

船体形状の記述と性能評価に関する研究 (第1報)

正員 荒井 加容子* 正員 山田 智貴**
正員 細田 龍介**

Description of Ship Form and Evaluation of Ship Performance

by Kayoko Arai, *Member* Tomoki Yamada, *Member*
Ryusuke Hosoda, *Member*

Summary

Ship form has been expressed using the "OFF-SETS" and "PRINCIPAL PARTICULARS (PRINCIPAL DIMENSIONS)" with "LINES" for about 100 years since the beginning of the modern developments of ship engineering/science.

In the field of ship design, ship performance has been estimated and evaluated by means of indirect parameters such as principal dimensions and coefficients. Since these parameters do not give an unique ship form, ship designer has utilize their experience and intuition during the procedure of performance design for improving and determining the ship form. However, how long are we able to pass on the skilful knowledge to the future generation?

In the present paper, the authors propose a method for describing ship form by means of Fourier series called Fourier Descriptors (FD). They will show that FD can determine an arbitrary ship section uniquely and can decompose/reproduce arbitrary 2-dimensional ship section form.

As the 1st step of the performance evaluation, they show the effects of section form on the damping and added mass coefficients of 2-dimensional oscillating bodies that are commonly used in the ship motion estimation with comparing results obtained by means of Lewis Form transformation.

1. 緒 言

100年に及ぶ近代造船技術の進歩の中で最も重要なものとして、コンピュータ技術に支えられた各種の解析、シミュレーションを挙げることができよう。さらに、コンピュータの導入によって船の設計も大きく変化を遂げたことは言うまでもないところである。しかし、100年の歴史の中でも基本的には変わっていない部分もある。それが船体形状(船型)の記述方法である。

船体形状の記述方法として従来用いられているのは、「オフセットテーブル」(直接的記述方法)と船体を3次元物体

として捉え、主要目、主要寸法比、各種肥瘠係数の力学的特性を用いて表現する方法(間接的方法)であり、これらをさらに形状として視覚的に評価する手段の線図である。コンピュータが世に現れるまでは流麗な船体形状を的確に記述、表現する方法としてはもっとも適した方法であり、しかも船体を表現する力学的特性と性能を結びつけ、その関係を利用して性能設計に結びつけた造船技術の先達の識見に敬意を表さずにはいられない。しかも、コンピュータの能力が強大となった現在でも基本的にはこの記述方法が用いられていることはむしろ喜ばしいことかもしれない。

しかし、船体の性能を左右する船型の設計において間接的な表現法がとられたことによる設計者の船型改良にかけた努力は並大抵ではなかったことであろう。主要目、肥瘠係数を変えることなく肋骨線形状を微妙に変化させて船体の抵抗、推進性能を向上させて新しい船を世に送り出してきた。その成果のすべては、オフセットテーブル、線図及び評価結果である水槽試験、試運転結果として蓄積されて

* 大阪府立大学大学院工学研究科

** 大阪府立大学工学部

原稿受理 平成9年7月10日

秋季講演会において講演 平成9年11月14, 15日

は来たものの、船体のどの部分を如何に変化させれば性能向上を図れるかに関しては設計者の経験と勘に頼ってきたため、設計者が交代する度に同じ苦勞を繰り返してきたのではなかろうか。もしそうであるとするならば、その原因の一つとして船体を「形」として捉えることをしなかったことが挙げられる。船体を形として捉えることができ、その形を表すことのできるパラメータを用いて記述、表現すれば、微妙な船形の変化をパラメータを用いて表現し、さらに水槽試験、試運転成績との関係を把握できれば、設計の先達の努力の結果を将来に伝えてゆくことが可能となると考える。

本論文は、船体形状を「形」として捉え、形を表すパラメータと船体性能の関係をデータベース化すること、さらには、船型改良、性能向上への応用への展開に関する研究の第一段階として、船体の肋骨線形状を形として捉え、肋骨線形状の微妙な変化をも記述し得るパラメータに分解およびパラメータから元の形に復元することのできる関数としてフーリエ級数(フーリエ記述子: Fourier Descriptor; FD)を用い、自由表面上で上下動揺する2次元柱状体の造波減衰力係数、付加質量係数に及ぼす断面形状の微妙な変化の影響を調べたものである。

2. フーリエ記述子法による船体形状の記述^{1,2,3,4)}

2.1 フーリエ記述子法

Fig. 1 に示される周長 L の閉曲線 C において、曲線上の始点 A から曲線に沿った長さ λ の位置にある点の座標を $u(\lambda)$ とするとき、

$$u(\lambda) = x(\lambda) + iy(\lambda); 0 \leq \lambda \leq L, u(0) = u(L) \quad (1)$$

のように複素表示することができる。 $u(\lambda)$ は周長 L を周期

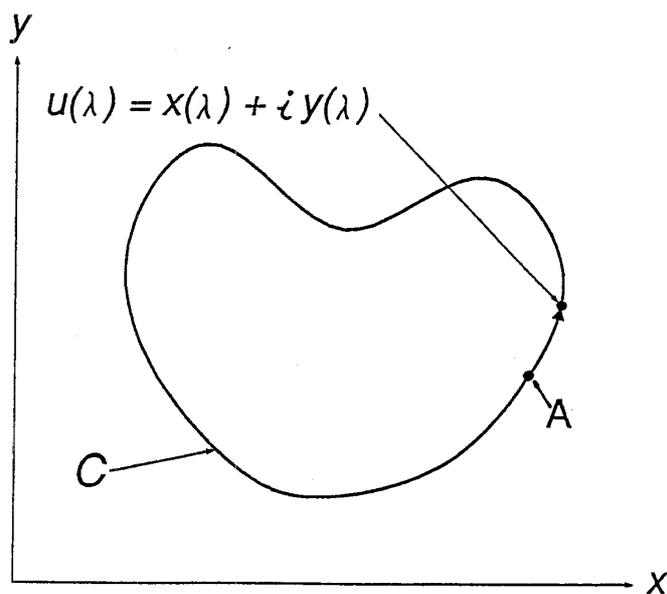


Fig. 1 Coordinate system for describing plane curve by Fourier descriptors

とする周期関数であるから、フーリエ級数展開することができ、

$$u(\lambda) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n \exp\left(in \frac{2\pi}{L} \lambda\right); 0 \leq \frac{2\pi}{L} \lambda \leq 2\pi \quad (2)$$

