



Title	不均一潮流中での船体操縦に関するシミュレータ実験
Author(s)	烏野, 慶一; KARASUNO, Keiichi
Citation	北海道大學水産學部研究彙報, 34(3), 231-249
Issue Date	1983-08
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/23829
Type	departmental bulletin paper
File Information	34(3)_P231-249.pdf



不均一潮流中での船体操縦に関するシミュレータ実験

烏 野 慶 一*

Simulator Studies of Ship Maneuvering Motions
in Non-uniform Tidal Stream

Keiichi KARASUNO*

Abstract

This paper deals with the simulator experiments of transits in the Kurushima channel which is one of the most famous channels in Japan due to the strength and eddies of its tidal stream and because it is a main fairway for merchant ships in the Seto-inland sea.

This paper aims to explain research on the following items:

- 1) the effect of the strength in the stream on ship maneuvering motions
- 2) the effect of the ship maneuverability on the transits
- 3) the effect of the ship handling capability in deck officers on the transit.

To pursue the above aims, the following experiments were conducted,

- 1) the experiments of transits through a straight course (Naka-suido) going down stream, and through a bent course (Nishi-suido) going up stream by an unstable on-course ship, where the strength of the stream is changed to nil, half and full of the highest speed of the stream.
- 2) the experiments of the transits by the ships having different maneuverabilities; the unstable on-course ship mentioned above, a stable on-course ship and an ultra-unstable on-course ship.
- 3) the experiments of transits by three deck officers using the ultra-unstable on-course ship.

The results of the simulator studies are that

- 1) ship maneuverings in the straight course going down stream that give deck officers mental tension are safer than the bent course going up stream.
- 2) three kinds of ships which are stable, unstable and ultra-unstable on-course are handled safely until the ship is at half of the highest speed of the stream. But at the highest speed of the stream, it is difficult to handle the ships safely.
- 3) the effect of the differences in the maneuverabilities on ship's trajectories doesn't make an appearance until the ship is at half of the highest speed of the stream, but it makes a clear appearance at the critical state of the ship maneuvering at the highest speed of the stream.
- 4) the differences of the ship handling capabilities in deck officers don't make a clear appearance until the ship is at half of the highest speed of the stream.

* 北海道大学水産学部漁船工学講座
(Division of Fishing Boat Engineering, Faculty of Fisheries, Hokkaido University)

緒 言

潮流の速い海峡や流れが複雑に入り組んだ海峡近辺を漁場とする漁船の操縦は、潮流に十分配慮しないと他船との衝突や座礁等の海難を招く恐れがある。また瀬戸内海等を航行する小型商船も同様な環境にあると言えるであろう。このような状況下で船を安全に運航するには、潮流が何ノット以下であればよいか、どのように航行すればよいか、また船の操縦性能はどの程度であればよいか等を予め知っておくことは安全を確保する上で必要であろう。そのためには、現実の海上での実例や実験を解析する方法は実際に把握する意味で大事である。しかし、それではその日時の又は現場での流れの様相を詳しく把握することは難しく、流れと船体運動との対応を求めることが出来ない。従って流れの分布等が明確に与えられる別の方法があれば望ましいものである。幸にも近年電子技術の発達により NASA の宇宙開発計画にも利用されたように現実の状況を再現することができ、しかも人間の操作能力が介在することのできる模擬装置(シミュレータ)が利用できるようになった。

本論文は海上での操船状況を再現しようとする操船シミュレータを用いて、既知の潮流分布下で、既知の操縦特性をもった船を、未知の熟練度を有する航海士が操縦する実験を試み、一例を挙げて潮流中での船の安全操縦に関する検討を行った。

潮流分布の選択

緒言で述べたように、船が潮流の速い海峡や流れが複雑に入り組んだ海域を流れに乗って又は逆って航行する状況を本論文では考えている。このような海域は実際には日本の津々浦々に存在するが、潮流分布までも詳細に明らかな場所は数少ない。しかし瀬戸内海の難所で知れた来島海峡は危険性のために潮流調査の対象となり、その分布は相当詳細なところまで知れている。しかもこの海峡は主に馬島をはさんで二つの水道、即ち中水道及び西水道に分れており、中水道は一直線での水道幅約 0.25 マイル、西水道は“く”の字形に屈曲してその幅 0.5 マイルの航路を有している。この両水道は潮流の速さ又は流れの複雑さにおいては本研究の恰好の材料となりうるので、来島海峡の潮流分布をモデルに選ぶことにする。

供試操船シミュレータの概要と制約

近年、日本国内で作製された操船シミュレータは視界再現方法においてそれぞれ特徴があり、再現できる操船状況が限定されている。例えば本研究で使用した神戸商船大学の狭水路用操船シミュレータはスピード感をリアルに表現できるので、大きくは屈曲しない航路・水路を通過して行く操船には最適のものである。しかし他船との出会い関係や大きく屈曲した航路を通過する場合の状況再現には、装置の機構上から適してはいない。

