

波浪による氷板の破壊に関する氷海水槽実験

堺 茂樹* ・笹本 誠** ・平山 健一***・劉 曉東****
松村 洋*****・金田成雄*****・泉山 耕*****

1. 緒 言

近年、北ヨーロッパと東アジアを結ぶ最短航路として、北極海航路の開発が注目されている。この実現には、経済性の評価、開発に伴う環境変化の予測、氷海航行技術の開発など多くの課題があり、工学的には氷海航行用最適船の開発、寄港先となる港湾の耐氷設計法の確立が主なものである。構造物に対する氷力の算定には、潮汐や風に起因する一般的な力に加え、氷塊が波浪と共に衝突する際に発生する衝撃氷力を考慮すべきであることが指摘されている。衝撃氷力の算定には、波浪による氷板の破壊、破壊された氷片域での波浪の減衰、構造物近傍での波浪に伴う氷片の運動といった、一連の現象の理解が必要である。

著者らは、その第一段階として波浪による氷板の変形に関する理論解析及び実験を行ってきた。これまでの実験では、模型氷として主にポリプロピレン板を使用していたため、破壊に関する実験的な検討は不可能であった。そこで、本研究では模型縮尺に対応して物性を調整した模型氷を用いて、波浪の進入に伴う氷板の変形及び破壊に関する実験を行い、氷板に進入する際の波高変化、氷板下での波速、氷板破壊条件及び破壊幅を検討した。また、これらに関する理論の適用性の検討も行った。

2. 実験装置および実験方法

2.1 実験装置

実験は運輸省船舶技術研究所の氷海船舶試験水槽にプランジャー式造波機を設置して行った。図-1に示すように、氷板の前端8m、後部9mを取り除き、水槽中央の18mを実験に使用した。また、側壁の影響を除くため、側壁から5cm程度を切り取ってある。氷板の後端では直径約2cmのパイプを水中に下ろすことにより、氷板が波の進行方向に移動するのを防いでいる。なお、水槽

後端では消波板により反射波を軽減している。

2.2 氷質試験

造波実験に先立ち、金田ら(1994)と同様の手順に従い、片持ち梁試験による曲げ強度とPDM (Plate Deflection Method) による弾性率の測定を行った。各ケースでの値は表-1に示すとおりである。

本実験に使用した模型氷は、プロピレングリコールの水溶液を凍結させた、いわゆるPG氷である。このような模型氷は写真-1に示すような二層構造を有し、上層には粒状構造のTop layerと呼ばれる高強度の層が形成され、下層には柱状構造の強度的に脆い層が出来る。そのため、載荷方向によって曲げ強度に差が生じる。

一方、海水の強度は水温の低下に伴い増大することが知られている。一般に、実氷海では気温は水温より低い

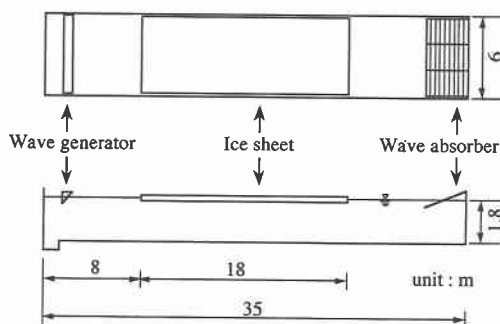


図-1 実験装置

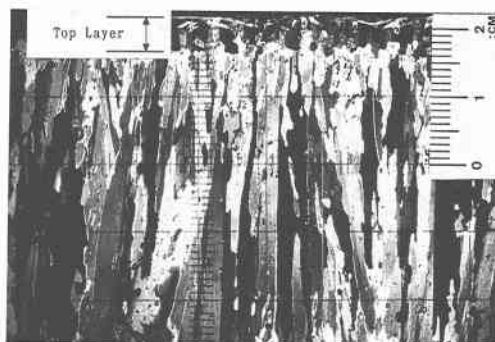


写真-1 模型氷の結晶構造

* 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
*** 正 会 員 Ph.D. 岩手大学教授 工学部建設環境工学科
**** 学生会員 岩手大学大学院 工学部建設環境工学科
***** 学生会員 岩手大学 工学部建設環境工学科
***** 運輸省船舶技術研究所 研究官
***** 正 会 員 工修 運輸省船舶技術研究所 主任研究官

