

鉄道車両におけるレーザ溶接技術

川崎重工業株式会社
平嶋 利行

1. はじめに

鉄道は他の交通機関に比べてエコの点で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、安全性や軽量性、合理性の向上を追求して進化し続けてきた。例えば、スチール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スチール製であるが、鉄道車両の構体はステンレス製あるいはアルミ合金製に置き換わってきた。スチールは腐食対策のため板厚を余分にとる必要があるため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。ステンレス車両においてもこのような特性を持たせるべく、レーザ溶接を用いた新しい構体の開発と実用化が行われた。レーザ溶接のメリットを最大限に活かすために構体構造まで手を入れた点が特徴的であり、これを含めて概略を説明する。

2. 開発の経緯

ステンレス鋼は線膨張係数が大きいというのに熱伝導係数が比較的小さい。そのため溶接を行うと局部に熱が溜まって熱変形を起こしやすい。従って、車両構体の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（通常の打点ピッチは50～80mm）ため外板の歪みは生じやすい。一般に構体は側、屋根、床、および妻（車体の前後の面）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熱歪みは課題となる。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る。近年のフラット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、より平滑で美しい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、2003 年頃から新しい接合技術としてレーザー溶接（図 2 および図 3）の適用開発が進められた。

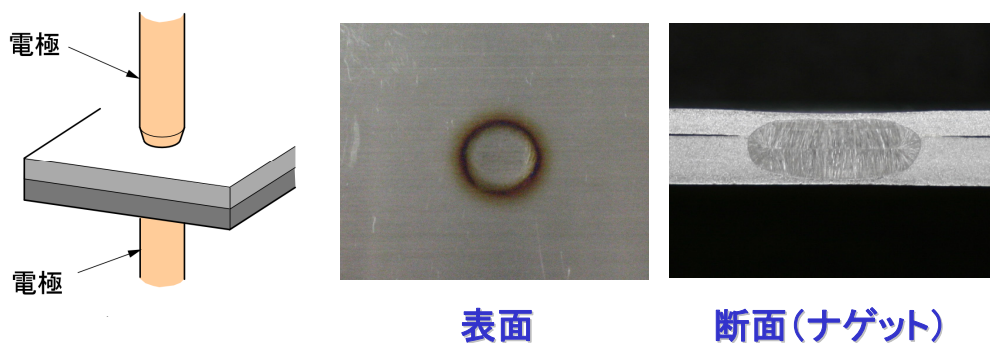


図 1 抵抗スポット溶接継手の外観と断面

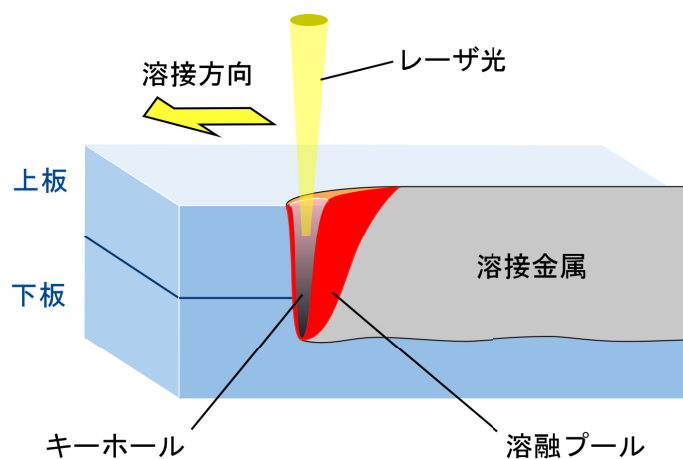


図 2 重ねレーザー溶接の概要

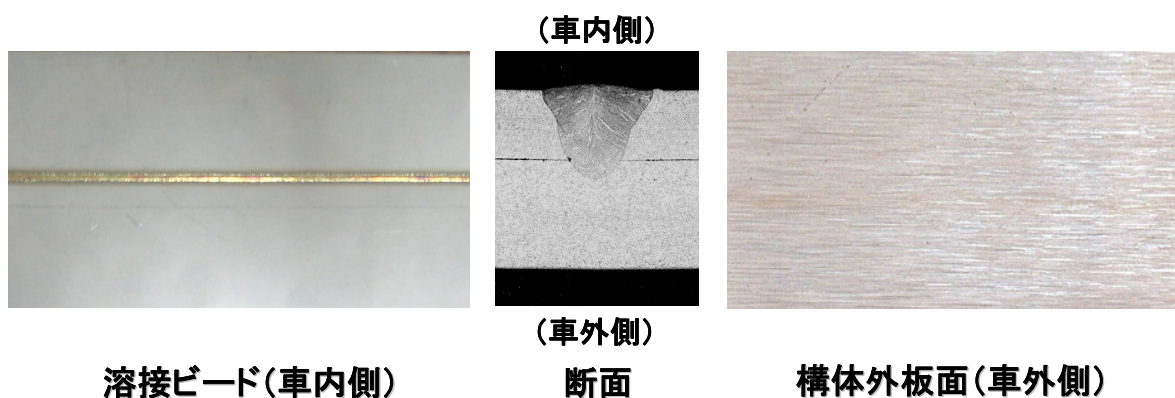


図 3 重ねレーザー溶接継手の外観と断面

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が開発された。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）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 に示すが、抵抗スポット溶接より 5 倍以上速い 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る。また通常の抵抗スポット溶接継手に比べ倍程度の強度（単位長さ当りの引張強度）が得られることも確認している。

3.2 外板の美観性

溶接痕の出な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。ベルトグラインド仕上げ）の仕上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。溶接線がスジ状に浮き出て見えるのは、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。つまり図 5 のように角折れによるスジが目立つことになるが、表面が平滑であると映りこむ像が異なってくるのでいっそう目立つ。しかし 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。なお、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。

