

多角錐型氷海構造物に作用する氷荷重に関する実験的検討

Experimental Considerations of Ice Forces on Pyramid Shaped Arctic Structures

加藤 一行*

Kazuyuki, Kato

It is desired that a method can grasp a first stage estimation of ice force on pyramid shaped arctic structures. To work out this task, making use of the Ralston's theory for conical shaped structures is seemed to be better way. In this study, relationship between ice force calculated from the Ralston's theory for conical structures and ice forces on three types of pyramid shaped structure was examined experimentally. As a result, the coefficients for practical use, which is able to use the ice force calculated from the Ralston's theory, for conical, quadrangular and octangular pyramid shaped structures were proposed.
keyword: Ice force, Arctic structure, Ralston's theory

1. はじめに

北極海、サハリン沖などの氷海域で各種の資源開発に供用される海洋構造物（以下、氷海構造物）を設計する際に、構造物と氷との相互作用によって構造物に作用する力（以下、氷荷重）は最も重要な設計外力である。氷海構造物を合理的に設計するためには、氷荷重の精度の高い推定技法の確立が不可欠である。これまでの諸研究により、相互作用面が傾斜している氷海構造物（傾斜氷海構造物）の方が垂直な氷海構造物（垂直氷海構造物）よりも氷荷重の面からは有利であることが良く知られるようになった。もしも、氷海構造物が完全に円錐（台）型をしていれば、Ralston の提案した推定式（Ralston, 1977）によりある程度の推定が可能であるが、建造コストの面からは完全な円錐型氷海構造物を建造することは必ずしも有利ではなく、実際には多角錐（台）型氷海構造物とならざるを得ないと思われる。そのような型式の氷海構造物に作用する氷荷重を推定する場合、その都度氷海水槽において模型試験を行わなければならないのが現状である。本研究の目的は、多角錐型氷海構造物に作用する氷荷重のある程度の推定を、氷海水槽で模型試験を行うことなく、簡易に行うことを可能とし、設計しようとする氷海構造物の主要目の初期的検討を迅速に行えるようにすることである。

本研究では、簡易に円錐型氷海構造物に作用する氷荷重を算定でき、かつ理論的信頼度の高い Ralston の提案した推定式（以下、Ralston の式）を利用して、その Ralston の式から算定される氷荷重の値と氷海水槽での小規模模型試験の結果得られた氷荷重との関係を求めるという方針で検討を行った。4 種の傾斜角の円錐型構造物、3 種の傾斜角の四角錐型、八角錐型構造物の模型試験を石川島播磨重工業（株）技術研究所の氷海水槽（以下、I H I 氷海水槽）（加藤、藤井, 1986）で行い、それらの結果得られた最大氷荷重と Ralston の式から算定される氷荷重との比較を行い、実用的価値の高い修正係数を提案している。

2. 模型試験の概要

模型試験は I H I 氷海水槽で行った。I H I 氷海水槽では重量比 1% の尿素水溶液を所定の環境温度で所定の時間凍結し、模型氷板を生成している。模型試験では、その模型氷板が目標の氷厚、曲げ強度になった時点で、曳引車に検力計を介して固定した模型を、曳引車を駆動して模型氷板中に所定の距離貫入させ、そのときに模型に作用した力を測定している。

氷板中への貫入距離は、少なくとも模型の水線面での有効直径（外接円の直径）の 3 倍以上とし、典型的には有効直径の 5 倍とした。曳引速度はすべての試験で 10 mm/s とした。模型に作用した力は、水平面内で 2 方向と垂直方向の 3 方向で測定しているが、本論で氷荷重と言う場合は水平面内の 2 方向の力のベクトル和である。さらに、氷荷重は現象が定式的に進行しているときには一定の幅を持って変動するのが一般的であるから、本論では現象が定式的に進行している区間での最大値を実験氷荷重と呼んでいる。

* 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 横浜市磯子区中原町 1 番地）

氷厚と曲げ強度は目標を設定し、模型氷板がその目標値となった時点で模型試験を行っているが、目標とした値とのずれを完全になくすることは不可能であり、模型試験終了直後に氷厚と曲げ強度を測定し、それらの値をその試験における氷厚と曲げ強度とした。氷厚は試験によって破壊されてできた氷片を数個採取し、ノギスにより直接測定した。曲げ強度は試験を行った部分の側方の健全な部分を用いて片持梁法により測定した。ただし、曲げ強度試験における載荷方向は模型試験における主要な曲げ方向と同様に氷板を上へ引き上げる方向である。

