

Ice Boomによる氷盤移動制御

Control of the ice floes movement by using Ice Boom

榎 国夫*・石井千万太郎**・國松 靖***・佐伯 浩****
 Kunio Enoki, Ishii Chimatato, Sei Kunimatsu, Hiroshi Saeki

The authors carried out a model study to evaluate the effects for control of ice floes movement by two kinds of Ice Booms(Traditional Ice Boom and New type Ice Boom) and to investigate the ice forces acted upon them. Through these systematic experiment, the authors obtain the following results:(1)The effect of sea ice control determined by a function of Fr and h/L (Fr :Froude number; h :ice thickness; L :representative length of ice).(2)In practical situations, if the traditional type Ice Boom can control ice floes of up to 80cm/sec velocity, the New type Ice Boom can control ice floes of up to 150cm/sec.(3)Ice forces can be calculated from the area of ice floes trapped by Ice Boom, roughness coefficient of ice cover and velocity.

Keywords:Ice Boom, sea ice, Ice forces

1. はじめに

北海道のオホーツク海沿岸には、サロマ湖、能取湖、コムケ湖等多くの湖沼が存在し、これらはオホーツク海と直接水路で繋がっている。これらの湖沼においては、水産関係の養殖が活発に行われており、また湖内には多くの漁港が建設されている。最近の沿岸域開発に伴い、これらの湖沼の水産、観光面の開発ポテンシャルは年々高まっている。なかでもサロマ湖は面積、水深も十分であり、湖内において、ホタテ貝、カキ貝の養殖が大変盛んで、平成元年度には、約31億円の生産量をあげている。

一方、北海道のオホーツク海沿岸には、オホーツク北西海域で結氷した海水が北西の季節風と東カラフト海流により運ばれてくる。この流水の北海道のオホーツク海沿岸への着岸時期は年によって異なるが、通常は1月下旬頃である。このとき、湖内が充分結氷した状態ならば流水が湖口から湖内に侵入しても、結氷した氷盤に阻止され、湖内深く侵入することはない。しかし、最近は気温の上昇もあり湖内の結氷時期が遅れ、流水の接岸時には、まだ湖内はほとんど結氷していない年が多くなり、流水が湖内奥深く侵入し、ホタテ貝、カキ貝およびその養殖施設に多大(特に、昭和49年には20億円を超え、最近は数千万円程度)の被害を与えることが心配されている。このため、湖内への流水侵入に対する防止策が急務とされている。さらに将来的には、北方圏諸国との交易、交流の拡大に備え、またオホーツク海沿岸の諸都市の発展のため、港湾の通年利用を考慮しなければならないようになってきている。そのため、港内、港口近傍への流水侵入制御のための技術開発も必要とされる。これらの要求に答えるため、まず米国、カナダにおける河川の氷盤移動の制御に用いられているIce Boomの氷盤移動の制御効果を調べるとともに氷盤移動のメカニズムを明らかにして、それによる流水制御の可能性を実験的に調べた。さらに、Ice Boomの氷盤移動の制御効果を高めるため、従来のIce Boomにネットを取り付けた新型Ice Boomを開発し、その制御効果並びにそれに働く環境力を調べた。

2. 移動する氷盤の制御技術

これまで移動する氷盤の制御方法として、以下のようなものが開発され、また提案されている。

- ・着底式および固定式……Pack Ice Barrier、Ice Breaker Frame、HITS、Three Legged Pack Ice Barrier
- ・浮体式 ……浮体式防水堤

現地サロマ湖口等においては流水来襲時以外は漁船等の航路として用いられ、船舶の出入りが非常に活発である。従って、氷盤移動の制御構造物は、季節ごとに、設置したり、取り外せる方式が望まれる。また、湖口部は海底地形の変化が激しいので標砂に影響を与えない構造形式が望ましい。このため、設置や取り外しが簡単で耐久性があり、設置点において、波と流れの影響等々を考慮すると、先に挙げた固定式や浮体式では上記の要求を満たすことができず、Ice Boomのような可動性に秀れ、流体抵抗も小さく、また海底や海岸汀線近傍の砂の移動現象へ及ぼす影響も少ない構造形式が理想と考えられる。以上のことにより、本研究ではIce Boomに対する氷盤移動制御効果を実験的に調べたものである。

* 正会員 秋田工業高等専門学校 (011 秋田市飯島文京町1.1)