本研究が目的とする潮流下での操縦は、場合によっては他船との出会い関係や大きく屈曲した航路の通行までも含めて考える必要もあろうが、研究の初段階として前述の操船シミュレータで可能な操船状況までを対象とした。本装置の概要を次に示す¹⁾(図 1, 2)。

視界再現装置とレーダ装置

本シミュレータは、船橋から見た視野 90 度にわたる来島海峡の景色を模擬船橋前方に現われるようにしてある。船橋内には操縦装置や

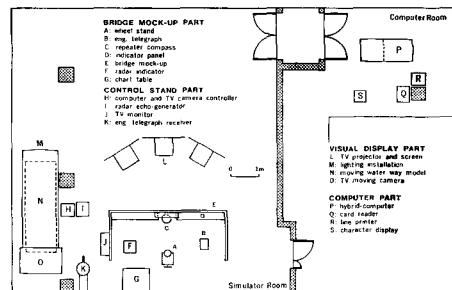


Fig. 1. General arrangement of ship maneuvering simulator.

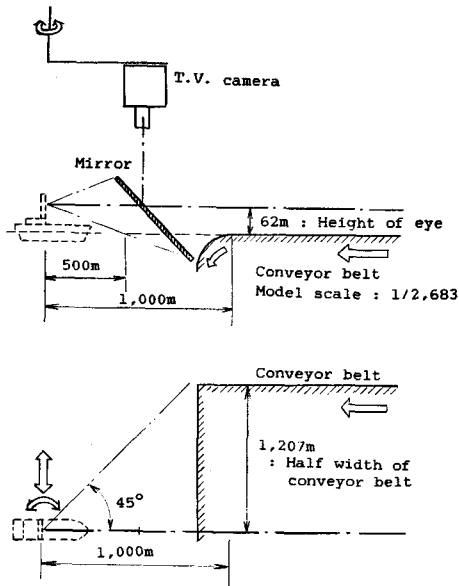


Fig. 2. Visual display systems of the ship maneuvering simulator.

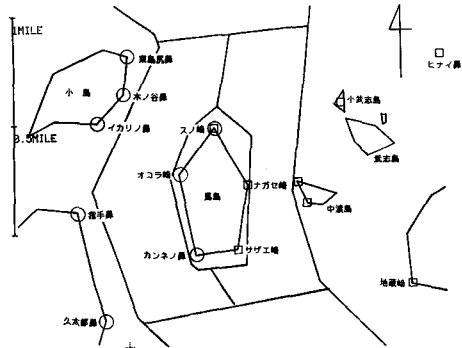


Fig. 3. Eight fixed-targets on radar display in Nishi-Suido (symbol: ○) or Naka-Suido (symbol: □).

レーダを初めとする航海計器が備わり、それら进行操作すると船の針路と船位変化に伴って前方の景色が映り変わる。景色を前方に表わす機構は船橋前方に置かれたカラーテレビプロジェクタ3台によるスクリーン(1.5m×1.0m)3台への投影によっているが、この映像は別置のコンベヤベルト(幅900mm)上に作製された海峡地理模型をテレビカメラで撮影することにより作り出されている。

もともと、この装置は縮尺1/1,000の地理模型を対象として作製されたものであるから、本研究で選定された来島海峡のように広い幅の海域には不向であるが、操船上差し支えない限りに於て縮尺を大きくとって1/2,683で地理模型を作製した。従って来島海峡の中水道及び西水道の地理模型を別々に作製し、コンベヤベルト上に別個に直列に並べ乗せてある。

ところで、この視界再現装置は光学系・機械系装置で組み立てられているために地理模型のTV撮影機構上からスクリーン画面の景色に大きな制約を与えている。これはTVカメラとコンベヤベルトの配置関係及び模型縮尺(1/2,683)から来るものである。その第1は、地理模型水路の中心針路から±45度を越えた針路に船首が向けば、スクリーン画面の景色映像は水道風景をはずれて現実と様相の違ったものになってしまう。これはTVカメラがコンベヤベルト上から外れて位置している事とベルト幅の制約に原因する。第2は反射鏡による撮影方式を採っているために船橋前方略1,000m以遠の海域だけに限られた風景が投影され、それより近景は映し出されない。第3は反射鏡とコンベヤベルトの接近に制限があるために眼高が62mになっている。更に第4には潮流等の海面状況を表現できないことである。

また他の航海援助をするレーダ装置は自船の船位の測定及び確認のために備え付けてあるが、それには沿岸線発生装置が装備されていないために、中水道又は西水道のレーダ映像は水道を代表的に表現する8地点(ターゲット)だけで表示しなければならない。しかし、この制約は船位の確認には支障をきたさないようであった(図3)。

船体運動の計算式

舵輪及びエンジンレグラフの操作に伴い船体運動が誘起されるが、その演算に関しては海域的に不規則に変化する潮流の影響を簡便に算入しうる演算式が妥当である。従ってこの運動を取り扱うには操縦運動を端的に表現することのできる操縦性指数 K, T を用いた応答方程式は不均一潮流の効果が入り難いので、流体力微係数を用いた基本の運動方程式による方法が妥当である。

