

# ステンレス車体の溶接技術史

## －抵抗スポット溶接の技術導入から世界初のレーザー溶接車体の開発まで－

History of Technology in Stainless Steel Car Body  
- From Technology Introduction of Resistance Spot Welding to Development of the World's First Laser Welding Car Body -

大塚 陽介 Yosuke OTSUKA  
及川 昌志 Masashi OIKAWA  
側垣 正 Tadashi SOBAGAKI  
大河原克美 Katsumi OGAWARA  
木村 億尋 Okuhiro KIMURA

鉄道車両構体は、設計技術、材料技術、加工技術によって成立し、加工技術の一つが溶接加工技術である。金属材料の溶接プロセスのメカニズムは未解明な部分がありつつも、実用技術は革新と同時に産業応用が進んでいる。当社は溶接技術の中でも抵抗スポット溶接技術とレーザー加工技術を革新し、鉄道車両の製造に採用してきた。今後も溶接技術の革新を進め、お客様の要求を満たす鉄道車両の実現に寄与する。本論文では、ステンレス鋼製鉄道車両製造の中核技術である抵抗スポット溶接技術と、レーザー溶接技術の歴史的変遷を述べる。

Railway car body structure consists of design technology, material technology, processing technology, and one of processing techniques is welding processing technology. Although the mechanism of the welding process of materials is still unknown, practical technology is progressing industrial application at the same time as innovation. We have developed resistance spot welding technology and laser welding technology and have adopted it for manufacturing railway car body shell. We will continue to innovate welding technology and contribute to the realization of railway car body shell that meet customer's requirements. In this paper, we describe the historical transition of resistance spot welding technology and laser welding technology, which is the core technology of stainless steel railway car body shell manufacturing.

### 1 はじめに

当社の前身である東急車輛製造（以下、東急車輛）は、日本におけるステンレス車両の開発、製造をリードしてきた。

鉄道車両構体は、設計技術、材料技術、加工技術によって成立し、加工技術の一つが溶接加工技術である。当社は溶接技術の中でも抵抗スポット溶接技術の開発をステンレス車両製造技術導入時の1958年より進めてきた。また、1996年よりレーザー溶接技術の車両構体製造への適用を検討し、レーザー加工技術を革新してきた。そして世界初のレーザー溶接を採用したJR東日本ACトレインを実現した。

本論文では、ステンレス鋼製鉄道車両製造の中核技術である抵抗スポット溶接技術と、レーザー溶接技術の歴史的変遷を述べる。

### 2 ステンレス車両と抵抗スポット溶接

#### 2.1 抵抗スポット溶接の原理と歴史

抵抗スポット溶接は、2枚以上の板を重ねて、それらを電極で挟んで加圧し、大電流を流して抵抗発熱によって材料を溶かして接合するものである。抵抗発熱の原理は1856年にイギリスの物理学者ジュールによって発見さ

れた。その原理を応用した抵抗スポット溶接は、1888年にドイツ人の技術者によって初めて特許化され、その約10年後に銅電極を用いる現在の方式が確立されている<sup>(1)</sup>。

抵抗スポット溶接は薄板の接合に適している。また、溶接電流、通電時間などのパラメータは、予めタイマと呼ばれる制御機に入力して、実際の溶接はボタンが押されると自動で行われる。そのため、ロボットと組合せた自動化が容易であり、自動車のボディの組立では、依然として主流な溶接方法である。

#### 2.2 日本初のステンレス車両

当社の前身である東急車輛は、日本におけるステンレス車両の開発、製造をリードしてきた。

日本初のステンレス車両は、1958年に製造した東急電鉄5200系である。この車両は、東急電鉄5000系をベースとして、外板にステンレス鋼を使用したもので、セミステンレス車両と呼ばれる。外板は抵抗スポット溶接で骨組みと結合され、板の座屈と歪を防止する目的で側と妻の外板には波形に加工した板を使用している<sup>(2)</sup>。しかしながら、台枠や構体の骨組は普通鋼を使用しており、これらもステンレス鋼としたオールステンレス車両の製造にあたり、アメリカのBUDD社と技術提携を行った。

### 2. 3 BUDD社との技術提携

オールステンレス車両の製造にあたっては、素材の加工やそれらを組立てるための溶接方法がポイントとなってくる。それらの内容についてBUDD社の技術者による講義が行われていたようで、その内容を記したノートのコピー(図1)が接合技術センターの書庫に残されている。年度に関する記述はないが、1ページ目の日付が2月29日(月)となっており、1960年のものと考えられる。日本語の文章に英単語が入り混じった手書きの資料で、当時の状況がわかる貴重なものである。

抵抗スポット溶接についても、その原理を含めた講義が行われている。この資料では「ショット溶接 (shot weld)」という単語が用いられているが、これは通常の抵抗スポット溶接機に溶接電流と通電時間を監視するレコーダを搭載したものを呼んでいて、BUDD社の商標名であった。1点ごとの溶接において、溶接電流と通電時間が正しく流れたかどうかをチェックしている。メモ書きによれば、「レコーダは電流と時間が正しく流れたかをチェックするもので、溶接が完全に行われたことを保障するものではなく、完全な溶接を行うためには作業者による正しい管理が必要」と書かれている。この考え方は、溶接条件選定試験や日常管理試験といった現在でも行われている抵抗スポット溶接の品質管理における基本

である。また、溶接条件選定方法や各種試験方法についても、細かく記載されているが、そのやり方は今も変わっておらず、現在の技術の基礎がここにあることがよくわかる資料である。

### 2. 4 日本初のオールステンレス車両

BUDD社の技術提携の下で、1962年に日本初のオールステンレス車両の東急電鉄(旧)7000系を製造した。

ステンレス鋼は、普通鋼と比べて線膨張係数が大きい。そのため、溶接による入熱での変形が大きくなる。ステンレス車両では、その耐食性の高さを生かして無塗装で使用されるため、熱による変形は外観を損ねることになってしまう。そのため、点接合で入熱を抑えられる抵抗スポット溶接を多用して、車体を組立てている。ステンレス鋼は普通鋼よりも固有抵抗が大きい。そのため、発熱しやすい。また、熱伝導率は小さいので熱が溜まりやすい性質があり、抵抗スポット溶接を適用しやすい材料といえる。

