

# 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) \*

吉 田 英 雄\*\*

Sumitomo Light Metal Technical Reports, Vol. 53 No. 1 (2012), pp. 60-78

# Extra Super Duralumin and Zero Fighter

## —History of Extra Super Duralumin— Part 1

Hideo Yoshida

The history of the development of the Extra Super Duralumin is divided in three stages ; first, pre-history before the invention of the ESD, next, the invention of the ESD and its commercial production during World War II and finally, the development of high strength aluminum alloys after World War II. In this review, the pre-history of the ESD in the first stage is summarized, while the other stages will be reviewed in the next issues. For the pre-history, the following seven topics are described : (1) the discovery of aluminum and the establishment of its smelting method, that is, the experiments of aluminum extraction by Davy, Oersted and Wöhler, and the invention of Hall and Héroult, (2) the starting of commercial production in Europe and North America, (3) the discovery of the age hardening phenomena in the Al-Cu-Mg alloy, the invention of Duralumin by Wilm, (4) the application of Duralumin to the Zeppelin Airship, (5) the research and development of Duralumin, (6) the invention of Super Duralumin, and (7) the growth of aluminum industries during and after World War II.

### 1. はじめに

超々ジュラルミンは、戦前我が国で開発されたアルミニウム合金で英語名 Extra Super Duralumin の頭文字を取って ESD の名前で知られている。この合金は世界の名機と賞賛された零戦（零式艦上戦闘機）の主翼に使用され、太平洋戦争で零戦の材料を分析した米軍は日本のアルミニウム材料の優れた強度に驚き、早速米国のアルミニウム会社アルコアに類似合金 7075 を製造させた。この 7075 合金は戦後の世界の代表的な航空機用アルミニウム合金になった。ここでは 7075 合金の基となった ESD はどのようにして誕生し、どのように生産されたか、そして戦後の材料開発にどのように引き継がれてきたかその歴史を明らかにし、今後の材料開発のための参考にしてもらえればとの思いでまとめた。参考とした資料が住友軽金属（住友金属）に残されたものが中心であ

るために、ほぼ住友軽金属（住友金属）の歴史になっていることを最初にお断りしておかねばならない。また、発明者の五十嵐勇博士（1892-1986）については、筆者自身が直接お会いしたこともないので、五十嵐博士の執筆されたものや対談、薫陶を受けた方々がかかれたものから判断していかざるをえないこともあり、実際のところ、実像はよくわからないというのが実情である。入社以来、我々にとっては伝説の人で、幾分神格化された部分もあるかと思うが、ご容赦願いたい。また、戦前から戦後の軽金属学の歩みについて、奇しくも五十嵐博士と同年生まれである京都大学名誉教授西村秀雄博士（1892-1978）が「軽金属時代」に執筆された「随筆軽合金史」（1948～1952）、「統軽合金史」（1953～1954）、「海外に於ける軽金属学の進歩」（1955～1957）、「軽金属研究雑話」（1957～1959）などを参考にした。一方、生産技術に関しては元技術研究所、技術調査役、竹内勝治博士の執筆された「アルミニウム合金展伸材—その誕生から半世紀—」<sup>1)</sup>、「技術の歩み」<sup>2)</sup>等を参考にした。なお、西村博士の随筆集等は、それを掲載した「軽金属時

\* 本稿はアルトピア, Vol.40 No.7, No.8, No.10, No.11 に掲載したものに加筆して転載したもの

\*\* 研究開発センター 常務研究員, 博士 (工学)

代」が一部アルミニウム協会に保管されているが、それを元に竹内博士が上記文献を執筆されるときに集録したもので、住友軽金属の図書室に保管されている。あらためて竹内博士に感謝の意を表します。

## 2. 超々ジュラルミン前史

### 2.1 アルミニウムの発見とその製錬法の確立

前史としてどこまで遡ればよいかは、いろいろ考えられるが、そもそもアルミニウムが登場するのは19世紀になってからでまだ新しい金属であるので、簡単にこの発見の歴史から述べる。往時ローマでは渋い収斂性のある物質を *alumen* と呼び、薬剤、染色、木材の耐火剤等に用いられていた。この *alumen* はたぶんアルミニウムと硫酸第一鉄との混合物に多少の不純物を交えたものであったろうと考えられている。12世紀頃には *alumen* の良質なものを *alum* (明礬) (注1) と称し、13世紀頃イタリアで製造された。18世紀、フランスの化学者ルイ・ベルナル・ギトン・ドゥ・モルボ (Louis-Bernard Guyton de Morveau, 1737~1816) は、*alum* は礬土の塩類 (*sel alumineux*) であるから、礬土は *alumine* と称すべきとし、英国では *alumina*、ドイツでは *Thonerde* と呼ばれた<sup>3)</sup>。これは今日の酸化アルミニウムのことである。その後、1782年ラボアジエ (Lavoisier) は、アルミナは多分ある金属と酸素の化合物であるが、その酸素との親和力は非常に強いために炭素やそのほかの還元剤では還元できないであろうと言った。1808年英国のデーヴィ (Sir Humphrey Davy) は、明礬 (*alum*) に因んでその金属にアルミアム (*aluminium*) という名を与えた。その後アルミナム (*aluminum*) に改称、さらにその後フランスのドヴィル (Henri Etienne Sainte-Claire Deville) によりアルミニウム (*aluminium*) と正式に命名される。以後、*aluminium* が一般的であるが、*aluminum* は主に米国で用いられるようになった。(注2)

(注1) 明礬は一価の陽イオンの硫酸塩と三価の金属イオンの硫酸塩の複合塩の総称である。一般にはカリウム明礬をさし、化学組成は  $\text{AlK}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  と記される。その他、鉄明礬、 $\text{KFe}^{3+}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$  などがある。大分の明礬温泉では、明礬の原料となる「湯の花」(硫酸礬土) を販売している。「湯の花」の主成分はハロトリカイトという鉱物で、化学的には鉄とアルミニウムの硫酸塩。江戸時代、「湯の花」から大きな明礬の結晶をどのように作っていたかは秘伝にされていたため、現在その記録は残されていない。最近、それを復活させた別府大学教授恒松柘氏の研究がある。詳細は筆者が軽金属学会ホームページに寄稿したエッセイ <http://www.jilm.or.jp/society/?mode=content&pid=139> を参照のこと。

(注2) 米国では1828年の Noah Webster's Dictionary が *aluminum* を採用しているが、1890年代半ばまでは両方が使用されていた。公式には1925年 The American Chemical Society が *Aluminum* を採用したことによる。一方、世界的には The International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) が公式に *aluminium* を採用し、現在は論文でも両方が用いられている。 <http://www.worldwidewords.org/articles/aluminium.htm> を参照のこと。

デーヴィは、アルミナ中の金属をヴォルタの電池を使って抽出しようと試みたが成功しなかった。その後1825年デンマークのエールステッド (Hans Christian Oersted) が塩化アルミニウムとカリウムアマルガムから金属アルミニウムを初めて取り出したと言われている。1827年にはドイツのヴェーラー (Frederick Wöhler) が塩化アルミニウムとカリウムを反応させてアルミニウムを分離した<sup>4,5)</sup>。

1854年にはフランスのドヴィルはカリウムに代わって価格の安いナトリウムによって塩化アルミニウムを還元しアルミニウムを分離した。ドヴィルは皇帝ナポレオン三世のあと押しを得て、1856年、パリ郊外に生産能力2トンの工場を作り、これが最初のアルミニウム製錬工場となった。ドヴィルの作ったアルミはパリ万博で「粘土から得た銀」(*l'argent issu de l'argile, the silver from the clay*) と呼ばれ、非常に高価なものであった。もともと甲冑を軽くしたいとの思いを持っていたナポレオン三世は大のアルミ好きで、特に大切な客には金や銀ではなくアルミ製フォークやナイフ、スプーンで接待したとの逸話は有名である。しかしながら、ドヴィルの化学的還元法では、まだまだ高価なナトリウムを用いなければならないことと、不純物の鉄やケイ素が多くなり、耐食性に乏しいため用途が限られるといった問題があった。このため電気化学的に抽出する方法も試みられたが、大量の電力を必要としたため工業的には実現しなかった。おりしも1870年発電機がベルギーのグラムによって発明され、1878年には英国で世界最初の水力発電が行われた<sup>6)</sup>。

1886年2月23日、米国の23歳のホール (Charles Martin Hall) は電気分解によるアルミニウムの製造に成功した。彼はオハイオ州オーバリン大学 (Oberlin College) で指導教官の F. F. ジュウェット (Frank Fanning Jewett) 教授 (注3) の下でアルミニウムの分離に取り組み、1885年に大学卒業した後も研究を継続していた。彼の方法は氷晶石を溶剤にしてアルミナを溶かし、その熔融塩を電気分解してアルミニウムを還元抽出するという画期的な方法であった。1795年グリーンランドで発見された氷晶石は、アルミナの融点 (2,050°C) を1,000°C 以上も下げ、980~1000°C で熔融することができ、アルミニウムの製造を容易にした。ホー

ルの発明とほぼ同時に、フランスのエルー (Paul Louis Toussaint Héroult) も同じ方法を見出した。エルーはサント・バルブ学校でドヴィルのアルミニウムの研究のことを学び、15歳のときに彼の有名な論文を読んだ。1885年相続した小さななめし革工場の蒸気機関とダイナモを利用してさまざまなアルミニウム化合物の電気分解を試みた結果、アルミニウムの分離に成功した<sup>4)</sup>。ホールの方法は1889年に米国で、エルーの方法は1888年フランス、ベルギー、イギリスなどで特許が取得された。彼らの方法は実質的に同じ方法なので、「ホール・エルー法」と呼ばれている。彼らは同年の生まれで、発見も同年、亡くなったのも同じ1914年で歴史の偶然である。

Fig. 1はホールとエルーの写真である。

(注3) F. F. ジュウエット, 1844年生まれで、イエール大学で化学と鉱物学を学び1870年卒業, 1873年から1875年, ドイツのゲッチンゲン大学で化学を研究し, アルミニウムの分離に成功したヴェーラー教授と出会った。1876年イエール大学総長から東京大学で科学を教えるよう推薦され, 翌年東京大学の教壇に立った。1880年, 日本を離れ, 36歳でオーバリン大学の化学・鉱物学の教授となった。ホールは大学に入学してジュウエットと会い, ヴェーラー教授からもらったアルミニウムの小片を見せられ, 「アルミの経済的製法を発明したものは人類に恩恵を与えるだけでなく, 巨万の富を得ることができるだろう」といわれ, ホールのアルミに対する関心はいっそう深まったとのことである (小寺純雄, C. M. ホールの師, F. F. ジュウエット, その来日120年に憶う)<sup>7)</sup>。

アルミニウムの原料であるアルミナに関しては, 1888年, オーストリアのバイヤー (Karl Josef Bayer) によってボーキサイトからアルミナを製造するバイヤー法が発明された。これはボーキサイトを苛性ソーダに溶かし, アルミン酸ナトリウム液とし, これを加水分解し水酸化アルミニウムを晶析させ, これを焼成し水分を除去してアルミナを製造する方法である。アルミナは明礬石



Fig. 1 C. M. Hall (left) and P. L. T. Héroult (right).