のように表せる。

フーリエ記述子 FD (Fourier Descriptors; $\{a_n\}$ と表記する) は、

$$a_n = \frac{1}{L} \int_0^L u(\lambda) \exp\left(-in \frac{2\pi}{L} \lambda\right) d\lambda \quad (3)$$

で求めることのできる複素フーリエ係数で、曲線 C の周期的特性を表す。FD はフーリエ係数と同様の性質を有しており、低次の $\{a_n\}$ が閉曲線の大略的な特徴を、高次の $\{a_n\}$ が微細な性質を表現する。

FD の平面図形の形状に対する寄与の仕方は、図形の持つ基本的性質および係数 $\{a_n\}$ の n の値により異なる。即ち、図形が直交する2つの軸に関して対称性を有する場合は、フーリエ係数の性質より偶数次の項および係数の虚部が零となる。従って、この場合は、 $\{a_n\}$ ($n = \pm 1, \pm 3, \pm 5, \dots$) の寄与は概ね以下のように表せる。

$n=1$ の場合、(2)式より、 $u(\lambda)$ に対する a_1 の寄与は、 $0 \leq \lambda \leq L$ 間で、

$$a_1 \cos\left(\frac{2\pi}{L} \lambda\right) + ia_1 \sin\left(\frac{2\pi}{L} \lambda\right) \quad (4)$$

であり、Fig. 1 で表される図形の、拡大・縮小に対応することがわかる。次に、 $n=-1$ の場合は、

$$a_{-1} \cos\left(\frac{2\pi}{L} \lambda\right) - ia_{-1} \sin\left(\frac{2\pi}{L} \lambda\right) \quad (5)$$

となり、Fig. 1 の図形に対して、 x 軸方向には拡大、 y 軸方向には縮小の寄与をする。

一方、 $n = \pm 3$ の場合は少し複雑で、

$$a_3 \cos\left(\frac{3 \cdot 2\pi}{L} \lambda\right) + ia_3 \sin\left(\frac{3 \cdot 2\pi}{L} \lambda\right) \quad (6)$$

と、

$$a_{-3} \cos\left(\frac{3 \cdot 2\pi}{L} \lambda\right) - ia_{-3} \sin\left(\frac{3 \cdot 2\pi}{L} \lambda\right) \quad (7)$$

で表されるため、 $0 \leq \lambda \leq L$ 間を3周期として $n = \pm 1$ の場合と同様の寄与を考えねばならない。このため、図形の拡大・縮小と凹凸で表されるねじれ(歪み)が加わることとなる。

Fig. 2 に、 $n = \pm 3$ の場合の FD による図形の復元の仕方を示す。図中の大きい円は原図形を表すものとし、大円上の小円の半径が $\{a_n\}$ を表す。大円の x 軸上の点から時計回りに回るとき、小円の動径(矢印の先端)は $n=3$ に対しては(6)式、 $n=-3$ に対しては(7)式で表されるように変化する。このために、復元図形に凹凸を生じることとなる。

FD を用いて形状を厳密に記述する場合、 $\{a_n\}$ は無限項が必要である。しかし、具体的に計算を行う際には有限項で打ち切る必要がある。このために、実用上差し支えない形状表現を可能とする項数の検討が必要であるが、この検討に関しては、実際に船体形状を対象とする次節で詳し

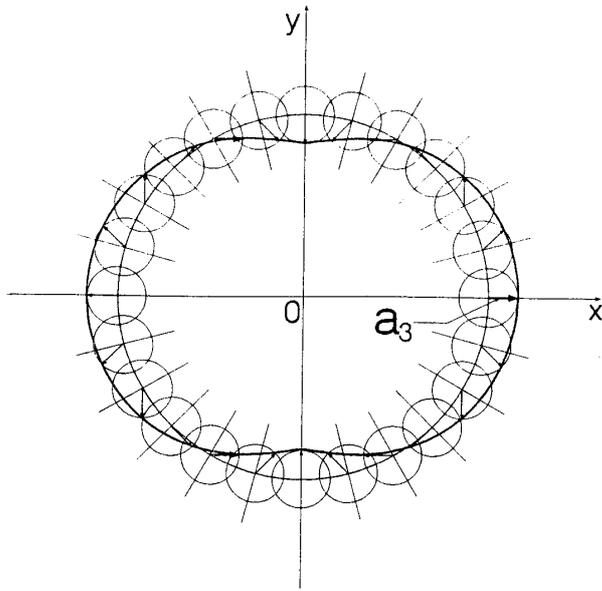


Fig. 2(a) Contribution mechanism of a_3 in reproducing closed plane curve

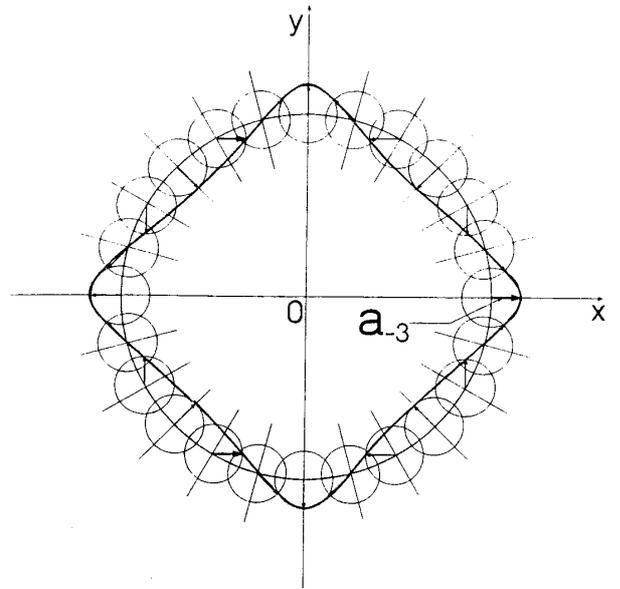


Fig. 2(b) Contribution mechanism of a_{-3} in reproducing closed plane curve

く述べる。

2.2 フーリエ記述子法による船体形状の記述

(1) 供試船型

FD を船体形状の記述に適応するための供試船型として SR-196 a, b, c 船型⁵⁾を採用する。その理由は船型に関する諸元と水槽試験を初めとする性能関係の種々の研究成果が公表されていることによる。この船型は、船体前半部は共通であるが後半部に変化を持たせてあり、本研究の最終目的である船体形状と性能の関係を正しく評価するのに適している。Fig. 3 に供試船型の sq.stn.=1/2, 2, 5, 9 3/4, FP の Body Plan を示す。

