

## 現地用結氷厚観測計器の開発

Newly Developed Ice Gauge For Field Surveys of Thin Sea Ice

高島 和夫\* 大森 康弘\*\* 武内 智行\*\*\*

Kazuo TAKASHIMA, Yasuhiro OHMORI  
and Tomoyuki TAKEUCHI

新成氷、薄氷板および蓮葉氷などを対象とした現地用結氷厚観測計器を開発した。現地試験の結果、その実用性が確認された。

《現地用結氷厚計：超音波式氷厚計》

An ultrasonic ice gauge for field surveys of new ice, nilas, and pancake ice was developed.

Field tests showed the gauge to be of practical use.

Keywords: ice gauge for field survey, ultrasonic ice gauge.

### まえがき

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、漁業面に影響を与えている。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、断熱効果あるいは消波効果など）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。その一助として、結氷の発生検知および結氷増厚過程の高精度計測が可能な現地用結氷厚観測計器が必要であるが、この種の現地用自動計測手法の例は見あたらない。

そこで、薄氷板状や蓮葉氷などにいたるまでの、結氷初期の厚さ0~5cm程度の氷を対象とした現地用結氷厚観測計器を実現すべく試作研究を行うこととした。

その第一歩として、超音波パルス反射法の組合わせに

よる氷厚計測法を選択し、その具体化のための基礎的技術についての検討を行い、続いて、超音波センサ部をブイ構造に取りつ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経て、結氷が増厚して行く過程を記録波形から判断し得た。

これらの結果により、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とおしが得られたので、ここに、その概要を報告する。

### 1. 測定方法の検討

#### 1.1 海水の結氷

海水の結氷姿態は塩分濃度によって異なる。図-1は海水の結氷温度と最大密度温度を示したもので、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、対流層の中で結晶

\* 水産土木研究室副室長 \*\* 同室員 \*\*\* 同室長

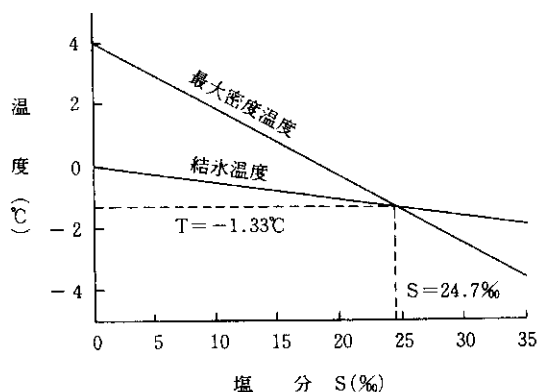


図-1 海水の結氷温度と最大密度温度

が生まれ、浮上するというかたちをとる。海域に河川水の流入があり、表層に低塩分層が形成されて、下層部の高塩分層との境（塩分・密度躍層）が生じた場合には上層の低塩分層だけが対流層となる<sup>1)</sup>。

このような結氷および成長過程において、塩分は結晶自身に入り込めずに、ブラインと呼ばれる濃い塩水となって吐きだされるが、その一部は結晶間のすきまに閉込められ水中に残る。このブライン吐きだしにより氷底面（固液界面）の塩分濃度が高くなり、結氷温度の低下およびゆらぎによる結氷突出などにより、固液界面に凹凸を生じ、極端な場合には樹枝状成長が起こるとされている<sup>2)</sup>（このような海水構造がプランクトンのよいすみかとなっているともいわれている）。

## 1.2 測定方法の選択

本開発研究の水厚観測計器は、海中の氷晶群（氷晶集合の意味とする）、海表面の氷晶層（氷晶集合や氷晶集合体が層状を呈している意味とする）などの新成氷および薄氷板、あるいは写真-1に示すような蓮葉氷状に成長した結氷初期の氷を対象とするものである。

