

超音波を利用した現地用水厚計の開発

——初期結氷を対象として——

高島和夫*・大森康弘**・武内智行***

1. 緒 言

厳寒期の北海道においては、オホーツク海側はもとより、寒冷域に位置する一部の港でも港内結氷が発生し、流通、漁業面に影響をあたえている。こうしたことから、近年、港内結氷の防除対策方法が種々研究されている。一方、増養殖場造成の立場では、結氷防除と結氷の有効利用（プランクトンの育成効果など）の両面の研究が必要と考える。いずれにしても結氷問題の検討には、現地における結氷の発生、成長のメカニズムを知る必要がある。このためには結氷発生や氷晶層の検出、結氷厚などの高精度計測が必要であるが、この種の現地用の自動計測手法の例は見あたらない。

そこで、誕生後まもない蓮葉氷や薄板状などの、厚さ 0~5 cm 程度の氷（海水の定義による分類もあるが、ここでは初期結氷と記述する）を対象に、当面、超音波を利用した氷厚計測法について、基礎的技術の検討及び試作研究を行うこととした。

その第一歩としてパルス反射法による氷底位（センサから氷底面までの距離）測定技術の検討を行い、つづいて、超音波センサ部をブイ構造に取り付けた方式を試作し現地の氷厚計測試験を行った。その結果、出力にパルス性雑音が記録されるという問題（後日原因判明）があったが、海表面の状況からは推定できなかった複雑な経緯をへて結氷が增厚する過程が記録波形から判断し得るなどの結果が得られた。

これらの結果から、現地の氷厚計測の有用な一法として超音波方式の実用化の見通しが得られたので、ここに、その概要を報告する。

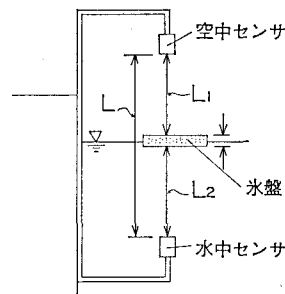
2. 測定方法の検討

海水の結氷は、塩分濃度が 24.7‰ 以下では湖が凍る場合のように対流によって表面が結氷温度となって凍っていくが、それ以上の塩分濃度では対流層全体が結氷温

度になり、対流層の中で結氷が発生して浮上してかたまりとなっていく。この、結氷過程において塩分は氷の結氷自身に入り込めずに濃い塩水（ブラインと呼ばれる）となって吐き出されるが、その一部は結氷間のすきまに閉じ込められ氷中に残る（木下, 1988）。このような海水の結氷経緯から、初期結氷は、表面や底面も一様な平面ではなく、また、波や風によって動揺するなど、その測定は必ずしも容易でない。そこで、氷厚測定の基本原理として、非接触の自動計測の可能な、図一1 に示すような超音波センサを利用し、水中基点から氷底面までの距離、および空中基点から氷表面までの距離を測定し氷厚を計測する方法を選択した。なお、当面の測定精度については、厚さ 3 cm 程度の氷板（平板状として）を誤差 $\pm 5 \sim 6$ mm 以下での測定を目標とした。

図一1 の具体化においては、温度変化による音速変動はもとより、降雪や融雪水の流入による塩分濃度の乱れの影響、さらには懸濁物質あるいは氷晶群などによる超音波減衰を考慮しなければならず、音速補正方法、周波数の選択が問題となる。

そこで、このような問題に対応する手段として、測定系に音速実測手段の組み込み（丹羽, 1982）が有効であると考え、センサ前方の一定距離に基準反射板（棒）を設け、その反射時間（以下、基準反射時間と記述する）を基準尺として測定して利用する方法を採用した。なお、周波数については、資料不足のため現地試験などにより検討していくこととした。



図一1 超音波方式による氷厚測定方法

* 正会員 北海道開発局開発土木研究所 水産土木研究室副室長
 ** 北海道開発局開発土木研究所 水産土木研究室
 *** 正会員 農博 北海道開発局開発土木研究所 水産土木研究室長

3. 氷底位測定技術の検討

選択した前記測定方式を実施するうえで技術的な問題点が種々不明であり、その抽出、検討が必要である。このため、問題要素の多いことが推測される氷底位測定技術の検討を目的に、水位や氷底位の自動測定システムを試作した。

