

氷海構造物の氷盤作用面積と氷荷重との関係について

竹内 貴弘*・佐伯 浩**

1. 緒 言

氷海構造物に作用する氷荷重は、主に構造物の幅、構造物の形状、氷厚、氷の強度、に依存する。最近、氷盤と構造物との作用面積が増大するに伴い、構造物に作用する貫入氷圧力（氷荷重）が非線形に減少するというスケール効果の重要性が指摘されている。また、北極海向けの氷海構造物はその安定上、大型とならざるを得ないが、大規模な氷盤貫入現地実験を実施することは困難である。このため、作用面積が大きい場合（大型構造物の場合）の氷荷重は、小規模な氷盤貫入実験から作用面積と貫入氷圧力との関係（勾配）を把握し、外挿することにより推定される。この勾配の推定には、構造物と氷盤の近傍で発生する氷盤の非同時的破壊特性と破壊氷片サイズ（独立破壊領域の大きさ）の把握が重要となる。しかし、特に、氷盤の独立破壊領域の大きさの推定に関する報告は極めて少なく、これが大型構造物に作用する氷荷重を推定するための大きな障害となっている。本研究では、サロマ湖の天然海水の強度分布についての試験結果、北海道の淡水湖水を用いた現地氷盤貫入試験時の局部氷圧力の測定結果、及び局部氷圧力を確率的に再現できる SHOT NOISE MODEL（以下、SNM）により、貫入氷圧力が作用面積の増大に伴って減少する時の勾配を推定する。また、北極海での現地観測結果（Sanderson, 1986）と比較し、独立破壊領域の大きさを逆に推定することも目的としている。

2. 現地海水氷盤の強度分布に関する実験

現地海水氷盤の強度は位置による多くのばらつきがあることが知られている（佐伯, 1981；平山ら, 1989）。このばらつきを氷荷重評価に取り込むために、測線上に採集した供試体を用いた測定結果から、供試体の採集距離と一軸圧縮強度の関係、及び一軸圧縮強度の確率分布を把握した。実験は、北海道の佐呂間湖の氷上で行った。サロマ湖養殖漁業協同組合の数百 m 沖合いに、簡易実験基地を設け、供試体の採集、実験を行った。現地の氷は、

定着氷である。実験を行った時期は 3 月上旬で、海水中には多くの気泡が存在した。実験期間中の天候はほとんどが晴れで、気温の変化も比較的少なかった。現地の氷は、上層が約 20 cm 以上にわたり積雪の影響を受けており、この部分を含めると氷厚約 80 cm 近くまで達していた。ここでは、雪氷以深の柱状氷の部分の中層、下層として供試体の採集を行った。供試体は、氷盤水平面の一様方向にわたり約 15 cm の間隔で採集した水平供試体（直径 10 cm、高さ 20 cm の円筒形）である。供試体の採集距離は、約 19 m であった。採集した供試体数は、約 200 以上である。測定項目は、海水の一軸圧縮強度（ σ_c ）、塩分量、水温、密度である。一軸圧縮試験時の氷の歪速度は、brittle range $\{1.8-2.9 \cdot 10^{-2} (1/\text{sec})\}$ とした。ここでは、下層供試体を用いた実験結果（総数 133 個）について示す。図-1 は、供試体の採集方向距離と一軸圧縮強度との関係を示している。水温は、 $-1.5 \sim -5.0$ (deg.) に分布していたために、佐伯 (1981) の報告を参考に -1.8 deg. に統一した。氷の供試体には大きな気泡（約径 1~2 cm）が含まれており、このまま実験時に用いた。このため、強度の大きい部分と小さい部分では、かなりの違いを示した。破壊様式は、せん断と縦割れであった。図-2 は、一軸圧縮強度の 3 母数対数正規分布への適合性を示している。平均値は、1.52 MPa、標準偏差は 0.447 MPa であった。変動係数は、約 29 % であった。最適な確率分布の選定には、正規分布、3 母数対数正規分布、ワイブル分布（3 母数）を用意し、 χ^2 検定（危険率 5 %）を行うと、いずれの分布も概ね近似可能であったが、近似度の最も高い以下の 3 母数対数正規分布（ f_u ）{確率密度関数 $[f_u(x)]$ } をその後の計算に用いた。

