

21 固体接触による船体荷重発生メカニズムの研究（氷）

構造強度部 *田中 義照、佐久間正明、安藤 孝弘
氷海技術部 泉山 耕、宇都正太郎、金田 成雄、
瀧本 忠教、若生 大輔

1 まえがき

本研究は、船舶の流氷中航行安全性の向上を目的として、指定研究「オホーツク海流氷域の航行安全に関する研究（平成 11 ～ 13 年度）」、および、重点基礎研究「固体接触による船体荷重発生メカニズムの研究（平成 12 年度）」において、平成 12 年度に実施した。

大型耐氷船舶あるいは砕氷型巡視船の南部オホーツク海域の航行を想定し、船体に作用する局所氷荷重発生メカニズムを解明するため、船首部および船側耐氷構造を模擬した防撓板模型（パネル、防撓材の板厚および防撓材間隔は実船の構造寸法にほぼ等しい）を製作し、氷塊による面外曲げ実験を実施した。パネルおよび防撓材において計測されたひずみ応答を参照して有限要素法（FEM）を用いた逆解析により局所氷荷重発生メカニズムをシミュレートした。

2 実験

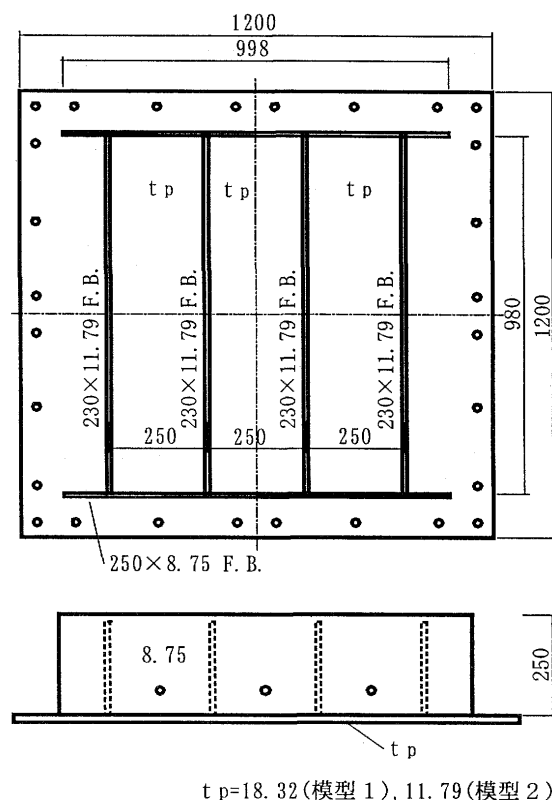
2.1 実験方法

2.1.1 防撓板模型

防撓板のスパン方向の氷圧力分布の非一様性を検討するため、パネル部の板厚を変えた防撓板模型を 2 体製作した。模型の形状および寸法を図－1 に示す。使用材料は軟鋼（SS400）で、材料の機械的性質を表－1 に示す。

2.1.2 実験装置および载荷用治具

実験は構造強度部の 500 トン大型構造物試験装置で行った。防撓板模型は試験機ベッドに支持治具を介して固定し、試験機クロスヘッドに取り付けた負荷治具により氷塊を防撓板模型に

