

## 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、井元忠博、中嶋雄一

### 【要旨】

本研究は、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、合理的劣化対策を提案することを目標としたものである。現地調査により、海水に砂等の固形分が含まれていること、その混入プロセスを明らかにするとともに、すべり摩擦摩耗試験によりこれが大きな損耗現象をもたらす一要因であることを実証した。固形分が含まれずとも、海水による繰り返しの腐食生成物の除去により、腐食が促進される可能性があることを示すなど、海水作用を受ける現象のうち、大きな損耗要因となりえるメカニズムを明らかにした。さらに、現地暴露試験、水質調査ならびに理論的検討より、海水作用あるいは海水作用以外の低温（水温）環境により、通常海域に比べ氷海域における材料劣化が進行する場合があることを示した。また防食対策として多く使用されるいくつかの防食工法の氷海域における暴露試験より、その耐氷性に問題があることが明らかとなった。その代替案として、安価な犠牲鋼板による補修/対策法、海水の作用力を軽減するため配置と形状に工夫した新たな陽極を提案し、現地暴露試験等により、その有望性を確認した。以上より、海水作用による種々の材料の損耗プロセスと損耗率の概略的な推定が可能となり、氷海域において、新たに提案した工法を含め、適切な構造形式・防食法の導入・設計、適切な補修・更新時期等の維持管理計画に資する大きな研究成果を得た。

キーワード：海水、劣化、鋼構造物、腐食、摩耗

### 1. はじめに

#### 1. 1 本研究の背景と目的

北極海やオホーツク海など海水の移動が活発な氷海域において、海水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水減少は、海水運動の活発化や漂流速度の高速化を招き、氷塊の衝突や、海水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などの被害事例があるなど、海水によると思われる劣化損傷が深刻な状態にあり、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、海水によるコンクリートの摩耗に関する研究事例はいくつかあり<sup>例えば4)</sup>、その摩耗メカニズムがある程度明らかにされるとともに、限定的ではあるが摩耗推定方法が提案されている<sup>例5)</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>例えば7)</sup>はあるが、海水による摩擦摩耗とともに、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。加えて、その防食対策として通常海域で使用されている被覆防食工法や電気防食方式等の耐氷性も未だ明らかにされていない。

本研究では、次節に示すように、海水や水質の現地調査、室内でのすべり摩擦摩耗試験・海水の衝突実験、理論解析、現地暴露試験など多くの研究手法を通じ、摩耗摩擦による海水の作用のみならず、低温環境に晒される沿岸構造物の劣化機構ならびに、現状の防食対策の耐氷性能を明らかにしつつ、その維持管理に資する損傷進行のモデルや劣化現象を踏まえた新たな合理的劣化対策を提案することを最終目標とするものである。なお、本研

究は国内要請のみならず、今後ますます活発になる北極海等における鉱物資源や油田開発のための氷海構造物等の海水作用による損傷・損耗や防食等の研究およびその対策の開発においても我が国がイニシアティブをとり、国際貢献を展開することができる。



図1 オホーツク海に面した導流堤の鋼矢板の損傷例

## 1. 2 本研究の構成

本研究は、次章にも述べるように、寒冷環境および海水による材料損耗のメカニズムの主な可能性を、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>に類似する海水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。これを踏まえ、要素研究を展開する。

まず、2章では、金属材料で現在まで知られている摩耗要因やメカニズムを紹介し、それから類推される摩耗・損耗要因について述べ、本研究の範囲を明確にする。3章ではアブレシブ摩耗を引き起こす海水表面および内部の砂等の固形分の含有量に関してオホーツク海沿岸部で実施した海水のサンプル調査について述べる。この調査より砂等の固形分は海水表面のみならず内部にも確認されたため、実験室ならびに現地において、海水内部への砂の内部混入プロセスについて実験を実施した。4章では、氷と材料とのすべり摩擦摩耗試験について述べる。氷には淡水氷(Fresh water)、人工海水のほか現地で採取した海水、材料には腐食性の炭素鋼、腐食の影響を除くためステンレス鋼、チタンなどの様々な金属材料、さらにウレタンエラストマーによる重防食被覆鋼材を用いた。接触圧力、雰囲気温度、摩擦速度が金属材料の損耗過程（腐食・凝着・アブレシブ）に与える影響、それから、特にアブレシブ摩耗特性について、砂の量や粒径、固形分としての腐食生成物を与える影響、アブレシブ摩耗と腐食摩耗との相乗効果、など多岐にわたる実験を実施することにより、基礎的な損耗機構を明らかにしている。さらには、現地では定量評価が困難な、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、氷海域での適用が困難であることを示すとともに、その適正な管理に役立つ知識を得ている。5章では、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、温度差腐食の影響、そして反応速度と酸素拡散に関連する水温変化が腐食速度に与える影響等を調べるための水槽実験結果について概説する。さらに北海道および本州において5年にわたり実施した水質調査結果より、主に腐食速度に影響を与えるDO（溶存酸素量）について取りまとめ、オホーツク海におけるDO特性について報告するとともに、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特性について考察した。6 章では、冬期に流水が来襲するオホーツク海沿岸部において実施した、各種材料の現地暴露試験について述べている。炭素鋼やステンレス鋼の材料のほか、通常海域で用いられている防食対策である、電気防食方式 (AL 陽極) および被覆防食工法の試験体も暴露に供し、それらの耐氷性能を調べ、氷海域での適用は困難であることを示す。さらに、犠牲鋼板による補修/対策工法や、海水の力を減少させるための形状と配置に工夫した新たな陽極など、安価で氷海域に適した工法を提案する。

最後に、得られた研究成果を整理し、実務上の提案を行うとともに今後の課題について整理する。

## 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<sup>8)</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。

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

ここに、 $W$  は荷重  $P$  の下、距離  $L$  まで摩擦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<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>9)</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。また、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)にも注意せねばならない。

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。これらをすべてを解明するのは困難であるが、極力網羅するよう努めるとともに、特に材料にとってシビアと考えられる現象についてはやや詳細に試験研究を実施した。

## 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



図-2 砂が付着(混入)した海水の漂流例

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、筆者らも、過去5年間にわたり、オホーツク海沿岸部における海氷の表面付近の砂の含有量を定量的に調べた。最初の2年とその後の3年とでは、測定方針・方法に違いがあるため、各年の測定方法と結果について概説する。

まず、2011～2012年（本中期研究実施以前の2008年調査を含む）の結果について述べる。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氷を対象とした。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。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(a)にまとめた。本データのみからは、概略次のように推論できる。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<sup>12)13)</sup>とも大体合致した。また、場所により、砂の量や中央粒径に大きな差はあったが、北浜で平均 $0.0587\text{g/cm}^2$ の砂の含有率であり、かなりの量の砂が付着する場所があることが分かる。なおこの場合、海氷に含まれていた砂は付近の

地面の砂の粒径に近いものであった。これを根拠とし、後述のアプレシブの摩耗試験の砂量の実験条件（標準値）を $0.05\text{g/cm}^2$ と設定するに至った。

次に、2013～2015年の結果についてまとめて述べる。調査地点は、2013年では、三里浜海岸、北浜海岸、常呂海岸の3箇所、2014年は、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、そして2015年は、止別川河口海岸、網走海岸帽子岩付近、網走二つ岩海岸の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内、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）。先と同様に、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(b)にまとめた。図-3には、汀線より沖側サンプル調査の様子を2015年調査を例に示した。表層部のみならず、内部層のサンプルにおいても変色が見られ、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。先と同様に、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比べ含有率は低い傾向にあること、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 $10^{-2}$ ～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、これらの傾向は平成25年度までの調査と大体同じで、濃度の範囲に

表-1(a) 海水表面付近の砂の含有量（2008～2012年）

調査地点	含有率(g/cm <sup>2</sup> )			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 <sup>2</sup> )			
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400～500m
	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	おもに第二湖口左岸側

表-1 (b) オホーツク沿岸部における海水表面付近の砂の含有量

2013 年実施分結果

調査地点	含有率(g/cm <sup>2</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)	—		

2014 年実施分結果

調査地点	含有率(g/cm <sup>2</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> )		
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)	—		
	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)	—		
	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)	—		
	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)	—		

2015 年実施分結果

調査地点	含有率(g/cm <sup>2</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> )		
止別川 河口海岸	表層(2cm)	0.0978(0.22)	0.0015(0.54)	Feb.24, 26, 2015	汀線より陸側へ3m
	内部	—	—		
網走海岸 帽子岩付近	表層(2cm)	0.00333(0.65)	—	Feb.26, 2015	汀線より沖合へ3m
	内部	—	—		
網走 二つ岩海岸	表層(2cm)	0.0516(0.61)	0.000821(0.59)	Feb.23, 2015	汀線より陸側へ3m
	内部	—	—		
	表層(2cm)	0.00467(0.4)	—	Feb.23, 14, 2015	汀線より沖合へ3m
	内部	—	—		
	表層(2cm)	2.64(0.72)	0.051(0.75)	Mar.4, 2015	汀線より陸側へ3m
	内部	—	—		
	表層(2cm)	0.0293(0.32)	—	Mar.4, 2015	汀線より沖合へ3m
	内部	—	—		

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。また単位面積質量(g/cm<sup>2</sup>)では、かなりのばらつきが見られるが、0に近いオーダーから大きい場合で0.257であったが、0.01のオーダーが妥当であると考えられ、前述のように初年度に設定したアブレシブ摩耗の砂の散布量の標準値 0.05g/cm<sup>2</sup> が概ね妥当であったことも確認できた。

こうして、2015年においても、沖合の氷、そして表面のみならず内部にも、僅かであるが砂が浸透していることが定量的に確認された。後述のように現地で採取した自然海水を用いたアブレシブ実験により、その含有していたごく僅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、アブレシブ摩耗による材料損耗への寄与の可能性が更に増したといえる。

しかし、アブレイブ摩耗を想定した鋼構造物の維持管理や損耗対策をより合理的かつ適切に行うため、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を継続していくことが望まれる。



全景の例



表層のサンプル



内部層のサンプル

図-3 汀線より沖側サンプルと調査の様子为例

### 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>10)</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後、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後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(a)に、斜里の防砂堤先端における灯台への着氷を、同図(b)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水が遡上して付着した後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、水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。



図-4(a) 灯台へ着氷した氷に混入した砂



図-4(b) 沖合のアイスリッジ表層に付着した固形成分

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、淡水氷を用いた実験室レベルでの簡易な実験(2012年)および、現地で採取した流氷を用いた現地での実験(2014年および2015年)を実施している。まず、実験室レベルでの簡易な実験結果について概説する。実験方法を次に示す。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/cm<sup>2</sup>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月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



図-5 試験氷表面への砂散布直後(左)と暴露60分後の状況



図-6 表層部除去後の横断面(左)と縦断面例(約2cm スライス)

に伴い、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。

次に、現地で採取した流氷を用いた現地での実験のうち2014年に実施した結果を概説する。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0.05g/cm<sup>2</sup>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、前述のように、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-7に表面砂の氷内部への取り込み過程の例を示す。

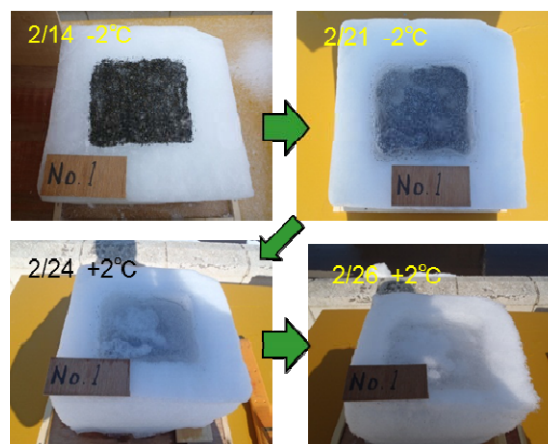


図-7 表面砂の氷内部への取り込み過程の例  
(2014年2月14~26日)

この期間では、日中の最高気温が+2℃となるなど、比較的暖かい事もあったが、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。これは先の実験室レベルでの実験結果で予測したプロセスの一つと同様であるが、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。

2015年の実験では、前年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。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内、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種類の試験用海氷をそれぞれ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-8(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-8(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。

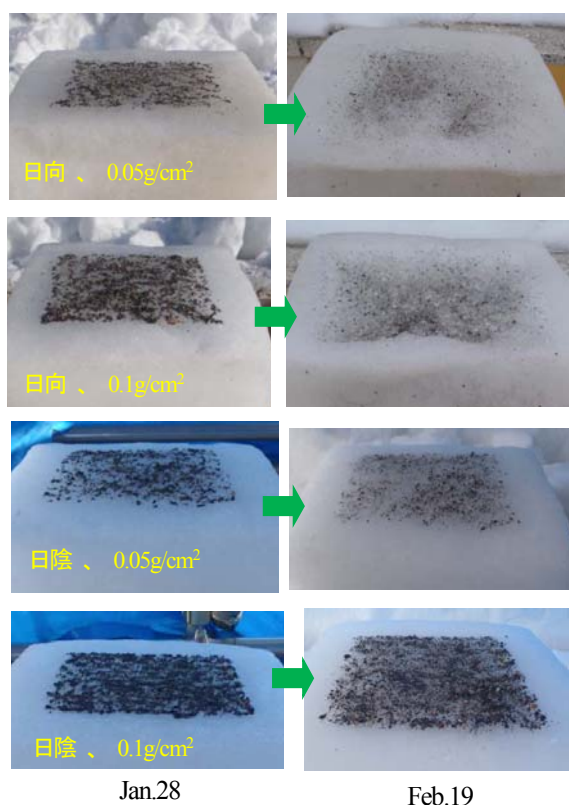


図-8(a) 固形分の内部浸透プロセスの簡易実験(日向/日陰、砂の散布量の違いによる氷の表面状態の変化)



図-8(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、前年の実験では、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 $+2^\circ\text{C}$ となるなど、比較的暖かいこともあったが、砂粒子が一樣に氷内部へ沈下し、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ことも考えられる。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、前年に続き、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. 海水によるすべり摩擦・摩耗試験

### 4.1 腐食摩耗試験

#### 4.1.1 概説

後述の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腐食をともなう要素実験を実施した。

#### 4.1.2 実験方法

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-9に示すように、鋼製ケースに収納された角柱の人工海水<sup>13)</sup>（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る。なお、摩擦面は、実際にその頻度が多いと思われる、氷の成長方向と平行、摩擦方向はそれに垂直とした。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。次に、鉛直下向きに圧力をかけた状態で、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。ただし、後に示すように、試験体には腐食によりある程度の錆が付着するため、母体に傷をつけない程度に、軟ブラシで除去後、速やかに計測した。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。

