

## 14.6 海水作用や低温環境に起因する構造物劣化・損傷機構の解明と対策に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：寒地水圏研究グループ（寒冷沿岸域）

研究担当者：木岡信治，森昌也，井元忠博，山本泰司

### 【要旨】

本研究では、海水の作用や低温環境に曝される沿岸構造物の劣化機構を解明し、劣化現象を踏まえた合理的劣化対策を提案することを最終的な目標とするものである。劣化機構の一つとして、特に海氷の摩擦による鋼材の機械摩耗および腐食促進に着目した。オホーツク海沿岸部での海氷の現地調査より、沖合側およびその海氷の内部層にも砂の混入が認められ、その内部への浸透プロセスは、日射エネルギーを吸収した砂粒子の表層への貫入プロセスが一つの要因であることが判明した。砂を含んだ氷と SS400/SUS304 の金属材料とのすべり摩耗試験のほか、防食被覆鋼材（ウレタンエラストマー被覆）の試験も実施した。氷の摩擦による防食被覆の損耗率は SS400/SUS304 のそれより 1 桁大きいこと、砂を含んだ氷による摩擦の場合には、そのアブレシブ摩耗率は SS400/SUS304 の倍程度であること、粒径依存性は小さいこと、等が分かった。また、水温変化が腐食速度に与える影響が複雑であることを理論によって説明するとともに、DO の飽和度が大きい氷海域の腐食速度の方が大きい場合もあり得ることを示した。また、安価な犠牲鋼板による補修/対策を想定した暴露試験を実施し、有望であることを確認した。

キーワード：海氷、劣化、鋼構造物、腐食、摩耗

### 1. はじめに

北極海やオホーツク海など海氷の移動が活発な氷海域において、海氷による衝突や摩擦によって構造物の摩耗・変形・剥離などの損耗や損傷が発生する（図-1 参照）。氷海は、その氷による摩耗に加えて、低温で海中酸素濃度が高く腐食性が強いことから、鋼構造物の損耗が激しいといわれる<sup>1)</sup>。鋼材の損耗率は通常海域の 2 倍という報告例があるほか<sup>2)</sup>、コンクリートでは 20 年間で約 14cm も摩耗したという報告例<sup>3)</sup>もある。特に、昨今の気候変動による海氷減少は、海氷運動の活発化や漂流速度の高速化を招き、氷塊の衝突や、海氷の接触や摩擦による構造物の腐食や摩耗の促進などといった構造物の損傷・劣化が加速する可能性がある。事実、我が国においても、海水の接触・摩擦・衝突による鋼矢板式の護岸や導流堤等の著しい材料損耗（図-1 参照）や、コンクリート表面の摩耗や剥離で鉄筋が露出する等の被害事例があるなど、海氷によると思われる劣化損傷が非常に深刻な状態にあり、寒冷海域特有の劣化メカニズムの解明と対策法の立案が急務である。

材料損耗の観点からは、これまでに、海氷によるコンクリートの摩耗に関する研究が精力的になされ<sup>例え<sup>4)</sup>7)</sup>、

その摩耗メカニズムが明らかにされるとともに、実用的な摩耗推定方法が提案されている<sup>6)</sup>。しかし、金属材料（特に炭素鋼）については、いくつかの基礎的な研究例<sup>例え<sup>7)</sup></sup>はあるが、腐食が同時に進行する複合的な損耗ということもあり、その評価が大変難しく、種々の損耗要因の定量的把握が未だなされていないのが現状であった。

本研究では、海氷の作用や低温環境にさらされる沿岸構造物の劣化機構を解明し、その維持管理に資する損傷進行モデルや劣化現象を踏まえた合理的劣化対策を提案することを最終的な目標とするものである。次節に示すように劣化機構の要因は様々考えられるが、特に、海水の摩擦も考慮した低温環境特有の腐食や、海水による機



図-1(a) オホーツク海に面した導流堤の鋼矢板の損傷例

械摩耗[mechanical wear]による劣化機構に着目しながら、最終目標にむけて研究を進めている。



図-1 (b) オホーツク海に面した導流堤の鋼矢板の損傷例

## 2. 損耗のメカニズムとこれまでの研究経緯の概要および平成26年度の研究目的

著者らは、海氷による材料損耗のメカニズムの可能性を、①真実接触部の塑性変形に起因する凝着摩耗（凝着の後、せん断・剥離・脱落作用が随伴）<sup>8)</sup>、②材料表面の突起あるいは材料に介在する砥粒による切削であるアブレシブ摩耗<sup>9)</sup>、③サンドエロージョン<sup>9)</sup>に類似する海氷による繰り返しの腐食生成物の除去にともなう腐食促進（腐食摩耗）、④温度の差による電位差で電池が形成されることによる集中腐食、⑤海氷の繰り返し作用による腐食疲労、⑥それらの複合作用、等いくつか挙げている。

このうち、過年度の研究で上記①に着目した実験を行った結果、凝着摩耗による寄与はほとんど無視でき、腐食する材料については、氷の摩擦による腐食生成物の繰り返し除去による腐食の促進（上記③）によるものが大きいこと、それは接触圧力と摩擦速度に関係する酸素供給状態に依存することを示した。

また、海氷表面付近に混入した砂の研磨作用（アブレシブ摩耗の一種、上記②）による材料損耗の可能性に着目した一連の調査ならびに実験を実施した。オホーツク海沿岸部の海氷に含まれる砂の含有率の調査ならびに砂の混入プロセスについての簡易実験より、海氷の表面のみならず内部にも砂等の固形分が含まれ得ることを明らかにした。腐食の影響を無視できる SUS/純氷(Freshwater ice)との間に砂を介したすべり摩耗（アブレシブ摩耗）試験を様々な条件で実施した結果、損耗率は、砂の粒径や量に依存せず、微小で微量な砂でも切削能力を有するほか、自然海水を用いた試験も実施し、そのアブレシブ摩耗が実証された。

海氷接触によらない、低温環境そのものによる劣化要因を調べる目的で、温度差腐食（上記④）に関する基礎

実験を実施した。雰囲気の方が低温の場合の、正味の温度差に起因する腐食量への影響はあまりがないことが分かった。さらに、水槽実験より、鋼材の腐食速度は、水温が高い程、腐食速度が大きくなるというわけではなく、むしろ低水温側でやや大きくなり、反応速度と酸素拡散との兼ね合いから、水温変化が腐食速度に与える影響は複雑であることを確認した。

冬期のオホーツク海に面した現地施設において、材料の暴露試験を実施している。まず炭素鋼板(SS400)とステンレス板(SUS304)の暴露試験を実施し、その損耗状態や損耗速度を調べた結果、通常海域における腐食速度(mm/year)の標準値等と比べ数倍大きいものであり、海氷による繰り返し錆び除去による腐食促進やアブレシブ摩耗の可能性が示唆されたほか、寒冷地特有の複雑で複合的な要因によるものであることが分かった。さらに、鋼矢板防食対策（電気防食・重防食被覆）の耐氷性確認のための暴露試験より、通常海域の防食法の耐久性に課題のあることが分かった。

平成26年度では、引き続き、主としてアブレシブ摩耗に関する研究を継続し、海氷の現地調査とすべり摩耗試験を実施した。現地調査については海氷の固形分の含有率について調べ、昨年度と同様に多量のサンプル調査にもとづき、表層部、内部層の含有量、岸沖方向の氷の砂の含有量の違いにも着目した。すべり摩耗試験については、氷温や摩擦速度が損耗率へ及ぼす影響、自身の錆の介在によるアブレシブの可能性、さらに重防食被覆鋼材の損耗プロセスについても調べた。また平成25年度と同様に自然の海水を使用し、より実環境に近い状況下における、海氷内部への浸透プロセスに関する実験も実施した。また、海氷以外の低温環境下における海水中での鋼構造物劣化機構の解明の一環として、DO 拡散や反応速度（ボルツマン因子）を考慮した腐食速度の簡易式を構築し、水温変化のみを考慮した場合の寒冷海域の腐食性について考察した。最後に、冬期のオホーツク海に面した施設において、安価な犠牲鋼板による補修/対策を想定した暴露試験を実施、今後の課題について整理した。

