

令和 6 年 4 月 8 日現在

機関番号：31103
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2021～2023
課題番号：21K04279
研究課題名（和文）温暖化に対応した氷海構造物の複合劣化プロセスの解明と新たな維持管理手法の構築

研究課題名（英文）1

研究代表者
竹内 貴弘（1, 1）

八戸工業大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：40305983

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：温暖化による海水減少は海岸・海洋構造物への海水作用を活発化し、劣化を早める。本研究では、腐食と摩耗が同時に進行するこの複合劣化プロセス解明のもとになる知見、特に、腐食量の経年変化に関する新たなモデルの提案、および、砂や海水の固体の衝突による多くの要素実験により損耗量の評価因子の提案を行った。これらの成果は“犠牲鋼板”という合理的で安価な対策技術を新たに示すことになり、LCCに配慮した設計にも寄与する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

当該研究は、気候変動の影響により海水の移動が以前より活発化してきた結氷海域に建設される海岸・海洋構造物の材料損耗・劣化に関して精度の高い評価法の提案に繋げるための新たな知見を得ることに学術的な意義がある。これらの成果は、氷海域の海岸・海洋構造物等の防食・摩耗対策の低コストかつ高度化等の実現、ならびに、北極海航路を含む氷海技術への国際貢献等、国際的にも先んじた成果の情報発信になる点においても社会的な意義がある。

研究成果の概要（英文）： This research is academically significant in that it will provide new knowledge for proposing a highly accurate evaluation method for material loss and degradation of coastal and offshore structures constructed in ice-covered waters, where sea ice migration has become more active due to climate change. These results have social significance in that they will help to realize low-cost and advanced measures to prevent corrosion and wear of coastal and offshore structures in ice-covered waters, as well as to make an international contribution to ice technology, including Arctic sea routes, and to disseminate information about the results ahead of other countries.

研究分野：氷工学・海洋工学

キーワード：エロージョン コロージョン 氷海構造物 摩耗 複合劣化 温暖化 維持管理

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

結氷海域では、気候変動により海水が減少する傾向にある。この“波浪の抑制効果”を有する海水の減少は冬期の波浪増大に繋がり、さらに海水移動の活発化や高速化を招く。このため、種々の目的で建設される海岸港湾関連施設との相互作用が一層激しくなる。実際、一般海域と氷海域を有する北海道内の港湾、漁港、河口導流堤などは、長年にわたる現地観測から、設計時に想定していた供用期間よりも早い速度で劣化が発生し崩壊に至った施設もある（例えば、図1）。この劣化は“腐食環境下”において、砂を含んだ海水や砂礫などの固体の接触や衝突による鋼材の摩耗現象によ



図1 複数貫通孔、内部空洞化後、海水衝突で崩壊（オホーツク沿岸導流堤）

って錆層が剥がれ、活性化された新生面の形成が腐食をさらに加速し損耗量を増加させる（図2）という腐食と摩耗の相乗効果（エロージョン・コロージョン現象）をもつ複合劣化プロセスの“腐食摩耗現象”に因るものである。

以上から、構造物の設計や管理方法についての早急な見直しが必要であり、また、合理的な対策を提案することが、種々の目的で建設される結氷海域の構造物の長寿命化にとって極めて重要となる。さらに、国際的にも対策が示されておらずこれらの知見は、北極海を含めた氷海技術分野の国際貢献も可能となる。

エロージョンとコロージョンの相乗効果をもつ複合劣化プロセスに因る損耗量の促進

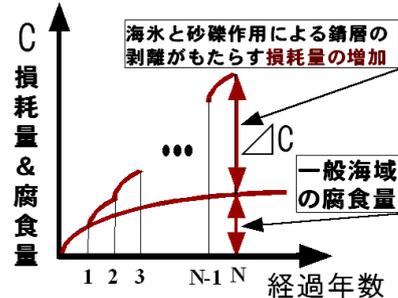


図2 エロージョン・コロージョンの相乗効果をもつ複合劣化プロセスに因る損耗量の増加

2. 研究の目的

この一般（無氷）海域とは明らかに異なる固有の問題により腐食が促進されるにも拘わらず、この影響がこれまでの耐氷設計法には反映されていない。このような背景から、当該研究ではエロージョン・コロージョンの相乗効果による結氷海域の構造物表面の複合劣化プロセスを考慮した構造物の設計や管理方法に寄与する基礎研究や要素研究を実施した。特に、①複合劣化プロセスの把握、②既存の知見と①の成果に基づく合理的な対策方法の検討、さらに③現地暴露試験の継続的な実施を研究の主たる目的とした。

