

技術報告

アルミニウム-リチウム系合金の製造技術と材料特性

坂本 敏正*

Technical trend of aluminum-lithium alloys

Toshimasa SAKAMOTO*

1. はじめに

アルミニウム合金は弾性率（ヤング率）の低いことが欠点の一つにあげられ、より軽量で高弾性かつ高強度の合金を開発することが求められている。アルミニウム-リチウム（Al-Li）合金はこれらを実現するものとして、6回の国際会議が開かれる等^{1)~6)}精力的な研究・開発が行われている。わが国でも本合金の析出に関する研究^{7),8)}、共同研究⁹⁾を経て、Al-Li合金の研究・開発を専門とする株式会社アリシウムが1989年に設立された。(株)アリシウムは、製造技術、合金技術および評価技術に関する研究開発を展開し、1996年3月に業務を終了した¹⁰⁾。

本稿では、アリシウムが公表した技術的成果を中心に、Al-Li合金^{*1)}の最新の研究動向を概説する。なお、著者による他のAl-Li合金の解説¹¹⁾も参照願いたい。

2. 製造技術

2.1 溶解・鑄造

リチウムは酸化減失、燃焼するので、アルミニウムと合金化するときは雰囲気溶解・連続鑄造を行う。連続鑄造時の冷却水とAl-Li溶湯は激しく反応する場合があります、エチレングリコールを用いる¹²⁾ドライビット方式¹³⁾にするほか、種々の工夫が行われる。

2.1.1 炉材と合金汚染

Al-Li合金溶湯による予備実験で¹⁴⁾、黒鉛（Carbon: 41%, SiC: 40%）、 Si_3N_4 および Al_2O_3 系の炉材が耐溶損性、耐浸透性に優れていた。また黒鉛系に Al_2O_3 を共存させ、溶解をくり返すと、安定な $\gamma\text{-LiAlO}_2$ が生成し侵食が抑制された¹⁵⁾。 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiN}_4$ の混合材では、反応層で炉材の密性が低下する可能性があるが、合金の汚染が溶解回数とともに減少する¹⁵⁾。 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2/\text{MgO}$ 混合材では、粉体層が残存せず、 MgO が15%以上になるとき裂が発生する¹⁵⁾。

以上の実験から、200 kg 炉で $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}/\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}/\text{CaO}$ 混合ラミング材を選定した溶解で、反応層と侵食層の深さが浅く、溶湯の汚染が少ないことを認めている¹⁶⁾。4 ton 炉では $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{TiO}_2/\text{CaO}/\text{SiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$ 混合の予備焼結るつばを用い好成績を得たが、スラグラインで添加したリチウムとの反応が起ると、合金がナトリウム、カルシウム、鉄、けい素により汚染する¹⁷⁾。合金の汚染は延性・靱性に対して不利に働く^{18),19)}。

2.1.2 水素

Al-Li合金は図1のように水素を吸収しやすく²⁰⁾、粒界で安定な水素化合物を形成し²¹⁾、延性、靱性を損なう²²⁾。

2.1.3 鑄塊の結晶粒微細化と割れ

製品によって鑄造組織を制御すること²³⁾、結晶粒径が大きい方が靱性に有利であること、双晶は伸びを損なうことが指摘されている²⁴⁾。

図2はアルミニウム合金に対するチタン添加の効果を示してあり、リチウム含有合金は結晶粒が微細化しにくい²⁵⁾。リチウムを含む合金はチタン添加によるき裂防止

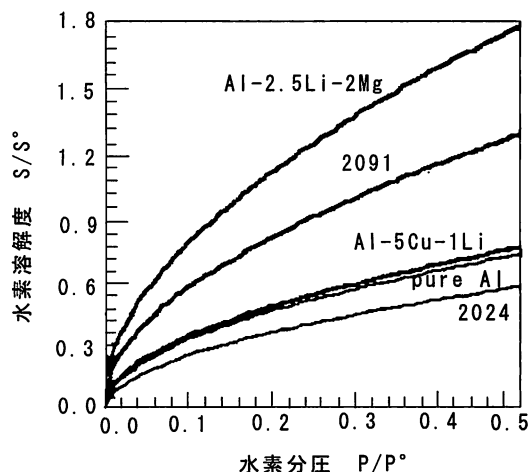


図1 種々の合金の973 Kにおける水素溶解度と水素分圧の関係

*1 Al-Li合金の成分組成は文献¹¹⁾に示した。

* (株)アリシウム (四日市市) [現在: (株)神戸製鋼所 (東京都)]。Alithium, Ltd. (Yokkaichi-shi, Mie) [Present: Kobe Steel, Ltd. (Chiyoda-ku, Tokyo)]。

