

## アルミニウム技術史：第5回

## ジュラルミンと Zeppelin 飛行船

吉田 英雄\*

## Duralumin and Zeppelin Airship

Hideo YOSHIDA\*

## 1. はじめに

アルミニウム技術史の後半はジュラルミン (Duralumin) の発明から超々ジュラルミン (Extra Super Duralumin) の発明まで20世紀前半のアルミニウム合金開発の歴史と航空機との関係を扱う。20世紀前半のアルミニウムの大きな市場は戦争とかかわりの深い航空機であった。このなかで高強度アルミニウム合金がどのように開発されていったかを振り返ることは今後の合金開発にも大いに参考になるものと思う。

## 2. ジュラルミン以前のアルミニウム合金の研究

金属材料では合金にすると硬くなるのはよく知られていたため、当時入手できるいろいろな純金属を組み合わせで合金化し強度を確認しようとした。まずは鋳物材の特性調査から始まりその後加工が可能かどうか圧延などで加工を行ってその材料の特性を調べている。これは19世紀末の有名な教科書 J. W. Richards の “Aluminium: Its History, Occurrence, Properties, Metallurgy and Applications, Including Its Alloys (Third Edition) [1896]” にも詳しい。この本では、アルミニウム合金として、Al-Sb, Al-Bi, Al-Cd, Al-Ca, Al-Cr, Al-Co, Al-Au, Al-Pb, Al-Mg, Al-Mn, Al-Hg, Al-Mo, Al-Ni, Al-Ni-Cu, Al-P, Al-Pt, Al-Si, Al-Se, Al-Ag, Al-Zn, Al-Zn-Cu に関する研究が報告され、特に Al-Cu 系と Al-Fe 系については新たに章立てて、詳細に述べてられている<sup>1)</sup>。ここでは主に、銅や鉄にアルミニウムを添加した Aluminium-Bronze (Cupro-Aluminium, アルミニウム青銅) や ferro-aluminium として脱酸剤や鋳鉄の黒鉛化剤などへの適用が主に述べられている。逆にアルミニウムへの添加についての記述は少ない。銅添加の引張性質への影響に関して、Al-6%Cu 合金圧延材で引張強さ 250 MPa (25 kg/mm<sup>2</sup>)、伸び 3.5%、焼鈍材が引張強さ 180 MPa (18 kg/mm<sup>2</sup>)、伸び 15.5% の結果が報告されている。そのほか、製造履歴が不明であるが、銅量を 0~8% 添加した合金の 1 mm 板の引張強さが報告されているのみである。

1905 年の A. Minet の “Production of Aluminum and Its Industrial Use-Primary Source Edition” (American Edition) においてもほぼ同様の記述である。この本の Part II には Aluminum and Its Alloys があり、合金の分類としては以下のようになっている<sup>2)</sup>。

(a) Pure Aluminum

(b) Heavy Alloys: Aluminum Bronze, Aluminum Brass

- (c) Alloys of Medium Density: Au-Al, Pt-Al, Pd-Al, Co-Al, Ni-Al, Ferro-silicon-aluminum  
 (d) Alloy of Various Densities: Al-W, Al-Mo, Al-Mg, Al-Sb  
 (e) Light Alloys (添加量 6% 以下): Al-3%Cu, Al-6%Cu, Al-Ni, Al-Ni-Cu, Al-Sn-Ni, Al-Ni-Fe, Al-Co, Al-Mn, Al-Mn-Cu-Zn, Al-Ti, Al-W, Al-Zn, Al-Cd, Al-Bi, Al-Sb, Al-Si, Al-Ag, Al-Sn, Al-Cr, Al-Hg

19世紀においては、アルミニウムの価格が高いため、装飾的あるいは建築工芸的な用途以外での実用的な用途は銅や鉄の添加元素としての役割しかなかったように思われる。表1に19世紀のアルミニウムの生産量を示す<sup>2)</sup>。1889年はアルミニウムの電解製錬が始まった年でその後生産量は、急速に増加していく。1855年、H. Sainte-Claire Devilleの研究によって地金が1000 fr/kg から375 fr/kg になった。その後、30 fr/kg

表1 アルミニウムの生産量 (1885~1900)<sup>2)</sup>, 単位トン

Year	アメリカ	スイス	フランス	イギリス	ドイツ
1885	1	—	2	1	10
1886	2	—	3	1	10
1887	8	—	2	1	15
1888	8	—	4	11	15
1889	22	—	15	34	15
1890	28	41	37	70	
1891	76	169	36	52	
1892	134	237	75	41	
1893	141	437	137		
1894	370	600	270		
1895	417	650	360		
1896	590	700	500		
1897	1184	800	500	300	
1898	1300	960	600	360	
1899	1500	1120	700	420	300
1900	1650	1232	800	500	500
Total Production	7431	6946	4041	1791	850

\*株式会社UACJ 技術開発研究所 (〒455-8670 愛知県名古屋市港区千歳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8月10日 受理日:平成27年9月11日

まで下がったが、電解製錬で一挙に3fr/kgまで価格が低下した。この価格になってアルミニウムは工業製品として利用されるようになった。1890年代になってから、台所用品として利用されたのがアルミニウムの最初の大きな用途であった<sup>3)</sup>。図1は1860年から1900年までの地金価格の推移を表している<sup>4)</sup>。ただし価格はイギリス通貨での表示である。N. F. Budgenは1860年から1900年の期間をアルミニウムのthe development eraと呼び、それ以後はthe industrial periodと呼び区別している<sup>4)</sup>。

京都大学の故 西村秀雄名誉教授<sup>\*1</sup>は戦後になって膨大な随筆集を残されている。そこには戦前から戦後にかけての世界のアルミニウム材料開発や研究の歴史が書かれていて、当時の研究の状況がわかり大変参考になる。教授の「随筆・軽合金史(其一)」<sup>5)</sup>には、「近代的な合金の研究はまず状態図の研究から始まっていると云える。その二元合金状態図についてはイギリスのRoberts-Austen, HeycockとNevilleの名を思い出すが、HeycockとNevilleによって発表された二元状態図を調べると、アルミニウム合金には次のようなものがある。

Al-Sn J. Chem. Soc. 57 (1890), 385.

Al-Zn 同上, 71 (1897), 389.

Al-Cu Philos. Trans. Roy. Soc. 189 (1897), 67.

Al-Au 同上, 194 (1900), 201.

