解 説

Al-Li 合金の製造上の問題点

宮木 美光*・日野 光雄*・江藤武比古*

Problems in production of Al-Li alloys

Yoshimitsu MIYAGI* Mitsuo HINO*
and Takehiko ETO*

1. はじめに

Al-Li 系合金（以下、Al-Li 合金と略す）は低密度と同時に高剛性が得られるため航空機の軽量化に大きく寄与できるとともに、機械加工および組立作業において従来の技術および設備がそのまま使用できるので航空機構造用材料として他の競合材料に比較して極めて魅力がある材料である。したがって、欧米では本合金の研究開発が鋭意行われており、次期新型旅客機としてボーイング社の B7J7 に、またエアバス・インダストリー社の A320 に本格的に採用が検討されている。一方、わが国の Al-Li 合金の研究は今まで基礎研究が主であったが、現在軽圧メーカー各社が通産省の支援のもと、あるいは自力で Al-Li 合金の開発だけでなく、原料 Li の製造技術の開発についても取り組んでおり、その早期工業化が強く要請されている。

ところで、本合金の研究開発の課題は大きく分けて 2 つあり、1 つは材料特性上靱性が既存合金に比べて劣るのでその改善が必要であること、他の 1 つは Li の高い化学的活性度に起因した素材の製造上の問題の解決である。靱性の改善には合金組成の検討や加工熱処理 (TMT: Thermo Mechanical Treatment) などの組成制御技術が駆使されているが、製造法にも影響され、健全な鋳塊を製造する技術や急冷凝固粉末法などが研究開発されている。素材の製造法は大別して、従来の I/M 法 (Ingot Metallurgy 法) と P/M 法 (Powder Metallurgy 法) の 2 つがあるが、Li が極めて化学的に活性なため溶解・鋳造をはじめとする各製造工程において従来にない新しい製造法の開発が強く要請されている。

このように、Al-Li 合金の製造法は材料特性の点で、また製造の困難さの面でその開発は極めて重要である。本稿は本合金の製造法について、これらの問題点とその開発状況をまとめるとともに今後の Al-Li 合金の実用化のあり方についても若干言及したものである。

2. 製造技術上の問題点

Al-Li 合金の製造法としては、①既存合金と同様に熔融金属から DC インゴットを作って展伸加工する I/M 法と②熔融金属を不活性ガス中でアトマイズ法やスプラット法で急冷粉末とし、次にそれを粉末冶金法で固化して展伸加工する P/M 法とがある。Al-Li 合金の製造上の基本的な問題はこれらの方法にかかわらず Li が化学的に極めて活性で、不活性ガスを除く非金属元素、特に O, N, C, H に対して高い反応性を示す点にある^{1), 2)}。すなわち、大気や水分と強い反応を起こすため Al-Li 合金の製造法において最大の問題となるのは Li の活性度がより高くなる溶解・鋳造、熱処理などの高温領域の工程である。

これらの工程について代表的な製造法である I/M 法の問題点と今後の課題を表 1 にまとめて示す。中でも特に問題なのは溶解・鋳造工程である。Al-Li 合金の溶湯は大気中で極めて酸化しやすいため³⁾、Li の溶損が大きくて Li の組成管理が困難なこと、さらには多量に発生した酸化物が巻き込まれて材料特性、特に靱性が低下するなどの問題がある。また、水素ガスも既存合金に比べ 1 桁多い数 cc/100 g Al も多量に吸収されることが知られており、鋳塊のポロシティの発生や LiH や Li₃AlH₆ などの水素化物を生成して⁴⁾、図 1 に示す⁵⁾ように靱性

