

Research Reports of the National Institute
of Industrial Safety, NIIS-RR-94 (1995)
UDC 620.1, 620.1.08, 620.179

ひずみゲージを用いた疲労き裂モニタリングの基礎研究*

佐々木哲也**

A Basic Study on the Fatigue Crack Monitoring Using Strain Gages*

by Tetsuya SASAKI**

Abstract : Fatigue is a major factor which must be taken into consideration to prevent fracture accidents of industrial installations and structures. A lot of researches were devoted to find out a method to prevent crack initiation due to fatigue. These studies, however, revealed that it was vain to make efforts to completely prevent fatigue crack initiation. Then new design concept called damage tolerance design was proposed and it has been applied to the design of fatigue critical structures. The damage tolerance design is a synthetic method to ensure the integrity of structures during their service life. Nondestructive inspection (NDI) is applied to materials and structures to verify the required integrity by detecting and characterizing cracks and flaws. The damage tolerance design has contributed to the decrease of fracture accidents due to fatigue.

Recent fracture accidents of airplanes, however, revealed that the damage tolerance design was also imperfect. No one can detect all cracks and flaws by NDI. Some cracks and flaws are not detected because their size is under NDI level which refers to the degree of resolution, and some are not detected due to human error in inspection. These problems of the damage tolerance design are rejected if all fatigue cracks which will result in a fatal accident can be always monitored. This idea may seem to be unrealistic. But, fortunately, it is not necessary to monitor all parts of the installation or structure. The place of crack initiation due to fatigue is almost limited to the stress concentrated part and it can be easily prospected.

Thus, this paper treats a basic study to monitor fatigue cracks using strain gages. Strain gages are selected for the sensor in this study because they are small, light, durable and low cost enough to be applied to the real structure. Two methods are proposed to monitor crack initiation and propagation. One is a direct method which detects the change of strain near crack tip, and the other is an indirect compliance method which detects the change of compliance due to a crack. An automated data logging system using real-time multi-task processing is also developed to store all the data during fatigue crack growth tests. Following conclusions are reached by fatigue crack growth tests using CCT specimens:

- (1) Fatigue cracks can be monitored by the direct method if a strain gage is close enough to crack tip. But the resolution drastically drops if crack initiation does not occur near the strain gage.
- (2) Fatigue cracks can be monitored more successfully by the indirect compliance method. The method has sufficient resolution even if the place of crack initiation cannot be precisely prospected.

Keywords : Fatigue, Crack initiation, Crack growth, Damage tolerance design, Crack monitoring, Strain gage, Automated fatigue crack growth test, Real-time multi-task processing

* 平成 6 年 9 月 20 日, 日本機械学会「材料と構造物の強度と破壊シンポジウム」において一部発表した。

**機械システム安全研究部 Mechanical and System Safety Research Division

1. 緒 言

機器・構造物に繰り返し荷重が負荷され続けると、疲労によってき裂が発生・進展し、ついには破壊事故が起きることがある¹⁾。通常は、設計寿命中には疲労破壊が生じないように強度設計が行われるが、設計時の想定を越えた荷重が負荷されたり、製造時に材料に微少な損傷が生じていたりすると、設計寿命中にも破壊事故が生じることが過去の事故例で明らかになっている²⁾。

疲労による破壊事故は何の前触れもなく起きることが多いため、重大な災害に結びつくことが多い。しかし、疲労によってき裂が生じても、それが直ちに破壊事故に結びつくわけではなく、き裂がある程度の大きさに成長して破壊に至るまでにはかなりの時間があるのが普通である。そこで、疲労破壊による事故や災害を防止するためには、定期的に非破壊検査を行って疲労き裂が生じていないことを確認するとともに、有害なき裂が生じた部材については補修・交換すればよい。これがいわゆる損傷許容設計の考え方である。損傷許容設計では全てのき裂を有害とは見なさない。次の非破壊検査までに危険な大きさにまで成長しないと予測されるき裂については許容する。こうすることによって、信頼性の確保と経済性の確保が両立できる。しかし、非破壊検査で全てのき裂が検出できるわけではない³⁾。き裂の場所によっては非破壊検査で発見することが困難である場合もあるし、ヒューマンエラー等によってき裂を見逃してしまうこともある。また、許容したき裂が予測以上に早く進展してしまうことも考えられる。このような損傷許容設計の問題点を解決するためには、何らかの方法で材料自身に疲労き裂の検出機能を持たせることが有効であると考えられる⁴⁾。