## 3. 海氷の砂含有率と混入プロセスに関する研究

### 3.1 オホーツク海沿岸部での現地調査

図-2に示すように、砂が付着（あるいは含有）した海氷が漂流していることがあることはかねてから知られている<sup>10)</sup>。過去に海氷の砂の含有率の調査事例はあるが<sup>10)11)</sup>、多年にわたる多量のサンプル（サイト数、同一サイトでの採集個数等）が必要であるとの認識により、筆

表-1 オホーツク沿岸部における海水表面付近の砂の含有量〔0は変動係数〕

調査地点	採取部位	含有率(g/cm <sup>2</sup> )		調査日	備考
		質量パーセント濃度 (%)	単位面積質量 (g/cm <sup>2</sup> )		
止別川河口海岸	表層(2cm)	14.221(0.46)	0.257(0.57)	Feb.24, 2014	汀線より陸側へ3m
	内部	0.010(0.78)	—		
オムサロ海岸	表層(2cm)	0.008(0.68)	0.0001(0.58)	Feb.24, 2014	汀線より沖合へ3m
	内部	0.004(0.53)	—		
オムサロ海岸	表層(2cm)	6.958(1.12)	0.130(1.23)	Feb.19, 2014	汀線より陸側へ3m
	内部	0.195(1.94)	—		
オムサロ海岸	表層(2cm)	1.706(1.31)	0.035(1.41)	Feb.19, 2014	汀線より沖合へ3m
	内部	0.024(1.58)	—		
コムケ湖西側海岸	表層(2cm)	3.311(1.05)	0.040(1.11)	Feb.21, 2014	汀線より陸側へ3m
	内部	0.127(0.32)	—		
コムケ湖西側海岸	表層(2cm)	0.603(1.95)	0.011(2.03)	Feb.21, 2014	汀線より沖合へ3m
	内部	0.089(0.12)	—		

者らも、平成25年に引き続き、オホーツク海沿岸部における海水の表面付近の砂の含有量を定量的に調べた。

平成26年度の調査地点は、止別川河口海岸、オムサロ海岸コムケ湖西側海岸の3箇所である。対象とする流氷は、汀線より沖側と陸側のそれぞれに存在しているもの



図-2 砂が付着（混入）した海氷が漂流



図-3 汀線より沖側サンプルと調査の様子の例。  
下の写真は内部層のサンプル

のうち、目視により表面付近により砂が付着しているものとし、1個につき、その寸法とともに、表層部および表層から約10cmにおける内部層の2カ所のサンプルをそれぞれ採取した。一海岸あたり汀線より沖側と陸側においてそれぞれ6個の流氷について実施し（合計12個）、3地点で36個の流氷について実施した（表層・内部層合わせて72箇所）。含有率は採取した氷のサンプルに対する砂の質量パーセント濃度としたが、表層サンプルについては、単位面積あたりの砂の質量とした含有率も推定した。調査結果（平均と変動係数）を表-1にまとめた。図-3には、汀線より沖側サンプル調査の様子の例を示した。変色しているのが固形分つまりその微小な砂が付着あるいは含有しているのが分かる。本調査結果は、場所やサンプル採取部位により違いがあり、一概には言えないが、概略次のように推論できる。当然ではあるが、表層ほど含有率が高いこと、内部層の含有率は表層にくらべて1オーダー小さいこと、沖合の氷は陸側の氷とくらべ含有率は低い傾向にあること、である。特に沖合側としてその氷の内部層にも砂が含有していることは注目される。砂の含有率（質量濃度）は10<sup>2</sup>~1%のオーダー範囲でかなりバラツキがあるが、平均的には数%と考えられ、これらの傾向は平成25年度までの調査と大体同じで、濃度の範囲については、他の研究者らによる調査結果<sup>10)11)</sup>とも概ね合致する。

今回の調査でも、沖合の氷、そして表面のみならず内部にも、わずかであるが砂が浸透している事が定量的に確認された。平成25年度実施した、現地で採取した自然海水を用いたアブレンブ実験により、その含有していたごくわずかな砂でも切削能力があることを明らかにしている。こうして、アブレンブ摩擦による材料損耗への寄与の可能性がさらに増したといえる。

### 3.2 海氷の砂の混入プロセスに関する検討

混入プロセスについて、伊藤ら<sup>10)</sup>も指摘しているよう

に、漂流している海氷に、飛砂や時化によって舞い上がる海底砂が付着する場合、あるいは砂浜に海氷が遡上して付着したのち、海へ戻る場合、などが考えられる。内部浸透については、表面についた砂が日中の日射によって一旦融解したのち再凍結するというサイクルの結果（あるいは降雪や波による被覆もある）、内部へ取り込まれていくという考え方が可能であるし、海域において、海中の微粒砂等の固形成分を取り込みつつ氷が成長していく結果であるとも考えられる。図-4に、斜里の防砂堤の沖合のラフティングやパイルアップによる氷塊（水深約5～6m）を示したが、茶色に変色しており、固形成分が含まれているのが分かる。これは、陸域からの飛来や、浮遊砂等が混じった海水の付着によるものと考えられ、上述のような単に砂浜に海氷が遡上して付着したのち海へ戻る場合以外にも要因があることが分かる。このように、氷中の砂の由来も様々で、その取り込み過程も様々であると考えられる。過年度まで、表面に付着した砂の内部への取り込みの機構について実験を行っているが、特に平成25年度は現地の流氷を採取して実施し、いくつかの可能性について検討した。その結果、砂粒子が一樣に氷内部へ沈下し、表層の融解・再凍結の繰り返しにより、粒子が内部へ閉じ込められるといったプロセスであり、日射エネルギーを吸収した砂粒子の表層への貫入プロセスが一つの要因である事が判明した。本研究では、平成25年度と同様に現地の流氷を用い、さらにいくつかの条件を追加して、表面に付着した砂の内部への取り込みの機構についての実験を行った。



図-4 沖合のアイスリッジ表層に付着した固形成分

実験方法を次に示す。2015年の1月に、①オホーツク沿岸部に来襲している海氷のうち、できるだけ砂の付着していない、比較的きれいなものを6つ採取する、②1辺30cm程度に切り出し、のこぎりやチェーンソーなどを用いて、表面部を除去し平らに整形する。③その表面部に、流氷を採取した付近の砂を $0.05\text{g}/\text{cm}^2$ および $0.1\text{g}/\text{cm}^2$ の量で一樣に散布する。④上記②③の手順で、2種の散布量および散布しない3種類の試験用海水をそれぞれ2

個ずつ準備し、日向と日陰でそれぞれ3個暴露する、といったプロセスである。図-5(a)に日向/日陰、砂の散布量の違いに応じた、氷の表面状態の変化を示す。図-5(b)には、試験体の縦断面を示す。表面上の砂を乱さないように、注意深く試験体の下部より上部へかけて手ノコで切断したものである。