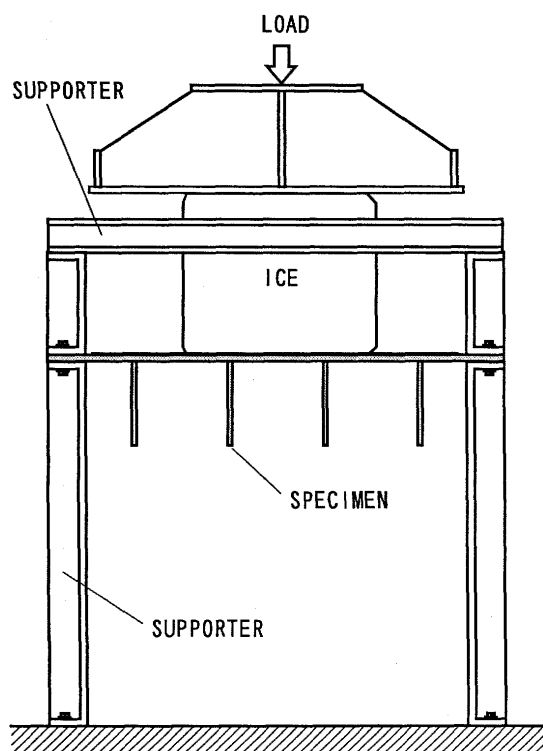


図－1 模型の形状および寸法

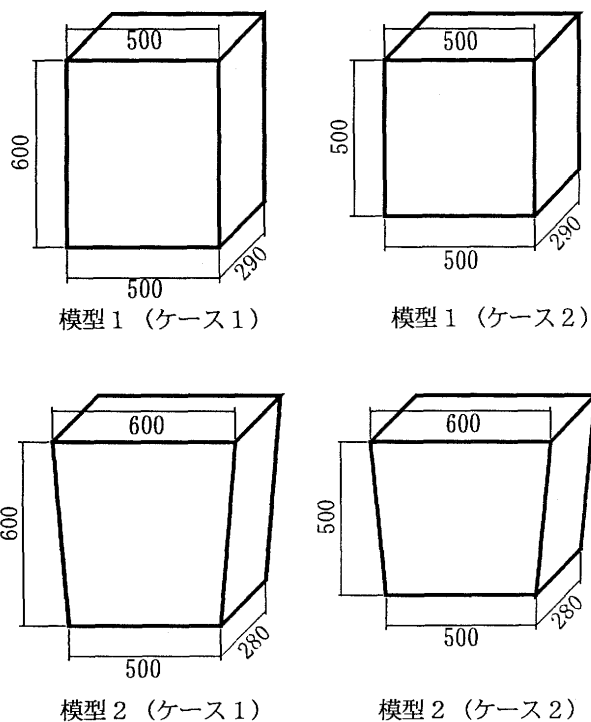
表－1 材料の機械的性質

板厚 mm	降伏応力 MPa	引張強度 MPa	ヤング率 GPa	使用部材
18.32	271	442	209	模型 1 のパネル
11.79	271	425	209	模型 2 のパネル、防撓材
8.75	272	428	212	横桁

押し付ける。このとき氷塊も支持治具により厚さ方向の変位を拘束される。模型および治具の設置状況を図－2に示す。



図－2 模型の設置状況



図－3 供試氷塊の形状・寸法（単位 mm）

2.1.3 供試氷塊

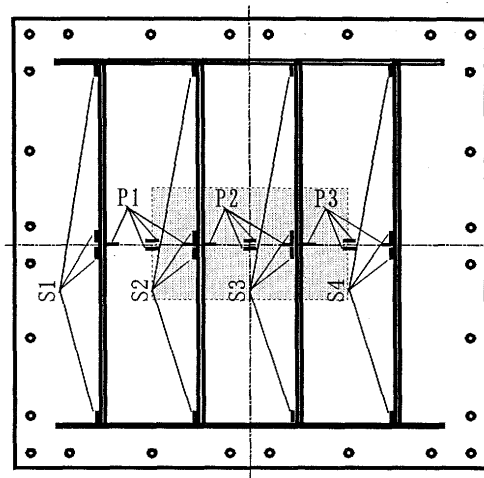
氷塊は低温実験室において木製タンク内に水道水を張り、氷厚300mmを目標に製氷した。模型1および模型2に対して高さおよび形状を変えた氷塊4種を切り出し実験に供した。供試氷塊の形状・寸法を図－3に示す。図中、氷塊の奥行き方向が氷の成長方向である。

2.1.4 計測項目および計測方法

氷荷重実験においては、防撓材の縦曲げひずみ4点（S1～S4）、パネルの曲げひずみ3点（P1～P3）、試験機ロードセルによる全体荷重、および、クロスヘッド変位をサンプリング周波数600Hzでデジタル集録したほか、圧力分布測定システム（I-SCAN）により氷圧力の時間変化を計測した。防撓板の曲げひずみは、パネルおよび防撓材とも4枚の1軸ひずみゲージによりブリッジを組み（模型のパネルおよび防撓材の中央に発生する引張ひずみ、および、端部に発生する圧縮ひずみの差が2倍の感度で計測される）、各部材に発生する平均的な曲げひずみ応答を計測する方法を採用した。ひずみゲージ貼付位置および計測点番号を図－4に示す。