疲労き裂が発生する場所は、溶接部やリベット穴、ボルト穴等の応力集中部に限定されると考えて良く、疲労き裂の発生位置を予測することはそれほど困難なことではない⁴⁾。従って、少なくとも破損した場合に致命的な事態に至るような部材については、き裂の発生が予測される場所を何らかの方法で常時集中的に監視(モニタリング)して、疲労き裂の発生・成長を検知することが可能であれば、破局的な破壊事故を回避できると考えられる⁴⁾。しかし、実際の機器・構造物に組み込んで、供用下でのモニタリングを可能にするためには、装置が小型・軽量かつ低価格であるとともに、耐環境性を有している必要がある。そこで、本研究では、現在の技術水準でこれらの条件を満たしていると考えられるひずみゲージを用いて、構造部材の応力集中部に疲労き裂の発生・進展の検出機能を持たせるた

めの手法について、基礎的な検討を行った。

2. 疲労き裂の検出方法

ひずみゲージを用いた疲労き裂の検出は、実験室での材料試験において既に実用化されているが、大きく分けて次の2種類がある。

- (1) 部材にき裂が入ると、き裂近傍のひずみの大きさが変化するので、そのひずみ変化をき裂近傍に貼り付けたひずみゲージで直接検出する方法⁵⁾。主として、疲労き裂発生の検知に用いられる。
- (2) き裂が入るとその部材のコンプライアンスが増加するため、コンプライアンス変化をひずみの変化に変換して検出する方法⁶⁾。疲労き裂長の自動計測によく用いられる。

しかし、これらの方法をそのまま実機の疲労き裂モニタリングに適用する場合には、次のような問題があると考えられる。

- ・(1), (2)とも部材に負荷される荷重の大きさを計測する必要があるが、実験室のようにロードセル等で計測することは困難である。
- ・(2)においては、通常クリップゲージが必要とされるが、供用中の実機にクリップゲージを取り付けることは困難である。背面ひずみ法⁶⁾を適用すればクリップゲージは必要ないが、適用場所が限定されてしまい、実用上重要な継ぎ手部分にはほとんど適用できない。

そこで、本研究ではこれらの問題点を解決するため、(1), (2)の方法をそれぞれFig. 1, Fig. 2に示すようにして適用することにした。以下、Fig. 1を直接法、Fig. 2を間接コンプライアンス法と呼ぶことにする。ただし、本研究では簡単のため平板試験片の単軸引っ張り問題を対象にした。

サンプナンの原理によれば、き裂からある程度離れた場所のひずみはき裂の影響を受けない。そこで、Fig. 1, Fig. 2では、き裂から十分離れ場所にひずみゲージG₀を貼り付け、その出力で部材の負荷荷重を代表させる。そして、直接法では次式で定義されるκを評価することにより、き裂のモニタリングを試みる。

$$\kappa = \frac{\varepsilon_{1 \max}}{\varepsilon_{0 \max}} \quad (1)$$

ただし、 $\varepsilon_{0 \max}$ はG₀によって計測されたひずみの最大値、 $\varepsilon_{1 \max}$ はG₁によって計測されたひずみの最大値である。なお、試験片に貼り付けたひずみゲージの出力信号だけからき裂の発生・進展を検知する試みは、Makabeら⁷⁾によっても行われている。

