

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) *

吉 田 英 雄**

Sumitomo Light Metal Technical Reports, Vol. 54 No. 1 (2013), pp. 264-326

Extra Super Duralumin and Zero Fighter —History of Extra Super Duralumin— Part 2

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. The pre-history was summarized in a preceding issue. In this issue, the second and third stages are summarized. In the second stage, aluminum was introduced into Japan in 1886 and Sumitomo began to produce aluminum sheets in 1898. In World War I, Sumitomo received part of the frame of the Zeppelin airship from the Japanese Navy in 1916 and produced Duralumin in 1919. To produce the Duralumin, Sumitomo sent engineers to Dürener Metallwerke after the World War I as compensation for the war. Sumitomo also cooperated with Alcoa on manufacturing equipment and it was possible to produce Super Duralumin (SD), similar to 24S, which was used in the Mitsubishi Navy Type 96 Carrier-Based Fighter. The Japanese Navy demanded a higher strength aluminum alloy than 24S. Dr. Igarashi and his cooperators invented Extra Super Duralumin (ESD) with a tensile strength of 60kgf/mm² within 1936 within a short time of period. Immediately, this new alloy, ESD, was applied to the main wing of the Zero Fighter, which became the main fighter for Japan in World War II. To produce Duralumin, SD and ESD in large amounts, Sumitomo developed a new continuous casting facility, and built a new plant in Nagoya and then introduced new rolling mills, new extruding presses, etc. ESD was invented by solving the problem of season cracking (now called stress corrosion cracking), which was prevented by the addition of chromium to the Al-Zn-Mg-Cu alloys. However, US forces found the secret of ESD by investigating a downed Zero Fighter. Based on ESD, Alcoa developed the 7075 alloy in 1943, which is even now a typical aluminum alloy for aircrafts and is available all over the world. After World War II, high strength aluminum alloys were needed for railway cars, motorcycles and automobiles instead of aircraft in Japan. In the railway cars, weldable Al-Zn-Mg alloys were noted in Europe and USA, which were already developed as good extruding alloys during the war and known as Honda Duralumin (HD) in Japan. In Sumitomo, Dr. Baba found through basic research that zirconium decreases the quench sensitivity compared to chromium in the Al-Zn-Mg alloys and prevents the weld crack and stress corrosion cracking, and he and his coworker invented a new Al-Zn-Mg alloy containing zirconium instead of chromium for the first time in the world. He then invented a new extruding Al-Zn-Mg alloy, 7003, with a good extrudability and medium strength the same as the 6061 alloy by air cooling. These alloys were used for the body structure of railway cars and rims, frames of motorcycles and the bumper reinforcement of automobiles. On the other hand, high strength aluminum alloys for aircrafts were used for the front fork of motorcycles and

baseball bats. For airplanes, Dr. Baba and his coworkers invented the 7075 alloy sheet with fine grains for the taper-rolled stringer of the B767. Recently, the 2013 alloy with a good workability was invented in cooperation with Kawasaki Heavy Industries. This alloy sheet is formed in T4 and it is possible to omit the quenching after forming and correction processing. Moreover it is possible to extrude hollow section and form integrated structures with this alloy. Therefore, this alloy has contributed to saving processing costs and reduce the weight. Hereafter, we are expected to develop aluminum alloys available for the Japanese aircraft industries in cooperation with government and academia, taking over the tradition of ESD.

3. 超々ジュラルミンの開発

3.1 アルミニウムの日本への導入^{1,2,3)}

ホールとエルーがアルミニウムの電解精錬法を發明した1886年の翌年には、少量のアルミニウムが陸軍砲兵工廠に輸入され、貴重品扱いで金庫に保管されたようである。その後、軍需用器物として使用されたのは1894年からである。住友伸銅場は1897年安治川に開設され、翌年、陸軍砲兵工廠から地金を受取り、アルミニウムを圧延して納入した。1913年7月、住友伸銅所(同年6月に伸銅場から伸銅所と改称)は農商務省技師で金属製品の分析・試験に従事していた杉浦彌三(しげぞう)氏を招いて試験係に任じた。1916年には、杉浦氏は「自身で研究開発しなければ、何時までたっても外国の下位に立たねばならない」、「工場に研究が専属することによって、官立の試験所では出来ないような工場規模の研究が行える」と発案し研究課が設けられた。日本で工場に研究課が設置されたのはこれが最初である。1916年末、海軍艦政本部、大阪海軍監督官長経由でツェッペリンの残骸が住友伸銅所に持ち込まれ、翌年この材料の調査を行ったのが研究課の杉浦氏であった。その分析結果や英国金属学会誌JIM(Journal Institute of Metals)の文献をもとに、工場における試作研究を開始し、1919年工場試作が完了し、「住友軽銀」(ジュラルミンとルビがふられた)と命名された。この当時のジュラルミンの成分はCu 4%, Mg 0.5%, Mn 1.0%, Al残である。海軍から住友伸銅所にこの調査依頼した経緯は明らかでないが、杉浦は「当時は金属に関する研究機関が少なく、住友伸銅所は一つの独立した金属専門の研究部門を持っていたためではないか」と述べている。1921年伸銅所は初めてジュラルミンの工業生産を行い、横須賀海軍工廠において国産化した英国ビッカース社製SS型軟式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^{4,5)}。

当時のジュラルミン製造技術はきわめて初歩的なものであったため、海軍は飛行艇を建造するため招聘した技術者の中で、ペーガン(Pagan)氏を伸銅所に推薦して

きた。彼はNPL(National Physical Laboratory)のローゼンハイン(W. Rosenhain)に師事して英国のアルミニウム製造技術を把握していたことによる。1922年1月から8ヶ月間、住友伸銅所に囑託として採用され、鑄造、圧延、押出、抽伸の各部門と波板と形材の製造方法について指導した。また、初めて傾斜鑄造法が紹介され、従来造塊方法である「平流し法」あるいは「縦流し法」が改められた。傾斜鑄造法は、ローゼンハイン博士の考案によるもので、Fig.1に示すように傾斜させた鑄塊をハンドル操作で機械的に立てながら鑄込む方式である。ペーガン氏はハンドル操作の代わりに鑄型の下隅をチェインブロックで吊り下げ、鑄型を傾斜させ、溶湯を注ぎ込みながら徐々に鑄型を立てていくように改良した。これによりジュラルミン鑄塊は板用が厚さ2.25"(57mm)、棒用が直径35"(89mm)となった。焼入れにも彼の指導で硝石炉を使用するようになった。

この年の4月中島式ブレゲー型飛行機の機体構造にはじめて伸銅所製ジュラルミンを使った。「軽銀」号と命名された。ジュラルミン使用の全金属機が生産されたのは1925年のことである。Fig.2は東京上野で開催され

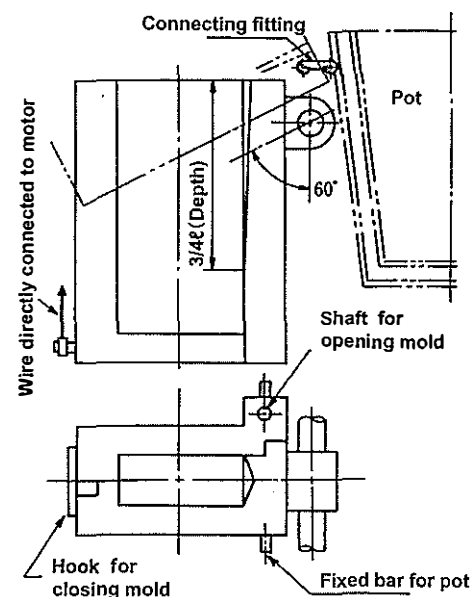


Fig.1 Inclined Casting¹⁾

* 本稿はアルトピア, Vol.42(2012), No.12, Vol.43(2013), No.1~7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 顧問, 工学博士



Fig. 2 Breguet 14 type aircraft, named "Keigin" fabricated by Nakajima Aircraft Industries Ltd.
(<http://www.ne.jp/asahi/airplane/museum/nakajima/nakajima.html>)

た平和博覧会に展示されたジュラルミンを使用した「中島式 B-6 型（ブレゲー 14 型）軽銀号」である⁶⁾。

同年、第一次世界大戦が終わり、日本は戦勝国としてドイツから賠償の 1 つとして何百台かの飛行機を受け取ることになっていたが、「飛行機を得るのは全くの一時の利得であり、むしろ、その製作技術、例えば機体の設計とか軽合金の製法を習得する方が国家百年の大計である」とされ、その結果ジュラルミン製造技術習得団が派遣されることになった。1922 年 3 月、習得団は、海軍造機大佐石川登喜治を団長とし、陸海軍それぞれ若干名と住友伸銅所の技術者 4 名をもって組織された。住友伸銅所からは、工作課の藤井成美氏、管棒工場の野本徳次郎氏、小板工場の柴田吉三郎氏、鑄造工場の山本正雄氏が参加した。1922 年 4 月 20 日出発、7 月下旬デュレンに到着し、9 月中旬まで、デュレナ・メタルヴェルケ社 (Dürener Metallwerke A. G.) でジュラルミン製造技術を実習、その後ドイツ、英国の工場を見学して、翌年 2 月 23 日帰国した。デュレナ・メタルヴェルケ社では「同社の作業員と同様に勤務して習得した内容を毎週取りまとめ、同社提供のジュラルミン製造方法習得書と照合検討の上、疑問点は質問して技術の真髄を習得するように努めた」とのことである。なお、同社はウィルムの特許を工業化し、当時、英米仏等の諸国に特許を分譲していた関係から、一行の技術習得に関して住友の名において有償契約の締結が要望され、その結果、陸海軍関係者も形式上は住友派遣員として実習した。なお、ジュラルミン製造技術習得団とともに金属機体製造技術習得団も渡独している。ジュラルミンに関しては、古河電工も 1922 年研究を開始し 1926 年陸軍から試作品の製造を命じられた。

3.2 住友におけるジュラルミン製造技術の確立 (桜島新工場建設)^{1,2,3)}

1923 年、ペーガンの指導と「ジュラルミン製造技術習得団」によってもたらされた技術を組み合わせることによって、新しい製造設備を起業する計画が立てられた。圧風式可傾炉を用い、8"角型鑄塊を傾斜鑄造機で造塊

し、この鑄塊を 1000 トン型水圧機で鍛造後、帯状圧延しようとする製造法である。しかし、この計画は工場移転の議が起こり、1928 年の桜島新工場移転まで持ち越された。この間、1926 年住友合資会社より分離して住友伸銅鋼管株式会社が設立され、アルコア社との提携が 1928 年成立した。アルコア社は地金販路拡大のため、日本の加工会社との提携を模索しており、1925 年株式会社住友電線製造所との提携が成立、この関係から伸銅鋼管もアルコアと提携し、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。なお、アルコアは 1928 年 5 月、カナダ法人のアルミニウム・リミティッド (アルキャン) を設立したため提携先も海外事業を主とするアルキャンに変わった。1930 年、アルキャンとの合弁で桜島の板工場と八尾の箔工場を母体に住友アルミニウム株式会社 (現、東洋アルミニウム) が設立された。

桜島移転に伴い、プロペラ翹素材やクランクシャフトなどの大型鍛造品、薄板を板曲げとダイ抽伸で製造するプロフィール品、また鑄造、圧延、押出ならびに抽伸に関する設備の拡充と新技術の採用が行われた。当時の飛行船などの骨組みに使用されたのはジュラルミン板を曲げ加工したプロフィールで、押出型材の最小肉厚は 3 mm が限度であったため、板からのプロフィールが用いられた。プロフィールは厚さが 0.4~0.6mm 程度、長さが 4~5 m である。1939 年頃になると押出最小肉厚は 1.2mm となり、これより薄くする場合には圧延と抽伸で仕上げた。

(1) 鑄造技術

この桜島新工場の鑄造設備は、可傾炉 4 基、坩堝炉 48 基である。最初は 80kg 角型鑄塊、直径 140mm の 40kg 鑄塊が傾斜鑄造法で鑄込まれたが、1931 年には、鍛造素材用に 11~13" 角型鑄塊 (110~120kg) が、管用には直径 150mm の 30kg 鑄塊または直径 9" の 50kg 鑄塊が造塊され、逐次大型化に移行した。溶解炉はアルキャンと協議した結果 9 トン反射炉を初めて採用した。反射炉の前には傾斜鑄造機が 4 列、計 16 基が配置され、朝 8 時半から鑄込み開始し午後 3 時半鑄込み終了、炉内清掃し、夜間に 11 トン溶解する一日一溶解方式であった。鑄型はブックモールドで、鑄造方法は反射炉より溶湯を取鍋に入れ、60 度傾斜している鑄型に鑄込み始め、鑄型を徐々に回転させ垂直になって鑄込みが終了する。この当時の板用鑄塊寸法は 4.5" (厚み) × 11" × 24" (約 53kg) であった。1931 年には反射炉を利用してジュラルミンの溶解・鑄造の実験が行われた。

1928 年、プロペラ翹素材の鍛造が始まり、大型鑄塊の必要が生じた。プロペラ翹鍛造用鑄塊はバケツ型で、1931 年頃は上部直径 330mm、下部直径 305mm、高さ 483mm、110kg で、これが次第に大きくなって、1942 年頃には、上部直径が 600mm、下部直径が 800mm、500kg 鑄塊が用いられている。材質は 25S(Al-4.5%Cu-0.8%Si-0.8%Mn) である。

1931~1940 年、鑄型を木炭で加熱後、反射炉から注

湯し、空タンク内に入れ、鑄型の下部を周囲から放水して冷却し、逐次、放水を鑄型上部に移して凝固させる方式を採用しており、水冷鑄型法と称した。問題は鑄塊の中心に巨大金属間化合物が生じやすいことである。これを改良するために Fig. 3 に示すような加熱水冷式鑄造法 (SKS-II 式, SKS: Sumitomo Kinzoku Shindosho の略) が開発された。溶湯を入れた鉄製取鍋を木製水槽の中に徐々に降下させ冷却させるが、水槽に入るまでをガスバーナーと水スプレーで冷却速度を調節する方式である。

(2) 圧延技術

板工場の主要設備は三段熱間圧延機 1 基、大型二段圧延機 10 基、小型二段圧延機 12 基、板引張矯正機 1 基、石炭炉 10 基であった。内、新設したものは幅 4' 迄圧延可能な Krupp 社製三段熱間圧延機、英国 Robertson 社製小幅用圧延機、石炭炉は Rockwell 社から購入した特許に基づいて製作された炉であった。ジュラルミン板の熱間圧延に使用された二段圧延機はロール径 26" × 66" であったが、1938 年には 26" × 80" となった。鑄塊はすべて傾斜鑄造法によるものであり、1931~32 年頃の 60kg 鑄塊から 80kg へ、さらに鑄塊端面が丸型の 70kg、90kg、1939 年頃には 120kg 鑄塊が使用された。熱間圧延の工程は、ジュラルミンの場合、500°C、8 時間の均質化処理を施したのちに、440°C で押え圧延を行い、面削したのちに再加熱し、同じく 440°C で熱間圧延する工程である。

鑄塊厚さ 120mm → 押え圧延 75mm → 面削 →
再加熱 → 熱間圧延 6.4mm

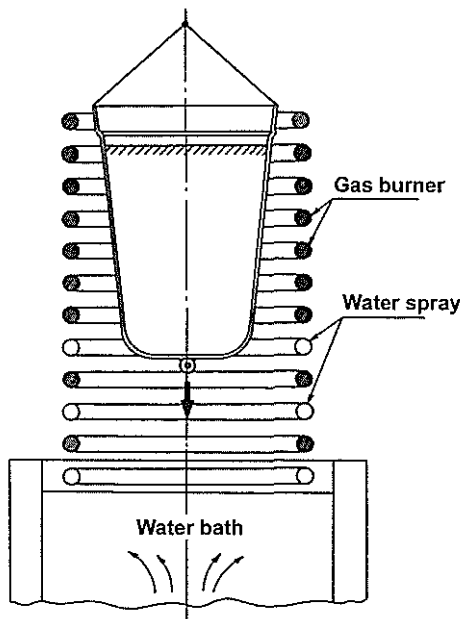


Fig. 3 Casting Mould with controlling cooling rate by gas burner and water spray¹⁾

ここで特徴的なことは、鑄塊をその厚さの 2/3 程度に圧延し、面削し疵を除去後再加熱し、通常の熱間圧延を行う押え圧延である。押え圧延の考え方は、戦後の高靱性高強度合金の開発の中で提唱された中間加工熱処理の考え方の原型となるもので、鑄造組織を鍛錬によって如何に壊すかということが課題である。当時、他社では熱間鍛造で行われていた。クラッド材については、鑄塊の両面に所定の厚さに圧延した皮材を被覆し、鉄のバンドで締め付けたあと熱間圧延で圧着したが、後に鑄造時に皮材を溶着させてからは皮付き鑄塊を用いて前述の工程で熱間圧延された。なお新設の三段熱間圧延機は主に銅及び黄銅板に用いられたが、プロフィール用にも用いられた。

冷間圧延では、大板は 3' × 6', 4' × 8', 5' × 10' ならびに 1000 × 2000mm の 4 種類、小板は 400 × 1200mm, 500 × 1200mm の 2 種類が標準寸法で、大板の最小板厚は 0.5mm、小板は 0.3mm であった。大板の圧延には二段圧延機 (ロール径 26" × 66") が用いられ、0.25" 熱間圧延板を焼鈍後圧延し、中間焼鈍を施してから途中で 2 枚合わせにし、0.8mm まで圧延した。0.6mm, 0.5mm 板は 3 枚重ねの圧延である。焼入れ後は冷間スキンプス上がり (T3) が主で、引張矯正は必要に応じて行った。板厚 1.0~1.5mm のものはすべてロール矯正である。小板圧延には、Schmitz 社製 (胴長 18", 板幅 400mm 用) 2 基と Farrel 社製 (胴長 23", 500mm 用) 1 基の小型帯板圧延機を用いた。プロフィール用素板には長さ 5000mm に切断後、引張矯正したがコイルで出荷したのもあった。

(3) 押出技術

管・棒・線用としては Krupp 社製 1000 トンの横型水圧押出機が 1 基で、1935 年頃に Schloemann 社製 2000 トン 1 基が設置された。前者にはコンテナヒータがなく、薪を焚いて暖めた。鑄塊は直径 5.5" のものが使用された。後者は複動型で、コンテナはガスバーナー方式で、鑄塊は 7" のものが使用された。堅型水圧押出機は Hydraulic 社製 600 トン 2 基が設置され、小径管の素管の押出に使用された。そのほか、丸棒の熱間圧延と管の熱間マンドレル圧延用に 3 段溝ロール圧延が 3 基、2 段溝ロールが 2 基用いられた。

ジュラルミン押出型材の製造に使用されたのは Krupp 社製の 1000 トン横型押出機で、大まかな形状を押し出し、圧延と抽伸で仕上げた。その後、Schloemann 社製 2000 トンも使用された。

(4) 鍛造技術

鍛造には、プロペラ翹素材用として 1930 年 6 トンエアハンマーが設置された。その後、1000 トンの堅型水圧機 3 基、スクリュープレス 4 基、3 トンエアハンマーが 2 基設置された。

3.3 住友の材料開発, ジュラルミンから超ジュラルミンへ

住友軽金属には住友伸銅所時代からの研究報告が保管されており, 最も古いところで, ツェッペリンの残骸を調査した杉浦氏が1917年に報じた「特殊合金に関する研究報」として報告書3通が保管されている。その一つが, 「軽礬素合金ニ就テ」で, 1915年のStahle und Eisen誌と1916年のJIM誌のH. Schirmeister論文の概要を報告して, アルミニウムにおける添加元素の効果を調べ, 銅がもっとも有効であり, 次いでマグネシウムが有効であることを述べている。ほか二報は, 「特殊合金に関する研究」(第一報, 第二報)として, マグナリウム(Magnalium, Al-6~12%Mg), Al-Cu及びAl-Ni-Mg合金に関するものである。

杉浦氏を継いで, ジュラルミンや伸銅などの研究を行ってきたのが, 松田孜(つとむ)博士である。松田博士(1886-1966)は1914年東北帝国大学工学部(物理)卒業後, 住友総本店伸銅所入所, 杉浦氏の試験係に配属, 1922年, 「真鍮青銅およびアルミニウム青銅に関する研究」で理学博士を取得し, 1932年伸銅所研究部長, 1936年伸銅所所長, 1937年取締役, 1941年住友金属工業株式会社常務取締役, その後専務取締役, 副社長を歴任した。この間, 1940年, 勲四等瑞宝章を授与された。研究所内の報告書以外に公開されたデータとしては当時の住友伸銅鋼管株式会社の製本された研究報告がある。この第1号が1932年3月である。この研究報告の目次をみると当時の研究の全容がほぼ把握できるが, その一番最初が松田博士らの論文, 「鍛錬アルミニウム合金の比較試験」である。ここで比較されている合金は, 1930年頃の代表的な鍛錬用合金で, アルコアのジェフリースらの著書“The Aluminum Industry, Aluminum Products and Their Fabrication”(1930, McGraw-Hill Book Company)にも掲載されている。成分値は実験に用いた試料の組成を示す⁷⁾。

ジュラルミン系では

- ・681A (Al-3.53%Cu-0.55%Mg-0.54%Mn-0.46%Fe-0.30%Si, デュレナ・メタルヴェルケ社),
- ・B17S (Al-3.46%Cu-0.35%Mg-0.44%Fe-0.30%Si, アルコア社),
- ・17S (Al-3.99%Cu-0.55%Mg-0.58%Mn-0.45%Fe-0.30%Si, アルコア社, 681Bと同成分),
- ・C17S (Al-4.01%Cu-0.54%Mg-0.58%Mn-0.47%Fe-1.30%Si, アルコア社, 含ケイ素型スーパー・ジュラルミン),

そのほか, 次の合金が比較されている。

- ・アルデュール Aldur (Al-0.99%Si-0.65%Mg-0.45%Fe, ジュリアーニ社 (Guilini Werke A. G.), アルコア51Sも同等),

- ・ラウタル Lautal (Al-4.06%Cu-1.88%Si-0.46%Fe, ラウタヴェルケ社 (Lautawerk)),
- ・25S (Al-4.54%Cu-0.79%Mn-0.82%Si-0.44%Fe, アルコア社),
- ・Y合金 (Al-4.04%Cu-1.58%Mg-2.14%Ni-0.46%Fe-0.13%Si, NPL)
- ・ザンダー Sander 合金 (Al-8.39%Zn-1.65%Mg-0.44%Fe-0.11%Si, ゴールドシュミット社 (Goldschmidt A. G.))

これらの合金で, 引張強さ, 耐力及び硬度はスーパー・ジュラルミン, ザンダー合金がもっとも優良, 耐酸性でアルデュールが最も優れている, これに次いでジュラルミン系, ザンダー合金が最も劣ると報告されている。

ザンダー合金はAl-Zn-Mg系合金で, エッセンのゴールドシュミット社の金属研究室で開発され, ドイツでは“Constructal”と称されていた^{8,9)}。なかでもConstructal 8 (Al-7%Zn-2.5%Mg-1%Mn-0.2%Si)は引張強さ60kg/mm², 伸び9~10%である。Al-Zn-Mg系の状態図は既に1913年Egerによって発表されていたが^{10,11)}, 1923年頃, ザンダーとマイスナーは, この三元系状態図を再検討し, Al-MgZn₂が擬二元系をつくり, しかも溶解度が温度とともに減少し, 475°Cでの最大固溶度28%から室温の4~5%まで変化することがわかった¹²⁾。そこでMgZn₂を4~10%含むアルミニウム合金をつくって時効性を調べたところ, 常温時効するとともに人工時効によってさらに強力なものが得られることがわかった¹³⁾。残念ながら当時は耐食性が悪いとのことで実用化にはならなかった。この件に関して, 西村博士は「随筆軽合金史」の中で, 1927年, 西原清廉氏の卒業論文の実験としてMgZn₂のアルミニウムに於ける固溶度を調べるとともに, 時効硬化を調べてもらったが, 焼入れした試料にブリネル硬度計で窪みを造ると甚だしいときは直に, あるいは時間が経てから, その周辺に割れ目が生じて, 所謂時期割れの現象を認め, この合金は使用し得ないとの結論になったと述べている^{12,14)}。

鍛錬用のアルミニウム合金の研究をもとに, 松田博士は, 1932年1月, 社内研究報告で超「ジュラルミン」の研究(第一報)を報告している¹⁵⁾。調査した合金組成はAl-8.60%Zn-1.57%Mg-1.41%Mn-0.34%Fe-0.14%Siで, ザンダー合金である。この合金の熱処理方法として, 450°C水冷, 室温時効, 100°C/6時間時効, 120°C/22時間時効を選定している。120°C/22時間時効では, 引張強さ51-55kg/mm², 耐力47kg/mm², 伸び10-14%が得られる。この研究は翌年9月の第12報まで続くが, 研究途中で伸び, 反復屈曲回数, 衝撃値が劣るため強度は犠牲にしてこれらの特性を向上させるためMgを

6%に増やした合金に転換した。この間、海軍との情報交換があったかどうか不明であるが、海軍技術研究所の五百旗頭(いおきべ)中佐からの依頼により住友とほぼ同じ合金、技研式超ジュラルミン Al-6%Mg-3.5%Zn-1.2%Mn 合金の試作に携わった¹⁶⁾。1933年7月五十嵐博士もこの合金の加工性、機械的性質を調査した。加工性は熱間で衝撃圧縮試験を行い、割れが生じるまでの程度圧縮できるかで評価した。この詳細は五十嵐博士の学位論文に超ジュラルミンに関する研究の一部として掲載されている¹⁶⁾。焼入れのままでは引張強さ 46kg/mm²、伸び 21%で、160℃で24時間の焼戻しで引張強さ 54kg/mm²、耐力 41.5kg/mm²、伸び 8%で機械的性質はジュラルミンに比べて優秀で、しかも比重が小さいので比強度を向上させるが、「然しながら本材質は加工性甚だ困難にして非常なる手数を要する」。「高温度に於いても尚 25~40%以上圧縮加工は不可能」、「従って本材質は試験的に非常な手数をかけて板棒を作ることは出来るが、廉価に多量に製造することは甚だ困難である。之本材質が実用合金となり得ない理由である」¹⁷⁾と結論付けている。

当時(1929年頃)の住友伸銅所のジュラルミンを Table 1 に示す^{1,18)}。D₂が一般にジュラルミンと称されて、引張強さは 42-45kg/mm²程度である。この強度レベルを超える合金は合金系に拘らずどれも超ジュラルミン(Super Duralumin)と呼ばれた。

伸銅所では松田博士の後を受けて田邊友次郎博士が登場してくる。田邊友次郎博士(1895-1957)は、1919年九州帝国大学工学部応用化学科を出て、住友伸銅所に入り、1927年「焼戻硬化性アルミニウム合金の研究」で学位を取得、1936年研究部長、1943年取締役・伸銅所長、1945年常務となった。復水器管用銅合金、強力耐食性合金「アルブラック」の開発者としてもよく知られている。アルミニウム関係では1925年(大正14年)3月27日の社内報告書に田邊友次郎研究課員翻訳の「「アルデュール」軽合金ノ性質及用途ニ就テ(独文)」がある。さらに田邊氏の「最近の Duralumin 類似合金と新軽合金“MC”の特異点」(1925.5.5)と題する報告書で、各社、各研究機関の特許から見た合金特許を調査し、類似合金は、Duralumin タイプ (Al-Cu-Mg-Si)、

Al-Cu タイプ、Al-Mg-Si タイプに分類されることを、さらに自身で開発した合金 MC の特徴を述べている。MC 合金は、成分は Cu 0.5~2.5%、Mg 0.2~1.0%で、焼入れ後冷間加工を施し、その後 100-170℃の低温で軟化を特徴とする合金で、特許と陸海軍への報告書を添付している。同時期に、ジュラルミンに匹敵する合金として新合金 C6 (Al-6%Cu) の研究開発もいつている(1925.10)。同年、五十嵐勇氏(注1)は「シルミンニ就テ」(1925.7)で文献をレビューしている。

(注1)五十嵐博士(1892-1986)は1913年広島高等師範学校卒業後、台湾の中学で教鞭を執った後1919年京都帝国大学に入学、1922年同大学理学部物理学科を卒業後住友合資会社に入社し、同伸銅所に勤務した。同年5月より翌年7月まで、住友家が本多光太郎博士の発明したKS鋼や研究所設立を支援した関係からか、東北帝国大学金属材料研究所に留学し、所長の本多博士に師事した。金属材料研究所は、1922年その前身の鉄鋼研究所が研究対象を鉄と鋼だけでなく銅合金や軽合金などにも広げるために改称されたものである。1924年には月刊誌「金属の研究」が発刊され、その第一巻には五十嵐博士の「焼入合金の時効に就テ」や松田博士の「青銅、アルミニウム青銅及び真鍮の変態に就テ」の論文が掲載されている¹⁹⁾。住友金属からも多くの研究者が派遣された。1939年、「航空機用材としての軽合金の研究」で工学博士を授与され、1941年名古屋製造所研究部長、1943年住友金属工業株式会社金属研究所長兼伸銅所研究部長、金属研究所は伸銅所と名古屋軽合金製造所の研究技術部門を横断的に統括するために1943年設立、1945年技師長兼名古屋製造部技術部長を歴任し、1946年退社した。その後、東北帝国大学に講師として招聘され、翌年工学部教授、1951年秋田大学鉱山学部教授を兼務、1958年岩手大学教授、1962年定年により退職、住友軽金属工業株式会社研究顧問、1970年顧問を退く。この間、1968年勲三等旭日中授章、1974年公益財団法人本多記念会の本多記念賞が授与された。

五十嵐博士は後述するように超々ジュラルミンの発明者であるが、入社当時は、シルミンなどの Al-Si、Al-Si-Zn や Al-Si-Cu 系の鋳物材やザンダー(Sander)合金、Zinc Duralumin (Al-20%Zn-3%Cu) への Mg 0~2.0% 添加の影響を調査している。そのほか、銅合金、鋳物用及び鍛錬用マグネシウム合金やその耐食性に関する一連の研究も行っている。社内研究報告書を見ると、多分実習も含めてか、Al-Cu-Mg-Ni-Fe 系 Y 合金などのピストン用鋳物合金、ジュラルミン、ラウタル合金、アルデュール合金、ザンダー合金、Al-Mn-Mg 系合金などの各種アルミニウム合金の機械的性質や耐食性も調査、研究している。こうした初期の幅広い調査研究

Table 1 Chemical compositions (mass%) of Duralumin type alloys at Sumitomo (about 1929)^{1,18)}

Alloy	Cu	Mn	Mg	Si	Al
D ₀	4	0.30	0.50	0.30	remainder
D ₁	4	0.55	0.53	0.30	remainder
D ₂ (Duralumin)	3.85	0.45	0.53	0.30	remainder
D ₃	2.50	—	0.30	—	remainder

が超々ジュラルミンの研究開発に役立っていると考えられる。

軽金属に「研究室の片隅から」という随想を執筆し、研究を始めた頃の話が掲載されている²⁰⁾。

「前々号から先輩諸賢の華やかな御話、勇ましい思い出興味深く拝見していた。ところが此度は僕に軽金属工業の回顧を書くようにとのことだが、研究室の片隅にジメジメと一生をおくった僕にはそれ等と逆な思い出のみに過ぎない。だが然し谷があつての山で皆が山ならば山はなくなる。勇ましい御話の引立役にジメジメした回顧も一つ位あつてもよからう。

僕は学校を卒業以来会社の研究室でずっと軽金属を弄っていた。はじめはアルミニウムという事だったが丁度日本に於けるアルミ合金の勃興期で先輩諸賢が皆アルミに手をつけられるので大変気楽にボヤボヤしていることが出来た。

やがてマグネシウムを取扱わねばならぬ時代が来た。僕はその方の手伝をする事になった。マグネシウムは取扱にくいので誰も手を出さぬ。不精な僕も止むを得ずいろんな実験をやらねばならなかつた。「先輩が夫々立身出世されると馬鹿な我輩も止むを得ず研究の凡てを見ねばならぬことになった。丁度その頃デュラルミンは板につきSD, SDCも工業化出来てやれやれと思っているとトム合金と云うものが華やかに宣伝された。第一次大戦当時英国にはE合金というのがある。其の後独乙にSander合金と云うのがある。別にめずらしい合金ではないが時期割れがあるので使いものにならぬ。学業成績は優秀でもLoadがかけられない秀才見たようなものである。とはいつても世間はうるさいし。止むを得ず吾々は使いものにするようにしようではないかと相談した。」

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年頃には米国の24S合金の情報が入ると、松田博士は海軍からの「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)では、成分に関して、「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、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る²¹⁾。引張強さは48kg/mm²、耐力は40kg/mm²、伸びは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によるものと考えた。Table 2は田邊博士の住友金属

Table 2 Tensile properties in US alloys, 24ST and 24SRT²²⁾

Alloy and temper	Yield strength kg/mm ²	Tensile strength kg/mm ²	Elongation %
24ST	30.1	45.5	20
24SRT	37.1	47.6	13
Alclad 24ST	28.0	42.0	18
Alclad 24SRT	34.5	43.4	11

Typical composition : Cu 4.2%, Mg 1.5%, Mn 0.6%,
(Fe 0.22%*, Si 0.16*, * Analyzed value²¹⁾)

Temper T : 500°Cquenching and natural aging

Temper RT : 500°Cquenching and natural aging followed by cold working

工業・研究報告に記載されている米国24ST, 24SRTの組成および機械的性質のデータである²²⁾。

田邊博士は1933年8月から1934年4月にかけて、松田博士も1935年10月から1936年4月欧米に相次いで出張し航空機用アルミニウム合金や銅合金の調査を行った。この背景としては、各国で航空機用の超ジュラルミンやピストン用合金の開発がしのぎを削っていることによるものと思われる。住友金属工業・研究報告に掲載された田邊博士の報告、「欧米に於ける航空機用非鉄合金に就て」²²⁾では、当時の状況を「ご承知の如く世界は其の何れの国たるを問わずナショナリズムの波澎湃として其岸を洗ひ、工場見学は極めて困難で、航空機に関して殊に甚しい。就中ドイツに於てはゲーリングが航空相として極度の秘密主義を採り航空研究所の見学すら思ふに任せぬ」とある。こうした状況の中、精力的に欧米を視察してきた。そのときの出張記録が訪問先の会社案内パンフレットと一緒に今も研究所に保管されている。このときの手紙類を見ると、大学や研究機関は東北大金研所長の本多教授らの紹介状で訪問していることがわかる。New KensingtonにあるアルコアのAluminum Research Laboratoriesの研究所も訪問し、各種の試験機を見学している。応力腐食割れ試験方法も図示して紹介されており、「Simpleにて面白し、一考の価値あり」とコメントがついている。研究所のパンフレットも保管されており、各種性能評価試験機が写真入で紹介され今では貴重な資料である。なお、当時の研究所の状況は、参考文献23にも詳しく紹介されている。

さて、ドイツに於ける軽合金については、「之は独りドイツのみではないが、航空機用強力鍛錬アルミニウム合金としては依然としてジュラルミンが斯界の王座をすべっていない。併しながら、引張強さ45kg/mm²以上、出来得べくんば50kg/mm²以上のものを得んとする即ち超ジュラルミンの研究が盛んである」と²⁰⁾。デュレナ・メタルヴェルケ社では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

Table 3 High strength aluminum alloys in USA and Europe²²⁾

		Cu	Ni	Mn	Mg	Fe	Si	Ti	Cr	YS kg/mm ²	TS kg/mm ²	E %
Germany	DM31-1 (*1)	3.5-4.5 3.66		0.9-1.5 1.17	0.9-1.5 1.38	0.29	0.2-0.9 0.65			32-40	46-52	16-10
	DM31-2 (*2)									40-42	50-52	12-10
Germany	681ZB-1 (*1)	4.2		0.6	0.9		0.5			28-34	42-46	18-12
	681ZB-2 (*2)									36-38	46-48	12-10
USA	24ST (*1)	4.2		0.6	1.5					30	45.5	20
	24SRT (*2)									37	48	13
USA	C17ST	4		0.5	0.5		1.25			35-38.5	44-49	14-8
France	Avial	1.5-3.5	0.5-1.5		0.25-1.0		0.5		0.5-1.0	30-38	44-54	20-10
UK	DTD252 Duralmin F	3.5-4.7		0.4-1.5	0.4-1.5	<0.7	0.7-1.5			34.5	>44	>10
UK	RR56	1.5-3.0	0.5-1.51		0.4-1.0	0.8-1.5	<1.0	<0.2		39-42.5	44-50	20-10
		2	3		0.8	1.35	0.6	0.08				

*1) - 1, ST : Quenching and natural aging

*2) - 2, SRT : Quenching and natural aging followed by cold working

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発売している。米国に於ける軽合金では、アルコア社の発売に係わるもので、「現今最も注目すべきは 24ST 及び 24SRT である。その組成は Al-4.2%Cu-1.5%Mg-0.6%Mn で、これらのクラッド材もある」と報告している。英国では RR56 や RR59 のピストン材を調査している。Table 3 は欧米各国の超強力鍛錬合金一覧を示す²²⁾。

この当時の日本では、1934 年、ドイツの 681ZB や DM31 合金と類似な焼戻し型超ジュラルミンで SD1 (Al-4.2%Cu-0.75%Mg-0.7%Mn-0.7%Si) と称した超ジュラルミンが、また SA1 (Al-1.2%Mn-0.8%Cu) を被覆した合わせ板も松田博士らによって開発されたが、この合金は焼戻後の耐食性に問題があり、また焼戻に時間を要して生産性が劣るため焼戻を必要としない 24S に代わることとなった。1935 年、24S 型超ジュラルミンは SD (Super Duralumin), その合わせ板は SDC (Super Duralclad) と称され、前述の SD1 は廃止された。SDC の皮材は、当初 SA1 であったが、のちには SA3 (Al-1.5%Mn-0.55%Mg) 合金となり、24SC より高強度の合わせ板となった。この皮材については米国のアルクラッド材では純アルミニウムが、ドイツのデュラルプラット材に耐食性アルミニウム合金が被覆されている。五十嵐博士は学位論文でこの皮材についての研究についても触れ、純アルミニウムと SA3 の表面研磨材と焼入れ材について 3%NaCl 液で電位の測定を行い、表面研磨材ではほぼ同じ電位であるが、焼入れ材では酸化

Table 4 Japanese military specification for aircrafts on Super Duralumin SD and SDC²⁴⁾
(1 mm thick sheet)

Alloy and temper	Yield strength kg/mm ²	Tensile strength kg/mm ²	Elongation %
SDH	28	44	15
SDR	32	44	10
Duralclad : SDCH	27	42	15
Duralclad : SDCR	31	43	10

SD : Cu 3.8-4.8 Mn 0.4-1.0 Mg 1.2-1.8 Fe <0.6 Si <0.6
SDC (Super-Duralclad)

Cladding alloy (SA3) : Cu <0.25 Mn 1.0-2.0 Mg 0.4-1.0
Fe <0.6 Si <0.3

Temper H : Quenching and natural aging

Temper R : Quenching and natural aging followed by cold working

皮膜の状態が異なるため電位差が異なり、純アルミニウムでは超ジュラルミンを保護できず、SA3 のみが保護できることを明らかにし耐海水性に優れていることを実証した。さらに心材の銅が皮材に拡散して皮材の耐食性を減じるため、各国は溶体化処理の加熱時間を調整して耐海水性を維持していたが、五十嵐博士は銅の拡散防止のため、皮材の耐食性を劣化させず銅の固溶度を減らす元素として Cr に注目し、Cr0.3% 以上添加した皮材を開発し、クラールクラッドと称した。Table 4 は日本の超ジュラルミン SD および SDC の海陸航空規格を示す²⁴⁾。

3.4 超ジュラルミンから超々ジュラルミンへ —合金探索—

1935年8月10日付けの社内研究報告書 No.3326, 五十嵐「超高力軽合金の探求 (No.1)」(Fig. 4)がある。これが超々ジュラルミン開発の第一報である。その第一章はしがきに五十嵐博士はこう述べている。「最近、日本電工 75kg/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(注1)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((抗張)力 54-58kg/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」²⁵⁾。Fig. 5 に五十嵐博士と北原氏の写真を示す。

ここで日本電工(のちの昭和電工)の 75kg/mm² 軽合金(トム Thom 合金)とは、西村教授の言葉を借り

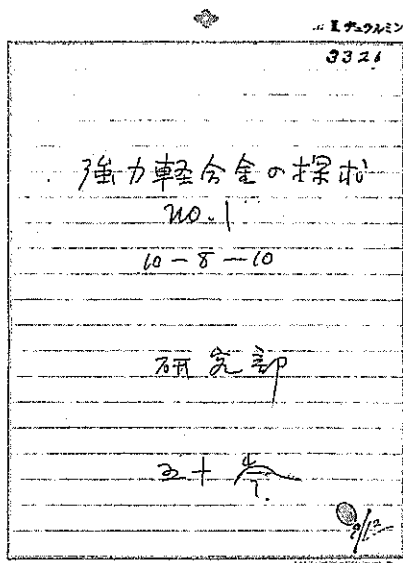


Fig. 4 Research of Extra Super Duralumin (1st Report)²⁵⁾



Fig. 5 Dr. Isamu Igarashi (left) and Mr. Goro Kitahara (right)

ると、「トム合金は喧伝されたが、海外までそのニュースが伝わってドイツなどでも問題となった。しかし応力割れの問題が解決されてなかったので、実用にならなかった。しかし、トム合金が ESD の誕生の動機を造ったことは明白であるから、日本火工株式会社(日本電工系、現在の日本冶金の前身)松永陽之助氏が昭和 10 年 12 月 13 日に特許出願(特許第 133182 号, 登録 1939.11.13)したアルミニウム合金を茲に紹介したい。これは Mg 3~6%, Zn 6~14%, Fe 0.1~0.5%, Si 0.1~0.7%, Mn 0.1~1.5%, Ti 0.1~0.5%, Ni 1~5% を含むアルミニウム合金で、熱処理すると引張強さ 80kg/mm² になるといふ」合金で、「唯、時期割れに関して注意の払われていなかったことは、その記述から知ることは出来るが、惜しいことであった」とある²⁶⁾。

