

上曲げ及び下曲げタイプの円錐脚型多脚氷海構造物に作用する 氷荷重及びのモーメント氷荷重に関する氷海水槽模型実験

Ice Tank Experiment of Ice Forces and Ice-Induced Moments
on Upward and Downward Bending Multi Conical Legged Structures(MCLS)

加藤 一行*, 足立明弥*, 岸本弘晴*, 林口清次*

Kazuyuki Kato, Meiya Adachi, Hiroharu Kishimoto, Seiji Hayashiguchi

Model experiments for multi conical legged structures (MCLS) were performed. Two types of MCLS, namely UB-MCLS and DB-MCLS were tested in IHI Ice Model Tank. The experiments were performed taking the intrusion angle as a testing parameter and six force components were measured.

In the experiments, the ice forces and the ice-induced overturning and twisting moments revealed its maximum at the intrusion angle of 30 deg. And in normalized fashion, the ice force and the ice-induced moments for DB-MCLS were twice as large as those for UB-MCLS. However, the magnitudes of those quantities were approximately the same for both DB-MCLS and UB-MCLS.

Keywords: (Ice force, Multi conical legged structure, Ice tank)

1. まえがき

円錐脚型多脚氷海構造物 (MCLS - Multi Conical Legged Structure) は、複数本の、水線面付近の形状が円錐型をした脚柱によって上部構造と下部構造を連結したタイプの氷海構造物である。特に下部構造が所定の海域に曳航するときに浮力を発揮するように箱型をしているものをマット型MCLSと呼ぶ。その概念図を図1に示したが、このタイプの氷海構造物は、氷象の比較的マイルドな氷海域、例えば、サハリン沿岸などでの天然資源開発などに使用することを想定している。

著者らはこれまでに、このタイプの氷海構造物に作用する氷荷重の推定法に関する研究を行ってきており^{1), 2)}、その一環として、脚柱が正方形に配列されたMCLSの模型実験を氷海水槽において行っている^{3), 4)}。しかしながら、それらの模型実験では水平力及び垂直力しか測定されておらず、このタイプの氷海構造物においては問題となる可能性があると考えられる氷板との相互作用によって構造物に作用する、転倒モーメント及び振りモーメントの測定は行っておらず、それらに関してはまったく未知であった。従って、それらが設計上考慮すべきレベルにあるか否かを判断するのにに関する情報さえ無いのが現状である。

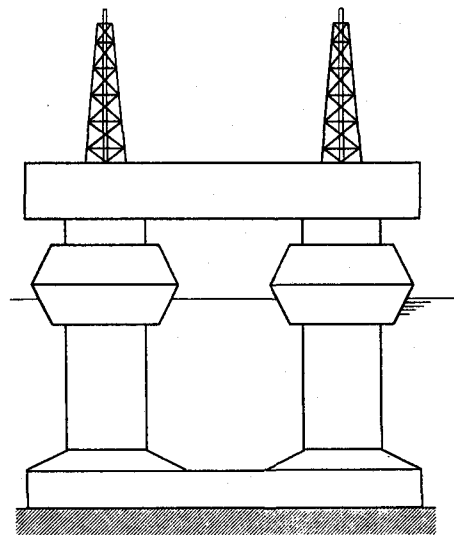


図1 MCLSの概念図

本研究では、氷海水槽において模型実験を行い、3方向の鉛直力と3軸回りのモーメントを計測した。そして、それらの計測データから、水平氷荷重、垂直氷荷重、転倒モーメント及び振りモーメントを抽出し、それらに関して検討を加えた。用いた模型は、氷板を押し下げて破壊するタイプの円錐(DBC)の脚柱を持つMCLS(DB-MCLS)と氷板を押し上げて破壊するタイプの円錐(UBC)を有するMC

* 正会員 石川島播磨重工業(株) 技術研究所 船舶海洋開発部(235 横浜市磯子区新中原町1番地)

