

船舶風圧力簡易推定プログラムについて

北村 文俊*、上野 道雄**、藤原 敏文*

On a Simple Estimation Program for Wind Load Coefficients of Ships

by

Fumitoshi KITAMURA, Michio UENO and Toshifumi FUJIWARA

Abstract

A simple estimation program for estimating wind load coefficients of ships is developed. Input parameters are only ship length and breadth if available together with the information concerning ship type and its loading condition, full load or ballast. This program consists of two steps. At first step, six or seven input parameters among eight input parameters of the original calculation method for wind load coefficients that had been developed by authors are estimated. On the second step, wind load coefficients are calculated by the original method using input and estimated parameters. Then the topic of this simple estimation program is mainly in the first step.

Based on 76 ships data, the input parameters to the original calculation method for wind load coefficients are analyzed. The input parameters to be estimated are side area overall, side area of super-structure, front area, position of side area center from midship, height of side area center, height of bridge top and breadth if it is unknown. These input parameters are expressed in the regression formulae for each type and condition of ships in which variables are ship length and breadth if it is available. Selective ship types and conditions are nine; tanker full load, tanker ballast, bulk carrier full load, bulk carrier ballast, LNG full load, LNG ballast, container ship full load, passenger ship and others.

Comparison between the results of the simple estimation program and of the experiments is provided for nine ship types and conditions. Errors in estimated input parameters and wind load coefficients are discussed. Difference between estimated results using ship length only and that using both ship length and breadth are also discussed. It is confirmed that the simple estimation program is reliable and useful in estimating wind load coefficients if information about a ship shape or ship dimensions are limited.

* 企画部 ** 流体性能評価系
原稿受付 平成21年 5月29日
審査済 平成21年 8月21日

目 次

| | |
|-------------------------|-------|
| 1. まえがき | ..... |
| 2. 計算手法 | ..... |
| 2. 1 プログラムの概要 | ..... |
| 2. 2 成分分離型モデルによる風圧力推定方法 | ..... |
| 2. 3 風圧力推定式入力変数の推定方法 | ..... |
| 3. 風圧力係数の推定計算例および精度評価 | ..... |
| 3. 1 風圧力係数の推定計算例 | ..... |
| 3. 2 風圧力係数推定式入力変数の残差評価 | ..... |
| 3. 3 風圧力係数の残差評価 | ..... |
| 4. あとがき | ..... |
| 参考文献 | ..... |

記 号

| | | |
|----------|----------------------------------|----------------------|
| A_F | : 水面上船体・上載構造の正面投影面積 | [m ²] |
| A_L | : 水面上船体・上載構造の側面投影面積 | [m ²] |
| A_{OD} | : 上載構造側面投影面積 | [m ²] |
| B | : 船幅(全幅) | [m] |
| C | : 船体中央から側面投影面積中心までの距離 (+が船首側) | [m] |
| C_X | : 風圧前後力係数 | |
| C_Y | : 風圧横力係数 | |
| C_K | : 風圧横傾斜モーメント係数 | |
| C_N | : 風圧回頭モーメント係数 | |
| H_{BR} | : 静水面からブリッジ等主要構造物の最高位 | [m] |
| H_C | : 静水面から側面積中心までの高さ | [m] |
| H_L | : 船体側面平均高さ | [m] |
| K_A | : 風圧横傾斜モーメント | [Nm] |
| L_{OA} | : 船長(全長) | [m] |
| N_A | : 風圧回頭モーメント | [Nm] |
| n_s | : 対象とする船の隻数 | |
| q_A | : 風動圧 | [N/m ²] |
| r | : 残差 | [対象と同じ] |
| rr | : 残差比 | |
| U_A | : 相対風速 | [m/s] |
| X_A | : 風圧前後力 | [N] |
| Y_A | : 風圧横力 | [N] |
| ρ_A | : 空気密度 | [kg/m ³] |
| ψ | : 船への相対風向角(0:向風、180:追風) | [deg.] |

