

浮沈式アイスブームの流水制御効果と砂による埋没防止に関する研究

Studies on the Effect of the Sink-and-Float type Ice Boom(SFIB) on Ice Floe Control and Measurements which Prevent SFIB from Burying in Sand

今 泉 章*・榎 国 夫**・原 文 宏***・佐 伯 浩****
Akira Imaizumi, Kunio Enoki, Fumihito Hara, Hiroshi Saeki

This is a report on the results of detailed experiments conducted to clarify: (1) the effect on ice floe control by the Sink-and Float-type Ice Boom(SFIB) and (2) the optimal sectional form of SFIB which may prevent SFIB from burying in sand when it is sunk.

SFIB has a structure with a number of floats connected to a steel wire which is tied to piers at both ends. When water is injected into the floats, the boom sinks. On the other hand, when air is injected into the floats, the boom floats to the water surface and prevents invasion of ice floes into the harbor.

keyword: Ice Floe Control, Ice Boom, Burying in Sand

1. はじめに

北海道沿岸で流水の影響を受ける水域は、稚内から根室半島北側の北海道のオホーツク海沿岸であるが、まれには利尻、礼文島や太平洋沿岸の根室半島から襟裳岬の沿岸まで達することがある。また、港内結氷する港湾は、オホーツク海に面している北見枝幸、紋別、網走、根室港（根室地区）の各港で、稚内、根室（花咲地区）、釧路の各港は港内の一部が結氷することがある。

オホーツク海に面する港湾の通年稼働を可能にするためには、港内の結氷防止、流水の港内侵入防止、オホーツク海に適した砕氷貨物船の開発が必要である。特に、稚内や太平洋に面した道東地域の港湾では、港内への流水侵入防止が必要といえる。稚内港に流水が侵入し、離島航路が不通になった例や根室港湾花咲地区に流水が侵入し、港内の漁船が出漁できなかった例、釧路港内が流水で埋めつくされ、フェリーをはじめ、船舶の航行不能になった例などがあり、港内への流水侵入防止対策工法の開発が望まれているところである。

本研究は港内への流水侵入防止を目的として開発してきた浮沈式アイスブーム（Sink-and-Float Type Ice Boom-SFIB）の流水侵入制御効果と、沈設時の砂による埋没防止を目的とした最適断面形状を明らかにするための実験を行ったのでその結果を報告する。浮沈式アイスブームとは、両端が締結された鋼製ワイヤーに多数の浮力体をつけた構造で浮力体に海水を注入すると海底に沈み、空気を入れると浮上し、海水侵入を防止する構造となっているもので、その概要図を図-1に示す。

2. 浮沈式アイスブームの特徴

港内への流水侵入防止を目的とした構造物（施設）の具備すべき条件は以下のような事項がある。

- ① 港内への流水侵入を防ぐことができる。
- ② 船舶の航行の妨げにならない。
- ③ 港内外の海水交流の妨げにならない。
- ④ 港口部近傍の砂移動に大きな変化を与えない。
- ⑤ 港の景観に大きな影響を与えない。
- ⑥ 波力、氷力に対して十分な耐久性を有する。
- ⑦ 使用頻度が少ないため建設費が低コストであること。

