

Fig.4.21 Yaw Moment N'

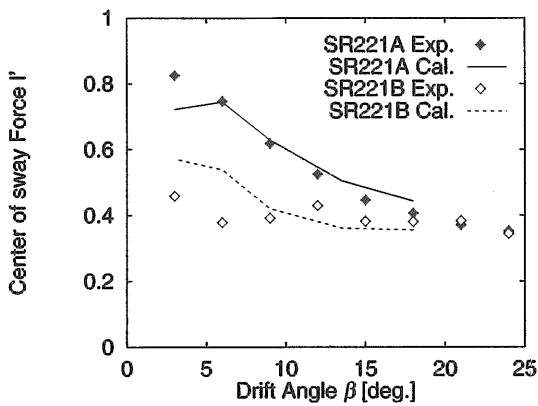


Fig.4.22 Center of sway Force I'

船型差は良く出ている。

Yaw Moment

Fig.4.21にYaw Momentを示す。計算はここでもA船型のほうが実験との一致度が非常に良い。船型差もほぼ表現できている。しかし、大きな斜航角 β において、実験ではA船型とB船型の値が交差しているが、計算では交差していない。 $\beta = 18$ 度ではA船型の計算結果は実験結果と良く一致しているのに対して、B船型は計算結果と実験結果のずれがA船型より大きい。やはり、B船型の計算結果の精度が低いようである。

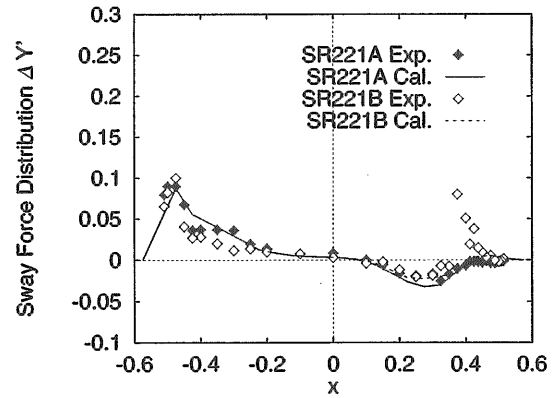
横力の着力点

Fig.22に横力の着力点を示す。A船型の計算結果は実験と良く一致している。B船型のそれは小さな斜航角 β で実験との一致度が低い。これはSway Forceの過大評価が主な原因である。

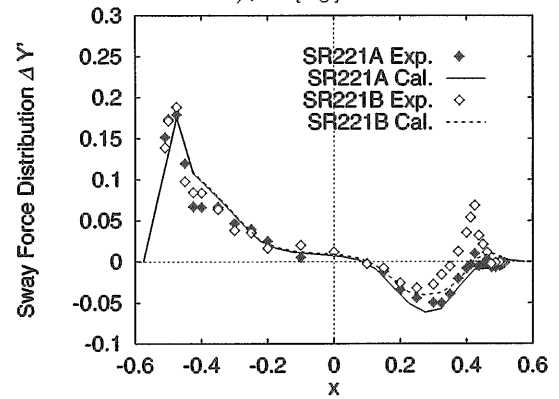
Sway Force分布

Fig.4.23に斜航角3, 6, 9度におけるSway Forceの船首尾方向の分布を示す。このSway Forceの分布は、船体前半部の実験値と計算値はどの角度でも、ピークの位置、ピークの大きさのいずれも良く一致しているが、船体後半部は実験に比べて計算は一樣に小さく評価している。

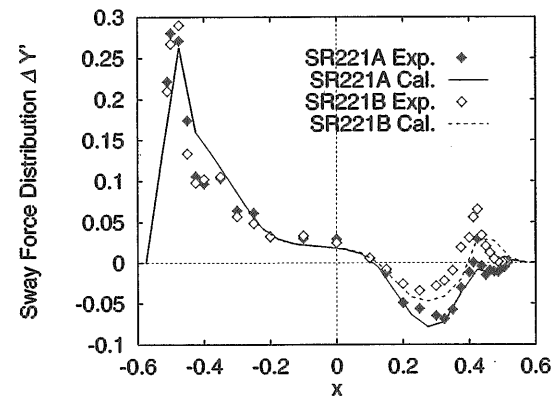
斜航角 $\beta = 3$ 度および6度では、実験には現れているB



a) $\beta = 3$ [deg.]



b) $\beta = 6$ [deg.]



c) $\beta = 9$ [deg.]

Fig.4.23 Distribution of sway force

船型の船体後半部の正のピークが計算には現れていない。A船型は計算値と実験値が良く一致している。

斜航角 $\beta = 9$ 度では、実験には現れているB船型の船体後半部の正のピークが現れているが過小評価をしている。また、A船型の正のピークは現れていない。

これらのピークが計算結果には捉えられていないが、船型差は良く出ている。ただし、斜航角 $\beta = 9$ 度までしか計測値が無いために、これ以上の斜航角での傾向は不明である。

これらのA船型はB船型より一致度が高い傾向は、4.3.2

の計算結果と同じ傾向である。

(5)船型差

A船型のSway Forceは、B船型のそれよりも常に小さい(Fig.4.20参照)が、A船型のYaw Momentは、B船型のそれよりも常に大きい(Fig.4.21参照)。この理由は、Fig.4.23を見れば明らかである。すなわち、A船型では、船体の前半部と後半部でSway Forceの分布の符号が逆であり、Sway Forceの積分において打ち消し合うが、Yaw Momentの積分においては強め合い、その結果、小さなSway Forceと大きなYaw Momentが得られるまた、B船型では、後半部のSway Force分布の一部に前半部と同一符号の高いピークがあり、そのため、Sway Forceの積分において強め合うが、Yaw Momentの積分においては弱め合い、その結果、大きなSway Forceと小さなYaw Momentが得られる

4.4 まとめ

肥大船型のSR221A, SR221Bの2つの船型について、船研で開発したNICEコードを用いて、斜航角が0度から18度までの斜航状態のCFD計算を行い、実験値と比較した。

計算はEWSを用いて1状態あたり1日程度の時間で完了し、斜航状態のNS計算がほぼ実用段階にあることが分かった。計算では、直進・斜航状態を問わず、縦渦を過小評価することが確かめられたが、この原因は、一部には格子解像度の不足があげられるが、主に計算に使用した乱流モデルであるBaldwin-Lomax乱流モデルにあると言える。

