

海水による波浪の減衰に関する一考察

Experimental study on an attenuation of wave by sea ice

水野雄三*・谷野賢二*・平沢充成**・高橋哲美*・長内戦治***

Yuzo.Mizuno,Kenji.Yano,Mitsunari.Hirasawa,Tetsumi.Takahashi and Senji.Osanai

Until now, offshore areas of Hokkaido coast faced on the Okhotsk sea have rarely been utilized in winter seasons because of pack ice driven to the coast. To utilize the sea areas more fully, it is necessary to control sea ice by ice barriers. The more the sea surface off the coast is covered by the sea ice, the more the wave height near shore is damped. Authors experimented on the attenuation of wave height due to ice cover by using model ice plates. Finally, the relations between the transmission coefficient under the various wave and ice conditions have been found.

Keywords: (sea ice, attenuation of wave height)

1. はじめに

北海道のオホーツク海沿岸には冬期間流水が来襲するため、港が閉ざされ貨物船、漁船の航行ができなくなるばかりか、海水による港湾・海岸構造物、養殖施設及び漁場の破壊・損傷等が生じたりしている。近年、地球の温暖化が問題とされているが、流水の来襲状況をみると、ここ数年北海道のオホーツク沿岸を流水が埋め尽くすことがなく、帯状に沖合に分布することが多い。港湾内の海水温をみても比較的温かく終日結氷温度以下に下がることが少ないため、港内及び湖内ですら結氷が生じにくい。

従来、真冬のオホーツク海では、台風並に発達した低気圧が年に1～2度発生するが被害が少ないのは、流水が天然の大規模浮防波堤の役目をしていることによる。近年のように流水が帯状に沖合に分布している時期に低気圧が発達すると大時化になり、小氷塊が防波堤上に打ち上げられ標識灯や構造物を破損したり、サロマ湖に流水が流入して養殖施設に被害を出したりする。これらの対策としては海水制御構造物の設置が不可欠であるが、単に構造物や漁場を守るというのみならず、流水を制御することによりできるだけ開水面を面的・時間的に確保し、船舶の通年航行、資源管理型漁業を一層推進するなど種々の活動を活発化し、地域の活性化を計っていくことも可能となる。

波浪が流水帯を通過する時、流水の密接度、流水塊の大きさ・厚さ、水深等により波の特性（波高、周期）に種々の影響¹⁾²⁾³⁾を受けるため、流水来襲状況毎に波浪の実測データを蓄積し、解析したうえで海水制御構造物を計画・設計することが必要である。しかし、流水が存在する時にある程度以上の時化になる頻度は一シーズンに数回あるかどうかで、調査が実施できるケースは更に少ない。

以上により、本研究は模擬水を用いた水理模型実験で、流水帯が存在する時の波浪減衰効果について検討することとした。

2. 室内水理模型実験

実験は、長さ27m×幅0.6m×深さ1.2mの吸収式不規則波発生装置付き片面ガラス張り2次元水路を用いて、図-1に示すとおり水深を1mと一定として所定の個所に模擬氷を設置し、規則

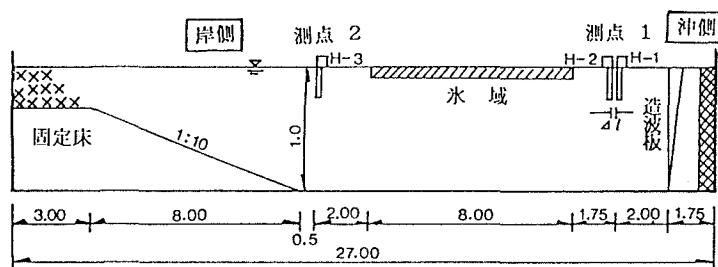


図-1 実験水路及び氷盤、波高計設置位置図

波及び不規則波を作用させ、氷盤帯前後に設置した容量式波高計で波高を測定した。模擬氷は、海水の比重に近くなるように水分調整した「なら材」（厚さ1.7cm, 平均比重0.88）と、比重0.9の「ポリプロピレン」（厚さ2cm）を用い、造波中水路壁面に触れないように氷盤幅は水路幅よりやや狭い58cmとすると共に、波による移動も防ぐため一つ一つに糸で緩い拘束を加えた。なお、以下「なら材」製模擬氷を「W氷盤」、「ポリプロピレン」製模擬氷を「P氷盤」と呼ぶ。

