

実船のバラスト状態での操縦性能の簡易推定法

Simplified Estimating Method of Ship Manoeuvrability in Ballast Conditions

海上安全研究領域 操縦・制御研究グループ 原口 富博

1. 緒言

操縦性暫定基準では、満載状態で海上試運転をできない船に対しては、バラスト状態の海上試運転結果にバラスト状態と満載状態での推定値の比をかけて修正する方法が提案されている[1]。

満載状態の船に対しては、操縦性暫定基準(A.751(18))で定められた指標を、船の主要寸法等から直接簡単に推定する方法を既に提案した[2]。そこで、ここではバラスト状態の船に対する操縦性能推定法の提案を行う。これらの推定法により、船のあらゆる載貨状態に対する操縦性能の推定値を得ることができ、操縦性暫定基準に提案されている載貨状態の修正法の検討も可能になる。

2 操縦運動方程式

偏角を β 、旋回角速度を r とし、船の前後方向の運動変化を無視した時の操縦運動方程式を $1/2\rho LdU^2$ (ρ : 密度、 L : 船長、 d : 喫水、 U : 船速) で無次元化して表示すると次式で表せる[3]。

$$\left. \begin{aligned} -(m' + m'_x)\dot{\beta}' &= \{-(m' + m'_x) + Y'_r\} r' + Y'_\beta\beta' + Y'_\delta\dot{\delta}' + Y'_\delta\delta' \\ (I'_{zz} + J'_{zz})\dot{r}' &= N'_r r' + N'_\beta\beta' + N'_\delta\dot{\delta}' + N'_\delta\delta' \end{aligned} \right\} (1)$$

(1)式より $\dot{\beta}'$ を消去し、 \ddot{r}' と $\dot{\delta}'$ の項を無視すると、良く知られた一次系近似式が得られる。

$$T\dot{r}' + r' = K\delta' \quad (2)$$

ここで T, K は操縦性指数である。

舵により船体の横方向に働く力 (Y_R) およびモ - メント (N_R) は次のように無次元で表される[3]。

$$\begin{aligned} Y_R &= -(1 + a_H)F_N \cos \delta \\ N_R &= -(1 + a_H)x_R F_N \cos \delta \\ F_N &= \frac{6.13\lambda}{2.25 + \lambda} \left(\frac{A_R}{Ld} \right) \left(\frac{u_R}{U} \right)^2 \sin \alpha_R \\ \alpha_R &= \delta - \gamma(\beta - l'_R r) \end{aligned}$$

これを $x_R = -1/2$ として書き直すと、(3)式となる。なお、バラスト状態の舵面積 (A_R) は船尾喫水と舵高さの比を全舵面積にかけた値とし、マリナ - 舵の場合

はホ - ンなしの舵面積と比べて小さい値を採用した。この舵面積を用いて舵のアスペクト比 (λ) を求めている。

$$\left. \begin{aligned} Y_R &= C_{YR} \sin \alpha_R = C_{YR} \alpha_R \\ N_R &= -\frac{1}{2} Y_R = -\frac{1}{2} C_{YR} \alpha_R \\ C_{YR} &= -(1 + a_H) \frac{6.13\lambda}{2.25 + \lambda} \left(\frac{A_R}{Ld} \right) \left(\frac{u_R}{U} \right)^2 \cos \delta \end{aligned} \right\} (3)$$

この舵の式を(1)式に代入し、舵の影響を考慮した(2)式の旋回力の指数である K は次式で表される。なお、(3)式の有効流入角 (α_R) には操縦運動の影響が考慮されている。

$$K = \frac{C_{YR} \left(N'_\beta + \frac{1}{2} Y'_\beta \right)}{\left[\begin{aligned} &(Y'_\beta - C_{YR}\gamma) \left(N'_r - \frac{\gamma}{2} C_{YR} l'_R \right) \\ &-\left(N'_\beta + \frac{\gamma}{2} C_{YR} \right) \{ -(m' + m'_x) + Y'_r + C_{YR}\gamma l'_R \} \end{aligned} \right]} \quad (4)$$

