

オホーツク海に設置されている海象計を活用した流氷の喫水深推定の可能性について

POSSIBILITY OF ICE DRAFT MEASUREMENT USING USW DEPLOYED AT OKHOTSK SEA

木岡信治¹・山本泰司¹・金田充²・北村康司³・竹内貴弘⁴
Shinji KIOKA, Yasuji YAMAMOTO, Mitsuru KANETA
Yasushi KITAMURA and Takahiro TAKEUCHI

¹正会員 博(工)(独)寒地土木研究所(〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1番34号)

²北海道開発局網走開発建設部紋別港湾事務所(〒094-0003 北海道紋別市弁天町1丁目2-10)

³正会員 博(工)株式会社ソニック(〒190-1295 東京都西多摩郡瑞穂町箱根ヶ崎東松原19-6)

⁴正会員 工博 八戸工業大学大学院教授 環境建設工学科(〒031-8501 八戸市妙大開88-1)

We have conducted surveys of the drift speed, draft depth and other details of sea ice using ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) and IPS (Ice Profiling Sonar) since 2001 in Okhotsk Sea. We have quantitatively analyzed those sea ice data and developed a practical simulation method for ice bottom topography (Kioka et al., 2008). An ultrasonic wave height meter (USW) has been deployed to measure wave height, direction and speed at off Mombetsu by Hokkaido Regional Development Bureau. If the USW can be applied to the sea ice measurement, the costs for the measurement are presumed to be reduced, and constant measurement for a long time can be possible. We statistically compared the ice draft depths by the IPS with those by the USW, and found that the USW was possible for its practical use of the surveys of the draft depth.

Key Words : Sea ice, draft depth, USW, IPS, Ultrasonic waves

1. はじめに

著者等は, 2000 年より, 北海道紋別沖において, ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) と IPS (Ice Profiling Sonar, 氷厚計)を用いて, 流氷・海氷の移動速度, 喫水深などの調査を実施し, それらの定量分析や, 実用的な海氷の下面形状(凹凸)のシミュレーション手法の開発などを行ってきた¹⁾. 他方, 北海道開発局が, 紋別沖に波高・波向, 流速の計測を目的として超音波式波高計(海象計)を常設しており, それを冬期の流氷観測にも活用できれば, 観測に伴うコストが大幅に軽減され, 今後の恒常的な流氷・海氷観測も期待できる.

本研究では, 既報²⁾に続き, 予め海象計付近に設置した IPS によるデータ(海氷喫水深)との比較を行い, 海象計(USW)による流氷喫水深の推定が可能であるかについて概略的に検討した.

2. IPS および USW(海象計)の概要

IPS は, 海氷の喫水深の計測を担っているが, 本機は指向角(1.8°)が小さいこと, サンプルング周期が短い(1Hz)ことが特徴的とされている. IPS は本体から鉛直上方に超音波(430kHz, ビーム幅

1.8°)を発信し, 海氷下面からの反射波の到達時間から距離を計測すると同時に, 内臓の水圧計により水面までの距離を計測する. 海氷の喫水はこの差で求められる. また, 水温および本体の傾斜を内臓センサにより同時に測定しデータを補正する.

海象計(USW)は, (社)海洋調査会と(株)ソニック, および運輸省港湾技術研究所と共同で開発した総合型海象観測装置である. 計測原理は, IPS や ADCP と同じで, 1 台の水中センサで波高・波向・流況等の多項目同時観測ができ, いわば IPS と ADCP を 1 台のセンサとして組み込んだ装置である. 鉛直上向に超音波を発し水位(波高)を計測するセンサ(200kHz, ビーム幅 3°)と, 各測定層の流向, 流速を測定するドップラー式の超音波センサー(500kHz)からなる. USW は, ナウファスでの海象計測に採用されており, 紋別沖を含め, 54 観測地点に設置されている.