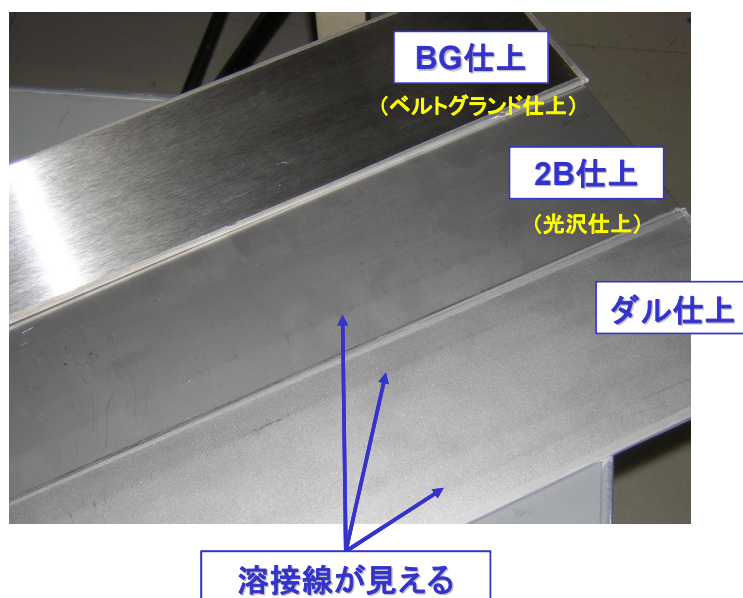


図 4 表面仕上げと溶接線の見え方の違い

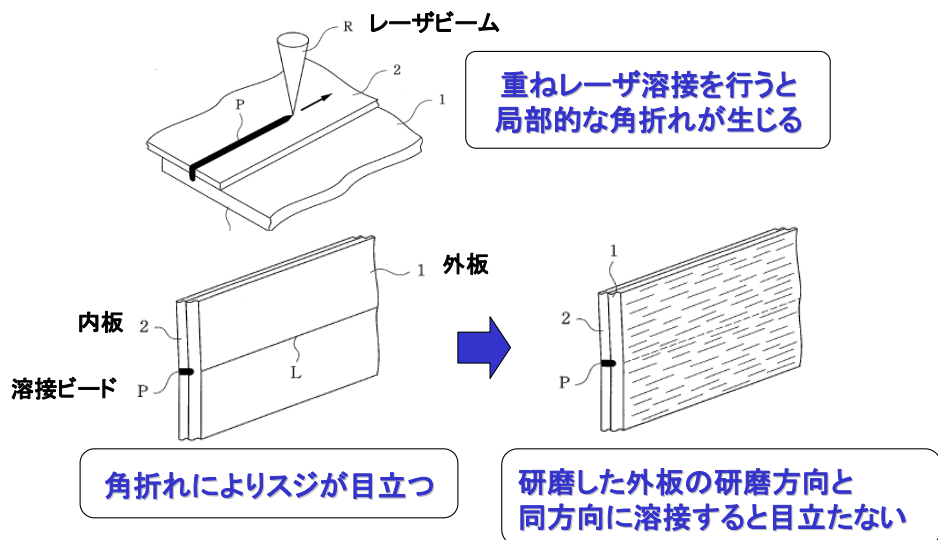


図5 溶接線が目立たなくなるしくみ

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。そこで構体構造が大きく見直されることになった。

従来のステンレス構体は板骨構造であり、外板には縦骨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。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立体交差させ、側パネルが構成される。こうすれば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ことができる。

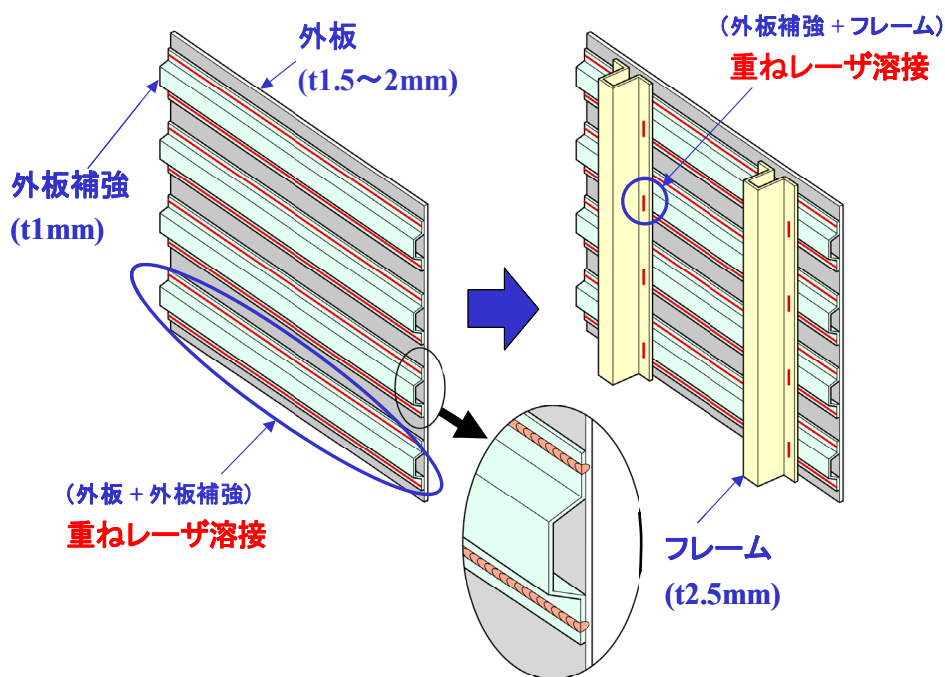


図6 レーザ溶接構体の基本構造

3.4 生産技術

重ねレーザ溶接を適切に行うためには重ねた板材どうしを隙間なく密着させる必要がある。このときレーザ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ということが課題となる。

レーザ切断などに従来から用いられてきた CO₂ レーザではレーザ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る。一方で、1990年代後半に大出力化の進んだ YAG レーザではレーザ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、精密な位置制御と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密着確保を同時に行うことが可能である。

