「軽量化金属材料の現状と今後の動向」特集

金属材料の現状と今後の動向
アルミニウム系材料

吉 田 英 雄

1. はじめに

アルミニウムは、その製錬技術が、ホールとエルーによって発明(1886年)されてから約100年で、工業的には鉄や銅に比べて歴史的に若い金属材料である。アルミニウムはその優れた種々の性質により、身近な家庭用品から高層ビル建材、陸運車両、船舶、電気通信機器、金属機械とその用途分野が多様化すると同時に、量的にも鉄に次ぐ第2の金属材料に成長している。現在わが国は新地金の消費で世界第3位の地位を占めるに至っている。

今後、輸送機関のエネルギー消費改善と効率の向上、電子機器等でのハイテク分野の拡大、生活水準の向上による耐久消費の需要拡大、リサイクルによる省資源の促進などに、最も期待される金属材料である。

ここでは、アルミニウムの一般的特性およびその種類、さらに航空機用アルミニウム合金の開発の動向と自動車の軽量化の現状について概要をまとめる。

2. アルミニウムの特性・種類¹⁾

2.1 アルミニウムの特性

(1) 強度

アルミニウムは比重が銅や鉄の約1/3であり、また合金の種類やその製造工程によっては引張強さが70～600MPaと変化させることができる。高強度材では他の金属材料に比べて高い比強度(引張強さ/比重)が得られるため、自動車、航空機、車両、船舶などの輸送機関での軽量化に役立っている。

(2) 耐食性

大気中にて緻密で安定な酸化皮膜が形成され、この皮膜には自己補修作用があるため腐食が自然に防止される。また電気化学的に表面に無色透明な酸化皮膜を形成

させるアルマイト処理により、銀白色の金属光沢を保持したままで耐食性、耐摩耗性を飛躍的に向上させることができる。さらに、染色、自然発色、電解発色などの方法により種々の色調を与えることができるため、家庭用品、建築物の内外装にも多く使用されている。

(3) 熱伝導性・電気伝導性

アルミニウムの熱伝達率は鉄の約3倍で、熱を伝え易いために、冷暖房装置、エンジン部品、各種の熱交換器に用いられている。急速に冷えるという特性はアルミニウム飲料缶にも生かされている。また、アルミニウムの電気伝導率は銅の約60%であるが、比重が約1/3であり、そのため同じ重さの銅に比べて2倍もの電流を通すことができる。現在では高電圧の送電線の約99%に採用されるとともに、導体などに広く用いられている。

(4) 加工性

アルミニウムは塑性加工が容易で、圧延では約5 μ mの厚みの箔が製造可能である。押出では中空で複雑な形状の押出形材ができるところに特徴がある。さらにできあがった圧延板や押出製品をさらにプレス成形や曲げ加工あるいは切削加工したりすることが比較的容易である。

また、鋳造加工も容易で、ピストンやシリンダーブロック、ホイールなどの自動車部品の幅広い分野で用いられている。接合に関しても、溶接、ろう付け、スポット溶接、リベット接合、接着などの各種の方法で信頼性の高い継手が得られる。

(5) その他

磁気を帯びないのでVTRのシリンダーや磁気ディスクの基板として用いられている。また、よく磨いたアルミニウムは、赤外線や紫外線あるいは電磁波をよく反射するために暖房器の反射板、照明器具、宇宙服あるいは

Aluminum Alloys

筆者紹介 HIDEO YOSHIDA

Technical Research Laboratories, Sumitomo Light Metal Industries, Ltd.

住友軽金属工業株式会社 技術研究所 主任研究員、工学博士

筆者は、金属材料が御専門で、現在、構造用アルミニウム合金の開発研究に従事しておられる。

本稿では、リサイクルがらみの軽量化材料として注目されているアルミニウム合金について、その性質や用途別の開発状況等についてわかりやすく解説いただいた。

鏡面加工を施して複写機のポリゴンミラーなどに用いられている。さらに、ガス放出率が非常に小さく真空到達性能が他の材料に比べて優れているために、各種の高真空ポンプや配管、高真空半導体製造装置に活用されている。

2.2 アルミニウム合金の種類

アルミニウムは純度99.0%以上のものを純アルミニウム、種々の元素を添加して合金にしたものをアルミニウム合金と呼んでいる。

また、最終製品の用途や要求特性によって板、形、管、棒、線、鍛造材に加工する展伸用合金と鋳物、ダイ

キャストなどの铸造用合金に大別でき、また各々に關して、非熱處理型合金と熱處理型合金に分類できる。非熱處理型合金は、圧延や引抜きなどの冷間加工によって、熱處理型合金は焼入れ(溶体化處理)、焼き戻し(時効析出處理)によって所定の強度が得られる。ただし熱處理型合金も熱處理の後で、強度を高めるために冷間加工を加えることがあり、また非熱處理型合金でも加工歪みを除去する焼きなまし(焼鈍)や安定化處理と呼ばれる熱處理を行なうこともある。このように製造工程で機械的性質が異なるので、製造工程および機械的性質を調質記号で區別している。アルミニウム合金の分類を図1に示

