

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月14日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560077

研究課題名（和文） ボルト締結部における疲労き裂の実時間超音波測定

研究課題名（英文） Real-time ultrasonic measurement of fatigue crack at bolt joints

研究代表者

加藤 寛 (KATO HIROSHI)

埼玉大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：80107375

研究成果の概要（和文）：機械類の安全性確保のために、ボルト締結部の疲労き裂を検出する必要があるが、ボルト頭などでき裂が覆われており、目視できない。本研究では、超音波測定によりボルト締結部に発生する疲労き裂を検出する方法について研究を実施した。その結果、表面弾性波を用いてボルト締結部に発生・伝播する長さ 100 μm 以下の微小な疲労き裂を検出するとともに、疲労き裂の寸法（長さ及び深さ）を推定した。また、疲労サイクル 1 周期中の各応力段階におけるき裂の開閉口に伴う反射波強さの変化を検出した。

研究成果の概要（英文）：It is vital to detect the fatigue crack appearing at the bolt joints for their safely, but it is unable to see the crack since it is covered by the bolt head. The present work was carried out to detect the fatigue crack appearing at the bolt joints by the ultrasonic measurement. A small crack less than 100 μm in length was detected at the bolt joints by using the surface acoustic wave (SAW), and also the length and the depth of the crack was evaluated. Then, the SAW intensity change following the crack opening/closing behavior of the fatigue crack was detected in one fatigue cycle.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 2009年度 | 2,600,000 | 780,000 | 3,380,000 |
| 2010年度 | 700,000 | 210,000 | 910,000 |
| 2011年度 | 500,000 | 150,000 | 650,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,800,000 | 1,140,000 | 4,940,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械材料・材料力学

キーワード：品質管理システム，ボルト締結，疲労損傷，非破壊検査，超音波測定，アルミニウム合金，表面弾性波

1. 研究開始当初の背景

ボルト締結部あるいはリベット締結部などの機械的締結部における安全性確保の点から、機械的締結部における疲労寿命の予測が重要となっている。しかし、これらの締結部ではき裂の発生起点が覆われており、き裂の発生初期段階を目視で検出することはできない。この疲労き裂を検出する方法として、

従来より、ラム波、横波、表面弾性波など、多くの超音波測定法が開発されてきている。研究代表者らも、ボルト締結材の疲労試験中に表面弾性波（SAW）測定を行い、ボルト穴近傍の摺動部において SAW 散乱波強さが疲労き裂の成長に従って増加していくことを明らかにしている。

また、疲労き裂の発生及び伝播過程のその

場超音波測定も行われているが、これらの多くは疲労試験機を停止させて行われてきた。さらに最近では、疲労試験中に試験機を停止させることなく実時間で測定する試みが報告されているが、これらでは、疲労試験中に超音波測定をランダムに行ったり、疲労サイクルの最大荷重において超音波測定を行っており、疲労サイクル中の超音波反射波の変化については必ずしも明らかにされていない。

疲労き裂は疲労サイクル中にその開口量を変化させるが、疲労サイクル中の各応力段階で疲労き裂からの超音波反射波を測定することにより、疲労き裂の開閉挙動に対して有益な知見が得られるものと期待される。

2. 研究の目的

本研究は、稼働中の機械的締結部の予寿命を非破壊的に評価する方法の開発を最終的な研究目標とし、本研究期間内に、以下の事項を達成することを目的として研究を実施した。

(1) 疲労き裂の検出・評価法の開発：表面弾性波波形を用いて、ボルト締結部に発生・伝播する長さ 100 μm 以下の微小なフレット疲労き裂を検出するとともに、疲労き裂の寸法（長さ及び深さ）を評価する方法を開発する。

(2) 実時間超音波測定法の開発：実時間超音波計測法により、疲労サイクル1周期中の各応力段階におけるき裂の開口状態を評価する方法を開発する。

3. 研究の方法

(1) 疲労面き裂の検出・評価法の開発

アルミニウム合金 (A2024-T3) 平板より製作したボルト締結試験片について疲労試験を行い、疲労寿命に及ぼす締結力及び疲労振幅の影響を調べた。

疲労試験中、所定の疲労繰り返し数ごとに試験機を停止させ、あるいは疲労周期に同期させた状態で、表面弾性波を試験片表面に伝播させ、ボルト穴縁、疲労き裂などからの反射波を計測した。また、ボルト穴前方の摺動部における散乱波を計測するとともに疲労き裂の長さの測定を行い、これらの間の相関を調べた。

