

## 論文の内容の要旨

### 論文題目 局所パラメータの導入による破面の特性化に関する研究

氏名 山際謙太

材料が破壊した際に形成される破断面には、破壊の進行状況を示す特徴的な模様が残っている。機械構造物の破損事故等の原因究明に、破面解析は非常に有効な手段であり、信頼性の高い構造物の設計の為に重要な役割を果たしている。従来の破面解析は、解析熟練者が、破面観察を行い、定性的な評価の元に事故原因を推定してきた。しかし、近年、熟練した破断面解析者は減少し、解析結果の信頼性が低下していることが指摘されている。この問題に対して、数値破断面解析の分野は、解析者に依存しない結果を提供することから、客観性があり、信頼性の高い解析結果を提供するものとして期待されている。また、解析初心者へ、破断面解析における意思決定の支援を行うことも期待されている。本論文では局所パラメータを用いた破面の数値解析法を提案し、破面の客観的解析を行う。

破面は、観察する領域や観察倍率に応じて、様々な様相を持つ。ここで、領域や倍率に応じた破面の特徴を「局所性」と呼ぶ。そして、様相の遷移は破壊機構と密接な関係があることが報告されている。しかし、数値破面解析の分野においては、局所性を評価するためのパラメータは確立されておらず、例えば領域評価に関しては人間の目で判断する機会が多く、観察者の主観の入りやすい解析手法が行われていた。本論文では、局所性を評価するために必要なパラメータ(局所パラメータ)を提案する。局所パラメータは、主に領域と破面様相の関係、観察倍率と破面様相の関係を示すパラメータである。領域と破面様相の関係を評価するためには、1:ストライエーション度、2:2次元局所 Hurst 数を提案する。破面は画像に周期性がある場合、疲労破面である場合が多いことから、周期性がある場合の領域評価用としてストライエーション度を提案する。一方、周期性が無い場合の領域評価を行うために、2次元局所 Hurst 数を提案する。また、観察倍率と破面様相の関係を評価するためには、観察倍率毎のフラクタル次元を提案する。次に個々のパラメータについて説明する。

疲労破面の主な特徴であるストライエーションの破面率は、応力比や  $\Delta K$  との関係が指摘されており、作用応力推定に有効な指標である。本章では、ストライエーション領域を評価するための局所パラメータとして、ストライエーション度を提案する。ストライエーション度は、破面画像内の画素単位に割り当てられるパラメータであり、その画素を中心とした周辺領域について、ストライエーションの周波数に対応した波の強度を示すパラメータである。画素単位に評価するために、本研究ではウェーブレット変換を用いる。ウェーブレット変換は、信号や画像の局所性評価に有効な手法である。そして、本論文では、疲労破面画像からストライエーション度を示すプロセスについて示す。

そして、ストライエーション度の有効性を確認するために、仮想的にストライエーションを含む破面を作成した。そして、ストライエーション度を用いて、仮想的に設定されたストライエーション領域を検出した。次に、2.25Cr-1Mo 鋼と A2017-T4 アルミニウム合金の軸荷重疲労試験の破断面に適用した。その結果、ストライエーション度を用いることで、疲労破面の破面率が評価でき、実破面においてもストライエーション度が有効であることを示した。また、ストライエーション破面率を求める過程において、従来の目視による領域評価よりも客観性の高い方法でストライエーション破面率を求めることが可能であることを示した。しかし、ストライエーション破面率を決めるために導入したしきい値の決定は、観察者の主観によるものであるため、自動的なしきい値の決定に関しては今後の課題として残された。

次に、破面が周期性を持たない場合に、領域の評価を行う為の局所パラメータを提案する。特に破面の観察倍率に依存しない複雑さを評価するための特徴量として、2次元局所 Hurst 数を提案する。局所 Hurst 数は、従来の研究から破面の複雑さ評価に有効な指標である。しかし、従来用いていた局所 Hurst 数は、1次元であり、局所 Hurst 数の計算には、詳細なプロファイル(縦断面)が必要であり、作成には非常に手間がかかった。その為、破面全体から、数本のプロファイルしか解析できず、解析したプロファイルと破面全体の特徴は不明瞭であった。本研究では 2次元の局所 Hurst 数を求める方法を提案し、破面の濃淡画像から求める手法を提案した。濃淡画像を用いることで、簡易に破面の全体の複雑さを評価することが可能になった。また、2次元化することで、従来はある画素の前後の画素のみを用いて評価していた複雑さが、ある画素の前後左右の画素を用いて評価することが可能になり、破面の様相を画素単位で、より特徴量に反映することが可能になった。

本論文では 2次元局所 Hurst 数を破面に観察されるストレッチゾーンの幅( $SZW_c$ )の定量評価について応用した。 $SZW_c$ は、破壊じん性値( $J_{Ic}$ )との相関が従来の研究で指摘されており、 $SZW_c$ の定量評価は、破断時の荷重を評価できる点で有効である。しかし、従来の研究ではストレッチゾーンの領域や  $SZW_c$ の評価は、目視によるものが主であった。本研究では、 $SZW_c$ を定量評価する為の手法をあわせて提案し、圧力用配管用炭素鋼 STPG370 の破壊じん性試験破面に適用した。その結果、目視により決定したストレッチゾーンや  $SZW_c$ を比較してよく一致することが確認された。従って、2次元局所 Hurst 数が破面の評価に有効であることが確認された。

最後に、観察倍率と破面様相の関係を示す局所パラメータとして、観察倍率毎のフラクタル次元を提案する。フラクタル次元は、計測する対象がフラクタル性を持つ場合は、フラクタル次元が一定であるが、フラクタル性を持たない場合は、フラクタル次元が減少する。破面観察において、観察倍率が低倍率の場合、破面はフラクタル性をもつが、観察倍率が大きくなると様相が変化し、フラクタル性を失う。従来の研究では、特定の観察倍率において得られた破面像からフラクタル次元を求めていたため、広範囲の観察倍率(空間スケール)におけるフラクタル性の議論が行われていなかった。本研究では、観察倍率を変化させながら、各観察倍率におけるフラクタル次元を計算して、

破面のフラクタル性を広範囲の観察倍率について求めた。観察対象としたのは、TiAl のクリープ、クリープ疲労破面である。クリープ破壊は、粒界破壊の領域と粒内破壊の領域、クリープ疲労破面に関しては、粒内破壊の破面に対して適用した。その結果、破面には、フラクタル性がある空間スケールと無い空間スケールが存在し、その境界は破面に特徴的な大きさと相関があることがわかった。例えば粒界破壊破面では、結晶粒の大きさが特徴長さとして求めることができた。しかし、その特徴的な大きさが、破壊機構や組織的な影響なのかについては別途の指標を用いる必要がある。

以上、本研究では、これまで観察者の主観に依存していた局所性の評価について3種類の局所パラメータを提案することで、主観に依存しない客観的な局所性評価を実現した。そして、具体的に実破断面に適用し、有効性を確認した。その上で、個々のパラメータの破面や破面画像への適用方法を示した。また、様々な破面様相に対し、局所パラメータを適用した際に得られる情報についてもまとめた。