図1 アルミニウム合金の分類

図2 アルミニウム合金の製造工程と調質記号 (H1n などの n は加工歪みの程度を示すもので、数字の大きいもの程、加工歪みが大きく、強度が高くなる)

表1 展伸用アルミニウムとその合金の特性および用途

種 類	主 成 分	特 性	主 な 用 途
1000系合金	純 Al	強度は低いが、耐食性、加工性、表面処理性がよく、熱や電気の良導体である、代表的なものに1050、1100合金がある。	家庭用品、機器部品、装飾品、ネームプレート、反射鏡、王冠など
2000系合金	Al-Cu	一般に、耐食性、溶接性は良好ではないが、強度は鋼材に匹敵する合金もあり、切削性もよい。代表的なものに2017、2024、合金がある。	航空機部材、機械切削部品など
3000系合金	Al-Mn	純アルミニウムとほぼ同等の耐食性、成形性を持ち、強度がやや高い。代表的なものに3003合金がある。	飲料缶、鍋、湯沸かし等の器物、熱交換器部材など
4000系合金	Al-Si	耐熱、耐摩耗性が優れる。代表的なものに4032合金などがあり、鍛造材やろう材として使用される。	熱交換器部材、シリンダーなど
5000系合金	Al-Mg	耐食性、溶接性、成形性がよく、強度も比較的高い。代表的なものに5052、5083、5N01合金などがある。添加量が少ないものは内装品や天井板に、添加量が多い高強度材は車両外板や構造材として使用される。	建築、船舶、車両、自動車外板、飲料缶など
6000系合金	Al-Mg-Si	耐食性、強度、押出加工性が優れ、代表的なものに6061、6063、6N01合金があり、近年車両の構造部材として多用されている。	車両構造部材、建築用サッシなど
7000系合金	Al-Zn-Mg-(Cu)	耐食性、溶接性は劣るが、アルミ合金の中でも最高の強度をもつ銅を含む7075、7178合金および高強度で溶接性が優れ、車両構造材として実績の多い銅を含みぬ7N01、7003合金がある。溶接後の熱影響部も室温時効硬化により母材に近い強さに回復するため、優れた継手効率が得られる。	航空機部材、スポーツ用品、車両構造部材など

す。さらに調質記号を図2に示す。特に展伸用合金についてそれぞれの合金の特性と用途を表1にまとめる。

3. 航空機用アルミニウム合金の開発の動向

3.1 航空機用アルミニウム合金の歴史²⁾

1906年に Wilm により Al-Cu-Mg 系合金の時効硬化現象が発見されて以来、ジュラルミン(2017)、超ジュラルミン(2024)、超々ジュラルミン(ESD、7075)等を始めとして種々の高力アルミニウム合金が開発され、航空機構造用材料として使用されてきた。航空機用材料としては、まず比強度(強度/比重)の高いことが要求されるため、ジュラルミンの開発以来、主として静的強度の向上を目標とした合金開発が行なわれ、1940～50年代までに2014、2024、7075、7079などの合金が開発され、今日でも主要な航空機材料として使用されている。

2024、7075、7079等の合金に代表される従来合金については、7079-T6 および7075-T6厚肉材の応力腐食割れ事故が1950～1960年代に頻発したこと、および厚肉材の使用に伴い ST 方向(肉厚方向)の靱性が低いことが問題

とされたことなどにみられるように、材料の信頼性に関しては必ずしも十分とはいえず、航空機技術の進歩に伴い材料の信頼性を向上させることが要求された。このような従来合金における問題点を解決するため、1960年代より応力腐食割れ性の改良、靱性の向上、疲労強度の向上などの材料の信頼性向上をはかることに合金開発の重点がおかれ各種の新合金が開発された。

さらに1973年の第一次オイルショック以降燃費の優れた航空機の開発、すなわち機体の軽量化が従来にも増して要請された。機体の重量軽減法の一つは高分子系マトリックス複合材の採用である。この複合材は非構造部材から構造部材へと適用範囲を徐々に拡大される方向にあるが、内在する欠陥の検出や損傷許容設計の導入等においてまだ問題が残されている。また複合材による部品の製造や組立には、全く新しい設備の導入やそれに伴う訓練など新たな投資が必要となり、適用拡大に制限が生じてくる。重量軽減のもう一つは Al-Li 合金の採用である。Al-Li 合金は従来の高力アルミニウム合金よりも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

