

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 9 月 4 日現在

機関番号：13201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06523

研究課題名(和文) 高品質Al-Li合金の鋳造法研究

研究課題名(英文) Investigation of casting process in high quality Al-Li alloy

研究代表者

才川 清二 (Saikawa, Seiji)

富山大学・大学院理工学研究部(工学)・教授

研究者番号：20642226

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：高品質なAl-Li合金の鋳造法の開発、作製された合金の成形性の測定およびダイカスト鋳造への適用を研究した。可傾式高品質鋳造法により鋳造されたAl-1～4mass%LiおよびAl-2mass%Mg-1mass%Li合金の圧延加工性は極めて良好であった。一方、それ以上のCu,MgおよびLi溶質の濃度増加は加工性を著しく低下させた。これらの加工性の低下原因は、晶出した相が組織中に残存する事により生じる事を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Development of the foundry of the Al-Li alloy of high quality, the measurement of the formability of a made alloy and application for die-casting were investigated. The rolling workability of the Al-1～4mass%Li and Al-2mass%Mg-1mass%Li alloy produced by “Tilt-casting method” were excellent. On the other hand, increasing of solute elements of Cu, Mg and Li was decreasing in rolling-formability due to remained of (AlLi) crystallized phase in the structure in those alloys.

研究分野：鋳造工学

キーワード：Al-Li 鋳造法 高品質 加工性

1. 研究開始当初の背景

地球環境保全の観点から、エネルギーの有効活用は不可避の課題であり、とくに航空機や鉄道、自動車は省エネルギーと低炭素化を両立させる材料での製造が望まれている。アルミニウム-リチウム(以後 Al-Li)合金は、原子番号 13 番のアルミニウム(Al)に、原子番号 3 番のリチウム(Li)を添加した合金であり、リチウムの添加で比重が 2.7g/cm³ から 2.5 g/cm³ へと軽くなる。

1970 年代半ばから省エネルギー対策として、特に航空機産業の分野を中心に本合金の研究が盛んとなった。そして AA 規格として 2090、2091、8090、8091 合金が登録された。その後のさらなる研究により、スペースシャトルの燃料タンクとして 2195 合金が使用された。しかし、この合金は大気中で非常に活性であるリチウムとアルミニウムを含むことから、酸化しやすく、合金の製造そのものが大変困難であり、さらに耐食性と機械的性質が安定しないため板材として普及していない。このような素材の性質の不安定性は、溶解中の激しい酸化と、それら酸化物のインゴット中への巻き込みが最も大きな要因である。そのため、Al-Li 合金は工業的には主に鑄造材として普及している。このことは、例えば航空機用部材を製造する際に、重力鑄造によってその部材を製造するしか方法がないということになり、複雑形状の部材は量産できないということになる。しかし、その後の軽量金属の開発研究の手詰まり感から、とくに米国を中心として、最近、第三世代の Al-Li 合金の開発が盛んになりつつあり、エアバス A380 に導入されたことは記憶に新しい。

申請者はこれまでに鑄造技術及び鑄造用合金の開発に携わってきた。軽量合金であるアルミニウム合金とマグネシウム合金の製造技術、とくにその中で、アルミニウム合金として最軽量である高品質な Al-Li 合金の製造について一連の技術開発に成功している。例えば右図は申請者が提案する「可傾式高品質鑄造法」を用いて製造した Al-Li 合金である。鑄造材には Al-Li 系の化合物が存在するが、溶体化処理を施すとほぼ単相化することが可能である。これは製造法として、鑄型、溶解炉、溶解雰囲気、溶解条件、脱ガス、注湯条件を最適化することで達成される。申請者の方法を利用すれば、溶解製造中の酸化は激減するため、高品質な Al-Li 合金が製造できるので、その後に圧延、鍛造、押出加工が可能となり、製造できる部材の形状や、ユーザーからのニーズに幅広くこたえることが可能になる。

2. 研究の目的

航空機あるいは自動車・鉄道の軽量化は、省エネルギー問題の解決に対する有力候補であることは既知である。ただしその具体策が提示されてこなかった。Al-Li 合金は、金

属元素として最軽量の Li を添加した合金であり、量産しうる Al 合金の中で、最軽量でかつ最高の比強度をもつ。この合金は 10 数年前に提案されたが、加工性と耐食性の問題から量産にはいたらなかった。申請者は、今までの研究実績により、高品質な Al-Li 合金の製造技術「可傾式高品質鑄造法」を既に確立している。本申請課題は、申請者が経験則に基づいて確立した「可傾式高品質鑄造法」で製造される Al-Li 合金の製造因子を系統的に解明し、本法で作製される鑄造品の圧延成型性の最適化とダイカスト鑄造に適用できる製造法として確立することを目的とする。

