

# 溶接鉄鋼構造の疲労強度の評価

## Evaluation of fatigue strength for welded steel structures

材料技術部 金属・物性科 佐藤浩樹 工藤弘行

局所ひずみ基準の疲労評価を振動試験機を用いて行い、比較した2種の材料で差がないことを確認した。CAEを用いて、溶接構造の強度比較を行った。CAEと試験を統合して疲労の定量評価が可能になった。

Key words: 疲労、ひずみ、CAE、振動試験、S-N線図、き裂

### 1. 緒言

提案企業はさまざまなサイズのコンプレッサを製造している。空気タンクに電動機などを接続しているブラケット部品において、板厚や材質を変えたときに強度がどのように変わるのか、またブラケット上の溶接部において振動による疲労破壊が起きないか短時間で調べる方法を探していた。しかし溶接構造を試験体とした場合、一般的な疲労試験では試験速度を上げられず、長時間の試験となる。

本事業ではブラケットの全体的な強度はCAEで、疲労強度は振動試験機で短時間に比較する方法を検討した。なお本報告では疲労強度の評価手法についてのみ報告する。

実際の製品では応力集中のため溶接止端部が弱点となる。そこで止端部近傍にひずみゲージを貼付け、片持ち固定の振動によるひずみ振幅を測定した。この時、試験開始時に比べひずみ振幅が20%減少したサイクル数は、き裂発生寿命(N20)と定義される<sup>1)</sup>。

### 2. 実験方法

#### 2. 1. 試験片とひずみゲージ貼付位置

試験片は金属A(SS400)板厚6mm、金属A(SS400)板厚4.5mm、金属B(SPHC)板厚4.5mmの3種類である。

試験片の振動試験機(IMV製 m130LS/MA1-CE)への取付は以下の図1のように行った。ひずみゲージ貼付位置を図2に示す。ゲージ長1[mm]の抵抗線ひずみゲージを使用し、き裂が入るとされる溶接止端部にゲージ先端を直角に当て、4枚貼り付けた。

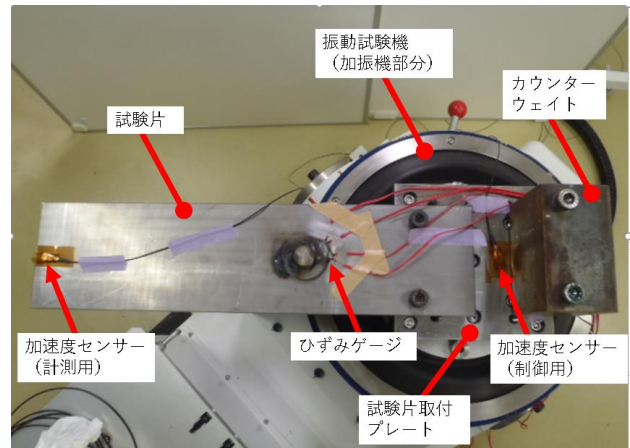


図1 試験機取付け

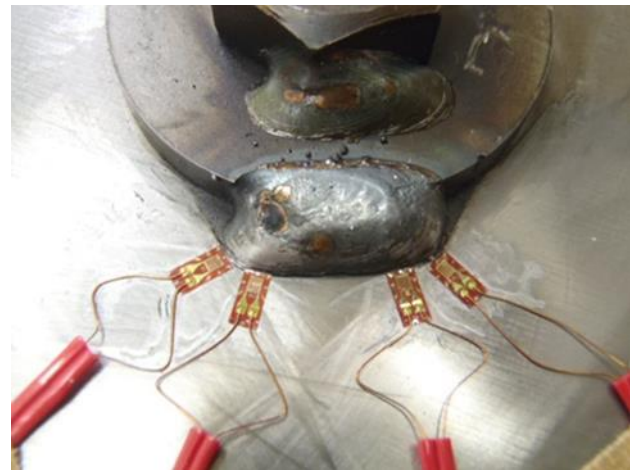


図2 ひずみゲージ貼付位置

#### 2. 2. 振動疲労試験

試験周波数は試験片の共振周波数とし、目標の初期ひずみ振幅となるような加速度とした。ひずみ振幅の目標値は先行文献と同じ $200[\mu\varepsilon]$ から $1000[\mu\varepsilon]$ とした<sup>1)</sup>。疲労試験中の周波数と加速度は一定とし、ひずみ振幅を動ひずみ計(共和電業製 EDX-100A)を用いて記録した。

