

浮氷群による波浪変形に関する実験的研究

Experimental research about the wave diformation under ice cover

今井 正*・堀合孝博*・金田成雄**・平山健一***・堺 茂樹***

Tadashi. Imai, Takahiro. Horiai, Nario. Kanada. Keniti. Hirayama, Sigeki. Sakai

In the sea partically covered by ice, ice pieces are swaied by waves propagating from the open sea area, and hit the structures with the speed of order of wave motion. To evaluate this impact ice force, the experiments were performed using plastic plate instead of real ice to examine the followings. 1) Wave attenuation under the ice cover. 2) Wave velocity under the ice cover. 3) Transportation of ice pieces caused by wave propagation.

Keywords: wave attenuation, ice plate, and velocity of ice transportation.

1. はじめに

浮氷群が存在する海域へ波浪が進行した場合、氷片は波浪と共に揺動しこれが海洋構造物に衝突すると、衝撃氷力による損傷、破壊が生じる。また、北海道オホーツク沿岸では、波浪によって氷塊が防波堤を乗り越える、いわゆる越氷が発生する。このような現象を予測、防止するためには、構造物近傍での波浪特性とそれによる氷片の運動特性の解明が必要であるが、本研究ではまず基本となる氷片群が存在する海域を進行する間の波浪変形に着目し、様々なサイズの低弾性率平板を用いた室内実験により、氷片海域での波浪特性と、波浪による氷板の移動速度を検討した。

2. 実験方法

実験には図-1に示すような長さ26m、幅80cm、深さ1mの造波水路を用い、水深は常に60cmとした。また疑似氷片として実際の氷と比重が等しい厚さ5mm、幅78cm、長さ2.0mのポリプロピレン板を5枚用い、波の進行方向に対する長さを1/2, 1/4, 1/8に切断、また5枚の板間を結束することで10.0mの疑似連続板を作成し、計5つの状態を設け、それぞれ造波水路の中央部10mの区間に浮かべて実験を行った。ポリプロピレン板の弾性係数は実験中の水温で測定した結果 $E=6.39 \times 10^8 (N/m^2)$ であった。

また、入射波の周期及び波形勾配は表-1の様に設定し、それぞれの状態において浮氷片下の波高変化、波速、及び板の移動速度について計測を行った。ポイントNo. 0とNo. 6の自由水面では容量式波高計を用いて計測した。ポイントNo. 1～No. 5の氷片下ではビデオカメラにより録画し再生時に波高を読み取り、また氷片下での波速及び板の移動速度は目視により計測した。

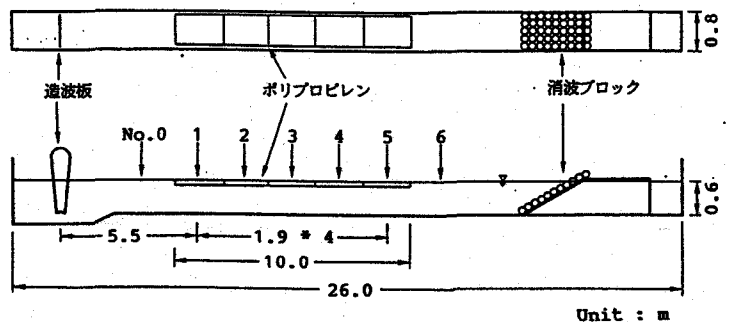


図-1 実験装置

氷片サイズ(m)	周期(s)	波形勾配(H/L)
10.0 (Case A)	0.8	
2.0 (Case B)	1.0	0.015 0.02
1.0 (Case C)	1.2	0.03 0.04 0.05
0.5 (Case D)	1.4	
0.25 (Case E)	1.6	0.015 0.02 0.03 0.04

