

TUMSAT-OACIS Repository - Tokyo

University of Marine Science and Technology

(東京海洋大学)

船舶の横揺れ回転半径の推定

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2011-11-22 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 那須, 正次 メールアドレス: 所属:
URL	https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/882

学位論文

題目 船舶の横揺れ回転半径の推定

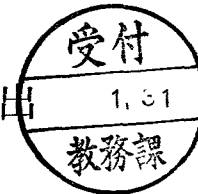
指導教授 森田 知治

商船学研究科 航海学 専攻

平成
~~昭和~~ 元年入学

氏名 那須正次

平成 3 年 1 月 31 日提出



目次

1. はじめに
 2. 回転半径の計算
 2. 1 自由横揺れの運動方程式
 2. 2 回転半径計算の現状
 3. 解析方法
 3. 1 主船体と上部構造の回転半径
 3. 2 主船体のモデル化
 3. 3. 1 モデルのあてはめ
 3. 2. 2 モデルの回転半径
 3. 3 上部構造のモデル化
 3. 4 説明変数候補
 3. 5 使用したデータ
 4. 解析結果
 5. 解析結果の検討
 6. おわりに
-
- 付録.1 解析に使用したデータ（カーフェリー）
 - 付録.2 解析に使用したデータ（客船）
-

1. はじめに

船の固有横揺れ周期は、メタセンタ高さと同調半径が与えられれば簡単に求めることができる。しかし、同調半径を正確に知るには傾斜試験及び、動揺試験を行わなければならない。もし、これらの試験を行わずしてその値が判れば船舶の設計の段階で同調横揺れ周期が推算でき、さらにはこれを用いることによって同調横揺れ角度が求められるので便利である。

固有横揺れ周期と波の出会い周期とが一致すると同調横揺れをおこす。この同調横揺れは転覆につながる可能性のある危険なものであり、動的復原力を考える上で考慮されなければならない事項である。

戦後、船舶復原性規則により旅客船について傾斜試験、動揺試験の実施が義務付けられるようになり、以来それらのデータが蓄積されている。ところが、この分野の研究は余り行われず、同調半径の推定についてもかなり過去に作られた推定式がもっぱら用いられている。そこで、傾斜試験及び動揺試験が行われた船の資料を基に重回帰分析の手法によって同調半径の推定式の作成を試みた。

2. 同調半径の計算

2. 1 自由横揺れの運動方程式

船舶が静水中でダンピングを受けずに横揺れするとき、その運動方程式は次のように表せる。

$$I \cdot \frac{d^2 \theta}{dt^2} + M \cdot g \cdot GM \cdot \theta = 0 \quad (2-1)$$

ここで、 I は重心を通る縦軸に関する船体の慣性モーメント、 GM はメタセンタ高さ、 M は船の質量、 θ は横揺れ角を示す。この運動の周期を T_R 、同調半径を κ とし $I = M \cdot \kappa^2$ とおけば(2-1)式を解いて、

$$T_R = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{\kappa^2}{g \cdot GM}}$$

ここで重力の加速度 $g = 9.8(\text{m/s}^2)$ 、円周率 $\pi = 3.14$ を代入すると、

$$T_R = \frac{2.01\kappa}{\sqrt{GM}} \tag{2-2}$$

となる。船が完成すれば傾斜試験が行われ重心位置が確認されるが、このとき動揺試験を併せて行い横揺れ周期を計測すれば、(2-2)式によって回転半径を知ることができる。また、船舶の場合これをもって一般に回転半径と定義されている。

2. 2 回転半径計算の現状

傾斜試験、動揺試験を行わずに回転半径を求める方法として、慣性モーメントの定義にしたがい船の重量分布を細かく計算することがあげられる。しかし、これは複雑な構造を有する実船に対して実用的ではないので、用いられることはほとんど無い。

現在、回転半径の計算式として公表されている主なものを以下に掲げる。

① 加藤の式

船舶復原性規則では加藤が提案した次式⁽¹⁾をもとに κ の計算を行っている。

$$\left(\frac{\kappa}{B}\right)^2 = f \cdot \left\{ C_b \cdot C_u + 1.10 C_u \cdot (1 - C_b) \cdot \frac{H}{D} - 2.20 + \frac{H}{B}^2 \right\} \tag{2-3}$$

但し C_b : 方形係数

C_u : 上甲板面積係数 (上甲板長さによる)

H : 船の有効深さ

$$H = D + \frac{A}{L_{pp}}$$

A : 船楼及び甲板室の投影側面積

L_{pp} : 垂線間長

d : 平均喫水

f : 船種による係数

客船、貨客船、貨物船に対して $f = 0.125$

タンカーに対して $f = 0.138$

かつお、まぐろ漁船に対して $f = 0.200$
 捕鯨船に対して $f = 0.177$

この式は係数 f のカテゴリー別に、次に示す隻数、状態別の動揺試験データに基づいて作成された。

表 2 - 1 加藤の式作成に用いられたデータ

船種	隻数	状態数
客船、貨客船、貨物船	12	23
タンカー	3	5
かつお、まぐろ、手繰網漁船	3	6
捕鯨船	2	4

(2-3)式の精度は $\frac{K}{B}$ の値で平均誤差 1%、最大誤差 3%と良好であった。しかし、その後船舶の大型化、新船型の開発などがあって(2-3)式がよく当てはまらない船も多くなっている。

船舶復原性規則の適用に当たっては、動揺試験時の $\frac{K}{B}$ とその状態での(2-3)式右辺の値が得られるので、これらにより船毎に f の値を定めてから使用状態の $\frac{K}{B}$ を計算している。よって、(2-3)式の精度低下はあまり影響がないようである。

② IMOの式

IMOの復原性基準である決議 A 5 6 2 (14)では、わが国で作成された次式⁽²⁾が同調横揺角の計算に使用されている。

$$\frac{K}{B} = 0.373 + 0.023 \frac{B}{d} - 0.00043 L_{pp}$$

これは加藤の式に使用されたデータに昭和55年頃までに建造された旅客船、カーフェリー、及び漁船計58隻の傾斜試験、動揺試験データを追加し、なるべく簡単に K を推定することを目的として作成されたものである。この式の精度は残差の標準偏差で 0.019、相対誤差の最大値で約8%である。

3. 解析方法

本論文では、船舶の設計の比較的早い段階でわかる変数のみで試験時（軽荷に近い）の κ をできるだけ高精度に推定することを目的とした。使用したデータは動揺試験時のものであるから、軽荷状態の κ の推定式と考えてよい。

κ を船幅 B で無次元化した $\left(\frac{\kappa}{B}\right)^2$ を重回帰分析の目的変数とし、説明変数の候補としては以下で述べるように、船体を幾何学的に単純な形状で近似することにより導きだした。さらに、現在用いられている推定式の変数で計算が容易に行えるものも候補に加えることにした。

説明変数の選択には、変数増減法で回帰式を導き、その中から赤池の情報量基準 AIC を最小とするものを選ぶという方法をとった。

3. 1 主船体と上部構造の回転半径

船体を上甲板から下の主船体と、船楼、甲板室からなる上部構造に分け、表 3-1 のように主船体には h 、上部構造には s の添え字をつけ記号を定義する。

表 3-1 重量等の記号

	主船体	上部構造	全船体
排水量	W_h	W_s	W
重心高さ	$K G_h$	$K G_s$	$K G$
慣性モーメント	I_h	I_s	I
回転半径	κ_h	κ_s	κ

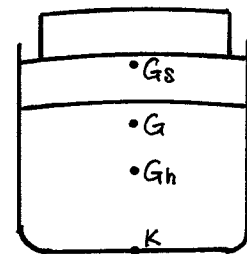


図 3-1 各部の重心

主船体及び上部構造の慣性主軸はそれぞれの重心を通り、ベースラインに平行であると仮定する。重心の移動を求める式を用い $G G_h$ 、 $G G_s$ は、

$$G G_h = \frac{G_h G_s \cdot W_s}{W} = \frac{K G_s - K G_h \cdot W_s}{W}$$

$$G G_s = \frac{G_h G_s \cdot W_h}{W} = \frac{K G_s - K G_h \cdot W_h}{W}$$

であり、全船体の重心 G を通る縦軸に関する慣性モーメントを I とおけば、

$$I = W_h \cdot G G h^2 + W_s \cdot G G s^2 + I_h + I_s$$

$$= \frac{W_h \cdot W_s \cdot (K G s - K G h)^2}{W} + I_h + I_s$$

両辺を $B^2 \cdot W$ で割り整理すると、

$$\left(\frac{\kappa}{B}\right)^2 = \frac{W_h \cdot W_s}{W^2} \cdot \left(\frac{K G s - K G h}{B}\right)^2 + \frac{W_h}{W} \cdot \left(\frac{\kappa h}{B}\right)^2 + \frac{W_s}{W} \cdot \left(\frac{\kappa s}{B}\right)^2 \quad (3-1)$$

