

これからの航空機産業とアルミニウム*

吉田 英雄**

Sumitomo Light Metal Technical Reports, Vol. 54 No. 1 (2013), pp. 250-263

Future of the Japanese Aircraft Industries
and Aluminum

Hideo Yoshida

The history and future of the relationship between the Japanese aircraft industries and aluminum alloys for airplanes are reviewed. Especially it has been made clear why the highest strength aluminum alloy, ESD (Extra Super Duralumin), was invented in Japan before World War II. The development of Japanese commercial airplanes, i.e, the YS-11, MU-2, and MU-100, and the relationship between the national project of YX, YXX and the Boeing airplanes, B767 and B777, are summarized after World War II. Furthermore, the development of aluminum alloys in Japan after World War II is reviewed and the technical subject about the aluminum alloys in the future are clarified by disclosing the present issues of using aluminum alloys in airplanes. Finally, it is claimed that a national project is needed to solve these issues in cooperation with industry, government and academia.

1. はじめに

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、戦後の歴史をまとめる。まず戦前、何故超々ジュラルミンのような優れた材料ができたのかを明らかにする。次に日本における戦後の民間航空機の開発、YS-11, MU-2, MU-100やYX, YXX, YSXとB767, B777の関わりについてまとめる。さらに戦後の航空機用アルミニウム合金の開発状況をまとめ、現在の航空機用アルミニウム材料が抱えている課題を整理し、今後の航空機に求められるアルミニウムの技術課題を明らかにする。最後にこの技術課題を解決するためには、産官学の連携した国家プロジェクトが必要であることを述べる。

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

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 (Fig. 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、早速ツェッペリン飛行船の骨組みに採用された。この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 (Fig. 2)を開発した。

第一次世界大戦後は各国で飛行船の製造が行なわれ、日本では海軍が英国ピ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

* 本稿はアルトピア, Vol.43, No.1, Jan.(2013), 14. およびアルミニウム, No.87, 20 (2013), 9. に掲載されたものに加筆して転載したものである。

** 研究開発センター 工学博士

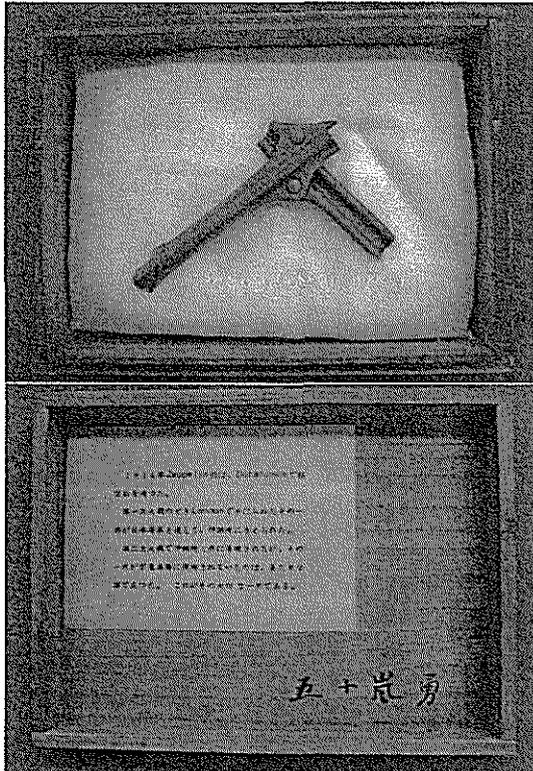


Fig. 1 Part of frame of Zeppelin Airship shot down near London, brought into Japanese Navy and stored in Sumitomo Light Metal

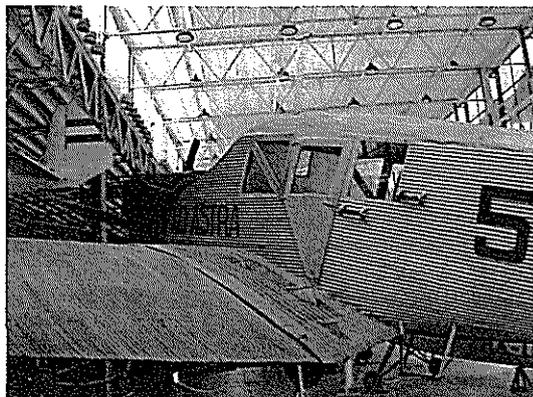


Fig. 2 Yunkers F.13 fabricated with corrugated panels of Duralumin sheets
(<http://www.idflieg.com/junkers-f13.htm>, ©2006 Andi Szekeres)

採ったもので、対潜水艦哨戒用であることを意味する⁹⁾。1921年、住友伸銅所は初めてジュラルミンの工業生産を行ない、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 (Fig. 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。この飛行機は「軽銀」と命名された。1925年には川崎航空機㈱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



Fig. 3 Breguet 14 type aircraft, named "Keigin" fabricated by Nakajima Aircraft Industries Ltd.
(<http://www.ne.jp/asahi/airplane/museum/nakajima/nakajima.html>)

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ペ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と呼称された。17S-T4は44kg/mm²の引張強さであった。

2.2 超ジュラルミン¹⁾

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) で耐力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

ラルミンを越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ならば24Sを指すことが多い。24S-T3は、代表値で引張強さ49kg/mm²、耐力35kg/mm²で、ジュラルミンの17S-T4は引張強さ44kg/mm²、耐力28kg/mm²で、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。この合金は強度が高いためすぐに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 (Fig. 4)である。

日本においても、1931~32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、住友でも焼戻し型超ジュラルミンが開発されていたが、この合金は焼戻後の耐食性に問題があり、また焼戻に時間を要して生産性が劣るため焼戻を必要としない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 (Fig. 5) に採用された。

2.3 超々ジュラルミン、ESDと零戦²⁾

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、しかももっと強力な引張り強さ50~60kg/mm²を有するアルミ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75kg/mm²級高強度合金「トム合金」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指示が五十嵐勇博士にきた。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、最終的にはザンダーの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



Fig. 4 DC-3 fabricated with Alclad 24-T3 sheets (from www.louisvilleartdeco.com)

