

# 「sustina」ステンレス構体水密化のための レーザすみ肉溶接技術の開発

Development of Laser Lap Welding for the “sustina” Stainless Steel Car Body Shell has secured Water-tightness

遠藤 翔太 Shota ENDO  
佐野 裕 Yutaka SANNO  
須田 剛 慈 Goji SUDA

浅賀 哲也 Tetsuya ASAKA  
西垣 昌司 Shoji NISHIGAKI

ステンレス製車両の在来工法は、抵抗スポットによる点接合が主であるため、その接合点間の水密性は樹脂シールによって確保されている。このため、樹脂シールの劣化に対するメンテナンスが必要であった。そこで「sustina」車両ではレーザ重ねすみ肉溶接を窓および出入り口フレームと外板との接合に適用し、樹脂シールを省略することを試みた。その前提となる継手の機械的特性を調査し、妥当性を確認したので報告する。

We have developed a new laser welding technology for the “sustina”. Our light stainless steel car body shell consists of various members assembled with the electric resistance spot welding method. Up to now, to secure water-tightness required for the car body shell, the resin sealing agent has been used. However, the sealing agent has a deterioration problem caused by long-term use. To solve this problem, we applied laser lap welding to secure water-tightness of the joint between the frame of the window and door, and outer panel. We investigated the mechanical properties of the welded part processed with laser lap welding method, and concluded that the method was suitable for production of railroad vehicles. This document reports detail of our investigation and conclusion.

## 1 はじめに

ステンレス製車両の在来工法は、抵抗スポットによる点接合が主であるため、その接合点間の水密性は樹脂シールによって確保されている。ここでいう水密性とは JIS Z 2329 に規定されている発泡漏れ試験法の加圧法により、観察部に塗布した発泡液から連続する発泡または気泡の成長、もしくは気体の噴出がない状態である。水密性が確保されなければ、各種電子機器の故障につながる可能性がある。その結果として、機器の誤作動、機能停止につながることも考えられる。このため、樹脂シールの劣化に対するメンテナンスが必要であった。

一方、近年鉄道車両にレーザ溶接が多用されつつあるが、これは側構体の外板の接合への適用が大半で、主に外板の低歪み化、水密性向上を狙ったものである<sup>(1)(2)</sup>。水密性向上に着目すれば、側構体の開口部（出入り口部と窓部）もレーザによる溶接部の連続化が必要であると考える。

そこで「sustina」車両ではレーザ重ねすみ肉溶接を窓および出入り口フレームと外板との接合に適用し、シールを省略することを試みた。シールを省略することにより、メンテナンスにかかるコストを削減することが可能となる。そのため実用化を見据え、レーザすみ肉溶接部の金属組織観察、耐食性試験、静的引張試験、高サイク

ル疲労試験などの各種試験を実施してきた。

今回その前提となる継手の機械的特性を調査し、妥当性を確認したので報告する。

## 2 適用部位

### 2.1 車両外観

図1にレーザすみ肉溶接を適用した車両の外観を示す。図中の囲み線で示した窓、出入り口部位にレーザすみ肉溶接を全周適用している。



図1 車両外観

なお、レーザすみ肉溶接は溶接条件の最適化により、フィラーワイヤなどの溶加材、ハイブリットレーザ溶接に見られるアーク溶接の併用は一切しておらず、レーザのみで溶接部を形成している。

## 2.2 窓部

図2にレーザすみ肉溶接を適用した窓部の外観を示す。SUS301L-DLT t1.5+SUS304 t1.5の重ねすみ肉溶接継手で構成されている。当該部位を矢印で示す。