となる。

3. 2 主船体のモデル化

(3-1)式の $K G h$ 、 κh を表すべく主船体をモデル化し重心高さ、及び回転半径を計算した。

軽荷状態にきわめて近い動揺試験状態でのモデルであるから、載荷物件は無いものとし、また簡単のため甲板と外板のみのモデルとした。

3. 2. 1 モデルのあてはめ

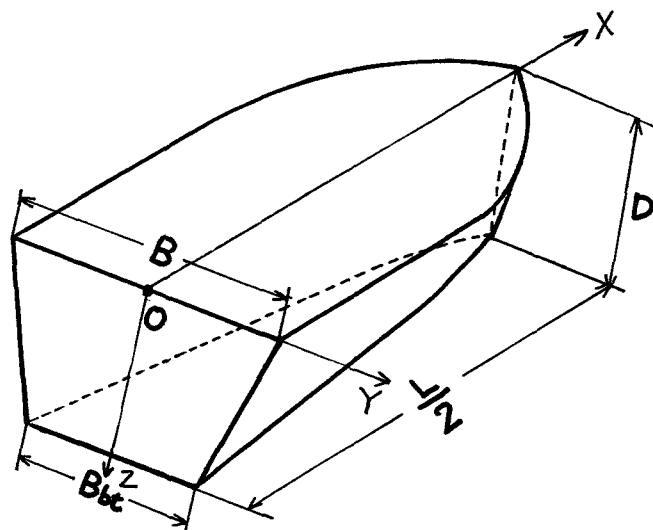


図 3 - 2 主船体モデル

図3-2は垂線間長L、型幅B、型深さDの主船体モデルの前半部を示す。このモデルは中央断面が台形であり、甲板部の幅B、キール部の幅B_{bt}が台形の平行2辺を構成し、深さがDである。上甲板はベースラインに平行な平面とするのでシアもキャンバーも零である。船底外板も上甲板に平行な平面とする。また、任意の横断面は中央断面に類似の台形とする。すなわち、船側外板はこの台形の斜辺から構成されるので、ビルジ部分は円弧ではなく角となっている。モデルの後半部は前半部と対称とする。また、上甲板に原点をとり前後方向をX、左右方向をY、上下方向をZとする座標系を用いる。

モデルの上甲板以下の方形係数をC_{bD}、中央断面係数をC_{∞D}、上甲板の水線面積係数をC_{wD}としてこれらを実船の値に等しくしてモデルの形状を定める。ところが設計時には設計喫水におけるこれら係数の値が設定されているだけであるから、これを基にして喫水がDになった場合の値を知る必要がある。このため、ある喫水dにおけるC_b、C_w、C_∞から他の喫水d'における値を推定する次式⁽³⁾を用いる。

$$C_{b'} = C_b \cdot \left(\frac{d'}{d}\right)^{\frac{1}{C_{vp}} - 1} \quad (3-2)$$

$$C_{w'} = C_w \cdot \left(\frac{d'}{d}\right)^{\frac{1}{C_{vp}} - 1} \quad (3-3)$$

$$C_{\infty'} = 1 - \frac{d \cdot (1 - C_{\infty})}{D} \quad (3-4)$$

(3-2)、(3-3)式は水線面積曲線が、喫水に関する $\left(\frac{1}{C_{vp}} - 1\right)$ 次の放物線で近似できることから導かれたものであるが、特異な船形でない限り好精度を与える。

(3-4)式は中央断面の形状から導かれる式であって、近似式ではなく正しい値を与える。

次にモデルの形を定める方法を示すが、(3-2)~(3-4)式のd'をDに換えた各値をC_{bD}、C_{wD}、C_{∞D}として用いる。

① Bbt の決定

モデルの中央断面積を S_{∞} とし、

$$S_{\infty} = \frac{D \cdot (B + B_{bt})}{2}$$

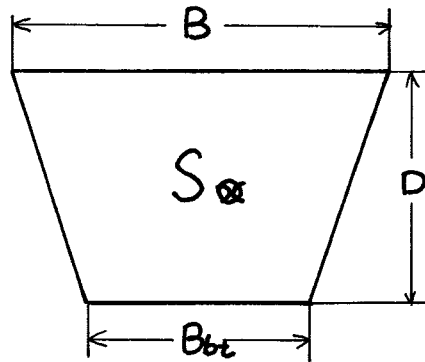


図 3 - 3 主船体モデルの中央横断面

S_{∞} を $(B \cdot D)$ で割り、 $C_{\infty}D$ と等しいとおき、 B_{bt} について解くと、

$$B_{bt} = B \cdot (2C_{\infty}D - 1)$$

② 上甲板形状の決定

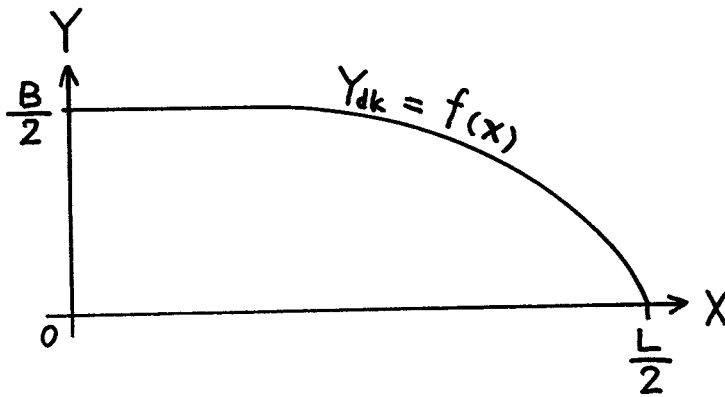


図 3 - 4 上甲板の形状

図 3 - 4 は図 3 - 2 の上甲板の半分の平面図である。図示の座標軸 X 、 Y において半幅 Y_{dk} を次式のような n 次の放物線とする。

$$Y_{dk} = \frac{B}{2} \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{X}{L/2} \right)^n \right\} \quad \text{但し、} 0 \leq X \leq \frac{L}{2} \quad (3-5)$$

この半幅によるモデルの水線面積が、実船の喫水が D に等しくなった場合の水線面積と同じになるように n を定める。

(3-5)式による水線面積を S_{dk} とすれば、

$$\frac{S_{dk}}{4} = \int_0^{L/2} Y_{dk} dX = \frac{B}{2} \cdot \int_0^{L/2} \left\{ 1 - \left(\frac{X}{L/2} \right)^n \right\} dX$$

$$\frac{X}{L/2} = x \text{ とおき変数変換すると、 } dX = \frac{L}{2} dx$$

$$\frac{S_{dk}}{4} = \frac{L \cdot B}{4} \cdot \int_0^1 (1 - x^n) dx$$

$$S_{dk} = L \cdot B \cdot \left(1 - \frac{1}{n+1} \right)$$

となり、 S_{dk} を $(L \cdot B)$ で割り、 C_{wD} と等しいとおき、 n について解く。

$$C_{wD} = 1 - \frac{1}{n+1}$$

$$n = \frac{1}{1 - C_{wD}} - 1$$

③ 船底外板形状の決定。

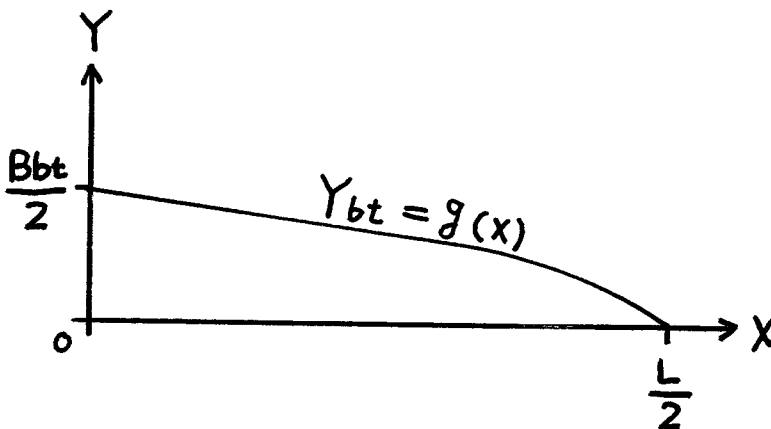


図 3 - 5 船底外板の形状

図 3 - 5 は船底外板の形を XY 平面へ投影したものである。船底外板の形も②の甲板と同形の r 次の放物線とする。

$$Y_{bt} = \frac{B_{bt}}{2} \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{X}{\frac{L}{2}} \right)^r \right\} \quad \text{但し、} 0 \leq X \leq \frac{L}{2} \quad (3-6)$$

