

(昭和 35 年 5 月造船協会春季講演会において講演)

船体固有振動数に対する水深影響の一計算法

正員 富田 哲治 郎*

The Effect of Shallow Water upon the Natural Frequencies of Hull

By Tetsujiro Tomita, *Member*

Abstract

An experiment has been carried out at the laboratory of Prof. Kumai to find the effect of shallow water upon the added virtual mass of the cylinder models of the typical sections of cargo ship, especially great emphasis being placed on the effect of breadth-draught ratio.

As the result of this experiment, the increase fraction of the added virtual mass due to shallow water (c) was disclosed as follows :

$$c = 1.1 \beta^3 (b/d) (d/h)^{2.2}$$

where, β : area coefficient of section

b : breadth of section

d : draught

h : depth of water

In the case of ship's form, the increase-fraction (C) deduced when applying the above formula for lines of hulls can be expressed as follows :

$$C = 1.19 (B/d) (d/h)^{2.2} C_b$$

where, B : moulded breadth

C_b : block coefficient

The natural frequencies at shallow water can be estimated according to the method described in the author's previous paper : "The Estimation of the Principal Natural Frequencies of Hull", and the coefficients of the increased added virtual mass necessary for the frequencies calculation are given in Fig. 3.

After comparison was given to the measured data and the calculated ones, this method has been confirmed to be satisfactory for practical use.

船型の大型化に伴ない、内海あるいは港内等喫水に対し比較的浅い水深における振動計測の機会も多く、これら実測資料の解析に当って信頼性ある水深影響の推定法が必要である。従来水深影響の修正は Prof. Prohaska によつて与えられた方法¹⁾によつていたのであるが、ここでは熊井教授との共同研究として行なつた貨物船の代表的断面を表わす cylinder model 等についての実験結果に基づき、先ず見掛け附加重量増加の実験式を求め、これに基づく固有振動数の計算法について述べてみる。

1. 模型実験の概要

模型実験は第 1 図(a)に示す 1 万屯型貨物船の線図より太線のごとき代表的断面を選び、縮尺 1/100、長さ 750 mm の木製 cylinder model を作り、満載、半載および空艙の 3 状態に相当する喫水においてそれぞれ水深を変え実験を行なつた。また幅喫水比の影響調査に重点を置き、第 1 図 (b) に示すごとき同一面積係数で幅喫水比の異なる cylinder model についての実験も加えた。

