

軽金属溶接誌に観る溶接・接合構造体（～1970年前後）

The Representative Aluminum Welded Structures through the Journal of Light Metal Welding up to around 1970

軽金属溶接誌創刊の頃、つまり1963年（昭和38年）頃にはイナートガスアーク溶接が既に適用され始めてはいたが、まだまだガス溶接に関する記事が散見される。このガス溶接は1910年代の明治末期頃に海外から導入された溶接技術であるが、ティグ・ミグ溶接が後に海外から導入されるまでは溶接方法のメインとなっていた。戦前・戦中の航空機用のジュラルミン系材料にはリベット接合や抵抗スポット溶接が適用されたが、燃料タンク・潤滑タンク・飲料水タンクをはじめ、日用品（やかんの口金溶接、水筒など）などにはこのガス溶接が多用されていた。通常は酸素-アセチレン混合ガスが用いられるが、それは火炎温度が高く、且つ激しい酸化から激しい還元まで広領域の火炎条件がえられる特徴を持っているからである。アルミニウムの場合は、中性炎の範囲を利用し溶接中はこれを維持しなければならない。酸素の過剰は酸化物の形成を増加させ、他方、還元炎すなわち燃料ガス過剰の場合には多孔質な溶接部を生じがちと報告されている。ところで、酸化膜を除去するためにはフラックスの塗布が必須であり、溶接されるアルミニウム合金組成にしたがってその種類が決定される。このフラックスの種類の大半は、吸湿性を有していることから、密封容器中に貯めておき溶接直前に溶剤に混ぜて塗布し、余ったフラックス入り塗布液は廃棄したという。ナトリウム弗化物など特定のフラックスは非吸湿性を有してはいたが、酸化膜除去能力が低く、特別な場合を除き用いられなかった。溶接後のフラックス残渣は、金属を

腐食するので完全に除去する必要がある。従って、このガス溶接法を一般の構造物に適用しようとする、フラックス残渣除去のための洗浄の問題（方法やコストなど）が生じ、大きな構造物への適用は容易ではなかったのである。

ティグ・ミグ溶接法が日本に導入されたのは1951（昭和26年）～1952年（昭和27年）頃である。フラックスを使うことなく、つまり溶接後のフラックス残渣の洗浄をすることなく溶接ができることは画期的なことであった。この溶接法の海外における開発から完成までには10数年用しており、それは不活性ガスの純度が低かったことやワイヤの送給性不安定の問題などがあったようである。終戦後間もなくの朝鮮戦争特需の航空機用軽合金燃料タンクの米国からの注文に際しては、抵抗スポット溶接とアルゴンアーク溶接がその図面に記載されていたが、抵抗スポット溶接機は被災工場から探し当てたものの、後者のアルゴンアーク溶接機は見当がつかず、ガス溶接法にて施工が承認されたようである。

1945年（昭和20年）の終戦により消費材的航空機のアルミニウム需要が皆無となり、従来の日用品以外の新しい需要分野の市場開拓を進めるために、軽金属協会内に先ずは1949年（昭和24年）に船舶用軽金属委員会、そして1951年（昭和26年）に車両用軽金属委員会などが相次いで発足した。既報のとおり、すべての構造物に共通する要素技術である溶接・接合技術の開発が一般構造物への適用開拓のポイントになるとして、本協会の設立に繋がってい

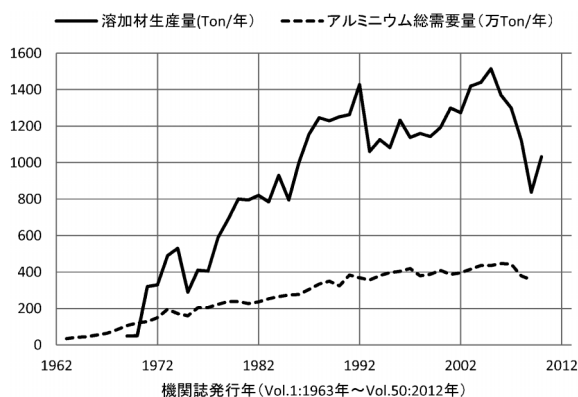


Fig. 1 溶加材生産量ならびにアルミニウム総需要量の推移



Fig. 2 やかん本体への水切り口のガス溶接

くのである。軽金属溶接技術会が設立される1962年（昭和37年）前後のことになるが、「あらかぜ」「山陽電鉄2000系車両」そして「金慶橋」について、その後の発行となった軽金属溶接誌に紹介されることが多く、またこれら構造物がその後の需要開拓の発展に大きく貢献したと考えられることから、これら溶接構造物を中心に、そしてそれに端を発してのその分野での発展ぶりを、いわば需要開拓揺籃期にあたる1970年（昭和45年）頃までの構造物の代表例を以下に紹介する。