3. 検討方法

既報(木岡ら, 2008)と同様に, 流氷の喫水深の経時変化を対象として, 海象計(USW)の流氷観測への適用性を検討した. これには IPS と, USW の水位(波高)計測センサによるデータが対象となる. 両

者の計測原理は基本的には同じであるが、ビーム幅(USW と IPS の半減半角はそれぞれ 3° および 1.8°)、周波数(USW, IPS それぞれ 200,430kHz)のほか、信号処理のアルゴリズムなどが異なる。IPS は海水を計測する目的で開発されている一方、USW は波高計測、つまり水面での反射を捕らえることを想定している(空気-水との境界面での反射強度は大きい)ため、その適用性を十分検討しておく必要がある。改良が必要な場合には(ハード以外)、信号処理のアルゴリズムを改良するか、現状のアルゴリズムのまま出力されたデータ特性を把握して、喫水深の実測値に合うように何らかの補正を施すことが考えられる。IPS も海水喫水深の真値を常に与えるとは限らないが、本研究では、それを実測値(真値)と仮定したうえ、後者による方法を検討した。そのため、まずは現状のアルゴリズムによって得られた USW データと IPS によるデータ(流氷喫水深)を統計的に比較することにより、USW データ(波高)の喫水深への換算方法を検討した。本研究では、2008 年 2-3 月に得られた USW と IPS による流氷データ(USW と IPS は超音波の干渉などを拒けるため 100m 離れている)を分析対象とし、既報²⁾の分析結果を踏まえつつ、新たな検討を加えた。

4. 検討結果

(1) USW と IPS によって得られた流氷喫水深の比較

海象計(USW)データについては、まず、IPS の水温を用いて音速補正し、その超音波水位と圧力水

位との差をとれば、これが海氷の喫水深と考えることができる。データが得られた 2008 年のうち、比較的流氷密接度が大きく、また IPS のデータより喫水深も大きいと判断された 1/28~2/11、2/27-3/7 の期間について検討した。しかし、特に最も喫水深が大きい後者の期間(2/27-3/7)のうち、2/27、2/29-3/4 の USW データが、通信回線断線のため取得できず、期待されていたデータ比較ができなかった。ここで、幾日かの USW および IPS によって得られた流氷喫水深の比較例を図-1 に示す。ただし、IPS (サンプリング周波数 1Hz) と USW (2Hz) をともに 5 秒平均したもので比較している。図より、まず、既報¹⁾²⁾と同様に流氷底面形状は平坦ではなく、数 m の凹凸をもつ変形氷であることが推察される。IPS と USW は互いに約 100m 程度離れており、海氷の底面凹凸のスケール¹⁾を考えると、両者が一致することは期待できないものの、両者の波形のパターンは比較的類似している。後述のように時刻歴にみる海氷の喫水深の大きさは USW の方がやや小さい感があるが、波形の形状(0 を最小値にもつ非対称・非ガウスの波形)が類似していること、時刻歴にみる流氷の喫水深の出現頻度が概ね同程度であり、同じような統計的性質があることが推察される。図-2 には、海氷がほとんどない状態と考えられる海氷喫水深の比較例、さらに図-3 には、海氷が非常に薄いもしくは、シャーベット状の海氷と考えられる場合の比較例を示した。まず、図-2 より流氷がほとんどないと考えられる場合にも、喫水深はほとんど 0 に近い状態で、両者の波形は類似している。ま

