

# 実海水貫入試験における氷圧力分布と 構造物剛性の影響

## ICE PRESSURE DISTRIBUTION IN ICE-STRUCTURE INTERFACE AND STRUCTURE STIFFNESS EFFECTS ON ICE-STRUCTURE INTERACTION

中澤直樹<sup>1</sup>・竹内貴弘<sup>2</sup>・赤川 敏<sup>3</sup>・酒井雅史<sup>4</sup>・寺島貴志<sup>5</sup>・松下久雄<sup>6</sup>

Naoki NAKAZAWA, Takahiro TAKEUCHI, Satoshi AKAGAWA, Masafumi SAKAI,  
Takashi TERASHIMA and Hisao TATSUSHITA

<sup>1</sup>正会員 工博 (有) フォレストワークス、<sup>2</sup>正会員 工博 八戸工業大学土木工学科

<sup>3</sup>正会員 Ph.D 北海道大学工学部、<sup>4</sup>正会員 工修 大成建設(株)技術研究所

<sup>5</sup>正会員 工博 パシフィックコンサルタンツ(株)、<sup>6</sup>正会員 工博 (財)日本海事協会

Field indentation tests using medium-scale model structures have been conducted since the winter of 1996. In the winter 1998 tests, two-dimensional pressure sensing panels were first installed on the face of the indenter. These panels clearly showed actual contact area, ice pressure distribution and movement of ice force location on the indenter surface during interaction. Ice flaking failure associated with a thin line-like contact area was observed from 3-D plots of pressure data in tests with an indenter velocity of 3.0mm/s. In the winter 1999 tests, a spring system (spring constant 15kN/mm) was first installed in the model structure to simulate a vibrating structure. These tests showed structure stiffness difference causes different manner of ice failure.

**Key Words:** Ice forces, ice pressure distribution, structure stiffness, simultaneous/non-simultaneous failure, ice-structure interaction

### 1. はじめに

(社)日本海洋開発産業協会は、通産省資源エネルギー庁の委託事業として平成5年度から「海洋石油開発技術調査 海洋構造物に及ぼす氷荷重に関する研究」を実施している。本事業は、構造物に作用する氷荷重特性を明らかにすることにより、氷海域における石油開発用構造物設計のための氷荷重推定法の確立を目指すものである。本研究では、氷海水槽実験と実海水野外実験が実施され、それらのデータを基に荷重推定プログラムの構築作業が行われている。

北海道網走市能取湖における実海水を用いた中規模野外実験は平成7年に始まった。当初は氷盤破壊の同時性・非同時性及び貫入構造物のスケール効果に着目した実験を行い、貫入速度と氷盤の破壊特性が明らかにされた。<sup>1)</sup><sup>2)</sup>平成9年度には2次元パネルセンサーが導入され、氷盤と貫入供試体の接触面における氷圧力分布のモニタリングが行われた。<sup>3)</sup>次に、アラスカボーフォート海における石油掘削構造物である「モリクパック」が氷

盤の連続的衝突による振動で危険な状態に陥ったことから、構造物の剛性と振動が注目されることとなった。従って、平成10、11年度は実験構造物にパネを装着し、貫入供試体の剛性を変化させることによって氷盤破壊と剛性の関係を調べた。

本報は主に、平成9、10年度の2次元パネルセンサーによる荷重分布特性と10年度の剛性変化による実験結果を報告する。表-1に平成7年度から10年度までの実験条件を示す。

### 2. 実験機器及び実験手順

#### (1) 実験機器

貫入実験機の全体概略図を図-1に示す。実験機は岸壁前面に設置され、岸壁を反力盤として利用する。貫入供試体模型は1.5m幅を基本ユニットとし、拡張盤及び基本ユニットを連結することにより最大6.0mまで拡張することが出来る。氷盤と接触する供試体模型前面には幅

100mm、高 400mm の分割パネルが取り付けられており、分割パネルの背後にロードセルが連結されている。この分割パネルにより局部荷重が計測され、それらの総和として全体氷荷重が算出される。貫入加力装置はサーボ制御油圧ジャッキであり、最大ストロークは 1.2m である。

貫入供試模型と 2 次元パネルセンサーを図-2 に示す。パネルセンサーは供試模型前面に貼られている。1 枚のパネルセンサーは縦 238mm x 横 238mm x 厚 0.3mm で、44 列 x 44 行の格子点によって圧力分布を測定する。

