

アイスブームの氷晶移動制御に関する 実験的研究

METHODS FOR CONTROLLING FRAZIL ICE MOVEMENT BY ICE BOOM

植田知行¹・横山 茂¹・佐伯 浩²

Tomoyuki UEDA, Shigeru YOKOYAMA and Hiroshi SAEKI

¹学生会員 北海道大学大学院 工学研究科 (〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

²フェロー 工博 北海道大学大学院教授 工学研究科 (〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

Blockage by ice floes and freezing of the seawater in ports along the coast of Hokkaido that freezes over in winter have serious economic impacts on various industries such as shipping and fishing industries. Otsu Fishing Port, located on the Pacific coast in eastern Hokkaido, is one of the ports in Hokkaido in which the water freezes every winter. The mechanism by which the water in Otsu Fishing Port freezes was found that the water freezes as a result of the accumulation of frazil ice on the quay side due to the effect of northwesterly winds. It seems that a method for controlling the movement of frazil ice would be the most effective method for preventing freezing of the water in Otsu Port.

In this study, we carried out experiments in the laboratory to test the effectiveness of a method for controlling the movement of frazil ice using an ice boom.

Key Words: Otsu Fishing Port, freezing in port, frazil ice, ice boom

1. はじめに

我が国で最北に位置する北海道では、冬期間において流氷の来襲、河川の結氷、港湾・漁港の港内結氷などの現象が起こり、物流や漁業などの産業に直接的、間接的に大きな影響を及ぼしている¹⁾。具体的に、道東の太平洋沿岸の大津漁港では、毎年発生する港内結氷により、出漁不能や船舶損傷などが問題となっている。また、2001年1月下旬から3月にかけては、寒さと降雪により太平洋沿岸の港湾・漁港の多くで港内結氷が発生し、それらの機能が麻痺した。以上のことから港内結氷防止対策の確立が望まれている。

北海道の港湾・漁港の冬期結氷については、以下に述べるように大きく三つの形態に分類される。

①オホーツク海(宗谷岬～納沙布岬)に建設されている港は、冬期の海水温も結氷温度あるいはその近くにまで冷え、また流氷も来襲する。現在、冬期は港湾としての機能を維持する必要がないため結氷防止策は必要とされていない。

②北海道の日本海沿岸北部地域の港は、対馬暖流の影響で海水温は比較的高いが、一部の海水交換の悪い港では、水温が結氷温度近くまで達する。この時、大量の降雪があると、港内の雪が融解せず、ア

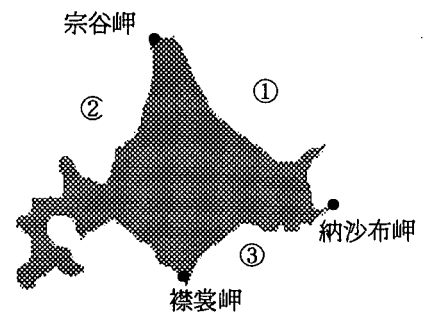


図-1 北海道の漁港・港湾の港内結氷区分

イスラッシュ状となり、港内の静穏度も高くなり、結氷へと至る。

③太平洋岸(納沙布岬から襟裳半島)の港では、冬期千島寒流の影響により外海水温は -1.2°C 近くまで下がる。また、低温の北西風が吹き、港内では多量の氷晶が発生し、それが港内にトラップされ結氷版を形成する。

前述の③に該当する掘込式の大津漁港ではほぼ毎年港内結氷が生じており、地元の漁業活動に大きな影響を及ぼしている。この漁港での港内結氷メカニズムは、本間ら²⁾により研究されており、卓越した北北西風の影響による吹送流により、港内に発生し

た氷晶、蓮葉氷が岸壁側に移動・堆積し結氷に至る。現状の対策として、漁船・作業船による砕氷作業が行われているが、労力や経済的負担、安全性等の問題があり、有効な結氷対策法の確立が望まれている。港内結氷対策としては、主に熱供給方式や氷晶排除方式など³⁾が挙げられる。この大津漁港では、風による氷晶の移動を制御し、氷板に成長する前に回収することが有効な結氷対策であると考えられる。そこで本研究では、アイスブームを用いた氷晶移動制御方式を提案し、氷晶移動の制御効果を調べるとともに氷晶移動のメカニズムを明らかにして、それによる氷晶制御の可能性を実験的に調べた。