以上の条件を満足する構造の1つが浮沈式のア

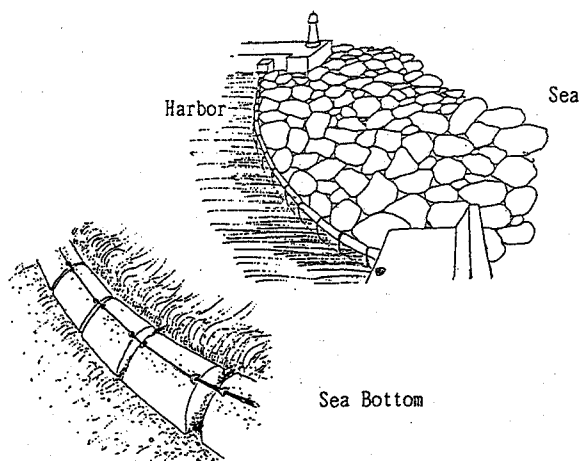


図-1 浮沈式アイスブームの概要図

* 正会員 榎西村組

** 正会員 秋田工業高等専門学校

*** 正会員 北海道大学大学院

**** 正会員 北海道大学工学部土木工学科（060 札幌市北区北13条西8丁目）

イスブーム (SFIB) である。SFIBは図-1に示すように、港口部の両防波堤端部に締結された二本のワイヤーに翼形断面の浮体を固定したものであり、流水来襲時は水面に浮いた状態で流水の港内侵入を防止する構造となっている。泉山等の研究によると氷盤の代表長 ℓ と波長 L の比が ℓ/L が0.4より小さい時は氷盤は常に水面にあり、このSFIBで港内への侵入が阻止されることになる。海面が氷盤で被覆されると波長は長い成分のみが残るし、また最近の調査では流水の代表長さは2~5mが多いことから、 $\ell/L < 0.4$ が満足される。このSFIBは図-2に示すように、浮体に空気が送り込まれ、中の海水が外へ放出されると浮上し、逆に浮体が海水で満たされると沈み、海底に横たわる構造となっている。この浮体の断面は浮力が比較的大きく、船舶通航に支障にならないよう扁平な形で、かつ波浪による底質の移動が活発であっても、砂中に埋没しない形状が望まれる。浮体が埋没したり、浮体の上に大量の砂が堆積すると、再浮上できないことになる。また、流水来襲時は、浮体下部からコンプレッサーから送られる空気を吹き出すことにより、流水とSFIBの凍着を防ぐことも可能となっている。本研究は主に浮体上に砂が堆積しにくい断面形状を明らかにするための実験結果について調べたのである。SFIBが浮上してその機能を果たしている時、全浮体の体積のK%が水面に出ているとし、浮体の全体積を V_0 、海水の単位体積重量を W_w 、浮体の単位長あたりに体積する砂の空中重量を W_s 、砂の単位体積重量を 2.6gf/cm^3 とすると、SFIBの浮上する条件は次式となる。

$$V_0 \cdot W_w > (60/K) \cdot W_s \quad \cdots \cdots (1)$$

この時の浮体の空中重量 W は次式で示される。

$$W = (1 - K/100) \cdot V_0 \cdot W_w \cdots \cdots (2)$$

3. 砂移動によるフロートの埋没及び移動に関する実験

(1)実験方法

港口部近傍の波は、入射波と、両防波堤端部からの散乱波それに港内からの反射波の影響を受け複雑であるが、本実験では現象を単純化して進行波を用いて実験を行った。用いた水槽は長さ24m、幅0.8m、深さ0.8mの両面ガラス張り鋼製造波水路である。水路床には厚さ20cmに平均粒径0.16mmの砂をしき、その砂面上に模型の浮体を並べて実験を行った。実験条件は、表-1に示すような波浪条件で、浮体の断面形状は図-4に示すように4通りとして実験した。実験においては、波浪により浮体の滑動状況と砂による埋没状況の観測を行った。波高は、ほぼ碎波限界時の波高としている。また、浮体の上に堆積した砂を取り、表面乾燥状態で空中重量を測定した。

また、縮尺はフルードの相似則にもとづいて1/20として実験を行った。

(2)実験結果と考察

図-5に各断面のフロート上に堆積した無次元砂重量と周期の関係を示した。図から明らかなように、翼形断面フロートの厚さが小さいA、Bの場合はその比が他の断面に較べて大きくなっていて、砂の堆積量が多いことを示している。

また、模型C、Dの場合は $W_s / V_0 \cdot W_w$ が0.11を越えることはない。また、Kとの関係を調べるとAの $T=2.24$ 秒の場合、Kは50%に相当する。つまり、浮上時にフロートの半分が水面に出る程度に軽い浮体でないと、砂の