(2) フーリエ記述子法による肋骨線形状の表現

船体の水線面下の断面形状は左右対称である。また、船体断面を閉曲線で表すために水線に関して上下対称な 2 重図形で表すことにすれば、前述したように FD の偶数時の係数 $\{a_n\}$ およびすべての係数の虚部は零となるから、 $\{a_n\}$ としては $n=\pm 1, \pm 3, \pm 5, \dots$ の場合だけ考えればよい。Fig. 3 には、 $n=\pm 1, \pm 3, \pm 5$ の 6 項の FD によって復元される肋骨線形状が細線で示されている。図より、FD による肋骨線の復元は全体として良好であることがわかる。この点を確認するためおよび実用的見地から FD の項数を有限に抑える必要から、 $n=\pm 5$ までの 6 項、 ± 7 までの 8 項、 ± 9 までの 10 項とした場合の復元肋骨線を Fig. 4 に示す。視覚的には $n=\pm 5$ までの 6 項で実際の肋骨線形状を表現し得ることがわかる。ただし、FD の性質上、水線および船底中心線と肋骨線の交点が実際と異なることに問題が残る。Table 1 は、 n の次数に対して FD の復元図形が原図形をどの程度近似できているかを SR-196 a 船型、sq.st.=1/2, 9 3/4, FP 断面について検討した結果である。表中の n

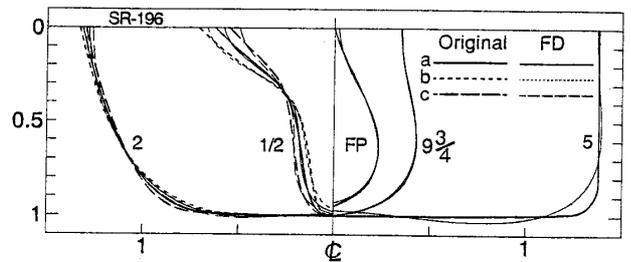


Fig. 3 Body plan of SR-196 a, b, c ship model and reproduction of frame line by Fourier Descriptors

は FD の項数を表す。Breadth, Draft, Area, Girth length の誤差に関しては原断面の諸元に対する偏位 (%) を表しており、Deviation に関しては偏位量の標準偏差/断面喫水を表している。表より、 $n=\pm 5$ までの 6 項で実用上差し支えない復元が可能であると考えられる。

2.3 フーリエ記述子法と Lewis Form 変換による復元図形の比較

波浪中船体応答の推定に一般に用いられるストリップ法においては、Lewis Form 変換⁶⁾によって肋骨線形状を表現し、流体力の推定を行う。そこで、Lewis Form 変換による復元図形と、FD ($n=\pm 1, \pm 3, \pm 5$) による復元形状の比較を、Fig. 5 に示す。Lewis Form 変換は 2-パラメータの変換であるので、当然のことながら FD の方が良好な復元結果を与えられる。ただし、Lewis Form 変換では断面の力学的性質をパラメータとして用いているため幅・喫水・断面積が一定であれば断面形状は唯一に定まり、制約条件から、水線面および船底における交点は原断面と一致する。

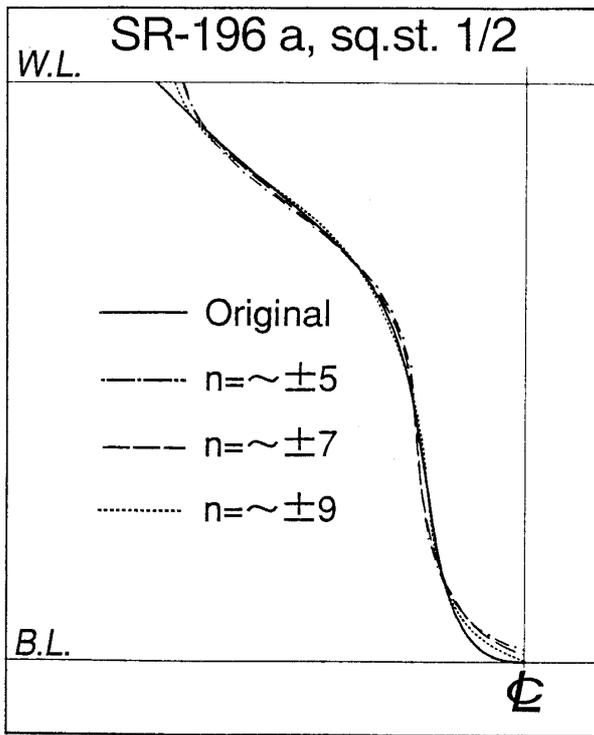


Fig. 4(a) Effects number of terms of Fourier Descriptors in reproducing ship frame line (SR-196 a, sq.st.=1/2)

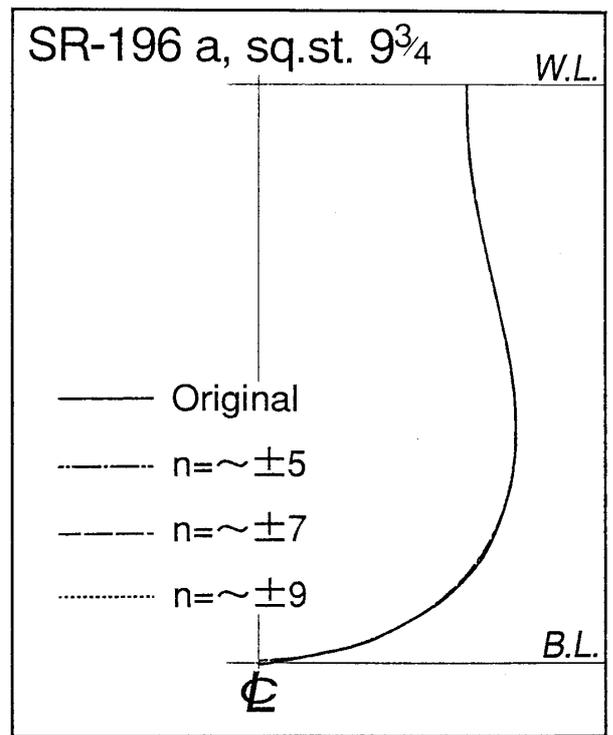


Fig. 4(b) Effects number of terms of Fourier Descriptors in reproducing ship frame line (SR-196 a, sq.st.=9 3/4)