表-1 入射波の特性

3. 実験結果

3. 1 波動による氷片の運動状態

各々の実験において、波動による氷片の運動の様子を写真撮影を併用して観測

* 学生員 岩手大学大学院工学研究科

** 運輸省船舶技術研究所

*** 正会員 岩手大学工学部建設環境工学科 (020 盛岡市上田4-3-5)

した。写真-1はCase D(0.5m)の周期0.8秒、波形勾配 $H/L=0.05$ 、写真-2はCase D(0.5m)の周期1.2秒、波形勾配 $H/L=0.03$ のもので、それぞれ造波後しばらくしてから撮影したものである。この写真に見られるように板が波の進行方向に対して前方の板に次々に乗り上げ重なる場合と、逆に均等な間隔で広がりを生じる場合が観測され、周期が短い0.8秒と1.0秒においては板は重なる傾向にあり、周期が長い1.2~1.6秒では広がる傾向がみられた。

3. 2 氷片下の波高減衰

図-2はCase B(2.0m)、周期1.0秒の場合における、疑似氷板下を進行する間の波高減衰を示している。横軸はPoint No.1からの進行距離 X を波長 L で除した無次元量で、縦軸はNo.1の波高に対する各ポイントでの波高の比を用いて表している。このように氷片下における波高は、指数関数的に減衰し、図中の直線によって近似することができる。この近似直線は次式のように表される。

$$H/H_1 = \exp \{-A \times (X/L)\} \quad \text{----- (1)}$$

ここで A : 減衰係数

波高減衰に対する波形勾配の影響はあまり見られないが、図-3 (Case C(1.0m)) に示すように入射波の周期により異なってくる。1.2秒以上の長い周期ではほぼ同一の波高減衰を示しているが、それより周期が短くなると減衰率が増加する傾向にある。また、周期1.0秒での各々のCaseにおける波高減衰を示したものが図-4であり、氷片の長さによっても減衰に差がみられる。そこで、氷片の長さを波長で除した無次元量を用い、式(1)より得られる減衰係数との関係を見たものが図-5である。このように、波高の減衰は周期が短いほど大きくなる傾向にあり、特に周期0.8秒と1.0秒は他の周期に比べ減衰率が卓越している。これは、前章で述べたように短い周期では氷片の重なりが生じ板相互の運動が拘束され、その結果氷片下を進行する波の運動が抑制され減衰率が大きくなるものと考えられる。また周期の長い1.2~1.6(s)では板の重なりはほとんど見られず、波高減衰に対する氷片サイズの影響はあまり見られなかった。さらに、周期0.8秒、1.0秒の場合において、氷片サイズ/波長が0.5~1.0の付近で減衰率は極大値をとる。