2.1.5 水圧負荷実験

氷荷重実験に先立ち、各模型の水圧負荷実験を行うとともに、水圧負荷時のFEM計算を行い、曲げひずみ応答を比較した。一例として、



図－4 防撓板模型の曲げひずみ計測位置

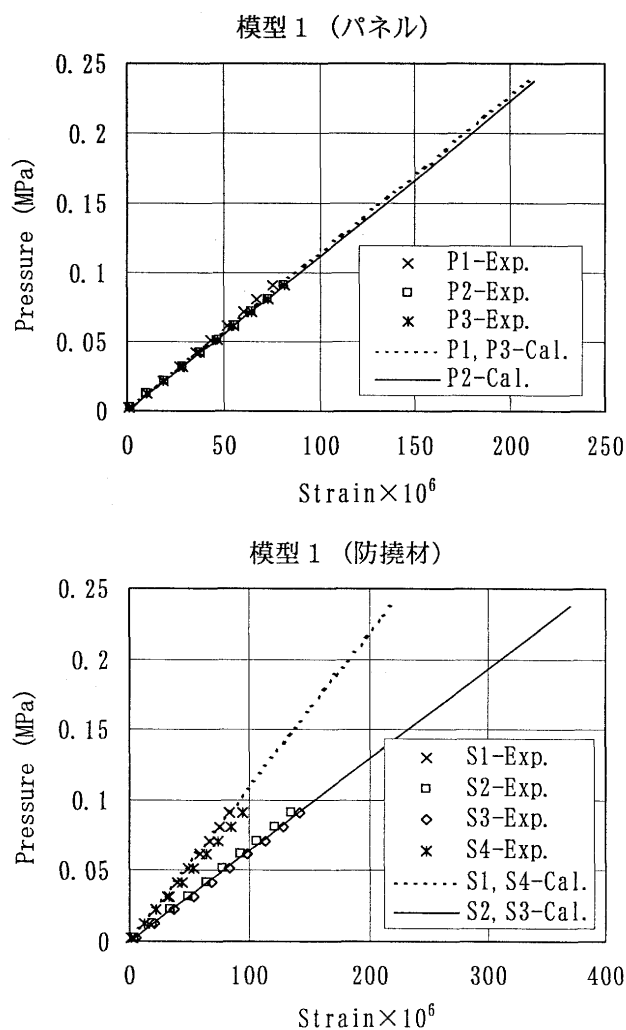


図-5 水圧負荷実験結果 (模型 1)

模型 1 の計測値 (Exp.) および計算値 (Cal.) を併せて図-5 に示すが、両者の応答値は良く一致しており (模型 2 も同様)、後述する防撓板の曲げひずみ応答値からの氷圧力分布の推定 (FEM による逆解析) が可能であることが確認された。

2.1.6 氷荷重実験方法

実験は図-3 に示す氷塊 (底面の幅約 500mm、厚さ約 300mm) を防撓板模型中央部 (図-4 に示す網掛け部分) に鉛直に立て、氷塊上面から圧縮荷重を負荷して氷塊を破碎させた。実験時の室温は約 5℃、氷塊内部の温度は -6.2℃ であった。また、500 トン大型構造物試験装置の最大ラムスピードは公称 50mm/min であり、平均ひずみ速度は $2 \times 10^{-3}/\text{sec}$ 程度である。