3. 研究の方法

高品質な Al-Li 合金の鑄造法「可傾式高品質鑄造法」を用いた Al-Li 合金の最適な鑄造条件の抽出、作製された合金の成形性、そしてダイカスト鑄造への適用を調査するため、3 年間にわたり下記の実施を目標とした。

- (1) 「可傾式高品質鑄造法」による基本合金 [Al-1~4%Li 合金] の作製条件の抽出と圧延成形性の調査
- (2) 実用系 Al-X%Li-Cu-Mg 合金作製条件の抽出と圧延性および時効硬化特性の調査
- (3) ダイカスト高圧鑄造による Al-Li 合金の作製とその性能評価

4. 研究成果

(1) 「可傾式高品質鑄造法」による基本合金 [Al-1~4%Li 合金] の作製条件(鑄造条件、鑄型条件)の抽出と圧延成形性の調査

作製条件の最適化の為に圧延元材となるブロックを鑄造する際の鑄型材質と塗型を検討した。表 1 には検討した鑄型剤と塗型条件を、図 1 および 2 には表 1 の鑄型に鑄造した場合の鑄物の外観および内部状態を示す。

表 1 鑄造砂型および塗型材の条件

Code	Mold Material	Binder	Coated Material	Heating of Mold before casting
Sand-mold	sand	Phenol Resin	---	473K, 4.8ks
BN-Coated			BN	473K, 4.8ks
TiO ₂ -Coated			TiO ₂	473K, 4.8ks
Al ₂ O ₃ -Coated			Al ₂ O ₃	473K, 4.8ks
MgO-Coated			MgO	473K, 4.8ks
CaO-Coated			CaO	473K, 4.8ks
Metal-mold	metal	---	BN	453-473K

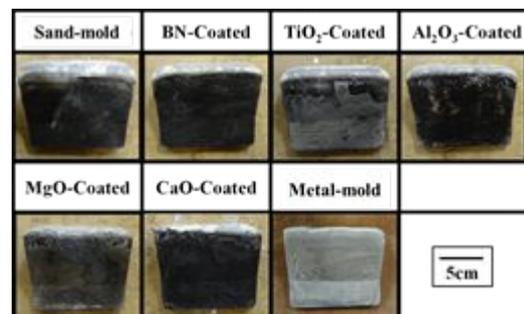


図 1 鑄造した Y ブロック鑄物の外観

図1および図2の結果から明らかなように凝固の最も早い金型による鋳物が内部欠陥が少なく、次いでCaO塗型、Al₂O₃鋳型の順で品質が低下、すなわち内部の欠陥が増加していく。この結果と共にXRDによる鋳物表面で生成物の量も測定して、総合的な鋳物品質の順位をまとめた。その結果を表2に示す。なお、表の最下段には、砂型に塗型した金属酸化物の生成自由エネルギーを示した。この自由エネルギーが最も低値であるCaO塗型による鋳物が、金型を除くと最も品質が良いことが分る。以上の研究結果から、これ以降の研究に用いるAl-Li合金鋳物の作製、鋳造には、鋳型内面の塗型をCaOとすることにより、最も内部品質の高い鋳物を圧延評価用として準備する事とした。

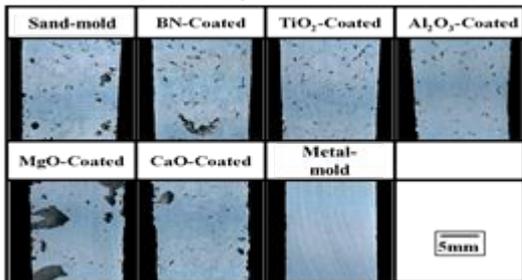


図2 図1に示した鋳物下部の断面

表2 各種鋳型による鋳物の総合評価

	Sand-mold	BN-Coated	TiO ₂ -Coated	Al ₂ O ₃ -Coated	MgO-Coated	CaO-Coated	Metal-mold
Expansion tendency of riser (large)	7	4	5	5	2	2	1 (small)
Amount of porosity defects	6	5	3	2	7	4	1
Reaction products on casting surface	7	5	2	2	5	2	1
total	20	14	10	9	14	8	3
Quality Ranking	7	5	4	3	5	2	1
ΔG(kJ/mol)	-710	--	-740	-920	-1030	-1080	--