3. 3 氷片下の波速

自由表面及び弾性板下を進行する波の分散関係式は次式により示される。

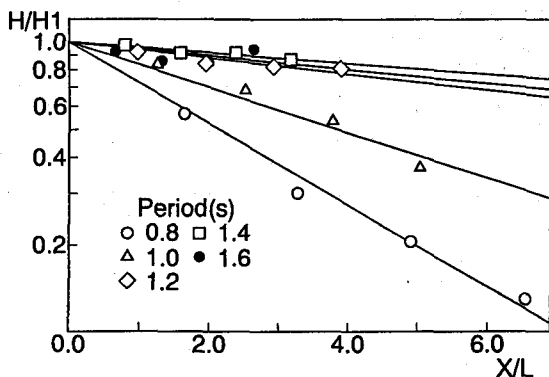


図-3 波高減衰に対する周期の影響

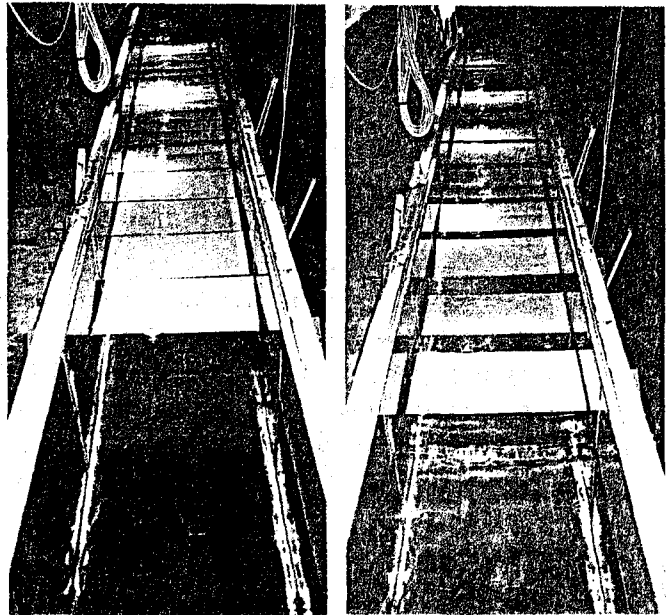


写真-1

写真-2

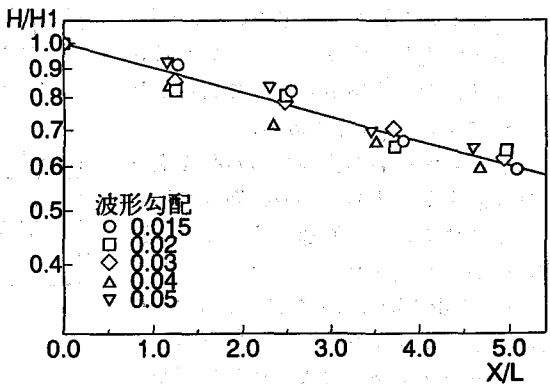


図-2 氷片下での波高変化の例

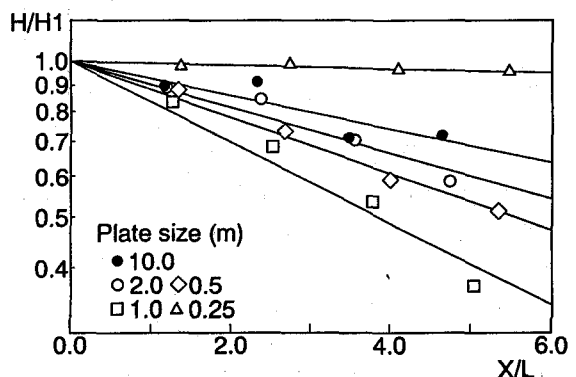


図-4 波高減衰に対する氷片サイズの影響

$$\text{OPEN WATER: } \omega^2 = g k \tanh k h \quad (2)$$

$$\text{ICE-COVER: } \omega^2 = \frac{M k_i^5 + \rho g k_i}{\rho \coth k_i h + \rho_i h_i k_i} \quad (3)$$

ここで、 ρ : 水の密度 ρ_i : 氷の密度
 h : 水深 h_i : 氷厚
 k, k_i : 波数 ($2\pi/L$) g : 重力加速度
 M : 曲げ剛性 ($E h_i^3 / 12(1-\nu^2)$)

これらの式を用い自由水面および弾性平板下の波速を求め、実験値と比較したものが図-6、図-7である。

図-6はCase B(2.0m)、図-7はCase E(0.25m)のものであり、両ケースとも波速に対する波形勾配の影響はみられず、周期に依存している。このように、氷板サイズが比較的大きいCase Bでは、実験値は理論値と多少のずれがあるものの、ほぼ同一の傾向を示している。一方、氷片サイズの小さいCase Eにおいては氷片下の波速は自由水面での波速と一致しており、従って板の弾性による影響はみられない。そこで、横軸を波長に対する氷片長の比、縦軸を氷片下の波速で示し氷片の長さによる波速の変化を表した(図-8)。図中の直線は各々の周期における波速変化の傾向を対数近似したものであり、波長に対する氷片サイズが長くなるに従い波速は増加し、弾性板下の波速の理論値に近づいていき、逆に氷片が小さくなると波速は自由水面での波速の理論値に近づく。