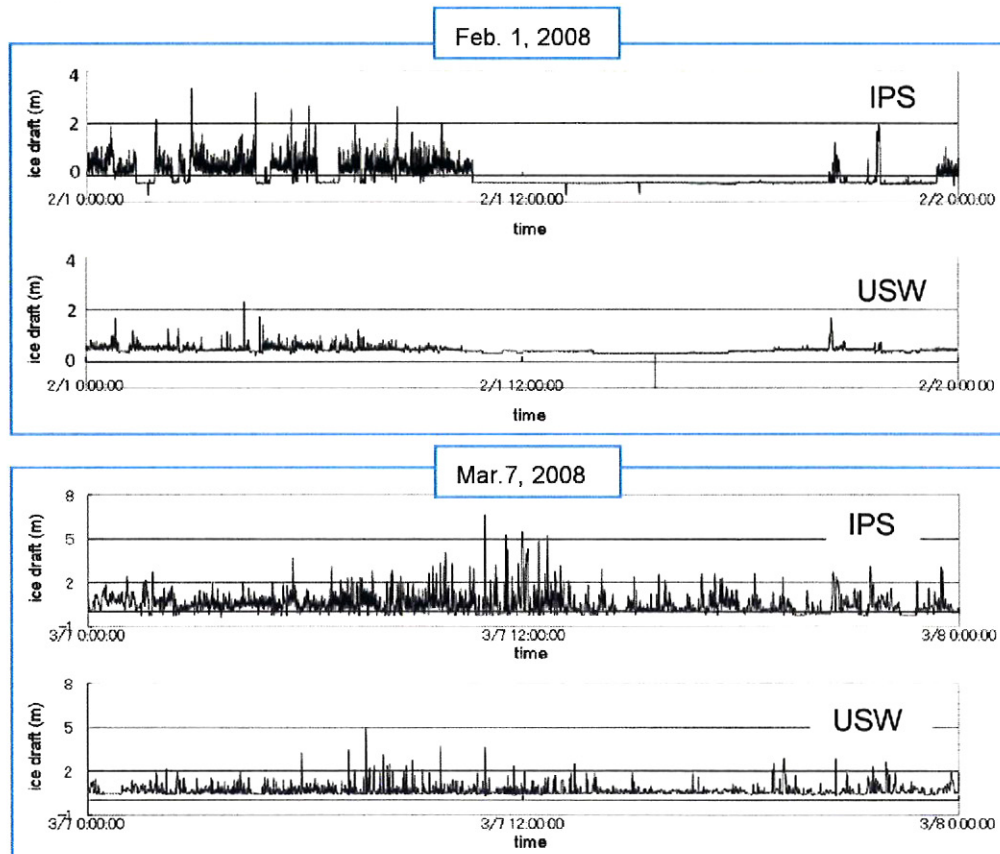


図-1 USWおよびIPSによって得られた流氷喫水深の比較例(2008年)

