

防波堤における越氷機構と氷盤の移動速度に関する研究

Overtopping Velocity of Ice Floe on the Breakwater due to Wave Action

酒井裕二* 高橋良正* 三谷朋行** 山下俊彦*** 佐伯 浩***

Yuji Sakai, Yosimasa Takahashi, Tomoyuki Mitani, Toshihiko Yamashita, Hiroshi Saeki

The Okhotsk Sea coast of Hokkaido is covered with drift ice in winter. When ice floe concentration is low, sometimes overtopping of ice floe occur at breakwater due to wave action. Fishing boats and pipelines behind breakwater have been damaged by the ice floes. It is required that ice control facilities are constructed. In order to design the facilities, we have to know the overtopping velocity of ice floe on breakwater.

We report on the systematic experimental results on overtopping of ice floes and its mechanisms.

Keywords: overtopping, velocity of ice floe, breakwater

1. はじめに

北海道ではオホーツク海沿岸域を中心に日本海側や太平洋側の一部でも冬期に流氷の来襲がみられる。沿岸部での流氷の密接度が高く、広範囲に海面が被覆されているときには流氷による波浪の減衰効果がみられるが、密接度が低いときは流氷による波浪の減衰効果が小さく高波浪が生じやすい。高波浪時に防波堤上を氷盤が越える事もしばしば見られる。最近では防波堤の背後が岸壁として利用され、また、それに隣接してドルフィンやパイプラインが作られたりしているが、実際に網走港では越氷により南防波堤背後のパイプラインやドルフィン、上架中の魚船への被害も報告されている(秋原ら1992)。一方、親水防波堤では人々が流氷を見る為に防波堤上を散策することになるが、越氷により防波堤天端上に氷盤が堆積することは交通や散策の障害となり本来の親水の目的に反し望ましいとは言えない。

越氷を制御する方法としては防波堤の天端高さを上げることが考えられるが、防波堤断面の増加によるコスト増や、防波堤を支持する地盤の強度の面などからも必ずしも有効な手段とは言えない。親水防波堤はともかくとして、ドルフィンやパイプラインでは多少の越氷では機能を損なうことはないで、防波堤の天端高さを嵩あげするよりも防波堤の天端上に越氷を防止する柵のような構造物を設ける方が有効となる。このような構造物を設計する際にどのくらいの氷力がかかるのかを知る必要がある。氷盤の運動による構造物に作用する衝撃力を決める因子としては、氷盤の大きさ、強度、移動速度、構造物の形状と有効幅などが考えられる。ここで、Kreider (1984)の衝撃氷力は(1)式で示される。(1)式は運動量の関係から得られたものである。

$$F_m = 2.66h(\rho_i D)^{1/3}(\sigma_c R_i V_i)^{2/3} \quad \text{---(1)}$$

F_m : 氷力(kgf)

h : 氷盤の厚さ(cm)

ρ_i : 氷盤の密度(kg/cm³)

D : 構造物の半径(cm)

σ_c : 氷の平均圧縮強度(kgf/cm²)

R_i : 氷盤の半径(cm)

V_i : 氷盤の移動速度(cm/sec)

また、佐伯らによる氷盤の貫入速度により得られた実験式は(2)式で示される。

$$F_m = 5.0 K \sqrt{D} h \sigma_c \quad \text{---(2)}$$

D : 円形断面の構造物の直径(cm)

K : 氷盤の貫入速度によって決定される係数(高速の場合 $K=0.8$)

* 学生員 北海道大学大学院 (060 札幌市北区北13条西8丁目)

** 正員 東亜建設工業

*** 正員 北海道大学工学部

以上のような 2つの式より計算された結果で小さい方の値を採用すれば良いことになる。(1)式において氷の運動から氷力を求めるときには氷盤の移動速度が必要となるが、氷盤の大きさや強度については國松らの研究があり、波浪による氷盤の運動については泉山らの実験結果が報告されているが、氷盤の越氷時の移動速度についての研究はなされていない。そこで、本研究ではこのような越氷制御の構造物を設計する場合の構造物部材に作用する衝撃氷力を求めるために必要な氷盤越氷時の氷盤の移動速度の特性を明らかにすることを目的としている。

