

氷板による波浪変形に関する基礎的研究

堺 茂樹* ・ 堀合孝博** ・ 笹本 誠***
平山 健一**** ・ 佐伯 浩*****

1. 緒 言

1952年の十勝沖地震津波により北海道太平洋沿岸と三陸沿岸は多大な被害を受けたが、特に北海道の霧多布においては、沿岸に流氷が接岸していたため、津波はそれら氷塊とともに陸上に遡上し、被害をより大きなものにした。津波のような特殊な場合に限らず、氷板が波浪と共に構造物に衝突することによって海岸構造物の損傷や破壊が生じるが、この種の被害は海域全面が結氷している北極海などでは発生せず、例えば北海道オホーツク海沿岸などのような自由海面と氷に覆われた海面が共存している海域に特有なものである。このような海域での構造物の耐氷性を検討するには、海流、潮汐、風などによって発生する一般的な氷圧力に加え、波浪による動的な衝撃氷圧を考慮する必要があることが認識されつつある。

衝撃氷圧を海象条件から見積るためには、自由海面から氷板下に進入する際の波浪変化、氷板下を進行する間の波浪減衰、構造物付近での波浪による氷板の運動といった一連の現象の理解が必要であるが、これまで氷板と波浪の相互干渉を扱った研究は少ない。そこで、本研究では特に氷板下に進入する際の波浪変形と氷板下での波浪減衰に着目し、これらの特性を模型氷板及び実氷板を用いた室内実験と氷板を低弾性率平板と仮定した場合の平板下での波動の線形解析により検討した。

2. 模型氷板を用いた実験

2.1 実験装置及び実験方法

実験には図-1に示すような長さ26m、幅0.8m、深さ1mの造波水路を用い、水路後端に消波ブロックを積み上げ、反射波の影響を軽減した。模型氷板には、幅78cm、長さ2m、厚さ5mmのポリプロピレン板を5枚用いた。ポリプロピレンの弾性率は温度によって多少変化するが、実験中の水温で測定した結果、 $E=6.39 \cdot 10^8$

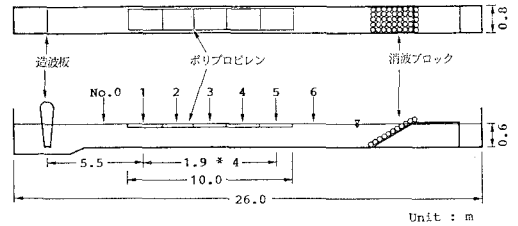


図-1 実験装置

N/m^2 であった。

実際の氷海域での氷の状態に対応して、図-2に示すような三種類の実験条件を設定した。条件1：氷のサイズが波長に比べて小さく、氷片の状態（ポリプロピレン板を単に並べて浮かす）、条件2：氷のサイズが大きく、氷板と見なせる状態（板同士を紐で結束し、疑似的な連続板とする）、条件3：氷板が接岸しており、氷板の移動が拘束されている状態（板全体の移動を拘束する）。

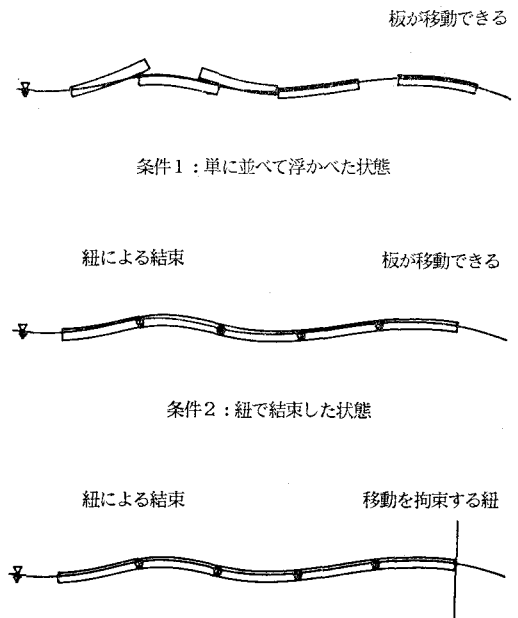


図-2 氷の状態に関する実験条件

* 正会員 工博 岩手大学助教授 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

*** 正会員 岩手大学扶官 工学部建設環境工学科

**** 正会員 Ph.D. 岩手大学教授 工学部建設環境工学科

***** 正会員 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科

波高及び波速の測定は図一1中の7測点で行った。No.0とNo.6は氷板外にあり、容量線式波高計を用いて波高を測定し、ヒーラーの方法により入射波と反射波とを分離した。No.1～No.5は氷板下にあり、1.9m間隔である。これらの測点ではビデオカメラにより氷板の運動を録画し、再生時に波高と波速を読み取った。

