Al-Mg-Si 系合金の開発・研究の変遷

里 達雄*・松田 健二**

Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 53, No. 11 (2003), pp. 449-453

History of research and development of Al-Mg-Si alloys

Tatsuo SATO* and Kenji MATSUDA**

1. はじめに

Al-Mg-Si 系合金（以後 6000 系合金と称する）はよく知られているように長い歴史をもつ合金でありながら、現在もお精力的な研究が続いている奇特性な合金である¹⁾。アルミニウム連盟（AA）に登録されている合金の種類は 70 にものぼる。表 1 にその一部を挙げた²⁾。基本的には図 1 に示したアルミサッシとしての使用が主であり、産業界での問題点を基本とする種々の研究テーマが精力的に設定されており、とくに Al-Li 系合金の研究が全盛となる 1980 年代までに、加工熱処理^{3)~5)}、二段時効現象、そして粒界破壊などに関するきわめて広範な研究が展開されてきたと言っても過言ではない。中でも電気比抵抗測定や比熱測定による優れた研究が多く、また、X 線回折による構造解析、当時普及し始めた透過型電子顕微鏡を用いた時効組織に関する研究もこの時期に多い。この時期の研究は現在の 6000 系合金に関する多くの知見の基礎を築いており、一つの成熟した時期ではなかったかと考えている。たとえば、時効過程としては Geisler らが報告した GP ゾーン⁶⁾よりも初期の微細ゾーンや溶質クラスタの存在^{7)~11)}が指摘され、二段時効現象の説明に現在もよく用いられている。機械的性質・破壊現象では、ピーク時効での破断形態が粒界延性破断であることや、すべり帯による粒界への応力集中に起因して粒界破壊が起こるという基本機構が提案されたり¹²⁾、過剰 Si 組成の 6000 系合金の粒界破壊の原因は粒界上の Si 析出物であるという指摘¹³⁾がなされている。また時代を反映したものとして、本系合金の放射能減衰能がきわめて良好であることから、原子炉の隔壁材としての使用が検討されたことが挙げられる¹⁴⁾。

2. 自動車用材料としての開発・研究

1990 年代に入ると、本系合金は優れた材料特性から自動車用材料として一躍脚光を浴び、自動車用 6XXX 合金の開発というような精力的研究が目白押しの状況となった。たとえば、1994 年にアトランタで開催された第 4 回アルミニウム合金国際会議（ICAA4）においても、Automotive Applications、

6XXX Alloys のセッションが設けられるほどとなり、TMS でも Automotive Alloys のシンポジウムセッションが組まれた。日本での 6000 系合金の自動車材などへの適用動向は地球環境保全や排ガス規制とあいまって、自動車だけでなく、鉄道車両や船舶などの軽量化対策のため鉄鋼材料に代わる材料として幅広く使用されている点がある。表 2 には表 1 以外の自動車用 6000 系合金を挙げた^{15),16)}。現在の世界の 6000 系合金自動車外板の理念や合金設計思想は日本が多くを樹立したと言っても過言ではない。図 2 にアルミニウム自動車のホワイトボディーの外観を示す。2 つの写真（Honda NSX とインサイト）を比較すると構造上の違いはあるが、安全装備搭載のために空間を広く取るなど軽量化に対する意識の変化が伺える。最近ではオールアルミの車体で 200 kg 台のものも出てきており、ハイブリッドカーや燃料電池の実用化などを考えると、今後ますます車体軽量化のために 6000 系合金を含むアルミニウム合金の需要増加が期待される。

3. 溶接構造用材料としての開発・研究

自動車用材料としての使用が注目される中、組立て時の接合方法として熱伝導の良好な本合金では溶接が大きな課題となった。また、日本では建築基準法の改正で 6000 系合金の使用が可能となり、図 3 に示すような大型構造物としての用途が拡大した。このような背景から、溶接性が良好でさらなる高強度、高延性の材料開発が行われている。表 3 には建築構造用の 6000 系合金を¹⁷⁾、またこれらの基準強度を表 4¹⁸⁾に挙げた。さらに溶接に変わる新しい接合方法として摩擦攪拌溶接（FSW）がアルミニウム合金に対して実用化されつつあり、たとえば図 4 に示したように、75 mm 厚さの 6082 合金の接合例が報告されている¹⁹⁾。さらに大型構造物として、たとえばスペースシャトルの外部燃料タンク部品は FSW によって接合された 2195（Al-Li 系）合金パネルが使用されたように、大型部材の製造に威力を発揮している²⁰⁾。

