

氷盤群下の波浪変形特性に関する実験

片山潤之介* ・ 劉 曉 東** ・ 笹 本 誠***
金田成雄**** ・ 泉 山 耕***** ・ 堺 茂 樹*****

1. 緒 言

北海道のオホーツク海沿岸には毎年流水が襲来し、時には養殖施設の損傷や海岸浸食などの被害をもたらす。氷塊が波浪と共に衝突する際に発生する衝撃力は、潮汐や風などに起因する一般的な水力に比べて強大なものとなることから、氷海域に於ける海岸構造物に対する外力を評価する上で、波浪とそれに伴う氷塊の運動を予測する必要がある。そのためには氷海域を伝播する間の波浪変形特性の解明が必要である。また、これは近年注目されている北極海航路を航行する船舶への航行支援情報としても重要である。

Liu et al. (1989) はラブラドル海に於いて、飛行機に搭載した合成開口レーダー、海上のブイ及び氷盤に設置した加速度計による海象観測を行い、レーダーに現れる波長とブイによって計測された海面変動の周期との関係が、連続弾性平板下の波動理論による分散関係とほぼ一致していることを報告している。しかし、氷盤と開水域が混在し、連続体として運動してはいない氷盤群下での分散関係が連続弾性平板下での理論解と一致することはむしろ不自然といえ、詳細な検討が必要であろう。

また、氷盤群下の波浪のエネルギー減衰に関しては、Wadhams (1975) がニューファンドランドの東海岸沖で行った飛行機に搭載したレーザと赤外線スキャナーによる海面変動と氷況（大きさと海面被覆率）の観測、Wadhams (1978) のスピッツベルゲン周辺での潜水艦に搭載した音響探査機による氷盤変動の観測、Squire and Moore (1980) がベーリング海において実施した、氷盤に設置した加速度計による氷盤変動の観測など、多くの現地観測が行われている。これらの現地観測より、波浪の各周波数成分のエネルギーは氷盤群下での進行距離と共に指数的に減少し、その減衰係数は周波数のべき乗に比例しており、その関係は気象（主に、風速）、氷況（氷盤

の厚さと大きさ、被覆率など）に依存していることが明らかとなっているが、減衰率に対するこれらの要素の影響を定量的に評価するには至っていない。

上記の要素のうち、被覆率に関しては、浅川ら (1989) のパラフィンを用いた実験があり、Wadhams (1975) の観測結果と同一の傾向を示している。また、風の影響に関しては、氷盤群内での風波の発生・発達機構との関連で議論する必要があるが、笹島ら (1996) の氷盤群内での波浪スペクトル特性の検討を発展させることにより可能となるであろう。一方、氷盤の厚さと大きさの影響に関しては、これまでほとんど検討されていない。

本研究では、氷盤群下での波浪の分散関係及びエネルギー減衰に対する氷盤の大きさの影響を検討する。また、規則波と不規則波の実験を行い、両者の比較により不規則波の周波数成分を規則波として扱うことの妥当性を検討する。

2. 実験装置及び実験方法

実験は長さ 26 m、幅 0.8 m、深さ 1 m の鋼製造水路を用いて行った。模型氷として、厚さ 5 mm のポリエチレン板を使用した。ポリエチレンの比重は 0.914 であり、氷とほぼ同一の値である。氷盤の長さは 10, 2, 1, 0.5, 0.25 m の 5 種類とし、いずれの場合も水路中央部の 10 m がポリエチレン板によって覆われている。なお、市販のポリエチレン板の長さが 2 m であるため、5 枚の板を接続して 10 m の模型を作成した。

開水域での水位変動を 2 組の容量線式波高計により測定し、入射波成分と反射波成分とに分離した。氷盤の鉛直変位は超音波式変位計を用いて約 60 点で測定し、これを氷盤下での波形として解析した。規則波の実験では、周期は 0.8~1.6 秒の 5 種類、波形勾配は 0.01~0.03 の 3 種類として、氷盤域へ進入する際の波高変化、氷盤域内での波高減衰及び波速を測定した。不規則波の実験では、JONSWAP 型の不規則波を造波させ、サンプリングタイム 0.01 秒で記録した 8192 個のデータをスペクトル解析した。実験条件は、有義波の諸元を規則波実験での値に対応させた。

以下では、波速に関する検討では全ての氷盤長での結

* 学生会員 岩手大学大学院 工学研究科
** 学生会員 工修 岩手大学大学院 工学研究科
*** 正 会 員 岩手大学技官 工学部建設環境工学科
**** 運輸省船舶技術研究所水海技術部 研究官
***** 正 会 員 工修 運輸省船舶技術研究所水海技術部 主任研究官
***** 正 会 員 工博 岩手大学助教授 工学部建設環境工学科

