

# 氷板による不規則波の変形に関する実験

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\*\*\*\*\*

## 1. 緒 言

北ヨーロッパと東アジアを結ぶ最短航路となる北極海航路の開発は、我が国の造船及び海運業の復興の契機となり得るものとして期待されている。北極海航路開発に当たっての海岸工学上の課題としては、氷海域に於ける波浪特性の解明がある。これは、夏期の北極海には開水域が広く存在し、このような海域では風波が発達し得るため、波浪と氷盤が共存する海域を航行する船舶の安全性、航行性能あるいは寄港先となる港湾の耐氷設計を検討する際の外力として、波力、氷力及びこれらの複合作用を正確に評価する必要があるためである。著者らは氷海域に於ける波浪特性の解明の第一段階として、連続氷板（以下では、単に氷板と記す）と波浪の干渉に関する研究を行ってきた。氷板は湾などの静穏海域にのみ存在し、むしろ希な状態ではあるが、大小の氷盤が混在する氷盤群中にあっても、大規模な氷盤では連続氷板と同一の現象が生じることから、波と氷の干渉の基礎的な現象と捉えることができる。

Squire (1984) はスピッツベルゲンのフィヨルド内で現地観測を行い、接岸氷板上の数点で計測した氷板の変位をスペクトル解析した結果に基づき、不規則波浪の各周波数成分のエネルギー密度は氷板下での進行距離に伴い指数的に減少し、減衰率は周波数に依存していることを明らかにしている。この研究は氷板と波浪の干渉を観測した唯一のものであり、極めて貴重なデータを提供している。しかし、減衰率は氷の物性及び厚さなどによって変化する可能性が考えられるが、単一の観測からはこれらの影響を評価することはできない。一方、実験的研究としては Ofuya and Reynolds (1967), Grande et al. (1983), 金田ら (1994) などがあるが、いずれも氷板と規則波の干渉が対象である。これらの実験から、氷板下での波浪エネルギーは指数的に減少し、その減衰率は周

期に依存することが示されており、上記の現地観測の結果と定性的には全く同一である。しかし、不規則波の周波数成分の減衰率とこれに対応する規則波の減衰率が定量的に同一であるか否かに関しては議論されていない。また、従来の研究では主に氷板下での減衰に着目しており、開水域から氷板下へ進入する際の伝播特性はあまり検討されていない。

本研究では、不規則波浪が氷板下へ進入する際の波高変化率及び氷板下を進行する間の減衰率を実験により求め、これらに対する来襲波のスペクトル特性及び氷厚の影響を検討する。また、同時に規則波での実験も行い、氷板による不規則波及び規則波の変形特性の比較を行う。

## 2. 実験装置及び実験方法

実験は図-1 に示すような長さ 26 m, 幅 0.8 m, 深さ 1 m の鋼製造水路を用いて行った。水路後端にはコンクリート製の消波ブロックの模型を用いて一様勾配の斜面を造り、反射波の発生を軽減している。模型氷板として、3 種類の厚さのポリエチレン板を使用しており、板厚は 5, 10, 20 mm である。市販のポリエチレン板の長さは 2 m であり、5 枚の板を接続して約 10 m の連続板を作成し、水路中央に設置した。ポリエチレンの比重は 0.944 であり、また弾性係数は温度によって変化するが、実験中の水温下では 345~641 MPa であった。

板前面の開水域での水位変動を 2 台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。氷板の鉛直変位を超音波式変位計を用いて 20 点で測定した。規則波実験での波高は波形が定常となった後の 5 波の平均値を用いた。また、不規則波実験では、サンパ

