

## 14.6 海氷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、山之内順

### 【要旨】

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。劣化機構の一つとして、特に海氷の接触および摩擦による鋼材の摩耗に着目した。我々の既往の研究成果から、凝着摩耗の寄与がかなり小さい事のほか、海氷に砂が混入している事が判明したため、主として、海氷と鋼構造物の間に砂が介在することによって生じるアブレシブ摩耗[abrasive wear]による損耗機構について調べた。オホーツク海沿岸部での現地調査により、海氷の表面付近の砂の含有量を調べた結果、最大で  $0.06\text{g}/\text{cm}^2$  程度のものも確認された。またほぼ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アブレシブ摩耗に関する基本的な要素試験を実施した。その損耗率は、過去に実施した炭素鋼(SS400)の腐食による損耗量と同等以上に大きく、無視できない劣化機構の一つに数えられることが分かった。最後に、冬期のオホーツク海に面した港湾内において炭素鋼板(SS400)の暴露試験を実施し、低温環境下の鋼構造物の腐食状態を調べた結果、通常海域の数倍の腐食速度であることが推察された。

キーワード：オホーツク海、海氷、摩擦、凝着摩耗、腐食摩耗、劣化、海岸構造物

### 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。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>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>10)~12)</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



図-1 オホーツク海に面した導流堤の鋼矢板の損傷例

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、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。その一部については、すでに着手しているが、それによれば、氷による金属材料の凝着摩耗の寄与がかなり小さい事、炭素鋼の場合にはその損耗要因はおもに腐食であることが明らかにされている。一方で、海氷に砂が混入している事が判明し、アブレシブ摩耗の可能性が示唆された。このため、今年度は、主として、海氷と鋼構造物の間に砂が介在することによって生じるアブレシブ摩耗[abrasive wear]による損耗機構について調べた。そのため、オホーツク海沿岸部で海氷調査を実施し、海氷表面付近の砂の含有量を調べるとともに、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アブレシブ摩耗に関する基本的な要素試験を実施した。また、冬期のオホーツク海に面した港湾内において炭素鋼板(SS400)の暴露試験を実施し、低温環境下の鋼構造物の腐食状態を調べ、通常海域における腐食速度と比較した。

## 2. 金属材料の主な損耗要因と本研究の実施範囲

まず、金属材料同士の摩耗現象の一般知識を引用する例<sup>10)</sup>と、代表的な摩耗形態としては、凝着摩耗(adhesive wear)が知られている。一般には、材料表面には微視的な凹凸があり、実際に接触する面積(真実接触面積)は微小であることが多い。このため、接触部分の圧力は高くなり、塑性変形(凝着)が生じ、そこに材料間の移動があると、凝着部分の付近で剪断による破断が生じ、他面に移着する。これが繰り返されると、移着物の成長によって、いずれ摩耗粉として接触面から排出され、摩耗が進行していくというメカニズムで説明される。これは前述のように、既往の研究結果から、氷の作用の場合にはこのメカニズムによる寄与は低いとされた。それから、材料表面の突起あるいは材料間に介在する砥粒による切削であるアブレシブ摩耗(abrasive wear)があり、凝着摩耗とともに代表的な摩耗形態である。前述のように、現地調査より、砂が混入している海氷が多く存在することから、腐食によるものに加えて、このアブレシブ摩耗が、材料表面の劣化損傷要因の一つと考えられる。この摩耗特性も凝着摩耗とともに次式で示す Holm の摩耗式で説明できる場合が多い。