cylinder model についての附加質量の計測は Prof. Prohaska の行なつた方法と同様で、装置のバネの固有

原稿受付 昭和 35 年 1 月 6 日

* 三井造船玉野造船所

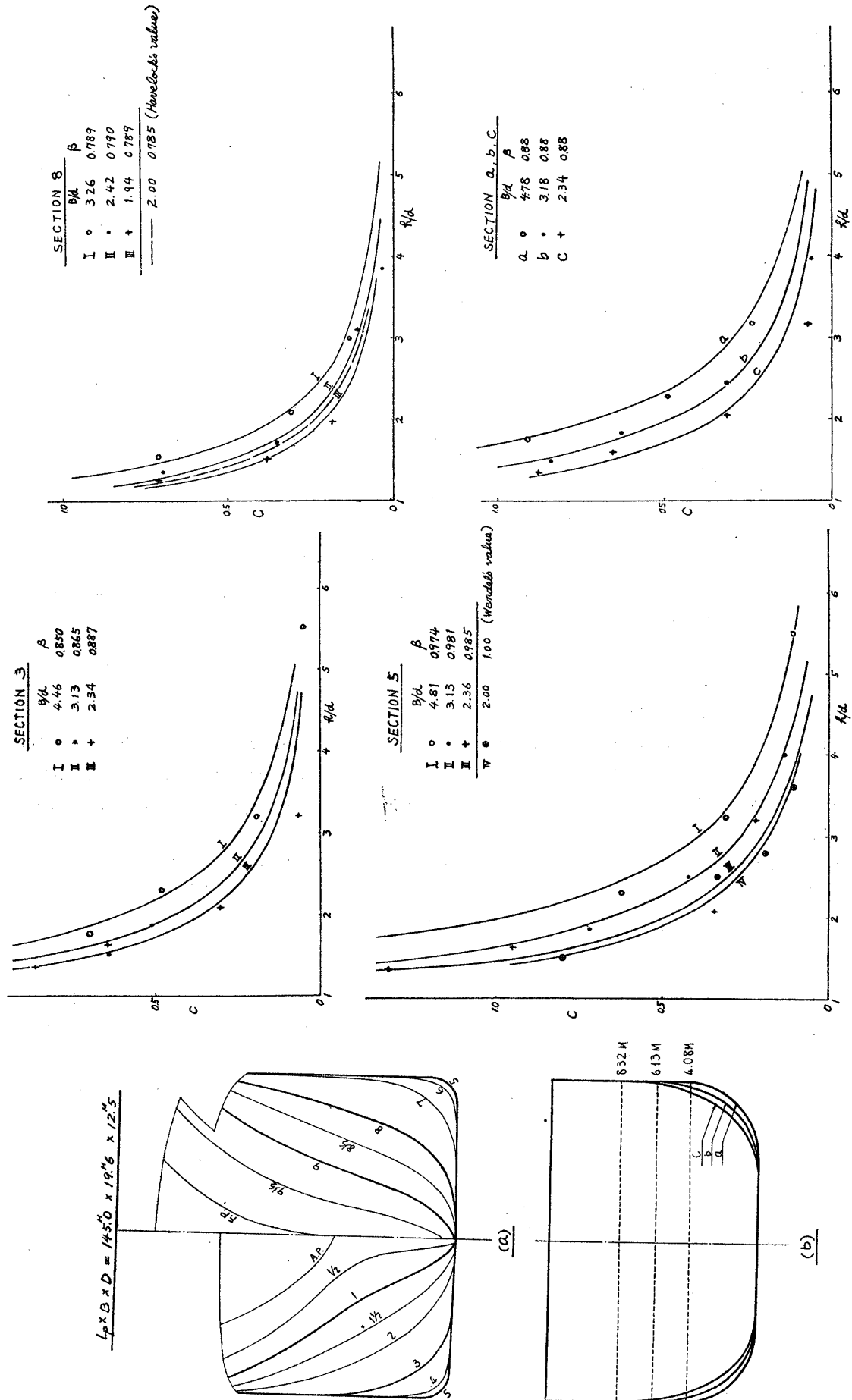


FIG. 2 (b)

FIG. 2 (a)

FIG. 1

振動数と模型を取付けた状態における系の固有振動数とを測定し計算により附加質量を求めた。

2. cylinder model に対する附加質量増加の近似式

各 cylinder model についての測定値を deep water の場合の見掛け附加質量に対する増加率 (c) で示すと、第2図 (a), (b) のごとくである。ただし断面1および9の測定値は形状の関係か、他のごとき斉一性が得られなかつたので省略してある。

第2図の計測値に基づき、附加質量に影響あると考えられる断面形状、幅喫水比および水深喫水比等の各要素につき検討してみる。

i) 断面形状の影響

断面の面積係数を β とすれば、水深影響による見掛け附加質量の増加は略 β^3 に比例すると見なすことができる。

ii) 幅喫水比の影響

従来の実験式には考慮されていなかった要素であるが、例えば同一水深喫水比であつても、船底と海底とのいわゆる bed clearance 大なる満載状態と、この clearance 小なる空艙状態とでは、その影響が異なるであろうことは容易に予想できるところである。この影響は実験値より幅喫水比 (b/d) にほぼ比例すると見なすことができ、この傾向はまた J. J. Koch の矩形断面についての実験²⁾によつても確認することができる。

iii) 水深喫水比の影響

Prof. Havelock は半円形断面の上下方向振動に対し、水深喫水比 (h/d) による見掛け附加質量の増加率を次式³⁾により与えている。すなわち、

$$c = 0.8225(h/d)^{-2} + 0.3382(h/d)^{-4} + 0.1391(h/d)^{-6} + \dots \quad (1)$$

本式による変化傾向はまた (h/d)^{-2.2} でよく表わすことができ、これは実験値の傾向とも比較的良好一致している。

以上の各要素を総合し、船型類似断面の cylinder model に対する見掛け附加質量の増加率としてつぎの実験式が得られる。

$$c = k\beta^3(b/d)(d/h)^{2.2} \quad (2)$$

ここに k は常数係数であるが、矩形に対する K. Wendel の値⁴⁾あるいは (1) 式による Havelock の理論値等を参考として $k \approx 1.1$ とすると、(2) 式は、

