オーステナイト系ステンレス鋼の低サイクル 疲労試験中における二次 AE の発生挙動[†]

太田 信* 水谷 義弘** 轟 章**
松崎 亮介*** 安岡 哲夫****

Behavior of Secondary AE Generation during Low-Cycle Fatigue Test of Austenitic Stainless Steel

by

Makoto OHTA*, Yoshihiro MIZUTANI**, Akira TODOROKI**,
Ryosuke MATSUZAKI*** and Tetsuo YASUOKA****

Acoustic emission (AE) testing is one of the major nondestructive testing (NDT) techniques, and it can be used as the real-time monitoring method for the purpose of detecting fatigue damages. However, AE testing data for steels during the low-cycle fatigue test is rarely reported. In this study, AE monitoring was conducted during low-cycle fatigue test for austenitic stainless steel with the aim of detecting fatigue damages and identifying the source of AE. A large number of AE were generated through the fatigue test and the AE data were divided into the increscent phase and decrescent phase. When focusing on the centroid frequency of AE, low frequency data had been observed since the crack size became detectable by PT. Those AE occurred in the process of increscent phase which is loading under tensile and unloading under compression and the contact of the crack surfaces were observed at the increscent phase. This means that the low frequency AE were secondary AE which were induced by friction of the crack surfaces. The behavior of crack surfaces was analyzed by FEM. The results showed that contact condition of crack surfaces were different between crack opening and closure, and it was revealed that friction-induced AE was mainly generated at the crack opening process. Therefore, the potential for monitoring low-cycle fatigue crack was demonstrated by focusing on both the friction-induced AE (secondary AE) and primary AE.

Key words: Low-cycle fatigue, Acoustic emission, Secondary AE, Stainless steel, Fatigue crack detection, Crack closure

1 緒 言

機械や設備の安全性を確保する上で疲労損傷を検出する技術は重要である。現在、原子力発電設備等の供用期間中検査では超音波探傷試験 (UT) 等の非破壊検査がプラント停止中に行われているが、検査の優先度の決定およびプラント停止期間の短縮などを目的とした運転中検査が検討されている。より早期に疲労損傷を検出するため、超音波の散乱や減衰等のパラメータに着目した超音波応用手法や電気化学的エッチング法、X線応用手法、電子後方散乱回折装置を用いた観察など様々な手法の研究が行われているが^{1)~4)}これらの検査方法を運転中検査にそのまま適用することは一般に困難である。また1回の検査では限られた狭い範囲しか検査をすることができないため、あらかじめ疲労損傷が発生しやすい箇所が判っていないと適用することが難しい。運転中に広範囲を一度に検出可能な検査方法が必要とされている。アコース

ティック・エミッション (Acoustic Emission ; AE) 試験はそのニーズに応えられる可能性の高い非破壊検査方法であり、疲労損傷検出への適用が検討されている。

高サイクル疲労試験における AE 試験の適用については多くの研究が行われており^{5)~8)}主き裂の成長から最終破断に至る段階においては AE の発生挙動は破壊力学パラメータを用いて定式化することが可能である。それに対し、低サイクル疲労試験における AE 試験はほとんど行われていない。C. E. Hartbower ら⁹⁾と M. Houssny-Emam ら¹⁰⁾の研究では、破断時に AE 発生数が急増することが示されているものの、それ以前では明確な変化は見られていないため、損傷の発生や進展の評価を行うことは難しい。また M. Shaira ら¹¹⁾は得られた AE の波形から、平均周波数、AE 信号振幅、立上がり時間などのパラメータを用いて塑性変形とき裂起因の AE とに分類しているが、き裂進展による一次 AE と進展に伴いき裂面の摩

[†] 原稿受理 平成 25 年 3 月 4 日 Received Mar. 4, 2013 ©2014 The Society of Materials Science, Japan

* 東海旅客鉄道(株) 〒450-6101 名古屋市中村区名駅, Central Japan Railway Company, Nakamura-ku, Nagoya, 450-6101

** 正 会 員 東京工業大学大学院理工学研究科 〒152-8552 東京都目黒区大岡山, Dept. Mech. Sci. and Eng., Graduate School of Eng., Tokyo Inst of Tech, Meguro-ku, Tokyo, 152-8552

