

## 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：山本泰司、木岡信治、森昌也

### 【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。平成 25 年度は、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、沖合側及びその海氷の内部層にも砂の混入が認められ、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。すべり摩耗試験より、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、そのアブレンプ摩耗が実証された。自然海水による鋼材の損耗率は、人工的な淡水氷と人工的に介在した砂による定常損耗率と一致した。氷海域における鋼矢板防食対策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あることが分かった。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。

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材料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、海氷の接触・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。

これまで、北海道沿岸部での護岸や水路壁面に及ぼす氷荷重の解析的検討<sup>4)</sup>、壁面接触圧の現地計測<sup>5)</sup>、などといった外力的な検討がなされている。一方、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>例えば6)~9)</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>8)</sup>。金属材料（特に炭素鋼）についてもいくつかの基礎的な研究例<sup>例えば9)</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、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。次章に示すように劣化機構の要因は様々考えられるが、まずは海氷の摩擦も考慮した低温環境特有の腐食や、海氷による機械摩耗 [mechanical wear] による劣化機構を明らかにしていく。



図-1 (a) オホーツク海に面した導流堤の鋼矢板の損傷例



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研究経緯の概要および平成25年度の研究目的

著者らは、海水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>10)</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>10)</sup>、③サンドエロージョン<sup>11)</sup>に類似する海水による繰り返しの腐食生成物（錆）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海水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、海水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水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、海水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）試験を行い、その基本的な損耗機構について調べ、重要な損耗要因の一つであることを確認した。また温度差腐食（上記④）に関する基礎実験より、雰囲気の方が低温の場合、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。最後に、冬期のオホーツク海に面した施設において炭素鋼板(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、海水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。

平成25年度は、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、海水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水の固形分の含有率について調べ、今回はさら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、砂の粒径や量が損耗量へ及ぼす影響の他、現地で採取した自然海水を使用し、固形分による切削プロセスによる実用的な損耗量推定のための基礎パラメータを明らかにする。さらに、自然の海水を使用し、より実環境に近い状況下における、海水内部への浸透プロセスに関する実験も実施した。また、海水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、今回は水槽実験より、水温変化が腐食速度に及ぼす影響について検討した。最後に、冬期のオホーツク海に面した施設において、通常の防食工法（電気防食・重防食被覆）の耐氷性確認のための暴露試験を実施し、その留意点と今後の課題について整理した。

## 3. 海水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）した海水が漂流している場合があることはかねてから知られている<sup>12)</sup>。過去に海水の砂の含有率の調査事例はあるが<sup>12)13)</sup>、筆者らも、昨年に引き続き、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。調査地点は、三里浜海岸、北浜海岸、常呂海岸の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内部層の2カ



図-2 砂が付着（混入）した海水が漂流

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

調査地点	含有率(g/cm <sup>3</sup> )			調査日	備考
	採取部位	質量パーセント濃度 (%)	単位面積質量 (g/cm <sup>2</sup> )		
三里浜海岸	表層(2cm)	5.014 (0.38)	0.065 (0.24)	Mar.12, 2013	汀線より陸側へ3m
	内部	0.285 (2.0)	—		
	表層(2cm)	2.295 (1.73)	0.039 (1.84)	Mar.12, 2013	汀線より沖合へ3m
	内部	0.022 (0.65)	—		
北浜海岸	表層(2cm)	1.410 (1.01)	0.022 (1.05)	Mar.8, 2013	汀線より陸側へ3m
	内部	0.106 (1.01)	—		
	表層(2cm)	2.763 (1.12)	0.034 (1.15)	Mar.8, 2013	汀線より沖合へ3m
	内部	0.049 (1.45)	—		
常呂海岸	表層(2cm)	6.534 (0.86)	0.091 (0.85)	Mar.13, 2013	汀線より陸側へ3m
	内部	0.618 (2.17)	—		
	表層(2cm)	2.582 (0.83)	0.033 (0.87)	Mar.14, 2013	汀線より沖合へ3m
	内部	0.834 (2.30)	—		

