

# 閉じたき裂の熱応力開口挙動について

## Behavior of Closed Crack under Thermal Loading

東北大学大学院工学研究科 燈明 泰成 Hironori TOHMYOH Member  
東北大学大学院工学研究科 坂 真澄 Masumi SAKA

This paper presents the ultrasonic response for closed crack under thermal loading. A part of stainless steel plate with a tightly closed crack is cooled for three minutes, and the thermal stress for reducing the crack closure stress is generated in the plate specimen. The back-scattering wave from the crack surface is monitored for several hours after cooling started.

**Keywords:** Closed Crack, Thermal Stress, Crack Opening, Back-Scattering Wave

### 1. 緒言

疲労き裂についてき裂閉口はよく知られており[1]、また応力腐食割れにおいてもき裂面間の酸化物はき裂閉口の要因となり得る。閉じたき裂を超音波探傷する場合、超音波はき裂面の部分接触を介して透過するため、超音波受信強度は開いたき裂のそれと比較して著しく低下し、き裂寸法の誤評価を招く。近年、閉じたき裂の問題を克服すべく、熱応力を利用したき裂開口手法が提案されている[2][3]。本報では、閉じたき裂を有する試験片を局所的に冷却することでき裂面に引張熱応力を発生させ、これにより一旦開口させたき裂のき裂面からの後方散乱波を長時間に亘りモニタリングすることで、熱応力の変化に伴うき裂の開閉挙動の経時的変化を明らかにする。

### 2. 実験方法

四点曲げ試験により導入した閉じた疲労き裂を有する SUS316L 製平板試験片 (164×82×15mm) を、き裂を裏面として水槽中に配置し、これを鋼中屈折角 45° の水浸斜角横波法で探傷した。き裂中央部の平板表面に直径 25mm の氷柱を 3 分間接触させて平板内に熱応力を発生させ、冷却終了後約 7 時間の超音波応答を観察した。冷却前に様々な超音波探触子位置で受信波形を収録したところ、いずれの探触子位置においてもき裂底部と平板裏面との角部からのコーナーエコー以外の際立った波形成分は観察されなかった。冷却後、き裂

面からの後方散乱波およびき裂端部エコーが確認できたので、き裂面後方散乱波が最大値を示す探触子位置において後方散乱波と端部エコーの両方をモニタリングした。なお、コーナーエコーと後方散乱波が最大値を示す探触子位置の移動距離差は 3.0mm であった。

### 3. 実験結果および考察

Fig. 1 に冷却開始からの時間が 0 (冷却前)、60s (冷却中)、210s (冷却終了後)、1h、6h の受信波形を示す。図中、波形成分 A はコーナーエコーであり、冷却前はこれ以外の顕著な波形成分が観測されなかった。このことは探傷したき裂が閉じていたことを示す。対して冷却中の受信波形ではき裂面後方散乱波 (波形成分 B) が明瞭に識別できる。また端部エコーが後方散乱波より早い伝搬時間において観察されることを踏まえれば、明瞭に認識できる後方散乱波とコーナーエコーとの位置関係より端部エコー (波形成分 C) を認識することができる。冷却終了後長時間経過した受信波形は冷却前のそれと類似しており、冷却中に確認されたき裂面

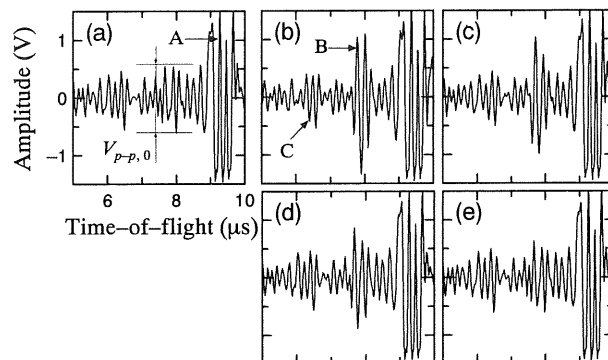


Fig.1 Received signals at the time after starting cooling 0s (a), 60s (b), 210s (c), 1h (d) and 6h (e).

連絡先: 燈明泰成、〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01、東北大学大学院工学研究科、電話: 022-795-6898、e-mail: tohmyoh@ism.mech.tohoku.ac.jp

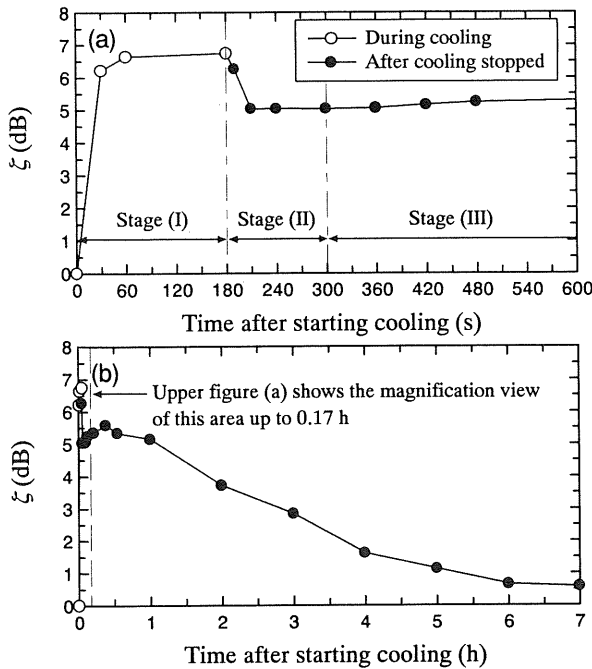


Fig.2 Relationship between  $\zeta$  and time after starting cooling. Upper (a) is the short time scale up to 600s, and below (b) is the long time scale up to 7h.