果が用いられるのに対し、波高に関しては氷盤長が10, 2, 1 m の場合のみを用いる。その理由は、超音波式変位計を用いて鉛直変位を測定する際、氷盤が冠水すると測定できず、氷盤長が短い場合に測定点の冠水が頻繁に生じるため、波高測定を空間的に連続して行うことができないためである。なお、波速に関しては、氷盤長が長い場合には全測点での平均値を用いているが、短い場合には計測出来た測点での値を平均しており、氷盤が長い場合に比べて精度が低い可能性はあるが、氷盤群下の平均的な波速を求めることは出来る。

3. 氷盤群下での規則波の変形特性

3.1 氷盤群下での波高

図-1 は氷盤長が10 m の場合の開水域及び氷盤下での波高変化を示している。氷盤下へ進入した直後に波高は大きく減小し、氷盤下での波高はいくぶん振動しながら、平均的には指数的に減少している。このような波高変化に現れる振動の要因は、氷盤の規模及び物性で決定される固有の振動であるのか、あるいは2 m の板を接続して作成したために2 m 毎の振動が現れているのかのいずれかであると考えられる。そこで、弾性浮体の波浪応答に関する境界要素と有限要素の接続解法(劉・堺, 1996)を用いて氷盤下での波高を計算したところ、数値計算には減衰項が含まれていないため、波高の絶対値には違いがあるが、振動の様子はほぼ一致しており、10 m の氷盤下での波高の振動はその作成方法によるものではなく、固有振動によるものであることが分かった。

図-2 は氷盤長が2 m の場合であるが、図-1 と同様に波高の振動が見られる。しかし、この場合の振動は上記とは異なった要因によると考えられる。つまり、波高が大きくなる箇所は常に各氷盤の両端近傍にあることから、各氷盤の端の運動はその中央に比べて自由であるために両端での波高が大きくなったと考えられる。

図-3 は氷盤長が1 m の場合であり、図-2 と同様に氷盤の両端近傍での波高が大きく、氷盤長が短いため振動の間隔が短くなっている。

3.2 氷盤群下へ進入する際の波高変化

図-1~3 に示したように、開水域から氷盤群下へ進入する際に波高は大きく変化する。この波高変化に対する周期及び氷盤長の影響をまとめたのが図-4 である。縦軸は氷盤群下へ進入した直後の波高と開水域での波高の比であり、開水域での波高には氷盤からの反射を除いた伝達波高を用いてある。図中の白抜き記号は波形勾配毎の平均値を表しており、黒塗り記号は全ての波形勾配を含む氷盤長毎の平均を意味している。いずれの氷盤長に於いても、波高比は周期と共に小さくなっている。周期が短い場合に、波高比は幾分変動するが、全体的には氷

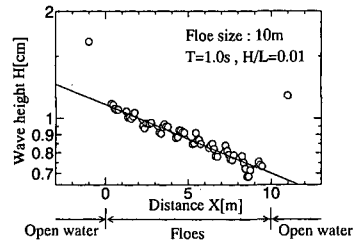


図-1 氷盤群下での波高 (氷盤長 10 m)

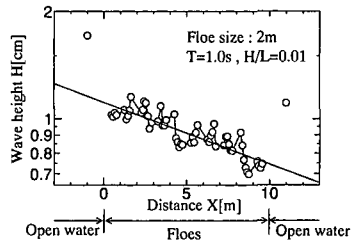


図-2 氷盤群下での波高 (氷盤長 2 m)

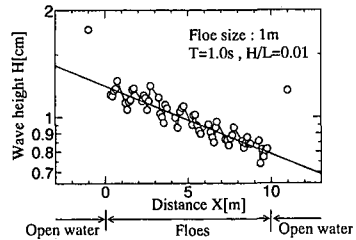


図-3 氷盤群下での波高 (氷盤長 1 m)

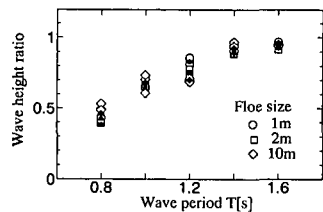


図-4 氷盤群下へ進入する際の波高変化に対する周期及び氷盤長の影響

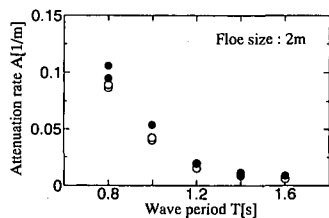


図-5 波高減衰率と周期の関係 (氷盤長 2 m)