また、全体的に実験値は理論値に比べやや小さい値をとっている。氷片のサイズが小さくなると板の弾性は現れなくなり、式(3)のMの項は省略され、弾性を持たない二層流体での分散関係式となる。その場合の波速は自由水面での波速以下になり、本実験結果はそのことに対応しているものと思われる。

4. 氷片の移動速度

波浪による氷片の移動速度を水粒子の移動速度と比較し検討した。ストークス波の第2近似式を用いると水粒子の移動速度は以下の式で表される。

$$\bar{U} = \frac{\pi^2}{2} C \left(\frac{H}{L} \right)^2 \frac{\cosh 2k(\bar{z} + h)}{\sinh^2 k h} \quad (4)$$

ここで C : 波速 $\bar{z}$: 静水時の水粒子の位置

図-9は周期 $T=1.4$ (S)での氷片の移動速度を長さ別に示したものである。図中の実線は式(4)より得られた理論値である。このように、氷片の移動速度は氷片サイズが短くなるに従い水粒子の移動速度に近づき、氷片サイズ0.25mでの実験値はほぼ理論値に一致している。

図-10は $l=0.25$ mでの板の移動速度を示したものである。同一波形勾配における水粒子の移動速度は周期が長くなるにつれて大きくなが、実験値は周期が短い場合に移動速度が大きくなるという結果を得た。特に周期0.8秒と1.0秒での移動速度が卓越しており、波高減衰と同様に氷片の重なりが原因となっていると考えられるが、

