー $G_{Al-Mg}^{ex}$ から算出できる。

$$\ln \gamma^\circ_{M(in\ Al-Mg)} = \frac{N_{Al}}{N_{Mg} + N_{Al}} \cdot \ln \gamma^\circ_{M(in\ Al)} + \frac{N_{Mg}}{N_{Mg} + N_{Al}} \cdot \ln \gamma^\circ_{M(in\ Mg)} - (1 - N_M)^2 \cdot \frac{G_{Al-Mg}^{ex}}{RT} \dots (5)$$

また、 $\gamma_{M(in\ i)}$  ( $i=Al, Mg$ )は、式(6)で表される。

$$RT \ln \gamma_{M(in\ i)} = \left( \frac{\partial G_{iM}^{ex}}{\partial N_M} \right)_{T, P, n_i} = G_{iM}^{ex} + (1 - N_M) \left( \frac{\partial G_{iM}^{ex}}{\partial N_M} \right)_{T, P, n_i, n_j} \dots (6)$$

$G_{iM}^{ex}$ はRedlich-Kister型多項式を用いて式(7)で表される。

$$G_{iM}^{ex} = N_i N_M \sum_{v=0} L_{i, M}^{Liq, v} (N_i - N_M)^v \dots (7)^{20)}$$

ここで、 $L_{i, M}^{Liq, v}$ は、 $i$ - $M$ 二元系の液相における*v*次の相互作用パラメータを示す。 $N_i = 1 - N_M$ かつ $N_M \ll 1$ であり、簡単のため3次以上の相互作用パラメータおよび、 $N_M$ の2次以上の項を無視すると、 $i$ - $M$ 二元系における元素Mの無限希薄溶液における活量係数は式(6)と式(7)から式(8)で表される。

$$RT \ln \gamma^\circ_{M(in\ i)} = L_{i, M}^{Liq, 0} + L_{i, M}^{Liq, 1} + L_{i, M}^{Liq, 2} + N_M (-2L_{i, M}^{Liq, 0} - 6L_{i, M}^{Liq, 1} - 10L_{i, M}^{Liq, 2}) \dots (8)$$

ここにAl-M系、Mg-M系(元素M=Fe<sup>20)</sup>, Mn<sup>20)</sup>, Si<sup>20)</sup>, Cr<sup>15), 20)</sup>, Ti<sup>20), 21)</sup>, Zr<sup>20)</sup>, Cu<sup>20)</sup>)の相互作用パラメータを代入することで元素Mのそれぞれの活量係数を求めることができる。さらに、式(5)中の $G_{Al-Mg}^{ex}$ は式(7)の*i*をAl、MをMgとし、Al-Mg系の相互作用パラメータ<sup>20)</sup>を代入することで求めることができる。

温度873 K、M濃度0.1%における $\ln \gamma^\circ_{M(in\ Al-Mg)}$ をMg濃度に対して計算した結果を図4に示す。さらに、Fe、Mn、Siについては比較としてShinomiyaら、およびKatoらの研究<sup>9)~11)</sup>の平衡実験による実験値を示した。なお、計算値には凡例に「(Calc.)」、実験値には「(Expt.)」と表記した。Fe、Mn、Siの活量係数に対して、計算値と実験値の絶対値は一致しないが、Mg濃度に対し増加または減少する傾向は同じであった。Mg濃度が0%から30%に増加するにつれてFe、Mn、Cr、Ti、Zrの活量係数は増加した。とくにFe、Cr、Ti、Zrの活量係数は2桁以上増加した。873 KにおけるAl-Mg系の $a_{Al}$ は1,000 Kの活量<sup>22)</sup>から正則溶液近似( $T \ln \gamma_i = \text{const.}$  ( $i: Al$  or

