

# サロマ湖口における流水侵入防止に関する模型実験

榎 国夫\* ・ 國 松 靖\*\*・ 原 文 宏\*\*\*  
藤 井 綱 男\*\*\*\*・ 佐 伯 浩\*\*\*\*\*

## 1. ま え が き

北海道のオホーツク海沿岸にはサロマ湖、能取湖等の湖沼が存在し、これらはオホーツク海と水路でつながっている。これらの湖沼ではホタテやカキの養殖が盛んで、なかでもサロマ湖においては平成元年度には、約 31 億円の生産高をあげている。これらの湖にオホーツク海から流水が侵入することがある。通常、流水が接岸する前に十分に湖内が結氷していれば、流水が湖口から侵入しても湖内の氷盤に阻止されて湖内深く侵入することはない。しかし、ここ数年は湖内の結氷の時期が遅れ、流水の接岸時にはまだ湖内はほとんど結氷していないという年が多くなり、流水が湖内深く侵入する事がある。ホタテの養殖施設は夏期には水面下 2.5 m の位置から釣り下げ、冬期には流入する流水の影響を避けるため水面下 3.7 m 程度の位置から釣り下げている。したがって、流水が 3.7 m 程度より大きい流水が侵入すると湖内を動き回り、ホタテやカキおよびそれらの養殖施設に被害を及ぼすことになる。サロマ湖における流水侵入による被害は、1972～92 年の間に過去 9 回おこっている。特に 1974 年には被害額は 20 億円を超えた。ここ数年は数千万～数億円の被害となっている。能取湖においてもまた同様の被害が起きている。これらの被害をなくすために、湖内への流水侵入防止のための技術開発が是非必要とされている。また、これら以外の沿岸部の湖沼であるコムケ湖、湊沸湖、藻琴湖等でも今後水産関係の開発が予定されており流水対策は緊急の課題となっている。著者らは湖沼への流水侵入防止施設として、Ice Boom を用いることを考え、これまでの基礎実験結果を踏まえながらサロマ湖第 2 湖口に Ice Boom を設置することを想定して、模型実験を行った。

## 2. 最適流水制御構造物

サロマ湖は面積 151.2 km<sup>2</sup>、周囲 91.1 km、最大水深

19 m であり、現在 2 つの湖口を有している。図-1 にサロマ湖の地図を示す。第 1 湖口は幅約 250 m である。第 2 湖口は幅 50 m であり、これは湖内の水質を改善するために開削された。第 1 湖口は砂浜の自然湖口であるが、第 2 湖口には導流堤が作られている。サロマ湖の流水による漁業への被害をなくすためには、湖口部において流水を制御する必要がある。今回対象を第 2 湖口としたのは導流堤により流心が一定であるため氷盤制御が行い易いと判断したからである。氷盤移動制御の施設として、固定式（着底式）や浮体式のいくつかのものがこれまでに開発されたり提案されたりしている（笹島ら、1992a；榎ら、1992b）。サロマ湖に流水侵入防止施設を作る場合、湖口部は流速が大きく海底の地形変化が大きいため漂砂、湖岸変形に影響を与えない構造形式が望まれる。また、湖内外の海水交流を妨げてはならないので湖口の流水断面を小さくするような構造物は望ましくない。湖口水路では、流水来襲時以外は漁船の往来が活発であるため航路部を確保しなければならないので、可動式構造物でなければならない。また、最近のオホーツク海沿岸の観光、レジャーの開発を考えると景観にも配慮する必要がある。これらのことを考慮すると固定式構造物は適さず可動性のある Ice Boom が最も適していると考えられる。従来、Ice Boom は米国やカナダにおいて河川や湖の氷盤制御のために用いられてきた。これは鋼製ワイヤーに角材や丸太材を浮体として取り付けただけのものであり、浮体によって氷盤を制御しようとするものである。可動部以外に固定式構造物を用いることも考えられるが、設置位置における局所洗掘や構造物の埋没の問題が起ることが考えられる。また、水深が約 5 m あり潮差も約 1 m あるため大規模な構造物を作らなければならず上記のような要求を満たそうとすると建設コストが高くなり過ぎ



図-1 サロマ湖

- |             |                     |
|-------------|---------------------|
| * 正 会 員     | 秋田工業高等専門学校教授        |
| ** 学生会員     | 北海道大学大学院 工学研究科      |
| *** 正 会 員   | 北海道大学大学院 工学研究科      |
| ****        | 東京電力株式会社 地中線建設所     |
| ***** 正 会 員 | 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科 |