** 正会員 秋田大学鉱山学部土木工学科

*** 学生会員 北海道大学大学院

**** 正会員 北海道大学工学部土木工学科

3. 実験方法

サロマ湖の現湖口の幅は250m、第2湖口は50mである。また、湖口の流速は、今まで測定された結果によると現湖口で最大約240 cm/sec、第2湖口で最大約100 cm/secである。また、流水の大きさについては平均径1m程度から数kmまで広い範囲に分布しているが、いまだで正確な調査は行われていない。さらに、流水の厚さについても、オホーツク海北部で生長した氷の厚さは150~200cm、また、オホーツク海南部海域では50cm程度であるが、実際にはrafted iceやice rigdeもあり、昭和49年サロマ湖に侵入した氷塊の最大厚は10mを超えるものもあった。実験はこれらのことを考慮して縮尺1/50で行った。

実験に用いた水路はFig. 1に示すように長さ20.0m、深さ0.5m、幅2.0mの変変勾配水路を用いた。流量は0~230 l/secの範囲で変化が可能である。また、用いるIce BoomはFig. 2に示すように、長さ300cmとし、浮体は直径20mm、長さ100mmの塩ビパイプと一辺20mmの正方形の長さ100mmの角材を径0.54mmのステンスローブにそれぞれ24個固定した2通りのTypeを用意した。喫水深はいずれも1cmである。Ice Boomの両端にはロードセルが接続され、Ice Boomに作用する張力も測定することができる。また、氷の模型として、氷と同じ0.900 gf/cm³のポリプロピレンを用いた。ポリプロピレンの板相互の摩擦係数は乾燥状態で0.188、水中で0.146であり、これは氷相互の動摩擦係数0.1~0.2とほぼ同じであった。模型氷盤の形状は10cm角の正方形で氷厚は1cm、2cm、4cmの3種類を用いた。実験はフルード則に従って1/50の縮尺で行っているの、実規模に換算すると、大きさは5.0m角の正方形、厚さはオホーツク海の平坦氷の厚さである50cm、100cm、200cmに相当することになる。これらの氷盤を1600枚(16m²)準備し、実験水路へはIce Boomの設置点より6m上流の地点で投入した。実験は水路の流速を9.5 cm/sec~22.8 cm/secの間で変化させて行った。これは現地の流速に換算すると66.5 cm/sec~160.0 cm/secに相当する。また、表面の水位変動幅は約1cmで現地換算で50cmの波高に相当する。

4. 結果と考察

Ice Boomによる氷盤移動の制御効果を流速、模型氷の厚さ、流下枚数、浮体の断面形状を変化させ、測定を行った。

(1) Ice Boomによる氷盤移動の制御状況

氷盤のIce Boomによる制御状況の一例を写真で示す。この例は流量87.0 l/secで表面流速16.21 cm/secの場合である。氷盤が流れてくる前のIce Boomは、流体力により懸垂曲線と同様の形を描いている。Fig. 3は氷盤がIce Boomに到達した初期の段階で、一部は浮体に接触した後、回転しながら下流へ流下していく状況を示している。Fig. 4は氷を100枚投入したときの状況で、この程度Ice Boomに氷がTrapされると、浮体に接触している氷は後方の氷盤に押しつけられた状態になり、Ice Boomを超えて流下するものは極端に少なくなる。このように、Ice Boomは離散状態で流下してくる氷盤に対しては、その制御効果は小さいが一度Trapが始まると、その制御効果は急に大きくなる。Fig. 5は、Ice Boomの浮体がCylinder Typeのもので流速が16.21 cm/secの場合における実験であり、横軸は投下した模型氷の枚数、左の縦軸はIce Boomから流出した模型氷の枚数のそれまでに投下された模型氷の枚数に対する割合、右の縦軸は累積流出枚数である。氷厚1cmの場合、投入初期は流出の割合が20%を超えるが、投入枚数が多くなると14%程