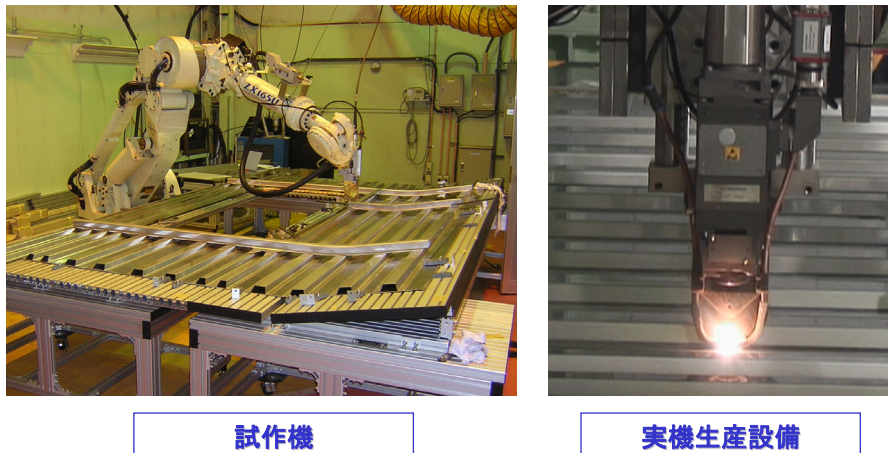


図 7 レーザ溶接機の外観

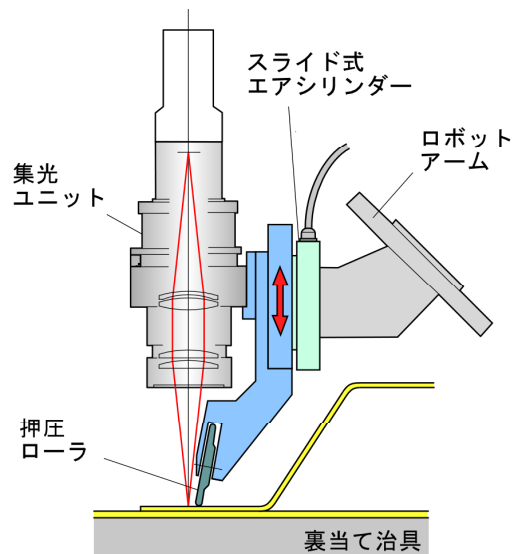


図 8 レーザ溶接ヘッドと押圧ローラ

4. 継手強度

重ねレーザ溶接では、レーザの出力と溶接速度をコントロールして目的の継手強度を得る。出力一定の場合では、溶接速度を遅くするほどレーザビームによる溶け込みは深くなるが、溶け込みが深いほど上下の板が溶着している部分の中（溶け込み中）も大きくなるので溶接継手の強度は高い。しかし深すぎるとレーザビームが裏面に貫通したり、あるいは焼け（酸化変色）を生じさせたりするので、適切な溶接条件の割り出しと施工管理が必要である。以下にいくつかの 카테고리ごとにレーザ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 はレーザ溶接とスポット溶接の強度基準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。連続溶接であるレーザ溶接継手は、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うる。一般にスポット溶接ピッチは 50~80mm 程度であるから、レーザ溶接継手は標準的なスポット溶接継手に比べて倍以上の引張強度を有していることになる。

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、参考に引き剥がし荷重で継手を破断させると、図 11 のような結果になる。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、破断荷重も安定している。従って母材が耐力を超えないように設計すれば、引き剥がし荷重が生じていても問題ないことが示された。