水深は常に60cmとし、入射波の周期及び波形勾配は表一のように設定し、計24ケースの実験を行った。

表一 入射波の特性

周期 (秒)	波形勾配
0.8	
1.0	0.015 0.02 0.03
1.2	0.04 0.05
1.4	
1.6	0.015 0.02 0.03 0.04

2.2 実験結果

図一3は条件2で周期1秒の場合の波高変化を示しているが、縦軸は各測点での波高を測点No.0での波高で除してある。氷板外にあるNo.0から氷板内のNo.1にかけて、波高は大きく変化しているが、氷板内では緩やかに減衰している。これは氷板下に進入する際の波高変化は波動エネルギーの一部が板の運動に変換されるために生じるのに対し、平板下での波高減衰は平板下面における摩擦などによるエネルギー逸散に起因するものであり、変化のメカニズムが異なるためである。そこで、以下では進入時とそれ以後を分けて検討する。

図一4は氷板への進入時の波高変化率を示しており、進入前の波高としては氷板端での反射波を除いた伝達波の波高を用いている。入射波の周期が短いほど、波高変化率が大きく、また氷の状態による違いは周期が短い場合に現われ、波形勾配の影響は見られない。

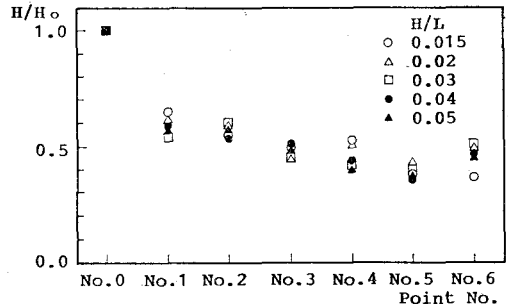
氷板下を進行する間の波高減衰に対する波形勾配と氷の状態の影響は小さいが、図一5に示すように入射波周期によって多少異なる。進行距離を氷板下での波長で除した無次元距離 X/L を用いて、波高減衰特性を表示したのが図一6であり、周期、波形勾配、氷の状態に係わらずほぼ同一の傾向が見られ、図中の直線によって全体が近似できる。近似直線の傾きから、氷板下での波高減衰率は以下の式で表わされる。

$$H/H_1 = \exp(-0.085 \cdot X/L) \dots\dots\dots (1)$$

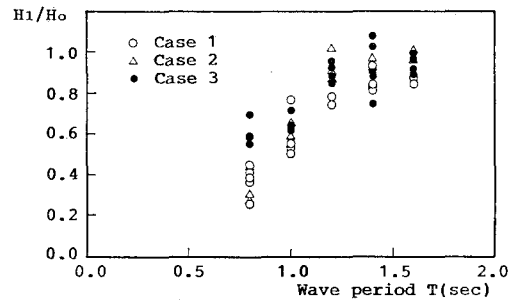
3. 実氷板を用いた実験

3.1 実験方法

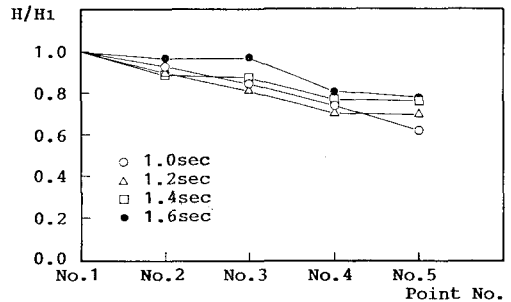
実験水路内の水面を冬期の夜間の自然冷気により結氷させ、氷板を作製した。この際、水路の側面を断熱材で