LS (UB-MCLS) の2種である。

2. 模型実験の概要

模型実験は石川島播磨重工業(株)技術研究所の水海水槽⁵⁾において行った。用いた模型は図2にその概要が示されているように正方形に脚柱が配列された4脚のMCLS模型である。DB-MCLS, UB-MCLSとも、脚柱中心間距離、すなわち脚柱中心の成す正方形の一辺の長さは800mmであり、水線面付近に配置された円錐型付加物の水線面での直径は300mm、傾斜角は60度(水平から)である。本来の円柱の直径は150mmである。

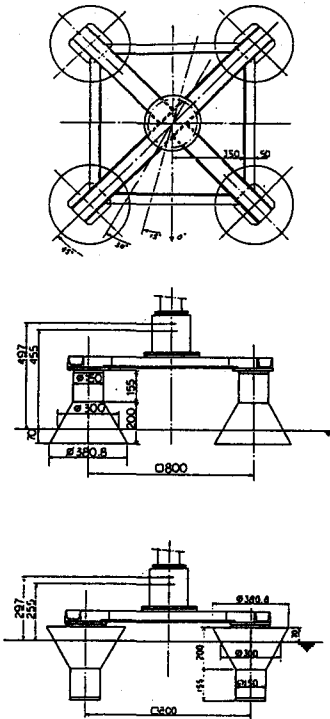


図2 模型の概要図

模型構造物を曳引車にロードセルを介して固定し、曳引車を駆動して模型氷板中に貫入させてそのときに模型に作用する諸荷重を測定した。測定した荷重は、模型進行方向に水平な方向(x軸)の荷重(F_x)、それに水平面内で直交する方向(y軸)の荷重(F_y)、模型進行方向に鉛直な方向(z軸)の荷重(F_z)、模型進行方向を中心軸とするモーメント(M_x)、模型進行方向と直交する方向を中心軸とするモーメント(M_y)及び模型進行方向と垂直な方向を中心軸とするモーメント(M_z)の6成分である。ただし、 M_x 、 M_y はロードセルの取り付け位置に依存する量であることを付記しておく。ロードセルの感力部は、DB-MCLSの場合、 M_x に対しては水線面から215mm、 M_y に対しては297mmの高さにあり、UB-

MCLSの場合は M_x に対しては415mm、 M_y に対しては497mmの高さにある。

各荷重の正方向は図3に示されたように定義した。 F_y と M_y の定義がDB-MCLSとUB-MCLSで逆であることを注意してほしい。

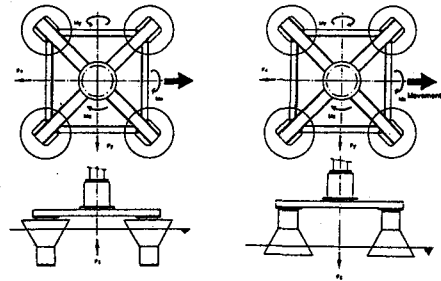


図3 荷重の正方向の定義

実験に用いた氷厚はおよそ20～35mmの範囲であり、実験中1mm毎に構造物により破壊された氷片を採取して、それをノギスにより測定し、それらの平均値をその実験での氷厚とした。1mm毎に測定した氷厚のばらつきは変動係数で2%以内であり、均一性は確保されていた。

模型氷板の曲げ強度は、およそ13～30kPaで、それぞれのタイプで1回だけ例外的に曲げ強度の大きな氷板があった。曲げ強度は、実験で破壊されない部分を用いて、実験開始直前(DB-MCLS)か終了直後(UB-MCLS)に行った。曲げ強度は片持梁法により測定し、3～4本の供試体を測定に供し、それらの平均をその実験における曲げ強度とした。曲げ強度のばらつきは変動係数で10%以内であった。なお、模型氷の場合載荷方向によって曲げ強度が異なるが、本実験では模型実験での主要な曲げ方向と同じ方向の載荷を行って曲げ強度を測定した。以下、DB-MCLSに対応する下向きの荷重を作用させて計測した曲げ強度を σ_{fd} 、UB-MCLSに対応する上向きの荷重を作用させて計測した曲げ強度を σ_{fu} と表記する。