ここに、 r はモデルの方形係数を実船の値に等しくすることにより決定する。

船側外板は、ある X における (3-5) 式の上甲板半幅 Y_{dk} の先端と、(3-6) 式の船底外板半幅 Y_{bt} の先端とを結ぶ直線で構成する。すなわち、ある X におけるモデルの横断面は図 3 - 6 に示すような台形となる。

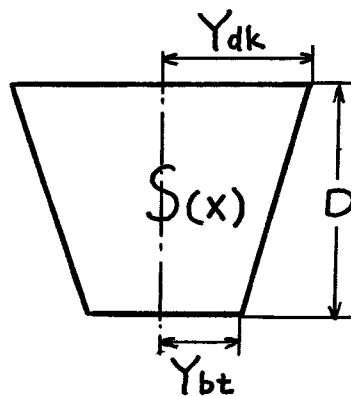


図 3 - 6 主船体モデルの一般横断面

一般横断面の面積を $S(X)$ とすれば、

$$S(X) = D \cdot (Y_{dk} + Y_{bt})$$

これを、長さ方向に積分しモデルの排水容積 V を求めると、

$$\begin{aligned} \frac{V}{2} &= \int_0^{L/2} S(X) dx = D \cdot \int_0^{L/2} (Y_{dk} + Y_{bt}) dX \\ &= D \cdot \int_0^{L/2} \left[\frac{B}{2} \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{X}{\frac{L}{2}} \right)^n \right\} + \frac{B_{bt}}{2} \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{X}{\frac{L}{2}} \right)^r \right\} \right] dX \end{aligned}$$

$$\frac{X}{\frac{L}{2}} = x \quad \text{とおくと、} \quad dX = \frac{L}{2} dx$$

$$\frac{V}{2} = \frac{D \cdot L}{2} \cdot \int_0^1 \left\{ \frac{B}{2} \cdot (1 - x^n) + \frac{Bbt}{2} \cdot (1 - x^r) \right\} dx$$

$$V = \frac{D \cdot L}{2} \cdot \left\{ B \cdot \left(1 - \frac{1}{n+1} \right) + Bbt \cdot \left(1 - \frac{1}{r+1} \right) \right\}$$

V を (L · B · D) で割り、CbD に等しいとおく。

$$CbD = \frac{1}{2} \cdot \left\{ \left(1 - \frac{1}{n+1} \right) + \frac{Bbt}{B} \cdot \left(1 - \frac{1}{r+1} \right) \right\}$$

これを r について解けば、

$$r = \frac{1}{1 - Cwb} - 1$$

但し、Cwb はモデルの船底外板の面積係数であり、次式で定まる。

$$Cwb = \frac{2 \cdot CbD - CwD}{2 \cdot C_{\infty}D - 1}$$

このようにしてできたモデルの 1 例を計算式とともに次頁図 3 - 7 に示す。図 3 - 8 は参考のためこのモデル例の一般配置図から上甲板を抜粋して示したものである。

主要目

L _{pp}	53.0
B	9.50
D	4.00
d	2.72
C _b	.540
C _{∞D}	.886
C _w	.757
C _{v_p}	.713

$$C_{wD} = C_w \cdot \left(\frac{D}{d}\right)^{\frac{1}{C_{vp}} - 1} = 0.884$$

$$C_{\infty D} = 1 - \frac{d \cdot (1 - C_{\infty})}{D} = 0.922$$

$$C_{bD} = C_b \cdot \left(\frac{D}{d}\right)^{\frac{1}{C_{vp}} - 1} = 0.631$$

$$n = \frac{1}{1 - C_{wD}} - 1 = 7.62$$

$$B_{bt} = B \cdot (2C_{\infty D} - 1) = 8.02$$

$$C_{wb} = \frac{2 \cdot C_{bD} - C_{wD}}{2 \cdot C_{\infty D} - 1} = 0.448$$

$$r = \frac{1}{1 - C_{wb}} - 1 = 0.81$$

上甲板:

$$Y_{dk} = \frac{9.50}{2} \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{2}{53.0} X \right)^{7.62} \right\}$$

船底:

$$Y_{bt} = \frac{8.02}{2} \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{2}{53.0} X \right)^{0.81} \right\}$$

但し、 $0 \leq X \leq \frac{53.0}{2}$

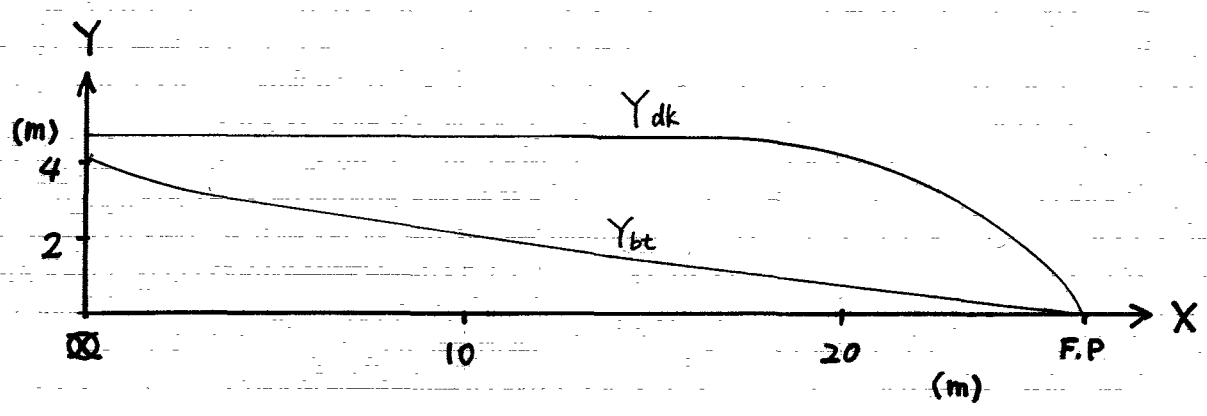


図 3-7 主船体モデルの例

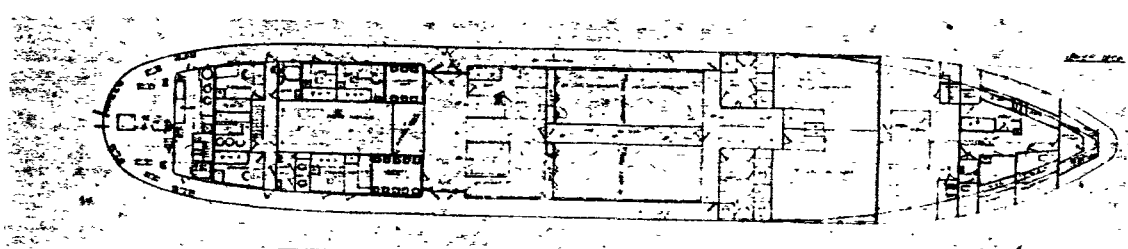


図 3-8 実船上甲板

3. 2. 2モデルの回転半径

多くの面積から構成される立体の慣性モーメントの算式は次の通りである。

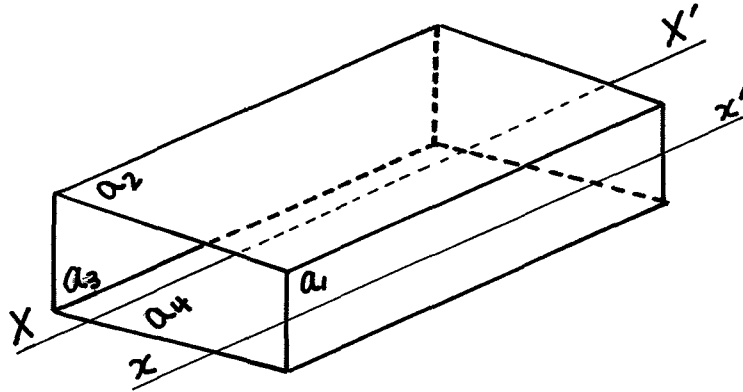


図3-9 4つの面積から構成される立体

n 個の面積 $a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n$ から構成される立体の重心を通る軸 XX' に関する慣性モーメントを I とする。