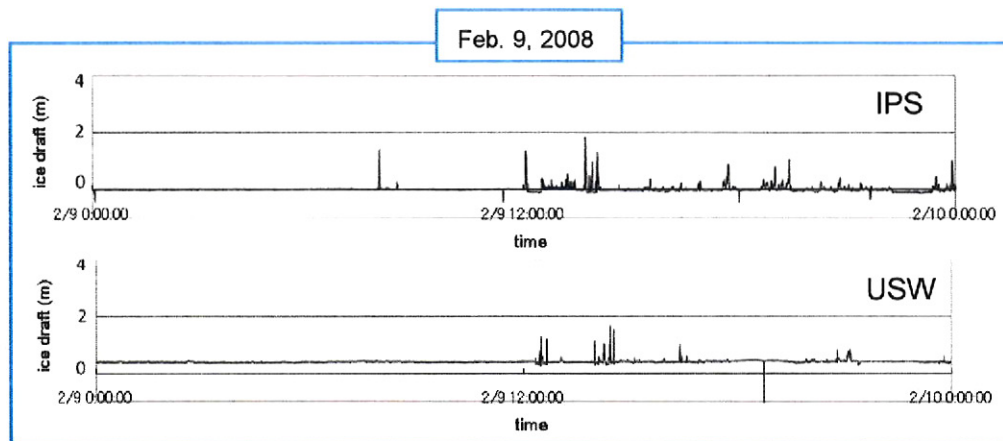


図-2 海氷がほとんどない状態における流氷喫水深の比較例

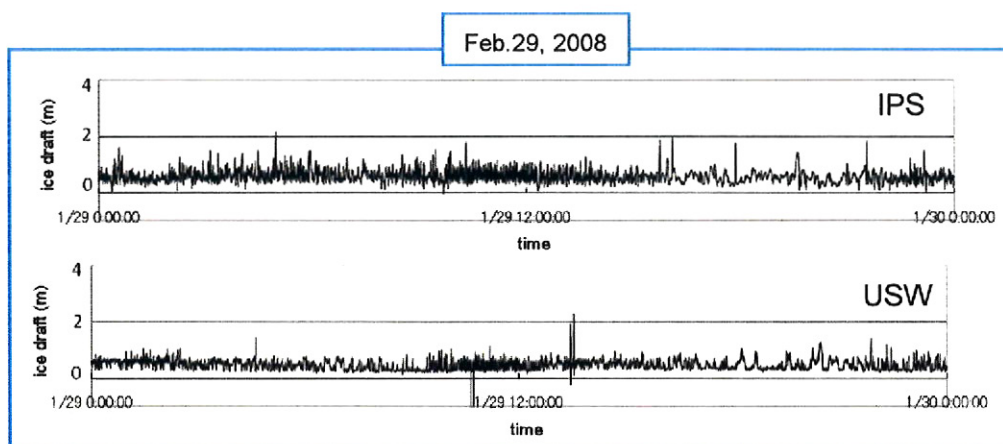


図-3 海氷が非常に薄い、もしくはシャーベット状の海氷と考えられる場合の流氷喫水深の比較例

た、図-3 をみると、これは海氷が非常に薄い場合か、もしくはシャーベット状のものと考えられるが、両者ともに、時間軸に対して対称なノイズに近い波形となっている部分もある。これは、水面からの強い反射も含まれ、複雑なエコーを捕らえていることが推察されるが、両者の波形は類似している。このように、両者の波形は非常に類似しており、IPS を真値とすれば、USW によって海氷喫水深の概略推定が可能であることを示唆しているといえる。

次に両者の類似性を、もう少し定量的に調べてみる。まず、既報²⁾と同様に、喫水深の時系列データをハイパスフィルターを通して低周波成分を取り除いた。これは、図-4 に示すように、概ね、変形氷の keel 部（下面凸部）を抽出することに対応していると考えられる。この場合、図-4 に示すような理想的には Level ice とみなされる母体の海氷厚（あるいは Keel 部以外の平均的な厚さ）を無視しているように見えるが、この厚さが正味の海氷部かどうかは現段階では不明であり、音速補正による観測誤差（流氷がない場合での圧力水位と超音波水位との差）である可能性もある。また通常、Keel 部以外の平均的な厚さよりも keel 部の大きさの方が遥かに大きく、実用的には後者の大きさが分かるだけで十分な場合も多い。また、前者の厚さは

気象条件から概ね推定することができる。以上の理由により、既報と同様に、もとのデータに対してハイパスフィルターを通し、keel 部と見なされる部分について主に調べることにした。

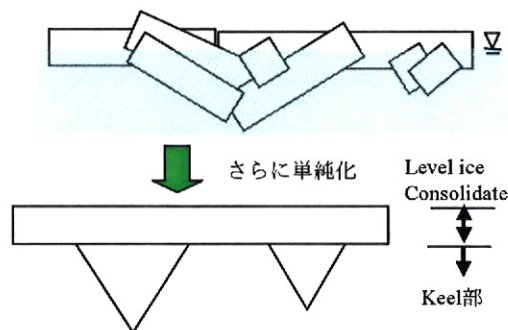


図-4 流氷下面形状の模式図（変形氷）

図-5には、海象計(USW)とIPSによる流氷喫水深（下面凸部）の経時変化の周波数スペクトルの比較例を示した。これらの例は図-1に示したデータに対応したものである。スペクトルの推定にはMEM法を用い、AR次数を50とした。図-1の波形は非ガウス過程、非定常であり、厳密には通常のスペクトル推定法は適用できないが、ここでは、既報²⁾の理由

を根拠として適用した。図-5をみると、両者のスペクトル形状は非常に類似しており、間接的には両者の（正規化された）波形の性質が類似していることを示唆しているものと考えられる。ただ、IPSデータのパワースペクトルの方がUSWよりも大きく、平均パワーが大きい、つまり、凸部の大きさが大きいことが分かる。これは、信号処理アルゴリズムの相違のほか、両者のビーム幅や周波数の相違などに起因する。USWのビーム幅(3°)はIPSのそれ(1.8°)より大きいため、氷下面の凹凸が平均化されて、特に凸部の大きさ（波形の極値、keel長と呼ぶ）がやや過小評価されること、USWの周波数はIPSより低く（IPS:630kHz, USW:200kHz）、その感度がやや劣る事などが挙げられる。

