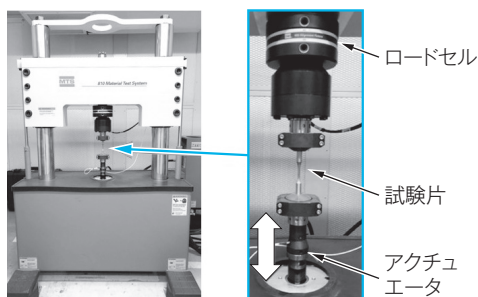


# インフラを支える材料強度評価技術の開発

嶋田祐也 Yuya Shimada  
阿部崇志 Takashi Abe  
渡辺広光 Hiromitsu Watanabe

キーワード 金属疲労, 非鉄金属, 超長寿命, 高速疲労試験, 疲労強度設計

## 概要



高速油圧サーボ式疲労試験機

発電機などの電機機器の導体には純銅が用いられている。純銅などの金属は、長期間の繰り返し荷重で疲労破壊が生じる場合がある。そこで製品の設計では、純銅の疲労寿命を予測することが必要となる。ところが、従来の疲労試験法は試験速度が遅いため、検証期間が長期にわたっていた。

そこで、開発期間内で製品使用の全期間の寿命を検証するため、従来の疲労速度の50倍以上の超高速でも安定した負荷が作用できる疲労試験技術を開発した。本開発によって、製品の長期間の稼働条件を満たす試験が迅速に実施でき、製品設計での適正な製品寿命を予測できる。

## 1 まえがき

製品の軽量化や小形化を実現するため、信頼性評価技術の向上が強く求められている。例えば、大形発電機では製品寿命が数十年にわたることから、導体へ繰り返し作用する機械的荷重は数億回以上となる。

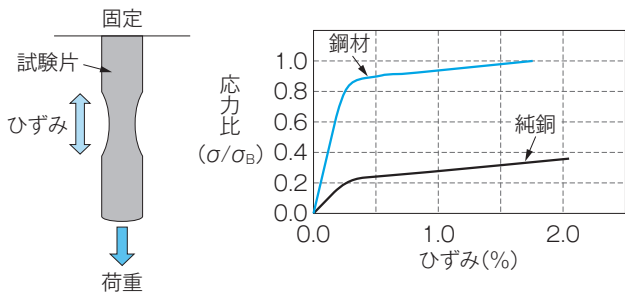
導体には純銅が用いられている場合が多いが、純銅は構造部材として用いられる鋼材に比べ強度が低く、構造（強度）部材としては適していない。このため、強度や寿命に関する研究が少なく、特に応力繰り返し数が数億回を超えるような超長寿命域に関する研究<sup>(1)(2)</sup>は極めて少ない。また純銅は柔らかいため、永久変形を生じやすい特性がある。このため疲労試験では、試験荷重の制御を高精度かつ高速で行うことが望ましい。

このような課題に対して、国内でも数台しか導入

されていない米国MTS社製の超高速疲労試験機（試験速度1kHz）の適用研究を行った。これにより、従来の試験機（試験速度33Hz）で約1年かかる10億回の繰り返し応力試験を11日間で完了できる技術を確立した。さらに環境温度や平均応力を変化させた実験を系統的に行い、それらの影響因子による疲労強度低下を明らかにした。本稿では、任意の条件で対応できる疲労試験技術を紹介する。

## 2 評価技術の開発

材料の引張試験から得られる強度特性に対して、例えば、繰り返し応力負荷・環境温度・平均応力・表面効果・寸法効果・変動応力などが重畳することで強度特性が半分以下になることがある。その影響の度合いは材料によっても異なり、例えば、室温と高温下の試験を比較すると、高温下では塑性ひずみ



第1図 鋼材と純銅の応力ひずみ線図

鋼材と純銅の強度特性を比較すると、純銅の方が低い応力で変形する特長がある。

が大きくなり、試験中の材料変化が大きくなる。このため、適正な荷重で評価するには、その材料変化に追従できる制御を行うことが必要となる。このような背景から、純銅の特長と要件を満たす試験機を以下に示す。

## 2.1 純銅の特長と試験機の必要要件

第1図に鋼材と純銅の応力ひずみ線図を示す。応力比 ( $\sigma/\sigma_B$ ) は、各材料の引張強さを1とした場合の応力の割合を示している。鋼材は0.8程度から塑性ひずみが生じるが、純銅は0.2程度から塑性ひずみが生じる。純銅は鋼材に比べて降伏応力が非常に低いという特長がある。製品の使用中にはこの降伏応力を超えることがあるため、そこでは大きな変形が生じる。このような変形の大きい領域での試験には、前述のように適正な荷重を負荷できる試験機が必要であるため、荷重制御型の油圧サーボ疲労試験機を選定した。