3. 研究の方法

当該研究の期間に解決すべき課題については、次の様に取り組むこととする。

① <複合劣化プロセスの把握>

エロージョン・コロージョンの相乗効果を設計法に適用するにあたり、一般海域の腐食量の経年変化（図2）についての精度の高いモデルの提案、および、海水“衝突”による錆層の損耗（剥離）現象を多くの要素試験により把握する。

② <合理的な対策方法の検討>

氷海海域固有の海岸・海洋構造物の合理的な対策である“犠牲鋼板”による方法を適用するための①の成果と既存の知見（モデルや氷圧力）により合理的な対策法を提案する。

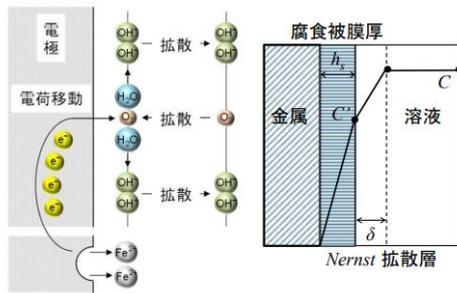
③ <現地暴露試験の継続的な実施>

現地海域に供試体を複数年間に亘って設置することで劣化状況を継続的に観測する。

4. 研究成果

①<複合劣化プロセスの把握>

一般海域の腐食量の経年変化に関しては、これまでのべき乗則では腐食速度となる時刻ゼロの接線勾配が無限大になるという課題に対して、海水接触による鋼材表面の腐食生成物（皮膜）の剥離・除去の有無を模擬した簡易な水槽実験の実施や腐食皮膜形成時の酸素拡散（律速）に基づく腐食進行モデルを提案することで、腐食量は時間の平方根に比例（腐食速度が減少）することを考案した（図3）。実験から錆除去の頻度が大きい程腐食が進むこと、錆の放置期間が同じなら、試験体の過去の錆除去の頻度・履歴に無関係に、その期間内の腐食量に大きな差はないこと等が推察された。



$$h = -B + \sqrt{B^2 + 2At}$$

ここに,

$$A = \frac{MnCD_f}{\rho NR}, \quad B = \frac{\delta D_f}{RD}$$

ここで、t:時間、M:原子量、n:反応の電子数、C:溶存酸素量、 D_f :皮膜内酸素拡散定数、 ρ :金属の密度、N:原子価、 δ :Nernst 拡散層厚、D:溶液内酸素拡散定数、R:腐食深さ h が皮膜厚 h_s に比例すると仮定した比例定数 ($h=R \times h_s$)

図3 腐食プロセス (左)、皮膜形成時の腐食モデル (中)、腐食深さ h の提案式 (右)