注) 括弧は変動係数



図-3 汀線より沖側サンプルと調査の様子例

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例を示した。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だいたい低い傾向にあるが、場所によりそうでない場合があること、である。特に沖合側そ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、平成24年度および過去に行われた調査結果<sup>12)13)</sup>ともだいたい合致する。

今回の調査で、沖合の氷、そして表面のみならず内部にも砂が浸透しているが定量的に確認され、後述する事象も含め、アブレイブ摩耗の寄与の可能性が示唆されたと考える。今後は、さらにサンプル数(サイト数、同一サイトでの採集個数等)を増やしていくとともに、ランダムに海水を採取することにより、砂が含有している海水の頻度分布についても調査する予定である。

### 3.2 海水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>12)</sup>も指摘しているように、漂流している海水に、飛砂や時化によって舞い上がる海底砂が付着する場合、あるいは砂浜に海水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、斜里の防砂堤先端における灯台への着氷を示したが、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、上述したような、単に砂浜に海水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。平成24年度は、表面に付着した砂の内部への取り込みの機構について簡易的な実験を行い、いくつかの可能性について検討した。この結果、日中の放射熱に起因する熱膨張等によるクラックが発生し、表面に付着した砂が表面融解水とともにそのクラックに流

入ることによって内部へと取り込まれること、発熱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推察された。平成 25 年度では、平成 24 年度と同様な実験を実施したが、実際の流氷を用い、より実環境に近い環境下で実施したことが特徴である。なお、平成 24 年度と同様に、砂の由来については、今後詳細な調査を別途行うこととし、本研究では、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検討を行ったものである。



図-4 灯台へ着氷した氷に混入した砂

実験方法を次に示す。2014 年の 2 月において、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 2 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  $0.05\text{g}/\text{cm}^2$  の量で一様に散布する。④上記②③の手順で試験用海氷を 2 個準備し、オホーツク海沿岸部の屋外の日射が当たるところに、暴露する、といったプロセスである。なお、平成 24 年度同様に、砂が流出しないように、氷表面の中央部に約 5mm の凹部を設け、そこに砂を散布した。

図-5 に表面砂の氷内部への取り込み過程の例を示す。

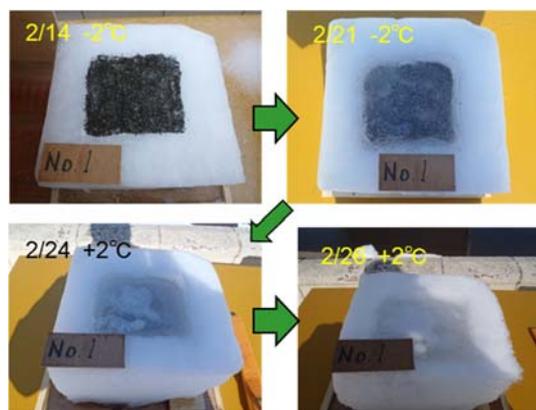


図-5 表面砂の氷内部への取り込み過程の例

この期間では、日中の最高気温が $+2^{\circ}\text{C}$ となるなど、比較的暖かいこともあったが、わずか 10 日の間に、砂粒子が内部へ浸透しているのが分かる。これらのことから、日射の放射エネルギーを吸収し熱した砂粒子が一様に氷内部へ沈下し、融解水が流入・再凍結し、閉じ込められるといったサイクルによるプロセスである。これは実験室レベルでの平成 24 年度の実験結果で予測したプロセスのひとつと同様であるが、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も、日射により発熱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明らかとなった。

今回は砂の混入プロセスをより明確に理解するために多少は、砂の量など極端な条件で実施した感もあるが、今後は、氷の質（結晶構造の違い、極端な比較対象として Freshwater ice など）、砂の量、日射量（あるいは可能なら気温や風速などの他の気象要因）が及ぼす影響などを定量的に把握したいと考えている。