$$c = 1.1\beta^3(b/d)(d/h)^{2.2} \quad (2')$$

第2図中の実線は (2') 式による値を示している。

3. 船型の場合の水深影響

船型の場合の deep water における見掛け附加重量を Δ_v 、単位長さ当りのそれを m_v とすれば、水深影響ある場合の増加量 $C\Delta_v$ は、

$$C\Delta_v = \int c m_v dx = \int 1.1\beta^3(b/d)(d/h)^{2.2} m_v dx = 1.1(B/d)(d/h)^{2.2} \int \beta^3(b/B) m_v dx \quad (3)$$

ここに B は型幅である。また $\int \beta^3(b/B) m_v dx / \Delta_v$ は近似的に block coefficient (C_b) のみの函数と見なすことができ、この値を実際の船型について求めてみると、

$$\int \beta^3(b/B) m_v dx / \Delta_v \approx 1.08 C_b \quad (4)$$

となる。したがつて、船型の場合の見掛け附加重量の増加量 $C\Delta_v$ は、

$$C\Delta_v = 1.1(B/d)(d/h)^{2.2} \cdot 1.08 C_b \Delta_v = 1.19(B/d)(d/h)^{2.2} C_b \Delta_v \quad (5)$$

つぎに水深影響ある場合の固有振動数の変化は、単位長さにつき $c m_v$ によつて与えられる見掛け附加重量の増加があるものとして求めることができる。

一般に固有振動数 N は、

$$N = k' k_n \sqrt{\frac{I_e}{W_e L^3}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+r_s} \sqrt{1+r_r}} \quad (6)$$

なる形で表わすことができる⁵⁾。ここに k' は上下振動の場合振動型の種類のみによつて決まる係数、また W_e は振動系が両端自由均一梁の節点位置で支持されていると仮定したときのいわゆる総有効重量で、 w' を見掛け附加重量を含む単位長さ当りの重量、 e を有効重量係数、 η を両端自由均一梁の各点における振幅の梁端振幅に対する比とすれば、

$$W_e = \int e w' dx = \int 4 \eta^2 w' dx \quad (7)$$

また、 k_n は実際の節点位置に対する修正係数で、

$$\left. \begin{aligned} & \text{2 節振動に対し, } k_n = \sqrt{\frac{W_e}{W_e - 4 \eta_0^2 W}} \\ & \text{3 節振動に対し, } k_n = \sqrt{\frac{W_e}{W_e - 4 \alpha^2 l \int_{-1/2}^{1/2} \xi^2 w' d\xi}} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

ここに、 $\eta_0 = \int_{-1/2}^{1/2} \eta w' d\xi / \int_{-1/2}^{1/2} w' d\xi$, $\alpha = \int_{-1/2}^{1/2} \xi \eta w' d\xi / \int_{-1/2}^{1/2} \xi^2 w' d\xi$ である。