#### 2. 4. 1 抵抗スポット溶接の作業標準

2. 3項の技術提携をうけて、オールステンレス車両を製造するにあたって、東急車輛社内の作業標準が作成されている。この時の標準書も接合技術センターの書庫に残されている。

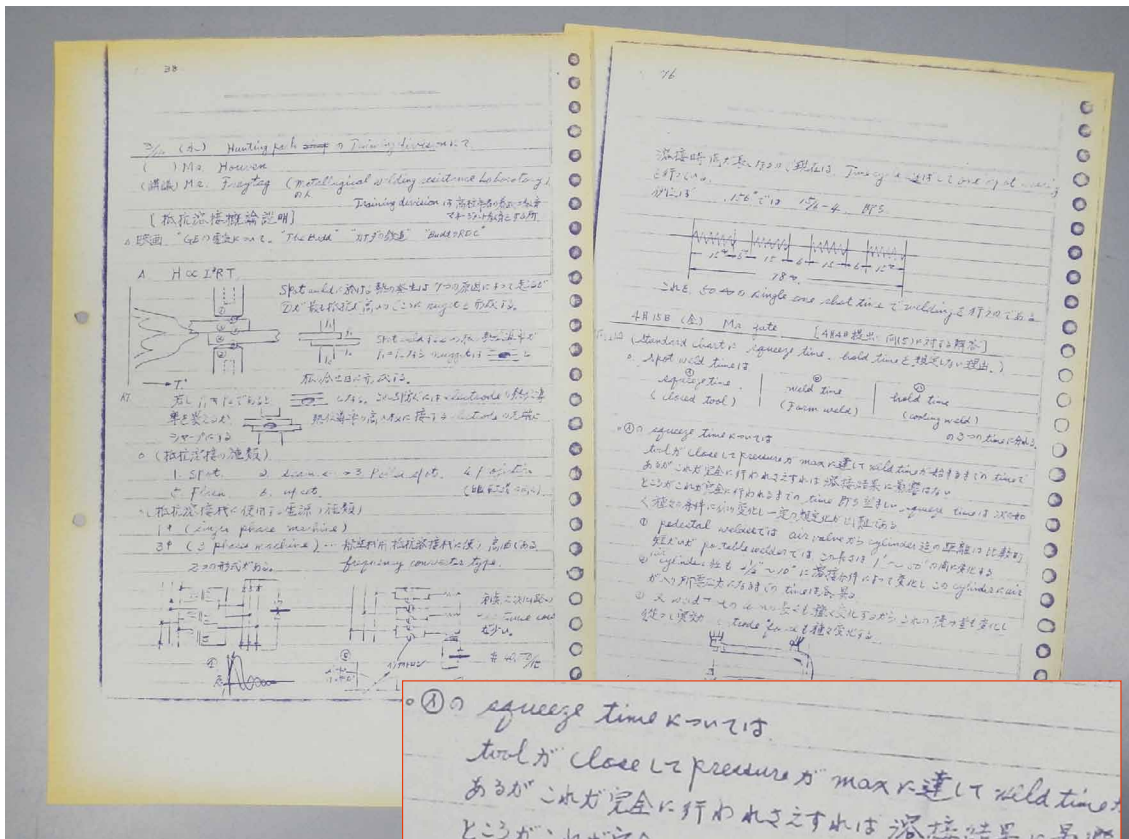


図1 BUDD社による抵抗スポット溶接の講義のメモ書きの一部



「<sup>ふしろうこう</sup>不銹鋼点溶接作業標準」というタイトルで、1961年4月に登録されている(図2)。「不銹鋼」はステンレス鋼、「点溶接」は抵抗スポット溶接を意味している。文章の構成やそれぞれの内容と、現在当社の社内で運用している「ステンレス鋼スポット溶接作業規準」と比べても、大きくは変わっていないことがわかる。溶接条件選定試験では断面試験を実施するが、ナゲットの板に対する溶込み率や内部欠陥の許容率の数值はまったく変わっておらず、書かれている図も含め、この当時の技術が現在に継承されていることがわかる(図3)。

