

(昭和 31 年 11 月造船協会秋季講演会に於て講演)

# 強制動揺法による大角度横揺減衰係 数の測定について

正員 工学士 元 良 誠 三\*

正員 工学士 清 水 浩\*\*

正員 工学士 錦 戸 輝 夫\*\*\*

On the Measuring of the Damping Resistance of Roll through a  
large Angle by a Forced Oscillation Method.

by Seizo Matora *Kogakushi, Member*  
Hiroshi Shimizu *Kogakushi, Member*  
and Teruo Nishikido *Kogakushi, Member*

Abstract

The damping resistance of roll has been measured from the extinction curve of the free-rolling of a model. But this free-rolling method was hardly applicable to the roll of an angle over 20° where free rolling damped immediately.

Giving forced oscillations of various amplitudes to a model ship by the newly devised gravity mechanism, and assuming the input energy of the forced roll equal to the energy dissipated by the damping resistance, the authors have carried out some model experiments to determine the damping coefficients applicable to a large angle where the deck edge of the model was entirely immersed.

Fortunately, the authors were able to obtain some satisfying results, and have come to the following conclusions.

- a) The forced oscillation method is applicable to a roll of large angle, even where the deck edge of the model is immersed, and the extinction coefficient obtained from this method agrees with that which is determined by the free-rolling method.
- b) The extinction coefficient of roll increases suddenly when the rolling angle exceeds the angle of deck-edge-immersion.
- c) The extinction curve was found to be approximated by following formula:

$$\delta\theta = \lambda\theta_m^n \begin{cases} n=1.7 & \text{before deck edge immersion} \\ n=3.2 & \text{after deck edge immersion} \end{cases}$$

where  $\delta\theta$  is decreasing angle per swing,  
 $\theta_m$  is the corresponding mean angle.

## 1. 緒 言

横揺に対する減衰抵抗は従来自由動揺における一揺れ毎の角度の減少即ち減減角より求め Froude の減減係数  $a$ ,  $b$ , 或いは Bertin の減減係数  $N$  の形で表わしていた。

所がこの方法では甲板縁が水に浸るような大角度になると、最初の一揺れで大きく減衰してしまうので、大角度の横揺に対する減衰を求めることは出来ない。従つて従来は 20° 乃至 25° 位迄の減減係数しか測れず、それ

原稿受付, 7月15日

\* 東京大学  
\*\* 川崎重工  
\*\*\* 三菱日本重工

より大角度では便宜上この値を代用している状態であった。

著者等は、大角度の動揺を強制的に起こさせ、その時供給された energy を減衰により失った energy と等しくおくことにより甲板縁が浸るような大角度横揺れに対する減衰を測定することを数年来試みて来たが、今回満足すべき結果を得ることが出来たので茲に発表して大方の御批判を乞う次第である。

## 2. 実験方法

### 2.1 原理

第1図に示す如く、摩擦の少い軸受に支えられた円板Aに調節出来る偏心軸Bがあり、これが連結棒Cで腕Dに伝えられる。Aが回転するとCは上下して、腕Dは軸Eの周りに或一定振幅の正弦運動を行うわけである。

Dの角変動をユニバーサルジョイントFで模型船に伝え、強制動揺を生ぜしめる。一方円板Aと同軸の円溝Gにナイロン糸を巻きつけ、これを天井に固定した滑車Hに通して重錘Wが掛けてある。従つて円板Aは重錘の作る偶力により強制的に回転せしめられ、それがリンク装置B.C.D.によつて正弦角運動に変えられて船に伝えられる。重錘を放してから暫く経て、運動が定常状態に達した時を考えると、船の一揺れの間の慣性による運動エネルギーと、復原力による位置のエネルギーの和は0となるから、外から供給した強制外力のエネルギーと減衰抵抗によつて散逸したエネルギーとが等しくなる筈である。強制外力のエネルギーは、重錘Wが一揺れの間に失う位置のエネルギーに等しいから円溝Gの周長をhとするとWhに等しいので簡単に求めることが出来る。

