

現地氷盤群の流体摩擦抵抗の推定

ON THE ESTIMATION OF SKIN DRAG COEFFICIENT BY WATER FOR ICE ACCUMULATION IN THE FIELD

竹内貴弘¹・木岡信治²・河合孝治³

Takahiro TAKEUCHI, Shinji KIOKA and Takaharu KAWAI

¹正会員 工博 八戸工業大学 工学部環境建設工学科 (〒031-8501 八戸市妙大開88-1)

²正会員 工博 (独) 寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

³正会員 工修 (社) 寒地港湾技術研究センター (〒060-0807 札幌市北区北7条西2丁目8)

The existence of an ice cover over an open channel increases the hydraulic resistance to flow due to the increased roughness of the undersurface of the ice cover and the wetted perimeter. Hydraulic resistance of ice-covered channels, such as open channels at Lake Saroma and Lake Noto, influences water exchange for closed water. There is an ice accumulation consisted of various size and shape of sea ice at the channel. Therefore, skin drag coefficient by water for ice accumulation is the fundamental value for the understanding of water exchange and the design of ice boom, which is installed at the entrance of Lake Saroma, to prevent damage to aquaculture facilities. In the paper, Manning roughness coefficient by water for ice accumulation is investigated from the longitudinal velocity profile through laboratory experiments using model ice made of polypropylene. It is examined how the size of ice influences the Manning roughness coefficient, and in turn the roughness coefficient in the field is estimated.

Key Words : Sea ice, Manning roughness coefficient, Skin drag coefficient, Ice boom

1. はじめに

冬期間結氷する閉鎖性水域の海水交換を検討する際には、氷盤群の存在による流体摩擦抵抗を考慮する必要がある。サロマ湖や能取湖などの湖口の開水路では、湖内の氷厚がほぼ一様な定着氷 (Land fast ice) とは違い、形状やサイズも多様な流氷群が存在する (図-1)。また、実海域では比較的大きな氷板や氷盤群に風や流れといった流体力が作用し、これは環境力と呼ばれ非常に大きな値となり氷荷重の原動力をなす。この算定においても氷盤群の流体摩擦抵抗係数は基本的かつ重要な値である。特に、湖内の水産養殖施設を流氷群の衝突から守り、また、氷海中の油の拡散を防ぐことにも有効なIce Boomの設計においては、それらを適切に評価することが求められる。海氷制御構造物であるIce Boomや氷板の存在下におけるサロマ湖での海水交換の数値計算¹⁾や氷板存在下での能取湖における海水交換の検討²⁾が報告されており、それらにおいても抵抗係数の値が重要となる。Ice Boomへの荷重伝達やその場合の氷盤の挙動に関しては、個別要素法による数値解析や室内模型実験による研究も実施されている³⁾。一方、結氷する河川の場合には、冬季の河川流量評価の精度向上や河川構造物による取水障害を低減することを目的として、北海道河川の結氷特性に関する



図-1 冬季のサロマ湖第2湖口 (水路幅50m)

系統的な研究がこれまでに実施されてきた (例えば4)-6)。また、吉川ほか (2008, 2009)⁷⁾⁻⁸⁾は、晶氷の発生や結氷現象に関する現地観測や計算モデルを示しており、結氷初期においては、晶氷が互いに固着して間もなく凹凸が大きいため、粗度係数が大きくなる事を現地観測データとともに示した。Majewski et al. (1988)⁹⁾は、結氷河川における氷板下の流速分布形状を計測することにより、氷板と水流との間に発生するManningの粗度係数の現地データを報告しており、データから晶氷の有無がManningの粗度係数に影響を及ぼしていることが分かる。さらに、Manningの粗度係数の値は、平坦な氷やslushの滞留

の少ない場合から、例えば早春の氷解時の様に氷盤が厚く滞留しているような起伏の大きい氷の場合となるにつれて大きくなり、 $0.1 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ 程度にも達することが報告されている¹⁰⁾。これは、洪水流計算時の高水敷の切株のある伐採地程度の値に相当する¹¹⁾。

以上から、本研究では、あまり取り扱われなかった“流氷群を構成する氷盤のサイズや形状の多様性”に注目することとし、マンニングの粗度係数に与えるこれらの影響を室内水槽実験により調べ、さらに実規模におけるマンニングの粗度係数の推定を行ったのでそれらの結果を報告する。