アルミニウムの平和的用途に対する取組に対して、海外で進んでいた船舶への利用を図るべくそれまで海外で適用されてきた5052, 5056, 6061の材料研究を1949年（昭和24年）にスタートした。5052, 6061では溶接の継手強度が低い、また5056では熱間加工性や耐応力腐食割れ性に問題があるとの認識から新規の材料開発に取り組むこととなった。その結果、1950年（昭和25年）12月に、世界に先駆けてAl-4.0% Mg-0.5% Mn-0.2% CrというAN系合金（防衛庁規格艦船用アルミニウム合金）の試作に成功し、翌年英国から発表されたNP5/6に比較して、結果的にはMgの上限値を抑えたものであると同時に、Si, Feの上限も抑制し、Mn, Crは同様に有効適量に添加することによって耐食性・耐応力腐食割れ性・溶接性により優れた特性をもつ材料の開発に至ったのである。1963年（昭和38年）には、耐食アルミニウム合金A2X7（当時の規格としては、A1：純アルミニウム、A2：耐食アルミニウム合金、A3：高力アルミニウム合金、A4：耐熱アルミニウム合金の4種類であった）としてJISに登録され、さらに1970年（昭和45年）のJIS規格の大幅な改訂においては5083として登録されるに至り、種々構造物の基盤材料となる画期的な成果を築いたのである。

その後、既述の通りティグ溶接、ミグ溶接が海外から導入されたことを契機に、この新たな耐食合金の溶接性が研究され、ガス溶接の場合に比較して継手強度の低下が少ないなどのメリットが確認され、1953年（昭和28年）には耐食アルミニウム合金系のAN系材料が、従来の5052, 5056に代わって、我が国初の15 m長の全アルミニウム合金製巡視艇「あらかぜ」に採用することが決定されたのである。元々は木造構造船の予定であったが、将来のための各種データを採取したい、アルミニウム化の一步を踏み出したいなど関係者の念願かなっての実現である。実は高速艇の構造設計の基礎となる外力の基準は、それまでの木造高速艇では、巧みな操船技術や損傷部のつぎはぎの繰り返しによりしのいできたことから明確になっていなかったのである。それが、「あらかぜ」の波浪中航走試験により研究の第一歩を踏み出した結果、高速艇の受ける外力及びそれに対応する構造部材の応力に関する試験方法の見通しが得られるようになり、各種データ採取により高速艇構造設計の基準としての第一次基準案がまとまったのである。

一方、工作法についても課題が初めて明確になり、溶接

ひずみ軽減・工数削減などのためにはミグ溶接機の導入が必須であること、ポロシティ対策には溶加材の表面清浄性向上が必須であること、加熱時に素材特性を害さないためには電気式表面温度計の活用が有効であることやX線検査の信頼性を高めるためにはペネトレータの開発が必須であることなどがわかり、工作基準としてまとめられ、その後多いに役立つことになる。

ウエブフレームを1 m間隔で置く肋骨構造で、縦肋骨はZ形材。ウエブフレームの取付と隔壁構造にはティグ溶接を採用し、縦肋骨の外板取付けならびに各ブロックの組付けにはリベットが用いられた。溶接変形、すみ肉溶接部のクレータ割れなど多くの作業管理の課題を克服して1954年（昭和29年）に竣工したのである。この成功を基に、1958年（昭和33年）まで各種魚雷艇、高速救命艇など6隻を建造することとなったが、基本的には鋼製構造を基本とした、全アルミニウム合金高速艇建造の第一期にあたる。

その後、鋼製のままのZ形材では、交差するウエブフレーム貫通口の切り開け部が大きくなり、アルミニウムにとっては剛性上不利になるので、その切り開け形状を小さくするための形材形状（特殊球山形）に工夫を加えるなどアルミニウム合金独自の構造方式の開発が始まった。さらには、高速航走中に最も高い応力を受け持つ船底外板と縦肋骨材とのすみ肉溶接部の欠陥回避対策として、1969年（昭和44年）の魚雷艇（形式：PT11, 速度：40ノット）には広幅（120 mm程度）形材を用いることで、突合せ溶接により健全な溶接部を得るだけでなく、スチフナ間の肉厚を曲げ荷重分布に対応してその断面形状を変化させることを可能とし、より合理的な構造として重量軽減に寄与した。

