

Ice Boom による氷盤移動制御に関する実験的研究

榎 国夫・菊地 秀達*・真坂 明義**

Experimental Study of the Ice Boom for control of the ice floes movement

Kunio ENOKI, Hidetatsu KIKUCHI and Akiyoshi MASAKA

(1994年 8 月22日受理)

This paper describes experimentally the effect for control of ice floes movement by the Ice Boom.

Some general conclusion obtained from a model study, are as follow :

- (1) Then ice thickness is large, ice floes are trapped easily by the Ice Boom. In real scale, if ice thickness is 2 m, ice floes are trapped until its velocity is over 1 m/sec. Conversely, then ice thickness is small, ice foles flow out slow velocity from Ice Boom. In real scale, if ice thickness is 50 cm, ice floes flow out from Ice Boom when surface velocity is over 0.8 m/sec.
- (2) On the form of floating pontoons of the Ice Boom, we got ready for two type, cylinder type and timber type. As a result, difference due to forms for control of ice floes movement was not distinguish practically.
- (3) It was found that the conditions of the effect for control of ice floes movement were determined by the number of Floude : Fe and ratio of ice thickness : h and size of ice floes : L .

1. まえがき

北海道のオホーツク沿岸に位置する湖沼は数多くあり、養殖事業が盛んに行われている。中でもサロマ湖(図-1)では、ホタテ貝とカキ貝により平成元年には約31億円の生産高をあげている。

オホーツク沿岸には、オホーツク北西海域で氷結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、毎年早い時で1月中旬、遅い時でも2月上旬に着岸する。これに対して湖内の結氷初日は、12月中旬であった。しかし最近では1月下旬から2月初旬にかけてと、結氷初日は年々遅くなっており、ついには平成元年には湖内はほとんど結氷しなかった。湖内が十分に結氷した状態では、流氷が湖口から侵入しても氷盤に阻止され、養殖事業に被害は生じることはない。しかし、昭和49年以降は湖内のほとんどが結氷してない1月中旬に流氷が湖内に侵入



図-1 サロマ湖の位置と形状

*秋田県庁

**㈱クボタ建設

してくるようになり、養殖貝及び養殖施設は多大な被害を受けるようになった。それに加え湖内が全面結氷して流氷による被害は一時的におさまるが、湖内の氷が融解すると共に再び流氷が移動を始め被害をさらに大きくする。このため湖内への流氷侵入に対する防止策が急務とされている。更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。そのため、港内、港口近傍への流氷侵入制御のための技術開発がぜひ必要とされる。これらの要求に応えるため、Ice Boom の制御効果を実験的に検討した。

2. 移動する氷盤の制御技術

一般には、流氷対策というのは流氷移動の制御がその対象になる。この流氷移動の制御は大きく3つに分類される。

1. 流氷の陸上遡上の制御

(1) バンプによる海水の制御

図-2-1にあるような bump を造り、そこで氷盤に自重で曲げ破壊を起こさせ pile-up させて、そ

の背後への遡上を防ごうとする方法。

(2) コンクリートタンクトラップ

汀線に沿って設置し、そこで強制的に氷盤を曲げ破壊させようとするもの。図-2-2

2. 流氷の浅海域における移動制御

(1) アイスプレーカーフレーム

アラスカのノーム港の流氷侵入防止策として立案されたもので図-2-3に示すような鋼管製である。これは流氷が港内に侵入し pile-up して、長期間港湾機能を阻害するのを防止するためのものである。これは固定式であって、航路の部分には設置できない。

(2) Pack ice barrier

4本脚となっていて銅管で造られ、流氷が岩礁域に侵入するのを防ぎ、また氷力を低減させるため氷盤を曲げ破壊させるような傾斜型となっている。図-2-4

(3) Three legged Pack ice barrier, HITS

図-2-5、図-2-6に示すような構造で4本脚の不安定さを解消した構造となっていて、さらに3点支持により基礎処理なしで利用できる利点をもっている。

3. 流氷の海岸浸食制御

わが国では流氷による顕著な海岸浸食は発生していない。

しかし、アラスカポーフォート海の人口島の場合流氷から法面を保護するためにコンクリートブロック張りで浸食を防いでいる。

現地サロマ湖口においては、流氷来襲時以外は航路として船舶の出入りが活発であるため、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漂砂に影響を与えない構造方式が望ましい。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などを考慮すると、先に上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ない。それらのことを考えると、理想と思われるものは Ice Boom と呼ばれる構造物である。Ice Boom とはアラスカ、カナダ、北米などの河川で実際に設置例のある構造物で、ワイヤーに浮体を接続しただけのシンプルな構造で、可動性に優れ、流体抵抗も小さい。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。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