表2 航空機用高力アルミニウム合金の化学成分(mass%)

合金	登録年	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti		その他		Al
												個々	計	
2014	1928	0.50-1.2	0.7	3.9-5.0	0.40-1.2	0.20-0.8	0.10		0.25	0.15	0.20Zr+Ti	0.05	0.15	残
2017	1916	0.20-0.8	0.7	3.5-4.5	0.40-1.0	0.40-0.8	0.10		0.25	0.15	0.20Zr+Ti	0.05	0.15	残
2219	1954	0.20	0.30	5.8-6.8	0.20-0.40	0.02			0.10	0.02-0.10	0.05-0.15V, 0.10-0.25Zr	0.05	0.15	残
2419	1972	0.15	0.18	5.8-6.8	0.20-0.40	0.02			0.10	0.02-0.10	0.05-0.15V, 0.10-0.25Zr	0.05	0.15	残
2519	1985	0.25	0.30	5.3-6.4	0.10-0.50	0.05-0.40			0.10	0.02-0.10	0.05-0.15V, 0.10-0.25Zr	0.05	0.15	残
2021	1965	0.20	0.30	5.4-6.8	0.20-0.40	0.02			0.10	0.02-0.10	0.05-0.15V, 0.10-0.25Zr	0.05	0.15	残
2024	1932	0.50	0.50	3.8-4.9	0.30-0.9	1.2-1.8	0.10		0.25	0.15	0.05-0.20Cd, 0.03-0.08Sn	0.05	0.15	残
2124	1970	0.20	0.30	3.8-4.9	0.30-0.9	1.2-1.8	0.10		0.25	0.15	0.20Zr+Ti	0.05	0.15	残
2224	1978	0.12	0.15	3.8-4.4	0.30-0.9	1.2-1.8	0.10		0.25	0.15	0.20Zr+Ti	0.05	0.15	残
2324	1978	0.10	0.12	3.8-4.4	0.30-0.9	1.2-1.8	0.10		0.25	0.15		0.05	0.15	残
2048	1972	0.15	0.20	2.8-3.8	0.20-0.6	1.2-1.8			0.25	0.10		0.05	0.15	残
2090	1984	0.10	0.12	2.4-3.0	0.05	0.25	0.05		0.10	0.15	1.9-2.6Li, 0.08-0.15Zr	0.05	0.15	残
2091	1985	0.20	0.30	1.8-2.5	0.10	1.1-1.9	0.10		0.25	0.10	1.7-2.3Li, 0.04-0.16Zr	0.05	0.15	残
7010	1975	0.12	0.15	1.5-2.0	0.10	2.1-2.6	0.05	0.05	5.7-6.7		0.10-0.16Zr	0.05	0.15	残
7012	1975	0.15	0.25	0.8-1.2	0.08-0.15	1.8-2.2	0.04		5.8-6.5	0.04-0.08	0.10-0.18Zr	0.05	0.15	残
7049	1968	0.25	0.35	1.2-1.9	0.20	2.0-2.9	0.10-0.22		7.2-8.2	0.10		0.05	0.15	残
7149	1975	0.15	0.20	1.2-1.9	0.20	2.0-2.9	0.10-0.22		7.2-8.2	0.10		0.05	0.15	残
7050	1971	0.12	0.15	2.0-2.6	0.10	1.9-2.6	0.04		5.7-6.7	0.06	0.08-0.15Zr	0.05	0.15	残
7150	1978	0.12	0.15	1.9-2.5	0.10	2.0-2.7	0.04		5.9-6.9	0.06	0.08-0.15Zr	0.05	0.15	残
7055	1991	0.10	0.15	2.0-2.6	0.04	1.8-2.3	0.04		7.6-8.4	0.06	0.08-0.25Zr	0.05	0.15	残
7064	1985	0.12	0.15	1.8-2.4		1.9-2.9	0.06-0.25		6.8-8.0		0.10-0.50Zr, 0.10-0.40Co 0.05-0.300	0.05	0.15	残
7075	1943	0.40	0.50	1.2-2.0	0.30	2.1-2.9	0.18-0.28		5.1-6.1	0.20	0.25Zr+Ti	0.05	0.15	残
7175	1957	0.15	0.20	1.2-2.0	0.10	2.1-2.9	0.18-0.28		5.1-6.1	0.10		0.05	0.15	残
7475	1969	0.10	0.12	1.2-1.9	0.06	1.9-2.6	0.18-0.25		5.2-6.2	0.06		0.05	0.15	残
7079	1954	0.30	0.40	0.40-0.8	0.10-0.30	2.9-3.7	0.10-0.25		3.8-4.8	0.10		0.05	0.15	残
7090	1980	0.12	0.15	0.6-1.3		2.0-3.0			7.3-8.7		1.0-1.9Co, 0.20-0.500	0.05	0.15	残
7091	1980	0.12	0.15	1.1-1.8		2.0-3.0			5.8-7.1		0.20-0.6Co, 0.20-0.500	0.05	0.15	残
8090	1984	0.20	0.30	1.0-1.6	0.10	0.6-1.3	0.10		0.25		2.2-2.7Li, 0.04-0.16Zr	0.05	0.15	残
8091	1985	0.30	0.50	1.6-2.2	0.10	0.50-1.2	0.10		0.25		2.4-2.8Li, 0.08-0.16Zr	0.05	0.15	残
8092	1985	0.10	0.15	0.50-0.8	0.05	0.9-1.4	0.05		0.10		2.1-2.7Li, 0.08-0.15Zr	0.05	0.15	残
8192	1985	0.10	0.15	0.40-0.7	0.05	0.9-1.4	0.05		0.10		2.3-2.9Li, 0.08-0.15Zr	0.05	0.15	残