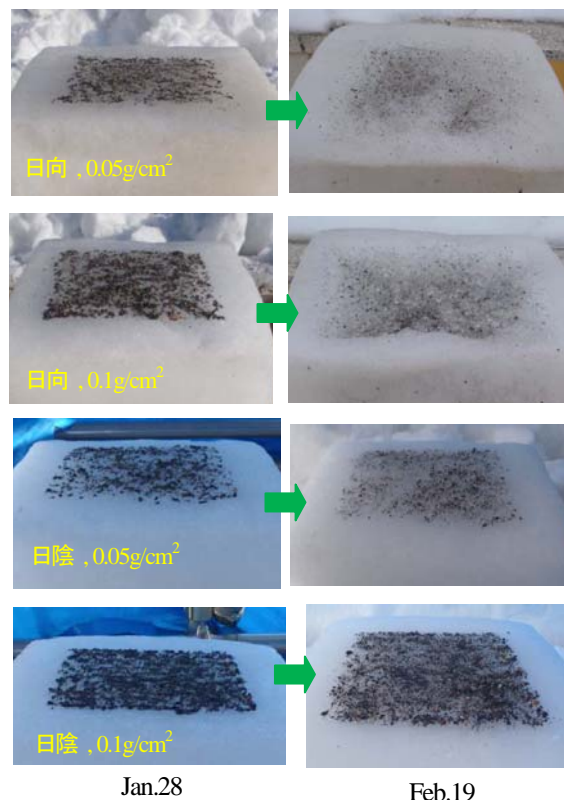


図-5(a) 固形成分の内部浸透プロセスの簡易実験（日向/日陰、砂の散布量の違いによる氷の表面状態の変化）



図-5(b) 試験体の縦断面の例（日陰、 $0.05\text{g}/\text{cm}^2$ ）

これらから、日向で散布量の多い $0.1\text{g}/\text{cm}^2$ の方が、他の条件に比べ散布したエリアが沈下していること、断面観察より、日陰でさえも砂粒子の表面からの貫入が見られること、散布量や日向/日陰による、見かけの氷表面（最終の融解した表面）からの個々の砂粒子の貫入状況にあまり違いはないように見えること、などが推察される。これらの傾向は、日陰といえども、放射熱や対流熱伝達で砂粒子が発熱して貫入し得ること、日向の場合には強

い放射熱により氷も全体的に融解すること（日向/日陰の違いによる相違は少ないことの説明）、それによって砂粒子も系外へ流出しやすく、初期と比べ最終段階での砂粒子の量に大きな違いがなくなる（散布量の違いによる相違は少ないことの説明）、等、実験方法の不手際も含めた要因と思われる。なお、平成25年度の実験では、砂の流出防止のため、あらかじめ試験海氷の上にプールを設けたこと、日中の最高気温が+2℃となるなど、比較的暖かいこともあったが、砂粒子が一様に氷内部へ沈下し、融解水が流入・再凍結して、散布した砂すべてが完全に閉じ込められる現象がみられた。現実には、初期のプールや融解水がなくとも、自身の貫入により表面に残存した砂粒子にさらに降雪や波によって水分が補給され、その再凍結により、見かけ上、より内部へ閉じ込められる事も考えられる。なお、図は省略するが、砂を散布しない場合でも、飛砂により非常に細かい固形分が表面に付着している状況が確認され、図-4も踏まえると、氷の固形分の付着は飛砂の可能性も十分に考えられる。

以上より、過年度に続き、実際の流氷を用い、より実環境に近い環境下における実験において、風（飛砂）による表面の固形分の付着、および放射熱等により発熱した砂粒子の貫入プロセスにより、表層あるいは内部へ固形分が取り込まれること等を確認した。

#### 4. 海氷によるすべり摩擦・摩耗(アブレシブ)試験

##### 4.1 実験方法

実験方法については、既報と同様であるが、簡単に説明しておく。摩擦・摩耗試験方法には様々な形式が知られているが<sup>12)</sup>、Itohら<sup>6)</sup>と同様な理由により、面接触の滑動式（ブロック・オン・プレート）を採用した。図-6に示すように、鋼製ケースに収納された氷（幅8cm、高さ5~10cm、長さ70cm）に、構造物を意図した金属供試体を、油圧ジャッキで適当な圧力で氷に接触させ、往復運動により摩擦させる。金属供試体は、摩擦方向に10cm、幅は氷の角柱と同じ8cm、厚さは14mmの寸法（氷との接触部10cm×8cm）をもつプレート型で、同図に示すように、これをホルダーに固定後、油圧ジャッキ

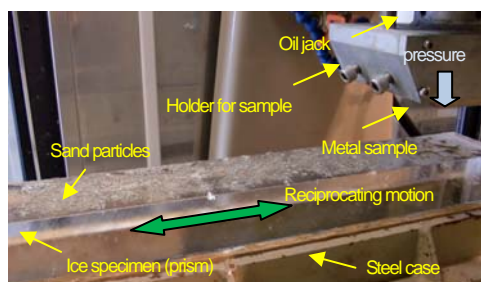


図-6 氷の表面に砂をセットした状態

に取り付ける。また、供試体のエッジ部による氷の切削防止のため、エッジ部には5mm程度の面取りを施した。このため実際の氷との見かけの接触面は9cm×8cmとなっている。供試体表面は正面フライス盤加工による表面仕上げ（粗さ; 6S）を行っている。実験では、金属供試体を油圧ジャッキで、予め指定した圧力で氷に接触させ、前述の氷の入ったケースを一定速度の往復運動（振幅距離 30cm）により摩擦させる。その動作の基本原理は、AC サーボモーターでボールネジを回転させることで実現しており、長距離の安定したすべり摩擦が可能な機構となっている。適当な摩擦距離の後、電子天秤（精度 1mg、A&D(株)、分離型上皿天びん AD4212A-1000）を用いて、質量変化を計測することにより、摩耗（損耗）量を推定した。他の計測項目として、摩擦力と接触圧力を推定する事を目的として、水平方向および鉛直方向の荷重、摩擦方向の変位を計測した。

##### 4.2 実験条件

まず、平成25年度と同様に、砂粒子を含んだ氷による金属材料のアブレシブ摩耗試験を実施した。腐食の影響を除去するため、基本的には、金属材料にはSUS（ビッカース硬さ;162）を、氷は人工的に作成した純氷（Freshwater ice）を用いている。金属と海氷の砂の介在の方法としては、既報と同様、氷表面に、砂粒子を一様に散布し、霧吹きで表面に水を吹きつけ再凍結させた。砂は、中央粒径 0.7mm（均等係数 3.8）の川砂を 0.05g/cm<sup>2</sup> となるようにセットした。実験条件は、これまでの標準条件と同じ、雰囲気温度-10℃、摩擦（移動）速度 0.06cm/s、接触圧力 0.6MPa、最大摩擦距離 50km とし、摩擦（移動）速度を 1~15cm/s、雰囲気温度を-4~-30℃に変化させて実施し、おもにアブレシブ摩耗の摩擦速度依存性と温度依存性について調べた。さらに、腐食生成物自体が鋼材表面を摩耗させるかどうか調べるため、砂粒子ではなく自然錆が介在したアブレシブ摩耗実験も実施した。

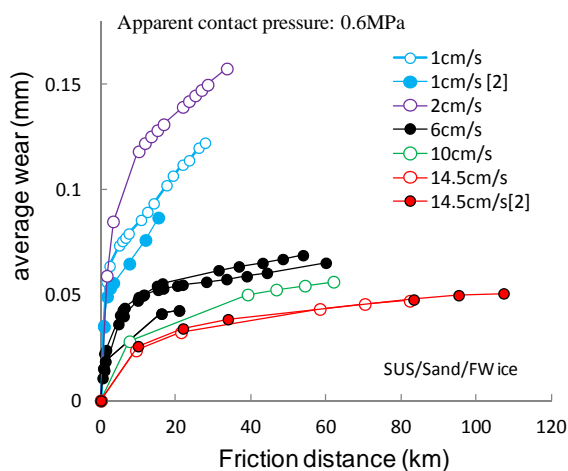
さらに、平成26年度では、重防食被覆鋼材の氷の耐摩耗性を調べるため、炭素鋼にウレタンエラストマー（2000 μ）を被覆した供試体を用いたすべり摩耗試験を行った。この供試体について、通常の摩擦試験（砂を含まない淡水氷）とアブレシブ摩耗試験を実施し、それらの実験の標準条件は前述と同様とし、それぞれの実験で、接触圧力を 0.2~1.2MPa に変化させ、圧力依存性について検討した。またアブレシブ摩耗試験については、砂の粒径が及ぼす影響を調べるために、0.01g/cm<sup>2</sup>~0.12g/cm<sup>2</sup>に変化（前述の川砂のほか、いわき珪砂 1、3号、東北珪砂 4、5、8号）させて実施した。なお、時間の都合上、今回実施