模型の進行速度と貫入距離は例外無く10mm/s、7000mmとした。模型実験は、進行角(定義を図4に示した)をパラメータとして行った。用いた進行角は0、15、30、45度の4種である。

MCLSを用いた実験を行う前に、参照値として、独立した円錐に作用する氷荷重を測定した。実験はMCLSを構成する脚柱の一つを用いて行った。実験は双方の模型（DBCとUBC）に対しても同様の氷厚と曲げ強度の範囲で行った。

しかし、曲げ強度はMCLSの実験と同様に、それぞれの模型の主要な曲げ方向と同じ方向の荷重を作用して測定した値である。すなわち、DBCに対しては σ_{fd} を、UBCに対しては σ_{fu} を用いた。模型の進行速度と貫入距離は例外無く10 mm/s, 3000 mmとした。

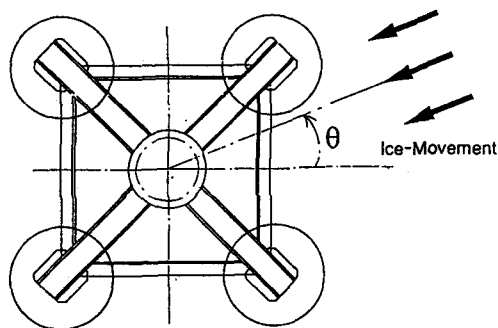


図4 進行角の定義

3. 実験結果

3.1 独立した円錐を用いた実験

3.1.1 観察

独立した円錐を用いた実験における氷板の破壊の様子は、これまでに多く報告されているものとまったく同様で、円弧状の破壊を繰返すというパターンであったが、DBCに対する破壊円の方がUBCに対するそれよりも大きいことが観察された。

3.1.2 独立した円錐に作用する氷荷重

ある試験における氷荷重は、次のような操作により抽出した。まず、 F_x の時刻歴と F_y の時刻歴から、それらのベクトル和の時刻歴を算定し、その時刻歴において定常的に現象が進行している区間での、最大値の50%以上のピーク値をすべて拾い出す。そして次に、それらの平均値と標準偏差を求め、平均値に標準偏差の3倍を加えた値をその試験における氷荷重とした。