る。よって Ice Boom が最も妥当な構造形式と考えられる。

### 3. Ice Boom の水盤移動制御効果

Ice Boom の水盤移動制御効果、および水盤移動制御のメカニズムを調べてきた。流速が大きくなると水盤は浮体との接点を支点として水中を回転し Ice Boom の下から通過していくということがわかった。そしてさらに水盤移動制御効果を高めるために、従来の Ice Boom の下にネットを取り付けた新型 Ice Boom を試作し、その水盤移動制御効果を調べるとともに、実際に流水制御に用いた場合に新型 Ice Boom に働く水力を実験的に求めてきた(榎ら, 1992a)。それによると、水盤の制御効果は  $F_e = V/(\Delta\rho gh/\rho_w)^{1/2}$  と  $h/L$  ( $V$ : 表面流速,  $h$ : 氷厚,  $L$ : 水盤の代表的長さ,  $\rho_w$ : 水の密度,  $\Delta\rho$ : 水と氷の密度差) によって決定されることが明らかとなっている。その結果を図-2 に示す。曲線の下側は完全に制御可能な領域, 上側は一部の氷盤が流下してしまう領域である。この結果によると氷厚 50 cm の水盤の場合従来型 Ice Boom では流速約 80 cm/sec まで制御可能である。新型 Ice Boom ではさらに大きい流速でも制御可能であるが、氷盤が Trap されることにより流体抵抗が増し、Ice Boom のワイヤーに作用する張力が大きくなる。また、新型 Ice Boom の場合ネットに海草などの生物が附着して、流体抵抗を大きくしたり流れに与える影響を大きくしたりする。また建設コストも新型 Ice Boom の方が高くなる。湖内の養殖施設に影響を及ぼさないように限られた水域において氷盤を制御しなければならないこと、および総工費を考えると、設置位置の流速に応じて新型と従来型をうまく組み合わせて使うことを考えなければいけない。Ice Boom の設置位置に関しては、湖外、水路部、湖内が考えられるが、施工、維持管理、制御効果を考えると、波浪の影響の少ない湖内側で、しかも氷盤制御の可能な程度流速の遅いところが適している。

## 4. サロマ湖第 2 湖口流水制御模型実験

### 4.1 実験装置

サロマ湖の第 2 湖口の幅は約 50 m である。また、湖口の流速は潮汐の影響によるが、今まで測定された結果によると、第 1 湖口で最大約 240 cm/sec, 今回の調査により第 2 湖口で最大約 220 cm/sec である。また、流水の大きさについては國松ら (1992) が平成 4 年 3 月に宇登呂漁港で行った流水の大きさの調査によれば、面積が一辺 2~4 m の正方形に相当するものが多く、調査した範囲の平均値は 4.5 m 程度となっている。また、rafted ice や ice rigde もあり、昭和 49 年サロマ湖に侵入した水塊に最大厚さが 10 m を越えるものもあった。実験はこれら

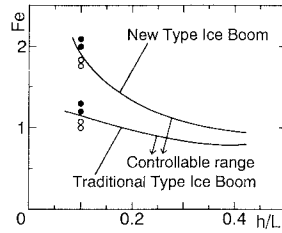


図-2 Ice Boom の水盤移動制御効果

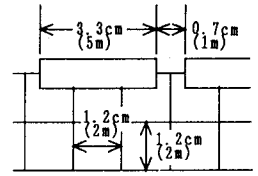


図-3 新型 Ice Boom

のことを考慮して縮尺 1/150 で行った。新型 Ice Boom の模型の概略を図-3 に示す。ネットの目は実規模では 2 m 角に相当するように模型では 1.2 cm 角とした。浮体は直径 7 mm, 長さ 3 cm の塩ビパイプを用い両端をコルクでふさいだ。実規模では、浮体は直径 1 m 長さ 5 m の鋼管を用いるものとし、ネットは直径 27 mm 程度のワイヤーを用いるものとした。Ice Boom の模型の延長は 2.8 m~4.8 m に変化させた。(実規模では 420 m~720 m)。実験は長さ 10.28 m, 幅 2 m の水平勾配水路を用い、図-4 に示すようなサロマ湖第 2 湖口の模型を水路上に設置して行った。実験に用いた模型氷はポリプロピレン製(密度 0.9 gf/cm<sup>3</sup>)で正方形をしており、3 cm 角、厚さ 3 mm (実規模換算で 4.5 m 角、厚さ 45 cm) のものと 10 cm 角、厚さ 1 cm~4 cm (実規模換算で 15 m 角、厚さ 1.5 m~6 m) のものを用いた。ポリプロピレンの板相互の摩擦係数は氷相互の動摩擦係数 0.1~0.2 とほぼ同じであった。(乾燥摩擦係数で 0.188, 水中で 0.146)