また、 a_i の重心を通り XX' に平行な軸 $x_i x_i'$ に関する慣性モーメントを I_i とする。図3-9は面積が4個の場合の簡単な立体を示す。 $x_i x_i'$ の軸がすべて XX' に重なっていれば、

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n = \sum_{i=1}^n I_i$$

である。

$x_i x_i'$ 軸が XX' と平行に離れた場合、両軸間の距離を Og_i とする。この場合、 XX' が全体の重心を通る限り、全体の I は、

$$\begin{aligned} I &= (I_1 + Og_1^2 \cdot a_1) + (I_2 + Og_2^2 \cdot a_2) + \dots + (I_n + Og_n^2 \cdot a_n) \\ &= \sum_{i=1}^n I_i + \sum_{i=1}^n (Og_i^2 \cdot a_i) \end{aligned} \tag{3-7}$$

となる。

① 船側部の面積及び慣性モーメント

図 3 - 1 0 はモデルの一般横断面の片側を示したものであり、これを見てわかるように船側外板は、以下の式で表せる。

$$Y_{sd} = f(X, Z) = Y_{dk} + \frac{Y_{bt} - Y_{dk}}{D} \cdot Z \quad \text{但し、} \quad 0 \leq X \leq \frac{L}{2} \\ 0 \leq Z \leq D$$

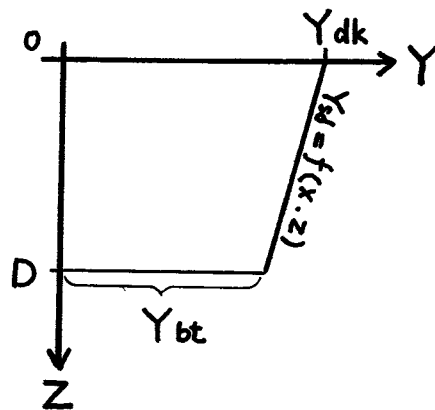


図 3 - 1 0 主船体モデルの一般横断面

船側の表面積 S_{sd} は公式によって次のように求められる。

$$\frac{S_{sd}}{4} = \int_0^D \int_0^{L/2} \sqrt{1 + \left(\frac{\partial f}{\partial X}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial Z}\right)^2} dX dZ \quad (3-8)$$

このモデルの場合、 f を偏微分し、

$$\frac{\partial f}{\partial X} = \frac{n \cdot B}{L} \cdot \left(\frac{Z}{D} - 1\right) \cdot \left(\frac{2}{L} X\right)^{n-1} - \frac{r \cdot Z \cdot B_{bt}}{D \cdot L} \cdot \left(\frac{2}{L} X\right)^{r-1}$$

$$\frac{\partial f}{\partial Z} = \frac{1}{2D} \cdot \left[B_{bt} \cdot \left(1 - \left(\frac{2}{L} X\right)^r\right) - B \cdot \left(1 - \left(\frac{2}{L} X\right)^n\right) \right]$$

である。また、 X 軸に関する慣性モーメント I_{sd} は、

$$\frac{I_{sd}}{4} = \int_0^D \int_0^{L/2} \sqrt{1 + \left(\frac{\partial f}{\partial X}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial Z}\right)^2} \cdot (Z^2 + Y_{sd}^2) dX dZ \quad (3-9)$$

となる。(3-8)、(3-9)式はシンプソンの公式を用い数値積分を行った。その一例を図 3 - 1 1 及び表 3 - 2 に示す。図 3 - 1 1 は積分を行う際に用いた X 座標、

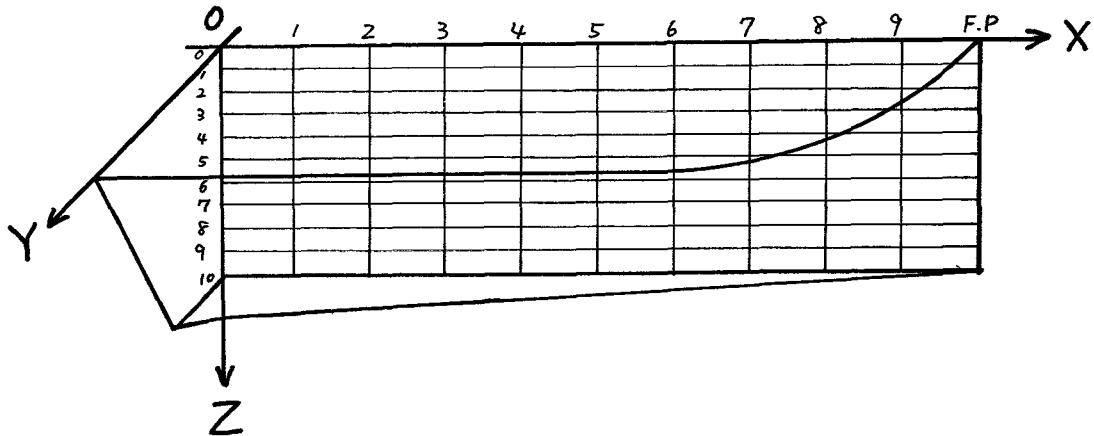


図 3-11 シンプソン積分区間

表 3-2 船側外板表面積の計算

		X										
		S	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Z	0	1	1.056	1.100	1.148	1.199	1.251	1.296	1.324	1.321	1.338	
	1	4	1.056	1.100	1.148	1.199	1.251	1.297	1.324	1.317	1.311	
	2	2	1.057	1.100	1.148	1.199	1.251	1.297	1.324	1.313	1.286	
	3	4	1.058	1.101	1.149	1.200	1.252	1.298	1.324	1.309	1.262	
	4	2	1.059	1.102	1.149	1.200	1.252	1.298	1.324	1.306	1.240	
	5	4	1.060	1.103	1.150	1.201	1.253	1.299	1.324	1.302	1.221	
	6	2	1.062	1.104	1.151	1.202	1.254	1.299	1.324	1.300	1.204	
	7	4	1.065	1.106	1.153	1.203	1.255	1.300	1.324	1.297	1.189	
	8	2	1.067	1.108	1.154	1.205	1.256	1.301	1.324	1.294	1.177	
	9	4	1.070	1.110	1.156	1.206	1.257	1.302	1.324	1.292	1.167	
	10	1	1.073	1.112	1.158	1.208	1.258	1.303	1.324	1.290	1.160	
$\Sigma y \cdot S$			31.9	33.1	34.5	36.1	37.6	39.0	39.7	39.1	36.9	$\Sigma y' \cdot S'$
$\frac{h}{3} \Sigma y \cdot S = y'$			4.248	4.415	4.604	4.808	5.014	5.196	5.296	5.214	4.922	117.53
S'			1	4	2	4	2	4	2	4	1	
面積 $(\frac{2L}{3}) = \frac{h}{3} \Sigma y' \cdot S'$											103.8	

備考: $h = \frac{D}{10}$ $h' = \frac{L}{10} \times \frac{1}{2}$

計算したモデルは 図 4-7 に示したもので、
求めた面積は 船側部全面積 (S_{sd}) の $\frac{1}{4}$ である。

Z座標の区間わけを示している。XZ平面に描かれたますめの交点で被積分関数の値を計算した。表3-2はそれに基づいて計算を行った結果である。表に示されているのは被積分関数の値であり、表中 ψ と略記する。sはシンプソン係数である。ここで計算したモデルは図3-7に示したものである。この例では、X、Zをそれぞれ10等分しているが、解析に使用したデータは精度を上げるためX軸の両端で更に区間を細かくして計算を行った。

