



アニメ「風立ちぬ」ともう一つの超ジュラルミン —UACJの研究報告書から読み解く—*

吉田 英雄**

Animation “The Wind Rises (Kaze Tachinu)” and Another Super-Duralumin, Deciphering from Old UACJ’s Technical Reports

Hideo Yoshida**

1. はじめに

2013年上映されたアニメ「風立ちぬ」には、三菱の航空機的设计陣が、「住友軽金属」と木箱に入ったアルミニウムの押出型材を取り出して眺めているシーンが出てくる。スタジオジブリ絵コンテ全集、「風立ちぬ」では「ジュラルミンの押し出し材のサンプルが姿をあらわす」とあり¹⁾、また徳間書店のアニメージュ・コミック・スペシャル「風立ちぬ」ではせりふの中で、「軽いな、ジュラルミンの押し出し材とはぜいたくなものだ…」²⁾と語らせている。現在は閉じられているが、auの「風立ちぬ」キャンペーンサイトの「風立ちぬ」を読み解く³⁾でも、このアルミニウム合金はジュラルミンとされていた。これが歴史的に妥当かどうか、ジュラルミンから超ジュラルミンの開発の歴史を遡って概説し、「風立ちぬ」に描かれた押出材が何であるのかを、UACJの技術開発研究所に保管されている研究報告書から読み解いて見る。

当社UACJの前身である住友軽金属と古河スカイは、太平洋戦争前後の時期にそれぞれ住友金属、古河電工として航空機用のジュラルミンおよび超ジュラルミンを製造していた会社でもある。そこで、歴史資料とともに主に住友軽金属およびその前身である住友金属、住友伸銅鋼管、住友合資会社伸銅所（以下、住友と記す）の技術資料をもとに、ジュラルミンから超ジュラルミンの開発の歴史を遡って概説し、「風立ちぬ」のなかでジュラルミンとされたことが歴史的に妥当かどうか、ここで登場した押出材が何であるのかを読み解くことにする。

2. アニメ「風立ちぬ」に登場する 戦闘機と押出型材

2.1 堀越二郎と戦闘機

アニメが描いていた航空機は、零戦（零式艦上戦闘機）ではなく、そこに至るまでの七試艦戦（七試艦上戦闘機、Fig. 1）³⁾、九試単戦（九試単座戦闘機、Fig. 2）³⁾である。九試単戦の成功で九六式艦上戦闘機（1936年制式採用、Fig. 3）³⁾、十二試艦戦（十二式艦上戦闘機）を経て零式

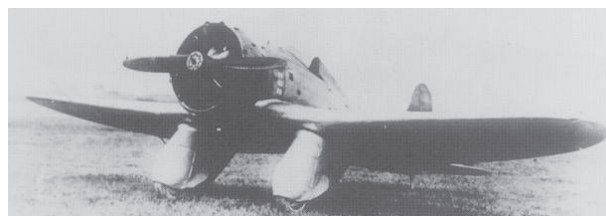


Fig. 1 Experimental 7-shi Carrier-Based Fighter (Gakken Publishing, Horikoshi Jiro and Zero Fighter, Aug. Rekishi Gunzo (2013))³⁾

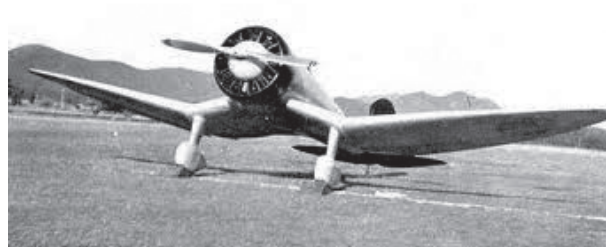


Fig. 2 Experimental 9-shi Single Seat Fighter, Prototype No.1 (Photo, Shigeru Nohara)³⁾

* 軽金属, 64 (2014), 111-116に掲載された“LM review”に加筆。

Revision of “LM review” published in Journal of Japan Institute of Light Metals, 64 (2014), 111-116.

** (株)UACJ 技術開発研究所

Research & Development Division, UACJ Corporation

艦上戦闘機(1940年制式採用, Fig. 4)へと繋がる。1932年(昭和7年)試作発注された七試艦戦は、この映画の主人公、三菱(1920年三菱内燃機製造→1921年三菱内燃機→1928年三菱航空機→1934年三菱重工業と社名が変遷、以下三菱と記す)の堀越二郎氏が設計主務者として初めて手がけた金属構造を持つ単葉戦闘機であった。先進的な低翼単葉機ではあったが、主翼は全金属製ではなく金属骨格に麻布を張った羽布張りという中途半端な構造であった⁴⁾。当時まだジュラルミンの大きな押出型材が容易に入手できなかったため、主桁は重量的に有利なジュラルミンの押出型材ではなく、薄板の重ね合わせでリベット留めとなり、片持ち式主翼に十分な強度を与えようとして必要以上の厚さとなった^{3), 5)}。また大直径の主車輪を支える旧式構造の脚柱とそれを覆うスパッツも見ると空気の抵抗の大きなものとなった。堀越は、「胴体は不恰好で、どうひいき目に見ても全体がどことなく調和がとれていなかった」³⁾として、この試作機を「鈍重なアヒル」とか「醜いアヒルの子」と自嘲した^{3)~5)}。この試作機は分厚い主翼、太く無骨な胴体、太い主脚といった空力的に不利な構



Fig. 3 Mitsubishi Navy Type 96 Carrier-Based Fighter
<http://www.mhi.co.jp/cats/airplane/photo/presea/96sento.html>



Fig. 4 Japanese Navy Type Zero Carrier-Based Fighter Model 21 (A6M2b) (Shigeru Nohara: Genealogy of Zero Fighters, Ei-Publishing, (2008))

造のため、目標とされた350 km/hの速度に達せず、また墜落事故も起こして失敗作となった。三菱も中島(中島飛行機)も七試ではともに不合格となったため、1934年(昭和9年)あらためて試作機が発注されたのが九試単戦である。七試の苦い失敗の反省から、堀越氏は当時の最新の技術をこの九試に全面的に取り入れた^{3)~6)}。分厚い金属骨格羽布張りの主翼は押出型材でできた主桁を持つ全金属製の薄翼に置き換えられ、主脚も小さな直径の車輪と単支柱を組み合わせて細くまとめ直され、逆ガル形式の主翼とし主脚を短くして重量を軽減した。また細部に至るまで流線形化を図り、表面の空気抵抗を抑えるため沈頭鉋を初めて採用した。エンジンも軽量で大馬力を発揮する中島製「寿」五型として、最大速度450 km/hを出すことが出来た^{3)~6)}。この九試単戦は1936年11月制式採用され、九六式艦上戦闘機となった。九六式艦戦と九試単戦は必ずしも同じではなく、主翼の逆ガルは航空母艦での着艦の際、安定性を失う危険があるため通常の楕円翼に、胴体も細長いため無線電話装置などの搭載が困難で太く再設計された。主脚も胴体に対応して太目の固定脚となった^{3), 6)}。九六式艦戦の性能は「世界の水準に追いついた。あるいは追い越した」との高い評価を得た³⁾。この九六式艦戦の成功で、次の十二試艦戦(零戦の試作機)の開発に繋がった。

