

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2023

課題番号：18K04594

研究課題名（和文）船体構造における腐食疲労き裂進展下限速度の解明

研究課題名（英文）Study on Minimum Corrosion Fatigue Crack Growth Rate of Ship Structures

研究代表者

林原 仁志（Hayashibara, Hitoshi）

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・海上技術安全研究所・主任研究員

研究者番号：20511588

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：予き裂を設けた腐食疲労試験及びき裂模擬スリット付試験片の無負荷腐食試験により腐食環境中におけるき裂進展挙動を検討し、試験期間短縮のため促進環境（希硫酸）での試験を実施した。無負荷腐食試験において、深い初期スリット先端の溶解速度が低下し、全面腐食との競合でスリット寸法が減少することを見いだした。全面腐食及び深いき裂先端の溶解速度低下を考慮可能なき裂進展解析プログラムを開発し、別途CCT試験片から得た進展速度により試験のき裂成長及び形状変化を再現できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

船体構造の長期的寿命を評価する上で、構造材の腐食疲労挙動をより高精度に把握することが重要である。本研究において、き裂寸法に対する溶解挙動の変化の評価が重要であると示唆する結果が得られると共に、実験結果から全面腐食との競合下にある腐食疲労表面き裂の進展挙動を評価でき、腐食疲労挙動の高精度化に資する知見が得られた。

研究成果の概要（英文）：Corrosion Fatigue test with pre-cracked specimens and Immersion test with coupon specimens having semi-elliptical slit were conducted. Accelerating corrosion environment (diluted sulfuric acid) was employed to reduce total testing time. It was observed that deep slit size were shortened due to decrease of dissolution rate at slit tip and competitive phenomenon between general corrosion during the immersion test. Crack growth analysis was also conducted by the developed analytical software that can treat general corrosion and dissolution rate decrease at deep crack tip. Crack growth behavior in the corrosion fatigue test was successfully reproduced in the analysis.

研究分野：腐食防食、材料力学

キーワード：腐食疲労 き裂進展 船体構造 応力腐食

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

船体構造の長期的寿命を評価する上で、構造材の腐食疲労挙動をより高精度に把握することが重要である。腐食疲労き裂の進展速度が応力拡大係数 (K 値) 範囲 ΔK に依存する大速度領域と比較して、低 ΔK 領域における一定速度に近いき裂進展挙動は、実験上の制約から、定量的な面では正確に評価されてこなかった。一方で、実船の荷重履歴を考えると、後者の低 ΔK 領域における下限界進展速度の値が、船体構造の腐食疲労寿命を解析する上で重要となる。更に、腐食疲労による表面き裂進展の長期的評価には、全面腐食との競合現象を検討する必要がある。

2. 研究の目的

本研究においては、実験により、低 ΔK 範囲領域における腐食疲労進展挙動及び全面腐食との競合現象を定量的に明らかにし、船体の腐食疲労寿命評価の高精度化を図ることを目的とする。

3. 研究の方法

実船の荷重を想定した海水中での腐食疲労試験は相当の長期間を要することが予想されたため、促進環境 (pH3 希硫酸、25°C) 中で各試験を先行して実施した。本環境は石炭を積載する貨物倉で生じ得る環境であると共に、先行研究⁽¹⁾によれば、海水環境と比較して全面腐食速度が大きくなる一方で腐食疲労進展速度は変わらないことから、負荷周波数を高くした状態で全面腐食との競合現象を検討できると考えた。

供試材は船体構造用圧延鋼材 (日本海事協会鋼船規則 KA32 鋼 板厚 10mm) とし、(1)き裂進展速度線図取得試験、(2)浸漬試験、(3)腐食疲労表面き裂成長試験を実施し、き裂進展解析と併せて腐食疲労挙動を検討した。

促進環境での結果を基に海水環境における腐食疲労挙動を評価するため試験を検討したが、事業期間内に整理された結果を得るに至らなかった。

4. 研究成果

(1)き裂進展速度線図取得試験

き裂進展速度線図取得試験では CCT 試験片により、貫通き裂の da/dN を希硫酸中及び空气中で取得した。き裂長さは直流電位差 (EPD) 法により計測し、希硫酸中試験では、全面腐食による試験片断面積減少が EPD に影響するためこれを補正した。概ね $\Delta K > 7 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ では荷重比 R 一定の ΔK 漸増試験、 $\Delta K < 8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ では最大荷重一定の ΔK 漸減試験を採用した。後者は期間内に試験を完了しておらず K 漸増試験結果のみ図 1 に示す。促進環境中のき裂進展速度は空气中より大きくなり、また負荷周波数 1Hz と 0.588Hz の da/dN に差は無かった。

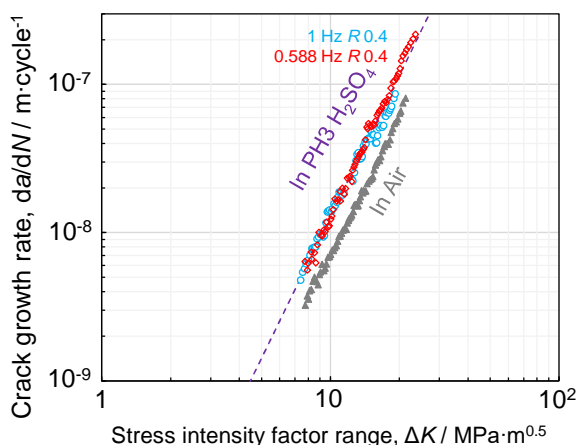


図1 KA32 鋼のき裂進展速度線図

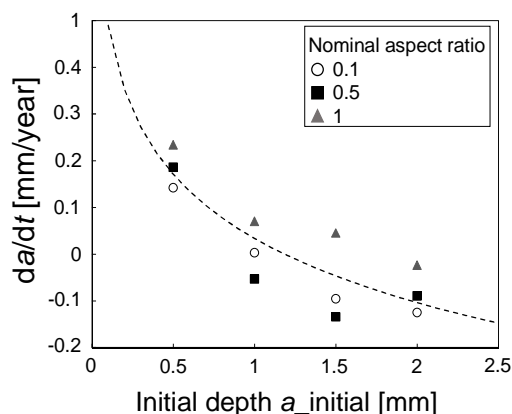


図2 浸漬試験におけるスリット底部の da/dt

(2)浸漬試験

放電加工による深さ a の模擬き裂と見做す半楕円スリットを KA32 鋼製試験片に付与し、希硫酸環境中に 90 日間浸漬した。浸漬前後のスリット寸法 (表面からの深さ) をレーザ変位計で計測し、試験片の厚さ変化から全面腐食深さを評価することで、スリット先端の平均的な溶解速度 da/dt (図 2) を得た。 da/dt はスリットの初期アスペクト比 a/c によらずスリット深さが大きくなると減少した。本 da/dt は全面腐食の影響を補正したものであり、値は現象的には 0 以上となる。図において $da/dt < 0$ と評価されているのは全面腐食による試験片厚さの変化の位置毎の変動があるためであり、概ね $a > 1 \text{ mm}$ ではスリット先端の溶解は進行していないと考えられる。pH3 における鉄の腐食は溶存酸素を消費する反応⁽²⁾と考えられ、かつ溶出した Fe の加水分解に

よっても pH がより大きく低下することは無いと考えられることから、深いスリット底部への物質移動が制限された結果、 da/dt が小さくなったと考える。

(3) 腐食疲労表面き裂成長試験及びき裂進展解析

引張試験片(図3)の中央に半楕円スリットを放電加工し、空气中で負荷することで疲労予き裂を導入した。表面き裂伝播に関する文献⁽³⁾を参考とし、この予き裂の寸法は表面長さ $2c = 3.34\text{mm}$ まで成長させたとき、深さ $a = 1.5\text{mm}$ と想定される。その後促進環境環境中において所定の公称応力範囲 $\Delta\sigma$ でそれぞれ腐食疲労き裂成長試験を実施した。波浪荷重による船体構造の代表的負荷周波数が 0.105Hz と評価される⁽⁴⁾こと、本促進環境中の全面腐食速度が海水中の 5.6 倍となることから、き裂進展と全面腐食の競合関係を、海水中腐食疲労を基準にバランスさせるため、負荷周波数を 0.588Hz とした。本試験中に、静置浸漬条件と比較して全面腐食速度の増大が確認されたことから後半に実施した試験は負荷周波数を 1Hz に引き上げた。各試験は、試験片が破断するかそれぞれ設定した試験期間に達した時に終了させた。

き裂進展解析は、腐食疲労表面き裂成長試験を想定した単軸引張条件とし、Paris 則に基づいて、表面及び深さ方向へのき裂伝播を評価する。同時進行する全面腐食による、き裂深さ減少と断面積減少も考慮した計算とした。表面のき裂進展速度 dc/dN は、項目(1)の促進環境中で得られた線図 da/dN_{pH3} を適用する。深さ方向の da/dN は、同じく da/dN_{pH3} を適用する場合と 項目(1)の空气中での線図 da/dN_{air} を適用する場合の二通りを検討した。は項目(2)で $a > 1\text{mm}$ で腐食溶解の進行が見られず、本項目のき裂成長試験の初期き裂深さ 1.5mm では腐食環境によるき裂成長の加速効果が無いことを仮定して設定した条件である。腐食疲労き裂成長試験の各試験条件の最終き裂形状及びき裂進展解析中の形状変化(図4)から、解析条件 よりも条件 が試験結果をよりよく表現できている。負荷サイクルと最終き裂深さの関係においても条件の方がより試験結果に近い値を与えていた。

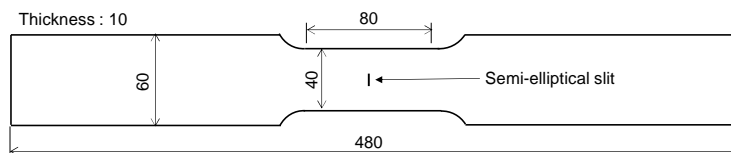
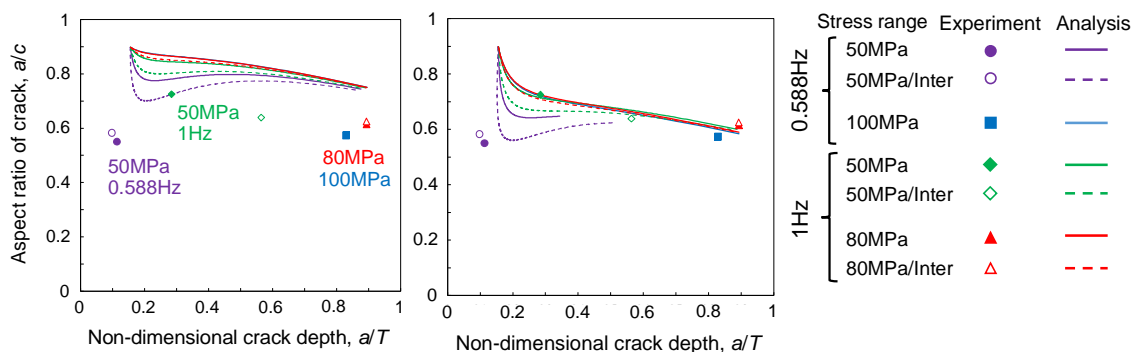


図3 腐食疲労表面き裂成長試験 試験片



(条件) (条件)

図4 腐食疲労表面き裂成長試験の最終き裂形状及びき裂進展解析のき裂形状変化

(注) “Inter”は負荷と無負荷を一定時間毎に繰り返す条件での試験を指す。

研究成果を総合すると、適用した促進環境における表面き裂の深さ方向の腐食疲労成長は、貫通き裂の試験で得られる値より小さく、空气中の値により近いと考えられる。これは浸漬試験で確認されたように、(模擬)き裂先端の溶解速度がき裂深さに影響されるためであると考察される。腐食疲労表面き裂成長挙動を検討する上で、項目(2)浸漬試験の様な評価方法が有効であることが示唆される。ただし海水中においてはスリット(模擬き裂)先端では pH が中性から低下すると予想されることから、図2の傾向はそのまま当てはまらず別個に評価が必要となる。

参考文献

- (1) 小林ら, 日本造船学会論文集, 185 (1999), 221-232 .
- (2) Hine *et al.*, DENKI KAGAKU, 38 (1970), 893-899 .
- (3) 川原及び栗原, 日本造船学会論文集, 137 (1975), 297-306 .
- (4) Yamamoto *et al.*, Proc. OMAE 2018, No. 78188 .

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hayashibara Hitoshi, Fueki Ryutaro, Yamamoto Norio, Sugimoto Tomohiro, Ando Takahiro, Tsumura Shuichi, Anai Yosuke, Murakami Chikahisa, Niwa Toshio, Iwata Toshiaki, Ishibashi Kinya	4. 巻 -
2. 論文標題 Surface Corrosion Fatigue Crack Growth Test in Accelerating Environment Where General Surface Corrosion Proceed in Parallel	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of 42nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1115/OMAE2023-101139	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Hayashibara Hitoshi, Fueki Ryutaro, Yamamoto Norio, Sugimoto Tomohiro, Ando Takahiro, Tsumura Shuichi, Anai Yosuke, Murakami Chikahisa, Niwa Toshio, Iwata Toshiaki, Ishibashi Kinya
2. 発表標題 Surface Corrosion Fatigue Crack Growth Test in Accelerating Environment Where General Surface Corrosion Proceed in Parallel
3. 学会等名 42nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 林原仁志
2. 発表標題 全面腐食進行下での腐食疲労表面き裂進展の評価試験
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会 材料溶接研究会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	笛木 隆太郎 (Fueki Ryutaro)	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所	
研究協力者	安藤 孝弘 (Ando Takahiro)	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所	
研究協力者	津村 秀一 (Tsumura Shuichi)	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所	
研究協力者	穴井 陽祐 (Anai Yosuke)	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所	
研究協力者	村上 睦尚 (Murakami Chikahisa)	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所	
研究協力者	丹羽 敏男 (Niwa Toshio)	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所	
研究協力者	岩田 知明 (Iwata Toshiaki)	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所	
研究協力者	山本 規雄 (Yamamoto Norio)	一般財団法人日本海事協会	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	杉本 友宏 (Sugimoto Tomohiro)	一般財団法人日本海事協会	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関