

令和元年8月27日現在

機関番号：31103

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K06239

研究課題名(和文) 気候変動による氷象の多様化に対応した新しい氷海構造物の設計法と維持管理手法の開発

研究課題名(英文) Development on new design method and maintenance technique of structure in ice-infested sea area, under diversification of ice conditions by climate change

研究代表者

竹内 貴弘 (Takeuchi, Takahiro)

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) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：氷海域の海岸・海洋構造物の劣化予測は国内のアセットマネジメントにおいては未解明な部分である。本研究では、初めに、海水移動に伴う鋼材の摩耗機構(凝着、アブレッシブ、腐食摩耗)を把握した。次に、この摩耗機構現象に基づき鋼製の海岸・海洋構造物に腐食代として付加すべき鋼材厚の計算法を示した。この“犠牲鋼板”による方法は、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、地球温暖化の影響で海水の移動が活発化する氷海域の海岸・海洋構造物の材料損耗・劣化に関して精度の高い評価を行い、対策に繋げることに学術的な意義がある。これらの成果は、資源の豊富な北極海域などの極地、亜極地の構造物の設計にも十分に適用可能であり、氷工学の分野では先端的な北米、北欧さらにロシアといった国外の研究の現状からみても、国際的に先んじた成果の情報発信になる点でも重要な意義があると考えている。

研究成果の概要(英文)：There are still many uncertainties as to a degradation prediction of coastal and offshore structure in ice-infested sea areas in terms of domestic asset management. In the study, it is firstly to grasp wear mechanism (adhesive wear, abrasive wear, and corrosive wear) of steel surface with sea ice movement. Secondly, it is shown the way to calculate thickness of steel plate added to their surface as wear thickness based on the wear mechanism. The method as "sacrificial steel plate" becomes a rational and inexpensive countermeasure of these structures, and also will contribute to the design considered in LCC in ice-infested sea waters.

研究分野：氷工学・海洋工学

キーワード：腐食摩耗 劣化予測 結氷海域 海岸・海洋構造物

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

地球温暖化は海氷の減少や気候変動を招く。このような海氷減少と低気圧の発生が増加することは冬期の波浪の増大に繋がり、さらに海氷移動の活発化や高速化を招く。これは、氷海域に種々の目的で建設される海岸・海洋構造物との相互作用はいつそう激しくなることを意味する。国内のオホーツク海でみると、過去に、流氷接岸時の大時化で多量の海氷が越波とともに防波堤を越え、種々の港湾施設が破壊したほか、上架中の漁船等にも被害を与えた。この時は、かなり流氷が少ない年であった。また、サロマ湖の第二湖口や導流堤などオホーツク海沿岸部に用いられている鋼矢板に大きな損傷（磨耗、腐食、貫通孔）が複数地点で発生（図1）しておりその設計および管理方法の早急な見直しという大きな課題に直面している。一方、国外でも海氷の移動が活発な海域におけるボスニア湾のコンクリート製灯台表面を対象とした現地計測結果においては、20年間に140mmも磨耗したことが報告されている。

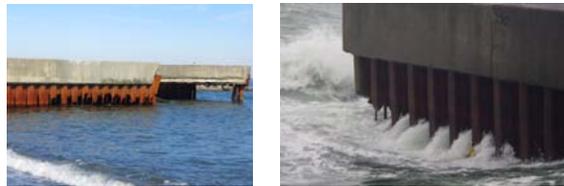


図1 オホーツク海沿岸の鋼矢板式の護岸や導流堤の材料損耗の被害例

従来までは、イニシャルコスト低減のみに配慮した耐氷設計法の構築が精力的に研究され、実用段階にまで成果が挙げられてきた。しかし、海氷移動の多様化・活発化は、構造材料の劣化を加速し、維持管理に膨大なコストが発生する。このような観点から、今後の環境変化を鑑みて、ライフサイクルコスト(LCC)にも配慮した新たな耐氷設計法の構築は重大な研究課題であると考えた。