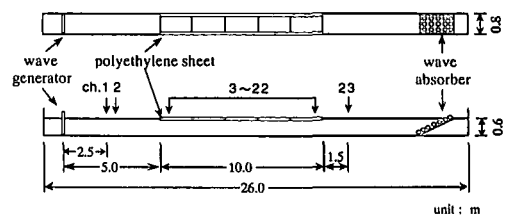


図-1 実験装置

- \* 正 会 員 工 博 岩手大学助教授 工学部建設環境工学科
- \*\* 正 会 員 岩手大学技官 工学部建設環境工学科
- \*\*\* 学生会員 岩手大学大学院 工学研究科
- \*\*\*\* 岩手大学大学院 工学研究科
- \*\*\*\*\* 正 会 員 Ph.D. 岩手大学教授 工学部建設環境工学科
- \*\*\*\*\* 正 会 員 工 修 運輸省船舶技術研究所 主任研究官
- \*\*\*\*\* 運輸省船舶技術研究所 研究官

表-1 規則波での実験条件

| wave period<br>$T$ (s) | wave steepness<br>$H/L$ |
|------------------------|-------------------------|
| 0.8                    | 0.010, 0.015, 0.020     |
| 1.0                    |                         |
| 1.2                    |                         |
| 1.4                    |                         |
| 1.6                    |                         |

表-2 不規則波での実験条件

| significant wave<br>period $T_s$ (s) | significant wave<br>height $H_s$ (cm) |
|--------------------------------------|---------------------------------------|
| 0.8                                  | 2.0, 3.0                              |
| 1.0                                  |                                       |
| 1.2                                  |                                       |
| 1.4                                  |                                       |
| 1.6                                  |                                       |

リングタイムを0.01秒として、8192個のデータをスペクトル解析した。規則波及び不規則波実験での入射波特性を表-1, 2に示す。なお、不規則波のスペクトル形状はJONSWAP型である。

### 3. 氷板による規則波の変形

#### 3.1 波高伝達率と減衰率の定義

図-2は開水域及び氷板下での波高の実験結果を示したものである。氷板に進入した直後の波高は大きく減少し、氷板下では寧ろ緩やかに減衰している。このような緩やかな減衰はエネルギー逸散によるものであり、波高は距離と共に指数的に減少している。そこで、指数的に減少する間のデータのみに対する回帰直線を求めた。回帰直線の傾きを用いると、この間の波高は以下の式で表現できる。

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

ここで、 $H$ は波高、 $H_e$ は回帰直線を外挿して求めた氷板前端での仮想の波高、 $x$ は氷板前端からの距離であり、 $A$ が減衰率である。

氷板端近傍は、開水域での流体運動が流体と弾性平板の複合運動に変換される遷移領域であり、氷板の後端近傍も同様である。本論では、遷移領域での波高変化を詳細に表現することはせず、上記の氷板前端での仮想の波高と開水域での波高との比を波高伝達率とする。

上記のように定義される波高伝達率と減衰率によって、遷移領域以外の任意の位置での波高を表すことができる。

#### 3.2 規則波の減衰率

図-3は開水域での波高に対する氷板下での波高の比を示している。図中には周期が同一で、波形勾配が異なる3種類の実験結果が示されているが、いずれもほぼ同

一な波高比となり、波形勾配の影響は見られない。なお、波形勾配を0.03とした実験も行ったが、結果は同一であった。また、これよりも大きな波形勾配の場合には氷板が破壊するため、実質的には連続氷板下での波浪特性に対する波形勾配の影響は無視し得る。

図-4は図-3に示した例より周期が短い場合の結果であるが、氷板下での波高は振動しながら、平均的には指数的に減少している。このような現象は氷板が厚く、周期が短いほど顕著となる。両図を比較すると減衰率は周期に依存していることが分かる。減衰率と周期の関係、さらにこれに対する氷厚の影響を示したのが図-5である。いずれの氷厚においても、周期が短いほど減衰率は大きくなっているが、周期の影響は氷厚が薄い場合に大きく現れる。

