

日本船舶振興会昭和51年度補助事業  
“巨大タンカーの研究”

研究資料No.265

## 第151研究部会

# 大型化に対応する船舶操縦 システムの調査研究

## 報告書

昭和52年3月

社団法人  
日本造船研究協会

近年急速に進んだ船舶の大型化、また史上例を見ない海上交通の輻輳は船と操船者を一体とするマン・マシン系制御問題の立場から操船問題を分析する必要をもたらした。このような分析の結果、新しい計装を含む船舶操縦システムの開発、設計、安全運航の指針決定なども可能となるであろう。3カ年研究の最終年度にあたる本年度は実時間作動の操船シミュレータを完成させ、これを使用して多数の模擬操船実験を行い、所期の成果を収めた。

## はしがき

本報告書は、日本船舶振興会の昭和51年度補助事業「巨大タンカーの研究」の一部として、日本造船研究協会が第151研究部会においてとりまとめたものである。

### 委員名簿（敬称略、順不同）

部会長	野本謙作（大阪大学）	
幹事	岩柳順二（船舶技術研究所）	小川陽弘（船舶技術研究所）
	鳥野慶一（神戸商船大学）	小瀬邦治（広島大学）
	小林弘明（東京商船大学）	小山健夫（東京大学）
	高木又男（日立造船）	小黒英男（船舶技術研究所）
	森正彦（石川島播磨重工業）	原潔（神戸商船大学）
	長谷川和彦（広島大学）	
委員	伊藤憲治（川崎重工業）	今田東行（川崎汽船）
	日高正孝（日本海事協会）	岡本洋（川崎重工業）
	音成卓哉（日本钢管）	小保方準（住友重機械工業）
	片山勇（出光タンカー）	坂本昭弘（佐世保重工業）
	谷初藏（東京商船大学）	篠原喜代美（函館ドック）
	日尾勇次（太平洋海運）	平野雅祥（三井造船）
	広田清一（東京タンカー）	藤井齊（三菱重工業）
	森川卓（日本船主協会）	渡辺久記（三井造船）
	前島孝雄（北辰電機製作所）	広川洋一（東京計器）

### 委員会等開催

第6回委員会	昭和51年 4月27日（於日本造船振興財団）
第10回幹事会	昭和51年 6月18日（於阪大工学部）
第11回幹事会	昭和51年 8月20日（於阪大工学部）
第7回委員会	昭和51年 8月20日（於阪大工学部）
第8回委員会	昭和51年 12月15日（於日本造船振興財団）
第9回委員会	昭和52年 2月 9日（於日本造船振興財団）

# 大型化に対する船舶操縦システムの調査研究

## 目 次

1. 供試数学モデル .....	1
1.1 供試船の想定 .....	1
1.2 数学モデルの形式 .....	1
1.3 特性値の設定 .....	4
2. 保針・変針操舵の模擬試験 .....	6
2.1 航路指定のない単純保針 .....	6
2.1.1 3年間の実験経過 .....	6
2.1.2 昭和51年度実験 .....	6
2.1.3 保針の難易と船の特性の関係 .....	10
2.1.4 角速度計の効果 .....	12
2.1.5 操舵速度の影響 .....	13
2.2 保針操舵の習熟効果 .....	13
2.2.1 概要 .....	13
2.2.2 実験 .....	14
2.2.3 解析 .....	14
2.3 保針に与える外乱の影響 .....	20
2.3.1 供試船、外乱および操舵員 .....	20
2.3.2 実験結果と考察 .....	21
2.4 人が制御し得る針路不安定の限界 .....	24
2.4.1 系の安定判別 .....	24
2.4.2 不安定船の制御における特徴 .....	24
2.4.3 シミュレータ実験結果の整理 .....	25
2.4.4 人の伝達関数 .....	29
2.4.5 人の操舵問題と位相不足(負の余裕)の関係 .....	29
2.4.6 人の保針限界に関する現在の結論 .....	30
2.5 航路指定のある保針変針 .....	32
2.5.1 設定状況 .....	32
2.5.2 保針操舵の分析と評価 .....	32
2.5.3 変針操舵の分析と評価 .....	33
3. 避航操船の模擬実験 .....	40
3.1 実験方法と状況設定 .....	40
3.1.1 航路指定のない海面での避航操船 .....	40
3.1.2 航路指定のある海面での避航操船 .....	40
3.1.3 操船者 .....	41
3.2 避航操船の分析と評価(1) .....	47
3.2.1 避航操船のモデル化 .....	47

3.2.2	出合状況と避航動作およびその効果	47
3.2.3	避航動作に与えるL/Vの影響	49
3.2.4	避航開始時機と避航動作の信頼性	50
3.2.5	航路に制約のある時の避航操船	52
3.3	避航操船の分析と評価(2)	60
3.3.1	衝突危険量の設定	60
3.3.2	実験解析	60
3.3.3	避航動作による衝突危険量の変化	61
3.3.4	文献[1]の実験概要	62
4.	増減速操船の模擬実験	71
4.1	状況設定	71
4.2	増減速操船の分析と評価	71
5.	二、三の新種計装の評価実験	76
5.1	供試船モデル	76
5.2	操舵・操船実験の種類	76
5.3	操船者および操舵員	78
5.4	実験の記録	78
5.5	YRW, CWおよびAPの設定係数	78
5.6	実験および解析結果	79
5.7	新計装の評価	80
6.	操船シミュレータ・スタディにおける外乱の設定	93
6.1	潮流による平行移動(場の移動)	93
6.2	定常風による回頭	93
6.3	不規則外乱	96
6.3.1	不規則外乱の参考資料	96
6.3.2	不規則外乱の設定と発生	100
7.	レーダシミュレータ	102
7.1	操船シミュレータスタディにおけるレーダシミュレータの意義	102
7.2	SR151 操船シミュレータに付設したレーダシミュレータの概要	102
8.	増減速時の操縦運動数学モデル	107
8.1	船速の応答方程式	107
8.1.1	プロペラ正転の場合	107
8.1.2	プロペラ逆転の場合	108
8.2	増減速を伴なう旋回の応答方程式	110
8.2.1	プロペラ正転の場合	110
8.2.2	プロペラ逆転の場合	110
8.3	アナログ演算回路	111

8. 3. 1 船速の応答方程式	111
8. 3. 2 旋回の応答方程式	112
8. 4 加減速モデルに関する今後の問題点	123
8. 4. 1 基本方程式	123
8. 4. 2 簡略化の一例	123
9. 現在の結論と今後の問題点	125
10. 引用文献	127

# 1. 供試船数学モデル

## 1.1 供試船の想定

操船運動のシミュレータ・スタディを行なうに当って想定した船舶の特性等は次のとおりである。

表 1.1.1 供試船一覧

想定船種	船速(ノット)	船長(m)	L/V(sec)	針路安定度(不安定ループ幅で示す)	5°	10°	25°
小型内航船	9.7	25	5	-	5°	10°	25°
一般内航船	9.7	50	10	-	5°	10°	25°
外航貨物船	11.7	150	25	安定	5°	10°	25°
大型タンカー	11.7	300	50	-	5°	10°	25°

合計 13 隻 判別記号を次のとおり定める。

D - - ( L/V の数字 ) - ( 不安定ループ幅の数字 )  
( 51 年度モデル群記号 ) ただし安定モデルでは記号 S

例え D - 5 - 5 : L/V=5 , ループ幅 5° の針路不安定小型内航船

D - 50 - 10 : L/V=50 , ループ幅 10° の著しい針路不安定の大型タンカー

D - 25 - S : L/V=25 の針路安定の外航貨物船

これらのモデルを想定するに当って考慮したこととは、

- (1) 水道、内海等港湾域への接近部を主体に考え、小型船は通常航海速力、大型船は港内全速を想定した。速力の選定値よりの偏差の影響は時間尺度 L/V に従って修正することができる。
- (2) 操船により困難のある針路不安定船に調査の重点をおいた。従来の資料によれば不安定ループ幅は大型タンカーで最大 8° 程度、小型内航船で 10° 以内、時に 25° を超える例がある。そして 8° の大型タンカーは運航に問題なしと判定されており、一方小型船では 5° のループ幅で操船に稍困難があり、25° を超えた例では殆ど運航不可能であった。これらの実績数字をもとに上記の不安定度を選定した。
- (3) 同じ不安定の程度であっても時間尺度 L/V の大小によって操船の難易には大差がある。人間の神経系統の時間的応答性は略一定であるのに対し L/V の小さい船は運動のテンポが相対的に早く、それだけ人間の神経系統に負担を与えるものと解されている。この点を考慮して小型船から VLCC に至る広い範囲に L/V の値を設定した。

## 1.2 数学モデルの形式 ( 記号表図 1.2.1 、特性値一覧表 1.3.1 )

50 年度までの研究を基に改良を加えた現用の数学モデル(船の運動を表わす広谷方程式)は次のとおりである。

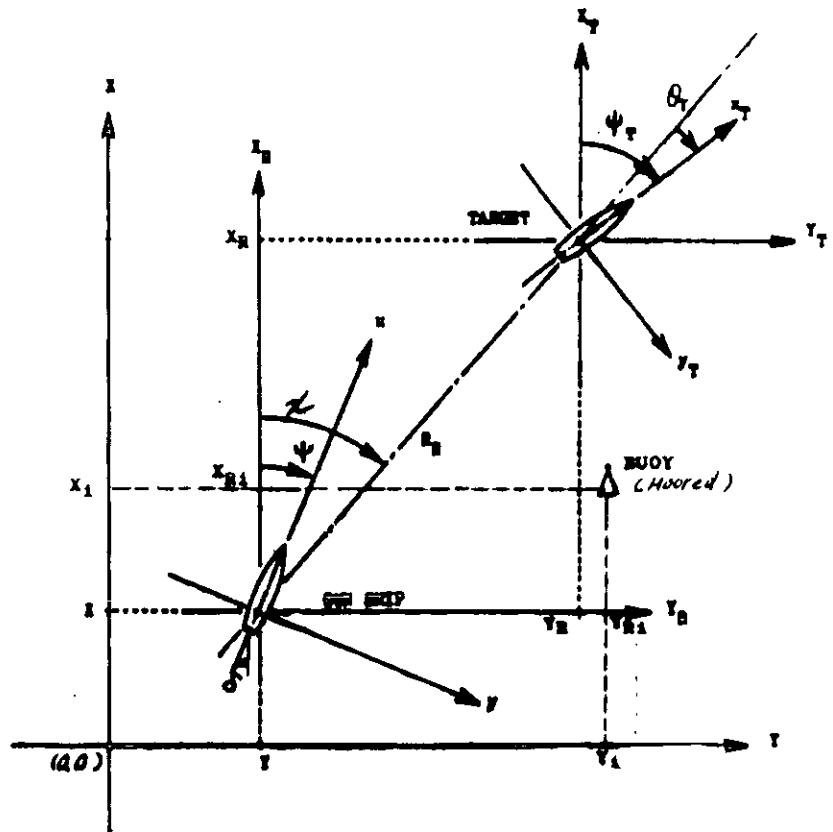
$$T_1' T_2' \left(\frac{L}{V}\right)^2 \ddot{\psi} + (T_1' + T_2') \left(\frac{L}{V}\right) \dot{\psi} + \dot{\psi} + \alpha' \left(\frac{L}{V}\right)^2 \dot{\psi}^3 = K' g(s) \frac{V}{L} \{ (\delta + \delta_N) + T_3' \left(\frac{L}{V}\right) \dot{\delta} \} \quad (1.2.1)$$

$$g(s) = \frac{1 + k s^{1.5}}{1 + k s_0^{1.5}}, \quad s = 1 - (1 - w) \frac{V}{n_p}, \quad s_0 = 1 - (1 - w) \frac{V_0}{n_0 p} \quad (1.2.2)$$

$$T_E \dot{\delta} + \delta = \dot{\delta}^* \quad \text{and} \quad |\dot{\delta}| \leq |\dot{\delta}|_{\max} \quad (1.2.3)$$

$$\dot{V} + a_{vv} V^2 + a_{rr} \dot{\phi}^2 + a_{\delta\delta} V^2 \dot{\delta}^2 = a_{nn} n^2 + a_{nv} n V \quad (1.2.4)$$

$$T_M \dot{n} + n = n^* \quad (1.2.5)$$



	X-Y AXES ( $x_T, y_T$ )	$x_B-y_B$ AXES ( $x_B, y_B$ )
TARGET	$(x_T + x), (y_T + y)$	$(x_T, y_T)$
BUOY	$(x_B, y_B)$	$((x_B - x), (y_B - y))$

図 1.2.1 座 標 系 と 記 号

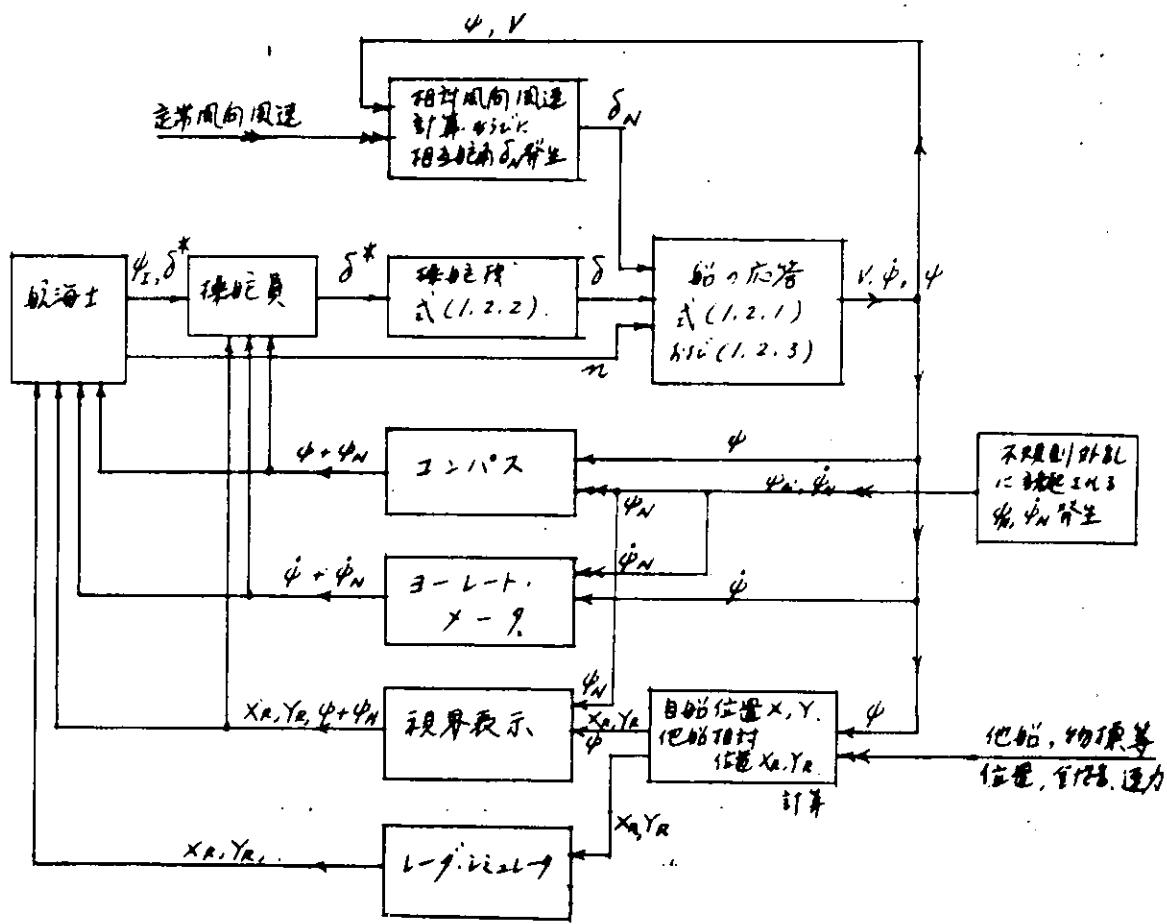


図 1.2.2 操船シミュレータにおける信号の伝達経路

このうち 操舵機, 船の応答, 自船他船位置計算の3ブロックはアナログ計算機  
 $\delta_N$  発生,  $\phi_N$  発生は外付回路  
 レーダ・シミュレータはインターフェイス回路を含む  
 $\delta, n, V$ , 風向, 風速の各指示器は表記を省略する。

(1.2.1)は速力変化に伴なう針路制御の特性常数( $K$ ,  $T_1$ , etc)の変化を考え、さらに速力変化に伴なうプロペラスリップの変化が誘起する針路制御特性の変化をも考慮に入れた、舵角対回頭運動の応答方程式である。その詳細は本報告8章に述べる。又、式中の $\phi_N$ は定常風の影響を相当舵角の形で近似的に表現したもので、これについては6章に述べる。

風向風速の不規則変動は波浪による不規則変動と合わせて、外乱の誘起する回頭運動 $\dot{\phi}_N$ の形で表現する。 $\dot{\phi}_N$ の実態についての資料は乏しいが、一応実情に近いと思われるスペクトルをもつ $\dot{\phi}_N$ を作り出し、(1.2.1)で求められたところの、操舵の誘起する中に重ね合わせて計器や人間に与える視覚表示のもととなる回頭角信号とする。又、今述べたところをブロック線図に表示すると図1.2.2となる。又上述の外乱角速度 $\dot{\phi}_N$ の推定と発生回路については6章に述べる。

(1.2.3)は一般の電動油圧操舵機の特性を表現するもので時定数 $T_E = 2.5 \text{ sec}$ 一定、 $\dot{\delta}_{\max} = 3.0^\circ/\text{sec}$ である。これらの値は大型船用操舵機の実績値であるが、小型船ではこれよりも早い操舵速度が広く使われているので、一部上記よりも小さい $T_E$ でも実験している。その結果は2.1に触れる。

(1.2.4)は操船運動に伴なう速力変化、ならびに主機回転数制御に応答する速力変化を併せて表現する。その詳細は(1.2.1)と会わせて8章に論ずる。

(1.2.5)は機関回転数制御のおくれを表現する。

### 1.3 特性値の設定

- (1) 回頭運動応答モデルの基礎としたものは200,000 DWT VLCCで約5°の不安定ループをもつものである。この他文献<sup>1), 2)</sup>に挙げられた実績を考慮しD群の母型D 50-5の $K'$ ,  $T_1'$ ,  $T_2'$ ,  $T_3'$ ,  $\alpha'$ をまず決定した。
- (2) 次にループ幅が変わっても $K'/T_1' = 0.50$ は一定に保たれるとし、又舵角15°における定常旋回曲率 $L/R = 0.43$ も一定と仮定した。この両者の仮定は、1), 2), 3)等の実績から略正しいと考えられる。この前提のもとに母型の不安定ループ幅を変えた場合の $K'$ ,  $T_1'$ ,  $\alpha'$ を求めることができる。
- (3) また1), 2)等の結果によると実用船型の範囲では $T_2'$ と $T_3'$ は余り変わらず、又船の特性への影響も比較的少ない。そこで $T_2' = 0.35$ ,  $T_3' = 0.60$ を一律に設定した。この値は実績の平均に近い。
- (4) 速力応答関係の特性値については8章に論ずる模型実験の結果、船体見掛け質量の計算量、プロペラ単独特性の推定値などから8章に述べる考え方で誘導した。
- (5)  $L/V$ はすべての時間スケールにかかって来る。

問題点としてはD群の母型がVLCCであるので貨物船や内航小型船に対してどの程度現実的な値を与えているかであろう。しかし $L/V$ を修正してやると船の大きさの影響はまず完全に取り入れられるのであとは針路安定の程度だけ抑えるとまず大まかなところ操縦特性はよく表わされていると考えてよからう。又、速力応答のモデルについてはプロペラ単独特性と船体見掛け質量の形で主機出力と排水量の関係が入ってるのでこれも大型から小型まで、一応現実に近い値を得ているものと期待される。

しかし特性値の設定の詳細についてはなお今後の研究にまつべき点も多いと考える。

このようにして設定した特性値を表1.3.1に示す。

表 1.3.1 供試船数学モデル特性値

判別番号 <i>i<sub>j</sub></i>	D5-5	D5-10	D5-25	D10-5	D10-10	D10-25	D25-5	D25-8	D25-10	D25-25	D50-5	D50-10	D50-25
L m	2.5	2.5	2.5	5.0	5.0	5.0	1.50	1.50	1.50	1.50	3.00	3.00	3.00
V k <sub>t</sub> k <sub>t</sub>	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
L/V s	5.00	5.00	5.00	1.00	1.00	1.00	2.50	2.50	2.50	2.50	5.00	5.00	5.00
ループ全幅	5°	10°	25°	5°	10°	25°	—	5°	10°	25°	5°	10°	25°
K'	-2.24	-1.30	-0.60	-2.24	-1.30	-0.60	1.60	-2.24	-1.30	-0.60	-2.24	-1.30	-0.60
T <sub>1</sub> '	-4.48	-2.60	-1.20	-4.48	-2.60	-1.20	3.20	-4.48	-2.60	-1.20	-4.48	-2.60	-1.20
T <sub>2</sub> '	0.35	.35	.35	.35	.35	.35	.35	.35	.35	.35	.35	.35	.35
T <sub>3</sub> '	0.60	.60	.60	.60	.60	.60	.60	.60	.60	.60	.60	.60	.60
<i>a</i> (deg <sup>2</sup> )	-0.00470	-0.00352	-0.00265	-0.00470	-0.00352	-0.00265	-0.0009	-0.00470	-0.00352	-0.00265	-0.00470	-0.00352	-0.00265
TE (sec)											2.5 (一部 1.2 5 )		
$\dot{\theta}_{max}$											3.0 (一部 6.0 )		
a <sub>w</sub> (m <sup>-1</sup> )	1.3×10 <sup>-3</sup>			6.4×10 <sup>-4</sup>			2.9×10 <sup>-4</sup>				1.4×10 <sup>-4</sup>		
a <sub>rr</sub> (m)	18			37			110.				207.		
a <sub>dd</sub> (m <sup>-1</sup> )	5.9×10 <sup>-3</sup>			2.6×10 <sup>-3</sup>			6.9×10 <sup>-4</sup>				1.7×10 <sup>-4</sup>		
a <sub>nv</sub>	-2.6×10 <sup>-3</sup>			-2.1×10 <sup>-3</sup>			-9.9×10 <sup>-4</sup>				-2.7×10 <sup>-4</sup>		
a <sub>nn</sub> (m)	3.8×10 <sup>-3</sup>			6.8×10 <sup>-3</sup>			8.6×10 <sup>-4</sup>				4.8×10 <sup>-4</sup>		
T <sub>M</sub> (sec)	5			5.			10.				10.		
k	3.2			3.2			3.2				3.2		
g(s) = $\frac{1 + k s^{1.5}}{1 + k s_0^{1.5}}$													
s : 運動中のプロペラスリップ比													
s <sub>0</sub> : 直進中													

左より、式(1.2.1), (1.2.2)参照

## 2. 保針・変針操舵の模擬実験

### 2.1 航路指定のない単純保針

#### 2.1.1 3年間の実験経過

初年度は、予備実験の意味で、 $L/V = 4.0$ 、不安定ループ全幅 $4^\circ$ 、船速一定、外乱なしという状況で実験を行ない、主に、Yaw Rate Wheel, Course Wheelとの相違、比較を行なった。

単純保針変針に関するかぎり、Visual Displayなしでも、夜間、霧中時を想定すれば、操船のシミュレーションが可能であることもわかった。（昭和49年度報告書）

昭和50年度は、ほぼ完成した設備を使って、実験を行なった。数学モデルには新たに、前後方向の運動方程式を導入し、 $L/V = 2.0$ 、ループ全幅 $4^\circ$ の船について、外乱なしでの保針シミュレーションを行なった。この実験では、主に、実験法、解析法の確立を目指し、操舵員を含んだ系の分析法を示した。その結果、実験時間は20～30分は必要であること、船によっては、顕著な自励発振が現れること等をつかんだ。

昭和51年度では、過去2年の経験をもとに、さらに、外乱を含めた実験を $L/V$ 、ループ幅、角速度計の有無、操舵速度などを系統的に変化させて模擬操船を行なった。操舵員は船舶工学教官で職業操舵員ではない。この点については2.2節を参照されたい。

#### 2.1.2 昭和51年度実験

行なった実験の種類、結果（一部）を表2.1.1に示す。また、保針データの記録例を図2.1.1に、実際舵角 $\delta$ （ $\delta^*$ ではない）、ヨーイング角 $\phi$ のパワースペクトラムを図2.1.2～図2.1.11に示す。

表2.1.1 航路指定のない単純保針実験一覧

実験番号	供試船判別記号	$\sqrt{\delta^2_N}$ (deg)	$\delta$ の中心周波数 (rad/sec)	$\phi$ の中心周波数 (rad/sec)	$\sqrt{\delta^2}$ (deg)	$\sqrt{\phi^2}$ (deg)
1	D5-5	0.623	0.17	0.37	2.54	1.97
2	D5-5'	0.630	0.33	—	2.16	1.26
3	D5-5 YR	0.630	0.21	0.17	1.06	1.16
4	D5-5 再	0.660	0.35	—	1.97	0.985
5	D5-10	0.314	0.35	0.07	3.41	2.99
6	D5-25	0.308	0.087	0.087	13.1	17.1
7	D5-25 YR	0.306	0.21	—	1.33	0.866
8	D10-5	0.683	0.20	—	1.86	0.837
9	D10-25	0.436	0.052	0.052	2.51	1.82
10	D25-5	0.685	0.14	—	1.60	0.371

（備考）判別記号右肩に“'”のついているものは、 $T_E = 1.25 \text{ sec}$ 、 $\dot{\delta}_{\max} = 6^\circ/\text{sec}$ 、同じく“YR”のついているものは、実験に際し、角速度計を使用したこと示す。また“再”とあるのは、再実験である。判別については1章参照。

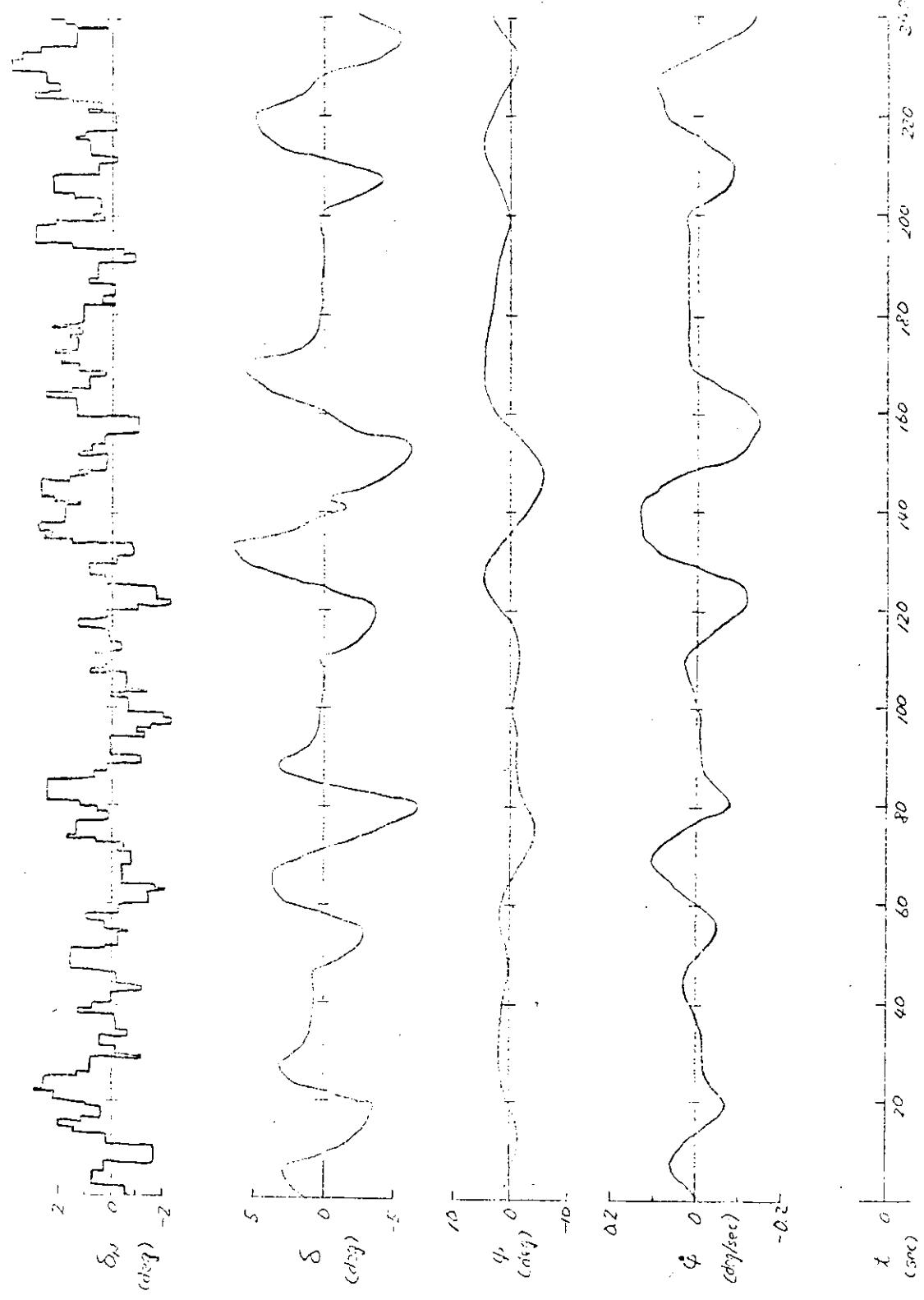


図 2.1.1 保針データの記録例 (D5-5)

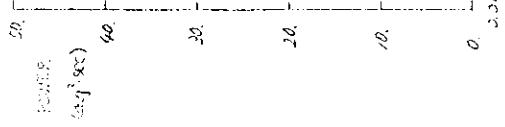


図 2.1.2 バワ - タイプトヨム (D5 - 5)

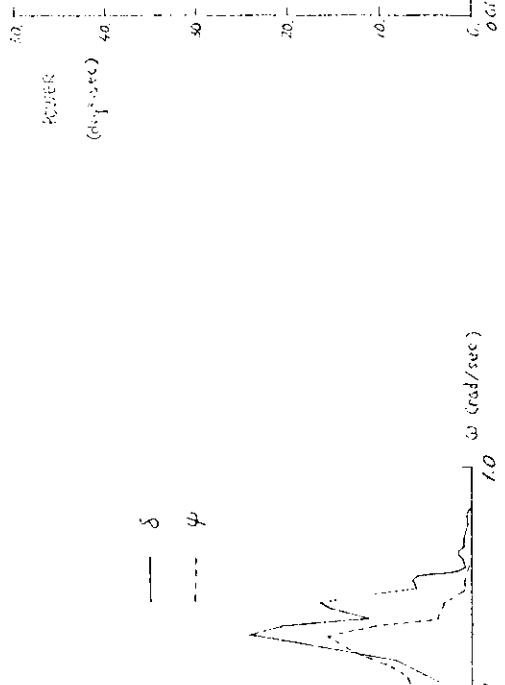


図 2.1.3 バワ - タイプトヨム (D5 - 5')

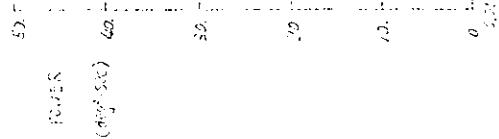


図 2.1.4 バワ - タイプトヨム (D5 - 5' R)

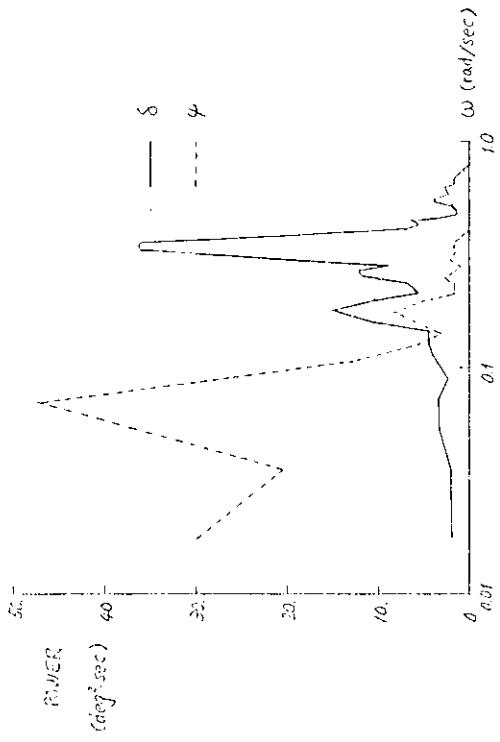


图 2.1.6  $\Delta\omega^2 - \omega$  曲线 (D5-10)

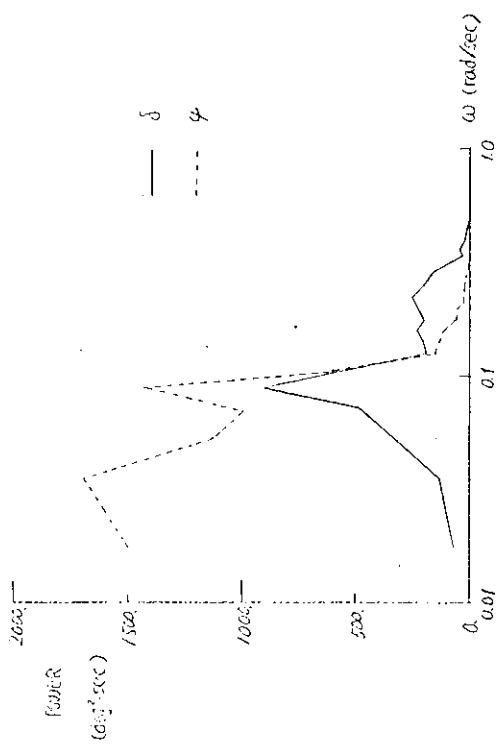


图 2.1.7  $\Delta\omega^2 - \omega$  曲线 (D5-25)

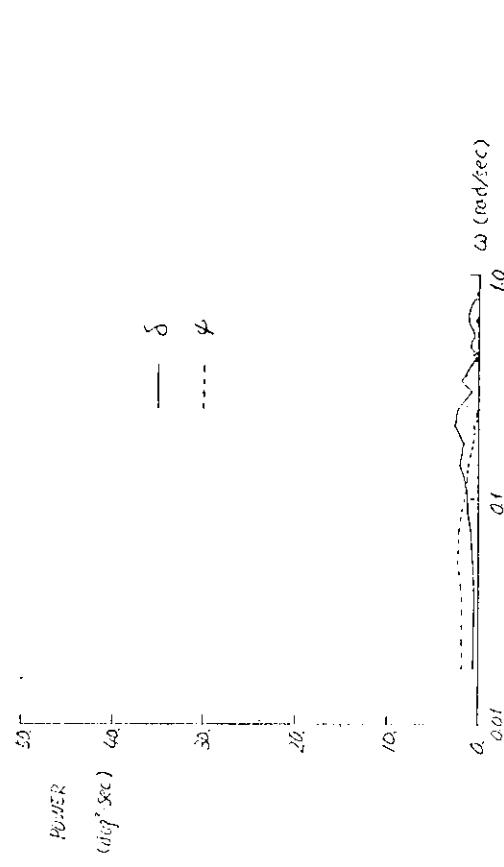
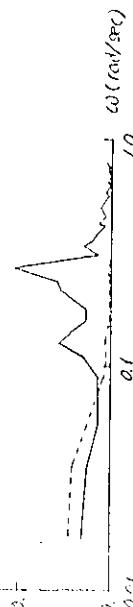


图 2.1.8  $\Delta\omega^2 - \omega$  曲线 (D10-5)

图 2.1.9  $\Delta\omega^2 - \omega$  曲线 (D10-25)



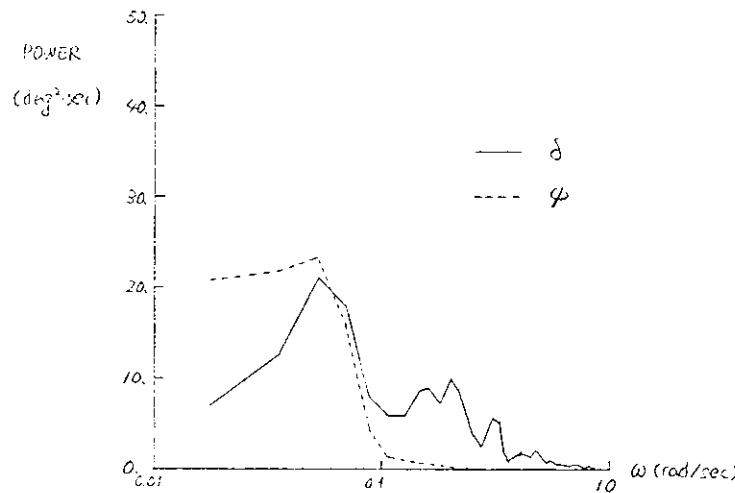


図 2.1.10 パワースペクトラム (D10-25)

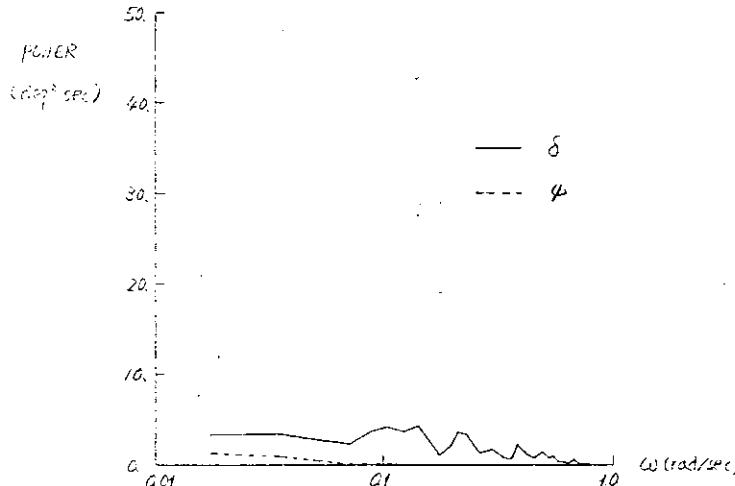


図 2.1.11 パワースペクトラム (D25-5)

### 2.1.3 保針の難易と船の特性の関係

#### (1) $L/V$ と不安定ループ幅の影響

表 2.1.1 で求めた  $\delta$  と  $\phi$  の各自乗平均値を図 2.1.12 にそれぞれ  $L/V$  ベースとループ全幅に対してプロットする。これを見ると明らかのように、ループ幅は大きいほど、また  $L/V$  は小さいほど各自乗平均値は増加し、操舵が困難となっている。特に  $L/V = 5$  の小型船では、ループ全幅が  $10^\circ$  をこえるときわ立って保針が困難になっている。

なお、本節の保針実験のあとに、今度は外乱の効果ならびに習熟の過程を調べる目的で工学部学生 2 名が繰返し同じ供試船を、外乱を変えて保針を行なった。その結果は 2.2, 2.3 節に示すが、それらを図 2.1.12 と同じ形式に表わしてみると大変よく似た結果になっている。従ってここに示す結果は操舵員の個人差は余り関係しない、一般的な傾向と考えてよいであろう。

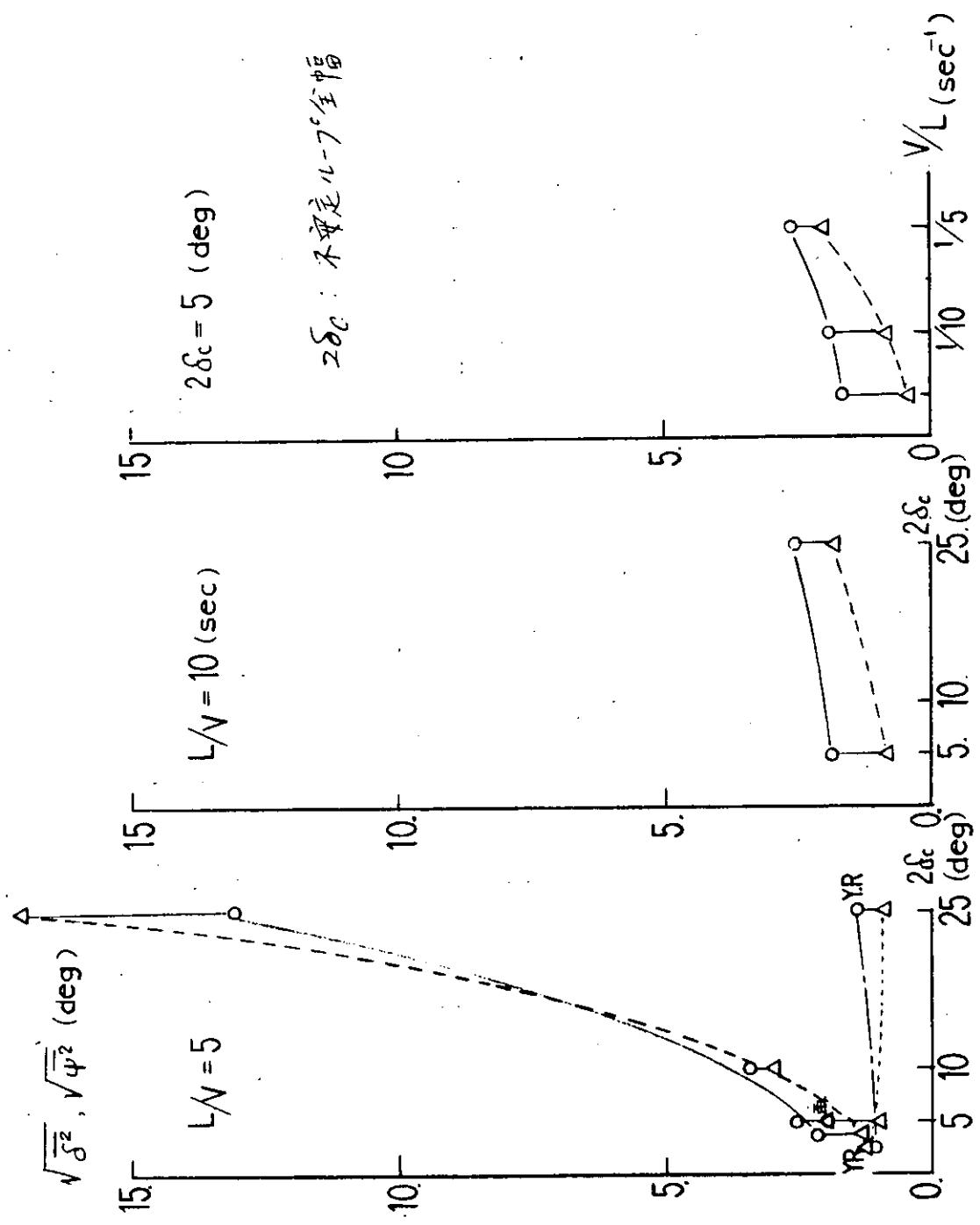


図 2.1.12 舵角およびヨーイング角の自乗平均値(保針の難易を示す)

## (2) 保針の難易と自励発振

一方、保針の難易はスペクトラム形状にもあらわれ、特に、自励発振として知られている持続振動の消長は保針の難易と関係が深いようである。

図 2.1.2 が典型的な自励発振であるが、中心周波数 0.17 ( 周期約 3.7 秒 ) で、  $\delta$  、  $\psi$  とともにピークを持っている。この  $\psi$  は明らかに操舵員がとった舵角によるものであり、船は大きく蛇航する。他には、図 2.1.6 、図 2.1.7 、図 2.1.10 にもその傾向が見られる。以上は、いずれも、  $\delta$  、  $\psi$  の自乗平均値が約  $2^\circ$  をこえており、保針が困難であるといえる。

ところが、保針が若干、容易になると、図 2.1.3 、図 2.1.5 、図 2.1.9 に見られるように、  $\delta$  のみにスペクトラムのピークが顕著にあらわれ、  $\psi$  にはあらわれなくなる。これは、人間がリズミカルなバンバン操舵を行なうことによって、船を直進させることができる状況である。しかしながら、これも長時間続いたり、外乱のレベルが大きくなると、制御しきれなくなるばかりでなく、操舵抵抗、操舵員の負担ともに増え、好ましい保針とはいえない。

さらに、保針が容易になると、図 2.1.4 、図 2.1.8 、図 2.1.11 ( 特に後の 2 例 ) でわかるように、  $\delta$  、  $\psi$  ともに目立ったピークは消え、ホワイトノイズ的になってくる。もはや、むだな操舵も減り、保針としては望ましい姿といえる。

### 2.1.4 角速度計の効果

#### (1) 操縦システムにおける角速度計の役割

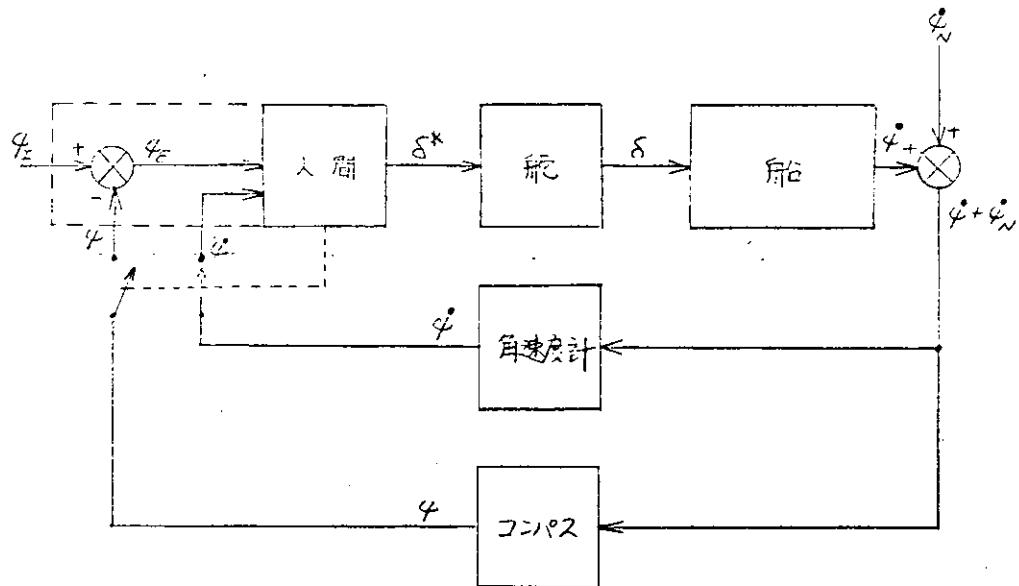


図 2.1.13 保針操船モデル

図 2.1.13 に簡単な保針操船のモデルを示す。角速度計がない場合には、操舵員はコンパスの出力をある時間間隔でサンプリングしながら  $\dot{\phi}_e$  を 0 にするような制御を行なう。ただし、単なる比例制御ではなく、人間の頭脳の中で何らかの擬似的な微分制御も行なっていることが多いと考えられる。

しかし、角速度計も見ながら制御する場合には、2変数制御系となり、 $\dot{\phi}$  と  $\dot{\phi}_e$  を交互にサンプルしながら、 $\dot{\phi}_e$  を 0 にする、いわゆる P D 制御により近くなる。したがって、オートパイロットで言えば  $c_2$  係数を増加させたり、より適格に求めたことに相当する。その結果、針路安定性の向上には役立つのであるが、あまり増やしすぎると、 $\dot{\phi}$  に偏差（低周波数変動）をもたらす危険がある。また、2変数制御であるため、人間の負担は増え、見おとし、錯誤等の制御エラーもおこしやすい。

このように、角速度計の出力は人間に入力されるため、その影響を一般的に論ずるのは難しい。操船者が、十分に角速度計に留意して操船するか、あるいは、十分、角速度に慣れていれば、その効果は大きく違う。さらには、外乱の種類やレベル、船の特性（応答の速さ）、コンパスの種類や角速度計の装備位置にも大いに影響される。

今回の実験では、操船者は十分に角速度計に慣れ、極力、その情報を取得するようにして行なった。

## (2) 自乗平均値、スペクトラムに見る角速度計の影響

図 2.1.4、図 2.1.8、図 2.1.12 で見るかぎり、各自乗平均値は、特に D 5 - 2 5 で激減し、スペクトラムも、角速度計なしでおこっていた自励発振は消失し、その効果は大きい。ただし、D 5 - 5 では微分制御をきかしすぎたためか、高周波の舵角成分と、低周波の回頭角成分が目立つ。

この 2 例に関するかぎり、応答の速い不安定船で、角速度計の効果は大きい。しかしながら、L/V によって、かなりそのようすは変化するであろう。

なおこの問題は 2.4 において再び論ずる。

## 2.1.5 操舵速度の影響

今回は、1 ケースしか実験を行なっていないが、図 2.1.3、図 2.1.12 を見ると操舵速度を 2 倍にすると保針はかなり楽になっている。これは、操舵速度の保針成績に与える影響が、特に応答の速い小型船で無視できないことを示しており、操舵機の選定の際には留意する必要がある。これについても 2.4 を参照されたい。

## 2.2 保針操舵の習熟効果

### 2.2.1 概 要

2.1 の保針実験において D 5 - 5 再は、D 5 - 5 と全く同じ船を一連の実験の最後に再実験したものである。その結果によると、同一船を同一操舵員が保針したにも拘らず、再実験の方が格段に保針状態がよい。これは操舵員に何らかの「慣れ」が作用した可能性が強い。この例からも明らかのように、この種の操船シミュレーション実験において、操舵員の習熟過程を調査しておくことは、結果の分析に重要であり、またシミュレータで操船訓練をする際にも必要であろう。

今回は、この習熟過程を単純保針操作について調査した一例を報告する。保針操船の難易を評価する量としては、操作量として  $\sqrt{\delta^*}^2$  を、保針成績として、 $\sqrt{\dot{\phi}}^2$ 、 $\sqrt{\frac{\dot{\phi}}{\phi}}^2$  を考える。習熟するに伴って、舵角、ヨーイングとも指數関数的に減少して、ある一定値に収束するようである。すなわち、

$$J_n = a e^{-\frac{n}{T_n}} + c$$

ただし、  $J_n$  : 評価量  $\sqrt{\delta^*}^2$ 、 $\sqrt{\dot{\phi}}^2$  又は  $\sqrt{\frac{\dot{\phi}}{\phi}}^2$   
 $n$  : 試行回数あるいは試行時間

(  $a + c$  ) : 初期保針成績（評価量）

$c$  : 終局的保針成績(評価量)  
 $T_n$  : 習熟の程度を示す時定数  
( 2.2.1 )

### 2.2.2 実験

操舵員は操船経験の全くない工学部学生 A, B で、供試船は、D 50-10 ( $L/V = 5.0$ , ループ幅  $10^\circ$ ) および D 5-5 ( $L/V = 5$ , ループ幅  $5^\circ$ ) であり、表 2.2.1 に示す回頭角速度外乱を与えた。外乱の詳細については 6 章に述べる。

1 回の実験は 30 分間とし、実験回数は各操舵員につき 15~25 回程度行なった。経過日数は 10 ~ 20 日にわたっている。実験は D 50-10、外乱 N 50-3、D 50-10、外乱 N 50-1、そして D 5-5、外乱 N 5-1 の順に行なった。

### 2.2.3 解析

各実験の評価量となる  $\delta^*$ ,  $\delta$ ,  $\phi$ ,  $\dot{\phi}$  の RMS を図 2.2.1 に示すアナログ計算で求める。解析の精度は 2 ~ 5 % 程度の誤差である。このプログラムでは、入力  $x$  の分散  $\sigma_x$  を次式で求めることになる。

$$\begin{aligned}
 \sigma_x &= \frac{\int_0^T (x - \bar{x})^2 dt}{T} \\
 &= \frac{\int_0^T (x + \epsilon)^2 dt}{T} - \frac{\epsilon^2}{T} \\
 &= \frac{y_1}{c_1^2 c_2 T} - \left( \frac{y_2}{c_1 c_3 T} \right)^2
 \end{aligned}$$

ただし、 $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$  : 常数  
 $\epsilon$  :  $\bar{x}$  および演算増幅器等のドリフト量  
 $T$  : 演算時間

( 2.2.2 )

図 2.2.2、図 2.2.3 は最初に実験を行なった D 50-10, N 50-3 の場合、操舵員 A, B, について  $\sqrt{\delta^{*2}}$ ,  $\sqrt{\delta^2}$ ,  $\sqrt{\phi^2}$ ,  $\sqrt{\dot{\phi}^2}$  を試行回数に対してプロットしたもの。また図 2.2.4、図 2.2.5 は日時の経過に対し同様の評価量をプロットした図である。これらの結果によると、習熟の過程は、日時の経過よりむしろ、試行回数ないしは試行時間に対し上達していくようである。

続いて、同じ供試船で、外乱を変えて実験を繰返した時の習熟曲線が、図 2.2.6、図 2.2.7 である。

図 2.2.8、図 2.2.9 は D 50-10 の一連の実験の後に行なった供試船 D 5-5 の場合の操舵員 A, B について各評価量をプロットした図である。これらの結果に ( 2.2.1 ) 式をあてはめて、常数  $a$ ,  $c$ ,  $T_n$  を求めると表 2.2.2 のようになる。

以上の結果から、まず先に実験をした D 50-10, N 50-3 の場合、試行開始時の保針の上手さ( $a$ )の値は、操舵員 A, B により個人差が存在するが、終局成績( $c$ )および、習熟の早さ ( $T_n$ ) は両者ほぼ一致するという結果が得られた。続いて供試船をそのままにし、外乱を約 6 倍に増加して行なった実験では、15 回も実験を繰返したにもかかわらず、A, B 両操舵員ともその成績にほとんど進歩がない。これは両操舵員がこの船の保針制御方法を十分マスターしていることを示している。保針成績については  $\phi$  および  $\dot{\phi}_N$  の自乗平均値を外乱 N 50-3 と N 50-1 とで比較すると分かるように、外乱の増加分だけ成績が悪くなっている。

最後に実験を行なった供試船 D 5-5 の結果によると、他の船で習得した保針能力は新しい船では必ず

しも十分ではない。従って新しい船に対しては、また新しい習熟過程が始まるようである。しかし操舵員 A, B共に D 50-10 の習熟経験の結果かと思われるが、 $T_n$  の値がかなり小さくなっている。この  $T_n$  の値が小さいことはしかし、あるいは、D 5-5 の  $L/V$  が D 50-10 の  $\frac{1}{10}$  と小さく、運動が小刻みであることによるのかも知れない。

表 2.2.1 外乱の特性

供 試 船	外 亂	$2\pi T_L$ ( s )	$2\pi T_H$ ( s )	$\sqrt{\dot{\phi}_N^2}$ ( deg/s )
D 50-10	N 50-3	14.	14.	0.008
	N 50-1	20.	10.	0.050
D 5-5	N 5-1	10.	5.	0.4

表 2.2.2 習熟過程の評価

供 試 船 (外乱)	操舵員	$\sqrt{\dot{\delta}^2}$			$\sqrt{\dot{\phi}^2}$		
		a (deg)	c (deg)	$T_n$ (回数)	a (deg)	c (deg)	$T_n$ (回転)
D 50-10 (N 50-3)	A	8.7	1.9	7.2	0.69	0.13	7.0
	B	6.1	1.7	7.4	0.34	0.12	7.6
D 50-10 (N 50-1)	A	2.5	2.5	—	0.35	0.35	—
	B	2.7	2.7	—	0.25	0.25	—
D 5-5 (N 5-1)	A	9.1	2.7	4.1	4.6	2.1	3.2
	B	4.9	2.8	3.1	4.6	2.5	2.7