* (株)神戸製鋼所真岡研究室 (真岡市)。Maoka Laboratory, Kobe Steel, Ltd. (Maoka)。

受理日：昭和61年 8 月21

表 1 Al-Li 合金の製造技術上の問題点

工 程	問 題 点	現在の考えられる対策	今 後 の 課 題
溶 解	Li の酸化と溶損の防止	● Ar ガスと LiCl/LiF フラックスのカバリング	低コストの酸化防止 雰囲気法の開発
	Li の酸化物の除去 多量の水素ガス吸収 炉材との反応防止 Na の低減	● 微細気泡の Ar ガスによる精練 ● 純黒鉛, 高純アルミナ ● 低 Na の原料 (Li, Al) の選定	フィルター等の精練法の開発 低コストの炉材の開発 低コスト, 低 Na の Li 原料の 開発 脱 Na 精練法の開発
鑄 造	溶湯と水との激しい反応による爆発	● 水に替る冷却媒体の使用 (エチレン グリコール等)	安全で低コストの鑄造法の開発
	酸化物の巻き込み	● 水のたまらない鑄造ピットの採用 ● 純 Al のクラッド鑄造法の採用 ● レベルボア等の溶湯の乱流の少ない 鑄造法の採用	酸化防止と静流鑄造法の開発
展 伸 加 工	加工割れ	● 最適加工温度の選定 ● Na や H ガスの低減	
熱 処 理	表面酸化による Li の表面減失	● Ar ガス雰囲気法の採用	低コストの酸化防止 雰囲気ガスの開発

図 1 Al-2.5Li-Cu-Mg 合金の機械的性質におよぼす水素ガス含有量の影響。人工時効：190°C, 16h.

を低下させることが知られている。したがって、一般に溶解・鑄造は大気との遮断を行うために LiCl/LiF などのフラックスや Ar ガスなどの不活性ガス雰囲気のカバリングおよびそれを併用した手段が講じられている。使用するガスは水分と Li の反応を考慮して十分に乾燥したものをを用いる必要がある。

また、Li は酸素や窒素などとの反応性が高いため、液体 Li は化学的に安定な耐火物とさえも反応することがあり、Al-Li 溶湯の場合も炉材と反応して炉材を浸食したり、浸食された炉材が材料中に混入して低靱性の一因となるので炉材の選定が重要である。

このように、Al-Li 合金の溶湯は酸化物や炉材などの介在物および水素ガスを多く含有しやすいので、この除去が重要である。除去法としては既存の精練法が基本的には使用可能であるが、使用される耐火物の選定（例えばセラミック・フィルターの材質など）や精練ガスの選定が重要であろう。窒素ガスは Li と反応して Li₃N を生成するため反応のないアルゴンガスを使用することが多い。現在、水素ガスは工業レベル的には 0.3 cc/100 g Al⁶⁾位までに減少されているようであるが、既存合金よりもまだ多い。

Li の添加は金属 Li あるいは Al-Li 中間合金として添加されるが、Li 中の不純物として含有される Na や K は Al-Li 合金中に数十 ppm 含まれても靱性を低下させるので^{7),8)}、その管理、規制が必要である。この Na の除去には Bi, Fe, Si を添加して化合物を生成させて改善する方法も提案されているが⁷⁾、不溶性化合物を増大さ

図2 Al-Li合金溶湯と水との接触を防止したクラッド铸造法（模式図）

図3 Al-3Li合金の大気中での溶体化焼入(550°C×3hr)後および人工時効(200°C×17hr)後のLiの酸化深さ

せるなどの問題もあると考えられる。

ところで、Liを1.2～2%以上含有する合金のDC铸造では冷却水と溶湯が反応して爆発を起こすことがあるので⁹⁾、冷却媒として水を使わず、水含有量を規制したエチレングリコールを用いる铸造法¹⁰⁾、铸造ピット内に水を溜めない铸造法¹¹⁾や図2に示すように融点の高い純AlをAl-Li合金铸塊表面にクラッド铸造する技術¹²⁾などが開発されつつある。また、铸造中の酸化物の巻き込み防止には溶湯の乱流の少ないレベルポア铸造法などが