一方、税関、港湾建設事務所などの20ノット級の交通艇などにも全溶接構造のアルミニウム船がこの時期に、中小の各造船所にて建造されたが、欠陥対策のために骨を補強するなどしたために品質的には安定したものの、重量的には過剰になるという傾向があったとも聞く。また、1969年（昭和44年）頃には、アルミニウム合金製漁船が初めて建造され、速度が速く、耐久性もよいと好評を得たようである。

ところで、竣工後27年を経過した1981年（昭和56年）に廃船となった「あらかぜ」は解体調査されているが、材料特性や耐食性などには全く問題なしと報告されている。塗装技術も大きく寄与し、その後の船舶のアルミニウム化の発展に結び付いていくのである。このように、「あらかぜ」竣工は、造船界を刺激し船舶への利用の基盤を確立したと言っても過言ではない。また、適用された材料や溶接施工は、その後の船舶のみならず、後述の鉄道車両・橋梁分野にも、大きな貢献を果たした。

鉄道車両に軽合金が用いられたのは、満鉄向けのガソリン輸送車の外板にジュラルミンが適用された1930年頃の



Fig. 3 15 m 長の巡視艇あらかぜ



Fig. 4 漁船“第15協栄丸”

昭和初期と記録されている。そして終戦後間もなく用途を失った多量の超ジュラルミンが国鉄の二等客車の外板に使われ、1951年（昭和26年）に起きた桜木町事件（走行中の火災）を契機に材料の不燃化が高まり、逐次内装部材のアルミニウム化が進んだ。そして車体の台車周りは別に、強度メンバーにアルミニウムが全面的に採用されたのは、1960年（昭和35年）の40トン積みアルミナ運搬貨車が最初である。そしてさらに客車電車としての登場は、本協会設立年1962年（昭和37年）の山陽電鉄の2000系車両となる。ラッシュアワーでの酷使・煩雑な踏切事故などの短期耐久性や、高湿度な海洋性気候における長期耐久性など検討課題を持ちながらのスタートであり、同時にステンレス車両も比較用として製造し、3年後にその両車両を比較検証している。保守上特に問題となる欠点もなく、重量比軽減（10～15％）に見合うランニングコスト節約率もほぼ同程度と推定できたとのこと。そしてさらに、初期製造時のコストアップに対しては、軽量化によるランニングコスト低減効果が大きくなる用途車輛へのアルミニウム適用がポイントになると結論付けされた。適用された材料は、あらかぜに用いられた5083と、6061であり、台枠・側・妻・屋根をティグ溶接・ミグ溶接で製作し、総組立はリベットに組み立てられた。

2年後の1964年（昭和39年）には、山陽電鉄3000系車両が、5083, 7N01を主材料として、もはやリベットは用いられることなく、ミグ溶接にて組み立てられた。

ところで7N01を代表例とする溶接構造用三元合金は、

世界的には1958年（昭和33年）に西ドイツやスイスで実際に使用され、そのことが紹介された1961年（昭和36年）頃からは日本でも精力的に研究開発がなされた。溶接熱によっても容易に溶体化されて、且つその冷却時にも過飽和固溶体が維持され、さらにその後の常温時効性にも優れていることを満足し、そして耐応力腐食割れ性にも優れることなどを目標に鋭意研究開発された材料であり、2000系車両に使用された6061に代わって適用が開始されたのである。

経済の高度成長時代を象徴する、人口の都市集中化による通勤地獄とまで揶揄された東京では、その解決策の一つとして、銀色・空気ばねという国鉄通勤輸送用電車のニューフェイス「オールアルミニウム電車」が、中央線（荻窪～中野間）から営団地下鉄東西線（中野～大手町間）に乗り入れ、ラッシュ緩和が図られた。1966年（昭和41年）のことであり、国鉄の地下鉄乗り入れ型通勤車両301系がそれで、台枠7N01、構体骨組み5083、外板5083、屋根・床5005は、その後に第1世代と称される基本構造となった。鋼製車両より5トンも軽いので、スピードが出しやすくブレーキもよくきき、また空気ばねにより揺れが少なく、騒音も少ない、そして電力費がかからないのが特徴であるとされた。この国鉄301系車両と同時期に、営団地下鉄もほぼ同じ構造の5000系車両を1966（昭和41年）～1967年（昭和42年）にかけて数編成投入した。これらの車両は、ミグ溶接が広汎に使われ始めた顕著な例であり、ミグ溶接機の改良、大容量の三相式抵抗スポット溶接の出現ならびにアーク溶接を前提とした溶接構造用7N01合金を初めて大量に実用したという点でも重要な事例である。さて、営団地下鉄では、その後も試験運転を実施しながら、次期新線となる千代田線に対して、6000系車両を1970年（昭和45年）に大量投入（124両）することになるのである。