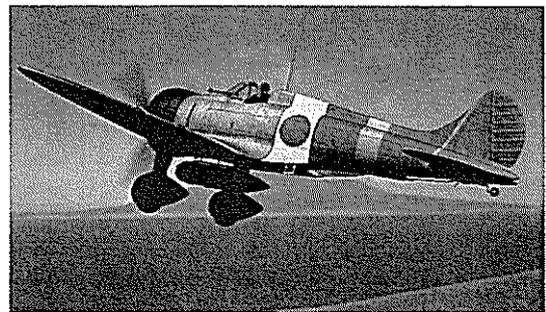


Fig. 5 Type 96 carrier-based fighter (The visual encyclopedia of Mitsubishi A6M Zero, Shinsei Publisher, 2011)

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。

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ぬくことも行われた。さらにも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は、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、九六式艦戦よりも素早く上昇でき時速 500km 以上が出せ、しかも航続距離が長く、空戦性能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、桁用の押出型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型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。零戦の主翼桁材に適用された ESD 押出型材を Fig. 6 に示す。

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」と名付けられた。「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)」「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 10400 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一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事ができた。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。

1938 年末に、海軍航空本部から月産 1364 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 2000 トン/月 (内、ストリップ方式が 1500 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した。

3. 戦後の航空機産業とアルミニウム

3.1 戦後の国産民間航空機^{7,8)}

(1) YS11^{7~10)}

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、鉄道車両やモーター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。1955

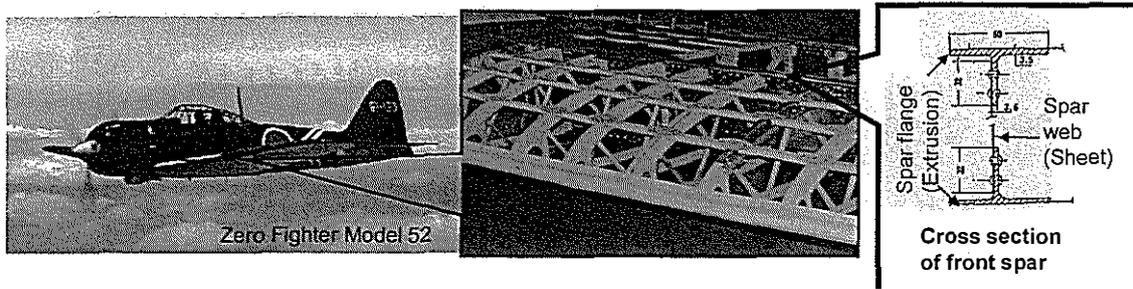


Fig.6 Zero Fighter and its main wings fabricated with ESD extrusions

年に自衛隊向けに川崎航空機がロッキード T-33A 練習機を、三菱がノースアメリカン F-86F ジェット戦闘機を国内でライセンス生産することが決定した。1957年には飛行機の運航や製造の禁止が全面的に解除された。この間、世界の航空機はジェット機、大型旅客機への転換期を迎えていた。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、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。輸研には堀越二郎氏をはじめ、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。この双発ターボプロップ旅客機は YS 11 と名づけられた（Fig. 7）。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



Fig. 7 YS11 airliner
(from <http://nekocraft.blog.so-net.ne.jp/2012-12-14-1>)

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 月に行なわれた。その後不具合のため一部設計変更となり各機体メーカーへの量産機の発注は、1963 年 1 月となった。以来 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 カ国、16 社の航空会社に 75 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、素材のアルミ材料は、日本のアルミ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とのことである¹⁰⁾。

(2) 三菱 MU-2, MU-300 (Fig. 8)

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 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

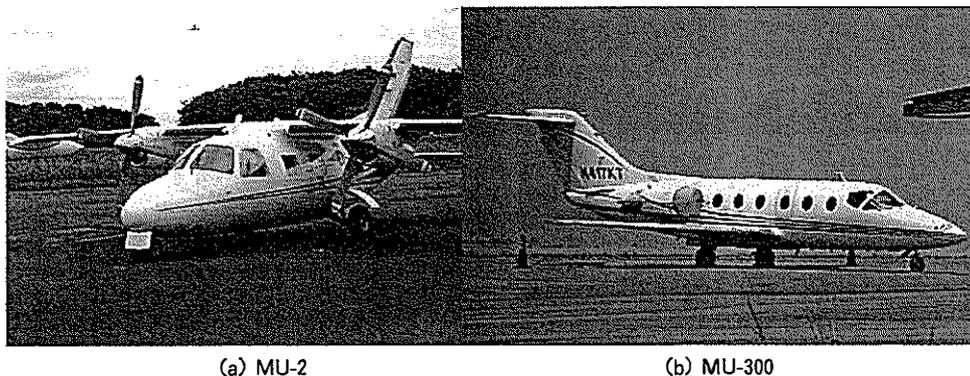


Fig. 8 Mitsubishi business aircraft
(from http://ja.wikipedia.org/wiki/ファイル:Mits_MU-2.JPG,
<http://ja.wikipedia.org/wiki/ファイル:N417KTatBNA.JPG>)

航空機は、その50パーセント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カ国で販売され、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と備え、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年に初飛行した。しかしながら、1979年(昭和54)、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したが利益をあげられず、1988年、設計を含めた生産過程全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FA-300は受注が確定する前に販売中止が決まり、すでに生産していた47機で生産終了となった。

(3) YX計画

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。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パーセント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パーセント、アエリタリア15パーセント、日本15パーセントに決定し、当初の50パーセント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B767(Fig.9(a))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。B767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。B767全シリーズの平成24年12月までの受注数は1108機、そのうち1040機が納入されている。

(4) YXX計画

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(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パーセント:日本25パーセント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開心を示して、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(JADC、民間輸送機開発協会に1983年、新明和工業と日本飛行機が参加して改組)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パーセント(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B777(Fig.9(b))の共同開発となった。1994年、B777の1号機が