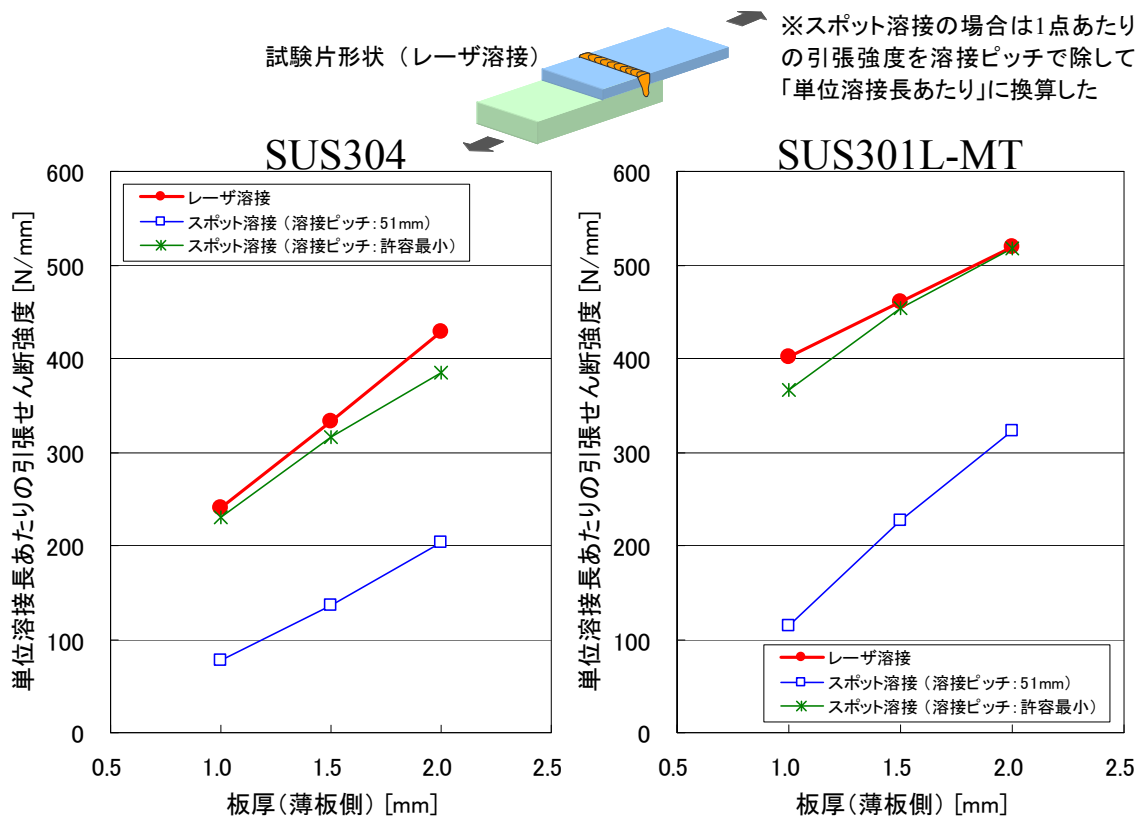


図 9 レーザ溶接とスポット溶接の継手強度（基準値）の比較

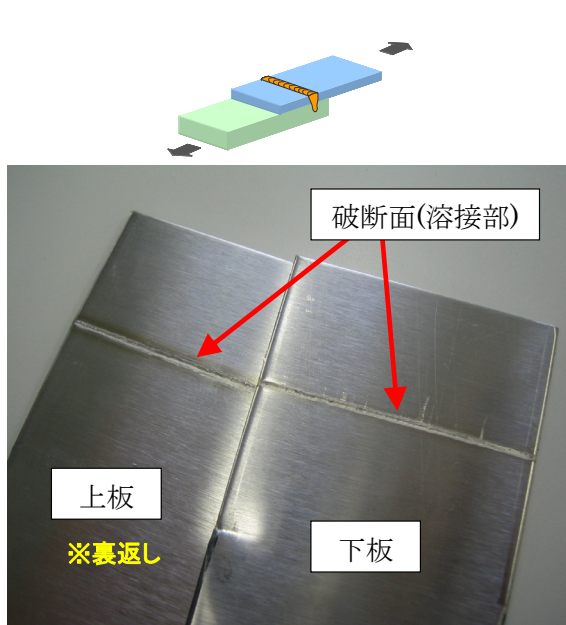


図 10 引張せん断の破壊形態

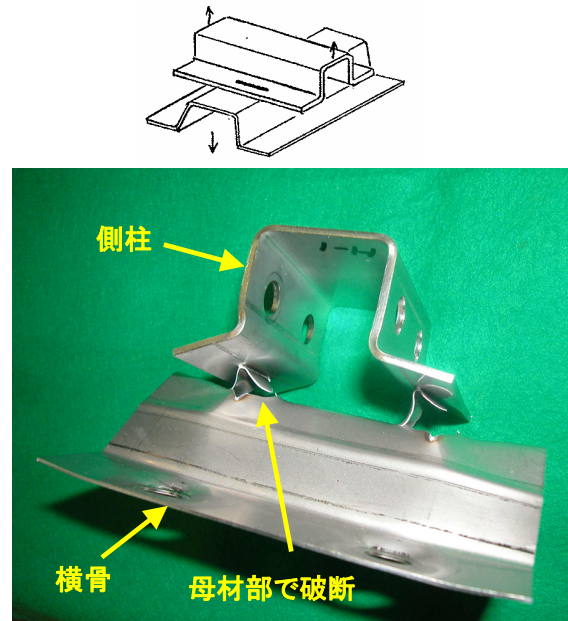


図 11 引き剥がし引張の破壊形態

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、溶け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）継手につい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。