だけでなく, 霞石, 礬土頁岩などいろんな鉱石に含まれているが, ボーキサイトには特にケイ酸が少なく, アルミナが約50%以上含まれている。ボーキサイトは1821年フランスのレ・ボー (Les Baux-de-Provence) (注4)でベルティエ (Pierre Berthier) により発見されボーキサイト (bauxite) と名づけられたが, 現在ではオーストラリア, ギニア, ブラジル, ジャマイカといった熱帯で雨が多く, 風化作用の大きい地域で多く産出されている。このようにしてアルミニウムが大量生産できる段階となった<sup>8,9)</sup>。

(注4) レ・ボーはフランスのプロバンス地方, アルル (Arles) とアビニョン (Avignon) の中間に位置し, 小高い白い岩山の上にボー族が支配した城跡が残っている。筆者はなぜここでボーキサイトが発見されたのかを確かめたくて, 2006年6月ここを訪れた。詳細は「軽金属」に書いた「レ・ボーを訪ねて」を参照のこと<sup>10)</sup>。この城跡は観光地になっていて, その案内書には風景の中で赤茶けた場所 (○印で囲んだところ) が採掘地点と書かれている (Fig. 2)。なお余談ではあるが, ここは松本清張の小説「詩城の旅人」(日本放送出版協会, 1989年)の舞台でもある。

## 2.2 アルミニウムの工業の形成<sup>11)</sup>

エルーは新しい溶融塩電解法の工業化のため, 最初は化学的還元法でアルミニウムを製造していたアレ・カマルグ社 (Produits Chimiques d'Alais et de la Camargue) の A. R. Pechiney に特許を売ろうとしたが断られたため, まず1888年スイス資本とドイツ資本の合弁でアルミニウム・インダストリー社 (Aluminium Industrie A. G. 略称 AIAG, 後のスイスアルミニウム) を設立し, スイスのノイハウゼン (Neuhausen) に工



Fig. 2 Mining place of Bauxite indicated by the circle near the ruined castle of Les Baux de Provence.

場を建設し、ライン川の瀑布を利用した水力発電でアルミニウムの生産を始めた。その後、フランスの Société Électrométallurgique Française (のちのユジューヌ (Ugine) 社) に実施権を与えグルノーブルの近くのフロージュ (Froges) に 1889 年最初のアルミニウム工場を設立した<sup>5)</sup>。A. R. Pechiney は、フロージュでの生産に危機感を覚え自らの会社を閉め、電解法での生産に変えるため、1897 年フロージュの会社を買収し、1921 年、アレ・フロージュ・カマルグ社 AFC (Compagnie des Produits Chimiques et Électrométallurgique d'Alais, Froges et Camargue, その後ベンネー (Pechiney) 社) と名称を変更した<sup>12)</sup>。イギリスでも、1894 年ブリティッシュ・アルミニウム社 (British Aluminium Co., Ltd.) が設立され、エルーの特許を譲り受けてスコットランドのフォイヤーズ (Foyers) で生産を始めた。アルミニウム生産量は 1890 年には 150 トンであったのが、1900 年には 4100 トンまで増大し、アルミニウムの価格もこの 10 年間で 1/8 程度まで低下した。エルーの特許が切れると多数の企業が操業を開始した。欧州では 1913 年には 11 企業、20 工場に達し、世界生産の 57% を占めるようになった。

一方、ホールは 1888 年 7 月 31 日にピッツバーグで新会社を設立した。当初、ピッツバーグ・アルミニウム社 (Pittsburgh Aluminium Company) としたが、二ヶ月後の 1888 年 10 月 1 日にピッツバーグ・リダクション社 (The Pittsburgh Reduction Company) に変更<sup>13)</sup>、

1907 年には今日のアルコア (Aluminum Company of America = ALCOA) に改称した。面白いことにこの会社の最初の名に Aluminum でなく Aluminium が用いられていることで、当時、米国でも両方の綴りが用いられていたことを物語っている。この会社が Aluminium を用いたのは、印刷屋が同社の或る便箋に Aluminium の i を不注意で抜かしてしまったが、その印刷屋が倒産してしまい刷りなおすための 300 ドルを支出するよりこのまま使おうと決めたからだとの真偽のほどはわからぬ逸話が残っている<sup>14, 15)</sup>。同社は 300 ドルの支出さえまかならないのが実態だったそうである。1888 年 12 月、日産 6 ポンドの生産であったが、その後、さらに新工場を建設して、1900 年には 3200 トンにまで増加した。電力は当初火力発電であったが、その後低廉な水力発電に切り替えた。1893 年ナイアガラ・フォールズ電力会社 (Niagara Falls Power Co.) から電力を買っていたが、1896 年にはこの会社を買収した。Fig. 3 はナイアガラの滝にある発電所とピッツバーグ・リダクション社の製錬所の様子を描いた絵画である<sup>16)</sup>。その後、各地の電力会社を買収して生産を拡大した。ボーキサイトについても当初はアルミナを購入していたが、原料の確保が重要になり、全米のボーキサイト会社を買収して、ボーキサイトの鉱床を独占していった。1899 年にはアルコアはカナダ、シャウィニガン (Shawinigan) に製錬工場を建設し、1901 年操業を開始した。この工場の生産はノーザン・アルミニウム社 (Northern Aluminium Co.) が行い、1925 年に社名をアルキャン

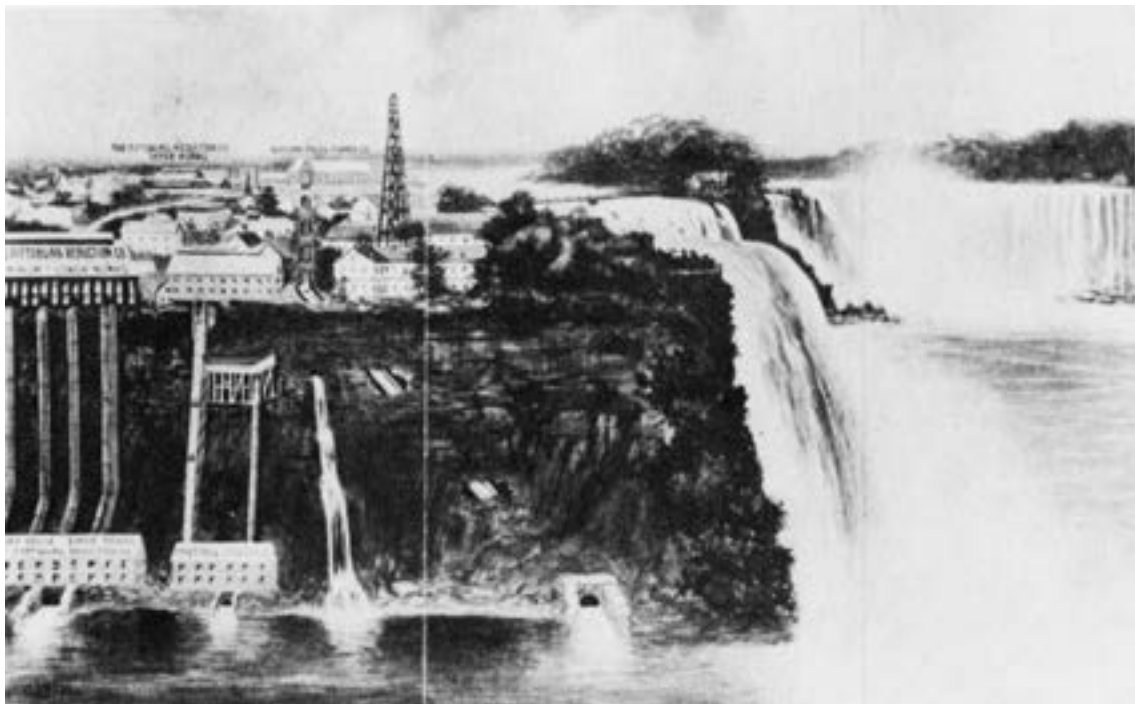


Fig. 3 Drawing of the upper works of the Pittsburgh Reduction Company adjacent to the at Niagara Falls Power Company and the two house of the lower works spanning the cliff face, circa 1900<sup>16)</sup>.

