

ジャケットタイプ海洋構造物の着氷調査について

北海道開発局開発土木研究所	正会員	平沢 充成
同 上	同 上	谷野 賢二
同 上	同 上	水野 雄三
同 上	同 上	時川 和夫
北海道開発局江差港湾建設事務所		大村 高史

はじめに

四方を海に囲まれた我が国では、人々の暮らしは古くから海と深い係わりをもって営まれてきたが、エネルギー資源の場、鉱物資源の場あるいは海洋レクリエーションの場などとしての近年における海洋域に対する認識、要請の多様化に伴い、その関係は一層密接化している。これらの要請に応えていくためには、今まで利用密度の低かった大水深海域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、実現のための手段として、海洋構造物は欠くことの出来ないものになる。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、海洋構造物への着氷に伴う作用波力受圧面の増大、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施工を行う場合は、流水襲来時を除き海水面の結氷がほとんど生じないことから、着氷による波圧受圧面増大の影響は大きいと考えられる。このような海洋構造物の着氷機構に関しては、Lozowski¹⁾、Horjen²⁾らにより円柱部材への着氷を中心に理論解析が行われているが、それらを検証する現地データはまだ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。本報ではこれまで実施してきた調査概要を、観測施設及び調査結果を中心に報告する。

1. 観測施設

1.1 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(図-2参照;以下、実験構造物と呼ぶ)を用いて行った。実験構造物は図-3に示すような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とした。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。

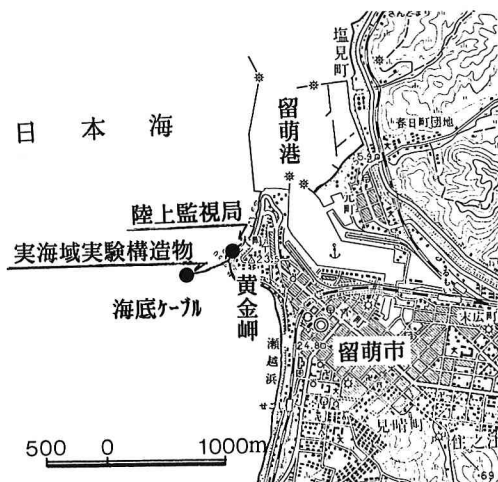


図-1 調査位置図

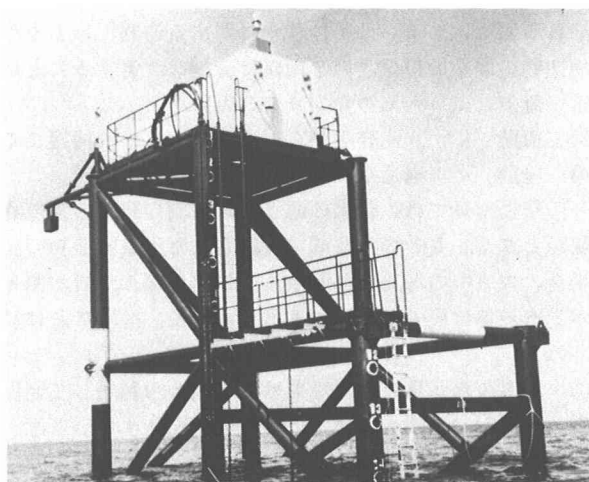


図-2 実海域実験構造物

1.2 観測装置

着氷観測は、黄金岬に設けた陸上監視局に35mmカメラ及びCCDカメラを設置して行った。実験構造物から陸上監視局までの距離は、約200mである。35mmカメラの場合、昼夜自動連続撮影を行うため、インターバルメー