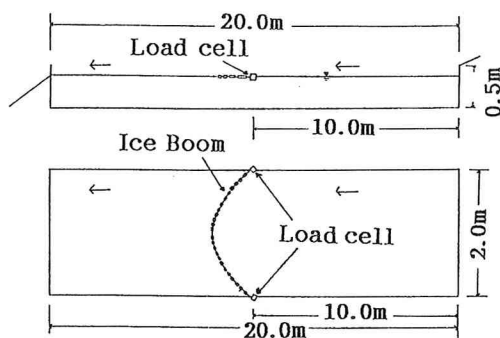


Fig.1 Experimental set-up

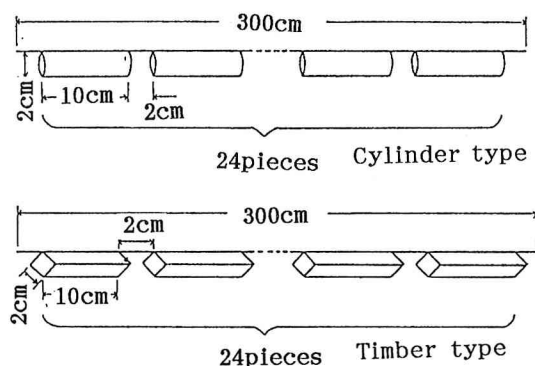


Fig.2 Formation of Ice Boom

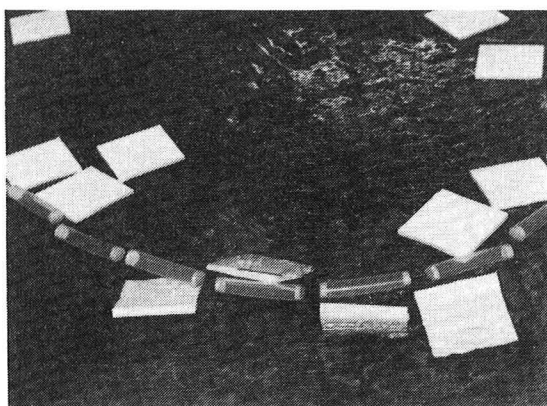


Fig.3

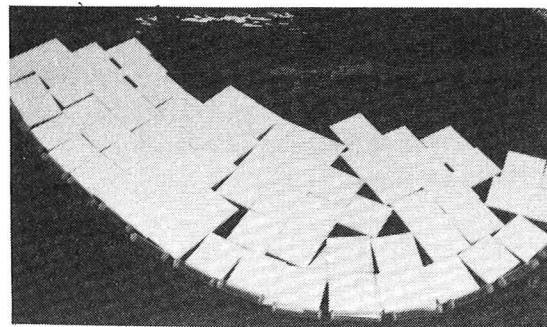


Fig.4

度まで下がる。この傾向は氷厚2cm、4cmの場合も同様である。浮体がTimber Typeの場合もほぼ同様の傾向がみられた。厚さの異なる3種の模型氷を1:1:1の比で混合状態で投入した場合も、同様の傾向がみられた。

(2) Ice Boom による氷盤制御効果

流速と氷厚それに浮体の形状を種々変化させて測定を行った。同じ流速でも氷厚が小さい程Ice Boomを通過しやすく、浮体の形状による相違はほとんど無いことがわかった。次に模型氷がIce Boomを通過する際の様子をFig. 6に示す。初めに上流から流れてきた模型氷の一端が浮体と接触すると軽く振動し、接点を中心に浮体の回りを水中を回転しながらIce Boomの外側に出て、流下していくことが、Fig. 6(1)～(6)の順序の様に観察することができた。このメカニズムを考察してみる。水中における模型氷に作用する力は、抗力、揚力、摩擦力、浮力の4力が考えられる。これらの力のモーメントにより、模型氷は浮体の接触点でこれを中心に回転運動を起こすと考えられる。しかし、この4つのモーメントのうち揚力によるものは他のものに比して、十分小さいと考えられるので、結局模型氷に作用するモーメントは以下の式で与えられる。

$$C_D \rho_w \frac{V^2}{2} h \cdot L \cdot \frac{h}{2} + C_f \rho_w \frac{V^2}{2} L^2 h - (\rho_w - \rho_i) g L^2 \cdot h \cdot \frac{L}{2} = 0$$

$$\therefore V^2 \left(C_D \rho_w h^2 \frac{L}{2} + C_f \rho_w L^2 h \right) = (\rho_w - \rho_i) g L^2 h L$$

$$\therefore \frac{V}{\sqrt{\frac{\Delta \rho}{\rho_w} g h}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{2} \left\{ C_D \left(\frac{h}{L} \right)^2 + C_f \left(\frac{h}{L} \right) \right\}}}$$

$$\therefore \frac{V}{\sqrt{\frac{\Delta \rho}{\rho_w} g h}} = f \left(\frac{h}{L} \right) \quad \dots \dots (1)$$

ここで、 L : 模型氷の長さ、幅、 h : 模型氷の厚さ、 ρ_w : 水の密度、 ρ_i : 氷の密度、 V : 表面流速、 C_D : 抵抗係数、 C_f : 摩擦係数、 $\Delta \rho = \rho_w - \rho_i$

