

## Application News

卓上型動的・疲労試験機 サーボパルス™ EHF-Lシリーズ  
走査電子顕微鏡つき高温疲労試験機 SEMサーボパルス  
電子線マイクロアナライザ EPMA™ -8050G

# SEMサーボパルサを使用した 溶接材の3点曲げ疲労試験

矢野 文彬、西川 祐貴、小野 卓男

### ユーザーベネフィット

- ◆ SEMサーボパルサとEPMAを使用することで、溶接材の3点曲げ疲労試験とその破断要員の解析が可能です。
- ◆ SEMサーボパルサを使用することで、疲労き裂の観察が可能です。
- ◆ Servo Controller 4830により高精度の動的制御が可能です。

### ■はじめに

溶接は、建設業、自動車・航空産業等の輸送機分野、電気・電子産業といったあらゆる産業で使用されており、これらの産業にとって欠かせない技術となっています。溶接の欠陥が原因で事故が発生すると、人命や地球環境に大きく影響を与える可能性が高く、長期信頼性や耐久性の評価が重要なテーマと位置付けられています。

今回は、2種類の鉄材料を中央で溶接した試験片を用意し、卓上型動的・疲労試験機サーボパルサを用いて3点曲げ疲労試験を実施しました。また、試験後の試験片について、電子線マイクロアナライザを使用して破面観察を実施しました。さらに、走査電子顕微鏡つき高温疲労試験機SEMサーボパルサを使用して、疲労試験中のき裂進展の様子も観察しました。

### ■ 試料情報および測定システム

試料情報、試験片の写真を表1、図1に示します。試験片はそれぞれ長さ18mm×幅4mm×厚さ3mmのSUS304とSS400をTIG溶接したものです。このとき溶接部はC1の面取りが施してあり、全周より溶接を行いました。

試験には、卓上型動的・疲労試験機サーボパルサEHF-Lと走査電子顕微鏡つき高温疲労試験機SEMサーボパルサ、電子線マイクロアナライザEPMAを使用しました。装置構成を表2に示します。まず、EHF-Lを使用して、溶接試験片のS-N線図を作成しました。その後、得られたS-N線図をもとにSEMサーボパルサにおける疲労試験条件を設定し、き裂を観察しました。また、試験後の試験片破面をEPMAによって観察しました。

表1 試料情報

試験片	: SUS304、SS400
溶接方法	: TIG溶接(TG308 Φ1.2mmの溶接棒)
寸法	: 長さ36 × 幅4 × 厚さ3 mm

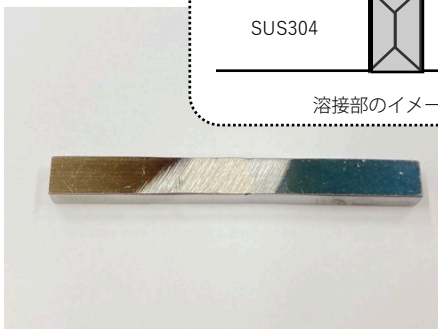
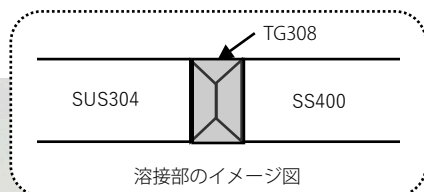


図1 試験片の写真

表2 装置構成

装置	: EHF-L、SEMサーボパルサ、EPMA-8050G
ロードセル	: 10 kN
試験治具	: 3点曲げ試験治具
制御装置	: Servo Controller 4830
ソフトウェア	: Windows ソフトウェア for 4830

### ■ 静的3点曲げ試験結果

疲労試験における条件設定のために、まず静的3点曲げ試験を行いました。静的3点曲げ試験の試験条件を表3に示します。図2に曲げ応力-ストローク線図を示します。静的3点曲げ試験における曲げ強さの平均値は、881 MPa (標準偏差63.8、変動係数7.2)となりました。この値をもとに疲労試験における負荷条件を設定しました。図3に試験の様子を示します。

