

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、山之内順

【要旨】

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の海氷の砂の含有率を調査した結果、多くの海氷サンプルで砂の混入が認められ、その内部への浸透プロセスも実験により調べ、一つの可能性を見いだした。海氷によるすべり摩擦・摩耗試験より、現地自然流水でもその含有砂による研磨作用であるアブレシブ摩耗を確認したこと、腐食へ及ぼす海氷の接触圧力や摩擦速度の影響は、主に酸素供給や材料表面の活性の状態に起因すること、アブレシブ摩耗と腐食が同時に進行する摩耗率は、各現象を足し合わせる以上に大きく、相乗効果があることのほか、様々な事項を明らかにした。冬期のオホーツク海に面した海域において炭素鋼板の暴露試験を実施した結果、通常海域の数倍の腐食速度であることが推察された。また、大気/海水の温度差腐食に関する基礎実験より、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。

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¹⁾。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²⁾、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³⁾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⁴⁾、壁面接触圧の現地計測⁵⁾、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^{例えば6)~9)}、その摩耗



図-1 オホーツク海に面した導流堤の鋼矢板の損傷例

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⁸⁹⁾。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^{例えば9)}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、海水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こと、炭素鋼の場合にはその損耗要因は主に腐食であることが明らかにされている。一方で、海水に砂が混入していることが判明し、アブレシブ摩耗の可能性が示唆された。このため、昨年度は、主として、海水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）による基本的な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水の簡易調査を実施し、海水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（網走港）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。

平成 24 年度では、引き続きアブレシブ摩耗に関する要素研究を継続し、海水の現地調査とすべり摩耗試験を実施した。今回は、砂の海水の内部への浸透プロセスに関する簡易実験も加えた。さらに海水の繰り返し錆除去や繰り返し接触による腐食助長に主眼を置いた腐食摩耗もかねてから重要であることは指摘していたが（一部は前重点プロジェクトテーマでも実施）、今回、新たな条件を追加した要素実験を実施した。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、温度差腐食に着目した実験を実施した。最後に、前年度に続き、冬期のオホーツク海において、鋼材損耗に関する現地暴露試験を実施し、通常海域における腐食速度と比較した。なお前年度の試験サイトは港内であり、港内結氷盤が接触し、その動きは潮汐による上下運動に限られるのに対し、今回は流氷の活発な接触に曝される点で前年と異なる。

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^{例えば10)}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）は微小である場合が多い。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水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。

$$W = k \frac{P}{p_m} L \quad (1)$$

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。海水によるコンクリート摩耗⁹⁾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、式(1)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¹¹⁾。海水の場合も、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水の作用（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、海水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、海水の作用があるため、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。平成 23、24 年度においては、このうち、「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. 海水の砂含有率に関する研究

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¹²⁾。過去に海水の砂の含有率の調査事例はあるが¹²⁾¹³⁾、著者らも、簡易的ではあるが、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概略的に調べ



図-2 砂が付着（混入）した海水が漂流



図-3 調査状況

た。調査地点は、サロマ湖、北浜、斜里漁港区の砂浜における遡上海氷、そして斜里漁港防砂堤上の海水を対象とした。調査方法については、調査日が複数年に渡ることや、その時の事情により、統一されていないが、概ね次のとおりである。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）、主に表層 1～3cm とそれより深い内部に分け、それぞれの層の砂の含有量（質量）と粒径を調べた。調査状況の例を図-3 に示す。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）を昨年度紹介した結果と合わせて表-1 にまとめた。場所やサンプル採取部位により、大きな違いがあり、またサンプル数（調査年数、サイト数、同一サイトでの採集個数等）の不足、により、一概には言えないが、本データのみからは、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、沖合の氷は、海岸に遡上している氷と比較して（斜里の海岸と防砂堤上で比較）、表層の含有率（単位面積質量で見た場合）が小さくなる傾向にあるが、内部は同程度と見なせること、表層のみならず氷の内部深くにも砂が含まれていること、などである。その内部の含有率（質量濃度）も 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、過去に行われた調査結果¹²⁾¹³⁾ともだいたい合致する。

今後は、さらにサンプル数（調査年数、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、表面からの詳細な含有量分布についても調査すべきであると考えているが、今回の調査でも、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、アブレシブ摩耗の寄与の可能性が示唆されたと考える。

3.2 海水の砂の混入プロセスに関する検討

海水の砂の混入プロセスに関して詳細に調査された事例はあまり見あたらないが、現時点で想定されることとしては、伊藤ら¹²⁾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

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 ²)			中央粒径 (mm)	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 ²)			
北浜	表層(2cm)	2.49	0.0587	1.3	Mar.15, 2008	
斜里	表層(2cm)	0.901	0.0167	0.36	Mar.22, 2008	斜里漁港防砂堤 基部近傍砂浜
	内部	0.065	—			
斜里防砂堤上	表層(1cm)	0.628	0.0071	—	Mar.3, 2011	汀線より沖合へおよそ 400m～ 500m
	表層(3cm)	0.263	0.0057			
	内部	0.187	—			
斜里防砂堤上	内部	0.181	—	—	Feb.18, 2012	汀線より沖合へおよそ 400m～ 500m
サロマ湖第二湖口	内部	1.317	—	—	Feb.17, 2012	主に第二湖口左岸側

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。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。



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。まず、氷温-5℃、直方体(15cm×15cm×12cm)に成形した Fresh water ice の氷表面の中央部に約 5mm の凹部を設け、そこに、0.03g/cm² の砂(川砂、中央粒径 0.7mm、均等係数 3.8)を、一様に散布する(図-5 左)。直接日射が当たる屋外に 1 時間暴露した(午前 10 時)。なお、実験は 2012 年 9/21～26 日に実施した。その後、-5℃の低温室に入れて再凍結後、次の日同じ時間帯に屋外で暴露させ、これを 3 回繰り返した(曇りの日は除外)。図-5 (右)には、初回の暴露後約 60 分経過後の状況を示す。初期の氷は側部と底部を