② 上甲板の面積及び慣性モーメント

上甲板の面積 S_{dk} についてはCWDを用いれば次のように簡単に求まる。

$$S_{dk} = CWD \cdot L \cdot B$$

次に、図3-12のように上甲板をX軸と平行な直線で細分して考えれば、X軸まわりの慣性モーメント I_{dk} について以下のようなになる。

$$\frac{I_{dk}}{4} = \int_0^{B/2} X \cdot Y^2 dY$$

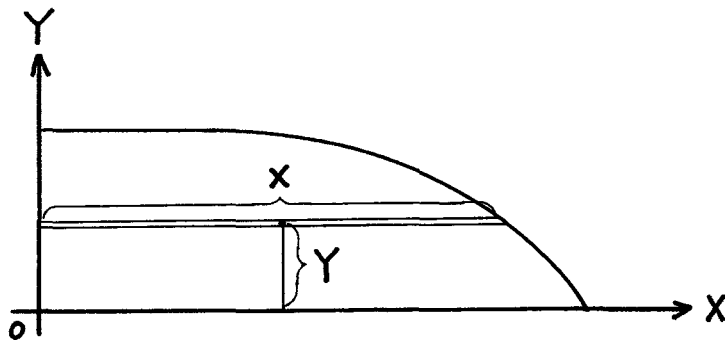


図3-12 主船体モデルの上甲板

ここで(3-5)式をXについて解き代入すると、

$$\frac{I_{dk}}{4} = \int_0^{B/2} Y^2 \cdot \left(\frac{L}{2}\right) \cdot \left(1 - \frac{2}{B} Y\right)^{1/n} dY$$

$1 - \frac{2}{B} Y = t$ とおけば、 $Y = \frac{B}{2} \cdot (1 - t)$ 、 $dY = -\frac{B}{2} dt$ であり、上式は、

$$I_{dk} = \frac{L \cdot B^3}{4} \cdot \left(\frac{n}{n+1} - \frac{2n}{2n+1} + \frac{n}{3n+1} \right)$$

と解ける。

③ 船底の面積及び慣性モーメント

船底の面積 S_{bt} 、及び船底の中心を通る縦軸に関する慣性モーメント I_{bt} について、上甲板の場合と全く同様にして

$$S_{bt} = C_{wb} \cdot L \cdot B$$

$$I_{bt} = \frac{L \cdot B b t^3}{4} \cdot \left(\frac{r}{r+1} - \frac{2r}{2r+1} + \frac{r}{3r+1} \right)$$

以上から、モデル全体の表面積 S_h 、及び X 軸を通る縦軸に関する慣性モーメント I_x について、

$$S_h = S_{sd} + S_{dk} + S_{bt}$$

$$I_x = I_{sd} + I_{dk} + I_{bt} + D^2 \cdot S_{bt}$$

となり、モデルの重心を通る縦軸に関する慣性モーメント I_G 、重心高さ K_{Gh} 、及び回転半径 κ_h は以下のようなになる。

$$I_G = I_x - S_h \cdot OG^2$$

$$K_{Gh} = D - OG$$

$$\left(\frac{\kappa_h}{B} \right)^2 = \frac{I_x}{S_h \cdot B^2} - \left(\frac{OG}{B} \right)^2$$

但し、 OG は X 軸から重心までの距離を表す

$$OG = \frac{\frac{1}{2} \cdot D \cdot S_{sd} + D \cdot S_{bt}}{S_h}$$

3. 3 上部構造のモデル化

上部構造については、以下の基準をもって簡略化し、長方形の四圍（壁）と長方形の天井が組合わさったものとしてモデル化した。

- ・ 複雑な形の構造物（船首楼、船尾楼、ウイングのある船橋等）は、上面の面積がほぼ同じとなる直方体に置き換える。
- ・ 連続した構造物は1つの構造物とみなす。
- ・ 構造物の窓等の開口は無視する。
- ・ 高さが甲板間寸法より小さいもの、幅が型幅の2分の1より小さいもの、低船首楼、低船尾楼、ブルワーク及びその延長のようなものは除外する。

そして、それぞれの位置及び寸法を一般配置図から得た。

薄板構造の慣性モーメントは、主船体の時と同様に(3-7)式に従って図3-13に示す長方形の面積の慣性モーメントの合計として求める。

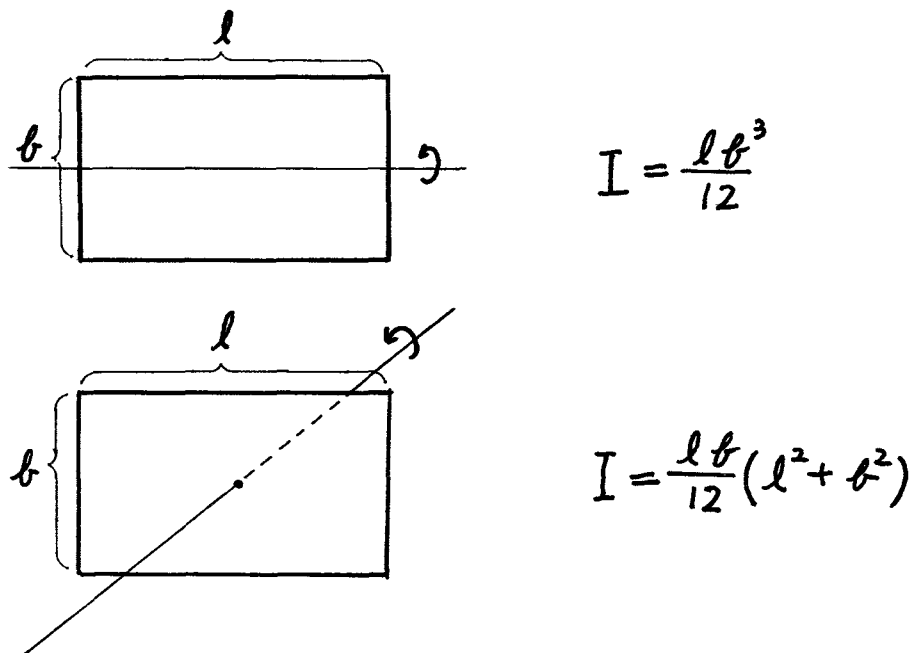


図3-13 長方形の慣性モーメント

図 3 - 1 4 のように記号を定義する。

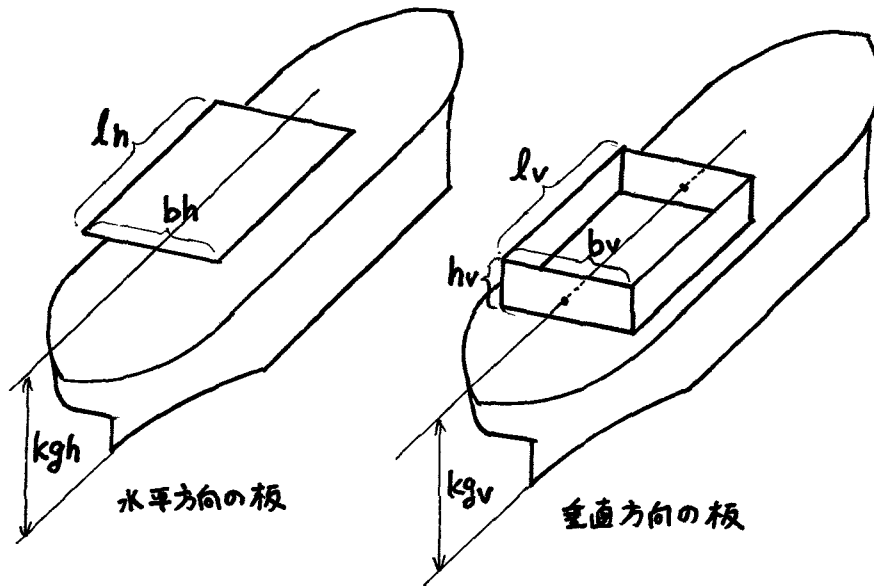


図 3 - 1 4 上部構造の寸法

① 表面積の計算

水平方向の板の面積の総和 A_h は、

$$A_h = \sum l_{h_i} \cdot b_{h_i}$$

となり、垂直方向の板の面積の総和 A_v は、

$$A_v = \sum 2 \cdot h_{v_i} \cdot (l_{v_i} + b_{v_i})$$

となる。

② 重心高さの計算

水平方向、垂直方向の板に関してそれぞれ、

$$kgh = \frac{\sum l_{h_i} \cdot b_{h_i} \cdot kgh_i}{\sum l_{h_i} \cdot b_{h_i}}$$

$$kgv = \frac{\sum 2 \cdot h_{v_i} \cdot (l_{v_i} + b_{v_i}) \cdot kgv_i}{\sum 2 \cdot h_{v_i} \cdot (l_{v_i} + b_{v_i})}$$