2.2 アニメ「風立ちぬ」中の押出型材

さて、この九試単戦に用いられた押出型材は、宮崎駿氏が言うジュラルミンだったのかどうかである。宮崎氏がジュラルミンという言葉を用いたのは、そんな厳密に考えたのではなく、単によく知られていて、通りがいいだけだったかもしれない。この押出型材に関して、堀越氏は「翼厚を薄くできたのは、外板をジュラルミンとし、かつ桁フランジに厚い押出型材を採用することができたからである」^{4), 6)}と書いているだけで、厚い押出型材が何であるのかは明瞭に書いていない。ただ、十二試艦戦での超々ジュラルミンの採用時に、「主桁の上下縁材とウェブ板だけにESD材を使ったとしても、従来のSD材に比して、十二試艦戦で300 kg(原文ママ、30 kgの間違いか)の重量節減が可能であった」⁷⁾と書いており、九試艦戦で用いられたのはSD、すなわち超ジュラルミンであることが推測される。柳田邦男氏は、「零式戦闘機」(文春文庫)の中で次のように書いている。堀越氏の言葉として、「七試のときにはなかった桁フランジ用の押出型材もできるようになったし、強度の大きい新しいジュラルミンも開発されたというから、今度は金属張りの薄翼を作れると思う。これは

大事なことなので、自分で住友金属まで行って調べてくるつもりだ⁸⁾(p.164)と言って、実際に大阪の住友金属まで出張しているとのこと。「堀越がいま九試単戦に使おうとしている新しいジュラルミンとは、一平方ミリ当たり45キログラムまでの張力に耐えられる、強度の大きな軽合金で、「45キロ超ジュラルミン」あるいは「SDH」と呼ばれていた。」⁸⁾(p.166)と書かれている(注、SDHとは焼入れ後室温時効硬化させた材料のこと)。この記述が間違いのないとしたら、あのアニメに登場してくる押出材はジュラルミンではなく、超ジュラルミン、一般的にはよく知られている24S(2024)合金ということになる。

ところが問題はそう簡単ではない。住友軽金属の年表には「松田は、再び24S系の工業化の研究に移り、昭和10年(1935年)4月ころ、それに成功、のちに24S系のものを超ジュラルミンと呼ぶようになった⁹⁾とある。九試計画が海軍航空本部から通知されたのは昭和9年(1934年)2月をはじめで、基本設計がまとまったのは3月後半とのこと⁷⁾、設計開始からわずかに10ヶ月後の1935年1月に1号機が完成している⁵⁾。この1号機に24S系超ジュラルミンが用いられているとしたら、少なくとも半年から一年前には工場試作なり製造技術が完成していないと実機には適用できないと考えられる。また海軍の軍用機であるので、海軍の材料規格制定も必要である。堀越氏はいったい何時、大阪の住友金属を訪問したのであろうか。この時、説明を受けた材料は果たして24S系超ジュラルミンなのであろうか様々な疑問が出てくる。堀越氏の本には超々ジュラルミンのときは大阪まで出向いて、担当の五十嵐勇氏や小関技師と会って説明を聞いていることを日付まで含めて克明に書いている⁴⁾、⁶⁾が、超ジュラルミンのときに柳田氏が言うような住友金属を訪問したという記述は見当たらない。柳田氏が堀越氏に直接インタビューされて得た情報かもしれない。

3. ジュラルミン¹⁰⁾

3.1 ドイツにおけるジュラルミンの発明とツェッペリン飛行船への採用

3.1.1 ジュラルミンの発明

ドイツのウィルム氏(Alfred Wilm)(1869-1937)は1901年、ベルリン近郊のノイバーベルスベルク(Neubabelsberg)にある理工学中央研究所(Zentralstelle für wissenschaftliche-technische Untersuchungen)に招聘され、翌年ドイツ兵器弾薬製造会社から真鍮製の薬莖をアルミニウム合金で代替す

るための開発委託を受け研究を開始した。彼はAl-4%Cu合金を鋼と同じように焼入れして、引張強さ15.5~22.9 kg/mm²、伸び5~7%を得たが、真鍮の代替には及ばなかった。1903年この熱処理法でDRP170085の特許を申請した。その後研究を続け、1906年時効硬化現象を発見した。1907年1月11日、Al-4%Cu合金をベースに微量マグネシウム添加の影響を調べ、2%以下のマグネシウムと5%以下の銅を含むアルミニウム合金で、特にCu 4%にMg 0.25~0.5%を含むアルミニウム合金が効果的として特許を申請した(DRP204543, 1908年11月認可)。マグネシウム量2%以下としたことについては、当時アルミニウムの強度を高めるには2%以上のマグネシウム添加が必要なことは、マグネシウム合金に代表されるように既に知られており特許も出されていたためである。その後、系統的な実験を行い、マグネシウムを含むアルミニウム合金の熱処理法としてDRP244554(1909年3月20日申請、1912年3月9日認可)の特許を取得した。この材料の製造については、1908年ドイツ兵器弾薬製造会社の姉妹会社であるデュレナ・メタルヴェルケ社(Dürener Metallwerke A.G.)での合金板の工場試作が行われたが、研究所はこの発明に関心を持たなかった。これは彼が特許を申請した1909年、彼を招聘した研究所長が交替したためで、ウィルム氏の研究は中止となり、ウィルム氏は本発明を自分の手で工業化するために研究所と交渉の上、特許を彼の名義とし研究所を辞めた。幸いにもデュレナ・メタルヴェルケ社がウィルムの特許の使用権を得て、同社技術役員のベック博士(R. Beck)の協力のもとで工業化に成功した。1909年ウィルムとデュレナ・メタルヴェルケ社の間でこの新製品に対する商品名の相談があり、ウィルム氏はドイツ語の硬いという意味のhartを用いて、当初ハルトアルミニウム(Hartaluminium)を提案したが、国際市場を考え、フランス語で硬いという意味のDurを用いてDuraluminにした。Duraluminは地名のDürenerから来たとも言われているが、現在のドイツ人の多くはDüralumin(Dürener-Alumin)よりDur-Aluminとして理解しているとのことである¹¹⁾。このジュラルミン(Duralumin)の化学組成はAl-4.0%Cu-0.5%Mg-0.6%Mnである。