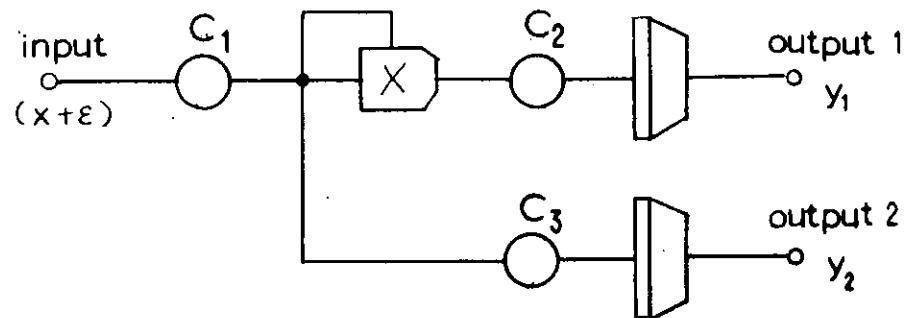


図 2.2.1  $\sigma_x$  を求める為のアナログ演算回路

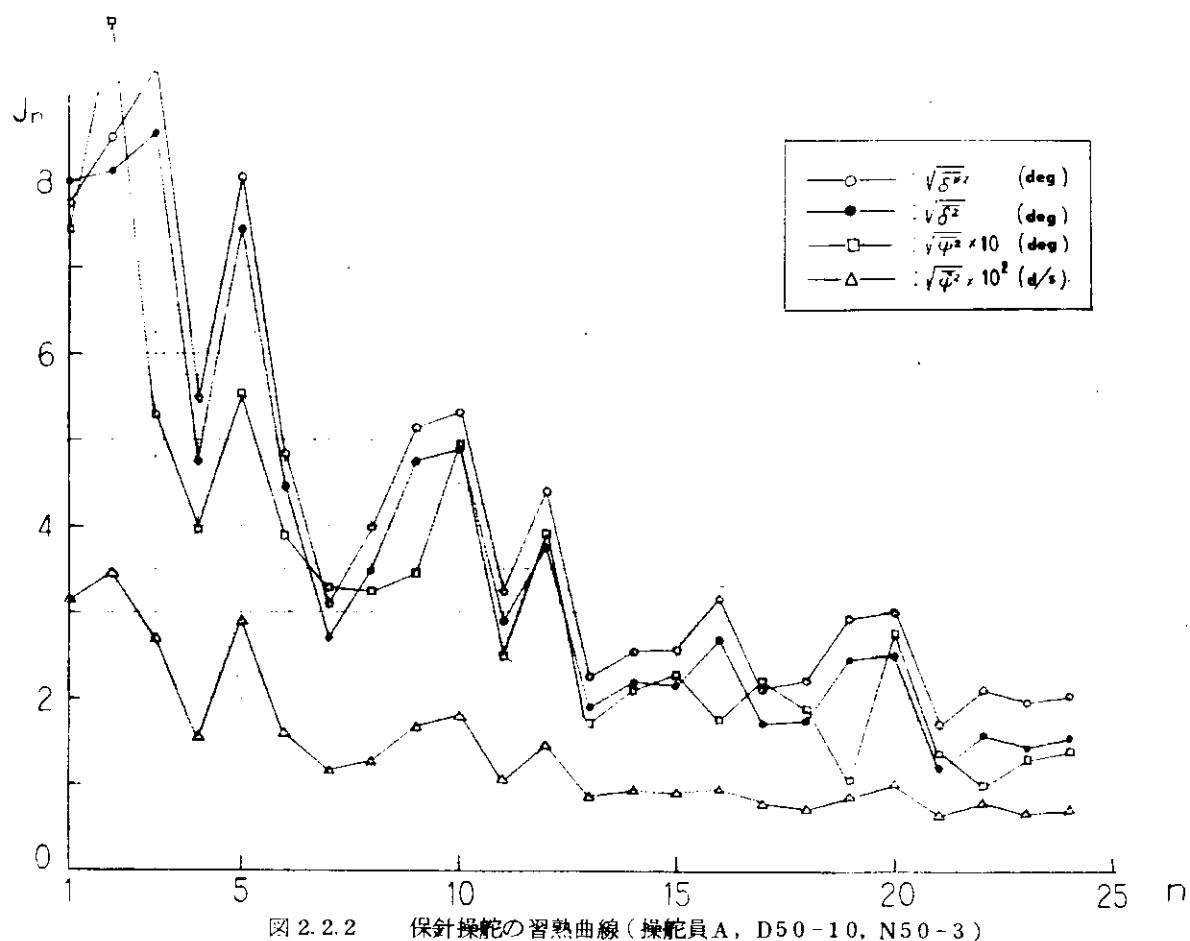


図 2.2.2 保針操舵の習熟曲線（操舵員A, D50-10, N50-3）

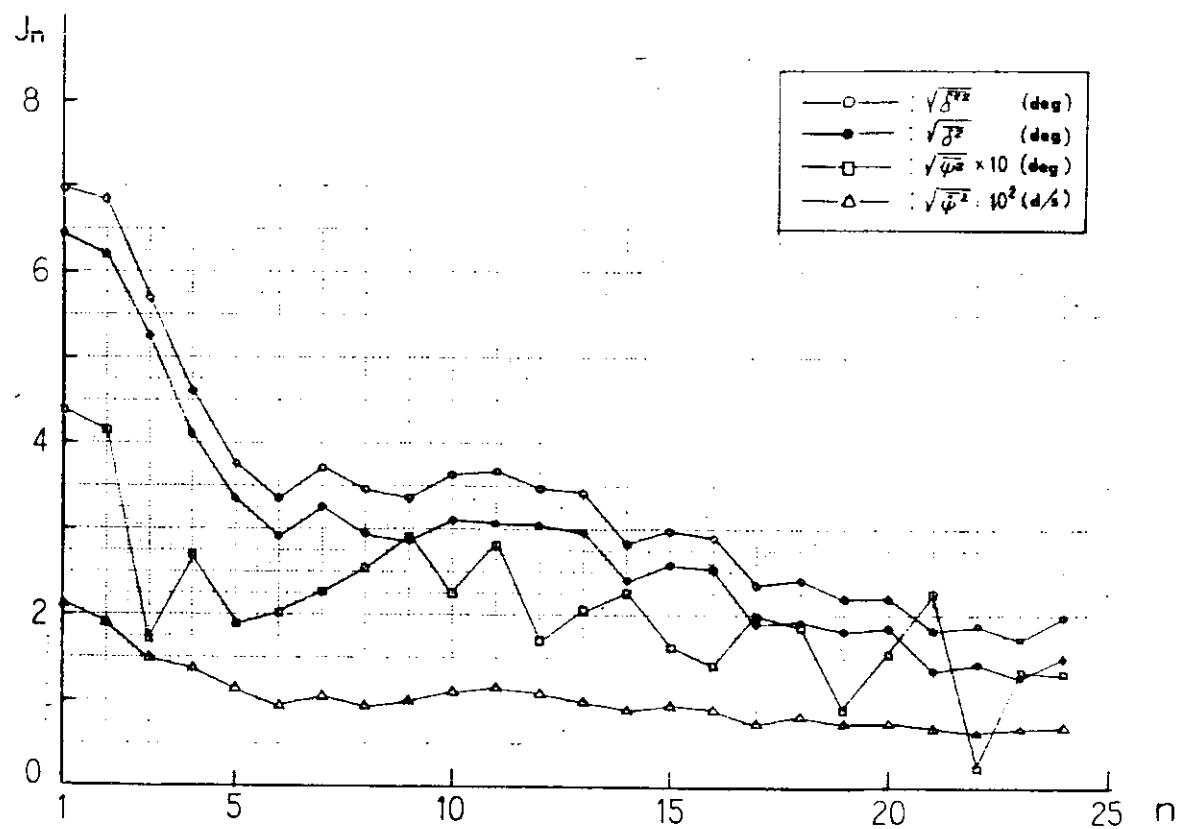


図 2.2.3 保針操舵の習熟曲線（操舵員B, D50-10, N50-3）

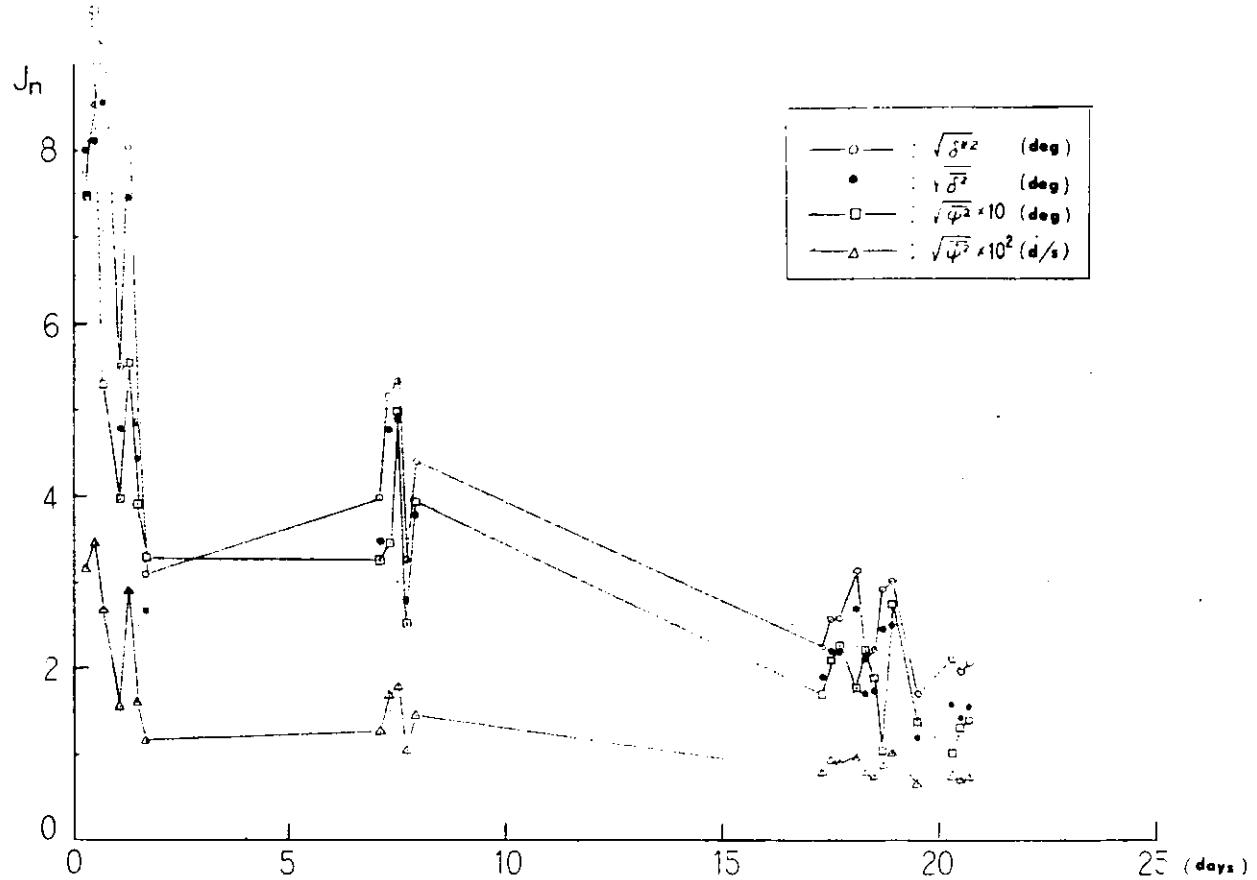


図 2.2.4 保針操舵の習熟曲線一日数（操舵員A，D50-10, N50-3）

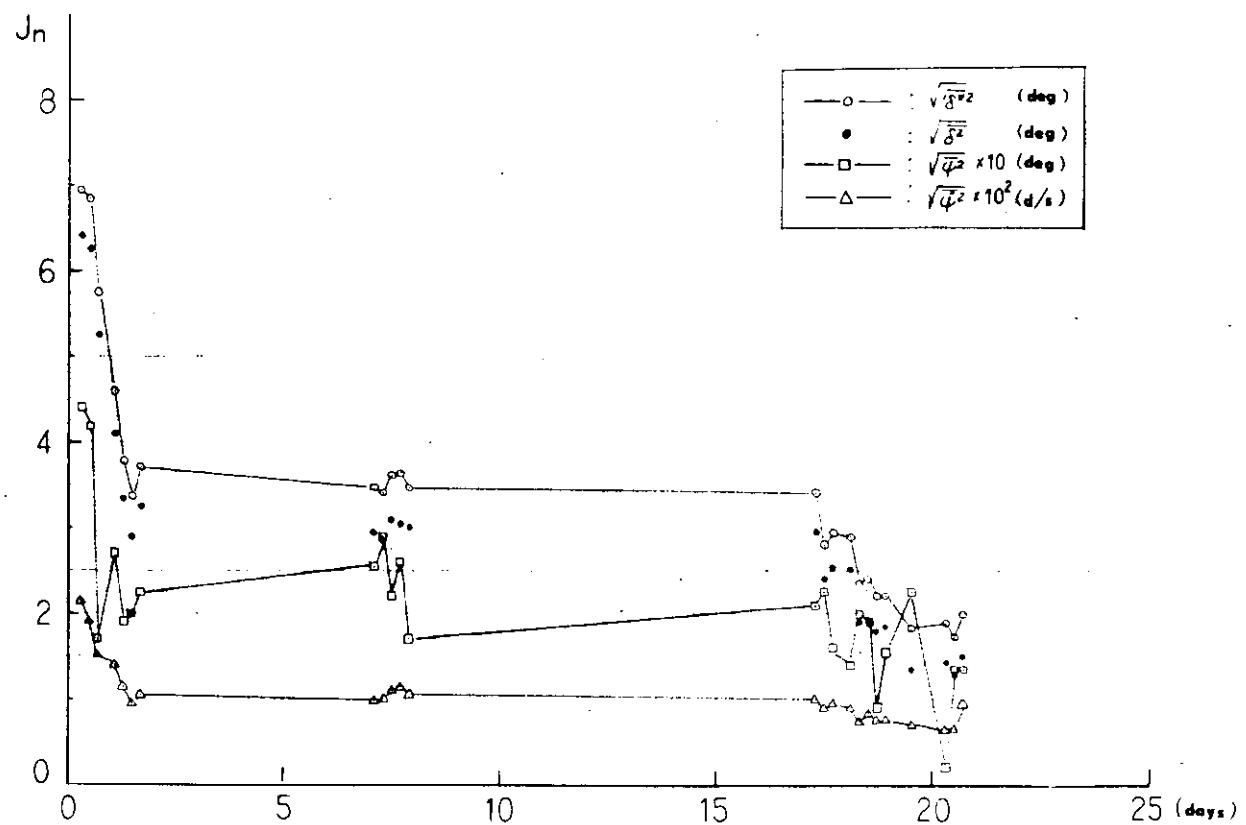


図 2.2.5 保針操舵の習熟曲線一日数（操舵員B，D50-10, N50-3）

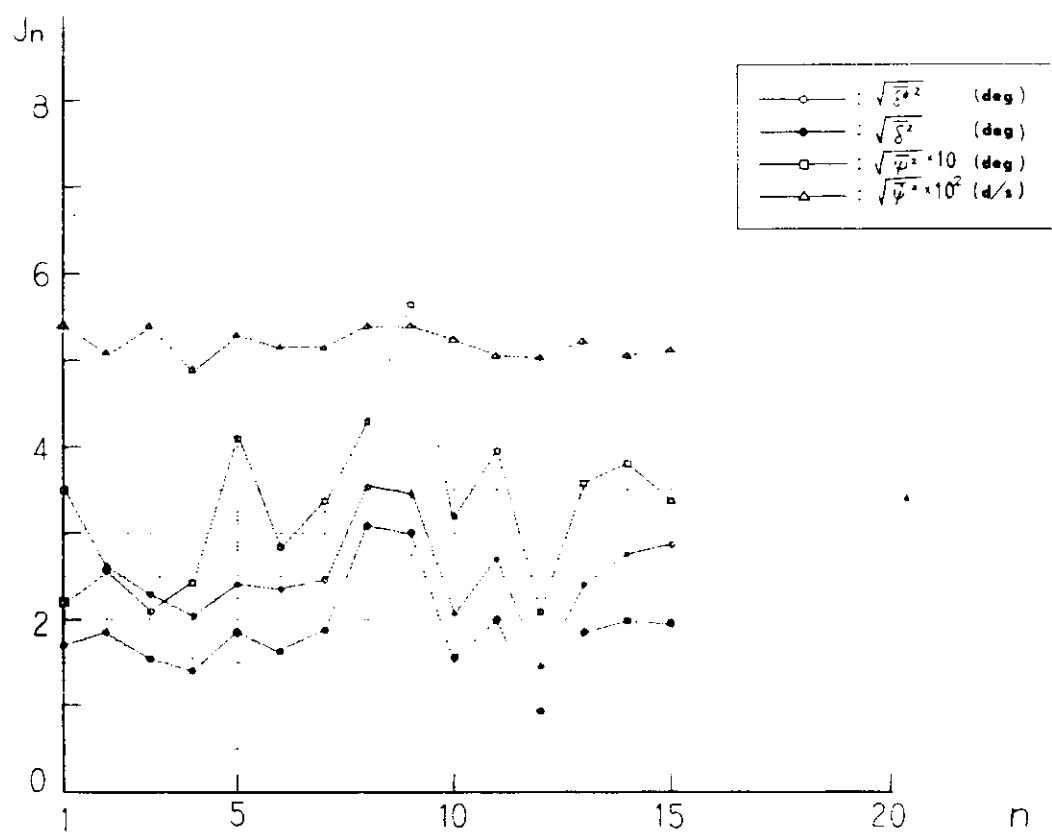


図 2.2.6 保針操舵の習熟曲線（操舵員A，D50-10, N50-1）

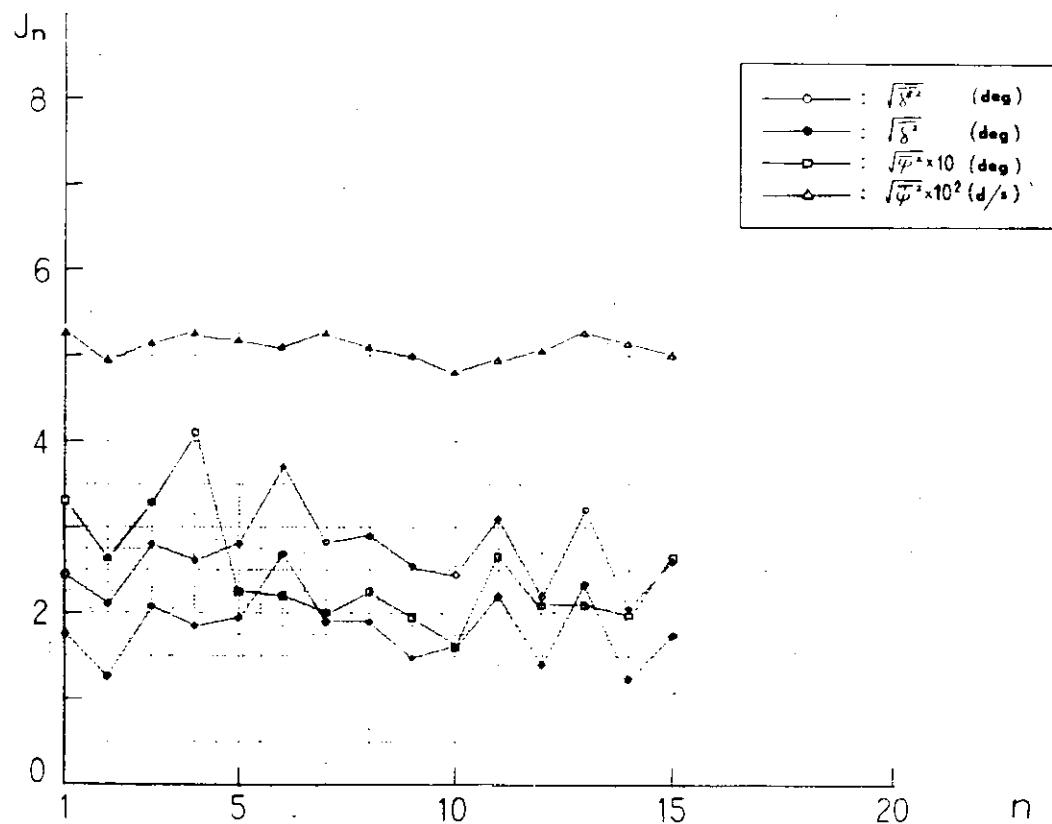


図 2.2.7 保針操舵の習熟曲線（操舵員B，D50-10, N50-1）

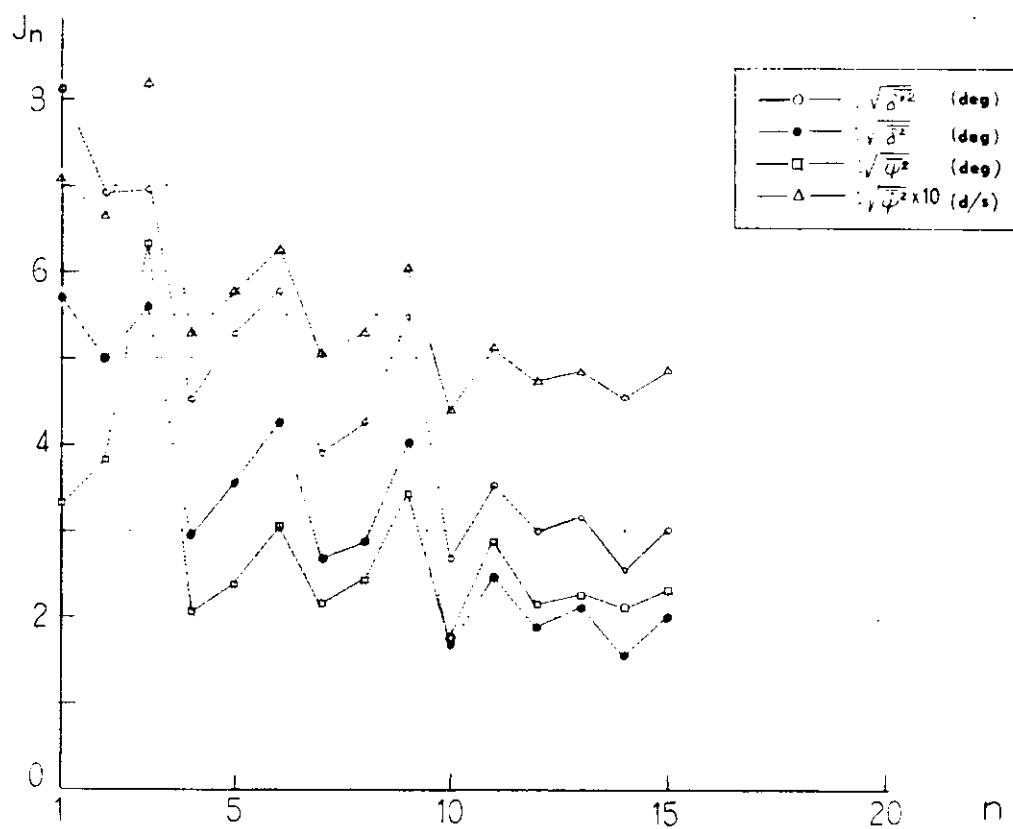


図 2.2.8 保針操舵の習熟曲線（操舵員A，D 5 - 5, N 5 - 1）

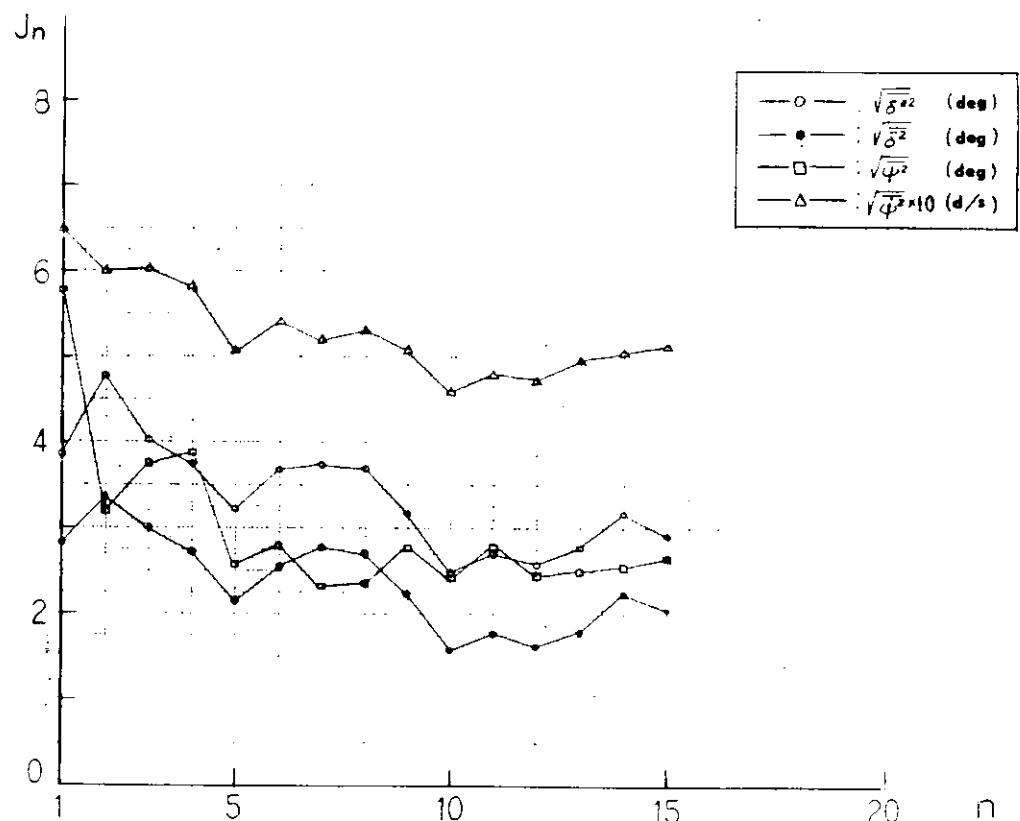


図 2.2.9 保針操舵の習熟曲線（操舵員B，D 5 - 5, N 5 - 1）

## 2.3 保針に与える外乱の影響

風や波などの外乱が作用すると船の針路が振られることは云うまでもないが、保針に対する外乱の影響を考える時もうひとつ見落してはならないことがある。それは外乱があるために、操舵員が自分の行なった操船の効果を正しく読み取り難いという点である。保針操舵は一種のフィードバック制御であるから、操舵員は絶えず自らの操作の効果を測りながら、その操作を加減している。外乱が作用するときは検知した船の運動のどの部分が操舵の結果であり、どの部分が外乱によるものか、その判別は簡単でない。その結果、操作の加減を誤ったり適確な時期を逸したりして保針状態の悪化を招く。

制御と云う立場から考えるならば実はこの方の外乱の影響が重要であって、その結果無外乱なら安定に保針できるものが外乱があるレベルを超えると保針できないことになるかも知れない。外乱の直接の影響の方は、特にその短周期成分はいずれにしても操舵で抑止できるようなものではなく、振れるにまかせるだけのことであり、そして短時間で原にもどって来るから保針に対して本質的な害を与えるものではない。図 1.2.2 に示す外乱の加え方はこの考えにもとづいている。

ここではこのような考え方方に立って、人間の保針能力を妨げるであろう外乱の強さをいろいろ変化し、又対象とする船の大きさや針路安定性もいくつか変えてみて、保針の難易がどのような影響を受けるかを調査する。

### 2.3.1 供試船・外乱および操舵員

#### (1) 供試船判別記号(1章参照)

L/V ループ幅	5	10	25	50
5°	D5-5	D10-5	D25-5	D50-5
10°	D5-10	D10-10	D25-10	D50-10
25°	D5-25	D10-25	D25-25	D50-25

#### (2) 外乱(6章参照)

船のL/Vに従って外乱の強さと周期分布を決める。すなわち船長Lと船速Vが同じなら針路安定性が変わっても外乱の様子は変わらないと考える。波や風によって誘発される不規則小刻みのヨーイングについては一応実情に近い仮定であろう。

項目\判別記号	N5-1	N5-2	N10-1	N10-2	N25-1	N25-2	N50-1	N50-2
$\sqrt{\phi^2} (\text{deg/s})$	0.40	0.20	0.22	0.11	0.092	0.046	0.050	0.025
T <sub>H</sub> (s)	0.796		0.971		1.305		1.592	
T <sub>L</sub> (s)	1.592		1.942		2.610		3.183	
適用船	D5-5, 10, 25		D10-5, 10, 25		D25-5, 10, 25		D50-5, 10, 25	

(3) 操舵員は2.2節と同じ工学部学生A, B両者で、職業上の操舵の経験は皆無であるが同節に述べる習熟のうちこの実験を行なっている。なお大造船所船渠課在職の職業操舵員Cの例を一つだけ実施したが有意の差はなさそうに見える(図2.3.1)。

### 2.3.2 実験結果と考察

2.1節と同様な形にまとめると図2.3.1、2.3.2のようになる。この場合の外乱1の方は港湾域の外乱としてはかなり強い方であると推定しているが、それでもその半分の強さの外乱2と比べて特別大差があるようには見えない。もっとも、やはり外乱が大きい方が航角やヨーイングの大きさ( $r m s$ 値)は明らかに大きい場合が多い。特にヨーイング角速度については外乱として与えた分だけは確かに大きくなっていることは既に2.2節で述べたところである。それにしても外乱がかなり大きくても保針状態が急に悪化することはなさそうで、特に外航船に対応する $L/V = 2.5$ ならびに50の船についてはそう云ってよいようである。

小型船で安定の悪い場合は、2.1でも述べたように、外乱が小さくても既に入間の制御限界に近づき、又はそれを越えているくらいなので外乱が加わってもその影響が定かでない。角速度計の効果などとも併せ、今後更に検討が必要であろう。

図2.3.3、2.3.4は上記の結果を次節2.4に述べる保針限界の形で示したものである。詳細は次節に譲るが、人間が操舵で補償しなければならない船プラス操舵機の応答の位相おくれが $30^\circ$ を越えるあたりから保針が困難になることを示している。そしてそのことは外乱がかなり強くても、また今までなくとも余り大きい遅いはこの結果からは読み取り難いと云うのが現在の結論である。

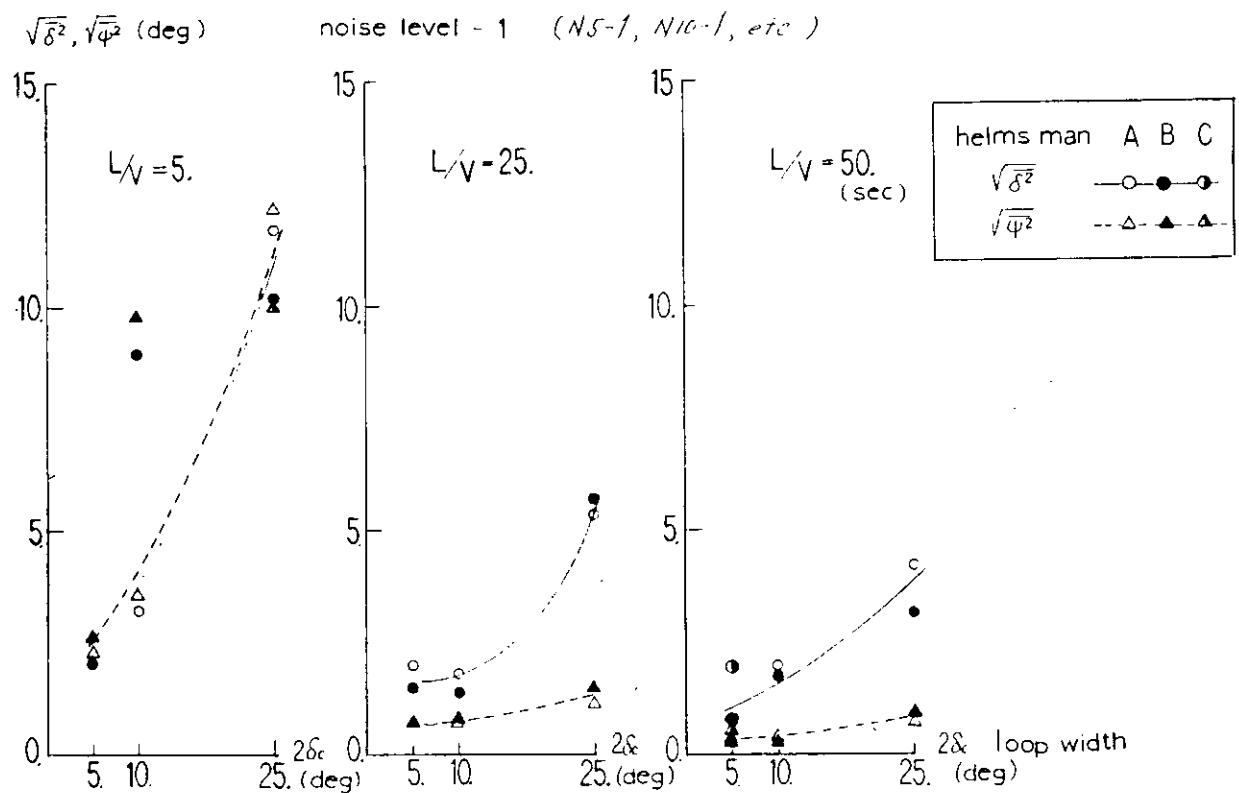


図2.3.1 保針の難易におよぼす外乱、ループ幅、 $L/V$ の影響(1)

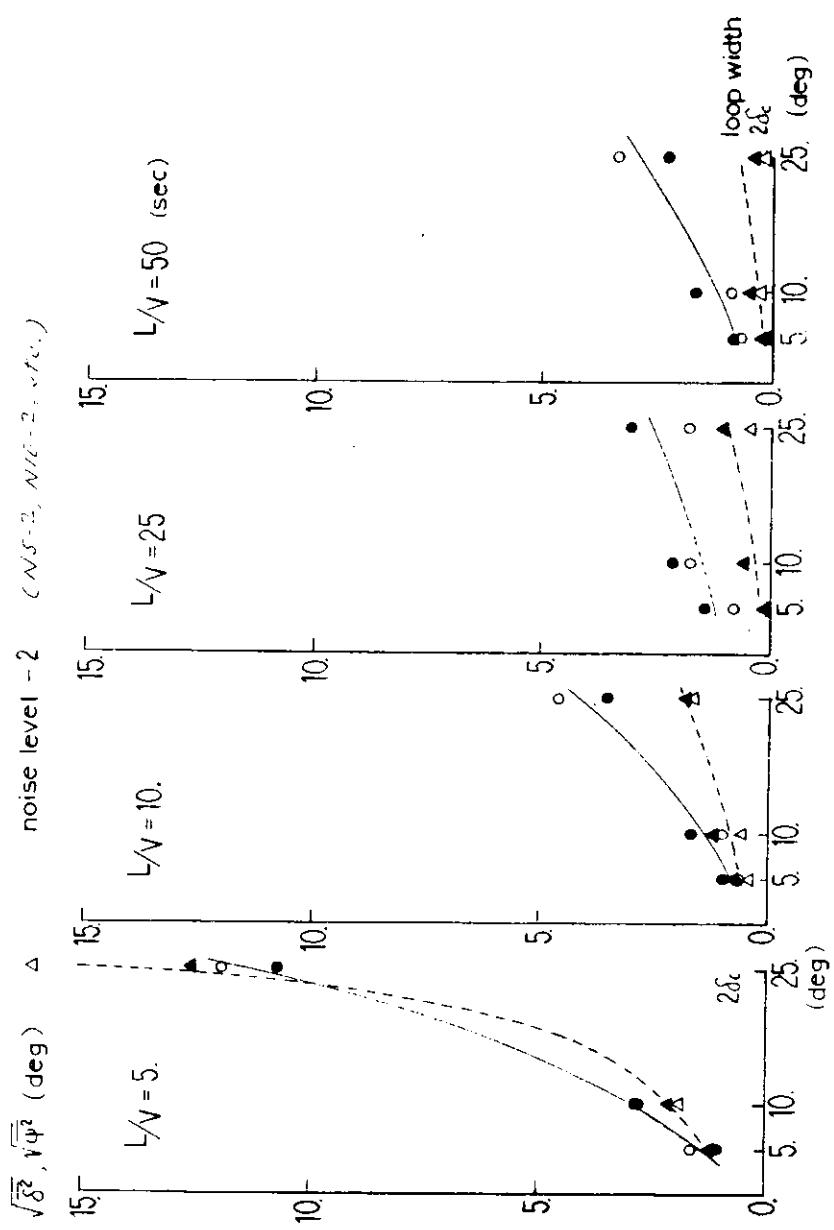


図 2.3.2 保針の難易における外乱、ループ幅、 $L/V$  の影響(2)

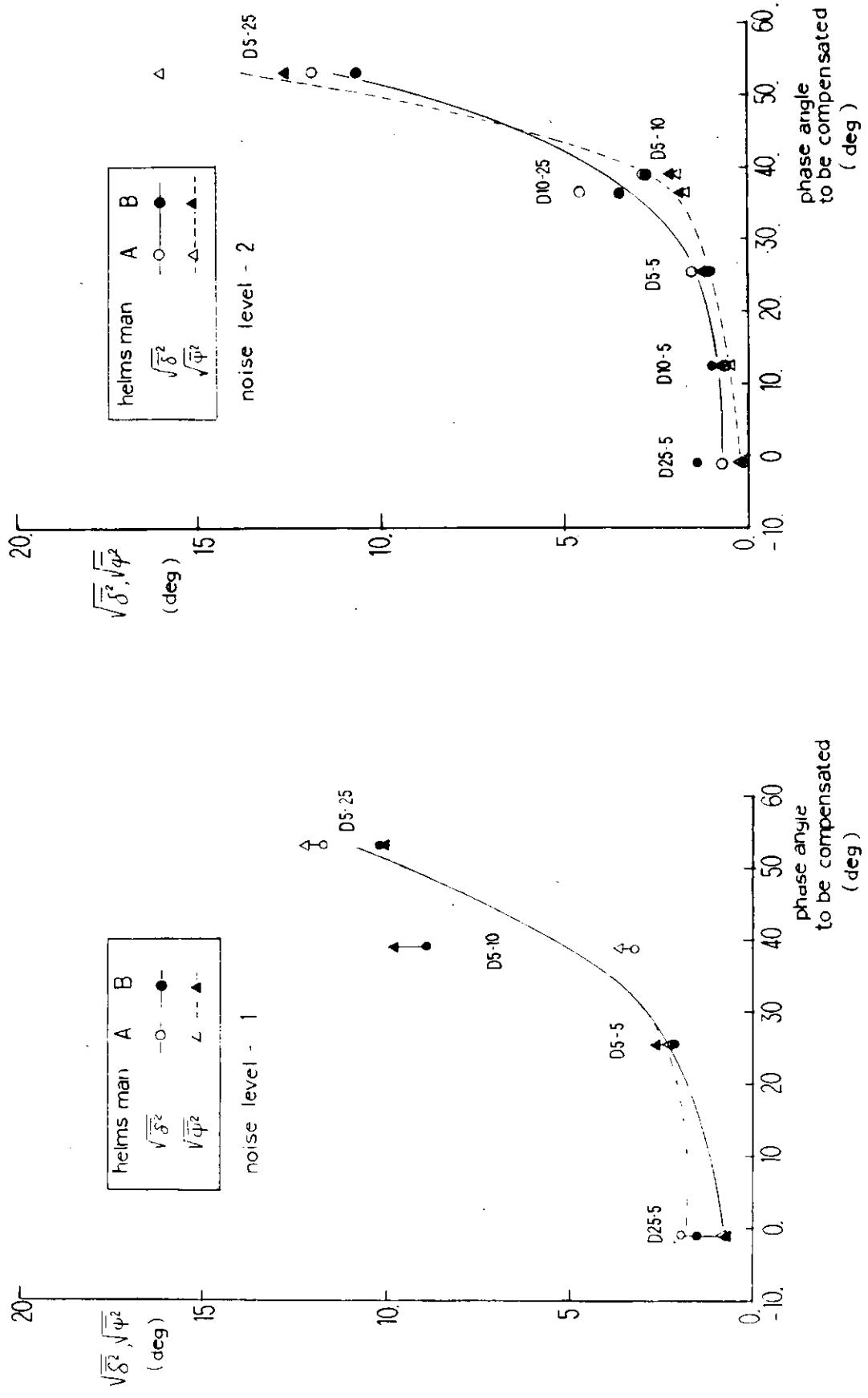


図 2.3.3 位相不足と保針の難易の関係におよぼす外乱の影響(1)

図 2.3.4 位相不足と保針の難易の関係におよぼす外乱の影響(2)

## 2.4 人が制御し得る針路不安定の限界

ところで、人はどこまで不安定な系（船）を制御しうるか。人の行なう制御動作がもつ適応性は、どこまで發揮しうるか。これらは、まだ、ほとんどの（と言ってよいであろう）制御系が人間によって、直接あるいは間接的に制御されている現状から言って、十分、解明すべきテーマであり、すでに、知り尽されているべき問題であるはずである。しかしながら実情は、残念ながら、一部、簡単な制御系か、逆に航空機、ロケット等の高度な制御系で研究されているにすぎない。そして、皮肉なことに、そういう制御系では、それ故、早くからコントローラ部を機械が人間にとてかわる自動化がすすみ、他の制御系では、いつまでも、特性の知れない人間や不完全な自動化による制御が行なわれるという悪循環をおこしている。

そこで、シミュレータを使った人間（操舵員）を含む系を制御論的あるいは人間工学的視点に立って論じてみる。

### 2.4.1 系の安定判別

制御系といふものは、まず安定に動作するものでなければならない。そのためには、系が安定に動作するかどうかを判別することが必要となる。系の安定判別には、種々の方法がある。有名なものでは、ナイキストの判別法や、ゲイン余裕、位相余裕、M<sub>p</sub>基準等があり、それぞれに一長一短がある。

人間のもつ比例制御のゲイン定数（K<sub>p</sub>とする）は適応性が高く、制御対象の特性が大きく変化しても、

$$|G(s) \cdot H(s)| = 1 \quad \dots \dots \dots \quad (2.4.1)$$

ただし  $G(s)$  : 制御対象の伝達関数

$H(s)$  : 制御者の伝達関数

を常に保つように適応するものらしい。それに反して、積分動作の時定数（T<sub>I</sub>とする）や微分動作の時定数（T<sub>D</sub>とする）は、K<sub>p</sub>に比して、その適応能力が低い。これは、日常生活でも、我々の経験するところである。

このことに注目してここでは、時定数に關係の深い位相余裕を中心議論をすすめてみよう。

### 2.4.2 不安定船の制御における特徴

微少運動を行なっている船の操縦性は、野本の2次系モデル

$$\frac{\psi}{\delta} = \frac{K(T_3 s + 1)}{S(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} \quad \dots \dots \dots \quad (2.4.2)$$

によって十分正確に表現できる。

不安定船ではKおよびT<sub>I</sub>が負、T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub>が正となり、また、絶対値はT<sub>2</sub>、T<sub>3</sub>、T<sub>I</sub>の順に大きいのが普通である。

このシステムにフィードバックをかけ、針路制御を行なうのが保針操船であり、図2.4.1のコントローラが機械であればオートパイロットの問題、人間の場合が本論のテーマである。

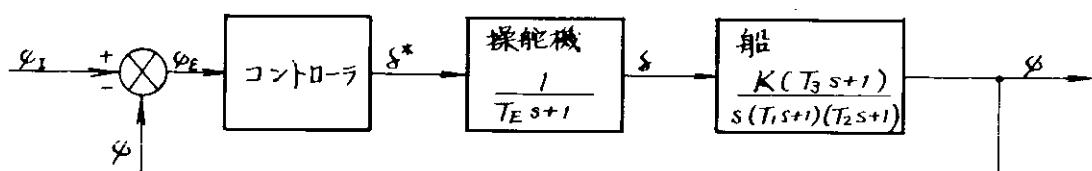


図 2.4.1

最も簡単なコントローラとして比例制御を考える。このとき船の位相特性は  $T_1$  が負であるため 図 2.4.2 の実線に示すように  $-270^\circ$  から始まり周波数の上昇にしたがって  $-180^\circ$  の方向へ進む。ここで  $T_2$  より  $T_3$  が大きいためこれが位相進みの役をし、 $T_1$  の絶対値が  $T_3$  にくらべて十分大きいときは 位相は一度  $-180^\circ$  より大きくなつて再び  $-180^\circ$  に収束する。

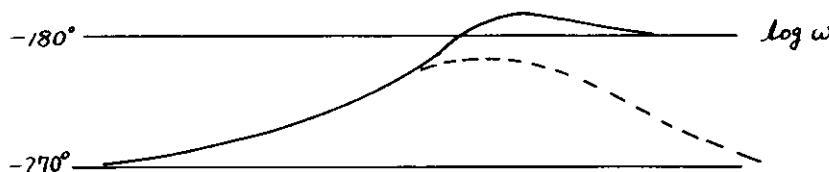


図 2.4.2

このように、わずかながらも位相が  $-180^\circ$  よりも大きくなる範囲があるということは制御にとって非常に有利なことであり、この部分にカットオフ周波数が来るようループゲインを調節すれば、単なる比例制御によっても少なくとも安定なシステムを得ることができる。（位相が  $-180^\circ$  より大きい周波数でループゲインが 1 になれば安定－ナイキスト判定）

しかし、 $T_1$  の絶対値が  $T_3$  に比べて十分大きくない場合は位相遅れが  $-180^\circ$  以上になる範囲が現われず、微分特性によって位相を進めるコントローラでないかぎり安定なシステムを得ることはできない。

船の制御を考える場合、操舵機の位相遅れも特に小型船で問題となる。操舵機の時定数が船の時定数に比べて十分小さくない場合、全体の位相特性に悪影響を与える、図 2.4.2 の破線で示すように、せっかくの位相が  $-180^\circ$  以上になる範囲を消してしまう。

#### 2.4.3 シミュレータ実験結果の整理

各モデルの位相特性を図 2.4.3、図 2.4.4 に示す。破線が船のみ、実線が操舵機を含めた位相特性で、船のみの場合はいずれも位相遅れが  $-180^\circ$  以内の範囲があるが、操舵機によって相殺されてしまうことが分かる。

システムを安定化するに必要な位相補償の大きさという見方からすると、D25-5、D10-5、D5-5、D10-25、D5-10、D5-25 の順に操船が困難になるはずである。2.1 に述べた保針実験の操舵量および針路偏差の 2 乗平均を位相不足に対しプロットしなおしてみると（図 2.4.5）、明らかに右上りの傾向が見られ、位相補償の必要量が操船の難易度と確かに強い関連があると考えられる。又、既に示した図 2.3.3 および 2.3.4 の結果もまたここに示すものと極めて近い傾向を示していることも想起すべきであろう。ここで位相余裕とは船および操舵機の総合位相が最大になった時、 $-180^\circ$  をどれだけ超えているかを示す量である。D25-5 がわずかのプラス余裕を示すだけで他はマイナス余裕、すなわち  $-180^\circ$  にとどかない。従って安定になるためには少くともこのマイナス余裕分だけは位相補償を行なう必要がある。

D5-25 の場合は操舵者に要求される位相補償の大きさがある範囲をこえた結果、操船不可能になったと見ることができよう。また、図中に示すように角速度計を併用すれば D5-25 でも比較的容易に操船できることも、位相補償の必要量が操船限界を与える一つの指標となり得ることを示唆している。

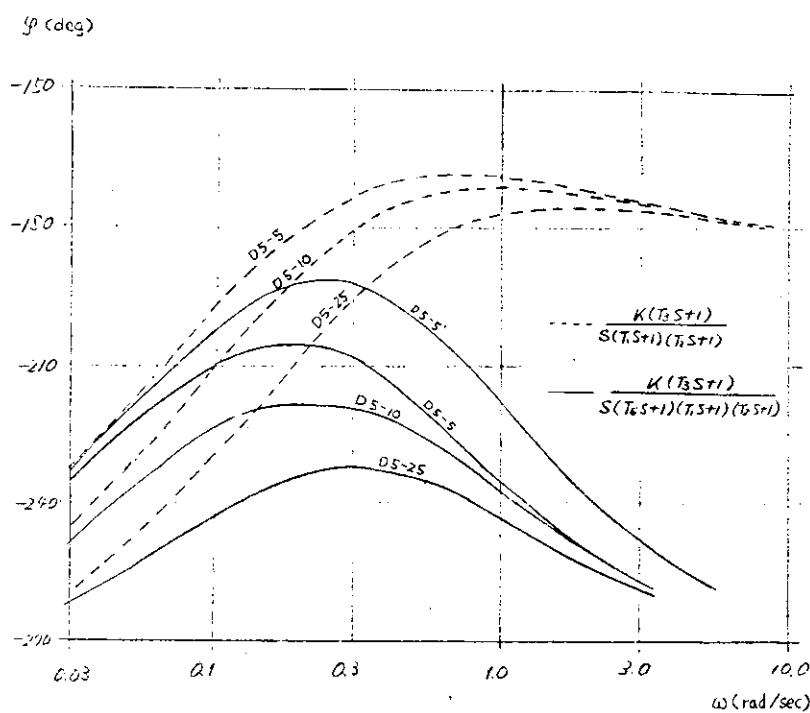


図 2.4.3 船 の 位 相 特 性 (1)

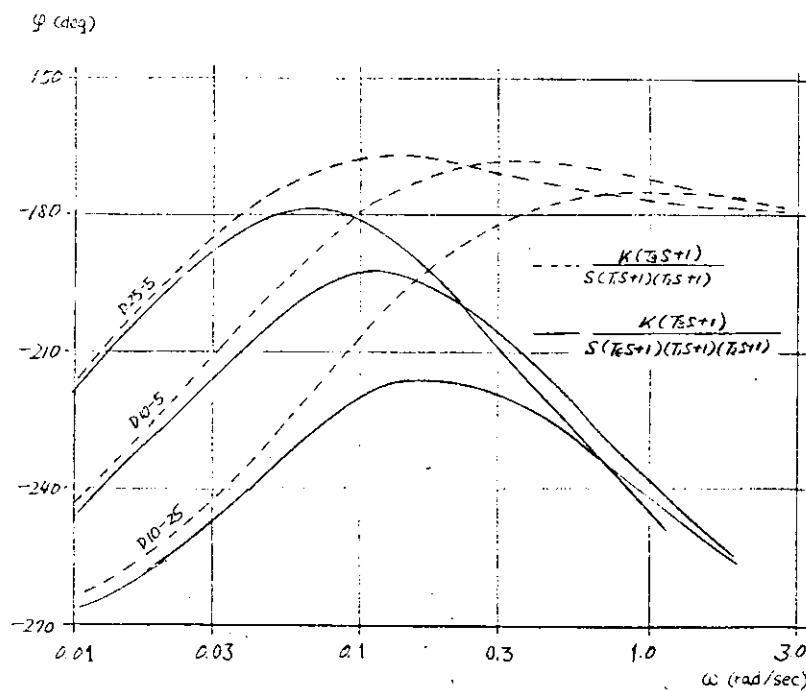


図 2.4.4 船 の 位 相 特 性 (2)

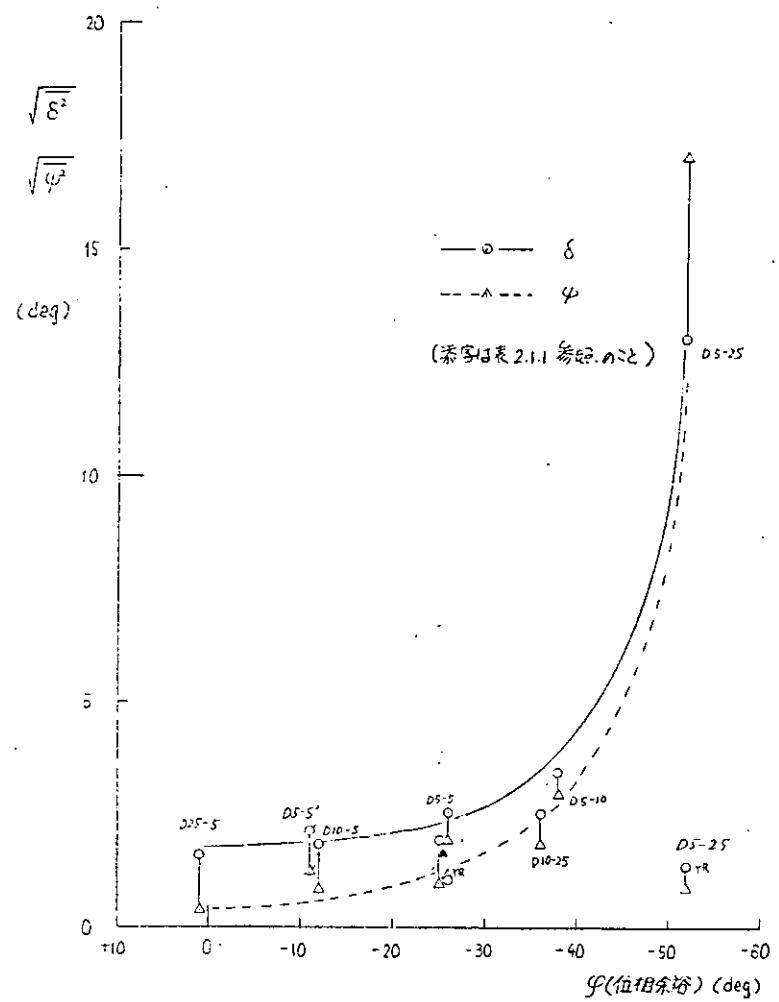


図 2.4.5 位相不足と保針の難易の関係

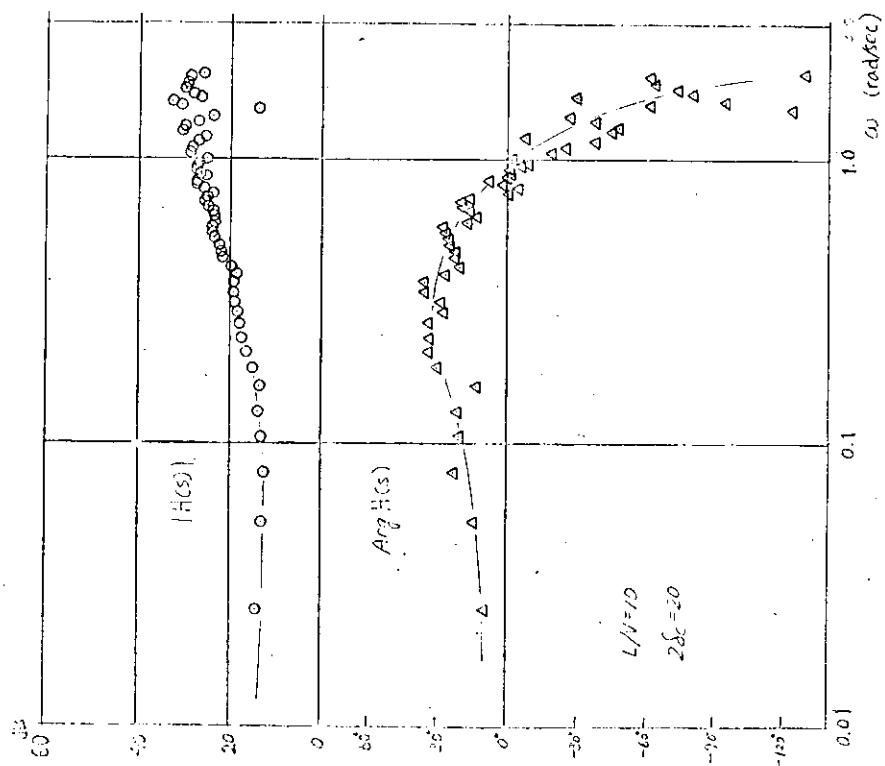


図 2.4.6 保針中の人間の伝達関数(1)  
——角速度計なし

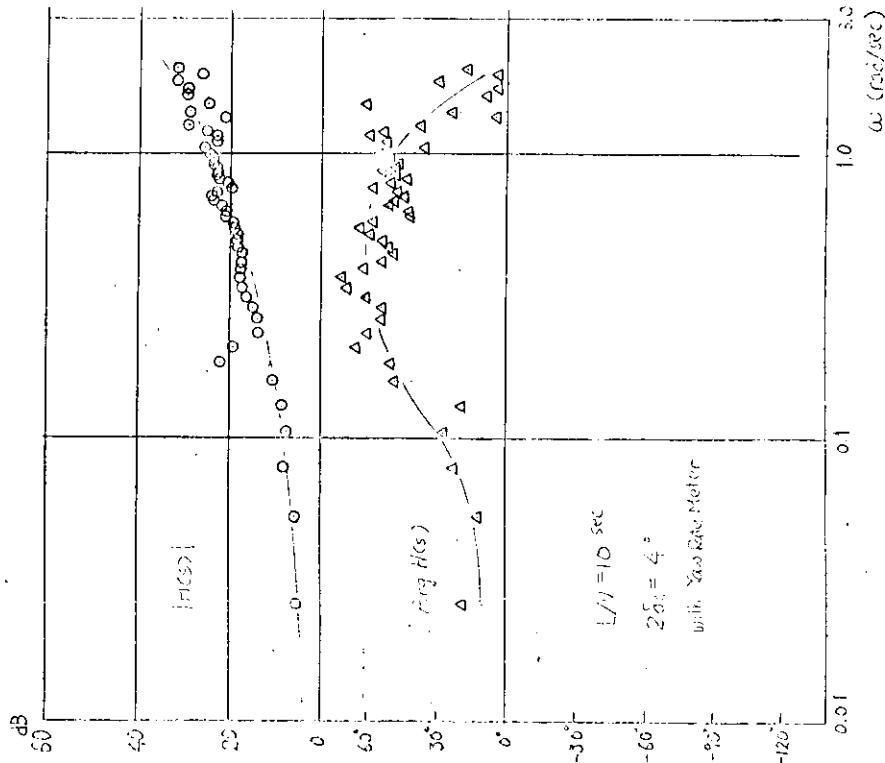


図 2.4.7 保針中の人間の伝達関数(2)  
——角速度計を見る場合

#### 2.4.4 人間の伝達関数

そこで、問題となるのは、果して、操船者に要求される位相補償が何度をこえれば、保針が困難になるか、言いかえると、人間は、何度までなら、位相補償しうるか、ということである。図 2.4.5 を見る限り、その限度は 30 ~ 40 度ぐらいで、その辺から自乗平均値に急激な増加がみられる。

図 2.4.6 に保針中の人間の伝達関数の一例をボード線図で示す。この実験（シミュレータ）で使った船は、 $L/V = 10$ 、 $2\delta_c = 20$  で、ほぼ、D10-25 と同じ特性をもつ。また、 $L/V$ 、使用するコンパスが同一であれば、大きな個人差や、ループ幅の影響は、あまりない。これで見ると、問題となる周波数領域で、約 20 ~ 30 度の位相進みのあることがわかる。<sup>注1)</sup> したがって、クロスオーバ周波数を検知しうる範囲で、その 20 ~ 30 度の位相進みは、系全体の位相余裕を正ならしめるように、 $\omega$  軸上をある程度、変動しうるものと考える。こう考えると、人間を除いた系の位相余裕は  $-20^\circ \sim -30^\circ$ （位相不足、従って必要な位相補償は  $20^\circ \sim 30^\circ$ ）が限度であると言える。

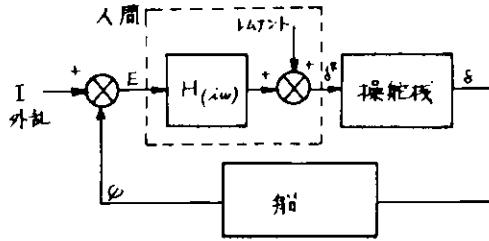
では、角速度計をつけた場合の変化は、どう説明すればよいのであろうか。もし、一巡伝達関数の位相余裕が正、というのが人間を含んだ系の安定条件にもあてはまるものであれば、角速度計をつけたことによって、人間の位相進みが増えているはずである。図 2.4.7 がそれを裏づけている。これは  $L/V = 10$ 、 $2\delta_c = 4$  の船（D10-5 に近い）で、角速度計をつけた時の保針実験の一例である。確かに、約 30 度さらに位相が進んでいる。約 52 度の位相不足で、大きく発振していた、D5-25 の実験も、角速度計をつけて、約 60 度の位相進みを生じたとすれば、系が安定化し、 $\delta$ 、 $\omega$  の各自乗平均値が激減したのも納得できる。ただし、ここで、注意を喚起したいのは、図 2.4.7 に示すのはうまく行った一例で、角速度計をつけたからと言って、常に位相が進むわけではなく、ほとんど変化しないもの、あるいは、若干、位相特性が劣る結果も経験されている。また、この傾向は外乱の大きさに相関をもっているように思われる。

#### 2.4.5 人間の操舵周期と位相不足（負の余裕）の関係

図 2.4.1 ~ 図 2.4.10 のスペクトラムを見て気づくのは、人間の操舵周期が、割合と一定していることである。0.1 ~ 0.4 rad/sec. 周期にして、15 ~ 60 秒の成分が正倒的に多い。これに反し、オートパイロットの場合、多くは 300 ~ 600 秒の長周期発振をおこす。しかし、オートパイロットでも比例制御だけにすると、同じような周期の発振をおこす。また、これらの周波数帯は、図 2.4.3、図 2.4.4 に見るように、船の位相余裕が最大となる、言いかえれば、この辺にクロスオーバ周波数を持ってくれば、系が安定となる帯域である。

4)

注 1) ここでいう人間の伝達関数とは次式の定義による。



$$H(i\omega) = \frac{\phi_{I\delta^*}}{\phi_{IE}}$$

ただし、 $H(i\omega)$ ：人間の伝達関数

$\phi_{I\delta^*}$ ： $I$  と  $\delta^*$  のクロススペクトラム

$\phi_{IE}$ ： $I$  と  $E$  のクロススペクトラム

注 2) クロスオーバ周波数  $\omega_c$  とは、次式をみたす周波数のことである。

$$|G(i\omega_c) \cdot H(i\omega_c)| = 1$$

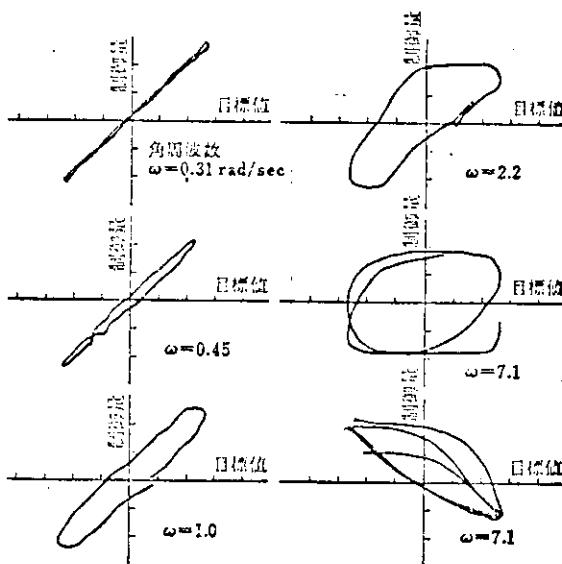


図 2.4.8 人間の追従性

これらのことから言えるのは、人間は、主に比例制御をしていること、また、適格にクロスオーバ周波数をとらえていることである。では、どのくらいの周波数帯まで追従しうるのか。図 2.4.8 は操舵ではないが一定周波数で変動する目標値を人が追従するときのリサーチュ图形である。<sup>5)</sup>  $\omega$  が 0.31 では、ほぼ、位相角 0 であるが、それが 0.45 になると、位相おくれがあらわれはじめ、 $\omega = 7.1$  では、位相が  $90^\circ$  ずれたり、 $180^\circ$  ずれたりしている。これから見ると、 $\omega = 0.4$  ぐらいが、人が生理学的に追従しうる最高周波数と言えよう。このことは、人が無意識にフィルタリングしていることとなる。

逆に言うと、クロスオーバ周波数が 0.4 以上にあれば、人は、それを検知しても追従しきれなくなる恐れがあり、そういう場合には、たとえ、船の位相不足が  $20 \sim 30^\circ$  以下であっても、人は補償しきれないことになるであろう。

#### 2.4.6 人間の保針限界に関する現在の結論

以上のことから次のようなことが言える。

- (1) 人が制御しうるためには、操舵機をも含めた船の位相遅れの最大値は、 $200^\circ$  ないし  $210^\circ$  以下であり、対応する周波数は、 $0.4 \text{ rad/sec}$  以下でなくてはならない。
- (2) 人が保針する場合には、無次元の指数で効くわけではなく、 $L/V$  のかかった有次元値できる。したがって、 $L/V$  の小さな船では  $5^\circ$  ループでも操舵が困難であるが、 $L/V$  の大きい VLCC クラスでは、今回の実験からは  $25^\circ$  ループになっても、さほど問題になりそうにない。
- (3) 以上の結果をもとに保針可能な船の性能を  $L/V$  と不安定ループ幅をパラメータにして表わすと図 2.4.9 のようになる。
- (4) 角速度計を上手に使うと、人の位相進みが増え、また操舵機の時定数の減少は船の位相進みを増すから、より不安定な船まで保針できることになるである。

