

日本における航空機用アルミニウム合金開発の歴史 —零戦からボーイング777まで—



吉田 英雄*

Journal of The Japan Institute of Light Metals, Vol. 65, No. 9 (2015), 432-440
© 2015 The Japan Institute of Light Metals

Development of aluminum alloys for aircraft in Japan: From Zero Fighter to Boeing 777

Hideo YOSHIDA*

Keywords: aircraft, aluminum alloy, Extra Super Duralumin, Zero Fighter, Boeing 767

1. はじめに

日本における航空機産業とアルミニウムの関わりについて、材料開発の観点から戦前、戦後の歴史(20世紀)をまとめる。戦前、どのようにして超々ジュラルミンのような優れた材料ができ、零戦に採用されたのかをジュラルミン、超ジュラルミンに遡って明らかにする。さらに日本における戦後の民間航空機の開発、YS-11からB777に至るまでの航空機の歴史とそれに関わる日本におけるアルミニウム合金の研究開発についてまとめる。

2. 戦前の航空機産業とアルミニウム^{1)~5)}

2.1 ジュラルミン

2.1.1 ジュラルミンとの出会い

日本のアルミニウム産業が航空機と関わるようになったのは、1916年ロンドン駐在の海軍監督官が墜落したツェッペリン飛行船から骨材(図1)を入手し、海軍が住友伸銅所に調査依頼したところから始まる。これを入手した伸銅所は、その分析結果や英国金属学会誌の文献をもとに工場における試作研究を開始した。1919年工場試作が完了し、「住友軽銀」と命名された。ジュラルミンは1906年ドイツのウィルム(ヴィルム, Wilm)によってAl-Cu-Mg合金で時効硬化現象が発見され、これをデュレナ・メタルヴェルケ社によって製品化された合金で、組成はAl-4.2%Cu-0.5%Mg-0.6%Mnである。この合金は従来の合金よりも強度が高いために、早速、飛行船(図2)の骨組みに採用された^{6),7)}。ドイツのツェッペリン飛行船は第一次世界大戦で活躍し、ロンドンなどの空襲で爆弾投下し、ロンドン市民を恐怖に陥れた。その後、ドイツのユンカーズ社は、1917年に単発複葉



図1 UACJ 技術開発研究所に保管されているツェッペリン飛行船の骨材

攻撃機J4にジュラルミンを使用し、1919年には波板状ジュラルミンを使用した全金属製旅客機F.13を開発している。

*株式会社UACJ 技術開発研究所(〒455-8670 愛知県名古屋市港区千年3-1-12) Research & Development Division, UACJ Corporation (3-1-12, Chitose, Minato-ku, Nagoya-shi, Aichi 455-8670) E-mail: yoshida-hideo@uacj.co.jp
受付日:平成27年6月28日 受理日:平成27年7月16日

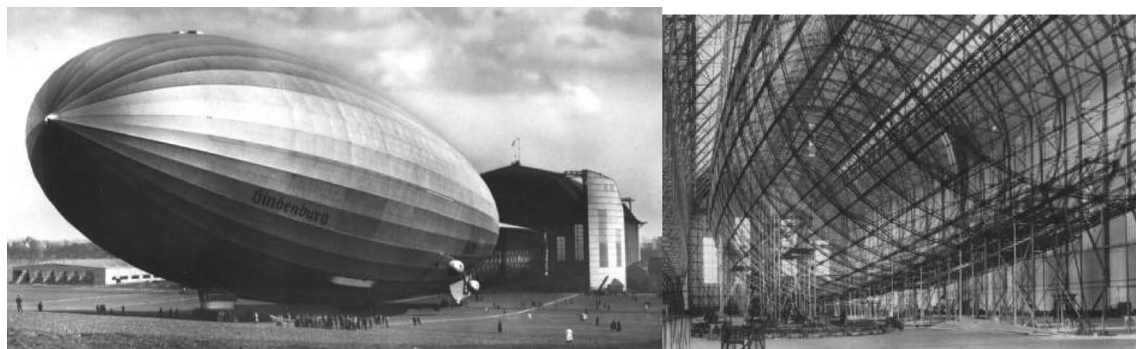


図2 ツェペリン飛行船LZ129（ヒンデンブルグ号）の外観⁶⁾とその骨格⁷⁾

2.1.2 日本におけるジュラルミンの飛行船，航空機への適用

第一次世界大戦後は各国で飛行船の製造が行われ，日本では海軍が英国ビッカース社に発注したSS型軟式飛行船の第2～4船を横須賀海軍工廠において国産化することになった。SSとはSubmarine Scoutの頭文字を採ったもので，対潜水艦哨戒用であることを意味する⁸⁾。1921年，住友伸銅所は初めてジュラルミンの工業生産を行い，この飛行船の吊り船やそのほかの構造材料として板管棒計1トン余りを受注した。1922年4月，中島式ブレゲー型飛行機B-6型（図3）の機体構造にはじめて伸銅所製ジュラルミンを使った⁹⁾。この飛行機は「軽銀」と命名された。1925年には川崎航空機（株）から陸軍のドルニエ試作重爆撃機（陸軍制式は八七式重爆撃機）の外板等を受注した。本機は胴体，翼とも木製骨格に羽布張りの複葉単発機で，機体前部のエンジン周辺だけ金属製となっていた。ジュラルミンの本格的採用は1930年以降の全金属製の機体となってからである。九二式および九三式重爆撃機，九三式双軽爆撃機は，ユンカース社の機体をベースに設計されたためにユンカース式の波板構造の全金属機で波板外板によって覆われていた。

ジュラルミン製造にあたっては，海軍が飛行艇を建造するために英国から招聘した技術者のパーガン氏の指導と第一次世界大戦で戦勝国となった日本がドイツから賠償の一環として，ジュラルミンの製造技術をデュレナ社から学んだことが大きい。さらに，アルコア社（1928年以降はアルコア社から分離したアルキャン社に変わった）は地金販路の拡大のために住友と提携し，住友はアルコア社の協力のもとに1928年大阪桜島に溶解炉とアルミニウム板専用の圧延工場を建設することとなった。板だけでなく，管，棒，線材や押出型材のための押出機，プロペラ翅用の鍛造機も導入され，ジュラルミン製造技術も確立していった。ジュラルミンは米国では17S（2017）と呼称された。17S-T4は引張強さ430MPa（44kg/mm²），耐力270MPa（28kg/mm²），伸び22%を有する合金であった。古河も1921年頃，ジュラルミンの破片を入手して研究を開始し，1926年，陸軍よりジュラルミンの試作命令を受け，石川島造船所にジュラルミン板500kgを納入した。