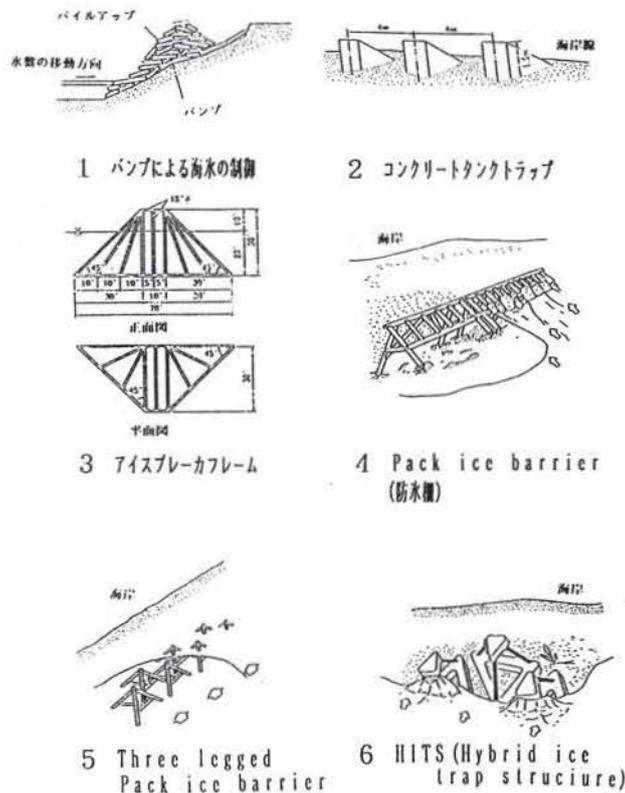


図-2 移動する氷盤の制御方法例

効果を実験的に調べたものである。

3. Ice Boom の実験方法

サロマ湖の現湖口の幅は250 m, 第2湖口は50 m である。また, 湖口の流速は潮汐の影響によるが, いままで測定された結果によると, 現湖口で約240 cm/sec, 第2湖口で約100 cm/sec である。また, 流氷の大きさについては平均径1 m 程度から数 km まで広い範囲に分布しているが, いままで正確な調査は行われていない。さらに, 流氷の厚さについても, オホーツク海北部で生長した氷の厚さは150~200 cm, また, オホーツク南部海域では50 cm 程度であるが, 実際には rafted ice や ice ridge もあり, 昭和49年サロマ湖に侵入した氷塊の最大厚は10 m を越えるものもあった。

実験に用いた水路は図-4 にしめすように長さ10.0 m, 幅0.4 m のものである。その水路の特性を知るために, 流速分布図を求めた。それを図-5 に示す。Ice Boom は図-3 に示すように, 長さ52 cm とし, 浮体は直径0.7 cm, 長さ3 cm のビニールパイプを12個固定したものを用意した。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30 mm 角の正方形で氷厚は3 mm, 6

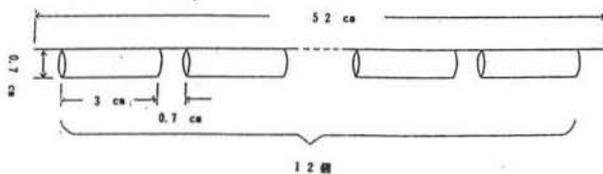


図-3 Ice Boom (Cylinder Type)