ここに、 kgh_i はベースライン上、水平板重心までの高さ、 kgv_i は同垂直壁重心までの高さである。これらを用い上部構造全体の重心高さ KG_s は次のようになる。

$$KG_s = \frac{A_h \cdot kgh + A_v \cdot kgv}{A_h + A_v}$$

③ 上部構造の重心を通る縦軸に関する慣性モーメントの計算

まず、ベースラインに関する慣性モーメントを求める。これは一般配置図上で各板の重心高さを測る上での便宜のためである。

$$I_h = \sum \frac{1}{12} l h_i \cdot b h_i^3 + \sum l h_i \cdot b h_i \cdot k g h_i^2$$

$$I_v = \sum 2 \cdot \frac{b v_i \cdot h v_i}{12} \cdot (b v_i^2 + h v_i^2)$$

$$+ \sum 2 \cdot \left\{ \frac{1}{12} l v_i \cdot h v_i^3 + \sum l v_i \cdot h v_i \cdot \left(\frac{b v_i}{2} \right)^2 \right\}$$

$$+ \sum 2 \cdot h v_i \cdot (l v_i + b v_i) \cdot k g v_i^2$$

ここに、 I_h は垂直壁の慣性モーメント、 I_v は水平板の慣性モーメントである。

次に、上部構造全体の重心を通る縦軸に関する慣性モーメント I_s 、及び回転半径 κ_s は以下のようなになる。

$$I_s = I_h + I_v - (A_h + A_v) \cdot K G s^2$$

$$\left(\frac{\kappa_s}{B} \right)^2 = \frac{I_h + I_v}{B^2 \cdot (A_h + A_v)} - \left(\frac{K G s}{B} \right)^2$$

この計算はベースラインと上部構造全体の重心を通る縦軸との間の距離に関する補正を行ったものである。

3. 4 説明変数候補

主船体と上部構造による回転半径の式、

$$\left(\frac{\kappa}{B} \right)^2 = \frac{W_h \cdot W_s}{(W_h + W_s)^2} \cdot \left(\frac{K G s - K G h}{B} \right)^2 + \frac{W_h}{W_h + W_s} \cdot \left(\frac{\kappa_h}{B} \right)^2 + \frac{W_s}{W_h + W_s} \cdot \left(\frac{\kappa_s}{B} \right)^2$$

(3-1)再掲

によれば、回転半径は主船体、上部構造の κ 、及びそれらの重心間の距離と重

量の分布によって説明できるということになる。しかし、重量 W_h 、 W_s は不明であるので、各項の重量比に関する部分は削除して回帰分析を行った。説明変数の候補としたものを次表に掲げる。

表 3 - 3 説明変数候補

変数記号	説明変数	備考
X_1	$\left(\frac{K G s - K G h}{B}\right)^2$	重心高さに関する変数
X_2	$\left(\frac{\kappa h}{B}\right)^2$	主船体モデルの回転半径
X_3	$\left(\frac{\kappa s}{B}\right)^2$	上部構造モデルの回転半径
X_4	$\frac{B}{d}$	I M O の式の変数
X_5	Lpp	I M O の式の変数

3. 5. 使用したデータ

旅客船以外の船舶については傾斜試験の実施が義務付けられておらず、資料の集収が困難であったため今回の研究では旅客船のみを取り扱うことにした。

船舶整備公団公表の以下の資料の中から、解析に必要な項目について記載のあるものを選び出して使用した。ただし、双胴船等の特殊な構造のもの及び小型の艇類は除外した。

- ・旅客船設計資料（沿海区域） 昭和43年4月
- ・共有旅客船資料集 昭和48年2月
- ・共有旅客船資料集 昭和50年7月

なお、カーフェリーは内部に車両を運搬するため大きな空間を空けた構造となっているので、他の旅客船（以下単に客船という）と分けて解析を行うことにし

た。

4. 解析結果

① カーフェリー

カーフェリー22隻のデータを基に解析を行った。各船別の関連数値を付録1に示す。表4-1は変数増減法による変数選択の経過を示したものである。

表4-1 変数選択経過

選択説明変数	決定係数	A I C
X ₃	0.778	-124.93
X ₃ X ₂	0.879	-136.17
X ₃ X ₂ X ₄	0.900	-138.38
X ₃ X ₂ X ₄ X ₁	0.900	-136.50

説明変数が X₃ X₂ X₄ の組で A I C が最小になり、これを採用して以下の推定式を得た。

$$\left(\frac{K}{B}\right)^2 = -0.022 + 0.870\left(\frac{Kh}{B}\right)^2 + 0.6835\left(\frac{Ks}{B}\right)^2 - 0.0097\frac{B}{d} \quad (4-1)$$

② 客船

33隻の客船データを基に解析を行った。関連数値を付録2に示す。

表4-2は変数選択の経過を表したものである。

表4-2 変数選択経過

選択説明変数	決定係数	A I C
X ₅	0.170	-167.21
X ₅ X ₄	0.253	-168.70
X ₅ X ₄ X ₁	0.265	-167.20

説明変数が X_5 、 X_4 の組で A I C が最小になり、これを推定式として採用した。得られた式を以下に示す。

$$\left(\frac{K}{B}\right)^2 = 0.141 + 0.0164 \frac{B}{d} - 0.0004 L_{pp} \quad (4-2)$$

5. 解析結果の検討

① 選ばれた変数の検討

カーフェリーについては、想定したモデルに基づいた変数がほぼ選択された。 X_1 が有意とならなかったが、これは主船体と上部構造の重心間の距離が今回のような方法ではうまく近似できなかったためと考えられる。

客船は、I M O の式の変数が選択され、回転半径とは一見無関係に見えるそれらの変数の有効性が確認できた。

② 残差の検討

次頁、図 5 - 1、図 5 - 2 にそれぞれカーフェリー、客船の推定値に対する残差を示す。多少、残差分散の増大傾向がみらるが、モデルの不適當を示すほどではない。