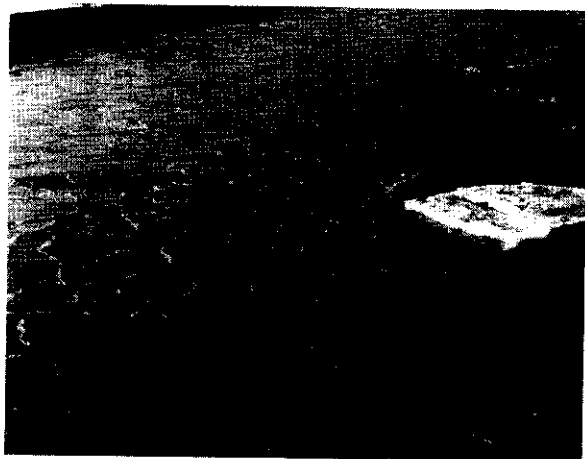


写真-1 蓮葉氷（大津漁港）

しかしながら、結氷初期の氷はブラインや空気の気泡などを多く含み、その成長過程でもブライン吐きだしが継続し、さらに温度や海水の動き（波浪、流れ）の影響を受け、グリース状、シャーベット状、あるいはかき氷が凍結したような状態を呈するなど、その形態は実に多様である。また、表面や底面も一様な平面ではなく、波や風によって動揺するなど、その計測は必ずしも容易でない。

こうしたことから、測定方法について種々検討した結果、非接触自動計測の一法として、図-2に示すように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3cm程度の氷板（平板状として）を誤差±5~6mm以下で測定することを目標とした。

図-2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込み<sup>3)</sup>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、その反射時間を基準反射時間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。以下、上記センサと基準反射板（棒）との距離を基準尺と記述する。

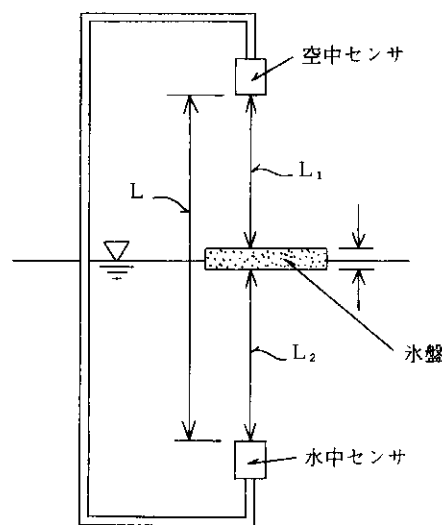


図-2 超音波方式による氷厚測定方法

## 2. 基礎的技術の検討

### 2.1 実験システムの試作

超音波パルス反射法による距離測定法は、送波器からの超音波パルスが物体の境界面（音響インピーダンスの差のある部分）から反射してくる時間と音速（縦波）をもとに送波器と物体までの距離を測定する方法である。この手法を具体化する上で、まず、音速の決定が問題となる。音速は媒質の温度によって大きく変わるほか、大気中においては水蒸気張力、圧力など、また海中では塩分濃度、圧力によっても変化する。このため、温度センサや塩分センサなどによる音速補正が必要となるが、本研究においては前記したように、音速実測手段の組み込みによる水厚測定方式を選択した。しかしながら、その具体化において、結氷を対象とした超音波計測技術について種々不明であり、これら問題点の抽出、検討が必要である。そこで、基礎的技術の検討を兼ね、問題要素の多いことが推測される氷底位（水中センサから氷底面までの距離）測定技術の検討を目的に、音響測深機のセンサ回路やパソコンなどを利用した水位や氷底位の自動測定可能な実験システムを試作し、淡水水槽および海水水槽を用いて水位や氷底位の測定試験を行うこととした。

図-3は、試作した実験システムのブロック図である。その構成は、振動子（圧電振動子）、基準反射棒（径8mm）、パルス信号発・受信部（超音波周波数200KHz、パルス幅114 $\mu$ s）、波形記憶部（A/D、D/A変換回路、メモリなど）および波形処理部（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 $\mu$ 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、ペンレコーダとパソコンに入力する。パソコンは初期設定のしきい