### 2. 研究の目的

本研究ではその新しい設計法に寄与する基礎研究や要素研究を実施し、とりわけ急務とされる、海氷の移動に伴う氷海構造物表面の材料損失（劣化予測）とその対策法の提案に関する研究を主たる目的とした。この材料損失に影響を与えるのは、a 海氷移動による摩耗（凝着、アブレッシブ）、b “腐食摩耗”の現象解明、c 海氷の衝突荷重、さらに、d 砂の移動に伴うエロージョンで、氷海域の構造物のLCCの検討には極めて重要になる。特に、腐食摩耗に関して寒冷海域では溶存酸素量が多いため鋼材の腐食が促進され、さらに、海水や砂の衝突が腐食生成物を除去するために材料表面が露出し、更に腐食し易い環境を作り出す（図2）。この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、これまでの耐氷設計法には反映されていない。さらに、肉厚の減少した構造物への海氷の衝突は、材料の損失に追い討ちをかける。実用的に最も重要とされるのは、腐食条件下（腐食摩耗）における材料固有の摩耗のし易さを表す“磨耗速度”を評価し、対策に繋げることである。これらの研究は、国内外でも初めての取り組みとなる。

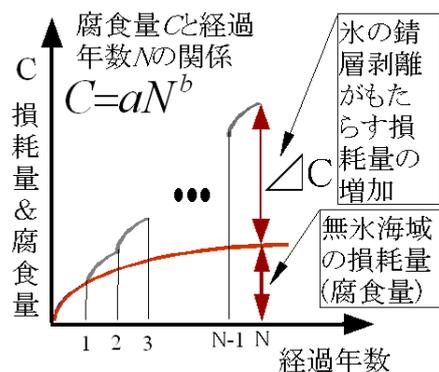


図2 無氷海域に比較して増加する損耗量の説明

促進されるにも拘わらず、これまでの耐氷設計法には反映されていない。さらに、肉厚の減少した構造物への海氷の衝突は、材料の損失に追い討ちをかける。実用的に最も重要とされるのは、腐食条件下（腐食摩耗）における材料固有の摩耗のし易さを表す“磨耗速度”を評価し、対策に繋げることである。これらの研究は、国内外でも初めての取り組みとなる。

### 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 <腐食摩耗現象の把握>

実海域の海氷との相互作用を考慮に入れたランダムな接触氷圧力を評価・推定し、室内試験等による海氷移動に伴う海岸・海洋構造物の腐食摩耗現象を把握する。

#### ② <新しい耐氷設計法を提案>

通常海域とは異なった氷海海域固有の海岸・海洋構造物の劣化対策（補修技術の提案）を示すことにより新しい耐氷設計法を提案する。

#### 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 <腐食摩耗現象の把握>

海氷中の介在砂、海水と構造物との実海域での接触圧力、及び海氷温を主たる因子とし、錆

加工した鉄供試体を用いた数年間に亘る室内の“滑り摩耗試験機”を実施した。摩耗距離 (m) と摩耗厚 (mm) との関係を示す“摩耗進行曲線”のその勾配から長期の摩耗特性を示す錆層の“定常摩耗率”は、凡そ 0.0001~0.0003 mm/m と評価された (図 3)。

② <新しい耐氷設計法を提案>

公開された 20 年間に亘る通常海域の鋼製の海洋構造物の暴露試験に関する報告から、経過年数と腐食厚との関係は“べき乗則”で回帰式できる。この関係と現地想定される海水の移動量と“定常摩耗率”から冬季の海水作用による毎冬の損耗量  $d$  が推定できる。また、図 4 に示す腐食・摩耗の進行図から  $N$  年後の損耗厚  $W_n$  を計算できる。これにより、サロマ湖第 2 湖口に適用された犠牲鋼板 (図 5: 概念図) の設計時に想定される供用期間に応じた付加すべき腐食代が算定で