#### 4.1.3 実験方法

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、人工海水を用いた。構造物試験体の材質は一般構造物用圧

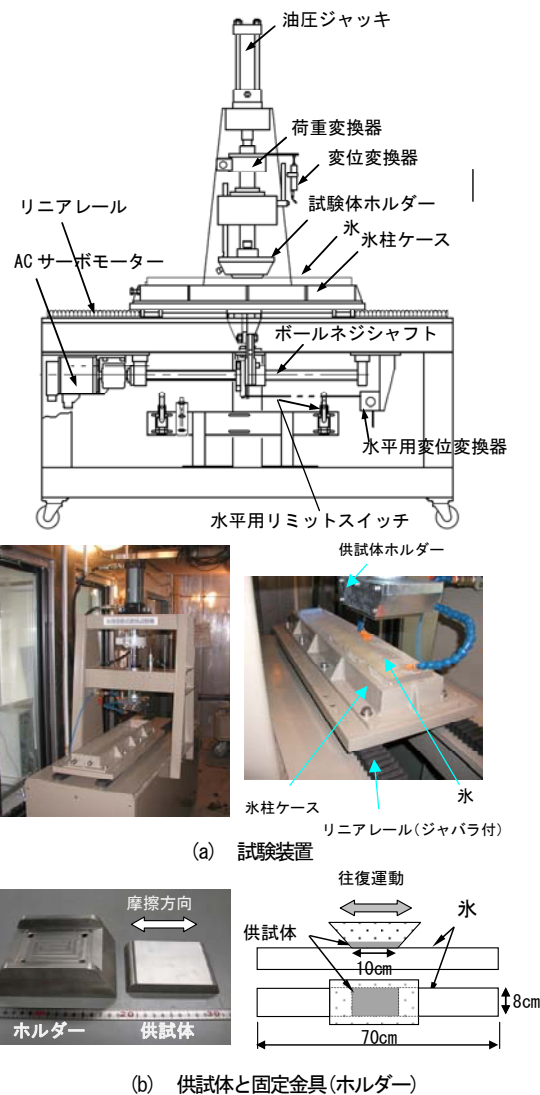


図-9 すべり摩耗試験装置と摩耗方法の概要図

延鋼材(SS400)であるが、限定した実験条件（標準条件）では、既報（前中期重点プロジェクト研究報告）のとおりステンレス鋼（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>14)</sup>によれば、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、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。

#### 4.1.4 初期摩耗と定常摩耗および既往の実験結果(前中期重点研究)のレビュー

本項では、既報の結果をまとめておく。まず、図-10に示した、一般材料のすべり摩耗の進行の基本形式<sup>12)</sup>について触れておく。同図が示すように、一般にはこの3つのタイプが存在する。すべり開始から摩耗(損耗)率が次第に変化して、後に一定の摩耗(損耗)率となる場合、摩耗(損耗)率が変化している状態を初期摩耗、一定の摩耗率の状態を定常摩耗状態と呼ぶ。特にType-Aのように、初期摩耗(シビア摩耗)状態での摩耗(損耗)率が大きく、定常摩耗(マイルド摩耗)状態における摩耗(損耗)率が小さいことが多い。初期摩耗状態はなじみ期間ともいわれ、初めにもっていた表面粗さの大きい突起が潰されたり、摩耗して除去されるとともに表面層の構造も変化して、互いに都合良くすべることができるようになる。あるいは金属材料間の摩擦の場合(特に遷移元素の場合)、シビア摩耗段階において、表面の同一箇所が反復摩擦されると、摩擦面では接触と分離を繰り返し(凝着摩耗)、その結果、雰囲気気体吸着に対して摩擦面が機械活性化される。その場合、酸素の化学吸着膜が形成され、真実接触部の中の固体直接接触部が大幅に縮小される。その結果、移着素子のサイズが小となり、摩耗粒子の微細化と比摩耗量の激減がもたらされる、という機構で説明される。Type-Cは直線的に損耗が進行するタイプである。

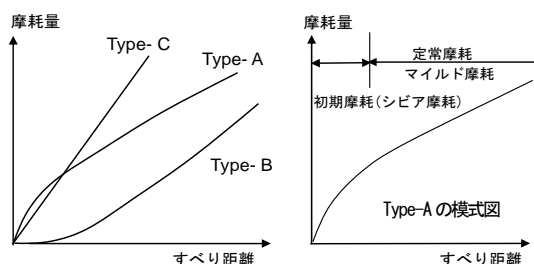
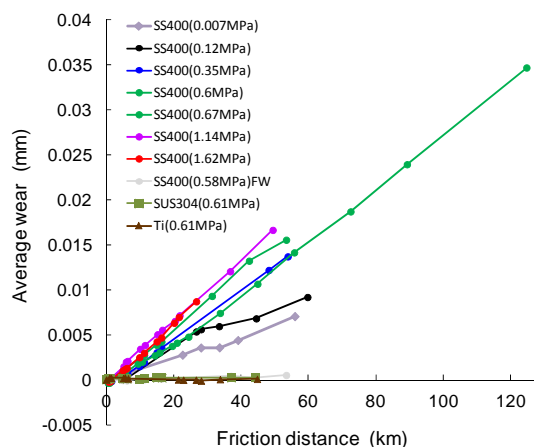


図-10 摩耗進行の基本形式

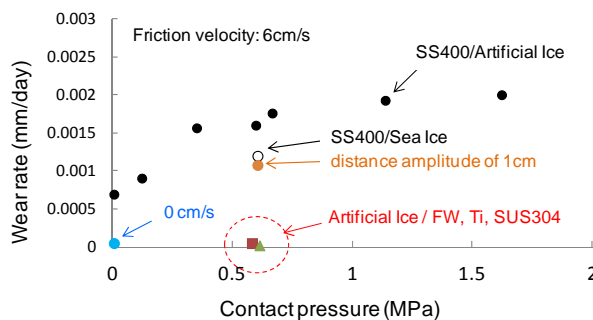
既往の実験結果のうち、摩擦距離と平均損耗量との関係を図-11(a)に示した。この場合、ほぼ直線的に損耗が進行しているType-Cに近いものと考えられる。しかし、Type-Aの場合でも初期摩擦距離が非常に短い場合(シビア・マイルド摩耗遷移を生じやすい)も存在するため、Type-AはType-Cを含んでいるともいう見方もできる。金属材料同士の摩擦の知見から、その遷移を生じやすい条件としては、 $p_v$  値(見かけ接触圧力と摩擦速度の積)が小さく、摩擦する2固体のうち少なくとも一方が遷移

金属の場合である。本実験で用いた材料は、Tiは遷移金属、SS、SUSもFe、Niなどの遷移金属を含んでいるため、シビア・マイルド摩耗遷移が早期に現れると考えられる。もし本実験における材料損耗が凝着摩耗によるものが支配的とした場合には、それに該当し、きわめて短い摩擦距離において遷移する。

こうして、損耗(腐食)量は摩擦距離にほぼ直線的に比例して増大するため、その直線勾配を損耗率(mm/km)として定義した。損耗率は、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-11(b)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。



(a) 摩擦距離と平均損耗量との関係



(b) 接触圧力と平均損耗量との関係

図-11 既往の腐食摩耗の実験結果

#### 4.1.5 実験結果と考察

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既出の図-11 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、流氷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。図-12 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-11 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。更に摩擦速度の増大に比例して増加する明確な理由是不明であるが、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事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。

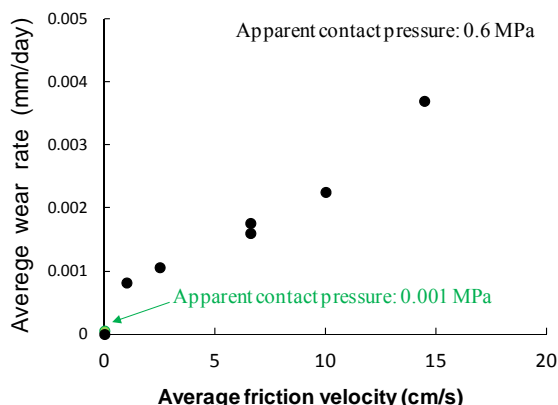


図-12 平均摩擦速度と平均損耗率との関係

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-13 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、酸素供給の差が現れている。他方、図-11 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。

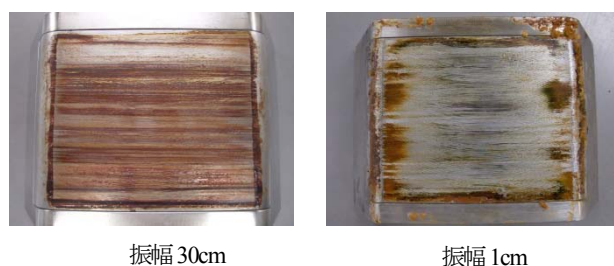


図-13 試験体と接する氷面のうち、雰囲気と接する氷の領域が異なる場合の試験体表面状況の例

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言える。また、前述のように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、海水摩擦にともなう錆層の繰り返し剥離によって腐食が促



図-14 鋼矢板付近の錆が付着した状態の海水の例

進している可能性がある。実際に海氷摩擦により船舶や鋼構造物の塗膜や錆層等が剥離し母材が露出することが経験的に知られている。図-14 は、鋼矢板付近の海水であるが、錆が付着しており錆層が削れていることが容易に想像できる。

## 4.2 様々な条件でのすべり摩擦摩耗試験

### 4.2.1 概説

本節では前節の腐食摩耗以外の主要な損耗要因を取り扱う。前節より、経験的にも、そして前節の現地調査でも、海水表面付近（あるいは内部）にある程度の固形分（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。主に本節では、その固形分（砂）を含む海水によるアブレシブ摩耗特性について、多くの紙面を割く。その接触圧力、雰囲気温度、摩擦速度などの物理環境の違いが与える影響のほか、固形分の量や粒径が与える影響、固形分としての腐食生成物が介在する場合の影響、アブレシブ摩耗と腐食摩耗との相乗効果、など多岐にわたる実験を実施することにより、基礎的な損耗機構を明らかにする。

### 4.2.2 実験方法

実験方法は前項 4.1.2 と基本的には同じであるが、砂の介在方法を含む、前項と異なる方法および条件のみ概説する。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-15）。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。計測項目や計測方法は前項と同様である。アブレシブのために供する金属供試体は、腐食の影響を除去するために SUS304 を用いた。SUS304 の硬度は、前述のように、ビッカース硬さに換算して、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、それは水温や 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>15)</sup>、金属よりおよそ 1 オーダー小さいことが推察される。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、本研究で用いた、前述の SS400 の硬さは 132 であり、SUS と比べて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。



図-15 氷の表面に砂をセットした状態

### 4.2.3 おもな実験条件

アブレシブ摩耗の実験については、基本的条件として淡水氷(Fresh water ice)を使用している。表-2 に示すように、雰囲気温度、接触圧力、介在砂の量および粒径、移動速度などを広く変えて、アブレシブ摩耗のそれぞれの依存性を明らかにした。なお、砂は、標準条件として、前述のように中央粒径 0.7mm（均等係数 3.8）の川砂を使用した。その他の粒径では、いわき珪砂 1、3 号、東北珪砂 4、5、8 号を使用した。また、氷は、前述の淡水氷のほか、人工海水、そして微量の固形分が含まれていると思われる、北海道斜里町において採取した自然の海水も使用した。

表-2 主な実験条件

試験体の材質	SUS3004
雰囲気温度 (°C)	4~30°C
接触圧力(MPa)	0.007~1.62 (0.6)
介在砂の粒径(mm)	0.111~0.984 (0.798)
介在砂の量(g/cm <sup>2</sup> )	0.01~0.12 (0.05)
移動速度(m/s)	0.01-0.15(0.06)
最大摩擦距離(km)	26.7~125 (50)
振幅距離(m)	0.3

注) ・括弧内は標準的な条件を示す  
 ・各試験体表面は正面フライス加工済（粗さ:6S）  
 ・SUS304 のビッカース硬度は 163  
 ・川砂の他、珪砂 5 種類  
 （いわき珪砂 1,3 号、東北珪砂 4,5,8 号）

さらに、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、腐食とアブレシブが同時に進行する

場合の損耗率の検討、つまりそれらの相乗効果についても調べた。このため、SUS304-砂-淡水氷 (FW ice) のほか、SUS304-砂-人工海氷、腐食をとまなう SS400-砂-人工海氷、の組み合わせによる試験を実施した。

#### 4.2.4 実験結果と考察

##### (1) アブレシブ摩耗の基本特性

図-16には、実験直後 (摩擦距離 50km) の SUS304 金属供試体 (上) と氷 (下) の表面状態の例を示し、図-17には摩擦距離と摩耗量との関係を示した。まず、図-17を見ると、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-16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、



図-16 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

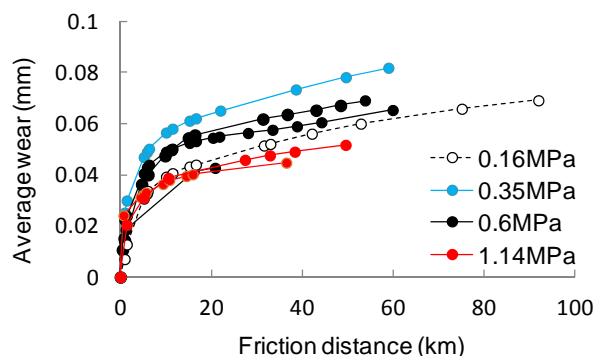


図-17 摩擦距離と摩耗量との関係

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、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 (図-16 下参照)、摩擦距離 50km 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。

次に、再び図-17を見ると、摩擦距離による摩耗量推移は、図-18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ことがわかった。そこで、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損耗率 (mm/km) と定義する。

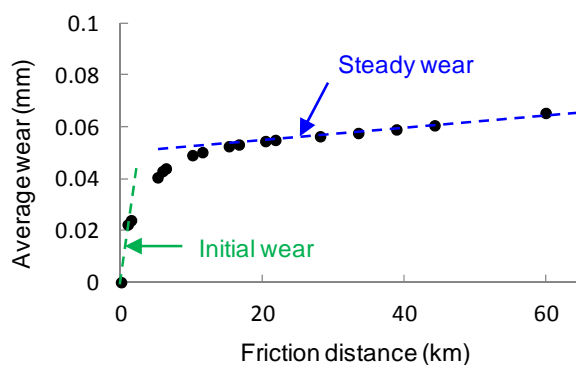


図-18 摩耗率の定義

##### (2) 計測中の金属試験体 (SUS304) に種々の変化を与えた場合の摩擦距離とアブレシブの損耗量との関係

図-19には計測中の金属試験体 (SUS304) に種々の変化を与えた場合の摩擦距離と損耗量との関係を示した。本実験方法は、試験終了時まで同じ試験体と氷を用い、適

当な摩擦距離毎に、損耗量の計測を行っている（その頻度は同図の個々のプロットに対応）。他方、距離毎に新しい試験体と氷に取り替え、砂の配置も初期状態にセットした一連の実験を実施した（換言して、様々な最終距離を設定し、その終了時点のみ計測）。まずその結果（同図の●）と通常条件（同図の●）と比較した。初期の砂量にリセットされるため、全体の損耗量（初期損耗率）としては前者の方が大きい、定常損耗率は、バラツキがあるものの、およそ等しいことが分かる。ステンレス表面が損傷されると、酸化皮膜が破壊されることにより、損耗（腐食）が促進される、あるいは逆に、加工硬化により損傷しにくくなる事が考えられる。当初、通常条件では計測のため一時中断(2hr.程度)していたことにより、酸化皮膜の形成と加工硬化により摩擦が軽減されることが懸念されたが、この結果より、損傷した酸化皮膜はすぐ修復することが推察された。また常に新しい試験体と氷の使用、砂の散布にもかかわらず、定常損耗が通常条件とほぼ等しいことから、アブレシブ摩擦が試験体一面に均等に生じていると思われる。さらに、アブレシブ摩擦で使用済（損傷している）SUSを用いた摩擦試験結果も図示（●）した。その定常損耗率が同等かむしろ大きい結果であり、加工硬化による影響はないことも示唆され、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。次に、通常条件において、ある摩擦距離以降から新しい氷に取り替え、砂を一切散布しない実験結果を図示（●）した。これより、砂の排除以降はその損耗率はほぼゼロであることが分かる。ゆえに定常損耗状態で残存する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、逆に凝着摩擦はほとんど無視できると言える。