2. 実験方法

実験に用いた水路は、図-2に示すような長さ10.6m、深さ0.6m、幅2.0mの循環水路を用いた。流量は自由に調節することが可能である。また、用いるアイスブーム模型は、図-3に示すように、長さ300cmとし、浮体は長さ約30cm、直径3cm、4cm、6cm (Type-1, Type-2, Type-3) の3種類の木材を用意し、それぞれ9個をロープで固定し、水路のほぼ中央位置に設置した。噴水深 a は流速により多少の違いがみられたが、ほぼ浮体の直径の半分であった。氷晶模型として、氷と同程度の比重 0.95gf/cm^3 であるポリプロピレンの削りカス3種類(粒径 $0.5\sim 1.0\text{mm}$, $1.0\sim 2.0\text{mm}$, $2.0\sim 4.0\text{mm}$)と粒径 4mm のポリエチレン、全4種類の粒子を用いた。氷晶模型が実物とほぼ同じサイズなので、縮尺は現地と1:1の関係にある。現地では、風の影響による吹送流により海面に流速が生じる。風速 U_{10} (海面より10m上方)と海面での吹送流速 u_s の関係は $u_s/U_{10} \leq 0.04$ で表され³⁾、現地での平均風速は 5.8m/sec であるので、平均表面流速は約 23cm/sec となる。そこで、実験での流速は $3\sim 31\text{cm/sec}$ の間で変化させた。

実験は、水路の流量を調節し、流速ごとに4種類の氷晶模型をアイスブーム上流側5mの位置から順に投下し、アイスブームによる氷晶移動制御特性について調べた。このとき、粒子同士が結合、付着することが懸念されるので、界面活性剤を用いることにより、表面張力の働きを抑制した。

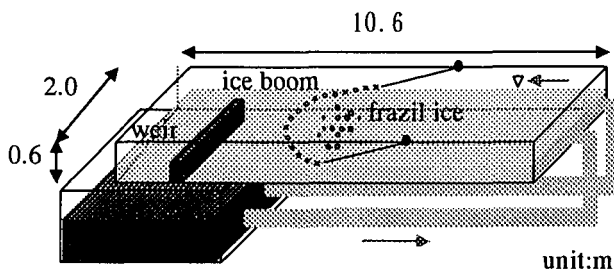


図-2 実験装置

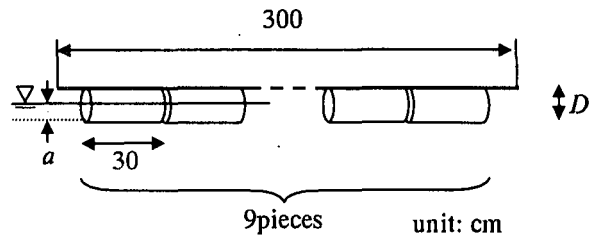


図-3 アイスブーム模型

3. 実験結果と考察

(1) 氷晶流下のメカニズム

氷晶模型がアイスブームにトラップされるメカニズムを図-4に示す。まず、流下してきた氷晶模型は①のように、浮体にトラップされた状態となる。このとき、表面流速が遅いと、浮体上流側には止水域と呼ばれる流れが生じていない領域が、広範囲にわたって広がっているため、粒子は移動せず浮遊した状態となる。表面流速がある一定の値を超えると、止水域が狭まり、②のように上流側の粒子が下流側の粒子の下に潜り込み、浮体下面に生じている斜め下方向の流れにのり、浮体後方へと流下していく。また、流下していく粒子とともに、③のように浮体下流側直後に粒子が溜まる現象が確認された。

