

岩手大学 大学院 学生員 小原 一哉
岩手大学 工学部 正会員 平山 健一

1. はじめに

氷海における構造物は水面付近の形状を傾斜させることにより氷板による水平力を大幅に減じると共に鉛直力を発生させて構造物基礎の安定性を高めることが可能である。氷板と斜面を持つ構造物との相互作用は、曲げ破壊、せん断破壊、座屈又は圧壊などの氷板の破壊モードがあるが水平に対する構造物の傾斜角が小さければ、圧壊、座屈は生じにくく、円錐型の様な曲面を持つ構造物においては曲げ破壊が支配的となる。本研究は低温室に置かれた水槽による小スケールの模型実験を行い、円錐型構造物に働く氷圧力に対する円錐傾斜角、及び円錐水際直径の効果について実験的に検討したものである。

2. これまでの研究

斜面あるいは円錐型構造物に作用する水平氷圧力の算定式は数多く提案されている。最も単純なアプローチは2次元の斜面に、氷板が押し上がる場合で近似した2次元弾性理論を用いた場合であり次式で示される。

$$H = 0.68 \sigma_f D \left(\frac{\rho_w g t^5}{E} \right)^{0.25} C_1 + z D t \rho g C_2 \quad (1)$$

$$C_1 = (\sin \alpha + \mu \cos \alpha) / (\cos \alpha - \mu \sin \alpha)$$

$$C_2 = (\sin \alpha + \mu \cos \alpha)^2 / (\cos \alpha - \mu \sin \alpha) + (\sin \alpha + \mu \cos \alpha) / \tan \alpha$$

α : 構造物の傾斜角 t : 氷厚 σ_f : 氷板の曲げ強度 v : 氷板の移動速度 E : 弾性係数
 μ : 構造物と氷板との摩擦係数 ν : 氷板のポアソン比 D : 構造物の直径 z : フリーボード
 ρ : 氷板の密度 g : 重力加速度 ρ_w : 水の密度

最初の項は氷板の破壊に要する力 ICE BREAKING FORCE を、第2項は氷片が斜面を押し上げるために必要な力の成分 RIDE-UP FORCE を示している。また、構造物前面に発生するクラックの幅 l は構造物幅 D より大きいとして(1)式の D を l で置き換えた式も提案されている。ここで $l = 0.25 \pi^2 l_c$ であり、氷板の破壊幅の長さは、氷板の特性によって決定され構造物幅 D には無関係となっている。

$$l_c = [E \cdot t^3 / 12 \cdot \rho_w \cdot g (1 - \nu^2)] \quad (2)$$

RALSTON (1977) は PLASTIC LIMIT ANALYSIS により円錐型構造物に働く水平、鉛直氷圧力の理論計算式を導いている。本計算式は、BREAKING FORCE と構造物表面を一層の氷片が覆うことによる RIDE-UP FORCE を仮定して導かれており、理論的には優れているアプローチといえよう。次に、実験的な研究としては AFANASEV 等 (1971) は、3 cm 程度の氷厚を持つ塩水氷を用い、角度 30° 、 45° 、 60° の小型の円錐について水平力を測定して、次に示される方程式を導いた。

$$H = \sigma_f t^2 S_x \tan \alpha / 1.93 l_c \quad (3)$$

ここで、 S_x は円周方向クラックの長さで、次式で示される。

$$S_x = 1.76 (R / 2 + l_c / 4) \quad (4)$$

本公式において角度の効果は $\tan \alpha$ で示され、構造物径の影響は(4)式で表現されている。EDWARDS & CROASDALE (1976) の実験は、 45° の角度を持ち、摩擦係数が約 0.1 の円錐を用いて行われており、その結果は次式で与えられた。

$$H = 1.6 \sigma_f t^2 + 6.0 \rho_w g D t^2 \quad (5)$$

BREAKING FORCE を示す第1項には D の効果は表われず、RIDE-UP FORCE が第2項に示されているが、角度、

構造物径などの実験範囲はせまい。その他、諸外国においては KORZHAVIN の公式、USSR SN 76/66、CSA S6 1974、CANADIAN LIGHTHOUSE PRACTICE 等多くの公式が使われている。