したすべての実験の繰り返し数を基本的に1とした。

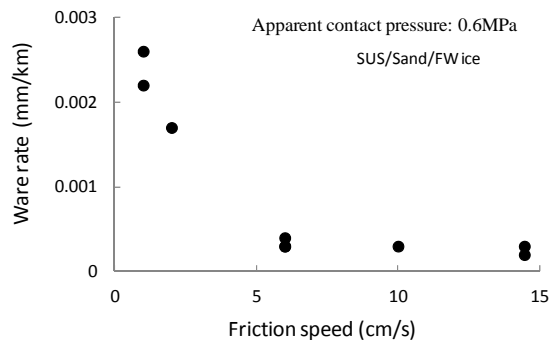
### 4.3 実験結果と考察

#### (1) 金属材料のアブレシブ摩耗特性

まず、図-7には摩擦速度の変化によるアブレシブ摩耗の推移を示した。定常損耗率（初期損耗率も同様）は、速度上昇とともに低下し、ある摩擦速度以上では一定値となることが推察される。しかし、本実験では、特に低速度の場合、同距離を摩擦させるのに必要な時間は多くなること、またクリープによる氷の消耗もあったことなどの諸事情もあり、中・高速度での最終距離から見れば、途中で試験を停止した形となっている。したがって、低速度ほど、初期から定常への移行する摩擦距離が増大するならば、特に1~2cm/sでの定常摩耗率が推定できず、暫定値に過ぎない。摩擦速度による影響があるとすれば、金属もしくは氷のクリープ特性に起因し、低速度ほど貫入量が上昇するためであると考えられる。これはまた、見かけの摩擦係数の速度依存性と同様の傾向となっている。いずれにしてもおよそ5cm/s以上では一定値となり、畠ら(1968)<sup>13)</sup>も、砂による炭素鋼板の摩擦試験（回転式）より、摩擦速度が10~30cm/sの範囲では摩耗量はほとんど変化しないことを示している。実用的に考えると、流水期間が決まっており、氷は一定速度で摩擦すると考



(a) 摩擦距離と摩耗量と関係



(b) 定常損耗率の推移

図-7 摩擦速度の違いによる損耗特性 (Fresh water)

えると、摩耗量は定常損耗率に摩擦速度を乗じた単位時間あたりの摩耗量で示すことが妥当であるから、低速度での定常損耗率が高くとも、移動距離は小さいため、結局は摩耗量が大きくならないと言える。

次に図-8には氷温変化によるアブレシブ摩耗率の推移および人工海氷と純氷 (Fresh water ice) との比較 (両者ともSUS使用および砂介在) を示した。まず純氷について見てみると、損耗率は温度低下にほぼ比例して増加している。これを図-9に示す簡易モデルにおいて説明してみる。直径 $D_0$ 、頂角 $2\theta$ を持つ円錐形の砂粒子が、損耗深 $d$ で矢印方向に金属を切削していると考ええる。その場合、図のように氷側の塑性流動圧(硬さ)( $p_i$ )が金属( $p_m$ )よりも十分小さく砂粒子が埋め込まれていると仮定すると(鉛直荷重を $W$ )、簡易的に、

$$W = \pi a^2 p_i = \frac{1}{2} \frac{\pi D_x^2 p}{4}$$

よって、摩耗量 $V$ は、摩耗距離を $L$ として、

$$V = N_e a^2 \frac{2p_i}{p_m} L \cot \theta \quad 1 > 2W / \pi a^2 p > 2p_i / p$$

ここに、 $N_e$ は、掘り起こし摩耗に寄与する有効粒子数である。したがって、損耗量は氷の塑性流動圧力(あるいは硬さ)に比例し、金属のそれに反比例することになる。対馬ら(1978)<sup>14)</sup>は、氷(単結晶)の塑性変形の圧力(掘り起こし強さ)は氷温低下に概ね比例して増大する実験結果を得ているが、この結果を $p_i$ に準用すれば、概ね摩耗量の温度依存性を説明できる(同図波線参照)。ただし $p_m$ も同様に温度低下とともに上昇すると考えられるが、氷の変化に対して無視できると暗に仮定している。また、人工海氷の場合を見ると、先の純氷よりも4~10倍程度小さくなるのが分かる。一般に人工海氷の方が柔らかい

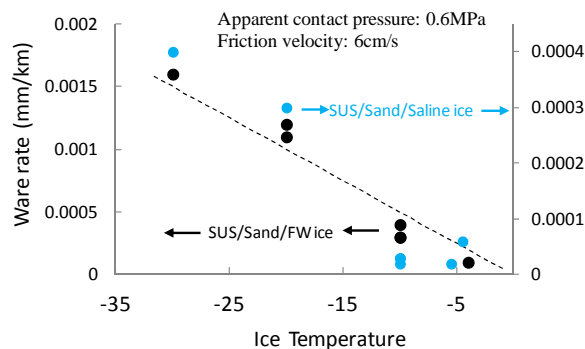


図-8 氷温変化によるアブレシブ定常摩耗率の推移および人工海氷と純氷 (Fresh water ice) との比較 (両者SUS304, 砂介在)

(空洞が多い) ことに起因し、これは上式からも推察できるが、海水の塑性流動圧力(硬さ)の温度依存性を調べるのは難しく、文献も少ないことから現段階ではその推定は困難である。以上より摩耗量は氷温にも大きく影響することが明らかとなった。

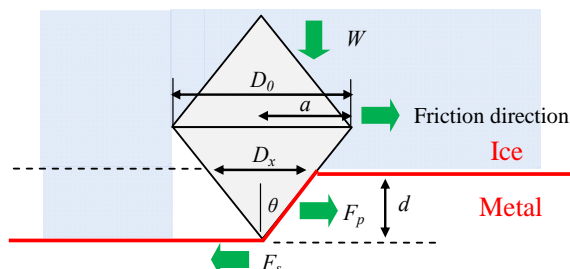


図9 アブレシブ摩耗の簡易モデル(砂粒子が氷側に深く埋め込まれている場合)

次に、鋼材自身から生成される腐食生成物つまり錆によるアブレシブ摩耗について検討する。過年度では、市販の酸化鉄III (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) (塵1級純度 95%(T)) を砂と同じ程度の量を散布した試験を実施した結果、その定常摩耗率は、砂のそれとほぼ同程度であり、特に粒子にある程度の硬さがあれば(氷よりも硬い)、介在物質によらない柔軟性を有していると考えた。また、平成25年度の報告でも論じたように、小さな粒径の砂や、砂混入の自然の流氷と同じく、試験の初期から定常を示した。平成26年度では、SUSとSSの試験体をそれぞれ半分に分断して、両者を接合し、人工海氷(介在物質なし)と摩擦させたほか、SUSの代わりにTi(チタン)を使用した実験も実施した。つまり、SS側で発生する腐食生成物がSUS側およびTi側のアブレシブ摩耗への寄与を調べた(図-10参照)。先のFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>粉末とは異なり、定常摩耗率は砂によるものに比べ、3桁程度小さくなり、