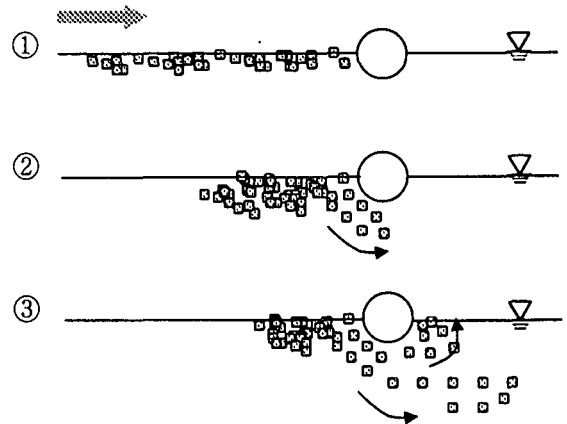


図-4 氷晶模型流下のメカニズム

(2) アイスブームによる氷晶移動制御状況

図-5は流れ場におけるアイスブームの様子を示す写真であるが、流体力により懸垂曲線と同様の形を描いている。

図-6は氷晶がアイスブーム (Type-3) に制御されている様子を示している。図-6(a)は表面流速 11.2cm/sec で粒径 $0.5\sim 1.0\text{mm}$ の粒子を投下した場合である。表面流速が小さいため、氷晶模型は点々と存在し、浮体上流側に浮遊している状況がわかる。これは、広範囲の止水域が形成されていることに起因している。図-6(b)は表面流速 20.3cm/sec で粒径 $2\text{mm}\sim 4\text{mm}$ の粒子を投下した場合である。図-6(a)と比べ、氷晶模型が浮体にさらに接近して漂っている

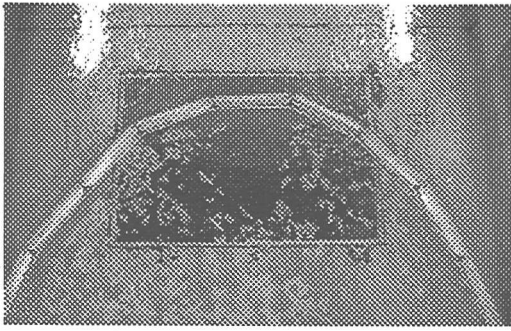
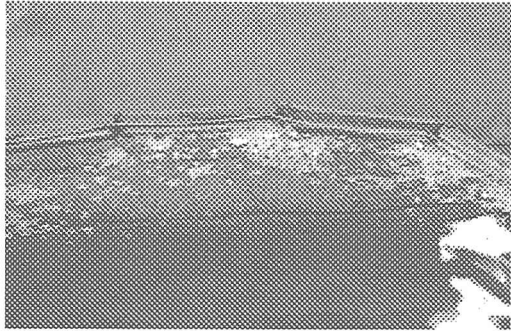
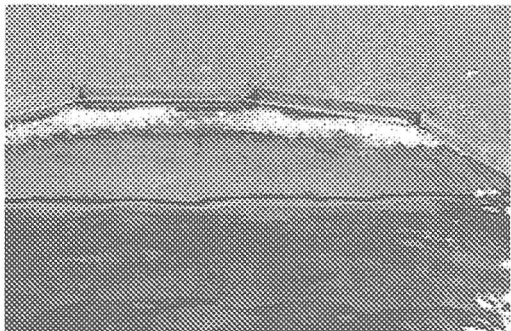


図-5 アイスブームの様子



(a) 表面流速11.2cm/sec 粒径0.5~1.0mm



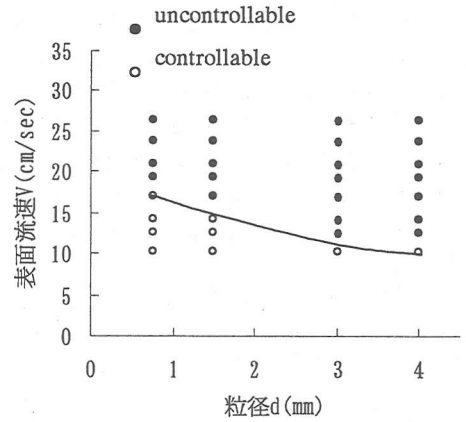
(b) 表面流速20.3cm/sec 粒径2.0~4.0mm

図-6 アイスブームによる氷晶制御の様子

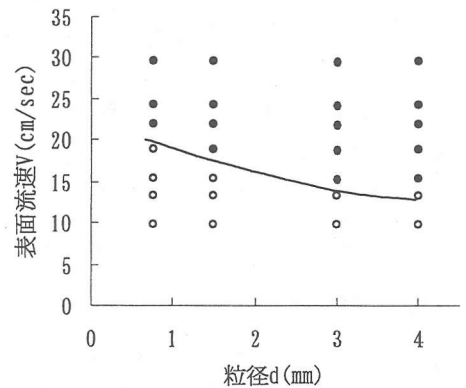
のがわかる。これは、表面流速の増加とともに止水域が狭まり、上流側の粒子が下流側の粒子の下に潜り込み、層を形成しているからである。また、粒径ごとに流下の様子を比較してみたが、粒径が小さいほど粒子同士が固まりあう傾向があり制御されやすく、大きいほど粒子が個々に流下していき制御されにくい傾向がみられた。