表面弾性波がき裂端に入射した際に発生するクリーピング波を測定し、疲労き裂深さの評価を行った。

(2) 実時間測定法の開発

疲労試験機を稼働させた状態で超音波測定を行うための測定システムを構築した。すなわち、疲労試験機からの制御信号の周期的変動をトリガー信号として超音波発生器に入力し、疲労サイクルに同期させた超音波信号を得た。

この測定システムを用いて、疲労サイクル中の任意の応力段階で超音波波形の測定を行い、SAW 反射波強さの変化を調べた。

4. 研究成果

(1) 疲労き裂の検出・評価法の開発

ボルト締結試験片について疲労試験を行うとともに、所定の疲労繰り返し回数ごとに試験機を停止し、表面弾性波 (SAW) を用いた超音波測定を行った。

次に、荷重サイクルに同期させた超音波測定を実施した。

その結果、以下の成果を得た。

① 疲労寿命-締結力図を、き裂の発生機構とともに、図 1 に示すが、ボルト締結力によって、疲労き裂の発生機構及び疲労寿命と締結力との関係が異なることが分かった。すなわち、ボルト締結力が小さい場合、疲労寿命は締結力の増大に従って増加していき、またボルト穴縁から拾うき裂が発生・伝播していく (機械的疲労損傷)。ボルト締結力が中程度になると、疲労寿命は締結力の増大に従って増加傾向を示すが、疲労き裂はボルト穴近傍に発生するようになる (フレット磨耗損傷)。更に締結力が大きくなると、疲労寿命は締結力の増大に従って低下していき、また疲労き裂はボルト穴近傍に発生する (フレット疲労損傷)。

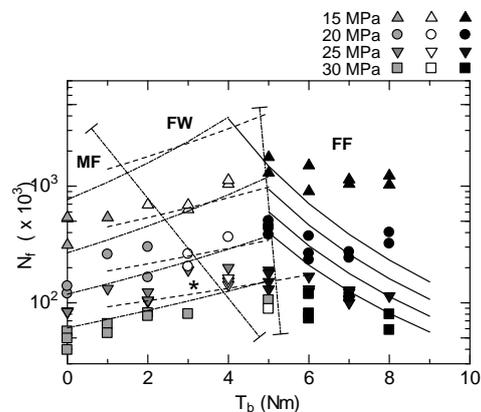


Fig. 1 疲労寿命 N_f と締結トルク T_b との関係に及ぼす応力振幅の影響. 図中、MF、FW 及び FF は、それぞれ機械的疲労、フレット磨耗及びフレット疲労を表す。また、*は試験片の破壊直前にボルト破損した。

② ボルト穴近傍で測定された SAW 反射波の例を図 2 に示すが、ボルト穴前方のフレット損傷領域における散乱波が疲労回数の増加に従って増大していった。図中、Rh は、ボルト穴縁からの反射波を示す。