図—2 は自動測定システムのブロック図である。その構成は、振動子（音響測深機センサ利用）、基準反射棒（径 8 mm）、パルス信号発・受信部（超音波周波数 200 kHz、パルス幅 114 μ s）、波形記憶部（A/D、D/A 変換回路、メモリなど）、及び波形処理部（マイクロ・コンピュータ）などからなっている。波形記憶部は、発、受信パルス波形を高速周期（1 μ s 間隔）でサンプリングしてメモリに記録し、所定データ数に達したときサンプリング・データを低速周期で出力する。この出力はペンレコードおよびパソコンに入力する。パソコンは初期設定の閾値により、発射パルス立ち上がり点、基準反射パルス（基準反射棒による反射）立ち上がり点、及び水面もしくは氷底反射パルス立ち上がり点を検出し、水面もしくは氷底位を算定してプリンタに記録する。この一連の測定は連続して行われる。

図—3 は、淡水水槽に結氷（厚さ約 17 mm）を発生させ、水面や氷底位の測定を行った結果である。この試験から、水面位の測定平均値は閾値の高低により差があるが、いずれも実測値より低く出る傾向がある。氷底位の実測は困難であったが、水位と氷底位測定値との差から算出した氷厚平均値については、ほぼ許容誤差内である。

図—4 は海水水槽に、流水を細かく砕いて（粒径約 2～20 mm）リング状浮き枠内に平均厚 3～4 cm 程度の層状にして浮かべ、水面測定、氷底位測定を行った結果である。ここでも水面位の測定平均値は実測値より下回る傾向がみられたが、水位と氷底位測定値との差から算出した氷厚平均値については、ほぼ許容誤差内であると判断された。

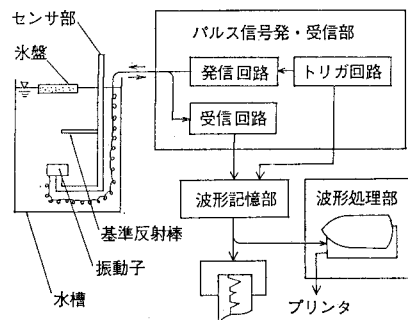
なお、上記の試験において、超音波反射波レベル（ここでは受信センサの受信レベルの意味とする）の水面比を見ると、淡水氷の場合にはほとんど差がなかったが、海水氷の場合には、ほぼ 30% 減であった。

以上の試験結果を見ると、水位測定値（氷底位の実測は困難であった）と、その実測値に差があることや、測定値にかなりのバラツキがある。そこで、これらの原因や問題点、さらには測定精度向上の方法などについて検討した。

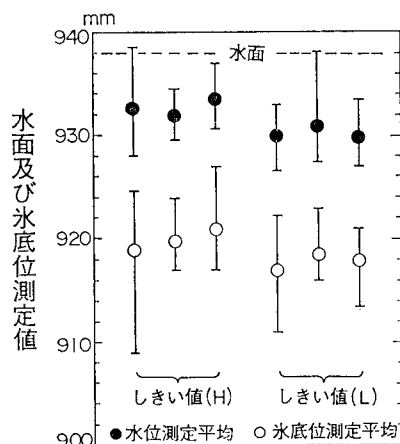
発振回路におけるパルス波形はパルス幅内で振幅や周波数が一定であるが、センサ（圧電振動子）の端子電圧

は立ち上がりが緩やかで最大振幅に達するまで時間がかかっている。また、反射波がたえず時間軸方向に振動し、かつ振幅も変動し波形が一定していない。

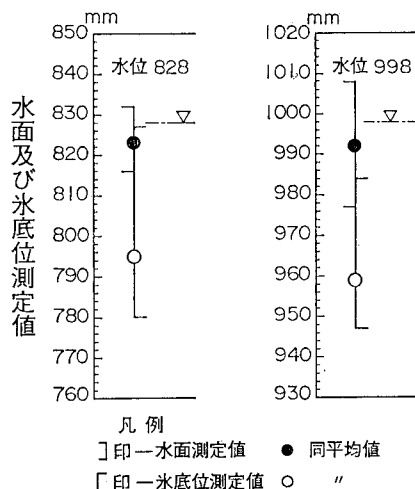
圧電振動子は、寸法によって機械的共振周波数が決まっていて、その振動状態は機械的共振系と見なすことが