2. 実験装置及び実験条件

実験に用いた水路は幅80cm、長さ24mの鋼製の造波水路で、氷盤の挙動が見えるように両面ガラス張りのものである。また、碎波による影響をより顕著にするために実際の海底勾配よりも急勾配とし、水路の勾配は1/30とした。その概略を図-1に示す。防波堤の模型は図-2に示したような直立堤であり天端高さは2種類である。そして、オホーツク海沿岸の網走港や紋別港での実際の防波堤の設置水深は約10mであり、本実験でも同様な水深で、縮尺1/50で20cmとした。氷盤の模型としては比重が約0.85と海水とほぼ等しいパラフィン盤を使用した。また、今回の実験においては流体と模型氷盤との摩擦係数が問題となるが、このことは上田ら(1992)の研究により、実氷盤の模型としてパラフィン盤が適当であることが明らかにされている。また、パラフィン盤の大きさについては宇登呂漁港南側海岸での調査結果(國松ら(1993))より実際の氷盤の大きさは1辺 2m~4mの正方形に相当する面積のものが最も多いという結果を参考にして表-1のような条件で実験を行った。また、対象となるオホーツク海沿岸の港湾における構造物の設計波は、波高10m、周期は12.3秒であり、このことを考慮し、フルードの相似則により周期は1.70、1.41、1.13秒(実際の周期では12、10、8秒)の3種類、波高は18、15、12、9cm(実際の波高では9、7.5、6、4.5m)の4種類である。次に実験方法であるが、各条件で造波後に防波堤前面約70cmの位置で氷盤を1枚ずつ投入しその挙動を観察した。また、1/30秒まで解析可能なビデオカメラを用いて予め水路のガラスに刻んであるメッシュにより防波堤天端前面での氷盤の移動速度、越氷高さを求めた。移動速度の算定には防波堤前面の前後 5cmでの氷盤の重心位置の移動時間とその角度により算出し、ほとんどの場合3つのデータの平均とした。図-3に越氷高さと移動速度の定義を示す。

表-1 パラフィン盤の寸法

パラフィン盤の寸法	実際の寸法
16 cm × 16 cm	8 m × 8 m
12 cm × 12 cm	6 m × 6 m
8 cm × 8 cm	4 m × 4 m
4 cm × 4 cm	2 m × 2 m