大きく寄与できるとともに、機械加工及び組立作業で従来の技術および設備がそのまま使用できるため、航空機材料として他の競合材料に比べて魅力がある。表2に代表的な航空機用アルミニウム合金の成分を示す。

3.2 2000系新合金

2000系新合金は7000系合金に比べて静的強度は劣るが、疲労特性、耐熱性等に優れている特徴がある。厚肉材のST方向の靱性を向上させる目的で新合金の開発が行われ、代表的な2000系合金である2024合金の靱性改良合金として、2124, 2224, 2324, 2048等の合金が開発されている。2124合金は、鉄、ケイ素等の不純物元素量を規制することにより、また、2224, 2324, 2048等の各合金は、鉄、ケイ素等の不純物元素量の規制とさらに主添加元素の量を調整することにより合金中の第二相化合物の量を減少させ、靱性、特にST方向の破壊靱性値の向上や疲労強度を向上させた合金である。

2024系合金とならぶ代表的な2000系合金である2219合金は、溶接性、耐熱性、靱性等に優れた合金であり、耐熱性、破壊靱性等を要求される宇宙機器燃料タンク用溶接構造材として使用されている。2219合金についてもその改良合金として2419合金および2021合金が開発されている。2419合金は2219合金の鉄およびケイ素含有量を規制することにより靱性の向上をはかった合金であり、2021合金は2219合金に微量のカドミウムおよび錫を添加することにより強度の向上をはかった合金である。最近では微量のマグネシウムを添加した2519合金が開発されT8で高強度が得られる。

3.3 7000系新合金

7000系従来合金における最大の問題は7079-T6, 7075-T6等のST方向で応力腐食割れが発生しやすいことであった。この対策として、従来の7075-T6材より過時効させたT73処理が開発された。T73処理は、7075合金のST方向の応力腐食割れの防止に非常に効果的であり、今日でも航空機材料に多用されている。しかしながら、T73処理は過時効処理でありT6材に比べて強度が10~15%低下するため、さらに高強度を有する合金の開発が必要とされた。このような背景から開発されたのが7049, 7050, 7150等の合金である。7049合金は7001合金の銅およびクロム含有量を減少させ、Zn/Mg量比を高めることにより、T73状態における優れた耐応力腐食割れ性と高強度を得ることを目的として開発された合金である。7050合金および7150合金の開発目的は7049合金と同じであり、過時効状態において優れた耐応力腐食割れ性と高強度を得ることを目的としている。また、7050合金および7150合金は、これまでの7000系合金と異なり、クロムに代ってジルコニウム添加しているため、優れた

焼入れ性に特徴がある。最近、欧州においても7000系合金のクロムに代ってジルコニウムを添加した7010合金や7012合金が開発されているが、開発の目的は7050合金とほぼ同じである。

最近では7000系合金の耐応力腐食割れ性を向上させる熱処理法としてRRA法(Retrogression and Reaging)が注目されている³⁾。この熱処理方法は一度T6処理した後、T6の熱処理温度より高温で短時間熱処理し再度T6処理する方法である。粒界のみが過時効状態で粒内は従来のT6状態となり、強度は従来のT6と同等で耐応力腐食割れ性は過時効させた材料と同等といった優れた性能が得られる。この熱処理法を用いれば従来応力腐食割れが懸念された高亜鉛添加合金でも利用できるようになり、7055合金といった高強度材が開発されている⁴⁾。

応力腐食割れ性の改良と共に靱性の問題も重要な課題である。特に、軍用機においては機体構造部材が厚板、鍛造材等の厚肉材より機械加工として製作されるため、厚肉材のST方向の靱性が問題で、靱性の向上が必要とされる。7000系合金については7075靱性改良合金として7175合金および7475合金が、7049合金に対しては7149合金が開発が開発されている。これらの新合金は、全て鉄、ケイ素等の不純物含有量を抑制し、合金中の第二相化合物の量を減少させることによる破壊靱性値 K_{IC} の改善を目的とした合金である。