その後、フレット損傷領域前方に疲労き裂 (図中 C) が生じたが、SAW 測定により、疲労き裂は初期段階から検出された。

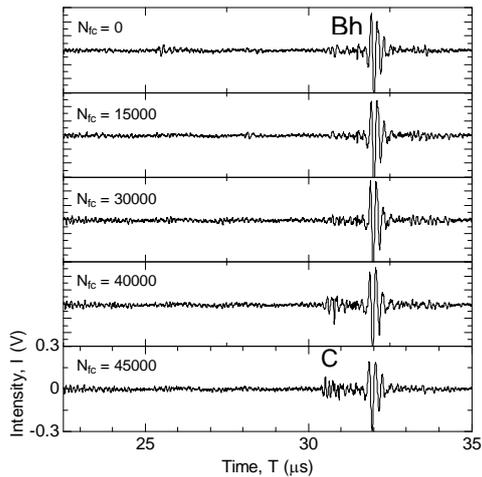


図2 疲労試験機を停止させて測定した表面弾性波分布の疲労回数の増加に伴う変化。

図3に、疲労回数の増加に伴う、SAW反射波強さの変化を示すが、疲労回数の増加に従って反射波強さは増大していったが、個々のき裂で増大の状況は異なっていた。

しかし、最終の反射波強さは、その後試験片を取り出して測定したき裂長さとの良好な相関を示した。

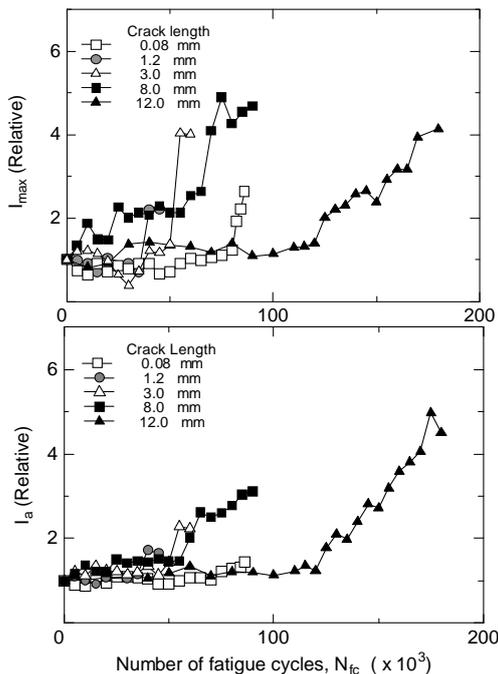


図3 ボルト穴手前のフレットング損傷領域からの散乱波強さの疲労回数による変化。

ボルト締結部で観察された疲労き裂の長さと、SAW反射波強さとの関係を図4に示すが、き裂長さの増大に伴ってSAW反射波強さは一様に増大していき、両者には良好な相関関係のあることが分かった。

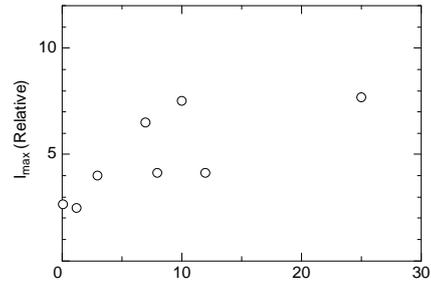


図4 疲労試験機を停止させてボルト締結部で測定したき裂長さとSAW反射波強さとの関係。

(2) 実時間測定法の開発

ボルト締結試験片について疲労試験を行うとともに、荷重サイクルに同期させた表面弾性波(SAW)の測定を行った。また、0.001 Hzの非常に低周波数の疲労試験を行い、実時間超音波測定及びき裂開閉口挙動の観察を行った。

その結果、以下の成果を得た。

① 同期測定により得られた、疲労サイクル1周期中のき裂からのSAW反射波強さの変化を図5に示す。疲労き裂が出現した初期段階では、SAW反射波強さは、疲労サイクル中の応力変化に対応して正弦波状に変化したが、疲労き裂がある程度成長した段階で、き裂からの反射波強さは矩形的な変化に移行していった。

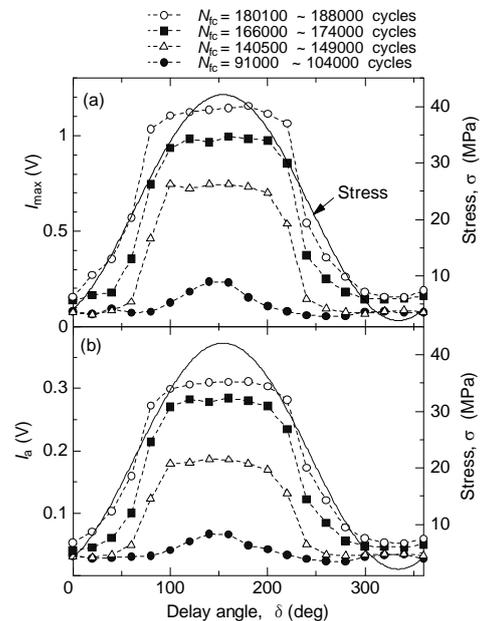


図5 実時間測定で得られた疲労サイクル1周期中の最大反射波強さ及び平均散乱波強さの変化。

反射波強さと応力との関係を反射波強さと応力拡大係数との関係に読み替え、反射波強

さが疲労き裂の開口長さに比例すると仮定して解析することにより、各疲労き裂の成長段階における疲労き裂長さを評価した。その結果を、試験片で直接測定した疲労き裂長さと比較して図6に示すが、両者には良好な一致が得られた。