(Aluminium Company of Canada = ALCAN) に改称した。アルコアによる独占体制に対する批判が1920年代に盛り上がり、同社は政府の勧告を受け入れ、1928年にカナダにアルミニウム・リミテッド (Aluminium Limited Co., 1966年アルキャン・アルミニウム・リミテッド, Alcan Aluminium Limited と改称) を設立し、持株を新会社へ移管した。ノーザン・アルミニウム社 (ALCAN) はその中核会社となった。北米のアルミニウム生産量は1900年の3200トンから1913年には27400トンと急激に増加した。1900年頃のアルミニウム市場は家庭用器物が50%、ついで鉄鋼脱酸剤が25%であったが、その後送電線、自動車部品、機械部品、容器の蓋などに利用されるようになった。

日本においてアルミニウムの利用は軍需品から始まった。1894年、当時の陸軍は飯ごう、水筒その他携帯用軍装品にアルミニウムを使用することを決定し、地金を輸入して、東京および大阪砲兵工廠で生産を開始した。1898年、住友伸銅場は大阪砲兵工廠から圧延を請け負って、輸入地金を受け取り圧延して板として納入した。この頃、アルミニウムは最初、陸軍がつけた名前で「礬素」と呼ばれていたが、通りが悪いので、新たに銀のように美しく、銀よりも軽い「軽銀」という名前が考案された<sup>4,5)</sup>。明治30年代になると民間でもアルミニウム什器が製造されるようになり輸入地金は1900年の100トンから1912年には約1000トンへと増大した。第一次世界大戦の開始で欧州からの地金の輸入が中断したが、その間隙を縫ってノーザン・アルミニウム社が日本に進出し、日本の市場はアルキャンの支配下に入った。1920年には、国内需要の増加とともに、大戦で欧州からの輸入が困難となった東南アジアへの器物輸出が増えて地金消費量が2000トンへと増大した。

### 2.3 ジュラルミンの発明

1890年代、欧米ではAl-Sn, Al-Zn, Al-Cu, Al-Auなどの二元合金状態図が研究されていた<sup>17)</sup>。アルミニウムも鉄や銅と同様に合金にして強度を高めることが行われた。現在、添加元素として多く用いられているマグネシウムは、1808年英国のデービーが電気化学的方法により硫酸マグネシウムから水銀を用いて分離して得られたのが最初である。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た。1899年マッハ (L. Mach) がマグネシウムを3~30%含む合金をマグナリウム (Magnalium) の名称で開発した<sup>18)</sup>。これはのちのマグネシウムを5~12%含むヒドロナリウム (Hydronalium) や56Sなどの合金に繋がっている。1906年にはMnが添加された3S (3003) が米国で開発された<sup>19)</sup>。

ドイツのウィルム (Alfred Wilm) は1901年、ベルリンの近く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15.5~22.9kg/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。この発見にまつわる次のエピソードは有名な話である<sup>20,21)</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℃の塩浴炉で加熱後焼入れした。ウィルムは午後の1時頃、退出間際の助手のヤブロンスキー (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1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、マグナリ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。

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、ウィルムの研究は中止となり、ウィルムはジュラルミン (Duralumin) 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、同社技術役員のリック博士 (R. Beck) の協力のもとで工業化に成功した<sup>21,22)</sup>。(注5)

(注5) 戦前、プロペラ技術導入のためにヤマハから

1941年ドイツに派遣されていた佐貫亦男元日大教授は、1981年、その数年前倒産して操業停止したデュレナ・メタルヴェルケ社を訪問している。「なぜ、ジュラルミンの生みの親のデュレナ・メタルヴェルケ社が倒産したか、アメリカのアルコア社などは、まだ栄えているのに」との疑問を持って訪問したが、明確な回答が得られず、何か小さい企業がこの大廃墟の中で細々と作業していて、これがあのデュレナ・メタルヴェルケ社のなれの果てかと思ひ写真を撮影したとの話が「ジュラルミンの誕生」に掲載されている<sup>23)</sup>。この佐貫博士の話を知らずに、筆者も2008年Aachenで開催されたICAA11に参加した際にDürenの同社を訪問しようと考えたが、ネットで調べても連絡先がわからず断念した。

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、ウィルムは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Duralumin (Dürener-Alumin) よりDur-Aluminとして理解しているとのことである<sup>22)</sup> (注6)。

(注6) Duraluminの語源については、前述の佐貫博士の「ジュラルミンの誕生」にも同様な記述がある。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「Dürener 派」であるとのこと、この原因は濱住松二郎著「金属総論」(内田老閣園, 1927)の記述にあると教授は述べている<sup>24)</sup>。それではということで外国の文献を調べてみると、R. J. Andersonの有名な教科書、*The Metallurgy of Aluminium and Aluminium Alloys*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>25)</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。

ウィルムの生涯についてはドイツのアルミニウムセンター (Aluminium Zentrale) のハース博士 (M. H. Haas) が1935~40年頃に詳しくまとめている<sup>20, 26, 27)</sup>。博士によれば、ウィルムは第一次世界大戦後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シレジアの山村に引退した。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

張した際にハース博士から贈られたウィルムのレリーフが、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 (Fig. 4)。1939年の訪問のいきさつに関しては、石田教授が、「軽金属」に執筆している<sup>28)</sup>。

## 2.4 ツェッペリン飛行船<sup>29)</sup>

ジュラルミンはまず飛行船に用いられた。有名なツェッペリン飛行船はフェルディナンド・フォン・ツェッペリン伯爵 (Ferdinand Adolf Heinrich August Graf von Zeppelin, Fig. 5) 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年ドイツ皇帝ウイヘルム2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。ツェッペリンの飛行船の構造は従来のエンベロープ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 (注7) 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



Fig. 4 Relief of Dr. A. Wilm at the office of the Japan Institute of Light Metals. This relief presented to Prof. Ishida by Dr. Haas was donated to the Japan Light Metal Association (now, the Japan Aluminium Association) by Prof. Ishida.

少ガス嚢がしぼんでも変形しないこと、(2) 水素ガスを数個のガス嚢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。種々の困難を乗り越えて、1900年6月、全長128m、直径11.65mのツェッペリン第一号硬式飛行船 LZ1 (注8) が完成した。Fig. 6はその構造を示す。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個のガス嚢を収納する構造であった。以後、40年間ツェッペリンの飛行船はこの構造様式を踏襲した<sup>29)</sup>。組み立てはフリードリッヒスハーフェン(Friedrichshafen)に近いマンツェル(Manzell)付近のボーデン湖(Bodensee)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イギリス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ツェッペリン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 (Fig. 7)<sup>30)</sup>が建造された。これらの飛行船の成功とともにツェッペリン伯爵は一躍「国民的英雄」となった。1908年9月、「ツェッペリン飛行船有限会社」をフリードリッヒスハーフェンに設立し、この新会社で最初に作られたLZ5の骨組みにジュラルミンが初めて用いられた。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」を設立した。



Fig. 5 Ferdinand Graf von Zeppelin.

(注7) 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ビーターズ・スキンを特殊なニカワで一重または二重に貼る。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。1頭の牛から得られる盲腸の大きさは700×150mm～1000×250mmであるから、大型硬式船一隻、例えば16個のガス嚢を持ったR101(英国の硬式飛行船)に必要な牛の盲腸は約15万頭分とのことである<sup>29)</sup>。

(注8) L: Luftschiff, Z: Zeppelin, LZはツェッペリン社の機体製造番号。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、シュツェ・ランツ社の飛行船はSLで識別された。

一方、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、試験飛行のため倉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、1911年、ヴィッカーズ社は、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<sup>22)</sup>。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1914年までにこの合金は独海軍ツェッペリン用に規格登録され、1916年までに720トン、生産された。飛行船の内部構造をFig. 8に示す。この図はL30の船体の内部である<sup>30)</sup>。外皮を覆った後で、ガス嚢は装着する前の状態である。ジュラルミンを



Fig. 6 Structure of Zeppelin Airship, LZ1<sup>29)</sup>.



Fig. 7 LZ4 at Bodensee near Freidrichshafen, with more powerful engines, flew to Zürich in twelve hour flights<sup>30)</sup>.

用いた複雑な骨組みがわかる。一機あたり約9トン使用され、1914年から1918年の間にツェッペリン船88隻、シュッテ・ランツ船 (Schütte-Lanz) 20隻が建造された。シュッテ・ランツ船はツェッペリン飛行船建造会社のライバル会社で、木材とベニア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年以後のシュッテ・ランツ船には、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>29)</sup>。

さて、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。ロンドンの初空襲は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、パリでは3回であったが、ロンドンには51回に及んだ。ロンドン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隻がロンドンとその周辺を襲い、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犠牲とな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がロンドンを爆撃した<sup>30)</sup>。L32はイギリス戦闘機に迎撃され、エセックス州のグレート・バーステッド (Great Bursted) 付近に墜落して乗員全員が死亡した。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



Fig. 8 Inside the hull of the L30, looking forward, after application of the outer cover, but before the gas cells were in place<sup>30)</sup>.

は不可能と判断し、24日、エセックス州リトル・ウィグバラ (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 (Fig. 9)。イギリスの技術者はその骨格を調査し、後日、英国の飛行船 R33 および R34 を建設する際の基礎とした<sup>31)</sup>。

飛行船の残骸の一部が日本に持ち込まれて、日本でのジュラルミンの研究が始まることとなる。Fig. 10は現在住友軽金属に保管されているツェッペリンの骨材の一部である。元住友金属の杉浦稠三 (しげぞう) 氏や山本正雄氏によると、大正5年 (1916年) 5月、ロンドン駐在の海軍監督官、氏家長明機関中佐がロンドン郊外クロイドン (Croydon) 飛行場付近に墜落したツェッペリン飛行船 (R33) の残骸の一部を入手し、呉海軍艦政本部に送り、同年末住友伸銅所に到着したとのことである<sup>32, 33)</sup>。現在、インターネットや文献で検索する限り、5月にクロイドン近郊で撃墜された飛行船はなく、R33も英国の機体番号でドイツの飛行船の機体番号にはない。元住友軽金属社長の佐藤史郎氏によれば、これは9月に撃墜されたL33 (LZ76) の可能性が高いとのことである<sup>34)</sup>、この日にクロイドンを通過して対空砲火を浴びたのはL33とともに出撃したL31である。L31はその日は無事戻ったが、10月1日の出撃でロンドン爆撃中にイギリス戦闘機にロンドンの北、ポッターズ・バー (Potters Bar) の付近で撃墜された<sup>31)</sup>。現在の所、持ち帰った残骸はどの飛行船のものか定かではない。ロンドン近郊で墜落した飛行船をクロイドン空港に集めて調査した後の残骸ではないかと推測される。

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 (有効塔載量はグラフ・ツェッペリン LZ127で30トン、ヒンデンプルグ号 LZ129で88トン<sup>29)</sup>) であるが、この飛行船による爆撃を阻止するために戦闘機

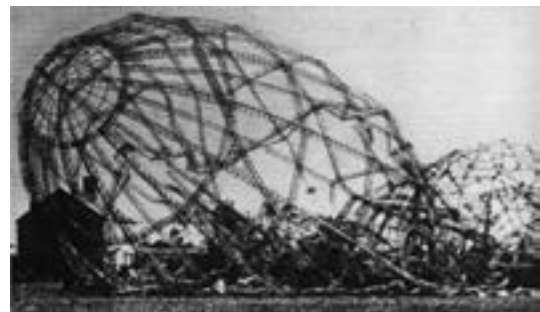


Fig. 9 The skeleton of L33 by New Hall Cottages, Little Wigborough, Essex. There was so little hydrogen left in the gas cells that the attempt to destroy the ship by fire left the framework almost intact, providing a useful source of information for the British authorities<sup>31)</sup>.





