破壊機構再現法(F R A S T A)とその秘めたる可能性

小林 隆夫*

Fracture Process Reconstruction Method (FRASTA) and Its Hidden Potential

by

Takao KOBAYASHI*

Fracture surface topography analysis (FRASTA) technique reconstructs fracture process in microscopic details by matching conjugate fracture surface topographs. It produces three different results: fractured area projection plot (FAPP), cross-sectional plot (XSP), and fracture progression curve (FPC). FAPP shows graphically where the crack initiation site(s) is and how it grew. By superimposing a series of FAPPs over a scanning electron microscope image of fracture surface, we can establish relationships between fracture process and microstructures. XSP is used to characterize the crack tip opening displacement or crack opening angle. Use of these two results is seen in published papers where the crack initiation mechanisms could not be determined by regular fractographic examination. However, these two results do not indicate the kinematics of crack growth.

FPC shows the relationship between fractured area and the spacing between conjugate surface topographs. This relatively unexplored relationship shows the crack growth history from the onset of microcrack initiation to the rupture of the component, and by analyzing this relationship such information as crack initiation time, crack growth rate, changes in loading conditions or environment can be learned. This paper presents some examples of use of FPC in failure analysis.

Keywords:

Fracture surface topography analysis, FRASTA, Fracture area projection plot (FAPP), Cross-sectional plot (XSP), Fracture progression curve (FPC), Crack opening angle (COA)

1 緒 言

破面解析は、破面の上の模様を見ることにより、き裂がどこで発生し、どのような方向に進展をし、そのメカニズムはなんであるかを知るために行われる。しかし、破面解析から得られる情報は、疲労破壊面のストライエーション間隔を読むような場合を除いて、大体において定性的であり、き裂進展の挙動に関する情報や荷重の変動に関するような情報は得がたく、ともすれば、破面解析は、他の力学的な破面解析とは交わりえない解析として取り扱われることが多いようである。

破面解析をより定量的な解析にし、き裂進展の歴史や力学的な情報を得るためには、違った観点からの解析が必要である。破壊面上のパラメーターでまだまだ十分に解析されていないのは破壊面のトポグラフィーであり、トポグラフィーをうまく利用することにより新しい展開が出来ると思う。

著者は、1980年代初めにメリーランド州立大学で故 George Irwin 教授と一緒に仕事をしていたときに、破壊面の3次元解析を薦められ、3次元解析で得られた結果を如何に有効に使うかを色々考えていたときに、一対の破壊面のトポグラフィーを重ね合わせ解析することを思いついた。それ以降、破壊面のトポグラフィーから破壊

機構を再現する解析方法の開発をおこない FRASTA 法を作り出した^{1),2)}。更に、破壊面の3次元情報を高精度で効率よく得られる方法の開発も行ってきた。これらの活動は George Irwin 生誕 100 年記念学会で発表され、論文としても掲載されている³⁾。

FRAST 法は日本でも幾人かの研究者により利用されているが⁴⁾⁻¹⁰⁾、その利用方法は、FRASTA の可能性からはまだまだ限られたものと思われる。ここで先ず FRASTA 法によって得られる結果とその使い方について述べ、さらに FRASTA 方法を適用するときの注意事項を述べた後、他者によって余り使われていない応用例を挙げ FRASTA 法の可能性について記述したい。

2 破壊機構再現法 (FRASTA) について

FRASTA 法では、一対の破壊面のトポグラフィーのデータをコンピューターに入力し、両面の間隔を変えながら、どこに隙間が出来、どこに重なり合いがあるかを算出し、その情報を使い破壊のプロセスを再現し、破壊解析に利用する方法である。この方法では三つの結果が得られるのでその個々の結果と使い方について論じたい。

2. 1 FRASTA法で得られる結果

Fig. 1 はこの解析で得られる結果の二種類を示した図である。Fractured Area Projection Plot (FAPP) は、両破面間に隙間があるところを白で示し、まだ重なっているところを黒で示した図である。この解析で両破面間に隙間があるということはき裂があるということと解釈をしている。FAPP はき裂の発生箇所の特特定や一連の FAPP を見ることによりき裂の進展方向やき裂先端の形状、またき裂先端での微小き裂の発生状況を知るのに役に立つ。更に、FAPP を破壊表面の電子顕微鏡写真と倍率を合わせ、重ね合わせることで、き裂発生や進展と材料の微小構造との関係を調査する有力な手がかりを得ることが出来る。

もう一つの結果は Cross-Sectional Plot (XSP) と呼ばれる破壊面に垂直に切った切断図である。切る方向は自由に選べる。XSP はき裂先端の開口度やき裂開口角を算出するのに有効である。さらにこの図で黒く重なり合っている部分では、それぞれの箇所が破断するまでにどれだけの塑性変形を必要とするかを示しており、各断面での破壊に至るまでの仕事を計算することも可能であると思われる。

Fig. 1. FAPP and XSP obtained by matching conjugate topographs on computer.

