

サロマ湖内結氷盤氷縁部における流入流水の運動に関する研究

Movement of Ice Floe at the edge of Ice Sheet in Saroma Lagoon

河合孝治*・正木智**・原文宏***・大島香織*・古屋温美****・佐伯浩*****

Takaharu Kawai, Satoshi Masaki, Fumihito Hara, Kaori Ohshima,
Atsumi Furuya, and Hiroshi Saeki

The Okhotsk Sea of Hokkaido is covered with drift ice in winter. Drift ice which rushed into Saroma Lagoon caused heavy damages to scallops and oysters, and its facilities. So the ice boom which prevents the drift ice from rushing into is started constructing in 1994, and is completed its 80%. Especially, ice boom with net that set at the center of lagoon mouth completely shut out the drift ice. However, decrease of the amount of sea water exchange is worried about.

In this paper, the authors make two experiment about movement of ice floe, and prove that quality of water does not become worse because of ice boom construction.

Key Words : drift ice, ice boom, under-turning, trap

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、ホタテ貝、カキ貝等の養殖が盛んに行われており、なかでもサロマ湖においては、年間 30 億円以上の生産額をあげている。一方、オホーツク海沿岸には、毎冬 1 月から 2 月にかけて流水が接岸するが、湖内が十分に結氷している場合には、その流水が湖内に侵入することはない。しかし、近年気温の上昇等により、湖内の結氷が遅れたり、結氷しないことがあったり、流水が 2 つの湖口部から湖内に侵入し、養殖施設等に大きな被害を与えている。そのため、流水侵入防止のため第一湖口（幅約 250 m）湖内側にアイスブームの建設が平成 6 年度から始まっており、現在約 80% が完成している。特に、流入流速の大きい湖口正面部のネット付きアイスブームは建設されてから 3 年が経過し、アイスブームは流入する流水盤を完全にトラップし、流水侵入防止の目的は達成されている。しかし、トラップされた氷盤群による流水断面の減少と流体抵抗の増大による、海水交換量の減少が懸念されている。本研究は、アイスブームの建設によって、海水交換が建設前に比べて悪化していないことを実験的に明らかにしたものである。

2. サロマ湖における流水侵入による被害状況および湖内結氷状況

サロマ湖の位置図を図-1 に示す。サロマ湖は面積 151.2km²、周囲 91.1km、最大水深 19 m であり、2 つの湖口によってオホーツク海と繋がっている。第一湖口は砂浜の自然湖口であり幅約 250 m、第二湖口は水質を改善するために開削された人工湖口であり、幅約 50 m である。ここ数年サロマ湖では、湖内の結氷の時期が遅れ、接岸した流水が湖内に侵入するようになった。サロマ湖における流水侵入によるホタテ貝、カキ貝およびその養殖施設の被害は、1972 年～1995 年の間に 9 回起こっており、最も顕著な例として 1974 年の被害額は約 22 億円にものぼり、ここ数年は数千万円の被害となっている。第一湖口付近の平面流速分布を図-2 に示す。これは、湖口付近の流速が最大となる最大潮差時の流速分布である。アイスブーム建設以