この方法の特徴はこのように input が簡単且確実に測定出来る点にある。

### 2.2 入力エネルギーと減衰エネルギーの関係及び解析方法

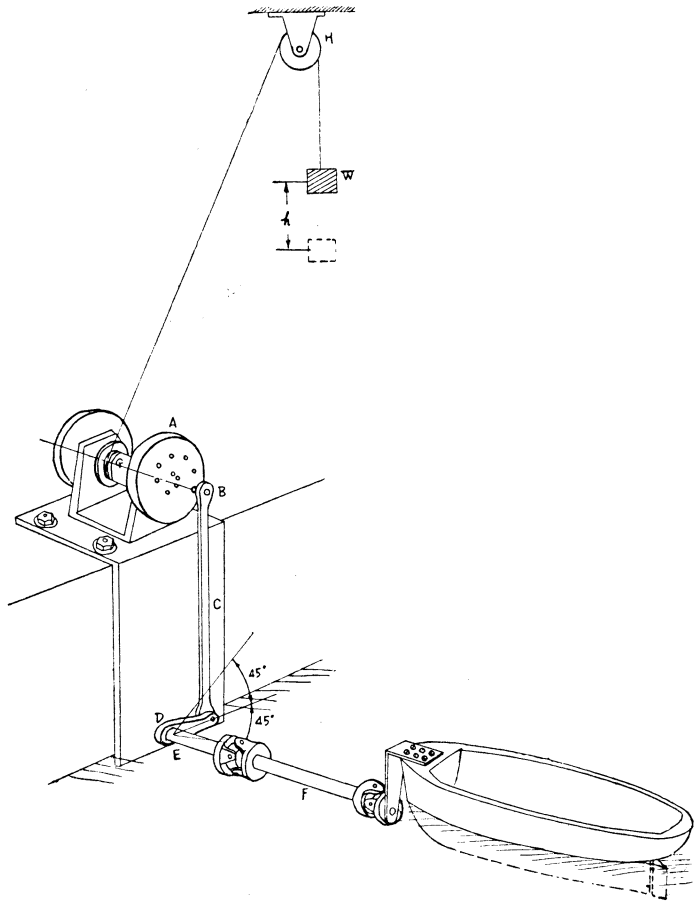
船体に強制外力  $Mr$  を加えて強制横揺れさせたとき、その運動方程式は

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} + R + \Delta \cdot Gz(\theta) = Mr \quad (1)$$

茲で抵抗  $R$  を角速度の一乗及二乗に比例する項で表わされるとすると、

$$R = K_1 \left( \frac{d\theta}{dt} \right) \pm K_2 \left( \frac{d\theta}{dt} \right)^2 = 2\alpha I \left( \frac{d\theta}{dt} \right) \pm \beta I \left( \frac{d\theta}{dt} \right)^2$$

或いは



第1図

$$R = K' v \left( \frac{d\theta}{dt} \right)^2 = \pm v I \left( \frac{d\theta}{dt} \right)^2$$

で表わされる。

船体が偶力  $Mr$  によつて一定周期で強制横揺し、その運動が  $\theta = \theta_0 \sin \omega t$  で表わされるならば一周期  $T$  の間に船体に与えられたエネルギーはその間に抵抗によつて失われたエネルギーに等しく、次の式が成立つ。

$$E = \int Mr \, d\theta = \int R d\theta$$

$$E = \frac{4 \pi^2 I \theta_0^2}{T} \alpha + \frac{32 \pi^2 I \theta_0^3}{3 T^2} \beta \quad (2)$$