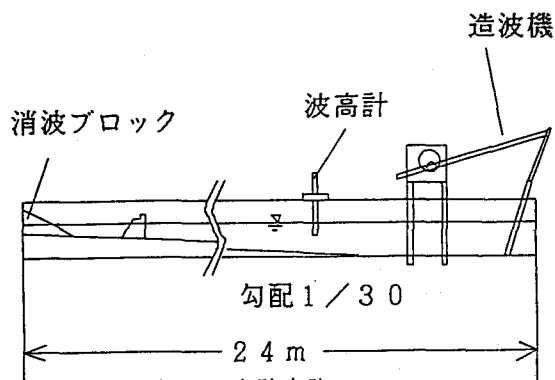


図-1 実験水路

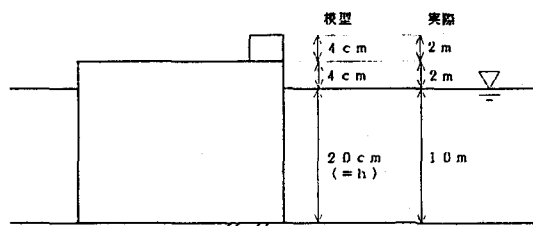


図-2 防波堤断面

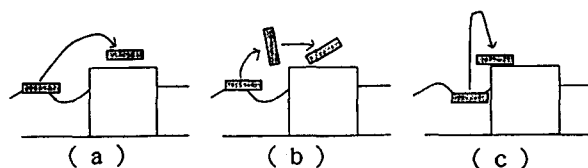


図-3 氷盤の越氷形態

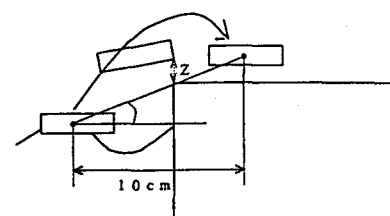


図-4 越氷高さと移動速度の定義

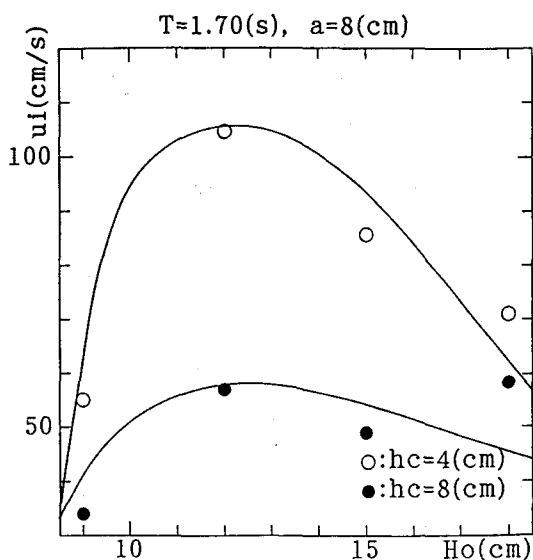


図-5 天端高さの影響

3. 実験結果とその考察

表-1に示したような4種類の大きさの氷盤でそれぞれ1、2、3、4cm(実際の厚さ50、100、150、200cm)の厚さで実験を行ったが厚さの越氷量への影響は見られたが、越氷速度には有意な差はみられなかった。そのため、以下においては越氷速度の値は全て厚さによる平均値としてある。

越氷の形態としては図-4に示すように大きく3つのタイプに分類される。まず、平行に越えていくタイプ(a)と波の進行方向に回転していくタイプ(b)と天端上には越氷するもののほとんどが鉛直方向にしか移動せず水平方向の移動がごく僅かなタイプ(c)が観察された。この3つの越氷形態は波浪条件や構造物の天端高さ等とほとんど無関係であった。また、条件によっては全く越氷をしないケースも見られたが、本研究では越氷の可能性の条件を明らかにすることよりも、越氷速度に注目しているので以下越氷しなかったケースや水平方向の速度が小さく、その結果として氷力が小さいと予想されるもの(Cタイプ)については無視した。

同一諸元の氷盤で、かつ同様な越え方をしたにもかかわらず、越氷速度にはかなりのばらつきが見られた。今回はおよその傾向を知るためにも平均値で表すことにした。

まず、図-5に氷盤の移動速度(u_i)と沖波波高(H_o)の関係を天端高さ(h_c)ごとに表した一例を示す。他の条件のケースでもほぼ同じ傾向である。天端高さが高くなるほど氷盤移動速度 u_i が遅くなる傾向がわかる。このことは天端高さが高くなるにしたがって越氷量は減少し、より重複波的になることを考えれば当然のことである。

図-6に氷盤の移動速度と波高の関係を表した一例を示す。周期1.13秒の場合には波高が増すにつれて氷盤の移動速度が大きくなっている。しかし、周期が1.70秒や1.41秒の場合にはそのような有意な傾向はみられない。

図-7には氷盤の移動速度と周期の関係を一例を示した。防波堤堤体がなく進行波で碎波地点を考えた場合、防波堤設置位置より沖側で碎波しているもの($H_o=18.15$ (cm))には周期と氷盤の移動速度での有意な傾向はみられないが、防波堤設置位置より陸側で碎波しているもの($H_o=12$ (cm))は周期が長くなると氷盤の移動速度が遅くなる傾向がみられる。この理由としては碎波後に波高が減衰しているため、防波堤前面での波高が沖での波高よりも小さくなっているためだと考えられる。また、 $H_o=9$ (cm)の場合は防波堤設置位置より陸側で碎波しているが、氷盤が越氷するかしないかの限界であり、そのためにデータのばらつきが激しく系統的な傾向はみられない。

図-8は各 h/L_o (h :防波堤設置水深、 L_o :沖波波長)での H_o/h_c (h_c :天端高さ)による u_i/u (u :進行波の水粒子水平移動速度の最大値)と a/L_o (a :氷盤の1辺の長さ)との関係を示したものである。