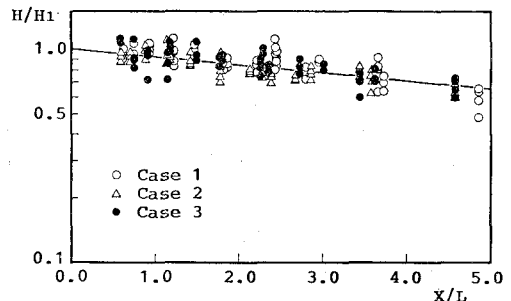
図一3 波高変化の例



図一4 氷板に進入する際の波高変化率



図一5 氷板下での波高減衰に対する周期の影響



図一6 無次元距離と波高減衰率の関係

覆い、側面からの結氷を防ぎ、自然状態と同じように表面の冷却のみによって氷を成長させた。また、氷の物性量の相似性を保つため Wet Seeding (水面に微細な霧を噴霧し、多量の凝結核を供給することによって粒径の小さい結晶からなる氷を作る) を水路全体に均一かつ充分に行った。氷の厚さは一晩で約 1 cm 程度になる。

使用した水路は前章と同じものである。造波機より 3.5 m の位置までの氷を完全に取り除いた後に造波し、造波機より 6.0 m の地点から 3.0 m 間隔に合計 3 か所で波高を測定した。測定方法は前章と同じである。なお、水深は 52 cm, 入射波の周期は 2 秒である。

3.2 氷の弾性係数

氷の弾性係数と曲げ強度との関係は一般に式 (2) で近似できる。そこで、本研究では曲げ強度から弾性係数の推定を行った。氷板の一部を片持ち梁状に整形し (氷厚を h とすると、長さ $6 \sim 7h$, 幅 $1 \sim 2h$ の大きさ)、最大荷重 2 kgf の push-pull 試験機を用いて梁先端に載荷する曲げ試験を行い、測定された破壊荷重と式 (3) の弾性理論式から氷の曲げ強度を算定した。

$$E/\sigma_f = 3000 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\sigma_f = 6 \cdot p_f \cdot l / (B \cdot h^2) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 σ_f : 曲げ強度 p_f : 破壊荷重 l : 梁の長さ

B : 梁の幅 h : 梁の厚さ

曲げ強度から式 (2) を用いて計算された氷の弾性係数は $3.17 \sim 3.88 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$ であった。

3.3 実験結果

今回の実験では入射波高が大き過ぎたため、造波直後から氷板の破壊が始まり、連続氷板の状態での測定は出来なかった。したがって、以下に示す実験結果は氷片の状態 (前章での条件 1 に対応) でのものである。図-7 は氷板下での波高減衰率と無次元距離の関係を示したものであり、図中の直線は模型氷板での実験から得られた減衰率の近似式である。模型氷板 (ポリプロピレン板) の弾性係数が $6.39 \cdot 10^8$ であり、一方実際の氷はその約 5 倍の値であるが、進行距離が一波長程度であればほぼ同一の波高減衰になっていることが分かる。

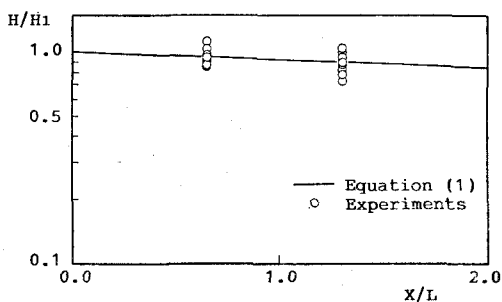


図-7 実氷板下での波高減衰率

4. 線形解析及び実験結果との比較

4.1 氷板下の波動の線形解

平板下の波動の線形解の概要を以下に示す。図-8 のように平板は水面と同一の運動を行い、その変位は式 (4) で表わされるものとする。

$$\eta = a_i \sin(kx - \omega t) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 $k = 2\pi/L$, $\omega = 2\pi/T$, $a_i = Hi/2$

L : 波長, T : 周期, Hi : 波高

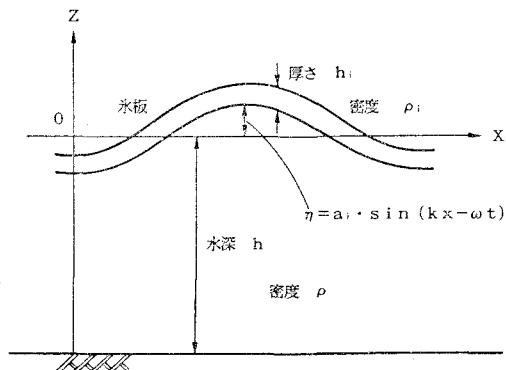


図-8 波動による平板の運動と使用する記号の説明

微小振幅波における表面でのベルヌーイの一般式は

$$\frac{p}{\rho} + g\eta + \frac{\partial \Phi}{\partial t} = 0, \quad z=0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 Φ : 速度ポテンシャル, p : 圧力,

ρ : 水の密度, g : 重力加速度

である。一方、板が曲げ変形を受け、その変位が η であるときの力の釣合は

$$\rho_i h_i \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} + M \frac{\partial^4 \eta}{\partial x^4} = p' \quad \dots\dots\dots (6)$$

ただし、 $M = Eh_i^3 / (12(1-\nu^2))$: 曲げ剛性

E : 弾性係数, ν : ポアソン比,

ρ_i : 氷の密度, h_i : 氷厚, p' : 外力

と表わされる。

氷板を変形させる力 p' は波動による圧力 p に等しいから、平板と流体の境界面での力学的条件は式 (5), (6) より、

$$\rho_i h_i \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} + M \frac{\partial^4 \eta}{\partial x^4} = \rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} - \rho g \eta, \quad z=0 \quad \dots\dots\dots (7)$$

となる。さらに、平板下での速度ポテンシャルを

$$\Phi = A \cosh k(h+z) \cos(kx - \omega t) \quad \dots\dots\dots (8)$$

とおいて、(7) 式に代入すると、

$$A = \frac{(\rho_i h_i \omega^2 - M k^4 - \rho g)}{\rho \omega \cosh kh} a_i \quad \dots\dots\dots (9)$$

が得られる。また、境界面での運動学的条件より、分散関係式が式 (10) のようになる。

$$\omega^2 = \frac{Mk^5 + \rho g k}{\rho \coth kh + \rho_i h_i k} \quad \dots\dots\dots (10)$$

図-9 は分散関係式を用いて波速を計算した例であるが、open water では周期が短くなるにしたがい波速は遅くなるのに対し、平板下では逆に大きくなり、その割合は板が厚いほど顕著である（ただし、表面張力を考慮すると open water でも極めて短い周期で波速は増加する）。また、周期が長くなるにつれて波速は open water での値に漸近する。

4.2 エネルギーフラックス法による波高変化の計算

Carter ら (1981) は前節に示した線形解を用い、波動の位置及び運動エネルギーと板の位置及び歪エネルギーの合計が群速度で輸送されるものとして、open water での波高と平板下での波高の比を計算している。しかし、ここで用いた線形解は波動による圧力によって平板が静的に歪むものとして誘導されており、従って板の持つエネルギーの輸送は存在しない。そこで、式(11)に示す波動のエネルギーフラックスが保存されるものとして、open water での波高と平板下での波高の比を計算すると、式(12)が得られる。

$$W = \frac{1}{T} \int_0^T \int_{-h}^0 -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} \frac{\partial \Phi}{\partial x} dz dt \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$\frac{H_i}{H_0} = \left\{ \frac{k(1 + (2k_0 h / \sinh 2k_0 h))}{k_0(1 + (2kh / \sinh 2kh))} \frac{1}{F} \right\}^{1/2} \quad \dots (12)$$

ここで、

$$F = \frac{1 + (M/\rho g) k^4}{1 + (\rho_i/\rho) k h_i \tanh kh}$$

なお、添字₀は open water での値であることを示す。

図-10 は波高変化率の計算結果であるが、周期が短いほど平板下での波高は小さくなり、その割合は板が厚いほど大きい。本計算と Carter らの結果を比較すると、ほぼ同一の結果であった。これは板の持つ全エネルギーは波動の持つ全エネルギーに比べて小さく、そのため実際は輸送されない板のエネルギーを含めて計算しても大差ない結果となったためである。

4.3 実験結果との比較

線形解析では連続平板を想定しており、また板の波動の進行方向への移動も考慮していないので、このような条件に最も近い条件3での実験結果との比較を行った。

図-11 は波速に関する実験値と理論値の比較を示している。平板下においても理論値は実験値と極めてよく一致しており、波速に関しては線形理論によって十分な精度で予測が可能である。

