

## ステンレス構体応力集中部の疲労強度評価法

車両構造技術研究部 車両強度

主任研究員 織田 安朝

### 1. はじめに

近年の鉄道車両用構体としては、ステンレス鋼製構体がアルミニウム合金製構体とともに主流となっているが、スポット溶接継手部において疲労損傷が見られる場合がある。しかし、スポット溶接継手部の疲労強度評価に関する明確な基準がないのが現状である<sup>1)</sup>。そこで、スポット溶接継手部の疲労設計線図を作成することを目的として、疲労試験および実車による走行試験を実施した。

また、経年車両において、構体外板に歪が見られる場合があり、実使用時に母材の耐力を超過する可能性が考えられる。母材部については、従来、構体荷重試験結果に基づき応力限界図<sup>2)</sup>により評価が行われてきたが、走行試験で得た実働応力から強度評価を行った例はほとんどない。そこで、高応力が発生する部位に着目し、走行試験に基づく実働応力による強度評価法について検討した。

さらに、作成済みのレーザ溶接部の疲労強度評価線図と併せて、ステンレス構体疲労強度評価法をまとめた。

### 2. ステンレス鋼製構体の損傷事例

ステンレス鋼製構体には重ね溶接継手を適用する場合が多い。重ね溶接継手には、スポット溶接、プラグ溶接、さらに、最近ではレーザ溶接があるが、実際に発生した損傷を調査したところ、以下に示すスポット溶接部を起点とする損傷事例が見られた。なお、外板や屋根の母材部に歪が生じる例はよく見られるが、比較的大きい歪があった一例を除いて、構体の内部を調査してもき裂損傷は見られなかった。

#### (1) 損傷事例1

側引戸フレームのスポット溶接部を起点とした損傷事例を図1に示す。この損傷は新製から15～16年を経て発見されたもので、フレームの上下端まで達していた。発見時の走行距離は360～500万km程度で、同形式車両の対象部位における損傷発生確率は36%と高い。

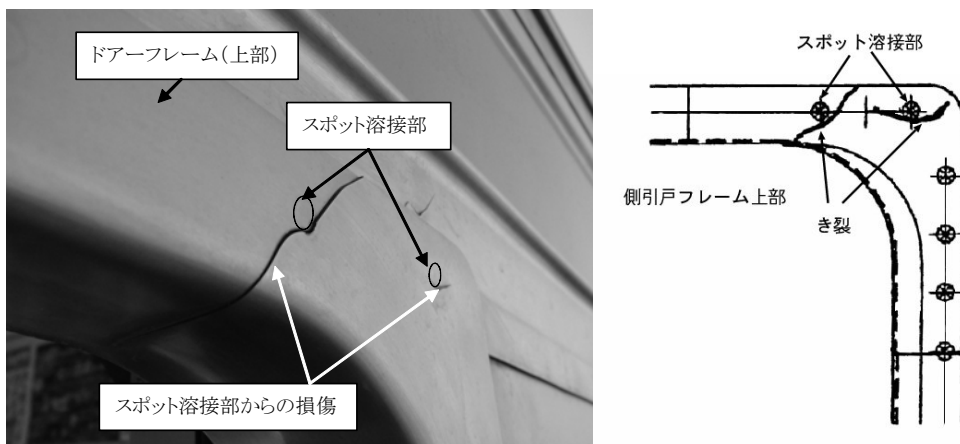


図1 損傷事例1 (側引戸フレーム溶接部の損傷)

## (2) 損傷事例2

側柱と腰帯のスポット溶接部を起点とし、腰帯のハット型材のツバ部が破断した例で、外板側が比較的大きく歪んでいる（図2）。新製から15年経過した外板の歪調査の時点で内部のスポット溶接部を起点とする損傷が発見されたものである。なお、調査は歪が最大のものについて実施したが、同様な外板の歪は、程度に違いはあるが、同形式車両のほとんどの同部位に見られる。