4. 6000 系合金の新しい開発・研究の潮流

従来の材料の性質を飛躍的に越える材料の開発が強く望ま

* 東京工業大学大学院理工学研究科（〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1）。Graduate school of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology (2-12-1 O-okayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8552).

** 富山大学工学部物質生命システム工学科（富山市）。Department of System Engineering for Materials and Life Science Faculty of Engineering, Toyama University (Toyama-shi, Toyama). E-mail: matsuda@eng.toyama-u.ac.jp

受理日：平成 15 年 9 月 10 日

表 1 JIS に登録されている 6000 系アルミニウム合金の一例とその化学組成, 用途および性質²⁾

合金名	主な成分の添加範囲(mass%)									調質	主な用途	引張強度	耐食性	成形性	切削性	溶接性	表面処理性
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	特殊な元素等								
6005A	0.6-0.9	<0.35	<0.1	<0.1	0.4-0.6	<0.1	<0.1	<0.1	(Mn+Cr): 0.12-0.5	T5	車両, 家具, 配管, 船舶	B	A	C	C	A	—
6013	0.6-1.0	<0.5	0.6-1.1	0.2-0.8	0.8-1.2	<0.1	<0.25	<0.1		T6	建築構造用部材	A		A	A		
6060	0.3-0.6	0.1-0.3	<0.1	<0.1	0.35-0.6	<0.05	<0.15	<0.1		T6	溶接構造用	C					
6061	0.4-0.8	<0.7	0.15-0.4	<0.15	0.8-1.2	0.04-0.35	<0.25	<0.15		T6	車両, 陸上構造物, 船舶	A	A	C	C	A	B
6063	0.2-0.6	<0.35	<0.1	<0.1	0.45-0.9	<0.1	<0.1	<0.2		T6	車両, 建築用, 家電, 家具	B	A	C	C	A	A
6066	0.9-1.8	<0.5	0.7-1.2	0.6-1.1	0.8-1.4	<0.4	<0.25	<0.15		T6		A					
6070	1-1.7	<0.5	0.15-0.4	0.4-1.0	0.5-1.2	<0.1	<0.25	<0.1		T6		A					
6082	0.7-1.3	<0.5	<0.1	0.4-1.0	0.6-1.2	<0.25	<0.2	<0.1		T4	溶接構造用	B					
6101	0.3-0.7	<0.5	<0.1	<0.03	0.35-0.8	<0.03	<0.1	—	B:<0.06	T6	導電用材, 電線	B	A	A	A	A	A
6181	0.8-1.2	<0.45	<0.1	<0.15	0.6-1.0	<0.2	<0.2	<0.1		T6		B					
6262	0.4-0.8	<0.7	0.15-0.4	<0.15	0.8-1.2	0.04-0.14	<0.25	<0.15	Bi:0.4-0.7 Pb:0.4-0.7	T651	快削合金	A	A		C	A	
6351	0.7-1.3	<0.5	<0.1	0.4-0.8	0.4-0.8	<0.2	<0.2	<0.05		T6	車両	A	A			A	B
6N01	0.4-0.9	<0.35	<0.35	<0.5	0.4-0.8	<0.3	<0.25	<0.01	(Mn+Cr)<0.5	T6	車両, 陸上構造物, 船舶	B	A	C	C	A	B