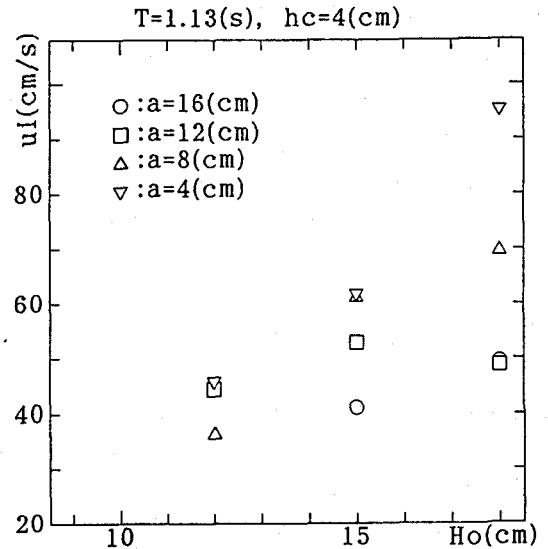


図-6-(a) 氷盤移動速度と波高の関係

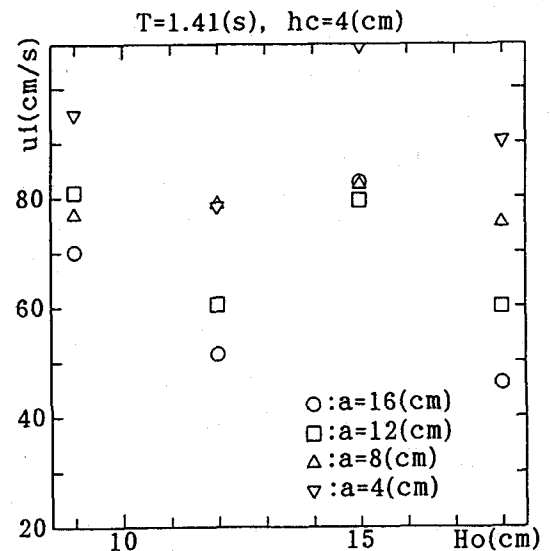


図-6-(b) 氷盤移動速度と波高の関係

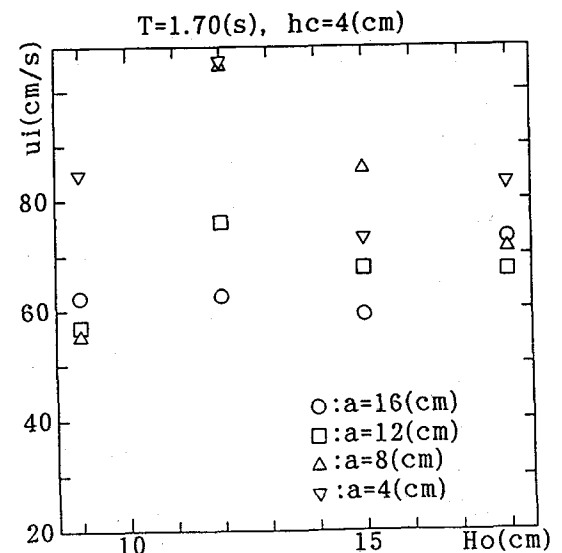


図-6-(c) 氷盤移動速度と波高の関係

ここで、水粒子の移動速度 u は

$$u = \frac{\pi H_0 \cosh 2\pi(h+z)/L}{T \sinh 2\pi h/L} \sin\left(\frac{2\pi}{L}x - \frac{2\pi}{T}t\right) \quad \text{----(3)}$$

の $z=0$ (静水面) での最大値を基準として用いた。

本来なら部分重複波であるが、越波をしているため進行波の傾向もあるので u は進行波の水粒子移動速度を便宜的に用いている。 a/L_0 が大きくなるにつれて u_i/u が小さくなるという一般的な傾向がわかる。つまり、線形波動の氷盤の移動速度は a/L_0 に依存している。また、かなりのケースで u_i/u が 1 より大きく、最大では 2.8 となっている。つまり、進行波の水粒子移動速度の最大値より氷盤の移動速度が速くなっているということである。これは勾配が 1/30 と急勾配でかつ波形勾配が大きいため起こる波の非対称性が理由であり、そのために波動理論が直接使えないが解析での便宜を考えて微小振幅波として扱っている為の影響であると考えられる。

次に越氷する氷盤の防波堤上の通過する位置 z について調べた。これは越氷防止施設を設計する際の衝撃氷力の作用位置を知るためである。

図-9 に $(H_0 - h_c)/z$ と a/L_0 の関係の一例を示す。 $(H_0 - h_c)/z$ は a/L_0 に依らずほぼ一定の値を取った。これは他の条件でも同様の結果であった。つまり、越氷高さ z は a/L_0 に依存していないことが明らかとなった。