上記2つの方法は、他の研究者にも利用され、その結果も論文発表されている⁴⁾⁻¹⁰⁾。

FRASTA 解析の第三の結果は、Fracture Progression Curve (FPC) と我々が呼んでいるき裂の面積と両破壊面の間隔とを結びつける曲線である。その一つの例を Fig.2 に示す。

著者はこの曲線こそが、き裂発生から破断までのき裂の挙動や荷重や環境との干渉の歴史を解き明かし、破面解析を破壊の力学的解析と結びつける重要な結果であると考えている。我々の作成した FRASTA ソフトでは、この曲線は自動的に作成され、その曲線の数値データも記録され、この曲線の解析がいろいろの観点から出来るようになっていく。

Fig. 2. Examples of Fracture Progression Curve.

Fig. 2 に示されているように、き裂進展開始から停止まで、いくつかの箇所曲線の傾きが変わっている。FPC では、直線部分では破壊条件(荷重並びに環境)が一定であり、FPC の屈折点では荷重あるいは環境の変化があったことを示している。これらの屈折点の時間関係と作業記録と比べることによりその対応を関連付けることが出来る。更に、この屈折点での両破壊面の間隔に基づいた FAPP を作成し、それを破面の写真に重ね合わせることで、破面上のどの地点で変化があったかも知ることが出来る。

この図における破壊面の間隔 (FPC の横軸) は多くの場合、経過時間とほぼ 1 次比例関係にある事が幾つかの例で検証されており (例えば次章で紹介する文献参照)、FPC の 2 点の時間が分かれば、比例関係を使う事により、き裂発生時期やき裂進展速度等を推定することが出来る。後節でいくつかの応用例を示す。

FPC の両面の間隔と時間との比例関係は、あらゆる荷重条件に対して検証されたわけではなく、今後色々な荷重条件に対し検証しデータベースを築き上げる事が重要であると考えている。

Fig. 2 に於いて “% of Fractured Area” は作製したファイルの面積に対して隙間のある部分の割合であるが、破壊面が必ずしも観察領域の全面を占めるわけではないので、曲線は必ずしも原点 (0%) を通らない。

更に、ファイルの実寸法も分かっているため、破壊面積も物理量で計算できる。“Conjugate Surface Spacing” も 1 という値の物理量が計算され示されているので、両破壊面の移動量も物理量で計算できる。

FRASTA 法はその概念は非常に簡単なものであるが、汎用性のある方法であると考えている。著者は金属材料、セラミック材料、高分子材料、複合材料等に応用成功した経験がある。面白いのはセラミック材料で、通常ではセラミック材料はぜい性材料で塑性変形をしないと考えられているが、FRASTA 法を応用するとき裂の形状を忠実に再現できることが分かった。これはある依頼者が FRASTA 法が窒化珪素のようなセラミックに適用できるかどうかをテストするために金属蒸気をき裂に浸透させき裂形状を解析した試験片の FRASTA 解析を依頼し、両結果がよく合うことを確認した結果である。なぜセラミック材に FRASTA 法がうまく適用できるのかは、き裂先端でかなりの微小

き裂が発生しそれが擬似塑性変形のようなものを起こしているのではないかと推測している。

FRASTA 法が適応しにくい、あるいは出来ない材料はゴムのような架橋高分子材料や高分子マトリックスの複合材料と思われる。ゴムのような材料はき裂先端での塑性変形に比べ弾性変形の量が非常に大きいため破壊機構の再現は難しい。高分子マトリックス材複合材料への応用は材料内での破壊のプロセスが広範囲で起こりファイバーに引き抜きなどが起こり破壊の再現は不可能と考える。

2. 2 FRASTA用のトポグラフィーのデーター作成に関して

破壊面のトポグラフィーデーターを得る方法はいくつかあるが、この方法はトポグラフィーを解析する装置、解析方法並びにその発展に大きく依存していることを知る必要がある。たとえば、1980 年当初には、共焦点顕微鏡や Atomic Force Microscope や立体写真解析のソフト等も市販されたものはなかった。

唯一考えられる方法は、走査電子顕微鏡の立体写真を航空測量会社の写真測量装置を使い、等高線図を作製しそれを利用することであった。著者が相談をした航空測量会社は、走査電子顕微鏡写真を解析した経験はなく、色々試行錯誤の上、非常に精度良い等高線図を作製する方法を開発してくれた。そして 1980 年代は主として等高線図によるデーターを利用して FRASTA 解析を行った。しかし、航空測量会社の装置によって作成されるデーターは精度は非常に高いが、データーの作成に時間とかなりの費用がかかり、手軽な FRASTA 解析が出来ない問題点があった。

