

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 30 日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2012

課題番号：23760429

研究課題名（和文） 反応表面近傍の流動特性に注目した分極曲線モデリングと腐食予測

研究課題名（英文） Corrosion Prediction through Modeling of Polarization Curve Based on Flow Properties in the Vicinity of Reaction Surface

研究代表者

須賀 一博 (SUGA KAZUHIRO)

東京理科大学・理工学部・助教

研究者番号：30408992

研究成果の概要（和文）：実験室環境の簡便な電気化学測定と数値解析技術を組合せて、複雑な流れ場の腐食を予測する手法を提案した。まず、腐食反応特性を表す分極曲線を金属表面の壁せん断応力の関数としてモデル化した。次に、CFD 解析で対象構造物の壁せん断応力で推定する。推定された壁せん断応力と分極曲線モデルを用いて構造物各部の反応特性を決定する。最後に、電場解析を行い、腐食速度および位置を予測するシステムを開発した。複雑流れ場での腐食予測結果を実験結果と比較し有効性を検討した。

研究成果の概要（英文）：This study proposed a prediction method of corrosion in complex flow fields using numerical simulations and simple electrochemical measurements in laboratory. First, the polarization curves, which give the properties of corrosion reaction, were modeled as a function of the wall shear stress on metal surface. Next, a prediction system of corrosion speed and location was developed using electrostatic simulation and the modeled polarization curves from numerically estimated wall shear stress of a target structure. The comparison between a prediction and an experimental result was carried out under a complex flow field in order to discuss the effectiveness of the developed system.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：腐食予測, 流れ加速腐食, 分極曲線, 数値シミュレーション, 電気化学測定

1. 研究開始当初の背景

腐食による事故は人的かつ経済的に甚大な被害をもたらす。また、腐食対策コストは年間約 3.9～5.2 兆円(GDP の約 1%)に上ると試算されている。安全性と経済性の両観点か

ら正確な腐食予測手法の開発が望まれている。さらに、水、エネルギー需要拡大に伴い、取水ポンプ、発電所の熱交換器、埋設パイプライン等の流れ場における腐食予測技術の向上に対する要求が高まっている。

流れ場の腐食予測は、経験式を用いる方法と数値シミュレーションを用いる方法の2つに大別できる。経験式による方法は簡便であるが、適用範囲が限定的である。数値シミュレーションによる方法は、適用範囲が広く、適切な腐食反応のモデル化により予測精度を向上できる可能性がある。

分極曲線を用いる方法は、実環境下での様々な要因(pH, 温度, 金属の表面状態など)を電流と電位の関数だけでモデル化できるという点で有用である。しかし、実環境下で測定しなければならない点が問題である。稼働中のプラントや取水口, 埋設パイプライン等で分極曲線を測定するのは困難である。

分極曲線を直接測定できない実環境複雑流れ場での腐食予測手法を開発することは、構造物の健全性維持, 腐食対策コストの低減に大きく貢献することが期待できる。

2. 研究の目的

本研究では、腐食反応が発生する金属表面近傍の流動特性に基づいた腐食予測手法を提案することを目的とする。まず、流動特性と分極曲線の関係をモデル化する。次に、予測対象となる構造物の流動特性をCFDシミュレーションにより予測する。予測した流動特性を基に、構造物各部位の分極曲線を決定する。決定した分極曲線を用いて電場解析を行い、電位・電流密度分布を決定する。得られた電位・電流密度分布から、腐食位置, 腐食速度を予測する。これにより、分極曲線を直接測定できない実環境複雑流れ場での、汎用的かつ高精度な腐食予測手法を開発する。

3. 研究の方法

(1) 分極曲線の測定

金属表面近傍の流動特性を変化させて、分極曲線の測定を行う。そのために、金属表面の流動特性を制御しながら、電気化学測定が可能な流路を開発する。開発した流路を用いて、様々な流動特性下で分極曲線を測定する。