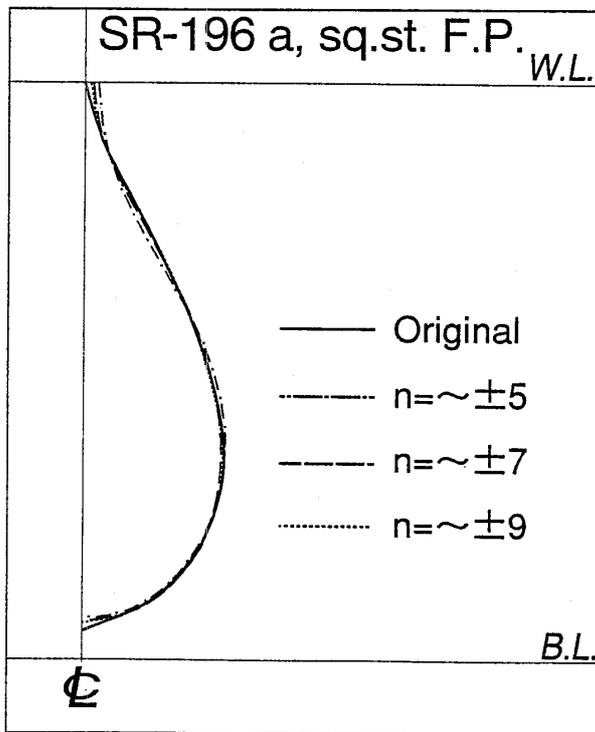


Fig. 4(c) Effects number of terms of Fourier Descriptors in reproducing ship frame line (SR-196 a, sq.st.=F.P.)

Table 1 Approximation accuracy of Fourier Descriptors in reproducing ship frame line

Item	sq.st.	n	±5	±7	±9	Lewis Form
Breadth	1/2		-7.35	-7.00	-4.91	0
	9 ³ / ₄		-1.60	-0.11	-0.48	0
	F.P.		—	—	—	—
Draft	1/2		-2.21	-1.37	-0.30	0
	9 ³ / ₄		-0.03	-0.49	-0.51	0
	F.P.		-1.93	-1.58	-1.34	—
Area	1/2		0.38	0.42	0.04	0
	9 ³ / ₄		0.04	0.00	0.00	0
	F.P.		0.06	-0.06	-0.01	—
Girth length	1/2		3.44	3.48	1.93	4.46
	9 ³ / ₄		0.40	0.27	0.27	-4.26
	F.P.		1.16	0.92	0.84	—
Deviation	1/2		0.021	0.017	0.010	0.069
	9 ³ / ₄		0.006	0.002	0.002	0.062
	F.P.		0.009	0.005	0.003	—

船体横断面形状の幅/喫水比と断面係数という「力学的」な意味を持つパラメータを用いて得られる Lewis Form に対し, FD は始点から断面形を構成するために与え

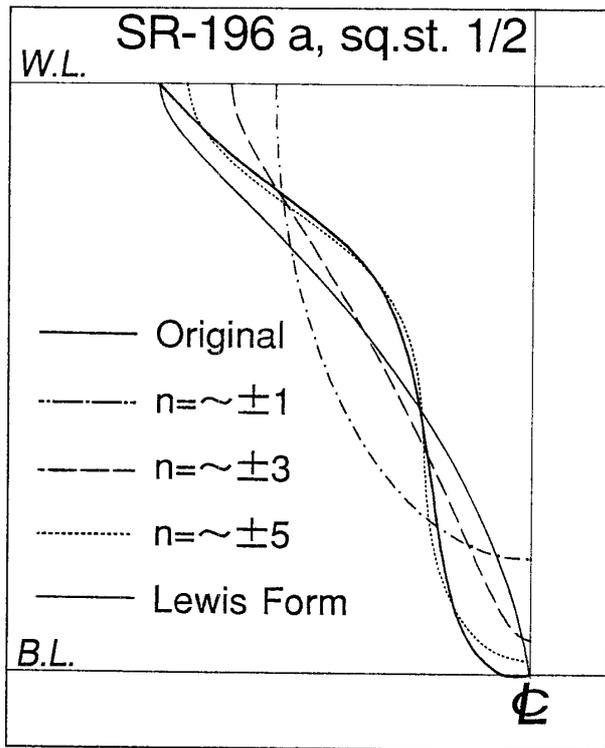


Fig. 5(a) Comparison of accuracy of FD-approximation and Lewis Form approximation (SR-196 a sq.st.=1/2)

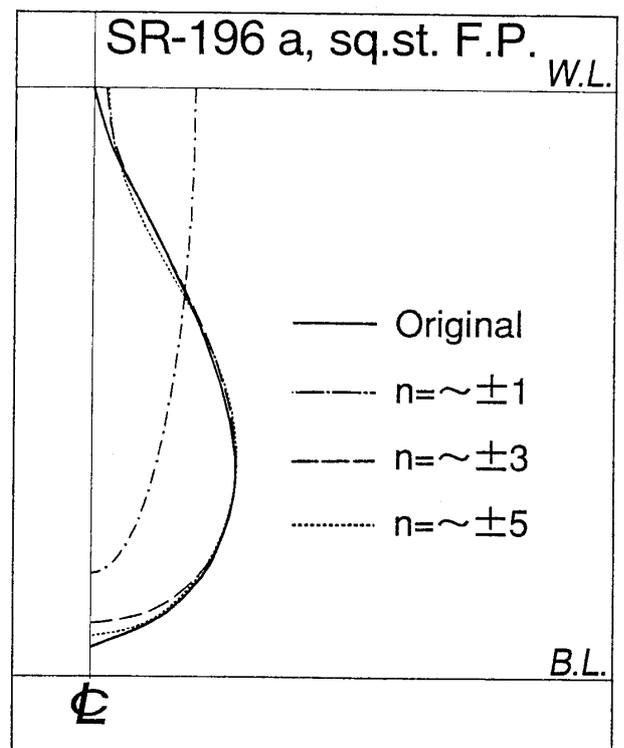


Fig. 5(b) Comparison of accuracy of FD-approximation and Lewis Form approximation (SR-196 a sq.st.=F.P.)

