

北極海の実氷を用いた海水の強度に関する実験的研究

竹 内 貴 弘*・ルイス・シャピロ**

1. 緒 言

北極海に建設される氷海構造物の設計においては、氷荷重が支配外力となる。氷荷重とは氷の破壊荷重であるため、その評価にあたっては氷と構造物相互作用時の氷の破壊モードの推定が必要不可欠である。直立構造物においては、これまで、氷は構造物との接触面において破壊し、氷厚が一様と仮定されてきた。しかし、実海域では一年・多年圧力氷脈 (pressure ice ridge) の存在 (Kovacs, 1983; 図-1 参照)、氷上に不規則に分布する雪の断熱効果 (Barnes, 1979)、夏期の多年氷の融解等により氷厚は非常に不規則となっている。このため氷は氷厚の最小部で破壊する可能性がある。特に、北極海に建設される大型の氷海構造物の設計氷荷重は、多年圧力氷脈によって与えられる可能性がある。本研究では、北極海の実氷を用いた①氷厚非一様氷の一軸圧縮試験 (COMP) と②曲げ強度試験 (BEND) を行い、氷厚非一様性を考慮した氷荷重評価を行った。また、有限要素法による応力計算も行ったのでこれらの結果を報告する。

2. アプローチ

2.1 実験場所と供試体

実験は、アラスカの北極海 (Chukchi sea) 沿岸の街バローにある UIC/NARL (前海軍北極海研究所、現在バロー住民により運営) の低温室を利用して行った。海水供試体は、Chukchi sea の定着氷 (landfast ice) (図-2) から切り出した。海水上部約 5(cm) は細粒径のスラッシュ氷、これより深さ 25(cm) までは相対的に等方・等質でグレインサイズ変化の小さい柱状氷、これより下部は粗雑でかつ異方性の強い氷であった。このため、実験に用いた氷は深さ 5~25(cm) の部分である。海水供試体は現地から、大きさ (40×30×30 cm) のブロックをチェーンソーにより切り出し、ソリで低温室まで運んだ。その後、バンドソーにより上下を刈り込み、深さ 8~20(cm) の部分を実験に用いた。

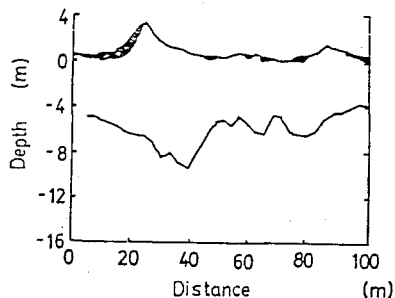


図-1 多年圧力氷脈の氷厚分布 (Kovacs, 1983)

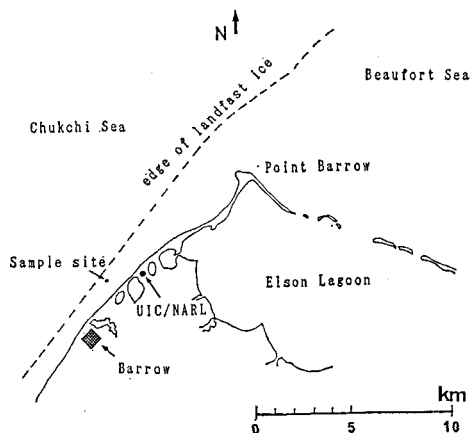


図-2 実験及び供試体採集 (Sample site) 場所

(COMP) の実験供試体は、まず 7.5×15×5 cm に切込み、最終的にジグで下面が正弦曲線となるように成形した (図-3)。正弦曲線の振幅は、四通りに変化させた。(BEND) の実験供試体は、図-4 の様に寸法、 $w=6.4$, $b=6.4$, $l_1=32$, $l_2=17$ (cm) とした。また、氷の成長方向に平行 (type 1) と垂直 (type 2) の二種類の載荷方向の供試体を用いた。

2.2 実験装置と実験方法

(COMP) の実験装置は 図-3 に示した通りである。実験では、一定速度でテーブルを通してピストンにより供試体を上方へ加力した。上下の main platen (upper,

* 正会員 M. S. 清水建設(株)技術研究所

** Ph. D アラスカ大学教授 地球物理学研究所

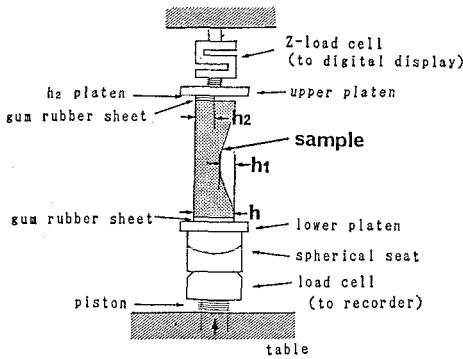
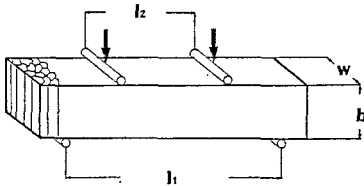


図-3 実験装置 (COMP) 及び成形後供試体

type 1



type 2

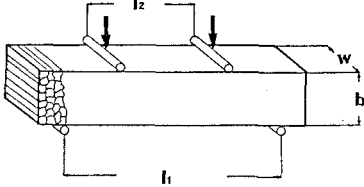


図-4 実験供試体 (BEND)

lower) と供試体との間にはゴム板 (厚さ 0.2 cm) をかませ、供試体と platen を一体化させた。また、球座を用いることにより载荷中に供試体端部に発生する曲げモーメントを最小限に抑えた。main platen とゴム板の間にはアルミニウム性の厚さ 1 cm、奥行き (供試体奥行き) 7.5 cm の small platen を用いて载荷幅 (h_2) を変化させた。下部 main platen は、直径 15 (cm)、厚さ 5 (cm) の鋼性で、上部 main platen は、直径 10 (cm)、厚さ 5 (cm) のアルミニウム性である。ロードセルによる出力はチャートレコーダーへ、Z-ロードセルによる出力はデジタル表示した。载荷能力は 88800 (N) であり、最大载荷速度は 0.44 (cm/分) であるため、供試体高さ 15 (cm) から供試体全体の平均歪速度は $4.9 \times 10^{-4} (\text{sec}^{-1})$ となりこの値を実験に用いた。図-3 に示された供試体の h_1 の寸法は 0, 1.25, 2.5, 3.75 (cm) の四通り、载荷幅 h_2 の寸法も 1.25, 2.5, 3.75, 5.0 (cm) の四通りに変化した。実験中の供試体の氷温は -18°C と一定に保った。 h_1/h (0, 0.25, 0.5, 0.75) と h_2/h (0.25, 0.5, 0.75, 1.0) の各組み合わせ 16通りの実験条件におい

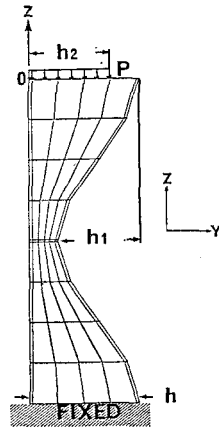


図-5 有限要素分割図

て各 4 ケースの実験を行い、全体で 64 ケースとした。各実験中の供試体のクラック形成や変形の様子はビデオにより収録した。実験後の氷破片は、塩分量測定用に使用した。

(BEND) の実験の応力速度は、0.58~1.48 (MPa/s) の範囲であった。試験回数は、全 9 ケースであった。塩分量は各実験後の氷片から測定した。

2.3 有限要素法による応力解析

図-5 に計算に用いた有限要素分割図を示す。2次元弾性応力解析とし、平面歪条件を用いた。計算時の弾性定数は 6 (GPa)、ポアソン比は 0.3 とした。要素の境界条件として、下端は固定端、上端は YZ 方向の変形を訴す場合を (2DFR)、Z 方向のみの変形を訴す場合を (1DFR) とした。载荷圧縮力を (P)、氷厚最小部上下面の応力 σ としこれらの比 (σ/P) から応力集中係数 K (top, bot) を評価した。载荷圧縮幅 h_2 、粗度振幅 h_1 をパラメータとして変化させた。計算には FEM program "ADINA" (ADINA R & D INC, 71 Elton Ave., Watertown, MA 02171, USA, 1984) を用いた。

3. 実験結果と考察

(COMP) 実験時には氷の破壊荷重 (ピーク値) F が測定され、この値から圧力 P を評価した。 σ_c を一軸圧縮強度、 σ_b を曲げ強度とすると、氷厚最小部の上下面における応力集中係数 K (top, bot) は σ_c/P もしくは σ_b/P となる。ここで、引張り強度は曲げ強度に等しいと仮定した。 σ_c か σ_b を用いるかは実験時の供試体の変形様式により決定した。また、各供試体中のブラインの氷全体に占める体積率 ν_b (ppt) は (Frankenstein and Garner, 1967),

$$\nu_b = 0.001 \cdot S \cdot (0.53 - 49.2/T) \quad (1)$$

となる。ここで、 S は塩分量 (ppt)、 T ($^\circ\text{C}$) は氷温である。 σ_c の値は $h_1/h=0$, $h_2/h=1.0$ の時から評価 (平

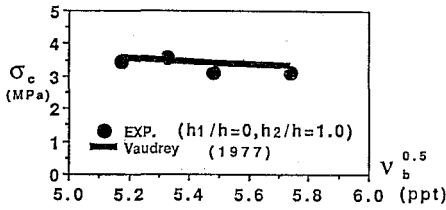


図-6 ブラインの体積と圧縮強度との関係

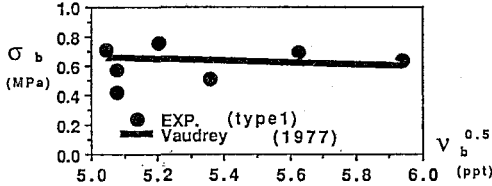


図-7 ブラインの体積と曲げ強度との関係

均 3.3025 MPa) した。図-6 にその実験結果を示す。図中の Vaudrey (1977) の実験は歪速度 $10^{-3}(\text{sec}^{-1})$ の条件下で行った結果である。 σ_b は (BEND) 試験の結果から 図-7 の様な結果を得た。本試験時の平均曲げ強度は 0.5889(MPa) であった。図-6, 7 から, Vaudrey (1977) の北極海での実測結果と本実験結果とはよく一致する。

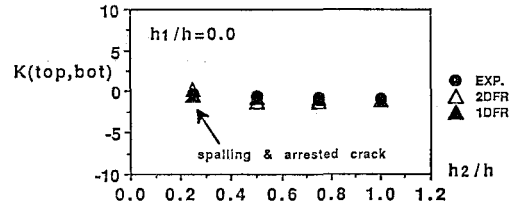
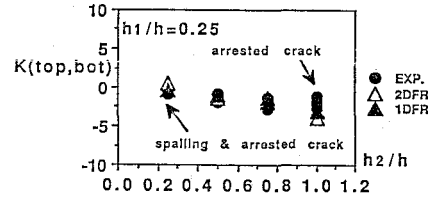
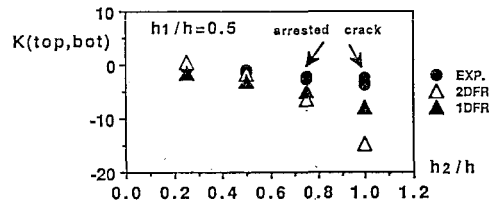
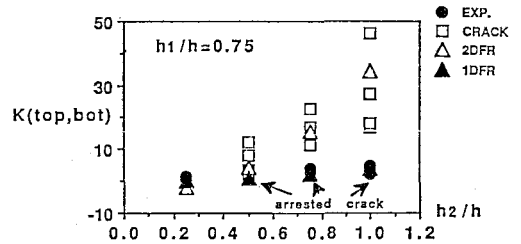
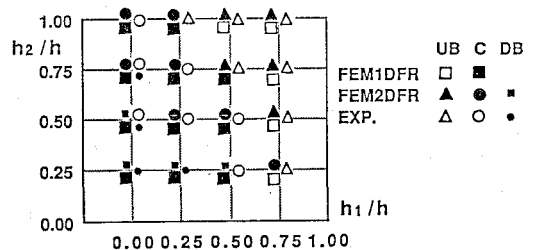
以下に, 粗度振幅比 (h_1/h)・載荷圧縮幅比 (h_2/h) と応力集中係数 $K(\text{top}, \text{bot})$, 氷の変形様式, 破壊モード, 破壊荷重との関係を示す。

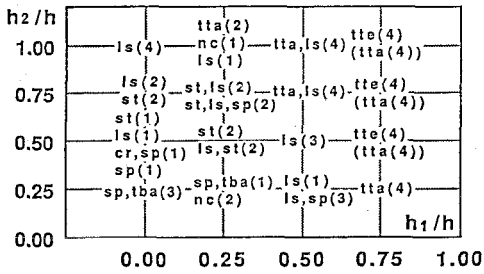
3.1 応力集中係数 $K(\text{top}, \text{bot})$

応力集中係数 $K(\text{top}, \text{bot})$ と h_1/h , h_2/h の関係に関する実験・計算結果を 図-8, 9, 10, 11 に示す。各図は, 一定な h_1/h の値に対しての h_2/h と $K(\text{top}, \text{bot})$ の関係を示しており, 図-12, 13 の鉛直線に沿った変形様式, 破壊モードに対応している。

図-8 ($h_1/h=0$) に示された結果は厚さが様な氷の場合であり, h_2/h の増加にともなって変形様式が下方曲げから圧縮に変化する場合に対応し, $K(\text{top}, \text{bot})$ は非常に小さい。この場合, (2DFR), (1DFR) の計算結果と実験結果は非常によく一致しており, 各境界条件の計算結果の範囲内となるが, どちらに強く依存するかは未定である。(2DFR) の計算結果では K_{bot} の値は $h_2/h < 0.5$ の範囲では常に引張側となるが, K_{top} の値はいつも圧縮側となる。これは氷厚最小部下面からの引張クラックが停止する場合に対応している。しかし, この粗度振幅比の場合は $K(\text{top}, \text{bot})$ の値が小さく, また, 供試体及び試験条件の僅かな違いがこの条件の破壊様式の違いに影響を及ぼしている。

図-9 ($h_1/h=0.25$) の場合は, h_2/h の増加にともなって変形様式が下方曲げから圧縮に変化する場合に対応

図-8 $K(\text{top}, \text{bot})$ と h_2/h の関係 ($h_1/h=0.0$)図-9 $K(\text{top}, \text{bot})$ と h_2/h の関係 ($h_1/h=0.25$)図-10 $K(\text{top}, \text{bot})$ と h_2/h の関係 ($h_1/h=0.5$)図-11 $K(\text{top}, \text{bot})$ と h_2/h の関係 ($h_1/h=0.75$)図-12 供試体の変形様式と h_1/h , h_2/h の関係

図-13 供試体の破壊モードと h_1/h , h_2/h の関係

し, $K(\text{top}, \text{bot})$ は減少していく。(h_2/h) が 0.25 の時は, 引張りクラックが氷厚最小部下面から発生し, $h_2/h = 1.0$ の場合は上面から発生する。どちらにおいても引張りクラックが圧縮領域で停止する破壊モードが現れる。(2 DFR) の計算結果では, $h_2/h < 0.5$ の時 $K \text{ bot}$ は引張りとなるが $K \text{ top}$ はいつも圧縮となり $h_2/h = 1.0$ に近づくにつれてゼロとなる。この場合も $K(\text{top}, \text{bot})$ の値は非常に小さく, 僅かの試験条件の違いが破壊モードの変化に影響を与える。したがって ($h_1/h = 0, 0.25$) の条件下では 図-13 に示したように幾種もの破壊モードが観察されている。

図-10 ($h_1/h = 0.5$) では, (h_2/h) の増加に伴い変形様式が下方曲げ, 圧縮, 上方曲げに変化する場合に対応し, $K(\text{top}, \text{bot})$ は大きく変化する。計算と実験結果はその傾向において一致するが, 上方曲げ変形に起因した引張りクラックが停止する領域になると実験による $K(\text{top}, \text{bot})$ の絶対値は計算結果に比較して小さくなる。