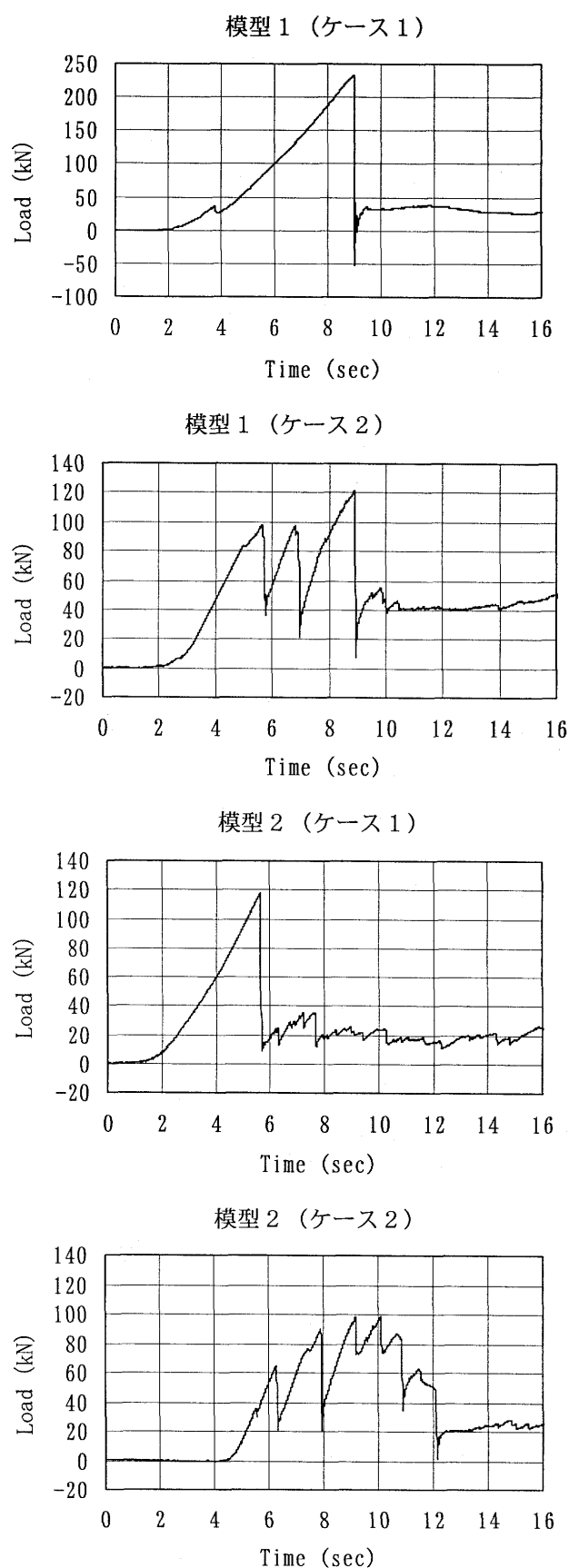


図-6 氷荷重実験における全体荷重の時刻歴

2.2 実験結果

2.2.1 荷重パターンと全体荷重

4つのケースの氷荷重実験における全体荷重の時刻歴を図-6に示す。氷塊の破碎パターンは2種類であり、一方はほぼ氷塊全体で荷重を分担し、ある1箇所まで破碎が生じるまで全体荷重が増加する場合であり（模型1，2ともケース1）、他方は、氷塊の片当たりの影響で部分的な破碎が数回生じ、全体荷重のピークが複数現れる場合である（ケース2）。計測最大荷重を供試氷塊の底面積で除して、最大氷圧力の公称値を求めると、模型1では1.6 MPa および 0.83 MPa、模型2では0.84 MPa および 0.71 MPa になる。いずれの模型においてもケース1の方が最大氷圧力が大きくなった。

2.2.2 防撓板の曲げひずみ応答

図-7に模型の中央パネル（P2）およびその両側の防撓材（S2，S3）の曲げひずみ応答の時刻歴を示す。両模型実験のケース1では、図-6に示した全体荷重の増大に従い、各計測点の曲げひずみがほぼ同時に増加し、氷塊の破碎に伴って急激にひずみが減少している。荷重の片当たりがみられるケース2では、初期段階で模型1では防撓材S2側から、模型2ではS3側から縦曲げひずみが増加しているが、局所的な破碎とともに荷重を主に分担する部材が入れ替わっている。次章では、これらの曲げひずみ応答値をもとに、防撓板上での局所氷荷重発生メカニズムを明らかにする。

3 FEMによる局所氷荷重推定

3.1 計算方法

図-8に示すように防撓板模型と氷塊との接触面を7つの領域に分割し、各領域ごとに均一の氷圧力 Q_j ($j=1,2,\dots,7$) が生じるとき（領域の幅は、 Q_1, Q_7 を 107mm、 Q_2, Q_6 を 35.7mm、 $Q_3 \sim Q_5$ を 71.4mm とした）、パネル P1、P2、P3 および防撓材 S1、S2、S3、S4 の曲げひずみ応答が R_i ($i=1,2,\dots,7$) であると仮定すると、両者の関係は応答マトリクス K_{ij} ($i=1,2,\dots,7, j=1,2,\dots,7$) を用いて次式で表される。

