

波浪中の浮沈式アイスブームの流水制御効果について

The Sink-and-Float-Type Ice Boom(SFIB) in Ice Floe Control with Wave

今泉 章*・佐藤 正樹**・榎 国夫**・原文宏***・佐伯 浩***
 A. Imaizumi, M. Sato, K. Enoki, F. Hara, H. Saeki

In Hokkaido pack ice usually reaches the area along the coast of the sea of Okhotsk from Wakkanai to the north shore of Nemuro peninsula and Cape Brimo on the Pacific Ocean.

In this study we report on the experiments concerning the effectiveness of the Sink-and-Float-type Ice Boom(SFIB) on preventing ice floes entering harbors due to wave action. The SFIB structure consists of a number of floating bodies linked by steel cables, with their ends tied to piers. The SFIB sinks to the sea bottom when the floats are filled with water, but when the floats are filled with air the SFIB floats entering the harbor.

Keywords: (Ice Floe Control, Ice Boom)

1. はじめに

北海道沿岸で海水の影響を受ける水域は、稚内から根室半島北側のオホーツク海沿岸であるが、まれには利尻、礼文島や太平洋沿岸の根室半島から襟裳岬の沿岸まで達することがある。また、港内結氷する港湾は、オホーツク海に面している北見枝幸、紋別、網走、根室港（根室地区）の各港で、稚内、根室（花咲地区）、釧路の各港は港内の一部が結氷することがある。

オホーツク海に面する港湾の通年稼働を可能にするためには、港内の結氷防止、流水の港内侵入防止、オホーツク海に適した砕氷貨物船の開発が必要である。特に、稚内や太平洋に面した道東地域の港湾では、港内への流水侵入防止が必要といえる。稚内港に流水が浸入し、離島航路が不通になった例や根室港湾花咲地区に流水が浸入し、港内の漁船が出漁できなかった例、釧路港内が流水で埋めつくされ、フェリーをはじめ、船舶の航行不能になった例などがあり、港内への流水侵入防止対策工法の開発が望まれているところである。図-1に根室花咲地区への流水侵入状況を示す。

本研究は港内への流水侵入防止を目的として開発してきた浮沈式アイスブーム (Sink-and-Float Type Ice Boom-SFIB)の波浪による流水侵入制御効果を明らかにするための実験を行ったのでその結果を報告する。浮沈式アイスブーム (SFIB)とは、両端が締結された鋼製ワイヤーに多数の浮力体をつけた構造で浮力体に海水を注入すると海底に沈み、空気を入れると浮上し、海水侵入を防止する構造となっているものである。



図-1 根室港花咲地区への流水侵入状況

* 正会員 (株)西村組

(〒099-64 紋別郡湧別町栄町133番の1)

** 正会員 秋田工業高等専門学校

*** 正会員 北海道大学工学部

2. 浮沈式アイスブームの特徴

港内への海水侵入防止を目的とした構造物（施設）の具備すべき条件は以下のような事項がある。

- ①港内への流水侵入を防ぐことができる。
- ②船舶の航行の妨げにならない。
- ③港内外の海水交流の妨げにならない。
- ④港口部近傍の砂移動に大きな変化を与えない。
- ⑤港の景観に大きな影響を与えない。
- ⑥波力、氷力に対して十分な耐久性を有する。
- ⑦使用頻度が少ないため建設費が低コストであること。

以上の条件を満足する構造の1つが浮沈式のアイスブーム(SFIB)である。港口部の両防波堤端部に締結された二本のワイヤーに翼形断面の浮体を固定したものであり、流水来襲時は水面に浮いた状態で流水の港内侵入を防止する構造となっている。泉山等の研究によると氷盤の代表長 l と波長 L の比 l/L が 0.4 より小さい時は氷盤は常に水面にあり、このSFIBで港内への侵入が阻止されることになる。海面が氷盤で被覆されると波長は長い成分のみが残り、また最近の調査では流水の代表長さは $2 \sim 5$ m が多いことから、 $l/L < 0.4$ が満足される。この浮体の断面は浮力が比較的大きく、船舶通航に支障にならないよう扁平な形で、かつ波浪による底質の移動が活発であっても、砂中に埋没しない形状がえられる。浮体が埋没したり、浮体の上に大量の砂が堆積すると、再浮上できないことになる。また、流水襲来時は、浮体下部からコンプレッサーから送られる空気を吹き出すことにより、流水とSFIBの凍着を防ぐことも可能となっている。浮体上に砂が堆積しにくい断面形状については、既に著者等によって明らかにされている（今泉等1990, 1993）。よって、本研究では、この浮沈式アイスブーム(SFIB)による波浪中の流水の制御特性を明らかにすることを目的としている。