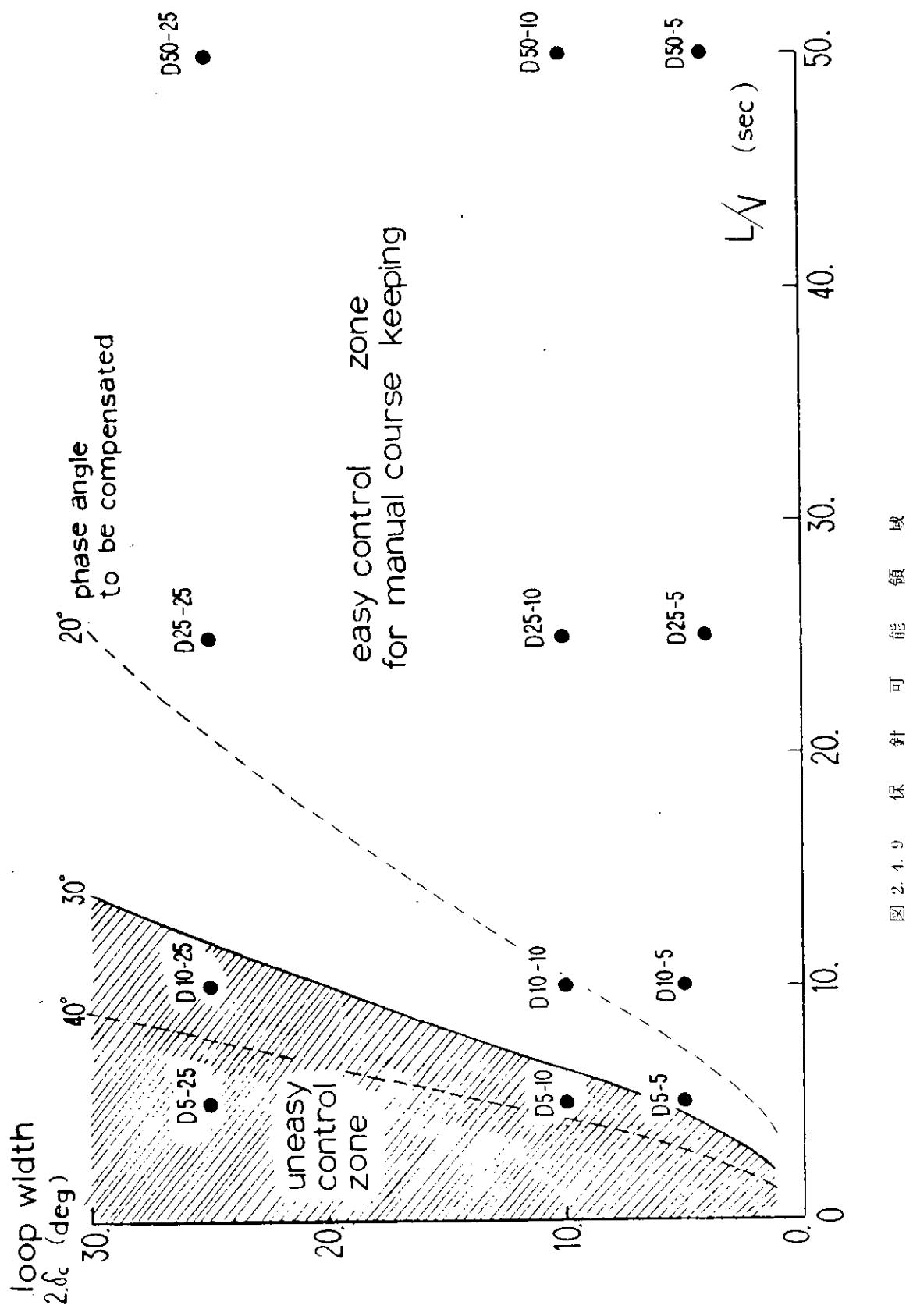


図 2.4.9 保針可能領域

## 2.5 航路指定のある保針、変針

### 2.5.1 設定状況

実験は図 2.5.1 のように第 1 区間から第 3 区間まで 2 マイル毎に  $30^{\circ}$ づつ 2 度変針する屈曲航路を指定し、操船者は航路中央線上を航走するよう心掛けるものとして実施した。外力として潮流を入れ、常に矢印の方向に一定流速を与えて、操船者には原則として潮流の有無、流速を知らさないで実験を行なった。

No. 1 ~ No. 3 の航路浮標および船位測定に利用するために設置した No. 4 浮標はレーダ PPI 上に表示し、No. 1 浮標はスクリーン上に表示した。したがって No. 1 浮標を通過するまでは通常の有視界航法であるが、それ以降は一種の霧中航法（レーダによる航法）になっている。

実験の設定条件は、表 2.5.1 に示すとおりで、供試船は D 50-5 と D 25-5 を用い、現在の一般航洋船舶で使用している航海計器を使用して航行する場合と、それらに加えて Course Wheel, Yaw Rate Wheel, XY-Recorder の三種類の新しい計装を用いて航行した場合で実験した。

なお、XY-Recorder は航跡自画器として使用した。

実験中に(1)1 分ごとのマーク入りの航跡 (2)航角 (3)回頭角 (4)回頭角速度 (5)速力 (6)自船の横流れ速度 (7)原針路からの横偏位距離(y) (8)操船者の行なう船位測定 の各項目を計測記録した。

操船者は、外航貨物船に乗船経験 3 年を有する 1 航海士で、操舵手は乗船経験のある 2 名が担当した。

図 2.5.2 は実験結果を整理した一例で、上段が航跡および操船者の測定船位、中段が航走距離ベースにみた横偏位、針路修正時機と針路修正角、下段が横流れ量を示している。

### 2.5.2 保針操船の分析と評価

#### (1) 針路修正と横偏位置

図 2.5.1 に示した狭水道の直航部分 3 ケ所における船首方位角と水路中央線方位との差角、すなわち針路修正角  $\Delta\phi$  を 20 sec ごと、横偏位  $y$  を 2 cable ごとに求め、その自乗平均値の平方根 (RMS) を計算して、潮流流速との関連および新計装との関連を図 2.5.3、2.5.4 および 2.5.5 に示した。

操船者は、潮流による圧流と横偏位を修正するために  $\Delta\phi_{RMS}$  をとるので、潮流の大きさによって、図 2.5.3 に示すように、 $\Delta\phi_{RMS}$  は大きくなる。同図で右肩の数字は図 2.5.1 に示した航路の区間を示している。操船の結果を示す  $y_{RMS}$  は、図 2.5.4 に示されているように、 $\Delta\phi_{RMS}$  よりも流速による影響が小さく、むしろ操船者の誤判断、誤操した等の操船ミスの影響を許容できる範囲として修正しきらないで航行しているため各区間でバラツキがみられる。しかし、図 2.5.5 に示すように変針部分を含めた航行区間全域について求めた  $y_{RMS}$  はほぼ流速に比例している。そしてそれは、L で無次元化すると  $L/V$  で差ができるが、絶対量はあまり変わらない。

$L/V = 50$  の場合に操船ミスが多く操船が安定していないのは、操船者が巨大船の操船に慣れていないためか、 $L/V$  の影響かはもう少し実験ケースを積み重ねる必要がある。

このような実験によって新計装の効果を評価する場合、このように位置制御を伴うとき、操船者の操作方法、時機によって、その効果が影響を受けるので、多数回繰返して平均的な値で評価すべきで、今回はケース数が少ないので傾向を示すとみるべきだが、図 2.2.4 で新計装を用いたときは  $y_{RMS}$  が、用いない場合に比べて小さくなっているのが注目される。

#### (2) 航跡の蛇行

図 2.2.6 は蛇行により 1 マイル当たり航路中央線を横切る回数（ゼロクロス周波数）を調べたもので、潮流が増すと増加するが、 $L/V$  によっては差がみられない。ただ新計装のうち Co-Wheel による操船は、蛇行回数が少なく、この時、図 2.5.5 の航跡の偏位量が大きくなっているが、これは係数設定上の理由によるよりも操船者の針路修正方法によるものと思われる。

### 2.5.3 変針操船の分析と評価

#### (1) 変針操船に影響する諸要素

図 2.5.7 に示すような変針操船において、操船者は、変針終了点での船位が航路中央線に一致するよう操船する。したがって変針操船の良否の評価は、変針終了点における横偏位量  $y_f / L$  を採るのが妥当であろう。これに影響すると考えられる要素は多様であるが、ここでは次の 5 種類を選んだ。

(1) 変針開始位置、(2) 変針開始点における横偏位  $y_0 / L$ 、(3)  $L / V$ 、(4) 潮流流速  $V_c$ 、(5) 新計装の有無（有 1、無 0 とする）そして、 $y_f / L$  にこれらの要素がどのような関係にあるかを調べるために、操船ミスのあった場合を除いた 23 ケースの実験結果について変数增加法によって重回帰分析を試みた。これは  $y_f / L$  が説明変数の線型結合で与えられると仮定して説明するのに最も適当な要素を順次選んで回帰式を作っていく方法である。表 2.5.2 はその結果を示すが、 $y_f / L$  には変針開始位置が最も効果をもち次いで  $L / V$  が効果をもち、その他の要素は付加してもあまり効果のないことがわかった。計算上上記の 5 变数について実施したが表中の变数以降の説明変数は  $R$  をほとんど改良しないので省略した。この他、後述の変針中の使用舵角の二乗平均値  $\delta_{RMS}$  は  $y_f$  と単相関をもつけれども、変針操船に使用する舵角はほとんどの場合  $L / V = 5.0$  のときは約  $30^\circ$ 、 $L / V = 2.5$  のときは  $15^\circ$  を使用しているため  $L / V$  の中に  $\delta_{RMS}$  の効果が入ってしまって表面には出てきていない。これは  $\delta_{RMS}$  を入れた重回帰分析の結果から確認できる。

#### (2) 変針開始位置と操船結果

操船者は変針動作に入るまえに自船の操縦性能および位置を考慮して変針点の手前、一定距離 ( $\bar{AP}$ ) のところで変針を開始する。そして丁度現在位置から希望針路にのせられるような変針点から変針開始点までの距離は新針路距離 ( $D_n$  とする) とよばれる。この  $D_n$  は、同じ変針角であっても、図 2.5.7 に示すように、その時の航路中央線からの横偏位量  $y_0$  によって異なる。いったん変針を開始すると、船の操縦性能によって航跡はほとんど決まるので、操船結果、つまり変針終了点での横偏位  $y_f$  は変針開始位置と密接な関係を持つと考えられ、表 2.5.2 に示した統計的解析の結果からも  $y_f$  と最も相関が高いことがわかる。そして変針点を  $(y_0, 0)$  とするとき、変針開始位置  $(y_0, x_0)$  で  $x_0$  が  $y_0$  に対応した  $D_n$  に等しいことが最も好ましい変針開始位置であるが、操船者が変針開始位置を決めるとき、 $(y_0, x_0)$  の推定精度やその時の気象、海象などの操船環境のもとでの自船の航の効果を推定する時の誤差等のために  $x_0$  を新針路距離と一致させるのはなかなか困難である。従って、変針中の操舵方法や航走距離によって修正しようとするが、その効果は  $x_0$  ほど大きくはないようである。

図 2.5.8 は変針開始位置と変針終了時の横偏位の関係を示しており、両者に相関があること、又  $L / V$  によって傾向が異なることがわかる。これからこの操船者が行う変針操船の新針路距離つまり  $y_f / L = 0$  になる点は  $L / V = 5.0$  のときは、 $1.3 \sim 1.6$   $L$  手前、 $L / V = 2.5$  のときは  $1.6 \sim 1.9$   $L$  付近で避航を開始すればよい。

なお、図 2.5.8 で参考までに最短時間変針になるような Bang-Bang 制御による新針路距離を求めて、図に実線で示した。ここで舵角は、操船者の常用舵角に合せて D50-5 の場合、 $30^\circ$ 、D25-5 の場合は  $15^\circ$  とした。新針路距離よりなお接近して  $y_f$  が小さくなる場合は、変針開始時にすでに原針路より偏角をもつ場合や同時に変針開始時に原針路から横偏位があって結果的に  $y_f$  が小さくなる場合である。

#### (3) 使用舵角および航走距離

図 2.5.9 は変針操船中の操舵々角の RMS を常用舵角で無次元化した値を横軸にとって潮流々速と新計装の種類との関係をしたものである。この図から潮流々速による  $\delta_{RMS}$  の影響ははっきりしないが、船型の影響は顕著である。 $L / V = 5.0$  の船では平均的に常用舵角の 2 倍程度の  $\delta_{RMS}$  となっているが  $L / V = 2.5$  の船ではほぼ常用舵角と同程度の  $\delta_{RMS}$  を示している。そして、変針中の操舵々角の大きさ

さと変針中に航走する距離との関係は、図 2.5.1.0 に示すように  $\delta_{RMS}$  が大きいほど航走距離は短縮される傾向があり、 $\delta_{RMS}$  が常用舵角より小さないと航走距離の増加が顕著になるようである。

表 2.5.1 航路指定のある保針、変針実験の設定状況 ( $V_A = 6 \text{ m/s}$ )

実験番号	Model	潮流 (ノット)	新計装
173	D25-5	N i 1	
174	"	-2	
175	"	-1	
176	"	-2	
177	"	-2	
178	"	+2	
179	D50-5	N i 1	
180	"	-2	
203	"	-1	
204	"	-1.5	
205	"	-2	Yaw Rate Wheel
206	"	-1.5	
207	"	-1	
208	"	-2	Course Wheel
210	"	-2	Course Wheel
211	"	-2	Yaw Rate Wheel
212	"	-2	Course Wheel
213	"	-2	X-Y Recorder
214	"	-2	X-Y Recorder
215	D25-5	-1	
216	"	-2	
217	"	-1	
218	"	-2	Yaw Rate Wheel
219	"	-2	Yaw Rate Wheel
220	"	-2	Yaw Rate Wheel
221	"	-2	Course Wheel
222	"	-2	Course Wheel
223	"	-2	
224	"	-2	X-Y Recorder

(注) 潮流 (-) は右舷正横より受ける。

表 2.5.2 変針終了時の横偏位量  $y_f/L$  の回帰分析

説明 变 数	R
$x_0/L$	0.69
$x/L, L/V$	0.85

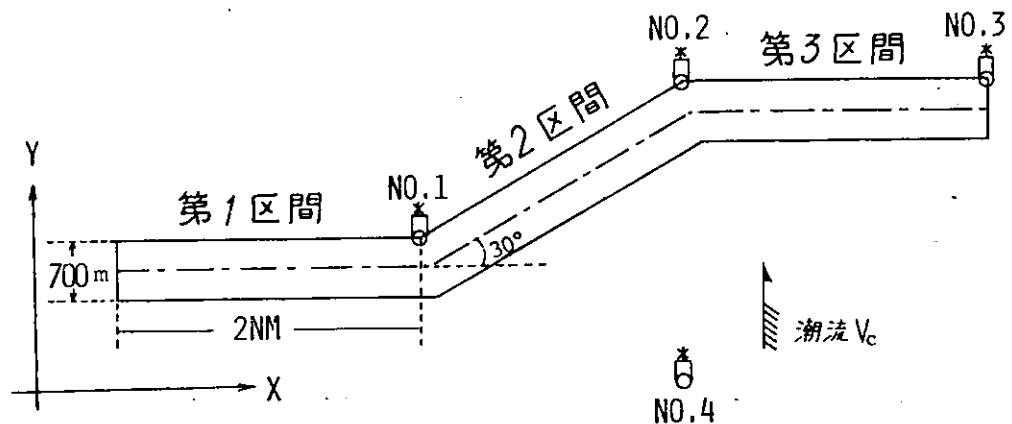


図 2.5.1. 航 路 設 定

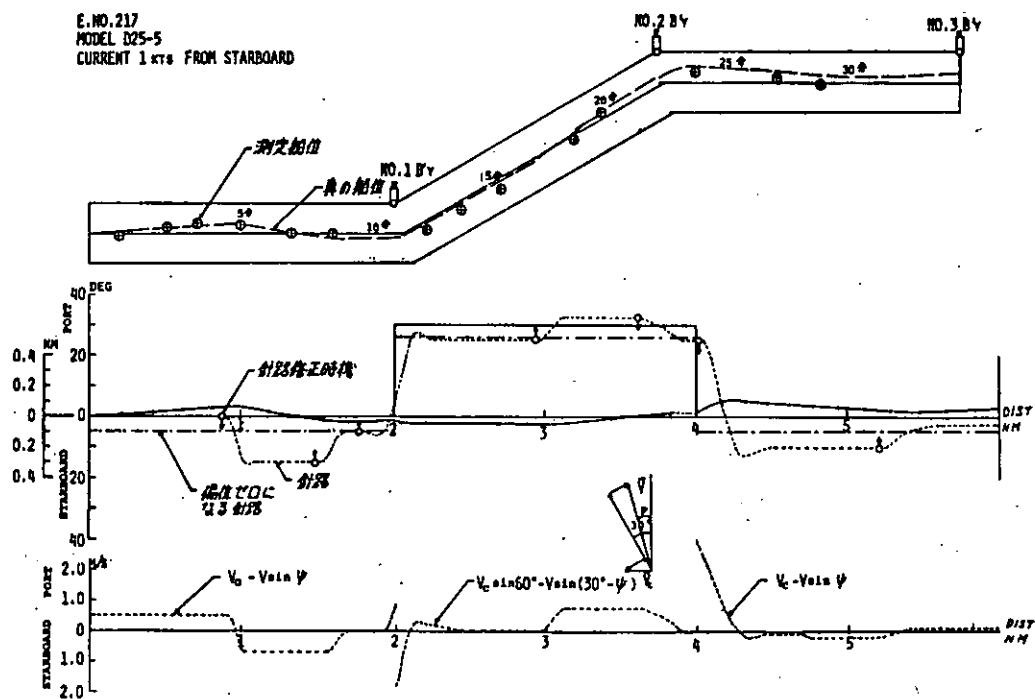


図 2.5.2 狹水道操船の実験例

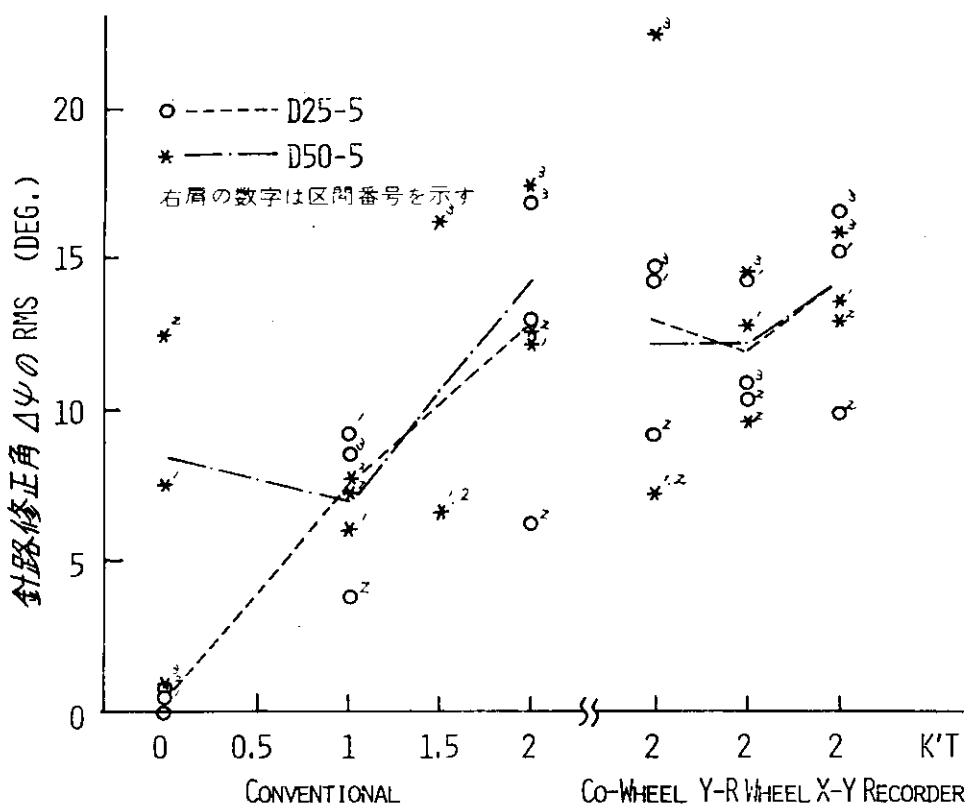


図 2.5.3 保針操船中の  $\Delta\psi$  RMS

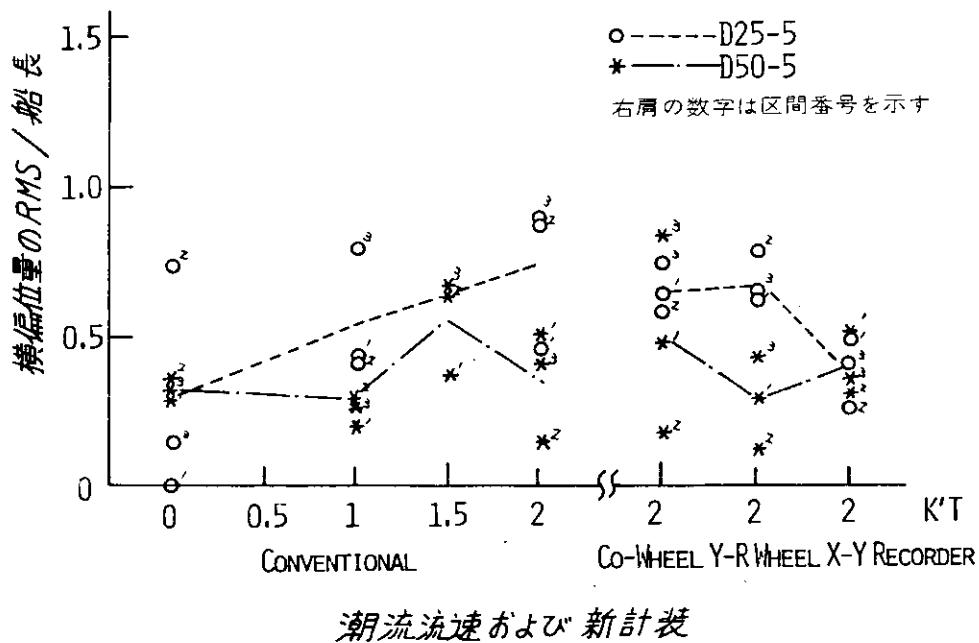


図 2.5.4 保針操船中の  $y$  RMS / L

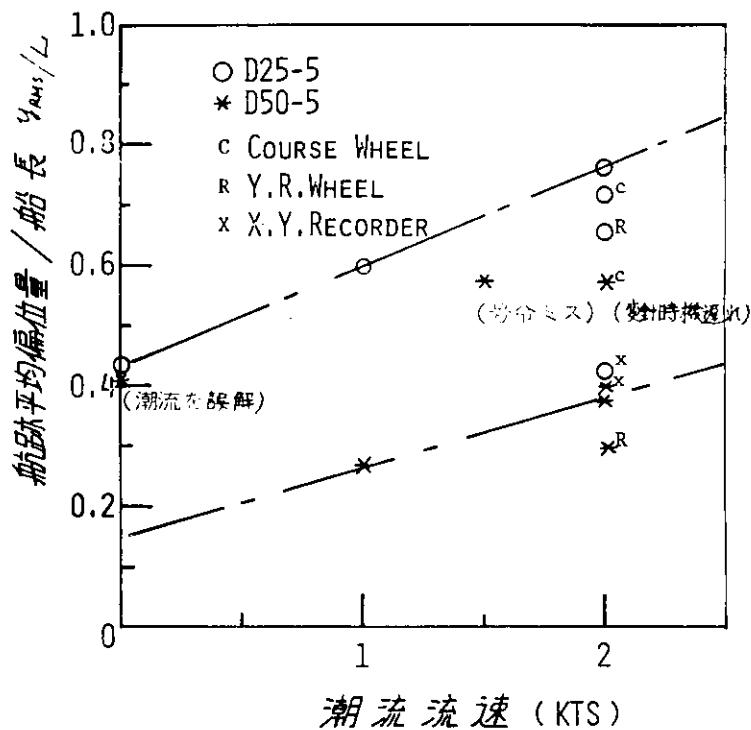


図 2.5.5 航跡平均偏位量 - 潮流流速

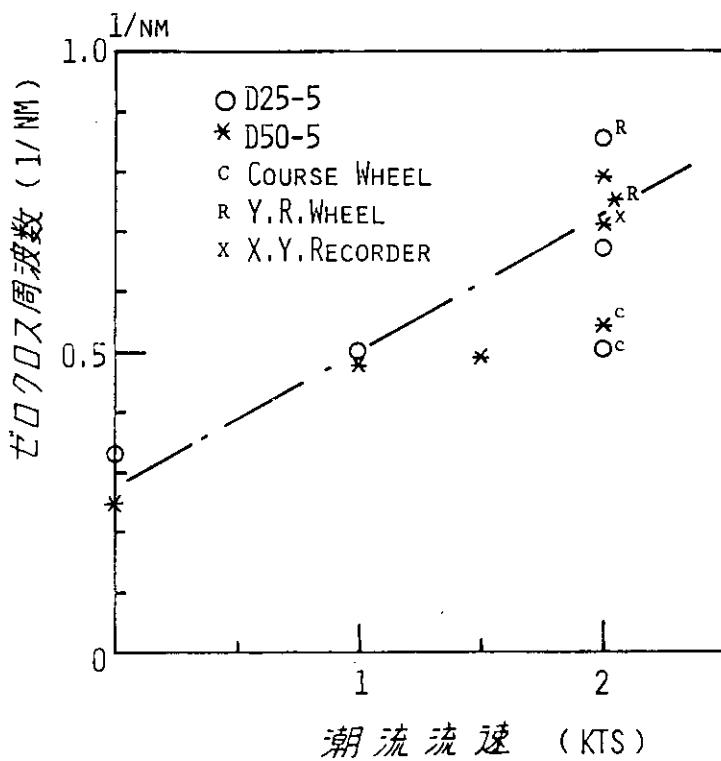


図 2.5.6 ゼロクロス周波数 - 潮流流速

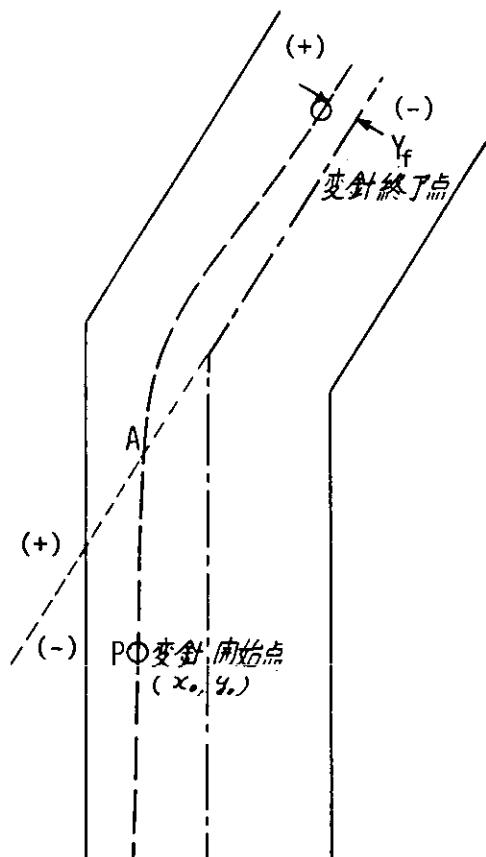


図 2.5.7 記号

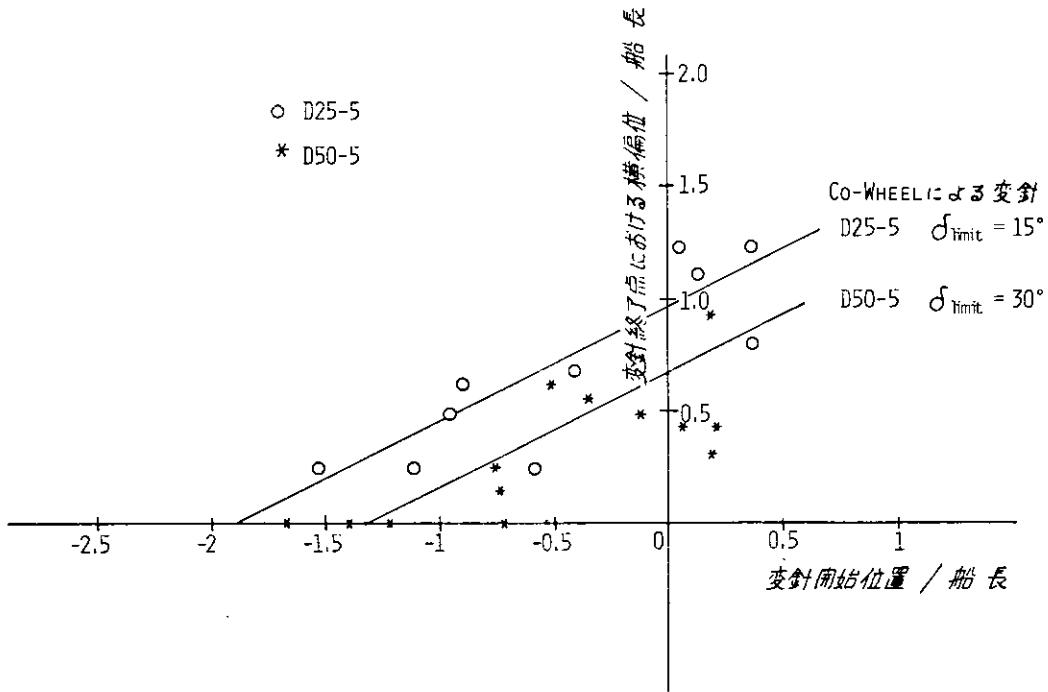


図 2.5.8 変針終了点における横偏位と変針開始位置の関係

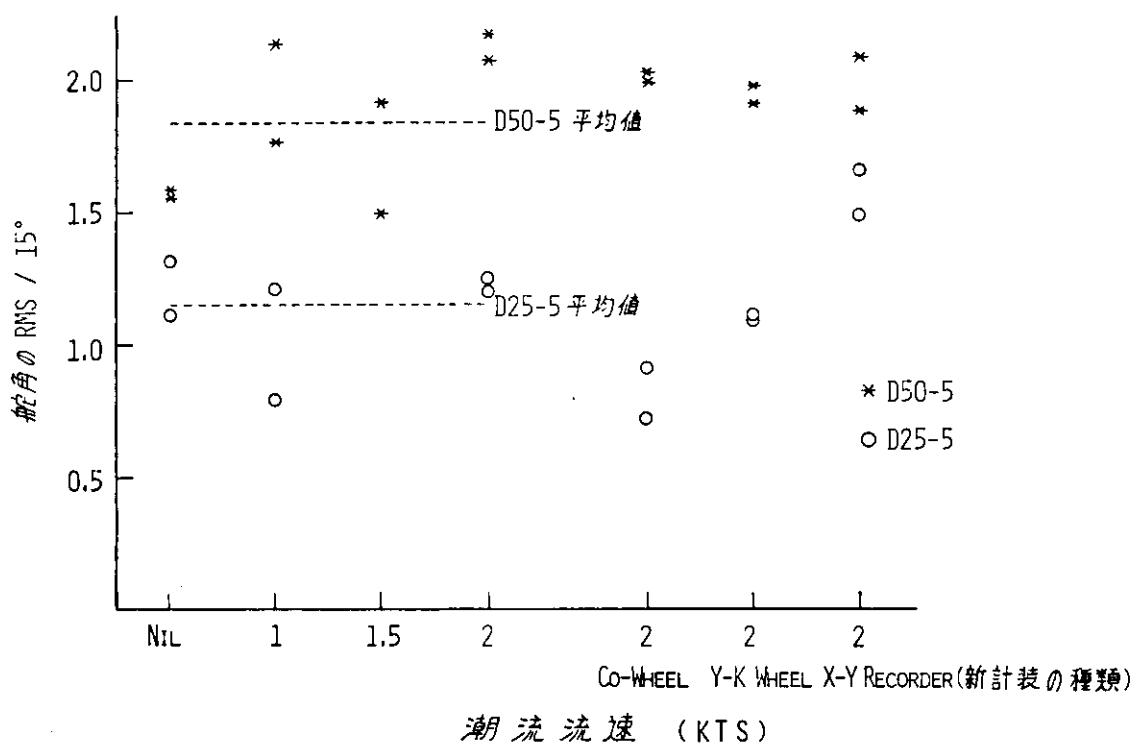


図 2.5.9 変針操船中の操舵舵角

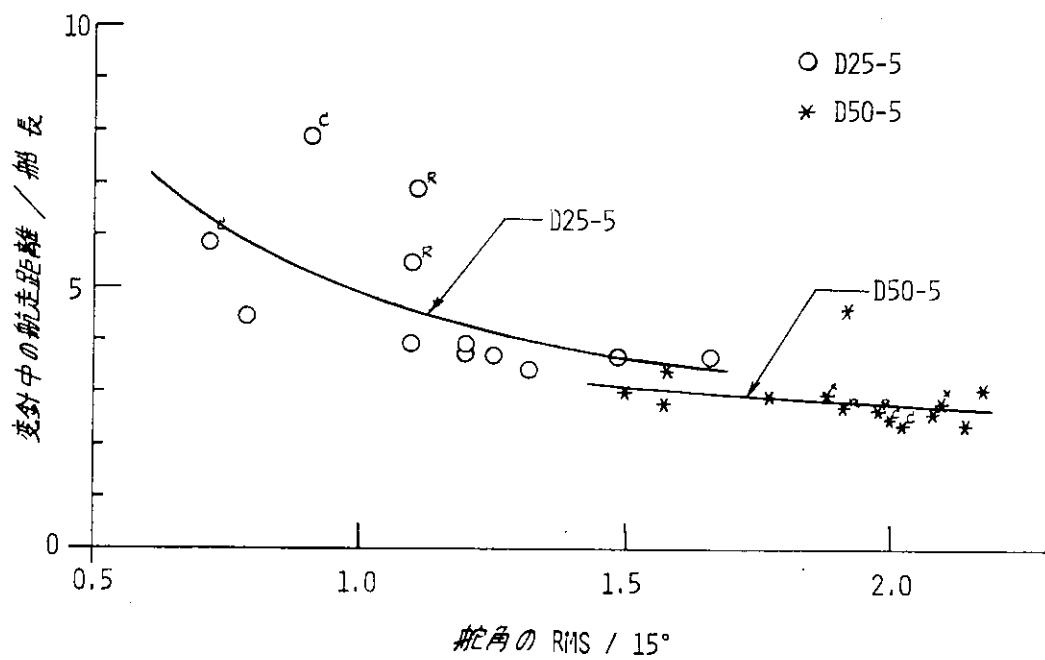


図 2.5.10 変針操船中の航走距離と操舵舵角の関係

### 3. 避航操船の模擬実験

#### 3.1 実験方法と状況設定

##### 3.1.1 航路指定のない海面での避航操船

避航操船に影響を与える諸要素を求めて、それらの相互関係のもつ共通のパターンを求めるために、まず操船者に加わる負担が最も単純な一隻の他船を避航する場合を想定して模擬操船を実施した。

実験はシリーズⅠ、Ⅱ、Ⅲについて表3.1.1から3.1.4に示す初期設定値で実施した。自船の速力 $V_A$ は6m/s(約11.7ノット)として、相手船には大型フェリー( $L_{pp} = 150\text{ m}$ )を選び、スクリーンに視覚表示されるとともに船橋内のレーダ画面にも表示され、実験開始時の自船と他船の位置は、原則として図3.1.1に示すように衝突予想点Cから1.5マイルのところに設定した。したがって他船の速力 $V_B = 6\text{ m/s}$ のときは、C点で両船が衝突する状況にあり、 $V_B$ を2m/secから7m/secに変え、又 $V_A\tau_0$ を0.6~1.5マイルに変えて必ずしも衝突しない場合を適宜おり込んで実験を実施した。したがって操船者は実験開始時からレーダおよびコンパスを使用して他船の動静を観測して避航が必要かどうかの判断をした後、必要な場合のみ避航動作をしている。この様子は、実際の避航操船と同じような過程を再現している。

実験中に計測した項目は、(1)自船の航跡、(2)舵角、(3)回頭角、(4)回頭角速度、(5)自船から見た他船の方位、(6)他船との相対距離、(7)速力の時間的変化、を記録した。そして、自船の航跡は1分間隔でタイムマークが示されている。計測結果の一部を一例として図3.1.2-1に示す。

避航開始時機 $\tau$ は、図3.1.1に示すように $\tau = \tau_0 - \Delta\tau$ で求められ、避航時間 $1/\mu$ は避航終了時機までをとり、避航開始時機(操舵開始時機)から原針路に戻るための操舵をして、回頭角速度がゼロになる時までをとり、その時の他船との相対距離をD C P A(Distance of Closest Point of Approach)とした。しかし、回頭角速度がゼロとなるまえに相対距離が最小になるときは、その時刻を避航終了時刻とみなした。なお、回頭後一定針路で航行する場合(例えば、反航船を避航するような場合)は原針路へ復帰するための操舵をした時を終了時刻とした。このような決め方は操船者の操船作業の処理能力を決め觀点からこの時刻以降は次の避航に必要な他船を避航する動作を行うことが出来るからである。

又、操船者が避航を実施するまでに行なう他船の位置測定回数と、避航終了後に操船者が受けた緊張感をアンケートによって調べた。

なお、物標投影装置のズーム設定( $\theta_Z$ )上の手違いで、実験Ⅰシリーズにおいては、 $\theta_Z = 0.78$ であり、実験Ⅱシリーズでは $\theta_Z = 1.56$ と $\theta_Z = 1.00$ (標準値)の3種の拡大率で実験を行なった。図3.1.3に示すように、 $\theta_Z$ の値によって投影される物標の大きさが、標準値に比べて相対距離の変化と共に増減することになった。

表3.1.5は各 $\theta_Z$ における同じ操船者が行なった避航動作のバラメータ避航開始距離( $D_r$ )、避航開始時機( $\tau$ )、避航時間( $1/\mu$ )の平均値( $\bar{x}$ )と標準偏差 $s$ として変動係数を示しているが、 $\theta_Z$ によってほとんどかわっていない。これは操船者が避航を開始する距離(約1マイル)付近では、映像の大きさはほとんど変らず、その後の相対運動は船自身の旋回運動で決まり、原針路に戻す時は、相対方位で見て行なうためではないかとみられる。

この結果により、以下では $\theta_Z$ の影響は小さいとみて、実験結果のすべてを解析の対象とした。なお実験Ⅲシリーズは $\theta_Z = 1.0$ で実施している。

##### 3.1.2 航路指定のある海面での避航操船

操船シミュレータを使う避航操船の模擬実験が実施されるようになってからまだ日が浅く、避航操船に影響する諸要素がよく確められていない現状なので、今年度の実験は、基本的な避航操船を中心にして実

施されている。したがって、航路指定のある（地形的な制約のある）海面での避航操船は図 3.1.4、表 3.1.6 に示すような状況で事例研究として行なわれた。実験の実施方法および計測項目は 3.1.1 の航路指定のない場合とほとんど同じである。なお表 3.1.6 で実験番号 327～336 は D25-5 を I 航海士が操船し、実験番号 411～414 は D50-5 を ドックマスター S 氏が操船した。

### 3.1.3 操船者

避航操船を出来るだけ実験に即して実験を行うため、操船者はいずれの場合も外航貨物船の航海士として乗船経験のある者が実施した。実験シリーズⅠおよびⅡは T 航海士、2.2 の航路指定のある保針、変針（狭水道操船）と表 3.1.6 の航路に制約のある避航操船は I 航海士が担当した。いずれも 2～3 年の乗船経験を有し、標準的な航海技術をもっている。しかし、超大型船の操船経験を有していないので、実験シリーズⅢでは超大型船の操船経験を有するドックマスター S 氏が操船を担当した。

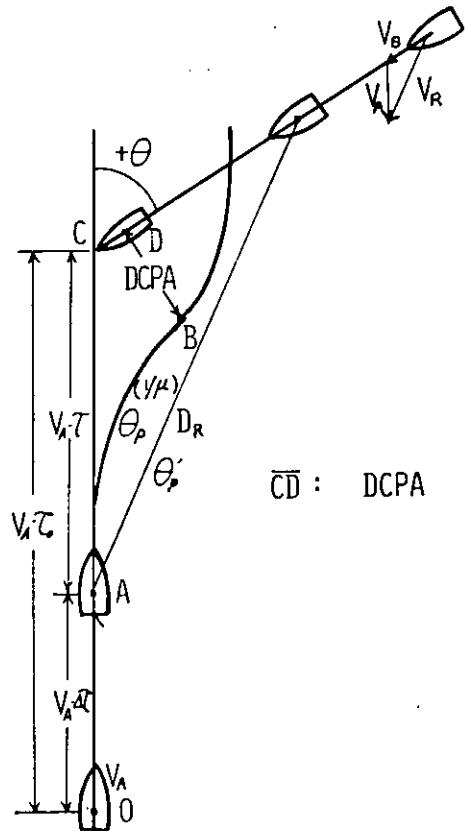


図 3.1.1 記号

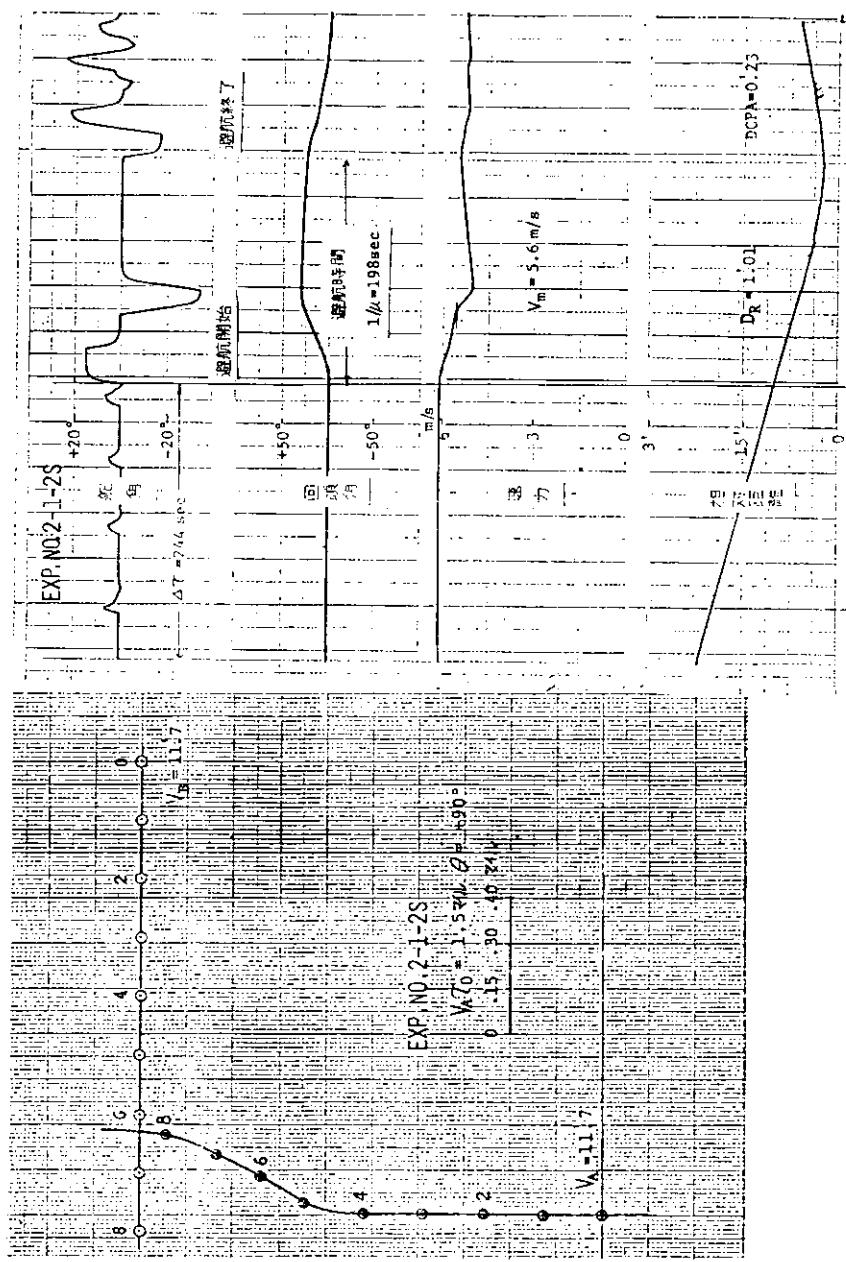


図 3.1.2 計測結果の一例

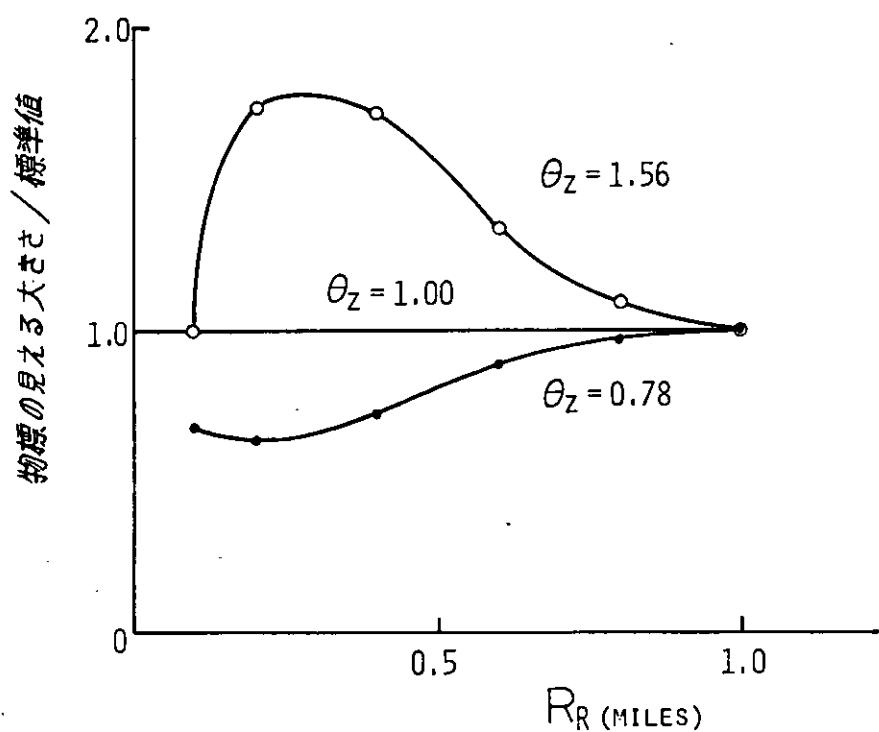


図 3.1.3 像の大きさと  $\theta_z$

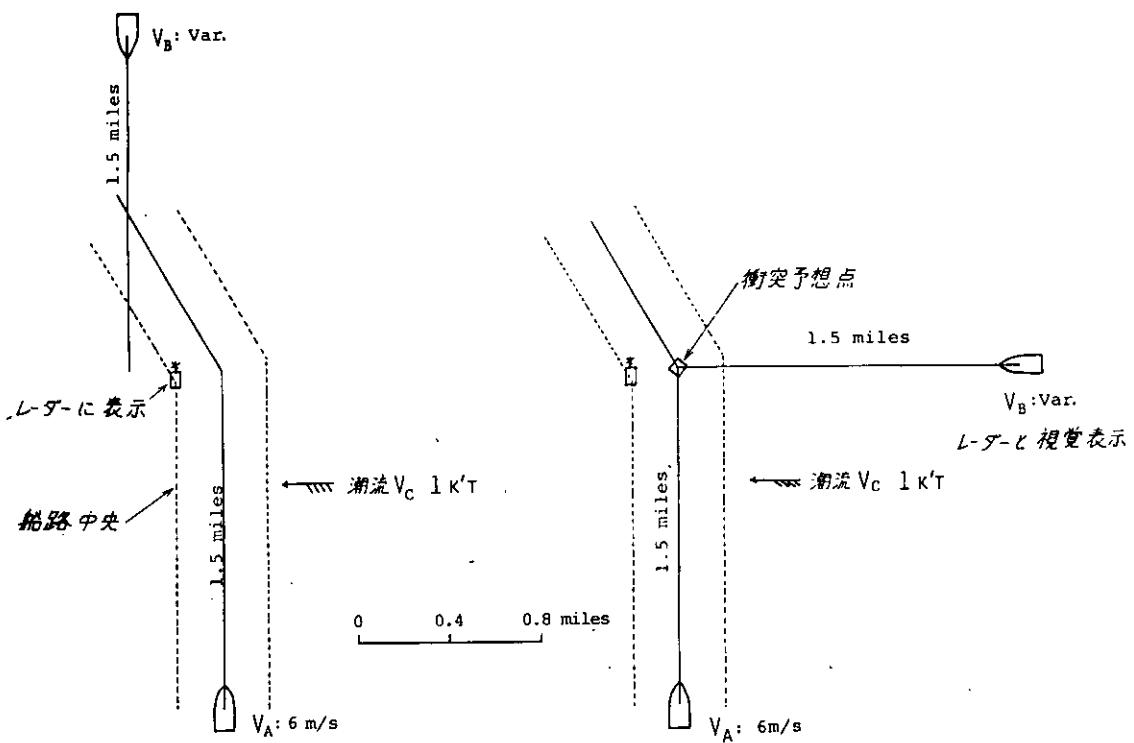


図 3.1.4 航路指定のある避航操船の状況設定

表 3.1.1 避航操船の初期設定（実験 I シリーズ）

(  $V_A = 6 \text{ m/s}$  )

実験番号	$V_A \cdot \tau_0$ (マイル)	$V_B$ (m/s)	$\theta$ (deg)	Model	
				D25-5	D25-S
2-1-2	1.5	6	+90	○	
2-1-2S	1.5	6	+90	○	
2-1-2 D25S	1.5	6	+90		○
2-1-5	1.5	5.96	+90	○	
2-1-5S	1.5	6	+90	○	
2-1-6	1.5	5.62	+90	○	
2-1-6S	1.5	4	+90	○	
2-1-7	1.5	6.65	+90	○	
2-1-7S	1.5	6.5	+90	○	
2-1-8	0.855	6	+90	○	
2-1-8 D25S	0.888	6	+90		○
2-1-9	1.18	6	+90	○	
2-1-9S	1.2	6	+90	○	
2-1-9 D25S	0.6	6	+90		○
2-1-10	1.5	6	-90	○	
2-1-10 D25S	1.5	6	-90	○	
2-1-11S	1.5	5	-90	○	
2-1-12S	1.5	4.5	-90	○	
2-1-13S	1.5	6.5	-90	○	
2-1-14	1.5	6	+45	○	
2-1-14 D25S	1.5	6	+45		○
2-1-15	1.5	6	+5	○	
2-1-15 D25S	1.5	6	+5		○
2-1-16	1.5	6	-45	○	
2-1-17	1.5	6	+135	○	
2-1-17 D25S	1.5	6	+135		○
2-1-17 D25SS	1.5	6	+135		○
2-1-18	1.5	6	-135	○	
2-1-19	1.2	2	0	○	

表 3.1.2 避航操船の初期設定（実験Ⅱシリーズ）

Model D50-5 ( $V_A = 6 \text{ m/sec}$ ,  $V_{A\tau_0} = 1.5 \text{ マイル}$ )

実験番号	$\theta_Z$	$V_B$ (m/s)	$\theta$ (deg)	実験番号	$\theta_Z$	$V_B$ (m/s)	$\theta$ (deg)
101	1.56	6	+90	119	1.56	5	+45
102	1.56	7	+90	121	1.56	7	+135
103	1.56	6	+5	156	1.0	6	+90
104	1.56	6	-45	157	1.0	7	+90
105	1.56	6	+135	158	1.0	6	+5
106	1.56	5	-90	159	1.0	6	-45
107	1.56	6	-135	160	1.0	6	+135
108	1.56	5	+90	162	1.0	6	-135
109	1.56	6	-90	164	1.0	5	+90
110	1.56	6	+45	165	1.0	6	-90
111	1.56	2	0	166	1.0	6	+45
112	1.56	2	180	167	1.0	2	180
113	1.56	6	-5	168	1.0	6	-5
114	1.56	7	-90	169	1.0	7	-90
115	1.56	6	+90	170	1.0	6	+90
116(別)	1.56	7	+45	171	1.0	7	+45
117	1.56	7	+45	172	1.0	5	+45
118	1.56	5	+45				

表 3.1.3 避航操船の初期設定（実験Ⅱシリーズ）

Model D25-5 ( $V_A = 6 \text{ m/sec}$ ,  $V_{A\tau_0} = 1.5 \text{ マイル}$ )

実験番号	$\theta_Z$	$V_B$ (m/s)	$\theta$ (deg)	実験番号	$\theta_Z$	$V_B$ (m/s)	$\theta$ (deg)
122	1.56	6	+90	135	1.56	7	+45
123	1.56	7	+90	136	1.56	5	+45
124	1.56	6	+5	137	1.0	6	+90
125	1.56	6	-45	138	1.0	6	+90
126	1.56	6	+135	139	1.0	7	+90
127	1.56	5	-90	140	1.0	6	+5
128	1.56	6	-135	141	1.0	6	+135
129	1.56	5	+90	142	1.0	5	+90
130	1.56	6	-90	143	1.0	6	+45
131	1.56	6	+45	145	1.0	5	+45
132	1.56	2	180	146	1.0	7	+45
133	1.56	6	-5	147	1.0	2	180
134	1.56	7	-90	148	1.0	6	-90

表 3.1.4 避航操船の初期設定（実験Ⅲシリーズ）

(  $V_A = 6 \text{ m/sec}$ ,  $V_A^{\tau_0} = 1.5 \text{ マイル}$  )

実験番号	$\theta_Z$	$V_B$ (m/s)	$\theta$ (deg)	実験番号	$\theta_Z$	$V_B$ (m/s)	$\theta$ (deg)
401	1.0	5	+90	406	1.0	6	+45
402	1.0	6	+5	407	1.0	6	-5
403	1.0	6	+135	408	1.0	6	+90
404	1.0	7	+90	409	1.0	2	180
405	1.0	6	-90	410	1.0	6	-135

表 3.1.5 避航要素におよぼす  $\theta_Z$  の影響

$\theta_Z$	D25-5						D50-5					
	Dr(マイル)		$\tau$ (sec)		$1/\mu$ (sec)		Dr(マイル)		$\tau$ (sec)		$1/\mu$ (sec)	
	$\bar{x}$	$s/\bar{x}$	$\bar{x}$	$s/\bar{x}$	$\bar{x}$	$s/\bar{x}$	$\bar{x}$	$s/\bar{x}$	$\bar{x}$	$s/\bar{x}$	$\bar{x}$	$s/\bar{x}$
1.00	1.00	.20	2.21	.32	1.73	.29	1.07	0.30	2.39	.21	2.17	.32
1.56	1.04	.32	2.18	.40	1.91	.30	1.05	0.38	2.38	.21	2.11	.16
0.76	1.00	.41	2.12	.35	1.63	.28	—	—	—	—	—	—

表 3.1.6 航路に制約のある海域での避航操船の状況設定

(  $V_A = 6 \text{ m/sec}$ ,  $V_A^{\tau_0} = 1.5 \text{ マイル}$  )

実験番号	$\theta$ (deg)	$V_B$ (m/s)	$V_C$ (knot)	実験番号	$\theta$ (deg)	$V_B$ (m/s)	$V_C$ (knot)
327	0	3	-1	334	90	7	-1
328	0	3	-1	335	90	5	-1
329	0	4	-1	336	90	5	-1
330	0	5	-1	411	90	6	0
331	0	6	-1	412	0	5	0
332	90	6	-1	413	90	4	0
333	90	6	-1	414	90	5	0

(注) 実験番号 327~336 Model D25-5 I 航海士が操船

実験番号 411~414 Model D50-5 ドックマスターS氏が操船

### 3.2 避航操船の分析と評価(1)

#### 3.2.1 避航操船のモデル化

避航操船は、(1)他船の状況確認 (2)避航の意志決定 (3)避航処置の実施 (4)安全の確保 というプロセスで行なわれる。これらの各プロセスを定量的に表現するには多数のパラメータを必要とするけれども、ここでは(3)の避航処置の実施の部分を避航動作として、これを避航開始時機 $\tau$ と避航時間 $1/\mu$ で表現する次の考え方に基づいて解析する。

船舶の輻轆する水域を航行中の船での操縦動作(避航動作、変針動作)と、それを必要とする到着単位(他船、障害物、変針点等)との関係に待ち合せ理論を応用した数学モデルによって比較的明解に避航操船における衝突の危険性を評価する方法がある。<sup>6), 7)</sup>

これによれば、いくつかの近似のもとで衝突の危険性 $P_c$ は、避航の必要な単位の到着率 $\lambda$ 、単位時間にそれを処理できる数(避航能力) $\mu$ および避航を開始する時機 $\tau$ (図3.1.1参照)の三つのパラメータによって次式で評価できることになる。

$$P_c = \rho e^{-\mu\tau} (1 - \rho) \quad \dots \quad (3.2.1)$$

ここで、 $P_c$  : 避航操船で危険な状況の発生する確率

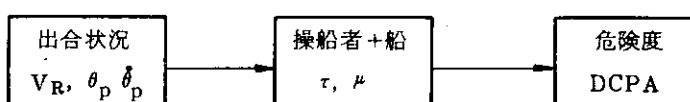
$\rho : \lambda / \mu$  避航密度

$\rho = \lambda / \mu$ は、操船者が自分の避航能力に対して他船がどのような頻度であらわれるかを示すパラメータである。 $\mu$ は操船者が衝突予想点に対して、避航時間( $1/\mu$ )の何倍の余裕をもつところで避航を開始するかを示すパラメータで操船上の一一種の安全係数である。だから $\lambda / \mu$ と $\mu$ は避航操船を表す重要な要素であり、そのいずれにも避航能力が影響を与えることに注目すべきである。

避航能力 $\mu$ は、自船の大きさ、操縦性能、速力、操船者の避航方法だけでなく他船の協力動作の有無、避航対象船以外の第三船の存在によって見かけ上能力が増減する。又屈曲のある航路では、変針動作が必要なために避航のために使える時間が減少するため避航能力が低下する。

$\tau$ は、操船者が避航能力を基礎にして、他船の動静や自分の操船上の判断ミスも考慮して決める避航開始時機であり、レーダ航法の用語によれば T C P A (Time of Closest Point of Approach) にほぼ等しい。以上の見地から、以下では主として $1/\mu$ と $\tau$ を使って避航操船を表現して、これが他船との出合状況や、避航操船の結果とどのような関係をもつかを検討することにする。

以上の見地から他船との出合状況によって、この $\tau$ と $\mu$ を操船者が決める結果として D C P A が決まるところみると、次のようなフローを考えることができる。



そこで、以下では $L/V$ を基準にして出合状況を相対速力 $V_R$ 、相対方位 $\theta_p$ 、およびその角速度 $\delta_p$ で表現し、 $V_R, \theta_p, \delta_p$  と $\tau$ と $\mu$ の関係と、 $\tau$ と $\mu$ と D C P A の関係を中心に調べてみた。

#### 3.2.2 出合状況と避航動作およびその効果

##### (1) 避航動作に影響する諸要素

避航動作のパラメータ $\tau$ 、 $1/\mu$ およびその比 $\mu$ が船の $L/V$ や出合状況によってどのように影響を受け、その効果として D C P A にはどのような影響を与えるかを解析するために、ここでは変数増加法による重回帰分析法によった。使用した資料はデータ数の多い実験シリーズⅡの表3.1.2、3.1.3に示した実験ケースのうち、データの不備なものを除いて60例を使用した。

出会い状況は、今回の実験のように、両船が衝突予想点から等距離について、他船が回頭して避航しない場合は、他船の接近速力 $V_R$ 、出会い角 $\theta$ 、および相対方位の変化率 $\delta_p$ によってその状況が決まって

くる。又、操船する船の操縦性能と関連する  $L/V$  も避航動作に影響を与えると考えられるので、 $\tau$  および  $\mu\tau$  の場合の説明変数は  $L/V$ ,  $V_R$ ,  $|\dot{\theta}_p|$ ,  $|\theta|$  の 4 変数をとり、 $1/\mu$  にはこれらに  $\tau$  を加えて 5 変数とした。 $\dot{\theta}_p$  と  $\theta$  の絶対値をとったのは符号よりもその大きさが  $1/\mu$  と  $\tau$  に影響を与えると考えたからである。又、 $1/\mu$  の説明変数に  $\tau$  を加えたのは、避航開始時機を決めてから、避航時間  $1/\mu$  が決まるという時間的な前後関係を考慮したためである。

変数增加法によれば、これらの説明変数のうちで  $\tau$  や  $1/\mu$  を最もよく説明するものから順次選んで (3.2.2) 式のような線型の回帰式を作っていくことができる。

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 \tau \quad \dots \quad (3.2.2)$$