図—2 実験システムの構成



図—3 淡水氷による試験結果



図—4 海水氷による試験結果

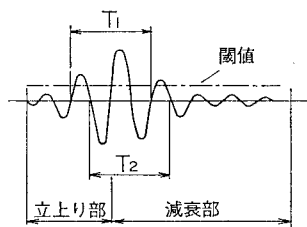


図-5 パルス波形モデル

でき、電気的等価回路が理論的に導かれている(実吉他, 1971)。圧電振動子をこのような、振動系として見たとき共振状態にするには時間が必要であることが容易に理解できる。伊藤(1988)は、図-5 の水中反射波形のモデルにより、パルスの立ち上がりに時間がかかること、また、振幅の減衰とともに波長が間のびして $T_1 = T_2$ ではなく、周波数スペクトルはある幅を生ずるとしている。

距離測定では受信波の山の立ち上がり点の検出が理想的であるが、反射時間測定は図-5 からわかるように、検出波が第1波か第2波かによって測定値に一波長分の差(周波数: 200 kHz, 音速: 1500 m/s では 7.5 mm)が生ずる。パルス波の検出は雑音レベルより高い閾値との比較であり、したがって反射波レベルが低いと第1波の検出が困難となる。

上述したことから、前記の試験測定値のばらつきの一因として周波数の変動や減衰が考えられる。また、基準尺測定において、超音波が丸棒により広角度に反射し、見かけ上、減衰が少なくても回折による時間遅れがあれば、基準尺測定値が大きくなり、水位測定値は小さくなる。しかし、この点については実験不足であり、言い切れない面があるが、基準反射棒として細棒使用には検討を要すると考える。測定精度の向上については、超音波が高周波であれば、パルス検出が第1波でなくても低周波に比して誤差を少なくすることが可能となる。また、測定パルス出力やビーム角の検討も必要である。

4. 現地用氷厚計の開発

4.1 センサ部の構造

これまでの結果をもとに、超音波周波数の高周波化と基準反射板を用いて基準尺センサを独立させる方法を採用し、水中部と空中部に、それぞれ測定用と基準尺用センサを設けてセンサ部を構成するとともに、これを潮位に追従するブイ構造に取り付ける方式を試作した。

図-6 はセンサ部をブイ構造に搭載した全体構成(以下、センサブイと記述する)を示したものである。浮体部は塩ビ管の両端に蓋をした中空筒を平面内、三方向に配置し、その中心軸方向の上方と下方には空中および、水中基準尺測定センサを各々収納するための両端開口の二本の中空管を相隔てて配置した構造である。

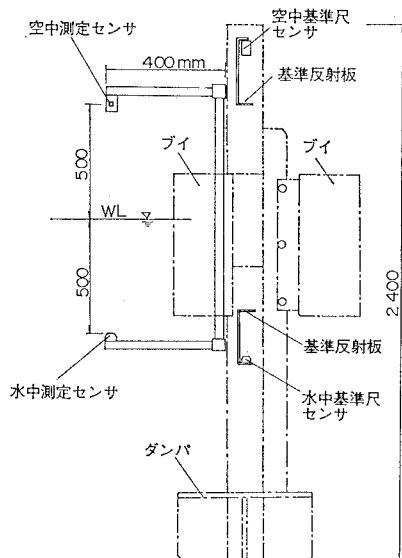
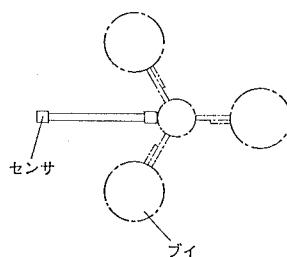


図-6 センサブイの構造

上方中空管内には空中基準尺センサを、下方中空管内には水中基準尺センサが取り付けられ、上、下中空管はそれぞれ大気、及び海水の入出流が自在となっている。空中、及び水中測定センサはコの字型部材に相対向して取り付け、その中間に静水面がくるようにしている。なお、このセンサブイは波浪による水面変動 50 cm 内外において測定対象の氷厚を前述のように 5 cm 程度までとして構成した。