一方、間接コンプライアンス法では、クリップゲー

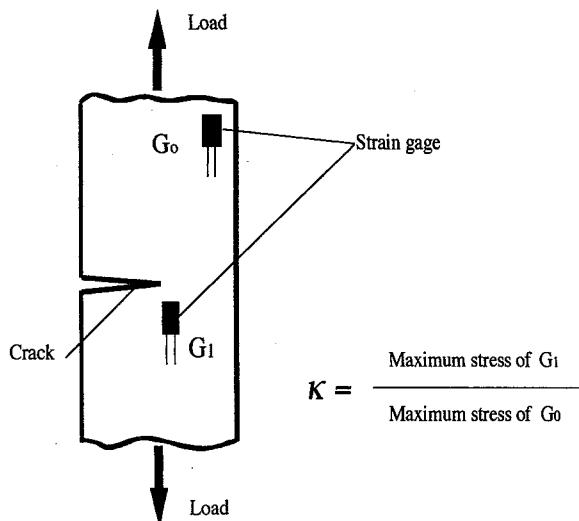


Fig. 1 Illustration of a direct method.
直接法の概念図

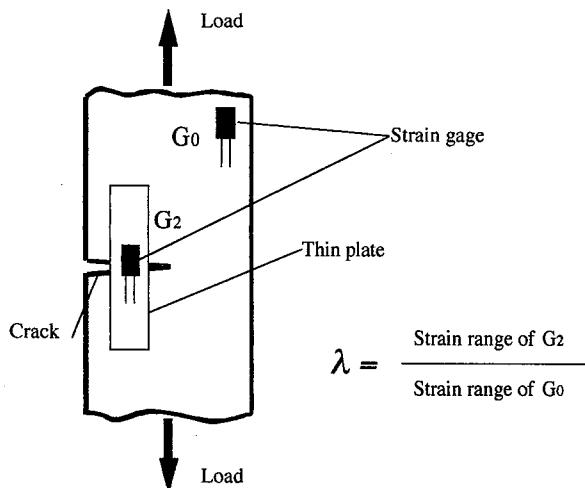


Fig. 2 Illustration of an indirect compliance method.
間接コンプライアンス法の概念図

ジの代わりに薄板をき裂をまたがせるようにして両端だけを接着し、その上に貼ったひずみゲージ G_2 の出力と G_0 の出力から、次式の λ でコンプライアンスを代表させ、その値を評価することにより、き裂のモニタリングを試みる。

$$\lambda = \frac{\Delta \varepsilon_2}{\Delta \varepsilon_0} \quad (2)$$

ただし、 $\Delta \varepsilon_0$ 、 $\Delta \varepsilon_2$ はそれぞれひずみゲージ G_0 、 G_2 によって計測されたひずみの変化幅を表している。

3. データ計測システム

ひずみゲージによる疲労き裂モニタリングを行うためには、自動データ計測システムの構築が不可欠である。

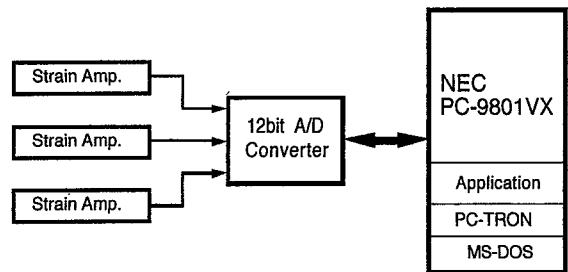


Fig. 3 Schematic diagram of data logging system.
データ計測システムの構成

る。本研究では、パーソナルコンピュータを用いたデータ計測システムを開発した。

3.1 データ計測システムのハードウェア

Fig. 3 にデータ計測システムのハードウェア構成を示す。ひずみゲージはストレインアンプ（東京測器製 DA-14D）に接続されており、その出力は 12 ビット 8 チャンネル A/D 変換ボード（マイクロサイエンス製 ADM-5898BPC）で A/D 変換され、16 ビットパーソナルコンピュータ（NEC 製 PC-9801VX）で処理される。

動的現象の多チャンネル計測においては、各チャンネルの計測時間のずれが問題となることがあるが、本研究で使用した A/D 変換ボードは同時サンプリング型であり、チャンネル間の計測時間にずれはない。また、この A/D 変換ボードには 512kByte のバッファが搭載されており、次節に示すリアルタイム・マルチタスク処理を行うことにより、A/D 変換を行っている間に CPU は別処理を行うことが可能となる。