(2) 実験手順

実験は自然結氷盤と新たに結氷させた再結氷盤によって行われた。再結氷盤は自然結氷盤を所定の大きさに切り抜き、積雪を除去した形で成長させた結氷盤である。氷盤が所定の氷厚に達した後、岸壁前面の氷盤を除去し、実験機を海水面に設置する。氷盤前面を貫入供試模型と平行になるように整形し、貫入試験を実施する。貫入中は氷盤中のクラック発生状況、氷盤の破壊状況が観測された。

表-1 平成7年度から行われた貫入試験の実験条件

| 実施年度 | 供試模型幅(m) | 氷厚(cm) | 貫入速度(mm/s) | 氷タイプ | パネの有無 |
|------|----------|--------|------------|------|-------|
| H7   | 1.5      | 12.0   | 3.0        | 再結氷  | 無     |
|      | 3.0      | 12.0   | 6.1        | 再結氷  | 無     |
|      | 3.0      | 24.0   | 6.1        | 再結氷  | 無     |
| H8   | 4.5      | 14.0   | 9.6        | 再結氷  | 無     |
|      | 4.5      | 16.0   | 9.6        | 自然氷  | 無     |
|      | 6.0      | 13.3   | 12.8       | 再結氷  | 無     |
|      | 6.0      | 27.3   | 12.4       | 自然氷  | 無     |
| H9   | 1.5      | 24.1   | 3.0        | 自然氷  | 無     |
|      |          | 24.1   | 0.3        | 自然氷  | 無     |
|      |          | 24.1   | 30.0       | 自然氷  | 無     |
|      | 1.5      | 23.8   | 3.0        | 再結氷  | 無     |
|      | 1.5      | 18.6   | 0.3        | 再結氷  | 無     |
|      | 1.5      | 23.8   | 30.0       | 再結氷  | 無     |
|      |          |        |            |      |       |
| H10  | 0.6      | 35.0   | 0.9        | 自然氷  | 無     |
|      |          |        | 0.9        |      |       |
|      |          |        | 0.3        |      |       |
|      | 0.6      | 35.0   | 1.5        | 自然氷  | 無     |
|      |          |        | 1.5        |      |       |
|      |          |        | 0.6        |      |       |
|      | 0.6      | 30.0   | 2.0        | 自然氷  | 無     |
|      |          |        | 2.0        |      |       |
|      |          |        | 0.9        |      |       |
|      | 0.6      | 33.9   | 3.0        | 自然氷  | 無     |
|      |          |        | 3.0        |      |       |
|      |          |        | 0.3        |      |       |
|      | 0.6      | 37.3   | 30.0       | 自然氷  | 無     |
|      |          |        | 0.3        |      |       |
|      | 1.5      | 27.2   | 3.0        | 再結氷  | 有     |
|      | 1.5      | 30.0   | 3.0        | 再結氷  | 無     |