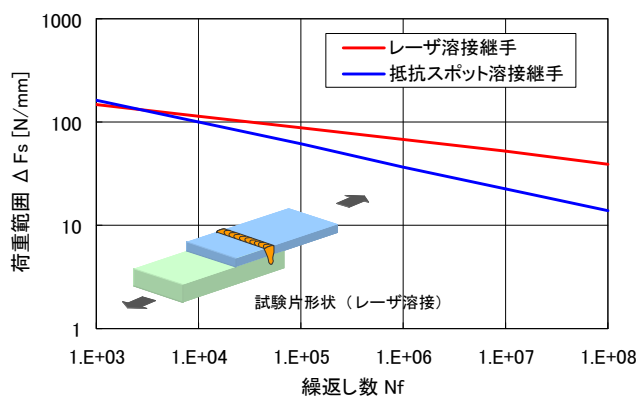


図 12 継手の引張せん断疲労強度(設計基準)の比較

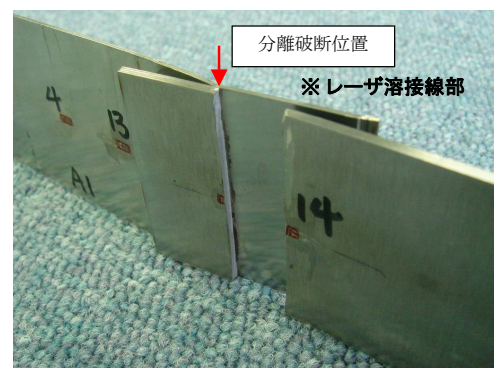


図 13 引張せん断による疲労破壊の形態

4.3 座屈強度

ステンレス構体は薄板構造であるため、外板の座屈が課題となることが多い。図 14 は座屈試験

の様子であり、これはせん断試験であるが圧縮試験も実施した。これら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による歪みにより座屈強度が理論値よりかなり小さくなることもある。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。また、スポット溶接パネルではスポット間での外板の座屈を想定しなければならないのに対し、連続溶接であるレーザー溶接パネルはそれを考慮する必要がないので、**図 15** に示すように理論上の座屈強度も大きくとれる。