近年、我が国においても室内あるいはサロマ湖などにおいて、三井造船、日本鋼管、石川島播磨重工、北大などが実験を行っており、その成果の一部は既に発表されている。しかしながら上記の実験、理論公式に基づいた氷圧力の計算値は、摩擦係数、構造物角度、直径など計算条件によって互いに異なっており、適切な計算式を選ぶことは難しく、これらの効果についてさらに検討が必要な現状である。次節以下では淡水氷、尿素氷を用いて、水平力に及ぼす円錐の角度、直径の効果について行った実験結果を述べてある。

3. 実験装置と実験方法

岩手大学工学部土木工学科低温実験室は、内部寸法が 3.8 × 1.8 × 2.1 m で天井全面には熱交換フィンが設置され、室内全体が一様に冷却されるようになっており、室温は約 -20℃ まで冷却が可能である。実験室内には FIG-1 に示される寸法を持つ木製の水槽が置かれ、側面は発泡スチロールにより断熱してある。水槽側壁には 2 本の円形レールが設置されており、そのレール上を 4 個のベアリングを取り付けてある台車が変速推進機により一定速度で移動する。本実験では台車のスピードを 0.8 cm/s とした。台車には模型構造物と、それに作用する氷圧力の水平方向、および鉛直方向分力の測定用に荷重計が取り付けられている。

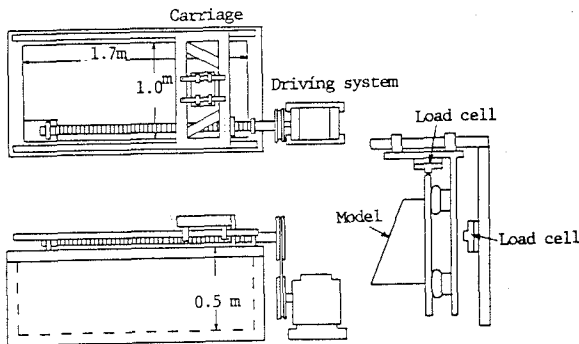


Figure 1
Ice tank, Carriage,
Force measuring unit

	傾斜角 α	底部直径 D _B (cm)	水線直径 D (cm)	上部直径 D _t (cm)	フリーボード Z (cm)	摩擦係数 μ
平山・赤松 (1977)	50° 60° 70° 80°	19.1 16.4 11.6 11.2	17.1 14.7 10.4 10.7	4.0 6.0 4.8 8.0	9.0	0.00
平山・小原 (1983)	"	"	"	"	"	0.05
平山・小原・及川 (1984)	60°	14.5 16.5 22.5 30.5 40.5	11.5 13.5 19.5 27.5 37.5	4.5 6.5 12.5 20.5 30.5	9.0	0.04

Table 1

実験に用いた模型構造物の諸元を TABLE 1 に示す。傾斜角の効果を調べるために用いた構造物は鉄製であり、表面は研磨されている。一方、幅の効果を求めた構造物は木製で、表面は木工用ラッカーを塗布してある。

	氷の種類	冷却温度 (℃)	氷板枚数	表面結晶径	Seeding 法	氷厚 t (cm)	曲げ強度 σ_f (kg/cm ²)	弾性係数 E (kg/cm ²)	ウォーム アップ
平山・赤松 (1977)	水道水を用いた淡水氷	-10.0	約 50枚	約2mm以下	Wet-Seeding	0.65 ~0.8	7.10	20000	有
平山・小原 (1983)	0.6%の尿素氷	-12.5	約 30枚	"	"	2.7 ~3.1	0.29	250	有
平山・小原・及川 (1984)	"	-9.0	約 30枚	"	"	1.9 ~2.3	0.40	260	有

