

北海道オホーツク海沿岸部における海氷の 底面形状とその分析

ANALYSIS OF UNDERSIDE PROFILE OF SEA ICE ON OKHOTSK SEA COAST
OF HOKKAIDO

山本泰司¹・木岡信治²・本間大輔³・先川光弘⁴・堺茂樹⁵

Yasuji Yamamoto, Shinji KIOKA, Daisuke HONMA, Mitsuhiro SAKIKAWA and Shigeki Sakai.

¹正会員 工修 (独)北海道開発土木研究所港湾研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

²正会員 博(工) (独)北海道開発土木研究所港湾研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

³(独)北海道開発土木研究所港湾研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

⁴正会員 国土交通省北海道開発局港湾建設課 (〒060-8511 札幌市北区北8条西2丁目)

⁵正会員 工博 岩手大学工学部建設環境工学科 (〒020-8551 青森県盛岡市4-3-5)

Sea ice surveys are conducted along the Okhotsk Sea coast of Hokkaido, Japan using a bottom-mounted IPS and ADCP. This paper reports on the analysis of a 180km long "ice draft profile" or "underside profile" of deformed pack ice moving past the mooring site in 2001. The underside profile was not flat and had very large undulations, and the maximum draft during the observation period was 3.6 m. Although the underside profile as a wave profile has non-stationary characteristics as results of *Discrete Wavelet Analysis* and application of *Locally Stationary AR Model*, the normalized power spectrums of the profile in locally stationary span were roughly the same and the mean wavelength was approximately 62 m. In addition, simulation methods for deformed sea ice draft depth and plane unevenness of sea ice bottom using the power spectrum from one-point measurement data as in this measurement are also discussed.

Key Words : Pack Ice, Deformed Ice, Power spectrum, Underside Profile, IPS, ADCP

1. はじめに

近年の極東サハリン大陸棚の石油・天然ガス開発に鑑み、冬期に海氷が存在する北海道オホーツク海における万一の油の流出・漂流に備えた油の拡散・漂流挙動予測およびその効率的な回収方法の確立が急務となっている。また、構造物、とくに海底パイプライン、アスペクト比(構造物の幅と氷厚との比)の小さな構造物、それに近年整備が進められている高天端マウントを付加した環境配慮型の防波堤、などの建造には、海氷との干渉・相互作用を十分考慮しなければならない。海氷の影響を考慮したより実践的な技術開発を行うには、予め実海域における氷象条件を把握することが極めて重要である。このような背景から、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、流氷の移動速度、喫水深などの海氷調査を実施している。海氷の移動特性や喫水深分布など、一部の調査結果についてはすでに報告済みである¹⁾²⁾。本研究では、主として2001年2月に得られた海氷の

断面形状データ(底面形状)の定量分析を行うとともに、それらの結果から、入力情報として上記の技術課題へフィードバックできるような、海氷の喫水分布または底面の凹凸形状を模擬する手法について検討することを主な目的とする。

2. 調査方法

調査地点は北海道紋別市沖約2.4kmの水深-18m地点にドップラー式多層流速計(ADCP, アメリカRD Instrument社製WH-ADCP)およびIPS(カナダASL社製IPS-4)を各1基設置し、観測機器上の海面を通過する海氷の喫水深および移動速度を連続的に観測した。ADCPおよびIPSはともに超音波を使用した計測器であり、互いが発信した超音波の干渉を避けるため約250mの距離をおいて設置した。なお、詳細な観測方法は、山本等(2001)¹⁾、Yamamoto, et al.(2002)²⁾に述べられている。なお、これらの計測器の原理などについては、Belliveau, et al.(1989)³⁾、Birch, et al.(1999)⁴⁾に詳しい。ここで、本調査で実施された調査項目とデータの獲得方法を表-1にまとめる。

表-1 調査項目とデータの取得

項目	機器・型式	測定位置	測定間隔	データ処理
海水喫水	IPS	---	1秒	10秒平均値
海水移動	ADCP	---	10分	10分平均値
海流	ADCP	-6.25m	10分	10分平均値
風向風速	超音波式	+18m	1時間	10分平均値
潮位	フース型	---	1時間	1時間平均値

