

実海域における海洋構造物着氷調査

水野雄三*・谷野賢二*・長内戦治**
時川和夫***・平沢充成****

1. ま え が き

大水深海域はその厳しい気象、海象条件から今まで利用密度が低かったが、波浪エネルギー資源の場合、海洋レクリエーションの場合、鉱物資源の場合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、その開発により積極的に取り組んでいくことが必要になるが、具現化していくための手段として海洋構造物は不可欠なものになると考えられる。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が、寒冷海域に施工する場合には、着氷に伴う作用波力・風力受圧面の増大、静的荷重の増加、動的応答性の変化等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オホーツク海を中心とする流水襲来時を除き、外海では海水面の結氷がほとんど生じないことから、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、Lozowski ら (1985)、Horjen (1983) が円柱部材の着氷を中心に理論解析を行っており、また最近では堀部ら (1990) が室内実験により様々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。そこで北海道開発局では、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て着氷調査を実施している。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ヵ年のデータを整理し、着氷の形状の特徴、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述べる。

2. 観 測 施 設

2.1 実海域実験構造物

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(図-1参照)に設置してある実海域実験構造物(写真-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水中コンクリートにより基礎地盤に固定する構造となっている。鋼管寸法は鉛直部材がφ508×12mm(下部28mm)、水平部材及び斜材がφ318.5×7.5mm及び10.3mmである。水平部材の一部及びスリット部には角材を使用しているが、それらの部材はいずれも水中あるいは水面付近に位置している。

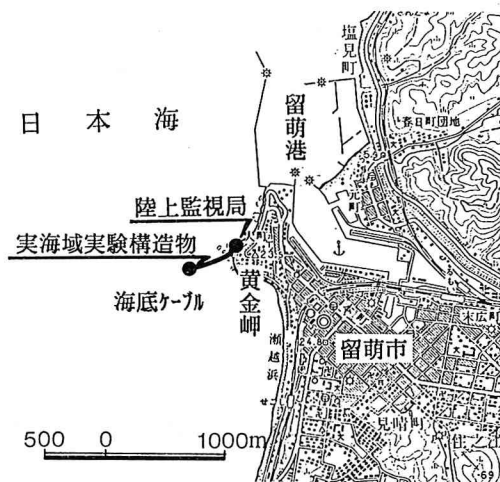


図-1 調査位置

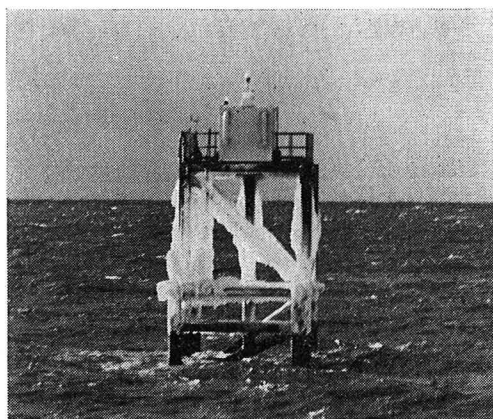


写真-1 実海域実験構造物

* 正会員 工修 北海道開発局開発土木研究所水工部港湾研究室
** 正会員 北海道開発局港湾部長
*** 正会員 工博 北海道開発局港湾部空港課長
**** 正会員 北海道開発局港湾部空港課

2.2 観測装置

着氷の状況観測は、黄金岬の陸上監視局に設置した 35 mm カメラと CCD カメラによって行っている。実験構造物から陸上監視局までの距離は約 200 m である。35 mm 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、モード切り換えにより最長 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。但し使用した 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施回窓を取り付けたカメラ収納ケース（写真-2 参照）を開発し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のチェックを行った。



写真-2 観測施設(カメラ収納ケース)

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付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 0.5 m, 1.5 m の 2 点）に設置した。1 回の測定時間は 35 mm カメラにより着氷の状況撮影を行う時間の前後 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 50 m 地点で計測されている。

3. 着氷過程

前出の Lozowski ら(1985)、Horjen(1983)の研究や岩田の船体着氷に関する研究(1971)などを踏まえると、海洋構造物の着氷機構は次の3段階の過程に分割して考えることができる。

第1段階：水滴の発生までの段階

第2段階：水滴発生から構造物による水滴捕捉までの段階

第3段階：構造物による水滴捕捉以降の段階

ここでは各段階毎に考察を行っていく。

3.1 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、岩礁などを水塊が遇上し、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(1982)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。

3.2 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付けられる。岩田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1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ュ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。

3.3 第三段階

この段階は飛沫が構造物に捕捉され氷結する段階であり、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至るまで若干のタイムラグを要するものと考えられる。但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）が、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）こととなる。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詳細に述べることとする。

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。但し、1989年は折からの暖冬であり有意なデータが獲得さ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置いて報告する。

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、1月25、26日、2月4日の計3日間、着氷状況の解析が不能な欠測が生じた。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、この時点で巡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日までの50日間である。この期間中においては着氷状況データの欠測は生じなかった。但し、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—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近傍で氷結する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分が下方に移動する“runoff water”が発生しやすくなると推測されることから、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°C 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湿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、樽形状の着氷が形成されたと考えられる。

他の外観の特徴としては、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

実験構造物の着氷厚の変化を、図—2に示す鉛直円柱部材の6点で解析した。同図に示す着氷厚の定義に従って算出した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図—3、4に示す。また着氷厚変化量は、前日の着氷厚との差を表示したものである。なお図—3、4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—3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