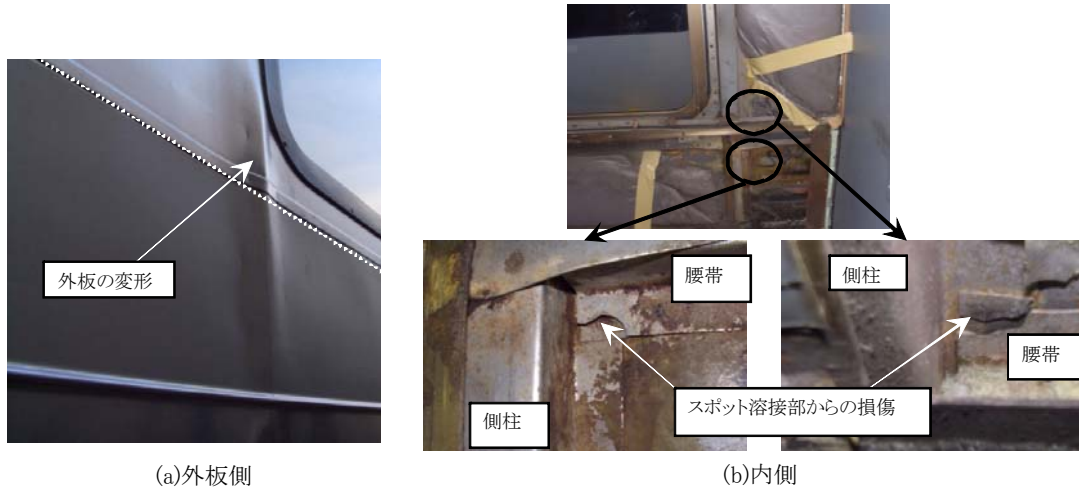


図2 損傷事例2（側柱と腰帯接合部の損傷）

## (3) 損傷事例3

まくらばり上にある外板と間柱のスポット溶接部を起点とした損傷例を図3に示す。この損傷は新製から約5年を経て発見された。発見時の走行距離は77～99万kmで、同形式車両の対象部位における損傷発生確率はほぼ100%に近い。

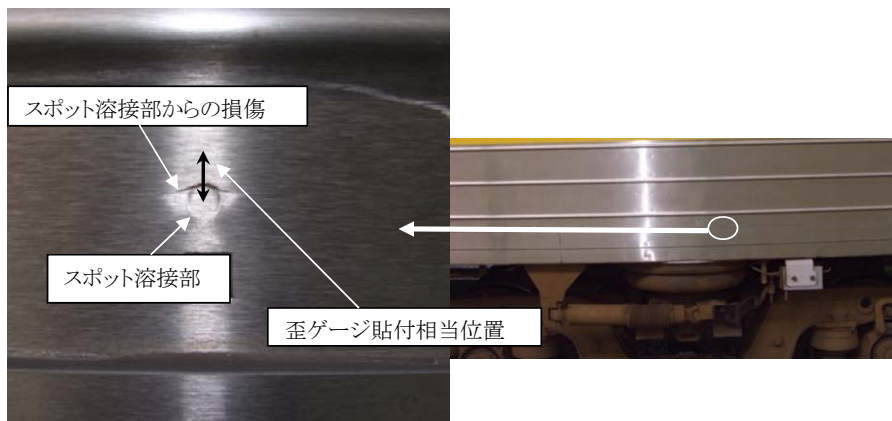


図3 損傷事例3（間柱と外板溶接部の損傷）

## 3. スポット溶接部の疲労設計線図

スポット溶接部について、疲労試験結果と走行試験結果の比較を図4に示す。疲労試験は、小型試験片および実物大試験体で実施した。図中のS-N曲線と疲労設計線は小型試験片のものである。また、走行試験は損傷事例のある車両とない車両で実施し、図中のプロットは、測定したスポット溶接部の実働応力ひん度分布を試験走行距離から1000万km走行時に換算して示す。

このS-N曲線を用いて、前述の各ひん度分布から、修正マイナー則により1000万km走行時の累積損傷

度を計算し、これが1となる走行距離、即ち、損傷が発生する走行距離を推定した結果を図中の右上に示す。各損傷事例の損傷発生時の推定走行距離は発見時の走行距離とほぼ同程度であること、また、損傷事例のないデータでは累積損傷度が0となり、損傷が発生しないと推定されることから、本S-N曲線が妥当であると認められる。したがって、本S-N曲線から標準偏差の2倍の値を引下げて引いた曲線を疲労設計線とすることとする。