或は

$$E = \frac{32 \pi^2 I \theta_0^3}{3 T^2} v \quad (3)$$

今、減衰角曲線 ( $\delta\theta \sim \theta_m$  曲線) を次の式で近似すると、

$$\delta\theta = a\theta_m + b\theta_m^2 \quad (\text{Froude の表現}) \quad (4)$$

$$\delta\theta = N\theta_m^2 \quad (\text{Bertin の表現}) \quad (5)$$

この  $a$ ,  $b$ , 或は  $N$  と、前述の  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $v$  との間には次の関係が成立つ。

$$a = \frac{\alpha T_s}{2} \left\{ 1 - \frac{1}{48} \alpha^2 T_s^2 \right\} \quad (6)$$

$$b = \frac{\pi}{180} \cdot \frac{4}{3} \beta \left\{ 1 - \frac{4}{15} \beta^2 \theta_0^2 \right\} \quad (7)$$

$$N = \frac{\pi}{180} \cdot \frac{4}{3} v \left\{ 1 - \frac{4}{15} v^2 \theta_0^2 \right\} \quad (8)$$

一方 (2), (3) 式において、入力エネルギー  $E$  は、重錘  $W$  が一周期間に失うエネルギーに等しく  $E = Wh$  重錘の重量  $W$  を変化させると、それに対応して振幅は変化せず、動揺の周期が変る。今荷重  $W$  を変化させて重量対周期の曲線を第 2 図の如く作り船の固有周期  $T_s$  に相当する所要重量  $W$  と、その微分  $(dW/dT)_{T=T_s}$  を測れば次の式より  $\alpha$ ,  $\beta$ , 及び  $v$  を求めることが出来、従つて (6), (7), (8) 式より  $a$ ,  $b$ ,  $N$  が求められる。

$$W_1 h = \frac{4 \pi^2 I \theta_0^2}{T_1} \alpha + \frac{32 \pi^2 I \theta_0^3}{3 T_1^2} \beta \quad (9)$$

$$-h \left( \frac{dW}{dT} \right) = \frac{4 \pi^2 I \theta_0^2}{T_2^2} \alpha + \frac{64 \pi^2 I \theta_0^3}{3 T_2^3} \beta \quad (10)$$

この二式より  $\alpha$  と  $\beta$  が求められ、その  $\alpha$  と  $\beta$  を用いて、(6), (7) 式より  $a$ ,  $b$  を求めることが出来る。この方法によれば船の固有周期に対する減衰係数を求めることが出来るが必要となれば、固有周期以外の周期に対する減衰係数を求めることも出来るわけである。

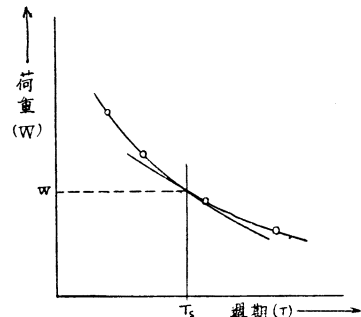
### 2.3 実験方法の詳細

#### 1) 周期の測定

周期  $T$  は第 1 図の円板  $A$  が 1 回転する毎に、電気接点が接触して時間マークと共に記録されるようにしてその記録より求め、同時に運動が定常的になつているかどうかを判別出来るようにした。

#### 2) 重錘の重さ及び装置の摩擦抵抗

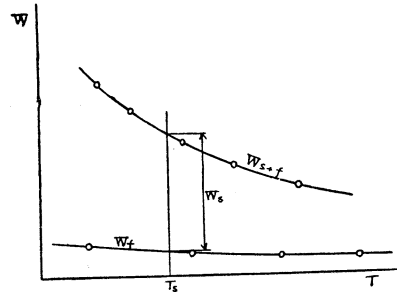
重錘の重さの中には装置を空廻しするに要する重さ  $W_f$  を含んでいるので、最初種々の周期及びストロークで空転してそれに必要な重さ  $W_f$  を求め、船をつけた場合の重さ  $W_{s+f}$  より差引いて実際の値を求めた (第 3 図参照)。この一例を第 1 表に示す。



