

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

金田成雄*・今井 正***・平山健一****・堺 茂樹*****

1. はじめに

氷海域に進入した波浪により氷板は変形し、変形がある限界を超えると曲げ破壊が生じる。破壊した氷片は波浪と共に運動し、これが海洋構造物などに対する衝撃水力の原因となる。また近年、欧州と極東を結ぶ最短航路となる北極海航路の開発が世界的に注目されているが、航行時の船首波と氷板の干渉は船舶の水中航行性能に影響するなど、氷板と波浪の相互干渉の解明も重要な課題の一つとなっている。

相互干渉に関する従来の研究としては、Wadhams (1973)、Carterら (1981) が弾性平板下での波動の線形解を用いて、氷板下での波浪特性及び波浪による氷板の破壊条件等を検討しているが、現地観測あるいは実験による検証は為されていない。堺ら (1992) はプラスチック板を用いた実験を行い、波浪による氷板の変形特性を検討しているが、実際の氷とは物性の異なる材料を用いることによる影響等の議論が残されている。

上記のような従来の研究を踏まえ、運輸省船舶技術研究所と岩手大学との共同研究では、波浪による氷板の変形及び破壊に関する二種類の実験が計画されている。一つは堺ら (1992) と同様なプラスチック板を用いた模擬氷実験であり、入射波の特性を広範囲に変化させ、変形特性を詳細に検討する。特に、これまでの実験では行われていない氷厚の影響に関する検討を行う。次いで、氷海船舶試験水槽 (以下、氷海水槽) において、模型氷 (物性などをスケールダウンさせて作成された実験用の氷) を用いた実験を行う。この実験に於いては、模擬氷実験では不可能である氷板の破壊を再現することが出来る。

本論では、波浪による氷板の変形に関する模擬氷実験及びいくつかの条件で行われた模型氷実験の結果を述べると共に、両者を比較することにより、模擬氷を用いることの有効性を検討する。

2. 模擬氷実験

2.1 実験方法

模擬氷実験は、長さ 26 m、幅 0.8 m、深さ 1 m の二次元造波水路を用いて行った。実験に使用した模擬氷板は、幅 78 cm、長さ 2 m のポリプロピレン板を 5 枚用い、これをボルトで接続し、長さ 10 m の連続板とした。造波中の冠水を防止するため、模擬氷板の前後には塩化ビニール板を一定の角度で貼り付け、また側面には極薄いビニールシートを貼り、それを立ち上げてある。また、氷厚の影響を検討するため、板厚が 5、10、20 mm の 3 種類のものを使用した。なお、板の比重は 0.914、弾性率は $E=458$ MPa である。

入射波の周期及び波形勾配は、表-1 のとおりで、水深は 60 cm とし、各厚さの氷板に対し計 24 ケースの実験を 2 回づつ行った。

開水域での波高及び波速の測定は容量線式波高計を用い、Healy の方法により入射波と反射波を分離した。模擬氷板の変形は超音波式変位計を用いて測定した。

以下では主に氷板厚の影響について述べる。

2.2 氷板変形の振幅及び伝播に伴う減衰

図-1 は開水域での波高及び氷板変形の振幅 (以後、変形振幅と呼ぶ) を示しており、中央の 10 m が変形振幅、その前後が波高である。長周期波では、模擬氷板前端付近での変形振幅は波高とほぼ同一であり、変形が氷板を伝播する間に次第に変形振幅は減少している。一方、短周期波では波高に比べ変形振幅は小さく、振幅伝達率は長周期波の方が大きい。図-2 は変形振幅に対する氷厚の影響を示しているが、氷板が厚くなる程変形振幅は全体的に小さい。なお、いずれの氷厚の場合でも、入射波

表-1 入射波の特性

周期 (sec)	波 形 勾 配 (H/L)			
0.8	0.015		0.02	
1.0				
1.2	0.03		0.05	
1.4				
1.6	0.015	0.02	0.03	0.04