2. 実験内容

(1) 現地の氷盤と模型氷盤について

オホーツク海沿岸における流氷のサイズに関する研究は、オムサロ、紋別空港、三里浜付近の沿岸を対象とした国松ほか(1993)¹²⁾やサロマ湖第二湖口を対象とした河合ほか(2008)¹³⁾などがある。それらは、氷の長軸、短軸、氷厚が主な測定項目であり、氷厚が1m以上のものを対象としている。流氷の長軸と短軸から同等の面積の正方形の一边を辺長とした頻度分布では、いずれも2m付近においてピーク値を示し、1m~6mの範囲に亘っていた。また、氷厚は0.6m~0.7m付近においてピーク値を示し、多くは0.4m~1.2m(まれに2m)の範囲に亘っていた。両者の測定結果とも辺長と氷厚に相関関係がみられた。両者の測定時期は大きく離れているが、それらの傾向には大きな違いはないとの報告である。このように流氷のサイズには分布があり、当然、同一サイズの氷盤のみが存在する訳ではない。また、オホーツク海北部では定着氷でさえも最大約1.3mに達するとの報告がある¹⁴⁾。以上の氷のサイズや実験の規模を考慮し、本研究では縮尺 λ (=実規模 p /模型規模 m)=40を目処に模型氷盤の寸法として<Cタイプ>を3種類(C1=5cm×5cm×1cm, C2=5cm×5cm×3cm, C3=5cm×5cm×5cm)用意した。さらに、形状の多様性を考慮するために形状が異なるが上記と同程度のサイズの<Rタイプ>(R1=2.5cm×5cm×7.5cm, R2=2.5cm×5cm×12.5cm)を2種類用意した。実海域には定着氷以外に圧力氷脈(pressure ridge)が存在するため、<Rタイプ>の縦横高さの寸法比は、サハリン北部でのBeketsky et al.(1997)¹⁵⁾の調査結果を参考にした。

以上のような複数の氷盤がIce Boomに遮られてIce Jamを形成するような“氷盤群”を研究対象として実験を行う。これは、通常の結氷河川の様な氷盤やもしくはその下面に晶氷が存在するものを対象としてはいない。

(2) 実験条件

幅34.5cmの実験水路(水路長8m;水路勾配1/100;底板は木材)を用いて、氷盤が存在する場

合の流速分布(縦流速曲線)を計測した。予備実験から、マンニングの粗度係数へ与える水深への影響は大きくはないため、ここでは50cmと一定にした。模型氷盤には、氷の密度に近く、摩擦係数がほぼ同程度と云われているポリプロピレン($\rho = 0.91 \text{ g/cm}^3$)とし、上述した<Cタイプ>、<Rタイプ>、さらに、氷厚の様な一枚板タイプ>の計6種類のポリプロピレンを使用した(図-2)。また、実海域には同サイズの氷盤のみ存在することは考え難いため、体積がそれぞれ50%となるように<Cタイプ>と<Rタイプ>の混合に対しての実験も行った(図-3)。実験時の流量は、 $Q_{10}=0.017 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $Q_{15}=0.025 \text{ m}^3/\text{s}$ および $Q_{20}=0.033 \text{ m}^3/\text{s}$ の3種類であった。この流速は、縮尺 $\lambda=40$ とフルードの相似則より0.5~1.6m/s程度となり、現地の水路(サロマ湖第二湖口)の流速に対応する。これにより氷盤下での流れを再現し、流速分布計測を通してマンニングの粗度係数 n_i を計算することにより、モデル氷盤の凹凸の程度がマンニング粗度係数 n_i に与える影響を評価検討した。用いた流速計は、(株)KENEK VP3000型3次元電磁流速計である。

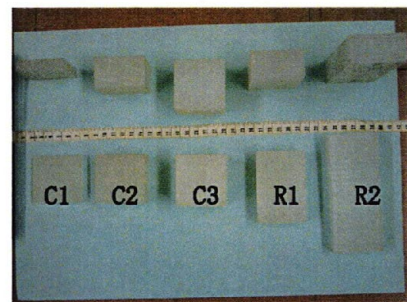


図-2 各種のポリプロピレン模型

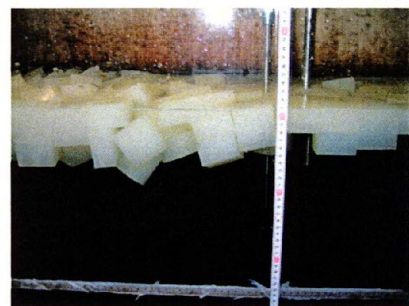


図-3 混合ブロックでの流速計測

(3) 結氷盤下の流速について

結氷盤下面によるマンニング粗度係数 n_i の計算にあたっては、氷盤下に通常乱流状態である速度分布として粗面对数則を適用することで、現地の粗度係数を評価したMajewski(1988)の手法に従った(図-4)。最大流速の発生する位置は中心からそれぞれの粗度係数の小さい方へ移動する。この位置を境界に、氷盤の影響を受ける領域と河床の影響を受ける領域に分割しそれぞれに(1)式の対数則を適用した。