図-1 サロマ湖の位置図

* 学生会員 北海道大学大学院工学研究科 (060 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

** 正会員 札幌市建設局土木部河川工事課

*** 正会員 (社)北海道開発技術センター

**** 正会員 (株)パンフィックコンサルティング

***** 正会員 北海道大学工学部土木工学科

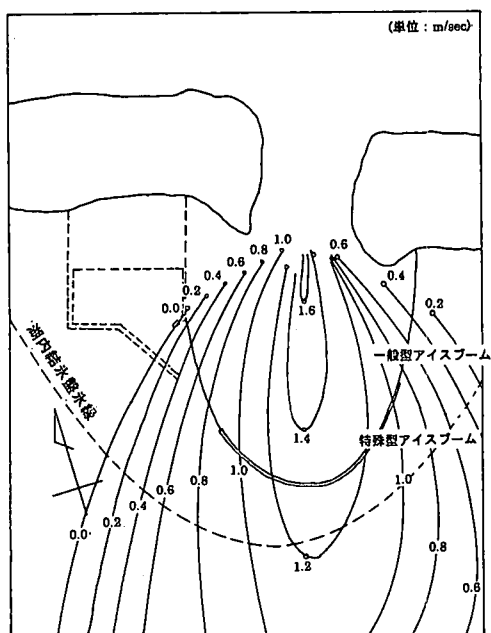


図-2 湖口付近の平面流速分布

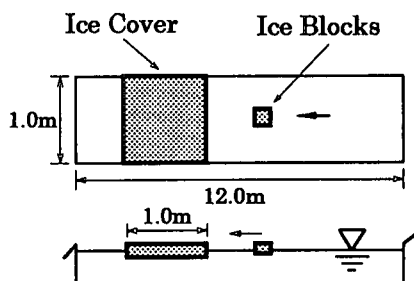


図-3 実験水路

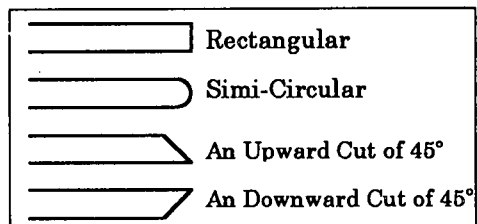


図-4 氷縁部の形状

前は、湖内結氷により流水侵入が防止されていたが、湖口付近は最大流速で $2.4(\text{m/sec})$ にも達するため、常に結氷することはなく、湖内結氷時の氷縁はおよそ図の点線で示した位置にある。結氷河川において、融氷期に流水盤が下流の定着氷盤氷縁部でアンダーターニングを起こし、定着氷盤下に潜り込むことによってアイスジャムが形成されることが知られている。これに似た現象として、サロマ湖等においても湖内結氷時に湖口部から侵入した流水が氷縁部でアンダーターニングを起こし、結氷盤下面にトラップされていることが予想される。このトラップにより、アイスブーム建設以前にも氷盤群によるアイスジャムが形成され、流水断面を減少させていたものと思われる。よって、今回は模型氷盤を用いて結氷盤氷縁部における流水盤の運動に関する実験、及び結氷盤下面における氷盤の滞留に関する実験の2つに実験を行い、流入氷盤が氷縁付近でトラップされアイスジャムを形成し得る条件を求めた。

3. 実験方法

実験は、 $1/40$ の縮尺で行った。流体中の氷盤の運動に関しては、 $1/150$ 程度までフルードの相似則が成立することが、原等(1992)によって確認されている。

実験には、図-3に示すような幅 1 m 、長さ 12 m の回流水路を用いた。流水盤の定着氷盤氷縁部および定着氷盤下における運動を観察できるように水路側面の一部をガラス張りにした。水路の一部に厚さ $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 0.02\text{ m}$ の模型定着氷盤を設置し、その上流から模型流水盤を流下させ、定着氷盤氷縁部における流水盤の運動、及び定着氷盤下における流水盤の滞留状況をみた。模型氷には実際の氷と同程度の比重を持つポリプロピレン盤を使用した。ポリプロピレン盤同士の動摩擦係数は氷盤相互の動摩擦係数 ($0.1 \sim 0.2$) とほぼ同じであることを確認している。(乾燥状態で 0.188 、水中で 0.146) また、定着氷盤の氷縁部の形状は、図-4に示すような、四つの形状を用意した。使用した模型流水盤は、現地調査によって流水の形状が四角形や五角形のものが大半を占めるといふ報告があることから、正方形のものを用いた。国松等(1993)による氷盤の大きさに関する調査結果によると、氷盤の辺長(正方形換算)は 4 m のものが最も多く、氷厚は数十 $\text{cm} \sim 1\text{ m}$ のものが多いと報告されているが、氷厚に関しては氷盤が何枚か重なり合うこともあるので、実験では辺長は 5 cm 、 7 cm 、 10 cm 、 13 cm とし、また氷厚は 1 cm 、 2 cm 、 3 cm 、 4 cm のものを使用した。辺長 L は現地に換算すると 2 m 、 2.8 m 、 4 m 、 5.2 m 、氷厚 h は 40 cm 、 80 cm 、 120 cm 、 160 cm に相当する。実験流速はポンプの流量を調節させることにより $5 \sim 30(\text{cm/sec})$ に変化させた。実験流速は、定着氷より上流に設置した流速計により測定し、流水盤一枚につき、その都度記録した。