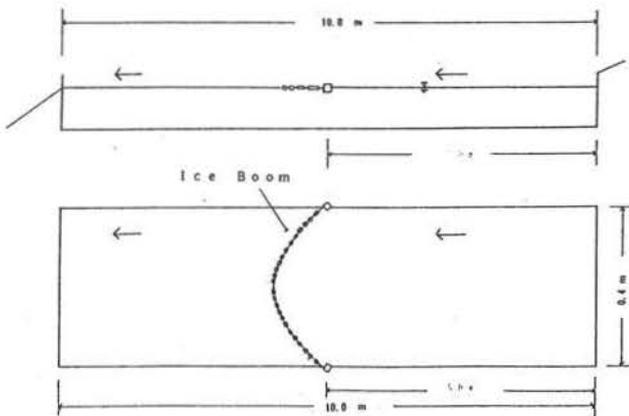


図-4 Ice Boom 実験水路

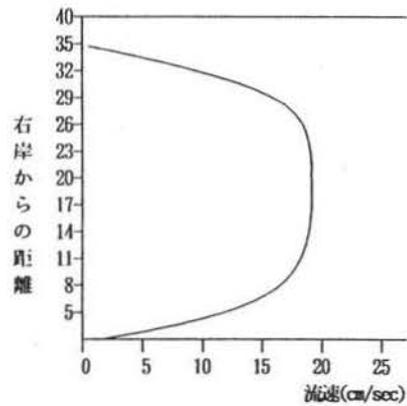
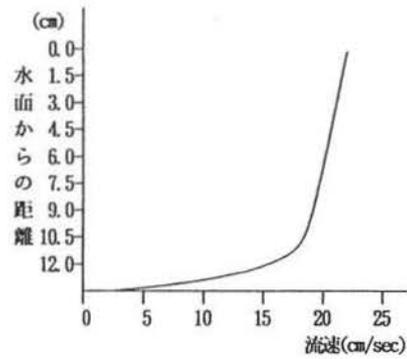


図-5 実験水路の流速分布図

mm, 12 mm の3種類を用いた。実験はフルード則に従って1/150の縮尺で行っているので実規模に換算すると, 大きさは4.5 m 角の正方形, 厚さはオホーツク海の平坦氷の厚さである0.45 m, 0.9 m, 1.8 m に相当することになる。これを Ice Boom の設置点より5 m 上流の地点で投入した。今回の実験で用いた流速は5.59~9.36 cm/sec で, これを現地の流速に換算すると67.18~114.62 cm/sec に相当する。

4. 実験結果

Ice Boom による制御効果を流速, 模型氷の厚さ, 枚数を変えて, 測定を行った。

(1) Ice Boom による氷盤移動の制御状況

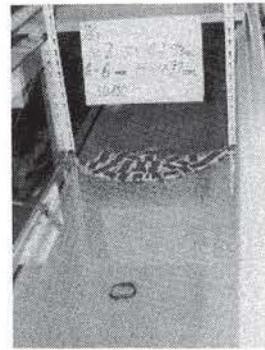
氷盤の Ice Boom による制御状況の一例を写真で示す。写真(1)は氷盤が流れてくる前の Ice Boom の状況で, Ice Boom は流体力により懸垂曲線と同様の形を描いている。写真(2)は氷盤が Ice Boom に到達した初期の段階で, これが写真(3)のように一部は Ice Boom に接触した後, 回転しながら下流に流下

Ice Boom による氷盤移動制御に関する実験的研究

していく。写真(4)は模型氷を30枚投入した時の状況で、この程度 Ice Boom に氷が Trap されると、Ice Boom に接触している氷は後方の氷盤に押しえ付けられた状態となり、Ice Boom を超えて流下するものは、極端に少なくなる。写真(5)は100枚投入したときの例で Ice Boom は30枚投入時よりさらに安定度を増す。写真(6), (7)はそれぞれ150枚200枚投入した時の例で、こうなると氷盤はほぼ完全に Ice Boom に Trap されている。この様に、Ice Boom の効果はバラバラに入っ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。図-6 は一例として、流速8.44 cm/sec の場合の投入枚数に対しての流出累積枚数と比率を示したものである。氷厚3 mm の場合、投入初期は流出の割合が20%を超えるが、投入枚数が増えると15%程度まで下がる。この傾向は6 mm, 12mm の場合も同様である。

(2) Ice Boom による氷盤制御効果

流速と氷厚を変えて測定を行った例を表-1 の様に示す。表中の数字は、30枚の模型氷をそれぞれの流速で5回ずつ流して何枚 Ice Boom を通り抜けたかを表したもので、流速5.48 cm/sec では、模型氷の