ひずみ振幅の測定に使用している動ひずみ計は長時間データの保存ができないため、10[min]ごとに

1. 0[sec]の間隔で記録した。  
振動疲労試験条件を表1に示す。

表1 振動疲労試験条件

周波数(Hz)	加速度(m/s <sup>2</sup> )
f0(共振周波数)	2~15

### 2. 3. 試験片観察

疲労振動試験終了後に、試験片をひずみゲージ貼り付け部分で切断し、エッチング後、光学顕微鏡にて観察を行った。

## 3. 結果

### 3. 1. 疲労試験

#### 3. 1. 1. 振動疲労試験

代表的な試験結果として、初期ひずみ振幅が大(1000[ $\mu\epsilon$ ])であるB-1試験片、中(450[ $\mu\epsilon$ ])であるB-3試験片、小(200[ $\mu\epsilon$ ])A-6試験片の3つの試験片の結果の詳細を図3、図4、図5に示す。

横軸にサイクル数[回]、縦軸にひずみ振幅をとり、ひずみ振幅をサイクル数ごとにプロットした。

450, 1000 [  $\mu\epsilon$  ] のひずみ振幅の試験では、試験開始直後よりひずみ振幅が減少し、その後一定に収束した。

200 [  $\mu\epsilon$  ] のひずみ振幅の試験では、 $6.7 \times 10^7$  [回] ( $\approx 27$  [h]) 振動を加えてもひずみ振幅に変化がなかったため、試験を打ち切った。

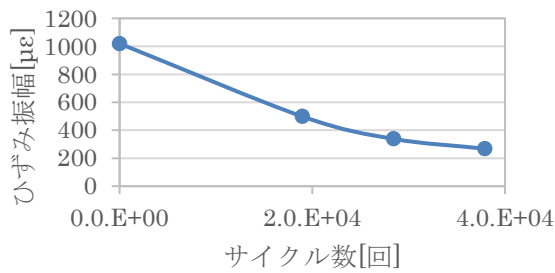


図3 初期ひずみ振幅 1000[ $\mu\epsilon$ ]

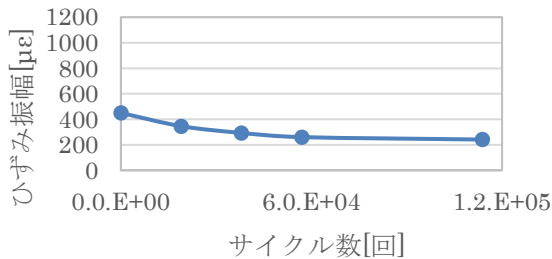


図4 初期ひずみ振幅 450[ $\mu\epsilon$ ]

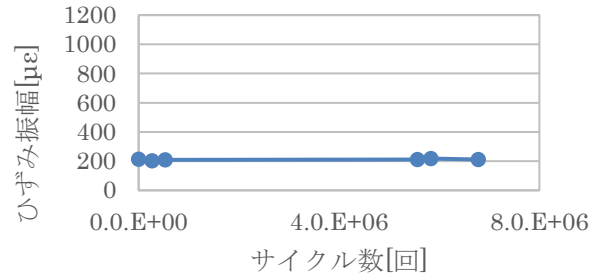


図5 初期ひずみ振幅 200[ $\mu\epsilon$ ]