### 4.2 フルード相似則の検証

模型実験を行う前に現地サロマ湖第 2 湖口の流況調査を行った。サロマ湖付近における潮差が流水襲来時の 1~3 月の最大潮差とほぼ等しくなる、1992 年 10 月 28, 29 日に、水路部の流速及び湖口より湖内側の流速、流線の調査を行った。最大潮差の日を選んだのはこのとき水路部の流速が最大となり流水制御にとって条件が悪くなるからである。水路部の流速は水路の中心で水深 1 m のところで計測した。湖口より湖内側の流速、流線は番号をつけた浮き玉を水面に投下し、それを湖口部の両岸に設置したトランシットにより追跡して求めた。

図-5 は 28, 29 日のサロマ湖における潮位変化を曲線で、水路中央部の水深 1 m の地点における流速の時間変化を白丸で示している。また、流況調査を行った時刻も図中に示した。図-6 に水路部の流速が約 200 cm/sec の時の流速ベクトルを実線で示している。Ice Boom を設置した様子も同図に示した。図-7 は湖口部の深淺測量図であるが、図-6 と比較してわかるように、水路の先の洗屈された部分に流れが集まっているのが観測された。

模型実験水路において水路部の流速を実規模換算で

2.2 m/sec に設定して、目印をつけた数枚の模型氷を同時に流し、水路上に設置したカメラにより1秒おきに撮影を行った。その写真を解析することにより、流速ベクトルを求めた。図-6の点線がこの流速ベクトルである。このように模型によって現地の流況が再現されていることがわかる。

次に氷盤制御効果が相似則を満たしているかを調べた。1/150 模型では表面張力の影響を消すために界面活性剤を加えて実験を行った。 $h/L=0.1$  の模型氷を用いた実験結果を図-2 に示す。完全に制御可能な場合を●印、一部流下した場合を○印で示した。このように、実線で示した縮尺 1/50 での実験結果(従来型については実規模での結果 (US Army Corps of Engineers, 1990) と一致している。)と一致していることが明らかとなった。流速ベクトル及び氷盤制御効果の比較の結果、縮尺についてフルードの相似則を満足していることが確認された。したがって 1/150 での実験結果の現地への適用が可能となる。

#### 4.3 Ice Boom による氷盤移動制御状況と配置の決定

新型 Ice Boom の模型を中央部は 120 cm、両側部は各 80 cm にして図-8 のように設置し水路部の流速を 10.2 cm/sec と 13.7 cm/sec (実規模では 125 cm/sec と 168 cm/sec に相当する) に設定し、3 cm 角、3 mm 厚の模型氷を海側から 1 分間に約 160 枚の割合 (実規模で 3240  $m^2/min$  に相当) で 1 枚ずつ重ならないようにして、流下させた。そして模型氷が Ice Boom に Trap される状況を観察した。その後中央部分は新型 Ice Boom を、両側部分は従来型 Ice Boom を取り付け従来型 Ice Boom の長さを変化させることにより図-8 に示した S を変化させ湖口部からどれだけはなして Ice Boom を設置するのがよいかを求める実験を行った。湖口水路部の流速を 17.8 cm/sec (実規模で 218 cm/sec) に設定し海側から 3 cm 角、3 mm 厚の模型氷を流下させ流出枚数を数えることにより制御効果を調べた。設置位置は  $S=85, 105, 125, 145, 165$  の 5 通りに変化させた。

