

A-23 破面形状計測に基づく作用応力推定法

Estimation procedure for the applied stress by measuring the fracture surface topography

○正 中馬 康晴 (三菱重工長崎研) 末吉 幸一郎 (三菱重工長崎研)
正 山内 雅文 (三菱重工長崎研)

Yasuharu CHUMAN, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Nagasaki R&D Center, Fukahori-machi 5-717-1, Nagasaki
Kouichirou SUEYOSHI, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Nagasaki R&D Center
Masafumi YAMAUCHI, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Nagasaki R&D Center

There have been great needs to estimate the applied stress from fracture surface in addition to the fracture mode obtained from the evaluation by conventional fractography using SEM. In this study, several estimation procedures for the applied stress were investigated by quantitative analysis of the fracture surface topography measured by a confocal-optics-based scanning laser microscope or an atomic force microscope. For fatigue crack of carbon steel, a good correlation was obtained between the stress intensity factor (ΔK) and roughness parameter derived from the analysis of fracture surface. For cast iron, it was possible to estimate the fracture mode and the applied fatigue stress.

Finally, the shape of striation in Al alloy and SUS304 were examined. And a correlation between the stress ratio (R) and the ratio of striation height to width was clarified.

Key Words: Fracture surface analysis, topograph analysis, laser microscope, AFM

1. 緒言

機器の損傷トラブルの際には、その損傷原因を究明し、次の設計および補修に反映することにより、その機器の損傷再発防止および信頼性向上を達成する必要がある。損傷原因究明の方法の一つとして破面解析が実施され、一般に電子顕微鏡 (SEM) による観察により、損傷モードや破壊の起点や方向が推定されている。SEM 観察像は見た目に近い画像であることから、損傷モード毎の特徴的模様を捉えやすく、破壊をイメージするという点で、今後も最も有効な方法として使用されいくと思われる。しかしながら、損傷には想定外の荷重が負荷されたことが原因となることが多く、定性的破面解析に加え、破面からの作用応力推定のニーズは高い。

本研究は、破面から作用応力を推定するという目的のために、破面の微視的形狀に着目した新しい破面解析法を検討した。破面の微視的形狀は、近年開発された共焦点型のレーザー顕微鏡や原子間力顕微鏡 (AFM) を用いることで、比較的簡単に計測することができる。本報では、最初にレーザー顕微鏡を使った計測された炭素鋼破面のミクロンオーダーの形状と作用応力 (ΔK) の相関性について検討した。また、得られた結果を用い、実機破面の作用応力推定の例を示す。また、通常の破面解析では一般に困難な鋳鉄破面について、損傷モードや作用応力の推定について検討を行った。また、AFM を使ったナノオーダーの応力推定破面解析の適用第一段階として、ストライエーション形状に着目した応力比推定の可能性について述べる。

2. 破面形状の計測方法

本研究では、比較的短時間に破面形状の計測が可能である共焦点型のレーザー顕微鏡および原子間力顕微鏡 (AFM) を使用し

た。図1にレーザー顕微鏡による計測状況を示す。計測原理は、高さ方向にスキャンを行い、画素毎に焦点が合った高さ位置を記録するというものである。図2に AFM の計測部模式図を示す。カンチレバーの探針部を計測部に近づけ、試料との原

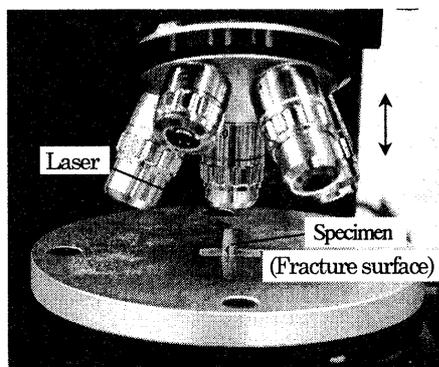


Fig.1 The appearance of measuring the fracture surface topography using Laser microscope