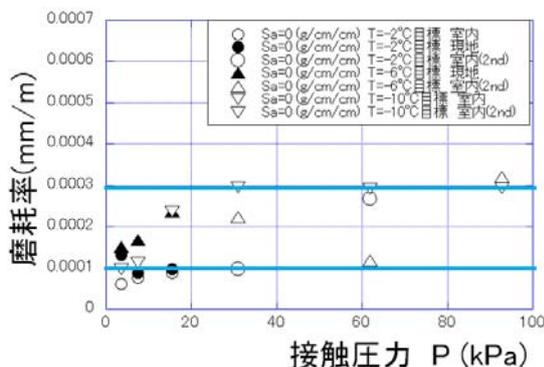


図 3 摩耗率 ( $dW/dL$ )<sub>m</sub> vs. 接触圧力

実測水温は (室内)  $-1.7^{\circ}\text{C} \sim -4.1^{\circ}\text{C}$  ; (現地)  $-2.3^{\circ}\text{C} \sim -3.6^{\circ}\text{C}$  ; (室内)  $-6.1^{\circ}\text{C} \sim -6.7^{\circ}\text{C}$  ; (現地)  $-6.2^{\circ}\text{C} \sim -6.9^{\circ}\text{C}$  ; (室内)  $-8.5^{\circ}\text{C} \sim -11.4^{\circ}\text{C}$ 。