$$W = k \frac{P}{p_m} L$$

ここに、 $W$ は荷重 $P$ の下、距離 $L$ 摩耗したときの摩耗体積、 $p_m$ は軟らかい方の個体押し込み硬さ(あるいは塑性流動圧力)、 $k$ は摩耗係数とよばれる定数である。海氷によるコンクリート摩耗<sup>9)</sup>の場合にも、摩耗量は摩擦距離に比例、荷重に比例することが明らかにされ、摩耗量推定には、上式と同様な形式の算定式が提案されている。また海域での鋼材表面の損耗の一つであるサンドエロージョンのメカニズムからも推察されるように、腐食摩耗である可能性もある。つまり、砂の衝突によって腐食生成物である錆層が除去・剥離され、あらたな表面を露出させ、より腐食を促進させる<sup>11)</sup>。海氷の場合も、構造物への衝突や摩擦により、錆層が除去されるため腐食が促進され損耗している可能性がある。また、もとは通常の海水の腐食によって劣化した部材への海氷の作用(摩擦、衝突)によって、致命的な損傷に発達する場合も想定される。さらには、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、海氷の繰り返し作用による腐食疲労の助長なども考慮されなければならない。このように、様々な損耗要因が考えられ、またそれは複合的に生じると推察される。本研究ではこれらに起因する主な損耗・劣化機構の解明と、最適な対策工について検討する。後者については、たとえば、損耗の主要因は腐食の助長(加速)であるとした場合、海氷の作用があるため、通常海域に適用されている、重防食被覆や流電陽極といった防食技術は馴染まないと考えられるため、これに変わる手法が必要となる。本年度においては、このうち、まずは、「機械摩耗」の基本的な形態である凝着やアブレシブ摩耗、それから腐食による劣化機構について調べるものである。

## 3. オホーツク海沿岸部での海氷調査

オホーツク海沿岸部での現地調査により、海氷の表面付近の砂の含有量を調べた。今回は、北浜および斜里の海岸付近の遡上海氷を対象とした。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場合があることはかねてから知られている。今回の調査により、砂は海氷表面に付着しているのみならず内部まで浸透している場合があった。海氷に砂が付着(あるいは含有)するメカニズムについては今後の課題となるが、漂流している海氷に、飛砂によるもの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、

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、海中の浮遊砂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。詳細には来年度以降検討していきたい。



図-2 砂が付着（混入）した海氷が漂流



図-3 調査状況

調査方法は、各調査地点において、砂が付着している氷塊をランダムに選び(サンプル数は10以上)、表層2cmまでを採取し、その砂の含有量(質量)と粒径を調べた。含有率としては単位表面積あたりの砂の質量としてあらわした。調査結果(平均)を表-1に示す。

表-1 オホーツク沿岸部における海氷表面付近の砂の含有量

調査地点	含有率(g/cm <sup>2</sup> )	中央粒径(mm)
北浜	0.0587	1.3
斜里	0.0029	0.36

場所により、砂の量や中央粒径に大きな差はあるが、北浜では平均0.0587g/cm<sup>2</sup>の砂の含有率であり、かなりの量の砂が付着する場合があることが分かった。また、海氷に含まれていた砂の付近の地面の砂の粒径に近いものであった。今後はさらに調査地点とサンプル数を増やしていくとともに、内部に浸透した砂の含有率も調べていく予定である。

#### 4. アブレシブ摩耗を考慮したすべり摩耗試験

##### 4.1 概説

経験的にも、そして前節の現地調査でも、海氷表面付近(あるいは内部)にある程度の砂が付着・混入している場合が、少なからず存在していることが明らかとなった。本節では、砂を含んだ人工海氷の鋼構造物表面の摩耗特性を調べるため、すべり摩耗試験を行った。前述したように、これらの摩耗形態は、材料間に介在する砥粒による切削である3元アブレシブ摩耗(abrasive wear)に分類されると思われる。

##### 4.2 実験方法と条件

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>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。なお、腐食の影響を無視するため、金属材料としてSUSを、氷は純氷(Freshwater ice)を用いた。図-4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。氷表面には、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。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、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-5)。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。これを摩耗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。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。

試験は温度制御できる低温室で実施し、今回はすべての条件で、雰囲気温度を-10°C に設定した。今回金属供試体として用いた SUS304 の硬度は、ビッカース硬度に