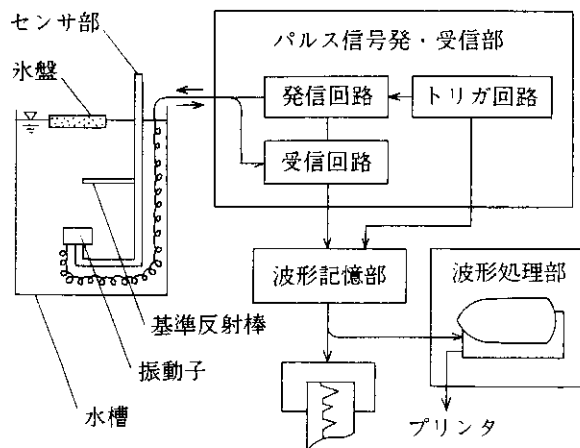


図-3 実験システムの構成

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）立ち上がり点および水面反射もしくは氷底反射パルス立ち上がり点を検出し、水位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。なお、測定間隔短縮のため、主処理プログラムはすべて機械語により構成し、波形記憶部データ出力が100Hzまで対応可能にした。次に、実験システムによる測定試験結果を示す。

### 2.2 測定試験

図-4は、淡水水槽に結氷（厚さ約17mm）を発生させ、水位や氷底位の測定を行った結果である。この試験から、水位の測定平均値はしきい値の高低により差があるが、いずれも実測値より低くする傾向がある。氷底位の実測は困難であったが、水位と氷底位測定値から算出した水厚平均値については、ほぼ許容誤差内である。

図-5は、海水水槽に写真-2に示すように、流水を細かく砕いて（粒径2~20mm）浮き枠内に平均厚3~4cm程度の層状にして浮かべ、水位測定、氷底位測定を行った結果である。ここでも水位の測定平均値は実測値より下まわ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水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、超音波反射波の受信レベル（ここでは、受信センサの電圧の意味とする）の水面比を見ると、淡水水の場合にはほとんど差がなかったが、海水水の場合には、ほぼ30%減であった。

以上の試験結果をみると、水位測定値と、その実測値

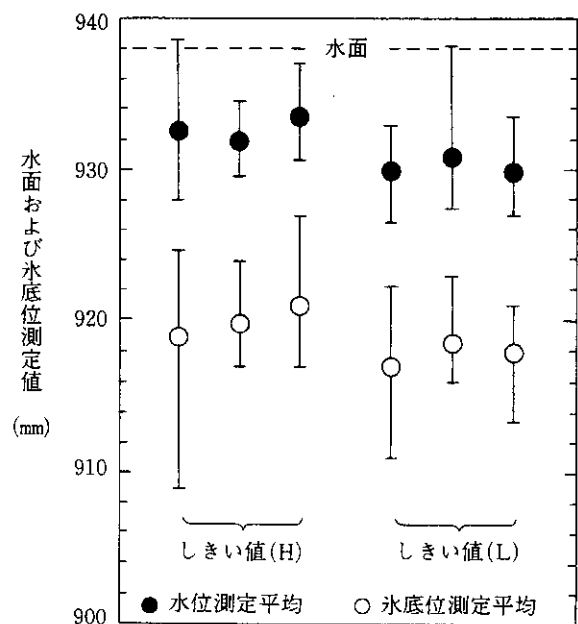
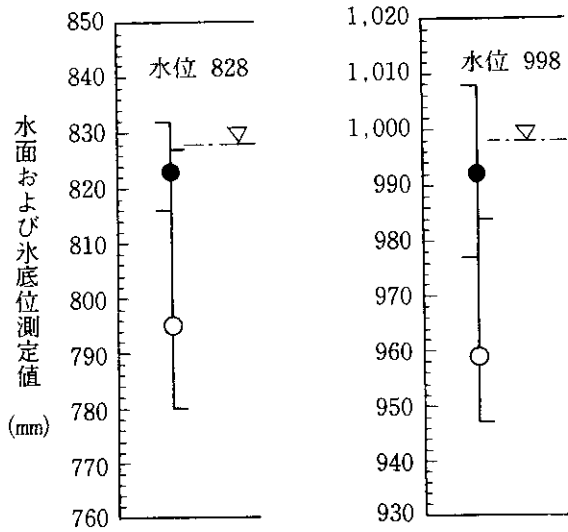