(1)式の左辺 $\frac{V}{\sqrt{\frac{\Delta \rho}{\rho_w} g h}}$ はフルード数に相当し、

F で表せるから(1)式は

$$F = f \left(\frac{h}{L} \right) \quad \dots \dots (2)$$

とも表し得る。(2)式を実験で得られた実測値を用いて検討してみる。Fig. 7は浮体がCylinder TypeのIce Boomの例で縦軸に Fe 、横軸に h/L をとり、実測値をプロットしたものである。図中の曲線群はIce Boomを模型氷が通過流出する割合を百分率で示したものであり、0%の曲線の下側では1枚の模型氷もIce Boomを通過することがない安定な領域を表している。その曲線より上に行くに従ってIce Boomを通過して下流に流れていく割合が増加していくことが判る。一定厚、一定大きさの氷盤のIce Boomによる制御効果は、Fig. 7に示したように Fe と h/L とによって明らかになったが、TatinclauxによるIce Jam発生初期の氷盤下面への水の回り込みもこれと同様の関係で表される。

Ice Boomの両端に容量500gfのロードセルを接続し、Ice Boomのワイヤーに作用する張力を測定し氷力を求めた。結果をFig. 8に示す。縦軸に氷力、横軸に流速を取り、流体力のみが働く場合、氷厚1cm、2cm、4cmの模型氷が各30枚Ice Boomにtrapされた場合にわ

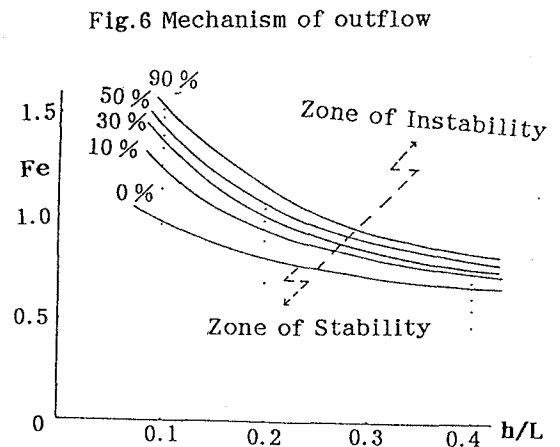
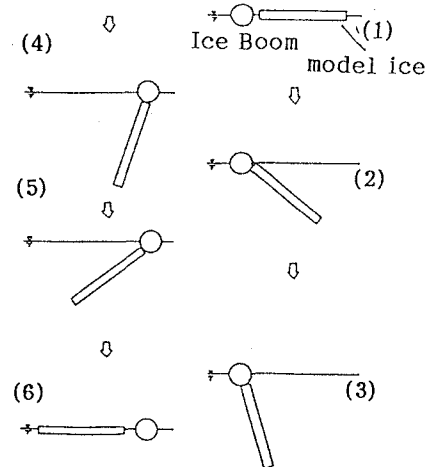
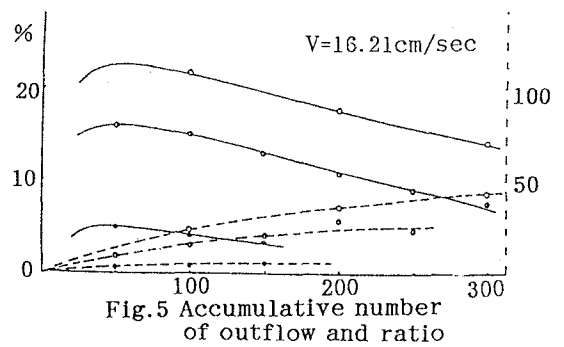


Fig. 7 The effect of sea ice control

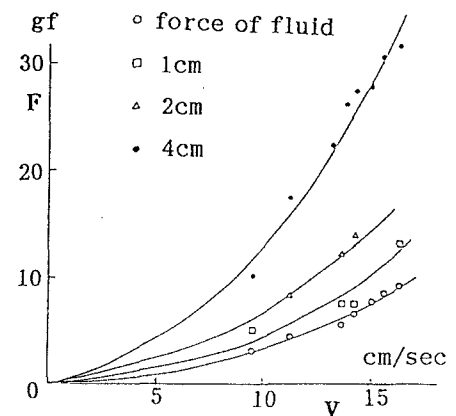


Fig. 8 Relation between ice forces and velocity

けて測定したものをプロットしたものである。図からわかる様に、張力(F)と流速(V)の間には明らかに $F \propto V^2$ の関係が成立している。実測値よりこの関係を式に表すと流体力みの場合、 $F = 0.03V^2$ 、氷厚: $h = 1\text{cm}$ の場合 $F = 0.043V^2$ 、 $h = 2\text{cm}$ の場合 $F = 0.069V^2$ 、 $h = 4\text{cm}$ の場合 $F = 0.138V^2$ (単位はgf) となることがわかった。このとき、抵抗係数 C_D の値は約0.5前後となることも同時にわかった。