表3 試験条件

試験速度	: 1 mm/min
試験数	: n = 3

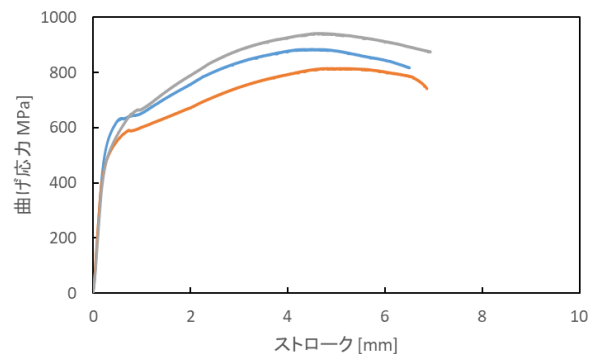


図2 曲げ応力-ストローク線図

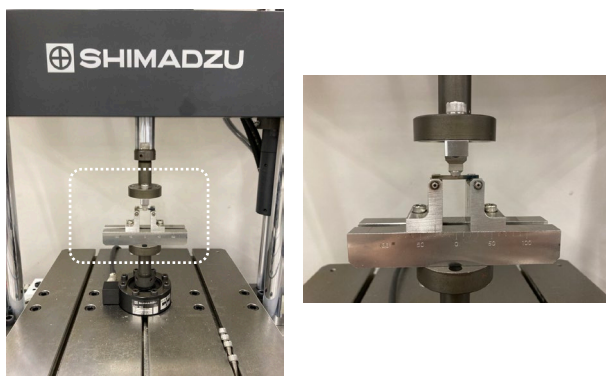


図3 試験の様子

### ■ 3点曲げ疲労試験結果

静的3点曲げ強さに対して、46%~80%の応力を3点曲げ疲労試験の負荷条件としました。表4に3点曲げ疲労試験の条件を示します。図4にSN線図を示します。最大負荷応力650 MPaのみ溶接部と異なる部分での破断が確認されたため2回試験(試験片A、試験片B)を行っています。この点の詳細については、次章のEPMAによる観察および元素分析にて紹介します。

表4 3点曲げ疲労試験の条件

最大負荷応力	: 405, 418, 499, 546, 593, 650, 700 [MPa] (静的な曲げ強さに対して46~80%)
応力比	: 0.1
周波数	: 20 Hz
試験数	: n = 1 (593 MPaのみn = 2)
支点間距離	: 30 mm
圧子/支点	: R2

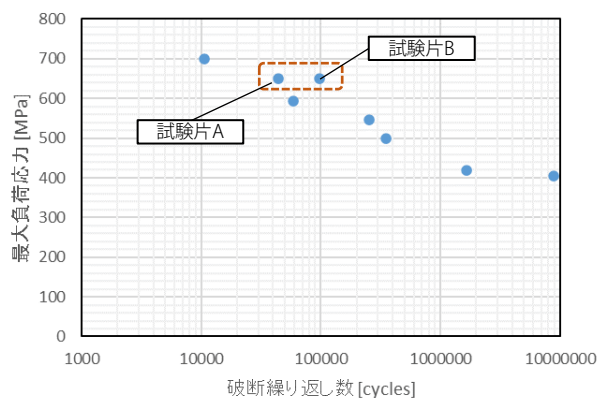


図4 SN線図

※青い点一つ一つが、1回の疲労試験結果になります。

### ■ EPMAによる観察および元素分析

まず、疲労試験前の試験片の元素マッピング分析を行いました。試験片は、SUS304とSS400をTG308で中央部を溶接したものですので、Ni、Cr等に違いが現れました。図5には反射電子像とNi、Crの元素マッピング分析画像を示します。図5(2)、(3)のようにSUS304、TG308、SS400の境界を明確に把握することが可能です。

次に3点曲げ疲労試験にて破断箇所の異なった2種類の試験片A、BのSS400側についてEPMAで元素マッピング分析を実施しました。図6に試験後の試験片AおよびBの写真を示します。試験片Aはほぼ中央で破断しましたが、試験片BではSS400側で破断しています。図7に試験片AのSS400側の破面のEPMAによる観察画像を示します。図7(3)、(4)の試験片中央部はNi、Crの含有量が低く、一方、その周辺はNi、Cr成分が多く検出されました。これは、SS400の溶接面と溶接棒のTG308の成分が検出されたためだと考えられます。