3.1.2 飛行船の骨組みへの採用

英国のヴィッカーズ社(Vickers Company, その後The Vickers Sons & Maxim Ltd.)は1909年、剛性の高い英海軍飛行船"Mayfly"の建造を開始した。1910年、デュレナ・メタルヴェルケ社はジュラルミンを12.75ト

ン生産したが、そのうち10トンをヴィッカーズ社に供給した。しかし、この船は1911年9月、試験飛行のため格納庫から移動するときに、操作ミスで真二つに折れてしまった。これはこの合金が「ドイツ製」だからとの疑いをもたれたことで、ヴィッカーズ社は、1911年、ウィルムから製造の許諾を得て自らこの合金の生産を開始した¹²⁾。ヴィッカーズ社は、英国、フランス、スペイン、ポルトガル、イタリアさらに米国で製造する権利を有した。

ドイツではフェルディナント・フォン・ツェッペリン伯爵(1838-1917)によって、飛行船建造を目的として、1898年飛行船建造会社が設立された。ツェッペリンの飛行船の構造は従来のエンベロープ(ガス囊)に水素を詰める軟式飛行船ではなく、金属で骨組みを作り、外皮(麻布か木綿布)で覆ってその中に水素ガスを詰めたガス囊を数個並べるといった硬式飛行船であった。船体の骨組みは鉄で作るつもりだったが、重くなることが懸念され、アルミニウムが用いられた¹²⁾。ツェッペリン伯爵は当時硬い合金と言われているアルミニウム・亜鉛合金を採用した^{13), 14)}。1900年6月、全長128 m、直径11.65 mのツェッペリン第一号硬式飛行船LZ1が完成した。「ツェッペリン伯爵はジュラルミンに変える1914年まではこの材料を用い続けた。当時のジュラルミンは同じ重さのアルミニウムに比べて2.5~5倍の強度を持っていたが、1910年当時、飛行船の桁に必要な断面形状を製造することが困難で、当初、ツェッペリンはこのため採用を拒否した。しかしヴィッカーズ社によって飛行船Mayflyに採用されて、1914年までにジュラルミン部品が製造可能なレベルになり、代替案として考えられていたマグネシウム合金より優れていたことが証明された」¹³⁾ため、この合金は1914年、独海軍ツェッペリン飛行船用に規格登録され、1914年のLZ26(Fig. 5¹³⁾)からジュラルミンが使われ、1916年までに720トン生産された¹⁵⁾。Fig. 6はFriedrichshafenにあるZeppelin Museumに展示されている飛行船の骨格とそのロールフォーミング工程を示している¹⁶⁾。

ツェッペリン飛行船は、第一次世界大戦では、軍事用として1914-1918年の間に88隻製造され¹²⁾、ロンドンを空襲して爆弾を投下し、ロンドン市民を恐怖に陥れたが、戦争が長引くにつれて、イギリスも高射砲や戦闘機で反撃し撃墜される飛行船も増えてきた。Fig. 7はエセックス州で撃墜されたL33飛行船の残骸である¹⁷⁾。ドイツでは、このジュラルミンは飛行船だけでなく航空機にも採用され、ドイツのユンカーズ社は1917年に単発複葉攻撃機J4に初めて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

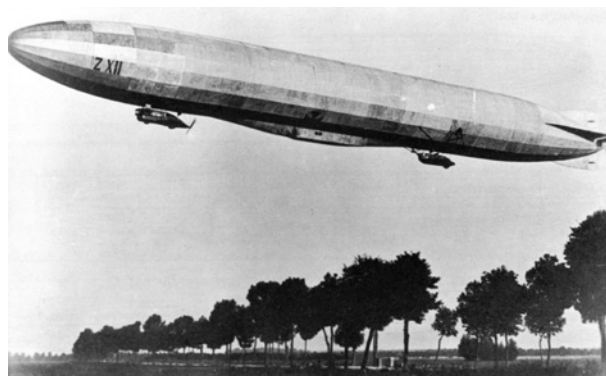


Fig. 5 Zeppelin Airship LZ26, which framework was constructed with roll-formed profiles of Duralumin sheet for the first time^{10), 13)}.

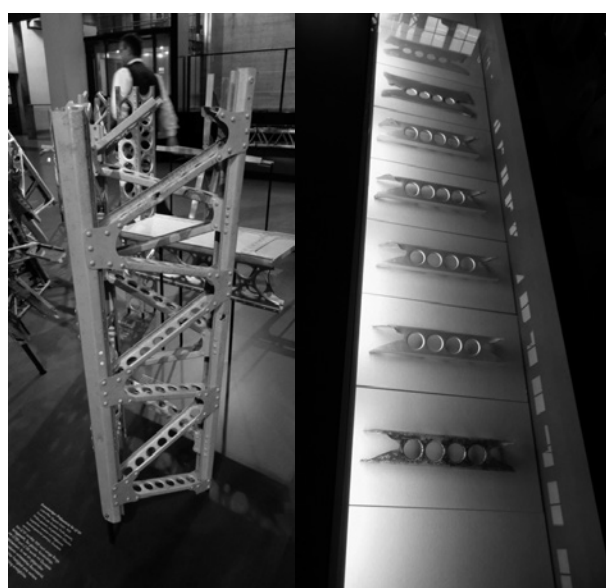


Fig. 6 Frameworks of Zeppelin Airship jointed with rivets and roll forming process of Duralumin sheets exhibited in Zeppelin Museum Friedrichshafen.

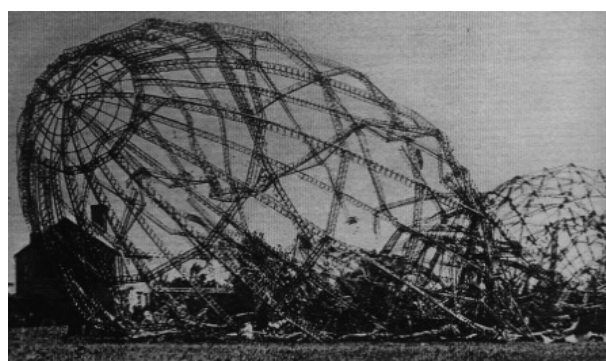


Fig. 7 Skeleton of LZ33 by New Hall Cottages, Little Wigborough, Essex. The framework was left almost intact and provided a useful source of information for the British authorities¹⁷⁾.