3 針路安定性能、回頭制動性能および初期旋回性能の推定法

操縦性暫定基準において、針路安定性能および回頭制動性能の指標は、推定する回帰方程式を針路安定判別式から求める。

3.1 針路安定判別式

一般に針路安定は、船が舵中央で直進中に外力を受け航路からそれ始めたとき、外力が除かれたときの特性で判別される。このため通常舵の影響を無視して表されるが、舵も旋回抵抗として作用するので、舵の影響を考慮した安定判別式(D)を求めた。これを以下に示す。

$$D = -\frac{1}{\Delta} \left[\begin{aligned} &(Y'_\beta - C_{YR}\gamma) (N'_r + C_{NR} l'_R \gamma) \\ &+ \{ (m' + m'_x) - Y'_r - C_{YR} l'_R \gamma \} (N'_\beta - C_{NR}\gamma) \end{aligned} \right] \quad (5)$$

ここで、 $\Delta = (m' + m'_x)(I'_{zz} + J'_{zz})$

3.2 針路安定性能、回頭制動性能および初期旋回性能を表す回帰方程式

前述の針路安定判別式(5)式から、針路安定性能、回頭制動性能および初期旋回性能の指標を推定する回帰方程式を求める。今、

$$Y'_\beta = -Y'_v, N'_\beta = -N'_v, Y'_r = Y'_r, C_{NR} = -\frac{1}{2}C_{YR}$$

とおき、線形の操縦微係数 Y'_v, N'_v, Y'_r, N'_r には井上の式を用いる[3]。舵の直圧力は(3)式で $=0$ とし、 $u_R/U=1$ として解析を進める。また、 a_H については C_B の 1 次式で推定している[3]。

$$a_H = 0.642C_B - 0.1619$$

さらに、整流係数 および実験係数である l_r' はそれぞれ 0.5 および 1.0 とする[5]。船体の横方向の付加質量 (m'_y) および重心周りの付加慣性モーメント (J'_{zz}) は、Clarke の推定式[6]で推定する。なお、船体の前後方向の付加質量 (m'_x) は、船の質量 (m) の 10% ($m'_x=0.1m$) とする。さらに、貫動半径 (l'_z) を l'_z とすると、 $\Gamma'_{zz}=m'l'_{zz^2}$ 。これらを(5)式に代入すると、次の様になる。

$$D = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} (Y'_{v0}N'_{r0} - Y'_{r0}N'_{v0} + 1.1m'N'_{v0}) \\ + C_{YR}\gamma \left(\frac{1}{2}Y'_{v0} + \frac{1}{2}Y'_{r0} - \frac{1.1}{2}m' + N'_{v0} + N'_{r0} \right) \\ + \left\{ Y'_{v0}N'_{r0} (a_{yv} + a_{vr}) - Y'_{r0}N'_{v0} \left(a_{yr} + \frac{a_{mv}}{l_{v0}} \right) + \left(1.1m' \frac{a_{mv}}{l_{v0}} \right) N'_{v0} \right. \\ \left. + C_{YR}\gamma \left(\frac{1}{2}a_{yv}Y'_{v0} + \frac{1}{2}a_{yr}Y'_{r0} + \frac{a_{mv}}{l_{v0}}N'_{v0} + a_{vr}N'_{r0} \right) \right\} \tau' \\ + \left\{ (a_{yv}a_{vr})Y'_{v0}N'_{r0} - \left(a_{yr} \frac{a_{mv}}{l_{v0}} \right) Y'_{r0}N'_{v0} \right\} \tau'^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

(6)式で $a_{yv}, a_{yr}, a_{mv}, a_{vr}$ は、それぞれ井上の式での線形操縦微係数 Y'_v, Y'_r, N'_v, N'_r のトリム修正項の定数を表している。 $Y'_{v0}, Y'_{r0}, N'_{v0}, N'_{r0}$ はイ - プンキ - ル時の線形操縦微係数を表している。

$$\text{ここで、} \quad l_{v0} = N_{v0}/Y_{v0}, \quad k = \frac{2d}{L}, \quad \tau' = \frac{\tau}{d}$$