## 2. 4. 2 当時の製造方法

これらの作業標準等をもとに、東急電鉄(旧)7000系

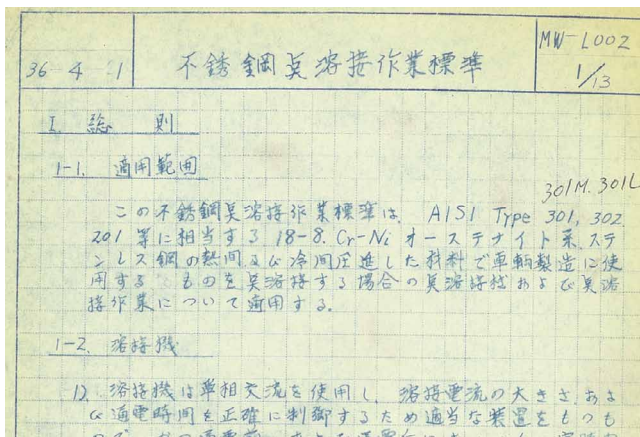


図2 不銹鋼点溶接作業標準

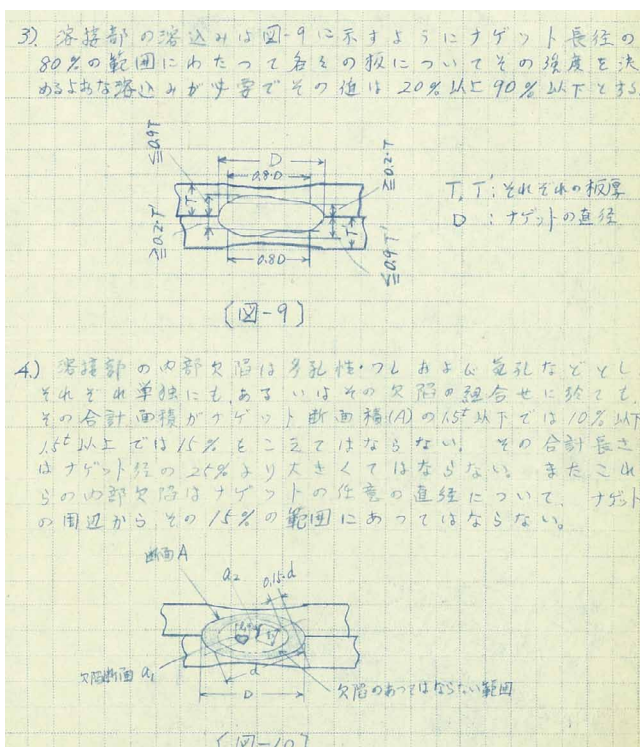


図3 断面試験に関する記述

を製造したわけであるが、当時の実際の製造状況を記録した映像資料「ステンレスカー」がある。東急車輛が宣伝用として自主的に制作した映像で、普通鋼製の車両と比べた様々なメリットなどが紹介されている。

構体製造の現場映像を見ると、抵抗スポット溶接は、ポータブルスポット溶接機を用いて、手作業で位置決めをして溶接をしている(図4~図6)。溶接の打点数も多く、作業には相当な時間がかかっていたものと思われる。屋根板のシーム溶接の風景も撮影されているが、こちらは材料の形状も含め、そのやり方は現在とあまり変わっていない(図7)。

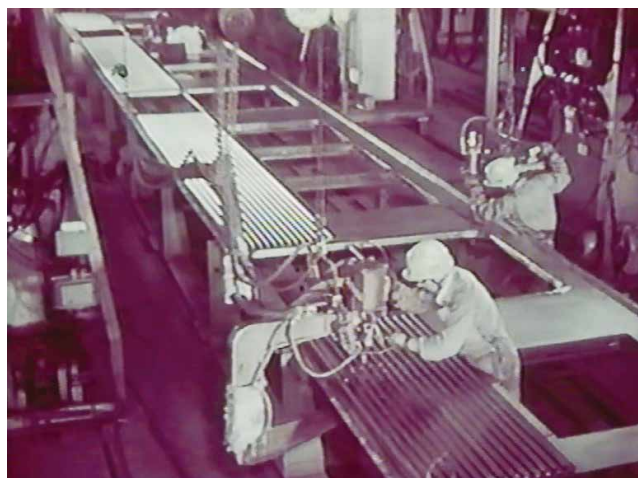


図4 側構体の抵抗スポット溶接<sup>(3)</sup>

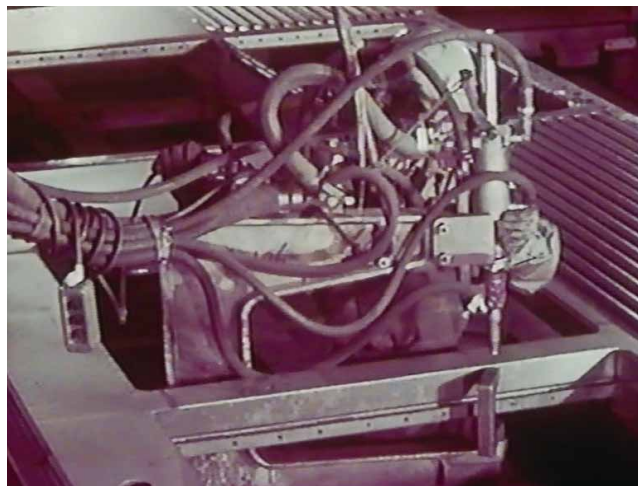


図5 側構体のポータブルスポット溶接機<sup>(3)</sup>

## 2. 4. 3 保存車両の抵抗スポット溶接部の現在

当社横浜事業所内にJ-TREC産業遺産第2号として東急電鉄(旧)7000系のデハ7052(1965年製)が保存されている(図8)。この車両の抵抗スポット溶接の圧痕(溶接部表面のくぼみ)は、現在製作している車両と比べると、全体的にやや形状がいびつである(図9)。図4に示すように、当時の側構体用のポータブルガンは1本の



ワイヤのみで吊られているので、ガンに多少の傾きが出て電極の当たりが悪くなっていた可能性がある。また、腰部はコルゲーションで全体のひずみを目立たなくしている構造であり、現在ほどは圧痕の状態に気を使っていなかったものと思われる。裾部に施工しているアーク溶接部では、周囲が粒界腐食と思われるサビが出てきているが、抵抗スポット溶接部は、製造当時の状態を保っている(図10)。急熱・急冷で入熱の小さい抵抗スポット溶接の特徴が生かされていることが、50年以上の月日を経て証明されている。

## 2. 5 軽量ステンレス車両 (第2世代・第3世代)

その後、ステンレス車両は軽量化や溶接の自動化などを行い、進化してきた。

今日、日本でオールステンレス車両が定着したのは、当時の国鉄でステンレス車両が制式採用されたことが大きい。1982年から国鉄、車両メーカーが合同で、素材、溶接、塑性加工、検査基準などの検討を行い、当社の技術・ノウハウを公開した<sup>(2)</sup>。ステンレス鋼の抵抗スポット溶