* 正会員 北海道開発局開発土木研究所水工部港湾研究室 (062 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

** 正会員 北海道開発局港湾部空港課

*** 正会員 北海道開発局港湾部

2-1 複数氷盤による実験

本実験は複数氷盤帯を波が進行する時の反射特性と伝達特性を調査するもので、一枚の波進行方向の氷盤長が20cmであるW氷盤を複数枚用いて、所定の氷域長（設置した複数の模擬氷のうち沖側先端から岸側後端までの距離をいう。）になるように設置する。実験は各W氷盤を2cmつつ離して並べた状態（「密接度Ⅳ」（約91～92%氷盤占有）と呼ぶ。）と、この状態から両端のW氷盤を残してとびとびにW氷盤を外して開水面を出した状態（「密接度Ⅱ」（約47～50%氷盤占有）と呼ぶ。）とで実施した。なお、密接度とはある海域に占める海水の占有面積割合で10階級に分類しているが、本報告では4階級に分類した呼称を用い、実験では上記2種類の状態についてのみ実施した。

実験ケースは表-1に示すとおりで、規則波実験では氷域長4ケース、密接度2ケース、波高3ケース、周期4ケースの計96ケースを、不規則波実験では氷域長2ケース、密接度2ケース、有義波高2ケース、有義波周期2ケースの計16ケースを実施した。

表-1 実験条件及びケース

実験内容		実験波	模擬氷種類	密接度	氷盤厚(枚)	波高(cm)	周期(sec)	氷域長又は氷盤長(m)
複数氷盤実験	規則波	W	Ⅱ	Ⅳ	1	2.0	0.7	2.40
						3.0	0.8	4.16
						5.0	0.9	5.92
						1.0		7.68
	不規則波	W	Ⅱ	Ⅳ	1	3.0	0.7	4.16
						5.0	1.0	7.68
単氷盤実験	(1)氷盤長に関する実験	規則波	W		1	2.0	0.7	0.2
						3.0	0.8	4.0
						5.0	0.9	8.0
						1.0		
	(2)氷盤厚に関する実験	規則波	W	P	3	2.0	0.7	0.2
						3.0	0.8	0.4
						5.0	0.9	0.4
						1.0		

2-2 単氷盤による実験

①氷盤長に関する実験

本実験は単一厚さの一枚のW氷盤を用いて、氷盤長が変化することによる氷盤前後の反射特性と伝達特性とを調査するものである。

実験ケースは表-1に示すとおりで、一枚の波進行方向の氷盤長が20,400,800cmであるW氷盤を用いて、規則波実験で、氷盤長3ケース、波高3ケース、周期4ケースの計36ケースを実施した。

②氷盤厚に関する実験

本実験は氷盤長を固定しておき、氷盤厚が変化することによる氷盤前後の反射特性と伝達特性とを調査するものである。氷盤長20cmのW氷盤及び氷盤長40cmのP氷盤を用いて、それぞれ一枚の場合と3枚重ねた場合について規則波実験を行なった。実験ケースは表-1に示すとおりで、氷盤長2ケース、氷盤厚2ケース、波高3ケース、周期4ケースの計48ケースを実施した。