計算結果として、船体表面における積分により抵抗値、Sway Force、回転モーメント、着力点の位置、Sway Force分布が求められた。これらの計算結果は、V型船尾断面を有するA船型は実験と計算の一致度が高く満足できるレベルだった。しかし、U型船尾断面を有するB船型はやや一致度が悪かった。この差の原因は、船尾の縦渦の強さを表現できない事と思われ、渦をより正確に表現できる乱流モデルを使用した計算が今後の課題である。

参考文献

- [1] Kodama, Y.: "Computation of Ship's Resistance Using an NS Solver with Global Conservation - Flat Plate and Series 60 ($C_b = 0.6$) Hull - ", 日本造船学会論文集第172号、1992年12月。
- [2] 牧野雅彦ほか,Y.: "斜航状態の肥大船の船体にかかる流体力のCFD計算", 船舶技術研究所報告第33巻1号、平成8年。
- [3] 松本光一郎ほか「操縦性基準と船型設計」、運動性能研究委員会第12回シンポジウム講演集、1995年12月。
- [4] Baldwin, B.S. and Lomax, H., "Thin Layer Approximation and Algebraic Model for Separated

Turbulent Flows," AIAA Paper 78-257.

- [5] 大森拓也ほか「肥大船の操縦運動中の流場に関する研究」,日本造船学会論文集第176号、1994年。

5. 載貨状態と操縦性能

5.1 概要

操縦性暫定基準(IMO決議A.751(18))が1993年11月のIMO第18回総会で採択されたが、この基準は5年間の暫定基準で、1994年7月1日以降建造される100m以上の船舶およびすべてのケミカルタンカーとガスキャリアーに適用される。この操縦性暫定基準は満載状態での性能基準となっているため、乾貨物船のように通常バラスト状態で海上試運転を行う船の場合、基準で定められた夏季満載状態での操縦性能を推定し、基準を満足しているかどうか判断する必要がある。このため今回2隻の模型船を用いて、バラストおよび満載の両状態について操縦性試験を行い、載貨状態の違いによる操縦性能の変化について調査した。

5.2 実験方法

今回実験に使用した模型船は2隻のバルクキャリアーで、これらの模型船の特徴は、船尾形状と舵の組み合わせが、それぞれ逆Gタイプと平衡舵、マリナータイプとマリナー舵となっている点である。以後、前者をA船、後者をB船と呼ぶことにする。その主要寸法等をTable 5.1に示す。載貨状態は、A船がHeavy Ballast condition (70%Load)とDesigned Full Load Condition、B船がTrial Condition (60%Load)とFull Load Condition (94%Load)である。平水中船速は、A船はバラスト、満載両状態とも $F_n = 0.14$ (実船で11.2kt)、B船はバラスト状態で $F_n = 0.17$ (実船で15kt)、満載状態で $F_n = 0.15$ (実船で13kt)である。また、2隻ともバラスト、満載両状態においてトリムなしの状態を実験を行っており、操縦性試験としては旋回試験、逆スパイラル試験、Z操舵試験の3種類の試験を行った。

Table 5.1 Principal dimensions of models

	Ship-A		Ship-B	
	Heavy Ballast Condition (70% Load)	Designed Full Load Condition (100% Load)	Trial Condition (60% Load)	Full Load Condition (94% Load)
L_{pp} (m)	4.5	4.5	4.5	4.5
B (m)	0.773	0.773	0.674	0.674
d (m)	0.1996	0.2784	0.162	0.245
W (kg)	559.1	798.7	390.3	608.6
GM (m)	0.1058	0.07932	0.11359	0.06348
κ (t/L)	0.2586	0.249	0.2436	0.2437

5.3 実験結果と考察

5.3.1 実験結果と考察

A船のバラスト、満載の両状態での旋回特性（角速度（ $r' = rU/L$ ）、偏角（ β ）、速度低下（ $U/U0$ ）、舵直圧力（ $F_n' = F_n / ((1/2) \rho L d U^2)$ ）、スラスト（ $T' = T / ((1/2) \rho L d U^2)$ ）を Fig.5.1 に示す。舵角に対する旋回角速度の変化を見ると、不安定ループ幅を除いてバラスト、満載の両状態の間に顕著な差は見られない。また、不安定ループ幅はバラスト状態では 1° と限界安定に近く、満載では 6° とバラスト状態と比べて強い針路不安定性を示している。舵角に対する速度低下の変化を見ると、舵角 0° 付近では不安定性特有の傾向を示しており、それ以外のところでは旋回角速度同様に、バラスト、満載両状態の間に顕著な差はない。次に、旋回角速度に対する舵直圧力の変化を見ると、 r' が不安定ループ高さ（ $-0.2 \sim 0.2$ ）の範囲では、バラスト状態では舵力がゼロになっており、満載状態では旋回抵抗になっていることが解る。それ以外の範囲ではバラスト状態が満載状態よりも大きくなっている。同様に、旋回角速度に対する偏角、スラストについても、 r' が $-0.2 \sim 0.2$ の範囲を除くとバラスト状態が満載状態よりも大きくなっている。一方、旋回角速度に対する速度低下については、両状態とも大差なく、同じ旋回角速度に対しては同じ速度低下を起こしていることが解る。

同様の解析をB船について行ったものを Fig.5.2 に示す。舵角に対する角速度および船速低下を見ると、両状態状態で不安定ループ幅を有し、それを除く範囲ではA船同様大きな差は見られない。不安定ループ幅は満載状態の方が軽荷状態より 1° 大きく針路不安定性が強い。旋回角速度に対する舵直圧力を見ると、A船と異なり r' が不安定ループ高さより広い範囲（ $-0.4 \sim 0.4$ ）で、バラスト、満載両状態で旋回抵抗になっていることが解る。それを除く範囲では、舵力、偏角、スラストともA船同様に、バラスト状態が満載状態よりも大きくなっており、また速度低下では、大きな差が見られない。

Fig.5.3、Fig.5.4にA、B両船の旋回縦距、旋回圏の結果を示す。この図から、小舵角の範囲を除いて、両船ともバラスト、満載両状態で顕著な差が見られず、旋回初期の運動が載貨状態によって大きく変化しないことが解る。

以上のことから、イーブンキールで載貨状態が異なる船の定常旋回運動の場合、角速度が同じことから、定常旋回時の遠心力は船の排水量に比例していること、この時偏角、舵力、スラストが異なることから、船体各部に働く力が載貨状態によって異なることが解る。また、今回の実験ではイーブンキールの状態で行っており、従って喫水の変化による影響を調べたことになるが、これらの結果は旋回性能には載貨状態の影響、即ち喫水変化による影響が、小舵角の不安定ループ幅を除けば表れないことを示している。通常のバラスト状態での海上試運転では、船尾トリムをつける場合が多いと考えられるので、そうした場合の旋回性能