5. 新型Ice Boomの開発

これまでIce Boomの氷盤移動制御の限界を検討してきたが、さらに、より一層制御効果をも高めるためIce Boomの下にネットを取り付け、これにより模型氷が回転しながら流出していくのを防止する目的で、Fig.9のような新型Ice Boomを試作した。上から各新型Ice Boomの喫水深(a)はそれぞれ4cm, 8cm, 12cmで、模型氷の代表長さ; $L = 10\text{cm}$ との比; a/L はそれぞれ0.4, 0.8, それに1.2になる。従来型Ice Boomの a/L は0.1である。また、この新型Ice Boomにおいては下端のワイヤーの締結方法が非常に重要となる。湖口部で、流水の侵入をIce Boomで防御する場合、DraftやSail Heightが広い範囲に分布しているため、風や流れによる流体抵抗もおおきく、流水が水面をおおう面積も非常に大きいので、Ice Boomに作用する氷力も非常に大きくなる。よってIce Boom上部の緊留索(メインワイヤー)は、浮体構造物に締結する方法でなく鋼管杭等に締結する方が望ましい。また、Ice Boom下部ワイヤーの固定方法についてはFig.10に示すように4つのタイプが考えられる。それぞれ一長一短はあるが、現地の事情を考慮し、(c)タイプを採用した。(c)タイプはネットの下端部5ヶ所にWeightをつり下げの方法で、着脱が容易であることと、Weightにより、ある程度の流体力に耐え得る構造であるからである。また用いたWeightの重さは1個10gfで、実規模では約1.25tfの重さに相当する。

6. 新型Ice Boomの氷盤移動制御効果

ネットのない従来型Ice BoomとFig.10(c)の締結方法でのType-1, 2, 3の新型Ice Boomの氷盤移動制御効果の比較を行った。その結果をFig.11に示す。それぞれの曲線は氷盤を制御できる範囲とできない範囲の境界を示している。曲線の下側は氷盤を完全に止めることのできる範囲であり、線の上側は氷盤の一部が流下してしまう範囲である(模型氷を30枚流して制御効果を観察した)。同一のサイズの氷盤では、新型Ice Boomの制御効果の方が大きい事を示している。この実験によってわかることは、模型氷が流体力によって回転し流下するのを阻止する能力である。模型氷の枚数がある程度多くなった場合の制御効果はIce Boomの締結方法や強度に依存すると考えられる。

7. 新型Ice Boomに作用する環境力

環境力とは氷盤に作用する外力のことで主に水による流体抵抗と風によるせん断力とが考えられる。氷力とは環境力が氷盤に作用することによって生じる力である。ここでは、水による流体抵抗によって新型Ice Boomに働く氷力について実験を行った。

Fig.12は厚さ1cm、2cm、4cmの模型氷を5:3:1の割合で流した場合の、各流速における模型氷による水面の被覆面積とType-3の新型Ice Boomに働く氷力の関係を示している。模型氷の混合比が1:1:1の時も同じような傾向がみられた。これらの実験においては流速の大きいところで数枚流下したほかはすべて模型氷を止める