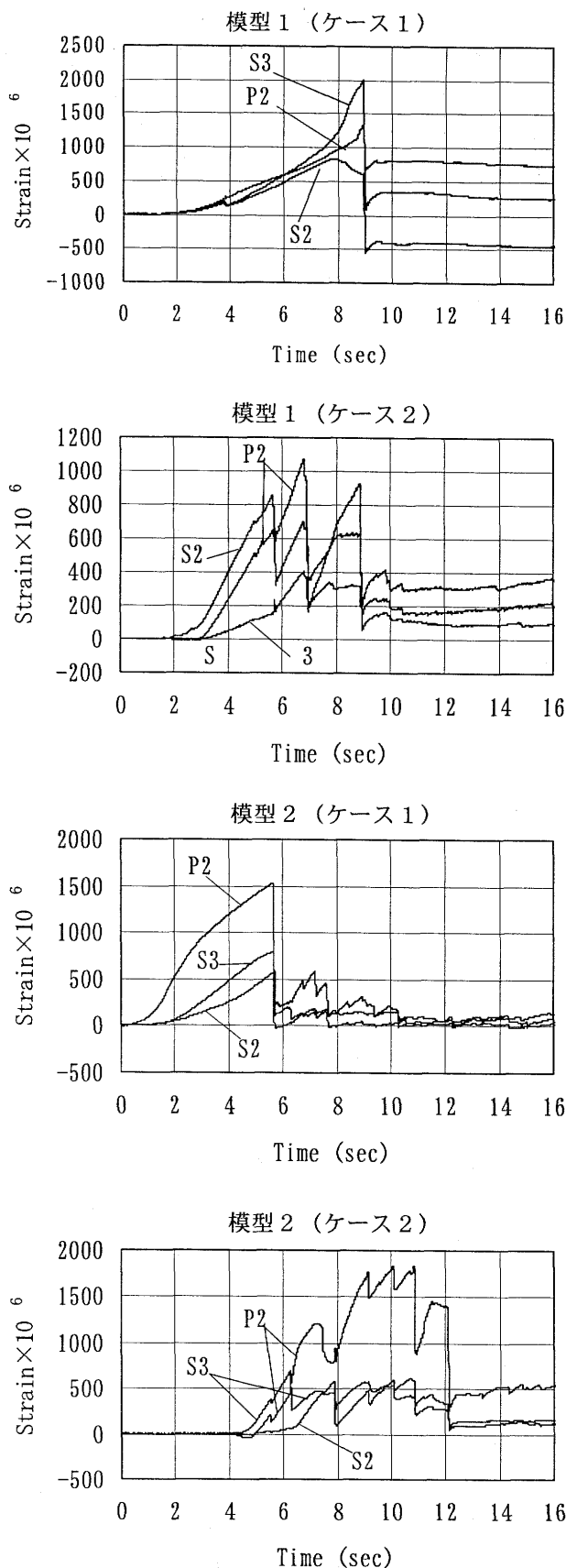


図-7 氷荷重実験における応答の時刻歴

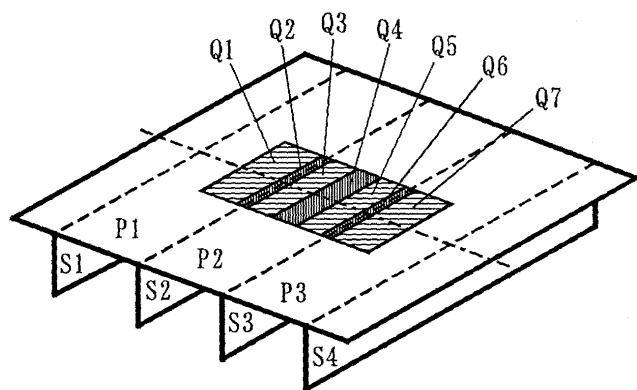


図-8 FEM 計算における単位荷重負荷領域

$$\{R_i\} = [K_{ij}] \cdot \{Q_j\} \quad (i=1,2,\dots,7, j=1,2,\dots,7)$$

ここで、 K_{ij} は領域 j にのみ単位圧力が生じるときの部材 i の曲げひずみ応答を示す。この応答マトリクス $[K_{ij}]$ を FEM 計算によりあらかじめ求め、 $[K_{ij}]$ の逆マトリクス $[K_{ij}]^{-1}$ を用いれば、氷荷重実験における各部材の曲げひずみ応答値から、各領域に発生する氷圧力 $\{Q_j\}$ が次式により計算できる。

$$\{Q_j\} = [K_{ij}]^{-1} \cdot \{R_i\} \quad (i=1,2,\dots,7, j=1,2,\dots,7)$$

一例として、模型 1 の応答マトリクス $[K_{ij}]$ は、表-2 に示すようになる。表-2 より明らかなように、パネルの曲げひずみ応答はパネル上に作用する圧力に、また、中央 2 本の防撓材 S2 および S3 の曲げひずみ応答はパネルと防撓材両方の圧力に主に依存する。