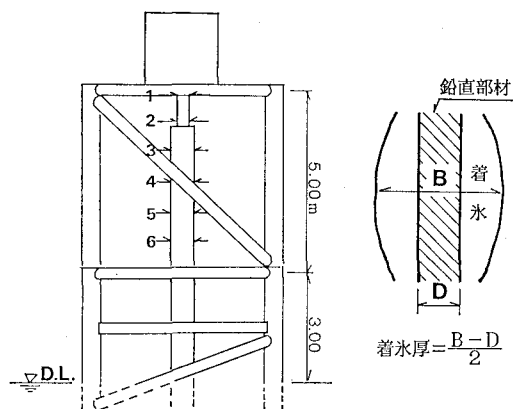


図-2 着氷厚算出位置と着氷厚定義

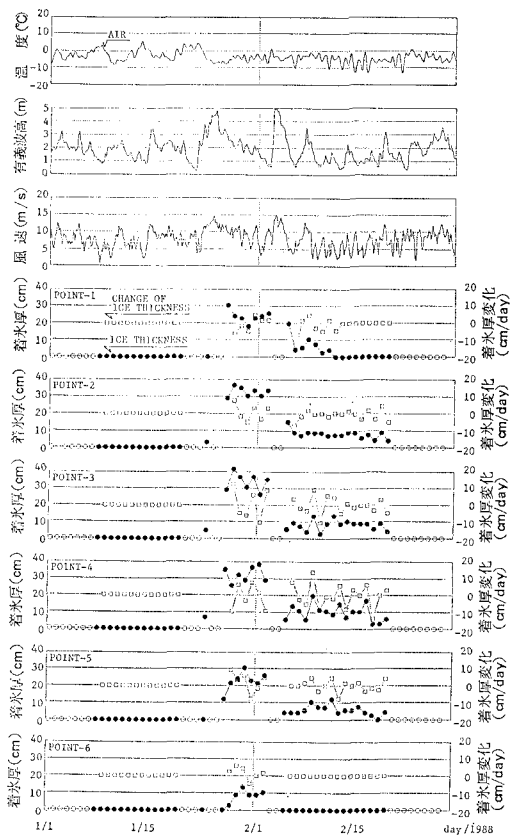


図-3 着氷厚, 着氷厚変化と周辺要因の関係 (1988年1~2月)

15.1 m/sec であり, 気温は $-4.8 \sim -8.2^{\circ}\text{C}$ であった。一方, 2月3日に最大有義波高 5.2 m 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 15.2 m/sec, 気温は $0.6 \sim 7.3^{\circ}\text{C}$ 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日の着氷厚の激減は, 結氷温度 (日本海の平均塩分量を 35.0‰ とすると -1.92°C と推定される) を上回る気温の影響を受け, 着氷強度が低下した直後に高波が襲来し, 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-4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, その度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 3.7 m, 最大風速 16.1 m/sec, 気温 $-4.3 \sim -7.2^{\circ}\text{C}$ 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が, 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-4に示すように対馬暖流の影響により 0°C 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

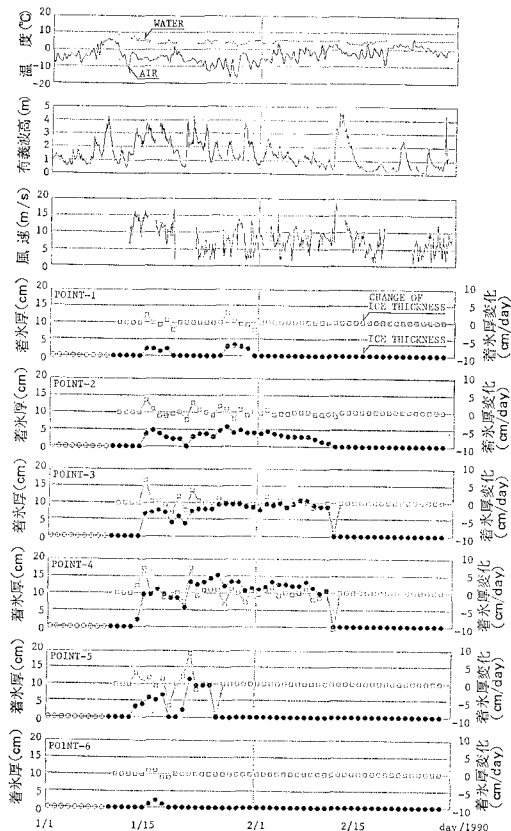


図-4 着氷厚, 着氷厚変化と周辺要因の関係 (1990年1~2月)

で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るが、有義波高が 2m 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 4m 程度と比較的大きなものが襲来しているが、風速が 5m/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 $-4.5 \sim -8.4^{\circ}\text{C}$ 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が、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回っているのにも関わらず、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. 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様々な検討を行った。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と考えられる。

(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。

今後は更に現地観測データを蓄積し、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、風洞水路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する。

最後に現地観測を行った際にご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頂いた留萌市の方々に深く感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 石田 昭・花田昌彦・細井正延 (1982): 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, pp. 385-388.
岩田秀一 (1971): 船舶の着氷について (その1), 日本造船学会論文集, 第129号, pp. 287-302.
佐伯 浩 (1985): 寒冷地海岸の諸問題, 海岸 No. 25.
堀部明彦・福迫尚一郎・山田雅彦・田子 真 (1990): 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, pp. 244-249.
Horjen, I. (1983): Icing on Offshore Structures-Atmospheric Icing, Norwegian Maritime Research, pp. 9-22.
Lozowski, E. P. and E. M. Gates (1985): An overview of Marine Icing Research, Proc. 4th Int. Offshore Mech. Arct. Eng. Symp., pp. 6-15.