フランスでも研究が行われているが、それにはGautier, Le Chatelierなどの名が見られる。これらの人々がAl-Sn, Al-Zn, Al-Sbなどの合金について研究発表し、それらがまとめられてContribution a l'etude des Alliaquesとして1901年に発行されている。」と記している。

工業的な利用については、「1909年の“Alloys and Their Industrial Application”の中でAl-15%Zn合金をCarl Zeissで製造してZiskonと称したこと、フランスではAl-6%Cu系合金が海軍の水雷艇に用いられたこと、Cuを3~5%含む合金が自動車にも利用された」ことが述べられている<sup>5)</sup>。アルミニウムへのマグネシウムの添加もすでに1900年以前に

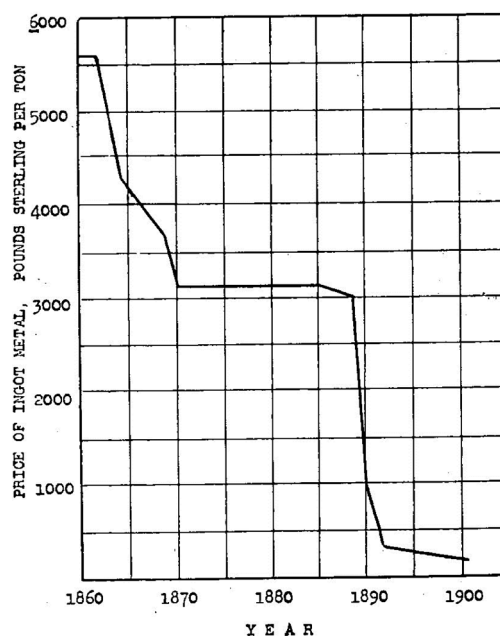


図1 アルミニウム地金の平均価格の変動(1860~1900)<sup>4)</sup>  
製錬は1889年までDevilleの化学的還元法で行われていたが、それ以降は安価なHall-Héroultの電解製錬法に切り替わった

行われていて、マグネシウムを15%まで添加していくと引張強さは徐々に上昇していくことがわかっていった。1899年L. Machがマグネシウムを3~30%含むアルミニウム合金をMagnaliumの名称で開発した<sup>6)</sup>。これはのちのマグネシウムを5~12%含むHydronaliumや56Sなどの合金に繋がっている。マンガン添加についても1906年にはマンガンが添加された3S (3003)がアメリカで開発された<sup>7)</sup>。

一方で、鋼が焼入れをすると硬くなる現象は古くから知られていたが、「焼入れによる鋼の硬化理論は1900年頃から研究が始められ、その第一歩としてFe-C等の状態図がRoberts-Austen, Osmondなどの実験的研究とRooseboomの理論から漸次明白にせられてきた。またGuilletはCu-Sn合金を熱処理して機械的性質を調べ、多少硬化する合金のあることを認めた。アルミニウム合金が同様の熱処理によって性質を改善することができるならばと考えるのは、鋼の焼入れ硬化が大きな課題であった当時としては、まず考えるべき課題であった」と西村教授は語っている<sup>8)</sup>。こうした時代背景のなかでいずれジュラルミン相当の材料が発明されるのは必然であったといえよう。

### 3. 時効硬化の発見

ドイツのAlfred Wilmは1901年、Berlin近郊の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152~225MPa(15.5~22.9kg/mm<sup>2</sup>)、伸び5~7%を得たが、真鍮の代替には及ばなかった。1903年この熱処理法で特許を申請した(DRP170085)。その後研究を続け、1906年時効硬化現象を発見した。この発見にまつわる次のエピソードは有名な話

\*<sup>1</sup>1892年京都市に生まれ、1918年7月京都帝国大学採鉱冶金学科卒業、三菱鉱業研究所に勤務後、約2年で母校に戻り、講師、助教授を経て1930年京都帝国大学教授に昇進、工学研究所長、工学部長を歴任後、1955年退官する。この間、金属材料学および金属加工学の講義および研究を担当する。退官後も財団法人応用科学研究所所長として人材の育成に尽力された。1962年日本金属学会賞、1963年本多記念賞を受賞、1970年日本学士院会員に選出、1968年勲二等旭日重光章が授与され、1978年に86歳で逝去された。村上陽太郎教授によると「絵や書をよくされ、平素はご多忙でゆっくり絵を描かれる時間的余裕もないが、たまの日曜日にとか夏休みなど暇を作っては描きになる。絵をご覧になることも好きであるので、展覧会等には研究室全部をつれて頂いて、先生からお得意のご説明を伺い、一向に知識のないわれわれにも楽しめる機会に恵まれた」とのことである<sup>29)</sup>。古河電工におられた田中道夫氏によると「先生がパリに御留学中一日お宅を訪問しますと、部屋中絵であり、冶金の学者の部屋のようではありませんでした」<sup>29)</sup>といわれるくらい絵画や書にも造詣の深い文化人でもあった。「軽金属時代」の「軽合金史」にも自らのスケッチを掲載していた。晩年には都会の喧騒を避け、小豆島に自ら設計した「碧水居」を訪ねては随筆などの執筆、書画などの創作をした。今回参考にした「軽金属時代」に発表された膨大な「随筆・軽合金史」等々は単行本として出版される予定だったが、「軽金属時代」の廃刊によって実現しなかったとのこと残念なことである。アルミニウムのみならず金属組織学、金属加工学が学問として確立し始めた頃の議論が今でも貴重で参考になる。是非、学会が中心になって復刻して欲しいものである。

である<sup>9),10)</sup>。

1906年9月のある土曜日、Al-4%Cu-0.5%Mn合金に0.5%Mgを添加した3mm厚みの板材を作成し、520°Cの塩浴炉で加熱後焼入れした。Wilmは午後の1時頃、退出間際の助手のJablonskiに硬度の測定を命じて計ったところ、その変化はわずかであった。その続きを翌々日の月曜日に行ったところ著しく増加していることに驚いて、測定器をチェックし実験を繰り返した。その結果、硬さが焼入れ後2時間まではほとんど変化せずにそれ以降4日間にわたって増加し、その後一定になることを確認した。この熱処理により、引張強さ390MPa(40kg/mm<sup>2</sup>)、伸び20~25%が得られた。

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、Magnalium合金に代表されるようにすで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D.R.P.244554(1909年3月20日申請, 1912年3月9日認可)の特許を取得した。特許請求範囲は「工程の最後に420°C以上に加熱し、少し成形加工する場合もあるが、常温に放置することを特徴とするマグネシウムを含むアルミニウム合金の処理方法」と書かれている。Wilmは先の2件を含めて4件の特許をアメリカで取得した<sup>12)</sup>。

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Dürener Metallwerke A.G.でジュラルミン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、Wilmの研究は中止となり、Wilmはジュラルミンを自分の手で工業化するために研究所と交渉の上、ジュラルミンの特許を彼の名義とし研究所を辞めた。幸いにもDürener Metallwerke A.G.がWilmの特許の使用権を得て、同社技術役員R. Beck博士の協力のもとで工業化に成功した<sup>10),11)</sup>。

1909年WilmとDürener Metallwerke A.G.の間でこの新製品に対する商品名の相談があり、Wilmは当初ドイツ語で硬いという意味のHartをつけた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Durを用いてDuraluminにした。Duraluminは地名のDüren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\*<sup>2),11)</sup>。Durが用いられたのはこの合金が初めてでなく、