#### 4. 海氷によるすべり摩擦・摩耗(アブレーション)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>14)</sup>、Itoh ら<sup>8)</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  $10\text{cm}\times 8\text{cm}$ )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  $9\text{cm}\times 8\text{cm}$  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ことを目的として、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

平成 24 年度と同様に、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。金属と海水の砂の介在の方法としては、既報と同様、氷表面に、後述の砂を一様にまき、霧吹きで表面に水を吹きつけ再凍結させた。次に、できるだけ砂を氷に浸透させ(馴染ませる)、砂が混入した氷の表面を平坦にすることを目的として、金属供試体を氷表面に接触させ、ゆっくり圧力をかけることにより実現した。これは砂粒子直下ではかなり高い圧力となるため、圧力融解による効果もある。これを摩擦させるエリア全体に対して行った。これが実験の初期設定である。使用した砂は、前述した北浜における砂の粒径と含有率程度を想定し、基本条件として、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 (図-6)。なお今回主に、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(いわき珪砂 1,3 号、東北珪砂 4,5,8 号)させて実施した。また、北海道斜里町で採取した実際の自然流水を用いた損耗試験も実施し、これまでの実験データと比較した。実験条件は、これまでの標準条件と同じ、雰囲気温度-10℃、移動速度 0.06cm/s、接触圧力 0.6MPa、最大摩擦距離 50km とした。また今回は、正味の凝着摩擦の寄与をさらに詳細に調べるため、SUS と純氷とのすべり摩擦試験 (砂を介さない状態) を、幅広い接触圧力の範囲 (0.007~1.6MPa) で実施した。なお、基本的に、同一条件での繰り返し実験は行わなかった。

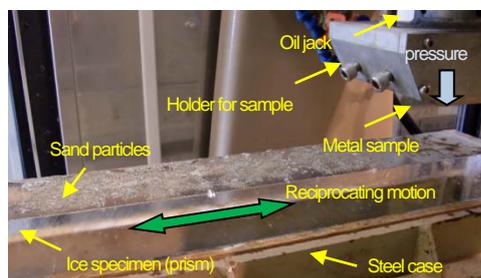


図-6 氷の表面に砂をセットした状態

#### 4.3 実験結果と考察

##### (1) 平成 24 年度までの主要な結果のレビュー

まずアブレシブ摩擦に関して、これまでの主な結果を振り返ってみる。まず実験直後の金属(SUS)供試体の表

面状態は、全く腐食がみられず、摩擦方向にごく細い直線状の傷が多くみられ、明らかに砂粒子の掘り起こしによるアブレシブ摩擦が確認された。摩擦距離による摩擦量推移は、実用的には初期状態と定常状態のバイリニア型の直線にモデル化でき、初期・定常それぞれの直線勾配を推定し、単位摩擦距離あたりの摩擦量である損耗率 (mm/km) と定義した。アブレシブ摩擦 (海水中の砂による摩擦) の損耗率は、接触圧力にあまり依存しないほか、海水摩擦による繰り返し錆除去で腐食促進を伴う腐食摩擦率と同等以上に大きく、無視できない劣化機構の一つであることが確認できた。また、腐食へ及ぼす海水の接触圧力や摩擦速度の影響は、おもに酸素供給や材料表面の活性の状態に起因すること、アブレシブの定常損耗率の特性として、介在物質の量や種類によらないある程度の柔軟性を有している可能性があること、アブレシブ摩擦と腐食が同時に進行する損耗率は、各現象を足し合わせる以上に大きく相乗効果の可能性があると、などが分かった。