3. 海氷底面の凹凸特性

(1) 流水の喫水深

図-1は、比較的良好にデータ取得できた、2001年2月8～19日に観測された海氷の見かけ上の移動軌跡である。なお、この図は固定された一地点における海氷の移動方向・速度データから単に座標表示されたものであって、本質的な海氷の移動軌跡を示すものではないが、この期間の海氷はおもにオホーツク海沿岸に沿って南下していたことが推察される²⁾。図-2(a)は、この期間中の移動距離に対する流水喫水深であり、ADCPによって測定した流水の移動速度を積分することにより移動距離をもとめた²⁾。即ちこの図は流水の断面形状と見なせる。また図-2(b)

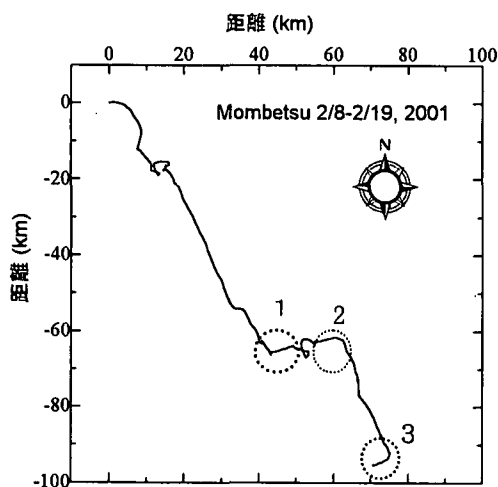


図-1 流水の見かけの移動軌跡

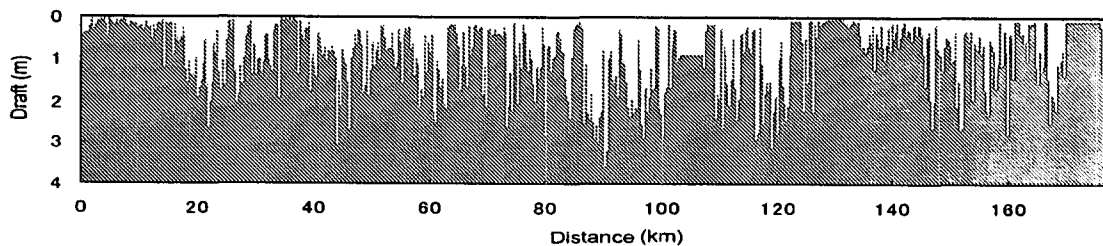


図-2(a) 流水の底面形状 (2001年2/8- 2/19) [Yamamoto. et al., 2002]

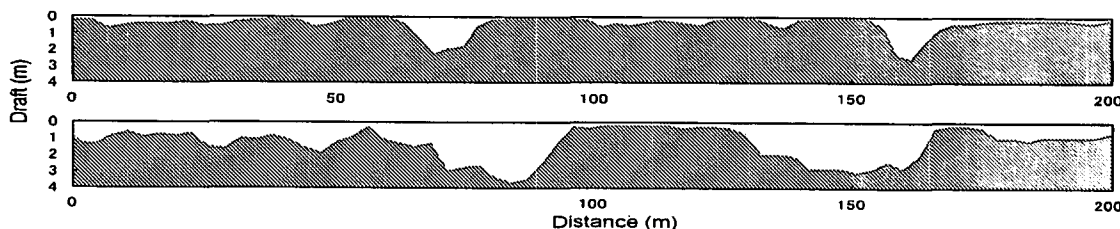


図-2(b) 流水の底面形状 (2月12日9:00頃 (上) 及び12:00頃 (右) における各200m区間を抜粋)

