海水中における軟鋼の表面疲労き裂成長挙動*

鈴木揚之助**, 元 田 慎 一**

**東京商船大学

Surface Fatigue Crack Growth Behavior of Mild Steel
in Sea Water

Yohnosuke Suzuki** and Sinichi Motoda**

** Tokyo University of Mercantile Marine

The influence of natural sea water on surface fatigue crack growth behavior of mild steel was investigated at four different testing frequencies, namely 0.33, 0.25, 0.17 and 0.09 Hz in terms of the rate of crack growth and from the observation of the cross section and of the fractured surface of specimens. At 0.33 Hz the correlation between the stress intensity factor range and the rate of crack growth followed Paris's law at the growth rate between 4×10^{-7} and 1.5×10^{-6} mm/cycle in air and at the growth rate between 3×10^{-7} and 1×10^{-6} mm/cycle in sea water. The rate of crack growth in sea water was found to be 1.6 times faster at the maximum than that in air within these ranges of growth rate. When testing at lower frequencies the rate of crack growth in sea water was found to be nearly equal to that at 0.33 Hz at the early time of crack growth, but from a certain crack depth it slowed down with exposure time and finally stopped. This tendency for crack growth to decline in sea water increased with the decrease of frequencies. These phenomena can be explained by crack tip blunting by dissolution in sea water.

Key words: surface fatigue crack, frequencies, rate of crack growth, stress intensity factor range, tendency for crack growth to decline, crack tip blunting.

1. ま え が き

鋼材の海洋環境下における疲労き裂成長挙動についての研究は従来より数多くなされており、き裂成長速度に及ぼす環境の効果として、き裂先端での腐食溶解によるき裂成長の加速効果^{1)~7)}と、き裂先端の鈍化^{8), 9)~10)}、ならびにき裂内腐食生成物のくさび作用^{11), 12)~17)}による減速効果が報告されている。き裂の成長挙動は、これら加・減速効果が複雑に競合し合う結果に依存しており、このため、き裂成長におよぼす海洋環境の影響については、まだ不明の点が多い。

さらに、これらの研究は、従来から主としてCT試験片等で代表される貫通き裂を対象として行われることが多く、実際の構造物等で見られることの多い閉塞形の欠陥、たとえば、表面欠陥からの腐食疲労き裂の成長に関

するデータの報告例^{9), 18)~21)}は少ない。

本研究では、天然海水中、波浪の周期を含む低くり返し速度のもとで、軟鋼丸棒表面から進展する表面き裂について、特に疲労き裂成長の下限界近傍、すなわち低き裂成長速度領域で試験を行い、表面疲労き裂の成長速度への海洋環境の影響に関する基礎的な資料を得ることを目的とした。

2. 試験方法

2.1 試験片

使用鋼は、5mmφ市販軟鋼材で、その成分をTable 1に示す。この試料を長さ約200mmに切断し、02番サンドペーパーで表面仕上げを施したのち、放電加工によって、それぞれ深さ130μm, 90μm, 40μmの切欠きを軸方向に垂直に付与し、これを試験片とした。切欠きの形状は、幅70μmのU字形切欠きであり、切欠き先端の曲率半径は約35μmである。なお試験片の形状・

* 第33回腐食防食討論会(那覇市, 1986)で発表
** 〒135 東京都江東区越中島 2-1-6 (2-1-6, Etchujima, Koto-ku, Tokyo, 135 Japan)

Table 1 Chemical composition of materials, wt%.

C	Si	Mn	P	S	Cu
0.09	0.01	0.32	0.016	0.018	0.001

Table 2 Mechanical properties of steel.

0.2%Y.S. (MN・mm ²)	U.T.S. (MN・mm ²)	E. L. (%)
433	478	11

Fig. 1 Dimensions of specimens (dimensions are in mm).

寸法を Fig. 1 に、機械的性質を Table 2 に示す。

2.2 試験海水

伊豆大島沖で採取した清浄な天然海水を使用した。海水の塩素イオン濃度は 20,000 ppm, pH は 8.2, また比重は 1.025 である。

2.3 腐食疲労試験

用いた疲労試験機は、片持梁形式に試験片の一端を保持して、切欠き部に変動荷重によるくり返し曲げ応力を付与する手製試験機²²⁾である。試験片は、アクリル製の試験槽²³⁾内に試験片の接液部長さが約 55~60 mm となるように装着し、海水約 200 ml を注入したあと、切欠き部に所定のくり返し曲げ応力を付与する。曲げモーメントの腕の長さは 100 mm である。試験は、くり返し速度(*f*)が 0.33, 0.25, 0.17, 0.09 Hz, 公称曲げ応力として、1 サイクル内の最大応力 332 MN/m², 応力変動幅 226 MN/m², 応力比 0.32 で行った。試験は室温 (293~296 K) 下で行い、海水の交換は 6 日に一度の割合とした。

