

## DMI 光学 SR-2 ひずみ計測技術を使った

### 留め具穴の亀裂の検出と亀裂成長の監視

W.F.Ranson, R. Ivachon, G.L.Hovis      J.Nargiello, R.Fidnarick, R.Christ Jr.

Direct Measurements, inc, Atlanta, GA      Northrop Grumman, Bethpage, NY

#### 要約

DMI SR-1 ストレインゲージと DMI SR-2 リーダーを使って周期的な負荷が与えられた 2 つの Northrop Grumman アルミニウム試験片の亀裂発生と亀裂成長を測定した結果を示します。その結果は、穴における亀裂と亀裂の成長を検知する技術の有用性をはっきり示しています。DMI SR-1 ストレインゲージは試験片の穴を縁取るように貼り付けられます。これにより、穴の接線方向のひずみとせん断ひずみの測定を可能にしました。穴の両側にある並行に貼り付けたゲージの異なったひずみの値を読み取ることによって(穴、周囲の材料の不連続性) 亀裂発生を検知し、差の増加を監視することにより亀裂成長もモニターできました。

#### 序章

軍用航空機の作戦待機状態の維持と交換部品の最適な供給プロセスは、重要な人的かつ経済的な影響をもっています。交換部品のために基地で待機しているパイロット、乗組員や航空機の損失は国家戦略を遂行するために作戦待機しているアメリカ軍へ負の影響を与えます。

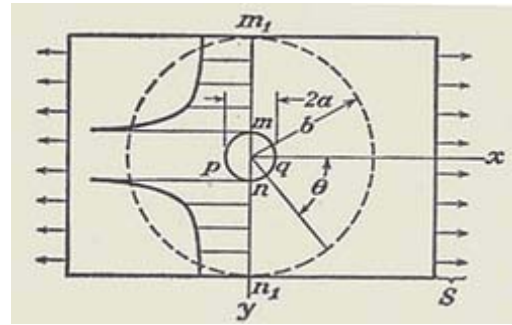
設計段階で予測された航空機の飛行状態と実際の状態は、通常全く異なっています。場合によっては、稼働状態は予測していたよりも良いかもしれないし悪いかもしれません。一方で構成部品は予測よりも早く設計限界を超えているかもしれないし、他方では予測をはるかに超えた長い寿命があるかもしれません。設計条件が加速的に超えてしまったら、安全性や作戦待機は危険にさらされ、供給プロセスは崩壊してしまいます。逆にいえば交換部品が予測された耐用年数より優れている場合は効果的にコスト減になり、待機状態を損ないません。

重要な部品における損傷の蓄積を継続的に評価することは生命を守り、傷害を防ぎ、供給プロセスを最適化し、作戦遂行の確実性を向上させる可能性を持っています。特に関心のある問題は疲労による留め具穴の内側の測面における亀裂発生と、穴側面の縦軸に垂直に進行する亀裂成長と欠陥です。

#### 技術の背景

亀裂現象の文献を再考することは、周期的な負荷に加えられた 7050 のアルミニウムのテスト結果と DMI 技術を議論するために役立ちます。Timoshenko & Goodier は 1951 年の “Theory of Elasticity” において

プレートのひずみ分布における丸穴の影響の古典的な解法の議論とそれに関する 10 本の論文を発表しています。右の図 [1] は “ 穴の影響はとても局所的な特徴である ” と示しています。それらは Saint-Venant の原理により穴の半径  $a$  と比較して十分離れた場所のひずみ分布には大きな変化が無いことを示しています。したがって穴の端近くのひずみは急激に変化します。ひずみ分布の穴の影響を検討する上で非常に重要なことは、可能な限り穴の近傍のひずみを測定することです。



穴の両端の塑性変形を測定し、両者ひずみの差異を得て、この値を元に亀裂発生の検知と穴の内部の側面での亀裂成長を監視することが DMI 技術の元です。

この文献には多くの亀裂成長や亀裂閉口や塑性変形の役割の研究が含まれています。Elber [2,3,4] Newman と他 [5,6,7,8] はこれらのテーマの様々な側面から研究しています。Dawicke など [9] では 2024-T35 アルミニウムでの三次元亀裂閉口を考察し、Newman など [10] は 7075-T7351 アルミニウムでの亀裂成長を調査していました。Schwalbe と Newman と Shannon [11] は塑性変形において本質的に低い制限で破壊力学を調査しました。これらすべての研究では亀裂発生装置を使用し、塑性変形を亀裂成長の先行核としている。Elber [3] は 1970 年の論文で “ 現段階では亀裂閉口現象の理論計算がとても難しいことを示しています。それ故に必要なとされるデータは実験的な手法により得られなければならないということになります。亀裂現象の研究は周期的な負荷がかかった状態での裂け目の亀裂に関連した現象の理解を広げます。しかしながら、これらの多くの有益性にもかかわらず、できるだけ穴の端に近づいてひずみを測定する技術はありません。穴の近傍で塑性変形を測定できることは、展望は損傷力学と破壊力学の橋渡しをするものです。これは亀裂発生や、亀裂成長や、穴を含んだ物質の最終的な分解により完全な理解を与えるはずで

## DMI 技術力

Direct Measurements 社の技術は重要な構成部品の測定した塑性変形量を亀裂発生の基準として関連付けを行います。この値を元に蓄積された損傷と残りの耐用年数の判定に使われます。連続体損傷力学の 1980 年代以来の理論的發展は、工学応用の理論を統一しました。この理論によると、損傷はしきい値または損傷変数の危険な値を超えた塑性変形の堆積が支配している予測しています。DMI 社のゲージ技術は稼働中の部品の塑性変形を測定することの出来る最初の実験装置です。

## DMI 技術力における理論的基盤

このセクションでは疲労に関連した損傷力学、亀裂検出に関連した機械的変形の原理と DMI 技術が既存の計測技術とどのように置き換わるのかを論じています。

### A . 全体的なひずみ理論

周期的な変形を受けた DMI ひずみゲージの全体ひずみは疲労であり、数学的に全体的な周期的ひずみ振幅は次のような式で表わされます。

$$= \frac{\epsilon}{2} + \frac{\rho}{2}$$

全体的なひずみ寿命を式は

$$= -f(2 \epsilon)^b + \rho(2 \epsilon)^c$$

そして全体的なひずみを塑性変形の観点からみると

$$= \frac{\rho}{2} + \left[ \frac{\epsilon}{2} \right]^{\frac{b}{c}}$$

そして塑性変形の関連からひずみ寿命は次のように表現することができます

$$\frac{\rho}{2} + \left[ \frac{\epsilon}{2} \right]^{\frac{b}{c}} = -f(2 \epsilon)^b + \rho(2 \epsilon)^c$$

これらの数式は、対象物の変形に関連した物理的モデルを表しています。これらのひずみの数式をグラフ上で表すと下図1のようになります。(材料：2024-T3 アルミニウム)そして塑性変形が破壊基準であることを示しています。この結果は周期的な全ひずみは制御されたひずみによる疲労試験での周期的塑性変形で表される。DMI 技術はひずみを制御されて計測された塑性変形から全体的なひずみを計算します。

