

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

On the Method to Estimate Horizontal Ice Force on Multi Conical Legged Arctic Structures (MCLS)

加藤 一行*

Kazuyuki, Kato

The author and his colleagues have been engaging in the study to estimate ice forces on Multi Conical Legged Structures (MCLS). They constructed a method to estimate ice forces on MCLS and gained a partial succession. It was recognized that the method must consider effects due to non-simultaneous occurrence of ice failure. In this study, the author employed the Monte Carlo simulation to consider the effects of non-simultaneity and obtained a better correlation to experimental results. Methods to calculate design ice force and simplified method to obtain a first look estimation of ice force were also proposed.

Keywords: (ice force, non-simultaneity, MCLS)

1. 緒言

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MCLSに作用する水平氷荷重（以後、単に氷荷重）の推定法に関する研究を行ってきた^{1), 2), 3), 4)}。それらの研究の結果、MCLSに作用する氷荷重を推定するには、決定論的には決めることのできない因子があり、その因子を的確に評価できない限り、氷荷重を過大評価してしまうことが判明した。本論では、その因子に対し、1種のモンテカルロシミュレーションにより、定量的評価を試みている。

2. これまでの研究の概要

本題に入る前にこれまでの研究についてその概要を述べる。MCLSに作用する氷荷重の推定式（氷荷重モデル）は、一般的に次のように記述され则认为る。

$$F = f(s, \theta) R_n F_1 \quad (1)$$

ここに、 F : MCLSに作用する氷荷重

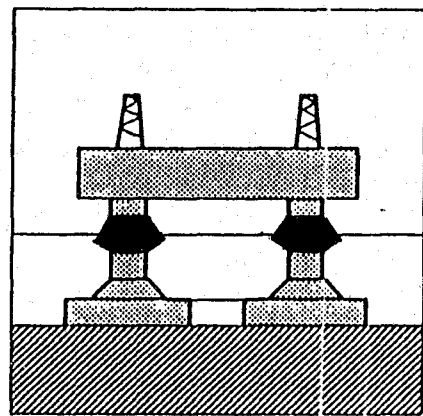


図1 マット型MCLSの概念図

$f(s, \theta)$: 最大荷重が同時に発生すると考えたときの脚柱の配列と氷板進行方向によって定まる倍率

R_n : 最大荷重発生時の非同期性による低減係数

F_1 : 独立した円錐構造物に作用する氷荷重

まず、 $f(s, \theta)$ を定めるために、次のように考えた。いま、4脚MCLSを考えると、氷板が構造物に十分貫入したときの状況は、理想的には図2に示されたようになると考えられる。各脚柱が破壊した氷板の軌跡の幅は円錐の形状と氷板の諸性質によって決まるが、脚柱が近

接している場合には氷板の破壊が二つの脚柱にまたがって同時に生ずるなど、状況によっては図2に示されたものとは必ずしも合致しない場合もある。しかしその場合は図2に示されている状況の基で構造物に作用する氷荷重よりも大きくなることはないから、図2の状況に対する氷荷重を考慮すれば安全側である。

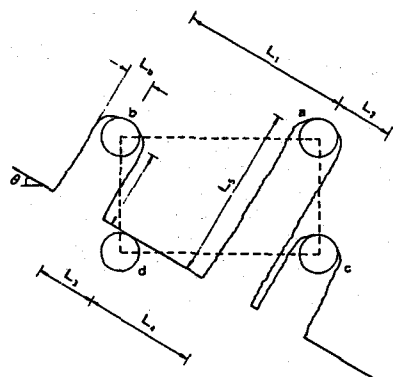


図2 理想化された相互作用

図2に示されている状況が発生したとすれば、脚柱と氷板との相互作用はさらに3種の小相互作用に分解することができる。すなわち、並列する脚柱が同時に氷板に貫入するような相互作用 (Type A と呼ぶ、図3参照)、片側に自由辺がある氷板に脚柱が作用する (Type B と呼ぶ、図3参照)、そして両側に自由辺がある氷板に脚柱が作用する (Type C と呼ぶ)、である。しかし、Type C の相互作用は距離 L_1 が大きい場合には Type B の相互作用に帰着し、 L_1 が小さいときには Type B の相互作用による氷荷重よりも大きくなることのないから、結局 Type A と Type B の相互作用の組合せを考慮すれば安全側の配慮となる。すなわち、 $f(s, \theta)$ は MCLS の脚柱の配列と氷板の進行角により如何なる幾何学的関係 (円錐中心間距離 L_w 及び円錐中心と自由辺までの距離 L_f) が生じるかを判断し、そのときに如何なる氷荷重が作用するかを知ることにより評価できると考えた。そして、作用する氷荷重は個々の相互作用における最大値であり、しかも各脚柱には同時に作用するものとしている。すなわち、(1)式で $R_n = 1$ とまずは仮定した。