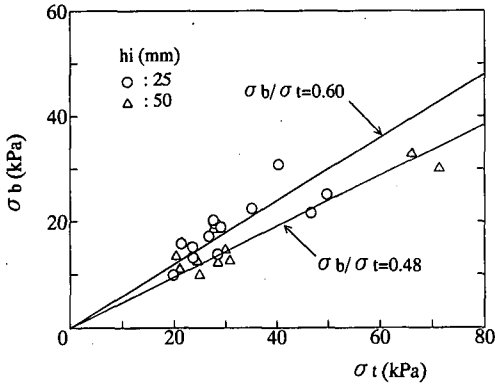


図-2 載荷方向による曲げ強度の違い

ため、氷板の下層に比べ上層ほど温度が低く、従って高強度となる。しかし、氷中の温度差は真冬には顕著であるが、春期に向けて次第に減少する。また、このような環境条件の影響に加え、氷板の細部構造（ブライン体積等）あるいは氷板の成長履歴（一年氷、多年氷）などによっても、強度分布が生じる。以上のように、Top layerの存在は模型氷に特有なものではあるが、実際の海水に於いても載荷方向による強度の差が存在する。

本研究で使用した模型氷については、載荷方向による曲げ強度の違いを3点曲げ試験により検討した。Top tensionの曲げ強度を σ_t 、Bottom tensionを σ_b と表すと、本実験に用いたPG氷での σ_b と σ_t の関係は図-2のようになり、両強度の関係は以下のように近似できる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_b &= 0.60\sigma_t & (h_i = 25 \text{ mm}) \\ \sigma_b &= 0.48\sigma_t & (h_i = 50 \text{ mm}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

2.3 造波実験

入射波の周期を表-1のような範囲とし、各ケースでは波高を数種類変化させた。氷板の変位は超音波式変位計とレーザー式変位計を用いて水槽の中心線上で計測した。

実験ではまず波高の小さな波を造波し、氷板の変形を計測する。造波を停止した後、波高をわずかに増大させ、同様の計測を行い、これを氷板が破壊するまで繰り返す。破壊が生じた後、同一の波高では破壊が進まないことを確認してから、更に波高を増大させ、氷板に数本のクラックが発生するまで繰り返す。初めのクラックが発生した後の実験は、氷板の前に氷片群が存在する海域に波が進入する場合に相当する。

3. 氷板下での波高及び波速

曲げ変形による応力が氷の強度を越えた時点で氷板の破壊が生じるが、その変形量は氷板下での波高及び波長で決まる。そこで、まず氷板下での波浪特性について述

表-1 実験条件

Case No.	周期 T(s)	開水域での波高 H_0 (mm)	氷厚 h_i (mm)	曲げ強度 σ_t (kPa)	弾性率 E(MPa)
1	1.19	20.5~30.2	49.2	35.1	21.8
2	0.80	20.6~26.1	25.2	22.6	5.3
3	0.79	12.3~32.0	28.4	36.0	31.4
4	0.80	18.9~32.2	53.3	39.7	29.3
5	0.99	29.7	53.3	39.7	29.3
6	1.40	20.6~27.7	53.3	39.7	29.3
7	1.20	27.7~29.7	54.2	38.1	34.3
8	1.40	14.3~26.7	23.2	119.3	125.4
9	1.20	17.9~23.8	24.3	137.4	202.5
10	1.00	18.4~26.0	23.2	87.9	201.5

べる。

3.1 氷板に進入する際の波高変化

図-3は開水域及び氷板下での波高を示しており、縦軸は開水域での波高との比であり、横軸は氷板端からの距離を氷板下での波長で無次元化した値である。図中には4種類の入射波高での結果を示してあるが、この程度の範囲では波高の影響は見られない。氷板下へある程度進入した後は、波高は距離の増加に伴い指数関数的に減少しており、図中の回帰直線で近似できる。Wadhams (1973)はクリープによる、またSquire and Allan (1980)は氷を粘弾性体と見なした場合の粘性によるエネルギー逸散によって上記の減衰特性を説明している。

一方、氷板端の近傍では、氷板と波浪の干渉による波高変化と上記の減衰が同時に生じている。このような範囲でも上記のエネルギー逸散による波高変化は指数関数的であるとすれば、図中の近似直線を延長した時の氷板端での値が氷板と波浪の相互干渉の効果を表していると思なせる。この方法で推定した相互干渉による波高変化の例を示したのが図-4である。なお、波高変化には氷厚及び弾性率が影響する(金田ら, 1994)ことから、これ