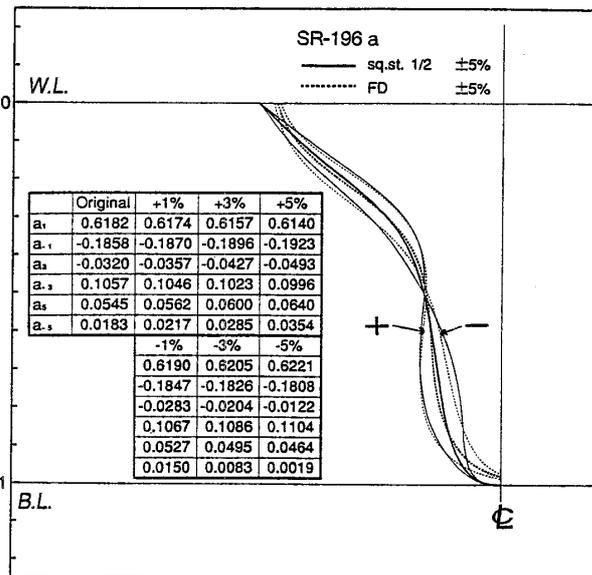


Fig. 6(a) Deformation of ship section contour, reproduction by Fourier Descriptors and changes of $\{a_n\}$ due to deformation (SR-196 a, sq. st.=1/2)

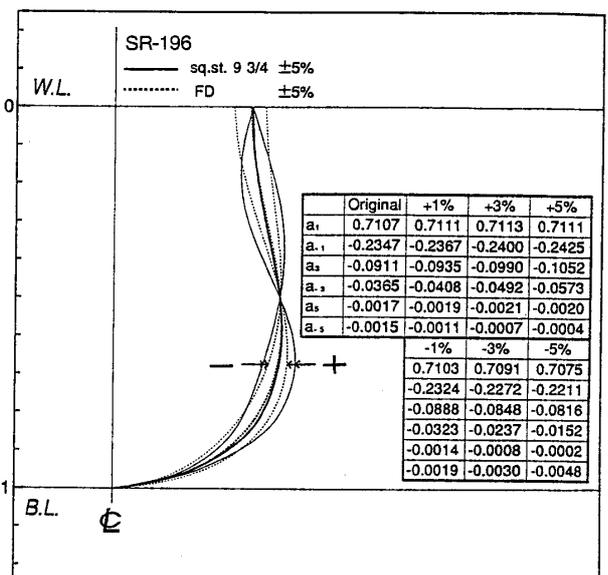


Fig. 6(b) Deformation of ship section contour, reproduction by Fourier Descriptors and changes of $\{a_n\}$ due to deformation (SR-196 a, sq. st.=9 3/4)

られる全ての点まで肋骨線に沿ってとられるの距離を用いて係数 $\{a_n\}$ を算出する「形状的」な表記方法と言うことができる。従って、FD によれば断面形状の力学的特性をることなくその形状を変化させた場合にも係数 $\{a_n\}$ の変

化として形状変化を把握することができ、復元図形にもその変化を確実に反映できるという長所がある。一方、Lewis Form 変換の場合、幅/喫水比と断面積係数の組み合わせによって一意に復元図形が近似されるという特徴を有する。

Fig. 6 は、任意の肋骨線に対し、幅・喫水・断面積を変えずに断面の各水線幅を正弦的に変化させた場合の復元図形の例である。断面形状の変化は振幅を断面喫水の 1, 3, 5% とする正弦曲線（周期：断面喫水）で与えた。Lewis Form 変換では、断面形状の変化を表現することはできないが、図より、FD の場合には形状変化に対応した復元図形を得ることが可能であることがわかる。

さらに、実船の横断面肋骨線形状の記述、表現に際して、Lewis Form 変換の場合、2-パラメータの変換であるため船体後半部のように断面曲率が大きく正負に変化する部分、肥大船の船首部付近のように肋骨線形状が U 型である場合、また、球状船首部のように水線面幅の極端に小さい部分など形状の把握、記述の困難な断面があるが、フーリエ記述子法にはそのような制限はない。

3. 2次元物体の動揺造波減衰力、付加質量に対する断面形状の影響

船体の波浪中動揺応答の推定に用いられるストリップ法においては、通常船体の水線面下の断面形状を Lewis Form によって近似し、Ursell-田才法によって流体力を推定するのが一般である⁷⁾。通常の船型の場合には、この方法によって船体動揺振幅の極めて良い推定値を得られることが知られている。本研究はストリップ法の改良を目的とするのではなく、断面形状の微妙な変化が流体力に与える影響を評価することである。本論文では、流体力に対する断面形状の変化の影響は、2次元物体の上下動揺の造波減衰力、付加質量係数を対象として評価する。このために、FD によって近似した断面の流体力の推定には特異点分布法⁸⁾を用いた。

評価の基準となる流体力に関しては、供試船型断面に対して OFF-SETS に与えられる肋骨線上の点に特異点を分布させ、やはり特異点分布法⁸⁾によって求めた。

動揺周波数範囲に関しては Irregular Frequency の影響の現れない低周波数領域 ($\xi_d=0\sim 1.0$) とした。

供試船型は、SR-196 a, b, c であり、この船型の sq.st. = 1/2, 2, 5, 9/4, FP の各断面を対象とした。

影響評価の比較対照として、断面形状を Lewis Form で近似し、Ursell-田才法による流体力の推定をも行った。

3.1 FD 近似断面の造波減衰力、付加質量係数

Fig. 7(a)~(e) に SR-196 船型の原断面および FD 近似断面に対する上下揺れ造波減衰力係数 A_H 、付加質量係数 K_H の推定結果を示す。また図には、比較のために Lewis Form 断面に対して Ursell-田才法を用いて推定される A_H , K_H をも同時に示す。なお、SR-196 船型は船体前半部は共通であるから、a, b, c の区別はない。