1990 年初めには、共焦点顕微鏡が市場投入されたが多くの共焦点顕微鏡は透視型のもので、金属表面の観察には向かないものであった。唯一の例外は、レーザーテック社の装置であった。著者は 1995 年ごろ、レーザーテック社の協力を得、Fig. 3 のような FRASTA 解析装置、FRASTAScope を開発した。また種々のデーター収集に必要な装置制御のソフトも開発した。この装置では、X-Y ステージは 152 mm の移動幅があり、 $\pm 0.1 \mu\text{m}$ の精度で位置決め出来るようになっている。FRASTA 用のファイルの作成は、興味ある破壊面上の長方形領域の対角線上の隅の 2 点を指定することにより、自動的に顕微鏡画面並びにトポグラフィーの情報をつなぎ合わせ一つのファイルを作成することが出来る様になっている。

多くの画面をつなぎ合わせ一つのファイルを作成すると、場合によってはファイルの容量が大きくなりすぎることもあるが、このような場合にはデーター間の間隔を指定することにより、測定中に自動的にデーターの間引きを行うことも出来るようにした。

一対の破壊面のマッチングは、顕微鏡の像を使い行っている。そのやり方は下記のようなものである。最初の面は、自由に領域を選びファイルを作成するが、そのときに、長方形の領域の 4 つのコーナーと各辺の中央の場所の顕微鏡の映像とトポグラフィーのグレイスケールの像を保存す

るようにソフトが作られている。そして対応する第 2 面のファイルを作成するときに、第一面のファイルの作成時に保存されたコーナーあるいは各片の中央のファイルをコンピューターのモニター上に反転して読み出し、対応する第 2 面の顕微鏡画像と保存された像をモニター上で上下半分ずつ分割して投影し、其れを迅速に交換投影することにより、顕微鏡画面の全面を使い第 2 面の位置合わせることが出来るようにしてある。一つの位置から他の保存位置への移動は第 1 面のトポグラフィーを取り込んだときの情報を使い、画面上に表示された 8 つの位置の一つを指定することで、すぐにその位置に移動出来るようにプログラムが組んである。

Fig. 3. Photograph of SRI's FRASTAScope.

長方形の 4 つのコーナー並びに 4 辺の中央の顕微鏡写真との対応がすべて正確に出来るように X-Y ステージ並びに回転ステージを調整すると $\pm 0.2 \mu\text{m}$ 以上の精度で両面を合わせることが出来る。そして開始のボタンを押すと第 1 面を作成したときの手順に従い自動的に第 2 面のファイルが作成されるようになっている。

我々が FRASTAScope に組み込んだ共焦点顕微鏡は 1990 年代に開発されたもので、レーザーを光源として使用しており、レンズシステムもトポグラフィーの情報を得るには最低限 20 倍のレンズが必要であり、その有効視野は約 $0.55 \text{ mm} \times 0.37 \text{ mm}$ であり、多くの破壊面解析においては、かなりの枚数の顕微鏡画像のつなぎ合わせが必要であり、解析に時間がかかる問題点がある。更に、共焦点顕微鏡は、高さの情報が 8 ビットで処理をされるため、たとえば高さ方向の顕微鏡の動きを 1 パルス 60 nm で動くような装置を使うと最大限解析可能な破壊面凹凸の幅は約 2 mm を少し超えるぐらいとなり、かなり制限される。データーは指定された高さの幅を 256 分割して記録されるので破面の凸凹が大きい場合、高さのステップがかなり荒くなる。

この点に関しては、共焦点顕微鏡の装置の発展は目覚しく、レーザーテック社は大口径低倍率(5倍や10倍)のレンズを開発し、共焦点測定を低倍率で可能にした。5倍のレンズを使うと3.6 mm x 3.6 mmの面積を一挙に解析できる。更に、通常の Long Working Distance Lens ではどうしても急斜面(70度以上)での高さの解析が難しかったが、この大口径のレンズではほぼ垂直に近い斜面も解析可能となっている。

更に、高さの分解能も16 bitの分解能を持った装置が開発されており、10 nmの分解能で約10 mm以上の高さの幅まで解析でき、これは大きな進歩といえる。著者は、大きな面積を高精度で迅速にトポグラフィーの解析が出来ることが、FRASTA法を実用の技術として完成させる方法であると考えている。

2.3 FRASTAに於ける両破壊面の合わせ方

FRASTA解析を行うときのFig. 4のフローチャートに基づき手順について注意事項を述べたい。破壊面は顕微鏡観察を可能にするため破損部材から切り出すことが往々に必要であるが、その作業において、破面背後の切断面を荷重方向と垂直になり、また出来るだけ両破面が良く合うように(例えば試験片の外辺の直線部を基準とし)選ぶことが重要である。切り出した試験片は立体ズーム顕微鏡や走査電子顕微鏡で観察し、き裂の発生点やき裂先端形状並びに進展方向を示す模様があるかどうかを観察することが重要である。もしき裂先端形状や進展方向を示す模様があればその模様を出来るだけ低倍率で広範囲に収まるように走査電子顕微鏡等で写真を取ることが必要である。次に、この様なき裂先端形状を示す模様を出来るだけ多く含む範囲の一对のトポグラフィーデータを作成する。