断熱した容器から作成されており、また冷却温度が低いいため、気泡が少なく極めて透明度の高い氷であった(図-5 左に図示した氷の表面はボール盤による成形跡があることに注意)。この条件下では、暴露後約 30 分あたりから、氷にクラックが発生し、その後複数のクラックに成長していることが分かる。さらに、表面での融解水とともに、表面に存在していた砂粒子が主にクラックに沿って内部奥深くへ流入していく様子が肉眼でも確認された。また別の機構として、太陽エネルギーを吸収して発熱した砂粒子自身が、表層から徐々に内部へ貫入し、融解凍結の繰り返しの伴い、ごく表層ではあるが砂粒子が氷に取り込まれた。図-6 には実験終了後の試験氷のごく表層を除去した横断面(左)と厚さ約 2cm スライスした縦断面の例を示したが、クラック跡と多くの砂粒子がそれに



図-5 試験氷表面への砂散布直後(左)と暴露 60 分後(右)の状況



図-6 表層部除去後の横断面(左)と縦断面例(約 2cm にスライス)

沿うように内部へ浸透しているのが分かる。このように、本条件における内部浸透機構は、クラック発生による砂の流入と自身の発熱による貫入によるものと推察される。

以上は、砂混入のプロセスの可能性のひとつを実験で確認したに過ぎず、様々な混入プロセスが存在するので、今後さらに検討したい。さらに今回は予備検討として現象のプロセスを早めるため、日射が強く気温も高い時期に実施した。したがって熱膨張によるクラック発生や表面融解等の状況が現実と異なると思われるため、今後は、海水を用いるとともに、できるだけ現実にあった環境で長期間に渡り実施したいと考えている。

4. 海水によるすべり摩擦・摩耗試験

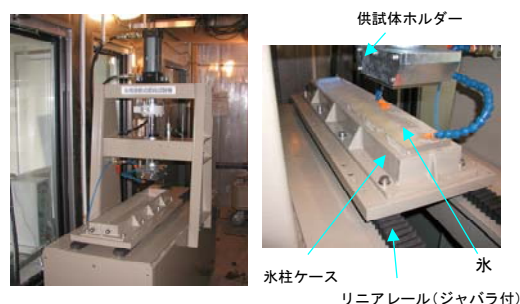
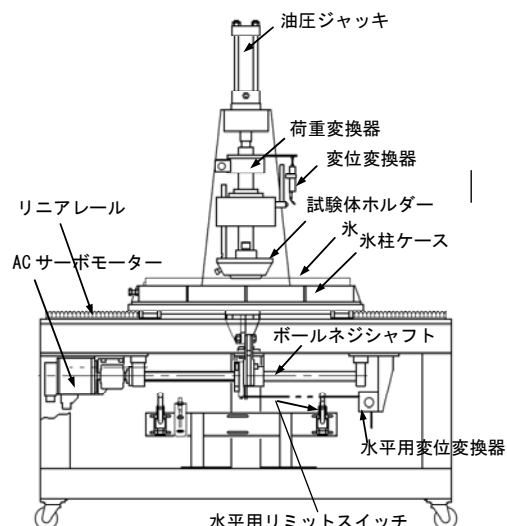
4.1 概説

平成 23 年度に引き続き、砂を含んだ人工海水の鋼構造物表面の摩耗特性を調べるため、アブレシブ摩耗に関する要素研究を継続し、すべり摩耗試験を実施した。この摩耗形態は、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。

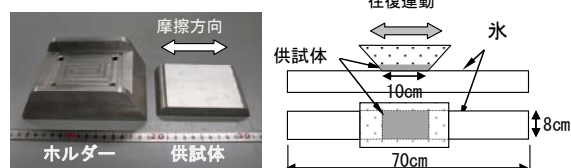
さらに、凝着摩耗や上記のアブレシブ摩耗等の機械摩耗のほか、海水の繰り返し錆除去や繰り返し接触による腐食助長に主眼を置いた腐食摩耗もかねてから重要であることは指摘していたが（一部は前重点プロジェクトテーマでも実施）、今回、材料表面の活性や酸素供給の増減による影響に着目し、新たな条件を追加した要素実験を実施した。

4.2 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¹⁴⁾、Itoh ら⁸⁾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-7 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。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、



(a) 試験装置



(b) 供試体と固定金具(ホルダー)

図-7 すべり摩耗試験装置と摩耗方法の概要図

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。

4.3 実験条件

(1) 腐食摩耗試験

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℃に設定した。試験用氷は、人工海水¹⁵⁾を用いた。構造物試験体の材質は一般構造物用圧延鋼材(SS400)であるが、限定した実験条件（標準

条件) では、既報 (前重点プロジェクト研究報告) では、ステンレス鋼 (SUS304) およびチタン (Ti) も用いた。今回金属供試体として用いた SS400、SUS304、Ti の硬度は、ビッカース硬さに換算して、平均でそれぞれ、132、163、218 であった。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、既報では、0.007~1.6MPa の範囲で実施している。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 ⁹⁾によれば、せいぜい本実験条件で設定した標準的条件 (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、約 0.06m/s (Itoh らでは 0.05m/s) を標準条件として、0~0.15m/s の範囲で行った。最大摩擦距離はおおよそ 50km とした。時間の都合上、実験の繰り返し数は基本的には 1 とした。