1. まえがき

近年、地球規模での環境汚染、とりわけ大気中のCO₂濃度の増加による地球温暖化の問題が大きくクローズアップされてきた。船舶についても燃料消

費効率向上のためその抵抗をより正確に把握することが求められるようになった。

船舶に作用する抵抗のうち風圧力については、主として強風下の操縦性の観点から、20世紀後半頃から行われるようになってきた。当時の研究はほとんど風洞実験によるものであった。Wanger¹⁾はいくつかの船種について系統的に実験を行った。Isherwood²⁾は風洞実験データを基にした船体主要寸法を変数とする回帰式を提案した。風洞実験データを基にした回帰式は、その後、米田ら³⁾、山野ら⁴⁾などによっても研究され、さらに藤原ら^{5,6)}は統計学的手法を応用した回帰式を提案した。21世紀に入ると、CFD(Computational Fluid Dynamics)による計算法の研究が進み、論文件数では風洞実験に関するものを上回るようになった。CFDによる方法は船体形状細部の影響まで考慮できる可能性がある点で今後が期待できるものの、現状では風洞試験が最も信頼できる風圧力係数を与える手段であると考えられる。

さて、これまでに提案されてきた回帰式やCFDによる計算法は、いずれもある与えられた船の風圧力係数をできるだけ正確に推定するために考案されてきたものである。その一方で、正確さはそれほど必要がないが、より時間と手間をかけずに、ある想定される船の風圧力係数を推定したいという場合が考えられる。例えば、船のごく初期の設計段階や海難事故の分析の際などである。特に、海難事故分析において風の影響を見積もる際には、素早い対応が求められることが多い一方で、詳細な船型情報が直ちに入手できることは極めて少ない。したがって、これらの場合においては風洞実験やCFDで対応することは困難となる。現在のところ、このような場合には船体主要寸法を用いた回帰式で推定するのが最も適当と考えられるが、それでも水面上船体の投影面積の中心や平均高さなどが必要となるため一般に対象とする船の一般配置図等が必要となる。

そこで、上記のような状況に対応するために、著者らは最低限の情報として船種と船長さえ入力すればおおその風圧力係数が推定できる計算プログラム“LB-WindLoad”を開発した。このプログラムは、船種により形状に共通性があるということを利用して、船種・載荷状態および船長ささらに判れば船幅も用いて藤原らの成分分離型モデルを利用した風圧力推定式に必要な入力変数を統計的に推定し、さらにその数値によって風圧力係数を推定するものである。全体として2段階の推定プロセスを経るので高い推定精度を望むことはできないが、きわめて簡単に風圧力の概略

値を知ることが可能となる。本報ではこのプログラムの概要と推定計算結果の精度について報告する。

2. 計算手法

2.1 プログラムの概要

本プログラムは船種、載荷条件、船長等のごく簡単な入力データから船舶の4つの風圧力係数（前後力 C_X 、横力 C_Y 、回頭モーメント C_N 、傾斜モーメント C_K ）を風向角 $0\sim 180$ 度に亘り推定計算するものである。

入力データとして、まず船種載荷条件をメニューから選択し、次に船の船長 LOA を、またわかれば船幅を入力する。

プログラムは入力されたデータを、船舶の配置図等から導いた統計式により処理し、藤原による風圧力推定に必要な8個の量を算出する。あとは藤原らの方法に従って各風圧力係数を計算し、結果を csv 形式ファイルとして出力する。Fig.2.1 にフローチャートを示す。