それらの氷荷重は、それぞれ次のように近似できる。すなわち、DBCに対しては、

$$F_{id} = 0.0541 \rho_{ig} h + 1.289 \sigma_{fd} h^2 \quad (1)$$

ここに、 ρ_{ig} は氷板の単位体積重量であり、 9000 N/m^3 と仮定した。 h は氷厚である。UB

Cに対しては、

$$F_{iu} = 0.138 \rho_{ig} h + 4.96 \sigma_{fu} h^2 \quad (2)$$

となる。実験結果は図5（DBC）と図6（UBC）に示した。

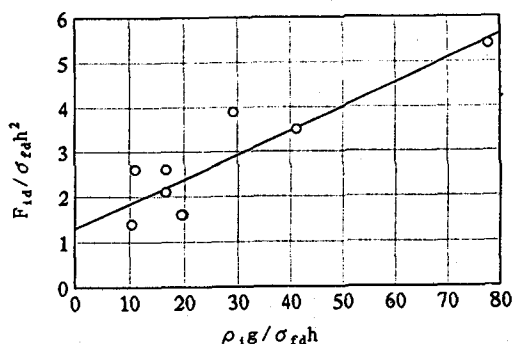


図5 独立したDBCに作用する水平氷荷重の実験結果

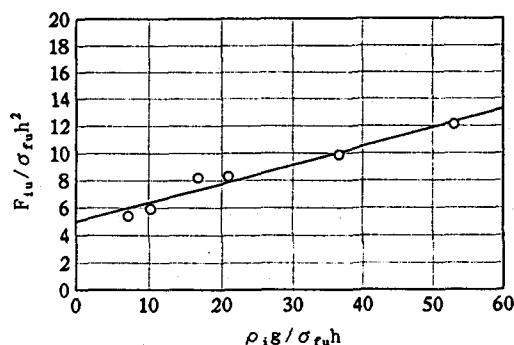


図6 独立したUBCに作用する水平氷荷重の実験結果

3.2 MCLSの実験

3.2.1 観察

MCLSの実験では、DB-MCLSとUB-MCLSとで脚柱間のジャミングの様子が異なっていることが観察された。すなわち、DB-MCLSの方がUB-MCLSに対するよりも多量のジャミングが観察された。

3.2.2 MCLSに作用する氷荷重、モーメント氷荷重と進行角の関係

模型実験で得た時刻歴応答は紙面の関係から示さないが、時刻歴応答には次に述べるような特徴が例外なく現れる。 F_x は模型が氷板に貫入し始めると徐々に大きくなって行き、模型全てが氷板中に貫入した後は一定のレベルで変動を繰り返す。 F_y は小さい値を中心とした正負にまたがる変動を繰り返す。中心値は進行角15, 30度の方が0, 45度よりも少し大きいが大差は無い。 F_n は F_x と F_y のベクトル和

であり、基本的には F_x と同様の時刻歴応答を示す。 F_z も F_x と同様の時刻歴応答を示す。また、 M_x と M_z は F_y と同様の時刻歴応答を示し、 M_y は F_x と同様の時刻歴応答を示す。

各試験で得た時刻歴応答から、次に示す諸量を抽出し、それらと進行角の関係を調査した。

水平氷荷重 $F: F_h$ の時刻歴応答で定常的に現象が進行している部分（模型がすべて氷板に貫入した後から曳引車停止の少し前まで）最大荷重の 50 % 以上の全てのピークを拾いだし、それらの平均値にそれらの標準偏差の 3 倍を加えた値。

垂直氷荷重 $F_v: F_z$ の時刻歴応答に対し、水平氷荷重と同様の操作を施した値。

転倒モーメント $M_o: M_y$ の時刻歴に対し、水平氷荷重と同様の操作を施した値。

振りモーメント $M_t: M_z$ の時刻歴応答に対し、正側及び負側全てのピークに対しそれぞれ水平氷荷重と同様の操作を行い、それらの内で絶対値の大きい方の値の絶対値。

以後、DB-MCLS に対する諸量に対しては添字 d を、UB-MCLS に対する諸量には添字 u を記すことにする。

これらの諸量を関連する独立した円錐に作用

する氷荷重、すなわち、(1) 式あるいは (2) 式で正規化し、それらを進行角に対してプロットすると、図 7 ～ 図 10 を得る。

4. 考察

4.1 進行角との関係

進行角と正規化された氷荷重、モーメント氷荷重との関係は、図 7 ～ 図 10 から明らかのように、いずれの量に対しても進行角 30 度で極大を示している。しかし、その傾向は DB-MCLS に対するものの方がより顕著である。UB-MCLS では正規化水平氷荷重に対しては進行角 30 度がやや大きくなるが、進行角による相違は顕著ではない。正規化垂直氷荷重、正規化転倒モーメント、正規化振りモーメントに対しては進行角による相違は明かでは無い。

UB-MCLS に作用する水平氷荷重に対しては、加藤⁶⁾により各脚柱に作用する荷重の非同期性を考慮した推定法を提案しており、それと UB-MCLS の実験結果は比較的良い対応を示している。しかしながら、DB-MCLS に対する実験結果は、その推定法から得られる値と比較すると 2 倍近く大きい値となっている。むしろ、非同期性を考慮しない、すなわち、各脚柱に荷重が同期的に作用するとした推定法から得られる値と良い対応を示している。