### 3. 1. 2. $\Delta\epsilon - N$ 線図

振動疲労試験の結果から初期ひずみ振幅とき裂発生時の振幅(N20)、き裂発生寿命時のサイクル数(N20)を表2に示す。なお20%減少したところを保存できなかった試験片は18%以上30%未満の範囲であればN20破断とみなし、A-4、A-5、B-2は範囲外であったため除外した。

ひずみを用いた疲労特性線図である $\Delta\epsilon - N$ 線図(N20)を図6に示す。疲労試験データは本質的なばらつきを有しているため、初期ひずみが小さくても低サイクルで破断する試験片がみられた。しかし全体の傾向として初期ひずみ振幅が大きくなるほど短いサイクルでN20に達した。これは先行文献と同様の結果となり、評価手法の妥当性を確認することができた。

表2 振動疲労試験(N20)結果

試験片名	材質	板厚(mm)	初期ひずみ振幅[ $\mu\epsilon$ ]	き裂発生寿命時の振幅[ $\mu\epsilon$ ]	サイクル数[回]
A-1	金属A	6	813	657	9.2.E+04
A-2			333	272	6.7.E+06
A-3			786	565	2.3.E+04
A-4			736	N/A	
A-5			685	N/A	
A-6			214	211	6.8.E+06
B-1	SS400	4.5	1020	561	2.8.E+04
B-2			1027	N/A	
B-3			398	306	1.9.E+04
B-4			532	441	1.7.E+05
B-5			823	697	1.9.E+04
B-6			219	205	6.7.E+06
C-1	金属B SPHC	4.5	809	647	6.6.E+04
C-2			470	373	5.0.E+05
C-3			1011	833	2.2.E+04
C-4			584	483	6.1.E+04
C-5			211	206	5.5.E+06

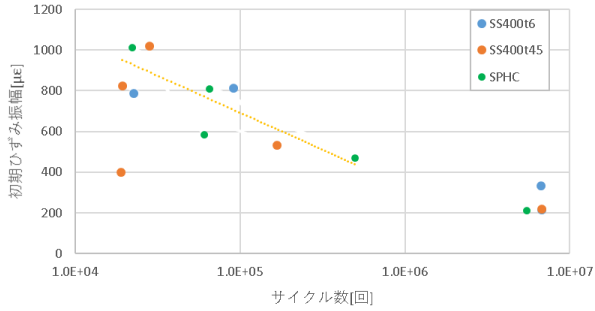


図6 Δε - N 線図 (N20)

### 3. 2. 試験片観察

ひずみ振幅が試験後に77%減少したA-4試験片の断面を図7に示す。き裂は角を起点に熱影響部を横切ったのち、母材を通過する。亀裂発生時の角度は表面に対しておおよそ60度で、熱影響部、母材を問わず、ほぼ同じ進行方向のまま進展している。

ひずみ振幅が試験後に1%減少したA-6試験片の断面を図8に示す。A-6試験片を拡大した断面を図9に示す。低倍率ではき裂は確認できなかったが高倍率にしたところ0.15[mm]のき裂が確認できた。