表3には、0~4%Liを含有したAl-Li合金の冷間圧延性(as-cast材を圧延)の評価結果を示す。ここで、限界圧延率とは、冷間圧延時に圧延した鋳物板材の表面に割れが生じ始める圧延率を示している。すなわち、この数値が高い程、圧延性が良好であると言える。表3からは2mass%Liまで含有したAl-Li合金は、純Al並みの極めて高い圧延性を有していることが示された。このことは、前述した本研究で開発した元材の鋳造鋳型と鋳造法(CaO塗型した鋳型によるYブロック鋳物の製作方法)が、実用においても圧延加工性の高い、実用的な鋳物材を製造できることを示唆していると言えよう。4%Li含有材はAl-Li合金の固溶限界成分であることもあり、(AlLi)相が組織中に多量に晶出した為、圧延性が極端に低下したと結論された。

表3 0~4%Liを含有したAl-Li合金の冷間圧延性(as-cast材を圧延)

合金記号	目標組成 [mass%]					限界圧延率[%]
	Mg	Cu	Li	Fe	Al	
純Al	-	-	-	<0.15	Bal.	98.0
1Li	-	-	1.0	<0.15	Bal.	97.8
2Li	-	-	2.0	<0.15	Bal.	98.3
4Li	-	-	4.0	<0.15	Bal.	6.8

(2)実用系 Al-X%Li-Cu-Mg合金作製条件の抽出と圧延性および時効硬化特性の調査
0~4%Liを含有したAl-2mass%Mg系合金およびAl-2mas%Mg-2mass%Cu系合金の冷間圧延性を測定した結果を表4および図3に示す。2元系のAl-Li系に比べてさらに溶質を増加させたAl-2mass%Mg系の方が、さらにCuも追添加したAl-2mas%Mg-2mass%Cu系合金の方が圧延性が低下する事が分る。そしてこれらの結果から実用的な使用を想定した場合、Al-2mass%Mg-1mass%Li(2Mg1Li)合金の限界圧延率が83.7%と比較的高い値を維持しており、従ってこの合金の溶質含有量が、本研究で見出した前期鋳造法、鋳型による鋳物の加工限界であることが明らかとなった。

表4 0~4%Liを含有したAl-2mass%Mg系合金およびAl-2mass%Mg-2mass%Cu系合金の冷間圧延性(as-cast材を圧延)

合金記号	目標組成 [mass%]					限界圧延率[%]
	Mg	Cu	Li	Fe	Al	
2Mg	2.0	-	-	<0.15	Bal.	97.7
2Mg1Li	2.0	-	1.0	<0.15	Bal.	83.7
2Mg2Li	2.0	-	2.0	<0.15	Bal.	35.0
2Mg4Li	2.0	-	4.0	<0.15	Bal.	2.1
2Mg2Cu	2.0	2.0	-	<0.15	Bal.	24.6
2Mg2Cu1Li	2.0	2.0	1.0	<0.15	Bal.	6.1
2Mg2Cu2Li	2.0	2.0	2.0	<0.15	Bal.	4.2
2Mg2Cu4Li	2.0	2.0	4.0	<0.15	Bal.	1.4

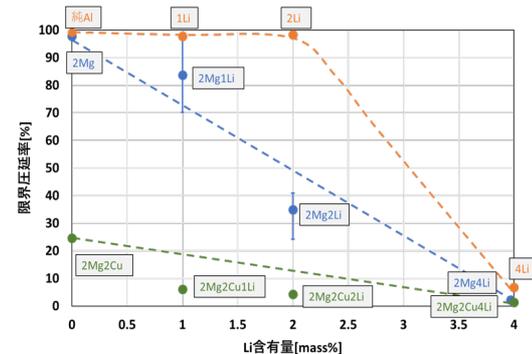


図3 Al-Li, Al-Li-MgおよびAl-Li-Mg-Cu系の各合金系における含有Li量と限界圧延率の関係

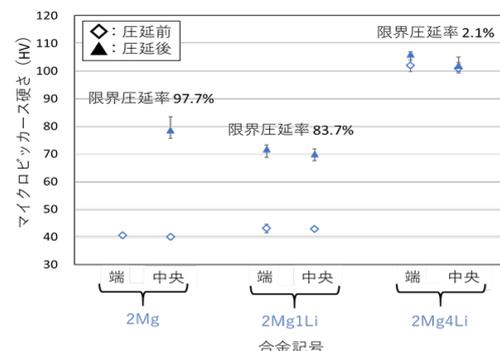


図4 Al-2mass%Mg系にLiを含有した各合金板材の圧延前後における硬さ測定結果

図4にはAl-2mass%Mg系にLiを含有した各合金板材の圧延前後における硬さ測定結果を示す。限界圧延率の高いAl-2mass%Mg(2Mg)およびAl-2mass%Mg-1mass%Li(2Mg1Li)の2合金の硬さは圧延前後で大きく異なっており、加工性が高かったことを示している、これに対して限界圧延率の低かったAl-2mass%Mg-4mass%Li(2Mg4Li)合金は、既に圧延前において自身の固溶強化ならびに'(Al3Li)相の析出硬化により、硬さの値が高く、これにより加工性が低かったと考えられた。