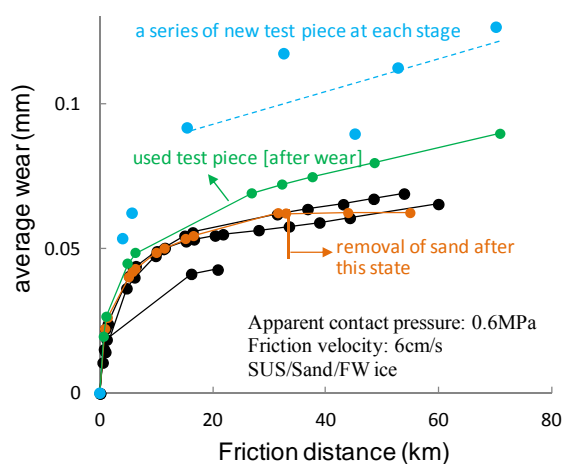


図-19 計測中の金属試験体(SUS304)に種々の変化を与えた場合の摩擦距離と損耗量との関係

### (3) アブレシブ摩擦の圧力依存性と Holm 式の適合性

図-20 には、それぞれの損耗率と接触圧力との関係を示した。まず、損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、初期摩擦は接触圧力に応じて増加傾向にあるようであるが、定常摩擦については、図-17 からも、その依存性は明確ではない。そうすると、アブレシブ摩擦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。また定常損耗率は、初期損耗率よりおよそ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 と人工海氷との摩擦による SS400 の損耗率の結果も示した。この場合の損耗は凝着摩擦などの機械的摩擦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、アブレシブ摩擦は腐食摩擦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損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。

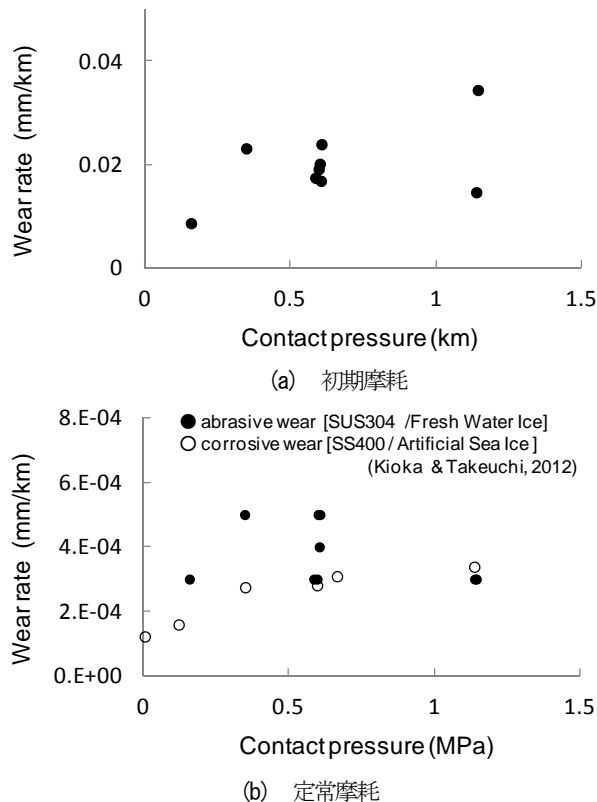
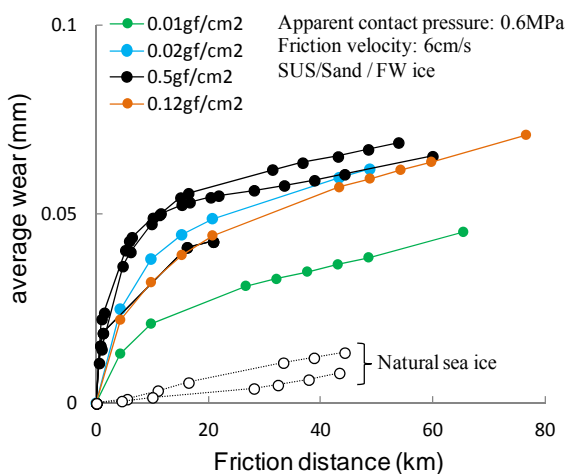


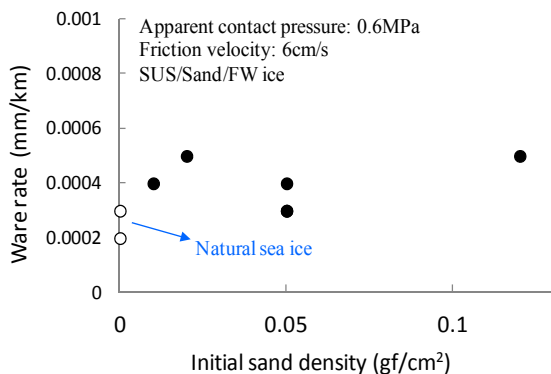
図-20 接触圧力と摩擦率との関係

(4) 損耗率に及ぼす砂の量の影響

初期の砂の散布量の違いによる損耗量（同じく淡水氷と SUS との間に砂を介在）について調べた結果を図-21 に示す。この図より、初期の砂の量による定常損耗率に大きな違いがないことが分かる。前述のように、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、砂の含有量が定常状態に落ち着くが、その量は初期の砂の量によらず、一定である事を意味している。あるいは、切削の観点から、進行方向に重複する微粒子は無視できるため、僅かな量で決まる可能性も示唆している。さらに、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事も理解できる。



(a) 摩擦距離と損耗量の関係

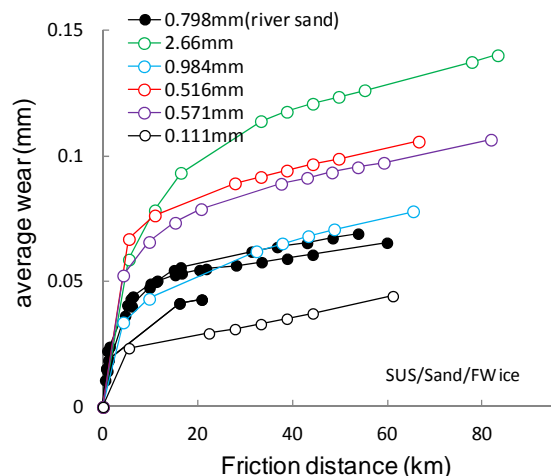


(b) 定常損耗率と初期の砂の散布量との関係

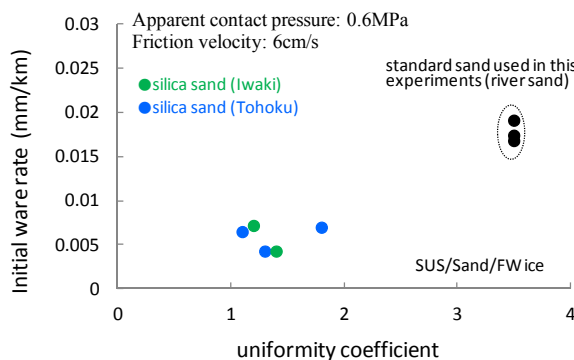
図-21 初期の砂の散布量の違いによる損耗特性および現地で採取した自然海水による損耗量との比較

(5) 損耗率に及ぼす砂の量の影響

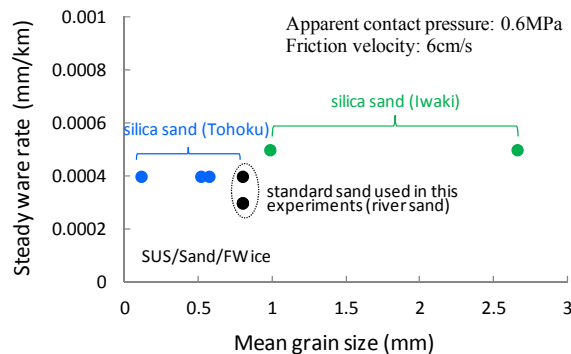
粒径の違いによる損耗量（同じく淡水氷と SUS との間に砂を介在）について調べた結果を図-22 に示す。今回主に用いている川砂の他に、珪砂5種類（いわき珪砂1、3号、東北珪砂4、5、8号）を使用した。これらの結果より、初期および定常損耗率は、概ね中央粒径には依存しないが、初期損耗率はやや均等係数に依存することが分かる。その均等係数が2以下ではほぼ一様であるが、



(a) 摩擦距離と損耗量との関係



(b) 初期損耗率と均等係数との関係



(c) 定常損耗率と中央粒径との関係

図-22 砂の粒径の違いによる損耗特性

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ると見ることができる。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落ち着くまで時間を要する事を意味している。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(海水表面にごく微量に付着した砂で粒径もかなり小さい)に近い。

#### (6) 自然の海水による損耗率と本実験の妥当性

前述のよう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-23に、摩耗試験結果を既出の図-20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と思われる。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とが分かる。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、つまり硬さに関わる)、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。



図-23 自然状態の表面部を有する自然海水の試験体

#### (7) 鋼材自身から生成される腐食生成物その他の固形分によるアブレシブ摩耗の可能性

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(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(図-24参照)。図より、定常摩耗率は砂よりもFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の方がやや小さい感があるものの、両者の粒径や量、硬さ等が異なる事を考えると、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いえる。つまり、粒径や量については、初期摩耗の段階で、ある程度ふるいに掛けられた如く、大きな粒径のものは排出されるとともに粉碎されて、粒度や量もそろってくるものと思われる。あとは硬さであるが、ある程度の硬さ以上であれば、それには鈍感であるかもしれない。また先の砂混入の自然の流水と同じく、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。

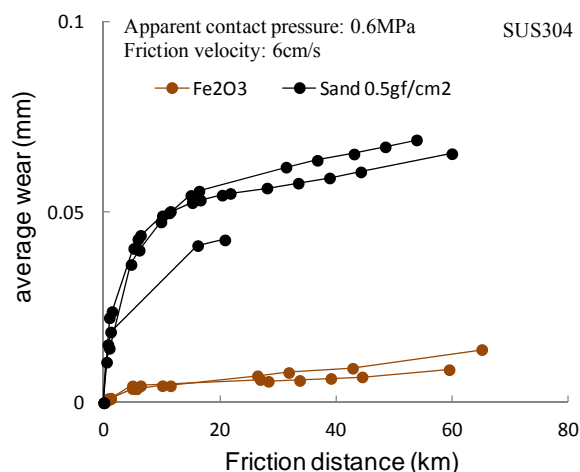


図-24 砂及びFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を介在した場合の摩擦距離と摩耗量との関係の比較 (Fresh water ice)

次に、SUSとSSの試験体をそれぞれ半分に切断して、両者を接合し、人工海水(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-25参照)。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、人工海水 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。また、錆が砂による切削を阻害している可能性があることもわかった。

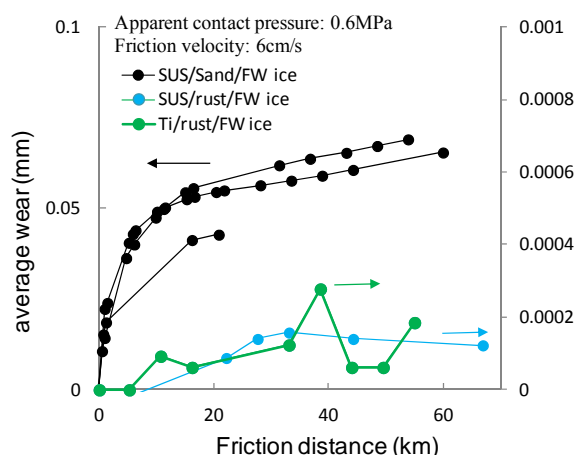


図-25 SS400 から発生する錆介在時の SUS と Ti の摩擦距離と摩耗量との関係の比較 (Fresh water ice)

#### (8) 腐食とアブレシブが同時に進行する場合の損耗率の検討

最後に、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。まず、その要素試験の一つとして、氷の硬さや組成の違いによるアブレシブ摩耗への影響について調べるため、これまで用いてきた人工海水と純水 (Fresh water ice) との摩擦距離と摩耗量 (両者とも SUS304 使用) との関係と比較したものを図-26 に示す。これより、人工海水の定常損耗率の方が小さいのが分かる。これは人工海水の方が柔らかく、砂粒子が人工海水の方に食いつく、人工海水の方がブラインセルなどの空隙部が多く、その空洞部に入り込んでいるためかもしれない。さらに、これを SS400 に変えた実験 (SS400/Sand/Saline ice)、つまり腐食とアブレシブが同時に進行する場合の実験結果を同図に示した。これより、この定常摩耗率は、SUS/Sand/Fresh water ice の結果よりかなり大きい事が見取れる。このアブレシブと腐食の両方が生じる定常損耗率は 0.0005mm/km、先の腐食のみ (SS400/人工海水、砂介在なし) では約 0.0003mm/km、先の SUS304/人工海水 (砂介在) では平均的に 0.00025mm/km となっている。SUS の方が SS より固いとしても、1.23 倍 (ビッカース硬さ)、SS がアブレシブされたとすると、 $0.00025 \times 1.23 = 0.0003$  と推測される。

したがって、腐食のみ (0.0003mm/km) と SS による正味のアブレシブ推定値 (0.0003mm/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事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。いずれにしても、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。

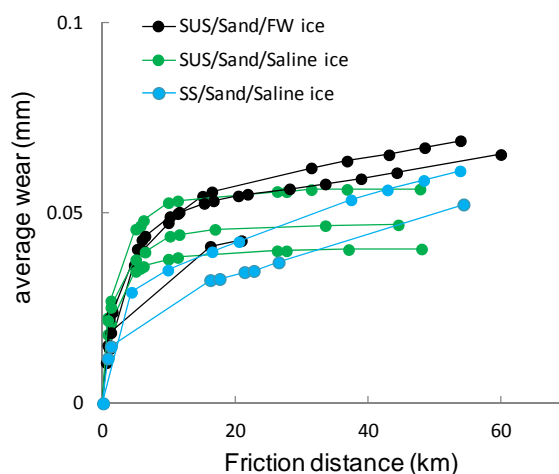
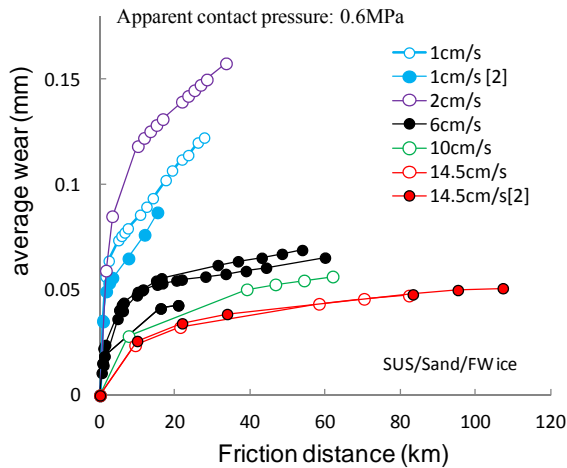


図-26 腐食とアブレシブが同時に進行する場合 (SS400/砂/人工海水) の摩擦距離と摩耗量との関係の比較

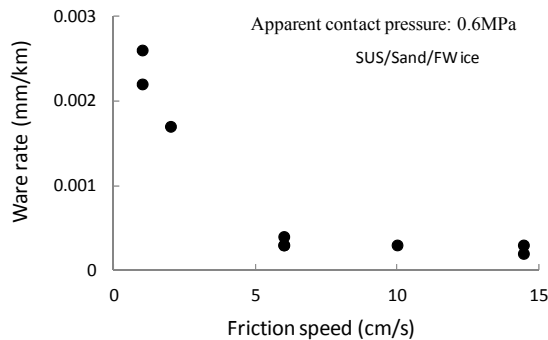
#### (9) アブレシブ摩耗の摩擦速度依存性

図-27 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>10)</sup>も、砂による炭素鋼板の摩耗試験 (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。



(a) 摩擦距離と摩耗量と関係



(b) 定常損耗率の推移

図-27 摩擦速度の違いによる損耗特性 (Fresh water)

(10) アブレシブ摩耗の水温依存性

図-28 は水温変化によるアブレシブ摩耗率の推移および人工海水氷と純氷 (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-29 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られる。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、

$$V = N_e a^2 \frac{2p_i}{p_m} L \cot \theta$$

$$[1 > 2W / \pi a^2 p > 2p_i / p]$$

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>17)</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、人工海水氷の場合を見ると、先の純氷よりも 4~10 倍程度小さくなるのが分かる。一般に人工海水氷の方が柔らかい