Fig. 7(a), (b) より、船体中央より後方の、断面形状が水面付近で幅広となる V 型断面に関しては、FD 近似断面の A_H の推定値は原断面の A_H に比べてかなり小さく、むしろ Lewis Form 近似の方が良好な推定値を与えることがわかる。また、 K_H に関しても FD 近似断面に対する推定値は必ずしもよい一致とは言えない。この不一致の原因は、FD による断面の近似においては断面全体としては肋骨線との近似度は高いものの、水線および船底部において原断面から離れるために A_H , K_H の推定値に差が生じたものである。この点に関して、Lewis Form 近似では変換上の制約としてこれらの部位で原断面と一致することが科せられているため、FD に比べて良好な推定値を与えたものである。

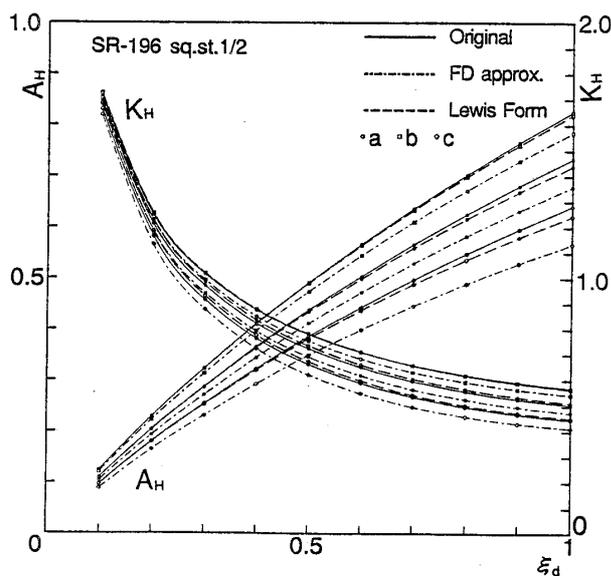


Fig. 7(a) Results of wave damping coefficient A_H and added mass coefficient K_H for ship model sections (SR-196, sq.st. = 1/2)

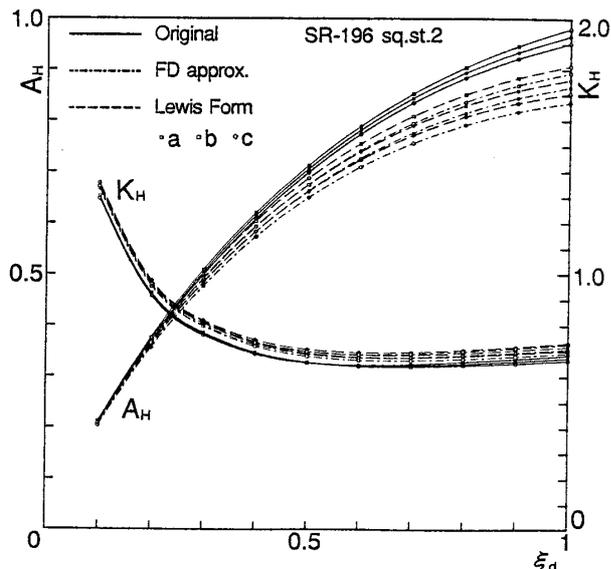


Fig. 7(b) Results of wave damping coefficient A_H and added mass coefficient K_H for ship model sections (SR-196, sq.st. = 2)

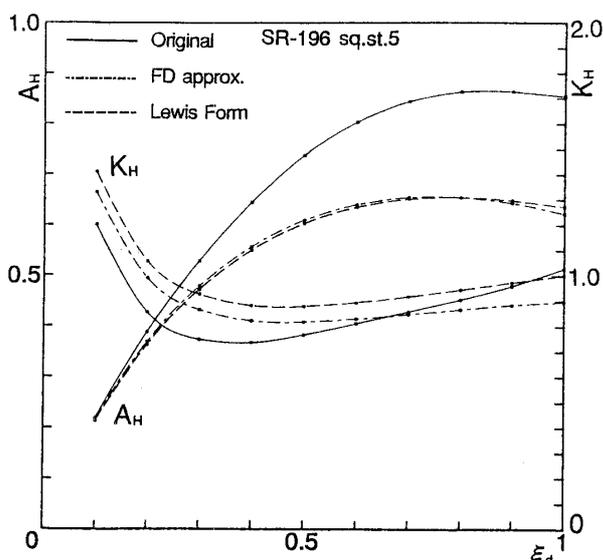


Fig. 7(c) Results of wave damping coefficient A_H and added mass coefficient K_H for ship model sections (SR-196, sq.st.=5 (midship))

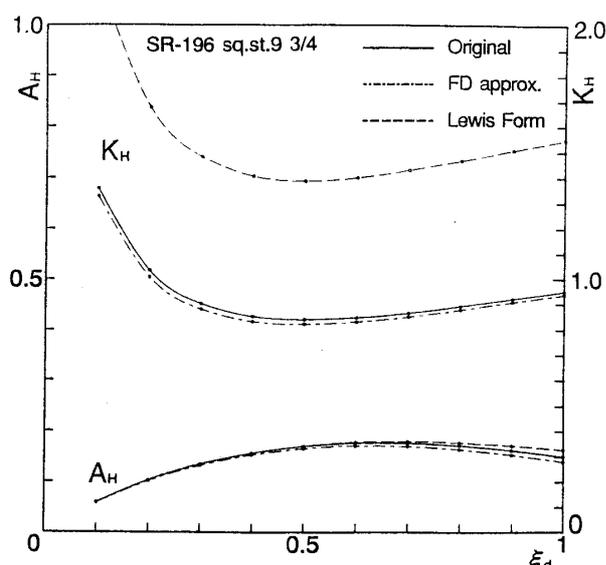


Fig. 7(d) Results of wave damping coefficient A_H and added mass coefficient K_H for ship model sections (SR-196, sq.st.=93/4)

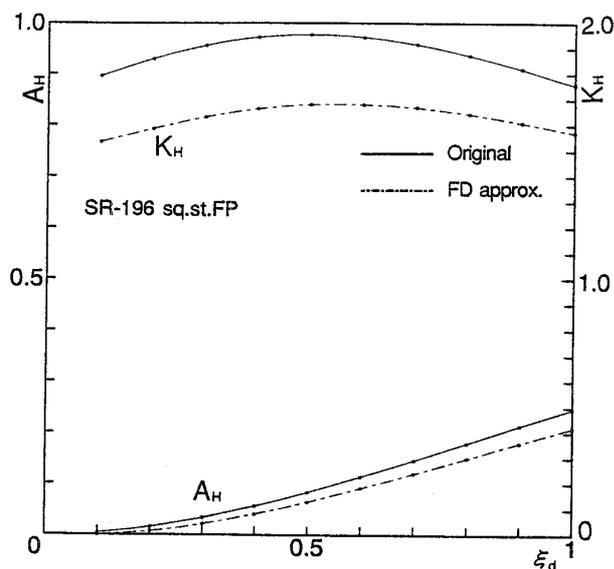


Fig. 7(e) Results of wave damping coefficient A_H and added mass coefficient K_H for ship model sections (SR-196, sq.st.=F.P.)