3.4 Al-Li合金

アルミニウムにリチウム(密度 0.53Mg/m^3)を添加すると、1%のLi添加で密度が3%低下し、弾性係数は6%上昇する。この特性を生かすために各種のAl-Li合金が開発されている。Al-Li合金の開発では既存の航空機用アルミニウム合金(2014, 2024, 6061, 7075)と同等以上の特性を得て、これらと代替することを目指としている。

表3に現在開発されているAl-Li合金の機械的性質、弾性係数、密度を2024および7075合金と比較して示す。各合金のLi添加量は1.7~2.9%で約6~8%の密度低下と12~18%の弾性係数の増加が得られている。航空機の燃費、航行性能を左右するのは機体重量であり、機体の軽量化が最も有効である。従来のアルミニウム合金より密度の小さいAl-Li合金を用いれば大幅な設計変更なしに軽量化が可能である。直接代替すると約10%の重量軽減ができ、さらに剛性が高くなることを考慮して設計変更すれば、約15%の重量軽減ができるといわれている。

最近ではこれらの合金以外にLiを少なくして強度を向上させたWeldalite™ 049 (Al-(4.5-6.3)Cu-1.3Li-0.4Ag-0.4Mg-0.14Zr)といった合金が米国で開発さ

表3 各種 Al-Li 合金の特性

開発会社	合 金		製 品 形 状	調 質	引 張 特 性			破壊靱性値 $K_{IC}(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$	弾 性 係 数 (GPa)	密 度 (Mg/m^3)
					引 張 強 さ (MPa)	耐 力 (MPa)	伸 び (%)			
Alcan	8090	Lital A	厚 板	T651	495	450	6	37	79	2.54
			薄 板	T6 T8	455 485	365 415	4 4	$K_{IC} 80$ $K_{IC} 60$		
	8091	Lital B	厚 板	T651	565	530	5	24	80	2.55
			薄 板	T6 T8	480 505	390 440	4.5 4.5	$K_{IC} 55$ $K_{IC} 50$		
	8090	Lital C	厚 板	T3X51	470	395	6	$K_{IC} 40$		2.54
			薄 板		430	360	5	$K_{IC} 90$		
Alcoa	8090A	Alithalite A	厚 板		476	400	9	$K_{IC} 45.6$	78.6	2.55
	2090	Alithalite B	厚 板	T8	569	530	7.9	42.5	78.6	2.59
			薄 板	T8	563	512	5.2	—		
			鍛造品	T6	472	416	1	27.4 ⁽²⁾		
	8192	Alithalite C	厚 板	T6X	442	313	5	—	81.6	2.52
Pephiney	8092	Alithalite D	厚 板		488	406	7.5	$K_{IC} 45.3$	78.6	2.55
	8090	CP271	厚 板	T851 ⁽¹⁾	500	455	7	$K_{IC} 33$	81	2.54
	2091	CP274	厚 板	T851 ⁽¹⁾	455	340	11	$K_{IC} 39$	78	2.58
			薄 板	T8 ⁽¹⁾	445	330	17	$K_{IC} 145$		
		CP276	厚 板	T851	605	595	7	—	80	2.58
Alcoa	2020			T6	579	531	3		77.2	2.73
	2024			T3	490	350	16	44	73	2.77
	7075			T6	570	510	13	27	72	2.80

注：(1)LT 方向, (2)LS 方向

れ、注目を浴びている。この合金は Li が 1.3% と少ないために密度は 8090 合金ほど小さくはないが、2219 合金ベースに Ag と Li を添加した合金で強度は 7075 合金を上回ることが報告されている。また製造プロセスも後述する P/M 法によりさらに低密度の Al-2.5Li-11Be 合金 ($2.42\text{g}/\text{cm}^3$) やメカニカルアロイング (M/A) 法による Al-4Mg-1.3Li-1.2C-0.5O (Al-905XL) 合金 ($2.55\text{g}/\text{cm}^3$) の開発、あるいは Al-Li 合金ベースの複合材料の研究も精力的に行われている。さらに量産化がなされた場合のリサイクルやスクラップ処理あるいは新しい鋳物用合金の開発研究もなされている⁵⁾。

3.5 急冷凝固粉末冶金合金

アルミニウム合金の特性を著しく改良する方法として、急冷凝固された粉末を用いる粉末冶金法 (Powder Metallurgy, 以下 P/M 法) がある。これに対し従来の溶