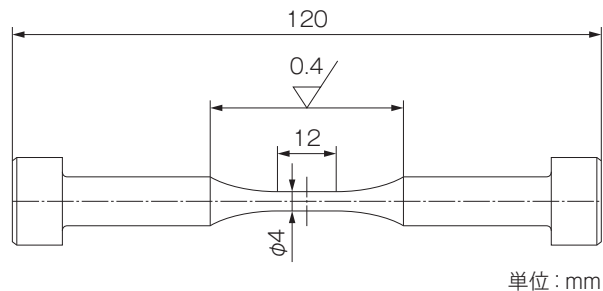
## 2.2 超高速疲労試験

応力繰返し数が10億回を超えるような領域の試験の場合、従来の試験法では検証期間が長期にわたってしまう。超音波を利用した高速試験技術は試験速度が高速なため要件を満たすが、荷重制御で試験を行うことができない。このため前述した理由で、純銅の試験では正確な荷重を負荷できず、荷重制御ができる高速疲労試験機を選定する必要があった。そこで、試験速度1kHz油圧サーボ疲労試験機を導入した。本試験機は、ボイスコイルサーボバル

第1表 1kHz油圧サーボ疲労試験機仕様

米国MTS社製の最大速度1kHzで試験ができる油圧サーボ疲労試験機の仕様を示す。

項目	仕様
容量	±25kN
速度	最大1kHz
雰囲気	大気
方式	ボイスコイルサーボバルブ
制御	振幅補正機能 (PID制御)
その他	低速用サーボバルブ 免震・防音



第2図 試験片形状・寸法

1kHz油圧サーボ疲労試験機で用いるボタンヘッド形の丸棒試験片を示す。

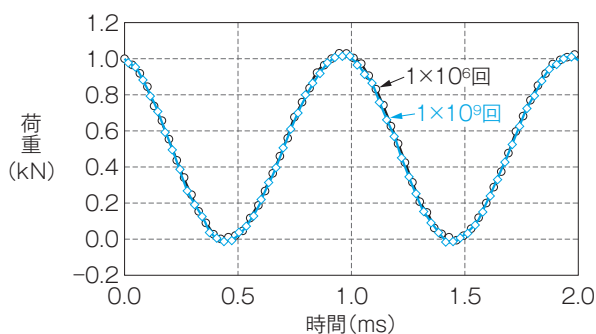
によって、最大試験速度1kHzと高い試験精度を実現している。

このような機構を有する試験機で適正に疲労試験が行えるかを検証するため、荷重波形の安定性、疲労試験過程での温度変化及び試験速度による寿命の差異を確認した。第1表に1kHz油圧サーボ疲労試験機の仕様を示す。

### 2.2.1 試験片及び試験条件

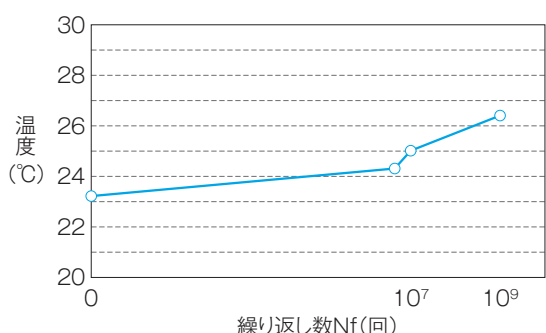
材料は、JIS H3140のタフピッチ銅 (C1100) である。機械的特性は0.2%耐力が293MPa、引張強度が302MPaである。第2図に試験片形状・寸法を示す。試験片の表面仕上げは#600までのエメリー紙を用い、軸方向に研磨を施している。

試験条件は、応力比  $R = 0$  の完全片振り、荷重波形は正弦波、試験速度は1kHzとした。試験は室温、大気中で実施した。なお、疲労試験中の強制冷却は施していない。破断回数の定義は、試験片の疲労き裂が進展し変位が1mmを超え、試験機の自動停止装置が働いた時の回数とした。



第3図 荷重波形 (サンプリング周波数30kHz)

試験速度  $f = 1\text{kHz}$ 、応力振幅  $\sigma_a = 40\text{MPa}$ 、応力比  $R = 0$  の試験過程での荷重波形安定性を確認した。全試験過程では、荷重が安定的に負荷されている。