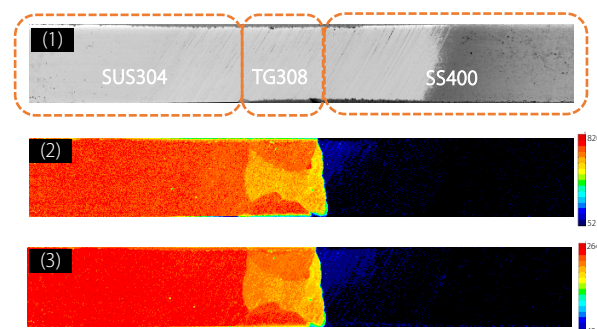


図5 EPMAによる観察画像  
(1) 反射電子像 (2) Ni (3) Cr



図6 疲労試験後の試験片AおよびB

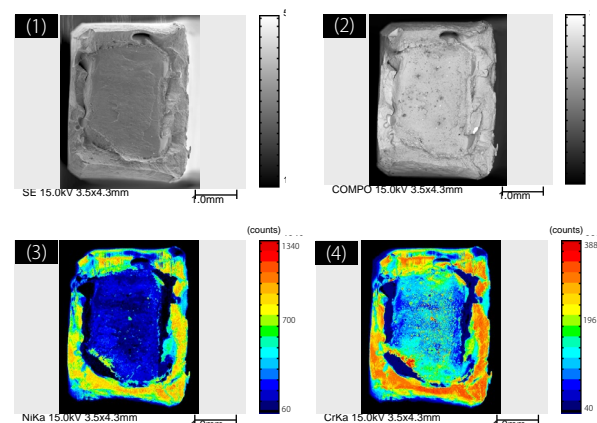


図7 EPMAによる試験片A破面の観察画像(SS400側)  
(1) 二次電子像 (2) 反射電子像 (3) Ni (4) Cr

一方、図8に試験片BのSS400側の破面のEPMAによる観察画像を示します。図8(3)、(4)よりNi、Crはほとんど検出されなかったため、試験片BについてはSS400側で疲労破壊したと考えられます。このことから試験片Bの溶接部の強度が高く、その結果、母材のSS400が疲労破壊し、試験片Aより破断繰り返し数が大きくなったと考えられます。

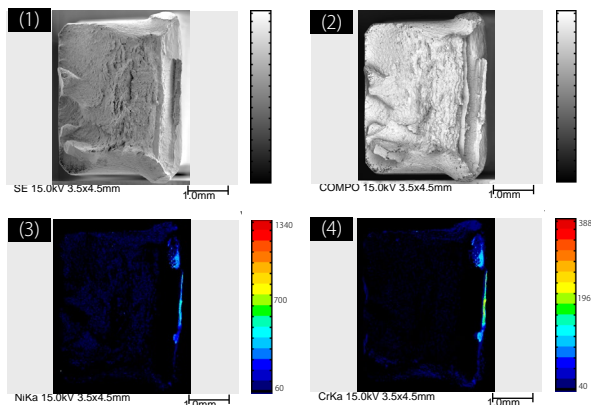


図8 EPMAによる試験片B破面の観察画像(SS400側)  
(1) 二次電子像 (2) 反射電子像 (3) Ni (4) Cr

### SEMサーボパルスによる観察

SEMサーボパルスは、走査電子顕微鏡(SEM)と疲労試験機(サーボパルス)を組み合わせた装置となっており、試験中のき裂の進展を詳細に観察することができる装置です。今回は、最大負荷応力700 MPaにてSEMサーボパルスによる観察を行いました。図9にSEMサーボパルスの写真を示します。

図10にSEMサーボパルスによる観察画像を示します。図10(1)は1000サイクル時の圧子と試験片の画像になります。図10(1)より、試験片中央よりやや右側にき裂が観察されました。図10(2)は図10(1)のき裂右側を倍率1000倍で観察した画像になります。図中の白矢印のように図10(1)で観察されたき裂先端から、さらにき裂が進展していることがわかります。図10(3)は8000サイクル時のき裂の様子を倍率300倍で観察した画像になります。図10(4)はき裂右側を倍率500倍で観察した画像になります。図10(2)と比較してさらに亀裂が進展していることがわかりました。