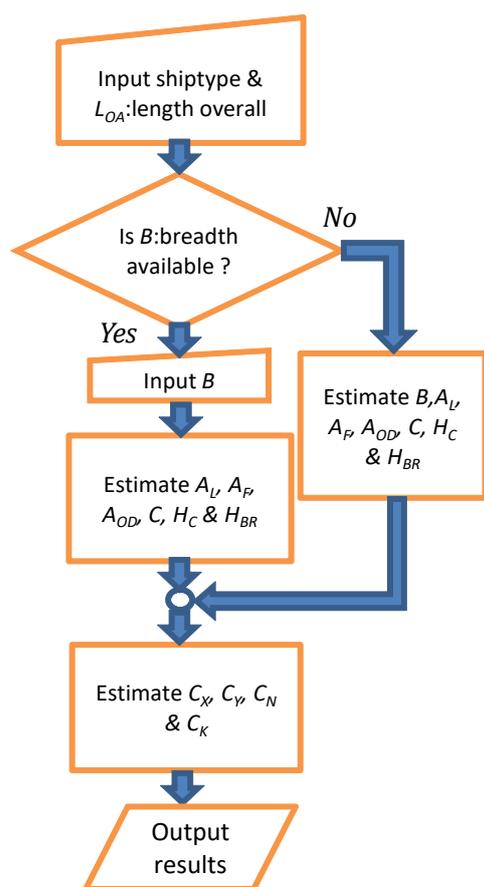


Fig.2.1 Flow chart on the estimation of wind load coefficients

2.2 成分分離型モデルによる風圧力推定法

ここでは藤原の成分分離型モデルを利用した風圧力推定法について概要を説明する。

この風圧力推定法は水面上巨大構造物船を含む広範な船舶に適用可能で、合理的かつ精度の良い推定法を目指して構築された。設計時、運航時等、様々な状況で対象船に対して容易に風圧力が推定できるように、船長、船幅、水面上船体の正面・側面投影面積等の船体外観形状を入力データとして計算で使用している。

推定式は、物理現象に基づく合理的な成分分離モデルを使って表現されている。すなわち、船体に作用する風圧力は、主流抗力、クロスフロー抗力、揚力、誘導抗力の各成分により構成されると仮定し、各成分を多変量回帰分析の一手法である逐次法を使って、船体外観形状から得られる船型変数を使った線形重回帰式で表現する。推定精度を向上させるための手段として逐次法を利用することにより、各成分の値を推定するための最良な変数の組み合わせを決定し使用している。使用する入力変数を Table 2.1 に示す。

Table 2.1 Input parameters for estimating wind load coefficients

| | | |
|---|-------|--|
| 1 | LOA | Length overall [m] |
| 2 | B | Breadth overall [m] |
| 3 | AL | Side area overall [m ²] |
| 4 | AOD | Side area of super structure [m ²] |
| 5 | AF | Front area of the ship [m ²] |
| 6 | C | Position of side area center from midship (forward positive) [m] |
| 7 | HC | Height of side area center [m] |
| 8 | HBR | Height of bridge top [m] |

回帰分析を行うためにサンプルとして様々な船型の風洞実験データを 56 隻分収集するとともに、さらに 15 隻分の風洞実験を実施してデータの補強を行った。結果として、従来の風圧力推定法と比較して多船種、最大サンプル数である計 71 隻分の風洞実験データを使用している。

最終的に求められた風圧力推定法は、従来の方法よりも精度良く推定できることが確認されている。また、成分分離モデルを用いたことにより、推定式を構成する各成分の物理的意味合いが明確になり、今後の研究の進展に応じて構成成分を個別に検討することが可能となった。

2.3 風圧力推定式入力変数の推定方法

成分分離型モデルによる風圧力推定法の入力変

数を船長のみまたは船長と船幅を変数とする多数の船型データに基づく回帰式で推定することとした。

現存する船舶は積荷や目的によって、船体および水面上の構造物等の形状が類型化している。すなわち同一船種であれば、船長が決まれば平均的な形状が推定でき、従って成分分離型モデルによる推定法に必要な入力変数も推定できることになる。

成分分離型モデルによる推定方法自体は船種によって係数を変えていないが、推定式や係数の検討段階で、データを6船種に分けて検討している。その分類に従ってまず船種毎に分類した。さらに、タンカー、バルカー、LNG船については、バラスト状態と満載状態での喫水差が大きいので、両者を別に扱った。Table 2.2に船種の分類およびデータとして使用した船の隻数、船長の範囲を示した。推定可能範囲を広げるために、この段階で延べ5隻分の船型変数データを加えている。

ここで、タンカーとは甲板上に船橋のほか有意な構造物のない船、バルカーとは甲板上にクレーン程度の構造物を持つ船、LNG船とは球形や楕円形タンクを持つ船、旅客船とは旅客船のような上部構造の大きな船で例えばPCCやRO-RO船等も含み、その他とは上記に含まれないものすべての船種で練習船、調査船、漁船、作業船等である。

Table 2.2 Ship type category, no. of ships used for estimation and overall length range

| Ship type | No. of ships | LOA[m] |
|-----------------------------|--------------|---------|
| 1. Tanker ballast | 9 | 50-351 |
| 2. Tanker full load | 7 | 72-351 |
| 3. Bulk carrier ballast | 7 | 119-226 |
| 4. Bulk carrier full load | 8 | 141-226 |
| 5. LNG ballast | 4 | 86-288 |
| 6. LNG full load | 4 | 86-288 |
| 7. Container ship full load | 8 | 119-232 |
| 8. Passenger ship | 13 | 85-195 |
| 9. Others | 16 | 25-134 |