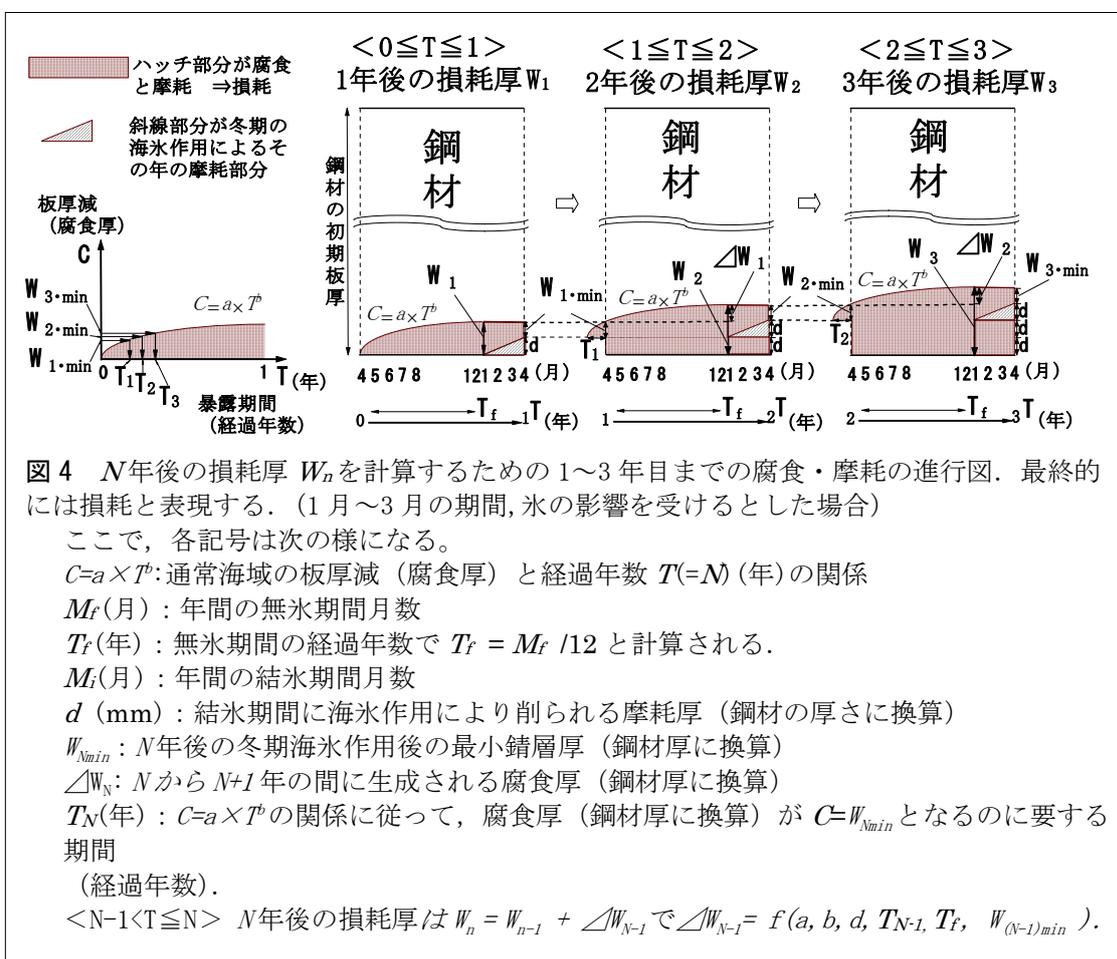


図 4  $N$  年後の損耗厚  $W_n$  を計算するための 1~3 年目までの腐食・摩耗の進行図。最終的には損耗と表現する。(1 月~3 月の期間, 氷の影響を受けたとした場合)

ここで、各記号は次の様になる。

$C = a \times T^b$ : 通常海域の板厚減 (腐食厚) と経過年数  $T (=N)$  (年) の関係

$M_f$  (月): 年間の無氷期間月数

$T_f$  (年): 無氷期間の経過年数で  $T_f = M_f / 12$  と計算される。

$M_i$  (月): 年間の結氷期間月数

$d$  (mm): 結氷期間に海水作用により削られる摩耗厚 (鋼材の厚さに換算)

$W_{N \cdot \min}$ :  $N$  年後の冬季海水作用後の最小錆層厚 (鋼材厚に換算)

$\Delta W_N$ :  $N$  から  $N+1$  年の間に生成される腐食厚 (鋼材厚に換算)

$T_N$  (年):  $C = a \times T^b$  の関係に従って、腐食厚 (鋼材厚に換算) が  $C = W_{N \cdot \min}$  となるのに要する期間

(経過年数)。

$\langle N-1 < T \leq N \rangle$   $N$  年後の損耗厚は  $W_n = W_{n-1} + \Delta W_{N-1}$  で  $\Delta W_{N-1} = f(a, b, d, T_{N-1}, T_f, W_{(N-1) \cdot \min})$ 。

きる。また、経過年数と損耗厚  $W_n$  との関係の試算例を図 6 に示した。飛沫帯下部や海中中部によって通常海域の経過年数と腐食厚との“べき乗則”の回帰式は若干異なるため、損耗厚  $W_n$  の関係も同一ではない。これらの計算結果と港外や港内など氷の移動状況に応じ、さらに、供用期間を考慮した損耗厚を算定できるため、予め付加すべき腐食代が評価できる (表 1 に計算例)。これに

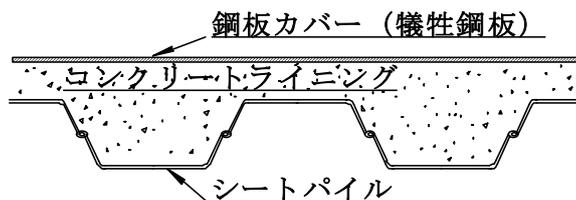
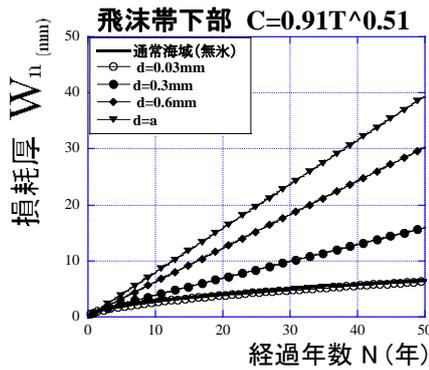
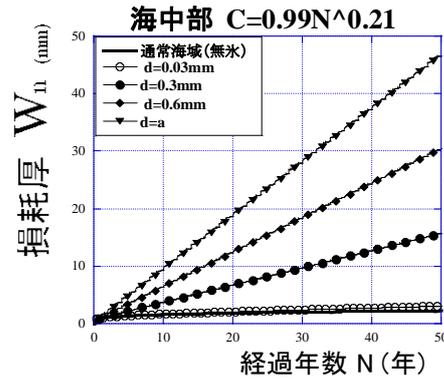