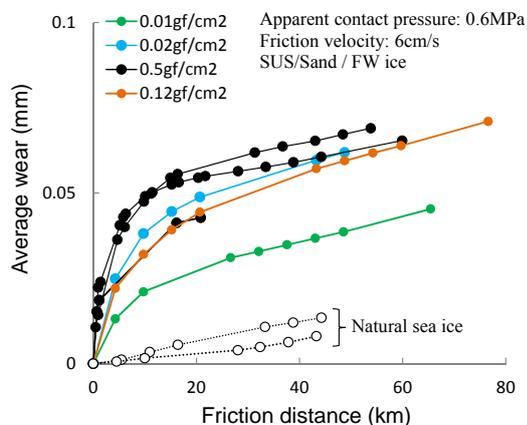
##### (2) 平成 25 年度得られた主要な結果

まず、平成 24 年度実施分の初期の砂の散布量の違いによる損耗量 (淡水氷と SUS との間に砂を介在) の推移を再掲した (図-7) が、述べたように初期の砂の量による定常損耗率に大きな違いがない。後述する自然の海水による損耗結果も図示したが、海水表面にごく微量に付着した砂 (量は把握していないが便宜上にゼロに近いと考えて図示) でもその定常損耗率に大きな違いが無いことは興味深い。また初期損耗から定常損耗に移行する距離は砂の量がある程度少なくなると短縮し、すぐに定常損耗を示す、含有率が微量の自然海水に近づくことも理解できる。

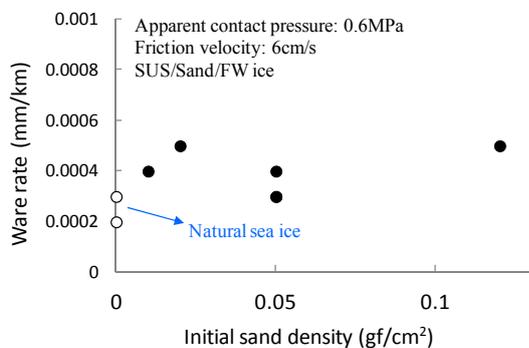
次に、粒径の違いによる損耗量について調べた結果を図-8 に示す。初期および定常損耗率は、概ね中央粒径には依存しないが、初期損耗率はやや均等係数に依存する (図は略)。その均等係数が 2 以下ではほぼ一様であるが、それ以上になると均等係数の増大とともに損耗率も増大する傾向にあった。また、初期損耗から定常損耗に移行する距離は、今回用いた砂の中間的な粒径の範囲内 (0.516~0.984mm) においては明確なオーダーは見られないが、最大の粒径 (2.66mm)、および最小の粒径 (0.111mm) では明確な違いがあり、粒径が大きい方が、その移行距離は長くなる。つまり粒子が粉碎して定常に着くまで時間を要することを意味している。逆に、粒径が小さいと直ぐに定常状態に移行し、後述のように、すぐ定常損耗が現れる自然の海水による損耗結果に近い。

次に、斜里町の沿岸部で採取した自然の海水を使用し、表面部分を直接ステンレス鋼と摩擦させた。その氷は柱状に加工したが、表面部の加工はしていない。その試験体を図-9に、摩耗試験結果を既出の図-5に示す。この場合の試験体は、見た目にも微量の砂が表面に付着しているのが確認できた。特に表面部では融解凍結の繰り返しにより材料特性としては淡水氷に近いと考え、本実験結果とも対等に比較できる。図より、初期から定常損耗を呈し、その損耗率は、人工的に作成した淡水氷のそれに近い。この結果から、海水の表層の材料特性は淡水氷に近いこと（砂の氷への押し込み量、硬さに関わる）、ごく微量でも切削する能力が内在すること、前述のように粒子の量や粒径に依存しないこと、等が推察される。いずれにせよ、ごく自然の海水によるアブレシブ摩耗の可能性を実証した。また、人工的に作成した淡水氷の使用と、砂の介在方法を含めた本試験方法による定常損耗率を実務においても参照出来ることを意味している。

さらに、SUS と純氷とのすべり摩耗試験（砂を介さない状態）を、幅広い接触圧力の範囲（0.007~1.6MPa）で実施した（図-10、●で表示）。その結果、いずれの圧力においてもその損耗率はゼロに近く、正味の凝着摩耗の寄与は無視できるほど小さいことを確認した。