その他の元素は 0.15 mass% 以下。

各種の性質について

引張強さ A: >295 N/mm², B: 195-295 N/mm², C: 100-195 N/mm², D: <100 N/mm²

耐食性 A: 問題なし, B: 屋外無処理使用可, C: 屋外では防食処理必要, D: 完全な防食処理必要

成形性 A: 問題なし, B: 若干の配慮必要, C: 特別の配慮必要, D: 実用的でない

切削性 A: 問題なし, B: 若干の配慮必要, C: 特別の配慮必要, D: 実用的でない

溶接性 A: 問題なし, B: 若干の配慮はいるが溶接可能, C: 実用的でない

表面処理性 A: 問題なし, B: 若干の配慮必要, C: 特別の配慮必要

図1 6000系アルミニウム合金押出型材の一例（写真御提供 YKK (株)）

図2 アルミ化自動車のホワイトボディー。(a) Honda NSX, 90年発表, (b) Honda インサイト, 99年発表（写真御提供 本田技研工業(株)）

図3 大型建造物への適用例（YKK M&E センター。写真御提供 YKK (株)）

図4 75 mm 厚さの 6082 合金に対する FSW 適用例¹⁹⁾ (TWI, E. D. Nicholas 氏のご厚意による)

ナノマルチ組織の創出

図5 ナノマルチ組織を有する 6000 系合金の概念図

図6 モンテカルロシミュレーションによる Al-Cu 合金と Al-Cu-Mg 合金における室温時効でのクラスタ生成の様子。(a) Al-1.7 mol%Cu 合金と, (b) Al-1.7 mol%Cu-0.3 mol%Mg 合金

表2 表1以外にAAで自動車用合金として紹介されている6000系合金^{15),16)}

合金名	主な成分の添加範囲 (mass%)								主な用途
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	
6009	0.6-1.6	0.5	0.15-0.6	0.2-0.8	0.4-0.8	<0.25	<0.1	<0.1	ボディパネル, バンパー ボディパネル
6010	0.8-1.2	<0.5	0.15-0.6	0.2-0.8	0.6-1.0	<0.25	<0.1	<0.1	
6022	0.8-1.5	0.05-0.2	0.01-0.11	0.02-0.1	0.45-0.7	<0.25	<0.1	<0.15	
6053	11	<0.35	<0.1		1.1-1.4	<0.1	0.15-0.35		メカニカルファスナー
6111	0.6-1.1	<0.4	0.5-0.9	0.15-0.45	0.5-1.0	<0.1	<0.1	<0.1	ボディパネル
6463	0.2-0.6	<0.15	<0.2	<0.05	0.45-0.9	<0.05			荷物用ラック

その他の元素は 0.15 mass% 以下

表3 建築構造用 6000 系アルミニウム合金¹⁷⁾

分類	材質・種類	呼称	主な用途
建築構造用合金	A6063-T5 押出材	AS110	建築用材, 土木用材, 家具, 家電製品等
	A6063-T6 押出材	AS165	建築用材, 土木用材, 家具, 家電製品等
	A6N01-T5 押出材	AS175	車両用材等
	A6061-T6 押出材	AS210	土木用材, スポーツ用品等
	A6N01-T6 押出材		車両用材等
	A6082-T6 押出材	AS235	接合金物
溶接する部分に用いる合金	A6N01-T5 押出材	AW100	
	A6061-T6 押出材	AW110	土木用材, スポーツ用品等
接合金物に用いる合金	A6061-T6 鍛造材	—	

Al 建 5 (1999), 22 より抜粋

表4 建築基準法における 6000 系アルミニウム合金材の基準強度の例¹⁸⁾

種類	材質	基準強度 (N/mm ²)	溶接部の 基準強度 (N/mm ²)	タッピングねじを 用いた接合部の 基準強度 (N/mm ²)
押出材	A6061-T6	210	110	130
	A6063-T5	110	50	70
	A6063-T6	165	50	100
	KA6082-T6	240	110	155
	A6N01-T5	175	100	110
	A6N01-T6	210	100	130
鍛造品	A6061-T6	210	110	130
リベット	A6061-T6	190	—	—

国土交通省告示第 409 号より抜粋

れ、とくに原子レベルでの材料組織制御が有効に行われようとしている。たとえば NEDO における「材料ナノテクノロジープログラム」のナノメタル技術プロジェクトでは、ナノクラスタ、マイクロロイニング制御、加工熱処理、多段熱処理そして ECAP 法を活用し、高強度・高延性・高成形性・高信頼性を実現する新規概念の組織であるナノマルチ組織を有する 6000 系合金の創製を目標としている。たとえば図 5 に示したように、結晶粒界と粒内に別々の組織を持たせることで性能の大幅な改善が期待される²¹⁾。