受理日: 平成8年4月18日

効果が低く、鋳造割れが発生しやすい^{25)~27)}。

2.1.4 酸化物

アルゴン雰囲気下でもリチウムの酸化を完全に防止することは困難であり、鋳型内湯面を広く覆い、かつ酸化物を捕らえることのできる分配器を設計した^{26),27)}。

2.1.5 Vacilite プロセス

Al-Li 合金を真空溶解 (Vacilite プロセス) し、水素とアルカリ金属を低減すると、破壊靱性、SCC および Thermal Stability が向上する²⁸⁾。

2.2 熱間加工

Al-Li 合金は圧延板、押出材として使用するの、熱間加工性を把握した。

2.2.1 均質化処理温度

図 3 に 723 K-86.4 ks の予備均質化処理後、773~853 K-21.6 ks の二段均質化処理をした 2090 合金鋳塊のシャルピー試験結果を示す。約 790 K 以下と 840 K 以上の二段均質化処理温度では熱間加工性が低く、その間では温度が高いほど加工性が高い²⁹⁾。

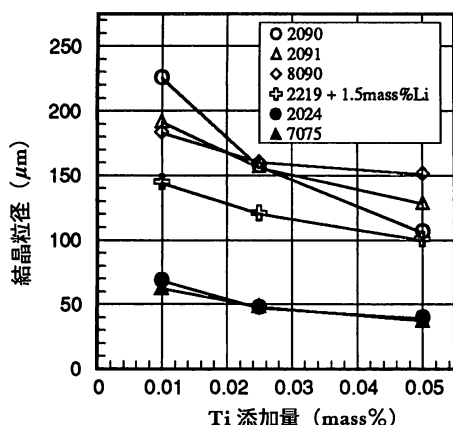


図 2 種々の合金の結晶粒に対するチタン添加の効果

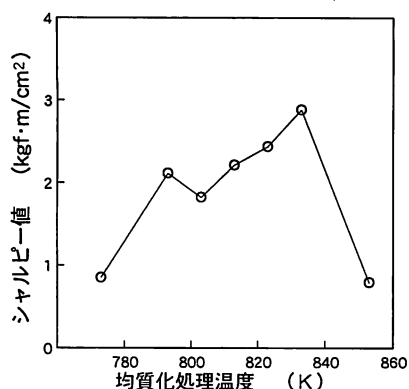


図 3 2090 合金鋳塊の熱間 (743 K) シャルピー値に及ぼす均質化処理温度の影響

2.2.2 熱間加工温度

図 4 は二段均質化処理を行った鋳塊の熱間特性を落重試験により求めた結果である。7075 合金に比較するとリチウムを含む 2090 および 2091 合金は高い温度で変形能が高く、ピークを過ぎた後は急激に変形能が低下する。変形抵抗は合金間の差が小さい³⁰⁾。落重試験とグリーブル試験による変形能はよく一致した²⁹⁾。

2.2.3 熱間圧延ダイアグラム

Al-Li 合金の熱間圧延では前記以外に、圧下率、エッジャーおよびクーラントを最適化するとともに、仕上げタンデム圧延条件を探索する必要があった。図 5 は 3 タンデム圧延のダイアグラムであり、各スタンドの圧延温度と圧延率を耳割れなしの範囲で行うと耳割れの小さな

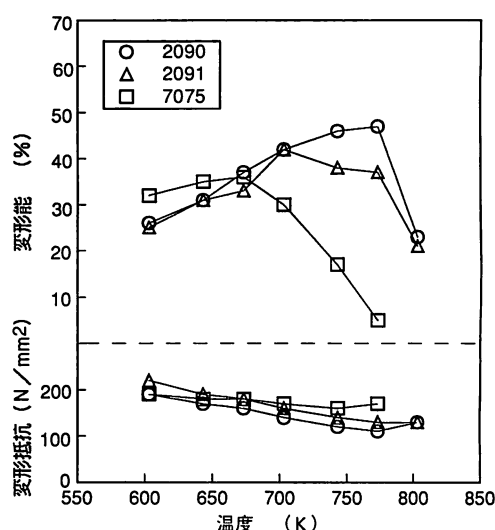


図 4 2090 および 2091 合金鋳塊の変形ならびに変形抵抗に及ぼす試験温度の影響

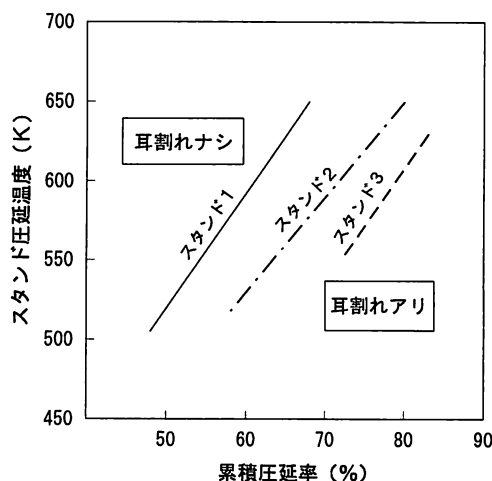


図 5 3 タンデム圧延ダイアグラム (2091 合金)