\*<sup>2)</sup>Duraluminの語源については、小岩昌宏京都大学名誉教授の「名前の由来を探る」では、外国人はすべて「Hard(Hart)派」だが日本人はほとんど「Düren派」であるとのことである。この原因は濱住松二郎著「金属総論」(内田老鶴圃, 1927)の記述にあると小岩教授は述べている<sup>30)</sup>。それではということで外国の文献を調べてみると、アメリカのR. J. Andersonの有名な教科書, “The Metallurgy of Aluminium and Aluminium Alloys”(1925)の261ページに“Duralumin takes its name from the Dürener Metalwerke Aktien Gesellschaft, where heat-treatable light aluminium alloys were first produced.”<sup>18)</sup>とあるので、一概に濱住教授に責任があるとも思えない。

Dürener Metallwerke A.G.の開発した多くの合金のトレードマークとして“DuranaMetalle”がすでに国際的にも認知され用いられていたことも関係していた<sup>11)</sup>。

#### 4. A. Wilmの生涯<sup>11)</sup>

A. Wilmは1869年6月25日Lower SilesiaのHaynauに近いNiederschellendorfで生まれた。父は領地を所有し、母は大きな宝石商の娘であった。1886年Breslau(現在のポーランドのWroclaw)の王立専門学校(Königliche Gewerbeschule)に学んだ後、BerlinにあるCharlottenburg工科大学の化学の聴講生となり、特にJulius Weeren教授の下で理論的かつ実践的な講義を受けた。彼はまたKönigliche Eisengießerei(王立鉄鑄造工場)で初めて冶金学を習得した。さらにKasselの鉱山局で3か月の実習に参加してバリウム、ストロンチウム、カルシウムの分離法に習熟した。1893年11月1日Göttingen大学の助手となった。在籍した研究室はF. W. Wöhler(1800-1882)が50年間、研究と教育を行っていたところでその流れを引き継いでいた。1897年3月からEssenのTh. Goldschmidt社で働き、Hans Goldschmidtと一緒に金属アルミニウムで金属酸化物を還元するテルミット反応(aluminothermy法とも呼ばれる。また、この方法はHans Goldschmidtにより発明されたのでGoldschmidt法とも呼ばれる)を利用して酸化物からCr, Mn, Co, Ni, Taなどの金属を分離することを行った。

1901年春には、Essenの会社を辞めて、NeubabelsbergにあるStribeck教授が所長を務める理工学中央研究所に移った。1902年から、WilmはStribeck教授の厚い信頼を受けてアルミニウム合金の系統的な研究を開始した。1906年、Al-Cu-Mn合金に微量のMgを添加して焼入れすると硬くなることを発見し、特許を取得した。1909年Stribeck教授がEssenのKrupp社に移るために理工学中央研究所を辞めるまで合金成分や熱処理を研究した。Stribeck教授の後任の所長は粉末の専門家で高強度アルミニウム合金には関心を持たなかったもので、1909年出願の特許については、前述したようにWilm本



図2 軽金属学会事務局に飾られているHaas博士から贈られたWilmのレリーフ(Haas博士から石田二郎教授に贈られたもので、石田教授が当時の軽金属協会に寄贈)



人が特許権者となり研究所を辞した。

Wilmの晩年についてはドイツのアルミニウムセンター (Aluminium Zentrale) のM. H. Haas博士が1935~40年頃に詳しくまとめている<sup>9),13),14)</sup>。Haas博士によれば, Wilmは第一次世界大戦後の1919年, 妻と6人の子供たちとともに鶏を育てることに専念するために生まれ故郷のSilesiaの山村に隠遁した。養鶏でもアルミニウム合金で培ってきた方法で採卵鶏, 中でも白色レグホーンを改良して名声を得た。その後1937年8月6日, 68歳で亡くなったとのことである。1939年, 東京大学航空技術研究所教授 石田四郎先生がドイツに出張した際にHaas博士から贈られたWilmのレリーフが, 先生の遺志により軽金属協会に寄贈され, 現在, 軽金属学会事務局に飾られている (図2)。1939年の訪問のいきさつに関しては, 石田教授が, 「軽金属」に執筆されている<sup>15)</sup>。

## 5. Zeppelin飛行船

ジュラルミンはまず飛行船に用いられた。有名なZeppelin飛行船はFerdinand Adolf Heinrich August Graf von Zeppelin伯爵 (図3) によって発明された。彼は軍人としてアメリカの南北戦争を視察するためにアメリカに赴き, ミシシッピ川の河畔で偵察用の繫留気球に乗ったことが契機となり, 飛行船の開発を始めた。彼の行き着いた飛行船は20人も乗れる巨大なものであった。彼の構想を実現するために, 1890年ドイツ皇帝Wilhelm II世に飛行船建造を進言したが理解されず, 1890年陸軍少将を退役し, 彼は全財産を投じて1898年自ら飛行船建造会社を設立した<sup>16)</sup>。

Zeppelinの飛行船の基本構造は従来の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<sup>\*3</sup>を数個並べるといった硬式飛行船であった。その理由は, (1) 船体を金属の骨組みで作れば, 飛行船が大型になっても, また多少ガス囊がしぼんでも変形しないこと, (2) 水素ガス

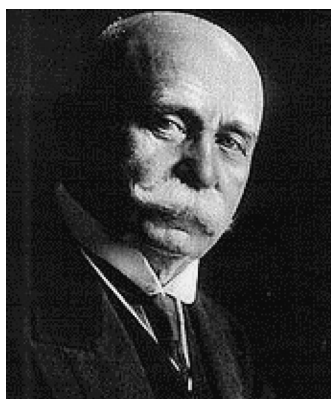
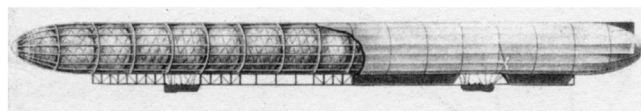


図3 Ferdinand Adolf Heinrich August Graf von Zeppelin伯爵  
([https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ferdinand\\_von\\_Zeppelin.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ferdinand_von_Zeppelin.jpg))

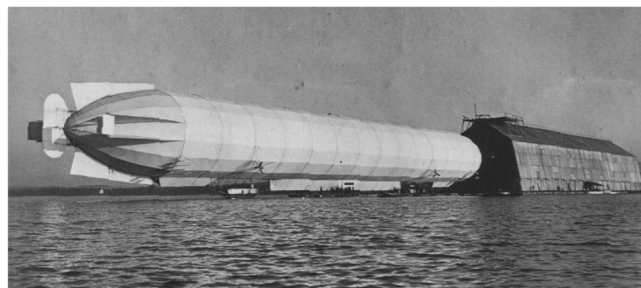
<sup>\*3</sup> 初期の飛行船のガス囊は, 木綿布の内面にゴムを薄く塗り, その上に牛の盲腸を切り開いて加工したゴールドピーターズ・スキンを特殊にかわで一重または二重に貼り, さらにその上に塗料を塗ってガスの漏洩を少なくしたものである。1頭の牛から得られる盲腸の大きさは700×150~1000×250mmであるから, 大型硬式船1隻, 例えば16個のガス囊を持ったR101 (イギリスの硬式飛行船) に必要な牛の盲腸は約15万頭分のことである<sup>16),17)</sup>。