図-6にはUSWとIPSによる海氷下面凸部（Keel部）の累積度数分布を比較した例を示す。これは、次節の方法で抽出したピーク値をkeel長と仮定した場合のものである。ただし、0.5m以上の大きさについて評価している。海氷が等速で動いていない限り、この分布形の本質的な意味合いは薄い、この場合指数形に近い形（あるいは実用的には歪みの大きな対数正規分布とも見なせる）となっており、両者の分布形も概ね類似していることが分かる。一連の考察から、両者による観測値が視覚的にも類似しており、その統計的性質も同等であると思われる。

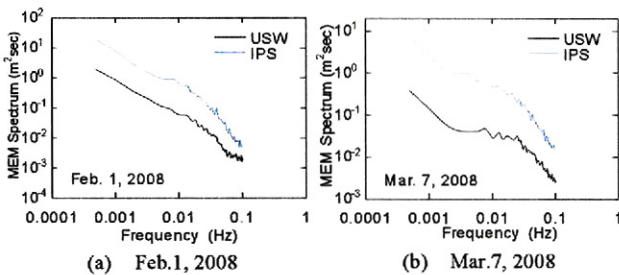


図-5 USWとIPSによる流氷下面凸部の経時変化（図-1に対応）の周波数スペクトルの比較例

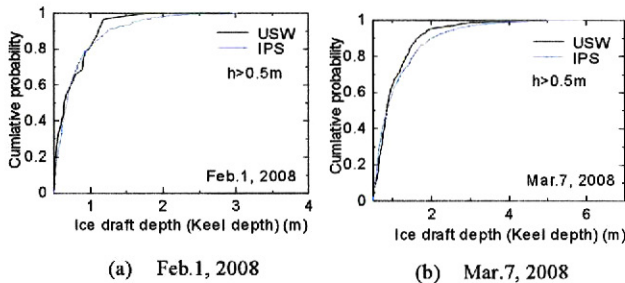


図-6 USWとIPSによる海氷下面凸部の累積度数分布の比較例 (0.5m以上)

(2) USW による流氷喫水深の概略推定法の検討

a) 概略推定の方法

USWから流氷喫水深を概略推定する方法については、まず既報²⁾と同様な方法で検討する。まず、先と同じハイパスフィルタを通した喫水時系列デー

タ（下面凸部を対象）のピーク値(keel長)を抽出し、それを両者互いに大きさ順に並べ替える。そこで、実用上重要となるIPSによる値が1m以上のものを対象として、両者の散布図を書いたのが図-7である。同図には例として、先に例示した2/1, 3/7,それから、対象とした全区間の1/28-2/11, 2/27-3/7（欠損分は除く）について整理したものを例示している。図-7より、USWとIPSによる海氷下面凸部のピーク値は互いにおおよそ直線の関係となっているのが分かる。同時刻で1対1に対応しているという訳ではないが、IPSを真値とすれば、実用的観点から、おおよそ、USWから喫水深を評価できることを示唆している。またその直線の勾配は1よりも大きく、前述のように、IPSデータの方が大きいのが分かる。2008年は比較的流氷喫水深が大きかったが、以上の傾向は、既報²⁾の傾向と同様であった。

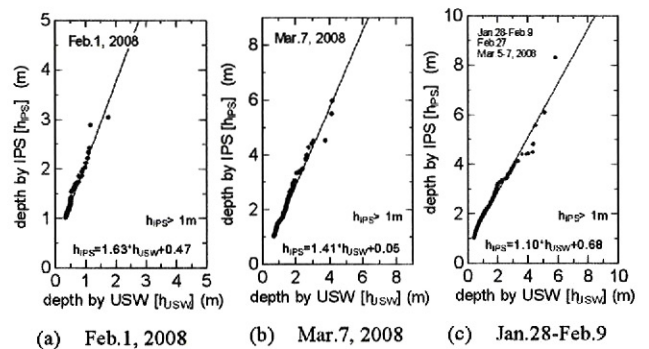


図-7 USWとIPSによる海氷下面凸部のピーク値(Keel長)の比較例（両者を大きさ順に並べ替え、IPSによるピーク値が1m以上のものを抽出して表す）

今、USWとIPSとの間に直線的な関係があると仮定すると、次式に示すように、USWデータ $[h_{USW}]$ から流氷喫水深 $[h]$ を推定する簡略式を仮定できる。

$$\begin{aligned} h &\approx h_{IPS} = h_{IPS0} + h_{IPS}' \\ &= (Kh_{USW0} + h'') + (Kh_{USW}' + h') \\ &= K(h_{USW0} + h_{USW}') + h' + h'' = Kh_{USW} + h''' \end{aligned}$$