4. 実験結果及び考察

まず、定着氷盤氷縁部における流水盤の運動に関する実験について述べる。定着氷盤氷縁部における流水盤の運動形態を分類すると、図-5に示す5つの形態が考えられる。Aは、定着氷盤上流部において停止した状態のもの、Bは回転しながら定着氷盤下に潜り込む Under-turning、Cは滑りながら潜り込む Sliding、Dは半分まで回転し、そのまま潜り込む Half-turning、Eは定着氷盤に乗り上げ、Pile-Up を形成するものであるが、今回の実験ではこの形態は見られなかった。定着氷盤氷縁部における、流水盤に働く力は図-6に示すように、重力、浮力、および形状抵抗力、剪断力である。それぞれの力に関するモーメントの釣り合い式は、以下のようなものである。

	Categories	Mark
A	Not Move	○
B	Under-turning	●
C	Sliding	△
D	Half-turning	▲
E	Pile up	

図-5 流水盤の運動形態

$$\frac{1}{2}C_D\rho_wV^2hL\cdot\frac{h}{2}+\frac{1}{2}C_S\rho_wV^2L^2\cdot h-(\rho_w-\rho_i)gL^2h\cdot\frac{L}{2}=0$$
$$\therefore \frac{V}{\sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho_w}gh}}=\frac{1}{\sqrt{\frac{1}{2}C_D\left(\frac{h}{L}\right)^2+C_S\left(\frac{h}{L}\right)}}$$
$$\therefore F_e=\frac{V}{\sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho_w}gh}}=f\left(\frac{h}{L}\right)$$

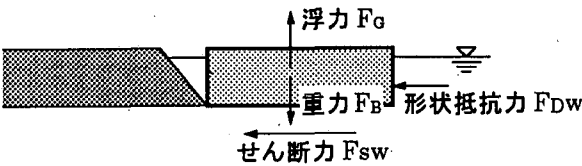


図-6 流水盤に働く力

ここに、 C_D は水の形状抵抗係数、 C_S は水の剪断力係数、 ρ_w は水の密度、 ρ_i は氷の密度、 $\Delta\rho=\rho_w-\rho_i$ 、 L は模型氷盤の辺長、 h は氷厚、 V は流速、 g は重力加速度である。

上式から分かるように、比重を考慮したフルード数 F_e が氷厚 h と辺長 L の比 h/L の関数として表すことができるため、実験結果は F_e と h/L の関係で整理する。

図-7~10は、辺長 L を 10cm として、氷厚 h を 1cm~4cm に変化させたとき、定着氷盤の氷縁部形状がそれぞれ半円形状、矩形状、上向き 45°、下向き 45° の時の実験結果を示したものである。図中の曲線は、流水盤が定着氷盤下に潜り込む限界を示したものである。氷盤の潜り込み方は、上向きの形状では Under-turning、半円形状、矩形状では Under-Turning、Half-Turning のものが多いのに対し、下向きの形状では Sliding によって潜り込むものが多かった。図-11は、それぞれの形状について限界線を重ね合わせたものである。潜り込む限界について形状による差異をみると、半円形状で最も潜り込みづらく、矩形状で最も潜り込みやすいという結果となった。図-12は、辺長 L が 5cm、7cm、10cm、13cm のときの限界線をそれぞれ重ね合わせたものである。氷縁部形状は矩形状とした。この結果から、辺長 L が長いほど流水盤は定着氷盤下に潜り込みやすいことが分かる。これらの限界線は、榎等(1992)のアイスブームによる氷盤移動制御に関する実験における限界線(図-13)とほぼ一