風圧力係数推定式入力変数の推定手順は以下の通りである。

・風圧力推定に必要な8つの量のうち、船長 LOA は必ず入力し、船幅 B はわかれば入力し、わからなければ入力しない。

・ B の入力がない場合は、 B の値は LOA の一次回帰式から推定する。

・面積の次元を持つ A_L 、 A_{OD} 、 A_F の推定に際しては、一次回帰式で推定する変数を Y として、1.生値($Y=A$)、2. LOA で除したもの($Y=A/LOA$)、3. B で除したもの($Y=A/B$)、4. LOA^2 で除したも

の($Y=A/LOA^2$)、5. $LOAB$ で除したもの($Y=A/LOAB$)、6. B^2 で除したもの($Y=A/B^2$)の6種について最小二乗法を用いて、それぞれ LOA と B の一次回帰式($Y=aB+bLOA+c$)の係数 a 、 b 、 c を求めた。また、長さの次元を持つ C 、 H_C 、 H_{BR} についてはおのおの上記1~3までの3種について同様に一次回帰式を求めた。

・各推定量と元値との比の標準偏差を比較する。 LOA や B 等で除したものについては、それぞれの平均値を掛けて元の量と同じ次元にした。これらの残差(推定値と実測値の差)のうち最小値を与える係数を選んだ。

・ただし、推定値がデータ範囲内で極値を持つ(変化率の正負が転じる)、バラスト時と満載時の値が途中で逆転するなどの不自然な現象が現れる場合は、残差が最小でなくても不適切な値を出さない推定式を選定した。

・推定式に船幅を含む場合、入力した B を使う場合は問題ないが、推定によって得た B を使う場合は残差が大きくなる可能性がある。そこで通常は LOA のみを使った推定結果と推定で得た B を用いた推定結果を比較して残差の少ない方を選択した。

・なお、評価に当たっては直接残差を比較するのではなく、残差を元データで除した残差率により評価した。この場合、側面積中心前後位置 C については零前後の値をとるので $LOA/2$ を加えて処理した。

3. 風圧力係数の推定計算例および精度評価

3.1 風圧力係数の推定計算例

船舶に作用する風圧力は以下のように表現される。

$$X_A = q_A A_F C_X \quad (1)$$

$$Y_A = q_A A_L C_Y \quad (2)$$

$$N_A = q_A A_L L_{OA} C_N \quad (3)$$

$$K_A = q_A A_L H_L C_X \quad (4)$$

ただし、

$$q_A = \frac{1}{2} \rho_A U_A^2 \quad (5)$$

$$H_L = A_L / L_{OA} \quad (6)$$

従って、推定される変数のうちでも、風圧

力算出の際直接使われる A_L と A_F の精度がとりわけ重要である。

次に船種毎に各係数の傾向を見るために、その平均値を計算する。例えば前後力係数 C_X の場合を例にとると次式になる。

$$C_{Xm} = \frac{1}{n_s} \sum_{j=1}^{n_s} C_{Xj} \quad (7)$$

ここで n_s は船種毎の隻数である。

Fig.3.1~3.9 に船種毎に実験による風圧力係数と簡易推定プログラムによる風圧力係数の(7)式に基づく平均値を、相対風向角 ψ を横軸として示した。0度が正面向い風を表す。