ここで  $\hat{y}$  : 被説明変数の回帰値  
 $x_1, x_2, \dots$  : 説明変数  
 $b_0, b_1, \dots$  : 偏回帰係数

この時  $b_i$  は、実際の  $y$  の値と  $\hat{y}$  との差の二乗和が最小になるように決定される。又、 $\hat{y}$  によって  $y$  がどれだけ説明出来るかを調べるために、 $\hat{y}$  と  $y$  の間の相関係数つまり重相関係数  $R$  が、説明変数の数を増加させていくたびに計算された。 $\tau$ ,  $1/\mu$ ,  $\mu\tau$  を被説明変数とした時の  $R$  の値が表 3.2.1 に示されている。これからみると  $\tau$  が  $\theta$ ,  $1/\mu$  が  $\tau$  とやや相関があるが、説明変数を増していくても重相関係数を向上させることができないことがわかり寄与率  $R^2$  は 0.25 程度で、これらの説明変数以外の要素によって決っている可能性を示している。

そこで同様の手順により、避航動作によって得られる避航中の最接近距離 (DCA) を被説明変数にとり、説明変数として  $L/V$ ,  $V_R$ ,  $|\dot{\theta}_p|$ ,  $|\theta|$ ,  $\mu\tau$ ,  $\phi_{max}$  の 6 変数をとって解析すると表 3.2.2 のような結果を得た。

これから  $\mu\tau$  がかなり高い相関をもち、これによって避航の効果の変動分が 50% (寄与率  $R^2 = 0.5$ ) 程度が説明できることになる。このことは 3.2.1 の避航操船の数学モデルによって衝突の危険性を評価するパラメータとして  $\mu\tau$  を使うことの妥当性を示すことになる。逆に、 $1/\mu$ ,  $\tau$  や  $\mu\tau$  が出会い状況のパラメータの線型結合によって説明しきれない理由は、非線型の項を入れていないことと、操船者が種々の出会い状況でかなり恣意的に  $\mu$  や  $\tau$  を選んでいるため、結果として出会い状況と  $\mu\tau$  の関係が一定でないためであると考えられる。

次に上の説明変数  $x_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots$ ) は相互に影響しあうので、その影響分を除去して、 $x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots$  を一定にして、 $x_i$  と  $y$  ( $x_j$  とする) との相関つまり偏相関係数を計算して、 $\mu\tau$ , DCA に影響する要素の程度を調べた。偏相関係数は変数間の単相関行列の逆行列  $[q_{ij}]$  の要素を使って次式で求められる。

$$r_{x_j x_i \cdot x_1 x_2 \dots} = \frac{-q_{ij}}{\sqrt{q_{ii} q_{jj}}} \quad \dots \quad (3.2.3)$$

これらの結果は表 3.2.3 に示されており、やはり、DCA には  $\mu\tau$  が大きな影響力をもつことがわかる。又、 $1/\mu$  には  $L/V$ ,  $\tau$ ,  $V_R$  が影響を与える、又、 $\tau$  には  $\theta$  の影響が他の変数に比べてやや大きいことがわかる。しかし、 $1/\mu$ ,  $\tau$  ともに、ここでとった説明変数以外の原因で変動する部分が大きいことになる。実験結果の統計的解析の結果を考慮してプロットしたのが以下の図 3.2.1 から図 3.2.8 である。

## (2) 出合い状況と避航動作

図 3.2.1, 3.2.2 はそれぞれ Model No D25-5 と D50-5 について、操船者が最も関心をもつ避航開始距離と相対速力との関係を示しており、かなりバラツキがあるが、右上りの傾向がある。実線は

実験シリーズⅠ、Ⅱの結果について、同図でnの添字をつけたニアミス( $DCPA \leq .1$ マイル)の場合を除いて求めた回帰直線であり、 $L/V$ の影響をみるために互に他のモデルの回帰直線を点線で示している。“△DCPAなし”というのは状況設定で避航開始前の相対方位の変化率の絶対値 $|\dot{\theta}_p|$ がゼロであることを示している。 $|\dot{\theta}_p|$ のある場合は、最大で $0.0435 \text{ deg/sec}$ まで変化したが、この程度の見透し線の変化は $D_R - V_R$ の関係にあまり影響を与えないようである。以上の表現は、以下の図に共通なものである。 $D_R = a(V_R) + b$ の回帰式で $\tau = D_R/V_R$ の関係を使うと、 $\tau = a + b/V_R$ となり、D50-5の場合のようにbが小さいとき、 $\tau$ はほぼ一定になることを意味する。

図3.2.3、3.2.4は、出合角と避航中の最大回頭角 $\phi_{max}$ を示している。操船実務上からは他船の船尾へ自船を向けるといわれるが、これは横切りに近い場合であり、実験結果もそれを示している。又、その他の出会い角での避航角もこの図から知ることが出来る。 $\phi_{max}$ は避航時間( $1/\mu$ )と関係するので避航操船における操縦性能の果す役割を検討する時、必要な値である。

$L/V$ の影響はあまり顕著ではないが、 $\dot{\theta}_p$ のあるときは $\phi_{max}$ が変わることを示している。

#### (3) $\mu\tau$ と最接近距離

図3.2.5、3.2.6は統計的解析で相関の高かった $DCPA$ と $\mu\tau$ の関係を示している。確かにD50-5およびD25-5のいずれのモデルの場合も線型関係にあることがわかる。

△DCPAがある場合(・印と◎印)、 $\tau$ を小さくしても $1/\mu$ も小さくなり、実質的な $DCPA$ を同じ程度になるように操船しているとみられる。しかし、 $\mu\tau$ のとり方にはかなり任意性があるので、 $DCPA$ は図のように分布する。

#### (4) 避航動作における個人差

以上はT航海士が操船した実験シリーズⅠおよびⅡについて分析したものであるが、避航動作における個人差を調べるために実験回数は少ないけれども、表3.1.4に示したように、ドックマスターS氏が操船を行なった。そして、その結果を $\mu\tau - DCPA$ の関係で示したのが、図3.2.7である。図中の点線は、T航海士の操船結果からえた $\mu\tau - DCPA$ の回帰直線でEng.と舵を併用して避航した1点を除いてほぼ同じ傾向を示すことがわかる。これらの比較だけで早急な結論は出せないが、このことはシミュレータ操船では、 $\tau$ が制約されるので、よく似た操船にならざるをえない結果と推察される。それは又、シミュレータ操船は厳しい状況で操船することになって、結果的に操船者の恣意性が少なくなり操船環境や船の操縦性能と操船者の行う避航動作の関係が明確にしやすいと思われる。

#### (5) シミュレータ操船における $\mu\tau$ と実際の $\mu\tau$

シミュレータによる避航操船で使われた $\mu\tau$ の分布と、実際に神戸港沖で行なわれた避航操船のうち、一船対一船の見合い関係で実測された $\mu\tau$ の分布を比較したのが図3.3.8である。シミュレータは同一人がくり返して操船を行なった結果であり、実測は陸上に設置したレーダーの画面を一分間隔で撮影して得たものなので、船の大きさや操船者も多様である。従って両者の比較は、傾向を示す程度にみるべきであろう。しかし、実際の操船に於ては $\mu\tau$ をシミュレータ操船におけるそれより平均値で、2倍程度大きくとっていることがわかる。これは、操船者に対して行なったアンケートによる緊張感の評価でも平均評点が4段階評価で平均1.0と緊張感が低いことや視界再現装置の制約で実験の開始時機が衝突予想点から近いためである。そして $\mu\tau$ が小さいことが図3.2.5、3.2.6に示したようにえられた $DCPA$ が0.1マイル以下になる場合が22%に達し、衝突も3回起っている。

### 3.2.3 避航動作に与える $L/V$ の影響

$L/V$ が避航動作に与える影響をみるために $L/V$ を5.0と2.5に変えて実験をしたが $V$ はいずれも $6 \text{ m/s}$ でおなじなので、結局 $L$ の影響をみたことになる。統計的な解析や $D_R - V_R$ 、 $\phi_{max} - \theta$ 、 $DCPA - \mu\tau$ の関係を示す図で $L/V$ の影響は顕著ではない。しかし $D_R$ 、 $DCPA$ がマイル単位で示

されているので  $L$  を基準にして表現すると、 $L/V$  によってこれらの値は大きな違いが出る。このことはシミュレータによる操船の場合は視界再現装置の関係で  $D_R$  や  $\tau$  が制約され、表 3.1.5 に示したように  $L/V$  によってこれらの平均値は変らず、 $L/V$  の大きい船の方が相対的には厳しい環境で操船していることになる。そのため  $L/V$  の大きい船の  $D_R$ 、 $\tau$  の変動係数は大きく、習熟をつめばこれらは安定してくるのかもしれないが、操船方法が安定していないように見える。

一方、図 3.2.3 にあるように、 $\phi_{max}$  は  $L/V$  の影響をほとんど受けないが、旋回性能がマクロには  $L/V$  に影響されるので、図 3.2.9 に示すように避航時間  $1/\mu$  の分布が影響を受け、 $L/V$  が大きい方が避航時間が長くなる。実験シリーズ I, II の実験結果、D25-5について 53ヶ、D50-5について 33ヶのそれぞれの  $1/\mu$  の平均値は 171 sec と 241 sec になり、この平均値の差を t-検定すると、5% 水準で有意差があると言え、その差の信頼区間は 6.5~19 sec となる。

シミュレータ操船の場合は、視界の制約のため顕著でないのが、実際の操船では避航を開始して一定針路で直進したあと避航を終了するので、この直進部分の航走時間  $L/V$  が必要である。したがって避航時間は第一近似としては

$$(1/\mu) \text{ の平均値} = \alpha (L/V) + (L/V) \quad \dots \dots \dots \quad (3.2.4)$$

の型が考えられる。そして係数  $\alpha$  は船の操縦性能によって定まる値とみられる。今回の実験では  $L/V$  を二点しかえていないので、未だ未解決の部分が多いけれども、危険性の基準が (3.2.1) 式で与えられる  $\mu\tau$  の型で定まり、一方操船者の運航技術の面から避航の開始のできる  $\tau$  が決まると、必要な  $1/\mu$  が決まり、そして係数  $\alpha$  の大きさからその船に必要な操縦性能を決めることができることが可能になるかもしれない。その一つのアプローチの方法を次節でのべる。

一方、避航動作によって両船の見合い関係が決まり、自船のみが一定の避航動作をする時、他船が避航しないで直進する場合には、両船間の相対距離は数値計算によって求めることができる。図 3.2.10 は出会い角  $\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$  で自船が舵角  $15^\circ$  又は  $35^\circ$  で旋回した時の最小相対距離 (DCPA) を示している。但し  $\theta = 135^\circ$  については、操船の常識から左へ避航しており又、自船の回頭角が  $100^\circ$  を超えて DCPA が生じない時は除外している。これから DCPA には  $\tau$ 、 $L/V$ 、 $\delta$  が影響を与える、出会い角  $\theta$  はあまり影響がないことがわかる。そして  $L/V$  が  $\tau$  になって、同じ回頭角になるのに時間が  $\tau$  になってしまっても、その時の他船の位置が同じでないので、DCPA には  $\tau = 120 \text{ sec}, \delta = 35^\circ$  の場合を除いて 2 倍の効果をもたないことに留意する必要がある。これは、(3.2.4) 式で示した  $1/\mu$  と同じ意味で、 $L/V$  を小さくしたからといってそれに反比例して DCPA が大きくならない。図 3.3.9 で数値計算で求めた DCPA は、その船でえられる DCPA の上限値とみることができ、操船者の判断の入った模擬操船の DCPA- $\tau$  の関係は、図 3.3.9 で点線で示すように当然上限値より小さくなるが、これは原針路に復帰することを意図するためである。この両者の関係が  $L/V$  によってやや異なることが  $L/V$  によって操船のしやすさが異なることの程度を示す一つの証拠なのかもしれない。その意味で、DCPA の上限値は、避航操船における一つの基本的な数値として利用できる。

### 3.2.4 避航開始時機と避航動作の信頼性

衝突関係が発生している状況で時間  $\tau$  が経過していくと、衝突の危険がどのように切迫してくるかを考慮して、 $L/V$  がこれにどのような影響を与えるか検討する。先の避航の数学モデルでは、これは、 $e^{-\mu\tau}$  の型で表現されているが、これは避航時間  $1/\mu$  の分布が  $\tau$  とは独立な指數分布であると近似して求めたものである。しかしそれ正確には、 $1/\mu$  は指數分布よりアーラング分布に近いと想像されるし、実際は  $1/\mu$  と  $\tau$  は操船者が  $\mu\tau$  の型で両方を調節するので、 $\tau$  の変化つまり避航関係における時間経過の様子が明らかでない。

一方、シミュレータによる模擬操船によれば、図3.2.5、3.2.6に示したように、 $\mu \tau$ とDCPAの間には、直線関係があるから、一定の $\tau$ における $1/\mu$ の分布によってDCPAが分布することになる。そして、DCPAの確保は、時間の経過と共に困難になるから、避航の初期と終期におけるDCPAの分布は異なるはずである。したがって、 $\tau$ の変化によるDCPAの分布は模型的に図3.2.11のようになると考えられる。

DCPAと $\tau$ の関係においてDCPAのピーク値は近似的に直線関係になる。これは、図3.2.12において実際のDCPAはC'附近で発生するが、これを近似的に衝突予想点Cに対する最接近距離と考えると、図3.2.12に示す記号で

$$\begin{aligned} DCPA &= \bar{AC} - \bar{AB} \\ &= \bar{AC} - (\bar{OB} - \bar{OA}) \\ &= V_m \tau_A \sin \phi - \{ R - R (\cos \phi - V_m T \sin \phi) \} \\ &= V_m (\tau_A - T) \sin \phi - R (1 - \cos \phi) \end{aligned} \quad (3.2.5)$$

となる。ここで $V_m$ は旋回中の平均速力( $C' \rightarrow C$ でおきかえる考え方では $\theta < \pm 90^\circ$ 以上ならばよい近似となる<sup>8)</sup>また、 $\phi$ は図3.2.3、3.2.4に示すように $\theta$ の関数となる。このことは大島氏と長畠氏らによって別々に備讃瀬戸東部にて計測された避航動作を解析して求めたDCPA- $\tau$ の関係(図3.2.13)<sup>9), 10)</sup>からもいえる。図3.2.13でシミュレータ実験の対応する平均値mが添字に $L/V$ を付して示される。そして、又図3.2.10に示したようにDCPAの上限値も $\tau$ と直線関係にある。

一方、一定の $\tau$ におけるDCPAの分布は、図3.2.14に示すようなレーベイ分布を想定する。

$$\begin{aligned} \text{密度関数} &: f(x) = k e^{-\frac{k}{2}x^2} \\ \text{平均値} &: m = \int_0^\infty x \cdot f(x) dx = \sqrt{\pi/2k} \end{aligned} \quad (3.2.6)$$

なぜならば、ピークが $\tau$ により移動していくので、一変数kで分布が決まる便利さが第一の理由だが、上記の実測結果にその平均値mをつかってピーク位置pを計算して実線で示したものがほぼ同じ傾向を示しているので第一近似として使用した。したがってkが $\tau$ によって変化していくわけで、つまりmが $\tau$ に比例すると、

$$m(\tau) = a\tau - b$$

$$\sqrt{\frac{1}{k}} = (a\tau - b) \sqrt{\frac{2}{\pi}} \quad \therefore k = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{(a\tau - b)^2} \quad (3.2.7)$$

となる。しかし、より厳密には2変数によって決まる分布型、たとえば、ある $\tau$ においてえられるDCPAの上限値が図3.3.10に示したように自船の操縦性能によって一意的に決まることから分布の上限、下限を制約するベータ分布や2変数で形状を決めるワイブル分布を使うべきであろう。

こうして、操船者と船とで得られるDCPAの分布をstrengthとし、必要なDCPAをstressとして、図3.2.14に示すような信頼性工学で言う Stress - Strength Model のように、 $DCPA \leq x_2$ ならば衝突するとみなすと、 $\tau$ において避航を開始する時の衝突の確率は次式となる。

$$\begin{aligned} P_f &= \int_0^{x_1} k e^{-\frac{k}{2}x^2} dx = 1 - e^{-\frac{k}{2}x_1^2}/2 \\ &= 1 - \exp \left\{ -\frac{1}{2} \cdot \frac{x_1^2}{(a\tau - b)^2} \right\} \end{aligned} \quad (3.2.8)$$

この考え方により図 3.2.15、3.2.16 に示すように、 $\tau$ をベースにして、DCPAを示すと、 $1/\mu$ によって $\mu\tau$ -DCPA の関係よりもバラツキが大きくなる。このバラツキがレーレイ分布となり、その回帰直線が一定の $\tau$ における $1/\mu$ の平均値とみなすと(3.2.7)式における係数 a, bを決めることができる。そして、係数 a, bが $L/V$ の影響を受けることになる。図 3.2.16には各 $L/V$ に関するDCPA- $\tau$ の回帰直線に図 3.2.12 の実測例の平均値が○印で示されているが、 $L/V=25$ の場合と傾斜がほぼ同じになるのが注目される。この $L/V$ ごとに求めた a, bをつかって、(3.2.7)式の kを求めるところ 3.2.17 に点線で示すようになり、 $L/V$ の影響を受ける。こうして得た kをもとに(3.2.8)式で衝突確率  $P_f$ を求めるところ 3.2.18 に示すようになり、 $\tau$ が 300 sec より小さくなってくると、 $P_f$ に与える $L/V$ の影響が極めて大きくなることがわかる。このように、操船シミュレータを利用して、いくつか避航操船を行ない、a, bを求めてそれを基礎に衝突確率の型で船の操縦性能を評価でき、逆に必要な安全率が決められると、それに必要な操縦性能の決定にも役立てることができるのではないだろうか。しかしながら、シミュレータによる避航操船の実験的研究は、まだ始まったばかりである、より系統的な実験を続けることによって、こうした考え方を実現に近づけることができよう。なお、参考までに、図 3.2.18 に $\mu\tau$ を基礎にした衝突確率の評価法を示したが、傾向がよく似ていることがわかる。

### 3.2.5 航路に制約のある時の避航操船

以上は航路に制約のない海面での避航操船を中心に分析評価をしてきたが、より実際的な場合として、3.1.2 でのべた避航海面に制約のあるところで行なわれた避航操船を分析する。

操船者にとって、変針動作はあらかじめその時機、操船方法を予測でき、かつ自分の判断のみで操船できるが避航動作はこうしたことができず、臨機の処置をしなければならないので、変針動作よりも難しい。そして、これら二つが同時に起る状態はより複雑な操船となる。

図 3.2.19 は、この種の実験結果の一例で、潮流のある制約された航路上を航行中に右 90°から他船が接近し、自船は左へ 30°変針したい状況のものである。この場合、操船者は、舵によって避航することができないので、図に示すように機関操作によって避航している。このことは、先の避航モデルにおける避航時間( $1/\mu$ )が長くかかり、 $\tau$ が同じならば $\mu\tau$ が小さくなることに対応する。又、変針所要時間が他船のない場合より長くかかることになる。しかし、機関操作によって速力をかえて避航する時は $\tau$ と $1/\mu$ を時間を単位として採るよりも、距離を単位としてとる方が合理的であろう。なぜならば $\mu\tau$ は操船上の余裕を示すものであり、速力制御は相手船との相対距離を得るために行なわれているからで、 $\tau$ を時間で表現しても衝突予想時間にはならないからである。

この考え方により、実験中に機関操作を開始した位置を避航開始点とし、DCPAが生ずるかあるいは Eng を Full ah'd にした位置を避航終了とみて、その間の予定航路上進出距離を $1/\mu$ (避航航走距離)とした。又、 $\tau$ は、避航開始点から予定航路上で他船と最接近するまでの距離をとった。図 3.2.20 は $\mu\tau$ -DCPA の関係を示しており、実験例が少ないのではっきりしない点もあるが、やはり $\mu\tau=1.6$ 付近までは直線関係にあることがわかり、 $\mu\tau$ が危険性の評価として妥当なことを示している。この実験では DCPA = 0.3 マイルを越える付近から避航動作をとらなくなっている。参考までに図 3.2.5 の航路に制約がなく、舵によって避航動作をしたときの $\mu\tau$ -DCPA の関係の点線を記入しているが、避航の効果に差があるのが興味深い。

これは地形の制約のある海面では同じ DCPA を確保するのに $\mu\tau$ を大きくしなければならないことになり、 $\mu\tau$ は操船上の余裕に対応しているので、それだけ操船者に負担を増すことになる。これを衝突確率からみれば、必要な $\mu\tau$ の増加分は指數関数的に負担を増すことになる。

図 3.2.5 の中で、×印で示したのは、ドックマスター S 氏が D 50-5 を操船した結果で、航路の制約のない海面での避航操船と同じく、D 25-5 を I 航海士が操船した結果とはほぼ同じ傾向を示している。

なお、表 3.1.6 中の実験番号 331, 413 では避航を行なっていない。操船者が避航の判断を相対方位の変化率  $|\dot{\theta}_p|$  で行なっているとすれば、この種の実験を横重ねると、避航の必要性についての数値を求めることができる。

変針動作と避航動作が同時に必要な場合は、当然避航動作が優先して行なわれているが、避航動作は前述したように、ランダムな要素が強いため、地形の制約を受ける海域ではこの優先性が保てず、避航しようとして座礁、乗揚げが起ることがある。このことは、地形の制約だけでなく、その海域の交通状況によって、避航対象船以外の第三船に影響されて、衝突、乗揚げを起こす場合も同じである。こうしたこと操船シミュレータで実験することによって操船者の処理能力と船の操縦性能の関係が解明されていくだろう。しかし、それには今年度実施したような基本的な保針、変針、避航といった操船を操船シミュレータで実験しておくことが先決であり、その結果を基礎にして、上記のような複雑な状況での操船を説明することが可能となろう。

表 3.2.1 避航要素の重回帰分析

y	$\tau$		$1/\mu$		$\mu\tau$	
	x i	R	x i	R	x i	R
Step	x i	R	x i	R	x i	R
1	$\theta$	0.41	$\tau, L$	0.34	$ \dot{\theta}_p $	0.20
2	$\theta, L/V$	0.44	$\tau, L/V$	0.42	$ \dot{\theta}_p , L/V$	0.28
3	$\theta, L/V,  \dot{\theta}_p $	0.47	$\tau, L/V, V_R$	0.48	$ \dot{\theta}_p , L/V,  \theta $	0.33
4	$\theta, L/V,  \dot{\theta}_p , V_R$	0.49	$\tau, L/V, V_R,  \dot{\theta}_p $	0.51	$ \dot{\theta}_p , L/V,  \theta , V_R$	0.39
5			$\tau, L/V, V_R,  \dot{\theta}_p , \theta$	0.52		

表 3.2.2 DCPA の重回帰分析

説明変数	重相関係数
$\mu\tau$	0.69
$\mu\tau, \phi_{max}$	0.71
$\mu\tau, \phi_{max}, L/V$	0.71
$\mu\tau, \phi_{max}, L/V, V_R$	0.71
$\mu\tau, \phi_{max}, L/V, V_R, \theta$	0.73
$\mu\tau, \phi_{max}, L/V, V_R, \theta,  \dot{\theta}_p $	0.73

表 3.2.3 避航要素の偏相関係数  $r_{x_j x_i} \cdot x_1 x_2 \dots$

$x_j$	$x_i$					$\mu\tau$	$\phi_{max}$
	$L/V$	$V_R$	$ \dot{\theta}_p $	$ \theta $	$\tau$		
$\tau$	.177	.118	.185	.274			
$1/\mu$	.257	-.264	.175	.187	.294		
DCPA	-.075	.209	.008	.203		.654	.173

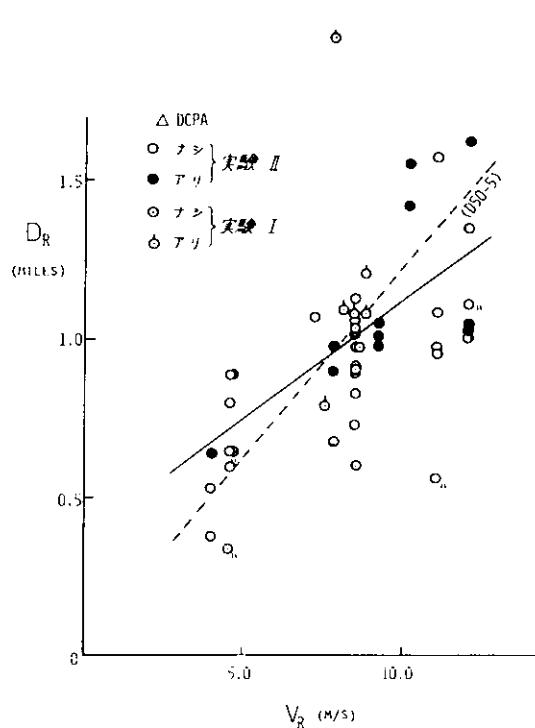


図 3.2.1

避航開始距離 (D25-5)  
(回帰直線はニアミスの場合を除いて計算)

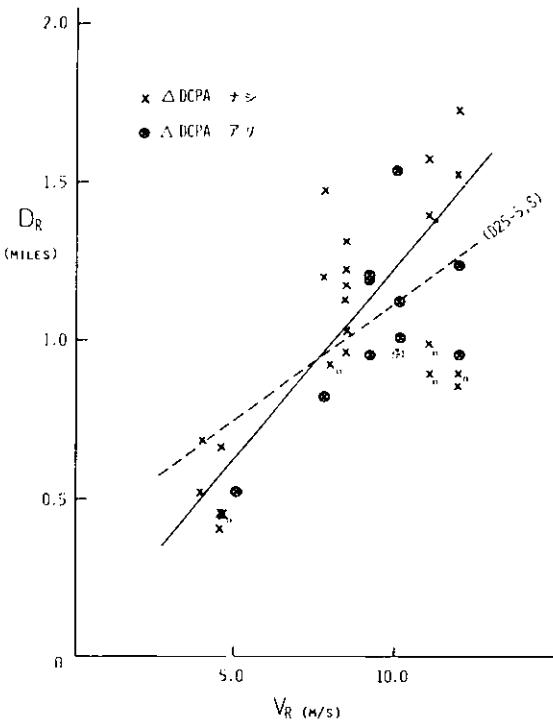


図 3.2.2

避航開始距離 (D50-5)  
(回帰直線はニアミスの場合を除いて計算)

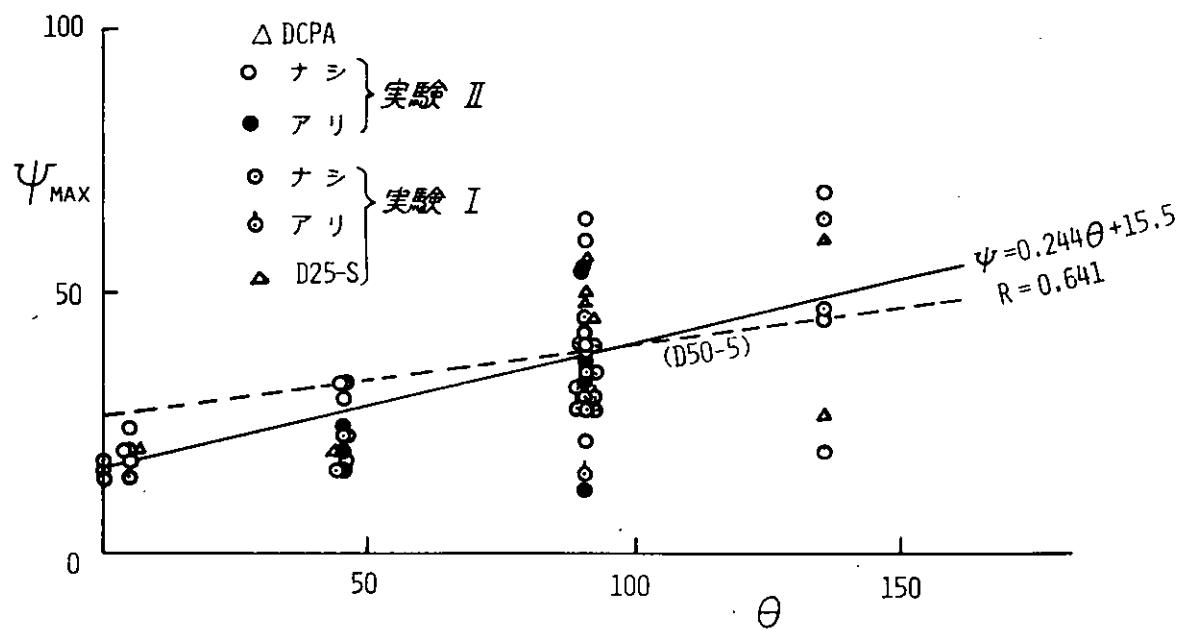


図 3.2.3  $\psi_{MAX} - \theta$  (D25-5, D25-S)

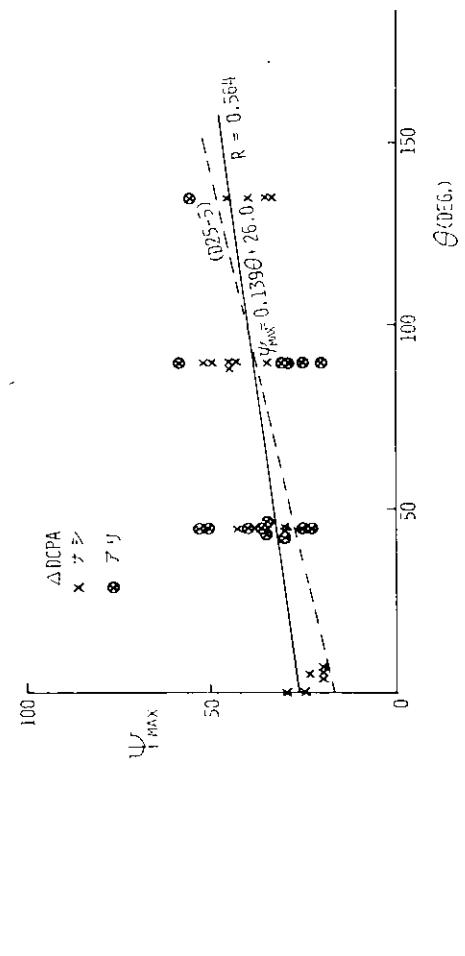


图 3.2.4  $\phi_{\text{MAX}} - \theta$  ( D 5 0 - 5 )

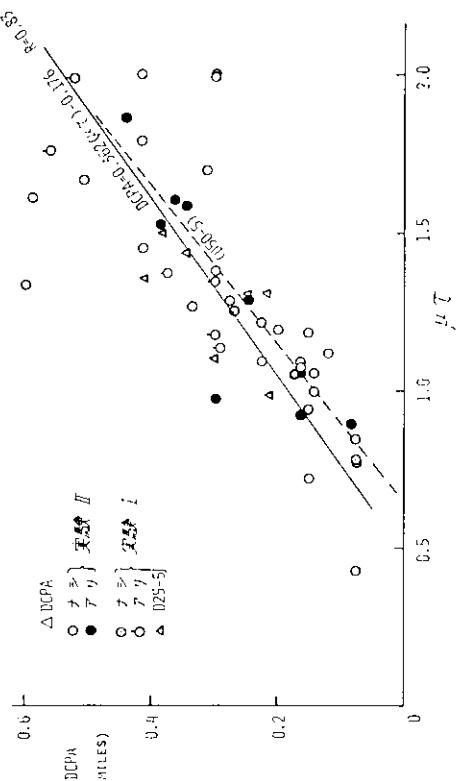


图 3.2.5  $\mu_T - \text{DCPA}$  ( D 5 - 5 , D 5 0 - 5 )

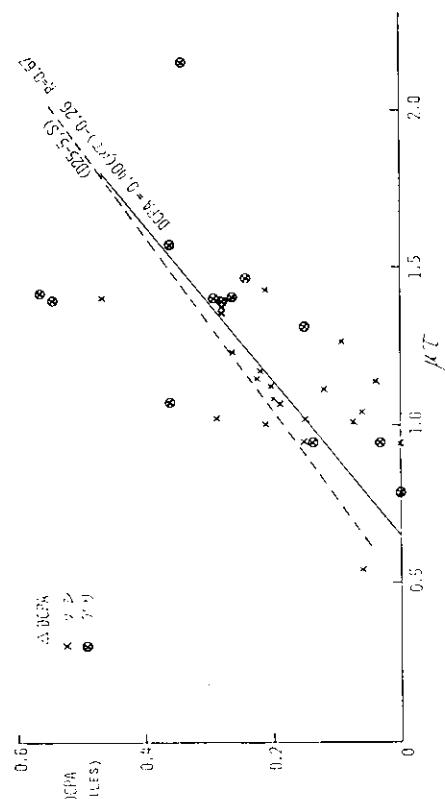


图 3.2.6  $\mu_T - \text{DCPA}$  ( D 5 0 - 5 )

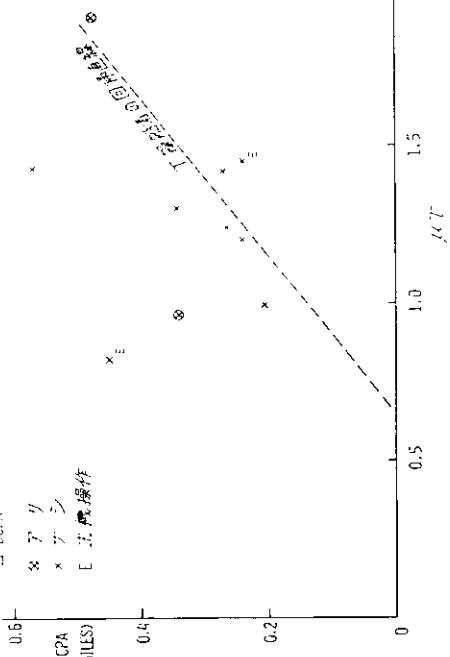


图 3.2.7  $\mu_T - \text{DCPA}$  ( D 5 0 - 5 , D 5 0 - 5 )

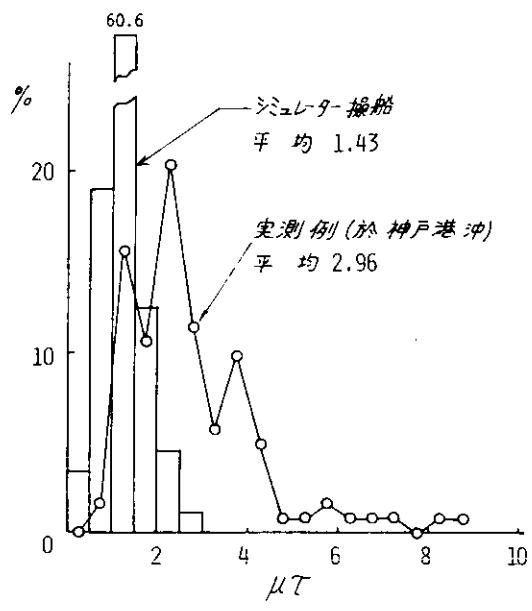


図 3.2.8

シミュレーター操船と実測の  $\mu\tau$

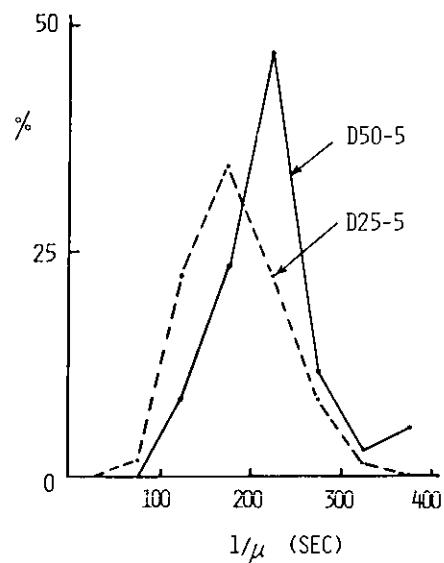


図 3.2.9

避航時間の分布

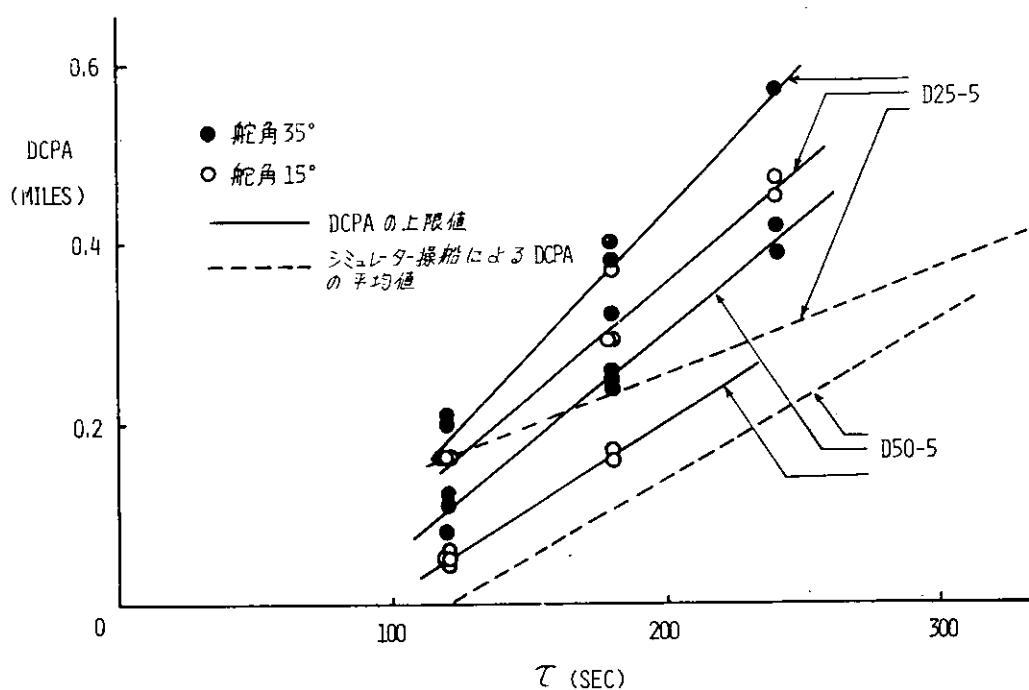


図 3.2.10 D C P A の 上限値

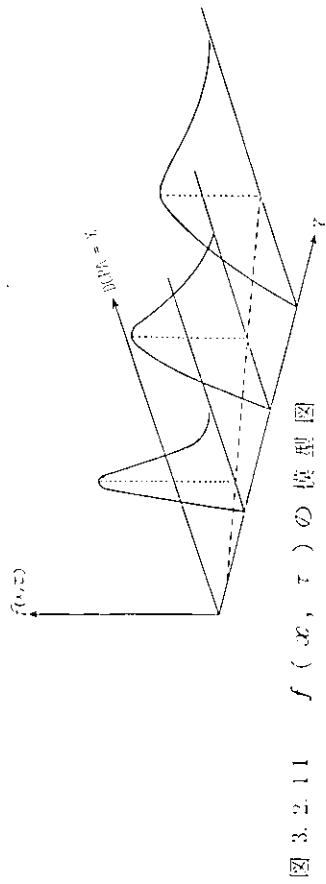


图 3.2.11  $f(x, \tau)$  的模型图

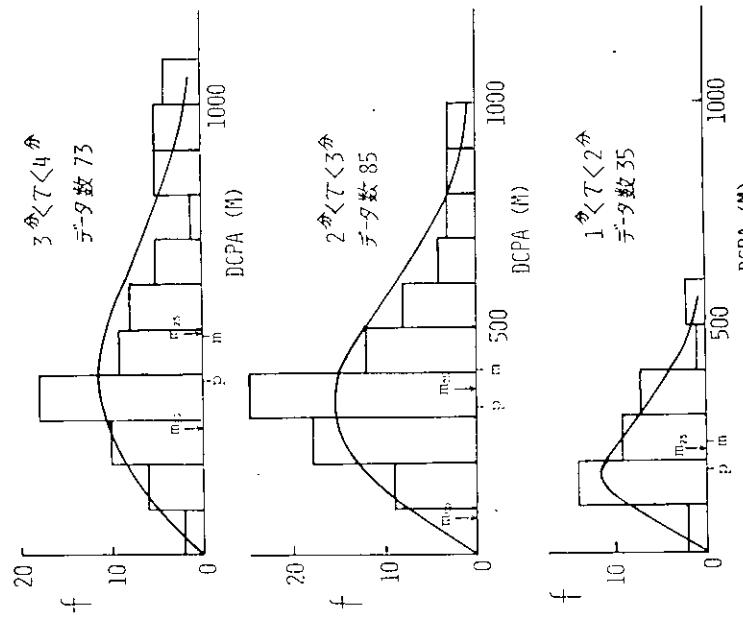


图 3.2.13 DOPA 分布 (偏振消弱における実測)

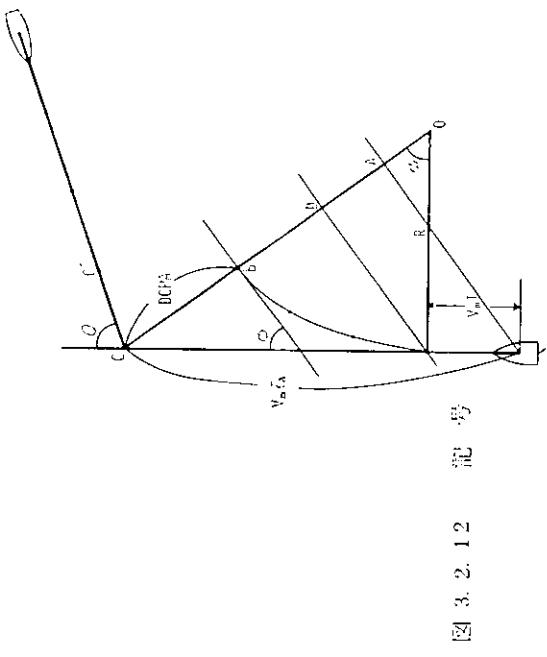


图 3.2.12 光路

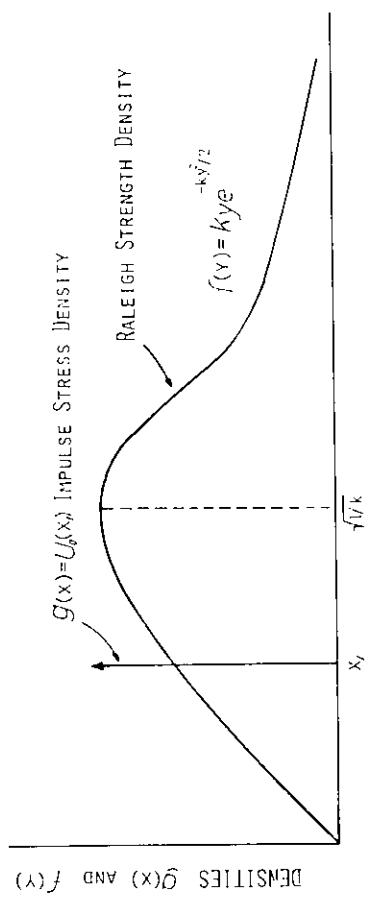


图 3.2.14 密度

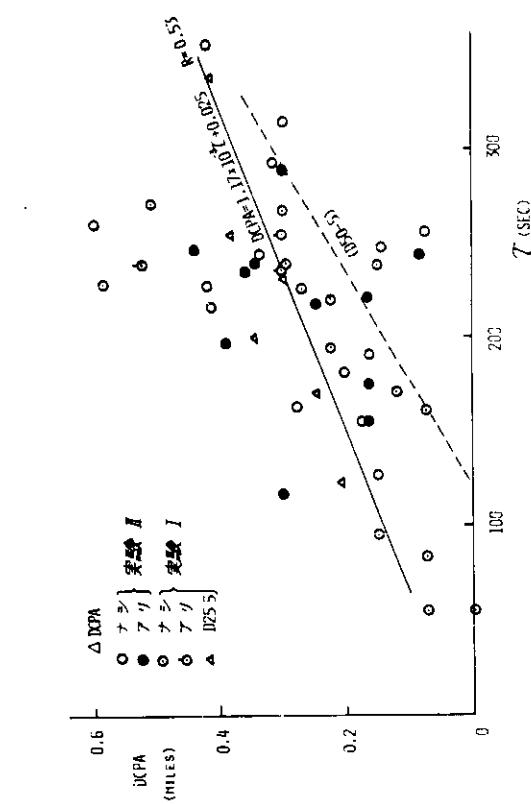


図 3.2.15 D C P A -  $\tau$  ( D 2 5 - 5 , D 2 5 - S )

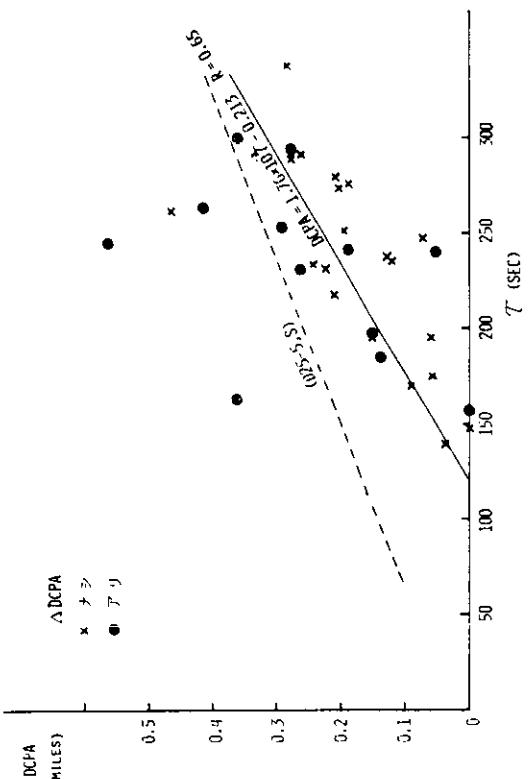


図 3.2.16 D C P A -  $\tau$  ( D 5 0 - 5 )

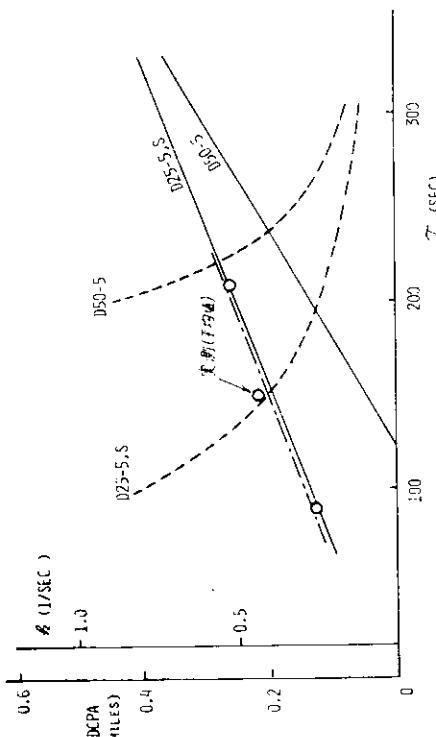


図 3.2.17 避航開始時機と  $k$  - Factor

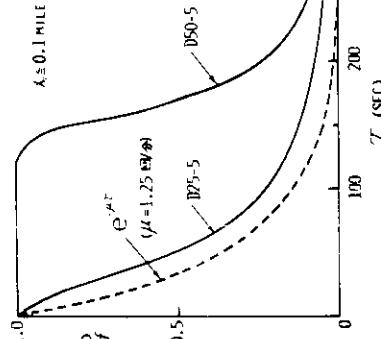


図 3.2.18 避航開始時機と衝突の危険

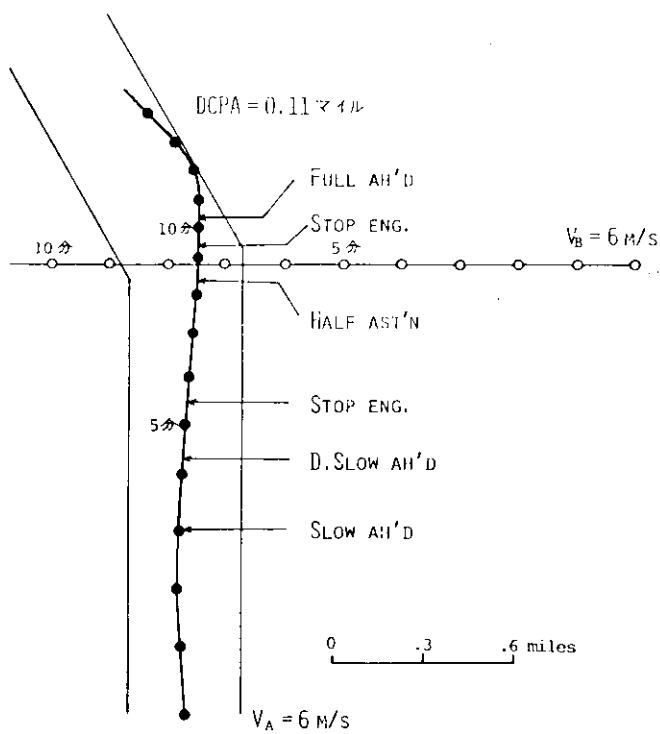


図 3.2.19 航路指定のある避航操船例  
(Model D25-5, Exp. No 332)

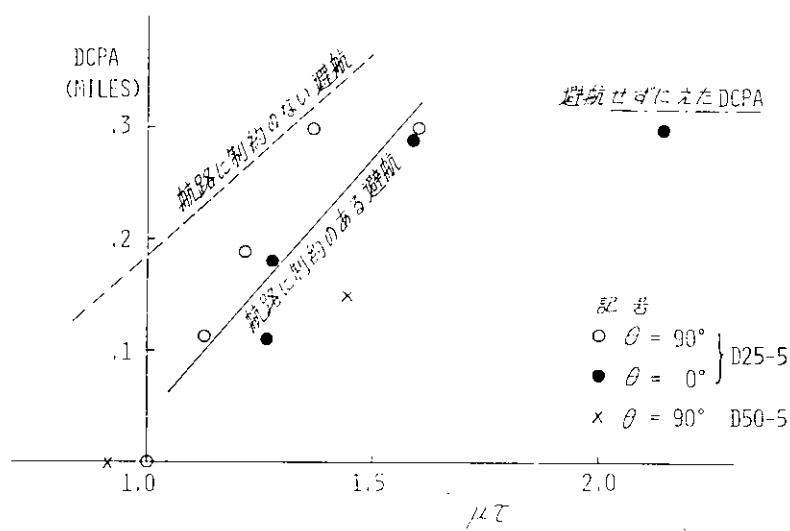


図 3.2.20 航路に制約のある避航操船

### 3.3 避航操船の分析と評価(2)

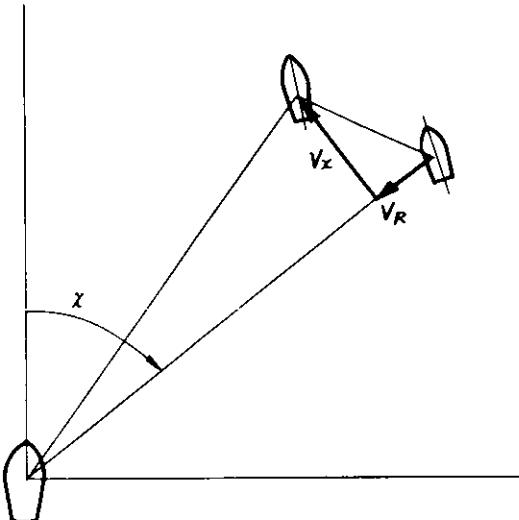
本節においては、二船が行合った場合の衝突に対する危険量を簡単な形で定義し、危険量の算定の是否をシミュレータによる避航操船の系統実験により検証を行う。さらに、この危険量を用いて各種行合い状態に対する避航動作の効果を危険量の変化の形で比較する。

#### 3.3.1 衝突危険量の設定

図3.3.1に従って衝突の危険性について考えてみる。座標原点に自船をとり、相手船の相対位置の変化を示している。 $V_R$  は接近速度ベクトルを表し、大なる程危険は増す事になる。 $V_\chi$  は  $V_R$  に対する直交成分で、相手船の離れてゆく速度ベクトルを意味し、大なる程安全は増す事になる。全体としての危険量は  $V_R$ 、 $V_\chi$  で決定される速度ベクトルの大小、方向により決定される。

今、衝突危険の評価量を CJ ( Collision Judgement ) とすると大雑把に(3.3.1)で表わす事が出来る。

$$CJ = V_R - aV_\chi = -\dot{R} - aR|\dot{\chi}| \quad (3.3.1)$$



(3.3.1) の第一項、危険度の項に距離の効果を加味すると共に、 $\chi$  が小さいもの、即ち、自船船首方向にある相手船ほど避航が容易であるという避航動作の効果を加えると(3.3.2)の様になる。

$$CJ = -\frac{\dot{R}}{R} - aR|\dot{\chi}| + b\chi \quad \dots \dots \quad (3.3.2)$$

通常、避航動作の評価量となっている最接近距離 (DCPA) 及びそれまでの時間 (TCPA) と(3.3.2)との対応は、次の様になる。

$$TCPA \doteq \frac{R}{V_R} = -\frac{R}{\dot{R}} \quad \dots \dots \quad (3.3.3)$$

$$DCPA \doteq V_\chi \times TCPA = -\frac{R^2}{\dot{R}} \dot{\chi} \quad \dots \dots \quad (3.3.4)$$

即ち、(3.3.2) の第一項はそのまま直進した場合、最接近までに残された時間余裕 (TCPA) の逆数であり、第二項は直進した場合の相手船の離れてゆく速度、すなわち、そのままの状態での安全度を示す。第三項は、避航動作の難易度を代表している事になる。

#### 3.3.2 実験解析

図3.3.2、図3.3.3に避航開始時の CJ に対する避航角度  $\phi_A$ 、避航のための使用舵角  $\delta_A$  の関係を示す。図中、黒丸で示しているのが、今回の実験(表3.1.2、表3.1.3)より得られたものである。図中、

縦線分で示されているものは、文献(11)の実験により得られたものである。文献(11)の実験は同じ状態の実験を4回繰り返し行っているので各計測値がこの線分中に含まれる事になる。なお文献(11)の実験の概要は本節末尾に示してある。

CJの計算に使用した係数a, bの値は、実験データより得られた下記の値を使用した。

$$a = 0.0000375$$

$$b = 0.00015$$

図3.3.4に避航開始時のCJ値に対する最接近距離DCPAを示す。避航操船開始時間と最接近点が発生する時間には、かなりの隔りがあるので良好な関係は得られていない。なお、図中、白丸は文献(11)の実験から得られたものである。図3.3.5も同様である。図3.3.5には、避航開始時のCJ値と3.2節に示されたマッピングとの対応を示している。

図3.3.6、図3.3.7にCJのタイム・ヒストリーの一例を示す。操船者は破線で示される( $dCJ/dt$ )を避航動作の効果として期待していると考えられる。

図3.3.8には、避航開始時のCJ値と避航の効果としての( $dCJ/dt$ )の関係を示す。図3.3.8は、2つの領域に分かれている。上方の領域は $0^\circ < \chi < 30^\circ$ の相手船の分布のものがほとんどであり、下方は $30^\circ < \chi$ のものである。この事からも、 $\chi$ の小さな相手船に対する避航ほど避航の効果の高い事が解る。又、危険量CJの高いものほど、危険度を急激に減少させる操船をしている事が解る。

### 3.3.3 避航動作による衝突危険量の変化

図3.3.9～図3.3.11には表3.3.1に示す各種行き合い状態における避航動作によるCJ値の変化を等高線の形式で示してある。

表 3.3.1

$V_o$ m/s	R m	X deg	$\phi_T$ deg	$V_T$ m/s
8.0	4 0 0 0	0	1 8 0	8.0
8.0	4 0 0 0	4 5	2 7 0	8.0
8.0	4 0 0 0	3 0	3 1 5	5.2
8.0	4 0 0 0	9 0	3 6 0	8.0

計算には姿勢の時間遅れは考慮されていない。半径方向に避航変針後の経過時間を示している。等高線の集中している点が仮想の衝突点である。

図3.3.12～図3.3.13には、変速による避航動作時のCJ値の変化を示す。半径方向には、避航変速後の航走路距離を示している。増速による避航より減速によるものの方が安全である事が解る。

図3.3.14～図3.3.17には、前述と同じ行き合い状態に対し、自船の操縦性能を考慮に入れた時の変針による避航動作時のCJ時の変化を示している。対象とした船の操縦性能は下記の通りである。