解鋳造を行なう方法を溶製法 (Ingot Metallurgy, 以下 I/M 法) と呼んでいる。工業的には I/M 法のなかでも連続鋳造法によって鋳塊を製造している。この連続鋳造法の凝固時の冷却速度は $1 \sim 10^2 \text{K/s}$ 程度であるが、急冷凝固粉末では $10^3 \sim 10^7 \text{K/s}$ と大きい。したがって P/M 法では溶質原子の固溶限が拡大し、また金属間化合物を I/M 法に比べて多く微細に分散させることができるので、I/M 合金よりも高強度合金、耐熱性合金、耐摩耗性合金が開発できる⁵⁾。

高強度合金では I/M 合金よりも Zn, Zr などの元素を多く添加して、結晶粒を微細にして、かつ耐応力腐食割れ性を向上させた 7090, 7091, CW67, 7064 合金などの高強度合金が開発されている。

耐熱性合金では Fe, Cr, Zr, V などの遷移金属を多く固溶させ、かつこれらの金属を含む金属間化合物を多く

く微細に分散させることができる。これらの化合物は比較的高温まで安定に存在できるため、I/M材に比べ耐熱性が向上する。8009(Al-8Fe-1V-2Si)や8019(Al-8.3Fe-4.0Ce)などの合金が開発されている。

耐摩耗性合金ではI/M合金に比べてSi粒子を多くかつ微細に分散させることができるために、耐摩耗性が優れている。さらにAl-Si系合金をベースに前述のFeなど添加して耐熱耐摩耗性合金が開発されている。またSi量が多い程線膨張係数が小さくなる。このためこの系の合金は各種の摺動部品、高温で寸法安定性を必要とする機械部品に用いられている。

3.6 アルミニウム基複合材料

アルミニウム合金の強度や剛性等の特性だけでは限界があるため、強化材との複合化によってこのような要求に応えようとする金属基複合材料(Metal Matrix Composite: MMC)が注目され、比強度、比弾性が高く、耐熱・耐摩耗性などの特性に優れたMMCが開発されている。MMCはその強化材の形態によって長繊維強化型、

図3 MMC(アルミニウム基複合材料, Vf=50% SiC 長繊維), Ti合金, 7075合金の高温強度比較

短繊維ウィスカー強化型、そして粒子分散型などに分類される。長繊維型の強化材には炭素繊維、ボロン繊維、SiC繊維などがあり、約10~100 μ mの直径を持つ連続繊維である。これらの連続繊維をあらかじめ複合化して中間素材(プリフォーム)を作製し、その中間素材を部品形状に配向・積層させ成形する工程がとられる。短繊維・ウィスカー強化型の強化材としては、SiC, Si₃N₄, チタン酸カリウムなどのウィスカーやアルミナ系の短繊維がある。粒子分散型の強化材にはSiCやアルミナの粒子がある。これらの短繊維・ウィスカー、粒子などのマトリックスへの分散は高圧 casting 造かアルミニウム合金粉末と混合分散させる粉末冶金法が用いられる。上記のMMCの特徴を表4にまとめる。図3にはVf=50%のSiC長繊維で強化した ϕ 0.3mmの純アルミニウム基複合材料の引張試験結果を示す。複合化したワイヤーは450°Cで1.4GMPaの強度を示し、高温強度に非常に優れていることがわかる⁶⁾。

3.7 超塑性材料

超塑性とは、ある条件下で変形すると低応力で異常に大きな延性を示す現象である。引張り変形ではネッキングを生じないで数百%の伸びを示す。現在航空機メーカーを中心にアルミニウム合金の超塑性を利用した一体化加工法の研究が精力的に行われている⁷⁾。

超塑性アルミニウム合金としては、1970代に英国で開発されたAl-Cu-ZrのSupral 100やその強度を高めたSupral 220、溶湯圧延等の凝固速度の大きい casting 方式で製造されているAl-Zn-Ca合金、超々ジュラルミンとして知られている7075やその不純物量を規制した7475合金がある。最近ではAl-Li系合金が優れた超塑性も示すことが知られている。またアルミニウム合金粉末を固化成形したP/M合金やMMCも超塑性を示す。このように超塑性の利用で難加工材と言われているMMCの成形が可能となり、今後さらに高強度・高剛性の材料の開発利用が進むであろう。また最近ではアルミニウム合金粉末

表4 MMCの種類と主な特徴

種 類	代 表 的 な 分 散 材	主 な 特 徴	二次加工	価 格
長繊維強化	炭素繊維・ボロン繊維 SiC繊維 Al ₂ O ₃ 長繊維 など	高強度・高弾性 高温強度 など	不 可	極めて 高 価
短繊維・ ウィスカー 強化	SiC, Si ₃ N ₄ ウィスカー Al ₂ O ₃ 短繊維 チタン酸カリウムウィスカー など	高強度・高弾性 低熱膨張 など	熱間加工 可	高 価
粒子分散型	SiC, Al ₂ O ₃ 粒子 黒鉛 など	耐摩耗性 高弾性 低熱膨張 など	塑性加工 casting 等 可	比較的 安 価