は、200m区間を抜粋した拡大例であり、海氷底面は平坦ではなく、かなり凸凹していることが分かる。観測期間中の最大喫水は3.6mであり、2月12日に観測された。また2000年2月の観測では最大6mに達する喫水も記録されており⁵⁾、さらに、Fukamach,et.al.(2002)⁶⁾は著者らと同じ計測法で、1999年3月6～10日の期間で北海道湧別沖の水深60mにおいて、17mにおよぶ喫水を観測している。これは、海氷の相互作用によって破壊した氷の堆積やラフティング(乗り上げ)等によって形成したもので変形氷と呼ばれる。このように、海氷の南限海域である我が国北海道オホーツク海沿岸部でも比較的大きな喫水をもつ変形氷が確認された。これらの大きな氷塊による海底掘削現象、構造物・船舶との干渉問題、それに油流出事故時における流出拡散予測・回収には、この流水喫水深(氷厚)や底面形状(凹凸)の情報は極めて重要である。特に後者の流水底面における油の拡散予測のためのシミュレーションを実施する場合など、あらかじめ氷の底面形状(凹凸)の設定・模擬が必要である。本節では、凹凸の非定常性を考慮した定量分析を実施し、その知見を用いて、喫水深・底面形状(凹凸)を模擬する手法について検討する。

(2) 解析対象の選択と底面凹凸の非定常性

凹凸を波形と見なした時、それが非定常性を有しているかを判定することは重要である。非定常性を考慮に入れるかは、対象とするスケールによっても異なり、流水底面における流出油の拡散の計算領域(例えば数kmのオーダー)など、対象とするスケールが全データ長に比べ十分小さいと考えられる場合、非定常性を考慮する必要があるものと考えられる。また、本来、波形特性の方向依存性や、開水面(あるいは平坦氷)と見なされる領域も考慮に入れることが望ましいが、現段階では正確に認識・分析に至るだけの情報に乏しいことから、本研究では、まずは、卓越している移動方向(南東)の波形のうち、マクロスケールな凹凸を有している領域を解析対象とした。すなわち、海氷の卓越移動方向に概ね直角方向

とみなされる領域や回転が生じているとみなされる領域を対象外とし、また、全データを後に示す局所定常ARモデルに用いる基本スパン(1200m)に分割したとき、各スパンにおける平均喫水深が10cm未満に相当する区間は開水面とみなして対象外とした。

(3) 離散ウェーブレット変換による分析

ウェーブレット解析より、喫水データの、時間(距離)一周波数(波数)解析を行った。このアルゴリズムの詳細については省略するが、この概念について簡単に紹介しておく。

ウェーブレット $\Psi(x)$ は信号 $f(x)$ の部分を切り出す単位で、ウェーブレット変換はこの単位で切り出した信号各部の大きさを示し、ウェーブレットと信号 $f(x)$ のたたき込み積分で、式(1)で定義される。

$$W_{\Psi}f(b,a) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{|a|}} \Psi\left(\frac{x-b}{a}\right) f(x) dx \quad (1)$$

図-3に示すように、マザーウェーブレットとよばれる関数をトランスレート(平行移動: b)し、あるいはスケール(伸縮: a)し、もとの関数にどれだけ、似ているかを調べるものといえる。ここに、 b, a は、それぞれ時間軸上(b)における位置と、その部分の局所的な周波数($1/a$)に対応する。

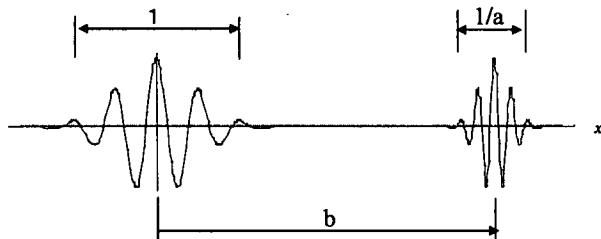


図-3 マザーウェーブレットとトランスレート

一方、離散ウェーブレット変換 $d_k^{(j)}$ は、通常、整数 j, k によって $(b, 1/a) = (2^j k, 2^j)$ と離散化され、(1)式は、次式のように表される。

$$d_k^{(j)} = W_{\Psi}f(b,a) = 2^j \int_{-\infty}^{\infty} \Psi(2^j x - k) f(x) dx \quad (2)$$

実際には、スケール関数が満足するトゥー・スケール関係からウェーブレットや、「分解アルゴリズム」などが導かれ、式(2)はそのアルゴリズムからレベル j ごとに順次計算されていく。

ここでは4階Bスプラインをスケール関数に選び、そのマザーウェーブレットを図-4に示す。この場合の $d_k^{(j)}$ の計算結果を図-5に示す。 j はレベルであり、これが小さくなるにつれ、低周波成分のエネルギーを示しており、 $j=0$ はもとの信号(喫水データ)を表している。また横軸は距離を表す。またこの時、波数 k で表すと、ナイキスト周波数 k_N を