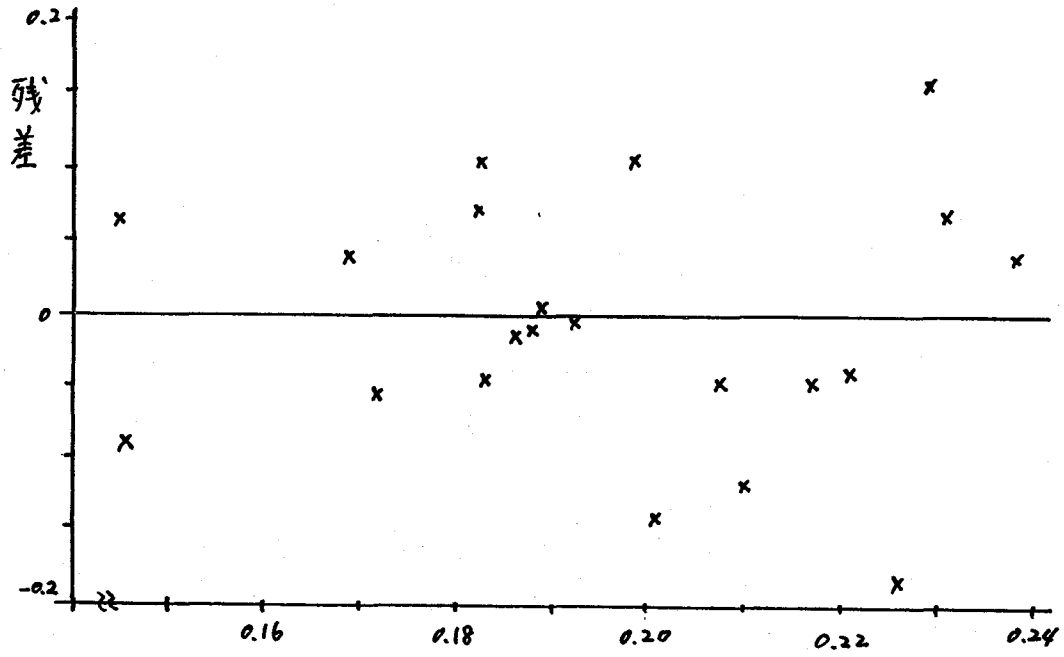


図5-1 残差のプロット(カフェリー) $(\frac{k}{B})^2$ 計算値

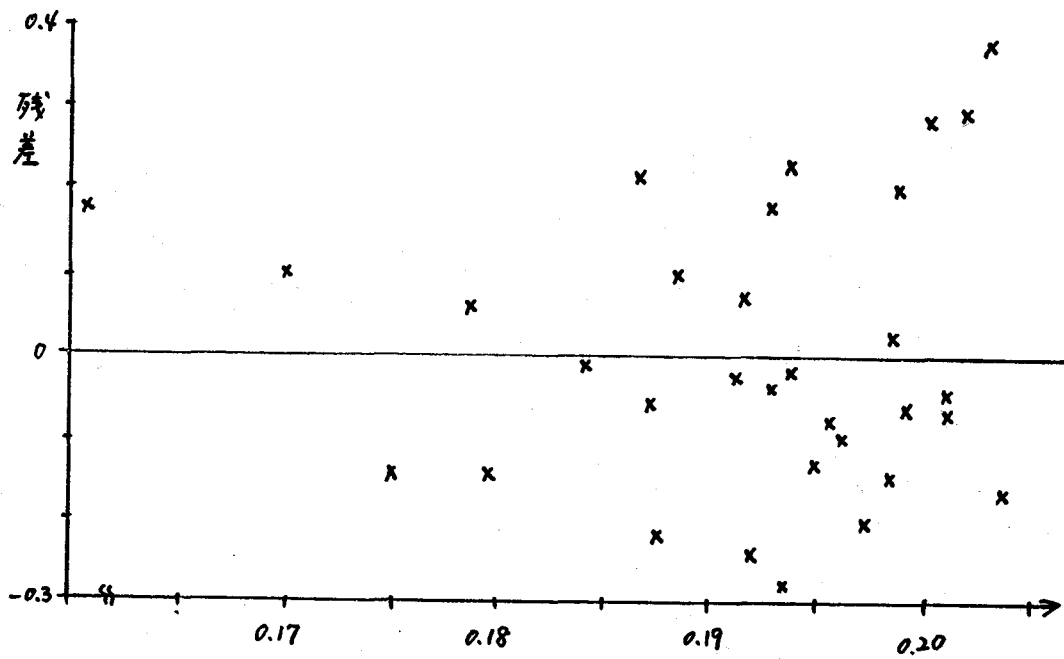


図5-2 残差のプロット(客船) $(\frac{k}{B})^2$ 計算値

③ 精度の検討

図5-3、図5-4にそれぞれ(4-1)式、(4-2)式の相対誤差を示す。 $(\frac{K}{B})^2$ 値でのカーフェリーの平均誤差3.36%、最大誤差8.6%であり、客船で同7.16%、17.0%であった。この式で同調横揺れ周期を計算する場合、GMの誤差が零とすれば周期の誤差はそれぞれこの半分程度になり実用上の精度は得られたといえる。

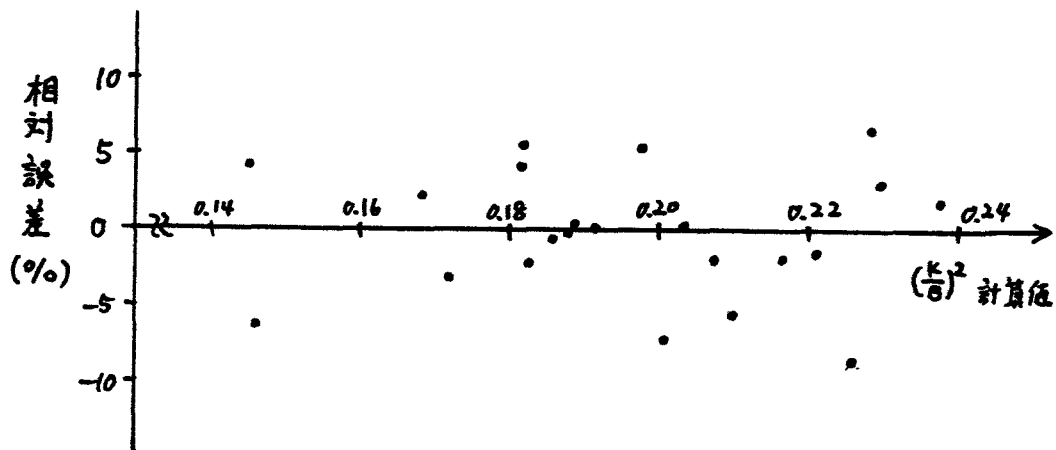


図5-3 相対誤差 (カーフェリー)

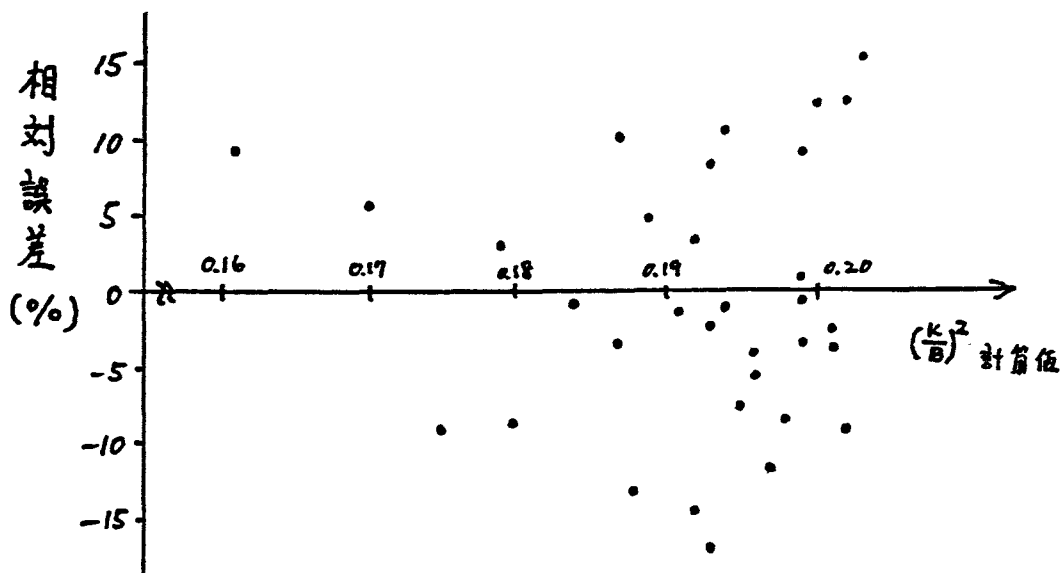


図5-4 相対誤差 (客船)

6. おわりに

一般配置図の整った傾斜試験、動揺試験のデータは数が限られ十分とは言えない数での解析であったが、カーフェリーについてはモデルがよく適合して良い結果が得られた。客船については船の外形のみでなく設備、機関等の船内重量配分を考慮にいったモデルを用いるなどの別のアプローチをとる必要がある。

最後に、本研究について適切なお意見、ご指導を頂いた東京商船大学教授、森田知治先生に甚深なる感謝の意を表します。

< 参考文献 >

- (1)加藤弘 「船の横揺れ周期の近似計算に就いて」 造船協会論文集 第89号
昭和31年4月
 - (2)森田知治 造船研究協会 第24基準研究部会報告書 研究資料 No.114R
昭和57年
 - (3)大串雅信 「理論船舶工学」(上巻) 海文堂 昭和46年6月
-

付録.1 解析に使用したデータ (カーフェリー) その1

No.	L(m)	B(m)	D(m)	d(m)	試験状態			$(\frac{k}{B})^2$	Cb	Cw	C _α
					KG(m)	d(m)	W(t)				
1	21.5	6.00	2.30	1.60	2.22	1.46	106.1	.173	.530	.850	.890
2	29.0	8.40	2.90	2.08	3.20	1.75	243.4	.204	.590	.860	.930
3	39.1	8.80	3.10	2.27	3.42	1.86	328.0	.245	.547	.790	.920
4	42.5	10.50	3.70	2.32	3.54	1.99	457.0	.213	.547	.908	.956
5	45.0	10.00	3.70	2.62	3.69	2.26	576.5	.187	.580	.810	.930
6	45.0	10.20	3.60	2.58	3.86	2.10	508.0	.218	.562	.779	.942
7	47.0	11.40	3.40	2.42	3.81	1.96	553.0	.192	.560	.800	.925
8	52.0	11.00	4.00	2.89	3.96	2.43	819.0	.208	.616	.875	.930
9	53.0	12.00	4.00	2.90	4.00	2.41	867.8	.167	.580	.800	.930
10	60.0	12.00	4.50	3.33	5.14	2.64	1028.0	.238	.575	.810	.920
11	60.0	11.50	4.30	3.28	4.35	2.75	1058.0	.243	.580	.850	.920
12	62.0	11.00	4.80	3.29	4.04	2.82	982.1	.209	.530	.800	.900
13	66.0	12.00	4.80	3.62	5.23	2.91	1170.0	.193	.540	.810	.880
14	68.0	13.60	4.50	3.28	5.21	2.74	1391.0	.190	.560	.815	.850
15	70.0	12.70	5.10	3.58	5.54	2.94	1474.0	.204	.592	.818	.925
16	75.0	14.50	5.20	4.10	6.13	3.14	1744.0	.190	.541	.804	.915
17	113.0	17.60	6.50	4.95	7.34	3.84	3702.0	.137	.451	.660	.760
18	118.0	22.00	8.10	5.52	8.57	4.44	5292.0	.151	.512	.785	.865
19	40.6	10.90	3.70	2.77	4.41	2.39	609.3	.185	.590	.950	.920
20	71.0	13.60	4.80	3.75	5.86	3.11	1550.8	.179	.533	.791	.877
21	62.0	10.80	4.50	3.04	4.37	2.57	884.2	.188	.530	.800	.890
22	68.0	10.80	4.80	3.14	4.20	2.89	1121.9	.199	.510	.750	.890

