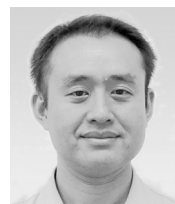


「鉄道・車輜 (技術トピックス編)」*

平嶋 利行**, 本間 志郎**



平嶋 利行



本間 志郎

Railroad, Rolling Stock (Technical Topics)*

by HIRASHIMA Toshiyuki** and HONMA Shirou**

キーワード

鉄道車輜, ステンレス車輜, レーザ溶接, 車体構造, 継手強度

1. はじめに

鉄道は、省エネルギーや環境負荷低減の観点から他の交通機関に比べ大きなメリットを持ち、クリーンな大量輸送手段としての期待は高い。そのような中、鉄道車両のボディー（構体）も、安全性の向上、ライフサイクルコストの低減および環境性能の向上を追求して進化し続けてきた。例えば、鉄鋼は安価で機械的特性も優れた材料であり、自動車のボディーなどは今でもほとんどが鉄鋼製であるが、鉄道車両の構体はステンレス鋼製あるいはアルミ合金製に置き換わってきた。鉄鋼は腐食対策のため板厚を増大する必要があり重量増が避けられず、また使用年数が30年を超えるものもある鉄道車両では再塗装や腐食部の部材取替などのメンテナンスに多大なコストがかかるためである。ステンレス鋼は高強度であり、かつ腐食に極めて強く表面硬度も高いため、塗装などの表面処理が不要でメンテナンス性に優れる。そのため通勤用車両を中心に広く適用されている。その一方で、軽量性や車体構造のシンプルさ、および外観の見映えの点ではアルミ構体の方が一般に優れ、これらの点を活かして特急車両や高速車両に用いられることが多い。ステンレス鋼車両においては逆にこれらが弱点となるが、それを補うためレーザー溶接を用いた新しい構体の開発と実用化を行った。

2. 開発のコンセプト

ステンレス鋼は熱伝導率が比較的小さく溶接変形を起こしやすいので、組み立てには入熱が少ない抵抗スポット

溶接が多用されるが、それでも非常に多くの点を溶接するため外板の歪みは生じやすい。一般に構体は側・妻・屋根・床の各パネルより構成されるが、よく目に触れる側パネルにおいてはとくに歪みは課題となる。そのため、従来のステンレス構体では外板を加工して細長い凹凸（コルゲートあるいはビード出し）を車体長手方向に設けることにより、歪みを目立たなくしていたが、近年では特に側パネルにおいて凹凸が全くない平滑な外板となってきた。これを可能としたのは強度解析技術と生産技術の向上によるところが大きい。

しかし、抵抗スポット溶接では電極の押圧力と入熱により図1のように直径1cm程度の圧痕が外板面に残り、近年の平滑な外板ではこれらが余計に目立つことになる。鉄道車両は公共の乗り物であると同時に鉄道会社の顔でもあるため、車両の外観への配慮は重要なテーマである。従って完全に平滑な外板を持つステンレス構体を目指すためには従来と異なる接合方法が必要である。そこで、多くの可能性を秘める新しい接合技術としてレーザー溶接（図2, 3）に着目し、ステンレス構体への適用と実用化を行った。レーザー溶接構体の開発コンセプトとしてはレーザー溶接の特長を十分に活かすこととし、次の5つを掲げた。

1. 溶接線を目立たなくし、外板の見映え品質を向上させる。
2. 溶接歪みが小さいことを活かして寸法精度を向上し得るようなシンプルな構体構造とする。
3. 溶接の完全自動化により、溶接品質を向上させる。
4. 溶接速度の高速化により、施工能率を向上させる。
5. 連続溶接が可能なることを利用して構体強度を向上させる。