ところで、扱う船体運動は平水中での操縦運動に限定してはいるが、潮目に船首を突っ込む状況が起るので、通常の操縦運動で考える ahead, sway および yaw 等の運動の他に roll 運動までも考慮すべきであろう。特に、最後の横揺れは船の復原性に伴う安全性の観点から重要なものである。しかし、潮流による横揺れを配慮した船体運動の研究²⁾も行われてはいるが、本研究に採り入れるには複雑であり、また横揺れによる操縦運動への影響も本研究の目的からは2次的と言えるので、本論文では通常用いられる3自由度の操縦運動方程式で扱うことにした。

今、地球固定座標系に対して船体の座標系及び潮流等を図4の様に定める。船の前後・左右及び船首回頭等の船体中央 (\bar{O}) に関する対地速度をそれぞれ u, v, r として運動方程式を表わすと³⁾

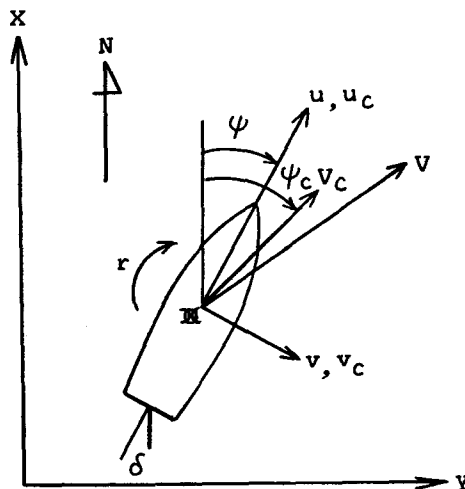


Fig. 4. Co-ordinate system of the ship motion and tidal stream.

$$m \cdot (\dot{u} - v \cdot r - x_G \cdot r^2) = X$$

$$m \cdot (\dot{v} + u \cdot r + x_G \cdot \dot{r}) = Y$$

$$(I_{ZG} + m \cdot x_G) \cdot \dot{r} + m \cdot x_G \cdot (\dot{v} + v \cdot r) = N$$

である。こゝに m は船体質量、 x_G は船体中央から船体重心位置までの前後距離、 X, Y, N は船体中央 (\bar{O}) に関する船体前後・左右方向及び回頭モーメントである。

船の対水前進速度は零でないとして流体力微係数 $X_{\dot{u}}, X_{v_r}$ 等を用いて、 X, Y, N を次の様に表した。

$$\begin{aligned} X &= X_{\dot{u}} \cdot (\dot{u} - \dot{u}_C) + (X_{v_r} - Y_{\dot{v}}) \cdot r \cdot (v - v_C) + X_{v_v} \cdot (v - v_C)^2 + X_{r_r} \cdot r^2 \\ &\quad + X_{H0}(u - u_C) + X_{R0}(u - u_C) + (1 - t) \cdot T + F_N \cdot \sin \delta \\ Y &= Y_{\dot{v}} \cdot (\dot{v} - \dot{v}_C) + Y_{v_r} \cdot (v - v_C) + Y_{\dot{r}} \cdot \dot{r} + (Y_r + X_{\dot{u}} \cdot (u - u_C)) \cdot r \\ &\quad + \int (v - v_C + x \cdot r) \cdot |v - v_C + x \cdot r| \cdot C_D(x) \cdot dx + (1 + a_H) \cdot F_N \cdot \cos \delta \\ N &= N_{\dot{r}} \cdot \dot{r} + N_{r_r} \cdot r \cdot r + N_{\dot{v}} \cdot (\dot{v} - \dot{v}_C) + (N_v + (Y_{\dot{v}} - X_{\dot{u}}) \cdot (u - u_C)) \cdot (v - v_C) \\ &\quad + \int (v - v_C + x \cdot r) \cdot |v - v_C + x \cdot r| \cdot x \cdot C_D(x) \cdot dx + (x_R + a_H \cdot x_H) \cdot F_N \cdot \cos \delta \end{aligned}$$

こゝで、 u_c, v_c は対地潮流速度ベクトルの船体前後及び左右方向の成分であり、 X_{H0} は定常船体直進抵抗、 X_{R0} は定常舵直進抵抗、 T はプロペラ軸の推力、 F_N は舵直圧力、 δ は舵角である。プロペラ軸推力 T 及び舵直圧力 F_N はそれぞれプロペラ及び舵の対水前進速度を用いて文献 [4] の方法で与えた。

シミュレータ実験

実船による潮流中での操縦実験と比べてシミュレータで行う実験は、次のような利点が考えられる。

先ず第1に実船の場合と違って刻々の船位と潮流のデータが明確であって、その状況下での操船を観察することができる。従って操作と潮流及び船体運動との因果関係が相当明白になる。第2は船の操縦性能の良否や操船者の熟練度にかかわらず潮流の強さ及び方向を任意に選ぶことができ、その結果