(注1)北原五郎氏(1892-1971)は秋田鉱専卒業後、海軍技術研究所に入所。20 数年勤務後、1935 年住友伸銅鋼管(株)入社。名古屋工場誕生とともに研究課長として名古屋に移り、1945 年堅田鋳物製作所研究部長となった。22 歳年下で、同時期に入社した住友軽金属元常務取締役深井誠吉氏は、「当社が世界に誇る強力合金 ESD の発明開発について五十嵐博士の片腕として、もっと端的にいえは、五十嵐、北原両雄の名コンビがあったからこそ ESD は誕生したと思います」。さらに「北原さんの人柄を語ることは後輩の私には不可能ですが、非常に善良でまた性急な人でした。私もよく聴きましたが『俺は兎に角実験するのだ、考えるのはその後だ。余り考えたり参考文献を調べると迷いが出る』といった調子でいわゆる『手が早くて』しかも実験が上手で、広範囲にわたる実験をする人でした。五十嵐さんがアイデアを出し北原さんがそれを実験する、というこの組合せは誠に絶妙であったと思います。『研究とか開発には、明晰な頭脳と立派な指導者は欠くことのできぬ要素であります。もう一つスピードが必要だと思えます。どんな優秀な発明も他に先んじられては影が薄くなります。ESD のような大きな仕事が極く短時日の間に完成されたのは北原さんの『迅速なる手』が大きな要因であったかも知れません」と述べている²⁷⁾。

トム合金に関しては、海軍も相当気にして、松永陽之助氏が海軍大学で講演をした後、当時海軍航空本部の材料主務者であった大谷文太郎氏は上層部から呼びつけられ、こういう良い材料があるのに何をしているのかと言われたことがある。これに対し大谷氏は「これはすでにザンダーが 10 年前に発表したものである。これがシーズンクラックを何とか解決して実用に供したいと思って、すでに住友に指令しております」と回答した。「住友としてはこの指令の前にどの程度研究が進んで居ったかこの点は知りませんが、共研究指令を出した覚え

があります。それより前に陸軍としては、このトム合金の仮規定を採用しました。海軍としては時期割れ防止の解決研究なきトムは採用出来ぬとして住友の研究を待ち、この研究結果を航空廠の川村君と相談研究会を度々開いて検討してあれを採用した。採用する時は実に悲壮な決意を持って採用した。但し、その採用する時分には板はいかん、まず押出型材を特に採用しました。華嚴の滝から飛んだようなつもりであった。そして規格に制定してESDを初めて世の中にだしたのである」と回想している²⁸⁾。柳田邦男氏の「零式戦闘機」(文芸春秋社)では、この開発研究を命じたのは、海軍航空廠発動機部員で材料研究者担当の川村宏矣機関中佐とのこと²⁹⁾。この本の中で、「当時すでに45キロ超ジュラルミンが開発されていましたが、将来戦闘機を飛躍させるには、同じように軽く、しかももっと強力な、一平方ミリメートル当たり五十キロから六十キロ位の張力にまで耐えられるような軽合金が欲しいということになりましたね。それで住友金属に対し、海軍航空廠として、研究開発を要請したのですよ」と川村氏は述べている。残念ながら、戦後すぐに焼却され、これに関する公式記録は残っていない²⁸⁾。

かくして、先人たちの研究をベースに軽合金の探求が開始された。E合金、ザンダー合金、ラウタル合金、海軍技術研究所の松山合金、五百旗頭合金、伸銅所の松田合金などのデータをベースに、まずは強度と加工性から合金系の予備検討がなされた。これはかつて圧延加工で大いに苦しんだことによるものであろう。興味深いことにAl-Zn-Mg-Liも検討された。ここでE合金というのは、NPLのローゼンハインらの開発合金Eでその組成はAl-20%Zn-2.5%Cu-0.5%Mg-0.5%Mn、亜鉛を20%まで含みZinc Duraluminとして知られていた。圧延材の強度は40°Cで焼入れ後、再圧延し時効したときの引張強さ53kg/mm²、耐力45kg/mm²、伸び10%であった。しかしながら、亜鉛が高い合金は引張強さに比べて十分小さい応力でも長時間の負荷で割れを生じる応力腐食割れが問題であった。腐食雰囲気では割れは促進されたが、Mn添加で結晶粒が伸長して割れの感受性は低下したと報告されている。

最終的にはザンダーのAl-MgZn₂系合金、超ジュラルミン、そして英国のローゼンハインのE合金をベースに成分が検討された。学位論文には、「第一のもの(S)はMg-Zn、第二のもの(D)はCu-Mg、第三のもの(E)はCu-Zn-Mgを主成分とするアルミニウム合金である。Zn、MgおよびCuはAgを除いては、Alと最も多く固溶体を作り、またその温度による溶解度の変化も最も多いものである。従って最強力にして最熱処理効果大なる実用合金(Agの如き貴金属の添加は工業用合金としては面白くない)は此の系にあることが想像される。航空機構成材料としては強度の大なる事は勿論必

要であるが薄板及び型材に製作可能という事がその強力材料を生かし使用する上にかく可らざる必要条件である。従って先づ此のS、D、及びEの三元系に於いて焼鈍状態に於いて最軟く熱処理状態に於いて最も強い、即加工性最大にして熱処理効果最大なる点¹⁷⁾を見いだすことで合金探索が行われたとある。それぞれの合金成分は、

D: Al-4%Cu-1.5%Mg-0.5%Mn,

S: Al-8%Zn-1.5%Mg-0.5%Mn,

E: Al-20%Zn-2.5%Cu-0.5%Mg-0.5%Mn

である。まず「D-S-E三元系の全系に渡る金型鋳物を鑄造し400°C、450°C、500°Cに各4時間保ち投水し7日間時効し後其ブリネル硬度を測定し、尚此等を150°Cに24時間焼戻を行ひ再び其硬度を測定し、次に300°Cに5時間焼鈍し炉冷して三度其硬度を測定した」。この結果をTable 5に示す。次に「焼鈍した硬度を基礎とし之と焼入焼戻により得られた硬度とを比較して其硬化率(注: 硬化率=(最高硬度-焼鈍硬度)÷焼鈍硬度)を求める。此硬化率(Hardenability)の大なる事は最高硬度の高き割合に焼鈍状態に於いて軟らかき材質なる事を示すものなるが故に加工等も容易に出来得る筈である³⁰⁾との確信に基づいての事である。この結果、No.54、No.61が硬く、「其成分は亜鉛8及10%、銅2.5%前後である」として、三つの合金が選定されたとある¹⁷⁾。

• Al-10%Zn-1.5%Mg-2.5%Cu-0.5%Mn-0.01%Ti
(ESD No. 1 合金)

• Al-8%Zn-1.5%Mg-2%Cu-0.5%Mn-0.01%Ti
(ESD No. 2 合金)

• Al-8%Zn-1.5%Mg-2.5%Cu-0.5%Mn-0.01%Ti

これらの合金の板、棒、押出型材、管について各種の特性を調査し、「新強力軽合金E.S.D.は耐力36~65kg/mm²、引張強さ58~70kg/mm²、伸び8~20%、硬度150~200を有し現在使用されつつある軽合金に比して著しく優秀なる機械的性質を有し航空機構成材料として画期的な新材料と思われる。然るに、本合金は或る特殊な状態の下に於て時刻の経過に従って亀裂を生ずるが如き致命的な欠陥を有する。独逸のザンダー合金及び英のE合金が優秀なる機械的性質を有するにかかわらず実用化されざる所以のものは、主として此の種の欠陥あるによる¹⁷⁾として割れの対策の検討に入る。

社内報告書でE.S.D.合金の名称が表題に出てくるのは、Table 6に超強力軽合金の研究報告書の一覧を示すように、研究報告No.3854「超強力軽合金の研究(第10-5)、E.S.D.合金の「クラッド」材の機械的性質」(1936.6.30)からである。多分この頃、合金の方向性が決まったことによるものと考えられる。E.S.D.の各アルファベットの後ろにピリオドがある表現になっている。この名称に決まった背景については報告書には特に記述がない。深井誠吉氏によると超々ジュラルミンをESD(Extra-Super-Duralumin)と名付けたのは住友

Table 5 Hardness of combination alloys with D, S and E alloys³⁰⁾

Alloy Number	D (%)	S (%)	E (%)	400°C 4 hWQ		450°C 4 hWQ		500°C 4 hWQ		300°C 5 hFC	Hardenability (%)
				RT 7days	150°C24h	RT 7days	150°C24h	RT 7days	150°C24h		
39	80	20	0	94.2	93.0	116.0	109.0	107.0	113.0	52.8	120
40	60	40	0	96.8	99.2	110.0	108.2	98.4	105.0	63.0	75
41	40	60	0	102.0	132.4	109.0	131.2	95.0	126.4	56.2	136
42	20	80	0	114.0	140.0	101.0	137.4	95.0	147.2	62.6	136
43	80	0	20	105.8	104.0	121.0	118.0	108.0	120.0	59.8	102
44	60	0	40	120.0	138.8	130.0	153.2	107.4	145.8	83.6	74
45	40	0	60	130.0	154.8	140.2	161.2	120.0	147.2	83.0	94
46	20	0	80	153.0	156.4	143.0	153.2	114.0	131.2	95.4	64
47	0	80	20	116.0	147.2	125.2	158.0	110.0	158.0	76.4	107
48	0	60	40	134.8	162.7	140.2	161.2	127.6	158.0	83.6	89
49	0	40	60	134.8	158.0	140.0	151.6	130.0	144.4	94.8	67
50	0	20	80	147.2	161.2	141.6	159.6	118.0	138.8	95.4	69
51	80	10	10	102.0	97.6	113.0	116.0	108.0	113.0	57.4	102
52	10	80	10	119.0	151.6	110.0	147.2	109.0	159.6	73.0	118
53	10	10	80	153.0	165.8	150.0	153.2	119.0	131.2	97.6	116
54	60	20	20	109.0	119.0	115.0	130.0	117.0	132.4	77.6	74
55	20	60	20	117.0	150.0	122.0	154.8	109.0	153.2	67.6	129
56	20	20	60	145.8	161.2	144.4	164.2	127.6	145.8	86.6	137
57	40	30	30	126.4	156.4	125.2	161.2	109.0	123.0	65.0	148
58	30	40	30	124.0	154.8	128.8	169.4	120.0	159.6	73.8	129
59	30	30	40	131.2	156.4	115.0	150.0	115.0	145.8	74.0	112
60	20	40	40	127.6	153.2	131.2	161.2	103.0	140.2	75.8	113
61	40	20	40	122.0	150.0	130.0	167.6	118.0	151.6	67.6	148
62	40	40	20	113.0	115.0	116.0	162.7	116.0	148.6	71.2	128
63	100	0	0	94.2	93.6	113.0	105.0	113.0	117.0	53.6	118
64	0	100	0	108.2	136.0	112.0	143.0	111.0	148.6	73.8	101
65	0	0	100	158.0	161.0	145.8	144.4	124.0	124.0	89.8	79

金属専務取締役で伸銅所所長の古田俊之助氏で1936年5～6月頃とのことであるが、住友軽金属年表では、「1937年、研究の基礎となったE合金、S合金、D合金（超ジュラルミン）の頭文字をとってESDと命名した」とある。さらに興味深いことに、この年の5、9、11月の報告書では、「アルミニウム軽合金界に一大センセーションを投げた」引張強さ75kg/mm²と称する日本電工製のトム合金板材、棒材、鍛造丸棒を入手して性能の確性調査を行っている。西村博士が先に述べたように如何にこのニュースの衝撃が大きかったかを物語るものである。研究報告No.3738「Thom Alloyに就いて」（1936.5.5）で、この入手したトム合金板材の組成はAl-9.05%Zn-2.15%Mg-0.9%Cu-0.49%Mn-0.22%Fe-0.27%Siで引張強さは61.7kg/mm²、耐力43.2kg/mm²、伸びは13%であった。この合金は五十嵐博士らの「研究している「60kgジュラルミン」と成分、機械的性質ともによく類似す」と5月の報告書にはコメントが付記されている。この「60kgジュラルミン」とはE.S.D.のことであろう。No.3852の本文中のT415にE.S.D.と追記しているので、このE.S.D.の組成は研究報告No.3814、「超強力軽合金T418、T415の機械的性質」からT415=E.S.D.：Al-10%Zn-1.5%Mg-2.5%Cu-0.5%Mn（1936.6.9）と考えられる。この報告書No.3814ではトム合金と同じ成分を合金T418として押出棒を作

り性能を比較してESDとほぼ同等の性能を示している。

3.5 時期割れ（応力腐食割れ）の評価方法の確立

さて、ここからが五十嵐、北原のコンビが本領を發揮した時期割れ対策である。Table 7に時期割れに関する報告書の一覧を示す。1936年8月20日の社内研究報告No.3939「E.S.D.新合金の「割れ」に就いて（第一報）」がその対策の第一報である³¹⁾。この報告書の概要を少々長い重要なので引用する。執筆者はその筆跡からして北原氏によるものと思われる。

「E.S.D.軽合金の残留内部応力の下に於ける割れを発生する特殊現象を調査し且つ現象の防止対策に就き考究した。

1) 割れの試験方法としては下記三方法を使用した。

1. 刻印法 2. 圧搾法 3. 屈曲法

2) i) 銅を含むと否とに係らず本系合金は残留内部応力の下に於いて自然に割れる傾向性を有す。勿論これはその成分又は状態の如何によりて多少の緩急の差はあるもいずれも割れる。

ii) 割れは静的外力を受けた場合よりも衝撃外力を受けた場合が遥かに甚だしい。

iii) 割れ疵は常に結晶境界線に沿っておる。また故意に破壊せし処も同様に概ね境界線に沿って割れる傾向にあ

Table 6 Technical reports in Sumitomo Metal on super high strength aluminum alloys

Report Number	Title and subtitle	Creation date	Content
No.3326	Research on super high strength aluminum alloys (No. 1)	1935. 8.10	Declaration of start in this study
No.3363	ibid. (No. 2)	1935. 8.29	Effect of MgZn ₂ on mechanical properties of Lantal alloys (Al-4%Cu-2%Si-0.5%Mg)
No.3379	ibid. (No. 3)	1935. 9	Effect of contents on hardness of E alloys (Al-20%Zn-2.5%Cu-0.5%Mg-0.5%Mn)
No.3385	ibid. (No. 4)	1935. 9.10	Natural and artificial age hardening of Al-(Al ₃ Zn ₆ Mg ₇) alloys and Al-(Al ₆ Mg ₄ Cu) alloys
No.3427	ibid. (No. 5)	1935.10	Estimation of properties in E alloys
No.3479	ibid. (No. 6) Tensile test about new kind of aluminum alloys	1935.11. 5	Tensile properties (1 mm thick sheet) in Lantal alloys with 8~10% (Al ₃ Zn ₆ Mg ₇) and Al alloys with 10~14% (Al ₃ Zn ₆ Mg ₇)
No.3538	ibid. (No. 7) Relationship between heat treatment and mechanical properties in No.23 and 24 alloys	1935.12.17	Examination in the optimum condition of heat treatment on the alloys in the previous report
No.3586	ibid. (No. 8) On the ternary alloys, based on D-S-E alloys	1936. 2. 4	Research by assuming that the optimum alloy exists in Al-Cu-Zn-Mg alloy system combined with D, S and E alloys
No.3719	ibid. (No. 9) On the mechanical properties of 60kgf class Duralumin sheet	1936. 4. 25	Next four alloys were chosen based on the result in No. 8 Report and the mechanical property of them (1 mm thick sheet) was examined. Al-9.6%Zn-1.2%Mg-2.0%Cu-0.5%Mn, Al-10%Zn-1.3%Mg-2.5%Cu-0.5%Mn, Al-6.5%Zn-3.0%Mg-0.5%Mn, Al-7.5%Zn-3.5%Mg-0.5%Mn
No.3800	ibid. (No.10) On the mechanical properties of 60kgf class Duralumin extruded bar	1936. 6. 2	Next two alloys were extruded into round bar with 30mm diameter and examined the tension test. Al-10%Zn-2.5%Cu-1.5%Mg-0.5%Mn, Al-9.0%Zn-1.0%Cu-2.0%Mg-0.5%Mn. These bars quenched followed by artificial aging show yield strength is more than 60kg/mm ² , tensile strength is more than 65kg/mm ² and elongation is more than 8%. The end of extrusion is very hard and has remarkable high strength compared with the top.
No.3810	ibid. (No.10- 2) On the mechanical properties of 60kgf class Duralumin	1936. 6. 8	Mechanical properties of sheets and extruded shapes were investigated. Sheets show yield strength is 50~52kg/mm ² , tensile strength is 60kg/mm ² and elongation is 10~15%. Extruded shapes have the same tensile properties as bars.
No.3851	ibid. (No.10- 3) Effect of additional elements on the properties of super high strength aluminum alloys	1936. 6. 26	Mechanical properties and corrosion resistance to sea water were investigated in Al-10%Zn-1.3%Mg-2.5%Cu-0.5%Mn and Al-8%Zn-3%Mg-0.5%Mn alloys added with Ni, Fe, Cr, Ca, Ti, V and etc. The additions of Cr (minor) and Ca, V and Ti did not reduce the these properties and increase corrosion resistance.
No.3852	ibid. (No.10- 4) On the workability of super high strength aluminum alloys	1936. 6. 26	Bending property by bending test of sheets was compared between alloy T415 (ESD: Al-10.1%Zn-1.61%Mg-2.3%Cu-0.52%Mn-0.28%Fe-0.18%Si), and alloy T418 (Thom alloy: Al-9.33%Zn-2.0%Mg-1.0%Cu-0.53%Mn-0.28%Fe-0.21%Si).
No.3854	ibid. (No.10- 5) Mechanical Property of E. S. D. C (Extra Super Duralclad) alloy	1936. 6. 30	E.S.D.C alloy with cadding alloy containing Cr was rolled. Adhesion of clad is good and the diffusionability of Cu by heating increase remarkably in a long time, but it is not necessary to regard within the regulated time.
No.3859	ibid. (No.10- 6) Heat treatment of E. S. D. alloy	1936. 7. 4	Determination of optimum quenching temperature and artificial aging time
No.3865	ibid. (No.10- 7) Corrosion resistance to sea water of E. S. D. alloy	1936. 7. 6	Measurement of the weight reduction and tensile test after dipping into 3% brine water as testing method. In bare sheet, intergranular corrosion occurred since corrosion resistance to sea water was not good, while this property improved remarkably in the clad sheet with cladding alloy containing Cr.
No.3892	ibid. (No.10- 8) Artificial aging temperature of E. S. D. alloy	1936. 7. 18	Investigation of optimum artificial aging temperature and time

Table 7 Technical Reports in Sumitomo Metal on season cracking (stress corrosion cracking)

Report No.	Title	Create date	Content
No.3939	On the season cracking of new E. S. D. alloy (No. 1)	1936. 8. 20	Investigation about the occurrence of special cracking under residual stress in E.S.D alloy and consideration to the prevention of cracking
No.3988	On the season cracking of E. S. D. alloy (No. 2)	1936. 9. 19	Commercial production of E. S. D. alloy with low Zn (Al- 4 %Zn- 3 %Mg-1or 2 %Cu), and E. S. D. No. 2 alloy (Al- 8 %Zn-1.5%Mg- 2 %Cu-0.5%Mn) is possible because of good artificial aging property.
No.4017	ibid. (No. 3)	1936. 9. 30	E. S. D. No. 2 alloy is available. Season cracking is prevented by addition of Ti, Mo.
No.4030	ibid. (No. 4)	1936.10.12	Grain growth and season craking are prevented by addition of Mn1.2 or 1.5%. The addition of Li was investigated.
No.4047	ibid. (No. 5)	1936.10.23	E. S. D. No. 1 (Al-10%Zn-1.5%Mg-2.5%Cu), with more than Mn1.2% prevent season cracking remarkably.
No.4092	ibid. (No. 6)	1936.11.18	Addition of 0.5~1.67%Mo to E. S. D. No. 2. The addition of less than 1%Mo improve remarkably the time to season cracking.
No.4099	ibid. (No. 7)	1936.11.27	Addition of Mo,Cr,Co,Ti,Cu,Mg and Be to E.S.D. No. 1 (Al-10%Zn-1.5%Mg-2.5%Cu-0.5%Mn). The addition of Co is effective to tensile strength and the addition of Cr is excellent in preventing season cracking. The addition of Mo is not effective compared with No. 2. The addition of Mn1.5% is too much.
No.4112	ibid. (No. 8)	1936.12. 1	Addition of Mn0.5, Mo0.3, Cr0.3, Ti0.1 and Mo0.3, Cr0.3, Ti0.1 to E. S. D. No. 2 alloy. It is good to prevent season cracking.
No.4113	ibid. (No. 9)	1936.12. 2	Addition of Mn, Cr separately or together to E.S.D.No.1 and E. S. D. No. 2 alloy. No. 2 alloy is superior.
No.4121	ibid. (No.10)	1936.12. 5	Addition of Ni to E. S. D. No. 1 alloy. Tensile strength increases. However it is not effective to season cracking.
No.4144	ibid. (No.11)	1936.12.21	Addition of Ag,Ca, Si, Sn to E. S. D. No. 1 alloy. The prevention of season cracking is not improved.
No.4244	ibid. (No.12)	1937. 2. 24	Effect of addition of Cu, Zn, Cr, Bi, Sb to E. S. D. No. 2 alloy on season cracking. The occurrence of season cracking is not changed within the range 0.1~0.35% Cr. Effect of addition of Sb, Bi on season cracking is small.

る。これは結晶の大きさに密接な関係があると思う。

iv) 焼入時効せるものは刻印法及び圧搾法では本試験の期間内では疵を生じないが屈曲法では割れる。

v) Al-Zn 二元合金では Zn20% を含有するものが、その焼入れ時効せるもの 300°C 焼鈍せるものが割れを生じ、焼入焼戻せるもの圧延せるものは起こらない。勿論 20% 以下のものはいずれの状態においても疵を生せず(屈曲法)。

vi) 本合金は「ジュラルミン」で「リベッチング」せるも割れを生じない。

vii) 本現象は本系軽合金の本質的特性が所謂 Season Cracking に類似せる物と考えるのが妥当である。

3. 本系合金の割れの現象は焼入及び焼戻温度の適当なる調節により、緩和する事を得、例えば E. S. D. 合金の 430°C 焼入 100°C 焼戻せるものは刻印法及び圧搾法で割れを生じない。然し屈曲法によれば時間の長短はあるが焼入時硬せんものでさえも割れを生ずるに到る。即ち焼入及び焼戻温度の調節では割れを完全に防止する事はできない。

4. 本系合金の割れの現象はその金相学的組成上 Al-Zn 系合金に於ける γ 相 (注、最近の状態図では α 相) の存否に影響するところ多いという仮説にもとづき下記五種合金につき試験した。

Al- 8 %Zn-1.5%Mg-2.5%Cu-0.5%Mn (製鉄失敗), Al- 8 %Zn-1.5%Mg- 2 %Cu-0.5%Mn, Al-7.5%Zn- 3 %Mg-0.5%Mn, Al-7.0%Zn- 3 %Mg-0.5%Mn, Al-6.5%Zn- 3 %Mg-0.5%Mn

1) 銅の少量の添加は割れを緩和する作用があるらしい。

2) 銅を含有せざる三種は Cu 入に比して著しい

3) 之等合金中 Al- 8 %Zn-1.5%Mg-2.5%Cu-0.5%Mn 合金がもっとも良質で割れを生じ難く、他のものは焼入時効せるものも割れたるも、之は割れず而もその抗張性は E. S. D. と伯仲である。

4) Al- 8 %Zn-1.5%Mg-2.5%Cu-0.5%Mn 及び E. S. D 合金の割れに及ぼす焼戻温度の effect は 125°C 最悪でそれより高くも低くも順次良好となる傾向を有す。

5) Al- 8 %Zn-1.5%Mg-2.5%Cu-0.5%Mn 合金は実用上、下記程度の屈曲には十分堪え得るものと考えた。

(実物写しの図あり)

5. 本系合金並びに Al-4%Zn-3%Mg-1~2%Cu-0.5%Mn 合金は之に Ti0.1% 内外の添加によりて著しく割れの減少を阻止し屈曲法実施後五日後経過するも猶割れず、先本問題を解決せらるるのではないかと思わる。然し予断は許されない。機械的性質は E. S. D. に伯仲す。」とあり、まずは実験方法を決めて、実験結果をよく観察していることがわかる。実験方法を更に詳しく見てみよう。日本金属学会誌や住友金属研究報告に報告されているのでこれをもとに紹介する。

時期割れの評価方法は「元来時期割れと称せらるる現象は銅合金就中真鍮に特有なものとして一般には好く知られて居る。これに関する研究論文は内外通じて沢山にある。軽合金に於いても亜鉛の多くを含むアルミ合金の時期割れを起こす傾向のある事は相当古くから言われて居るものの研究文献に至っては内外国を通じて全然皆無と言っても差し支えないであろう」³²⁾ ということ、実験・評価方法の確立から始まる。勿論、当時住友では銅合金の復水器管の研究も行なっており、真鍮の応力腐食割れは当然知られており、銅合金の応力腐食割れの研究も当然参考にしたものと考えられる。上記の研究報告にあった評価方法も含めて少し詳しく述べる。今では当たり前になっている方法も、過去には文献もなく、一から評価方法を確立して材料開発した先人の苦勞を少しだけでも理解できればと思う。Fig.6 に試験方法を示す³²⁾。

「1) 刻印法

試料の表面に 7 mm 角大ききの英字又は数字の鑿を持って刻印し亀裂の生ずる状況を検するに図に示す様に概ね文字の角立る部分に早きは刻印後数時間にして割れを生じた。

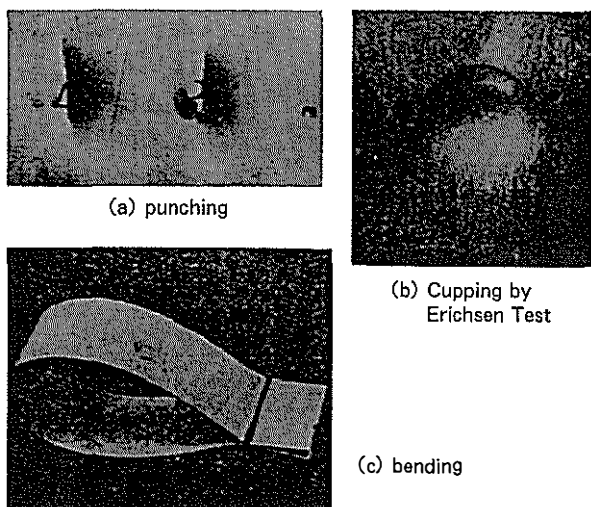


Fig. 6 Estimating method of season cracking (stress corrosion cracking)³²⁾

2) 圧搾法

エリクセン試験機により最大深度をそのエリクセン値とし、種々の深度に圧搾し放置せるに深度の甚だしきものは十数時間後に早くも割れを生じた。圧搾度の少なきものは数日後更に少なきものは数ヵ月後を経過するも割れを生じない。図(略)にその亀裂の一例を示す。

3) 屈曲法(湾曲法)

幅 25mm, 長さ 180mm の試片を Fig. 7 に示すように両端を以って湾曲し略両端より 15mm 内外の所でその間隔を色々に変えて銅線にて束ね室内に放置して割れの発生を調査した³¹⁾。試験結果はその間隔が零のものは言い換えれば全く密着せるものは僅々数十分にして割れを生じ、その距離を次第に遠ざくるに従って割れるまでの経過時間は大となり、或る距離以上に達すると殆ど割れを生じない。換言すれば湾曲試料片の頂部に於ける屈曲半径の大きさに比例して割れるまでの経過時間は増減する。即ち割れは一定以上の応力を必要とする。

4) 管の扁平試験

外径 20mm, 肉厚 1 mm の所定熱処理を施せる押出管を取り、長さ 30mm の円筒試片を作りこれを小型万力に挟み色々な割合に圧縮したる儘放置して試験せるに、粘性的変形を生ずるまで圧縮せるものは比較的短時間にして割れを生じたるも、然からざるものは遥かに長時間を経過するも割れを生じない。而も割れは常に管軸に経線的に起こる。

4) 引張試験

時期割れの発生は複合応力の引張応力に依り圧縮応力に依りては絶対的に起こらないと言われ又は以上の諸実験に於ける割れが常に引張応力の働く側に限られて起る事実に照らしても明らかなことである。然し均等な引張応力下における時期割れに関しては嘗て試みられた事を聞かない。仍って本合金に就いて応力と時期割れとの関係を定量的に明らかにすると共に単純なる引張応力の下に割れを生ずるものかどうかを明らかにする為、図(略)に示す形状寸法の試片を作り、水平型弾性率測定試験機にて割れを試験した。図(略)は引張応力と時期割れを生ずる迄の経過時間との関係曲線を示す。これに依れば時期割れは応力の小なるに従って起り難くなり而も曲線の傾向から判断して大約 15kg/mm² 以下の応力では割れは起り得ないのではないかと思われる。要するに引張応力は合金の時期割れに対して少なくとも一つの重要な因子で、割れを生ずるに必要にして充分なる応力には自ずから限度がある。而もその限度は周囲の状況その他色々な条件に依りて変化する事は言う迄もない事である。」

以上の実験方法を確立し、「時期割れは結晶粒界に沿うこと及び合金の引張強さよりも遥かに小なる応力でさえも割れを生ずることの実験的事実から考えて応力が時期割れに対する充分にして満足なる条件とは考えられない。また金属の内部的変化に依るが如き本質的な例証も認められない。さすれば応力と外部的要因との合成作用

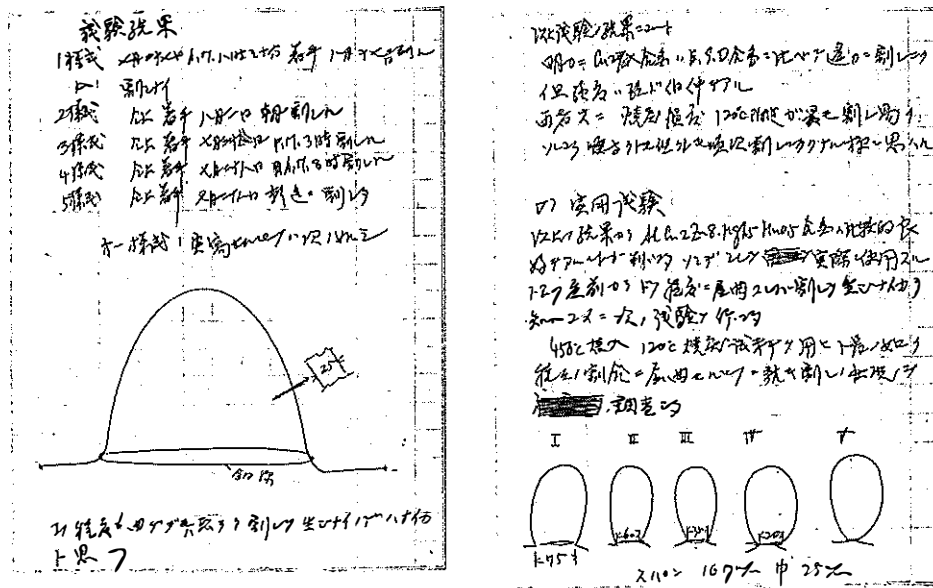


Fig. 7 Estimation of season cracking by bending test
 屈曲試験による割れ評価³¹⁾

によるものと考えざるを得ない」ということで試験環境の影響を検討した。真鍮の時期割れは純粋な空気中やNiメッキを施した場合には生じないとのことで、大気中のいかなる要素がもっとも影響があるものかを確かめるために、大気中、乾燥空気、酸素、窒素、水素、真空中で湾曲法により試験した。この結果、水蒸気中に於ける場合がもっとも激烈で大気中での約十分の一で割れた。なお特に顕著なことは大気中では30分内外で割れを生じるものが真空中では割れを生じないことであった。次に、結晶粒界に沿って割れることから、結晶間腐食性を有する水溶液も割れを促進すると考え、各種水溶液で試験した所、食塩水及び塩酸水溶液中でその効果が甚だしいことが判明した。さらに真鍮や鋼は半田付け時に応力を負荷しながら行なうと容易に亀裂を生じることから、80℃の低融点金属(PbSn, BiCd)の溶液に浸すと1~2分で割れた。これも時期割れの一種とみなしてもよいと考えた。外部的要素をなくするために合わせ板で試験した所全く時期割れを生じなかったと報告している。

3.6 時期割れに及ぼす合金元素の影響

前節の第一報に引き続き、8月から12月まで集中して、板厚0.5mm板を製作し屈曲曲げによる時期割れの研究がなされた。第11報(1936.12.21)の最後に総括として、「今、超強力軽合金(E.S.D.)の化学成分を仮定すれば次の如し。Al, Cu 2, MgZn₂ 11~12, Mn 0.5, Cr 0.3, Cu, Cr, Mnの添加量に関しては更に研究を要す。機械的性質は引張強さ55kg/mm², 耐力45kg/mm², 伸び8%以上」とある。

ほぼ成分も固まり、いよいよ工業的試作の段階に入る。研究報告No.4241「E.S.D.軽合金の研究, E.S.D.-No. 2試作品の二三性能に就いて」(1937. 2. 22)では、E.S.D.No. 2 (Al-8%Zn-1.5%Mg-2%Cu-0.5%Mn)とE.S.D.No. 2 +Cr0.3について工場試作し、E.S.D.No. 2 +Cr0.3は引張強さ58~60kg/mm², 耐力48~52kg/mm², 伸び10~16%で所定の規格(引張強さ53kg/mm²以上, 耐力45kg/mm²以上, 伸び8%以上)を満足し、180°曲げ試験で半径3tと良好、耐破壊性でも二ヶ月以上経過しても割れないで極めて優良であると結論づけている。これ以降のE.S.D.No. 2合金に関しては0.2-0.3%Crが添加されている。ほぼ2月の時点までにはESDの合金成分は固まったものと考えられる。日本金属学会誌には「ESD No. 2に就いて」を執筆し、1936年ESDを完成したとある³³⁾ので、研究報告No.4241執筆の数ヶ月前には成分は決まったものと考えられる。この日本金属学会誌は1942年9月号で、ESDの成分が学会誌で公にされたのはこれが初めてで、特許出願してから6年後である。ちなみに真珠湾攻撃はその前年1941年12月8日である。なお、アルコアが7075を完成するのは1943年であるから、非常に微妙なタイミングである。

ESDの代表組成: Al-8%Zn-1.5%Mg-2%Cu-0.5%Mn-0.25%Cr

研究報告No.4352「超強力軽合金E.S.D.-No. 2に就いて, E.S.D.-No. 2クラッド材の性能」(1937. 4. 27)で

は、皮材に Al-2.5%Zn-0.5%Cr を用いたクラッド材の性能調査を行っている。引張強さは 55kg/mm², 耐力 49kg/mm², 伸び 10% で裸材に匹敵し, 耐破壊性, 耐食性は良好との結果であった。このクラッド材に就いてはその年の 5 月の時点で特許申請中とのことであった。なお, 研究報告 No.4405 「E. S. D.-No. 2 クラッド材の確性試験」(1937. 5. 27) では「クラッド皮材の拡散性は相当著しきもののように思われる」とある。これ以降の研究報告書は一部なぜか欠落している。

3.7 特許出願と論文発表

ESD に関する基本特許は, 「鍛錬用強力軽合金」として, 1936 年 6 月 9 日に出願されている。公告は 1939 年 10 月 24 日, 特許としては第 135036 号として 1940 年 2 月 28 日成立。発明者は五十嵐勇と北原五郎で, 特許権者は住友金属工業株式会社である。この特許の第一ページを Fig. 8 に示す³⁴⁾。

「発明の性質及び目的の要領」

本発明は亜鉛 3 乃至 20%, 「マグネシウム」1 乃至 10%, 銅 1 乃至 3%, 「クローム」0.1 乃至 2% を含み「マンガ」0.1 乃至 2% を含み, 又は含まず残部「アルミニウム」より成ることを特徴とする鍛錬用強力軽合金に係り其の目的とする処は強力にして時期割性無き鍛錬用軽合金を得んとするにある。

1935-1937 年かけて五十嵐博士により出願された特許は Table 8 に示すように Al-Zn-Mg 系に関する合金特許は 5 件で, それも Cr に関するもの 2 件のみである。

日本火工松永氏のトム合金関係 13 件に比べて意外に少ないことに驚く。それらの特許は関連のあるものも含めて出願順に表に示す。なお, この ESD 関連特許に関しては 1938 年頃から米国, 英国, ドイツ, フランス, イ

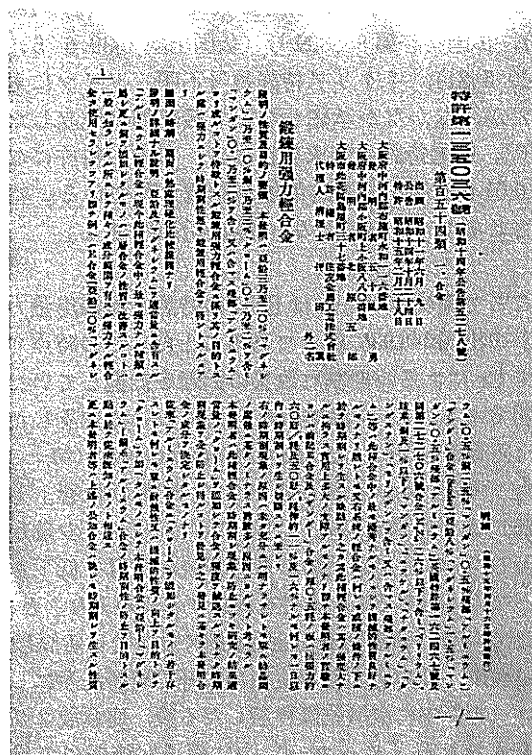


Fig. 8 Patent of Extra Super Duralumin³⁴⁾

Table 8 Patents about Al-Zn-Mg alloys

Patent	Title	Inventor	Application (A) Notification (N) Registration (R)	Claims
114321	High hardened aluminum alloy	Igarashi	A : 1935. 4. 5 N : 1935.10.25 R : 1936. 2. 4	Zn : 5 ~ 25%, Mg : less than 5 %, Li : less than 3 %
135036	High strength wrought aluminum alloy	Igarashi, Kitahara	A : 1936. 6. 9 N : 1939.10.24 R : 1940. 2. 28	Zn : 3 ~ 20%, Mg : 1 ~ 20%, Cu : 1 ~ 3 %, Cr : 0.1 ~ 2 %, (Mn : 0.1 ~ 2 %) no season cracking
133183	High strength aluminum alloy	Igarashi, Kitahara	A : 1936. 9. 9 N : 1939. 8. 12 R : 1939.11.13	Zn : 4 ~ 20%, Cu : 1 ~ 3 %, Mg : 1 ~ 3 %, Ti : 0.01 ~ 0.5%, Mn : 1.2 ~ 3 %
145112	Aluminum alloy	Igarashi, Kitahara, Kosaki	A : 1936. 9. 19 N : 1941. 4. 30 R : 1941. 8. 22	CuAl ₂ : 0.5 ~ 10%, Mg ₂ Si : 0.5 ~ 5 %, MgZn ₂ : 2 ~ 20%, Mn : 1.2 ~ 2.0, Cr : 0.1 ~ 0.5%, Ti : 0.1 ~ 0.5, Mo : 0.1 ~ 2 % Prevention of grain growth
133193	High hardened aluminum alloy	Igarashi, Kitahara	A : 1936.10.15 N : 1939. 8. 12 R : 1939.11.13	(Additional invention to No. 114321) Zn : 5 ~ 25%, Mg : 1 ~ 5 %, Li : less than 3 %, Cu : less than 3 %, Supplement (Brinell hardness : more than 150)
155806	High strength aluminum alloy clad sheet with zinc	Koizumi	A : 1939.10.14 N : 1942.12.26 R : 1943. 4. 2	Cladding sheet containing Zn : 0.5 ~ 1.5, Mn : 0 ~ 2 % to aluminum alloy with Zn, Corrosion resistance
161892	High strength wrought light alloy for	Kitahara, Kodama	A : 1942. 5. 29 R : 1944. 2. 19	Zn : 3 ~ 20%, Mg : 1 ~ 10%, Cu : 1 ~ 3 %, Cr : 0.1 ~ 2 %, Bi : 0.01 ~ 0.2%, (Mn : 0.1 ~ 2%), no season cracking

タリアに特許出願している。成立した特許は、米国特許第 2166495 号 (米国出願 1938.6.20, 特許 1939.7.18), 第 2166496 号 (米国出願 1938.6.20, 特許 1939.7.18), 第 2208186 号 (米国出願 1938.6.20, 特許 1940.7.16), 英国特許第 510483 号 (英国出願 1938.6.17, 特許 1939.8.2), 519160 号 (英国出願 1938.6.17, 特許 1940.5.19), 仏国特許第 855809 号 (仏国出願 1939.6.6, 特許 1940.5.21), イタリア特許番号不明, ドイツにも出願したが, なかなか承認しなくて最終的に成立したか不明³⁰⁾。外国特許の請求項目には, 日本の特許になかった 0.01-0.2%Ca の同時添加が記載されている。特許成立させるための方策なのか理由は不明である。

ここで興味深いことは ESD の特許「鍛錬用強力軽合金」の出願が 1936.6.9 であることだ。この時点でどこまで Cr による時期割れ改善の問題を把握していたかが不明である。Cr を添加した合金について言及した報告書は研究報告 No.3851「超強力軽合金の研究 (第十の三), 超強力軽合金の性質に及ぼす他元素の影響」(1936.6.26) まで見当たらない。そこには「Cr (少量), Ca, V 及び Ti の各元素添加は基合金の性質を低下させることなく, 而もその耐食性を改善する効果あり」とある。ここでいう耐食性とは 3% 食塩水中に於ける試験で, 熱処理後「その表面を木炭塊にて好く研磨洗浄し「アルコール」中に浸漬乾燥秤量したる後, 腐食液 2 リットルを入れたる「ビーカー」中に硝子保持器にて吊るし 300 時間経過したる時, とり出しその表面の付着物を, 地質を害しない程度にかきとり水洗後秤量した。耐食性は単位面積 (/cm²) に於ける減失量を以て現した」とあり, 時期割れのための試験ではない。

時期割れに及ぼす Cr 添加の影響については, 研究報告 No.4099「E. S. D. 合金の Cracking に就いて (第七報)」(1936.11.27) の報告書の中で, ESDNo.1 (Al-10%Zn-1.5%Mg-2.5%Cu-0.5%Mn) に Mo, Cr, Co, Ti, Cu, Mg, Be 添加。引張強さは Co 添加が, 耐破壊性は Cr 添加が優秀。Mo は No.2 ほどでない。Mn1.5% は多過ぎと述べられているのが最初と思われる。勿論, 実験結果と報告書執筆では現在でも数ヶ月のタイムラグのある場合もあるので, 実験結果はもっと早く出ていただろうと推定されるが, 多分, ESD 合金の制定の 6 月頃には, 簡便な方法での時期割れの評価結果は出ていて, この結果に基づいて特許が出願されたものと考えられる。