は今回の結果と異なるものと思われる。

Z操舵試験におけるオーバーシュート角の計測結果を、Table5.2～Table5.5に示す。A船については、 $10^\circ Z$ のファーストオーバーシュート角が右舵から始めた場合（ $+10^\circ/10^\circ$ ）と左舵から始めた場合（ $-10^\circ/10^\circ$ ）とでは、バラスト状態では大差ないものの満載では大きく異なっており、左右の非対称性が見られる。この時、ファーストオーバーシュート角は左舵から始めた方が大きくなっているが、計測舵力は左舵の方が右舵より小さいことから、この舵力の差によるものと考えられる。一方、セカンドオーバーシュート角は右舵から始めた方が大きくなっている。 $20^\circ Z$ についても $10^\circ Z$ より小さいものの同様の傾向が見られる。B船についてみると、 $10^\circ Z$ のファーストオーバーシュート角には、A船同様満載状態で左右非対称性が見られるが、 $20^\circ Z$ については左右非対称性が見られない。また、A船同様計測舵力は左舵の方が右舵より小さい。これらの結果から、左右の非対称性は $10^\circ Z$ のファーストオーバーシュート角に顕著に表れると言える。

次に、A船について $10^\circ Z$ 操舵試験における運動等の時系列例を Fig.5.9、Fig.5.10に、それぞれバラスト状態および満載状態を示す。舵力について見ると、バラスト状態では一定舵角の間ほぼ一定の値を示しているが、満載状態では時間とともに減少している。これは、舵への有効流入角に対する運動の影響の違いと推測される。B船については、Fig.5.11、Fig.5.12に示すが、バラスト、満載両状態について一定舵角時の舵力の減少が見られ、バラスト状態ではA船の結果と異なっている。これは、舵を含む船尾形状の違いと推測される。

5.3.2 実験結果と推定計算結果の比較

操縦性能の推定を数学モデル[1]を用いて行った結果と実験結果との比較を、A船のバラスト、満載両状態の旋回特性（角速度、偏角、船速低下）について行ったものを Fig.5.5、Fig.5.6に示す。角速度については不安定ループ幅を除けば、バラスト、満載の両状態について計算結果と実験結果との一致は良好である。また不安定ループ幅を除いて、偏角については計算結果の方が小さく、船速低下については計算結果の方が低下量は少ないが、実用的な範囲で推定できていると言える。しかし、角速度における不安定ループ幅については推定できておらず、その結果偏角も船速低下も小舵角では一致していない。不安定ループ幅は針路安定性能を表す指標として重要であり、載荷状態にかかわらず推定法の確立が必要である。B船の旋回特性については、Fig.5.7、Fig.5.8に示す。推定精度はA船に比べてやや落ちている。また、A船と同様、小舵角での不安定ループ幅が推定できていない。

A船について、Z操舵運動時の推定値と実験値の比較をバラスト、満載の両状態について Fig.5.9、Fig.5.10に示す。いずれも起ち上がりは推定値、実験値とも良く一致しているが、その後は偏角、方位などの変化が時間とともに推定