(2) アブレシブ摩耗試験

平成 23 年度は、腐食の影響を除去するため、金属材料には SUS を、氷は純氷 (Freshwater ice) を用い、主に接触圧力が及ぼす損耗率の変化について調べた。今回はそれに加え、介在する粒子 (砂) の量と質 (他の粒子)、腐食による複合作用も考慮するなど、様々な条件で実施した。金属板は SS も使用し、氷には人工海水氷および現地で採取した流水も使用した。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、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、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/cm² となるようにセットした (図-8)。なお今回、砂の量が及ぼす影響を調べるために、0.01g/cm² ~0.12g/cm² に変化させて実施した。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。また、腐食が同時に進行することを想定して、腐食生成物の固形微粒子によるアブレシブ摩耗への寄与を調べるため市販の酸化鉄および自然の錆を介在させる実験も実施した。また、雰囲気気温度や、移動速度 (標準条件)、接触圧力範囲は、上記の腐食摩耗試験と同様である。

4.4 実験結果と考察

(1) 腐食摩耗試験



図-8 氷の表面に砂をセットした状態

まず、既報の結果をまとめておく。損耗量は摩擦距離にほぼ直線的に比例して増大し、その直性勾配で定義した損耗率 (mm/km) は、接触圧力とともに増大するが、0.5MPa 前後以上では、大きな増加は見られず (図-9 参照)、金属材料の (凝着) 摩耗特性を表す Holm の式に適合しない結果となった。SUS の損耗率は、SS に比べ 2 オーダー小さく、Ti のそれはほぼゼロであり、SS との硬さの違いのみでは説明がつかず、材料損耗は、機械的摩耗 (凝着あるいはアブレシブ) よりも腐食による寄与が遙かに大きいことが推察された。

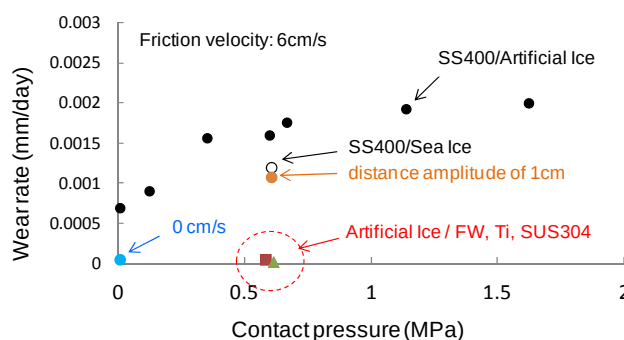


図-9 接触圧力と平均損耗率との関係

今回は、まず、代表的な条件でのみ、現地で採取した流水を使用し、既報の人工海水による結果と比較した結果を図-9 に図示した。人工海水に比べその損耗率がやや小さい感があるが、流水を長期間保存していたこともありブラインの脱落によりやや塩分量が小さかったことを考慮すると、概ね人工海水による摩擦試験結果の妥当性を示唆していると考えられる。次に、酸素供給状態や材料表面活性が腐食に及ぼす影響を調べるため、主に摩擦速度の変化が損耗率へ及ぼす影響について調べた。するとともに、図-10 には、接触圧力が約 0.6MPa での平均摩擦速度と平均損耗率との関係を示す。ただし、損耗が腐食によるものと見た場合、時間あたりの損耗率

(mm/day)で整理したものである。図より、時間あたりの損耗率は、摩擦速度にほぼ比例して増大している。特に、摩擦速度がゼロの時、つまり加圧したのみでは損耗量はゼロで腐食も一切生じないことが興味深い。貧酸素状態によるものと思われる。また同図には、速度がゼロで、極めて接触圧力の小さな（金属供試体の自重のみ）場合の結果も図示したがやや損耗率は増加することからも、酸素供給の状態に起因すると考える。またこの結果は図-9にも図示しているが、摩擦すると格段に腐食量が増大することも分かる。さらに摩擦速度の増大に比例して増加する明確な理由は不明であるが、摩擦熱の上昇等による氷あるいは金属表面が活性化するとともに、それらへの酸素吸着が活発になることによる酸素供給増大が要因と考えられる。さらに腐食膜が摩擦により繰り返し除去回数が増大するとも考えられるし、氷の融解（前述のブラインの解放）に起因する可能性もある。氷表面は常にやや濡れた状態であったが、今回は速度変化による明確な違いが確認できなかった。今後の詳細な検討が必要である。

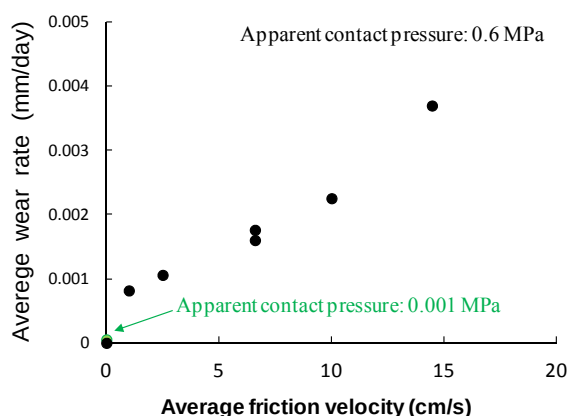


図-10 平均摩擦速度と平均損耗率との関係

前述のように本実験では、金属材料の長さ(10cm)よりも氷の長さが長く、振幅距離が30cmであるから、金属と接する氷表面が酸素と周期的に接触することになる。できるだけ氷の摩擦面を空気に触れないようにするため振幅距離を1cmとした摩擦実験も追加した。図-11には、計測終了時(50km 時点)での、標準状態(振幅30cm)と振幅1cmにおける試験体表面を比較した例である。前者は赤さび（腐食生成物）が摩擦方向に平行な帯状の模様となって現れているのに対し、後者は、試験体エッジ部に限られ、試験体中央部はあまり腐食していないように見えるが、よく観察すると、除去しにくい黒い錆であった。組成は不明であるが、それは貧酸素状態に発生しやすい腐食生成物であると思われる、酸素供給の差が現れている。

