

海洋構造物の着氷に関する研究

Investigation of Sea Spray Icing on Offshore Structure

水野 雄三* 谷野 賢二**
山本 泰司*** 平沢 充成****

Yuzo MIZUNO, Kenji YANO
Yasuji YAMAMOTO and Mitsunari HIRASAWA

海洋構造物の鉛直円柱部材の着氷について、35 mm 一眼レフカメラおよび CCD カメラを用いて着氷形状の現地観測を行った。同時に波高、気温・水温、風速調査を実施して着氷の形状の特徴、気温、風速、波浪との関連性について検討した。

主な現地調査結果は、以下のとおりである。

①着氷形状の特徴として、鉛直部材では樽形状の成長が水平部材と斜材では幕形状の成長が見られた ②着氷が生じるときの気温は、 $-4 \sim -5^{\circ}\text{C}$ 以下のときが多い ③着氷の位置は、波高および風速の条件に影響される ④海水の凍結温度より気温が高いときに高波浪が来襲すると、氷厚の急激な減少が生じる ⑤着氷成長のマクロ的な特徴は、気温と（風速・波高／空気の動粘性係数）で表わせる。

〈着氷；海洋構造物；現地調査〉

Field investigations of sea spray icing of vertical steel pipes in an offshore structure was carried out. The shape of the icing was observed by a 35mm single-lens reflex camera and a CCD camera, and data of waves, air and water temperatures, and wind velocities were recorded.

The main results obtained by this investigation are as follows:

1. Typical ice shapes were a barrel-type ice cover observed on vertical structural members and a curtain-type ice cover observed on horizontal and diagonal members.
2. Icing occurs when the air temperature is below $-4.0 \sim -5.0^{\circ}\text{C}$.
3. The location of over icing is affected by wave heights and wind velocities.
4. The ice thickness decreases rapidly when the air temperature exceeds the freezing point of the sea water and when high waves occur.
5. The characteristics of the ice growth is expressed by a coefficient, $U \cdot H / \nu$, where U , H , and ν represent wind velocity, significant wave

*港湾研究室長 **同室副室長 ***同室員 ****前港湾研究室員 現港湾部空港課

height, and the coefficient of kinematic viscosity of dry air.

Keywords: icing, sea spray, offshore structure, field experiment.

まえがき

大水深海域はその厳しい気象、海象条件から漁業の場以外には十分に利用されていなかったが、波浪エネルギー資源の場、海洋レクリエーションの場、鉱物資源の場などとして近年注目を浴びてきている。大水深海域に秘められたこのような資源を有効に利用していくためには、その開発の拠点となるべき海洋構造物が不可欠と考えられる。一般に海洋構造物を設計する場合は、作用波力の算定法が問題となる。寒冷海域に建設する場合には、さらに着氷に伴う作用波力・風力受圧面の増大、静的荷重の増加、動的応答性の変化などについても考慮する必要がある。特に、北海道周辺の海域においては流水が襲来する冬期のオホーツク海を除き、外海では海水面の結氷がほとんど生じないことから、構造物への着氷による波力・風力受圧面増大の影響は大きいと考えられる。構造物への着氷に関しては、Lozowski¹⁾、Horjen²⁾らが円柱部材の着氷を中心に理論解析を行っており、また最近では堀部³⁾が室内実験によりさまざまな試みを行っているが、それらを検証する現地データは不十分なのが現状である。そこで著者らは、1988年より留萌市黄金岬沖に設置してある実海域実験構造物を用いた着氷調査に着手した。本報では観測施設を紹介するとともに、これまで得られた3カ年のデータを整理し、着氷の形状的特徴、気温、水温、波浪などの周辺要因と着氷との関連性について報告する。

1. 観測施設

1.1 実海域実験構造物

図-1.1に示すとおり、着氷調査は北海道西部の日本海側に面する留萌市黄金岬沖水深7m地点に設置してある実海域実験構造物(写真-1.1;以下、実験構造物と呼ぶ)を用いて行った実験構造物は10m×5m、天端+8.0mの鋼管骨組構造物で、特殊水中コンクリートにより基礎地盤に固定される構造となっている。鋼管寸法は鉛直部材がφ508×12mm(下部28mm)、水平部材および斜材がφ318.5×7.5mmおよび10.3mmである。