換算して、平均で 163 であった。氷の硬さの測定は、今回は難しく実施するに至らなかったが、純氷の単結晶のブリネル硬さを参照すると、それは氷温やc軸の向き等に依存するが、おおよそ1~10のオーダーであり<sup>13)</sup>、金属よりおよそ1オーダー小さいことが推察される。今回、腐食の影響を除去するため SUS を用いたが、多くの場合、実務において対象となるのが炭素鋼の場合が多いと思われるが、既往の研究で用いた SS400 の硬さは 132 であり、大きくは異なるわけではなく、本実験結果を参照できるものと思われる。見かけの接触圧力（鉛直荷重を見かけ接触面積で割ったもの）は、0.6MPa を標準的な条件とし、0.16~1.14MPa の範囲で実施した。北海道沿岸部で接触圧力（氷群の移動方向に垂直な圧力）が計測された例は多くないが、サロマ第二湖口水路側壁で計測された結果<sup>9)</sup>によれば、せいぜい本実験条件で設定した標準的な条件（0.6MPa）以下と推定され、実用上十分な接触圧力の範囲で実施していると言える。移動速度は、Itoh ら<sup>8)</sup>にならない、約 0.06m/s とした。最大摩擦距離は 50km 程度としたが、1ケースのみ 100km 程度実施した。本実験に費やす時間は、1ケースおよそ2週間要するため、やむを得ず、実験の繰り返し数は1としたが、標準的な試験条件と最も接触圧力が高いケースでは2回実施した。

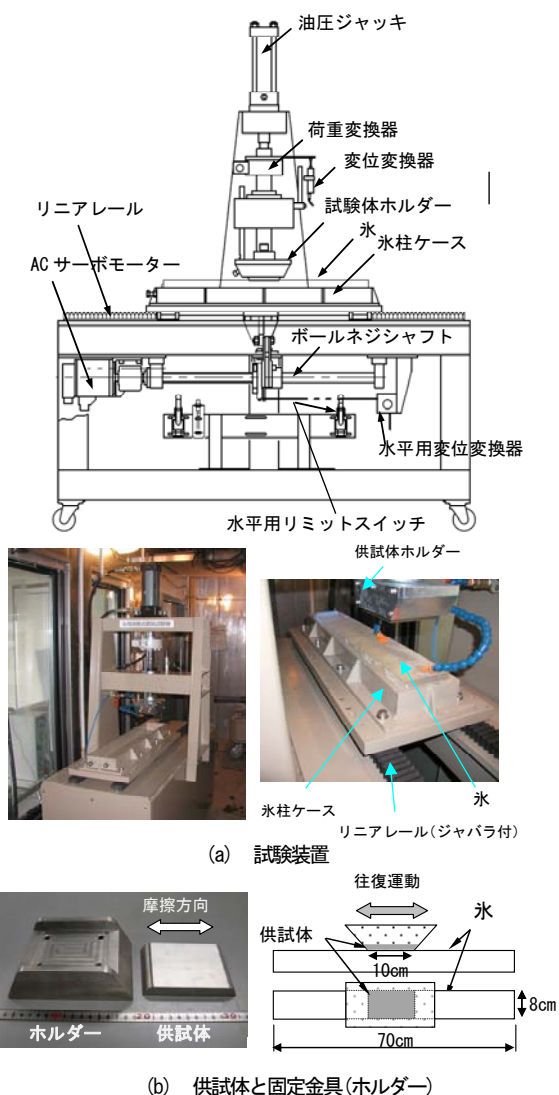


図-4 すべり摩擦試験装置と摩擦方法の概要図



図-5 氷の表面に砂をセットした状態

### 4.3 実験結果と考察

図-6 には、実験直後（摩擦距離 50km）の金属供試体（上）と氷（下）の表面状態の例を示し、図-7 には摩擦距離と摩耗量との関係を示した。まず、図-7 を見ると、初期に大きな摩耗率（曲線の勾配）を示すが、徐々にその摩耗率が減少し、一定の摩耗率で推移しているように見える。これは、初期に氷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、金属/砂氷の摩耗状態が定常状態に落ち着くためであると思われる。図-6 より、実験直後の金属供試体の表面状態を見る