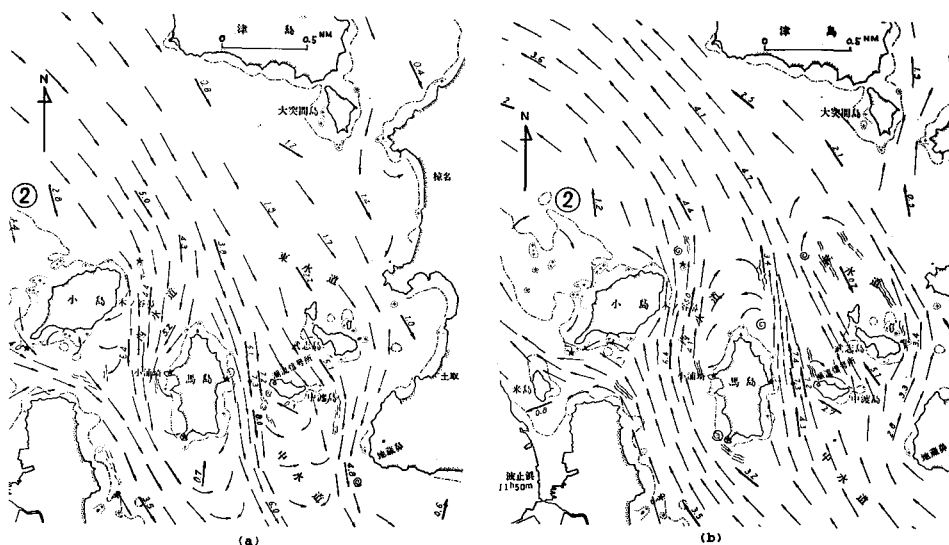


Fig. 5. Diagram of tidal stream in Kurushima-Kaikyo at the highest speed: (a) southward stream (b) northward stream. [ref. 5]

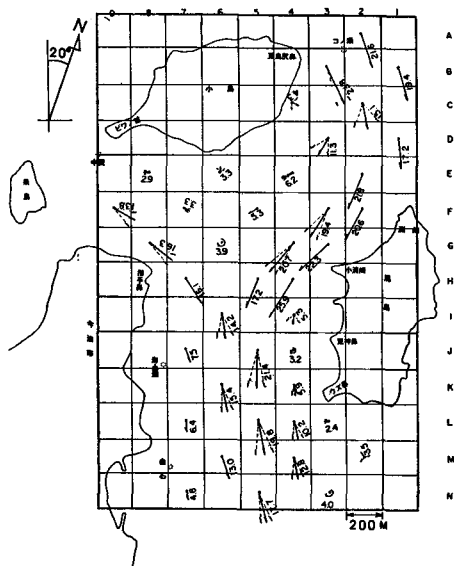


Fig. 6. Diagram of southward tidal stream in Nishi-Suido at the highest speed. The actual speeds are obtained by multiplier 0.31 k't. [ref. 7]

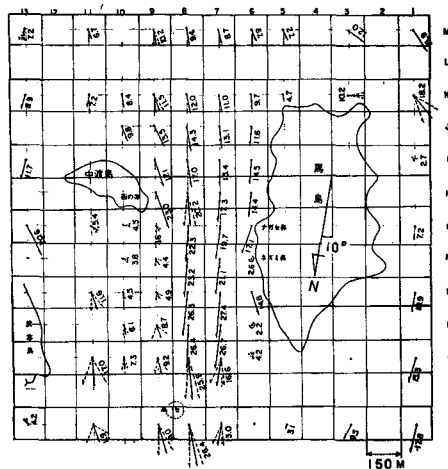


Fig. 7. Diagram of northward tidal stream in Naka-Suido at the highest speed. The actual speeds are obtained by multiplier 0.31 k't. [ref. 6]

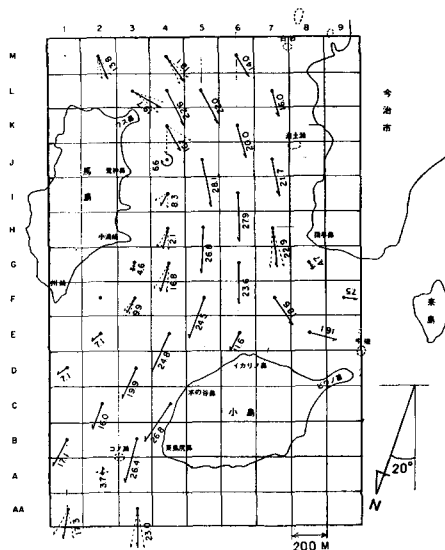


Fig. 8. Diagram of northward tidal stream in Nishi-Suido at the highest speed. The actual speeds are obtained by multiplier 0.31 k't. [ref. 7]