他方、図-9にその損耗率を示したが、大きく減少しているわけではないのが見て取れる。別途凹凸計測した結果から試験体エッジが特に損耗しているわけではなく、見た目以上に、ある程度試験体中央部も損耗していると推察される。これは貧酸素状態にもかかわらずある程度の速度で摩擦されると表面が活性化して、酸素吸着が活発になるとも考えられる。

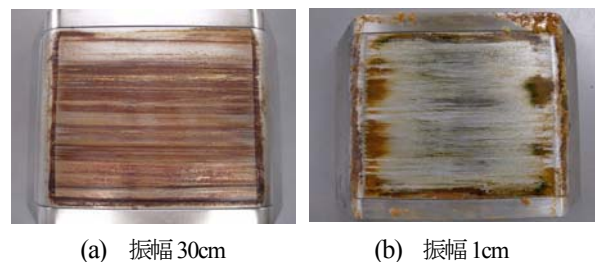


図-11 試験体と接する氷面のうち、雰囲気と接する氷の領域が異なる場合の試験体表面状況の例

以上より、主に腐食による損耗を考えた場合は、接触圧力や速度の依存性は主に酸素供給や材料表面の活性の状態に起因するものであることが推察されたとと言える。

(2) アプレシブ腐食試験

まず昨年度の結果についてレビューしておく。摩擦距離と摩耗量との関係について、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する。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。また、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ことが特徴であった。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る、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、砂で摩耗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、修復（被膜形成）が即座に行われているものと思われた。摩擦距離50kmでは、氷表面に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、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母体が

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り、今後の課題とした。摩擦距離による摩耗量推移は、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耗量である摩耗率 (mm/km) と定義した。摩耗率の接触圧力依存性について、バラツキは大きい、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、その依存性は明確ではなく、アブレシブ摩耗でも成り立つとされる Holm 式(1)に馴染まない結果となった。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、初期摩耗率よりおよそ 1~2 オーダー小さくなる。既往の腐食摩耗結果とも比較すると、アブレシブ摩耗は腐食摩耗よりも大きくなっており、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た。

次に本年度得られた結果について、簡単に要約して以下に箇条書きに示す。

- 本実験で使用している金属供試体である SUS304 の酸化 (不動態) 皮膜の形成と加工硬化により摩耗が軽減されることが懸念されたが、損傷した酸化皮膜はすぐ修復すること、加工硬化による影響はないことが示され、総じて、計測時に休止する本実験方法に不都合はないことが分かった (図-12 参照)。
- 定常摩耗状態での砂の量は僅かであるが、その僅かな量でも損傷させる能力があり、逆に、砂介在なしの場合の氷による凝着摩耗はほとんど無視できる (図-12 参照)。
- 初期の砂の散布量の違いによる損耗量の推移について調べた結果、初期の砂の量による定常摩耗率に大きな違いがないことが分かった (図-13 参照)。
- 自然の現地流氷塊による損耗は腐食ではなく、微量でも内部に含まれる固形成分によるアブレシブ摩耗であることが判明した。本実験で、人工的に砂を介在した人工海水による結果のうち、定常状態の損耗率は、砂が混入している場合の自然の流氷による損耗率に大体近く、また実用的な観点から、前述の一連の実験結果より、砂の量や粒径にあまり関係ないと言えそうである (図-14 参照)。
- 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。市販の酸化鉄 III

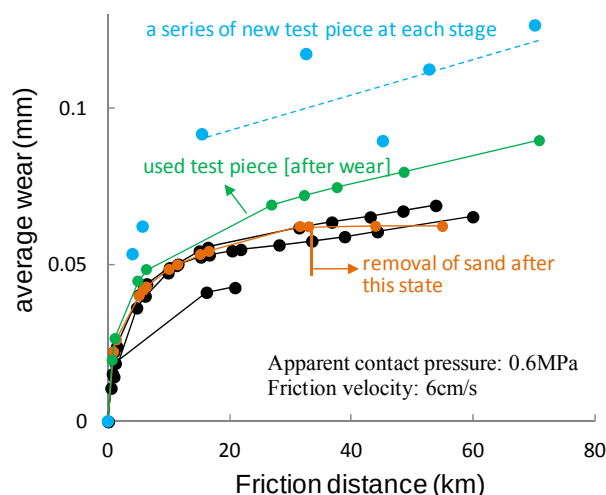


図-12 計測中の SUS 供試体に種々の変化を与えた場合の摩擦距離と摩耗量との関係 (Fresh water ice)

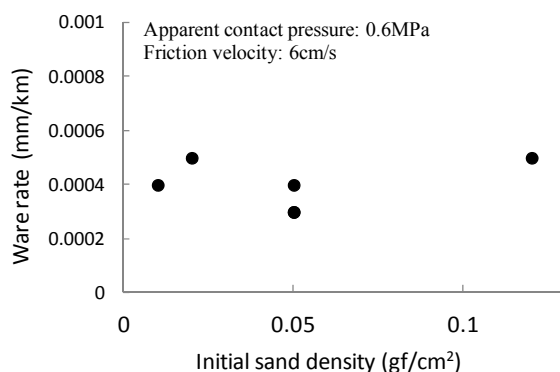


図-13 初期の砂の散布量の違いによる定常損耗率の推移

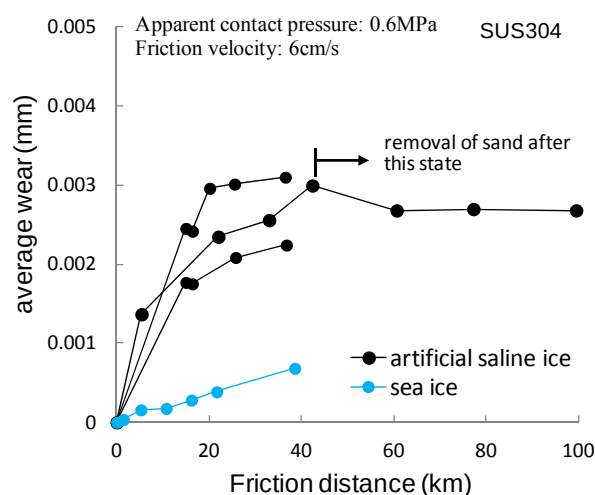


図-14 現地で採取した流氷による定常損耗率との比較

(Fe_2O_3) (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、定常摩耗率は砂よりも Fe_2O_3 の方がやや小さい感があるものの、両者の粒径や量、硬さ等が異なることを考えると、定常摩耗に