図-10 に $(H_0 - h_c)/z$ と H_0/L_0 の関係の一例を示す。越氷高さ z は h_c/h の影響を受けた。実線は z が最大側、点線は最小側の包絡線を示した。これは氷力の作用位置の最大の範囲を示したものである。越氷高さ z については波浪条件や構造物の条件との関係を調べたが良い相関は得られなかった。実際に越氷制御構造物を設計する場合には最も安全側の実線の値を用いて越氷高さを決めれば良いと思われる。

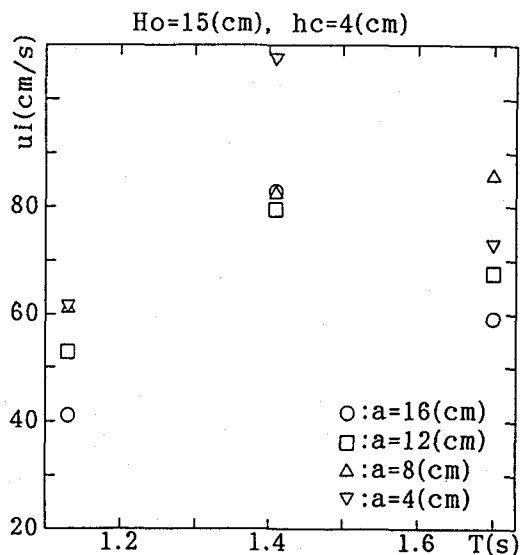


図-7-(b) 氷盤移動速度と周期の関係

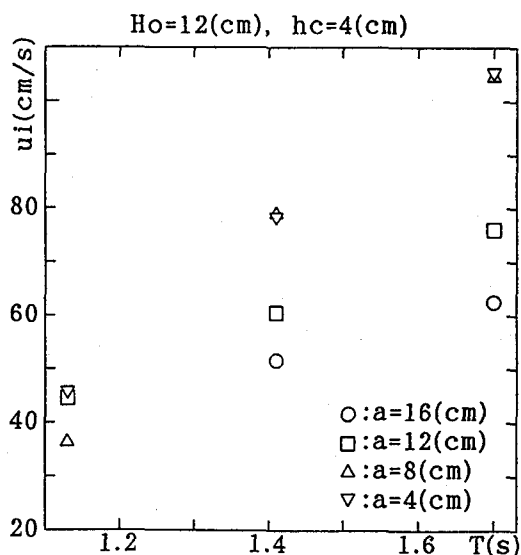


図-7-(c) 氷盤移動速度と周期の関係

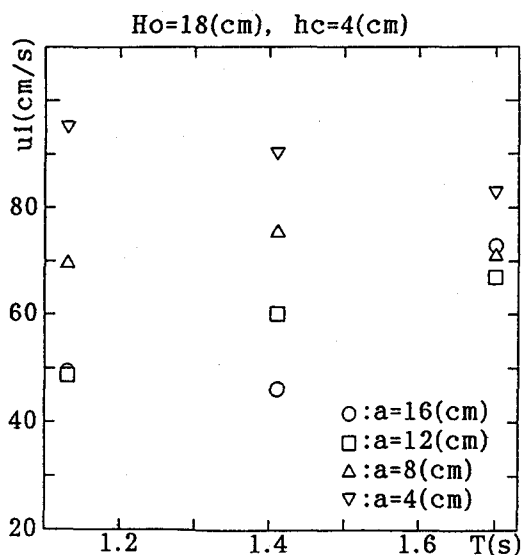


図-7-(a) 氷盤移動速度と周期の関係

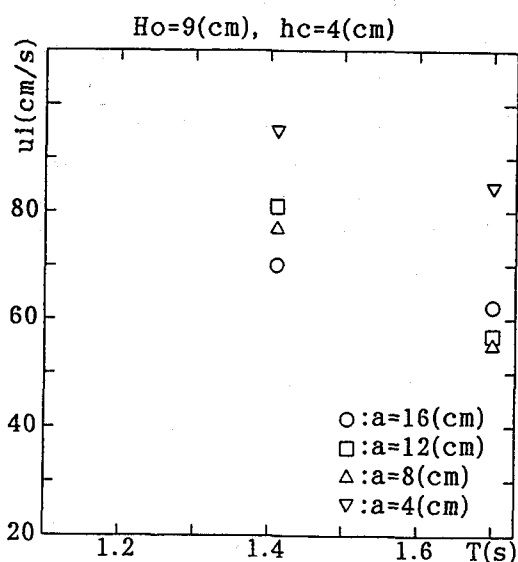


図-7-(d) 氷盤移動速度と周期の関係

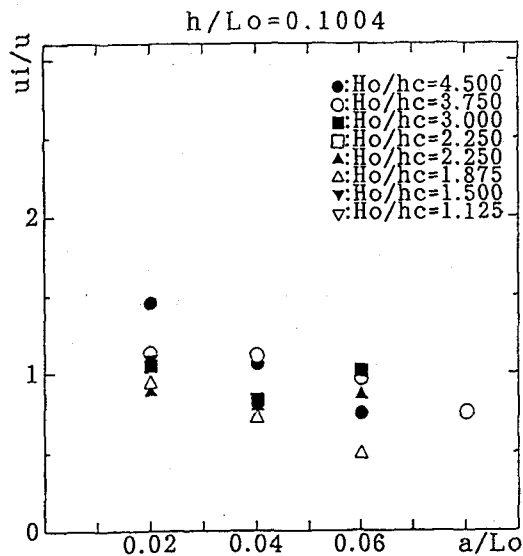


図-8-(a) u_i/u と a/L_o の関係

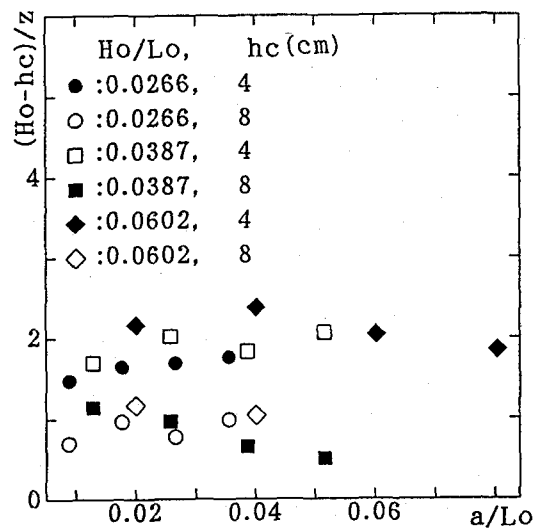


図-9 $(H_o - hc)/z$ と a/L_o の関係