図-4 淡水水による試験結果



凡例  
 ] 印—水面測定値 ● 同平均値  
 [ 印—氷底位測定値 ○ 〃

図—5 海水氷による試験結果



写真—2 浮枠内の海水

に差があることや、個々の測定値にかなりのバラツキがある。氷底位の実測は困難であったが、水位の場合と同様であると推測される。そこで、これらの原因や問題点、さらには測定精度向上などについて検討した。

### 2.3 問題点の検討

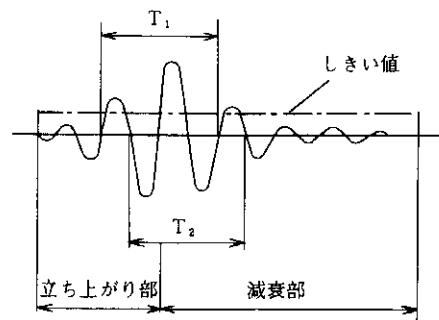
実験システムの発振回路におけるパルス波形は、パルス幅内で振幅や周波数が一定の、いわゆる矩形変調波であるが、センサ（圧電振動子）の端子電圧は立ち上がり

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、反射波が絶えず時間軸方向に振動し、かつ振幅や波形が一定していない。こうした現象は、圧電振動子の電気音響変換<sup>4)</sup>における一典型として、概略、次のようなことであることがわかった。

超音波パルスの発・受信は電気を音響に変え、音響を電気に変換する電気・音響変換器によって行われる。実験システムでは、電気・音響の可逆変換器の一種である圧電振動子を利用している。超音波パルスの発生は、矩形変調波により圧電振動子を振動（厚さ方向のひずみ）させ、その振動により水粒子が振動することにより得られる。圧電振動子はその寸法によって機械的共振周波数が決っていて、その振動状態は機械的共振系と見なすことができ、励振電流の矩形変調波が加えられても最大振幅（共振状態）にいたるまでには時間がかかる。そして、励振電流がなくなった後も減衰しながら固有振動を継続するというかたちをとる。

このような電気・音響変換において、海水に接する圧電振動子の振動面は、放射インピーダンスとして表現される海水の反作用により、また、海中を伝播する超音波パルスは媒質の音響インピーダンス、標的の反射強度などの反射特性、さらには反射波の受信段階での、受信作用として表現される受信面の振動変位により、パルス波形に減衰や位相づれが生ずる。このように、超音波パルスの発信、伝播、反射、受信の系には複雑な要素が多く、矩形変調波が、なまったかたちで受信されることが理解できる。

図—6 は水中物体の反射波形のモデルにより、パルスの立ち上がりが緩やかであること、また、波形ひずみにより  $T_1 = T_2$  ではなく、周波数スペクトルはある幅を生ずることを示したものである。距離測定では図—6 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：1,500 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しきい値との比較であり、したがって反射波レベルが



図—6 パルス波形モデル

低いと第1波の検出が困難となる。

以上のことから、試験測定値のバラツキの一因として振幅の減衰や周波数の変動が考えられる。また、基準尺測定に用いた丸棒(径8mm)により、超音波が広角度に反射し、見かけ上の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、水位測定値が小さくなる。これについては実験不足であり、いい切れない面があるが、細径の反射基準棒の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ことがわかった。

### 3. 現地用水厚計の試作

#### 3.1 センサ部の構成

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つける方式を試作した。

図-7は、センサ部をブイ構造に搭載した構造(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2本の中空管を相隔てて配設した構造である。

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や海水の入出流が自在となっている。空中およ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50cm内外において測定対象の水厚を、前述のように5cm程度までとして構成した。

#### 3.2 回路構成

図-8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200kHzと水中用超音波周波数1MHzの発振回路、パルス幅設定回路およびパルス発信周期設定回路などで構成され、測定用と基準尺用パルスを発信する。測定クロック発信部は、クロック計数値が測定距離の値と一致させるための、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変換回路とからなるクロック周期