図 5 サロマ湖第 2 湖口に適用された犠牲鋼板の概念図



(a)  $a=0.91$  mm  $b=0.51$  飛沫帯下部



(b)  $a=0.99$  mm  $b=0.21$  海中部

図6 経過年数と損耗厚  $W_N$  の関係の試算例 (a) 飛沫帯下部, (b) 海中部

より通常海域とは異なった氷海域固有の海岸・海洋構造物の劣化対策として新しい耐氷設計法の提案につながる。

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。複数年間の観測が必要であるとの見解からさらに設置期間を延長して貴重データを得る方が有利と考え劣化状況を今後も継続的に観測することにした。

以上、国内のアセットマネジメントで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効果的で安価な補修等といった対策技術法を新たに示すことでLCCに配慮した設計へ寄与する。さらには、当該研究の成果は、資源の豊富な北極海域などの極地、亜極地の構造物の設計にも十分に適用可能であり、氷工学の分野では先端的な北米、北欧さらにロシアといった国外の研究の現状からみても、国際的に先んじた成果の情報発信が出来る点で意義がある。そして、資源に乏しい我が国の氷海域開発に関する技術的な国際貢献は、学術的な貢献に加えて国策上も一層重要となる。

表1 損耗厚と損耗速度の試算例 (30年間)

係数	上：損耗厚 (mm)		下：損耗速度 (mm/y)		
	通常海域	氷海域			
		$d=0.03$ mm (港内)	$d=0.3$ mm (氷の移動状況)	$d=0.6$ mm (氷の移動状況)	$d=a$ mm (港外)
$a=0.91$ $b=0.51$	5.16 0.17	4.76 0.16	9.91 0.33	18.22 0.61	23.57 0.79
$a=0.99$ $b=0.21$	2.02 0.07	2.39 0.08	9.67 0.32	18.33 0.61	27.96 0.93

炭素鋼板試験体



流水来襲後 (20170703撮影)

流水来襲後 (20180510撮影)

図7 現地暴露試験の様子 (2016.9 設置)

以上、これら一連の成果は、土木学会論文集 B3 (海洋開発), 国際水理環境学会 (IAHR) や米国土木学会 (ASCE) のプロシーディングに掲載された。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計6件)

- ① 竹内貴弘・木岡信治・宮崎均志: 結氷海域に建設される鋼構造物の推定損耗量: 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 74, 2018, CDR (Paper No. 94), 査読有
- ② 木岡信治・遠藤強・宮崎均志・竹内貴弘: 海水の摩擦による重防食被覆材の摩耗特性, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 74, 2018, CDR (Paper No. 94), 査読有
- ③ Takahiro Takeuchi, Shinji Kioka and Hitoshi Miyazaki: "ON THE THICKNESS OF SACRIFICIAL STEEL WALL FOR PROTECTION OF SEA ICE ACTION", ASCE Congress on Technical Advancement, 2017, 査読有

- ④ Shinji Kioka, Norihiro Maruta and Takahiro Takeuchi : Wear of steel and heavy duty coating caused by friction of sea ice ASCE Congress on Technical Advancement 2017, 査読有
- ⑤ 川村大徳・水木裕人・竹内貴弘・木岡信治・宮崎均志 : 鋼構造物の腐食摩耗促進に与える海水作用の影響について, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 72, 2016, CDR (Paper No. 94) , 査読有
- ⑥ Takahiro Takeuchi, Shinji Kioka and Naohiro Maruta : Effect of Sand inside Sea Ice on Wear of Corroded Steel Proc. of the 23th IAHR International Symposium on Ice, Ann Arbor, MI., CDR (Paper No. 4936855). ISSN: 2414-6331, 201, 査読有

[学会発表] (計 0件)

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
出願年 :  
国内外の別 :

○取得状況 (計 0件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
取得年 :  
国内外の別 :

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名 : 木岡 信治

ローマ字氏名 : (KIOKA, shinji)

所属研究機関名 : 国立研究開発法人土木研究所

部局名 : 土木研究所 (寒地土木研究所)

職名 : 主任研究員

研究者番号 (8桁) : 20414154