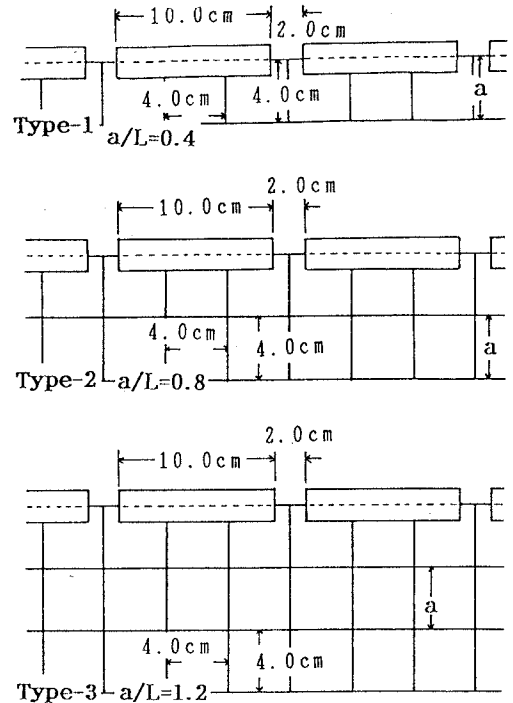


Fig.9 New type Ice Boom

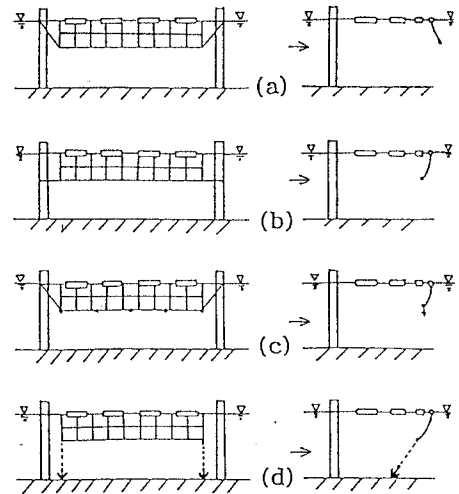


Fig.10 Connection method of New type Ice Boom

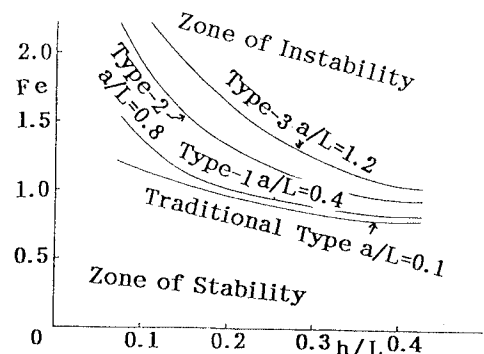


Fig.11 Effects of Sea Ice Control due to New type Ice Boom

ことができた。

流速9.5~13.6cm/secの範囲では、流れてきた模型氷が重なりあうことや、回転してネットに張り付くことはほとんどない[Fig. 15]。Fig. 12のグラフよりこの流速の範囲では、模型氷におおわれる水面の面積の増加に比例してIce Boomにかかる氷力が増加していることから、これは模型氷に働くせん断力に支配されていると考えることができる。

流速が14.2~15.8cm/secの範囲では最初に流れてきた模型氷が、互いに重なりあうのが少しみられた。Fig. 12のグラフよりこの流速の範囲では、被覆面積の小さい所ではIce Boomに働く氷力の増加は、流速9.5~13.6cm/secにおける増加よりもはるかに大きい。これは、模型氷が浮体に接触し、回転して垂直となってネットに張り付いたり重なりあったりすることによって、模型氷に働く抗力の影響が大きく表れたものと考えられる。被覆面積が約 1×10^4 cm²以上になるとさらに模型氷を流し続けても、重なりあうことはほとんどない。したがって、Fig. 12のグラフの流速14.2~16.2cm/secの範囲で、被覆面積が約 1×10^4 cm²以上の領域において、それ以下の領域よりもゆるい傾きでIce Boomにかかる氷力が被覆面積に比例して増加しているのは、新たな抗力が働かず模型氷にかかるせん断力だけが增加しているからと考えられる。

流速18.7cm/sec以上のときには多数の模型氷が回転して垂直となりネットにはりつき、あとから流れてくる模型氷は重なりあってIce Jam状になった[Fig. 16]。Fig. 12のグラフよりこの流速の範囲では、流速9.5~15.8cm/secに比べて流速に対するIce Boomに働く氷力の増加がきわめて著しい。これは模型氷群がIce Jam状になったためその氷盤下面の粗度が増すことによってせん断力が大きくなり、Ice Boomに働く氷力も大きくなったものと考えられる。

次にFig. 12において、氷力の増加がせん断力の増加のみに依存していると考えられる部分から各流速における模型氷に働くせん断応力を求めた。流速約10~17cm/secの範囲におけるせん断応力と流速の関係を示したのがFig. 13である。この図からせん断応力はおおむね流速の2乗に比例していると見ることができる。これは、壁面のせん断力を表す式 $\tau = (\rho/2) \cdot C_f \cdot V^2$ (ρ :水の密度、 C_f :水と氷の間のせん断係数、 V :流速)の関係を示していると考えられる。

また、この範囲における各流速のデータから個々に C_f を計算し流速で整理するとFig. 14の●■印ようになる。この範囲では流速への顕著な依存はみられなかった。また、Fig. 14に流速が大きく氷盤群がIce Jam状になった場合(○印)と、全て同じ厚さの模型氷を用いて氷盤群を凹凸がない状態にした場合(△印)の C_f を求めた結果を示した。