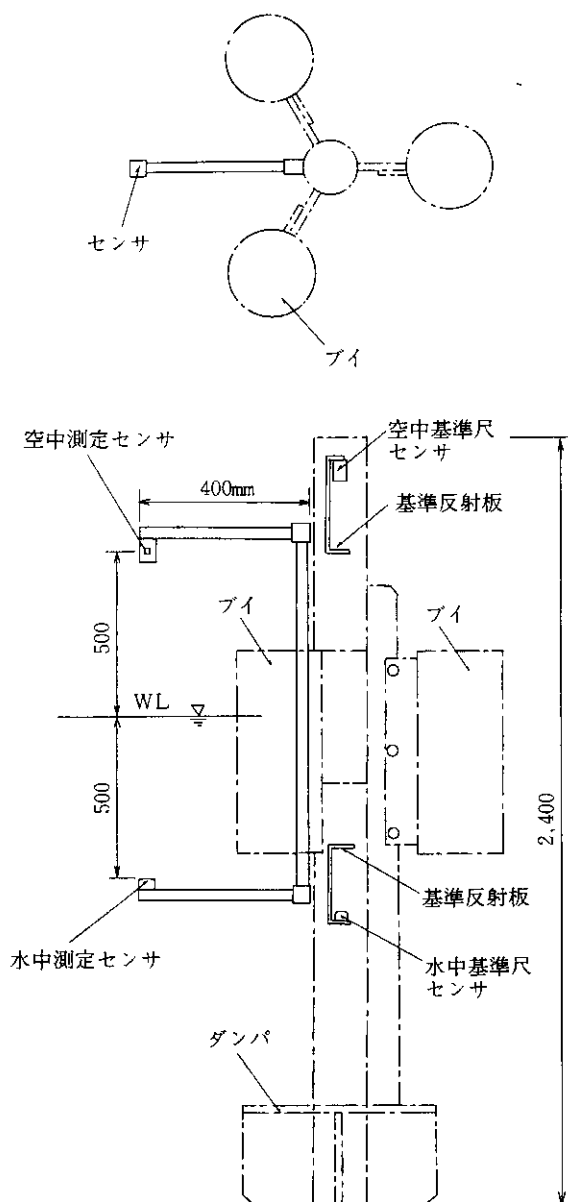


図-7 センサブイの構造

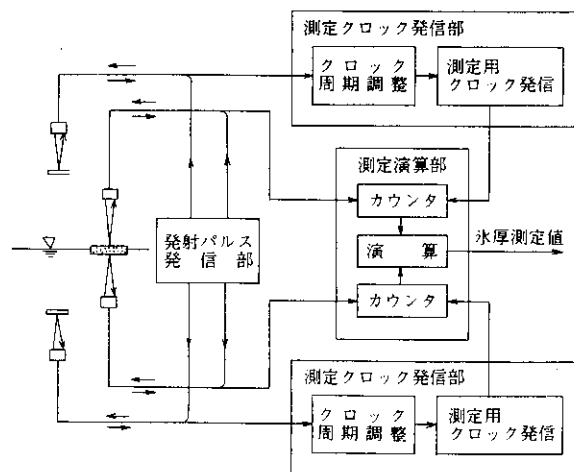


図-8 測定回路構成

調整回路で構成される。測定用クロック発信部は空中用、水中用に各々設け、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值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. 試作氷厚計の現地試験

##### 4.1 試験の状況

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。

センサブイの海上設置に先だち、現地海水を用いたパラフィン板の測厚試験を行った。使用したパラフィン板は径200mm、厚さが5, 10, 15, 20, 30, 40mmの6種類で、写真-3に測定試験状況を、図-9に記録例を示す。図中で、変動のある記録は実際の氷盤の動揺を考慮し、

測定周期を10Hzとした場合の記録である。また、なめらかな波形は測定出力をフィルタにより平滑したものである。この試験結果、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、どの程度の測定周期や平滑が適切かについては、波浪その他、現地状況により随時選択することにした。