*** 正 会 員 東京理科大学理工学部 〒278-8510 野田市山崎, Faculty of Sci. and Tech., Tokyo Univ. of Sci., Yamazaki, Noda, 278-8510

**** 学生会員 東京工業大学大学院理工学研究科 〒152-8552 東京都目黒区大岡山, Dept. Mech. Sci. and Eng., Graduate School of Eng., Tokyo Inst. of Tech., Meguro-ku, Tokyo, 152-8552

擦等により発生する二次 AE¹²⁾との区別はできていない。学術研究においては一次 AE のみを評価対象とすることが多いが、実構造物における疲労損傷のモニタリングでは、二次 AE も有効信号としてむしろ積極的に取り扱う場合もあり、¹²⁾配管の疲労試験中の AE 計測を行った Yamaguchi らもき裂の開閉口時に摩擦による AE が多く発生することを報告している。¹³⁾しかしながら、現状では高サイクル疲労を含めて、二次 AE の発生メカニズムについて詳細に検討された例はなく、低サイクル疲労については、損傷検出への有効性も明らかでない。そこで本研究では、低サイクル疲労における二次 AE 発生メカニズムについて考察する。また、一次 AE と二次 AE を分類し、低サイクル疲労における二次 AE の損傷検出への有効性も検討する。

2 低サイクル疲労試験

2・1 試験片と試験方法

試験片供試材にはオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316NG を用いた。供試材の力学的特性および化学成分をそれぞれ Table 1, 2 に示す。また試験片形状は圧縮時の座屈防止を勘案し、Fig. 1 に示すような砂時計型とした。

試験機および計測システムの概要を Fig. 2 に示す。試

Table 1 Mechanical properties of SUS316NG.

Young's modulus [GPa]	0.2% proof strength [MPa]	Tensile strength [MPa]	Elongation
195	287	573	0.63

Table 2 Chemical composition of SUS316NG (wt.%).

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
0.016	0.51	1.36	0.025	0.001	17.51	11.30	2.05

Fig. 1 Shape of the specimen for low-cycle fatigue test.

Fig. 2 Schematic illustration of experimental setup.

験機には MTS 製 100kN 油圧サーボ型疲労試験機を用い、自作のクリップゲージを用いて試験片最小径部の径変化を測定した。弾性域を無視した体積一定の仮定に基づき、試験片最小径の変位から次式を用いて真ひずみを算出し、ひずみ制御により疲労試験を実施した。

$$\varepsilon = -2 \ln(D/D_0) \quad (1)$$

ここで、 D_0 は試験前の試験片最小径、 D は試験中における試験片最小径である。

疲労試験は全ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon = 2, 4, 8\%$ の条件で各 3 回ずつ行った。ひずみ比は $R = -1$ 、ひずみ速度は $0.3\%/s$ 一定である。また AE 試験の結果を比較検討するために、デジタルマイクロスコープによる試験片表面の目視観察を行うとともに、試験を適宜中断して、溶剤除去性染色浸透探傷試験（カラーチェック、以後 PT という）を実施し、疲労き裂の観察を行った。PT は 1 回の試験につき 10 回程度の割合で実施した。

AE センサには広帯域型センサ（PAC 社製、WD、周波数帯域 100-1000kHz）を用い、試験片の両端に設置した。AE センサにより取得した信号はブリアンプ（PAC 社製、1220A）にて 60dB 増幅し、試験機の振動によるノイズを低減するために 200kHz のハイパスフィルタを介して AE 計測システム（PAC 社製、PCI-2）に取り込んだ。AE 試験のしきい値は、無負荷状態において環境ノイズを検出しない値とし、25dB と設定した。同時に試験機のロードセルの出力も取り込むことで、試験機側の PC に入力された応力およびひずみのデータと同期を行えるようにした。なお得られた AE については、各センサに到達するまでの時間差から位置標定を実施し、試験片中心部において発生した AE のみを用いて以後の疲労損傷の評価を行った。