と、全く腐食していないこと、摩擦方向にごく細い直線状の傷が多くみられる事が特徴であった。これは明らかに砂粒子による掘り起こしによるものと思われ、しかも傷は直線状であることから、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。用いた金属供試体は SUS304 であるが、防食の機構は、クロムが酸素と結合してステンレスの表面にうすい酸化皮膜(不動態皮膜)を形成することによる。無数の直線状の傷から、砂で摩擦することにより不動態被膜を破壊していると思われるが、前述のように見た目は腐食していないことから、修復(被膜形成)が即座に行われているものと思われる。次に、氷の表面状態を観察すると(同図下参照)、摩擦距離 50km



図-6 実験直後(摩擦距離 50km)の金属供試体(上)と氷(下)の表面状態の例

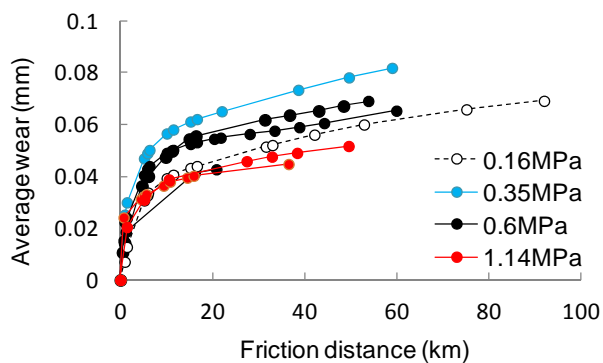


図-7 摩擦距離と摩耗量との関係

では、非常に細かい粒子が残存していた。粒径の大きな砂はすでに吐き出されたか、破壊して微粉化したものと思われる。さらに、それは砂によって削られた金属表面の摩耗粉と混在していた。注目すべきは、それらの混合物は黒く変色していたが、これは、SUS 母体から分離した Fe などの成分が化学反応を起こしている可能性があるが、今後、詳細な成分分析が必要である。

次に、再び図-7を見ると、摩擦距離による摩耗量推移は、図-8のように、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る。図のように、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耗量である摩耗率(mm/km)と定義する。図-9には、それぞれの摩耗率と接触圧力との関係を示した。まず、

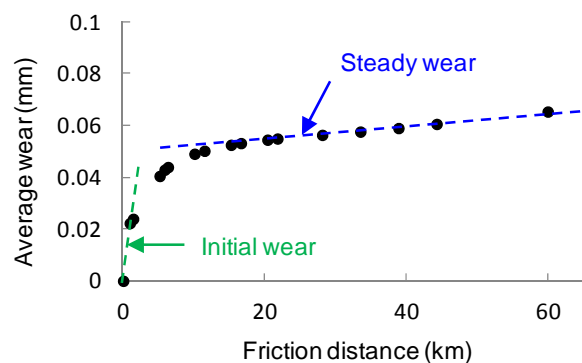
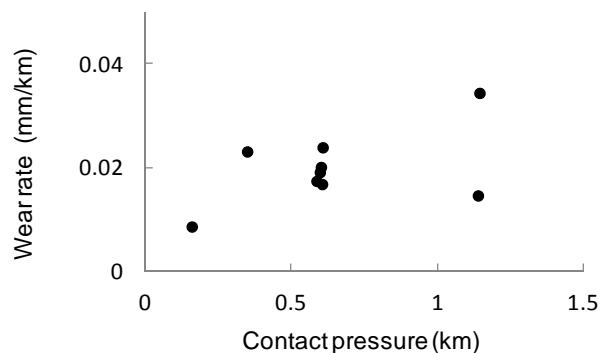
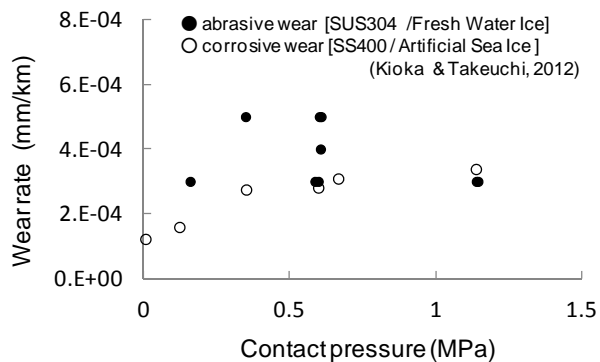