2.4 き裂成長速度の測定

あるくり返し数 (*N*) で疲労試験を中断して取り出した試片を室温下で曲げによって破断し、その破面を 200 倍程度の光学顕微鏡で観察し、Fig. 2 に示すように、放電加工により、あらかじめ導入した切欠き深さ (*A*) と、切欠き底から半楕円状に成長する疲労き裂長さ (*B*) の和として、き裂深さ (*l*), 及びき裂幅 (2*c*) をそれぞれ測定する。これらの測定値から、*l* と *N* の関係、また *l* とき裂幅の 1/2 の比 (*l/c*), すなわちアスペクト比と *N* の関係をそれぞれ求める。さらに、この *l* と *N* の関係を示す曲線、すなわちき裂成長曲線の接線勾配から求め

A NOTCH DEPTH
B CRACK LENGTH
l CRACK DEPTH
2c CRACK WIDTH

Fig. 2 Schematic illustration of surface cracked specimen.

たき裂成長速度 (*dl/dN*) と、その速度における *l*, *c*, 及びその時の負荷公称応力値を用いて求めた応力拡大係数範囲 (ΔK) との関係を求めた。計算式は、半無限固体の半楕円状表面き裂 (離心角 φ) に対する次式²⁴⁾で近似する。

$$K_I=1.12\sqrt{\pi l}\cdot\sigma/E(\kappa)$$

ここで、

$$E(\kappa)=\int_0^{\pi/2}\sqrt{1-k^2\sin^2\varphi}\cdot d\varphi,\quad k^2=1-(l/c)^2$$

σ : 公称曲げ応力

2.5 破面の観察

所定のくり返し数で疲労試験を中断して取り出した試験片を、室温下で曲げによって破断したのち、破面をそのまま乾燥して走査型電子顕微鏡で観察した。また一部の試験片については、き裂の縦断面を光学顕微鏡により観察を行った。

3. 試験結果及び考察

切欠き深さ 130 μm における空気中でのき裂成長曲線を Fig. 3 に示す。き裂は切欠き底から発生し、くり返し数の増加と共にゆるやかに成長し続けるが、切欠きの深さを 90 μm と浅くすると、くり返し数約 900 Kc 後も、切欠き底からのき裂の発生・成長は観察されなかった。一方、天然海水中自然浸漬下では、Fig. 4 に示す

Fig. 3 Fatigue crack depth vs. number of fatigue cycles in air at 0.33 Hz.

Fig. 4 Fatigue crack depth vs. number of fatigue cycles in sea water for three notch depths at 0.33 Hz.

Fig. 5 Fatigue crack aspect ratio vs. fatigue crack depth at 0.33 Hz, notch depth: 130 μm .

ように、くり返し速度が 0.33 Hz の場合には、空気中の場合と同様に、くり返し数の増加と共にき裂は成長し、切欠き深さ 130 μm の場合、空気中のそれに比べ急激な成長が認められる。さらに、空気中ではき裂の発生・成長が観察されなかった深さ 90 μm , 40 μm の場合にも、くり返し数の増加と共にき裂成長が見られる。Fig. 5 は、空気中及び天然海水中で、切欠き深さ 130 μm の場合のき裂のアスペクト比と、その時のき裂深さの関係を示したものである。アスペクト比は、空気中、海水中共に、従来の報告例同様に、き裂深さの増大と共に半円形に近づくように変化する^{20), 25)~27)}が²⁾、空気中に比べ、天然海水中では偏平化傾向を示す。Fig. 6 は、空気中、海水中における dl/dN と ΔK の関係を示したものである。本図から明らかなように、空気中では、 $4 \times 10^{-7} < dl/dN < 1.5 \times 10^{-6} \text{ mm/cycle}$ 、海水中では、 $3 \times 10^{-7} < dl/dN < 1 \times 10^{-6} \text{ mm/cycle}$ の範囲内で dl/dN と ΔK の間に、他の表面き裂についての報告例^{21), 25), 28)}と同じく、いずれの場合にも、Paris 則が成立する。こ

Fig. 6 Fatigue crack growth rate vs. stress intensity factor range at 0.33 Hz.

Fig. 7 Fatigue crack depth vs. number of fatigue cycles in sea water for three notch depths at 0.17 Hz.