属製旅客機F.13 (Fig. 8) も開発している。

第一次世界大戦後は、飛行船は郵便や旅客輸送の手段として活躍する。1929年、全長236.6 mのグラフ・ツェッペリン号¹³⁾はツェッペリン伯爵の夢であった世界一周を果たす。フリードリッヒスハーヘンを出発し、シベリアを横断後、日本の霞ヶ浦の海軍基地にも寄航し、次の寄航地ロスアンゼルスに向かった。1933年ヒトラーが政権に就くと飛行船が対外宣伝に効果抜群と考え、多額の資金援助を与え、さらに大きなヒンデンプルグ号を製造し、1936年完成した。全長245.0 m、直径41.2 m、ガス囊16個、ダイムラー・ベンツ製の1150馬力のディーゼルエンジン4基を搭載し、船体の断面は正36角形で、乗員40名、乗客50名が乗ることができ、その船内は、客室、食堂、ラウンジ、トイレ、シャワールーム等を備え、ラウンジにはアルミ製のピアノまで積み込んだ近代的な設備であった^{12), 16), 18)}。五輪のマークを施したヒンデンプルグ号は同年開催されたベルリンオリンピックをはじめ、ナチスの国威発揚に貢献したが、1937年、ニュージャージー州レイクハースト海軍飛行場で着陸寸前、「ヒンデンプルグ号の悲劇」と呼ばれる爆発・炎上を起こした。この爆発と第二次世界大戦の勃発により飛行船の時代は終了する。航空機の速度が向上し飛行船を上回るようになったため、ナチスによってすべての飛行船は解体され、航空機の機材に転用された^{12), 18)}。

3.2 米国におけるジュラルミンの製造

米国でも海軍は第一次世界大戦の開戦とともに硬式飛行船の開発に異常な興味を示し、アルコアに生産を



Fig. 8 Junkers F.13 was the world's first all-metal transport aircraft fabricated with corrugated panels of Duralumin sheets, developed in Germany at the end of World War I. (<http://www.idflieg.com/junkers-fl13.htm>, ©2006 Andi Szekeres)

促した。1916年、アルコアはフランスで墜落したツェッペリン飛行船の桁の破片が海軍から送られてきて、米海軍からドイツが使用している合金と同等かより高い強度の合金が求められた。これらの情報をもとに、アルコアは引張強さ43 kg/mm²、耐力28 kg/mm²を有するジュラルミンと同様な合金17S (Cu 4.0%, Mg 0.5%, Mn 0.5%)を商品化した。ジュラルミンは米国では17Sと呼称された。17S-T4は引張強さ43 kg/mm²、耐力28 kg/mm²、伸び22%であった。アルコアは海軍の建造する飛行船シェナンドア (Shenandoah) 号のための17S合金圧延材を供給する義務を負うことになり、1922年末には、高強度合金板、年間25000トンの生産が可能となり、17Sが主役となった¹⁹⁾。1923年にシェナンドア号はニュー・ケンジントン (New Kensington) 工場の上空を飛行し、成功のうちに完工した。しかし、1925年、この飛行船は嵐の中で三つに割れて墜落し、14名が死亡するという悲劇が生じた (Fig. 9)²⁰⁾。この事故の情報を受けて、アルコアは飛行船の事故は金属が原因で起こしたかどうか確認するためにすぐに事故現場に向かい、残骸を確認して破壊点がすべて綺麗で腐食がないことを確かめた。この事故に対し、標準局やMIT教授から、粒界腐食の嫌疑がかけられたため、アルコアの試験部は同業他社に先じた最新鋭の機器を備えることで対処しその嫌疑を晴らすこととなった^{20), 21)}。さらに耐食性向上のため、1928年、17S板材に高純度アルミニウムを板厚の2.2～10%表面に貼り付けたクラッド材を開発し Alclad と呼んだ²¹⁾。

3.3 日本におけるジュラルミンの製造^{22)～24)}

日本におけるジュラルミンの研究開発は1916年ロン

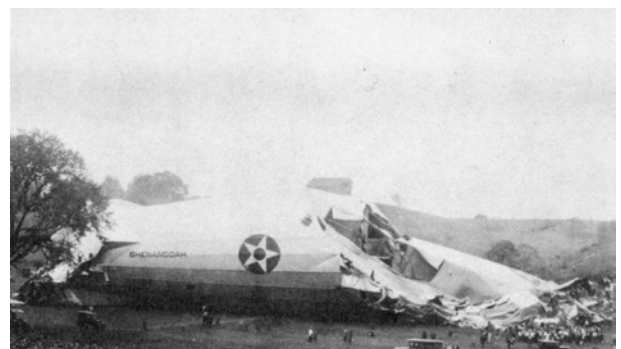


Fig. 9 Wrecked Shenandoah at the site in Caldwell County, Ohio, where the rear section of the airship came down on September 3, 1925, next to a cornfield. Out of the 11 officers and 31 men aboard, 14 were killed and 2 injured²⁰⁾.

ドン駐在の海軍監督官が墜落したツェッペリン飛行船の骨材 (Fig. 10) を入手し、海軍が住友に調査依頼したところから始まる。これを入手した住友は、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。

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ヴィッカーズ社に発注した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。1921年、住友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。航空機の分野では、大正時代の機体は、胴体部分は木製、支柱や張り線で繋がれた上下の翼は木骨羽布張り複葉機、プロペラは木製であったが、既述したようにドイツではすでにユンカース社が、1917年に単発複葉攻撃機J4や、1919年には全金属製旅客機F.13にジュラルミンを用いていた。日本では、1922年4月、中島式ブレゲー型飛行機B-6型複葉機 (Fig. 11) の機体構造にはじめて住友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。さらに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



Fig. 10 Part of framework of Zeppelin Airship shot down in near London, brought into Japan by Japanese Navy and the authentication of Dr. Igashiki on the box stored in UACJ Corporation¹⁰⁾



Fig. 11 Breguet 14 type aircraft, named “Keigin” fabricated by Nakajima Aircraft Industries Ltd. <http://www.ne.jp/asahi/airplane/museum/nakajima/nakajima.html>

等を受注した。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。九二式重爆撃機、九三式重爆撃機、および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住友は、1922年、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。なお、古河電工も1921年本所伸銅所においてアルミニウムおよびジュラルミンの製造研究に着手した。1924年には関東大震災で罹災した本所伸銅所から日光電気精銅所へ移転した製板設備をもって、アルミニウム板の本格的生産を開始した。ジュラルミンの研究は1926年完成の域に達し、同年6月陸軍航空本部から試作命令を受け、石川島造船所に納入された²³⁾。