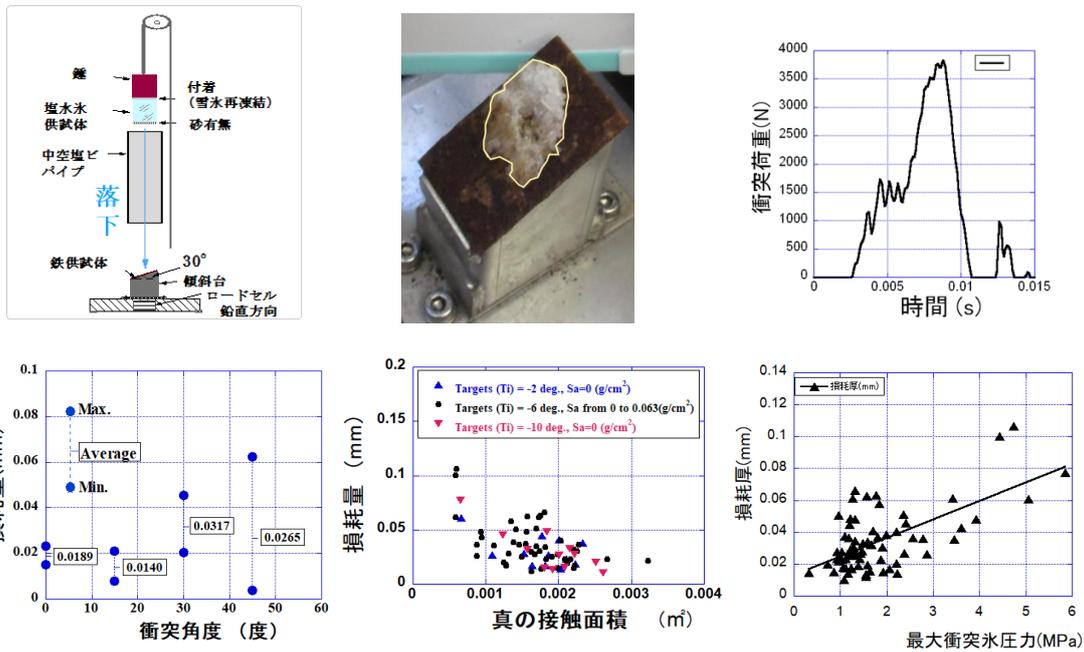


図4 衝突試験 (上左)、鉄供試体 (鋳加工) 表面への氷付着 (上中)、衝突氷圧力 (上右) 衝突角度と損耗量 (下左)、真の接触面積と損耗量 (下中)、衝突氷圧力と損耗量 (上右)

海氷“衝突”による錆層の損耗 (剥離) 現象を多くの要素試験に関しては、100 以上もの海水供試体の衝突試験から衝突角度、氷温、力積、衝突荷重、水中の砂濃度、運動量などをパラメータとして変化させ、衝突氷荷重による鋼材の損耗厚に与える主要な因子を検討した。これにより、損耗厚は衝突角度が 30 度でピークとなり、真の接触部分における衝突氷圧力によって損耗量が推定できることが知られた。

② <合理的な対策方法の検討>

犠牲鋼板 (図 5) による対策法を設計に適用するためには、想定される供用期間に応じた付加すべき腐食代の算定が必要となる。①で提案した腐食進行モデルと想定外力に応じた腐食鋼材の損耗量の値から、図 2 による相乗効果を考慮した供用期間に応じた損耗量 (腐食量) を推定できる。例えば図 3 の腐食深さ (損耗量) h の提案式 (流水接触なし) と流水接触圧による構造物表面の腐食の剥離により、流水接触頻度に応じた腐食深さを計算すると図-6 に様になる。

これにより一般海域とは異なった氷海域固有の

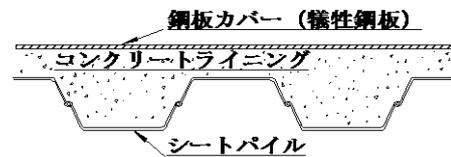


図5 犠牲鋼板の概念図

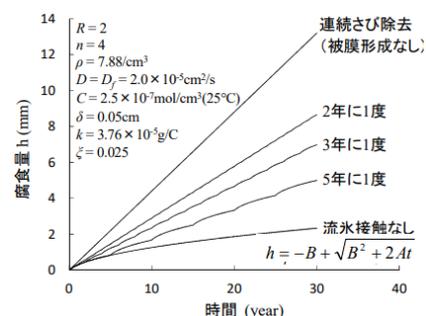


図-6 流水接触頻度に応じた腐食深さ推移の計算例

海岸・海洋構造物の合理的な対策法につながる。

③<現地暴露試験の継続的な実施

図7は現地海域に設置された暴露試験の様子である。R5年度に取り外しを検討していたが、気象状況などから、さらにもう一度冬期の流氷の影響を受けた後のR6年度早期の取り外しとなり、その後、肉厚減少データを取得し、公表することを予定している。