Fig. 10 Part of frame of Zeppelin Airship shot down near London, brought into Japan by Japanese Navy and stored in Sumitomo Light Metal.

の性能が向上した。第一次世界大戦後は、ドイツは戦争に敗れ、一時飛行船の建造は禁止されたが、その後1928年、「グラフ・ツェッペリン」(Graf Zeppelin, 全長 235.5m, 最大直径 30.5m) が完成し、主に旅客飛行船として世界のほとんどの地域の空を翔破した。この中で、1937年、ニュージャージー州で着陸寸前、爆発炎上するというヒンデンプルグ号 (Hindenburg, LZ129, 全長 247.2m, 最大直径 41.2m) の大惨事が起きた。この発火の原因は静電気放電説が有力である。なお、旅客機分野では1919年ユンカースは波板状ジュラルミンを使った全金属製旅客機 F.13 (Fig. 11) を開発した。第二次世界大戦ではナチスは飛行船を飛ばして打ち落とされるより、そのジュラルミンで戦闘機を作ったほうがましだと考え、全ての飛行船が解体された<sup>29)</sup>。

## 2.5 英米のジュラルミン研究 (1910~1920年代)

### 2.5.1 英国

ウィルムの研究成果は、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 Fig. 12 に示す<sup>35)</sup>。ジュラルミンの研究が発表されると、ウィルムの論文は同年、ル・シャトリエによりフランスの金属学会誌 Revue de Métallurgie に、翌



Fig. 11 Yunkers F.13 fabricated with corrugated panels of Duralmin sheets.

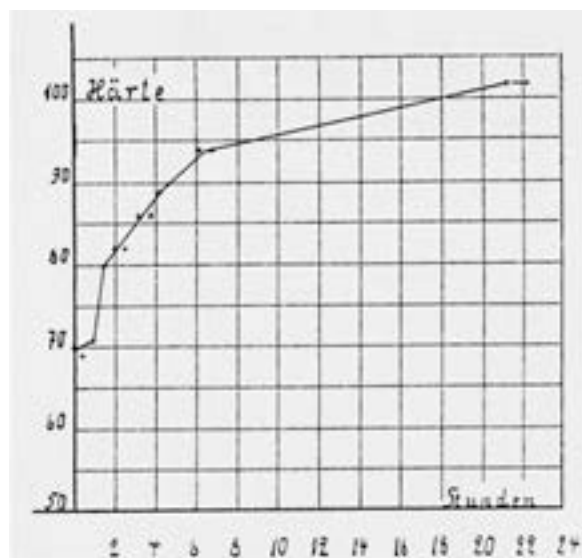


Fig. 12 Age hardening curve at room temperature of an Al-3.5%Cu-0.5%Mg alloy obtained by Wilm (vertical axis; hardness, horizontal axis; time (hours))<sup>35)</sup>.

年に英国の金属学会誌 Journal of the Institute of Metals にその要約が掲載された。残念なことに、フランスに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、西村秀雄博士(注9)は、「随筆・軽合金史(其六)」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、他の国で既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>36)</sup>。

(注9) 西村秀雄博士 (Fig. 13) : 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、三菱鋁業研究所に勤務後、約2ヵ年で母校に戻り、講



Fig. 13 Prof. H. Nishimura (J. Japan Institute of Light Metals, No. 15 (1955), 9.

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長として人材の育成に尽力した。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た。村上陽太郎博士によると「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お書きになる。絵をご覧になることもお好きであるので、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>37)</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>37)</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。後述するFig. 14にも示すように、「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」に発表した膨大な「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ことで残念なことである。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。

仏国に対し、英国は、National Physical Laboratory (NPL) の冶金部長であったローゼンハイン (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おり、ジュラルミンの成分がこの合金に近いので、彼はこの報告書の

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述べている。こうした中で、1913年ジュラルミンは英国のヴィッカーズ社の発明であるかのような記事がでてきて、ウィルムは、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。ここにウィルム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>22)</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。ところがドイツ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自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プロシア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) ベルリンとカールスルーエ (Karlsruhe) にあるドイツの武器弾薬工場は、ベルリン近郊の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デュレンの鉄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>38)</sup>。肝腎のプロシアはウィルム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。

1921年、英国 National Physical Laboratory のハンセン (D. Hansen) とゲイラー (M. L. V. Gaylor) の両氏によって、Al-Mg<sub>2</sub>Siの準二元系の状態図が得られ、Mg<sub>2</sub>Siはアルミニウムに固溶するが、これも高温から低温になるにつれて著しく固溶度が減少することを発表した<sup>39)</sup>。1922年、ゲイラー女史はAl-CuAl<sub>2</sub>-Mg<sub>2</sub>Siの準三元系合金の状態図を明らかにし、ジュラルミンの硬化にはCuAl<sub>2</sub>とMg<sub>2</sub>Siの両方の析出硬化が寄与することを報告した<sup>39)</sup>。さらにゲイラー女史は1923年Al-Cu-Mg系三元合金状態図を研究し、アルミニウム固溶体と

平衡するのは  $\text{CuAl}_2$ ,  $\text{Al}_6\text{Mg}_4\text{Cu}$ ,  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  であることを報告した。 $\text{Al}_6\text{Mg}_4\text{Cu}$  については 1919 年ドイツのボーゲル (Vogel) がすでに発見していたが、これを再確認した<sup>40)</sup>。

なお、 $\text{Al-Mg}_2\text{Si}$  準二元系状態図の研究と  $\text{Mg}_2\text{Si}$  を含むアルミニウム合金の時効については、英国で研究され発表されたが、それを実用合金として利用しようとしたのは、スイスのジュリーニ (Giulini) 社で、1916 年アルデュール (Aludur) という名称で、焼入れ焼戻しを使用する合金として特許を取得している<sup>21)</sup>。その後スイスの AIAG によってアルドライ (Aldrey) という名称の合金が導電率の高いアルミニウム合金として、特許が成立した。このアルドライは焼入れしてから線引きをして焼戻しすると強度がさらに向上し導電率も高いので送電線に適した<sup>40)</sup>。

### 2.5.2 米国

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、アルコアに生産を促した。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<sup>41)</sup>。1914 年ホールが亡くなり、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<sup>16)</sup>。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 (Zay Jeffries, 1888-1965) (注 10) 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なくては意味がないと考えた<sup>41)</sup>。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<sup>16)</sup>。

(注 10) ザイ・ジェフリース (Zay Jeffries, Fig. 14<sup>42)</sup>)<sup>43, 44)</sup>: 1888 年サウスダコタ生まれ。1909 年サウスダコタ鉱山技術大学の機械工学を卒業後、クリーブランドのケース応用科学大学 (現在 Case Western Reserve 大学) の冶金学インストラクターとして採用された。その後クリーブランドでの新技術に関するコンサルタントになり、GE のタングステンランプの事業所やアルミニウム鋳造の ACC で働いた。1920 年アルコアのコンサルタントになり、同時に一緒に研究するためミシガン大学から R. S. Archer を迎え入れ、

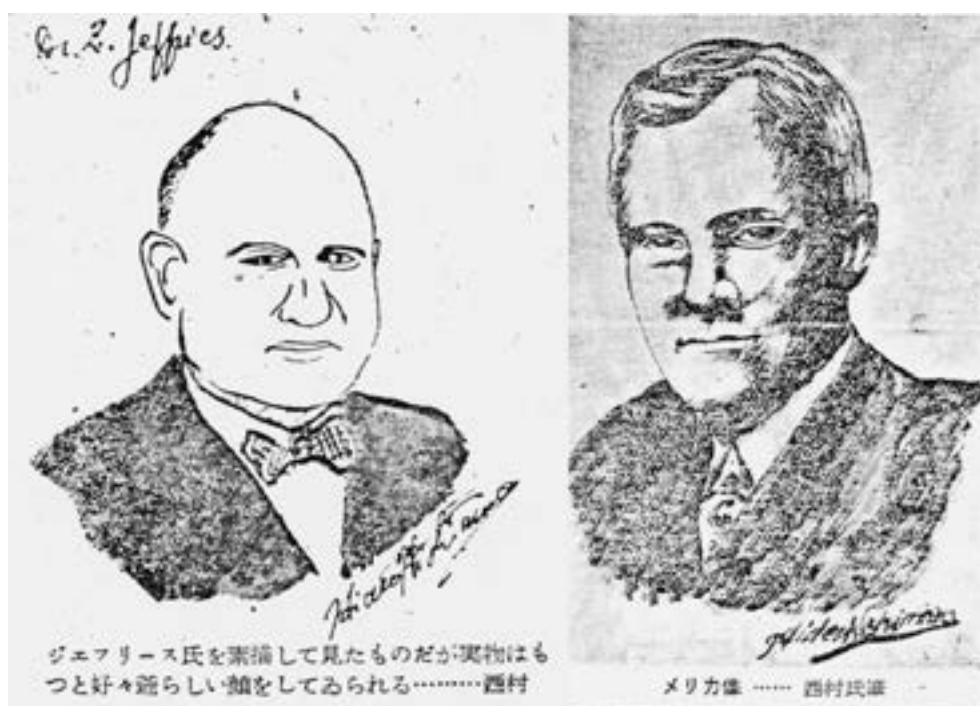


Fig. 14 Dr. Jeffries (left) and Dr. Merica (right) sketched by Prof. Nishimura<sup>42, 50)</sup>.

