

令和 4 年 6 月 6 日現在

機関番号：11201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K03902

研究課題名(和文) マイクロスケールの損傷プロセスを考慮した腐食摩耗メカニズムのモデル化

研究課題名(英文) Modelling of tribo-corrosion in a microscopic scale

研究代表者

内館 道正 (Uchidate, Michimasa)

岩手大学・理工学部・教授

研究者番号：30422067

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、海洋構造物等で問題となる腐食摩耗のマイクロスケールの損傷メカニズムを考慮したモデル化を試み、将来的な損傷予測を可能とする基礎の確立を目指した。腐食摩耗とは、引っかき等の機械的な摩耗と、摩耗した金属表面からのイオン化等による材料損失(電気化学的・化学的摩耗)、及びそれらの相乗効果による摩耗形態を指す。研究より、人工海水中では静的な環境における耐食性よりも摩擦によって表面に薄く形成される成分が腐食摩耗に大きな影響を及ぼすことがわかり、実表面の凹凸データを用いた接触解析によって腐食摩耗における材料のマイクロスケールの接触状態が推定できることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

海に囲まれた日本では海洋資源の有効活用が重要であるが、海洋構造物では海水による腐食だけでなく、流水などの衝突と腐食との相互作用による材料損失(腐食摩耗)も問題となる。実験から、耐食性に優れるステンレス鋼を使用しても腐食摩耗に対する効果は低く、耐食性には劣るが材料自体の潤滑性や耐摩耗性に優れる材料を用いた方が有効であることがわかった。微小凹凸を考慮した接触解析によってマイクロスケールの接触状態が把握できることが示され、腐食摩耗以外の問題にも同手法が適用可能と考えられる。一方、計算手法の更なる高速化とライブリ構築、ロバストな表面処理手法の確立などの課題も明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：This study tried to develop a microscopic model that can be applied for future prediction of tribo-corrosion for marine structures. Here, tribo-corrosion is material loss due to synergism between mechanical wear e.g., abrasion and chemical/electrochemical wear e.g., ion release from a metal surface. It was found that a thin tribofilm, rather than corrosion resistance, plays an important role to tribo-corrosion in an artificial sea water environment. The microscopic contact conditions between the mating surfaces were estimated by a contact analysis using real surface topographies.

研究分野：トライボロジー

キーワード：腐食摩耗 接触 腐食

1. 研究開始当初の背景

海に囲まれた日本では、海洋資源の有効利用が重要である。船舶や海洋構造物（橋脚、洋上風力発電や潮力発電、メタンハイドレート掘削プラント等）においては、海水による鋼の腐食（静的作用）に加え、流氷などの浮遊物が衝突することによる動的な損傷による腐食摩耗が実用上の問題となる。この腐食摩耗は「機械的な摩耗」と「電気化学的・化学的な摩耗」、及びそれらによる「相乗効果」によってもたらされていると考えられている。これまでの研究では、損傷を比較的マクロな大きさの現象として捉えており、実際の表面間のマイクロスケールの接触や損傷に着目した研究はほとんどなされてこなかった。

2. 研究の目的

本研究課題では、腐食摩耗による損傷の予測を可能とするため、腐食摩耗のマイクロスケールの損傷メカニズムを考慮したモデル化による基礎の確立を目指し、マイクロスケールに適用できる腐食モデルを実験と数値解析によって検討した（図1）。得られた知見は、将来的に腐食摩耗による材料損失や機器寿命の予測、材料選定に役立つものである。

3. 研究の方法

腐食摩耗実験においては、図2に示す試験装置を用いた。腐食摩耗試験片としてはスーパー二相ステンレス鋼 CE3MN、高クロム铸铁 27Cr、球状黒鉛铸铁 D3 の円筒試験片を用い、相手材としてはアルミナボールを用いた。CE3MN は極めて高い耐食性が知られており、海洋構造物の構造部材などとして用いられている。27Cr と D3 は耐食性には劣るものの、しゅう動を伴う用途では優位性がある可能性を考慮して選定した。試験片は人工海水中に浸漬させ、三電極法による分極測定を行った。試験荷重は 10 N、往復しゅう動の振幅は 10 mm、しゅう動周波数は 3 Hz とした。比較のため、腐食摩耗が起こりにくい環境として純水中での腐食摩耗試験も実施した。