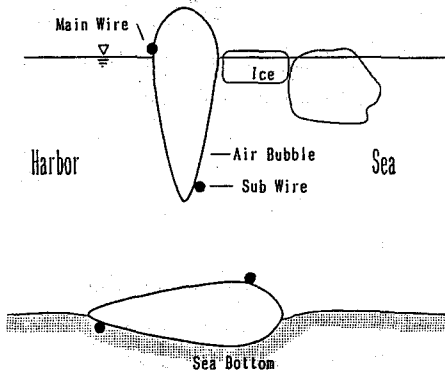


図-2 浮沈式アイスブームの運動

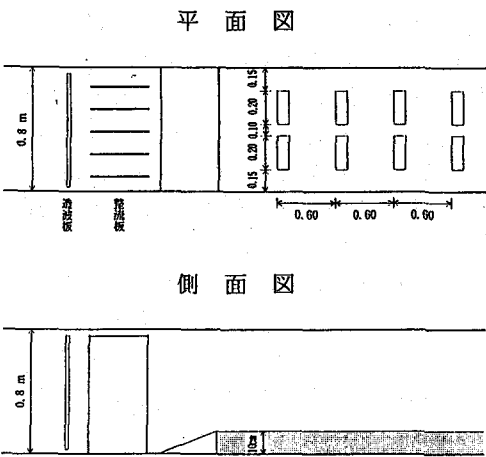


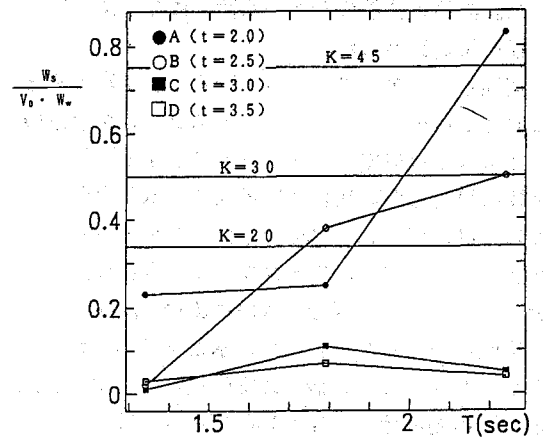
図-3 実験水路

A (t=2.0cm)	B (t=2.5cm)	C (t=3.0cm)	D (t=3.5cm)
$\Lambda=10.56\text{cm}^3$	$\Lambda=12.37\text{cm}^3$	$\Lambda=15.09\text{cm}^3$	$\Lambda=17.46\text{cm}^3$

図-4 フロート (浮体) の断面形状

表－１ 実験条件と結果

	周 期	波 高	砂重量 (g)	単位当り 砂重量 (g/cm)	W_s	移動の 有 無
					$V_0 \cdot W_0$	
A ($l=2.0\text{cm}$)	$T=2.24$	0.25m	174.4	8.720	0.83	●
	$T=1.79$	0.25m	53.1	2.655	0.25	●
	$T=1.34$	0.20m	49.4	2.470	0.23	○
B ($l=2.5\text{cm}$)	$T=2.24$	0.25m	123.1	6.155	0.50	●
	$T=1.79$	0.25m	94.2	4.710	0.38	●
	$T=1.34$	0.20m	13.4	0.190	0.02	○
C ($l=3.0\text{cm}$)	$T=2.24$	0.25m	13.9	0.695	0.05	○
	$T=1.79$	0.25m	34.2	1.710	0.11	○
	$T=1.34$	0.20m	19.6	0.155	0.01	○
D ($l=3.5\text{cm}$)	$T=2.24$	0.25m	13.1	0.655	0.04	○
	$T=1.79$	0.25m	24.5	1.225	0.07	○
	$T=1.34$	0.20m	10.9	0.545	0.03	○