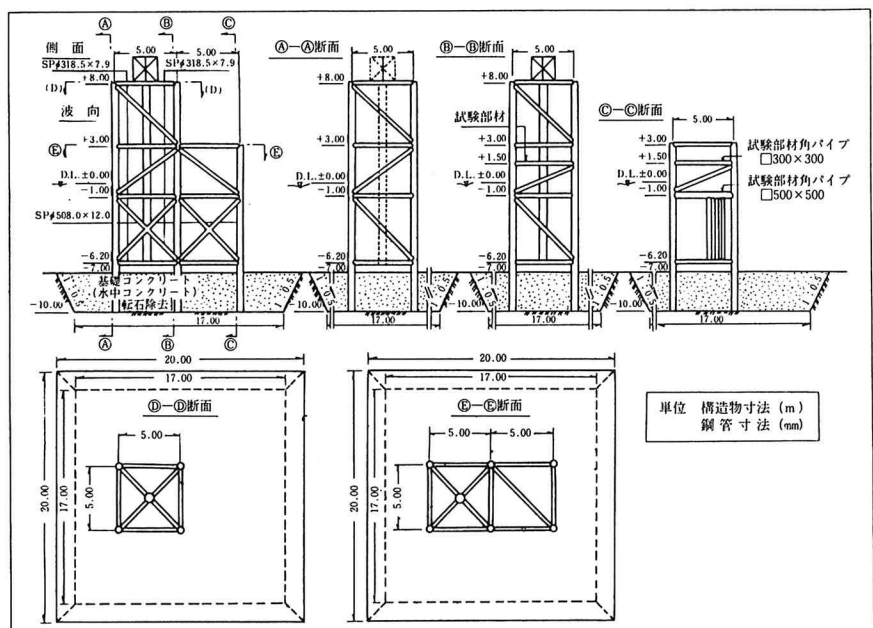


図-3 実験構造物詳細図

タと長尺マガジンを装着している。今回の観測ではインターバルを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、着氷状況の記録を行った。但し今回使用した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。また冬期間のこのような現地観測では、撮影面の雪氷付着による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旋回窓を取り付けたカメラ収納ケース（図-4参照）を開発し、欠測防止対策を図った。カメラ収納ケースについては逐次改良を行っており、現在は解氷用に旋回窓周囲にヒーターを取り付けている。



図-4 カメラ収納ケース

2. 着氷要因の一考察

実験構造物への着氷は、図-5に示すような気象、海象などの周辺要因が複雑に関連して生じるものと考えられるが、前出のLozowski, Horjenらの研究、あるいは船体着氷に関する研究³⁾などを踏まえると、海洋構造物の着氷過程は次の3段階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

第一段階については、着氷の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。海域における飛沫の成因としては

- ① 波峯の水が風の影響を受け、水面から剥離して発生する
- 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、風の影響を受け発生する

などが考えられるが、今回の調査の場合、実験構造物周辺に岩礁などが存在しないことを勘案すると、①により発生する飛沫の影響が最も大きいと考えられる。このような飛沫の発生に関する研究としては室内実験による石田ら⁴⁾の報告があり、定常風速下においては飛沫量が鉛直方向にはほぼ指数分布するという実験結果を得ている。海上における飛沫の発生機構を把握することは、着氷機構を解明するうえで大きなウェイトを占めることから、現地データを室内実験結果により検証していくことは着氷機構を解明する上で今後の重要な課題といえる。

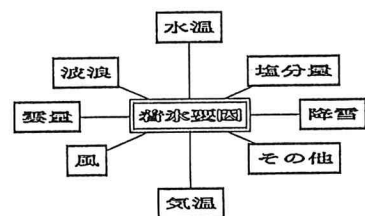


図-5 着氷要因

第一段階を飛沫の発生段階とすると、第二段階は空中における飛沫の冷却段階として位置付けられる。飛沫冷却については、飛沫粒径、海水温、気温、風速、発生から捕捉までの時間などの諸条件により冷却状態が決定されると考えられる。岩田⁵⁾は空中部における飛沫冷却について理論解析を行っているが、第一段階における飛沫発生機構の解明により、飛沫粒のラグランジェ的な取り扱いが可能となれば、捕捉直前の飛沫の冷却状態の推定も可能になると考えられる。

第三段階は飛沫が構造物に捕捉され氷結する段階であるが、その着氷状況は飛沫の冷却度合、飛沫量などの諸条件により変化すると考えられる。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）にある飛沫が構造物に捕捉されると、瞬時に過冷却状態がやぶれその一部が氷結する。残りの未氷結部分は空中への熱量放出や構造物の温度の方が低い場合、構造物への熱伝導等により潜熱が奪われ、若干のタイムラグをおいて氷結すると考えられるが、その間に次の飛沫が捕捉されるか否かにより、着氷の成長形態が決定されると推察される。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、次の飛沫が捕捉されるため、表面が乾いた状態で着氷が成長する乾き成長(dry growth)として氷厚が増大するが、捕捉間隔が氷結時間よりも短い場合は、着氷面が濡れた状態で成長する濡れ成長(wet growth)となる。このような捕捉後の飛沫状態が固体となるか液体のままであるかは、着氷形状、着氷位置などに影響を与えると考えられる。

3. 観測結果

3.1 観測期間

着氷観測は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が、1989年は折からの暖冬であり有意なデータが獲得されず、また1990年のデータは現在解析中であることから、本報告では1988年のデータを中心に観測結果を報告する。1988年の観測期間は、1月18日から2月19日までの33日間である。その間、1月25、26日、2月4日の計3日間、解析不能の欠測が生じた。欠測原因としては、この期間、北海道周辺の気圧配置が冬型となり、激しい吹雪の影響により撮影が物理的に不可能な状態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ガラス面への雪氷付着が発生したことによる。