2・2 疲労試験結果

疲労試験の結果を Fig. 3 に示す。図の縦軸は全ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon$ 、横軸は破断までの繰返し数 N_f である。図から各試験条件において結果に大きな差異はないことが分かる。また試験中の各サイクルにおける最大・最小応力を Fig. 4 に示す。図の縦軸は真応力、横軸は繰返し数である。この図から、いずれの全ひずみ範囲においても加工硬化しており、全ひずみ範囲が大きいほど繰返し数に対する応力上昇の勾配が高くなる傾向にあるが、破断直前には最大応力が低下していることが分かる。これは、この範囲において、マクロき裂が進展したためであると考えられる。

3 二次 AE による疲労損傷検出

AE の計測結果の一例として全ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon = 8\%$ の結果を各サイクルにおける最大、最小応力とともに Fig. 5 に示す。図の縦軸は累積 AE ヒット数、第二縦軸は真応力、横軸は疲労試験における繰返し数であり、実線が累積 AE ヒット数、破線が最大、最小応力である。一方、Fig. 6 は疲労試験結果と比較するために行った SUS316NG 材の一軸引張試験中の AE 計測結果である。真応力—真ひずみ線図を重ねて示した。一般に、一次 AE は塑性変形起因の AE とき裂起因の AE に分けられ

Fig. 3 Results of fatigue test.

Fig. 4 Variation of maximum and minimum stress during fatigue tests.

Fig. 5 Results of AE test and maximum and minimum stresses at each cycle ($\Delta\epsilon = 8\%$).

Fig. 6 Cumulative AE hit during uniaxial tensile test.

る。Fig. 6 から、破断直前に AE が発生することを除けば、SUS316NG 材は塑性変形による AE がほとんど発生しないことが分かる。Fig. 5 においては初期の段階から AE が発生しているが、これはき裂起因の AE であり、疲労き裂が疲労試験初期から発生していることが分かる。また、マクロき裂進展に伴う最大応力の低下に先駆けて AE 数が急増していることも分かる。しかし Fig. 5 における AE の急増点 (N/N_f で約 0.85) 以前の段階に関して

Fig. 7 Example of AE waveform and its frequency spectrum. ($\Delta\epsilon = 8\%$, $N/N_f \approx 0.5$). Fig. 8 Example of AE waveform and its frequency spectrum. ($\Delta\epsilon = 8\%$, $N/N_f \approx 1.0$).

は累積 AE ヒット数の変化は単調であり、計測した AE をそのまま用いて疲労損傷の程度を詳細に評価することは困難である。

AE 試験の疲労損傷検出への応用の可能性を探るため、はじめに検出した AE をその発生タイミングに着目して 2 つに分別することを考えた。タイミングは、ひずみと応力がともに増加している漸増過程と、ともに減少して

いる漸減過程に分けた。次に、漸増過程で発生した AE の一つ一つについて周波数解析を行った。一例として Fig. 7 と Fig. 8 に $\Delta\epsilon = 8\%$ の試験において、計測した AE 波形の例（上図）とその周波数解析結果（下図）を示す。Fig. 7 は $N/N_f \approx 0.5$ の時に、Fig. 8 は $N/N_f \approx 1.0$ の時に計測した AE である。本研究で計測した AE の多くは 200kHz 近傍と 500kHz 近傍に二つのピークを持つことが分かった。ピーク周波数はそれぞれのピークの大小関係によって大きく変動することから、本研究では重心周波数を用いて以後の解析をすすめることにした。Fig. 9 に、漸増過程における AE の重心周波数について調べた結果の一例を示す。それぞれの図の縦軸が累積 AE ヒット数、第二縦軸が周波数、横軸が繰返し数であり、図中の実線が AE の累積ヒット数、マーカーが AE の重心周波数である。この結果から、AE の周波数帯は疲労試験の途中から低い側に幅広くなることが分かった。次章で詳細を述べるがこの低重心周波数の AE は、疲労き裂進展に伴う摩擦等による二次 AE であると考えられる。

そこで、漸増過程における重心周波数が 450kHz 以下の AE のみを取り出した結果を Fig. 10 に示す。抽出後の AE 総数は $\Delta\epsilon = 2\%$ では 933 個、4% では 277 個、8% では 71 個であったが、各条件における結果を比較する

Fig. 9 Centroid frequency of AE signals at incremental phase during fatigue tests.

Fig. 10 Cumulative AE hits of AE generated at incremental phase under 450kHz.