制御状況を図-8 を用いて説明する。実験を行った 2 つの流速ではいずれも A 領域に最初にトラップされ、そ

の後 B, C, D 領域にトラップされ、最後に E 領域にトラップされた。流速 13.7 cm/sec の場合は最初に Ice Boom の先端に流れ着いた氷盤から次々に水中を回転して、ネットに張り付き垂直の状態でトラップされていった。そして C, D 領域の Ice Boom 近傍以外は、Ice Jam 状になった。流速 10.2 cm/sec の場合、A 領域は流速が小さいため氷盤の回転が起こらない。そして、湖口に近い B, E 領域は流速が大きいため氷盤の回転が起こり重なり合っていた。氷盤の回転が起こるのは実規模で流速約 80 cm/sec 以上の場合であり、ほぼ流速分布に一致して Ice Jam が発生し、周辺部ほど流速が遅いため Ice Jam は発生しにくかった。以上の結果は榎ら (1992a) や笹島ら (1992b) によって求められている条件を満たしている。このことから Ice Boom に氷盤がトラップされても流心は大きく変化しないと考えられる。今回の実験ではどちらの流速でも氷盤を完全に制御することができた。実際にサロマ湖に Ice Boom を設置する場合、建設コストを考えなければならない。そのため流速に応じて新型 Ice Boom と従来型 Ice Boom を使い分けた方がよい。以上の実験により Ice Boom の両側部分においては、流速が小さく氷盤の回転が起こりにくいため、新型 Ice Boom を取り付けの必要性のないことがわかった。従って、その後の実験は両側部分を従来型 Ice Boom に取り

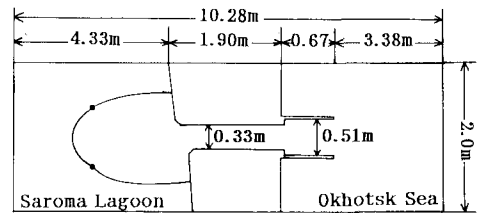


図-4 実験水路

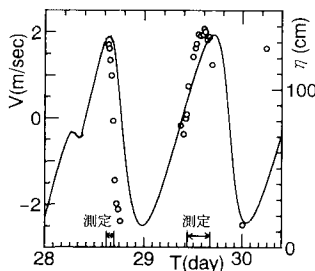


図-5 調査時の潮位変化と水路部流速

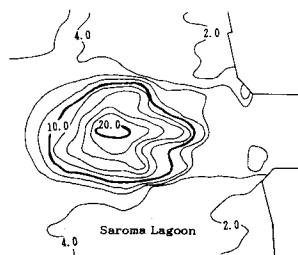


図-7 湖口部の深浅測量図 (単位: m)

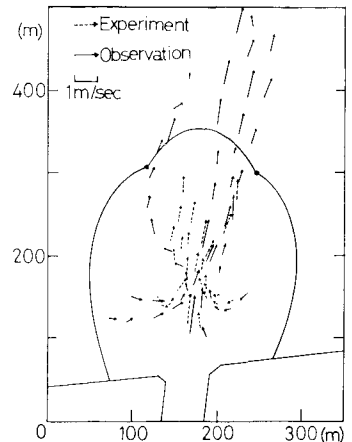


図-6 湖口部の流速ベクトル

替えて行った。建設コストと制御効果を考えて最適の位置を求めると  $S=145\text{ cm}$  となり、中央部の新型 Ice Boom は延長  $120\text{ cm}$ 、従来型 Ice Boom は  $310\text{ cm}$  となった。実規模ではそれぞれ  $180\text{ m}$ 、 $465\text{ m}$  で合計  $645\text{ m}$  となる。 $S=145\text{ cm}$  以上であれば下流へ流下する模型水はほとんど存在しなかった。よってこの位置に設置するのが最適であることが明らかとなった。

#### 4.4 新型 Ice Boom に作用する張力

図-8 のように新型 Ice Boom の両端にロードセルを取り付けて、ワイヤーに作用する張力を測定した。初期の水路部の流速を  $V=100, 150, 220\text{ cm/sec}$  の3種類に変化させ、模型氷は  $3\text{ cm}$  角、厚さ  $3\text{ mm}$  のものと  $10\text{ cm}$  角で厚さ  $1\text{ cm}$ 、 $2\text{ cm}$ 、 $3\text{ cm}$ 、 $4\text{ cm}$  の4種類のものを枚数比にして  $100:0:0:0$  (混合比A)、 $100:1:1:1:0$  (混合比B)、 $100:2:2:1:1$  (混合比C) の3通りに混合させて合計9通りについて実験を行った。また、氷盤がトラップされて海水が流れにくくなっても上流側の水位が上がらないように流量を調節した。