次いで、センサブ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。写真-4は、センサブイの設置状況である。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、異様に海表面の動きがなくなり、やがて、岸壁側部から結氷（氷晶群の薄い層と思われる）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。時間の経過とともに、結氷縁部が次第にセンサブイ方向



写真-3 パラフィン板の測厚試験状況

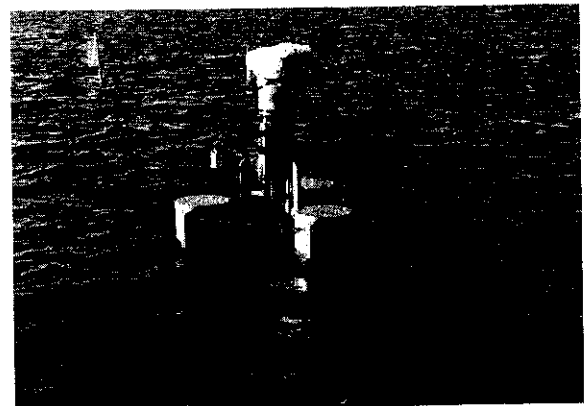


写真-4 センサブイ設置状況

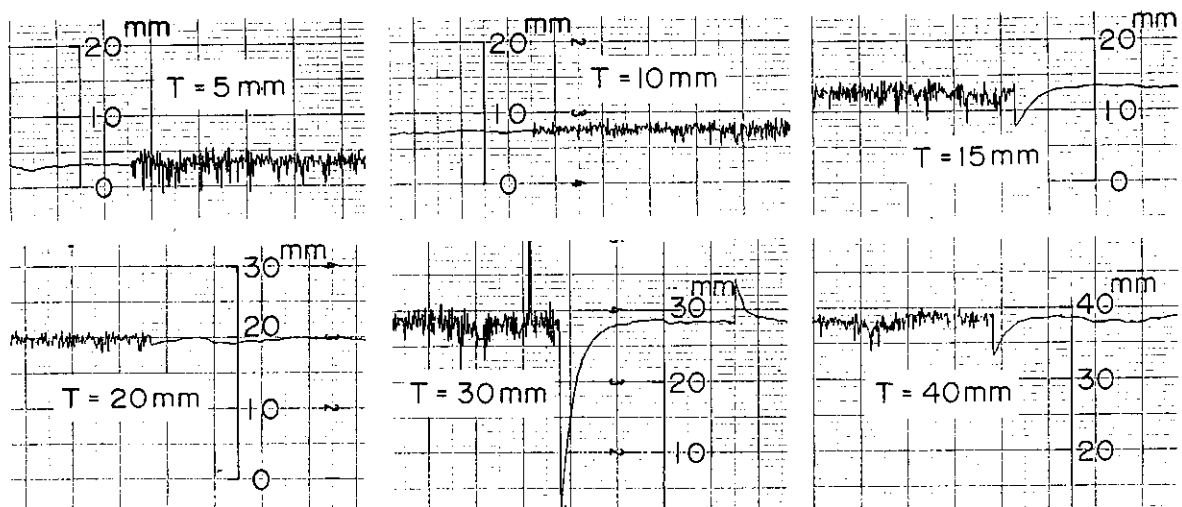


図-9 パラフィン板厚測定記録例

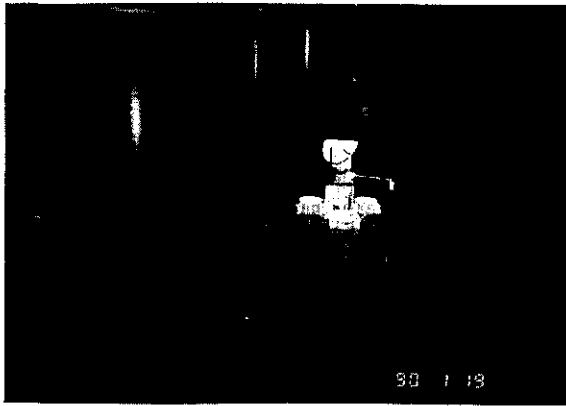


写真-5 結氷発生時の海表面状況

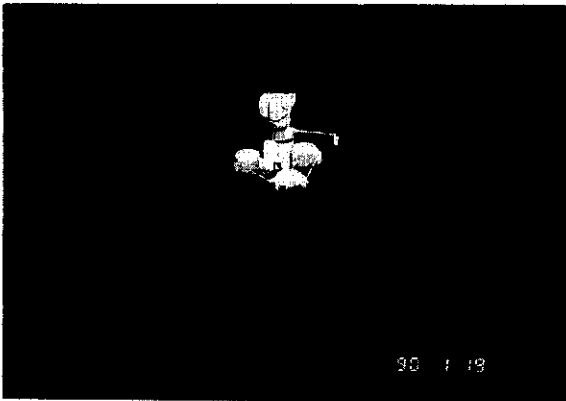
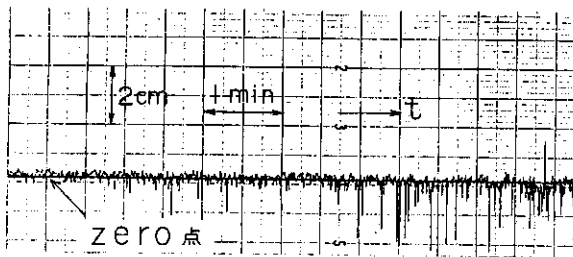
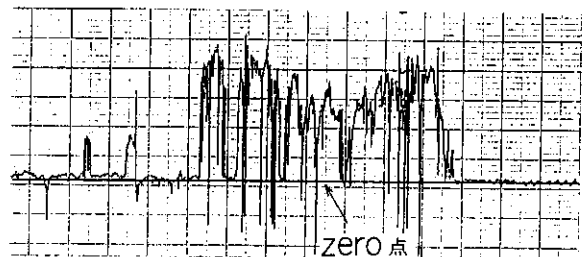