3. 要素技術の開発

3.1 レーザ溶接技術

レーザー溶接は高エネルギーのレーザービームを集光し、移動しながら接合部材の表面に照射することにより高速で溶

*原稿受付 平成24年8月30日

** 川崎重工株式会社 Kawasaki Heavy Industries Ltd.

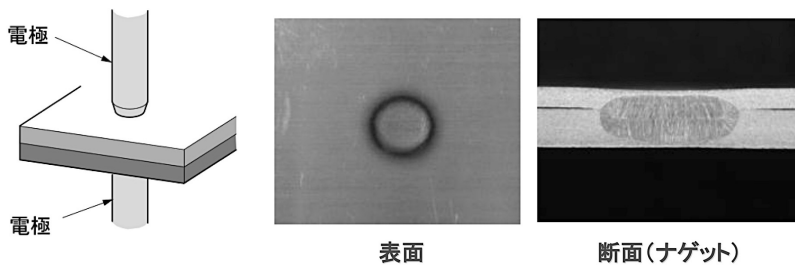


図1 抵抗スポット溶接継手の外観と断面

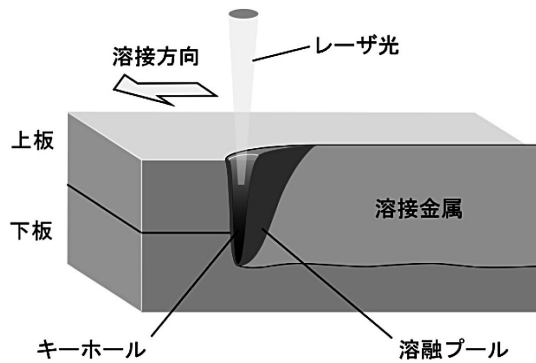


図2 重ねレーザー溶接の概要

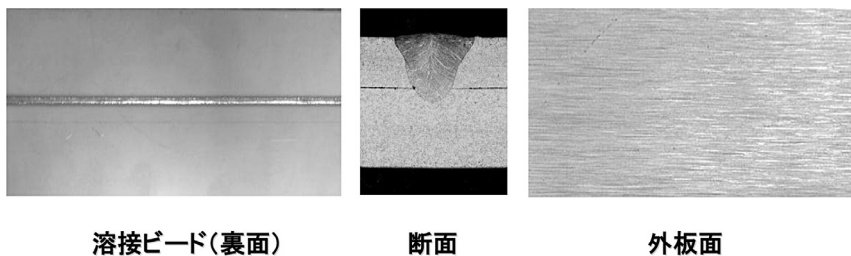


図3 レーザ溶接継手の外観と断面

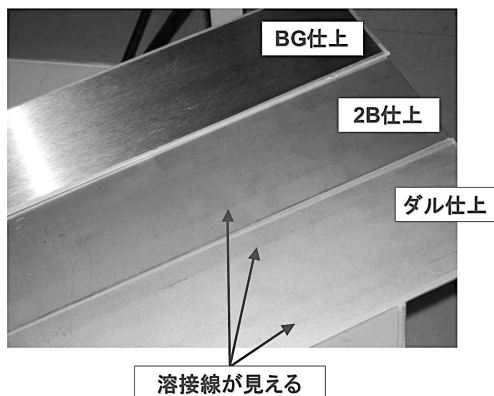


図4 各種表面仕上げと溶接線の見え方の違い

接を行う接合法である。加熱範囲を微小なエリアに抑えることができるので熱歪みが極めて小さく、かつ精密に溶接条件を制御することが可能である。これらの点に注目し、重ねた2枚の薄板にレーザービームを照射し下板の板厚の途中までを溶融させて一体化する重ねレーザー溶接を開発した。抵抗スポット溶接の“点”継手に対し、レーザー溶接は“線”継手を構成できるのが特長である。溶接する部材は板厚

0.8mm 以上 (外板補強部材) および 1.5mm 以上 (外板) の SUS304 あるいは SUS301L ステンレス鋼板である。

レーザー溶接された重ね継手の外観と断面を図3に示す。抵抗スポット溶接より5倍以上高能率の5~6m/minの溶接速度で、下板裏面に溶接痕の出ない美しい溶接継手が得られた。また通常の抵抗スポット溶接継手に比べ約2倍の強度(単位長さ当りの引張強度)が得られることも確認した。