3.2 着氷形状

実験構造物の着氷状況を図-6に示す。着氷の外観的な特徴としては、まず鉛直部材における樽状の成長があげられ、その原因として次の3要素が考えられる。

- 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についてみると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、空中での冷却時間も長いため過冷却状態が進行すると考えられることから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 傾向の成長となり捕捉水の一部が下方に移動する” runoff water ”が発生しやすいと推測される。そのため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最大値を示す点が現れると考えられる。また水面付近では氷結温度に達していない波の作用を直接受け(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る(③の影響)ことから、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。

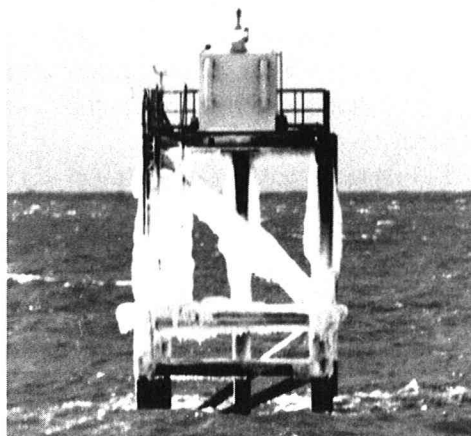


図-6 着氷状況

他の外観的特徴としては、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、捕捉された飛沫の未氷結部分は部材に沿って下方に移動する runoff water となるが、水平部材および斜材の場合は滴状に垂れ下がるため幕状の着氷が形成され则认为られる。

他の外観的特徴としては、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、捕捉された飛沫の未氷結部分は部材に沿って下方に移動する runoff water となるが、水平部材および斜材の場合は滴状に垂れ下がるため幕状の着氷が形成され则认为られる。

3.3 着氷厚および着氷厚変化

図-7、8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月別に海水温、気温、波高、風速湿度変化とともに示したものである。図中の海水温は留萌港内で、気温、風速、湿度は留萌港で、波高については留萌沖水深-50m地点で測定されたデータを示している。また着氷厚の定義は図-9に示す通りであり、画像

処理装置を用いて図-10に示す6点の水厚を算出している。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。図によると有義波高が5 m程度となる波浪は観測期間中に2度襲来しているが、1月25日にピークを示す波浪の襲来時には着氷が成長し、2月3日にピークを示す波浪の場合には着氷の大部分が欠落した。2つの波浪襲来時の気象、海象条件を比較すると、海水温、風速、湿度については顕著な差は認められなかったが気温についてはピーク日前後5日間の日平均気温が前者では $-3.9^{\circ}\text{C}\sim-7.0^{\circ}\text{C}$ 、後者では $-1.9^{\circ}\text{C}\sim-4.5^{\circ}\text{C}$ となっていた。ここで日本海の海水塩分量を35.0%とすると氷結温度は -1.92°C と推定され⁶⁾、気温差は発生飛沫の空中部における過冷却状態の差に現れると考えられることから、2月の波浪時には飛沫温度が着氷厚の成長するレベルまで到達していなかったと推測される。今回の観測によると、海水飛沫による着氷が問題となる場合、気温 -4.0°C 程度が着氷厚の増大、減少の境界になると考えられる。また着氷変化量を鉛直方向について比較すると、point3,4を境界として上方で着氷厚が増加する場合は下方では減少し、逆に上方で減少する場合は下方で増加する傾向がみられる。この現象の原因としては、波高の影響あるいは runoff water の影響が考えられるが、今後更に詳細な検討を行う必要がある。

おわりに

前節までにこれまでの調査概要と主な結果を記したが、本調査を継続するに当たり次の2点が今後の検討課題として考えられた。

①着氷観測データの欠測防止

②実験構造物周辺の着氷要因のデータ取得

①については前述したように旋回窓前面の着雪氷を防止するためカメラ収納ケースの改良を逐次行ってきたが、実験構造物で着氷が成長する周辺条件は旋回窓の維持面からは厳しい条件となり通常の周辺条件に比べ欠測の生じる確率が高くなる。そこで、1990年の観測より静止画像伝送装置を導入し、観測期間中、旋回窓の監視を行っている。静止画像伝送装置とは、ビデオカメラ等で撮られた画像を電話回線を利用し遠隔地にカラー静止画像として送信する装置であり、現在、これを留萌市黄金岬の陸上監視局と札幌の当研究所に設置している。また静止画像伝送装置により送信された画像は、着氷厚などの定量解析に利用できる可能性も高く、今回の調査で獲得された現地データと比較し、今後、画像データとしての利用可能性について検討を行っていく予定である。