ために図の縦軸は正規化した累積 AE ヒット数で、横軸は疲労寿命で正規化した繰返し数で示した。この図から、いずれの結果においても疲労寿命の 20 ~ 30% 程度から重心周波数 450kHz（低重心周波数）以下の AE が現れていることが確認できる。450kHz 以下の累積 AE 数に対し、その割合が 0.03 を超えた時を 450kHz 以下の AE 発生開始点と定義し、PT によりき裂を確認したタイミングと比較した結果を Table 3 に示す。Table 3 は、各全ひずみ範囲 $\Delta\epsilon$ における破断繰返し数 N_f に対して、PT と AE でき裂を検出できた時の回数 N を正規化 (N/N_f) して示している。Table 3 より各全ひずみ範囲について両手法による疲労損傷の検出タイミングはおおよそ一致していることが確認できる。

以上の結果から、疲労き裂が PT で検出できる程度の大きさになった時にこのような低重心周波数の AE が発生し、適切なしきい値を設定してフィルタリングを行えば抽出できることが分かった。この低重心周波数の AE は二次 AE であり、一次 AE による損傷評価と組み合わせることにより、より詳細に疲労損傷を評価できる可能性がある。

4 二次 AE の発生メカニズム

前述した通り、一般に AE 発生源としては塑性変形とき裂進展に起因した一次 AE とき裂面の摩擦等に起因した二次 AE がある。本章では前章で述べた 450kHz 以下の AE について、その発生メカニズムを詳細に調べた。

Fig. 9 では、いずれの条件においても 450kHz 以上の AE が試験初期から発生している。これは一次 AE が主体と考えられ、要因として塑性変形が除外されることから、き裂進展に起因するものであると判断できる。一方、450kHz 以下の AE は試験初期には確認されない。よって、これらはき裂の拡大に伴う副次的な要因によって発生する二次 AE と考えられる。このような二次 AE の原

Table 3 Normalized number of cycle of the crack confirmed by PT and AE begun to increase.

$\Delta\epsilon$	PT	AE (under 450kHz)
2%	0.33	0.25
4%	0.38	0.23
8%	0.35	0.32

因としてき裂面の摩擦が考えられるため、以下では摩擦について着目し考察を行った。

各サイクルにおける AE の発生タイミングについて調査した。Fig. 11 に $\Delta\epsilon = 8\%$ ($N_f = 141$ サイクル) の $N = 129$ サイクルと 130 サイクル時の AE の発生タイミングを示した例を示す。図中のマーカーが AE の重心周波数、実線が真応力、破線がデジタルマイクロスコープにより目視でき裂の開閉を確認した時間である。なお、ひずみと応力の漸減時の AE も参考のために合わせて示した。Fig. 11 より、AE は主にき裂開口を確認したタイミングで発生しており、このときの AE が幅広い周波数帯となっている。Fig. 9 において疲労試験の途中から AE の周波数が幅広くなった原因はき裂開口挙動が関与していると考えられる。これらの AE の発生源がき裂進展に起因するもの（一次 AE）であれば、AE は Fig. 11 の高真応力側でも観測されるはずである。今回、高真応力側で AE がほとんど観測されなかったことから、発生源はき裂進展に起因するものではないと判断できる。また、開口時には多くの AE が発生しているが、閉口時にはほとんど発生していない。この原因を探るため、デジタルマイクロスコープを用いた観察と有限要素法を用いた解析を行った。

デジタルマイクロスコープによる観察はき裂の開閉口が明確に確認できる $0.9N_f$ 以降に行った。観察したき裂の全体図の例を Fig. 12 に示す。また Fig. 12 に白丸で示した箇所ではき裂が合体しており、段差が生じていることが分かる。この段差部を拡大し、疲労試験中に観察した結果を Fig. 13 に示す。Fig. 13 (a) は、漸増過程においてまだき裂の上部と下部の一部が接触している状態であり、その後き裂がさらに開口していき、完全に離れた状態が (b) である。さらに、漸減過程でき裂が閉じ始める状態が (c)、再びき裂面同士が重なる状態が (d) である。なお、Fig. 13 中の白線はき裂面のそれぞれの段差部における傾きを表している。図に示すように、完全にき裂面同士が離れた (b) の段階でき裂面の傾きに大きな差が生じていることから、き裂が開口する (a) の段階で接触部分が強く擦れ、多くの AE が発生したと考えられる。一方で漸

Fig. 11 Timing of AE generation and centroid frequency of AE generated at increment phase ($\Delta\epsilon = 8\%$).