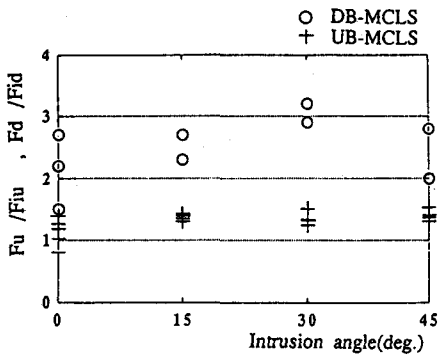


図 7 正規化水平氷荷重と進行角の関係

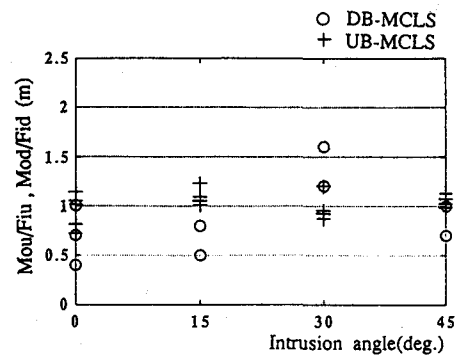


図 9 正規化転倒モーメントと進行角の関係

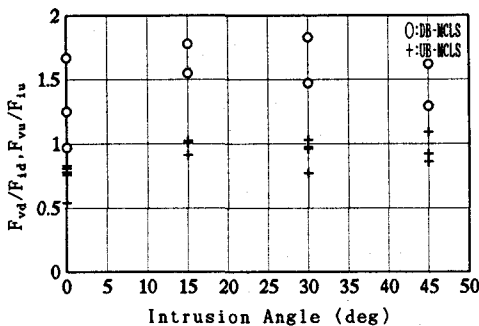


図 8 正規化垂直氷荷重と進行角の関係

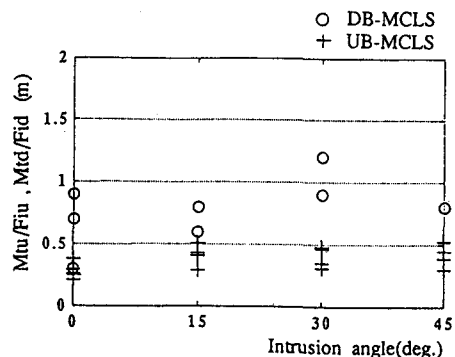


図 10 正規化振りモーメントと進行角の関係

このことは、決してDB-MCLSでは各脚柱に作用する荷重が同期しているのではなく、脚柱間に発生したジャミングが原因しているものと考えられる。ジャミングによる荷重は、脚柱の幾何学的構成から、進行角30度で最大になると予想される。この効果により進行角30度で正規化水平氷荷重が最大になったものと思われる。従って、DB-MCLSではジャミングによる荷重が、氷板を破壊したり、移動したりするのに必要な荷重と同等水準であるのではないかと予想される。残念ながら、本実験からではこの予想を検証することはできないので今後の課題としたい。

垂直氷荷重、転倒モーメント及び振りモーメントに関しては推定法は提案されていないが、大まかに言えば、それらは水平氷荷重と密接な関係を持っていると考えて良く、定性的には正規化水平氷荷重と同様の傾向を進行角に対して示すのは自然なことである。その意味で、本実験での垂直氷荷重、転倒モーメント及び振りモーメントの計測に不都合は無かったものと考えられる。

4.2 DB-MCLSとUB-MCLSに作用する氷荷重の比較

図7～図10で明かなように、正規化転倒モーメント以外はDB-MCLSに対する正規化氷荷重・モーメント氷荷重の方がUB-MCLSに対するそれらよりもかなり大きい。転倒モーメントは、図3に示したように正方向の定義が異なり、そのためにUB-MCLSでは水平氷荷重と垂直氷荷重の寄与分が加算されるのに対し、DB-MCLSではそれらの差が転倒モーメントになる。また、DB-MCLSとUB-MCLSではモーメントの感受部の水線面からの距離が異なるので、比較することに意味がなく、全体としてDB-MCLSに対する正規化転倒モーメントがUB-MCLSに対するそれよりも小さくなったことは自然であると思われる。しかし、進行角30度でその関係が逆転しているのは、やはりジャミングの影響であると考えられる。