また、 L は船長 (垂線間長)、 B は船幅、 C_B はブロック係数、 d は平均喫水、 h はトリム (船尾トリムを正とする) である。

操縦性暫定基準における針路安定性能および回頭制動性能の指標、および初期旋回性能の指標が、針路安定判別式(6)式と近似的に線形関係にあると仮

定する。このとき、 10° Z 操縦試験のファ - ストオ - バ - シュ - ト角 (Ψ_{10-1}) とセカンドオ - バ - シュ - ト角 (Ψ_{10-2}) および 20° Z 操縦試験のファ - ストオ - バ - シュ - ト角 (Ψ_{20-1})、 10° Z 操縦試験において舵角を 10° 取ったとき初期方位から 10° 変針するまでの船の航走距離 (S_T) を推定する回帰方程式は(6)式の各項をパラメ - タとして次の様に表すことができる。

$$\begin{pmatrix} \Psi_{10-1} \\ \Psi_{10-2} \\ \Psi_{20-1} \\ S_T \end{pmatrix} = b_0 + \frac{b_1}{\Delta} (Y'_{v0}N'_{r0} - Y'_{r0}N'_{v0} + 1.1m'N'_{v0}) \\ + \frac{b_2}{\Delta} C_{YR}\gamma \left(\frac{1}{2}Y'_{v0} + \frac{1}{2}Y'_{r0} - \frac{1.1}{2}m' + N'_{v0} + N'_{r0} \right) \\ + \frac{b_3}{\Delta} \left\{ (a_{yv} + a_{vr})Y'_{v0}N'_{r0} - \left(a_{yr} + \frac{a_{mv}}{l_{v0}} \right) Y'_{r0}N'_{v0} + \left(1.1m' \frac{a_{mv}}{l_{v0}} \right) N'_{v0} \right\} \tau' \\ + \frac{b_4}{\Delta} C_{YR}\gamma \left(\frac{1}{2}a_{yv}Y'_{v0} + \frac{1}{2}a_{yr}Y'_{r0} + \frac{a_{mv}}{l_{v0}}N'_{v0} + a_{vr}N'_{r0} \right) \tau' \\ + \frac{b_5}{\Delta} \left\{ (a_{yv}a_{vr})Y'_{v0}N'_{r0} - \left(a_{yr} \frac{a_{mv}}{l_{v0}} \right) Y'_{r0}N'_{v0} \right\} \tau'^2 \quad (7)$$

ここで $b_0 \sim b_5$ は回帰式の係数であり、その値は実船試験データから指標ごとに求める。

4 旋回性能の推定法

操縦性暫定基準において、旋回性能の指標は旋回試験でのアドバンス、タクティカルダイアメ - タが採用されている。このアドバンスおよびタクティカルダイアメ - タを推定する回帰方程式は、 $1/K$ から求める。

前節同様に舵力の項に操縦運動の影響を考慮すると(4)式で表される。この式の線形の操縦微係数に対し、井上の操縦微係数をイ - プンキ - ル時とトリムの項に分けて表すと、次式が得られる。

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{C_{YR} \left(N'_v + \frac{1}{2}Y'_v \right)} \begin{bmatrix} Y'_{v0}N'_{r0} - N'_{v0} \{ Y'_{r0} - (m' + m'_x) \} \\ + \gamma C_{YR} \left\{ \frac{Y'_{v0}}{2} + \frac{1}{2} \{ Y'_{r0} - (m' + m'_x) \} + N'_{v0} + N'_{r0} \right\} \\ + \left\{ (a_{yv} + a_{vr})Y'_{v0}N'_{r0} \right. \\ \left. - \left(a_{yr} + \frac{a_{mv}}{l_{v0}} \right) Y'_{r0}N'_{v0} + \left(1.1m' \frac{a_{mv}}{l_{v0}} \right) N'_{v0} \right\} \tau' \\ + \gamma C_{YR} \left\{ \frac{a_{yv}}{2} Y'_{v0} + \frac{a_{yr}}{2} Y'_{r0} + \frac{a_{mv}}{l_{v0}} N'_{v0} + a_{vr} N'_{r0} \right\} \tau' \\ + \left\{ (a_{yv}a_{vr})Y'_{v0}N'_{r0} - \left(a_{yr} \frac{a_{mv}}{l_{v0}} \right) Y'_{r0}N'_{v0} \right\} \tau'^2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