1920年代のアルコアの鋳造や鍛造でのアルミニウム合金研究を進展させた。彼の材料学に対する貢献としては金属の結晶粒径の測定法（ジェフリース法として知られている）と材料学的特性との関連、二次再結晶と介在物の関連、転位論の先駆けとなった「すべり干渉説」がある。その後、政府の多くの委員会で活動し、1945年にはGEの副社長となった。日本では日本金属学会のジェフリース賞でその名前はよく知られている。昭和26年、日本金属学会は博士の業績と日米間交流の尽力を評価して名誉員に推薦した。その折に100ドルの寄贈を受けた学会では、この寄付金を賞金として新進気鋭の研究者、技術者に奨学を主眼とする懸賞論文を募集して、昭和29年からジェフリース賞が出されるようになった。現在では賞牌がなくなったため終了している<sup>45)</sup>。なお、ジェフリース本人が冶金学者としての研究業績を報告している<sup>46)</sup>。

1916年、アルコアは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、同じ頃、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た。これらの情報をもとにアルコアは引張強さ43kg/mm<sup>2</sup>、耐力28kg/mm<sup>2</sup>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。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った。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<sup>41)</sup>。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. 15）<sup>16)</sup>。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生じ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。これに対し、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ん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<sup>16, 41)</sup>。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<sup>19)</sup>。

米国政府も合金の研究開発を支援するために、1913年、米国標準局はメリカ（P. D. Merica, Fig. 14<sup>50)</sup>）を長とする非鉄金属研究班を組織し冶金専門家を投入した。彼はベルリン大学で学位を取得したばかりであった<sup>22)</sup>。1919年米国鋳山冶金学会（AIME）の講演会でジュラルミンに関する報告を行い、1921年AIMEの会誌にも発表された<sup>47, 48)</sup>。その発表内容を西村博士の「随筆軽合金史（其三）」から引用して紹介する<sup>49)</sup>。アメリカからは、Cu 0.04~3.74%、Mg 0~3.5%を含む16種の試料を造塊、熱間圧延、冷間圧延、焼鈍により0.8mmの板を作り、この板を熱処理して引張試験と硬度を測定した。478~525℃から焼入れして20℃および100℃で時効した。最も強度が高い成分はCu 3.18%、Mg 0.46%、

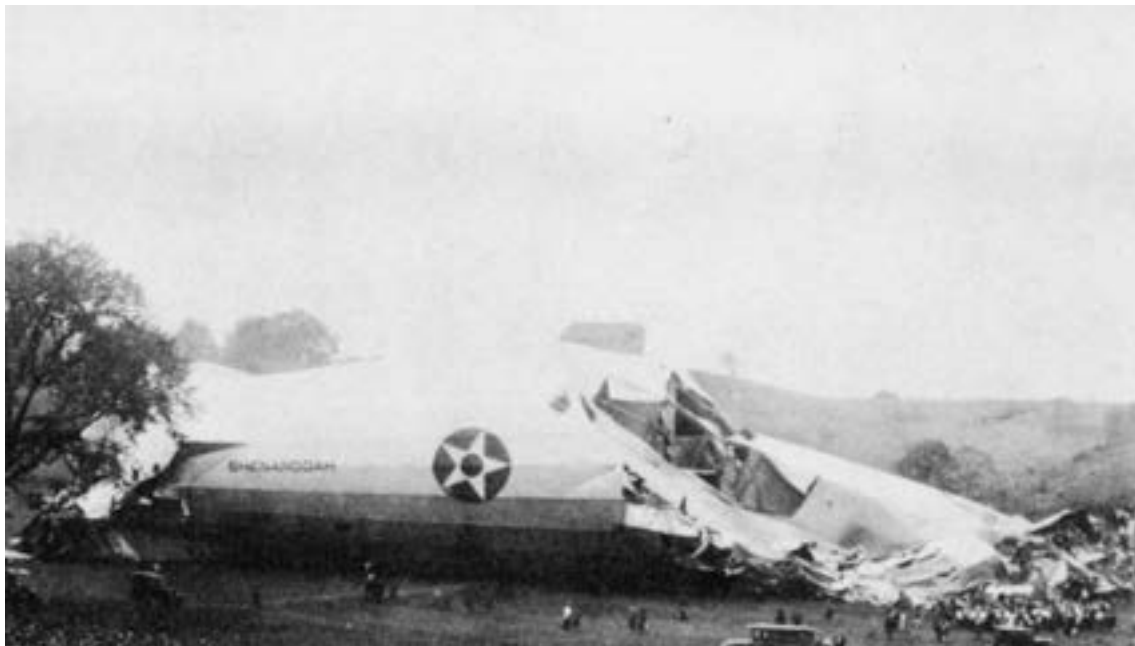


Fig. 15 Wrecked Shenandoah at the site in Caldwell County, Ohio, where the rear section of the airship came down 3 September 1925, next to a cornfield. Of the 11 officers and 31 men aboard, 14 were killed and 2 injured<sup>16)</sup>.

Fe 0.34%, Si 0.24%であった。引張強さが35~36kg/mm<sup>2</sup>でジュラルミンより強度が低いのが、これはCuが少なく、Mnが含まれないためと考えられた。その他、Cu 3.74%, Mg 1.08%, Fe 0.52%, Si 0.3%という合金を515°Cから焼入れして125°Cで14日間時効すると引張強さ45kg/mm<sup>2</sup>、伸び11%を得ている。この成分はその後開発された超ジュラルミンに近く、既にジュラルミンを超える材料が示唆されている。

幸田成康博士は編著「合金の析出」<sup>21)</sup>の第一章「時効硬化研究の歩み」の中で、メリカの研究成果の優れた点として、第一にAl-CuとAl-Mg二元系の状態図を決定し、時効硬化は合金の固溶限が温度低下に伴って減少するが相変化が原因で起こることをはっきりと認めたこと、第二に500°Cからの焼入れによってCuAl<sub>2</sub>の析出が抑えられ、室温あるいは100°Cの時効でCuAl<sub>2</sub>がコロイド状に分散したきわめて細かい粒子として析出することによって硬化が生じると考えたことをあげている。すなわち焼入れして時効すると硬化を生じるという「析出硬化説」を提唱していることである。西村博士も「この析出硬化説がもとになって時効硬化の現象が研究されてきたから、時効硬化に関する理論の第一歩をここに画した意味で、メリカの業績は大切なものである」と評価している<sup>49)</sup>。しかしながら、「実際、CuAl<sub>2</sub>のみを含むアルミニウム銅合金も、Mg<sub>2</sub>Siのみを含むアルミニウム合金も、どれも焼入れして常温では時効を余りしない。Mg<sub>2</sub>Siを含む合金などは全く示さないのである。これが両方の化合物を含んだときに、どうして常温で硬化が著しいのか不思議でならなかった」、また「アルミニウム、マグネシウム、銅の三元合金になると、どうしてジュラルミンのように常温時効が進むのか、この疑問に応えるような研究はなかった」と述べている<sup>50)</sup>。

このようにメリカの析出硬化説では高温時効には有効であったが、常温時効硬化については十分な説明を与えることができなかった。1920年、フレンケル(W. Fraenkel)は電気抵抗が常温時効とともに上昇することを明らかにした<sup>39, 51)</sup>。この結果、常温時効硬化については析出によるものならば、母相の濃度が低下し電気抵抗は減少すべきであるのに、実際は上昇するため、常温時効と高温時効は違うメカニズムで生じていることが認識され、いくつかの析出前硬化説が唱えられた<sup>21)</sup>。しかしなぜ硬化するかという機構についての説明は不十分であった。この頃、常温時効、人工時効、低温時効、高温時効という術語が固定化されてきた<sup>21)</sup>。

メリカの発表に関してジェフリースは1921年、メリカの硬化説を補強する立場から、塑性変形の微細機構であるすべりと析出物の干渉という観点から、ある臨界の大きさの粒子が最も硬化に寄与するという「すべり干渉説(slip interference theory)」を提唱した<sup>52)</sup>。考え方としては今日の転位論による析出硬化の説明と似てい

る<sup>21)</sup>。これらの説に対し、東北大学の本多光太郎博士や今野清兵衛博士は硬化が過飽和固溶体から析出状態に移る中間の状態が生じると考えた。これは鋼がオーステナイト→マルテンサイト→パーライトに変化する中間のマルテンサイトにおいて硬化することと同じ機構を考えていたが、その中間の状態の内部構造に関する説明は不十分であった。幸田博士は「析出前に過飽和に固溶した溶質原子が析出しようとして移動し、それが固溶体母相内で偏析ともいふべき状態をつくりだすことが、どうして著しい硬化をもたらすのかの説明が不足していた」と述べている<sup>21)</sup>。1930年頃、小久保定次郎博士は、常温時効硬化は銅原子がアルミ原子よりも小さいため、銅原子の移動によって格子にひずみを生じて硬化および電気抵抗の上昇があるとし「ひずみ硬化説」を唱えた<sup>21)</sup>。メリカも同様に硬化が析出に先立って生じることがわかってくると、結晶格子内にCuAl<sub>2</sub>として析出するまでに特定の場所に銅原子が集合してくる。メリカはこれをノットと称し、銅原子が集まった周囲の格子が歪み、それが迂りを妨げるため硬化の現象が生じると考えた。ノットは今日よく用いられるクラスターに相当する<sup>21)</sup>。なお時効硬化理論については、Gürtlerが1956年時点でのドイツにおける研究の歩みをまとめていて、この日本語訳が「軽金属資料」に掲載されている<sup>53)</sup>。

## 2.6 ジュラルミンから超ジュラルミンへ (1920~1930年代)

アルコアは17Sについてドイツから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<sup>41)</sup>。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(R. S. Archer)とジェフリースの研究である<sup>54)</sup>。彼らは、Siを0.5%以上添加することで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、ジェフリースが引張強さ38~44kg/mm<sup>2</sup>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されている<sup>55)</sup>。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。焼入れ焼戻し(T6調質)で耐力42kg/mm<sup>2</sup>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<sup>19, 56)</sup>。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<sup>57, 58)</sup>。論文でSuper-Duraluminが

出てくるのはこれが最初である<sup>59, 60)</sup>。マイスナー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50kg/mm<sup>2</sup>近くなる。マイスナーは多分CuAl<sub>2</sub>とMg<sub>2</sub>Si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。西村教授は、もし常温時効をする合金を目標にしたなら、もっと変わった方向に進んだかもしれないと述べている<sup>55)</sup>。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<sup>21)</sup>。

これに対し、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<sup>21)</sup>。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49kg/mm<sup>2</sup>、耐力35kg/mm<sup>2</sup>で、17S-T4は引張強さ44kg/mm<sup>2</sup>、耐力28kg/mm<sup>2</sup>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<sup>61)</sup>。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<sup>19)</sup>。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. 16) 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、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。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 (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 (DC-3の軍用輸送機バージョン) とジープとバズーカ砲である」と述べている。

1930年代になるとX線回折を用いた研究が進展してきた<sup>21)</sup>。1935年ヴァッサマン (G. Wassermann) とヴィアツ (J. Weerts) により200°C 30分加熱したAl-Cu合金で平衡相のCuAl<sub>2</sub>と違う斑点を見出した<sup>62)</sup>。これは結晶構造から組成としてはCuAl<sub>2</sub>であるが、さらに300°Cの高温に加熱すると平衡相に変化するので、平衡



Fig. 16 DC-3 fabricated with Alclad 24-T3 sheet.