1.2 観測装置

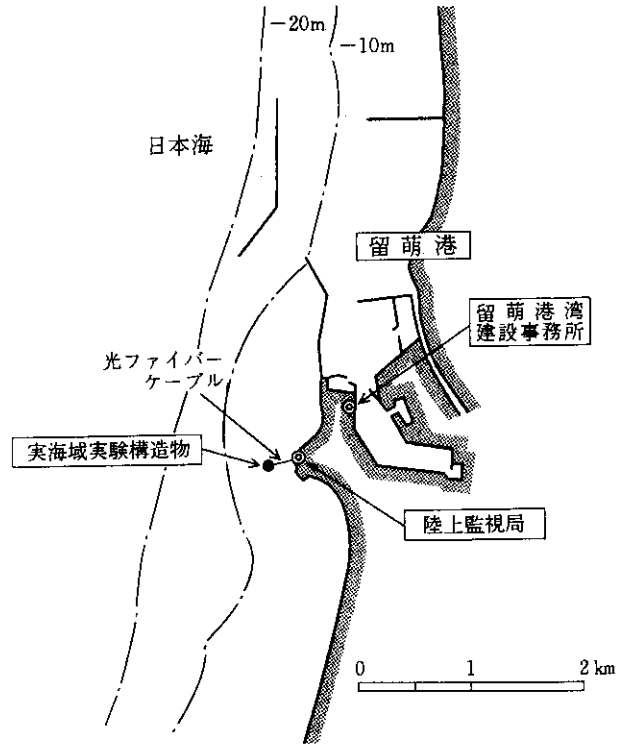


図-1.1 実験位置図

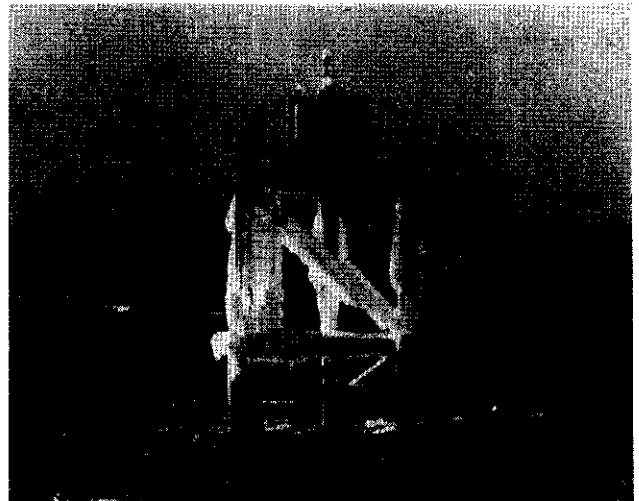


写真-1.1 実海域実験構造物の着氷状況

着氷の状況観測は、黄金岬の陸上監視局に設置した35mmカメラとCCDカメラにより行っている。実験構造物から陸上監視局までの距離は約200mで、ほぼ実験構造物の真後側から撮影する位置に当たる。35mmカメラによる観測は昼夜自動連続撮影を目的としているため、インターパロメータと長尺マガジ

ンを装着している。今回の観測では撮影インターバルを2時間に設定し、250枚の連続撮影を行った。CCDカメラの場合は、モード切換えにより最長240時間の連続録画が可能なビデオデッキを使用して着氷状況の記録を行った。ただし、使用したCCDカメラでは夜間の撮影が行えないため、撮影時間を8:00~16:00に限定した。また、このような冬期間の現地観測では、撮影面への雪氷付着に伴う画像データの欠測が問題となるため、本調査では撮影方向にヒーター付きの旋回窓を取りつけたカメラ収納ケース(写真-1.2参照)を開発し、窓枠に取りつけ雪氷防止対策を図っている。しかしながら、実験構造物への着氷が発達する際の周辺条件は、カメラ収納ケースの維持管理の立場からは非常に厳しい条件になるため欠測が起りやすく、一度生じると一連の観測に大きな打撃を与える可能性がある。そこで、1990年より静止画像伝送装置を導入し、撮影装置の管理を行うこととした。静止画像伝送装置は電話回線を通じてカラーの静止画像を遠隔地に送信する装置であり、これを留萌の陸上監視局と札幌の開発土木研究所に設置し、観測期間中、CCDカメラで捕らえる画像を札幌でチェックするという体制をとった。また、1990年の観測からは実験構造物に設置してある風向風速計、超音波式波高計や新たに取りつけた温度センサーにより実験構造物周辺の気象、海象データを測定している。温度センサーは空中部と水中部(水深0.5m、1.5mの2点)に設置した。1回の測定時間は35mmカメラにより着氷の状況撮影を行う



写真-1.2 雪氷防止用カメラ収納ケースの窓枠取り付け状況

時間の前後20分間であり、データは海底ケーブルを通じて陸上監視局へ送信し、データレコーダにより記録した。周辺データの測定を行っていない1988年と1989年の着氷解析には、留萌港湾建設事務所で測定しているデータを使用させていただくこととした。その際の気象データは留萌港湾建設事務所周辺で、波浪データは留萌沖水深50m地点で計測されている。

2. 着氷過程

前出のLozowski, Horjenらの研究や船体着氷に関する研究⁴⁾などを踏まえると、海洋構造物への着氷機構は次の3段階の過程に分割して考えることができる。

第一段階：水滴の発生までの段階

第二段階：水滴発生から構造物による水滴捕捉までの段階

第三段階：構造物による水滴捕捉以降の段階

2.1 第一段階

この段階では、着氷源となる水滴の発生機構の解明が重要な検討課題となる。ここで実海域に設置された実験構造物の着氷を対象とする場合、大気中の湿気と海面から発生する飛沫が着氷源としてあげられるが、寄与率は後者が大きいと考えられる。海洋域での飛沫の成因としては、

- ① 波峯の水が風の作用を受け、水面から剝離して発生する
- ② 水塊が構造物、岩礁などに衝突し発生する
- ③ 構造物、岩礁などを水塊が遡上し、風の作用を受けて発生する