この一对のトポグラフィーデータを使い、一連のFAPPを作製し走査電子顕微鏡写真の上に倍率を調整し重ね合わせ、走査電子顕微鏡写真のき裂先端形状とFAPPで示されたき裂形状が合うかどうかを調べる。もし食い違いがあれば、一对のトポグラフィーデータにx-方向並びにy-方向へウエッジをさしこむように傾きを変えて再度一連のFAPPを作製し(我々のFRASTAソフトではこの様な傾きを変える機能が組み込まれている)、再度顕微鏡写真のき裂先端の形状が合うかどうかを調べる。この作業をき裂先端形状とFAPPのき裂形状が良く合うまで一对の破面の傾きを変えて繰り返し調整する。

誤った傾きを入れると、FAPPにおけるき裂先端形状が歪み、破面写真のき裂先端形状と合わなくなったり、極端な場合にはき裂進展が逆方向に向かうこともある。

この破壊面のx-方向並びにy-方向の傾きを変える作業は、トポグラフィーデータ作成作業が試験片が破断をしてしまった後で1対の破面に対し別々に行われるため、両面を合わせた状態が必ずしも破断前の状況と一致しないため、両破面に傾きを入れ、破断前の状況を再現する必要がある。試験片によってはき裂進展中に試験片の形状が変わることもあり、このような場合も、両破面の

傾きを調整することにより各所でのき裂先端形状の変化を追従することが出来る。

Fig. 4 FRASTA analysis flow chart.

き裂先端形状を示す模様がFAPPと良く合うことが確認されれば、その時の一对の破面の傾きの情報を記録し、後に局所の高倍率での解析を行うときに利用する。

次にFPCを作製する。FPCで曲線に屈折点があれば、それは荷重条件あるいは環境が変わったことを示すのもので、屈折点に相当するFAPPをつくり、破壊面の写真に重ね合わせ破壊面のどの位置で変化が起こったのかを記録することも重要である。更に、作業記録を調べ、この屈折点に対応する変化があったかどうかを調べる事も重要で

ある。対応する事象があれば、その時間がわかり、FPC の横軸の両面の間隔と時間の関係を確立出来る可能性がある。

低倍率の FRASTA 解析はき裂発生から進展の過程を示し、き裂発生箇所やき裂先端での特殊現象、例えば主き裂の先端より前のところでの独立した微小き裂の発生や部分的なき裂速度の違い等、を示すもので、このような箇所に対しては、より詳細な破壊機構の解析を高倍率で FRASTA 解析を行うことが必要となる。このような箇所の一对のトポグラフィーターを作成し、解析を行うときに、低倍率で解析したときの両面の傾きの情報を利用して FAPP を作製することが重要である。

3 Fracture Progression Curve を利用した解析例

FRASTA 解析の論文を見ていると FAPP を使いき裂発生、進展を見る応用が多い。しかし FPC を利用した解析はあまり見られていないので、この節では FPC を利用した解析を中心に紹介し、FRASTA 解析の別の面白みを例を示しながら論じたい。

3.1 Constant Extension Rate Test (CERT) 試験片でのき裂発生時間の割り出し

CERT 試験は材料の応力腐食割れ開始や進展への抵抗を調べる代表的な試験である。CERT 試験では、Fig. 5 に示すようなノッチ

を入れた丸棒試験片をゆっくりと環境中で 1 週間の設定された時間引っ張り、試験片が 1 週間後、破断していなければ、その試験片を強制破断し、破面からき裂の深さを読み取り、き

Fig. 5. CERT Specimen Geometry.

裂進展速度を計算する方法である。もし試験片が 1 週間以内に破断すれば試験開始から破断までの時間を用い、ノッチ根底の半径を時間で割りき裂進展速度を計算する。このように計算されたき裂進展速度は非常にばらつきが多く、更に実際の材料のき裂進展試験結果とも場合によっては合わないことも知られている。CERT 試験の不都合の考えられる一つの理由は、このような試験ではき裂発生時間が分からないことである。更に、き裂発生への抵抗とき裂進展への抵抗がそれぞれの材料で異なっていることも原因の一つである。

著者は、Electric Power Research Institute (EPRI) から依頼を受け、FRASTA 法を利用しき裂の発生時間並びにき裂進展速度の解明を行った¹¹⁾。き裂発生時間の決定に FPC を

利用し成功したのでその例を紹介する。き裂発生時間の決定に FPC を利用し成功したのでその例を紹介する。

解析した試験片は 2 本あり、一本は純粋な原子炉冷却水の中で試験され、この試験片は 1 週間 (171.8 時間) 後破断しなかった。もう一本の試験片は、1 PPM の硫酸を不純物として加えた冷却水の中で試験され、167.8 時間後に完全破断したことが知られている。試験片の材料は 304 のステンレスである。どちらの試験も 288 °C の温度環境で、試験片の引っ張り速度は、25 mm のゲージ長さで $7 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ のひずみ速度となるように調整されていた。

Fig. 6 は、純粋の冷却水の中でテストされた試験片の破面の写真であり、Fig. 7 は、不純物を加えた冷却水の中で破断した破面である。電子顕微鏡での破面観察によると両試験片とも破壊機構は応力腐食破壊によく見られる粒界破壊であった。純粋の冷却水の試験片は円周上の 10 時と 2 時の場所でき裂が発生進展したことが分かる。一方 Fig. 7 の破面では中心辺りに粒界破壊でない模様ありそこが最終破断箇所であると考えられる。

Fig. 6. Fracture surface images of sample tested in clean water.