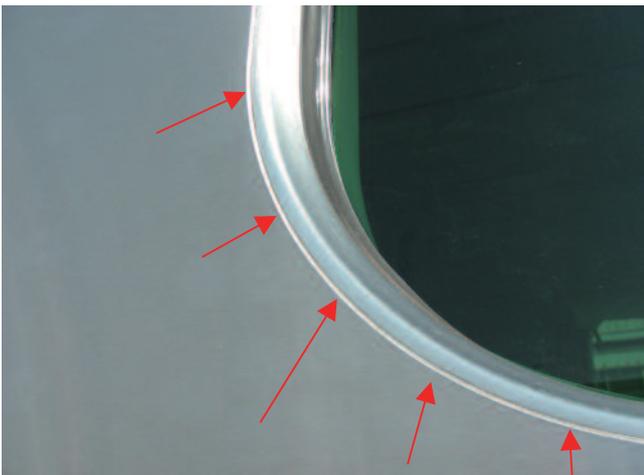


図2 側窓部

## 2.3 出入り口部

図3に出入り口部の外観を示す。SUS301L-DLT t1.5+SUS304 t4.0の重ねすみ肉溶接継手で構成されている。当該部位を矢印で示す。

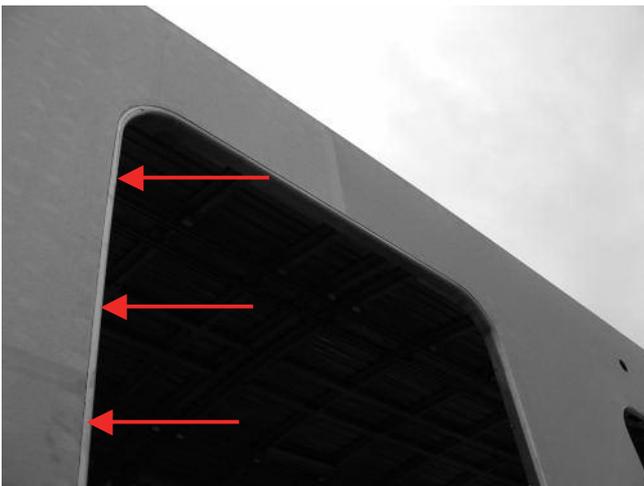


図3 側出入り口部

## 3 重ねすみ肉溶接部の評価方法

レーザ溶接装置における加工ヘッド周りの機器を品質工学によってパラメータ設計し、最適な溶接条件でのすみ肉溶接部を評価した<sup>(4)</sup>。詳細は後述するが、複合サイクル試験を用いた耐食性試験を実施し、その結果からす

み肉溶接部の金属組織観察を行った。また継手の機械的特性を調査するため静的強度試験（引張）、動的強度試験（疲労）を実施した。

なお、板厚組み合わせは、一番力のかかる出入り口フレーム部のSUS301L-DLT t1.5+SUS304 t4.0である。

## 4 結果と考察

### 4.1 耐食性試験

#### 4.1.1 試験概要

耐食性確認のため、レーザ重ねすみ肉溶接部の複合サイクル試験（CCT試験）を行った。なお、試験体は24時間ごとに試験機から取り出し、水洗いを行っている。

#### 4.1.2 試験体

SUS301L-DLT t1.5+SUS304 t4.0をレーザすみ肉溶接した試験体を用いた。試験前の外観を図4に示す。なお、試験体は板厚差があるため周囲をビニールテープでマスキングし、特に試験体上面から錆が流れ出るのを予防した。

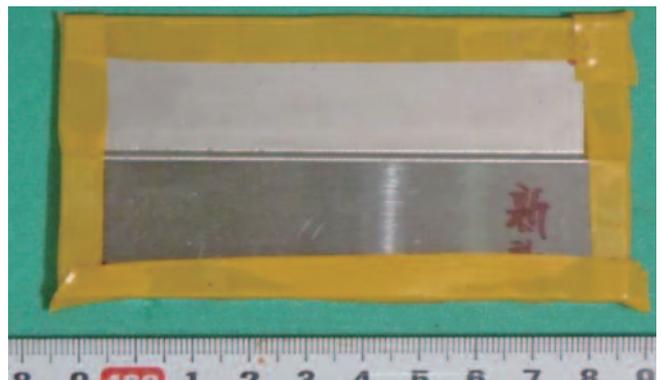


図4 試験前の外観形状

#### 4.1.3 試験方法

試験は図5に示す複合サイクル試験方法に従って合計216時間（27サイクル）まで行った。観察は24時間（3サイクル）ごとに試験体を装置から取り出し、発錆状況の写真撮影を行った後、試験面の水洗いを行って試験槽へ戻すことを繰り返した。なお、試験面は試験前にアルコールで脱脂を行った。