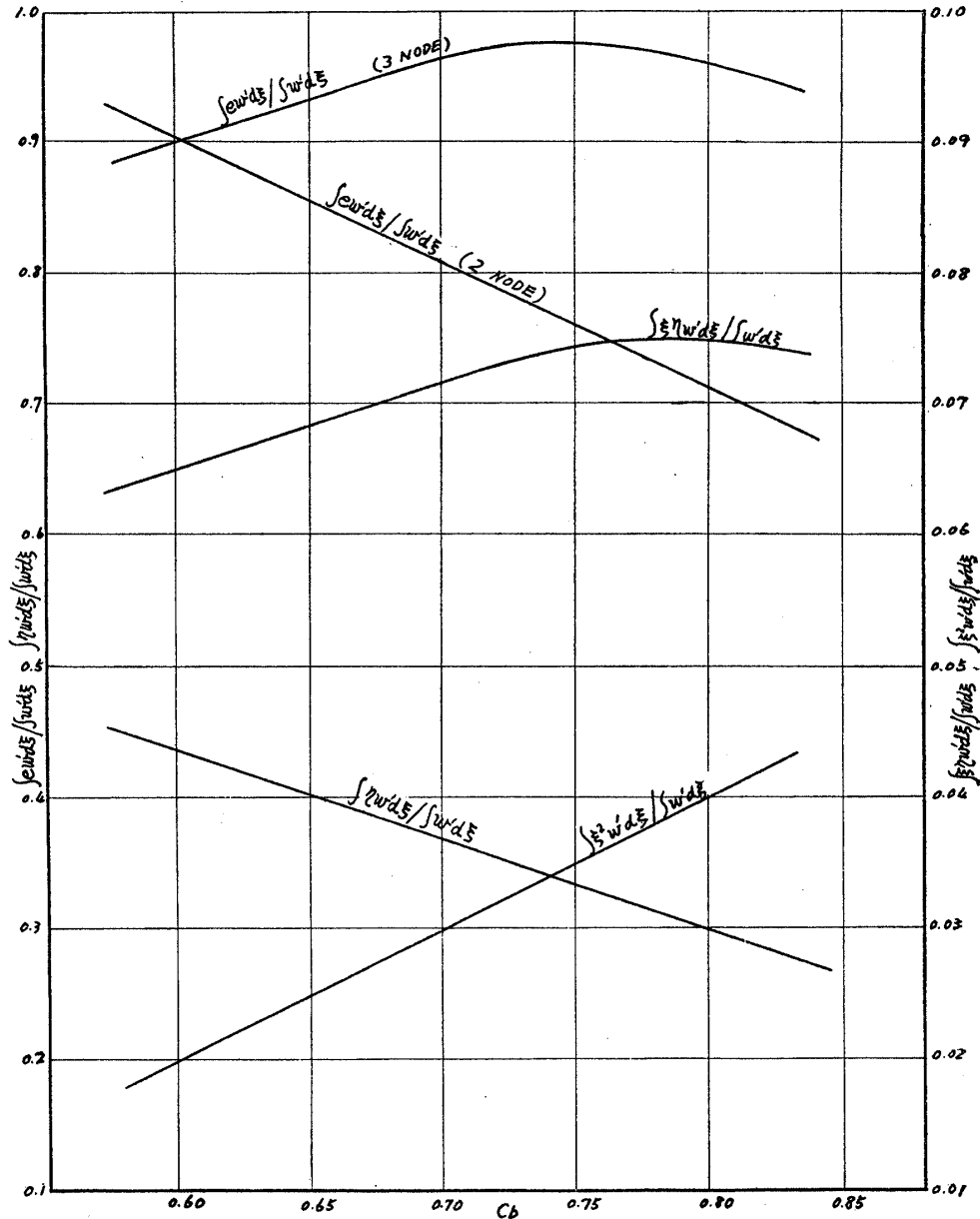


FIG. 3 COEFFICIENTS FOR INCREASED ADDED VIRTUAL WEIGHT

なお、その他の記号は文献 5) 中のものと同様である。

今、水深影響ある場合の値を附記号 s を付して表わせば、

$$N_s = k' k_{ns} \sqrt{\frac{I_e}{W_{es} L^3}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+r_s} \sqrt{1+r_r}} \quad (9)$$

したがって、水深影響による固有振動数の低下率 N_s/N は、

$$\frac{N_s}{N} = \frac{k_{ns}}{k_n} \sqrt{\frac{W_e}{W_{es}}} \quad (10)$$

さて、 k_{ns} , W_{es} の算定に当り必要な、 $C\Delta_v$ に対する諸係数 $\int ew'd\xi / \int w'd\xi$, $\int \eta w'd\xi / \int w'd\xi$, $\int \xi \eta w'd\xi / \int w'd\xi$ および $\int \xi^2 w'd\xi / \int w'd\xi$ の値は実船の線図について求め、 C_b に対して表わせば第 3 図のごとくである。

4. 実測値との比較

第 1 図に示す線図の実船穂高山丸の就航中各港において計測し得た実測値と、本船の載貨状態に基づき、文献 5) に準じて行つた計算値との比較を第 1 表に示してある。また、熊井教授の行なつた油槽船模型の ballast 状態における水深影響実験⁶⁾の結果と本論の方法による計算値との比較を第 2 表に示す。ただし本表において 4 節以上に対しては、 k_n および $\int ew'd\xi / \int w'd\xi$ 値がともに 1 に近づくとの見解から、固有振動数低下は近似的に 3 節振動の場合の総見掛け重量比によつて与えられるものとしている。すなわち、4 節以上に対しては、

$$\frac{N_s}{N} = \sqrt{\frac{W}{W_s}} = \sqrt{\frac{\Delta + \Delta_v}{\Delta + \Delta_v + C\Delta_v}} \quad (11)$$