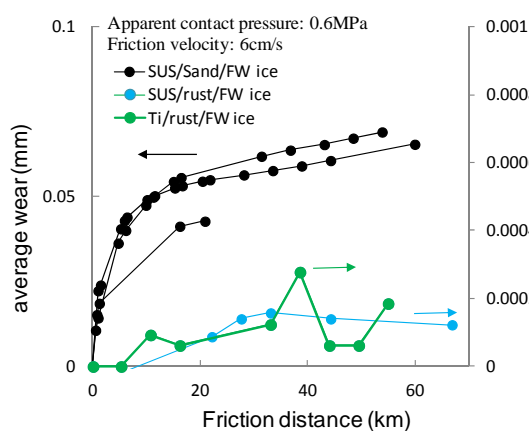


図-10 SS400 から発生する錆介在時の SUS と Ti の摩擦距離と摩耗量との関係の比較 (Fresh water ice)

人工海氷 vs.SUS (介在物質なし) 程度の損耗率であった。つまり腐食生成物による摩耗(研磨)作用はほとんど確認されなかったが、この条件での腐食生成物は先のFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> よりもかなり柔らかく、切削作用はないものと判断できる。本来、腐食生成物は様々で複雑な組成から成り、それは環境条件や時間経過とともに変化するため、実用的レベルにおいてはその予測は極めて困難であるが、上の一連の実験によっては、錆も場合によってはアブレシブ摩耗の要因となることは考慮しておくべきと言える。

(2) 重防食被覆鋼材の摩耗特性

図-11(a)には、接触圧力の違いによる重防食被覆試験体の摩耗(凝着)進行曲線の比較を示した。なお氷は Fresh water ice を用いている。既報では、氷よりも遥かに硬い金属材料の凝着摩耗はほとんどないことを明らかにしたが、重防食被覆(ウレタンエラストマー)では、氷の供試体表面に被覆材の移着があり、凝着摩耗が確認された。

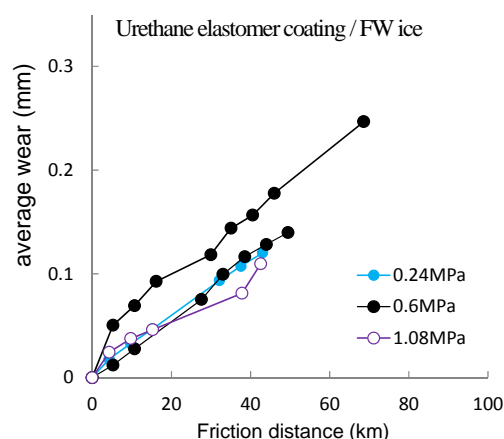


図-11(a) 接触圧力の違いによる重防食被覆試験体の摩耗(凝着)進行曲線の比較

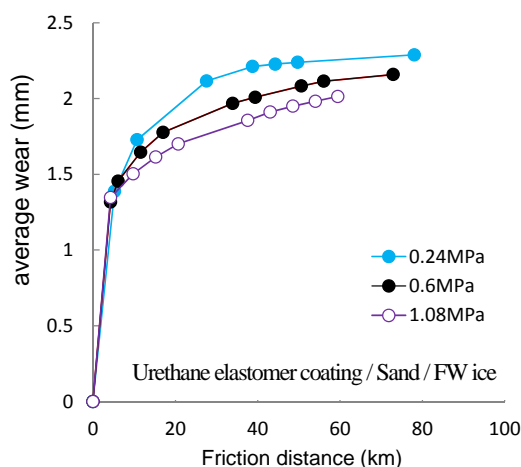


図-11(b) 接触圧力の違いによる重防食被覆試験体の摩耗(アブレシブ)進行曲線の比較

しかもその進行は、直線的であることがわかる。またその損耗率 ( $10^3 \text{mm/km}$  のオーダー) は非常に大きく、既報の腐食摩耗、そして砂が介在した金属材料のアブレシブ摩耗の定常損耗率より 1 オーダー大きいことは注目に値する。さらに、金属同士の凝着摩耗と異なり、明らかな接触圧力の依存性は見られなかった。

同図(b)には、同じ条件で、氷に砂が介在した場合の摩耗進行曲線の比較を示した。既報の金属材料の摩耗進行曲線と同様に、初期に大きな損耗率 (曲線の勾配) を示すが、徐々にその損耗率が減少し、一定の損耗率で推移する傾向にある。これは、初期に表面に付着していた砂が徐々に系外へ吐き出され、砂の含有量、あるいは、材料/砂/氷の損耗状態が定常状態に落ち着くためである。試験体表面には、摩擦方向の深い溝が形成されていた。試験体表面には、砂粒子による掘り起こしによる摩擦方向の直線状の傷が多くみられた。その傷は定常状態においては直線状 (深い溝が形成) であり、砂粒子が氷と金属との間で自由に転がっている訳ではなく、氷に押し込まれ固定化しているものが多いと推察される (2 元摩耗)。定常損耗率で評価すると、先の凝着摩耗と同様に、接触圧力の依存性は見られなかった。また、凝着摩耗にくらべ数倍程度、アブレシブ摩耗によるものが大きい結果となった。

次に、図-12 には、砂の有無および粒径の違いによる重防食被覆試験体の摩耗進行曲線の比較を示した。粒径に応じた明確なオーダーは確認できないが、初期および定常損耗率で評価すると、だいたい中央粒径が大きくなるにつれ損耗率が大きくなる傾向にあるものの、ある粒径以上では一定になると考えられる。これは、本来同一条件でもバラつきが大きいことに加え、大きな粒径でも

初期の段階でクラッシュ (破碎) するため、粒径に大きく依存しないことに起因すると思われる。なお、特に初期の損耗率については、均等係数にはやや依存性があるようであり、均等係数が大きくなるにつれ、摩耗率も上昇し、これがシバラツキの要因になっているともいえる。

こうしてアブレシブ摩耗はバラつきが大きく複雑であるが、前述のように、氷単独による凝着摩耗も大きく、定常損耗率で評価すれば、アブレシブ摩耗による損耗率は、凝着摩耗による損耗率の 2~3 倍程度を見込めば良い。また海氷の接触と摩擦が常にあるところでは、重防食被覆はすぐに消耗すると考えられるため、その適用には十分留意する必要がある。

### 5. 低温環境における腐食速度に関する検討

平成 25 年度に実施した、水槽を用いた温度差腐食に関する基礎実験より、腐食速度は、本実験での水温範囲 ( $0 \sim 13.7^\circ\text{C}$ ) では、水温が高い程、腐食速度が大きくなるというわけではなく、むしろ低水温側でやや大きくなった。腐食速度に影響を与える因子である水温、とりわけ、そこに内在する化学反応速度と酸素拡散の寄与は、その水温変化によって相反するため、腐食速度に与える影響は複雑であることを確認した。

ここでは、その DO 拡散や温度に起因する反応速度 (ボルツマン因子) を考慮した腐食速度の簡易式を構築し、それを用いて、水温変化のみを考慮した場合の温暖 (通常) 海域と寒冷海域の腐食速度の季節を通じた変化等を概略的に調べる。ひいては低温環境の方が腐食しやすい傾向にあるのかを大局的に推論するものである。