Fig. 7. Fracture surface images of sample tested in contaminate water.

Fig. 8 は、純粋な冷却水での試験片の一連の選ばれた FAPP を示す。FAPP を試験片の破壊面の写真の上に重ねる事により、どの FAPP がき裂発生の時期に相当するのか、またき裂発生箇所が破面上のどの位置であるかわかる。更に、どの FAPP が試験停止に時期に相当するのかも分かる。

Fig. 8. A selected series of FAPPs of specimen tested in clean water.

Fig. 9 は、破壊面と両面間の間隔の関係を示す Fig. 2 に示された様な FPC の数値データを利用して作成された試験片断面の面積の減少量と両破面の間隔の増加量を示したものである。

Fig. 9. Relationship between reduction of the area at the notch and the conjugate surface displacement.

この図からき裂発生から試験停止までの破壊面の移動量は $513 \mu\text{m}$ であることがわかる。ここで、 25 mm のゲージ長さの変化は 1.082 mm であることがわかっている。この試験片がノッチを入れた丸棒であることを考えると、ゲージ長さの変化はノッチ内で起こっていることが考えられる。 1.082 mm の移動が 171.8 時間で起こったことを考え、比例関係をとると $513 \mu\text{m}$ の移動に対応する時間は、 81.4 時間である。したがってき裂の発生時期は試験開始

後 90.4 時間経過した時点であるといえる。荷重の時間的な記録を見ると試験開始後 90 時間のところで荷重に変化が記録されており、き裂発生による影響と考えられ、比例関係が十分使える証拠であると考えている。

次に、Fig. 10 は、不純物を含んだ環境下で破断した試験片の一連の選ばれた FAPP を示す。ここで注目したいのは、き裂の発生は円周表面からではなく内部からの発生を指示していることである。これはおそらく水素が内部のいくつかの点に集まり水素ぜい性を引き起こしていることが考えられる。もうひとつ重要なことは、き裂進展速度を考慮する上で、き裂が環境に接する円周上で発生し内部に進展するというモデルは、この場合には当てはまらないという事である。

Fig. 10. A selected series of FAPPs of specimen tested in contaminated water.

Fig. 11 は、Fig. 9 に示されたと同様、不純物を含んだ環境下で試験された試験片の破壊面の減少と両破壊面の間隔を示した FPC である。破断点は FAPP の試験片の破壊面の写真の重ね合わせにより決定でき、Fig. 10 に示されている。更にこの試験片は試験開始から 167.8 時間後に完全破断しているため、 167.8 時間の試験片のゲージ長さの伸び量を計算すると、 1.057 mm となる。従って破断点から 1.057 mm さかのぼったところが試験開始点となる。

始点となる。従って破断点から 1.057 mm さかのぼったところが試験開始点となる。

Fig. 11. Relationship between reduction of the area at the notch and the conjugate surface displacement.

この図から言えることは、微小き裂の発生は試験開始後比較的短時間で起こるが、微小き裂の進展はすぐには起っていないことである。急速なき裂の進展は比例計算で算出すると試験開始から 46 時間後に起こりだしたことがわかる。荷重の変化の記録を見ると、やはり 46 時間辺りで変化が見られた。

この例は、FRASTA 解析で得られた破面の間隔を試験片の変形に関連付け、き裂発生時間を決定した例である。更に不純物を含んだ冷却水中では、き裂発生メカニズムが従来考えられていたメカニズムと全く違っていたことを示しており、FRASTA 解析でないと得られない結果であったと思う。

最後に、き裂進展速度に関しては、FAPP で見られるように、一つのき裂が外から内部に進展して行くのではなく、幾つものき裂が内部で発生し、進展合体をして最終破断に至ることを考えると、荷重を支える面積の減少率の様なパラメーターが最適かもしれない。面積減少率は計算すると $2.9 \times 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{s}$ という値が得られる。

3. 2 ボイラー管に発生したき裂の発生時期並びに操作条件とき裂進展速度の関係の解析

ボイラー管のき裂寛通による漏れは、火力発電所の操作停止のもっとも大きな原因である。操作停止時間を押さえ、また出来るだけ周期的に計画出来るようにするには、き裂の挙動を知り、き裂の進展具合を予測できるモデル作りが一つの方法である。

Ontario Hydro 社は FRASTA がその様な情報を提供する方法ではないかと考え、22 年間使われていたき裂の入ったボイラー管を提供し SRI に解析を依頼した。詳しい結果は、参考文献¹²⁾ に発表されているが、ここでは FPC の利用という点から結果のいくつかを紹介したい。