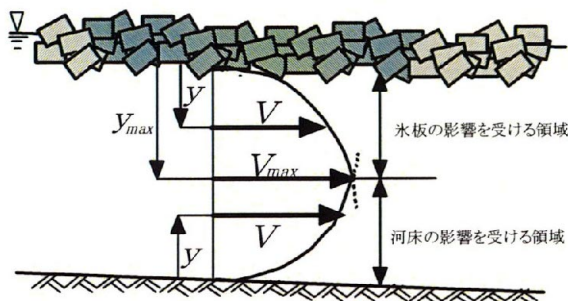


図-4 氷盤下面の流速分布の模式図

$$V = \frac{V_*}{\kappa} \times \ln\left(\frac{30y}{k}\right) \quad (1)$$

(1) 式は係数 a, b を用いて簡単化した (2) 式に変形し、(3)～(7) の手順で Manning の粗度係数を計算した。

$$V = a \times \ln(y) + b \quad (2)$$

$$y_0 = e^{-b/a} \quad (3)$$

$$V_{\max,c} = a \times \ln(y_{\max}) + b \quad (4)$$

$$V_{ave} = \frac{V_{\max,c} \times y_{\max}}{y_{\max} - y_0} - a \quad (5)$$

$$f_i = 1.28 \left(\frac{V_{\max,c}}{V_{ave}} - 1 \right)^2 \quad (6)$$

$$n_i = \sqrt{\frac{f_i}{8g}} \times (y_{\max} - y_0)^{1/6} \quad (7)$$

ここで、それぞれ記号は以下ようになる。

κ : カルマン定数 (0.4)

k : 粗度 (m)

V_* : 摩擦速度 (m/s)

V : 水深 y (氷盤側もしくは河床側より) における流速 (m/s)

y_0 : 氷盤下での流速 0 になる水深 (m) (計算値)

$V_{\max,c}$: 計算で求めた最大流速 (m/s) (計算値)

$y_{\max}$: 測定した最大流速 (m/s) (計測値)

V_{ave} : 平均流速 (m/s) (計算値)

a, b : 係数

f_i : 摩擦係数

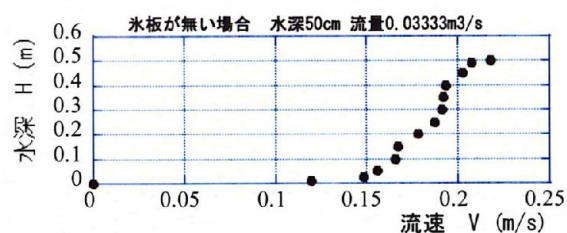
n_i : Manning の粗度係数 ($m^{-1/3}s$)

さらに、Froude の相似則を適用することにより、縮尺を λ とすると、実規模のマニング粗度係数 n_p は模型規模のマニング粗度係数 n_m を用いて $\lambda^{(1/6)} \times n_m$ と計算されるため、模型実験結果から実海域

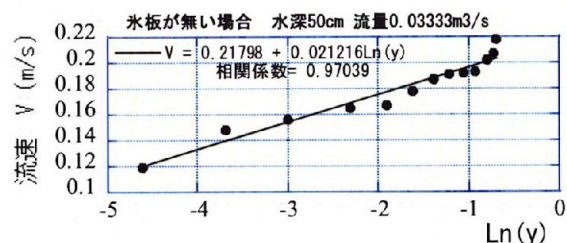
の値がおよそ推定可能となる。

3. 実験結果

はじめに、結氷盤が存在しない場合の流速分布 (図-5(a)) から、(1)～(7) 式を水路底側に適用して求めた Manning の粗度係数は、 $0.01325 (m^{-1/3}s)$ となった。実験の水路底の材料は木材であり、Chow¹¹⁾ の提案した Manning の粗度係数 n_i は、 $0.011 \sim 0.014 (m^{-1/3}s)$ 程度となり両者は対応する。この時の流速分布の対数則への対応は、相関係数で 0.97 程度であった (図-5(b))。