一方、大阪市交通局も1970年（昭和45年）の日本万国博覧会（大阪）に向けての輸送力増強のために、1968年（昭和43年）～1970年（昭和45年）にアルミニウム製車両を大量に投入し、北大阪急行分も合わせて250両の車両が活躍することになる。また、1972年（昭和47年）開催の札幌冬季オリンピックの輸送の大役を果たしたのも札幌交通局のアルミニウム車両（案内軌条式ゴムタイヤ電車）である。

このようにして、1972年（昭和47年）にはアルミニウム車両は累計で650両を突破する勢いで、特にその約85％は1968年（昭和43年）からの5年間であり、車両の軽量化に基づく車両性能向上や経済性向上などのニーズが強く、それに応えていった材料技術・溶接技術の開発が功を奏し、その地位を確固たるものにしていった。

一方、橋梁土木分野においても新たな取組があった。1961年（昭和36年）に、兵庫県芦有道路の道路橋に溶接によるアルミニウム主桁とコンクリート床版の合成桁橋

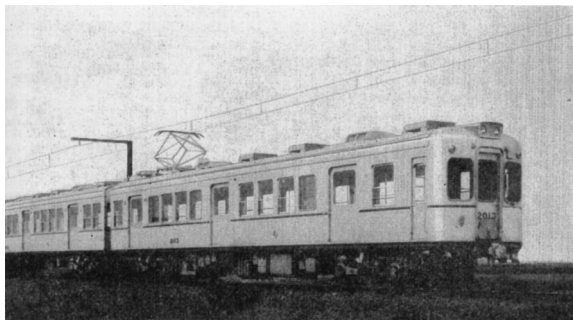


Fig. 5 山陽電鉄2000系車両

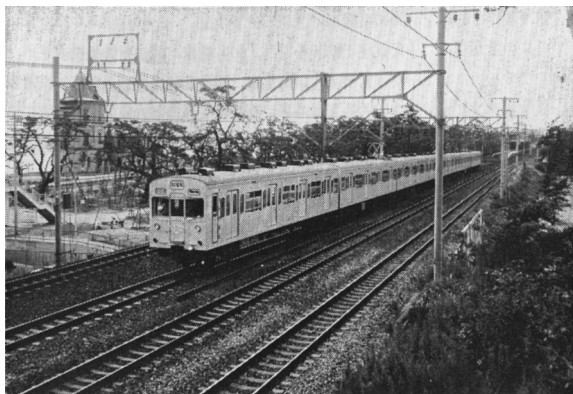


Fig. 6 国鉄の地下鉄乗入通勤301系車両



Fig. 7 帝都高速度交通営団千代田線6000系車両



Fig. 8 札幌交通局案内軌条式ゴムタイヤ電車

“金慶橋”が建造された。橋長20.6 m、幅員8.16～7.12 mで、両端が対岸の橋台上に固定されている。コンクリート床版の上にはアルミ製高欄が取り付けられている。主桁にはあらかじめ適用された耐食アルミニウム合金7種 A2P7（後の5083）が用いられた。20トントラックの活荷重を考慮した一等橋である。この程度の橋長・幅員では通常3本の主桁で済ますところであるが、はじめての試みであったことから、剛性を慎重に考慮して主桁には4本が用いられた。主桁そのものは、工場にて予め溶接（仮付け以外は全てミグ溶接）にて組み立てられ、4本の主桁の一体組立はリベットにて行われた。使用されたアルミの総重量は約7トンである。建造36年後の1977年（平成9年）にその腐食状況などが調査されているが、沢に架かる橋として高湿度の使用環境においてメンテナンスフリー状態でも良好な耐食性を有することが確認でき、初期投資コストを吸収できるのではと論じられている。