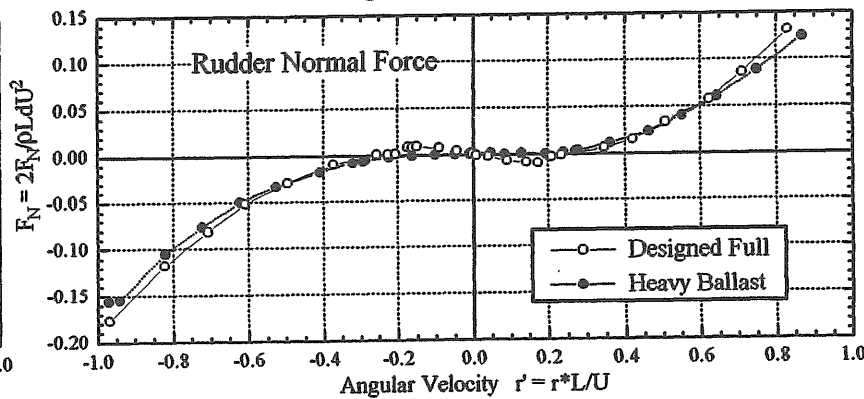
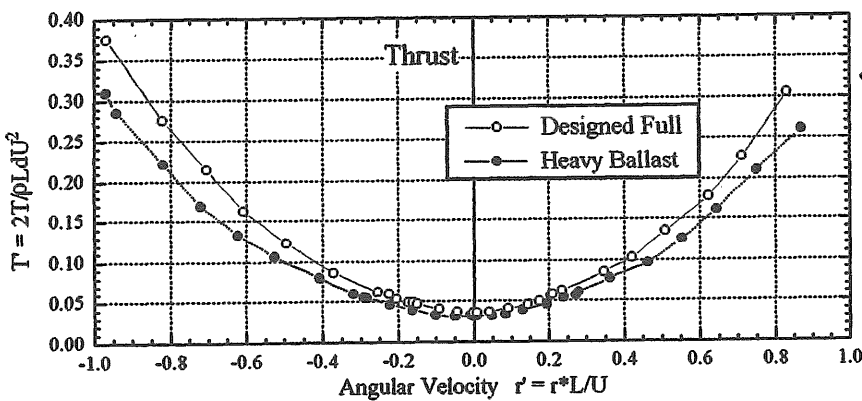
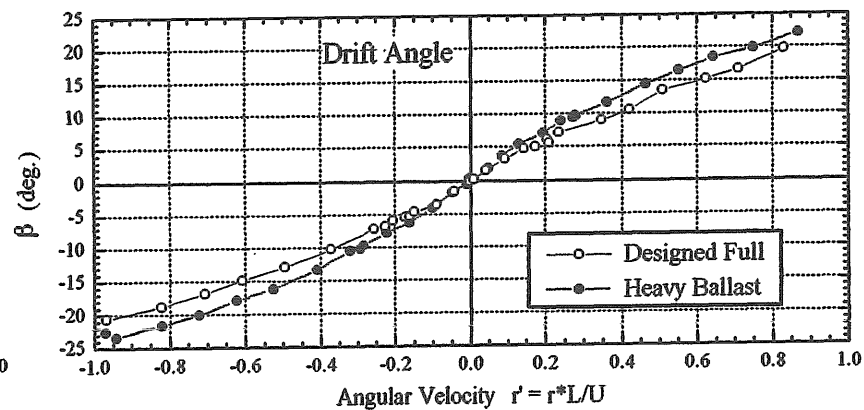
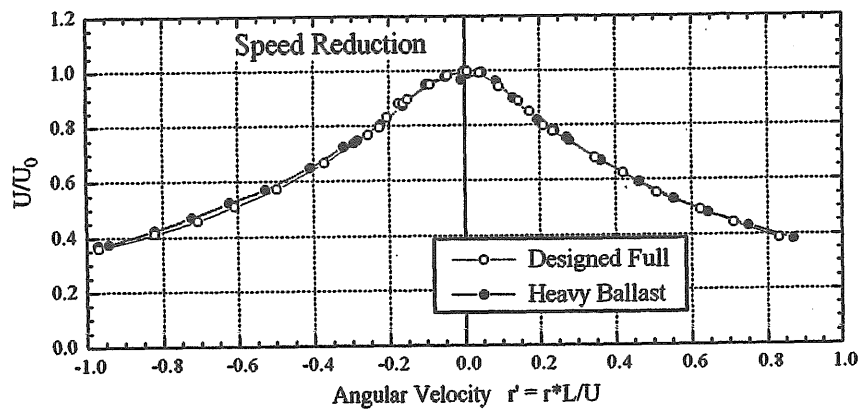
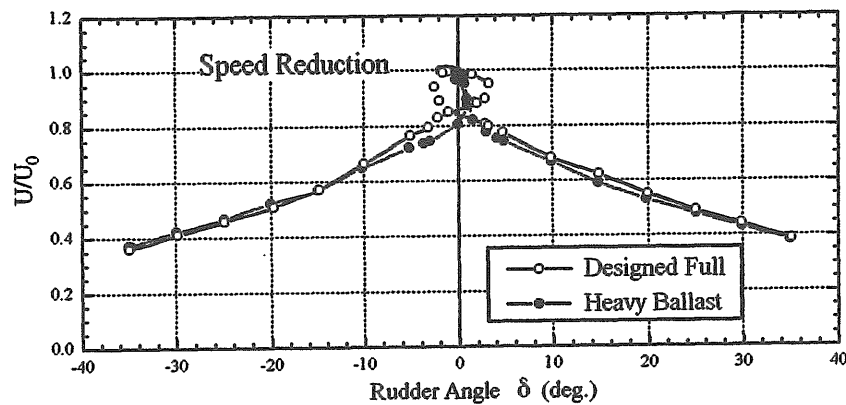
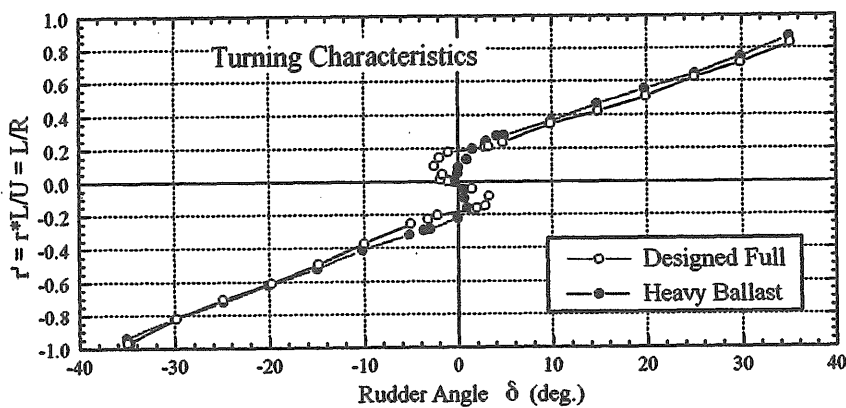


Fig.5.1 Turning performance (Ship A)