(a)



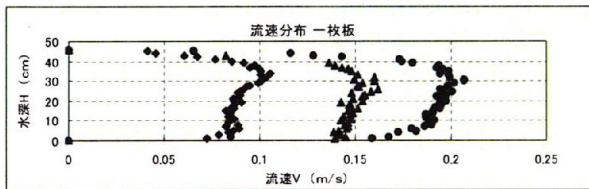
(b)

図-5(a), (b) 無氷板時の流速分布と対数則への適用

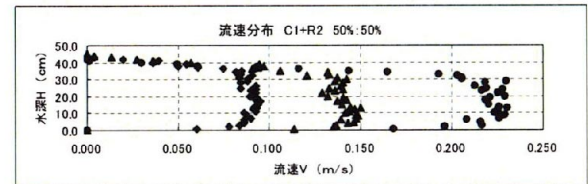
同様に、各模型氷盤を用いた時の流速分布を図-6(a)～(m) に示す。上記と同様に流速分布が対数則で近似可能かを相関係数 R により確認 (表-1) し、

表-1 流速分布の対数則への適用性

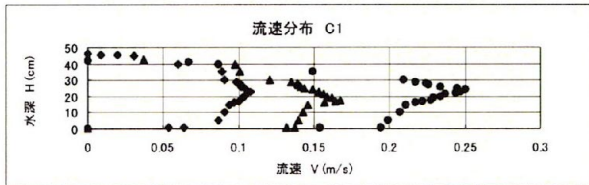
模型氷盤	相関係数 R		
	0.017m³/s	0.025m³/s	0.033m³/s
C1	0.988	0.932	0.984
C2	0.993	0.978	0.991
C3	0.986	0.975	0.973
R1	0.978	0.969	0.976
R2	0.972	0.949	0.958
C1+R1	0.973	0.976	0.979
C1+R2	0.967	0.925	0.923
C2+R1	0.960	0.963	0.953
C2+R2	0.970	0.956	0.949
C3+R1	0.969	0.983	0.974
C3+R2	0.965	0.983	0.946
R1+R2	0.946	0.963	0.952
一枚板	0.934	0.882	0.978



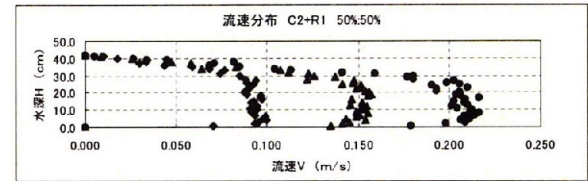
(a)



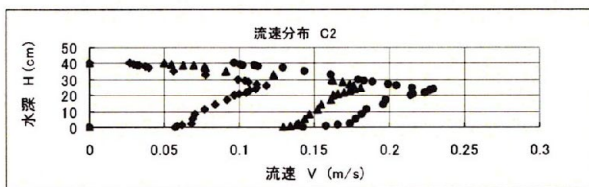
(h)



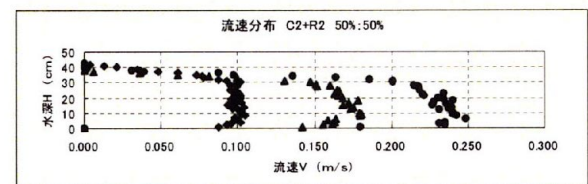
(b)



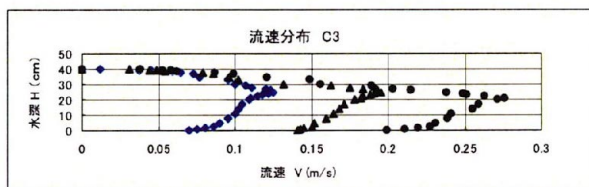
(i)



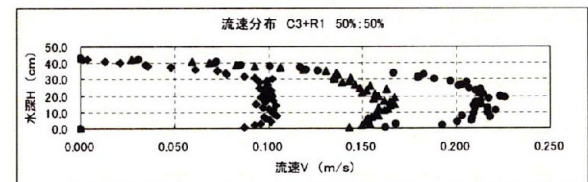
(c)



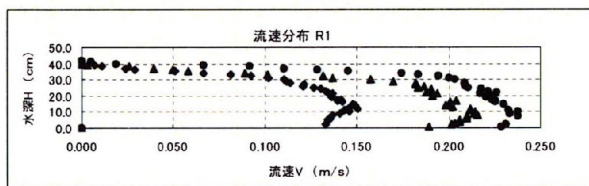
(j)