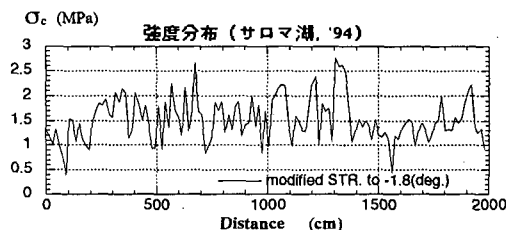


図-1 供試体の採集方向距離と一軸圧縮強度の関係

* 正会員 工博 沼水建設技術研究所地下技術研究部

** 正会員 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科

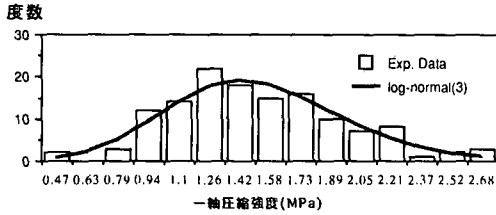


図-2 一軸圧縮強度の対数正規分布への適合性

$$f_u(x) = 1 / \{ (x-a) \times \sigma_y \} \times (2\pi)^{0.5} \times \exp \{ - (y - \mu_y)^2 / (2\sigma_y^2) \} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $y = \log(x-a)$ 、母数は、平均値 ($\mu_y = 1.21$ MPa)、標準偏差 ($\sigma_y = 0.131$ MPa)、($a = -1.86$ MPa) である。

3. 氷盤貫入試験

北海道の淡水湖水を用いた現地氷盤貫入試験から、構造物前面に圧力センサーを氷厚中心線 (TYPE-1, 9 個) と氷厚中心線の上下 (TYPE-2, 18 個) に配置 (図-3) し、貫入時の局部氷圧力を測定した。なお、各圧力センサーの水平距離は 10 cm、鉛直方向距離は 5 cm である。また、同時に、全氷力の測定も行った。構造物模型の幅 W は 1.0 m、氷厚 h は 6.5~8.8 cm である。構造物と氷盤の相対 (貫入) 速度は、全氷力が最大値を与える遷移域 (Saeki, H. and A. Ozaki (1980)) (Exp. 1, 3, 5, 6, 7, 9, 10, 11) を基準とし、これより遅い速度 (粘性域, Exp. 2) でも実験を行った。氷荷重は、構造物前面の氷盤の破壊様式に強く依存し、目視では判断出来にくい破壊特性を、各圧力センサーの時系列から推定した。図-4 には、遷移域で得られた全氷力、局部氷圧力の測定結果を示す (Exp. 3, $h=7$ cm)。図中の E3C0 は全氷力を、E3C1~E3C9 は No. 1~9 のセンサーによる局部氷圧力の測定結果を示している。全氷力は貫入に伴い初期ピーク (first peak) を示し、その後変動を伴う継続氷力が発生する領域 (subsequent range) となる。初期ピーク

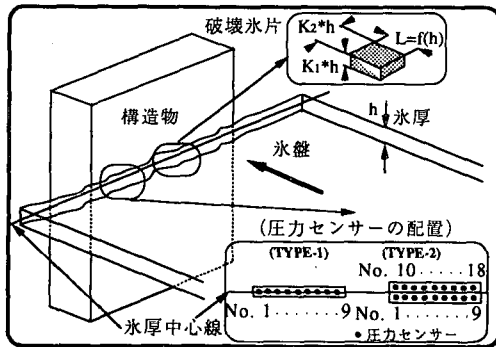


図-3 氷盤貫入試験の圧力センサー配置と破壊氷片

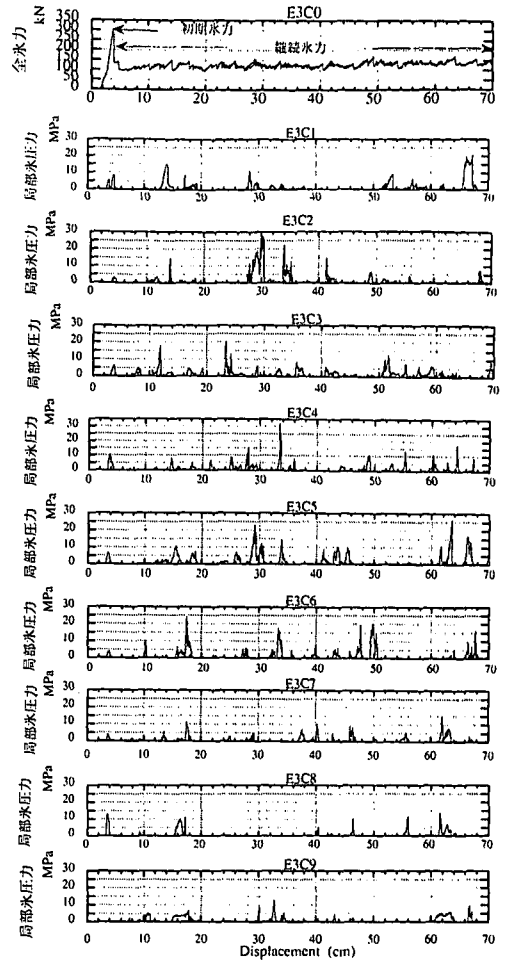


図-4 全氷力、局部氷圧力の測定結果 (Exp. 3)

(first peak) では、氷盤はほぼ同時に破壊するのに対して、継続氷力時では、局部氷圧力の時系列が異なった時間に間欠ピークを示しているように氷盤は非同時的に破壊する。図-5 には、粘性域で得られた全体氷力、局部氷圧力の測定結果を示す (Exp. 2, $h=7$ cm)。図中の E2C0 は全氷力を、E2C1~E2C9 は No. 1~9 のセンサーによる局部氷圧力の測定結果を示している。全氷力の初期ピーク (first peak) が鈍くなり、遷移域のピーク値に比較して 2/3 程度に減少する。この時、局部氷圧力もピークを与えており、構造物前面の氷盤はほぼ同時に変形している。

これらの時系列に対して、全氷力と局部氷圧力、各局部氷圧力間の相関係数を計算したものが表-1 である。氷盤の非同時的破壊時には小さい相関係数を、氷盤がほぼ同時に破壊する場合には相関係数が大きい。センサーの取り付け TYPE-1 から、継続氷力が発生する遷移域では、水平方向 (10 cm) の間隔において氷盤は非同時に破

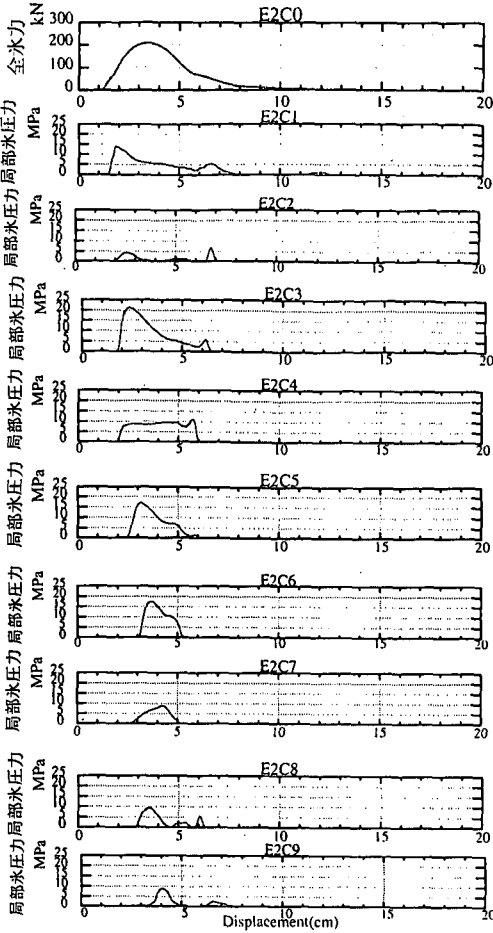


図-5 全体氷力、局部氷圧力の測定結果 (Exp. 2)

壊している。また、TYPE-2 から、継続氷力が発生する遷移域では、氷厚中心線の上下においても氷盤は非同時的に破壊している (図-6)。

以上から、遷移域における独立破壊領域の大きさは、氷厚 (鉛直) 方向では、既報告 (Saeki, H. and A. Ozaki, 1980) の上下方向の楔破壊と関連して氷厚以内であり、水平方向ではセンサー間隔と試験氷厚の関係から氷厚付近である。また、貫入方向では、局部氷圧力の間欠ピーク発生間隔 L_i と試験氷厚 h の比 L_i/h が 0.87~1.43 であることや、試験時の破壊氷片サイズの観測からも、遷移域における独立破壊領域は、氷厚と密接に関係している。

4. 独立破壊領域の氷圧力確率特性

貫入時のある時刻において、一軸圧縮強度よりも大きい局部氷圧力値を与えるセンサーの個数を n_c とし、これを氷盤と構造物の接触数とする。前報 (竹内・佐伯, 1993) では、TYPE-1 について SNM で局部氷圧力の時系列を

表-1 相関係数の計算結果

実験番号	センサー取り付け	速度領域	局部氷圧力相互間の相関係数 (上段: 平均, 下段: 範囲)		全氷力と局部氷圧力間の相関係数 (上段: 平均, 下段: 範囲)	
			First Peak Range	Subsequent Range	First Peak Range	Subsequent Range
EXP.1	TYPE1	遊移	0.516 (-0.13-0.99)	-0.008 (-0.12-0.18)	0.642 (0.09-0.93)	0.107 (0.01-0.25)
EXP.2	TYPE1	粘性	0.511 (0.05-0.94)	.....	0.728 (0.50-0.89)	.....
EXP.3	TYPE1	遊移	0.676 (0.26-0.99)	0.037 (-0.19-0.47)	0.716 (0.43-0.90)	0.200 (0.13-0.33)
EXP.5	TYPE1	遊移	.....	0.115 (0.05-0.54)	.....	0.192 (0.02-0.56)
EXP.6	TYPE1	遊移	.....	0.051 (0.003-0.15)	.....	0.137 (0.03-0.29)
EXP.7	TYPE1	遊移	.....	0.133 (0.007-0.48)	.....	0.245 (0.05-0.46)
EXP.9	TYPE2	遊移	.....	0.112 (0.001-0.94)	.....	0.106 (0.001-0.39)
EXP.10	TYPE2	遊移	.....	0.093 (0.001-0.622)	.....	0.102 (0.02-0.32)
EXP.11	TYPE2	遊移	0.411 (0.003-0.96)	0.079 (0.001-0.62)	0.557 (0.03-0.93)	0.161 (0.03-0.31)

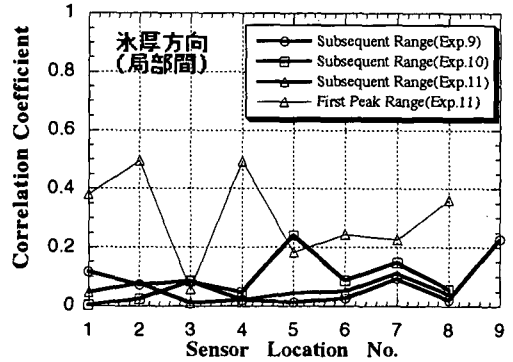


図-6 氷厚 (鉛直) 方向の相関係数 (TYPE 2)

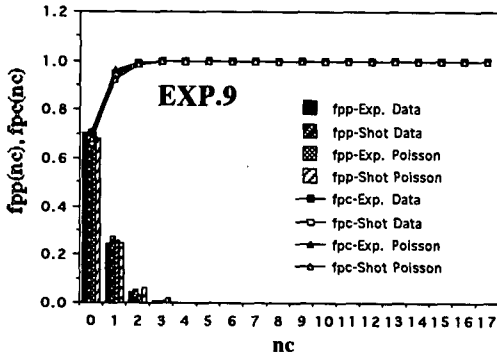
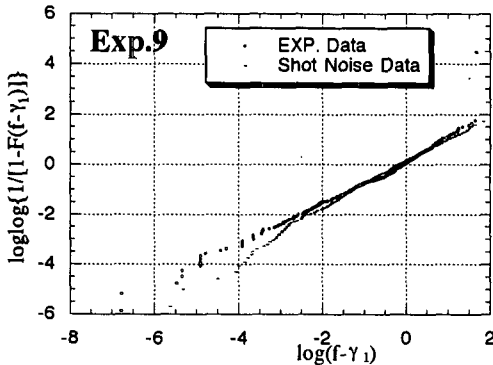
再現した。ここでは、TYPE-2 の場合について検討する。SNM は、以下の様に表される。

$$X(t) = \sum_{m=N(-\infty)}^{N(+\infty)} [y_m \times \exp\{-b(t-\tau_m)\}] \quad \cdots \cdots (2)$$

ここで、 $N(t)$ は、事象発生率 ν のポアソン過程、 y_m は時刻 τ_m における氷圧力に相当し平均 θ の指数分布に従う変数、 b は低減係数、 τ_m は氷圧力 (破壊) が発生する生起時刻である。この式により発生される $X(t)$ は、ガンマ分布に従うことが知られており、この過程のパラメータと $X(t)$ の積率の関係は、 ν 、 θ 、 b の値により推定可能となる。データ発生のための基本式は、

$$X(t+1) = e^{-b} \times X(t) + \sum_{m=N(t)}^{N(t+1)} [y_m \times \exp\{-b(t+1-\tau_m)\}] \quad \cdots \cdots (3)$$

であり、これから独立破壊領域の局部氷圧力の時系列を独立破壊領域の数 n 発生させることにより、各種の計算が可能になる。図-7 は、この n_c の値が、ポアソン分布で近似可能であることを示している (Exp. 9)。確率密度

図-7 (n_c) のポアソン分布への適合性 (Exp. 9)図-8 (f) のワイブル分布への適合性 (Exp. 11)

関数 $f_{pp}(n_c)$, 分布関数 $f_{pc}(n_c)$ を以下に示す。

$$f_{pp}(n_c) = \frac{(m)^{n_c}}{n_c!} \times \exp(-m) \quad (n_c = 0, 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

$$f_{pc}(n_c) = \sum_{n_c=0}^n \frac{(m)^{n_c}}{n_c!} \times \exp(-m) \quad (5)$$

m は、全データ数についての n_c の平均である。したがって、独立破壊領域の数 n が大きい時は、中心極限定理より正規分布で近似できる。

次に、一軸圧縮強度よりも大きい値を与える局部氷圧力を一軸圧縮強度で除して、これを $f(>1)$ とする。この f に対してワイブル分布近似が成立することを示したものが図-8である。SNM で再現したデータについてもワイブル分布近似が成立する。このワイブル分布についての確率密度関数 $f_{wp}(f)$, 確率分布関数 $f_{wc}(f)$ を以下に示す。ここで、 γ_1 は f の下限値で1とする。

$$f_{wp}(f) = (M/\alpha_1) \times (f - \gamma_1)^{(\alpha_1 - 1)} \times \exp[-\{(f - \gamma_1)^{\alpha_1}\}/\alpha_1] \quad (6)$$

$$f_{wc}(f) = 1 - \exp[-\{(f - \gamma_1)^{\alpha_1}\}/\alpha_1] \quad (7)$$

前報(竹内・佐伯, 1993)では、TYPE-1 について SNM により局部氷圧力の時系列を再現出来ることを示している。このため、TYPE-1 と TYPE-2 の両方の場合におい