4. 超ジュラルミン²²⁾

4.1 欧米における超ジュラルミン研究開発

4.1.1 14S系超ジュラルミンの開発

第一次大戦前のアルコアは地金生産工程の研究開発に重点を置いていたので、画期的な加工製品を開発したり、工業規模で生産したりする力を持っていなかった。また、アルコアの創始者の一人であるホール氏が中央研究所の創設といった考え方を拒否していたので、実験設備はないに等しいかあっても原始的なものであり、実験に従事する訓練されたスタッフもいない状況だった¹⁹⁾。1914年ホール氏が亡くなり、新しいアルミニウムの市場を開拓することを目指して体系的な研究計画を進める中央研究機関 (central research department) を設立することとなり、1919年 Technical Department が設立され、その下に Technical Direction Bureau と Research Committee (その中に Research Bureau) が設置された。一方で、アルコアは ACC (Aluminium Casting Company) のリナイト研究所 (Lynite Laboratories) を手に入れた。この研究所は当時、

米国では最高級の非鉄金属の技術者を抱えており、特に同所の所長であったザイ・ジェフリース博士 (Zay Jeffries, 1888-1965) は、高強度アルミニウムについての科学的解明がなされなくては本当の値打ちはわからない、そして冶金学的に書き記した指図書を見ればその製品ができるのではなくては意味がないと考えた。1920年リナイト研究所はアルコアの研究所に合併された。1930年、Technical Direction BureauとResearch BureauはNew Kensingtonに設立されたARL (Aluminum Research Laboratories, 1950年代、Alcoa Research Laboratoriesに改称) に統合された^{19), 20)}。

アルコアは17Sについてドイツからの過大なロイヤリティ支払いの要求や、過大な法廷費の支払いを嫌い代替合金の開発を研究者に要求した¹⁹⁾。研究者の方でもジュラルミンの強度をさらに向上させたいという要求は当然起きてくる。その最初は、1925年のアルコアのアーチャー博士 (R.S. Archer) とジェフリース博士の研究である²⁵⁾。彼らは、Siを0.5%以上添加する高温時効でジュラルミンより高い強度が得られることを報告している。西村博士によれば超ジュラルミン (スーパー・ジュラルミン) という名称は1927年、米国の機械学会 (ASME) のクリーブランドの講演会で、ジェフリース博士が引張強さ38~44 kg/mm²の強力なアルミニウム合金ができ、これを超ジュラルミンという名称で発表したのが最初と言われている²⁶⁾。アルコアは1928年、14S (Cu 4.4%, Mg 0.4%, Si 0.9%, Mn 0.8%) を開発した。14Sは焼入れ焼戻し (T6調質) で引張強さ49 kg/mm²、耐力42 kg/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^{21), 27)}。しかし英国ではT4ならびにT6の板材や押出材が広範囲に航空機材として用いられている²¹⁾。ドイツのデュレナ・メタルヴェルケ社の主任技術者であったマイスナー博士も1930年、英国の金属学会で講演発表し、論文名“The Effect of Artificial Ageing upon the Resistance of Super-Duralumin to Corrosion by Sea-Water”, “The Artificial Ageing of Duralumin and Super-Duralmin”として英国金属学会誌に投稿している^{28), 29)}。論文でSuper-Duraluminが出てくるのはこれが最初である^{30), 31)}。マイスナー博士の超ジュラルミンはCu 4%, Mg 0.5%, Si 0.8%, Mn 0.5%, Al残分という合金で、ジュラルミンと比較してケイ素が多い。この合金の板材の焼入れ焼戻し後の引張強さは50 kg/mm²近くなる。マイスナー博士は多分CuAl₂とMg₂Siの析出を組み合わせるとよく時効硬化すると考えてこのような成分を選んだと考えられる。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。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³²⁾。ドイツでは、前述のデュレナ社が従来の超ジュラルミン681ZB (Al-4.2%Cu-0.9%Mg-0.6%Mn-0.5%Si) とその強度10%向上させたDM31 (Al-4.2%Cu-1.2%Mg-1.2%Mn-0.5%Si) と称する超ジュラルミン合金を開発している^{33), 34)}。

4.1.2 24S系超ジュラルミンの開発

含ケイ素型超ジュラルミンに対し、24S (Cu 4.5%, Mg 1.5%, Mn 0.6%) がアルコアによって1931年開発された。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³²⁾。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49 kg/mm²、耐力35 kg/mm²で、17Sに比べ耐力が25%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³⁵⁾。そしてそのクラッド材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である²¹⁾。DC-3はDC-2に比して定員を5割増としながら、その運航経費は僅か3%ほどの増に過ぎなかった。それ以前のアメリカ合衆国の航空旅客輸送は、旅客運賃収入だけでは必要なコストを賄えず、連邦政府の郵便輸送補助金を受けることで何とか成り立っていた。ところがDC-3 (Fig. 12) は、その収容力によって、自らの運賃収入だけでコストをペイできた。郵便補助金に頼る必要のない「飛ばせば儲かる飛行機」の出現は、



Fig. 12 DC-3 fabricated with Alclad 24-T3 sheets.
<http://www.boeing.com/boeing/history/mdc/dc-3.page>

航空輸送の発展における重要なエポックであった。これはひとえに24S合金開発によるところが大きい。第二次世界大戦中には連合軍の軍用輸送機 (DC-3の軍用輸送機バージョン, 米軍用輸送機としての制式名称「C-47 スカイトレイン」, 英軍用輸送機としての名称「ダコタ」) として活躍し, 1945年までに一万機以上が製造された。連合軍欧州総司令官であり, のちにアメリカ合衆国大統領となったドワイト・D・アイゼンハワー氏 (D.D. Eisenhower) は, 第二次世界大戦の連合軍勝利に著しく寄与したのは「ダコタとジープとバズーカ砲である」と述べている。