第 2 図

第 1 表 実験結果の一例

北斗丸 No 10 計画振幅 45°				
$I$ (kg·m·sec) <sup>2</sup>	0.0728			
$h$	0.3260			
$W_{s+f}$ (gr)	3567	3587	3612	3637
$W_f$	81	81	81	81
$W_s$	3486	3506	3531	3556
$T$ (sec)	1.510	1.486	1.488	1.457
$\theta_0$ (deg)	45.9	45.9	—	45.9
$N$	0.0142	0.0139	—	0.0136
$\bar{W}_{s+f}$ (gr)	3588			
$\bar{W}$	81			
$\bar{W}_s$	-3507			
$dW_{s+f}/dT$	-1343			
$dW_f/dT$	-5			
$dW_s/dT$	1338			
$T$ (sec)	1.485			
$\theta_0$	45.9			
$a$	0.928			
$b$	0.00637			



第 3 図

3) 動揺振幅の調節

第1図の円板 A の偏心軸の位置によつて振

幅の調節を行つた。軸の位置により得られた計画振幅は次表の通りである。

No	$\theta$	No	$\theta$	No	$\theta$
1	4° 2'	5	20° 37'	9	39° 21'
2	8° 6'	6	25° 0'	10	44° 45'
3	12° 13'	7	29° 32'		
4	16° 22'	8	34° 18'		

4) 動揺角度の記録

パンタグラフ動揺計により記録を行つた。計画振幅に対し実際振幅は大角度程誤差が出て、45° で約 1° 大き目に出た。これはユニバーサルジョイントのガタ、振れ等に基くものと考えられる。

5) 船の慣性モーメント

角度により見掛の慣性モーメントが變つて来て、概して大角度では慣性モーメントは大きくなる傾向があるが今は小動揺の周期から求めた見掛の慣性モーメントを用いた。

6) この外、模型が余計に yawing 等を起さないように、第1図に於てバネで船首尾線の方向に引張り、且つユニバーサルジョイントをスリットに挟んで左右に振れないようにする外、動揺で生じた波が水槽壁で反射して来ないように、両側に消波装置を置く等の考慮を払つた。

3. 使用模型及び実験結果

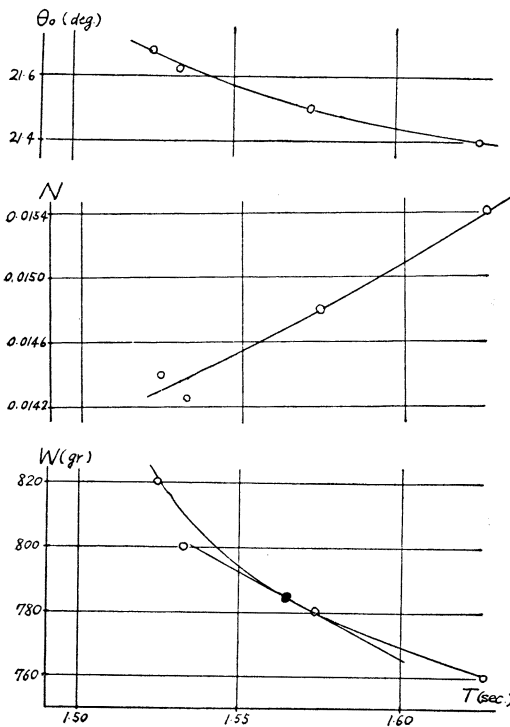
3.1 模型

使用した模型は北斗丸 2m 模型並に箱船に Bulwark をつけた場合及びつけない場合の三種である。要目を第2表に示す。

第 2 表

	北 斗 丸		箱 船 I	箱 船 II
	実 船	模 型		
	満 載 出 港	(縮率 1/24.26)	Bulwark なし	Bulwark あり
長	68.50 m	2.00 m	1.00 m	"
幅	11.00		0.25	"
深 さ	7.50		0.188	"
排 水 量	1840.0 ton	46.06 kg	36.60 kg	36.85 kg
G M	0.89 m	0.0264 m	0.0190 m	0.0175 m