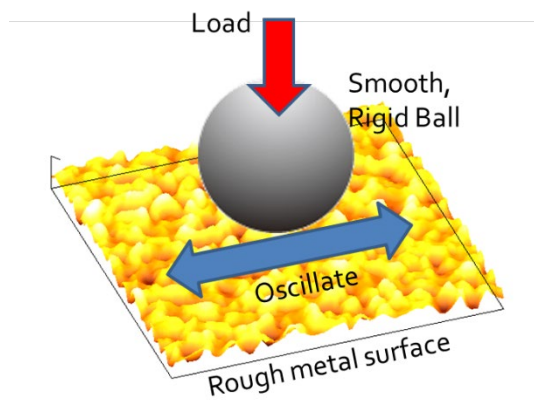


図1 微細凹凸を考慮した接触モデル

試験後の摩耗痕の電気化学的特性を調べるため、人工海水中における摩耗痕の分極測定を行った。分極測定での面積効果の検証のため、図3に示すように摩擦前の試験片に対して露出面積を変化させた測定も実施した。

腐食摩耗試験に先立ち、試験片の静的な環境下での耐食性を評価するため、JIS G 0578:2000（ステンレス鋼の塩化第二鉄腐食試験方法）を元に濃度 6%及び 15%の塩化第二鉄溶液中での腐食試験を実施した。その際の溶液温度は 35°Cと 75°Cの 2 水準とした。

試験中における試験片表面の接触状態を評価するため、境界要素法に基づく接触解析を実施した。上述の腐食摩耗試験を模擬するのは計算機の負荷的に困難であったため、3 Nの軽荷重における接触解析を実施した。

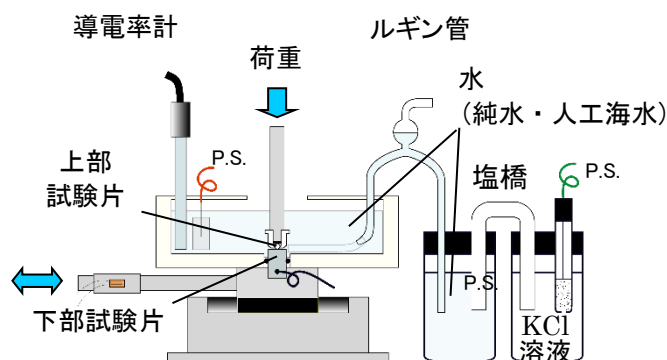


図2 腐食摩耗試験装置の概念図

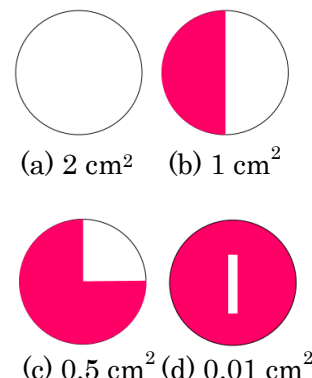


図3 露出面積を変化させた分極測定用試験片の概念図

#### 4. 研究成果

前述の塩化第二鉄溶液中での静的な腐食試験では、スーパー二相ステンレス鋼 CE3MN の極めて優れた耐食性が明らかとなった(図4)。また、図5(a)に示す分極曲線より、約0~800 mV/vs. SCEの広い範囲で不動態化することもわかり、優れた耐食性が不動態膜によるものであることも示