3.2 局所氷荷重推定結果

前節で述べた方法により、実験各ケースにおける氷圧力分布を推定した結果を図-9 に示す。氷塊に局所的な破碎が起こらず、全体荷重がほぼ一様に増加したケース 1 の場合、氷圧力推定

表-2 応答マトリクス (模型 1)

	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7
P 1	388.1	4.9	18.2	14.9	8.0	0.9	-0.9
P 2	20.1	3.7	188.5	429.9	188.5	3.7	20.1
P 3	-0.9	0.9	8.0	14.9	18.2	4.9	388.1
S 1	115.5	11.2	0.6	-9.1	-6.5	-1.5	-0.4
S 2	227.3	86.9	152.8	124.8	86.9	22.2	17.2
S 3	17.2	22.2	86.9	124.8	152.8	86.9	227.3
S 4	-0.4	-1.5	-6.5	-9.1	0.6	11.2	115.5

注) 圧力 1 MPa あたりのひずみ $\times 10^6$

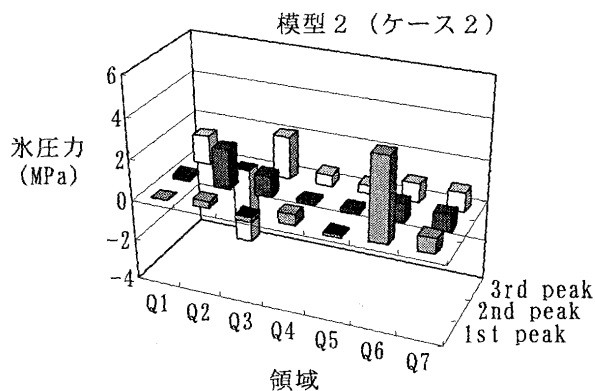
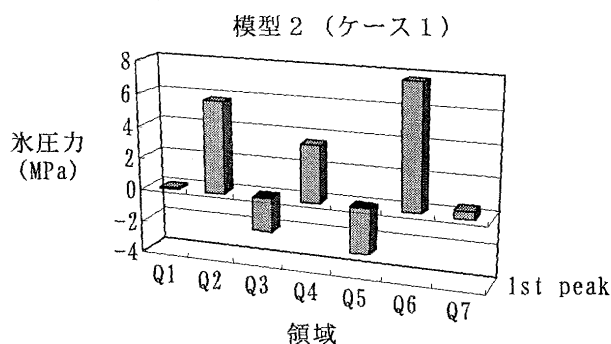
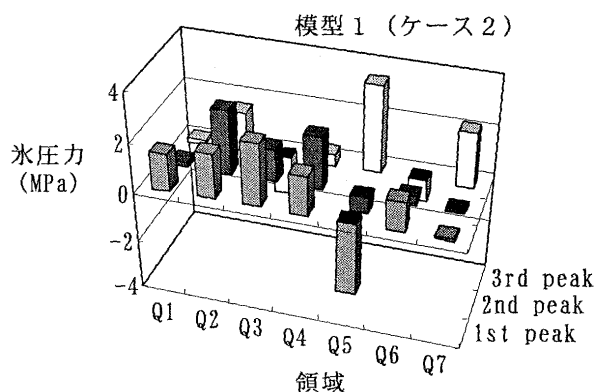
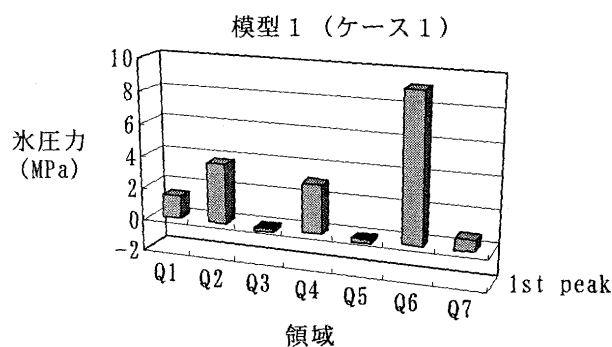