* 運輸省船舶技術研究所氷海技術部
 *** 学生会員 岩手大学大学院 工学部研究科
 **** 正 会 員 工博 岩手大学教授 工学部建設環境工学科
 ***** 正 会 員 Ph.D. 岩手大学助教授 工学部建設環境工学科

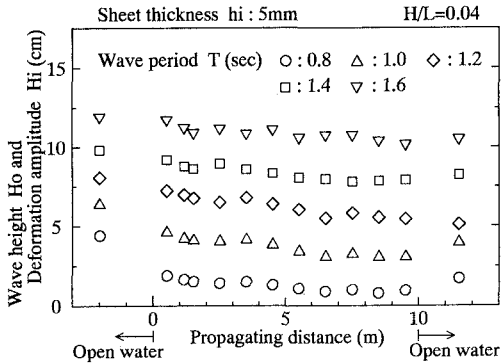


図-1 開水域の波高及び変形振幅に対する周期の影響

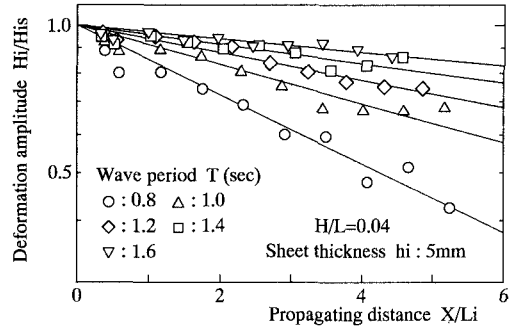


図-3 氷板内の振幅減衰

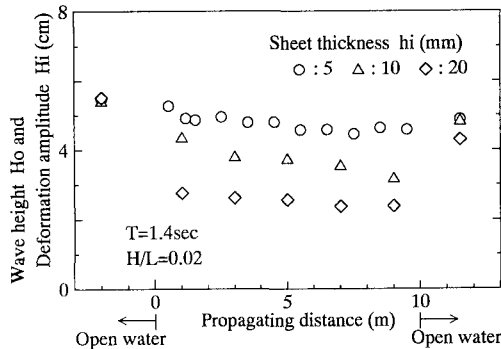


図-2 開水域の波高及び変形振幅に対する水厚の影響

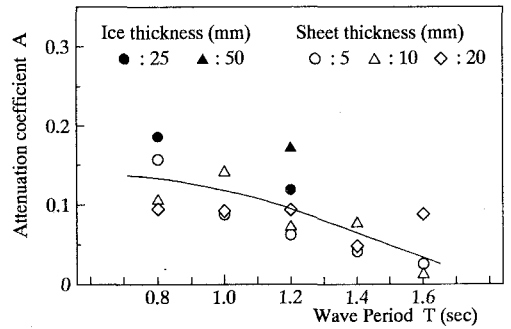


図-4 振幅減衰率

の波形勾配の影響は見られなかった。

図-3は変形が氷板上を伝播する間の振幅の変化を示したものであり、縦軸は氷板前端に最も近い測点での振幅で、また横軸は氷板の変形形状の波長で無次元化している。変形振幅は無次元伝播距離と共に、指数関数的に減少しており、減衰率は短周期波の方が大きい。減衰率に対する水厚の影響を検討したのが図-4であり、各周期毎の減衰率は水厚によって多少ばらつくが、明瞭な傾向は見られない。入射波の波形勾配の影響もないことから、伝播に伴う振幅減衰率は周期のみに依存していると言え、平均的には図中の実線で近似できる。

図-5は振幅伝達率に対する入射波の周期及び水厚の影響をまとめたものである。この図に示した変形振幅は計測された値ではなく、以下の方法によって見積もったものである。上述の伝播に伴う減衰の影響は氷板前端に最も近い計測点での値にも含まれており、波動から氷板変形への振幅伝達率を考える場合にはこの影響を除く必要がある。そこで、図-3で示した振幅減衰の近似直線を用いて、氷板前端での値を見積る。図-5から分かるように、伝達率は周期が短い場合に小さくなり、また水厚が厚い程小さいが、短周期波ではその差は減少している。