の範囲内でのき裂成長速度を比較すると、海水中では、空気中のそれに比べ、最高 1.6 倍程度加速している。一般に、き裂成長速度に及ぼす海洋環境の加・減速効果は、種々の力学的因子、なかんずく荷重くり返し速度に大きく影響され、例えば、従来の貫通形き裂の場合で、くり返し速度 1~0.2 Hz 程度の範囲では、空気中に比べて数倍以上の加速が報告されている^{1), 2), 4), 6), 7), 9), 10)}。これらの例に比較して、本実験で得られた天然海水によるき裂成長速度の加速率は、比較的小さいと考えられる。

Fig. 7 は、Fig. 4 の場合と同じく、天然海水中自然浸漬下で、くり返し速度のみを半分の 0.17 Hz に低下させた場合の結果を示したものである。切欠き深さ 130 μm , 90 μm , 40 μm いずれの場合も、初期のき裂成長は 0.33 Hz の場合とほぼ等しいが、いずれの切欠き深さに

Fig. 8 Fatigue crack depth vs. number of fatigue cycles in sea water for three frequencies.

対しても、き裂深さがほぼ $160 \mu\text{m}$ 位から、き裂成長が抑制され始め、長時間後には停止する。この時のき裂の形状は、Fig. 5 に示したくり返し速度 0.33 Hz の場合同様に、き裂深さの増大と共に半円形に近づくように変化するが、 0.33 Hz の時に比べて、より扁平化している。

Fig. 8 は、切欠き深さ $130 \mu\text{m}$, $90 \mu\text{m}$, 及び $40 \mu\text{m}$ の場合について、くり返し速度を 0.17 Hz の前後、 0.25 Hz 及び 0.09 Hz と変えた場合のそれぞれのき裂成長曲線を示したものである。Fig. 7 で示したくり返し速度 0.17 Hz の場合と同様に、 0.33 Hz 時と同一の初期き裂成長の後、切欠き深さ、くり返し速度の違いに無関係に、き裂深さ約 $160 \mu\text{m}$ からき裂成長の抑制が始まり、長時間後には同じく成長を停止する。き裂成長の抑制の度合いは、くり返し速度が小さい場合ほど大きく、したがって成長停止時のき裂深さは、くり返し速度の小さい場合ほど小さくなる。また、この時のき裂の形状も、Fig. 5 と同様の変化を示すが、くり返し速度が小さくなる程扁平化傾向は著しい。

従来報告されている 0.1 Hz 前後の低くり返し速度下での貫通き裂、及び表面き裂についてのき裂成長挙動を見ると、 0.25 Hz , 0.17 Hz , 及び 0.09 Hz でき裂成長の抑制・停止が認められる本実験結果と異なり、いずれも空気中のそれに比べ加速されるとするものが多い。例えば、貫通き裂の場合、3% 食塩水中の軟鋼で空気中のき裂成長速度の 2~3 倍の加速⁽²⁵⁾、人工海水中の BS 4360, 50 D 鋼で数倍から 10 倍程度の加速^{(4), (26)}、同じく 50 D 鋼の天然海水中で数倍の加速^{(9), (18), (20), (30)}が報告されている。表面き裂の場合の例は少ないが、天然海水中 50 D 鋼の場合、貫通形のき裂と同じく数倍の加速を示したといわれる⁽²⁰⁾。さらにくり返し速度を下げて、 $0.04 \sim 0.01 \text{ Hz}$ の場合でも、貫通き裂で、人工海水中の X-70 パイプライン鋼が、また 3.5% 食塩水中の X-65 パイプライン鋼がそれぞれ空気中に比べ、加速することが報告されている^{(31), (32)}。

一方、き裂成長の抑制ないしは停止現象についても従来から報告例はあり、その原因についても、腐食溶解によるき裂先端の鈍化、き裂の分岐、またはき裂内腐食生成物によるくさび作用等が考えられている。このうち、き裂の分岐については、Fig. 9 に成長を続けるき裂 (a) と成長を停止したき裂 (b) の縦断面顕微鏡観察結果を示したが、いずれの場合もき裂の分岐は観察されず、このことが今回のき裂成長抑制・停止の原因とは考え難い。

次に、き裂成長の抑制を腐食生成物によるくさび作用に帰する考え方は従来からも多く、低い応力比のもとでは、特にこの作用が大きしいといわれている^{(15)~(17)}。また、同一応力比のもとでは、このくさび作用は、くり返し速度が比較的大きい場合の方が、小さい場合に比較して、より効果的に働くことが知られており^{(11), (12), (13), (14), (16)}、その理由として、くり返し速度の増大に伴い、き裂の開閉口による溶液のポンピング作用が活発となり、このためき裂内への酸素の供給を高め、き裂内腐食生成物量が増大するためとするもの⁽¹¹⁾、あるいは、逆にくり返し速度

Fig. 9 Metallographic section of growing and stopped cracks in sea water. (a) Growing crack, (b) Stopped crack.