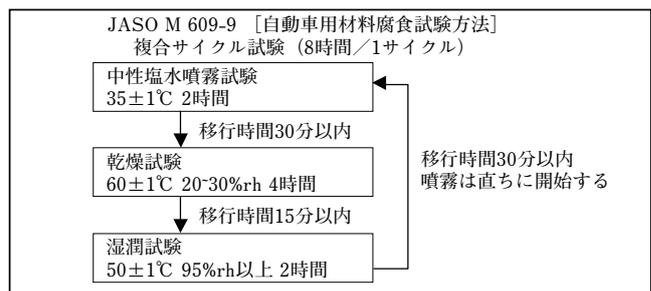


図5 複合サイクル試験要領

#### 4. 1. 4 試験結果

図6に示す部分において、発錆の観察を行い、216時間（27サイクル）実施したが、重ねすみ肉溶接部に発錆は見受けられなかった。216時間（27サイクル）経過後の試験体外観を図7に示す。

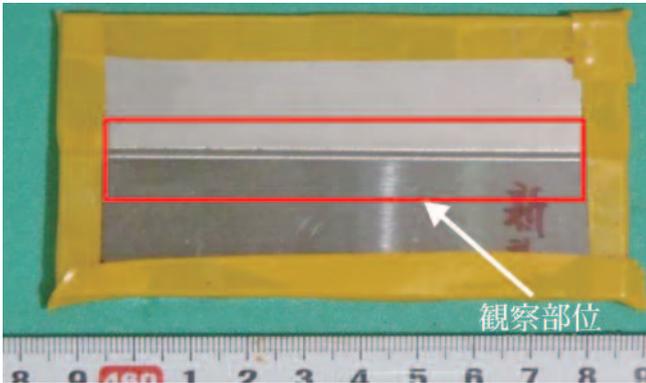


図6 試験体観察部位

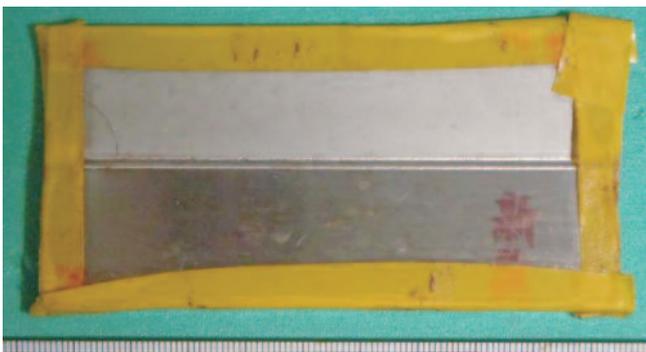


図7 試験後の外観形状

#### 4. 2 レーザすみ肉溶接部の金属組織観察

耐食性試験の結果、発錆は見られなかったため、レーザ重ねすみ肉溶接した試料の溶接金属部の鋭敏化について観察した。鋭敏化とはオーステナイト系ステンレスが600℃～800℃に加熱された場合、粒界にクロム炭化物を析出しやすくなる状態である。