模型試験はそれぞれ傾斜角の異なる4種の円錐型構造物模型と傾斜角の異なる3種の四角錐型及び八角錐型構造物模型の10種の模型を用いて行った。四角錐型及び八角錐型模型はすべて有効直径400mm、水線面上の高さが150mmであるが、円錐型模型ではそれらが個々にわずかに異なる。それらの値は表1に示されている。傾斜角は、円錐型模型では45°、60°、70°、80°の4種、四角錐型及び八角錐型模型では45°、60°、75°の3種である。また四角錐型模型では図1に示されている2種の進行方向の試験を行った。模型と氷板との間の摩擦係数は、同じ表面処理をした平板を用いて測定し、多少のばらつきはあるが0.1と定めた。

模型試験は、円錐型構造物模型に対しては45回、八角錐型構造物模型に対しては24回、四角錐型構造物模型に対してはそれぞれの進行方向に対して各24回の総計117回行った。

3. 円錐型氷海構造物に対する Ralston の式

本研究では Ralston(1977) が提案した円錐型氷海構造物に対する氷荷重の推定式を、多角錐型氷海構造物に作用する氷荷重の推定に、利用するときの修正係数を模型試験結果と比較して求めようとしている。そこで、ここではまず Ralston の式を示すことにする。Ralston の原論文においては数式の形では与えられておらず、下記の諸式は加藤と Guillot(1990) が Ralston の理論を再構築して導いたものである。

Ralston は塑性極限解析の上界定理を用いて円錐型氷海構造物に作用する氷荷重の推定式を定式化した。塑性極限解析の上界定理については説明を省略するが、結局、次式が氷荷重の推定式となる。

$$R h = \{ a_1 \sigma_f h^2 + a_2 \rho g h D w^2 + a_3 \rho g h (D w^2 - D t^2) \} a_4 \quad (1)$$

ここで、 σ_f は氷板の曲げ強度、 h は氷厚、 ρg は氷の単位体積重量 (upward) あるいは氷と水の単位体積重量の差 (downward)、 $D w$ は水線面での円錐の直径、 $D t$ は円錐の頂面での直径、 α は傾斜角である。係数 a_1, a_2, a_3, a_4 は、それぞれ次の式で与えられる。

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{1 + (1.5 + E(k)) \omega \ln \omega}{3(\omega - 1)} \\ a_2 &= \frac{1}{12} (\omega^2 - \omega - 2) \\ a_3 &= \frac{1}{4 \cos \alpha} \left\{ 1 + \frac{\mu E(k_1)}{\tan \alpha} \right\} \\ &\quad - \frac{1}{4 \tan \alpha} \mu f(\alpha, \mu) g(\alpha, \mu) \\ a_4 &= \frac{\tan \alpha}{1 - \mu g(\alpha, \mu)} \end{aligned}$$

ここに、 $f(\alpha, \mu) = \sin \alpha + \mu \cos \alpha F(k_1)$

$$g(\alpha, \mu) = \frac{G(\alpha)}{H(\mu, \alpha)}$$

$$G(\alpha) = \frac{1}{2} + \frac{\alpha}{\sin 2\alpha}$$

$$H(\mu, \alpha) = \frac{\pi}{4} \sin \alpha + \mu \frac{\alpha \cos \alpha}{\sin \alpha}$$

$$\omega = A/R$$

$$k = (3/4)^{1/2}$$

$$k_1 = \sin \alpha$$

A は氷板の破壊円の半径、 R は円錐型氷海構造物の水線面での半径であり、 μ は摩擦係数である。また $E(*)$ 、 $F(*)$ はそれぞれ第1種、第2種完全楕円積分である。