を数個のガス囊に分散して詰めれば, その内の1つに穴が開いてガスが流出しても安全であることであった。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。Zeppelinは当時硬い合金と言われている亜鉛アルミニウム合金を採用した。亜鉛アルミニウム合金というのは亜鉛を20%程度含んだ合金のことである<sup>\*4,17),18)</sup>。

1900年6月, 全長128m, 直径11.65mのZeppelin第一号硬式飛行船LZ1<sup>\*5</sup>が完成した。Zeppelinは骨組みをジュラルミンに置き換える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, Zeppelinはこのためジュラルミンの採用を拒否した。図4はZeppelin飛行船LZ1の内部構造とボーデン湖上の格納庫から離陸するLZ4である。正24角形の筒状でアルミニウムの骨組みの上に羽布を張り, 内部に水素ガスを詰めた17個のガス囊を収納する



LZ1



LZ4

図4 Zeppelin飛行船LZ1のガス囊とボーデン湖上の格納庫から離陸する直前のLZ4<sup>21)</sup>

<sup>\*4</sup> スミソニアン国立航空宇宙博物館のフェローのP. W. BrooksのZeppelin: Rigid Airships 1893-1940. (Smithsonian Institution Press, 1992) の本の最後に, Notes (p. 187) として, 次のような記述がある<sup>18)</sup>。「Schwarzはアルミニウム製造業者のCarl Bergから供給された純アルミニウム (un-alloyed aluminum) で二隻の飛行船を建造したと信じられていた。これに対し, Zeppelinは多分, Bergのアドバイスを受けて, 硬い合金と時々言われている亜鉛アルミニウム合金 (Zinc-Aluminium alloy) を採用した。Zeppelin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。ジュラルミンというのは時効硬化型のアルミニウムで1908年ドイツのAlfred Wilmによって発見され, 1909年の遅くには工業的に実用化された。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。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, Zeppelinはこのため採用を拒否したが, Vickers社によって飛行船Mayflyに採用された。1914年までにジュラルミン部品が許容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。」なお, Zeppelin飛行船の一号機LZ1には純アルミニウムを用いたとしているサイトもある ([http://en.wikipedia.org/wiki/Carl\\_Berg\\_%28airship\\_builder%29](http://en.wikipedia.org/wiki/Carl_Berg_%28airship_builder%29))

<sup>\*5</sup> L: Luftschiff, Z: Zeppelin, LZはZeppelin社の機体製造番号。この番号とは別に, 第一次世界大戦中は, 陸軍はLZ (ただし生産数を秘匿するために30を加えた数字を用いた), 海軍はLで識別した。これに対し, Schütte-Lanz社の飛行船はSLで識別した。

構造であった。以後、40年間Zeppelinの飛行船はこの構造様式を踏襲した<sup>16)</sup>。組み立てはFriedrichshafenに近いボーデン湖上に浮かぶ格納庫で行われた。これには土地を購入する資金の問題もあったが、湖上では格納庫を回転させることができ搬出や搬入のときに横風を受けにくくすることができるメリットもあった。このLZ1は不幸にも400m上昇し、15分ほどボーデン湖上を飛び回ったところで、異常が生じ、船体が折れ曲がり墜落した。この失敗で、「狂人伯爵」とまで陰口をたたかれたが、それにめげることなく、1905年LZ2を建造した。そのころ皇帝は自国の海軍が英海軍に遅れを取っていることに懸念を抱き、空飛ぶ戦艦ともいえるZeppelin飛行船に期待をかけて国費を投じることを決め、1906年LZ3、1908年LZ4が建造された。これらの飛行船の成功とともにZeppelinは一躍「国民的英雄」となった。1908年9月、飛行船建造会社の「Zeppelin飛行船有限会社」をFriedrichshafenに設立し、翌1909年に世界初の旅客を専門とする商業航空会社「ドイツ飛行船運輸株式会社 (DELAG)」をFrankfurtに設立した<sup>16)</sup>。

イギリスの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、Dürener Metallwerke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Vickers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、Vickers社は、1911年、Wilmから製造の許諾を得て自らこの合金の生産を開始した<sup>11)</sup>。Vickers社は、イギリス、フランス、スペイン、ポルトガル、イタリアさらにアメリカで製造する権利を有した。

一方のドイツは、1914年までにジュラルミンで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<sup>17)</sup>ため、このアルミニウム合金は1914年、独海軍Zeppelin飛行船用に規格登録され、1914年のLZ26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<sup>19)</sup>。図5はFriedrichshafenにあるZeppelin博物館に展示されている飛行船の骨格とそのロール成形工程を示している<sup>20)</sup>。Mayfly号の失敗もジュラルミンのロール成形技術にあったようである。Mayfly号の製造に当たっては、ドイツで基本形状に加工された材料をイギリスに輸入したが、これらの75%は所定の形状にロール成形ができていないために用いることができなかったといわれている<sup>17)</sup>。ジュラルミンが飛行船に採用されるにはロールフォーミングの加工技術も進歩する必要がある<sup>17)</sup>。

飛行船の内部構造を図6に示す。この図はL30の船体の内部である<sup>21)</sup>。外皮を覆った後で、ガス囊の装着する前の状態である。ジュラルミンを用いた複雑な骨組みがわかる。1機あたりジュラルミンは約9トン使用され、1914年から1918年の間にZeppelin船88隻、Schütte-Lanz船20隻が建造された。Schütte-Lanz飛行船建造会社はZeppelin飛行船建造会社のライバル会社で、木材とベニヤ合板と接着剤で接合させた骨組みを持つ硬式船を作ったが、水に弱い構造的な欠陥があったため主として陸軍で用いられた。1918年以後のSchütte-Lanz船には、木材に代わってジュラルミン、主としてパイプが多用された<sup>16)</sup>。表2は世界の代表的な飛行船の仕



図5 Zeppelin飛行船骨格の一部とフレームのロールフォーミング工程 (FriedrichshafenのZeppelin博物館にて著者撮影)

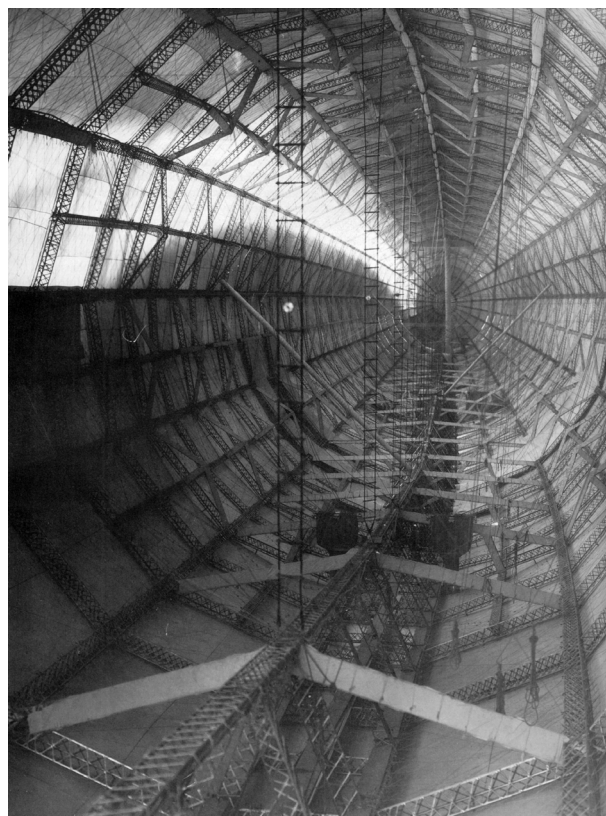


図6 Zeppelin飛行船LZ30の内部の骨格構造 (外皮を覆った後で、ガス囊が装着される前の状態)<sup>21)</sup>

様と機体に用いられた材料の一覧を示す<sup>17)</sup>。

## 6. Zeppelin飛行船と第一次世界大戦

第一次世界大戦では、ドイツは、イギリス、フランスに対して飛行船を用いた空爆を行った。Londonの初空襲は1915年5月31日の深夜に陸軍のLZ38により行われた。1915年から1918年の間の襲撃回数は、Parisでは3回であったが、