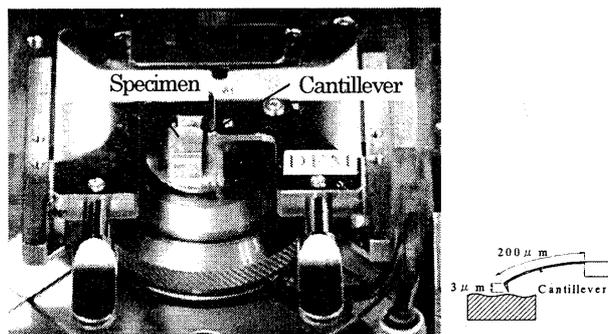


Fig.2 The appearance of measuring the fracture surface topography using AFM

子間力を検出し、その作用力を制御しながら表面形状を測定するというものである。破面形状計測においては、前者は数 μm ~数百 μm といったミクロンオーダーの凹凸計測に用い、後者は数 nm ~数 μm といったナノオーダーの凹凸計測に適している。

3. 破面粗さに基づく作用応力推定法

破面粗さに基づく作用応力推定例として、実機破面（炭素鋼）の解析例および鋳鉄破面の検討結果を報告する。本報では、破面形状を詳細に分析するため、破面形状データを周波数分析することにより凹凸の波長毎の特徴を分析する。

(1) 炭素鋼の破面解析

SS400 鋼の破面粗さと作用応力 (ΔK) の関係を把握するため、標準 CT 試験片を用いた疲労き裂伝播試験を行った。試験条件は、室温、応力比 $R=0.1$ 、繰り返し速度 5Hz である。

き裂伝播試験より得られた破面サンプルの破面形状をレーザー顕微鏡にて計測を行った。1点あたりの計測範囲は約 $0.5\text{mm} \times 0.4\text{mm}$ である。

図3にSS400鋼の疲労破面形状のFFT周波数分析結果を示す。波長が大きい範囲 ($100\mu\text{m}$ 以上) は、試験片の傾きや破面凹凸の大きなうねりを示している。また、波長 $20\sim 50\mu\text{m}$ の範囲で若干周波数特性がばらついており、結晶粒（本材料の結晶粒径は $20\sim 50\mu\text{m}$ ）に対応しているものと考えられる。また、波長 $3\mu\text{m}$ 以下において傾きが変わっているが、これは、計測精度に起因していると思われる。図より、 ΔK の増大とともに、

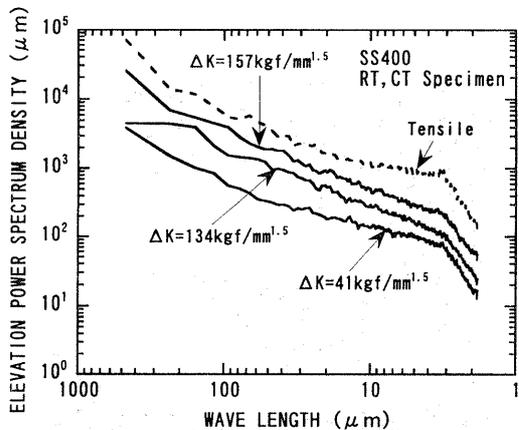


Fig.3 FFT analysis of fracture surface topography of SS400

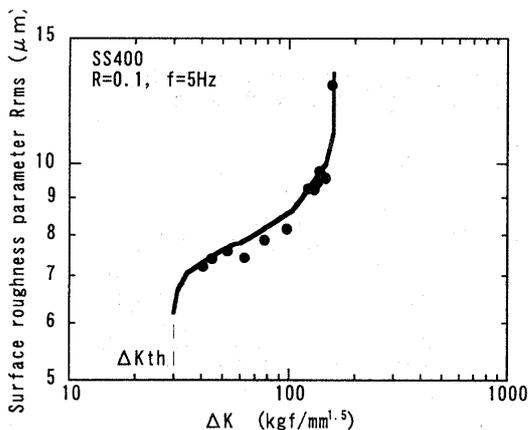
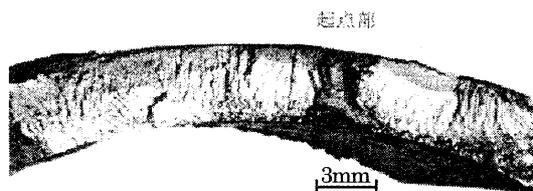