解析に使用したデータ(カーフェリー) その.2

No.	上部構造			主船体		
	$(\frac{K_s}{B})^2$	面積(m ²)	KG _{S(m)}	$(\frac{K_h}{B})^2$	面積(m ²)	KG _{h(m)}
1	.192	178.8	4.72	.114	79.9	1.38
2	.251	489.3	6.42	.115	148.6	1.70
3	.292	586.3	5.94	.111	205.4	1.90
4	.262	1012.0	6.01	.127	281.5	2.05
5	.241	1002.3	7.03	.116	273.0	2.24
6	.281	1027.2	7.47	.112	270.1	2.19
7	.262	1091.6	7.35	.105	310.2	2.07
8	.273	1612.7	8.49	.121	354.1	2.32
9	.214	1230.0	8.77	.110	373.6	2.42
10	.284	2215.7	9.78	.118	440.1	2.69
11	.290	2041.3	8.15	.117	421.7	2.57
12	.217	1682.5	8.14	.126	432.0	2.89
13	.206	2661.9	8.92	.118	491.8	2.89
14	.233	3256.5	9.93	.107	555.6	2.68
15	.239	2892.4	10.10	.124	556.0	3.01
16	.231	3668.8	11.00	.112	651.4	3.18
17	.188	7120.9	12.72	.096	1097.2	3.86
18	.169	8711.7	14.81	.114	1588.1	4.83
19	.220	1113.7	7.94	.116	273.2	2.12
20	.224	3696.1	8.94	.108	574.6	2.98
21	.210	1830.9	8.18	.123	421.0	2.69
22	.236	1094.9	8.34	.122	454.9	2.94

付録.2 解析に使用したデータ(客船)

その1

No.	L(m)	B _(m)	D _(m)	d _(m)	試験状態			W(t)	(g) ²	C _b	C _w	C _μ
					KG _(m)	d	d					
1	21.0	4.90	2.10	1.53	2.05	1.34	76.0	.211	.570	.806	.941	
2	38.0	7.60	3.40	2.55	3.45	1.76	300.0	.176	.615	.827	.926	
3	29.5	6.40	2.80	2.11	2.61	1.66	172.9	.188	.582	.810	.918	
4	41.5	8.20	3.35	2.52	3.43	2.97	356.2	.180	.551	.760	.911	
5	47.0	8.10	3.35	2.44	3.29	2.05	432.2	.166	.562	.828	.894	
6	55.0	9.80	4.40	3.05	3.61	2.38	647.8	.181	.512	.742	.891	
7	23.0	5.30	2.35	1.60	2.12	1.37	105.4	.188	.615	.858	.896	
8	23.0	5.30	2.40	1.58	2.23	1.41	97.2	.192	.577	.840	.914	
9	29.0	5.80	2.60	2.01	2.32	1.75	162.1	.183	.565	.811	.917	
10	30.0	6.20	2.70	1.71	2.57	1.37	139.4	.187	.532	.791	.896	
11	31.5	6.20	2.60	1.66	2.38	1.41	136.3	.194	.518	.759	.865	
12	34.0	6.70	2.80	1.90	2.66	1.81	232.5	.198	.555	.803	.908	
13	21.0	5.10	2.05	1.43	1.87	1.21	69.0	.231	.543	.825	.880	
14	29.8	6.20	2.55	1.73	2.49	1.53	153.3	.186	.553	.782	.897	
15	29.5	6.00	2.60	1.85	2.33	1.59	151.9	.198	.558	.801	.911	
16	32.0	6.60	3.10	2.42	2.63	1.66	204.6	.217	.625	.847	.934	
17	58.0	9.70	4.10	3.02	4.21	2.64	858.8	.185	.560	.790	.900	
18	23.0	5.30	2.30	1.50	2.11	1.31	81.5	.200	.529	.803	.888	
19	22.0	5.60	2.30	1.47	2.08	1.30	84.3	.241	.550	.776	.926	
20	25.0	5.80	2.60	1.78	2.24	1.57	124.8	.168	.548	.757	.920	
21	28.0	5.80	2.60	1.67	2.29	1.47	128.5	.181	.555	.760	.926	
22	27.0	5.70	2.60	1.74	2.45	1.49	130.2	.165	.581	.811	.909	
23	26.5	5.90	2.40	1.60	2.16	1.38	111.1	.196	.526	.780	.872	
24	29.0	6.10	2.70	1.68	2.41	1.45	137.0	.198	.540	.820	.895	
25	29.5	6.20	2.80	1.72	2.56	1.47	143.4	.219	.545	.780	.910	
26	34.0	6.80	3.00	2.00	2.52	1.54	179.3	.229	.538	.758	.902	
27	37.0	7.20	3.10	2.05	2.80	1.97	288.8	.208	.543	.785	.905	
28	50.0	8.80	4.10	2.55	3.56	2.49	579.3	.165	.520	.725	.914	
29	62.0	10.50	4.40	3.20	4.15	2.96	1114.2	.161	.563	.775	.915	
30	22.2	5.00	2.00	1.40	1.77	1.23	81.9	.192	.625	.875	.955	
31	41.0	7.80	3.40	2.41	3.33	1.94	303.5	.188	.520	.785	.835	
32	29.0	6.60	2.60	1.85	2.49	1.58	159.6	.183	.550	.780	.890	
33	100.0	13.90	6.20	4.82	5.63	3.88	2752.8	.178	.520	.750	.890	

解析に使用したデータ(客船) その2

No.	上部構造			主船体		
	$(\frac{K_S}{B})^2$	面積(m ²)	KG _{S(m)}	$(\frac{K_H}{B})^2$	面積(m ²)	KG _{H(m)}
1	.226	116.0	4.08	.125	64.4	1.27
2	.195	597.2	6.31	.139	190.5	1.94
3	.211	199.5	4.95	.129	120.8	1.66
4	.205	801.4	5.92	.104	185.6	1.96
5	.236	870.3	6.08	.123	239.5	1.99
6	.170	1490.8	7.47	.126	341.7	2.68
7	.124	158.3	4.11	.135	80.8	1.34
8	.195	215.4	4.62	.134	79.9	1.40
9	.170	307.1	4.61	.126	105.9	1.58
10	.139	330.8	4.87	.131	120.5	1.57
11	.196	369.7	4.92	.121	122.8	1.57
12	.180	571.3	5.58	.121	141.5	1.71
13	.171	170.6	3.97	.121	67.6	1.21
14	.172	361.5	4.78	.120	114.2	1.54
15	.164	365.7	5.22	.125	111.9	1.57
16	.160	413.2	5.39	.145	142.1	1.75
17	.197	1825.0	7.73	.120	344.3	2.46
18	.150	178.8	4.57	.126	78.1	1.37
19	.137	178.4	4.67	.122	76.9	1.39
20	.129	272.0	4.66	.124	89.1	1.54
21	.237	262.9	5.18	.127	101.1	1.54
22	.149	353.9	5.17	.133	100.3	1.53
23	.168	252.7	4.57	.119	97.7	1.45
24	.146	408.3	5.09	.133	115.7	1.56
25	.176	482.2	5.06	.132	118.3	1.66
26	.161	480.1	5.11	.128	147.6	1.79
27	.175	668.8	5.66	.122	165.2	1.89
28	.174	971.5	7.04	.124	264.9	2.44
29	.185	2087.9	8.04	.117	385.0	2.61
30	.177	79.7	4.15	.128	70.2	1.16
31	.216	751.5	6.47	.124	205.3	2.02
32	.180	505.9	5.11	.116	116.7	1.56
33	.175	5063.2	10.72	.121	843.9	3.75