(a) B767

(b) B777

(c) B787

Specifications of B767, B777 and B787

| | B767-300 | B777-200 | B787-8 |
|---------------------------|-----------------------|-------------------------|---------------|
| Length | 54.9m | 63.7m | 56.7m |
| Wingspan | 47.6m | 60.9m | 60.1m |
| Height | 15.8m | 18.5m | 16.9m |
| Engine thrust | 21,800kgf × 2 | 42,500kgf × 2 | 31,660kgf × 2 |
| Standard seating capacity | 261 or 232 | 268 or 302 | 186 |
| Cruising speed | 862km/h | 905km/h | 901km/h |
| Maximum take-off weight | 133.8t or 152.0t | 213.2t | 227.9t |
| Range | 3,280km or 5,510km | 8,200km or 12,600 km | 14,800km |

Fig. 9 Boeing jet airliners, B767, B777 and B787 and their specifications
(from <https://www.jal.co.jp/aircraft/>)

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1431機であり、そのうち1066機が納入されている。

(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よりも日本の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において、当面YSX開発の可能性はないとして、国として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。この開発が三菱のMRJに繋がる。一方、川崎重工は、2001年（平成13）防衛庁の次期輸送機（CX）と次期対潜哨戒機（PX）の主契約企業となり、YSXの大きさに近いCXとPXの開発に取り組んだ。

1995年に就航開始したB777に次ぐ機種の開発を検討していたボーイングは、将来必要な旅客機は音速に近い速度で巡航できる高速機であると考え、2001年初めに250席前後のソニック・クルーザーを提案した。しかし運航経費を抑えたいという航空会社各社の関心を得ることができず、2002年末にこのソニック・クルーザー開発を断念して通常型7E7の開発に着手した。この通常型7E7は、速度よりも効率を重視したボーイング767クラスの双発中型旅客機である。2004年4月に全日本空輸が50機発注したことによって開発がスタートし、呼称も787（Fig. 9 (c)）に改められた。当初の開発スケジュールは大幅に遅れ、ボーイング787型機が初飛行

を行ったのは、当初の予定から2年以上遅れの2009年12月15日であった。2011年9月28日、初号機となった全日本空輸向けの第1号機が東京国際空港に到着した。ロールアウトから実に4年越しであった。787は767より、航続距離や巡航速度は大幅に上回るとともに、燃費も向上している。炭素繊維を使用した炭素繊維強化プラスチック(CFRP)の複合材料の使用比率が約50%であり、アルミニウムは20%にまで減少した。日本の分担比率は35%である。この間のボーイング機の機体材料の構成比率をFig. 10に示す¹¹⁾。

3.4 戦後の国産航空機用材料, B767用ストリンガー用材料, ポリッシュドスキン材, 鍛造材の開発

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、1957年には全面的に解禁された。日本ではYS11, MU-2, MU-300などの国産航空機が生まれたが、販売網やサービス網、円高などの理由で赤字となり生産中止に追い込まれた。その後、日本の航空機メーカーはYX, YXX計画(B767, B777)でボーイング社の機体の分担生産を通して復活してきた。この国内生産に伴い、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(現在の古河スカイ)の三社も素材の国産化を行って機体メーカーに供給してきた。特に、古河スカイの最新鋭の福井工場は広幅厚板の航空機材が生産できる製造設備を有している¹²⁾。

ボーイングのB767機体の製造では、従来、7075押出型材を用いたストリンガー(縦通し材)の重量を軽減するため、Fig. 11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ーストリンガー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¹³⁾。三菱重工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B767, B777のストリンガーに用いることができた。Fig. 12はB767機の胴体部で、ハット型に成形されたテーパーストリンガー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様子がわかる^{14,15)}。その後、ストリンガー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¹⁶⁾。

一方、神戸製鋼や古河スカイは、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疵防止のために、表面を塗装しているが、4~5年で塗り替えるため有機溶剤で剥離して環境に負荷を与えることや、塗料の重量が相当なもので、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ようになった。Fig. 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、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

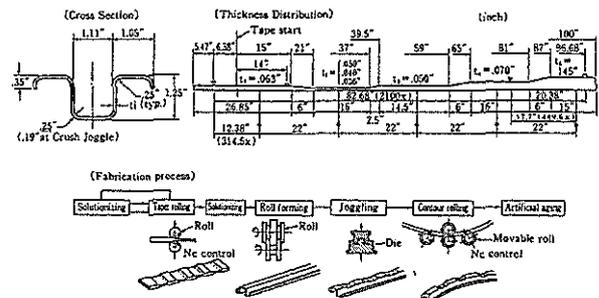


Fig. 11 Manufacturing process of a taper-rolled stringer

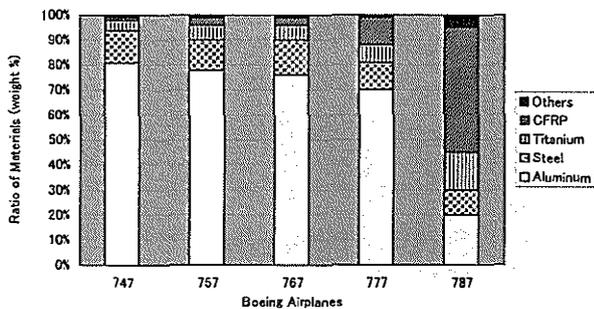


Fig. 10 Component Ratio of Materials in Boeing Airplanes

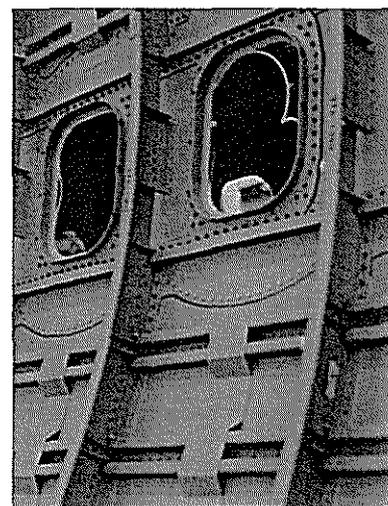


Fig. 12 B767's fuselage constructed with frames, skins and taper-rolled stringers

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、表面疵、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¹⁷⁾。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。その他、鍛造材として、神戸製鋼は8000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B767の窓枠材を納入した^{18, 19)}。古河スカイも15000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²⁰⁾。