なお、参考として穂高山丸の場合の一計算例と、代表的な 2 船型、すなわち、 $C_b=0.67$ の貨物船、 $C_b=0.79$ の油槽船の満載、空艙両状態における水深影響による固有振動数低下の模様をそれぞれ第 3 表および第 4 図に示してある。

以上先ず cylinder model の実験により、従来無視されていた幅喫水比を考慮に入れた新しい水深影響の実験式を求め、これを船型に適用し、実船あるいは模型の実測値と比較して実用上満足できる精度のものであることを確かめることができたと思う。

TABLE 1 NATURAL FREQUENCIES AT SHALLOW WATER
MEASURED ON M/S "HODAKASAN MARU"

MODE	2 NODE VERTICAL							3 NODE VERTICAL		
	11	12	18	12	12	40	15	14	15	
DEPTH OF WATER (M)	11	12	18	12	12	40	15	14	15	
MEAN DRAFT (M)	5.53	6.07	7.39	7.61	8.11	8.23	8.40	7.39	8.40	
DEPTH OF W/M. DRAFT	2.0	2.0	2.4	1.6	1.5	4.9	1.8	1.9	1.8	
BREADTH/M. DRAFT	3.54	3.23	2.65	2.57	2.41	2.38	2.33	2.65	2.33	
TRIM (M)	0.98	0.46	0.84	0.85	0.11	0.17	0.28	0.84	0.28	
Δ (KT)	9,872	10,830	14,044	14,557	15,441	16,009	16,414	14,044	16,414	
C_b	0.622	0.632	0.655	0.658	0.664	0.668	0.670	0.655	0.670	
FOR DEEP WATER	W_e (KT)	19,314	19,619	21,233	22,088	22,200	25,761	25,360	25,677	26,841
	η_g OR α	0.172	0.167	0.189	0.190	0.227	0.193	0.195	1.018	0.852
	k_n	1.075	1.072	1.109	1.108	1.174	1.101	1.108	1.143	1.099
	$k_e N_e$	88.8	88.0	87.5	85.7	90.7	78.8	79.8	161.2	151.3
FOR SHALLOW WATER	$C\Delta_v$ (KT)	6,460	6,091	3,619	9,318	9,970	760	6,794	5,733	5,982
	W_{es} (KT)	25,014	24,930	24,313	29,990	30,750	26,398	31,040	31,032	32,500
	η_{gs} OR α_s	0.228	0.218	0.212	0.240	0.274	0.198	0.230	1.172	1.011
	k_{ns}	1.145	1.136	1.140	1.186	1.279	1.108	1.160	1.180	1.132
	$(k_e N_e)_s$	83.2	82.5	84.2	78.8	84.0	78.6	75.8	151.4	142.0
RECORD. FREQ. N_R	83	82	83	79	84	79	76	149	143	
$k_e = 1.015$ FOR 2 NODE, $= 0.94$ FOR 3 NODE										