Fig. 12 は、ボイラー管内部に発生したき裂の写真と開かれた破断面 (A-面) の写真である。き裂を開いた直後は、き裂の面は厚い酸化物で覆われてたので、参考文献¹³⁾ であげた方法で電気化学的に酸化物を除去した。この酸化物除去方法は、酸化物だけを除去し、何度繰り返し使

用しても母材には全く影響しない優れた方法である。さらに、この方法は酸化物を表面から取り除いて行くので、応用する時間を調整し繰り返し使うことにより、各所で酸化物の厚みの違いすなわちき裂の存在時間の違いを知ることが出来る利点がある。

Fig. 12b に掲示されている破面の写真は、酸化物除去後の写真で、写真の上端部はボイラーの内壁に相当する。この写真で興味深い点は、上部約 1/3 の破面の模様が随分と滑らかであり、下部のざらざらした粒子状の模様と違っていることである。この模様の違いは後で述べるように重要な意味がある。

Fig. 12 Images of internal wall of boiler tube and fracture surface.

Fig. 13 はこの破壊の一連の選ばれた FAPP を示す。そして、Fig. 14 は、破断面積と両破面の間隔を示す FPC である。この図において、破面間隔 0.719 はこのボイラー管が取り出された最終点に対応する。更に、破面間隔 0.447 で傾きが水平に近くなっていることが見える。これは何かの理由でき裂進展が滞っていることを示している。

Fig. 14 に示されている FPC は幾つもの屈曲点があり、これらの屈曲点での FAPP で示されたき裂先端の位置を破面の写真上に示したものが Fig. 15 である。

ここで注目したいのは、破面間隔 0.447 に相当するき裂の面が上で述べた、破面の滑らかな状態の部分と一致することである。

Fig. 16 は、両面を垂直にきった一連の断面図 (XSP) を示す。この図から言えるのは、破面間隔 0.447 の時点で何か起こり破面間隔 0.503 時点まではき裂はほとんど進展せず、き裂先端の鈍化が起っていることである。

Fig. 13 A series of selected FAPPs.

Fig. 14 FPC of crack in boiler tube.

なぜこのようなことが起こったのかを調べるためにこのボイラーの操作履歴を調べると、過去に3回ボイラー管の化学洗浄がおこなわれており、最初の2回の化学洗浄を行った後にはボイラー管の損傷の数が急に減っており、3度目の洗浄後は損傷数が急に増えていたことが分かった。

Fig. 15 Crack front positions superimposed on fracture surface image.

これらのことを考えると、第3回目の化学洗浄が、我々が解析しているき裂の破面間隔 0.447 の時点で行われたと解釈されることである。この最初の2回の洗浄後の損傷数の削減は FRASTA 解析で示されたように、化学洗浄の影響によるき裂鈍化によりき裂進展がとまることが理由であると思われる。

Fig. 16 A series of selected XSPs.

第3回目の洗浄後の急激な損傷増加は、おそらく、すでに随分と深いき裂が多く化学洗浄により、残留壁厚の減少が起こったのではないと思われる。

ここで重要なことは、破面間隔 0.447 の時点が第3回目の化学洗浄が行われた時点に相当するということで、これで、FPC 上の2点の時間（2点目はボイラー管取り出しの時）が分かったことである。これにより、時間と破面間隔の一対一の比例対応性を考慮すると、このき裂の発生時期や各屈曲点の時期を計算できる。

この操作時間との対応性を考慮し、き裂進展速度と操作条件との関係も調査することが出来る。ちなみにこのき裂は操作開始後 68000 時間(7.8 年)後に発生し進展速度は 5×10^{-5} から 9.5×10^{-5} mm/h の間で変動し、その変動は操作記録の高温からの運転開始や停止、低温からの運転開始や停止の影響と関連付けることが出来た。

この例は FRASTA 解析が、従来の破面解析を超え、破壊解析でより重要な役割を果たすことの出来ることを示した良い例であると思う。

3. 3 ニッケル基超合金の疲労試験片の解析

ニッケル基超合金のような材料では、ミクロのレベルでは、破壊面にき裂発生点を示すような模様ははっきり残されていないことがあり、き裂発生や進展の機構を破面から解明することが難しいことがある。SRI は、そのような材料の疲労試験された試験片を空軍から 2 本受け取り FRASTA 解析を依頼された。ただし、この依頼は FRASTA 解析の能力をテストする意味もあり、疲労試験条件などは一切知らされず、ただ試験片だけが提供された。この解析では、FPC を利用した興味深い結果が得られたのでここで紹介したい。

Fig. 17 は、2 本の試験片の破壊面の写真である。低倍率で見るとき裂の発生場所やその後の進展具合等比較的良好に分かる。試験片 A は比較的内部で疲労き裂が発生しほぼ円形状に成長したことが見れる(濃いねずみ色のところ)。これに反し、試験片 B ではき裂は表面近くで発生し、最初は円形状に進展していたがすぐに表面に達し、その後は指のつめのような形状で成長したことがわかる。

Fig. 17 Fracture Surface images of two samples.