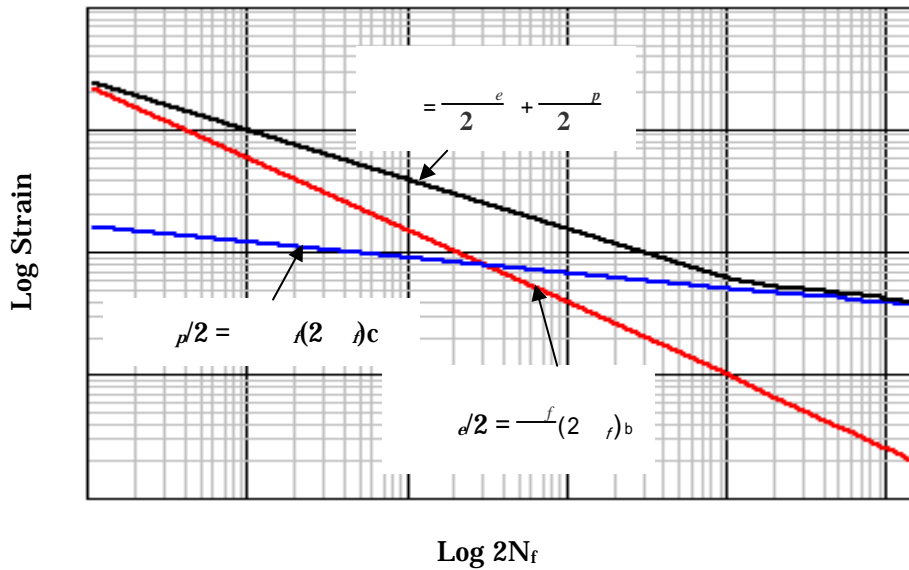
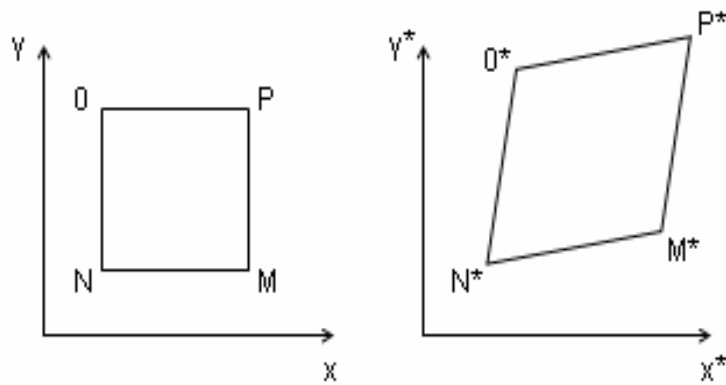


図1. 全ひずみと弾性ひずみと塑性ひずみ

しかしながら、塑性変形は蓄積された損傷と関係があります。DMI 技術を開発した理論は、次のように説明されます。力学の基礎とソフトとハードによって均一な塑性変形と不均一な塑性変形を測定することで。不均一な塑性変形または、ひずみの差は亀裂発生や成長を示します。

### B. 均一および不均一あるいは異なったひずみを直接計測する基礎

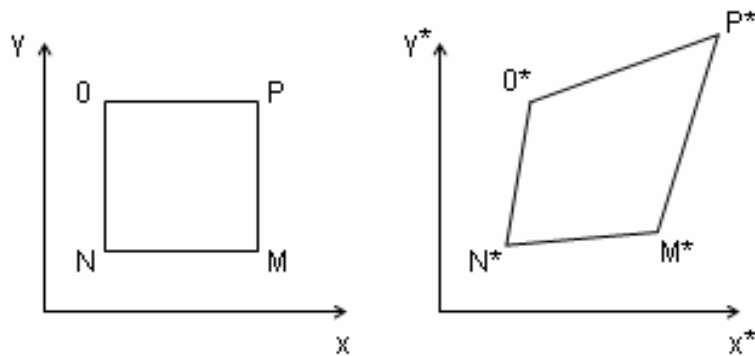
局所領域の変形の特徴は下の図で示すように[13]変形後も並行した線は並行のままです。このため領域内のひずみは均一な値になります。



変形前の要素

均一な変形後の要素

また、例外的な変形を含む領域は次の図のようになり、この変形は不均一さやひずみの差を発生させます。  
 (すなわち  $O^*-P^*$  と  $N^*-M^*$  は平行でなくなり、従って  $N^*-O^*$  と  $M^*-P^*$  も同様です)

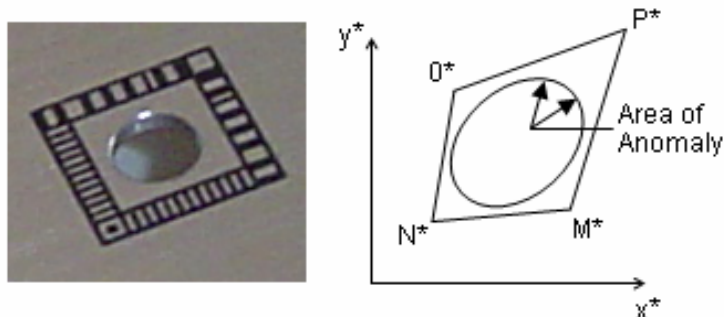


変形前の要素

不均一な変形後の要素

この事実は DMI ゲージの特許の元になっています。そのゲージは直接、均一あるいは、不均一な変形を測定します。不均一あるいはゲージの両側での変形の差は、不均一な塑性変形（疲労）あるいは亀裂を示します。

穴の囲むように貼られた DMI ゲージは、両側の変形の差に基づいた亀裂と例外的な変形を検知します。次に穴あるサンプルに貼り付けた DMI ゲージを示します。



穴の周りに貼られた DMI ゲージ (特許)

ゲージの側面は不均一に変形し

DMI ゲージは両側のひずみの違いを検知します

上述のように、ゲージの両側で計測されたひずみの違いは、異常性を示しています。DMI ゲージ両側のひずみの違いの始まりは、均一な材料での亀裂発生を示しています。上の図の矢印は亀裂エリアを示しています。不均一な変形や亀裂発生の位置の検知は、負荷の方向や DMI ゲージの貼付け方向とは独立しています。