図8 J-TREC 産業遺産第2号 東急電鉄デハ7052<sup>(4)</sup>



図6 屋根構体と側構体を結合する抵抗スポット溶接<sup>(3)</sup>

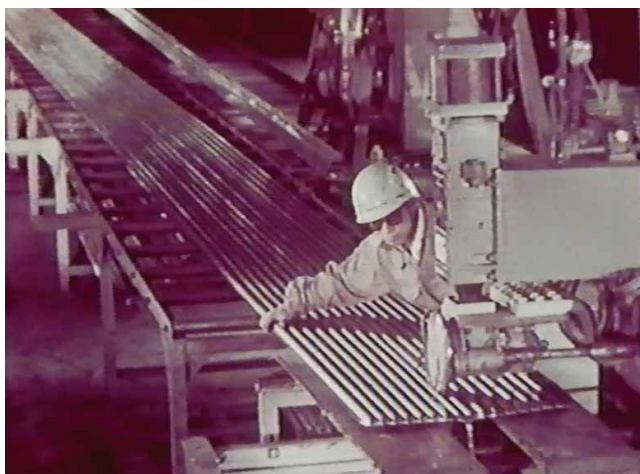


図7 屋根板のシーム溶接<sup>(3)</sup>



図9 側構体の抵抗スポット溶接の圧痕



図10 抵抗スポット溶接とアーク溶接

接については、2.4.1項で紹介した東急車輛の作業標準がベースとなって、当時の国鉄規格(JRS)が制定されている。この規格は、その後、日本鉄道車輛工業会規格(JRIS)として改めて制定され、日本国内の車両メーカーで共通に使用されている。また、板の組合せ等の設計に関わる項目は、JIS E 4048(鉄道車両-旅客車用構体-スポット溶接継手の設計方法)にも反映されており、



日本国内のステンレス車両の溶接技術の原点が当社にあることを改めて認識した。

また、抵抗スポット溶接は自動化が進んだ。側ブロックの製作は、ポータブルガンによる施工から、外板の平滑化とあわせて、外板側の電極を銅板とした自動溶接機の導入により時間短縮、外板のひずみ低減を図った(図11)。屋根構体では、ワンサイドアクセスが可能なシリーズスポット溶接の導入により、屋根板とタルキなどを自動溶接している。

側構体(外板)と台枠(側はり)の結合では、従来はポータブルガンを用い、構造的にガンが入らない部位ではアーク溶接で施工していたが、コンタクト電極を側はり下面にとって施工するインダイレクトスポット溶接の自動機の実用化により、外板部の結合もすべて抵抗スポット溶接となって、耐食性が向上した(図12)。

## 2.6 sustinaにおける抵抗スポット溶接

現在製作しているsustina車両でも抵抗スポット溶接を進化させて用いている。

sustina国内第1号車である東急電鉄5050系5576号車



図11 側ブロックの自動溶接機



図12 インダイレクトスポット溶接機

では、側構体の外板と骨などの接合に、電気サーボ式の加圧機構により可変加圧機能を有する抵抗スポット溶接機であるSmartRSW<sup>®</sup>を用い、溶接プロセス中の加圧力を変化させることで従来よりも圧痕外観の品質向上を図った<sup>(5)</sup>。その後のsustina量産車種の製造にあたっては、5576号車製造時の知見をもとに、エアシリンダによる加圧機構を用いて、板厚組合せに応じた適切な加圧力を設定することができる溶接機を導入し、板厚組合せに応じた最適な溶接条件を設定し、従来車と比べて圧痕の改善を図った<sup>(6)</sup>(図13)。

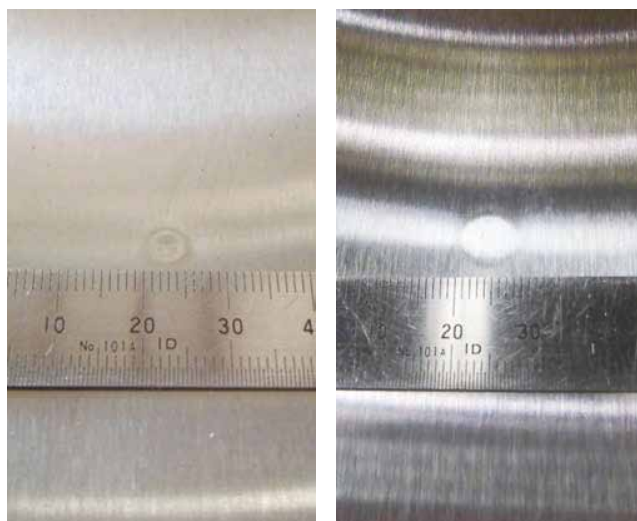


図13 側構体の圧痕(左:sustina量産,右:従来車)<sup>(6)</sup>

## 2.7 これからのステンレス車両と抵抗スポット溶接

次章以降に示すレーザ溶接も、ステンレス車両の製造にあたっては大きな革新をもたらす可能性があるが、ステンレス鋼の材料特性と抵抗スポット溶接の溶接原理を考えると、この2つはとても相性が良く、今後も主流な溶接方法として用いられていくと思われる。

## 3 レーザ溶接の原理と歴史<sup>(7)</sup>

レーザ発振の最も基本的な原理は1917年にアインシュタインによる誘導放出(負の吸収)の理論まで遡るが、実際的なレーザ発振の原理は1958年に米国の物理学者タウンズとショウロウによって提唱されている。レーザ発振の実現は1960年5月16日にアメリカの実験物理学者メイマンによって行われ、同年7月8日付けのThe New York Timesの記事によってレーザ発振の実現が世界に知られるようになった(図14)。メイマンは前日の7月7日に新聞記者へレーザ発振のデモンストレーションを行っているが、そこで、剃刀の刃に対する穴あけを披露している。これがレーザ加工の始まりであり、レーザ溶接の起点でもある。

## Light Amplification Claimed by Scientist

By JOHN A. OSMUNDSEN

Achievement of the first true amplification of light was claimed here yesterday by a Hughes Aircraft Company scientist.

The feat was said to have been accomplished with an experimental device developed at the company's research laboratories in Culver City, Calif.

Such a device, once perfected, could generate a fine light beam of sufficient intensity to illuminate from the earth small swaths of the moon's surface or to vaporize materials placed in its path. The distance to the moon is 238,840 miles.

A light signal is said to be amplified if its power is increased without changes in its wave length or frequency.

