

寒冷地の港湾、湖沼における流水の制御対策について

Drift Ice Control for Port, Lagoon and Coast in Hokkaido

笹島隆彦*・安田 修**・榎 国夫***

國松 靖****・岡本 智****・佐伯 浩*****

Takahiko Sasajima, Osamu Yasuda, Kunio Enoki,

Sei Kunitatsu, Satoshi Okamoto and Hiroshi Saeki

The Okhotsk Sea coast of Hokkaido is covered with sea ice and drift ice for three or four months, therefore ships can't navigate, and ports are closed. All works in the sea are discontinued completely except for the culture fishery. The drift ice which rushed into lagoons caused heavy damages to culture fishery, and marine products in coastal areas of the Okhotsk Sea were damaged by the movement of drift ice. This paper describes the control techniques for drift ice movement.

Keywords: Ice Control, Ice Management, Drift Force

1. はじめに

北海道のオホーツク海沿岸は毎年流水の影響を受ける。その範囲は宗谷岬から知床半島それに根室半島にかけてであるが、根室海峡から流出した流水の一部は襟裳岬まで達することがあるし、宗谷海峡から流出した流水は、利尻・礼文島まで達することもある。オホーツク海沿岸の流水による直接的な被害としては、①岩礁地帯の昆布・ウニへの被害、②宗谷海峡や根室海峡から流出した流水による漁具、養殖施設等への被害、③それらの海峡から流出した流水とそれを取りまく冷水塊によるアワビ等への被害、④サロマ湖など流水の湖内への侵入によるホタテ貝、カキ貝等と養殖施設への被害等が顕著である。最近の流水による被害額は1984年が約60億円、1985年が約10億円である。また、流水のサロマ湖内への侵入による被害は1972年以来度に発生していて、1972、1974、1975、1977、1988、1989、1990、1991年と過去8回である。一般にサロマ湖（塩分量約33g・ml）は1月中旬には、湖内ほぼ全域が結氷するため、たとえ湖口部から流水が湖口に侵入しても、湖内の結氷氷盤に阻止され、水面下2m以深に沈設されている養殖施設への被害は発生していないのであるが、湖内の結氷が完了する前に流水が侵入すると、氷塊が湖内を動きまわり養殖施設に大きな被害を及ぼすことになる。1974年には約23億円の被害となったが、最近では湖内結氷時期が遅くなり、毎年被害を受けていて、昨年は約2億円の被害となっている。

上述した水産関係の被害を少なくするためには流水の移動、運動の制御が必要となってきた。また最近では、オホーツク海沿岸部に位置する港湾の取扱い荷役量の増加とこの地域の振興、さらには北方圏諸国との交易の拡大に対して港湾の通年稼働に対する地元の期待は大きいことから、港内の結氷防止対策や港内への流水侵入防止対策技術の確立が望まれている。この他、親水防波堤の越氷防止技術等、流水の制御技術の確立が各方面で望まれているところである。本論文は、これらの流水制御に当たっての構造物（施設）の具備すべき条件を明確にすることと、現在すでに開発されていたり、開発中の流水制御技術について述べるものである。

2. 流水制御構造物（施設）の具備すべき条件

流水の移動を制御する構造物（施設）を開発する場合、その設置目的によって構造物（施設）の具備条件は異なる。本論文においては、過去の流水による被害例とオホーツク海沿岸に位置する港湾の通年利用を考えて以下の3つの目的について述べることにする。

(a) 港内への流水侵入を防止する場合（港口部設置）

- (1) 船舶入出港の妨げにならないこと。
- (2) 港口部近傍の砂移動に大きな影響を与えないこと。
- (3) 港内・外の海水交流を妨げないこと。
- (4) 港内結氷氷盤が“海あけ”時に支障なく港外に流出可能であること。

* 正会員 北海道開発局

**** 学生会員 北海道大学大学院

** 正会員 寒地港湾技術センター

***** 正会員 北海道大学工学部土木工学科

*** 正会員 秋田工業高等専門学校

(札幌市北区北13条西8丁目)

- (5)大波浪に対する充分な配慮
- (b)湖内への流水侵入を防止する場合（湖口部設置）
- (1)船舶の出入を妨げないこと。
 - (2)沿岸漂砂、海岸変形への影響を与えないこと。
 - (3)湖内と外海の海水交流を妨げないこと。
 - (4)景観にも十分な配慮が必要であること。
 - (5)養殖施設等の妨げにならないこと。
- (c)岩礁域への流水の侵入を防止する場合（岩礁水域設置）
- (1)磯船程度の船舶の航行に支障のないこと。
 - (2)海水交流を妨げないこと。
 - (3)沿岸部の漂砂に大きな影響を与えないこと。
 - (4)景観へも配慮すること。
 - (5)建設コストが合理的な範囲内であること。