幸田教授によれば「同じ頃, 東京大学航空研究所石田四郎教授らによって, 通称航研超々ジュラルミンが発明され, また古河電気工業株式会社において SSD なる超々ジュラルミンが発明された。前者は Sn 添加により, 後者は Zr 添加によって応力腐食感受性を防止したものである。しかし, ESD ほど効果的でなかったためか, 実用にはならなかった」とある³⁵⁾。

石田教授らの特許は, 特許第 137117 号 (出願 1938.4.15, 公告 1939.8.19, 特許 1940.7.1) で, 五十嵐らより約 2 年遅れて出願されている。成分は Zn 6.0~10.0%, Mg 1.0~3.0%, Cu 1.5~4.5%, Mn 0.5~1.5%, Sn 0.1~1.0%, Si 0.8% 以下, Fe 0.8% 以下である。古河電工の特許は特許第 147525 号 (出願 1938.11.25, 公告 1941.9.30, 特許 1942.1.12) で, 成分は Zn 4~10%, Mg 0.5~3%, Cu 0.5~4%, Mn 0.1~1.5%, Si 0.4~1%, Zr 0.05~1% である。特に, ケイ素とジルコニウム作用により時期割れが防止されたとある。最近の航空機用アルミニウム合金は焼入れ感受性等の理由からクロム添加からジルコニウム添加を基本とする合金に代わってきたが, この特許はその走りとも言えよう。これに関して, 古河スカイの小山克己博士は「当時は十分な組織制御ができなかったためか, 実用化にはいたらなかった」と記している³⁵⁾。

太平洋戦争以後, 航空機材料の生産は急を告げ, 陸軍ならびに海軍の各航空本部から, ESD の特許の実施権を(株)神戸製鋼所と古河電気工業(株)へ委譲する要請があり, 住友はこれを許諾した。1943 年, (株)神戸製鋼所は, 当社にアルミニウム合金に関する技術指導を要請し, その内容は溶解・鋳造・装置・図面・工場実習・特許を含むすべてであったが, 住友は承諾して技術指導等が名古屋軽合金製造所で行なわれた²⁾。

論文に関しては, 五十嵐と北原連名で, 1937 年 2 月発行の住友金属・研究報告第 2 巻第 9 号 (1937) に「新強力軽合金の研究 (其 1)」を発表している。D, S と E 合金を組み合わせて, 加工性の良い 70kg/mm² の引張強さを持つ合金ができることを述べている。(其 3) がなくて, 同上第 3 巻第 1 号 (1938) に「新強力軽合金の研究 (其 4)」³⁷⁾ を, 同上第 3 巻第 3 号 (1938) に「新強力軽合金の研究 (其 5)」³⁸⁾ を発表している。内容は強度に及ぼす亜鉛, マグネシウム, 銅の最適な成分範囲を調べたものである。同上第 3 巻第 3 号 (1938) に「新強力軽合金の研究 (其 6) 新合金 RR77 に就て」³⁹⁾ を発表している。RR77 は英国の規格 DTDNo.363 に記載された High Duty Alloys 社の合金で, Ni が添加されている。其の 2 は少し遅れて 1939 年 5 月発行の第 3 巻第 5 号 (1939) に「新強力軽合金の研究 (其 2) 超々ジュラルミン “ESD” 及び其のクラッド材 “ESDC” に就て」⁴⁰⁾ で, 次いで, 1939 年 9 月発行の住友金属・研究報告第 3 巻第 6 号 (1939) に「高力 Al 合金の時期割れと其防止に就て」が報告されている³²⁾。其の 2 では ESD (ピリオドはなくなっている) を Extra-Super-Duralmin と呼び, ESD とそのクラッド材 ESDC (Extra-Super-Duralclad) の皮材の成分が明らかにされており, このためか, 発表時期が遅らされていると考えられる。住友金属・研究報告がどこまで配布されていたかは分からないが, 米軍がその気になれば, 1939 年 5

月の時点で(其の2)を読めばESDの実態は把握できる状況であった。いつ研究発表するかの判断の難しさは後にならないと良く分からないのが実情である。

学会誌関係では「鉄と鋼」23(1937)には、「新強力軽合金の研究(其1)」が掲載されている³⁰⁾。これは1936年10月の日本鉄鋼協会第16回講演大会で講演されたものを論文化したものである。住友金属・研究報告(其1)とほぼ同じ内容である。日本金属学会誌、3(1939)には「高力Al合金の時期割れと其防止に就て」が掲載され³²⁾、住友金属・研究報告第3巻第6号(1939)とほぼ同じ内容である。クロム添加が明らかにされたのは、ESDの基本特許である特許135036が公告(1939年10月)として公開された時期とほぼ重なっていることがわかる。なお、ESDの成分が明らかにされたのは、学会誌としては前述したように日本金属学会誌の1942年9月号で、これらの動向を米軍が把握していたかどうか不明であるが、真珠湾攻撃で撃墜された零戦の残骸を調べれば、日本のどこで生産していたかは分かるはずで、きっと溯って調査したものと考えられる。

なお、当時研究部長であった田邊氏は戦後、「ESDの試作に懸命であった1940年の秋(?)某日、故山本元帥が中将で海軍航空本部長に内定していた頃であったが、工場に来られ、私がESDの経過を話した。「...といった訳で某大要は学界にも発表」と言わせも果てず「発表等はいつでも宜しい。一日も早く実用に邁進せよ!」との言葉が鋭い。何業!!という訳でクロム添加による時期割れ防止も完成。遂に今次大戦に間に合った次第であった。往時茫茫夢の如し」と回想している⁴¹⁾。

五十嵐博士は以上の研究論文と、これまでに発表してきたジュラルミン、超ジュラルミン、4.5~8%Mgを含むHydranaliumなどの耐食性合金、3Sや4SなどのAl-Mn系合金、ジュラルミン系プロペラ用鍛造品、鋳材、マグネシウム合金の防食性についてまとめ、1939年4月学位論文として大阪帝国大学工学部に提出し工学博士が授与された。Fig. 9は生家に保管されていた学位記である⁴²⁾。なお、1937年発行の共著「軽金属及軽合金最近の進歩」(工業図書株式会社)には「耐食性アル

ミニウム合金」の章を執筆している⁴³⁾。この本では、Fig. 10に示すように当時の軽金属に係わる大家が工学的な視点から執筆している。

3.8 ESDと零戦

1937年10月6日、三菱重工業名古屋航空機製作所の堀越二郎氏(Fig. 11)は課長からカナまじりの和文タイプで打たれた一通の書類を受け取った。それは、「十二試艦上戦闘機計画要求書」であった。「十二試」とは昭和12年試作発令、艦上戦闘機とは航空母艦上から発着する戦闘機のことである。堀越氏は「この要求書は、当時の航空界の常識ではとても考えられないことを要求していた。もし、こんな戦闘機がほんとうに実現するのなら、それはたしかに、世界のレベルをはるかに抜く戦闘機になるだろう」⁴⁴⁾と述べている。その要求書はTable 9に示すような内容である。この十二試艦上戦闘

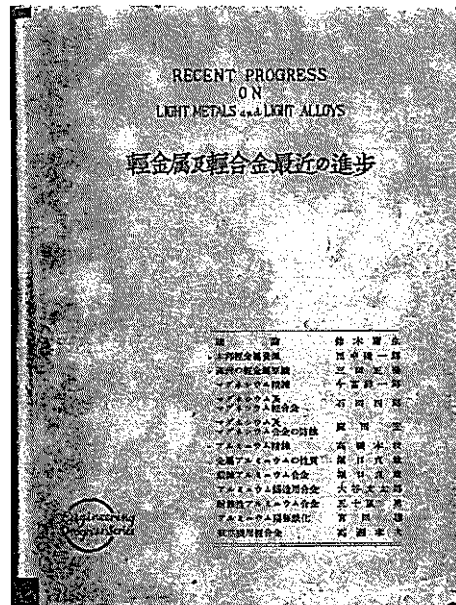


Fig. 10 Cover of book titled Recent Progress on Light Metals and Light Alloys⁴³⁾

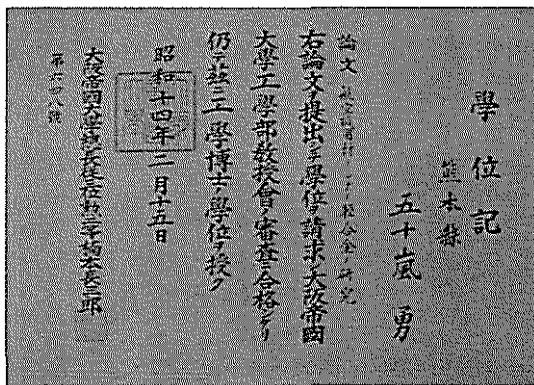


Fig. 9 Diploma of Dr. Igarashi⁴²⁾



Fig. 11 Mr. J. Horikosi⁴⁸⁾

機はのちに太平洋戦争で空の王者として君臨した「零戦」の試作段階の呼び名であった。

このような要求が出てきた背景には、当時、日華事変の華中戦線での戦闘機の護衛なしで裸同然の出動した日本海軍自慢の新鋭攻撃機が、予想に反して迎え撃つ敵の戦闘機にばたばたと落とされる事態が起った。その後、攻撃機の護衛についた九六艦戦が、海軍の期待したとおりの強さを発揮した。そこで、あらためて戦闘機によって空の主導権を握ること、つまり制空権を確保することが航空戦の基礎であることがはっきりと実証されたためである。そこで大型機を落とすために 20 ミリ機銃を持ち、同時に、攻撃機を護衛までして敵地まで長距離を往復し、しかも、そこで待ち構えている敵の戦闘機に打ち勝つ空戦能力をもたせたいという要求が出てきた⁴¹⁾。

当時、三菱の主任設計技師の堀越氏は、この機体の設計の問題点を四つに整理していた。第一にエンジンの決

定。第二にプロペラの選択、第三に重量軽減対策、第四に空力設計、つまり機体の空気抵抗を少なくし、同時に理想的な安定性、操縦性を実現することであると。第一のエンジンは重量の軽い瑞星を使うことに決め、第二のプロペラは新式の定回転プロペラを使用することになっていた。このプロペラ製造に関しても住友金属は活躍することになるのであるが、これは別途稿をあらためることにする。最大の難関は第三の重量軽減対策であった。このため一律であった安全率の見直しや、グラム単位での重量軽減のために、「肉落とし」と称して、強度に関係のないところをくりぬくことも行われた。重量の軽減には、このほか、どのような材料を使うかということもおおいに関係がある。

特に、内部構造で最も重要な主翼の桁についても、可能な限り軽くてしかも強い材料を使いたかった。前の九六式艦戦のときは 45 キロ超ジュラルミン (SDH) が開発され、その押出材が生産されていたので、翼を薄く

Table 9 Specifications for Experimental 12-shi Carrier-Based Fighter requested by Navy⁴⁴⁾
十二試艦上戦闘機計画要求書

Item	Specification
Mission	A Fighter capable of intercepting and destroying enemy attack bombers, and of serving as an escort fighter with combat performance greater than that of enemy interceptors. 掩護(えんご)戦闘機として、敵の戦闘機よりもすぐれた空戦性能をそなえ、迎撃戦闘機として、敵の攻撃機をとらえ、撃滅できるもの。
Dimensions	Wingspan less than 12m 全幅、つまり主翼のはしからはしまでの長さが 12メートル以内。
Maximum Speed	Maximum speed exceeding 270kt, 500km/h at 4000m in level flight. 高度 4000m で 270 ノット (500km/h) 以上
Climb	Climb to 3000m within 3min30sec. 高度 3000m まで 3 分 30 秒以内で上昇できること
Endurance	Normal flight duration of 1.2-1.5hr with normal rated power (maximum continuous) at 3000m fully loaded with auxiliary fuel tank; 1.2-1.5hr at 3000m using normal rated power, or 6-8hr at maximum cruising power. 機体内に備え付けられたタンクの燃料だけで、高度 3000m を全馬力で飛んだ場合、1.2 時間ないし 1.5 時間。 増設燃料タンクをつけた過荷重状態で、同じく 1.5 時間ないし 2.0 時間。 ふつうの巡航速度で飛んだ場合、6 時間ないし 8 時間。
Takeoff	Less than 70m with head wind of 12m/sec and approximately 175m in calm win. Must be able to take off from a carrier deck. 航空母艦上から発進できるようにするため、向かい風秒速 12m のとき 70m 以下。(無風ならこの 2.5 倍内外)
Maneuverability	Equal or better than Type 96 Fighter A5M. 九六式艦上戦闘機 2 号 1 型に劣らないこと。
Armament	Two Oerlikon Type 99, 20mm machine guns Mk.1, Model 3, and two Type 97, 7.7mm machine guns. 20 ミリ機銃 2 挺。7.7 ミリ機銃 2 挺。
Radio	Type 96-ku-1 airborne radio and Type Ku-3 radio homer ふつうの無線機のほかに、電波によって帰りの方向を正確にさぐりあてる無線帰投方位測定器を積むこと。
Engine	Mitsubishi Zuisai 13 of 875hp at 3600m or Mitsubishi Kinsei 46 of 1070hp at 4200m 三菱瑞星 13 型 (高度 3600m で最高 875 馬力) か、三菱金星 46 型 (高度 4200m で最高速度 1070 馬力) を使用のこと。

し、重量軽減に大いに役立った。十二試艦戦では、機体がさらに大きくなるため重量増加が避けられない。九六式艦戦と同じ超ジュラルミンでは、桁用の押出型材を分厚くしなければならずその結果重量増加につながり、桁の部分が分厚くなると翼も厚くせざるをえなくなり、いっそう悪くなると考えられた。

従来のジュラルミンを更に改良したものか、あるいは、別のもっとすぐれた軽い金属はないだろうかを堀越氏が考えていたところに次のような住友のESDとの出会いがあった。

「ある日、会社の材料購入を担当している木村技師が、堀越氏の机にぶらりとやってきて、次のような話をしていた。『堀越さん、いま住友で非常に強い新しい合金ができかかっているらしいですよ』と。話によれば、従来のジュラルミンの成分を少し変えて、強度の高い材料を開発し、試験的に生産に入れる段階だという。私はこの話におおいに興味をそそられた。そこで、住友金属に問い合わせると、担当者が直接私に説明しながら、実物を見せたいという返事がきた。早速、大阪の住友の工場に飛んでいって、五十嵐博士と小関技師から『60kg/mm²の強度があることについては、住友として責任を持って保証できます。海軍の材料規格にはまだ採用されていませんが、時期割れの問題は、押出型材に関する限りすでに技術的には解決しています』^{45,46)}との説明を聞き、実物を見せてもらっているうちに、私は、これは使えるぞ、と判断した。そして、この新材料を使用するにあたって、注意しなければならない点をよく聞いてきた。私は、さしあたり、主翼の桁だけに押出型材を使うとして、大まかに重量を計算してみると、30kgは軽くなるのがわかった。そこで、会社からこの新しい金属の使用を航空本部に願出た。すると、航空本部でもすでにこの金属に注目しており、許可する一歩手前まで来ていたとのことだった。海軍側はむしろ願出を喜んで、この新材料の使用を認めてくれた」^{29,44,45,46)}。

第四の空力設計は、胴体の形状、主翼の断面と面積、翼端の形状、尾翼の大きさや形状などを検討し、最適な形状を決めていった。空気抵抗を減らすために、引き込み脚や沈頭鉸が採用された。

かくして、堀越氏の言によれば、千篇一律的な安全率の規定を洗い直して、新たな合理性のうえに設計方針を立てるといふ冒険的方法にはじまって、超々ジュラルミンの採用という、日本の航空機史上画期的な事件にいたるまであらゆる手段を研究し取り入れて、1939.3月試作第一号機が完成した。試作機は数個の部分に分解され梱包されて、3月23日午後7時過ぎに、牛車2台に分載されて、名古屋市の南はずれ、港区大江町の工場を出発、名古屋市内を夜のうちに通過し、小牧、犬山を経て、まる一日がかりで、約48kmはなれた岐阜県各務原飛行場の片隅に或る三菱の格納庫に着いた。初飛行は4月1日で、ほぼ満足のいく結果も得たが、問題点も明らかと

なった。その後、特に設計要件の見直しをすることにより操縦応答性の面で画期的な進歩を遂げた。1940年4月末までに十二試艦戦を前線に送ろうとしていた矢先、3月11日、十二試の2号機が横須賀で空中分解して、パイロットが殉職したとの連絡があり、この原因解明が緊急に必要なようになった。3月16日、検討会が開催され、機体強度研究の主任である山名正夫技師が、十二試艦戦で始めて採用した超々ジュラルミンESDの主翼桁の疲労強度に疑わしい点があることと、外板打ち付けのための沈頭鉸が外板にしわが寄るほど強い力が加わったときに、抜けるおそれがあるのではないかといて、主翼が単なる衝撃で折れたのか、ESDの時期割れか金属疲労によるひびが入って飛行中に折れたのか実験中であると述べた²⁹⁾。

3月18日の空技廠の事故調査委員会で、折れていた主翼桁の破断面を観察した結果、心配されていた超々ジュラルミンの時期割れの現象は起っていなかったことが確認されたこと、さらに疲労試験も行なったところ、空中分解となるような疲労破壊も起っていなかったこと、ただし桁の削り落とし部分は、段付のシャープコーナーになっているため耐用時間が予想よりかなり短いことが明らかとなった。沈頭鉸も今回の事故と関係がないことが明らかとなった。他に先駆けて採用した超々ジュラルミンに濃厚な疑いをかけられたが、「シロ」ということで落着いた。切り欠き疲労強度の低下はそれ以降のコーナーの形状変更となった²⁹⁾。この事故の原因は昇降舵マスバランスの横揺れ振動が繰り返り起り、次第にその腕に疲労破壊が生じてマスバランスが脱落して、その後尾部でフラッターが起り、空中分解したとの結論に達した。前述の空技廠の川村氏も「主翼の破面が材木を折ったような破面なんで、飛行機の落ちた原因はESDのシーズンクラック(時期割れ)ではないかと随分突っ込んで調査した」と述べている²⁹⁾。

1940年7月、十二試艦戦は制式機として採用され、その年が日本紀元2600年であったところから、その末尾の零をとって、「零式艦上戦闘機^{レイシキ}一型」と名付けられた。「零戦」とは「零式艦上戦闘機」の略称である。「ゼロ戦」というのは外国のパイロットから「ゼロ・ファイター (Zero Fighter)」「ジーク (Zeke)」と呼ばれ、外国の評判などから戦後生まれた零戦の愛称である。一型は零戦の改造の型式で、数字はエンジンと機体の変更(改修)回数を表し、最初の数字はエンジンが変更されると「一号、二号」と数え、二番目の数字は機体に変更されると「一型、二型」と呼ばれ、「一一型」は「一号一型」のことである。海軍航空本部は大陸での零戦の目覚ましい活躍でその性能の優秀さを認め、中島飛行機にも零戦を生産させる事を決めた。これは、三菱の量産能力に対し、当時最新鋭だった新設の小泉製作所に、アメリカ流のオートメーション生産ラインを整えた中島飛行機の量産能力が高く評価されたためである⁴⁷⁾。こう

いう場合、「製造権や特許権の問題は、民間同士に於ける場合とは違い、開発を担当した会社に対して適当な額の報償を支払い、海軍が指定した製造を受け持つ会社にいっさいの技術資料と技術援助を与えること」で決着がついた。第 67 号機以降は、艦上で取り扱いやすいように、左右の翼端を折り曲げられるようにした零戦 21 型に変更された。その後、主翼翼端の折りたたみ機構を廃止し、高高度では回転数を高い方に切り替えができる二速過給器付きの中島製米 21 型エンジンに替えた零戦三二型となった。1941 年 12 月太平洋戦争に突入し、真珠湾攻撃やフィリピン進攻、翌年 3 月のジャワ作戦、インド洋作戦に至る太平洋戦争中盤までは、その性能を發揮し華々しい成果を上げた。1942 年 6 月のミッドウェー海戦での敗北が太平洋戦争の転回点となった。同時に行われたアリューシャン作戦で、無人島に不時着したほとんど無傷の零戦一機をアメリカが手に入れた。アメリカは、真珠湾攻撃以来、落ちた零戦の切れ端を集めてまでも、謎の飛行機といわれる零戦の秘密を解き明かそうとしていた。そして、この完全な零戦に飛行試験を含むあらゆる角度からの調査を施し、その長所と短所を完全に知る事ができた。調査の結果は、新戦闘機の設計の上でも、零戦との戦術の上でも非常に大きな役割を果たす事になったといわれている。調査の結果、零戦が優れた旋回性能と上昇性能、航続性能を持つ一方で、高速時の横転性能や急降下性能に問題があることや装甲板・防弾燃料タンク・防弾ガラス・自動消火装置などが搭載されておらず防御性能の弱いが判明し、零戦と普通に戦っては勝ち目のなかった F4F ワイルドキャット戦闘機は急降下し接近して銃撃し、優位速度を維持したまま旋回・離脱、再度急上昇し優位高度を回復する一撃離脱戦法と 2 機編隊を組んで攻撃するサッチウィープなどの戦法をとって、零戦に対して優位に立った。このため零戦の翼幅を 11m に短縮し、ロケット排気管を採用し最大速度 565km/h が出せる五二型に改良された。1943 年 9 月にはアメリカ海軍の新戦闘機グラマン F6F ヘルキャットが「打倒零戦」のかけ声とともに登場してきた。運動性に優れた F6F の出現で、零戦の苦闘が始まった。こうした事態に対処するには、質的にさらに勝った新しい戦闘機を投入する必要があったが、設計の人手不足などで後継機をすぐにだすことができずに終戦となった。この間、零戦は各型合計すると約 10425 機生産された⁴⁸⁾。Fig. 12 は零式艦上戦闘機五二型で、主翼桁材に ESD 押出型材が用いられた。

米軍は撃墜された機体の残骸の回収を行っており、「真珠湾攻撃の際に撃墜された機体も数機分回収されており、まずそれらの分析が進められた。機体の構造や材質については詳細なデータが取られた。米軍を驚かせたのは機体に使われた超々ジュラルミンの強度の高さであった。それは当時、日本の航空機開発技術に対して「欧米に数年は遅れている」と考えていたアメリカの陸海軍や

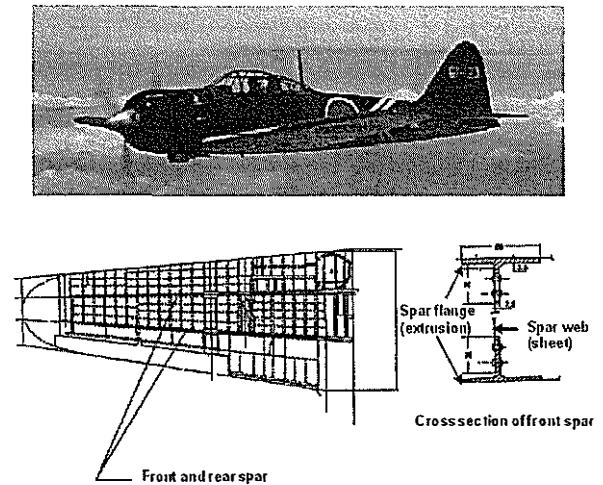


Fig. 12 Zero fighter, Model 52 (A6M5) and the structure of its main wing

航空機産業関係者の目を覚まさせる一因となった⁴⁹⁾。当然 ESD が主翼桁材に用いられたことは 1941~42 年にかけて撃墜された零戦からも把握し、アルコア社に伝えられていたと考えられる。

3.9 超ジュラルミン、超々ジュラルミンの増産^{1,2,3)}

1935 年、住友伸銅鋼管(株)住友製鋼所と合併し、住友金属工業(株)が設立された。同年におけるアルミニウム合金の生産高は 1400 トンであったが、後半から国際情勢の緊迫化による航空戦力の大幅増強の必要から飛行機材料の増産が要求された。1937 年 2 月にはプロペラ需要激増による鍛造工場拡充計画が立案された。さらに、陸・海軍による 3 回の増産計画により、陸軍は 7418 トン/年、海軍は 4400 トン/年の目標が立てられ、大阪桜島の伸銅所に飛行機材料専門の製板課第二工場、管棒課第二工場が建設され、1938~1939 年稼動を開始した。1938 年末に、海軍航空本部から月産 1364 トンのアルミニウム合金生産の要請があり、既定の増産計画の 3 倍もの要求で、伸銅所には拡張の余裕がなく、新工場の敷地が検討された。新工場敷地としては、空襲、天災などの危険も考慮に入れて、各地を物色したが、結局航空機製造の中心地となっている名古屋に決定した。

敷地は、1939 年はじめ、航空機事業を手がけていた愛知時計電機(株)青木鎌太郎社長の斡旋で、名古屋市港区千年の水田に、工場付属地として博覧会跡地 4 万余坪を加えた約 19 万坪を入手した³⁾。この地域は、1937 年、名古屋市長の大岩勇夫氏が名古屋開港 30 周年、国際都市としての名古屋をアピールするため名古屋汎太平洋平和博覧会を開催した会場跡地になっていた⁵⁰⁾。もともとこの会場となった南区熱田前新田（現在の名古屋市港区港明・港楽一帯）は、1935 年に会場が決定した当時は、港北耕地整理組合が管理する葦の茂る田んぼにすぎない地域であった。大岩氏には名古屋に自動車産業を誘

致して「中京デトロイト」にする構想があり、その一環として、交通網などインフラ整備のため博覧会が開催されたものと考えられる。名古屋汎太平洋平和博覧会 (Fig. 13) は 1937 年 3 月 15 日から 5 月 31 日まで開催され、入場者数は 480 万人、海外からの参加は 29 カ国であった。

1939 年 7 月杉浦稔三氏を部長として臨時名古屋工場建設部が設置され、铸造、製板、管棒、鍛造を持つ総合的軽合金専門工場の建設にあたった。同時期に、国家総動員法の公布で伸銅所軽合金関係工場、プロペラ製造所全工場などが陸海軍共同管理工場となり、管理官が派遣され、生産または修理の業務に関し、陸海軍大臣の指揮監督を受けることになった。1941 年 9 月名古屋軽合金製造所が設置された。所長に杉浦稔三氏、副所長に丸山正男氏が就任し、五十嵐博士もこのときに研究部長となった。1942 年 2 月名古屋軽合金製造所も陸海軍共同管理工場となった。この工場は、当時伸銅所で開発中であった連続铸造法による大型铸塊を用いることを前提としたストリップ方式圧延の製板工場を目標とした。

1943 年に入ってから工場の整備が急速に進み、反射炉 30 基、わが国最初の連続铸造設備、可逆式二段熱間圧延機ならびに四段冷間圧延機、大型押出形材生産用 3600 トン横型水圧押出機、プロペラ翅素材生産用の 4000 トン型水圧機、35000kg-m エアーハンマー等を設備した総合軽合金工場となり、その生産量は最盛期には月産 4000 トンであった。なお、铸物関係は 1943 年名古屋軽合金製造所鳴海支所と伸銅所豊橋製作所、伸銅所堅田製作所が設置され、そちらに移管された。铸造、圧延、管棒、形材、鍛造の技術の進歩を紹介する。

(1) 铸造技術

製板技術の発展に伴い、ストリップ方式で圧延を行う

ためには、高品質でかつ大型铸塊の必要性が生じてきた。1936 年春頃の外国雑誌に、「これからは連続铸造法に向かわねばならぬ」という二三行の記事があり、これに着目したのが佐藤新治氏である。1937 年彼は「物事すべて根本は素質である。素質のないものでも努力すれば上手の域に達するが、努力だけでは名人になれない…、しかして、素質のよい铸塊を作るには連続铸造法以外にない」という趣旨の報告書を当時の製造部長である丸山五男氏に提出し、許可を得て実験を開始した。その後、建設中の名古屋軽合金製造所は米国の United Engineering 社のストリップ方式圧延設備を導入することとなり、製板用角型大型铸塊を必要としたため、大型铸塊連続铸造技術の完成が必須となった。これを担当した鹿子木立郎氏は銅製铸型を用い、铸型内面に塗油し、溶湯注入の工夫や底板にダミーブロックをおくなどして、1941 年 6 月、長さ 1200mm、約 400kg の铸塊を製造する SKS-V 式と呼ぶ铸造法を完成させた (Fig. 14) ¹⁾²⁾。1942 年には、反射炉の前に深さ 5 m 余のピットを作り、其の中にダミーブロック付き降下装置を据え付け、铸型を設置し、二つの取鍋で交互に铸型の中に樋を通じて溶湯を流しこんで、最大 1400kg、厚さ 220mm、幅 600 及び 800mm、長さ 4000mm 程度のものが造塊された。実際の圧延には 400kg、600kg 铸塊が用いられたので、一本のスラブから 3 枚取りまたは 2 枚取りされた。当初、Vereinigte Leichtmetallwerke GmbH (VLW 社) の技術導入で製造する予定であったが、古河電工が先に交渉していたため技術導入はできなくなった。このため鹿子木氏は 1937 年のドイツの Aluminium 誌に掲載された連続铸造法に関する記事や VLW 社のイタリア特許を参考に、大型铸塊の製造の実験を行い、铸型、形状、铸込み法、冷却法、亀裂防止、異常結晶粒や発汗の防止に独自の技術を確立し 3 件の特許を取得し、1942 年名

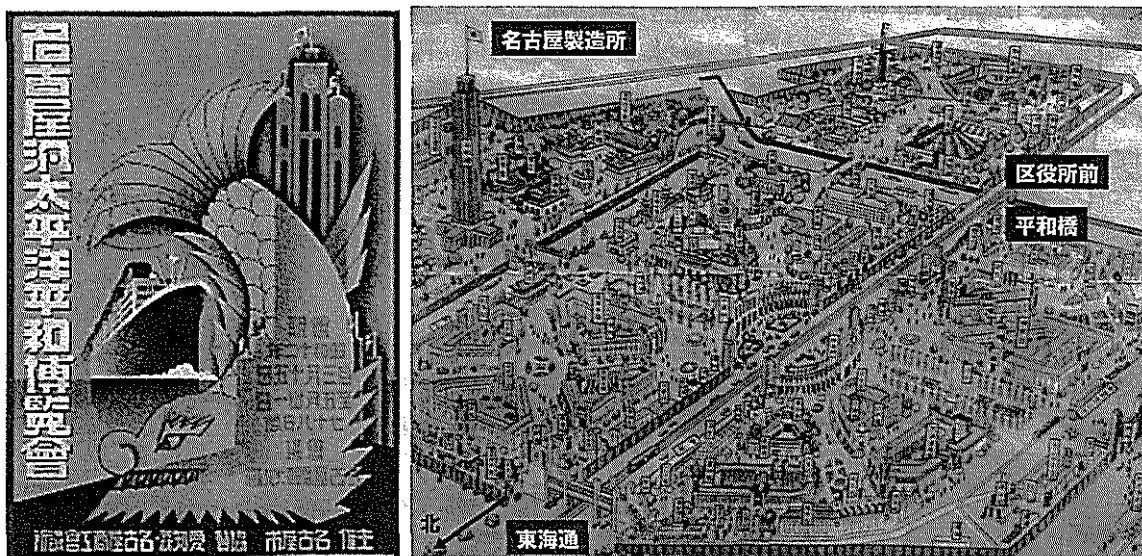


Fig. 13 Poster and site map of Nagoya Pan-Pacific Peace Exhibition (white text shows the present place name) ⁵⁰⁾

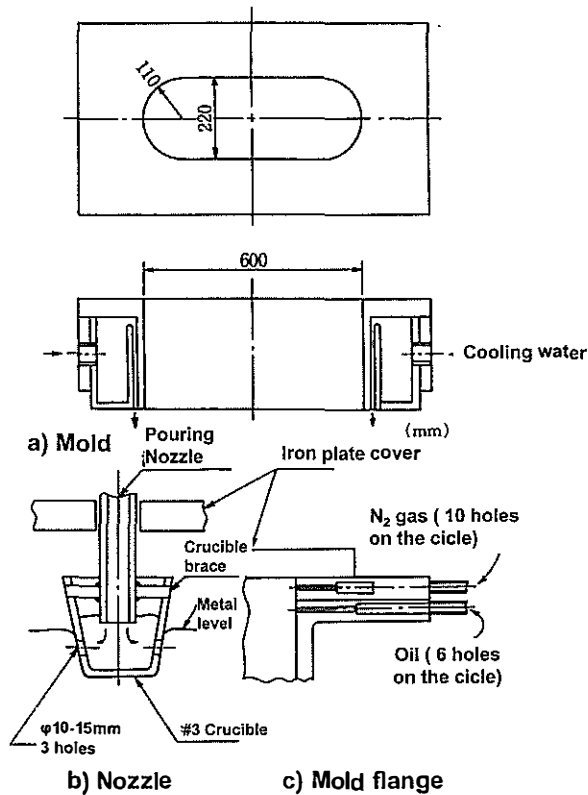


Fig. 14 Continuous casing mold for slab¹⁾

古屋軽合金製造所にて量産化した。連続鋳造法の確立は製板工場のストリップ方式圧延設備の生産性向上に大きく貢献した。この連続鋳造法ではジュラルミン、超ジュラルミンだけで、超々ジュラルミンは鋳込んで放置すると割れるといった問題があり、Züblin法（SKS-VI式）が適用された。Züblin法は鋳型の一方の縁を解放しておき、そこから水平な樋で溶湯を流し込み、鋳型を降下させていくと同時に縁の解放された部分を逐次塞いでいく方式である（Fig. 15）^{1,2)}。Züblin法によるESD板用鋳塊は、厚さ120mm×幅400mm×長さ600mm（約80kg）程度のものであった。

（注）古河電工は1937年9月の工場事業管理令に基づいて、日光と大阪の工場が陸海軍の管理を受けるようになった。特に古河は陸軍からの要請で航空機用アルミニウム合金の大量生産のための新工場の建設が必要になった。新工場建設にあたっては外国の最新の技術導入することが不可欠であった。当時、ALCOAやVLWが第一級の技術を有していた。1938年VLWから技術提携の話があり、鋳塊を作る技術ではVLWが優れていると判断し、1939年8月古河とVLWは契約を結び、溶解鋳造、圧延、鍛造、押出、研究に関して技術導入を行い、技術習得のために三ヵ年で技術者を三回派遣することとなった。派遣されたのは松尾敏彦、川村知、北島正元の三名で、1941年5月シベリア経由でドイツに向かった。6月にベルリンに着い

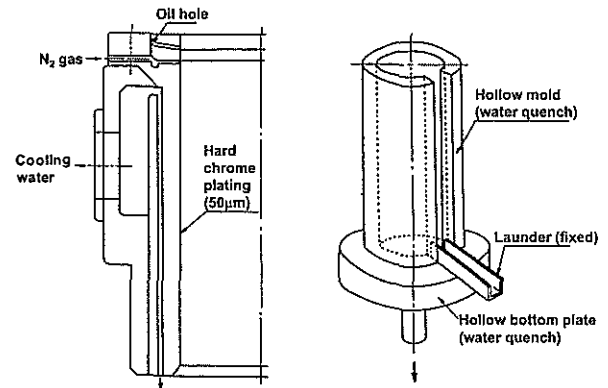


Fig. 15 Continuous casing mold for billet (Left is for Duralumin or Super Duralumin, Right is for Extra Super Duralumin)¹⁾

たが、12日後、ドイツはソ連に対し宣戦布告をした。7月にハノーバーに着き、空襲の最中VLWでの研修、VLWの連続水冷鋳造法などの技術習得を行なった。11月にハノーバーを引き上げたが、日米開戦の危機ですぐに帰国することは難しくなった。購入機械類や技術資料は潜水艦で日本に運ばれた。1942年9月、帰国手続きをとったが、ソ連を通過するビザが取れず翌年まで持ち越された。1943年の春、技術資料や駐在員との連絡で日光では連続水冷鋳造設備を作り上げた。その結果、24SはできたがESDは良品ができなかった。1943年10月ようやくソ連通過ビザがおりたが、一社2名までということで北島にはビザは発給されなかった。一人残された北島はベルリンの空襲中、肺をやられて闘病生活となり、陸軍の計らいでドイツ陸軍傷痍軍人療養所に入った。戦況が悪化し1945年1月にはスイスの結核療養所に移ったが、9月18日39歳で客死した⁵⁾。

(2) 圧延技術

a. 伸銅所製板第二工場

1935年ころから、超ジュラルミンが飛行機の外板材として量産に入って多忙を極めた。そこで桜島の伸銅所に大板を専門とする製板課第二工場が建設される。1938年頃から稼働し、主要設備は圧延機12基である。大板の生産には、熱間圧延機として米国Mesta社製の三段圧延機（22"、30"×66"）1基、冷間圧延機にはUnited Engineering (U. E.)社製の三段圧延機（20"、30"×66"）1基と二段圧延機（28"×60"）4基、日立製作所製二段圧延機2基（28"×61"、28"×66"）、その他U. E.社製四段帯板圧延機1基有していた。製板第一工場で押え圧延された熱間圧延板を用いて大板が製造された。大板の圧延工程は次のようであった。

加熱→熱間圧延 (0.25") →焼鈍→両耳切断→
地取切断→冷間圧延 (三段圧延機, 3 mm) →
地取切断→焼鈍→傷取り→冷間圧延 (1.5mm)
→焼鈍→二枚合せ圧延→0.8mm →焼入れ→洗
浄→スキンパス (→焼戻し)

熱間圧延での問題点としては、第一に、押え圧延では端面割れが多かったが、時折表面割れも発生し、この場合は両面を5~6mm面削した。第二に、三段圧延機では軽圧減率の加工なのでクロコダイルを発生しやすいことや合せ板圧延開始時に上側皮材が剥離し飛ぶことがあった。第三に、熱間圧延板のキャンパが不揃いであったため、圧延ごとに冷却水量の調整が必要であった。

b 名古屋軽合金製造所

名古屋軽合金製造所の熱間圧延では連続鋳造法による大型鋳塊をストリップ方式で圧延する、当時としては世界でも極めて新しい試みで圧延が行われた。この方式では幅1000mm板用スラブをU. E. 社製可逆式二段圧延機 (Fig. 16) で厚さ6mmまで熱間圧延後、コイルアップする。

焼鈍後、冷間粗圧延はU. E. 社製2スタンドタンデム四段冷間圧延機 (Fig. 17) で3パス通板し、中間焼鈍を入れて、その後シングルのU. E. 社製4段冷間圧延機で圧減率50%の仕上げ圧延を行い、板厚0.5ならびに0.6mmとした。ストリップ方式で圧延した板はジュラルミン (D2)、超ジュラルミンとその合せ板 (SD, SDC) の3種類で、板厚は0.4~1.2mm、幅1250mm以下である。超々ジュラルミンESDとESDCは従来の圧延方式であった。

可逆式二段熱間圧延での超ジュラルミン合せ板 (SDC) の圧延工程は次のようである。

400kgスラブ→押え圧延 (厚さ135mm×幅850mm) →面削 (片面10mm) →洗浄→皮板付け→加熱→熱間圧延 (厚さ6mm×幅1100mm) →両耳切断 (幅1050mm)

傾斜鋳造法による鋳塊の熱間圧延には、日立製作所製二段圧延機 (30"×70") 2基、冷間圧延にはU. E. 製三段圧延機 ((31", 21")×72") 1基、ならびにU. E. 製二段圧延機 ((32", 36")×(66~96")) 7基が用いられた。小幅コイルの冷間圧延には、Schmitz社製 (500×800mm) 2基、Farrel社製 (20"×32") 1基の二段可逆式圧延機があり、そのコイル単重は50~60kgであった。その他、マグネシウム合金圧延用に日立製作所製二段圧延機 (36"×130") 4基、復水器管板用ネーバル黄銅いた熱間圧延用に日立製作所製二段圧延機 (36"×130") 1基が据え付けられていた。

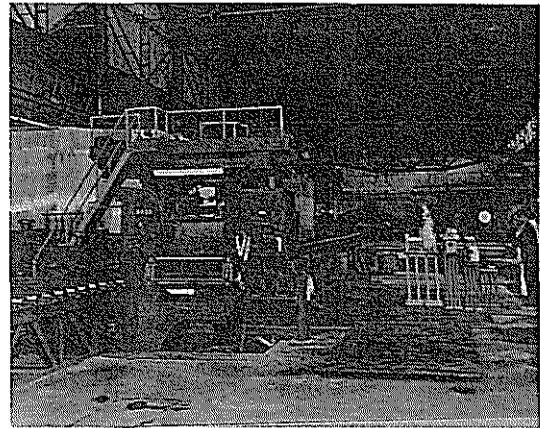


Fig. 16 Reversible 2 Hi hot rolling mill, R1, restored after World War II
(from *100Years of Working with Copper and Aliminum, 1897-1996*, Sumitomo Light Metal, 1997)

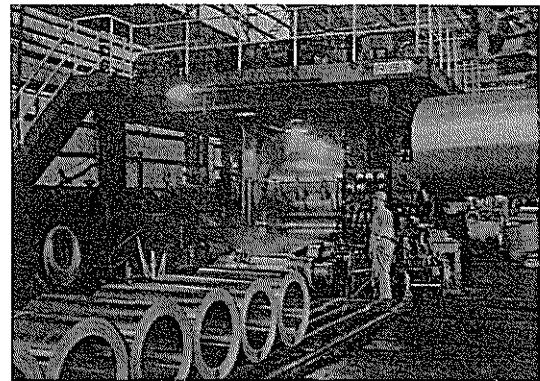


Fig. 17 4 Hi-2 stands tandem cold rolling mill
(pictured in 1958)
(from *100Years of Working with Cop- per and Aliminum, 1897-1996*, Sumitomo Light Metal, 1997)

焼入れには硝石炉を使用し、大板はつり下げ方式であるが、小板の場合には寸法によってコイル (最終単重40~50kg) のまま焼入れしたこともあった。

現在行われているストリップ方式の圧延技術の基礎は、小幅圧延から始まり、連続鋳造法の開発と相俟って、1942年以降、名古屋軽合金製造所によって完成された。これは、戦後公表された欧米各国の技術水準と比較して何等遜色がなかった。

1944年における伸銅所製板課第二工場のアルミニウム合金生産量は500~600トン/月、名古屋軽合金製造所製板工場は最盛期には2000トン/月 (内、ストリップ方式が1500トン/月) である。