The light would also be of such purity as to permit more precise studies of the structure

Continued on Page 7, Column 5

The New York Times

Published: July 8, 1960

Copyright © The New York Times

図 14 世界初のレーザ発振を知らせる記事<sup>(8)</sup>

### 3. 1 レーザの特徴<sup>(7)</sup>

レーザはLight Amplification by Stimulated Emission of Radiationの頭文字を繋ぎあわせた造語（アクロニム）であり、日本語では「輻射の誘導放出による光の増幅」となる。ここではレーザ発振原理は割愛するが、レーザの特徴は波長がほぼ単一で位相の揃った人工の光であり、レーザ発振器の構成により、広がり角を非常に小さくできる。この特性によって、レーザは加工分野に限らず、計測分野でも広く活用されている。レーザ発振から数年後にはアポロ計画で月面上にレーザの反射板を設置し、地上から月面の反射板にレーザを照射し、地上に反射光が届くまでの時間から月と地球の距離を数cmの精度で測定している。身近な製品では、DVDやBlu-rayディスク

クの信号の読み取り装置、スーパーなどで使われるバーコードの読み取り装置にレーザが使われている。近年では自動車の衝突防止のためのレーザレーダの実用化など、その応用例には枚挙に暇がない。光であるレーザはレンズなどの光学装置によって、その大きさを自由に選択できる。太陽光をレンズで集めるのと同じようにレーザもレンズによって集光することができる。例えば出力2kWの加工用レーザでは、直径9 $\mu$ mに集光することもできる。その時の出力密度は、10<sup>11</sup>W/cm<sup>2</sup>まで到達し、このような高出力密度のレーザを金属材料などに照射すると、一瞬にして蒸発させることができる。

### 3. 2 レーザ加工とレーザ溶接の特徴<sup>(7)</sup>

1960年7月7日のメイマンによる世界初のレーザ加工のデモンストレーション、剃刀の刃への穴あけは、このレーザ加工の最も基本的な装置構成と原理を示している。1960年代前半には日本国内からもルビーレーザを金属材料に照射し、溶接部を形成した報告が行われている。1970年代以降はレーザ発振器の安定化と高出力化が進み、1980年代からは日本国内でも各種の生産プロセスにレーザ加工が積極的に採用されるようになってきた。

レーザ加工は、エネルギー密度に応じ固相から気相まで瞬時に相変態を行う加工形態から、金属内部の熱伝導による加工形態を選択することができる。同じ出力密度でもレーザの照射時間（レーザ出力の時間的分布）の制御によって様々な加工状態を選択することができる。低エネルギー密度のレーザ加工では、例えば炭素鋼の焼き入れ、ブリージングなどがある。対して高エネルギー密度のレーザ加工では、脆性材料の孔あけが可能である。レーザ溶接では概ね10<sup>7</sup> ~ 10<sup>8</sup>W/cm<sup>2</sup>の出力密度の範囲で行うレーザ加工形態一つである。

従来のアーク溶接の出力密度は概ね10<sup>6</sup>W/cm<sup>2</sup>といわれ、レーザ溶接はそれより1~2桁高い。車両構体のようなステンレス鋼板の薄板にアーク溶接法を適用すると、熱歪みによる変形が大きく、高い施工技能が要求される。レーザ溶接ではレーザを照射した箇所を選択的にエネルギーを集中できるため、レーザ照射部と周囲の温度勾配が急峻となり、アーク溶接法に比べると熱変形の小さな溶接となる。また、母材と溶融凝固部の境界に生じる熱影響層も少なく、溶融凝固部の冷却速度も速いため、一般に鉄鋼材料では溶接部の機械的特性の低下が少ないという特徴がある。その一方で、金属板の突合せ溶接や重ね溶接では、健全な溶接を得るためには材料同士の隙間が板厚の概ね10%以下とする必要があり、材料の寸法精度や材料の固定治具を工夫することが求められる。



レーザー発振媒質によって異なるものの、半導体レーザーや半導体レーザーの励起によるレーザー発振は、例えば出力0の状態から出力5kWを安定的に得る時間は数 $\mu$ sのオーダーで、時間に対する応答性が高い。また、加工物上のビーム径も熱的な影響を極力排除した集光光学装置によって出力数十kWまで安定的に得ることができる。レーザー出力の時間的空間的分布を比較的自由に選択できるので、加工物に対する入熱量を精密に制御することができ、例えば車両構体に使うステンレス鋼の溶け込み深さは0.1mm単位で制御することも可能である。ただし、加工雰囲気はレーザー溶接の品質に与える影響の考慮は必須である。鉄鋼材料のレーザー溶接では、酸素量1molあたりの発熱量はおよそ200kJであり、酸素量の多寡が溶け込み体積や溶接品質に影響を与える。また、加工雰囲気のガスの電離電圧もレーザー溶接品質に影響を与える。波長10.6 $\mu$ mの炭酸ガスレーザーでは、金属材料、加工雰囲気、およびレーザーの相互作用によって生じるレーザー誘起プラズマにより、安定溶接を得るためには電離電圧の高いHeを加工ガスに使う必要も生じる。2010年以降に高出力化した波長1 $\mu$ m帯のYAGレーザーやファイバレーザーでは、レーザー誘起プラズマは生成しないか、生成してもわずかであり、溶接品質の制御は、炭酸ガスレーザーに比べ格段に容易となっている。レーザー発振器に限らず、加工の目的別に加工ヘッドも市販されるようになり、波長1 $\mu$ m帯の高出力レーザーを用いたレーザー溶接のメカニズムの解明には未踏領域があるものの、利用技術の開発領域は十分に開拓されている。