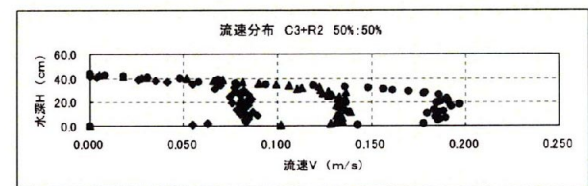
(d)



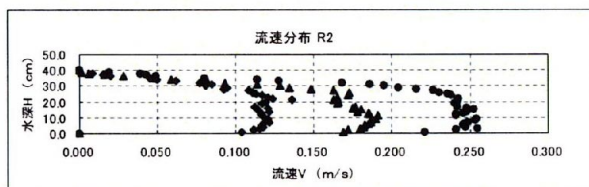
(k)



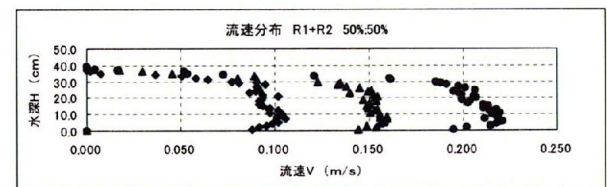
(e)



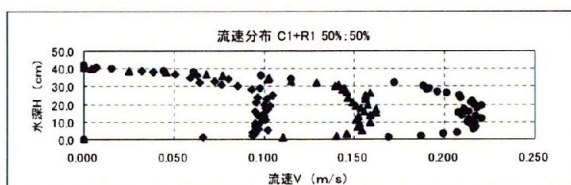
(l)



(f)



(m)



(g)

図-6(a)～(m) 流速分布の計測結果
 (◆) ($0.017\text{m}^3/\text{s}$), (▲) ($0.025\text{m}^3/\text{s}$),
 (●) ($0.033\text{m}^3/\text{s}$)

同様の方法でマンニング粗度係数を算定した。Majewski(1988)の計測結果では、相関関係Rが0.934～0.988の範囲に入っていた。

以上の流速データからManningの粗度係数を計算したものが図-7である。＜Cタイプ＞や＜Rタイプ＞の両方において模型氷の寸法が大きくなるにつれManningの粗度係数は大きくなる。また、これらの混合もその傾向を反映しているようである。＜Cタイプ＞に比較して＜Rタイプ＞の方が粗度は若干大きい傾向を示す様であるが、C3が比較的大きくなることについては再度計測が必要と思われる。

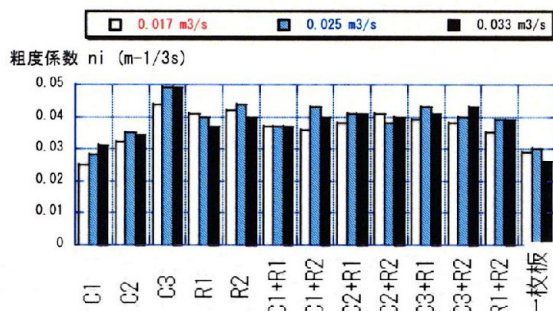


図-7 Manningの粗度係数のまとめ

オホーツク海の氷厚をおよそ0.4～2m、代表的な辺長を2m付近とし、縮尺λ (=実規模p/模型規模m) =40を仮定して模型規模のマニング粗度係数 n_m から実規模のマニング粗度係数 n_p をフルードの相似則 ($n_p = \lambda^{1/6} \times n_m$) に従って計算したものが表-2

表-2 実規模の粗度係数の推定

模型氷盤	実験データ (平均値) $n_m (m^{-1/3} \cdot s)$	$\lambda = 40$ 場合 $n_p (m^{-1/3} \cdot s)$
C1	0.028	0.052
C2	0.034	0.063
C3	0.048	0.088
R1	0.039	0.073
R2	0.042	0.078
C1+R1	0.037	0.068
C1+R2	0.040	0.073
C2+R1	0.040	0.074
C2+R2	0.040	0.073
C3+R1	0.041	0.076
C3+R2	0.040	0.075
R1+R2	0.038	0.070
一枚板	0.028	0.052

である。この縮尺は主に＜Cタイプ＞を参考にしてることから、実規模のマニング粗度係数 n_p は0.052～0.088($m^{-1/3} \cdot s$)に分布することになる。実際はサイズや形状もばらついているために混合タイプ