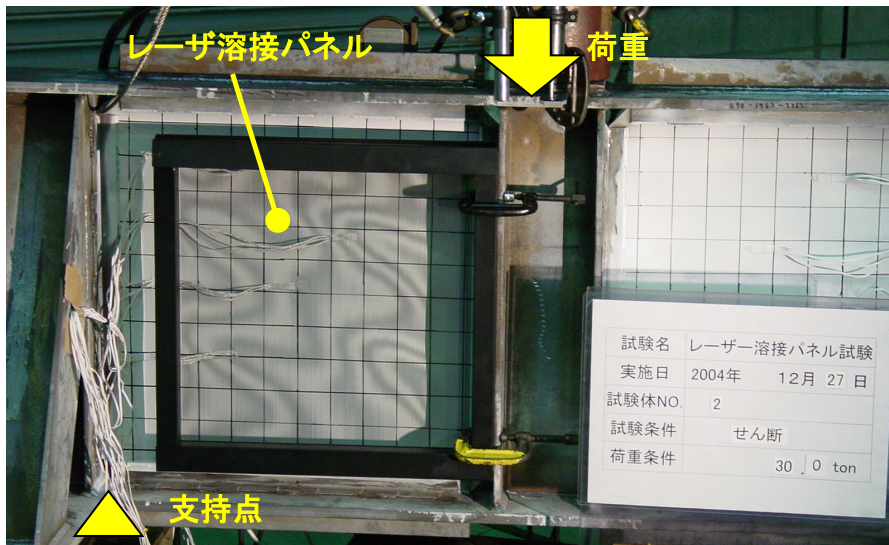


図 14 レーザー溶接パネルの座屈試験の様子（せん断座屈）

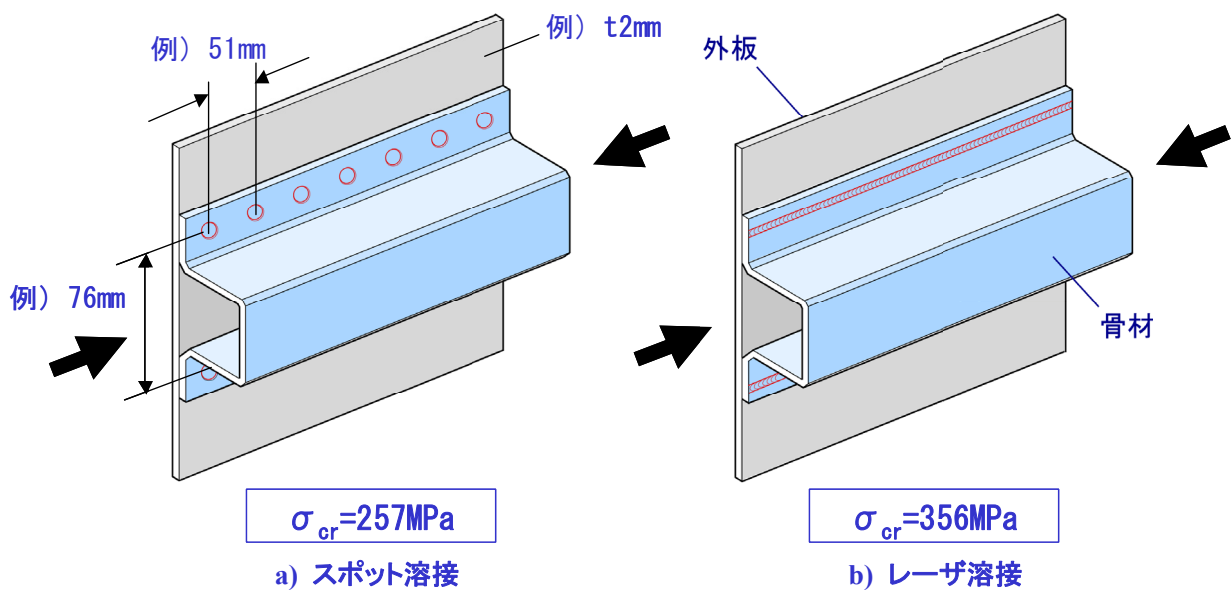


図 15 溶接方法による座屈強度の相違

5. 非破壊検査

重ねレーザー溶接継手は表面に溶接痕が出ないため、要求される継手強度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。目視検査だけでなく、超音波探傷技術（UT）を応用した非破壊検査が用いられる。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、溶着している部分では「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所要の継手品質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。これを溶接線の見えない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け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。溶け込み巾に応じてエコー高さの差は変わるのでこれにより所要の溶接品質を確保しているかどうかを判断できる。