表2 Zeppelin 飛行船の仕様と骨格に使用された材料<sup>17)</sup>

APPENDIX 5: CHARACTERISTICS OF RIGID AIRSHIPS 203

### Appendix 5 Characteristics of Rigid Airships

Airship	Type	First flight	Gas capacity (cu m)	Gas capacity later (cu m)	Engines	Total max power (cv)	Length (m)	Diameter (m)	Spacing of main frames (m)	Cat cells	Empty weight (kg)	Typical gross lift (kg)	Empty weight as percentage of gross lift	Maximum speed (m/s)	Maximum range (km)	Crew/passengers	Main structural material	Number built	Remarks
Schwarz No.2		3.11.97	3,700	-	1 Daimler P1896	12	47.5	•	3.5	1	3,560	4,300	82.8	7.5	280	1	Aluminium	1	Crashed on first flight
Zeppelin LZ1	a	2.7.00	11,300	-	2 Daimler N1899	28	128.0	11.7	8.0	17	10,300	13,100	78.6	7.8	280	5	Zn-Al Alloy	2	
Zeppelin LZ2	b	17.1.06	10,400	12,200	2 Daimler H4L	160	128.0	11.7	8.0	16	9,250	12,050	76.6	11.0	1,100	7	Zn-Al Alloy	2	
Zeppelin LZ4	c	20.6.08	15,000	-	2 Daimler J4	210	136.0	13.0	8.0	17	12,750	17,400	73.3	13.5	1,450	11/14	Zn-Al Alloy	2	Later 3 engines
Zeppelin LZ6	d	25.8.09	15,000	16,000	3 Daimler J4F	360	148.0	14.0	8.0	18	13,550	17,400	77.9	16.7	2,000	7/10	Zn-Al Alloy	1	
Zeppelin LZ7 Deutschland	e	19.6.10	19,300	-	3 Daimler J4F	360	148.0	14.0	8.0	18	15,600	22,400	69.6	16.7	1,600	8/20	Zn-Al Alloy	2	Did not fly
Vickers No.1	f	(22.5.11)*	18,800	16,550	2 Wolseley	320	156.0	14.6	Var	17	19,900	20,500	91.3	(18.8)	(1,750)	22/-	Duralumin	3	
Zeppelin LZ10 Schwaben	g	26.6.11	17,800	-	3 Maybach A-Z	435	140.0	18.0	12.0	17	13,600	20,650	65.9	21.0	1,450	8/20	Zn-Al Alloy	1	
Schütte-Lanz S.L.1	a	17.10.11	20,500	-	2 Daimler J8L	420	140.0	18.0	8.0	18	19,100	21,800	81.1	19.7	1,060	12/-	Wood	2	
Zeppelin LZ11 Viktoria-Luise	b	14.2.12	18,700	19,500	3 Maybach B-Y	450	148.0	14.0	12.0	18	15,150	21,700	69.8	21.0	1,100	8/25	Zn-Al Alloy	1	
Zeppelin LZ14 (L1)	h	7.10.12	22,970	16,300	2 Maybach B-Y	540	158.0	14.9	9.0	17	17,900	21,700	68.3	21.0	1,100	8/25	Zn-Al Alloy	2	
Zodiac 13 Spies	i	9.9.13	27,000	16,300	2 Maybach B-Y	420	113.0	13.5	9.0	14	12,875	12,875	58.3	18.0	1,560	7/-	Wood	6	At first 1 engine
Zeppelin LZ18 (L2)	k	10.11.13	20,870	-	4 Maybach C-X	840	158.0	16.6	8.0	18	20,250	31,350	64.6	20.2	2,100	23/-	Zn-Al Alloy	1	
Zeppelin LZ21 (L3)	l	8.1.14	22,140	-	3 Maybach C-X	540	156.0	14.9	8.0	17	15,450	24,250	63.6	20.5	1,900	18/-	Zn-Al Alloy	1	
Schütte-Lanz S.L.2 (S.L.11)	m	28.2.14	25,000	27,000	4 Maybach C-X	720	144.0	18.2	12.0	15	21,000	29,000	72.4	24.5	2,100	19/-	Wood	2	
Zeppelin LZ24 (L3)	n	11.5.14	22,470	-	3 Maybach C-X	540	158.0	14.9	10.0	18	16,900	26,100	64.7	23.4	2,200	16/-	Wood	1	
Zeppelin LZ26 (ZX11)	o	14.12.14	25,000	-	4 Maybach C-X	840	161.2	16.0	10.0	15	16,800	29,000	57.9	22.5	2,500	18/-	Duralumin	12	
Schütte-Lanz S.L.3	c'	4.2.15	32,410	-	3 Maybach C-X	840	153.1	19.7	9.0	17	24,400	37,600	64.0	23.5	3,000	19/-	Wood	3	
Zeppelin LZ36 (L9)	p	8.3.15	24,900	35,800	4 Maybach C-X	940	161.4	16.0	10.0	15	17,800	28,900	61.6	23.6	3,300	16/-	Duralumin	22	
Zeppelin LZ38 (L10)	d'	3.4.15	31,900	-	4 Maybach C-X	1,200	163.5	18.7	10.0	18	24,900	37,000	56.3	26.7	4,300	18/-	Duralumin	2	
Schütte-Lanz S.L.6	q	19.9.15	35,130	-	4 Maybach C-X	940	166.5	18.7	10.0	18	24,900	40,700	61.2	25.8	4,300	16/-	Wood	12	
Zeppelin LZ59 (L20)	e'	21.12.15	35,800	38,780	4 Maybach H-S-Lu	960	174.0	20.1	10.0	18	23,650	41,550	57.0	26.5	4,300	16/-	Duralumin	10/12	
Schütte-Lanz S.L.8	f'	28.3.16	35,130	55,200	4 Maybach H-S-Lu	960	174.0	20.1	9.0	17	21,600	37,800	49.1	28.7	7,400	17/-	Wood	17	
Zeppelin LZ62 (L30)	r	22.12.17	55,500	-	4 Maybach H-S-Lu	1,440	198.0	23.9	9.1	17	31,600	63,800	49.1	30.1	7,400	17/-	Duralumin	2	Later 3 engines
Vickers No.9	s	1.4.17	55,500	-	5 Maybach H-S-Lu	1,200	196.5	23.9	10.0	18	28,100	64,500	43.6	27.7	10,400	23/-	Duralumin	2	
Zeppelin LZ61 (L43)	t	1.4.17	55,500	-	5 Maybach H-S-Lu	1,200	196.5	23.9	10.0	18	28,100	64,500	43.6	27.7	10,400	23/-	Duralumin	2	
Zeppelin LZ63 (L44)	u	22.5.17	55,800	-	5 Maybach H-S-Lu	1,200	196.5	23.9	15.0	14	25,000	65,000	38.5	29.9	13,500	19/-	Duralumin	10	
Zeppelin LZ65 (L48)	v	8.8.17	56,000	-	5 Maybach H-S-Lu	1,200	196.5	23.9	15.0	14	25,000	65,000	38.5	29.9	13,500	19/-	Duralumin	5	
Zeppelin LZ100 (L53)	w	10.9.17	56,000	-	5 Maybach H-S-Lu	1,200	196.5	23.9	15.0	14	25,000	65,000	38.5	29.9	13,500	19/-	Duralumin	10	
Schütte-Lanz S.L.20	x	19.9.17	56,000	-	4 Rolls-Royce Eagle	1,000	163.1	16.2	9.1	18	27,100	65,000	41.7	28.5	3,050	16/-	Wood	4	Later 3 engines
Zeppelin LZ102 (L57)	y	26.9.17	68,500	-	4 Rolls-Royce Eagle	1,200	228.5	23.9	15.0	16	27,400	79,500	34.5	28.6	16,000	22/-	Duralumin	2	
Admiralty R27 (21X class)	z	29.6.18	28,050	-	4 Rolls-Royce Eagle	1,200	164.3	16.2	9.1	18	25,000	30,575	76.6	36.4	12,000	30/-	Duralumin	2	
Admiralty R31	aa	1.7.18	62,200	68,500	7 Maybach Mb IVa	1,715	211.1	23.9	15.0	15	24,700	72,200	34.2	31.8	5,200	21/-	Wood	3	Later 6 engines
Admiralty R33	ab	1.8.18	43,975	-	6 Rolls-Royce Eagle	1,350	196.0	24.0	10.0	20	31,200	47,935	61.1	31.8	5,200	21/-	Wood	2	Later 5 engines
Zeppelin LZ120 Bodensee	ac	6.3.19	55,460	-	5 Sunbeam Motor IV	1,350	196.0	24.0	10.0	19	36,900	64,450	37.3	26.8	7,500	23/-	Duralumin	2	
Admiralty R30	ad	19.7.20	35,000	22,550	4 Maybach Mb IVa	980	120.8	18.7	12.3	12	13,650	23,400	36.9	36.8	1,400	10/21	Duralumin	2	
Vickers R80	ae	1.4.21	60,030	-	5 Sunbeam Cossack	980	162.0	21.3	10.0	15	22,000	38,890	53.1	26.8	10,300	20/-	Duralumin	1	
Admiralty R36	af	1.4.21	60,030	-	5 Sunbeam Cossack	980	162.0	21.3	10.0	15	22,000	38,890	53.1	26.8	10,300	20/-	Duralumin	1	
RAW R38 (ZR-2)	ag	23.6.21	77,600	-	2 and 2 Maybach Mb IVa	1,540	205.0	24.0	10.0	20	53,400	65,430	76.6	29.1	12,500	28/50	Duralumin	1	With passenger cabin
Zeppelin LZ126 Los Angeles	ah	4.9.23	60,915	-	6 Sunbeam Cossack	1,800	211.8	26.0	15.0	14	36,700	84,585	40.8	29.5	10,500	30/-	Duralumin	1	
Zeppelin LZ127 Graf Zeppelin	ai	27.8.24	70,000	-	6 Packard 1A-1551	2,000	207.3	24.0	15.0	20	35,100	64,740†	53.4	28.0	4,200	23/-	Duralumin	1	Later 5 engines
Metalclad ZMC-2	aj	18.9.28	75,000	-	5 Maybach VL1	2,650	236.6	30.5	15.0	16	47,200	81,300	52.0	35.6	12,500	28/20	Duralumin	1	Blaugas fuel
RAW R101	ak	19.8.29	5,720	-	2 Wright J-5 Whirlwind	440	45.5	16.0	Var	16	91,440	6,175†	67.1	27.7	1,100	3/-	Dural and Alclad	1	
AGC R100	al	14.10.29	141,540	156,000	5 Beardmore Tomado III	2,925	222.9	40.0	12.2	15	106,600	154,280	67.8	31.3	8,600	48/50	Dural and Steel	1	
Zeppelin LZ129 Hindenburg	am	16.12.29	146,970	-	8 Maybach VL2	4,020	216.1	40.5	15.9	16	130,000	232,000	56.1	37.5	16,500	40/50	Duralumin	2	
Goodyear-Zeppelin ZRS4 Akron	an	25.9.31	193,970	-	4 Daimler-Benz DB 602	4,200	245.9	41.2	15.9	16	130,000	232,000	56.1	37.5	16,500	40/50	Duralumin	2	