2-3 データ処理

通過波高の測定は、模擬氷盤の沖側及び岸側にそれぞれ2本ずつの波高計を設置して模擬氷盤のない状態で測定した。規則波実験では、収集したデータの内安定した5～7波を選定し、入反射波分離して通過波を定めた。不規則波実験ではブレット・シュナイダー・光易型の周波数特性を有する不規則波を発生させ、205波をパソコンにオンラインで取得し、入反射波分離して通過波を定めた。氷盤帯からの伝達特性の検討では、図-1に示した測点2での測定波高を同じ位置での通過波高で除した値を伝達率として、氷盤帯からの反射特性の検討では、測点1での測定波高を入反射波分離して反射率を求めた。

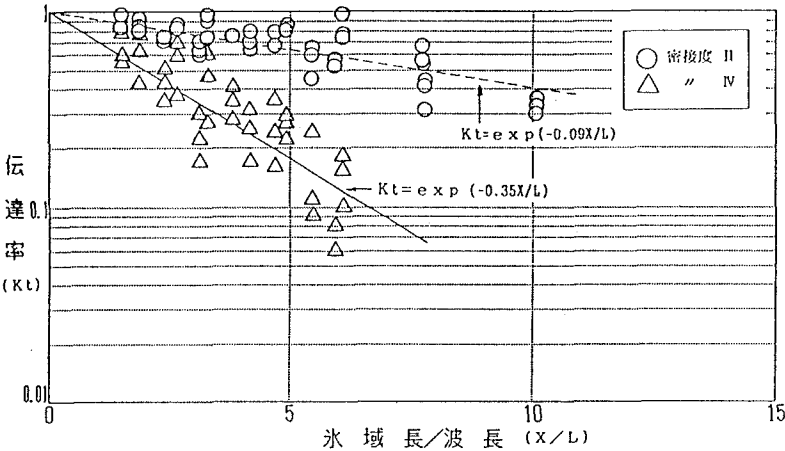


図-2 複数氷盤による伝達特性（規則波、W氷盤）

3. 実験結果

3-1 複数氷盤による実験

①規則波実験

図-2は、氷盤岸側の伝達率と、氷域長を波長で除した無次元量との関係を密接度(Ⅱ,Ⅳ)をパラメータにし

て片対数グラフに図示したものである。伝達率は密接度の大きい方が減衰も大きく、氷域長／波長の増加に伴い直線的に減少している。図中の直線は、実線が密接度Ⅳの、点線が密接度Ⅱの回帰直線を表わしている。

$$\text{密接度Ⅳの回帰式: } Kt = \exp(-0.35X/L)$$

$$\text{密接度Ⅱの回帰式: } Kt = \exp(-0.09X/L)$$

ここで、 Kt : 伝達率、 X : 氷域長、 L : 波長

図-3は、氷盤沖側の反射率と、氷域長を波長で除した無次元量との関係を密接度(Ⅱ,Ⅳ)をパラメータにして片対数グラフに図示したものである。伝達率とは異なり密接度との相関に乏しく、全体的にみるとやや増加傾向にあるが、上限値から判断すると、氷域長／波長が約5以上では最大反射率は約0.2と一定している。

②不規則波実験

図-4は、有義波高、有義波周期を用いて整理した伝達率及び反射率を、規則波実験結果と同様に氷域長を波長($L_{1/3}$)で除した無次元量との関係を密接度(Ⅱ,Ⅳ)をパラメータにして片対数グラフに図示したものである。なお、図中の直線は、図-2で求めた密接度Ⅱ及びⅣの回帰直線を表わしたものである。

初めに、伝達率をみると規則波実験と同様に密接度が大きい方が減衰も大きく、氷域長／波長の増加に伴いほぼ直線的に減少している。規則波実験に比してデータ数が少ないが、規則波実験の回帰直線と比較するとやや上方に位置している。