氷盤による水面の被覆面積と張力の関係を図-9 に示す。これは、初期の水路部の流速が  $150\text{ cm/sec}$  の場合である。Ice Boom に働く力は主に氷盤に作用する流体抵抗に起因する。そのため流速が大きいくほど Ice Boom に働く力は大きくなる。どのケースの場合でもある程度氷盤による被覆面積が大きくなると張力の増加が緩やかになる傾向がみられた。これは初めのうち抗力の増加が顕著に表れその後の増加は主に氷盤下面と流れの間のせん断力によるものと考えられる。また氷盤がトラップされることにより、湖内へ海水が流入しにくくなり流体抵抗も小さくなる。図-10 に水路部流速と氷盤の被覆面積の関係を示す。◆印は最も流入量が減少したケースである。他のケースでは氷盤が Ice Boom 内全面にトラップされた状態の海水の流入量は初期の流入量に比べて  $1\sim 3$  割程度減少していた。このように海水交流が一時的に悪くなるが、長期にわたる現象ではないので水質には影響な

いと考えられる。どの流速の場合でも混合比C、B、Aの順で流入量の減少が多かった。また、混合比Aの方が張力が最も小さいのは、氷厚がすべて  $3\text{ mm}$  なので氷盤群の下面の粗度が小さく、せん断力も抗力も小さいためであると考えられる。混合比Cが混合比Bの場合よりも力が小さいのは  $4\text{ cm}$  厚の氷盤の一部が湖底に接することによる氷盤と湖底部の摩擦により水力が減少したことと、トラップされた氷盤により、湖口部からの海水の流入量が小さくなっていることが原因であると考えられる。上田ら(1992)の実験結果に基づき、抗力係数を  $0.6$ 、せん断係数を  $0.025$ 、代表氷厚を  $3\text{ m}$ 、代表流速を  $1\text{ m/sec}$  として、氷盤群の影響が全て新型 Ice Boom に及ぶと仮定し今泉ら(1991)の計算法を用いて計算すると、新型 Ice Boom に働く張力は図-9 に示す点線で表される。また、9 ケースの実験のうち、最も張力の増加が大きかったのは  $V=220\text{ cm/sec}$  で混合比Bのケースである。実験結果では約  $80\text{ t}$  ( $784\text{ kN}$ ) の張力となり、上記と同様の計算を行うと約  $95\text{ t}$  ( $931\text{ kN}$ ) となった。このように実験と計算が比較的良好一致を示していることがわかる。

図-11 は水路部流速  $18.6\text{ cm/sec}$  (実規模で  $228\text{ cm/sec}$ ) で Ice Boom 内に氷盤がトラップされている状況における Ice Boom の外側の流速ベクトルである。このように Ice Boom に氷盤がトラップされると流況が変化することが明らかになった。Ice Boom に囲まれた水域全体に氷盤がトラップされた状態になると、氷盤のない状態の時に流速の大きかった水路の延長線部分の流速が小さくなり逆に流速の小さかった周辺部分の流速が増加するということが考えられる。実際に Ice Boom を設置する場合にはこれまで浸食対策のされていなかった湖岸部についても浸食対策の必要性が確認された。