Table 2

TABLE 2 には模型氷の特性を示してある。ウェット・シーディングは、圧縮空気を用いたスプレーガンにより霧を実験室内に発生させ、室内の冷気でこれをすばやく氷結させて水面に落下させ、毎回の実験の結晶径を一定とし均一な氷質を得ると共に構造物径と結晶径の比を自然状態に近づけ、模型実験における寸法効果をなくする目的で行った。模型氷の曲げ強度と弾性係数の測定は、氷板3枚に1回の割合で実施し、TATINCLAUX&HIRAYAMA (1981) に示される方法を用いて種々の桁長の片持ち梁試験の結果より計算した。氷板は、結晶方向がランダムである上層と柱状構造を持つ下層との2層構造をなしている。目標氷厚を持つ氷板の形成後、室内の気温を

上昇し氷板をウオーム・アップして、強度を低下させ一定の強度を得てから実験を開始した。

4. 円錐型構造物に作用する氷圧力の次元解析

円錐型構造物に氷板が作用する場合、その水平力Hには氷板の破壊に関与する成分H₁と破壊した氷片が構造物表面を押し上げるための成分H₂からなると考えられる。

H₁、H₂に関するパラメーターは次の様に示される。

$$H_1 = f_1(\alpha, t, \sigma_c, v, \mu, \nu, E, D, g) \quad (6)$$

$$H_2 = f_2(\alpha, t, z, \mu, D, \rho, g) \quad (7)$$

従って、次元解析よりそれぞれについて次式が得られる。

$$H_1 / \sigma_c t^2 = F_1(D/l_c, \alpha, \mu, V/\sqrt{gD}) \quad (8)$$

$$H_2 / \rho_i g t D^2 = F_2(\alpha, \mu, z/D) \quad (9)$$

いま、前節の始めに述べたように2次元的な状態を考えると、水平力Hと鉛直力Vの比は斜面の角度 α と摩擦係数 μ より次式の無次元量 ξ で与えられる。

$$H/V = \xi = (\sin\alpha + \mu\cos\alpha) / (\cos\alpha - \mu\sin\alpha) \quad (10)$$

さらに、破壊における重力の影響が小さいものとする、水平力Hは次式のような形で表わすことができる。

$$H = \sigma_c t^2 \xi \cdot F_1(D/l_c) + \rho_i g t D^2 \xi \cdot F_2(z/D) \quad (11)$$

次節以下で述べる本実験では、第2項の効果が小さい場合につき第1項の ξ 、D/l_cのHに及ぼす影響について実験を実施するものである。

5. 実験結果

実験は TABLE- 2 にあるように淡水氷による平山、赤松の実験(1977)と尿素氷による平山、小原(1983)、さらに平山、小原、及川(1984)の実験に分けられる。1977年の実験では約50枚の淡水氷板について実施され、氷が透明であるためクラックの長さ、位置などが明瞭であったので、氷板との最初のコンタクトが100%となるように氷板を整形して貫入を開始し、これらについて測定を行った。

破壊のパターンは、他の文献に見られるように、貫入が進むと氷板が構造物面に沿って押し上げられ、4~6本の半径方向のクラックが生じ

TABLE- 3 に示すように角度が増すにしたがってクラック長Lは増大した。この間、構造物に作用する力は増加し円周方向クラックが発生すると同時に最大値に到達する。さらに、TABLE-3 には円錐模型の直径D、氷との接触面より円周方向クラックまでの平均距離X_c、平均的な氷板の特性長l_cを示した。AFANASEV 他によれば、X_c/l_c=0.78 としているが TABLE- 3 の値はこれよりやや小さい。

$\alpha(^{\circ})$	L(cm)	D/2(cm)	X _c (cm)	l _c (cm)	X _c /l _c
50	31	8.55	15.0	28.3	0.53
60	37	7.35	15.1	28.0	0.54
70	44	5.18	16.8	28.9	0.58
80	50	5.34	16.1	29.7	0.54

Table 3

記録より得られた1つのピークに対する水平力Hと鉛直力Vの比はTAN α にほぼ等しく、淡水氷による実験では摩擦係数は無視できる程度に小さいことがわかった。

尿素氷における実験(1983)は、約30枚の氷板について行われた。氷の曲げ強度は淡水氷の1/20程度におとし、氷厚は3~5倍の約3cmとして構造物への作用力の測定を行った。この場合に水平力Hと垂直力Vの比は、必ずしもTAN α に一致せず淡水氷の実験時に比べて構造物表面が粗くなっており摩擦係数 μ を測定して、(10)式を用いて表わすことができた。

垂直力Vを曲げ強度 σ_c 、氷厚tを用いて無次元化し、円錐の傾斜角 α との関係を求めるとFIG-2に示されるように垂直成分は角度によらずほぼ一定で次式のように近似できた。

$$V / \sigma_c t^2 = 1.7 \tan\alpha \quad (12)$$

一方、水平力は FIG- 3 のように角度と共に増加し、次式のように示される。

$$H / \sigma_f t^2 = 1.6 \tan (\alpha + \phi) \quad (13)$$

ここで、 $\phi = \tan^{-1} \mu$ で表われ、摩擦係数 μ が増加すると角度に対する増加の割合は大きくなることになる。また、 $\xi = \tan (\alpha + \phi)$ を用いてさらに無次元化すると FIG-4 に示されるように $H / \sigma_f t^2 \xi$ は角度に
関係なく、(12) 式とほぼ等しい係数を持つ次式が得られた。

$$H / \sigma_f t^2 \xi = 1.6 \quad (14)$$

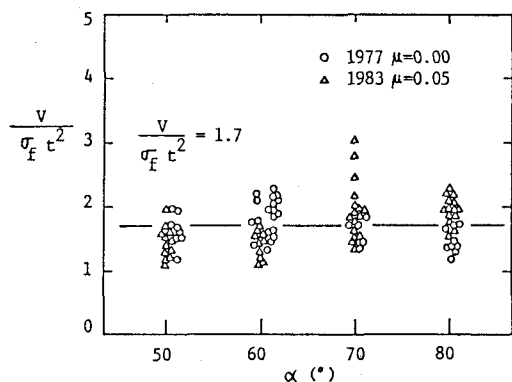


Figure 2

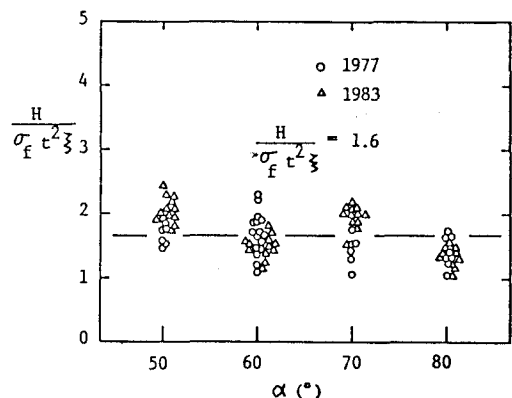


Figure 4

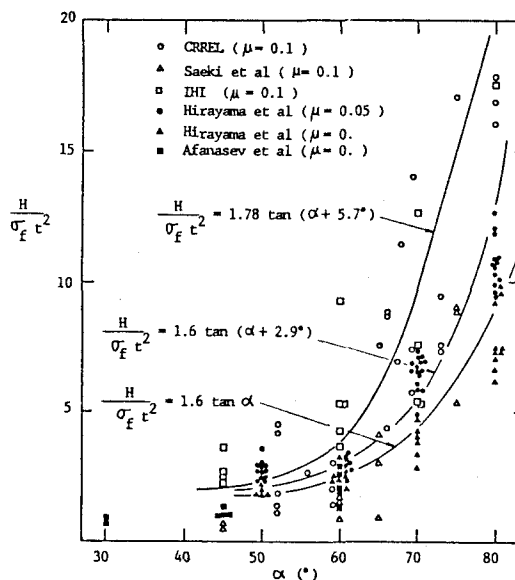


Figure 3

構造物直径 (cm)	半径方向クラック長 X_c (cm)	特性長 l_c (cm)	X_c / l_c
14.5	12.0	20.4	0.59
16.5	14.5	20.4	0.71
22.5	9.1	20.4	0.45
30.5	14.0	20.4	0.67
40.5	12.5	20.4	0.61

Table 4

構造物の幅の効果を調べるために尿素氷による実験(1984)は、約 30 枚の氷板について行われた。氷の曲げ強度は約 40 KPa、氷厚は D/l_c の広い範囲をカバーするために約 2 cm とした。構造物幅は 14.5~ 40.5cm の間で 5 種類の状態について氷圧力水平成分の測定を実施した。本実験において氷板は構造物の形状と一致するように整形しなかったため接触係数は 1.0 以下であり、構造物が氷板中に入入している状態(ペネトレーションモード)の実験に相当している。本実験による観察では幅の増加に共なって半径方向クラックの数は増加するが、構造物より破壊面に至るクラックの長さ X_c は TABLE-4 のようにほぼ一定となり、 X_c / l_c の値は 1976 年の実験結果に近い。また最大水平力に対応する円周クラックの形状は、構造物前面の持つ円弧とは必ずしも同心円上になく、構造物中心に対して非対称なものも多く、構造物周辺の氷板の破壊は全幅にわたって同時には発生しないことが確かめられた。無次元化した水平力 $H / \sigma_f t^2 \xi$ と構造物幅 D / l_c の関係は 1977, 1983, 1984 年の全てのデータを用いて FIG- 5 に示され、ややばらつきが見られるがその関係は (15) 式のように与えられ、本実験による角度、構造物の幅の効果を考慮した水平力算定式が求められた。

$$H / \sigma_f t^2 \xi = 2.43 (D / l_c)^{0.34} \quad (15)$$

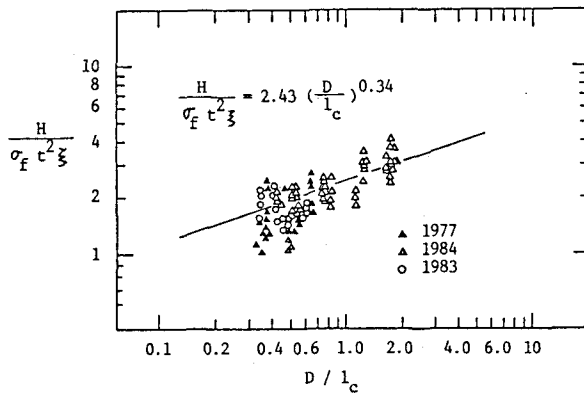


Figure 5

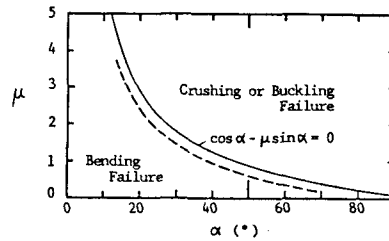


Figure 6

6. 実験結果の考察

本研究の結果は構造物表面の摩擦係数が小さく、フリーボードが低い RIDE-UP FORCE が全水平力の 10 % 以下 (RALSTON の式による推定) の実験値によって得られたものであり、(11) 式における BREAKING FORCE が主体を占める場合に相当している。氷板の破壊に対する無次元鉛直力 $V / \sigma_f t^2$ は角度にかかわらず一定値を示した。鉛直力は氷板と構造物との相互作用がペネトレーションモード、あるいは氷板と構造物の接触時の状態に相当するインデンテーションモードによって異なるが、本研究においては半無限氷板縁への集中載荷に相当するインデンテーションモードの場合に V が小さいことが定性的に認められた。一般に、角度が急になるほど、また摩擦係数が大きくなるほど氷板中の圧縮応力が増加し V は大きくなると考えられるが、本実験では必ずしもこの傾向が見られなかったのは構造物表面が平滑であったためと思われる。

水平氷圧力に対する角度の効果については他にも数多く実験が行われており、種々の実験値の概要は TABLE-5 に示されている。これらは FIG- 3 のようにプロットされるが、実験条件に違いはあるがほぼ角度の増加と共に急激に大きくなり、 $H \propto \tan \alpha$ の関係が認められる。また、摩擦係数の増加と共に関係式が右に移動する傾向が認められる。また、角度が一定以上大きくなると座屈あるいは圧壊が発生するが、本実験では全ての実験条件において場合において曲げ破壊が生じ、座屈破壊や圧壊は認められなかった。2次元の斜面の場合、破壊に要する力の水平、鉛直成分の比は (10) 式で示され、 $\cos \alpha - \mu \sin \alpha = 0$ の条件は曲げ破壊と圧壊を区別する第一義的な条件と考えられる。実際には RIDE-UP FORCE による力成分も存在し点線のような条件式が予想されるが、本実験に用いられた構造物の摩擦係数は小さく FIG- 6 においても十分曲げ破壊の領域にある。実際の人工島などにおいては斜面部に捨て石やコンクリートブロックなどで護岸する場合がありますが、摩擦係数は必ずしも 1 以下とは限らず曲げ破壊と圧壊のモードの区別は設計上重要となる。

	曲げ強度 σ_f の 範囲 (kg/cm^2)	弾性係数 E の 範囲 (kg/cm^2)	D の範囲 (cm)	Z の範囲 (cm)	α の範囲 (°)	μ の範囲	実験場所	氷厚の範囲 (cm)
EDWARDS & CROASDALE	0.01 ~ 0.41	1.45 ~ 460	25 ~ 100	不明	45	0.03	室内	1.65 ~ 6.77
I H I	0.18 ~ 0.40	10000 と仮定	98 ~ 108	不明	45 ~ 80	0.1	サロマ湖	12 ~ 28
NKK	0.24	390	30	12	45	0.03	室内	4.2
CRREL	0.32 ~ 1.28	不明	10.3	21	52 ~ 87	0.1	室内	2.9 ~ 6.3

Table 5

構造物の幅に対する直立柱の場合 D の 0.5 乗に比例するとされているが、円錐型構造物に対する本実験の場合はこれより小さな $D^{0.34}$ が得られた。これまでに提案された実験公式においても D の効果について調べられたものは、わずかに AFANASEV のみであり、前述したように D に比例するとしたもの、 D に関係なく氷の特性長に比例する氷片の寸法に関係するとしたもの、物体の表面積に関係するとするものもあり、その取扱いは概念的なものであった。直立柱の圧壊の場合は、氷板の破壊による氷片の寸法が小さく構造物の全幅にわたって生じやすいが、円錐のような曲面を持つ構造物に生ずる曲げ破壊は、1 点の載荷によってしかも構造物前面の全域にわたって発生し、破壊片の寸法も大きい、従って水平力の D に対する従属性は半径方向クラックの長さ X_c 、すな

わち氷板の特性と構造物直径Dの関連によって異なり $D/X_c \ll 1$ の場合は構造物の幅は水平力に独立となり、一方Dが X_c に比べて十分に大きい場合には水平力はDに比例することが予想される。(15)式におけるDの効果は $0.4 < D/X_c < 1.8$ の範囲、つまり D/X_c が約 0.6 ~ 3.0 の間における結果である。本算定式は、RALSTON の計算式による BREAKING FORCE 成分とよく適合しているが、幅が広く、フリーボードの大きい RIDE-UP FORCEが卓越する構造物においてはこれらの大きさを考慮する必要がある。

7. あとがき

本実験では、BREAKING FORCE に対する角度、構造物直径の効果を実験的に導いたが、今後さらに RIDE-UP FORCE を含めた計算式、人工島のように D/X_c が大きい場合のDの効果、斜面角度、摩擦係数ともおよび破壊モードの関係の検討、構造物前面に破壊した氷片が堆積することによる氷圧力の増加など、さらに広い実験条件について検討が必要であろう。