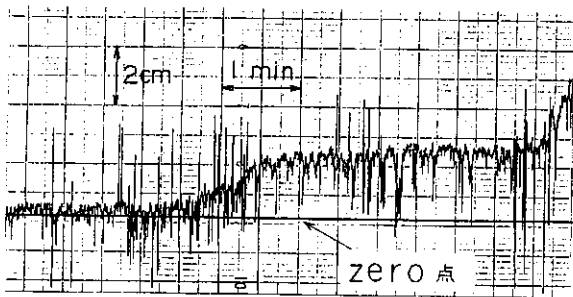
写真-6 氷晶層増厚時の海表面状況  
(港内部) に向かって拡大し、センサブイが結氷範囲内に入った。同時に、超音波反射波の振幅や波形の変化および測定記録に波形の変化が観察された。写真-5は結氷発生時、写真-6は氷晶層増厚時の海表面状況である。



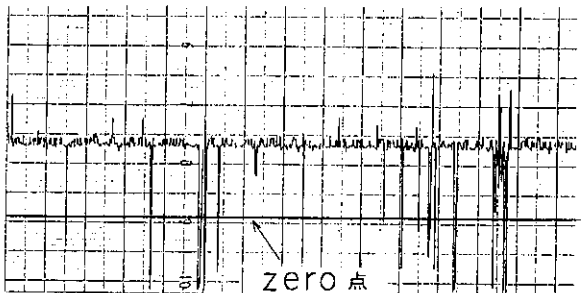
(a) 結氷の発生状態と推測できる



(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-10 結氷発生、氷晶塊の移動、氷晶層の増厚、氷板化の記録例

#### 4. 2 観測結果と考察

図-10は観測記録例である。記録例のパルス性雑音は、測定用水中センサが反射波の検出不能によりクロックカウンタが異常値となることが原因であることがわかった。反射波の検出不能は、海面や水底面の傾斜による斜め方向への反射(以下、偏向反射と記述する)、あるいは氷晶群(層)などによる減衰(吸収、散乱)によるものと考えられる。図中に示した(a)~(d)の結氷過程は、海表面状況の目視観測、ポールによる水面感触およびシンクロスコープによる反射波観測により判断したものである。これらについて、次に述べる。