図4 Al-Li-Cu-Mg合金铸塊におけるLiの高温酸化におよぼす雰囲気ガスの影響

有効であろう。

Al-Li合金の展伸加工性は既存合金より劣るが、加工温度などの展伸条件を管理することで大きな問題はないようである。

熱処理時の問題は大气中、溶体化処理などの高温で熱処理すると材料表面においてLiが酸化、窒化および蒸発するため、図3に¹³⁾示すように数百 μm の脱Li層が生成する点であろう。脱Li層は硬度の低下が大きいため板厚の薄い材料での強度の低下、疲労強度の低下が認められる¹⁴⁾。またLiが希薄になっているので耐食性にも影響するであろう。この表面酸化の防止には図4に示すように乾燥したアルゴンガスや窒素ガスなどの雰囲気

図5 Al-Li合金の硝酸ナトリウム塩浴中における爆発温度とLi量の関係

表2 Al-Li系合金の開発目標の代表例

目標設定者・開発会社	合金符号	開 発 目 標
米空軍	A	7075-T6と類似性能で比剛性30%増
	B	7075-T76と類似性能で比剛性・比強度とも20%増
Alcoa	A	2024-T3X 類似性能で密度8%減
	B	7075-T6X 類似性能で密度8%減
	C	6061-T6X 類似性能で密度9%減
	D	7075-T73X 類似性能で密度9%減
Alcan	A	2014-T6あるいは、2024-T8相当性能で密度10%減，剛性10%増
	B	7075-T6あるいは、7075-T76相当性能で密度10%減，剛性10%増
	C	2024-T3あるいは、2024-T4相当性能で密度10%減，剛性10%増

表3 Al-Li合金の靱性改善法

指 針	方 法 手 段
局部的な優先変形の阻止	(1) 転位によって剪断されにくい析出物の微細均一分散化 (i) $ZrAl_3$ などの微細均一分散 (ii) θ' , S' などの析出物の微細均一分散化(時効前の予歪による微細均一分散化)
粒界への応力集中の阻止	(1) UnderageによるPFZの幅の減少と粒界析出物の抑制 (2) 時効前の予歪などによるPFZの幅の減少，粒界析出物の抑制 (3) TMTによる結晶粒の微細化 (4) Zrなどの添加による結晶粒の非再結晶微細化
粒界脆化阻止	(1) 不純物Na量の規制(Na量が多い場合はBiの微量添加) (2) H_2 ガス含有量の減少
粒内の応力集中源の減少	(1) 非金属介在物の減少 (2) 不溶性晶出物の減少・微細化(高純化) (3) 可溶性晶出物の固溶化

ガスが有効である¹⁵⁾。NaNO₃などの塩浴炉での熱処理は図5に示すようにAl-Li合金の液相温度以下(600℃以下)であれば安全との報告¹⁶⁾もあるがAlcoaは爆発の危険があるとして推奨していない^{9), 17)}。

また，溶解，熱処理や切削加工時などに蒸発したLiはNaと同様，酸化物や水酸化となつてのどや目を刺激するため，安全上1mg/m³以下の規制が推奨されている¹⁷⁾。

一方，P/M法の製造上の問題は，基本的にはI/M法と同様であるが，より重大な問題として粉末の爆発がある。Al-Li合金は既存合金より活性なため，この粉末の爆発にはさらに細心の安全対策が必要であろう。

なお，このようにしてAl-Li合金は素材の製造上の問題点が多いが，使用する場合は既存の加工設備などがそのまま使用できるため，使用する側の設備上の問題点

は少ない。しかし，設備以外の大きな問題としてはスクラップの回収技術が挙げられる。航空機用Al材料は安全設計，軽量化設計の観点から構造上必要な厳しい寸法まで切削などの機械加工が施されるため著しいスクラップが発生する。したがって，Al-Li合金は組成管理が厳しいこと，他の既存合金への混入が不可なため，既存合金と併用して使わざるを得ない加工・組立工程でのスクラップの管理は極めて重要な問題である。また，このAl-Li合金のリサイクル技術の開発は後述するAl-Li合金のコスト低減に大きく寄与できる重要な問題であり，今後ぜひ開発すべき課題である。