図－５ フロート上の砂重量と周期の関係

堆積により浮上できないことを示している。この場合、フロートは水面に直立することが出来ず横だおれ状態となり水盤移動制御効果はなくなる。水盤移動制御のためアイスブームの浮体が充分な喫水を持つよう設計せねばならないので、Kは20程度で良いと考えられる。そのような理由から判断すると、C、Dの断面のフロートが良いことになる。

次に、着定時における波によるフロートの運動を調べた結果を表－１に示す。表中の●印は２個の模型とも5cm以上移動したり、裏返しになったもの、●印は２個のうち１個が5cm以上移動したもの、○印は２個とも、全然移動しないか移動したとしても2～3cmであったものである。この表からも明らかなように、模型A、Bの場合は波高が20cm、周期が1.34秒の場合は移動がないが、他の波浪条件の場合は移動が激しい。これに対してC、Dは、全ての波浪条件に対して移動しないことが明らかとなった。以上のことからフロート上の砂の堆積やフロート自体の移動に対しては、C、D断面が優れていることを示している。なお、フロートに水を満たした時の比重は1.6とした。フロートに作用する流体力Fは次式で示される。翼形断面の形状抵抗係数 C_D を求める。

$$F = (W_w / 2g) \cdot C_D \cdot A \cdot U^2 \quad \text{max} \quad \dots (3)$$

式中の W_w は水の単位堆積重量、Aは投影面積、Uは微小振幅浅水波の水底における最大流速である。表－１の条件で計算を行うと、形状抵抗係数 C_D は $C_D=0.44$ となった。浮遊時のSFIBに作用する氷力については、氷野に作用する風と流れによるdriving forceより求められるが、それについては、服部等の研究結果を用いるとよい。

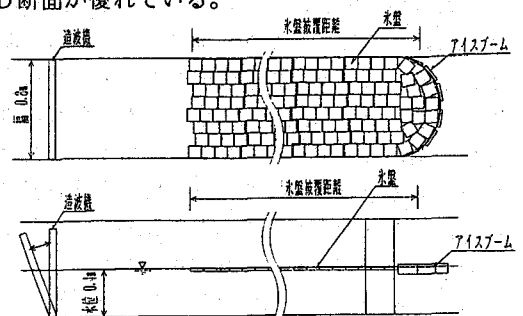
以上のような実験結果からわかったことを以下に整理する。

- ①翼形断面フロートの厚さが小さいA、Bの場合は、厚さが大きいC、Dに較べて砂が堆積しやすい。
- ②水盤移動制御のためアイスブームの浮体が充分な喫水を持つよう設計するためには、Kは20程度と考えられる。そのような理由から判断すると、C、D断面のフロートが適当である。
- ③模型A、Bは波浪に対して移動が激しい。これに対してC、Dは、全ての波浪条件に対して移動しないことが明らかとなった。
- ④フロート上の砂の堆積やフロート自体の移動に対しては、C、D断面が優れている。
- ⑤翼形断面の形状抵抗係数 C_D は、表－１を使った計算の結果 $C_D=0.44$ であった。

４．波浪による流水の侵入防止効果実験

(1)実験方法

実験に用いた浮体は、バルサ材で製作した。浮体１個の長さは15cm、幅7cm、厚さ3cmで、浮体相互の間隔を5cmとし、6個の浮体を直径0.5mmのステンレスロープ製のメインワイヤーとサブワイヤーで連結した。また、実験は水路幅80cmに対してアイスブ



図－６ フロート（浮体）の設置状況

ーム長を 135cm とし、浮体と氷盤接触部が浮体の平らな方になるようにアイスブームを水路に固定した。浮体は体積の20%が水面上にできるように、鉛板を使い調整した。

実験水路とアイスブームの固定は、水路の両端に直径 9 mm の鉄棒をたて、アイスブームが水位の高さになる位置でアイスブームのワイヤー端部を鉄棒に締結した。次に、アイスブームが水路幅全体に一樣に保たれ、締結部と浮体の間から氷盤が流出することなく、アイスブームが自由に上下運動できるような状態で、水路に鉄棒を固定した。