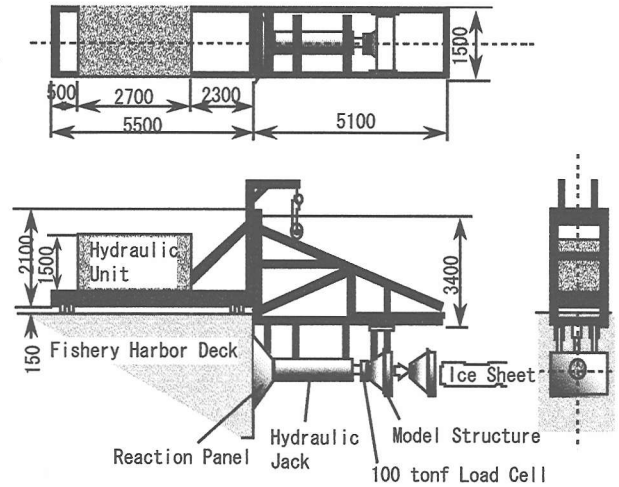


図-1 貫入実験機の全体概略図

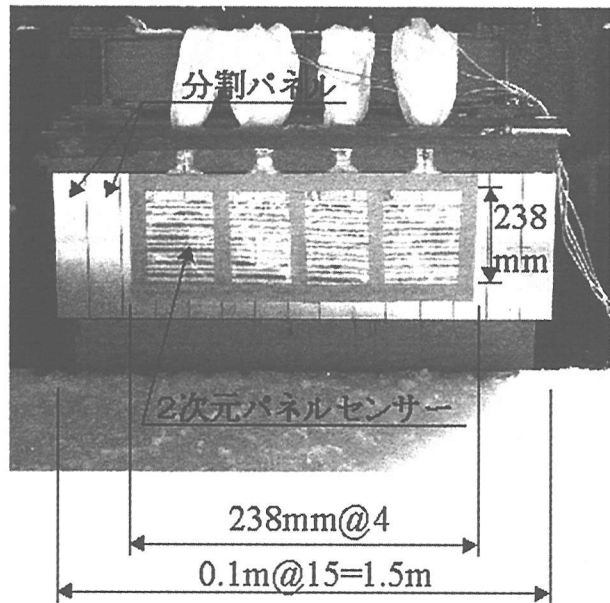


図-2 貫入供試模型と 2 次元パネルセンサー

(3) 実験環境と実験条件

実験は毎年 1 月から 3 月にかけて北海道網走市能取漁港の岸壁を利用して行われた。貫入速度は歪み速度 ( $V/2W$ 、ここで  $V$  : 貫入速度、 $W$  : 貫入供試模型幅) がほぼ  $10^{-4}s^{-1}$ 、 $10^{-3}s^{-1}$ 、 $10^{-2}s^{-1}$  となるように設定された。実験では、全氷荷重、局部氷荷重、パネルセンサーによる氷圧力、貫入速度、加速度、実験機の傾き、氷盤破壊様式、氷厚、及び氷温が観測された。氷温は海水温に近い  $-1.8^{\circ}C$  前後、塩分量は 4-5‰、実験水の圧縮強度はほぼ 1~2MPa である。実験条件は表-1 に示す通りである。供試模型幅最大 6.0m は、氷盤貫入試験としては世界最大規模である。

### 3. 実験結果

#### (1) 2次元パネルセンサーによる氷圧力分布

供試模型前面に取り付けられた2次元パネルセンサーにより、貫入継続中の氷盤と供試模型の真の接触域と接触面における氷圧力分布を計測し、更にコンピュータモニター上で氷圧力分布の時系列変化を3次元動画で観察することが可能となった。一枚のパネルセンサーは44列44行の格子点(面積は $5.4 \times 5.4\text{mm}$ )を持ち、この格子点により圧力が計測される。

図-3及び図-4に貫入速度 $0.3$ と $3.0\text{mm/s}$ で行われた実験の氷荷重の時系列と、幾つかのポイントにおける3次元表示による氷圧力分布を示す。供試模型の幅は $1.5\text{m}$ 、氷厚はそれぞれ $18.6$ と $24.1\text{cm}$ である。氷荷重は4枚の2次元パネルセンサー部分の氷荷重の合計である。

図-3に示す貫入速度 $0.3\text{mm/s}$ の場合、貫入開始と共に氷盤と貫入模型の接触面積が徐々に増加し、氷荷重も増加して行く(図-3a,b)。氷荷重が最大となる付近で接触面積も最大となりほぼ等分布の氷圧力分布が見られる(図-3c)。その後氷盤のクリープ破壊によるバック

リングにより圧力分布は下方に移動する(図-3d)。この様に貫入速度が遅く氷盤が ductile 破壊の性状を示す場合は、最大荷重時において接触面積が大きく等分布荷重が現れる。

これに対し図-4に示す貫入速度 $3.0\text{mm/s}$ の場合は、接触初期から氷荷重は急速に増加し最大時には接触面積も大きくなるものの氷圧力分布は等分布の性状とは異なりノコギリ状となっている(図-4a,b)。荷重最大値後に氷盤は破壊し、氷盤には水平方向に平面的に成長する cleavage crack が発生する(図-4c)。初期破壊後の氷盤の継続的な連続破壊ではフレーキング破壊が見られ、氷盤と貫入供試模型の接触は横方向に直線的に表れる(図-4d)。これは Joensun and Riska<sup>4)</sup>により観察された 'line-like' contact と同様の氷荷重作用形態と考えられる。この line-like contact は接触面鉛直方向のほぼ中央に現れるものの、氷圧力分布は一定せずそのピーク値は水平方向にランダムに移動し、且つ非同時に発生する。この様に貫入速度が比較的速く、氷盤が brittle 破壊の性状を示す場合は、直線的な氷盤接触と氷盤破壊の非同時性が現れることが示された。