Fig. 18 は、試験片 A の一連の選ばれた FAPP を破面の写真に重ね合わせたものである。この図ではき裂は黒で表示されている。そして FRASTA はき裂の発生点から疲労き裂の最終形状まで忠実に再現していることがわかる。

Fig. 19 は、き裂の面積の増え方と両破面の間隔を示す FPC 図である。き裂発生直後はずいぶん大きな傾きの線に沿ってき裂が進展しているがしばらくすると傾きが変わったことがわかる。この屈折点は 0.526 である。その後また傾斜の少し緩やかな直線に沿って進展している。そして、0.585 近辺が疲労き裂の最終点で、その後破断が起こっている。

Fig. 18 FAPPs superimposed on surface image of Sample A.

Fig. 19 FPC of Sample A.

Fig. 20 は、試験片 B の一連の FAPP を示す。この図では、き裂のある所を透明に、まだ破断していないところを黒で表示してある。この場合も FRASTA は正確にき裂発生点から最終疲労き裂形状まで正確に出している。

Fig. 21 は、試験片 B の FPC 図を示す。この試験片でもき裂発生後は大きな傾きの直線に沿ってき裂は成長しているが、途中で FPC の傾きが変わった事が分かる。両面の間隔の 0.460 近傍で破壊進展モードが変わり始め 0.510 辺りで破断したと思われる。

Fig. 20 FAPPs superimposed on surface image of Sample B.

Fig. 21 FPC of Sample B.

この2つのFPCを下記のように変革するとより意味のある面白い結果が得られる。き裂の発生後初期の段階でのき裂の進展は試験片Aでは、円形であり、試験片Bでも円形で近似すると、面積から半径を計算することが出来る。そして、両破面の間隔を破面の開口度とするとFig. 22のような関係が得られる。そしてこの曲線の傾きはき裂の開口角と解釈できるのではないかとと思う。

非常に面白いのはき裂の大きさが半径 $100\ \mu\text{m}$ から $400\ \mu\text{m}$ の間では試験片AとBの開口角は一定で 2.2 度を示している。これは両試験片に加えられた疲労試験条件が同一であることを示していると解釈される。この結論は、試験片提供者により両試験片は同一荷重条件で試験されたことが確認された。

Fig. 22 Crack opening displacement as a function of crack radius.

更に興味深いのは、き裂半径が $100\ \mu\text{m}$ 以下では、直線から離れ角度は大きくなり、また、試験片Aでは半径 $400\ \mu\text{m}$ 以上、試験片Bでは $300\ \mu\text{m}$ を超えると直線から離れて角度が大きくなる。つまり半径 $100\ \mu\text{m}$ と $300\text{--}400\ \mu\text{m}$ の間ではCOAが最小であり同一であることがわかる。これの解釈は以下のように出来るのではないかと考えている。

破壊力学では破壊力学の法則が当てはまらない Small Crack が論議されているが、Fig. 22 は Small Crack の大きさが半径約 $100\ \mu\text{m}$ 以下の領域を示しているのではないかと考えられる。そして COA が一定の領域は、疲労き裂が試験片が有限の大きさであることを検知せずに進展している状態(いわゆる Plane Strain の条件)であると考えられる。そして半径 $300\text{--}400\ \mu\text{m}$ 以上のところで直線からずれCOA が大きくなってきているのは、き裂先端が試験片の境界の影響を感じ始めき裂先端の応力状態が Plane Strain から Plane Stress に変わって行く状況を示しているのではないかと考えられる。

FRASTA 法により Plane Strain 条件下で COA が測定出来れば、このような情報を色々の疲労荷重条件下で試験し集積することにより、破壊面から作業荷重を予測することが出来るようになるのではないかと期待している。

4 考 察

FRASTA 法によって作製される三つの結果のうち FAPP や XSP はその利用方法や価値は非常に明白であり他者によっても利用されているが、FPC の利用はまだ十分でないように思われる。しかし、FPC を有効に利用するためには、前節で示したようにケースごとに臨機応変にその利用方法を変えて行くことが必要である。

破壊機構を再現する FRASTA 法の開発に長年関わってきたが、この方法の進展には、ソフト面での進展だけでなく、トポグラフィードーターを作成する装置の進展も大きな要因であると思う。著者が1980年に破壊面の3次元解析を始めたときは、共焦点顕微鏡もまだ市販されておらず、ミクロのレベルでのトポグラフィの測定は、操作電子顕微鏡の立体解析が唯一思いつく方法であった。

電子顕微鏡の立体写真解析を精度良く行うために航空測量会社の等高線図作製装置を利用しそのデーターを FRASTA 解析用に変換するソフトを開発すいぶんと多くの破壊解析を行った。航空測量会社で作製されたデーターは非常に精度が良いが、等高線の密度を増すと、その作成に時間がかかり、また作製の費用もずいぶんと高価なものであった。しかし一番の問題は、気軽に観察場所を変えたり異なった倍率で解析をすることができないことであった。