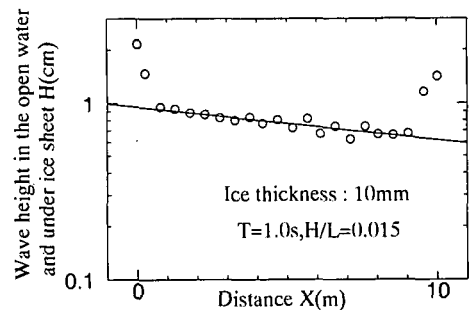


図-2 開水域及び氷板下での波高

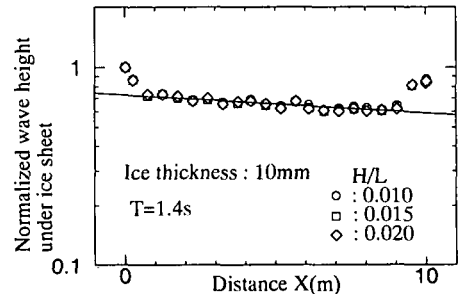


図-3 開水域での波高に対する氷板下での波高の比

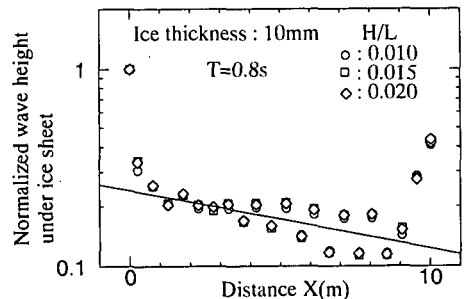


図-4 開水域での波高に対する氷板下での波高の比

表-3 各氷厚でのKとn

| Ice thickness $h_i$ (mm) | K     | n    |
|--------------------------|-------|------|
| 5                        | 0.040 | 3.26 |
| 10                       | 0.044 | 1.88 |
| 20                       | 0.038 | 1.18 |

Wadhams (1975) はニューファンドランドの東海岸沖で行った観測から、氷盤群中を伝播する波浪の減衰率と周波数の間に以下の関係があることを見いだしている。

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

この関係が連続氷板下での減衰にも適用できるものとする、図中の回帰曲線のようになり、表-3に示す値が得られる。氷厚が5 mmの場合にばらつきがあるが、全体としては連続氷板下でも上記の関係が成り立つ。

3.2 規則波の波高伝達率

図-3に示した長周期波の場合には波高がほとんど変化せずに氷板下へ進入するのにに対して、図-4に示した短周期波では波高が大きく減少しており、波高伝達率が周期に強く依存していることが分かる。そこで、波高伝達率と周期の関係、さらにこの関係に対する氷厚の影響を示したのが図-6である。周期が短く、氷板が厚いほど、波高伝達率は小さい。

前述の減衰率と周期の関係と上記のように、短周期波

に比べて長周期は、氷板端での伝達波高率が大きく、さらに氷板下での減衰率が小さいため、氷海内部へ伝達し易い。実際の氷海内部では主に長周期波のみが観測されるのは、波浪伝播特性の周期依存性によるものであることが分かる。

4. 氷板による不規則波の変形

4.1 スペクトル形の変化

図-7は開水域及び氷板下でのパワースペクトルを比較した例である。氷板下へ進入する際に、各周波数成分のパワースペクトル密度（以下、PSDと記す）は急激に減少している。また、開水域でのスペクトルと比較して氷板下でのスペクトルは高周波成分が極めて小さな値となっており、このことは各 PSD の氷板下への伝達特性が周波数に依存していることを示している。

氷板下を進行する間の変化は氷板前端での急激な減少と比較するとむしろ緩やかである。図-8は氷板下でのスペクトルのみを拡大したものであるが、氷板下での PSD の減衰する割合は高周波成分ほど大きく、周波数に強く依存している。