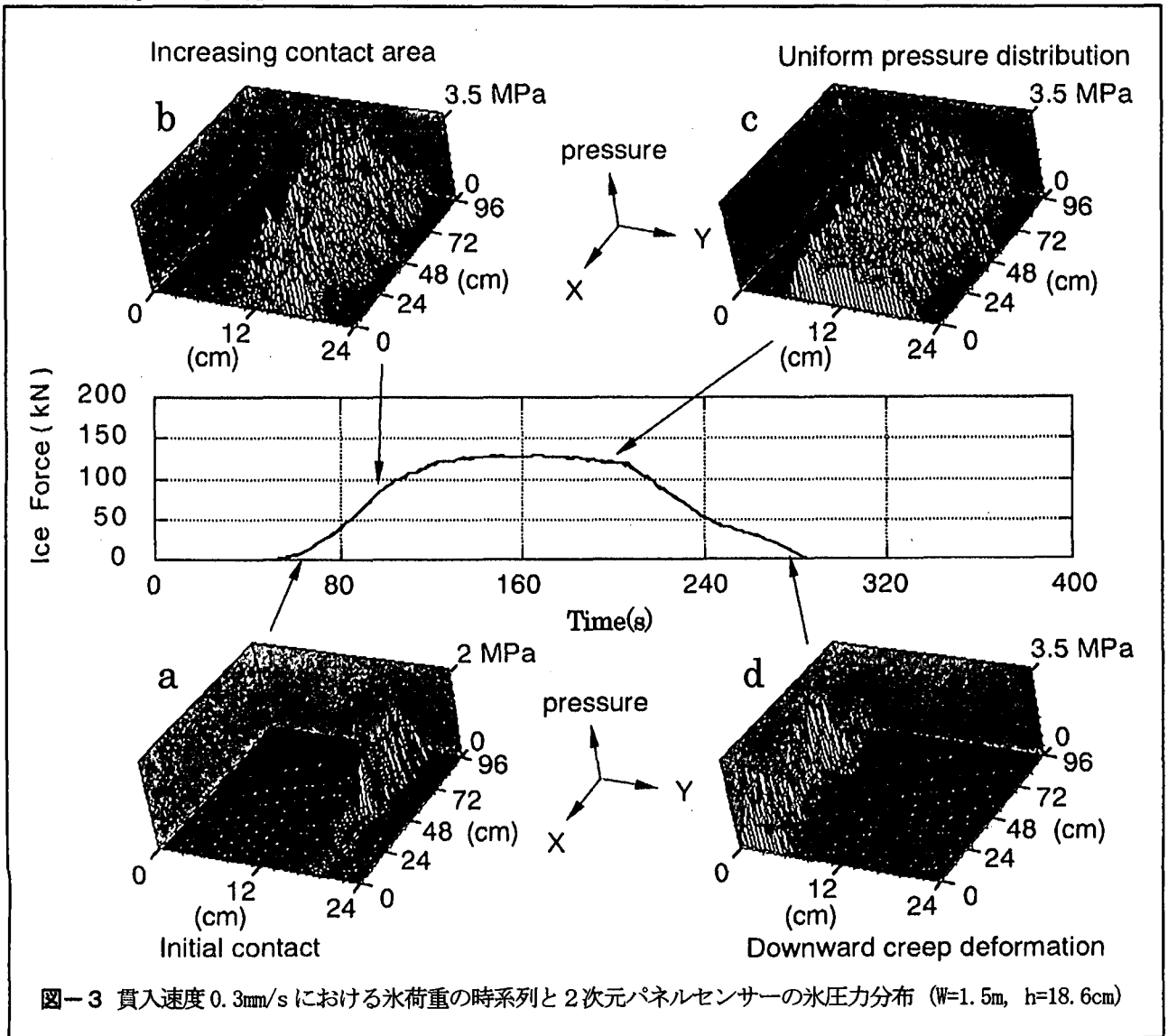


図-3 貫入速度  $0.3\text{mm/s}$  における氷荷重の時系列と 2次元パネルセンサーの氷圧力分布 ( $W=1.5\text{m}$ ,  $h=18.6\text{cm}$ )