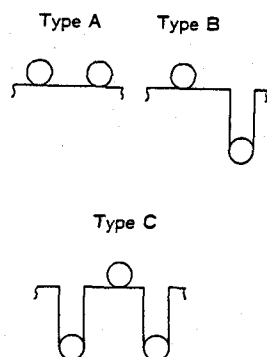


図3 理想化された小相互作用

そこで、Type A と Type B の相互作用の状況を I H I 低温試験水槽⁵⁾において人工的に作りだし、円錐中心間距離 L_w 及び円錐中心と自由辺までの距離 L_f が氷荷重に及ぼす影響を調べた実験を行った¹⁾。

L_w, L_f が有限の時の氷荷重と $L_w, L_f = \infty$ のときの氷荷重の比を L_w あるいは L_f と脚柱の円錐の水線面での直径との比、 $k_w = L_w/D, k_f = L_f/D$ の関数として表すことを試みた。すなわち、 L_w, L_f が有限の時の氷荷重を F として、 $L_w, L_f = \infty$ 、すなわち独立している時の氷荷重を F_1 とすると、

$$F = f(k) F_1 \quad (2)$$

ここに、 $f(k)$: 氷荷重倍率、 k の関数と仮定する。

k : 相対距離、 k_w あるいは k_f

として、表すことを試みた。さらに、円錐構造物では氷荷重はライドアップ成分と破壊成分の和で表されるから、

$$f(k) = \frac{F}{F_1} = \frac{F_r + F_b}{F_{r1} + F_{b1}} \quad (3)$$

ここに、 F_{r1} : $L_w, L_f = \infty$ のときのライドアップ成分

F_{b1} : $L_w, L_f = \infty$ のときの破壊成分

F_r : $L_w, L_f = \text{有限}$ のときのライドアップ成分

F_b : $L_w, L_f = \text{有限}$ のときの破壊成分

となり、さらに次のように記述することができる。

$$f(k) = \frac{\frac{F_r}{F_{r1}}}{1} + \frac{\frac{F_b}{F_{b1}}}{\frac{F_{b1}}{F_{r1}}} = \frac{A}{1} + B \frac{\frac{b_1}{a_1} \frac{\sigma_f h}{\rho_{ig} (Dw^2 - Dt^2)}}{\frac{b_1}{a_1} \frac{\sigma_f h}{\rho_{ig} (Dw^2 - Dt^2)}} \quad (4)$$

ここで、 σ_f は氷板の曲げ強度、 h は氷厚、 ρ_{ig} は氷板の単位体積重量 (9000 N/m^3 と仮定した)、 Dw は円錐の水線面での直径、 Dt は円錐の頂部の直径である。氷荷重係数の比 A, B は実験の結果を多線型近似して¹⁾ (5) ~ (8) 式のように定めた。また、独立した円錐構造物に対する破壊成分とライドアップ成分に関する氷荷重係数の比 b_1/a_1 は、Type A では $b_1/a_1 = 2.431$ 、Type B では $b_1/a_1 = 2.416$ という結果を得た。