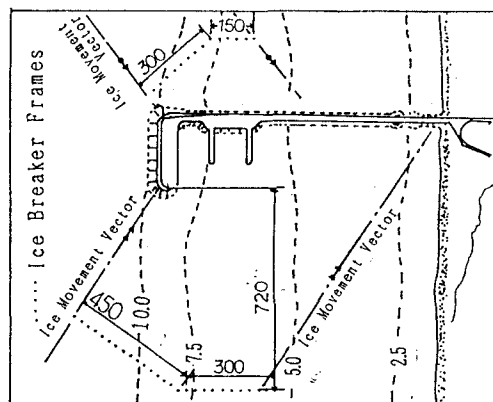


図-1 Nome港におけるIce Breaker Frameの配置状況

(a)の港内への流水侵入防止対策については、北海道のオホーツク海に面した地域の発展とそれにとまう貨物量の増加、港湾の通年稼働、耐氷・砕氷貨物船の普及といった条件が整うと、当然港内に流水が侵入することは操船に大きな支障をきたす。そのため港内への流水侵入防止対策が必要となるが、同時に港内結氷防止対策も必要となる。この流水侵入防止のための構造物は流水制御効率から考えると港口部の港内側に設置するのが適当であるが、大波浪を受ける可能性があるし、また、船舶の入・出航時には開閉が可能でなければならない。また氷力に対して十分な耐久性を有していなければならない。このような構造物の開発の例としては、アラスカのノーム港はの流水侵入防止対策として、図-1に示すようなIce Braker Frameを流水の卓越侵入方向に設置する案がIowa大学のグループにより立案されたが、現在のところ未だ建設されていない。これは冬期の強い風と流れにより氷盤が港内に侵入し、うず高くPile upし、その水が長期間港内に存在して港湾機能を阻害するためである。よって、このIce Breaker Frameの設置に際しては航路の部分には本構造物は設置されていない。よって、港湾の通年利用を目的としている本研究での目的とは異なっていることになる。

(b)の湖内への流水防止対策として特に留意すべきことは、湖内の水質環境の保持と湖口部の海岸変形に対してである。サロマ湖の場合、湖内の水質は必ずしも良好とは言えない。そのため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。また、湖口部近傍は、現湖口の場合、その海岸変形が激しく、滞筋も大きく変動している。よって、海水制御を目的の構造物（施設）を建設することにより、湖口部変形に影響を与えることは好ましくない。よって構造物の設置位置は波浪の影響が少なく流水の制御も楽な湖内側が望ましいし、また、透水性の大きな構造物がのぞまれる。

(c)の岩礁域への流水侵入防止については、オホーツク海沿岸の岩礁地帯（水深0～4m）は良質の昆布とウニの生産地帯である。この水域に流水が侵入し、それが波浪の影響を受けて動揺したり、Ride-upするときに、岩礁に着床している昆布を削り取ったり、ウニを圧死させたりする。一般にオホーツク海に面した北海道沿岸の浅海域では流水が汀線近くに接近すると海水は凍結し、比較きれいな平坦氷を形成することになる。このような平坦氷は水産生物に被害を与えないとされていて、流水のように塊状でドラフトの大きな氷が被害を与える原因とされている。よって岩礁地帯の沖側に流水の接岸を阻止する機能を持った構造物の開発が望まれている。これらの構造物は背後の岩礁地帯の水質を保持するため透過性の高い構造型式であると同時に、氷力を低減させるため、氷盤を曲げ破壊させるよう傾斜型となっている。これらの構造物は、すでにいくつか開発されていて、その一部を図-2に示す。図-2(a)はPack Ice Barrierと呼ばれるもので、四本脚となっていて鋼管でつくられている。湖の構造物はすでに興部の沙留海岸や北見枝幸で建設されていて、流水侵入防止効果をあげている。この他図-2(b)の三脚式防水柵や図-2(c)のHITS等が開発されていて、4本脚の不安定さを解消した構造になっているが未だ建設の実績はない。この他、通常の海岸保全施設として数多く建設されている異型ブロックを用いた離岸堤を防水目