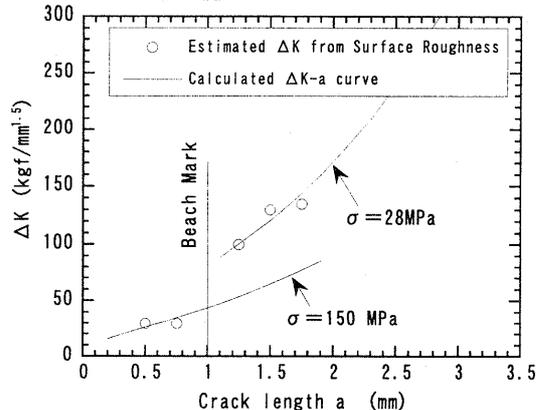
Fig.4 Relation between the fracture roughness parameter and ΔK

凹凸波長全域にわたって大きくなるのが分かる。また、図中には延性破壊している最終破断部破面の周波数分析結果も示しているが、疲労破面は ΔK の増大とともにこの周波数特性に近づいていくことが予想される。また、き裂伝播速度 $0.01\sim 1.0\mu\text{m}/\text{cycle}$ よりも大きいオーダーで計測されているにもかかわらず、このような結果となっているのは、 ΔK とマクロな破面形状すなわち伝播経路に相関があることを意味している。応力の増大とともに、疲労き裂が結晶粒界や粒内の組織に影響を受けて方向を変えていると考えられる。

図4にCT試験片の応力拡大係数範囲と自乗平均粗さの関係を示す。周波数分析の結果から、低周波数成分および高周波数成分を除去したのち、自乗平均粗さパラメータ R_{rms} にて整理した。破面粗さパラメータ R_{rms} と ΔK は良好な相関があり、本図を用いて応力推定が可能であることが分かる。図5に実機の破面に適用した例を示す。図5(1)に破面外観を示す。材料はSTK400鋼（鋼管 t3.5）である。破面には明瞭なビーチマークが見られ疲労と判断されたが、ストライエーションは観察されなかった。また、構造上、片振りの荷重しか考えられず、上記き裂伝播試験の応力比と同等である。図中に示す点を計測し、自乗平均粗さ R_{rms} を求めた。図5(2)に作用応力推定結果を示す。き裂進展とともに推定される ΔK は大きくなっている。また、破壊力学により、応力を変えて応力拡大係数とき裂長さの関係を求め、破面粗さから求めた点に対し、最もカーブフィットする応力を求めた。その結果、ビーチマーク前では作用応力は約 $15\text{kgf}/\text{mm}^2$ 、ビーチマーク後では作用応力は約 $28\text{kgf}/\text{mm}^2$ とビーチマーク前後で作用応力が変わっている。作用応力の変化の原因としては、構造改造が考えられ、首記応力によりき裂伝播解析の結果、その改造時期と一致した。改造前、作用応力約 $15\text{kgf}/\text{mm}^2$ で約 1mm 進んでいたき裂（ビーチマーク）が、改



(1) Macroscopic appearance of fracture surface



(2) Relation between crack length and ΔK

Fig.5 The result of the estimation the applied stress from fracture surface of an actual component

造後何らかの原因で、作用応力が約28kgf/mm²と上がりき裂の進展が加速したものと推察された。

(2) 鋳鉄の破面解析

鋳鉄は一般によく使われる構造材料であるが、破面解析は一般には困難で、損傷モードすら分からないケースが多い。いずれの損傷モードにおいてもき裂は介在物である黒鉛を主に伝播するため、破面には損傷モード毎の特徴的な模様は見られないためである。そこで、まず最初に鋳鉄の破面形状と損傷モードとの相関を検討した。