Type A の相互作用では、 $k_w = L_w/Dw$ とすると、

$$A = 0.462 + 0.180 (k_w - 1) \quad 1 \leq k_w \leq 4$$

$$A = 1 \quad k_w > 4 \quad (5)$$

$$B = 0.88 + 0.04 (k_w - 1) \quad 1 \leq k_w \leq 4$$

$$B = 1 \quad k_w > 4 \quad (6)$$

Type B に対しては、 $k_f = L_f / D_w$ とすると、

$$A = 0.45 (k_f + 0.5) \quad -0.5 \leq k_f < 0.5$$

$$A = 0.36 + 0.194 k_f \quad 0.5 \leq k_f \leq 3.0$$

$$A = 1 \quad k_f > 3.0 \quad (7)$$

$$B = 0.85 (k_f + 0.5) \quad -0.5 \leq k_f < 0.5$$

$$B = 0.8 + 0.1 k_f \quad 0.5 \leq k_f \leq 2.0$$

$$B = 1 \quad k_f > 2.0 \quad (8)$$

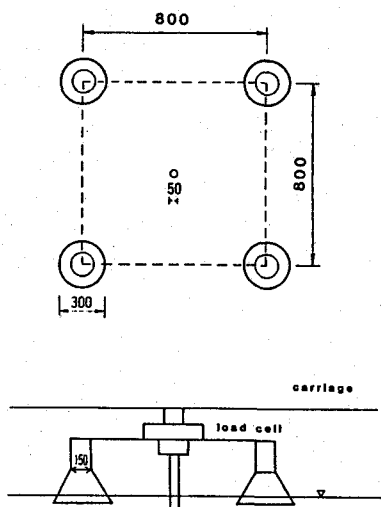


図 4 模型実験に用いた模型の概略図

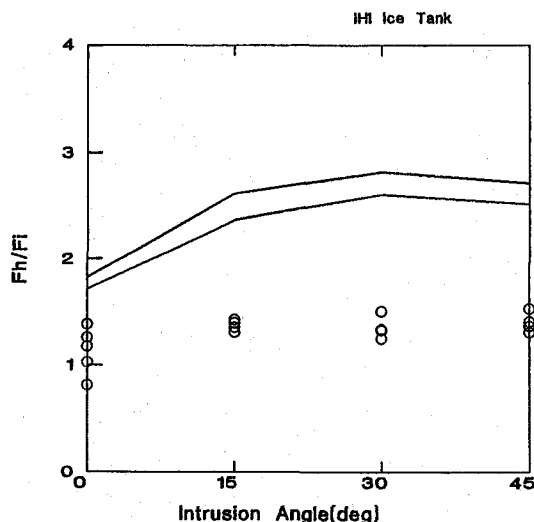


図 5 $f(s, \theta)$ の計算値と実験値との比較

模型試験結果⁶⁾との比較を行うと図 5 を得る。ここで、試験に用いた模型は、図 4 にその概略図を示したが、一辺が 800 mm、脚柱部の円錐の水線面での直径が 300 mm、円錐頂部の直径が 150 mm、傾斜角が 60 度の正方形配列

の 4 脚 MCLS である。模型試験によって得た氷荷重は、定常的に現象が進行しているときの氷荷重履歴から、最大値の 50 % 以上のピーク値をすべて取り出し、それらの平均値に標準偏差の 3 倍を加えた値である。図中の実線が $f(s, \theta)$ であるが、(4)式を見ても明らかなように、 $f(s, \theta)$ は $\sigma_{fh} / \rho_{ig} (Dw^2 - Dt^2)$ に依存するので、試験に用いた $\sigma_{fh} / \rho_{ig} (Dw^2 - Dt^2)$ の最大値と最小値の各々に対して $f(s, \theta)$ を求めた。この図から明らかなように、 $f(s, \theta)$ だけでは、(1)式で $Rn = 1$ としたのでは、氷荷重を過大評価してしまう結果となった。すなわち、各脚柱に対して最大荷重が同時に作用すると考えたのでは、氷荷重を過大評価してしまうことになり、最大荷重発生 of 非同期性を考慮する必要性が明らかとなった。

3. 非同期性を考慮した氷荷重の推定法

(1)式の Rn は、実験的には、MCLS の模型試験を行い、その過程で得た氷荷重を独立した円錐構造物に作用する氷荷重で正規化した値と $f(s, \theta)$ との比として求めることができる。しかし、MCLS に作用する氷荷重は MCLS を構成する各脚柱に作用する氷荷重の重ね合わせであり、それぞれの脚柱に作用する氷荷重が調和的でない限り、確率論的な量であると考えられる。それ故 Rn の最確値を求めるには非常に数多くの模型試験が必要であると考えられる。そこで、本論では多少強引であるが、一種のモンテカルロシミュレーションにより、非同期性を考慮した氷荷重の推定法を提案した、すなわち、本論で提案する方法を用いれば、 Rn を別途定める必要がなく、直接(1)式の $f(s, \theta) Rn$ を推定することができる。

独立した円錐構造物に作用する荷重の時刻歴は図 6 に示したようなものとなる。すなわち、ある荷重レベルを底として間欠的にピークが現れるという時刻歴を示す。紙面の都合から図は割愛するが、Type A の相互作用においても、Type B の相互作用においても各々の円錐構造物に作用する荷重の時刻歴は同様である。