(2) 流動特性評価手法の開発

金属表面極近傍の局所的流動特性を直接評価することは困難であること、腐食予測をする構造物の流動特性をCFD解析により予測すること、以上2つ理由から金属表面の流動特性は、CFDシミュレーションにより推定する。オープンソースコードOpenFOAMを用いて、Navier-Stokes方程式と連続の式を解く事で、流れ場を決定する。決定された速度場から、流動特性を算出する。

(3) 分極曲線のモデル化

測定された分極曲線を流動特性の関数としてモデル化する。

(4) 腐食予測システムの開発

(1)から(3)の成果を統合し、流動特性に基づく複雑流れ場の腐食予測手法を開発する。開発した手法を用いた腐食予測結果を実験結果と比較し、有効性を検証する。

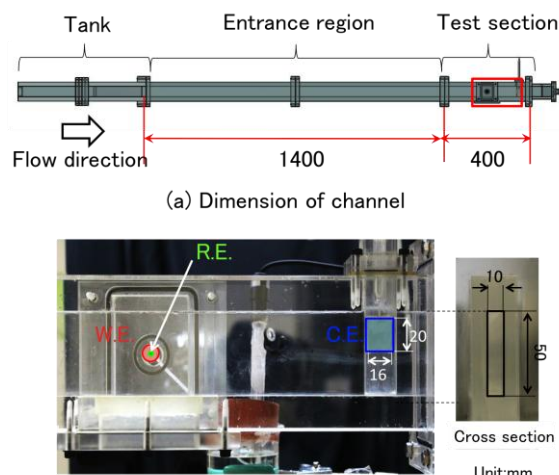
4. 研究成果

(1) 流れ場における電気化学測定装置の開発

矩形流路内の壁面に試験片金属を埋込み分極曲線の測定と表面変化の観察が同時に実施できる実験装置を提案した。回転円盤電極を用いた従来法では困難な同時観察を実現した。また、流路内部に遮蔽物を設置することで、オリフィス下流部などの複雑な流れ場を模擬できるようにした。

開発した装置の概形をFig.1(a)に、赤で囲まれた試験部の写真と電極配置を(b)に示す。試験片表面の流れ場が、参照電極(R.E.)により乱されないようにするため、参照電極は、試験片(W.E.)の中心に裏面から挿入した。対極(C.E)は試験片下流部の流路壁面に埋込んで設置した。

開発した装置を用いて、種々の流動特性下で、炭素鋼 S45C の分極曲線を測定した。参照電極には飽和カロメル電極, 対極には Pt 電極を使用した。電解質溶液は、3 wt.% NaCl 溶液を用いて海水環境を模擬した。



(b) Test section
Fig.1 Apparatus

(2) 金属表面の壁せん断応力を変数とした分極曲線のモデル化

分極曲線は、Fig.2に示すように金属表面の電位と電流密度の関係を与える曲線である。電流密度は、腐食反応速度を表している。

流動特性の関数としてモデル化するために、分極曲線を自然電位 ϕ_{self} , アノード分極抵抗 $R_{p,A}$ およびカソード分極抵抗 $R_{p,C}$ の3つ変数を用いて表現した。

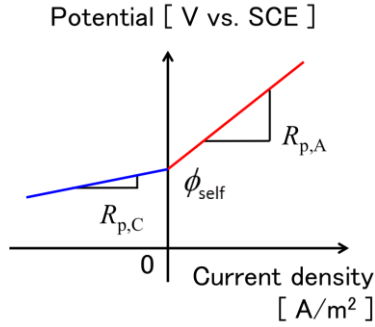


Fig. 2 Polarization curve

流動特性として、壁せん断応力に着目した。3変数と壁せん断応力の関係を Fig.3 から Fig.5 に示す。点が測定値を示す。測定値を最小二乗法により回帰した曲線を実線で示す。