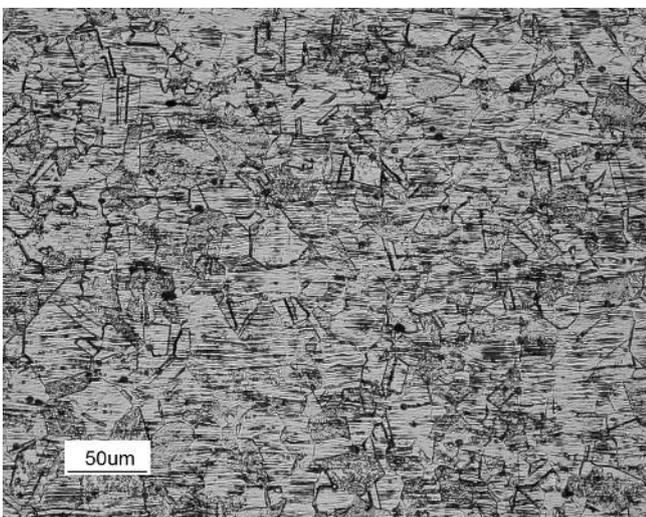
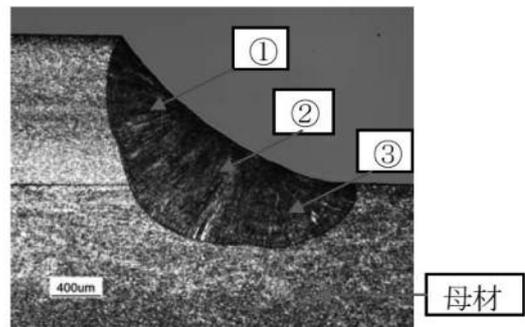


図9 試料C母材×200倍

鋭敏化することにより炭化物の近傍はクロム濃度が少なくなるため、局部的に耐食性が著しく悪くなり、粒界腐食を生じやすくなる。

図8にC（試料端部より80mm）の観察位置（①～③）を示す。加熱による鋭敏化の影響を調べる上で、同じ溶接部の中でも上板、上板と下板の境界付近、下板で熱の加わり方が異なると考え、①上板、②上板と下板の境界付近、③下板、についてそれぞれ観察した。図9～図16に試料Cの母材と観察位置の代表的なシュウ酸電解写真を示す。図11、図13、図15に示す200倍の写真から分かるように、レーザすみ肉溶接部は一般の溶接と同じ、デンドライト組織（樹枝状結晶）を形成しており、溶接金属の特異な凝固現象は確認できない。溶接部との比較のため図9に母材の写真を示すが、母材にはデンドライト組織が形成されていない。

なお、より詳細な組織観察を行うため500倍で撮影した結果、試料Cの図10と図12、図14、図16のように母材と溶接内部を比較しても粒界が溝状に深いエッチングが認められないため、鋭敏化は確認できない。また、観察位置（①～③）のそれぞれを比較しても熱の加わり方に大きな差はなかったと言える。