3.2 データ計測システムのソフトウェア

疲労実験システムのソフトウェアにリアルタイム・マルチタスク処理を導入すると次のようなメリットが得られることが菊川ら⁸⁾ 及び著者ら⁹⁾ によって示されている。

- ・ 一台のコンピュータでデータ計測、機器の制御、実験状況のグラフィック表示などを同時にを行うことが可能になる。
- ・ 独立した処理ごとにモジュール化し、優先度を付与することにより、CPU の使用効率を大幅に上げることが可能になる。
- ・ データ計測を正確に一定時間間隔で行うことを保証できる。
- ・ プログラムをモジュール化することにより、開発・保守が容易になる。

そこで、本研究でも全体の処理を 7 個のタスクに分割して、リアルタイム・マルチタスク処理を行うこと

Table 1 Function and priority of each task.
各タスクの機能と優先度

Task No.	Function of task	Priority
Task 1	Detection of error	1
Task 2	A/D conversion start	2
Task 3	Reduction of the measured data	3
Task 4	Storage of the reduced data	4
Task 5	Management of the detected error	5
Task 6	Keyboard monitoring	7
Task 7	Graphic process	8
Shell	MS-DOS shell	6

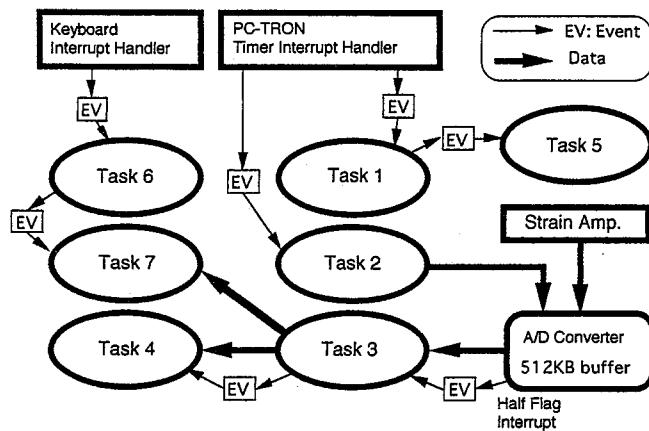


Fig. 4 Data flow of the developed system.
開発したシステムのデータフロー

にした。使用したリアルタイム・モニタはマイクロニクス製の PC-TRON 3.3V.III であり、各タスクは C 言語 (Boarland 製 Turbo-C) で記述した。

各タスクの処理内容と優先度を Table 1 に、タスク間のデータフローを Fig. 4 にそれぞれ示す。

4. 実験方法

4.1 供試材及び試験片形状

供試材はアルミニウム合金 2024-T3 である。供試材の化学成分及び機械的性質をそれぞれ Table 2, Table 3 に示す。

試験片は Fig. 5 に示すような形状の CCT (中央き裂入り帶板) 試験片とした。

4.2 実験方法

直接法および間接コンプライアンス法を 1 本の試験

Table 2 Chemical composition of the material used (wt. %).
供試材の化学成分 (重量%)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Zr + Ti	Ti
0.10	0.24	4.73	0.57	1.43	0.02	0.04	0.04	0.03

Table 3 Mechanical properties of the material used.
供試材の機械的性質

Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)
48.8	34.1	24.3

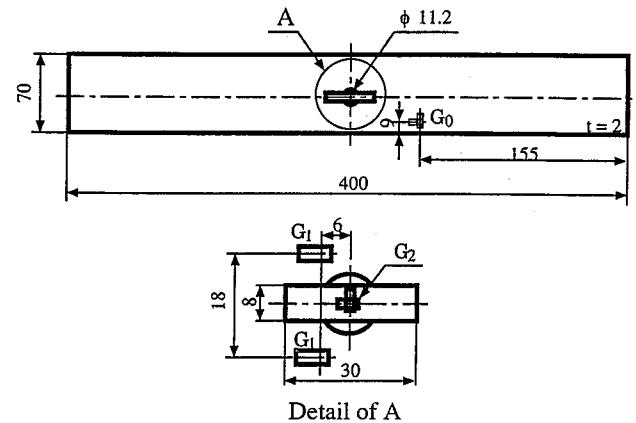


Fig. 5 Test specimen configuration.
試験片の形状と寸法

片に対して同時に適用するために、Fig. 5 に示すような位置にひずみゲージを貼り付けた。

また、間接コンプライアンス法で使用する薄板は、アルミニウム箔 (厚さ 1.5×10^{-5} m) と塩化ビニールの薄板 (2.5×10^{-4} m) の 2 種類を使用し、それぞれき裂をまたがせるようにしてシアノアクリレート接着材で試験片に接着した。ただし、アルミニウム箔にたるみを持たせないで貼ると、試験片にき裂が入るよりも先にアルミニウム箔の方が破れてしまうことが予備実験の段階でわかっているので、アルミニウム箔を貼る際には少しだけたるみを持たせることにした。