造船協会論文集 第107号

TABLE 2 DECREASE OF NATURAL FREQUENCY DUE TO SHALLOW WATER
(TANKER MODEL EXPERIMENT BY PROF KUMAI)
BREADTH/DRAFT = 4.6

WATER DEPTH/DRAFT		1.5	2.0	3.0	4.0	∞	
2-NODE	CALCULATION	R_n	1.220	1.167	1.121	1.105	1.085
		W_B (KG)	43.2	33.8	27.6	25.5	23.2
		$N_s/N = \frac{R_{ns}}{R_n} \sqrt{\frac{W_B}{W_{es}}}$	0.825	0.891	0.950	0.973	1.00
	EXPERIMENT	N_s/N	0.813	0.895	0.947	0.970	1.00
3-NODE	CALCULATION	R_n	1.200	1.155	1.120	1.105	1.090
		W_B (KG)	47.3	37.0	30.0	27.7	25.2
		$N_s/N = \frac{R_{ns}}{R_n} \sqrt{\frac{W_B}{W_{es}}}$	0.805	0.876	0.944	0.967	1.00
	EXPERIMENT	N_s/N	0.763	0.863	0.943	0.974	1.00
4-NODE	CAL.	$W_B = \Delta + \Delta_D + C_D V$	49.1	38.5	31.4	29.1	26.5
		$N_s/N = \sqrt{\frac{W_B}{W_{es}}}$	0.736	0.831	0.920	0.955	1.00
		EXPERIMENT	N_s/N	0.754	0.864	0.942	0.970
	5-NODE	CAL.	$W_B = \Delta + \Delta_D + C_D V$	49.1	38.5	31.4	29.1
$N_s/N = \sqrt{\frac{W_B}{W_{es}}}$			0.736	0.831	0.920	0.955	1.00
EXPERIMENT			N_s/N	0.742	0.836	0.922	0.962

TABLE 3 CALCULATION OF NATURAL FREQUENCY
AT SHALLOW WATER

SHIP : M.S. HODAKASAN - MARU
 $L_p \times B \times D$: 145.00 x 19.60 x 12.50
 MEAN DRAFT : 7.39 , $\Delta = 14,044$ KT , $C_b = 0.655$
 PLACE : SAN FRANCISCO
 DEPTH OF WATER : 18 M FOR 2-NODE , 14 M FOR 3-NODE

i) 2-NODE VERTICAL

	w	e	e w	η	ηw
Δ	14,044		10,720		1,413
Δ_D	13,707		10,513		3,811
$C_D V$	3,619 ^{*1}	0.851 ^{*2}	3,080	0.397 ^{*3}	1,437
$W_B = 31,370$		$W_{es} = 24,313$		$(\sum \eta w)_s = 6,663$	

$\eta_{gs} = (\sum \eta w)_s / W_B = 0.212$
 $R_{ns} = [W_{es} / (W_{es} - 4 \eta_{gs}^2 W_B)]^{1/2} = 1.140$
 $(ReNc)_s = Re R_{ns} \cdot 307 \sqrt{\frac{I_e \times 10^8}{W_{es} L_p^3 \sqrt{1+\eta_{gs}} \sqrt{1+\eta_{gs}}}} = 1.015 \cdot 1.140 \cdot 307 \sqrt{\frac{53.4 \times 10^8}{(24,313 \cdot 14,500)^{3/2} \cdot 1.133}} = 84.2$
 (RECORDED FREQ. $N_R = 83$)

ii) 3-NODE VERTICAL

	w	e	e w	ξ^2	$\xi^2 w$	$\xi \eta$	$\xi \eta w$
Δ	14,044		13,607		941		643
Δ_D	12,469		12,070		511		835
$C_D V$	5,733 ^{*1}	0.936 ^{*2}	5,360	0.0254 ^{*4}	146	0.0687 ^{*5}	394
$W_B = 32,246$		$W_{es} = 31,032$		$(\sum \xi^2 w)_s = 1,598$		$(\sum \xi \eta w)_s = 1,872$	

$\alpha_s = (\sum \xi \eta w)_s / (\sum \xi^2 w)_s = 1.172$
 $R_{ns} = [W_{es} / (W_{es} - 4 \alpha_s^2 \sum \xi^2 w)]^{1/2} = 1.180$
 $(ReNc)_s = Re R_{ns} \cdot 84.5 \sqrt{\frac{I_e \times 10^8}{W_{es} L_p^3 \sqrt{1+\eta_{gs}} \sqrt{1+\eta_{gs}}}} = 0.94 \cdot 1.180 \cdot 84.5 \sqrt{\frac{44.3 \cdot 10^8}{(31,032 \cdot 14,500)^{3/2} \cdot 1.338}} = 151.4$
 (RECORDED FREQ. $N_R = 149$)

NOTE : *1 : FROM EQUATION (5) , *2 : FROM $\int w dx / \int w dx$, AND *3 , *4 , *5 FROM $\int w dx / \int w dx$, $\int w dx / \int w dx$, $\int w dx / \int w dx$ RESPECTIVELY IN FIG. 3.