(3) 管棒技術

a. 伸銅所管棒課第二工場

1939年頃から稼働開始し、主要設備は横型水圧押し

機4基、堅型水圧押出機2基、製管製棒用の二段溝ロール2基、鎖式抽伸機18基である。横型水圧押出機はHydraulik社製1500トン（铸塊直径6"）、Schleomann社製3600トン（10"）、同2000トン（7"）、Southwork社製1000トン（5"）の計4基である。前3者は棒材にも使用されたが、形材が主であった。Southwork社製は主に棒材に用いられた。堅型水圧押出機はHydraulik社製複動型1000トンが2基で、管専用であった。素管はマンドレル押出方式で製造された。材質はジュラルミン、超ジュラルミン等で、ESDは比較的少なかった。用途としては飛行機の小骨その他の構造材、操縦桿、エンジン台座、給油配管であった。鋳用に線材が製造された。線材は堅型水圧機で八角形断面に鍛造後、三段溝ロールと二段溝ロールで縮径した後、ドラム抽伸された。

b. 名古屋軽合金製造所管棒工場

1941年、主要設備として、横型水圧押出機8基、堅型水圧押出機および堅型水圧機1基、プロペラ翹素材用の圧延溝ロール3基、鎖式抽伸機17基、20トン及び300トン引張り矯正機各1基、リーラ矯正機が設置された。Fig. 18は2000トンの横型押出機である。

いずれの工場でも、ピレットの直径は5"、7"、9"、10"で、傾斜铸造法で製造され、名古屋では連続铸造法も併用された。焼入れは硝石炉が用いられた。生産量は伸銅所（桜島）、名古屋でいずれも管棒が300トン/月であった。

(4) 形材押出技術

a. 伸銅所管棒課第二工場

押出形材に使用されたのは、横型水圧押出機はHydraulik社製1500トン（铸塊直径6"）、Schleomann社製3600トン（9"、10"）、同2000トン（7"）で、Schleomann社製3600トンは当時としては最大級のもので、主翼桁用ESD大型形材の生産に用いられた。大型の場合には10"に取り替えた。Schleomann社製2000トンは中型形材の生産に使用された。肉厚は1.2、1.5mmであったが、1.0mmの場合には、1.2mmで押出した後に4"ロールで圧延して1mmとした。なお、1940～1941年頃クラッド形材やマンドレルを摺動させてテーパ形材の実験をしている。

b. 名古屋軽合金製造所管棒工場

押出形材生産用に横型水圧押出機が7基設置された。その後増設され、計11基となった。ESDは2000トン級以上の押出機で生産され、最小肉厚は4mmとしたが、主に6mm以上の肉厚であった。押出速度はSDが2～2.5m/min、ESDが1～1.5m/minであった。

ESDよりも押出性のよい合金が要求され、Cu量2%を1.1%に減らし、Mg、Zn量を少し増やしたNSD合金（Table 10）¹⁾が作られ、押出速度が3m/minとSDより優れたものができた。合金の名前のNはNagoyaのNである。合金成分がESDの規格範囲内であるので、名古屋の海軍監督官が承認し生産に踏み切った。

当時の押出形材生産上の問題は、押出材尾部の結晶粒粗大化、押出性が形状寸法に依存すること、押出材尾部のまくれ込みであった。押出形材の矯正方法は、引張り矯正、叩き矯正、プレス矯正、ツイスタによる振り矯正

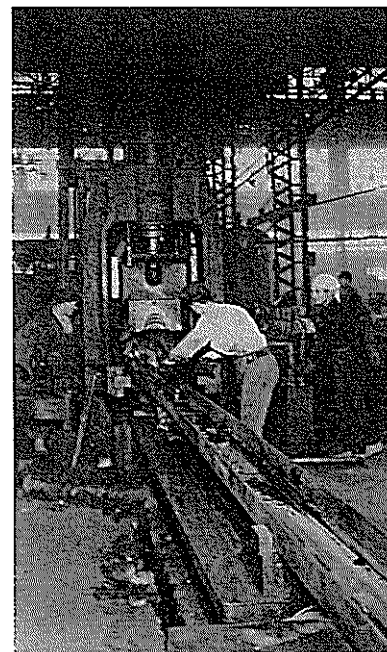


Fig. 18 Horizontal hydraulic pressure extrusion press for shapes (from *100 Years of Working with Copper and Aliminum, 1897-1996*, Sumitomo Light Metal, 1997)

Table 10 Chemical compositions of ESD and NSD (mass%)¹⁾

	Zn	Cu	Mg	Mn	Cr	Si	Fe	Al
Spec. *1)	7.0~9.0	0.8~1.7	1.2~1.8	0.3~1.0	0.1~0.4	<0.6	<0.6	残
ESD	8	2	1.5	0.45	0.2	(<0.5)	(<0.6)	87.8
NSD	8.5	1.1	1.6	0.45	0.2	(<0.45)	(<0.6)	88.15

*1) Specification for aircrafts 7222 (Chi 263)

である。矯正は傷取りと同様、非常に手数がかり、人海戦術であった。生産量は桜島と名古屋でそれぞれ 700 トン/月であった。名古屋では ESD の生産が 500 トン/月であった。

(5) 鍛造技術

a. 伸銅所鍛造工場、薬莖工場

1940 年頃、米国 Eric 社製 30000lbs エアーハンマー、1 トンエアーハンマー、1000 トントリミングハンマー各 1 基が導入された。薬莖工場には大阪鉄工所製 2000 トン型水圧機、1000 トン型水圧押出機各 1 基、抽伸ならびに口絞り用に 150 トン型水圧機 1 基が設置された。ピストンはドイツのワインガルテン社製 180 トン及び 700 トンスクリュープレスで、クランクケースは 2000 トン型水圧機で製造された。

b. 名古屋軽合金製造所

設備の大型化、大型クランクプレスの採用、鍛造ロール、アプセッタの使用、黒皮を残す鍛造、製型工場の設置を基本に工場ができた。4000 トン型水圧機 2 基、1000 トン型水圧機 (アプセッタ) 1 基、Beche 社製 35000kg-m カウンタブローハンマ 1 基、鍛造ロール 1 基が設置された。小型鍛造品専用にはピストン用スクリュープレス 4 基、1 トン及び 3 トンエアーハンマ各 1 基設置、その後米国 National 社製 1500 トンクランクプレス 2 基、国産の 700 トン 3 基、200 トン 2 基クランクプレスが増設された。

3.10 ESD とアルコア合金 7075

元住友軽金属常務取締役、研究部長であった畑栄一博士は住友軽金属技報の中で、次のように書いている。「戦後、75S の inventor に会いたいという目的で、米軍の将校が名古屋工場に現れたことがあった。五十嵐博士はすでに東北大学に去られたあとであった。アメリカは捕獲された零戦に ESD の使用されていることを知り 75S をつくったとの噂は聞いていたが、五十嵐博士を 75S の発明者として正式に認めていることは、その時初めて知った」とのことである⁵²⁾。米軍は撃墜された零戦の材料を分析し、75S を開発したことを証拠付ける貴重な証言である。

大平五郎名誉教授は東北大学金属工学科創立 75 周年

記念誌 (2000 年, p.112) で次のように語っている。「五十嵐教授着任後のある日、アメリカの海軍研究所の高級技師とアルコア研究所の人が突然やってきた。ESD のことについて質問があり、名古屋の住友金属に伺ったら此処に居るといので仙台まで来たという。そして、教授にすぐにアメリカに来ないかという。先生の返事は唯一、「負けた国のものが勝った国へ行って何かいいことがあるか。断る」。その結果は毎月 1~2 回、ときには 3 回必ず 2~3 人の技術者が訪ねてきた。ほぼ 2 年は続いたと思う。先生は自分のやった仕事だけにこの次は多分これを聞きに来るだろうと話していたが、大体その予想通りになっていたのには敬服した。住友では 7~8 人でしていた研究を海軍研究所とアルコアでは 600 人でやっていたという」⁵³⁾。

1941 年まで研究部長を務めた田邊氏によると「戦争の末期某米機の或重要部品の巨大な鍛造品が Al-Zn-Mg-Cu 系合金である事を知ったが ESD よりも Zn 少なく、Mg 多く確か、Cr の含入はなかった。思へば是が 75S 或は其の初期のものであったらしい。敗戦後 Alcan (原文まま、Alcoa の間違いか?) 社のカタログに依り、75S の如何なるものなりやを知り、更に Materials & Methods 誌によって其詳細を知り得た。Reynolds の R303 も同種類のものであろう。全く同系統であって其性能も大同小異であり、合せ板の表皮も落ちつく所に結着しているのは愉快である。私共はクロム添加によって時期割れを防止したが 75S に於いても恐らく然りであろう」と⁴¹⁾。

Table 11 に住友の ESD とアルコア社の 7075 合金の成分比較を示す⁴¹⁾。アルコア社の 7075 は当然のことながら ESD の米国特許の請求範囲に入る (Table 8 の日本特許参照のこと)。Mn は現在では不純物元素扱いであるが、この当時、Mn は必須成分として扱われている。Cr 添加の合金が特許としてでてくるのは米国特許 2240940 (出願 1940.9.28, 特許 1941.5.6)⁵⁴⁾ で、その請求項は次のようである。出願は住友の米国特許が成立した後である。

1) Zn 4-6%, Mg 0.75-2.5%, Cu 0.1-2%, Mn 0.1-1% に、少なくとも Ti 0.02-0.25%, B 0.005-0.1%, Zr 0.01-0.15%, Mo 0.02-0.25%, W 0.02-0.2%, Co 0.02-0.2%, Cr 0.05-0.5%, V 0.02-0.2% を 1 種類以上添加

Table 11 Comparison between ESD and 7075 alloys⁴¹⁾

	Zn%	Mg%	Cu%	Mn%	Cr%
Sumitomo ESD	6.0~9.0	1.2~1.8	1.5~2.5	0.3~1.0	0.1~0.4
Coating alloy for Sumitomo ESD	0.5~3.0	—	<0.2	—	0.1~0.4
Alcoa 7075	5.1~6.1	2.1~2.9	1.2~2.0	0.1~0.20	0.15~0.40
Coating alloy for Alcoa 7075	0.75~1.25	0.10	<0.10	<0.10	—

2) Zn 4-6%, Mg 0.75-2.5%, Cu 0.1-2%, Mn 0.1-1%, Cr 0.05-0.5%, Ti 0.02-0.25%,

3) Zn 4-6%, Mg 0.75-2.5%, Cu 0.1-2%, Mn 0.1-1%, Ti 0.02-0.25%

第二項がほぼ 7075 合金に相当する。実施例として Cr を添加した合金はなかった。

田邊氏はさらに続けて、「今両者の優劣を詳細に比較し難いが、75S の 5.5%Zn, ESD の 8%Zn は種々の点で前者に有利になるは否み難く、我国で主として実用した押出材は規格として引張強さ 58kg/mm²以上を呼号したものであったが、75S の 54kg/mm²でも実用上何等差支えないであろう。こゝろあたりに徒に強力を求める我国の通弊をみる。我国では合せ板はほとんど実用されなかったが、米国では必ずや相当に使われていると思ふが、其実態を知りたいものである。尚又米国では 0.3mm の板も規定されているが、私共は之を 0.5mm に止めた、組成及製造方法の差異はあるが、彼に一日の長がある」⁴¹⁾。

ESD の組成は、現在でも鋳造での鋳塊割れや押出での押出性など生産性で非常に問題が多く、当時の技術でよくこれだけ生産できたものと感心させられる。米国は鋳造性や圧延性、押出性などの生産性を重視したのか、あるいは応力腐食割れを考慮したためか、Zn 量を ESD より大幅に減らしている。また薄板の圧延についても、米国から導入した圧延技術なので、この生産技術面では日本の技術は遅れていたといわざるを得ない。材料規格の件では、当時の空技廠からの無理難題な要求に応えながら成分を決めていかざるを得ない状況がよくわかる。しかし、この要求がなければ世界に誇る材料もできなかったであろう。これは何時の時代も変わらない。

「航空機工業禁止の現時日本ではこの種優秀合金は恐らく活用の道はなかりうけれど、兎に角斯界の歴史に些少なりと足跡を残し得た事を五十嵐博士ら舊同僚諸君等と共に喜びたい。尤も、ESD といえども全然新しいものではなく、独の Sander 合金、英の E 合金等先哲の業績を再検討し、E-S-D 系を組織的に開拓して生まれたものであるが、少なくとも其耐時期割れ性増進のためクロム添加の如きは、五十嵐、北原両氏の前人未踏の偉業なることを付記して置く」⁴¹⁾と田邊氏は結んでいる。後述するが、戦後の航空機用高強度アルミニウム合金材料は ESD の成分と同じ方向に開発が進んでいる。

1960~1980 年代、アルコアの航空機材料開発の中心的役割を果たした J. T. Staley は 1989 年、“History of Wrought-Aluminum-Alloy Development”の中で、Al-Zn-Mg-Cu 合金について、アルコア社は 1940 年 7076 (Al-7.5Zn-1.6Mg-0.7Cu-0.6Mn) を鍛造用合金として開発し、2025 合金 (Al-4.25Cu-0.8Si-0.75Mn) より耐摩耗性や疲労が優れているのでプロペラの翅に用い

た。1938 年までにラボでは板での応力腐食割れの問題は解決できたので、X74S (Al-5.2Zn-2.1Mg-1.5Cu-0.4Mn) を主翼の一部に用いたが、この合金板材はフィールド試験で、時効材を加工して用いると応力腐食割れに敏感になることが判明した。このため、高融点の微量添加元素の影響を調べ、クロムを 0.2 から 0.35% 含む合金が応力腐食割れに強いことがわかった。強度も少し向上させて耐応力腐食割れ性にも良好な、今日良く知られている 7075-T6 を 1943 年開発したと述べている。その後、“Interestingly, chemical analysis of sheet from a downed Japanese Zero fighter aircraft disclosed that the composition was almost the same as that of 7075.”と書いている。この新合金はすぐに機体の設計に反映され、7075-T6 板は B-29 Super Fortress 後期モデルの主翼上部のスキン材やストリンガー材として用いられた。アルコアの研究者が Zero Fighter について記述したのはこれが初めてではないかと推察される⁵⁸⁾。

1930 年以來、応力腐食割れについて研究を続け、アルコアの材料開発で中心的役割を果たした E. H. Dix は “Alcoa 75S, after many years of research, was put into commercial production for clad sheet and extrusions in 1943 and later for nonclad sheet, wire, rod and bar, and forgings.”⁵⁶⁾と述べている

同じく、米国特許 2240940 の発明者でもあり 7075 の開発に関係したアルコアの J. A. Nock, Jr. は、M. B. W. Graham らの著書 “R & D for Industry, A Century of Technical Innovation at Alcoa”⁵⁷⁾で次のように紹介されている。“Ultimately, Joseph Nock, working with small DC ingots cast on the premises at Alcoa Research Laboratories, solved the problem empirically, demonstrating that small amounts of chromium added to Al-Zn-Mg-Cu composition yielded resistance to SCC that had long been sought。”その Nock は、“This alloy is the culmination of a number of years' intensive work.”⁵⁸⁾と述べ、これはその後の 1949 年 ASM の単行本でも “Years of extensive laboratory investigation, including painstaking studies of susceptibility to stress corrosion cracking, finally terminated in the selection of the alloy composition designated 75S.”⁵⁹⁾述べていて、75S の成分を決めたのは自分たちの研究の成果だと述べている。

アルコアの物理冶金部門のリーダーだった H. Y. Hunsicker もまた然りで、“Continuing alloy development efforts led to the discovery that the addition of a small amount of chromium greatly reduced the sensitivity to stress corrosion.”⁶⁰⁾と述べている。

このように、歴代のアルコアの材料研究者が日本の ESD について敢えて触れてこなかったためか、2008 年ドイツのアーヘンで開催されたアルミニウム合金国際会

議 ICAA11 の最初の基調講演、ヴァージニア大学の E. A. Starke, Jr 教授の “Precipitation Hardening : From Alfred Wilm to the Present” の講演で、Al-Zn-Mg-Cu の開発の歴史が語られたが、彼の示したパワーポイントの図の中には全く ESD が入っていないことに、東京工業大学里教授や小職も含めて日本から来た参加者は驚いた。同時に配布された本の中には “The early alloys were susceptible to stress-corrosion cracking but later examination of small addition, of first Mn and then Cr, proved that alloys containing 0.2 to 0.35% Cr had high resistance to stress-corrosion. In 1940 Sumitomo developed an Al-Zn-Mg alloy for the Mitsubishi A6M2 (Zero) airframe. The chemical composition of the Sumitomo alloy was very similar to the Al-Zn-Mg alloy 7075 developed by Alcoa and introduced in 1943.”⁶¹⁾ と書かれているにも係らず。ここでも住友の発明のプライオリティについては直接触れていない。

これは ESD について、我々日本人による PR が足りないのではないかということで、2010 年横浜で開催された ICAA12 では、Fig. 19 に示すように ESD の開発の歴史と零戦残骸の展示とその材料調査結果を英文ポスターで PR し、そして実行委員長里教授の基調講演 “Innovative Development of Aluminium Research and Technologies in Japan”⁶²⁾ や小職の講演 “Alloy Development for Transportation in Sumitomo Light Metal”⁶³⁾ の中で、ESD 開発の先進性を世界のアルミニウム材料研究者に向かってプレゼンした。

発明というのは、大概同じ時期に同じような研究をし

ているので結果的に同じ結論に達することはホールやエールの発明をみても理解できる。しかしながらどのような研究をしてアルコアが 7075 を開発したのか公表されたデータはほとんどないのが実情である。勿論、特許での ESD の優先性は明らかであるが。

3.11 軍官学共同研究による HD 合金と ND 合金

HD 合金と ND 合金については、西村教授が軽金属時代に「随筆軽合金史」(第 34, 35 回, 第 38 回, 1951 年)として詳しく書いているので、それを紹介する⁶⁴⁾。

1941 年 11 月下旬、本多光太郎教授などが主宰者として、陸軍が後援で日本学術振興会の航空機に関する総合研究をするための特別委員会の準備会合が東京の如水会館で開かれた。第 3 小委員会として強力軽合金に関する研究部会が企画され、本多博士が委員長として、大学側から東北大大日向一司教授、早稲田大学石川登喜治教授、京都大学西村秀雄教授、製造業者は住友金属、古河電工、神戸製鋼の三社であった。陸軍が主宰したため海軍からは協力がなかったとのことである。第一回の会合は 1942 年 4 月、初空襲の最中開催された。西村教授によれば「研究方針を定めることになり、どうするかと云って別に案がなかったから、銅を用いないで超ジュラルミンの代用になるような合金を造ってはどうかと提案した。銅は軽合金に使用される量はさほど多くないが、しかし我国の銅資源は必ずしも豊富とは云えない、少しでも節減が出来るなら時局に役立つではないかという考えであった」。その結果、Al-Zn-Mg 系合金を取り上げることとなった。超ジュラルミンと同等の強度で、焼入れして常温で時効硬化を示す様な材料をこの系統の合金で造るこ



Fig. 19 Presentation of two typical inventions before World War II, Extra Super Duralumin (left) and Aluminite technology at RIKEN in ICAA12 (12th International Conference of Aluminium Alloys) held at Yokohama in 2010.

とが出来るか検討した。まず成分の目標を定め三社が試作してそれを検討することから始めた。

住友金属から Zn 6%, Mg 2%, Mn 0.8%, Cr 0.25% を目標として造られた板は引張強さ 45kg/mm², 伸び 18% を示し, 超ジュラルミンの規格値 (引張強さ 43kg/mm² 以上, 伸び 14% 以上) を満たしたが, 焼鈍材は規格値以上となり加工性に問題があったので, 「もうこの研究はこれで打ち切って新しい方向に向かうことにしようか」と考えたが, 折角研究を始めたのであるから, 鍛造材とか押出材を造ってみてはということになって, その試作をすることにした。古河電工での Al-6%Zn-2%Mg-0.75%Mn-0.35%Cr 押出材の試作結果は非常に良好で, 引張強さは 50~54kg/mm², 伸びは 12~15%, 超ジュラルミン SD の規格値を十分満足していた」。この時, 「押出が容易で, その速度を数倍にしても差支えないことを知った。これは予期しなかった一つの発見であった。当時, 押出材の製造が航空機製造の一つの隘路となっていた。急に押出機を製造することは困難であったから, 若し押出性能の良い材料があったならば, それだけ製造能力が増すことになる訳である」から, 注目すべき発見であった。押出性能に関しては, 神戸製鋼でも実験をし, 超ジュラルミンの 2 倍程度の速度が得られた。この合金は HD というときに話が陸軍からの提案でまとまった。これは本多博士が委員長であった関係で H のイニシャルを取ったものである。こうして HD (Honda's Duralumin) という合金が生まれた。化学成分は Zn 5~5.8%, Mg 1.5~2.5%, Mn 0.3~0.8%, Cr 0.1~0.4%, Cu 0.8% 以下, Fe 0.6% 以下, Si 0.5% 以下, Al 残である。この合金は, 後述するが, 戦後, 三元合金として新幹線や二輪車などに適用され大きく発展することとなる。

太平洋戦争も終わりに近づくにつれて, アルミニウム新地金が不足して, 航空機の解体屑やそのほかの返り材 (再生塊) を使用する率が多くなり, Fe, Si, Zn などの不純物の混入が増してきて, 航空機に不可欠の品質の良い超ジュラルミン SD の生産が困難になってきた。そこで, 上記の不純物の許容は範囲を拡げ, SD に匹敵する機械的性質を有する材料の開発が要望され軍官民で開発した合金が ND である。ND は Nippon Duralumin という意味である。その成分は, Cu 4.0~4.8%, Mg 0.6~1.2%, Mn 0.6~1.0%, Fe 0.8% 以下, Si 0.3~1.0%, Zn 1.0% 以下で, 機械的性質は焼入れ後常温時効で引張強さ 44kg/mm² 以上, 耐力 32kg/mm² 以上, 伸び 10% 以上である。西村教授は, 結果的には「アルコアで 14S として既に使用されていたものを多少変えたものに過ぎず, 25S にマグネシウムを加えたものになった。ND と称した材料は軽合金としては止むを得ない事情から造られたものであって, 進歩した材料とは云えない」が, ND の研究から「ケイ素が 0.8% も含まれていても焼入れ時効材の機械的性質が SD のように低下する

こともなく, また鉄も時効を阻止しない理由は不明のまま残っていて」, 学術的な問題を提供してくれたので, 無駄な研究ではなかったと述べている。

3.12 なぜ ESD は短期間で開発できたのか?

五十嵐博士は, 戦後, ESD 開発当時を振り返って, 次のように述べている²⁰⁾。

「先輩が夫々立身出世されると馬鹿な我輩も止むを得ず研究の凡てを見ねばならぬことになった。丁度その頃デュラルミンは板につき SD, SDC も工業化出来てやれやれと思っているとトム合金と云うものが華やかに宣伝された。第一次大戦当時英国には E 合金というのがある。其の後独乙に Sander 合金と云うのがある。別にめづらしい合金ではないが時期割れがあるので使いものにならぬ。学業成績は優秀でも Load がかけられない秀才見たようなものである。とはいっても世間はうるさいし。止むを得ず吾々は使いものにするようにしようではないかと相談した。

割れるやつなら大いに割って見ようとするので最も時期割れの甚だしいのを作ってそのよって来る原因をつかもうとつとめた。種々の気体の中, 液体の中, 真空中, 等で割らして見た。その結果から此の種の時期割れは水分による結晶粒界の局部腐蝕が重大なる原因をなすことがわかった。そこで腐るものに腐るなどは無理な話だから腐りたければ大いに腐らしてやろう。それも局部腐蝕などケチな事云わずに全面腐らすようにもって行こう。それには全面に析出する Mn を増して 1.2% にもって行けば全面腐蝕になり時期割れはなくなる。処が大物鋳塊では Mn 化合物が大きく発達して物にならぬ。そこで Mn を減じて Cr で補うことにした。そしてその limit が ESD の Mn, Cr の成分になった。他の成分は量産の目的で最も加工し易い点をとった。量産を考えないならば 80kg/mm² 程度は出せる。かくて ESD は出来上がったが素人はおそろしいもので「完全に時期割れはないか」等と詰問されたものである。吾々の見解からすればデュラルミンでも時期割れをおこさせることが出来るのであって絶対に割れないなどいい切ことは出来ない。実用上差支えないと答える以外に道はない。大事なことは実用の限度と量産と力とのかねあいである。それらは見る人の心にまかせおくよりしかたがない。そして少し成分をいじれば注文通りのものがつくれる」と。

五十嵐博士から直接指導を受けた元常務取締役深井誠吉博士との対談⁶⁵⁾では次のように次のように語っている。

「今度は考え方を全く変えて, どのように割れるかを研究することにした。そこで, いろいろ研究して, 一番割れやすいものを作った。普通なら時期割れは 1 カ月から 2 年ほどの間に起るが, 曲げて 5~10 分で割れるのができた。割れは結晶粒界で起こる。ここが腐って割れるので, 酸, アルカリにつけて腐らせてみたらもっと割れやすくなると思った。ところがより割れるはずなのが

割れない。人間の考えがいかに馬鹿なものであるか、これで明らかである。頭から割れるはずだと思い込んでいたものが割れない。

そこで別れの原因を調べてみると、空気中でも割れるので、その因子を調べるために、酸素、窒素、いろいろやってみたが、一番影響するのは水蒸気。次に調べねばならないのは、金属それ自体が、割れるかということです。そこで真空中で調べた。普通なら4~5分で割れるのが1日たっても、2日たっても割れない。それでわかった。つまり水蒸気があると割れる。純アルミで割れないのはわかっている。そこで酸、アルカリにつけると全面が腐るので割れなくなる。ここで問題が決ってくるわけですね。

結局、結晶粒界と同じ速度で全面を腐らせる。全面が平均して腐るためには微細な析出物を全面に作る。そうすると全面の腐り方と結晶粒界の腐り方の歩調がそろう。こうすれば割れない。結局1ミリ腐るのに、何年もかかるから、金属の腐食が進む前に、飛行機の方が駄目になる。研究はこれで終り。後は何を何%、何を何%と実験すればすぐできる。それから先は、アメリカ流にサーッとやればよい。」と。

同様に、元専務取締役で技術研究所長であった寺井士郎博士はESDが開発できた要因を次の六点にまとめている⁶⁵⁾。

(1) 具体的なニーズ

1935年当時は、準戦時下であり、列国より優位な軍事力、特に優秀な戦闘機の開発それに伴う機体構造材としての高力アルミニウム合金の強度向上に対する軍の要求は切実であった。引張強さ60kg/mm²級の強力軽合金の開発が海軍航空本部より要求された。と

(2) 非凡なる発想

応力腐食割れの解決の難しさから、リスクの少ないAl-Cu-Mg系合金を選択せず、強度的にはAl-Zn-Mg系合金に勝る合金なしと考え、応力腐食割れ防止によって実用化せんとした積極的発想と、アルミニウム合金の応力腐食割れが局所的な結晶粒界での割れであることに着目し、むしろ全面的に腐食させることで割れを防止しようとした、逆転の発想は非凡である。

(3) 的確な実験対象

実験対象として、D合金、S合金、E合金を選定し、それぞれの配合比率と強度マップの関係からの的確な合金を選択したこと、粒内に全面に析出させて全面腐食させる微量添加元素の選択が的確であったこと。

(4) 系統的な実験

応力腐食割れ防止について金属組織、環境、応力、成分及び熱処理に関し系統的な実験を短期間に実施し、MnおよびCrの微量添加が有効であるとの結論を得て、合金特許を取得した。

(5) 創造に対する執念

五十嵐博士は、「研究室で出来たものが、工場で出来ない筈がない。必ず物にするという執念で事に当たれば、自然が、これでもか、これでもかと呼び掛けてくれるものだ。この自然の呼び掛けを聞く耳をもたねばならない」とよく言われていた。

(6) 優れた協力者

ESDは工場生産技術者の協力なしでは、工業製品としては恐らく開花しなかったであろう。当時の生産技術は、製造部長の丸山五男氏の献身的な協力に負うところが多かったと五十嵐博士は述懐している。

時期割れの対策に関しては「逆転の発想」ということで寺井博士が紹介されたが、同じく元社長で技術研究所長の佐藤史郎博士はセレンディピティの観点から次のように述べている⁶⁷⁾。

「五十嵐博士から、我々研究に当たる物に対して、最も心すべきこととして対象を徹底的に観察することの重要性を説かれた。「ものをよく見よ。理屈(理論)は後からつけたらよい。もし誰かがつけてくれるならばそれでよい。とにかく、ものをよく見よ」と。「応力腐食割れに関しては「光学顕微鏡で応力腐食割れの組織を観察すると、結晶粒界が割れている。応力腐食割れに析出物が関与していることは明白である。そこで、応力腐食割れを徹底的に観察しようという魂胆もあった。これらの合金の試験片の応力腐食割れ試験を実施した結果、意外なことに応力腐食割れが著しく改善(抑制)されている合金があった。その添加元素がCrであり、Cr添加が組織を微細化し、析出物の析出形態を粒界析出型から粒内均一析出型へ変えていた」ことを見い出してESDの発明に繋げた。すなわち、入念な光学顕微鏡観察と柔軟な洞察-セレンディピティと言うに十分値する一により達成されたものであることは疑う余地がない」と述べている。

小職は、直接五十嵐博士にお会いしたことはないのですが、研究論文や五十嵐博士本人やその同僚あるいは薫陶を受けられた方々が書かれた内容や先輩からの言い伝えしか知らないもので、それを基に判断するしかない。寺井博士や佐藤博士が述べているように研究者本人の資質の問題もあるが、やはり研究を支える環境と研究に対する会社の考え方が重要で、それがまた研究所の風土とか姿勢とかが伝統となって受け継がれているように思われる。小職なりにまとめてみる。

(1) 研究開発目標が明確

海軍より米国の24Sよりも高い引張強度(60kg/mm²)を有し、応力腐食割れを生じない材料の開発の要請。軍事がすべてに優先した時代であり、目標達成のために人も物も金も付いてきた。

(2) 実験工場の存在

杉浦氏の先見の明で、我国最初に実験工場を設立させ、工場に近い条件で铸造、圧延ができたこと。これは現在でもできるだけ工場に近い条件で製造できる実験工場は合金開発や製造条件確立には不可欠である。

(3) 海外文献の豊富さ

1910年代からの文献が揃っていること。当時から海外の情報をいつもウォッチングしていたことがわかる。世界的なレベルでものを考えていたことが重要である。小職が入社した頃、英国の金属学会誌 Journal of the Institute of Metals はもとより米独仏の金属学会誌、さらには Nature や 1930年代の量子力学形成の頃重要な文献が掲載されていた Zeitschrift für Physik がこの研究所に揃っていることに驚きを覚えた（これらの文献の一部は 1996年産業技術記念館に寄贈された）。海外の図書も豊富で、現在でも図書室は充実していて、この執筆に当たってもそれほど不自由することなく過去の文献や著作を直接調べることが出来た。

(4) 研究成果の記録化、特許化、理論化

研究した内容を報告書として記録として残す風土、必要に応じて特許化すること、また学会等で発表し社外からの評価も受けること、重要な内容は理論化して論文として報告すること、そして学位論文としてまとめること、こうした研究習慣があった。Fig. 20は超々ジュラルミンが開発された頃の研究報告書である。

(5) スタッフを支える優秀な研究者、技能者

五十嵐博士には北原氏というすばらしい研究者がついて実験を担当した。彼の存在なしではESDは発明できなかったものと思われる。技能者については記録がないのでよくわからないが、小職が入社した頃には多くの優秀な技能者がいて、铸造、圧延、分析、組織観察に長けた方々が多くおられた。現在では優秀な設備があるので、当時ほど必要ではないかもしれないが、研究内容を理解し研究者の目や耳となり、手足となるスタッフがいることは研究を早く進める上では重要である。



Fig. 20 Technical reports (1935~1938) stored now in R&D center of Sumitomo Light Metal

(6) 広範囲の材料の調査研究

五十嵐博士はもとより、当時の研究者はいろいろな材料、銅合金やアルミニウム合金の調査、研究を手がけていた。五十嵐博士は、鋳物材、展伸材などほとんどのアルミニウム合金、銅合金、マグネシウム合金の材料とその防食の研究、工場材クレーム処理や他社材の調査を手がけていて、幅広い視野と観察力が出来ていた。

(7) 現場力、生産技術力

研究した物が形になるには優れた生産技術が不可欠で、この協力なしではユーザーに受け入れられる製品が出来ない。生産技術者との信頼関係が重要で、日頃から生産技術と協力し、ともに生産技術上の問題を解決していくことが必要である。五十嵐博士から直接指導を受けた深井博士は五十嵐博士から、「発明者は、私ということになっているが、その段階における北原さん達のご苦労は勿論、その工業化に際しても当時の、丸山副所長など随分頭を痛められました。すごいスクラップの山でしたから。五十嵐君、こりゃあ、伸銅所が潰れるよ。といわれましてね」と聞きました。また岡村金次郎さん（铸造工場長）から「決められたことを忠実に実行して、ものにするのが、現場の使命です。難しい事も毎日やっている、上達するものです」と聞きました⁶⁸⁾。

3.13 五十嵐博士の人となり

五十嵐博士について直接お会いしたことも指導を受けたこともない世代なので、どこまで実像に迫れるかわからないが、記録からできるだけ探してみたい。

まず五十嵐博士は、生家が浄土真宗大谷派（本山：東本願寺）に属し、東光明寺（ひがしこうみょうじ）（注）で長男として出生したこと、これは五十嵐博士のものの考え方、生き方に大きく反映されているように思われる。

（注）東本願寺（大谷派）の光明寺という意味。近くに西光明寺もある。現在の玉名市溝上に承応3年（1654年）開基。現在は五十嵐勇博士の末弟秀雄氏のご長男である五十嵐聖氏が第13世住職とされている。五十嵐博士は三男四女の長男として出生。博士は先妻いきとの間に一男三女を儲けられた。先妻は1929年、33歳で早世され、後妻シズ江を迎えられた。晩年は熊本市島崎で余生をおくられた。博士の長男の全（たもつ）氏は秋田大学鉱山学部講師として研究をされ、1960年頃には「軽金属」にも勇氏と連名で論文を執筆されていたが、2003年他界された。Fig. 21は1928年頃、東光明寺本堂の前で撮影された五十嵐家の写真である。詳細は文献69を参照のこと。

京都大学に入る前に広島高等師範学校を卒業後、八代中学・台湾中学で教鞭をとり、再び京都大学理学部物理学科に入学される。なぜ教師を辞めて理学部物理学科に入学したのか、最初から金属を研究するつもりであった

のかどうか分からないが、本誌 15 周年記念号 (1975 年) に寄せた巻頭言で述べているように「大自然の理法」を身につけたいとの気持ちはあったようだ。当時の物理学はアインシュタインの相対性理論や光子量子仮説の発表、量子論から量子力学の確立に向けて大きく変化を遂げていく段階で、自然に対する価値観も変わっていく激動の時代ではなかったかと思う。日本では長岡半太郎や本多光太郎が活躍していた頃である。7 年ほど後にノーベル賞を受賞した湯川秀樹や朝永振一郎が理学部物理学科に入学している。五十嵐博士の求めた「大自然の理法」は、万物は流転するといった古代ギリシアのヘラクレイトスの考え方や仏教の「縁起の理法」とも相通ずるところがあるように思われる。住友軽金属技報の巻頭言では次のように書かれている。

「すべてのものは時とともに永遠に流れてやまない。人間はその流れに節をつくり、句切りをつける。昔は男の子生れて 15 年たては元服のお祝いをした。一人前の男と認められる。今でいえば成人式である。これもひとつの句切りである。句切りができれば、そこを元として新たに出発せねばならぬ。独立独歩、ヘビが出るか、ジャが出るか、大黒様がころげ出ぬとはかぎらぬ。

世の中は非常な速度で変わりつつある。その変化を追ってはいつまでたっても追いつかぬ。15 年の経験実績、これが大きな宝である。その中にいろんな鍵が含まれている。鍵は小さい。その小さい鍵を押せば大きな扉



Fig. 21 Photograph of Igarashi Family taken before the main temple of Higashi-Koumyoji at about 1928. The back row ; Dr. I. Igarashi (the second person from the left) and his two younger brothers and sister. The front row ; his father (the center) and mother (the second from the left), his former wife (the right end) and his son and three daughters⁴²⁾.

が開く。

リンゴや柿は熟すれば落ちる。それは当り前のことである。どんな当り前の小さなことでもすべて大自然の理法に従って動いている。その小さいできごとの中に大自然の理法を見る目を養わねばなるまい。一木一草ことごとく大自然の理法のあらわれである。

人間 15 才ともなれば若い血潮のあふれでるときである。「皆んなついて来い」と雄たけびをあげてもよからう。大衆とともに、ナポレオンはフランス国民とともにウオーターローで戦って一敗血にまみれた。だが、フランス国民は今なお健在である。

理屈でなく、実績をもとに立ちあがろう。雄たけびをあげよう。それを我々皆んな拍手をしてたたえよう⁷⁰⁾と。

五十嵐博士は生前に一冊の著書を執筆されている。Fig. 22 に示す鉄鋼新聞社発行の「アルミニウム技術入門」(1969年)である。現在でも十分通用する入門書で、必要にして最小限の事柄について書かれている。ところどころ実際に経験していないとわからないようなことを簡潔に書き、ハッと気がつかされることが多い。この本の前書きでは執筆の動機について語っている。

「万物は生成流転する。瞬時もとどまることを知らない。アルミニウムについても広範な新しい業績が山のように集められつつある。集りつつある新しい業績によって新しい理論が組立てられ、ふるいものと代りつつある。日に月に、しかも急速に。

戦後家庭の台所で黒い鉄は白いアルミニウムに代った。金と思った万年筆のキャップはアルミニウムだった。ダラリの帯の金糸銀糸もアルミニウムと聞いて驚いた。ピ

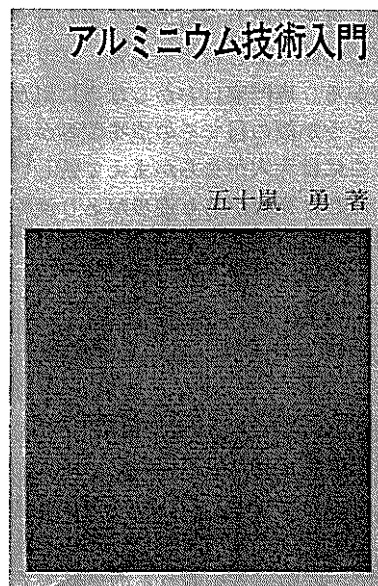


Fig. 22 Introduction to Aluminum Technology written by Dr. Igarashi⁷¹⁾

ルの外壁はアルミニウムのカーテンウォールとなった。時速 250km の新幹線の電車は全アルミニウムで計画されつつある。このときに当ってアルミニウムとはどんなものかを書いてみよう。難かしい理屈や細かい数値は専門家におまかせして、ここではアルミニウムの常識を、そして常識さえあれば必要に応じて情報センターは最新の数値を引きだしてくれることにもなろう。僅かの暇で読めるような素人の常識、だれでもよめばわかる常識、しかもそれは今日の常識であって、新しい事実はたえずこの常識を覆しつつ進歩するであろう。」⁷¹⁾

そのあとがきでは、どのように読むべきかの心構えが書かれている。科学技術に関する五十嵐博士の思いが込められている。

「これからアルミニウムの仕事にはいろいろという新人にアルミニウムとはどんなものかを知ってもらうために、アルミニウムの常識を書いてみた。理屈めいたことはできるだけ簡素化した。また実用に必要な細々としたデータも 2, 3 例を示すにとどめた。科学でもなく、技術でもない、常識である。

科学技術振興が叫ばれている。科学は自由な発想の下で何の牽制も受けないうちにのみ、のびのびと発展する。その前によこたわる第一の障壁は官僚化であり第二の障壁は大衆化である。技術は科学を基礎としながらもプロジェクトが与えられて官僚化し、できた結果は大衆化してその効果を増す。呉越同舟ともいべき渾沌たるなかに常識という鶴みたようなものをほり込んでどちらからも叩かれるであろう。だが文句なしに読んでみていただきたい。「アルミニウムができるまで」はスッとよめる。「アルミニウムの性質」はすこしでもややこしいと思った場所はとばしてもよかろう。「アルミニウムの合金」はアルミニウム合金そのものの大要である。「アルミニウムの加工」はそれぞれ自分の行く道だけでよかろう。そうすれば数時間で済むはずである。ズブの素人はそれで大要がわかる。専門家はおかしな点に気がつかれるはずである。どうか凝目の目でその点を眺みかえしていただきたい。そこには大穴がまちかまえて新しい飛躍を待望している。そこに発展があり進歩があり流転してとどまるところを知らないであろう。」⁷¹⁾

戦後については、深井誠吉博士が日本金属学会誌で「名誉員の近況」の中で次のように書かれている。

「終戦直後の昭和 22 年暮、扶桑金属工業株式会社(占領軍の指令により住友金属工業は数年間社名を変更した)を停年退職された五十嵐先生は東北大学工学部、秋田大学鉱山、岩手大学工学部教授として数多くの俊秀を育てられた。」「一応形は顧問ということで研究、技術全般について、敗戦日本を救うものは若人であり、その若人を指導、教育するのが自分の使命であるとの御信念に基づくものであろうか。とくに若い技術陣の指導をお願いしているが、現職のときでもいわゆる指示とか指導

はお嫌いな五十嵐先生は例の調子で悠々閑と構えられ、正に大人の風格がある。他人には寛容、自己にはきわめて厳しい御性格は昔も今も変わらず、朝 9 時から夕方 4 時までキチンと勤務されている。もともと外国語に堪能な五十嵐先生は内外の文献、図書、あるいは社内の研究報告などは隅々まで精読されて、要点はメモされ、それを五十嵐流に分析、整理される。したがってときどき部屋へ伺って無駄話をしているときでも鋭い閃きを感じ思わずハッとさせられたり、また自分の文献調査が間に合わないときには五十嵐さんのものを利用させていただくが、別に嫌な顔もされない。よき時代、明治に生を享けられた五十嵐先生が、いま最大の関心を持っておられるのは日本の将来というか、文化国家日本が世界の強豪を相手に堂々と太刀打ちするにはどうするか、科学技術の振興も人作りも量の問題ではなくて質の問題である。さらに一步を進めると良質のものとの協調だ、と考えておられるようだ。」⁷²⁾