氷板下へ進入する際の変化及び氷板下での減衰特性が周波数に依存することは、前節で示した規則波でのものと定性的に全く同一である。

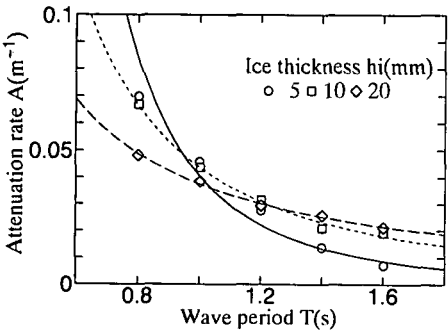


図-5 減衰率に対する周期及び氷厚の影響

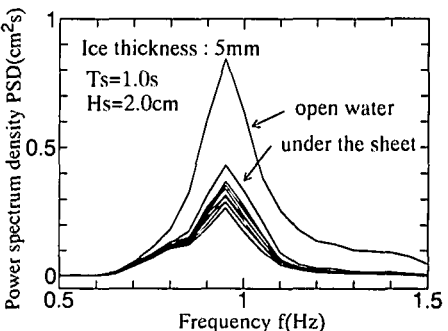


図-7 開水域及び氷板下でのパワースペクトル

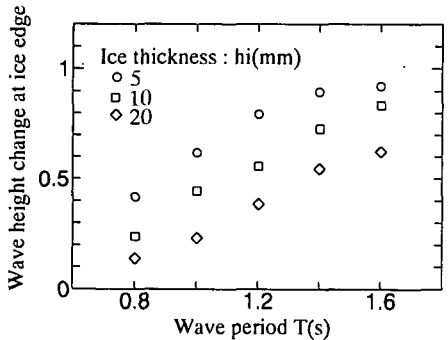


図-6 波高伝達率に対する周期及び氷厚の影響

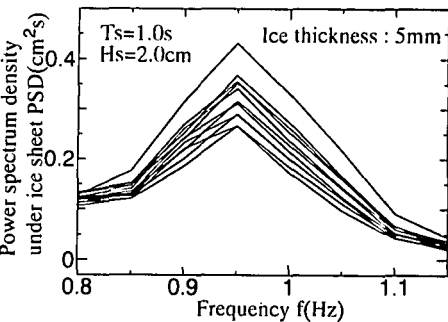


図-8 氷板下でのパワースペクトル

## 4.2 不規則波の周波数成分の減衰率

規則波での解析と同様に、各 PSD と進行距離との関係を検討した。図-9(1) はピーク周波数とそれより低周波成分の PSD の変化を、図-9(2) はピーク周波数とそれより高周波成分の PSD の変化を示している。なお、図中の PSD の値は対象とする周波数を中心に  $\pm 0.15$  Hz の範囲をスムージングした値である。規則波の変形と同様、氷板端近傍での急激な変化と氷板下での緩やかな減衰が見られる。

ピーク周波数を中心として高周波、低周波のいずれの PSD も指数的に減少しており、減衰の傾きは高周波成分ほど大きい。氷板下での PSD と距離の関係を以下のように表現する。

$$\frac{PSD}{PSD_e} = \exp(-2Ax) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $PSD_e$  は氷板端での PSD、 $A$  は減衰率、 $x$  は距離である。なお、規則波との比較を容易にするため、図中の回帰直線の傾きの  $1/2$  を減衰率としたが、これはエネルギーが波高の 2 乗に比例することによる。図-10(1)、(2)、(3) は、それぞれ氷厚が 5、10、20 mm での減衰率と周波数の関係を示したものである。各図には、有義周期が 0.8~1.6 秒、有義波高 2~3 m の計 10 ケースの結果が含まれているが、全体としてほぼ一定の傾向が見

られる。同一の周波数であっても、PSD の値は実験毎に異なっているにも係わらず、同一の減衰率であることは、規則波の実験において波形勾配の影響が見られなかったことと一致しており、減衰率が波浪特性のうち周波数のみに依存していることを示している。