推定値は船長と船幅の両方を入力した場合の計算結果である。船幅を入力しない場合でも風圧力係数に大きな差がないので、その場合の推定結果の表示は省略した。

各タイプとも実験と差がある係数もあるが、抗力の推定に重要と思われる C_X , C_Y は比較的良く一致している。

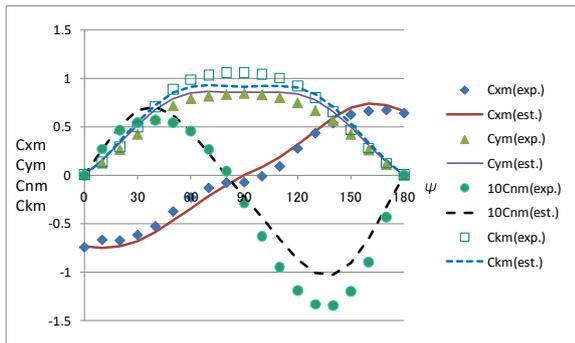


Fig.3.1 Average wind load coefficients of tanker ballast

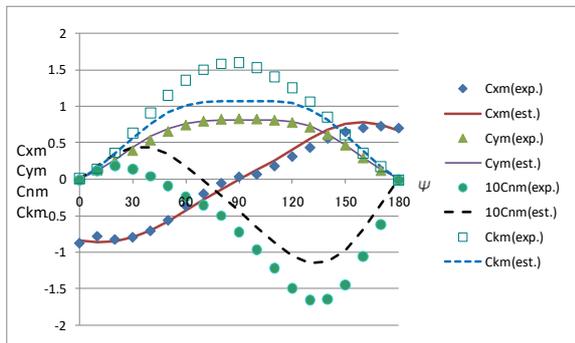


Fig.3.2 Average wind load coefficients of tanker full load

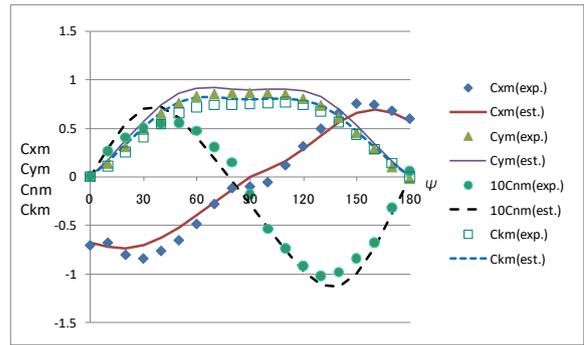


Fig.3.3 Average wind load coefficients of bulk carrier ballast

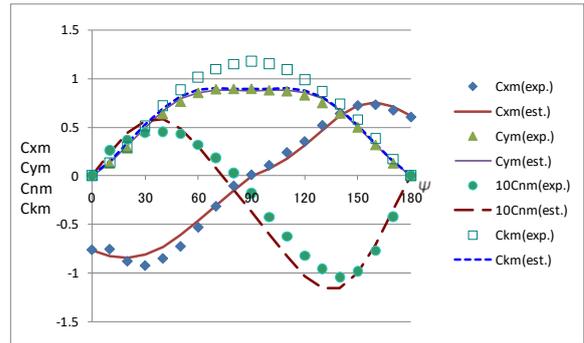


Fig.3.4 Average wind load coefficients of bulk carrier full load

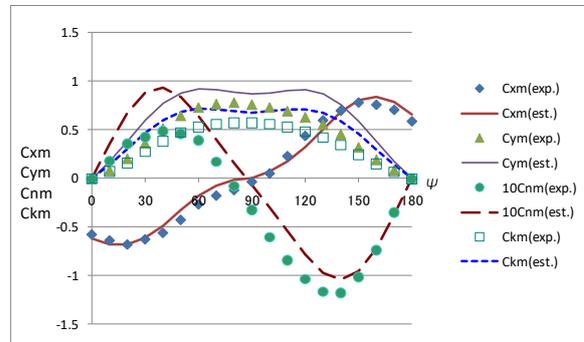


Fig.3.5 Average wind load coefficients of LNG ballast

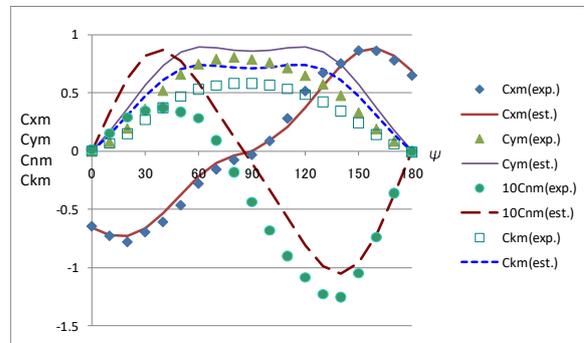


Fig.3.6 Average wind load coefficients of LNG full load

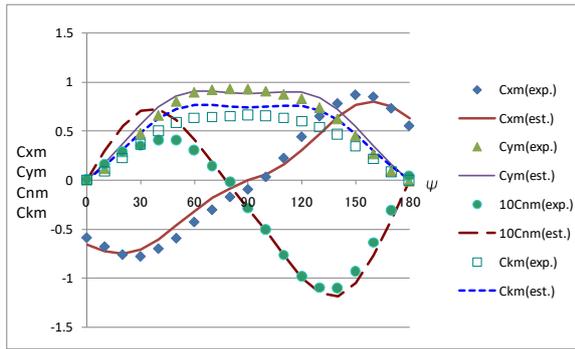


Fig.3.7 Average wind load coefficients of container ship full load

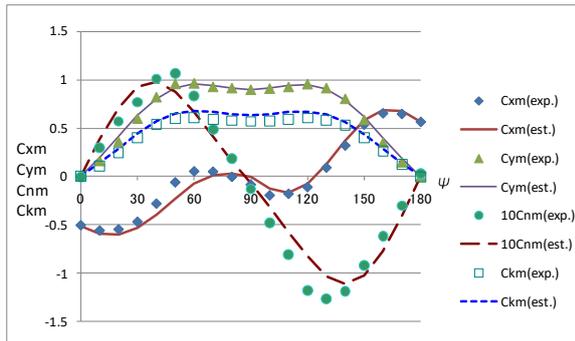


Fig.3.8 Average wind load coefficients of passenger ship