反射率は、氷域長／波長が2.5以上の領域の値しかないが、最大反射率は約0.2と一定している。

図-5は、一例として密接度Ⅳの状態に有義波高3.0cm、有義波周期1.0secの波を作用させた時の氷盤岸側の透過波の周波数特性を、氷域長をパラメータにして図示したものである。周波数帯でみると氷盤の存在によりピーク周波数より高周波数側領域の方のスペクトル密度の減衰が著しく有義波周期も氷域長の増加と共に1.0secから1.16secに長くなっており、現地で見られる現象と一致している。

3-2 単数氷盤による実験

①氷盤長に関する実験

図-6は、一枚だけ氷盤が氷域に存在する時の氷盤長による伝達特性の変化を求めたもので、伝達率を縦軸に、氷盤長を波長で除した無次元量を横軸にして片対数グラフに図示したものである。伝達率は、3-1と同様に氷盤長／波

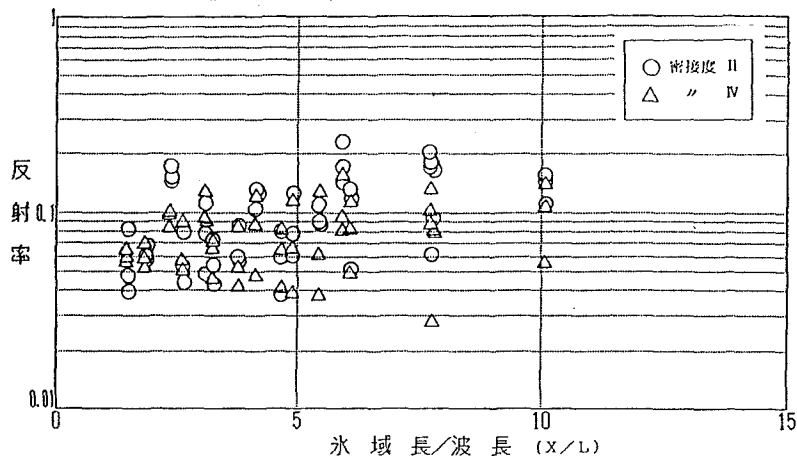


図-3 複数氷盤による反射特性(規則波、W氷盤)

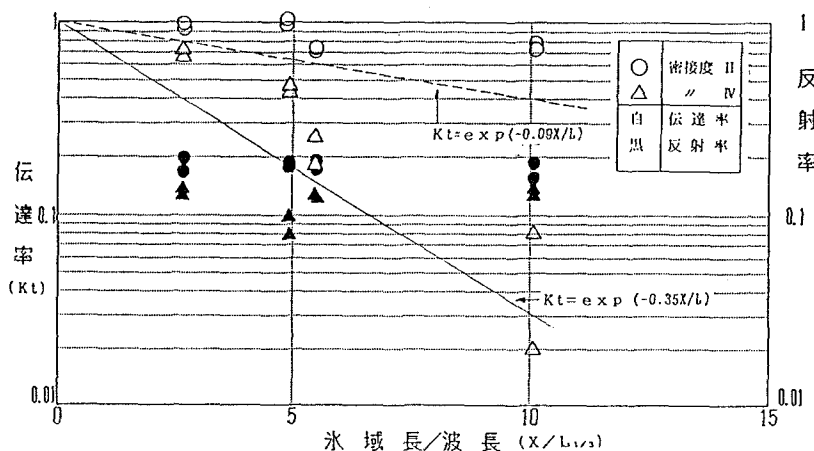


図-4 複数氷盤による伝達・反射特性(不規則波、W氷盤)