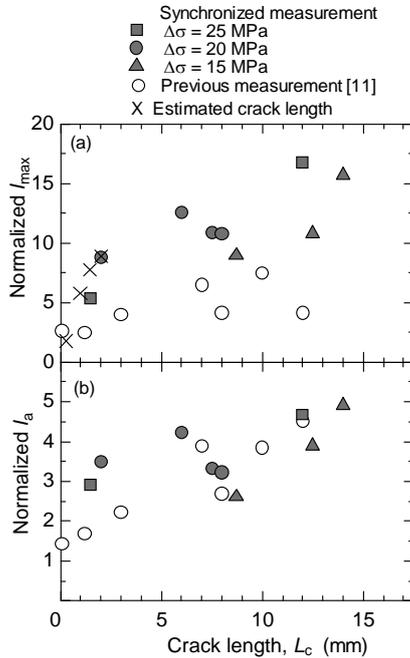


図6 ボルト締結面で測定された疲労き裂長さと、SAW反射波強さ及びボルト締結面前方の散乱波強さ(図中の○, ●, ▲, ■)との関係。図中、×は同期SAW測定により評価された、各段階における疲労き裂長さ。

次いで、同期測定により得られたSAW反射波中のクリーピング波の位置から評価したき裂深さと、超音波顕微鏡により得られた音響画像から推定したき裂深さ及び試験片の縦断面で測定したき裂深さとの関係を、図7に示す。測定方法の違いにも係らず、各き裂深さは良く一致していた。

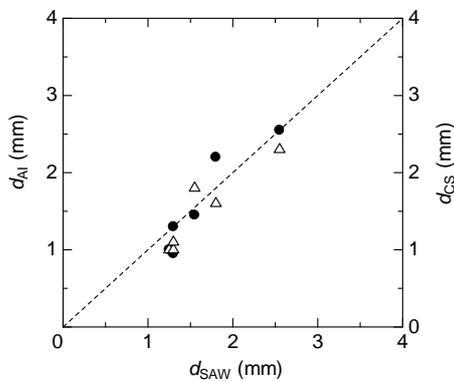


図7 SAW反射波から評価したき裂深さ d_{SAW} と超音波画像から推定したき裂深さ d_{AI} 及び断面で測定したき裂深さ d_{CS} との比較。

② 0.001 Hzの非常に低い周波数で疲労試験を行いながら実時間でSAW測定を行い、疲労き裂からのSAW反射波強さを測定した。結果を、周波数10 Hzの疲労試験中に同期測定した結果と比較して図8に示す。疲労サイクル中の増減の時期は異なっていたが、増減の状況は良く一致した。