正規化水平氷荷重、正規化垂直氷荷重及び正規化振りモーメントで、DB-MCLSの方が大きくなった原因もジャミングによるものと考えられる。ここでもジャミングによる寄与分は定かではないが、半分程度になるのではないかとと思われる。この件に関しても今後の課題としたい。

正規化された量としては、DB-MCLSに作用する氷荷重がUB-MCLSに作用する氷

荷重よりも大きくなるという実験結果を得たが、氷荷重自体はDB-MCLSとUB-MCLSでどのような関係になっているかを次に検討する。実験で得た氷荷重をそのまま比較することは、氷厚と曲げ強度が異なるので適切では無いと考えられるので、UBCに作用する氷荷重、すなわち F_{iu} ((2)式) でそれぞれの試験で得られた水平氷荷重、垂直氷荷重、振りモーメントを正規化して考えることにする。しかし、それを実行するには上曲げによって得た曲げ強度 σ_{fu} が必要であるが、DB-MCLSの実験ではそれが計測されていない。IHI氷海水槽のこれまでの経験では、 σ_{fu} は σ_{fd} のおよそ $1/2$ 程度であるから、 $\sigma_{fu} = 1/2 \sigma_{fd}$ と仮定して、DB-MCLSの実験に対して F_{iu} を算定し、その値によりそれぞれの氷荷重を正規化し、それらを進行角に対してプロットすると図11～図13を得る。

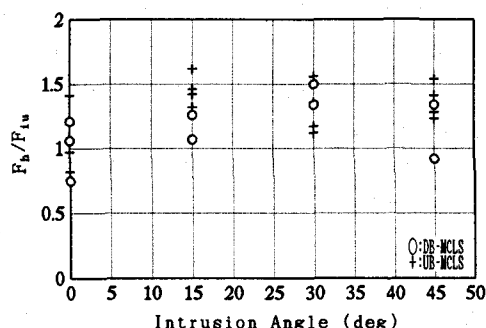


図 11 正規化水平氷荷重と進行角の関係
(F_{iu} で正規化した)

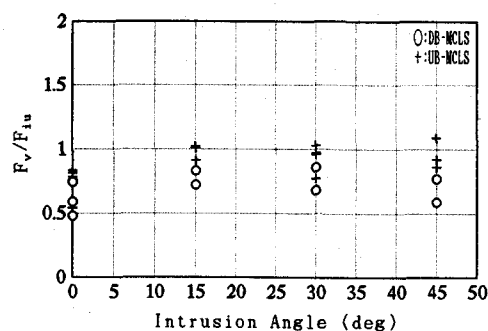


図 12 正規化垂直氷荷重と進行角の関係
(F_{iu} で正規化した)

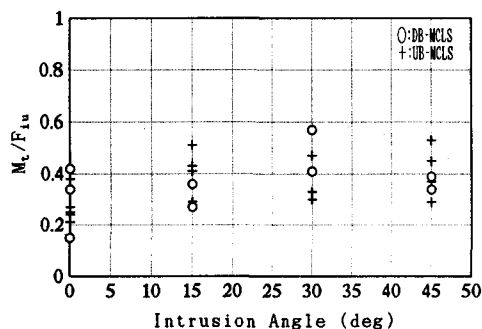


図 13 正規化振りモーメントと進行角の関係
(F_{1u} で正規化した)

これらの図から、UB-MCLS に対する諸量が DB-MCLS に対する諸量よりやや大きいという結果が得られる。しかし、 $\sigma_{fu} = 1/2 \sigma_{fd}$ という仮定に含まれる誤差を考えると、UBC に作用する氷荷重、 F_{1u} で正規化したときに UB-MCLS と DB-MCLS に対する正規化水平氷荷重、正規化垂直氷荷重及び正規化振りモーメントは同等の水準にあると結論できる。このことは、とりもなおさず、UB-MCLS と DB-MCLS に作用する水平氷荷重、垂直氷荷重及び振りモーメントはほぼ同等であると考えて良いことを意味している。