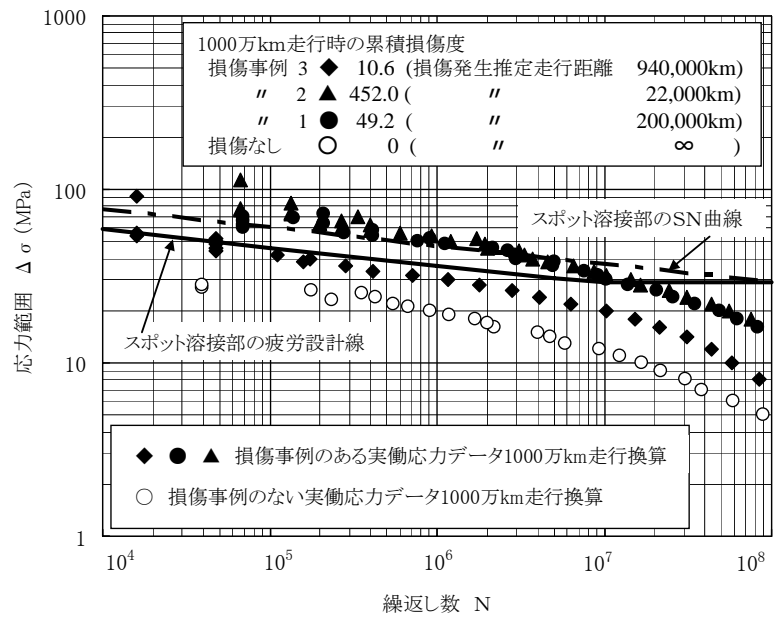


図4 疲労試験結果と走行試験結果の比較

#### 4. 母材部の応力限界図による評価

母材部については、従来、構体荷重試験

結果に基づき応力限界図により評価が行われてきた。SUS301Lの応力限界図については、日本鉄道車両工業会の規格、RIS210<sup>2)</sup>に記載されているが、廉価で調達容易で最も汎用性の高いSUS304については、応力限界図が存在しない。そこで、SUS304の応力限界図を得るため、母材について高平均応力下で疲労試験を実施し、得られたS-N曲線の安全率を考慮した10<sup>7</sup>時間強度に基づき応力限界図を作成した。

走行試験において、損傷事例のあるスポット溶接部およびその付近の母材部の実働応力を測定し、実働応力の最大値を変動応力として上記のように作成した応力限界図にプロットした結果を図5に示す。ここで、スポット溶接部については、応力限界図に疲労に対する許容限度がないため疲労強度評価はできないが、耐力に対する強度評価は行えるため参考として記した。

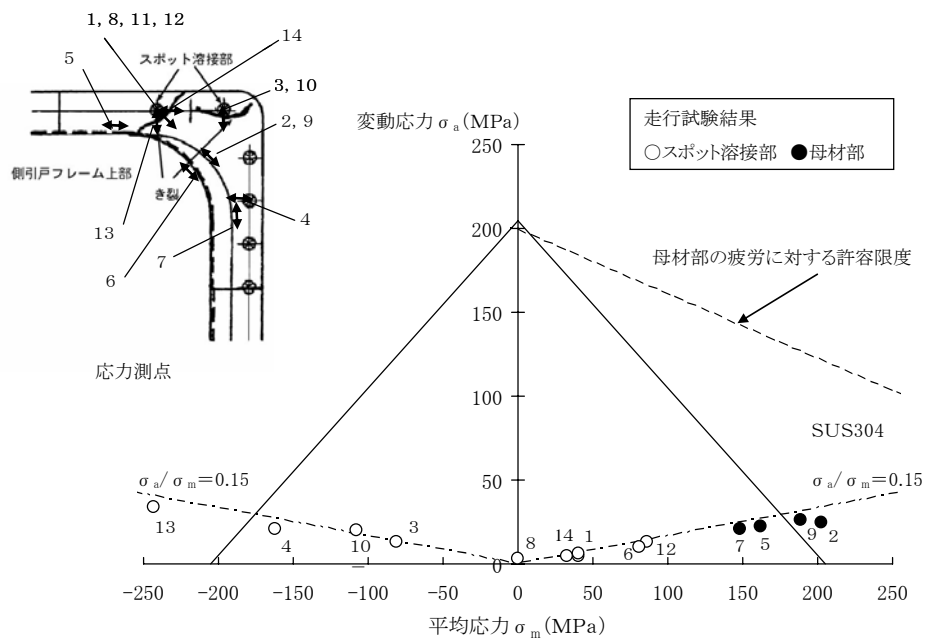


図5 応力限界図に走行試験結果をプロットした結果例

SUS304の耐力は205MPa

で、その許容限度を超えた例が見られる。また、設計時の動的付加係数に相当する変動応力 $\sigma_a$ /平均応力 $\sigma_m$ は0.15であり、まくらばねが空気ばねであるにもかかわらず、JISにおける空気ばねの場合の0.1を超えている。また、SUS304の母材部では、平均応力0における疲労に対する許容限度が耐力に近いいため、実車体が高平均応力下にあることを考慮すると、疲労に対する許容限度を超える以前に耐力を超過することになる。