ここに、 h_{IPS}' および h_{USW}' は、それぞれハイパスフィルタを通したIPSとUSWによる喫水深、 K はそれらの関係の比例定数、 h'' は誤差量（バイアス）（または図-7のグラフの縦軸方向のシフト量）、 h_{IPS0} および h_{USW0} は、それぞれ無視した母体の海氷厚（keel部以外の平均的な厚さ）のIPSとUSWによる測定値、 h''' は h_{USW0} を h_{IPS0} より推定した場合（同じ K で表されると仮定）の誤差量、である。また、ここでは、IPSを真値と仮定しているが、 h''' はIPS自身の観測誤差も含んだものと考えることができる。

b) 既報データ²⁾も含めた検討結果

図-8には、図-7と同様に、既報の結果(2007年)も

含めたUSWとIPSによる海氷下面凸部のピーク値（Keel長）の比較を示した。既報の結果と比較して、比較的流氷喫水深が大きかった本データの方のK値がやや小さめの感があるが、IPSとUSWとの関係についてはほぼ同様な傾向を示している。ここで、今までに得られたデータについて、K値を推定してみる。このため、まず、本研究で検討した h_{IPS}' と h_{USW}' との関係に戻り、両者の関係を直線と仮定した場合の勾配Kと切片 h' とを1日毎に推定する。ただし、対象としたデータのうち、有効と思われる日数を抜粋した。これらの散布図を図-9に示す。この切片 h' とK値との間に相関性が見られ、 h' の取り方によってK値が異なってくる。図中の直線はデータ数を重みとしたDeming法による回帰直線を表す。この切片 h' の物理的意味は薄い。あくまでも、IPSの値で1m以上のデータを対象とし、さらに両者の関係を直線と仮定して得られたものである。もし小さなピーク値をかなり正確に得られ、解析に含められたら、原点付近に収束することも考えられる（もはや直線性は期待できない）。本研究では、小さなピーク値（Keel長）は、①その物理的意味に乏しい、②観測誤差や解析（統計処理）にともなう誤差の方が大きい事も考えられる、③実用上は数m以上の大きさが対象となり、小さなピーク値を含めた解析は、

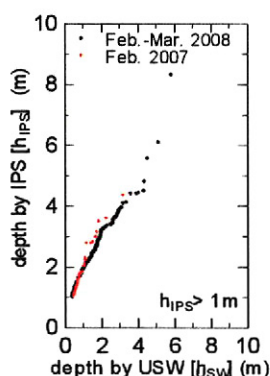


図-8 既報の結果も含めたUSWとIPSによる海氷下面凸部のピーク値(Keel長)の比較

不適切な情報が混入し、実用上大きな喫水深推定の妨げになる可能性がある、などの事情により、予め、小さな値は無視していたわけである。ここで、同図に示したプロットの重心位置を求めると、 $K=1.33$, $h'=0.45$ （データ数で重み付き平均）が得られる。あるいは単に、 $h'=0$ とした場合、 $K=1.69$ が得られる。このように、Kと h' の選

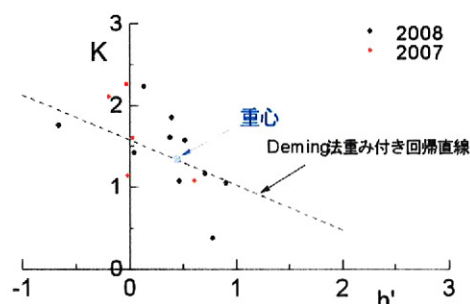


図-9 IPSとUSWデータとの関係を直線と仮定した場合のKと h' との関係（対象としたデータのうち、有効と思われる日数を抜粋、1日毎にK, h' を推定）

び方によって異なり、その推定方法にもまだ課題を残すため、今後さらに多くのデータを収集して再検討する余地がある。しかし、現段階では、「USWデータ（後述の音速補正も考慮した）をK倍し、母体厚の推定値やその他の誤差(h' , h'')等を考慮した値を加えたものが海氷の喫水深になる（適用範囲は、 $(1-h')/K < h_{USW}'$ ）」という概念は適用できそうであり、既設の海象計より流氷喫水深の概略推定が可能であると言える。本研究では、流氷の喫水深を計測しているが、流氷底面の凹凸を推定する場合には、この情報のみで十分である。一方、氷厚を必要とする場合には、アイソスタシーの原理により、また複雑な変形氷の場合には、水面上の厚さと喫水深との比に関する文献が多く見られ^{例えば7)}、それらを参照することにより推定できる。