2.2 超ジュラルミン¹⁾

2.2.1 米国での超ジュラルミン開発

合金開発ではさらに高強度が求められ，世界中でジュラルミンを超える超ジュラルミンの研究開発が進行した。当時の超ジュラルミンはジュラルミンの強度レベルを超える合金は



図3 中島式ブレゲー型飛行機，「軽銀」⁹⁾



図4 Alclad 24-T3板をスキンに用いたDC-3¹⁰⁾

どれも超ジュラルミンと呼ばれた。超ジュラルミンという名称を最初に用いたのは，1927年アルコア社のジェフリースが米国機械学会で高強度合金について報告したのが最初といわれている。アルコア社はまず，1928年，Siを添加した14S（Al-4.4%Cu-0.4%Mg-0.9%Si-0.8%Mn）を開発した。14Sは焼入れ焼戻し（T6調質）で引張強さ480MPa（49kg/mm²），耐力410MPa（42kg/mm²）が得られたが，伸びが13%と低いので，板材としてよりも鍛造品で多く用いられた。当時，ケイ素を多く含有した超ジュラルミンを含ケイ素型超ジュラルミンと称していた。1931年，24S（Cu 4.5%，Mg 1.5%，Mn 0.6%）が同じくアルコア社によって開発された。ジュラルミン中のMg量を1.5%まで増加させたもので，含ケイ素型超ジュラルミンが人工時効を必要とするのに対し，24Sは室温時効だけでジュラルミンを超える強度に達する特徴がある。これを24S型超ジュラルミンと称した。現在では超ジュラルミンというと24Sを指すことが多い。24S-T3は，代表値で引張強さ480MPa（49kg/mm²），耐力340MPa（35kg/mm²）で，ジュラルミン17Sに比べ耐力が20%高い。T3調質では圧延材や押出材を焼入れ後矯正ある

いは残留応力を最小限にするために1.5~3%の引張加工をすることで強度も向上する。24S-T3は強度も高いためにすぐに17S-T4に取って代わった。そして純アルミニウムを皮材としたクラッド材 Alclad 24S-T3は旅客機の胴体の材料としていまなお使われているが、その最初の飛行機がDC-3 (図4)である¹⁰⁾。

2.2.2 日本での超ジュラルミン開発

日本においても、1931~1932年頃になり飛行機の性能は向上し全金属製の機体になると、材料の比強度の向上が要求された。当時の日本では、住友でも焼戻しを行う含ケイ素型超ジュラルミンが開発されていたが、この合金は伸びが低く加工性に問題があることと焼戻し後の耐食性に問題があり、また焼戻しに時間を要して生産性が劣るため焼戻しを必要としない24Sに代わることとなった。1935年、24S型超ジュラルミンはSD、その合わせ板はSDCと称され、SDCの皮材はSA3 (Al-1.5%Mn-0.55%Mg) 合金で、アルコアの24SCより高強度の合わせ板となった。住友の超ジュラルミンSDは全金属製低翼単葉機の九六式艦上戦闘機に採用された。住友が容易に純度の高い地金を用いた24S系に踏み切れなかった背景には、当時、礮土頁岩や明礮石から製錬した国産アルミニウム地金には不純物が多い問題もあったようである。

2.3 超々ジュラルミン、ESDと零戦²⁾

2.3.1 超々ジュラルミンの発明

海軍から将来戦闘機の性能を飛躍させるには、同じように軽く、米国の24Sよりもさらに強力な引張強さ590MPa (60kg/mm²)を有するアルミニウム合金が必要ということになり、住友に開発が命じられた。住友の方も、SD、SDCが工業化できた段階であったが、他社が740MPa (75kg/mm²)級高強度合金を華やかに宣伝し始めたため、上層部からも早く開発せよとのことで五十嵐博士に白羽の矢が立った。開発を担当した住友の五十嵐博士は、合金開発の最大の問題点は時期割れ(応力腐食割れ)対策だとの認識で、1935年8月、合金探索を開始した。まずは強度と加工性から合金系の予備検討がなされ、最終的にはドイツのザンダー (Sander) のS合金 (Al-8%Zn-1.5%Mg-0.5%Mn)、D合金 (超ジュラルミン、Al-4%Cu-1.5%Mg-0.5%Mn)、そして英国のローゼンハイン (Rosenhain) のE合金 (Al-20%Zn-2.5%Cu-0.5%Mg-0.5%Mn、亜鉛を20%まで含みZinc Duraluminとして知られていた)をベースに成分が検討された。最大の懸案事項である応力腐食割れに対しては、クロムの微量添加が非常に有効であることが明らかとなり、その結果、新合金の代表組成はAl-8%Zn-1.5%Mg-2%Cu-0.5%Mn-0.25%Crとなった。この合金は1936年6月「鍛錬用強力軽合金」として特許出願され、

1940年2月特許になっている。この合金は、1936年5~6月頃、ベースとなったE合金、S合金、D合金の頭文字をとってESD (Extra-Super-Duralumin)、超々ジュラルミンと命名された。

2.3.2 超々ジュラルミンの零戦への採用

1937年10月6日、三菱重工業名古屋航空機製作所の主任設計技師の堀越二郎は課長からカナまじりの和文タイプで打たれた一通の書類を受け取った。それは、「十二試艦上戦闘機計画要求書」であった。「十二試」とは昭和12年試作発令、艦上戦闘機とは航空母艦上から発着する戦闘機のことである。堀越氏は「この要求書は、当時の航空界の常識ではとても考えられないことを要求していた。もし、こんな戦闘機がほんとうに実現するのなら、それはたしかに、世界のレベルをはるかに抜く戦闘機になるだろう」と述べている。これが零戦、零式艦上戦闘機の開発の始まりであった。堀越二郎氏は、次期戦闘機の開発に際して、最大の難関は重量軽減対策と考え、このため一律であった安全率の見直しや、グラム単位での重量軽減のために、「肉落とし」と称して、強度に関係のないところをくり抜くことも行われた。さらにどのような材料を選択するかが課題となった。内部構造で最も重要な主翼の桁について、前の九六式艦戦のときは45キロ超ジュラルミンSDH (住友の超ジュラルミンで焼入れ後常温時効した材料)が開発され、その押出形材が生産されていたので、翼を薄くし、重量軽減に大いに役立った。十二試艦戦では、九六式艦戦よりもすばやく上昇でき時速500km以上が出せ、しかも航続距離が長く、空戦に優れた性能などが要求されたため、機体がさらに大きくなり重量増加が避けられなかった。九六式艦戦と同じ超ジュラルミンでは、桁用の押出形材を分厚くしなければならずその結果重量増加につながり、桁の部分が分厚くなると翼も厚くせざるをえなくなり、いっそう悪くなると考えられた。もっと高強度の軽い材料はないだろうかと堀越氏が探していたところに住友のESDとの出会いがあった。住友を訪問してその詳細を聞いて、ESDをさしあたり主翼の桁だけに押出形材を使うとして重量を計算してみると、30kgは軽くなることがわかり、この新しい金属の使用を航空本部に願い出た。海軍側はむしろ願い出を喜んで、この新材料の使用を認めた。零戦とその主翼桁材に適用されたESD押出形材を図5に示す。