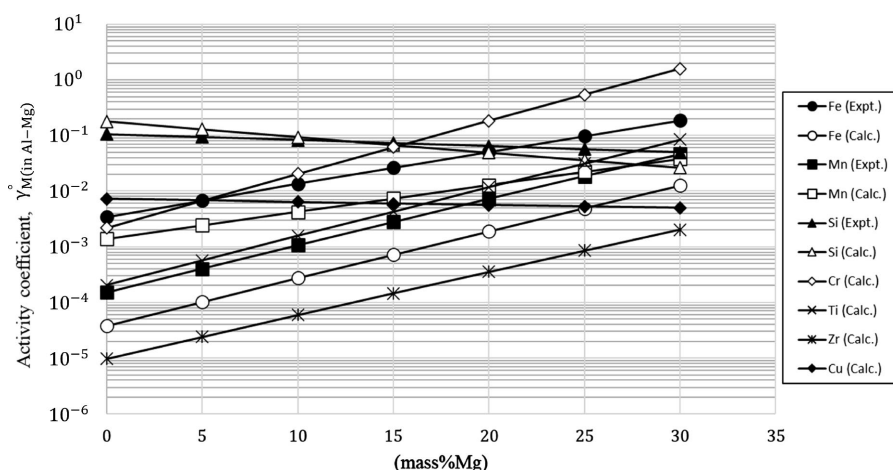


図4 Mg濃度と液体Al-Mg合金中の各元素Mの活量係数(873 K)の関係  
Fig.4 Activity coefficients of various elements M in liquid Al-Mg alloys at 873 K as a function of Mg concentration

Mg)) により概算でき、Mgのモル分率が0から0.3に増加した場合に $a_{Al}$ は1から0.675へ低下する。この減少率は $\gamma_{M(in Al-Mg)}$ の増加率に対して小さい。よって、元素Mの溶解度の低下は活量係数の増加の影響が大きく、溶解度以上の元素MがAl-M化合物を生成したと考えられる。同様にTiおよびZrについても活量係数が増加することからAl-Mg合金からの除去が可能と推定される。また、Mgはアルミニウム溶湯に溶解しFe, Mn, Cr, Ti, Zrと化合物を形成しないことから、複数の不純物元素を同時に除去可能と見込まれる。いっぽう、CuおよびSiの活量係数は、Mg濃度の増加に伴い低下した。Al-Cu系では、状態図によりCuAl<sub>2</sub>(s)の生成が予測される<sup>23)</sup>。しかし、Mg濃度の増加に伴い $a_{Al}$ および $\gamma_{Cu(in Al-Mg)}$ がともに低下するため、式(4)において溶解度が低下しない。したがって、本手法でのCuの除去は難しいと考えられる。Siについては、実験中にSi濃度が低下し、化合物生成の可能性が示唆された。この挙動は、本研究で扱ったほかの元素とは異なり、SiがMgと直接反応してMg<sub>2</sub>Siを形成するため、Mgの活量増加の影響をとくに強く受けた結果であると考えられる。

本節では、Al-Mg-M三元系における元素Mの活量係数を評価することで、Fe, Mn, Crの実験結果を考察し

た。また、実験していないTi, Zr, CuについてMg添加の効果を計算により推定した。

### 3.2 Mg添加法における不純物溶解度の計算値と実験値の比較

本実験の妥当性を評価するため、化合物形成時の液相中元素Mの溶解度を熱力学データに基づいて算出し、実験結果と比較した。本研究では、XRDなどを用いた化合物種の同定を実施していないため、文献よりAl-Fe化合物はAl<sub>3</sub>Fe<sup>9)</sup>、Al-Mn化合物はAl<sub>6</sub>Mn<sup>10)</sup>、Mg-Si化合物はMg<sub>2</sub>Si<sup>11)</sup>、Al-Cr化合物はAl-Cr系状態図の高Al濃度側の化合物Al<sub>7</sub>Cr (Al<sub>13</sub>Cr<sub>2</sub>)<sup>15), 20)</sup>と仮定した。表2に化合物の生成反応とそのギブズ自由エネルギーを示す<sup>9)~11), 15), 20)~22)</sup>。文献でギブズ自由エネルギー $\Delta G^\circ$ が $\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ$ として表されている場合はそのまま使用し、それ以外の場合は、823 Kおよび873 Kにおける $\Delta G^\circ$ を反応物および生成物の自由エネルギーから算出し、切片と傾きから $\Delta H^\circ$ および $\Delta S^\circ$ を求めた。元素Mの活量係数はFe, Mn, Siは実験値<sup>9)~11)</sup>、Crは計算値<sup>15), 20)</sup>から求めた。Al, Mg活量はAl-Mg二元系かつ正則溶液であると仮定し、Al-Mg系の1,000 Kの活量<sup>22)</sup>より算出した。なお、簡単のためMg<sub>2</sub>Siの混入は無視した。図5に計算によって求めたMg濃度に対する液相中の元素M