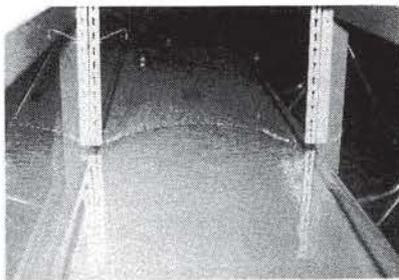


(4) 制御される模型氷 30枚投入時



(5) 制御される模型氷 100枚投入時

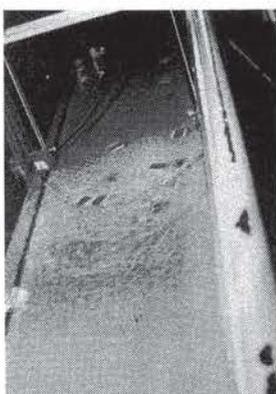
Ice Boom の制御状況例 (写真) No. 2



(1) Ice Boom 設置 模型氷投入前



(6) 制御される模型氷 150枚投入時



(2) 模型氷到達直前



(3) 流出する模型氷



(7) 制御される模型氷 200枚投入時

Ice Boom の制御状況例 (写真) No. 1

Ice Boom の制御状況例 (写真) No. 3

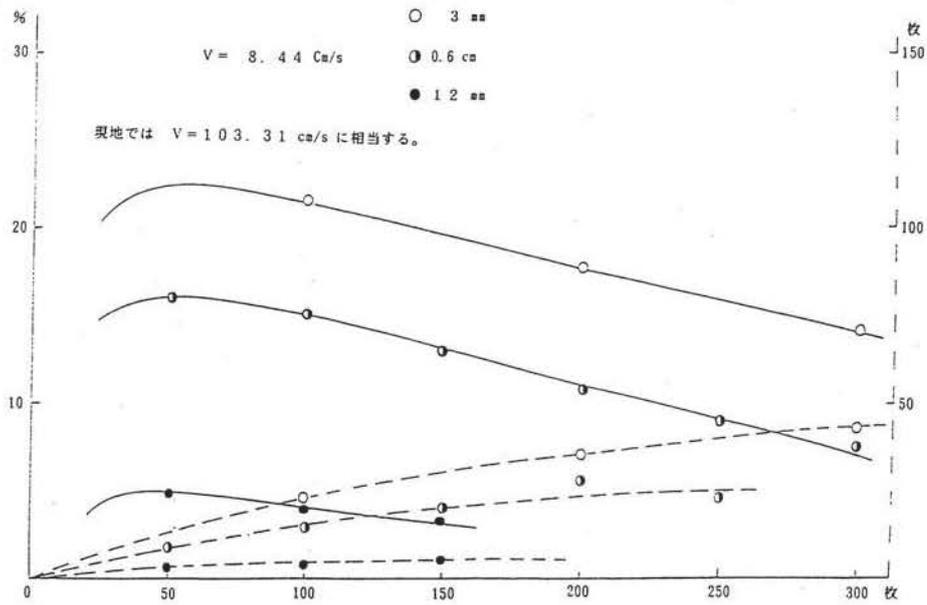


図-6 Ice Boom (Cylinder Type)の流出累積枚数と比率

厚さに関係なく1枚もIce Boomから流出していない。流速6.49 cm/secでは、氷厚3 mmのものが一部流出した。流速7.85 cm/secで氷厚6 mmのものも一部流出し始め、流速8.67 cm/secでようやく氷厚12 mmのものも一部流出していった。これより、同じ流速でも氷厚が小さい程Ice Boomを通過しやすいことが分かった。すなわち、Ice Boomは氷厚が大きくなる程（もちろん限界はあるが、その制御効果を発揮するといえる。なお浮体の形状で制御効果に違いがあるかを、北海道大学のTimber Typeの

測定例と比較してみたが、ほとんど違いは見られなかった。浮体の形状の違いは制御効果には影響を及ぼさないようである。次に模型氷がIce Boomを通過する様子を図-7に示す。上流から流れてきた模型氷の一端がIce Boomの浮体と接触すると軽く振

Velocity (cm/s)	5.48	6.49	7.85	8.20	8.67	8.97	9.36
Ice Thickness (3mm)							
Cylinder type	0	0~10	3~9	3~11	3~16	18~29	24~25
Timber type	0	0~16	0~4	-	7~14	1~16	28~30
Ice Thickness (6mm)							
Cylinder Type	0	0	0~3	0~5	3~9	14~18	11~20
Timber Type	0	0	0~2	1~8	5~9	11~20	21~23
Ice Thickness (12mm)							
Cylinder Type	0	0	0	0	1~3	0~6	3~11
Timber Type	0	0	0	0	0~1	2~8	5~15