2.3.3 超々ジュラルミンとアルコア7075

1940年7月、十二試艦戦は制式機として採用され、その年が日本紀元2600年であったところから、その末尾の零をとって、「零式艦上戦闘機」と名づけられた。「ゼロ戦」というのは外国のパイロットから「ゼロ・ファイター (Zero Fighter)」

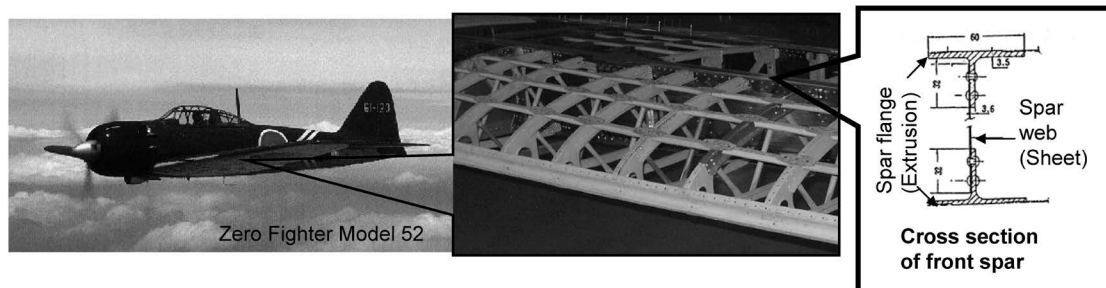


図5 主翼桁に超々ジュラルミン (ESD) 押出材を用いた零式艦上戦闘機

「ジーク (Zeke)」と呼ばれ、外国の評判などから戦後生まれた零戦の愛称である。太平洋戦争中に、零戦は各型合計すると約10,400機生産された。1942年6月のミッドウェー海戦での敗北が太平洋戦争の転回点となった。同時に行われたアリューシャン作戦で、無人島に不時着したほとんど無傷の零戦1機をアメリカが手に入れた。アメリカは、真珠湾攻撃以来、落ちた零戦の切れ端を集めてまでも、空戦性能に優れた謎の飛行機といわれる零戦の秘密を解き明かそうとしていた。そして、この完全な零戦に飛行試験を含むあらゆる角度からの調査を施し、その長所と短所を完全に知ることができた。米軍を驚かせたのは機体に使われた超々ジュラルミンの強度の高さであった。それは当時、日本の航空機開発技術に対して「欧米に数年は遅れている」と考えていたアメリカの陸海軍や航空機産業関係者の目を覚まさせる一因となった。その後、1943年アルコア社は超々ジュラルミンで応力腐食割れに効果のあるクロムを同様に添加して7075合金を完成させ、現在でも、7075合金は代表的な航空機用アルミニウム合金として用いられている。7075合金の生みの親は超々ジュラルミンということになる。

2.3.4 超々ジュラルミンの生産

1938年末に、海軍航空本部から月産1,364トンのアルミニウム合金生産の要請があり、既定の増産計画の3倍もの要求で、大阪桜島の伸銅所には拡張の余裕がなく、新工場の敷地が検討され、結局航空機製造の中心地となっている名古屋に決定した。敷地は、名古屋市港区千年の水田に、博覧会跡地4万余坪を加えた約19万坪を入手した。この地域は、1937年、名古屋市長の大岩勇夫氏が名古屋開港30周年、国際都市としての名古屋をアピールするため名古屋汎太平洋平和博覧会を開催した会場跡地になっていた。1941年9月、陸海軍大臣の指揮監督のもと、鑄造、製板、管棒、鍛造を持つ総合的軽合金専門工場である名古屋軽合金製造所が設置された。この工場は、当時伸銅所で開発中であった連続鑄造法による大型鑄塊を用いることを前提としたストリップ方式圧延の製板工場を目標とした。1944年における桜島の伸銅所製板課第二工場のアルミニウム合金生産量は500~600トン/月、名古屋軽合金製造所製板工場は最盛期には2,000トン/月(内、ストリップ方式が1,500トン/月)であった。なお、管棒生産量は伸銅所(桜島)、名古屋でいずれも300トン/月であった。型材生産量は桜島と名古屋でそれぞれ700トン/月であった。名古屋ではESDの生産が500トン/月であった。なお、古河電工や神戸製鋼も軍からジュラルミン、超ジュラルミン、超々ジュラルミンの製造要請を受け、ESDは住友から特許の実施権を委譲されて生産された。

3. 戦後の民間航空機の動向^{11), 12)}

3.1 YS11^{13), 14)}

戦後、GHQにより航空禁止令が布告され、航空機の研究開発、製造は禁止されていたため、戦争中、航空機に携わっていた研究者や技術者の多くは自動車、鉄道車両やモータサイクル開発に移っていった。しかしながら、朝鮮戦争特需で国内の航空機産業は復活した。1956年、通産省は国産民間航空機計画を策定し、航空工業会で国産輸送機開発に関する構想を発表した。世界の国際路線では大型ジェット機が就航し、国内路線ではDC-3などのプロペラ機が飛んでいたが、



図6 YS11

この旧式プロペラ機の代替として、日本が開発した国産航空機を輸出し、日本の航空機工業を輸出産業のひとつとして育てたいとの考えであった。

1957年、財団法人輸送機設計研究協会(輸研)が東大内に設立され、乗客50~60人乗りの小型旅客輸送機の設計が始まった。輸研には戦前の航空業界を支えた技術者が参加、設計に携わった。試作機を製造するために、1959年官民共同の特殊法人として日本航空機製造(NAMC)が設立されて輸研は解散した。この試作機は双発ターボプロップの旅客機でYS11と名づけられた(図6)¹⁵⁾。YSは輸送機設計研究協会の輸送(Y)と設計(S)の頭文字に由来する。日本航空機製造は設計開発、生産管理、品質管理、販売、プロダクトサポートを行い、生産は機体メーカー六社(新三菱重工業、川崎航空機、富士重工業、新明和工業、日本飛行機、昭和飛行機)が分担し、最終組立は新三菱重工業が行った。飛行試作機1号機は1962年7月に新三菱小牧工場でロールアウトし、初飛行は8月に行われた。1973年5月に最後の機体が送り出されるまで10年間製造された。1964年に日本の航空局の型式証明を、1965年にアメリカ連邦航空局(FAA)の型式証明を取得した。