### 3.3 鉄道の車体へのレーザー溶接の開発<sup>(9)(10)</sup>

鉄道車両構体へのレーザー溶接の採用の検討は、1996年に開始した東急車輛、JR東日本、新日本製鉄（当時）の3社の共同研究に遡る。そこでは、鉄道車両のコストダウンを背景に、車体をステンレス製のパネルで構成するという構想が描かれた。その解決策の一つが図15に示すステンレス鋼製ダブルスキンパネルである。これは、図に示すように、1枚の波板を2枚の平板で挟み込んだ段ボール形状であり、波板と平板の接合にレーザー溶接を採用したことが特徴である。このパネルの製造方法は図16に示すとおりである。平板の上に波板を重ね合わせ、波板と平板の接触部分にレーザーを照射し、レーザー溶接によって接合する。このとき、溶け込み深さを平板の厚さの30～50%とすることで、平板の表面にレーザー溶接部や熱歪みがほとんど生じないという特徴を得られる（図17）。次に平板と接合された波板に平板を重ね合わせ、波板と平板の接触部分にレーザーを照射し溶接すること

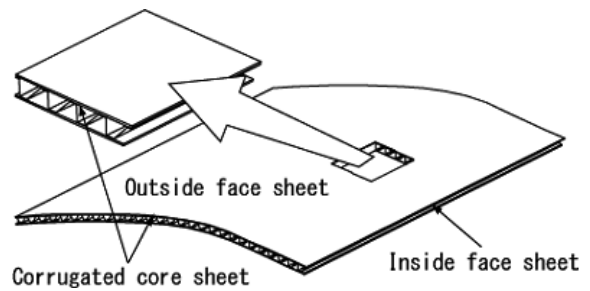


図15 ステンレス製ダブルスキンパネルの概要図

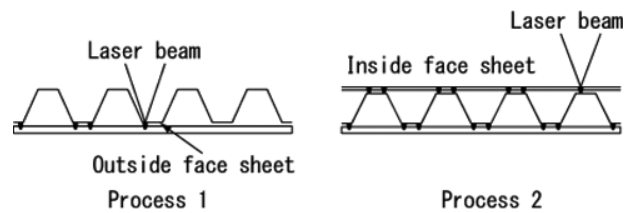


図16 レーザ溶接によるダブルスキンパネルの製造方法の概要図

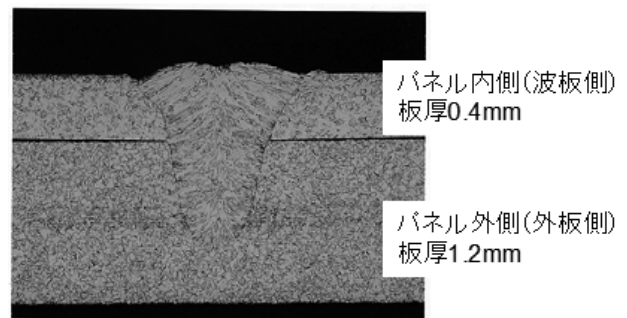


図17 レーザスポット溶接部

で、段ボール形状を得る。なお、この面にはレーザー溶接のナゲット（溶融凝固部）が形成されるが、車両の内側となり、内装材が取り付けられるので、外観の品質には影響しない。また、レーザースポット溶接では溶融凝固部がほぼ円錐形に形成されるので、連続溶接で生じるような角変形が少ないことも特徴である。薄板で構成する構造物の外板に角変形が生じると、特にこの外板にも応力を担持する場合にはせん断剛性の低下につながる懸念があるので注意する必要がある。さらに、同一平面内に複数のレーザー溶接線を形成すると、溶接線と直角の角変形に加えレーザー溶接線方向にも変形が生じる。

レーザー連続溶接の欠点を鑑みステンレス製ダブルスキンパネルの製造に採用したレーザースポット溶接は離散的な点溶接（レーザースポット溶接）であり、スポット溶接の数量や配置を適正化し、鉄道車両に適したパネルの強度を確保している。また、ステンレス鋼製鉄道車両の外板は、意匠のためベルトグラインダによる微細な磨き疵を付与しているが、この研磨の方向と、レーザー溶接の点列の方向を一致させることで、外板の意匠性を向上させ

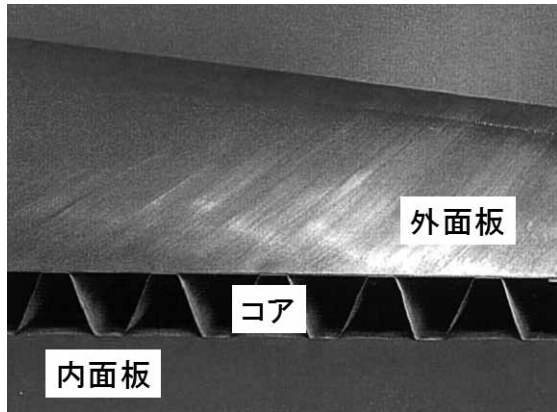


図18 レーザ溶接によるステンレス鋼製ダブルスキンパネルの外観

ることも検討した。レーザー溶接によるステンレス鋼製ダブルスキンパネルの外観を図18に示す。試作したパネルは、外板の板厚1.0mm、波板の板厚0.4mm、内板の板厚0.6mmであり、波板の高さは34.4mm、パネルの厚さは36mmである。

### 3.4 レーザスポット溶接による

#### ステンレス鋼製ダブルスキンパネルの開発<sup>(8)(9)</sup>

レーザー溶接によるステンレス鋼製ダブルスキンパネルが鉄道車両構体を構成するために適切な剛性と強度を得ているかどうかの検討を、車両の試作と荷重試験、および数値シミュレーションモデルを活用し検討を行った。車両構体全体をレーザースポット溶接部まで含めたパネルで構成すると車両モデルが莫大となり、計算時間を多く要するため、パネル単体での等価剛性モデルを作成し、妥当性を検証した。パネルは先に示したように波板を平板で挟み込む構成であり、かつ外板と内板の板厚が異なることから、カップリングを有する直交異方性のモデルの構築が必要となる。このモデルは図19に示すように積層板の理論にしたがう。