## DMI 技術の図解

### A . DMI 技術の図解

機械工学に基づいた DMI 技術（ゲージ、ソフトウェア、ハードウェア）は下記に図式的に示されており、ハードウェアを含んだものも述べられています。

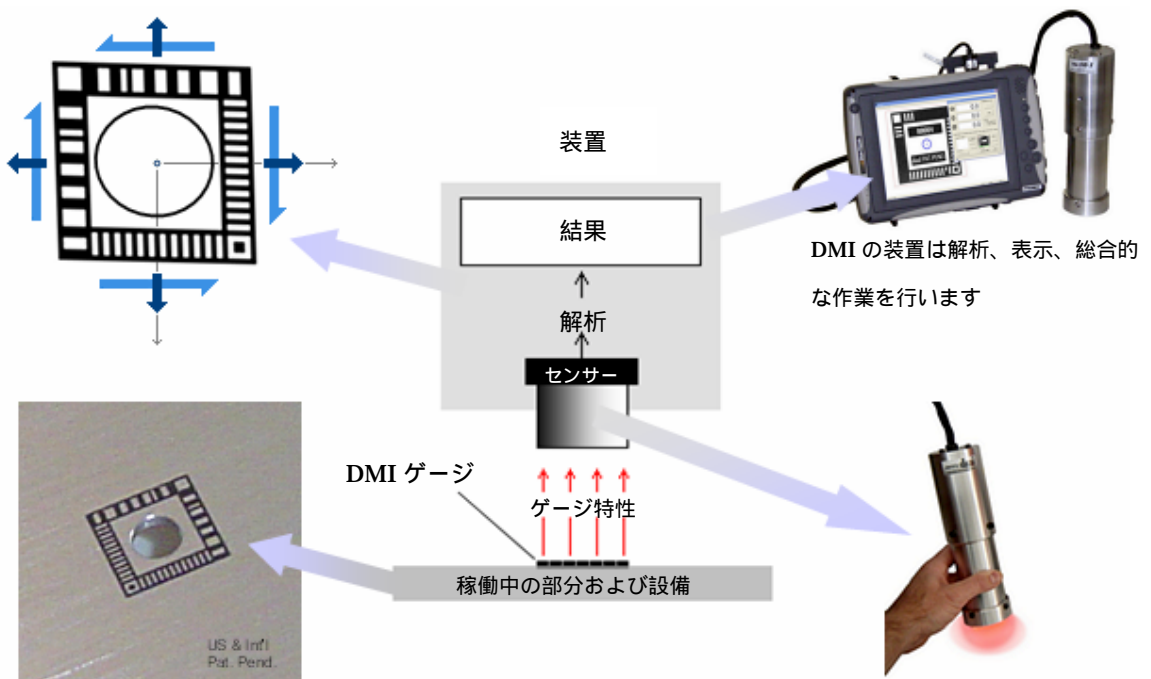
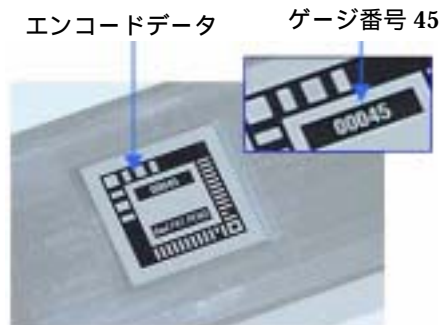


図 3. DMI の技術の概要と働き

### B . DMI ゲージでエンコードされたデータ

DMI ゲージのエンコードされたデータは、ゲージの識別番号で、どこの場所のゲージのひずみデータを認識するために用いられます。下の図は上のエンコードされたデータとゲージナンバーの表示位置を示しています。



そのエンコード技術は1から65536までの65536種の独自のゲージナンバーを割り当てられます。これはUIDとしてCBMやヘルスマニタリングをサポートします。

### C. 技術の特徴

技術の特徴は次のようなものがあります。

- ・非線形ひずみセンサー
- ・2つの直角な垂直ひずみとせん断ひずみ
- ・5マイクロストレイン以下のシステムエラー
- ・ $\pm 10$  マイクロストレイン以内の計測エラー
- ・材料の依存性なし
- ・位置補正 ゲージとセンサーの座標が整合されている
- ・照準あるいは光ファイバーによるターゲットの取込
- ・ドリフト無し
- ・ゲージと表面は1対1の関係
- ・ゲージは拡張性があり曲った表面においても使われる
- ・温度補正
- ・エンコードされたゲージナンバーはゲージの位置または部品のデータを提供
- ・リアルタイムでエンコードとひずみデータにリモートアクセス
- ・ラップトップコンピュータで7-10Hzでの読み込みとデータ出力(PCの性能による)
- ・ハイスピードでのひずみ現象はリアルタイムで記録し、記録後分析
- ・ひずみ量が大きくなるとともに精度向上
- ・ゲージの大きさ: 1mm×1mm以上 (通常使用サイズは10mm×10mm)
- ・ワイヤレスストレインゲージ
- ・試験体に適合する工学的センサー
- ・ゲージの貼り付け過程では、主材料の材料及び工学特性に影響を与えない
- ・サンプリング: ミリ秒から年
- ・ゲージの冗長情報によりゲージマーキングのある程度劣化が許される
- ・ゲージの変形(応力)のゼロセットは初期状態または応力ゼロかを選択可

次にDMI技術の重要な特色を図示します。DMI技術と別のひずみ測定を比較したものです。

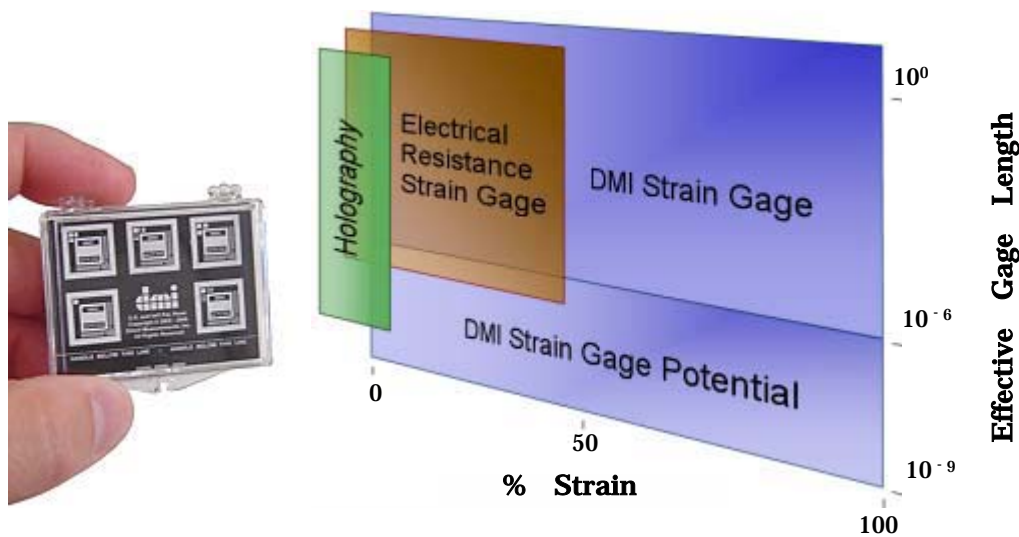


図 4. ひずみセンサーの比較

#### D . 使用されるゲージ

DMI 社のポリマーゲージ（上記左側参照）は、穴の周りの非均一なひずみを計測し亀裂の発生と成長を測定します。ゲージは穴の周りに接着され、元になるデータを取り、次に試験体が疲労されていく過程のデータを取得します。

#### 亀裂発生と亀裂成長を探知するための実験の結果

DMI 社は試験片の疲労テストを実施し、理論と DMI 技術が実際の航空機用の穴の亀裂発生を検知することを確認しました。亀裂の存在は DMI ゲージの両側の非均一な変形を測定することにより検知できます。

これらの結果は、稼働している航空機の重要部位の定期的あるいは非定期的なメンテナンスをサポートすることになります。従来の電気式ひずみゲージと違って DMI 技術は光学計測です。それために光学リーダーは再校正は必要ありません。また、データを読み取る時はゲージの上にリーダーを再配置するだけです。

#### A . 重要性

非均一な、あるいは両側の差ひずみを計測し、穴で異常性や亀裂を検知する能力の重要性は明らかです。DMI の技術は、次の理由により、これらの非均一ひずみを直接測定することができます。（ゲージ形状、亀裂が予想される変形の隣接部や穴の周囲への貼付け）この実験の結果を元にメンテナンスのサポートに対して DMI 技術が使用可能か議論されました。

#### B . DMI 技術をサポートするデータ

まず、DMI でのデータを説明する前に、穴の周りの平均ひずみの測定を検討することは有益です。図 6 では周期的な荷重下での板の穴のデータを示しています。図 6 は中央に直径 3/16 インチの穴のある 2024-T3 アルミニウム試験片（7 インチ x3 インチ t=0.05 インチ）のテスト結果を示しています。DMI ゲー

ジは穴を囲むように張付けられゲージの中央に直径 3/16 インチの穴が開けてあります。(下図参照) 電気抵抗式ひずみゲージは DMI ゲージの反対側の穴そばに貼り付けてあります。