量産に着手して、順調に生産が続いていたが、海外でのセールスでは非常に苦戦しており、事業収支では悪化していた。当初、50~100機の輸出が期待できると見込まれていたが、日本航空機製造は航空機の製造も販売も初めての経験で、航空機の販売のノウハウもないに等しい状態であり、結局12か国、16社の航空会社に79機が輸出されるにとどまった。その結果、日本航空機製造は360億円に及ぶ累積赤字となり、通産省は1971年にYS-11を182機で打ち切ることを決定した。日本航空機製造は1982年解散し、残務は三菱重工業に引き継がれた。なお、素材のアルミニウム材料は、日本のアルミニウム材料メーカーも採用に向けて意欲を示したが、YS-11に使用する量のみの生産では、量産効果が出ず、輸入品より有利な価格で調達できないため、結局アメリカ製の材料が採用された¹⁴⁾。

3.2 三菱MU-2, MU-300

YS11の開発が始まった1960年頃から、三菱は小型ターボプロッププロペラ機で、北米の社用・自家用のビジネス向け(7~9人乗客)に独自の設計を進めた。1963年に試作1号機が初飛行し、1965年、運輸省航空局の型式証明を、11月にアメリカの連邦航空局(FAA)の型式証明も取得でき、翌1966年にMU-2(図7(a))¹⁶⁾として発売を開始した。しかし

ながら、アメリカには国内で飛ばす航空機は、その50%以上を米国製の部品で作られていなければならないというバイアメリカン法があり、そのために現地委託して部品を調達したが、うまくいかず三菱が自らやらねばならなくなった。三菱が販売を開始した1967年、ようやく5機を受注して以降、安定性の高い飛行機として評判が広がり、年産40機から50機にまで成長した。ところが、1971年ニクソン・ショックの影響を受け、円は急速に値上がりし、MU-2も採算割れを起こして赤字が増大した。しかし赤字ながらも販売は好調だった。1973年秋の中東戦争により世界的なオイルショックとなり、燃料費の高騰によってエアラインは軒並み経営不振となりMU-2の受注が急減した。1987年、新型機MU-300に販売を集中するため、MU-2の生産を終了した。総生産数は757機、世界27か国で販売され、世界の小型機の中でもベストセラーであった。

MU-2が好調であった1969年、三菱はMU-2よりもワンランク上の高級ビジネスジェット機を計画した。市場調査の結果、最高速度は約800km/h、快適な広いキャビンを備え、高い燃焼効率を持った機体を目指して、1976年に開発に着手し、1978年にMU-300 (図7(b))¹⁷⁾として初飛行した。しかしながら、1979年(昭和54年)、マクドネル・ダグラス社のDC-10の航空機事故後、FAAは審査基準を大幅に厳しくすることとなり、FAAの型式証明を取得できたのは1981年に入ってからであった。さらに日本は円高不況で売上は伸び悩み、一方、アメリカ政府は高金利政策をとったことで不況に陥り、航空業界も軒並み経営悪化しビジネス機の需要は皆無となった。三菱は、ビーチクラフト社と提携し、BEECHJET 400(ビーチジェット400)の名で販売することにしたが利益をあげられず、1988年、設計を含めた生産過程すべてをビーチに売り渡す契約に合意し、同年に日本国内での販売も終了した。MU-300はその後米国のビーチ社のHawker 400および米軍の訓練機T-1A Jayhawkとして生産・運用中で、これまでに総計約800機が生産されている。

なお、富士重工業も愛称エアロスバルで知られる軽飛行機FA-200を製造した。1965年(昭和40年)に初飛行し、1986年(昭和61年)に生産終了するまでに、試作機3機を含めて299機が製作された。FA-200に続いて、米国のロックウェル・インターナショナル社と共同でビジネス用双発プロペラ機FA-300を開発して1975年初飛行したが、オイルショックの影響により47機で生産終了となった。

3.3 YX計画とボーイング767

1966年、YS-11に続く民間機の研究のため航空審議会によって「次期民間輸送機のための研究」が始まり、1968年には「90席前後のターボジェット旅客機」が発案された。



a) MU-2

b) MU-300

図7 三菱重工業製ビジネス飛行機MU-2¹⁶⁾とMU-300¹⁷⁾

日本航空機製造内に「YX開発本部」が設置されて、市場調査と基礎設計が行われた。開発費が高騰すると見込まれる中で、1970年ごろ、外国各社が同クラスの機体の共同開発を持ちかけてきた。1971年、共同開発先を見極めるため「航空機工業海外調査団」がアメリカに派遣された。ボーイングは日本を対等パートナーとして50%の分担比率を提示したため、YX開発専門委員会は、「交渉相手として、当面ボーイングを第一対象とする」と決めて、YX計画は本格的に動き出した。その後1977年7月の日米交渉において、分担率はボーイング70%、アエリタリア15%、日本15%に決定し、当初の50%から大きく後退した。開発の全責任はボーイングが負い、主導権を持つこととなった。

1978年、ボーイングが7X7の受注を獲得したことから、民間航空機開発協会とボーイングの間で基本事業契約が締結され、7X7の開発が開始された。YX/7X7はボーイング767となり、日本では民間航空機開発協会が三菱重工業、川崎重工業、富士重工業に作業を委託し、3社によって分担開発された。開発部位は三菱が後胴パネル、川崎が前胴・中胴パネル、富士が主翼胴体間フェアリングを担当し、ボーイングに引き渡すこととなった。767は1981年に初飛行、1982年7月に連邦航空局の形式証明を取得して9月に就航した。767全シリーズの平成24年12月までの受注数は1,108機、そのうち1,040機が納入されている。

3.4 YXX計画とボーイング777

1979年8月、新たな国産機、「YS-11の精神を引き継ぐ、日本独自の計画」として「100席クラスまたはそれよりやや大型」旅客機の開発計画が始まった。これがYXXである。日本航空機開発協会(JADC、民間輸送機開発協会が新明和工業と日本飛行機が加盟したことから改組)はボーイングが参加を打診してきた7J7を共同開発することを決定した。このYXX/7J7の概要は、座席数は147席から166席とし、ターボプロップエンジンより進歩したプロップファンエンジンを搭載した双発プロペラ機で、開発比率はボーイング75%：日本25%とするものであった。しかし、ターボファンエンジンの高性能化によってジェット機の燃費も向上したため、7J7の魅力もなくなって、1987年にはボーイングの7J7計画は事実上中止となった。

その後、ボーイングは国際分担によって開発費を減らすことと、日本の高品質低価格の技術力や日本の開発費に関心を示して、747と767の間を埋める350席クラスの中型旅客機