図-8 摩耗率の定義



(a) 初期摩耗



(b) 定常摩耗

図-9 接触圧力と摩耗率との関係

## 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

摩耗率の接触圧力依存性についてみると、バラツキは大きいですが、初期摩耗は接触圧力に応じて増加傾向にあるようであるが、定常摩耗については、**図-7**からも、その依存性は明確ではない。そうすると、アブレシブ摩耗でも成り立つとされる Holm 式に馴染まない結果となる。明確な接触圧力依存性が確認されない理由は、粒子の接する箇所が氷と材料の塑性流動圧力を超え、粒子の食い込み量（氷と材料双方）が一定になるためと思われる。また定常摩耗率は、初期摩耗率よりおおよそ1~2 オーダー小さくなる。また、**同図下**には、既往の結果である、SS400と人工海水との摩擦によるSS400の損耗率の結果も示した。この場合の損耗は凝着摩耗などの機械的摩耗による寄与は少なく、主に腐食によるものであることが明らかにされ、氷の摩擦による錆の剥離がその腐食を助長している可能性も示唆された。この図から、アブレシブ摩耗は腐食摩耗よりも大きくなっていることが分かる。このことから、海水に砂が介在した場合の損耗率は、海水摩擦を加えた炭素鋼の腐食摩耗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と推察される。

今回は、腐食の影響を除去するため、SUSと淡水氷との間に砂粒子を介在させた最も基本的なすべり摩耗（アブレシブ摩耗）試験を実施し、このうち、特にアブレシブ摩耗の接触圧力依存性について調べた。今後は、砂の粒径、含有量、摩擦速度、雰囲気温度（氷温）など様々な因子の依存性について調べるとともに、腐食生成物（錆）を生成し、それらと競合するであろうSS400と人工海水に砂粒子を介在させた場合のすべり摩耗試験などを実施していく予定である。

### 5. 実寒冷海域での鋼板(SS400)の予備的腐食暴露試験

#### 5.1 概説

前節までは、氷と材料との間に砂が介在した場合のアブレシブ摩耗について検討したが、言うまでもなく、SS400の場合には腐食も随伴する。特に寒冷海域における海水作用はその腐食生成物の繰り返し除去にともなって腐食を促進させている可能性がある。また寒冷海域においては、海水作用以外にも多くの損耗・腐食要因が考えられる。特に、前述にも述べたように、腐食の原因である溶存酸素量が多いこと、海中と気中との温度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（温度差腐食）である。特に冬期には海水温は-1~-2℃以下には低下しない一方、雰囲気温度は-20℃以下に達する場合がある。23年度は、低温室において、水温を-1~-2℃に維持しつつ、この温度差腐食を再現できる試験水槽を

開発したが、試運転と予備試験に留まった。また、寒冷海域における鋼板の腐食状態を調べ、通常海域の腐食速度等と比較することを目的として、長方形の鋼板（SS400）を冬期の寒冷海域に設置し、予備的な暴露試験を実施した。

#### 5.2 調査方法

試験用鋼板(SS400、寸法：0.5m×1m、t13mm)1枚を、網走港内岸壁（漁業協同組合南側7.5m岸壁）（**図-10**参照）にL.W.Lを中心とした位置に設置した。設置は、コンクリート壁面にアンカーボルトで固定した。なお、鋼板の背後の腐食を防止するためにゴムシートを介している。設置は、流氷が来襲する直前である1月下旬とし、撤去は流氷が去る3月下旬とした。予め、**図-11**に示す箇所において、設置直前の鋼板厚を超音波厚さ計