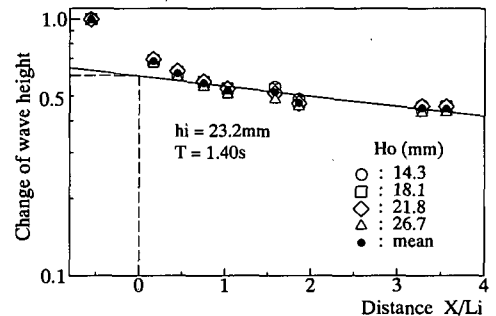


図-3 氷板下での波高の変化

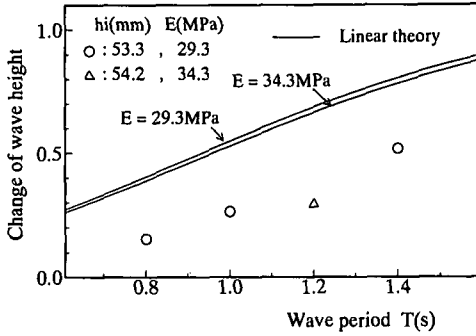


図-4 氷板と波浪の干渉による波高変化率

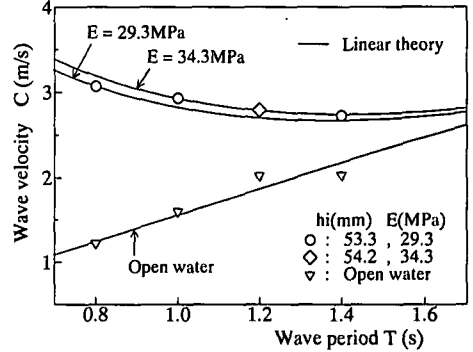


図-6 波速と周期の関係

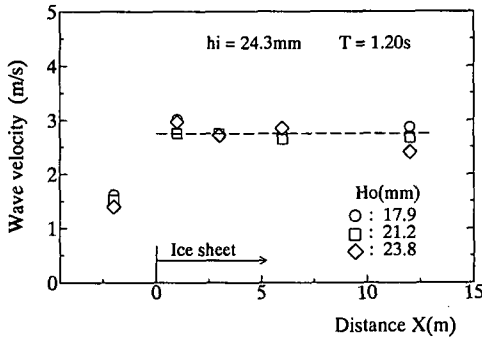


図-5 氷板下での波速

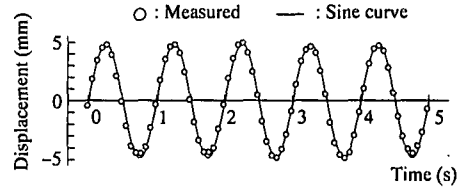


図-7 氷板変形の時間波形

らの値がそれぞれほぼ同一であるケースでの結果のみを
図示してある。波高の変化は周期が短いほど大きく、ま
た他の実験結果を含めると氷厚、弾性率が大きいほど変
化も大きくなる傾向がある。図中の曲線は弾性平板下で
の波動の線形解を用いたエネルギーフラックス法による
波高変化の理論解（堺ら，1992）であり，実験結果の傾
向を説明しているが，定量的な精度は不十分であり，
さらに検討が必要である。

3.2 氷板下での波速

破壊発生以前の氷板下での波速の測定例を図-5に示
す。氷板下ではほぼ一定の値であり，また波高の影響も
無視できる程度のものである。氷板下での波速は周期及
び水深の他に，氷厚及び弾性率に依存する。そこで，図-4
と同様，これらの値がそれぞれほぼ同一であるケースで
の波速と周期の関係を示したのが図-6である。開水域
では周期の減少と共に波速も減少するのに対し，氷板下
では逆に増大する。図中の曲線は弾性平板下での波動の
線形解による理論値であるが，実験結果と良く一致して
いる。他のケースでの結果に対しても同様であり，本実
験条件の範囲内では線形解が極めて精度良く波速を表現
している。

4. 氷板の破壊条件及び破壊幅

4.1 氷板の破壊条件

弾性平板に曲げ変形が生じている時の縁応力 σ は，平
板厚を h_i ，変形を η とし，ポアソン比 ν を用いると，

$$\sigma = -\frac{Eh_i}{2(1-\nu^2)} \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} \dots\dots\dots (2)$$

となる。氷板変形の時間波形は図-7に示すように，三角
関数で近似でき，さらに図-5に示したように波速はほ
ぼ一定であるから，空間波形も三角関数で表すことがで
きる。波高を H とし，さらに氷の曲げ強度 σ_f を代入して
整理すると，破壊時の波高は

$$\frac{Hh_i}{L_i^2} = \frac{1-\nu^2}{\pi^2} \frac{1}{E/\sigma_f} \dots\dots\dots (3)$$