図 5. 試験片の中央に貼り付けられた DMI ゲージ

試験片は 1 分間当り 30 サイクルで周期的な 700 ~ 4200 ポンドの張力(降伏力の 60%) が加えられ 700 ポンドのプレロードかかっています。試験は 10 サイクルで停止させ(700 ポンドの負荷) DMI SR リーダーをゲージの上に持って行き、ひずみを記録しました。リーダーを移動させ、周期的な負荷が再びかかり、その後、定期的に負荷が止められひずみを記録しました。試験片が分断されたことによって試験は終了しました。このデータで注意するポイントは

1) DMI 技術は穴の周りのひずみを検知し記録しました。: 2) 同じサイズの電気式ひずみゲージはひずみが発生する領域に貼ることができなかつたため、ほとんどひずみの兆候を示しませんでした。これはの Timoshenko と Goodier[1]によって議論された平らなプレートの伝統的、理論的解法と Chen と Han[12]によって述べられた穴の開いたプレートにおける弾性変形と塑性変形に関連した損傷を特徴づけに沿っています。もうひとつの注意すべきポイントは周期的なひずみ履歴です。データは予想通りに徐々に上昇していきます。電気抵抗式ひずみゲージの配線はテスト期間中、接続されていなければならない、ゲージを外したり、校正作業を行ったり配線を再接続することは不可能です。DMI のリーダーのゲージの上に置くだけでひずみの値を記録でき、リーダー 1 台で複数のゲージの管理が可能です。これは電気抵抗式ひずみゲージには不可能です。

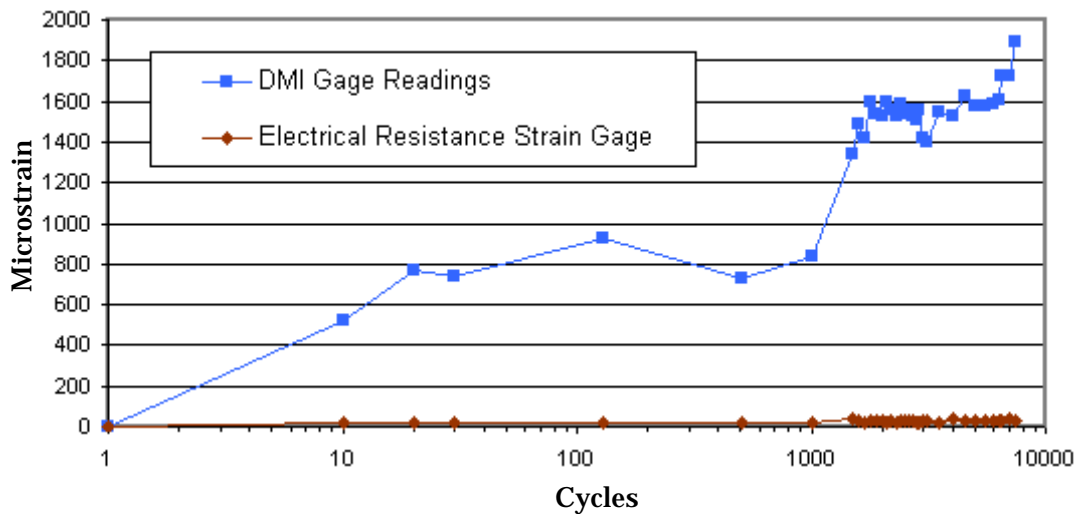


図 6. 繰り返し荷重が負荷されたプレートの穴の亀裂発生前のひずみ測定

### C . 技術の結果

DMI ストレインゲージは Northrop Grumman Bethpage テスト工場で周期的な負荷をかけられた二枚の試験片の疲労試験のために用いられました。ゲージは連続的な周期的荷重を負荷された 13DMI389 と 13DMI397 試験片のモニターを行いました。次に、ひずみの結果と Hi rox (マイクロスコープ) イメージを示します。

## 1. 13DMI389/SIPS S13-0389のための予備データ分析(ゲージ 24)

疲労試験は試験片中央付近の二つの穴が開いた Northrop Grumman 試験片 SIPS S13-0389 において行われました。



DMI ゲージは両方の穴の位置の上に貼り付けられます(図7での“1”と“2”の位置)。ゲージにあげられた穴は試験片の穴と同心で同じ直径 0.190 インチです。ここでの解析は試験片左側の DMI ゲージ(1 側)で行います。この DMI ゲージは 24 のエンコードされたシリアルナンバーをもっていますので、これを“ゲージ 24”とします。早い段階での疲労亀裂は、このゲージの左の外側で始まりました。右側はゲージ(エンコード 25)は、本試験中では使用しませんでした。

図 7. DMI ゲージがある疲労試験片

これらのテストでの、ランダムな疲労負荷の範囲は Northrop Grumman によって決められています。ある間隔の負荷を止め(プレロード状態) Hirox マイクロスコープを使って亀裂を観察しました。それぞれの停止ポイントで、ひずみは DMI のハンドヘルドひずみ読み取り装置を使ってゲージ 24 で記録されました。最初のゲージの測定値は、JENTEK 装置を用いて計測された最小亀裂サイズに対応する 6500 サイクルを記録しました。カウント 6 は 7000 サイクルを記録し、ひずみは 6500 サイクルのものと比較されました。測定は 9500 サイクルまで 500 サイクル間隔で記録されました。

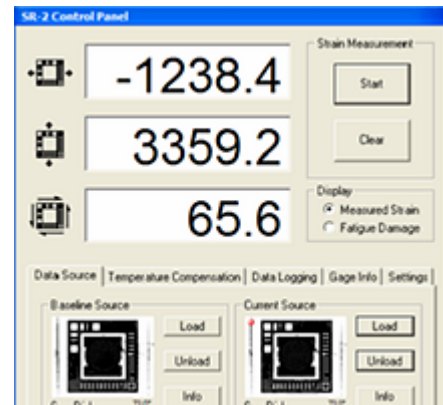


図 8. カウント 6 での DMI 測定値

最初のポイント(カウント 6 あるいは 6500 サイクル)の並行辺での、ひずみ測定値は、ほぼ等しく元の測定値に対しても均一な状態にあることを表しています。カウント 6 で DMI 装置は、与えられた負荷に対し亀裂発生前の材料の反応と一致した軸上と横軸のひずみを記録しました。また DMI 装置はカウント 6 で、亀裂の兆候はないという証拠を示す小さなせん断ひずみ(主ひずみの方向が荷重方向と、その 90° 横方向)も記録しました。

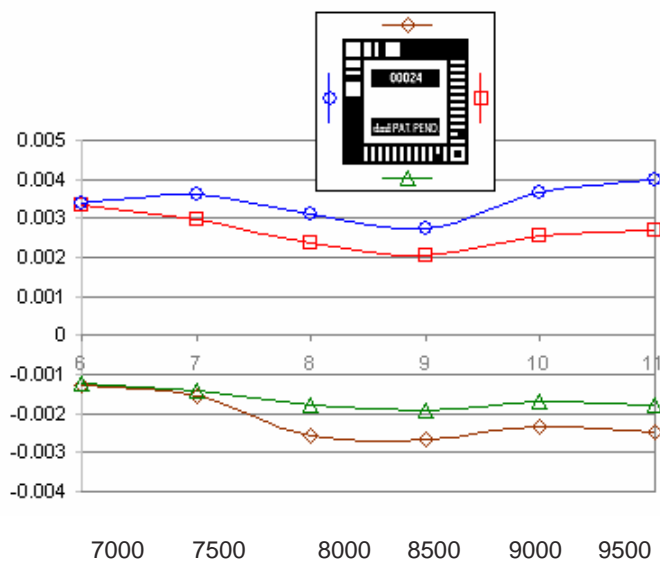


図 9. DMI ひずみ測定値 vs. 周期カウント(ゲージ 24)