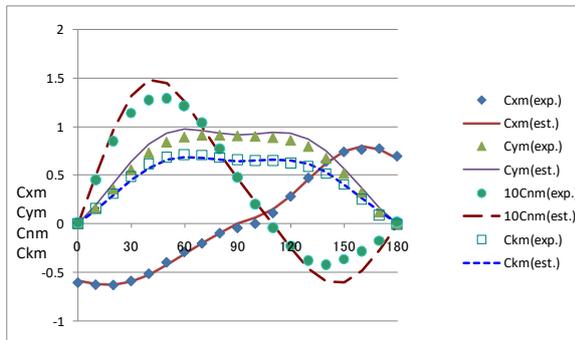


Fig.3.9 Average wind load coefficients of other type ships

3. 2 風圧力係数推定式入力変数の残差評価

残差の評価に当たっては、残差の大きさそのものではなく、推定式でも無次元化して使用していることをふまえて、残差を対応する主要寸法等で除した比で考えた。

Fig.3.10に全船76隻の推定量の'平均残差率(root mean square of residual ratio)'すなわち、船毎にある量の残差を対応する主要寸法等で除して平方し、全船の平均値を求めて、その平方根を取ったものを示した。例えば側面積 A_L の場合を例にとると次式に

なる。

$$rrA_L = \sqrt{\frac{1}{n_s} \sum_{j=1}^{n_s} \left(\frac{\hat{A}_{Lj} - A_{Lj}}{A_{Lj}} \right)^2} \quad (8)$$

ここに、 \hat{A}_{Lj} はサンプル船 j の推定値、 A_{Lj} は実際の側面積である。ただし C については、値がゼロ付近なので、分母に $LoA/2$ を加えた。各推定量の平均残差率は、船幅も入力した方が小さくなっている。

上載構造物側面積 A_{OD} の平均残差率が他の量に比べて大きいのが目立つが、他は 0.1 程度に収まっている。

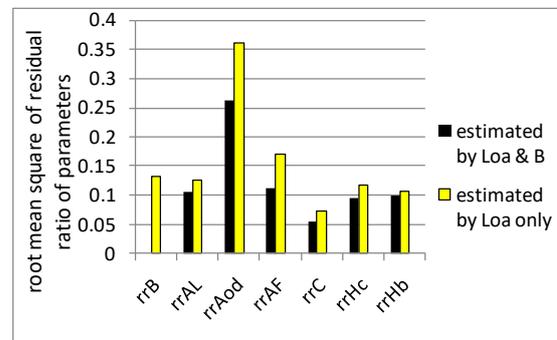


Fig.3.10 Root mean square of residual ratio of estimation parameters by input data

3. 3 風圧力係数の残差評価

次に実験データのある船71隻について、推定値の残差を調べる。風向毎に各係数の残差平方和の平均値の平方根を計算する。例えば前後風圧力係数 C_X の場合を例にとると次式になる。

$$rC_X = \sqrt{\frac{1}{n_s} \sum_{j=1}^{n_s} (\hat{C}_{Xj} - C_{Xj})^2} \quad (9)$$