第4図 試験片の温度変化

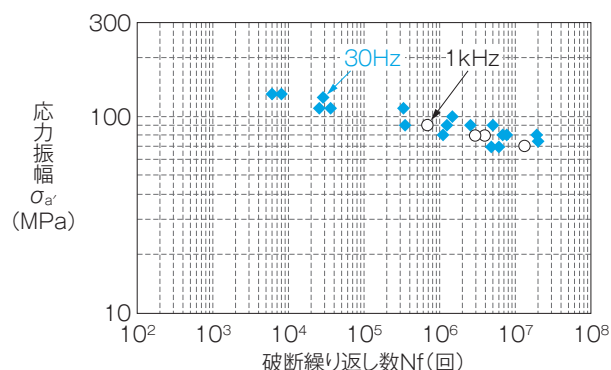
試験速度  $f = 1\text{kHz}$ 、応力振幅  $\sigma_a = 40\text{MPa}$ 、応力比  $R = 0$  の試験過程での温度変化を確認した。全試験過程では、温度変化は3K程度である。

## 2.2.2 荷重波形の安定性

試験速度  $1\text{kHz}$  の疲労試験で、第1図に示した純銅でも荷重が正確に作用していることを確認するため、ロードセルの荷重波形を出力した。第3図に荷重波形 (サンプリング周波数  $30\text{kHz}$ ) を示す。繰り返し数  $1 \times 10^6$  回と  $1 \times 10^9$  回の波形が一致することから、全疲労試験過程に荷重が正確に作用していることが分かった。

## 2.2.3 試験時の温度変化

第4図に試験片の温度変化を示す。試験速度  $1\text{kHz}$  の疲労試験過程で、材料の内部摩擦による発熱を確認した。測定位置は試験片中央部を黒点化し、放射温度計を用いて測定した。繰り返し数  $4 \times 10^6$  から  $1 \times 10^9$  回までの温度変化は約  $3\text{K}$  の上昇であることから、材料の機械的特性が変化する高い温度上昇がないことが分かった。



第5図 S-N曲線 (試験速度依存性)

試験速度  $f = 30\text{Hz}$ 、 $1\text{kHz}$  で試験速度の差による疲労寿命に与える影響を確認した。速度による寿命に与える影響は、本検討の範囲内ではほぼない。

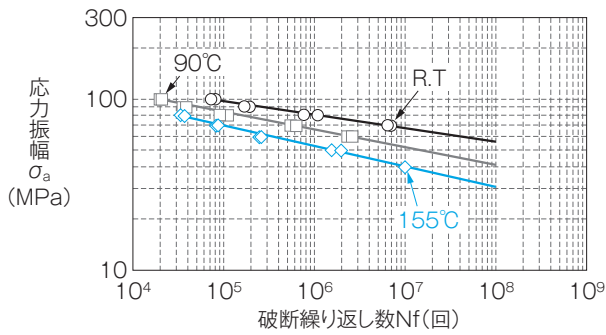
## 2.2.4 試験速度依存性

第5図にS-N曲線 (試験速度依存性) を示す。ここでS-N曲線は、一定の振幅で繰り返し負荷される応力と破断に至るまでの繰り返し数の関係を示す。疲労寿命に影響を与える試験速度の影響を調べるため、試験速度  $30\text{Hz}$  と  $1\text{kHz}$  で試験した結果である。試験速度  $30\text{Hz}$  及び  $1\text{kHz}$  のプロットはほぼ重なっており、試験速度による寿命の影響は小さい結果となった。