図 8 は装置のひずみの結果を表示画面です。

負荷の方向と横軸方向でのひずみは塑性変形成分の測定と一致しています。しかしながら、元の

イメージは小さな亀裂を記録し、変形しています。これは予想された結果です。変形していない元のイメージは、亀裂成長の前の初期塑性変形を明らかにします。

図 9 はゲージ 24 データの測定結果です。DMI 装置はゲージの四辺に沿ってひずみを記録しました。これら 4 つデータを図 9 にプロットしました。予想通りに、負荷の方向と並行な左右のひずみ（青丸と赤四角）は大きく、プラス方向です。ゲージの上下に沿った測定値（緑三角と茶色ひし形）は負荷に対して 90° 横方向なので圧縮ひずみを示しています。

初期亀裂は青丸線に対応したゲージ 24 の外側に発生しました。青丸と赤四角線のひずみ差は亀裂発生の特徴です。疲労試験の回数を増加すると、測定している並行なゲージの値の差は大きくなります。カウント 7 からカウント 11 ま、左右のひずみの差があり、この差はテストが終了するまで無くなりません。このデータから、亀裂が発生すると、平行なゲージのひずみ値が分岐し始め、その傾向は試験片が破壊するまで続きます。横軸の曲線も同様な振る舞いを示します。亀裂は線対称で発生しないということを横軸カーブは示しています。

テスト後の写真（カウント 11 の後 図 10 参照）は試験片の裏側に亀裂が発生している事を示しています。この部分は、DMI ゲージの左側のひずみデータです。この目に見える亀裂は穴の中央線下に発生し、ゲージの上側（図 9 の茶色ひし形線）のひずみと一致しています。

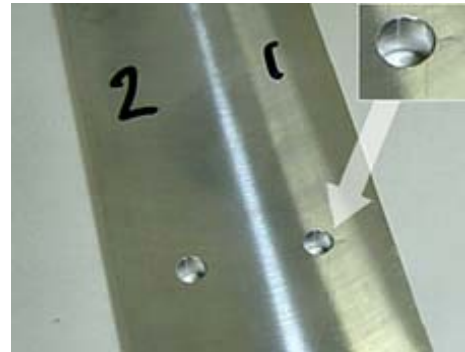


図 10. ゲージ 24 の裏側の亀裂位置

このテストは裂け目が発生する前に終わり、試験片は試験機から取り外されました。試験片は 9500 サイクル負荷後、試験機から取り外し各種の測定値はゼロになりました。

9500 サイクル負荷後、ゼロ荷重状態となった試験片のゲージ 24 のひずみを再び DMI 装置で記録しました。このテストは疲労による損傷が無負荷状態で DMI 装置とゲージによって検知できるか確認するために実施されました。無負荷状態でのひずみ測定の再現性を確認する試験も実施されました。図 11 では無負荷で

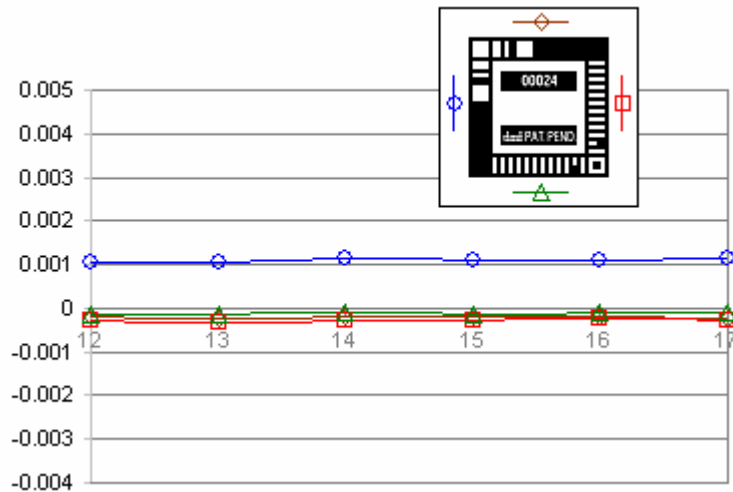


図 11. ゼロ位置での連続した DMI ひずみ測定値(ゲージ 24)

ゲージ 24 の上、下と右側のゲージがほぼゼロに戻ったことを示しています。亀

裂の端にある左側のゲージは、大きな残留ひずみがあります。図 9 での 9500 サイクルでの不均一なひずみ

と図 11 での不均一なひずみの値の比較は本質的に同じ結果をもたらします。これらのデータは、本ゲージを用いると無負荷での検査の可能性を示しています。

## 2. 13DMI397/SHIPS S13-0397 のため予備データ分析 (ゲージ 28)

疲労試験はプレート中央に穴が開いている Northrop Grumman Coupon SHIPS S13-0397 で実施されました。DMI ゲージ 28 は穴の位置の上に貼り付けられます。ゲージにあけられた穴は試験片の穴と同心で同じ直径 0.190 インチです。疲労負荷は一定の振幅で、(ゼロ-張力) その振幅は Northrop Grumman 側で決められます。テストの初期段階は、疲労負荷下試験の方法と使用できるゲージの見出すことでした。ベースになる値は無負荷の試験片によってつくられました。

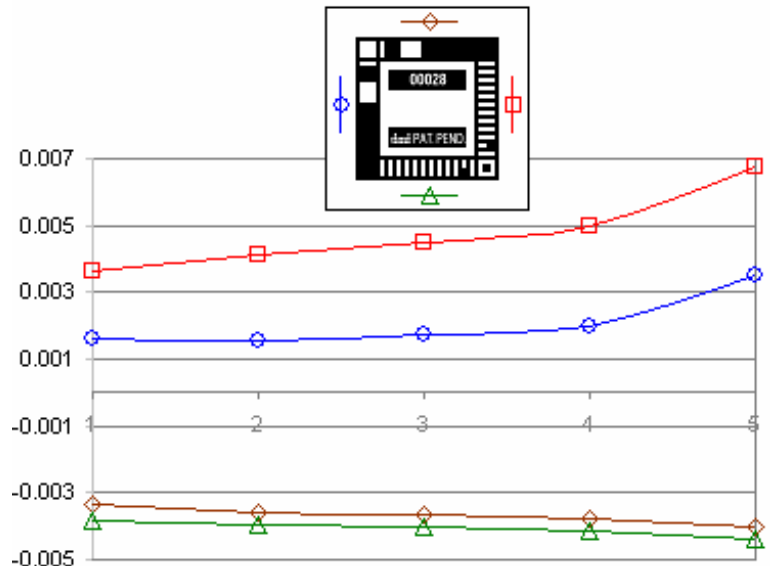


図 12. ひずみ測定値 vs. カウント(ゲージ 28)

ある間隔の負荷を止め (プレロード状態) Hirox マイクロスコップを使って亀裂を観察しました。それぞれの停止ポイントで、ひずみは DMI のハンドヘルドひずみ読み取り装置を使ってゲージ 28 で記録されました。