そこで、パネルの曲げ剛性、剪断剛性などの機械的特性を調査し、モデル(式1、図20)の妥当性を確認した。このモデルと図21に示した試験車両を用いた構体荷重試験によって、レーザー溶接によるステンレス製ダブルスキンパネルの妥当性を検討し、本パネルを採用した車両構体の機械的特性が適切であることがわかった。そして、実走行試験用の車両、JR東日本ACトレイン「モハE993-1」が2002年2月17日に出場した。これが世界初のレーザーによる車両構体である(図22)。

### 3.5 レーザ突合せ溶接による側外板の平滑化の検討

レーザースポット溶接を従来構造の側外板と内部骨組み

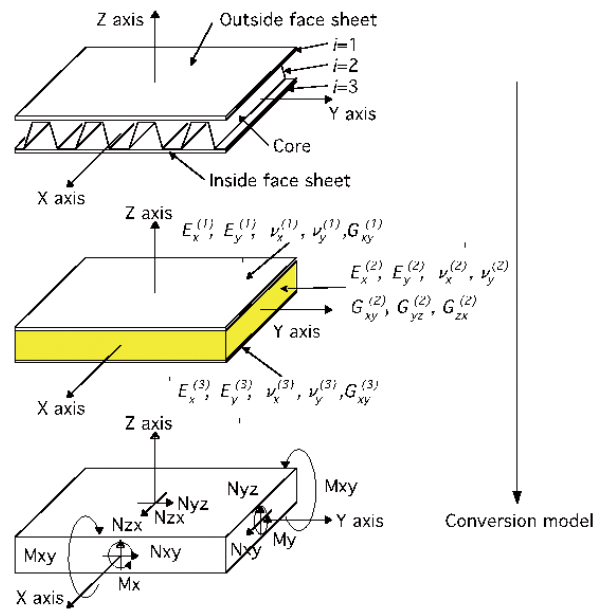


図19 ダブルスキンパネルの定式化の概要

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ N_{yz} \\ N_{zx} \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 4.94e5 & 1.04e5 & 0 & 0 & 0 & -1.43e6 & -4.37e6 & 0 \\ & 3.45e5 & 0 & 0 & 0 & -4.37e6 & -1.46e6 & 0 \\ & & 1.37e5 & 0 & 0 & 0 & 0 & -5.08e5 \\ & & & 1.08e5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & 1.30e5 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & 1.21e8 & 3.17e7 & 0 \\ & & & & & & 1.06e8 & 0 \\ & & & & & & & 3.85e7 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_z \end{Bmatrix}$$

式1 ダブルスキンパネルの定式化

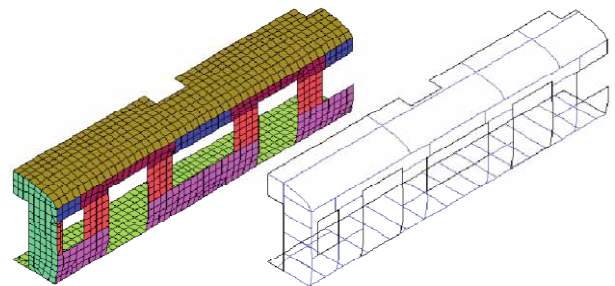


図20 ダブルスキンパネルを用いた車両のモデル

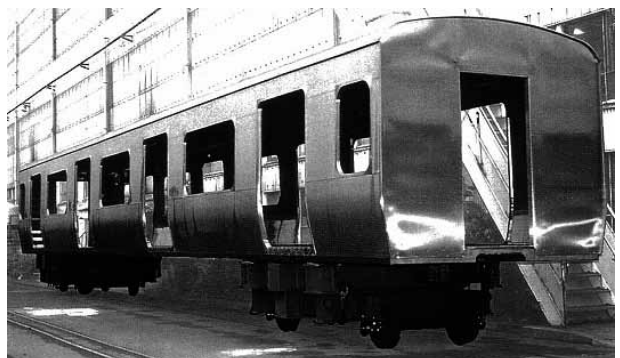


図21 構体荷重試験用の試作車両





図 22 世界初のレーザーによる車両構体



図 23 レーザスポット溶接とレーザー突合せ溶接を採用した横浜シーサイドライン 2000 型<sup>(11)</sup>



図 24 東急電鉄 5050 系 5576 号車<sup>(12)</sup>

との接合に用い、レーザー連続溶接を側外板の突き合わせ溶接に採用した車両を図23に示す。これは2011年に運行を開始した横浜シーサイドライン2000型である。従来の鉄道車両の側面は高さ方向に複数枚の板を組み合わせて構成していた。これは製鉄メーカーで製造されるステンレス鋼板の幅による制約のためである。既往の側外板同士の接合では、一方の外板に背切りと呼ぶ段差を設け、段差部分を他の板と重ね合わせ、抵抗スポット溶接法によって接合する方法を採用していた。背切り構造は意匠上の制約になること、樹脂シールが必要であること、背切り部分の汚れが目立つことから車両側外板の平滑化を図った。

側外板の平滑化を徹底した東急電鉄5050系5576号車を図24に示す。その特徴は、横浜シーサイドライン2000型と同様に側外板へのレーザー突合せ溶接の採用、出入り口

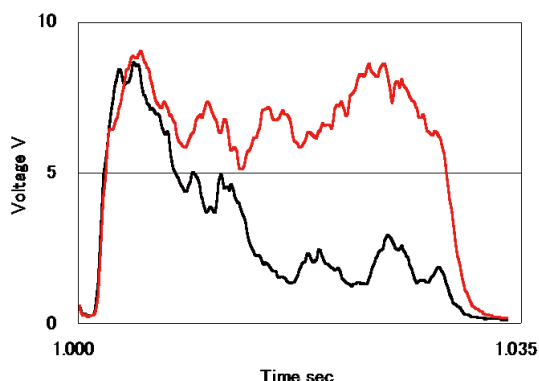


図 25 レーザスポット溶接でのプルームの時刻歴波形

フレーム、窓フレームと外板の重ね隅肉溶接の採用である。雨樋の構成も変更し、床下から屋根まで平滑化を行っている。

### 3. 6 レーザ溶接品質の確保の開発<sup>(13) (14)</sup>

これまでに述べたように当社はステンレス鋼製鉄道車両構体の製造にレーザー溶接を採用してきた。

レーザー溶接品質の確保は、レーザー発振器と周辺装置の状態監視によって行う方法を採用している。レーザー溶接中には、レーザー出力、加工物から反射したレーザー、レーザープルームの強度の時刻歴波形の解析によって機器の状態を検知し、溶接品質の異常の可能性を示すことができる。