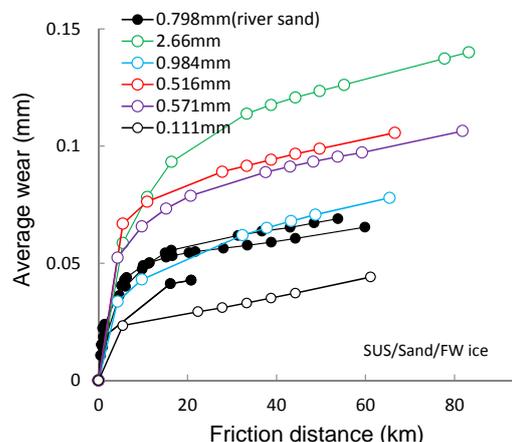
(a) 摩擦距離と損耗量の関係



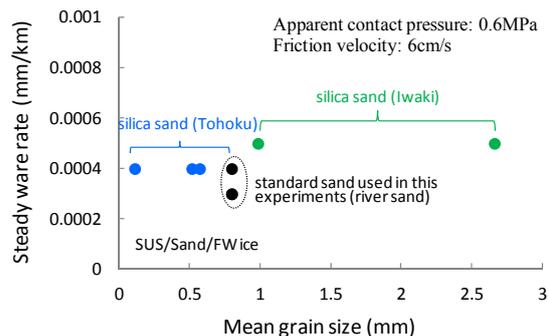
(b) 定常損耗率と初期の砂の散布量との関係

図-7 初期の砂の散布量の違いによる損耗特性および現地で採取した自然海水による損耗量との比較

以上から、淡水氷の使用に加え、砂の介在方法を含めた本実験が妥当であること、自然の海水内の砂は微量で粒径が小さい場合が多いこと、そして現象が長期的であることを勘案してアブレシブ摩耗の指標として「定常損耗率」が妥当と考えられることから、実務でも本実験での定常損耗率を参照できると考える。



(a) 摩擦距離と損耗量との関係



(b) 定常損耗率と中央粒径との関係  
図-8 砂の粒径の違いによる損耗特性



図-9 自然状態の表面部を有する自然海水の試験体

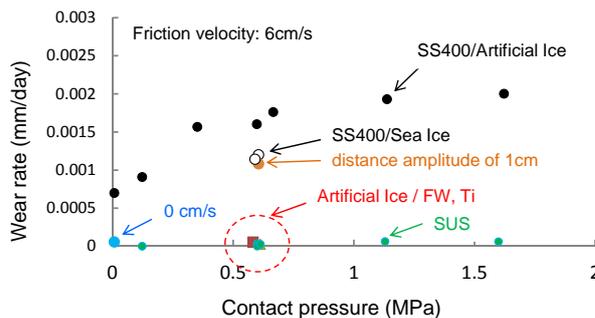


図-10 様々な条件における接触圧力と定常損耗率との関係

## 5. 温度差腐食に関する基礎実験

### 5.1 平成24年度の結果のレビューと平成25年度のターゲット

平成24年度は、気中と水中の温度の差による電位差で電池が形成されることによる腐食増大について調べるため、簡単な試験を実施した。一般に氷海域の冬期は雰囲気気温度は $-20^{\circ}\text{C}$ 以下になり得る一方、海水温は $-1.7^{\circ}\text{C}$ 程度に保たれ、その温度差は大きくなることに着目したものである。実験の結果、鋼棒は水中部で腐食→全面腐食ではなく局部的に腐食、酸素濃淡によるマクロセル腐食を確認したが、気温の方が低い場合の、正味の温度差に起因する腐食量への影響はあまりないことが推察された。

今回は、一般に、水温が低いと腐食速度（化学反応速度）が遅くなる傾向に働く一方、溶存酸素量増大のため腐食速度が増す効果（酸素拡散律速の場合）もあることに着目し。こうした水温変化によって相反する要因が腐食速度に及ぼす影響を検討した。