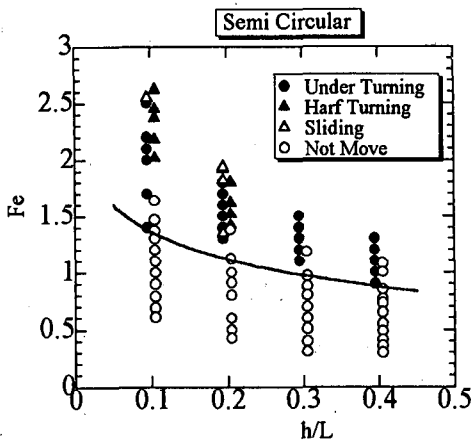


図-7 半円形状

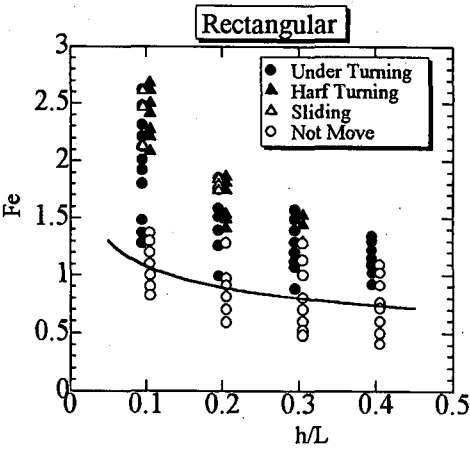


図-8 矩形状

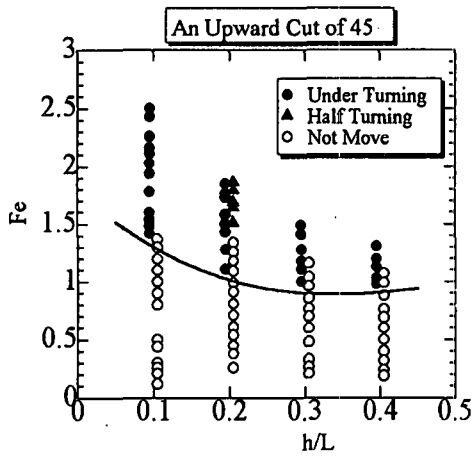


図-9 上向き 45°

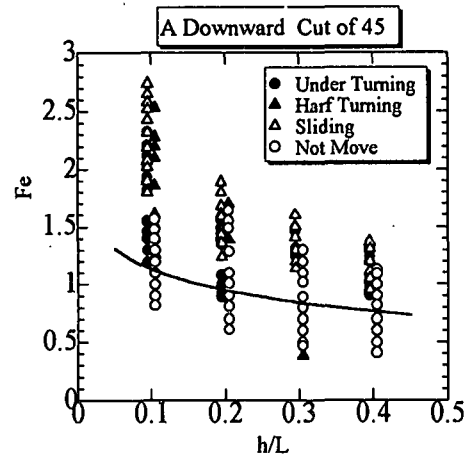


図-10 下向き 45°

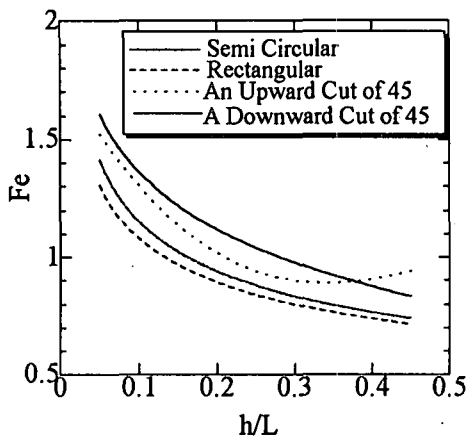


図-11 限界線の比較

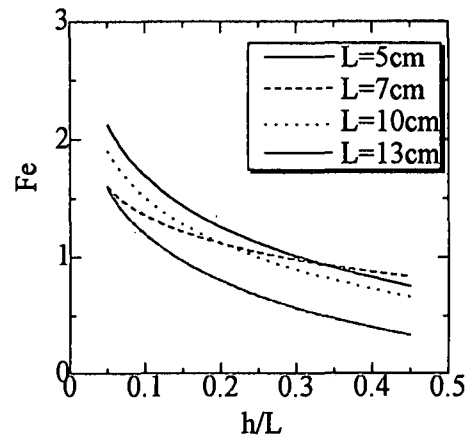


図-12 氷盤の辺長Lの効果

致している。

次に、定着氷盤下における流水盤の滞留に関する実験の結果について述べる。定着氷盤下における潜り込んだ流水盤に働く力は図-14 示すように、流体による形状抵抗力、剪断力および氷盤相互の動摩擦力である。その釣り合い式は、以下のものである。