図9 SEMサーボパルス™

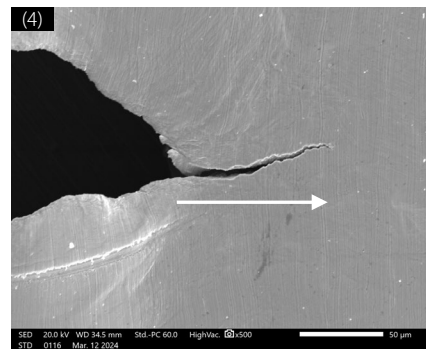
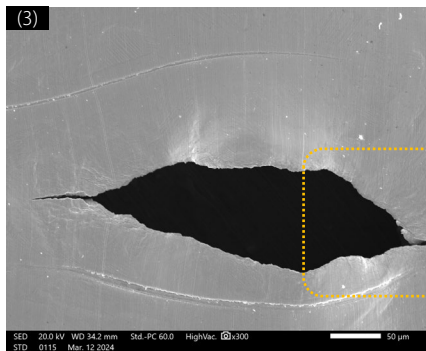
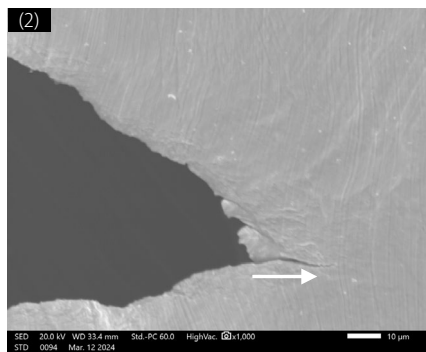
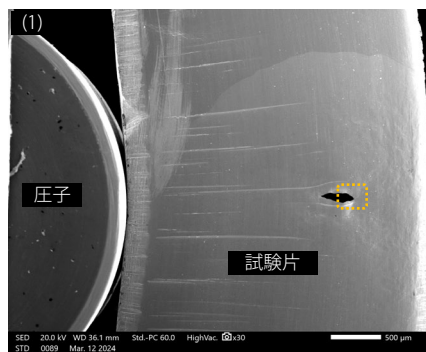


図10 SEMサーボパルスによる観察画像例  
(1) 1000 cycles、×30倍 (2) 1000 cycles、×1000倍  
(3) 8000 cycles、×300倍 (4) 8000 cycles、×500倍

## ■まとめ

まず最初に、サーボパルサを用いて溶接材の曲げ疲労試験を実施し、SN線図を求めました。その中で、破断繰り返し数の異なる2つの試験片に対して、EPMAを使用して元素分析を行いました。その結果、破断箇所が溶接部と母材と異なることが原因であることがわかりました。

その後、得られたSN線図を参考に、SEMサーボパルサにおける条件を設定し、測定中の試験片のき裂を観察しました。SEMの倍率を変更することで、試験片のき裂を詳細に観察することが可能であり、また、試験が進行とともに、き裂が進展していく様子を観察できました。このように、これらの装置は溶接材料の疲労特性の評価に役立ちます。

### <関連アプリケーション>

- SEMサーボパルサを使用した炭素繊維強化プラスチックの3点曲げ疲労試験 Application News No.01-00793
- SEMサーボを用いた亀裂試験片の3点曲げ疲労試験と亀裂観察 Application News No.01-00794

サーボパルサ、EPMAは、株式会社島津製作所またはその関係会社の日本およびその他の国における商標です。

**株式会社 島津製作所** 分析計測事業部  
<https://www.an.shimadzu.co.jp/>

01-00792-JP 初版発行：2024年 9月

島津コールセンター ☎ 0120-131691

本資料は発行時の情報に基づいて作成されており、予告なく改訂することがあります。  
本文中に記載されている会社名、製品名、サービスマークおよびロゴは、各社の商標および登録商標です。  
本文中では「TM」、「®」を明記していない場合があります。

＞ アンケート

**関連製品** 一部の製品は新しいモデルにアップデートされている場合があります。



＞ SEMサーボパルサ  
(走査電子顕微鏡高温疲労試験機)

走査電子顕微鏡つき高温疲労試験機



＞ EHF-Lシリーズ

卓上型動的・疲労試験機 サーボパルサ



＞ EPMA-8050G

電子線マイクロアナライザ(Electron Probe Microanalyzer)

## 関連分野

＞ 工業材料・マテリアル

＞ 金属材料

＞ 価格お問い合わせ

＞ 製品お問い合わせ

＞ 技術お問い合わせ

＞ その他お問い合わせ