また五十嵐博士と深井博士の対談⁶⁵⁾では、

1) 企業での研究のあり方について

「技術者は第一にその企業、住友軽金属なら住友軽金属の技術を体得しなくてはいかん。学校を出たと、よその会社で優秀だったとかいって、偉そうなことをいっていても駄目。また単に表向きだけ「ああ、そうか」と頭の中を素通りしただけでは駄目。学校の講義ならそれでいいが、物はとても作れない。だからまずその企業の技術を体得する。これが第一です。次に、少なくとも 4~5 年やって、ここが割れたとか、ここが切れたとか、ここがどうなったとか、その技術自身に附属して起こるいろんな問題をしっかりと把握することです。それで始めて技術が体得されたといえる。ここでやっと技術者の卵が生まれるわけですね。ここまできて始めて、さっきお話したような建築の共同研究会等ができた際に、それをどのように応用していくかという市場の開拓ができます。」

2) 基礎研究については、

「技術を体得してやっているうちにわからないところが生まれてくる。それを解明するために基礎研究が必要となってくる。だから基礎研究といっても常に企業と関連のあるものです。そして、そうした基礎研究を徹底させることによって、思いがけない結果がでてくる。これが本当の創造であり、新しいアイデア、新しい商品の生まれてくるゆえんです。

今までできたものをよそに使うとか、よそと一緒にするとかいうことに創造はあり得ません。疑問を当り前だと見過すようでは困ります。どうしてだ、どうしてこうなんだ、と徹底的に突込んでいかななくては駄目です。できるか、できないかわからないけれど、とにかく徹底させる。そこからだけ新しいものが生まれるのです。」

3) 人づくりについて

「それは人によって違う。最近人づくりの話がよく出ますが、近頃の教育のように、なるべく広く常識を養えというのは、一面ではいいが、壁にぶつかったときは駄目ですね。彼等は徹底させることを知らない。アメリカ式の技術屋ならどんどん生まれますが、ぶつかった壁をぶち抜いてゆくだけの徹底した知識を持った人は生まれません。ではどういうふうに教育するかというと、教育で人がつくれると思うことが間違いなので、本質的な問題ですな。(笑声)」「その辺のところは非常に難しいですな。一般には、今のようにアメリカ式の研究所を考えて、そこで働く人をつくるということならいけますな。しかし、その人がぶつかった壁を切り開くことができるかということ、私はそれを望む方が間違っていると思う。」「テーマが大事だとか、そのテーマは誰が選ぶかとか、結局そのテーマが与えられた人は、馬車馬のように走れということですか。そこでテーマを出す人、それは技師長です。」アメリカ式というのは、超々ジュラルミンの開発では住友では7~8人でしていた研究を海軍研究所とアルコアでは600人でやっていたということを意識しての発言かと思われる。

昭和28年卒業の奥田彰氏は東北大学金属工学科創立75周年記念誌(2000年, p.124)で、五十嵐博士の思い出を次のように語っている。「事実、事実が大切なんだ!」。「いろいろ理屈は言わないこと。質問は出るだろうが、何故なんて、分かりもしない理屈は言わないこと。こうやったら、こうなったとだけ言えばいいのだ」これが、卒業論文発表前日の先生からの訓示だったそうであり、その年の春の学会発表当日も同じ注意をいただいたことである。いかにも五十嵐先生らしい話である。「残念だったことは、超々ジュラルミンの体験談は一回も聞

かれなかったことである。お聞きしても、くわえたタバコを唾液でクチャクチャさせながら、ただ笑っていただけかもしれないが、何しろ、自慢話は聞いたことがない。」と、五十嵐博士は大変謙虚な方だったと飯島嘉明元岩手大学教授は、「超々ジュラルミンと五十嵐勇」⁵³⁾の中で付け加えている。

同様に「総て物事は徹底すること、徹底すれば新事実を見出すことができる、真理は理屈ではない、実験の結果が真理である」(深井誠吉氏、五十嵐博士への弔辞より)とまで言い切っている。

住友軽金属に顧問として戻って来られた頃について、当時、研究部軽合金研究室にいた高島章氏は次のように語っている。

日常は顧問室で研究報告書を丹念に見ておられてことと思うが、ある日ちょっと来てくれとのこと。今まで直接お話ししたことのない先生にお叱りでもあるのかと思ひ、直立不動で先生の前に立った。「多くのレポートを見ているが、君の報告書が一番面白い」まさかどこが面白いのかななどと失礼なことは聞けず、「はあ」とだけ言ったら、次に「最近の学会誌はあまり面白くないな。屁理屈が多すぎる。前(軽金属学会の前身である軽金属研究会のことか?)の方が面白かった」

博士の持論の「理屈は結果に対しての討論で、もっと現象というか過程をよく観て、これはと思うことはすぐやれ」と言いたかったのだと思う。博士との話は禅問答のようでもあった⁷³⁾。

元副社長、技術研究所長であった永田公二博士は、以上の五十嵐博士が語った中から、いくつか選んで五十嵐語録(Table 12)なるものを紹介している⁷⁴⁾。

Table 12 Sayings of Dr. Igarashi collected by Dr. Nagata⁷⁴⁾

五十嵐語録

-
1. 自社の歴史、人、技術等の一切を体得することが第一。4~5年はかかる。学校の講義だけでは駄目。
At first, it is necessary to master company's history, persons, technology and so on entirely. It takes 4~5 years to master them. It is insufficient to learn only school's lectures.
 2. 理論も実験も日に日に進んでこそ工業も発展する。未熟な理論を絶対だと考えてもらっては困る。
Industries develop by the progress of theory and experimental technology every day. It is not correct to consider immature theory is absolute.
 3. 事実が大切なんだ!あれこれ理屈を言わないこと。思った結果と矛盾した事実が示されたときのみ進歩があり、発展がある。
Fact is important! It is not to say various quibbles. Progression and development are generated when a new fact inconsistent with expected results is found.
 4. 疑問を生じたとき、どうしてだ、どうしてこうなるのかなと繰り返し、徹底的に突っ込んで調べなくては駄目だ。
When questions arise, it is necessary to consider repeatedly why they occur and investigate them thoroughly.
 5. テーマが大事だが、誰がテーマを決めるのか。
Theme is important. But it is problem who decides the theme.
-

以上、先輩諸氏が書かれたものから、五十嵐博士の人となりが見えてくることを引用してきた。ESDにおけるクロムの発見は偶然であるが、時期割れを評価するための方法論がなければ発見はできなかったという意味で必然である。方法論は対象をよく観察することでできる。しかし必ず解が存在するであろうという自信はどこから来るのであろうか。これは幅広い視野で各種のアルミニウム合金やマグネシウム合金の腐食の挙動をいつも観察してきた結果ではなかろうかと思う。添加元素によって腐食の挙動が色々変化する。それでも駄目なときは最終的にクラッドがあると考えていたのではないかと個人的には考える。クラッド材についてよく研究して学位論文にも掲載していたのだから。ある意味で壁を突破するには何らかの確信と楽観が必要であろう。ESDの発明は個人的な資質によることも多いが、製品となると個人の手を離れてしまう。自分ひとりの手で出来るものではない。発明における個人と会社組織の関係をよく理解していたため、自分一人の手柄にしたいとの思いがあり、戦後は超々ジュラルミンの発明についてあまり多くを語っていないのではないかと考える。むしろ若い人には、上の語録に示したような自分の経験から得られた教訓を雄弁に語っている。

最後に郷里熊本（熊本市島崎）で悠々自適の生活を送られた五十嵐博士の日記から、日頃の生活を詠んだ詩を引用する。Fig. 23 にその一部を示す（「五十嵐勇 年譜」より⁷⁵⁾）。

陽炎や 媼（おうな）は見たり 花の精
紫陽花は 昔を今に 咲きにけり
野わきして 百日紅（さるすべり）は倒れけり 葉末々々
は 蕾したまま
六尺の頬杖について 立ちあがり 春に芽ばえよ 沢に
豊かに
黙鼓子は こすたくりに 変わりはて
大河の流れ 流れてよしあしの 茂みに霜を まつ根

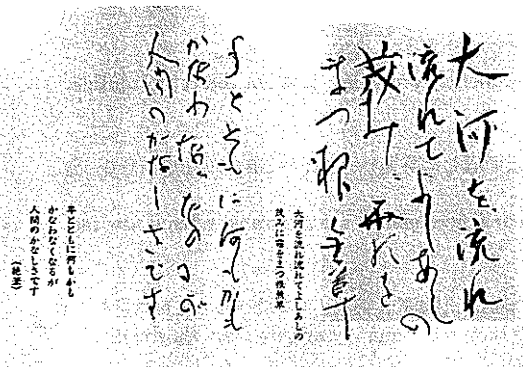


Fig. 23 Poetries in the diary from chronological record of Dr. Igarashi⁷⁵⁾

無草

（絶筆）年とともに何もかも かなわなくなるが
人間のかなしさです

4. 戦後の高強度アルミニウム合金の開発

4.1 戦後の状況

敗戦とともにアルミニウム製錬は軍需産業であったため、連合軍によって生産停止を指令され、製錬設備をカリ肥料、石灰窒素などの生産に転用して細々と経営をはかる事態に追い込まれた。一方、加工企業は戦時中抑制されていた家庭用品の需要が顕在化し、異常なブームを迎えた。加工企業の多くは航空機を解体したアルミニウム合金屑を減量として、鍋・釜をはじめとした家庭用器物の生産を再開した。しかし、これらの製品は耐食性の悪いジュラルミン系合金屑を原料とした粗悪品であったため、アルミニウム製器物は腐食しやすいという誤った印象を与え、その後の製品開発に大きな悪影響を与えた⁷⁶⁾。

戦後復興とジュラルミンの関係は、東京駅にも見られる^{77,78)}。東京駅丸の内駅舎は、1945年（昭和20年）、戦災により南北のドームと屋根・内装を焼失した。戦後、3階建ての駅舎を2階建て駅舎に復興した。現在、ほぼ完成に近い「保存・復原工事」では、鹿島建設が中心となり、外観を創建時の姿に忠実に再現するのはもちろんのこと、さらに、未来へ継承するため、鉄骨煉瓦造の下に地下躯体を新設し、巨大地震にも耐えうる建築とするため、「免震工法」で施工している。この戦後復興させた駅舎天井の内面（Fig. 24）には、Fig. 25 に示すようにアルミ製リベットで接合された0.8mm厚みの航空機用ジュラルミン板とトタン板が塗装を施して使用されていた。この板の成分分析値はAl-4.2%Cu-0.43%Mg-0.79%Si-0.74%Fe-0.80Znと鉄や亜鉛などの不純物が非常に多いことがわかる。このジュラルミン板は戦争中に製造されたもので、終戦近くなるとスクラップを多く用いていたことを裏付けるものである。

終戦直後の状況を、五十嵐博士はこう書き記している⁷⁹⁾。

「敗戦後早や2年も過ぎようとして居るそのあいだに金物屋は申すに及ばず、百貨店も雑貨屋も電気器具屋も、果は露天商も、すべては白一色かと思はれる程の軽合金の氾濫。これまさに軽金属時代である。

新憲法は発布され政治は民衆のものになったとはいえ、其の足どりは中々だが、戦時中鍋釜まで供出させられた軽金属は、たちまちにして民衆のものとなった。今や大衆は右向いても左向いても白く輝く軽金属にぶつかる。ないないづくめの此の世の中に、たゞあるものは、闇と軽金属だと云ひたい位だ。新日本の文化は軽金属の利用

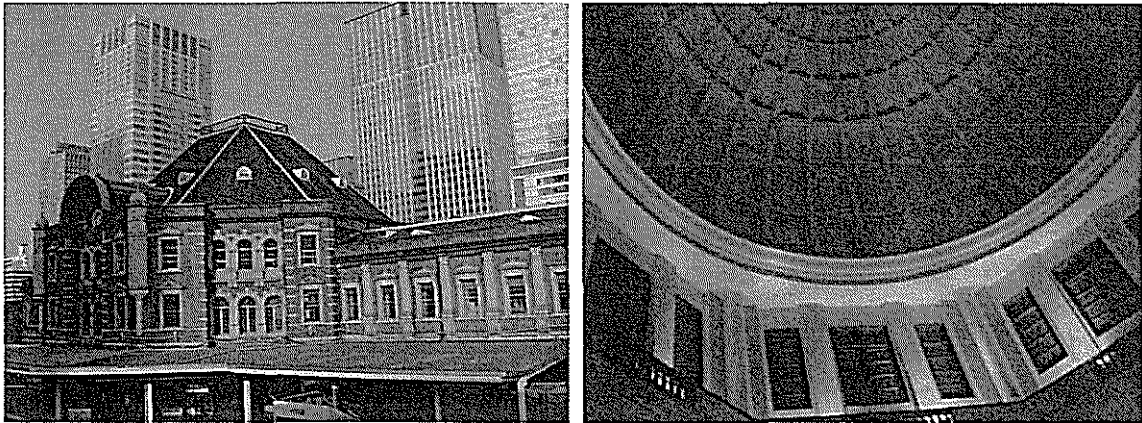


Fig. 24 Exterior and interior of the dome in Tokyo Station before restoration

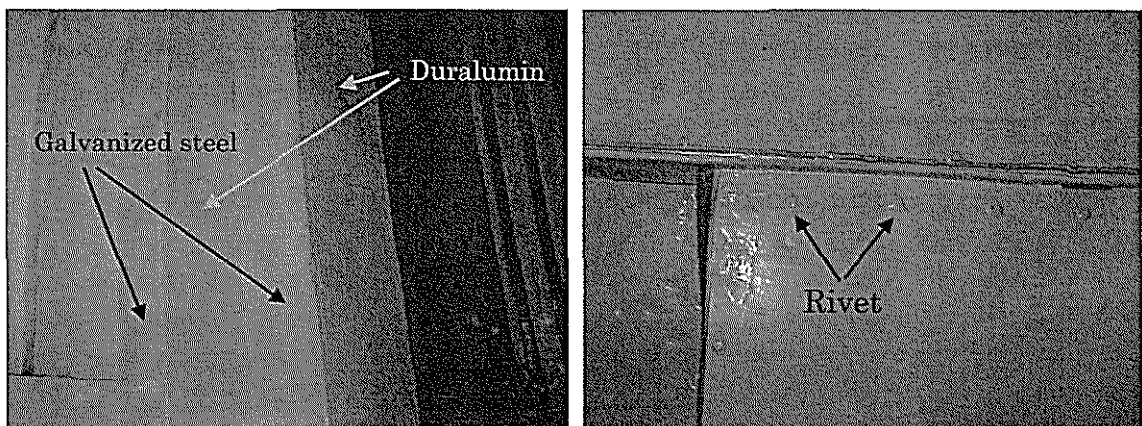


Fig. 25 Photographs of the ceiling

から始まると云つても、過言ではあるまい。

敗戦後間もない時であった。軽金属を車両に使つたらどうかと推薦に出かけた。早速試作する事になって喜んで焼だされの仮寓（木曾川べりの養蠶堂の一隅）に帰って見れば、塵取が買って来てあった。SDCと紫インもあざやかに。欧米では10年も前からデュラルミンの高級車は走って居たが、デュラルミンの塵取とは驚いた。然し考へ直して見れば至極常然の事かもしれない。なにひとつ無い焼け野原では目の前にあるものを何にでも流用する。勿論常道ではあるまい。もったいないとも云へよう。だが自然の勢である。かくて軽金属時代が出現、諸種の實際試験で体験されつつある。」

「デュラルミンDや超デュラルミンSDは、御承知の通り構造用材料として少しでも強いようにと苦労をした材料であるが、各方面に流用する事になれば加工し易いと云ふ事が第一となる。軟くせねばならぬ。焼鈍温度や焼鈍時間が焼入温度や焼入時間取って代らばならぬ。ものにしようと思ふ人々の一念はむづかしい事を云はなくても、夫々しるるべく物になって行く。然しそれは板や棒がある間の事である。屑を集めて板や棒につくらふと云ふ事になると、そう簡単にはまいらぬ。然しこれも構造材料として少しでも強くと思へればこそ、苦心もし

困難と感じたのであるが、加工が出来ればよろしい、物になりさへすればと云ふ事になれば、少しぐら不純物（主として鉄）が増加しても、案外楽である（鉄に封して夫々珪素等を添加すれば尚優秀になる）。

だが先にも云った通り自然の勢として流れて居る材料は、こんな面倒な事は飛び越して鋳物屋のルツボの中にとけ込んで行くにきまって居る。何もかも鋳物でつくつて見る。勿論常道ではない。従って長続きもすまい。

製造を禁止される軽金属は輸入にまつより道はない。昔舶来とは貴重品の代名詞だった。今後の軽金属は舶来になる。各々其の特性を十二分に発揮せしめ得なければ、新しい軽金属は使へなくなる事は云ふまでもあるまい。」

一方、西村教授は「我が軽金属工業並に学界の進むべき道」と題して以下のように書き記している⁸⁰⁾。

「日華事変以采12年に近くなるその間我が国は戦争目的に供するため乏しい鉱産資源を濫掘し永年貯蔵した資材を消費し尽し、なほ都市を爆撃で失ってしまった。それに道義まで廃棄して現在ではインフレに恨みつつ惨めな姿を世界にさらしている。我々はこの敗戦の苦難の生活を続けながら、国家の再建を計るべき必要があるが、之は容易な業ではない。殊に航空機工業の全般的禁止

は、軽金属材料の工業の前途に全く光明を失はせ、その日暮しの個人と同じく苟生活をなして、唯戦時中に貯蔵した材料を喰ひつづけているに過ぎない現状である。

最近になり、漸く貿易の再開とか講和会議の開催とか云ふ問題が新聞に見るやうになる、幾分気分が明るくなったやうである。しかし我が国の再建の目途がついたとは云へない。恐らく自由な貿易が出来る日は遠い将来で、当方は総て何事をなすにも指示を受けて初めて許されると云ふ状態がつづくのであらう。

しかし悲観しては何日までも立ちあがれないから、再起の努力を惜しまないことが第一であり、またその時々に対処して方策を樹て、進むと同時に、恒久の策をも考へて置かねばならない。」

軽金属工業の進むべき道として、次の点を指摘しているが、予想はほぼ的中したといえよう。

「地を走るものゝ軽金属化：それにはさしづめ地上の輸送機である。鉄道、車輛、トラック、オートバイなどに出来るだけ利用の途を開いて欲しい。これ等の輸送機を海外に輸出するとしても、新しい進歩した設計でスマートな形状とするためにも、重要の軽減の点からも、軽金属材料を使用する要があることは申すまでもない。建築、家具などにも現在既に利用やられているが、之も出来るだけ合理的な使用を考へねばならない。例へばデュアルミンはその強さに特徴があるのだが、耐蝕性は劣るから建築方面でも腐蝕が問題となる方面は耐蝕性合金とか、合せ枚とかを用ひるやうにする。かやうに考へると相当研究の余地が残されている。なほ一歩進んで希望を述べると、かやうな加工材も、その適合した製品として、海外にまで輸出したい。」

我が軽金属学界の進むべき方向については、「学徒に不動の信念あれ」として、次のように述べているが、現在でも十分当てはまることではなからうか。

「元来學術の研究は流行を追ふべきものでない。独自の見地から眞理の探究に孜々として進むべきであるから、時代が変わったからとて急に研究の対象を変更すべきでない。状態図を研究するもよいし、時効の現象を追究しても差支へない。唯、現在禁止されている方向にのみ触れなければ差支へない。幸い軽金属材料に関しての研究は禁止されていないから、如何なる方向に進出してもよいと思ふ。がしかし国力が甚しく低下した現状で皆が同じ方面に集中したら、無駄な仕事をしないこと、もっと独自の立場で猿の人真似とならぬやう心掛けて貰ひたい。外国の研究を見ると、一人がある題目で研究しているとき、他の人がそれと争って同じ題目の研究をしたりすることは少いやうである。

それについても唯是非とも研究して置きたいことは、アルミニウム製錬でも軽金属材料に関しても、戦時中未完成のまゝ残されたものはこの際解決して学界に発表し、日本の研究成果の裏付けをして置きたい。例へば材料でHDとかND、とか云ふやうなものに関する基礎研究の

やうなものが是非望ましい。この他にも同様の例が多いと考へる。」

零戦の設計の責任者であった堀越二郎氏も、昭和30年頃、住友金属に来て、管棒工場にあったポートホールダイスによる中空押出型材に目をとめられて「こんな形が出来るのですか。戦争中、我々は削って削って、それが作業の大半だったのです」と、感慨深くその場に立ち止まられた。「こんなものが出来るなら」と、また新しい構想が浮かんだのでしようかと元常務取締役の深井誠吉氏は述べている⁶⁸⁾。ポートホール押出が可能で2024-T3材並みの強度を有する2013合金押出材は、この一言がきっかけとなって開発された。

東北大学に移られた後の五十嵐博士については「金属」に書かれた元岩手大学教授飯島嘉明博士の「超々ジュラルミンと五十嵐勇」が詳しい⁶⁹⁾。

「五十嵐勇博士は住友金属の研究所長を辞して、昭和22年、柳行李一つ下げてリュック姿で飄然と仙台にやってきた。空襲で丸焼け後の仙台には下宿などない。金属工学科2階の教授室に畳2枚敷いて自炊生活を始めた。当時は実験室や製図室に学生が寝泊まりしていたので特に不自然でもなかった。」「五十嵐博士は、夕方になると、ちょうど、入院患者の病室に回診にやってくる医者のように、実験室にお見えになって、ディスカッションをして、今後の実験方向を指示して下さった。なにしろ、2階の教授室に畳を2枚持ち込んで寝泊まりしていて、ときどき夜は8時頃になると、「どうじゃ、いっぱいやらんか」と、キングとかアイディアルとかいうウイスキーを飲ませてくれたりしたものだった。なにしろ、昭和27年の頃は、まだ電力事情が悪く、電圧は93~98ボルトほどしかなく、しかも値は一定でなく、絶えず上下しているので、試料の溶解は「徹夜してでも一気に作ったほうがよい」と指示されていた時代である」。戦後は、主に純アルミニウムやアルミニウム合金の再結晶挙動や鑄鉄の凝固過程、黒鉛化に関する研究を行なった。

4.2 戦後の軽金属学 一西村教授、村上教授に即して一

京都大学の冶金学教室金属材料学講座を率いてこられた西村教授とその後を継がれた村上陽太郎教授の執筆された随想や文献、解説に即して戦後の研究の歩みをまとめてみたい。

まず、75Sに対する評価であるが、西村教授は「隨筆軽合金史(第40回)」⁸¹⁾で、「75SもHDも亜鉛が多いと応力割れの危険があるから、強さを多少犠牲にして安全な材料として造られたものである。また仏国でも1933年以来、d'Alais, Froges et Camargue会社にてGauthierとVacher両氏によって研究されてZicralと

称しているものである。亜鉛 8.5%, 銅 1%, マグネシウム 2.5%, マンガン 0.75% の合金である。いずれも E. S. D に類似しているが, 亜鉛はやや低いものが多い。ミネソタ大学の Mackay と Dowdell 両氏が Metal Progress (1949 年, 9 月, p.331) 誌上に強力軽合金の動向という問題の下にこれ等の合金について論評し, そのうちに E. S. D は耐食性が低く圧延並びに押出が困難であったと書いている。恐らく E. S. D についても試験したのであろう。金属材料は一般に信頼性に乏しいものは避けるべきである。単に強力であるという点から使用するのは危険である。殊に応力割れの生じ易いもの, 或は焼戻脆性の敏感なものは避けなければならない。将来もし, 超強力軽合金の必要がある場合, E. S. D と 75S と何れを求めべきかとの質問に対して, 75S と答えざるを得ないであろう。E. S. D は我が国で生まれた材料ではあるが製造の難易からも, かく答えざるを得ないのではなからうか。」と率直に語っている。これに対し, 小職はこんなに製造が難しい合金をよく現場が協力して作ってくれたものだと感心している。現場の製造技術の創意工夫がなくてはとてできる合金ではない。戦時中だからこそできた合金といえよう。平時には現場からこんな合金できるかと怒られて考え直してこいといわれるのが落ちである。海軍の要求の引張強さ $60\text{kg}/\text{mm}^2$ を満たし, 応力腐食割れ防止のためには, こままの成分量が必要とされたのだ。応力腐食割れの限界については, どこで線引きするか今でも難しい判断が要求される。しかし戦後の米国の高強度アルミニウム合金開発の合金成分をみると間違いなく超々ジュラルミンの成分に向かっている。このことは ESD の先進性を示すものといえよう。

西村教授によると, 英国では Hume-Rothery 氏 (注 1) の指導で Raynor 等の諸氏が Al-Mg-Zn 系合金, それに Mn, Cu などを加えた合金の状態図の研究を発表して基礎研究が続けられている。「ここに研究を忘れないで着々と成果を挙げて行く英国の着実さが見受けられるようである」⁸¹⁾と書いている。日本では, 西村教授の下で村上陽太郎教授 (注 2) が Al-Zn-Mg 合金状態図の研究を続けていた。

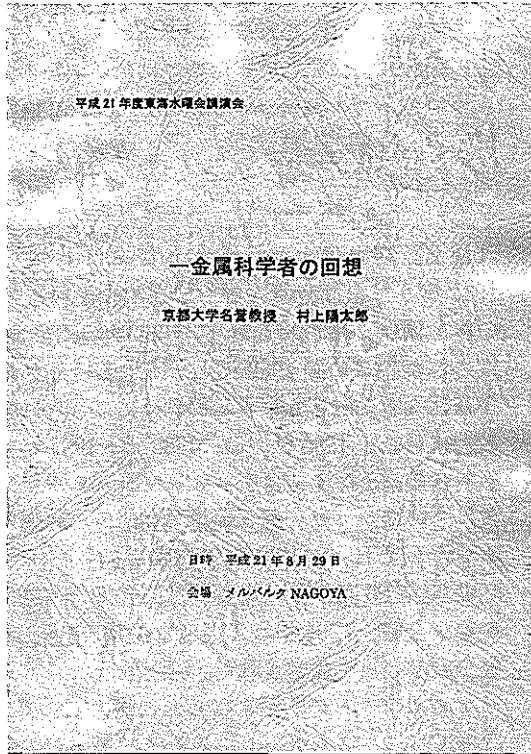
(注 1) Hume-Rothery (1899-1968) に関しては, 多くの方が述べておられるので, 小職如きが述べるのも気が引けるが, 学生時代, 指導教官の山本悟博士と “The structure of Metals and Alloys, 4th edition”, (W. Hume-Rothery and G. V. Raynor, The Institute of Metals, 1962) や 「鉄鋼物性工学入門」 (W. ヒューム・ロザリー, 平野賢一訳, 共立出版, 1968) を読んで記憶をなつかしく思い出す。「対話金属基礎論」 (鈴木平監訳, アグネ, 1971) では Young Scientist と Old Metallurgist との対話形式で書かれ, 自分はどちらなのだろうかと思いながら読んだ。最近, このよう

な本が少なくなったことが残念である。若くして聴覚を失ったが故に, これをハンディキャップとせず, 雑音に囚われずに熟考できたのではないかと失礼ながらつい思ってしまう。Hume-Rothery の生涯については小岩昌宏博士の「金属学プロムナード」⁸²⁾に詳しい。

(注 2) 村上陽太郎教授は 1917 年 4 月生まれで, 1942 年 9 月京都帝国大学工学部冶金学科を卒業。その後, 講師, 助教授を経て, 1953 年工学部教授に昇進された。この間 1952 年工学博士を授与され, 1981 年京都大学を退官し京大名誉教授に, さらに関西大学教授に着任し 1988 年退職。1986 年~1997 年 (財) 大阪科学技術センター附属ニューマテリアルセンター所長, そのほか (財) 軽金属奨学会理事, 評議員, 軽金属学会副会長, 日本金属学会副会長を歴任された。1985 年第 26 回本多記念賞受賞, 1990 年第 35 回日本金属学会賞, 1991 年勲二瑞宝章受賞, 1998 年第 1 回軽金属学会賞を受賞された。村上教授は, ニューマテリアルセンターの所長となられた後, この 22 年間, 「NMC ニュースレター」に最新のトピックスを, 専門外の方々にも読めるようにわかりやすく執筆され, 昨年「新素材・新技術, 第 V 集」(ニューマテリアルセンター)⁸³⁾を出版されている。教授の矍鑠と歩かれるお姿とこの知的好奇心の旺盛さにははなはだ驚嘆するものである。Fig. 26, 27 の写真は 2009 年 8 月, 名古屋で開催した東海水曜会 (東海地区の京都大学金属系, 資源系学会の同窓会) での講演をされる村上教授とそのときのテキスト⁸⁴⁾である。2009 年には 92 歳となられたご高齢の村上教授に東海水曜会にてご講演をお願いした次第である。これはこの前年に京都で開催された第 31 回軽金属学会セミナーで「アルミニウム合金の時効析出にまつわる歴史と進歩」⁸⁵⁾と題して村上教授が講演され, よく通るお声でお話しになる様子を見て, 是非東海地区でもご講演くださいとお願いしたところ快くお引き受けいただき講演の運びとなっ



Fig. 26 Lecture of Prof. Murakami at Tokai Suiyokai (graduate's association of Metallurgy and Mining department, Kyoto University)



目次

- 1) 感謝したい茨木中学校で受けた教育 1
- 2) 第三高等学校時代の思い出 3
- 3) 私の水曜会の思い出 5
- 4) 研究生活の思い出あれこれ 8
- 5) 退官記念講演 ―研究生活を顧みて― 10
- 6) 金属学とその研究手法の進歩 ―合金の時効析出― 15
- 7) 関西大学の7年間 31
- 8) 日本金属学会賞受賞の研究学習 32
- 9) レオーベンにおける国際軽金属会議とヨーロッパの二三の軽金属研究所 33
- 10) 第7回国際軽金属会議とドイツ金属学会に出席して 39
- 11) 第3回アルミニウム合金国際会議に参加して 46
- 12) ニューマテリアルセンターと新素材関連団体連絡会 48
- 筆者経歴と専門分野 50

Fig. 27 Cover and table of contents of the text lectured by Prof. Murakami at Tokai Suiyokai⁸⁴⁾

たものである。

村上教授は茨木中学、第三高等学校と進学され、旧制第三高等学校の第三学年には、大学準備を始めたが、「よく知っていた大学生の先輩から、航空機や兵器に金属材料が極めて重要であることを聞き、冶金学科の内容も教えてもらい、合金の開発のような仕事をやってみたいという気持ちが強かったので、隣の京都大学の冶金科(当時の採鉱冶金学科は採鉱科と冶金科に分かれていた)に進学する希望を決めていた」とのことである(アルミニウム:5 (1998), 282)。1939年京都大学に入学し、在学中に発病し一年の休学後復学して1942年9月繰上げ卒業した。健康上の理由で兵役には関係がなくなり、大学に残り西村教授の指導を受けることとなった。西村教授からは、超々ジュラルミンの状態図と時効硬化に関するテーマが与えられ、Al-Zn-Mg-(Cu)系状態図の研究から始めた。「当時の状態図の研究は、多数の試料を溶製し、丹念にデータを取る根気のいる仕事ですが、やれば必ず成果が出ますし、金属組織学の多くの実験手法に習熟できる点で、初心者には恰好のテーマで、大変有難かったと思っています」と退官記念講演(水曜会誌, 19 (1981), 495)⁸⁴⁾で語っている。実験手法は極めてシンプルで、示差熱分析、示差熱膨張、硬さ測定、光学顕微鏡観察などで、X線的手法はかなり高度なものと思われていた。昭和25年工学部紀要に掲載された状態図をFig. 28に示す⁸⁴⁾。一方、時効析出の研究では、示差熱膨張計で研究を行ってきたが、海外に刺激され

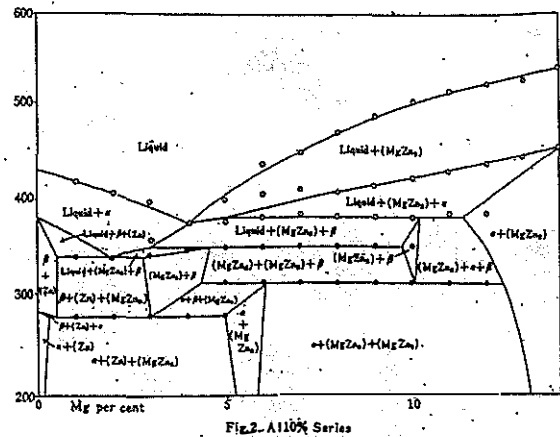


Fig. 2. Al 10% Series

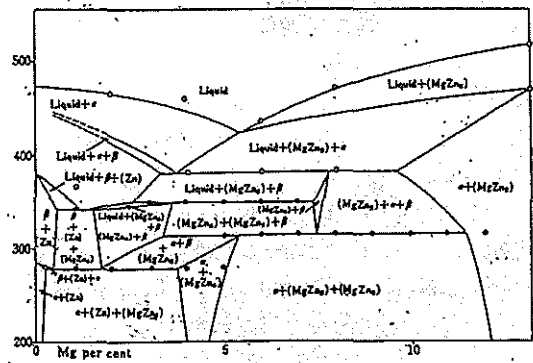


Fig. 3 Al 15% Series

Fig. 28 Cross section of Al-Zn-Mg ternary phase diagram created by Prof. Nishimura and Prof. Murakami⁸⁴⁾

1947～1948年頃から島津製作所と日立製作所で電子顕微鏡の製造が始まった。1948年島津製作所で5万ボルトの電子顕微鏡が試作され、これを用いてアルミニウムの析出組織の研究を始めた。当時、薄膜透過法はまだ知られておらず、酸化皮膜レプリカ法で行なった。この方法で、1万倍程度で極めて明瞭なマイクロ組織が得られ、析出組織の観察には極めて有用なことが初めて判り、このことは当時としては画期的なことであったと述べている。ESDのCrの効果についても電子顕微鏡を用いて研究を行なっている。酸化レプリカ法の観察から、微細な粒界析出物が連続して析出していると、SCC感受性が増すが、析出処理温度を高くし粒界析出物が粗大化し連続性を失うことでSCC感受性が弱くなることが判った。またCrを添加した合金で耐SCC性向上の顕著な効果が得られたのは、粒界が湾曲したり、途中で途切れて不規則になることで割れが起りにくくなることが原因であることを明らかにした。これらは英文で発表し海外でも高い評価を受けたとのこと。

X線回折法も析出現象の解明には重要な手法であった。1942年頃西村研究室にも瓦斯イオン管式シーラー管球が設置されていたが、調整するのに手間がかかり、その後クーリッジ管球を購入したが事情で使用できなくなった。1953年に教授に昇進し、X線装置を充実させ、河野修博士と一緒に、Al-Cu-Mg系、Al-Mg-Si系及びAl-Zn-Mg系合金の析出初期過程に及ぼす塑性変形ならびに添加元素の影響研究を始めた。当初はX線ラウエ法でGPゾーンの研究を行っていたが、1961年、ドイツのマックス・プランク金属研究所に短期間滞在した時に、V. Gerold教授のところで時効初期の研究にX線小角散乱法(SASX法)が活用されていることを知った。その後河野博士がV. Gerold教授のところに留学してSASX法を修得し帰国したが、惜しいことに小職の学生時代に亡くなられた。河野修博士の研究については、本人の書かれた「析出に伴う結晶構造変化」(幸田成康編、「合金の析出」)⁸⁹⁾に詳しい。その後のSASX法は村上先生の後任の長村光造教授に引き継がれた。

加工硬化に関しても戦争中、外国では基礎研究がすすんでいた。金属結晶の本質を知るためには単結晶から始める必要があるが、西村教授によるとアルミニウムの単結晶を造るのに初めて成功したのは英国のカーペンター博士で、歪一焼鈍法と云われている⁹⁰⁾。この博士の講演で「単結晶は極めて柔らかい。すなわち弾性限界が極めて低い。こんな低い応力でどうして変形するのだろうか。金属結晶が一つの面である方向に極めて容易に切り始めるのは何故だろう。切りが進むにつれて切り抵抗が増するのは何故だろう」との疑問に対し、テーラー氏は1934年、原子配列に欠陥があってその欠陥が移動するとの転位説を提唱した。こうした粘り強い研究に対して、西村教授は「英国における塑性変形の研究の伝統の強さ、

ニュートン以来の伝統がものをいうのであろう、そして英国人のもつ根気というか、とにかく学問に誇りをもって仕事をする風が見える。この点わが国での真の意味の学問の伝統を造って行く必要がある。もっとも派閥を造るのではないことを忘れてはならぬが」と英国の研究を評価している。もっとも、村上教授によると後になって知ったとのことであるが、日本においても1929年、理化学研究所にいた山口珪次博士が世界に先駆けて転位の概念を発表されていたとのことである。Al単結晶の変形後のX線ラウエ斑点のぼやけの解析から、結晶格子の湾曲がすべり帯の先端に起こって、それが加工硬化の原因であることと、現在常識になっている刃状転位の集積によって起こる結晶格子の湾曲を示す図と全く同様な図を示されている。今では、加工硬化機構の論文には山口博士の論文が引用されるとのことである^{84,87)}。西村教授も山口博士の研究が転位論の発展の萌芽となったことを「統軽合金史(第11回)」⁸⁹⁾で述べているにもかかわらず、その後の日本金属学会の転位論の代表的な教科書、「転位論の金属学への応用」(日本金属学会金属結晶分科会編、丸善、1957)、「新版転位論—その金属学への応用—」(日本金属学会編、丸善、1971)、「結晶の塑性」(日本金属学会編、金属物性基礎講座8、丸善、1977)では山口博士の研究について触れていないのが不思議である。その後、東京大学の鈴木秀次教授が、日本金属学会会報(1984)で「転位論発展の歴史と将来の展望」⁹⁰⁾の中で、山口博士について言及されているが、教授の代表的な教科書「転位論入門」(アグネ、1967)では述べられていなかった。改めて、西村教授の慧眼に感服した。

1948年、西村教授はこの転位の研究に対して電子顕微鏡を利用することを同研究室の村上教授の弟弟子にあたる高村仁一博士に指示して、切り線が明瞭に観察できることを明らかにした^{88,89)}。結晶の下部組織として亜結晶粒が存在することについて、HultgrenとHerrlanderが鋼で観察した結果を1946年発表した。アルミニウムでは99.99%を用いて、ラコンブ(P. Lacombe)とボージュール(L. Beaujard)両氏が1947年発表した。1949年にはCastaingとGuinierが電子顕微鏡で見だしている。ポリゴニゼーション(Polygonization)も一種の亜粒界であるが、わずかに変形した結晶は、X線ではラウエ斑点が変形のために伸びてアステリズムを示し、加熱すると亜粒界が生じ分裂した斑点となり、カーン(R. W. Cahn)とオロワン(E. Orowan)両氏は湾曲した面が多角化したと考え、ポリゴニゼーションと名付けた。電子顕微鏡が発達してくると切り線以外に変形帯の生成が知られてきた。変形帯については1950年頃から注目されたもので、Honeycomb, Cahn, Chenなどのによって研究された。これも高村教授によって研究がなされ、切り方向に直角な[110]方向に生じることが認められた。西村教授等は「変形帯というものは単結晶の

両端を固定して引張ると所謂迂りが一定の迂り面で迂り方向に生じるとすると、試片がそのままでは迂り得ない状態に達する。その無理を避けて変形するために生じる一種の迂り現象である」と結論づけている⁸⁹⁾。

その後、析出硬化機構について著しく進歩したが、その理由について、村上先生は、1956年になって、W. BollmannやP. B. Hirschが、ステンレス鋼やAlの薄膜試料を用いて、転位、格子欠陥や内部組織の直接観察を可能にしたことを挙げている⁸⁷⁾。当時一般的であった加速電圧100kVの電子顕微鏡では、約2000Åの厚さの薄膜にする必要がある。ポールマン法やジェット・ポリッシング法が開発され、電解研磨で作成できるようになった。その後、ダイヤモンド・カッターでも良質な薄膜が得られるが加工歪みが問題となることがある。現在ではさらにイオン・ミリング法、特にその一種であるFIB (Focused Ion Beam) 法では観察したい場所をピンポイントで薄くできる。「薄膜の透過電顕観察法が可能になったことで、微細な析出相が観察でき、制限視野電子線回折法で、析出相の構造や母相との方位関係を解析できること、更に高分解能分析電顕では析出物の化学組成が分析できること、一方、結晶中の種々の格子欠陥も直接観察できて、電顕中で加熱や引張応力を与えることで格子欠陥の析出に及ぼす影響、転位と析出物の相互作用や、過飽和固溶体からの析出過程や運動転位と析出物の相互作用が直接観察できるようになりX線、電気抵抗、比熱、機械的性質の測定を併用することによって、析出硬化機構が明らかになってきた」⁸⁷⁾。私事で恐縮するが、小職も学生時代(1972~75年頃)、山本悟博士の指導のもとで、研究室の日本電子製120kV電子顕微鏡を用いて、じっくり観察ができ振動の少ない夜を選んで徹夜で卒業論文、修士論文に取り組んだことを思い出す。白鉄中のセメンタイトの生成機構ではセメンタイトの構造や母相との方位関係を、セメンタイトの黒鉛化や球状黒鉛鑄鉄中の黒鉛の生成機構の研究では、空洞の内壁面の各所から黒鉛が双晶関係で積層されて中心方向に成長して球状黒鉛が出来ていること、そしてそのc軸が球の中心方向に向いていることなどを明らかにして、黒鉛化機構や球状黒鉛の形成機構を考える上で電子顕微鏡が有効な手段であることを実感した。ただし当時はウィンドウ法やジェット法による電解研磨しかなかった時代で、また現在のように市販の装置もないため、セメンタイトの観察では、鑄鉄を研磨して薄片とし、高いところから液を流してジェットを作ったことを覚えている。黒鉛の観察結果は「球状黒鉛鑄鉄—基礎・理論・応用—」⁹¹⁾の本に掲載された。こうした研究は、入社後アルミニウム中の球状の晶出物の形成機構を考える上で大いに役立った。その成果は「純アルミニウム中における α -AlFeSi晶出相の球状化機構」⁹²⁾の論文で報告され、平成11年度の軽金属学会論文賞を頂いた。

1965年頃には、各種の新しい機器の利用によって、従来疑問視されていた種々の現象が基礎的に究明されるようになってきた。一方、経済の拡大によりアルミニウム合金の需要も盛んになり、時効硬化性アルミニウム合金もAl-Mg-Si系合金はサッシとして広く利用され、またAl-Zn-Mg系合金は各種の構造物の部材としての用途が拡大し、実用的にも種々の問題がでてきた。その一つが「二段時効」(two-step aging, split aging)問題で、各国で研究された。Al-Zn-Mg系合金は室温で長くおけばおほくほど二段目の高温時効後の強度は高くなる。これに対し、Al-Mg-Si系合金はMg₂Siが多いと室温で放置すればするほど、二段目の高温時効後の強度は低下する。この現象に対して、詳細は村上教授の執筆されたレビュー「アルミニウム合金および銅合金の時効過程」⁹³⁾や「最近の非鉄合金の時効析出における問題その1 アルミニウム合金」⁹⁴⁾に譲るとして、1967年軽金属学会で白熱した議論がなされ、この問題は一応の解決はなされたと先生は述べている⁸⁷⁾。しかし、未解決の問題もあり、先のレビューでは「G. P. ゾーンが中間相の核になることを完全に実証することはできないが、G. P. ゾーンが漸次その構造を変えて中間相に移行することはありそうに思われる。何が強化に寄与しているかも未だ十分明確でもないし、G. P. ゾーンそのものの定義やその構造自体も十分究明されて、はじめてこれらの問題がさらに明確になるものと思われ、そのことが期待される」と結んでいる。この教授の述べられた未解決の問題は今なお続いている課題でもあり、これらの問題は小職も拘った1990年代の自動車板材のペークハード性向上の研究で再び顔を出してくる。