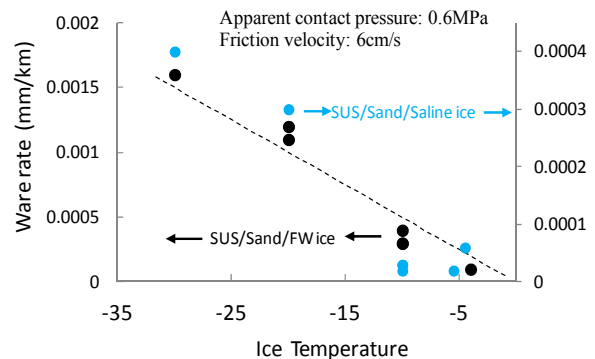


図-28 氷温変化によるアブレシブ定常摩耗率の推移および人工海水氷と純氷 (Fresh water ice) との比較 (両者 SUS304, 砂介在)

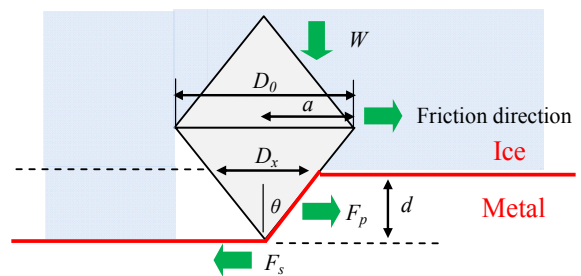


図-29 アブレシブ摩耗の簡易モデル (砂粒子が氷側に深く埋め込まれている場合)

(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。以上より摩耗量は水温にも大きく影響することが明らかとなった。

#### (11) 氷による鋼材の凝着摩耗の可能性の再検討

これまで、間接的に氷による鋼材の凝着摩耗の寄与が小さいことを示してきた、本節の最後に、直接的な方法で再検証する。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)で実施した結果を図-30に示した。なお、本図は他の条件との比較のため既出の図(図-11b)に、●で表示している。図より、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事が分かる。以上より、腐食摩耗やアブレシブ摩耗に比べ、氷による鋼材の凝着摩耗はほとんど無視できることを再確認した。

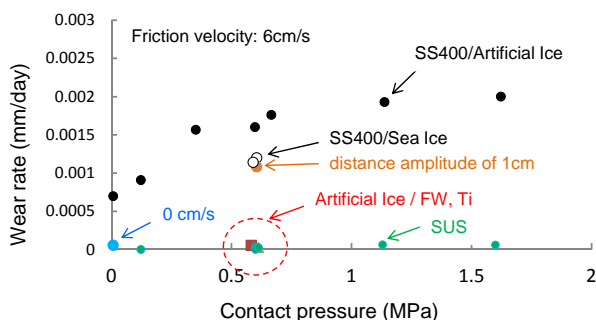


図-30 様々な条件における接触圧力と定常損耗率との関係(凝着摩耗を調べるためのSUSと純氷との摩耗試験は緑色で表示)

### 4.3 重防食被覆鋼材の氷による耐摩耗性の検討

#### 4.3.1 概説

現地では定量評価が困難な、防食被覆鋼材(ウレタンエラストマー被覆)のすべり摩耗試験を実施し、氷海域での適用が困難であることを示すとともに、その適正な管理に役立つ知識を得ることを目的とする。

#### 4.3.2 実験方法および条件

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 $\mu$ )を被覆した供試体を用いたすべり摩耗試験を行った。図-31に、使用した供試体の例を示す。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、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。

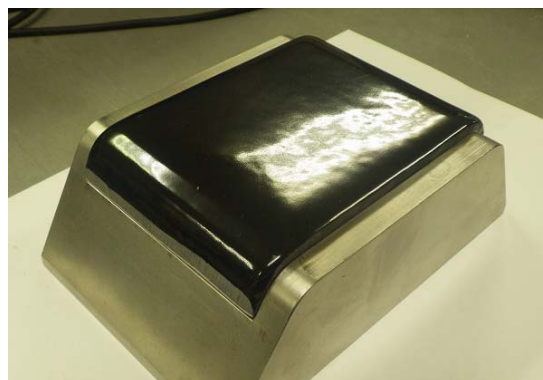


図-31 重防食被覆鋼の供試体(炭素鋼にウレタンエラストマー(2000 $\mu$ )を被覆)

#### 4.3.3 実験結果および考察

##### (1) 接触圧力の違いが及ぼす重防食被覆鋼材の耐摩耗性の影響

図-32(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。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<sup>-3</sup>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し値する。図-33(a)に、その試験体表面の状態を示したが、明らかな凝着摩耗による損傷が確認できる。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、凝着摩耗に比べ数倍程度、アブレシブ摩耗によるものが大きい結果となった。図-33 (b) に、試験終了状態（摩擦距離が約 50km）における試験体表面の状態を示したが、下地の母材が露出するほど、極めて大きな剥離も伴った損傷が確認できる。



図-33 (a) 重防食被覆試験体の表面の損傷状態（凝着）（摩擦距離 50km）

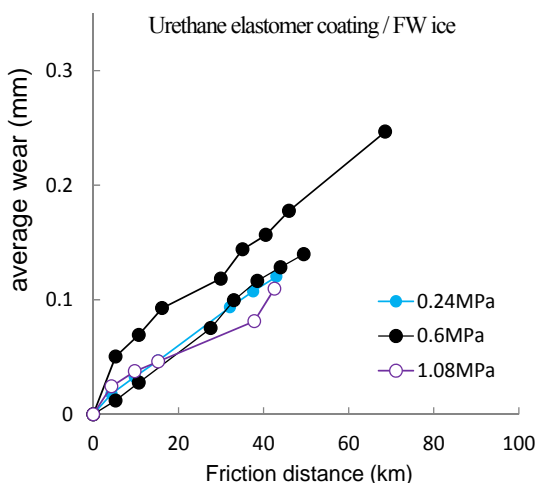


図-32 (a) 接触圧力の違いによる重防食被覆試験体の摩耗（凝着）進行曲線の比較

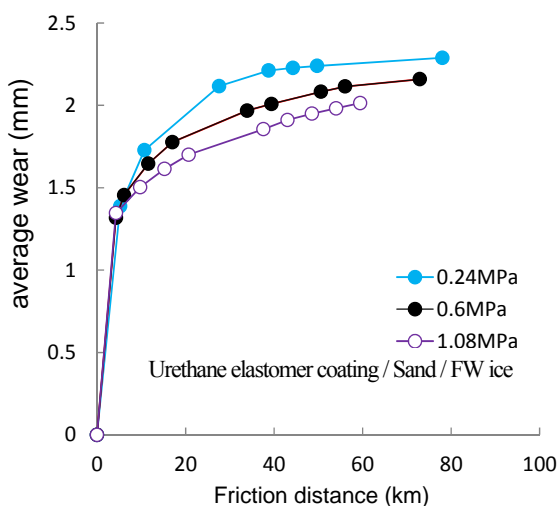


図-32 (b) 接触圧力の違いによる重防食被覆試験体の摩耗（アブレシブ）進行曲線の比較

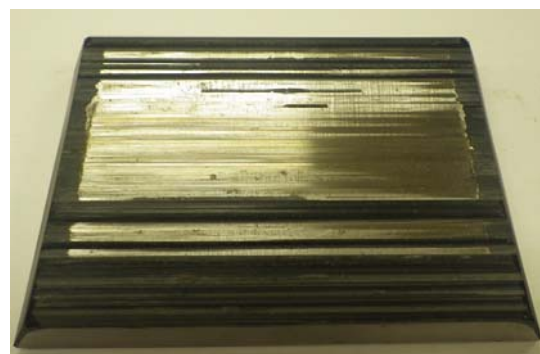


図-33 (b) 重防食被覆試験体の表面の損傷状態（アブレシブ摩耗）（摩擦距離 50km）

(2) 砂の有無および粒径の違いが及ぼす重防食被覆鋼材の耐摩耗性の影響

図-34 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、大体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ツキ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ツキ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所では、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。

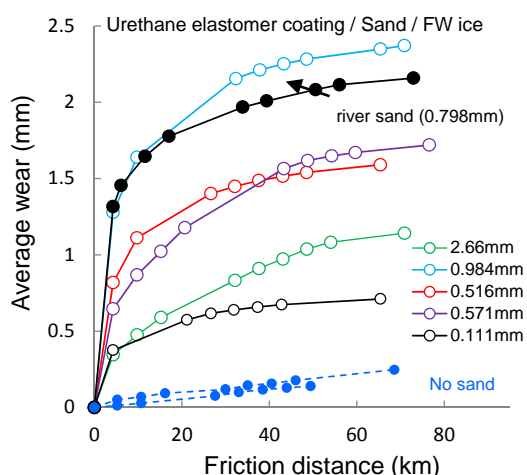


図-34 砂の有無および粒径の違いによる重防食被覆試験体の摩耗進行曲線の比較

#### 4. 4 本章の主要な結論と実務への応用

本節で得た劣化メカニズムについて整理するとともに、劣化進行プロセスの予測モデル構築など実務上有用な知見について述べる。そのためまず特に実務において意味をもつと考えられるメカニズムを改めて下記に列挙すると、

##### ■海氷内部に砂などの固形分の混入がない場合

- ① 海氷による金属材料の凝着摩耗はほとんど生じないこと。
- ② 海氷の作用は錆層の繰り返し剥離による腐食の促進に関与していること。
- ③ その損耗量（腐食）は摩擦距離（時間）にほぼ直線的に比例して増大すること。
- ④ つまり、通常腐食であれば、腐食速度は、錆層の発達とともに減少すると考えられるが、海氷等による連続摩擦によって常に金属表面は錆層が無い状態となり、腐食速度は一定（つまり直線）に保たれると推察されたこと
- ⑤ 定常損耗率（腐食速度）は、0.5MPa 前後以上では、接触圧力に変化は見られないこと。

##### ■海氷内部に砂などの固形分の混入がある場合

- ⑥ 海氷に砂の混入が認められ、さらに内部まで浸透しているものも確認されたこと。
- ⑦ 摩耗率は、接触圧力にあまり依存しないこと。
- ⑧ 定常摩耗率は、固形成分の粒径や成分および量に依存せず一定であり、ごくわずかな固形成分の量でも切削する能力を有すること（金属よりもある程度固い粒子の場合）。

⑨ 粒径が小さく、少量の場合には、すぐに定常摩耗に移行する傾向にあること。

⑩ 現地から採取した自然の海氷を用いた摩耗試験により、固形成分の切削によるアブレシブ摩耗が実証されたこと。

⑪ その自然の海氷に付着した砂の粒径は小さく微量であるため、上記⑧⑨より、その摩耗は、確かに初期摩耗を示さず、すぐ定常摩耗に至ることが確認された。しかもその定常摩耗率は、本実験で採用した、人工的な Fresh water ice とその砂の介在方法による定常摩耗率とはほぼ一致した。

⑫ 腐食とアブレシブが同時に進行する場合、砂粒子が錆を削り、常に材料表面を露出させる事により腐食を加速する、腐食摩耗の可能性が示唆される一方、逆に錆がアブレシブ摩耗を阻害する可能性も示唆されたこと。

特に、上記①④⑧は実務上、比較的シンプルな劣化進行プロセスを考える上で重要なヒントを与える。さらに、⑧～⑪より、自然の海氷内の砂は微量で粒径が小さい場合が多いこと、また摩耗現象が長期的であることを勘案すると、アブレシブ摩耗の指標として「定常摩耗率」を採用することが妥当と考えられ、実務でも本実験での定常摩耗率を参照できると考えられる。これらより、その当該現場における流氷の来襲率や固形分を含む海水の割合などその現場に必要な情報が得られれば、劣化進行プロセスを提案することができる。

一方で、逆に寒冷環境が腐食を抑制する状況が存在する可能性がある。前節で示したように、海氷がある接触圧において静止した状態（速度がゼロ）においては貧酸素状態により腐食が進行しない。したがって、海氷がほぼ静止状態で長期間にわたり接触するような状況では、腐食の進行は抑制されると判断される。さらに、ほとんど腐食が進行しないことがわかった。温度にもよるが、凍結によって腐食の根源となる水分や酸素が表面に付着しないこと、氷層そのものによって水分や酸素の表面への到達が遮断されること等が考えられる。このようなコンディションがあり得るといことも念頭に入れておきたい。

現段階で入手できる知見により、最も合理的な劣化予測や対策に努力する必要があるが、そのためにも、今後特に、現場での流氷接触率、固形分を含む海水の割合等の把握のための調査や、現地暴露試験や室内実験等による腐食損耗率（通常腐食における連続摩擦時の腐食速度）の定式化、等が強く望まれ、引き続き研究が必要である。

## 5. 低温環境下における海水中での鋼構造物劣化機構に関する検討

### 5.1 温度差腐食に関する基礎実験

#### 5.1.1 概説

本節では、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が $-20^{\circ}\text{C}$ 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。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ある。このうち、5.1.1では気温が低い場合の温度差腐食の可能性について述べる。また、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5.1.2で検討した。

#### 5.1.2 気温が低い場合の温度差腐食の可能性の検討

##### (1) 実験方法

試験は雰囲気温度を制御できる低温室で実施した。図-35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製の丸鋼を図-36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 $-25^{\circ}\text{C}$ 、 $-12.5^{\circ}\text{C}$ 、 $-5^{\circ}\text{C}$ に変化させる一方、塩水の温度は結氷温度よりやや高い $-1^{\circ}\text{C}$ （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事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本ずつ、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、棒鋼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塩分量と溶存酸素量を計測した。

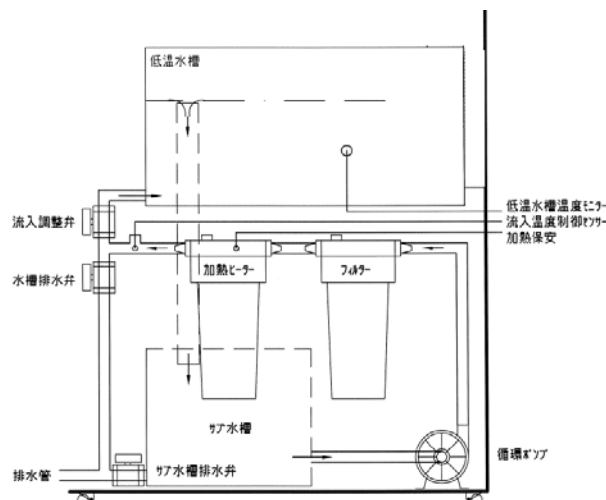


図-35 温度差腐食試験に用いた実験装置の概要図



図-36 水槽および実験中の写真

(2) 実験結果と考察

実験中の様子を図-36 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、棒鋼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