試料：C

図8 試料Cの観察位置

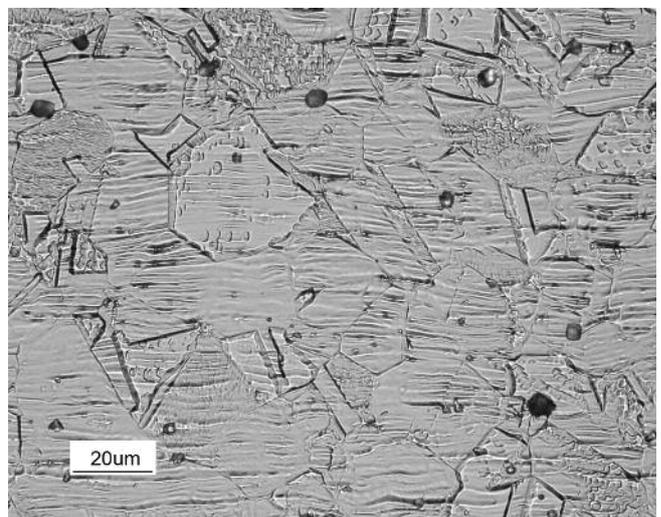


図10 試料C母材×500倍

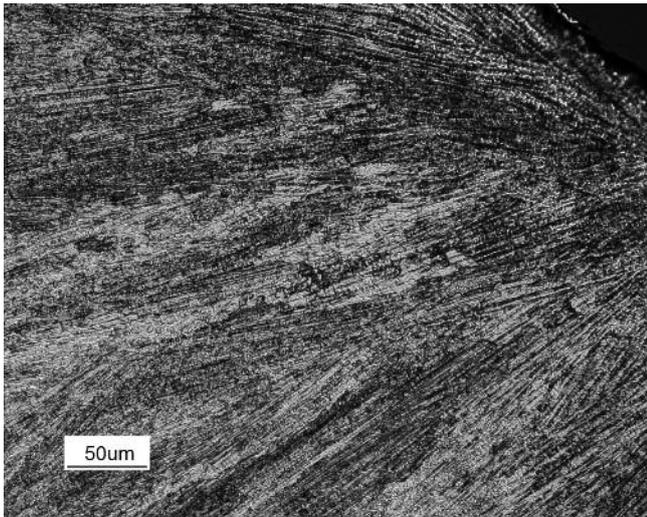


図11 試料C-①×200倍

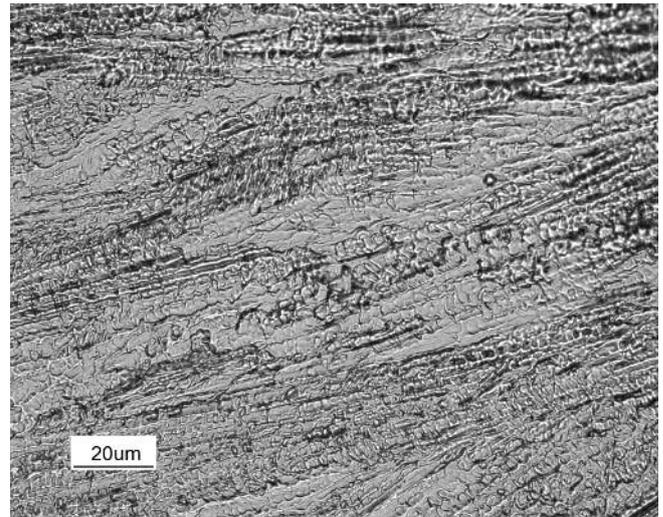


図12 試料C-①×500倍

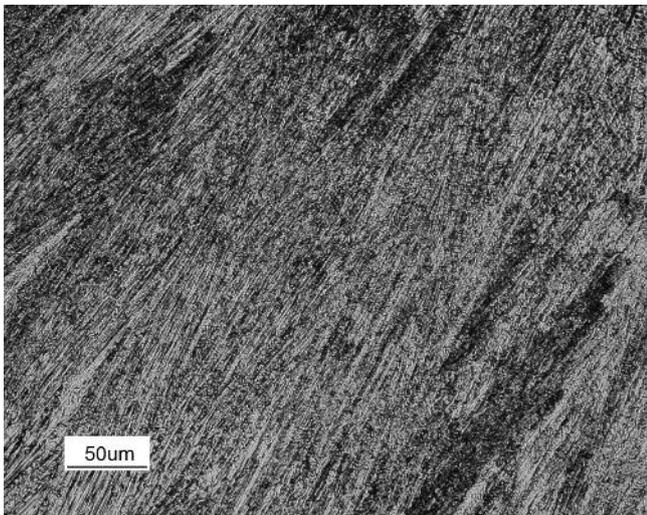


図13 試料C-②×200倍

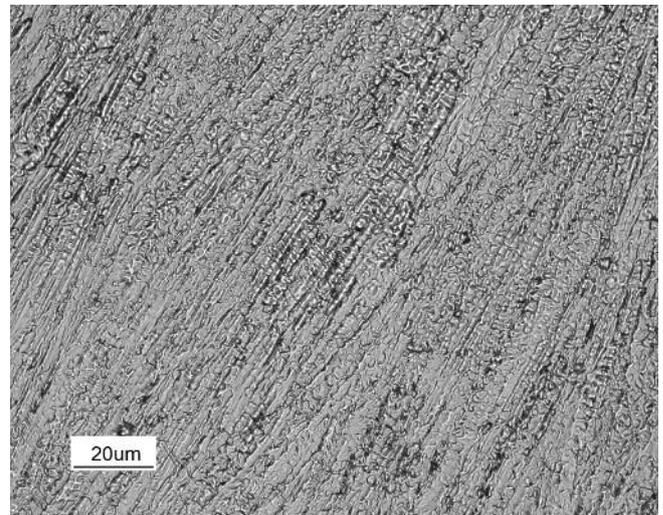


図14 試料C-②×500倍

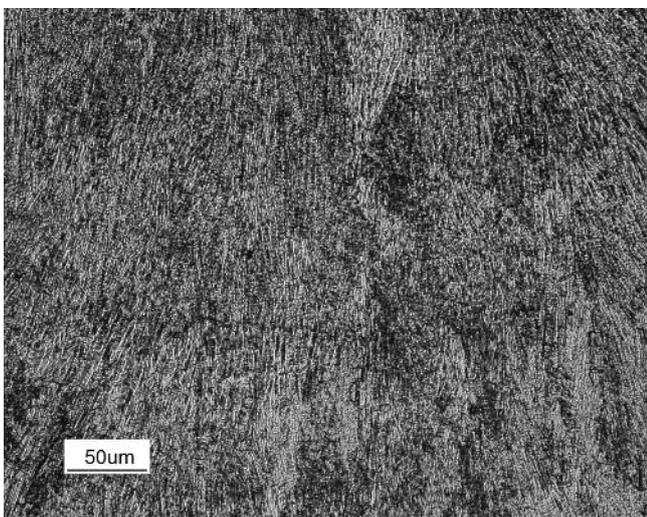


図15 試料C-③×200倍

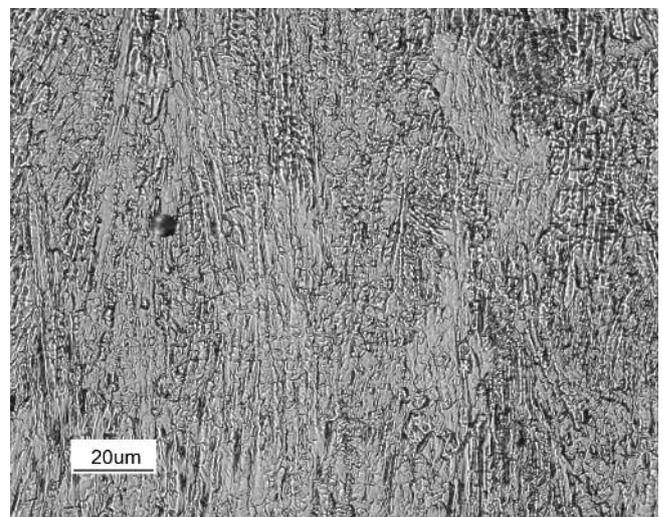