【参考文献】

- 1) AFANASEV, V.P. et al : ICE PRESSURE ON INDIVIDUAL MARINE STRUCTURES, IN ICE PHYSICS AND ICE ENGINEERING, ISRAEL PROGRAM FOR SCIENTIFIC TRANSLATION, 1973
- 2) BERCHA, F.G. AND DANY, J.V. : INVESTIGATION OF ICE FORCE ON A CONICAL OFFSHORE STRUCTURES, MARINE SCIENCE COMMUNICATIONS, 1975
- 3) CARSTENS, T. : WORKING GROUP ON ICE FORCES ON STRUCTURE, CRREL SPECIAL REPORT 80-2 1980
- 4) EDWARDS, R.Y. AND CROASDALE, K.R. : MODEL EXPERIMENTS TO DETERMINE ICE FORCES ON CONICAL STRUCTURES, SYMPOSIUM ON APPLIED GLACIOLOGY, 1976
- 5) HAYNES, F.D. et al : ICE FORCES ON MODEL BRIDGE PIERS, CRREL REPORT 83-19, 1983
- 6) HIRAYAMA, K. : PROPERTIES OF UREA-DOPED ICE IN THE CRREL TEST BASIN, CRREL REPORT 83-8, 1983
- 7) HIRAYAMA, K. AND AKAMATSU, H. : EXPERIMENTAL STUDY OF ICE FORCES ON CONICAL STRUCTURES TECH. REPORT, IWATE UNIV., VOL.16, 1982
- 8) HIRAYAMA, K. AND OBARA, I. : EXPERIMENTAL STUDY OF ICE FORCES ON A CONICAL STRUCTURE, 7TH OCEAN ENGINEERING SYMPO. 1984
- 9) 平山、小原、及川 : 円錐型構造物に働く氷圧力-幅の効果 土木学会東北支部技術研究発表会 昭和60年3月
- 10) HYSING, T. et al : ICE LOADS ON MARINE STRUCTURES, MARINE STRUCTURES AND IN ICE, A JOINT NORWEGIAN RESEARCH PROJECT, REPORT NO. : 79-02. AUGUST. 1979
- 11) 三井造船 : 流水力測定現地実験
- 12) 中島 他 : 海洋構造物に作用する氷圧力の研究, 日本鋼管技報 NO.83, 1979
- 13) OJIMA, T. MATSUSHIMA, Y AND YAMASHITA, S. : SOME CONSIDERATIONS ON THE DESIGNING OF ARCTIC STRUCTURES, PROC. OF 4TH INT.OMAE SYMPO. FEB, 1985
- 14) NEVEL, D.E. : THE ULTIMATE FAILURE OF FLOATING ICE SHEETS, PROC. OF IAHR ICE SYMPO. 1972
- 15) RALSTON, T.D. : ICE FORCE DESIGN CONSIDERATIONS FOR CONICAL OFFSHORE STRUCTURES, POAC. 1977
- 16) 佐伯 他 : 海洋構造物に作用する海水の力に関する研究, 第26回海岸工学講演会論文集 1979
- 17) SHIBATA, K. et al : THE METHOD OF PREDICTING ICE INDUCED FORCES AGAINST MARINE STRUCTURES, POAC 81, 1981
- 18) TATINCLAUX, T.C. AND HIRAYAMA, K. : DETERMINATION OF THE FLEXURAL STRENGTH AND ELASTIC MODULUS OF ICE FROM IN-SITU CANTILEVER-BEAM TESTS, COLD REGIONS SCIENCE AND TECHNOLOGY, 6, 1982
- 19) YOSHIMURA, N. AND KAMESAKI, K. : THE ESTIMATION OF CRACK PATTERN ON ICE BY THE NEW DISCRETE MODEL, PROC. OF IAHR ICE SYMPO. 1981