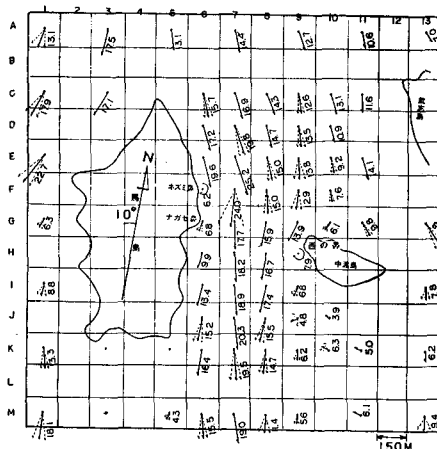


Fig. 9. Diagram of southward tidal stream in Naka-Suido at the highest speed. The actual speeds are obtained by multiplier 0.31 k't. [ref. 6]

実船では不可能に近い状況下で実船実験を模擬することができる。第3は操縦すべき船舶の船種・船型を任意に選んで実験できる。第4は簡単に繰返し実験が可能なことである。

以上のような特徴がシミュレータ実験に備わっているので、本研究では次のような目標のもとに実験を計画した。

- 1) 潮流の強さを変えた順中逆西航法（順流では中水道を、逆流では西水道を通行する航法）を試みて航過できる潮流の限界を探り、現実との比較資料を得る。
- 2) 船の操縦特性が異なる場合や操船者の熟練度が異なる場合に操縦の結果がどのように変化するかを調査する。

供試地理模型の縮尺と潮流データ

海峡の地理模型は、それを乗せるコンベヤベルトの幅 900 mm の制約下で視界再現装置の性能面上できるだけ縮尺を大きくとって対象海域を狭めたい要求と操船面上できるだけ広い海域を見せたい要求とがぶつかり会った結果の妥協で決められる。来島海峡の場合、前述したように中水道の海峡幅は約 0.25 マイルでストレートになっており、一方、西水道の海峡幅は約 0.5 マイルで屈曲した水路である。ところが操船には航路標識又は物標等を必要とするので、これらの水道幅より更に広い地域の縮尺模型を必要とする。結果的には海図の拡大複写との関係から縮尺 1/2, 683 の西水道及び中水道の地理模型を作製し、コンベヤベルト（約 6 m 長）の表面に直列に並べて設けることになった。

潮流の分布に関しては、海上保安庁⁶⁾及び港湾技研^{6),7)}の資料がある。ここでは詳細に記述してある港湾技研の模型実験による結果を主として利用して、流れ場を与えることにする。この流れ場を数学モデルで簡潔に表現できれば理想的であるがそれも適わないので、本論文では簡単のため航路筋を小さな格子縞に分割して各格子内で一様潮流とする方法を採用した。この結果、格子目内では速度・方向共に一定の潮流が与えられるようにしているので、隣接の格子目の境では不連続な流れとなり、

潮目が出来たようになっている。操船面では、このことは実際の流れより厳しい条件になるであろうが、安全性を確認する上では危険側となって支障をきたさないであろうから敢えて補間による連続分布を採用しなかった。また潮流分布は、潮の強さによって潮流速度の変化は勿論のこと、潮の向き、歪流の範囲・強さ・向き等も変化するが、本論文では最強流の場合を基準にとって強さのみに変化をもたせた。なお、格子目の大きさは、文献 [6, 7] に於る測定点の関係から中水道では $150\text{m} \times 150\text{m}$ 、西水道では $200\text{m} \times 200\text{m}$ のものになっており、潮流の時間的変動は考慮していない (図 5~9)。

供試船要目と操縦性能

実験に用いる船のモデルは、実際の航行状態との対応がつけられるように、来島海峡航行の最多船型よりは多少大き目ではあるが、北大漁業練習船北星丸 ($L \times B \times d = 56\text{m} \times 11.1\text{m} \times 4\text{m}$) に近い小

Table 1. Particulars of ship used by simulator.

Length	L_{PP}	50 m
Breadth	B	11 m
Draft	d	4 m
Displacement		1,500 ton
Rudder Area Ratio	A_R/Ld	1/45
Rudder Aspect Ratio	A	1.5
Propeller Dia.	D	2 m
Propeller Pitch	P	1.5 m
Propeller Shaft Revolut.		200 r.p.m.
Ship Speed		9.8 k't