表2 平衡計算に使用した熱力学データと参考文献

Table 2 Thermodynamic data and references used for equilibrium calculations

Element M	Formation reaction of compounds	Formation Gibbs free energy $\Delta G^\circ$ (J/mol)	Reference		
			$\Delta G^\circ$	$\gamma_{M(in Al-Mg)}$	$a_{Al} \cdot a_{Mg}$
Fe	3Al(l) + Fe(l) = Al <sub>3</sub> Fe(s)	-136,460 + 68.4T	9)	9)	22)
Mn	6Al(l) + Mn(l) = Al <sub>6</sub> Mn(s)	-189,344 + 116.3T	21)	10)	22)
Si	2Mg(l) + Si(l) = Mg <sub>2</sub> Si(s)	-136,248 + 62.7T	20)	11)	22)
Cr	13Al(l) + 2Cr(l) = Al <sub>13</sub> Cr <sub>2</sub> (s)	-364,186 + 196.3T	20)	15, 20)	22)

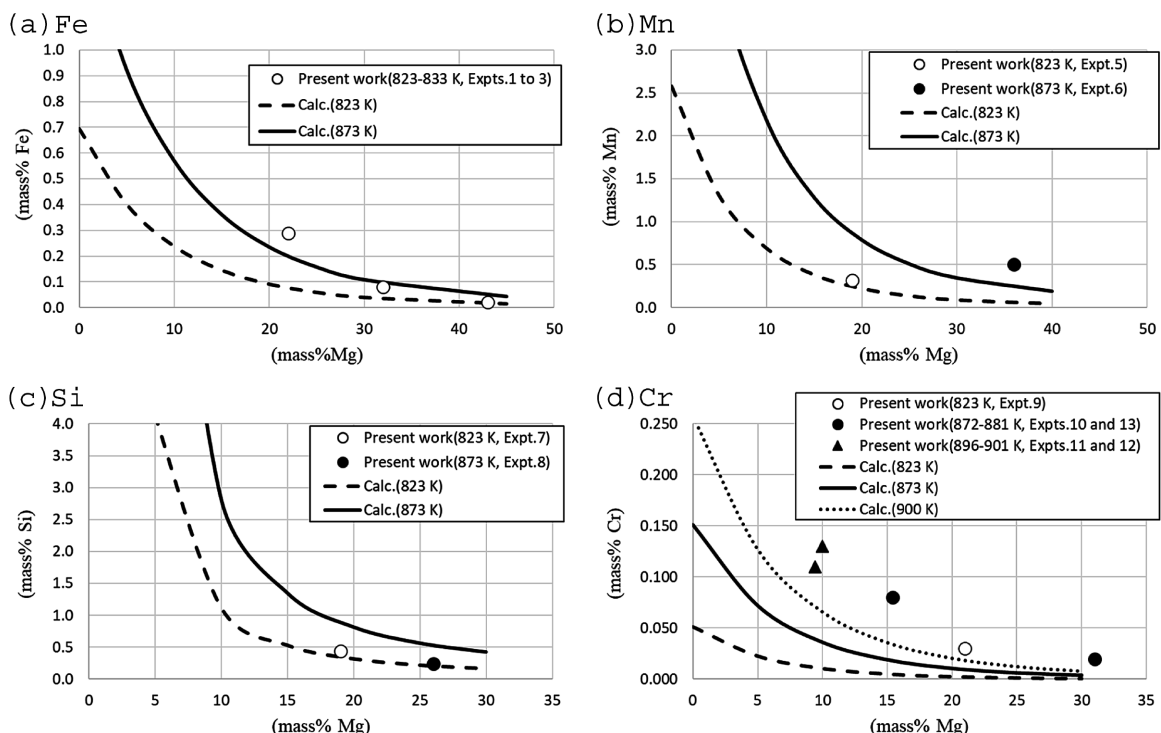


図5 Mg濃度に対する液体Al-Mg合金中Fe, Mn, Si, Cr溶解度の計算値と実験結果の比較

Fig. 5 Comparison of calculated and experimental solubilities of Fe, Mn, Si and Cr in liquid Al-Mg alloys as a function of Mg concentration