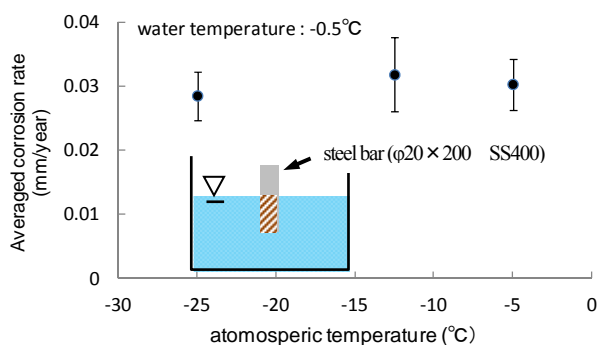


図-37 雰囲気温度に伴う平均腐食速度の推移

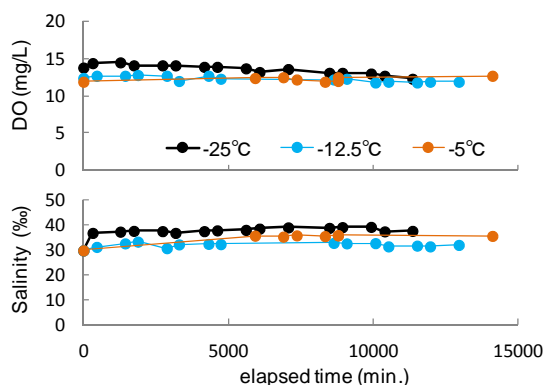


図-38 (a) 塩分濃度および溶存酸素量の経時変化

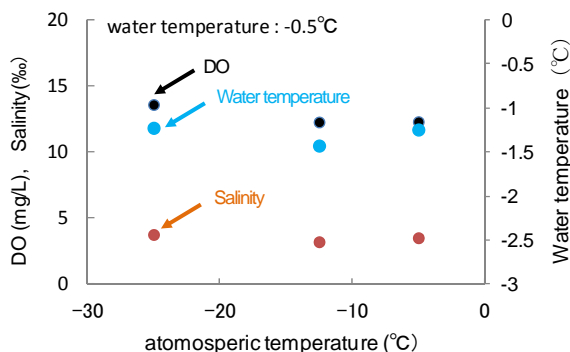


図-38 (b) 雰囲気温度にともなう塩分濃度、溶存酸素量および水温の推移 (それぞれ時間平均)

思われる。図-37 には、雰囲気温度に伴う平均腐食速度 (mm/year)、図-38 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-37 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、雰囲気温度に伴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-38 より、塩分濃度や溶存酸素量の変化を見てみる。-25°C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伴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。

Huglgaard (1973)<sup>18)</sup>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。公表されている内、極めて数少ない氷海域での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、海水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、むしろシベリ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。

5.1.3 水温変化に伴う腐食速度の検討

(1) 実験方法

用いた水槽や実験方法は前項とほぼ同様であり、塩水を入れた水槽内に長さ20cm、直径20mmのSS400製の丸鋼を気中と水中に半分ずつ暴露した。また、前述のように、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。本項での実験条件は、雰囲気温度を $-10^{\circ}\text{C}$ に固定し、水温は $0\sim 13.7^{\circ}\text{C}$ に変化させて行い、腐食速度の推移を検討するものである。

## (2) 実験結果と考察

実験中の様子を図-39 に示した。同図からも分かるように、前項と同様に、棒鋼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-40 には、水温変化に伴う平均腐食速度(mm/year)の推移、図-41 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>19)</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。

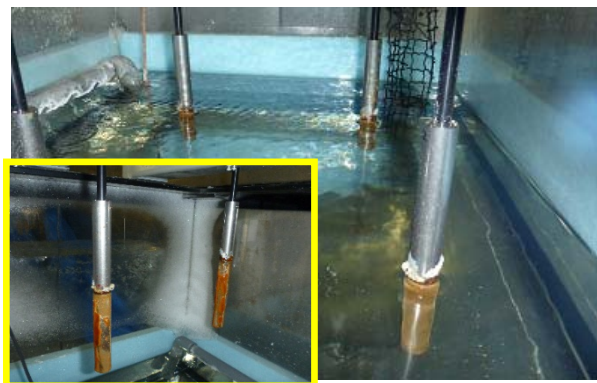


図-39 水槽および実験中の写真

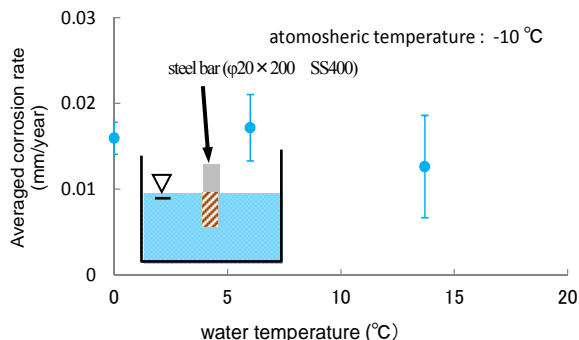


図-40 水温変化に伴う平均腐食速度の推移

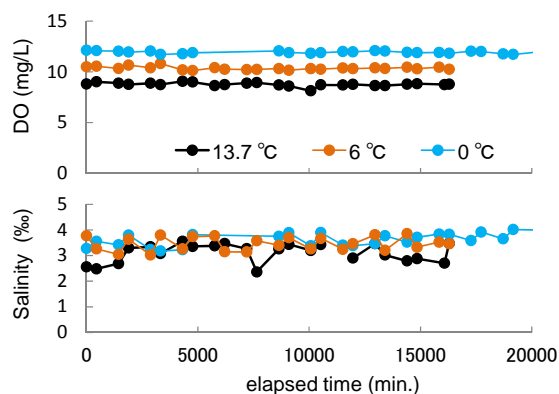


図-41 (a) 塩分濃度および溶存酸素量の経時変化

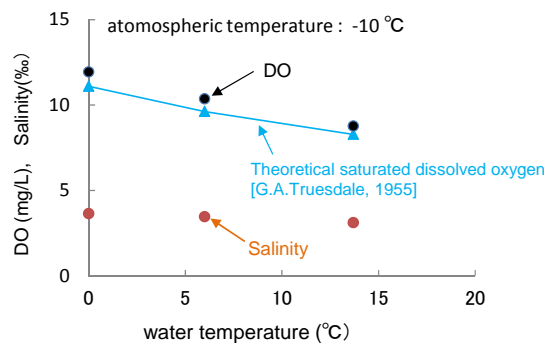


図-41 (b) 水温変化にともなう塩分濃度および溶存酸素量の推移（それぞれ時間平均）

以上より、一般に、ほかの条件が同一とすると、温暖海域の方が寒冷海域よりも腐食速度が速いという認識があるようであるが、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、水温変化が腐食速度に与える影響は複雑であり、一概には言えないことを実証したと言える。



## 5.2 北海道沿岸域における水質調査と腐食速度に関する検討—酸素拡散律速支配と Arrhenius 型の反応速度に基づく検討—

### 5.2.1 本節の目的

海水の作用以外にも低温環境が腐食速度に与える影響も考慮する必要があるが、それらの検討はあまりない。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）があり、ほかの条件が同一で水温の違いのみに着目する場合、温暖海域と寒冷海域ではどちらの腐食速度が大きいかは、一概には言えないことが前節より分かった。

我々は、過去5年間にわたり、北海道周辺の海域を中心に、オホーツク海とそれ以外の海域（日本海や太平洋）、そして一部の本州での海域において溶存酸素量(DO)等の水質調査を実施してきた。本報告では、このうち、DOの調査結果をとりまとめ、その海域による違い、とりわけ流氷の影響を受ける氷海域（寒冷海域）であるオホーツク海における DO と他海域との比較を行った。さらに、DO 拡散や反応速度（ボルツマン因子）を考慮した腐食速度を表す簡易式から、例として、あるサイトを選定して推定された、年間を通じた温暖海域と寒冷海域の腐食量を比較し、寒冷海域において、海氷の力学的作用以外にも、腐食速度にも留意すべきことを概念的に示す。

### 5.2.2 海域別の溶存酸素量の比較

#### (1) 調査の方法

過去5年間にわたり、北海道を中心に、季節別（夏期・冬期）の、オホーツク海とそれ以外の海域（日本海・太平洋）、そして一部の本州の海域における溶存酸素量(DO)等の水質項目について調査を実施している。ここでは DO のみについて整理し、その各海域での比較を行う。調査地点は主に港湾漁港内とし、水面より 50cm 地点における水質を調べた。同一の港内では数地点において計測し、その平均値をその港内の代表値とした。調査期間を、夏期（7月～8月）および、冬期（12月～3月）に大別して実施した。図-42 に調査地点の概略図を示す。また前述のように一部の本州（東北、名古屋、大阪の港湾）でも実施し、参考程度に比較した。本水質調査では、ポータブル多項目水質計 WAC-24 型（東亜ディーケーケー製）を用いた。DO の測定方式はガルバニ式角膜電極法であり、塩分補正、大気圧補正済である。また調査はすべて同一の計測機器、同一の調査者（筆者自ら）により行っているため、計測上の系統誤差は少ないものと思われる。

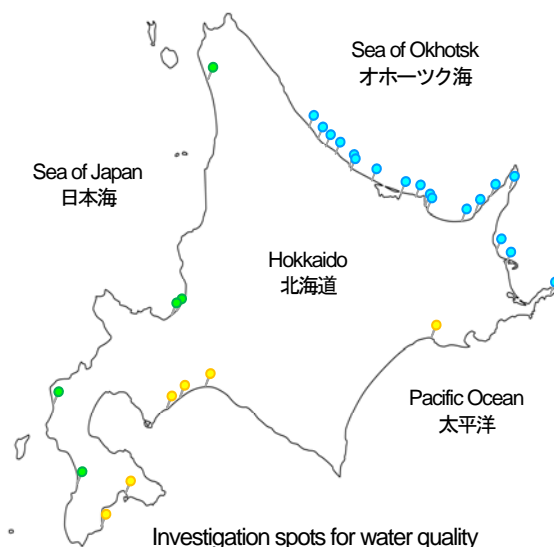


図-42 水質の調査地点

図示した色別は図-2の凡例（海域別）に対応している

#### (2) 各海域における DO の調査結果

図-43(a)には、各地点の溶存酸素量(DO)を各シーズン、海域の違いを示すひとつの指標である水温で整理した結果を示した。図中の各点は、すべての調査地点を表すが、前述のように各調査地点の代表値として、数点での測定値の平均値を表す。また図中の曲線は、塩分量と水温で表される Truesdale (1955)の式<sup>19)</sup>による飽和と溶存酸素量の推定値を実線で示した。その計算には、仮に全計測地点の塩分量の平均値を用いて計算し、水温変化のみに対応する飽和値を表示している。実測の DO も大体その水温変化に対応しており、水温低下に伴って DO が増加していることが理解できる。

次に、実測の DO と Truesdale の式による飽和値の比、つまり飽和度(Saturation percentage of DO)を同図(b)に示す。各海域でサンプル数が異なるので一概には言えないが、同一の海域でもばらつきが大きいことが分かる。

表-3には、季節別および海域別の飽和度の平均値および変動係数をまとめた。これらの図表から、直感的あるいは大雑把には、オホーツク海の飽和度(あるいは DO)が他の海域に比べて高いこと、夏期より冬期の飽和度が大きいこと、さらには、北海道の海域の DO が本州よりも高く、高い場合には 140%となっており、過飽和している場合が多いこと、などが見て取れる。

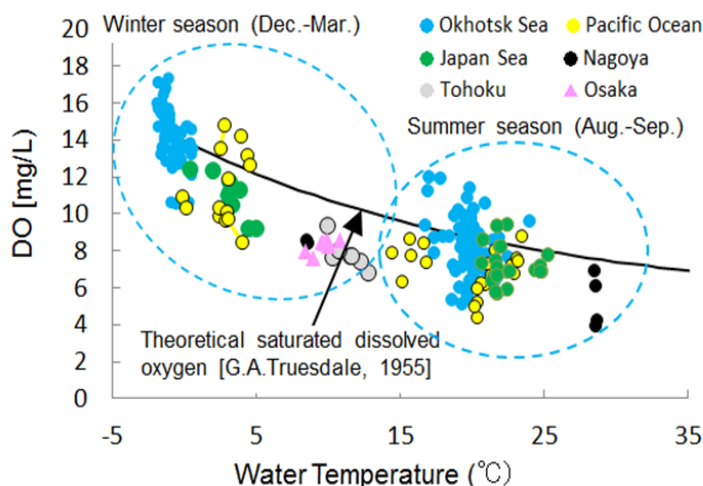


図-43(a) 海域別にみた溶存酸素量およびその水温変化

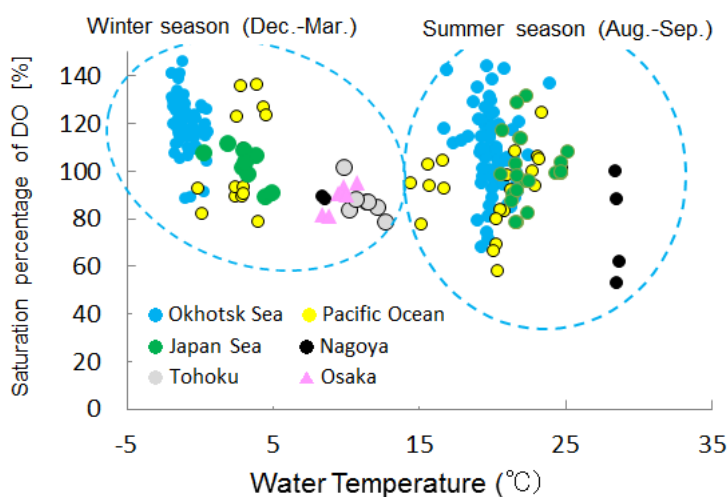


図-43(b) 溶存酸素の飽和度

表-3 季節別・海域別のDOの飽和度の基本統計量

夏期			
	標本数	平均値	変動係数
オホーツク海	74	109.1	0.182
太平洋	21	92.8	0.166
日本海	21	101.0	0.139
冬期			
	標本数	平均値	変動係数
オホーツク海	69	120.7	0.09
太平洋	15	105.7	0.18
日本海	13	102.2	0.07

次に、季節別および海域別に統計的に有意な差があるか調べてみる。まず、海域毎に、季節(夏・冬)による

飽和度の母平均に差があるか調べるため、t検定を行った結果を表-4に示す。なお、F検定により、あらかじめ母分散が等しいことを確認している。これによれば、オホーツク海では有意水準1%で有意な差があり、太平洋では5%で有意差があり、日本海では有意差がない、という結果になった。特にオホーツク海では冬期に飽和度が高くなる傾向にあると解釈できる。

表-4 季節(夏期・冬期)による飽和度の差のt検定結果

	T	自由度	危険率	判定
オホーツク海	4.31	116	p<0.0001	**
太平洋	2.17	34	p=0.0368	*
日本海	0.248	28	p=0.4029	-

\*\* 1%有意差あり, \*5%有意差あり, -なし

次に、季節毎に、海域による飽和度に差があるか調べ

るため、1元配置の分散分析(ANOVA)を行った結果を表-5に示す。因子間に有意差がある場合には、Tukeyの方法により多重比較を行った。また事前に、Bartlett検定により、母分散の等分散性の検定を行った。夏期のデータでは有意水準5%で等分散性を仮定できた一方、冬期のデータでは、1%で少なくとも一つの母分散は異なる結果が得られたが、ひとまず分散分析を続けた。この結果により、太平洋と日本海では飽和度に差がないが、オホーツク海が他の海域とはやや異なり、最も高い飽和度をもつ海域と判定される。

表-5 海域による飽和度の差の分散分析(ANOVA)結果

夏期			
	分散比	危険率	判定
	6.935	p=0.0014	**
多重比較 [Tukeyの方法]			
オホーツク海 vs. 太平洋			**
オホーツク海 vs. 日本海			-
太平洋 vs. 日本海			-
冬期			
	分散比	危険率	判定
	14.963	p<0.0001	**
多重比較 [Tukeyの方法]			
オホーツク海 vs. 太平洋			**
オホーツク海 vs. 日本海			**
太平洋 vs. 日本海			-

\*\*1%有意差あり, \*5%有意差あり, -なし

以上により、オホーツク海の飽和度(あるいはDO)が他の海域に比べて高いこと、夏期より冬期の飽和度が大きいこと、等が統計的にも示された。この場合、オホーツク海の飽和度が他海域よりも1~2割高いことが推察される。また本州の調査が不定期で標本数も限られていたため統計的検定は行わなかったが、図-43から、北海道の海域自体が本州よりも高い飽和度(あるいはDO)を有していることも推察される。