Fig. 12 Overall view of fatigue crack.

(a) A part contacted at increment phase

(b) Separated at increment phase

(c) Separated at decrement phase

(d) A part contacted at decrement phase

Fig. 13 Closeup view of fatigue crack at Fig. 12.

減過程になると(c)に示すように傾きが小さくなっていることが確認でき、段差がほとんど接触することなくき裂が閉口していくことが分かる。Fig. 11の漸減時においてAEがほとんど発生していないのはこの理由によるものと考えられる。本試験において低サイクル疲労試験の漸増過程において発生したAEの多くはき裂開口時のき裂の段差部の接触による二次AEであることが分かり、それらの重心周波数は低周波を含むことが分かった。他の試験片形状、試験条件の低サイクル疲労であっても、このような段差部が生じる場合には二次AEが発生し、疲労損傷の検出に利用できる可能性が高い。ただし、二次AEの疲労き裂検出への適用範囲については、段差とAEの発生の関係についてさらに詳しく研究する必要がある、本研究では明確にすることはできなかった。

デジタルマイクロ스코プによるき裂の詳細な観察結果より、き裂の開口時における主なAE発生源はき裂段差部の接触であり、併せてき裂の開閉口で段差部の接触状態が変化するため、AEの発生挙動が変わる可能性を示したが、実験的にこのような段差部の挙動を詳細に調べることは困難である。また、疲労き裂の開閉口を扱った研究は多くあるが、^{14), 15)}いずれもき裂の開口がき裂進展に与える影響について論じており、開口と閉口時の段差部の挙動を扱った例は無い。そこで疲労試験中のき裂段差部の挙動を明らかにするため、有限要素法を用いて弾塑性解析を実施した。

解析には汎用有限要素法ソフトANSYS13.0を用いた。解析モデルは、3次元の砂時計型試験片の中央部にき裂が発生した状態を模擬して作成した。Fig. 14に解析モデルを示す。またき裂の寸法と形状はFig. 15の通りであり、位置は試験片中央の表面とした。き裂形状は実際の段差部を単純化したため、試験結果と解析結果を定量的に比較することはできない。解析に用いた材料物性値をTable 4に示す。これらの値はFig. 6の単軸引張試験結果から算出した。塑性変形については2直線等硬化化を仮定した。試験辺長手方向(z方向)の片側を固定し、

Fig. 14 FE-model of hourglass specimen for the analysis.

Fig. 15 Shape of the uneven crack for hourglass model.

Table 4 Mechanical properties of SUS316NG.

Young's modulus [GPa]	195
Tangent tensile modulus [GPa]	1.6
Poisson's ratio	0.3
Yield strength [MPa]	318

反対の面に235MPaまで引張応力を負荷した後、除荷して-240MPaまで圧縮応力を付与、その後除荷した。

Fig. 16はき裂段差幅とき裂開口変位の関係を調べた結果である。き裂段差幅とき裂開口変位の関係は漸増過程と漸減過程で異なり、漸増過程ではき裂段差幅が減少するのに対して、漸減過程では増加していることが確認される。本解析では段差部が接触しない条件（初期段差幅3μm）で解析をしているためFig. 13に示した実験結果と直接比較することはできないが、これらの違いが漸増過程と漸減過程においてAEの発生挙動の違いを生じたと考えられる。

以上の解析的検討と実験結果により、低サイクル疲労試験において発生する二次AEは、き裂段差部等の接触摩擦により発生することが分かった。また、漸増・漸減過程でき裂段差部の接触状態が異なり、二次AEの発生挙動が異なる場合があることを明らかにした。

Fig. 16 Relationship between the distance of step and the crack opening displacement for hourglass model.