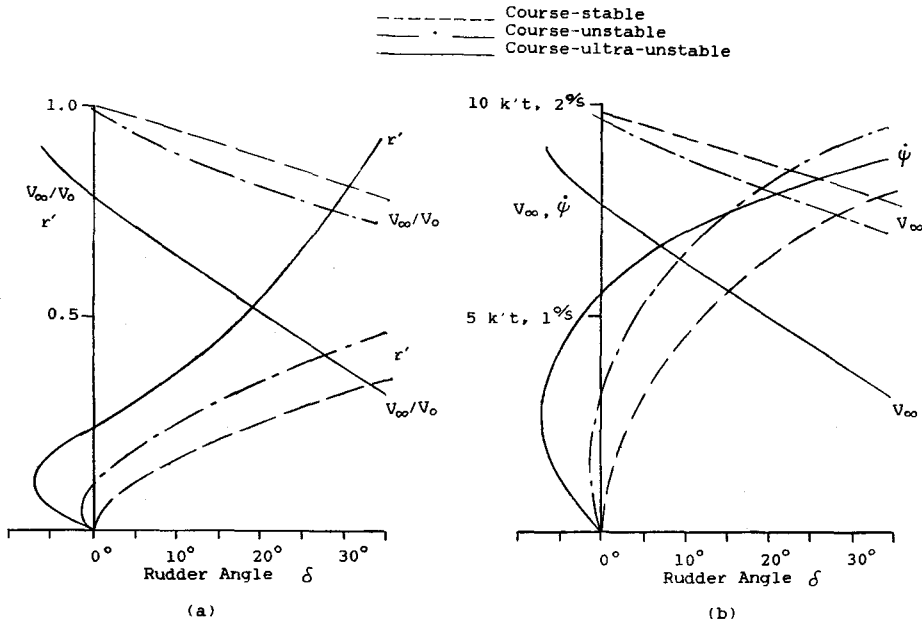


Fig. 10. Steady turning characteristics of ships used by simulator. (a) Non-dimensional yaw-rate (r') and ship speed (V_∞/V_0) vs. rudder angle. (b) Dimensional yaw-rate (ψ) and ship speed (V_∞) vs. rudder angle.

型貨物船を代表させた。モデル船の主要寸法は $L \times B \times d = 50 \times 11 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ 、排水量 1,500 トンの実船をモデルとした。その船体要目を表 1 に示す。

船の操縦性能を変えらるに当っては、運動方程式中の流体力微係数を基準値から適当に変更する方法で行い、針路不安定船、針路安定船及び針路超不安定船を得た。それぞれの旋回特性曲線を図 10 に示しておく。なお、流体力微係数の値は、参考文献 [8] のものを基準値として採用した。

実験内容とその結果

現在、来島海峡の通航は、通常の右側航法と違って順中逆西の航法を採っている。本研究では実船との比較を行えるためにも、これと対応した実験を行った。即ち順流にて通過する場合は中水道を採り、逆流にて通過する場合には西水道を採る規則である。この航法の所以は、潮流下における操船経験から出て来たものである。つまり順流に於ての操船は、流れに乗っかるために対地船速が大きくなって短時間のうちに大きな船位変化を生じ、また操舵に対する船の運動応答も速度（対地）の割には遅くなるので、それらに対する応答操作を素早くしなければ手遅れになってしまう。このことから順流では屈曲航路は危険で不適當となり、直線航路の方がより安全になるので、順流は直線的な中水道を、また逆流は屈曲した西水道を採ることになっている。しかし、この中水道の通過帯域幅は 300 m 程度のために、遠方からその一点の開口をねらって突入する操船が要求されるので、順流中の直線的航過と言えども中水道の通過は安心できないものである。

流れに関して言えば、北流時の中水道では馬島及び中渡島の陰の北方海域は大きな歪流になって、その流れは遅くて不安定である。一方、本流は一直線の河の流れのようになって略真北に向って流れ、最強流域は馬島・中渡島の最狭部分ではなく馬島の北端を正横に見る当りで現われ、流速 8.4 ノットである。更にこゝを過ぎると高瀬の影響および中渡島・武志島間から流れ込む潮の影響を受け、本流も真北から西寄りの方向に変化すると同時に絞られた流れとなっている。南流時の中水道は、馬島・中渡島最狭部の入口北側で真南から少し東に振った本流があり、最狭部入口手前で流速が 8 ノット近くに達している場所がある。最狭部を過ぎた当りから中渡島南側に生じた大きな歪流の影響を受け、流向は略真南になると同時に本流は狭まっている。

他方、逆流における操船は航海士にとって順流中ほど緊張感を与えない。それは対地船速が遅くなる理由による。このために屈曲した西水道は順流よりむしろ逆流で航過するのが適当と考えられたのであろう。西水道の地理的水路幅は 800 m と結構広いものであるが、馬島・小島の歪流が相当広範囲に達して本流幅は狭いものになっており、更に小島・馬島への衝突流が流向を大きく変化させている。北流時の西水道は四国本土に沿って北西に近い流れが北上し、馬島の南西端カンネノ鼻から北部にかけて大きな歪流をつくっている。その歪流は馬島のオコラ崎及び北端スノ崎の北方まで大きく延びて、馬島を包み込むようになっている。本流は馬島を大きく廻り込むように流れ、カンネノ鼻の北、荒神鼻の西方で流速 8.6 ノットである。小島に衝突した本流は流向を大きく変え、略真北になり、更に小島の東島尻鼻から流向を西に大きく振る。南流時の西水道は、南東の流向をもつ流れが小島の東側近辺と南側に大きな歪流をつくり、それに押し出された本流が馬島北端に向い、馬島で反射された流れが向を変えて真南に流れて約 8 ノットに達する狭い本流となる。この本流は馬島オコラ崎以南に大きな歪流をつくり、この結果更に本流を狭いものとし、次には来島方面からの流れと合流して馬島南端のカンネノ鼻の西方を四国本土に沿って南下する。

以上の潮流下でその潮速を憩流、1/2 最強流および最強流の条件に設定して、操縦特性の違った 3 種の船舶での航過実験を行った。その結果を次に示す。

1. 針路不安定船の実験

本船は針路不安定ループ幅が ± 1.5 度（舵角）の旋回特性を有する船舶である。操船は、5,000 GT

鳥野：不均一潮流中での船体操縦に関するシミュレータ実験

Table 2. Lists of experiments by simulator for transits of Kurushima-Kaikyo
Course-unstable ship.