## 4.3 不規則波の周波数成分の波高伝達率

周波数成分の波高伝達率を開水域での PSD に対する氷板端での PSD の比の平方根として求め、これと周波数との関係を示したのが図-11 である。図中には 3 種類の氷厚での結果が示されており、各氷厚毎には有義周期あるいは有義波高が異なる 10 種類の結果が含まれている。全体としてほぼ一定の傾向が見られ、減衰率と同様に、

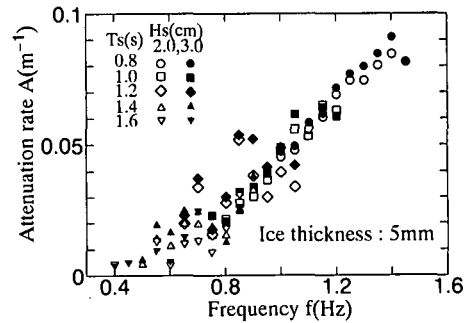


図-10(1) 減衰率と周波数の関係 (5 mm)

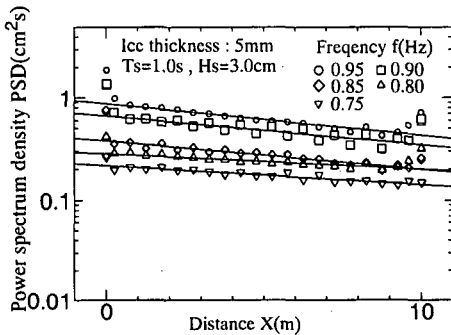


図-9(1) 開水域及び氷板下での PSD

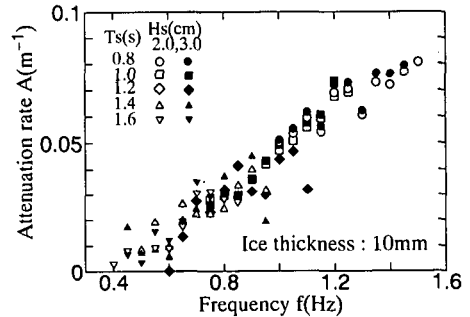


図-10(2) 減衰率と周波数の関係 (10 mm)

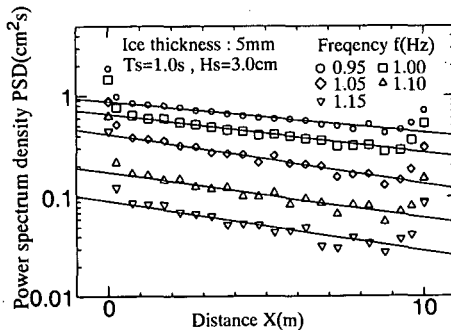


図-9(2) 開水域及び氷板下での PSD

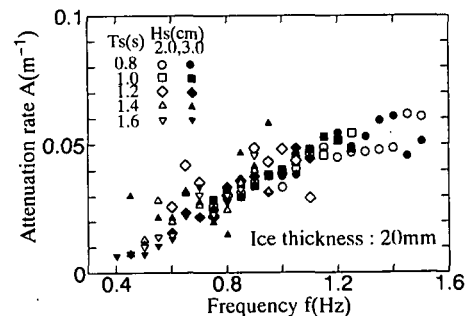


図-10(3) 減衰率と周波数の関係 (20 mm)

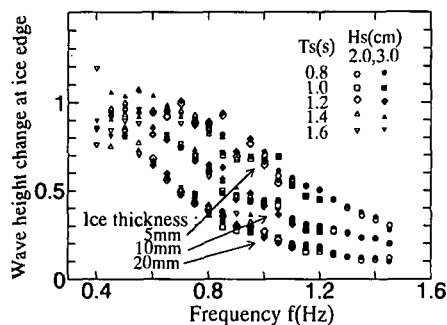


図-11 波高伝達率と周波数の関係

波浪特性のうち周波数のみに依存している。周波数が増大するにつれて、波高伝達率は急激に減少し、氷板が厚いほど小さい。

#### 4.4 不規則波と規則波の変形特性の比較

図-12 は PSD と規則波の減衰率を比較したものであり、両者はほぼ同一の値である。また、式(2)で示される近似式は不規則波に対しても適用できるが、氷厚が 5 mm の場合での高周波成分に対する精度は他と比べて低い。