4.2 日本における超ジュラルミンの研究開発²²⁾

4.2.1 各種の超ジュラルミン

日本においても, 1931, 32年頃になると飛行機の性能向上につれて, 材料の比強度の向上が要求された。1933年10月の陸軍航空本部技術部 (立川) への出張報告 (松田, 研究報告No.2270, 1933. 10) や「超Duralumin 見本提出ニ至ルマデノ二・三ノ試験」 (五十嵐, 中田, 研究報告No.2363, 1933. 12) をみると, この当時, 二種類の「超」ジュラルミンの試験結果が報告されている。五十嵐博士 (超々ジュラルミンの発明者, 五十嵐勇氏のこと。以下, 五十嵐博士と記す) らの報告では第一種超ジュラルミンとして, 試作合金名T241板材 (Cu:4.47%, Mg:0.73%, Mn:0.67%, Si:0.66%, Fe:0.37%) とT225板材 (Cu:3.89%, Mg:0.70%, Mn:0.62%, Si:0.66%, Fe:0.50%) の試験結果が, 第二種超ジュラルミンとして, T222板材 (Mg:6.06%, Zn:3.64%, Mn:0.49%, Si:0.17%, Fe:0.32%), T240板材 (Mg:6.04%, Zn:4.11%, Mn:0.45%, Si:0.16%, Fe:0.40%) の試験結果が報告されている。前者の第一種超ジュラルミンは含ケイ素超ジュラルミンで, 後者の第二種超ジュラルミンはAl-Mg-Zn系合金である。後者の合金系は1932年1月頃から住友でも松田孜 (つとむ) 博士らもAl-8.5%Zn-1.5%Mg-1.5%Mn合金を「超」ジュラルミンとして研究していたが, この出張時の合金は海軍技術研究所の五百旗頭 (イオキベ) 中佐の指示によるものである (「五百旗頭式超Duralumin 製作に関して海軍技術研究所へ出張報告」, 五十嵐, 研究報告No.2167, 1933. 8. 7)。この五百旗頭中佐の下に, 二年後超々ジュラルミンを五十嵐勇博士と一緒に開発することになる北原五郎技手がいた。

4.2.2 米国24Sの情報と調査

1933年頃には米国の24S合金の情報が入ってくると, 住友は海軍航空本部和田大佐からの「御注意」もあり, 9月にアルコア製の24SRT材を注文して, 12月には入

手しすぐに確性調査を行っている。12月の「米国製”24SRT”板 試験成績 (第1報)」 (研究報告No.2381, 1933. 12) では, 成分に関して, Al-3.98%Cu-1.59%Mg-0.46%Mn-0.16%Si-0.22%Feで, 「注意すべき点は, 普通のジュラルミンに比し, (1) Mgの量の非常に大なること, (2) Siの量の小なること, (3) Feの量の小なること, (4) 各板の成分よく一致せること, 等で, Mgは焼入状態における引張強さ, 降伏点を増し, 伸びをも増加する性質を有する点より特にその量を増加したるもの…」と記している。24SRT材は従来の超ジュラルミンよりも, Mg量が多く, Si量の少ないことが特徴であった。入手した材料は引張強さ48 kg/mm², 耐力40 kg/mm², 伸び16%であるが, 反復屈曲回数がかなり小さいことが指摘されている。これは焼入れ後常温圧延を行うことで耐力が上昇したことによるものと考えられた。

4.2.3 含ケイ素超ジュラルミン合金

アルコアの24Sを調査したにもかかわらず, 1934年当時の研究報告書を見る限り, 住友では, ドイツの681ZBやDM31合金と同様に焼入れ焼戻しする含ケイ素超ジュラルミンが研究開発の対象であった。前述の第一種超ジュラルミンをSD (Al-4.2%Cu-0.75%Mg-0.7%Mn-0.7%Si), またSA1 (Al-1.2%Mn-0.8%Cu) を被覆した合わせ板をSDCと称して, これらの合金を社内で制定したばかりで, これらの合金の評価を専ら行っていた。制定された時期は明確でないが, SDCの名称が研究報告書で初めて使われたのが1934年9月8日の報告書からである。1934年8月31日海軍航空廠にて, SDC研究会が開催されているが, ここでの議論も前述の含ケイ素超ジュラルミンSDC, 45 kgジュラルミン板材の特性評価と各種形状での強度試験結果についてであった (「SDC研究会概況」(8月31日海軍航空廠), 研究報告No.2731, 1934. 9. 18)。1935年2月の研究報告書 (松田, 研究報告No.2965, 1935. 2) をみると, 「超ジュラルミン及超ジュラルミンクラッドノ規格ハ板ニ就テハ, サキニ海, 陸軍相次イデ制定發布セラレ, 陸軍ニ就テハ, 最近更ニ, 管及棒ノ規格發布セラレ, 超ジュラルミンクラッドノ規格モ亦近ク發布ノ筈デアル。…参考トシテ米国の24S系合金ノ規格モ知ラレ居ル丈ケ収録シタ」とあり, SD, SDC規格制定の動向が書かれている。成分規格をみると, 海軍と陸軍で異なり, 海軍はCu: 3.5-4.5%, Mg: 0.4-1.0%, Mn: 0.4-1.0%, Si: 0.4-1.0%, Fe: 0.6%以下で, 陸軍はCu: 4.0-4.5%, Mg: 1.0%以下, Mn: 1.0%以下, Si: 1.0%以下, Fe: 0.7%以下である。クラッド材の被覆合金は, 海軍, 陸軍ともに同じで, Mn: 1.0-2.0Mn, Mg: 0.4-1.0%, Cu: 0.25%以下, Si: 0.3%

以下, Fe: 0.6%以下である。ちなみに, 米国の24Sは報告書によるとCu: 3.6-4.7%, Mg: 1.25-1.75%, Mn: 0.3-0.9%である。

4.2.4 24Sへの方向転換と超々ジュラルミンの研究開発開始

しかしながら, 1935年5月頃からの報告書を見ると, T3およびT3C合金の試験結果が報告されるようになる。「従来, SD及SDC板ニ代ワッテ, コノ数ヶ月以前カラ, 新配合ノT3(従来, SDヨリMg多シ)並ニ之ノ中味トスルT3C板ノ製造ガ開始セラレタ」とある(「T3及T3C板ニ就テ(第1報)」(東尾, 研究報告No.3200, 1935. 6)。住友軽金属の年表と符合する。T3押出材の成分はAl-4.14%Cu-1.36%Mg-0.68%Mn-0.14%Si-0.28%Feで, まさに24S合金である(武富, 研究報告No.3202, 1935. 6)。この頃から, 住友は超ジュラルミンに関して, 大きく舵を切ることとなる。当時, 松田孜研究部長のもとで副長をしていた田邊友次郎博士は7月31日付けの研究報告「所謂「超ジュラルミン」ヲ載ル」(研究報告No.3306, 1935. 7. 31)で次のように総括して今後の方向を述べている。

- 1) 超ジュラルミンには, 大別して, Al-Cu-Mg系, Al-Zn系, Al-Mg系があるが, 薄板の工業生産可能なものはAl-Cu-Mg系に限られている。
- 2) 現行のSD合金(筆者注: 含ケイ素超ジュラルミンのこと)は焼入れ焼戻しを行うが殆ど完璧に近い。Cu, Mgをさらに増加すれば, 多少靱性は犠牲となるが, より高い強度が得られる。
- 3) 米国の24Sは99.8%のような高純度地金が相当自由

に使える国柄で発達したものである。大勢ならば致し方ないが, 日本がこれを採用するには疑問を持つ。米国でも24Sは高価すぎて, 一般材として最近SD合金そっくりの27S(Al-4.5%Cu-0.8%Mg-0.8%Si)を採用したではないか。