図8 ボーイング777¹⁸⁾

の共同開発を改めて日本に打診してきた。日本航空機開発協会は、アメリカの対日感情悪化を恐れる日本政府に配慮する形で参加を決定した。日本の分担を21%（胴体の大部分、中央翼、主翼胴体間フェアリング、主翼リブなど多数）まで伸ばすことができたが、やはり最重要な部分からは締め出された。「日本が主体性をもつ」こととしたはずのYXXも、結局ボーイングの777（図8）¹⁸⁾の共同開発となった。1994年、777の1号機がロールアウトした。1998年より量産事業への移管に伴い、JADCの権利義務は民間航空機株式会社（CAC）に移管された。平成24年12月末現在の受注数は1,541機であり、そのうち1,263機が納入されている。

3.5 YSX計画

日本航空宇宙工業会はボーイングが絶対的主導権を握るYXXよりも日本に主体性をもたせた輸送機計画を持つべきだとして、1986年に「民間機調査検討委員会」を設置し、以下の機体の検討をはじめた。①50席から100席の小型機開発の検討、②YS-11の姿勢を引き継ぎ、経験を生かせる機体、③共同開発においても、マーケティング、商品企画、開発、生産、販売、サポートにおいて日本が主体性とメジャーシェアを保つこと。翌1987年、ターボファンエンジンの双発とすることになった。1989年に日本航空機開発協会は、ターボファン双発・75席輸送機の開発と、国際共同開発の可能性の検討をはじめた。1991年には、「小型民間機（YSX）開発調査」が開始された。1994年4月になると、ボーイングが突如YSXへの関心を強めたが、1997年ボーイングはマクドネル・ダグラスMDを吸収合併し、MD-95を「ボーイング717-200」として継続販売すると発表し、事実上のYSXを放棄した。2000年、国家産業技術戦略検討会は、当面YSX開発の可能性はないとして、YSX放棄を発表した。

この間、三菱はボンバルディアとの間で小型リージョナルジェット機の共同開発を次々に進め、川崎重工業もこのころ三菱への対抗上、エンブラエルへの接近姿勢を強めていた。2002年8月末に経済産業省が発表した30席から50席クラスの小型ジェット機開発案「環境適応型高性能小型航空機」で、YSXまでの企業各社横並びの事業を取りやめ、積極的な企業が自己責任で開発を推し進めることとした。この開発が三菱重工業のMRJに繋がる。

4. 戦後の航空機用アルミニウム合金の研究開発

戦後、一時期、航空機の研究開発、製造は禁止されていたが、朝鮮戦争特需で復活し、その後、日本の航空機メーカーはYX, YXX計画（767, 777）でボーイング社の機体の分担生産を通して成長してきた。この間、戦前から航空機材の生産を行ってきた住友軽金属、神戸製鋼、古河電工の3社もまたボーイングの認定を受け素材の国産化を行って機体メーカーに供給してきた¹⁹⁾。特に、現UACJの福井工場は広幅厚板の航空機材が生産できる最新鋭の製造設備を有している。

4.1 航空機用材料の開発

4.1.1 ストリング用材料

ボーイングのB767機体の製造では、従来、7075押出形材を用いたストリング（縦通し材）の重量を軽減するため、図9に示すように、板材を圧延により長手方向で肉厚を変動させ、継手部分のみを厚くしたテーパストリングを全面的に用いようとした。しかしながら、従来の海外製7075板材では、テーパ圧延で弱加工された部分は溶体化処理で結晶粒粗大化が生じて、その後のハット型加工で割れが発生し、疲労強度の低下する問題が発生した。このため弱加工でも結晶粒粗大化しない材料の開発が求められた。住友軽金属の馬場、宇野らは連続焼鈍炉を用い急速加熱、急速冷却処理で結晶粒を50μm以下に微細化し、その後適正な析出処理により軟化させることで、テーパ圧延の弱加工・溶体化処理で結晶粒粗大化が生じない加工熱処理法を開発し国産化した²⁰⁾。三菱重工業はこの加工熱処理を施した板材をハット型に成形し、ボーイング767, 777のストリングに用いることができた。図9の767機の胴体外観から、ハット型に成形されたテーパストリングと湾曲したフレームと外板がリベットで組み合わされている様子がわかる^{19), 21)}。その後、ストリングのコストダウンや耐応力腐食割れの改善のための成分や調質（RRA処理）の検討、復元処理利用による加工工程の簡略化を三菱重工業と共同研究した^{22), 23)}。さらに、テーパ圧延での圧延加工度が大きくなると結晶粒が微細化して耐応力腐食割れ性が低下することが懸念されたため、結晶粒のアスペクト比（圧延方向の長さや板厚方向の長さの比）に注目して、アスペクト比が設計要求を満足する4以上になるような加工熱処理法を開発した²⁴⁾。テーパ圧延後、溶体化処理前に343℃で2時間の予加熱を施すことによってすべての加工度で4以上になるこ

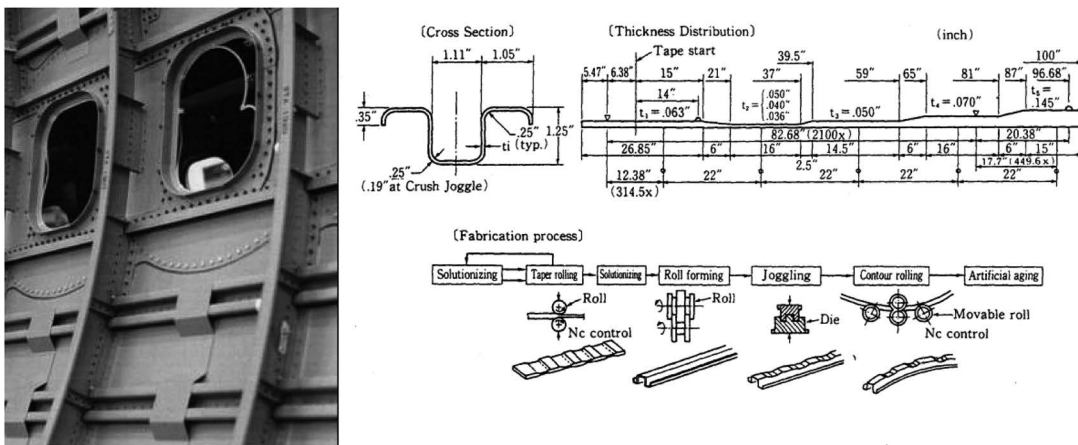


図9 フレーム、テーパストリングと外材でできたボーイング767胴体とテーパストリング材の製造工程¹⁹⁾

とが確認され、777のストリングに採用された^{22)~24)}。

4.1.2 超塑性材料

住友軽金属は三菱重工業と共同で7475合金、Al-Li合金超塑性材開発と超塑性加工法の開発(1983~1988年)の研究を実施した^{25), 26)}。図10は工場で試作した7475合金超塑性材を用いて一体化加工されたドアパネルのモデルである。この7075合金は、熱延板に対し適切な析出処理(過時効処理)を施し、その後、冷間圧延と急速加熱処理を行う加工熱処理法を用いると、 $10\mu\text{m}$ 程度まで結晶粒は微細化する。この材料を高温で引張変形させると超塑性が得られることから、ドアパネル等に成形された。この超塑性成形法により、図10に示すドアパネルでは、従来方法では45個のパーツ、400個のリベットで加工されたパネルに対して、3個のパーツと80個のリベットで組立ができ、コストで30%、重量で15%軽減されることがわかった²⁵⁾。そのほかの実際の超塑性成形事例に関しては文献(27), (28)を参照されたい。