## 5. ステンレス構体疲労強度評価法

### 5.1 スポット溶接部およびレーザー溶接部の疲労強度評価法

スポット溶接部の疲労設計線に作成済みのレーザー溶接部の疲労設計線を併記し、スポット溶接部およびレーザー溶接部の疲労設計線図としてまとめたものを図6に示す。ここで、 $10^7$ 回の応力範囲は、スポット溶接部が29MPa、レーザー溶接部が43MPaである。

スポット溶接部およびレーザー溶接部の疲労強度評価の方法については、最大値が疲労設計線図の $10^7$ 回の応力範囲以下であれば問題なしと判定し、超えるものについては、本線図を用い、走行試験等から得られた実働応力ひん度分布とから、マイナー則により疲労照査を行う。ここで、評価の際用いる応力は、構体の外板側に、ゲージ長5mmの歪ゲージの中央溶接部の母材との境界相当位置に貼付して測定を行う。

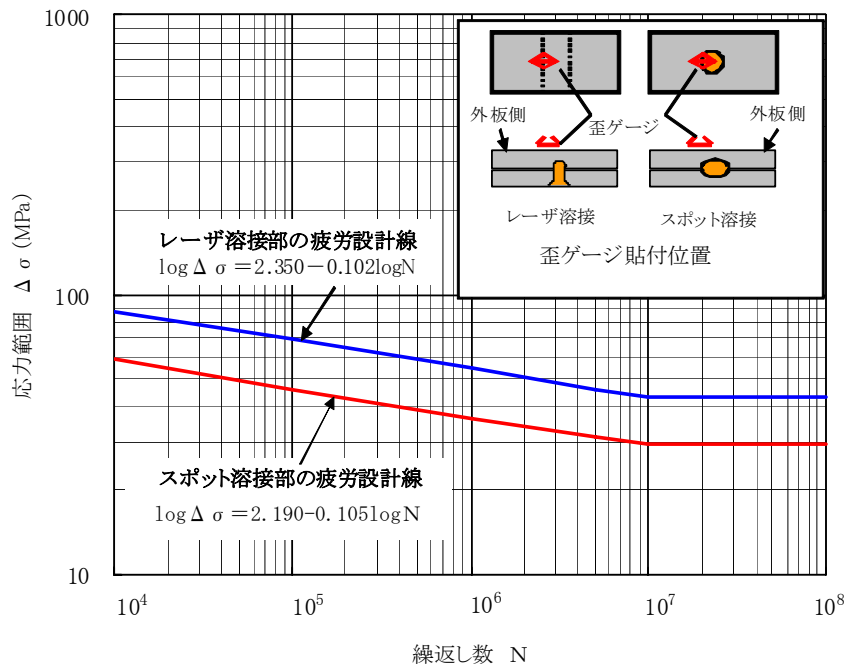


図6 スポット溶接部およびレーザー溶接部の疲労設計線図

### 5.2 母材部の疲労強度評価法

母材部の強度評価については、従来どおり応力限界図により評価する。変動応力は走行試験等から得られる最大応力値、平均応力は静荷重試験等で得られ、その想定される最大の応力値を応力限界図にプロットして評価する。評価に用いる応力限界図は、SUS304材については図2に示した応力限界図、SUS301L材については鉄道車両工業会規格RIS210の応力限界図<sup>2)</sup>とする。

なお、構体設計時の動的荷重条件として、まくらばねが空気ばねの場合、動的付加係数（変動応力／平均応力）はJIS<sup>1)</sup>では0.1とされているが、使用状況によっては0.1を超える場合があり、今後、動的付加係数の適正值について検討する必要がある。

## 6. まとめ

疲労損傷が見られるステンレス鋼製構体のスポット溶接継手部については、疲労強度に関する基準がないため、疲労試験および現車走行試験から疲労設計線図を作成した。また、構体外板に歪が見られる経年車両においては、走行試験で得た実働応力から応力限界図により強度評価を行った例がほとんどないため、走行試験に基づく実働応力による強度評価法について検討した。これらの結果とレーザー溶接部の疲労強度評価線図と併せて、ステンレス構体疲労強度評価法を提案した。今後、さらなる現車試験データの蓄積により信頼性を高めていきたいと考えている。

### 参考文献

- 1) 日本規格協会；JIS E 7106「鉄道車両用—旅客車用構体—設計通則」、2006
- 2) 日本鉄道車両工業会；RIS210「鉄道車両構体用 SUS301L 各調質材の強度基準」、1986. 3