②については実験構造物に空中部2点、水中部2点（水深 -0.5m 、 -1.5m ）の温度センサーを新たに取り付け、既設の超音波式波高計と風向風速計を併用し、実験構造物周辺の気温、海水温、波浪、風向、風速の同時計測が可能な計測システムを整備した。なお計測時間は35mmカメラによる写真撮影が行われる前後20分間であり、実験構造物上で計測された諸データは、海底ケーブル内の光ファイバーを介して陸上監視局に送信され、データレコーダにより自動記録している。

以上の着氷調査体制により1990年1月～3月のデータが取得されたことから、今後は着氷と周辺要因との関係をより詳細に解析していくとともに、着氷調査も継続的に実施し、データを蓄積していく予定である。

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) 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.
- 4) 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.
- 5) 前出3)
- 6) 佐伯 浩: 寒冷地海岸の諸問題, 海岸No.25, 1985.

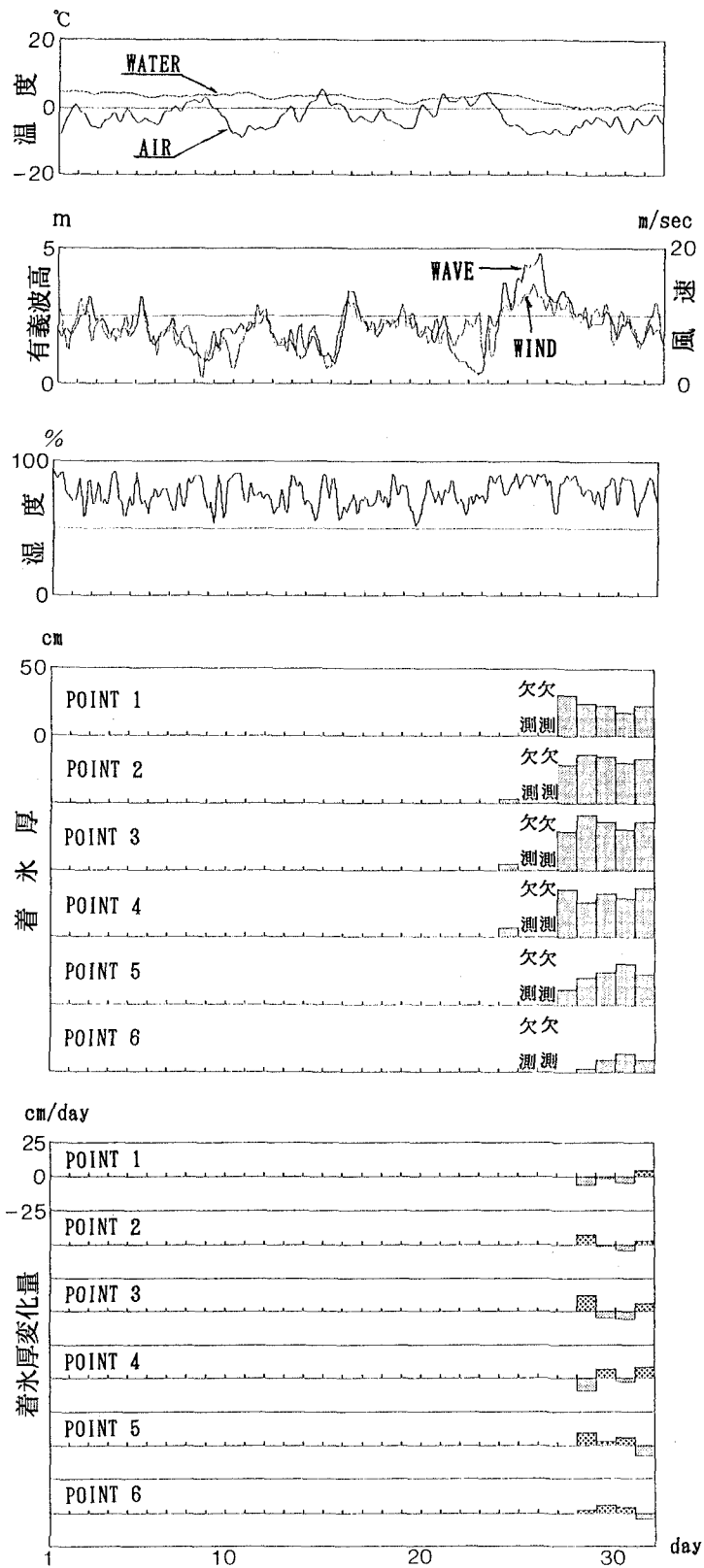


図-7 着氷厚と周辺要因の関係(1988年1月)