以上、国内のアセットマネジメントとしては空白部分である氷海域の海岸・海洋構造物の劣化予測と合理的な対策法を示すことでLCCに配慮した設計へ寄与する。また、国際的にも先んじた成果の情報発信を今後も引き続き行う。

さらに、これら一連の成果は、土木学会論文集B3(海洋開発)、土木学会論文集B2(海岸工学)および米国機械学会(ASME: International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering(OMAE))のプロシーディングに掲載された。



図7 現地暴露試験(炭素鋼板供試体)の様子(設置3年後)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計7件)

- ①Takahiro Takeuchi, Shinji Kioka, Hitoshi Miyazaki: ON WEAR THICKNESS OF RUST LAYERS OF STEEL STRUCTURE DUE TO ICE IMPACT LOAD (OMAE2023-101599), Proceedings of the ASME 2023, 42nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2023, June 11-16, 2023, Melbourne, Australia
- ②Kioka, Shinji, Takeuchi, Takahiro: EROSION-CORROSION OF STEEL STRUCTURE CAUSED BY FRICTION OF SEA ICE BASED ON SIMPLE EXPERIMENT AND THEORY (OMAE2023-101702), Proceedings of the ASME 2023, 42nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2023, June 11-16, 2023, Melbourne, Australia
- ④簡易的な実験と解析に基づく海水の摩擦を考慮した鋼構造物の腐食摩耗に関する一考察 木岡 信治, 竹内 貴弘 土木学会論文集 B2(海岸工学) 2022年 78巻 2号 p. I_637-I_642. https://doi.org/10.2208/kaigan.78.2_I_637
- ⑤木岡信治・石田麻衣子・長谷川朋毅・竹内貴弘・佐伯浩: 北海道オホーツク海沿岸部における海水のサイズ分布に関する一考察, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 76, 2020. 08. https://doi.org/10.2208/jscejoe.76.2_I_905
- ⑤Takeuchi, Takahiro, Kioka, Shinji: WEAR AMOUNT OF STEEL STRUCTURE IN ICE-INFESTED SEA BY SLIDING WEAR TEST, Proceedings of the ASME 2019 38th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE2019 Glasgow, Scotland, 2019. 6
- ⑥竹内貴弘・紫葉敬太・佐藤光紀・木岡信治・宮崎均志: 氷盤の衝突に着目した鋼構造物表面における錆層の損耗に関する実験的研究, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 75, 2019. 07 803-808. https://doi.org/10.2208/jscejoe.75.I_803
- ⑦木岡信治・遠藤強・宮崎均志・竹内貴弘: 砂等の固形分を含む氷による金属材料のアブレシブ摩耗特性に関する研究, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 75, 2019, 809-814. https://doi.org/10.2208/jscejoe.75.I_809

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 1件）

1. 著者名 木岡 信治, 竹内 貴弘	4. 巻 78 巻 2 号
2. 論文標題 簡易的な実験と解析に基づく海水の摩擦を考慮した鋼構造物の腐食摩耗に関する一考察	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 土木学会論文集B2(海岸工学)	6. 最初と最後の頁 p. 1_637-1_642
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/kaigan.78.2_1_637	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	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 2件）

1. 発表者名 Takahiro Takeuchi, Shinji Kioka, Hitoshi Miyazaki
2. 発表標題 ON WEAR THICKNESS OF RUST LAYERS OF STEEL STRUCTURE DUE TO ICE IMPACT LOAD
3. 学会等名 Proceedings of the ASME 2023,42nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kioka, Shinji, Takeuchi, Takahiro
2. 発表標題 EROSION-CORROSION OF STEEL STRUCTURE CAUSED BY FRICTION OF SEA ICE BASED ON SIMPLE EXPERIMENT AND THEORY
3. 学会等名 Proceedings of the ASME 2023,42nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2023 (国際学会)
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
研究分担者	木岡 信治 (Kioka Shinji) (20414154)	国立研究開発法人土木研究所・土木研究所 (寒地土木研究所)・総括主任研究員 (82114)	

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
研究分担者	大塚 淳一 (Ohtsuka Jyunnichi) (50540556)	国立研究開発法人土木研究所・土木研究所（寒地土木研究所）・主任研究員 (82114)	

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