試験片には応力比 $R = 0.1$ 、応力振幅 $\Delta\sigma = 128$ MPa の正弦波状一定振幅荷重 (周波数 5 Hz) を負荷して疲労き裂を発生・進展させた。

5. 実験結果と考察

Fig. 6, Fig. 7 は、それぞれアルミニウム箔及び塩化ビニール板を用いた場合について、荷重繰り返し数

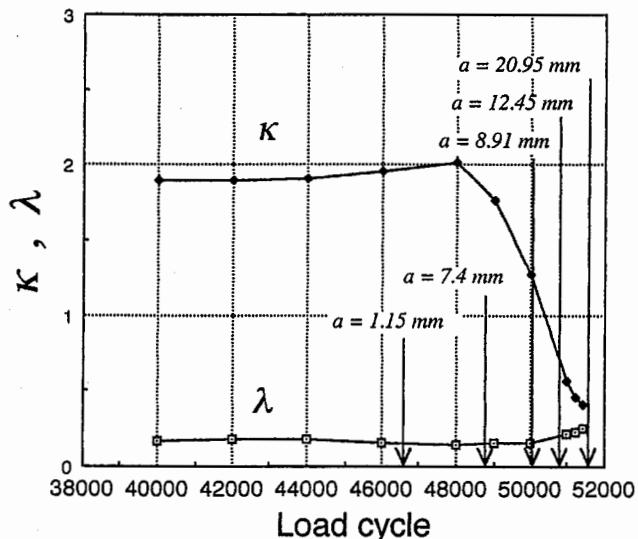


Fig. 6 Load cycle versus κ and λ (for aluminum foil).
荷重繰り返し数と κ , λ の関係 (アルミニウム箔の場合)

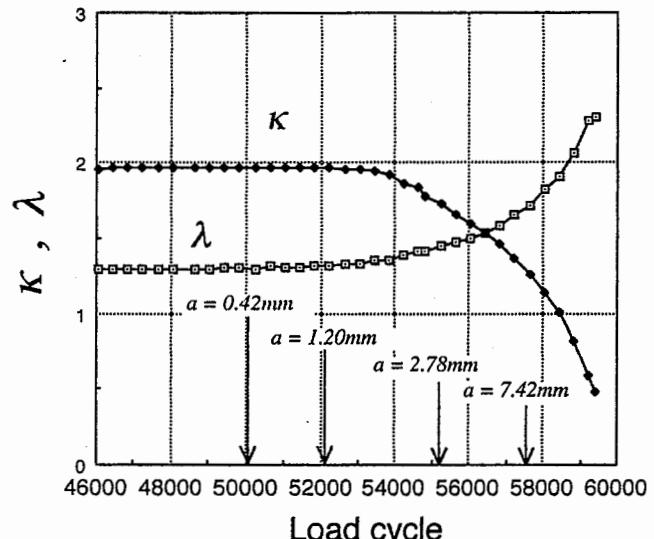


Fig. 7 Load cycle versus κ and λ (for polyvinylchloride plate).
荷重繰り返し数と κ , λ の関係 (塩化ビニル板の場合)

N と 2 章で定義した κ , λ の関係を示している。図中には、移動式光学顕微鏡を用いて計測したき裂長さ a とその時の荷重繰り返し数も示してある。

まず、Fig. 6, Fig. 7 で κ の変化を比較してみる。Fig. 6 ではき裂が 7.4 mm になる少し前から κ が急激に減少しているのに対して、Fig. 7 ではき裂が 1.2 mm になる頃から既に κ は減少し始めており、両者のき裂の検出感度に大きな差があることがわかる。両者のき裂の入り方を比べてみると、Fig. 6 の方がひずみゲージ G_1 から離れた位置にき裂が入っていた。このため、き裂の検出感度が低かったものと思われる。このことから、直接法でもき裂のモニタリングは可能であるが、その検出感度はき裂とひずみゲージ G_1 の距離に大きく依存することが確認された。