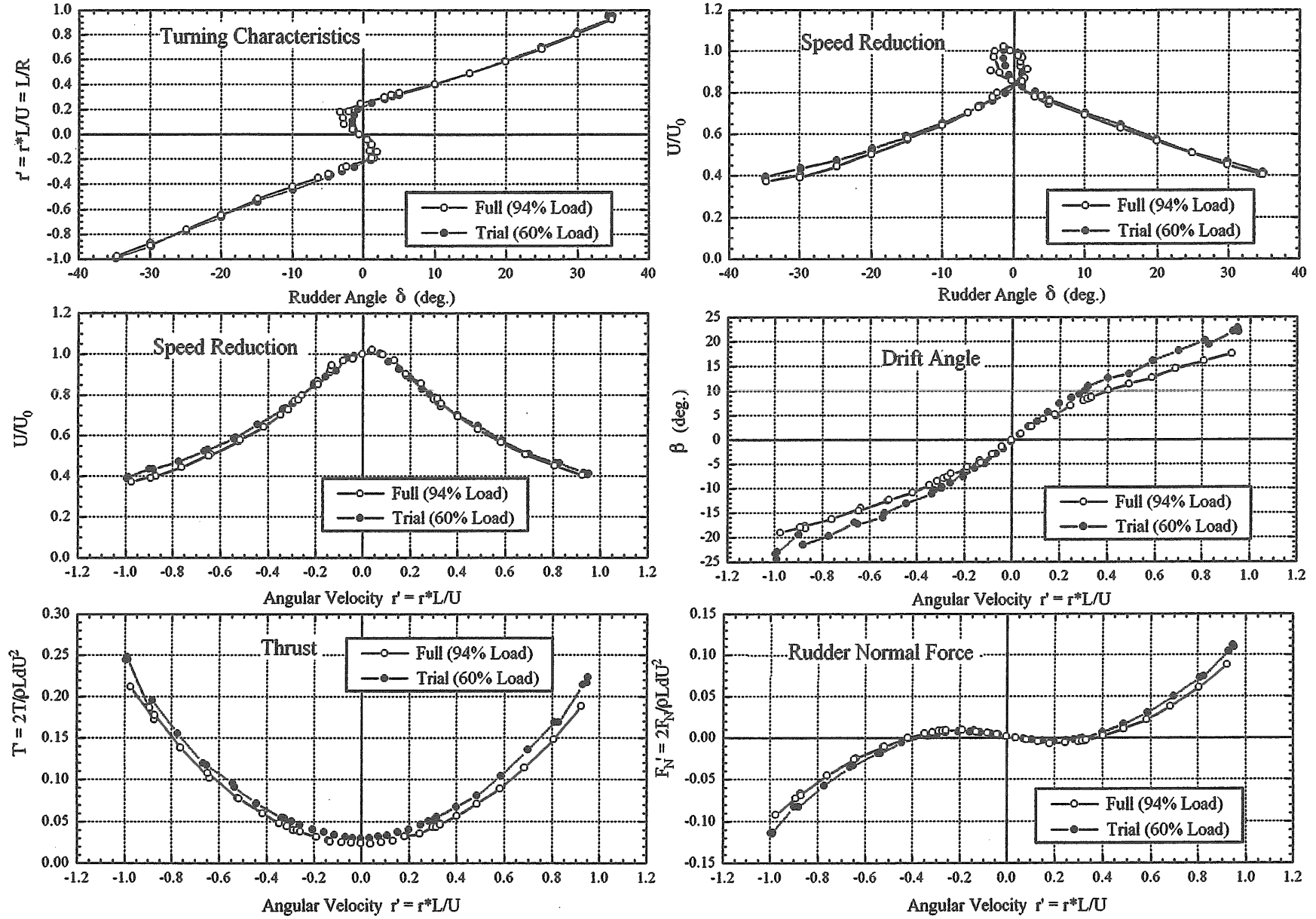


Fig.5.2 Turning performance (Ship B)

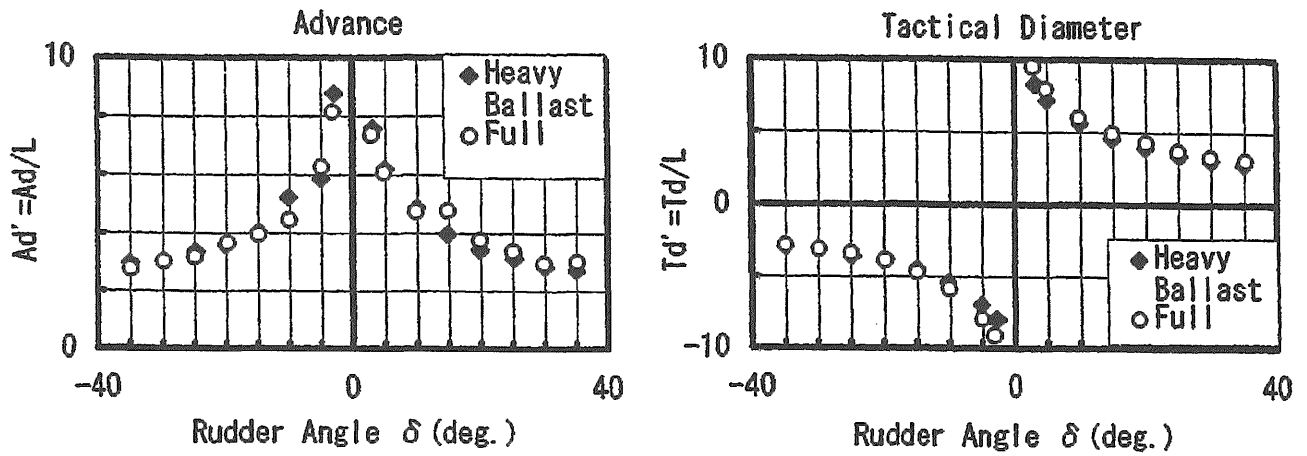


Fig.5.3 Advance and transfer (Ship A)

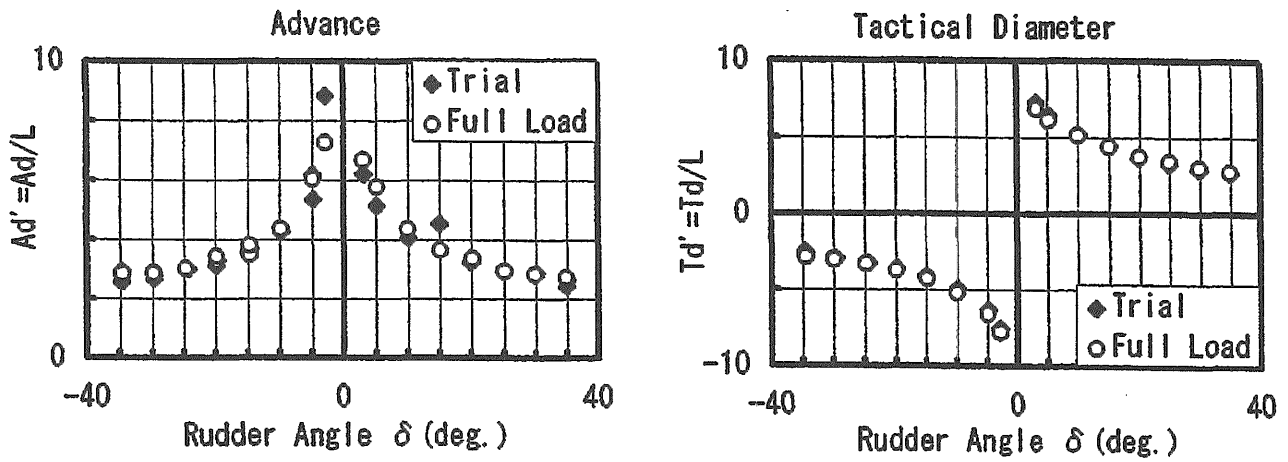


Fig.5.4 Advance and transfer (Ship B)

Table 5.2 Overshoot angle in zig-zag manoeuvre (Ship A in ballast condition)

	No.	1st overshoot angle (deg.)	2nd overshoot angle (deg.)	3rd overshoot angle (deg.)
+ 10° / 10°	1	6.10	14.83	11.34
	2	5.29	14.22	12.90
	Mean	5.70	14.53	12.12
- 10° / 10°	1	8.13	11.60	14.86
	2	8.32	12.08	15.39
	Mean	8.23	11.84	15.13
+ 20° / 20°	1	11.68	12.84	10.96
	2	11.12	12.52	11.05
	3	12.26	13.23	10.92
Mean	11.69	12.86	10.98	
- 20° / 20°	1	11.98	11.76	12.07
	2	11.68	11.23	12.52
	Mean	11.83	11.50	12.30

Table 5.3 Overshoot angle in zig-zag manoeuvre (Ship A in full load condition)

	No.	1st overshoot angle (deg.)	2nd overshoot angle (deg.)	3rd overshoot angle (deg.)
+ 10° / 10°	1	8.40	18.10	9.11
	2	7.85	17.44	
	Mean	8.13	17.77	9.11
- 10° / 10°	1	15.67	14.88	
	2	15.34	14.75	
	Mean	15.51	14.82	
+ 20° / 20°	1	12.41	15.58	11.97
	2	11.78	15.27	12.90
	3	12.29	15.46	11.85
	4	12.62	15.70	12.62
Mean	12.28	15.50	12.34	
- 20° / 20°	1	16.60	12.78	14.61
	2	16.29	13.42	15.28
	3	16.90	13.18	14.57
Mean	16.60	13.13	14.82	

Table 5.4 Overshoot angle in zig-zag manoeuvre (Ship B in ballast condition)

	No.	1st overshoot angle (deg.)	2nd overshoot angle (deg.)	3rd overshoot angle (deg.)
+10° / 10°	1	9.12	14.89	
	2	8.27	14.92	
	3	8.76	15.98	
	4	9.38	15.69	
	Mean	8.88	15.37	
-10° / 10°	1	9.15	15.60	
	2	9.91	15.35	
	3	7.08	14.89	
	4	9.80	15.87	
	Mean	8.99	15.43	
+20° / 20°	1	14.38	14.03	12.77
	2	14.20	13.60	12.62
	3	14.29	14.49	13.15
	4	14.30	13.80	14.25
	Mean	14.29	13.98	13.20
-20° / 20°	1	13.32	13.54	13.47
	2	13.54	14.32	13.47
	3	13.88	14.38	13.65
	Mean	13.58	14.08	13.53

値と実験値でずれてくる。舵角が一定の時の舵力の大きさは、バラスト状態では実験値が時間とともにほぼ一定値なのに対し、推定値は時間とともに減少する傾向にある。一方、満載時では推定値より実験値の方が大きく減少している。この原因としては、前述した様に推定値は小舵角での運動を正しく表していないため、この運動の違いが舵力の違いになっていると考えられる。B船についてのZ操舵運動時の推定値と実験値の比較を、Fig.5.11、Fig.5.12にそれぞれバラスト、満載の状態について示す。舵力の推定値の大きさは、バラスト、満載両状態とも実験値ほど時間とともに減少しない。

この小舵角での運動の推定精度を高めるため、造研のSR221研究部会では線形項のみであるが、船のフレームラインを考慮した操縦微係数の推定法[2]を提案している。この方法に従い計算した例をFig.5.13～Fig.5.16に示す。Fig.5.13はA船のスパイラル特性を示したものであり、小舵角での推定精度がかなり改善されていることが解る。Fig.5.14はA船についてZ操舵運動時の推定値と実験値を比較したもので、推定値と実験値の一致は良好である。同様にB船について示したものが、Fig.5.15、Fig.5.16である。ここでは、操縦微係数の推定に加えて、更に小舵角での舵力の推定精度の改善を考慮し、有効流入角を減少させた結果を示す。それぞれ小舵角でのスパイラル特性およびZ操舵運動時の推定値と実験値の一致は良い。これらの計算結果を見ると、線形項の操縦微係数の推定精度の向上により小舵角でのスパイラル特性は改善される。更にZ操舵運動時の推定精度、特に基準との関係でオーバーシュート角の精度が重要であるが、舵力の推定精度が良くなるとともに、

Table 5.5 Overshoot angle in zig-zag manoeuvre (Ship B in full load condition)

	No.	1st overshoot angle (deg.)	2nd overshoot angle (deg.)	3rd overshoot angle (deg.)
+ 10° / 10°	1	15.80	24.40	
	2	15.23	24.61	
	Mean	15.52	24.51	
- 10° / 10°	1	9.92	27.29	
	2	10.87	29.15	
	Mean	10.40	28.22	
+ 20° / 20°	1	21.46	20.48	18.64
	2	21.24	20.01	17.21
	Mean	21.35	20.25	17.93
- 20° / 20°	1	19.08	20.42	18.04
	2	19.50	19.92	19.55
	Mean	19.29	20.17	18.80

オーバーシュート角の一致度が良くなっていることがわかる。

5.4 まとめ

A船,B船の2隻の模型船を用いて、オープンキールで載貨状態が異なる場合の実験を行い、次のことが解った。

- (1)舵角に対する旋回性能の変化を見ると、A、B両船とも小舵角での不安定ループ幅を除いてバラスト、満載の両状態の間に顕著な差は見られない。また、小舵角での不安定ループ幅は、満載状態の方がバラスト状態よりも大きい。
- (2)旋回角速度に対する舵直圧力の変化を見ると、A船の場合r'が不安定ループ高さ(-0.2~0.2)の範囲では、バラスト状態では舵力がゼロになっており、満載状態では旋回抵抗になっている。それ以外の範囲ではバラスト状態が満載状態よりも大きくなっている。B船の場合、A船と異なりr'が不安定ループ高さより広い範囲(-0.4~0.4)で、バラスト、満載両状態で旋回抵抗になっている。
- (3)旋回角速度に対する偏角、スラストについては、r'が不安定ループ高さの範囲を除くと、A、B両船とも、バラスト状態が満載状態よりも大きくなっている。
- (4)また、旋回角速度に対する速度低下については、A、B両船ともバラスト、満載の両状態で大差ない。
- (5)旋回縦距、旋回圏については、バラスト、満載両状態状態でA、B両船とも顕著な差は見られない。
- (6)Z操舵試験における左右の非対称性は、10°Zのファーストオーバーシュート角に顕著に表れる。
- (7)操縦性能の推定を数学モデルを用いて行った結果と実験結果との比較をすると、A、B両船とも、角速度、偏角、船速低下については不安定ループ幅を除けば、バラスト、満載の両状態について計算結果と実験結果との一致は実用的な範囲で良好である。