などが考えられるが、今回の調査の場合、実験構造物の沖側に岩礁などの障害物が存在しないことから、①による飛沫の発生量が最も多いと考えられる。前出の堀部らの報告によると、飛沫粒径が着氷形状、着氷厚などに影響を与えることが報告されており、飛沫発生に関する研究として石田ら⁵⁾の報告があり、定常風速下において飛沫量が鉛直方向にはほぼ指数的に分布するという実験結果を得ているが、これについては、今後、現地データとの整合性を確認していくことが必要であると考えられる。

2.2 第二段階

この段階は、空中部を浮遊する飛沫の冷却段階として位置づけられる。岩田⁶⁾は飛沫冷却について飛沫粒径、海水温、気温、風速、飛沫発生から捕捉まで

の時間などをパラメータとした理論解析を行っている。第一段階の飛沫の発生機構が解明され飛沫粒単位のラグランジェ的な解析が可能となれば、捕捉直前の冷却状況の推定も可能になると考えられる。

2. 3 第三段階

この段階は、飛沫が構造物に捕捉され水結する段階であり、着氷状況は飛沫の冷却度、飛沫量などにより変化すると考えられる。ここで1粒の飛沫粒が発生し、空中部で過冷却状態（凝固点以下の液体が凝固せずに冷却された状態）となり構造物に捕捉されたと仮定すると、捕捉後、瞬時に過冷却状態が破れ飛沫粒の一部が氷結するが、残りの未氷結部分については空中への熱量の放出や構造物への熱伝導により潜熱が奪われ氷結にいたるまで若干のタイムラグを要するものと考えられる。ただし、実際には多くの飛沫粒が空中部に存在することから、次の飛沫がどのタイミングで捕捉されるかにより、着氷の成長形態が変化していくものと推察される。つまり、飛沫の捕捉間隔が氷結時間よりも長い場合は、その直前に捕捉された飛沫が完全に氷結した後に次の飛沫が捕捉されるため、着氷表面が、乾いた状態で成長する（dry growth）タイプに、逆に、捕捉間隔が氷結時間よりも短い場合は、着氷表面が濡れた状態で成長する（wet growth）タイプになる。このような捕捉後の飛沫状態の相違は着氷形状、着氷位置などに影響を与えると考えられるが、これについては後で述べる。

3. 着氷横断面の型

前出の岩田の室内実験によると、円柱に凍着した着氷の横断面の形は図-3.1に示すとおり、風上に向かい三日月のような形に成長するA型、風上に向

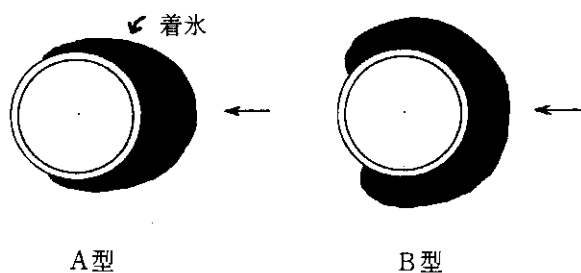


図-3.1 着氷の横断面形状

かいペレー帽を被ったような形に成長するB型、風上に向かい扇子を開いたような形に成長するC型に大別でき、大気中の含水量が限界水量（ある気温、水滴の温度、風速のもとで、ある直径と長さの円柱の全捕捉水量が単位時間に凍着しうる大気中の含水量の限界値）に満たない場合はおおむねA型に、余剰水のある場合はおおむねB型かC型になることを示している。しかし、B型とC型との違いがどうして起きるかは不明であり、実船実験ではC型着氷は発生しなかったと報告されている。

著者らの現地調査は、実験構造物の岸側の風下の方から着氷を撮影することとなるため、B型（またはC型）着氷の調査を実施したことになる。なお、着氷厚は図-3.2に示すとおり定義した。

4. 観測結果

4.1 観測期間

着氷の状況観測は1988年1～2月、1989年2～3月、1990年1～3月の3期間にわたり実施している。ただし、1989年は折からの暖冬であり有意なデータが得られなかったことから、本報告では1988年と1990年のデータに主眼をおいて報告する。

1988年の観測期間は1月18日から2月19日までの33日間であり、その期間中で着氷が存在していたと考えられるが、欠測したのは、1月25～26日、2月3～4日の計4日間であった。これらの欠測は、北海道周辺が冬型の気圧配置となり、激しい吹雪が発生したことにより撮影が物理的に不可能となったことやこの時点で旋回窓の熱線処理を施しておらず、カメラ収納ケースガラス面への雪氷付着が発生したことにより生じている。

1990年の観測期間は、1月10日から2月28日ま

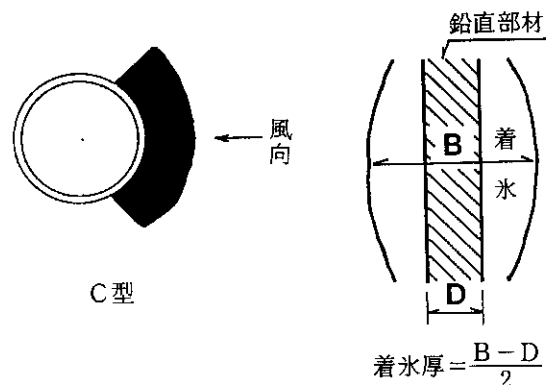


図-3.2 着氷厚定義

での50日間である。この期間中においては、着氷状況のデータの欠測は生じなかった。ただし、この年の調査から実験構造物周辺の気象、海象データの計測を開始しているが、超音波式波高計が正常に作動しなかったことから、以後の検討では留萌沖水深50m地点での観測波浪データを使用していく。