5. まとめ

氷板を押し下げて破壊するタイプの円錐 (DBC) の脚柱を持つ MCLS (DB-MCLS) と氷板を押し上げて破壊するタイプの円錐 (UBC) を有する MCLS (UB-MCLS) の 2 種の模型を用いて、氷海水槽において実験を行った。主な実験パラメータとしては構造物と氷板の進行方向との相対的角度 (進行角) を用いた。本実験の特色は、これまで計測されなかった氷との相互作用によって構造物に作用するモーメント氷荷重、すなわち転倒モーメント及び振りモーメントを、水平氷荷重、垂直氷荷重と同時に測定したことにある。

主な実験結果は次に述べるようにまとめられる。

(1) 関連する独立した円錐に作用する水平氷荷重で、それぞれの氷荷重・モーメント氷荷重を正規化した場合、いずれの荷重に関しても、進行角 30 度で最大となる。この傾向は DB-MCLS に対する方が顕著であり、UB-MCLS に対するものは顕著ではない。

(2) 関連する独立した円錐に作用する水平氷

荷重で、それぞれの氷荷重・モーメント氷荷重を正規化した場合、転倒モーメントを除いて、DB-MCLS に対するものが UB-MCLS に対するものより大きくなり、その大きさは約 2 倍となる。これは UB-MCLS ではあまり生じない脚柱間のジャミングが、DB-MCLS では相当量発生したことに起因すると考えられるが、そのジャミングが氷荷重などに及ぼす影響は定量的には不明である。

(3) 独立した UBC に作用する水平氷荷重で、それぞれの氷荷重・モーメント氷荷重を正規化した場合、転倒モーメントを除いて、DB-MCLS に対するものも UB-MCLS に対するものもほとんど同様となる。これは、UB-MCLS に対する氷荷重が推定できれば、DB-MCLS に作用する氷荷重もある程度推定できることを意味していると考えられる。

最後に、MCLS に作用する氷荷重を更に的確に理解するためには次のことが今後の課題になると考えられる。

- (1) 異なった模型 (脚配列、傾斜角) を用いた実験による上記諸結論の検証
- (2) ジャミングによる荷重の寄与分の明確化
- (3) 各脚柱に作用する氷荷重の非同期性の理解
— 各脚柱に作用する氷荷重を独立して測定する実験の実施

参考文献

- 1) 加藤一行、岸本弘晴、三田重雄：円錐脚型多脚氷海構造物に作用する氷荷重の要素試験。海洋開発論文集 vol.5 pp.31-36 平成元年
- 2) 加藤一行、岸本弘晴、三田重雄：円錐脚型多脚氷海構造物に作用する氷荷重。第 36 回海岸工学講演会講演論文集 pp.683-687 平成元年
- 3) 加藤一行、岸本弘晴、三田重雄、林口清次：多脚型氷海構造物に作用する氷荷重に関する実験的研究。第 5 回オホーツク海と流水に関する国際シンポジウム講演要旨集 pp.146-150 平成 2 年
- 4) Kato, K.: Total Ice Force on Multi Legged Structures. Proceedings, 10th IAHR Ice Symposium Vol.2 pp. 974-983 1990
- 5) 堤孝行、荻原誠功、溝口純敏、横田孝次、加藤一行、増子章、伊東章雄、秋山弘之、大金英一：IHI の新しい船舶海洋研究設備について。日本造船学会誌 第 745 号 pp.421-426 平成 3 年
- 6) 加藤一行：円錐脚型多脚氷海構造物 (MCLS) に作用する水平氷荷重の推定法について。海洋開発論文集 vol.9 pp.83-88 平成 5 年