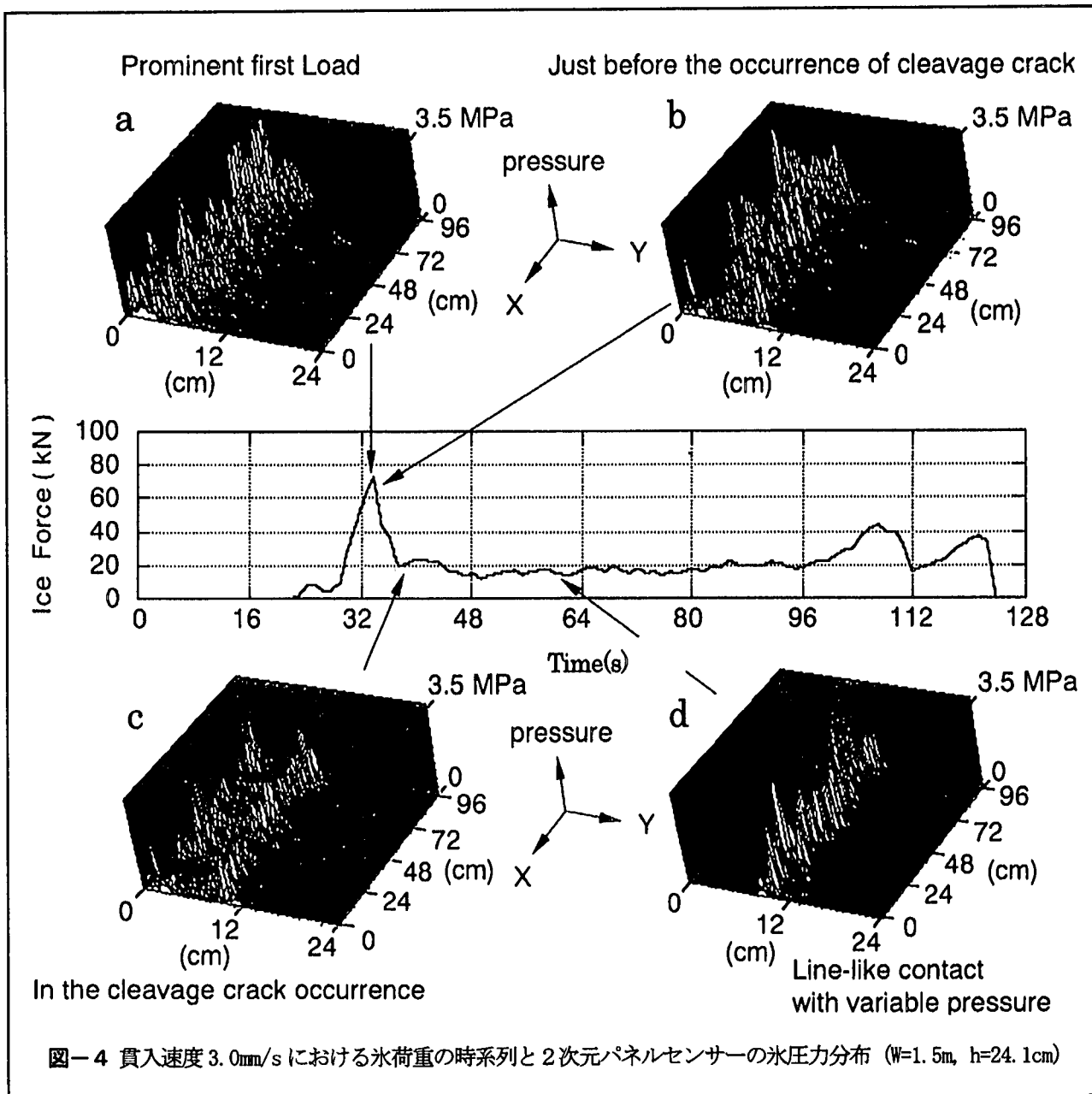


図-4 貫入速度 3.0mm/s における氷荷重の時系列と 2 次元パネルセンサーの氷圧力分布 (W=1.5m, h=24.1cm)

## (2) 貫入構造物の剛性変化による影響

本プロジェクトで行われている氷海水槽実験の結果から、氷盤の同時・非同時破壊と構造物の剛性及び貫入速度の関係は図-5の様にまとめられている。<sup>5)</sup> 縦軸は構造物の剛性を表すコンプライアンス、横軸は貫入速度の効果を表す歪み速度である。本野外実験の剛性を変化させた実験条件は図中に示す 2 点であり、●印がパネ有り (K=15kN/mm)、◆印がパネ無しを示す。その他の実験条件を同じとして、構造物の剛性変化により氷盤の破壊様式が変化することを本実験により検証する。

パネを装着した場合としない場合の実験による全氷荷重と供試模型の変位の時系列を図-6に示す。供試模型にパネを取り付けることにより剛性を落とした実験の場合は、供試模型の変

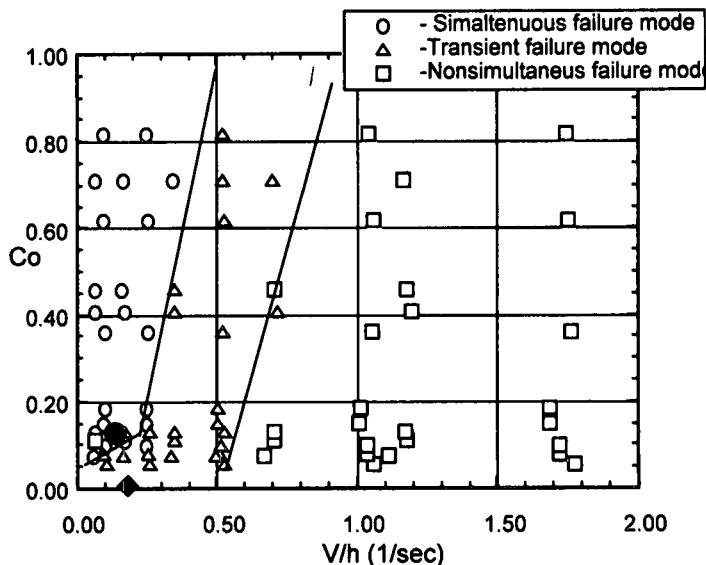


図-5 氷海水槽実験による氷盤の同時・非同時破壊と構造物の剛性及び貫入速度の関係

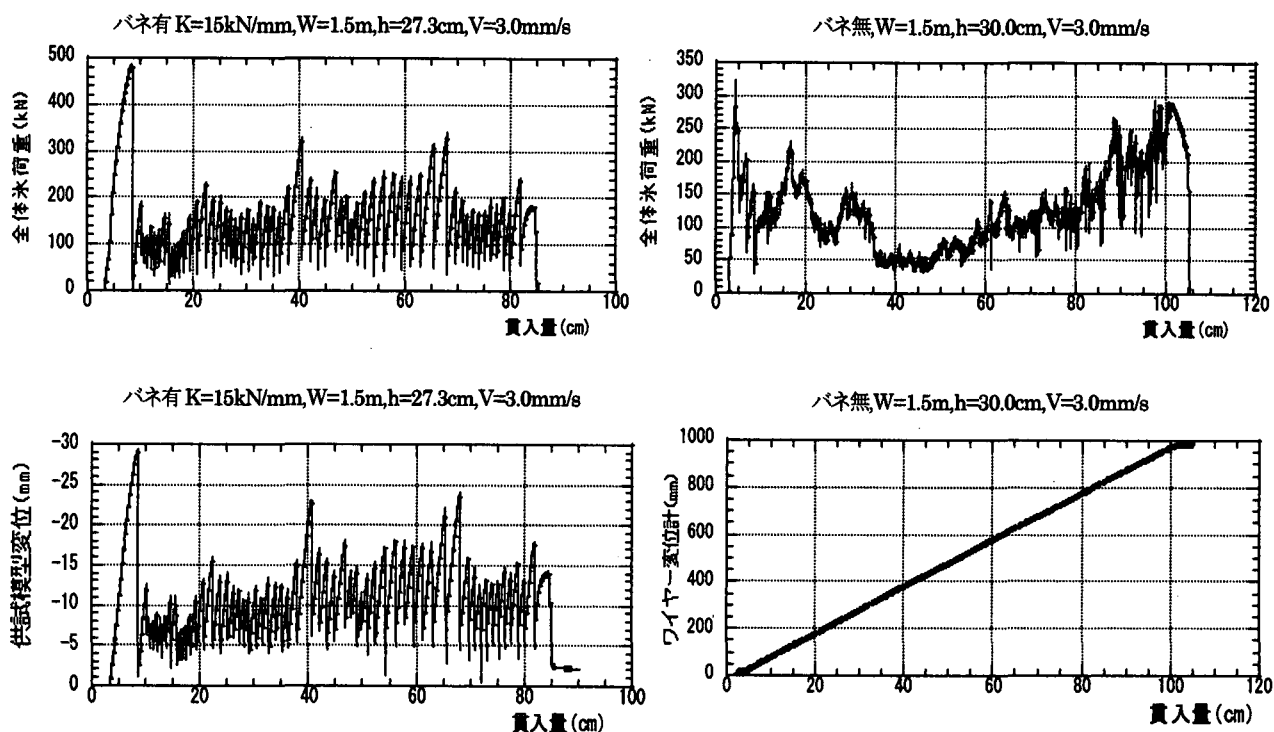


図-6 パネを装着した場合としない場合の実験による全氷荷重と貫入供試模型の変位の時系列

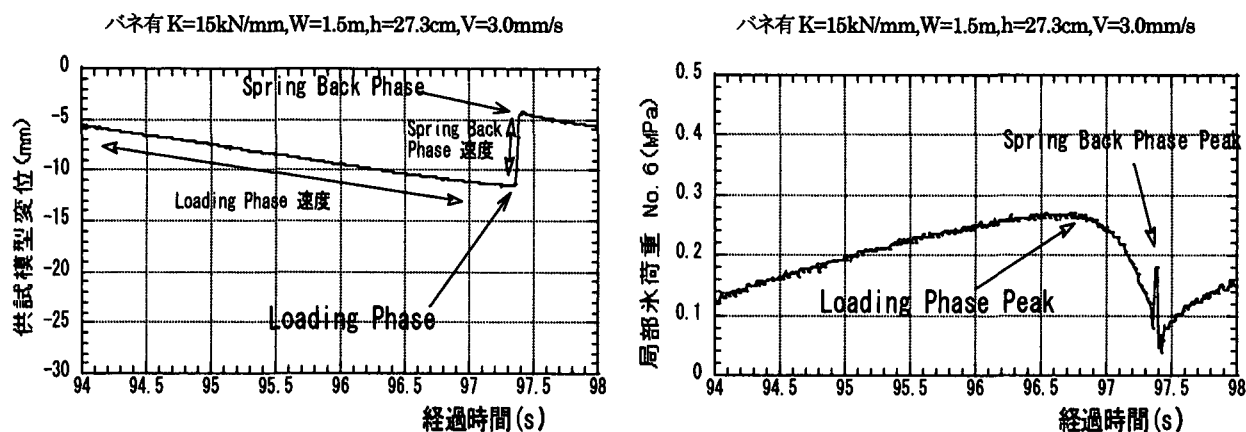


図-7 貫入供試模型にパネを取り付けた場合の分割パネルの局部荷重と供試模型の変位の拡大図

位に対応した繰り返し荷重が現れている。この時、氷荷重は氷盤の破壊のたびに零近傍まで下がる。これに対してパネを取り付けない剛性の非常に高い実験の場合は、供試模型の変位はほぼ認められず、氷荷重も零近傍まで下がることはなくランダムなピークの発生を示している。これは剛性が低い方が高い場合に比べて、氷盤破壊の同時性がより高いことを示している。

更に、供試模型にパネを取り付けた場合の分割パネルの局部荷重と供試模型の変位を拡大したものを図-7に示す。貫入速度は3.0mm/s、氷厚は27.2cmである。供試模型がジャッキの固定点に対して氷盤貫入逆方向(-)へ戻される場合の loading phase と、氷盤の破壊によって供試模型が貫入方向(+)へ急激に揺り戻される

spring-back phase が現れている。これは構造物の剛性が低くなるほど氷盤破壊に連動して構造物は変位(振動)を繰り返すことを示している。この結果はこれまでの室内実験で示された結果とも対応している。<sup>6), 7)</sup>