の溶解度を示す。Fe, Mn, Siについては823 Kと873 Kの計算結果を, Crについては900 Kの結果も加えて表示した。実験点は, 823 K, 873 K, 900 Kのそれぞれに近い条件のものをプロットした。その結果, Fe, Mn, Siの実験結果は溶解度に近く, 35 min以内の保持時間で平衡に達したことが示唆された。図5(a)では, 実験1のFe濃度が計算値より高かった。これは, 図2(a)に示すように, 試料中のAl-Fe化合物が十分に沈殿しておらず, 分析サンプルへのAl-Fe化合物混入が避けられなかったためと考えられる。いっぽう, Crの実験値は全体的に計算値より高かった。これは, 実験が平衡に達していない可能性も考えられるが, 主な原因は計算に用いた活量係数の精度が十分でなく, 実際より低い溶解度が算出されたためと考えられる。図4に示すFeの活量係数のように, 熱力学データから導出した値と直接測定した値の間で差が生じる場合がある。Al-Mg-Cr系において本実験が平衡に達しているかを判断するためには, 直接測定した活量係数を用いて比較することが望ましい。

以上より, 本プロセスの化合物生成に要する平衡時間は短く, 実用的な処理時間で実施可能であることが示唆された。

**むすび** = 本研究では, Mg高濃度添加によりアルミニウム中のFe, Mn, Si, Crを短時間で化合物として除去できることを示した。また, 活量係数の評価により不純物の除去挙動を推定し, 新たにTi, Zrの除去可能性が示唆された。いっぽうで, Cuは本手法で除去困難であることも示された。また, 生成化合物の沈降挙動を利用した上層回収法により清浄溶湯が得られた。

これらの知見により, 本手法は実用的な保持時間で複数種の不純物を低減できると期待され, 低品位アルミニウムスクラップの展伸材への高度利用に向けた基盤技術となり得る。

## 参 考 文 献

- 1) 田端祥久. 軽金属. 2022, Vol.72, No.9, p.549-555.
- 2) 廣瀬明夫. 軽金属. 2021, Vol.71, No.4, p.188-196.
- 3) 高杉篤美. 軽金属. 2009, Vol.59, No.2, p.87-93.
- 4) 平木岳人ほか. 資源循環学会第23回年次大会講演論文集. 2012-10-22/24, 廃棄物資源循環学会, 2012, p.269-270.
- 5) 近藤光博ほか. までりあ. 1994, Vol.33, No.1, p.62-65.
- 6) 鳥井正次. 日本金属学会誌. 1948, Vol.11, No.10, p.17-19.
- 7) 朴 俊杓ほか. 日本金属学会誌. 1995, Vol.59, No.3, p.312-318.
- 8) 北 竣太ほか. 軽金属. 2025, Vol.75, No.4, p.190-198.
- 9) Y. Shinomiya et al. Mater. Trans. 2023, Vol.64, Issue 2, p.385-391.
- 10) K. Kato et al. Mater. Trans. 2023, Vol.64, Issue 2, p.392-397.
- 11) K. Kato et al. 実験力学. 2025, Vol.25, No.4, p.200-207.
- 12) A. Lendvai. J. Mater. Sci. Lett. 1986, Vol.5, p.1219-1220.
- 13) J. L. Murray et al. Metall. Trans. A. 1987, Vol.18, p.385-392.
- 14) J. L. Murray et al. Bull. Alloy Phase Diagr. 1984, Vol.5, No.1, p.74-84.
- 15) Y. Liang et al. J. Alloy. and Compd. 2008, Vol.460, p.314-319.
- 16) Y. Xu et al. Jpn. J. Appl. Phys. 2011, Vol.50, 11RH02.
- 17) E. A. Brandes et al. Smithells Metals Reference Book, 7th Ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, 1997, Table14.3a.
- 18) 鄭 敏輝ほか. 日本金属学会誌. 1987, Vol.51, No.1, p.44-50.
- 19) 森山徐一郎ほか. 日本金属学会会報. 1970, Vol.9, No.12, p.764-776.
- 20) I. Ansara et al. COST 507, Thermochemical Database for Light Metal Alloys, Vol.2, EUR 18499, 1998, 396p.
- 21) J. L. Murray. Bull. Alloy Phase Diagr. 1986, Vol.7, No.3, p.245-248.
- 22) P. Franke and D. Neuschütz(Ed.). Elements and Binary Systems from Ag-Al to Au-Tl (Binary Systems. Part 1). Landolt-Börnstein - Group IV: Physical Chemistry, Vol.19B1. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002, 332p.
- 23) T. B. Massalski (Ed.). Binary Alloy Phase Diagrams. 2nd Ed., Vol.1, ASM International, 1990, p.141-143.