$$\frac{1}{2}C_D\rho_wV^2Lh + \frac{1}{2}C_s\rho_wV^2L^2 + C_s\rho_wV^2Lh - (\rho_w - \rho_i)g\mu_kL^2h = 0$$

$$\therefore \frac{V}{\sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho_w}gh}} = \sqrt{\frac{2\mu_k}{C_D\left(\frac{h}{L}\right) + C_s\left(1 + 2\frac{h}{L}\right)}}$$

$$\therefore F_e = \frac{V}{\sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho_w}gh}} = f\left(\frac{h}{L}\right)$$

ここに、 μ_k は氷盤相互の動摩擦係数である。定着氷盤下における流水盤の運動に関してもフルード数 F_e が h/L の関数として表すことができるため、これについても実験結果は F_e と h/L の関係で整理する。

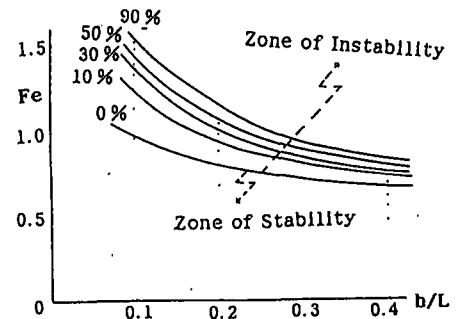


図-13 アイスブームによる氷盤移動制御(榎等、1992)

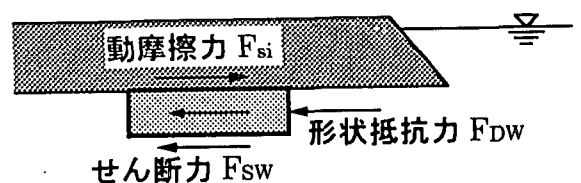


図-14 定着氷盤下における流水盤に働く力

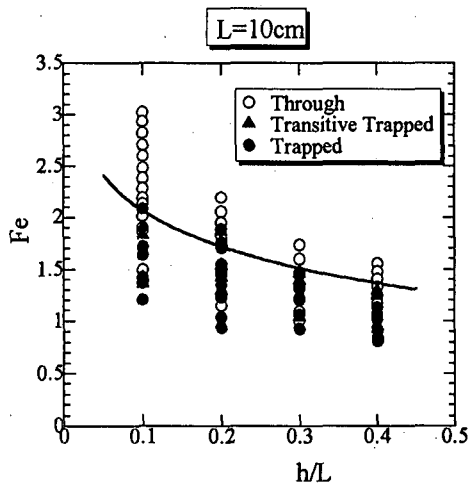


図-15 流水盤の停滞状況 ($L=10\text{cm}$)

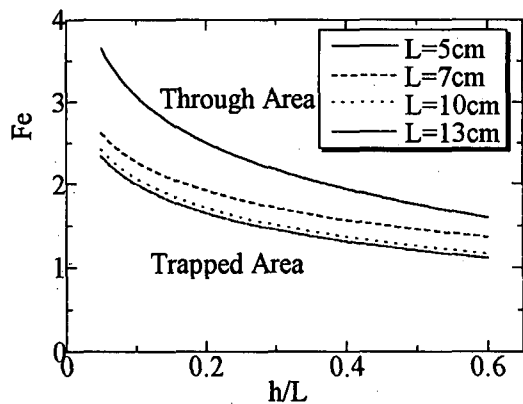


図-16 停滞限界の比較

図-15は、辺長 L を10cm、氷厚 h を1cm、2cm、3cm、4cmに変化させた場合において、潜り込んだ流水盤の定着氷盤下における停滞状況を示したものである。図中の曲線は、流水盤が定着氷盤下で停滞する限界線を示したものである。この限界線より下の範囲において流水盤は定着氷盤の氷縁付近でトラップされることになる。図-16は、辺長 L を5cm、7cm、10cm、13cmとして、それぞれ整理した場合の限界線を重ね合わせたものである。この図から明らかなように、流水盤の辺長 L が小さい程定着氷盤下にトラップされやすいことが分かる。これは、単位面積当たりの氷盤間の接触圧力が、辺長 L が小さい程大きくなるからに他ならない。