Type L : T = 2.0, K = 0.03

Type S : T = 2.0, K = 0.1

ある一定の等高線以下を航行するためには、Type L の大型船は、Type S の小型船に較べ早めの避航、大きな避航角を必要とする事になる。

### 3.3.4 文献(11)の実験概要

参考資料として文献(11)の操船シミュレータ模擬実験の概要は次のとおりである。

図 3.3.18 に実験開始時における二船の位置、速力、針路を示す。

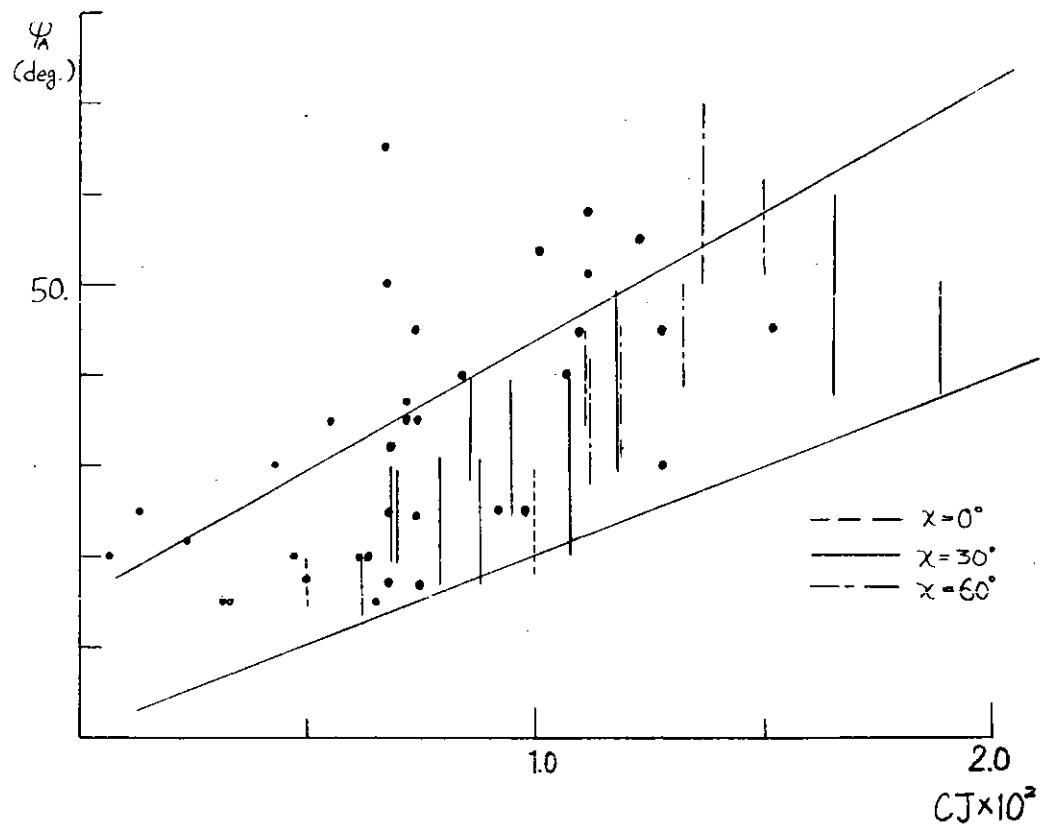


図 3.3.2

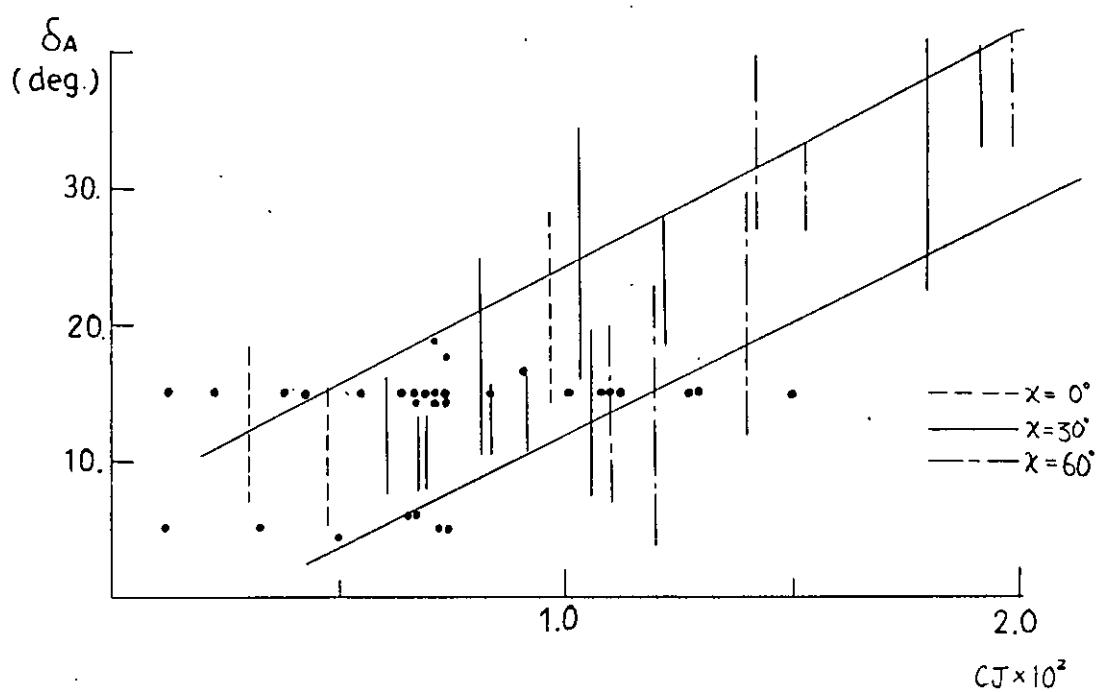


図 3. 3. 3

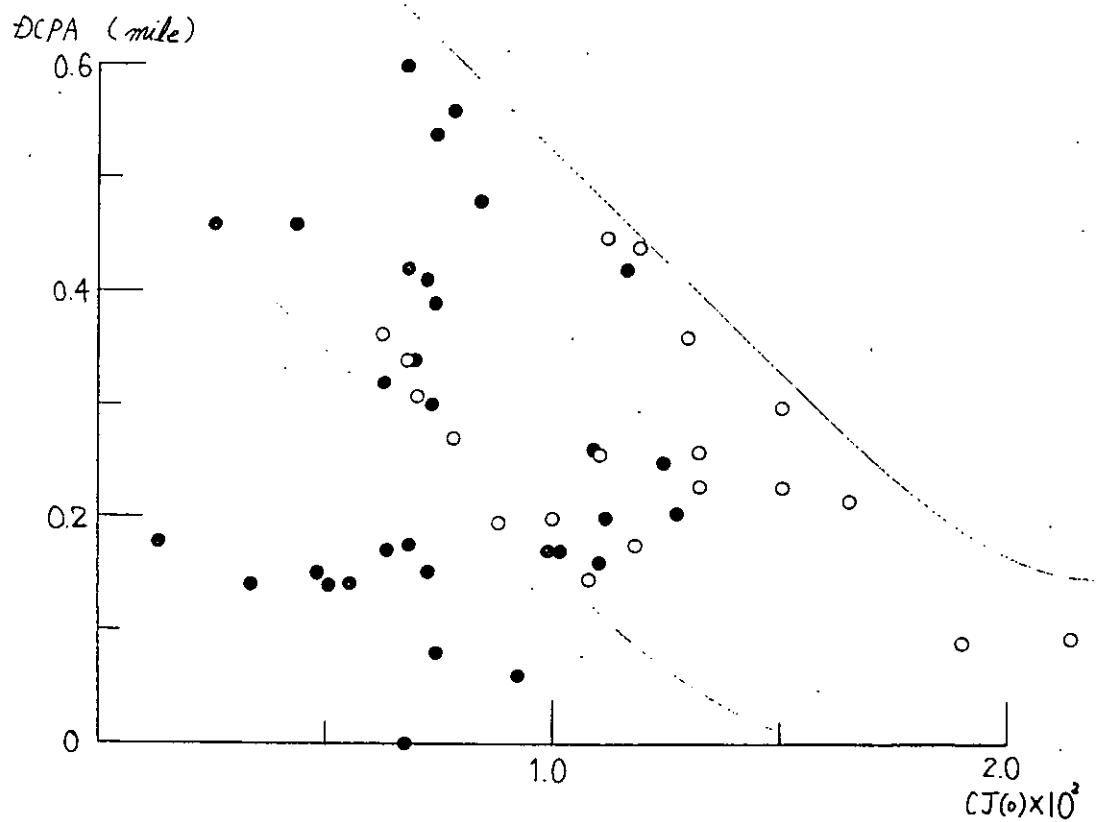


図 3. 3. 4

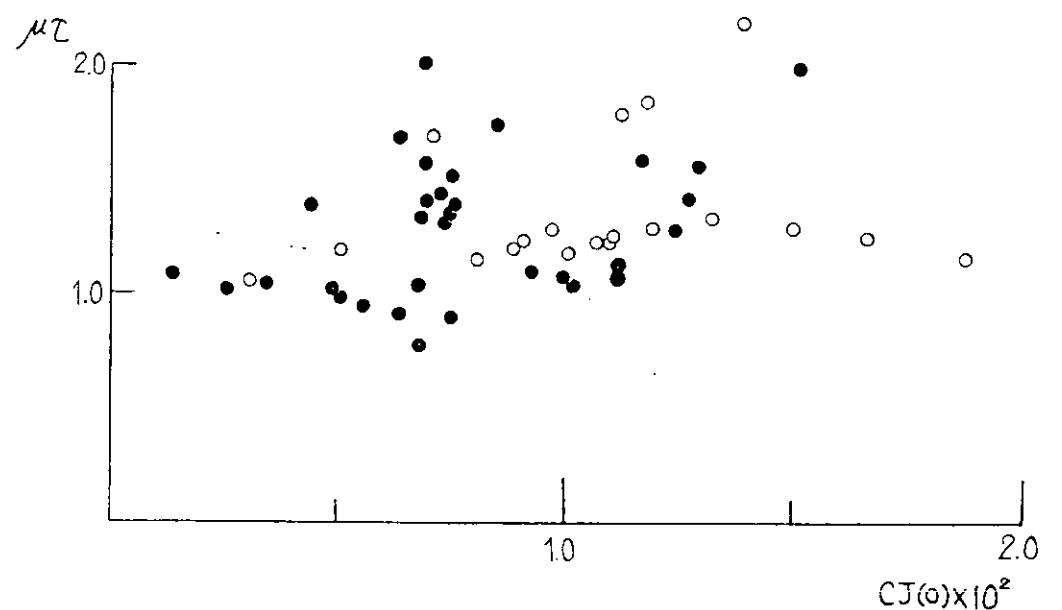


図 3. 3. 5

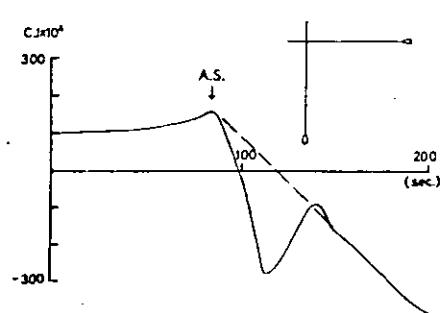


図 3. 3. 6

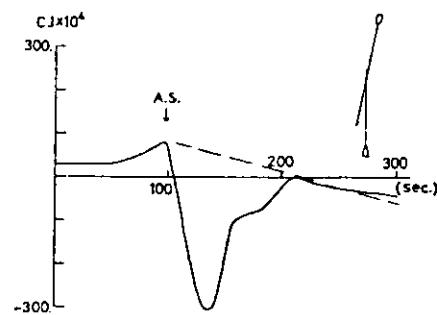


図 3. 3. 7

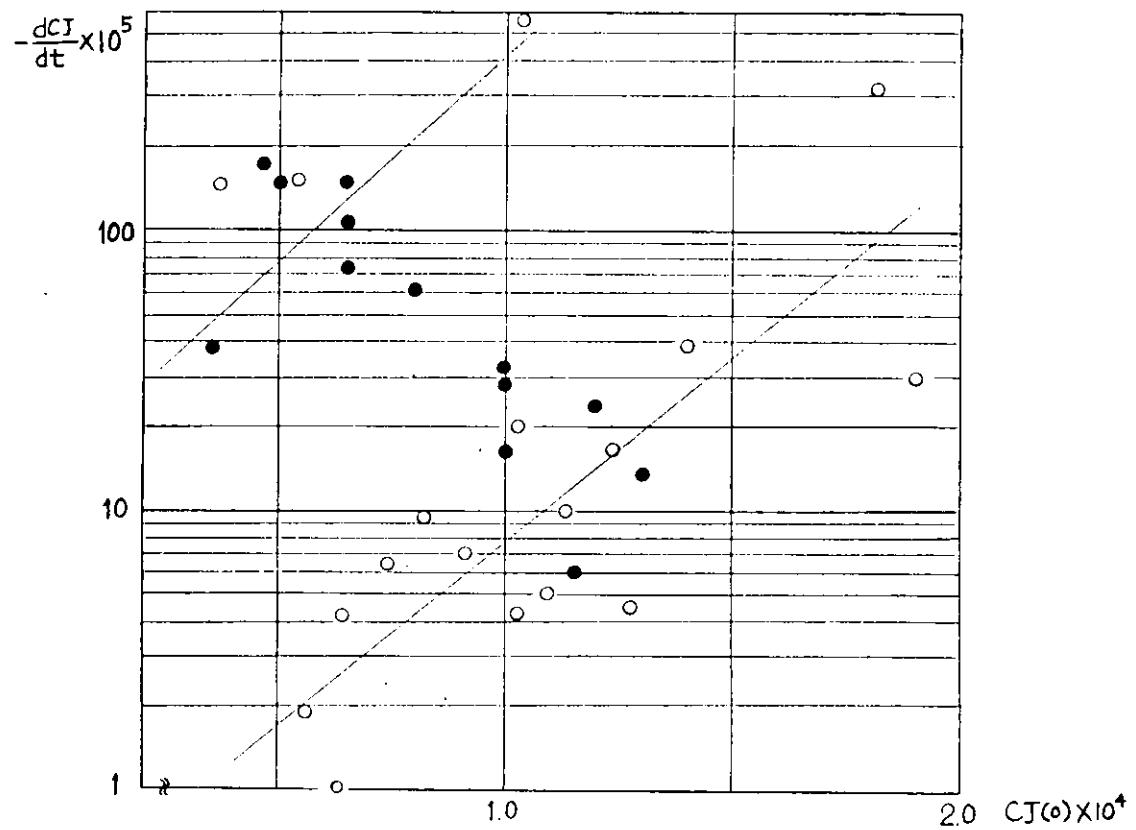


図 3.3.8

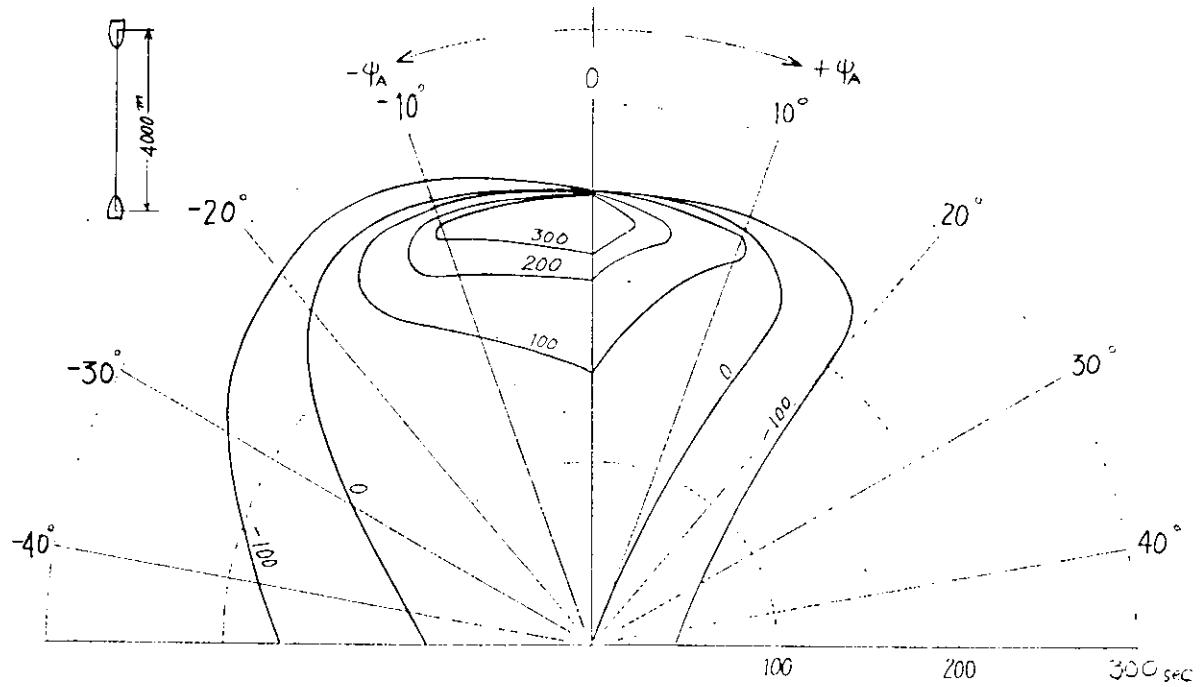


図 3.3.9

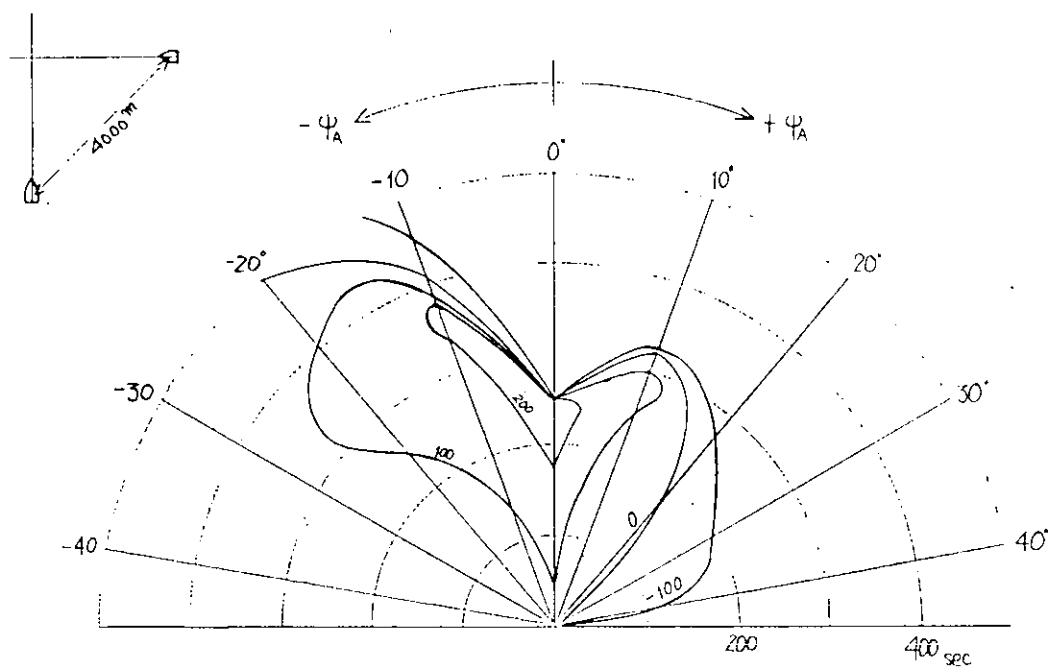


図 3.3.10

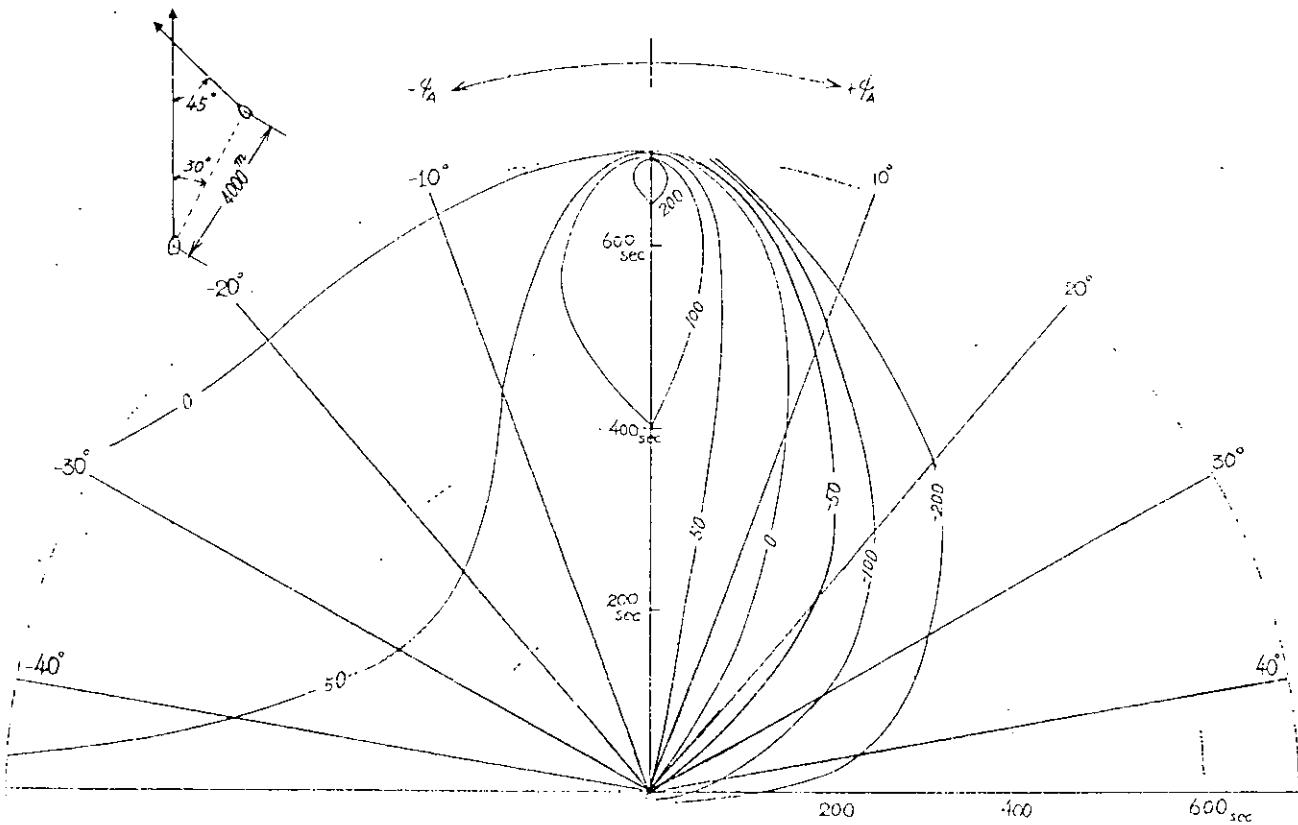


図 3.3.11

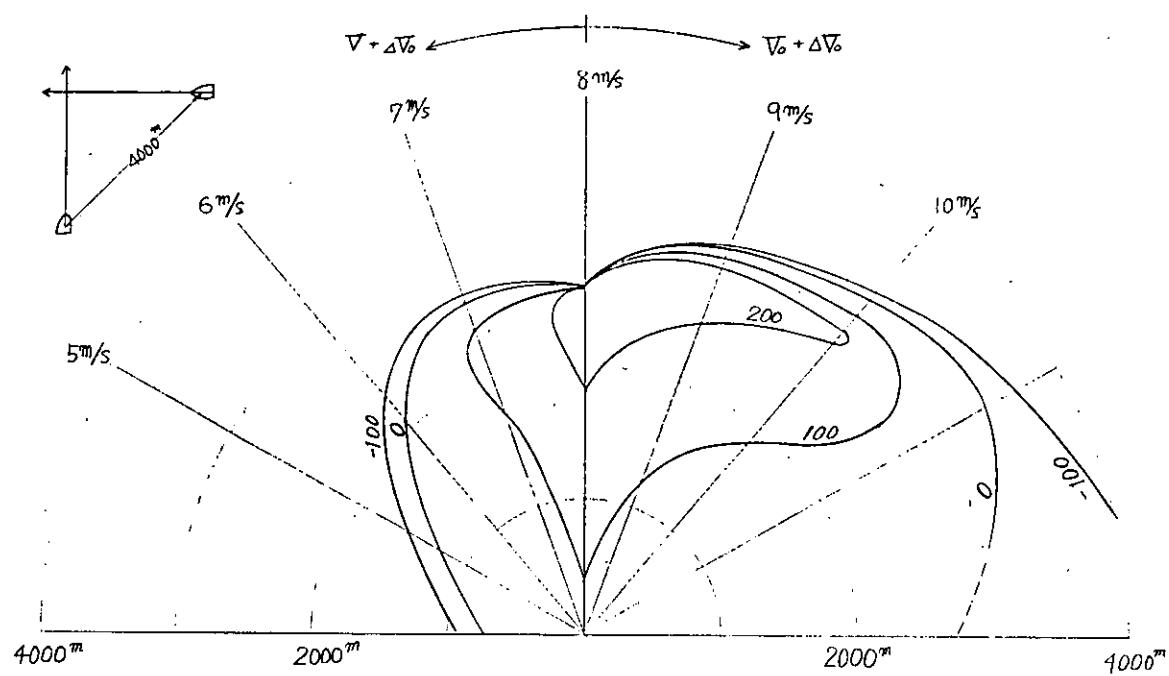


図 3.3.12

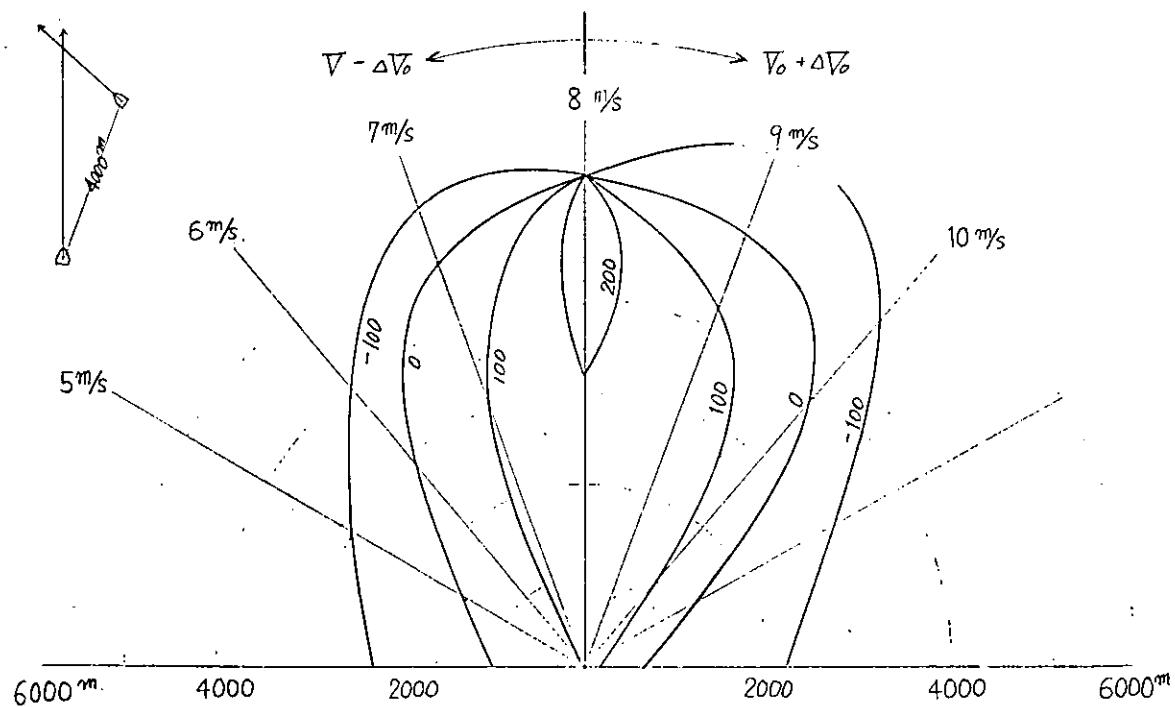
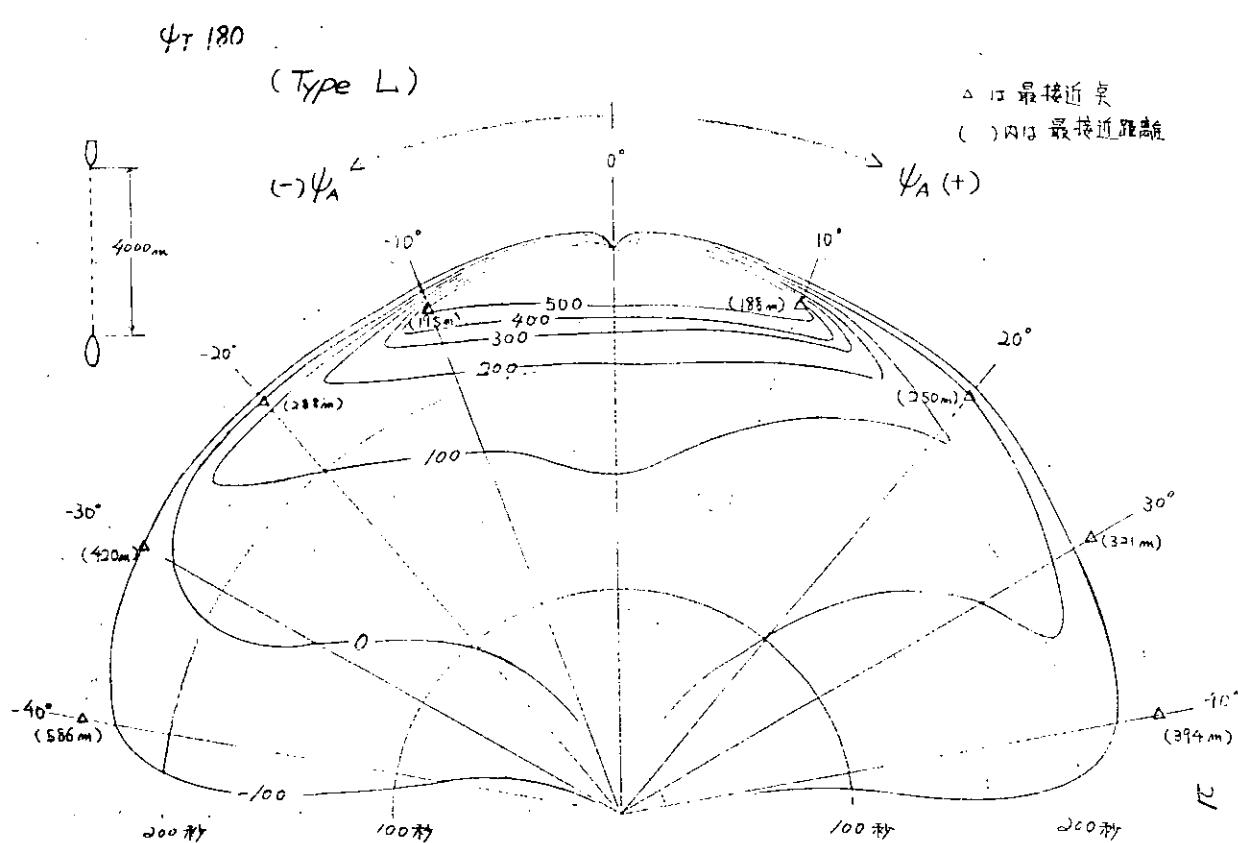
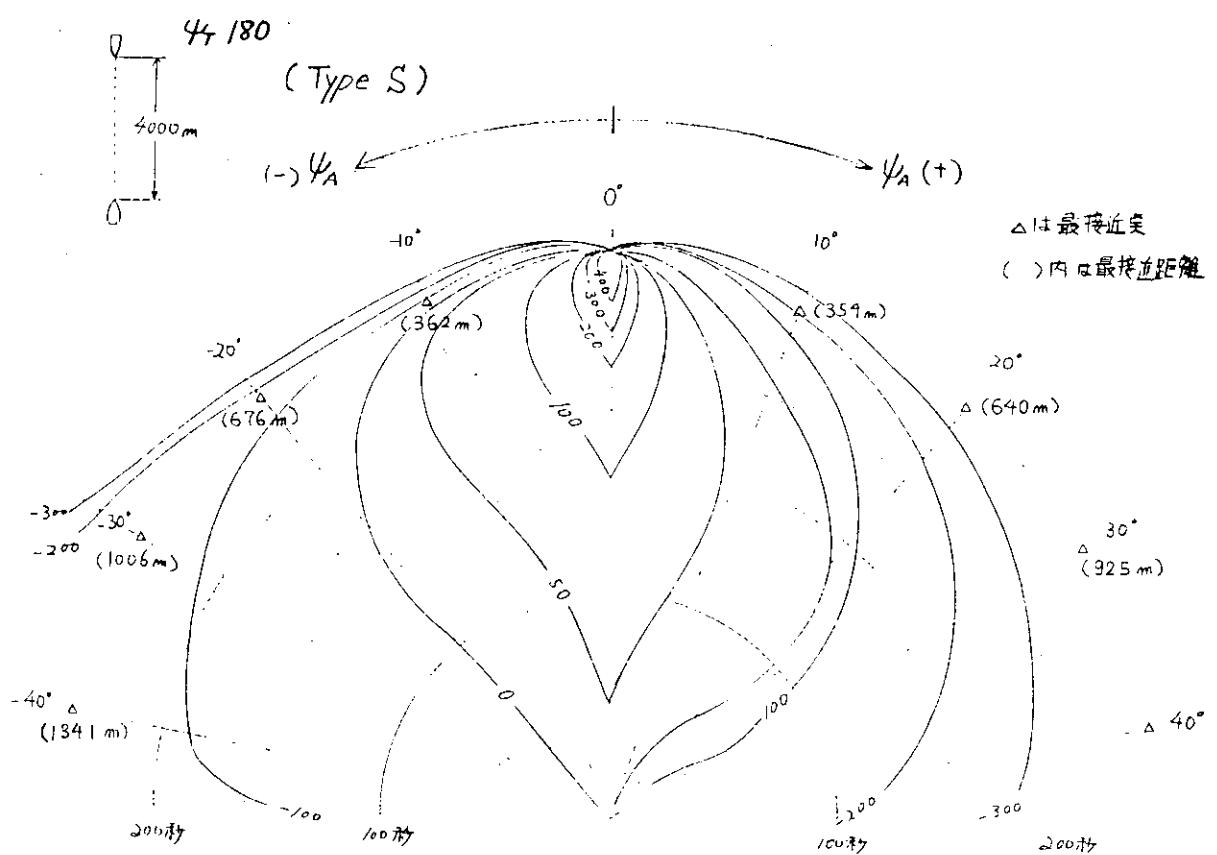


図 3.3.13



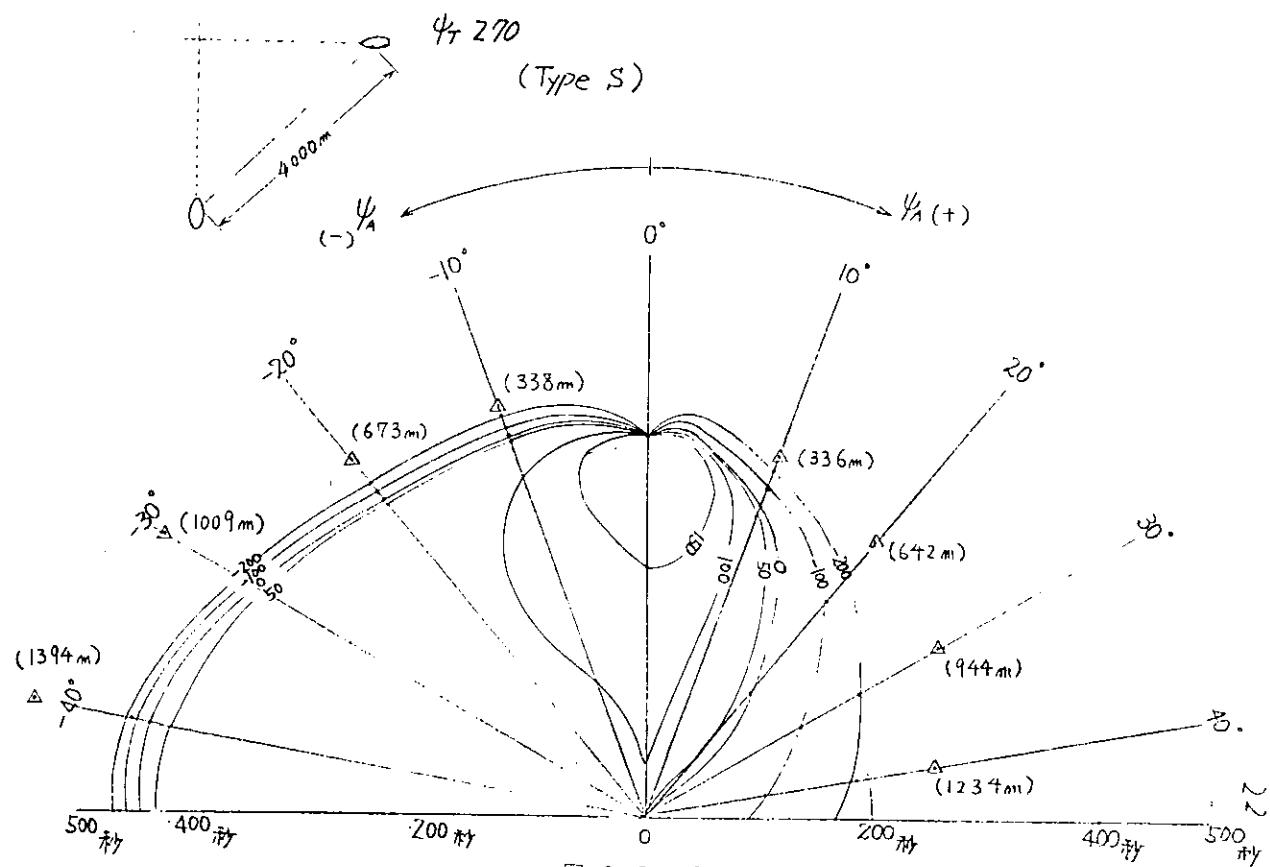


図 3.3.16

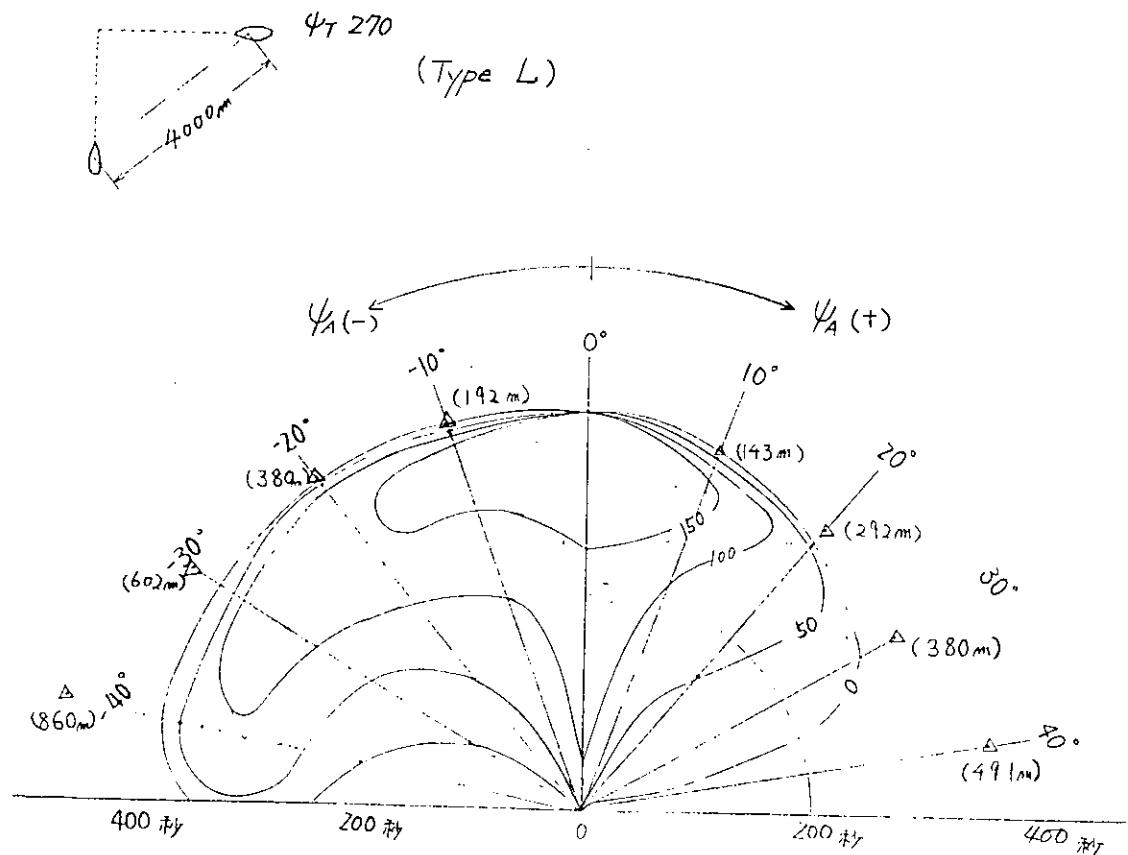


図 3.3.17

表 3. 3. 2

船 船 操 縱 性 能*	長 速 能*	100 m 5 m/s, 10 m/s
$T'_t$	-4.8189	
$T'_t$	0.3289	
$T'_t$	0.674	
$K'$	-1.892	
$\nu'$	-0.00395	
$2\delta\sigma$ (不安定ループ幅)	7.5°	

$$\begin{aligned} * T'_t T'_t \left(\frac{L}{V_0}\right)^2 \ddot{\phi} + (T'_t + T'_t) \left(\frac{L}{V_0}\right) \dot{\phi} + \phi \\ + \nu' \left(\frac{L}{V_0}\right)^2 \phi^2 = K \left(\frac{V}{L}\right) \left(\delta + T_B \left(\frac{L}{V}\right) \dot{\delta}\right) \end{aligned}$$

表 3. 3. 3

M. No.	$V_0$ (m/s)	$V_T$ (m/s)	$X_{IO}$ (m)	$Y_{IO}$ (m)	$\theta_{IO}$ (deg.)
1	5.0	4.48	866	500	45
2	5.0	8.66	866	500	90
3	5.0	2.59	500	866	45
4	5.0	2.89	500	866	90
5	5.0	9.66	500	866	135
6	5.0	4.48	1732	1000	45
7	5.0	8.66	1732	1000	90
8	5.0	2.59	1000	1732	45
9	5.0	2.89	1000	1732	90
10	5.0	9.66	1000	1732	135
11	5.0	4.48	2598	1500	45
12	5.0	8.66	2598	1500	90
13	5.0	2.59	1500	2598	45
14	5.0	2.89	1500	2598	90
15	5.0	9.66	1500	2598	135
16	5.0	5.0	44	1000	175
17	5.0	5.0	87	2000	175
18	5.0	5.0	131	3000	175
19	10.0	5.77	500	866	90
20	10.0	5.77	1000	1732	90
21	10.0	5.77	1500	2598	90

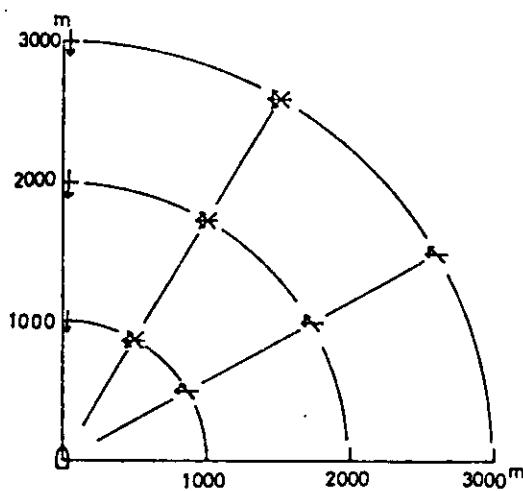


図 3. 3. 18

## 4. 増減速操船の模擬実験

### 4.1 状況設定

今年度改良された増減速時の操縦性数字モデルを使って、表4.1.1に示すように、次の二種の操船状況が実験された。一つは実験開始点から( $X_R$ )の距離にある位置で自船の現速力を指定速力 $V_f$ まで減速する操船(錨地進入)である。他の一つは前方( $X_R$ )のところを航行中の先行船がいくつかも速度パターンで増減速したとき、安全な範囲内で先行船に追従していく操船(追従制御)である。操船者は、大型練習船のE航海士(乗船経験2年)と巨大船経験の豊富なドックマスターS氏とが行なった。

操船者にはあらかじめ船の大きさ、および最短停止距離を与えた。

### 4.2 増減速操船の分析と評価

#### (1) 錨地進入時の減速状況

図4.2.1は、E航海士の操船した結果を定点までの距離をベースに速力を示したもので、最終速力 $V_f$ は、いずれの場合も4.7～5.0ノットになっている。D50-5においては、Half ah'd ( $V_0 = 5 \text{ m/sec}$ )から減速し、D25-5 Full ah'd ( $V_0 = 6 \text{ m/sec}$ )から実験を始めたので、 $V_f/V_0$ の値は異なってくる。両モデルとも操船回数によるバラツキも少なく、スムーズに減速をしていることがわかる。図4.2.2はドックマスターS氏の操船結果で、E航海士と同じような傾向を示しており、これでみると、巨大船の操船経験の有無は、このような減速だけを行う操船においてはあまり差がないようである。しかし、潮流がある状況での減速や避航、変針操船である場合は差が出てくると推察される。

実験中操船者はレーダーで船位を確認しながら単位時間あるいは航走距離あたりの減速量を推定しながら操作しているためか、この種の実験は、同一状態で、比較的再現性が高いとみられる。

#### (2) 追従制御

図4.2.3は、先行船が直線状に減速した時の相対速力と原針路方向の相対距離 $X_R$ をプロットした位相面図で、実験開始時からのズレの様子をみることができる。図で点線は1分ごとのタイムマークを示している。同様に図4.2.4は、先行船が正弦状に増減速したときの位相面図で、先行船の速力 $V_B$ が2周期かわる間の結果で、いずれの場合もD50-5の方が目標値からのズレが大きく、発振ぎみで、操船の困難なことを示している。他船速力 $V_B$ が正弦状にかわった時の自船速力の追従時間の遅れは、增速性能と減速性能が異なるため、 $V_B$ が増加する時は減少するときより大きく、その値はD25-5で增速時に約150sec、減速時に約100sec、D50-5で增速時に約150sec、減速時に約250secである。

図4.2.5、図4.2.6および図4.2.7はほぼ同じ状況で、ドックマスターS氏が操船した結果であり、他船が直線状に減速する時は、E航海士よりもよく追従できているが、正弦状に変化する時は同じような傾向を示している。これは、後者のような増減速操船においては、操船者の経験よりも船の増減速性能によって操船結果が支配されているとみられる。

今回の増減速操船のシミュレーションを通じて立っていることは、150mの貨物船を想定したD25-5と300mのタンカーD50-5の予想以上の相違であろう。いずれも5°の不安定ループ幅をもつが、今の場合、針路安定性上の問題はなさそうに見える。やはり両者の大きい差は、船の大型化に伴う身動きの重さを人間が十分にはこなし切れないという点にありそうに考えられる。

錨地進入操船、追従制御のいずれの場合も、操船者はスクリーン上の他船の大きさよりもレーダーによって相対距離の変化を測定して機関操作を行なっており、視界再現装置の映像は、情報源として補助的に使用している。この速力制御をしながら錨(泊)地に進入する際、変針、避航操船が必要な場合や、その時潮流などの外乱がある状況下での模擬操船を行なうと、操船経験の有無で差が出るであろうし、操船者の処理能力を調べるのには有効であろう。

表 4. 1. 1 入港操船の設定状況

実験の種類	Model	$(X_R)_0$ (miles)	$V_0$ (m/s)	$V_f$ (k't)	実験番号	
錨(泊)地進入	D50-5	6	4.8, 5	2.6	307, 308, 309	
	"	"	6	5.5, 8, 6	420, 421, 422, 423	
	D25-5	3	6	2.6	337, 338, 339	
追従制御	D50-5	1	$(V_A)_0$	(VB)	直線状減速	$(V_B)_0 \ (V_B)_f \ t_1 \ (s)$
						6 5.4 540
						5 4 600
						T = 9, 20 分
	D25-5	0.5	5	正弦状変化	" 426, 425	T = 10, 20 分
						$(V_B)_0 \ (V_B)_f \ t_1$
						6 4.5 540
						5 6 540
						T = 10, 20 分

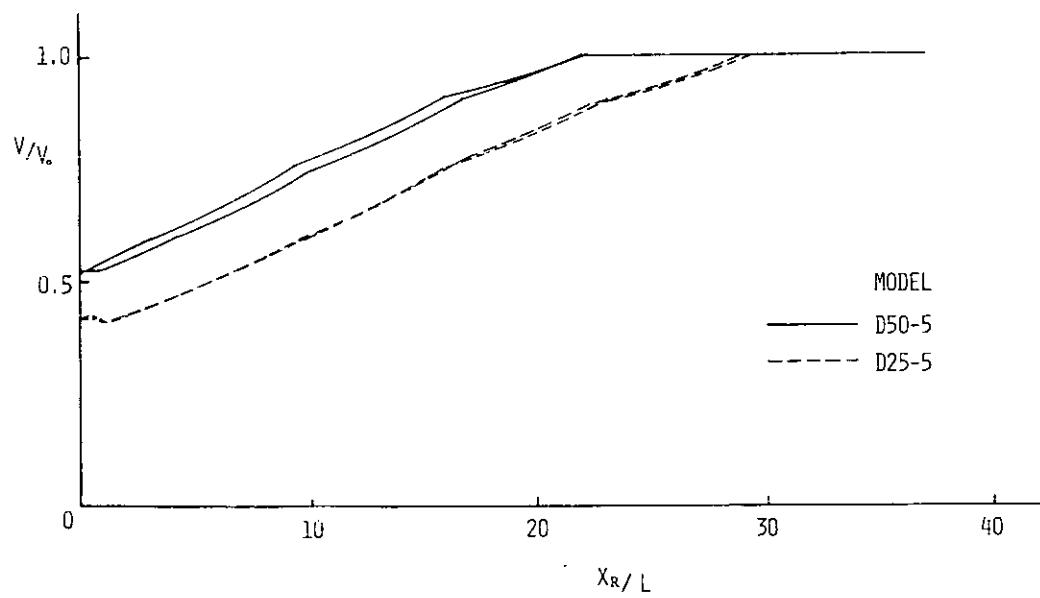


図 4. 2. 1 錨(泊)地進入時の減速状況(E航海士)

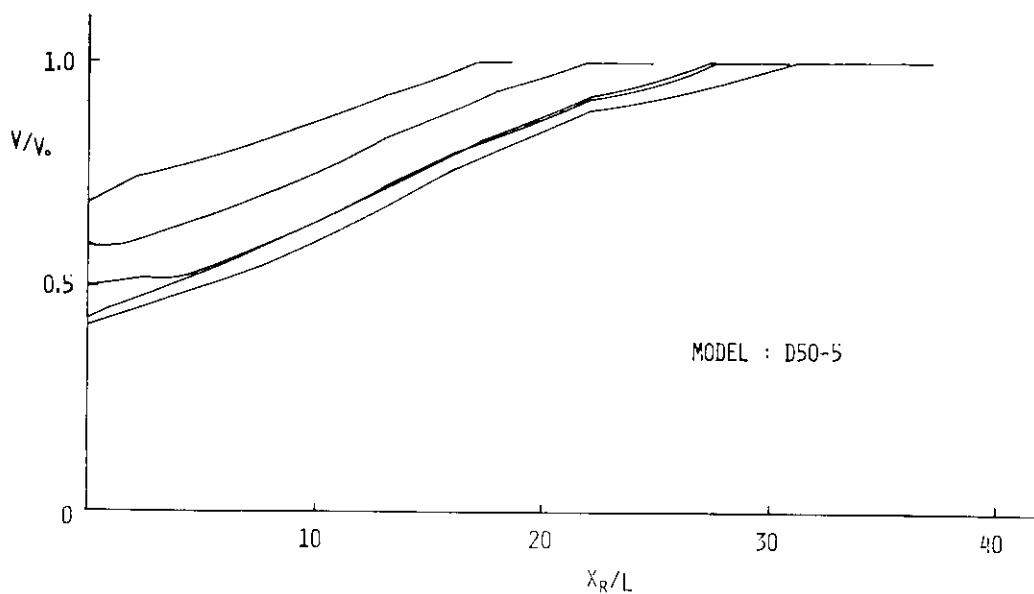


図 4. 2. 2 鎖(泊)地進入時の減速状況(ドックマスターS氏)

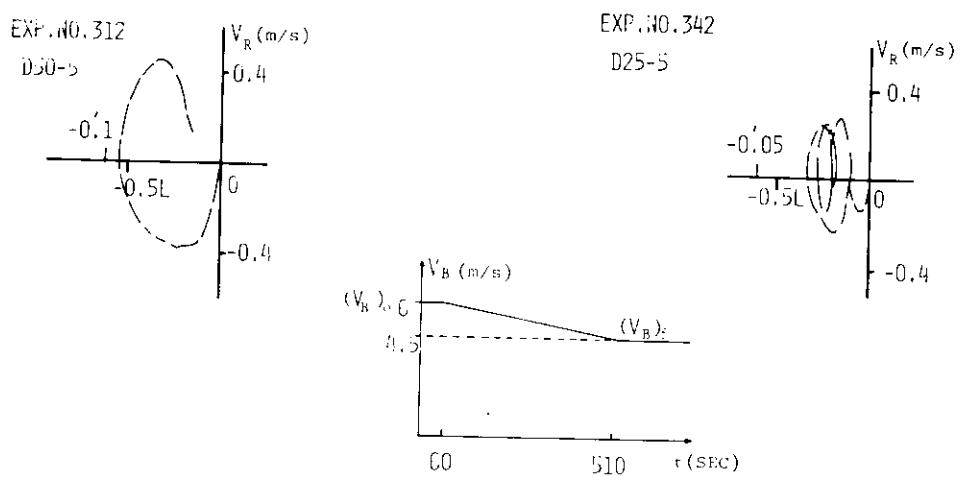


図 4. 2. 3 追従制御 ( $V_B$ :直線状減速, E航海計)

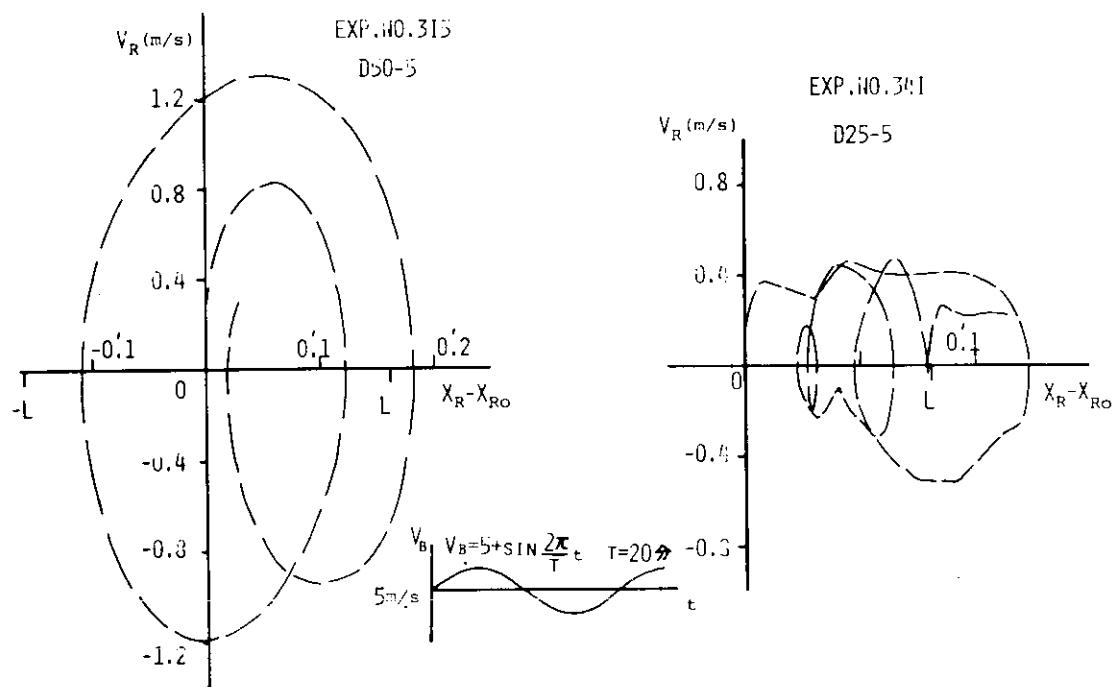


図 4.2.4 追従制御 ( $V_B$ :正弦状, E航海士)

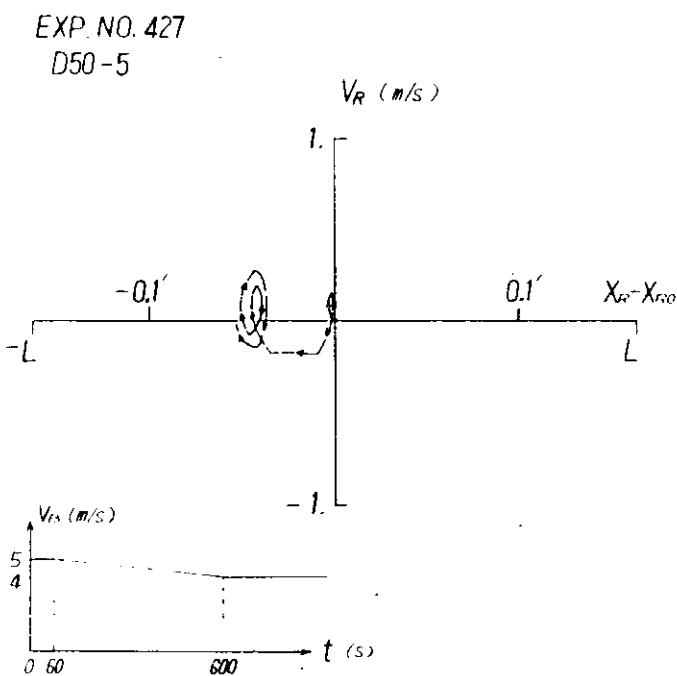


図 4.2.5 追従制御 ( $V_B$ :直線状減速, ドックマスター S 氏)

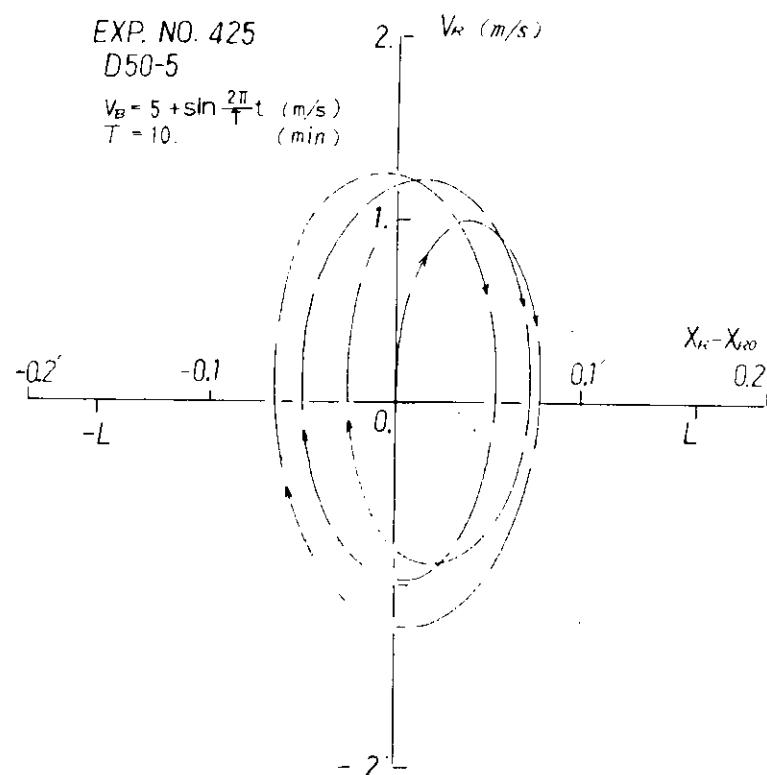


図 4. 2. 6 追従制御 ( $V_B$ :正弦状, ドックマスターS氏)

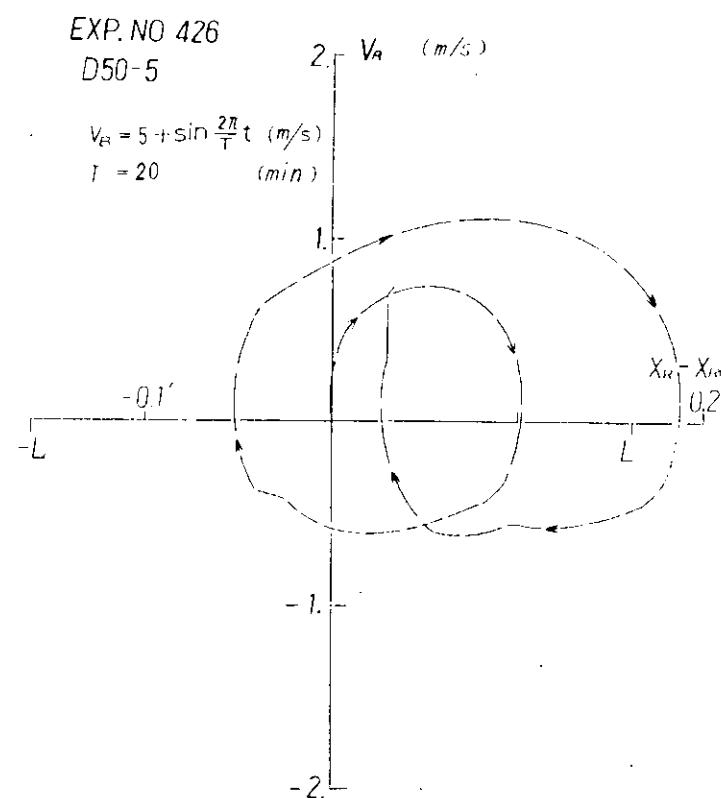


図 4. 2. 7 追従制御 ( $V_B$ :正弦状, ドックマスターS氏)

## 5. 二、三の新種計装の評価実験

将来、船舶乗組員は運航の経済的理由から削減の方向に向いその結果、大洋航行中はできるだけ小人数による運航形態へと移行してゆくであろう。しかしながら、沿岸近く又は港湾内の操船はいくら航海計器等が発達するからと云っても設備投資の経済面や船舶等の安全面から多大な費用により操船されなければならないであろう。これに対処して入出港時の場合は常時には陸上勤務である入出港専門の運航要員が操船に当る形態になると想像される。このような体制になるとすれば、入出港専門の運航要員は各種の船舶を扱うことになり、それらの船舶を安全に入出港させる能力を要求される。このためには船が規格化されるか、又は船の運動性能等が規格化されるのが望ましい。<sup>1)2)</sup> 後者の規格化は可能な限り、人間の勘を排除して機械化されることにより実現されるであろう。ただこの機械化は船舶の安全運航面と経済面の双方を追求するものになるであろう。将来の予想はさておき、現実の問題としても、針路安定性に劣る船舶や人間の持つ距離感覚及び時間感覚を越える大型船が出現しており、在来の船舶は勿論のこと、これらの船舶をも安全に容易に操船できる航海計器や航海装置の開発が期待されている。<sup>3)4)5)6)</sup>

この新種計装に要求される項目を列挙するとすれば

1. 入出港時に使用する。
2. 港湾内や沿岸近辺で使用する。
3. 入出港専門の熟練運航要員が使う。
4. 船舶の安全を目的とする。
5. 確実に作動し、操作が容易であること。
6. 低廉であること。

等が考えられる。

これらの新種計装は多岐にわたるけれども、こゝでは所謂 Rudder Translator 2種と船位の XY 記録器を使用する模擬操船を行ない、その効果を調査した。すなわち

- (1) YAW-RATE WHEEL (記号 YRW)
- (2) COURSE WHEEL (記号 CW)
- (3) XY RECORDER (記号 XY)

を取り扱うこととした。(1)と(2)は主として針路不安定の特性を補償する目的の操舵機構であり、(3)は狭水道航行に有効と思われる。これら新計装の性能や取り扱い易さを評価するに当って従来の HAND STEERING (記号 HND) や AUTO-PILOT (記号 AP) をも同時に試みた。なお、最近大型船に装備されつつある YAW-RATE METER (又は TURN RATE METER) の評価については 2.1.4 節で述べられているので、こゝでは省略する。