Cantilever Bending

$$\sigma_{\max}: 332 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$\sigma_{\min}: 106 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-2}$$

Fig. 10 Appearance of fatigue fracture surface in specimen.

が低下した場合、1サイクル当たりのき裂壁面の腐食溶解量が増加する結果、き裂の拡幅化が起こり、相対的にくさび作用の効果を減ずると考えられている^{13,14)}。これらの考え方からすれば、くり返し速度の低下と共にき裂成長の抑制が増大するという本実験結果、及び Fig. 9 に示したように、成長を続けるき裂に比べ、成長を停止

したき裂がより拡幅化しているという観察結果、さらに、Fig. 10 に示したき裂先端近傍のき裂壁面の観察結果では、空气中におけるき裂壁面 (a) に比べ、海水中でいき裂壁面 (b~d) は、いずれも壁面上に腐食生成物の固着が認められるものの、成長を続けるき裂の壁面 (b) と完全に成長を停止したき裂の壁面 (c, d) 上での腐食生成物固着量に差異は認められないことから、今回のき裂成長の抑制・停止の原因をくさび作用から説明するのは困難と思われる。

き裂先端の鈍化をき裂成長の抑制ないしは停止に帰する従来の報告では、例えば、食塩水環境下で、低 ΔK 、及び低き裂成長速度域において、くり返し速度が小さい場合にき裂成長の停止が認められる⁹⁾ こと、一定 ΔK のもとで、くり返し速度の低下と共にき裂成長の抑制の割合が増加すること⁹⁾、さらには、人工海水の飛沫帯をシミュレートした環境下で認められるき裂成長の抑制・停止の原因を、き裂内への充分な量の酸素の供給がき裂壁面の腐食溶解速度を増大させたためとする報告¹⁰⁾、あるいは、表面き裂について、天然海水の乾湿くり返し環境下で認められるき裂成長の抑制・停止の原因を乾燥サイクルの過程で起こるき裂内溶液の塩分濃縮によるき裂内の腐食溶解速度の増大によるとする報告⁹⁾ 等、いずれもき裂の成長速度とき裂壁面の腐食溶解速度が相対的に同じ程度の大きさにまで近づき、このため鋭いき裂を維持できなくなることが鈍化の原因³⁵⁾と考えているようである。このため、き裂成長の抑制・停止が起こるための限界のくり返し速度²⁾、³²⁾、ないしは、き裂成長速度⁸⁾が存在するとしており、これらの考え方は今回の実験結果をも良く説明し得る。

き裂内の腐食溶解作用は、き裂内の溶液の状態によって異なるが、特にき裂先端では酸素濃度が沖合溶液中のそれに比べ著しく低下するといわれており^{33),34)}、さらに、この傾向はくり返し速度の低い場合に著しいこと、き裂先端酸素濃度が最小値を示すき裂深さが存在することなどが推定されている³⁴⁾。今回の実験から明らかとなった低くり返し速度下でのき裂成長の抑制現象が、いずれもほぼ一定のき裂深さ (約 $160 \mu\text{m}$) を境にして始まることも、き裂深さとその時のき裂先端における溶液状態の変化に関係しているとも考えられるが、詳細については明らかではない。

4. ま と め

天然海水中、波浪の周期を含む低くり返し速度のもとで、軟鋼材表面から成長する表面き裂の成長挙動に及ぼす海洋環境の影響について調べた。

くり返し速度 0.33 Hz における疲労試験では、空气中、海水中的任意の場合も、き裂成長速度と応力拡大係

数範囲の間に Paris 則が成立し、この速度範囲内では、空気中に比べ海水中き裂成長速度は最高 1.6 倍程度の加速が認められた。

くり返し速度を 0.33 Hz から 0.25, 0.17, 0.09 Hz と低下させると、0.33 Hz 時と同一の初期き裂成長の後、あるき裂深さから成長の抑制が始まり、長時間後には成長を停止する。また、この成長抑制傾向は、くり返し速度の低下と共に増大する。この原因は、本実験結果のみからは必ずしも明らかではないが、くり返し速度が低下することにより、き裂成長速度に対し、き裂壁の溶解速度が支配的となる結果、腐食溶解によるき裂先端の鈍化が起こるためと推定される。

(Received February 18, 1988)