となる。

破壊が生じる瞬間を目視によって確認するのは極めて
難しく，氷板に生じたクラックがわずかに広がった段階
で破壊していたことが確認できる。破壊した後では，破
壊位置より前方（造波機側）で測定される波形は連続氷
板としての変形ではなく，氷片の動揺を表しているもの
であり，また後方では氷片の影響のため，破壊する以前
とは異なった波形になっている可能性がある。従って，
破壊が生じた実験での氷板下での波形から破壊時の波高
を測定することは精度的に問題がある。そこで，以下の
ような方法によって破壊時の波高を推定した。

図-8は破壊が生じる以前の実験での，開水域での波

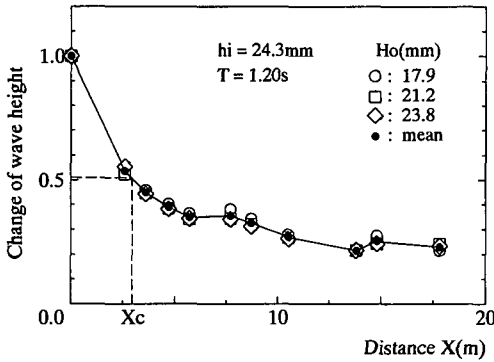


図-8 開水域及び氷板下での波高

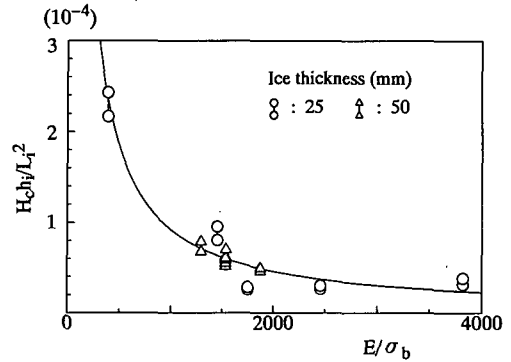


図-10 σ_b を用いた場合の破壊条件

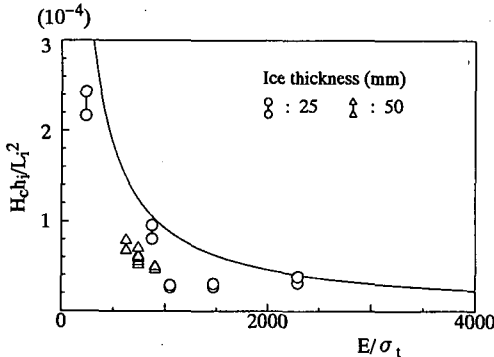


図-9 σ_t を用いた場合の破壊条件

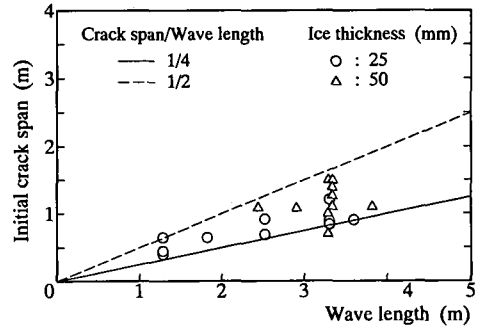


図-11 連続氷板上での破壊幅

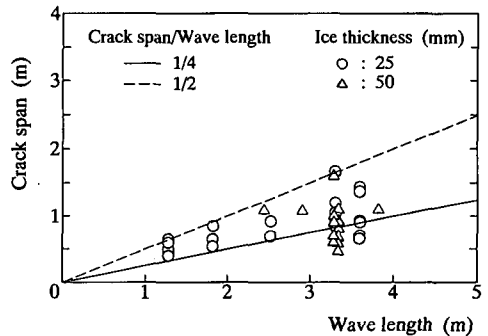


図-12 最終的な破壊幅

高に対する氷板下での波高の比を示しているが、入射波の波高に関わらず波高比と距離の関係は同一の傾向を示している。そこで、破壊が生じる瞬間まではこの関係が維持されているとすると、図中の平均線と開水域での波高から破壊位置 (X_c) での波高が推定できる。この波高は破壊に必要な最小の波高か、あるいはそれより少し大きい値であるから、最小波高 (H_0) は 1 つ前の実験での波高との間にあると考えられる。

以上の方法によって求めた破壊時の波高を用い、式 (3) の形で破壊条件を示したのが図-9 である。図中では、破壊時の波高と破壊直前の波高を線で結んで表示してある。ここでは曲げ強度として Top tension での値を用いたが、傾向は一致しているものの、定量的には一致しているとはいえない。そこで、Bottom tension での曲げ強度を用いると、図-10 に示すように極めて良く一致し、式 (3) が氷板破壊条件として有効であることがわかる。また、Top tension の曲げ強度は波頂で破壊が生じる場合に対応しており、また Bottom tension は波谷で破壊する場合に対応する。従って、Bottom tension での曲げ強度を用いた場合に理論解と実験結果が一致したことは氷板は波谷で破壊することを示している。