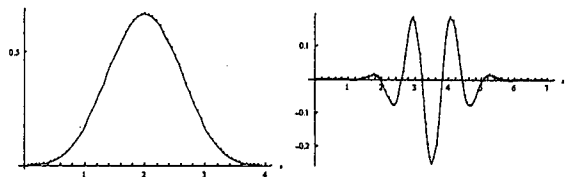


図-4 用いたスケール関数(4階Bスプライン)(左図)とマザーウェーブレット(右図)

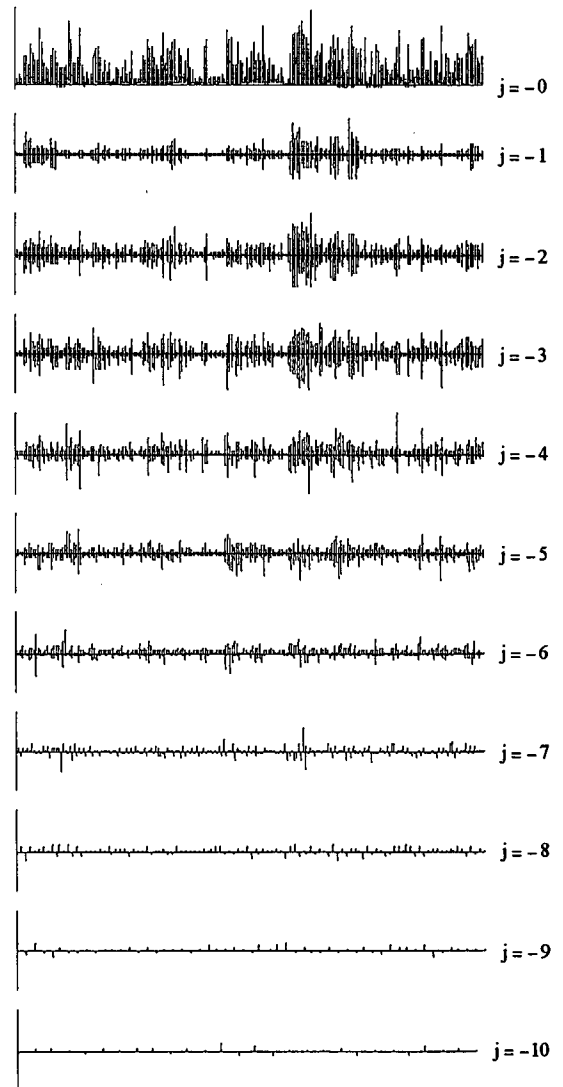


図-5 ウェーブレット変換による喫水深の時間周波数解析

用いて、 $k=2^j k_N$ と表される。この場合 k_N は0.167(cycle/m)である。この図より、とくに、レベル-1~-5程度、この場合、波長にして、概ね12mから192m程度のエネルギーをより多く含んでいるように見える。また、時間軸すなわち距離に沿っていえば、強弱があり、基本的には非定常性があると考えられ、前述したように、対象とするスケールに応じては、この非定常性を考慮する必要があるものと思われる。しかしながら、距離軸に沿って、各 j レベルことのエネルギー分布の偏りはなく、各時間軸上での波数レベルのエネルギーはおおむね同じような比率で含まれている。すなわち、局所的にみた波形はその平均パワー(分散)は異なるが、同じような周波

数特性をもっていると考えられる。すなわち、実用的には、基本となるスペクトルを用意しておき、一方で、距離（時間）領域でそのパワーの変化パターンなどを調べることが考えられる。