表 1 円錐型構造物模型の寸法

傾斜角 (度)	水線面直径 (mm)	水線面上高 (mm)
45	342	180
60	400	250
70	336	235
80	349	255

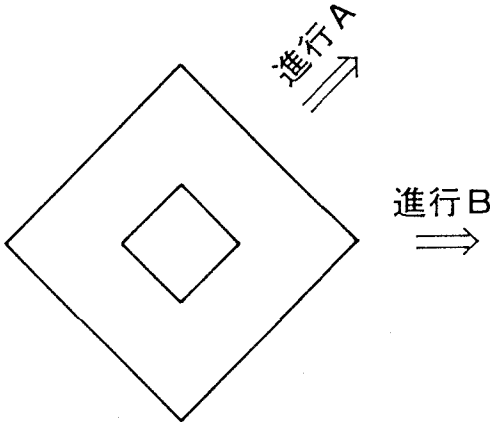


図 1 四角錐型氷海構造物模型試験における進行方向の定義

ただし、 ω は次式を満足する値でなければならない。

$$\frac{\partial (a_1 \sigma r h^2 + a_2 \rho g h D w^2)}{\partial \omega} = 0$$

4. 実験氷荷重と Ralston の式から算出される氷荷重との比較

模型試験で得た氷荷重（実験氷荷重）を横軸に、その試験の条件（氷厚、曲げ強度）を用いて Ralston の式より算定した氷荷重（Ralston 氷荷重）を縦軸にとってプロットすると図 2 ～ 図 5 を得る。図 2 は円錐型構造物に対するもの、図 3 は八角錐型構造物に対するもの、図 4 は四角錐型構造物で進行方向 A に、図 5 は進行方向 B に対するものである。図中の斜線は完全一致線で、もしもこの線にプロットが乗っていれば両者は完全に一致していることを示している。すなわち、完全一致線の上部にプロットがあれば、Ralston 氷荷重の方が実験氷荷重よりも大きい、また下部にあれば Ralston 氷荷重の方が実験氷荷重よりも小さいことを示している。

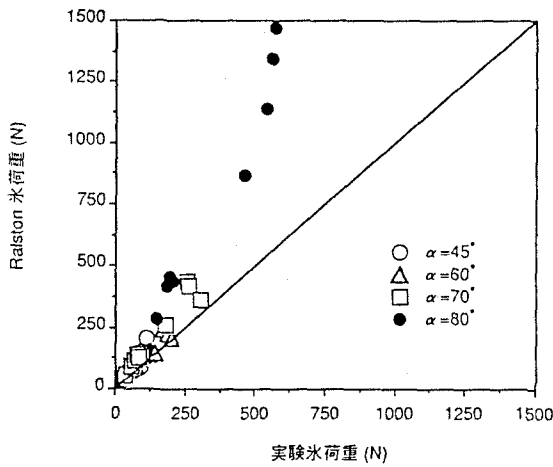


図 2 Ralston 氷荷重と実験氷荷重の比較
(円錐型構造物)

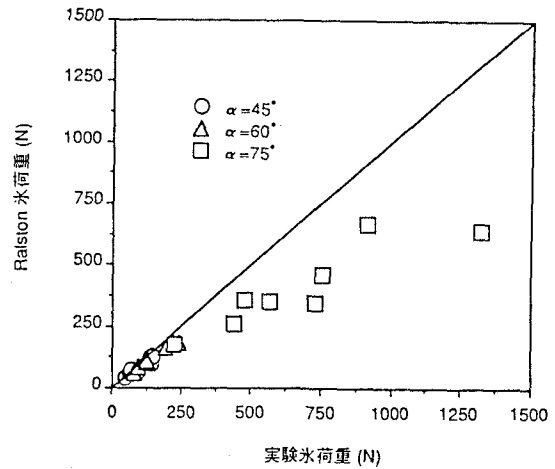


図 3 Ralston 氷荷重と実験氷荷重の比較
(八角錐型構造物)

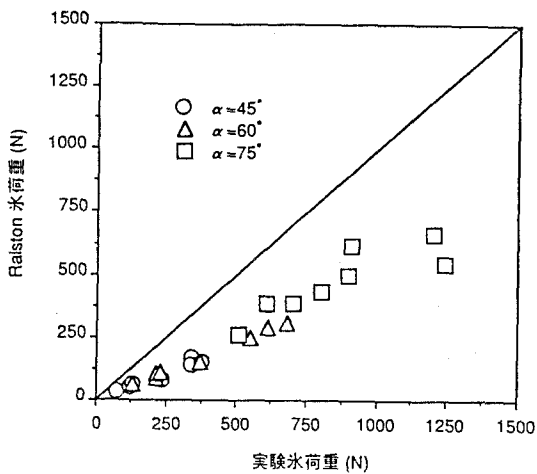


図 4 Ralston 氷荷重と実験氷荷重の比較
(四角錐型構造物進行 A)