4.2 測定回路の構成

図-7 は測定回路の概略構成を示すものである。

発射パルス発信部は、空中用超音波周波数 200 kHz と水中用超音波周波数 1 MHz の発振回路、パルス幅設定回路及びパルス発信周期設定回路などで構成され、測定用及び基準尺用パルスを発信する。

測定クロック発信部は、クロック計数値が即測定距離となるようにするための、基準尺距離に対応した所定数値の読み込み、および、クロックパルスにより減算するプリセット・ダウンカウンタとプリセットカウンタの残差をなくする方向にクロック周期を調整するための D/A、V/F 変換回路からなるクロック周期調整回路で構成される。測定用クロック発信部は空中用、水中用に各

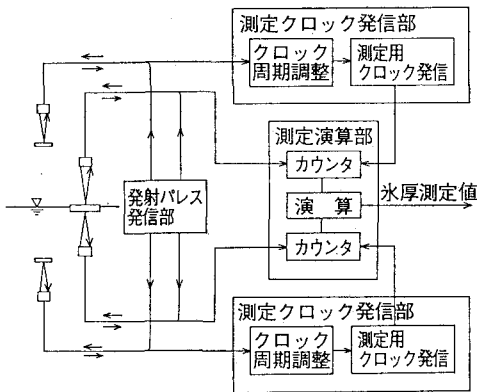


図-7 測定回路構成

タ設け測定用クロックパルスを測定演算部に送出する。

測定演算部は、測定用パルス発信時から反射波受信時まで、測定用クロックパルスをカウントするカウンタ回路2組（空中用と水中用）と、これらのカウンタ回路による、各測定用クロックパルスの計数値、および空中と水中のセンサ間距離から、氷厚を算定する演算回路とD/A変換回路などにより構成される。

4.3 現地試験

現地試験は十勝港の東方、十勝川河口付近に位置する大津漁港港内で行った。

図-8は現地の海水槽で行ったパラフィン板の測厚試験の記録例である。使用したパラフィン板は径200mmで厚さが5, 10, 15, 20, 30, 40mmの6種類である。ここでは、超音波出力やパラフィン板の傾斜による反射波の散乱あるいは測定サイクルについて若干の検討を行った。測定サイクルは実際の氷盤の動揺を考慮し10サイクルとした。図中で変動のある記録は10サイクル測定時の出力波形で、なめらかな波形は出力をフィルタにより平滑したものである。10サイクル測定では-5mm

程度、フィルタによる平滑値では、-3mm程度の誤差となっている。実用上、どの程度の測定サイクルやフィルタ時定数が適当かについては、波浪その他、現地状況により随時選択することにした。

ついで、センサパイを港内隅部の岸壁（直上に観測小屋を設置してある）の前方8mの水面に設置し結氷厚計測試験に供した。

現地における結氷厚計測は全く初めての試みでもあり、結氷開始以前から海表面状況、シンクロスコープによる水中反射波形、および測定記録を対比しながら連続観察を行った。海表面観察を続けるうちに、静穏状態となりやがて結氷（氷晶群の薄い層と思われる）が岸壁側部から発生しだしたことが確認（照明灯による海面の光沢、きらめきの変化などにより）された。時間経過とともに結氷縁部が次第にセンサパイ方向（港内部）に向かって拡大し、センサパイが結氷範囲内に入った。同時に、超音波反射波の振幅変動やパルス形状の変化、及び測定記録の増厚傾向が観察された。このような経過のなかから結氷発生、流れによる水中の氷晶塊の移動、氷晶層の増厚、及び氷板化などの状態が記録波形から推測可能であることがわかった。図-9にこれらの波形記録例を、また写真-1にセンサパイの設置状況を示す。

以上の試験結果から多くの知見が得られた。特に、センサパイによる現地の結氷厚計測試験において、結氷の発生からその増厚過程が当初の認識とは大差があり、海表面の状況からは推定できなかった、複雑な経緯をたどることが記録波形から判断し得た。このことは、試験後にセンサ付近の挿孔による観察でも、態様が異なる種々の結氷層が確認されたことにより裏付けられた。なお、前記のパルス性雑音は、測定用水中センサの反射波の減衰などによる検出不能時の対策手段の欠落であることがわかった。これは回路構成の手落ちであり、その解決は容易である。