実験に使用した模型氷は、氷とほぼ同じ比重をもつポリプロピレン盤（比重 0.9gf/cm³）で、模型氷相互の動摩擦係数は 0.146 であり、実際の氷相互の動摩擦係数 0.1~0.2 と同程度である。

模型氷の形状は正方形（10×10cm）で、氷厚は 1 cm と 3 cm の 2 種類とした。これを現地の氷盤に換算すると、一辺が 2 m の正方形、氷厚は 20cm と 60cm に相当する。

実験水深は 40cm。実験は、進行波および重複波、それぞれ現地波に換算して周期 (T) が 6.0, 8.0, 10.0 (秒) の 3 種類で行った。波高は、進行波の場合、現地波に換算して H=1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 4.8 (m) である。また、氷盤の水面被覆面積は、アイスブームから氷盤群の最後部までの距離で表し、進行波の場合は、現地距離にして 60m, 30m, 6m の 3 種類で行った。重複波は氷盤の被覆距離を 60m とし、アイスブームの設置位置を変え、波の腹と節の 2 点で行った。

実験時間は現地換算で 45 分間。実験縮尺は、前述の実験と同様にフルード則に従って 1/20 で行っている。

なお、本実験の前に浮体・氷盤の上下方向の固有振動周期の調査を行った。結果は浮体が 0.4 秒、氷盤（10cm×10cm・t=3cm）が 0.42 秒であり実験波浪に対応して応答性がよく、浮体及び氷盤が常に水面上にあることを確認した。

(2) 実験結果と考察

図-7 は、氷盤がアイスブームから流出するメカニズムを段階ごとに示したものである。波の質量輸送により移動した氷盤はアイスブームの位置で止まり、次々と後方に直列的にならんだ状態が①である。次に氷盤相互の接触と後方からの流体力の増加によって、アイスブームに近い氷盤から氷盤下面に潜りこみ、2 段、3 段と氷盤下面に重なりあった状態が②③である。最終的に、重なりあった氷盤の厚さがアイスブームのフロートの喫水以上に発達し、その後に潜り込んだ氷盤がアイスブームの下から港内へ流入する。