#### 4. 2次元パネルセンサーデータの設計への適用

2次元パネルセンサーを氷盤貫入試験に採用したのは本研究が初めてである。この装置の利点は、①氷盤と構造物の真の接触域を計測できる、②接触面における氷圧力分布を計測できる、③氷圧力分布の時間的推移をパソコン画面上で観察できる、ということである。

構造物に作用する氷荷重は貫入速度、構造物の大きさとその剛性、氷の物性など多くの条件に影響される。貫

入速度の違いが全氷荷重に影響を及ぼさない場合でも、図-3と図-4の氷圧力分布に見られるように、局部的には異なる荷重が作用していることから明らかになった。貫入供試体幅 (0.6m) と氷厚 (35cm 前後) をほぼ同じ条件として、貫入速度のみ変化させた場合の2次元パネルセンサーで計測した氷圧力分布を図-8に示す。速度を0.3mm/sから30.0mm/sまで変化させた場合の6ケースの実験結果である。接触面における氷圧力は、速度の遅い場合の接触面積の大きい等分布荷重状態から、速度の速い場合の水平方向に直線的に作用する集中荷重状態へと変化している。このことは構造物の設計において、①構造物の安定計算に対する全体氷荷重と、②部材の構造設計に対する局部氷荷重を明確に分けて考えなくてはならないことを示すと共に、2次元パネルセンサーによる荷重情報が非常に有効であることを示唆している。

#### 参考文献

- 1) 竹内貴弘、青島正和、松下久雄、中澤直樹、寺島貴志、赤川 敏、酒井雅史、佐伯 浩：氷荷重に関する中規模野外実験における構造物と氷盤の相互作用について、海洋開発論文集, Vol.12, pp.379-384, 1996.
- 2) 赤川 敏、河村宗夫、竹内貴弘、酒井雅史、青島正和、勝井秀博、松下久雄、寺島貴志、中澤直樹、平山健一、佐伯 浩：氷荷重に関する中規模野外実験

における構造物と氷盤の相互作用について(その2)、海洋開発論文集, Vol.13, pp.771-776, 1997.