以上2つの実験結果より、氷縁部付近においてアイスジャムが形成される条件を図-17に示す。図の斑点部は、流水盤が氷縁部で定着氷盤下に潜り込み、氷縁付近で定着氷盤下にトラップされる範囲を示したものである。斜線部の下限は、氷盤が氷縁部で最も潜り込みやすい $L=13\text{cm}$ 、上限は最もトラップされやすい $L=5\text{cm}$ の限界線で、氷縁部形状は矩形状とした。国松等(1993)の流水の大きさに関する調査結果を図-18、19に示す。この結果より、氷厚を平均的な $h=60\text{cm}$ とし、流速は図-2より氷縁付近の流速 $V=1.2(\text{m/sec})$ として計算すると $Fe=1.56$ となり、氷縁付近でトラップされる流入流水は全体の約90%以上で、アイスブーム建設以前にも、氷縁付近でアイスジャムが形成されていた可能性が高い。

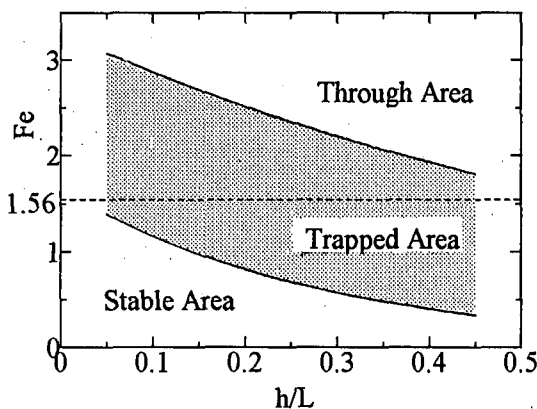


図-17 アイスジャム形成条件

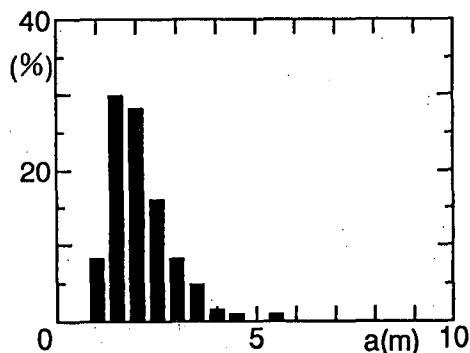


図-18 流水の大きさの頻度分布(国松等、1993)

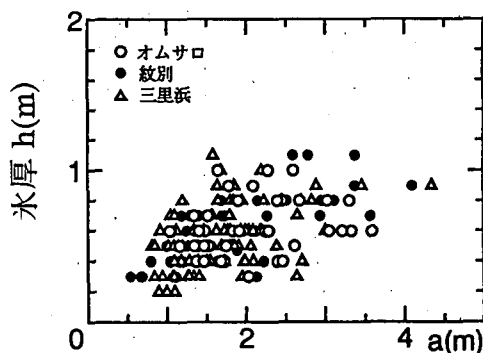


図-19 流水の大きさと氷厚の関係(国松等、1993)