鋼材の腐食速度は、アレニウス型の温度依存性<sup>(例えば15)16)</sup>、(水温変化に起因する反応速度) および DO の拡散律速支配型 (反応物の濃度に依存) を考慮し、さらに、次式のように、その「反応速度 (ボルツマン因子)」と「反応物の濃度」との積であらわされると仮定する。

$$V = Ca \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$

ここに、 $C$ : 反応物の濃度、 $E$ : 活性化エネルギー、 $R$ : 気体定数、 $T$ : 絶対温度、 $a$ : 頻度因子

さらに、反応物の濃度は、ここでは、溶存酸素量(DO)に比例するとし、次式のように、塩分量( $S$ )と水温( $T$ )で決まる飽和 DO( $DO_{SAT}$ )と飽和度( $k$ )の積で表されるとする。

$$C \propto DO = k \times DO_{SAT}(S, T)$$

なお、飽和 DO の算定には Truesdale の式<sup>17)</sup>を用いた。

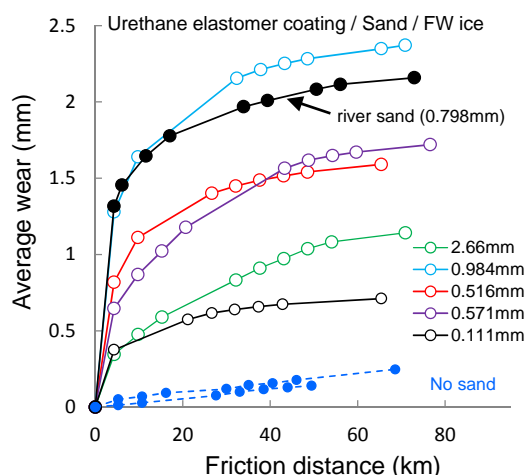


図-12 砂の有無および粒径の違いによる重防食被覆試験体の摩耗進行曲線の比較



ここで流氷が来襲するオホーツク海域と本州の海域における腐食速度を推定するため、仮に、前者と後者の代表をそれぞれ紋別港、神戸港に選び、それぞれの1年を通じた平均的な水温変化を推定した。これには日本海洋データセンターが提供する水温データ<sup>18)</sup>を使用し、2003～2009年までの日平均気温を抽出し、それらのアンサンブル平均をとることにより、図-13に示すように、年間の平均水温変化を推定した。また、 $S=3\%$ 、炭素鋼の活性化エネルギー $E=1.6 \times 10^4 \text{J/mol}$ <sup>19)</sup>と仮定した。さらに、筆者らの数年にわたる全国の港湾内のDO調査より、オホーツク海の方が本州より、数割、飽和DOが高いことが分かっている。その概要は来年度報告するが、ひとまずここでは、神戸および紋別の飽和度 $k$ をそれぞれ0.9、1.1と仮定した。以上の手続きより、神戸港と紋別港内の炭素鋼の腐食速度の年間変化を推定し、両者を比較したものを図-14(a)に示す。

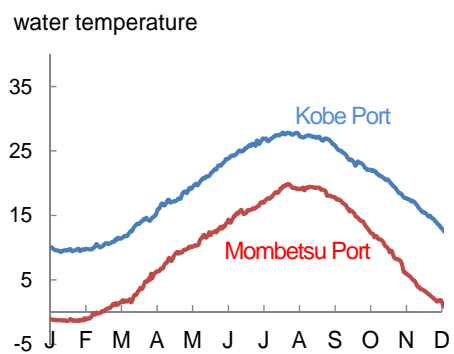


図-13 神戸港と紋別港の年間の平均水温変化

この図より、年間を通じた腐食量（腐食速度の年間積分値）が、神戸港に比べ約2割ほど紋別港の方が高いこと、両者とも夏期に腐食速度が高くなること、また紋別に着目すると、最も気温が低くなる頃にも腐食速度が極大値を持つことなどが理解できる。特に後者は、前述の「水温が高い程、腐食速度が大きくなるというわけではなく、むしろ低水温側でやや大きくなった」という結果を説明することができる。さらに、仮に両港で飽和度が等しい場合（ $k=1$ ）の結果を同図(b)に示した。この場合には、年間を通じた腐食量が、約2%程度、神戸港の方が大きくなったが、ほとんど変わらないと考えてよく、水温変化のみを考慮した場合には、温暖海域での腐食量の方が寒冷海域のそれよりも常に高くなるとは限らないことが分かる。また両者を比較すると冬季においてはその腐食速度は逆転していることも興味深い。ただ、本検討では、水温変化のみの検討であり、汚染物質やその他の流動環境等により腐食速度が変わる可能性があること

に注意する必要がある。

以上より、腐食速度に影響を与える因子である水温、とりわけ、そこに内在する化学反応速度と酸素拡散の寄与は、その水温変化によって相反するため、腐食速度に与える影響は複雑であることを理論式によってこれを確認するとともに、DOの飽和度が大きい氷海域の腐食速度が大きいことを示した。ゆえに流氷の影響を考慮しないとしても、腐食速度に留意する必要がある。また、仮にDO飽和度が通常海域と等しいとしても、低温環境の腐食速度の方が決して小さいとは限らないことを示した。

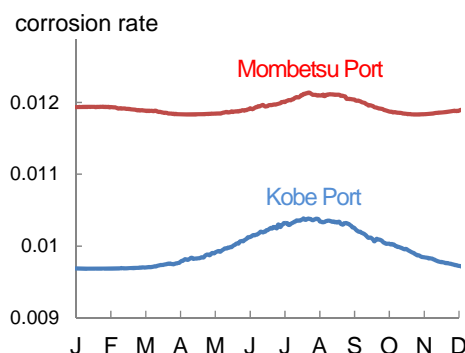


図-14(a) 神戸港と紋別港の腐食速度の推定値の比較（それぞれ $k=0.9, 1.1$ の場合）

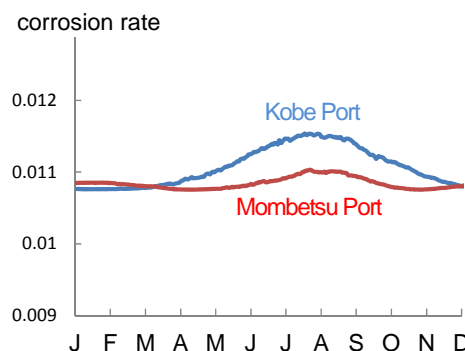


図-14(b) 神戸港と紋別港の腐食速度の推定値の比較（両者とも $k=1$ とした場合）

## 6. 鋼矢板の劣化対策のための暴露試験

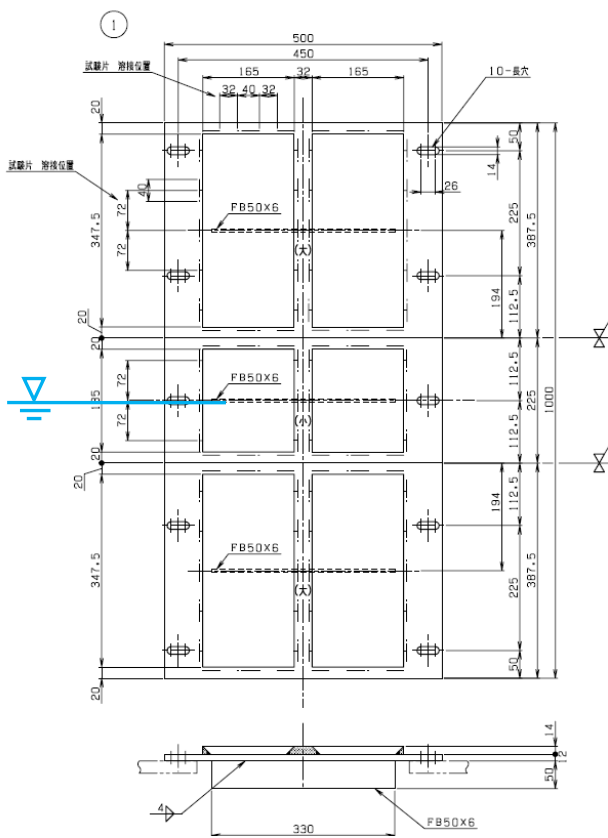
平成25年度では、氷海域における鋼構造物の劣化状況や通常海域で施される防食対策の適用性を調べることを主な目的とし、実海域において暴露試験を行った。電気防食および重防食被覆による対策を想定し、それぞれ、アルミ陽極と2mmウレタンエラストマー被覆した炭素鋼板を、オホーツク海に面した施設（斜里漁港防砂堤先端付近）の鋼矢板に取り付け、海氷が来襲する期間中暴露し、それらの耐久性を目視によって調べた。その結果、アルミ陽極が破損し、その耐久性に課題あることが分かった。一方、重防食加工試験体は、短期間では大きな損