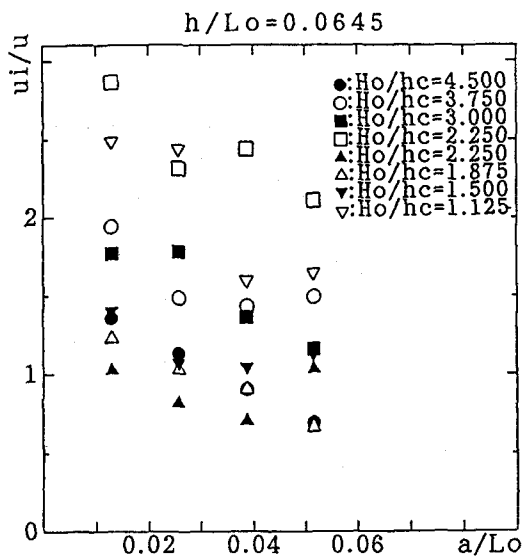


図-8-(b) u_i/u と a/L_o の関係

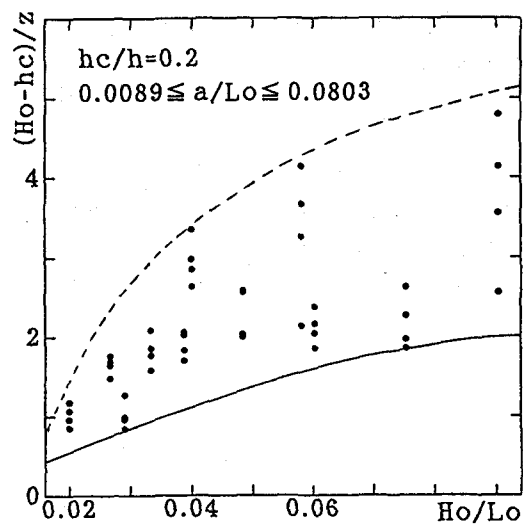


図-10-(a) $(H_o - hc)/z$ と H_o/L_o の関係

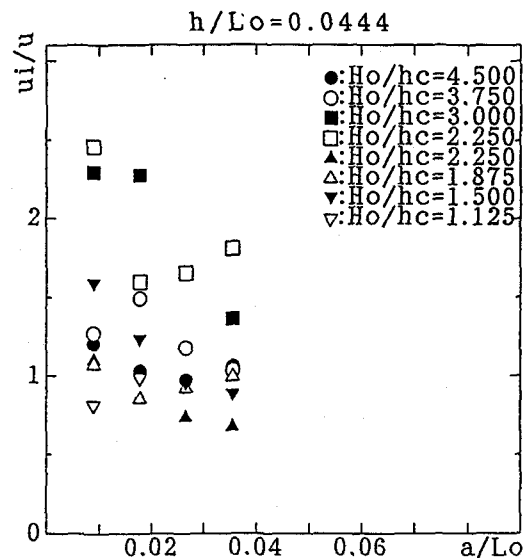


図-8-(c) u_i/u と a/L_o の関係

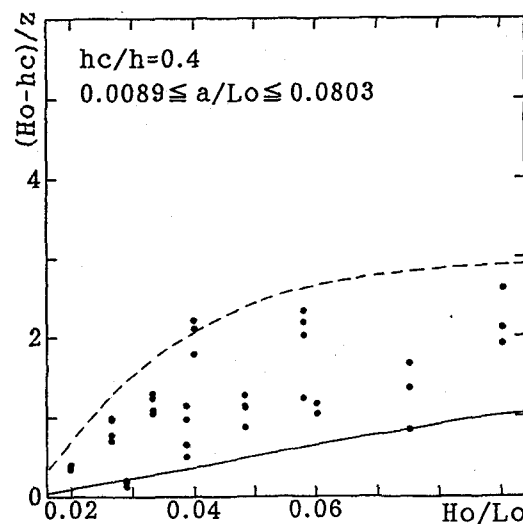


図-10-(b) $(H_o - hc)/z$ と H_o/L_o の関係

4. まとめ

本研究で得られた主な結論を以下にまとめると、

- ①越氷の形態は3種類に分類された。
- ②氷盤の厚さによる有意な差は厚さ1cm～4cm（実寸50cm～200cm）の範囲ではみられなかった。
- ③天端高さが高くなると氷盤の移動速度は遅くなった。
- ④越氷時の氷盤の移動速度は a/L_0 が増加すると遅くなり、 a/L_0 に依存した。
- ⑤防波堤設置位置より沖側で砕波しているものには周期と氷盤の移動速度での有意な傾向はみられないが、防波堤設置位置より陸側で砕波しているものは周期が長くなると氷盤の移動速度が速くなる傾向がみられた。また、 $H_0=9(\text{cm})$ の場合は氷盤が越氷するかしないかの限界であり、そのためにデータのばらつきが激しく系統的な傾向はみられなかった。