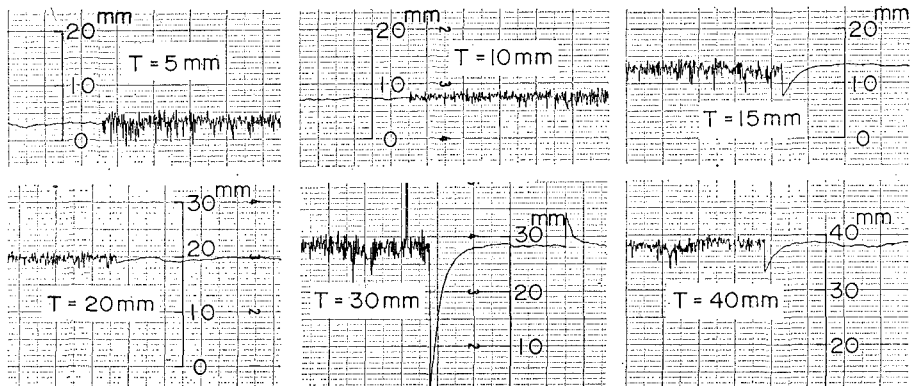
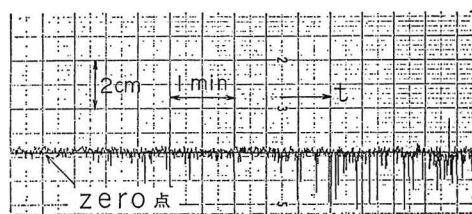
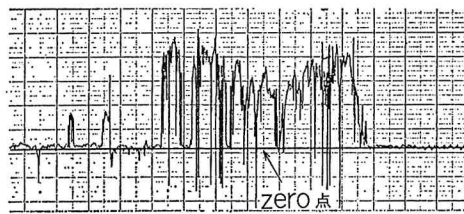


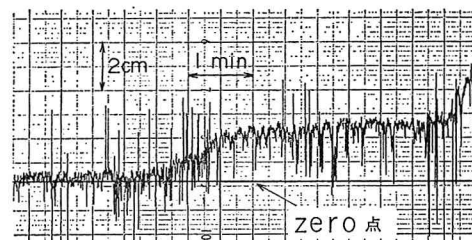
図-8 現地海水槽でのパラフィン板の測厚試験



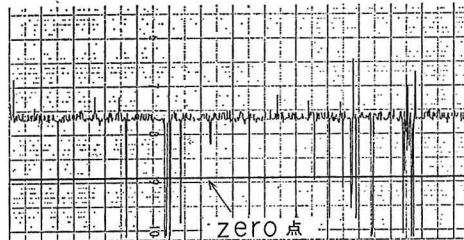
(a) 結氷の発生状態と推測できる



(b) 氷晶塊の移動であると推測できる



(c) 氷晶層の増厚状態と推測できる



(d) 氷晶がくっつき氷板化状態と推測できる

図-9 結氷発生、氷晶塊の移動、氷晶層の増厚、氷板化の記録例



写真-1 センサブイの設置状況

5. あとがき

港内の初期結氷を対象として、超音波を利用した現地用氷厚計の開発をめざし、基礎的技術の検討および試作

研究を進めた結果、今回、現地の氷厚計測の有用な一法としてセンサブイ方式の実用化の見通しが得られた。

本氷厚計の開発研究にあたり、運輸省船舶技術研究所北川部長より、貴重なご助言、ご指導をたまわった。

また、現地試験の実施には、帯広開発建設部十勝港湾建設事務所大津漁港監督員詰所、前田建設他 J・V には多大のご協力をいただいた。ここに、記して深く感謝する次第である。

参 考 文 献

- 伊藤健一 (1988): 超音波のはなし, 日刊工業新聞社, 176 p.
- 木下誠一 (1988): 雪と氷のはなし, 技法堂, pp. 183~186.
- 丹波 登 (1982): 超音波計測, 昭晃堂, pp. 46~47.
- 実吉純一・菊池喜充・能本乙彦 (1971): 超音波技術便覧, 日刊工業新聞社, pp. 34~44.