5 結 言

本研究では二次AEによる低サイクル疲労損傷検出と低サイクル疲労試験中に発生する二次AEの発生メカニズムを明らかにすることを目的に、実験と解析を行った。本研究条件において得られた結論は以下の通りである。

(1) AEの重心周波数に着目することにより、一次AEと二次AEを分別でき、疲労損傷がPTで検出できる程度の大きさになると、二次AEが発生開始することが分かった。

(2) 低サイクル疲労試験においては、き裂の開閉口時にき裂段差部等が接触することにより二次AEが発生することを示した。

(3) き裂段差部の接触に起因する二次AEは、開口時と閉口時で発生挙動が異なる場合があることを示した。

本研究は、東京電力(株)、北海道電力(株)、東北電力(株)、中部電力(株)、北陸電力(株)、関西電力(株)、中国電力(株)、四国電力(株)、九州電力(株)、日本原子力発電(株)、電源開発(株)からの受託研究として(社)日本溶接協会 原子力研究委員会 LCF小委員会で行われたものの一部である。ここに記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) M. N. Islam and Y. Arai, "Ultrasonic back reflection evaluation of crack growth from PSBs in low-cycle fatigue of stainless steel under constant load amplitude", *Materials Science and Engineering A*, Vol.520, No.15, pp.49-55 (2009).
- 2) T. Shoji, Y. Kawamori, Y. Watanabe and J. Fukakura, "Fatigue properties of reactor pressure vessel steel and damage evaluation", *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol.41, No.469, pp.1558-1564 (1992).
- 3) S. Rai, B. K. Choudhary, T. Jayakumar, K. B. S. Rao and B. Raj, "Characterization of low cycle fatigue damage in 9Cr-1Mo ferritic steel using X-ray diffraction technique", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol.76, No.5, pp.275-281 (1999).
- 4) M. Kamaya, "Influence of bulk damage on crack initiation in low-cycle fatigue of 316 stainless steel", *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol.33, pp.94-104 (2009).
- 5) A. C. E. Sinclair, D. C. Connors and C. L. Formby, "Acoustic emission analysis during fatigue crack growth in steel", *Materials Science and Engineering*, Vol.28, pp.263-273 (1977).
- 6) F. Hamel, J. P. Bailon and M. N. Bassim, "Acoustic emission mechanisms during high-cycle fatigue", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.14, No.4, pp.853-860 (1981).
- 7) A. Berkovits and D. Fang, "Study of fatigue crack characteristics by acoustic emission", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.51, No.3, pp.401-416 (1995).
- 8) T. M. Roberts and M. Talebzadeh, "Acoustic emission monitoring of fatigue crack propagation", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol.59, No.6, pp.695-712 (2003).
- 9) C. E. Hartbower, C. F. Morais, W. G. Reuter and P. P. Crimmins, "Acoustic emission from low-cycle high-stress-intensity fatigue", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.5, No.3, pp.765-782 (1973).
- 10) M. Houssny-Emam and M. N. Bassim, "Study of the effect of heat treatment on low cycle fatigue in AISI 4340 steel", *Materials Science and Engineering*, Vol.61, pp.79-88 (1983).
- 11) M. Shaira, N. Godin, P. Guy, L. Vanel and J. Courbon, "Evaluation of the strain-induced martensitic transformation by acoustic emission monitoring in 304L austenitic stainless steel", *Materials Science and Engineering A*, Vol.492, No.25, pp.392-399 (2008).
- 12) The Japanese Society for Non-Destructive Inspection (JSNDI), "Acoustic emission testing", pp.7-13 (2008) JSNDI.
- 13) K. Yamaguchi, H. Fujita, H. Oyazu, A. Yamashita and Y. Sakakibara, "Generation characteristics of acoustic emission from fatigue crack in FBR piping component at room temperature" *Proceedings of The 7th International Acoustic Emission Symposium*, pp.262-269 (1984).
- 14) Y. Takahashi, "Improvement of fatigue crack growth evaluation method -2nd report : detailed analysis of crack opening behavior and development of simplified estimation method", *CRIEPI Research Report*, T99045, pp.14-18 (2000).
- 15) M. Toyosada, K. Gotoh and T. Niwa, "Fatigue crack propagation for a through thickness crack : a crack propagation law considering cyclic plasticity near the crack tip", *International Journal of Fatigue*, Vol.26, No.9, pp.983-992 (2004).