- ⑥越氷時の氷盤の移動速度は周期が1.13秒の場合には波高が増すにつれて氷盤の移動速度が大きくなっているが、周期が1.70秒や1.41秒の場合にはそのような有意な傾向はみられなかった。
- ⑦越氷高さは a/L_0 に依存せず、 h_c/h の影響を受けた。
- ⑧移動速度は図-8により、作用位置は図-10により決まり、よって氷力とそのモーメントが求められる。

参考文献

- 1)國松、原、高橋、佐伯、榎、今泉：オホーツク海沿岸部の流水盤の大きさに関する研究、海洋開発シンポジウム1993, pp95-100
- 2)秋原、笹島、水野、神田、佐伯：越氷に関する実験的研究、寒地技術シンポジウム講演論文集1992, pp423-427
- 3)Kreider: Summer Ice Impact Loads from Multiyear Floes, Proc. IAHR Ice Sympo. Vol. 2, Hamburg, pp55-66
- 4)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1981, pp135-140
- 5)上田、佐伯、山下、村木、榎：浮氷盤に作用する流体力に関する実験的研究、海洋開発シンポジウム1992, pp135-140
- 6)中澤、竹内、小野、佐伯：海洋構造物に作用する氷力式の評価、海洋開発シンポジウム1986, pp115-120