図中の実線は弾性平板下での波動の線形解を用い、エ

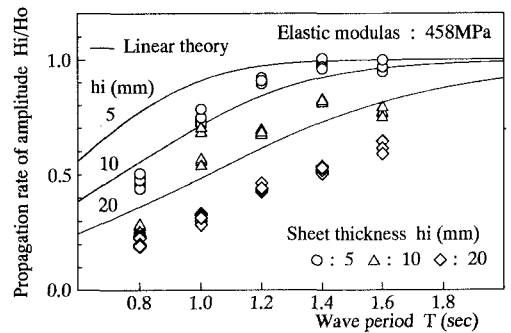


図-5 振幅伝達率

ネルギーフラックス法によって計算された波高変化の解析解であるが、伝達率が周期及び水厚に依存していることなどを定性的に表現してはいるが、定量的には充分とは言えない。この原因としては波動の非線形性あるいは氷板と波動の非線形干渉の影響が考えられたが、堺ら(1994)が誘導した氷板下での波動の三次近似解を用いても、線形解に比べ大きな違いはなく、非線形性の影響とは言えない。波浪による氷板の変形は流体と弾性体の干渉であるが、表面の変形が流体運動としては微小であっても、弾性体の変形としては大きく、いわゆる“大変形問題”として扱わなければならない可能性がある。この

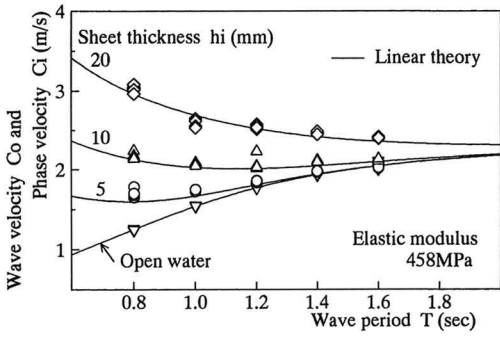


図-6 氷板変形の伝播速度

ような観点から、現在新たな波動解を検討中である。

2.3 氷板変形の伝播速度

図-6は変形の伝播速度を示したもので、開水域での波速は周期が短い場合に遅くなるのに対し、伝播速度はある周期以下では逆に増大する。また、全体的に波速より大きく、その差は氷厚が厚くなるほど顕著となる。図中の実線は前述の線形理論によるものであり、いずれの氷厚に対しても実験結果と良く一致しており、弾性平板下での線形理論は氷板の変形伝播速度を十分な精度で計算することができると言える。

以上のように、模擬氷実験での結果に基づき、主に氷厚の影響について述べたが、氷板の変形特性に影響するものは、

- 振幅伝達率 : 入射波周期, 氷厚
- 振幅減衰率 : 入射波周期
- 変形伝播速度 : 入射波周期, 氷厚

となる。

3. 模型氷実験

3.1 実験方法

模型氷実験を行った氷海水槽は、図-7に示すとおり、長さ35m、幅6m、水深約1.8mであり、各国にある氷海水槽の中では中規模なものである。通常の船舶試験施設である曳航水槽と基本的には同じ機能を有しているが、水槽全体が冷凍庫の中に設置されており、庫内温度を-30°C程度まで冷却することが可能である。水槽の底面及び側面は断熱されており、水面のみを冷却することにより、実際の寒冷水域に於ける氷の生成に近い状態を再現することができる。通常は氷の物性、砕氷船の航行性能あるいは海洋構造物に作用する水力等に関する実験を行う施設であるが、今回新たにプランジャー式造波装置を設置し、造波実験を行った。