表1 代表的 Al-Li 合金の特性

合金	形態	調質	引張強さ (MPa)	耐力 (MPa)	伸び (%)	破壊靱性 (MPa√m)	弾性 (GPa)	密度 (g/cm ³)	比強度	比弾性	備 考
2090	Plate	—	530	485	5	K _{IC} 27.5	—	—	—	—	AMS4346
		T8	572	543	7.0	K _{IC} 33	81.4	2.58	220	30.5	アリシウム試作材
2090	Sheet	—	531	490	4	—	—	—	—	—	AMS4251
		T8	595	565	6.3	—	—	—	231	30.5	アリシウム試作材
2091	Plate	—	445	360	7	K _{IC} 30	—	—	—	—	PrEN6008
		T8	525	477	12.0	K _{IC} 38.9	78.0	2.58	—	30.6	アリシウム試作材
2091	Sheet	—	400	295	10	K _C 90	—	—	—	—	PrEN6003
		T8	451	351	10.2	—	—	—	175	30.6	アリシウム試作材
8090	Plate	—	455	365	8	—	—	—	—	—	PrEN6002
		T8	494	441	9.6	K _{IC} 46.3	79.2	2.55	194	31.8	アリシウム試作材
8090	Sheet	—	410	280	9	K _C 95	—	—	—	—	PrEN6001
		T8	431	334	11.5	—	—	—	169	31.8	アリシウム試作材

熱間圧延コイルを製造することができた³¹⁾。

3. 代表特性

表1に試作材の代表特性を示す。

3.1 鋳塊の特性と破壊靱性²⁹⁾

図6は2090合金厚板材 (T8) の破壊靱性に対する、鋳塊サイズ (小型: 厚さ150 mm, 大型: 厚さ300 mm) の影響を示す。亜時効 (UA), ピーク時効 (PA) 材では明らかに大型鋳塊の方が破壊靱性が低い。小型鋳塊はデンドライト組織であったのに対し大型鋳塊はセル組織であったこと、小型鋳塊による厚板は繊維組織が粗いことが関係していると思われる。図7は破壊靱性に対する熱間圧延時の総圧下率が60%を超えると急速に破壊靱性が低下し、破壊靱性に対して最適な粗さの繊維組織が存在することを示す。また、図8は大型鋳塊で均質化処理

時間を延長すると、破壊靱性が向上しており、鋳塊により晶出物の分解速度が異なることを暗示している。Al-Li 合金に最適な鋳塊組織制御技術が必要である。

3.2 焼入感受性

Al-Li 合金は溶体化処理後の焼入感受性は引張強さでは小さく、靱性では大きい¹⁹⁾。靱性低下は粒界への T₂ 相の析出によるものと考えられる。

3.3 ストレッチおよび時効

Al-Li 合金の強化に寄与する、T₁, S' 相は時効前の冷間加工によって導入される結晶欠陥部 (転位) 上に核生成する。図9は2090合金について、時効前ストレッチにより引張りおよび耐力が向上し、2091合金では効果が小さいことを示す³²⁾。