4.2 氷板の破壊幅

氷板上に発生するクラックは、波の進行方向にほぼ垂直である。連続氷板が破壊する時の幅と波長の関係を図-11 に示す。図中の直線の傾きは 1/4 と 1/2 であるが、実験結果は 2 本の直線間にある。従って、氷板の破壊幅は氷板下での波長に依存しており、波長の 1/4 から 1/2 であることが分かる。

初めの破壊が生じた後で、入射波高をさらに大きくすると、連続氷板上での破壊も生じるが、既に破壊された氷片がある程度大きい場合にはさらに破壊する場合もあ

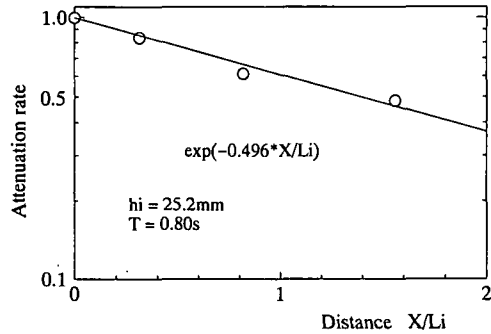


図-13 氷片による波高減衰

る。波高が過大であったり、造波時間が長すぎると、氷片間の衝突などによる破壊も生じるが、波浪による曲げ破壊のみが生じていると思われる最終的な氷片の幅は図-12 のようになる。再破壊のため、1/4 波長より短いものも現れるが、大半は波長の 1/4~1/2 であり、氷海域の連続氷板端で見られる規則的な破壊状況が再現された。

5. 氷片による波浪減衰

破壊が生じた後に同一の入射波高で造波を継続しても、連続氷板上ではそれ以上の破壊は生じない。これは破壊された氷片を通過する間に波浪エネルギーの減衰が生じ、連続氷板に達した時点では破壊に必要な波高以下になっているためである。

減衰率を算定するには、氷片群の前後での波高を計測すればよいのであるが、本実験に於いては氷片群の後方での開水域の波高は計測していない。そこで、以下のように推定した。図-10 に示したように、氷板破壊時の波高は式 (3) で表されるので、氷板が均質であり同一の周期であれば、氷片の有無に関わらず、破壊が生じた位置での波高は同一であると考えられる。したがって、氷片がある場合と無い場合での開水域での波高の比が氷片による減衰率を表すことになる。

以上の方法で推定した減衰率の例を図-13 に示す。氷板下での減衰と同様、距離の増加に伴い指数関数的に減衰しており、減衰係数は図中の回帰直線から求められる。このような減衰特性は北極海などでの現地観測でも確認されている (例えば、Wadhams, 1978)。

上記の解析が可能であったのはわずか 4 ケースのみであり、表-2 にその結果を示す。ポリプロピレン板(厚さ

表-2 氷片による波高減衰係数

Case No.	周期 T(s)	氷厚 h _i (mm)	弾性率 E(MPa)	減衰係数 AC
2	0.80	25.2	5.3	0.496
7	1.20	54.2	34.3	0.610
9	1.20	24.3	202.5	0.387
10	1.00	23.2	201.5	0.223

5 mm) を用いた実験 (Sakai et al, 1993) での減衰係数は約 0.05 以下であったのに対し、本実験での値はかなり大きい。この相違の原因としては、測定方法、実験条件の違いが考えられる。ポリプロピレン板を用いた実験ではある一定の間隔で氷片群中の波高を測定したのに対し、本実験では前述のように開水域での波高から推定しており、このような推定方法に精度的な問題があるのかもしれない。また、実験条件の違いとしては、主に弾性率と厚さであるが、これらが波の反射あるいは散乱に影響している可能性もある。

謝辞： 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.

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.

Sakai, S., T. Horiai, T. Imai, M. Sasamoto, S. Kanada, K. Hirayam (1993): Wave Attenuation Under Ice Sheet, Proc. of 12th Int. Nat. Conf. on Port and Ocean Eng. under Arctic Conditions, Vol. 2, pp. 959-968.

Squire, A. V. and A. J. Allan (1980): Propagation of Flexural Gravity Waves in Sea Ice, Proc. of the Arctic Ice Dynamics Joint Experiment, pp. 327-338.

Wadhams, P (1973): Attenuation of Swell by Sea Ice, J. G. R., Vol. 78, No. 18, pp. 3552-3563.

Wadhams, P (1978): Wave decay in the marginal ice zone measured from a submarine, Deep-Sea Res., Vol. 25, pp. 23-40.