文 献

- 1) K. Endo, K. Komai & Y. Suzuki: Bull. of the JSME, **18**, 9 (1975).
- 2) J.D. Atkinson & T.C. Lindley: The Influence of Environment on Fatigue, IME, London, May, 65 (1977).
- 3) 田中正清: 日本機械学会関西支部第 55 期定期総会講演論文集, 55 (1980).
- 4) G. S. Booth, J. G. Wyld & T. Iwasaki: Fatigue **84**, 3, 1541 (1984).
- 5) 松岡三郎, 西島 敏, 下平益夫, 升田博之, 竹内悦男: 鉄と鋼, **72**, 55 (1986).
- 6) 升田博之, 松岡三郎, 西島 敏, 下平益夫: 防食技術, **35**, 27 (1986).
- 7) Z. S. Tong, B. X. Feng, M. Q. Li & Y. Shi: Corrosion, **42**, 669 (1986).
- 8) J. C. Randon, C. M. Branco & L. E. Culver: Int. Journ. of Fracture, **12**, 467 (1976).
- 9) R. Johnson, I. Bretherton, B. Tomkins, P.M. Scott & D.R. V. Silvester: Proc. of Offshore Steels Conf., Welding Institute, England, Nov., VI/P 15-1 (1978).
- 10) P. Bristoll & J. A. Roeleveld: Proc. of Offshore Steels Conf., Welding Institute, England, Nov., VI/P 18-1 (1978).
- 11) R. van der Velden, H. L. Ewalds, W. A. Schultze & A. Punter: Corrosion Fatigue ed. T. W. Crooker & B. N. Leis, p. 64, ASTM-STP 801 (1983).
- 12) S. J. Gill, K. M. Htun, M. I. Jolles & T. W. Crooker: Embrittlement by the Localized Crack Environ., p. 471, AIME (1984).
- 13) 駒井謙治郎, 敷田卓祐, 遠藤吉郎: 日本機械学会論文集 (A編), **50**, 1453 (1984).
- 14) 駒井謙治郎, 箕島 弘二, 山本 和利: 材料, **33**, 1407 (1984).
- 15) 駒井謙治郎, 長野 整: 日本機械学会論文集 (A編), **52**, 876 (1986).
- 16) 駒井謙治郎, 野口昌利: 日本機械学会論文集 (A編), **52**, 1770 (1986).
- 17) 板垣 浩, 石塚鐵夫, 中村 靖: 日本造船学会論文集, **60**, 529 (1986).
- 18) T. W. Thorpe, P. M. Scott, A. Rance & D. Silvester: Int. J. Fatigue, **15**, 123 (1983).
- 19) 高野太刀雄, 浅川 武, 岡村弘之: 圧力技術, **21**, 305 (1983).
- 20) P. M. Scott: Corrosion Fatigue ed. R. N. Parkins & Ya. M. Kolotyrkin, p. 89, The Metals Society (1983).
- 21) R. P. Gangloff: Metal. Trans. A, **16A**, 953 (1985).
- 22) 辻川茂男, 久松敬弘: 防食技術, **24**, 9 (1975).
- 23) 鈴木揚之助, 辻川茂男, 久松敬弘: 防食技術, **28**, 623 (1979).
- 24) A. E. Green: Proc. Cambridge Phil. Soc., **46**, 159 (1950).
- 25) 今井康文, 真武友一: 材料, **32**, 1157 (1983).
- 26) 鷲田朗秀, 土田栄一郎, 小林英男: 日本機械学会論文集 (A編), **51**, 2715 (1985).
- 27) W. S. Pierce & J. L. Shannon, Jr.: J. of Testing & Evaluation, **6**, 183 (1978).
- 28) 永井欣一, 岩田光正, 矢島 浩, 山本 豊, 藤本由紀夫: 日本造船学会論文集, **140**, 241 (1976).
- 29) E. Bardall, J. M. Sodenfor & P. O. Gartland: Proc. of Offshore Steels Conf., Welding Institute, England, Nov., VI/P 16-1 (1978).
- 30) P. M. Scott, T. W. Thorpe & D. R. V. Silvester: Corr. Sci., **23**, 559 (1983).
- 31) O. Vosicovsky: Can. Metall. Q., **19**, 87 (1980).
- 32) F. P. Ford & P. W. Emigh: Pap. Int. Corros. Forum, 84-173 (1984).
- 33) G. Gabetta: Fatigue of Eng. Mat. & Struct., **5**, 215 (1982).
- 34) A. Turnball & R. C. Newman: Proc. Conf. Small Fatigue Cracks, 269 (1986).
- 35) F. P. Ford & S. J. Hudak, Jr.: Proc. Conf. Small Fatigue Cracks, 289 (1986).