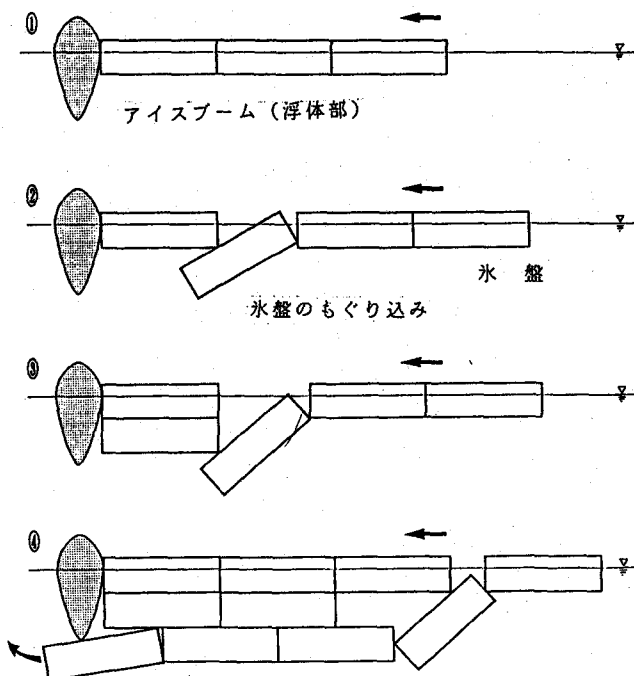


図-7 氷盤の流出メカニズム

表-2 進行波の場合の氷盤流出（氷厚 20cm）

氷厚 20cm
寸法 2.0m×2.0m

周期 (秒)	波高 (m)	流出氷盤枚数 / 100 m (%)		
		氷盤被覆距離 60m	氷盤被覆距離 30m	氷盤被覆距離 6m
T=6.0	1.0	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)
	2.0	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)
	3.0	219 (14.6)	0 (0.0)	0 (0.0)
	4.0	594 (39.6)	200 (26.7)	0 (0.0)
	4.8	1500 (100.0)	1500 (100.0)	150 (100.0)
T=8.0	1.0	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)
	2.0	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)
	3.0	13 (0.9)	0 (0.0)	0 (0.0)
	4.0	75 (5.0)	0 (0.0)	0 (0.0)
	4.8	1469 (97.9)	731 (97.5)	138 (92.0)
T=10.0	1.0	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)
	2.0	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)
	3.0	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)
	4.0	56 (3.7)	63 (8.4)	0 (0.0)
	4.8	1431 (95.4)	750 (100.0)	150 (100.0)

表-3 進行波の場合の氷盤流出（氷厚 60cm）

氷厚 60cm
寸法 2.0m×2.0m

周期 (秒)	波高 (m)	流出氷盤枚数 / 100 m (%)		
		氷盤被覆距離 60m	氷盤被覆距離 30m	氷盤被覆距離 6m
T=6.0	1.0	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)
	2.0	38 (2.5)	0 (0.0)	0 (0.0)
	3.0	600 (40.0)	163 (21.7)	0 (0.0)
	4.0	1006 (67.1)	375 (50.0)	0 (0.0)
	4.8	1488 (99.2)	719 (95.9)	131 (87.3)
T=8.0	1.0	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)
	2.0	50 (3.3)	0 (0.0)	0 (0.0)
	3.0	288 (19.2)	0 (0.0)	0 (0.0)
	4.0	619 (41.3)	63 (8.4)	0 (0.0)
	4.8	1225 (81.7)	475 (63.3)	50 (33.3)
T=10.0	1.0	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)
	2.0	138 (9.2)	0 (0.0)	0 (0.0)
	3.0	369 (24.6)	0 (0.0)	0 (0.0)
	4.0	569 (37.9)	63 (8.4)	0 (0.0)
	4.8	1481 (98.7)	750 (100.0)	150 (100.0)

本実験では、フロートの高さとお氷盤厚の関係から、氷厚3cmの場合は3枚が重なった時に流出し、氷厚1cmでは5枚の時に流出を開始した。

1) 進行波の場合

表-2、表-3に氷厚20cmと60cmの時の氷盤の流出枚数についての結果である。この表中の流出氷盤枚数は、アイスブームの両端締結距離を現地換算して幅100mとした時の枚数である。表中の太線は、完全に氷盤を侵入防止できる限界の位置である。

表からも明らかなように、アイスブーム沖側に氷盤を多く被覆した際、氷盤にかかる流体力が大きくなり、それにともない氷盤が流出する割合も大きくなる。また、氷厚が大きいほど流体力が増加することと、氷盤の重なる枚数が少なくてよいので、流出割合が大きくなると考えられる。

2) 重複波の場合

表-4、表-5に氷厚20cmと60cmの場合の実験結果を示す。重複波の流出枚数が進行のそれに比較して少なくなっている。その理由として、被覆している氷盤全体にアイスブーム方向への流体力が作用しなくなり被覆距離が減少した状態と同様になると考察される。

進行波、重複波の場合ともに氷盤の厚さがアイスブームの制御効率に大きな影響を与えていることが明らかとなった。

5. 結 論

(1) 波浪による流水の港内侵入防止効果

①沿岸部に最も多く存在する大きさの流水(2m×2m~4m×4m)については、侵入波と重複波の各々に対して浮沈式アイスブームの流水侵入防止の限界波浪条件を明らかにした。

②氷厚の効果については、氷厚が大きい程、侵入防止の効果が低下することが明らかになった。

③流水の来襲時には水野による波浪の減衰効果により、波高は小さ

くなるため現実には港口部内側に設置した浮沈式アイスブームにより、流水の港内侵入がしにくくなる。また、アイスブームの設置位置を選択することにより制御効果を高めることができる。