表-1 流速と流出枚数の関係
 <Timber Typeは北海道大学のデータを使用>

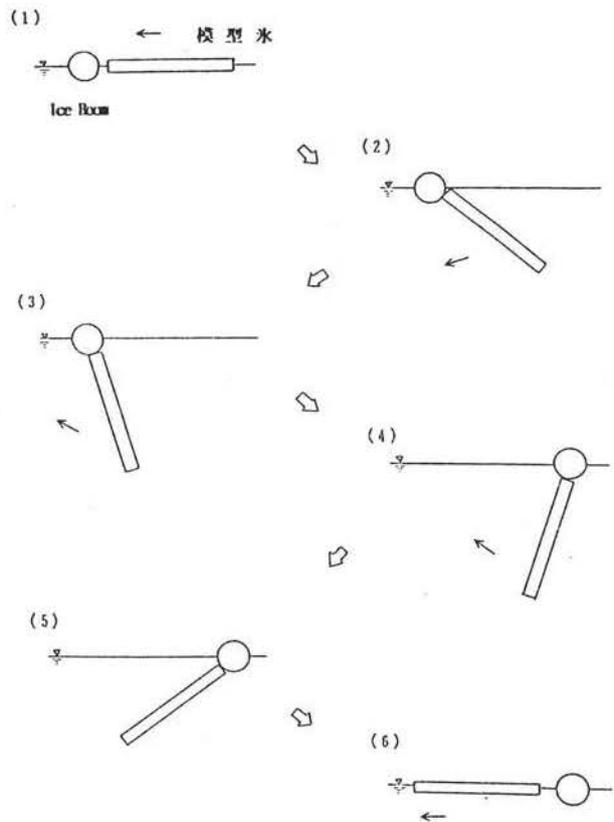


図-7 模型氷の流出図

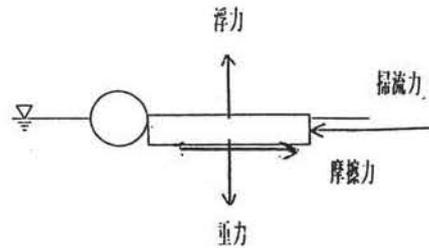
動し、接点を中心に浮体の回りを水中を回転しながら Ice Boom の外側に出て、流下していくことが、図-7 の(1)~(6)の順序の様に観察することができた。このメカニズムを考察してみると、水中における模型氷に作用する力は、掃流力、摩擦力、浮力、重力、揚力の5力が考えられる。これらの力のモーメントにより、模型氷は浮体との接触点でこれを中心に回転運動を起こすと考えられる。しかし、この5つのモーメントのうちで揚力によるものは他のものに対して十分小さいと考えられるので、結局模型氷に作用するモーメントは図-8 の(1)式で考えられる。

図-8 の(2)式を実験で得られた実測値を用いて検討してみる。

図-9 は縦軸に 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表したもので、この(2)式によって描かれるグラフと類似しており、実験結果は理論的に裏付けされた。また、0%の曲線の下側では1枚の模型氷も Ice Boom から流出し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流出の割合が増加していくことが判る。

以上の結果から、

(1) 氷厚の大きい氷は、流速がある程度大きくなっても比較的 Ice Boom で補足しやすい。実規模で表すと厚さ1.8mの氷は約 1 m/sec 以上にならな



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

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

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

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

- L : 模型氷の長さ、幅 ρ_w : 水の密度 V : 表面流速
- h : 模型氷の厚さ ρ_i : 氷の密度 C_D : 抵抗係数
- C_f : 摩擦係数 Δρ : ρ_w - ρ_i