次に、Fig. 6, Fig. 7 で λ の変化を比較してみる。Fig. 6 では、 λ はき裂が 9 mm 程度の大きさになってからようやく少し増加し始めているが、これはアルミニウム箔を貼る際に少したるみを持たせたためと思われる。アルミニウム箔をたるませないで貼った場合には試験片にき裂が入るよりも先にアルミニウム箔にき裂が入ってしまうことを考えると、この厚さのアルミニウム箔を用いた間接コンプライアンス法でき裂のモニタリングを行うことは困難であると思われる。これに対して、Fig. 7 ではき裂が 1.2 mm になる頃から λ が増加し始めており、塩化ビニル板を用いた間接コンプライアンス法ではき裂がかなり小さい段階からモニタリング可能であることがわかる。

以上から、直接法は疲労き裂の発生位置がかなり正

確に予測できる場合以外はき裂の検出感度が十分でなくなることがあり、実機の疲労き裂モニタリングへの適用は困難であることが確認された。これに対し、塩化ビニル板を用いた間接コンプライアンス法は、き裂の正確な発生場所が事前に予測できない場合でもき裂の検出が可能であると同時に、十分な検出感度を有しているので、実機の疲労き裂のモニタリングに適用できる可能性があることがわかった。

なお、ひずみゲージ G_0 の出力をを利用して構造部材に負荷された荷重をモニタリングすることにも可能であり、これは特に不規則荷重下の疲労き裂進展寿命予測の精度向上に有効であると考えられる。

6. 結論

本研究により、以下の結論が得られた。

- (1) ひずみゲージを用いて供用下の疲労き裂モニタリングを行う方法として、直接法と間接コンプライアンス法の 2 つを提案した。
- (2) 直接法及び間接コンプライアンス法の計測をできるだけ短く、かつ正確に一定の時間間隔で行うために、リアルタイム・マルチタスク処理を用いたデータ収集システムを開発した。
- (3) CCT 試験片を用いた疲労き裂進展実験を行い、直接法及び間接コンプライアンス法による疲労き裂モニタリングの可能性を評価し、次の結論を得た。
 - i) 直接法のき裂検出感度はひずみゲージとき裂の距離に大きく依存するため、き裂の発生位置が正確に予測できる場合にしか適用できない。

- ii) 塩化ビニール板を用いた間接コンプライアンス法は十分なき裂検出感度を有しており、き裂の発生位置が正確に予測できない場合にも適用可能である。

参考文献

- 1) 例えば, 榎本信介, 材料強度要論, 62, 養賢堂 (1988).
- 2) 例えば, 小林英男, 最近の疲労の予防と診断技術, 日本機械学会講習会教材, 890-22, 1~10 (1989).
- 3) 荒川敬弘, 非破壊試験の欠陥検出能力調査の動き, 溶接学会誌, 55-4, 213~220 (1986).
- 4) 小林英男, 破壊事故は何故起こるか (2), 高圧ガス, 27-6, 423~431 (1990).
- 5) 町田 進ほか, ブロック荷重を受ける溶接構造の疲労寿命推定法に関する一考察, 日本造船学会論文集, 172,

- 579~587 (1992).
- 6) 小林英男, 破壊力学試験におけるき裂進展の測定 (II), 材料試験技術, 28-2, 124~128 (1983).
- 7) Makabe, C., Kaneshiro, H., Itokazu, M. and Ohba, K., An Inspection of Fatigue Crack Extension Based on Strain Information, Engineering Fracture Mechanics, 45-5, 655~662 (1993).
- 8) 菊川 真ほか, ミニコンピュータの利用による疲労試験における計測の高精度自動化, 材料, 29-327, 1240~1246 (1980).
- 9) 佐々木哲也・酒井信介・岡村弘之, 信頼性工学的研究のための疲労き裂進展実験システムの開発, 材料, 39-441, 776~781 (1990).

(平成 7 年 5 月 10 日受理)