### 5.2 試験方法

試験は平成24年度と同様、雰囲気気温度を制御できる低温室で実施した。水槽に25cm水深となるように30%の塩水を入れ、長さ20cm、直径20mmのSS400製の丸棒を図-11に示すよう、その長さの半分（10cm）を塩水に浸漬させた。つまり鋼棒が気中と水中に半分づつ暴露される状態となっている。今回は、雰囲気気温度を $-10^{\circ}\text{C}$ に固定し、水温は $0\sim 13.7^{\circ}\text{C}$ に変化させた。水槽内の水は、水面付近に設置した塩ビ管の呑み口へオーバーフローさせることにより水位を制御する仕組みとなっている。そのオーバーフローさせた水は、サブ水槽へ自由落下させ、その水槽の水は、循環ポンプによって、錆等の不純物を除去するためにフィルター層へ運搬し、それを通った水はさらに加熱ヒーターで暖められて、水槽へ戻る仕組みとなっている。水槽内の水へは、意図的に酸素供給を行っていないものの、前述のように排水時のサブ水槽における混合や、水槽に戻る際の水流により水槽内の水が流動しているため、ある程度の曝気はあると思われる。

実験は、各水温毎に、場所によるバラツキなどを考慮して鋼棒を6本づつ、10日間暴露して、その質量減量より、平均的な腐食速度を推定し、水温による依存性を調べた。計測項目は、鋼棒の試験前と暴露試験後の質量を電子天秤（精度1mg、A&D(株)、分離型上皿天びんAD4212A-1000）で測定し、毎日（朝・夕の二回）、午前午後の水槽内の水温、塩分量、溶存酸素量を計測した。

### 5.3 主な試験結果

実験中の様子を図-11に示したが、同図からも分かる

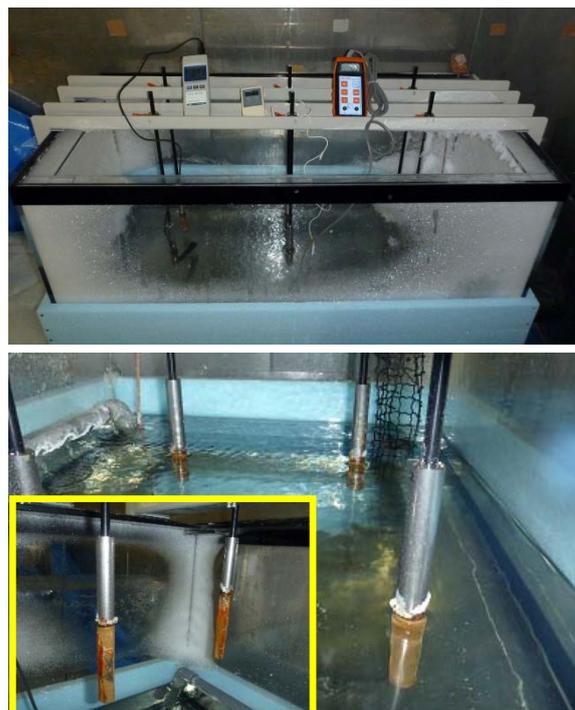


図-11 水槽および実験中の写真

ように、前回と同様に、鋼棒は水面より深いところで腐食し、気中ではほとんど腐食が生じていなかった。水中部は、全面腐食ではなく局部的に腐食しており、前述のように半没水であるから、酸素濃淡によるマクロセル腐食によるものと思われる。図-12には、水温変化に伴う平均腐食速度(mm/year)の推移、図-13には、溶存酸素量および塩分濃度の時系列およびそれらの時間平均の水温変化にともなう推移を示した。なお腐食速度は、腐食減量を鋼材密度と腐食表面積（腐食領域を水中部前面で発生すると仮定）を考慮して平均腐食厚として算出し、さらに1年あたりの腐食厚に換算したものである。