3. 製造法と材料特性

Al-Li合金の開発は既存合金と同様，I/M法で始まり，軽量化効果を狙って1958年米海軍機Vigilanteの翼

材に Al-Li 合金として初めて実用化された 2020 合金 (Al-4.5Cu-1.2Li-Mn, Cd) も I/M 法で製造された。2020 合金は Li 量が 1.2% と現在の Al-Li 開発合金より低かつたため製造上の問題は比較的少なかったが、靱性が劣るため 1966 年その採用が中止となつた。その後、靱性改善の目的で P/M 法の適用が検討されはじめ、現在に至っているが、合金開発や組織制御などによる靱性改善技術が進歩するにつれ I/M 法が見直され、I/M 法は広幅・長尺の製品的大量生産が可能であるという大きな特徴を有するため現在の製造法の主流を占めている。

一方、P/M 法は I/M 法より多くの Li を含有させることができるため軽量化効果に優れることや、今まで I/M 法では固溶させられなかつた元素を急冷固溶させることができるため材料特性の飛躍的な向上が期待されるとして、研究開発が鋭意行われている。

現在、欧米を中心にして表 2 に示すような開発目標がたてられ材料開発が行われているが、最大の開発目標は靱性改善である。Al-Li 合金の低靱性の主要因は、強化析出物の δ' が母相と整合な Li₂ 型の規則格子であるため転位対の剪断を受け、そのすべり面上で大きな平面すべりが集中して粒界に応力が集中するためといわれている。この靱性改善の考え方としては、局部的な優先変形の阻止、粒内の応力集中源の減少、粒界の応力集中の阻止と脆化阻止などがあるが具体的に検討されている改善法を表 3¹⁸⁾ に示す。これらの改善策は前述の I/M 法の 2020 合金の靱性改善効果に顕著に認められ、表 4¹⁹⁾、表

5²⁰⁾ に示すような組成の検討と組織を制御することにより、表 6¹⁹⁾ のような伸びと破壊靱性の優れた合金が得られている。すなわち、TMT により粗い不完全再結晶組織を集合組織の強い微細な非再結晶組織にして、均一なすべりを増大させて粒界の応力集中を緩和させるとともに Under Aging を併用することで伸びの著しい向上が得られている。また、組成的には Fe, Si を規制し、Mn を除いて応力集中源となる不溶性化合物を抑制するとともに、Zr を添加してより微細な非再結晶組織化を計り、さらに粒界破壊を助長するといわれている Cd を除くことなどにより破壊靱性の向上が得られている。2020 合金は Li 量が少ないため密度の低下量は小さいがこのように現在は製造法を検討することにより伸びと靱性の大幅な改善が行われている点は注目に値する。

2020 合金より、さらに密度の低下を狙つた 2~3% Li を含有する合金が現在開発中であるが、その代表的な合金を表 7 に示す。いずれも Zr を含む 2090 合金などの Al-Li-Cu 系と 8090, 8091 合金などの Al-Li-Cu-Mg 系であり、上記の靱性改善方法を用いて²¹⁾ 表 2 の開発目標を一部達成しているものもあるが、概して伸びがまだ低い。I/M 法と P/M 法の製造法による材料の特性の差は余りなく、むしろ開発メーカーによる差の方が大きいようである。P/M 法で靱性が期待されている程改善されない一因は、粉末表面の大きな酸化物が分散強化剤として働かず、展伸されて酸化物のストリンガーとなり延性、靱性を低下させていると推察されており²²⁾、粉末表面の酸化膜の形成の抑制が重要であるとされている。ところで、最近では P/M 法の一つであり、高エネルギーのボールミルで合金化する Mechanical Alloying 法 (M/A 法) が開発され、表 7 に併記したように強度と伸びの高い合金が得られており²³⁾、ボーイング社も M/A 法合金を高く評価している²⁴⁾。本合金はノバメットアルミナム社で一部企業化されているようである²⁵⁾。P/M

表 4 2020 合金とその改良合金の化学組成 (wt%)

合金	Cu	Li	Zr	Cd	Fe	Si	Mn	Ti	Al
2020	4.45	1.21	—	0.21	0.16	0.08	0.51	0.06	Bal.
M1	4.62	1.26	0.17	—	0.06	<0.02	—	—	Bal.
M2	4.17	1.16	0.15	0.275	0.04	<0.02	—	—	Bal.