図-9 氷圧力の推定値

値は、図－6 および 7 から明らかなように、中央 2 本の防撓材上で高くなる。氷圧力の最大値は、模型 1、2 とも防撓材 S3 上で発生し、模型 1 では 9.1 MPa、模型 2 では 7.7 MPa に達した。

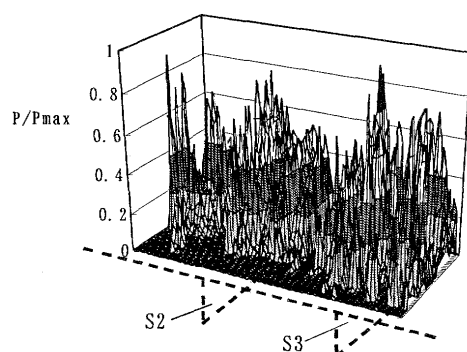
一方、氷塊の各所で部分的な破碎が数回起こったケース 2 の場合には、氷圧力推定値は、最大でも模型 1 で 2.6 MPa、模型 2 で 4.1 MPa 程度であり、ケース 1 の半分程度であった。供試氷塊の一軸圧縮強度は、別途行われた圧縮試験により 4～7 MPa が得られている。本氷荷重実験で発生したと推定される氷圧力推定値がこの範囲を超えていること、また、氷圧力推定値に負値が現れていることは、図－8 に設定した荷重負荷領域の分割の粗さによると考えられる。

3.3 I-SCAN による氷圧力分布計測結果

I-SCAN により計測された氷圧力分布（最大荷重発生時）の一例として、模型 1 のケース 1 のものを図－10 に示す（計測各点での圧力 P を最大圧力 P_{max} で無次元化した）。氷圧力は防撓材上で高くなっており、パネル中央部では圧力が発生していない領域も見られる。I-SCAN のセンサシート受圧面（238mm × 476mm）は氷塊の底面にほぼ一致しており、計測された圧力分布は、図－9 に示した氷荷重推定値と良い相関があることがわかる。

4 考察

今回の実験結果から、防撓板上に発生する氷



図－10 I-SCAN により計測された氷圧力分布（模型 1、ケース 1）

圧力は防撓材上の領域で高く、パネル中央部では低いことがわかった。また、模型 1 と模型 2 での計測値を比較するとパネルの板厚が薄い模型 2 の方が氷圧力の非一様性が高いことがわかる。このことは氷圧力のスパン方向分布の非一様性がパネルの板厚（剛性）の影響を受けることを示している。Watanabe et al.¹⁾ はサロマ湖で氷と防撓板模型の干渉に関する模型実験を行い、同様の傾向があることを報告している。また、Uto²⁾ は理想的な条件の下で理論解析を行い、スパン方向の氷圧力分布の非一様性がパネルの剛性と氷塊の剛性の比に依存することを示した。

Finnish Swedish Ice Class Rules の耐氷構造基準では、パネル上の氷圧力を防撓材上の 75 % とした設計氷荷重を設定している。これは上記の傾向を勘案したものであるが、パネルの剛性の影響は陽に表現されていない。設計氷荷重の合理的な設定を行うために、パネルの剛性の影響について今後更なる検討を行う予定である。

5 まとめ

大型耐氷船舶あるいは砕氷型巡視船の耐氷構造を模擬した防撓板模型を製作し、氷厚約 300mm の氷塊を用いて氷荷重負荷実験を行い、以下の結論を得た。

- 1) 防撓板模型の各部材に発生するひずみ応答の FEM 逆解析により、防撓板に発生する氷圧力分布の推定が可能である。
- 2) 防撓構造に発生する氷圧力分布は Finnish Swedish Ice Class Rules の耐氷構造基準で設定された圧力分布と同様に、防撓材上で最大となるが、このスパン方向の氷圧力の非一様性はパネルの剛性に依存する。

参考文献

- 1) Watanabe T. et al. : Interaction between Ice and Stiffened Panel, Proceedings of POAC'83, pp.458-467 (1983).
- 2) Uto S. : Influence of Plate Rigidity on Ice Loading under Line-like Contact between Ice and Stiffened Ship Hull Structure, Helsinki University of Technology, M-254, pp.1-47 (2000).