Fig. 13 B767 Airplane with polished skins
(http://blog.goo.ne.jp/boeing767_fan/e/ebcb9807f00eb82400d40ef80474a987
by Hideo Obayashi 尾林 英夫)

航空機材料の研究は日本航空宇宙工業会の委託研究を受け、住友では7075, 7050合金板材、押出材での高靱性アルミニウム合金の開発研究(1980-82, 神戸製鋼, 古河電工と共同研究)²¹⁾, 7475合金, Al-Li合金超塑性材開発と超塑性加工法の開発(1983-88, 三菱重工業と共同研究)の研究を実施した^{22, 23)}。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、その後温間圧延, 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 μ 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, Fig. 14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てができ, コストで30%, 重量で15%軽減されることがわかった。

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れ, Al-Li合金国際会議が盛んに開催された。日本でも欧米をキャッチアップすべく, 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」²⁴⁾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。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²⁵⁾。最近の第三世代のAl-Li合金は, 8090, 2090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。Fig. 15はAl-Li合金開発の流れである²⁶⁾。

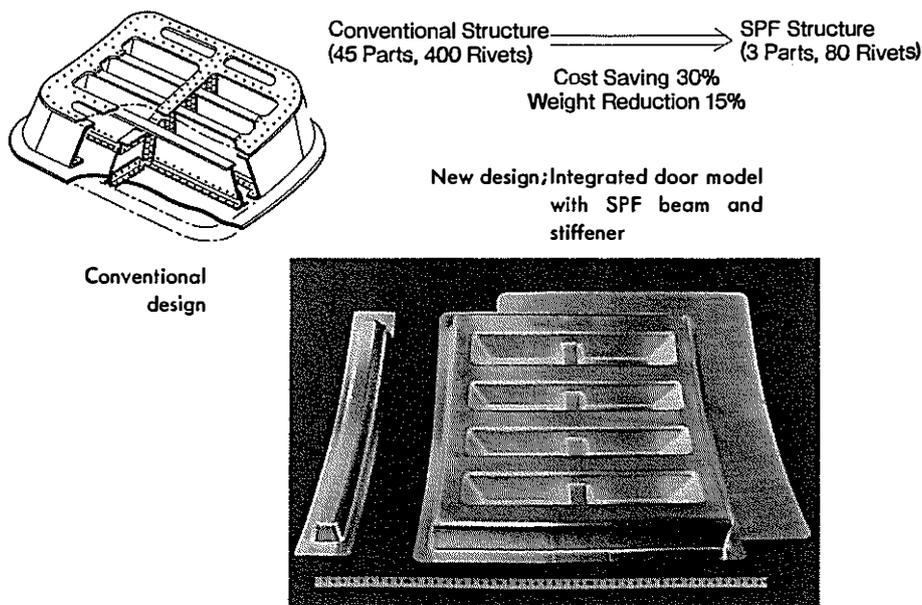


Fig. 14 Door panel model formed using a 7475 superplastic sheet compared with a conventional structure.

4. アルミニウム産業からみた航空機用材料

4.1 航空機用材料の市場、欧米との比較

アルミニウム産業における国内の航空機向けアルミニウム材の生産量は2012年約4100トン²⁷⁾で、アルミニウム圧延品(板, 押出)の年間国内生産量200万トンの0.2%程度である。国内での航空機生産に使用するアルミニウム材料は約26700トンで8割が輸入材である。日本航空宇宙工業会「航空機用アルミニウム合金の生産能力の実態及び課題の調査」(平成14年3月)の資料では2016-2020年民間機(大型機, リージョナル機)用アルミ素材市場推定では世界で約27万トン/年あるといわれている¹²⁾。

日本の航空機メーカーはアルミニウムの素材を、米国をはじめとして圧倒的に海外に依存している。この原因は、大型設備で大量生産された海外製品が安いということと日本国内ではその製造工程が複雑で生産性が低く、それよりも缶材などの製品を大量に生産した方が時間当たりの利益が大きいといったことがあげられる。そのため日本でしか製造できないような特殊な航空機材料しか注文がこないことになる。さらに、アルコア社は7055-T7751といったような特殊な熱処理された合金を特許化して、それをボーイング社に認定させ他社が参入できないようにしていることもあげられる。かくして日本製品は航空機材料市場に入れていないのが現状である。このため高強度材料の開発や製造技術もまた海外勢に遅れを取っている。住友の場合、厚板材から撤退し薄板へ戦略を転換させた。これは熱間圧延設備の制約により他社のように厚板での広幅材が製造できないことにもよる。航空機材では水焼れが可能な連続焼鈍加熱炉を有している

ので薄板のみ生産できる。押出材では縦型の焼入れ炉を有し航空機材料のような高強度合金を製造できるが、これも超々ジュラルミンの延長上としてオートバイのフロントフォークや硬式野球バット用に航空機材並みの高強度材を製造し続けてきたからである²⁸⁾。古河スカイは福井に最新の熱間圧延設備を有し、広幅厚板の航空機材を製造する能力があり航空機材を製造しているが量的には多くない。むしろ最近ではLNGやIT関連の厚板の需要の方が旺盛である。海外勢に対抗するには航空機材の生産性が課題で、生産性をあげ低コスト化をはかるか、短納期で寸法精度が高く残留応力の少ない高品質の素材を生産し、機体メーカーや部品メーカーでの加工コスト低減に寄与できる製品を製造していくかに係っている。いずれにしても機体メーカー、部品メーカーの協力が必要である。マーケットのないところでは技術も研究も廃れていくのは当然である。戦前が国策として航空機のためにアルミニウム産業を育成してきた状況とは大きく異なっている。これは航空機産業についてもいえることである。日本の航空機産業が米国に依存しているうちは新しいアルミニウム合金開発も難しいと考えられる。