(3) アイスブームによる氷晶制御効果

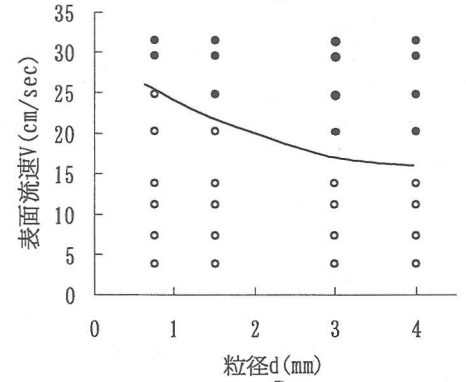
流速と氷晶模型の粒径、アイスブームの大きさを種々変化させて測定を行った。図-7は縦軸に表面流速 V 、横軸に氷晶模型の粒径 d をとり、アイスブームによる氷晶制御効果をグラフ化して表したものである。図-7(a), (b), (c)はアイスブームのTypeごと(喫水深 $D/2$ の違いごと)の制御効果を示しており、(d)はTypeごとの比較をするため、(a), (b), (c)のグ



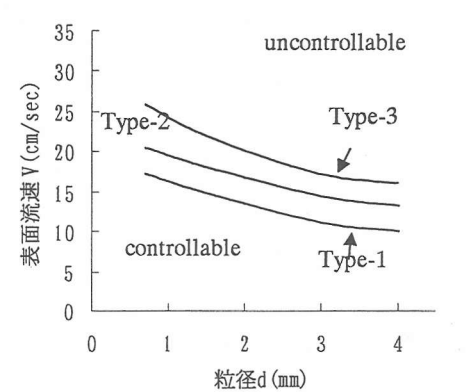
(a) Type-1 $\frac{D}{2} = 1.5cm$



(b) Type-2 $\frac{D}{2} = 2cm$



(c) Type-3 $\frac{D}{2} = 3cm$



(d) 各Typeの比較

図-7 氷晶移動制御効果

ラフをまとめたものである。氷晶制御効果の評価方法は、アイスプームを越えて流下していく氷晶を回収し、投入量から回収量を引いた値を制御量とし、投入量に対するその割合を制御率として算出した。グラフには実験で得られた表面流速データから、制御率が95%以上の場合の流速を制御可能(controllable)とし白丸で表し、95%以下の場合を制御不可能(uncontrollable)とし黒丸で表している。図の曲線は各粒径での制御可能な最大表面流速を結んだものである。

図より、各Typeとも同様の傾向を示しており、粒径が小さいものほど制御効果が高く、浮体の喫水深 $D/2$ が大きいものほど、制御範囲が広いことがわかった。これより、氷晶移動制御は浮体の喫水深 $D/2$ と氷晶の粒径 d に大きく依存する結果となった。図-7(c)より、Type-3 ($D/2=3\text{cm}$) については、表面流速 $16\sim 25\text{cm/sec}$ の範囲で制御可能であり、現地の平均表面流速 23cm/sec と比較しても、よい結果が得られたが、浮体の喫水深を大きくすることで、さらに制御可能な範囲は広がると考えられる。また、実際の氷晶は粒子同士が固まり結氷する可能性があるため、より制御しやすいことが予想される。

上述の結果をもとに、浮体の喫水深と氷晶制御効果との関係について調べた。図-7(d)より各Typeのアイスプームによる粒径別の制御可能な最大流速を求め、縦軸を表面流速、横軸を浮体の喫水深としたグラフに、その値をプロットし、図-8に示す。プロットした値を対数近似したところ、相関係数が平均で0.986であったことから、浮体の喫水深と制御可能な最大流速との間には、対数関数的な関係があるといえる。