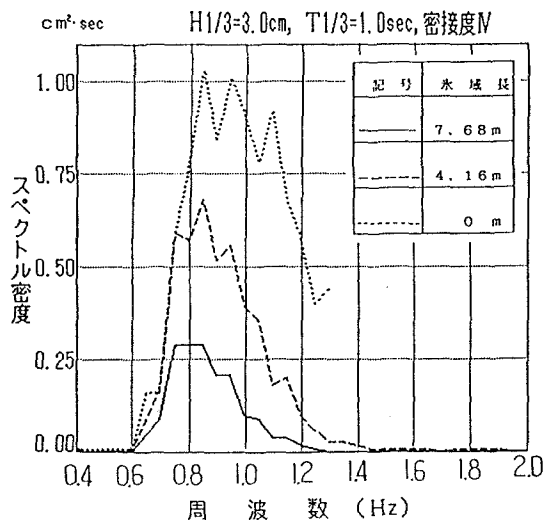


図-5 透過波高の周波数特性

長の増加に伴い直線的に減少している。なお、図中の直線は、図-2で求めた密接度Ⅳの回帰直線を表わしたものである。氷盤長を氷域長に読み替えて図-2と合わせて比較すると、全体的な伝達率は密接度Ⅳの複数氷盤実験の伝達率の上限に位置していることが分かる。

図-7は、氷盤長による反射特性の変化を求めたもので、反射率を縦軸に、氷盤長を波長で除した無次元量を横軸にして片対数グラフに図示したものである。氷盤長が20cmの氷盤とそれ以外の氷盤とでは反射率に差が出ている。全体的に見て最大反射率は0.3~0.4と複数氷盤実験結果より大きいが、氷盤長/波長が2.5以上の領域で最大反射率は一定している。

②氷盤厚に関する実験

図-8は、一枚だけ氷盤（氷盤長20,40cm）が氷域に存在する時の氷盤厚による伝達特性の変化を求めたもので、伝達率を縦軸に、氷盤長を波長で除した無次元量を横軸にして片対数グラフに図示したものである。伝達率は、氷盤長/波長の増加に伴い概ね直線的に減少しており、その減少率は氷盤厚の影響を大きく受けている。なお、図中に示した線は、概略の傾向を見るため伊藤ら⁴⁾の矩形2次元自由浮体運動の近似解により計算した波高伝達率である。実線は氷盤長20cm、氷盤厚5.1cmについて、点線は氷盤長40cm、氷盤厚6cmについて計算したもので、両計算値共に直線傾向にあるが、氷盤長/波長が増加するに伴い傾きが緩くなっていく。この傾向は図-6に示した実験値にも読み取れる。

図-9は、反射率について同様に示したものである。氷盤厚による違いが明瞭に表われており、氷盤長/波長の値が小さいこともあ

るが、氷盤長/波長の増加と共に反射率も増加している。最大反射率は約0.4であり、図-7の最大値と一致している。本研究での実験範囲では、氷盤長/波長が0.5~2.5の領域のデータが少ないが、図-9から推定すると、氷盤長/波長が比較的小さな値で最大反射率をとりそうである。