表 5 2020 合金の TMT による組織改善

記号	TMT 処理	溶体化と人工時効	組織と組晶寸法
AR-PA	As-received T651	—	DR—26pct d_L , d_T —10–1500 μm d_S —4–118 μm
UR-1	HR40 pct @ 733. K	30 min @ 763 K, WQ+18h @ 433 K	DR—0 pct UR_{d_L} , UR_{d_T} >1000 μm UR_{d_S} —25 μm
UR-2	20 min @ 788 K, WQ+CR 40 pct+20 min @ 788 K, +HR 40 pct @ 763 K	30 min @ 763 K, WQ+18 h @ 433 K	DR—0 pct UR_{d_L} , UR_{d_T} —60 μm UR_{d_S} —12 μm
WQ	水焼入れ	d_L	ST 方向の再結晶粒径
CR	冷間圧延	d_T	LT 方向の再結晶粒径
HR	熱間圧延	$UR-d_L$	L 方向の未再結晶粒径
DR	再結晶率	$UR-d_S$	ST 方向の未再結晶粒径
d_L	L 方向の再結晶粒径	$UR-d_T$	LT 方向の未再結晶粒径

表6 2020合金とその改良合金の材料特性

Alloy	YS (MPa)	UTS (MPa)	EL (%)	K_Q (MPa m ^{1/2})	E (GPa)	ρ (g/cm ³)	E/ρ (GPa/g/cm ³)
2020-T651 As-received	534	567	5.0	20.8	—	—	29.14
2020-T6 UR-1	518	573	11.0	19.5	—	2.67	—
2020-T6 UR-2	505	561	13.0	20.3	78.1	2.67	29.3
M1-T6	332	536	16.1	—	—	2.62	—
M1-T651	491	573	12.1	28.9	78.4	2.62	29.9
M2-T6	560	616	10.1	—	77.6	2.65	29.3
M2-T651	552	608	11.8	27.8	79.2	2.65	29.9
7075-T651	516	573	11	29	—	—	25.61

表7 代表的な Al-Li 合金の材料特性

合 金		組 成	製法	形態 ^{*)}	調質	引張強さ kgf/mm ²	耐力 kgf/mm ²	伸び (%)	密度 g/cm ³	ヤング率 kgf/mm ²	文献
Alcoa A (8090A)		2.4Li, 1.3Cu, 1.2Mg, 0.12Zr	I/M	P	—	45.7	40.1	9	2.55	8010	18)
B (2090)		2.2Li, 2.7Cu, 0.12Zr	I/M	S	—	57.4	52.2	5.2	2.60	8010	
		2.2Li, 2.7Cu, 0.12Zr	I/M	P	—	59.8	56.9	9	2.60	8010	
C (8192)		Li, Cu, Mg, Zr	I/M	P	—	45.0	32.1	5.0	2.52	8370	
		Li, Cu, Mg, Zr	I/M	E	—	37.5	34.2	10.0	2.52	8370	
D (8092)		2.4Li, 0.7Cu, 1.2Mg, 0.12Zr	I/M	F	—	49.9	44.3	4	2.58	8230	
Northrop NOR10		3.0Li, 1.7Cu, 0.23Mn	P/M	E	T6 (V)	38.0	27.4	7	2.54	7170	1.9)
		3.0Li, 1.7Cu, 0.23Mn	P/M	E	T6 (P)	41.5	30.2	5.5	2.54	7170	
/Boeing NOR11		2.5Li, 4.8Mg, 0.1Zr	P/M	E	T6 (U)	53.5	41.5	4.5	2.51	8020	
		2.5Li, 4.8Mg, 0.1Zr	P/M	E	T6 (P)	53.5	43.0	3	2.51	8020	
Lockheed A		3Li, 1.5Cu, 1Mg, 0.2Zr	P/M	E	T6	50.0	42.0	7.4	2.54	8140	20)
/米空軍 B		2Li, 3Cu, 1Mg, 0.2Zr	P/M	E	T6	52.0	39.5	15.3	2.64	7850	
		2Li, 3Cu, 1Mg, 0.2Zr	P/M	E	T6	63.5	56.6	10.6	2.64	7850	
INCO IN-905 XL		4Mg, 1.7Li, 1.15C, 0.40	M/A	F	T6	55.6	47.1	10	2.54		15)
既存合金	2024	4.5Cu, 1.5Mg, 0.6Mn	I/M	S	T3	49.5	35.2	18	2.78	7590	
		4.5Cu, 1.5Mg, 0.6Mn	I/M	P	T351	48.0	33.1	20	2.78	7590	
		4.5Cu, 1.5Mg, 0.6Mn	I/M	P	T851	49.5	45.9	6	2.78	7590	
	7075	5.6Zr, 2.5Mg, 1.6Cu	I/M	P	T6	58.1	51.5	11	2.80	7280	
		0.2Cr	I/M	P	T73	51.5	44.3	13	2.80	7280	