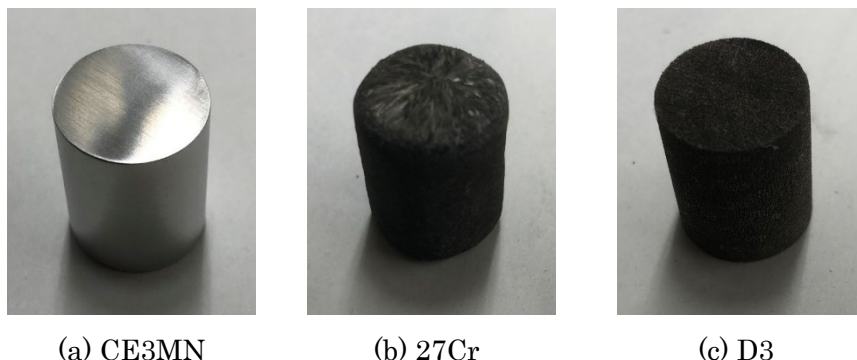


図4 静的腐食試験後の試験片の写真の一例(温度 35°C, 48 時間後)

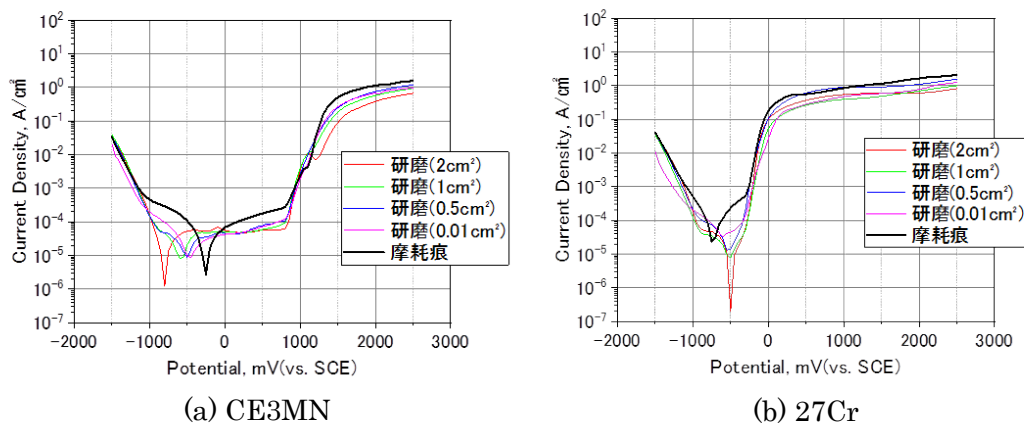


図5 分極測定結果

唆された。一方、27Crの不動態化域は狭く(図5(b))、D3では不動態化域が確認できなかった。なお、試験片の表面積を変えた分極測定の結果にほとんど差異はなく、本実験での分極測定における面積の影響は無視できることがわかった。

腐食摩耗特性に関しては、CE3MNと27Crの人工海水中での比摩耗量は $6 \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$ 程度であったのに対して、D3ではその約半分の $3 \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$ 程度であった。また、摩擦係数についてもCE3MNが0.2程度、27Crが0.18程度、D3が0.08程度であった。すなわち、静的な耐食性で優れたCE3MNであるが、動的な作用が加わった腐食摩耗環境下ではさほど優れた摩擦摩耗特性を示さないことがわかった。一方、D3は人工海水中で優れた摩擦摩耗特性を示した。

これらの差異は、摩擦を受けた際の表面状態に依存していると考えられる。CE3MNは緻密な不動態膜によって高い耐食性を示しているが、この不動態膜は機械的な摩擦に対しての保護性は低く、相手材によって機械的に容易に損傷を受け、新生面が露出する。新生面では金属イオンは人工海水中に電気化学的に溶出し、摩耗量を増加させる。この様子は、図6(a)に示すような試験片表面の電位の変動から明らかである。すなわち、摩擦中に新生面が露出すると自然電位は低下するが、しゅう動中一貫して電位は下がったままであり、摩擦によって摩耗痕のいずれかの箇所は常に新生面として露出していると言える。さらに、図5(a)の摩耗痕の分極曲線から明らかのように、摩耗痕での耐食性はしゅう動前の表面よりも低下している可能性がある。この原因としては、機械的な摩擦と電気化学的な溶出によって、保護性の高い不動態被膜を生成する化学成分が失われたことが考えられる。一方、D3では図6(b)に示した様に、摩擦を開始すると一度は自然電位が低下するが、すぐにもとの電位付近まで回復した。これは、しゅう動を開始するとD3中の黒鉛が表面にグラファイトからなるトライボ膜をすみやかに形成し、新生面の露出を抑制したためであると考えられる。静的な耐食性に極めて優れるCE3MNを用いても腐食摩耗環境下では効果が無く、耐食性に劣るが潤滑性に優れる材料の方が結果的には優れていると言える。