材料は片状黒鉛鋳鉄(FC30)である。サンプル破面作製のため、CCT試験片を用いたき裂伝播試験(RT), 引張試験(RT), シャルピー衝撃試験(RT)を実施した。

図6に各損傷モードの破面の周波数分析結果を示す。周波数特性は、全波長領域において延性破面>疲労破面>衝撃破面となっており、それぞれ明確な差が見られた。

図7に各損傷モードの破面断面観察結果を示す。鋳鉄のき裂伝播経路はいずれの損傷モードにおいても黒鉛の分布状態に大

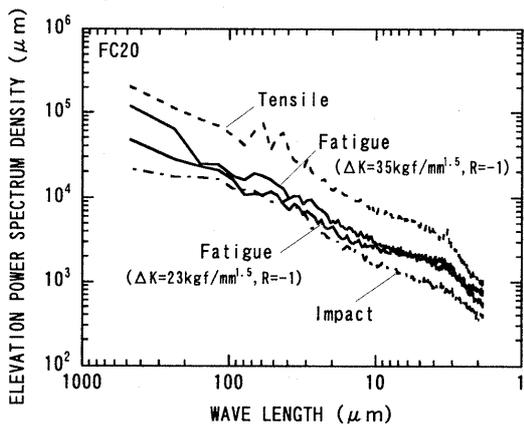


Fig.6 FFT analysis of fracture surface topography of FC30

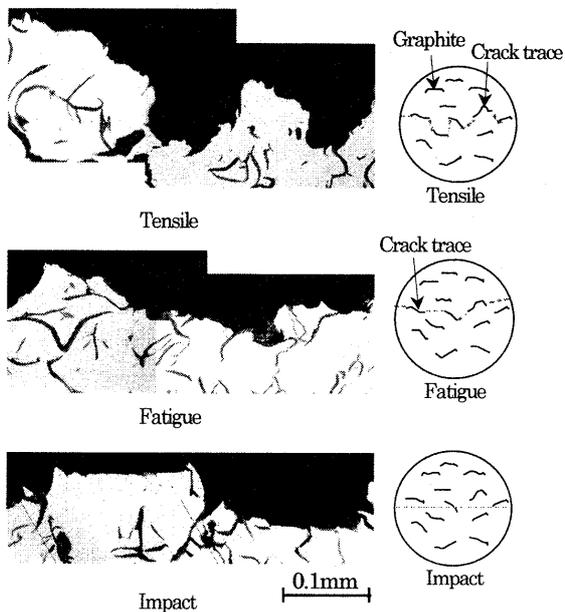


Fig.7 Appearance of section of fracture surface of FC30

き影響を受けている。最も影響を受けているのは延性破面であり、黒鉛と基地部の剥離の次にその黒鉛に最も近い黒鉛とのリガメント部が延性破壊するという形態のため、破面の凹凸が大きくなると考えられる。疲労破面についても、黒鉛を選択的にき裂は進んでいるように見られるが、基地部はある程度荷重方向に垂直に疲労き裂伝播しているようであり、延性破面に比べると破面凹凸は小さくなると考えられる。また、衝撃破面については黒鉛の影響が他の損傷モードに比べ小さく、直線的にき裂が進んでおり、破面凹凸が小さくなると考えられる。