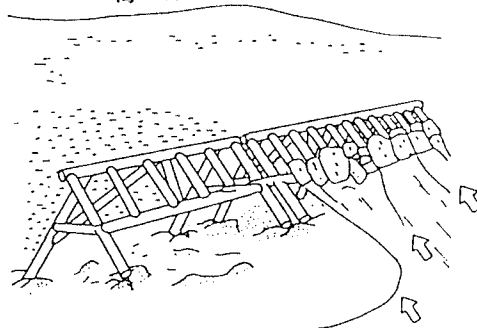


図-2(a) 防水柵 (Pack ice barrier)

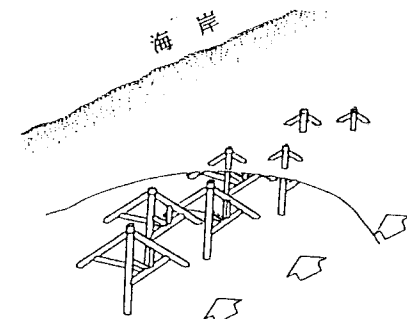


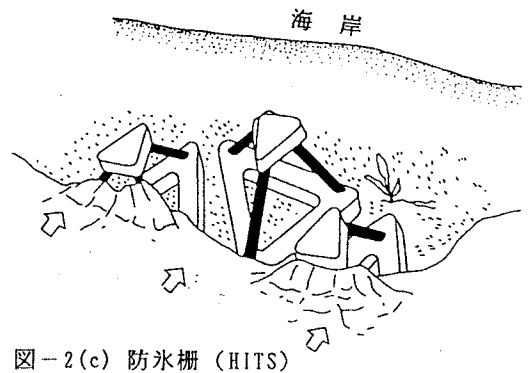
図-2(b) 三脚式防水柵
(Three legged pack ice barrier)

的で建設されている例もある。離岸堤を流水制御の目的で建設する場合には、その背後の岩礁域に砂を呼び込むことがあってはならない。また、岩礁域への流水侵入を防止するための構造物は、砕波帯に位置する可能性が高くなることから、構造設計上は砕波帯波力が支配外力となることが多い。よって砕波に対する安全性を充分考慮しておく必要がある。

3. 氷盤移動制御の方法

上述したように、氷盤移動を必要とする水域によって、その移動制御構造物の具備すべき条件は異なる。岩礁域や港への侵入を防止するための構造物は、密接度の高い場合は、氷盤制御構造物は氷力に対して充分な耐久力を持たねばならないし、氷盤が構造物をRide-upしないようにすることも必要である。また、氷盤の密接度が低く相当の波浪が存在する場合には、波浪に伴う氷盤の運動が発生するが、そのような状態では構造物には波力と氷盤の衝撃力が同時に作用することになるので設計に際してはそれらのことに充分な配慮が必要である。波浪による氷盤の運動については泉山・佐伯の実験がある。実験は氷盤の密度(0.92程度)と同程度のプラスチック板を氷の模型として用いた実験を行っている。弾性率については相似則を満足していないが、運動を調べるには密度を合わせておけば充分である。氷盤の重心運動は図-3(a)に示すように、大きく6つに分類できる。これらA～Fまでの運動の軌道をまとめた物が図-3(b)である。縦軸のUはアーセル数で HL^2/d^3 (H:波高、L:波長、d:水深)であり、横軸は氷盤の波浪進行方向の長さ1と波長の比である。同図からも明らかなように、 $1/L$ が0.4以下の場合には、氷盤は常に水面に存在することになるが、 $1/L > 0.7$ の範囲では、氷盤は水面下に沈み込むことになり、海底を削ったりすることにもなるし、移動を制御する構造物も大規模になる。オホーツク海沿岸の波浪の周期は7～14秒が多いが、水深を5mとすると、波長は45.6～105.1mとなる。氷盤が水面に存在する条件($1/L \leq 0.4$)からすると、 $1 \leq 18.2 \sim 42.0$ mの氷盤の長さとなり、沿岸部の氷盤長は10m以下が大部分を占めることから、氷盤のほとんどが水没することはなく、その分、制御は楽となる。よって、岩礁地域や港口部における流水の制御においては、固定式の流水制御部の下端は基準面下、波谷部相当水位に氷厚を加えた分をとれば充分であるし、浮遊式の場合は、その喫水深は氷厚の分をみれば充分となる。