相析出の途中の中間的な準安定相であると考えた。その翌年、フィンク (W. L. Fink) とスミス (D. W. Smith) はDebye-Scherrer写真において中間相の干渉線を認め、平衡相CuAl<sub>2</sub>の $\theta$ 相に対し、この新相を $\theta'$ と名づけた<sup>63)</sup>。1938年、National Physical Laboratoriesのプレストン (G. D. Preston) は200°Cで見れる中間相の結晶構造を研究し、母相の{001}面上で整合性を有するため、この中間相は母相の{001}面に平行な平板状の外形をとることを明らかにした<sup>64)</sup>。

1938年、フランスのパリ大学のギニエ (A. Guinier) と英国のプレストンはそれぞれ別個に、時効初期のAl-Cu合金単結晶に単色X線を照射することで、今日GPゾーン (Guinier-Preston Zone) と呼ばれている溶質原子の集合体を発見した<sup>65~68)</sup>。Fig. 17に示すようにX線照射でラウエ斑点に異常な線状模様が出現し<sup>66)</sup>、この線状模様は母相の{001}面上に平面状にCu原子の偏析が生じたことによるためと同じ結論に達した。これまで曖昧であった時効初期の過飽和固溶体で生じる変化が明らかとなった。その後ギニエ等は、Al-Cu合金で25~300°Cまでの時効処理を行い、X線の変化と硬さの関係調べ、初期の時効変化はGPゾーンの形成と、高温の弱い硬化は中間相の析出と関連があることを明らかにした<sup>69)</sup>。またGPゾーンのサイズを求め、20°C時効では径50 Å以下、100°C時効では150~200 Å、厚みは20~100°Cで4 Åとしている。

ここで最近のGPゾーンの直接観察の研究成果を示し、最近の研究の進歩を紹介したい。Fig. 18は京大原子炉実験所に在職された故吉田博行博士が存命中に大阪大学の橋本初次郎教授グループと共に撮影されたGP(I)ゾーンの高分解能電子顕微鏡である<sup>70)</sup>。Al-3.97%Cu合金を140°Cで3時間加熱した時に生成した単層のGPゾーンを円盤に平行な方向から観察しているため筋状のコントラストになっている。今でこそ高分解能電子顕微鏡法観察は容易になったが、上記の観察像が発表された時代にあってはGP(I)ゾーンのこのように鮮明な観察像は画期的な成果であった。吉田博士は、電子回折動力学理論

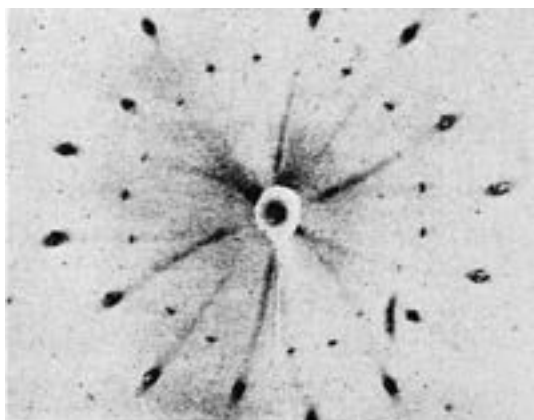


Fig. 17 X-ray diffraction patterns of an Al-4%Cu crystal which demonstrated the existence and nature of GP zones after aging at room temperature (Preston, 1938)<sup>66)</sup>.

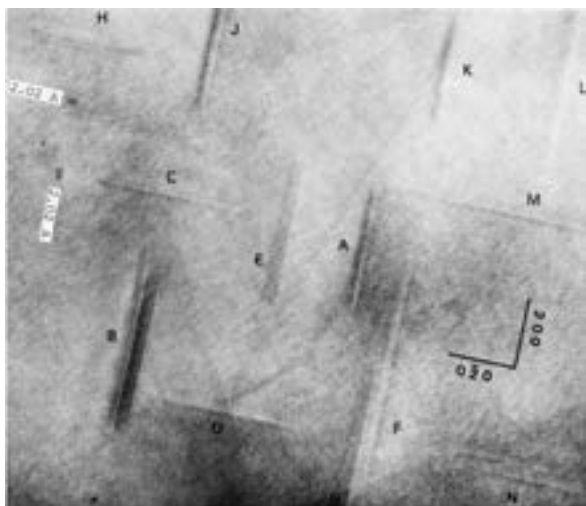


Fig. 18 Lattice image of a (001) specimen of an Al-3.97 wt%Cu alloy aged for 10.8 ks at 413K and 2146.4 ks at room temperature. The image of G.P.(I) zones appeared as sharp contrast along the (200) and (020) lattice plane<sup>70)</sup>.

の創始者の一人として電子顕微鏡法の世界的権威に数えられる橋本初次郎博士（京都工芸繊維大学、のちに大阪大学）のもとで研究され、京大村上陽太郎教授研究室在籍中、更に京大原子炉実験所転出後も一貫して電子顕微鏡法を金属材料研究に応用することに執念を燃やし続けられた方である。その熱意とは裏腹に、性格温厚で学内外の研究者と和気藹々と付き合っておられた。著者も学生時代、原子炉実験所での鉄への放射線照射の実験や会社への電子顕微鏡導入では随分お世話になった。電子顕微鏡は、その後も電界放射型電子銃の搭載、特性 X 線組成分析 (EDX)、電子線エネルギー損失分光法 (EELS)、走査透過電子顕微鏡法 (STEM)、収差補正装置等、目覚ましい発展を遂げた。HAADF-STEM 法も電子顕微鏡法の新機能の一種で、現在は単層で銅原子が集積した構造も原子オーダーの像として撮影できる。HAADF-STEM 法のアルミニウム合金への応用は東北大学の今野豊彦博士が先鞭を付けられたが、掲載の Fig. 19 は横浜国立大学の竹田真帆人博士（彼は京大村上陽太郎教授研究室から阪大の橋本初次郎教授研究室に進んだので吉田博行博士と同門で、GP ゾーンの電顕観察や生成機構に関して化学結合の観点から精力的に研究されている<sup>71)</sup>）の研究グループのメンバーであった孫成圭博士が得た Al-Cu 合金に形成される複数の構造の HAADF-STEM 像を示す<sup>72)</sup>。単層、多層 GP ゾーンの Cu 組成像で Cu の偏析が良く分かる。

常温時効した試料を高温時効すると少し軟化してから再び硬化する現象は、初め英国でゲラー女史が Al-Cu 合金で発見し発表した<sup>73)</sup>が、その後忘れられていた<sup>73)</sup>。当初その解釈は明確ではなかったが、その後、焼入れ状態に戻ると考えられた。プレストンは線状模様が 200°C 10 分の熱処理で消失することから、Cu 原子の集合体 (GP ゾーン) が熱処理で溶解すると結論付けている<sup>21)</sup>。この現象を、独語では Rückbildung、英語では reversion、日本語では復元と訳されている<sup>74)</sup>。

西村教授は、アルコアの 24S が実用化されてくると、

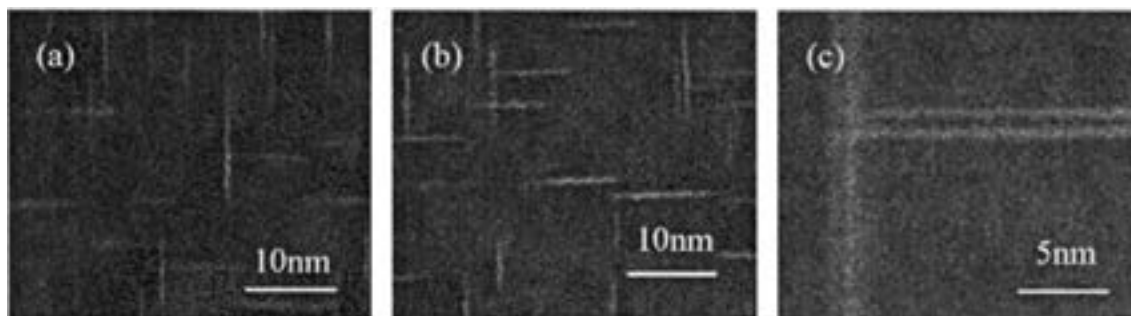


Fig. 19 HAADF-STEM images obtained from Al-1.94 at% Cu aged at 403 K for (a)  $6.0 \times 10^2$ , (b)  $6.0 \times 10^4$ , (c)  $3.0 \times 10^6$  s. (a) shows monolayer copper-rich clusters smaller than single-layer platelets seen in (b). A slightly larger monolayer G.P.(I) is observed in (b). In (c), the precipitates consisting of two copper-rich planes were formed<sup>72)</sup>.