本項では、ウェーブレット変換を用いて波形のもつ性質を、距離（時間）と（周）波数の両面から視覚的に捕らえたが、これを別の手法を用いて定量化してみる。

(4) 局所定常ARモデルによる分析

非定常性を考慮する解析手法のひとつに、局所定常ARモデルの適用が考えられる。局所定常ARモデルとは予め時間（距離）軸に小さな基本スパン（ここでは1.2kmとした）で分割し、それらの各基本スパンに自己回帰（AR）モデル（MEM法と本質的には同じアルゴリズム）を順次適用していき、それから計算される赤池情報基準量（AIC）で判定して、類似する各基本スパンを併合していく手法である。ただし、各基本スパンにおける波形の定常性を仮定している。ゆえに各基本スパンまたは併合されたスパンを定常区間とみなす。ここで局所定常ARモデルを適用した場合の解析結果を図-6に示す。横軸は波数 k (cycle/m) と距離 (km) であり、縦軸は喫水深の分散（スペクトルの0次のモーメント）で除して正規化された波数スペクトルである。なお、この場合、定常区間は66区間である。図より、定常と見なされる各区間における正規化スペクトルは、概ね類似しているものと見なせる。即ち、実用的な観点からは、各区間における平均パワー（喫水深の分散）は異なるが、同様なスペクトル特性があり、その正規化されたスペクトルは同一と仮定できる。これは、前項のウェーブレット解析と概ね同様な結果であることを示している。一方、この正規化されたスペクトルと分散との関係についても調べたが、有意な関係は見られなかった。したがって、実用的には代表的な正規化スペクトルを推定するとともに、分散の頻度、範囲などを推定しておけばよく、極めて単純な取り扱いができる可能性がある。その代表的な正規化スペクトルを各定常区間の正規化されたスペクトルのアンサンブル平均とし、以下、代表正規化スペクトルとよぶことにする（図-8参照）。なお、このスペクトルは波数の-2乗に比例し、平均波長は62mであった。ここで、図-7に各区間における波数スペクトル（正規化ではない）と、図-8の代表正規化スペクトルに各定常区間の分散の最大値と最小値を乗じたスペクトル（上下の太線）を示す。図より、各定常区間のスペクトル（正規化ではない）はある幅をもってばらついてはいるが曲線形状は概ね類似（平行）であることが分かる。述べたように、あるいは図-6からも推察されるように、そのスペクトルを分散で除して正規化すると、そのバラツキ幅は大きく減少する。また、代表正規化スペクトルに各定常区間の分散の最大・最小を乗じた図中の太線は、もとのスペクトルの範囲をカバーしていることから、上