④波浪による氷盤の運動形態は、泉山等の結果と一致することが確認された。

(2) 波浪に伴う砂移動によるフロートの埋没及び移動に関する実験

①翼形断面のフロートの長さ(p)と厚さ(t)の費p/tが小さいほど移動しにくく、p/t<0.4のでは波浪により全く移動しないことが確認された。

②上記の理由として、p/t≒0.4程度になると、フロート下面の砂が洗掘され窪みの中にフロートが沈設された状態になるためである。

③p/t=0.4の時の見かけの形状抵抗は0.44であった。

④フロート上面への砂の堆積量はp/tが小さいほど小さくなることが明らかとなった。

⑤p/t<0.4の範囲の翼形断面のフロートは、砂の堆積量から判断し浮上可能であることが明らかとなった。

参考文献

- 1) 服部卓也、上田俊也、中辻宏一、村木義男、佐伯浩：浮氷盤に作用する環境力に関する研究、寒地技術シンポジウム論文集、P386~392, 1990
- 2) 今泉章、上田俊也、榎国夫、寺谷勝利、佐伯浩、笹島隆彦：Ice Boomの設計方法について、寒地技術シンポジウム論文集、P644~649, 1991
- 3) 榎国夫、国松靖、大平正治、村木義男、佐伯浩：新型Ice Boomの開発、寒地技術シンポジウム論文集、P644~649, 1991
- 4) 泉山耕、佐伯浩、尾崎晃：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集、第38号、P135~P140, 1982

表-4 重複波の場合の氷盤流出(氷厚20cm)

周 期 (秒)	波高 (m)	流出氷盤枚数/100m (%)	
		設置位置 腹	設置位置 節
T= 6.0	1.0	0 (0.0)	0 (0.0)
	2.0	0 (0.0)	0 (0.0)
	3.0	0 (0.0)	0 (0.0)
	4.0	0 (0.0)	0 (0.0)
	5.0	0 (0.0)	0 (0.0)
	5.5	44 (2.9)	38 (2.5)
T= 8.0	1.0	0 (0.0)	0 (0.0)
	2.0	0 (0.0)	0 (0.0)
	3.0	0 (0.0)	0 (0.0)
	4.0	0 (0.0)	0 (0.0)
	5.0	0 (0.0)	0 (0.0)
	5.5	44 (2.9)	0 (0.0)
T=10.0	1.0	0 (0.0)	0 (0.0)
	2.0	0 (0.0)	0 (0.0)
	3.0	0 (0.0)	0 (0.0)
	4.0	0 (0.0)	0 (0.0)
	5.0	0 (0.0)	0 (0.0)
	5.5	0 (0.0)	0 (0.0)

表-5 重複波の場合の氷盤流出(氷厚60cm)

周 期 (秒)	波高 (m)	流出氷盤枚数/100m (%)	
		設置位置 腹	設置位置 節
T= 6.0	1.0	0 (0.0)	0 (0.0)
	2.0	0 (0.0)	0 (0.0)
	3.0	0 (0.0)	0 (0.0)
	4.0	0 (0.0)	0 (0.0)
	5.0	0 (0.0)	0 (0.0)
	5.5	494 (32.9)	344 (22.9)
T= 8.0	1.0	0 (0.0)	0 (0.0)
	2.0	0 (0.0)	0 (0.0)
	3.0	0 (0.0)	0 (0.0)
	4.0	0 (0.0)	0 (0.0)
	5.0	31 (2.1)	169 (11.3)
	5.5	269 (17.9)	475 (31.7)
T=10.0	1.0	0 (0.0)	0 (0.0)
	2.0	0 (0.0)	0 (0.0)
	3.0	0 (0.0)	0 (0.0)
	4.0	0 (0.0)	0 (0.0)
	5.0	6 (0.4)	0 (0.0)
	5.5	38 (2.5)	0 (0.0)