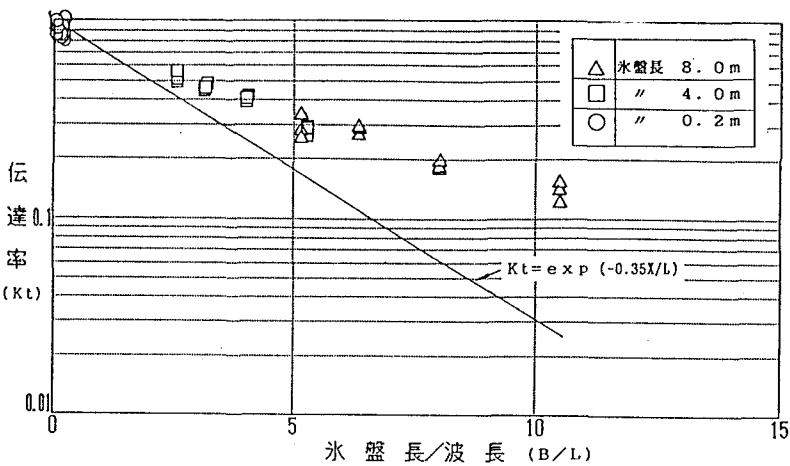


図-6 単数氷盤の氷盤長による伝達特性（規則波、W氷盤）

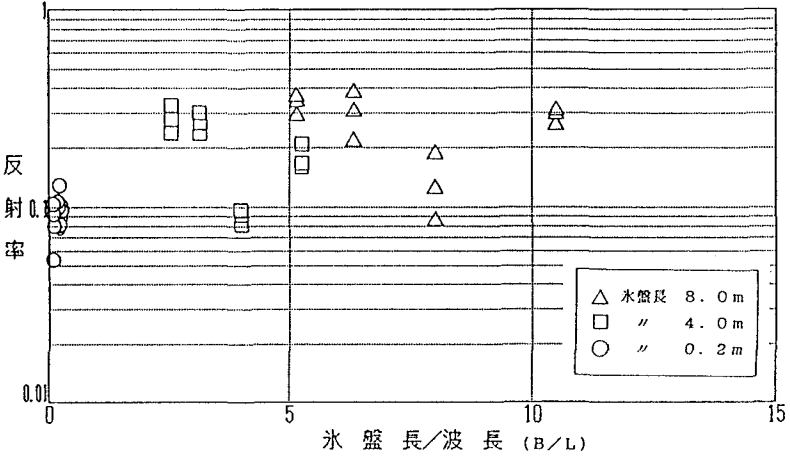


図-7 単数氷盤の氷盤長による反射特性（規則波、W氷盤）

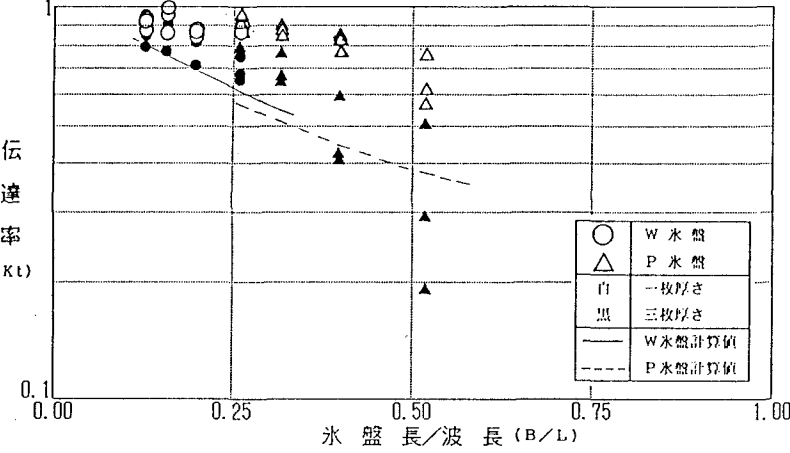


図-8 単数氷盤の氷盤厚による伝達特性（規則波、W・P氷盤）

4. まとめ

実験条件は氷盤帯に深海波が来襲した状態を想定して定めた。しかし、波高に比して氷盤の露出面が少なく、氷盤上に波が打ち上がる非定常な現象を伴うこと及び実験ケースが少なかったこともあり、今回の実験結果だけでは結論は出せないが、本実験から知り得た事項について以下に示す。

①複数氷盤からの伝達率は、 $\exp(-\alpha \cdot \text{氷域長} / \text{波長})$ で表現できる。なお、 α は、密接度、氷盤長、氷盤厚等に関係する係数である。単数氷盤の場合、今回の実験範囲ではほぼ上式の氷域長を