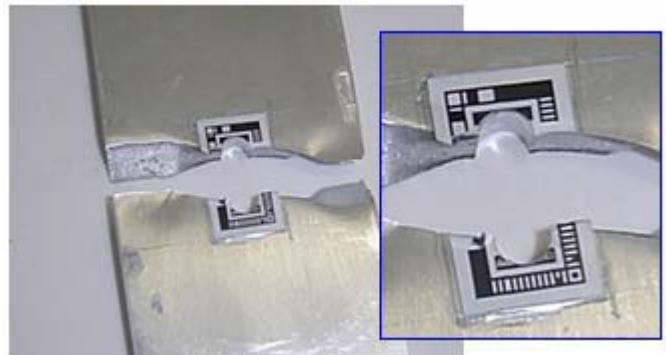


図 13. 疲労後の疲労クーポン

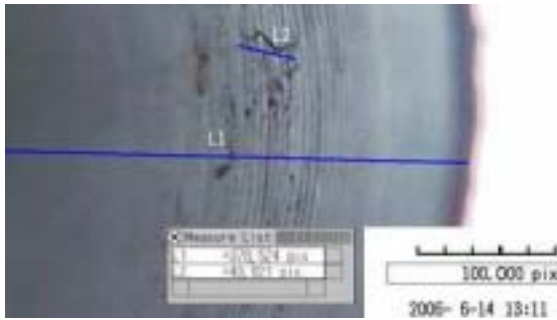
この試験片のひずみ測定は疲労試験の後半で行われ、カウント 1~5 に示します。図 12 はゲージ 24 と同じ方法でプロットされたデータです。このテストでは疲労亀裂は穴の右側 (赤線) で始まり

ました。テストが完了後、試験片はさらにゲージの耐久性のテストをするために壊れるまで繰り返されました。(図 13) の写真で見られるように、ゲージは壊れた後も接着したままであり、DMI ゲージの接着特性の良さを実証しています。

## 3. 13DMI389 のための Hirox イメージとひずみデータの比較 (ゲージ 24)

図 14(a-g) は Hirox マイクロスコップで撮影した 13DMI389 クーポンの穴 “ 1 ” の画像で亀裂の成長を示しています。JENTEK センサーで検知した亀裂発生の 6500 サイクルから 9500 サイクルまで各 500 サイクル間隔で画像を取りました。図 9 で示した様に、この取込間隔でゲージ 24 のひずみも測定しました。これらの

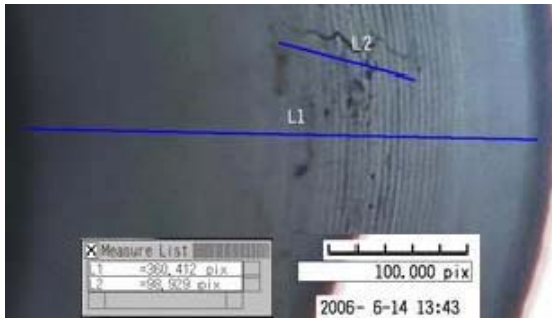
一連の画像で分かるように亀裂は中央近くで発生し、DMI ゲージの反対側へと成長しています。



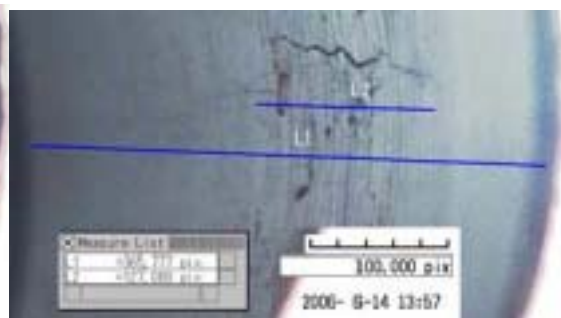
(a)S13-0389 H1 OB 6500cycles 15K load



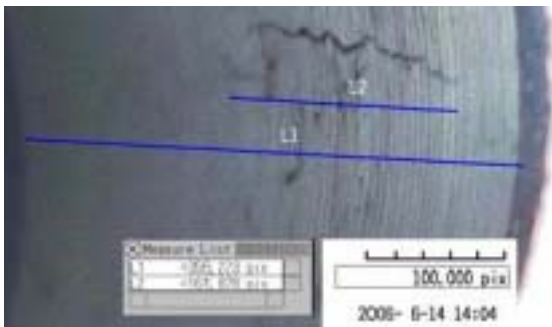
(b)S13-0389 H1 OB 7000cycles 15K load



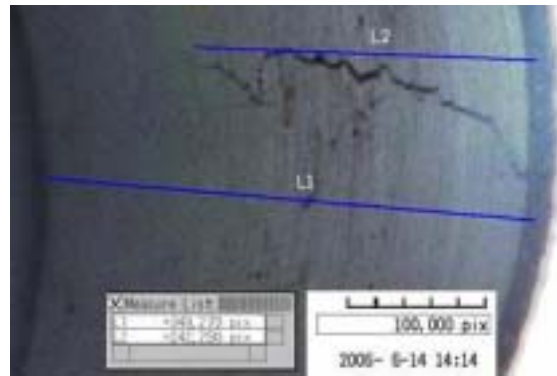
(c)S13-0389 H1 OB 7500cycles 10K load



(d)S13-0389 H1 OB 8000cycles 10K load



(e)S13-0389 H1 OB 8500 cycles 10K load



(f)S13-0389 H1 OB 9000 cycles 10K load

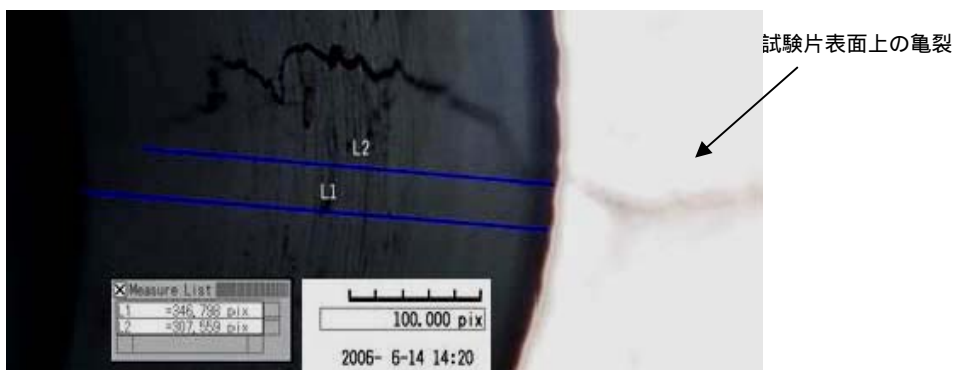


図 14. 位置 1 の試験片 S13-0389 の Hirox 亀裂画像(ゲージ 24) vs. サイクル数

## 4. Hi rox データの比較

図 15 は亀裂の長さ対サイクルの数を示しています。

データ数は限られていますが、プロットは明らかにサイクルの増加に伴って亀裂長が長くなる傾向を示しています。

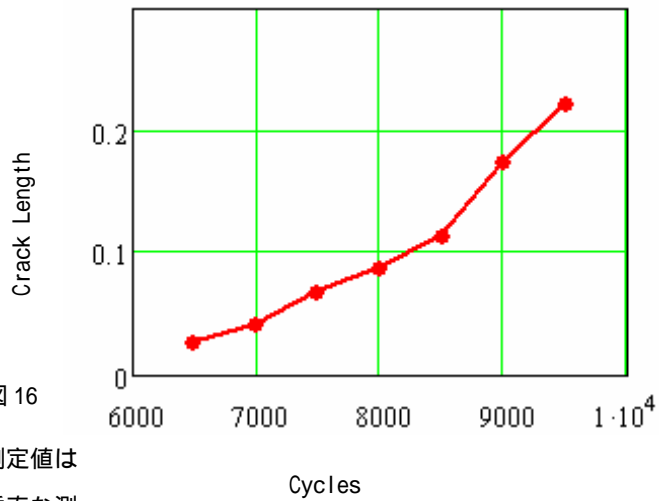


図 15. 亀裂の長さ vs. 周期数

図 16 で示すように穴を取り囲んでいる 4 つの辺に沿ったゲージのひずみ値を記録されます。亀裂はゲージ左側に発生し、図 16

の一番下のゲージに対応します。これらの測定値はゲージ(上から 2 番目のゲージ)の右側の垂直な測定値と比較されます。これらの二つの測定値は図 9 の赤四角と青丸で示されています。