	北 斗 丸		箱 船 I	箱 船 II
	実 船	模 型	Bulwark なし	Bulwark あり
	満 載 出 港	(縮率 1/34.26)		
O G	0.045 m			
乾 舷	3.515 m	0.103 m	0.033	0.032
横 揺 周 期	9.0 sec	1.538 sec	1.278 sec	1.367 sec
I		0.0728 kg-m-sec <sup>3</sup>	0.0333 kg-m-sec <sup>2</sup>	0.0301 kg-m-sec <sup>2</sup>
bilge circle			30R	"
Deck edge が浸り始める角度		32° 30'	14° 35'	14° 22'
Bulwark の上端が浸り始める角度				21° 26'



第 4 図

(註) Bulwark の寸法は長さ 1 m, 高さ 1.5 cm, 下方 0.2 cm の透しあり,

箱船を使用したのは甲板縁が一時に没水するためにその影響が大きく現われると予想したからである。

3.2 実験結果

北斗丸の実験結果中、計画振幅 20° 37' のものにつき周期対荷重曲線、実測振幅及び実験より得られた N 係数の値をグラフにしたものを第 4 図に示す。

北斗丸で得られた N-θ<sub>0</sub> 曲線を第 5 図に示す。図中点線は従来の自由横揺より求めたもので、20° 以上は点が散つて不離突である。実線は強制動揺によつて求めたもので極く小角度では糸の摩擦のために点が散るが大角度になる程正確な値が得られている。

予想されたように甲板縁が浸る迄は N 係数は殆んど一定か少し減少気味であるが、甲板縁が没すると急激に増加するのが判る。

第 6 図には得られた減衰係数を用いて逆算した減減角曲線 δθ-θ<sub>0</sub> と、自由動揺より求めた減減角曲線とを比較してある。

二つの値は全く相異なる方法によつて求めたものであるに拘らず極めてよく一致している。

第 7 図は δθ-θ<sub>0</sub> の関係を log-log chart に plot したものである。大角度では略々直線となり傾斜は、1.7 位となるから、次の関係が成立つわけである。

$$\delta\theta = \lambda\theta_0^{1.7}$$

尚甲板縁が没してからは一点しか取れていないのでこれ丈で結論は下せないが、θ<sub>0</sub> 指数はずつと大きく、約倍になると考えられる。

$$\delta\theta = \lambda\theta_0^{3.4}$$

第 8 図は箱船 I (Bulwark の\* ない場合) の N-θ<sub>0</sub> 曲線であり、第 9 図は同じく逆算した δθ-θ<sub>0</sub> 曲線である。

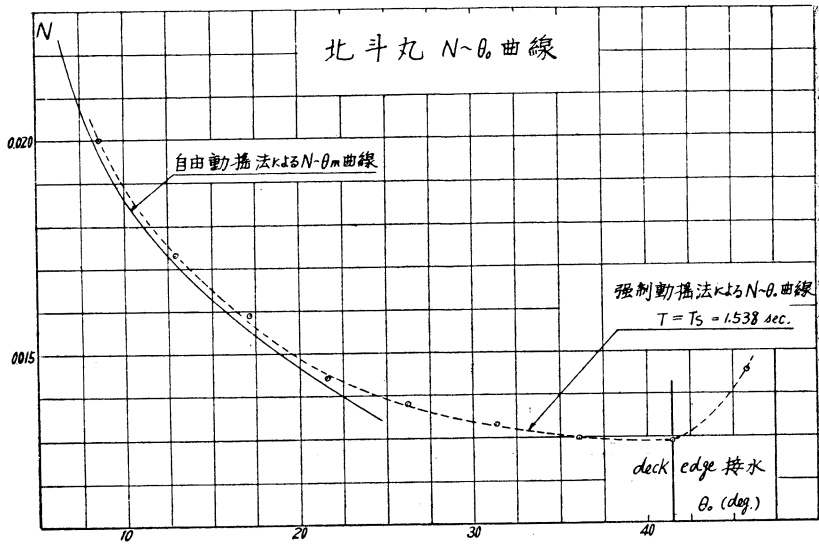
この場合も δθ-θ<sub>0</sub> は強制法と自由動揺法とよく一致しているが、N-θ<sub>0</sub> 曲線は多少遠違いが出来ている。自由動揺法は大角度が不正確であり強制動揺法は小角度が不正確なための喰違いと考えられる。