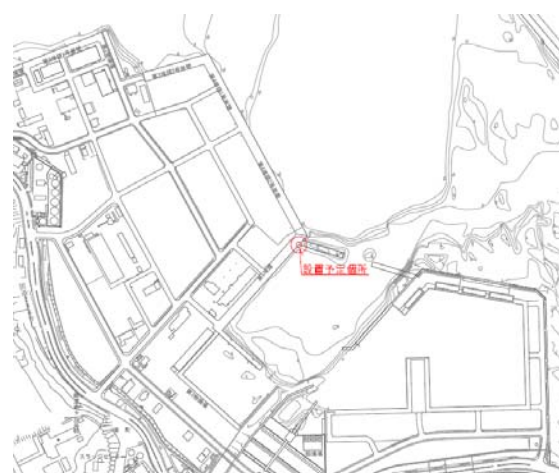


図-10 鋼板の暴露試験サイト

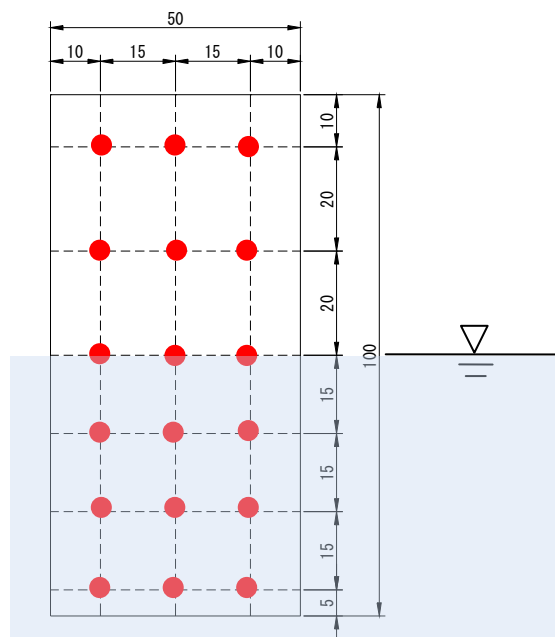


図-11 鋼板の板厚の計測箇所

(MX-5DL、TMI ダコタ製) を用いて計測し、撤去直後においても同一箇所を測定し、その差から腐食量を推定した。

### 5.3 調査結果

図-12 に暴露試験の状況例を示す。冬期の網走港は港内結氷するが、本暴露試験サイトは静穏であり氷の動きは潮汐による上下程度であるため、氷による影響は少なく、海氷以外の寒冷環境が腐食状況に及ぼす影響を調査していると見なすことができる。ただし、これは海氷の直接的で機械的な作用が少ないという意味で、海水の接触や融解によって酸素の供給状態や塩分量が若干異なる事による腐食への間接的な影響はあるかもしれない。



図-12 暴露試験状況



図-13 暴露試験板の撤去直後の状況

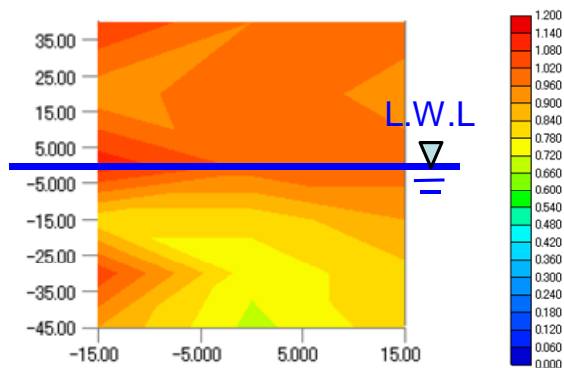


図-14 暴露試験板の損耗量分布

図-13 には試験板の撤去直後の状況を、図-14 には暴露試験板の損耗量分布の推定値を示した。表-2 には、推定した腐食量を暴露期間を考慮して腐食速度(mm/year)に換算したものをまとめた。鋼板の腐食は裏面も考えられるが、前述のようにゴムシートを用いて、腐食を防止していたため、裏面の腐食はあまり発生していなかった。図より、L.W.L より上は一様に分布しているが、常に水中にあるL.W.L 以下は一様ではなくやや局所的な違いがあるように見受けられるが、集中腐食は見られなかった。なおこの損耗分布が発生する要因は流氷の影響によるものかは確認できなかった。またL.W.L より上の領域の方が、それより以下の領域に比べやや腐食量が多かった。一般に腐食量の鉛直分布は、L.W.L より上の干満帯で最も腐食量が大きく、その次にL.W.L 直下(厳密にはM.L.W.L)で大きくなる。この事から推察すれば妥当な結果となっているように思えるが、試験板の長さが短く、このような分布を形成するに至るマクロセル腐食(酸素濃淡電池)が生じたかは不明である。