Al-Li合金も高温で超塑性を示すことはよく知られている。このため7475合金で開発した加工プロセスをAl-Li-Cu-Mg-Zr系8090合金に適用したところ、圧延方向では 10^{-3}s^{-1} オーダで700%程度の伸びを示すが、圧延直角方向では300%程度と異方性を示すことが明らかとなった。この異方性をなくすために温間圧延による新たな加工熱処理法を検討した。その結果、8090合金は異方性が小さく、 500°C 到達後10分保

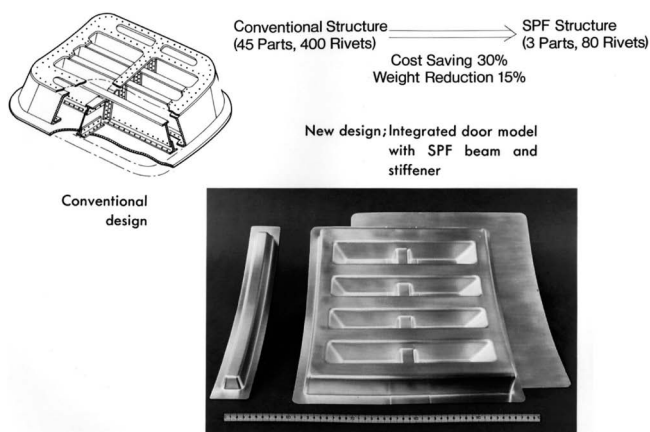


図10 超塑性成形でできたドアパネルのモデルと従来法で製造したドアパネルの比較²⁵⁾

持し、 $5.6 \times 10^{-3}\text{s}^{-1}$ で引張試験するとL, LT方向で1100%の伸びが得られた。8090合金について、従来工程と温間圧延による新工程による伸びの比較を図11に、 500°C で5分間ソルトバスにて加熱後の組織を図12に示す^{29), 30)}。新工程では元の結晶粒界が消失し、均一微細な組織の得られることがわかる。さらにこうした加工熱処理法で製造された材料は室温強度の異方性もなく、室温での伸びも高いことがわかった³¹⁾。Al-Li合金の機械的性質の異方性に関して、これを解決する加工熱処理法を開発することができた。成形法においても、本開発合金板に対して、変形応力の40%以上の静水圧力(背面圧力)を負荷することで、真ひずみ $\epsilon=1.1$ まではキャビティの発生を防止できることがわかった³²⁾。

4.1.3 ポリッシュドスキン材, 鍛造材

一方、神戸製鋼や古河スカイ(現 UACJ)は、ポリッシュドスキンの国産化に取り組んだ。航空機は耐食性向上やさび防止のために、4~5年ごとに表面を塗装しているが、塗り替える際に有機溶剤で剥離するため環境に負荷を与えることや、重量のかさむ塗装が省ければ燃費の節約にも寄与できることから、ボーイング社では外板を無塗装で使用する

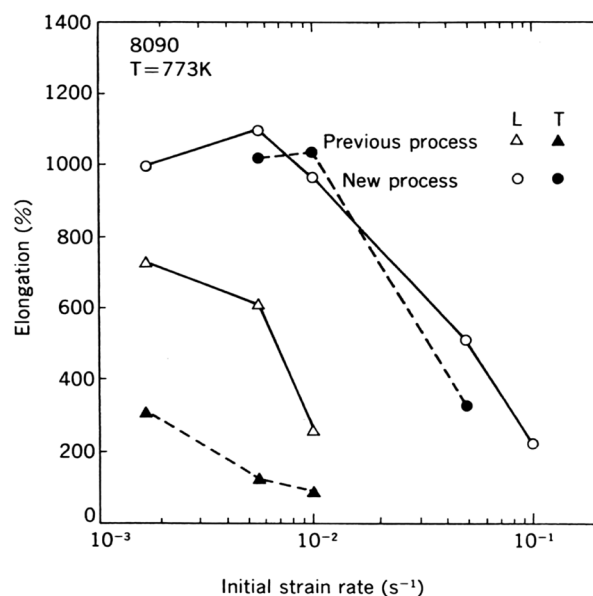


図11 8090Al-Li合金の超塑性特性(従来工程:冷間圧延, 新工程: 300°C 温間圧延)^{29)~31)}

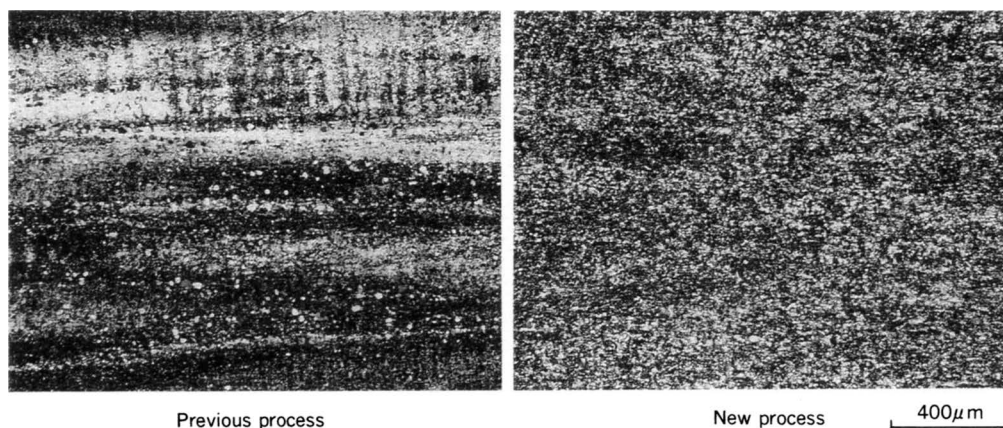


図12 従来工程と新工程により製造した板材を 500°C 、5分熱処理(ソルトバス)後のマイクロ組織^{29)~31)}。新工程では均一微細な組織となり、組織の圧延方向での異方性もなくなり、結果として強度や伸びの異方性もなくなった