Navigation	Transit of Nishi-Sudio			Transit of Naka-Suido		
	Tidal Stream	Ex. No.	Fig. No.	Tidal Stream	Ex. No.	Fig. No.
Northward -bound	Nil	10	20	Nil	1	11
	Southward 1/2 highest speed	11	20, 21 22	Northward 1/2 highest speed	2	11, 12 13
	Southward 1/1 highest speed	12, 13	21 23, 24	Northward 1/1 highest speed	3, 9	12 14, 15
Southward -bound	Nil	20	25	Nil	31	16
	Northward 1/2 highest speed	29	25, 26 27	Southward 1/2 highest speed	32	16, 17 18
	Northward 1/1 highest speed	28	26 28	Southward 1/1 highest speed	33	17 19
Course-stable ship						
Southward -bound	Northward 1/2 highest speed	23	29 30			
	Northward 1/1 highest speed	24	29 31			
Course-ultra-unstable ship						
Northward -bound	Nil	1	[W1] 34			
	Southward 1/2 highest speed	2				
	Nil	3	[W2] 35	Nil	14	[W2] 33
	Southward 1/2 highest speed	4		Northward 1/2 highest speed	15	
	Nil	11	[W3] 36	Nil	17	[W1] 32
	Southward 1/2 highest speed	12		Northward 1/2 highest speed	19	
	Southward 1/1 highest speed	13		Northward 1/1 highest speed	20	

[W1], [W2], [W3]: Identifiers of navigators

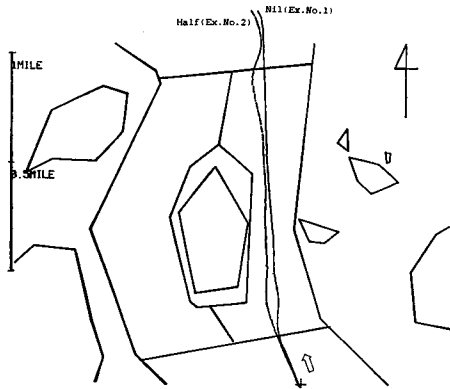


Fig. 11. Course-unstable ship's trajectories of northward-bound navigation in Naka-Suido at nil (Ex. No. 1) and half (Ex. No. 2) of the highest speed of northward tidal stream.

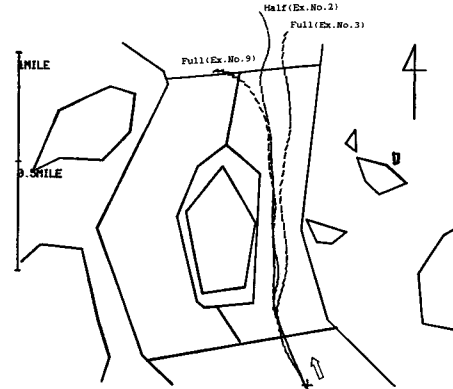


Fig. 12. Course-unstable ship's trajectories of northward-bound navigation in Naka-Suido at half (Ex. No. 2) and full (Ex. No. 3, 9) of the highest speed of tidal stream.

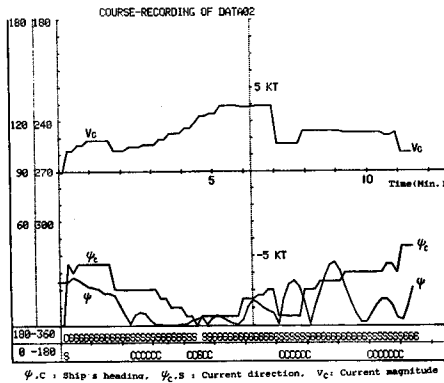


Fig. 13. Time histories of course-unstable ship's heading and affected tidal stream (Ex. No. 2: at half of the highest speed) on northward-bound navigation in Naka-Suido.

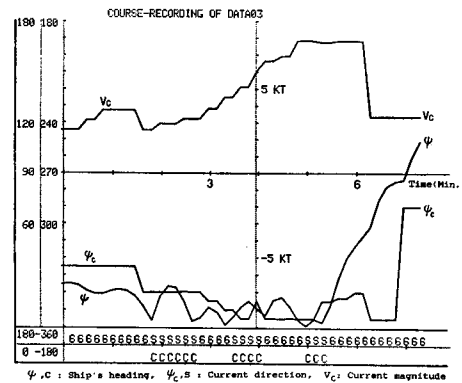


Fig. 14. Time histories of course-unstable ship's heading and affected tidal stream (Ex. No. 3: at the highest speed) on northward-bound navigation in Naka-Suido.