結局旋回性能を表す指標であるアドバンス(A_D)およびタクティカルダイアメータ(T_D)は $1/K$ に比例すると考えると、それを推定する回帰式は次式で与えられる。ここで、 $b_0 \sim b_4$ は旋回性能の各指標ごとに実船試験データから決定される。また C_{YR} については、(3)式の \cos は定数となるため係数 b_2, b_4 に含めている。

$$\left. \begin{aligned} \frac{A_D}{T_D} \right\} &= b_0 + \frac{b_1}{C_{YR} \left(N'_v + \frac{1}{2} Y'_v \right)} \left[Y'_{v0} N'_{r0} - N'_{v0} \{ Y'_{r0} - (m' + m'_x) \} \right] \\ &+ \frac{b_2 \gamma C_{YR}}{C_{YR} \left(N'_v + \frac{1}{2} Y'_v \right)} \left\{ \frac{Y'_{v0}}{2} + \frac{1}{2} \{ Y'_{r0} - (m' + m'_x) \} + N'_{v0} + N'_{r0} \right\} \\ &+ \frac{b_3}{C_{YR} \left(N'_v + \frac{1}{2} Y'_v \right)} \left\{ (a_{y0} + a_{nr}) Y'_{v0} N'_{r0} \right. \\ &\quad \left. - (a_{yr} + \frac{a_{mv}}{l_{v0}}) Y'_{r0} N'_{v0} + (1.1 m' \frac{a_{mv}}{l_{v0}}) N'_{v0} \right\} \tau' \\ &+ \frac{b_4 \gamma C_{YR}}{C_{YR} \left(N'_v + \frac{1}{2} Y'_v \right)} \left\{ \frac{a_{y0}}{2} Y'_{v0} + \frac{a_{yr}}{2} Y'_{r0} + \frac{a_{mv}}{l_{v0}} N'_{v0} + a_{nr} N'_{r0} \right\} \tau' \\ &+ \frac{b_4}{C_{YR} \left(N'_v + \frac{1}{2} Y'_v \right)} \left\{ (a_{y0} a_{nr}) Y'_{v0} N'_{r0} - (a_{yr} \frac{a_{mv}}{l_{v0}}) Y'_{r0} N'_{v0} \right\} \tau'^2 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

さらに、 uR/U についても定数として扱い係数に含めている。また、旋回運動は非線形な力の影響を受けているので、実際には線形微係数のみでの表現では誤差を生じるが、その誤差は回帰方程式の係数に含めて表現できると考える。

5. 実船試験結果との比較

回帰式(7)および(9)式の係数は、1999年までに操縦性能データベースに収集されたデータの中から、バラスト状態で左右の操舵方向の試験結果がそろっているデータを用いて求めている。ここでバラスト状態の定義は、試験時の喫水が平均喫水で設計喫水の95%未満のものを指している。また、操縦性試験データを用いて求めた(7)式および(9)式の係数等を表1に示す。

5.1 推定式の有効性

バラスト状態の実船試験データから(7)式および(9)式の回帰式の係数を求め、計測値と推定値を比較した結果を図1に示す。図中の実線は計測値と推定値が一致する点であり、点線は実線から標準誤差の値だけずらした値を示している。

旋回性能では、幾つかの点は大きくはずれているが、全体的な傾向は良く表している。旋回性能の場

合、載貨状態によりオバシュト角ほど大きく変化しないためと考えられる。

初期旋回性能、針路安定性能および回答制動性能についてはほぼ全体の傾向は良く捕らえているものの、 $10^\circ Z$ の2nd overshoot angleの計測値で 15° 以上ものがやや傾向からはずれている。これらのデータは喫水比で80%以上であり、イブンキルかあるいは船首トリムである。

喫水比の増加およびトリムの減少とともにオバシュト角は増加し、その分布も大きく広がるようになる[7]ことから、推定精度を改善するには喫水比、即ち満載に近い状態であつイブンキルの状態に対する精度の改善が必要となる。このためには満載状態の簡易推定式の様にフレムライン影響のようなパラメータの導入を検討する必要がある。あるいはまた、満載状態に対する推定式で推定することも検討する必要がある。

5.2 バルクキャリアの実船データとの比較

これまでのデータベースの解析で、満載状態は設計喫水の95%以上のデータと定義している。このため表2に示すバルクキャリア[8]はバラスト状態の取り扱いであり、バラスト状態の簡易推定式を求める際のデータとしても含まれていないことから、この船を用いて推定法の検討を行った。