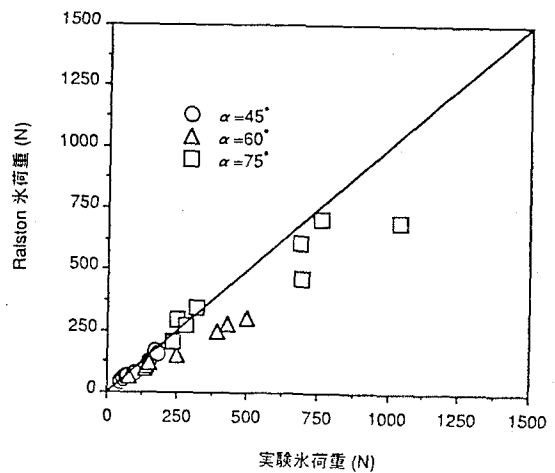


図 5 Ralston 氷荷重と実験氷荷重の比較
(四角錐型構造物進行 B)

これらの図から、傾斜角に関わらず、円錐型構造物では Ralston 氷荷重の方が大きく、その他の構造物では実験氷荷重の方が大きいことが明かである。

さらに実験氷荷重と Ralston 氷荷重の関係を明らかにするために、実験氷荷重と Ralston 氷荷重の比（氷荷重比）を求めて、それらをまとめると表 2 ～ 表 5 を得る。これらの表からは傾斜角が氷荷重比に一定の影響を与えるという傾向を認めることはできない。例えば、氷荷重比が最大となる傾斜角は円錐型構造物では 60°、八角錐型構造物では 75°、四角錐型構造物進行 A では 45°、四角錐型構造物進行 B では 60° である。すなわち、本研究で行った模型試験からは、傾斜角が氷荷重比に影響を与えないと結論できる。そこで Ralston 氷荷重に対する修正係数は傾斜角のいかんに関わらず決めることができると考えて良いと思われる。

表 2 氷荷重比（円錐型構造物）

傾斜角 (度)	試験 回数	氷荷重比 (%)	
		平均	標準偏差
45	16	71.5	14.2
60	12	81.0	9.76
70	9	65.3	8.35
80	8	45.8	4.81
全	45	68.2	15.8

表 3 氷荷重比（八角錐型構造物）

傾斜角 (度)	試験 回数	氷荷重比 (%)	
		平均	標準偏差
45	8	118.4	18.4
60	8	119.6	9.78
75	8	164.1	31.5
全	24	134.0	30.1

表 4 氷荷重比（四角錐型構造物進行 A）

傾斜角 (度)	試験 回数	氷荷重比 (%)	
		平均	標準偏差
45	8	225.4	29.8
60	8	217.7	16.8
75	8	182.2	24.4
全	24	208.4	30.1

表 5 氷荷重比（四角錐型構造物進行 B）

傾斜角 (度)	試験 回数	氷荷重比 (%)	
		平均	標準偏差
45	8	112.4	7.34
60	8	145.3	18.7
75	8	114.1	23.4
全	24	123.9	23.0

5. Ralston 氷荷重を利用するときの修正係数

前述したように、傾斜角は氷荷重比に影響を与えないと考えられるので、傾斜角に関わらずすべての氷荷重比のヒストグラムを描くと図 6 ～ 図 9 を得る。氷荷重比の分布形状は必ずしも典型的な確率分布形状とはなっていないが、近似的には正規分布であると考えても大過無いような分布形状である。そこで本論では、正規分布であると仮定して議論を進めることにする。

5.1 円錐型氷海構造物に作用する氷荷重の推定に Ralston 氷荷重を利用する場合

Ralston 氷荷重は本来円錐型氷海構造物に作用する氷荷重を推定するものであるから、これを利用するとき修正係数は必要ないわけであるが、本論で示した模型試験でもそうであるように、一般的には模型試験で得られる氷荷重は Ralston 氷荷重より大きくなる（例えば、泉山，1990）。それ故に、Ralston 氷荷重を利用する場合に修正係数を決めることは意義があると考えられる。

表 2 によれば、氷荷重比は、傾斜角より異なるが、すべての模型試験から得た値を用いれば、平均値は 68.2 % である。しかし、本論の目的である氷海構造物の設計に際しての初期的検討を迅速に行うという観点に立ったなら、平均値ではなく、ある極値を基にして修正係数を定めた方が本論の目的にはふさわしいと考えられる。そこで上記の目的にあった値として 1% 超過確率値を選択すると、その値は 115.6 % である。よって、修正係数は 1.15 とする。

5.2 四角錐型氷海構造物に作用する氷荷重の推定に Ralston 氷荷重を利用する場合

四角錐型氷海構造物では、その進行方向（実際には氷板の進行方向）によって構造物に作用する氷荷重は大きな相違を示す。設計的には大きな氷荷重を与える進行方向、すなわち、進行方向 A の模型試験に対する氷荷重比のみを基にして修正係数を決めれば良い。それ故、円錐型氷海構造物と同様に修正係数として 1 %超過確率値を選択すると、修正係数は 3.0 となる。