図16 試料C-③×500倍

#### 4. 3 静的引張試験結果

##### 4. 3. 1 試験概要

レーザーによる重ねすみ肉溶接材を製作し試験片形状に加工後、引張試験を実施した。

##### 4. 3. 2 試験片形状

40mmの短冊状に試験体を加工し、引張試験片2体、疲労試験片11体、(予備1体)を作製した。図17に試験体形状を示す。

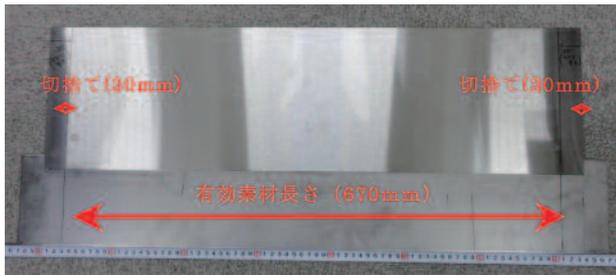
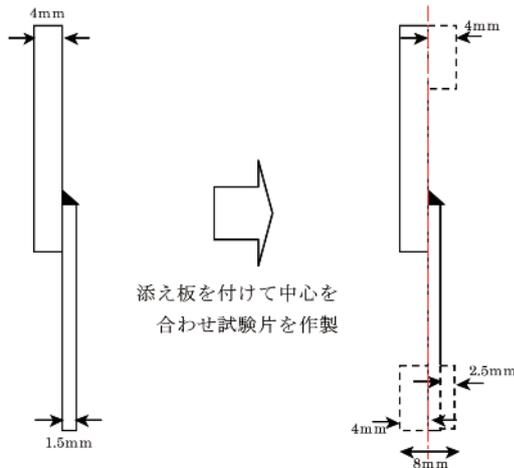


図17 試験体形状

なお、試験時には板厚差を考慮し、添え板を取り付けてクランプした。詳細を図18に示す。



(a) 割り出し後の形状 (b) 添え板の取り付け後の形状

図18 添え板取り付け図

##### 4. 3. 3 試験条件

試験温度は室温(22℃)のもと、試験速度は耐力まで0.5mm/min、耐力以降破断まで12mm/minで実施した。なお、試験は2回(体)実施しT1、T2と識別している。

##### 4. 3. 4 引張試験機

試験装置は万能引張試験機 島津製作所AG-IS250kNを使用した。

##### 4. 3. 5 試験結果

表1に引張試験結果一覧を示す。図19～図20にT1、T2の荷重-ストローク線図を示す。JRIS-W0161「鉄道車

両一作業標準-ステンレス鋼材のスポット溶接」で示される最小引張せん断荷重を参照すると、12.1kNであるので、T1、T2とも在来工法である抵抗スポット溶接継手と同等以上の強度を持っていることがわかる。

抵抗スポット溶接継手と同等以上の強度を得た理由に、溶接方法の違いによる(抵抗スポット溶接は点接合だがレーザーすみ肉溶接は連続接合)溶接部の接合面積の違いが考えられる。