4.3 戦後のアルミニウム産業の動向

アルミニウムの需要は、第二次世界大戦中では需要の大半を航空機用が占めていたが、戦後は大幅に縮小し、まず家庭用器物、日用品の需要が急速に伸び、続いて自動車、車両、機械などの分野に新需要を開拓した。その後、サッシ、ドア、カーテンウォールなどの建築部門、自動車、トラック、トレーラー、鉄道車両、船舶などの輸送機関、テレビ、電気洗濯機などの電機通信機器、電力の送電線、包装容器などの一般民需市場が急速に拡大した。戦後から1960年代中頃までのアルミニウム工業の動向については、佐藤眞住、藤井清隆著の「アルミニウム工業」⁷⁶⁾に詳しいので、それに基づいてまとめた。ロシア、中国、豪州などについては別途稿を改めることにする。

(1) 北米

第二次世界大戦によって、戦争の被害を受けず、かつ大戦に勝利したアメリカの優位は圧倒的で、1939年には年間地金生産約15万トンであったが、1943年には7倍の83万トンに拡大した。軍需を中心としたアルミ

ニウムの需要により、アルコアは自社工場のみならず、政府の建設した8つのアルミニウム工場の受託経営も行うこととなり、アルコアの独占は強化された。しかし、アルコアの独占を恐れたアメリカ政府は、1940年、軽金属加工業者であったレイノルズ社に地金生産の許可を与え、資金を融資し、アメリカのアルミニウム工業の第二の地位に育てた。さらに、アメリカ政府は1949年カイザー社への政府工場の払い下げを行った。カイザー社が進出した1949年のアメリカにおけるアルミニウム生産のシェアは、アルコア51%、レイノルズ29%、カイザー20%となり、戦前に比べてアルコア社のシェアは半減した。1950年アメリカ連邦裁判所はアルコア社がカナダのアルミニウム・リミテッド(Aluminium Limited)を通じてアルミニウムを独占しているとして、アルコアならびにアルミニウム・リミテッドの両社の株主であるメロン、デビス、デュークの三大財閥に対しいずれか一方の株式を売却すべきことを命令した。これによりアルコアとアルミニウム・リミテッドは完全に別個の企業体として活動することとなり、北米はアルコア、レイノルズ、カイザー、アルキャン(アルミニウム・リミテッドの子会社)という四社の寡占状態で発展した。1950年勃発した朝鮮動乱により、アルミニウムの需要は一層増しアルミニウムの拡張計画が進み、新規企業としてハーベイ社(Harvey Machine Co.)、アベックス社(Apex Smelting Co.)の参入が認められた。同時に各企業はいずれも建設費の85%の五ヵ年加速償却を認められたうえ、新工場で生産されたもののうち商業ベースで販売しえなかった売れ残りのアルミニウムを政府が買い上げるという優遇措置の恩恵を受けたので、積極的に設備拡張を行なった。その後、アベックス社は撤退したが、ハーベイ社はハーベイ・アルミニウム社(Harvey Aluminum Co.)を、ついでアナコンダ社(Anaconda Copper Mining Co.)が参入し、アナコンダ・アルミニウム社(Anaconda Aluminum Co.)を、オリン社(Olin Mathieson Chemical Corp.)とレベア・銅材社(Revere Copper and Brass Co.)と共同でオーメット社(Ormet Corp.)を設立した。こうしてアルコア社のシェアは1949年の51%から1958年の38%へと大幅な低下を示した。しかし、アルミニウムの生産量は拡大の一途をたどり、1955年の150万トンから1960年には220万トン、1965年には250万トンへと拡大した。アルコア社の売上高は1960年の約8億ドルから1965年には約12億ドルと伸びた。1960年代においても新たな参入があり、1963年スイス・アルミニウム系のコンソリデーター・アルミニウム社(Consolidated Aluminum Corp.)が、1964年にアマックス・アルミニウム社(Amax Aluminum Co.)とフランス、ペシネー系の会社が株式参加したインタルコ・アルミニウム社(Intalco Aluminum Corp.)が設立された。1970年代、アルコアは積極的に海外展開を図った。2000年、アル

キャン、ペシネー、アルスイス三社の統合を受けて、アルコアはAlumax, Reynolds, Howmetを買収した。2004年、アルミニウム圧延のコモンウェルス社(Commonwealth Industries, Inc.)はリサイクルメーカーのIMCO Recycling Inc.と合併してアルミニウムのリサイクルと圧延を手がけるアレリス社(Aleris International, Inc.)を設立した。2006年、アレリス社は欧州圧延メーカーのコラス社(Corus Group plc)を買収した。

カナダにおいてもアルキャンは朝鮮動乱を機に生産を拡大していった。1951年にはケベック州の低廉な水力に依存した体制を一新し、ブリティッシュ・コロンビア州のキチマットに世界最大のアルミニウム製錬工場の建設に着手した。1956年には、アルキャンの独占が崩れ、英国のブリティッシュ・アルミニウム系のカナディアン・ブリティッシュ・アルミニウム社(Canadian British Aluminium Co., Ltd., 後にレイノルズの子会社となる)が地元の企業との共同出資で設立された。1966年Aluminium LimitedはAlcan Aluminium Limitedと改称した。1999年、Alcan Aluminium LimitedはスイスのAlgroup(Aluswiss Lonza Group)とフランスのPechineyの三社の統合を図ろうとしたが、欧州の独禁法の関係ですぐには実現せず、まず2000年にAlgroupを買収し、2001年Alcan Inc.となった。2003年にはPechineyを買収して三社は統合された。2005年にはAlcan Inc.から圧延部門が分離独立し、ノベリス社(Novelis Inc.)となったが、ノベリス社は2007年Hindalco Industries Limitedに買収された。2007年、Rio TintoがAlcan Inc.を買収し、2009年Rio Tinto Alcanと改称した。加工部門のAlcan Packagingは、2010年豪州のAmcorに買収された。さらに同じくAlcan Engineering Productsは、2011年、Apollo Global Management等が資本参加し、フランスに本社を置くコンステリウム社(Constellium)となった。

(2) 欧州

戦前、世界第一位を誇ったドイツは、敗戦によって大きな打撃を受け地盤沈下は著しかったが、朝鮮動乱によって復興し、戦後12年にして戦前の最高水準まで回復した。スイス・アルミニウム(元AIAG)系のアルミニウム・ヒュッテ・ラインフェルデン社(Aluminium Hutte Rheinfelden G.m.b.H)と国営企業のフェライニッヒテ・アルミニウム社(VAW; Vereinigte Aluminiumwerke AG)の二社体制が続いた。両社の地金生産のシェアは、フェライニッヒテ社が80%、AIAGが20%である。1965年、アルキャン社とVAWは合併でアルノルフ社(Aluminium Norf G.m.b.H)を設立し、アルノルフ社は世界最大の圧延工場となった。そのVAWは2002年、ノルウェーのハイドロ社

(Hydro Aluminium AS) に買収され、アルノルフ社は、現在、ハイドロ社とアルキャン社から出たノベリス社が運営している。1964年、カイザーはドイツのコブレンツ (Koblenz) に圧延工場を建設したが、1987年オランダの鉄鋼資本ホーゴベンス社 (Koninklijke Hoogovens) の傘下に入った。その後、1999年、ベルギーのデュッフエル (Duffel) の圧延工場、押出工場とともにコーラスグループ (Corus Group) に入ったが、アルミニウムの圧延押出事業は2006年に米国のアレリス社に買収された。

フランスは終戦後の回復はドイツより早く、1950年には戦前のピークまで回復し、アルミニウム生産量は1958年には16万トンに達して、アメリカ、カナダ、ソ連に次ぐ世界第四位となった。1960年代に入っても相当発展を示したが、ペシネー社とユジーヌ社の戦前からの二社独占体制は崩れなかった。しかし、1971年、ペシネー社とユジーヌ・クールマンが合併し、持株会社ペシネー・ユジーヌ・クールマン (Pechiney-Ugine-Kuhlmann) となった。電力条件の不利を克服すべく積極的に海外進出を図った。オイルショック後、1982年、化学と特殊鋼の分野を諦めて会社の名前をPechineyとしたが、前述のように2003年Alcanに買収され、その圧延加工部門Alcan Engineered Productsは、2011年Constelliumと名前を変えた。

ノルウェーは西欧ではフランスに次ぐ生産国で、1962年には20万トン台の水準に達した。最大のアーダル・ベルク社 (A/S Årdal og Sunndal Verk) は1948年ノルウェー国会の決定で設立された国営企業である。1966年にはアルキャンと提携したが、1986年ハイドロ社に吸収された。第二位のモスジョアン社 (A/S Mosjøen Aluminium Verk) はノルウェー最大の電気化学メーカーのエレクトロ・ケミスク社 (Elektrokemisk S. A. のちのElkem社) とアルコア社の合併としてできた企業であるが、現在はアルコア社の子会社である。同国で最も古い企業であるデット・ノルスク・ニトリダクテゼルスカブ社 (Det Norske Nitridaktieselskap, DNN) の株式はアルキャンとブリティッシュ・アルミニウムが折半して所有していたが、1976年その一部は国営化された。ノルスク・アルミニウム社 (A/S Norsk Aluminium Co.) もナコー社 (De Norsk Naco-Aktier A/S) とアルキャンが折半で株式を保有していたが、1986年ハイドロの子会社となった。1965年稼働したソール・ノルジュ社 (Sør-Norge Aluminium A/S) はスイス・アルミニウム社とフランスの金融会社が株式の75%、地元資本が25%を保有する合併企業であったが、現在はアルキャンとハイドロの合併会社である。1964年設立されたアルノール社 (A/S Alnor-Aluminium Norway) もノルウェーの電力会社A/S

Norsk Hydro-Electrisk Kvaestofakieselskab とハーベイ・アルミニウム社の合併でできたが、現在はハイドロの子会社である。同国企業六社がすべて外国資本との合併企業でできたが、現在モスジョアン社以外はハイドロ社に吸収された。1969年、ハイドロ社の前身であるA/S Norsk Hydro-Electrisk Kvaestofakieselskab はノルスク・ハイドロ社 (Norsk Hydro A.S.) と改称した。1972年にはノルウェー政府はノルスク・ハイドロ社の株の51%を所有し、1980年代、軽合金部門を拡張した。まず、アルキャン・アルミニウムリミテッドから欧州の5つの押出工場を買収した。次に1986年には国営のアーダル・ベルク社を合併し、1988年Hydro Aluminium ASと改称し、自動車のエアコン配管材に焦点をあてて押出ビジネスを拡大した。1998年、ハイドロ社は石油とエネルギー、農業、軽金属をコアビジネスと位置づけて非コアビジネスを売却した。2002年、ドイツのVAWを買収して板の圧延品にも進出した。2012年にはハイドロ社がオークラ社 (Orkla ASA) の子会社でスウェーデンのサパ社 (Sapa AB) と押出事業を統合することで合意した。

スイスでは、スイス・アルミニウム社は国内だけでなく、海外にも進出した。1990年にはAluisse-Lonza Holdings AGと名称を変更し、さらに1998年にはAlgroupとなったが、2000年にはAlcanに買収された。イギリスには1894年設立されたブリティッシュ・アルミニウム (British Aluminium Ltd.) があるが、1959年、レイノルズとTI Groupが買収した。その後1982年アルキャンに買収され、ブリティッシュ・アルキャン (British Alcan Ltd) と改称した。アルキャンは1996年に投資会社に売り、再びBritish Aluminium Ltd.となり、これをアルコアが買収するといったM&Aの対象となった。

(3) 日本⁷⁶⁾

戦前は、アルミナの製造と電解の一貫メーカーが10社、アルミナ専門メーカーが7社、電解事業メーカーが3社あり、その生産能力はアルミナ年産48万トン、アルミニウム地金年産20万トンであった。日本軽金属、昭和電工、住友アルミ三社が全体の55%を占めていた。戦後は軍の需要を失い、多くの製錬企業は生産を断念し、戦後は先の三社が生き残り寡占状態となった。その後、アルミニウムの大幅な需要で、新規メーカーの参入がでてきた。1960年三菱化成を中心とする三菱グループは直江津にアルミニウム製錬工場の建設を発表し、1963年操業を開始し、第四の製錬企業として登場した。三井グループも1968年三井アルミニウムを設立して、第五勢力として登場した。この間、八幡製鐵もカイザーと組んで、製錬加工の一貫工場を作ろうとしたが、既存圧延業界の猛反対に会い、製錬部門は断念し、加工だけの

「スカイアルミニウム」が1967年操業を開始した。その後、住友軽金属は製錬加工の一貫工場を目指して、1973年アルミニウム製錬を行う「住軽アルミニウム工業」を設立した。

第一次石油危機のあとアルミニウム製錬業界は、電力コストの上昇に伴う国際競争力の喪失、内需の急冷と輸入地金の急増による大幅な需給ギャップの発生で深刻な不況に見舞われた。これに対し、通産省は、1975年産業構造審議会を開き、製錬と圧延の間の垂直統合を実施する一方で、海外製錬を推進することで、危機を打開しようとした。その結果、1975年以降相次いだ石油化学メーカーからの製錬部門の切り離しで、三菱軽金属、住友アルミニウム製錬、昭和軽金属が分離独立したが、垂直統合は製錬、加工メーカー何れも累積赤字のため不調に終わった。海外製錬は水力発電が使い電力コストの安い海外で製錬するというもので、それなりの前進があった。その第一号は1971年操業開始した昭和電工と住友化学の共同投資のエンザスプロジェクトである。続いてカナダでのアルパック、インドネシアでのアサハン、ブラジルのアマゾン、ベネズエラのベルナムなどのプロジェクトが稼動した。しかしながら、国内での各製錬メーカーは、累積赤字が膨らむ中で、全面停止に追い込まれた。1981.9 三菱軽金属、直江津工場を全面停止、1982.5 住軽アルミニウム、酒田工場アルミ製錬全面停止、1982.6 昭和軽金属、大町工場アルミ製錬全面停止、1983.5 アルミ製錬業、特定産業構造改善臨時処置法の対象業種に指定、1984.12 住友アルミニウム製錬、東予工場閉鎖、1988年アルミ製錬業の設置縮小処理終わった。

一方、圧延加工などの二次加工部門では、原料供給の関係から企業系列化が進んだ。1950年那須アルミニウムが日本軽金属の系列に入り、日軽アルミニウム工業に、1953年高田アルミニウムが昭和電工の傘下に入り、昭和アルミニウム工業に、1954年、日本アルミニウム工業が住友軽金属の系列に、大阪アルミニウムが日本軽金属の傘下に入った

北米のアルコア、レイノルズ、カイザー、アルキャンはイギリス、ドイツ、ベネルックスなどの地金輸入が増加の傾向をみせ、これにともなって資本進出したが、日本市場の高い成長性にも注目して、積極的に進出を図ってきた。カナダのアルキャンは、日本軽金属および東洋アルミニウムと資本・技術提携を行ったほか、神戸製鋼および住友軽金属に技術援助を行い、系列化をすすめた。1952年アルキャンは日本軽金属と資本提携し、1959年アルコアは古河電工、日本軽金属と合併で古河アルミニウム工業を、1964年レイノルズは三菱化成と合併で三菱レイノルズアルミニウムを、1964年カイザーは昭和電工、八幡製鉄と合併でスカイアルミニウムを設立した。こうした二次加工メーカーは、二次製品の市場

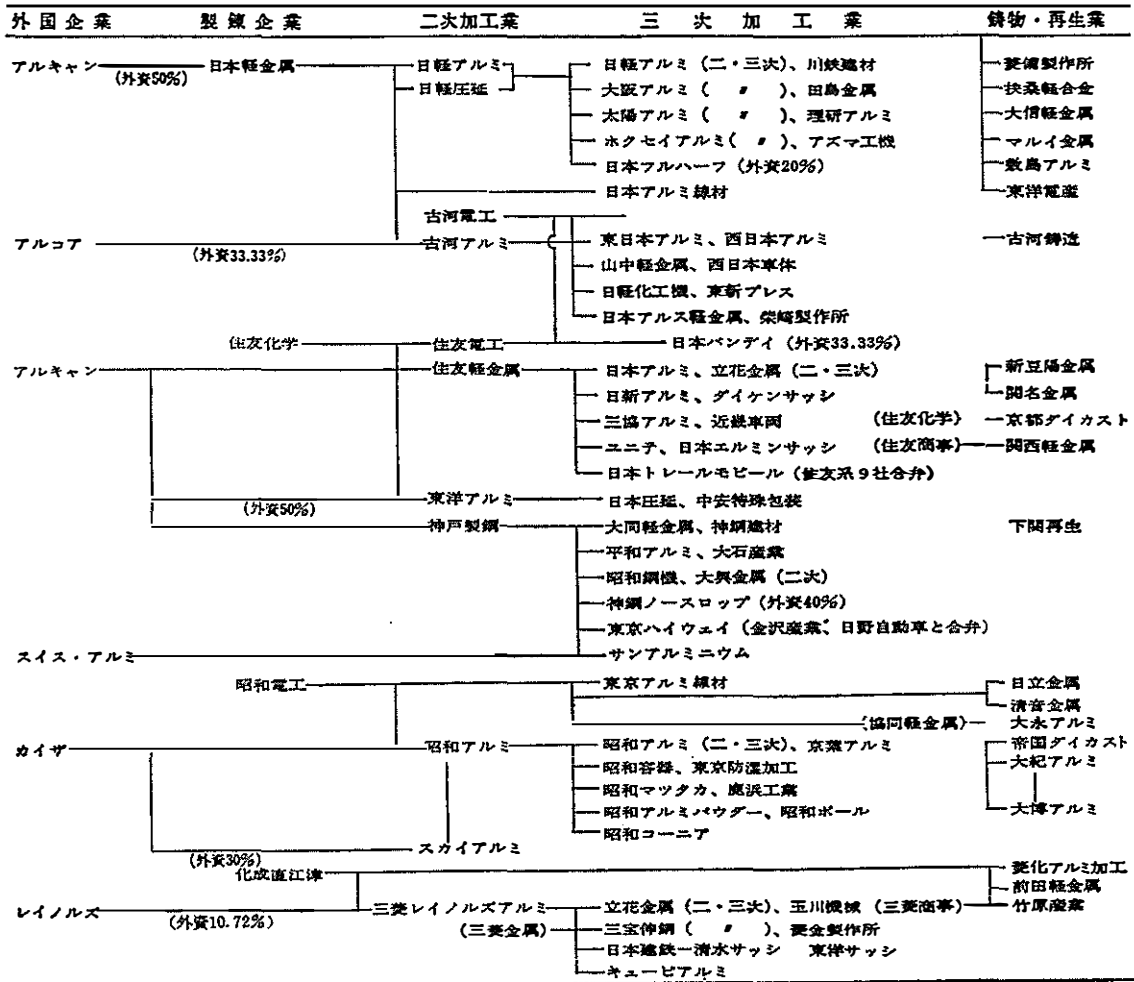
を確保し、新需要の開拓をはかるため、三次加工企業を育成し、系列支配を強化した。1965年頃の日本のアルミニウム産業の系列図をFig. 29に示す⁷⁶⁾。その後古河アルミニウムは古河電工に、昭和アルミニウムは昭和電工に吸収された。また東洋アルミニウムは日本軽金属と合併した。2003年に古河電工とスカイアルミニウム両社のアルミニウム事業が統合され、古河スカイが設立された。さらに住友軽金属と古河スカイは今後「グローバルマーケットで確固たる存在感を持つ世界的な競争力を持つアルミニウムメジャー会社となることを目指す」ために、2013年10月に統合され、株式会社UACJ (United Aluminum Company of Japanの頭文字)が設立される。

4.4 住友の生産再開と生産設備の拡充^{1,2,3)}

(1) 鋳造

1945年8月の終戦により、名古屋軽合金製造所で働いていた1万3000人が動員解除や希望退職で1000人以下となった。10月には名古屋製造所と改称(1947年再び伸銅所と改称)し、連合総司令部から民需転換の許可が出て、銅合金とアルミニウム合金の生産を開始した。圧延は1946年1月から再稼働したが、鋳造の反射炉が再開したのは試験記録から1948年頃と考えられる。この頃の板製品の主力はR₂(プロペラ材、Al-4.5%Cu-0.8%Si-0.8%Mn)とND合金(ジュラルミンD₂の屑を用いた合金、Al-4.5%Cu-0.8%Mg-0.8%Mn)でいずれも傾斜鋳造法のブックモールドで造塊していた。1949年頃より耐食性の良い純アルミニウム系、3S(3003)、52S、56Sとなり、合金呼称や成分もアルキャン社やアルコア社式に変わっていった。1950年の伸銅所副所長澤田彰逸氏の訪米で、カイザー社やアルコア社の連続鋳造方式、炉が溶解炉と保温炉で構成され、それらを交互に使用していることを見学してその生産性の高さに驚き、早速、従来の反射炉の操業方式一日1チャージ方式を見直して、一日6回チャージの連続操業に変わった。

1950年頃、朝鮮動乱と関連して米国極東空軍からの発注で24S、75S、61S航空機用合金が生産されるようになった。鋳込み方式は、総て傾斜鋳造で、板用は60キロスラブ、棒・型材用は径170ミリビレットが多かった。1951年頃から連続鋳造法による200キロ鋳塊の試験が始まった。75SについてはESDと同様なツープリン法で鋳込んだ。鋳塊の均質化処理や鋳造組織の微細化などの研究も1954年頃から始まった。1961年には当時の技術課長で後の社長、大柏英雄氏のアルキャン社での見学と実習で、アルキャン社の連続鋳造技術の詳細、保持炉からの樋の構造と溶湯の流れ、溶湯濾過用のグラスウールの詳細、湯面自動調節用のフロート、モールド構造などが明らかとなった。これらはすぐに現場の炉に適用され生産性の向上、鋳塊品質の向上に寄与した。この時の出張報告書は、しばらくの間、鋳造課のバイブルに



- (注) 1. 外資提携は(外資%)と表示したものにきざる。
 2. ……は技術提携のみを示す。
 3. 国内の系列化は資本提携のみを示し、原料供給関係は含まない。

Fig. 29 Affiliation of Japanese aluminum industry in about 1965⁷⁶⁾.

なったとのことである。鋳塊の化学分析についても、従来成分の化学分析に再分析も含めると約一週間もかかっていたが、1955年、米国アプライド・リサーチ・ラボラトリ (ARL) 社のカントメーター (PCQ) が日本で最初に研究部に設置され、オンライン分析により成分調整が容易になった。

1958年頃からスタートした第一期長期計画により、反射炉の増設・大型化がすすんだ。月産1800トンの生産計画に対し、溶解炉20トン、保持炉15トン炉 (F24) が設置された。溶解鋳造に対し、炉温、炉圧、冷却水量等に計器制御技術が取り入れられているのが特徴である。その後、同様な形式の炉が増設された。1961年からの第二期長期計画では、日本で最初のホットチャージ式の純アルミ溶湯の反射炉受け入れが行われた。住友化学工業は、伸銅所の増設計画に対し、隣接地にアルミナ電解工場を建設し、ホットアルミを供給することとした。ホットアルミの受け入れは月2900トンであった。またインライン脱ガス処理を保温炉内で送湯時に行うことや排ガス

の浄化装置も設置された。その後、溶解炉60トン、保持炉55トンの世界最大級の反射炉 (F31) が設置された。

1989年頃から缶材等の需要の大幅な伸びを予想して、月産能力1万トンの鋳造工場の建設に取り掛かった。8トンスラブから20トンスラブにして生産性を上げるため、国内最大級の95トン溶解炉2基と100トン保持炉、最新式の溶湯処理装置、最大2100mm幅、500mm厚の鋳塊を同時に7枚鋳造でき、最大長さ10mスラブ、最大重量28トンスラブが鋳造できる設備を導入した⁹⁵⁾。導入された溶解炉をFig. 30に示す。

(2) 圧延

戦後の圧延は三段冷間圧延機によるジュラルミンNDから始まる。当時は、物資不足で航空機材料のジュラルミンから鍋釜や弁当箱用の板を生産した。圧延方式は戦争中の伸銅所製板第二工場 (桜島) 方式とほぼ同じであったが、1947年頃は被爆した可逆式二段熱間圧延機 (R1)

が復旧していないためにシートバー圧延方式が一時期採用されたこともある。これは幅 150 ミリ、厚さ 25 ミリで押し出した ND バーを長さ 1 メートルに切断し、これを二段熱間圧延機で 6 ミリまで幅出し圧延した。圧延時にバーがロールとテーブルに落下しないように行うため危険な作業であった。朝鮮動乱での 75S、24S、61S 合金クラッド材の大量発注では、米軍の連邦規格と軍用規格が導入され、その品質管理の厳しさが製品のレベルアップに貢献した。このときのクラッド板用鋳塊はブックモールド鋳型の内側に皮材を貼付けその中に鋳込む方式で作られた。

可逆式二段熱間圧延機 (R1) (Fig. 16) が復旧されたのは 1952 年である。純アルミニウムの 200 キロ鋳塊が最初である。その後鋳塊は 400 キロ、500 キロと大きくなるが、コイルはスリーロールによるガサ巻きだったので、傷防止としてコイル巻きの際に径 6、7 ミリの木綿の紐を二列に入れて面と面の接触を防ぐ工夫をした。最終圧延は二段冷間圧延機で圧延し、厚さ 1 ミリ前後で、幅 1220 ミリ長さ 2440 ミリの薄板製品とした。1953 年米軍極東空軍の意向もあり、航空機材の順調な生産のために、カナダのアルミニウム・リミティッドの研究所から住軽、神鋼、古河三社に技術指導に来た。その板材生産での質疑応答には、鋳塊切削面の状態、皮付け板の洗浄、ふくれ対策、熱間及び冷間圧延油、二段冷間圧延での問題が取り上げられていた。

1959 年、この年は伊勢湾台風が襲ってきて大きな被害を被ったが、住友軽金属が住友金属から独立した年で、

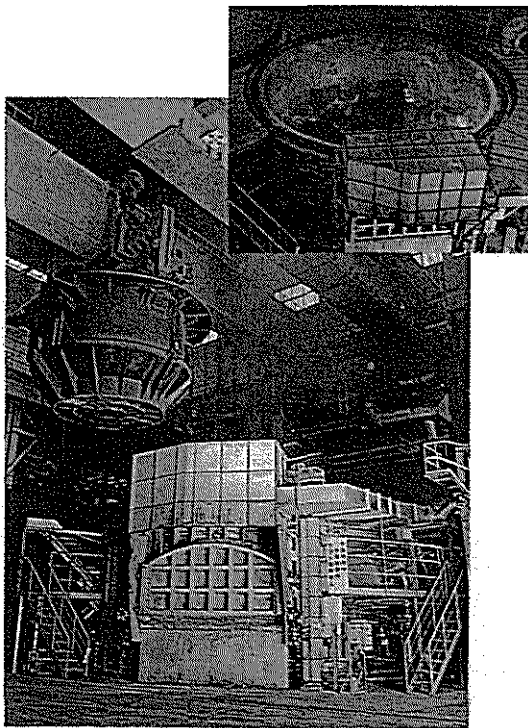


Fig. 30 Large melting furnace

第一期長期計画として板 1800 トン生産設備起業が決定された。板用鋳塊は 1 トンと大型化し、両面面削機、均質化熱処理用のピット型加熱炉が新設された。可逆式二段熱間圧延機では熱延テーブルの延長、モーターの更新、クーラントシステムの改造のほかに、コイル方式が大きく変化した。従来はスリーロール方式によるガサ巻きだったが、アッペンバハ社製のホットコイラーを設置することでタイトコイルとなり、板面の傷防止が可能となった。四段冷間圧延機では、入側アンコイラーと出側リコイラーの大型化、圧延制御の更新、クーラントシステムのノズル毎の電磁弁によるオンオフ制御への変更などが行われた。1957 年頃から家電製品、アルマイト用装飾品の材料開発では表面品質が重要で、これは製造工程と関連していたため、AlTiB 添加による铸造組織の微細化や熱延温度の管理が重要となった。

1961 年から五カ年にわたる第二期長期計画が立案され、月産 3600 トン生産が目標とされた。新四段冷間圧延機が設置され、板厚制御方式の採用、板形状制御のためのワークロール・ベンディング装置、X 線板厚計、圧延荷重計等の各種計測器の設置などが導入され、製品の形状寸法・品質の飛躍的向上を狙った。第二期長期計画の途中から板月産 6000 トン、付帯設備の増強で 10000 トンまで可能という計画を達成するため新熱延が検討され、粗圧延機 (R100) (Fig. 31) と仕上げ圧延機 (R101) (Fig. 32) が新設された。いずれも四段圧延機で R100 はロール幅 3 メートル余、R101 は 3 タンデムでロール幅 2.3 メートル弱である。本格稼働は 1966 年 4 月からである。

アルミニウムの需要は器物、家電製品、装飾品から車両、建築など構造用の分野へと著しい発展を遂げていたが、日本は技術革新で欧米より遅れていたため、住友はカナダのアルキャン社と技術援助契約を 1961 年結んだ。技術援助の内容は、アルミニウムとその合金について、铸造、圧延、押し出し、抽伸等の製造技術並びに建築、運輸、電気、包装等の関連産業分野におけるアルミニウム使用

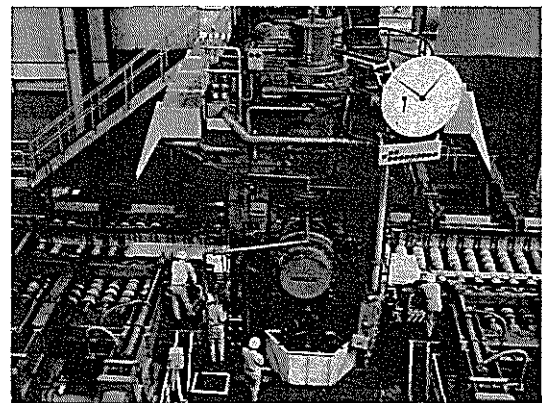


Fig. 31 Single stand hot roughing reversible mill, R100 (1966)³⁾

についての一般的技術援助であった。この援助期間は調印発効後15年間で1978年まで続いた。缶エンド材のアルミ化では需要の拡大を見越してその表面処理のために1969年連続仕上げライン(SH80)が導入された。表面処理ラインと同じく、連続加熱式コイル焼鈍炉(F80)も1969年設置された。1989年から始まった板の近代化では仕上げ圧延機のスタンドを増設して4スタンド化し、既設スタンドの主モーターを含む電気設備一式の更新、プロセスコンピュータおよび制御装置の更新、さらに面削機、加熱炉の新設を実施し、全面的な改造を行った⁹⁵⁾。Fig. 33は4スタンド化された仕上げ熱間圧延機R101である。

(3) 管・棒・形材

1958年頃のアルミニウム管・棒・形材の生産量は月100トン程度で、棒が主であった。ビル用サッシの需要が徐々に始まったのが1959年過ぎで、建築業界が一般のアルミサッシに注目するのは1961年頃からといわれている。このような需要に対応するために横型単動式油圧押出機が設置されたのは1959年である。米国ローウィ・

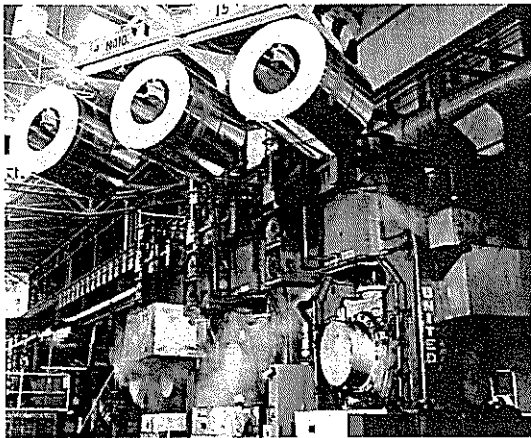


Fig. 32 Three stands tandem hot finishing mill, R101 (1966)³⁾



Fig. 33 Four stands tandem hot finishing mill added a new stand, R101

ハイドロプレス社製の2000トンプレスでピレット径は7インチであった。この押出機には自動搬送(クーリングテーブル、搬送テーブル)、引張り矯正、切断と連続的に作業ができる付帯設備があり、サッシ用6063合金押出形材の生産に効果的であった。その後需要に応じて複動式を含む横型油圧押出機が8機導入された。1962年頃からビル用サッシのブームが訪れ、月あたりの片材生産量は1964年が470トンであったが、1968年には2000トンに達した。ソリッド材の生産ではフラットダイスが主流で現在のようなフローガイドは使用されていなかった。ホロー材についてはスパイダーダイスカブリッジダイスが主であったが、薄肉化に伴いポートホールダイスに移行していった。ダイスの製作には1958年放電加工機が導入され、1970年にはコンピュータ制御のワイヤカット放電加工機が日本で最初に導入された。小物多孔品の押出にはプラーが1966年頃設置された。継目無し管の製造には従来の横型水圧押出機方式では扁平率が問題で、扁平率5%以下の要求を目指すために2660トン横型複動式油圧押出機が設置された。1969年には千葉製作所での生産が始まり油圧プレスが導入された。また同年、軽金属押出開発会社(KOK)への出資がなされた。また棒の押出では、コンテナとの摩擦がなく、低温で高速押出が可能な3000トン単動式油圧間接押出機が1973年設置された。その後加工品への展開が行われ、千葉アルマイト工場や加工品工場ができた。1985年バブル景気の最中、押出設備の近代化、大型化が計画され、5600トンの直間兼用大型複動押出機(Fig. 34)や大型ブルブロック抽伸機、縦型焼入れ炉(Fig. 35)などが導入された⁹⁷⁾。自動車材の海外展開に伴い、2003年チェコに、2012年タイに自動車熱交換器用多穴管の押出工場が設置された。

4.5 鉄道車両用材料

—7N01, 7003, 6N01の開発—

日本の鉄道車両の車体にアルミニウム合金が用いられたのは、1945年、終戦直後の物資不足から航空機のジュラルミンが転用されたのが最初であったが、腐食が激しく改造された。本格的な鉄道車両への採用は、1962年にデビューした山陽電鉄2000形電車に始まる。当時、初めてアルミニウム合金をわが国の過酷な使用条件の通

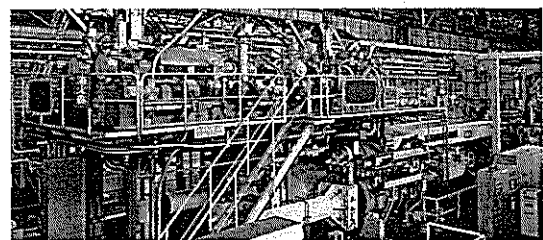


Fig. 34 Direct and indirect 5600ton extrusion machine with double action

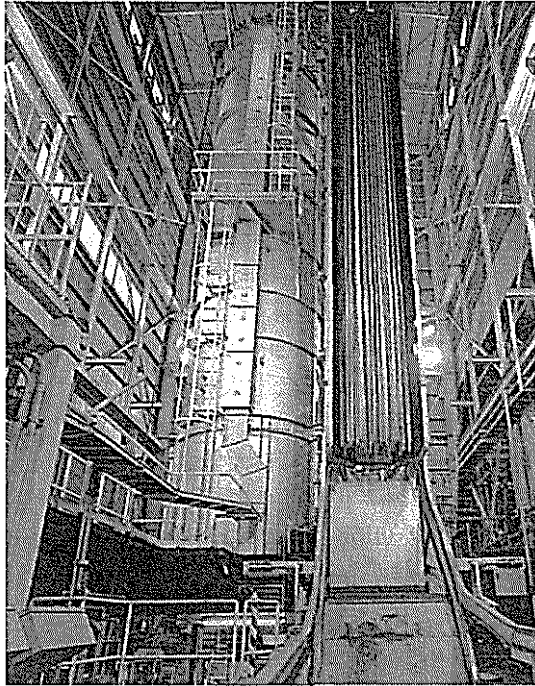


Fig.35 Vertical furnace with quenching equipment

動電車に適用し、数年間の使用実績を見守った結果、実用上の問題は皆無であることがわかった。しかも予定通りの経済性が確認されたので、大都市の地下鉄を中心にアルミ車両を採用する鉄道が相次いだ。

アルミニウム合金製車体の構造の変遷を Fig. 36 にまとめる^{98,99)}。山陽電鉄 2000 形電車に代表される第 1 世代では、当初、鋼製車体の外板の置換えに始まったが、その後、台枠に溶接性の劣る 6061 合金を用いたため、ブロックごとに溶接され、ブロック相互はリベットで結合された車体となった。第 2 世代では、60 年代中期に溶接が可能な Al-Zn-Mg 系の高強度 7N01 合金が開発され、骨組み、外板はもとより台枠も含めた全溶接構造のアルミニウム合金製車体となった。骨組み、台枠の張りには押出型材が多用され、従来の鋼製車体の重量に比較して 1/2 以下となった。

Cu の添加されない Al-Zn-Mg 系合金には、戦前開発された HD 合金（ホンダジュラルミン、Al-5.4Zn-2.0Mg-0.55Mn-0.25Cr）があり、ESD より強度は低いが押出性に優れているために、型材として利用されていた。接合に関しては、戦前は溶接技術の未熟もありリベット接合が主体であったが、戦後は、第二次世界大戦中に米国で高純度ガス生産ができるようになった結果、アルゴンアーク溶接法が研究され、TIG、MIG 法が開発され

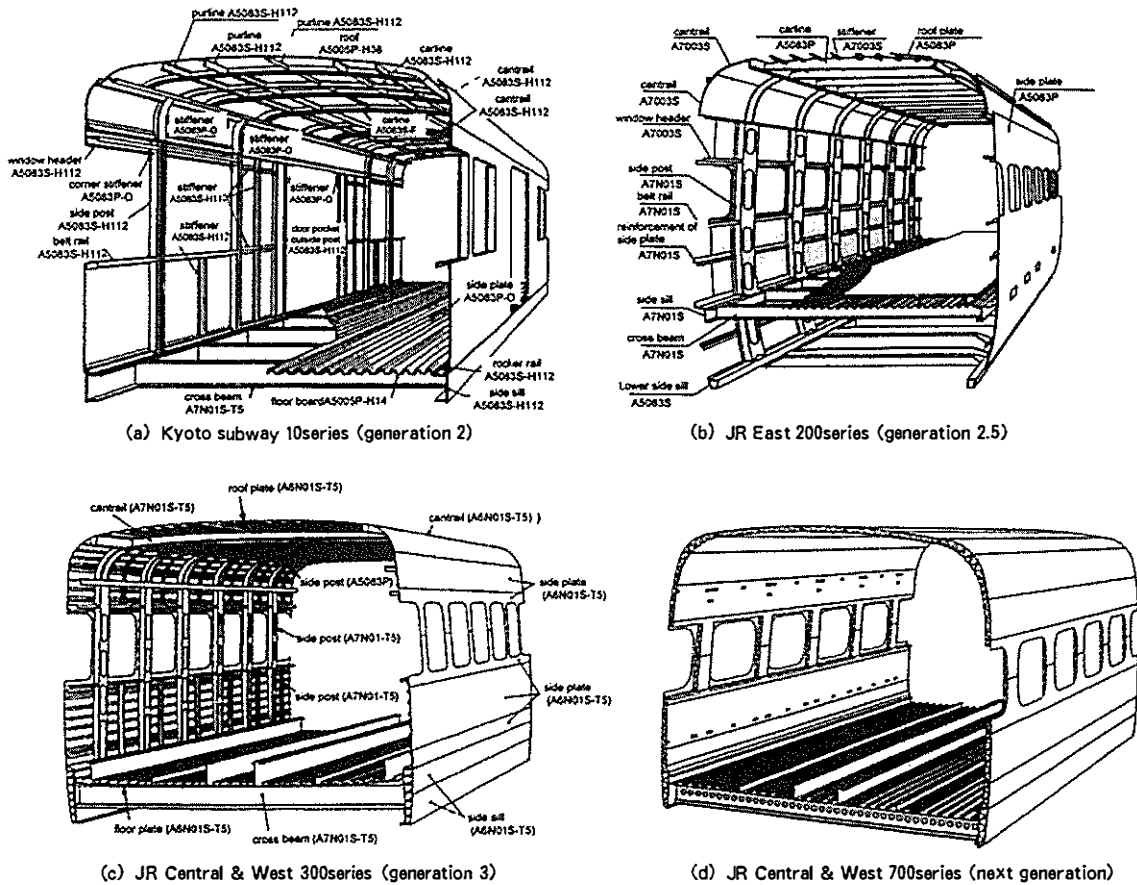


Fig. 36 Trend of the body structures of aluminum railways cars^{98,99)}

た¹⁰⁰⁾。これに伴って、欧米ではAl-Zn-Mg系溶接構造用材料の研究が盛んになり、AlZnMg 1, AlZnMg 2, 7004, 7005などが開発された。この系の合金は、溶接後も自然時効にて強度が増加し、引張強さは母材強度に近いところまで到達するため、継手効率は高い特徴がある¹⁰¹⁾。

日本においても、住友軽金属の馬場義雄博士らはいち早くMn, Cr, Zrの添加の影響を調べ、Cr添加が最も焼入れ性を低下させることを明らかにし¹⁰²⁾、1965年、Crは添加せずZrを必須とする住友合金ZK41を開発した¹⁰³⁾。その後欧米でもZrを必須とするようになった。ここにも住友の合金開発における先進性を見ることができ^{104,105)}。Fig. 37は焼入れ性と溶接割れ感受性に及ぼす微量元素の影響を示す^{101,102,106)}。この系の合金は押出後も空冷で強度が得られ、冷却による歪も少なく生産性がよいため、各社も開発し、1970年JIS A7N01(2005年、The Aluminum Association (AA)にも登録され、AA7204と呼称)が制定された。しかしながら、腐食環境によっては、剥離腐食や応力腐食割れ性を生じることがあるため、前述の過時効処理や微量添加元素が検討された。特に、肉厚方向での応力腐食割れ抑制に対

しては、0.15%前後の微量のCu添加が有効であることが明らかとなり^{109,110)}、住友合金ZK141が制定された¹¹¹⁾。世界各国と住友のAl-Zn-Mg系合金の成分をTable 13に示す^{104,105)}。そのほか、クロムやジルコニウム添加については鋳塊の均質化処理条件の影響の大きいことも明らかにした^{106,107)}。

(注) 馬場義雄博士は1935年生まれ、1958年京都大学工学部冶金学科を卒業、村上陽太郎研究室の出身で、チタンの研究開発に従事したくて住友金属に入社したとのこと。入社翌年、住友軽金属が独立するとともに第一期生となり、アルミニウム合金の研究開発に取り組んだ。1969年、京都大学から工学博士を授与される。1972年、住友軽金属工業(株)主任研究員。小職が入社時(1975年)は主任研究員であり直接の上司であり、まずAl-Zn-Mg系三元合金の溶接部の応力腐食割れの研究のテーマが、その後、Al-Zn-Mg-(Cu)系合金の機械的性質、応力腐食割れに及ぼすZr添加の影響の研究テーマが与えられた。1985年、同社取締役、1992年、豊橋技術科学大学客員教授兼任(3年間)、1999年、同社専務取締役退任、顧問。1963

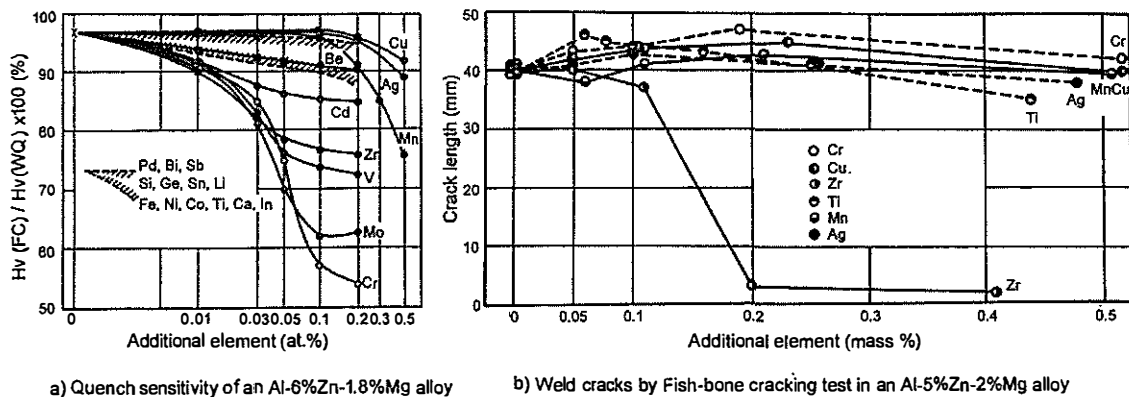


Fig. 37 Effects additional elements on quench sensitivity and weld cracks by fish-bone cracking test in Al-Zn-Mg alloys^{99, 101, 102)}.