不規則波及び規則波のいずれの場合でも減衰率が周波数及び氷厚に依存することは本実験のみならずこれまでの研究でも報告されていたが、両者の値の比較は行われていなかった。しかし、本実験によって両者は量的にも一致していることが明らかとなった。

図-13 は PSD と規則波の波高伝達率の比較であり、減衰率と同様に両者は良く一致している。

以上のことから、不規則波の伝達特性は、そこに含まれる周波数成分を規則波として扱った場合の伝達特性の線形和で表現できることが分かる。

## 5. 結 語

氷板による規則波及び不規則波と氷板の干渉に関する実験から、以下のような結果が得られた。

- 1) 規則波の伝達特性（氷板端での波高伝達率及び氷板下での減衰率）は、周期及び氷厚に依存する。
- 2) 不規則波の周波数成分の伝達特性は規則波でのものと量的にも一致している。
- 3) 不規則波の伝達特性はそこに含まれる周波数成分の伝達特性の線形和で表現できる。

最後に、本研究の一部は文部省科学研究費補助金（一般研究 (C)、代表：岩手大学工学部 堺 茂樹）と北極

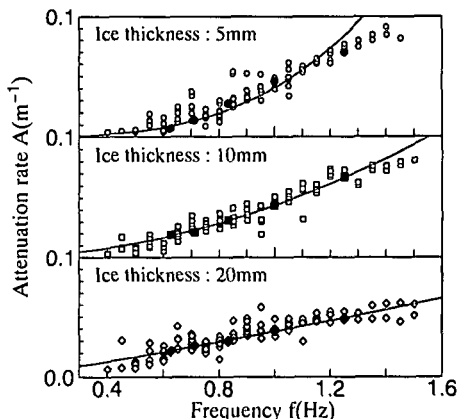


図-12 不規則波と規則波の減衰率の比較

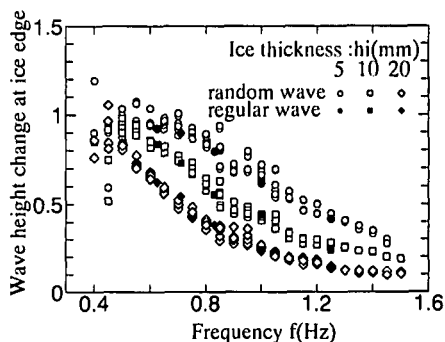


図-13 不規則波と規則波の波高伝達率の比較

海航路開発調査研究（シップ・アンド・オーシャン財団）により行われたことを付記し、ここに謝意を表します。

## 参 考 文 献

- 金田成雄・今井 正・平山健一・堺 茂樹 (1994): 波浪による氷板の変形に関する模型氷及び模擬氷を用いた実験, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 901-905.
- Grande, O., V. M. Arunachalam and D. B. Muggeridge (1983): Model tests of wave attenuation in ice, Proc. of 7th Int. nat. Conf. on Port and Ocean Eng. under Arctic Conditions, Vol. 3, pp. 143-152.
- Ofuya, A. O. and A. J. Reynolds (1967): Laboratory simulation of waves in an ice floe, J. G. R., Vol. 72, No. 14, pp. 3567-3583.
- Squire, V. A. (1984): A theoretical, laboratory, and field study of ice-coupled waves, J. G. R., Vol. 89, No. C5, pp. 8069-8079.
- Wadhams, P (1975): Airborne laser profiling of swell in an open ice field, J. G. R., Vol. 80, No. 33, pp. 4520-4528.