これまでの結果から、 $1\text{kHz}$  の疲労試験には問題がないことを確認した。

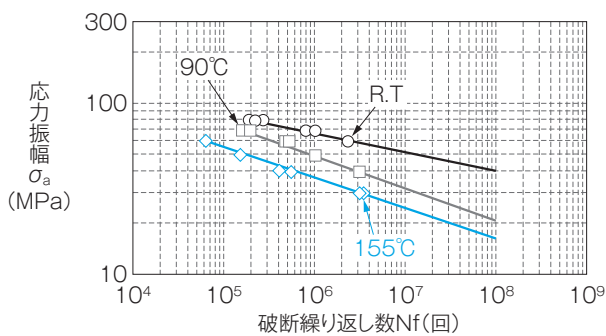
## 3 実験結果

疲労寿命に影響を与える因子として、平均応力や環境温度が変化した場合の実験結果を紹介する。試験材料はJIS H3140のタフピッチ銅 (C1100) で、ろう付けを模して  $720 \sim 780^\circ\text{C}$  で数十秒保持して炉冷する熱処理を施している。機械的特性は  $0.2\%$  耐力が  $63\text{MPa}$ 、引張強度が  $204\text{MPa}$  である。  $1 \times 10^7$  回以下の寿命域の試験は、米国MTS社製の汎用試験機の油圧サーボ式疲労試験機を用いて、試験速度は  $30\text{Hz}$  で実施した。試験片形状は、室温の試験では試験部直径が  $8\text{mm}$  の平行部を有する丸棒を用いた。高温の試験では試験部直径が  $6\text{mm}$  の平行部を有する丸棒を用いた。なお、試験部直径の影響は疲労試験を行い、両者の差が小さいことを確認した。



第6図 S-N曲線（温度による影響， $R = -1$ ）

応力比 $R = -1$ で温度が室温， $90^\circ\text{C}$ ， $155^\circ\text{C}$ での応力振幅と寿命の関係を示す。



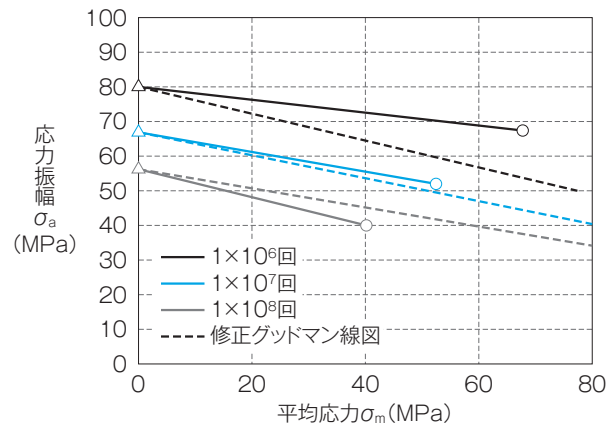
第7図 S-N曲線（温度による影響， $R = 0$ ）

応力比 $R = 0$ で温度が室温， $90^\circ\text{C}$ ， $155^\circ\text{C}$ での応力振幅と寿命の関係を示す。

### 3.1 平均応力

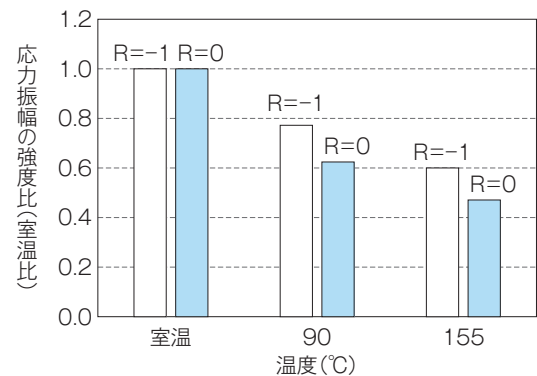
第6図にS-N曲線（温度による影響， $R = -1$ ）を，第7図にS-N曲線（温度による影響， $R = 0$ ）を示す。S-N曲線から平均応力の影響を読み取るとは一見して分かりづらいため，横軸に平均応力，縦軸に応力振幅をとった疲労限度線図を用いて説明する。S-N曲線では純銅には明確な疲労限度が現れないため，破断に至るまでの繰返し数が $1 \times 10^6$ ， $1 \times 10^7$ ， $1 \times 10^8$ 回の寿命時間で疲労限度線図を作成した。

第8図に室温の条件での疲労限度線図を示す。 $\Delta$ 印が応力比 $R = -1$ ， $\circ$ 印が応力比 $R = 0$ の実験点を示している。いずれの疲労限度線図でも平均応力が増加すると応力振幅が低下する傾向が見られた。さらに実験結果に対して，銅などで一般的に用いられる手法の修正グッドマン線図<sup>3)</sup>を適用することで，各繰返し数を比較した。修正グッドマン線図



第8図 疲労限度線図

平均応力による疲労寿命に与える影響を明らかにした。



第9図 応力振幅に及ぼす平均応力及び温度の影響（ $1 \times 10^7$ 回）

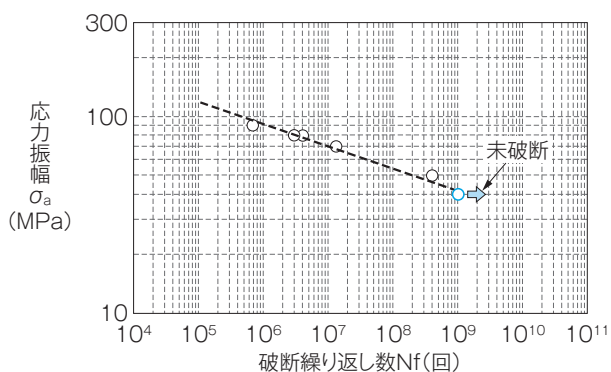
室温の疲労試験結果を基準とし，高温における応力振幅の減少率を縦軸，温度を横軸に示す。