## 5. 結 論

### (1) 現地と模型での流速ベクトルの空間分布の比較

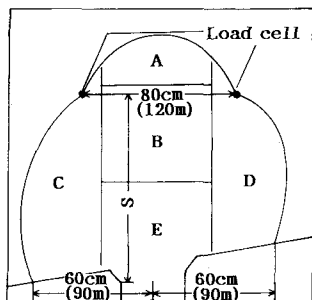


図-8 Ice Boom の設置状況

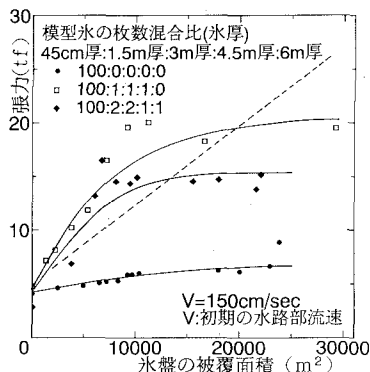


図-9 新型 Ice Boom に作用する張力

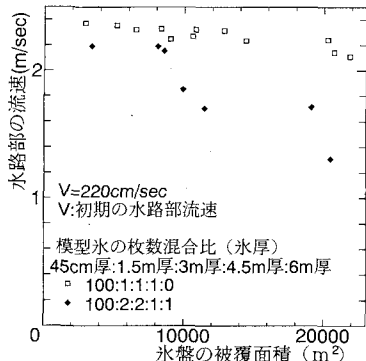


図-10 湖口水路部の流速

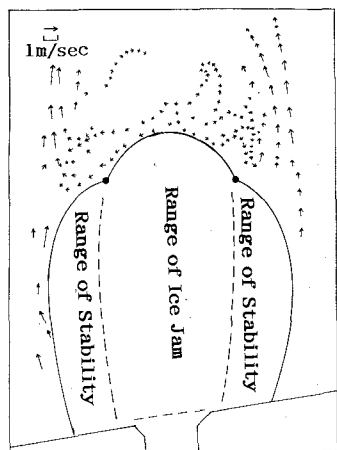


図-11 Ice Boom 周辺部の流速ベクトル

の結果から 1/150 の模型でも現地の状況がよく再現され、また Ice Boom の制御効果についても縮尺 1/50 の結果（実規模での結果と良い一致を示している。）と 1/150 の結果が一致し、フルードの相似則が満足されていることを確認した。また張力についても計算値との比較より相似則が成りたっていた。従って、模型実験による結果の現地への適用が可能になる。

(2) 一辺 4.5 m、厚さ 45 cm の氷盤の場合流速が約 110 cm/sec を超えるとほぼ流速分布に一致して Ice Jam が形成される。

(3) 図-11 に示すように流速の速い領域は氷盤の回転が起こり Ice Jam 状に、流速の遅いところは安定領域となり、Ice Boom に氷盤が Trap される過程とそのメカニズムは、著者らの Ice Boom や新型 Ice Boom による氷盤制御の基礎実験結果 (1992a) や笹島ら (1992b) によって推定されるものとよく一致している。

(4) Ice Boom によって湖口部に氷盤が Trap されることにより、Ice Boom 周辺部の流速が増加するなど湖口部近傍の流況が変化するため湖岸部の侵食防止対策や、洗堀の対策が必要となることが明らかとなった。

(5) Ice Boom の設置の場所によっては氷盤が Trap されると湖内と外海の海水交流が一時的に悪くなるが、落潮時には流れが逆になり、氷盤は外海に出て行くので氷盤が海水交流を妨げる時間は長期におよぶもの

ではない。また、流水が侵入するのは一冬に数回であるから、水質にはほとんど影響しない。

(6) Ice Boom の設置場所は湖口からある程度離れた流速の遅いところが適しており、流速の大きい中央部は新型、流速の小さい周辺部は従来型の Ice Boom を用いることによって、水路部の流速が最大の時 (2.2 m/sec) でも流水侵入を完全に防止することができることが明らかとなった。従って、Ice Boom の設置に際しては、コストの軽減をはかるために現地の流速に応じて新型と従来型を効果的に使い分けることができることを示した。

(7) Ice Boom によって Trap される氷盤が多くなると湖内への海水の流入量が減少するので Ice Boom にかかる張力の増加は緩やかになる。また厚い流水が海底に接することにより張力の増加が軽減される。本実験で得られた張力に関する結果は上田ら (1992) の実験結果に基づいた今泉ら (1991) の計算法を用いた計算結果及び榎ら (1992a) の既存の実験結果と良い一致を示している。

## 参考文献

- 今泉章・上田俊也・榎 国夫・寺谷勝利・佐伯 浩・笹島隆彦 (1991): Ice Boom の設計方法について, 第 7 回寒地技術シンポジウム論文集, pp. 644-649.
- 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.
- 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.
- 榎 国夫・田淵浩文・國松 靖・佐伯 浩 (1992): 氷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論文集, pp. 287-293.
- 國松 靖・秋原真哉・榎 国夫・高木雄一朗・原文宏・佐伯 浩 (1992): 氷盤の大きさに関する研究, 第 8 回寒地技術シンポジウム論文集, pp. 417-422.
- 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.
- 笹島隆彦・安田 修・榎 国夫・國松 靖・原文宏・佐伯 浩 (1992): 湖沼へ流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論文集, pp. 394-399.
- Tatinclaux, J. C., M. Gogus (1981): Stability of Floes below a Floating Cover, Proc. International Symposium on Ice, Vol. 1, pp. 298-308.
- US Army Corps of Engineers (1990): Engineering and Design-Winter Navigation on Inland Waterways.