1980 年後半には共焦点顕微鏡が市場に投入されたが、破壊面のトポグラフィ解析には、高さ解析の幅が十分でないこともあり、著者は、レーザーテック社の助けをかり、高さ解析の幅を 2 mm を超えた装置を作製、FRASTA 解析用装置を開発した。当時の共焦点顕微鏡は、8 bit の分解能であったので、どうしても高さ解析幅が限られてしまう弱点があった。しかし最近の共焦点顕微鏡は 16 bit が主流となっており、高分解能で大きな高さ幅の解析が出来るようになってきている。更に、低倍率で急斜面を解析できる大口径のレンズも開発されており、FRASTA 解析を本来の意味で実用的な破壊解析の道具とする段階にきていると思われる。

FRASTA 解析の方法も、ここで紹介したように、FPC が破面解析を単に破面の模様に基づいた定性的な解析からき裂の発生時期や進展に関する定量的な解析へと進展させてゆく鍵であると考えている。

5 結 言

FRASTA 解析で作成される破壊面と破面間隔の関係 (FPC) は、き裂の挙動に関するを利用した解析はまだまだ行われていないように思えるので、FPC を利用した解析の例を紹介した。

FPC を解析することにより、き裂発生の時期の決定やき裂進展の歴史の中で荷重や環境の変化の時期やそのき裂進展速度への影響等を調べることが出来、従来の破面解析より以上に破壊解析に貢献できるものと思っている。特に、FPC を変形し、たとえば COA を割り出す作業は、今後破面から荷重を推定するのに大きな手助けになるのではないかと考えている。

参 考 文 献

- 1) T. Kobayashi and D. A. Shockey, "FRASTA: A New Way to Analyze Fracture Surfaces, Part 1: Reconstructing Crack Histories," *Advanced Materials & Processes*, Vol. 140, pp.28-34 (1991).
- 2) T. Kobayashi and D. A. Shockey, "Fracture Analysis Via FRASTA, Part 2: Determining Fracture Mechanisms and Parameters," *Advanced Materials & Processes*, Vol. 140, pp. 24-32 (1991)
- 3) T. Kobayashi and D. A. Shockey, "Fracture surface topography analysis (FRASTA)—Development, accomplishments, and future applications," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 77, Issue 12, pp. 2370-2384 (2010).
- 4) A. Ueno, H. Kishimoto, K. Kino, and Y. Ishii, "Topographical Fractography and Fracture Simulation with Scanning Laser Microscope," *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 63, No. 615, pp. 131-137 (1997)
- 5) Y. Murase, J. Nagakawa, and N. Yamamoto, "Fracture surface topography analysis of in-beam fatigue behavior for 20% cold-worked 316 stainless steel," *Journal of Nuclear Materials*, No. 322, pp. 249-254 (2003)
- 6) Y. Murase, J. Nagakawa, and N. Yamamoto, "Effects of implanted hydrogen on fatigue behavior of F82H under irradiation," *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 417, Issue 1-3, pp.120-123 (2011)
- 7) T. Naoe, Y. Yamaguchi, M. Furukawa, and T. Wakui, *Journal of the Society of Materials Science*, Vol.59, No. 4, pp. 309-314 (2010)
- 8) K. Shiozawa, Y. Morii, S. Nishino, and L. Lu, "A study of Subsurface Crack Initiation, and Propagation, Mechanism of High-Strength Steel by Fracture Surface Topographic Analysis," *Journal of the Society of Materials Science*, Vol. 52, No. 11, pp. 1311-1317 (2003)
- 9) K. Shiozawa, Y. Morii, S. Nishino, and L. Lu, "Subsurface crack initiation and propagation mechanism in high-strength steel in a very high cycle fatigue region," *International Journal of Fatigue*, Vol. 28, Issue 11, pp. 1521-1532 (2006)
- 10) T. Miura, T. Sakakibara, S. Miura, T. Kuno, S. Kikuchi, A. Ueno, and T. Sakai, "Fractographical Investigation on Mechanism of Interior-Induced Fatigue Fracture of SUP7 Steel for Hot Formed Springs," *Journal of the Society of Materials Science*, Vol. 64, No. 8, pp. 613-619 (2015)
- 11) T. Kobayashi, D.A. Shockey, and R.L. Jones, "Deriving SCC Initiation times and Growth Rates from Posttest Fractographic Analysis," *Corrosion*, Vol. 47, No. 7, pp. 528-535 (1991)
- 12) T. Kobayashi, D.A. Shockey, G. Ogundele, D.D. McNabb, and D. Sidey, "Deducing Crack History in an Aged Boiler Tube from Fracture Surface Topography," *Journal of Testing and Evaluation*, pp. 309-317 (1994)
- 13) P.M. Yuzawich and C. W. Huges, "An Improved Technique for Removal of Oxide Scale from Fractured Surfaces of Ferrous Materials," *Practical Metallography*, Vol. 15, pp. 184-194 (1978)