### 5.1 供試船モデル

通常、針路不安定な船の不安定ループ幅は約 5° 以内である。これを限度とした船型を主として選び、SR 151 の D タイプ・不安定ループ幅 5° のモデルを使用した。船型も大型タンカー、外航貨物船及び小型鋼船を範囲に考えるとすれば  $L/V$  が 50S, 25S, 10S となるから、D50-5, D25-5, D10-5 の 3 タイプを選んだ。なお、比較のため針路安定な船も 1 隻加えることにして普通貨物船型の D25-S タイプを採用した。

### 5.2 操舵・操船実験の種類

本節の新計装による操船は場所的には港湾内を考えている。従って海象条件は大体において平穏な海域と考えてよいであろう。しかし、港湾内といえども潮流、風、波等があり、これらは地理的制約条件から操船

には重要な要因となる。まず海象条件の面から 2つに分けて潮流・風・波等の外乱のない平穏な操船状況と外乱のある操船状況の実験を分けて行なう。更に各海象条件下で地理的条件を考えて、地理的制約のない即ち航路指定のない状況と地理的制約のある航路指定された状況に分ける。これも又各々、保針操船と変針操船に分類される。これらを整理分類すると図 5.1 の様になる。こゝで操船上見落してはならないのに、他船との航路関係がありこれが又重畠されるが、基本的操船は自船の動作であるから他船との関係は省略することにした。

本節で実施された操船実験は各種計装において次の通りである。

(1) 外乱のない状況下での単純な保針

計装 : HND, YRW, CW, AP

船型 : D50-5, D25-5, D10-5, D25-S

(2) 外乱のない状況下での単純な変針

変針角は針路修正のための小角度変針と避航及び航路変更のための大角度変針を行なった。変針に際してとられる舵角は任意として特に  $35^\circ$  を指定しなかった。

変針角 :  $4^\circ, 30^\circ$

舵角 : 任意

計装 : HND, YRW, CW, AP

船型 : D50-5, D25-5, D10-5, D25-S

(3) 外乱のある状況下での単純な保針

外乱として風と波を別個に考え、それぞれの影響下で計装の効果を調べた。風は定常風が常に船の正横から吹くものとし、又波は、港湾内では多少過大すぎると思われるが、6章のものを採用した。

a) 外乱 1 : 定常風 舵角  $2^\circ$  相当

計装 : HND, YRW, CW

船型 : D50-5, D25-5

b) 外乱 2 : 港湾内波浪

計装 : HND, YRW, CW, AP

船型 : D50-5, D25-5

$$\begin{pmatrix} T_L & T_H & \bar{\phi} \\ 1.59 & 3.18 & 0.050 \\ 1.31 & 2.61 & 0.092 \end{pmatrix}$$

(4) 外乱のある状況下での単純な変針

港湾内波浪中の変針は基本的に外乱のない状況と変りはないであろうから、省略して定常風外乱の場合について行なう。

外乱 : 定常風 舵角  $2^\circ$  相当

計装 : HND, YRW, CW

船型 : D50-5, D25-5

(5) 外乱のある状況下での狭水道操船

2.2 節で述べられた屈曲した狭水道を正横より潮流を受けて航過する操船を行なう。操船チームは航海士と操舵員とで構成され(1)～(4)に述べた操舵員のみによる計器操舵とは異って潮流の存在さえも情報として知らされていない航海士は、視界物標とレーダ情報とともに常に船位確認を行ないながら操舵命令を下す形となる。なお操舵命令は HND, YRW, XY の計装に対しては通常の Starboard, Port の舵角指令方式であるが CW に対してはコース何度の針路指令方式である。又、XY の計装に於ては船位情報は物標、レーダ、XY から得られることになる。

潮流の強さに関しては計装の効果を大きく引出すために、実際には珍らしい位の強さになっている。

外乱 : 潮流正横より  $2 \text{ kt}$

計装 : HND, YRW, CW, XY

船型 : D50-5, D25-5

### 5.3 操船者および操舵員

本実験における単純な保針・変針操舵は操舵員の個人差を除くため原則として同一人、1人A氏が操舵に当った。又、狭水道操船に於ても航海士は同一人、1人E氏が担当した。

保針・変針実験：操舵員 A（商船大学学生、乗船経験3ヶ月）

B（商船大学船舶工学教官）

C（大阪大学学生）

狭水道操船実験：航海士 E（商船大学大学院生、乗船経験3年）

操舵員 H（商船大学・教官）

” B（商船大学船舶工学教官）

なお、航海士及び操舵員は各種新計装の使用には十分慣れていない未熟練者である。

### 5.4 実験の記録

操舵員の操作、船体運動、航跡に実験解析の主眼点を置いているため、4ペン・レコーダにて舵輪指令舵角 $\delta_w$ 、実舵角 $\delta$ 、回頭角 $\phi$ 、回頭角速度 $\dot{\phi}$ を記録した。航跡はXYレコーダー取り、参考資料として船速Vも3ペン・レコーダーに入れた。計測時間は保針で約15分間とした。

### 5.5 YRW、CWおよびAPの設定係数

#### (1) Y RW

Y RWの制御則を表わすと

$$\begin{cases} \delta^* = k_1 (k_1 \delta_w - \dot{\phi}) & \text{こゝに } \delta_w: \text{舵輪による指令舵角} \\ \dot{\phi}_I = k_1 \delta_w & \delta^*: \text{制御機器による指令舵角} \\ \dot{\phi} & \dot{\phi}: \text{回頭角速度} \\ \dot{\phi}_I & \dot{\phi}_I: \text{指令角速度} \end{cases}$$

である。調整係数 $k_1$ 、 $k_2$ のうち指令角速度 $\dot{\phi}_I$ を定める係数 $k_1$ は舵輪指令舵角 $\delta_w$ が常用舵角(15°)で丁度実施角15°の定常旋回になるように定める。(図5.2)又、 $k_2$ は角速度 $\dot{\phi}$ がオーバーシュートしない非周期限界から定め、保針操舵では高周波数域の操舵になるから一次系近似の追従性指数Tは $\frac{1}{T_1 + T_2 - T_3}$ として49年度SR151報告書の計算から定めた。

#### (2) CW

CWの制御則を表わすと

$$\delta^* = k_2 [k_3 (\phi_I - \phi) - \dot{\phi}] \quad \phi_I: \text{設定針路}$$

である。調整係数 $k_2$ 、 $k_3$ のうち $k_2$ はYRWの非周期限界から定め(変針操舵の場合は低周波数域の操舵になるから $T = T_1 + T_2 - T_3$ とする)、 $k_3$ は回頭角がオーバーシュートしない非周期限界から定まる数値の8割の値で設定した。係数の設定値は表5.1に示す。

実用されているオートパイロットの慣用式で制御則を書き直すと

$$\delta^* = -k_2 k_3 (\phi_e + \frac{1}{k_3} \dot{\phi}) \quad \text{こゝに } \phi_e = \phi - \phi_I$$

$$K_p = k_2 \cdot k_3$$

$$T_D = \frac{1}{k_3}$$

となり  $k_2$ ,  $k_3$  を  $K_p$ ,  $T_D$  に換算した値を表 5.1 に併記しておく。

### (3) A P

オートパイロットの一般式は積分制御のない場合、制御則を伝達函数で表わすと

$$\frac{\delta^+}{\phi_e} = K_p \left( 1 + \frac{T_D S}{T_F S+1} \right)$$

で慣用的に用いられている。  $K_p$  は舵角比、  $T_D$  は微分時定数,  $T_F$  はフィルター時定数である。

一般的な  $K_p$  係数の範囲は  $K_p = 0.5 \sim 3.5$  で保針時の性能を満足し、かつ変針時のレスポンスも敏速でオーバーシュートも少ないので調整係数は、周波数応答域の観点から妥協値になり、実用的には

$$\omega_c = \sqrt{K \cdot K_p / T}$$

$$T_D = 1.6 / \omega_c$$

$$T_F = 7.8 \times 10^{-2} / \omega_c$$

に選ばれる。

こゝでは CW の場合と同様に低周波数域を主眼におき  $K_p = 2$ 、  $T = T_1 + T_2 - T_3$  として  $T_D$  を算定した。数値を表 5.1 に併記しておく。

## 5.6 実験および解析結果

### (1) 外乱のない状況下での保針操舵

D50-5 タイプモデルによる実験例の時間経過を図 5.3 ~ 5.6 に示す。保針操舵の目的は針路を保持することであるから設定針路からの偏差が少ないので良好である。これには針路の標準偏差を用いる。又操舵員にかかる負担の大きさを表わす指標として舵輪の操作頻度を示し、馬力損失の観点から実舵角の RMS を求めた。図 5.7 ~ 5.9 に結果を示す。図 5.7、5.8 は計装別の比較を、図 5.9 は船型別の比較をしたものである。

### (2) 外乱のない状況下での変針操舵

D50-5 タイプモデルによる 30° 変針実験例の時間経過を図 5.10 ~ 5.13 に示す。変針操舵の評価は、変針に必要とした時間即ち、変針が出来たと略判定される変針角 ±1° 以内に収まった時間（変針所要時間と称す）と針路が整定して角速度が略ゼロになった変針整定時間で表わす。操舵員にとっては舵輪操作回数が問題にされるから、変針整定時間内にとられた操作回数を求めた。4° 変針の結果を図 5.14 ~ 5.16 に 30° 変針の結果を図 5.17 ~ 5.19 に示す。図 5.14、5.15 及び図 5.17、5.18 は計装別の比較を、図 5.16、5.19 は船型別の比較を示している。図 5.20 に、変針整定所要時間と変針所要時間の相関を描いておいた。

大角度変針は航路指定のある変針と関係するため、新針路距離、航走路距離を求めるとき図 5.21 となる。

### (3) 外乱のある状況下での単純な保針

定常風（舵角 2° 相当）での保針結果を図 5.22 に示す。波外乱下での D50-5 タイプモデルでの実験の時間経過例を図 5.23 ~ 5.26 に示す。波外乱下での結果は図 5.27 に記しておいた。

### (4) 外乱のある状況下での単純な変針

定常風下での 4°、30° 変針の結果を図 5.28、5.29 に描く。

### (5) 外乱のある状況下での狭水道操船

航跡図を D50-5、D25-5 モデルについてそれぞれ図 5.30、5.31 に描いておく。この狭水道操船の目標値は航路中央ブイ線に沿った航路中央線上を可能な限り正確にトレースすることであるから、全航跡の偏位量の RMS、航路を横切る頻度、潮流による計路修正量即ちリーウェイ角の RMS を求めた

結果が図 5.3.2 である。又、変針点で次の航路に乗せるためにいかに早く変針開始点を航路中央上に持つてゆき、変針終了点で航路中央上に操って行ったかを示したのが図 5.3.3、5.3.4 である。変針開始点の横偏位量、変針開始距離、変針終了時の横偏位量、変針時の航走距離、航跡偏位量の RMS を描いている。なお、狭水道航過中の舵輪操作頻度及び操舵頻度を図 5.3.5 に示しておく。

## 5.7 新計装の評価

評価の前提条件として新計装は

- 1) 外乱の殆んどない港湾に於ける交通の混雑した所で使用される。従って外洋航行中の様を外乱はない。
- 2) 経済性よりもむしろ高精度保針・変針を目標とする。
- 3) 港湾内スピードではある程度舵角を大きくとれるようにして舵角制限機構は設けない。
- 4) 操作の確実さと容易さを求める。

を考えると

- 1) 外乱のない状況下の保針では A P が最も優れ、以下 C W、 Y R W、 H N D の順に性能がよい。特に針路不安定船でその差が顕著である。(図 5.7 ~ 5.9)
- 2) 外乱のない状況下での小角度変針では Y R W が最も優れ以下 C W、 H N D、 A P の順に変針終了時間が長くなる。なおオーバーシュートはいずれの場合にも小さい。(図 5.1.4 ~ 5.1.6)
- 一方、大角度変針では H N D を除いて各計装とも大差はないが、 D 50-5 の A P は例外的に悪い結果を示した。(図 5.1.7 ~ 5.2.1)
- 3) 定常風下での保針は C W が最も優れ、以下 Y R W、 H N D の順に性能が悪くなる。(図 5.2.2)
- 一方、波浪下での保針は各計装とも優劣つけ難く、回頭角の RMS に注目すれば平均的には A P が優れており、以下 C W、 Y R W、 H N D の順に性能が悪くなる。(図 5.2.7)
- 4) 定常風下での小角度変針では、 Y R W が最も優れ、 C W、 H N D の順に性能が悪くなる。(図 5.2.8)
- 大角度変針では各計装とも大差はない。(図 5.2.9)
- 5) 潮流下での狭水道操船では H N D、 Y R W、 X Y とも優劣つけ難い性能を示しているが、強いて言えば X Y が良い。C W は操舵命令方式が通常の方式と異なるため不慣れが効いていたかも知れない。

(図 5.3.2 ~ 5.3.5)

総じて Y R W は H N D に比べて性能が良く Y R W、 C W 等は操船の規格化という意味からも H N D に劣らぬ性能を持ち将来有効になるかも知れない。ただ計装に対する慣れの問題と波浪外乱の処理が問題として残される。

表 5.1 C W 及び A P の 設定係数

計装	係数	船 型			
		D 2 5-S	D 5 0-5	D 2 5-5	D 1 0-5
CW	$k_2$	1 0 7 s	5 3 3 s	1 3 7 s	2 3 s
	$k_3$	0.0 2 7 1/s	0.0 2 3 1/s	0.0 2 3 1/s	0.0 1 9 1/s
	$K_P$	2.9	1 2.0	3.1	0.4
	$T_D$	3 7 s	4 5 s	4 5 s	5 2 s
AP	$K_P$	2	2	2	2
	$T_D$	3 9 s	8 3 s	4 2 s	1 6 s

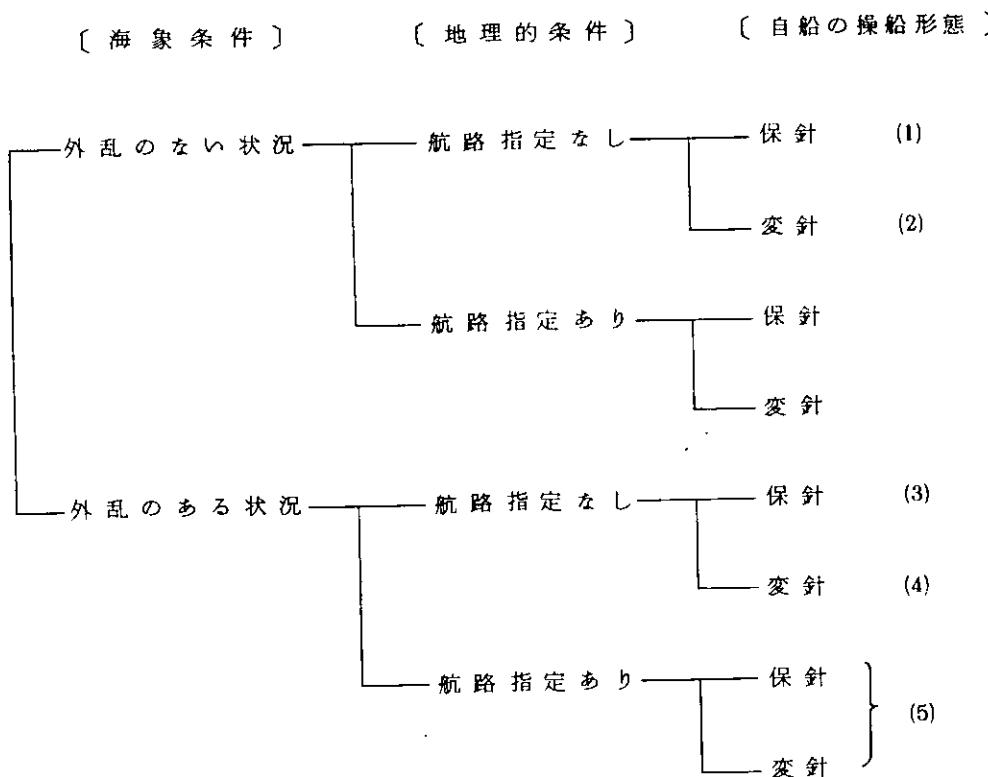


図 5.1 操船状況の分類

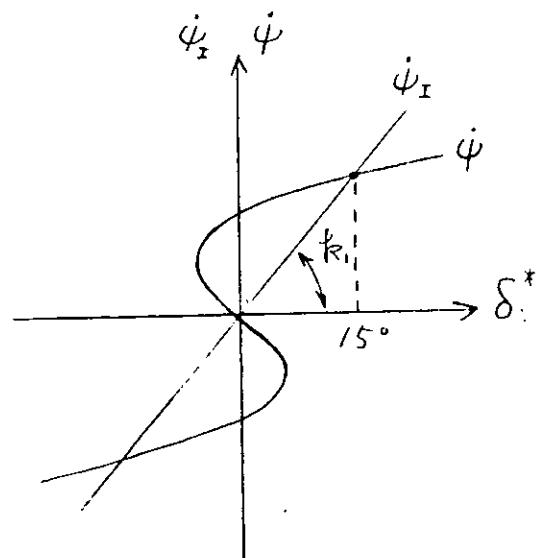
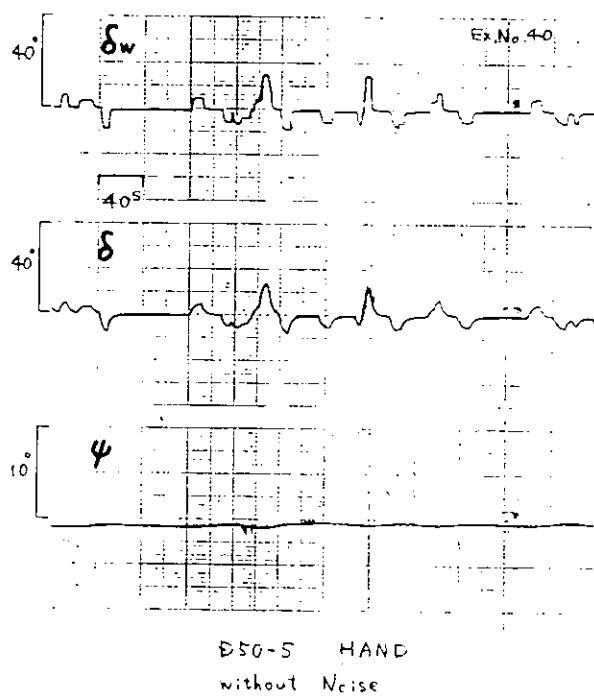
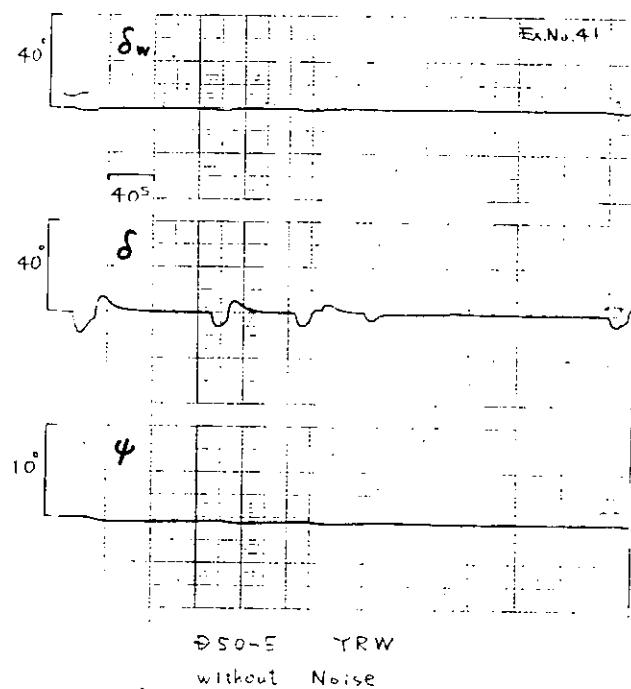


図 5.2 YRW の設定係数  $k_1$  の選定



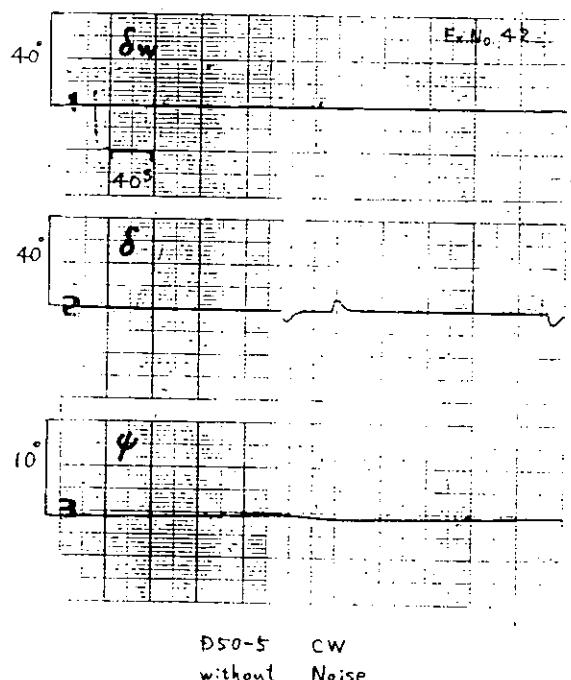
D50-S HAND  
without Noise



D50-S YRW  
without Noise

図 5.3 HAND 操舵による保針例

図 5.4 YAW-RATE WHEEL 操舵による保針例



D50-S CW  
without Noise

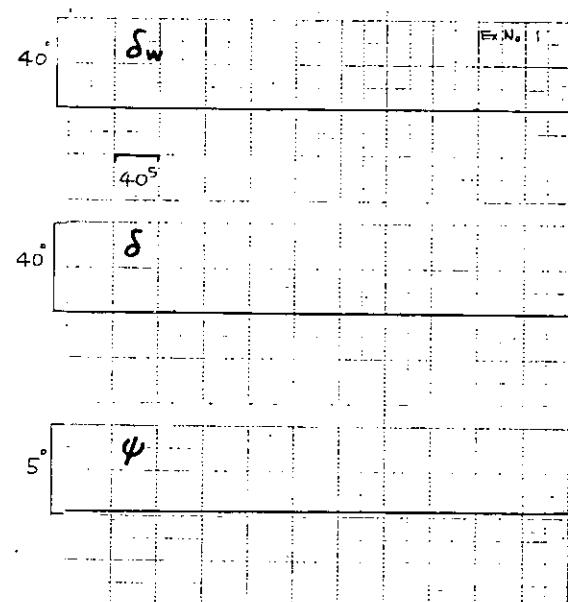


図 5.5 COURSE WHEEL 操舵による保針例

図 5.6 AUTO PILOT 操舵による保針例

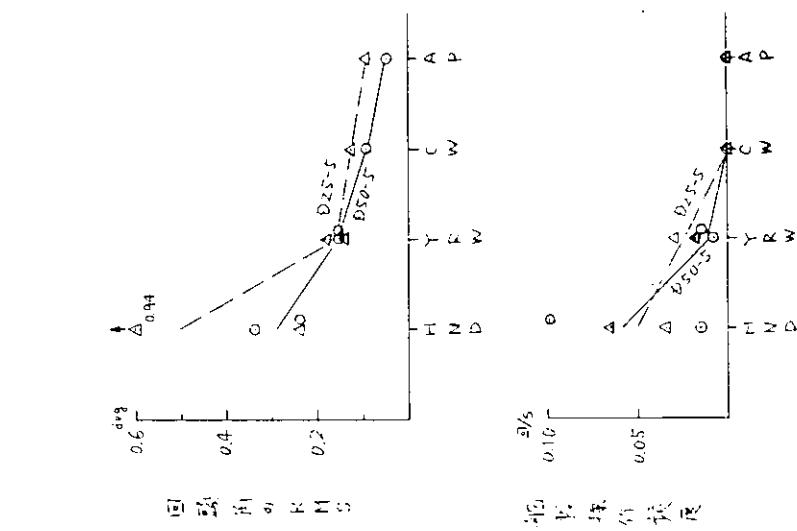


図 5.7 保針機械における新設計結果の比較  
(ノイズなし) D10 - S, D10 - 5, D25 - S  
D25 - 5, D50 - S, D50 - 5

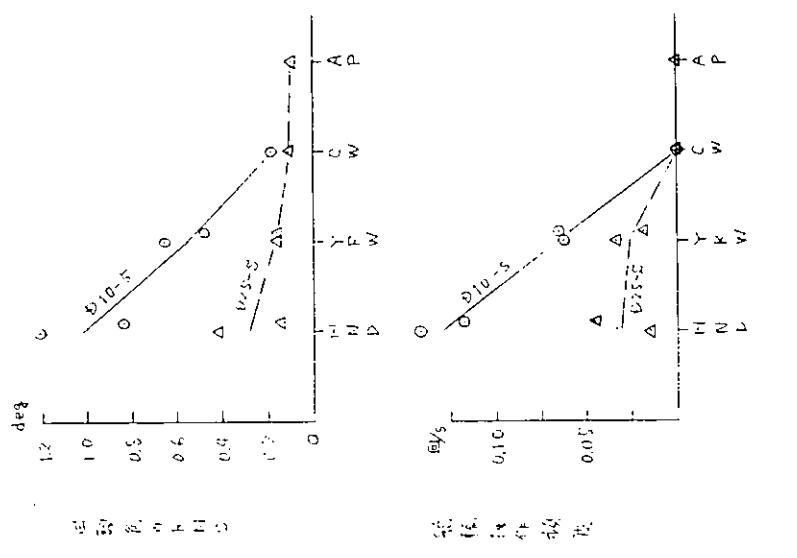


図 5.8 保針機械における新設計結果の比較  
(ノイズなし) D10 - S, D10 - 5, D25 - S  
D25 - 5, D50 - S, D50 - 5

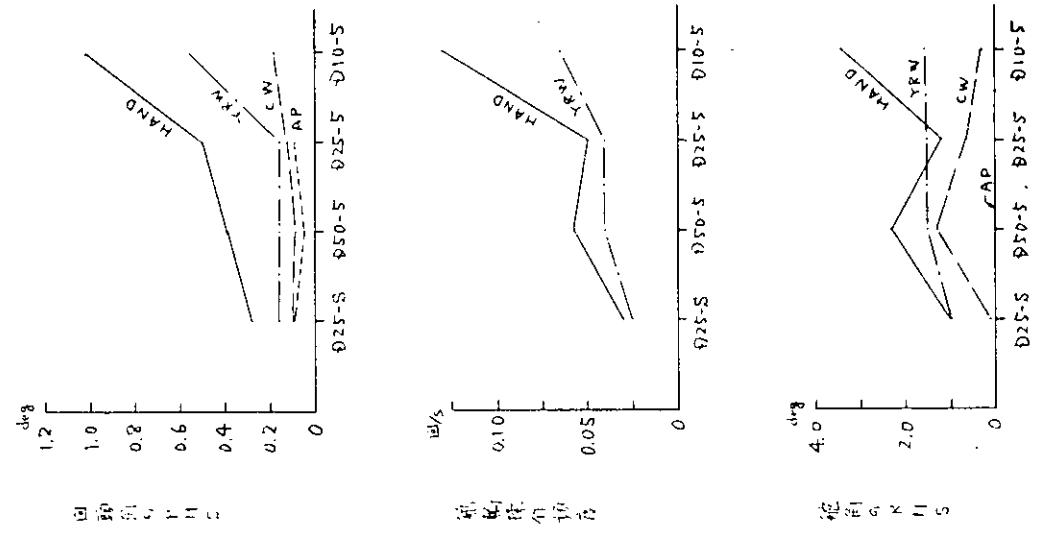


図 5.9 保針機械における新設計結果の比較  
(ノイズなし) D25 - S, D25 - 5, D50 - S  
D50 - 5, D10 - S, D10 - 5

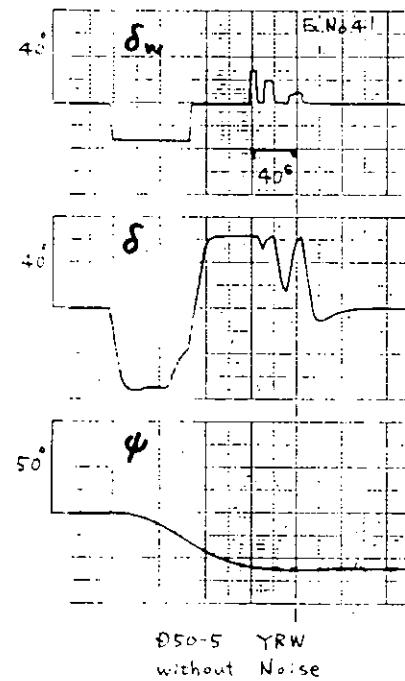
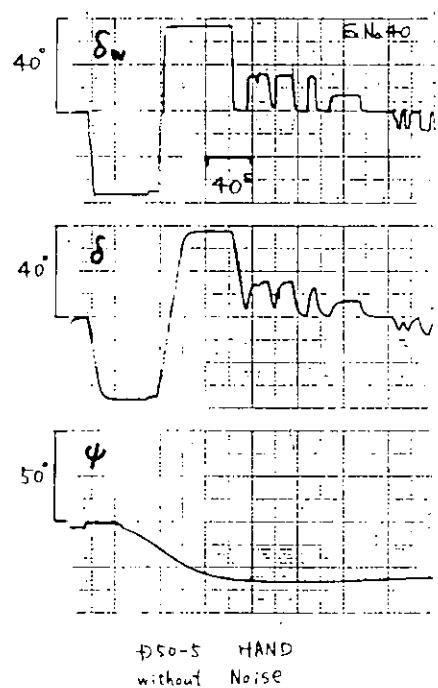


図 5.10 HAND 操舵による  $30^\circ$  変針例

図 5.11 YAW-RATE WHEEL 操舵による  
 $30^\circ$  変針例

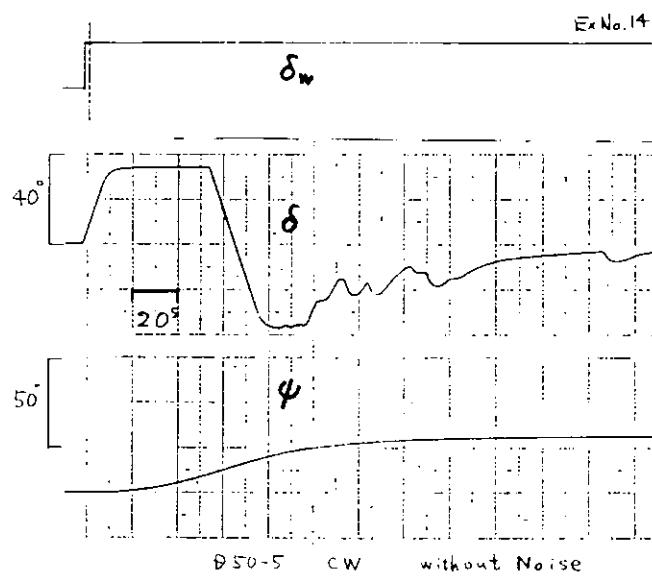


図 5.12 COURSE WHEEL 操舵による  $30^\circ$  変針例

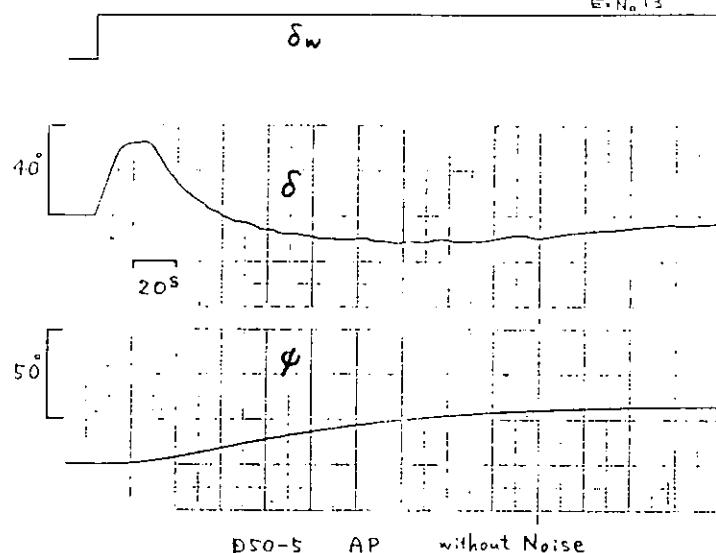
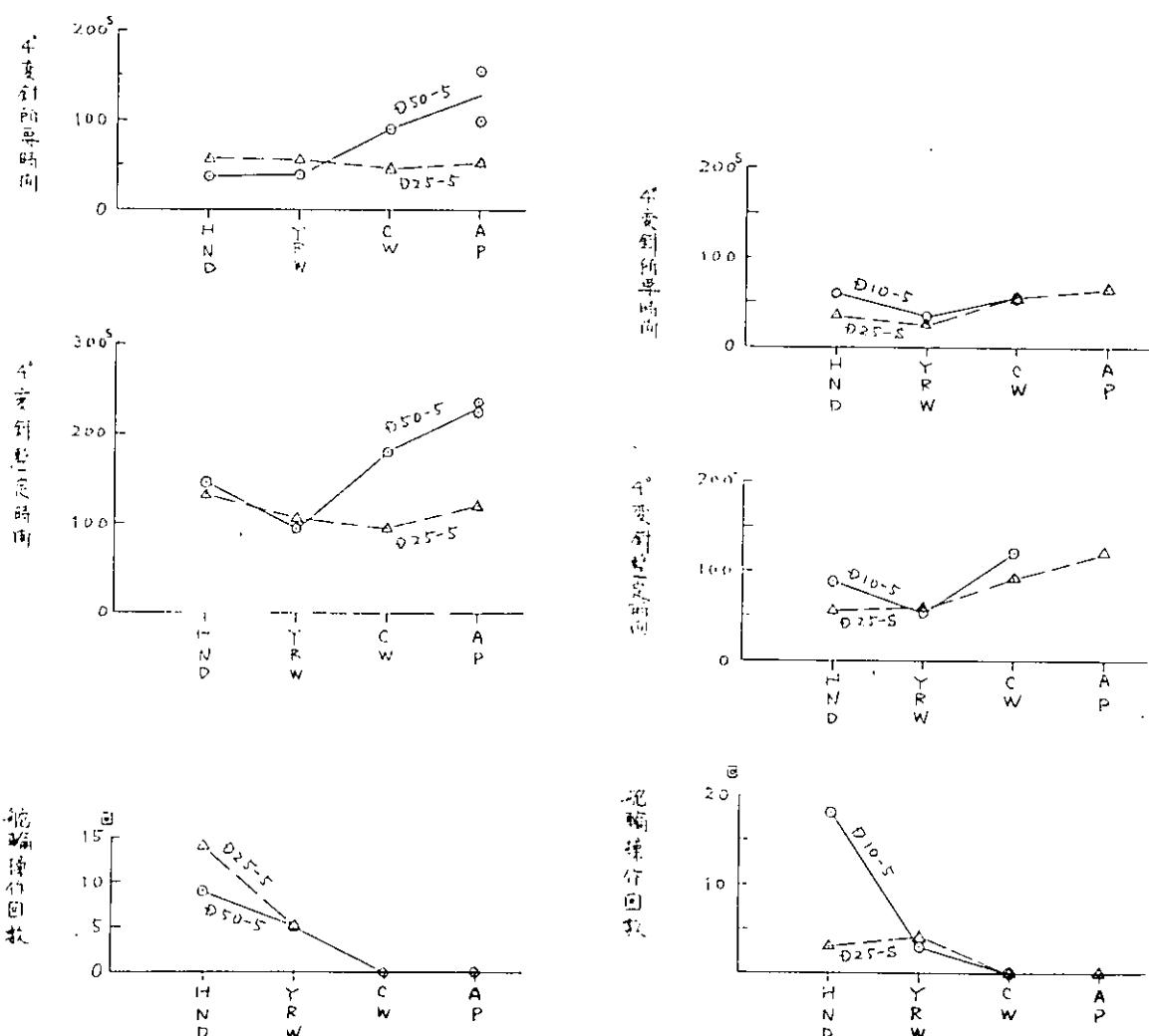


図 5.13 AUTO PILOT による 30°変針例

図 5.14 4°変針操舵における新計装効果の比較  
(ノイズなし) D50-5, D25-5図 5.15 4°変針操舵における新計装効果の比較  
(ノイズなし) D10-5, D25-S

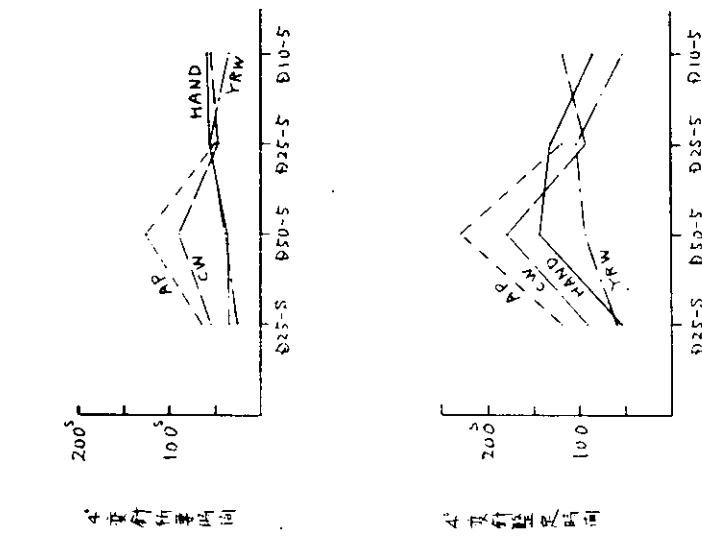


図 5.16 4°多針操舵における新計装効果の比較  
(ノイズなし) D10 - 5, D25 - S

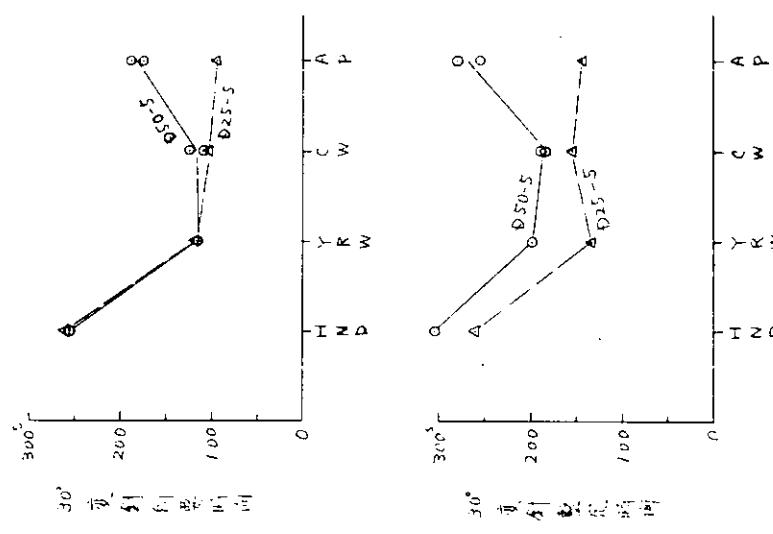


図 5.17 3°多針操舵における新計装効果の比較  
(ノイズなし) D10 - 5, D25 - S

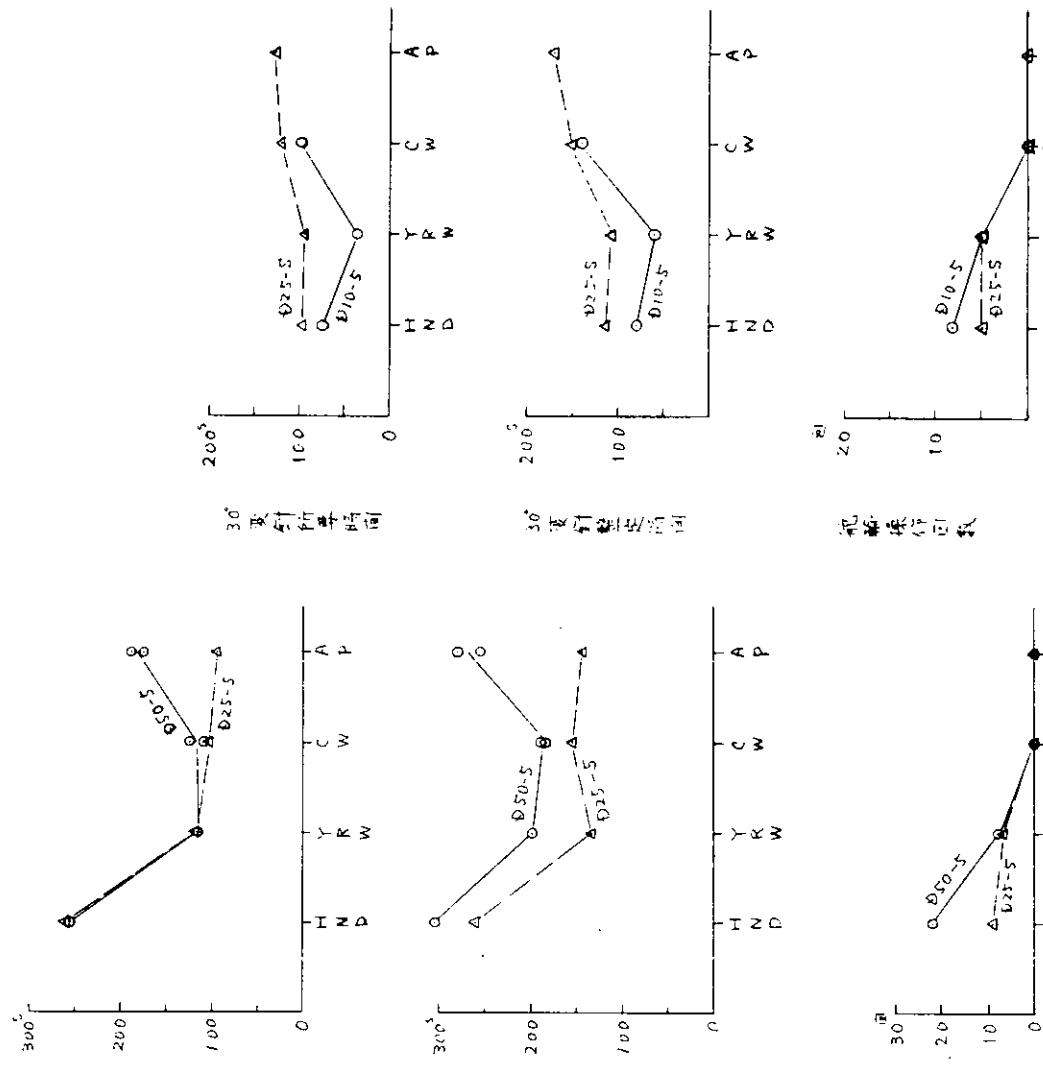


図 5.18 3°多針操舵における新計装効果の比較  
(ノイズなし) D10 - 5, D25 - S

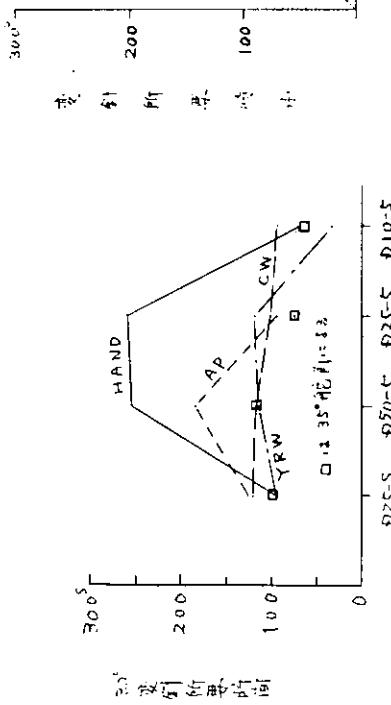
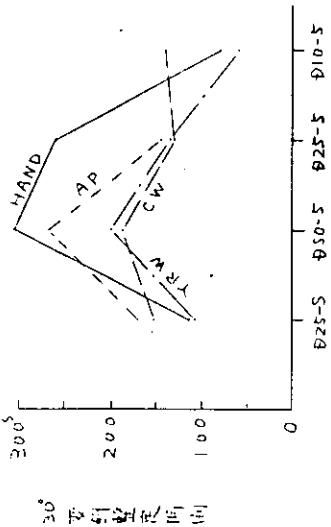


図 5.19 30°変針操舵における新計装効果の比較(ノイズなし)



- 87 -

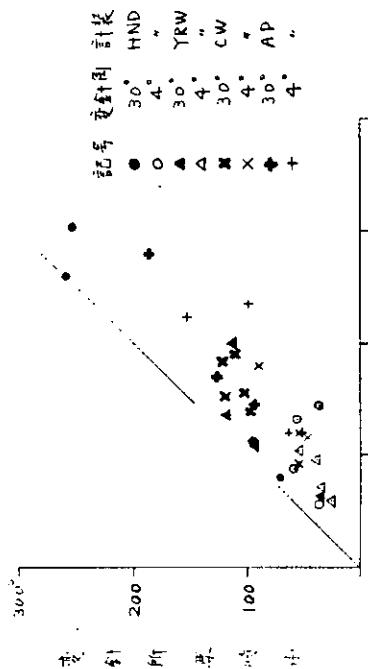


図 5.21 30°変針操舵における新計装効果の比較(ノイズなし)

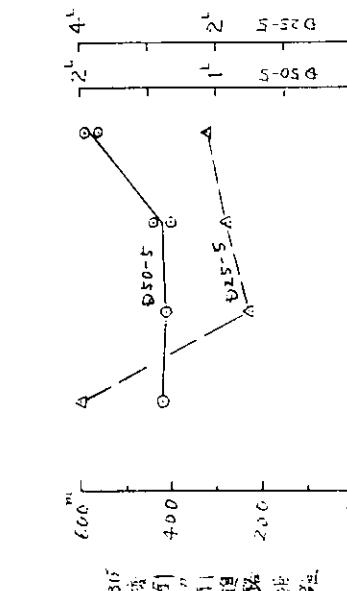


図 5.22 30°変針操舵における新計装効果の比較(ノイズなし)

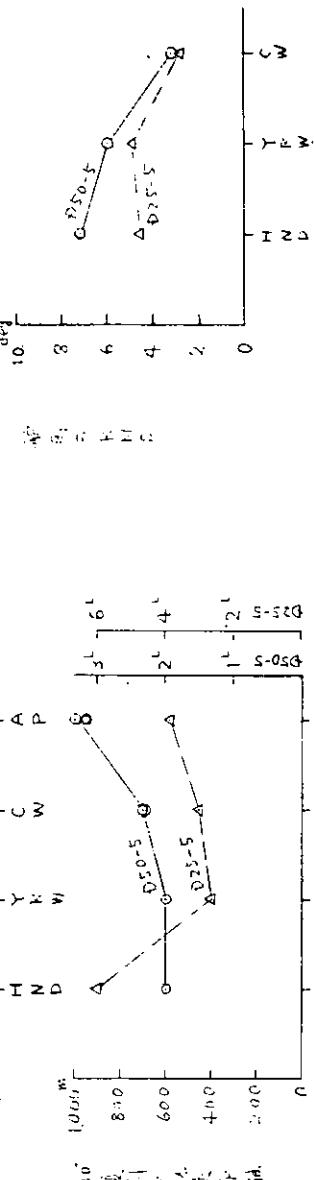


図 5.23 30°変針操舵における新計装効果の比較(ノイズなし)  
D 25-S, D 50-5, D 75-5, D 10-5

図 5.19

— 新進路距離及び航走距離 —

図 5.22

定常風下での保針保舵における新計装効果の比較  
D 50-5, D 25-5

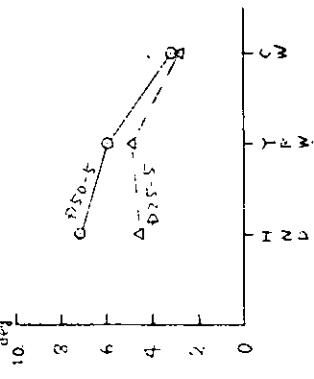


図 5.24 定常風下での保針保舵における新計装効果の比較

— 新進路距離及び航走距離 —

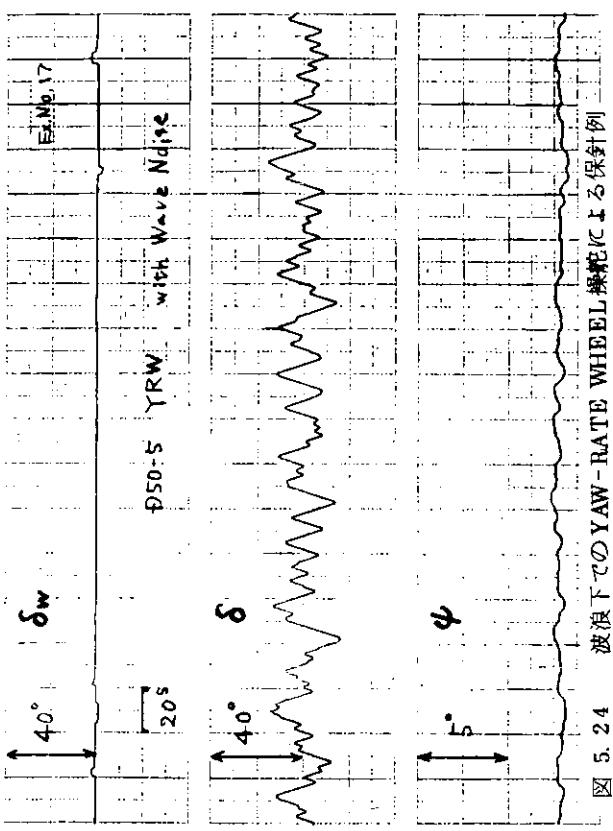


図 5.23 波浪下での HAND 操舵による保針例

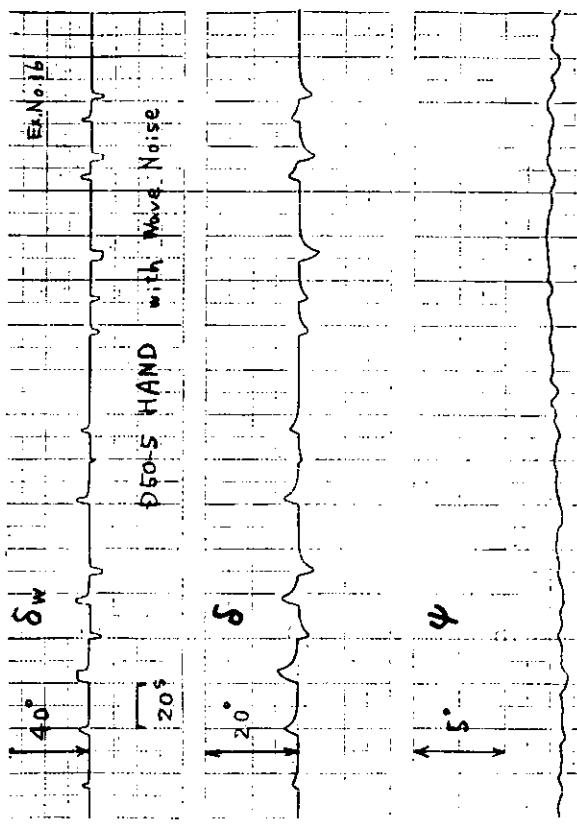


図 5.24 波浪下での YAW-RATE WHEEL 操舵による保針例

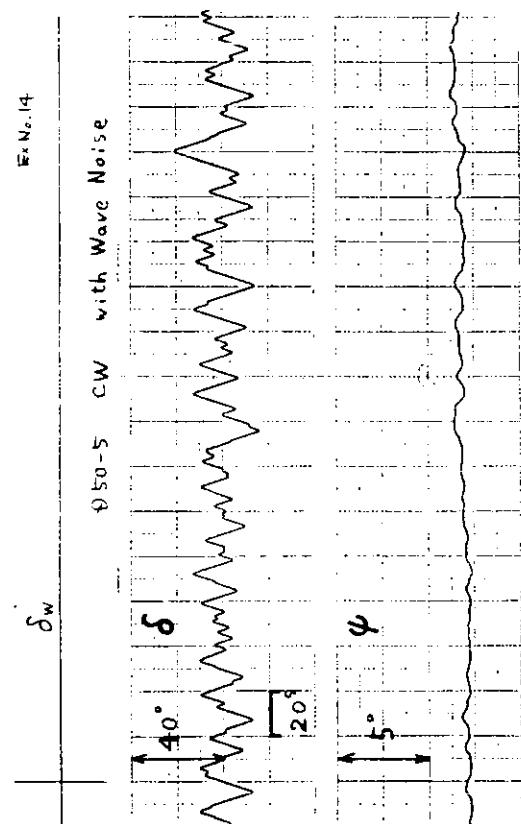


図 5.25 波浪下での COURSE WHEEL 操舵による保針例

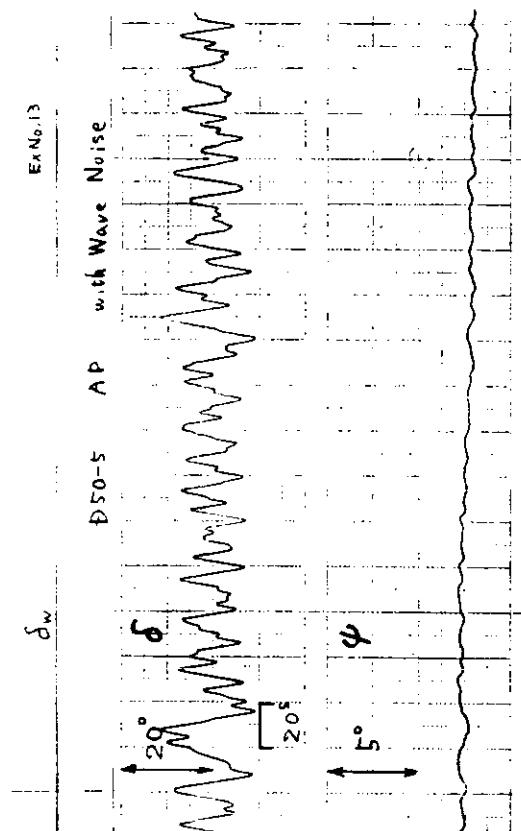


図 5.26 波浪下での AUTO-PILOT による保針例

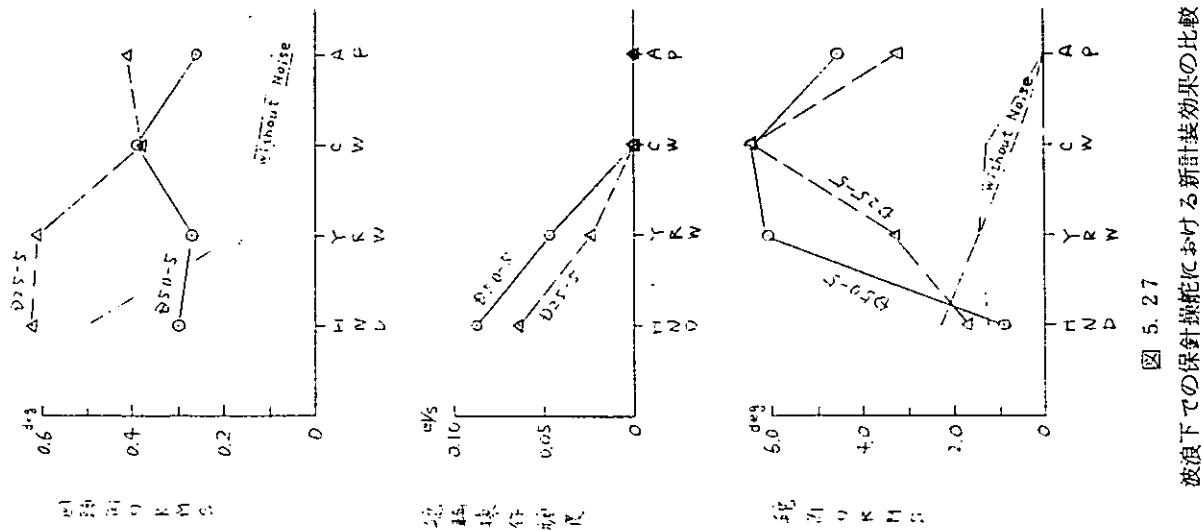


図 5.27

波浪下での保針操舵における新計装効果の比較  
D50 - 5, D25 - 5

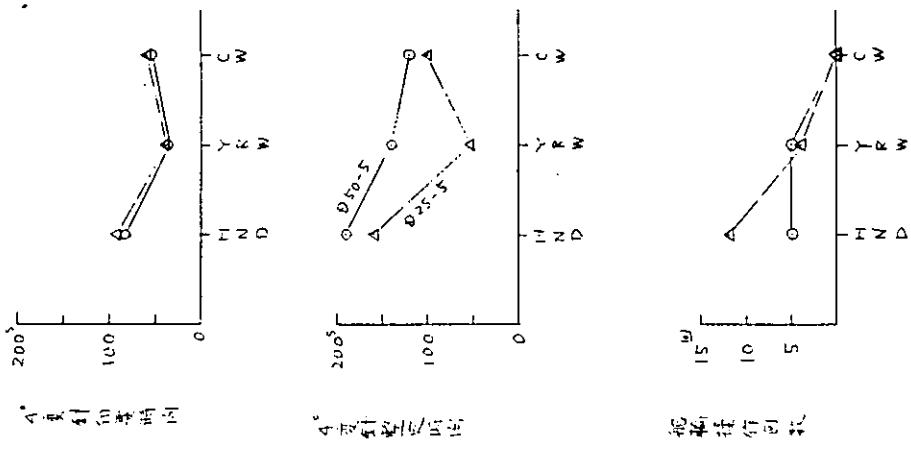


図 5.28

定常風下での4°変針操舵における新計装効果の比較  
D50 - 5, D25 - 5

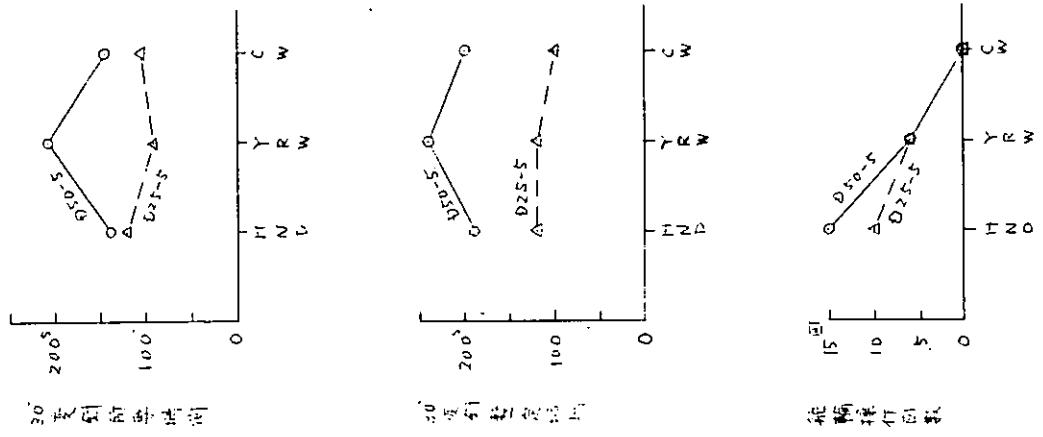


図 5.29

定常風下での30°変針操舵における新計装効果の比較  
D50 - 5, D25 - 5

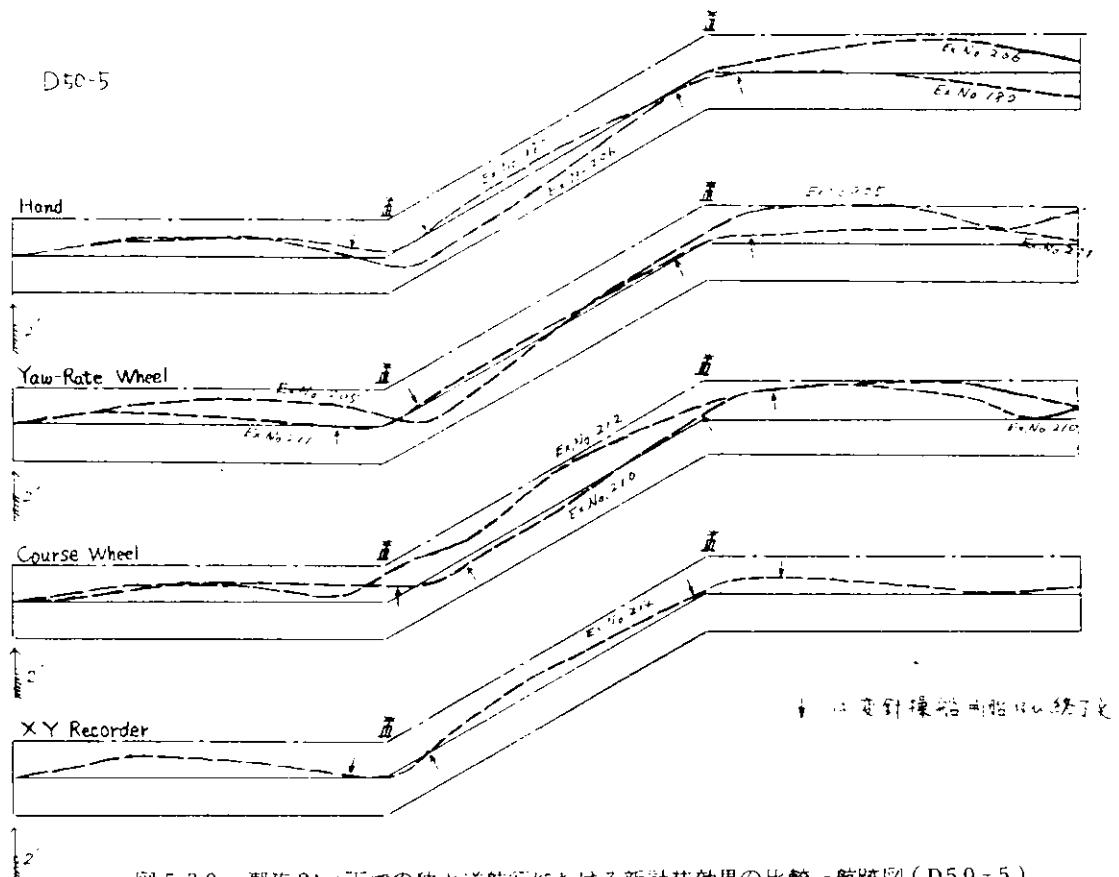


図 5.3.0 潮流 2 kt 下での狭水道航行における新計装効果の比較一航跡図 (D50-5)