NOTES  
 1 Most published data on airships are unreliable and often contradictory. The figures in the above table are taken from what appears to be the most reliable source in each case and, as far as possible, are given in metric units.  
 2 The gas capacity quoted are intended to be for 100 per cent inflation of the lifting gas cells. However there are usually wide discrepancies in recorded figures for gas capacities. This is because of confusion with 'nominal capacity' (usually 95 per cent of full) and with the air volume of the hull. There are also frequent errors of conversion to and from metric units.  
 3 Typical gross lift is a notional figure derived from the assumption of 1,160 kg of lift per 1,000 cu m of hydrogen or 1,070 kg of lift per 1,000 cu m of helium, as the case may be.  
 4 Sometimes there were quite important differences between individual airships in one class.  
 5 Performance and load-carrying capabilities of airships are more sensitive to operating conditions, pilot technique, weather and climate than are heavier-than-air craft. Thus, for example, the disposable lift of R101 would have been reduced from its design value in Britain by no less than 11 per cent (30.4 per cent) in India.  
 6 There were different operating philosophies in relation to the use of dynamic lift. Zeppelin pilots apparently tended to keep their ships more in static equilibrium than some others; that is to say they made less use of the upward or downward force resulting from flying nose up or nose down. Use of dynamic lift had a serious adverse effect on speed.