盤長による顕著な相違は見られず、氷盤群下へ進入する際の波高変化は周期のみに依存するといえる。

3.3 氷盤群下での波高減衰

3.1で述べたように、氷盤群下では波高は指数的に減衰する。そこで、この減衰を、

$$\frac{H}{H_e} = \exp(-Ax) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 H ：波高、 H_e ：氷盤群端での波高

A ：減衰率、 x ：進行距離

と表現し、式中の減衰率 A の特性を検討する。図-5は氷盤長が2mの場合の減衰率と周期の関係を示したものであり、図中の黒塗り記号はラフティング（氷盤が相互に重なり合った状態）が生じたことを、また白抜き記号はそうでないことを意味している。短周期波ほど減衰率は大きく、ラフティングが生じると約10%ほど減衰率は増加する。図-6は減衰率と周期の関係に対する氷盤長の影響を示したものであるが、氷盤長による系統的な違いは見られないことから、減衰率は氷盤長には依存していないと判断できる。

Wadhams (1975) はニューファンドランドでの観測から、減衰率と周波数の間に、

$$A = K \cdot f^n \quad \dots\dots\dots (2)$$

の関係があることを報告している。そこで、上式を用いて回帰曲線を求めた結果が図中の曲線である。周期が1.2秒でのばらつきが大きいのが、全体的にはよく近似されている。ここで求められた係数は、堺ら(1996)が行った氷盤長10mの結果と極めてよく一致している。しかし、上記の研究では式(2)中の係数は氷厚に依存することが示されていることから、氷盤群下の減衰に関しても氷盤の厚さが影響する可能性が大きく、今後の検討が必要である。

3.4 氷盤のラフティングの発生限界

本実験では、造波開始後観測点の全体がほぼ定常になったと思われる時点からの5波を対象として解析している。そのため、ラフティングが生じた場合でも、氷盤端がわずかに重なった状態での波高変化を観測したことになり、図-5に示したように、ラフティングの有無によ

る違いは小さく見える。しかし、時間と共に氷盤相互が重なり合う範囲が広くなり、時には幾重に重なる場合もあり、このような状態での減衰は極めて大きなものとなる。従って、ラフティングの発生の有無を判断することは氷盤群下での減衰を予測する上で、極めて重要である。

氷盤端が水表面から離れ、いわば自由に運動することによってラフティングが発生すると仮定すれば、氷盤端が水表面から離れ得る条件としては氷盤群下での波形勾配が大きいことと波長に比べて氷盤長が長いことが考えられる。そこで、これら2つの要素とラフティングの発生の関係を示したのが図-7である。上記の予想通り、氷盤群下での波形勾配及び相対氷盤長（氷盤群下での波長に対する氷盤長の比）が大きいほどラフティングが生じやすいことが分かる。また、図中の直線によって完全にはないが発生の有無を区分でき、平均的な発生限界として用いることができよう。

3.5 氷盤群下の波速

連続弾性平板下で波動の線形理論による分散関係式は、

$$\omega^2 = \frac{Mk^5 + \rho g k}{\rho \coth(kh) + \rho_i h_i k} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 ω ：角周波数 ($2\pi/T$, T ：周期)

k ：波数 ($2\pi/L$, L ：波長)

h ：水深、 h_i ：平板厚、 g ：重力加速度

ρ ：水の密度、 ρ_i ：平板の密度

M ：曲げ剛性 ($Eh^3/(12(1-\nu^2))$),

E ：弾性率、 ν ：ポアソン比 ($=0.3$)

と表現される。氷盤長が長い場合には、上式はポリエチレン板を用いた実験結果をよく説明する事をすでに報告

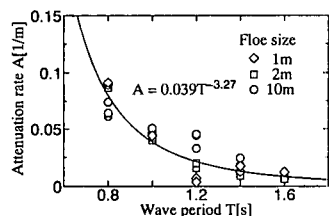
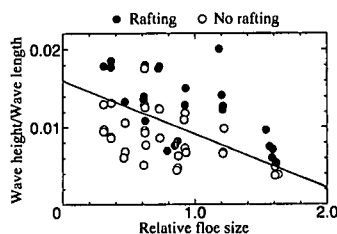