4.2 戦後初の国産の航空機用2013合金の開発

最近の航空機材開発の流れは、従来からの超々ジュラルミンを超える高強度高靱性材料の開発ともう一つは航空機製造のコスト低減化に寄与できる材料、技術開発がある。後者における材料開発では、耐食性に優れている6000系合金が目され、米国では6013合金が開発された。2024合金に比べ耐食性が優れるためクラッド材を用いる必要がなく、さらに腐食環境に晒された後の疲労強度は2024合金と同等である。日本においても、川崎

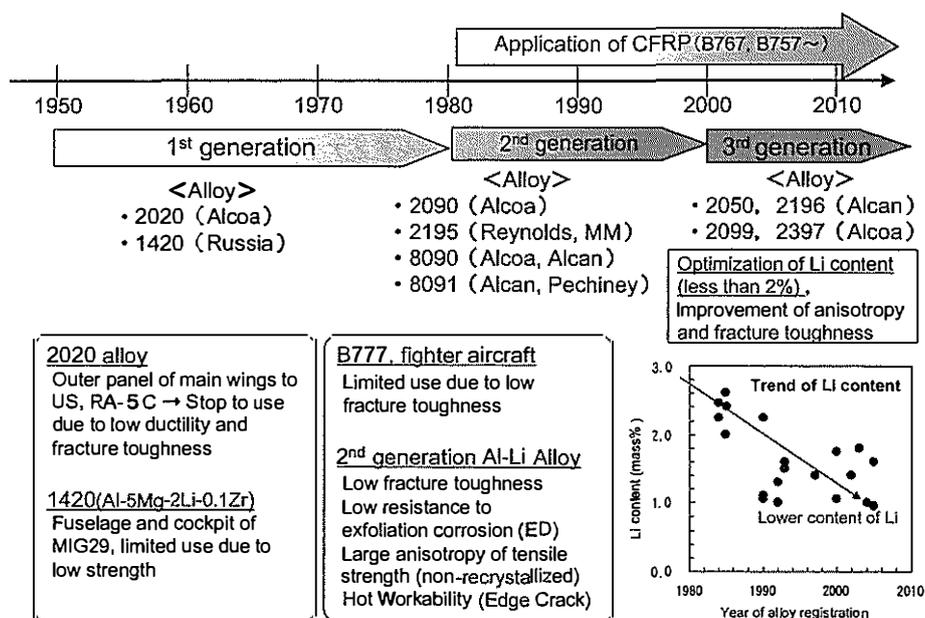


Fig. 15 Trend of the development in Al-Li alloys

重工業と住友軽金属は日本航空宇宙工業会の委託研究として、2024合金-T3材の強度に匹敵し、6013合金より高強度の6000系板材を開発し、航空機に適用する検討を行った²⁸⁾。この板材を用いると、従来2024-O材で成形し、焼入れしていた工法が、T4で成形し成形後人工時効する工程が可能となり、成形加工後の焼入れによるひずみ矯正が不要で製造コスト低減となる。この合金はまた、Fig. 16に示すように、従来の2000系合金ではできなかった中空薄肉ホロー形材が押出可能で、複雑な形状の航空機部品の一体化成形ができ、従来のリベット接合が不要になり重量軽減が図れ、低コストで製造できることが明らかとなった³⁰⁾。この高強度高成形6000系合金は2013合金として、米国のAluminum Associationに国際登録され、その押出材は米国の航空機規格MMPDSを取得している³¹⁻³⁸⁾。日本で最初にMMPDSに登録された国産合金である。この合金は航空機のコスト低減が可能で軽量化に寄与できるもので、今後の航空機の設計には是非織り込んで欲しいと考える。戦後、住友を見学した堀越二郎氏は、現場でホロー形材をみて、こんなものがアルミニウムでできるならばもっと違った航空機も出来ただろうとの感想を述べている³⁹⁾。航空機的设计者がアルミニウムの製造現場を見ていただくのはとても重要なことである。

4.3 航空機用材料の研究開発の意義、高強度高靱性合金の研究開発の必要性

航空機材料は、その用途が航空機だけにアルミニウム材料の中でも最も厳しい品質が要求される材料である。逆にこの品質要求に応えられる材料はどこでも通用できると言えよう。こうした材料を製造できる技術は他の用途の材料も当然高品質で生産できると考えられる。高強度高靱性アルミニウム合金の研究はアルミニウム合金の究極の特性を探求することでもあり、超々ジュラルミンの探求がまさにそれであった。この間の世界の高強度合金開発の歴史を辿ってみると、Table 1にみるように最

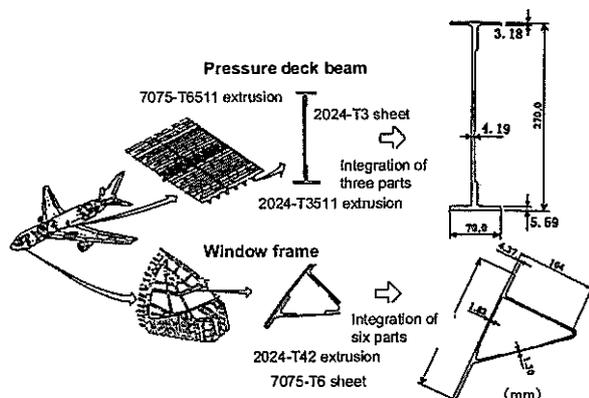


Fig. 16 Applications of new alloy 2013 extrusions to integrated structures in a pressure deck beam and a window frame

近の合金の成分は超々ジュラルミンの成分に近づいていることがわかる。それだけこの合金は世界でも先進的な発明でもあった。超々ジュラルミンの発見から80年近い年月が経っていて、この間の製造技術の進歩も大きく発展しているが、合金成分で見ると限りクロムがジルコニウムに置き換わっただけであり進んでいないとも言える。いま、この超々ジュラルミンを超える材料が求められている。しかし既存のプロセスだけでは限界があることも確かである。強度を上げようとする、延性や靱性が低下してしまうことである。これらの原因の一つに、 casting時に晶出物が生成し、これが粗大化し結晶粒界に残存することである。晶出物の生成を抑制あるいは微細化できる casting技術が必要である。また生成しても、その後の加工熱処理で晶出物を粒内に取り込むことができれば粒界割れを抑制でき、延性、靱性を向上させることが出来るであろう⁴⁰⁾。こうした技術開発は、当然航空機材料以外でも十分活用でき、例えば晶出物の多いAl-Fe系やAl-Mn系合金、Al-Si系合金に適用することで、これらの合金の適用限界も大きく拡大することも可能となる。日本の英知を結集して超々ジュラルミンを超える材料を開発して、世界に通用できる航空機材料として貢献できることが必要である。