次に鋳鉄疲労破面からの作用応力推定の検討を行った。サン

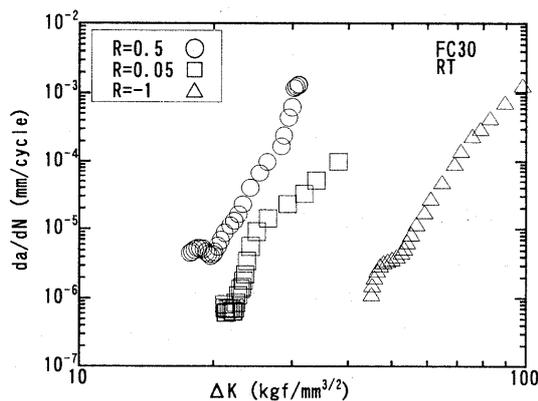
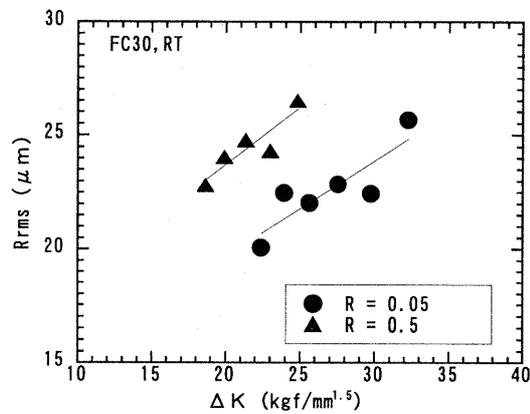
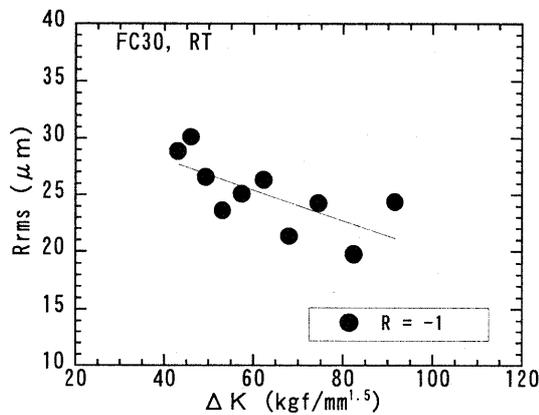


Fig.8 Crack propagation rate of FC30



(1) R=0.05, 0.5



(2) R=-1

Fig.9 Relation between the fracture roughness parameter and ΔK

プル破面作成のため、CCT試験片を用いたき裂伝播試験(RT)を実施した。応力比は、0.5, 0.05, -1である。図8にき裂伝播速度と ΔK の関係を示す。鋳鉄疲労き裂伝播特性は応力比に大きく依存しており、また、応力比毎では疲労き裂伝播する ΔK の範囲は狭い。

図9に鋳鉄破面の破面粗さ R_{rms} と応力拡大係数 ΔK の関係を示す。応力比毎に ΔK と破面粗さは相関があり、 ΔK 推定は可能と考えられる。応力比 $R=0.05, 0.5$ においては、 ΔK 増大とともに破面凹凸が大きくなっており、これは、黒鉛の影響を次第に受けやすくなっているためと考えられる。一方、 $R=-1$ においては、 ΔK 増大とともに破面凹凸が小さくなっており、圧縮応力が影響しているものと思われる。

破面粗さに基づく作用応力推定は炭素鋼以外にも、低合金鋼やステンレス鋼等で確認されている⁹⁾。ただし、応力比の影響が大きく、応力比が既知である場合にしか適用できないのが現状である。

4. AFM利用による応力推定について

AFMはnmオーダーの計測精度を持っていることから、疲労1サイクル毎のき裂進展量に対応する破面形状を計測することができるため、より正確に破壊物理量(作用応力)を推定できる可能性を持っていると考えられる。以下に、AFMの適用例としてストライエーション形状計測による応力比推定の検討結果を示す。

近年、古川らによって、ストライエーションの形状と応力比($R=\sigma_{max}/\sigma_{min}$)の間に相関があることが報告されている⁹⁾。古川らの方法は、破面を特殊な方法で切断し、その断面を観察し、ストライエーション形状を計測するというものであるが、AFMなどを使って、迅速に形状を計測することができれば、実際の事故調査に適用できるとと思われる。ストライエーションは幅が数十nm~数 μm 程度、高さはさらに小さい値となることから、レーザー顕微鏡での形状計測は困難でありAFMを使用した。