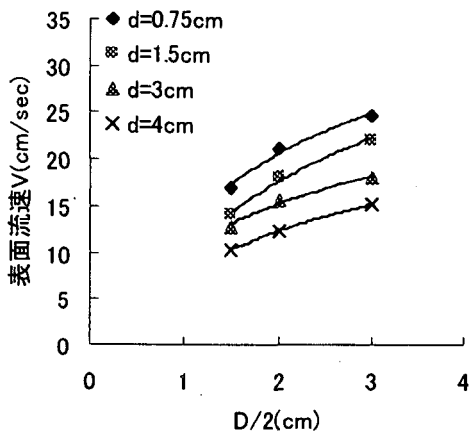


図-8 喫水深をパラメータとした場合の氷晶制御効果

4. ネット付アイスプームによる実験

これまで、アイスプームによる氷晶移動制御特性について述べてきたが、さらに、より一層の制御効果を得るため、浮体にネットを取り付けた、ネット付アイスプームによる実験を行った。

実験方法は先の実験と同じ条件で行い、図-9に示すように、Type-3の浮体に間隔約0.5mm、幅3cmのネットを取り付け、流れに耐えられるよう、下端部に重さ約100gのweightを設置した。この場合、ネットを含めた喫水深は6cmとなっている。その制御効果を図-10に示す。

ネット付アイスプームでは、表面流速 $25\sim 28\text{cm/sec}$ まで制御可能であり、先の結果と比較しても制御範囲が一段と広がったことがわかる。しかし、曲線の傾向が異なり、平均粒径が3mm以下では制御範囲に差異がみられない。これは、表面流速が大きくなるにつれ、氷晶は浮体に制御されるのではなく、ネットにより制御されるようになるため、粒径の大きい4mmの粒子は粒子同士がまとまらず、一粒ずつ流下していくことが原因であると考えられる。

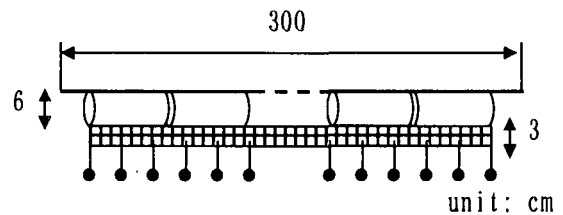


図-9 ネット付アイスプーム模型

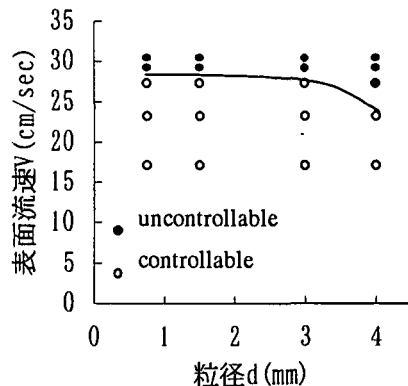


図-10 ネット付アイスプームによる氷晶制御効果

5. 過去に行われた実験との比較

アイスプームによる氷晶移動制御は、浮体の喫水深と氷晶の粒径に大きく依存することがわかった。過去において榎ら⁴⁾により、流水制御を目的とした、アイスプームによる氷盤制御の実験が行われている。この実験においては、氷盤の厚さと長さの比を用いて、その制御効果について調べている。この実験より得られている氷盤制御効果のグラフを図-11に示す。ここで、過去の実験では、アイスプームの形式としてTraditional Type, Net Typeと表現してあるが、Traditional Typeは図-3に示された、本実験で用いたアイスプームと同じ構造をしており、Net TypeはTraditional Typeにネットを取り付けた構造となっている。

h は氷盤の厚さ、 L は氷盤の長さ、 a は浮体の喫

水深、 Fe は内部フルード数で以下の式(1)で表される。

$$Fe = \frac{V}{\sqrt{\varepsilon gh}}, \quad \varepsilon = \frac{\rho_w - \rho_i}{\rho_w} \quad (1)$$

ここで、 V は表面流速、 g は重力加速度、 h は氷盤の厚さ、 ρ_w は水の密度、 ρ_i は氷の密度である。この図より、氷盤制御は氷盤の厚さ、氷盤の長さ、浮体の喫水深に依存していることがわかる。これは、本実験での氷晶制御特性と類似しており、両実験での結果を比較することで、アイスブームによる、規模の違った模型氷を用いた場合の制御効果を評価することができる。比較するための手法を以下に述べる。

本実験での氷晶模型の形状は円形であり $h/L \cong 1.0$ となるので、図-11から $h/L \cong 1.0$ のときの制御可能な最大 Fe 値を求め、喫水深と模型氷の厚さの比 a/h をパラメータとして値をプロットする。本実験の結果も同様に制御可能な最大 Fe 値を算出し、条件ごとの a/h 値をもとに、値をプロットする。そのグラフを図-12に示す。