表-2 試験板の腐食速度(mm/year)の推定値

	腐食速度 (mm/year)	備考
干満帯	0.98	L.W.L 以上
水中部	0.89	L.W.L 以下
平均	0.92	
最大	1.12	

表-3 無防食構造施設で得られた腐食速度の標準値

腐食環境	腐食速度 (mm/y)
1) H.W.L以上	0.3
2) H.W.L~L.W.L-1.0m	0.1~0.3
3) 海水中	0.1~0.2
4) 海底土中部	0.03
5) 背面土中部	
a. 残留水位より上	0.03
b. 残留水位より下	0.02

次に、腐食速度に着目すると約 1mm/year に近い結果が得られた。表-3 には通常海域における試験板の腐食速度(mm/year)の標準値<sup>例えば 14)</sup>を示した。これらの値と比較すると、明らかに今回実施した寒冷海域における鋼板の腐食速度の方が大きいことが分かる。むろん、今回は予備実験程度で、一カ所で一冬のみ実施したに過ぎないため、まだ結論はできない段階ではあるが、今後引き続き調査していく価値のあるものであることを確認した。さらにこれに海氷の作用が加わることを想定すれば、損耗量はより増大すると考えられる。

今後は、標本数、つまり鋼板の数を増やすとともに、様々なサイトで実施予定である。

## 6.まとめ

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。23 年度においては、このうち、まずは、「機械摩耗」の基本的な形態である凝着やアブレシブ摩耗、それから腐食による劣化機構について調べた。

オホーツク海沿岸部での海氷調査より、海氷の表面付近の砂の含有量を調べた。砂は海氷表面に付着しているのみならず内部まで浸透している場合があった。砂の量や中央粒径に大きな差はあるが、北浜では平均 0.0587g/cm<sup>2</sup>の砂の含有率であり、かなりの量の砂が付着する場合があることが分かった。

またこの結果をうけて、ほぼ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試験を用いたアブレシブ摩耗に関する基本的な要素試験を実施した。摩擦距離と摩耗量との関係について考察すると、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ることが分かった。損耗率(定常摩耗率(mm/km)で定義)は接触圧力依存性は見られず、アブレシブ摩耗でも成り立つとされる Holm 式に馴染まない結果となった。また、その損耗率は、過去に実施した炭素鋼(SS400)の腐食による損耗量と同等以上に大きく、無視できない劣化機構の一つに数えられることが分かった。

最後に、冬期のオホーツク海に面した港湾内において炭素鋼板(SS400)の暴露試験を実施し、低温環境下の鋼構造物の腐食状態を調べた結果、通常海域の数倍の腐食速度であることが推察された。

## 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氷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：流氷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, pp. 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, 198
- 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 Sixth 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) 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) Butkovich, T. : Hardness of Single Ice Crystals, The American Mineralogist, Vol.43, pp. 48-57, 1958
- 14) 沿岸開発技術センター：港湾鋼構造物防食・補修マニュアル(改訂版)、1997



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

**Budget** : 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

YAMANOUCHI Jun

### 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 of metal materials due to contact and friction with sea ice. In this year, we mainly examined the mechanisms of *abrasive wear* caused by interposed sand particles in the sea ice surface. As a result of field observation, we found the contents of sand at sea ice surface of 0.06g/cm<sup>2</sup> at the maximum. We also made the sliding wear test considering the abrasive wear by interposing sand particles between SUS304 and fresh water ice so that corrosion wear could not occur. The wear rate due to the abrasive wear was greater than that due to the corrosive wear of SS400 which had been already performed. Therefore, the abrasive wear also is presumed to be one of main factors for the deterioration as well as the corrosive wear. Also, in order to estimate the corrosion conditions of steel structure in the cold environment, we made the exposure corrosion test of a steel plate (SS400) at a port facing the Okhotsk Sea in this winter season. It was presumed that its corrosion rate under the cold environment was several times that in the normal sea water.

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