Table 13 Chemical compositions of Al-Zn-Mg alloys in the world (mass%)^{104, 105)}

		Zn	Mg	Mn	Cr	Zr	Ti	Cu	Fe	Si
AlZnMg 1	Germany	4.0-5.0	1.0-1.4	0.1-0.5	0.1-0.25	—	0.1-0.2	<0.1	<0.5	<0.5
AlZnMg 2	Germany	4.2-5.3	2.0-3.5	0.1-0.6	0.1-0.3	—	<0.2	<0.10	<0.7	<0.7
7004	USA	4.0-4.6	1.0-2.0	0.2-0.4	0.1-0.3	— (*)	<0.15	<0.2	<0.4	<0.25
7005	USA	4.2-5.0	1.0-1.8	0.20-0.70	0.06-0.20	— (*)	0.01-0.06	<0.10	<0.35	<0.35
ZK41	Sumitomo	3.5-4.5	1.5-2.5	0.2-0.5	<0.10	0.1-0.2	<0.10	<0.10	<0.25	<0.20
ZK141	Sumitomo	3.8-5.0	1.0-2.2	0.2-0.9	<0.30	<0.30	<0.20	<0.30	<0.40	<0.30
7N01, 7204	Japan	4.0-5.0	1.0-2.0	0.20-0.7	<0.30	<0.25	<0.20	<0.20	<0.35	<0.30
ZK60, 7003	Sumitomo	5.0-6.5	0.5-1.0	<0.30	<0.20	0.05-0.25	<0.20	<0.20	<0.35	<0.30

(*) Afterwards, 0.10-0.20% zirconium was added to 7004 and 0.08-0.20% Zr was to 7005.

年、軽金属学会、軽金属論文賞受賞、1968年、第8回日本金属学会ジェフリース賞受賞、1974年、「新しいAl-Zn-Mg系三元合金の研究開発」で第9回小山田記念賞受賞、1978年、第36回日本金属学会功績賞(金属材料部門)受賞、1980年、「焼入れ性の優れた溶接構造用強力Al-Zn-Mg系合金の製造法」で全国発明表彰、1996年、「航空機テーパー・ストリンガー用高力アルミニウム合金板材およびその加工技術の開発」で第9回中日産業技術賞受賞、2000年、第3回軽金属学会賞受賞。2012年惜しくも77歳で逝去。

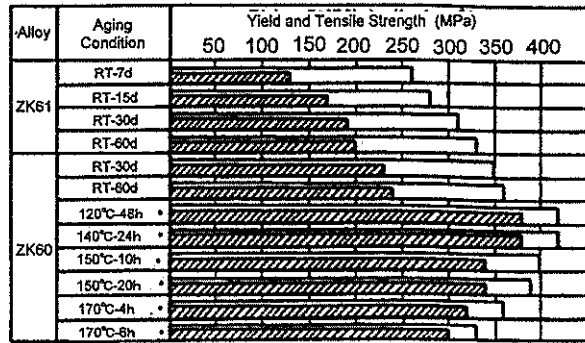
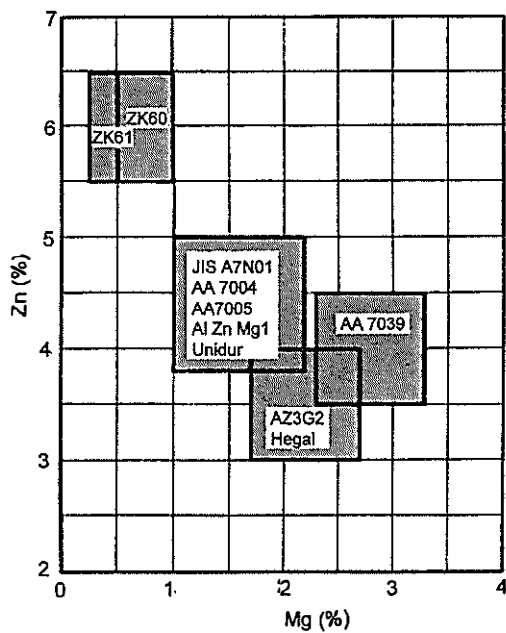
馬場博士は住友軽金属技報50周年記念号の随想¹¹²⁾の中で、「1961年にドイツのP. BrennerがAluminium誌に欧州における溶接構造材としてのAl-Zn-Mg系合金の利用について発表した。Al-Zn-Mg系合金は我が国ではHD合金として、Al-Zn-Mg-Cu系のESD合金、超々ジュラルミンよりも押出加工性が良く、強度もかなり強い合金として知られていたが、一般に溶接性に劣るため、Al-Mg系の非熱処理型合金に比べて溶接構造材としての利用は少なかった。上司からの勧めもあり本格的にAl-Zn-Mg系合金の研究開発を進めることとした。当時、研究開発の中心は亜鉛3~5%、マグネシウム1~3%を含むAl-Zn-Mg系合金に応力腐食割れ防止にクロムとマンガンをも0.2~0.6%添加した材料の実用化であった。ESDの応力腐食割れ防止にクロムが0.2~0.3%添加されて以来Al-Zn-Mg系合金にもクロムを添加することが当たり前のように思われていたが、空冷での押出加工性を重視した場合、クロムは焼入れ性に悪い影響を与えるので好ましくない。基礎研究の結果、400°C以上の高温での不溶性析出粒子がより微細なジルコニウムの微量添加、0.15~0.2%が応力腐食割れ防止も含めて極めて有効であることを見出した¹⁰²⁾。亜鉛とマグネシウム量も見直し、各種微量添加元素の役割を時効現象と格子欠陥に関連して詳しく調べた。「その結果を住友軽金属技報と金属学会誌に発表し、金属学会第8回ジェフリース賞受賞となった」。これは「住友軽金属技報で論文の書き方を学ぶとともにレベルアップ図った成果が集大成されたものと思っている」と書いている。バランスのとれた基礎研究と開発研究、論文投稿によるレベルアップなど、我々はこれら住友のよき伝統、DNAを受け継いでいく必要がある。

VAWのBrennerの発表について、西村教授のDNAを引き継いだ村上教授も次のように書いている。「この合金(HD合金)は戦後わが国では顧みられることはなかったが、1960年前後に、ヨーロッパで溶接構造用三元合金として研究されていた。筆者が1961年当時の西ドイツのマックス・プランク金属研究所に滞在していた際に、オーストリア、レオーベン市で開催された第4回軽金属国際会議(4. Internationale Leichtmetalltagung, Leoben, 1961)に出席した。その節、ド

イツ・アルミニウムのP. Bennerが、同社が1958年頃から製品化している溶接構造用三元Al-Zn-Mg合金、Konstruktal 21/51 (Al-Zn3.5~4.8, Mg0.5~1.2, Mn0.1~1.0, Cr0.1~0.3)の優れた溶接性と応用例を発表した。屋外に特設されたテント張りの展示場にはこの合金の種々の溶接構造物が陳列されていた状況が今でも思いだすことができる。この合金の最大のメリットは溶接部の強度が、溶接後室温で徐々に回復し、約3ヶ月後には、その強度が母材と同程度に回復することで、この図をみて感動した記憶がある」と述べている^{84,87)}。これもDNAの為せる技かなと思ってしまう。

A7N01のMg量を減らし、Zn量を増加させて、さらに押出性を高めた合金も、1967年馬場博士らによって開発され^{113,114,115)}、その後、日本から初めてAAに7003合金として国際登録された。Fig. 38は7003合金(住友ZK60)と住友ZK61合金の成分範囲と強度、押出性を示す⁹⁹⁾。7003合金により広幅の大型材の製作が可能となった。1969年には四日市市に圧延業界、精錬業界が共同出資の軽金属押出開発(KOK)が設立され、わが国最大の9500トン押出機が設置された。最大幅520mmの材が押出可能となり、新幹線車両軒桁に7003合金広幅大型材が採用された。これが第2.5世代といわれた車両構体(Fig. 36参照)である。その後床板、側構などに大量に使用された。この7003合金は、鉄道車両はもとより、コンテナ、バンおよびトレーラー等の強度メンバー、また中空押出も可能でオートバイや自転車のリム、自動車のバンパーなどにも広く利用されている。

アルミ合金製車両は鋼製車両に比べてイニシャルコストが高いため、さらに押出性、溶接性、耐食性に優れた合金が求められていた。欧州ではAl-Mg-Si系の6005Aが開発され、車両に使われていた。この合金は、Mn+Crを0.12-0.5%含むが、添加量や押出条件次第では結晶粒が粗大化したり、MgとSiの量比如何では、靱性が劣ったり、溶接でマイクロフィッシュなどの割れが発生しやすいことがわかった。各社は成分等の最適化を図り、1980年、それらを集約してJIS 6N01合金が制定された⁹⁹⁾。この合金は薄肉で中空の押出材が製造可能で、構体がすべて押出材で構成されるようになった。これが第3世代の車両構体である。強度が必要とされる台枠の枕はり・横はり等については7N01が依然として使用された。1990年代に入ってから、次世代車両構体といわれる、中空トラス断面押出材によるダブル・スキントタイプの構体構造が主流となり、さらに枕はりや横はりも6N01合金に置き換えられている。また新技術として、ろう付けハニカムパネル¹¹⁶⁾や摩擦攪拌接合(FSW)¹¹⁷⁾も利用されるようになってきている。



* Pre-aging at RT to 100°C followed by artificial aging

Alloy	Extrusion Speed (m/min)	Minimum Thickness (mm) *
ZK 60	21	3.5-4
ZK 61	28	2.5-3
ZK160	14	4.5-5
JIS 7N01	14	4.5-5

* 350-450mm wide shape

Fig. 38 Development of Al-Zn-Mg alloys (Sumitomo alloys ZK60, ZK61) with high extrudability^{99, 113, 114)}

4.6 二輪車用材料

—高強度高靱性 7000 系合金の開発—

二輪車（モーターサイクル、オートバイ）も戦後大きく発展した分野で、戦前からのメーカー（陸王、みずほ、宮田）以外に戦前の航空機メーカー（中島、三菱、川西）や本田技研など 100 社以上のメーカーが製造に乗り出した。生産台数が伸びるに従いスポーツとしての使われ方がされるようになった。レースでは性能の差が成績となって表れるので、各社の技術競争が始まり、それによって性能向上がもたらされた。レースによって磨かれた技術は市販車にもフィードバックされ、1960 年頃から市販車の性能や品質が向上した。その後世界グランプリへ進出し欧州車を圧倒して世界のナンバーワンとなり、ホンダ、ヤマハ、スズキ、カワサキが競うオートバイ王国へと成長を遂げた⁹⁹⁾。

二輪車も航空機に次いでアルミニウムの使用量の多い輸送機器で、オフロードレーサーではアルミニウム材料は重量の約 3 割を占めているといわれている。二輪車は軽量高性能化へのニーズが高く、早くからアルミニウム部品の採用には積極的であり、シリンダーヘッド・ケースなどエンジンの外殻となる部品は当初よりアルミ合金で設計されてきた。

1980 年ごろより、スポーツ車において軽量化とデザインニーズが高まり、ホイール、フレーム、スイングアーム、ラジエータなどアルミ化が進んだ。比較的早かったのはホイールで、スポークホイールのリムに Al-Zn-Mg 系合金 7003 合金が用いられ始めた。これは高強度で溶接性が良好なためである。通常 O 材で曲げ加工後、フラッシュバット溶接を行い、その後スポーク穴用に張出

し加工を行ってから焼入れをする。最近では、銅が多く添加された Al-Zn-Mg-Cu 系合金も用いられている。Fig. 39 は高強度 7000 系押出材が用いられている二輪車の部位を示す⁹⁹⁾。

溶体化処理時の結晶粒粗大化はその後の表面研磨、アルマイト処理した後の外観品質に影響を及ぼすため、押出材の組織制御も重要な課題であった。一般に高力系合金押出材は強度、靱性、耐応力腐食割れ等の観点から Mn, Cr, Zr などが微量添加されるため繊維状組織を有するが、押出表面はダイスとのせん断加工を受け再結晶組織となりやすい。溶体化処理で再結晶組織は厚くなるが、この後の研磨、アルマイト加工で再結晶組織と繊維状組織が混在すると、光沢の違いで斑が生じるため、外観上どちらかの組織に制御する必要がある。

フレームのメインパイプ部やスイングアームのアーム部には 7N01, 7003 押出材が用いられ、ヘッドパイプやブラケット部の鋳造品や鍛造品と溶接で接合された。また一部のプレス成形タイプでは溶接性の良好な 5083 合金板材が採用された。

フロントフォークは車体とフロントタイヤを繋ぐサスペンションで、操舵と緩衝および懸架の役割があり、衝撃を吸収するため二重管で構成され、インナーチューブには高張力鋼が、アウターチューブにはアルミニウム合金鋳造材が用いられてきた。1990 年頃、モトクロスなどのオフロードレーサーではジャンプ着地時に大きな衝撃力が加わるため、鋳造材よりも高強度高靱性合金が必要とされ、航空機用 Al-Zn-Mg-Cu 系合金が注目された。この中でも、Zr 添加合金は、間接押出後の表層結晶粒粗大化を抑制でき、また焼入れ感受性が鈍感（焼入れ性

が良好)になるため、水冷に替わりポリアルケレングリコールを用いた縦型焼入れ炉(図5)を用いることで不均一な残留応力を低減できた。現在ではアルミニウム合金で最も高強度高靱性材料が、フロントフォークのアウトチューブに実用化されている¹¹⁸⁾。戦前の航空機用材料開発の伝統が二輪車用材料の開発に生きている例といえよう。なお、製管の技術は高校の硬式野球バットにも活かされている。春夏の甲子園の高校野球大会で用いられている硬式野球バットの半数以上は住友軽金属の高強度 Al-Zn-Mg-Cu 系合金の押出で製造されたものである。アルミニウム製野球バットの例を Fig. 40 に示す。

4.7 航空機用材料

戦後、一時期、航空機の研究開発、製造は禁止されていたが、朝鮮戦争特需で復活し、1957年には開発が解禁された。しかしながら、戦中、航空機に携わっていた研究者や技術者は自動車、鉄道車両やモーターサイク

ル開発に移り、航空機もまたジェット機、大型旅客機への転換期を迎えていた。日本の航空機メーカーは米国の航空機のライセンス生産で基盤技術を築き、YS11などの航空機が生まれたが、価格の面で欧米機に比べて不利で、少量生産で終わった。その後、ボーイング機の機体生産を通して復活してきた。

ボーイングの B767 機体の製造では、従来、7075 押出型材を用いたストリンガー(縦通し材)の重量を軽減するため、Fig. 41 に示すように、板材を圧延により長手方向で肉厚を変動させ、継手部分のみを厚くしたテーパストリンガーを全面的に用いようとした。しかしながら、従来の 7075 板材では、圧延で弱加工した部分はその後の溶体化処理で結晶粒粗大化が生じて、その後工程のハット型加工で割れが生じて、疲労強度の低下する問題が発生した。このため弱加工でも結晶粒粗大化しない材料の開発が求められた。馬場博士、宇野照生博士、小職は連続焼鈍炉を用い急速加熱、急速冷却処理で結晶粒を 50

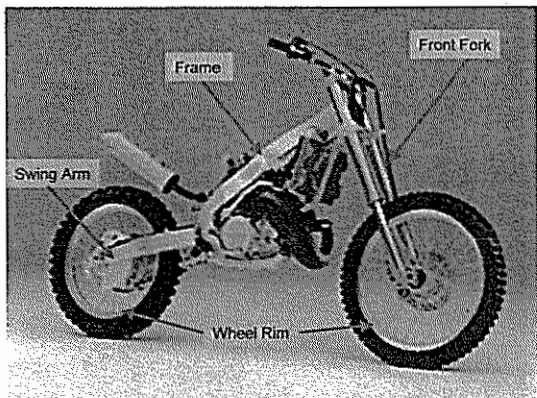


Fig. 39 Motor cycle parts using high strength wrought aluminum alloys in a motocrosser⁹⁹⁾

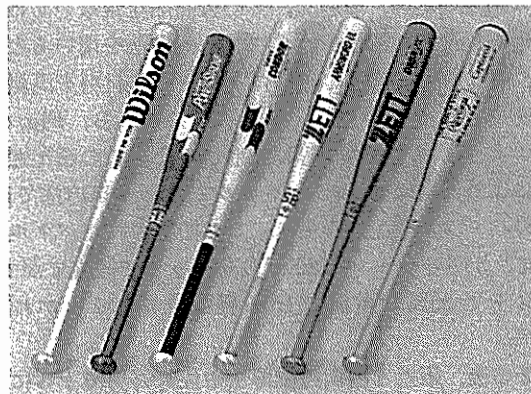


Fig. 40 Baseball bats made of Sumitomo's high strength aluminum alloys

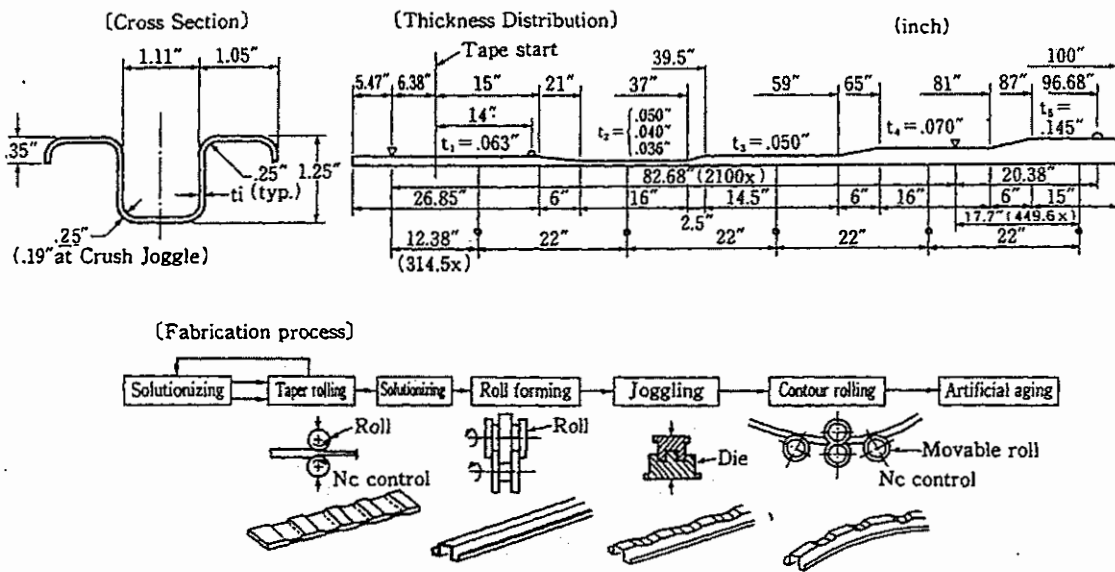


Fig. 41 Manufacturing process of a taper-rolled stringer for airplanes^{99,104)}.

μm 以下に微細化し、その後適正な析出処理により軟化させることで、弱加工・溶体化処理で結晶粒粗大化が生じない加工熱処理法を開発した¹¹⁹⁾。三菱重工はこの加工熱処理を施した板材をハット型に成形し、ボーイング B767, B777 のストリンガーに用いることができた^{104, 120, 121)}。Fig. 42 は B767 機の胴体部で、ハット型に成形されたテーパーストリンガーと湾曲したフレームと外板がリベットで組み合わされて様子がわかる。早速、1979 年 12 月には「75S 系合金の結晶粒径 $100\mu\text{m}$ 以下のストリンガー材およびその製造方法」で特許出願された。この技術開発に対し、1996 年、三菱重工と共同で中日産業技術通商産業大臣賞を受賞している。

航空機材料の研究は日本航空宇宙工業会の委託研究を受け、小職らは高靱性アルミニウム合金の開発研究(1980~82 年)¹²³⁾、7475 合金、Al-Li 合金超塑性材開発と超塑性加工法の開発(1983~88 年)^{124, 125)}の研究を実施した。この 7075 合金は、熱延板に対し適切な析出処理(過時効処理)を施し、その後温間圧延ないしは冷間圧延と急速加熱処理を行う加工熱処理法を用いると、 $10\mu\text{m}$ 程度まで結晶粒は微細化する。この材料を高温で引張変形させると超塑性が得られることから、Fig. 43 に示すようなドアパネル等に成形された。この超塑性成形法により、図 3 に示したパネルでは、従来方法では 45 個のパーツ、400 個のリベットで加工されたパネルに対して、3 個のパーツと 80 個のリベットで組立てができ、コストで 30%、重量で 15% 軽減されることがわかった¹²⁶⁾。

その後、筆者と内田秀俊博士や佐野秀男博士らによって川崎重工業と 2024 合金と同等の強度を有する高強度高成形 6000 系板材の開発および薄肉ホロー型材の開発

(1993~96 年)^{127, 128)}、2013 合金押出材、板材の開発と適用研究(2004~05 年、2007~08 年)^{129, 130)}あるいは熊谷正樹博士とともに三菱重工業と摩擦攪拌接合による主翼の製造法開発(2000~01 年)を共同研究¹³¹⁾してきた。こうした基礎研究は、航空機以外でモーターサイクルのリム用押出型材やフロンフォーク用管材の開発¹¹⁸⁾、自動車(ホンダ)のフェンダーなどの超塑性成形用材料開発⁸⁹⁾に波及効果をもたらした。

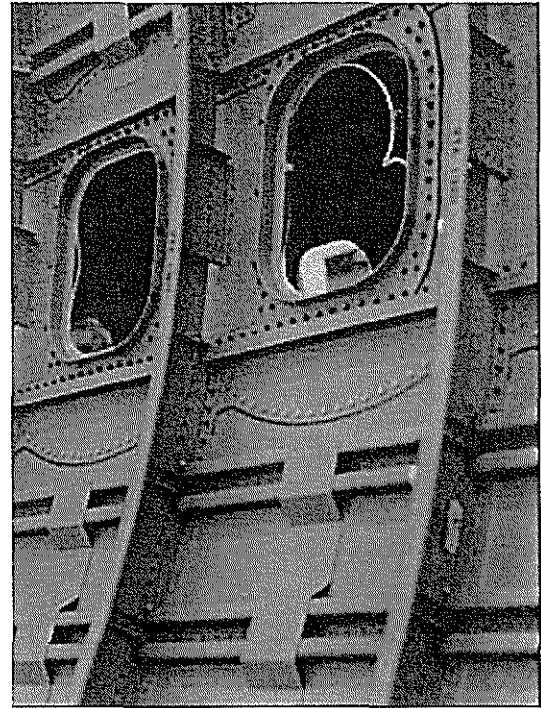


Fig. 42 B767's fuselage constructed with frames, skins and taper-rolled stringers^{99, 104)}

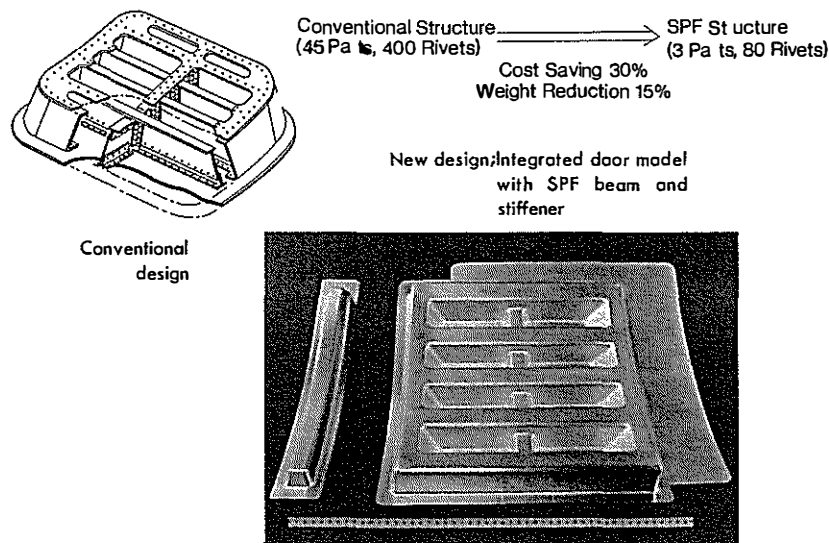


Fig. 43 Door panel model formed superplastically using a 7475 alloy sheet with fine grains compared with a conventional structure⁹⁹⁾,

合金開発では、7075 合金は航空機用材料の代表として、現在でも世界中で多く使用されている。1950 年代、米国で ESD に近い Zn 量を有する 7178, 7001 合金が開発されたが、破壊靱性、損傷許容、応力腐食割れの観点から次第に使われなくなった。その後、破壊靱性や疲労特性を向上させるために、不純物の Fe や Si を減らした 7475 合金が開発された。特に厚板材の靱性、疲労強度等を改善するために各種の加工熱処理法 (TMT: Thermomechanical Treatment) が開発された。中間加工熱処理 (Intermediate TMT) として、 casting 時の晶出物を熱間加工で微細再結晶させることで微細に分散させる方法が開発された¹³²⁾。これを Fig. 44 に示す。この方法は、戦前、ESD を圧延するために用いた「押え圧延」(本稿 3.9 参照) とほぼ同じ方法であり、「押え圧延」は製造現場が経験的に工夫発明した方法である。ここにも先人たちの先進性を見ることが出来る。また剥離腐食や応力腐食割れを抑制する方法として、通常の熱処理条件より高温長時間側で行う過時効処理 (T7) が開発された。さらに、最近では RRA 法と称して、通常の T6 処理した後に、170~260°C の復元温度まで加熱してその後再び 120°C で熱処理する方法である。これを T77 処理と表記している。これは粒界の連続した析出物を高温に加熱することで凝集化させ、粒内は若干復元状態となる。その後の熱処理で析出して強度は T6 並で応力腐食割れ性は T7 相当になる優れた熱処理法である¹³³⁾。1970 年以降は焼入れ性の観点から、Cr の代わりに Zr を微量添加した 7050, 7150 合金などが開発された。さらに最近では Zn も多く添加されるようになり、ESD と同じ 8% 添加された 7055 という合金も開発され使

用されている。これは製造技術の進歩とともに、材料学的にも、強度、靱性、疲労、応力腐食割れに関する多くの知見が得られ、特性を向上させるための手法も見出された結果である。Table 14 に戦後開発された航空機用 7000 系合金の成分の代表値を示す。住友軽金属においても高強度高靱性合金である高 Zn 合金の ZC88 が開発されている。Zn のレベルでは世界的にもようやく超々ジュラルミンのところまで来たといえる¹³⁴⁾。

1980 年代には航空機の燃費向上のため、一層の軽量化が要求され、低密度で高剛性の Al-Li 合金が注目された。リチウムを 1% 添加すると、密度は 3% 低下し、弾性率は 6% 増加し、2024 や 7075 合金並みに高強度が得られる。このため、欧米では次世代の航空機用合金として注目し、リチウム 2~3% 含む 8090, 8091, 2090, 2091 合金などが開発された¹³⁵⁾。この合金系は焼入れ感受性が鈍感で、空冷でも十分な強度が得られ、高温で超塑性を示し 7075 合金よりも速い成形が可能であるなどの興味ある特徴があり、著者らも基礎研究を行ってきた^{136, 137)}。しかしながら、製造の面では溶解鑄造が非常に困難で、通常の大気溶解では酸化反応が激しく酸化物が形成されやすい、熱延では圧延割れが生じやすい、溶体化処理では表面酸化で脱リチウムが生じるといった問題がでてきて、従来の技術では容易に製造できないことがわかってきた。このため日本でも、欧米の開発競争に遅れないために、軽圧各社が集まり、通産省の支援のもとでアリシウムという研究会社を設立し、1990 年度から 7 年間、製造および材料開発に取り組んだ。しかしながら、欧米も含めて、この合金の課題である破壊靱性、疲労亀裂伝播性などで大きな改善ができず、また製造コストも高いためほとんど実用化には到らなかった。しかし、最近、欧米では Li 量を減らした合金が開発され復活の兆しがある¹³⁸⁾。

最近の航空機材開発の流れは、従来からの高強度高靱性材料の開発ともう一つは航空機製造のコスト低減化に寄与できる材料、技術開発がある。材料開発では、耐食性で優れている 6000 系合金が注目され、米国では 6013 合金が開発された。2024 合金に比べ耐食性が優れるためクラッド材を用いる必要がなく、さらに腐食環境に晒された後の疲労強度は 2024 合金と同等である¹³⁹⁾。日本においても、前述したように川崎重工と住友軽金属は日本航空宇宙工業会の委託研究として、2024 合金-T3 材に匹敵する耐食性に優れた高強度 6000 系板材を開発し、航空機に適用する検討を行った。この板材を用いると、従来 2024-O 材で成形し、焼入れしていた工法が、T4 で成形し、成形後人工時効する工程が可能となり、焼入れによるひずみ矯正が不要で製造コスト低減となる¹³⁹⁾。この合金はまた、Fig. 45 に示すように、従来の 2000 系合金ではできなかった中空薄肉ホロー形材が押出可能で、

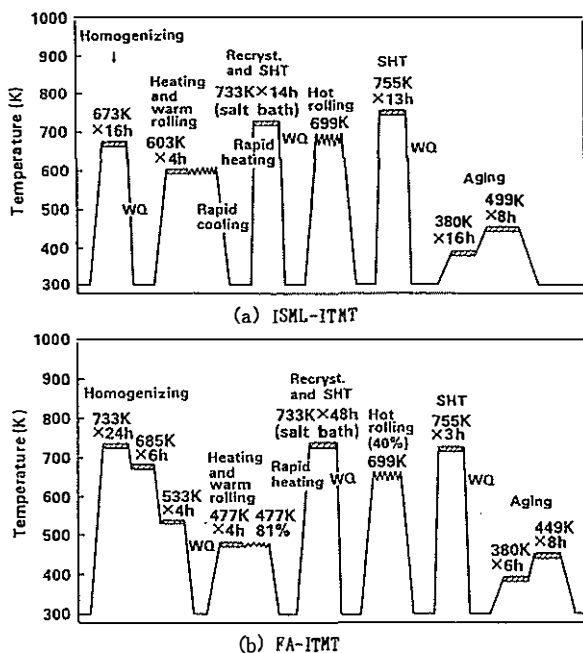


Fig. 44 Intermediate Thermomechanical Treatment for thick plates of airplanes¹³²⁾

複雑な形状の航空機部品の一体化成形ができ、従来リベット接合が不要になり、低コストで製造できることが明らかとなった¹⁴⁰⁾。佐野秀男博士の努力で、高強度高成形

6000 系合金は 2013 合金として、Aluminum Association に国際登録され、その押出材は米国の航空機規格 MMPDS を取得している。接合の分野では、従来、リ

Table 14 Aluminum alloys for aircrafts

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

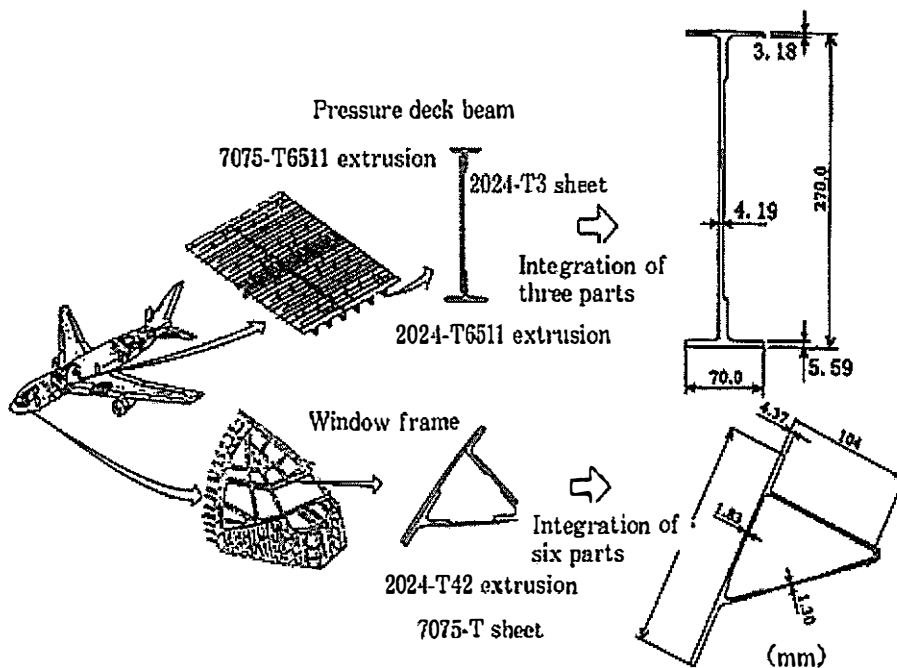


Fig. 45 Application of new alloy 2013 extrusions to integrated structures in a pressure deck beam and a window frame^{128, 129, 140)}

ベット接合でしか接合できなかった 2024, 7075 合金が摩擦攪拌接合 (FSW) で、Fig. 46 に示すような三菱重工と共同で 7050 合金押出形材を FSW で接合して幅の広い主翼が製造できることを明らかにした¹⁴¹⁾。これも従来厚板から大半切削加工して製造していた翼の材料歩留をあげ、航空機製造の低コスト化に寄与できる開発である。

高強度高靱性合金の開発では、従来の ESD の強度を凌駕する合金の開発が求められている。最近、三菱重工が小型近距離旅客機 MRJ (Mitsubishi Regional Jet) の開発、生産、販売を始めるとのことで、再び日本の航空機産業が活性化し始めた。70 年前、名古屋の地に生産拠点を移して航空機材料を製造してきた住友がこの地の利を活かして、これをビジネスチャンスとして捉え、これまでの航空機材料開発の研究成果をもとに、再び航空機材を本格的に製造することはその伝統を引継ぎ、さらに発展をさせるためには必要なことであろう。航空機材料を開発するには、材料面での高度な研究開発力が問われ、製造面でも通常の材料に比べて非常に難しいので新たな技術開発力が求められている。住友の DNA を活かして、研究と製造の協力体制が不可欠である。このような研究開発は当然のことながら、そのほかの一般材への性能向上、品質向上への波及効果が期待できる。

4.8 最近の研究 応力腐食割れはどこまで 解明できたか？

2008 年京都で開催された軽金属学会軽金属セミナーの特別講演で、92 歳になられた村上教授は矍鑠とした

口調で「アルミニウム合金の時効析出にまつわる歴史と進歩」を講演された⁸⁵⁾。そのテキストに「筆者の卒業論文のテーマは高力 Al-Zn-Mg 合金の SCC であった。当時から SCC は高力アルミニウム合金の最大とも言うべき課題であった。双結晶試料を調整し、ブリネル硬度計の圧痕で応力を与えて、3%NaCl 中で浸漬して、割れの時間と組織の様相を調べるのに種々苦勞した思いが強く残っている。その後も研究室で、黄銅の SCC を含めて多くの研究を行なった。SCC は黄銅では古くから知られているが、アルミニウム合金では必ず粒界から起ることが特徴であることはすでにレプリカ法電頭の筆者の研究でも述べた。SCC は特定の腐食環境と引張応力が同時に作用した場合に著しい脆性破壊を起こす現象で、それらが別々に作用した場合には決して起らない」とある。村上教授が卒業された 1942 年 9 月頃は西村教授らが主導された HD 合金の研究開発が真っ只中であつたことがわかる。応力腐食割れの研究が村上教授の学生時代からのテーマであつたことはこのとき初めて知った。

さて、Al-Zn-Mg 系合金の応力腐食割れに関しては、1974 年 5 月の「軽金属」の「Al-Zn-Mg 系合金の応力腐食割れ」と題して、馬場義雄博士がまとめたシンポジウムの報告書がある^{142, 143)}。このシンポジウムの背景について「ここ数年のあいだにわが国でも急速に車両構造体の強度メンバーとして使用されるようになってきたこの Al-Zn-Mg 系合金も、アルミニウム合金中では比較的応力腐食割れ感受性が強いために、その実用化に際して非常に数多くの研究と努力がなされてきた。現状では一応問題なく使われているものの、熱処理などで故意に強度を下げる場合もあり、材料的には決して十分に完成されたものとはいえない。このシンポジウムでは Al-

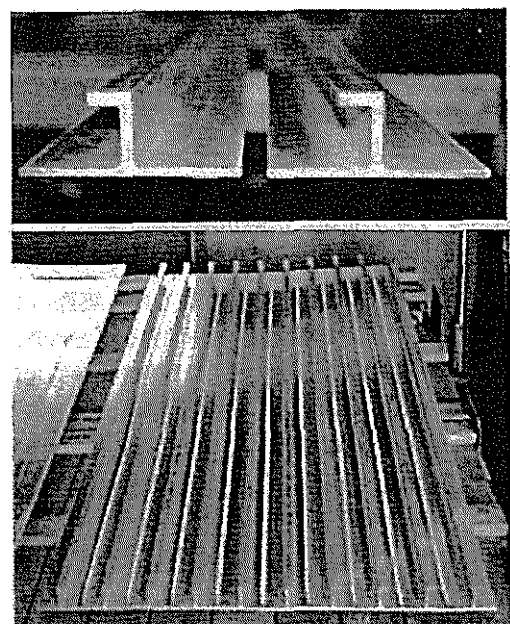
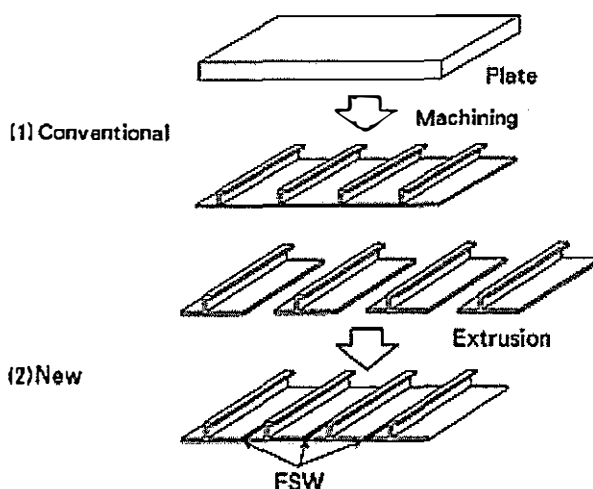


Fig. 46 Large integral wing panel made by friction stir welding^{117, 131)}

Zn-Mg 系合金の応力腐食割れに関する現象と機構を多面的に検討して、今後の新しい合金材料開発の指針をつくるのがねらいであった」とあり、シンポジウム最後に村上博士が全体の問題点を総括している。この報告書のむすびで、馬場博士は「応力腐食割れに影響する因子としては、合金組成、微量添加元素、鑄塊の健全性、均質化処理、鍛錬加工法、焼入れ速度、時効熱処理、結晶組織と方向性、粒界構造、無析出帯、粒内析出相の整合と非整合性などきわめて多い。さらに単一の因子が影響するのか、多数の因子の複合効果が大きいのか、とくにこれらに対して定性的でなくより定量的な議論ができることが望ましい。今後さらに深く検討されることを期待したい」と結んでいる。

1981年に、村上教授が「軽金属」に「アルミニウム合金の応力腐食割れ」のレビューを執筆している¹⁴⁴⁾。この中で、「アルミニウム合金は合金の強度が高くなるほど、SCCの感受性が著しくなるので工業的にも極めて重要視され、基礎的にも実用的にも多くの研究が行われ、実用合金ではSCC防止の効果的な対策が判明しているので、正しい状態で使用する限りでは、大きい問題を起こすことはない」と述べ、むしろSCCのメカニズムに関して陽極溶解機構説と水素脆化機構説の大きな対立があることを明らかにした。ここで従来からいわれてきた陽極溶解説について、村上博士は次のようにまとめている。「一般に、SCCは不動態皮膜などの保護皮膜の形成されやすい合金に起こり、局部腐食が重要な因子と考えられている。不動態皮膜が形成される場合に、機械的な引張応力は表面保護皮膜を破壊する作用を与え、その下から露出した金属は適当な電気化学的条件下で陽極として作用し、そこに優先的な溶解が起こり、クラックの形成が起こる。低温時効ではGPゾーンで強化されているような場合には、GPゾーンは転位によって剪断されやすいので転位は平面的な配列をして表面に大きいすべりのステップを生じ保護皮膜を局部的に破壊する。引張り応力が引き続いて作用すると皮膜の修復作用が起こってもすぐにまた破壊されるので、常に露出状態を生じ、優先的な腐食反応が促進されて破壊が起こる」という説である。「クラック先端に溶解が集中的に起こり、割れの伝播が電気化学的な溶解によって起こるという考え方であるが、このような腐食作用だけでは、実際のSCCの際のクラックの速い伝播速度を説明することに無理があった」ので、これを補足するために機械化学的陽極モデルも提唱されている。連続的な応力集中による塑性変形が直接的に陽極溶解を助ける、すなわち、局部的な塑性変形が局部的な溶解を加速して、溶解が急速に進行するというモデルである。