なお、本調査は、海域毎や季節毎にサンプル数の相違(実施しなかった年もある)、測定精度等に加え、調査データの年変動を調べたわけではないこと等から厳密な解析を行ったわけではないが、大局的には、冬期のオホーツク海のDO(あるいは飽和度)が大きいであろうことは本調査から推察される。今後引き続きデータの蓄積に努める予定である。

### 5.2.3 低温環境における腐食速度に関する一考察

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。本項では、DO拡散や反応速度(ボルツマン因子)を考慮した腐食速度を表す簡易式から、例として、あるサイトを選定して推定された年間を通じた温暖海域と寒冷海域の腐食量を比較し、寒冷海域において、海氷の力学的作用以外にも、腐食速度にも留意すべきことを概念的に示す。

鋼材の腐食速度  $V$  は、Arrhenius型の温度依存性<sup>例)ば20)21)</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。

$$V = Ca \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (1)$$

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、である。

さらに、反応物の濃度は、本検討では、溶存酸素量(DO)に比例するとし(比例定数を  $b$ )、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。

$$C \propto DO = k \times DO_{SAT}(S, T) \quad (2)$$

なお、飽和DOの算定には、前述と同様にTruesdaleの式を用いた。最終的には、定数  $a$ 、 $b$  を一定として式(1)をそれらで除した、腐食速度を表す指標  $V'$  で評価する。

$$V' = V / ab = kDO_{SAT} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (3)$$

ここで、寒冷海域と温暖海域を、それぞれ、流氷が来襲するオホーツク海域と本州の海域とし、さらに、本研究では、前者と後者の代表地点を、それぞれ紋別港、神戸港に選び、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>22)</sup>を使用し、2003~2009年までの日平均気温を抽出して、それらのアンサンブル平均をとることにより、図-44に示すように、年間の平均水温変化を設定した。また、 $S=30\text{‰}$ 、炭素鋼の活性化エネルギー  $E=1.6 \times 10^4 \text{J/mol}$  と

仮定した。さらに、前述の結果から、オホーツク海の方が他海域より、1~2割、飽和度が高いことが分かっているが、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、神戸港と紋別港内での鋼材の腐食速度を表す指標  $V'$  の年間変化を推定し、両者を比較したものを図-45 (a) に示す。

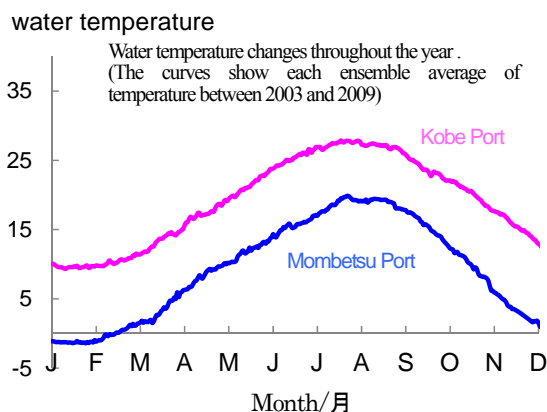


図-44 神戸港と紋別港の年間の平均水温変化 (2003~2009年の日平均気温のアンサンブル平均)

この図により、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2割程度、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、しかし紋別港では、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%、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と言える。

前述のように、Huglaard (1973)<sup>18)</sup>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、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。本検討もそれを裏付けるものとなっている。

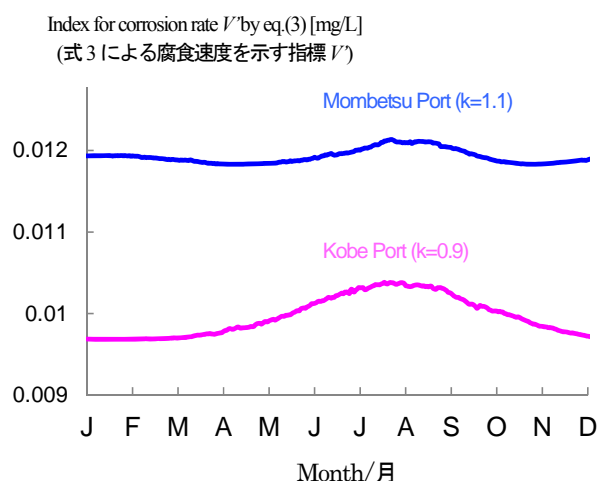


図-45 (a) 神戸港と紋別港での腐食速度を表す指標  $V'$  の比較 (それぞれ  $k=0.9, 1.1$  の場合)

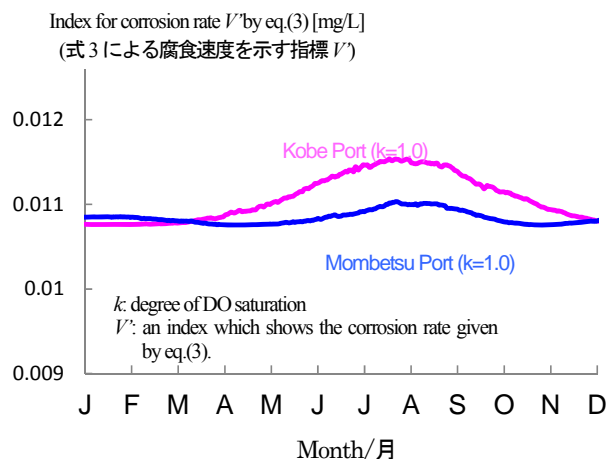


図-45 (b) 神戸港と紋別港での腐食速度を表す指標  $V'$  の比較 (両者とも  $k=1$  とした場合)

### 5.3 本章の結論

過去5年間にわたって、北海道を中心に、オホーツク海とそれ以外の海域（日本海や太平洋）、そして一部の本州での海域において実施した、オホーツク海の飽和度が他海域よりも1～2割高いこと、北海道の海域自体が本州よりも高い飽和度を有していること、等が推察された。

また、水温の違いのみに着目し、酸素拡散律速支配とArrhenius型の反応速度に基づく考察から、寒冷海域と温暖海域の腐食速度の違いについて概略的な検討を行った。とりわけ、水温変化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。また、DOの飽和度が大きい氷海域は腐食速度が大きい場合があることを示し、寒冷海域において、海氷の力学的作用以外に、腐食速度にも留意すべきことを概念的に示した。また、仮に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。

なお、水質調査については、まだサンプル量が不足していること、他の水質項目も必要であること、また、調査データの年変動も調べる必要があることから、今後引き続きデータの蓄積に努める予定である。

## 6. 鋼構造物の劣化対策のための暴露試験

### 6.1 概説

本章では、冬期に流氷が来襲するオホーツク海沿岸部において実施した、各種材料の現地暴露試験について述べている。まず炭素鋼やステンレス鋼等の材料の暴露試験結果から損傷あるいは腐食状況のほか損耗（腐食）速度を推定し通常海域のそれと比較した。また、通常海域で多用されている防食対策である、電気防食（アルミニウム合金陽極を想定）および重防食被覆の試験体の暴露試験を実施し、それらの耐氷性能を調べ、氷海域での適用は困難であることを示す。さらに、安価で氷海域に適する新たな補修および対策法として、犠牲鋼板による被覆法を提案し、それを暴露試験に供し、その耐氷性を調べた。加えて、海氷の圧力、衝突力や摩擦によるせん断力等を減少させるための形状と配置に工夫した新たな陽極を提案し、中規模実験等によりこの耐氷性を調べた。

### 6.2 オホーツク海における炭素鋼版およびステンレス鋼板の暴露試験

#### 6.2.1 調査の目的

現場においては、固形分が内在する氷によるアブレイブ摩耗のほか、炭素鋼の場合にはむしろ腐食も随伴する。前述のように、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伴って腐食を促進させている可能性があるほか、海水作用以外にも多くの損耗・腐食要因が考えられる。2011年1～3月に、網走港港内およびオホーツク海に面した斜里漁港の防砂堤で、炭素鋼とステンレス鋼板の暴露試験を実施した。前者の試験サイトでは、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、後者は水平移動のある流氷の接触に曝される事が特徴である。

#### 6.2.2 調査の方法

炭素鋼板(SS400、寸法：0.5m×1m、t13mm)を網走港内に1枚、および、斜里防砂堤基部に3枚を、LWLを中心とした位置に設置した。また、斜里には、同じ寸法のステンレス板(SUS304)1枚を同様に設置した。それぞれのサイトの位置図と設置状況の例をそれぞれ図-46および図-47に示す。設置方法は、既設鋼矢板に架台を溶接により取り付け、その上に、鋼板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



図-46(a) 網走港での暴露試験サイト



図-46(b) 斜里漁港での暴露試験サイト

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。図-48に示すように、予め、鋼板一枚あたり、幅方向に3箇所×鉛直方向に6箇所の計18箇所において、設置前と撤去後の鋼板厚を、超音波厚さ計（MX-5DL、TMIダコタ製）を用いて計測し、その差から損耗量を推定した。



図-47(a) 網走港での暴露試験状況

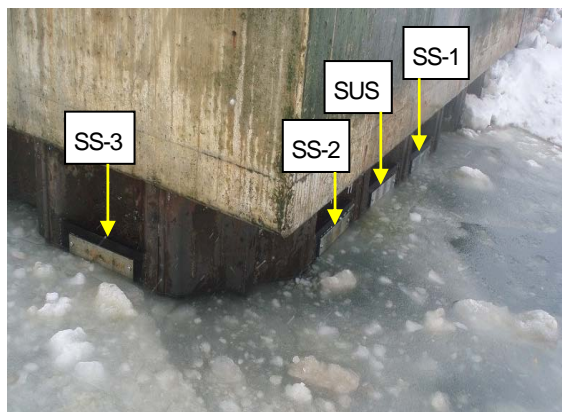


図-47(b) 斜里漁港での暴露試験状況

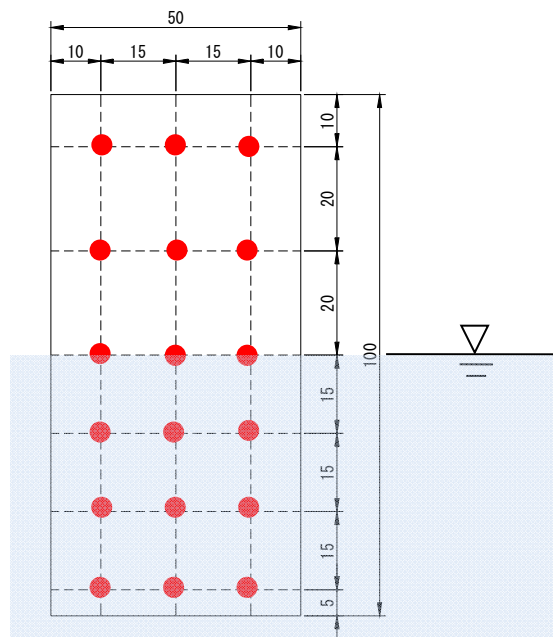


図-48 鋼板の板厚の計測箇所

### 6.2.3 調査結果および考察

図-49には、暴露試験板の撤去後の状態例を示した。さらに、図-50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-6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。



図-49(a) 暴露試験板の撤去後の状況(網走港)  
(右側が上)



SS-3 (炭素鋼版)



SS-2 (炭素鋼版)



SS-1 (炭素鋼版)



SS-1 (ステンレス鋼版)

図-49(b) 暴露試験版の撤去後の状況(斜里漁港)  
(右側が上)

他方、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-6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)、などが伺える(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。前節のように、凍結により腐食が進行しないことを示した。また前節で見たように、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(アブレーション/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

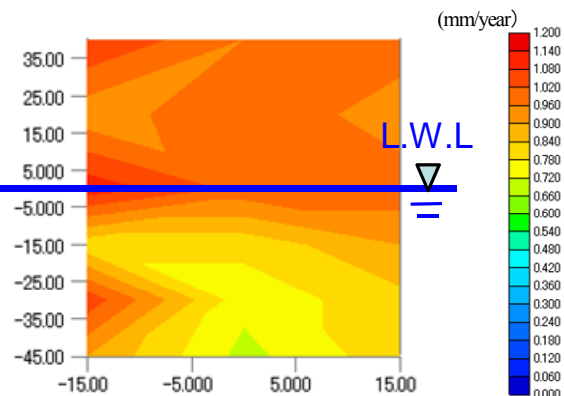


図-50(a) 暴露試験版の損耗量分布(網走港)

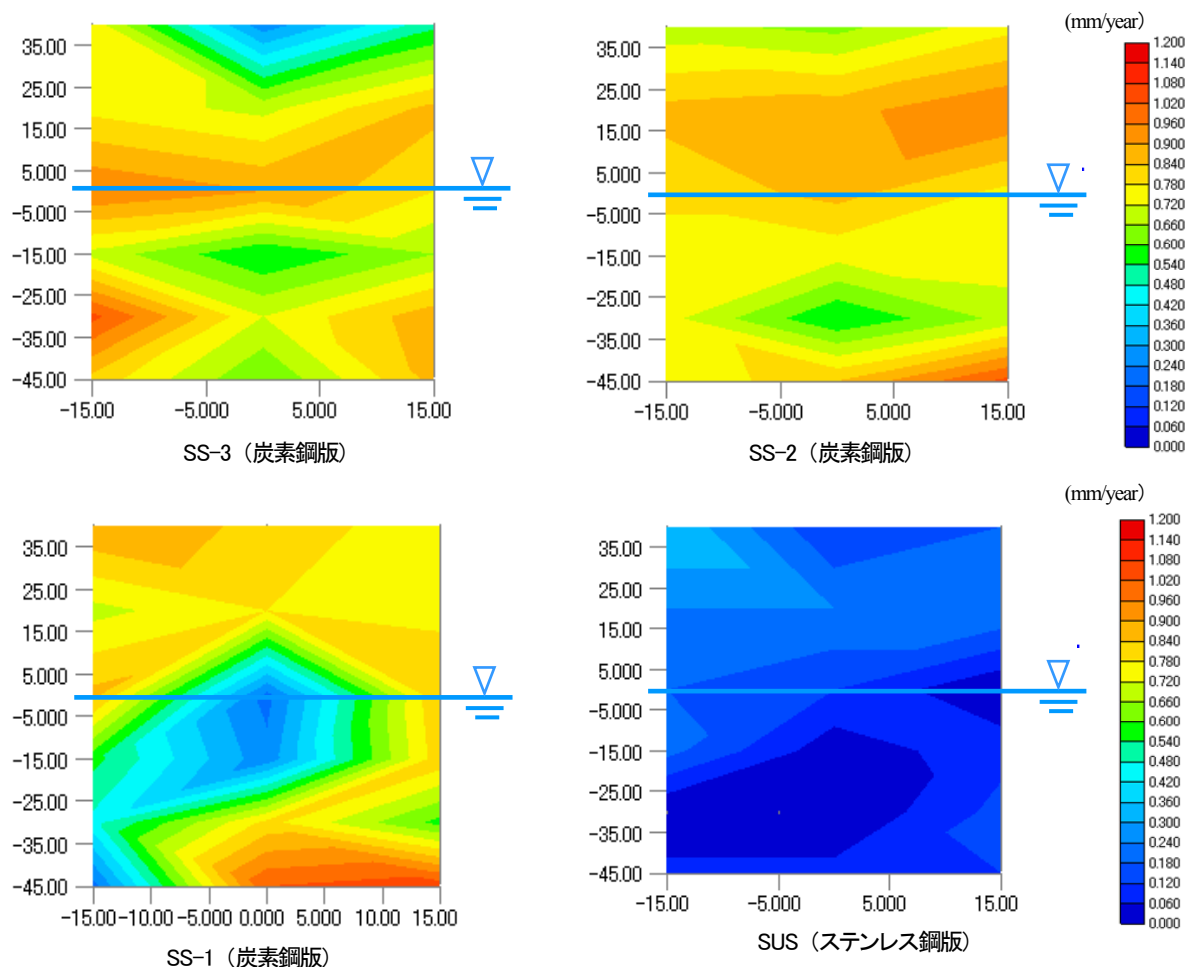


図-50(b) 暴露試験板の損耗量分布 (斜里漁港)