法は強制固溶量を多くできるため I/M 法より Li を多く含有できるとして密度や弾性率の向上が期待されているが、まだ I/M 法より著しく優れているということはないようである。

その他、Al-Li 合金は耐熱合金としても興味を持たれているが²⁶⁾、I/M 法より耐熱の合金設計が容易な P/M 法で開発が進んでいる²⁷⁾。また、Al-Li 合金も結晶粒を

微細化することにより超塑性を示すが、P/M 法では大きな板材が生産できないため I/M 法が有利と考えられ、また超塑性特性も I/M 法の方が優れているとの報告もある²⁸⁾。

以上より、I/M 法と P/M 法の得失を後述する価格(表 10)も含めてまとめると表 8 のようになる。現時点では P/M 法が期待されている程材料特性の面で優れていな

表8 現在におけるI/M法とP/M法の得失

製造法	材料特性				製品		
	靱性	密弾性 度率	高温 特性	超 塑性 性能	寸法 形態	品質 の安定 性	価 格
I/M法	△	○	△	○	大 全 て	○	○
P/M法 (アトマイズ法 M/A法など)	△	○	○	△	小 押 出 ・ 鍛 造	△	△

優劣評価：(優) ○>△

いため、価格も安いI/M法が総合的に優れていると考えられる。

4. 製造設備とコスト

現在の主要なAl-Li合金の製造設備を表9に示すが、いずれもI/M法によるものであり、Alcoa, AlcanおよびPechineyは既に数Tonのパイロットプラントの設置を終え現在、量産化のため設備規模の大型化を計りつつある。Al-Li合金の製造設備は前述のように圧延、押出、鍛造熱処理などは既存の設備が使用できるが、溶解・鋳造はLiの酸化防止、防爆対策、他合金へのLiの汚染防止などの諸点から専用設備が必要であり、このため高額な投資が必要となつている。

航空機用材において、大部分のシート、押出材、鍛造材は約500kgのインゴットで十分であるが、このように数Tonの高額な設備を必要とするのは厚板や全体の歩留り、生産性を配慮しているためである。B757クラスでは鍛造材の80%が約150kgインゴットで製造可能で、最も大きい鍛造材でも、また大部分の翼用の押出材でも

表10 材料価格の比較

材 料		価格 US\$/kg
既存の航空機用Al合金		6
Al-Li合金	I/M法	12~18
	P/M法(3)	87~130
ARALL(1)		30~50
Aramid-プリプレグ		50以上
カーボン-プリプレグ		80~120
Ti合金		5,500円/kg(2)

(1) Al合金とAramid繊維を用いたFRPとの積層複合材

(2) 1984年9月(文献発刊時)国内板材の市況

(3) ノバメットアルミニウムが発表した価格²⁵⁾

約750kgインゴットで製造可能といわれている²⁹⁾。

ここで、わが国のAl-Li合金の需要を考えた場合、1983年でのわが国の航空機用Al材料の需要量が1700t/年位であり³⁰⁾、もしこの量の10%が1990年代前半にAl-Liに代替されたとすると、約170t/年とかなり少ないといわざるを得ない。したがって、欧米のような例えばPechiney社の3億フラン(約80億円)をかける生産能力4000t/年の大型設備を考えるというより、むしろ大部分の製品が1Ton未満のインゴットで間に合う押出材や鍛造材をまず製造することを検討することと、航空機以外の民生分野における用途開拓が重要であろう。