溶接品質の正常状態を計測することは困難であり、機器の異常を、例えばレーザープルームの時刻歴波形という代用特性によって評価している。

図25はレーザースポット溶接で発生するレーザープルームの材料同士のギャップに対する時刻歴波形を示す。フォトセンサの前に赤外領域を透過させるバンドパスフィルタを介している。図中の赤線はギャップありの場合、黒線はギャップ0 mmの時刻歴波形である。このように溶接欠陥の要因であるギャップを容易に判定することができる。一般に時刻歴波形の解析では、取得したデータにしきい値を設け、取得データとしきい値を比較する方法、取得したデータを正規化し、その上でしきい値を設け、しきい値と比較する方法、あるいは、しきい値とデータとの微分特性や積分特性による評価方法がある。求められるレーザー溶接品質、レーザー溶接の形態に対し、適切な波形解析を行う必要がある。

### 3. 7 sustinaにおけるレーザー溶接

現在のsustina車両でもレーザー溶接を進化させている。レーザー溶接の採用箇所は、側外板の平滑化が目的である外板の突合せ溶接、水密性の確保を狙った出入り口

レーム、窓フレームと外板との重ね隅肉溶接、同様に妻部の水密性確保を目的とした重ね溶接である。

車両構体に要求される機能とレーザー溶接の機能の合致によってレーザー溶接を積極的に採用している。

### 3.8 これからのステンレス車両とレーザー溶接

レーザー溶接を含むレーザー加工の革新は、レーザー発振器とその周辺機器の開発によって進化発展してきた。どの製品のどの部位にレーザー加工を使えるかという視座でレーザー加工は用途が探索されてきた。鉄道車両製造の分野では、鋼板のレーザー切断が先行し、レーザー溶接の採用は1990年代中盤から検討され産業分野の中でも比較的後発である。

近年のレーザー発振器とその周辺機器の価格の低下、高機能化によって車両へのレーザー加工の展開が見込まれる。レーザー溶接を含むレーザー加工は今度とも車両の高付加価値化に寄与すると確信している。

## 4 おわりに

鉄道車両構体は、設計技術、材料技術、加工技術によって成立し、加工技術の一つが溶接加工技術である。金属材料の溶接プロセスのメカニズムは未解明な部分がありつつも、実用技術は革新と同時に産業応用が進んでいる。当社は溶接技術の中でも抵抗スポット溶接技術とレーザー加工技術を革新し、鉄道車両の製造に採用してきた。今後ともお客様の要求を満たす鉄道車両の実現に寄与する。

### 参考文献

- (1) 松山欽一，他：「抵抗溶接の基礎と実際」，(2011)，産報出版（株）
- (2) 杉山隆：「東急車輛技報で辿るステンレス車両の技術史」，東急車輛技報，No.60，2-11，(2010)，東急車輛製造（株）
- (3) 「ステンレスカー」，東急車輛製造（株）
- (4) 松岡茂樹，他：「東急車輛産業遺産と横浜製作所歴史記念館の整備—産業遺産による技術の来歴の保存—」，東急車輛技報，No.60，62-69，(2010)，東急車輛製造（株）
- (5) 渥美健太郎，他：「抵抗スポット溶接システム SmartRSW<sup>®</sup>を用いた鉄道車両の圧痕外観向上に関する研究」，総合車両製作所技報，Vol.1，2-9，(2013)，（株）総合車両製作所
- (6) 側垣正，他：「sustina車両側構体の量産化について」，総合車両製作所技報，Vol.5，58-61，(2016)，（株）総合車両製作所

- (7) 新井武二：「レーザー加工の基礎工学」，(2013)，丸善出版
- (8) Light Amplification Claimed by Scientist：The New York Times，(1960.7.8)
- (9) 及川昌志，他：「レーザスポット溶接によるステンレス鋼ダブルスキンパネルの開発（第1報）」，精密工学会誌，vol.72，No.12，1515-1519，(2006)
- (10) 及川昌志，他：「レーザスポット溶接によるステンレス鋼ダブルスキンパネルの開発（第2報）」，精密工学会誌，vol.74，No.12，1287-1291，(2008)
- (11) (株) 総合車両製作所ホームページ「製品」，[http://www.j-trec.co.jp/rw/New\\_transportation\\_and\\_streetcar/index.html](http://www.j-trec.co.jp/rw/New_transportation_and_streetcar/index.html)
- (12) 浅賀哲也，他：「sustina国内第1号車両の開発」，総合車両製作所技報，Vol.2，4-11，(2016)，（株）総合車両製作所
- (13) 河田直樹，他：「ステンレス鋼板のレーザスポット溶接に関する品質評価システムの開発」，精密工学会誌，Vol.75，No.9，973-978，(2009)
- (14) 河田直樹，他：「ステンレス鋼板のレーザ溶接システムに関する品質評価システムの開発」，精密工学会誌，Vol.75，No.5，629-633，(2009)

### 著者紹介



**大塚陽介**  
技術士（金属部門），IWE  
生産本部  
技術部（接合技術センター） 主査



**及川昌志**  
博士（工学），技術経営修士  
生産本部  
技術部（技術企画） 課長



**側垣正**  
生産本部  
生産管理部（生産技術） 主査



**大河原克美**  
生産本部  
生産管理部 部長（生産技術）



**木村億尋**  
生産本部  
生産管理部 部長（統括）