図13 ポリッシュドスキンを用いたボーイング767貨物機³³⁾
(写真: Hideo Obayashi 尾林英夫)

ことになった。図13はポリッシュドスキンを採用した航空機である。当初、Bright Rolled Skin (ロールドスキン) が用いられたが³³⁾、光沢、ロールマーク、デント、スクラッチ等、表面品質が厳しく歩留まりが悪くてコスト的にあわず、多くの会社が撤退した。その後ボーイング社とMPC (Metal Polishing Co.) と共同でポリッシュドスキンを開発し、アルコア社のみが供給できることとなった。ポリッシュドスキンとは、アルミニウムクラッド材を研磨剤で磨き、光沢をだし、表面に形成される自然酸化皮膜で腐食防止をはかる方法である。神戸製鋼と古河スカイは、表面きず、色むらがなく、光沢に優れた表面の評価技術と研磨方法を確立して外板用広幅クラッド材の国産化に成功した³⁴⁾。ただし、このポリッシュドスキン材も航空機会社が耐食性を維持するために定期的に研磨することが必要である。

スキン材では、損傷許容性を高めるために、アルコアが高純度地金を使用して疲労き裂進展速度を遅くした2524合金を開発し、B777およびCanada Global Express (GX) の胴体外板に採用された。三菱重工業も神戸製鋼と共同で2524合金相当の2000系板材を開発し、現行の2024合金に比べて疲労寿命が約2倍に延長でき、その結果として、最大21%の薄肉化が可能であることを明らかにした³⁵⁾。

そのほか、鍛造材として、神戸製鋼は8,000トン精密型鍛造プレスを導入し、鍛造方法と残留応力除去技術を確立して767の窓枠材を納入した^{36), 37)}。UACJも15,000トンの大型液圧熱間鍛造プレスを導入し、2004年より航空機用大型鍛造品を製造している³⁸⁾。

4.2 航空機用合金および摩擦攪拌接合の研究

4.2.1 高靱性アルミニウム合金の研究

航空機用アルミニウム合金については、767が日本で分担生産されるということで、戦前から航空機用アルミニウム合金を製造していた住友軽金属、古河電工、神戸製鋼が集まって、1980~1983年「高靱性アルミニウム合金開発の研究」と題して日本航空宇宙工業会の委託研究を始めた³⁹⁾。また同時に、軽金属学会研究委員会でも、1981年から馬場義雄博士が部会長を務める材料・物性部会において「高強度・高靱性アルミニウム合金の諸性質」に関して産学で共同実験をし、高力アルミニウム合金開発の指針を得た⁴⁰⁾。

4.2.2 Al-Li合金の研究

Al-Li合金の研究開発では、最近欧米で復活しつつあるが、1980年代に低密度、高強度、高剛性材料として着目さ

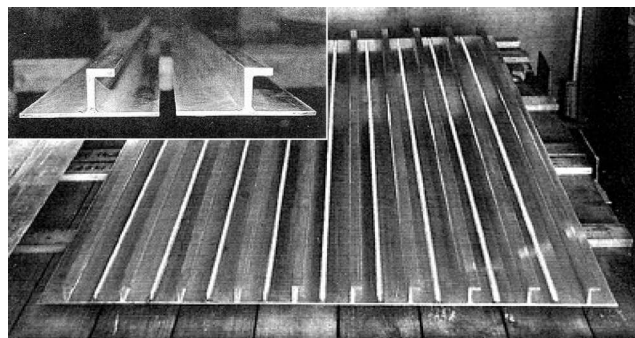


図14 摩擦攪拌接合法 (FSW) で接合されたパネル (幅1531 mm, 長さ2700 mm)。左肩の写真はFSWする前の7050押出形材⁴⁵⁾

れ、Al-Li合金国際会議が盛んに開催された。日本でも軽金属学会材料物性部会を中心に1984年から5年間、産学共同で靱性の向上のための基礎的知見を得ることを目的として活動してきた。その成果は部会報告書「Al-Li合金」に集約されている⁴¹⁾。さらにJRCMの「アルミニウム系新材料の高機能化に関する調査部会」の構想のもと、(株)アリシウムを設立して1989年から共同研究を開始した^{42), 43)}。一応予定された範囲の研究は終了したが、靱性で問題があり、価格が高いことなどがあって、実用化には至らなかった⁴¹⁾。最近の第三世代のAl-Li合金は、8090, 2090, 2091といった第二世代のAl-Li合金と比較して、Li添加量を2%以下にして、若干密度を犠牲にして靱性を向上させているのが特徴である⁴⁴⁾。

4.2.3 摩擦攪拌接合の利用

航空宇宙分野では、FSWはまず再利用しないロケット燃料タンクに採用された。続いて航空機への適用を目的とした多数のプロジェクトが立ち上がり、継手の強度や耐食性などのデータが蓄積されて来た。航空機に用いられる高強度の2000系および銅を含む7000系合金は、溶接割れ感受性が高いことから熔融溶接が困難であり、機体はリベット接合によるスキン/ストリング構造が主であった。最近では接合個所を減らすため、厚板から切削加工によりリップ付き部材を削り出すインテグラル構造が翼に用いられているが、厚板からかなりの量の切削屑を生じる加工であり改善が望まれていた。

住友軽金属と三菱重工業は「摩擦攪拌接合を用いたアルミ合金製大型押出部材の航空機適用化研究」を行い、代表的な航空機部材である2024, 7475および7050合金について、FSWによる大型押出部材の航空機への適用の可能性を調査した⁴⁵⁾。継手効率 (継手の引張強さ/母材の引張強さ) はいずれの合金も継手効率80%以上をほぼ満足していたが、応力腐食割れや焼入れ後の曲がり等を考慮して、溶体化→FSW→時効の製造プロセスが有効であることを明らかにした。図14はFSWにより製造した全幅1531 mm, 長さ2700 mmの大型パネルである。リップ付きのアルミニウム合金押出形材をFSWにより幅方向に並列に接合した広幅材は、各分野でうまく利用されており、非熔融溶接であるFSWは2000系や7000系合金にも適用が可能で、航空機においてはリベットを使わない線接合が可能になるので軽量化や製造コストの面で意義は大きい。

5. おわりに

日本の20世紀における航空機用アルミニウム合金開発の歴史を述べてきたが、超々ジュラルミンやテーパストリングに見られるように、アルミニウムメーカーは、戦前は海軍の要求に、戦後は機体メーカーのニーズに応える材料開発を行ってきた。