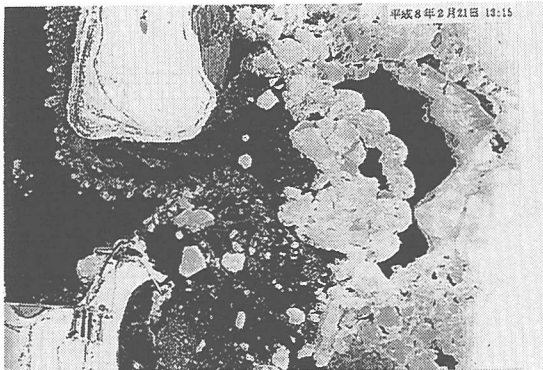


写真-1 アイスブームにトラップされた氷盤群

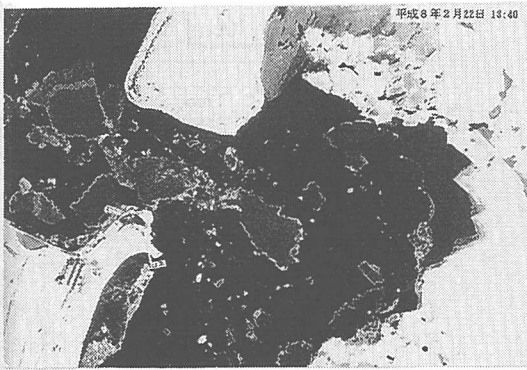


写真-2 氷盤は流れとともに流出

また、湖口部からの流入時にはジェットとなって湖口部正面部の流速が大きくなり、流出時にはポテンシャル流れに近い平面流速分布になることが知られていることから、定着氷盤下面にトラップされた流水盤は再び湖外に流出することはない。一方、アイスブームにトラップされた氷盤(写真-1)は海水流出時に流れとともに湖外に流出(写真-2)するため、海水交流の面では、アイスブームを設置した時のほうが条件は良いといえる。漁業関係者の調査によると、実際にもアイスブーム建設以後サロマ湖内にプランクトンが増え、ホタテガイ等の稚貝が増加しているという報告がある。

5. 結論

- 1) 定着氷盤氷縁部における流水盤の運動は、Under-turning、Half-turning、Sliding の3つに分類される。
- 2) 氷盤に働く力のモーメントの釣り合い式から、フルード数 Fe が h/L の関数で表すことが出来るので、定着氷盤氷縁部における流水盤の運動は、 Fe と h/L の関係で整理することが出来る。
- 3) 流水盤が定着氷盤下面に潜り込む限界は、榎等(1992)のアイスブームによる氷盤移動制御効果に関する実験結果とほぼ一致した。
- 4) 定着氷盤下面における流水盤の運動も、氷盤に働く力の釣り合いから、フルード数 Fe が h/L の関数で表すことが出来るので、 Fe と h/L の関係で整理することが出来る。
- 5) 2つの実験結果から、定着氷盤氷縁部付近の下面においてアイスジャムが形成される条件を Fe と h/L の関係で示した。
- 6) 国松等(1993)の流水の大きさに関する調査結果をこの条件に当てはめると、流入流水の約90%以上は定着氷盤氷縁部付近の下面にトラップされることになる。
- 7) アイスブーム建設以前にも、湖口付近の氷縁において流水盤はトラップされており、その氷盤は定着氷盤下に留まったままであるが、アイスブームによってトラップされた氷盤は海水流出時に流れとともに流出する。よって、アイスブームの建設によって海水交換の条件は以前より改善されたといえる。

参考文献

- 1) Tatinclaux, J.C., M. Gogus (1981): Stability of Floes below a Floating Cover, Proc. of International Symposium on Ice, Vol.1, pp.298~308
- 2) 上田俊也、佐伯浩、山下俊彦、村木義男、榎国夫(1992): 浮氷盤に作用する流体力に関する実験的研究、海洋開発論文集 Vol.8, pp.135~140
- 3) 榎国夫、石井千万太郎、國松靖、佐伯浩(1992): Ice Boom による氷盤移動制御、海洋開発論文集 Vol.8, pp.153~158
- 4) 笹島隆彦、安田修、榎国夫、國松靖、岡本智、佐伯浩(1992): 寒冷地の港湾、湖沼における流水の制御対策について、海洋開発論文集 Vol.8, pp.159~163
- 5) 笹島隆彦、安田修、榎国夫、國松靖、原文宏、佐伯浩(1992): 湖沼へ侵入する流水の制御法について、第8回寒地技術シンポジウム講演論文集, pp.394~399
- 6) 榎国夫、國松靖、原文宏、藤井綱男、佐伯浩(1993): サロマ湖における流水侵入防止に関する模型実験、海岸工学論文集第40巻, pp.1026~1030
- 7) 國松靖、原文宏、高橋良正、佐伯浩、榎国夫、今泉章(1993): オホーツク海沿岸部の流水の大きさに関する研究、海洋開発論文集 Vol.9, pp.95~100
- 8) Fumihiro Hara, Takaharu Kawai, Masakuni Hanada, Akifumi Nishihata, and Hiroshi Saeki (1996): Movement of Ice Blocks Under the Ice Cover, Proc. of The 13th International Symposium on Ice Vol.2, pp.769~778