一方、船体中央より前方の断面に関しては、Fig. 7(d), (e)に示されるようにFD近似断面の A_H , K_H 共に良好な流体力推定値を与えることがわかる。この理由は、SR-196船型は船体前半部はU型の肋骨線形状であり、水面近傍におけるFDの近似度も良好であるためである。特に、sq.st.=93/4断面においては K_H の一致度はLewis Form近似の場合に比べてきわめて良好とすることができる。

また、FP断面に対しては、水線面部で閉じた肋骨線形状でありLewis Form近似は存在しないため、比較はできないが、FD近似断面の流体力推定値は原断面のそれに比べ

て小さめの値を示していることが分かる。この場合にも、FD近似において水線面部および船底部の近似度が低下していることが不一致の原因である。

そこで、SR-196 a船型のsq.st.=1/2およびFP断面に関してFD近似の項数を増して近似度を上げ、 A_H , K_H を推定した結果がFig. 8(a), (b)である。図より、U型、V型両断面に対して水線部の近似度が向上すれば流体力の推定精度が向上することが分かる。換言すれば、上下揺れの流体力、特に造波減衰力係数に関しては水面幅の寄与がきわめて大きいことを表すものであり、また、船首部分の付加質量推定にLewis Form近似、Ursell-田才法を用いるとかなり大きめの推定値を与えることが分かる。

船体中央部sq.st.=5の断面に関しては、Fig. 3に示されるとおり直線部分の長いため、肋骨線形状の近似にFDを用いることはその性質上好ましくはない。流体力の推定値にもそれが明瞭に現れている。Lewis Form近似もこの点に関しては同様である。

3.2 肋骨線形状の変化に伴う流体力の変化に関する検討

FDの特徴は僅かな肋骨線形状の変化をも表し得ることである。前節の議論により、船体前半部においては肋骨線形状の僅かな違いにより流体力に差の生じることが明らかとなった。そこで、肋骨線形状の変化に伴うFDの近似度および流体力の変化に関する感度解析を行った。Fig. 9(a), (b)はSR-196 a船型のsq.st.=1/2, 93/4断面を断面幅、幅・喫水を変えずに断面形状を変化させた場合のFDの近似の程度を示したものである。計算に供した肋骨線形状の変化はFig. 6に示すように断面喫水の $\pm 1, \pm 3, \pm 5\%$ の振幅で幅方向に変化させてある。Fig. 6中に示さ

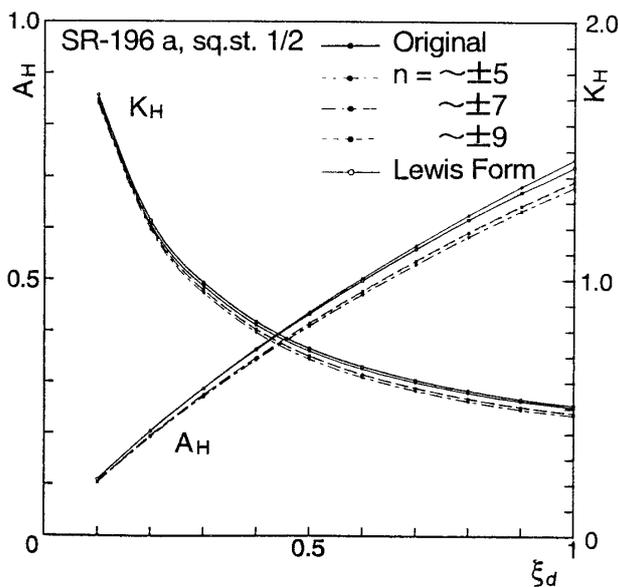


Fig. 8(a) Effects of number of terms of Fourier Descriptors in estimating A_H and K_H compared with the results by Lewis Form-Ursell Tasai estimation (SR-196 a, sq.st.=1/2)

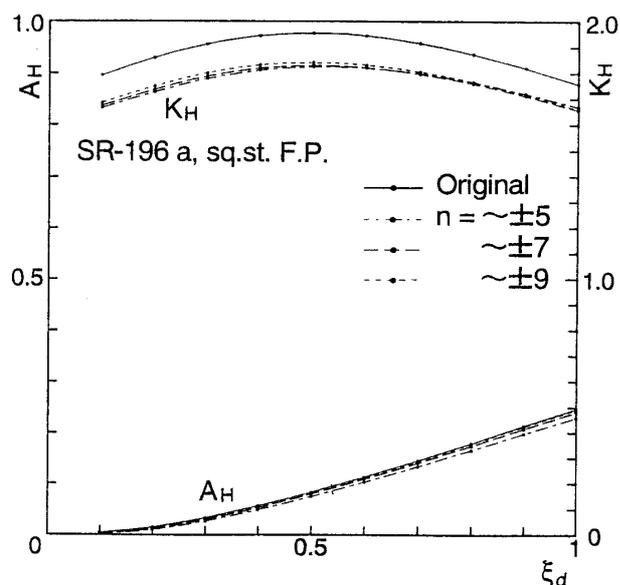


Fig. 8(b) Effects of number of terms of Fourier Descriptors in estimating A_H and K_H compared with the results by Lewis Form-Ursell Tasai estimation (SR-196 a, sq.st.=F.P.)