5. 今後の航空機用アルミニウム合金開発の課題

5.1 国産旅客機MRJの登場

ボーイング767、777、787の機体の製造を通じて、日本の航空機産業は発展してきた。この間、三菱重工では国産の乗客9人乗りの高級ビジネスジェット機MU300なども製造してきたが、今また再び国産旅客機MRJ (Fig. 17)を製造し世界中に販売することとなった。この機体は将来需要が期待される70~90人のリージョナルジェットである。将来の需要予測をFig. 18に示す^{41,42)}。この分野の航空機としては既にカナダのボンバルディアやブラジルのエンブラエル、さらにロシアや中国が進出しようとしている。ここでの競争に打ち勝つには、自動車と同様にユーザーニーズを的確に把握しこれを機体の性能に反映させることと、一層のコストダウンを図ることが重要である。アルミメーカーにとっては幸いにもMRJはB787とは違ってアルミニウムを多く使用する機体であり、材料面でもさらに性能、品質の向上を図って行くことが必要である。できるだけ国産の材料をもちいていただくよう、材料メーカーも努力することが必要である。特に、自動車の分野では自動車メーカーと材料メーカーが一緒になって性能を満足する材料を開発してきている。材料メーカーが自動車メーカーの中に入って一緒に考える仕組みが出来ている。航空機でもこのような仕組みを用いればもっとすばらしい材料が生まれてくるものと考えられる。

Table 1 High strength aluminum alloys for aircrafts developed after World War II

| Alloy | Year | Country | Zn | Mg | Cu | Mn | Cr | Zr | Ti | Fe | Si |
|-------|------|----------|---------|---------|---------|----------|-----------|-----------|------|------|------|
| 2024 | 1954 | USA | 0.25 | 1.2-1.8 | 3.8-4.9 | 0.30-0.9 | 0.10 | | 0.15 | 0.50 | 0.50 |
| 2324 | 1978 | USA | 0.25 | 1.2-1.8 | 3.8-4.4 | 0.30-0.9 | 0.10 | | 0.15 | 0.12 | 0.10 |
| 2524 | 1995 | USA | 0.15 | 1.2-1.6 | 4.0-4.5 | 0.45-0.7 | 0.05 | | 0.10 | 0.12 | 0.06 |
| 2026 | 1999 | USA | 0.10 | 1.0-1.6 | 3.6-4.3 | 0.30-0.8 | | 0.05-0.25 | 0.06 | 0.07 | 0.05 |
| 2027 | 2001 | France | 0.20 | 1.0-1.5 | 3.9-4.9 | 0.50-1.2 | | 0.05-0.15 | 0.08 | 0.15 | 0.12 |
| 7075 | 1954 | USA | 5.1-6.1 | 2.1-2.9 | 1.2-2.0 | 0.30 | 0.18-0.28 | | 0.20 | 0.50 | 0.40 |
| 7475 | 1969 | USA | 5.2-6.2 | 1.9-2.6 | 1.2-1.9 | 0.06 | 0.18-0.25 | | 0.06 | 0.12 | 0.10 |
| 7050 | 1971 | USA | 5.7-6.9 | 1.9-2.6 | 2.0-2.6 | 0.10 | 0.04 | 0.08-0.15 | 0.06 | 0.15 | 0.12 |
| 7150 | 1978 | USA | 5.9-6.9 | 2.0-2.7 | 1.9-2.5 | 0.10 | 0.04 | 0.08-0.15 | 0.06 | 0.15 | 0.12 |
| 7055 | 1991 | USA | 7.6-8.4 | 1.8-2.3 | 2.0-2.6 | 0.05 | 0.04 | 0.08-0.25 | 0.06 | 0.15 | 0.10 |
| 7349 | 1994 | France | 7.5-8.7 | 1.8-2.7 | 1.4-2.1 | 0.20 | 0.10-0.22 | Zr+Ti0.25 | | 0.15 | 0.12 |
| 7449 | 1994 | France | 7.5-8.7 | 1.8-2.7 | 1.4-2.1 | 0.20 | | Zr+Ti0.25 | | 0.15 | 0.12 |
| 7040 | 1996 | France | 5.7-6.7 | 1.7-2.4 | 1.5-2.3 | 0.04 | 0.04 | 0.05-0.12 | 0.06 | 0.13 | 0.10 |
| 7085 | 2002 | USA | 7.0-8.0 | 1.2-1.8 | 1.3-2.0 | 0.04 | 0.04 | 0.08-0.15 | 0.06 | 0.08 | 0.06 |
| 7056 | 2004 | France | 8.5-9.7 | 1.5-2.3 | 1.2-1.9 | 0.20 | | 0.05-0.15 | 0.08 | 0.12 | 0.10 |
| 7140 | 2005 | France | 6.2-7.0 | 1.5-2.4 | 1.3-2.3 | 0.04 | 0.04 | 0.05-0.12 | 0.06 | 0.13 | 0.10 |
| ESD | 1936 | Japan | 8 | 1.5 | 2 | 0.50 | 0.25 | | | | |
| ZC88 | 1999 | Sumitomo | 8.8 | 1.7 | 2.3 | | | 0.15 | | | |

また川崎重工業では防衛省の大型輸送機(XC-2)や対潜哨戒機(XP-1)(Fig. 19)を製造することで機体の設計製造が総て国産化できる状況になってきている⁴³⁾。この技術を民間機に転用し世界に販売して行くことも日本の技術力をあげていくことに繋がると考えられる。