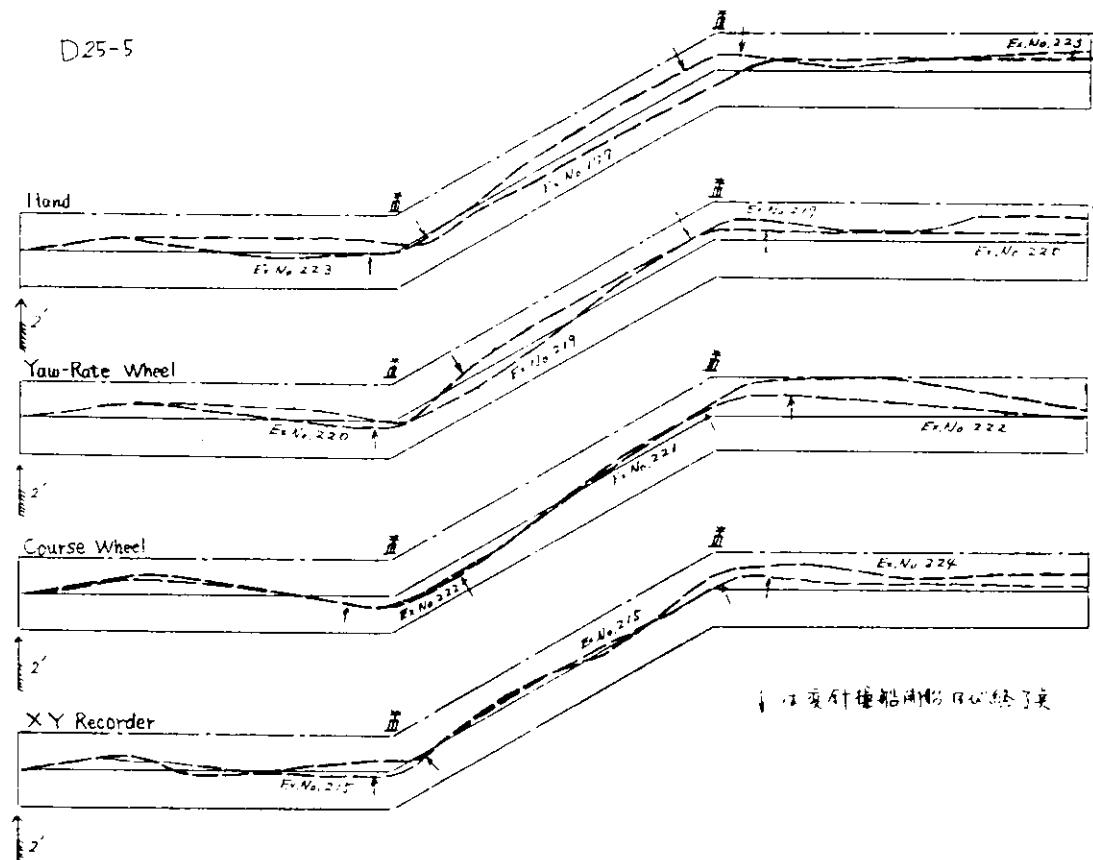


図 5.3.1 潮流 2 kt 下での狭水道航行における新計装効果の比較一航跡図 (D25-5)

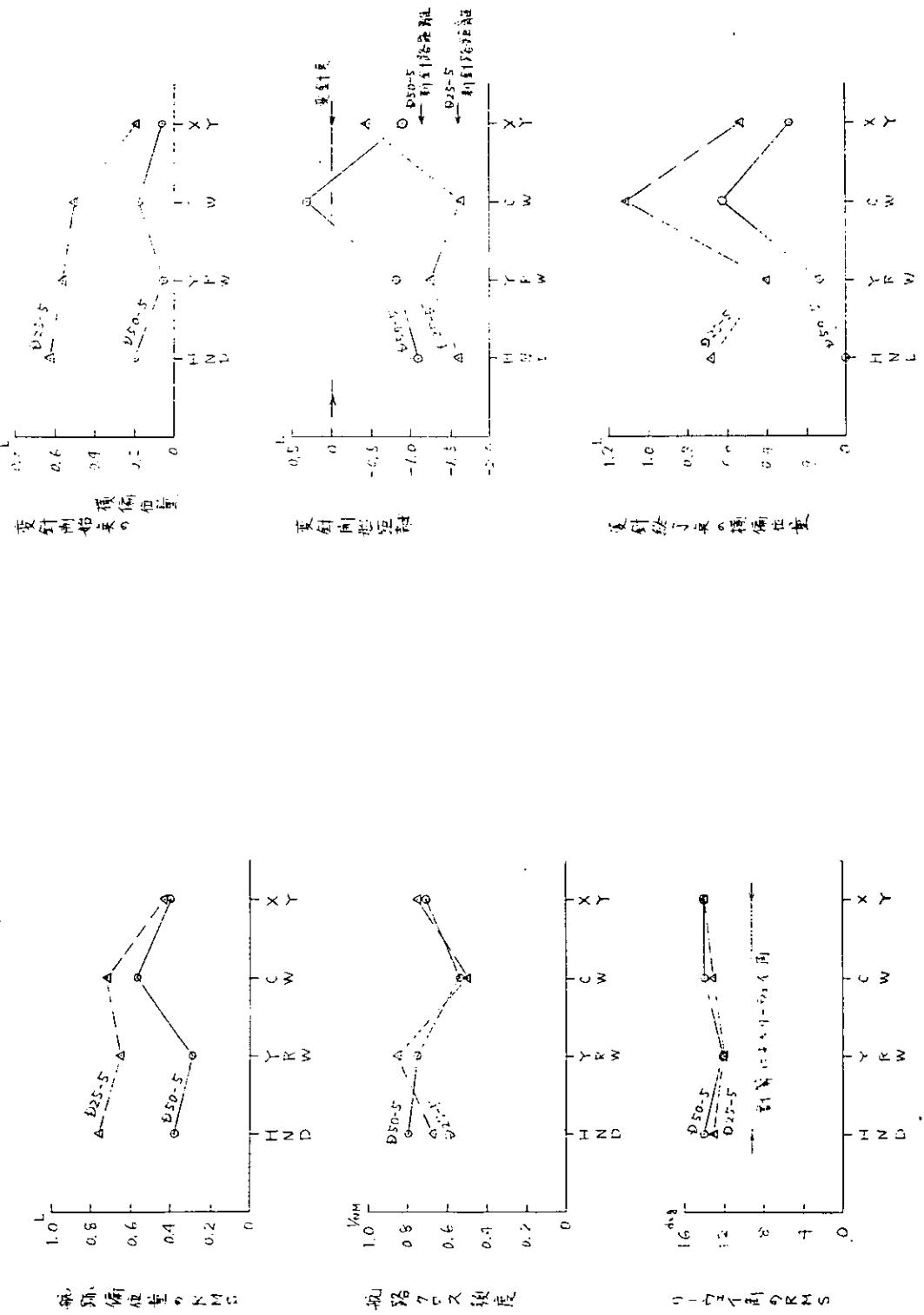


図 5.32 潮流 2 knts 下での狭水道航行における新計画結果の比較  
—航跡偏角、リードイ角等—

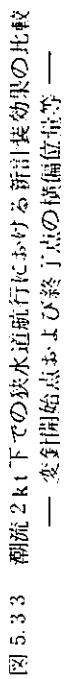


図 5.33 潮流 2 knts 下での狭水道航行における新計画結果の比較  
—変針開始点および終了点の横偏位置等—

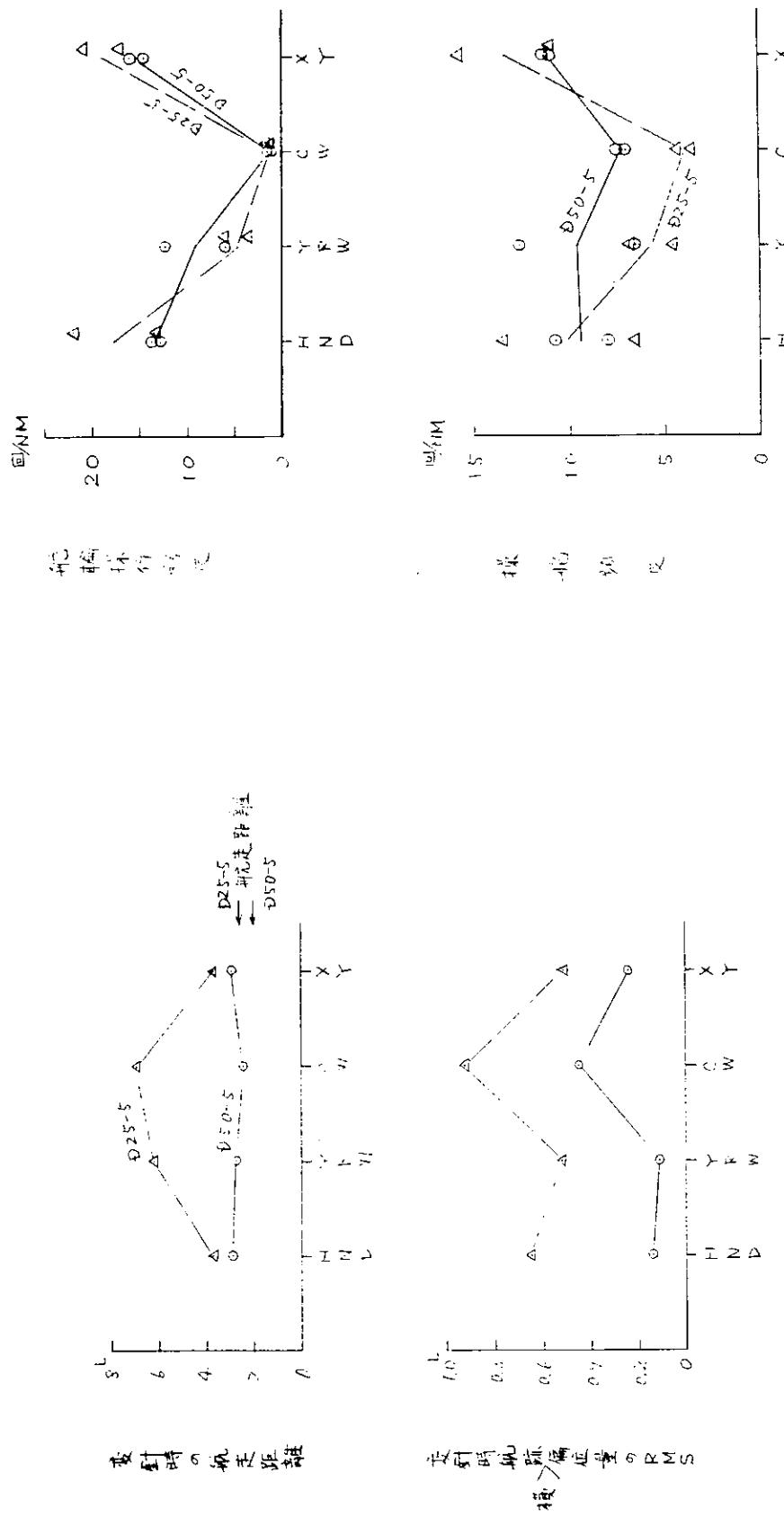


図 5.34 潮流 2 kt 下での狭水道航行における新計装効果の比較  
— 变針時の航跡角度 —

図 5.35 潮流 2 kt 下での狭水道航行における新計装効果の比較  
— 船輪操作頻度および操舵制御 —

## 6. 操船シミュレータ・スタディにおける外乱の設定

操船シミュレータを使って模擬操船を行なうに当たり風や波浪、潮流などの外乱は必要不可欠である。これらの外乱を大別すると次の二つに整理できるであろう。すなわち

(1) 定常的外乱 …… 平均風向風速の函数である定常的風圧力、船長に比べてかなり広い水域をほぼ一様に流れる潮流による場の移動など。

(2) 非定常不規則外乱 … 風向風速の不規則変動、風波や他船の航跡波、岸壁などの反射波や廻折波などが船に加える作用。

(1)の外乱は船の運動にアンバランスや偏りを惹き起こし、操船者はそれを探知してそれを打ち消すための操舵や変針や变速などの操作を行なう。狭水道航路指定の通航とか他船を避航する時などにこのような外乱があるとそれだけ操船は複雑になるであろう。

(2)の外乱は少し趣を異にしている。その原因はいずれにしても比較的短周期の不規則変動であり、操船者は普通、いちいちその変動に対応する操作は行わない。その必要も余りないし、又そのような短周期の操作を行なっても船はほとんど応答しない。

それならばこの種の外乱は操船制御上問題にならないかと云うと、決してそうではない。操船と云う動作は一種の閉回路フィードバック制御であって、操船者は絶えず自分の行なった操作の効果を測定し続けており、その効果に応じて操作を加減し続けている。不規則外乱は、この操作の効果の読み取りを乱し、そのために操作の加減が不正確になったり、時期を逸したりすることになる。

このような考え方の上に本研究で取り上げた外乱は次のとおりである。

(1) 定常風による回頭と一様潮流による平行移動

(2) 原因はいずれにせよ、ある周波数範囲の、そしてある自乗平均値（振幅レベル）をもって不規則に変動するヨーイング

(2)の外乱は図1.2.2にも示したように操船者の操作とは独立に外部で作り出した不規則変動ヨーイングを、コンパスやヨーレートメータ、外部視界の動きを通して操船者に探知させることになる。こうして操船者が既取る船の動きは自分の行なった操作に対する船の応答と、不規則に変動する外乱の両者を加え合わせたものになるわけである。

以下順を追ってそれぞれを説明する。

### 6.1 潮流による平行移動（場の移動）

本船の位置X、Yは

$$\left. \begin{aligned} X(t) &= \int_0^t (V \cos \phi + V_{CX}) dt + \ell_p (1 - \cos \phi) \\ Y(t) &= \int_0^t (V \sin \phi + V_{CY}) dt + \ell_p \sin \phi \end{aligned} \right\} \dots\dots (6.1.1)$$

ここで  $V_{CX}$ 、 $V_{CY}$  は潮流のX（原針路）方向成分、Y方向成分、又、 $\ell_p$  は操船者位置より前方、Pivoting Pointまでの距離である。

自船から見た他船又は航路ブイなどの相対位置  $X_R$ 、 $Y_R$  も全く同様に求めることができる。

### 6.2 定常風による回頭

水面上の船体、上部構造に働く風圧は船体横傾斜モーメント、前後方向ならびに横方向の水平力、そして回頭モーメントを発生する。傾斜モーメントと前後方向の水平力の操船に与える影響は小さいとして無視す

ると、風圧による横押力と回頭モーメントが問題になる。船の操縦運動を解析する基礎式である回頭と横流れの連立方程式にこの風圧力とモーメントを付加すると風圧下の操縦運動の方程式ができる。

この方程式に若干の近似を行なうと回頭運動に関する限り、風圧の影響を等価的な舵角でおきかえることができる。すなわち

$$\delta_N = \left( \frac{Va}{V} \right)^2 - \frac{N'_v Y'_a - Y'_v N'_a}{N'_v Y'_\delta - Y'_v N'_\delta} \quad (6.2.1)$$

ここで  $\delta_N$  : 風圧の操縦に与える影響を操舵でおきかえる等価舵角

$\left( \frac{Va}{V} \right)$  : 風速船速比

$$Y'_a = Ya / \frac{\rho}{2} Ld V^2 = - C_Y \left( \frac{\rho a}{\rho} \right) \left( \frac{S}{Ld} \right)$$

$$N'_a = Na / \frac{\rho}{2} L^2 d V^2 = - C_N \left( \frac{\rho a}{\rho} \right) \left( \frac{S}{Ld} \right)$$

$Ya, Na$  : 風圧の横押力ならびに回頭モーメント

$C_Y, C_N$  : 風圧の横押力、モーメントの無次元係数  
風洞実験などで求められる。

$(\rho_a / \rho)$  : 空気と海水の密度比

$(S/Ld)$  : 水面上および水面下の船の側面積比

$Y'_v, N'_v$  : 横流れ (sway) によって船体に作用する横力ならびに回頭モーメントの流力微係数

$Y'_\delta, N'_\delta$  : 操舵によって船体に作用する横力ならびに回頭モーメントの流力微係数

以上の詳細は本研究部会昭和 50 年度報告書を参照されたい。

図 6.2.1 は現在大型タンカー用に使用している等価舵角  $\delta_N$  の値である。 $\phi a$  は見掛風向角である。風圧力はアフト・ブリッジタンカー模型風洞実験結果<sup>8)</sup> 船体流微係数は  $L/B = 7.3, C_B = 0.85$  のタンカー模型実験結果<sup>9)</sup> を用了。なお見掛風速  $Va$ 、見掛風向  $\phi a$  は真風速、真風向に船速のベクトル修正をして求めるべきであるが(図 1.2.2) 現在のところ計算を簡略にするため真風速、真風向をそのまま使ってい る。船が回頭すればその分だけ真風向が変ることになる。

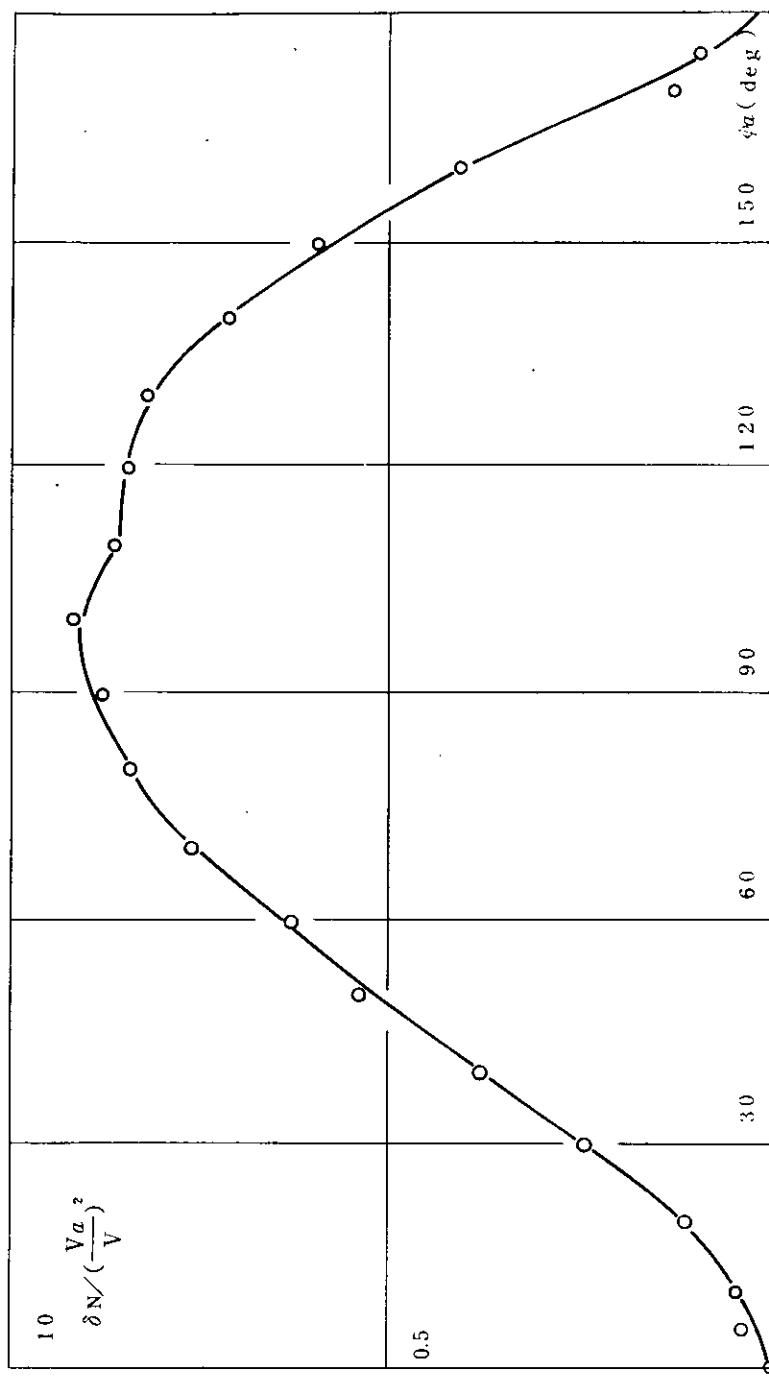


図 6.2.1 風圧力による外乱の等価舵角係数の例

### 6.3 不規則外乱

さきに述べたように操船に介入する非定常不規則外乱はその原因が多様であり、その資料は十分でない。

こゝでは若干の参考資料をもとにスペクトル範囲と外乱の自乗平均値を推定している。

#### 6.3.1 不規則外乱の参考資料

(1) 港湾、平水区域における風浪の資料として瀬戸内海播磨灘北部の波浪スペクトル観測例<sup>20)</sup>がある。

図 6.3.1 にその一部を転載する。

OSM法で計算した船のヨーイング応答函数を使って、この資料からヨーイングのスペクトルを求めてみると図6.3.2のようになる。図6.3.1と比較すると明らかなように本研究供試船記号のD5シリーズに相当する内航小型船では船体応答の大きい周波数と波浪の主要周波数範囲がほぼ一致しているが、D25に相当する外航貨物船では内海波浪の主要周波数域では船の応答がほとんど無く、ヨーイングとして現われているのは、波浪スペクトルの低周波域の basic white noise 的な成分が誘起したものと云うことになっている。そしてそのレベルはD5に比べて全く問題にならないくらい小さい。

この結果も暗示しているように、港湾域の波浪外乱を考えるに当っては外洋波浪に対する応答のようには行かないところがある。

もちろん港湾域における現実の複雑な波スペクトル、たとえば反射波や他船の航跡波やらの混在する波スペクトルを使えば原理的にはうまく行くはずであるが、そのような波スペクトルを求めるることは簡単でない。

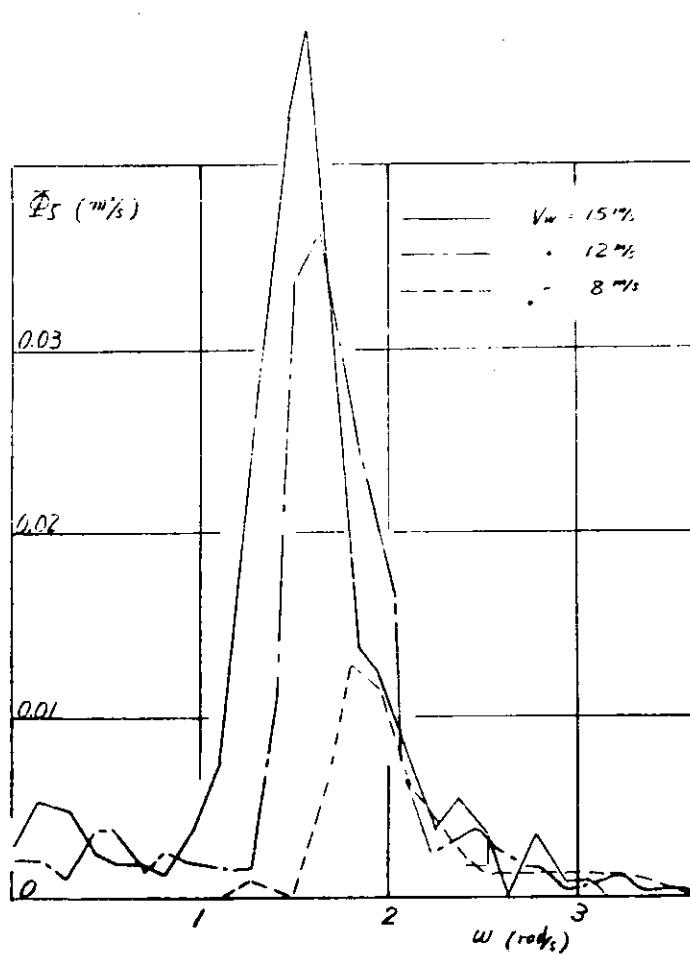


図 6.3.1 内海の波浪のスペクトル

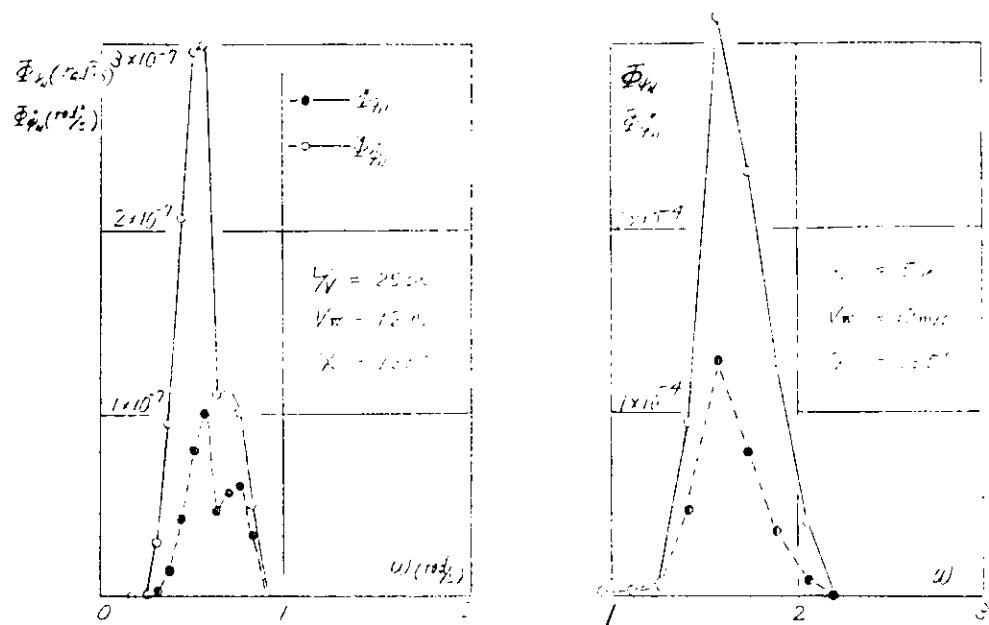


図 6.3.2 波浪によって誘起された船首搖のスペクトル

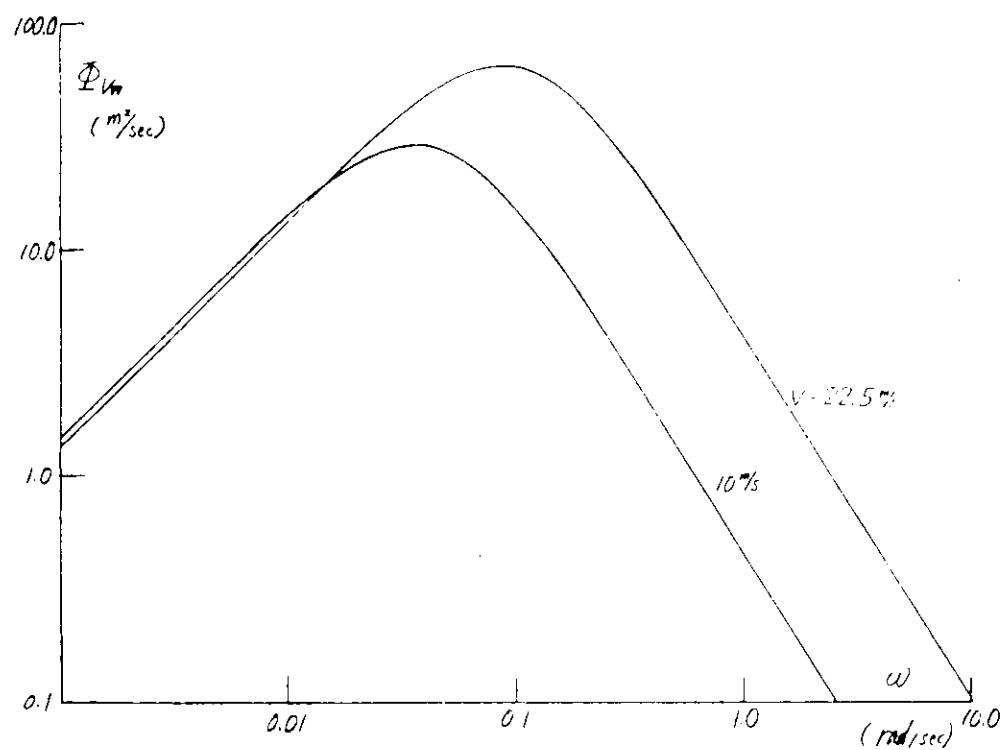


図 6.3.3 Davenportによる風速変動のスペクトル

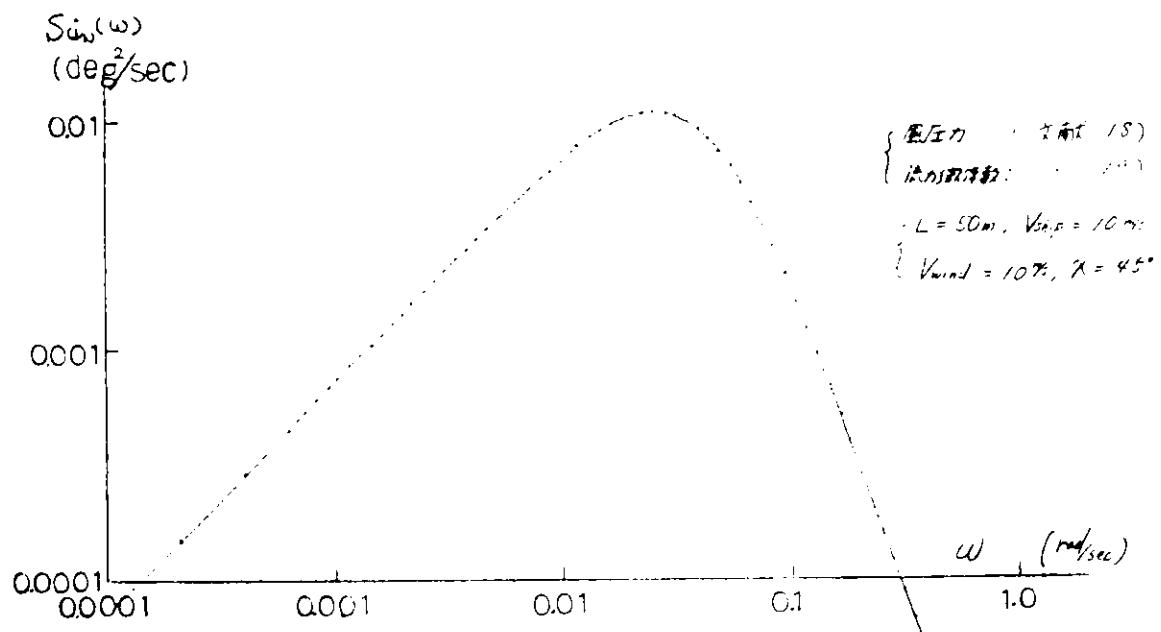


図 6.3.4 風によるスペクトルの計算例

(2) 風速変動にもとづく不規則外乱としてはこれも昭和 50 年度報告に引用したところであるが

Davenport の与える風速変動のエネルギースペクトルを図 6.3.3 に、又、これをもとに前述の文献 18) および 19) を使って求めた船の応答のスペクトルを図 6.3.4 に示す。

この資料にもとづく限り風による不規則外乱は主に低周波に偏していることになるが、港湾域の複雑な地形地物は自然風の中に多くの渦動を誘起するであろうからもっと周期の短い成分も出て来るかも知れない。前項(1)でも同様であるが、港湾域ないし内海、水道部で操船に介入するであろう風や波の不規則変動の実態についての調査が望まれる。

(3) 一方、実船において観測されたヨーイングの不規則変動の例を調べてみると表 6.3.1 が得られた。

表 6.3.1 ヨーイング不規則変動分の実測例

船種	L (m)	L/V (sec)	海象	$\phi$ 片振幅 有義値(% <sub>s</sub> )	平均周期 (sec)
タンカー	25	12.5	湾内 風速 8~10 m/s	0.2 ~ 0.4	3 ~ 4
練習船	30	5.8	内海 風速 4~8 m/s	0.3 ~ 0.6	7 ~ 9
巡視船	64	10	内海 風速 1~3 m/s	0.04~0.08	6 ~ 8
バルクキャリア	246	37	太平洋沿岸	0.03~0.05	8 ~ 10

変動外乱の資料が(1)、(2)の様な現状であることを考へるとこの表のような概略的観測結果も亦、この種の外乱を想定するに当つてひとつの拠りどころとすべきであろう。

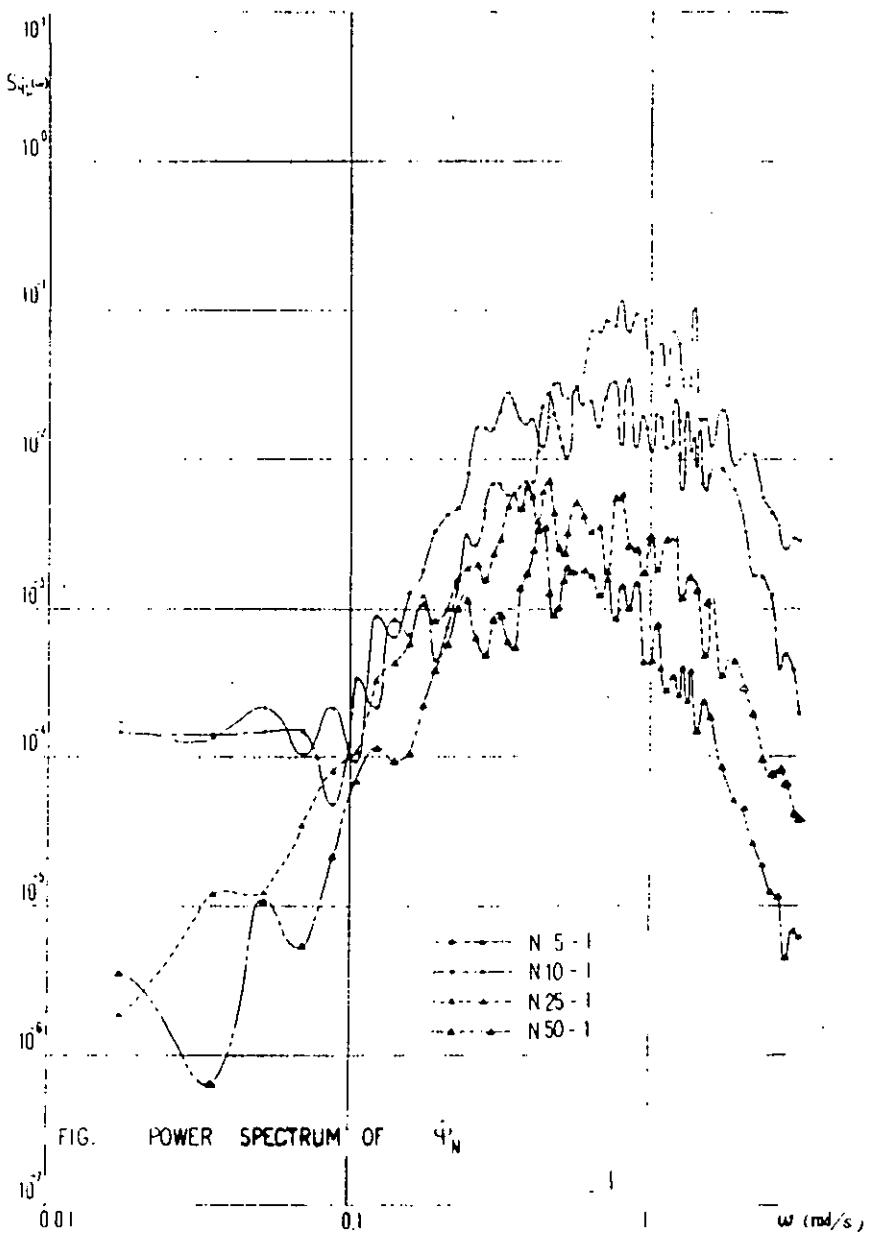


図 6.3.5 不規則変動ヨーイングエネルギースペクトル

### 6.3.2 不規則外乱の設定と発生

以上の資料を考慮した上で本研究の模擬操船に使用した不規則外乱は表 6.3.2 やび図 6.3.5 のとおりである。

表 6.3.2 不規則外乱特性値

外乱記号 項目	N5-1	N5-2	N10-1	N10-2	N25-1	N25-2	N50-1	N50-2	N50-3
$\sqrt{\phi_N^2} \%$	0.40	0.20	0.22	0.11	0.092	0.046	0.050	0.025	0.008
T <sub>H</sub> s	0.796		0.971		1.305		1.592		2.228
T <sub>L</sub> s	1.592		1.942		2.610		3.183		2.228
適用船	D5-5, 10, 25	D10-5, 10, 25	D25-5, 10, 25		D50-5, 10, 25				

ここで  $\dot{\phi}_N$  の形で与える不規則変動ヨーイングのエネルギー・スペクトルは

$$S_{\dot{\phi}}(\omega) = C \left[ \frac{T_L^2 \omega^2}{(T_H^2 \omega^2 + 1)(T_L^2 \omega^2 + 1)} \right]^2 \quad \dots \dots \dots (6.3.1)$$

で表わされる。 $\dot{\phi}_N$  はその積分である。

実際の模擬操船ではこの形のスペクトルをもつ不規則変動を与えるわけであるが、その回路を図 6.3.6 に発生した不規則ヨーイングの例を図 6.3.7 に、又そのスペクトルは図 6.3.5 に示す。

二値雑音発生器は Burr - Brown 社製のファンクション・モジュルひとつである。非常に高い繰返し周波数でプラス 5 V 又はマイナス 5 V のどちらかの電圧を全く不規則に発生する。これに低周波発振器利用の刻時信号（一種の電接時計）を 1 sec. 每に送ると二値雑音の繰返し周期が 1 sec. に変換される。すなわち一度刻時信号が来ると、その直後に出て来るプラス 5 V かマイナス 5 V かどちらかが次の刻時信号まで保持されるようになっている。次の刻時信号が来た後の出力がプラス 5 V であるかマイナス 5 V なるかはもちろん確率 1/2 である（二値雑音）。

このようにして繰り返し周波数を適当に低周波にした二値雑音を適当な特性をもつ shaping フィルターに通すと (6.3.1) 式のスペクトル形状をもつ不規則雑音を作ることができる。スペクトルの主要周波数範囲  $1/T_L \sim 1/T_H$  はフィルター回路の時定数を変えて加減する。不規則変動ヨーイングの大きさ (rms 値) はフィルター回路の倍率 C を加減すればよい。

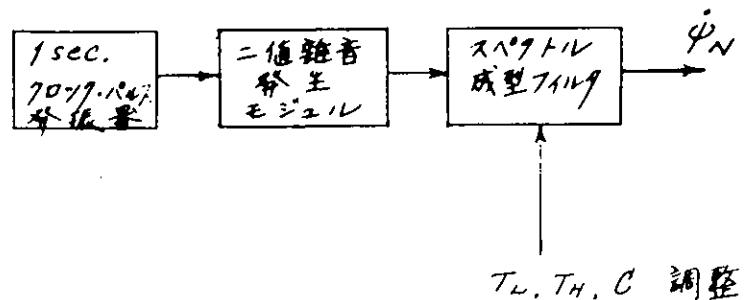


図 6.3.6 不規則変動ヨーイング発生回路

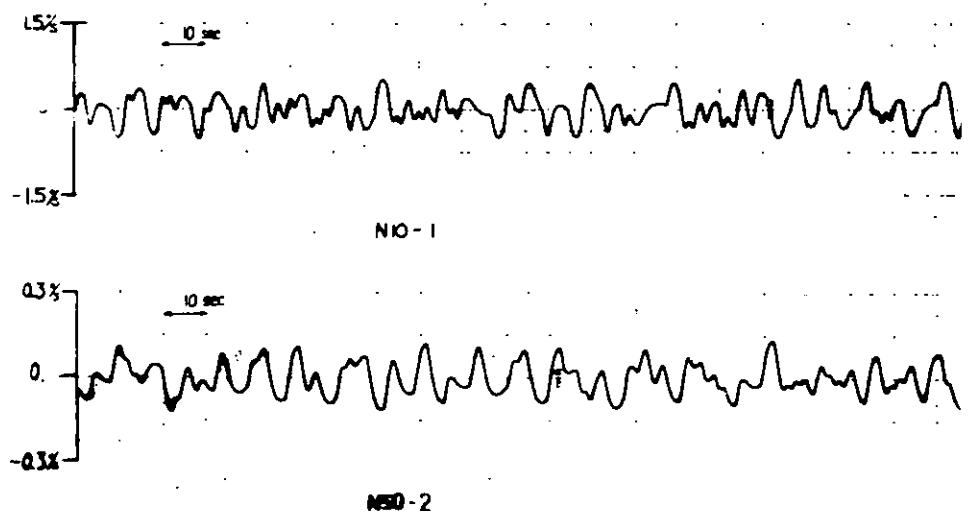


図 6.3.7 不規則ヨーイングの例

## 7. レーダ・シミュレータ

### 7.1 操船シミュレータ・スタディにおけるレーダ・シミュレータの意義

レーダ・シミュレータと云う言葉は普通レーダ航法訓練用シミュレータを指している。これらのシミュレータではその目的上、船の運動特性は KT 近似程度の概略表現で十分であり、又視界表示もないものが普通である。

ここで云うレーダ・シミュレータは船の応答特性の詳細を実時間シミュレーションと視界表示、実寸に近い模擬船橋と計装からなる操船シミュレータの一部として使用されるレーダ・シミュレータであって、模擬船橋計装の一部と考えてよい。

このようなレーダ・シミュレータの意義ないしは必要性は次のように考えてよいであろう。

本来レーダは夜間とか霧中航行のように視界の悪い時の見張り装置として登場した。ところがこれが普及してみると単なる見張り装置に止まらず、自船の位置の測定、他船やその他物標との相対位置を手早く知る計器として有用であることが明らかになった。これらの測定は従来はコンパスによる目標方位角測定を主体とする海図上の作図と、直接目視による感覚的把握に依存していたものである。船舶の大型化に伴ない感覚的把握はますます信頼に倣しないものとなり、定量的操船あるいは常に計算を基本とする操船が不可欠になると、位置測定の手段としてのレーダは、ますますその有用性を増した。船舶の高速化、港湾域における海上交通の複雑化はこの傾向をさらに助長したはずである。

こうして現在ではレーダは昼間夜間、視界の良否を問わず船位測定や目標との相対位置測定の主力計器となっている。従って人間機械混成制御系の立場から船の操縦問題を取扱う操船シミュレータにおいては、コンパスや視界表示と並んで、レーダのこの機能を取り入れる必要がある。

### 7.2 SR 151 操船シミュレータに付設したレーダ・シミュレータの概要

計画に当って留意した点は次の通りである。

- (1) 視界表示との関連で一般のレーダ・シミュレータとは異なる点がある。現用の視界表示では船が走っても大きさが変らず、回頭に応じて左右に偏位するだけの遠方物標（背景）と、相対位置や見合い角に応じて大きさ、形状の変化する近接物標を一箇だけ表示している。レーダ表示面の半径は有限であるから背景の陸岸は現われないことになり、近接物標一箇がスポット状に表現できればよい。
- (2) 一方、航路標識ブイを次々に航過していく航法などにおいては、視界表示には出でていなくても何箇かの静止物標を上記の移動物標に加えて表示することは有用である。ここで云う静止とは絶対座標に対しても静止であるから船の進行に伴ないレーダ面上の相対位置は変化する。
- (3) レーダ面上に表われる海面反射の雜音エコー、船首方向を表わす静止輝線、アンテナ・スキヤニングを示す回転輝線は現実的な感覚を与えるために必要である。又、距離測定のレンジ・リング輝線や方位角測定用カーソルも不可欠である。
- (4) その他輝線調整とか、レンジ切換とか、実機の操作になるべく近いものにすることが望ましい。経済的側面からしても結局、実機のレーダースタンドを装備し、信号回路にインターフェイスを付けて現用のアナログ計算機と接続する方法が賢明であろう。

以上の方針の下に製作設置したレーダ・シミュレータの諸元、性能等を以下に示す。又回路構成を図7.2.1に、レーダ指示器外形を図7.2.2に、インターフェイス、計算回路部外形を図7.2.3に示す。

(a) レーダ指示器

i) 指示方式 12 inch C R T による PPI 指示  
ヘッディングアップ

ii) 指示するもの 物標の映像  
固定距離目盛  
可変距離目盛  
船首線  
海面反射映像

iii) 指示距離レンジ  $\frac{1}{4}$  ~  $1\frac{1}{2}$  NM 3、6、12、24、48 (NM) の 7 段階

iv) 固定距離目盛 上記(iii)の距離レンジに対応して

$\frac{1}{4}$  ~  $1\frac{1}{2}$  NM 1、2、4、8 (NM)

v) 可変距離目盛 0.1 ~ 48 NM 3 段階連続可変  
距離は C R T 上部にデジタル表示。

vi) 距離レンジ可変範囲 3 ~ 48 NM のレンジにおいて約 1.5 倍まで連続拡大可能

vii) パルス繰返し周波数 1 KHz

viii) アンテナ回転数 14 rpm

ix) その他の付属機能 ◦ 中心位置調整  
◦ F T C ( 雨雪除去 )  
◦ S T C ( 海面反射除去 )  
◦ 受信感度調整  
◦ C R T 明度調整  
◦ アンテナ回転 ( ON-OFF )

(b) 疑似信号発生器

i) 海面反射発生範囲 自船を中心半径 3 NM

ii) 物標発生数 視界表示 ( visual display ) に現われる近接物標 1、その他対地静止の物標 3、合計 4

各物標はノースアップ直交座標 ( X R - Y R 座標 ) で、 X, Y を電圧で入力する。  
10V に対する距離  $R_j$  " (  $j = 1, 2, 3$  ) と位置精度は次表である。

指示距離レンヂ	$j$	$R_j$	誤 差
1/2 ~ 3 NM	1	5 NM	± 0.2 NM 以下
6 , 12 NM	2	20 NM	± 0.4 NM "
24 NM , 48 NM	3	40 NM	± 0.6 NM "

(c) 物標の相対座標  $X_R, Y_R$  の演算

アナログコンピュータ (ALS-200X) で算出される自船の時々刻々の絶対位置 ( $X, Y$ ) および自船と近接物標との相対位置 ( $X_R, Y_R$ ) をうけ、以下の演算をし、疑似信号発生器へ転送される。

i) 近接物標

自船と近接物標との相対位置 ( $X_R, Y_R$ ) が算出されているので、この値をスケール変換し、疑似信号発生器へ出力する。

$$(X_R \text{ 方向}) = \left( \frac{R''}{R'_j} \right) \left( -\frac{R'}{R''} \right) \left[ \frac{X_R}{R'} \right]$$

$$(Y_R \text{ 方向}) = \left( \frac{R''}{R'_j} \right) \left( -\frac{R'}{R''} \right) \left[ \frac{Y_R}{R'} \right]$$

ii) ブイ等、対地静止物標は  $X-Y$  静止座標系で ( $X_i, Y_i$ ) と与え、この座標系での自船の位置 ( $X, Y$ ) を差し引き i) と同様なスケール変換し、疑似信号発生器へ出力する。

$$(X_R \text{ 方向}) = \left( \frac{R''}{R'_j} \right) \left\{ \left[ \frac{X_i}{R''} \right] - \left( -\frac{R'}{R''} \right) \left[ \frac{X}{R'} \right] \right\}$$

$$(Y_R \text{ 方向}) = \left( \frac{R''}{R'_j} \right) \left\{ \left[ \frac{Y_i}{R''} \right] - \left( -\frac{R'}{R''} \right) \left[ \frac{Y}{R'} \right] \right\}$$

ただし  $R'$  : アナログコンピュータの距離フルスケール

2 ~ 10 NM (可変)

$R''$  : 付属演算回路の距離フルスケール

10 NM (固定)

$R_j''$  : 疑似信号発生回路の距離フルスケール

$$\begin{cases} R_1'' = 5 \text{ NM} \\ R_2'' = 20 \text{ NM} \\ R_3'' = 40 \text{ NM} \end{cases}$$

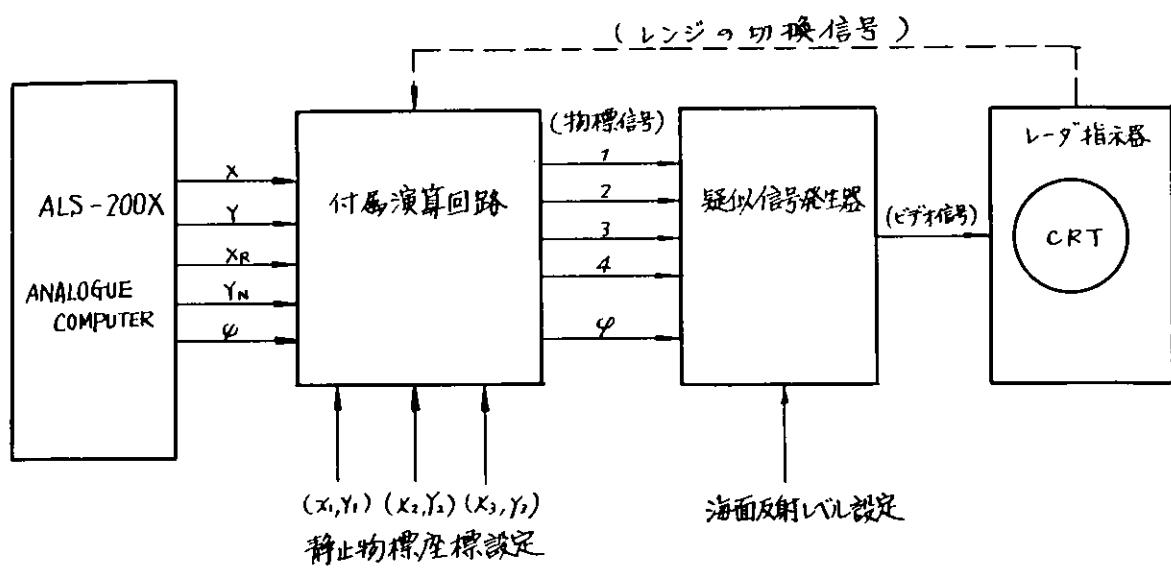


図 7.2.1 レーダシミュレータ回路構成

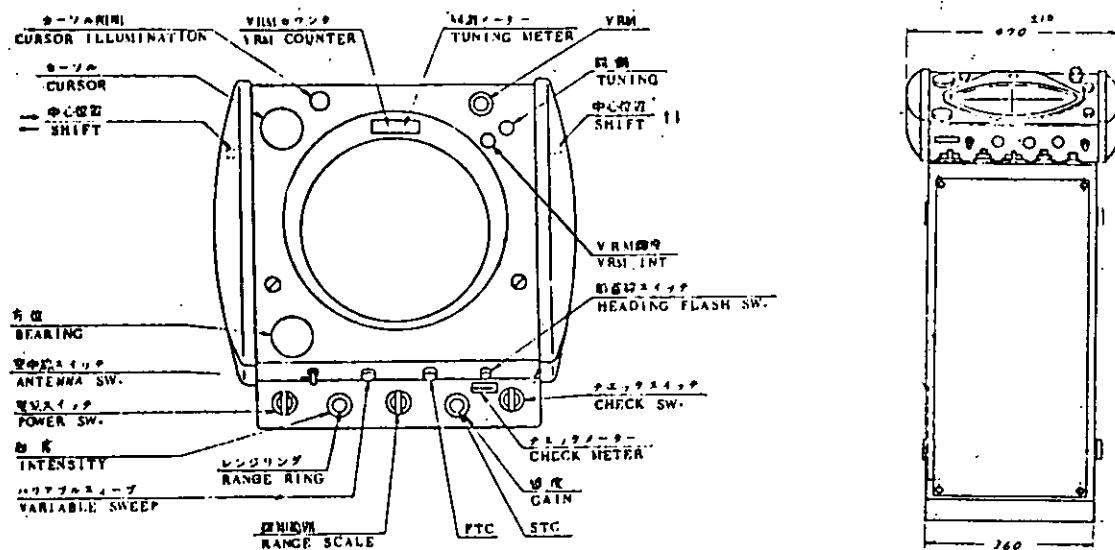


図 7.2.2 レーダシミュレータ指示部

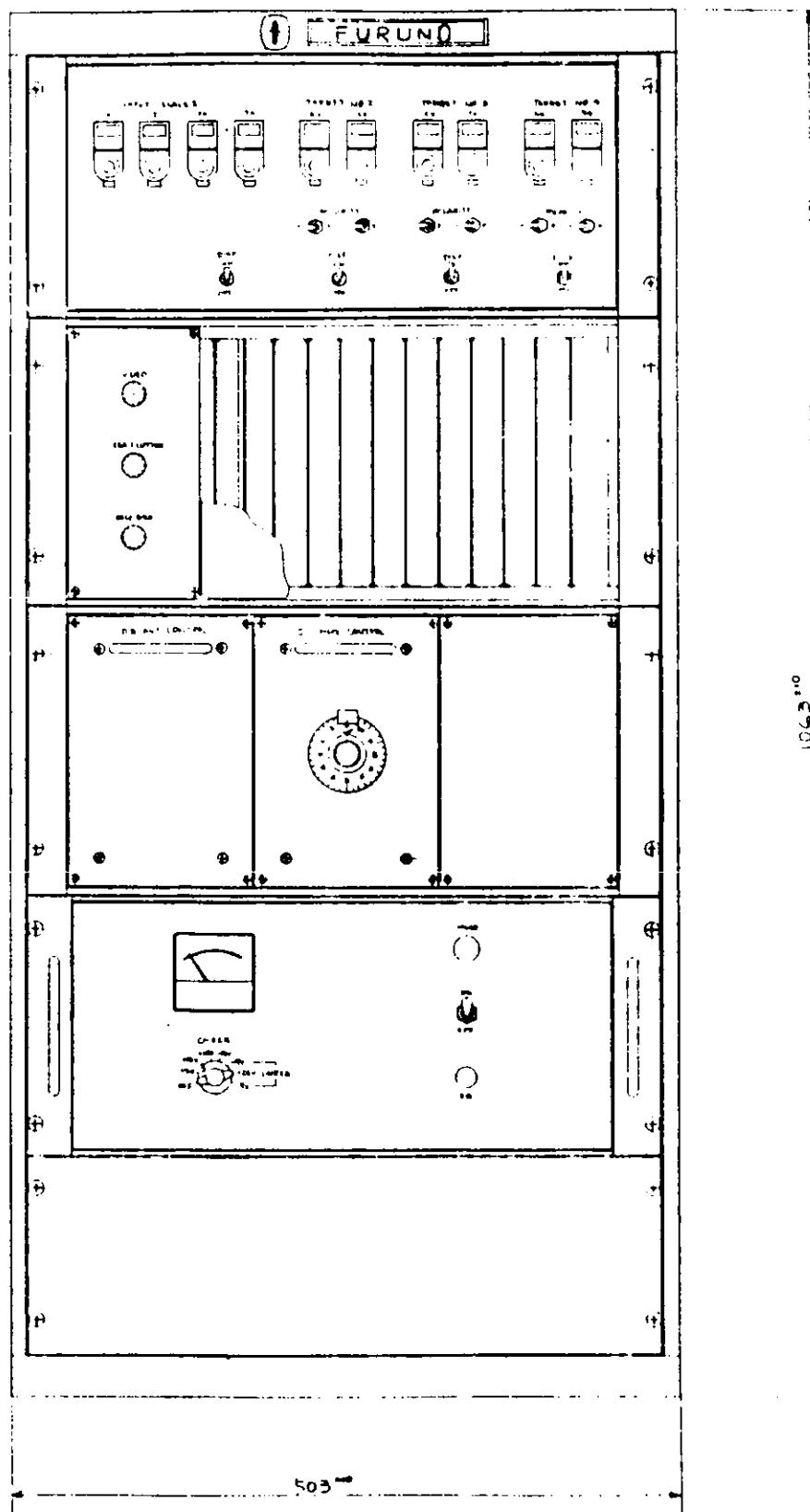


図 7.2.3 レーダシミュレータ疑似信号発生器、付属演算回路

## 8. 増減速時の操縦運動数学モデルの検討

### 8.1 船速の応答方程式

前年度までの操船シミュレーションにおいては、主機出力一定、ないしは小幅な主機操作を行なう場合の応答方程式として、次式を使って来た。

$$T_e \dot{V} + V + c_r \dot{\phi}^2 + c_\delta (2V - V_0) \delta^2 = K_e n$$

$$\text{ただし、 } T_e = \left( \frac{L}{V_0} \right) T'_e$$

$$K_e = L + K'_e$$

$$c_r = \left( \frac{L^2}{V_0} \right) c'_r$$

$$c_\delta = X_{\delta\delta} \left( \frac{A_R}{Ld} \right) / D'_u$$

$$T'_e = (m' + m'_x) / D'_u$$

$$K'_e = J_{so} \left( \frac{D}{L} \right)$$

$$c'_r = (m' + c_m m'_y) \ell'_p / D'_u$$

$$D'_u = 2X'_o - 2c_2 \left( \frac{D}{L} \right)^3 \left( \frac{D}{d} \right) / J_{so}$$

..... ( 8.1.1. )

しかし、この( 8.1.1 )式では、大幅な主機回転数操作に対し、船速の変化を正確に表現することは困難である。以下にその改良を試みる。

#### 8.1.1 プロペラ正転の場合

模型船の抵抗試験、プロペラ荷重変更試験の結果によると、 $(1-t) T / \rho D^4 n^2$  (無次元有効推力) はほぼ  $J_s$  の一次式になる。

$$(1-t) T / \rho D^4 n^2 = c_1 + c_2 J_s \quad \dots \dots \dots ( 8.1.2 )$$

とおく。運動方程式は、

$$\begin{aligned} (m + m_x) \dot{V} + Xvv V^2 + (m + c_m m_y) \ell_p \dot{\phi}^2 + X_{\delta\delta} V^2 \delta^2 \\ = \rho D^4 n^2 (c_1 + c_2 J_s) \end{aligned} \quad \dots \dots \dots ( 8.1.3 )$$

となる。両辺を  $(m + m_x)$  で除して次式の応答方程式を得る。

$$V + a_{vv} V^2 + a_{rr} \dot{\phi}^2 + a_{\delta\delta} V^2 \delta^2 = a_{nn} n^2 + a_{nv} n V$$

ただし、

$$a_{vv} = \frac{1}{L} \cdot \frac{X'_{vv}}{(m + m'_x)}$$

$$a_{rr} = L \cdot \frac{(m' + c_m m'_y) \ell'_P}{(m' + m'_x)}$$

$$a_{\delta\delta} = \frac{1}{L} \cdot \frac{X'_{\delta\delta}}{(m' + m'_x)} - \left(\frac{A_R}{Ld}\right)$$

$$a_{nn} = L \cdot \frac{2c_1}{(m' + m'_x)} - \left(\frac{D}{L}\right)^2 \left(\frac{D}{d}\right)$$

$$a_{nv} = \frac{2c_2}{(m' + m'_x)} - \left(\frac{D}{L}\right)^2 \left(\frac{D}{d}\right)$$