図7 A-4 断面

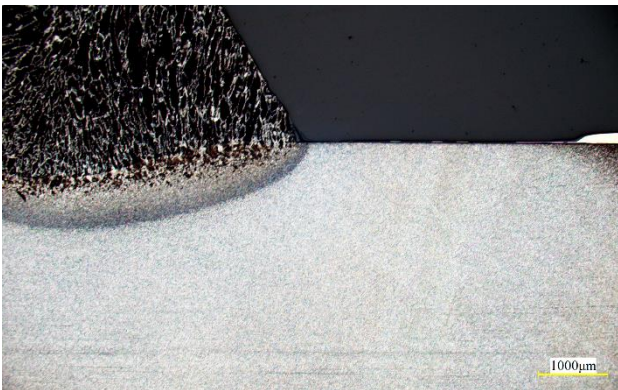


図8 A-6 断面

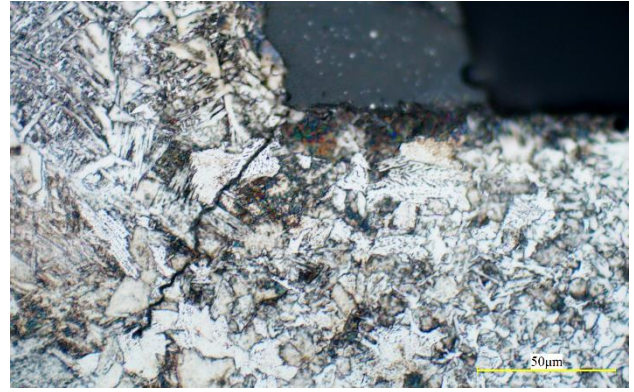


図9 A-6 断面

## 4. 考察

### 4. 1. 疲労試験

疲労試験の結果である図6は初期ひずみ振幅が大きくなるほど短いサイクルでひずみ振幅が減少し、右下がりの直線となる特徴を持つ結果となった。これはひずみ振幅とその低下傾向が同じ動きを示すことより材料の違いによる疲労寿命の差はないと判断できる。

### 4. 2. き裂の長さ

初期ひずみが高く、ひずみ振幅が大きく減少した試験片は深いき裂あった。また初期ひずみが低く、ひずみ振幅がほとんど減少しなかった試験片は微小なき裂が確認できた。

A-6試験片においてひずみ振幅の減少が検知できなかったのはき裂が非常に小さく周りへの影響が小さいためであると考えられる。この微小なき裂は停留き裂と呼ばれ、応力(ひずみ)振幅が小さい場合、き裂ができてそれ以上進展しないことが知られている。

### 4. 3. CAEと疲労試験の関係

疲労試験は局所ひずみと疲労寿命のΔε - N線図から材料の疲労強度を得ることができる。一方でCAE解析は荷重P[N]を加えたときの応力S[MPa]の結果から構造強度を得ることができる。しかし溶接止端部は応力特異点であるためS-N線図を利用できない。実験とCAEの関係を図10に示す。

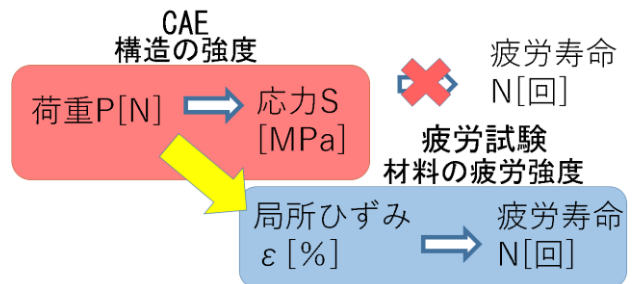


図10 実験とCAEの関係

図 1 1 に示すように、CAE では実際のひずみゲージを貼付した場所に同じサイズで領域を作ることによって領域の平均ひずみを計算することができる。予め  $\Delta \varepsilon - N$  線図 (N20) を求めておけば疲労試験をせずとも CAE 解析から疲労寿命を予測することが可能となる。

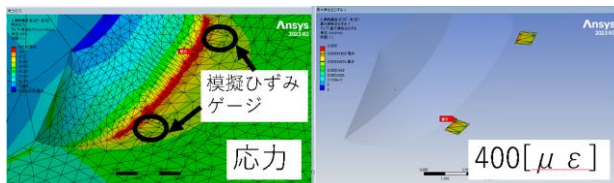


図 1 1 CAE 解析結果  
(左) ひずみゲージ位置 (右) 模擬ひずみ

## 5. 結言

振動試験機による疲労試験とひずみゲージによる測定からひずみ振幅基準の疲労評価を行い、2 種の材料の違いによる疲労強度に差がないことを確認した。

CAE 解析から疲労寿命を予測することが可能と考えられる。

## 参考文献

- 1) 鯉淵興二, 小久保邦夫, 初田俊雄, 坂田光児, 製品開発のための疲労破壊事故の解析と強度対策, 2011, p. 41-44.