5.2 現状の課題、軽金属学会東海支部航空機材料部会の活動に即して

軽金属学会東海支部は、2010年、こうした最近の東海地区の航空機産業の状況を鑑みて、アルミニウム材料を継続的に用いていただくために、産として素材製造メーカー、機体製造メーカー、部品加工メーカー、表面処理メーカー、官として中部経済産業局、愛知県労働産業部、産業技術総合研究所、中部航空宇宙技術センター、学として名古屋大学、大同大学などを入れた産官学の航空機材料部会(部会長、名古屋大学金武直幸教授)を発足させた。ここで航空機用アルミニウム材料の現状把握と課題の抽出を行い、素材製造WG、切削加工WG、リサイクルWG、表面処理WGの四つのワーキンググループに分けて、ワーキンググループごとに将来の技術課題を検討した。素材WGからは、材の寸法精度向上技術、ブリストル発生抑制技術、高強度高剛性合金の開発、大型素材の国産化、切削加工WGからは素材の残留応力低減技術、切削後の変形予測技術、加工発熱の少ない高速加工技術などの開発、リサイクルWGからは can to can



Fig. 17 Mitsubishi regional jet MRJ

のようなリサイクルシステム構築、二輪車部品への再利用技術の開発、表面処理WGからは、素材、表面処理、使用環境が耐食性に及ぼす影響の解明、環境適合でかつ自己修復機能を持った表面処理技術の開発が将来の技術課題として提案された。

5.3 国プロとしての材料開発の意義、海外からの攻勢に対抗して

東海支部航空機材料部会では将来技術課題をまとめたが、これを実行に移していくには個別の会社ごとに取り組むのは非常に難しいのが現状で、是非、国家プロジェクトとして総合的に取り組んでいく必要がある。航空機産業は自動車産業と並んで東海地区の基幹産業で発展の原動力となっている。航空機産業を支えていくには各種の基盤技術の確立が必要であるが、アルミニウムに関してはこのような基盤技術を促進させるセンターがないの

で、国はこれを設立させ基盤技術を牽引していくことが切望される。

最近ではCFRPが注目されているが、アルミニウム材料ですらまだ多くの課題を抱えているのが現状である。小型の航空機はまだアルミニウムが利用されると考えられる。日本の自動車産業は、低コストで性能がよいものを作る技術を確立してきたが、これをもって航空機産業に活用して世界に販路を開拓していくことが重要である。小型のリージョナルジェットでは、カナダ、ブラジル、ロシア、中国が競合相手で、いずれも国家の支援を受けて成長してきている。素材の大型化では大型の生産設備が必要になるが、とても一社だけではリスクが大きく、ここにも国の支援が必要である。また最近欧米で復活してきたAl-Li合金については、機体メーカーとあらためてその必要性を議論したうえで、アリシウムの

経験を踏まえ、合金成分、溶解铸造について国家プロジェクトとして検討すべき課題であろう。こうした課題を実行していくためにもナショナルセンターが必要である。

6. ま と め

戦前、戦後の航空機産業とアルミニウムの関わりについてまとめてきた。戦前は軍が航空機産業を国策として位置づけ、その指導的役割を果たしてきた。その結果、超々ジュラルミンのような世界に誇れる合金が開発でき、航空機の性能を高めることに貢献できた。合金開発したアルミニウム産業にも確固とした人材と製造技術があったのであり、機体メーカーにも材料の重要性を認識して設計者がいて、官と産がうまく結びついて零戦という優れた航空機に結実したといえよう。戦後は、米国に

Demand in the regional jet with 60 to 99 seats: more than 5000 planes in the next 20 years

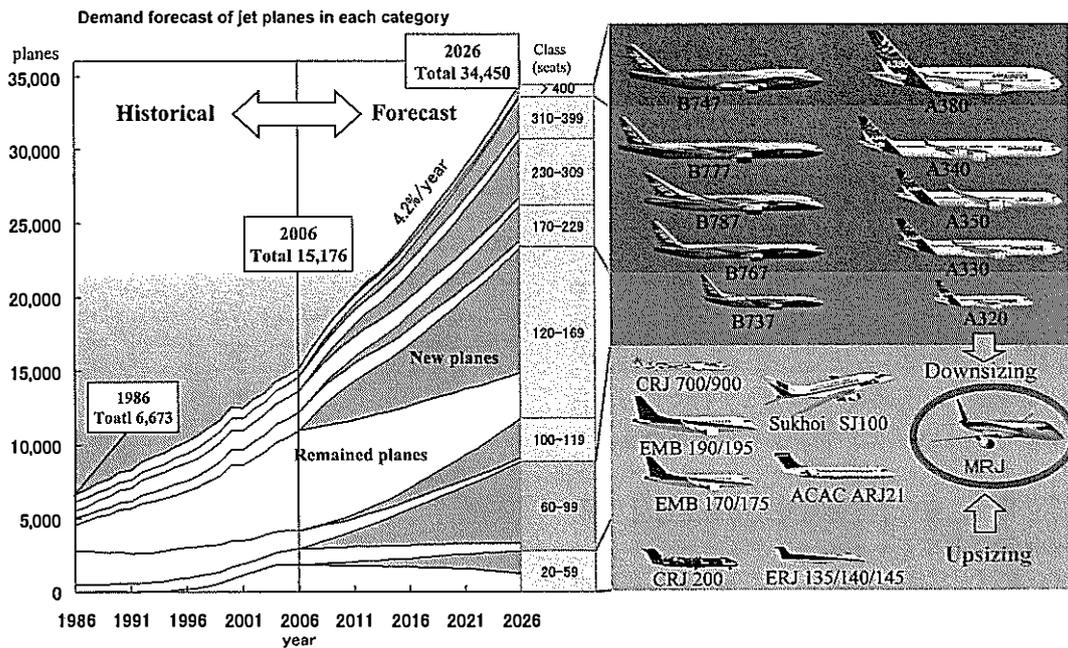


Fig. 18 Demand prediction of jet planes classified by the number of seats and representative planes in each class