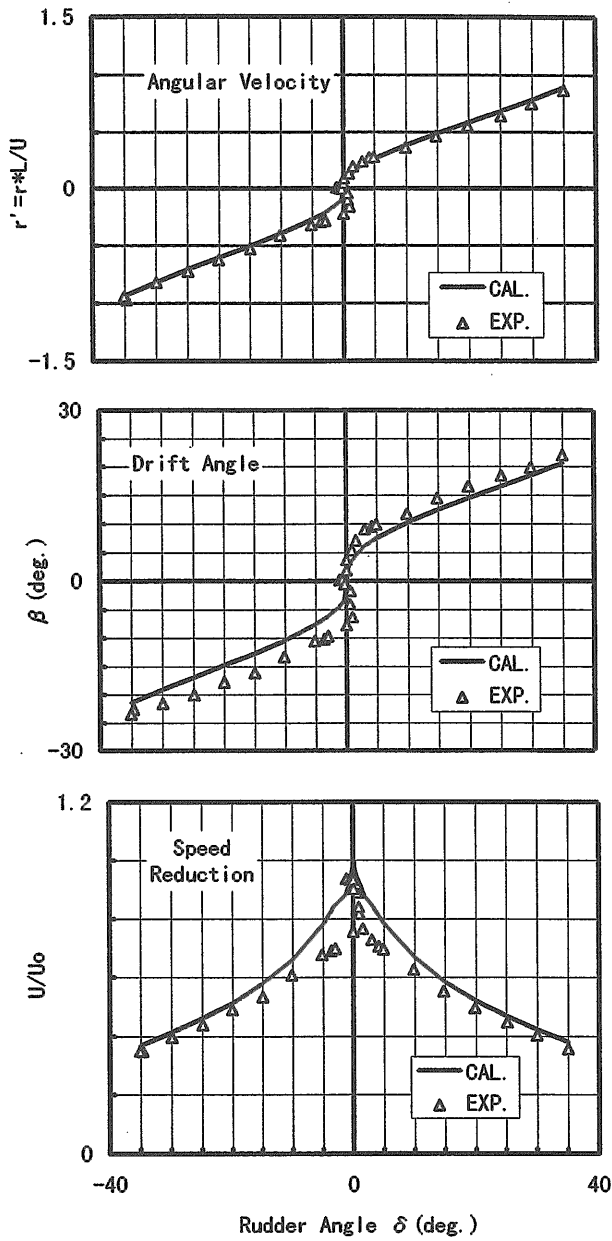


Fig.5.5 Comparison between estimation values and experimental results in turning performance (Ship A in ballast condition)

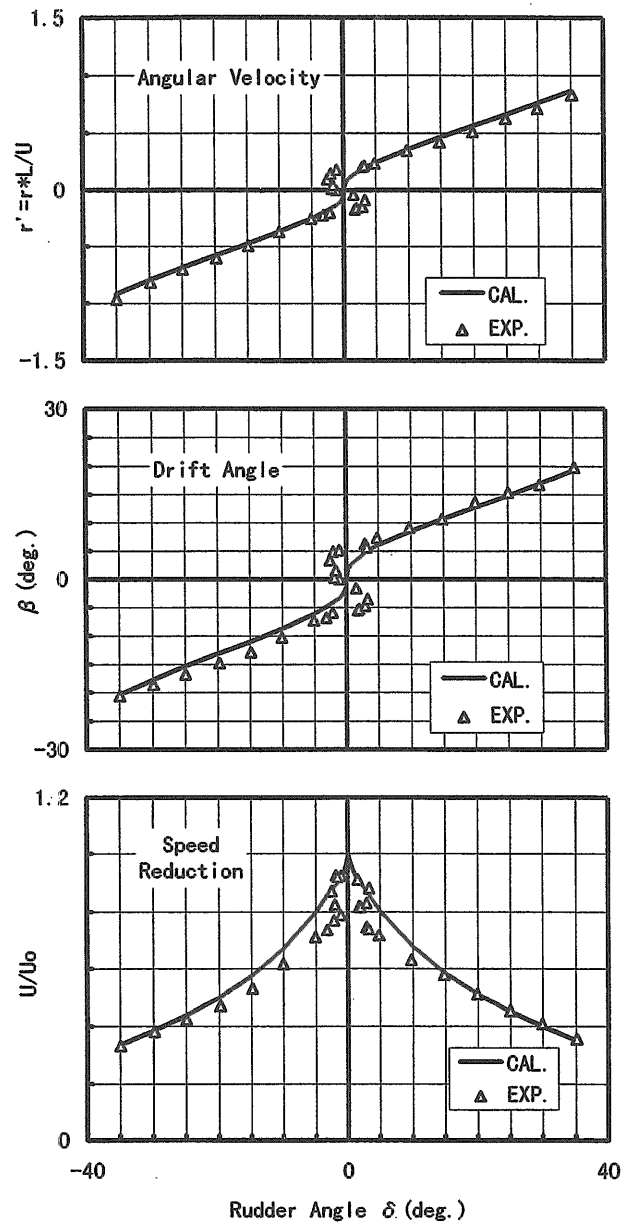


Fig.5.6 Comparison between estimation values and experimental results in turning performance (Ship A in full load condition)

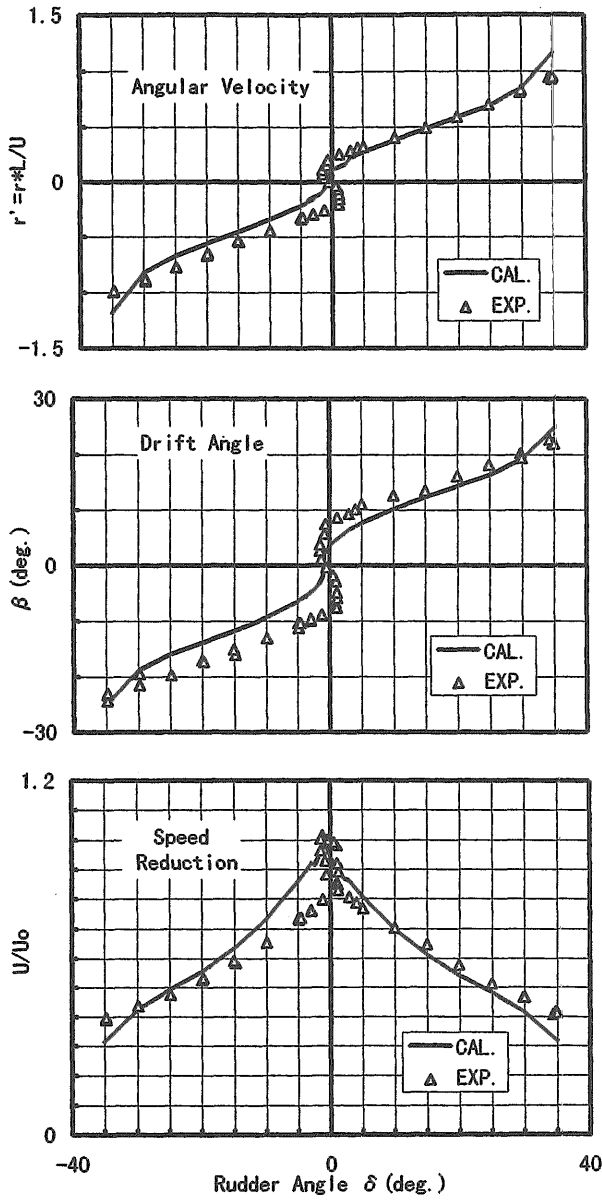


Fig.5.7 Comparison between estimation values and experimental results in turning performance (Ship B in ballast condition)