4.2 着氷形状

写真一1.1に典型的な実験構造物の着氷状況を示したが、その外観的な特徴として、まず鉛直部材上での樽状の成長があげられる。その発生要因としては、次の3要因が考えられる。

- ① 飛沫量の鉛直分布の影響
- ② 海水の直接的な作用による影響
- ③ 海水の間接的作用による影響

①については、飛沫量が鉛直方向に指数関数的に分布し、構造物に捕捉後、瞬時に氷結する状態まで飛沫が過冷却されていると仮定すると、飛沫量の多い鉛直部材の下方ほど着氷厚が増加することになる。しかしながら、飛沫の冷却機構を念頭におくと、海水面から離れた部材上方の飛沫ほど粒径が小さく、また空中での冷却時間も長いと考えられることから過冷却状況がより進行する。このことから、部材上方ほど捕捉水が捕捉地点で近傍氷結するdry growth傾向での着氷成長が生じやすく、部材下方ほどwet growth傾向となり、捕捉水の一部が下方に移動することから、飛沫量と過冷却状態のバランスにより、鉛直部材のある高さで着氷厚の極大点が現われるものと考えられる。また後述するようにこれまでの調査では、対馬暖流の影響により留萌周辺の海域の海水温が0℃以下になることはなかったことから、水面付近の着氷は比較的温度の高い波の作用を直接受けやすく(②の影響)、鋼管からの熱伝導によっても間接的に海水温の影響を受け(③の影響)、鉛直部材上方に比べ着氷が成長しにくいと考えられる。このような諸要因の相互作用により、樽型形状の着氷が形成されたと考えられる。他の外観的な特徴としては、水平部材と斜材で観測される幕状の着氷があげられる。鉛直部材の場合は、捕捉された飛沫の未氷結部分が部材に沿って下方に移動するrunoff waterとなるが、水平部材や斜材の場合には滴状に垂れ下がるため幕状の着氷が形成されたと考えられる。

4.3 着氷厚および着氷厚変化

図一4.1, 4.2は、実験構造物中央の鉛直円柱部材の着氷厚および着氷厚変化量を気温、海水温(1990年のデータのみ)、有義波高、10分間平均風速とともに示したものである。着氷厚算定位置は図一4.3に示す6点とし、毎正午の着氷写真より着氷厚を算出し、着氷厚変化量は、前日の着氷厚との差を表示した。なお、図一4.1, 4.2中の○印は、観測期間外あるいは欠測により着氷厚の算定ができなかったことを示す。

図一4.1によると、1988年の観測期間中に有義波高が5m程度に達する波浪は2度襲来しているが、その着氷状況には大きな相違がみられた。1月25日に最大有義波高5.0mを示す1回目の波浪襲来時には着氷が成長し、1月28日にはこの観測期間中で最大の氷厚41.6cmがPOINT-3で観測された。この波浪襲来時の最大風速は15.1m/secであり、気温は-4.8~-8.2℃であった。一方、2月3日に最大有義波高5.2mを示す2回目の波浪襲来時には着氷厚が激減している。この波浪襲来時の最大風速は15.2m/sec、気温は0.6~-7.3℃であった。このように2回の波浪襲来時の気象、海象条件は気温以外ほぼ同等であったことから、着氷の成長、衰退には気温の影響が大きく関与しているといえる。なお、2月3日から5日までの間の着氷厚の激減は、結氷温度(日本海平均塩分量を35.0‰とすると、-1.92℃と推定される⁷⁾)を上まわる気温の影響を受け、着氷強度が低下した直後に高波浪が襲来し、構造物の振動などの作用により氷塊が欠落したと考えられる。次に、図一4.2に示すように1990年の観測期間中には数回の波浪が襲来しており、そのたびに着氷厚の増減が見られている。この年の観測期間中に着氷が初めて観測されたのは1月14日であり、翌日の1月15日にかけて急激に着氷が成長している。この波浪襲来時の最大有義波高は3.7m、最大風速16.1m/sec、気温-4.3~-7.2℃であり、最も海水面に近いPOINT-6を除く5点で着氷厚の増加が見られた。POINT-6では観測期間を通じて着氷があまり成長しなかった。その原因としては前述の波の直接的、間接的影響が考えられる。海水温は図一4.2に示すように、対馬暖流の影響により0℃以下にはならなかったことから、波の作用を特に受けやすいPOINT-6では着氷が生じにくかったと考えられる。1月19日には着氷厚の減少が生じており、POINT-5で