図-6 波高減衰率と周期の関係に対する氷盤長の影響



氷盤群下の波浪変形特性に関する実験

図-7 ラフティングの発生限界

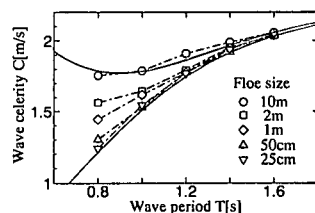


図-8 氷盤群下での波速に対する氷盤長の影響

した(堺ら, 1992)。しかし, 本実験で行ったような水盤長が短い場合にも上式が適用できるとは考えにくい。つまり, 水盤長が短い場合には上式の分子の第1項 Mk^5 は, 水盤中央部では運動に影響を与え得るが, 盤端近傍では実際には生じ得ない力であり, 従って水盤群全体では Mk^5 の影響は小さくなる。水盤長が極めて短くなると, その極限として Mk^5 が零, つまり二層流体上の波動に漸近すると考えられる。

図-8 は水盤群下での分散関係に対する水盤長の影響に関する実験結果を示している。図中の2本の曲線(実線)は, それぞれ連続弾性平板下での波速と二層流体上の波速である。水盤長が10 m の場合は連続弾性平板下での値とほぼ一致しているが, 水盤長が短くなるにつれて波速は小さくなり, 次第に二層流体上の波速に漸近している。

水盤長による波速の変化を相対水盤長で表したのが, 図-9 である。波速と相対水盤長の関係は片対数上で直線関係にあり, その傾きは図-10 となる。用いた水盤長及び周期の種類数が限定されているためここでは定式化は控えるが, 図-9 あるいは図-10 に示す関係によって周期と水盤長から水盤群下での波速を予測することが可能である。ただし, 相対水盤長を求めるためには水盤群下の波速が必要であるから, 実際の手順は繰り返し計算となる。

4. 水盤群下での不規則波の変形特性

4.1 水盤群下へ進入する際のエネルギー変化

3.2 で述べたように, 水盤群下へ進入する際に波高は大きく減少し, その変化の割合は周期に依存する。そこで, 不規則波の各周波数成分のエネルギー密度に関して, 開水域と水盤群端との比を検討した。図-11 は水盤長が10 m の場合であり, 高周波ほどエネルギーの比は小さくなっている。図中の黒塗り記号は規則波の波高比であるが, おおむね不規則波の結果の平均的な値となっており, 不規則波の周波数成分と規則波は同一の変化特性を有することが分かる。しかし, 図-12 に示す水盤長2 m の場合では, 変化率と周波数の関係は定性的には図-11 と同一であるが, 規則波との比較に於いては大きく異なっている。つまり, 規則波の結果は不規則波の成分の値のほぼ下限となっており, さらに短い1 m (図-13) ではその傾向は顕著となっている。従って, 水盤長が大きい場合には, 不規則波の各周波数成分を規則波として取り扱うことによって不規則波全体の変形を表現することができるが, 水盤長が短くなるほどその妥当性は失われる。

4.2 水盤群下でのエネルギー減衰率

不規則波の各周波数成分の PSD は進行距離と共に指数的に減少しており,

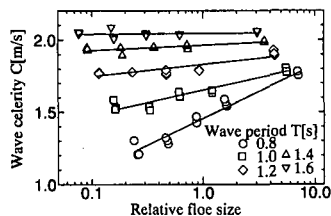


図-9 水盤群下での波速と相対水盤長の関係

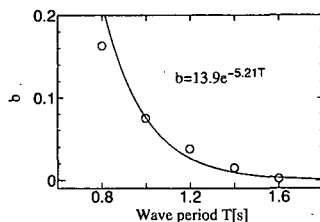


図-10 水盤群下での波速と相対水盤長の関係に於ける傾きと周期の関係

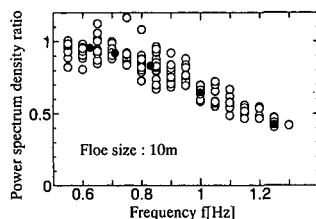


図-11 水盤群下へ進入する際のエネルギー変化に関する規則波と不規則波の比較 (水盤長 10 m)

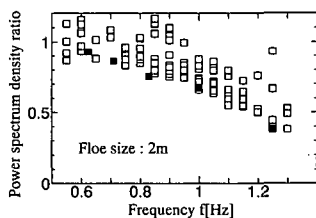


図-12 水盤群下へ進入する際のエネルギー変化に関する規則波と不規則波の比較 (水盤長 2 m)

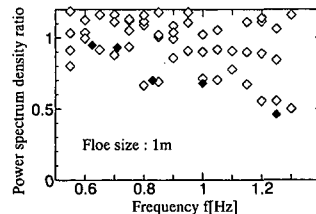


図-13 水盤群下へ進入する際のエネルギー変化に関する規則波と不規則波の比較 (水盤長 1 m)