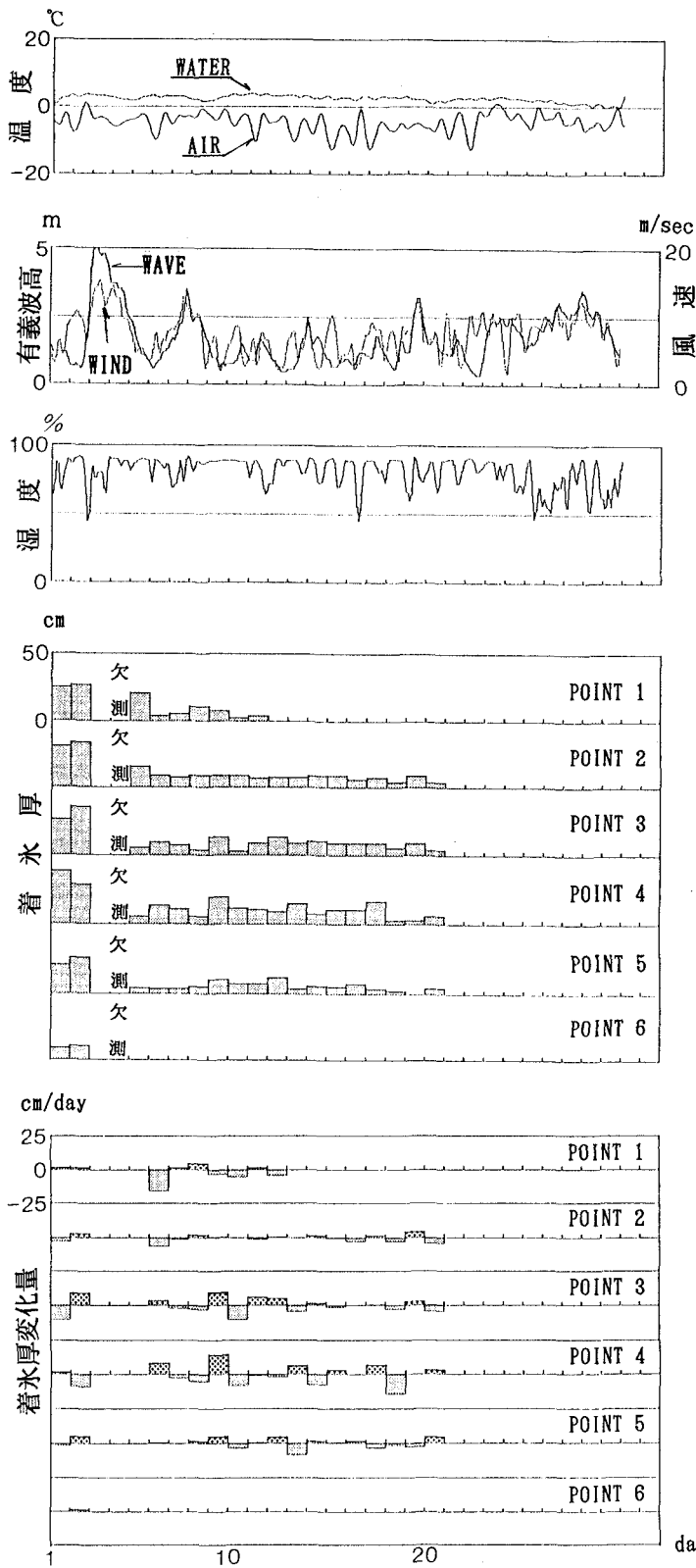


図-8 着氷厚と周辺要因の関係(1988年2月)

$$\text{着氷厚} = \frac{B-D}{2}$$

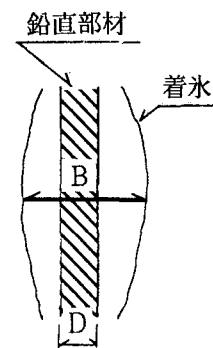


図-9 着氷厚の定義

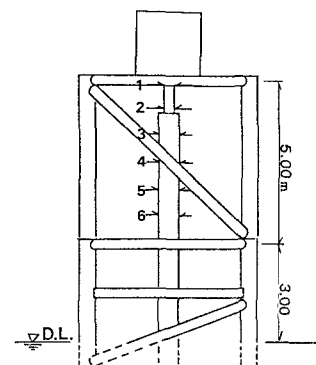


図-10 着氷厚算出位置