傷・劣化は見られないが、端部やボルト周辺部に剥離が見られたほか、多数の細かい引っ掻き傷が確認され、海水摩擦(固形分による摩耗)による可能性が示唆された。

平成26年度では、対策工法として、もっとも安価な犠牲鋼板による補修/対策を想定した暴露試験を同一サイトにおいて実施した(新日鐵住金株式会社北海道支店との共同実験)。図-15、16には、犠牲鋼板試験体とその設置状況を示す。犠牲鋼板は、材料の貫通孔や劣化が顕著な箇所に、炭素鋼板をその必要な部分のみ溶接によって接合する事を想定している。腐食代の考え方を踏襲し

ており、シンプルではあるが、必要なところをピンポイントで容易に補修できる事から、確実な方法であるとともに材料費および施工費の面からも有利であることが期待される。さらに、溶接材料とその人件費を抑えること、それから水中溶接による溶接部の悪影響(急冷による溶接部の硬化、水素脆化、欠陥等<sup>20) 21)</sup>、ひいては母材への悪影響等を考慮して、溶接部をできるだけ少なくすること、さらには低温環境および流氷の作用による溶接部の劣化・損傷、等が主な課題となる。

試験体は同図に示すように、鋼矢板にベースプレート(500mm×1000mm)を設置し、その上に1ブロックあたり6枚の犠牲鋼板を溶接によって接合する。その溶接方法は同図に示すように開先の異なるAおよびBの2パターンとし、溶接を間欠的に行う。さらにその溶接部には、エポキシ被覆材であるナプロリヤーNを被覆した。この被覆材は厳しい腐食環境にある鋼構造物の新設や塗り替え等実績がある。厚塗りが可能であり、高度な環境遮断機能を有し、低い下地処理でも優れた耐久性を発揮するという特長がある。本暴露試験ではこの試験体を2ブロック設置したほか、流氷の接触荷重を計測するため、矢板に3つの土圧計を設置した。なおこの試験体の中央部がちょうどLWLとなるよう設置し、流氷来襲時期を挟む2013年7月～2014年4月下旬まで設置した。



犠牲鋼板取り付け要領

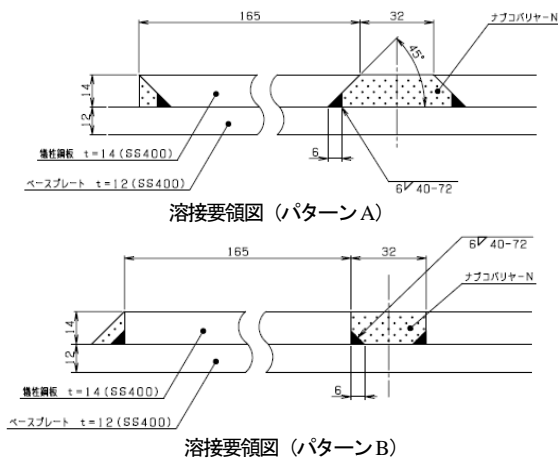


図-15 犠牲鋼板試験体



図-16 試験体の設置状況(暴露直後)

図-17には暴露試験後の試験体を示す。本試験サイトは防砂堤先端付近で流氷の接触が活発なところであるが、目視によれば、溶接部やその被覆材もほぼ健全な状態を維持しており、氷海域における鋼矢板の補修方法のひとつとして犠牲鋼板は有望と考えられる。しかし経年にわたる劣化、それに流氷の衝突や接触状況も年変動があるため、長期にわたる暴露試験が必要である。なお、残念ながら荷重計測システムが流氷によって損壊を受けたため計測できなかった。

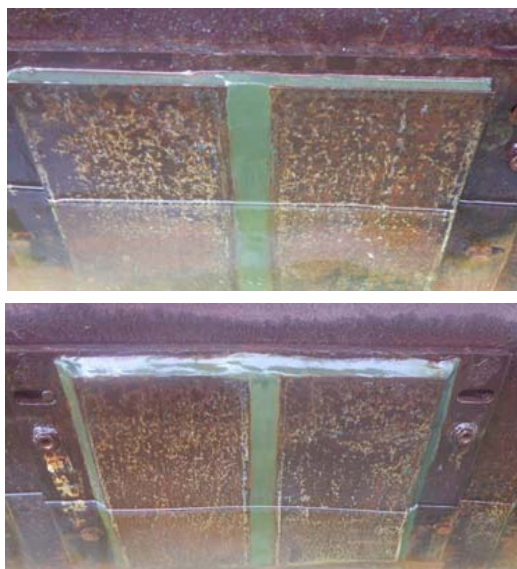


図-17 暴露後の試験体の状況(2014. 4. 25撮影)  
(上下それぞれパターンA, B)

## 7. 主要な結論

海水の砂の含有率に関する現地調査より、

- (1) 表層ほど含有率が高い事、内部層の含有率は表層にくらべて1オーダー小さく、沖合の氷は陸側の氷とくらべ含有率は低い傾向にあったが、沖合側としてその氷の内部層にも砂が含有していることは注目される。
- (2) 砂の含有率(質量濃度)は $10^{-2}$ ~1%のオーダー範囲でかなりバラツキがあるが、平均的には数%と考えられ、これらの傾向は昨年度までの調査と大体同じで、濃度の範囲については、他の研究者らによる調査結果<sup>10)11)</sup>ともだいたい合致した。

海水の砂の混入プロセスに関する検討より、

- (3) 過年度に続き、実際の流水を用い、より実環境に近い環境下における実験において、風(飛砂)による表面の固形分の付着、および放射熱等により発熱した砂粒子の貫入プロセスにより、表層あるいは内部へ固形分が取り込まれること等を確認した。

砂粒子を含んだ氷による金属材料のすべり摩擦・摩耗(アブレシブ)試験より、

- (4) 定常損耗率(初期損耗率も同様)は、速度上昇とともに低下し、ある摩擦速度以上では一定値となる事が推察された。金属もしくは氷のクリープ特性に起因し、低速度ほど貫入量が上昇するためであると考えられる。
- (5) 損耗率は温度低下にほぼ比例して増加した。これを氷の塑性流動圧力の氷温度依存性を考慮した粒子

の材料への切削モデルから、その温度依存性を説明した。

- (6) 鋼材自身から生成される腐食生成物つまり錆によるアブレシブ摩耗について検討した結果、それによる摩耗(研磨)作用はほとんど確認されなかった。重防食被覆鋼材(ウレタンエラストマー2000 $\mu$ 被覆)のすべり摩耗試験より、

<氷に砂が混入していない場合>

- (7) 氷の表面に被覆材の移着があり、凝着摩耗が確認された。その摩耗量は摩耗距離に比例して増大した。また、明らかな接触圧力の依存性は見られなかった。
- (8) その損耗率は非常に大きく、金属材料のアブレシブ定常損耗率より1オーダー大きい。

<氷に砂が混入している場合(アブレシブ摩耗)>

- (9) 金属材料と同様に、初期に大きな損耗率(曲線の勾配)を示すが、徐々にその損耗率が減少し、一定の損耗率で推移する傾向にある。
- (10) 粒径に応じた明確なオーダーは確認できないが、損耗率で評価すると、だいたい中央粒径が大きくなるにつれ損耗率が大きくなる傾向にあるものの、ある粒径以上では一定になると考えられる。
- (11) 均等係数にはやや依存性があり、これがバラツキの要因と推察された。