5.3 八角錐型氷海構造物に作用する氷荷重の推定に Ralston 氷荷重を利用する場合

八角錐型氷海構造物に対する氷荷重比は、傾斜角 75° に対する値が他の傾斜角に対する値とは相当に離れており、このことが氷荷重比の平均及び標準偏差を大きくしている。いま傾斜角 75° に対するデータを除外すると、氷荷重比の平均は 119.0 %、標準偏差は 14.3 % である。修正係数は、傾斜角 75° を含めると 2.25、傾斜角 75° を除外すると 1.61 となる。傾斜角 75° のデータを除外すべきか否かに関しては本研究では結論を下すことができないが、本論の基本的立場に立てば、傾斜角 75° のデータを含めて得た修正係数を用いることが好ましい。

5.4 他の形状の多角錐型氷海構造物に作用する氷荷重の推定に Ralston 氷荷重を利用する場合

これまでに述べたところでは、多角錐型氷海構造物の角数が多いほど Ralston 氷荷重に対する比、すなわち修正係数が小さくなることは明かである。多角錐型氷海構造物の角数 (n) の逆数と修正係数をプロットすると図 10 を得る。プロットの数が少なく、また上記したように八角錐型氷海構造物に対する修正係数にあいまいな部分もあるが、この角数の逆数と修正係数の関係はほぼ線型である。この図を基にすると、任意の角数の多角錐型氷海構造物に作用する氷荷重を Ralston 氷荷重を利用して推定するときの修正係数を近似的ではあるが知ることができる。

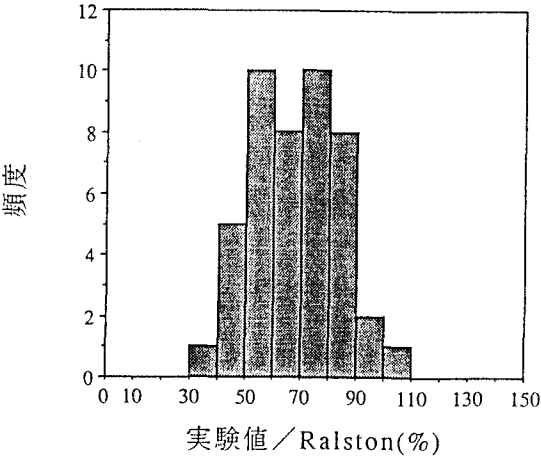


図 6 氷荷重比のヒストグラム
(円錐型構造物)

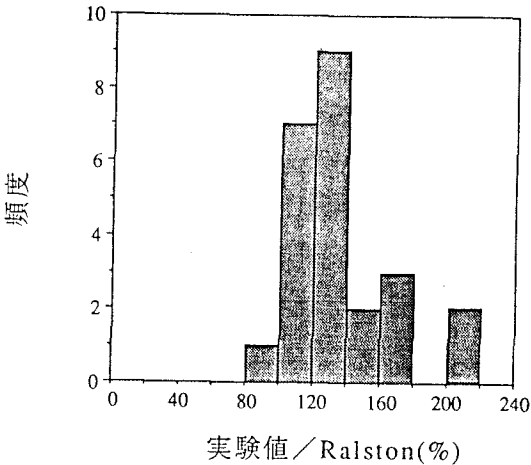


図 7 氷荷重比のヒストグラム
(八角錐型構造物)

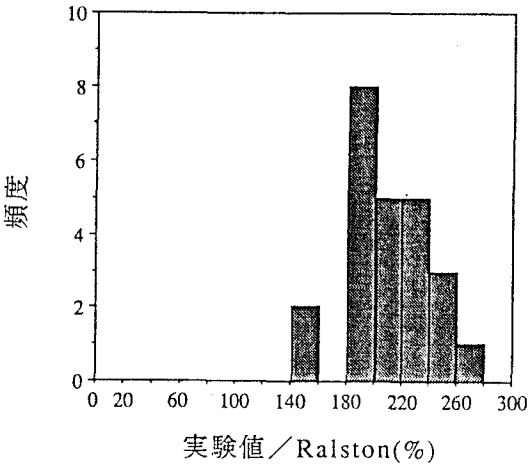


図 8 氷荷重比のヒストグラム
(四角錐型構造物進行 A)