ところで、Al-Li合金の価格は航空機用既存Al合金に比べて、表10に示す³¹⁾ように2~3倍高いといわれている。その理由は①添加元素のLiが高い(約2万円/kg)②高価な大型の溶解・鋳造専用設備が必要である。③スクラップのリサイクルが困難、④靱性の点から高純度のAl地金が必要であるなどである。Al-Li合金のコスト高は原料を単純に計算しても3%Li添加で600円/kg高、高純地金で数十円/kg高となるが、最もウェート

表9 I/M法におけるAl-Li合金の量産設備投資状況

会 社 名	設 備 (溶解・鋳造装置)			合 金 名	生 産 能 力
	インゴット・サイズ	投 資 額	稼動時期		
Alcoa	4.5 t	—	1984年	Alithalite	
	9t	1,000万ドル	1985年末		
	(9t)	5,000万ドル	(1988)		
Alcan	1t	—	1983年末	Lital	
	3t	1,000万ポンド	1985年		
Pechiney	1.2t	—	1984年9月	CP合金	4,000t/年
	7t	3億フラン	1978年末		

() は種々の記事からの予測

の大きいのはやはり②, ③に起因した加工費であろう。Liの原料を安くする方法の1つとして、安価で不純物の少ないAl-Li中間合金の製造を電解法で行うことが検討されているが³²⁾, 安価な溶解・鑄造設備の開発やスクラップのリサイクル技術の開発が今後特に重要であろう。

5. おわりに

欧米では2090や8090合金などの合金開発が行われ、製造設備的にもI/M法で工業化レベルの規模に達するなど、すでに実用化の段階に入っており、B747機のけん引用取り付け鍛造部品に試験的に採用³³⁾するなど、実用化も間近いといわれている。しかしながら、これらの合金は既存合金に比べ延性や靱性の面ではまだ不十分であるとともに、製造法についても高価な専用設備を必要とするなど、まだまだ問題が多い。今後の研究開発はこの靱性の改善のための最適組成の選定と最適組織の探究とその制御法の確立が必要であり、同時に量産化のための健全な鑄塊を経済的かつ安全に製造する溶解・鑄造技術の開発が必要であろう。

なお、わが国におけるAl-Li合金の工業化を考えた場合、航空機用途だけではまだ需要量が少ないこと、また圧延材で考慮すると極めて高額な設備投資が必要なることを考慮すると、航空機以外の民生用途の需要を発掘するとともに押出材や鍛造材といった比較的小物製品の工業化がまず重要であろう。