図-12 は open water での波高と平板下での波高の比に関する実験値と理論値を比較したものである。理論値が 2~3 割実験値より大きい場合も見られるが、定性的には波高変化特性をよく表現しており、また定量的にも線形解析としては満足できる結果であると言える。

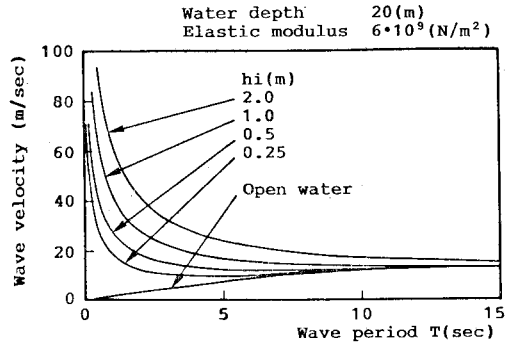


図-9 波速の計算例

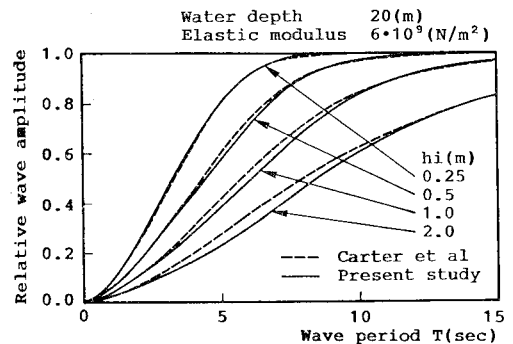


図-10 波高変化の計算例

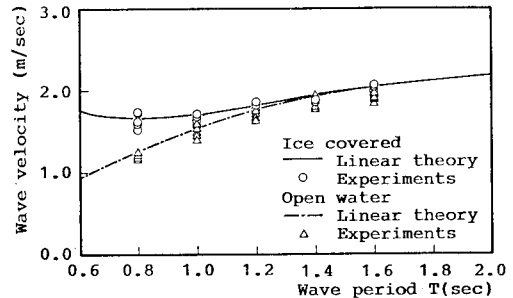


図-11 氷板下での波速の理論解と実験結果との比較

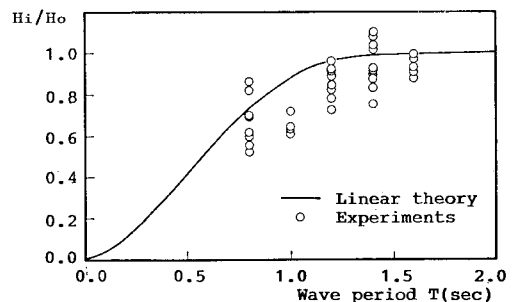


図-12 氷板に進入する際の波高変化の理論解と実験結果との比較

5. 結 語

本研究では氷板に進入する際の波浪変形と氷板下を進行する間の波浪減衰について、模型氷板と実氷板を用いた実験及び線形解析により検討した。主な結論を要約すると以下のである。

- 1) 波高は氷板に進入する際に大きく変化し、氷板下での減衰は比較的緩やかである。
- 2) 氷板に進入する際の変化率は周期が短いほど大きく、また周期が短い場合に氷の状態（氷片、氷板、接岸した氷板）の影響が現れる。
- 3) 氷板下での波高減衰率は式(1)で近似できる。
- 4) 実氷板を用いた実験と模型氷板を用いた実験を比較すると、波高減衰率は同一の傾向を示す。
- 5) 平板下での波動の線形解から計算される波速は実

験結果とよく一致し、またエネルギーフラックス法による波高変化の計算結果も実験での変化特性を定性的によく表現している。

謝辞 最後に、本研究に際し当時岩手大学学生の川口臣君（現秋田県土木部）と内藤幸弘君（現東京電力）の協力を得たことを記し、ここに感謝の意を表します。また、本研究の一部は文部省科学研究費補助金（重点領域研究（1））、代表者：北海道大学工学部 佐伯 浩教授により行われたことを付記する。

参 考 文 献

Carter, D., Y. Ouellet, P. Pay (1981): Fracture of a solid ice cover by wind-induced or ship-generated waves, Proc. of 6th Int. conf. on Port and Ocean Eng. under Arctic Conditions, pp. 843-856.