関しては、介在物質によらない、ある程度の柔軟性を有していると言える。また先の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初期摩耗は比較的大きな粒径によるものであることがここでも推察された。他方、自然の腐食生成物による摩耗（研磨）作用はほとんど確認されず、人工海氷 vs SUS（介在物質なし）程度の損耗率であった。この条件での腐食生成物は先の Fe_2O_3 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。

- 錆が砂による切削を阻害している可能性がある。
- 腐食とアブレシブが同時に進行する場合の損耗率について検討した結果、腐食のみ (0.0003mm/km) と SS による正味のアブレシブ推定値 (0.00003mm/km) を単純に足しても腐食とアブレシブが同時に進行する損耗率 (0.0005mm/km) に及ばず、相乗効果があると推定される。基本的には腐食であるが、砂粒子による機械摩耗に加え、砂粒子が錆を削り、常に材料表面を露出させることにより腐食を加速する、前述の腐食摩耗である可能性がある。 実現象でも十分に起こりえる腐食とアブレシブが同時に進行する定常摩耗率は、各現象を単純に足し合わせる以上に大きく、相乗効果があると考えられ、引き続き検討していく必要がある（図-15 参照）。

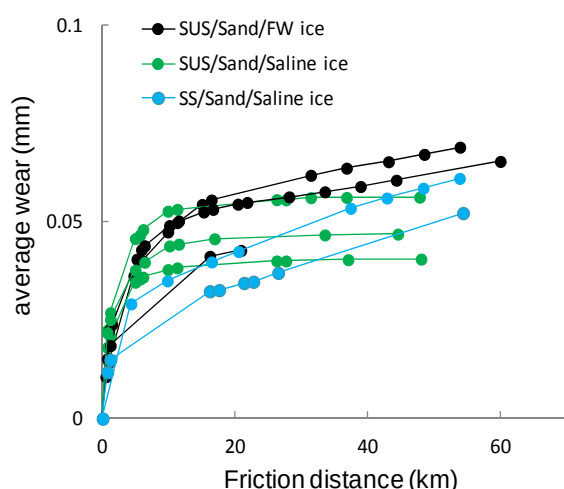


図-15 腐食とアブレシブが同時に進行する場合（SS400／砂／人工海氷）の摩擦距離と摩耗量との関係の比較

5. 温度差腐食に関する基礎実験

5.1 概説

ここでは、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温度は -20°C 以下になり得る一方、海水温は -1.7°C 程度に保たれ、その温度差は大きくなる。逆に、夏場は気温が上昇する一方、水温は比較的低温に保たれることが多い。また一般に、水温が低い場合には、溶存酸素量が多くなる傾向にあり、腐食量が増大するという複合的な効果が考えられるが、ここではまずは、温度差腐食の可能性についてのみ検討する。

5.2 試験方法

試験は雰囲気温度を制御できる低温室で実施した。図-16 に示すように、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-17 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ずつ暴露される状態となっている。雰囲気温度は -25°C 、 -12.5°C 、 -5°C に変化させる一方、塩水の温度は結氷温度よりやや高い -1°C （目標値）に制御した。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

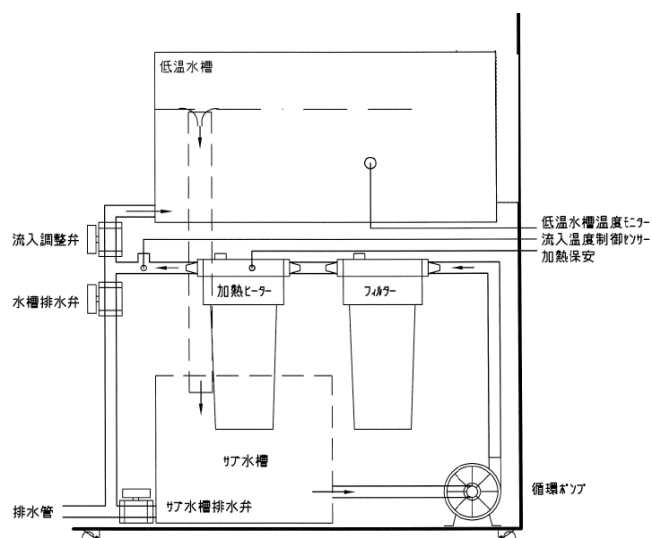


図-16 温度差腐食試験に用いた実験装置の概要図



図-17 水槽および実験中の写真

ているため、ある程度の曝気はあると思われる。

実験は、各雰囲気温度毎に、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、温度差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)、分離型上皿天秤 AD4212A-1000）で測定し、毎日（朝・夕の二回）、午前午後の水槽内の塩分量と溶存酸素量を計測した。

5.3 試験結果

実験中の様子を図-17に示したが、雰囲気温度が低くなれば、水槽の縁や、鋼棒の水面付近が若干結氷する場合もあったが、全体的には水面は結氷することもなく、概ね良好な状態で試験ができた。また同図からも分かるように、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、前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-18には、雰囲気温度に伴う平均腐食速度(mm/year)、図-19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雰囲気温度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