これらの図より、DOや塩分濃度は時間によって大きな変動はなくほぼ一定に推移していること、そして確かに水温が低下するにつれてDOは増大しているのが分かる。DOの飽和値の理論値(G.A.Truesdale,1955)<sup>10)</sup>を図示したが、やや過飽和傾向にあるがほぼ理論どおりの水温変化による傾向を呈している。腐食速度については、この水温範囲では、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ているのが分かる。前述のように、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が理解できる。さらに引き続き、詳細な実験の継続が必要である。

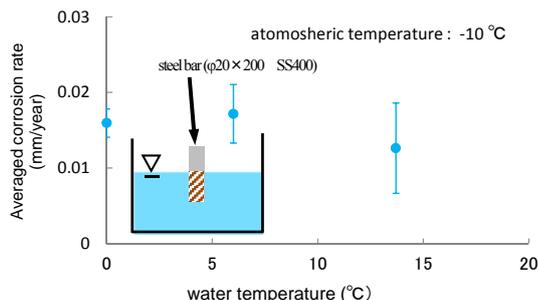


図-12 水温変化に伴う平均腐食速度の推移

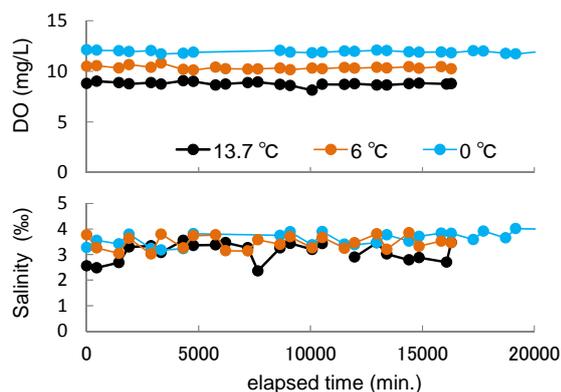


図-13(a) 塩分濃度および溶存酸素量の経時変化

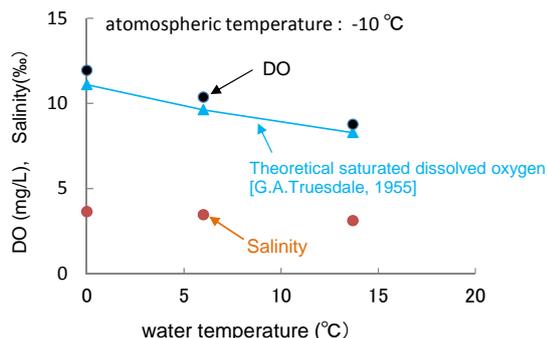


図-13 (b) 水温変化にともなう塩分濃度および溶存酸素量の推移 (それぞれ時間平均)

## 6. 矢板防食対策のための暴露試験

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、海水が存在する実海域において、防食対策試験体の暴露試験を行った。防食対策は、電気防食および重防食被覆加工によるものを対象とし、図-14 に示すように、それぞれ、アルミ陽極と 2mm ウレタンエラストマーとした試験体を製作した。これらを、オホーツク海に面した施設（斜里漁港防砂堤）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るとともに、海氷による接触荷重を計測した。

暴露試験後の試験体の様子を図-15 に示す。アルミ陽極試験体については、早い段階から、取り付け部が、氷



図-14 暴露試験体

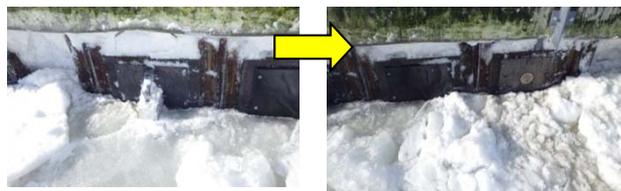


図-15 暴露試験体の変化 (アルミ陽極の破損)