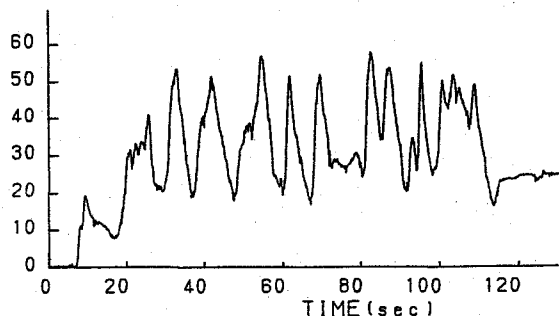


図 6 円錐構造物に作用する氷荷重の時刻歴の一例

これらの時刻歴が重ね合わさったものがMCLSに作用する氷荷重の時刻歴となるが、各々の脚柱に作用する氷荷重の時刻歴にはある定まった法則性が見いだせない、次に述べるような方法で数値シミュレーションを行い、非同期性を考慮した氷荷重を推定した。

まず、各々の脚柱に作用する氷荷重の時刻歴を図7に示すようなものに単純化する。次に、図8に示したように時刻歴の1周期をn個に等分する。各々の脚柱に対する荷重の時刻歴は、相互作用の種類に関わらず相似形をしているが、その大きさを規定する諸値(図8のF及びF_a)は相互作用の種類とその幾何学的条件により変わると仮定する、そしてそれらは最大値あるいはそれに類した値に立脚しているものとする。F及びF_aの決定法に関しては後で検討を加える。

ある試験において、MCLSに作用する荷重が最大値を記録したとき、MCLSを構成する各々の脚柱に作用する荷重が各々の脚柱に作用する荷重の時刻歴のn個に分割された点の各々異なったある点にあると仮定する。すなわち、MCLSに作用する氷荷重F_tは、

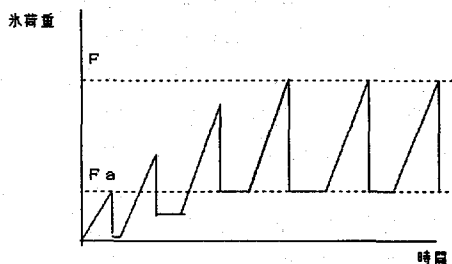


図7 単純化した氷荷重時刻歴

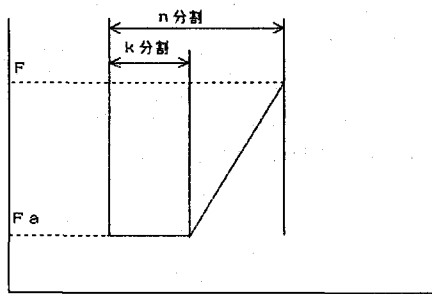


図8 シミュレーションに用いた荷重の履歴

$$F_t = \sum F_1(m_i) \quad (9)$$

であると仮定する。ここで、F₁(m_i)は各々の脚柱に対する荷重の時刻歴において、1 ≤ m_i ≤ nなるm_iに対応する荷重である。iは相互作用を起こす脚柱の数である。

いま、mの値は1～nの間で発生させた一様確率密度分布の整数乱数の1要素と仮定すると、k番目の試験におけるMCLSに作用する氷荷重は、各々の脚柱に対して、異なった種値により一様確率密度分布の整数乱数を発生させ、それらのk番目の要素に対応する荷重を求め、それらを加算したものとなる。この操作、すなわち数値シミュレーションをL回繰り返すことにより、F_tの最確値などを求めようと考えた。ただし、1本の脚柱は必ずその最大値を経験していると仮定した。例えば進行角45度の場合は、先行する脚柱には独立した円錐に作用する氷荷重が常に作用し、他の脚柱にはその幾何学的条件に見合ったType Bの相互作用に対する荷重の時刻歴のどこかにある氷荷重が作用すると仮定した。

さて、次に氷荷重の時刻歴の特性値の求め方について検討を加える。円錐構造物のような傾斜した面を持つ構造物に作用する氷荷重は、氷板を破壊するのに必要な成分(破壊成分)と破壊した氷片を移動させるのに必要な成分(ライドアップ成分)との和として与えられると仮定するのは十分に合理的である。ある与えられた相互作用の幾何学的条件の基においては、定常的に現象が進行している過程において移動されるべき氷片の(相対的)量は常に一定であると仮定すると、氷荷重の時刻歴の底はライドアップ成分に対応し、ピーク値はそれに破壊成分が重ね合わさったものであると考えることができる。上記の仮定は完全には正当とは言えないが、氷荷重の時刻歴の特性値が最大値あるいはそれに類した値に立脚しているとしているので、合理的であると考えられる。