1967年（昭和42年）には、甲州街道の大月橋の歩道拡幅工事に当たり、その床版、高欄にアルミニウムが採用された。大月橋は幹線道路でありながら車道（208.23 m）だけだったために、急激に増えた交通量から歩行者の安全を図るために、幅1.5 mの歩道部が追加敷設された。敷設の歩道部の重量が全面的に従来の橋に架かるので、軽量性が必須。また、交通事情により架設作業の短時間化が要求されたことも、アルミニウム材適用の大きな理由の一つである。アルミニウムの総使用量は約11トンである。

ところで、アルミニウム接合の大きな一角を占めるろう付に目を転じてみることにする。実験的に行われたのは、1930年代後半の米国においてであるが、強固な酸化膜で覆われていることからその濡れ性不良のために困難視された。その後、酸化膜を破壊する塩化系フラックスの開発とAl-Si系ろう材との組合せが米国にて見出されてから大きな発展を遂げた。航空機のエンジン部品の一つであるオイルクーラーをディップろう付（浸漬ろう付法）にて製造したのが工業化の始まりであり、1944年（昭和19年）頃のことである。終戦後、日本にこの製品が輸入され、アルミ

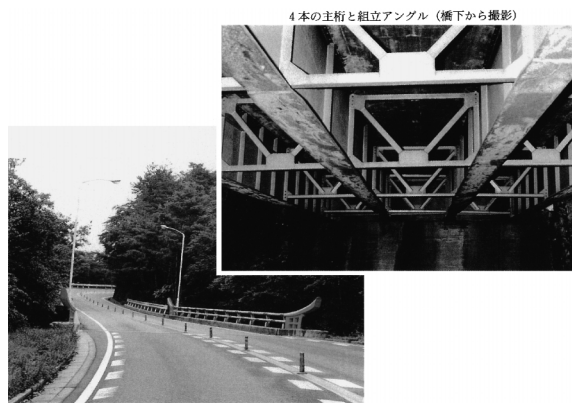


Fig. 9 金慶橋（建造後37年経過調査時の撮影）



Fig. 10 アルミニウム床版を用いた大月橋拡幅歩道

ニウムのろう付が注目されることとなり、国内では1950年代にその試作の完成をみている。イナートガスアーク溶接の幕開けとほぼ時期が重なる。

さて、この塩化系フラックスは、潮解性があり、且つ腐食性が強いために、ろう付後の除去処理が不可欠である。そして、ディップろう付の場合には、炉や治具類をも腐食させる問題もある。ディップろう付は、溶融したフラックス浴中（約600℃）でろう付するために高精度の温度分布が容易に得られやすく、確実な酸化膜破壊とプロセス中での再酸化抑制に効果がありメリット大であるが、多量のフ

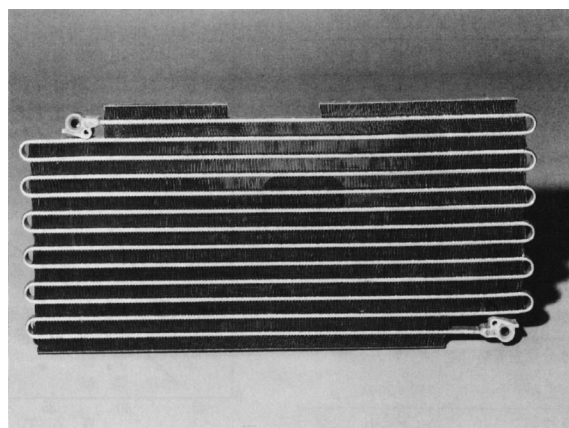


Fig. 11 炉中ろう付によるカークーラー用コンデンサ

ラックスの常時溶融の必要性と前述のろう付後のフラックス除去の高コストの問題などから炉中ろう付へと移行していくこととなる。

適用ターゲットは、自動車のラジエータ・ヒーターコアであり、銅からアルミニウムへの代替であり、当時の銅材料は価格が不安定であったために、価格が安定していたアルミニウムに目が向けられたのであるが、フラックス使用によるろう付工程の複雑さや、製品使用時における冷却水による孔食の課題が残ったので、結局実用化されたのは、カークーラー用熱交換器であるコンデンサが最初であり、エバポレータ、そして空冷用のオイルクーラー、インタークーラであった。炉中ろう付法は、フラックス溶液（50～70%）を接合部に塗布した後、空気炉中で加熱することにより接合する方法であり、炉を連続にすることで大量生産が可能になり、1960年代後半（昭和40年頃）にはクーラー用コンデンサが多量に生産された。

（事務局 笹部誠二）