第 10 図は箱船 I の δ<sub>0</sub> と θ<sub>0</sub> の log-log chart である。この場合も甲板縁迄は δθ = λθ<sub>0</sub><sup>1.7</sup> が成立つ、甲板縁が没水してからは θ<sub>0</sub> の指数は急に変つて、δθ = λθ<sub>0</sub><sup>3.2</sup> 位になる。

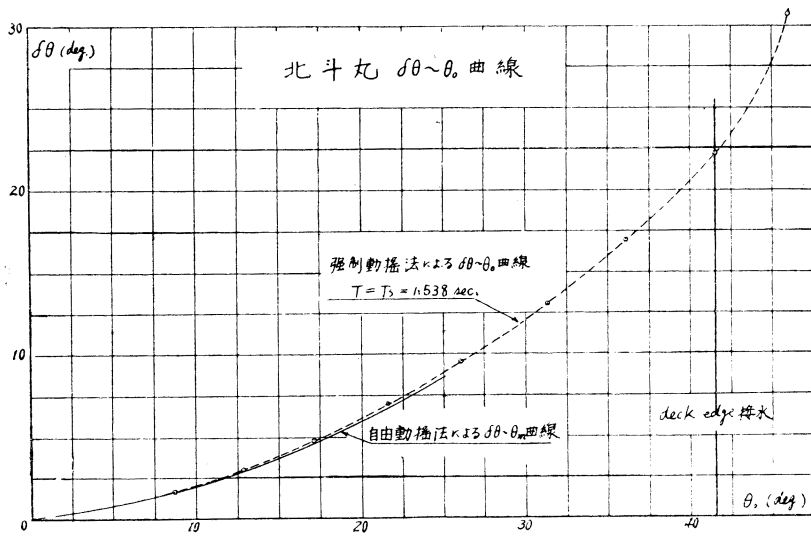
第 11 図は箱船 II の N-θ<sub>0</sub> 曲線、第 12 図は δθ-θ<sub>0</sub> 曲線である。

Bulwark がある場合には甲板縁が浸つても曲線は急変せず、Bulwark の上端が没水してから曲線は急に上向きになる。

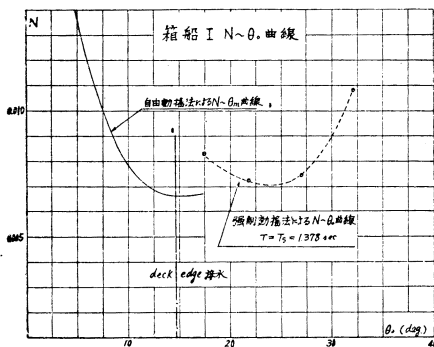
第 13 図は δθ-θ<sub>0</sub> の log-log chart で、上記の傾向がよく現われ Bulwark が没水する迄 δθ = λθ<sub>0</sub><sup>1.7</sup> 没水後 δθ = λθ<sub>0</sub><sup>3.2</sup> の関係が略々成立つ。