以上のような実験結果より、腐食摩耗のモデル化に際しては非摩擦面における静的な耐食性でなく、摩耗痕における動的な耐食性を考慮する必要があること、及び摩擦によって生成されるトライボ膜の保護作用を考慮する必要性が示された。

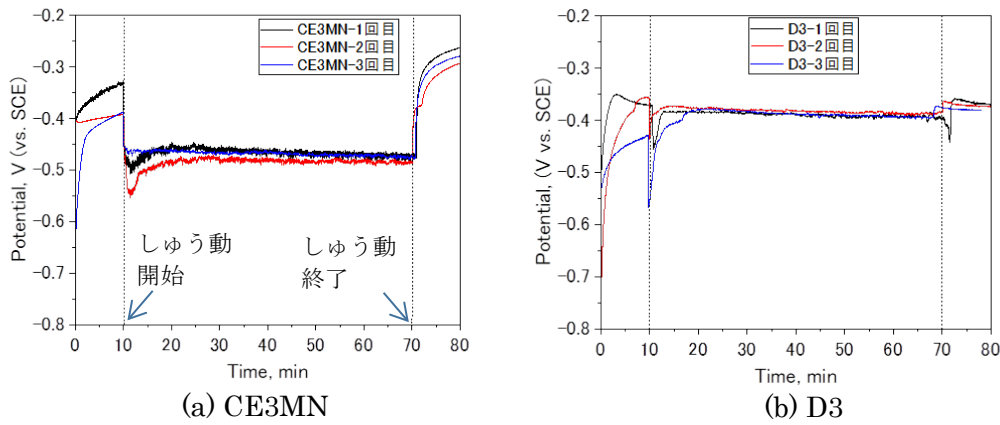


図6 腐食摩耗試験中の自然電位 (OCP) の変化

実験で確認できるような新生面の露出と電気化学的な溶出をモデル化するために、しゅう動時の上下試験片の接触状態を把握する必要がある。そこで、境界要素法による接触解析を実施した。解析に先立ち、それぞれの試験片の表面の形状を精度良く測定し、解析に取り込む必要がある。接触式による測定が微細凹凸の評価には信頼性が高いと判断し、触針式の面積領域（三次元）表面粗さ測定機を用い、試験片表面を測定した。しかしながら、同測定機では測定中に熱や電気的なドリフトが生じ、形状にゆがみが生じることがわかった。そこで、微細凹凸の成分のみを抽出し、マクロな形状（ボールの形状や平面）については設計値を用いることとし、データの分離と合成を行った。このような処理で得られた表面データを用いて、接触解析を実施したところ、真実接触面積はヘルツの接触面積の約半分であることがわかった（図7）。通常、真実接触面積の割合は見かけの接触面積の数パーセントと言われているが、予想よりもずっと高い割合で接触していることとなる。このマイクロな接触部が摩耗することで新生面が露出し、摩耗痕以外の箇所と局部電池を形成し、電気化学的な溶出がもたらされる。

このような接触計算を接触箇所を変更しながら実施しつつ、機械的な摩耗と新生面の露出、新生面からの電気化学的な溶出、再不動態化をモデル化することで腐食摩耗の直接シミュレーションを実施することを検討したが、計算時間による制限、摩耗のモデル化、非正規分布の形状データの取り扱いに課題があり、実現に至らなかった。今後、腐食摩耗のモデル化を進めるにあたり、直接接触計算手法の更なる高速化と柔軟性を持ったライブラリ構築、ロバストな表面凹凸処理手法を確立し、得られる接触状況データ、試験中の自然電位や電流変化による新生面の露出状況予測、実測による摩耗痕形状変化などを組み合わせた新たな手法の確立が必要である。