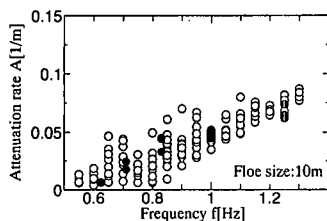


図-14 エネルギー減衰に関する規則波と不規則波の比較 (氷盤長 10 m)

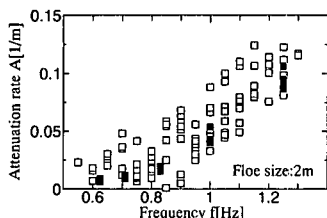


図-15 エネルギー減衰に関する規則波と不規則波の比較 (氷盤長 2 m)

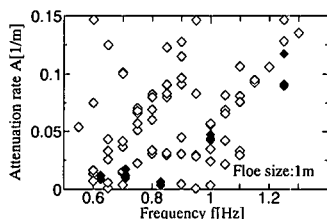


図-16 エネルギー減衰に関する規則波と不規則波の比較 (氷盤長 1 m)

$$\frac{\text{PSD}}{\text{PSD}_e} = \exp(-2Ax) \dots\dots\dots (4)$$

ここで、PSD：パワースペクトル密度

PSD_e：氷盤群端でのパワースペクトル密度と表現できる。なお、式中の定数2は規則波での波高減衰率とここでのエネルギー減衰率とを比較しやすくするために用いている。

図-14は氷盤長が10mの場合の結果であり、周波数の増大と共に減衰率も増加している。図中の黒塗り記号は規則波の減衰率であるが、図-11と同様に不規則波の結果とほぼ一致している。しかし、図-15及び16に示す氷盤長が小さい場合には、規則波の結果は不規則波のほぼ下限となっており、不規則波の周波数成分を規則波として扱うことは妥当ではないことが分かる。

5. 結 語

本研究では、氷盤群下での波浪の分散関係及びエネルギー減衰に対する氷盤の大きさの影響と不規則波の周波数成分を規則波として扱うことの妥当性を検討したが、ここで得られた主要な結論を要約すると、以下のとおりである。

- 1) 入射波周期は氷盤群下の波浪変形特性の全てに影響を及ぼし、相対氷盤長は波速及びラフティングの発生に影響する。
- 2) 氷盤群下の波速は、連続弾性平板下の波動の理論解及び相対氷盤長によって予測できる。このことは、上記の理論を用いて氷盤群下の波動を表現する場合、曲げ剛性を相対氷盤長に対応して変化させることによって、氷盤長の影響をモデル化することが可能であることを示唆している。
- 3) 氷盤長が大きい場合には、氷盤群下の不規則波の変形特性は不規則波の周波数成分を規則波として扱った場合の変形の線形和で表現できる。しかし、氷盤長が小さくなるに従い、その妥当性は失われる。

最後に、本実験に際して岩手大学大学院生影佐拓也君、堂崎真弓さん及び学部学生平賀健司君、芋田功司君の協力を得たことを記し、ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 浅川典敬・折谷徳弘・佐藤英泰・佐伯 浩・井上一正 (1989): 浮氷盤群による波浪の減衰に関する実験的研究, 第5回寒地技術シンポジウム講演論文集, pp. 410-415.
- 堺 茂樹・堀合孝博・笹本 誠・平山健一・佐伯 浩 (1992): 氷板による波浪変形に関する基礎的研究, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 11-15.
- 堺 茂樹・笹本 誠・片山潤之介・劉 曉東・平山健一・泉山 耕・金田成雄 (1996): 氷板による不規則波の変形に関する実験, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 426-430.
- 笹島隆彦・早川哲也・吉野真史・後藤智明 (1996): 海水存在時における風波の周波数スペクトル特性, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 431-435.
- 劉 曉東・堺 茂樹 (1996): 弾性浮体の波浪応答に関する境界要素と有限要素の接続解法, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 991-995.
- Liu, A. K., B. Holt and P. W. Vachon (1989): Wave Evolution in the Marginal Ice Zone: Model Predictions and Comparisons with On-site and Remote Data, Int'l. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS), IEEE, Vol. 3, pp. 1520-1523.
- Squire, V. A. and S. C. Moore (1980): Direct Measurement of the Attenuation of Ocean Waves by Pack Ice, Nature, Vol. 283, pp. 365-368.
- Wadhams, P. (1975): Airborne Laser Profiling of Swell in an Open Ice Field, J. G. R., Vol. 80, No. 33, pp. 4520-4528.
- Wadhams, P. (1978): Wave Decay in the Marginal Ice Zone Measured from a Submarine, Deep Sea Research, Vol. 25, pp. 23-40.