表1 引張試験結果一覧

識別	試験温度℃	0.2%荷重(kN)	引張荷重(kN)
T1	22	14.1	20.3
T2	22	13.5	20.0

適用規格：JIS Z2241 備考：耐力まで0.5mm/min→耐力以降破断まで12mm/minで行った。

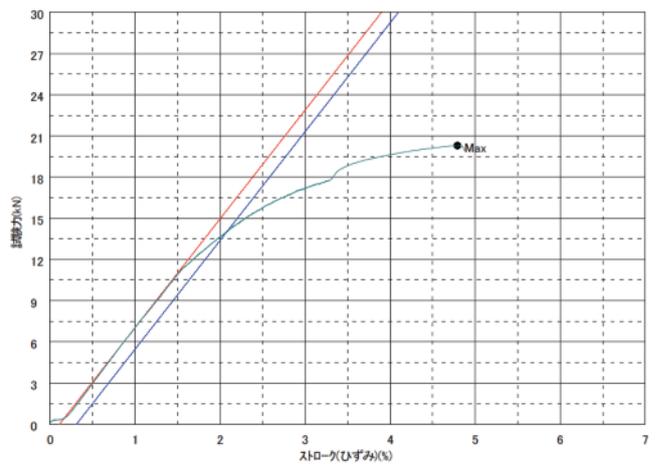


図19 荷重-ストローク線図 T1

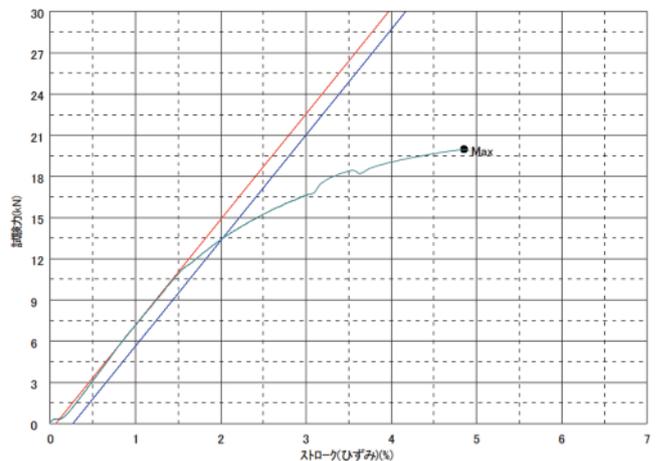


図20 荷重-ストローク線図 T2

#### 4. 4 疲労強度試験結果

##### 4. 4. 1 試験概要

レーザによる重ねすみ肉溶接材を製作し試験片形状に加工後、高サイクル疲労試験を実施した。

##### 4. 4. 2 試験片

図17の試験体から切り出した試験片を用いる。

##### 4. 4. 3 試験条件

試験温度は室温（23℃）のもと、試験制御は一定荷重制御、応力比R：0.1、周波数：40Hz（sin波）で実施した。

##### 4. 4. 4 疲労試験機

試験装置は電気機械式油圧サーボ疲労試験機MTS Landmark Material Test System、±100kN（16号機）を用いた。

##### 4. 4. 5 試験結果

試験の結果、図21に示すS-N線図が得られた。疲労限は5.0kNであり（最大荷重10.0kN、平均荷重5.5kNで $10^7$ 回を達成）疲労限に基づいて、樹脂シールをレーザすみ肉溶接に置き換えることが可能となった。

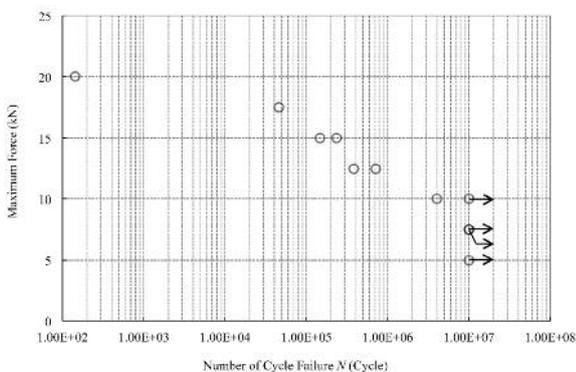


図21 S-N線図

## 5 まとめ

「sustina」ステンレス構体水密化のために開発したレーザすみ肉溶接を用いた各種試験結果を以下に示す。

- (1) レーザすみ肉溶接部の金属組織観察を行った結果、溶接金属部の鋭敏化は見られなかった。
- (2) 耐食性試験として実施した複合サイクル試験では216時間経過後も溶接部の発錆は見られなかった。
- (3) 静的引張試験の結果、在来工法である抵抗スポット溶接継手と同等以上の強度を持っていることがわかった。また疲労試験により繰り返し数 $10^7$ 回を達成し、疲労強度を確認した。

以上の結果に基づき、「sustina」車両にレーザすみ肉溶接技術を採用した。

今後の課題として、工数の低減、品質の安定化、すみ肉溶接の適用範囲の見直しが挙げられる。

最後に、本論文を執筆するにあたり多大なご協力を頂いた出向中の及川昌志氏に感謝の意を述べる。

#### 参考文献

- (1) 古賀信次，他：「ステンレス車両構体のレーザ溶接技術」，溶接学会全国大会講演概要 第82集，F40-F45，(2008)，川崎重工業（株）
- (2) 伊藤昌隆：「構体製作の現在」，近畿車輛技報 17号，12-19，(2011)，近畿車輛（株）
- (3) 河田直樹：「研究開発における品質工学の活用」，総合車両製作所技報 第1号，38-45，(2013)，(株)総合車両製作所

#### 著者紹介



遠藤翔太  
生産本部  
技術部（sustina）



佐野 裕  
生産本部  
生産管理部（生産技術）



須田剛慈  
生産本部  
技術部（sustina）主査



浅賀哲也  
生産本部  
技術部（sustina）主任技師



西垣昌司  
生産本部  
技術部 部長（設計）