本研究課題で実施した摩耗痕のみの分極測定によって、摩耗・再不動態化した表面の電気化学的特性は初期のものとは異なることを示すことができた。これまでの研究では、摩耗痕とそれ以外の箇所が混在した状態でのマクロなスケールでの特性評価しかされてこなかったため、新規性のある手法であると考えている。一方で、得られた摩耗痕の電気化学的特性は摩擦直後のものではなく、表面に絶縁コートをする時間が必要であったため、再不動態化がほぼ完了した安定な表面における特性である。今後は、新生面が露出された直後から不動態化の完了までの摩耗痕の電気化学的特性をリアルタイムで評価できる手法の確立が望まれる。

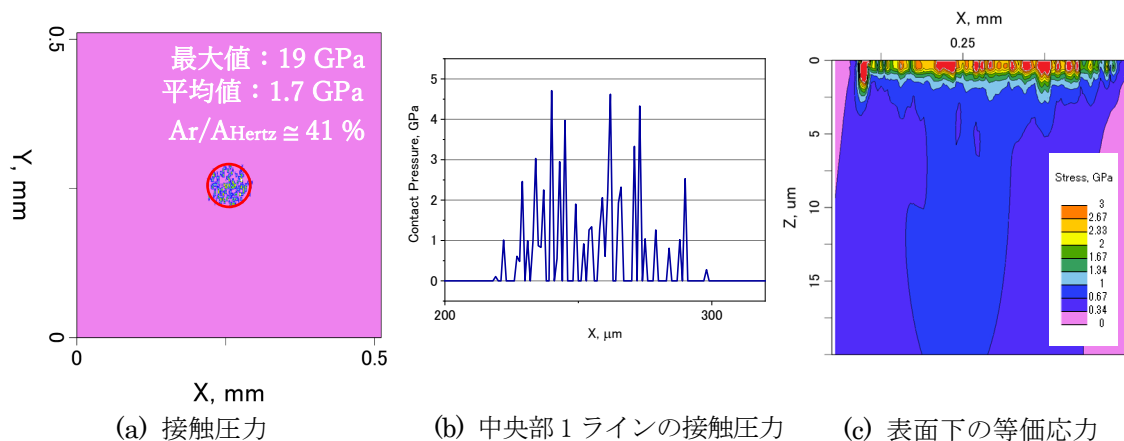


図7 接触解析結果の一例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Michimasa Uchidate, Yutaka Sasaki, Kento Narita
2. 発表標題 Robust Evaluation Method of Skewness and Kurtosis Using Probability Density Functions
3. 学会等名 International Tribology Conference (ITC) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Michimasa Uchidate, Yutaka Sasaki, Kento Narita
2. 発表標題 Robust Evaluation Method of Skewness and Kurtosis based on Probability Density Functions
3. 学会等名 2nd International Conference on Metrology and Properties of Surfaces (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Michimasa Uchidate
2. 発表標題 Rough Contact Analysis based on Boundary Element Method (BEM)
3. 学会等名 Japan-Taiwan Tribology Symposium 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. UCHIDATE, A. YOSHIDA, Y. SHIRAKAWABE, T TAMURA
2. 発表標題 Water-repellent textured surfaces produced by injection moulding using laser textured moulds
3. 学会等名 ASIATRIB 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Uchidate, Y. Sasaki, K. Narita
2. 発表標題 Robust Evaluation Method of Skewness and Kurtosis based on Probability Density Functions
3. 学会等名 22nd International Conference on Metrology and Properties of Surfaces (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小島悠人, 内館道正
2. 発表標題 鉄系鋳造材料の人工海中における腐食摩耗特性
3. 学会等名 トライボロジー会議2021 秋 松江
4. 発表年 2021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
研究分担者	佐藤 善紀 (Sato Yoshiki) (20739362)	佐賀大学・理工学部・助教  (17201)	

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
---------	---------