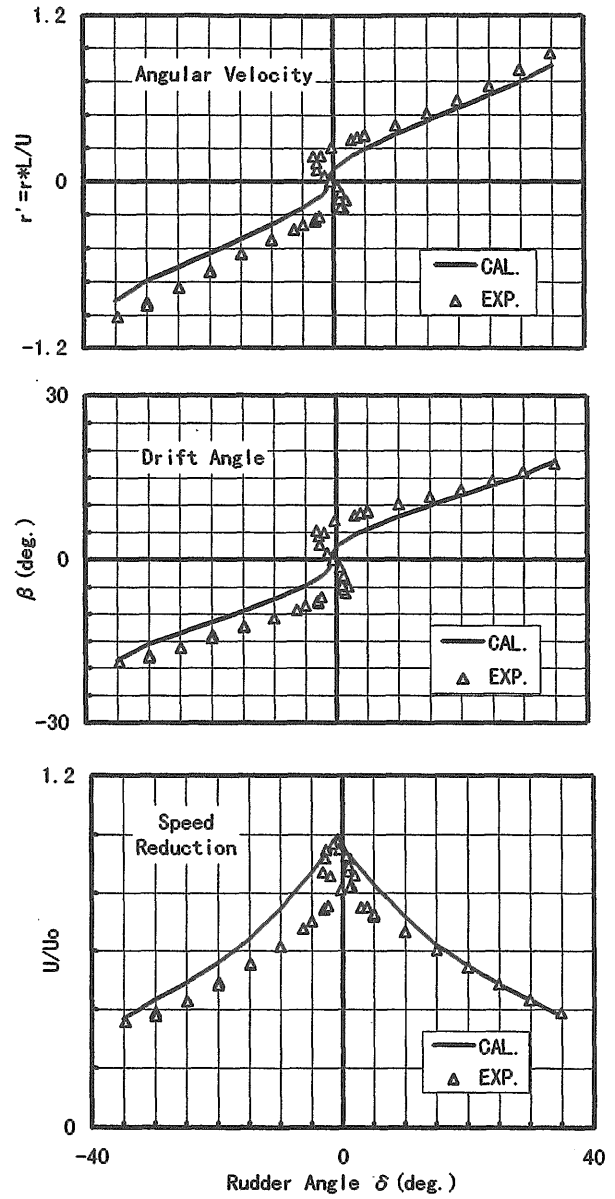


Fig.5.8 Comparison between estimation values and experimental results in turning performance (Ship B in full load condition)

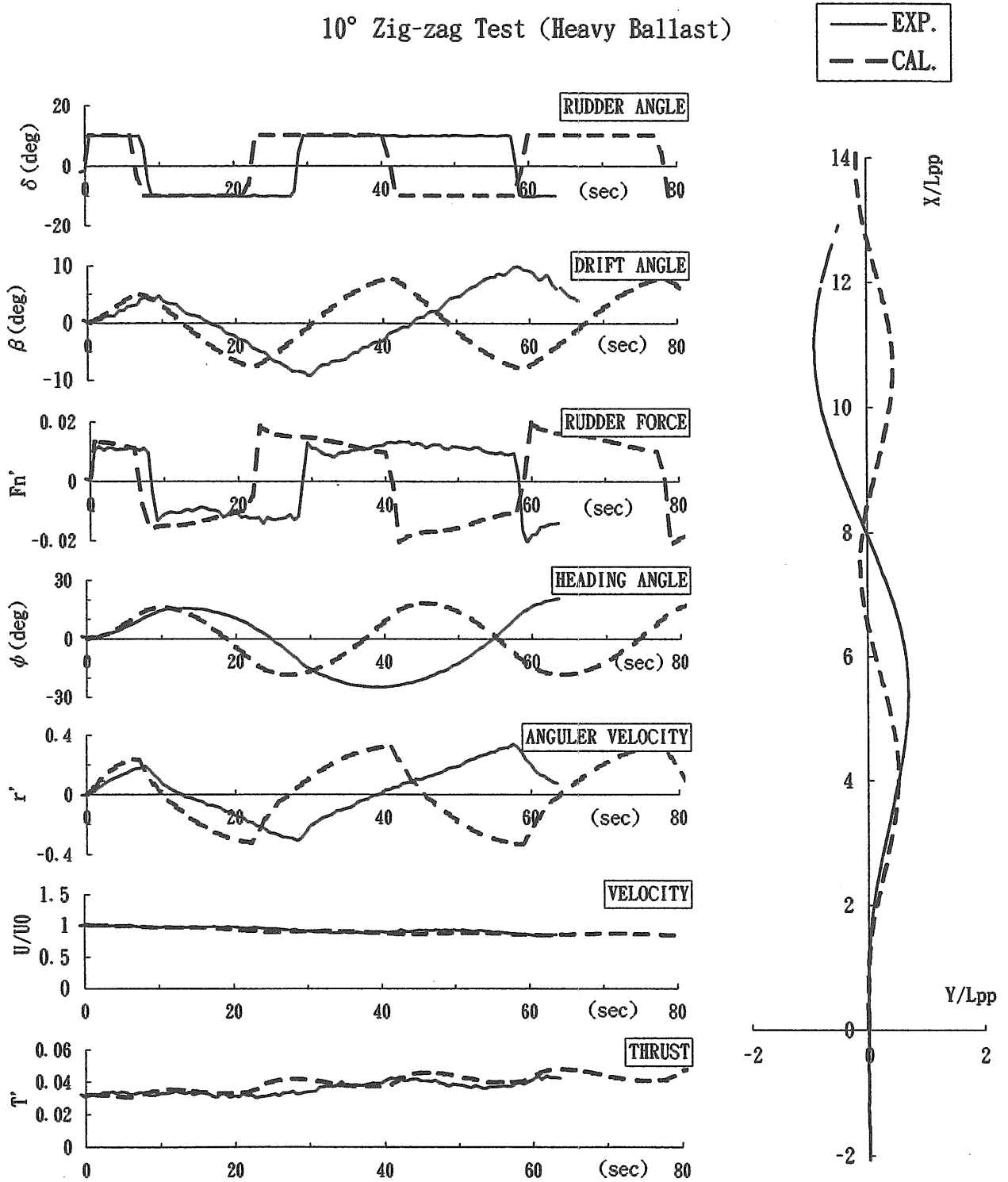


Fig.5.9 Comparison between estimation values and experimental results in zig-zag manoeuvre (Ship A in ballast condition)