次に湖口部に設置する場合であるが、前節で述べたように、流水制御構造物の設置位置は湖内側が全ての点で有利である。サロマ湖をはじめ、能取湖等、オホーツク海に面している湖沼の湖口部は北から北東に向かう水路でオホーツク海と繋がっている。流水来襲時の1月～3月は北西から北向きの風が多く、湖内で発生する風波に対しては湖口部はフェッチがゼロとなり、湖内波浪による影響は湖口部では非常に小さい。また、外海から湖内に侵入する波は、波高の大きな波は湖口部外海側に左右から伸びているサンドバーによって砕波させられることになる。また、上げ潮時の外海から湖内に海水が流入する時は、その速い流れによって波高は小さくなり、波長は長くなるし、また下げ潮時には、その波は砕波することになり、湖内側の湖口部近傍は波の影響を強く受けることがない。これに対して、潮汐による湖口水路部の流速は大きく、サロマ湖においては現湖口部(幅約250m)で最大2.40m/sec、第二湖口部(幅約50m)で1.1m/secとなっている。湖口部水路から湖内へ流入した後も流心部の流速はかなり大きく、湖口部で最大流速時に現湖口近傍で流速が1(m/sec)になるのは湖口水路湖内端部から500m以上離れた位置となる。以上の事から湖内への流水侵入を防止するためには、



(Hybrid ice trap structure)

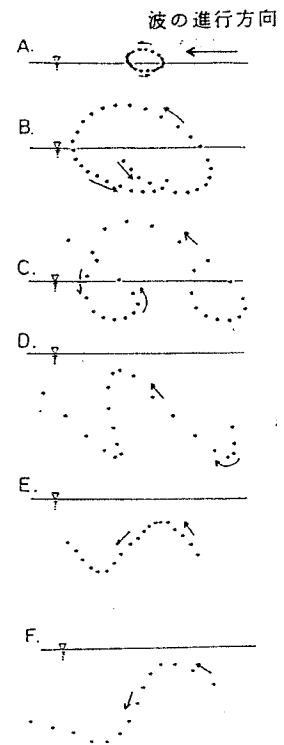


図-3(a) 重心の軌道形状

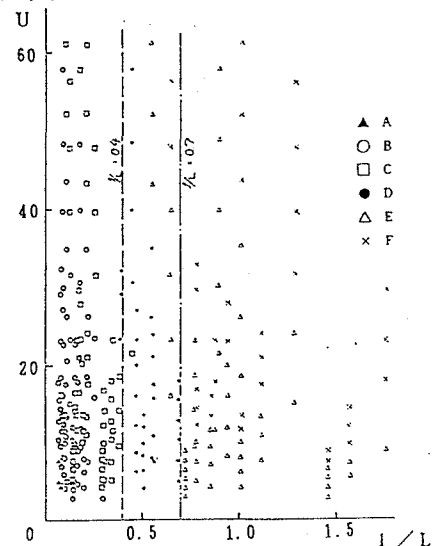


図-3(b)

速い速度で移動する氷盤の制御方法の開発が必要となる。このような流水中における氷盤移動の制御に対しては北米で、河川の氷盤移動制御に用いられているIce Boomがある。これは図-4に示すように、アンカーで固定された浮体どうしをワイヤーで繋ぎ、そのワイヤーに木材やフローターを取り付けた構造となっている。このタイプのIce Boomは過剰な氷力がIce Boomに作用すると、ワイヤーを固定している浮体とともにワイヤーの浮力体の沈み込み、その上を氷盤が通過していく構造とな