時効前冷間加工は2090合金の粒界腐食を低減し、粒内

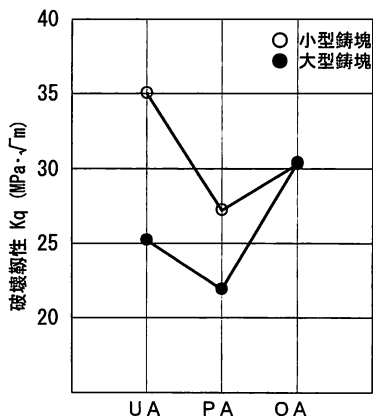


図6 2090合金厚板の鋳塊による破壊靱性の差

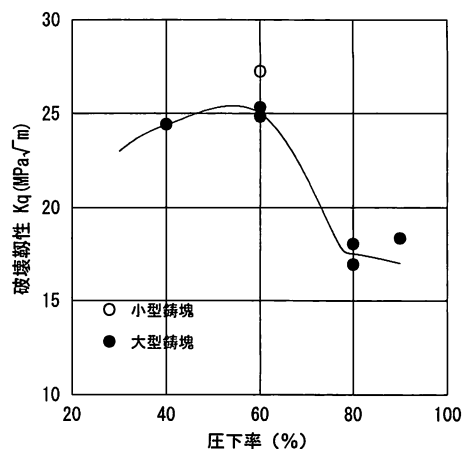


図7 2090合金厚板の破壊靱性に及ぼす圧下率の影響

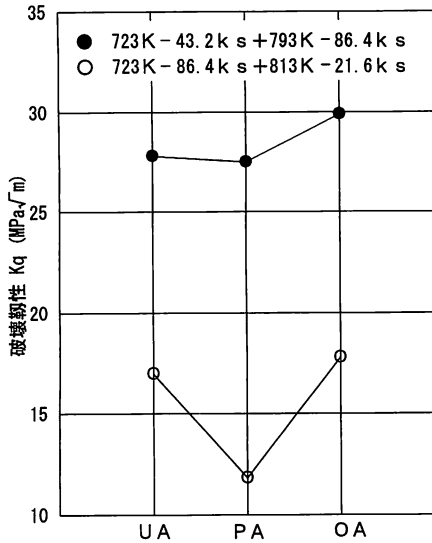


図8 2090合金厚板（大型鋳塊）の破壊靱性に及ぼす均質化処理の影響

・粒界の全面腐食性を促進する。これは粒内に T_1 相が均一に析出するためと考えられる。2091合金の場合はストレッチによる δ' 相の粒内析出効果が小さく、粒界腐食が防止されない³²⁾。図10は2090, 2091合金とも時効が進むと銅富相の析出が進行して、マトリックスの銅濃度が低下するので腐食速度が大きくなることを示す。応力腐食割れ性は2090合金では $OA > PA > UA$, 2091合金では $UA > PA > OA$ の順に高い^{33), 34)}。

図11は2091合金の疲労き裂伝播速度について、応力拡大係数範囲が小さいときは時効条件による差が小さいが、 $20 \sim 30 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ あたりから OA 材のき裂の伝播速度が大きくなることを示す³⁵⁾。

4. 合金の特性向上

加工熱処理、二段時効および亜鉛の添加による特性向上を試みた。

4.1 加工熱処理による強靱性の向上^{36)~38)}

2091合金について図12の加工熱処理を行い、降伏強さと動的破壊靱性の積として強靱性を評価した結果が図13である。温間圧延率が高いほど、温間圧延温度が低いほど、冷間圧延率は20%のとき強靱性が高い。降伏強さは δ' 相の転位による剪断機構と δ' 相については Orowan の by-pass 機構によって定量的に説明することができる。また動的破壊靱性は図14のようにサブ結晶粒の微細化によって向上する。

4.2 二段時効による破壊靱性の向上

8090合金 (T8) に短時間再時効処理を行うと破壊靱性が向上し、リチウムの粒界偏析が関係していると考えられている^{39), 40)}。

2090, 2091および8090合金厚板について二段時効を行い、S-L方向の破壊靱性を調査した。2091および8090合金については強度/破壊靱性バランスの向上が認められた^{41), 42)}。図15は8090合金についての結果を示しており、二段目の時効温度が高いほど、破壊靱性が向上し、ケース①線： $K_{IC}/\sigma_{0.2} \geq 1.1\sqrt{\text{mm}}$ およびケース②線： $K_{IC}/\sigma_{0.2} \geq 2.5\sqrt{\text{mm}}$ を満たすことができる。二段時効の効果は、 δ' 相の再溶解と PFZ の幅の拡大による粒界での歪集中の緩和によるものと考えられる。

4.3 亜鉛添加による耐 SCC の向上^{43)~46)}

図16は2090合金の S-L 方向について SCC き裂伝播速度を測定した結果であり、亜鉛添加により K_{ISCC} 、き裂伝播速度が改善される。2091合金についても2024合金の特性を上回ることが確かめられている。亜鉛添加の効果は粒界腐食性の緩和と密接な関係がある。

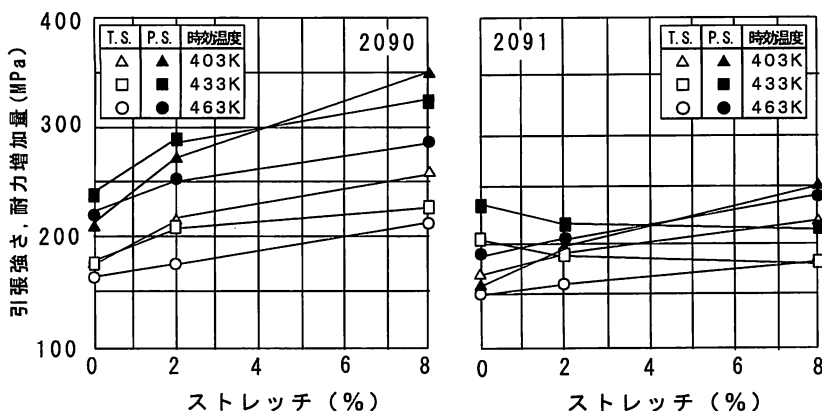


図9 2090および2091合金のピーク時効の強度増加量に及ぼす時効前冷間加工（ストレッチ）の影響

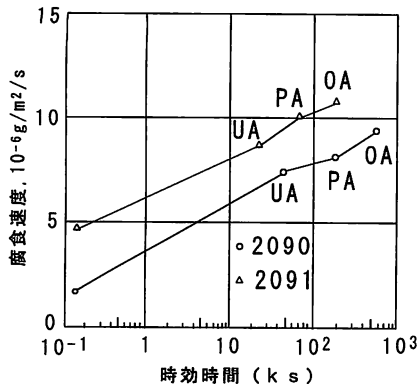


図10 2090および2091合金の腐食速度に及ぼす時効の影響

5. 新合金

Al-Li-Cu-Mn-Cd系の2020合金を第一世代, Al-Li-Cu(-Mg)-Zr系の2090, 2091および8090を第二世代とすると, 近年 Al-Li-Cu-Mg(-Ag)(-Zn)(-Mn)-Zr系の低リチウム第三世代合金が開発されている。