図4 超塑性 Al-Li 合金を用いて超塑性成形したドアパネルモデル

をメカニカルアロイング(MA法)のような特殊な加工法で加工した材料は、 $1s^{-1}$ といった超高歪速度で成形が可能となる。MA法と超塑性成形を組合せることにより強度や耐熱性にすぐれた新素材の開発が期待されている。

図4は、超塑性用に金属組織が制御された Al-Li 合金を用い、超塑性成形法による一体化加工した航空機のドアパネルのモデルである。超塑性成形による一体化加工は部品点数を減らすことができるため、接合部の補強材が少なくなり大幅な軽量化が図れる。また超塑性成形は雄型か雌型かの方の型で済むためにコストが低減できるメリットがある。

4. 自動車の軽量化とアルミニウム

4.1 自動車の軽量化

地球環境問題の一つは CO_2 等により起因した温室効果による地球の温暖化である。このため大気中に排出される炭酸ガスの15~20%程度を占める自動車の排出ガス規制が問題になってきて、燃費の効率向上が自動車メーカーの課題となっている。

燃費効率を向上させるための技術には燃費技術と軽量化技術に大別できる。燃費技術にはエンジン熱効率、トランスミッションの伝達効率の向上、空気抵抗、転がり抵抗等の走行抵抗低減などがある。一方、軽量化技術には部品の合理化、削除、薄肉化、小型化、中空化、材料変更、車体構造の改革などがある。この中で最も効果的な軽量化技術は材料変更と考えられている。軽量化のための材料変更ではアルミニウム、プラスチック、マグネシウムがあげられる。プラスチックの最大の問題はリサイクルであり、軽量化効果もアルミニウムに比べて小さいともいわれている(アルミニウムでは50%程度の軽量化が期待できるが、プラスチックの場合は部品にもよるが、10~40%程度といわれる)。また、マグネシウムは軽量化効果は大きいものの価格が高いことから採用され

にくく、その使用範囲はかなり限定されるものと考えられる。以上のことから、アルミニウムが当面の軽量化材料の主役となるであろう。

4.2 アルミ化の現状

自動車の材料構成比率は年々変化し、アルミニウムは1989年には約4.9%に達している。すなわち、現在の平均的な総重量1300kgの自動車のうちの約60~65kgがアルミニウムといえる。一方、自動車用アルミニウム製品の総需要量は1990年には100万トンを超えており、アルミ総需要量の約28.6%を構成するに至った。

現在アルミ化されているのは「熱伝導性が良好で軽い」か「生産性が高く軽い」部品で、ダイカストが主に利用されている。部位からみるとエンジンやトランスミッションまわりが多い。さらにラジエータやシリンダーブロックのアルミ化も進むと予想される。今後アルミ化が増加しそうな部品は、サスペンション、ブレーキ、ボディまわりである。特に、燃費を10%向上させようとするならばボディの大部分(ボディシェル、ドア、エンジンフード、トランクリッド)をアルミ化することが必要になる。今後はボディシェルを念頭に、展伸材が多用され、このための加工技術(プレス技術、曲げ加工、接合技術など)の開発に重点が置かれていくであろう⁸⁾。

ボディシェルのアルミ化では、現在のボディの主流となっているモノコック構造をそのままアルミニウムで置き換える案や、アルミ押出型材を曲げた後溶接することでフレーム構造を作り、その上に外板を張ってボディを作る案がある。本田技研のNSXやアルカンヤのASVT方式はアルミモノコックの代表であり、フォード社のブローブVなどはアルミフレーム構造の代表である。その他に、押出型材とろう付けハニカムを組合せたアルミフレーム構造も発表されている。

ボディパネル用板としては日本で最初に Al-Mg-Zn 合金(30-30合金)が開発され、RX-7のフロントフードに採用された。現在ではプレス時の室温時効硬化等の問題から Al-Mg-Cu 系合金が多く用いられている。NSXでは外板パネルに6000系合金が用いられている。これはボディの塗装焼付で耐力が増加(ベークハード)し、耐 Dent 性が向上するからである。今後は170℃あるいはそれ以下の温度でベークハードする材料の開発が要求されている⁹⁾。押出材に関しても、バンパー・レインホースメントでは軽量化効果が大きいために、アルミ化が実用化され、7000系や6000系の薄肉中空型材が使用されている。今後増加が期待されている部材である。また、押出材を用いてドアシートフレームやサンルーフ・レールなどの開発もなされている。NSXではサイドシルには6000系押出材が、サスペンション部品のアーム類に6061