記のアイデアは妥当性があるものと思われる。

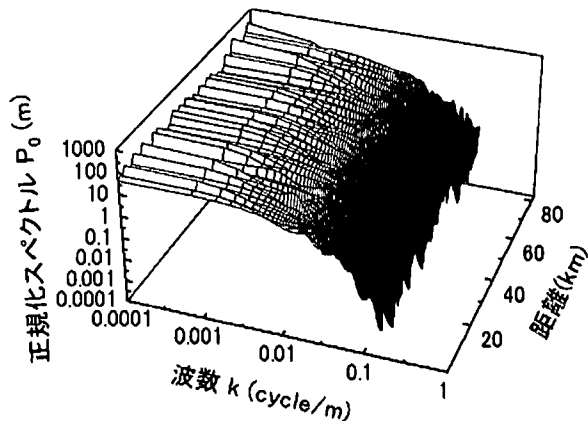


図-6 局所定常ARモデルによる各定常スパンにおける正規化スペクトル

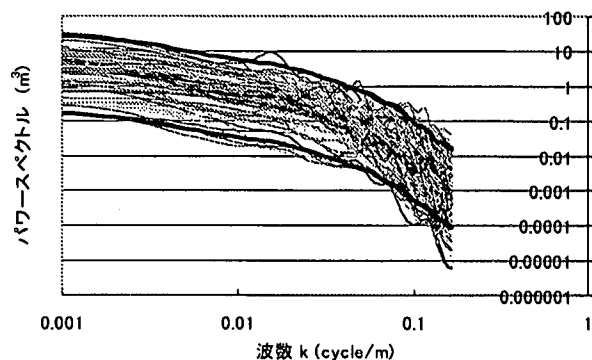


図-7 代表正規化スペクトルによる各定常区間における波数スペクトルの範囲の検証

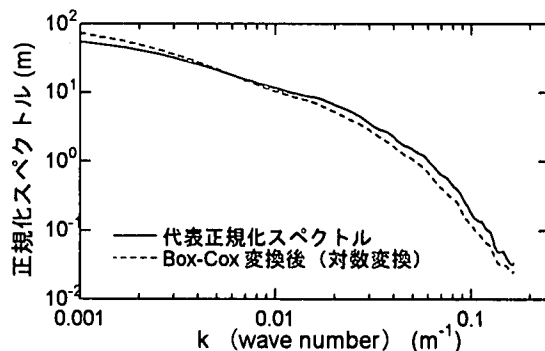


図-8 代表正規化スペクトルと波形に対数変換を施した代表正規化スペクトル

しかしながら、上記の議論は暗にデータの正規性（ガウス過程）を仮定していた。実際にはこれと異なり、かなり歪んだ分布となっており、種々の統計的推定に上記のスペクトルをそのまま適用することは適切ではない。とくに、あとに示す氷の底面形状・凹凸の模擬にスペクトルを用いる場合は何らかの工夫、あるいは別の解析手法の適用が必要であると考えられる。非ガウス型モデルなど様々な手法が提案されているが、ここではデータ変換により、できるだけ正規性に近づける試みをした。対数変換を

含む一般のデータ変換として,Box-Cox変換

$$z_n = \begin{cases} \lambda^{-1}(y_n^\lambda - 1) & \lambda \neq 0 \\ \log y_n & \lambda = 0 \end{cases} \quad (3)$$

が知られている。λはパラメータであり、変換後のデータに正規分布をあてはめた時の赤池情報基準(AIC)を最小となるよう選ぶ。実際適用すると、λ=-0.1となったが、実用的にはλ=0とみなし、単に対数変換を採用することとした。対数変換後、先にのべた方法で解析し、その代表正規化スペクトルを図-8に示した。前のスペクトルと比較して大きくは異なるが、やや低周波側に推移している。なお、このスペクトルは前の結果と同様に波数の-2乗に比例し、平均波長は81mであった。また、前述した「各区間における平均パワーは異なるが、その正規化されたスペクトルは同一とみなせる」ことを含む、図-6や図-7に示したような傾向特性など、全く同様な結果が得られた。

4. 喫水深と底面形状(凹凸)の模擬

ここでは3.(4)で得られた知見を利用して、喫水深や底面形状(凹凸)を模擬する手法について検討する。

(1) 1次元の場合

これには様々な方法があるが、ここでは、フーリエ成分波の重ね合わせによる方法、または線形応答系の入出力の関係を利用し、次式で計算した。

$$h(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \exp[i(kx + \theta(k))] \sqrt{S(k)} dk \quad (4)$$

この式は波のフーリエ変換とスペクトルの定義により、直接得られるものであるが、計算上はこれを離散化し、位相θ(k)は各波数kにおける乱数で与えた。実際の計算では、上述したよう、Box-Cox変換の1種である波形の対数変換をとってそのスペクトル

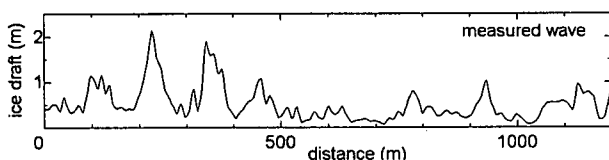


図-9(a) 実測波形の一例(1200m区間)

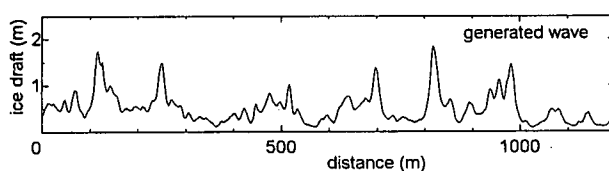


図-9(b) 対応する模擬波形の一例(1200m区間)

ルを用いて計算し、最終的に逆変換(exp())を施した。このメリットは、その対数はおおむねガウス過程と見なされること、最終のアウトプットは非負であることによる。計算例を図-9(a)(b)に示す。図-9(a)はある定常区間の実測波形の一例、図-9(b)はその対応する模擬波形である。なお計算には、代表される正規化スペクトルに、図-9(a)の区間の分散を乗じたスペクトルを用いた。両図より、分布の歪を再現しており、視覚的にも再現性が良いものと考えられる。

(2) 二次元の場合

一方、応用面においては、平面的な底面形状の設定が必要となる場合が多い。先と同様な考え方で、平面的な波形の模擬は、二重フーリエ変換より、二次元スペクトルS(k₁,k₂)を用いて、

$$h(x_1, x_2) = \iint_{-\infty}^{\infty} \exp[i(\mathbf{k}\mathbf{x} + \theta(k_1, k_2))] \sqrt{S(k_1, k_2)} dk_1 dk_2 \quad (5)$$

ここに位相θ(k₁,k₂)は波数k₁,k₂に応じた乱数である。しかしながら、本観測では、1点計測であるから、むしろ二次元スペクトルS(k₁,k₂)は未知であり、このような試みは、困難であるが、ここでは、スペクトルは等方的、即ち海氷の移動方向に直角方向のスペクトルも等しいものと仮定して、シミュレーションを試みた。ここで、一例として300m四方において模擬した波形を図-10(a)に示す。

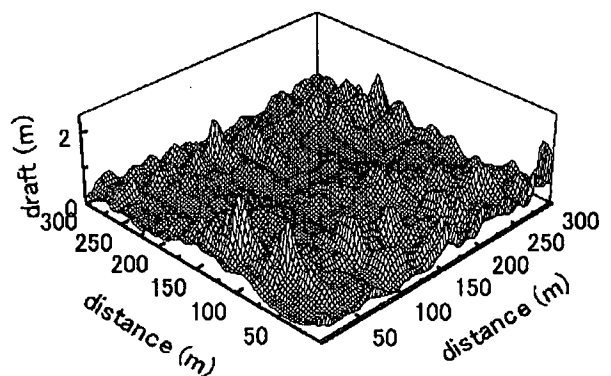


図-10(a) 平面的な模擬波形(300m区間)
(スペクトル特性は等方的と仮定)

一方、前述のように、主に氷の移動は南東に卓越している可能性がある。このような複雑な底面形状はもともとラフティングすなわち氷相互の乗り上げ、破壊によって生じていると考えられるから、特に海氷の主な移動方向に対して直角方向すなわち波形の奥行きスペクトルは必ずしも同一であるとは言えない。氷脈として、長い場合には、数百mから、数kmまで連続している場合も考えられ、より長周期変動である可能性がある。述べた様に、本研究では主な移動方向(南東方向)における断面形状のみを

対象として取り扱ったが、本観測データにおいて南東方向に直角方向に近いと思われるデータが僅かではあるが認められた。例として、図-1の1-丸印で囲んだ領域の拡大図と、それに対応する断面形状を、

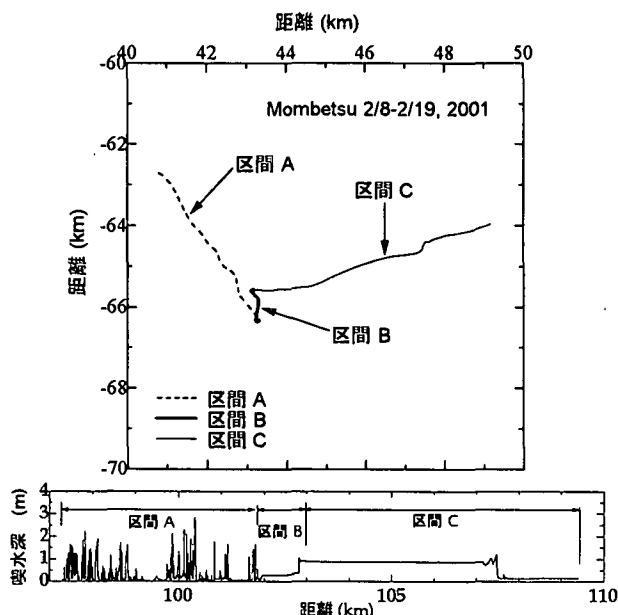


図-11 流氷の主な移動方向の変化区間（図-1の1-丸の拡大部）とその部分に対応する流氷喫水深

図-11に示した。区間Aは南東方向、区間Cはそれに概ね直角な方向、区間Bは遷移領域である。

図より、この場合、波形特性の変化は、移動方向の変化に対応している。南東方向の波形特性は区間Aや図-9(a)に代表されるが、直角方向である区間Cの波形は明らかに異なっており、この場合、平坦に近い形状となっている。直角方向を含む他の区間（図-1の2,3-丸印）についても同様な試みをしたが、概ね同様な傾向を示した。この、直角方向の断面形状は、標本も少なく、現段階では、氷脈方向に沿ったものなのか、平坦な氷/開水面を表しているのか、あるいは偶然の異常値かは判別できないが、波形特性が流氷の移動方向に依存している可能性があることを示唆している。今後は多点観測やマルチビーム方式、あるいはそれらを潜水艇に装備するなど、何らかの方法で、とくに移動方向が卓越している場合におけるその直角方向の喫水深あるいは面的な底面形状の観測が望まれる。

5. まとめ

本研究は、北海道オホーツク沿岸における海氷下での流出油の拡散（拡がり）・漂流予測や海氷と構造物の干渉による氷荷重推定等にとって必要な入力情報の整備に鑑み、流氷の喫水深・底面（凹凸）形状についての定量分析を実施するとともに、それらを模擬する手法について検討した。本研究で得られ

た結果をまとめると以下のようである。

- ① 得られた観測データ（距離-喫水深）において、離散ウェーブレット変換による距離一波数解析および、局所定常ARモデルを適用した結果、対象とするスケールに応じて、非定常的性質を考慮すべきことを確認した。しかし、距離毎（各区間）の平均パワー（喫水深の分散）は異なるが、同様なスペクトル特性があり、さらに、局所的に定常と見なされる各区間において正規化されたスペクトルは、概ね等しいと見なせ、実用的には単純化できる可能性を示した。
- ② ①の結果を受けて、代表的な正規化スペクトル密度の推定ができ、別途、平均パワーの頻度分布・範囲を考慮することにより、非定常的性質に対応できることを提案した。
- ③ その代表的な正規化スペクトルより、適時、平均パワーを考慮し、1次元的な断面形状を模擬した結果、実測値の波形特性を再現しており、その妥当性を示した。また、1点計測データから平面的な凹凸性（底面形状）を模擬する手法も示した。
- ④ 流氷が一方向に卓越して移動していると考えられる場合には、その断面形状は等方的であるとは限らないことを確認した。

今後の課題としては、特に④から、何らかの方法で他方向の断面形状あるいは面的な底面形状の情報収集が望まれる。また同時に、変形氷の発達・成長という観点から、さらに長期期間のデータ収集、多年にわたる観測を実施していく予定である。

参考文献

- 1) 山本, 先川, 本間, 梅沢: 「オホーツク海沿岸における流氷形状・移動状況の現地観測」海洋開発論文集Vol. 18, pp. 779-784, 2002.
- 2) YAMAMOTO, Y., SAKIKAWA, M., HONMA, D. and KIOKA, S.: Underside profile and drift characteristics of sea ice on the Japanese Coast of Okhotsk Sea, *Proc. of the 16th International Symposium on Ice*, Vol. II, pp. 399-406, 2002.
- 3) Belliveau, D.J., Bugden, G.L. and Melrose, S.G.K.: Measurement of sea ice motion using bottom mounted Acoustic Doppler Current Profilers, *Sea Technology*, 1989.
- 4) Birch, R., Fissel, D., Melling, H., Vaudrey, K., Schaudt, K., Heidemann, J. and Lamb, W.: Ice Profiling Sonar, *Sea Technology-Article on Sahalin Ice Project*, 1999.
- 5) Hayakawa, T., Yamamoto, Y., Umezawa, N.: Characteristics of Ice Thickness on the Japanese Coast of the Okhotsk Sea, *Proc. of the 16th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice*, pp. 265-269, 2000.
- 6) Fukamachi Y., Mizuta G., Ohshima K. I., Aota M. and Wakatsuchi M.: Mooring Measurement of Ice Thickness off Yubetu, Hokkaido, *Proc. of the International Symposium on Atmosphere-Ocean- Cryosphere, Interaction in the Sea of Okhotsk and the Surrounding Environment*, edited by M. Wakatsuchi and T. Hara, Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, pp. 32-33, 2001.