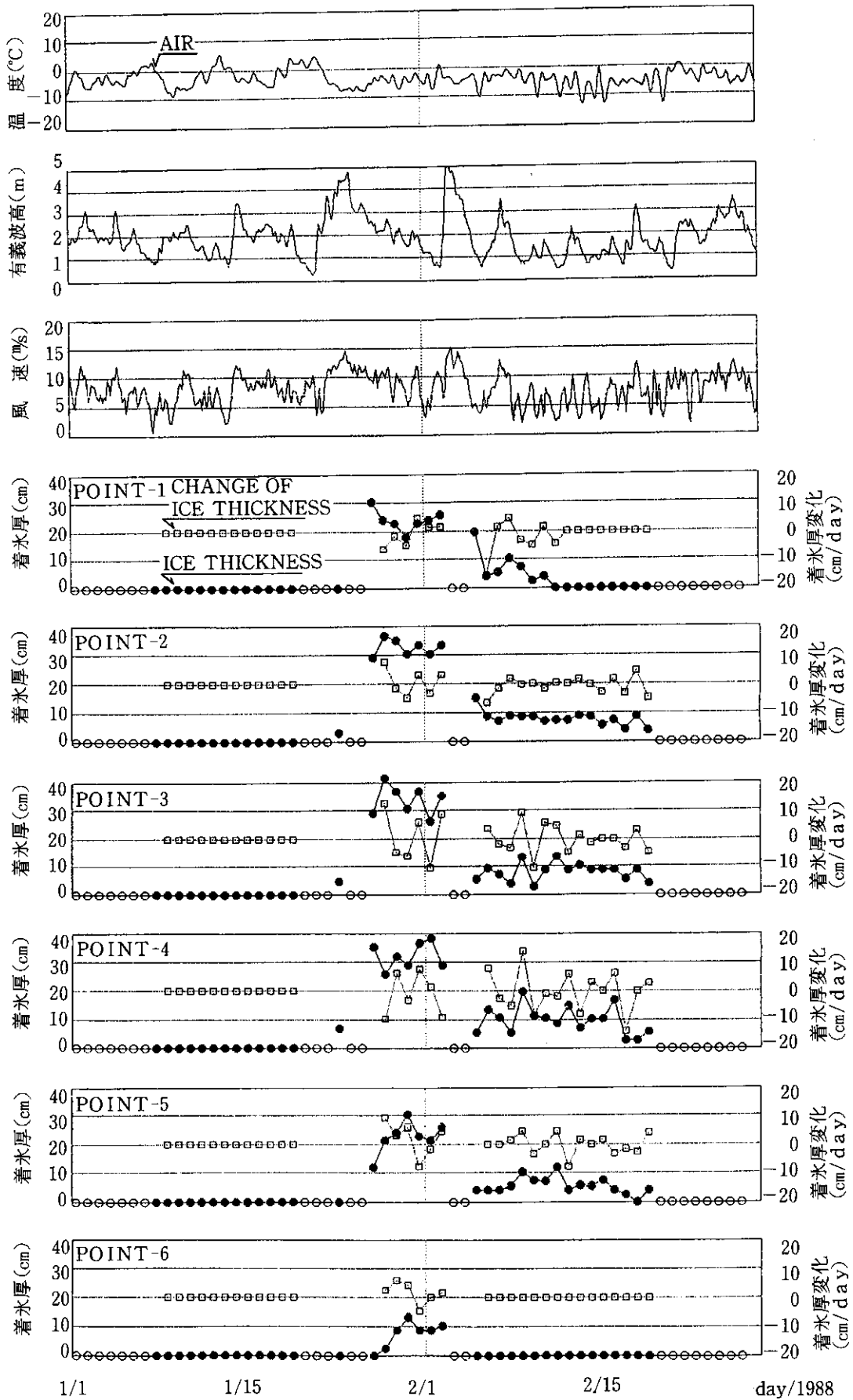


図-4. 1 着氷厚, 着氷厚変化と周辺要因の関係 (1988年1~2月)