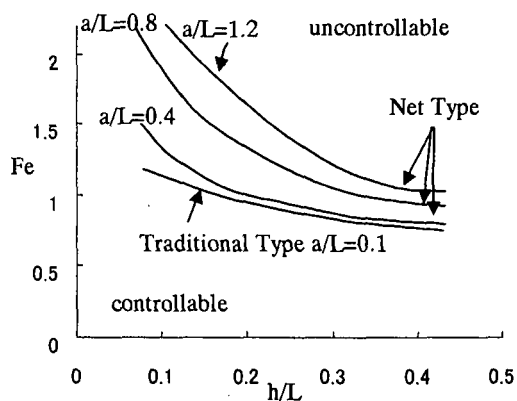


図-11 氷盤移動制御効果

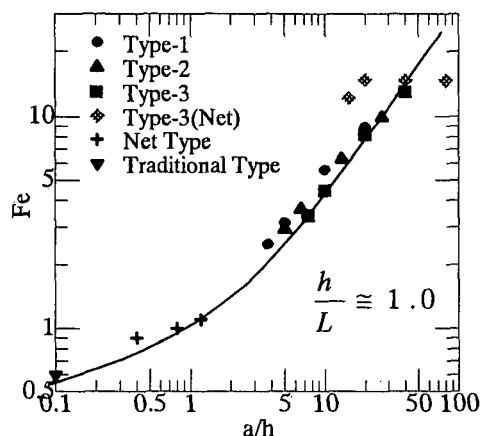


図-12 氷盤・氷晶制御効果の比較

この図より、両実験結果は比較的よい相関がみられ、アイスブームによる模型氷の制御効果は、その規模にかかわらず同様の傾向を示す結果となった。

5. 結論

本論における結論は以下の通りである。

- ・氷晶が浮体にトラップされるメカニズムは、アイスブーム上流側に生じる止水域に氷晶が浮遊している状態となり、流速が大きくなるにつれ止水域が狭まり、上流側の氷晶が下流側の氷晶の下面荷潜り込み、浮体下部に生じている斜め下方向の流れにより、浮体を越えて流下していく。

- ・アイスブームの氷晶移動制御効果は、浮体の喫水深と氷晶の粒径に大きく依存し、浮体の喫水深と制御可能な最大流速との間には、比例関係があることがわかった。

- ・Type-3(喫水深3cm)のアイスブームの場合、表面流速16~25cm/secの範囲で氷晶移動制御が可能であり、ネット付アイスブーム(喫水深6cm)では表面流速25~28cm/secの範囲で制御可能である。

- ・現地においては、風速の影響で、吹送流が生じており、風速 U_{10} (海面より10m上方) と海面での吹送流速 u_s の関係が $u_s/U_{10} \leq 0.04$ であることから、浮体の喫水深を大きくすることで、かなりの風速まで氷晶を制御できることがわかった。

- ・本実験結果と過去に行われた実験結果を比較すると、比較的よい相関がみられた。これにより、アイスブームによる模型氷の制御効果は、その規模にかかわらず同様の傾向を示すことがわかった。

- ・本実験では、表面流速のみを考慮した氷晶移動制御の可能性を模索したが、現地においては、波浪の影響も考えられるので、今後の実験で検証する必要がある。

参考文献

- 1) 大村高史, 平澤充成, 寺島貴志: 北海道沿岸の港湾・漁港周辺における海水被害の現状について, 土木学会海洋開発論文集, Vol.16, pp151-155, 2000.
- 2) 本間 薫, 小玉茂義, 梅沢信敏, 沖野晃一, 寺島貴志, 佐伯 浩: 掘込漁港における港内結氷メカニズムと対策に関する研究, 土木学会海洋開発論文集, Vol.17, pp619-624, 2001.
- 3) 泉 洌, 村木義男, 小野敏行, 後藤克人, 佐伯 浩: 寒冷地における有限沿岸域の結氷防止対策に関する一考察, 土木学会海洋開発論文集, Vol.5, pp19-23, 1989.
- 4) 榎 国夫, 石井千万太郎, 国松 靖, 佐伯 浩: Ice Boomによる氷盤移動制御, 土木学会海洋開発論文集, Vol.8, pp153-158, 1992.