上記のように考えると、

$$F_a = F_r \quad (10)$$

$$F = F_r + F_b \quad (11)$$

であるから、(4)式から、F_a、Fはそれぞれ次のようになる。

$$F_a = \frac{A}{1 + \frac{b_1}{a_1} \frac{\sigma_f h}{\rho_1 g (Dw^2 - Dt^2)}} F_1 \quad (12)$$

$$F = \frac{A + B}{1 + \frac{b_1}{a_1} \frac{\sigma_f h}{\rho_1 g (Dw^2 - Dt^2)}} F_1 \quad (13)$$

試行回数 L=1000、荷重の時刻歴の分割数 n=30、平坦部の割合 k/n=1/3の条件により数値シミュレーションを行い、それぞれの進行角に対してF_t/F₁の最確値(平均値)を求めた。その結果は表1に示されている。F_t/F₁はこれまでの諸論から明らかなように、次式で定義されるCに依存するので、模型実験に用いたCの最大値(C=1.613)と最小値(C=0.396)の各々に対して求めてある。

$$C = \frac{\sigma_f h}{\rho_{1g} (D w^2 - D t^2)} \quad (14)$$

表 1 数値シミュレーションから得た F_t/F_1

進行角 (度)	C=0.395	C=1.613
	F_t/F_1	F_t/F_1
0	1.341	1.256
15	1.690	1.552
30	1.942	1.753
45	1.882	1.688

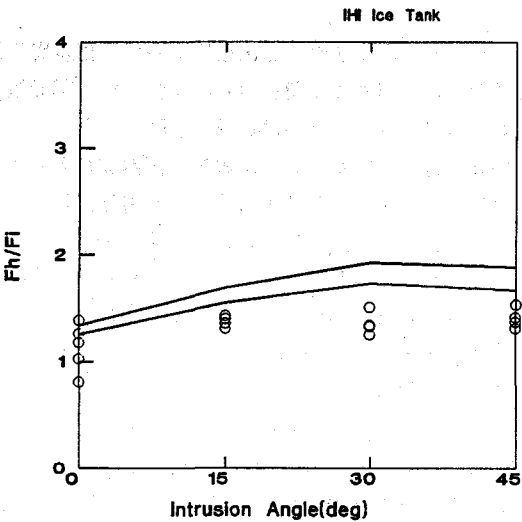


図 9 数値シミュレーションより得た F_t/F_1 と模型実験から得たそれとの比較

これら数値シミュレーションから得た F_t/F_1 を再び模型試験結果と比較したものが図 9 である。この図から明らかに氷荷重の推定精度が向上したと結論できる。しかも、模型試験から得た氷荷重は推定値を越えることが無い、すなわち、安全側の推定がなされていると考えられる。

4. 数値シミュレーションの感度に関する検討

上記の数値シミュレーションに採用した試行回数などのパラメータは確とした根拠のある数字ではないので、その妥当性を検討するために、数値シミュレーションのパラメータに対する F_t/F_1 の感度について検討する。

4.1 試行回数

進行角 30 度の場合で、荷重の時刻歴の分割数 $n=30$ 、平坦部の割合 $k/n=1/3$ 及び $C=0.395$ の条件における試行回数 L の影響を調べた。その結果を表 2 に示した。

表 2 試行回数の F_t/F_1 に及ぼす影響

試行回数	F_t/F_1
100	1.935
1000	1.941
10000	1.942
100000	1.942

4.2 氷荷重の時刻歴の分割数

進行角 30 度の場合で、試行回数 $L=1000$ 回、平坦部の割合 $k/n=1/3$ 及び $C=0.395$ の条件における荷重の時刻歴の分割数 n の影響を調べた。その結果を表 3 に示した。

表 3 氷荷重の時刻歴の分割数の F_t/F_1 に及ぼす影響

分割数	F_t/F_1
10	1.887
20	1.924
30	1.941
40	1.937
50	1.945

4.3 荷重の時刻歴の平坦部の割合

進行角 30 度の場合で、試行回数 $L=1000$ 回、荷重の時刻歴の分割数 $n=30$ 及び $C=0.395$ 条件における平坦部の割合 k/n の影響を調べた。その結果を表 4 に示した。