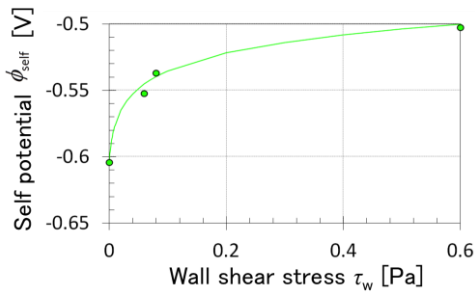


Fig. 3 Self potential vs. wall shear stress

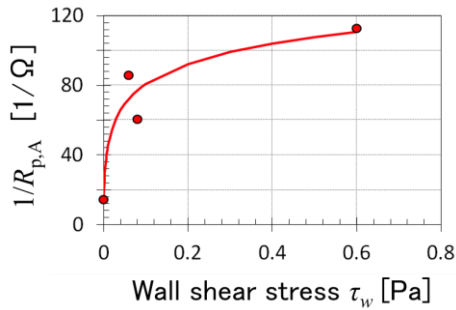


Fig. 3 $R_{p,A}$ vs. wall shear stress (Anode)

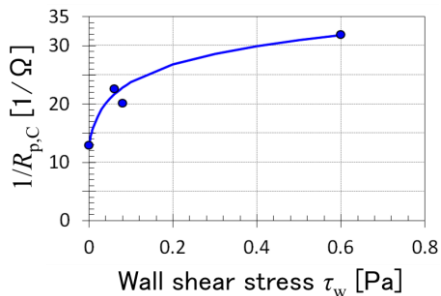


Fig. 5 $R_{p,C}$ vs. wall shear stress (Cathode)
 ϕ_{self} , $R_{p,A}$, $R_{p,C}$ と壁せん断応力 τ_w の関係を多項式で表すと Eq.(1)から(3)となる。

$$\phi_{self} = 0.02 \times \ln(\tau_w + 0.004) - 0.5 \quad (1)$$

$$R_{p,A} = 1/\{16.9 \times \ln(\tau_w + 0.002) + 119.3\} \quad (2)$$

$$R_{p,C} = 1/\{4.7 \times \ln(\tau_w + 0.011) + 34.1\} \quad (3)$$

(3) 壁せん断応力に基づく複雑流れ場の腐食予測

金属表面の局所的な壁せん断応力に着目して、腐食予測を行った。予測結果を暴露試験の結果と比較し、予測手法の有効性を検討した。

Fig. 6 に示すように、矩形流路内の壁面に 30mm×30mm の試験片 (S45C) が埋め込まれている。試験片表面で壁せん断応力を分布させるために、試験片の上流に高さ 20mm、長さ 10mm の遮蔽物を配置した。この条件で、試験片の腐食予測を行った。

まず、試験片表面の局所壁せん断応力を CFD 解析により推定した。推定されたせん断応力の分布を Fig. 7 に示す。推定した壁せん断応力とモデル化した分極曲線 (Eq. (1), (2) および (3)) を用いて、試験片各部の分極曲線を決定した。決定した分極曲線を境界条件として、電解質領域でラプラス方程式を解き、試験片表面の電流密度分布を得た。得られた電流密度分布を Fig. 8 に示す。