ここで、SR223A船型は逆G船尾と平衡舵の組み合わせであり、SR223B船型はマリナ船尾とマリナ舵の組み合わせである。その主要目と載貨状態を表2に示す。(F)は満載状態に近いことを表しており、(B)は通常のバラスト状態を表している。なお、表2では排水容積を表している。

今回求めたバラスト状態に対する簡易推定法((7)式と(9)式)による推定結果を図2に示す。この結果からSR223A(B)で推定精度がやや落ちるもののほぼ推定できていることが解る。

6 結 言

今回バラスト状態の船の操縦性能を推定する簡易推定法について、満載状態に対する簡易推定式と同様な手法で求めた。主要目、喫水、トリムを主に用いた推定法だが、ほぼ全体的にその傾向を表していると考えられる。また、喫水比が0.8以上ではほぼイブンキルの状態の船で推定精度が落ちる場合がある

が、満載状態の時の様にフレ - ムライン影響と言った船型を表す要素が含まれていないことが、一因と考える。

次に、簡易推定式の有効性を調べるため、バルクキャリアのデータをを用いて、バラスト状態の簡易推定式で操縦性能を推定し計測値と比較した。その結果、ほぼ推定できることが解った。

7. 謝辞

本研究は、日本財団の助成事業の一つであるRR74 操縦性WG との共同研究の一部であり、発表を承諾して頂いた(社)日本造船協会に感謝します。

参考文献

- [1] MSC/Circ.644 : EXPLANATORY NOTES TO THE INTERIM STANDARDS FOR SHIP MANOEUVRABILITY, June, 1994
- [2] HARAGUCHI, T. : PREDICTION OF SHIP MANOEUVRABILITY BY A SIMPLIFIED ESTIMATING METHOD, Mini Symposium on Prediction of Ship Manoeuvring Performance, (18 October 2001), pp.31-40

- [3] 平野雅祥他 : 第 3 回操縦性シンポジウム, 造船設計への操縦運動モデルの応用 - 実船の操縦性能推定 -, 日本造船学会, 昭和 56 年 12 月, pp.101-136
- [4] 藤井斉, 野本謙作 : 操縦性試験法, 第 2 回操縦性シンポジウム, 日本造船学会, 1970, pp.1-39
- [5] 小瀬邦治他 : 第 3 回操縦性シンポジウム, 操縦運動の数学モデルの具体化 - 船体・プロペラ・舵の相互干渉とその表現, 日本造船学会, 昭和 56 年 12 月, pp.27-80
- [6] 高品純志, 石黒剛 : 船舶設計時における操縦性能の推定と評価, 第 2 章船の設計と操縦性能, 運動性能研究委員会・第 10 回シンポジウム, 日本造船学会, 1993 年 12 月, pp.15-54
- [7] 原口富博 : 試験水槽委員会シンポジウム 操縦性および復原性基準に関する研究の動向, 第 3 章 操縦性能データベ - スと実船の操縦性能簡易推定法, 日本造船学会, 平成 12 年 12 月
- [8] 第 223 研究部会 : 乾貨物船の載荷状態が運航性能に及ぼす影響, 解析, 平成 7 年度報告書(総合報告書), (社)日本造船研究協会, 平成 8 年 3 月

表 1 バラスト状態の簡易推定式の係数等

Item	Turning Ability		Initial Turning Ability	Course Keeping Ability & Yaw Checking Ability		
	Turning		10° / 10°	Zig-zag Manoeuvring		20° / 20° Zig-zag Manoeuvring
Index	Advance/L	Tactical Diameter/L	Track Reach/L	1st Overshoot Angle(deg)	2nd Overshoot Angle(deg)	1st Overshoot Angle(deg)
Coefficient of Correlation	0.695	0.692	0.762	0.824	0.795	0.780
Standard Error	0.273	0.443	0.167	1.295	2.803	2.547
Observed Data	87	87	84	84	84	82
Number of Parameters	5	5	5	5	5	5
b_0	3.612	-0.075	2.326	12.164	23.275	26.271
b_1	1.900	5.197	0.552	4.679	6.515	10.830
b_2	-0.343	5.610	-0.386	-2.240	-6.317	-5.835
b_3	-6.390	-11.723	-4.295	11.147	34.047	-21.716
b_4	-47.651	-85.495	-8.494	-79.533	-64.288	-307.713
b_5	-8.768	-13.390	0.961	-36.703	-75.130	-49.753