実験では船舶あるいは海洋構造物を適当な縮尺で縮小した相似模型を用いるが、実験に供する氷も実験の縮尺に合わせて氷の機械的諸特性を調整した、いわゆる「模

型氷」である必要がある。模型氷の調整すべき特性には各種あるが、最も重要となるのが氷厚、各種の強度、弾性率及び摩擦係数等である。氷厚については比較的精度よく制御することが可能であり、また摩擦係数も実際のものに近い。しかし、その他の特性を制御するにはいくつかの工夫が必要となる。その主なものは、

- 1) 海水が成長する過程で海水中の塩分は凍らず、高濃度塩水(ブライン)として結晶内に在留しており、これが強度の低下をもたらすが、模型氷内にブラインを発生させるため、凝固点の低い溶質を添加する。この添加物の量により強度の調整を行う。
- 2) 結氷開始時点で水槽室内に水を均一に噴霧する(seeding)ことにより結晶核を人工的に与え、氷の構造を微細化する。
- 3) 凍結させた後、結氷点近傍の温度下で適当な時間放置することにより氷の強度を低下させる(tempering)などである。

本実験では、添加物としてプロピレングリコール(濃度0.6%)を用い、以下の手順で模型氷を製作した。水面の氷片を排除した後、seedingを行い-20°Cで製氷を続ける。この温度下では、氷は2.5mm/hr程度の割合で成長するので、所定の氷厚に達する時間が経過した時点で庫内温度を-2°Cまで昇温し、氷のtemperingに入る。本実験での模型氷では15時間程度で強度低下がほぼ無くなり、定状態となるため、この時点で実験を開始する。なお、seedingから実験開始まで24~34時間を要する。

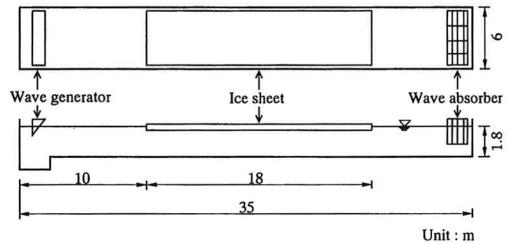


図-7 氷海水槽

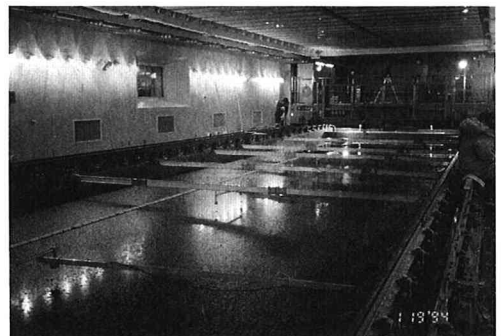


写真-1 実験状態

図-7のように水槽端付近の水を取り除き、実験には水路中央の18mの水板を使用し、側壁より5cm程度の水を取り除いてある。また、水板の各隅にはポールを下ろし、水板が波の進行方向に移動するのを防いだ。水槽前端から2m付近に造波板を設置し、水槽後端では消波板により反射波を軽減している。

波高は超音波式変位計により、また水板の変位はレーザー式変位計を用い、水槽の中心線上で計測した。

3.2 模型水の強度試験

造波実験に先立ち、水板の物性の計測が必要である。本実験の対象となる現象では、水板の弾性率と曲げ強度が重要であるため、以下の方法により計測した。曲げ強度は、水板の一部を片持ち梁状に切り出し、その先端に載荷し、破壊荷重から弾性梁理論による曲げ強度 σ_f を計算した。この方法は、現地試験との直接的比較が可能であること、試料を水面から引き上げずに試験が行え試料の変質がないこと等の利点があり、最も一般的な手法である。なお、片持ち梁6本に載荷し、その平均値を曲げ強度として用いた。水板の弾性率については、一般にPlate Deflection Method (PDM) と呼ばれる手法(例えば、Hirayama, 1983)により計測した。この方法は、鉛直に荷重を加えた時の変位から、弾性薄板理論により弾性率を推定する方法である。本実験では、一定の荷重を2段階に載荷し、この時の変位をレーザー式変位計により計測した。計測例を図-8に示す。各載荷時及び除去時毎の変位から弾性率を計算し、その平均値を模型水板の弾性率とした。