氷盤長に読み替えて用いることが可能であるが、傾向として氷盤長／波長の増加に伴い傾きは緩くなっていく。

②規則波実験の結果によると、一枚の氷盤長の長い氷盤からの伝達率は複数氷盤からの伝達率より大きく、ほぼ上限値付近に分布していた。これは、反射特性とも関係していると考えられる。一枚の氷盤からの反射率の方が複数氷盤からの反射率より大きい、氷域長（又は氷盤長）／波長の値がある程度以上の領域では、両方とも最大反射率は一定となっている。このことは、ある程度以上の長さの一枚の氷盤から伝達する波エネルギーを考えると、氷盤先端で反射せずに侵入する波エネルギーは長さに係わりなくほとんど同じで、波が氷盤下を進行しながら減衰していると考えられる。これに対して、氷盤長と同じ長さの密接度Ⅳの氷域長を持つ複数氷盤の場合、先端から侵入した波エネルギーは一枚氷盤の場合より大きい、波が氷盤帯を進行する際に各氷盤からの反射等によるエネルギーロスが生じているため、透過波高としては低くなっていると考えられる。

③不規則波実験結果によると、透過波の周波数特性はピーク周波数より高周波数領域でのスペクトル密度の減衰が大きく、氷域長の増加と共に有義波周期は1.0secから1.16secに変化しており、現地の傾向に一致している。また規則波実験結果と比較すると、伝達率の減衰は少ないが、最大反射率は約0.2とほぼ同様な値となっている。

④氷盤が厚いほど伝達率の減衰が大きく、逆に反射率も大きい。氷盤長が波長に比較して短い場合でも最大反射率は、比較的一定に成りやすい傾向にある。

5. あとがき

今年から流水だけに覆われていた冬期のオホーツク海に本格的な砕氷観光船が就航しだしているが、観光のみならず積極的に海水を制御し、生産・交流・生活の場の拡大を計っていくことが要請されている。

本研究は、第一段として水理模型実験により波浪の減衰に関する検討を実施したが、今後現地の氷域長など流水の特性や流水時の波高データの収集を合わせて行ない精度の向上に努めていきたい。

最後に、本実験をするに当たり大阪市立大学の夏期実習生 小川 学君、山中 隆史君には熱心に実験に協力して頂いたことに対し、謝意を表します。

参考文献

- 1) 泉山、佐伯、尾崎：「波浪による氷盤の運動に関する研究」、土木学会北海道支部論文報告集、昭和56年度
- 2) 浅川、折谷、佐藤、佐伯、井上：「浮氷盤群による波浪の減衰に関する実験的研究」、第5回寒地技術シンポジウム、1989.11
- 3) 上田、服部、佐伯、山下、榎：「浮氷盤群による波浪の減衰に関する実験的研究」、第6回オホーツク海と流水に関する国際シンポジウム、1991.2
- 4) 伊藤、千葉：「浮き防波堤の水理に関する近似理論と応用」、港湾技術研究所報告、第11巻第2号、1972.6

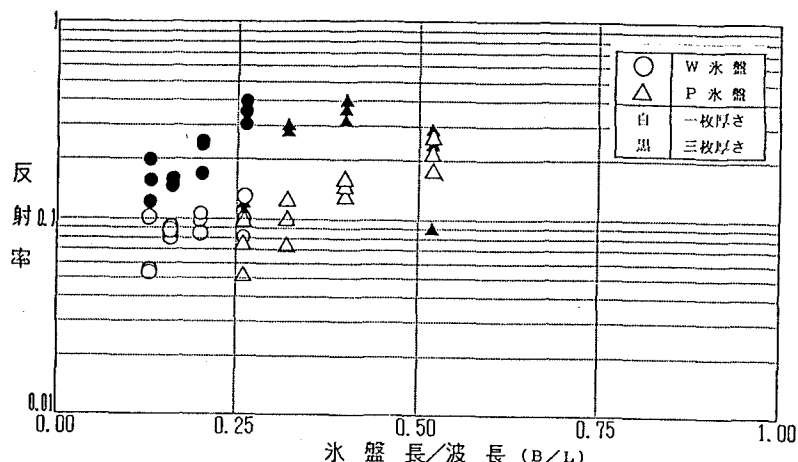


図-9 単数氷盤の氷盤厚による反射特性（規則波、W・P氷盤）