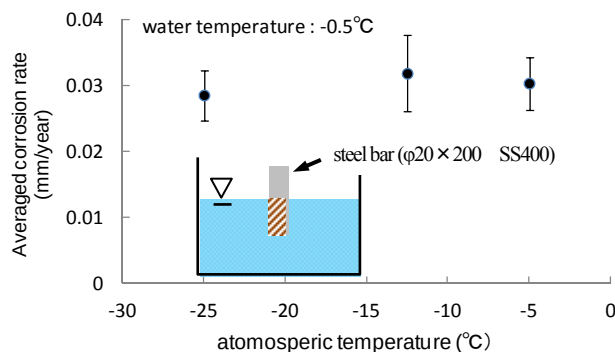


図-18 雰囲気温度に伴う平均腐食速度の推移

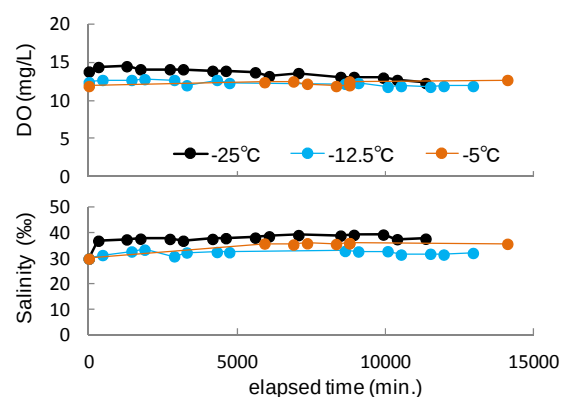


図-19 (a) 塩分濃度および溶存酸素量の経時変化

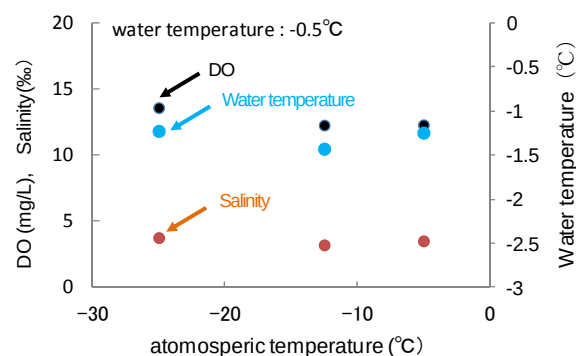


図-19 (b) 雰囲気温度にともなう塩分濃度、溶存酸素量および水温の推移（それぞれ時間平均）

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。図-18を見ると、雰囲気温度にともなう腐食速度に明確な変化はないように見えるが、これを統計的に検定してみる。まず等分散性の検定として Bartlett 検定を用いると、有意水準5%で母分散が等しいと仮定できた。次に、等分散性を仮定できたので、一元配置の分散分析（最も検出力の高いと言われる Tukey の方法を採用）により、有意水準1%、5%で有意差がない（よって多重比較は行わない）ことが示された。つまり、雰囲気温度にともなう腐食量に統計的

に有意な差はなく、本実験条件では、温度差腐食は確認されなかった。他方、図-19 より、塩分濃度や溶存酸素量の変化を見てみる。-25℃におけるそれらは若干高い値であるようにも見受けられるが、概してそれらの時間変化や雰囲気温度にともなう大きな変化はないと言える。

以上より、特に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考慮する必要がないと言える。また腐食量について見てみると、0.03mm/year 付近で推移しているが、あくまで水面下での平均腐食量であり、集中的に腐食している箇所はそれらの数倍であり、現地の集中腐食量に対しても大体において整合するものであることは強調しておきたい。

今後は、雰囲気温度の方が高い場合の温度差腐食や、水温変化にともなう（一般に低温であれば溶存酸素量が多い）溶存酸素量の変化と腐食量への影響などについて調べていくことが必要であると考ええる。

6. 実寒冷海域での鋼板(SS400)の腐食暴露試験

6.1 概説

前章までは、主に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う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。平成 23 年度においては、比較的静穏な網走港内（図-20、21）において長方形の鋼板（SS400）を設置して鋼板の腐食状態を調べ、通常海域の腐食速度等と比較し、数倍腐食速度が大きいことを示した。

平成 24 年度は、オホーツク海に面した斜里の防砂堤で、同様な暴露試験を実施した。なお前年の試験サイトは港内であり、港内結氷盤が接触し、その動きは潮汐による上下運動に限られるのに対し、今回は流氷の活発な接触に曝されることが異なる。

6.2 調査方法

試験用鋼板(SS400、寸法:0.5m×1m、t13mm) 3 枚を、斜里防砂堤基部（図-22、23 参照）に L.W.L. を中心とした位置に設置した。また比較のため、同じ寸法のステンレス板(SUS304)も同様に設置した。設置方法は、既設鋼

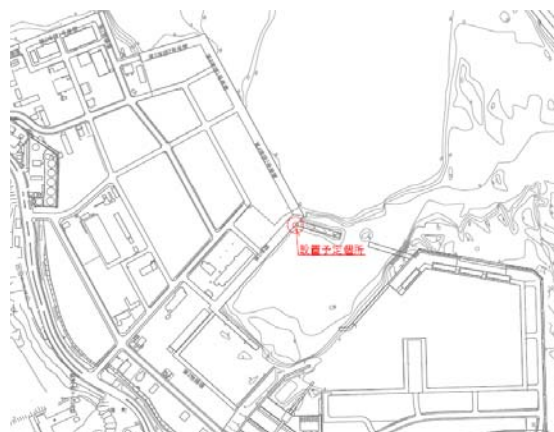


図-20 鋼板の暴露試験サイト(網走港内)



図-21 暴露試験状況(網走港内)