とは，縦軸に応力比 $R = -1$ の疲労限度の応力振幅，横軸に引張強さをプロットし，結んだ線から得られる疲労限度線図のことである。寿命が $1 \times 10^7$ 回は，修正グッドマン線図ともよく合っていることが分かった。一方で，短寿命である $1 \times 10^6$ 回は，応力振幅の低下に及ぼす平均応力の影響が小さくなったため，修正グッドマン線図が適用できない。さらに，長寿命である $1 \times 10^8$ 回は，応力振幅の低下に及ぼす平均応力の影響が繰返し数 $1 \times 10^6$ ， $1 \times 10^7$ 回より大きくなった。このため，横軸に交差する点が引張強さを大きく下回り，修正グッドマン線図が適用できない結果となった。

### 3.2 環境温度

第9図に応力振幅に及ぼす平均応力及び温度の





第10図 S-N曲線（超長寿命域）

試験速度 1kHz で実施した超長寿命域のS-N曲線を示す。

影響 ( $1 \times 10^7$  回) を示す。第7図と第8図のS-N曲線から読み取り、疲労寿命に与える温度の影響をまとめた図である。破断に到るまでの繰返し数は  $1 \times 10^7$  回とし、室温の結果を基準としている。応力比  $R = -1$  は室温に対して  $90^\circ\text{C}$  で20%、 $155^\circ\text{C}$  で40%応力振幅が減少した。さらに応力比  $R = 0$  では、室温に比べ  $90^\circ\text{C}$  で40%、 $155^\circ\text{C}$  で50%減少し、従来の変位制御の疲労試験結果<sup>(4)(5)</sup>よりも減少が大きくなっている。

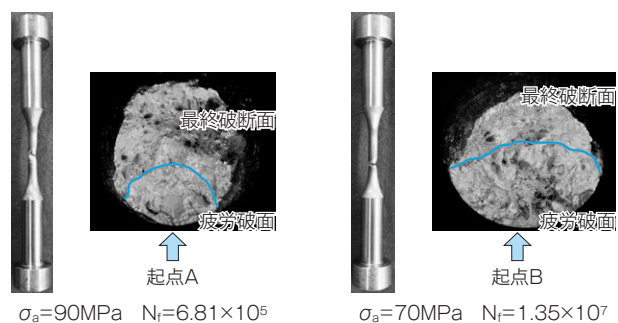
### 3.3 超長寿命域

第10図に試験速度 1kHz の疲労試験で得られた  $1 \times 10^7$  回を超える超長寿命域のS-N曲線を示す。点線は破壊確率50%を示す。なお、応力振幅  $\sigma_a = 40\text{MPa}$  の繰返し数  $1 \times 10^9$  回は未破断であったが、S-N曲線を確定させるため破断とした。このS-N曲線は従来の  $4 \times 10^8$  回までの研究結果<sup>(3)</sup>とほぼ一致し、本結果と合わせて超長寿命域まで寿命推定ができるようになった。

## 4 今後の展開

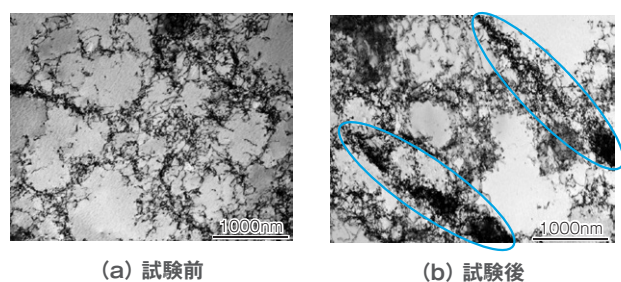
### 4.1 金属組織観察

第11図にS-N曲線を作成した際の破断した試験片のマクロ写真と光学顕微鏡で観察した破断面の一例を示す。破断した場所は、肩部やR部ではなく試験片中央付近であった。また、破断面の写真から破断の起点は矢印で示したA及びB付近であるこ