参 考 文 献

- 1) 中村, 勝田, 古川: 日本金属学会会報, **21** (1982), 150.
- 2) W. A. Averill, D. L. Olson, D. K. Matlock and G. R. Edwards: *Aluminum-Lithium Alloys*, (ed. T. H. Sanders, Jr. and E. A. Starke, Jr.), Met. Soc. AIME (1981), 9.
- 3) D. J. Field and E. P. Butler: *Aluminum-Lithium Alloys II*, (ed. T. H. Sanders, Jr. and E. A. Starke, Jr.), Met. Soc. AIME (1983), 667.
- 4) D. P. Hill, D. N. Williams and C. E. Mobley: *ibid*, **201**.
- 5) 宮木, 日野, 江藤: 軽金属学会第28回シンポジウム“リチウムを含むアルミニウム合金, 軽金属学会, (1986), 6.
- 6) W. S. Miller, A. J. Cornish, A. P. Titchener and D. A. Bennet: *Aluminum-Lithium Alloys II*, (ed. T. H. Sanders, Jr. and E. A. Starke, Jr.), Met. Soc. AIME (1983), 335.
- 7) E. A. Starke, Jr., T. H. Sanders, Jr. and I. G. Palmer: *J. Metals*, **33** (1981), 8, 24.
- 8) A. K. Vasudevan, A. C. Miller and M. M. Kersker: *Aluminum-Lithium Alloys II*, (ed. T. H. Sanders, Jr. and E. A. Starke, Jr.), Met. Soc. AIME (1983), 181.
- 9) Alcoa: *Light Metal Age*, **44** (1986), 3/4, 26.
- 10) ヤコビー他: 公開特許公報, 昭60-127059.
- 11) R. Grimes, D. C. Martin: European Patent Application, 0150922-A2, Aug. 1985.
- 12) G. J. Binczewski: *Light Metal Age*, **44** (1986), 5/6, 31.
- 13) 植田, 松井, 古川, 美浦, 根本: 日本金属学会誌, **49** (1985), 562.
- 14) S. Fox, H. M. Flower and D. S. McDermid: *Aluminum-Lithium Alloys III*, (ed. C. Baker, P. J. Gregson, S. J. Harris and C. J. Peel), The Inst. Metals (1986), 263.
- 15) R. F. Ashton, D. S. Thompson, E. A. Starke, Jr. and F. S. Lin: *ibid*, **66**.
- 16) E. R. Clark, P. Gillespie and F. M. Page: *ibid*, **159**.
- 17) D. M. Naser: *Materials Engineering*, (1986), 4, 48.
- 18) 宮木: アルミニウムの基礎と工業技術 (村上陽太郎編), 軽金属学会, (1985), 416.
- 19) W. X. Feng, F. S. Lin and E. A. Starke, Jr.: *Aluminum-Lithium Alloys II*, (ed. T. H. Sanders, Jr. and E. A. Starke, Jr.), Met. Soc. AIME (1983), 235.
- 20) E. A. Starke, Jr. and F. S. Lin: *Metall. Trans., A*, **13A** (1982), 2259.
- 21) P. E. Bretz and R. R. Sawtell: *Aluminum-Lithium Alloys III*, (ed. C. Baker, P. J. Gregson, S. J. Harris and C. J. Peel), The Inst. Metals (1986), 47.
- 22) R. J. Kar, J. W. Bohlen and G. R. Chanani: *Aluminum-Lithium Alloys II* (ed. T. H. Sanders, Jr. and E. A. Starke, Jr.), Met. Soc. AIME (1983), 255.
- 23) S. J. Donachie and P. S. Gilman: *Aluminum-Lithium Alloys II*, (ed. T. H. Sanders, Jr. and E. A. Starke, Jr.), Met. Soc. AIME (1983), 507.
- 24) W. E. Quist, G. H. Narayanan, A. L. Wingert and T. M. F. Ronald: *Aluminum-Lithium Alloys III*, (ed. C. Baker, P. J. Gregson, S. J. Harris and C. J. Peel), The Inst. Metals (1986), 625.
- 25) 日刊金属特報, 昭和59年12月7日.
- 26) M. Pridham, B. Noble and S. J. Harris: *Aluminum-Lithium Alloys III*, (ed. C. Baker, P. J. Gregson, S. J. Harris and C. J. Peel), The Inst. Metals (1986), 547.
- 27) P. S. Gilman, J. W. Brooks and P. J. Bridges: *ibid*, **112**.
- 28) J. Wadsworth, I. G. Palmer, D. D. Crooks and R. E. Lewis: *Aluminum-Lithium Alloys II*, (ed. T. H. Sanders, Jr. and E. A. Starke, Jr.), Met. Soc. AIME (1983), 111.
- 29) R. F. Simenz: *Collect. Tech. Pap. AIAA/ASME/ASCE/ASM 24th. Dyn. Mater. Conf. 1983, Part I*, (1983), 578.
- 30) 日本航空宇宙工業会: 昭和59年度「航空機系統部品開発及び航空機素材の国産化に関する長期構想」(1985), 26.
- 31) H. F. de Jong: *Aluminum*, **60** (1984), E587.
- 32) 田部, 伊藤, 渡辺: 公開特許公報, 昭60-11089.
- 33) 日本工業新聞, 昭和61年7月10日.