て、SNM によって遷移域における独立破壊領域の局部氷圧力を再現できる。

5. 氷盤作用面積と氷圧力の関係

上記の結果と (SNM) を基に、破壊氷片 (独立破壊領域) の寸法 (図-3, $K_1 \cdot h$, $K_2 \cdot h$, $L=f(h)$) を氷厚の関数とし、各独立破壊領域の数 n だけ氷圧力の時系列を発生させ、これを組み合わせることにより貫入氷圧力の作用面積に対する勾配を検討する。ここで $L=f(h)$ の値は、SNM により発生される局部氷圧力の間欠ピークの発生間隔に関連しているため、SNM のパラメータ ν を h の関数として再現した。したがって、 n_c を発生させるための P_c の値も、 h の関数とした。ここで、作用面積 A 、独立破壊領域の大きさ A_f 、一軸圧縮強度 σ_c から以下のように確率的に貫入氷圧力 P_f を計算する。

$$\{P_f\} = \{N_c\} \times \{f\} \times \{\sigma_c\} \times \{A_f\} / \{A\} \quad (8)$$

$\{N_c\}$ は平均値 ($N \times P_c$)、標準偏差 $(N \times P_c)^{0.5}$ の正規分布に従う変数、 $\{f\}$ はワイブル分布に従う変数、 $\{\sigma_c\}$ は対数正規分布に従う変数、 $\{A_f\}$ は $(K_1 \times K_2 \times h^2)$ 、 $\{A\}$ は $(W \times h)$ である。計算には、構造物幅 W 、氷厚 h の組み合わせを、 $(W, h) = (1, 0.1), (10, 1), (50, 1), (50, 2), (100, 1), (100, 2)$ (単位: m) とし、乱数 10000 個発生させて貫入氷圧力 (P_f) を計算した。氷盤は遷移域において楔破壊となるため (Saeki, H. and A. Ozaki, 1980)、図-9 に示した様に氷厚を 3 等分して TYPE-1 と TYPE-2 の場合のパラメータを入力した場合を CASE 1、氷厚を 2 等分して TYPE-2 の場合のパラメータを入力した場合を CASE 2 として計算した。ここで、計算された P_f の小さい方から 9901 番目を 1% 超過確率値とし、一軸圧縮強度の平均値で除した無次元貫入氷圧力 NP_f と、作用面積 A との関係を調べた。 NP_f は、 A^c に比例し、回帰係数は、全て 0.999 以上であった。 (K_1, K_2) に対する c の計算結果を図-10、図-11 に示した。

実験結果では、水平方向のセンサー間隔 (10 cm) で前面の氷盤は独立に破壊していることや、試験氷厚 (h) から、 K_2 の値は、 $K_2 < 1.54$ (CASE 1), $K_2 < 1.14$ (CASE 2) となり、この時の c の値は、 -0.39 から -0.44 の領域にある。Sanderson (1986) の現地観測結果では、 -0.25 から -0.5 の間にあると推定されている。実験結果に基づく本計算結果はこの値に含まれており、氷盤の独立破壊

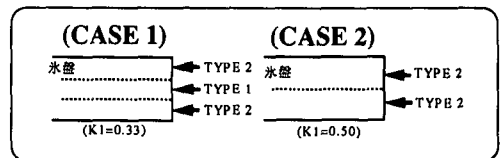
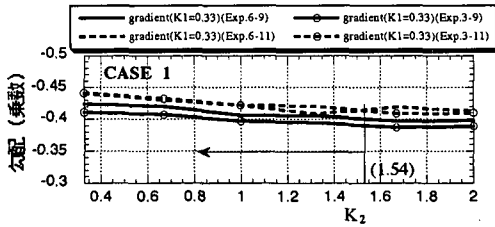
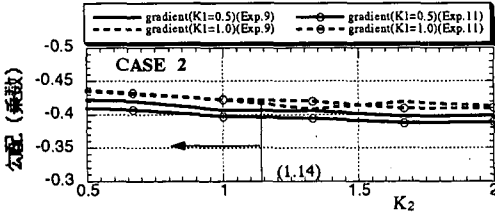


図-9 無次元貫入氷圧力計算時の外力入力タイプ

図-10 勾配 (乗数) と K_2 の関係 (CASE 1)図-11 勾配 (乗数) と K_2 の関係 (CASE 2)

領域の大きさは、氷厚（鉛直）方向では氷厚以下、貫入及び水平方向では氷厚付近であると推定される。しかし、実際の氷盤と構造物の相互作用時には、氷片のサイズは確率的に分布していることが考えられ、これらと氷力へ大きく貢献する部分の関係を把握する必要がある。また、今後は、広範囲の試験条件で得られた SNM パラメータの推定が望まれる。

6. 結 論

一様方向に採集した氷供試体を用いた本試験結果から、1) 現地海水氷盤の一軸圧縮強度は、ばらつきが大きく、変動係数で約 29 % であった。2) 現地海水氷盤の一軸圧縮強度は、対数正規分布で近似可能である。3) 現地氷盤貫入試験結果から、貫入速度が粘性域の場合には構造物前面の氷盤はほぼ同時に変形し、貫入時の構造物と氷盤の接触率は増加するが、同時に氷盤の強度は減少す

る。また、貫入速度が遷移域の場合は、氷盤は非同時的に破壊する。4) TYPE-2 の様に配置した圧力センサーの測定値から、氷盤は、氷厚（鉛直）方向では非同時的に破壊した。TYPE-1 と TYPE-2 の両方では、構造物幅（水平）方向における氷盤の破壊は、センサー間隔（10 cm）において、非同時的であった。また、これらの氷圧力の時系列は、ワイブル分布に従い、構造物との接触数はポアソン分布で近似できる。さらに、これらの氷圧力の時系列は SNM で再現できる。5) 上記の強度分布と貫入試験結果及び SNM とから、無次元貫入氷圧力は作用面積の -0.39 乗から -0.44 乗に比例するという計算結果が得られた。この勾配は、Sanderson (1986) の現地観測結果と対応することから氷盤独立破壊領域の大きさは、氷厚（鉛直）方向では氷厚以下、貫入及び水平方向では氷厚付近であると推定される。

謝辞：強度試験を実施するに当たり、サロマ湖漁業協同組合の加藤参事、藤芳研究部長に大変お世話になった。また、氷盤貫入試験では北海道大学工学部土木工学科港湾研究室の各位にお世話になりました。記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 佐伯 浩 (1981): 海水の強度試験方法の確立と強度特性に関する研究, 昭和 54, 55, 56 年度文部省科学研究費補助金一般研究 (B) 446137, p. 50.
- 竹内貴弘, 佐伯 浩 (1993): 氷盤と構造物の接触率に注目した氷盤非同時的破壊時の構造物に作用する氷荷重の評価, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 771-775.
- 平山健一, 石田宏, 堺茂樹, 笹本誠, 前田智春 (1989): 氷強度試験条件の効果と試験方法の基準化, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 678-682.
- Saeki, H. and A. Ozaki (1980): Ice forces on piles, Physics and Mechanics of Ice, Ed. Per Tryde, Springer-Berlag, pp. 342-350.
- Sanderson, T. J. O. (1986): ICE MECHANICS-risks to offshore structures, Graham & Trotman, pp. 1-253.