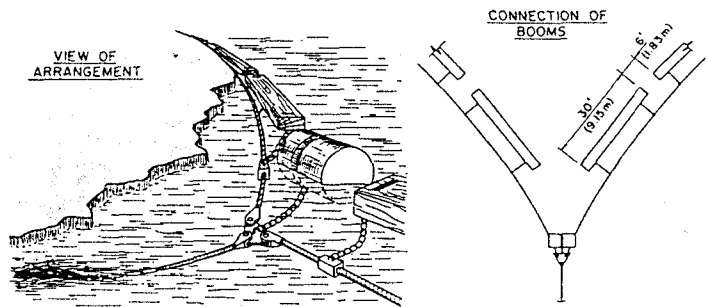


図-4 Ice Boom

っていて、その氷盤の制御能力は流速60cm/secが限度とされている。これに対して榎らは、フローターをつけたワイヤーの両端を固定杭に締結したIce Boomの氷盤制御に関する系統的な実験を行った。それによると、氷厚50cmの氷盤は、流速60cm以下で、氷厚200cmの氷盤は流速100cm/sec以下までは、Ice Boomで完全に氷盤を制御できることを明らかにした。流速がそれらの限界値を越えると、氷盤はIce Boomとの接触点を中心に水中を回転して、Ice Boomの下流に流れていく。これらの実験室において、榎等は、Ice Boomに大きなメッシュ(2m×2m)の鋼製ネットを取り付けることにより、回転した氷盤をネットで捕捉することで下流に流さないよう制御できることを明らかにし、その新型Ice Boomの氷盤制御効果を調べた。その結果によると氷厚2mの場合で流速130cm/sec以下、氷厚50cmの場合で70cm/sec以下で制御可能であることが明かとなり、新型Ice Boomの方が氷盤の制御効果のよいことが明らかとなった。しかし新型Ice Boomの場合、氷盤の一部がネットに捕捉されるため流体抵抗が増し、Ice Boomのワイヤーに作用する張力が大きくなる。このIce Boomに作用する張力の計算方法については今泉等の研究に基づき求めることが可能である。この他、流れによって移動する氷盤を制御するためには、図-2に示すような着定式の構造物を設置することも可能であるが、船舶の航行のためには支障となるので、可動式でなければならない。

4. 最適制御構造物

岩礁域、港口部、それに湖口部における流水侵入制御のための最適構造物(施設)の開発に当たっては上述した、各水域における流水制御構造物の具備すべき条件と氷盤移動制御に関する過去の実験結果を参考にせねばならない。岩礁域の水産物保護を目的とする構造物については、すでに開発され実際に建設されている。しかし、守るべき水産資源にみあう建設コストでなければならないし、また、十分な耐久性も必要とされる。また、碎波帯に位置するため施工性の良さも満足されねばならない。そのような観点からみると、改良の余地が数多く残されている。特に現在建設されているものは着定式の4本脚であることから設置に難点があるし、鋼材を用いた構造形式が主であるため耐久性に問題を残している。この種の構造物は、将来的には、北極海等における石油掘削施設の保護構造物としての利用も残されていることから今後、より独創性にあふれた構造形式の開発が望まれる。この他に浮体式の防水構造物も開発されているが、建設コストと耐久性に難点が残される。また鋼管を打ち込み、ジャケットタイプの構造形式も提案されているが、建設コストと海底土質が軟岩や岩のところが多いため施工性にも問題が残される。

次に港口部に設ける港内への流水流入防止構造物については、船舶の出入りも考慮して波力低減と海水交流の必要性から透過性のゲート方式(上下方向開閉、回転方式開閉等)が考えられる。しかし、船舶の出入りのしやすさを満足するためにはゲートの幅は広く、また潮位と出入り船舶の規模から、決定されるクリアランスを考えると巨大なゲートとなり、構造物にも景観上からもゲート式は難点が多い。浮体式構造物をゲートのかわりに用いることも不可能ではないが、船舶の出入港の度に移動させるのに難点が残るし、流水来襲時期以外は港内面積を狭くするなど問題点も多い。現在浮沈式のIce Boomの開発も行われているが、これについては流水来襲時期以外の沈めておいている間に、海底の砂移動により埋没して、緊急の浮上が困難なことも予想されるため、現在漂砂により埋没しにくいフローター形状の開発が行われている。この他、港口部海底からエアバブルカーテン用の配管をする案もあるが、流水に作用する環境力は大きく、エアバブルにより発生する表面流程度では流水を阻止することは不可能である。

次に、港内流水流入制御構造物について述べることにする。前述したように湖内湖口部近傍で流水を制御することが最も望ましいが、流速が大きいことと、湖口部は砂浜海岸となっていて、波浪や流れの影響により変形が激しい脆弱な海岸である。よって、湖口部海岸への影響の少ない構造形式が望ましい。また湖内外の海水交流と景