5.1 Weldalite 049ファミリー合金

表2は, リチウム濃度が低く銀とマグネシウム添加に特徴のあるI/Mアルミニウム合金では最強のWeldalite 049ファミリー合金の特性である。本合金はリチウム濃度が1.2%付近で最も強度が高いこと^{(47),(48)}, 銀とマグネシウムの添加が Ω 相, または T_1 , θ' 相の析出を促進することを利用している^{(49),(50)}。最近の研究では, マグネシウムおよび銀は T_1 , δ' 相内に存在する⁽⁵¹⁾, Mg/Cu/Vacancyの複合クラスタが T_1 相の異質核生成サイトになり, 粒内析出が促進されると考えられている^{(52),(53)}。

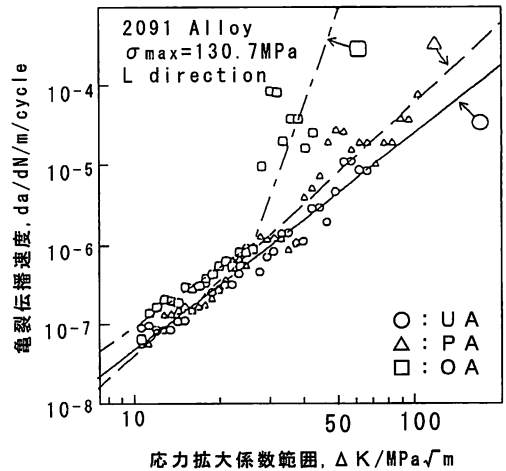
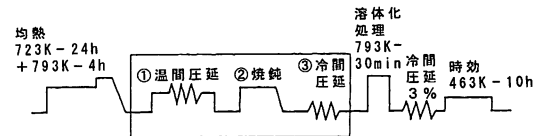


図11 き裂伝播速度と応力拡大係数範囲の関係 (L方向)



	①	②	③
(a)	623 K 30%, 45%, 60%, 75%	none	none
(b)	573 K, 623 K, 723 K 45%	none	none
(c)	623 K 45%	none	0%, 20%, 30%
(d)	623 K 45%	673 K-2 h	0%, 20%, 40%

図12 加工熱処理方法の組合せ

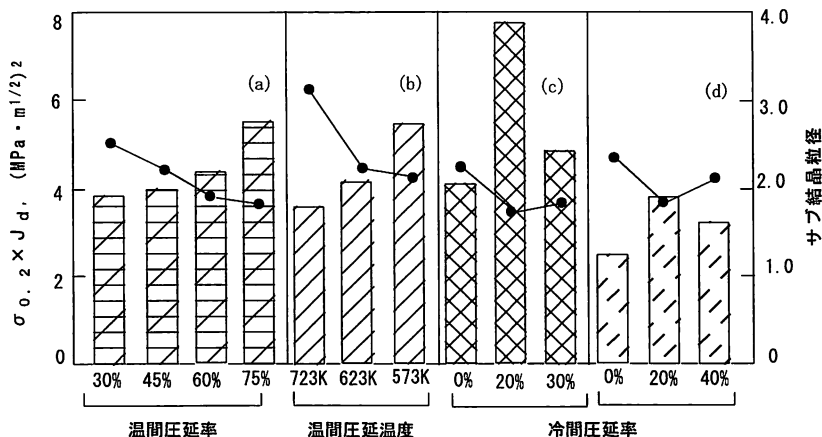


図13 2091合金板の $\sigma_{0.2} \times J_d$ とサブ結晶粒に及ぼす加工熱処理の影響, (a)~(d)はFig. 12の工程を示す (●: サブ結晶粒, □: $\sigma_{0.2} \times J_d$)