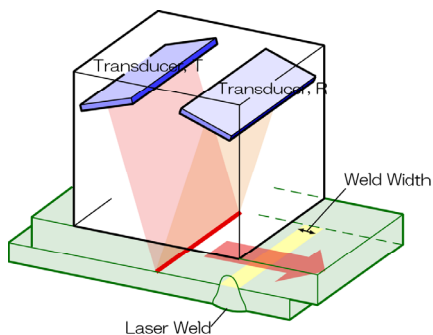


図 16 ラインフォーカス超音波探傷

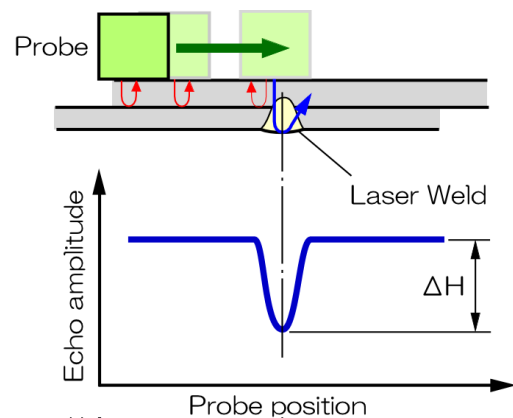


図 17 UTによる継手品質検査の原理

6. 実車適用

側構体パネルにレーザー溶接が適用された。2003 年度に試作構体が製作され、図 18 および図 19 に示すようにコンセプトどおり美しい外板の得られることが実証された。2005 年度以降、数多くの鉄道車両に採用されている。



図 18 レーザ溶接による試作構体



図 19 試作構体の側外板面の仕上がり
(側構体全面に適用)

7. おわりに

本稿では、レーザ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、レーザ溶接の担う役割はこれから益々大きくなると考えている。

<略歴>

1998年 大阪大学 大学院 工学研究科 卒業

1998年 川崎重工業株式会社入社 車両カンパニー技術総
括本部 配属

2012年 車両カンパニー技術本部開発部、基幹職
現在に至る