3. 波浪により運動する流水の侵入防止効果実験

(1)実験方法

実験に用いた浮体は、バルサ材で製作した。浮体1個の長さは15cm、幅7cm、厚さ3cmで、浮体相互の間隔を5cmとし、6個の浮体を直径0.5mmのステンレスロープ製のメインワイヤーとサブワイヤーで連結した。また、実験は水路幅80cmに対してアイスブーム長を135cmとし、浮体と氷盤接触部が浮体の平らな方になるようにアイスブームを水路に固定した。浮体は体積の20%が水面上にできるように、鉛板を使い調整した。実験水路の概略図を図-2に示す。

実験水路とアイスブームの固定は、水路の両端に直径9mmの鉄棒をたて、アイスブームが水位の高さになる位置でアイスブームのワイヤー端部を鉄棒に締結した。次に、アイスブームが水路幅全体に一樣に保たれ、締結部と浮体の間から氷盤が流出することなく、アイスブームが自由に上下運動できるような状態で、水路に鉄棒を固定した。実験に使用した模型水は水とほぼ同じ比重をもつポリプロピレン盤（比重 0.9gf/cm^3 ）で、模型水相互の運動摩擦係数は 0.146 であり、実際の氷相互の摩擦係数 $0.1 \sim 0.2$ と同程度である。模型水の形状は正方形（ $10 \times 10\text{cm}$ ）で、氷厚は1cm、2cm、3cmの3種類とした。これを現地の氷盤に換算すると一辺が2mの正方形、氷厚は20cm、40cmそれに60cmに相当する。実験水深は40cmである。

実験は、進行波および重複波、それぞれ現地波に換算して周期(T)が6.0, 8.0, 10.0（秒）の3種類で行った。波高は、進行波の場合、現地波に換算して $H=1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 4.8$ （m）である。また、必要に応じて、それ以外の波高でも実験を行った。また、氷盤の水面被覆面積は、アイスブームから氷盤群の最後部までの距離で表し、進行波の場合は、現地距離にして60m, 30m, 6mの3種類で行った。重複波は氷盤の被覆距離を60mとし、アイスブームの設置位置を変え、波の腹と節の2点で行った。実験時間は現地換算で45分間。実験縮尺は、フルード則に従って $1/20$ で行っている。

なお、本実験の前に浮体・氷盤の上下方向の固有振動周期の実験を行った。結果はSFIBの浮体が 0.4 秒、氷盤（ $10\text{cm} \times 10\text{cm} \cdot t = 3\text{cm}$ ）が 0.42 秒であり実験波浪に対応して応答性がよく、浮体及び氷盤が常に水面上にあることを確認した。

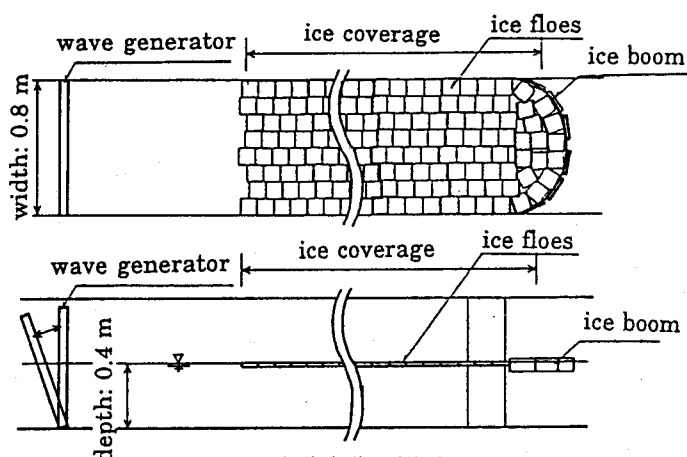


図-2 実験水路の概要図

(2)実験結果と考察

図-3は、氷盤がアイスブームから流出するメカニズムを段階ごとに示したものである。波の質量輸送により波の進行方向移動した氷盤はアイスブームの位置で止まり、次々と後方に直列的にならんだ状態が①である。次に氷盤相互の接触と後方からの流体力の増加によって、アイスブームに近い氷盤から氷盤下面に潜りこみ、2段、3段と氷盤下面に重なりあった状態が②③である。最終的に、重なりあった氷盤の厚さがアイスブームのフロートの喫水(0.8P)以上に発達し、その後に潜り込んだ氷盤がアイスブームの下から港内へ流入する。①の場合を図-4(a)、④の場合を図-4(b)に示す。

以下に進行波の場合と重複波の場合に分けて、浮沈式アイスブーム(S FIB)による、波動により移動する氷盤の制御限界及び通過氷盤数の実験結果について述べる。

1) 進行波の場合

アイスブーム沖側に氷盤を多く被覆した際、氷盤にかかる流体力が大きくなり、それにともない氷盤が流出する割合も大きくなる。また、氷厚が大きいほど流体力が増加することと、氷盤の重なる枚数が少なくてよいので、流出割合が大きくなると考えられる。

実験結果より、浮沈式アイスブームによる氷盤の制御限界を示したものが図-5である。図中の L_i は氷盤の初期海面被覆長で60m、30m、それに6mである。 L_o は沖波波長、 t は氷厚、 P は浮沈式アイスブームの高さで、喫水深は0.8Pである。本研究では P/t については7.5、3.5それに2.5の三種類に変化させて実験を行っている。図中の白抜き印は制御可能なもの(controllable)で、黒印は制御不可能なもの(uncontrollable)で、図中の曲線の上の領域が制御可能な範囲である。同図より、同一の P/t であれば、 t/H が大きい程、また、 L_i/L_o が小さい程、氷盤の制御が簡単であることを示している。

また P/t が小さい程、氷盤の移動制御が困難になることを示している。また浮沈式アイスブームの間隔100m当りの氷盤の通過枚数を示したものが図-6である。同一の t/P では、 H/t が大きい程また、 L_i/L_o が大きい程通過枚数が増えることを示している。

また(a)、(b)、(c) 3枚の図から、同一の L_i/L_o でも t/P が大きい程、 H/t が小さくても流出氷盤が多くなることも示している。

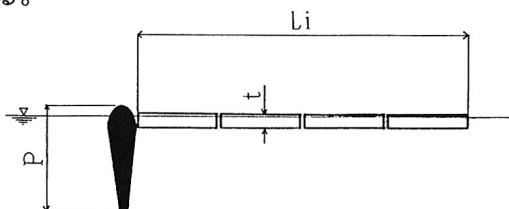


図-5 浮沈式アイスブームの氷盤の制御限界

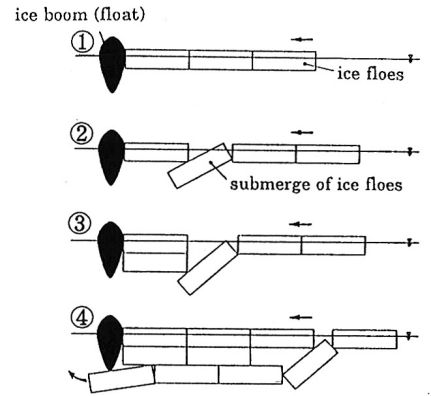


図-3 氷盤の流出メカニズム

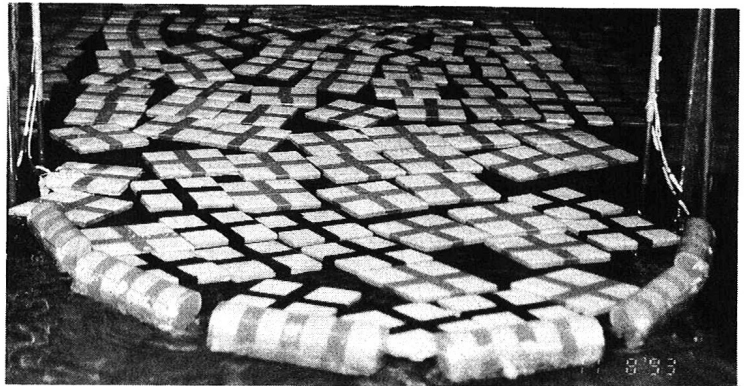


図-4(a) 氷盤流出のメカニズム①

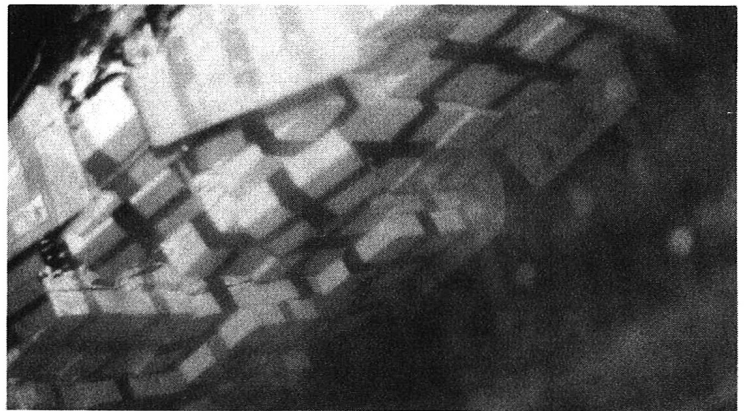
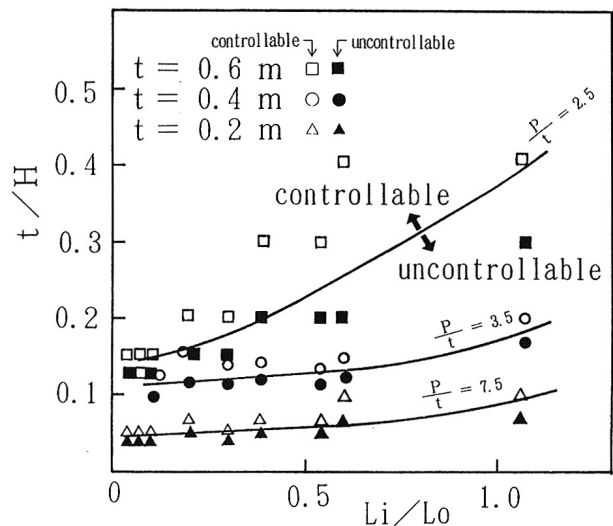


図-4(b) 氷盤流出のメカニズム④



以上、この浮沈式アイスブームは喫水は小さいにもかかわらず、氷盤の移動制御が可能であることが明らかとなった。しかし、このアイスブームは港外の進行波の領域に設置する場合には、氷厚及び氷盤被覆長 L_i が大きい場合、アイスブームに大きな張力が作用するとともに、波浪により常に動揺していることから耐久性にも問題が残ることになる。よって、波高が大きく、進行波に近い波が来襲する港口部の外海側で港内への流水流入を防ごうとすることは、この型式では無理があると考えられる。また流水の制御特性だけでなく、春から秋のアイスブームを必要としない場合には、海底におかれているので、フロートの上に砂が堆積し易くなると考えられる。

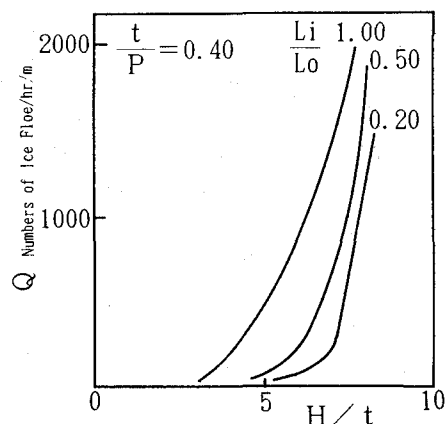


図-6(a) H/t と Q 及び L_i/L_o の関係

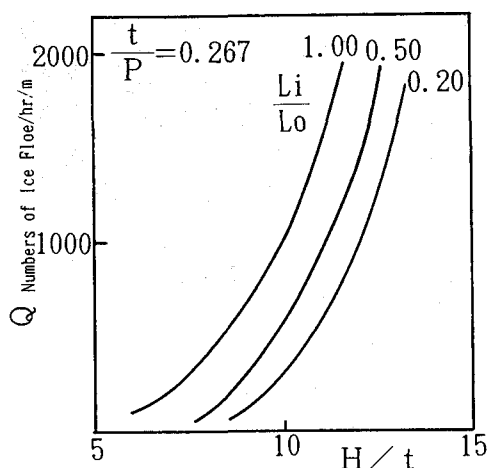


図-6(b) H/t と Q 及び L_i/L_o の関係

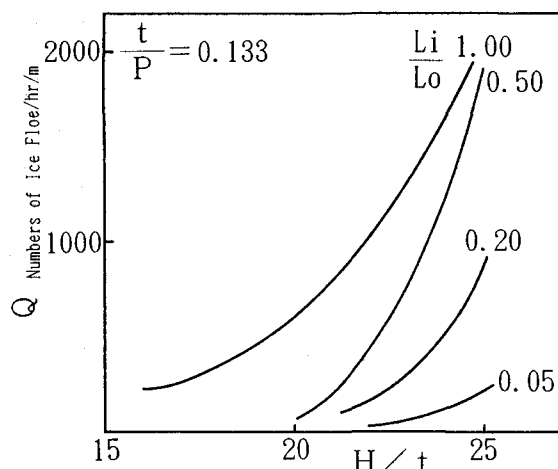


図-6(c) H/t と Q 及び L_i/L_o の関係

2) 重複波の場合

氷厚20cm、40cmそれに60cmの場合について実験を行った。重複波の場合、直立構造物直前で腹となり、 $L/4$ 離れた位置で節、また $L/2$ 離れた位置で腹となっている。波面での水の運動は、腹近傍においては、水位が上昇する時は腹の位置に向かって流れ、下降する時には節に向かって流れる。よって、海面が氷盤で長い距離覆われていても、水面の氷盤の運動は腹の位置で分解されることになる。また進行波に較べて定常流は極めて小さいため、氷盤がアイスブームに押しつけられることもない。そのため、浮沈式アイスブームによる氷盤移動制御は非常に簡単となる。

被覆している氷盤全体にアイスブーム方向への流体力が作用しなくなり被覆距離が減少した状態と同様になると考察される。

氷厚が20cm、40cmそれに60cmに対しては波高が5m程度までは、浮沈式アイスブームで制御可能である。その結果をまとめたのが図-7(a)、(b)である。

図-7(a)は、重複波の節(Node)の位置にSFIBを設置した時の氷盤移動の制御範囲を表したもので、図中の曲線の下側が制御不可能な領域で、上側に制御可能な範囲を示している。同様に重複波の腹(Loop)の位置での制御限界を示したものが図-7(b)である。両図を比較すると、節の位置で設置した方が氷盤の制御領域は若干広いが大差はない。また、同一の P/t に対しては、水深 h と沖波波長 L_o の比 h/L_o の変化に対して、 t/H はほとんど一定である。このことより、安全側を採用すると、周期が6秒以上で、氷厚が20~60cmの範囲では、 $P/H \geq 0.3$ の範囲で重複波による氷盤移動を制御できることになる。また、この図-6と進行波の図-5を比較すると、 P/t が7.5程度で L_i/L_o が非常に小さい場合は、重複波と進行波では、氷盤移動の制御範囲には差はないが、全般的には進行波に比べて重複波の方が遙かに氷盤制御が可能な範囲が広い。

進行波、重複波の場合ともに氷盤の厚さがアイスブームの制御効率に大きな影響を与えていることが明らかとなった。

港内の波浪は、港口部から侵入した波が港内の岸壁等で反射して、一般的には重複波あるいは部分重複波の状態となっていて、波高も港口部のごく近傍を除いては1m以下の場合が多い。よって浮沈式アイスブームで完全に流水の港内侵入を防ぐためには、港外に設置するより、港内側に設置する方が、確実に流水の港内侵入を防ぐことができる。また港外では進行波となり、波高も大きいので、アイスブームに作用する氷力も大きくなるためア

アイスブームの耐久性を増す必要となり、必要以上に重い構造となるし、その固定も困難となる。また、港外は波浪条件が厳しいため、砂移動も活発であることから、冬以外の沈設時に埋没する危険性も考えられる。以上のことを考えると、流水の港内侵入防止に、この浮沈式アイスブームを用いるとすれば港内側に設置することが望ましいと言える。