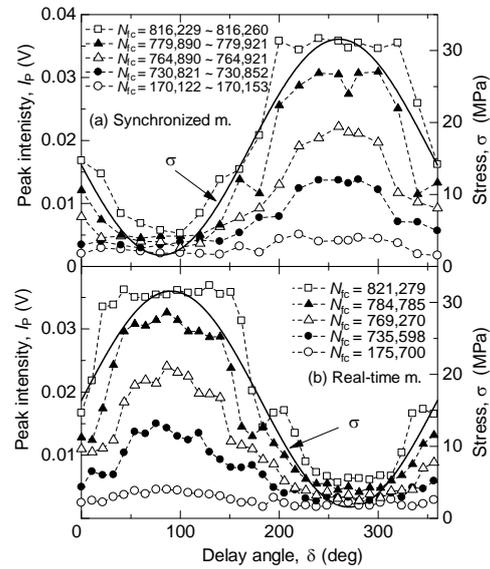


図8 同期測定及び実時間測定で得られた疲労サイクル1周期中の最大反射波強さの変化の比較。

③ 周波数0.001 Hzの疲労試験中に疲労き裂の開閉口挙動を撮影するとともに、実時間測定を行った。疲労サイクル1周期中のき裂の実効長さ(き裂開口量が $2.5 \mu\text{m}$ 以上の部分)を測定し、SAW反射波強さとの関係を求めた結果を図9に示す。開口量とSAW反射波強さとの間に正の相関のあることが確認されたが、両者の間には明確な比例関係は得られなかった。これは、超音波の透過/反射特性がき裂実効長さを規定するき裂開口量に依存するためと思われる。

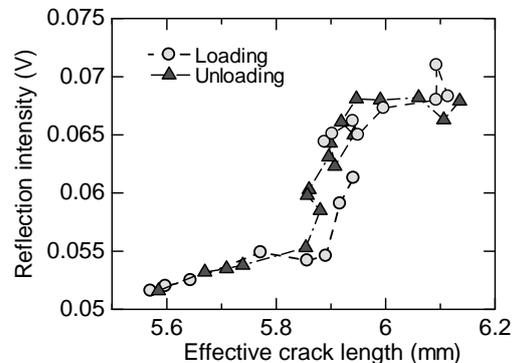


図9 反射波強さと実効き裂長さとの関係。

5. 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① S. Wagle and H. Kato: “Depth evaluation of fretting fatigue crack appearing at bolt joints of aluminum alloy plates by synchronized surface acoustic wave measurement”, Mater. Trans., 査読有, vol. 53 (2012), No. 2, 256-263.
- ② S. Wagle and H. Kato: “Real-time measurement of ultrasonic waves at bolted joints under fatigue testing”, Exp. Mech., 査読有, vol. 51 (2011), Issue 9, 1559-1564.
- ③ S. Wagle and H. Kato: “Size estimation of fatigue crack appearing at bolt joints of aluminum alloy plates by synchronized SAW measurement”, Exp. Mech., 査読有, vol. 51 (2011), Issue 6, 869 - 878.
- ④ ワグル サナット, 趙 春慧, 蔡 育霖, 加藤 寛: 「疲労き裂からの表面弾性波反射強さの疲労サイクル中の変化」, 非破壊検査, 査読有, 第 59 巻 (2010), 第 1 号, 28-32.
- ⑤ S. Wagle and H. Kato: “Ultrasonic wave intensity reflected from fretting fatigue cracks at bolt joints of aluminum alloy plates”, NDT&E Int., 査読有, vol. 42 (2009), 690-695.
- ⑥ S. Wagle and H. Kato: “Ultrasonic detection of fretting fatigue damage at bolt joints of aluminum alloy plates”, Int. J. Fatigue, 査読有, vol. 31 (2009), Issues 8-9, 1378-1385.

[学会発表] (計 3 件)

- ① S. Wagle and H. Kato: “Synchronized surface acoustic wave measurement of fretting crack appearing at bolt joints of aluminum alloy plates”, The 13th Asia-Pacific Conf. Non-Destructive Test. 2009 APCNDT2009, Yokohama, (2009-11/11), 176.
- ② S. Wagle and H. Kato: “Ultrasonic detection of invisible fatigue crack initiated at bolted joints of aluminum alloy plates”, Proc. 3rd JSME/ASME Int. Conf. on Mater. Process. ICM&P 2008, Evanston Illinois, (2008-10/7-10), MSEC_ICM&P2008-72038, 1-8.
- ③ S. Wagle, H. Kato and K. Kageyama: “Ultrasonic detection of the fatigue crack initiated at a deep notch and a bolt hole”, Proc. Int. Conf. Advanced Technol. Exp. Mech. 2007, Fukuoka, (2007-9/12), OS3-3-2, 1-6.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]
○出願状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

[その他]
ホームページ等
<http://mehp.mech.saitama-u.ac.jp/index.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者
加藤 寛 (KATO HIROSHI)
埼玉大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号: 80107375

(2)研究分担者
()

研究者番号:

(3)連携研究者
()

研究者番号: