

多年氷の変形様式と応力伝達について

Deformation and Stress Transmission of Multiyear Ice Floe

竹内 貴弘*・ルイスシャピロ**

Takahiro Takeuchi and Lewis Shapiro

ABSTRACT

In this paper, we presents the results of calculations to examine the role of variable thickness in limiting the strength of multiyear ice floe. We model a multiyear ice floe with bottom roughness both in the form of sine curve and in two beam sections of variable thicknesses with/without an elastic foundation. It is shown that the roughness amplitude and thickness of the floe over which compressive loads are applied to the boundary are the most important variables in determining the force which can be transmitted through the floe to an offshore structure in Arctic waters.

Keywords , multiyear ice floe, offshore structure, Arctic waters

1. はじめに

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。これまで直立構造物に作用する氷荷重は構造物と氷の接触面における破壊荷重とされ、また、氷厚も一様と仮定され評価されてきた。北極海域の氷海構造物の設計氷荷重評価においては、多年氷によって与えられる荷重の推定が不可欠となる。多年氷の氷厚は非一様であるため、その氷厚最小部で破壊する可能性がある。本研究では、多年氷を単純化した有限要素モデル及び弾性支承有無の変断面梁モデルにより理想化し、多年氷の氷厚最小部上下面の応力集中係数 $K(top, bot)$ とこれに影響を与えると考えられる各種パラメータとの関係を調べ、多年氷が伝達可能な力を推定したのでこの内容を報告する。

2. 計算法

図-1に、北極海の冬季の典型的な氷厚分布を示す(Sanderson 1988)。氷厚は、open leadや多年圧力氷脈の存在等により非常に不規則となっている。ここでは、特に氷荷重評価にとって重要な多年氷を以下の様にモデル化し、氷厚最小部の応力集中係数を評価した。

2.1 有限要素モデル (FEM)

図-2に、多年氷を単純化した二種類のFEM modelを示す。計算は、平面歪条件下の二次元弾性応力解析とした。下面は正弦曲線により氷厚の変化を示し、その波長(l)、振幅(h_1)、載荷荷重幅(h_2)、最大氷厚部(h)、水深(D)、載荷圧縮力(P)、浮力の効果はバネ要素により示した。氷と構造物の境界の氷凍着有無をFIXED・ROLLER条件、overhang/ice footを示すため接触厚さは上・下から(h_4)・(h_3)、氷厚最小部上下面の応力を σ とし、比(σ/P)を $K(top, bot)$ (引張を正)とした。構造物を鉛直面としたのは、傾斜面を有する場合でも破壊された氷盤はrubble pileとして構造物前面に積み重なるためである。FIXED・ROLLER条件による K_{top} 値の差はほとんど無いことが予備計算から知られたため、ほとんどの計算結果はROLLER条件を用いていた。また、弾性定数値(E)は4~8GPaと変化させて計算したが K_{top} は僅か2.2%の変化であったために、ほとんどの計算においては8GPaを用いた。計算にはFEMプログラム"ADINA"(ADINA R&D Inc, 71 Elton Ave., Watertown, MA 02171, USA., 1984)を用いた。

2.2 弾性支承有無の変断面梁モデル(NOBUOY, BUOY)

図-3(a), (b)に示した様に、多年氷は厚さの違う二つの梁の組合せにより表されると仮定した。

(a) 浮力の無い場合 (NOBUOY, 図-3(a)参考)

モーメントの釣合より

$$M_1 + M_2 - F(h_2 - h + h_1)/2 = 0 \quad \text{---(1)}$$

載荷圧縮力(F)

$$F = h_2 \cdot l \cdot P \quad \text{---(2)}$$

二つのbeam接合部の角度が同一という条件から

$$M_1 l_1 / 2(l_1 E_1) = M_2 l_2 / 2(l_2 E_2) \quad \text{---(3)}$$

ここで、 $l_1 = h_3/12$, $l_2 = (h - h_1)^3/12$, であり、 $l_1/l_2 = LS$, $E_1/E_2 = ES$, $h_1/h = X$, $h_2/h = Y$ とする。

* 正会員 清水建設(株)技術研究所 (135 東京都江東区越中島3-4-17)

** アラスカ大学地球物理学研究所 (Geophysical Institute, UAF)

beam2(薄い方のbeam, 氷厚 $h-h_1$)側の曲げモーメントに起因する応力と軸力に起因する圧縮応力とから上面, 下面の応力集中係数 K_{top} , K_{bot} は次のように計算される。

$$K_{top} = [3(Y^2 - Y + XY)LS(1-X)^2 - \{LS(1-X)^3 + ES\}Y] / [(1-X)\{LS(1-X)^3 + ES\}] \quad \text{---(4)}$$

$$K_{bot} = [-3(Y^2 - Y + XY)LS(1-X)^2 - \{LS(1-X)^3 + ES\}Y] / [(1-X)\{LS(1-X)^3 + ES\}] \quad \text{---(5)}$$

特に, $LS \rightarrow \infty$ ($L_1 \gg L_2$)とすると, 次のようになる。

$$K_{top} |_{LS \rightarrow \infty} = \{3Y^2 + 4XY - 4Y\} / (1-X)^2 \quad \text{---(6)}$$

$$K_{bot} |_{LS \rightarrow \infty} = \{-3Y^2 - 2XY + 2Y\} / (1-X)^2 \quad \text{---(7)}$$

(b)浮力がある場合 (BUOY, 図-3(b)参考)

弾性支承上両端ヒンジのbeamが圧縮力 F により押されている場合を考える (図-4)。このときの支配方程式は

$$EI(d^4y/dx^4) + F(d^2y/dx^2) + ky = 0 \quad \text{---(8)}$$

ここで, k は浮力に起因する弾性支承定数。この式を次の境界条件で解くと以下のようなになる (Hetenyi, 1946)。

$$y|_{x=0} = y|_{x=1} = 0, \quad -EI(d^2y/dx^2)|_{x=0} = -EI(d^2y/dx^2)|_{x=1} = M_0 \quad \text{---(9)}$$

(case 1) $F < 2(kEI)^{0.5}$

$$y = M_0 \{ \sinh(\beta x') \sin(\alpha x) + \sinh(\beta x) \sin(\alpha x') \} / [2EI\alpha\beta \{ \cosh(\beta l) + \cos(\alpha l) \}] \quad \text{---(10)}$$

(case 2) $F = 2(kEI)^{0.5}$ ($\alpha' = \{(F/2/EI)\}^{0.5}$, $\beta = 0$)

$$y = M_0 \{ x' \sin(\alpha' x) + x \sin(\alpha' x') \} / [2EI\alpha' \{ 1 + \cos(\alpha' l) \}] \quad \text{---(11)}$$

(case 3) $F > 2(kEI)^{0.5}$ ($\beta' = \{(F/4/EI) - (k/4/EI)\}^{0.5} = i\beta$)

$$y = M_0 \{ \sin(\beta' x') \sin(\alpha x) + \sin(\beta' x) \sin(\alpha x') \} / [2EI\alpha\beta' \{ \cos(\beta' l) + \cos(\alpha l) \}] \quad \text{---(12)}$$

ここで,

$$\alpha = \{(k/4/EI) + (F/4/EI)\}^{0.5} \quad \text{---(13)}$$

$$\beta = \{(k/4/EI) - (F/4/EI)\}^{0.5} \quad \text{---(14)}$$

次に beam1(h), beam2($h-h_1$)の組合せを考慮し, モーメントの釣合より

$$M_1 + M_2 - F(h_2 - h + h_1)/2 + \int_0^{l_1/2} x_1 y_1 k(dx_1) - \int_{l_2/2}^{l_2} (l_2 - x_2) y_2 k(dx_2) = 0 \quad \text{---(15)}$$

二つのbeam接合部の角度が同一という条件から

$$M_1 l_1 / (I_1 E_1) = M_2 l_2 / (I_2 E_2) \quad \text{---(16)}$$

これらの式よりbeam2の上下面の最大応力集中係数 K_{top} , K_{bot} を計算すると

$$K_{top} = 3(1-X)Y(Y-1-X) / \{Z(1-X)^3 - Y/(1-X)\} \quad \text{---(17)}$$

$$K_{bot} = -3(1-X)Y(Y-1-X) / \{Z(1-X)^3 - Y/(1-X)\} \quad \text{---(18)}$$

$$Z = \{1 + f - ad(1 + e)/(bc)\} \quad \text{---(19)}$$

ここで, a, b, c, d, e, f の値は付録に示した。また, 計算に用いた多年氷に関するパラメーター及び変数はCoxら(1984), Cox and Richter-Menge(1985), Kovacs(1983)の測定結果を参考に決定した(表1)。

3. 計算結果

3-1. Hallamら(1987)の実験結果との比較

Hallamらの室内実験は、淡水柱状氷(氷温 -10°C)の図-5に示された形状・寸法のサンプルを使い, 平均氷盤歪速度は 10^{-2}sec^{-1} の条件下で圧縮したものである。図-6には, Hallamら(1987)の実験結果と計算結果(FEM, NOBUOY)との比較を示しており, 本計算の有効性を確認した。以下に各種パラメーターと K_{top} , K_{bot} 値との計算結果を示す。

3-2. (h_1/h)の効果

図-7に K_{top} に与える h_1/h の計算結果(FEM, NOBUOY, BUOY)を示す。 h_1/h が増大するにつれて K_{top} の値が大きくなる傾向は, FEM, NOBUOY, BUOYともに同様となる。また, BUOY, NOBUOYの違いによる K_{top} の差はほとんどない。ここで, 多年氷の引張強度を1MPaと仮定すると, 例えば, $h_1/h = 0.3$ は $K_{top} = 2$ に対応しこの時氷が伝達可能な強度は0.5MPa, $h_1/h = 0.7$ の場合は $K_{top} = 20$ に対応しこの時の強度は僅か0.05MPa程度となる。また, 北極海のCoonら(1989)の多年圧力氷脈縁部においてlead iceから圧力氷脈が形成される時の現地観測では, 圧力氷脈内の平均圧縮応力は0.035MPa, leadの曲げ強度は0.862MPaと測定され, よって $K_{top} = 24.6$ となる。氷厚計測では, 圧力氷脈(160cm)とlead ice(38cm)となり $h_1/h = 0.766$ で図-7よりおよそ $K_{top} = 25$ 程度と見積られる。よって, 計算結果と現地測定データは非常によく一致することが分かる。また, 図-8に, $h_2/h = 0.667$ の時の h_1/h と K_{top} , K_{bot} の関係を示す。 h_1/h の増大にともない K_{bot} も K_{top} と同様にその絶対値は大幅に増大することが分かる。

3-3. (1)の効果

図-9は, K_{top} に与える(1)の効果を示したものである。図から(1)の K_{top} への影響は小さい事が分かる。大き

な h_1/h に対して K_{top} は(1)の増加と共に変化するが(FEM, BUOY, NOBUOY), K_{top} の値が大きいため強度を評価する上では影響が少ない。また、小さな h_1/h に対して K_{top} は(1)に影響を受けないが(BUOY, NOBUOY), FEMでは多少変動し特に $K_{top}(h_1/h)$ の値が小さいときには(1)に敏感に反応する。例えば、 $K_{top}=2$ の時は氷強度0.5MPa, $K_{top}=4$ の時は0.25MPaとなり50%程度の強度減少となるが、 $K_{top}=60$ では0.0167MPa, $K_{top}=80$ では0.0125MPaとなり大きな差がない。即ち、氷の強度は K_{top} の逆数に比例するため、 $K_{top}(h_1/h)$ の値が小さい時は(1)の変化が氷の強度に影響を与える。

3-4. (h_2/h)の効果

図-10には $K(top, bot)$ に与える h_2/h の効果を示す。 h_2/h が減少するにつれて K_{top} も減少し、その後 K_{top} が負となり圧縮応力が作用することとなる。これは応力集中に影響を与える曲げモーメントがゼロに成ることを示し、この時には曲げ破壊は起こらない。Hallamらは $h_2/h=1$ と一定のみ考慮しているため、この効果にはふれていない。しかし、載荷幅 h_2 は一年氷の厚さに起因すると考えられるため、変数として考慮する必要がある。また、 K_{bot} も h_2/h の変化に敏感に反応し、この傾向はFEM, BUOY, NOBUOY共に非常によく一致している。

3-5. (h_3/h), (h_4/h)の効果

氷と構造物の接触面にice foot, overhangが形成されるときには、その境界は完全な接触とはならない。これが K_{top} に与える影響を考慮した結果を図-11に示す。 K_{top} は $h_3/h, h_4/h$ の変化に殆ど影響を受けずほぼ一定の値となる。しかし、接触面積が減少するために局部荷重が増大する。この場合、載荷荷重と接触面の局部荷重は釣り合わなければならないため、局部荷重が氷の強度に達するとice foot/overhang部の氷は破壊し構造物前面に堆積する。その後、完全接触($h_3/h, h_4/h=1$)の状態となる。

3-6. 深さ方向の弾性定数値(E)変化の効果

氷の弾性定数(E)はブラインの体積に依存して変化し(Cox and Weeks 1988), 通常氷盤の深さ方向に行くに従いは小さくなる。このため氷盤の深さ方向へEの値を6GPa-5GPa, 6GPa-3GPa, 6GPa-2GPaと変化させて計算した結果を図-12に示す。ここで図2の左側境界の水平方向の歪を一定とするため載荷圧縮力を調節した。図-12から計算結果に大きな差が無いことが分かり、E一定として計算した場合が安全側となった。

3-7. 弾性定数比 $ES=E_1/E_2$ の効果

氷厚の最小部($h-h_1$)と最大部(h)において氷の物性が変化するときにはそれらの比として弾性定数の違いを考慮する必要がある。例えばopen leadと多年氷、一年氷と一年氷脈の関係がこれに当たる。図13にその計算結果を示す。 K_{top} は ES の増加とともに減少していく。即ち厚い氷の方が薄い氷より($E_1>E_2$)が大きくなるにしたがい K_{top} の値が小さくなる。

4. 変形様式と破壊荷重

$K(top, bot)$ は、 h_1/h と h_2/h に大きく影響を受けることが計算結果から知られた。この結果から氷の変形様式は、 h_1/h と h_2/h に応じて図-14の様に表せる。ここで、 $K_{top}>0, K_{bot}<0$ の時は上方曲げ(upward bending), $K_{top}<0, K_{bot}<0$ の時は圧縮(compression), $K_{top}<0, K_{bot}>0$ の時は下方曲げ(downward bending)変形とした。Hallamらは実験結果より、 $h_2/h=1.0$ の時の破壊モードとしては、bending(B)が卓越しているが h_1/h の減少にともないsplitting(S), crushing(C)へと変化することを観察している。この点は図-14の結果と傾向が一致する。しかし、 h_1/h が小さくなると単一の破壊モードになるとは限らず、また、 h_2 は実海域では一年氷の氷厚に対応すると考えられ、 h_2/h の値を変化させた実験が今後必要と考える。

また、多年氷の伝達可能な力(F)は、その氷厚最小部上下面の応力が多年氷の圧縮強度 σ_c 及び引張り強度 σ_t に達した時に限定されたとした場合、次のように計算される。

$$F = (\sigma_{c,t}) \cdot h_2 \cdot l / (K_{top, bot}) \quad \text{---(20)}$$

ここで、Coxら(1984), Cox and Richter-Menge(1985)の研究結果を参考にとると、多年氷の圧縮強度 σ_c は10MPa及び引張り強度 σ_t は1MPa程度となり、 $h_1/h=0, h_2/h=1.0, h=6m$ の時の最大伝達圧縮力を F_{max} とすると、 F/F_{max} と $h_1/h(=X), h_2/h(=Y)$ の関係は図15のようになる。 h_1/h が増大するにつれ、 F/F_{max} は大幅に減少することが分かる。

5. 結論

以上の計算結果(FEM, NOBUOY, BUOY)から、多年氷の強度に関して次のことが知られた。

- ①Hallamら(1987)の研究結果の多年氷の氷厚非一様性が強度低下に大きく寄与していることを計算結果により確認した。
- ②強度効果を調べるために用いた応力集中係数 K_{top} , K_{bot} と各種パラメータとの関係を調べた結果、 K_{top}, K_{bot} は粗度振幅比(h_1/h)・載荷荷重幅(h_2/h)に敏感に影響を受け、(h_1/h)・(h_2/h)が増大するに伴い K_{top} , K_{bot} の絶対値も増大する。
- ③粗度波長(l)の K_{top} に与える影響は、粗度振幅比(h_1/h)が小さい時を除き無視できる。

④氷盤と構造物の接触条件($h_3/h, h_4/h, \text{Roller, Fixed}$)・氷の特性を表す弾性定数値(E)は K_{top} の評価において無視出来る。

⑤弾性定数(E)の深さ方向変化が K_{top} に与える程影響は小さく、 E が一定として計算した方が安全側の値となった。

⑥ K_{top} は $ES=E_1/E_2$ に影響を受け、厚さが違う氷相互のタイプが違う場合には考慮する必要がある。

⑦多年氷の変形様式は(h_1/h)と(h_2/h)の値に応じて、上方曲げ、圧縮、下方曲げ変形に分類される。また、多年氷の圧縮強度及び引張り強度が与えられると伝達可能な力は、 h_1/h の増大、 h_2/h の減少にともない減少する。

⑧以上の計算結果から、実海域に建設される氷海構造物の氷荷重評価においては、氷と構造物接触面の氷の破壊荷重よりも、構造物からある距離の位置にある薄い氷の破壊荷重の方がはるかに小さくなる可能性があることから今後は実海域の氷厚分布に関する詳細な測定が望まれる。

参考文献

- Coon, M.D., Lau, P.A., Bailey S.H. and Taylor, B.J., 1989, "Observations of ice floe stress in the eastern Arctic," Proc. of 10th POAC, vol. 1, pp.44-53
- Cox, G.F.N., Richter-Menge, J.A., Weeks, W.F., Mellor, M. and Bosworth, H., 1984, "Mechanical properties of Multi-year sea ice Phase I: Test Results," CRREL REPORT 84-9
- Cox, G.F.N. and Richter-Menge, J.A., 1985, "Tensile strength of multiyear pressure ridge sea ice samples," Proc. of 4th OMAE, vol. 2, pp.186-193
- Cox, G.F.N. and Weeks, W.F., 1988, "Profile properties of undeformed first-year sea ice," CRREL REPORT 88-13
- Hallam, S.D., N.Jones and M.W.Howard, 1987, "The effect of subsurface irregularities on the strength of multiyear ice," Proc. of 6th OMAE, vol.4, pp.235-238
- Hetenyi, 1946, Beam on elastic foundation, the University of Michigan press.
- Kovacs, A., 1983, "Characteristics of multiyear pressure ridges," Proc. of 7th POAC., vol. 3, pp.173-182
- Sanderson, T.J.O., 1988, Ice Mechanics-Risk to Offshore Structures, Graham and Trolman Ltd., London, U.K.

付録

$$(\text{type } 1) \quad P < 2(kE_2 l_2)^{0.5} / h_2 \quad \text{---(21)}$$

$$\begin{aligned} a &= -\beta_2 \sin(\alpha_2 l_2) - \alpha_2 \sinh(\beta_2 l_2) \\ b &= E_2 l_2 (2\alpha_2 \beta_2) \{ \cosh(\beta_2 l_2) + \cos(\alpha_2 l_2) \} \\ c &= \alpha_1 \sin(\beta_1 l_1) + \beta_1 \sin(\alpha_1 l_1) \\ d &= E_1 l_1 (2\alpha_1 \beta_1) \{ \cosh(\beta_1 l_1) + \cos(\alpha_1 l_1) \} \\ e &= \int k x_1 \{ \sinh(\beta_1 x_1') \sin(\alpha_1 x_1) + \sinh(\beta_1 x_1) \sin(\alpha_1 x_1') \} / \\ &\quad [2\alpha_1 \beta_1 E_1 l_1 \{ \cosh(\beta_1 l_1) + \cos(\alpha_1 l_1) \}] (dx_1) \\ f &= \int k(l_2 - x_2) \{ \sinh(\beta_2 x_2') \sin(\alpha_2 x_2) + \sinh(\beta_2 x_2) \sin(\alpha_2 x_2') \} / \\ &\quad [2\alpha_2 \beta_2 E_2 l_2 \{ \cosh(\beta_2 l_2) + \cos(\alpha_2 l_2) \}] (dx_2) \end{aligned}$$

$$(\text{type } 2) \quad P = 2(kE_2 l_2)^{0.5} / h_2 \quad \text{---(22)}$$

$$\begin{aligned} a &= -\sin(\alpha_2' l_2) - \alpha_2' l_2 \\ b &= E_2 l_2 (2\alpha_2') \{ \cos(\alpha_2' l_2) + 1 \} \\ c &= \alpha_1 \sin(\beta_1 l_1) + \beta_1 \sin(\alpha_1 l_1) \\ d &= E_1 l_1 (2\alpha_1 \beta_1) \{ \cosh(\beta_1 l_1) + \cos(\alpha_1 l_1) \} \\ e &= \int k x_1 \{ \sinh(\beta_1 x_1') \sin(\alpha_1 x_1) + \sinh(\beta_1 x_1) \sin(\alpha_1 x_1') \} / \\ &\quad [2\alpha_1 \beta_1 E_1 l_1 \{ \cosh(\beta_1 l_1) + \cos(\alpha_1 l_1) \}] (dx_1) \\ f &= \int k(l_2 - x_2) \{ x_2' \sin(\alpha_2' x_2) + x_2 \sin(\alpha_1 l_2' x_2') \} / \\ &\quad [2\alpha_2' E_2 l_2 \{ \cos(\alpha_2' l_2) + 1 \}] (dx_2) \end{aligned}$$

$$(\text{type } 3) \quad 2(kE_2 l_2)^{0.5} / h_2 < P < 2(kE_1 l_1)^{0.5} / h_2 \quad \text{---(23)}$$

$$\begin{aligned} a &= -\beta_2' \sin(\alpha_2 l_2) - \alpha_2 \sin(\beta_2' l_2) \\ b &= E_2 l_2 (2\alpha_2 \beta_2') \{ \cos(\beta_2' l_2) + \cos(\alpha_2 l_2) \} \\ c &= \alpha_1 \sinh(\beta_1 l_1) + \beta_1 \sin(\alpha_1 l_1) \\ d &= E_1 l_1 (2\alpha_1 \beta_1) \{ \cosh(\beta_1 l_1) + \cos(\alpha_1 l_1) \} \\ e &= \int k x_1 \{ \sinh(\beta_1 x_1') \sin(\alpha_1 x_1) + \sinh(\beta_1 x_1) \sin(\alpha_1 x_1') \} / \\ &\quad [2\alpha_1 \beta_1 E_1 l_1 \{ \cosh(\beta_1 l_1) + \cos(\alpha_1 l_1) \}] (dx_1) \\ f &= \int k(l_2 - x_2) \{ \sinh(\beta_2' x_2') \sin(\alpha_2 x_2) + \sin(\beta_2' x_2) \sin(\alpha_2 x_2') \} / \end{aligned}$$

$$[2\alpha_2\beta_2'E_2l_2\{\cos(\beta_2'l_2)+\cos(\alpha_2l_2)\}](dx_2)$$

(type 4) $P = 2(kE_1l_1)^{0.5}/h_2$ ---(24)

$$a = -\beta_2'\sin(\alpha_2l_2) - \alpha_2\sin(\beta_2'l_2)$$

$$b = E_2l_2(2\alpha_2\beta_2')\{\cos(\beta_2'l_2) + \cos(\alpha_2l_2)\}$$

$$c = \alpha_1'l_1 + \sin(\alpha_1'l_1)$$

$$d = E_1l_1(2\alpha_1')\{\cos(\alpha_1'l_1) + 1\}$$

$$e = \int kx_1\{x_1'\sin(\alpha_1'x_1) + x\sin(\alpha_1'x_1')\} /$$

$$[2\alpha_1'E_1l_1\{\cos(\alpha_1'l_1) + 1\}](dx_1)$$

$$f = \int k(l_2 - x_2)\{\sin(\beta_2'x_2')\sin(\alpha_2x_2) + \sin(\beta_2'x_2)\sin(\alpha_2x_2')\} /$$

$$[2\alpha_2\beta_2'E_2l_2\{\cos(\beta_2'l_2) + \cos(\alpha_2l_2)\}](dx_2)$$

(type 5) $P > 2(kE_1l_1)^{0.5}/h_2$ ---(25)

$$a = -\beta_2'\sin(\alpha_2l_2) - \alpha_2\sin(\beta_2'l_2)$$

$$b = E_2l_2(2\alpha_2\beta_2')\{\cos(\beta_2'l_2) + \cos(\alpha_2l_2)\}$$

$$c = -\beta_1'\sin(\alpha_1l_1) - \alpha_1\sin(\beta_1'l_1)$$

$$d = E_1l_1(2\alpha_1\beta_1')\{\cos(\alpha_1l_1) + \cos(\beta_1'l_1)\}$$

$$e = \int kx_1\{\sin(\beta_2'x_1')\sin(\alpha_2x_1) + \sin(\beta_2'x_1)\sin(\alpha_2x_1')\} /$$

$$[2\alpha_1\beta_1'E_1l_1\{\cos(\alpha_1l_1) + \cos(\beta_1'l_1)\}](dx_1)$$

$$f = \int k(l_2 - x_2)\{\sin(\beta_2'x_2')\sin(\alpha_2x_2) + \sin(\beta_2'x_2)\sin(\alpha_2x_2')\} /$$

$$[2\alpha_2\beta_2'E_2l_2\{\cos(\beta_2'l_2) + \cos(\alpha_2l_2)\}](dx_2)$$

ここで, $x_1' = l_1 - x_1, x_2' = l_2 - x_2$

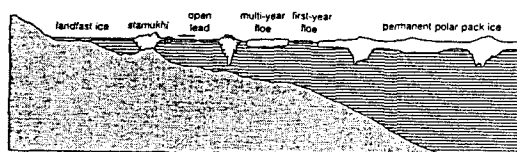
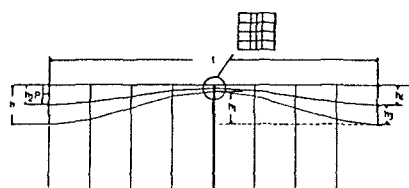
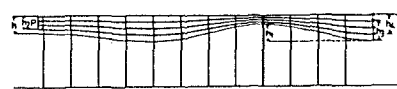


図-1 ボーアートの典型的な海氷状況(Sanderson 1988)



(1W-1 WAVELENGTH MODEL)



(1.5W-1.5WAVELENGTH MODEL)

図-2 計算に用いた理想的な多年氷(FEM)

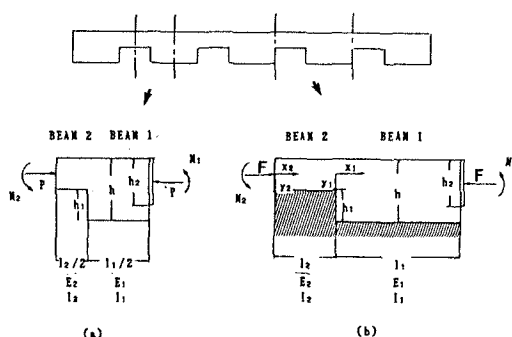


図-3 計算に用いたBEAM形状(a)浮力無し(NOBUOY) (b)浮力有り(BUOY)

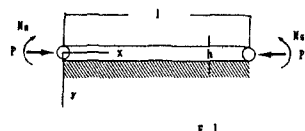


図-4 両端ヒンジの弾性支承上BEAM

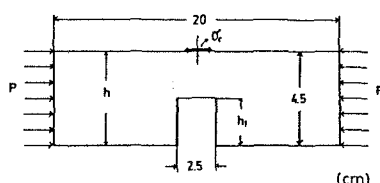


図-5 Hallamら(1987)の用いた室内実験用柱状氷供試体形状 ($1.7 < h_1 < 3.3\text{cm}$)

表1 計算に用いたパラメータ

PARAMETERS and VARIABLES	VALUES
FER	
WAVELENGTH(l_1) (1W-1.5W)	25.50, 75
MAXIMUM THICKNESS(h_1) (1W-1.5W)	6
AMPLITUDE RATIO(h_1/h) (1W)	0.333, 0.5, 0.667, 0.833
AMPLITUDE RATIO(h_1/h) (1.5W)	0.333, 0.667, 0.833
CONSTANT ELASTIC MODULUS(E) GPa (1W-1.5W)	4.8, 7.8
VARIABLE ELASTIC MODULUS top GPa (1W)	6
VARIABLE ELASTIC MODULUS bot GPa (1W)	6, 3.2
POISSON'S RATIO(ν) (1W-1.5W)	0.3
BOUNDARY CONDITIONS (1W)	FIXED, ROLLER
BOUNDARY CONDITIONS (1.5W)	ROLLER
BOUNDARY STRESS RATIO (h_2/h) (1W)	0.25, 0.5, 0.75, 1.0
BOUNDARY STRESS RATIO (h_2/h) (1.5W)	0.167, 0.333, 0.5, 0.667
APPLIED STRESS(P) MPa (1W-1.5W)	0.5
SIMPLE BEAM (BUOY/NOBUOY)	
WAVELENGTH(l_1)	25.50, 75
MAXIMUM THICKNESS(h_1)	2, 4.8, 10, 20
AMPLITUDE RATIO(h_1/h)	0.333, 0.5, 0.667, 0.833
CONSTANT ELASTIC MODULUS(E) GPa	4.8, 7.8
END CONDITIONS	HINGE
BOUNDARY STRESS RATIO(h_2/h)	0.167, 0.333, 0.5, 0.667, 1
APPLIED STRESS(P) MPa	0.5, 1, 0.5, 0, 10, 0

(1W-1 WAVELENGTH MODEL, 1.5W-1.5WAVELENGTH MODEL)

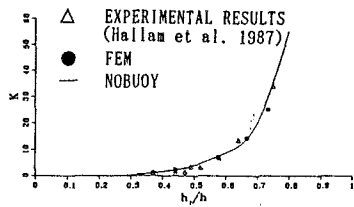


図-6 Hallamら(1987)の室内実験, NOBUOY, FEM計算結果の比較($h_2/h=1$)

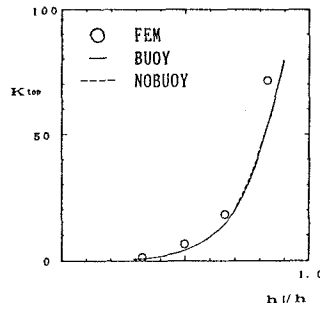


図-7 K_{top} と(h_1/h)の関係 ($l=50m, h_2/h=1.0, h=6m, ES=1$)

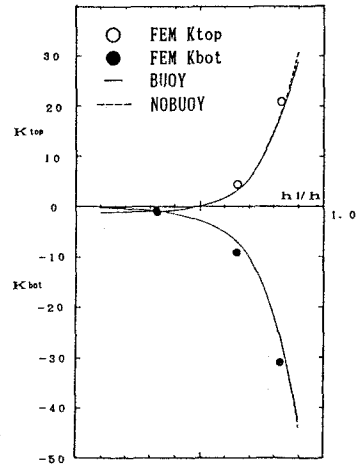


図-8 $K(top, bot)$ と(h_1/h)の関係 ($l=50m, h_2/h=0.667, h=6m, ES=1$)

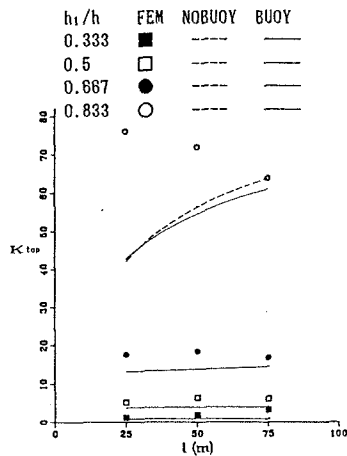


図-9 K_{top} と(l)の関係($h_1/h=0.333, 0.5, 0.667, 0.833, h_2/h=1, h=6m, ES=1$)

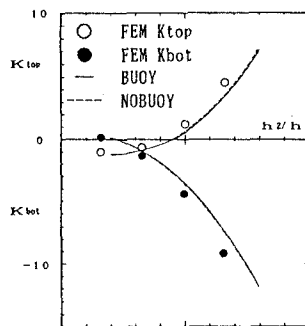


図-10 $K(top, bot)$ と(h_2/h)の関係 ($h_1/h=0.667, l=50m, h=6m, ES=1$)

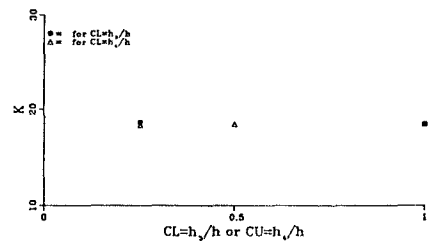


図-11 K_{top} と($h_2/h, h_4/h$)の関係 ($h_1/h=0.667, h_2/h=1, l=50m, ES=1$)

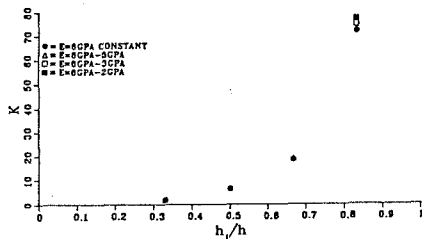


図-12 弾性定数上層6GPa, 下層5GPa, 3GPa, 2GPaを用いた時の K_{top} と(h_1/h)の関係 ($h_1/h=0.667, h_2/h=1.0, h=6m, ES=1$)

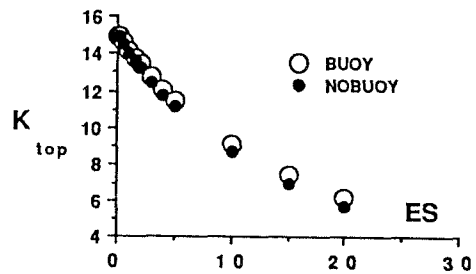


図-13 K_{top} と(ES)の関係($l=50m, h_1/h=0.667, h_2/h=1, h=6m, E_1=6GPa$)

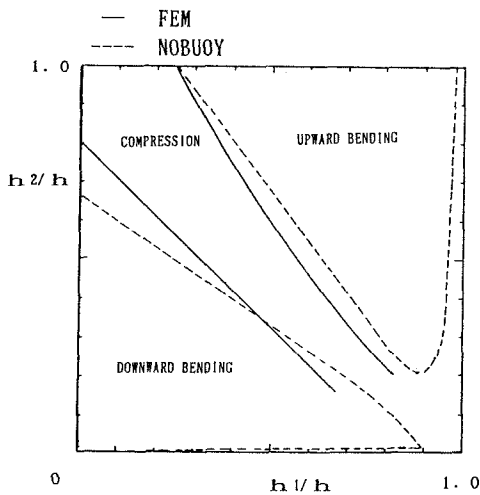


図-14 変形様式($h=6m, l=50m, ES=1$)

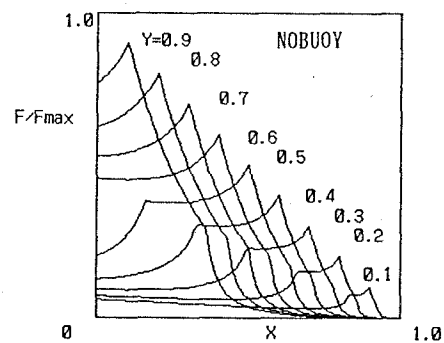


図-15 破壊荷重($h=6m, l=50m, ES=1$)