超々ジュラルミンやテーパストリングは海外ではできない日本オリジナルな発明である。戦後は航空機用アルミニウム合金開発においては、航空機生産がボーイングのTier 1として胴体の分担生産を行うことになり、アルコアの特許合金をボーイングが認定していく構図となったため、日本において航空機用新合金開発はほとんど行われなくなった。今後、機体メーカーや部品メーカーは国産の航空機を開発するにあたり、もっと材料メーカーに要望を出せばきっとそれに適した新材料を開発するであろう。材料メーカーも将来の航空機の発展を考えて長期的な展望に立って国産の航空機材料を開発すればそれは大きな果実となるであろう。機体メーカー、部品メーカー、素材メーカーがもっとしっかりと手を結んで開発していくことが世界での競争に打ち勝つことになるものと考えている。

参考文献

- 1) 吉田英雄：住友軽金属技報, **53** (2012), 60-78.
- 2) 吉田英雄：住友軽金属技報, **54** (2013), 264-326.
- 3) 竹内勝治：アルミニウム合金展伸材—その誕生から半世紀—, 軽金属溶接構造協会, (1986).
- 4) 竹内勝治：技術の歩み, 住友軽金属工業株式会社, (1995), (非売品).
- 5) 住友軽金属年表 (平成元年版), 住友軽金属工業株式会社, (1989).
- 6) J. Christopher: The Zeppelin Story, The History Press, (2010), 78.
- 7) P. W. Brooks: Zeppelin Rigid Airships, 1893-1940, Smithsonian Institution Press, (1992), 176.
- 8) 牧野光雄：飛行船の歴史と技術, 成山堂書店, (2010).
- 9) <http://www.ne.jp/asahi/airplane/museum/nakajima/nakajima.html>
- 10) <http://www.louisvilleartdeco.com>
- 11) 日本の航空宇宙工業 (平成26年度版), 一般社団法人日本航空宇宙工業会, (2014).
- 12) 民間航空機関連データ集 (平成26年度版), 一般財団法人日本航空機開発協会, (2015). Wikipediaなど参照.
- 13) 横倉 潤：翔べ! YS-11, 小学館, (2004).
- 14) YS-11 物語, エアライナークラブ編, JTBパブリッシング, (2006).
- 15) <http://nekocraft.blog.so-net.ne.jp/2012-12-14-1>
- 16) http://ja.wikipedia.org/wiki/ファイル:Mits_MU-2.JPG
- 17) <http://ja.wikipedia.org/wiki/ファイル:N417KTatBNA.JPG>
- 18) <https://www.jal.co.jp/aircraft/>
- 19) 馬場義雄：住友軽金属技報, **29** (1988), 29-46, **31** (1990), 65-81, **41** (2000), 91-121.
- 20) T. Uno, H. Yoshida and Y. Baba: Aluminum Alloys; Their Physical and Mechanical Properties (ICAA-1), Vol. 1. ed. by E. A. Stark, Jr. and T. H. Sanders, Jr., EMAS, (1986), 371-385.
- 21) 住友軽金属技報：新製品紹介, 航空機ストリンガー用微細結晶粒7075合金板, **23** (1982), 120.
- 22) 日本航空宇宙工業会：航空機部品・素材産業振興に関する研究調査, 低コスト胴体構造部品加工法の開発, 三菱重工業, 住友軽金属工業, 成果報告書, No. 807 (1994), No. 904 (1995).
- 23) 箕田 正, 吉田英雄, 都筑隆之：軽金属, **49** (1999), 161-165.
- 24) 広田和弘, 佐藤正五, 伊原木幹成, 木村隆嗣, 中村康一：三菱重工技報, **33** (1996), 158-161.
- 25) 日本航空宇宙工業会, 革新航空機技術開発センター：革新航空機技術開発に関する研究調査, 超塑性高力アルミニウム合金の開発および一体化加工法の研究, 住友軽金属工業, 三菱重工業, No.802(1984), No.901(1985), No.6001 (1986).
- 26) 日本航空宇宙工業会：航空機部品・素材産業振興に関する研究調査, Al-Li合金の超塑性材料開発, 超塑性加工法の研究, 三菱重工業, 住友軽金属工業, 成果報告書, No. 105 (1987), No. 205 (1988), No. 307 (1989).
- 27) 高橋明男, 都筑隆之：軽金属, **39** (1989), 224-234.
- 28) 江藤武比古：軽金属, **49** (1999), 332-335.
- 29) 吉田英雄：住友軽金属技報, **37** (1996), 90-98.
- 30) 吉田英雄, 田中宏樹, 土田 信：軽金属, **39** (1989), 817-823.
- 31) 吉田英雄：住友軽金属技報, **36** (1995), 37-46.
- 32) 都筑隆之, 高橋明男：軽金属, **39** (1989), 824-830.
- 33) http://blog.goo.ne.jp/boeing767_fan/e/ebcb9807f00eb82400d40ef80474a987
- 34) 日本航空宇宙工業会：航空技術水準の向上に関する研究調査, 航空機用広幅長尺高力アルミ合金板製造技術の研究, 神戸製鋼所, No.19 (1980).
- 35) 木村隆嗣, 高橋孝幸, 大西哲也, 江藤武比古, 中井 学：三菱重工技報, **35** (1998), 326-329.
- 36) 堀内健文, 川手剛雄, 上坂辰男, 福塚敏夫, 西本英敏：神戸製鋼技報, **32-2** (1982), 40.
- 37) 立松武雄, 高田与男, 黒崎敏夫：神戸製鋼技報, **31-1** (1981), 24.
- 38) Furukawa-Sky Review, 新技術紹介, No. 1 (2005), 52.
- 39) 日本航空宇宙工業会：革新航空機技術開発に関する研究調査, 高靱性アルミニウム合金の開発の研究, 神戸製鋼所, 住友軽金属工業, 古河アルミニウム工業, 成果報告書, No. 506 (1981), No. 603 (1982), No. 702 (1983).
- 40) 軽金属学会研究委員会：高強度・高靱性アルミニウム合金の諸性質, 研究部会報告書 No. 13, (1985).
- 41) 軽金属学会研究委員会：Al-Li合金, 研究部会報告書 No. 21, (1989).
- 42) 金属系材料研究開発センター, アルミニウム系新材料の高機能化に関する調査部会：高比強度アルミニウム合金調査WGの調査研究報告書, (1998), (1999), (2000).
- 43) 吉田英雄, 内田秀俊：住友軽金属技報, **34** (1993), 87-98.
- 44) 航空機国際共同開発促進基金【解説概要24-2】, 航空機用アルミリチウム合金および航空機産業の最近の動向 http://www.iadf.or.jp/8361/LIBRARY/MEDIA/H24_dokojyoho/24-2.pdf
- 45) 日本航空宇宙工業会：先端航空機部品・素材技術に関する研究調査, 摩擦攪拌接合を用いたアルミ合金製大型押出部材の航空機への適用化研究, 三菱重工業, 住友軽金属工業, 成果報告書, No. 1405 (2000), No. 1502 (2001).