..... ( 8.1.4 )

記号については、本節末尾の記号表を参照されたい。

この(8.1.4)式の妥当性を模型実験で当たってみる。図8.1.1と図8.1.2は表8.1.1にその要目を示すタンカーボート型とコンテナ船型(いずれも一軸一舵)の $(1-t)T/\rho D^4 n^2$ を抵抗試験とプロペラ荷重変更試験により計測した例である。図に示す如く $n > 0, V > 0$ でこの特性は $J_s$ に対し、略直線とみなすことができる。これから(8.1.2)式の $c_1$ と $c_2$ を決めることができる。

図8.1.3、図8.1.4は模型船を直進で旋回を拘束した時に種々のプロペラ回転数に対する船の運動を $V - \dot{V}$ 位相面の形で示す。一方、(8.1.4)式を用いて種々の回転数(正転)に対する直進時の船の運動を計算して同じ位相面表示すると、図中の破線となる。コンテナ船で減速時の運動が、プロペラ回転数の小さい所で計測した運動と多小ずれしているが、全般的に(8.1.4)式は操舵、旋回をしない場合、満足できるものであろう。

図8.1.5はタンカーモデル船でプロペラ回転数を一定にし、計測した定常旋回中の船速低下を示している。図中の破線は、(8.1.4)式で $\dot{V} = 0$ とし、このモデル船の $r' - \delta$ 特性を代入し、計算した船速低下である。両者は大変よく一致しており、操舵し旋回する場合も(8.1.4)式は十分満足できると考えられる。

### 8.1.2 プロペラ逆転の場合

プロペラ逆転の場合、次の如く考える。

22)

i) 逆転時は、舵の直圧力は舵角に無関係で、値そのものも小さい。

従って $\delta$ による抵抗成分 $X_{\delta\delta}$ の項を省略する。

ii) 模型試験によると、プロペラ逆転時の $(1-t)$ や $K_T$ の変化は複雑で、現象を数式で記述しにくいが、有効推力である $(1-t)T/\rho D^4 n^2$ を考えると、略図8.1.6の如くモデル化することができる。(図8.1.1、図8.1.2参照)

この場合、 $(1-t)T/\rho D^4 n^2$ を次式で表わす。

$$(1-t)T/\rho D^4 n^2 = \begin{cases} c_3 & (J_{st} < J_s < 0) \\ c_5 + c_4 J_s & (J_s < J_{st}) \end{cases}$$

..... ( 8.1.5 )

上式中の $c_3, c_4, c_5$ は $c_1, c_2$ と関連があると考えられるが、模型試験結果より、略次のように推定できる。

$$\left. \begin{aligned}
 c_3 &= -\frac{3}{4}c_1 \\
 c_4 &= -\frac{5}{3}c_2 \\
 c_5 &= -\frac{c_3}{2} - c_4 J_{ST} t \\
 \text{ただし } J_{ST} &= -\frac{2}{5}p/(1-w)
 \end{aligned} \right\} \quad (8.1.5)$$

以上より応答方程式は(8.1.4)式のδの項を省き  $a_{nn}$ ,  $a_{nv}$  の係数の値を変えるだけでよく次式となる。

$$\dot{V} + a_{vv} V^2 + a_{rr} \dot{\phi}^2 = a_{nn} n^2 + a_{nv} n V$$

ただし

$$a_{nn} = \begin{cases} L \cdot \frac{2c_3}{(m' + m'_x)} \left(\frac{D}{L}\right)^3 \left(\frac{D}{d}\right) & (J_{ST} < J_S < 0) \\ L \cdot \frac{2c_4}{(m' + m'_x)} \left(\frac{D}{L}\right)^3 \left(\frac{D}{d}\right) & (J_S < J_{ST}) \end{cases}$$

$$a_{nv} = \begin{cases} 0 & (J_{ST} < J_S < 0) \\ \frac{2c_4}{(m' + m'_x)} \left(\frac{D}{L}\right)^2 \left(\frac{D}{d}\right) & (J_S < J_{ST}) \end{cases}$$

..... (8.1.6)

## 8.2 増減速を伴なう旋回の応答方程式

### 8.2.1 プロペラ正転の場合

プロペラスリップが変化すると、プロペラ後流におかれた舵の直圧力は大きく変化する。昨年度の検討では、このスリップの変化を等価的に舵面積の大きさに代え、従来の応答方程式を修正して用いた。このことは舵直圧力のうち舵角 $\delta$ に依存する部分も、船の運動 $\dot{\phi}$ や $\dot{\beta}$ に依存する部分も等しくスリップの影響を受けると仮定したことになる。

一方、斜航や旋回斜航、PMM等、模型船に $\dot{\phi}$ や $\dot{\beta}$ を与え流体力を測った結果を調べると、プロペラの回転数をかなり変えても船速を一定に保つ限り、 $\dot{\phi}$ 、 $\dot{\beta}$ に依存する力の変化は余り大きくないよう見える。<sup>21)</sup> また、このことは舵への水流の所謂「整流効果」に対するプロペラスリップの作用を考えてみると、定性的には正しい方向と考えられる。この点、なお研究の必要はあるが、今年度の応答数学モデルではこの知見に従い、プロペラスリップの変化は舵直圧力のうち、舵角に依存する部分にのみ影響を与えるとの仮定を採用した。その結果、旋回力ゲイン常数 $K'$ のみがプロペラスリップ比の影響を受けることになる。(1.2.1)式の関数 $g(s)$ がこの影響を表わす。 $s$ はスリップ比である。 $g(s)$ は舵直圧力に与えるプロペラスリップの影響を表わす 岡田-藤井の式から、

$$g(s) = \frac{1 + ks^{1.5}}{1 + ks_0^{1.5}}$$

$$\text{ただし } k = 3.2$$

$$s = 1 - \frac{(1-w)V}{nP} : \text{船速 } V, \text{ 回転数 } n \text{ の時のスリップ比}$$

$$s_0 = 1 - \frac{(1-w)V_0}{n_0 P} : \text{定常直進時のスリップ比}$$

で表わすことができる。 $w$ については、現状では定常直進時の値を採用せざるを得ない。図8.2.1はタンカー、コンテナ両模型船の場合の $g(s)$ を一例として示す。

プロペラスリップの変化を $g(s)$ という形でおくことにより、その結果、定常旋回特性が変る。大舵角で船が旋回すると、プロペラ回転数は一定でも大幅な船速低下を引き起す。このためスリップは著しく増大し、 $g(s)$ も増加し、大舵角での $r'$ は増加する。これは実際の大舵角の定常旋回特性の上反りの傾向を表わしている。

### 8.2.2 プロペラ逆転の場合

プロペラを逆転するいくつかの拘束試験結果<sup>21), 22), 23)</sup>によれば、直進時( $r = \beta = 0$ )で種々の $n$ 、 $V$ に対する流体力、 $Y$ 、 $N$ は主に $n$ と $V$ の関数で表わすことができて、 $\delta$ にはほとんど無関係である。また一方、旋回、横流れ運動をするとき、流力微係数 $Y'_V$ 、 $Y'_r$ 、 $N'_V$ 、 $N'_r$ は種々の $n$ 、 $V$ に対してさほど左右されず、正転の自航点における値とそれほど変化がない。

以上を考慮すると、プロペラ逆転時の流体力は、一応線形の範囲で

$$\left\{ \begin{array}{l} Y' = -m'_y \dot{v}' + Y'_V v' + Y'_r r' + Y'_0 \left( \frac{nD}{V} \right)^2 \\ N' = -J'_{zz} r' + N'_V v' + N'_r r' + N'_0 \left( \frac{nD}{V} \right)^2 \end{array} \right.$$

$$\text{ただし } Y'_0 = Y_0 / \frac{\rho}{2} L d (nD)^2$$

$$N'_o = N_o / \frac{\rho}{2} L^2 d (nD)^2$$

.....( 8.2.1 )

となり上式より運動方程式は

$$(m' + m'_y) \ddot{v}' - Y'_v v' - (Y'_r - m') \dot{r}' = Y'_o / J_s^2$$

$$(I_{zz}' + J_{zz}') \ddot{r}' - N'_v v' - N'_r r' = N'_o / J_s^2$$

.....( 8.2.2 )

となる。上式より  $v'$  を消して、次式を得る。

$$(I_{zz}' + J_{zz}') (m' + m'_y) \ddot{r}' - \{(I_{zz}' + J_{zz}') Y'_v + (m' + m'_y) N'_r\} \dot{r}' + \{N'_r Y'_v - (Y'_r - m') N'_v\} r' = (N'_v Y'_o - Y'_v N'_o) / J_s^2$$

.....( 8.2.3 )

上式の両辺を  $r'$  の係数で除すと、

$$T'_1 T'_2 \ddot{r}' + (T'_1 + T'_2) \dot{r}' + r' = a'_R / J_s^2$$

$$\text{ただし、 } a'_R = \frac{N'_v Y'_o - Y'_v N'_o}{N'_v Y'_v - (Y'_r - m') N'_v}$$

.....( 8.2.4 )

あるいは

$$T_1 T_2 \ddot{\phi} + (T_1 + T_2) \dot{\phi} + \phi = a'_R (\frac{V}{L}) / J_s^2$$

.....( 8.2.5 )

となり、要するに  $J_s$  の関数であるところの旋回力を加えた船の回頭運動と言うことになる。図 8.2.3 は S R 154 母型船について、先の文献(23)より  $Y'_o$ ,  $N'_o$  を計算した結果であり、同様に図 8.2.3 は、文献(21)より他のタンカー模型船の  $Y'_o$ ,  $N'_o$  である。

これらの図に示す如く、 $Y'_o$ ,  $N'_o$  の値は、 $J_s$  の関数で表わすことができ、従って  $a'_R$  もまた  $J_s$  の関数となり、シミュレーションが可能である。ただ現在、模型船のデータは十分ではなく、今回は一応最も起りやすい  $-0.7 < J_s < 0$  の範囲に限り  $Y'_o = -1.5 \times 10^{-3}$ ,  $N'_o = 0.5 \times 10^{-3}$  一定とみなし、 $a'_R$  を算定する。なお他の流力微係数は、先の文献(21)に従う。

$$\frac{a'_R}{T'_1 T'_2} = \frac{N'_v Y'_o - Y'_v N'_o}{(I_{zz}' + J_{zz}') (m' + m'_y)} = 0.024$$

.....( 8.2.6 )

### 8.3 アナログ演算回路

#### 8.3.1 船速の応答方程式

図 8.3.1 の演算ブロック図に示す如く、プロペラ正転の場合は汎用アナログコンピータ：ALS-200X 内で演算を行なうが、逆転時には、逆推力となる項 ( $a_{nn} n^2 + a_{nn} nV$ ) は、外部アナログ演算回路で演

算する。

### 8.3.2 旋回の応答方程式

図 8.3.2 の演算ブロック図に示す如く、 $g(s)$  および  $a_R'/J_S^2$  を外部アナログ演算回路で演算する。なお、アナログ演算要素の記号は表 8.3.1 に示す。

記号表

$A_R$	舵面積
$a_R'$	旋回の応答方程式におけるプロペラ逆転時の旋回力係数
$a_{vv}$	
$a_{rr}$	
$a_{\delta\delta}$	
$a_{nn}$	
$a_{nv}$	
$c_m$	$= X_{vr}' / m_y'$ 旋回遠心力抵抗における横方向付加質量修正
$c_1$	
$c_2$	
$c_3$	
$c_4$	
$c_5$	
$c_r$	
$c_\delta$	
$D$	プロペラ直徑
$g(s)$	プロペラ スリップ の変化による $K'$ の修正
$I_{zz}'$	$= I_{zz} / \frac{\rho}{2} L^4 d$ : 船の慣性モーメント
$J_{zz}'$	$= J_{zz} / \frac{\rho}{2} L^4 d$ : 付加慣性モーメント
$J_s$	$= V / n D$
$J_{so}$	$= V_o / n_o D$
$K'$	操舵に対する旋回力を表わす操縦性指數
$K_4$	船速の応答方程式(8.1.1)のプロペラ回転数の係数
$\ell_p$	軸心と船の重心間の距離
$\ell_p'$	$= \ell_p / L$
$m'$	$= m / \frac{\rho}{2} L^2 d$ : 船の質量
$m_x', m_y'$	$x, y$ 軸方向の付加質量

$N_0$	プロペラ逆転中の流体モーメント ( $r = v = \delta = 0$ )
$N'_0$	$= N_0 / \frac{\rho}{2} L d ( n D )^2$
$N'_r, N'_v$	旋回角速度、横流れ速度に対する流力微係数 ( $N' = N / \frac{\rho}{2} L^2 d v^2$ )
$n$	プロペラ回転数
$n_0$	定常直進船速 $V_0$ のプロペラ回転数
$P$	プロペラ ピッチ
$p$	$= P/D$ : プロペラ ピッチ比
$s$	$= 1 - (1-w)V/nP$ : プロペラ スリップ比
$s_0$	$= 1 - (1-w)V_0/n_0 P$ : 定常直進中のスリップ比
$T'_1, T'_2, T'_3$	旋回の応答方程式における操縦性指標 ( 時定数 )
$T_4$	船速の簡易応答方程式 ( 8.1.1 ) の係数 ( 時定数 )
$V$	船速
$V_0$	プロペラ回転数 $n_0$ における定常直進船速
$X'_{vv}$	旋回による遠心力抵抗係数
$X'_{vv}$	$= X_{vv} / \frac{\rho}{2} L d$ : 船体の全抵抗係数 ( $X'_{vv} = c_t ( s/Ld )$ )
$X'_{\delta\delta}$	$= X_{\delta\delta} / \frac{\rho}{2} A_R$ : 艤の抵抗係数
$Y_0$	プロペラ逆転中の横力 ( $r = v = \delta = 0$ )
$Y'_0$	$= Y_0 / \frac{\rho}{2} L d ( n D )^2$
$Y'_r, Y'_v$	旋回角速度、横流れ速度に対する流力微係数 ( $Y' = Y / \frac{\rho}{2} L d V^2$ )

表 8. 1. 1 模型船の主寸法

	Tanker Model M. NO. 277	Container Model
Hull		
L (m)	4.4	4.0
B (m)	0.7932	0.5874
d <sub>m</sub> (m)	0.2834	0.2076
▽ (m <sup>3</sup> )	821.9	276.9
c <sub>b</sub>	0.831	0.568
I <sub>cb</sub> (% fore)	3.935	-2.0
L/B	5.55	6.81
B/d <sub>m</sub>	2.80	2.83
Rudder		
A <sub>R</sub> (m <sup>2</sup> )	0.0233	0.01662
A <sub>R</sub> /Ld <sub>m</sub>	1/53.3	1/50
λ	1.335	1.598
propeller		
D	0.12057	0.150
P	0.08043	0.150
p	0.6669	1.000
E.A.R	0.651	0.700
Z	5	5
Coefficients		
m'	0.295	0.167
m' + m'_x	0.322	0.172
m'_y	0.204	0.157
c <sub>m</sub>	0.75	0.41
l <sub>p</sub>	0.5	0.5
X <sub>VV</sub>	2.12 × 10 <sup>-2</sup>	1.48 × 10 <sup>-2</sup>
X <sub>δδ</sub>	0.922	2.18
J <sub>so</sub>	0.45	0.85
1-w	0.36	0.67
1-t	0.75	0.8
s <sub>o</sub>	0.76	0.43
	V = 0.8 m/s	V = 1.5 m/s
	M.S.P.P	M.S.P.P

表 8.1.2 (8.1.4) 式の係数(模型船の例)

	Tanker Model M.NO.277	Container Model
$a_{vv}$ ( $m^{-1}$ )	$1.50 \times 10^{-2}$	$2.14 \times 10^{-2}$
$a_{rr}$ ( $m \cdot rad^{-2}$ )	3.05	2.68
$a_{\delta\delta}$ ( $m^{-1} \cdot rad^{-2}$ )	$1.22 \times 10^{-2}$	$6.54 \times 10^{-2}$
$a_{nn}$ ( $m$ )	$6.22 \times 10^{-5}$	$8.58 \times 10^{-4}$
$a_{nv}$	$-2.48 \times 10^{-4}$	$-3.89 \times 10^{-3}$
$c_1$	0.26	0.485
$c_2$	-0.125	-0.33
$c_3$	-0.20	-0.36
$c_4$	0.21	0.55
$c_5$	0.06	0.15

表 8.1.3 アナログ計算機の構成表

演算部	E 号	演算式	制限事項
積 分 器	$X_{1C}$	$y = X_{1C} + \frac{b}{a} \int_0^x (x_1 + x_2 + x_3 + x_4) dx$	$-1 < x < 1$ $-1 < x_1, x_2, x_3, x_4 < 1$ $X_{1C}$ : 初期条件 $b = 0.1, 1.10, 100.$ 1000
加 算 器		$y = x_1 + x_2 + x_3 + x_4$	$-1 < y < 1$
乗 数 器		$y = ax$ ( $x = -ax$ ) $0 <  a  < 1$ ( $-1 < a < 1$ )	$-1 < x < 1$
符号変換器		$y = -x$	$-1 < y < 1$
乗 算 器		$y = x^2$	$-1 < x < 1$
余弦関数発生器		$y = I(x)$	$-1 < y < 1$
正弦関数発生器		$y = \sin(\pi x)$	$-1 < x < 1$
余弦関数発生器		$y = \cos(\pi x)$	$-1 < x < 1$

演算部	E 号	演算式	制限事項
比較器	$x_1 > x_2$	$D = \log_{10} "1"$ $x_1 + x_2 \geq 0$ の時 $D = \log_{10} "0"$ $x_1 + x_2 \leq 0$ の時	$-1 < x_1, x_2 < 1$
比較器	$x_1 < x_2$	$D = "1"$ $D = "0"$	$-1 < x < 1$
比較器	$x_1 = x_2$	$D = "1"$ $D = "0"$	$y = 0$
比較器	$x_1 = x_2$	$D = "1"$ $D = "0"$	$y = 1$
絶対値演算器		$y = \sqrt{x}$	$x \geq 0$
不等式演算器		$y = \sqrt{ x }$	$x \geq 0$
複数演算器		$y = \sqrt{x^2 + y^2}$	$x \geq 0$
绝对値演算器		$y = \sqrt{x^2 + y^2}$	$x \geq 0$

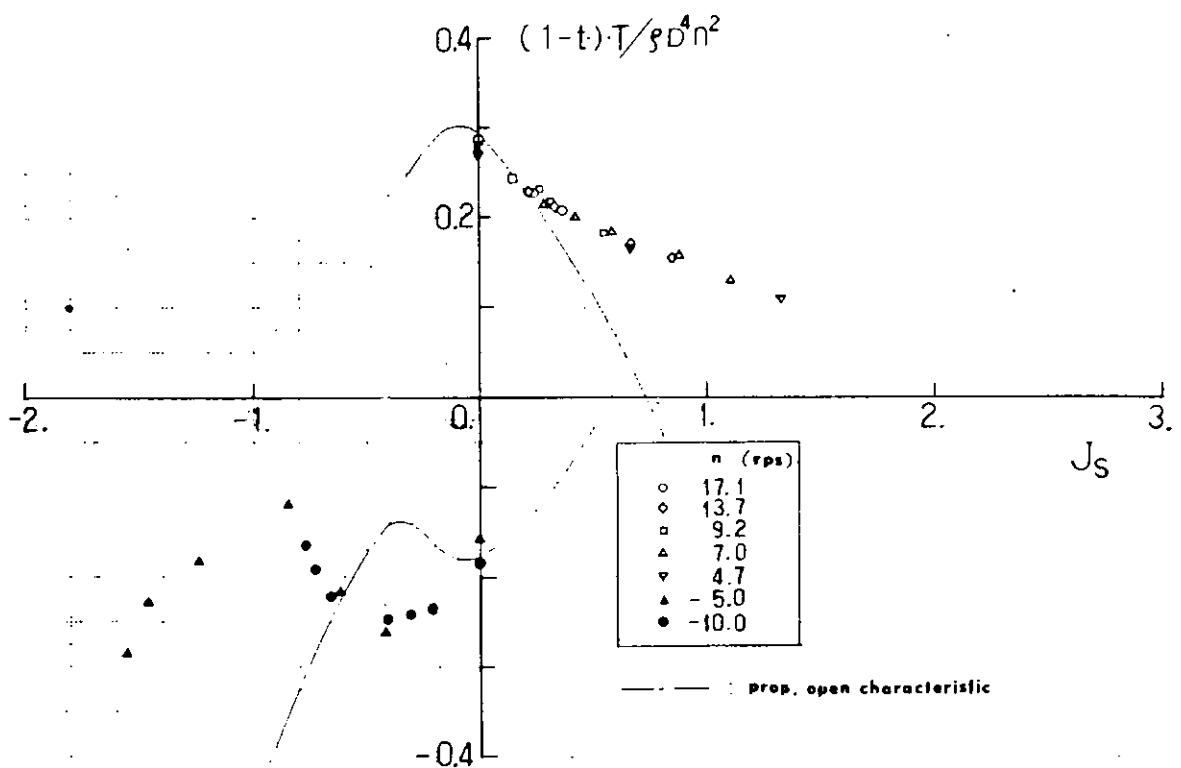


図 8. 1. 1  $(1-t)T / \rho D^4 n^2 - J_S$  特性(タンカー模型船)

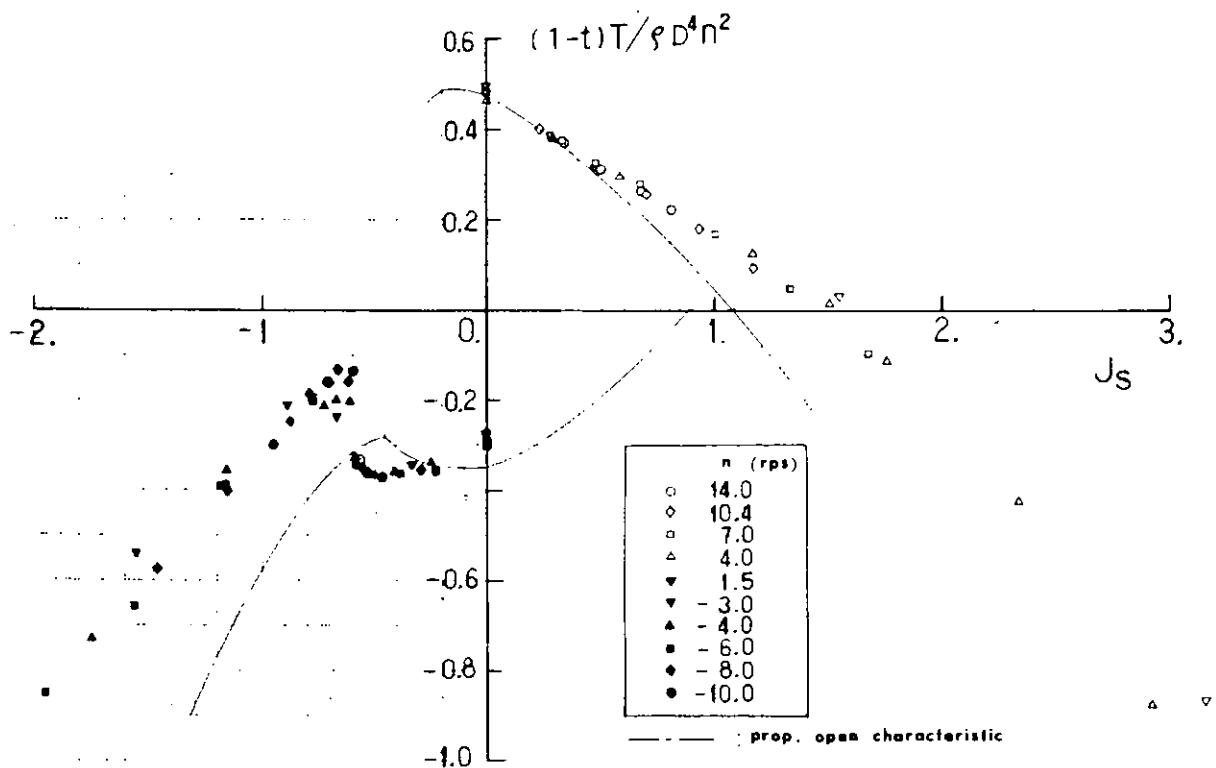


図 8. 1. 2  $(1-t)T / \rho D^4 n^2 - J_S$  特性(コンテナ模型船)

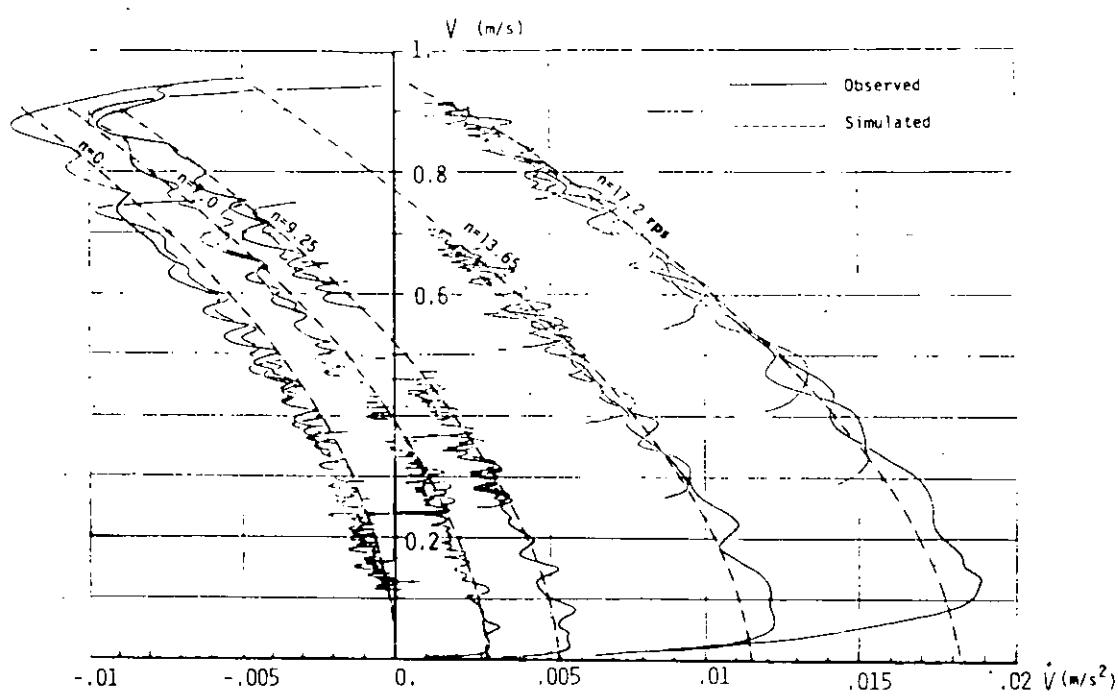


図 8.1.3  $V - \dot{V}$  位相面軌跡 (タンカー模型船)  
( $\delta = \phi = \beta = 0$ )

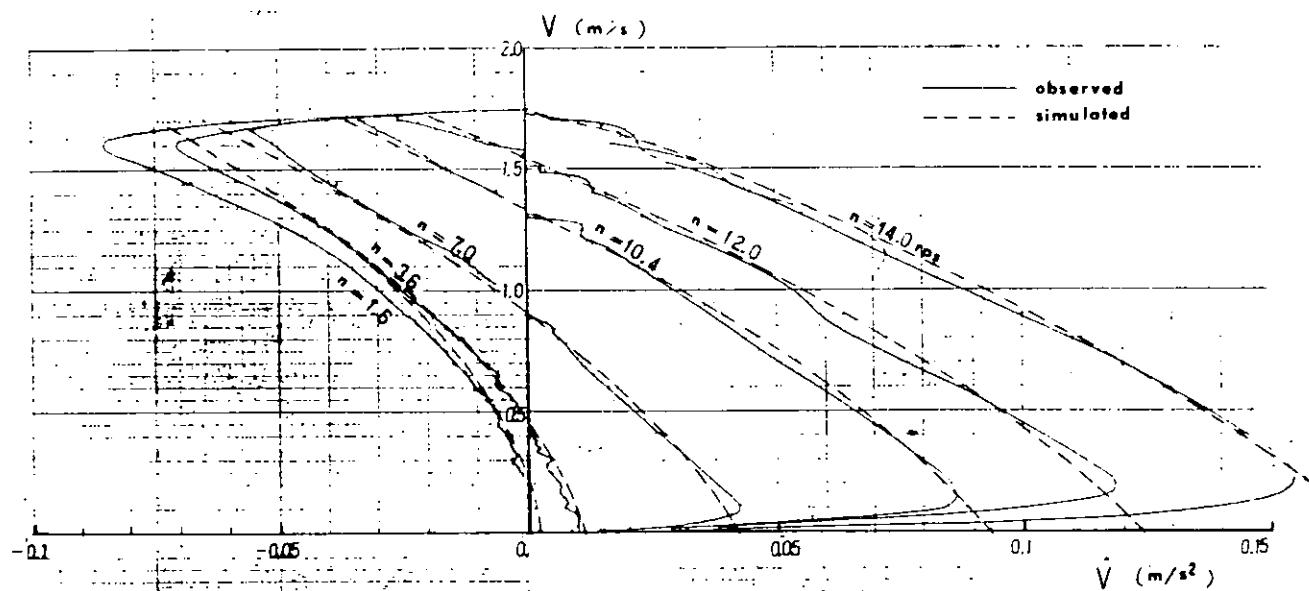


図 8.1.4  $V - \dot{V}$  位相面軌跡 (コンテナ模型船)  
( $r = \beta = \delta = 0$ )

$$\dot{V} + \alpha_{vv} V^2 + \alpha_{rr} \psi^2 + \alpha_{\delta\delta} \delta^2 = \alpha_{vv} \eta V + \alpha_{\eta\eta} \eta^2 \quad (8.1.4)$$

$\delta$	$\dot{V}$	$\alpha_{vv} V^2$	$\alpha_{rr} \psi^2$	$-\alpha_{\delta\delta} \delta^2$	$\alpha_{vv} \eta V$	$\alpha_{\eta\eta} \eta^2$
10°	0	$7.04 \times 10^3$	$7.03 \times 10^3$	$0.17 \times 10^3$	$-2.81 \times 10^3$	$17.05 \times 10^3$
20°	0	$4.02 \times 10^3$	$10.50 \times 10^3$	$0.40 \times 10^3$	$-2.13 \times 10^3$	$17.05 \times 10^3$
30°	0	$1.63 \times 10^3$	$13.56 \times 10^3$	$0.50 \times 10^3$	$-1.36 \times 10^3$	$17.05 \times 10^3$

( m/s<sup>2</sup> )

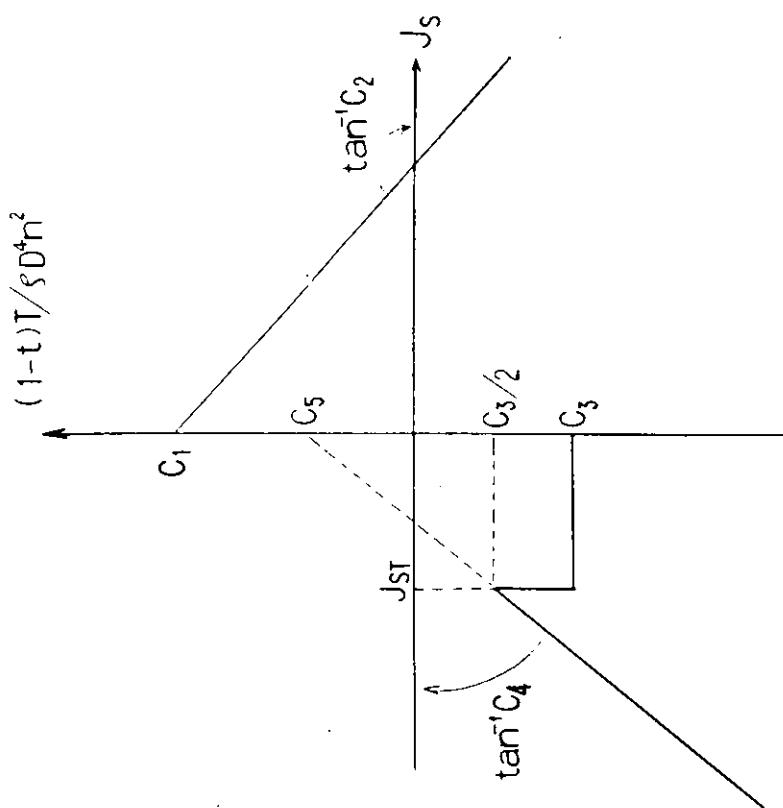


図 8.1.6  $(1-t)T / \rho D^4 n^2 - J_s \tan' C_2$  の関係

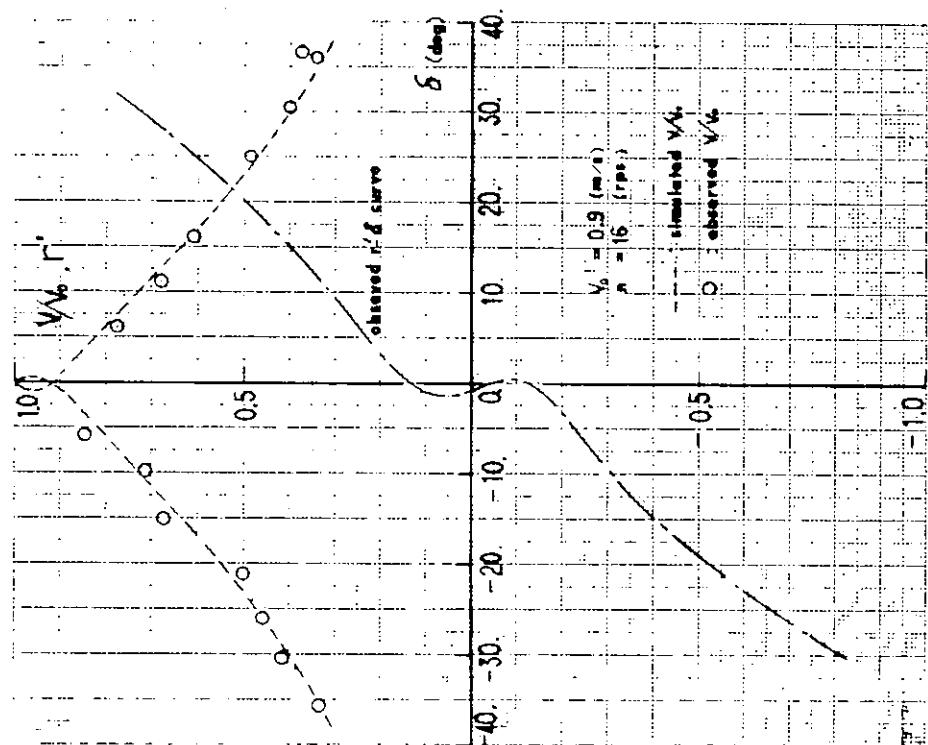


図 8.1.5 定常旋回時の船速低下(タンカーモデル船)

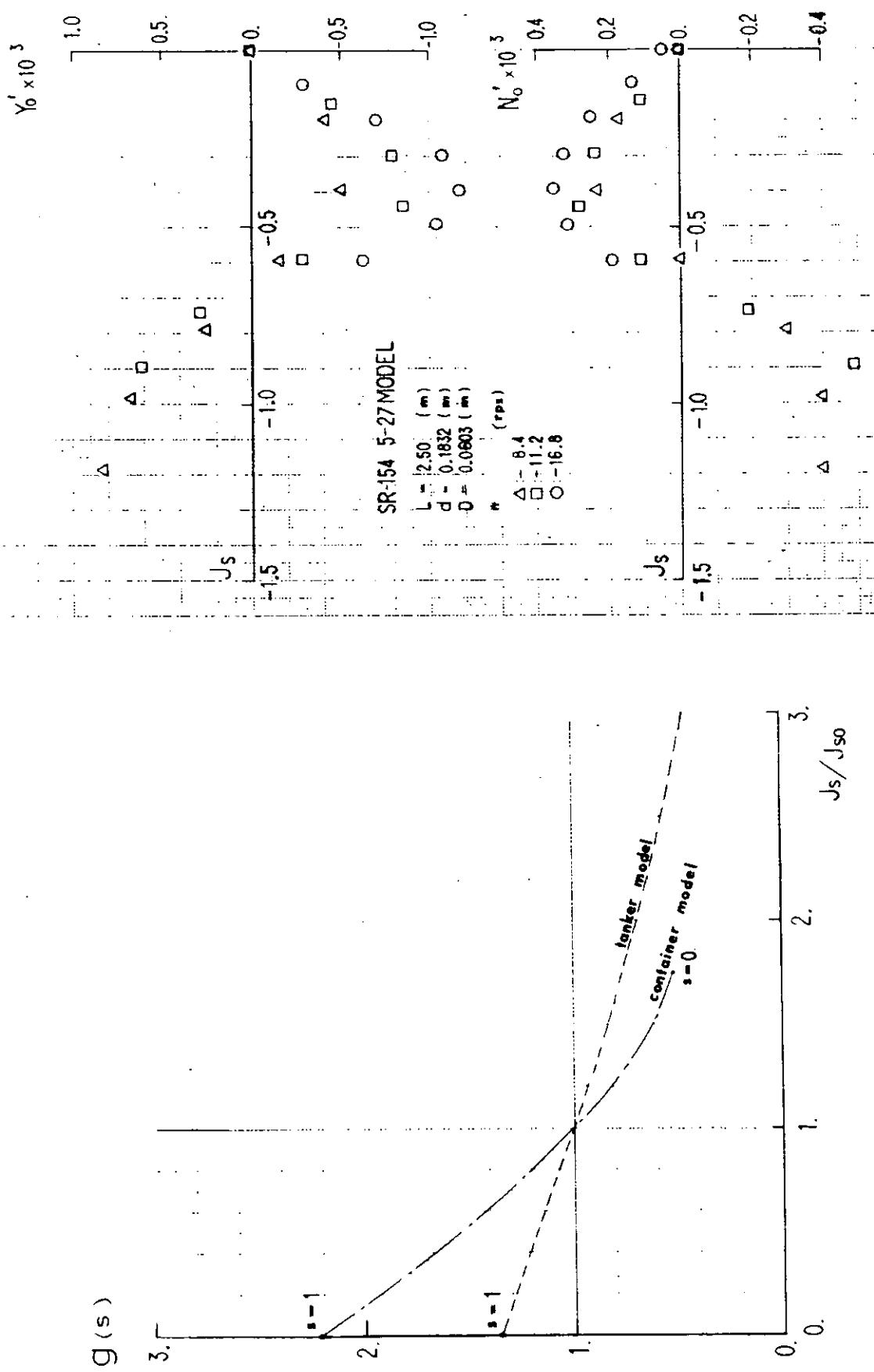


図 8.2.1  $g(s)/J_s - J_s/J_{so}$  (タンカーモデル船、コンテナモデル船)

図 8.2.2 ブロペラ運動中の流体力 ( $r = \beta = \delta = 0$ )

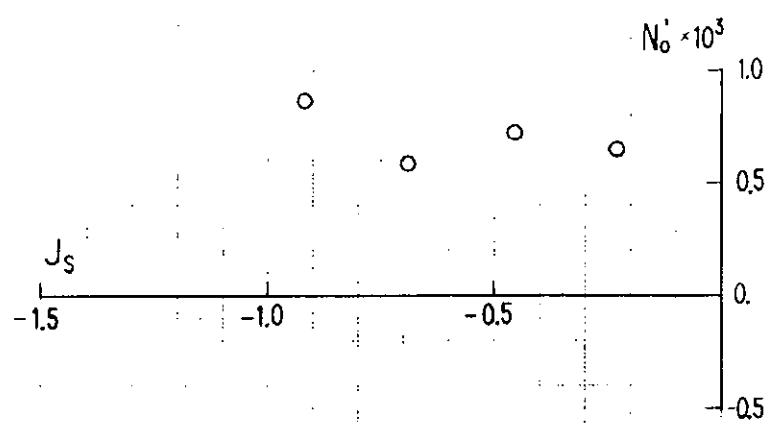
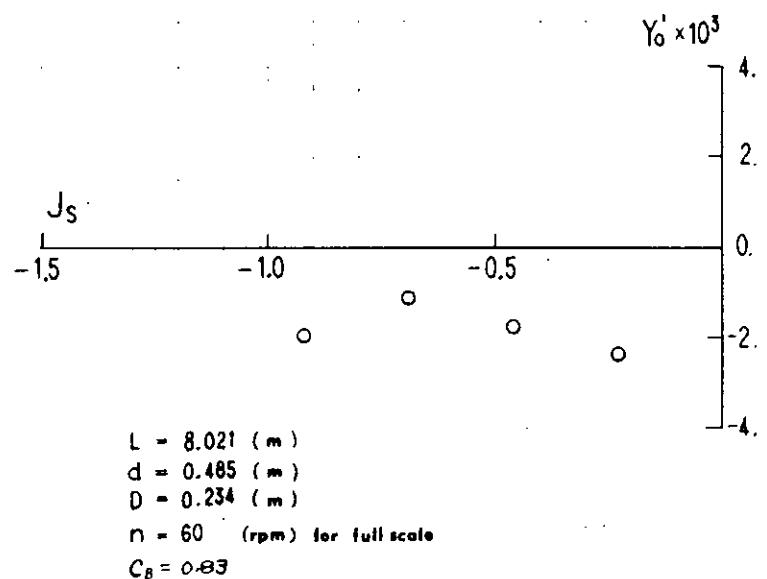


図 8. 2. 3 プロペラ逆転中の流体力 ( $\tau = \beta = \delta = 0$ )

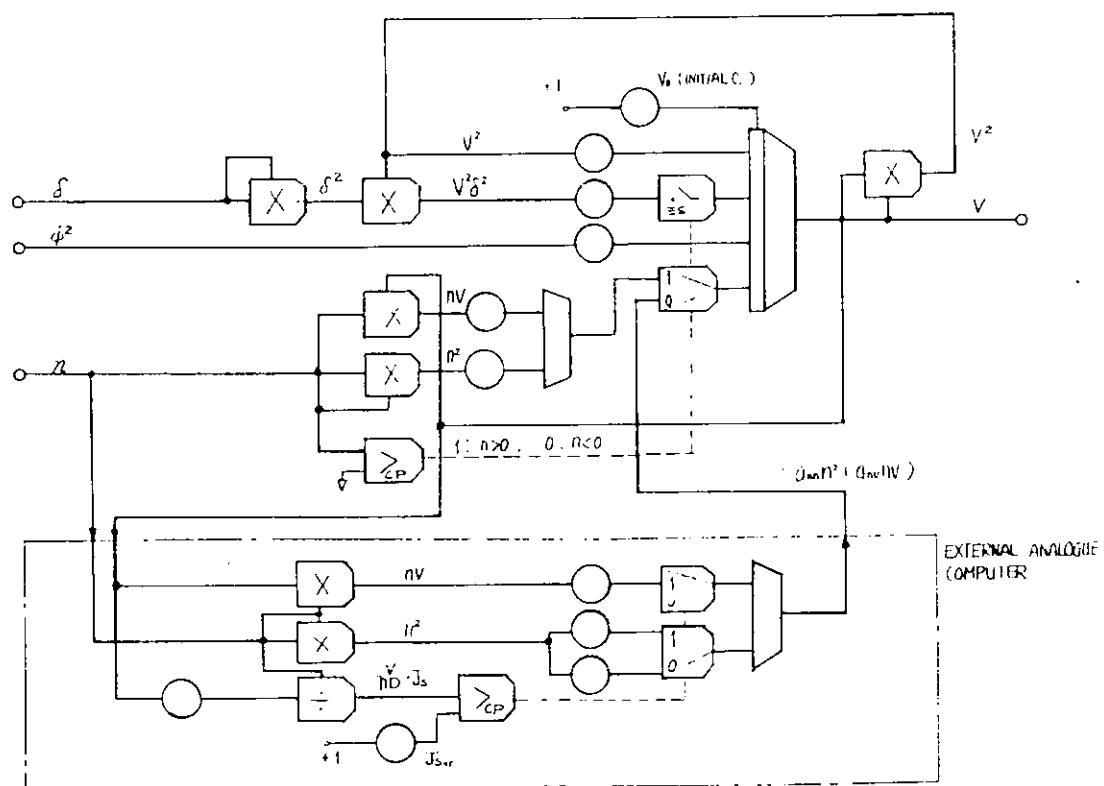


図 8.3.1 船速演算のブロック図

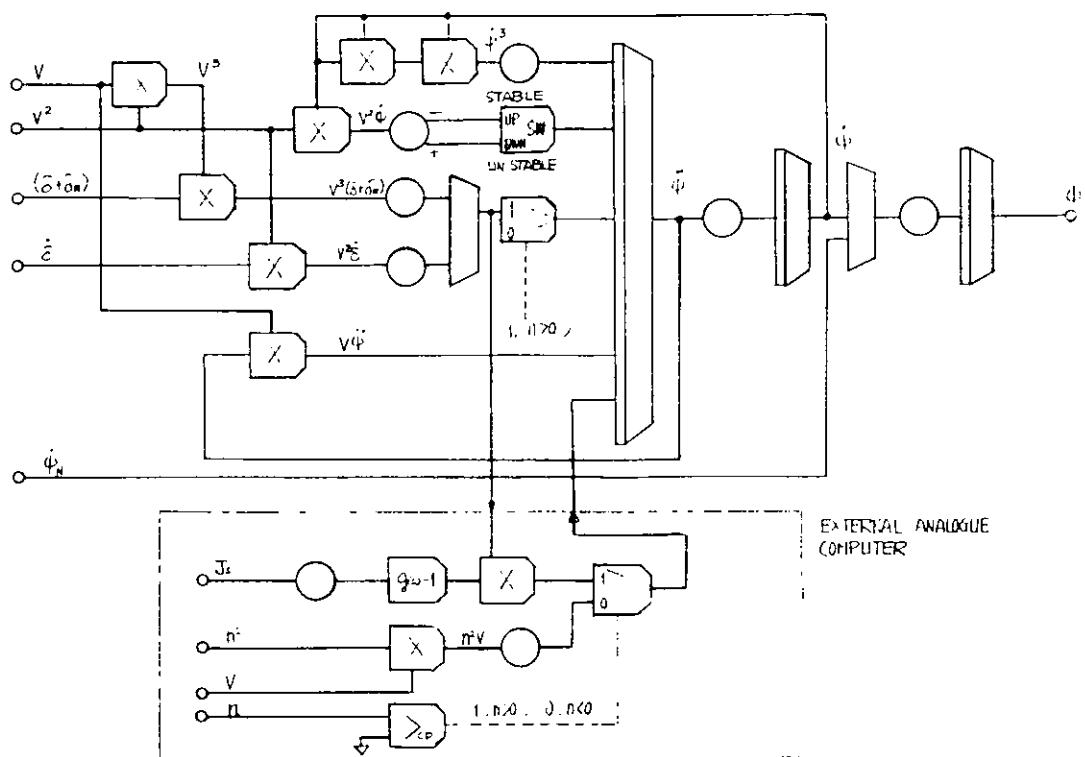


図 8.3.2 旋回運動演算のブロック図

## 8.4 加減速モデルに関する今後の問題点

### 8.4.1 基本方程式

船の操縦運動は次式で表わされる。

$$\left. \begin{array}{l} (m+m_x)\dot{v} - (m+m_y)v\tau = X \\ (m+m_y)\dot{v} - (m+m_x)v\tau = Y \\ (I_{zz} + J_{zz})\dot{\tau} = N \end{array} \right\} \quad \dots\dots (8.4.1)$$

右辺の力X, YとモーメントNの記述については、現在、日本造船学会試験水槽委員会第2部会で検討が行われており、それによれば、大約次のように表わされる。

$$\left. \begin{array}{l} X = (1-t)T + X_u(u) + f_X(v, \tau) - F_N \sin \delta \\ Y = N_v v + Y_f \tau + f_Y(v, \tau) + (1+a_H)F_N \cos \delta \\ N = N_v v + N_f \tau + f_N(v, \tau) + (\ell_R + a_H \ell_H)F_N \cos \delta \end{array} \right\}$$

ただし、 $-X_u(u)$ 、 $-f_X(v, \tau)$ はそれぞれ直進時の船体抵抗、運動による抵抗増加を、 $f_Y$ 、 $f_N$ は非線型成分を、 $F_N$ は舵の直圧力を表わす。 $a_H$ 、 $\ell_H$ は舵による船体への影響を表わす係数である。また $Y_f$ 、 $N_f$ の項は微小とみて省略した。

$F_N$ は舵の単獨特性と、舵への有効流入角 $\alpha_R$ 、有効流入速度 $u_R$ によって次のように書き表わされる。

$$F_N = \frac{1}{2} \rho A_R V^2 f_\alpha(\Delta) \cdot \alpha_R \cdot \left( \frac{u_R}{u} \right)^2 \quad \dots\dots (8.4.3)$$

ただし、 $f_\alpha(\Delta)$ は舵単獨特性の傾斜を示す。

### 8.4.2 簡略化の一例

ここでは原則としてX、Y、N式のまま扱うことを前提として考える。

まず(8.4.2)式の非線型項 $f_Y$ 、 $f_N$ は本来 $v, \tau$ の2次式で表わすのが適当とされているが、アナコンでの使用を目的とする場合には、取扱いの容易な3次式の形が便利と思われる。即ち、

$$\left. \begin{array}{l} f_Y(v, \tau) = Y_{vvv}v^3 + Y_{rrr}\tau^3 + Y_{vv\tau}v^2\tau + Y_{vrr}v\tau^2 \\ f_N(v, \tau) = N_{vvv}v^3 + N_{rrr}\tau^3 + N_{vv\tau}v^2\tau + N_{vrr}v\tau^2 \end{array} \right\} \quad (8.4.4)$$

非線型項が効いてくるのは、運動が大きくなつてからであるから、このときにはPivoting Pointは一定と仮定しても、弱い運動での線型項の場合のような大きな誤差は生じないと考えられる。したがつて $v = -\ell_p \tau$  ( $\ell_p = 0.35 \sim 0.5$ )の関係を用いれば、(8.4.4)式を $\tau^3$ の項だけで代表させることが出来よう。

$f_X(v, \tau)$ は比較的小さいので省略することも可能であるが、(8.4.4)式の演算を行うとすれば、次のような項をとり出すのは容易であるから、無理に省く必要もないであろう。すなわち、

$$f_X(v, \tau) = X_{vv}v^2 + X_{rr}\tau^2 + X_{v\tau}v\tau \quad \dots\dots (8.4.5)$$

もちろん、更に簡略化するすれば、前記の  $f_Y$ ,  $f_N$  と同様に、 $r^2$  のみの関数とすることが可能である。

$T \cdot (1 - t)$  と  $X_u(u)$  については、前節の考察がそのまま利用できるとすれば、プロペラ逆転の範囲までカバーできる。

最も問題になるのは、舵力の式に含まれる有効流入角、有効流入速度であるが、これに関して定量的な資料に乏しい現状では、生半可な簡略化はかえって混乱のもととなる恐れが多分にある。前節の検討から得られた修正係数  $g(s)$  を利用できるのではないかと考えられる。

なお、前節では、プロペラスリップの変化に対しても、 $Y_v^1, Y_r^1, N_v^1, N_r^1$  は変化しないとしているが、これは針路安定性にあたえるスリップの影響に関する従来の知見と矛盾する点があり多少問題が残る。例えばこれらの係数を  $J_s$  の関数として表わすなどの方法で、スリップの影響を取り入れる方が自然であろう。

## 9. 現在の結論と今後の問題点

- (1) アナログ計算機、模擬船橋、テレビ投影機と幻灯映像およびレーダンミュレータを主要構成要素とする操船シミュレータを完成し、船舶操縦制御の人間、機械混成系解析の途を開くことができた。又、このようなシミュレータは既存船や新規計画船の操船性能の評価や新しい操船用計装の開発、評価に使うことができるし、操船訓練にも応用できるであろう。
- (2) 現在までの使用実績に照らし、操船シミュレータ設備の面で気付いたところを例挙する。将来の参考となることを期待する。
- (i) アナログ計算機とディジタル計算機の利害得失については本研究部会内部でもホットな討論があった。価格と使い勝手の良さ、要求精度などを総合的に検討すれば、少くともアナログ型にも相当のメリットがあることは確かである。一方シミュレーション機能の時間的、空間的拡大、質的な多様化に対してはディジタル型の併用が明らかに有利であり、大規模の操船シミュレータにおいてはディジタルを主要部としてアナログを補助に使う方法が有望であろう。本部会設備程度の中型シミュレータでは“ミニコン”級の電算機とアナログ計算機の併用形式が最も適しているようである。
  - (ii) 現在近距離物標の視界表示は一箇だけであるが航路標識ブイのような簡単な形状のものでもよいからあと2~3箇の近接物標の視界表示が欲しい。現在スライドプロジェクタを利用する補助投影装置を計画している。
  - (iii) 船の応答を計算すると数字モデルとしては操船に伴なう回頭運動と機関制御に伴なう船速変動、そして両者の連成を現実的によく表現する必要がある。船速範囲は全速から停止まで、機関回転は前進全速から後進全速まで（機関は逆転しても船は前進している）、舵角はハードオーバーからハードオーバーまでを含むべきである。
  - (iv) レーダ・シミュレータは是非とも必要である。現在ではレーダは視界不良の見張り計器に止まらず、他船や固定目標の位置を測定して操船情報を得る主力計器となっているからこれを欠く模擬操船は現実的でない。
- (3) 人間が重大な困難なしに制御し得る針路不安定の程度はいか程であるか、と云う問題は大型タンカーを中心とする針路不安定船の一般化とともにクローズアップされて来たものである。本研究においても一つの重点をこの問題においたがその結果は第2章に述べた。ここにその要点を述べると
- (i)  $L/V$  が小さい程、そして不安定ループ幅で代表される針路不安定の程度が大きい程、保針は困難となる。換言すれば小型で高速な船程許容し得る不安定の程度は小さい。
  - (ii) その状況を図示すると図2.4.8の如くなる。すなわち  $L/V = 5 \text{ sec}$  の内航小型船級では  $5^\circ$  のループ幅で保針困難となり、 $L/V = 10 \text{ sec}$  では  $10^\circ$  くらいで限界に近づく。一方  $L/V = 25 \text{ sec}$  外航貨物船の港内全速に対応するが、この値ではループ幅が  $25^\circ$  もあっても単純な保針に関するかぎり大きな問題はない。 $L/V = 50$  のVLCCクラスではさらに楽である。
  - (iii) 以上は本研究シミュレータ模擬実験の結果であるが、内航船ではループ幅  $5^\circ \sim 10^\circ$  で保針困難が起り  $25^\circ$  ではほとんど操船不能になると云う実船の経験とほづきが合っている。またVLCCでは  $10^\circ$  弱のループ幅で運航に支障がないと云う実績とも矛盾しない。
  - (iv) 小型船では操舵機速度を上げることによって不安定船の保針が目立って楽になる。又、旋回角度計を上手に使うと保針は大いに改善される。
  - (v) 普通程度の外乱の存在は人間の保針能力を著しく害することはないようである。

- (4) 海図上に指定した屈曲航路を辿る操船や、いろいろな角度で交差する他船を避航する操船も船の大小、針路不安定の程度を系統的に変えて実験したが、これらより高度な操船については上記(3)に示す程の明確な結論は未だ得られてない。個々の結果については本文に依られない。ひとつの注目すべき点はこれらの模擬操船を通じて航海士用の旋回角度計が有効であろうと云う多くの指摘や微候があったことである。現在航海士はコンパスとレーダーと船速計(ログ)を主要計器として操船判断を下しているが、これに加えて旋回角度計があれば変針操船や“あて舵”発令の判断に役に立ちそうである。
- (5) 増減速を伴なう操船運動の応答特性は従来十分の知識がなかった。本研究の模擬操船実験が進むに従ってこの知識がますます必要となり、関連研究として理論的、実験的検討を行ない一応の結論を得た。それは第8章(8.1.4), (8.1.6), (8.2.5)の諸式に集約される。
- (6) 単なる保針に止まらず拡張された機能をもつオートバイロットや種々の Rudder-Translator, 運動予知計器などの新しい操船援助計器や制御システムは人間機械系操船制御の観点から大いに検討すべきものである。本研究においても第5章において二、三の新計装を取り扱っている。個々の内容は本文に譲るが、このような検討は今後さらに広汎かつ系統的に展開する必要があると思われる。本研究の数学モデルでは省略しているが指令舵角を操舵機に伝えるサーボ装置(通称パワーユニット)の影響も軽視できない場面が出て来る可能性があり、これに関連して所謂“Single-loop control”的操舵機も検討すべきであろう。

#### 謝　　辞

本研究の実施に当り委員を派して研究に参画された造船、海運、航海計器関係各会社、各機関の他、特に設備面で下記の各会社に主要な貢献をしていただいた。終りに記して謝意を表したい。

日立電子株式会社  
古野電気株式会社  
鶴布谷計器製作所

## 10. 引用文献

- 1) 田中 豊、小瀬邦治 ; 船の操縦運動の位相面解析、関西造船協会誌、第 147 号、1973年3月
- 2) 小瀬邦治、芳村康男 ; Z 試験の新しい解析法(続報)、日本造船学会論文集、第 138 号、1975年12月
- 3) 野本謙作、田口賢士 ; 船の操縦性について(2)、造船協会論文集、第 101 号、1957年8月
- 4) 小瀬邦治、佐々木直人、針路指示装置の形式が操舵員による保針操縦に及ぼす影響、西部造船会性能委員会第 67 回資料、1976年
- 5) 井口雅一 ; 手動制御の研究、東京大学工学部博士請求論文、1962年
- 6) 原 淳 ; 船の衝突確率を任意の水域で推定する方法について、日本航海学会論文集、第 46 号、1971年12月
- 7) 原 淳 ; 航行システムモデルによる衝突確率の考察、日本航海学会論文集、第 50 号、1973年12月
- 8) 原 淳 ; 航行開始距離について、神戸商船大学紀要、二類、第 18 号、1971年
- 9) 大崎良三 ; 宇高航路における航行実態、航海 38 号、1972年12月
- 10) 長畠 司 ; 航行の判断と操船者の特性、日本航海学会論文集、第 1972 年 12 月
- 11) 小林弘明、遠藤 真 ; 船舶避航操縦の解析、日本航海学会論文集、56号、1976年12月
- 12) 元良誠三、小山健夫 ; 自動操縦による操縦性能の向上について、造船協会論文集、第 116 号、1964年
- 13) 鳥野慶一、松本 哲 ; 練習船“深江丸”における操縦性能変換装置の設計、神戸商船大学 紀要、二類、第 20 号、1973年1月
- 14) T.Koyama ; Improvement of Course Stability by the Subsidiary Automatic Control, Laboratorium voor Scheepsbouwkunde, Technische Hogeschool Delft, Rep. №317, 1971, 8
- 15) 鳥野慶一 ; 最短時間旋回操舵法を用いた新しい自動操舵機構による操縦性能の向上について、日本造船学会論文集、第 132 号、1972年12月

- 16) J.P.Hooft and P.J.Paymans : Four Years Operation Experience with the Ship Control Simulator, STAR Symposium, Washington, D.C., 1975.8
- 17) 乌野慶一、糟谷 昇、中尾秀夫 ; 船舶操縦における Yaw - Rate Wheel の有効性について、神戸商船大学紀要、二類、第 24 号、1976.10.
- 18) 辻 豊治 ; 「船体に働く風圧に関する模型試験」、船研報告 第 7 卷 第 5 号 1970.
- 19) Clarke, D. ; "An Investigation into the Course Stability of B.S.R.A 0.85 c<sub>b</sub> Methodical Series Form", International Shipbuilding Progress, vol. 17 Nr. 188, 1970.
- 20) 田口賢士 ; 「内海における航路付近の波浪について」、造船協会論文集、120号、1966.
- 21) Hooft, J.P. ; "The Steering of a Ship during Stopping Manoeuvre", International Shipbuilding Progress, vol. 17, Nr. 190, 1970.
- 22) Wagner Smitt, L. & Chislett, M.S. ; "Course Stability while Stopping" Transaction of International Symposium on Directional Stability and Control of Bodies moving in Water, Journal of Mechanical Engineering Science, vol. 14 No. 7, 1972.
- 23) 藤野正隆 ; 「ゾロベラ逆転によって船体に生ずる流体力に関する実験結果」、SR154 資料 12-5 又は水槽委員会第 2 部会資料 M48-11、1976.