供試材はSUS304鋼およびAl合金である。破面サンプル作成のため、応力比-1, 0.0, 0.5, 0.8の条件でCT試験片を使った室温疲労き裂伝播試験を行った。SUS304鋼は $\Delta K=40\sim 120 \text{ kgf/mm}^{23}$ で実施され、ストライエーション間隔は、 $0.3\sim 2.0 \mu m$ である。Al合金は、 $\Delta K=20\sim 50 \text{ kgf/mm}^{23}$ で実施され、ストライエーション間隔は、 $0.08\sim 0.2 \mu m$ である。

図10にAl合金のストライエーション形状鳥瞰図を示す。

図11に応力比とストライエーション形状(高さHと幅sの比)の関係を示す。全体的にバラツキが見られるが、応力比Rが大きくなるほどストライエーション形状H/Sも大きくなっていることが分かる。精度については、統計的な処理をすることで、バラツキを押さえることができると考えられる。しかしながら、低 ΔK 領域では応力比とストライエーション形状との明確な相関は見いだせないという報告もある⁹⁾ことから、今後本手法の適用範囲を明確にしていく必要がある。

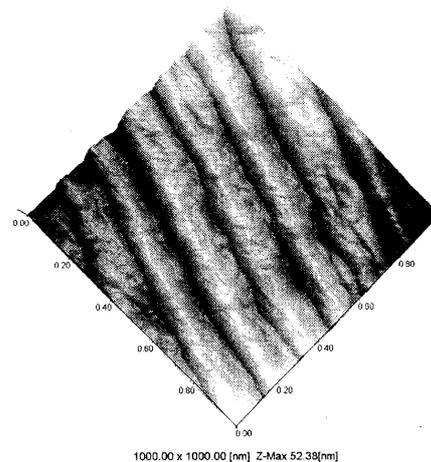


Fig.10 AFM observation for striation of Al alloy

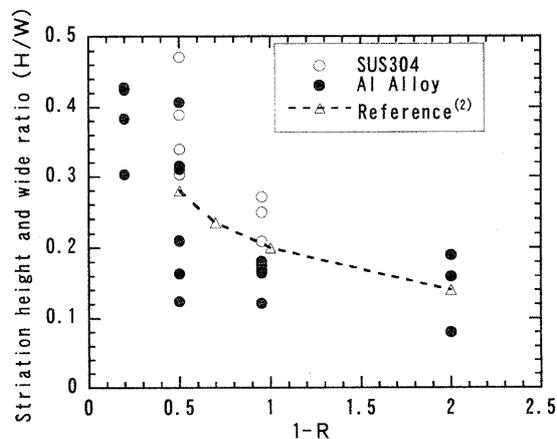


Fig.11 Relation between the striation shape (H/W) and stress ratio

5. 結言

共焦点型走査レーザー顕微鏡や原子間力顕微鏡(AFM)により破面形状を計測し、定量的に解析することで、作用応力を推定する手法を検討した。炭素鋼について、粗さパラメータで表した破面の形状は作用応力(ΔK)と良好な相関を有しており、その関係を使い作用応力推定が可能である。また、通常の破面解析では困難な鋳鉄の破面解析においても、破面形状にもとづき、損傷モードや作用応力の推定が可能であることが分かった。また、AFMを使いストライエーション形状に着目した応力比推定法を検討した結果、バラツキはあるものの応力比とストライエーション形状は相関性があることが確認された。

【参考文献】

- (1) 藤原, 服部, 「材料」(J. Soc. Mat. Sci., Japan), Vol.47, No.10, pp.1088-1092, Oct. 1998
- (2) 古川, 村上, 西田, 「材料」(J. Soc. Mat. Sci., Japan), Vol.45, No.3, pp.340-345, Mar. 1996
- (3) H. Ishii, S. Choi, K. Tohgo, ICM8, Vol.12, pp.73-78