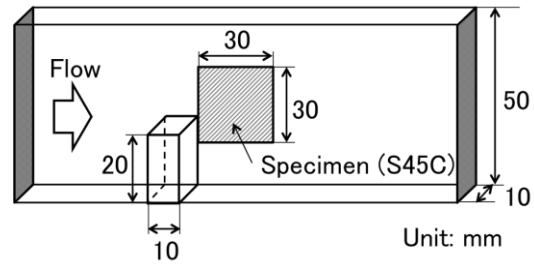


Fig. 6 Setup of corrosion prediction

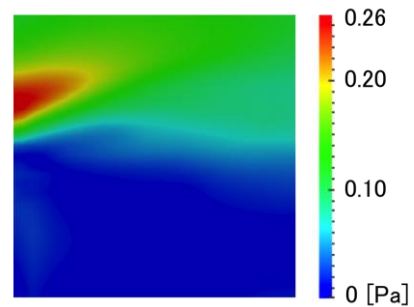


Fig. 7 Wall shear stress on specimen

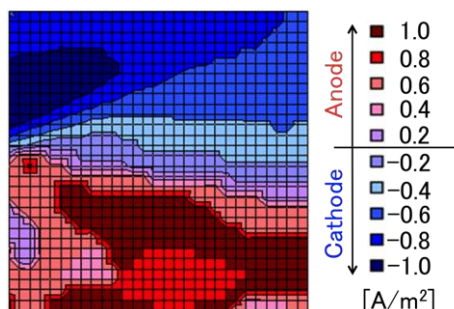


Fig.8 Current density on specimen

予測結果の妥当性を検証するために、矩形流路を用いた暴露実験を実施した。12時間の暴露試験後の試験片表面の状態をFig.9に示す。壁せん断応力の低い試験片下部領域に赤褐色の腐食生成物が堆積した。この領域では、鉄のアノード反応が進行している。一方、壁せん断応力の高い領域では、腐食生成物の堆積が観察されなかった。また、大きな減肉も観察されないため、カソード反応が支配的であると考えられる。

予測結果(Fig.8)と実験結果(Fig.9)を比較すると、アノード反応領域とカソード反応領域がおおむね一致している。したがって、定性的には、腐食予測が実現された。

今後は、より信頼性の高い腐食予測を実現するために、試験片表面の電流密度を定量的に評価した結果との比較・検討を進める。さらに、実構造物の腐食事例に対して腐食予測を行い、本手法の有効性を検証する。



Fig.9 Specimen surface after exposure test

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1件)

- (1) Kazuhiro SUGA, Taro MOTEKI, Masanori KIKUCHI, Corrosion Prediction under Flow Field, Key Engineering Materials, 462-463 (2011), pp. 1261-1266, DOI:10.4028/www.scientific.net/KEM.462-463.1261. (査読あり)

[学会発表] (計9件)

- (1) K. Suga, K. Minagawa, R. Arimura, Y. Ishikawa, M. Kikuchi, Corrosion

Prediction in FAC through Local Wall Shear Stress, EuroCorr 2013, Estoril, Portugal, (September 1-5, 2013).

- (2) Kazuhiro Suga, Yoshiaki Ishikawa, Masanori Kikuchi, Numerical-Experimental Combined Prediction for FAC, 9th International Conference on Fracture & Strength of Solids, Jeju, Korea, (June 9-13, 2013).
- (3) Yoshiaki Ishikawa, Kazuhiro Suga, Ryoma Arimura, Koichi Minagawa, Masanori Kikuchi, Corrosion prediction under flow field based on local wall shear stress, The 8th International Conference Numerical Analysis In Engineering (NAE 2013), Pekanbaru, Riau, Indonesia, (May 13-15, 2013).
- (4) Kazuhiro Suga, Koichi Minagawa, Taro Moteki, Ryoma Arimura, Masanori Kikuchi, Corrosion Prediction Based on Fluid Dynamic Properties, 63rd Annual Meeting of the International Society of Electrochemistry, Prague, Czech Republic, (August 19-24, 2012).
- (5) Kazuhiro Suga, Koichi Minagawa, Taro Moteki, Ryoma Arimura, Masanori Kikuchi, Experimental-Numerical Approach for Corrosion Prediction, ICCES' 12, International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences, Create, Greece, (April 30 - May 4, 2012).
- (6) Taro Moteki, Kazuhiro Suga, Masanori Kikuchi, A Morphological and Numerical Characterization of FAC with Flow Properties at Near Metal Surface, 18th International Corrosion Congress, Perth, Western Australia, Australia, (November 20-24, 2011).
- (7) Kazuhiro Suga, Masanori Kikuchi, Taro Moteki, Ryoma Arimura, Polarization curve modeling with flow properties, ASME 2011 Pressure Vessels and Piping Conference, Baltimore, Maryland, USA, (July 17-21, 2011).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

須賀 一博 (SUGA KAZUHIRO)
東京理科大学・理工学部・助教
研究者番号: 30408992

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし