

海水制御構造物の開発について

東海大学 正会員 泉 洲

北大工学部 正会員 小野 敏行, 浜中 建一郎

山下 俊彦, 佐伯 浩

1. 緒 論

北海道のオホーツク海に面した海岸や日本海に位置する利尻、礼文両島さらには根室から釧路にかけての太平洋岸においては流水や沿岸結氷の影響を受ける。図-1. にも示すように、これらの海域は北半球における結氷海域の南限に位置する事になる。

海水は様々な形で水産資源、水産施設それに漁具・漁網に多大な被害を及ぼす。これら水産関係の被害は昭和59年で約60億、昭和60年で約20億円であった。また、本来港内結氷が起らない港湾や漁港に流水が侵入し、船舶が入港できない事も度々あり、離島等においては生活物資（生鮮食料品、灯油等）の搬入もできず市民生活にも大きな影響を与えている。図-2. には根室市花咲港が流水で埋め尽くされている様子を示す。

この他、海水の移動や波浪による運動が引き起こす被害としては、アラスカ等で起こる海水の陸上への遡

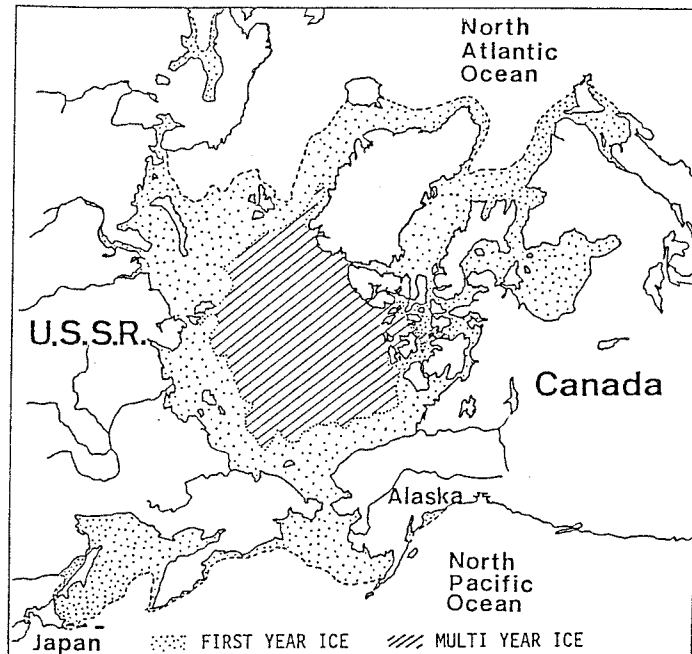


図-1. 北半球の結氷海域

上 (ride up) による家屋や道路の破壊や機能低下、ボーフォート海等における石油掘削のための土砂マウンドへの pile up や ride up による機能低下も大きな問題となっている。以上は風や潮流や波浪による海水の運動に伴う被害であるが、この他に海水の凍結による被害もある。港内凍結による港湾・漁港の機能停止は北海道においては度々問題となるし、北米大陸の漁港や港湾でも重要な課題となっている。その他、栈橋等杭状構造物への氷盤凍着による被害も米国等で数多く報告されている。本研究は、まず海水制御の構造物や海水凍結防止のための諸施設を体系化し、さらに既存の海水制御構造物の例を挙げるとともに、それらの基本原理を明らかにし、今後の海水制御構造物の開発に当たっての留意点を明らかにしようとするものである。

2. 特定水域の海水凍結防止対策

北海道のオホーツク海に面したような海岸においては、冬期は水温が $-1.7 \sim -1.8^{\circ}\text{C}$ まで低下し、浅水域では流水の襲来とともに海面の波浪も減衰するため海水が凍結し、定着氷 (land fast ice) を形成する。また流水も沿岸に接岸するため、このような海域で港湾や漁港等の結氷を制御するためには火力発電の排水等を港湾内に導入する事が必要となるが、このような地域では外海が完全に海水で覆われているため、港湾や漁港の機能を果し得ないので、港内結氷を制御する必要はない北海道北部の日本海に面した港湾や漁港は外海の水温は浅海域 ($\sim 7\text{m}$ 程度以浅) で厳冬期で $-0.2 \sim -0.5^{\circ}\text{C}$ 前後で、それより深い所では、水温はプラスになっているため海水が凍結する事はないが、港内においては①水深が浅い、②防波堤等の効果で静穏度が高い、③水産加工場からの排水及び生活

廃水により港内の淡水化が進んでいる。といった理由により結氷し易い条件にある。さらに、冬の降雪により、海面に落下した雪の結晶は、浅海域においては水温が氷点下であるため融解せず、雪泥状となり、それが冬の季節風により岸側に押しつけられ、港内を覆いつくし港内結氷を加速する事になる。このような例は、遠別漁港、苫前漁港等にみられる。また同様の例は太平洋岸においては根室半島から釧路にかけての港湾や漁港にも起こっていて、花咲港、歯舞漁港、それに落石漁港の例が報告されている。

諸外国においては北欧においてはフィヨルド奥部港湾やカナダ・アラスカの漁港や港湾の凍結や海水侵入が重要な問題となっていて、その効果的な対策の確立が望まれている。

限定された水域の結氷制御及び結氷した氷盤の除去の方策を表-1. に示す。

海水の凍結防止方法は大きく4つに分類されるが、①海水温を結氷温度以上に保つ、②結氷を遅らせる方法、③海水の結氷温度を下げる、④結氷を促進する雪泥等の侵入防止及び除去、等の方法が考えられる。①の限られた水域の水温を結氷温度以上に保つためには、図-3. に示すように、海水の結氷温度が海水の塩分量Sに依存する事から、海中への生活廃水や工場排水の流入を出来る限り抑制し淡水化を防ぐ事がまず第一に必要な条件である。次にその限られた水域の近くで結氷温度以上の水源があればそれを積極的に利用する事で例えば火力発電所の排水の利用や、ノルウェーのフィヨルドの最奥部の港湾凍結を防止したポンプによる、より暖かい沖合の海水を導入する方法が有効である。一般に海水の塩分量Sが24.7‰以上になると、海水の最大密度を示す温度が結氷温度より低くなるため、水面からの放熱により表面で冷却された海水は結氷するまで対流を続け、水深全体が結氷温度に達した後、表面から凍結が始まる。よって、塩分量が24.7‰以上の水域においては、その水域の深部の海水を循環する事により、その水域の水温を上昇させる事は不可能となるため、他の水域からより暖かい海水の導入が必要となる。

次に、限られた水域の結氷を遅らせる方法としては、水面をかく乱したり、流れを発生させる事である。北海道の日本海側に位置す

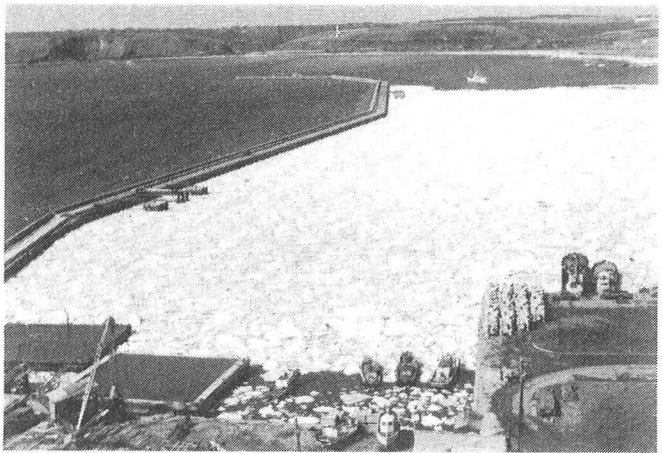


図-2. 花咲港への流水侵入状況

分類	種 別	方 策	自然の力を利用するもの	強制的に行なうもの
結 氷 防 止	・水温を結氷温度以上に保つ	・海面からの放熱を防ぐ ・熱の供給 ・外海水導入	・地下水や温泉水の導入	・薬剤等の散布 ・ヒーター ・ポンプにより海水を港外→港内あるいは港内→港外へ送水
		水位差 流 れ 密度差 波 浪	・潮位差 ・潮汐流等 ・温度差による対流 ・越波、斜面式、天竜港方式、部分透過堤、波動ポンプ ・温度差による対流	・ブローラかくはん、エアバブル式、水流式
	・結氷を遅らせる	・海水の鉛直混合 ・水面のかく乱	・波浪越波、部分透過堤、波浪よここみ	・小型船の港内はいかい、エアバブル式人工造波
	・結氷温度を下げる ・結氷を促進する物の侵入防止、除去 ・雪泥等の侵入防止及び除去	・雪泥の侵入防止 ・雪泥・はす水の集収・除去 ・雪泥・はす水の溶解	・波浪流、流れ、風 ・波浪流、流れ、風	・薬剤等の散布 ・アイスブーマ、エアバブル式、水流式 ・スキマバージ ・薬剤等の散布
海 水 除 去		・砕氷		・砕氷船、ホバークラフト式、土木作業機械（重機、ディッパ、バックホー等） ・土木作業機械
		・運搬	・離岸風、流れ	

表-1. 結氷防止対策法

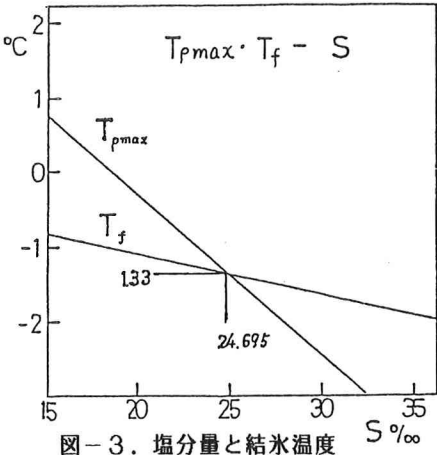


図-3. 塩分量と結氷温度

苦前漁港や遠別漁港も建設当初は、防波堤延長も短く、港奥部の静穏度も悪かったため、港内結氷は起こらなかったが、防波堤の延伸に伴い、港内静穏度が高まるにつれて外海水との交流も悪くなった事もあり、港内結氷が問題となってきた。これは海水が流動している事により、海水の結氷初期の氷晶の生成を遅らせ、また出来た氷晶を破壊する効果がある。この結氷を遅らせる方法としては、①海底に配管し、コンプレッサーで空気を送り、エアバブルを発生させて、鉛直流及び表層での水平方向の流れを発生させて結氷を遅らせる方法で、スベリオル湖北岸に位置するサンダーバイ港での試験でも成功しているし、ノルウェーのレナ（Rena）港においても成功の例が報告されている。特に表層が流入する淡水の影響で密度成層が形成されて結氷し易い条件の場所では、鉛直流により成層を破壊し混合を進める効果が強いエアバブル方式は高い効果を示している。エアバブル方式と同様の海水結氷を遅らせる方法としては、アンダーセン等が提案している人口造波による方法がある。アンダーセン等の研究はボーフォート海に面した海岸に通年利用可能な港湾を建設するため、砕氷船による砕氷と海水除去システムと人口造波及び温排水を組合せた方式を提案している。この方式では人口造波により温排水の混合を促進するとともに、結成される氷晶を波の質量輸送の作用により港外へ押し出そうとするもので、そのコンセプトを図-4. に示す。また、この研究では人口造波により結氷が押えられる事を実験により確かめている。また、限られた水域の結氷温度を下げる事により結氷しにくくする事も考えられるが、そのためには塩等を散布する必要がある、囲りの海域の水質環境を変化させる事になり好ましい事ではない。

次に結氷を促進するような雪泥等の侵入を押える方法としては、港の場合には港口から外海へ向かう流れをポンプ等を利用して起こす方法も考えられる。

現在、北米の河川において氷の制御に用いている ice boom を改良し、下部に 1m~2m 程度カーテンを有する ice boom を港口に設置する事で雪泥の侵入を防止する事はできると思われるが、入出港する船舶や漁船の障害となるので設置の仕方等に問題が残る。以上、限られた水域の海水制御のうち、特に結氷防止法について述べてきたが、この他、冬期間結氷した海水の融解を促進したり、港内で結氷した氷盤を外海へ排出する事も海水制御の重要な項目である。融解を促進

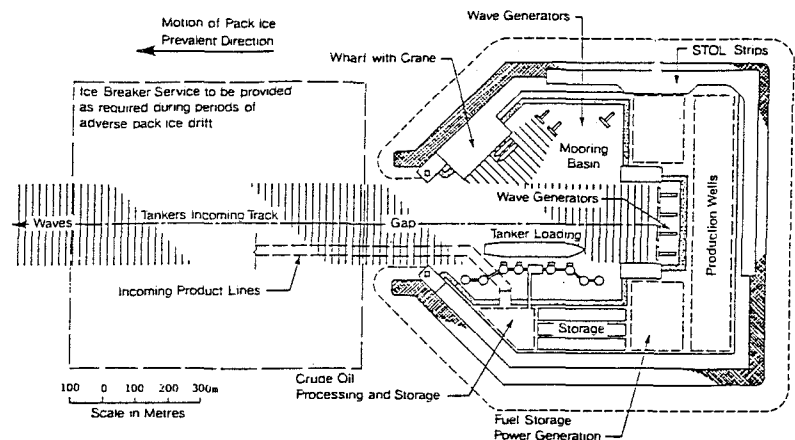


図-4. Lay out of Beaufort Sea Production Harbour[Anderson et al 1984]

するためには、表面に灰等をまき、アルベードを変化させる事も役立つし、昭和49年サロマ湖に流水が侵入した時に部分的にこの手法が用いられた。また、氷盤を建設用作業機械（重錘、ディッパー等）で割り、離岸風により港外へ出易くする事は北海道のオホーツク海に面した港湾で行なわれている。この他、大がかりに氷盤を破碎する方法としては、砕氷船、ホバークラフト等を用いる方法がカナダ等では採用されている。

以上、限られた水域での結氷防止方法と結氷盤除去の方法について述べたが、今後は以上述べた方法を組合せたり、あるいは新しい視点に立った独創的な海水制御手法の開発が望まれる。

3. 海水の移動を制御する構造物

海水の影響を受ける海岸、海洋の面積は全海洋の面積の10%程度である。また、海岸、海洋の場所によって海水の形態は異なっていて、オホーツク海の場合には、オホーツク海北西部海域で結氷が始まり、次第に結氷域を増していき、その一部が東カラフト海流と北西の季節風により南下し、途中波浪等により砕かれ、あるものは ridge を形成しつつ、あるものは pack ice として北海道のオホーツク海沿岸に到達する。沿岸に氷野となって接近すると、波浪も減衰し、沿岸海水温も $-1.7 \sim -1.8^{\circ}\text{C}$ に低下して定着氷 (fast ice) が形成される。また一部の流水は、宗谷海峡から日本海側に流れ出し、バラバラの pack ice 状で風により漂流し、利尻や礼文島の水

産資源等に被害を与える。また、三月になるとオホーツク海を埋めつくした海水の一部が根室海峡から太平洋に流れ出し、接岸しては沿岸の昆布等に大きな被害を与えている。図-5. にアラスカのボーフォート海沿岸の典型的な海水の状態を示す。

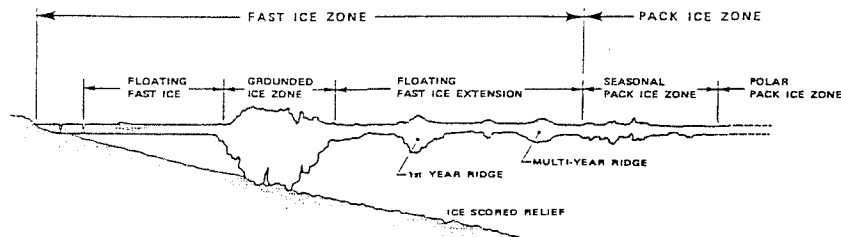


図-5. ボーフォート海における海水状況 [Kovacs et al 1979]

移動する海水の制御の方法は、その制御海域の水深と海水の形態 (level ice, ice ridge, pack ice等) それに、海岸地形によって異なる。また、制御の目的によっても制御構造物の型式が異なる。それを分類すると以下の如くである。

(1) 大水深域 (-20m以深)

- ・ルーズなpack iceに対してはice boom。
- ・大きなlevel ice, ice ridge、それに密なpack iceに対しては効果的な制御法なし。

(2) 浅水深域 (0~-20m)

- ・人口のice barrier (level iceやice ridgeに対して)
- ・ridgeに対する制御構造物としては、完全に水中に没した構造物 (pack ice barrier, ice breaker frame等)
- ・水平氷に対する構造物 (pack ice barrier, ice breaker frame等)
- ・ルーズなpack iceに対してはice boom、鋼管杭列等。

(3) 陸域

- ・陸上へのride up防止構造物及びpile up促進構造物 (concrete tank traps, artificial bump in slope, ice refractor等)

3. 1. 大水深域での海水の制御

大水深域における海水の移動を制御する事は極めて困難である。特に大規模のlevel iceやice ridgeの動きを構造物によって制御する事は、その氷力の大きさ及び建設コストの面からみると難しいのが現状である。しかし、非常にルーズな状態でのpack ice等の場合には、すでに河川において、氷の運動の制御

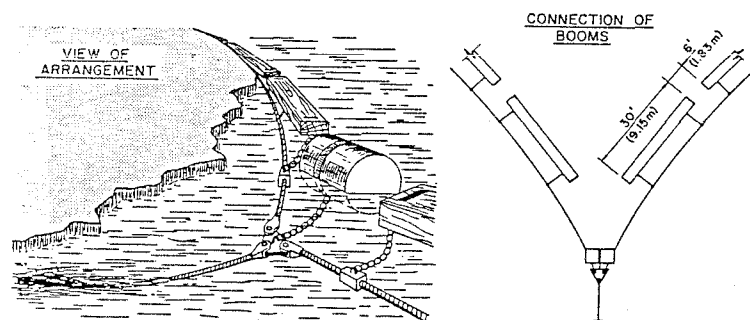


図-6. Ice Boom [Danys 1979]

に用いられているice boomが有効である。勿論、海岸においては波浪もあるため、アンカーを大型にし、ジョイント部や鋼製ワイヤも疲労に耐えるようなものが必要であるし、腐蝕対策も必要である。

図-6. にセントローレンス川のice boomの略図を示す 北海道の利尻、礼文の両島では、ここ数年流氷の襲来により、アワビが大きな被害を受けている。アワビは急激な水温の低下に非常に弱いため、沿岸から離れた場所で海水を止める必要があるが、この両島近傍ではルーズなpack iceの集まりなので、このiceboom方式で充分海水を止める事ができる。また、流氷の襲来は2月から3月にかけてなので、他の時期はアンカーとパイ

のみを残して撤去した方が船舶の安全航行の面からも良いと思われる。

3. 2. 浅水域での海水の制御

比較的水深の浅い海域においては、着定した構造物により、比較的安価に海水を制御する事が可能である。水深が比較的深くて、喫水の大きな ice ridge を制御するような場合には、潜水型で、かつ傾斜型の構造物が有利である。捨石や異形ブロックを用いた潜堤でも、法面勾配を緩くする事により ice ridge を止める事が可能である事は、オホーツク海に建設された離岸堤やアラスカに数多く建設されている傾斜型の防波堤が海水により破壊された例がない事からも明らかである。また Yamaguchi 等が開発した、オホーツク海沿岸のウニ及び昆布を流水の被害から守るための鋼管製の pack ice barrier (図-7.)、や Ettema 等がアラスカのノーム港の防波堤を ride up した海水が港内に堆積するのを防ぐために、防波堤の沖側に、図-8. に示すような ice breaking frame を設置して、移動してくる海水を破壊し pile up させる方法を開発しているが、これらの構造物を水中に設置する事により ice ridge を制御する事が可能である。また、水平氷の制御や比較的水深の浅い所では、それらの構造物の天端を海面上へ出すように建設すれば海水を制御できる。

またルーズな pack ice に対しては ice boom や、鋼管をアーチ状に打込む事により、氷塊自身にアーチを形成させる事により、海水を制御する事も可能である。

3. 3. 陸域における海水の制御

陸域に海水が ride up する事により、海岸近くの家屋や道路に多くの被害を与えた例が、アラスカで報告されている。また土砂を使った石油掘削のための人口島に海水が ride up し、掘削を妨げるような例もある。このように陸上に ride up する海水を制御する事も非常に重要であるし、陸上への ride up を防止し、pile up を促進させるための構造物の開発も重要である。Croasdale は図-9. に示すような pile

up の model を考えた。海側から ride up した海水は陸上の急勾配部で行きどまった所で、bump で pile up が始まるとしているが、model 氷での実験結果からは、かなり急勾配の bump を作らないと pile up を起さない事が報告されている。また、Vaudrey 等はアラスカ、ボーフォート海の Challenge 島に図-10. に示すようなコンクリート製の tank traps を汀線から約 4 m 程離れた所に、4 m 間隔に設置して、その効果を調べているが、その結果は良好で tank traps の海側に海水が堆積し、陸岸への侵入を止めた事を報告している。このように汀線近くに傾斜構造物を建設する事により ride up を止める事

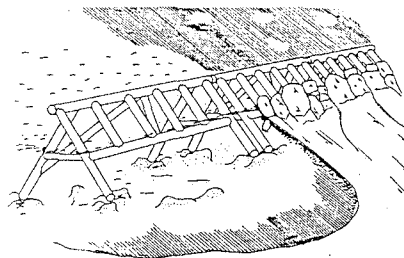


図-7. Pack Ice Barrier [Yamaguchi et al 1983]

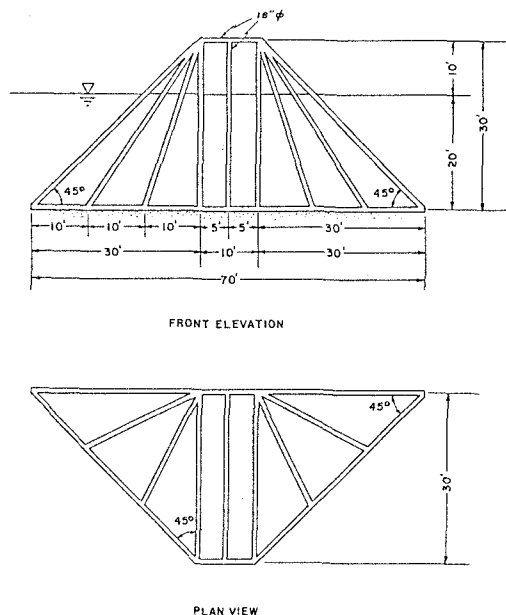


図-8. Ice Beaker Frame [Ettema et al 1983]

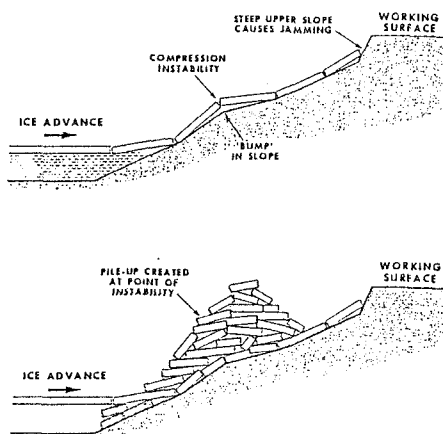


図-9. Pile up の発生モデル [Croasdale et al 1978]

ができるが、石油掘削のように非常に重要な施設を ride upやpile upから守るためには 海岸護岸と同様の構造型式の水返し (ice reflector) の建設も必要となる。



図-10. Concrete Tank Traps [Vaudrey et al 1981]

参 考 文 献

- 1) 泉 洸、浜中 建一郎、佐伯 浩：1984,1985 年の流水による水産物の被害について、寒地開発シンポジウム論文集, P.119 -123,1985
- 2) 清水 利孝：流結氷地帯における沿岸漁業、海と港, NO.2, P.81- 86,1979
- 3) 本間 史夫、佐伯 浩、竹田 英章：北海道北部日本海側の港内結氷についてー苫前漁港における港内結氷の調査とその防止対策案についてー, 寒地技術シンポジウム論文集, P.95-102,1985
- 4) 尾崎 晃、佐伯 浩、泉 洸：港湾内の結氷について, 土木学会北海道支部論文報告集第30号P. 101-106,1974
- 5) 尾崎 晃、佐伯 浩、泉 洸：港湾内の結氷について, 土木学会北海道支部論文報告集第31号P. 199-203,1975
- 6) Carstens,T.:Maintaining an ice-free Harbour by Pumping of Warm Water,Proc.of 4th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions[POAC].P.347 -354,1977
- 7) Eranti,E.,E.Leppanen and M.Penttinen: Ice Control in Finnish Harbour ,Proc.of 7th International Conference on POAC, P.370 -390,1983
- 8) Carstens,T.:Prevention of ice Formation by Forced Mixing, Proc.of 1st International Conference on POAC,P.140-151,1971
- 9) Hill,J.E.,D.A.Nelson and H.R. Kamo: Development of an Efficient Bubbler Systems for Grain Terminal Elevator Berths,Proc.of 7th International Conference of POAC,P.407-416,1983
- 10) Ashton,G.D.:Air Bubbler Systems to Suppress ice,U.S.Army CRREL,Special Report 210,P.1- 36,1974
- 11) Anderson P.F. and M.F.B.Allyn:Ice Management for Bearfort Sea Production Harbours, Proc.of IAHR Ice Symposium,P.3 303-314,1984
- 12) Anderson P.F.:Surface Agitation in ice Prone waters, Proc.of 6th International Conference on POAC,P.820-829,1981
- 13) Danys,J.V.:Development of Winter Navigation in the St.Lawrence River below Montreal,Proc.of 5th International Conference on POAC,P.1243 - 1256,1979
- 14) Perham,R.E.:Ice Sheet Retention Structures, Proc.of IAHR Ice Symposium.P. 339-348,1984
- 15) Design for ice Forces,Ed.by Caldwell, S.R.and Crissman,R.D. Pub.by ASCE,1983
- 16) Ettema,R.and J.F.Kennedy:ice Study for the Port Development at Nome,Alaska,Proc.of 7th International Conference on POAC,VOL2,P.865 -874,1983
- 17) Yamaguchi T.,H.Yoshida and M. Ando:Field Test Study of "Pack Ice Barrier" Proc.of International Conference on POAC,P.313 -322,1981
- 18) Calkins,D.J.:Arching of Model ice Floes at Bridge Piers,Proc.of IAHR Ice Problems,P. 495-507,1978
- 19) Calkins,D.J. and G.D.Ashton: Arching of Fragmented ice Covers,Canadian Journal of Civil Engineers, vol.2,NO.4, P.392-399,1975
- 20) Croasdale,K.R.,M.Metge and P. H.Verity: Factors Governing ice Ride-up on Sloping Beaches, Proc.of IAHR Ice Symposium,P.405-420,1978
- 21) Kovacs,A.and D.S.Sodhi:Ice Pile-up and Ride-up on Arctic and Subarctic Beaces,Proc.of International Conference on POAC,P.127-146,1979
- 22) Vaudrey K.D.and R.E.Porter:Ice Defence for Natural Barrier Islands during Freez up,Proc.of the 6th International Conference on POAC,P.302-312,1981