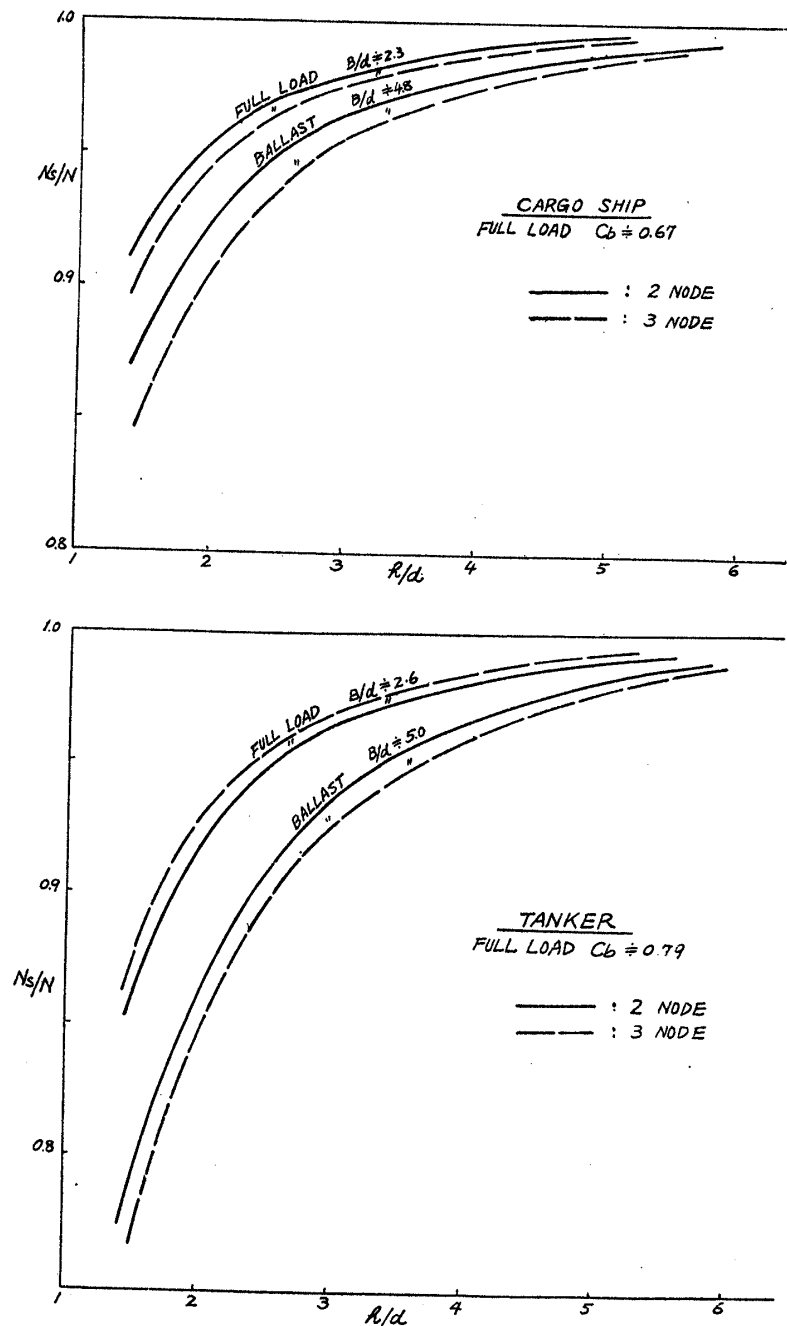


FIG. 4 DECREASE OF NATURAL FREQUENCY DUE TO SHALLOW WATER.

終りに、種々困難を伴った模型実験を実施して頂き、また資料を引用させて頂いた熊井教授に厚く感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) C. W. Prohaka : "The Vertical Vibration of Ships" ATMA, 1947
- 2) J. J. Koch : "Experimental Method for Determining the Vertical Mass for Oscillations of Ships" Ing-Arch., 1933
- 3) T. H. Havelock : "Ships Vibrations : The Vertical Inertia of a Spheroid in Shallow Water" TINA, 1953
- 4) K. Wendel : "Hydrodynamische Massen und Hydrodynamische Massenträgheitsmomente" STG. 1950
- 5) 筆者 : 船体低次固有振動数の推定 (昭和 35 年 5 月造船協会講演会にて発表)
- 6) 熊井豊二 : 船体振動型の水深影響に関する一模型実験造 (造船協会構造委西部地区部会にて発表)