##### (a) 結氷発生

前記したように、薄い氷晶層と推定される領域が拡大してセンサ部感知領域に入った。その時点で、それまで頻繁に発生していた海面の偏向反射によるパルス性雑音が急減した。やがて、記録値が増厚傾向になるとともにパルス性雑音が多くなってきた。これは海面の静穏化に加えて、氷晶の海表面への浮上により超音波の偏向反射が少なくなり、微視的凹凸による散乱状態に移行したこと、そして氷晶発生が継続し氷晶群による大幅減衰が生ずるようになったものと考えられる。このような状況の中で気泡の破裂音が確認され、結氷時の気泡発生と推測された。

##### (b) 氷晶塊の移動

肉眼により、水中に塊状のものがセンサ部を弱い流れによって移動していることが確認された。なお、記録波

形ではパルス性雑音の記録により不明瞭であるが、シンクロスコープでは2個の塊状体が通過したことが確認された。

#### (c) 氷晶層の増厚

肉眼により、氷晶層がだんだん白色を呈し増厚傾向にあることが確認され、記録振幅も変動分を含みつつ増加している。

#### (d) 氷板化の状態

(c)で示した氷晶層の増厚記録が続いていたが、やがてパルス反射波や記録振幅の変動が落ちつき、反射面が平板状態になったことを示し、氷板化の状態であると判断される。

以上は結氷発生から氷板化までの経過であるが、この氷板化後において、さらに、(c)のような氷晶層の増厚現象が記録された。

今回の現地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削孔による観察でも、態様が異なる種々の結氷層が確認されたことにより裏づけられた。

パルス性雑音自体の発生防止対策は、発・受信パルスを2進カウンタ(F/F回路)に入力し、反射波検出不能を判断するような回路構成により容易に実現しうる。また、超音波パルスの出力増大により減衰が原因の反射波検出不能もある程度避けられる。

しかし、反射波の検出不能現象は、前記のように水中の状態を示しているものであり、記録波形上でも結氷状況との対応が見られる。したがって、パルス性雑音のペンレコーダへの記録は除去すべきであるが、その発生頻度や周期性および受信時波形の特徴(周波数スペクトルなど)と合わせて調べることにより、氷晶群や氷板などの自動的判断が可能になると考えられる。現地試験の当初は、パルス性雑音の発生を憂慮していたが、上述のよ

うに反射波検出不能現象は有用情報として利用しうる。こうした観点から、本試作機に採用したパルス諸元(センサ径25mm;周波数1MHz;半減角約 $2.3^\circ$ )については、微細な現象検知には有効であると考えられる。

#### 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水厚計の開発を目指し、基礎的技術の検討および試作研究を進めた。その結果、反射波検出不能が原因のパルス性雑音が記録されるという問題があったが、期待以上の成果が得られ、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とおしが得られた。

今後の方針としては、当面、反射波検出不能現象の信号化処理とセンサブイの簡易構造化を行い実用化を進める。また、本開発をとおして蓄積された超音波計測技術や現地の結氷態様などの知見を軸に、観測機能の拡充をはかる。

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、貴重な御助言、御指導を賜わった。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、前田建設ほかJ・Vには多大の御協力をいただいた。ここに、記して深く感謝する次第である。

#### 参考文献

- 1) 木下誠一：雪と水のはなし、技法堂、1988、など。
- 2) 前野紀一、福田正巳：雪氷の構造と物性、古今書院、pp 69-71、1986、など。
- 3) 丹波 登：超音波計測、昭晃堂、pp 46-47、1982。
- 4) 実吉純一、菊池喜充、能本乙彦：超音波技術便覧、日刊工業新聞社、pp 34-44、1971。
- 5) 伊藤健一：超音波のはなし、日刊工業新聞社、pp 176、1988。