また、上田らによる”浮氷盤に作用する流体力に関する実験的研究”によると、模型氷と水の間の摩擦係数は、凹凸のない場合 $C_f=0.007$ 、凹凸のある場合の最大値は $C_f=0.0257$ となっており今回の我々の実験結果と極めてよく一致している。また今回の実験により求めた形状抵抗係数 $C_D=0.5$ も上田らの実験結果とよく一致している。これらの結果より、氷盤群の水との摩擦係数は、氷盤群の粗度に非常に大きな影響を受けるということがわかる。

もう1つの主な環境力として風によるせん断力があるが、このせん断力は水と氷の間のせん断力の1/10のオーダーであるので、氷力には主に水の流体抵抗に支配されていると考えることができる。

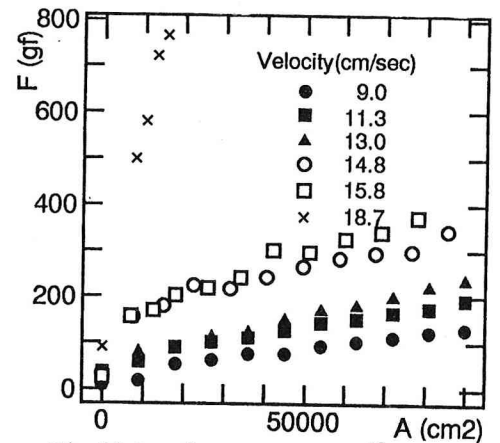


Fig. 12 Ice forces versus the area covered with ice floes

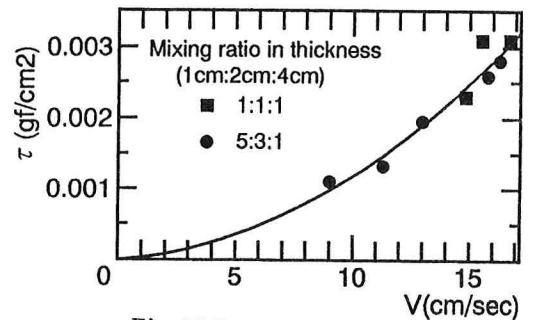


Fig. 13 Relation between drag force and velocity

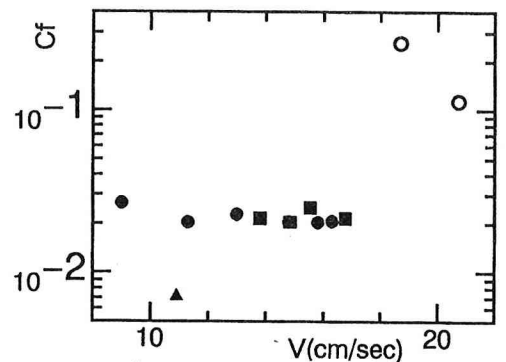


Fig. 14 Relation between drag coefficient and velocity

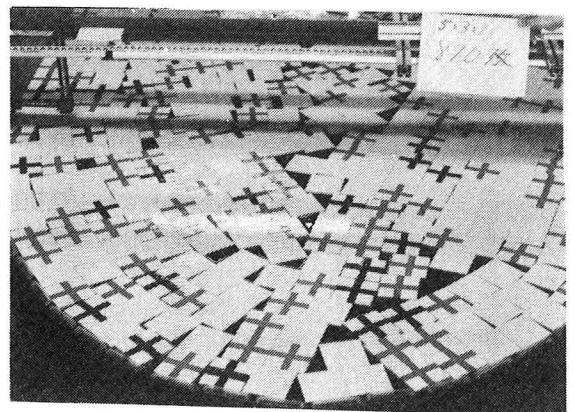


Fig. 15

実際にサロマ湖の湖口においてIce Boomを用いる場合、設置位置も問題となる。漂砂への影響をなるべく少なくするためには、流速の遅いところに設置する必要があるし、またそれがIce Boomの水盤移動制御効果を高めることにもなる。次に、維持管理のことを考えると、波浪の影響少ない湖内側に設置するのが好ましい。Fig. 17はIce Boomの設置位置の例であるが、流速の大きい真中の部分は新型Ice Boom、流速の遅い両側は従来型Ice Boomを設置している。

この実験の結果では、模型氷の枚数が無限に増加すればIce Boomにかかる氷力も無限に増加するというようになってしまう。しかし、実際にはFig. 17に示すように湖口においてArchが形成されるので、Ice Boomにかかる氷力はArchの内側の氷盤によるものだけを考えればよいと思われる。また、潮汐の影響により流れの方向が変わるので氷盤が一方的にたまり続けることはない。よって、この新型Ice Boomによって流水の侵入を防止できると期待される。

5. 結論

- (1) 従来のネットのないIce Boomにおいては、流速がある程度以上大きくなると浮体と氷盤の接触点をヒンジとして水中に向かって回転して、Ice Boomの下から下流側へ出ていく。
- (2) 浮体の形状に関して、今回の実験では円柱型と角柱型の2通りを用いたが、ほとんど違いをみつけることができなかった。この点からも、浮体として製作し易く、かつ設置や移動がすみやかに行える型を選択することができる。
- (3) 新型Ice Boomは浮体の下にネットがついているために氷盤が回転するのを、途中で阻止できる。そのため氷盤制御効果が高まった。
- (4) 氷盤の制御効果は Fe と h/L (Fe :フルード数 h :氷厚 L :氷盤の代表長さ) の関数で表すことができる。
- (5) 今回の実験では、実規模において5m四方で厚さ50cmの氷盤は流速約80cm/sec、厚さ2mの氷盤は流速約1m/secで回転することになる。平成3年2月の船舶技研の現地調査の結果でも氷厚はたかだか30cm~80cmとの報告があり、従来型Ice Boomではこれらの氷を制御することは難しい。
- (6) 流速が約15cm/secを越え、氷盤は非常に不安定な状態となり、Ice Jamの発生につながる。これは、現地では約110cm/secに相当する。
- (7) 氷盤群による水面の被覆面積が大きい場合は、Ice Boomに働く氷力はおもに氷盤に働くせん断力に支配される。
- (8) Ice Jamが発生すると、氷盤群下面の粗度が増しせん断力が非常に大きくなる。流速18.7cm/secの場合、実験値よりせん断係数 C_f の値を求めると、0.1~0.2程度となった。
- (9) 今回の実験結果を実規模に換算すると、現地における流速を100cm/secと仮定し、幅100m長さ500mの水野の影響がIce Boomに及ぶとすれば、Ice Boomに働く氷力は約50tになる。
- (10) この実験においては、流速約22cm/secが新型Ice Boomの水盤移動制御の限界であった。これは、実規模では流速約150cm/secにおいてメインワイヤーに約100tの張力が働くことに相当する。



Fig.16

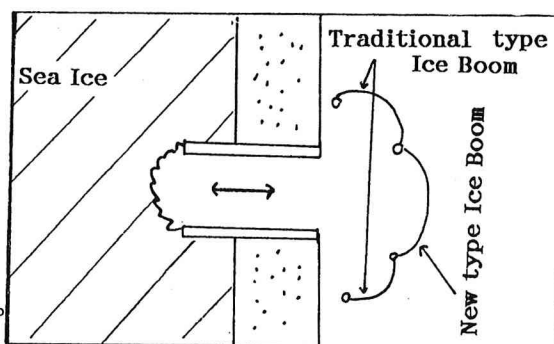


Fig.17 Inlet of Saroma lagoon

参考文献

- 1) Parham, R. E.: "Forces Generated in Ice Boom Structures" U.S. Army CREEL, special Rep. 200, 1974, ppl-34
- 2) Tatinclaux, J. C., M. Gogus: "Stability of Floes below a Floating Cover" Proc. International Symposium on Ice, Vol. 1, 1981, pp. 298-308
- 3) 今泉、上田、榎、寺谷、佐伯、笹島: "Ice Boomの設計方法について" 第7回寒地技術シンポジウム, Vol. 7, 1991, pp. 644-649
- 4) 下田、小山、吉田、宇都、金田、田淵、門井、泉山、北川: "巡視船「そうや」によるオホーツク海水況観測" 第58回船舶技術研究所研究発表会講演集, Vol. 58, 1991, pp. 100-103
- 5) 榎、國松、田淵、大下、佐伯: "氷盤移動制御用Ice Boomの特性について" 第7回北方圏国際シンポジウム, 1992, pp111-115
- 6) 榎、國松、大平、上田、今泉、佐伯: "新型Ice Boomの氷盤移動制御特性と作用する環境力" 第7回北方圏国際シンポジウム, 1992, pp116-120
- 7) 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" 第8回海洋開発シンポジウム, Vol. 8, 1992