「ジュラルミンははじめ  $\text{Al-CuAl}_2\text{-Mg}_2\text{Si}$  の準三元系として取り扱われたが、筆者はこれを  $\text{Al-Cu-Mg}$  系として扱うことが合理的であると考えて、 $\text{Al}$  側の  $\text{Al-Cu-Mg}$  系合金の状態図を研究した。その結果  $\text{Al}$  と平衡すべき三元化合物に  $\text{S}$  と名称を与え、その固溶度が  $24\text{S}$  の時効の原因をなすことを提唱した」と述べている<sup>75)</sup>。この  $\text{S}$  相の組成比は、 $\text{CuAl}$  と  $\text{Mg}_4\text{Al}_3$  を結ぶ線上の化合物 ( $7\text{CuAl}$ ,  $2\text{Mg}_4\text{Al}_3$ ) が最も近い組織と考え  $\text{Al}_{13}\text{Cu}_7\text{Mg}_8$  とした<sup>76, 77)</sup>。その後、英国の Raynor らは西村教授の提案した  $\text{S}$  化合物を  $\text{CuAl}_2$  と  $\text{Mg}$  を結ぶ直線上の化合物になるとして  $\text{Al}_2\text{CuMg}$  とした<sup>75)</sup>。この相の組成は、教授の分析値とほぼ一致する。 $\text{S}$  相を考え  $\text{Al-Cu-Mg}$  系合金の時効析出現象を解明したことは西村教授の大きな業績である<sup>21, 78)</sup>。

## 2.7 世界大戦によるアルミニウム工業の発展<sup>11)</sup>

第一次世界大戦はアメリカに膨大な軍需市場を提供し、アメリカの生産量は 1915 年の 4 万 1100 トンから、19 年には 5 万 8300 トンに増大した。大戦終了後、各国は余剰在庫を抱えたため、欧州から米国への輸出が活発となり、米国は国内市場の防衛のため関税障壁を設けてアルコアの独占を強化することとなった。またアルコアは 1920 年代に入ると欧州への進出を図り、ノルウェーの会社に資本参加し、フランス、イタリアの会社を買収した。さらには欧州諸国のボーキサイト資源や水力発電の買収も行い、各地にアルミニウム加工及び製品工場を建設した。このようにして、ボーキサイト鉱山、水力発電所、アルミナ製造工場、電解工場、圧延・鋳物などの加工工場を展開し、米国のみならず北米大陸さらには第一次世界大戦後も海外の鉱山や製錬工場を系列化におき、世界最大のアルミニウム企業へと成長した。このように海外活動の多角化に伴って、国内事業と海外事業を分離して管理することとなった。1928 年カナダにアルミニウム・リミテッド (Aluminium Limited, 1966 年 Alcan Aluminium Limited と改称) を設立し海外事業をこの会社に移管した。形式的には別会社に分離したが、大株主は共通なので、事実上アルコアの支配下にあった。その後反トラスト法により 1950 年完全に分離独立した。1931 年世界恐慌に見舞われ米国、カナダの生産量は半減したが、国際カルテルと軍備拡張により、1936 年以降急速に拡大し、北米の生産は 39 年 22 万 3000 トンに達し、世界全体の三分之一を占めた。

第二次世界大戦による軍需の増大は、アルミニウム産業の飛躍的な発展をもたらした。米国政府は一層の設備拡張をするため、1926 年以来タバコ包装用アルミニウム箔の生産を行っていたレイノルズ社 (Reynolds Metals Corp.) に融資を行ってアルミニウム製錬事業に進出させ、アルコアの独占が事実上崩壊した。この結果、1943 年アルコアが年産 44 万トン、レイノルズ社が

年産 8 万 5000 トンの能力となった。また政府は 7 億ドルの資金を投じて、アルミナ工場 2、電解工場 9、加工工場 25 を建設し民間業者に委託した。これらの大部分をアルコアが建設・運営した。1943 年には 83 万 4800 トンの生産をあげた。

Fig. 20 はアルコアが管理運営していた Trentwood の米軍軍需工場の 5 タンデム熱間圧延機である。1949 年 Kaiser に払い下げられた<sup>79)</sup>。

カナダにおいてはアルミニウム・リミテッドが海外事業を展開し、その直系のアルキャンがカナダ唯一のアルミニウム企業として発展した。その原動力はカナダ国内の豊富で低廉な水力電源である。1925 年サガネー河口 (Saguenay River) に 20 万 kw の水力発電所を建設し、4 マイル先のアーバイダ (Arvida: 創立者のアーサー・バイニング・デイビス, Arthur Vining Davis の頭文字をとって命名) に新工場を建設した。その後も発電所の建設や設備の拡張を行い、1943 年には 45 万トンの生産をあげ、世界第二位を占め、カナダはアルミニウムの世界最大の輸出国となった。

ドイツの生産は第一次世界大戦までは、スイス系のラインフェルデン (Rheinfelden) 精錬所が生産する年間 800 トンに過ぎず、14,000 トンにも達していた当時の国内消費は輸入に頼っていた。大戦の勃発とともに、三製錬工場を建設し、1917 年国営の VAW (Vereinigte Aluminium Werke) を設立し、三製錬所と新たに建設した三工場を国営及び半国営とした<sup>40)</sup>。軍備拡張を背景として、1918 年には、14,100 トンであったが、1925 年、27,200 トン、1936 年 70,700 トン、1943 年 203,100 トンと増大し、第二次世界大戦では、米国、カナダに次ぐ世界第三位の生産国になった。1918 年から 1943 年までの各国のアルミニウム地金の生産量の推移を Table 1 に示す。

わが国では、1912 年九州水力電気(株)はブリティッシュ・

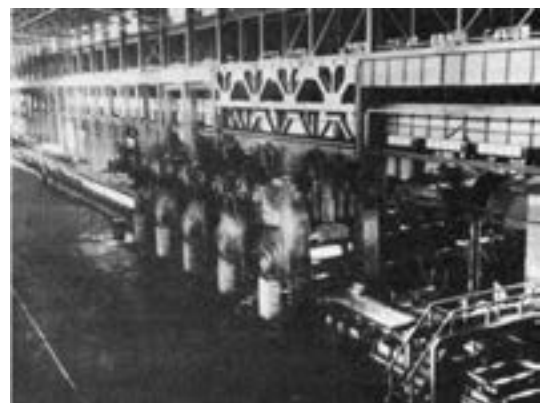


Fig. 20 A five-stand hot rolling mill at the Alcoa's combined Defense Plant Corporation facility at Trentwood, Washington<sup>79)</sup>.



アルミニウム社からの輸入により鋼芯アルミニウム電線が敷設された。これが契機となって古河合名はブリティッシュ・アルミニウムからの技術導入で1919年古河電工を設立した。これに対抗して住友電線もアルコアからの技術導入により1925年生産を開始した。1935年に入ると準戦時体制下に入って航空機製造事業の拡大が急がれアルミニウムの需要は急激に増加した。1938年政府はアルミニウム地金と屑の価格および流通を完全に統制し大増産に乗り出した。

国産地金に関しては、1916年日本軽銀(株)が年産200トンの電解工場を名古屋に建設したのがわが国最初のアルミニウム製錬企業である。この計画は知多半島の白粘土を原料として苛性ソーダで処理してアルミナを製造し電解するという方式であった。しかし原料が不適でコスト的に合わず一年で閉鎖された。その後、同社の経営は藤田組(同和鉱業)に委ねられ、名古屋工場での研究を続け、1918年長野県大町に電解工場を建設した。この工場は藤田組系列の明治水力電気が3万kWの電源開発に対応したものであったが、第一次世界大戦後の不況で挫折した。1921年軍部は航空機を中心とする軍需の拡大に対応させるために軍需工業研究奨励金を交付してアル

ミニウム製錬の企業化を促進した。この政府助成を得て、日本軽銀大町工場での工業化試験が再開されるとともに、政府機関である東京工業試験所でもアルミナの製造研究が進められた。

アルミニウム製錬の企業化に成功したのは1934年のことである。日本電工(昭和電工の前身で当時の社名は日本沃度)は横浜にアルミナ工場、大町に電解工場を建設した。原料は朝鮮の明礬石であった。これに対し、住友化学は、同社で開発した住友法と浅田明礬製造所の子会社し磨(しかま)化学が開発した浅田法によって明礬石からアルミナ製造を行い、1934年、年産1500トンの製錬能力を有する住友アルミニウム製錬(株)を発足させた。理化学研究所は乾式アルミナ製造法を開発し、この方式を採用した日満アルミニウム(株)が設立され、富山県に工場を建設した。同工場は満州の礬土頁岩を原料として年産3000トンの規模で1935年操業を開始した。1935年、三井、三菱、古河の共同出資で設立された日本アルミニウムは台湾高雄にアルミナ工場、電解工場を建設し、ピントンの島のボーキサイトを原料としてわが国最初のバイヤー法による年産6000トン規模で生産を開始した。1936年には日本曹達、満州軽金属の二社が、1939年に

Table 1 Aluminum Production in the world (1918-1943)<sup>11)</sup>.