図-16 撤去後の重防食加工試験体表面状態の例

により施設側へ押されるように変形し、結局はアルミ陽極が破損（もぎ取られ）した。こうして氷海域におけるアルミ陽極の耐久性に課題があることを確認した。重防食加工試験体については、大きな損傷・劣化は破損が見られないが、試験体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た。特に後者は海水摩擦の（海水に含まれる固形成分による摩耗）可能性もある。また損傷により海域に流出・溶出する環境へのインパクトの検討も必要である。こうして重防食被覆試験体には大きな損傷はないものの、こうした軽微な損傷がどう発達するかも含め、今後数年の継続した暴露試験が必要と考える。

## 7. まとめ

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だいたい低い傾向にあるが、場所によりそうでない場合があること、等が分かった。

(2) 特に沖合側そ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。

海水の砂の混入プロセスに関する検討より、

(3) 自然海水を用いた実験より、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ことが判明した。

海水によるすべり摩擦・摩耗(アブレシブ)試験より、

(4) 定常損耗率は、砂の粒径および量に依存せず一定であり、ごくわずかな固形分の量でも切削する能力を有する。粒径が小さく、少量の場合には、すぐに定常損耗に移行する傾向にある。

(5) 自然海水を用いた摩耗試験により、固形分の切削によるアブレシブ摩耗が実証された。

(6) その自然海水に付着した砂の粒径は小さく微量であるため、上記より、その摩耗は、初期損耗を示さず、すぐ定常損耗に至ることが確認された。しかもその定常損耗率は、本実験で採用した、人工の淡水氷の使用とその人工的な砂の介在方法による定常損耗率とほぼ一致した。

(7) 正味の凝着摩耗の寄与は無視できるほど小さいことを確認した。

温度差腐食に関する基礎実験より、

(8) 腐食速度は、本実験での水温範囲では、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。

鋼矢板防食対策のための暴露試験より、

(9) アルミ陽極が破損、その耐久性に課題あることが分かった。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を確認。海水摩擦(固形分による摩耗)による可能性が唆された。

## 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) 竹内貴弘、木岡信治、寺島貴志：感潮狭水路に設置された構造物表面の海水移動による磨耗量の推定について、海洋開発論文集、Vol.23、pp.697-702、2007

5) 河合孝治、牧田佳巳、木岡信治、寺島貴志・竹内貴弘：流水が作用する水域における鋼矢板護岸に作用する接触圧力の現地計測、海洋開発論文集、Vol. 26、pp.909-914、2010。

6) Hoff, G. C. : Resistance of Concrete to Ice Abrasion - A Review, American Concrete Institute SP, 109, p. 427-455, 1988.

7) 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.

8) 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.

9) 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.

10) 笹田直：摩耗、養賢堂、2008。

11) 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。

12) 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。

13) 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。

14) 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。

15) Truesdale, G.A., Downing, A.L. and G.F. Lowden: the solubility of oxygen in pure water and sea water, Jour.Appi. Chem., Vol.1.5, pp.53-65, 1955.

## 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 :** YAMAMOTO Yasuji  
KIOKA Shinji  
MORI Masaya

**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. Sliding wear test between metal material and artificial ice with interposed sand was carried out to clarify the deterioration mechanism of steel structures due to abrasive wear caused by solid matter such as sand in sea ice. The amount of wear of the metal sample (stainless steel) increased bi-linearly with increase in sliding distance. While the wear rate (amount per distance) did not depend on the sand amount or sand particle size, even a tiny amount of small sand particles had a certain cutting ability, in which case the wear state immediately shifted to steady wear. Tests using natural sea ice samples confirmed that solid matter in the natural sea ice actually caused abrasive wear. The steady wear rate caused by the natural sea ice agreed with that rate by artificial ice with artificially interposed sand in this test method. We made the exposure tests of corrosion prevention measures applied in normal seas at a coastal area facing the Okhotsk Sea in winter season. It was presumed that such measures have some problems to be solved to apply them to icy seas. According to the corrosion tests of carbon steel bars in water tank, the corrosion rate of such carbon steel bar did not increase with an increase of water temperature, or rather, its rate slightly increased in the lower water temperature. 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 water temperature change.

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