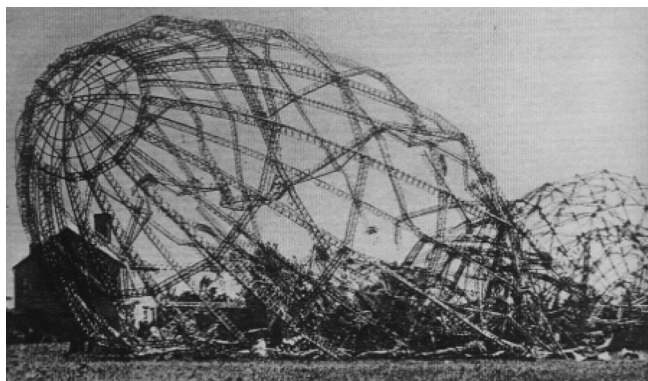


図7 Essex州 Little Wigboroughで不時着し焼却された LZ33の残骸<sup>22)</sup>



図8 波板状ジュラルミンを使用した全金属製旅客機 Junkers F.13 (©2006 Andi Szekeres)<sup>23)</sup>

Londonは51回に及んだ。London空襲で最大のものは1916年9月2日の深夜に行われた。この日は一度に陸海軍の飛行船16隻がLondonとその周辺を襲い、460発以上の爆弾を投下した。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。9月23日は12隻が出動し、その中で、Super Zeppelin (全長189m, 最大直径24m) と呼ばれる海軍のL30, L31, L32, L33がLondonを爆撃した<sup>22)</sup>。この中のL33は対空砲火と戦闘機の攻撃により北海を越えて帰還するのは不可能と判断し、24日、Essex州 Little Wigboroughに不時着した。乗員たちは船体の焼却を試みたが、ろうじて一部を燃やすことができただけだった。図7はEssex州で不時着し焼却されたL33飛行船の残骸である<sup>22)</sup>。

イギリスの技術者はその骨格を調査し、後日、国の飛行船R33およびR34を建設する際の基礎とした<sup>17), 22)</sup>。アメリカや日本もZeppelin飛行船の残骸を入手して、飛行船の製造を始めた。一方で、この飛行船による爆撃を阻止するために戦闘機の性能も向上した。

ドイツでは、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Junkers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属製旅客機F.13 (図8)<sup>23)</sup>も開発している。なお、Zeppelinは1917年3月肺炎がもとで急逝している。平時であれば国民的英雄として盛大な葬儀が催されたで

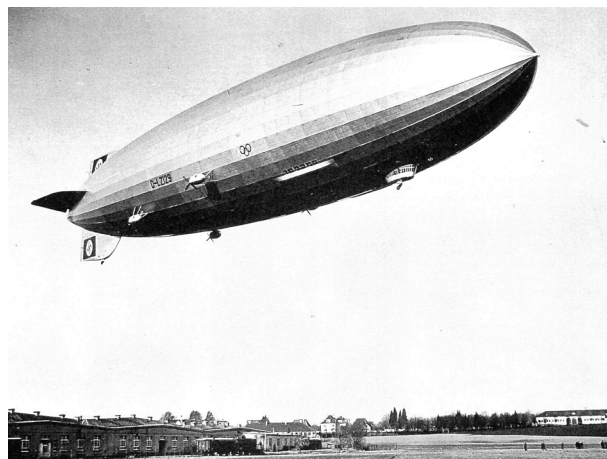


図9 機体側面にオリンピックマークを配したHindenburg号<sup>17)</sup>

あろう<sup>16)</sup>。

## 7. 第一次世界大戦後の飛行船

第一次世界大戦後は、飛行船は高高度で航続距離が長く、重量物を運べるのが長所 (有効搭載量はLZ127で30トン, LZ129で88トン<sup>16)</sup>) で、郵便や旅客輸送の手段として活躍する。1929年、全長236.6mのGraf Zeppelin (LZ127) 号<sup>17)</sup>はZeppelinの夢であった世界一周を果たす。Friedrichshafen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、アメリカのLos Angelesに向かった。1933年Hitler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Hindenburg号 (LZ129) を製造し、1936年完成した。全長245.0m, 直径41.2m, 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ニウム製のピアノまで積み込んだ近代的な設備であった<sup>16), 17), 20), 24)</sup>。五輪のマークを施したHindenburg号 (図9) 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、New Jersey州 Lakehurst海軍飛行場で着陸寸前、「Hindenburg号の悲劇」と呼ばれる爆発・炎上を起こした。この発火の原因は静電気放電説が有力である。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、ナチスドイツではすべての飛行船は解体され、航空機の機材に転用された<sup>16), 24)</sup>。

## 8. ジュラルミン発明のその後

Wilmの研究成果は、論文としてはMetallurgieに1911年発表された。その論文に掲載された3.5%Cuと0.5%Mgを含むアルミニウム合金の室温での時効硬化曲線を図10に示す<sup>25)</sup>。ジュラルミンの研究が発表されると、Wilmの論文は同年、Le Chatelierによりフランスの金属学会誌Revue de Métallurgieに、翌年にイギリスの金属学会誌Journal of the Institute of Metalsにその要約が掲載された。残念なことに、フランスは学会や工業界からの支持を得た研究組織が作られなかった。これに関して、西村秀雄教授は、「随筆・軽合金史 (其六)」



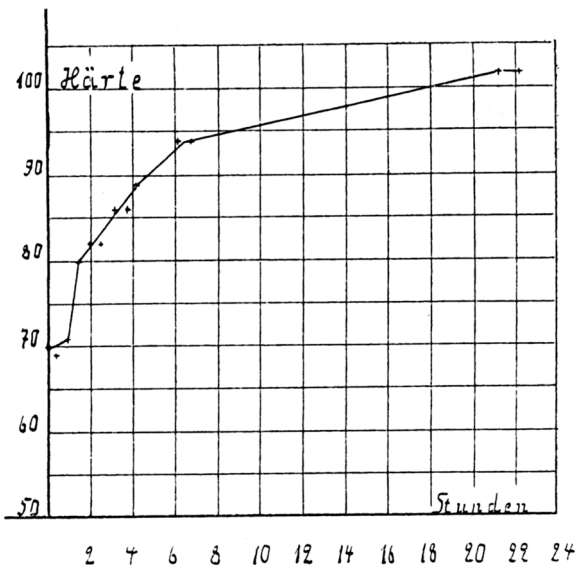


図10 Wilmによって論文発表されたAl-3.5%Cu-0.5%Mg合金の室温時効硬化曲線（縦軸：硬度，横軸：室温時効時間（h））<sup>25)</sup>

に、「ジュラルミンがドイツで生まれたためか，フランスではこの方面に関して1920年頃まで余り語るべき学術的な発表はない。元来，フランス人は創意に富んだ国民であって，近代的な発明とか発見に多くの名を残しているが，他の国ですでに研究したことなどを，追従することを好まないのである。この点はわが国と異なっている」と書いている<sup>26)</sup>。

イギリスは，National Physical Laboratoryの冶金部長であったW. Rosenhainらが，1910年，Al-3%Cu-1%Mn合金が優れた性質を有していることを報告している。ジュラルミンの成分がこの合金に近いので，この報告書のデータが利用されてジュラルミンができたものでドイツの発明ではないとの疑いがかけられた。こうしたなかで，1913年ジュラルミンはイギリスのVickers社の発明であるかのような記事がでてきて，Wilmは，直ちに“Improvement of aluminium and its alloys, and in particular Duralumin, for armament”と題して反論している。ここにWilmの発明に対する思いが込められているのでその内容を紹介する<sup>11)</sup>。