- 4) そうは言っても, Mg量を1.5%まで上げたことはアルコア社の努力に深甚なる敬意を表せざるを得ない。かのデュレナ社もジュラルミンのMg量の範囲を0.2-0.7%から0.2-2.0%と上げている。世界の大勢に我等は盲目であってはならぬ。将来, 高級超ジュラルミンはSiフリー, Feフリーの字義通り, Al-Cu-Mg合金によって支配さるべきは確信にて疑わざる処。
- 5) 我等は, 我国は, 徒に24Sに心酔せず, 欧州各国の事例を参照し, 我国独自の立場を, 今しばらくとるべきではあるまいか。99.8%地金の輸入が途絶えた暁はどうするか, 深く思わざるべからず。
- 6) Al-Zn系, E合金(筆者注, 英国Rosenhain博士が開発, Al-20%Zn-2.5%Cu-0.5%Mg-0.5%Mn), Scleron(筆者注, ドイツVLW社が開発, Al-12%Zn-3%Cu-0.5%Mg-0.6%Mn-(0~0.1)%Li系), Constructal 8(筆者注, ドイツVLW社開発, Al-7%Zn-2.5%Mg-1%Mn-0.2%Si系)³⁶⁾など圧延が困難として, すでに過去の遺物となっているが, 再認識して合金開発すべきではないか。五十嵐君発見のAl-Zn-Li系は何とか完成させたいものである。Al-Mg系も地金純度が上がると可能性はあるので, 注目を忘れるべからず。

この直後に, 五十嵐勇博士の超々ジュラルミンの研究開発開始の意思を示した8月10日付けの「強力軽合金

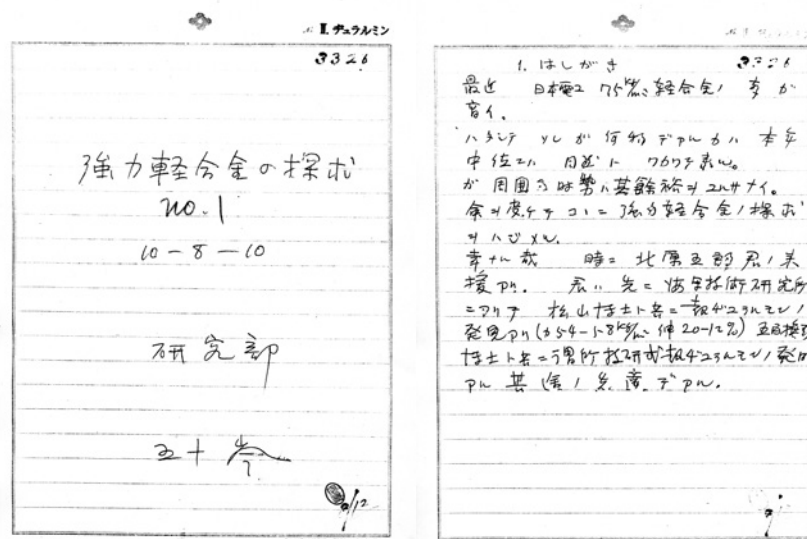


Fig. 13 Cover and preface of the first technical report about Extra Super Duralumin dated October 8, 1935, written by Igarashi²²⁾.

の探求 (No.1)」(Fig. 13, 研究報告No.3326, 1935. 8. 10) がでてくる。はしがきには次のように書かれている。「最近、日本電工75 kg/mm²軽合金の声が高い。はたして、それが何物であるかは本年中頃には自然とわかって来る。が、周囲の時勢は其余裕を許さない。命を受けて、ここに強力軽合金の探求をはじめ。幸なる哉、時に北原五郎君の来援あり。君は先に海軍技術研究所にありて、松山博士と共に超ジュラルミンの発見あり(力(原文のママ、筆者注、引張強さ)54-58 kg/mm², 伸び20-12%)。五百旗頭博士と共に、所謂、技研式超ジュラルミンの発明がある。其途の先達である」²²⁾。この報告書は海軍の要求に応じて60キロ級の超々ジュラルミンESDを開発するための宣誓書でもあった。

4.2.5 24Sの工業生産

その後、焼入れ焼戻し型の超ジュラルミンSD合金は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³²⁾。研究報告書からは、年表にあるように「24S系の工業化の研究に移り、昭和10年(1935年)4月ころ、それに成功した」といえるのかわからなかったが、24S型超ジュラルミンT3はSD、その合わせ板T3CはSDCと称されるようになった。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^{22), 23)}。

押出型材については、住友は1924年頃、クルップ社製1000トン横型水圧押出機を用いて、一辺が50 mm、肉厚3 mm以上のジュラルミンL型型材の製造に成功し、川西機械(株)の水圧機フロートの小骨に使用されたのが実用化の最初と言われている。1928年安治川から桜島に新工場を移転してからも前述の一基のみで需要がなかった。当時は大凡の形状を作り圧延と抽伸で仕上げたようである。1935年、Schleomann社製2000トン横型水圧押出機(複動型)が設置された。住友の超ジュラルミンSD(24S)は、1936年、全金属製低翼単葉機の九六式艦上戦闘機に採用され、軍用機全盛時代の需要期を迎えた。その後、1940年頃、3600トン横型水圧押出機が導入され、零戦主翼桁材向けの超々ジュラルミンESD大型型材の生産に用いられた^{23), 24)}。