模型水実験に於いても、入射波特性及び水板特性を

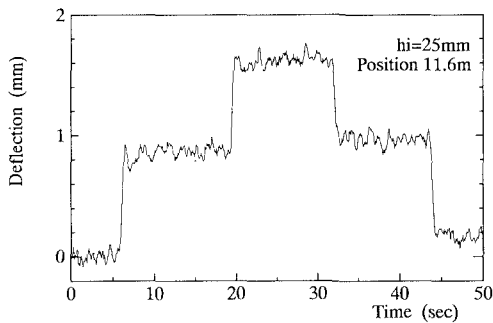


図-8 弾性係数計測時の載荷に伴う水板の変位

表-2 実験条件 (模型水)

Case	周期 T (sec)	波形勾配 H/L	水厚 h_i (mm)	曲げ強度 σ_f (kPa)	弾性率 E (MPa)
1	0.8	0.02	25.15	22.61	7.18
2	1.2	0.015	25.17	23.41	12.12
3	1.2	0.01	49.23	35.09	23.76

種々変化させ、系統的に検討することが望ましいが、実験回数は模型水作成の費用と実験に要する時間によって制限される。本研究では、波浪による水板の変形特性に対する入射波周期と水厚の影響を検討するため、表-2に示す3ケースの実験を行った。