図5には、限界圧延率が2.1%と低値で加工性の低いAl-2mass%Mg-4mass%Li(2Mg4Li)合金の加工後の組織観察結果を示す。粒界およびセル境界に残存した晶出相を経由して割れが伝播しており、このことから添加した余剰の溶質による晶出相の形成も加工性の低下の一因であることが明らかとなった。

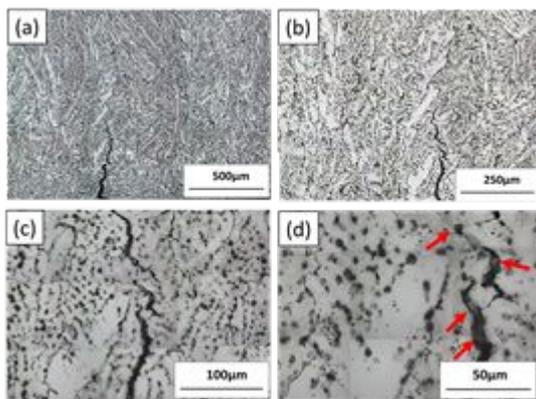


図5 2Mg4Li合金のミクロ組織
(a)100倍, (b)200倍, (c)500倍, (d)1000倍

(3)ダイカスト高圧鋳造によるAl-Li合金の作製とその性能評価

前項(1)および(2)の研究の進展により当初の計画通り、高圧鋳造に供する事の出来る材料の鋳造法(塗型材)および加工特性までを明らかにした。本項(3)ではこれを高圧鋳造してその評価と最適条件を検討する予定の為に、350tonダイカスト鋳造機のセットアップを予定通り進めて稼働させたものの、評価の為に時間を確保できず、平成29年度内の高圧鋳造の実施、検討には至らなかった。しかしながら、以上の(1)および(2)項の研究結果から、極めて高品質な鋳造条件、塗型材(CAO)を見出し、高品位な鋳物材を製造する方法を具現化した事、ならびにそれによる圧延加工性が適切な組成範囲内であれば極めて良好である事等を初めて明らかにすることが出来た。とくに、Al-Li系合金においては相を主体とした晶出相の組織制御、とりわけ凝固時の組織制御が、本系合金の加工性の向上とひいては(3)項にて実施予定であったダイカスト鋳造性の向上にも結び付くであろう事が推測された。これらの成果は、今

後の工業部品の軽量化にAl-Li系合金を用いる場合の重要な要素技術となると判断される。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計5件)

1) 大坪千春, 加古博紀, 香村祥太, 才川清二, 池野進, 駒井公一; 砂型鋳造したAl-Li合金鋳物の凝固および熱処理組織, 日本鋳造工学会第167回全国講演大会, 2015年10月

2) 大坪千春, 加古博紀, 香村祥太, 才川清二, 池野進, 駒井公一; 砂型鋳造したAl-Li合金鋳物の健全性に及ぼす塗型材の影響, 軽金属学会第129回秋期大会, 2015年11月

3) Seiji Saikawa, Susumu Ikeno, Koichi Kom; Development of Al-Li Alloy Castings Excellent in Formability, The 72nd World Foundry Congress, May 2016

4) Seiji Saikawa, Chiharu Otsubo, Susumu Ikeno, Koichi Komai; Age hardening behavior of Al-Li alloys produced by sand mold process, THERMEC'2016 International Conference on Processing & Manufacturing of Advanced Materials, May 2016

5) 灰塚祐平, 李昇原, 才川清二, 松田健二, 堀田善治, 廣澤渉一, 寺田大将, 池野進; Al-2.5Li-(2.0Mg)合金の時効挙動に対するHPT加工の影響, 軽金属学会第132回春期大会, 2017年5月

6. 研究組織

(1)研究代表者

才川清二 (SAIKAWA, Seiji)
富山大学・大学院理工学研究部(工学)・教授
研究者番号: 20642226

(2)研究分担者

松田健二 (MATSUDA, Kenji)
富山大学・大学院理工学研究部(工学)・教授
研究者番号: 00209553