図-11 ($h_1/h = 0.75$) では, h_2/h の増加に伴い変形様式は圧縮から上方曲げに対応し, $K(\text{top}, \text{bot})$ は非常に大きく変化する。実験の初期において非常に小さな荷重で引張りクラックが入り, その後引張りクラックが停止し, 更に荷重の増加を必要とする場合が観察された。このため, 初期引張りクラックが入った場合と最終破壊の場合の二通りの結果を図に示した。2 DFR の計算結果と初期引張りクラックが入った場合はよく対応し, 最終破壊の場合は 1 DFR に対応している。Hallam ら (1987) は, 氷の歪速度 10^{-2} sec^{-1} , $h_2/h = 1$ の条件下で実験を行っており, $0.44 < h_1/h < 0.75$ の時には上方曲げに起因した引張破壊となり, 引張りクラックの停止は観察されていない。本研究との違いは, 載荷速度と載荷条件の違いによるものと推定される。

以上, 計算と実験結果は傾向においてよく一致するが, 引張りクラックが停止する領域では最終破壊に更に載荷力を必要とし, 計算結果による $K(\text{top}, \text{bot})$ の絶対値は実験値に比較して小さくなった。

3.2 氷の変形様式・破壊モード

図-12 に, 供試体の変形様式の結果を示す。変形は,

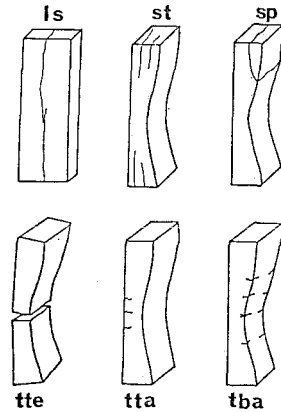


図-14 供試体の破壊モードの説明

h_1/h と h_2/h の相互関係により上方曲げ (UB 縮), 圧 (C), 下方曲げ (DB) の三つに分類される。実験結果と (2 DFR) とは変形様式の変化する領域を除き非常によく一致する。1 DFR では下方曲げ変形領域がすべて圧縮となる。これは, この領域の実験時の破壊モードが複数になることまた, 下方曲げ変形が上方曲げ変形ほど顕著にならないことに関連している。ここで, 計算による変形様式は ((UB) では ($K \text{ top} > 0$, $K \text{ bot} < 0$), (DB) では ($K \text{ top} < 0$, $K \text{ bot} > 0$), (C) では ($K \text{ top} < 0$, $K \text{ bot} < 0$) の条件で分類した。

破壊モードに関する結果を図-13 に示す (図中の数字は観測回数であり, 各条件では欠測時を除き合計 4 回となる)。また, 図中の記号の説明は 図-14 に示したように分類される。既ち, (ls-longitudinal splitting), (st-splitting), (sp-spalling), (tba-arrested tension crack at the base of sample), (tta-arrested tension crack at the top of sample), (tte-explosive fracture), (nc-no crack) となる。多くの実験において最終的には縦割れ (ls-longitudinal splitting) が形成されていた。これらの破壊は荷重の増加に伴い供試体端面の摩擦力の増大に伴って発生する。(UB) の領域では splitting, spalling 破壊は観察されず, 通常は氷厚最小部上面の引張り破壊となるが, 引張りクラックが停止する領域もあった。引張りクラックの停止は (DB) の領域でも観測された。Hallam ら (1987) の実験結果は ($h_2/h = 1.0$ 一定) の場合であり, h_1/h の増大に伴い crushing と splitting から bending への移行を観察している。しかし, 引張りクラックの停止は観察されていない。

3.3 破壊荷重

図-15 には, 各実験データの無次元化破壊荷重 (F/F_{max}) と氷厚変化 h_1/h の関係を h_2/h の値に応じて示す。この場合, F_{max} とは氷厚一定 $h_1/h = 0$ かつ h_2/h

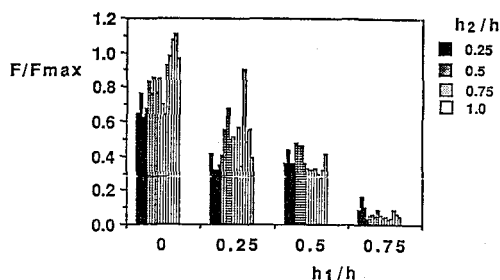


図-15 F/F_{max} と h_1/h の関係

$=1.0$ の時の破壊荷重である。ここでは平均値の 12384 (N) を用いた。図-15 から、 h_1/h の値が増大するにつれ無次元化氷荷重 (F/F_{max}) は大幅に減少する傾向となる。既ち、最小氷厚が減少するに伴い伝達可能な力は減少する。Hallam ら (1987) の研究結果においても h_1/h の増大に伴って破壊荷重は大幅に低減し、本研究結果と同様の傾向を示す。本研究においては、 h_2 の値は実海域の一年氷厚と密接な関連があるため、 h_2 を変数として考慮した。しかし、本実験結果からは、 h_1/h の値が小さい時は h_2/h の増加とともに F/F_{max} も増大するが、 h_1/h の値が大きくなると h_2/h の変化は F/F_{max} に対して顕著な影響を及ぼさなかった。

北極海では、多年氷の平均氷厚は 6m、一年氷の最大厚さは 2m であるため、 $h_1/h=0.667\sim 1.0$ 、 $h_2/h=0.0\sim 0.333$ 程度となる。したがって、図-15 から $F/F_{max}=0.3\sim 0.4$ 程度となり、氷荷重が大幅に低減する。ここでは、二次元の実験結果であるため、今後は三次元の実験結果とその数値計算が必要である。

4. 結 論

本研究結果から、氷厚非一様氷の強度特性として次のことが分かった。

①氷厚非一様性を表す粗度振幅比と載荷圧縮幅比が応力集中係数の評価に大きく影響を与え、これらの値が増大するにつれて応力集中係数の絶対値が大きくなる。また、引張りクラックが停止する場合を除き、実験と計算結果とは一致する。

②氷の変形様式は粗度振幅比と載荷圧縮幅比の値に応

じて上方曲げ・下方曲げ・圧縮の三通りに分類される。

③氷の破壊モードとしては、粗度振幅比、載荷圧縮幅比の値に応じて (ls-longitudinal splitting), (st-splitting), (tba-arrested tension crack at the base of sample), (tta-arrested tension crack at the top of sample), (tte-explosive fracture), (nc-no crack) 等各種の破壊となる。下方変形領域では、複数の破壊モードまた、同一試験条件下で各種の破壊モードが発生し、いつも下方曲げ変形に起因した引張り破壊とはならない。また、上方・下方曲げ変形に起因する引張りクラックがいつも最終破壊になるとは限らず、圧縮側で停止したため更に載荷力が必要とする領域があった。

④破壊荷重と氷厚変化の関係においては、 h_1/h の値が増大するにつれ無次元化破壊荷重 (F/F_{max}) は大幅に減少する傾向となった。既ち、最小氷厚が減少するに伴い伝達可能な力は減少していく。この結果より、氷盤と構造物の接触部分における氷盤の破壊によってのみ氷荷重が限定されるのではなく、浮氷盤の氷厚の薄い所での破壊も起こることと、それにより氷荷重も低減することが明かとなった。

以上、これらの結果は二次元の条件に基づくため、今後は三次元的な実験とその数値解析が必要である。また、載荷圧縮幅比は一年氷の厚さに対応しているために、氷海構造物の氷荷重評価においては、実海域の氷厚分布に関する詳細な測定が必要である。

参 考 文 献

- Barnes, P. W., E. Reimnitz, L. J. Tomil and H. R. Hill (1979): Fast ice thickness and snow depth relationships related to oil entrapment potential, Prudhoe Bay, Alaska, Proc. 5th POAC, pp. 1205-1225.
- Frankenstein, G. E., and R. Garner (1967): Linear relationship of brine volume and temperature from -0.5 to -22.9°C for sea ice, Journal of Glaciology, No. 6, pp. 943-944.
- Hallam, S. D., N. Jones and M. W. Howard (1987): The effect of subsurface irregularities on the strength of multiyear ice, Proc. 6th OMAE, Vol. 4, pp. 235-238.
- Kovacs, A. (1983): Characteristics of multiyear pressure ridges, Proc. 7th. POAC Vol. 3, pp. 173-182.
- Vaudrey, K. D. (1977): Ice engineering study of related properties of floating sea ice sheets and summary of elastic and viscoelastic analyses, Technical Report, r860, US Naval Civil Engineering Laboratory, pp. 1-81.