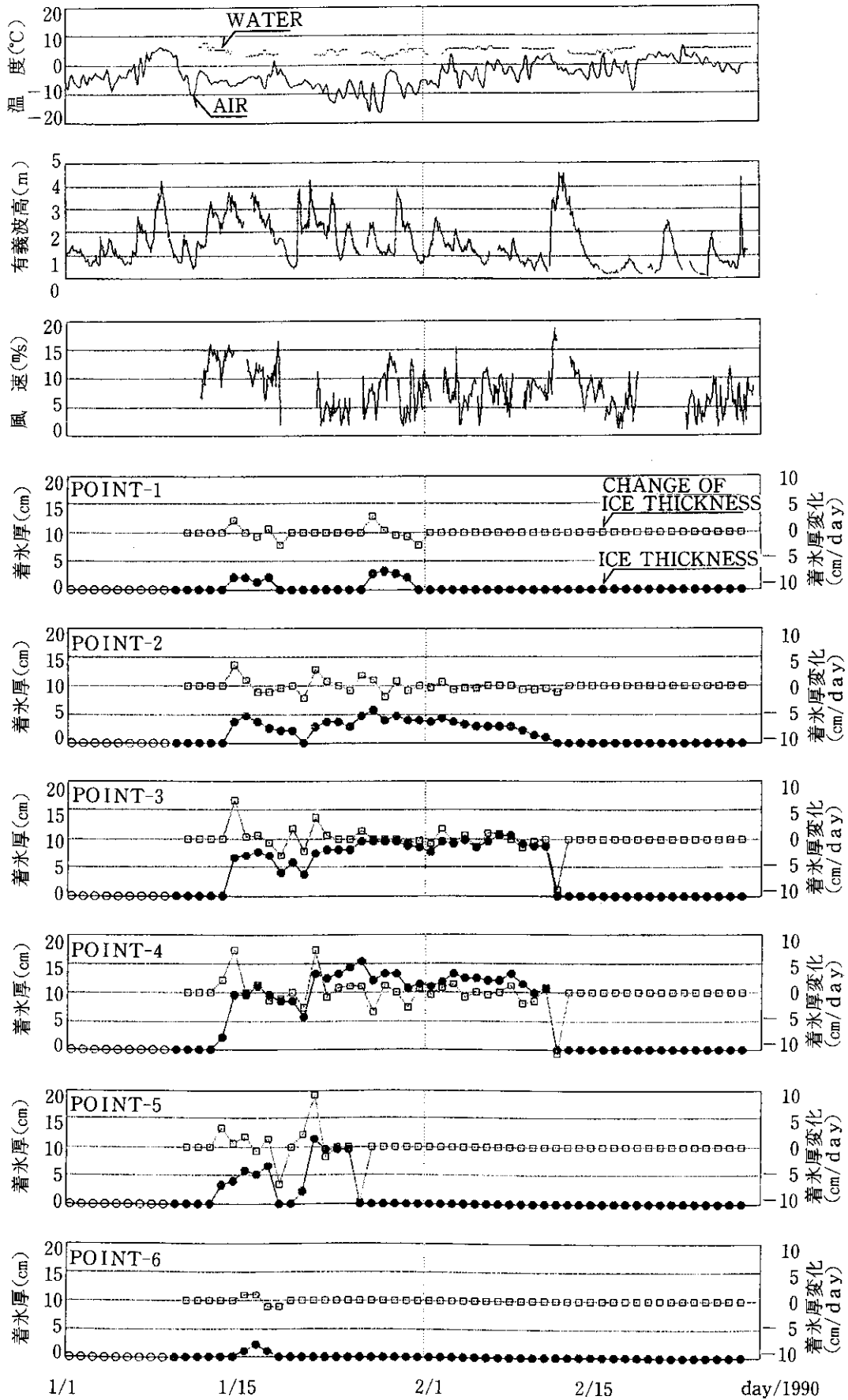


図-4. 2 着氷厚, 着氷厚変化と周辺要因の関係 (1990年1~2月)

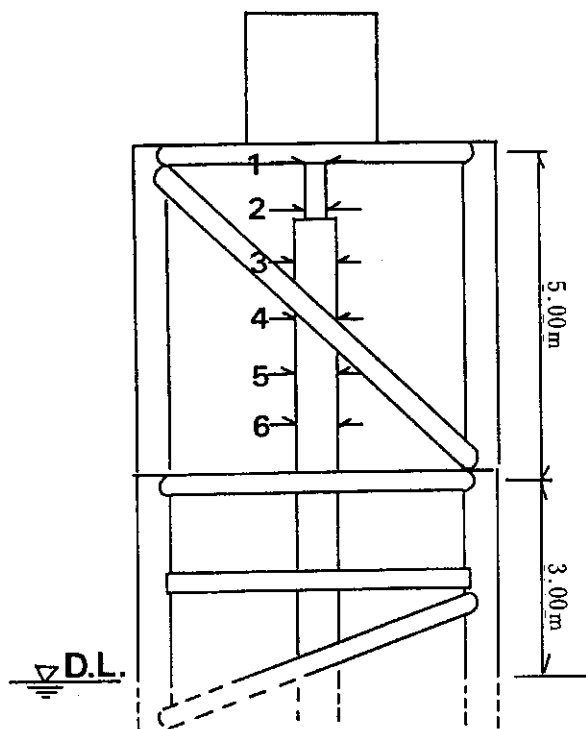


図-4. 3 着氷厚算定位置

特にその変化量が著しく見られた。この日の着氷厚の減少は前日からの気温上昇の影響によるものと推察され、有義波高が2 m程度と比較的低かったことから、鉛直部材下方 POINT-5 の着氷厚が特に減少したと考えられる。1月22日には着氷厚が再び増加しており、変化量は POINT-4, 5 の鉛直部材下方で特に顕著であった。鉛直部材上方の着氷厚の変化が微小であった理由として、波浪としては有義波高4 m程度と比較的大きなものが襲来しているが、風速が5 m/sec程度と小さかったため鉛直部材上方に到達する飛沫量が少なかったことが考えられる。なお、このときの気温は-4.5~-8.4℃であった。2月12日には鉛直部材上の着氷がほとんど欠落した。この原因も気温上昇と波浪の襲来によるものと考えられる。

また、2月1日から2月11日までの期間に着目すると、気温が結氷温度を上まわっているにもかかわらず、着氷厚は大きな変化を示していない。この理由としては、この期間に大きな波浪が襲来していないことがあげられるが、この事実は着氷厚の激減が気温上昇と波浪の相互作用により生じることの根拠になると考えられる。

5. 考 察

5. 1 着氷成長のマクロ的な指標

観測結果からみて着氷が大規模に成長するのは、気温の低下とともに強風・高波浪の条件が整ったときであると考えられる。これは気温がある程度以下の時、強風により波頭から大量に飛沫が発生すると過冷却状態の水滴が連続的に構造物に捕捉され、一部は衝突の瞬間に氷結し、残りの水量はほとんど熱伝導で熱が奪われて氷結し、runoff water がほとんど生じない状態であると考えられる。また、北洋での実船実験の経験⁹⁾で着氷は夜に発生しやすいことが述べられている。