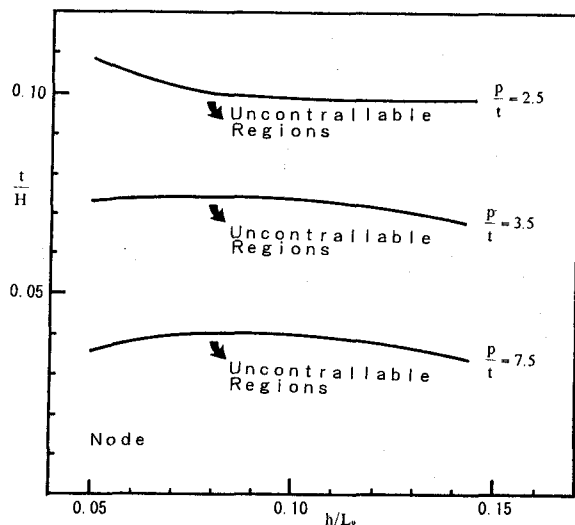


図-7 (a) 重複波の節 (Node) の位置での t/H と h/L_o の関係

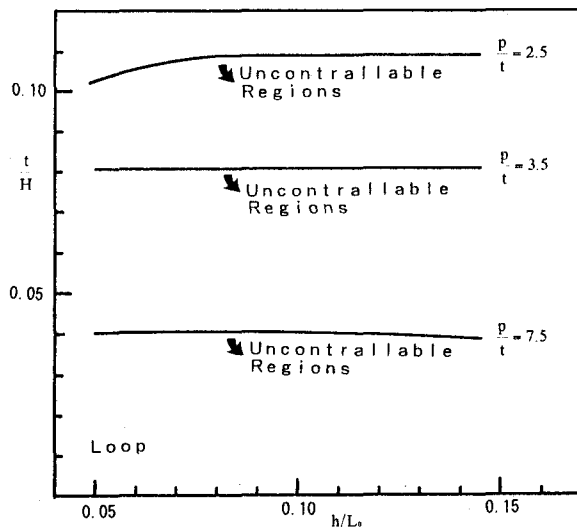


図-7 (b) 重複波の腹 (Loop) の位置での t/H と h/L_o の関係

4. 結 論

波浪による流水の港内侵入防止効果として次のような結論が得られた。

①沿岸部に最も多く存在する大きさの流水

($2\text{ m} \times 2\text{ m} \sim 4\text{ m} \times 4\text{ m}$) については、進行波と重複波の各々に対して浮沈式アイスブームの流水侵入防止の限界波浪条件を明らかにした。進行波については、その制御限界条件は t/H , P/t それに L_i/L_o で示される。また、重複波の場合は波高 5 m 程度までは完全に流水の動きを制御できる。

②進行波の場合、波浪条件が同一の場合、水厚 t が大きい程、氷盤の被覆長 L_i が大きい程、また、アイスブームのフロートの高さ P が小さい程、制御効果が低下する。

③重複波の場合の波浪による氷盤移動制御限界も、進行波と同様に t/H , P/t それに h/L_o により示されるが、概略的には $P/H \geq 0.3$ の範囲で制御可能である。また、進行波に比べて重複波の方が制御可能領域が遙かに広い。

④流水の来襲時には水野による波浪の減衰効果により、波高は小さくなるため現実には港口部内側に設置した浮沈式アイスブームにより、流水の港内侵入がしにくくなる。また、港内は波高が小さく、重複波であることから、港外に較べて浮沈式アイスブームの氷盤移動制御効率が高いし、砂の移動も少ないので埋没する危険も少ない。また、アイスブームに作用する水力も港内側の方がはるかに小さいことから、浮沈式アイスブームを流水の港内侵入防止に用いるには港内側に設置する方が望ましい。

⑤波浪による氷盤の運動形態は、泉山等の結果と一致することが確認された。また、浮沈式アイスブームの波浪により、移動する氷盤制御機構について明らかにした。

参 考 文 献

- 1) 服部、上田、中辻、村木、佐伯：浮氷盤に作用する環境力に関する研究、寒地技術シンポジウム論文集、p 386~392, 1990
- 2) 今泉、上田、榎、寺谷、佐伯、笹島：Ice Boomの設計方法について、寒地技術シンポジウム論文集、p 644~649, 1990
- 3) 榎、国松、大平、村木、佐伯：新型Ice Boomの開発、寒地技術シンポジウム論文集 p 638~643, 1991
- 4) 泉山、佐伯、尾崎：波浪による氷盤の運動に関する研究、土木学会北海道支部論文集、第38号 p 135~140, 1982
- 5) 今泉、原、榎、佐伯：浮沈式アイスブームに関する実験的研究、寒地技術シンポジウム論文集 p 445~448, 1990
- 6) 今泉、榎、原、佐伯：浮沈式アイスブームの流水制御効果と砂による埋設防止に関する研究、海洋開発論文集 Vol 9, p 101~106, 1993