の鍛造材が適用されている。

ホイールのアルミ化は当初そのファッション性に負うところが多かったが、最近は軽量化が強く求められている。アルミホイールの特徴としては、バネ下重量の軽減による車の運動性、操縦安定性や乗り心地の向上、優れた放熱性によるブレーキ、タイヤの性能低下の防止および寿命向上、ステアリングの振動低減による安全性向上などがある。リムには5000系合金が多く使用されているが、最近では6000系合金を用いたものもある。

4.3 自動車用アルミ材料のリサイクル

廃棄公害、資源の再利用、地球環境保護の世界的規模での提唱から廃車リサイクル問題がクローズアップされている。アルミニウムの新地金の製造に要するエネルギーはアルミナの生産に必要な分も含めて約210TJ/トンであるのに対し、リサイクルで再溶解すれば、その約2.6%の5TJ/トンですむことになる。このようにアルミニウムのスクラップは溶解して再利用でき、安価に再生地金ができる。今後は展伸材と鋳造材はアルミニウムの純度が異なるために混合された時の再生地金に利用法や、自動車の各部品、部材への適用アルミ材の区分を明示して統一化する必要がある。また解体しやすい接合・構造設計の開発とか効率的な解体装置・方法の開発なども必要になっている¹⁰⁾。

5. おわりに

アルミニウムはこの数年好景気に支えられてその生産量を伸ばしてきた。この間、ユーザーの要求特性を満足する形で合金の改良や新合金の開発が行われ素材開発がなされてきた。また、同時に高品質で低コストの製品を製造するために様々な技術革新もなされてきた。特に、電子機器での要求特性を満足するには、不純物や水素量の制御や介在物の除去が不可欠であり、また缶材、建材などの低コスト化をはかるには鋳造・圧延・押出設備の大型化、連続化、無人化それを支えるコンピューター制御技術が不可欠で、設備の近代化がなされている。今後自動車関連のアルミ化が本格化してくれば、なお一層の

材料の高品質化とコストダウンが要求されるものと予想される。自動車材料では強度・延性に優れた材料開発だけでなく、成形加工性、接合性、表面処理性に優れた材料を安価に量産する技術の確立が必要となる。

新素材・新技術の分野では一部実用化の始まった分野もあるが、Al-Li合金、超塑性材料、複合材料、急冷凝固粉末冶金合金、TiAl金属間化合物、アモルファスなどの分野で研究が活発になされている。また理論面からも分子軌道法に基づく合金理論による先端材料の開発が始まったばかりである。新技術では表面改質技術によるアルミニウム表面の高性能化・高機能化の研究や半凝固加工技術が現在進行している段階である。これらの新素材・新技術が開花してくると、アルミニウムの利用はさらに拡大していくものと考えられる。

文 献

- 1) アルミニウムハンドブック(第4版)軽金属協会(1990)
- 2) 馬場義雄：住友軽金属技報，29(1988)，29
- 3) W. H. Hunt, Jr. and J. T. Staley: Light-weight Alloy for Aerospace Applications, ed. by E. W. Lee, et al. TMS, (1989), 111
- 4) M. V. Hyatt and S. E. Axter: Science and Engineering of Light Metals, ed. by K. Hirano et al., JILM, (1991), 273
- 5) 渋谷和久：軽金属，39，(1989)，850
- 6) アルミニウム合金と車両の軽量化：超高速鉄道車両軽量化調査部会編，産業研究所，(1990)，144
- 7) 吉田英雄：同上，131，住友軽金属技報，29(1988)，58
- 8) 高須賀俊蔵，アルトピア，11月号(1990)，17
- 9) 吉田英雄，平野清一：住友軽金属技報，32，(1991)，20
- 10) 自動車用アルミ材料のリサイクル，日本アルミニウム連盟，(1992)，9

(平成4年6月24日受理)

92-2高分子錯体研究会

主題：高分子材料と環境問題

主 催：高分子学会 高分子錯体研究会

協 賛：繊維学会ほか

日 時：10月23日(金) 9:30~16:50

会 場：神奈川サイエンスパーク701会議室(川崎市高津区坂戸100 電話 044-819-2400)

参加要領：1) 定員100名 2) 参加費 主催・協賛学会員 会社5,000円 大学・官庁3,000円 学生2,000円 会員外10,000円(当日徴収) 3) 申込方法 ハガキに氏名、勤務先、連絡先を明記し、下記あてお申し込み下さい。

連絡先：〒104 東京都中央区築地2-4-2 築地第3長岡ビル 高分子学会 高分子錯体研究会
電話 03-3543-7858 FAX 03-3545-8560