c) 水温による音速補正の必要性について

音速は水温によっても異なる。IPSの場合には、内蔵されている水温センサで補正しているが、波浪（水面変動量）計測を担うUSWは水温センサが内蔵されていない。とくに海氷底面までの距離計測の場合で、海象計設置地点の水深(52m)のように水深が深くなる場合には、その誤差も大きくなる。また、氷海では氷点下になることも多く、適当な水温（例えば15℃）に仮定した水温による推定値はなお誤差が大きくなる。したがって、何らかの形で水温データを入手するなどの対応が必要である（前項まではIPSに内蔵されている水温データで補正したものを使用）。本項では、まず、水温誤差が及ぼす測定誤差への影響を調べ、その簡易的な対応について検討してみる。既報においても同様な検討を試みたが、本データも含め、再検討を行った。図-10には水温による音速変化の例（Wilson式、塩分濃度を30‰と仮定した場合）を、および、水深52mを測定することを想定した場合、音速1500m/s(15℃の水温)を基準にした場合の測定誤差、を示している。流氷期の水温は-2℃近くまで下がることを考えると、2m程度の誤差が生じ、温度補正が必要であることが分かる。しかし、流氷期の水温を0℃と仮定すればその誤差は小さくなる。例えば、図-11(a)には2008年1-3月における、海象計付近に設置したIPS内蔵の水温センサで測定された水温の経時変化の例を示した。流氷期の水温はおおよそ0℃付近で推移しているのが分かる。さらに水温を0℃と仮定した場合の、図-11(a)に対応した測定誤差（水深52m）の推移を図-11(b)に示す。+は過大評価、-は過小評価を示しているが、測定誤差はおおよそ0.5m以内である。船舶航行の安全確保や氷海構造物の設計では、数mあるいは10mを越えるような大きな海氷の大きさが対象になると考えられること、また、氷質やその形状によっては、IPSを含むあらゆる観測法による推定値によっても不確かさがあることを鑑みれば、0.5m～1m程度の誤差は許容の範囲であ

と思われる。このような観点から、わざわざ水温センサを設置し、データ回収するにはコストがかかるため、仮に水温を 0°C と仮定するのみの方法が考えられる。さらに、上述のような船舶航行の安全や氷海構造物の設計などに寄与することを踏まえ、その誤差が予め安全側となるよう設定できれば、実用上、有効な方法といえる。あるいは、付近の何らかの水温データを参照することもできる。

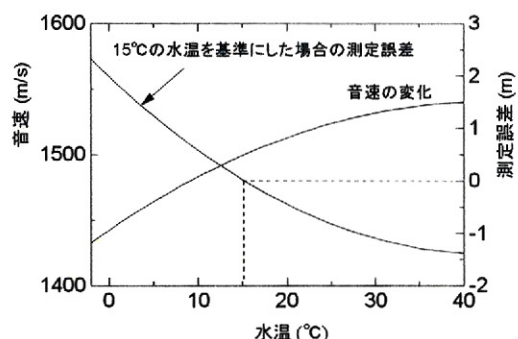


図-10 水温による音速の変化および水深52mを測定することを想定した場合、音速1500m/s (15°Cの水温)を基準にした場合の測定誤差

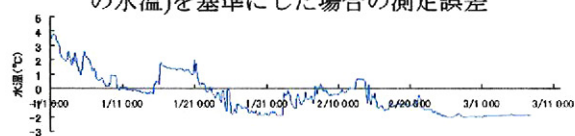


図-11(a) 水温変化の例(IPSによる)(2008年1-3月)