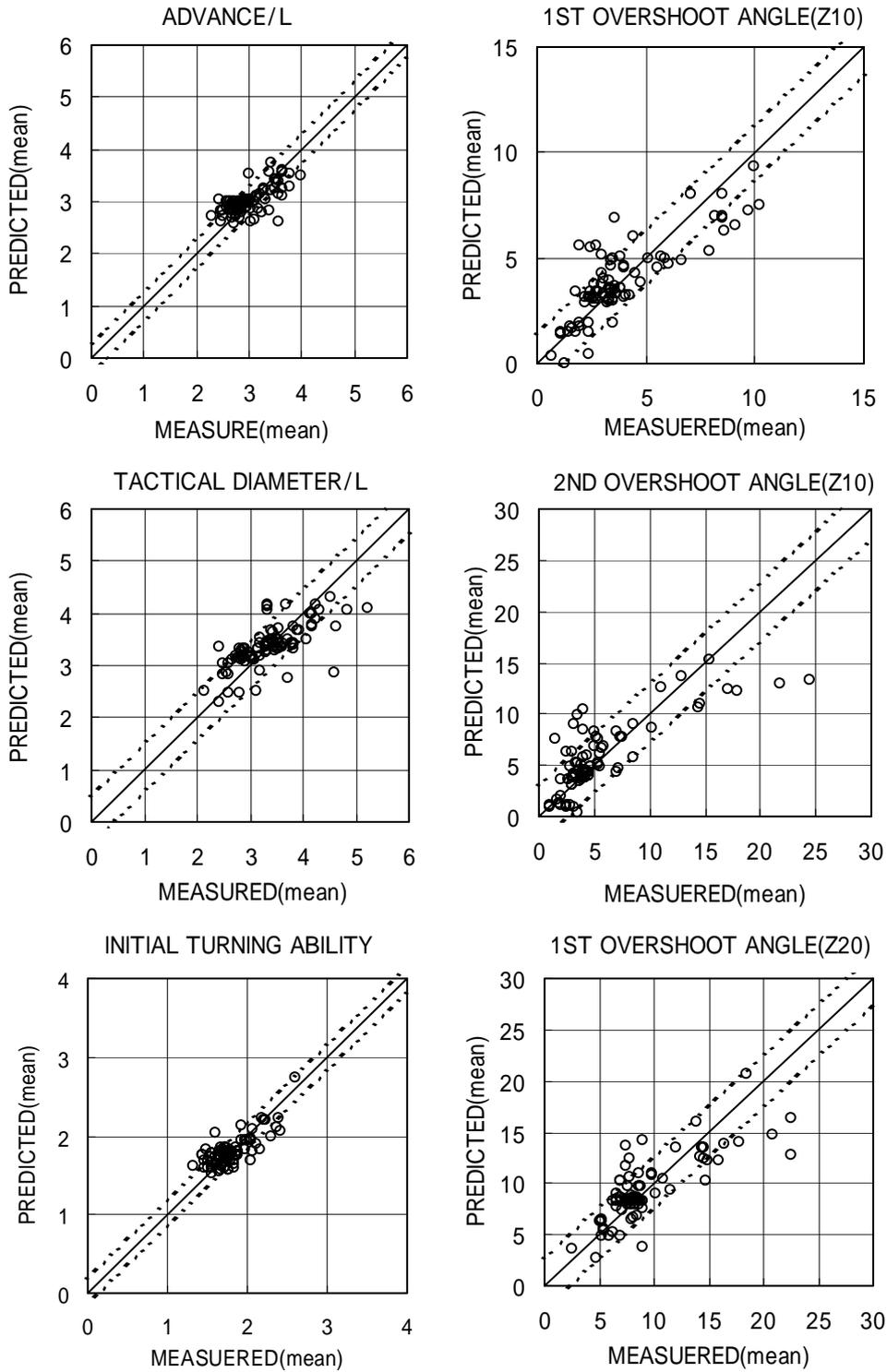


図1 バラスト状態の簡易推定法による推定値と計測値の比較

表2 バルクキャリアの主要目と載貨状態

SHIP NAME	L/B	B/d	(Trial)/ (Design)	$d_{\text{mean}}/d_{\text{design}}$	$/d_{\text{mean}}$
SR223A(F)	5.82	2.78	0.90	0.91	0.01
SR223A(B)	5.82	2.78	0.48	0.51	0.56
SR223B(F)	6.68	2.60	0.94	0.94	0.01
SR223B(B)	6.68	2.60	0.60	0.62	0.01