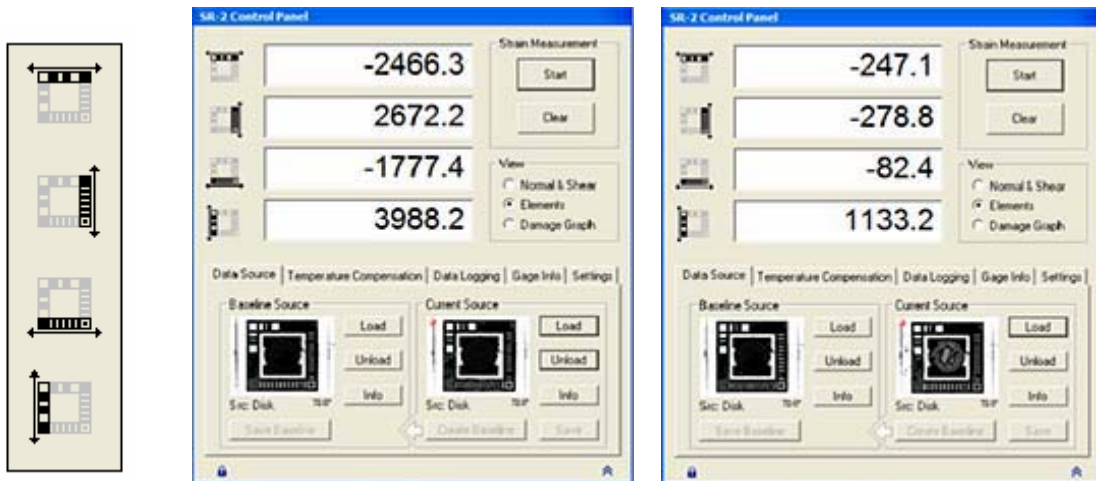


図 16. 4 辺に沿ったゲージ

図 17. (a)9500 サイクル、100,000 ポンド負荷でのひずみ要素測定値  
(b)9500 サイクル、無負荷でのひずみ要素測定値

図 17 (a.b) は 9500 サイクル時の 2 つのケースのを示しています。図 17 (a) は 10000 ポンドの負荷でのひずみ要素測定値を示したもので図 14 (g) で亀裂の長さの写真に対応しています。図 17 (b) は無負荷でのひずみ要素測定値とを示しています。これは亀裂の長さが、無負荷で亀裂閉鎖後でも測定可能を確認するために行われました。これら二つの測定値が比較した時、興味深い結果が得られました。10000 ポンドと無負荷時の左右の要素のひずみの差は、ほぼ同じという結果が得られました。次式を参照してください。

a)Load 10,000lbs:  $3988.2 - 2672.2 = 1316.0$

b)Load 0 lbs.:  $1133.2 - 278.8 = 1412.0$

注意：無負荷と 10000 ポンド時の差は約 7% ( 1412-1316 ) / 1364 ( 平均 ) = 0.07

図 18 は左右のひずみ差と亀裂の長さを 6500 から 9500 サイクルまで 500 サイクル 間隔でプロットしたものです。図 9 から、ひずみ差は求められ、亀裂の長さは取り込んだ図 14 ( a-g ) から求められます。

限られたテストとデータではありますが、DMI 技術が亀裂発生と成長を実験室レベルにおいて測定が可能であることを示しました。また現場での十分な可能性も持っています。無負荷での亀裂の存在を検知する能力は、定期的な保守の検査技術として適用される可能性があります。データベースの構築や留め具穴の検査への適用を示すためには、さらなる実験やデータが必要です。今回の実験で使用したデータはゲージの外側のひずみの値です。図 19 ( a ) 参照

DMI のさらなる可能性として図 19 ( b ) のゲージの内側のデータを処理できるなら、亀裂発生場所により近づぐために穴の測定に適していると思われます。3 番目の選択は図 19 ( c ) で示されたように内側と外側の境界線上の二つの測定値を平均化することです。今回実施したテストと同様な実験を計画しています。そして取り込んだ全てのデータや取込方法を検討して亀裂発生と成長が、ひずみ測定値との相関の精度を上げ感度の高い手法を見出す予定です。

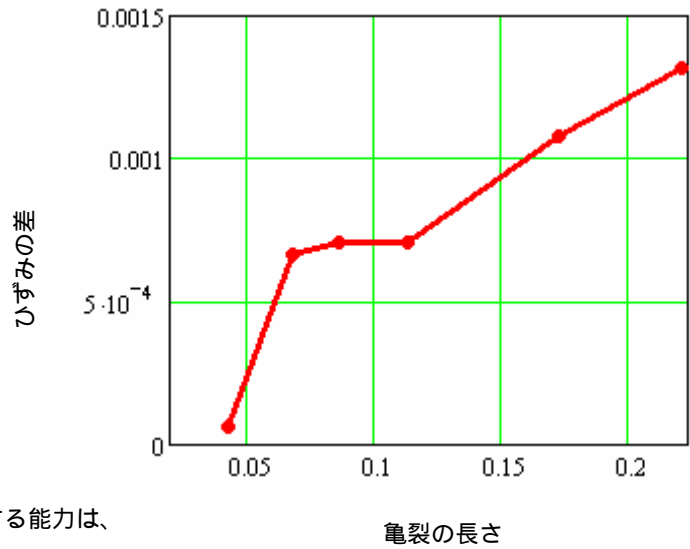


図 18. ひずみ差異 vs. 亀裂の長さ

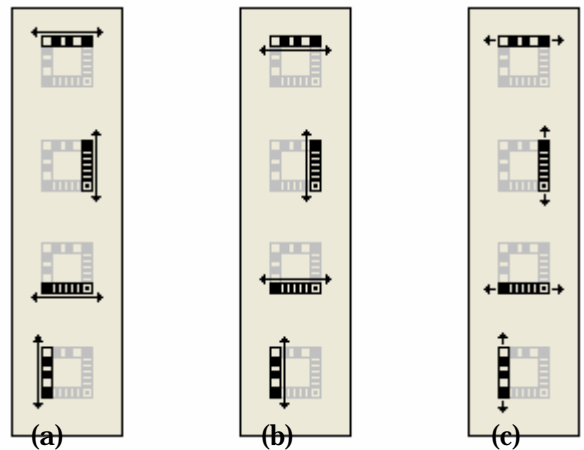


図 19. DMI ひずみゲージの境界要素ひずみセンサー

## 結果と結論

技術的な方法論の重要性の基は、多くの基礎実験です。これらの実験は、周期的な負荷にさらされたプレート上の穴に発生する亀裂が表面へと成長することを測定するために DMI 技術が利用出来ることを述べています。多くの調査[14 から 25]が、この研究の背景を形作るために使われました。特定の結果と結論としては