5. まとめ、九試単戦の超ジュラルミンとその後

UACJの技術開発研究所(名古屋センター)に保管されている研究報告書から読み解いた結果、九試単戦に用いられた超ジュラルミンは、少なくとも24S系の超

ジュラルミンではないと考えられる。1934年当時は、焼入れ焼戻し型の含ケイ素超ジュラルミン押出型材が九試単戦の主翼桁材に用いられたものと推定される。24SはMg量が多く焼入れ焼戻し型の超ジュラルミンよりもさらに変形抵抗が高いため、量産には2000トンプレスが必要とされたのであろう。24Sが用いられたとすれば新プレスも導入された1935年後半と考えられる。1936年11月に制式採用された九六式艦戦の量産には間に合ったと思われる。この時期の海軍航空廠とやり取りした出張記録がないので詳細はわからないが、材料規格制定の問題もあり、方向転換には相当な指導があったものと推定される。田邊博士の研究報告書には、一時期ジュラルミンの研究開発に携わっていただけに、アルコアの後塵を拝したことに研究者としてその悔しさが窺えるように思える。この悔しさがその後の60キロ級超々ジュラルミンの開発に繋がっているように筆者には思える。もちろん、上司であった田邊博士と部下であった五十嵐博士ではその想いは違うと思うが。五十嵐博士は、1935年北原氏とともに短期間で集中的に研究開発を行い、翌年1936年6月9日、応力腐食割れを防ぐためにクロムを添加したAl-Zn-Mg-Cu合金、60キロ級超々ジュラルミンESDを発明し、その特許を出願した。クロム添加については1939年の特許公開とともに論文発表し、1939年大阪大学から工学博士の学位が授与された。一方、このESDは1937年には鑄造、圧延、押出、鍛造、二次加工などの実用化研究がなされた³⁷⁾。これらの結果を三菱の堀越氏らは聞きつけ住友金属桜島に向いて五十嵐博士らの説明を聞き、海軍航空本部へESDの使用許可を申請して即刻許可され、1939年の十二試艦戦の試作第一号機主翼桁材に採用された。1940年7月、十二試艦戦は制式機として採用され、「零式艦上戦闘機一一型」と名づけられた。最後に、木箱に「住友軽金属」と書かれていたが、1935年10月、住友金属は住友伸銅鋼管が住友製鋼所を吸収合併してできたので、九試単戦開発の1934年頃は「住友伸銅鋼管」と書かれるべきであろう。住友も、航空機用ジュラルミン、超ジュラルミン、超々ジュラルミンさらには鍛造プロペラ翅素材及びプロペラ完成品などの軍需品を受注することにより規模を拡大し、社名も変遷した。

参考文献

- 1) 宮崎 駿：スタジオジブリ絵コンテ全集19、「風立ちぬ」、徳間書店(2013)、463。
- 2) 宮崎 駿：アニメージュ・コミック・スペシャル「風立ちぬ」下巻、徳間書店(2013)、156。

- 3) 堀越二郎と零戦:歴史群像 8月号別冊, 学研パブリッシング, (2013).
- 4) 堀越二郎:零戦, その誕生と栄光の記録, カッパ・ブックス, 光文社, (1970)., 角川文庫, 角川書店, (2012).
- 5) 古峰文三:堀越二郎, 零戦への道, 丸, 8月号別冊, 潮書房光人社, (2013), 81.
- 6) 堀越二郎, 奥宮正武:零戦, 航空戦史シリーズ, 朝日ソノラマ, (198)., 学研文庫, 学研パブリッシング, (2013).
- 7) 堀越二郎:零戦の遺産, 光人社NF文庫, (1995).
- 8) 柳田邦男:零式戦闘機, 文春文庫, (1980).
- 9) 住友軽金属年表, 平成元年版, 住友軽金属工業株式会社, (1989).
- 10) 吉田英雄:超々ジュラルミンと零戦-超々ジュラルミン開発物語-(その1), 住友軽金属技報, **53** (2012), 60.
- 11) O.H. Duparc: Alfred Wilm and the beginnings of Duralumin, *Z. Metallkde*, **96** (2005), 398.
- 12) 牧野光雄:飛行船の歴史と技術, 成山堂書店, (2010).
- 13) P.W. Brooks: Zeppelin: Rigid Airships, 1893-1940, Smithsonian Institution Press, (1992), 58.
- 14) R.J. Anderson: The Metallurgy of Aluminium and Aluminium Alloys, Henry Carey Baird & Co., Inc., (1925), 266.
- 15) H.Y. Hunsicker: History of Precipitation Hardening. The Sorby Centennial Symposium on the History of Metallurgy, ed. by C.S. Smith, Gordon and Breach Science Publishers, (1963), 271.
- 16) 吉田英雄:四つのツェッペリン博物館とアルミのピアノ, 軽金属学会ホームページ, エッセイ, <http://www.jilm.or.jp/society/?mode=content&pid=207>
- 17) Ian Castle: London 1914-17, The Zeppelin Menace, Osprey Publishing, 2008.
- 18) 柘植久慶:ツェッペリン飛行船, 中公文庫, (2007).
- 19) 清水 啓:アルミニウム外史(上巻), 戦争とアルミニウム, カロス出版, (2002).
- 20) M.B.W. Graham and B.H. Pruitt: R&D for Industry, A Century of Technical Innovation at Alcoa, Cambridge, 1990.
- 21) T. T. Staley: History of Wrought-Aluminum -Alloy Development, Aluminum Alloys- Contemporary Research and Applications, Edited by A.K. Vasudevan and R.D. Doherty, Academic Press, (1989), 3.
- 22) 吉田英雄:超々ジュラルミンと零戦-超々ジュラルミン開発物語-(その2), 住友軽金属技報, **54** (2013), 264.
- 23) 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).
- 24) 竹内勝治:技術の歩み, 非売品, 住友軽金属工業株式会社, (1995).
- 25) R.S. Archer and Z. Jeffries: New Developments in High Strength Aluminum Alloys, *Trans. AIME*, 71 (1925), 828.
- 26) 西村秀雄:随筆・軽合金史(第20回), 軽金属時代, **No.191** (1950), 2.
- 27) W.A. Anderson: Precipitation Hardening Aluminum-Base Alloys, *Precipitation From Solid Solution*, ASM, (1959), 150.
- 28) K.L. Meissner: The Effect of Artificial Ageing upon the Resistance of Super-Duralumin to Corrosion by Sea-Water, *J. Inst. Metals*, **35** (1931), 187.
- 29) K.L. Meissner: The Artificial Ageing of Duralumin and Super-Duralumin, *J. Inst. Metals*, **35** (1931), 207.
- 30) 西村秀雄:アルミニウム及其合金, 共立社, (1941), 231.
- 31) J.D. Edward, F.C. Frary and Z. Jeffries: The Aluminum Industry, *Aluminum Product and Their Fabrication*, McGraw-Hill Book Company, (1930), 247.
- 32) 幸田成康:時効硬化研究の歩み, 合金の析出, 幸田成康監修, 1972, 丸善, 1.
- 33) 田邊友次郎:各国超ジュラルミンの現況, 住友金属工業・研究報告, 第2巻第10号(1937), 1021-1040.
- 34) 田邊友次郎:現代の工業用軽合金に就て(II), 日本金属学会誌, **1** (1937), 107.
- 35) T.W. Bossert: Development of 24S alloy extensively used in aircraft, *Metal Progress*, Jan. (1937), 42.
- 36) A. von Zeerleder: The Technology of Aluminium and its Light Alloys, Nordemann Publishing Company, translated from the 2nd German edition, (1936), 19.
- 37) 永田公二:わが国アルミニウム産業の明るい未来を拓くために, 軽金属, **60** (2010), 192., 244.



吉田 英雄 (Hideo Yoshida)
(株)UACJ 技術開発研究所