3.3 模型水実験結果

図-9は変形振幅に対する入射波周期の影響を示したもので、周期が長い場合には水板前端付近の振幅は波高とほぼ同じであるが、短周期の場合の伝達率は著しく減

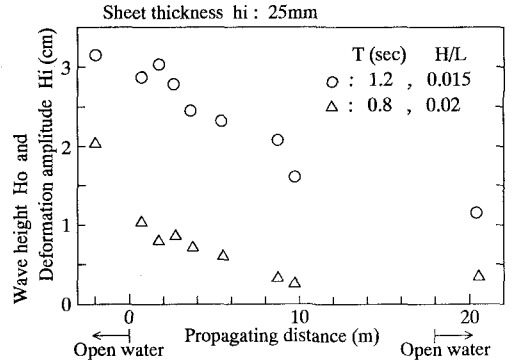


図-9 開水域の波高及び変形振幅に対する周期の影響

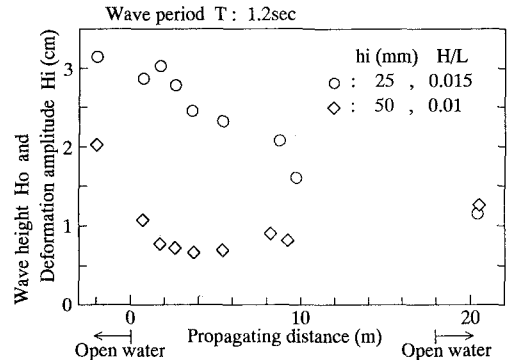


図-10 開水域の波高及び変形振幅に対する水厚の影響

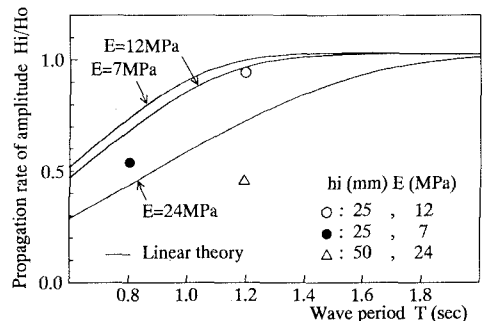


図-11 振幅伝達率

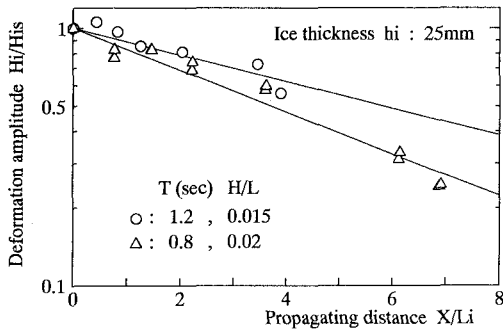


図-12 氷板内の振幅減衰

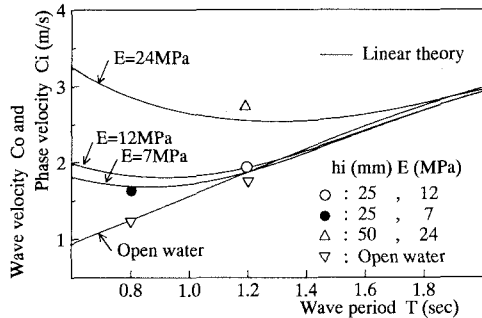


図-13 氷板変形の伝播速度

少している。図-10は氷厚の影響であるが、厚い氷板での変形振幅は波高に比べかなり小さい。図-11に振幅伝達率を示したが、伝達率が入射波周期及び氷厚に依存していることが分かる。また、図-12は振幅の減衰を示しているが、若干ばらつきはあるが減衰の傾向は実線によって近似でき、その傾きは周期によって異なる。図-4中には模擬氷実験での結果と共に模型氷での減衰率も示してある。模擬氷での値より若干大きめであり、また模型氷の氷厚が厚い程大きくなっているが、弾性率の違いが現れているものと考えられる。

図-13は変形の伝播速度の実験結果を線形解と共に示したが、模擬氷実験と同様良く一致しており、伝播速度に対する線形解の有効性が模型氷でも確認できる。

以上のように、伝達率、振幅減衰率及び伝播速度に関して、模型氷実験での結果は模擬氷でのものと同一であ

り、模擬氷実験の有効性を確認できた。

4. 結 論

本研究では、模擬氷と模型氷を用いた実験を行い、変形特性を検討し、また両者の比較により模擬氷実験の有効性を検討した。主な結論を要約すると以下のようになる。

- 1) 氷板に進入する際の波動の伝達率は入射波周期に依存しており、更に氷厚によっても大きく異なる。これは模型氷実験においても確認され、波形勾配の影響は本実験条件の範囲内では見られない。
- 2) 氷板内での伝播速度も入射波周期及び氷厚に依存しており、波形勾配の影響は見られず、模型氷実験も同一の傾向を示している。
- 3) 氷板内を進行する間の振幅減衰率は、波長で無次元化した進行距離の指数関数で表現でき、その減衰係数は波形勾配及び氷厚には依存せず、周期に依存しており、模型氷実験での値は模擬氷でのものより僅かに大きい、ほぼ同一の結果である。
- 4) 以上のような模型氷と模擬氷との比較の結果、波浪と氷板の干渉に関する模擬氷を用いた実験の妥当性が認められる。
- 5) 氷板内の波動の線形解は、伝播速度に対する入射波周期及び氷厚の影響を定量的に良く表現しているものの、波動の伝達率に関しては定性的傾向を説明するに留まり、今後の検討を必要とする。

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・劉 曉東・平山健一 (1994): 弾性平板下の波動の三次近似解とこれに基づく氷板破壊条件, 海岸工学論文集, 第41巻, (印刷中).

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.

Hirayama (1983): Properties of urea-doped ice in the CRREL test basin, CRREL REPORT 83-8, p. 44.

Wadhams, P. (1973): Attenuation of swell by sea ice, Journal of Geophysical Research, Vol. 78, No. 18, pp. 3552-3563.