- 3) 竹内貴弘、赤川 敏、河村宗夫、酒井雅史、勝井秀博、松下久雄、寺島貴志、中澤直樹、平山健一、佐伯 浩：氷荷重に関する中規模野外実験における構造物と氷盤の相互作用について(その3)、海洋開発論文集, Vol.14, pp.423-428, 1998.
- 4) Joensuu, A. and K.Riska : Contact between ice and structure, (in Finnish), Laboratory of Naval Architecture and Marine Engineering, Helsinki University of Technology, Espoo, Finland, Report M-88, 1989.
- 5) (社) 日本海洋開発産業協会：平成9年度 極限海域における海洋構造物の基礎調査研究、海洋構造物に及ぼす氷荷重に関する研究 成果報告書、1998.
- 6) Nakazawa, Naoki and D.S.Sodhi : Ice forces on flat, vertical indentors pushed through floating ice sheets, USA Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Special Report 90-14, 1990.
- 7) Sodhi, D.S. and Naoki Nakazawa : Frequency of intermittent ice crushing during indentation tests, Proc. 10th IAHR Symposium on Ice, Vol.3, pp.277-290, Espoo, Finland, 1990.

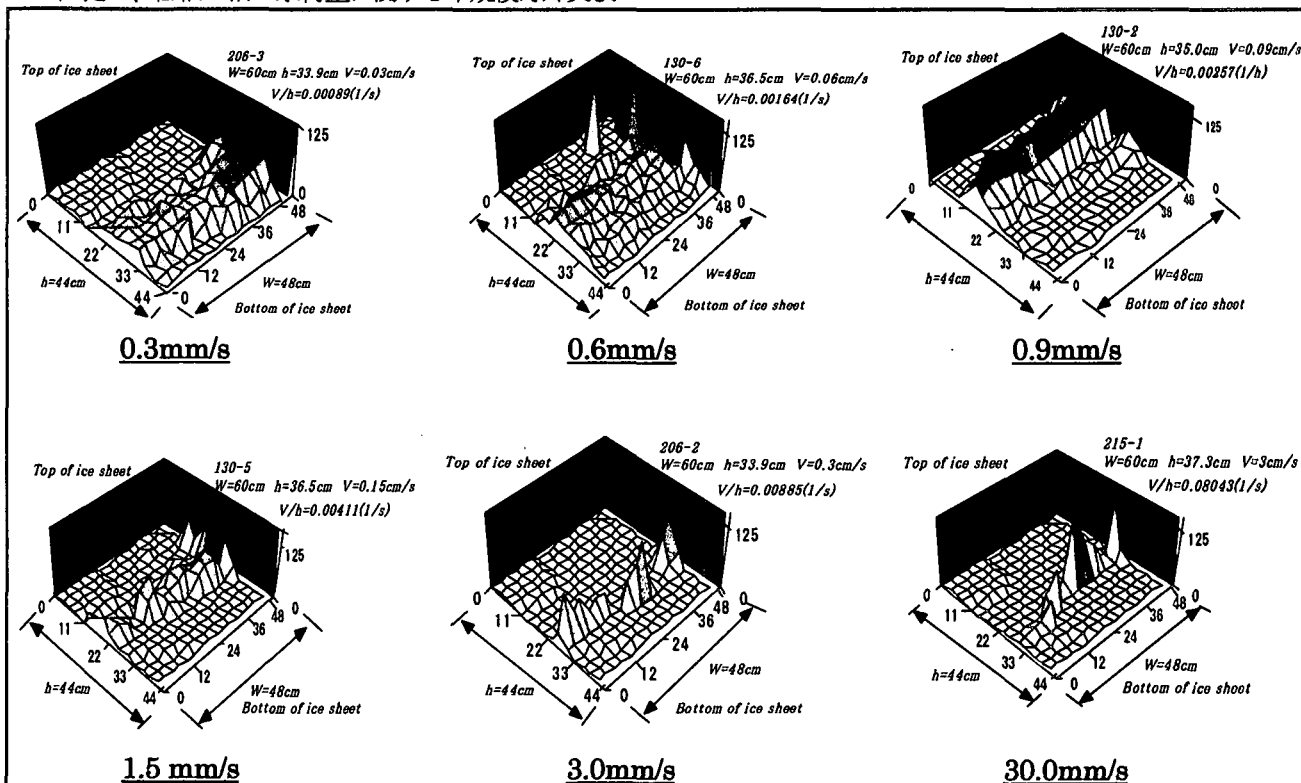


図-8 貫入供試体幅 (0.6m) と氷厚 (35cm 前後) をほぼ同じ条件として、貫入速度のみ変化させた場合の2次元パネルセンサーで計測した氷圧力分布図 (0.3mm/s~30.0mm/s)