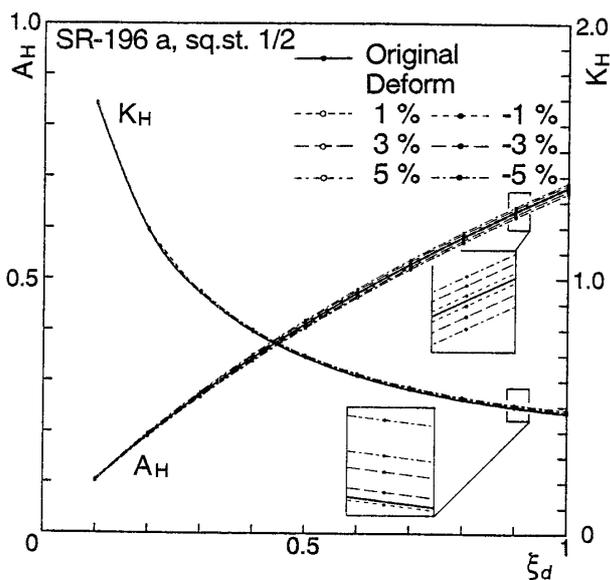


Fig. 9(a) Effects of frame line deformation to the wave damping coefficient A_H and added mass coefficient K_H (SR-196 a, sq.st.=1/2)

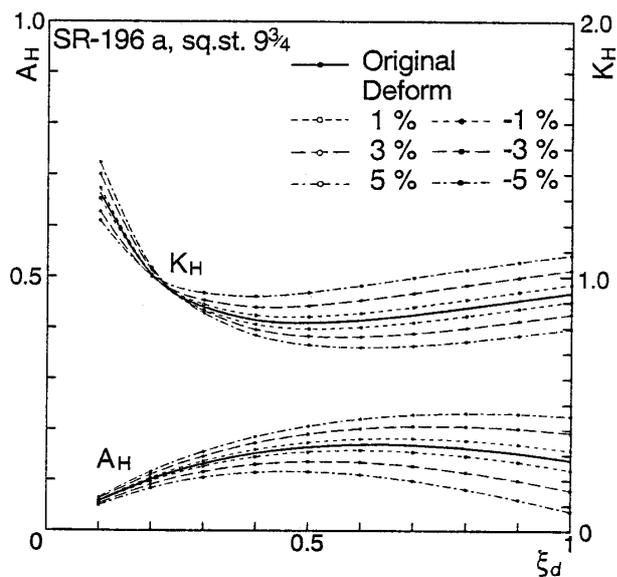


Fig. 9(b) Effects of frame line deformation to the wave damping coefficient A_H and added mass coefficient K_H (SR-196 a, sq.st.=9 3/4)

れている $\{a_n\}$ は、原断面と変化後の FD の値である。Fig. 9 より、船体後半部では断面形状の変化は上下揺れ流体力に大きく影響を及ぼさないが、船体前半部においては一見僅かとも思える断面形状の変化が上下揺れ造波減衰力、付加質量に及ぼす影響がかなり大きいことがわかる。しかし、この差が波浪中船体運動に与える影響は把握できていない。また、通常ストリップ法で用いられる Lewis Form 近似ではここに示した肋骨線形状の変化を記述、表現するこ

とはできない。

4. 結 言

従来船体形状の記述方法として用いられてきた 3 次元物体としての船体の持つ力学的特性を用いる方法だけでは、船体の性能推定、評価に際して行われてきた設計者の経験と勘に基づく船型改良、性能向上の Know-How を重要な財産として蓄積するには船型に関する情報が若干不足して

いると考えられる。この点を改善する方策の一つとして、従来の造船学に船を形として捉え、船型記述に形状パラメータを採り入れる方法を提案し、さらに力学的特性と、形状的特性を用いた性能評価方法、船型改良の可能性を調べることを最終目的として、船体形状の記述と性能評価に関する研究を実施している。

本論文ではその第一段階として、船体形状の記述方法としてフーリエ記述子法を採用し、船体肋骨線形状の微妙な変化を記述、表現できることを示した。ただし、フーリエ記述子の三角級数としての性質のため、項数を少なくすると水面付近、船底付近で近似度が低下することが明らかとなった。

さらに、このフーリエ記述子法を用いて、ストリップ法で用いられる2次元柱状体の上下動揺に対する造波減衰力および付加質量を例として断面形状の変化が流体力に及ぼす影響を調査した。その結果、船体の縦運動(上下揺、縦揺)に関しては船形の微小な変化はあまり影響せず、Lewis Form 近似、Ursell-田才法による流体力推定を基本としたストリップ法の有用性を確認する結果となった。ただし、今回調査対象として用いたSR-196船型のような船体前半部がU型の場合には付加質量の推定に留意しなければ応答の位相特性影響の現れる可能性があることがわかった。本論文では扱わなかった船体の横運動(左右揺、横揺、船首揺)に関しても同様の調査をする必要がある。

本論文を作成するにあたり、流体力計算に便宜をはかっ

て頂いた大阪府立大学工学部海洋システム工学科池田良穂教授にお礼申し上げます。また、本研究は、文部省科学研究費の助成を受けて実施されていることを付記する。

参 考 文 献

- 1) Granlund, G. H.: Fourier preprocessing for hand print character recognition, IEEE Trans. on Computers, vol. C-21, pp. 195-201, 1972
- 2) Zahn, C. T. and Roskies, R. Z.: Fourier descriptors for plane closed curves, IEEE Trans. on Computers, vol. C-21, pp. 269-281, 1972
- 3) Person, E. and Fu, K. S.: Shape discrimination using Fourier descriptors, IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, vol. SMC-7, no. 3, pp. 170-179, 1977
- 4) 細田龍介, 山田智貴, 池田和外: 船体形状の記述と特徴表現, 日本造船学会論文集, 第169号, pp. 487-495, 1991
- 5) 船尾形状設計法(粘性流場)に関する研究報告書, 日本造船研究協会, 研究資料 no. 389, 1987
- 6) Lewis, F. M.: The Inertia of the Water surrounding a Vibrating Ship, Trans. SNAME, vol. 37, pp. 1-20, 1929
- 7) 田才福造, 高木又男: 規則波中の応答理論および計算法, 日本造船学会耐航性に関するシンポジウム, pp. 1-52, 1969
- 8) 前田久明: 任意船型に及ぼす波の強制力について: 日本造船学会論文集, 第126号, pp. 55-83, 1969