表-6 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

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-7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 23)</sup>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事が推察されたが、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、海水作用による、アプレシブ摩耗、繰り返す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。無論、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。



表-7 無防食構造施設で得られた腐食速度の標準値<sup>23)</sup>

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

### 6.2.4 本節の結論

寒冷海域特有の複合的な損耗要因のため、この程度では、明確な要因を特定したとはいえないが、本海域における炭素鋼の損耗速度がかなり大きいこと、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量が確認されたということなどは注目に値し、海氷による繰り返し錆び除去による腐食促進やアプレシブ摩耗の可能性が示唆されたと言える。今後も継続して試験を実施していく予定である。

## 6.3 通常海域で用いられている防食法の氷海域における暴露試験

### 6.3.1 概説

通常海水腐食のほか、海氷による腐食生成物の繰り返しによる腐食促進などの海氷作用の場合にも、腐食を抑制しなければならず、何らかの防食対策が必要となる。さらに、仮に鋼材の直接的な海氷の摩擦摩耗による損耗・摩耗を無視できたとしても、氷海に設置する限り、海氷による強大な摩擦力や静的あるいは動的な圧力（衝突）による耐氷性を確認しておかなければならない。

一般に、腐食から守るための防食対策は、被覆防食、電気防食、耐食材料の使用、環境抑制の4つからなる<sup>24)</sup>。この中で港湾構造物に適用される防食対策は、前二者であり、海水中および海底土中には電気防食を、干満帯から上部については被覆防食が適用される。近年では水中部においても被覆防食を施し、電気防食とラップさせる場合もある。本研究では、比較的多く採用されている方策を対象とし、電気防食には、流電陽極方式（AL陽極を想定）、被覆防食には、4.3節で試験した重防食被覆（ウレタンエラストマー）を選び、それぞれの暴露試験を実施した。

### 6.3.2 電気防食工法（AL陽極）の暴露試験

電気防食工法は、鋼材から電解質（海水）へ流れ出ようとする腐食電流に対して、これに打ち勝つだけの直流

電流を、外部から鋼材へ連続的に流し込むことにより、鋼材がイオン化（腐食）することを防止する電気化学的方法である<sup>24)</sup>。電気防食の方式には、外部電源方式と流電陽極方式の二つの方式があるが、今日、我が国の港湾構造物への電気防食は、100%流電陽極方式（AL陽極）である<sup>24)</sup>。一方、北極海など海氷の活発な動きがあるところでは、外部電源方式に頼る場合があるが、維持管理に莫大なコストがかかる。

本項では、まず通常に取り付け方法で、図-51 および図-52 に示すアルミニウム合金（AL陽極）の試験体を、斜里漁港防砂堤に取り付けた。前節と同様に、L.W.Lを中心とした位置に設置している。なお、設置場所は前節の暴露試験板よりも沖合である。暴露試験は2012年および2013年の流氷来襲期（1~3月）の2か年実施した。

まず、2012年の試験では、図-53(a)に示すように、早い段階から、取り付け部が、氷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。別途、ロードセルを用いて壁面に作用する垂直方向の荷重を計測しているが、約1MPaオーダーの大きな

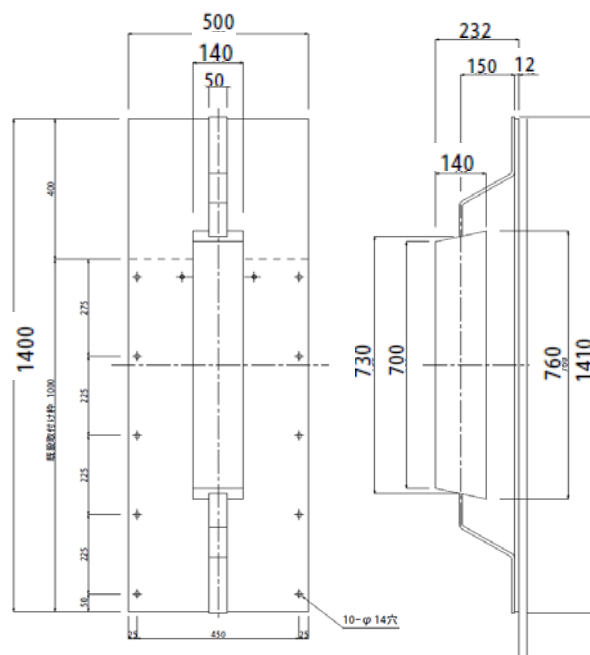


図-51 AL陽極試験体の概要図



図-52 AL 陽極試験体の設置状態の例

準静的あるいは動的な荷重が作用していることから、容易に破損することが想像される。

また、図-53(b)に示すように、2013年の試験では、もぎ取られることはなかったものの、やはり早い段階から、施設側へ押されるように変形していた。このような場合にも、陽極自身が母体へ与える影響も懸念される。

以上から、通常取り付け方法および形状では、海水の静的あるいは動的な作用により、容易に破損することが分かり、氷海域においては適当でないことが実証されたと言える。事実、氷海域ではこれまで経験的にもこの手法による防食法は皆無であった。後述するように、海水の圧力、衝突力や摩擦による剪断力等を減少させるため形状と配置に工夫した新たな陽極を提案した。



図-53(b) 試験中・試験後のAL陽極試験体の状態例  
(2013年試験)

### 6.3.3 被覆防食工法の暴露試験

本研究で暴露試験体は、室内でのすべり摩擦摩耗試験(4.3節参照)で供したウレタンエラストマー(2000 $\mu$ )を、前節の暴露試験板と同じ炭素鋼板(SS400、寸法:0.5m $\times$ 1m、t13mm)に被覆したものを用いた(図-54参照)。設置場所は前節と同じ斜里漁港防砂堤(やや沖側)で、

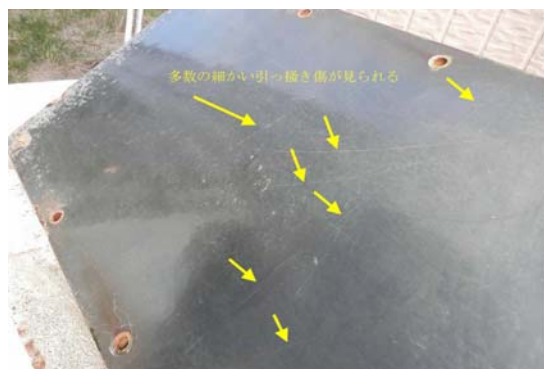


図-53(a) 試験中・試験後のAL陽極試験体の状態例  
(2012年試験)



図-54 試験中の重防食試験体  
(2000 $\mu$ ウレタンエラストマー)

L.W.L を中心とした位置に設置した。また 2013 年冬期より、暴露試験を継続中である。



多数の細かいスクラッチ傷跡



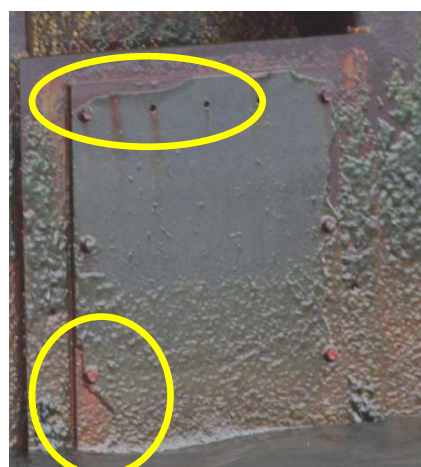
端部の剥離

ボルト周辺部の剥離

(a) 暴露 1 年目 (2013 年)、流氷離岸後



(b) 暴露 3 年目 (2015 年)、流氷離岸後



(c) 暴露 4 年目 (2016 年)、流氷離岸後

図-55 重防食試験体の経過状態

まず、図-55(a)に示すように、1 年目の重防食試験体は、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。その後の経過状態を同図(b)および(c)に示す。端部より剥離が進み、4 年目では大きな剥離に進展している。

4.3 節で示したすべり摩擦摩耗試験では、氷に砂が混入していない場合でさえも、大きな凝着摩耗が発生し、金属材料のアブレシブ定常損耗率より 1 オーダー大きいこと、砂が混入している場合には、さらにその 2~3 倍程度に増大することを示した。よってこれらの事も鑑みれば、通常海域で適用されている重防食被覆工法は、海水が活発に運動する氷海域では適当ではないことが分かる。また、氷海域で適用する場合には、剥離に注意することに加え、本研究成果から、摩耗量が推定できるため、適切な更新時期を把握し、管理することが望まれる。

## 6. 4 新たな補修・対策の提案

### 6.4.1 犠牲鋼板による方法

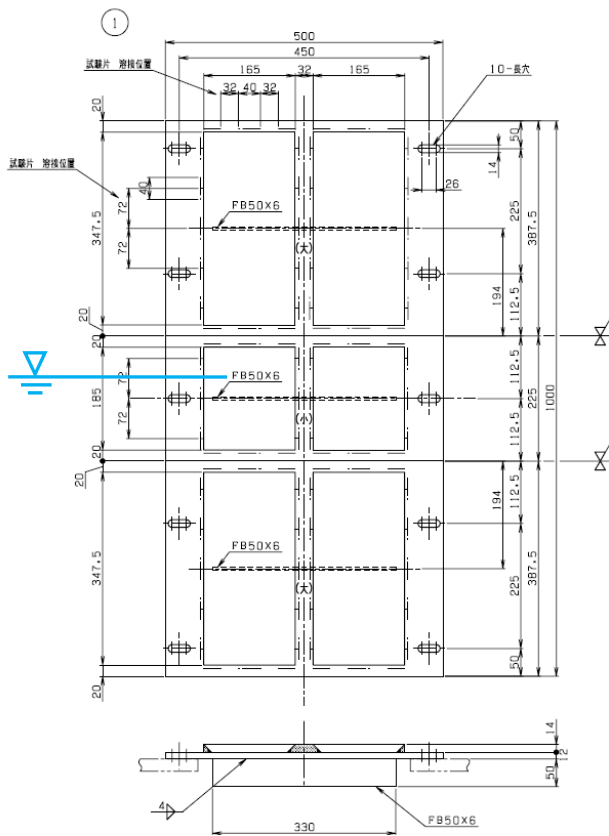
最も安価な犠牲鋼板による補修/対策を想定した方法を提案し、その暴露試験を斜里漁港防砂堤の先端に近い箇所において実施した。なお、本暴露試験は、新日鐵住金株式会社北海道支店との共同で実験している。図-56、57 には、犠牲鋼板試験体とその設置状況を示す。犠牲鋼板は、材料の貫通孔や劣化が顕著な箇所に、炭素鋼板をその必要な部分のみ溶接によって接合することを想定している。腐食代の考え方を踏襲しており、シンプルではあるが、必要なところをピンポイントで容易に補修できることから、確実な方法であるとともに材料費および施工費の面からも有利であることが期待される。さらに、溶接材料とその人件費を抑えることのほか、水中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>25) 26)</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や、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、溶接を断続的に行う。さらにその溶接部には、

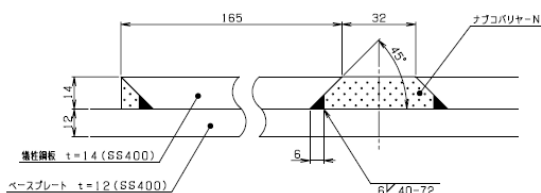
エポキシ被覆材であるナプロバリヤー-Nを被覆した。この被覆材は厳しい腐食環境にある鋼構造物の新設や塗り替え等実績がある。厚塗りが可能であり、高度な環境遮断機能を有し、低い下地処理でも優れた耐久性を發揮するという特長がある。本暴露試験ではこの試験体を2ブロック設置したほか、流水の接触荷重を計測するため、



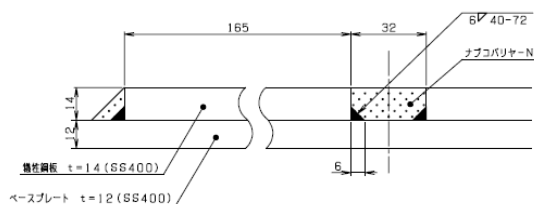
図-57 試験体の設置状況（暴露直後）



犠牲鋼板取り付け要領



溶接要領図（パターンA）



溶接要領図（パターンB）

図-56 犠牲鋼板試験体

矢板に3つの土圧計を設置した。この試験体の中央部がちょうどLWLとなるよう設置している。本試験は2014年から実施しており、現在も展開中である。しかし、2年目の2015年に、ボルト脱落により一部の試験体が海中に落下し、一部計測不能となった。

図-58(a)には1年目（2014年流水離岸後）の暴露試験後の試験体の状況を示す。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いるのが分かる。同図(b)および(c)にはその後の経過の状態例を示す。溶接部の被覆材であるエポキシ樹脂が部分的に劣化している箇所が認められたが、溶接部は概ね健全であり、当初の技術課題である、低温環境および流氷の作用による溶接部の劣化・損傷などは現在認められず、現時点では概ね良好であると判断される。

以上より、氷海域における鋼矢板の補修方法の一つとして犠牲鋼板は有望と考えられる。また、前節までのすべり摩擦摩耗試験により、海水作用による鋼材

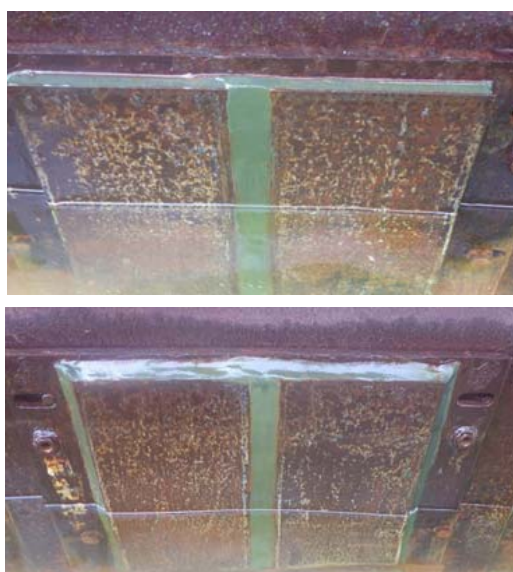


図-58(a) 試験体の状況（1年目、2014年流水離岸後）  
（上下それぞれパターンA、B）



図-57(b) 試験体の状況(2年目、2015年流水離岸後)

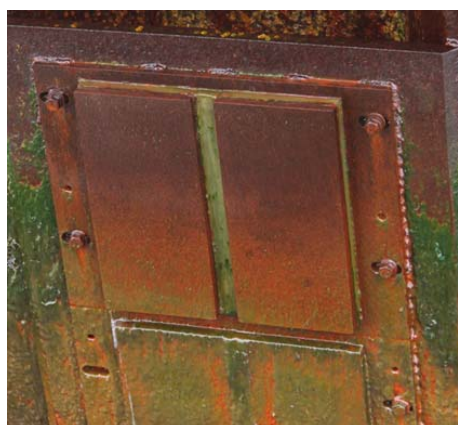


図-57(c) 試験体の状況(3年目、2016年流水離岸後)

日本磁気吸着工法協会 (JAM 協会) と共同で実施している。図-59 に示すように、鋼矢板の凹部において、陽極が母体全体に接するように設置することを想定しており、これにより海水が直接的に陽極に作用しづらい機構となっているほか、荷重を均一に母材へ分散し、局所的に大きな荷重が作用しづらい構造となっている。したがって、陽極自体が母材へ及ぼす影響も小さいと考えられる。さらに同図右側に示す半円筒形は、海水の破壊を促進するとともに、荷重の接触時間を長くすることにより最大の衝突荷重を軽減することを想定している。