2008年のセミナーのテキスト⁸⁵⁾では、村上教授は「Al-Zn-Mg系合金のSCCの機構に関する初期の研究では、陽極溶解説が主流であった。時効熱処理によって粒

界にPFZが生じる。PFZは強化に寄与する析出粒子がなくて弱いので応力集中が起こり、メカノケミカルな優先的陽極溶解が起こり、クラックが形成され、その成長・伝播で割れに至るといものである。したがって、PFZの幅、粒界および粒内析出粒子の種類と分布などの因子が考えられていた。1963年頃、ドイツVAWのW. Gruhlが水素脆性説を提唱し始めると、この説が支持を挙げ、現在では陽極溶解説に替わって水素脆性説が一般に受け入れられている」と水素脆性説が有力になっていることを述べている。この水素脆性説を裏付けるものとして、「あらかじめ、湿度の高い雰囲気中で均一化熱処理を行うと、SCCを生じるが、真空処理をしたり、室温で長時間放置すると、耐SCC性が回復すること、この過程が可逆的であること、変形の様式ではモードIがモードIIIよりも著しいSCCを生じること、水素添加によってSCCが生じること、SCC破壊面で析出物の溶解による破壊がみられないことなどによって、Al-Zn-Mg系およびAl-Mg系のSCC中のクラックの進展は陽極溶解によるのではなく、水素脆性によるものと考えられている」。

この水素がSCCとどのように関わっているかそのメカニズムについてまだ不十分であるが、村上教授によるとオージェ電子分光法を用いて粒界での溶質原子の偏析について測定することにより、MgとZnは粒界に偏析し、Znの大部分はMgZn₂析出相を形成するが、かなりのMg原子は原子状態で存在することなどが明らかになっている。この原子状Mgと、MgのHに対する大きな親和力によって、Mg-H相互作用が生じることや「表面酸化膜は粗大粒子の近傍でH₂Oの侵入を許す。Cl⁻があればさらに容易になる。酸化膜が破れ、マイクロクラックが形成されると、H₂Oによって粒界領域に溶解が起こり、クラックの先端のpHは~3.5程度であるので、H⁺+e⁻→Hが生成し粒界に吸着する。MgはHを粒界に引留める役目をし、三軸応力場ではHはクラック先端に濃縮して、クラックを進展させ水素脆性を引き起こす。もし粒界に粗大な粒子が存在していると、Hを再結合させH₂ガスとして放出する」といったメカニズムが現在のところ考えられているとのことである。

小職は日本金属学会会報に馬場博士と連名で「アルミニウム合金の粒界破壊」と題して、アルミニウム合金の粒界破壊に及ぼす要因とその防止法についてまとめた¹⁴⁵⁾。その中で、最後に「合金系によっては水素が粒界でトラップされ金属原子と結合するために、結晶粒界での塑性変形能を失ったり、あるいは結合エネルギーの低下となって、応力腐食割れの原因ともなっている」と書き、アルミニウム中の水素の役割を「塑性変形を担っている金属結合あるいは他の結合も含めた化学結合の観点にまで遡ることが必要であろう」と述べた。この視点は現在でも変わっていない。

最近、水素を直接観察しようとする流れは強まっている。1990年頃、東京大学生産技術研究所の齊藤秀雄博士と(故)石田洋一教授は薄膜電顕試料を用いて電解チャージによりトリチウムを導入して、加熱中の放出特性や試料表面にオートラジオグラフィ用の写真入膜剤を塗布し、トリチウムから放出された β^- 線が照射された塗膜中の臭化銀と反応し、現像処理で銀粒子となり、この現像銀粒子を電子顕微鏡で観察する手法を確立した¹⁴⁶⁾。この手法を用いて鉄や鋼、Al-Li合金などの水素の存在状態を検出した。同じく東京大学の岡田浩博士(現日本軽金属)、伊藤吾朗博士(現茨城大学教授)、菅野幹宏教授らの研究グループは同じくトリチウムオートラジオグラフィを用いて水素の挙動を調べようとしたが、電解(陰極)チャージ法ではチャージ後室温大気中に数日間放置し、応力腐食割れ性に関与する可能性の高い拡散性のトリチウムを試料外に放出させた後に露出を行なう必要があるため、応力腐食割れと直接関係する結果は得られにくいと考え、溶湯とトリチウム水蒸気との反応によって直接トリチウムを添加する溶湯反応法を考案した¹⁴⁷⁾。これによって casting で混入する水素の影響がわかる。Al-3%Li合金を溶湯反応法でトリチウムを導入し通常の圧延、焼入れ、時効処理を行なった試料をオートラジオグラフィで観察すると、粒界に析出した δ 相の界面付近に水素が存在することがわかった。茨城大の伊原智章氏、泉孝裕氏、伊藤吾朗教授は、オートラジオグラフィはトリチウムの取り扱いが危険で特殊な設備を有したところでしか実験ができないため、水素マイクロプリント法を用い水素の存在状態を把握しようとした。水素マイクロプリント法は写真用乳剤を試料の片面に被覆することで、材料中から放出される原子状水素を可視化する手法である。材料中から放出される水素は臭化銀を還元して金属銀となる。この銀粒子をSEMで観察することで水素の存在位置を知ることができる^{148,149)}。この手法で、片面に乳化剤を被覆し、もう一方の片面から水素ガス圧0.2MPaで30分負荷し、7075, 7475合金の水素透過能を調査した¹⁵⁰⁾。この結果、水素透過量は、再結晶組織のほうが未再結晶組織よりも多く、T6材のほうがT7材よりも多く、また不純物量が増すと多くなることを明らかにした。水素の放出サイトはAl₇Cu₂Feのような晶出物であった。このことは侵入サイトも同じ晶出物と

推定された。なお亜結晶粒を構成する転位や析出相と母相の界面のミスフィット転位は水素のトラップサイトとして働くと考えられた。

このような水素透過性は堀川敬太郎准教授らによって高圧水素貯蔵用アルミニウム合金として7000系合金が適正かどうか¹⁵¹⁾、また大崎修平教授らによって水素脆化特性すなわち応力腐食割れ感受性との関連で議論されている¹⁵²⁾。大崎教授らの議論で興味深いことは低ひずみ速度法試験で、7003-T6合金のほうが7N01-T6合金よりも水素脆化感受性が高いという結果になったことである。ここでいう水素感受性指数というのは、乾燥窒素ガス(25°C)雰囲気での引張試験での伸び(X_0)から相対湿度90%の湿潤空気(30°C)での引張試験での伸び(X)を引いた数値を X_0 で割った値($I = (X_0 - X) / X_0$)をいう。この原因として、7N01合金にはMn系分散物が平均粒径82nmとなり大きく、また7003系合金に比べ面積率で2倍以上存在していたことを挙げている。これらの化合物が水素バブルの核発生サイトとしても十分なサイズであり、水素のトラップ、再結合サイトとしてこれらが粒内に水素を停留させる寄与を果たしたものと推定している。表面に露出した第二相粒子は水素の優先的な侵入サイトである可能性が高いばかりでなく、同時にその母相界面は水素再結合サイトにもなると考えている。7N01合金の高い水素脆性の割れ抵抗は表面における水素侵入および粒内での水素トラップあるいは再結合による水素輸送がそれぞれ抑制されることで粒界割れの進行が遅れたためと結論付けている。

九州大学(2013年3月まで豊橋技術科学大学)の戸田裕之教授のグループは精力的にSpring-8での放射光を用いX線トモグラフィの手法で3D, 4D観察を行って、Fig. 47に示すようにポアの発生、成長を可視化している^{153,154)}。ポアの大半は固溶限を超えた大量の水素が様々な水素トラップサイトに集積し分子状水素となり形成されたものである。これらのポアは鑄塊の熱処理、加工で成長、合体、消滅と変化するもので、こうした水素マイクロポアの制御が今後重要となってくる。また元豊田工業大学の上田一之教授は電子励起イオン脱離法を応用して走査型水素検出顕微鏡を開発し¹⁵⁵⁾た。その結果、空間分解能500nmで水素の二次元分布を可視化できるようになった。教授によると、今後、バルク試料の結晶

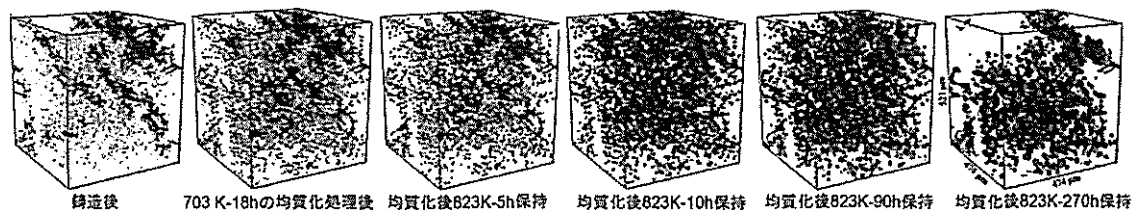


Fig. 47 Growth, coagulation and annihilation of hydrogen micro-pores during heat treatment of Al-5%Mg Cast Material¹⁵³⁾

粒界での水素の状態分析や可視化も可能になるとのことである。

以上の最近の研究で、水素の可視化やその存在状態が明らかになりつつある。これらの結果は従来からの応力腐食割れの原因解明につながっているかどうかが問題である。五十嵐博士は、クロム添加で割れ寿命が長くなったのは、クロム添加で局部腐食から全面腐食に変わったからと考えた。戦後はクロム添加で結晶粒界が亜結晶粒界となったために割れにくくなったと考えられた。では同じように亜結晶粒界を形成する微量添加元素 Mn, Cr, Zr に関して、その違いはあるのかどうか、あるとすれば何が効いているのか、クロム添加では Al-Zn-Mg 系は Al-Zn-Mg-Cu 系よりも応力腐食割れに敏感だといわれているがそれはなぜか、また微量 Cu 添加すると肉厚方向の耐応力腐食割れ性はなぜ向上するのか、まだまだ疑問が多い。負荷応力をかけると一定時間後に割れが生じるので、その時間は何に支配されているのか、化学反応との関連で議論を進める必要がある。また水素との関係では、水素ミクロポアと応力腐食割れの関係はどうか、また内在した水素と環境から侵入した水素の区別はつくのか、内在した水素は応力腐食割れには関係しないのか、さらに粒内あるいは粒界を拡散する水素は水素イオンなのか原子状水素であるのかどうか、Mg-H 結合が生じた場合、どの程度の結合力か、どの程度上述の結合が生成したら粒界の結合力は弱くなるのか、化学結合論的な検討が必要である。応力腐食割れは材料を高強度化しようとするとき必ず直面する課題であるが、これを完全に防止することは出来ていない。未だ実用的に問題とならない範囲で用いているだけである。化学反応、化学結合の面からの解明が急がれる。こうした現状を踏まえ、軽金属学会研究委員会では「アルミニウム合金中の水素」部会を立ち上げた。総合的な検討を加え、その水素の制御法が明らかになれば材料開発も新たな発展を向かえるであろう。

5. おわりに

本稿を執筆した直接の動機は、既に述べたが、ICAA 国際会議で ESD について世界ではあまり知られていなくて、これは我々の PR が足りないのではないかと思ったことである。もちろん先輩諸氏がいろんなところで書かれたものはあるがまとまったものが少ないのが現状かと思う。小職としては以前から自分の研究の位置づけをするためにも、何らかのアルミニウム合金の発展史が必要だと思い、古くから神田の古本屋街でアルミニウムに関する古書を漁っていたことも背景にあった。さらに竹内勝治博士がすでにこの住友の「技術の歩み」²⁾や「アルミニウム合金展伸材—その誕生からの半世紀—」¹⁾をまとめられており、これを材料屋の観点からまとめてみたいとの思いもあった。この思いは永田公二博士が「超々

ジュラルミンに対していつから始めたのか、ESD のネーミングの経緯は、応力腐食割れはどのようにして解決できたのか」ということを解明するために図書館の奥深く入って調査され、軽金属に「わが国アルミニウム産業の明るい未来を拓くために—温故知新 back to the Future—」⁷⁾を発表されて、その思いは一層強くなった。先輩方の熱き思いを引き継いで後輩たちに伝えるためにも、ESD 開発とその後の歴史をまとめることは航空機材料の開発に携わった小職の使命だと考え、「超々ジュラルミンと零戦」というタイトルで、アルミニウムの歴史および住友軽金属の歴史を書いてきた。ただ戦後の住友軽金属の発展は建材、缶材、熱交換器材、自動車材に支えられていてこれらの発展の歴史も書かねば片手落ちのそしりも免れないが、ご容赦願いたい。また材料開発にはそれが実現するためには製造技術の発展がないとできない。製造技術の発展では、竹内勝治博士の著書がなければ本稿はとてどもまとめることはできなかった。それとともに、大いに参考になったのが京都大学西村秀雄教授の「軽金属研究雑話」と称する軽金属研究に関する膨大な随想録は教授の考え方が反映され、その時代の学問の雰囲気を感じることができ、今でも十分通用できる生きた教科書である。この DNA は村上陽太郎教授の著書「新素材・新技術」(I~V)の中にも引き継がれている。

このアルトピアに連載中に二つの大きな出来事に遭遇した。一つは、住友軽金属と古河スカイとの経営統合であり、二つ目は馬場義雄博士の逝去であった。一つ目の古河スカイとの統合は、いずれどこかの統合は予想されたが意外と早く訪れた。小職は直接経営に携わっていないのでどの時点から統合の話になったかは詳らかではない。古河スカイとはほぼ同じ分野で競合していただけに競っていた担当者には複雑な思いがあったようである。しかし日本でのアルミの歴史から見ると戦前は航空機分野でジュラルミン、超ジュラルミン、超々ジュラルミンを同様に製造し、戦後も分野は違うが同じユーザーで競っていたので、実際やっていることは蓋を開けてみればほぼ同じであることはほぼ推測できる。お客が同じであれば同じ要求に応えるために同じように必死になることは当然である。今後は世界にでて外国勢と戦うことが必要になるので、小職にとって同じことを研究・製造している両社の統合は当然の成り行きだと考えている。お互いの文化の違いを乗り越えてお互いの強みを活かして 1+1 が 3 以上になるよう発展していくことを期待するものである。本稿は自分にとっても節目であったが、会社にとっても節目にあたり、住友軽金属の名前がなくなる直前でその歴史をまとめることができたことは偶然とはいえ感慨深いものがある。二つ目は馬場博士の 77 歳での惜しまれる逝去である。この原稿に最初に眼を通していただいたのが馬場博士である。小職にとって直接の上司でもあったが、何よりも五十嵐博士の材料開発を継いだのが戦後は馬場博士との思いが小職にはあるからで

ある。博士は戦後の住友軽金属の材料開発のほとんどを手がけたといえよう。馬場博士からの感想は一言五十嵐博士をあまり神格化するなよと言われたように記憶している。いつもながらクールな馬場博士の言葉である。馬場博士には昨年小職からは是非若い研究者に開発初期の苦労話をお願いしますと申しあげたところ、久々に住友軽金属から配当がでたのでお礼に講演をしようということになった。博士が退社して10年振りの講演である。過去のエピソードを交えた貴重な講演であったが、最後に、締めくくりとして開発に成功するためにはということで、第一に、(最近のTPPを振られたのか,) 新製品開発の基本はTP³であり、TP³とは①Timely, ②Professional, ③Production Process and Price (Cost), ④Patent (Key Technology) が重要と考えている。第二に、Seeds 研究は成功するのは難しく、10~20年要する。Needs 研究の方が効率がよい。第三に、やるからにはTopを狙うことであって欲しい。第四に、最低一回は成功体験が必要である。しかし、成功体験は捨てることが重要である。第五に、努力なくして将来なし。最後に、開発をしっかりとやって、中国に真似のできないようなものを作ってほしいと述べられた。これが奇しくも最後のメッセージ、遺言となった。我々は、馬場博士の遺言を肝に銘じながら、グローバルで戦う準備をしていく必要があろう。

最後に受け継ぐべき住友のDNAは何であるのか、材料屋の立場から考えてみる。我々はいつもユーザーの「無理難題に答える」ことで材料開発をおこなってきたことである。戦前は海軍の要求に応えることでESDを開発してきた。戦後は缶、印刷板、熱交換器、自動車、二輪車、鉄道などのユーザーの要求に応えることで、ユーザーの信頼を勝ち取り、生き残ってきたと言えよう。このことは住友だけとは思えないが、むしろ難題に応えられるだけの研究力や技術力を日頃から培っていることが重要であろう。研究力は優れた観察力とそれを理解する能力であろう。ものを見るというのはある程度予測する能力がないと見えるものも見えてこない。折角の宝物もゴミにしか見えない。大学出たての新人が大学で習ってきた理屈で現象を説明しようとするが、それでできるほど現象は単純ではない。五十嵐博士の言葉を借りるのなら、「自社の歴史、人、技術等の一切を体得することが第一。4~5年はかかる。学校の講義だけでは駄目」で、やはり実際に生じている現象を良く観察して、「どうしてだ、どうしてこうなるのかなと繰り返し、徹底的に突っ込んで」そこから理論を組み立てて行く能力が求められる。「理論も実験も日に日に進んでこそ工業も発展する。未熟な理論を絶対だと考えてもらっては困る」。「思った結果と矛盾した事実が示されたときのみ進歩があり、発展がある」と考え、現象と合わない理論にいつまでも拘泥する必要はない。見えているものだけで説明しようとしなくても重要で、見えないものを見る能力が必要で

ある。機器分析が発展してきて、いずれ見えてくることを想定してそれに耐えられる考え方が重要である。技術力においても、日頃研究者は生産現場と接触していると、自分たちの製造できる技術の枠の中でしかものを考えなくなる。日本にある圧延技術はほとんどアルコアやアルカンから習得したものである。同じ技術であれば基本的に同じものしか出来ないであろう。過去の研究や鉄鋼などの製造技術も学びそれらの技術も取り込みながら、従来と違った発想で製造することを考えることも重要である。材料屋は何がしたいのかしっかりとメッセージをだせば製造現場も協力してくれるはずである。「決められたことを忠実に実行して、ものにするのが、現場の使命です。難しい事も毎日やっている、上達するものです」という先人の言葉に励まされる。技術も難しい材料をやればやるほど創意工夫が必要である。その点、航空機材料は最も難しい材料の一つで、高性能で高品質が要求される。逆に航空機材料を製造していますということはユーザーの高い信頼を勝ち取ることに繋がる。原理を追求して最短のコースで製造する技術を確立していくことは商品化していく上でとても重要である。どんなにいい材料でも商品化できなければ企業の研究としては成功したとはいえないであろう。先人のいい所を学び、そのDNAを引き継いで新材料・新製品を開発し、世界の企業として飛躍してくれることを期待したい。

参 考 文 献

- 1) 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.
- 2) 竹内勝治：技術の歩み, 住友軽金属工業株式会社, 1995. (非売品)
- 3) 住友軽金属年表 (平成元年版), 住友軽金属工業株式会社, 1989年.
- 4) 牧野光雄：飛行船の歴史と技術, 成山堂書店, (2010).
- 5) 秋本 実：日本飛行船物語, 光人社, (2007).
- 6) <http://www.ne.jp/asahi/airplane/museum/nakajima/nakajima.html>
- 7) 松田 孜, 東尾伸吉, 田村正郎：研究報告, 住友伸銅鋼管株式会社, 1 (1932), 1.
- 8) W. Sander : Z. Metallkunde, 19 (1927), 21.
- 9) A. von Zeerleder : *The Technology of Aluminium and Its Light Alloys*, Nordemann Publishing Company, Amsterdam, (1936), 26.
- 10) G. Eger : Inten. Z. Metallg., 4 (1913), 29.
- 11) 西村秀雄：随筆・軽合金史 (其 14), 軽金属時代, No.185 (1949), 9.
- 12) W. Sander and K. L. Meissner : Z. Metallkunde, 15 (1923), 180., 16 (1924), 12.
- 13) 西村秀雄：随筆・軽合金史 (其 15), 同上, No.186 (1950), 2.
- 14) 西村秀雄：随筆・軽合金史 (其 25), 同上, No.196 (1950), 2.
- 15) 松田 孜：超「ジュラルミン」の研究 (第一報), 研究報告 (社内), デュラルミン, No.1576.

- 16) 五十嵐 勇：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，研究報告（社内），デュラルミン，No.2167.
- 17) 五十嵐 勇：航空機用材としての軽合金の研究（学位論文），（1939），37.
- 18) 山本正雄：Duralumin 製造の憶ひ出，軽金属時代，198（1951），5.
- 19) 平林 眞編：本多光太郎—マテリアルサイエンスの先駆者—，本多記念会監修，アグネ技術センター，（2004），11.
- 20) 五十嵐 勇：研究室の片隅から，軽金属，5（1952），29.
- 21) 松田 孜：米国製“24SRT”板 試験成績（第1報），研究報告（社内），デュラルミン，No.2381
- 22) 田邊友次郎：住友金属工業・研究報告，第2巻第2号（1934）p.147.
- 23) M. B. W. Graham and B. H. Pruitt： *R&D for Industry, A Century of Technical Innovation at Alcoa* , Cambridge, (1990), 183
- 24) 田邊友次郎：日本金属学会誌，1（1937），107.
- 25) 五十嵐 勇：超高力軽合金の探求（No.1），社内研究報告書，No.3326，（1935）.
- 26) 西村秀雄：随筆・軽合金史（其 29），軽金属時代，No.200(1951)，10.
- 27) 深井誠吉：北原五郎氏の逝去を悼む，住友軽金属・社内報，No.144，11月（1971），9.
- 28) 軽金属工業発達史（其の一），航空機用軽金属材料について，第一回軽金属座談会記録，軽金属，6（1953），103.
- 29) 柳田邦男：零式戦闘機，（文春文庫），文芸春秋社，（1980），288.
- 30) 五十嵐 勇，北原五郎：新強力軽合金の研究（其 1），鉄と鋼，23(1937)，447.，住友金属・研究報告，第2巻，第9号（1937），883.
- 31) 五十嵐，北原：E. S. D. 新合金ノ「割レ」ニ就テ（第一報），社内研究報告書，デュラルミン，No.3939，（1936）.
- 32) 五十嵐 勇，北原五郎：高力 Al 合金の時期割れと其防止に就て，日本金属学会誌，3（1939），66.，住友金属研究報告，第3巻，第6号（1939），531.
- 33) 五十嵐 勇：日本金属学会誌，6（1942），316.
- 34) 特許第135036号，鍛錬用強力軽合金，五十嵐 勇，北原五郎，昭和15年2月28日.
- 35) 幸田成康：時刻硬化研究の歩み，合金の析出（幸田成康監修），丸善，（1973），42.，金属学への招待，アグネ技術センター，（1998），135.
- 36) 小山克己：高強度・耐熱性アルミニウム合金，Furukawa-Sky Review，6（2010），7.
- 37) 五十嵐 勇，北原五郎：新強力軽合金の研究（其の4），住友金属・研究報告，第3巻，第1号（1938），1.
- 38) 五十嵐 勇，北原五郎：新強力軽合金の研究（其の5），同上，第3巻，第3号（1938），232.
- 39) 五十嵐 勇，北原五郎：新強力軽合金の研究（其の6）軽合金RR77に就て，同上，第3巻，第3号（1938），247.
- 40) 五十嵐 勇，北原五郎：新強力軽合金の研究（其の2）超々ジュラルミン“ESD”及其ノクラッド材“ESDC”ニ就テ，同上，第3巻，第5号（1938），455.
- 41) 田邊友次郎：軽合金雑筆—追想と見透—，軽金属時代，186（1950），5.
- 42) 吉田英雄：五十嵐博士の生家を訪ねて，軽金属
- 43) 五十嵐 勇：耐食性アルミニウム合金，軽金属及軽合金最近の進歩，工業図書株式会社，（1937），182.
- 44) 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，（2012）.
- 45) 堀越二郎，奥宮正武：零戦（文庫版），朝日ソノラマ，（1982），学研M文庫（2013）.
- 46) 吉村 昭：零式戦闘機（新潮文庫），新潮社，（1978）.
- 47) 零戦のしくみ，新屋出版社，（2011）
- 48) 堀越二郎：零戦の遺産（光人社NF文庫），光人社，（1995）.
- 49) おちあい熊一：零戦激闘伝説 謎101，学研パブリッシング，（2009）.
- 50) 特集，汎太平洋平和博覧会，ニュースレター，Vol.62（2004），財団法人名古屋都市センター，
http://www.nui.or.jp/news_letter/16/pdf/vol62-1.pdf，他に http://underzero.net/html/tz/tz_213_1.htm，
<http://network2010.org/article/147>参照.
- 51) 北島正和：ベルリンからの手紙，第二次世界大戦，大空襲下の一技術者，中央公論事業出版，（2005）.
- 52) 畑 栄一：ESDと割れ，本誌，29（1988），91.
- 53) 飯島嘉明：超々ジュラルミンと五十嵐勇，金属，76（2006），1132.
- 54) US Patent 2,240,940. Aluminum Alloy, J. A. Nock, Jr., ALCOA, Application Sept. 28, 1940. Patented May 6, 1941.
- 55) J. T. Staley：History of Wrought-Aluminum-Alloy Development, *Aluminum Alloys-Contemporary Research and Applications*, Edited by A. K. Vasudevann and R. D. Doherty, Treatise on Materials Science and Technology, Vol.31, Academic Press, Inc., (1989), 3.
- 56) E. H. Dix, Jr.：Aluminum Alloys-1940 to 1950, Metal Progress, (1950), 484.
- 57) M. B. W. Graham： *R&D for Industry, A Century of Technical Innovation at Alcoa*, Cambridge University Press, (1990), 263.
- 58) J. A. Nock, Jr.：75S-Alcoa's New High-Strength Aluminum Alloy, *Metals and Alloys*, (1944), 922.
- 59) J. A. Nock, Jr.：Commercial Wrought Aluminum Alloys, *Physical Metallurgy of Aluminum Alloys*, ASM, (1949), 167.
- 60) 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.
- 61) E. A. Starke, Jr.：Precipitation Hardening：From Alfred Wilm to the Present, *Aluminium Alloys, Their Physical and Mechanical Properties*, (ICAA11 in Aachen) Vol. 1 Edited by J. Hirsch, B. S. Skrotzki and G. Gottstein, DGM, Wiley-VCH, (2008), 3.
- 62) T. Sato：Innovative Development of Aluminium Research and Technologies in Japan, Proceedings of the 12th International Conference on Aluminium Alloys, Edited by S. Kumai and etc. The Japan Institute of Light Metals, (2010), 1.
- 63) H. Yoshida：Alloy Development for Transportation in Sumitomo Light Metal, Proceedings of the 12th International Conference on Aluminium Alloys, Edited by S. Kumai and etc. *ibid.*, (2010), 54.
- 64) 西村秀雄：随筆・軽合金史（第34，35，38回），軽金属時代，No.205(1951)，6.，No.206（1951），2.，No.209(1951)，

- 11.
- 65) 五十嵐 勇, 深井誠吉: (対談)研究の今昔とそのありかた, 住友軽金属(社内報), 68 (1965).
- 66) 寺井士郎: ジュラルミンとESD開発における創造性, 本誌, 29 (1988), 93.
- 67) 佐藤史郎: 最近, 想うこと…「セレンディピティについて」, アルミニウム 11 (2004), 38.
- 68) 深井誠吉: ESDについての思い出, 本誌, 29 (1988), 87.
- 69) 吉田英雄: 超々ジュラルミンの発明者, 五十嵐 勇博士の生家を訪ねて, 軽金属, 62 (2012), 502.
- 70) 五十嵐 勇: 住友軽金属技報第15周年を迎えて, 本誌, 16 (1975), 1.
- 71) 五十嵐 勇: アルミニウム技術入門, 鉄鋼新聞社, (1969)
- 72) 深井誠吉: 名誉員五十嵐勇先生の御近況, 日本金属学会誌, (1963年), 149.
- 73) 高島 章: 零戦あれこれ, 軽金属, 60 (2010), 475.
- 74) 永田周二: わが国アルミニウム産業の明るい未来を拓くためにー温故知新, Back to the Futureー, 軽金属, 60 (2010), 192.
- 75) 五十嵐 勇年譜, 非売品, (1987).
- 76) 佐藤眞住, 藤井清隆: 現在の産業, アルミニウム産業, 東洋経済新報社, (1968), 27.
- 77) 林 章: 東京駅はこうして誕生した (ウェッジ選書 24), ウェッジ, (2007), 249.
- 78) JR 東日本パンフレット, 東京駅丸の内駅舎保存, 復元～いま, 甦る赤レンガ駅舎～, (2007).
- 79) 五十嵐 勇: 庄延材の関所, 鋳物の奔流, 軽金属時代, 160 (1947), 7.
- 80) 西村秀雄: 我が軽金属工業並に学界の進むべき道, 同上, 160 (1947), 4.
- 81) 西村秀雄: 随筆・軽合金史 (第40回), 同上, No.211 (1952), 3.
- 82) 小岩昌宏: 金属学ブロムナード, アグネ技術センター, (2004), 127.
- 83) 村上陽太郎: 新素材・新技術 ～第V集～, 大阪科学技術センター付属ニューマテリアルセンター, (2012).
- 84) 村上陽太郎: ー金属科学者の回想ー, 平成21年度東海水曜会講演会, (2010).
- 85) 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, (2008),
- 86) 河野 修: 析出に伴う結晶構造変化, 合金の析出, 幸田成康編, 1972, 55.
- 87) 村上陽太郎: 金属学とその研究手法の進歩ー研究生活を顧みて (II), 水曜会誌, 23 (2004), 600.
- 88) 西村秀雄: 統軽合金史 (第10回), 軽金属時代, No.231 (1953), 10.
- 89) 西村秀雄: 統軽合金史 (第11回), 同上, No.232 (1953), 2.
- 90) 鈴木秀次: 転位論発展の歴史と将来の展望, 日本金属学会会報, 23 (1984), 445.
- 91) 吉田英雄: 球状黒鉛鋳鉄ー基礎・理論・応用ー, 張博, 明智清明, 堀健三共編, アグネ, (1983), 24.
- 92) 本居徹也, 福岡 潔, 吉田英雄: 軽金属, 48 (1998), 624.
- 93) 村上陽太郎: アルミニウム合金および銅合金の時効過程, 合金の時効過程とその解釈, 日本金属学会, 1968, 74.
- 94) 村上陽太郎: 最近の非鉄合金の時効析出における問題, その1, アルミニウム合金, 合金の析出, 幸田成康編, 1972, 403.
- 95) 高井美樹, 足立俊輔, 上原敏彦, 正木克明, 氏家隆之: 名古屋製造所の近代化, その1, 新製造設備の紹介, 本誌, 34 (1993), 253.
- 96) 上野順一郎, 藤本隆行, 杉江明士, 星野郁弥, 橋爪雅紀, 今西由幸, 岡村義英: 名古屋製造所の近代化, その2, 熱間圧延ラインの紹介, 同上, 36 (1995), 53.
- 97) 疋田達也, 佐野秀男, 毛利英一, 安保満夫: 名古屋製造所の近代化, その3, 押出製品の製造設備紹介, 同上, 36 (1995), 60.
- 98) 原 純: アルミニウム合金製鉄道車両の動向, アルミニウム, 11巻, 25号 (2004), 23.
- 99) 吉田英雄: 輸送機器向け展伸用アルミニウム合金の開発の歩み, 本誌, 46 (2005), 99.
- 100) 小林藤次郎: アルミニウムおよびその合金の加工技術, アルミニウムおよびその合金のアルゴン・アーク溶接 (1), 同上, 1 (1960), 129.
- 101) 寺井士郎, 馬場義雄: 溶接構造用 Al-Zn-Mg 系合金について, 同上, 10 (1969), 42.
- 102) 馬場義雄: Al-Zn-Mg 合金の焼入感受性および析出物の核形成に対する添加元素の影響, 同上, 9 (1968), 24. Y. Baba: Tran. JIM., 7 (1966), 224.
- 103) 寺井士郎, 竹内勝治, 田中英司, 馬場義雄, 中村 授: 溶接構造用アルミニウム合金 ZK41 の機械的性質について, 同上, 8 (1967), 52.
- 104) 馬場義雄: アルミニウム技術開発の回顧と展望, 同上, 41 (2000), 91.
- 105) 馬場義雄: 企業における研究開発: 私の体験より, アルミニウム, 7巻, 35号 (2000), 80.
- 106) 馬場義雄, 高島 章: クロムを含む Al-Zn-Mg および Al-Zn-Mg-Cu 合金の時効特性と応力腐食割れにおよぼす鋳塊均質化熱処理の影響, 本誌, 15 (1974), 287.
- 107) 吉田英雄, 馬場義雄: Al-Zn-Mg および Al-Zn-Mg-Cu 合金の強度と応力腐食抵抗の改善に及ぼすジルコニウムの役割, 同上, 22 (1981), 42.
- 108) 寺井士郎, 杉山禎彦, 馬場義雄, 福井利安: 構造用 Al-Zn-Mg 合金 ZQ50 の溶接性について, 同上, 7 (1966), 197.
- 109) 馬場義雄, 高島 章: 微量の銅を含む溶接構造用 Al-Zn-Mg 系合金の応力腐食割れと機械的性質, 同上, 17 (1976), 28.
- 110) 吉田英雄, 福井利安, 馬場義雄: すみ肉溶接された実用 Al-Zn-Mg 系合金厚板端面の応力腐食割れに関する研究, 同上, 19 (1978), 95.
- 111) Technical Data Sheet, 構造用 Al-Zn-Mg 合金 ZK141 の諸性質, 同上, 17 (1976), 165.
- 112) 馬場義雄: 住友軽金属技報発刊初期「1960年代」の思い出, 同上, 51 (2010), 185.
- 113) 馬場義雄, 福井利安, 高島 章: マグネシウムの少ない Al-Zn-Mg 系合金の実用化, 同上, 15 (1974), 117.
- 114) 馬場義雄, 吉田英雄: 押出性にすぐれた Al-Zn-Mg 系三元合金, 同上, 18 (1977), 68.
- 115) Technical Data Sheet, 構造用 Al-Zn-Mg 合金 ZK60 の諸性質, 同上, 10 (1969), 49.
- 116) 伊藤泰永, 難波圭三: ろう付けハニカムパネルの開発とその応用, 同上, 39 (1998), 130.
- 117) 熊谷正樹: FSW の実用化と展望, 同上, 52 (2011), 107.
- 118) 吉田英雄, 毛利英一, 平野清一, 箕田 正, 日比野壮美, 岡島賢三, 伊藤日出国, 塚本鎮正: オートパイフフロントフォーク用高力アルミニウム合金管の開発と実用化, 同上, 37

- (1996), 185., 軽金属, 46 (1996), 89.
- 119) T. Uno, H. Yoshida and Y. Baba : Aluminum Alloys; Their Physical and Mechanical Properties, Vol. 1. ed. by E. A. Stark, Jr. and T. H. Sanders, Jr., EMAS, 371.
- 120) 馬場義雄 : 航空機用アルミニウム合金の進歩, 本誌, 29 (1988), 29.
- 121) 馬場義雄 : 最近のアルミニウム展伸材の用途と特性, 同上, 31 (1990), 65.
- 122) 新製品紹介, 航空機ストリンガー用微細結晶粒 7075 合金板 : 同上, 23 (1982), 120.
- 123) 日本航空宇宙工業会 : 革新航空機技術開発に関する研究調査, 高塑性アルミニウム合金の開発の研究, 神戸製鋼所, 住友軽金属工業, 古河アルミニウム工業, 成果報告書 No.506 (1981), No.603 (1982), No.702 (1983).
- 124) 日本航空宇宙工業会, 革新航空機技術開発センター : 革新航空機技術開発に関する研究調査, 超塑性高力アルミニウム合金の開発および一体化加工法の研究, 住友軽金属工業, 三菱重工業, No.802 (1984), No.901 (1985), No.6001 (1986).
- 125) 日本航空宇宙工業会 : 航空機部品・素材産業振興に関する研究調査, Al-Li 合金の超塑性材料開発, 超塑性加工法の研究, 三菱重工業, 住友軽金属工業, 成果報告書, No. 105 (1987), No.205 (1988), No.307 (1989).
- 126) H. Yoshida, M. Kumagai and Shin-ichi Matsuda : Superplasticity of Aluminum Alloys, Sumitomo Light Metal Technical Reports, 31 (1990), 203.
- 127) 日本航空宇宙工業会 : 航空機部品・素材産業振興に関する調査研究, 高強度高成形 6000 系新合金の研究, 住友軽金属工業, 川崎重工業, 成果報告書, No.806 (1994), No.904 (1995).
- 128) 日本航空宇宙工業会 : 航空機部品・素材産業振興に関する調査研究, 新 6000 系合金の航空機用鍛造/押出材の開発, 住友軽金属工業, 川崎重工業, 成果報告書, No.1004 (1996), No.1102 (1997).
- 129) 日本航空宇宙工業会 : 環境調和型航空機技術に関する調査研究 (CD 版), 複雑形状の押出可能な高強度合金 2013 の一次構造体への適用研究, 住友軽金属工業, 川崎重工業, 成果報告書, No.1615 (2005), No.1705 (2006).
- 130) 日本航空宇宙工業会 : 環境調和型航空機技術に関する調査研究 (CD 版), 高成形合金 2013 板材の開発及び低コスト構造への適用研究, 住友軽金属工業, 川崎重工業, 成果報告書, No.1914 (2008), No.2006 (2009).
- 131) 日本航空宇宙工業会 : 先端航空機部品・素材技術に関する調査研究, 摩擦接合を用いたアルミ合金製大型押出部材の航空機への適用化研究, 三菱重工業, 住友軽金属工業, 成果報告書, No.1405 (1999), No.1502 (2000).
- 132) 吉田英雄 : 高強度アルミニウム合金の加工熱処理法とその応用, 本誌, 36 (1995), 37.
- 133) 吉田英雄, 内田秀俊 : 最近の航空機用アルミニウム合金の開発動向, 同上, 34 (1993), 87.
- 134) 新製品紹介, 高強度アルミニウム合金 ZC88, 同上, 40 (1999), 168.
- 135) 宇野照生, 平野清一 : 航空機用アルミニウム合金の研究 その 1, アルミニウム-リチウム合金, 同上, 29 (1988), 47.
- 136) 平野清一, 吉田英雄, 宇野照生 : Al-Li-(Zr, Cr) 合金の焼入れ感受性, 同上, 30 (1989), 59.
- 137) 田中宏樹, 吉田英雄, 土田 信 : Al-Li 合金の超塑性に及ぼす熱間加工条件の影響, 同上, 30 (1989), 169.
- 138) 航空機国際共同開発促進基金 (IADF) : 解説概要 17-5-7 「航空機に於けるアルミリチウム合金の開発動向」 (2005).
- 139) 小関好和, 岩村信吾, 上向賢一, 山田悦子 : 高成形合金 2013 板材の開発および低コスト構造への適用研究, 本誌, 51 (2010), 61.
- 140) H. Sano, S. Tani, T. Minoda, T. Iwakami and Y. Yoshino : Properties of Hollow Extrusion of High Strength Al-Mg-Si-Cu Alloy for Aircraft, Sumitomo Light Metal Technical Reports., 39 (1998), 31.
- 141) 熊谷正樹 : 航空宇宙分野への FSW の適用, 本誌, 44 (2003), 142.
- 142) 馬場義雄 : Al-Zn-Mg 系合金の応力腐食割れ, 軽金属, 24 (1974), 227.
- 143) 馬場義雄, 高島 章 : Al-Zn-Mg 系合金の応力腐食割れ, 本誌, 16 (1975), 60.
- 144) 村上陽太郎 : アルミニウム合金の応力腐食割れ, 軽金属, 31 (1981), 748.
- 145) 馬場義雄, 吉田英雄 : アルミニウム合金の粒界破壊, 日本金属学会会報, 22 (1983), 115., 本誌, 24 (1983), 141.
- 146) 材料工学領域における最新オートラジオグラフィの解析とその応用, 齊藤秀雄編集, うらべ書房, (2008) .
- 147) 岡田 浩, 伊藤吾朗, 菅野幹宏 : トリチウムオートラジオグラフィによる水素の微視的解析, 軽金属, 42 (1992), 112.
- 148) 伊原智章, 伊藤吾朗 : 水素マイクロプリント法による Al-Mg 系合金中の水素の挙動解析, 同上, 53 (2003), 575.
- 149) 泉 孝裕, 伊藤吾朗 : 水素マイクロプリント法による高強度 Al-Mg 系合金中の環境水素の挙動解, 同上, 56 (2006), 478.
- 150) 伊藤吾朗, 泉 孝裕, 遠山拓史 : 7075 系アルミニウム合金における水素挙動に及ぼすマイクロ組織の影響, 同上, 58 (2008), 15.
- 151) 堀川敬太郎 : 高圧水素貯蔵用アルミニウム合金の研究動向, 同上, 60 (2010), 542.
- 152) 大崎修平, 前田悦宏, 森田 到, 中井 学, 藪田 均 : 高湿度空気中における中強度 7000 系アルミニウム合金の水素脆化特性, 同上, 60 (2010), 19.
- 153) 戸田裕之, 小林正和, 鈴木芳生, 竹内晃久, 上杉健太郎 : 3D・4D マテリアルサイエンス : その現状と展望, 非破壊検査, 58 (2009), 433.
- 154) H. Toda, K. Minami, K. Koyama, K. Ichitani, M. Kobayashi, K. Uesugi and Y. Suzuki : Healing behavior of preexisting hydrogen micropores in aluminum alloys during plastic deformation, Acta Materialia, 57 (2009), 4391.
- 155) 上田一之 : 走査型水素検出顕微鏡による水素の 2 次元分布, 金属, 72 (2002), 628. 電子励起を応用した水素顕微鏡, 顕微鏡, 40 (2005), 105.