(1) この10年間，わが国の軍事当局者は，アルミニウムは非常に軽いためにアルミニウムを採用しようとしてきた。ところが軍部はアルミニウムの導入に関心をほとんど持たなかった。期待してもしばしば失望することが多いが，軍事の世界ではアルミニウムはその輝きを決して失ってはならず，たゆまない熱意で新しい実験がなされている。

(2) 小さな武器の改良や発射速度を増加させるにはおのずと弾薬の軽量化が問題となる。非常に重要なことは，ジュラルミンの存在はわが陸軍省にとって役立つものとなるということである。

(3) わが軍事当局者はアルミニウムが軍備品に寄与するとして，アルミニウムが果たすべき条件を発表し，わが国の国内産業は問題解決に着手した。

(4) BerlinとKarlsruheにあるドイツの武器弾薬工場は，主にBerlin近郊のNeubabelsbergの理工学研究所を通して仕事を行っていた。1902年，私はアルミニウムの大気中での耐食性向上とともに機械的性質向上の研究のために，この研究所

で正式な職を得た。

(5) それゆえ，ジュラルミンの発見はドイツでなされた長年の研究の結果である。それは，1906年にアルミニウムに他の金属を添加することと実用的な薬莖に必要な強度と硬さが得られる熱処理を組み合わせることによって成功した。

(6) ドイツにおいて，ジュラルミンはこの数年Dürenの鋳物工場で製造されてきた。この工場はドイツで製造販売する独占的な権利を有している。

英独のジュラルミン発明の先陣争いに関する論争はこれ以降も続く<sup>27)</sup>。なお，Rosenhain自身は，自分の著書“An introduction to the study of physical metallurgy”の1914年発行の初版では，Wilmの論文を引用しながらAl-Cu-Mnに0.5%Mg添加することで，室温で徐々に強度が増加する「奇妙な現象」を述べているので，Wilmの功績は認めていると思われる<sup>28)</sup>。肝心のドイツはWilmの研究を止めさせて，研究所は彼の発明を擁護しなかったことである。20世紀初頭，理論物理はもとより化学にも多くのノーベル賞受賞者を輩出しドイツの科学技術の発展には見張るもののあるにもかかわらず，なぜこのような事態になるのであろうか？ ドイツでは優れた科学技術を生み出した一方で，縦割りの官僚主義の弊害が内在していたことを意味するものと考えられる。

## 9. おわりに

ジュラルミンの発明は偶然Wilmによって発見されたかもしれないが，最初に述べたように時代背景を考えると発見は必然であったとも言えよう。結果論かもしれないが，約20年後に発明された超ジュラルミンはマグネシウム量を高々1%増やしたにすぎないのであるが，なぜWilmはそこまで到達できなかったのであろうか。特許では2%Mgまで許容しているにもかかわらずというのが，これを執筆しているの素朴な疑問である。逆に超ジュラルミンを発明したAlcoaはなぜできたのであろうか。著者はその理由のひとつに技術的なハードルがあったのではないかと考えている。ひとつは鋳造・圧延技術で，ふたつ目はジュラルミンがなかなかZeppelin飛行船に採用されなかった原因であるロール成形技術ではないかと考えている。マグネシウム量が1%増えるだけで，鋳造が難しくなること，加工硬化で熱間加工やロール成形が容易でなくなることがあったのではないかと推察する。逆にこれを克服して超ジュラルミンの工業化に成功したとすると，アメリカの生産技術のレベルの高さにあらためて驚く。得てして，我々のように企業内の研究者は現状の生産設備の枠の中で材料開発を考えてしまう傾向がある。これを打破しない限り新たな発展はないということであろう。

## 参考文献

- 1) J. W. Richards: Aluminium, Its History, Occurrence, Properties, Metallurgy and Applications, Including Its Alloys (Third Edition), Henry Carey Baird & Co., London, (1896), [Cornell University Library, Digital Collections]
- 2) A. Minet: The Production of Aluminum and Its Industrial Use-Primary Source Edition (American Edition), John Wiley and Sons, New York, (1905), [Nabu Public Domain Reprints]
- 3) J. H. Dunn and L. S. Sewell: Aluminum, Vol. II, Design and Application, ed. by K. R. Van Horn, ASM, (1967), 1.
- 4) N. F. Budgen: Aluminium and Its Alloys, Second Edition, Pitman Publishing Corporation, (1947).



- 5) 西村秀雄：随筆・軽合金史（其一），軽金属時代，No. 172 (1948)，2.
- 6) A. Zeerleder: The Technology of Aluminium and its Light Alloys, Nordemann Publishing Company, (1936), 31.
- 7) J. T. Staley: History of Wrought-Aluminum Alloy Development, Aluminum Alloys-Contemporary Research and Applications, eds. by A. K. Vasudevan and R. D. Doherty, Academic Press, Inc. (1989), 3.
- 8) 西村秀雄：随筆・軽合金史（其二），軽金属時代，No. 173 (1948)，7.
- 9) M. H. Haas: Aluminium, **18** (1936), 366.
- 10) 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，金属学への招待，アグネ技術センター，(1998)，95.
- 11) O. H. Duparc: Z. Metallkd., **96** (2005), 398-404.
- 12) 鈴木雄一：金属，**83** (2013)，1077-1084.
- 13) M. H. Haas: Aluminium, **17** (1935), 502.
- 14) M. H. Haas: Aluminium, **22** (1940), 497.
- 15) 石田四郎：基礎研究とその応用，軽金属，**22** (1972)，5.
- 16) 牧野光雄：飛行船の歴史と技術，成山堂書店，2010.
- 17) P. W. Brooks: Zeppelin: Rigid Airships, 1893-1940, Smithsonian Institution Press, (1992), 58.
- 18) R. J. Anderson: The Metallurgy of Aluminium and Aluminium Alloys, Henry Carey Baird & Co., Inc., (1925), 266.
- 19) 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.
- 20) 吉田英雄：アルトピア，No. 1 (2015)，17-25，四つのZeppelin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>.
- 21) D. H. Robinson: The Zeppelin in Combat, Schiffer Publishing, (1994), 21.
- 22) Ian Castle: London 1914-17, The Zeppelin Menace, Osprey Publishing, (2008).
- 23) <http://www.idflieg.com/junkers-f13.htm>, ©2006 Andi Szekeres.
- 24) 柘植久慶：Zeppelin飛行船，中公文庫，(2007).
- 25) A. Wilm: Metallurgie, **8** (1911), 225.
- 26) 西村秀雄：随筆・軽合金史（其六），軽金属時代，No. 177 (1949)，2.
- 27) R. Beck: Z. Metallkd., **16** (1924), 122.
- 28) W. Rosenhain: An Introduction to the Study of Physical Metallurgy, D. Van Nostrand, (1914), 158.
- 29) 村上陽太郎：西村秀雄先生退官功績記念会記事，軽金属，No. 16 (1955)，15.
- 30) 小岩昌宏：金属学プロムナード，アグネ技術センター，(2004)，139.