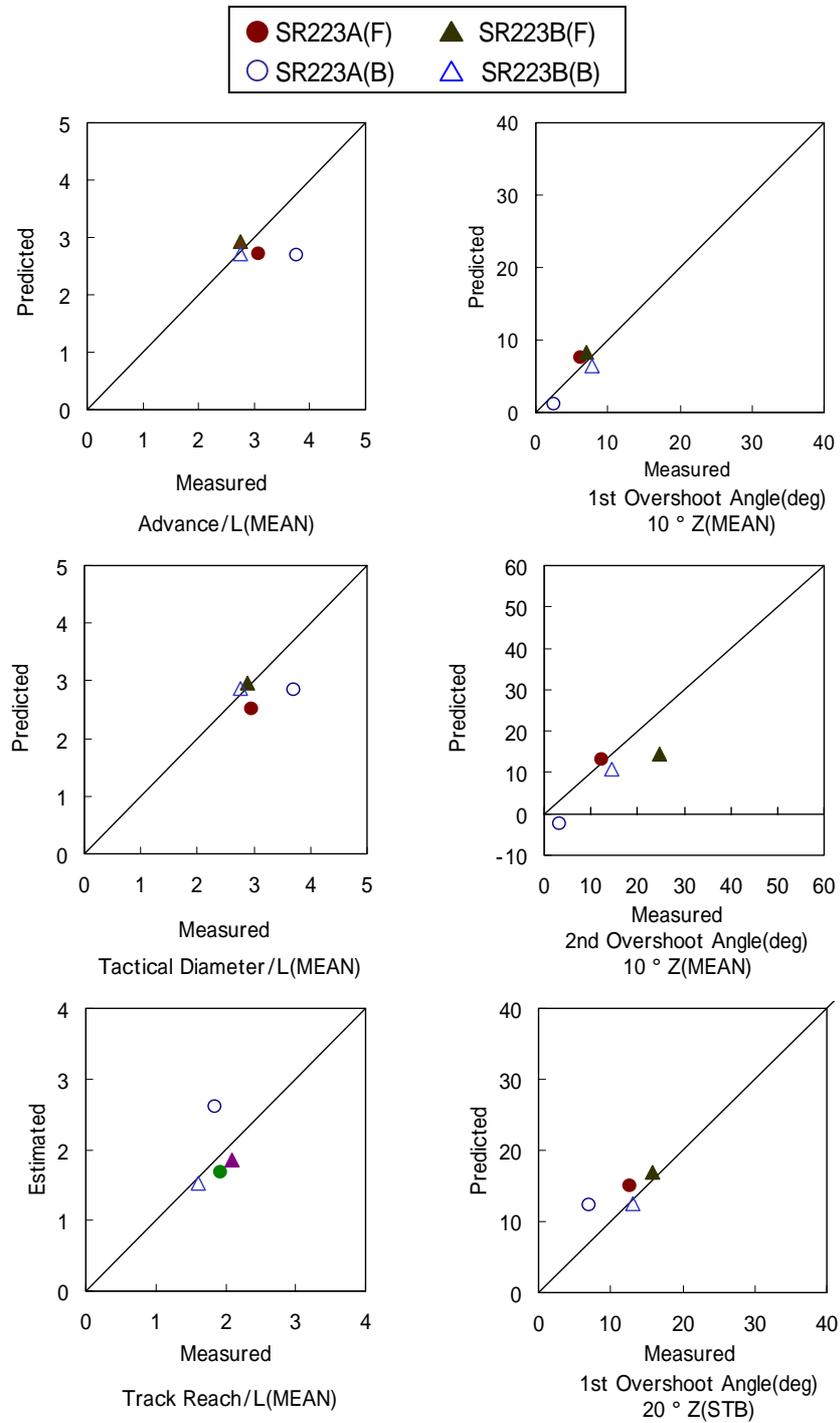


図2 バルクキャリアに対する推定結果