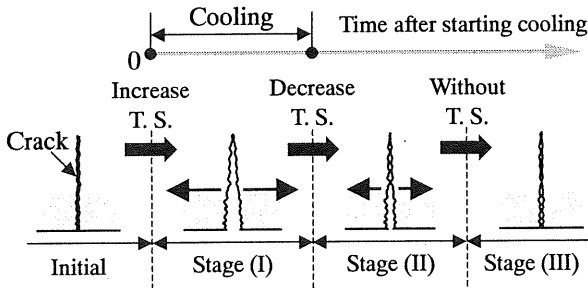


Fig.3 Schematic of change in the contact condition between crack surfaces with change in the thermal stress.

後方散乱波の際立った向上が認められない。超音波探傷後に破断試験を実施したところ、測定位置におけるき裂深さ  $a$  は 6.2mm であり、幾何学的モデルより、き裂面後方散乱波は超音波ビームの中心がき裂の中央に一致する際に最大値を示すことが確認された[3]。

熱応力が作用していない場合と比較したき裂面後方散乱波の向上は次式で dB 表示される。

$$\zeta = 20 \log (V_{P-P} / V_{P-P,0}) \quad (1)$$

ここで  $V_{P-P}$  はき裂面散乱波の受信振幅、 $V_{P-P,0}$  ( $= 1.15V$ ) は冷却前のそれである。Fig.2 に  $\zeta$  を冷却開始からの時間の関数として示す。図よりき裂面後方散乱波の向上が冷却中のみならず、冷却後の数時間に亘って持続されることわかる。また、その特徴は Fig. 3 に模式的に

示すように三領域に分けられよう。領域 (I) は冷却中であり、熱応力の増加に伴い後方散乱波が向上する。領域 (II) は冷却終了直後であり、熱応力の消失に伴い冷却中に一旦向上した後方散乱波が再び低下する。領域 (III) は冷却終了後、平板内の熱応力が消失しているにもかかわらず後方散乱波の向上が認められる領域である。片側にき裂のある帯板の一樣引張のき裂底部での開口変位は次式で与えられる[4]。

$$\delta = (4a\sigma / E') V \quad (2)$$

$$V = \{1.46 + 3.42 [1 - \cos(\pi\xi/2)]\} / [\cos^2(\pi\xi/2)] \quad (3)$$

ここに  $\sigma$  は応力、 $E' = E/(1-\nu^2)$ 、 $E$  ( $= 193\text{GPa}$ ) ヤング率、 $\nu$  ( $= 0.3$ ) ポアソン比、 $\xi = a/W$ 、 $W$  ( $= 15\text{mm}$ ) 板厚であり、三次元有限要素法解析で得た冷却中の平板裏面における発生熱応力の最大値  $13.9\text{MPa}$  を  $\sigma$  に代入すれば、 $\delta = 5.5\mu\text{m}$  と算定される。き裂面性状にも大いに依存するが、数  $\mu\text{m}$  程度のき裂開口変位が十分に音響的なき裂開口を与えることが実験結果より明らかである。領域 (III) でのき裂面散乱波の向上はき裂面の接触状態の変化を反映しており、微小突起からなるき裂破面の隙間が数  $\mu\text{m}$  から数  $\text{nm}$  に変化するのに長時間要することを示唆している。従って、この期間においては閉じたき裂が顕在化された状態にある。

## 4. 結言

熱応力開口法により閉じたき裂を一旦開かせ、熱応力の消失に伴うき裂面からの後方散乱波の変化をモニタリングした。一旦開口させた閉じたき裂はき裂面の部分接触状況の緩和に長時間を要し、この期間においては熱応力が消失した後も閉じたき裂が顕在化された状態にあることが明らかとなった。

## 参考文献

- [1] W. Elber, "The significance of fatigue crack closure," ASTM STP, Vol. 486, 1971, pp. 230-242.
- [2] M. Saka, H. Tohmyoh and Y. Kondo, "Techniques for NDE of closed cracks," Proceedings of 16th WCNDT, 2004, CD-ROM.
- [3] H. Tohmyoh, M. Saka and Y. Kondo, "Thermal opening technique for non-destructive evaluation of closed cracks", ASME J. Press. Vess. Tech., in press.
- [4] H. Tada, P.C. Paris and G.R. Irwin, "The stress analysis of cracks handbook," Del Research Corporation, 1973.