3.2 外板の美観性

溶接痕の出ない美しい継手を得るためにはステンレス鋼板の表面仕上げと溶接方向に工夫が必要である。図4は、表面仕上げの異なるステンレス鋼板をレーザー溶接したものであるが、2B仕上げ(光沢仕上げ)やダル仕上げ(にぶいつや消し仕上げ)では溶接線が浮き出してしまう。ヘアライン仕上げ(連続な研磨目仕上げ)でも同様である。しかし従来から鉄道車両の側外板に多く適用されているBG仕上げ(不連続な研磨目仕上げ、ベルトグランド仕上げ)の仕上げ目方向に溶接を行ったときは溶接線がほとんど見えない。これは、重ねレーザー溶接を行うと局部的に微小な角変形が生じるためである。このため図5のように表面が平滑であると反射する像により角折れによるスジが目立つことになるが、BG仕上げでは反射する像が散乱するた

めスジが目立たない。これがレーザー溶接構体の外板の美観性を確保する基本原理である。なお、仮にこの仕上目と直交する方向に溶接を行った場合はスジが顕著に現れることになり、側外板などの意匠面には適さない。

3.3 車体構造

上述のように、意匠性を重視したレーザー溶接構体では外板の仕上目と溶接線の向きを一致させる必要がある。また、外板面の熱的損傷を防止するためには、緻密な溶接条件制御と高精度なギャップ管理が必要となるため、シンプルな溶接構造となるよう車体構造（構体構造）を根本的に見直した。

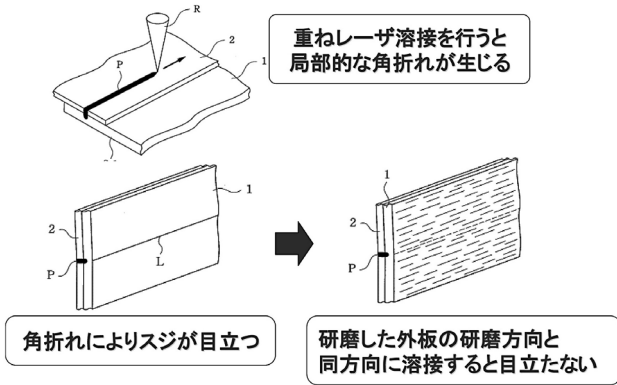


図5 溶接線を目立たせない手法

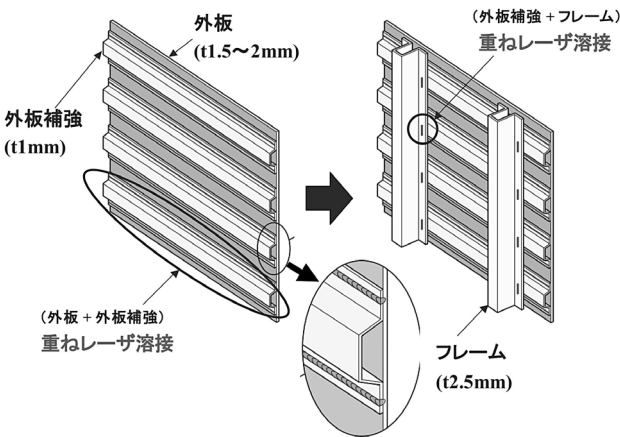


図6 レーザ溶接構体の基本構造

従来のステンレス構体は板骨構造であり、外板には縦骨（柱）と横骨が接合されるので、車体長手方向の溶接とともに、それと直交する方向の溶接も生じる。これに対し、新構造では図6のように、まず外板上に車体長手方向に長尺の外板補強を配置してこれらをレーザー溶接にて接合する。これらの横骨のピッチは外板の座屈強度や車体部品の取付性を考慮して決定される。次に、それと直交する方向のフレームをその補強材の頭頂部にレーザー溶接にて接合して側パネルを構成した。こうして外板面に現れるレーザー溶接を車体長手方向に統一して外板の表面仕上げの方向と一致させるとともに、板厚組合せと周辺条件の統一化を図った。また横骨・縦柱をつなぐガセット（継手）を削減することなどにより、部材点数の低減を図っている。

3.4 生産技術

重ねレーザー溶接を適切に行うためには重ねた部材同士を隙間なく密着させる必要がある。このときレーザー溶接ヘッドの移動と部材密着をいかに正確に、かつ効率よく行うかが課題となる。

レーザー切断などに従来から用いられてきたCO2レーザーではレーザー光をミラーで反射させながら発振器から加工点まで導く必要があった。しかし、この方法では鉄道車両のような大型の溶接物に対しては装置が巨大になり過ぎてしまう。一方で、1990年代後半に大出力化の進んだYAGレーザーではレーザー発振器から溶接ヘッドまでを柔軟な光ファイバで導光できるようになった。これにより、図7に示すように多関節ロボットを用いることが可能となり、精密な位置制御で広い溶接範囲をカバーすることができるようになった。さらに、図8に示すように溶接ヘッドに押圧用のローラを取り付けることにより、大掛かりな押さえ治具を用いることなく溶接ヘッドの移動と部材の密着確保を同時に行うことを可能としている。

4. 継手強度

本件のレーザー溶接は重ねた2枚の板にレーザービームを照射し、下側の板の途中で溶込みを止めるというデリケートなものである。レーザーの出力を一定にすれば溶接速度を遅くするほど溶込みは深くなる。溶込みが深いほど上下の

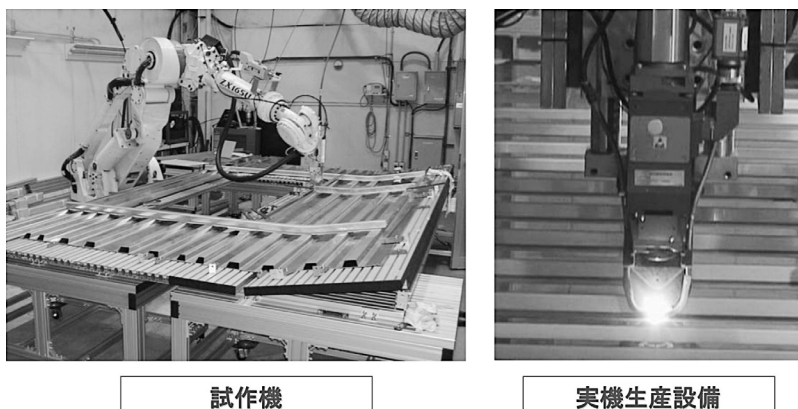


図7 レーザ溶接システムの外観

板が溶着している部分の幅（溶込み幅）も大きくなるので溶接継手の強度は高くなるが、深すぎるとレーザービームが裏面に貫通したり、あるいは焼け（酸化変色）を生じて外板の品質を悪化させたりする。この繊細な溶接を実際の生産現場で安定的に実現するため、溶接パラメータを周到に

選定し、最適な板厚組合せや溶接条件を選定した。また部材の拘束位置や溶接方向・順序など、技術的なノウハウを蓄積し、かつ、適切に施工管理をすることにより安定して溶接を行うことを可能とした。以下にいくつかのカテゴリーごとにレーザー溶接継手の強度レベルについて述べる。

4.1 静的強度

レーザー溶接は連続溶接が可能であり、一般にスポット溶接継手よりも引張強度は高くなる。図9はレーザー溶接とスポット溶接の強度基準（工作保証強度）を板厚ごとに示したものである（また引張せん断の破壊形態を図10に示す）。これが意味するところは、連続溶接であるレーザー溶接継手は、スポット溶接において許容されている最小ピッチ（例えば板厚1mmの継手の場合16mmピッチ）で溶接した継手と同等以上の強度を保証しようということである。一般にスポット溶接のピッチは50~80mm程度であるから、レーザー溶接継手は標準的なスポット溶接継手に比べて2倍以上の引張強度を有していることになる。

また、レーザー溶接はスポット溶接と異なり、溶接線は必ず始末端部を有しており、しかも溶接線と荷重方向はかならずしも一致しない。そこで、始末端部を含む継手や引張方向に対して角度を持った（斜めになった）継手に対して

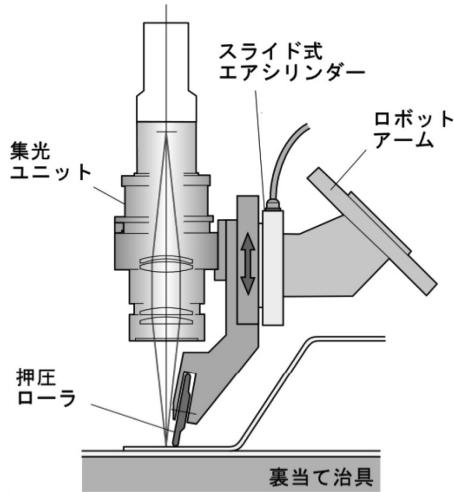


図8 レーザ溶接ヘッドと押圧ローラ

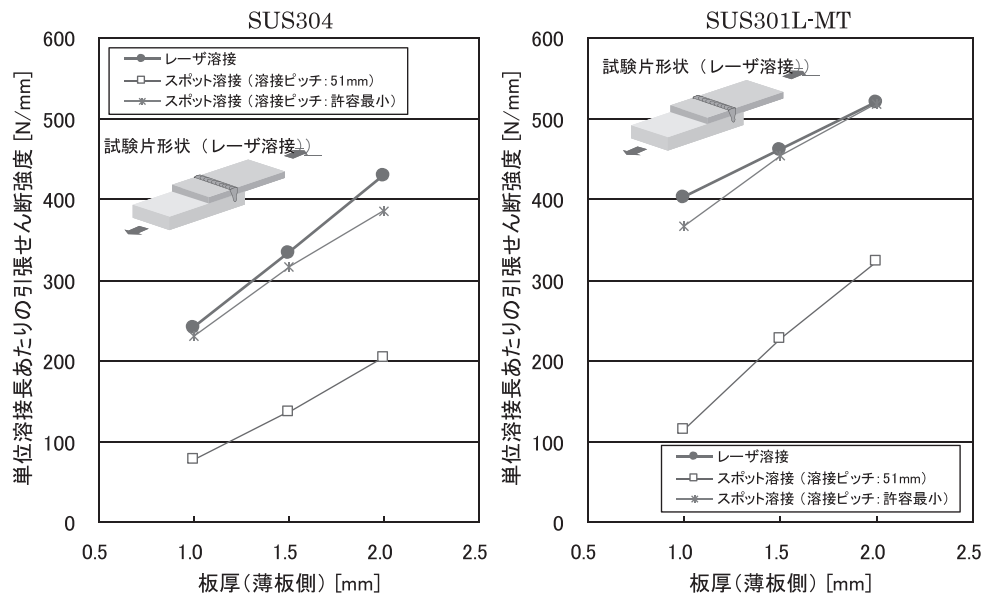


図9 レーザ溶接とスポット溶接の継手強度（基準値）の比較

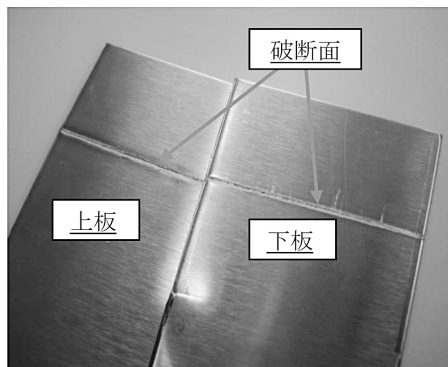


図10 引張せん断の破壊形態

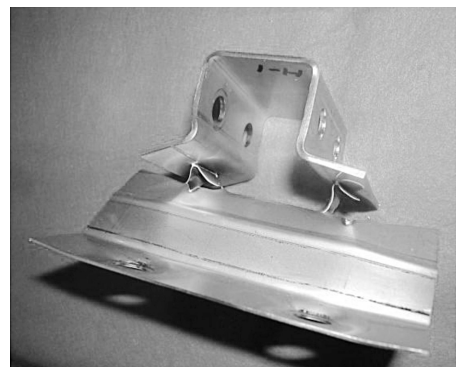


図11 引き剥がし引張の破壊形態

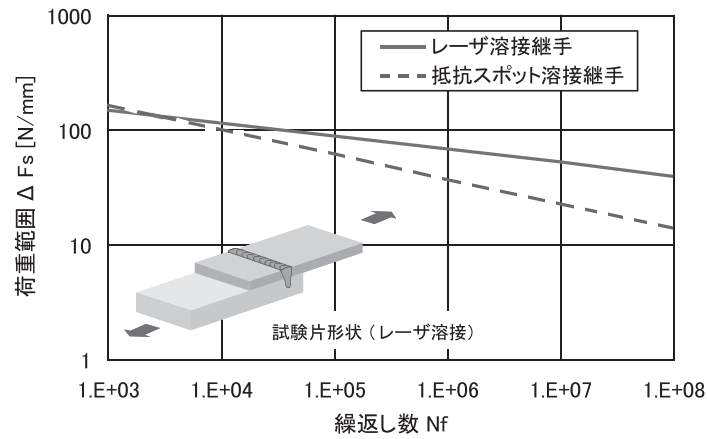


図12 継手の引張せん断疲労強度（設計基準）の比較の比較

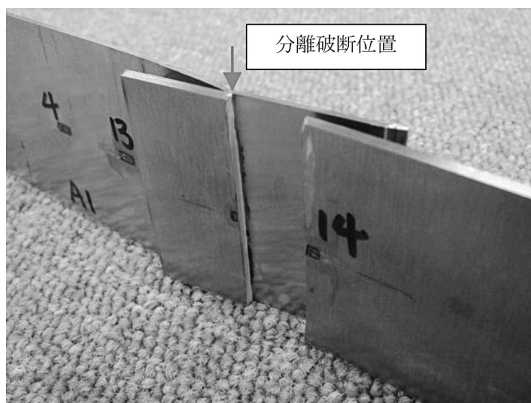


図13 引張せん断による疲労破壊の形態

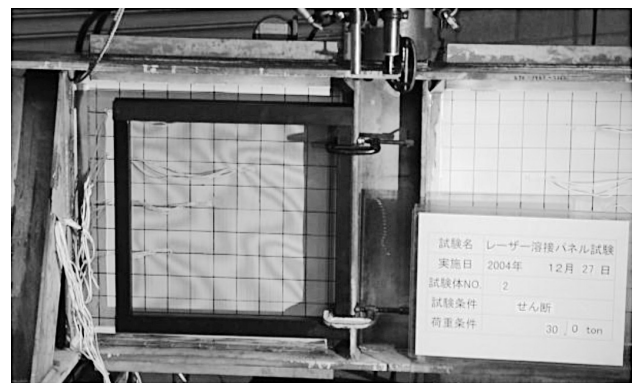


図14 レーザ溶接パネルの座屈試験の様子（せん断座屈）

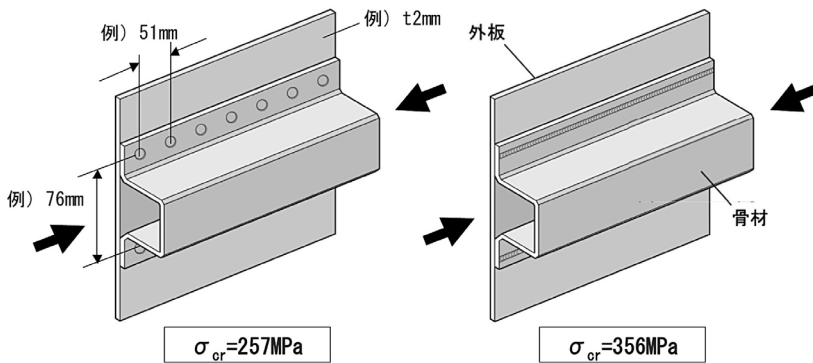


図15 溶接方法による座屈強度の相違

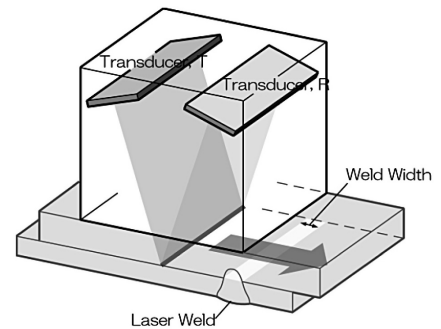


図16 ラインフォーカス超音波探傷

引張試験を実施したところ、単位溶接長あたりの引張強度にほとんど違いはなく、レーザー溶接継手は標準的なスポット溶接継手よりも優れた強度を有していると言える。

なお、抵抗スポット溶接の継手設計においては、継手を引き剥がす方向の荷重が発生しないよう配慮するが、引き剥がし荷重で継手を破断させた場合、図11のようになる。これは横骨と縦柱の交点を模擬した試験体であるが、どの試験体もこのように母材部で破断しており、破断荷重も極めて安定していた。従って母材にかかる応力が耐力を超えないような設計をすれば、引き剥がし荷重が生じた場合でも問題はないことが示された。

4.2 疲労強度

図12はスポット溶接継手とレーザー溶接継手の疲労線図を比較したものである。継手形式は板厚の組合せや材料により種々あるが、それらの影響は比較的小さく、非破壊確率97.7%の設計線図は図12の線図に統一される。これは、疲労破壊の場合、図13に示すようにレーザー溶接線に平行に板厚方向に亀裂が進展して破壊するためであり、溶込み深さにはほとんど影響を受けないからである。また、始終端部を含む継手や引張方向に対して角度を持った（斜めになった）継手に関しても顕著な強度低下は見られず、疲労試験結果による強度はこの設計線図のなかに収まる。従って

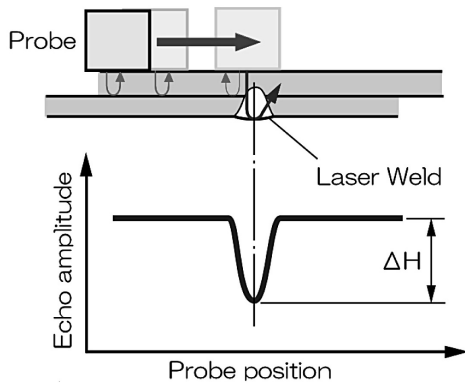


図17 UTによる継手品質検査の原理



図18 レーザ溶接による試作構体

疲労に関しても、レーザー溶接継手は抵抗スポット溶接継手よりも優れた強度を有していると言える。

4.3 座屈強度

ステンレス構体は薄板構造であるため、材料や溶接継手の引張・圧縮強度よりもむしろ外板の座屈強度がネックになることが多い。このためレーザー溶接パネルについて座屈強度の調査を入念に行った。図14は座屈試験の様子であるが、この試験結果からレーザー溶接パネルは Euler 座屈（最も簡単な座屈理論）ベースで設計可能であることがわかった。スポット溶接パネルでは、スポット溶接の歪みにより座屈強度が比較的小さくなることもある。よって座屈強度を増すために外板補強材をスポット溶接で取り付けても、歪みによりかえって座屈強度を低下させる恐れがある。これに対しレーザー溶接パネルでは、歪みが小さいので座屈強度上も有利である。さらに図15に示すように、スポット溶接パネルではスポット間での座屈を想定しなければならないが、連続溶接であるレーザー溶接パネルではそれを考慮する必要がないので、理論上も座屈強度は向上する（図15の例では座屈応力 257 MPa→356 MPa）。

5. 非破壊検査

今回開発されたレーザー溶接継手は表面に溶接痕が出ないため、規定の溶込み幅を有していることを何らかの方法で検査する必要がある。目視検査では十分ではないので、超音波探傷技術（UT）を応用して非破壊検査を実施することとした。UTは、融合不良などの溶接欠陥を検出するための技術であるが、重ねレーザー溶接継手では重ねた2枚の板の隙間を「傷」と見なすと、溶融接合している部分では「傷がない」ので、エコー高さが異なってくる。この原理を応用して規定の溶込み幅を有しているかを検査する。具体的には図16に示すようなラインフォーカス二振動子垂直探触子を用いる。これを溶接施工側と反対側の外板面側から、溶接線と直交する方向に走査していくと、図17に示すようにレーザーによる溶込み部の直上ではエコー高さが変化するのでこのエコー高さの差を検出する。溶込み幅に



図19 試作構体の側外板面の仕上り

じてエコー高さの差は変わるのでこれにより規定の溶接品質を確保しているかどうかを判断している。

6. 実車適用

最も目に触れる側構体パネルにレーザー溶接を適用した。2003年度にまず試作構体を製作し、図18, 19に示すようにコンセプト通り、美しい外板の得られることを実証した。また構体荷重試験を実施して従来車と同等以上の車体剛性・強度を持つことを確認した。さらに強度基準や施工基準を整備することにより実車設計を可能とした。

7. おわりに

本稿では、レーザー溶接を用いたステンレス構体の開発について、その概要を紹介した。鉄道車両業界に限らず製品の品質や環境性能の更なる向上が求められる中、数ある溶接工法のうち、レーザー溶接の担う役割はこれから益々大きくなることが見込まれ、今後においてはレーザー溶接の適用範囲拡大が求められると考えている。