観にも充分な配慮がなされなければならない。また、湖口水路は流水来襲期以外は漁船の往来も活発であり、最低2箇所の航路も必要となる。よって航路部（幅約100m）は冬期は流水侵入を防ぐ必要から可動式とせねばならない。新型のIce Boomによる流水制御特性でも述べたように海面下4m程度までネットを張っても流速1.3m/sec以下の範囲でしか流水を制御することはできない。よって、流速の小さい、湖口部からあまりにも離れた地点に制御構造物を設置すると延長が長くなり建設コストは高くなるし、湖口部の近くに建設すると、海面から海底までの制御構造物が必要となるし、構造物により氷盤がトラップされ、局所的に非常に速い流速となり、湖口部の海岸変形にも大きな影響を及ぼす。また流入海水量も減り、水質にも影響を与えることになる。よって少なくとも制御が可能な流速1.3m/sec以下の地点に設置することが望ましく、少なくとも湖口水路部から400～500m離す必要がある。航路となる可動部以外では、岩礁水域に用いる着定式構造物やジャケットタイプの固定式構造物でも流水制御効果をあげることができるが、-4.0mからH.W.Lの+1.3mまでの5.3mの範囲を構造物で制御するには建設コストが高くなりすぎる。また、浮体式構造物を用いることも可能ではあるが、アンカーライン等により漁場を狭くすることにもなる。また、観光ポテンシャルの高い湖内の景観上の問題もある。以上の結果を考えると浮遊式であるIce Boomが最も諸条件かなう流水侵入制御施設と考えることができる。図-5に示すように流速が70cm/sec以下の所は、通常のIce Boomとし、流速がそれより速い所では新型のIce Boomを用いることができる。航路として必要な2箇所については、Ice Boomの片側を取り外し可能にしておけばよい。Ice Boomを固定するためには構造物が必要である。簡単な構造設計によると、120m間隔に固定杭を設置しIce Boomの延長を150mとすると、Ice Boomのワイヤーに作用する張力は100tf程度となり、固定杭のIce Boomに作用する水平力は170tf程度となり大口径の鋼管でも充分横抵抗力に耐えることができる。また、可動部を固定する構造物は航路でもあるので燈標の設置も望まれる。現実にはIce Boomが河川でしか用いられた実績しかない（航路）ため、用いる材料の耐久性や腐食の問題、さらには、付着生物による流体抵抗の増大と海水交流への影響、Ice Boomにトラップされた氷盤に作用する環境力の推定方法等については今後の検討が望まれるところである。

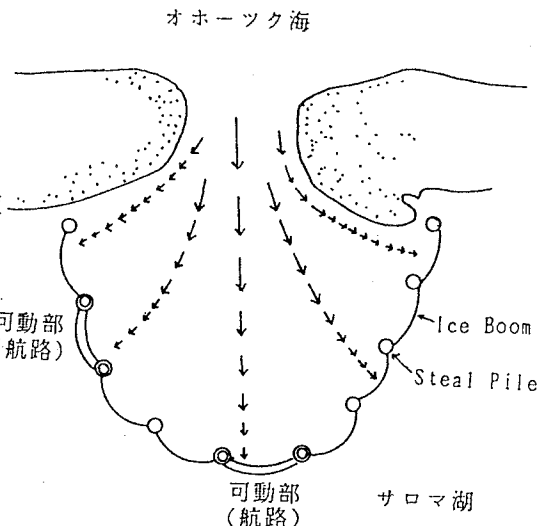


図-5 サロマ湖にIce Boomの配置状況

5. まとめ

流水の影響を受ける北海道のオホーツク海沿岸においては、岩礁域、港口部および湖口部における流水移動を制御するための構造物の開発が急がれている。本研究では、それぞれの流水制御の目的に応じた構造物（施設）の具備すべき条件と波や流れによる流水の挙動、基本的な流水制御構造物の流水制御機構とその制御限界を示すとともに、すでに開発されている構造形式と現在開発中の構造物や施設について述べた。残された未解決の問題は多いが、上述したそれぞれの目的の流水制御構造物は、極地におけるエネルギー資源の開発やそれに伴う社会基盤施設の設計等に寄与するものだと考えられる。

参考文献

- 1) 泉 冽、浜中健一郎、佐伯浩:1984・1985年の流水による水産物の被害について、寒地技術シンポジウム論文集、p. 119-123, 1986
- 2) 清水利平:流結氷地帯における沿岸漁業、海と港、No. 2、p. 81-86, 1985
- 3) Ettema, R. and J.F. Kennedy: Ice Study for the Port Development at Nome, Alaska, proc. of POAC, Vol. 2, p. 865-874, 1983
- 4) 榎国夫、国松靖、大下史、村木義男、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論文集、p. 650-656, 1991
- 5) 榎国夫、国松靖、大平正浩、村木義男、佐伯浩: 新型Ice Boomの開発、第7回寒地技術シンポジウム論文集、p. 638-643, 1991
- 6) 今泉章、上田俊也、榎国夫、寺谷勝利、佐伯浩、笹島隆彦: 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、p. 644-649, 1991
- 7) Tatinclaux, J.C.: Stability of Ice Floes below a Floating Cover, Proc. IAHR Ice Symposium on Ice, Vol. 1, 1981