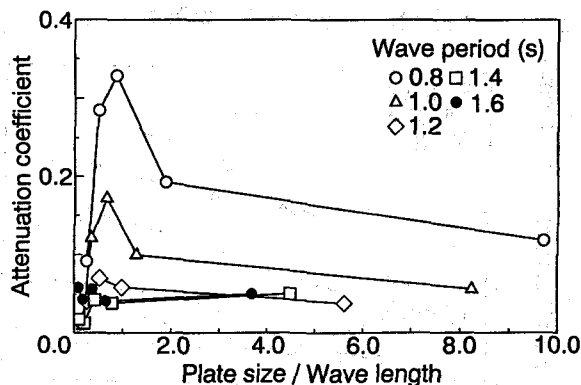


図-5 氷片サイズの無次元量と波高減衰との比較

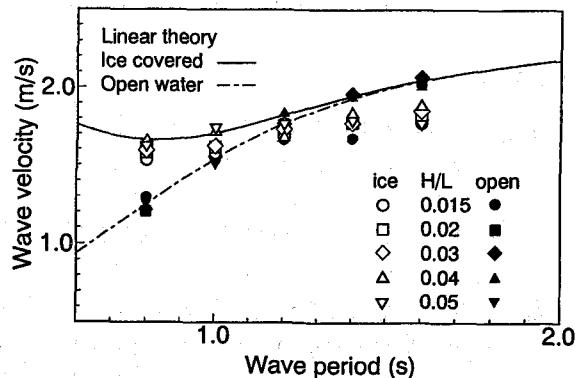


図-6 氷片サイズ2.0mの波速

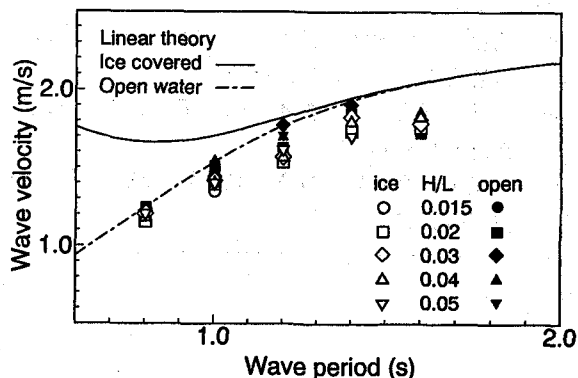


図-7 氷片サイズ0.25mの波速

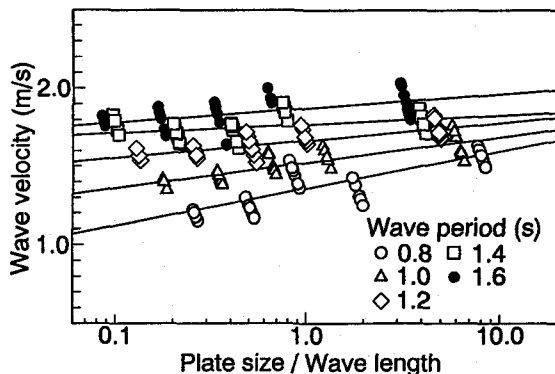


図-8 氷片サイズの無次元量と波速の関係

これらの運動特性の解明は今後の課題である。

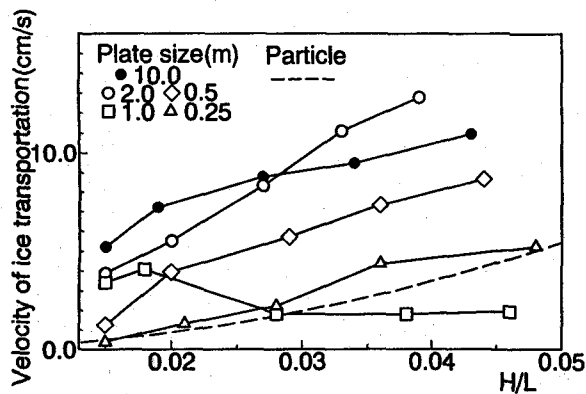


図-9 周期1.4秒における氷片の移動速度

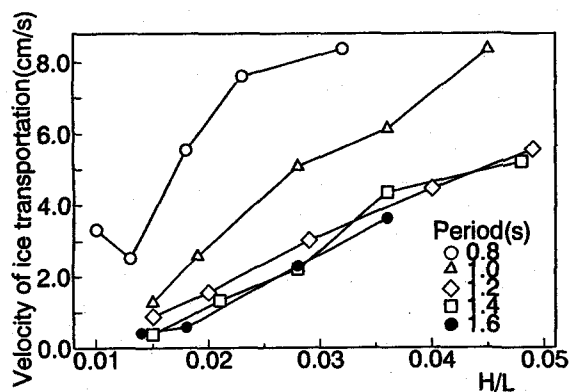


図-10 氷片サイズ0.25mでの移動速度

5. 結論

本研究における主な結論は以下の通りである。

- ① 波浪による氷片の運動状態は、重なりを生じる場合と均等に広がる場合の大きく2つに分けられ、入射波の周期に依存している。
- ② 氷片群中での波高は進行距離に従い指数関数的に減少し、減衰率は入射波の周期及び氷片サイズに依存するが、氷片サイズが氷片群下での波長の0.5~1.0倍程度で波高は最も減衰する。
- ③ 氷片群下での波速は周期及び氷の弾性係数以外に、氷片の大きさに依存しており、氷片が大きい場合は弾性平板下での波動の線形解と一致するが、小さくなるにしたがい自由表面波の線形解に近づく。
- ④ 波浪による氷片の移動速度は氷片サイズ、入射波の周期、氷片群下での波速及び波形勾配に依存する。

【参考文献】

- 堺 茂樹・堀合孝博・笹本 誠・平山健一・佐伯 浩(1992): 氷片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
- 内藤幸弘・堀合孝博・笹本 誠・堺 茂樹・平山健一: 氷片による波浪の減衰に関する実験, 平成3年度東北支部, pp.164-165
- 今井 正・堀合孝博・笹本 誠・堺 茂樹・平山健一: 浮氷片による波浪の減衰に関する実験, 平成4年度東北支部, pp.154-155