結果を Fig.3.11 に示す。図中の添字'0'は船幅の入力がないことを示す。

船幅を入力するかしないかによる影響は風向角 Ψ が 90~180deg.における C_K を除いて小さい。

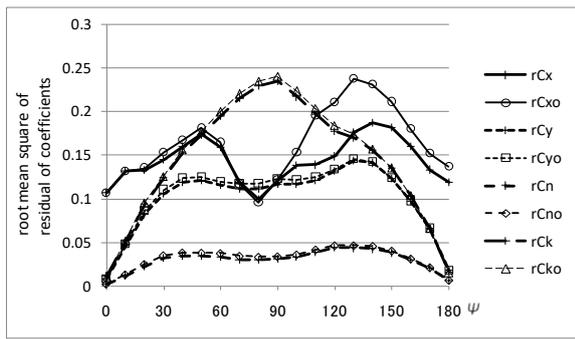


Fig.3.11 Root mean square of residual of coefficients
(Subscript 'o' means 'without B')

さらに全船、全風向角についての各係数の残差を計算した。例えば C_X の場合、

$$raC_X = \sqrt{\frac{1}{n_s} \frac{1}{n_\psi} \sum_{j=1}^{n_s} \sum_{k=1}^{n_\psi} (\hat{C}_{Xjk} - C_{Xjk})^2} \quad (10)$$

n_ψ はデータ処理に用いた風向角数、すなわち 19 である。

Fig.3.12 にその結果を示す。図中の all とは、図面等から計測した面積寸法等の全数値を入力したものである。ここでも全体として、入力データを簡便化しても、残差にさほど大きな違いは見られない。

ただし、実際のカ・モーメントを計算する際には、代表面積として無次元化に使用している A_L , A_F の残差が直接結果に影響するので、船幅も入力した方が高い精度が得られることになる。

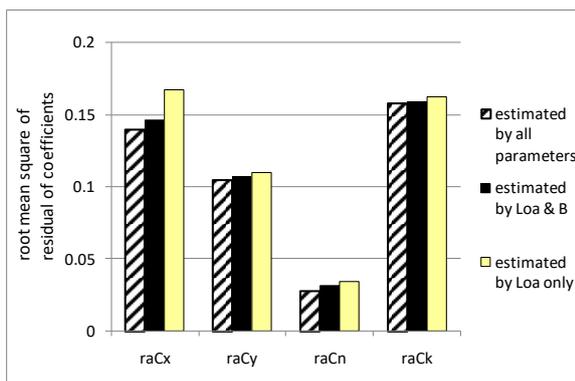


Fig.3.12 Root mean square of residual of coefficients by input data

4. あとがき

船種と船長、あるいはさらに船幅というごく簡便な入力データから、回帰式により成分分離型モデルによる風圧力推定式に必要な入力変数を求め、全風向角の風圧力係数および風圧力を推定するプログラム“LB-WindLoad”を開発した。

推定した結果として得られた各風圧力係数自体の残差は、成分分離型モデルによる推定式に必要な全数値を直接入力した場合に比べて、全体としてさほど遜色がないことがわかった。以上より、本簡易推定プログラムは船体寸法情報が限られている場合の風圧力係数の概略推定といった用途に役立つと考えられる。

本プログラムの基本は回帰式による寸法要素の推定である。従って母集団のデータ数を増やすことと船長の範囲を広げることにより、精度の向上と適用範囲の拡大が期待できる。そのためには、推定式の改良と共に、船舶の一般配置図等から風圧力推定に必要な数値を読み取り、地道に母集団の数と範囲を拡充していくことが今後も必要と考えられる。

参考文献

- 1)Wanger, B. : “Windkräfte an Überwasserschiffen”, JSTG 61. Band 1967, pp.226-250(or Schiff und Hafen, pp.894-900)
- 2)Isherwood, R.M. : “Wind Resistance of Merchant Ships”, The Royal Institute of Naval Architects, Vol.115(1972) pp.327-338.
- 3)米田国三郎,蛇沼俊二,鳥野慶一 : 「船舶風圧力データの力学モデルによる解析」,日本航海学会論文集第 83 号(1990) pp.185-192,および「船舶風圧力データの力学モデルによる解析 - II」,同第 86 号(1992) pp.169-177
- 4)山野惟夫, 齊藤泰夫 : 「船体に働く風圧力の一推定法」, 関西造船協会誌, 第 228 号(1997) pp.91-100
- 5)藤原敏文, 上野道雄, 二村 正 : 「船体に働く風圧力の推定」, 日本造船学会誌, 第 183 号(1998) pp.77-90
- 6)藤原敏文, 上野道雄, 池田良穂 : 「成分分離型モデルを利用した新しい風圧力推定法」, 日本船舶海洋工学会論文集第 2 号(2005) pp.243-255