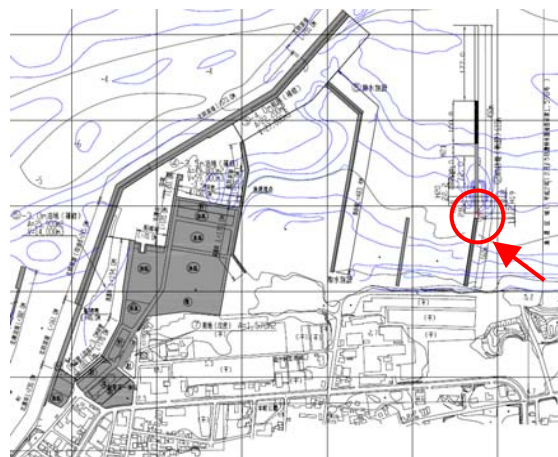


図-22 鋼板の暴露試験サイト(斜里防砂堤)

矢板に架台を溶接により取り付け、その上に、試験体をボルトによって取り付けた。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、流水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-24 に示す箇所において、設置直前の鋼板厚を、超音波厚さ計（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。



図-23 暴露試験状況(斜里防砂堤)

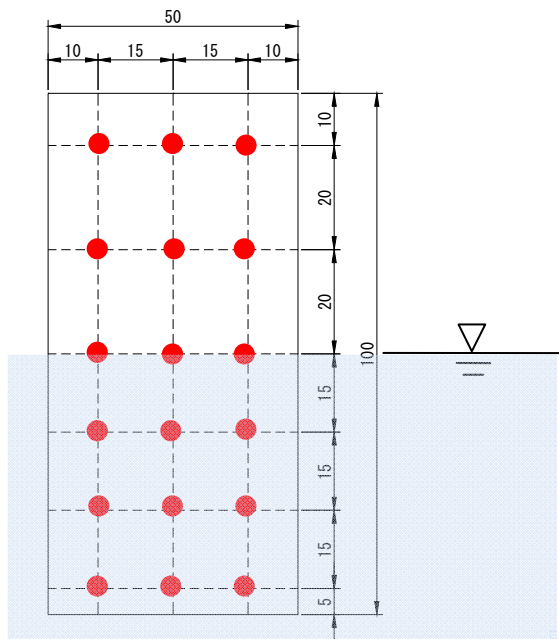


図-24 鋼板の板厚の計測箇所

6.3 調査結果

図-21、23 に暴露試験の状況例を示した。図-25 には暴露試験板の損耗量分布の推定値を示し（昨年度の網走港での結果も合わせて図示）、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。斜里の方では、各々の試験板についてみると、集中腐食とは言えないが、局所的に損耗量が多い箇所があり、均一に腐食

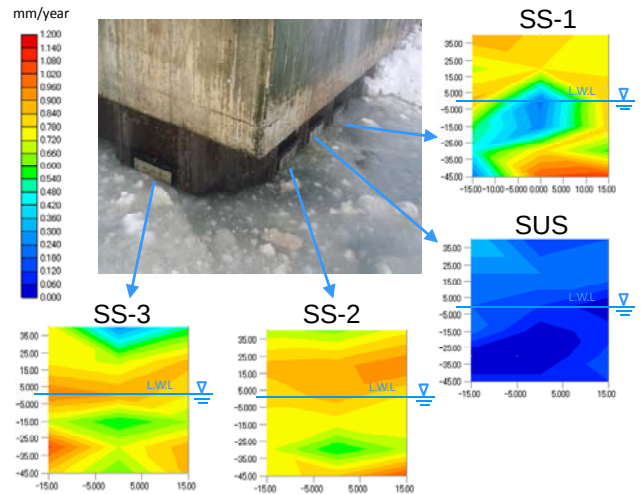


図-25 (a) 暴露試験板の損耗量分布 (斜里防砂堤)

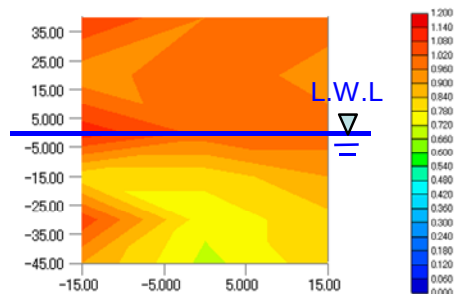


図-25 (b) 暴露試験板の損耗量分布 (網走港)

表-2 試験板の腐食速度(mm/year)の推定値

		斜里			ステンレス	網走
		SS-1	SS-2	SS-3	SUS	SS-4
L.W.L.~+0.5m	最大	0.90	0.96	0.86	0.36	1.08
	平均	0.78	0.80	0.64	0.23	0.98
L.W.L.~-0.5m	最大	1.06	1.04	1.04	0.20	1.12
	平均	0.64	0.77	0.79	0.04	0.89

注) 最大は、正味の最大値ではなく、測定点での最大を表す

する全面的な腐食とは言えない状況であった。しかし、隣接する試験板と比べるとその平面分布にバラツキがあり、M.L.W.L直下（この場合 L.W.L 付近と思われる）に生じるマクロセル腐食が顕著であるとは言えないようである。

他方、昨年度報告済の網走港については、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、特にマクロセル腐食含む、集中腐食は見られなかった。このように平面分布は、先の斜里とは異なるものの、氷の影響やその挙動性の違いがもたらすものであるかは不明である。ただ、今回の斜里での暴露試験サイトは、網走港とは異なり、流氷が関与するものの、管理の都合上、陸に近い基部に設置しており、頻繁に、活発