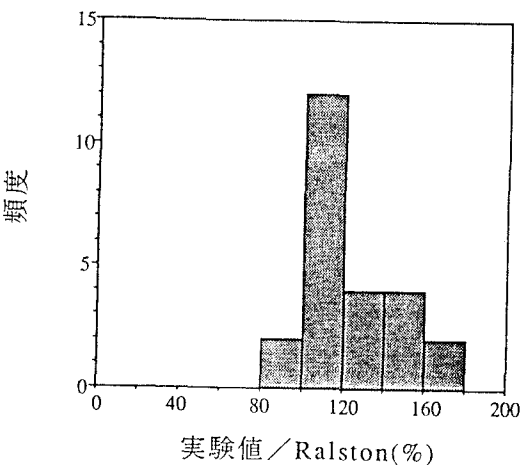


図 9 氷荷重比のヒストグラム
(四角錐型構造物進行 B)

6. 結語

一般に傾斜氷海構造物に作用する氷荷重を推定する場合、円錐型氷海構造物を除くと、氷海水槽における模型試験を行わなくてはならない。しかし、氷海水槽における模型試験は一般に高価であり、試験結果のばらつきの多さはさらに氷海水槽での模型試験を高価なものにしている。本研究では、多角錐型氷海構造物に作用する氷荷重のある程度の推定を、模型試験を行うことなく、簡易に行うことを可能とし、設計しようとする氷海構造物の主要目の初期的検討を迅速に行えるようにするため、氷海水槽で行った小規模模型試験の結果と Ralston の提案した円錐型氷海構造物に作用する氷荷重の推定式を比較し、上記の目的にあった修正係数を提案した。

ここで提案した修正係数は、得たデータの 1% 超過確率値を基にしており、この点に関しては議論があると思われる。一般的には、模型試験では Ralston の式が仮定している完全接触の条件を満足していないので、実験氷荷重は Ralston 氷荷重より小さい傾向にある。実験氷荷重のばらつきの一因にはその接触条件のばらつきが作用していると考えられ、接触条件の良いものほど実験氷荷重は相対的に大きくなる。実際の相互作用においても接触条件は一樣ではなく、接触条件の度合により氷荷重が影響を受けると考えられるから、例え同様の氷板との相互作用においてもイベントごとに氷荷重は異なる。それ故に修正係数を決めるのに氷荷重比の平均値を基にすると氷荷重を過小評価する恐れがある。本研究では、過大評価となる可能性はあるが、安全側を指向するという立場に立って、氷荷重比の 1% 超過確率値を修正係数の基準として選択した。

本研究で提案した修正係数はあくまでも多角錐型氷海構造物の主要目の初期的検討に用いられるべきであり、そのまま設計氷荷重とすることを意図していない。設計氷荷重を定めるには主要目を決定した後に縮尺模型試験を行うことを推奨する。

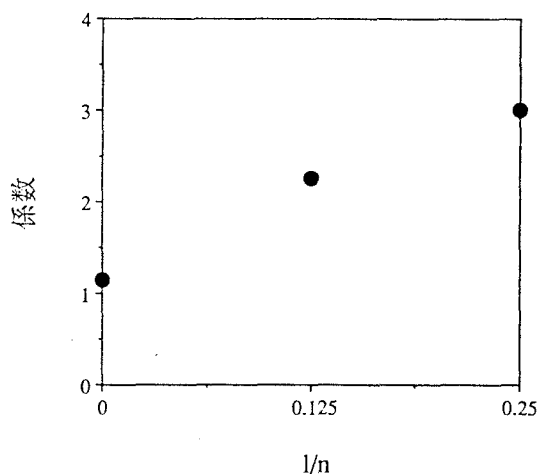


図 10 修正係数と角数の逆数の関係

参考文献

- 泉山 耕 (1990) : 円錐型海洋構造物と氷板の干渉問題に関する一考察. 第 6 回 寒地技術シンポジウム 講演論文集. pp.412-417 札幌
- 加藤 一行、藤井 克哉 (1986) : 氷海水槽における構造物の氷荷重模型試験. 石川島播磨技報 第 26 巻 第 6 号 pp.354-359
- 加藤 一行、S. Guillot (1990) : Ralston の氷荷重推定式に関する検討. 第 6 回 寒地技術シンポジウム 講演論文集. pp.233-238 札幌
- Ralston, T.D. (1977) : Ice Force Design Consideration for Conical Offshore Structures. Proceedings. 4th Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. (POAC'77) vol.2 pp.741-752 St. John's Canada