以上のことから、着氷成長のマクロ的な特徴を検討する前提として、「ある日の正午に観測した着氷状態は、前日の18時から当日6時までの時間ごとの気象・海象現象により決定される。」と仮定し、2時間ごとの気温 (T_i : °C)、風速 (U_i : cm/s)、有義波高 (H_i : cm) より以下に定義する無次元量のマクロ的な指標 ($U \cdot H / \nu$) と (T' : °C) を算出し (以下ではこれらを「マクロ指標」および「換算気温」という)、その日の代表値とした。

$$U \cdot H / \nu = \frac{\sum_{i=1}^n (U_i \cdot H_i / (0.0009 \times (T_i + 0.135)))}{n} \quad (1)$$

$$U \cdot H = \sum_{i=1}^n (U_i \cdot H_i) / n \quad (2)$$

$$T' = ((U \cdot H) / (U \cdot H / \nu) - 0.135) / 0.0009 \quad (3)$$

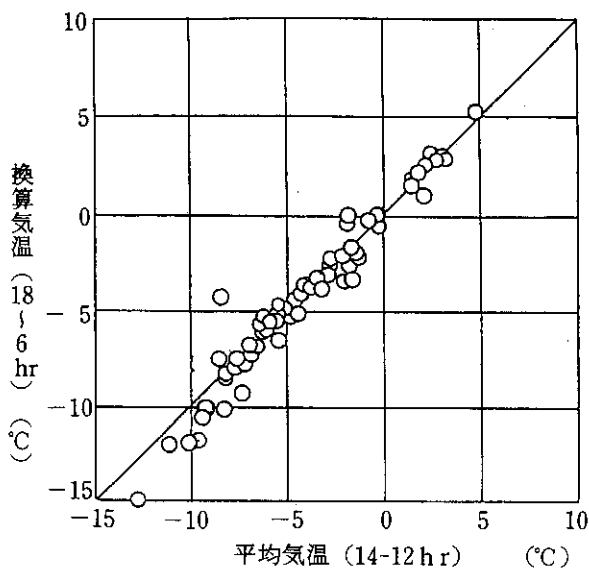


図-5. 1 平均気温と換算気温との関係

ここで、 ν は乾燥空気の動粘性係数⁹⁾(cm^2/s)($\nu = 0.0009 \text{ Ti} + 0.135 (-20 \leq \text{Ti} \leq 10)$), n は観測時間数で欠測がなければ7となる。なお、計算は着氷観測ができた日だけを対象にしたので、1988年1月25、26日、2月3、4日のような高波浪時のデータは含めていない。

図-5.1に平均気温(前日の14時から当日の12時までの算術平均気温)と換算気温との関係を図示した。全体的に相関は高いが、傾向として約 $-4 \sim -5^\circ\text{C}$ 以下では換算気温の方が低くなる。 -7.5°C 以下ではその度も大きくなり、 $1 \sim 2^\circ\text{C}$ 換算気温が低くなり着氷にとっては、重要な要素と考えられる。

5.2 着氷の型の分類

着氷厚変化量(cm/day)は、図-4.1、4.2に示したとおり着氷厚算定位置により違いがあり、単純に一樣に増減しているわけでないため、着氷の型を分類するにあたり着氷算定位置による違いは考慮せず、6 pointの着氷状況から「最大増加量」、「減少の有無」、「着氷の有無」を指標に選び、以下に示すとおり5タイプに分類した。

- ① 完全増加型：最大増加量が6 cm以上(鋼管直径の約1割以上)の着氷成長あり、かつ減少した point がない
- ② 不完全増加型：最大増加量が6 cm以上の着氷成長あり、かつ減少した point あり
- ③ 不完全微増型：最大増加量が6 cm未満の着氷成長あり
- ④ 完全減少型：成長した point なし、かつ着氷あり
- ⑤ 未着氷型：すべての point に着氷なし

5.3 着氷成長のマクロ的な特性の検討

着氷の型をパラメーターにして換算気温とマクロ指標($U \cdot H / \nu$)との関係を、図5.2(①~③の増加時)および図-5.3(④、⑤の非着氷時)に示した。なお、図中には参考のため $U \cdot H$ の代表値を示す曲線を示した。

(1) 着氷の成長と換算気温

図-5.2より着氷が増加した最小の換算気温は -1.6°C で、 -4.0°C 以下の領域に含まれる着氷増加事例の頻度は約85%である。逆に着氷しないか着氷減少の事例の頻度については、図-5.3より -4.0°C 以下

の領域では約25%、 -5.0°C 以下の領域では約20%と少なく、着氷成長は $-4.0 \sim -5.0^\circ\text{C}$ 以下の領域で多く生じているといえる。

次に、図-5.2のデータの下方向境を見るとほぼ直線で、換算気温の低下とともに縦軸のマクロ指標の値が小さくなっており、これは実験構造物の着氷限界を示していると考えられる。