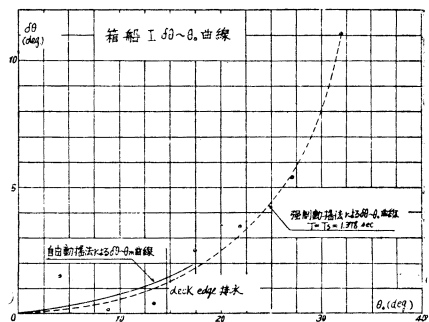
第 5 图



第 6 图

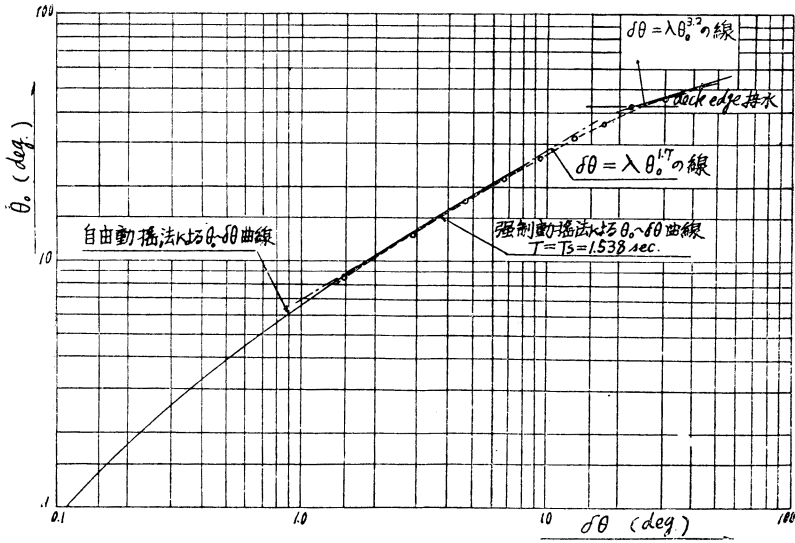


第 8 图

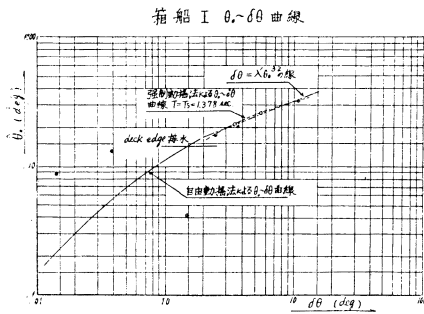


第 9 图

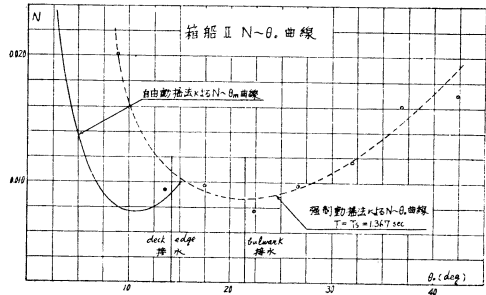
北斗丸  $\theta_0 \sim \delta\theta$  曲線



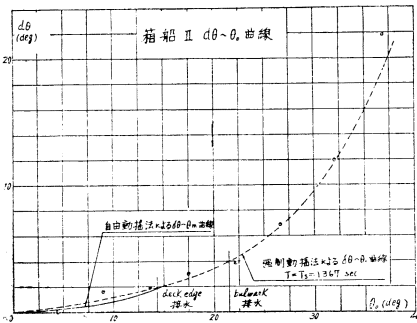
第 7 図



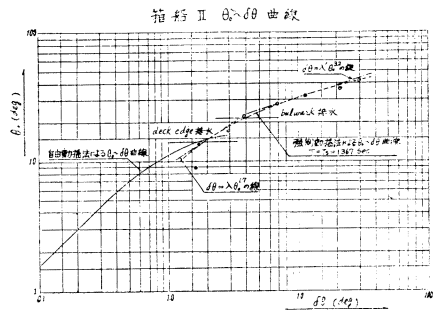
第 10 図



第 11 図



第 12 図



第 13 図

### 4. 結果に対する考察

4.1 今回初めて強制動揺法によつて減衰を測定したわけであるが、この方法より求めた減減曲線は予想以上によく従来の自由動揺法より求めたものと一致し、この事からこの方法の精度が満足すべきものである事が判つた。