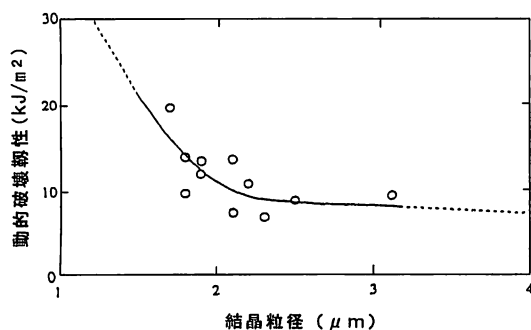


図14 2091合金のサブ結晶粒と動的破壊靱性の関係

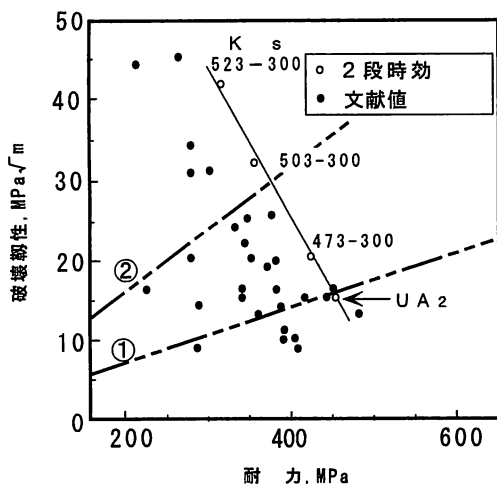


図15 8090合金の耐力と破壊靱性の関係と航空機設計における要求値（二段時効温度：K，二段時効時間：s）

5.2 2097および2197合金

2097および2197合金は開発コンセプトが明瞭で⁵⁴⁾，特性向上に成功している。例えば，2090合金を380 Kに長時間ばく露すると，微細な δ' （および T_1' ）相の析出が進むため⁵⁵⁾脆化（70°CのThermal Stability）が進行する。このため，2097および2197では低リチウム系を選択している。

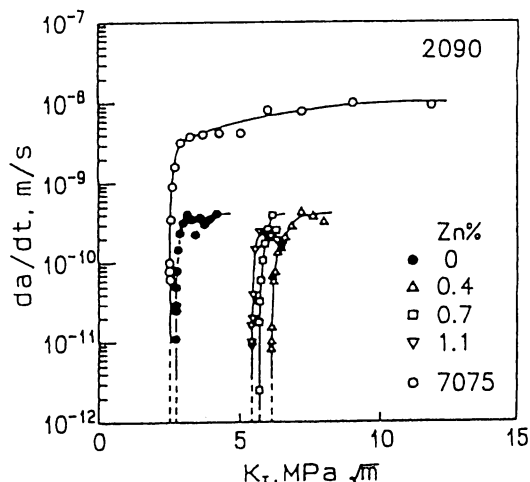


図16 2090系合金のSCCき裂進展速度と応力拡大係数の関係

5.3 C155

C155は低リチウムではないが，破壊靱性，疲労亀裂進展特性が非常に優れている⁵⁶⁾。成分的にはマンガンと亜鉛が添加され，製造工程にも特徴がある（AERO-MAT '95）。

5.4 P/M 合金

急冷粉末冶金（P/M），複合材（MMC）およびメカニカルアロイング（MA）も試みられている。MA材として5091合金がAAに登録しており，わが国でも特性が評価されている⁵⁷⁾。

6. 実用新合金開発の試み

（株）アリシウムでは，ロケット燃料タンクを想定した極低温用合金⁵⁸⁾，耐摩耗性合金，高速車両に適した合金の開発を行った。車両用合金はAl-2.7Li-2Mg(-0.5Cu)-0.13Zrで焼入感受性が良好なため，押出し後の時効（T5）で δ' 相により強度がでる^{59),60)}。表3に特性を示してあり，従来合金より比強度，比弾性率が優れていることがわかる。導電率が低いことから，TIG溶接性，スポット溶接性にも特徴がある⁶¹⁾。TIG継手の強度は，

表2 Weldalite 049 ファミリー合金の特性

*計算値

合金	形質	調質	引張強さ (MPa)	耐力 (MPa)	伸び (%)	破壊靱性 K_{IC} (MPa√m)	密度 g/cm ³	比強度
2094	押出	T8	716	709	6.5	$K_{IC}28.3$	2.71*	264
2095	押出	T8	689	682	6.0	$K_{IC}26.4$	2.71*	254
2195	Plate	T8	585	566	11.6	$K_{IC}34.0$	2.72*	215
2096	Plate	T8R70	570	546	11.0	$K_{IC}45.3$	2.60*	219

表3 Alithium A,B合金の代表特性

合 金	引 張 特 性			密度 (g/cm ³)	弾性率 (N/mm ²)	比強度 (引張強さ)	比弾性率	導電率 (IACS %)
	引張強さ (MPa)	耐力 (MPa)	伸び (%)					
Alithium A-T5	470	370	4	2.50	78453	188	3200	19.7
Alithium B-T5	510	420	4	2.51	78453	203	3190	18.8
6005	274	225	12	2.70	68646	101	2590	49.8
7005	383	319	16	2.78	71588	138	2630	32.3

6005合金を上回り、耐食性、疲労強度も良好である。

7. 高力合金の設計

電子論を合金の設計に適用し、Al-Li-Mg-Zn-Cu-Ag-Zr系合金押出材で引張強さ714 MPa、耐力700 MPa、伸び6%を得ている⁶²⁾。またAl-Li-Cu-Mg-Zn-Ag-Zr-Mn系合金圧延板で引張強さ656 MPa、耐力634 MPa、伸び2.4%を得ている⁶³⁾。