を参考にすると0.068～0.076($m^{-1/3} \cdot s$)に分布し、上記の範囲に入る。さらに、海底面の粗度係数 n_b が与えられると例えば(8)式¹⁶⁾と n_p から合成粗度係数 n_t が計算できる。

$$n_t = \left(\frac{n_p^{2/3} + n_b^{2/3}}{2} \right)^{3/2} \quad (8)$$

4. まとめ

各種の氷盤を用いた実験から縦流速曲線を計測し、それらは概ね対数分布で近似できる。また、木材のマニング粗度係数は、既知であるChowの提案値と計算値は概ね整合し上記の推定手法の妥当性を確認した。さらに、一枚板氷盤の結果も含め、13種類の氷群の状態に対してマニングの粗度係数を示した。この結果、氷盤のサイズが大きくなるほど、若干ではあるが粗度係数が増加する傾向を示した。また、＜Cタイプ＞、＜Rタイプ＞と形状の違いによっても粗度係数に若干の違いがある。これらの結果から、オホーツク海の氷厚をおよそ0.4～2m、代表的な辺長を2m付近とした場合の実規模の粗度係数の推定値を示した。

今後は、現地の氷盤の形状は図-1の写真にあるように様々であるため、さらに氷盤模型の形状を種々変化させた実験を行う必要がある。

参考文献

- (1) 蒔田俊輔, 古屋温美, 佐伯浩: サロマ湖における冬季間海水交換に関する研究, 第18回寒地技術シンポジウム論文報告集, pp.167-172, 2002.
- (2) 竹内 貴弘, 佐々木 幹夫: 能取湖の海水交換についての一考察, 第19回寒地技術シンポジウム論文報告集, pp.811-815, 2003.
- (3) 木岡信治, 蒔田俊輔, 山本泰司, 森昌也, 竹内貴弘: 流水群と防水施設の相互作用に関する水理模型実験, 海洋開発論文集, 第24巻, pp.1035-1040, 2008.
- (4) 平山健一: 結氷河川の水理に関する諸特性について, 第25回水理講演会論文集, pp.139-145, 1981.
- (5) 山下彰司, 吉田義一: 結氷河川の特性調査について, 第7回寒地技術シンポジウム論文報告集, pp.454-459, 1991.
- (6) 山下彰司, 福田正一, 石田亨平: 寒冷地河川における平均流速推定手法について, 第11回寒地技術シンポジウム論文報告集, pp.164-169, 1995.
- (7) 吉川 泰弘, 渡邊 康玄, 平井 康幸: 結氷河川における氷板の形成要因に関する一考察, 土木学会北海道支部, 年次技術研究発表会論文報告集, 第65号, CD, B-02, 2009.
- (8) 吉川 泰弘, 渡邊 康玄, 早川 博, 清治 真人: 氷板下における晶氷厚の連続測定, 土木学会, 水工学論文集, 第53巻, pp.1027-1032, 2009.
- (9) MAJEWSKI, W., BAGINSKA, M. and WALCZAK,

P.: "DETERMINATION OF ROUGHNESS COEFFICIENT OF THE UNDERSIDE OF ICE COVER," Proc. Of IAHR Ice Symposium, pp.122~130, 1988.

10) Michel, B.: *Ice Mechanics*, Les presses de l'Universite, Laval Quebec. 1979.

11) 水理公式集「平成11年版」, 土木学会, 1999.

12) 国松靖, 原文宏, 高橋良正, 佐伯浩, 榎国夫, 今泉章: オホーツク海沿岸部の流氷盤の大きさに関する研究, 海洋開発論文集Vol. 9, pp. 95-100, 1993.

13) 河合孝治, 木岡信治, 成田恭一, 寺島貴志, 竹内貴

弘: オホーツク海沿岸における流氷のサイズに関する現地計測結果, 寒地技術論文・報告集Vol. 24, pp. 233-236, 2008.

14) 基礎雪氷学講座IV 雪氷水文現象, 古今書院, 1994.

15) Beketsky, S.P., Astafiev, V.N. and Truskov, P.A.: Design Parameters for Hummocks and Grounded Hummocks in the Sea of Okhotsk, Proc. of ISOPE, Vol.2, pp.487-493, 1997.

16) *River and Lake Ice Engineering* edited by G.D. Ashton, WATER, 485p., RESOURCE PUBLICATIONS, 1986.