さらに時効析出のおおもとである核生成の挙動に対して、高分解能電顕法²²⁾では対応しにくい溶質原子と空孔との挙動が、3次元アトムプローブ²³⁾や陽電子消滅法の適用²⁴⁾によって実験的に明らかにされつつあるとともに、計算機実験による理論的な裏付けも充実しつつある。図 6 は計算機実験により求められた Al-Cu 合金と Al-Cu-Mg 合金における室温時効でのクラスタ生成の様子を示したものである²⁵⁾。黒丸で示されているランダムに固溶していた Cu あるいは Mg 原子が、時間の経過（シミュレーションの進展）とともに溶質クラスタを形成していく様子が再現されており、近い将来には、6000 系合金の核生成に関する各種実験データと理論計算結果の整合性が明らかにされ、合理的な 6000 系合金の設計や熱処理法が構築されるであろう。

5. ま と め

価格破壊の影響も一因として作用しているのであろうか、6000 系合金の需要は当初の予想とはかけ離れているようである。しかしながら、アルミニウム合金の中では溶質元素の添加量が 4 mass% 程度と非常に少ないにもかかわらず、製品種類と謎だけは非常に多い合金である。先人の優れた研究結果に甘んじることなく、本稿を一つの契機として、今後さらに 6000 系合金の新たな可能性を引き出す広範囲の研究が新たに展開されることを期待したい。

参 考 文 献

- 1) 松田健二, 池野 進: 軽金属, **50** (2000), 23.
- 2) 例えばアルミニウム材料の特性データベース, 日本アルミニウム協会
- 3) 金子純一: 軽金属, **27** (1977), 49, 384.
- 4) 平田俊也, 松尾 茂: 日本金属学会誌, **36** (1972), 405.
- 5) 宇野照生, 馬場義雄: 日本金属学会誌, **45** (1981), 405.
- 6) A. H. Geisler and J. K. Hill: Acta Cryst., **1** (1948), 238.
- 7) A. Lutts: Acta Met., **9** (1961), 577.
- 8) C. Panseri and T. Federich: J. Inst. Metals, **94** (1966), 99.
- 9) D. W. Pashley, J. W. Rhodes and A. Sendorek: J. Inst. Metals, **94** (1966), 41.
- 10) 宮内忠一, 藤川辰一郎, 平野賢一: 軽金属, **21** (1971), 565.
- 11) 鈴木 寿, 菅野幹宏, 白石泰久: 軽金属, **28** (1978), 233.
- 12) J. D. Evensen, N. Ryum and J. D. Embury: Mater. Sci. Eng., **18** (1975), 221.
- 13) J. Aucote and D. W. Evans: Metal Sci., **12** (1978), 57.
- 14) 斉藤英之, 飯島嘉明, 平野賢一: 軽金属, **36** (1986), 286.
- 15) 例えば Aluminum Association (AA), Automotive Aluminum Alloys and Application ホームページ
- 16) I. J. Polmear: *Light Alloys*, 3rd ed. Arnold, London, (1995), 92.
- 17) 例えば Al 建, **5** (1999), 22.
- 18) 国土交通省告示第 409 号.
- 19) E. D. Nicholas: Advanced Mater. Process, 157 (1999), 69.
- 20) TWI 技報, No. 19, (2001), 8.
- 21) 材料ナノテクノロジープログラム 実用金属材料分野ナノメタル技術開発成果報告書, 金属系材料研究開発センター, (2002).
- 22) 里 達雄, 松田健二: 電子顕微鏡, **37** (2002), 29.
- 23) M. Murayama and K. Hono: Acta Mater., **47** (1999), 1537.
- 24) Y. Nagai, M. Murayama, Z. Tang, T. Nonaka, K. Hono and M. Hasegawa: Acta Mater., **49** (2001), 913.
- 25) 廣澤渉一, 里 達雄: 金属, **73** (2003), 191.