- (12) 砂が混入していない氷による凝着摩耗も大きく、定常損耗率で評価すれば、アブレシブ損耗率は、凝着による損耗率の2~3倍程度を見込めば良い。

- (13) 海水の接触と摩擦が常にあるところでは、重防食被覆はすぐに消耗すると考えられるため、その適用には十分留意する必要がある事が推察された。

低温環境における腐食速度に関する検討より、

- (14) DO拡散や温度に起因する反応速度(ボルツマン因子)を考慮した腐食速度の理論式を構築した。
- (15) 腐食速度に影響を与える因子である水温、とりわけ、そこに内在する化学反応速度と酸素拡散の寄与は、その水温変化によって相反するため、腐食速度に与える影響は複雑であることを理論式によってこれを確認するとともに、DOの飽和度が大きい氷海域の腐食速度が大きいことを示した。ゆえに流水の影響を考慮しないとしても、腐食速度に留意する必要がある。また、仮にDO飽和度が通常海域と等しいとしても、低温環境の腐食速度の方が常に小さいとは限らないことを示した。

鋼矢板の劣化対策のための暴露試験より、

- (16) 安価な犠牲鋼板による補修/対策を想定した暴露試

験を実施した。特に、溶接材料と人件費を抑えること、水中溶接による母材への悪影響等を考慮して、溶接部をできるだけ少なくすること、さらには低温環境および流氷の作用による溶接部の劣化・損傷、等が主な課題となるが、1シーズンの流氷来襲を経た段階では、溶接部やその被覆材もほぼ健全な状態を維持しており、氷海域における鋼矢板の補修法のひとつとして犠牲鋼板は有望と考えられる。

#### 参考文献

- 1) JOGMEC 編：海洋工学ハンドブック，第3版，2005.
- 2) Smuga-Otto, I.: Factors Influencing Corrosion of Vessels and Offshore Structures in Arctic Seawater, Corrosion 86, 1986.
- 3) Janson, J. E. : Report No. 3, Results from the winter season 1988-1989, Conclusion after the three winters 1986 - 1989. Joint Industry Study, Field Investigation of Ice Impact on Lightweight Aggregate Concrete, VBB, 1989.
- 4) Hoff, G. C. : Resistance of Concrete to Ice Abrasion - A Review, American Concrete Institute SP, 109, p. 427-455, 1988.
- 5) Nawwar, A.M., Malhotra V.M. : Development of a Test Method to Determine the Resistance of Concrete to Ice Abrasion and/or Impact American Concrete Institute SP 109, 401-426, 1988.
- 6) Itoh, Y., Tanaka, Y., and Saeki, H. Estimation Method for Abrasion of Concrete Structures Due to Sea Ice Movement. Proc. of the Forth International Offshore and Polar Engineering Conference, Osaka, Japan, April 10-15, Vol. II, pp. 545-552, 1994.
- 7) Hanada, M., Ujihira, M., Hara, F. and Saeki, H. Abrasion Rate of Various Materials Due to the Movement of Ice Sheets. Proc. of the 6th International Offshore and Polar Engineering Conference, Los Angeles, USA May 433-437, 1996.
- 8) 笹田直：摩耗，養賢堂，2008.
- 9) 阿部正美，上田茂，清水一夫：波浪海域のサンドエロージョンに対する電気防食の防食効果，材料と環境，Vol.47, pp.36-41, 1998.
- 10) 伊藤喜栄，浅井雄一郎，佐伯浩，折谷徳弘，石井千万太郎：氷盤移動による海洋構造物の予測と制御について，海洋開発論文集，Vol.8, pp.147-151, 1992.
- 11) 伊藤喜栄，浅井雄一郎，折谷徳弘，佐伯浩，橋治国：コンクリート製構造物の氷盤移動による摩耗量の予測方法に関する研究，海洋開発論文集，Vol.7, pp.243-246, 1991.
- 12) 日本トライボロジー学会編：摩擦・摩耗試験機とその活用，養賢堂，2007.
- 13) 畠昭次郎，室達郎：鋼板の砂質土に対する摩擦および摩耗特性，土木学会論文集，No.157, pp.42-53, 1968.
- 14) 対馬勝年：単結晶氷の摩擦に関する研究II，低温科学物理編，No.35, pp.23-33, 1977.
- 15) 電気化学編：電気化学測定マニュアル基礎編，第6刷，丸善株式会社，2002.
- 16) 飯島亨，工藤輝大，玉井譲：コンクリート中の鉄筋の腐食速度に及ぼす気温の影響，鉄道総研報告，Vol.23 (6)，pp.11-16, 2009.
- 17) Truesdale, G.A., Downing, A.L and G.F. Lowden: the solubility of oxygen in pure water and sea water, Jour.Appi. Chem., Vo1.5, pp.53-65, 1955
- 18) 日本データ海洋センター：定地水温データ，[http://www.jodc.go.jp/data/coastal/obs\\_detail\\_data.htm](http://www.jodc.go.jp/data/coastal/obs_detail_data.htm)
- 19) 動力炉・核燃料開発事業団東海事業所：腐食メカニズムに基づく炭素鋼オーバーパックの腐食モデルの開発（I），1993.
- 20) 蓮井淳，菅泰雄：水中溶接技術の現状，鉄と鋼，No.69 (2)，pp.187-195, 1983.
- 21) 渡邊尚彦，北根安雄，伊藤義人：一般構造用鋼管へのあて板湿式水中溶接補修の継手挙動のモデル化，構造工学論文集，Vol.55A, pp.909-914, 2009.

## STUDY ON DETERIORATION MECHANISMS OF COASTAL STRUCTURES DUE TO SEA ICE INTERACTION IN THE COLD REGION AND ON THEIR LIFE EXTINCTION

**Budgeted :** Grants for operating expenses  
General account

**Research Period:** FY2011-2015

**Research Team:** Cold-Region Hydraulic and Aquatic  
Environment Engineering Research  
Group (Port and Coast)

**Author :** KIOKA Shinji  
MORI Masaya  
IMOTO Tadahiro  
YAMAMOTO Yasuji

**Abstract :** This study aims to clarify the deterioration mechanisms of marine and coastal structures due to sea ice action and/or to the cold environment, and also to propose appropriate measures against the deterioration. Especially, we have focused the mechanical wear and corrosion of metal materials due to contact and friction with sea ice. While a mixture of sand in sea ice has been found in some surveys at coastal areas facing the Okhotsk Sea, we also clarified the penetration processes of sand particles to the inside of ice by an experiment. Along with sliding wear test between metal materials such as stainless/carbon steel [SUS304/SS400] and an artificial ice with interposed sand, we performed the test for steel protected by heavy duty coating (urethane elastomer coating). We found that the wear rate of the heavy duty coating steel was one order of magnitude greater than that of SUS304/SS400, and that the abrasive wear rate of the coating steel by an ice with interposed sand particles was twice as large as that of SUS304/SS400. The abrasive wear rate of the coating steel did not greatly depend on the grain size of the interposed sand in the ice, which indicated the similar results as previous ones using SUS304. Also, while we confirmed that the effect of water temperature change on the corrosion rate was very complicated in light of the balance between chemical reaction rate and oxygen diffusion rate due to the temperature change according to a theoretical approach, we found that it would be possible that a corrosion rate in ice infested water areas with high saturation percentage of DO was larger than that in normal seas. We also performed an exposure test of sacrificial carbon steel plates for one of methods of countermeasure and maintenance/repair against deteriorations of the steel structures caused by sea ice actions, which would be very easy and inexpensive method, and we confirmed the method would be useful in the future.

**Key words :** Okhotsk sea, Sea ice, friction, Abrasive wear , Corrosive wear, Deterioration, Coastal structure