Country	Company	Factory	Aluminum Production (unit : 1,000ton)			
			1918	1925	1935	1943
France	2	5	12.0	20.0	21.8	46.5
Germany	2	5	14.1	27.2	70.7	203.1
UK	2	4	8.3	9.7	15.1	56.6
Switzerland	2	6	19.9	21.0	11.7	18.5
Norway	5	6	6.9	21.3	16.0	23.5
Sweden	1	1	—	—	1.7	3.6
Spain	1	1	—	—	1.2	0.8
Hungary	1	1	—	—	0.3	9.5
Jugo-Slavia	1	1	—	—	—	2.0
Austria	2	3	—	3.0	2.4	44.2
Italy	3	5	1.7	1.9	14.0	46.2
Europe (Total)	22	38	62.9	104.1	154.9	454.5
USSR		6	—	—	24.5	62.3
USA	3	16	56.6	63.5	54.1	834.8
Canada	1	4	15.0	15.0	20.6	449.7
India	1	1	—	—	—	1.3
Japan	6	8	—	—	2.7	114.1
Others	5	6	—	—	—	35.6
Total (World)	38	79	134.5	182.6	256.8	1952.3

は朝鮮窒素, 東北振興アルミニウムがアルミニウム製錬に進出した。国産原料で出発した日本電工, 住友化学も1937年頃からコスト的に有利なボーキサイト原料に転換した。1939年古河電工と東京電灯との共同出資で日本軽金属(株)が設立され, 地金生産は年産5.4万トンでわが国最大のアルミニウム製錬工場ができた。終戦時にはわが国の地金生産能力は年間13万トンの規模に達し, 米国, カナダ, ドイツに次いで世界第4位を占めた。

#### 参 考 文 献

- 竹内勝治：アルミニウム合金展伸材—その誕生からの半世紀—, 軽金属溶接構造協会, 1986.
- 竹内勝治：技術の歩み, 住友軽金属工業株式会社, 1995, (非売品).
- 小久保定次郎：アルミニウムの性質及び用途, 内田老鶴圃, 1940, 5.
- ウィークス, レスター：元素発見の歴史 (大沼正則監訳), 朝倉書店, 1989, 610.
- 小林藤次郎：アルミニウムのおはなし, 日本規格協会, 1985.
- アルミニウム読本, 軽金属協会監修, 軽金属通信社, 1974.
- 小寺純雄：C. M. ホールの師, F. F. ジュウエット, その来日120年に憶う, アルトピア, 2月(1997), 62.
- 森永卓一：アルミニウム製錬, 日刊工業新聞社, 1968.
- 新版アルミニウム技術便覧, カロス出版, 1996.
- 吉田英雄：レ・ボーを訪ねて, 軽金属, 57(2007), 389.
- 佐藤眞住, 藤井清隆著：現代の産業アルミニウム工業, 東洋経済新報社, 1968.
- <http://www.fundinguniverse.com/company-histories/pechiney-sa-history/>
- [http://www.alcoa.com/global/en/about\\_alcoa/pdf/Alcoa\\_History\\_120\\_years.pdf](http://www.alcoa.com/global/en/about_alcoa/pdf/Alcoa_History_120_years.pdf).
- C. C. Carr : *ALCOA, An American Enterprise*, Rinehart & Company, Inc., (1952), 25.
- アルコア物語 (其三), 軽金属時代, No.297, April (1959), 5.
- M. B. W. Graham and B. H. Pruitt : *R & D for Industry, A Century of Technical Innovation at Alcoa*, Cambridge, 1990.
- 西村秀雄：随筆・軽合金史 (其一), 軽金属時代, No.172 (1948), 2.
- A. Zeerleder : *The technology of Aluminium and its Light Alloys*, Nordemann Publishing Company, (1936), 31.
- J. 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, Inc.(1989), 3.
- M. H. Haas : *Wie das Duralumin erfunden wurde*, Aluminium, 18 (1936), 366.
- 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.
- O. H. Duparc : *Alfred Wilm and the beginnings of Duralumin*, Z. Metallkde, 96 (2005), 398.
- 佐貫亦男：ジュラルミンの誕生, アルミニウム, 618号, 2月号(1982), 28.
- 小岩昌宏：金属学プロムナード, アグネ技術センター, 2004.
- R. J. Anderson : *The Metallurgy of Aluminium and Aluminium Alloys*, Henry Carey Baird & Co., Inc., (1925), 261.
- M. H. Haas : *Alfred Wilm, der Erfinder des Duralumins*, Aluminium, 17 (1935), 502.
- M. H. Haas : *Unser Alfred Wilm*, Aluminium, 22 (1940), 497.
- 石田四郎：基礎研究とその応用, 軽金属, 22 (1972), 5.
- 牧野光雄：飛行船の歴史と技術, 成山堂書店, (2010).
- D. H. Robinson : *The Zeppelin in Combat*, Schiffer Publishing, 1994, 21.
- Ian Castle : *London 1914-17, The Zeppelin Menace*, Osprey Publishing, 2008.
- 山本正雄：私の歩んで来た軽金属工業, 軽金属, 5 (1952), 31.
- 軽金属工業発達史 (其の一), 航空機用軽合金材料について：軽金属, 6 (1953), 103.
- 佐藤史郎：最近, 想うこと, 「セレンディピティ」, アルミニウム, 11 (2004), 38.
- A. Wilm : *Metallurgie*, 8 (1911), 225.
- 西村秀雄：随筆・軽合金史 (其六), 軽金属時代, No.177 (1949), 2.
- 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.
- R. Beck : *Duralumin. Seine Eigenschaften und Verwendungsgebiete*, Z. Metallkde, 16 (1924), 122.
- 西村秀雄：随筆・軽合金史 (其七), 軽金属時代, No.178 (1949), 27.
- 西村秀雄：随筆・軽合金史 (其11), 軽金属時代, No.182 (1949), 14.
- 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).
- 西村秀雄：随筆・軽合金史 (其29), 軽金属時代, No.200 (1951), 10.
- <http://www.asmcleveland.com/zay-jeffries>
- <http://www.encyclopedia.com/doc/1G2-2830902180.html>
- 木村 尚：ジェフリース博士の志を忘れまい, 日本金属学会誌, 25 (1986), 782.
- Z. Jeffries : *Autobiographical Notes of a Metallurgist, The Sorby Centennial Symposium on the History of Metallurgy*, ed. by C. S. Smith, Gordon and Breach Science Publishers, 1963, 109.
- P. D. Merica, R. G. Watenberg and J. R. Freeman : *Constitution and Metallography of Aluminum and Its Light Alloys with Copper and with Magnesium*, Trans. of AIME, 64 (1921), 3.
- P. D. Merica, R. G. Watenberg and H. Scott : *Heat Treatment and Constitution of Duralumin*, Trans. of AIME, 64 (1921), 41.
- 西村秀雄：随筆・軽合金史 (其三), 軽金属時代, No.174 (1949), 2.
- 西村秀雄：随筆・軽合金史 (第23回), 軽金属時代, No.194 (1950), 17.
- W. Fraenkel and R. Seng : *Z. Metallkde*, 12 (1920), 225.
- 西村秀雄：随筆・軽合金史 (其五), 軽金属時代, No.176

- (1949), 2.
- 53) G. Gürtler : 50 Jahre Aushärtung, Aluminium, **32** (1956), 575., 時効硬化現象の研究 (時効現象研究同好会誌, 東京工業大学), 軽金属資料, No.291 (1957), 5.
- 54) R. S. Archer and Z. Jeffries : New Developments in High Strength Aluminum Alloys, Trans. AIME, **71** (1925), 828.
- 55) 西村秀雄 : 随筆・軽合金史 (第 20 回), 軽金属時代, No.191 (1950), 2.
- 56) W. A. Anderson : Precipitation Hardening Aluminum-Base Alloys, *Precipitation From Solid Solution*, ASM, (1959), 150.
- 57) 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.
- 58) K. L. Meissner : The Artificial Ageing of Duralumin and Super-Duralmin, J. Inst. Metals. **35** (1931), 207.
- 59) 西村秀雄 : アルミニウム及其合金, 共立社, (1941), 231.
- 60) J. D. Edward, F. C. Frary and Z. Jeffries : The Aluminum Industry, Aluminum Product and Their Fabrication, McGraw-Hill Book Company, (1930), 247.
- 61) T. W. Bossert : Development of 24S alloy extensively used in aircraft, Metal Progress, Jan. (1937), 42.
- 62) G. Wassermann und J. Weert : Über den Mechanismus der  $CuAl_2$ -Ausscheidung in einer aushärtbaren Kupfer-Aluminium-Legierung, Metallwirt. **14** (1935), 605.
- 63) W. L. Fink and D. W. Smith : Age-Hardening of Aluminum Alloys, I-Aluminum-Copper Alloy, AIME, Met. Div., **122** (1936), 284.
- 64) G. D. Preston : Diffraction of X-rays by an Age-Hardening Alloys of Aluminium and Copper, The Structure of an Intermediate Phase, Phil. Mag. **26** (1938), 855.
- 65) A. Guinier : Un nouveau type de diagrams de rayons X, Compt. Rend., **206** (1938), 1641.
- 66) G. D. Preston : The Diffraction of X-Rays by Age-Hardening Aluminium-Copper Alloys, Proc. Roy. Soc., **A167** (1938), 526.
- 67) A. Guinier : Structure of Age-Hardened Aluminium-Copper Alloys, Nature, **142** (1938), 569.
- 68) G. D. Preston : Structure of Age-Hardened Aluminium-Copper Alloys, Nature, **142** (1938), 570.
- 69) J. Calvet, P. Jacquet et A. Guinier : The Age-Hardening of a Copper-Aluminium Alloy of Very High Purity, J. Inst. Metals, **6** (1939), 177.
- 70) H. Yoshida, H. Hashimoto, Y. Yokota and N. Ajika : High Resolution Lattice Images of G. P. Zones in an Al-3.97wt%Cu Alloy, Trans. Japan Inst. Metals, **24** (1983), 378.
- 71) M. Takeda, H. Oka and I. Onaka : A New Approach to the Study of the GP(I) Zones Stability in Al-Cu Alloy by Means of Extended Hückel Molecular Orbital Calculations, phy. stat. sol.(a), **132** (1992), 305.
- 72) S. K. Son, M. Takeda, M. Mitome, Y. Bando and T. Endo : Precipitation behavior of an Al-Cu alloy during isothermal aging at low temperature, Materials Letters, **59** (2005), 629.
- 73) M. L. V. Gaylor : The Constitution and Age-Hardening of Alloys of Aluminium with Copper, Magnesium, and Silicon in the Solid State, J. Inst. Metals, **28** (1922), 213.
- 74) 西村秀雄 : 随筆・軽合金史 (第 33 回), 軽金属時代, No.204 (1951), 2.
- 75) 西村秀雄 : 続・軽合金史, (第六回), 軽金属時代, No.227 (1953), 22.
- 76) 西村秀雄 : Al を主成分とせる Al-Cu-Mg 系合金の状態図に就て, 日本金属学会誌, **1** (1937), 8.
- 77) 西村秀雄 : Al を主成分とせる Al-Cu-Mg 系合金の時効硬化に就て, 日本金属学会誌, **1** (1937), 59.
- 78) 村上陽太郎 : アルミニウム合金の時効析出にまつわる歴史と進歩, 第 31 回軽金属セミナー「アルミニウム合金の時効析出—基礎から応用まで—」, 軽金属学会, (2008).
- 79) G. D. Smith : *From Monopoly to Competition, The Transformation of Alcoa, 1888-1986*, Cambridge University Press, (1988).