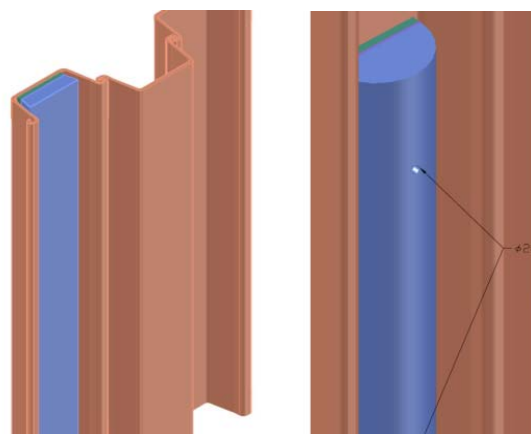


図-59 新たな陽極の設置イメージ

の損耗率が推定できるため、犠牲鋼板の損耗量の推定も可能であり、更新時期など維持管理も可能となる。しかし、この工法をより確かなものとするため、経年にわたる劣化、それに流氷の衝突や接触状況および年変動も勘案し、長期にわたる暴露試験が必要である。

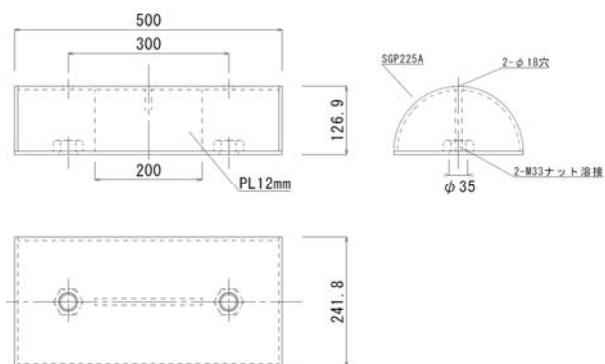
#### 6.4.2 海氷の作用に強い陽極の提案

前節では、海氷の静的あるいは動的荷重により、早い段階で流電陽極が破損あるいは変形することが明らかとなった。同時に計測していた海氷による荷重は、最大で数 MPa のオーダーであり、その継続時間は数秒であったため、衝突的な荷重であったと判断される。また準静的な荷重でもその 1/10 程度であった。これまで、海氷の貫入試験や現地計測でも、そのオーダーの荷重が計測されており(例えば14)27)、大きな海氷が作用することが分かる。このため、経験的にもこの流電陽極方式が氷海域で適用されてこなかったものと推察される。

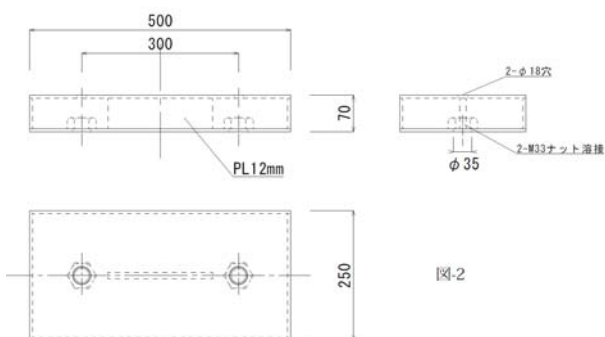
そこで、本研究では、海氷の圧力、衝突力や摩擦によるせん断力等を減少させるための形状と配置に工夫した新たな陽極を提案し、中規模実験等と現地暴露試験によりこの耐氷性を調べた。なお、本研究は、一般社団法人

本研究では人工海氷による中規模衝突実験により、この耐氷性を検証する。実験方法はおおむね木岡ら(2012)<sup>13)</sup>と同様であるが、ごく簡単に説明しておく。幅 0.6m、厚さ 0.18m、衝突方向の長さ 0.6m の直方体の人工海氷を、高さ 1~1.5m より自由落下させて、構造物に衝突させる自由落下方式の衝突試験である。衝突速度は 5m/s 程度であるが、波浪による氷塊の衝突を想定しているので、この程度で実施しておけば十分と考えられる。本実験で用いた陽極試験体は、タイプ A (半円筒型) およびタイプ B (平板型) とし、図-60 に示すように、SS400 製で、中空である。半円筒は SGP225A を用い、板厚は 12mm である。この陽極試験体が架台である SS400 製の平板に取り付けられている。なお、この試験体は、次期中長期研究計画(平成 28 年度~)で実施予定の磁気吸着装置、つまり強力な磁石(ネオジウム磁石)<sup>28)</sup>で取り付けられており、3L 型(水平および垂直吸着力はそれぞれ 1,100kgf および 400kgf)を使用している。陽極試験体の方向は、水平(衝突方向に対して垂直)のほか、様々な方向からの衝突を想定し、試験体の方を、30, 45° に傾斜させて実施した。図-61 には、実験状況例

を示す。水平平板（衝突方向に垂直に向く平板）そのものに作用する最大衝突荷重は100kN オーダーの大きな衝



(a) タイプA（半円筒型）



(a) タイプB（平板型）

図-60 新たな陽極の試験体

突力が作用するが、試験体の表面状態は剥離・欠損等がなく良好で、また凹みなどの変形は見られなかった。各供試験体は3回ずつ衝突に供したが、劣化損傷が進行することもなく、多数回の衝突に耐えることができるものと思われる。さらに、特にタイプA(円筒型)の場合には、最大の衝突荷重を2~3割程度軽減することができ、その形状も大きな利点の一つである。本実験は、直接海氷が衝突する最も厳しい条件で行っていることに加え、本試験体は中空であるが、実際の陽極は塊であるため、新たに提案する陽極は有望性があると思われる。

さらに、改良を加え、海氷作用を軽減することを目的として供試験体の両端部にテーパを設けた新型の陽極試験体を前述の斜里漁港防砂堤先端部の鋼矢板凹部に2016年の冬期間設置し、暴露試験を実施した。設置方法は前述の磁気吸着装置による（本格的な研究は平成28年度～）。図-62に流氷来襲前後の試験体の暴露状態の例を示す。流氷来襲後は塗装の剥離は見られるものの、凹みなどは全くなく、また試験体自体も脱落、ずれや移動

などもなく、良好な状態を保っていた。2016年は流氷があまり接岸しなかったこともあるが、実際の現場において良好な状態が保たれたことの意義は大きい。

以上より、海氷の圧力、衝突力や摩擦による剪断力等を減少させるための形状と配置に工夫した新たな陽極を提案し、中規模実験等と現地暴露試験により、その有望性を確認した。今後は、本格的に現地での暴露試験を実施し、様々な海氷の作用モードに曝して、その性能を確認していくとともに、凹部に取り付けることによる、防食電流の効率低下などについても検討を行っていく予定である。また、現段階においては、その陽極と鋼矢板との接合方法についてはあまり触れてはいない（暗に水中溶接と仮定）が、前述のように磁気吸着装置による接合を想定している。これは、脱着が容易なことから施工



0° 傾斜、タイプA（半円筒型）



45° 傾斜、タイプA（半円筒型）

図-61 陽極試験体の衝突実験状況の例

費が通常に比べて大幅に安くなること、また水中溶接が伴わないことから、急冷等による母体への悪影響が抑えられることなど、かなり大きなメリットが期待される。この装置の活用も次期中長期研究計画（平成28年度～）で検討する予定である。



流氷来襲前



流氷来襲後

図-62 陽極試験体の暴露試験状況の例（2016年）

## 7. 主要な結論

### 7.1 各章の主要な結論

■ 海水の砂含有率と混入プロセスに関する研究（第3章）より、

- ① オホーツク海沿岸部の海水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、多くの海水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。これは大きな摩耗現象であるアブレシブ摩耗を生じさせる要因の一つである。
- ② 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実験により確認した。

■ 海水によるすべり摩擦摩耗試験結果（第4章）より  
・海水内部に砂などの固形分の混入がない場合、

- ① 海氷による金属材料の凝着摩耗はほとんど生じない。
- ② 海氷の作用は錆層の繰り返し剥離による腐食の促進に関与している。
- ③ その損耗量（腐食）は摩擦距離（時間）にほぼ直線的に比例して増大する。
- 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。  
・海氷内部に砂などの固形分の混入がある場合、
- ⑤ 摩耗（損耗）進行曲線は、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。
- ⑥ アブレシブ摩耗の損耗率は、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。
- ⑦ 摩耗率は、接触圧力にあまり依存せず、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。
- ⑧ 定常摩耗率は、固形成分の粒径や成分および量に依存せず一定であり、ごく僅かな固形成分の量でも切削する能力を有する（金属よりもある程度固い粒子の場合）。
- ⑨ 粒径が小さく、少量の場合には、すぐに定常摩耗に移行する傾向にある。
- ⑩ 自然の海水を用いた摩耗試験により、固形成分の切削によるアブレシブ摩耗が実証された。
- ⑪ その自然の海水に付着した砂の粒径は小さく微量であるため、確かに初期摩耗を示さず、すぐ定常摩耗に至る事が確認された。しかもその定常摩耗率は、本実験で採用した、人工的な Fresh water ice とその砂の介在方法による定常摩耗率とはほぼ一致した。
- ⑫ 定常損耗率は、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た。
- ⑬ 損耗率は温度低下にほぼ比例して増加した。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これを説明した。  
・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、
- ① 氷に砂が混入していない場合でさえも、大きな凝着摩耗が発生し、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。
- ② 砂が混入している場合には、さらにその2~3倍程度に増大する。
- ③ 海氷の接触と摩擦が常にある所では、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ことが推察された。

■ 低温環境下における海水中での鋼構造物劣化機構に関する検討（第5章）より、

- ① 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ない。
- ② 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。
- ③ オホーツク海の飽和度が他海域よりも1~2割高いこと等が推察された。酸素拡散律速支配とArrhenius型の反応速度に基づく考察から、寒冷海域と温暖海域の腐食速度の違いについて概略的な検討を行った結果、DOの飽和度が大きい氷海域の腐食速度が大きい場合があることを示し、寒冷海域において、海水の力学的作用以外に、腐食速度にも留意すべきことを概念的に示した。

■ 鋼構造物の劣化対策のための暴露試験（第6章）より、

- ① 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。また、通常MLWL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量が確認されたということ等は注目に値し、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。
- ② 通常海域で用いられている電気防食方式（AL陽極を想定）の氷海域における暴露試験を実施した結果、通常取り付け方法および形状では、海水の静的あるいは動的作用により、容易に破損することが分かり、氷海域においては適当でないことが実証された。
- ③ 通常海域で用いられている被覆防食工法（ウレタンエラストマー(2000 $\mu$ )）の氷海域における暴露試験を実施した結果、大きな劣化・損傷が確認され、4.3節の試験結果からも、海水が活発に運動する氷海域では適当ではないことが分かった。
- ④ 安価な犠牲鋼板による補修/対策を想定した方法を提案し、氷海域における暴露試験を実施した結果、当初の技術課題である、低温環境および流氷の作用による溶接部の劣化・損傷、などは現在認められず、

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であることを示した。

- ⑤ 海水の圧力、衝突力や摩擦による剪断力等を減少させるための形状と配置に工夫した新たな陽極を提案し、中規模実験等と現地暴露試験により、その有望性を確認した。

## 7.2 総括的な結論および今後の課題

現地調査により、海水に砂等の固形分が含まれていること、その取り込みプロセスを明らかにするとともに、すべり摩擦摩耗試験によりこれが大きな損耗現象をもたらす一要因であることを実証した。また固形分が含まれずとも、海水による繰り返しの腐食生成物の除去により、腐食が促進される可能性があることを示すなど、海水作用を受ける現象のうち、大きな損耗要因となりえるメカニズムを明らかにした。さらに、現地暴露試験、水質調査ならびに理論的検討より、海水作用あるいは海水作用以外の低温（水温）環境により、通常海域に比べ氷海域における材料劣化が進行する場合があることを示した。また防食対策として多く使用される電気防食工法ならびに被覆防食工法の氷海域における暴露試験を実施し、海水の作用により損傷する可能性があり、海水が活発に運動する氷海域への適用は適当ではないことを実証した。その代替案として、安価な犠牲鋼板による補修/対策法、そして海水の作用力を軽減するため配置と形状に工夫した新たな陽極を提案し、氷海域における現地暴露試験等によりその有望性を確認した。

以上より、海水作用による種々の材料の損耗プロセスと損耗率の概略的な推定が可能となり、氷海域において、新たに提案した工法を含め、適切な構造形式・防食法の導入・設計（設計腐食代等含む）、適切な補修・更新時期等の維持管理計画に資する大きな研究成果を得た。

しかし、海水の性質およびその来襲特性（移動特性、密接度等）は年変動が大きく、作用形態も大きく異なるため、本来は長年にわたる調査および実績が必要となる。以上の知見をより確かなものとし、損耗プロセスや損耗率等の推定精度を高め、そして、より良いものを導入、つまり、より洗練された補修・対策工法へ改良を積み重ねるといった観点からも、引き続き、現地調査および暴露試験を継続していくことが肝要と考える。また実践導入（現場への実用段階）を目指した検討も望まれる。

## 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



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

- 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, pp. 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, pp.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, pp.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) 木岡信治, 竹内貴弘, 蟹江俊仁 : 海氷塊の杭構造物への衝突に関する中規模実験とその数値計算法の基礎的検討, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol. 68, No2, pp.423-432, 2012
- 14) 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
- 15) Butkovich, T. : Hardness of Single Ice Crystals, The American Mineralogist, Vol.43, pp. 48-57, 1958
- 16) 嶋昭次郎, 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
- 17) 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
- 18) Hulgaard, E. and Sorensen, T. : Corrosion of Marine Structures at Godthaab, Greenland, POAC'73, Vol.1, pp.410-416, 1973
- 19) Truesdale, G.A., Downing, A.L and G.F. Lowden: the solubility of oxygen in pure water and sea water, Jour. Appl. Chem., Vol.5, pp.53-65, 1955
- 20) 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
- 21) 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
- 22) 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)
- 23) 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
- 24) 阿部正美, 海洋構造物の腐食と防食対策, (社) 日本防錆技術協会, 2009
- 25) 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
- 26) 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
- 27) Takeuchi, T., Akagawa, S., Nakazawa, N., Kioka, S. and Saeki, H. : "Local ice pressure, distribution acting on offshore structure," Proc. 15<sup>th</sup> IAHR Ice symposium, Vol.1, pp.37-44, 2004
- 28) 一般社団法人日本磁気吸着工法協会ホームページ, <http://jamkyokai.dip.jp/home/>

## 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  
IMOTO Tadahiro  
NAKAJIMA Yuichi

**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. We found that natural sea ice floes usually contain sand particles at coastal areas facing the Okhotsk Sea and clarified the penetration processes of sand particles to the inside of ice from the field observations. We clarified that “Abrasive wear” caused by friction of such sea ice with interposed particles in addition to “accelerate corrosion” caused by repeated removal of rust layers by friction with sea ice could be major factors that cause a serious damage to structures. Furthermore, from results of exposure tests of various materials, investigations of water qualities at coastal areas facing the Okhotsk Sea and theoretical approaches, it became clear that the deterioration in cold regions could advance more than in normal seas due to the cold conditions including low temperature of sea water along with sea ice action. Also, exposure tests of some corrosion prevention methods that have usually used in normal seas have been performed during winter seasons at a coastal area facing the Okhotsk Sea, and the application of such methods has been proved to be inappropriate. As alternative ideas, while we proposed easy and inexpensive sacrificial carbon steel plates for countermeasure and maintenance/repair and a new galvanic anode system considering the shape and the arrangement to reduce sea ice loads, such methods have been proved to be appropriate in ice infested water areas by these exposure tests. Thus, we have obtained very significant research outcomes useful to the introduction/design of appropriate structural types/corrosion prevention methods including the proposed methods by this study, and to planned maintenance for their appropriate repair/replacement because it has become possible to estimate deterioration processes of various materials and their wear rates by the research outcomes.

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