(2) 着氷の大型成長の条件

図-5.2より完全増加型を示す○印を見ると、マクロ指標の値が最大付近に分布して 2.5×10^6 以上であり、強風・高波浪のとき(図より約 $U \cdot H \geq 30 \text{ m}^2/\text{s}$)に発生していることがわかる。また、増加型を示す○印、○印は換算気温で約 $-4 \sim -8^\circ\text{C}$ の領域に集中しており、それよりも低い気温ではかなり少なくなっている。これは、前述した着氷の横断面の型と写真撮影位置との関係もあるであろう。着氷の横断面の型を決定する限界水量は、気温の低下に比例

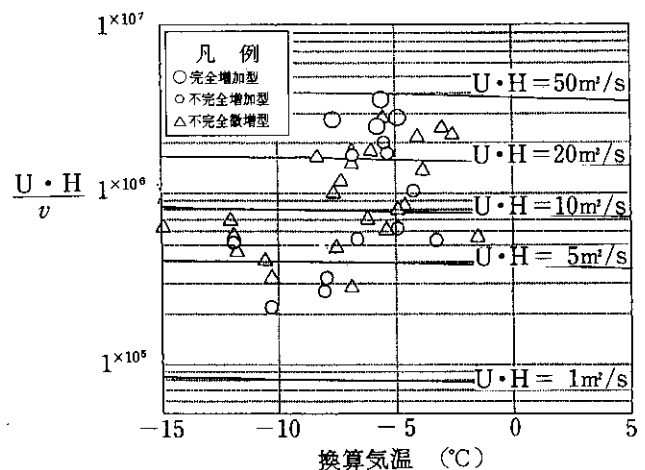


図-5.2 着氷成長特性(増加時)

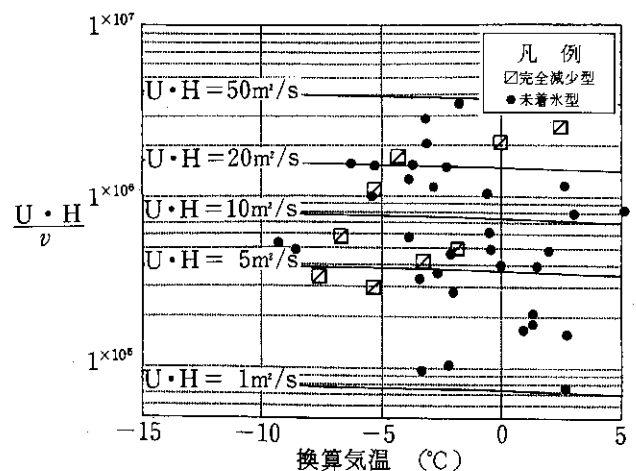


図-5.3 着氷成長特性(非着氷時)

して多くなるため、換算気温の低い領域ではA型着氷が多くなると考えられる。今回の写真撮影位置からみて、A型着氷に近い着氷形態の場合は着氷厚は小さい値となるので増加型に分類されにくい。

あとがき

本報告では、これまでの現地観測から実海域上の実験構造物への着氷についてさまざまな検討を行った。検討結果を以下にまとめて記す。

- (1) 着氷形状の特徴として、鉛直部材では樽状の成長が水平部材と斜部材では幕状の成長が見られた。
- (2) 着氷形状はdry growth, wet growthなどの成長形態と波の作用により決定されることが考えられる。
- (3) 着氷は気温が $-4.0\sim-5.0^{\circ}\text{C}$ 以下になったときに成長する。着氷位置は波浪、風速により変化する。
- (4) 気温が上昇し、波浪が襲来したとき、着氷厚は急激に減少する。
- (5) 着氷成長をマクロ的に捉える指標として、本報で定義したマクロ指標 ($U\cdot H/v$) が有効で、完全増加型着氷の評価や着氷成長の下限条件と換算気温とを関係づける指標として用いれる。

今後はさらに着氷厚算定位置の違いによる着氷成長の解析を行うとともに、着氷現象のモデル化を図っていく予定であるが、特に飛沫の発生機構には未解明な部分が多く、低温観測室などを利用

して基礎的実験を行っていく必要があるものと考ええる。

最後に、現地観測を行った際に御協力を承った留萌港湾建設事務所の方々や施設を使用させていただいた留萌市の方々に対し、深く感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) E. P. Lozowski and E. M. Gates: An Overview of Marine Icing Research, Proc. 4th Int. Offshore Mech. Arct. Eng. Symp., 1985.
- 2) I. Horjen: Icing on Offshore Structure — Atmospheric Icing, Norwegian Maritime Research, 1983.
- 3) 堀部明彦, 福迫尚一郎, 山田雅彦, 田子 真: 船体着氷防除に関する基礎的研究, 寒地技術シンポジウム講演論文集, 1990.
- 4) 岩田秀一: 船舶の着氷について(その1), 日本造船学会論文集 第129号, 1971.
- 5) 石田 昭, 花田昌彦, 細井正延: 飛沫の発生に関する実験的研究, 第29回海岸工学講演会論文集, 1982.
- 6) 前出4)
- 7) 佐伯 浩: 寒冷地海岸の諸問題, 海岸 No.25, 1985.
- 8) 岩田秀一: 船舶の着氷について(その4), 日本造船学会論文集 第132号, 1972.
- 9) 海洋物理 I, 東海大学出版会, P 162, 1977.