表 4 氷荷重の時刻歴の平坦部の割合が F_t/F_1 に及ぼす影響

平坦部の割合	F_t/F_1
3/4	1.731
2/3	1.780
1/2	1.860
1/3	1.941
1/4	1.974
1/5	2.006

これらの感度解析により、数値シミュレーションで用いた試行回数、荷重の時刻歴の分割数は妥当であったと結論できる。しかし、平坦部の割合に関しては、それを少なくすればするほど値が大きくなるという性質を持っているので、この感度解析からは妥当な値を見つけることはできないが、 $k/n=1/3$ を選べばシミュレーション結果の差異は 10 % 以内なので、悪い選択ではないと思われる。

5. 設計的氷荷重の推定法

本論で述べた方法を用いればMCLSに作用する氷荷重を推定することができるし、そのために必要となるプログラム作成などの手間は極僅かである。しかし、第0近似的ではあるが、設計的（安全側の）氷荷重の推定をさらに容易に行うことができるようにすることは価値のあることと考える。そこで本節では、数値シミュレーションに依らなくても簡易にMCLSに作用する氷荷重を推定できるように、安全側の値であり、しかもそれほど過大評価ではない R_n の値を算定する。

MCLSに作用する氷荷重がとり得る最大値は $4F_1$ である。これはMCLSの脚柱間の距離が脚柱間の相互作用の影響を受けないようにほど大きい場合に相当する。このような状況に対し本論で述べた数値シミュレーション手法を適用することにより安全側の、しかも過大評価ではない R_n の推定が可能となる。すなわち、この状況では $A=B=1$ であるので、 C をパラメータとして一連の数値シミュレーションを行い R_n を算定すると図10を得る。この図は R_n と C の関係を示しているから、対象としているMCLSの設計条件から $C(=\sigma_{fh}/\rho_{ig}(Dw^2-Dt^2))$ を算定し、それに対応する R_n を図10から読み取ることにより設計的な R_n を見積ることができる。すなわち、与えられたMCLSに対して進行角をパラメータとして式(4)~(8)を用いて $f(s, \theta)$ を計算し、その最大値を算定する。そして図10より求めた R_n と F_1 を乗ずることにより設計的なMCLSに作用する氷荷重を推定することができる。なお、 F_1 の算定にはRalstonの推定式⁷⁾を用いることを推奨する。また、 $f(s, \theta)$ の最大値の算定にあたっては、 $\theta=30$ 度で算定すれば実用的には十分である。

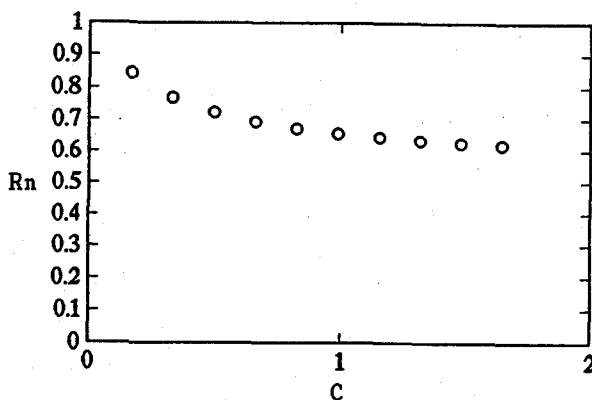


図10 R_n と $C(=\sigma_{fh}/\rho_{ig}(Dw^2-Dt^2))$ の関係

6. まとめ

著者は長年MCLSに作用する氷荷重の推定法を研究してきたが、その初期の段階から最大荷重発生 of 非同期性を考慮すべきである主張してきた。著者は初期の段階では模型試験を積み重ねることにより実験定数としてこの最大荷重発生 of 非同期性に由来する因子を定めることが可能ではないかと考えていたが、氷海水槽における模型試験は効率が悪く、しかも高価であるので別の方法を考えざるを得なくなった。そこで考え付いたのが本論で述べた方法である。本論で述べた方法が幾分強引であることを著者は認識しており、多くの研究者のご討論、ご批判を仰げれば幸いと考えている。

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 東京 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 京都 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氷に関する国際シンポジウム講演要旨集 pp.146-150 紋別 平成2年
- 4) Kato, K.: Total Ice Force on Multi Legged Structures. Proceedings, 10th IAHR Ice Symp. Vol.2 pp.974-983 Espoo 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、林口清次、岸本弘晴、足立明弥：4脚MCLSの氷海水槽模型試験。第8回寒地技術シンポジウム講演論文集。pp.250-255 札幌 平成4年
- 7) Ralston, T.D.: Ice Force Design Considerations for Conical Offshore Structures. Proc. 4th POAC vol.2 pp.741-752 St. John's Canada 1977