上式の左辺はフルード数に相当するので

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

とも表し得る。

図-8 模型氷に作用するモーメント

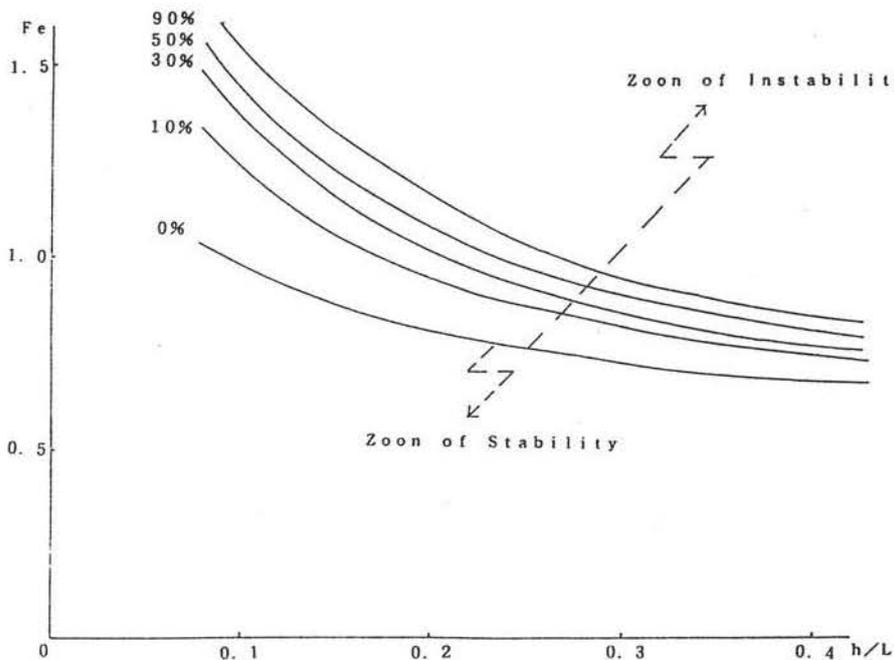


図-9 Ice Boom (Cylinder Type) の制御効果

いと Ice Boom から流出することはない。

(2) 逆に氷厚の小さい氷は、流速が小さいうちでも流出してしまう。実規模で表すと厚さ45 cmの氷は流速が0.8 m/secを越えると Ice Boom から流出してしまうことになる。平成3年2月の船舶技研の現地調査の報告では氷厚はたかだか30 cm～80 cmであり、薄い氷は比較的発生しやすいといえ、この Ice Boom の構造では、これらの氷を制御することは難しい。

(3) 浮体の形状による制御効果の違いはほとんど無い。それにより、浮体としては制作しやすく、かつ移動や設置が容易である型を選択することができる。

5. 結論と今後の課題

(1) 氷盤は、流速がある程度以上大きくなると Ice Boom の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) 氷盤が回転し始める限界の流速は氷厚3 mmで約5.5 cm/s、氷厚6 mmで約6.5 cm/s、氷厚12 mmで約8.2 cm/sである。これは現地ではそれぞれ、約70 cm/s、80 cm/s、105 cm/sに相当する。これが、Ice Boom の氷盤移動制御の限界流速である。

(3) 氷盤の制御効果は Fe と h/L (Fe :フルード数 h :氷厚 L :氷盤の長さ、幅)の関数、すなわち $Fe = f(h/L)$ の形式で表し得る。

これで、抵抗係数 C_D と摩擦係数 C_f が与えられると Fe と h/L の関係が具体的に明かになることが分かりました。

(4) 上で得られた結果より、Ice Boom による氷盤移動制御を行うためには、現地における湖内の正確

な流速分布や深浅図、流入する流水の厚さやサイズを知る必要がある。

(5) Ice Boom による氷盤移動の制御効果をあげる為に、従来の浮体にワイヤーを接続した Ice Boom に対して、氷盤の回転による流出を抑えるため、ネットを取り付けた、いわゆる新型の Ice Boom の開発も併せて考慮していかねばならない。

6. 参考文献

- 榎 国夫, 国松 靖*, 佐伯 浩*, 「Ice Boom の氷盤移動制御効果に関する研究」第7回寒地技術シンポジウム pp. 650-656, 1991 (*北海道大学工学部)
- 榎 国夫, 石井千万太郎*, 国松 靖**, 佐伯 浩**, 「Ice Boom の氷盤移動制御」海洋開発論文集 Vol. 8 pp. 153-158, 1992 (*秋田大学鉱山学部, **北海道大学工学部)
- 榎 国夫, 田淵浩文*, 国松 靖**, 佐伯 浩**, 「氷海域における氷盤移動制御に関する研究」第11回海洋工学シンポジウム pp. 287-293, 1992 (*運輸省船舶技術研究所, **北海道大学工学部)
- Kunio Enoki, Sei Kunimatsu*, Hiroshi Saeki* "Experimental Study on the control of Ice Movement with a new Design of Ice Boom" Proceedings of the Third International Offshore and Polar Engineering Conference, Vol. II pp. 730-735, 1993 (*Faculty of Engineering Hokkaido Univ.)
- 榎 国夫, 国松 靖*, 原文宏*, 佐伯 浩*, 「サロマ湖口における流水侵入防止に関する模型実験」海岸工学論文集 Vol. 40 (2) pp. 1026-1030, 1993 (*北海道大学工学部)