これらの合金はWeldalite 049に匹敵する強度特性を有しており、今後製造工程の最適化、強化機構の解明等を経て実用合金としての発展が期待される。

8. おわりに

Al-Li合金の真の実用化を図るためには、メーカ、ユーザ、公共機関が一体となった活動の必要性が指摘されており⁶⁴⁾、アリシウムはその一部を担ってきたが、道はまだまだ険しい。スペースの関係でアリシウムの研究・開発成果のうち、成形性⁶⁵⁾、破壊靱性に関する解析的研究⁶⁶⁾、耐食型8092合金、微量元素の添加効果⁶⁷⁾等については記述を割愛した。

(株)アリシウムの研究開発は基盤技術研究促進センター、軽圧7社による物心両面からの支援および学界、大阪ニューマテリアルセンター(村上陽太郎所長)、ユーザの協力により成しえたものであることを記し、謝辞としたい。

本稿の整理には、福田祐子、畦地美紀両氏の協力を得た。

参 考 文 献

- 1) Aluminum-Lithium Alloys, Proc. of the First Int. Aluminum-Lithium Conf., TMS-AIME, (1980).
- 2) Aluminum-Lithium Alloys II, Proc. of the Second Int. Aluminum-Lithium Conf., TMS-AIME, (1983).
- 3) Aluminum-Lithium Alloys III, Proc. of the Third Int. Aluminum-Lithium Conf., The Inst. of Met., (1985).
- 4) 4th Int. Aluminum-Lithium Conf., J. de Phys.,

Tome 48, Colloque C3, Sept., (1987).

- 5) Aluminum-Lithium Alloys, Proc. of the Fifth Int. Aluminum-Lithium Conf., Mat. and Component Eng. Pub., (1989).
- 6) Aluminum-Lithium, Papers presented at the Sixth Int. Aluminum-Lithium Conf., DGM Inf., (1992).
- 7) T. Yoshiyama, K. Hasebe and M. Mannami: J. Phys. Soc. Japan, 25 (1968), 908.
- 8) 田村, 森, 中村: 日本金属学会誌, 34 (1970), 919.
- 9) 軽金属学会編: 研究部会報告書 No. 21「Al-Li合金」, (1989).
- 10) 研究開発マネジメント, アーバンプロデュース, (1996. 4), 44.
- 11) 坂本敏正: アルミニウム, 2 (1995), 201.
- 12) 公開特許公報, 昭60-127059.
- 13) 公開特許公報, 昭60-180656.
- 14) 大園智哉, 岡 一嘉, 杉山禎彦, 山本君二: 軽金属学会第79回秋期大会講演概要, (1990), 17.
- 15) 岡 一嘉, 若崎 修, 大園智哉, 林雄一郎, 鷲尾治七, 山本君二: 軽金属学会第80回春期大会講演概要, (1991), 55.
- 16) K. Oka, O. Wakasaki, T. Ohzono, Y. Hayashi, S. Washino and K. Yamamoto: 文献6), 877.
- 17) M. Toyoshima, S. Kurino, K. Ohara and O. Wakasaki: Aluminum Alloys Vol. II, The 4th ICAA (1991), 114.
- 18) D. Webster: Met. Trans. A, 18A (1987), 2181.
- 19) R. F. Ashton, D. S. Thompson and F. W. Gayle: Aluminum Alloys-Phys. and Mechanical Properties, (1986), 403.
- 20) O. Wakasaki, S. Kurino, M. Toyoshima and K. Ohara: 文献17), 130.
- 21) H. Okada, G. Itoh and M. Kanno: Scripta Met. et Mat., 26 (1992), 69.
- 22) D. P. Hill, D. N. Williams and C. E. Mobley: 文献2), 201.
- 23) R. Grimes, M. A. Reynolds, A. P. Titchner, M. S. Graves, I. Strassheim and D. Warrington: 文献6), 3.
- 24) L. C. Labarre, R. S. James, J. J. Witters, R. J. O'Malley and M. R. Emptage: 文献4), C3-93.
- 25) 大原欽也, 若崎 修, 大園智哉: 軽金属, 43 (1993), 594.
- 26) 大原欽也, 若崎 修, 豊嶋雅康, 大園智哉: 軽金属, 43 (1993), 600.