な流氷の作用を受けている箇所とは言えない（むしろ静穏環境で氷板が準静的に接触している期間が長い）ことを付け加えておく。

次に表-2を見ると、腐食量は、やや、全体的に網走港の方が斜里よりも大きいこと、個々の試験板において、「平均」でみると、L.W.L以下のほうがやや腐食量は小さい傾向にあるが、「最大」でみると、L.W.L以下のほうがやや腐食量は大きい傾向（最大と平均との比が大きい）などがうかがえる（最大は正味の最大ではなく測定点での最大を示すことに注意）。前者の理由については、斜里の方が、波浪などにより水塊が試験板全体に接触し、厚く凍結する期間が長いこと等が考えられる（簡易実験により、鋼板表面を凍結させた場合は腐食が進行しないことが分かっている）。また前章で見たように、安定した氷塊の接触（特に高い圧力で）は貧酸素状態となり腐食の進行を比較的遅らせるが、斜里の方の氷厚が大きいことを考えるとL.W.L以上に氷が接触している時間が長いことも考えられる。それらの作用が斜里と網走での損耗の平面分布の違いをもたらす原因の一つであるかもしれない。他方、ステンレス板はその損耗量はむしろ小さいがゼロではない。これが、計測誤差、海氷に含まれる微粒子などによる研磨作用（アブレシブ摩耗）によるものであるのか、あるいは腐食損耗によるものかは特定できなかった。しかし、網走および斜里のいずれも、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^{例え 17}を示した。これらの値と比較すると、明らかに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。前述のように、この寒冷域での結果は、試験板が短いこともあるが、通常M.L.W.L直下で比較的大きな腐食が見られるマクロセル腐食ではないことが推察されたが、それでも大きな損耗をもたらすということは注目に値する。前述から議論しているように、寒冷海域特有の、海氷作用による、アブレシブ摩耗、繰り返し錆除去による腐食促進、そして溶存酸素量が多いことによる腐食増加、などの複合的な要因によるものである可能性がある。Huglgaard(1973)¹⁶⁾は、グリーンランドのGodthaabの栈橋（鋼管）の腐食調査結果を示している。公表されている資料としては、氷海域での極めて数が少ない貴重な調査結果であると言える。それによれば、最大の腐食速度は0.38mm/yearであること、海氷作用によるものであるかは言及されていないが、これまで極域の低水温や汚染の無い水にある鋼材の腐食は、他の海域に比較して腐食量が少ないと考えられてきたが、これは

誤りであり、むしろシビアである場合があると結論づけていることを強調しておきたい。

表-3 無防食構造施設で得られた腐食速度の標準値¹⁷⁾

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

7. 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。本年度においては、昨年度に続き、室内実験、現地調査および現地暴露試験により、「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とともに、海氷が関与しない場合でも低温環境によるインパクトの一つとして温度差による腐食促進について調べた。

海氷の砂含有率に関する研究 より、

- (1) オホーツク海沿岸部の海氷の砂の含有率を調査した結果、混入率にバラツキはあるが、多くの海氷サンプルで砂の混入が認められ、内部まで浸透しているものも確認された。
- (2) 砂混入（特に内部への浸透）プロセスの簡易実験より、この内部浸透のプロセスは、日中の放射熱に起因する熱膨脹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す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。
- 海氷によるすべり摩擦・摩耗試験より、
- (3) アブレシブ摩耗の損耗率は、接触圧力にあまり依存しないほか、海氷摩擦による繰り返し錆除去で腐食促進を伴う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。
- (4) 腐食へ及ぼす海氷の接触圧力や摩擦速度の影響は、主に酸素供給や材料表面の活性の状態に起因する。
- (5) 定常摩耗状態での砂の量は僅かであるが、その僅かな量でも損傷させる能力があり、逆に、砂介在なしの場合の氷による凝着摩耗はほとんど無視できる。
- (6) 初期の砂の散布量の違いによる損耗量の推移について

調べた結果、初期の砂の量による定常摩耗率に大きな違いがない。

- (7) 自然流水でも試験実施、アブレシブ摩耗が確認され、微量でも内部に含まれる固形成分による機械摩耗であることが判明した。本実験で、人工的に砂を介在した人工海水による結果のうち、定常状態の損耗率は、砂が混入している場合の自然の流水による損耗率に大体近く、一連の実験結果より、定常摩耗については、砂の量や粒径にあまり関係ないと推論できた。
- (8) 錆も場合によってはアブレシブ摩耗の要因となる。
冬期のオホーツク海における鋼板(SS400)の現地暴露試験より
- (9) マクロセル腐食含む、集中腐食は確認されなかった。
- (10) 通常海域の数倍の腐食速度であることが推察され、寒冷海域特有の、海水作用による、アブレシブ摩耗、繰り返し錆除去による腐食促進、そして溶存酸素量が多いことによる腐食増加、などの複合的な要因を考慮すべきである。
温度差腐食に関する基礎実験より
- (11) 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。
- (12) 今後は、気温の方が高い場合の温度差腐食や、水温変化による溶存酸素量変化と腐食量への影響など調べていくことが必要である。

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) 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) 木岡信治、森昌也、山本泰司、竹内貴弘：流氷期の津波来襲を意図した流氷の構造物への衝突に関する中規模実験およびその数値計算法の基礎的検討、海岸工学論文集、査読有、第55巻(2)、pp.851-855、2008。
- 16) Hulgaard, E. and Sorensen, T. : Corrosion of Marine Structures at Godthaab, Greenland, POAC'73, Vol.1, pp.410-416, 1973.
- 17) 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 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

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 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. According to tests on wear due to ice friction, we found the abrasive wear by natural sea ice including sand particles, and that the influences of contact pressure and friction speed of ice between metal test materials to corrosion related to the activation of material surfaces or fluctuations in atmospheric (oxygen) supply. When abrasive wear and corrosion wear cause at the same time, the wear rate could be greater than that by the sum of each wear rate and the synergy was therefore expected. We also found other various facts according to the tests. Also, we made the exposure corrosion tests of steel plates (SS400) at a port and a coastal area facing the Okhotsk Sea in winter season. It was presumed that its corrosion rate under the cold environment was several times that in the normal sea water. According to the test on thermo-galvanic corrosion between air and water, there was no influence by the corrosion process when atmospheric temperature is lower than that of water.

Key words: Okhotsk Sea, sea ice, friction, abrasive wear, corrosive wear, deterioration, coastal structure