この方法による  $N$  係数はやはり自由動揺法によるものと小角度で略々一致し、大角度では従来測れない所迄測ることが出来、その結果 deck edge が没水する角度以上の動揺角度では  $N$  係数は急激に増加することが確かめられた。

$a, b$  係数は  $N$  係数程奇麗に求められずかなり点が散つたが、 $a$  が大きい時は  $b$  が小さく出ていることから、 $dW/dT$  の測りに難点があつたものと考えられる。

4.2 減減角  $\delta\theta$  は deck edge が浸る迄は  $\delta = \lambda\theta_m^{1.7}$

” が浸つて後  $\delta = \lambda\theta_m^{3.2}$

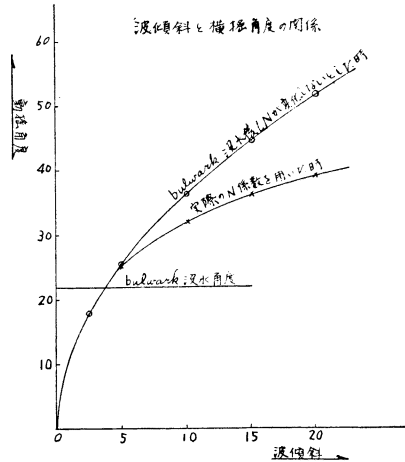
で略々表わすことが出来る事が判つた。

これより見て、deck edge 又は bulwark が没水すると急激に減衰が増え、揺れ難くなる事が予想される。

第14図は箱船IIについて、種々の波傾斜に対する船の横揺角度を一つは bulwark が没してから  $N$  を一定とし一つは実際に求めた  $N$  を用いて計算したものである。尚 Bertin の  $N$  係数は大体次の関係がある。

$$0.8 N_{10^\circ} \approx N_{20^\circ}$$

この様になる為には、 $\lambda$  一定として  $\theta_m^n$  の冪数が幾らになるかを計算して見ると  $n=1.678$  なる我々の得た値と略々一致する。



第14図

### 4.3 週期の減衰係数

自由動揺法では固有週期に対する  $N$  しか測れないが強制動揺法によれば任意の週期に対するものが得られるわけである。実際には固有週期より長い週期に対するものは回転が停つて測定が困難であつた。

減減係数に対する週期の影響は、第4図に示す様に週期が短くなると  $N$  は減少し、大体週期の減少の1%につき  $N$  の減少2%程度である。

## 5. 結 論

1. 強制動揺法によつて船の減衰係数を求めることは可能であり、特に大角度の横揺れに対しては自由動揺法で求められない範囲迄の測定が可能である。
2. deck-edge 又は bulwark が没水すると減衰は急激に増える。従つて deck-edge 又は bulwark が没水すると減衰は急激に増える。従つて deck-edge 又は bulwark が没水すると揺れ難くなる事が判つた。
3. 大角度の横揺時に於ては、 $\delta\theta$  は  $\theta_m$  の冪の形で近似出来る事が推察され、 $\theta_m=10^\circ$  から deck-edge が水中に没する迄は  $\delta\theta = \lambda\theta_m^{1.7}$

deck edge が没水してからは

$$\delta\theta = \lambda\theta_m^n \quad n > 3.2$$

と云う式で近似出来そうである。

4.  $N$  係数は船の横揺週期と密接な関係があり一例を挙げれば週期が1%短くなると  $N$  係数は約2%減少することが判つた。

最後に本研究に対し終始懇切な指導を賜つた加藤教授並びに実験遂行に尽力された東大工学部船舶科安定性能研究室諸氏に対し厚く御礼申上げる次第である。