第11図 破断した試験片と破断面

疲労試験後の応力レベル別の疲労破面の領域を示す。応力レベルが低くなると疲労破面が広がる。



第12図 TEMによる転位の観察結果

試験前後での転位の変化を示す。倍率は30,000倍で、○で示す転位が集積している箇所にすべり帯を確認できる。

とが予想できる。さらに疲労破面は、応力大きいと狭く、応力が小さいと広いことが確認でき、過去の実験結果<sup>(3)</sup>や鋼の実験結果と類似していた。

第12図に透過型電子顕微鏡 (TEM) による転位の観察結果を示す。観察対象として、 $1 \times 10^9$  回で未破断であった試験片を用いた。なお、試料の加工は無応力状態で作製するために電解研磨を用いている。

観察は、金属が壊れる初期の兆候として、結晶に存在する原子の空洞 (格子欠陥) に対して、隣り合う原子が移動する転位と言われる現象を確認するために実施した。試験前後で比較すると、丸棒で示した結晶のすべり面で、転位の集積と思われる箇所を確認した。これは  $1 \times 10^9$  回の応力レベルでも転位が進行し、いずれは破壊に至ることを示唆している。疲労限度がないとされる純銅は、疲労限度となる指標をミクロな視点から見極めることで、より高精度な設計ができる。

## 4.2 変動荷重

実際に使用されている機械や構造物に負荷される荷重は変動している。このような変動荷重に対する疲労寿命推定方法には、線形累積損傷則（マイナー則）が用いられる。マイナー則とは、変動する応力に対して、対応する各応力の寿命に対する繰り返し数比の累計が1となったときに破壊に至るという仮定のことである。変動する応力が全て疲労限度より大きい場合、マイナー則が適用できることが過去の研究で明らかとなっている<sup>(6)(7)</sup>。一方、タフピッチ銅の変動荷重下で、超長寿命域での低応力負荷の影響を検討した渡辺らの研究<sup>(1)</sup>では、二段二重試験（応力・繰り返し数が各2水準）でマイナー則が0.5程度となった。このため、S-N曲線を修正することで、マイナー則を満たすように検討した結果が報告されている。さらに、上記研究で用いられていた平面曲げ疲労試験機では、荷重負荷形式や制御に制限があり、細かな波形制御ができなかった。

上記を踏まえ、現在、油圧制御の疲労試験機で実働荷重の疲労試験を行い、マイナー則での評価を進めている。得られた結果から、変動応力下の疲労寿命予測精度を向上させるため、マイナー則が1に近づくようS-N曲線の傾きを修正する。さらに疲労寿命が減少するメカニズムを明らかにし、余寿命予測につなげていく。

## 5 むすび

今回、純銅について様々な機種に対応できる疲労強度設計基準を確立した。電気機器の高出力・高エネルギー密度・長寿命化のため、材料に求められる

要求は年々高まり続けている。

今後も製品競争力の向上に貢献するため、分子・原子レベルで疲労のメカニズムを探求し、疲労強度設計に関する研究を推進していく。

・本論文に記載されている会社名・製品名などは、それぞれの会社の商標又は登録商標である。

### 《参考文献》

- (1) 渡辺広光・山本晴生・三沢啓志・大塚満章：「日本機械学会論文集（A編）」、66巻、651号、2000、pp.2044-2048
- (2) 栗谷丈夫・片桐一宗・大村彰・白石哲郎：「日本機械学会論文集（第1部）」、40巻、337号、1974、pp.2453-2461
- (3) N. E. Frost, K. J. Marsh, L. P. Pook : "Metal Fatigue," Oxford Univ. Press 1974
- (4) 小賀正樹・小山田建四郎・釘元英俊・大塚満章：明電時報211号、1990/No.2、pp.37-41
- (5) 山下満男・氏家隆一・板垣敏則：富士時報、第58巻第10号、1985、pp.643-648
- (6) 中村宏：日本機械学会学会誌、73巻、621号、1970、pp.1350-1358
- (7) 中村宏・堀川武・鎌田敬雄・山地成一：日本機械学会論文集（第1部）、39巻、318号、1973、pp.472-479

### 《執筆者紹介》



嶋田 祐也  
Yuya Shimada

基盤技術研究所  
解析シミュレーション技術及び材料強度評価技術の開発に従事



阿部 崇志  
Takashi Abe

基盤技術研究所  
解析シミュレーション技術及び材料強度評価技術の開発に従事



渡辺 広光  
Hiromitsu Watanabe

基盤技術研究所  
解析シミュレーション技術及び材料強度評価技術の開発に従事