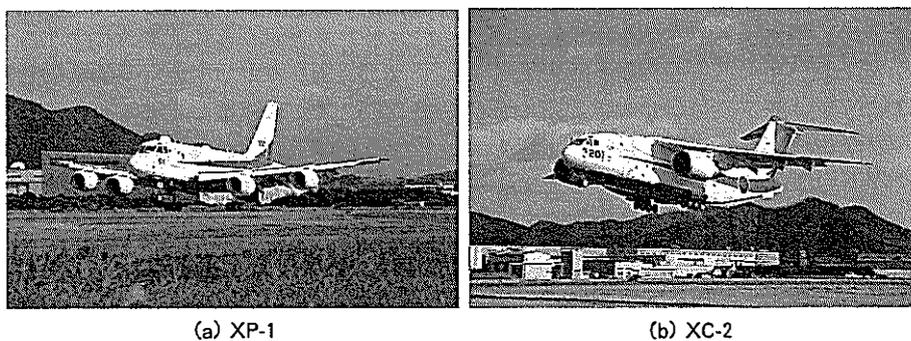


Fig. 19 XP-1 (Maritime patrol aircraft) (a) and XC-2 (Military transport aircraft) (b) (<http://www.khi.co.jp/aero/product/index.html>)

よって航空機産業は解体され、その人材が自動車や二輪車のほうに行き、戦後の自動車産業を支えてきた。今後日本の産業の発展の一つに航空機産業を位置づけるのであれば、素材製造、機体製造、部品製造が個別に課題を解決していくのでは、とても世界の成長スピードには対応しきれない。戦後、自動車メーカーは、部品メーカー、素材メーカーを取り込んで摺り合わせの技術で優れた品質の自動車を生産してきた。これに倣い、国の指導の下、機体メーカーや部品メーカーと素材メーカーの技術を摺り合わせて、さらに大学での基礎研究も織り込んで、もっと総合的かつ戦略的に問題解決するためのセンターの構築し、ここに産官学の英知を結集して、将来の人材育成も視野に入れて将来の航空機開発に取り組むことが必要である。

参 考 文 献

- 1) 吉田英雄：本誌，53 (2012)，60.
- 2) 吉田英雄：同上，54 (2013)，264.
- 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年.
- 6) 牧野光雄：飛行船の歴史と技術，成山堂書店，(2010).
- 7) 日本の航空宇宙工業 (平成25年度版)：一般社団法人日本航空宇宙工業会，2013.
- 8) ウィキペディア (Wikipedia)：YS-11，MU-2，MU-300，YX，YXX，YSX.
- 9) 横倉 潤：翔べ！YS-11，小学館，2004.
- 10) YS-11 物語，エアライナークラブ編，JTBパブリッシング，2006.
- 11) 伊牟田守：航空機用構造材料の技術開発動向，SOKEIZAI，Vol.51，No.11 (2010)，2.
- 12) 日本航空宇宙工業会：平成13年度，航空機用アルミニウム合金の生産能力の実態と課題調査，(2002).
- 13) T. Uno, H. Yoshida and Y. Baba: *Aluminum Alloys; Their Physical and Mechanical Properties*, Vol. 1. ed. by E. A. Stark, Jr. and T. H. Sanders, Jr., EMAS, 371.
- 14) 馬場義雄：本誌，29 (1988)，29., 31 (1990)，65., 41 (2000)，91.
- 15) 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.
- 16) 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).
- 17) 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，航空機用広幅長高力アルミ合金板製造技術の研究，神戸製鋼所，No.19 (1980).
- 18) 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，Vol.32，No.2 (1982)，40.
- 19) 立松武雄，高田与男，黒崎敏夫：同上，Vol.31，No.1 (1981)，24.
- 20) Furukawa-Sky Review，新技術紹介，No.1 (2005)，52.
- 21) 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).
- 22) 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，超靱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).
- 23) 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合金の超靱性材料開発，超靱性加工法の研究，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).
- 24) 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).
- 25) 吉田英雄，内田秀俊：本誌，34 (1993)，87.
- 26) 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
- 27) アルミニウム協会：アルミニウム圧延品 需要部門別特殊分類出荷実績 (2013).
- 28) 吉田英雄：本誌，46 (2005)，99.
- 29) 日本航空宇宙工業会：航空機部品・素材産業振興に関する調査研究，高強度高成形6000系新合金の研究，住友軽金属工業，川崎重工業，成果報告書，No.806 (1994)，No.904 (1995).
- 30) 日本航空宇宙工業会：航空機部品・素材産業振興に関する調査研究，新6000系合金の航空機用鍛造/押出材の開発，住友軽金属工業，川崎重工業，成果報告書，No.1004 (1996)，No.1102 (1997).
- 31) 佐野秀男，松田真一，吉田英雄：本誌，45 (2004)，168.
- 32) 佐野秀男，加藤勝也：本誌，46 (2005)，126.
- 33) 加藤勝也，佐野秀男：本誌，47 (2006)，105.
- 34) 佐野秀男，加藤勝也：本誌，51 (2010)，166.
- 35) 日本航空宇宙工業会：環境調和型航空機技術に関する調査研究 (CD版)，複雑形状の押出可能な高強度合金2013の一次構造体への適用研究，住友軽金属工業，川崎重工業，成果報告書，No.1615 (2005)，No.1705 (2006).
- 36) 日本航空宇宙工業会：環境調和型航空機技術に関する調査研究 (CD版)，高成形合金2013板材の開発及び低コスト構造への適用研究，住友軽金属工業，川崎重工業，成果報告書，No.1914 (2008)，No.2006 (2009).
- 37) 岩村信吾，小関好和，吉田英雄：本誌，51 (2010)，32.
- 38) 小関好和，岩村信吾，上向賢一，山田悦子：本誌，51 (2010)，61.
- 39) 深井誠吉：本誌，29 (1988)，87.
- 40) 吉田英雄：本誌，36 (1995)，37.
- 41) 例えば日本航空機開発協会：民間航空機に関する市場予測2013-2032，最新版は <http://www.jadc.or.jp/jadc13.pdf> 参照のこと.
- 42) 八代充造：国産旅客機MRJ事業への挑戦と適用軽量化材料，平成22年度軽金属学会東海支部第一回講演会資料，(2010).
- 43) 野久 徹：大型機開発のトピックス，平成23年度軽金属学会東海支部第一回講演会資料，(2011).