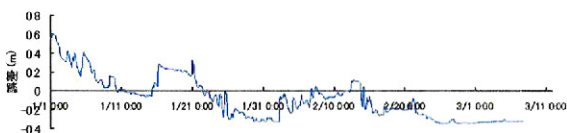


図-11(b) 水温を 0°C と仮定した場合の誤差の例
(水温は図-11(a)に対応)

d) 本研究で得られた概略推定法のまとめ

暫定的ではあるが、本研究で得られたUSW による流氷喫水深の概略推定法を以下にまとめる。

- ① ハイパスフィルタを通した音速補正後の USW データ (h_{usw}') を K 倍した(暫定では 1.33)ものに誤差量 h' (暫定では 0.45m) を加え、母体厚を加えたものが海氷喫水深になる。ただし適用範囲は、 $(1-h')/K < h_{usw}'$ である。
 - 1) 母体厚 (平坦氷) は、元のUSWのデータから h_{usw}' を除去したデータ (h_{usw0}) を K 倍して得るか(h' 考慮)、もしくは、気象条件を用いて熱収支から推定する。あるいは、単にオホーツク海南部の海氷の場合、経験的にせいぜい 0.5m 程度であると考えられるため、この程度を見込む。
 - 2) 音速補正の際は、水温を 0°C と仮定する。その誤差として 0.5m 程度を見込む。
- ② 氷厚を推定する場合には、アイソスタシーの原理により、また複雑な変形氷の場合には、水面上の厚さと喫水部深との比に関する文献^{例えば 3)}、等を参照して、推定することができる。

5. まとめ

- 流氷底面形状は平坦ではなく、数 m の凹凸をもつ変形氷であることが推察された。
- USW による喫水深 (特に凸部の大きさ) の方が、IPS に比べ小さい傾向にあった。これは、信号処理アルゴリズムの相違のほか、両者のビーム幅や周波数の相違などに起因する。USW のビーム幅は IPS より大きいため、凹凸が平均化され、特に凸部の大きさがやや過小評価されること、USW の周波数は IPS より低く、その感度がやや劣る事などが挙げられる。
- しかし、USW と IPS は約 100m 離れており、流氷下面の凹凸のスケールを考えると、両者は一致することは期待できないものの、両者の波形パターンは類似している、つまり、波形の形状 (0 を最小値にもつ非対称・非ガウスの波形) が類似していること、時刻歴にみる流氷の喫水深の出現頻度が概ね同程度であり、同様な統計的性質があることが分かった。
- 既報の結果も踏まえ、特に実用上、重要となる流氷下面の凸部の大きさ (keel 長) は、USW データ (喫水深) を、水温に応じて音速補正し、それをハイパスフィルタに通したものを 1.33 倍して、その他の誤差などを考慮することにより概略推定できることを提案した。
- 水温に応じた音速補正については、水温を 0°C と仮定して補正すればよいことを示した。
- 以上より、既設の海象計を活用した流氷喫水深の概略推定が可能であること確認した。

本研究で検討したデータは未だ 2 か年分であり、その統計処理にも課題が残った。さらに K と h' の選び方にも曖昧さを残した。しかし、本研究では、既設の海象計を活用した流氷喫水深の概略推定が可能であることを示し、低コストで恒常的な流氷観測の実現性があるという明るい見通しを得た。今後もデータ収集を継続し、課題を克服してより実用的な喫水深推定方法の構築に努めたい。さらに、USW のドップラー成分を利用した流氷移動方向・速度などの流氷挙動観測の方法も検討する予定である。

参考文献

- 1) Kioka, S., Yamamoto, Y., Honma, D. and Sakikawa, M. : Analysis and Simulation of Sea Ice Draft Profile on Okhotsk Sea Coast of Hokkaido, Proc 17th International Symposium on Ice, Vol.1, pp191-198, 2004.
- 2) 木岡信治, 山本泰司, 佐藤英喜, 竹内貴弘 : 海象計を用いた海氷喫水深の推定の試み, 寒地技術論文・報告集(CD-ROM), Vol.24, 2008.
- 3) Surkov, G.A. and P.A. Truskov, P.A. : Study of Ice Pressure Ridges and Stamkhi Offshore of Sakhalin, The 10th International Symposium on Okhotsk Sea, Sea ice & Peoples ABSTRACTS, pp.86-92, 199.