- 1 . このテストは周期的な負荷にさらされたプレートでの亀裂成長のモニターや穴の周囲のひずみの差の測定のための DMI 技術の有効である事を実証しています。
- 2 . 本実験において端の 2 つのゲージは、周期的な負荷方向と並行でした。ゲージの方向と亀裂の発生と成長を見つける能力はお互いに独立しています。なぜならゲージは直角の引っ張りひずみと関連したせん断ひずみを測定するからです。他の亀裂の検知技術は穴における亀裂の発見するために負荷の方向とセンサーが特定の方向性を持っていなければなりません。
- 3 . 本実験は DMI ゲージが留め具を含んだ穴の中央にある時、れ亀裂成長がモニターできることを示しています。この提案は 1930 年と 1940 年に実施された[26,27,28,29,30,31]基礎的研究に基づいています。
- 4 . DMI 技術は予定された検査、周期的な検査または異常な負荷の後、働中の機器の亀裂の存在を測定できます。これは激しい離陸や極限の飛行状態でフライトした航空機の検査に役に立ちます。塑性変形はゲージに記録されているので、どんな時でも DMI リーダーをゲージの上に置くだけで測定できます。
- 5 . ひずみを測定するのに DMI ゲージのパターンを使用しています。
- 6 . リベットの穴の表面ひずみの計測は、従来の電気式ひずみゲージを使うより、ひずみが高い穴の近くを測定することが出来る DMI ゲージ方が、多くの情報を得られます。これは Timoshenko と Goodier による前述の議論に基づいています。これは電気式ひずみゲージが、このような測定には向いていないことを意味します。

**参考文献**

- [1] S. Timoshenko and J.N. Goodier, *Theory of Elasticity*” McGraw-Hill Book Company, Inc. New York, 1951
- [2] W. Elber, *Fatigue Crack Propagation*, Ph.D. Thesis, University of N.S.W., Australia, 1968
- [3] W. Elber, *Fatigue Crack under Closure Cyclic Tension*, *Eng. Frac. Mech.*, 3,37-34 (1970)
- [4] W. Elber, *The Significance of fatigue crack Closure*, *Damage Tolerance in Aircraft Structures*, ASTM STP 748, 53-84(1981)
- [5] J.C. Newman Jr., M. Jordan Haines, *Verification of stressintensity factors for various middle-crack tension test specimens*, *Eng. Frac. Mech.*, 72, 1113-11,(2005)
- [6] Kiran Solanki, S.R.Daniewz, Jc. Newman Jr., *Finite element analysis of plasticity-induced fatigue crack closure: an overview*, *Eng. Frac. Mech.*, 71,149-171 (2004)
- [7] S.K. Ray, R Perez , A.F. Grandt Jr., *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 10 (3),239-250,(1987)
- [8] A.I. Rifani, A.F. Grandt,Jr., *A FRACTURE MECHANICS ANALYSIS OF FATIGUE CRACK GROWTH IN A COMPLEX CROSS SECTION*, *Engineering Failure Analysis*, Vol 3., No. 4 249-265 (1996)
- [9] D. S. Dawicke, A. F. Garndt Jr., and J.C. Newman Jr. *THREEDIMENSIONAL CRACK CLOSURE BEHAVIOR*, *Eng. Frac. Mech.*, Vol. 36, No. 1, 11-121 (1990)
- [10] J.C. Newman Jr., A. Brot, C. Matias, *Crack-growth alculations in 7075-T7351 aluminum alloy under various load spectra using an improved crack-closure model*, *Eng. Frac. Mech.*,7, 2347-2363 (2004)
- [11] Karl-Heniz Schwalbe, Jams C. Newman Jr, John L. Shannon Jr. , *Fracture mechanics testing on specimens with low constraintstandardisation activities within ISO and ASTM*, *Eng. Frac. Mech.* ,72 557-576 (2005)
- [12]. W.F. Chen, D. J. Han, *Plasticity for Structural Engineers*, Gau Lih Book Co., Ltd.,1995.
- [13]. V. Novozhilov, *Foundations of the Non Linear Theory of Elasticity*, Graylock Press, New York, 1953.
- [14] M. Carboni, *Stain-gauge compliance measurements near the crack tip for crack closure evaluation: Applicablity and accuracy*, *Eng Frac. Mech* ,to be published based on being accepted 19 April 2006
- [15]. K.H.Schwalbe, *Estimating the load line displacement of cracked laboratory specimens using the engineering treatment*, *Eng Fract Mech*, 45 (1993) (6), 751-758.
- [16]. K.H.Schwalbe, B. Hayes, K. Baustain et al, *Validation of the fracture mechanics test method EGF P1-87d (ESIS P1-92)*. *Fatigue Fract. Eng Mater Struc*, pp1231-1284, 1993.
- [17]. W. Mekky, P.S. Nicholson, *The fracture toughness of Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> laminates by digital image correlation I: experimental crack opening displacement and R-curves*, *Eng Fract Mech*, 73, (2006), (5), 571-582.
- [18]. L.J. Fellows, D. Nowell, *Measurement of crack closure after the application of an overload cycle, using moire’ interferometry*, *Inter J Fatig*, 27, 2005, (10-12), 1453-1462,.

- [19]. P. Hung, A. S. Voloshin, In-plane strain measurements by digital image correlation, *J Braz Soc Mech Sci. Engng*, XXV,(2003), (3), 215-221.
- [20]. D. Amodio, G.B. Broggiato, F. Campana, G. M. Newaz, Digital speckle correlation for strain measurement by image analysis, *Soc Exp Mech*, 43 (2003) (4), 396-402.
- [21]. M.A. Sutton, F. Ma, X. Deng, Development and application of a CTOD based mixed mode fracture criterion, *Int J Solids Struct* 37 (2000), 3591-3618.
- [22]. F. Hild, Measuring stress intensity factors with a camera: integrated digital image correlation (I-DIC), *Comptes Rendus Mechanique*, 334, 2006 (1), 8-12.13 Copyright © 2007 by ASME
- [23]. J.D. Helm, M.A. Sutton, S.R. McNeill, Deformations in wide, center-notched panels, part I: three-dimensional shape and deformation measurements by computer vision, *Optical Engineering*, 42, 2003 (12), 1293-1305.
- [24] J. Lemaitre, *A Course Damage Mechanics*, Springer –Verlag, 2nd Edition, Berlin, (1991)
- [25]. M.A. Sutton, A.P. Reynolds, J. Yan, B. Yang, Microstructure and mixed mode I/II fracture of AA2524-T351 base material and friction stir welds, *Eng Fract Mech*, 73, 2006 (4), 391-407.
- [26] K. Sezawa and G Nishimura, Rept. Aeronaut. Research Inst.. Toyko Imp. Univ.,, vol. 6. no. 25, (1931)
- [27] J. N. Goodier, *Trans. A.S.M.E.*, vol.55, 39 (1933)
- [28] L. H. Donnell, *Theodore von Karman Anniversary Volume*, Pasadena, 293, (1941)
- [29] E. Thibodeau, L.A. Wood, *J. Research Natl. Bur. Standards*, vol. 20, 393, (1938)
- [30] A.E. Green, *Trans. Roy Soc( London)*, series A, vol. 103, 229
- [31] E. Sternberg, M. Sadowsky, *J. Applied Mechanics (Tans. A.S.M.E.)*, vol. 16,27, (1949)