- 27) K. Ohara, S. Kurino, M. Toyoshima and O. Wakasaki : 文献17), 122.
- 28) L. G. Bennet and D. Webster : 文献17), 98.
- 29) 萩原卓三, 小林一徳, 坂本敏正 : 軽金属学会第90回春期大会講演概要, (1996), 77.
- 30) 小林一徳, 萩原卓三, 坂本敏正 : 軽金属学会第88回春期大会講演概要, (1995), 255.
- 31) 萩原卓三, 小林一徳, 坂本敏正 : 文献30), 257.
- 32) 萩原卓三, 神尾彰彦, 里 達雄, 辻 美紘, 岸野邦彦, 平野清一, 江藤武比古 : 文献15), 71.
- 33) 大崎修平, 小林一徳, 兼田裕章, 辻 美紘 : 軽金属, 43 (1993), 199.
- 34) 大崎修平, 小林一徳, 田中浩毅, 辻 美紘 : 軽金属, 44 (1994), 204.
- 35) 浦島洋之, 加藤 一, 杜澤達美, 高山善匡, 渡部英男, 萩原卓三, 坂本敏正 : 軽金属学会第89回秋期大会講演概要, (1995), 91.
- 36) 新家光雄, 小林俊郎, 山田裕樹, 入佐 徹, 萩原卓三, 坂本敏正 : 軽金属, 45 (1995), 121.
- 37) 新家光雄, 小林俊郎, 山田裕樹, 入佐 徹, 萩原卓三, 坂本敏正 : 軽金属, 45 (1995), 127.
- 38) M. Niinomi, K. Kobayashi, H. Yamada, T. Hagiwara and T. Sakamoto : 文献17), 342.
- 39) S. P. Lynch: Mat. Sci. and Eng., A136 (1991), 25.
- 40) B. Noble, S. J. Harris and K. Dinsdale : 文献17), 460.
- 41) 大崎修平, 飯野牧夫, 打江正樹, 小林一徳, 坂本敏正 : 軽金属, 45 (1995), 660.
- 42) 大崎修平, 小林一徳, 吉野和彦, 飯野牧夫, 坂本敏正 : 材料, 45 (1996).
- 43) 小林一徳, 大崎修平, 神尾彰彦, 里 達雄, 辻 美紘 : 軽金属, 42 (1992), 211.
- 44) 大崎修平, 兼田裕章, 小林一徳, 辻 美紘 : 日本機械学会論文集 (A 編), 60 (1994), 671.
- 45) K. Kobayashi, S. Ohsaki, A. Kamio, T. Sato and Y. Tsuji : 文献6), 673.
- 46) S. Ohsaki, K. Kobayashi, M. Iino and T. Sakamoto: Corrosion, 38 (1996), 印刷中.
- 47) T. J. Langen and J. R. Pickens : 文献5), 691.
- 48) T. J. Langen and J. R. Pickens: NASA Contractor Report 4364, (1991).
- 49) 廣澤渉一, 里 達雄, 神尾彰彦, 小林一徳, 坂本敏正 : 文献30), 261.
- 50) 崔 祺, 伊藤吾朗, 菅野幹宏 : 文献30), 269.
- 51) 宝野和博, S. P. Ringer, 桜井利夫 : 軽金属学会第87回秋期大会講演概要, (1994), 197.
- 52) S. Hirose, T. Sato, A. Kamio, K. Kobayashi and T. Sakamoto : 文献17), 199.
- 53) 廣澤渉一, 里 達雄, 神尾彰彦, 小林一徳, 坂本敏正 : 軽金属, 46 (1996), 119.
- 54) E. S. Balmuth and D. J. Chellman : 文献17), 282.
- 55) 伊藤吾朗, 崔 祺, 菅野幹宏, 萩原卓三, 坂本敏正 : 文献30), 267.
- 56) A. L. Veolucci: Aviation Week and Space Technology, Jan. 24, (1994), 51.
- 57) 附田賢二, 飯久保和人, 平 博仁 : 電気製鋼, 64 (1993), 116.
- 58) T. Hagiwara, K. Kobayashi and T. Sakamoto : 文献17), 297.
- 59) 里 達雄, 神尾彰彦, 岩田充浩, 小林一徳, 辻 美紘 : 軽金属学会第85回秋期大会講演概要, (1993), 91.
- 60) 小林一徳, 萩原卓三, 坂本敏正 : 軽金属学会第86回春期大会講演概要, (1994), 233.
- 61) K. Kobayashi, T. Hagiwara and T. Sakamoto : 文献17), 488.
- 62) 酒井崇之, 小林俊郎, 湯川 宏, 森永正彦 : 文献35), 75.
- 63) 廣澤渉一, 里 達雄, 神尾彰彦, 小林一徳, 坂本敏正 : 文献29), 267.
- 64) 今村次男 : 軽金属, 36 (1986), 705.
- 65) 佐藤金司, 萩原卓三, 坂本敏正, 酒井大作 : 第45回塑性加工連合会講演会, (1994), 69.
- 66) 小林俊郎, 新家光雄, 入佐 徹, 酒井崇之, 萩原卓三, 坂本敏正 : 軽金属, 45 (1995), 654.
- 67) 崔 祺, 伊藤吾朗, 菅野幹宏, 辻 美紘, 小林一徳 : 日本金属学会誌, 59 (1995), 251.