級練習船の扱いに慣れた航海訓練所二等航海士が全実験を通じて当たり、その際操船の状況判断の手段として模擬船橋前方の景色、レーダ、ジャイロコンパス及び海図を用いて操舵号令を發した。前もって操船者に与えられた知識は、船の大きさと潮流の強弱及び方向の3点だけである。

実施した実験種目は、中水道と西水道の航行を順中逆西航行で行い、潮流の強さは憩流、最強流の1/2 および最強流で行った。実施した実験のまとめたものを表2に掲げておく。

実験結果を船跡図および針路・潮速・潮向の時間経過で示すと図11~28となる。なお、各種データのサンプリング時間間隔は10秒、潮流入力サンプリング時間間隔は20秒、演算時間間隔は0.1秒である。

鳥野：不均一潮流中での船体操縦に関するシミュレータ実験

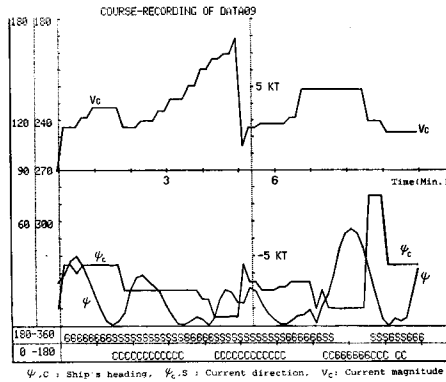


Fig. 15. Time histories of course-unstable ship's heading and affected tidal stream (Ex. No. 9: at the highest speed) on northward-bound navigation in Naka-Suido.

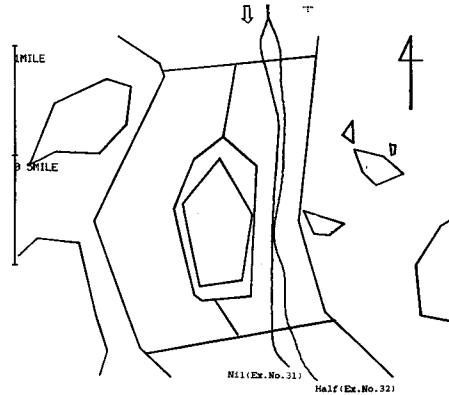


Fig. 16. Course-unstable ship's trajectories of southward-bound navigation in Naka-Suido at nil (Ex. No. 31) and half (Ex. No. 32) of the highest speed of tidal stream.

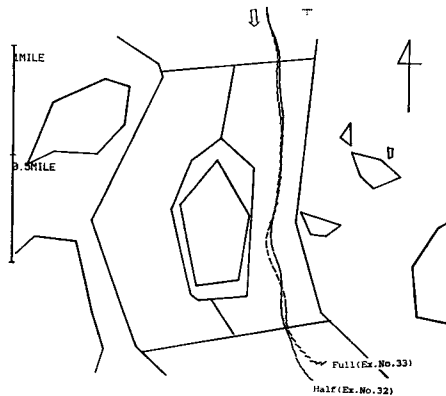


Fig. 17. Course-unstable ship's trajectories of southward-bound navigation in Naka-Suido at half (Ex. No. 32) and full (Ex. No. 33) of the highest speed of tidal stream.

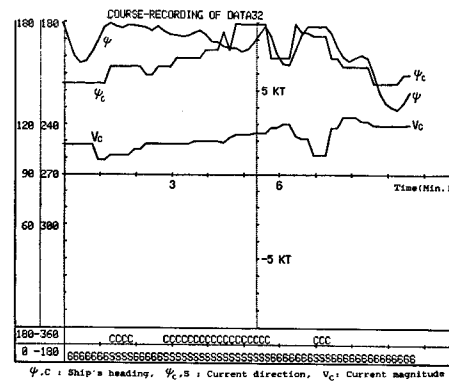


Fig. 18. Time histories of course-unstable ship's heading and affected tidal stream (Ex. No. 32: at half of the highest speed) on southward-bound navigation in Naka-Suido.

中水道・北航・北流の実験

- 総流中では馬島と中渡島の丁度真中を通り、針路 355 度のコースを直線的に航過している (図 11)。
- 1/2 最強流 (順潮) 中では最狭部の西寄り (ナガセ鼻寄り) を通過後、馬島を過ぎたあたりから中渡島・武志島間より流れ込む潮に影響され、針路が西寄りになって急速に潮 (4 ノット) で流されている。しかし、その後針路を持ち直し、無事航過できている (図 11, 12, 13)。
- 最強流 (順潮) 中では前述の 1/2 最強流中の場合と同じコースを辿って通過後、中渡島・武志島間からの強い西寄りの流れ (8 ノット近い) に大きく影響され、その結果は左回頭が強くなると同時に潮に流されて遂には馬島の歪流に突っ込むケース (図 12, 14) と最狭部の東寄り (中渡島信号所寄

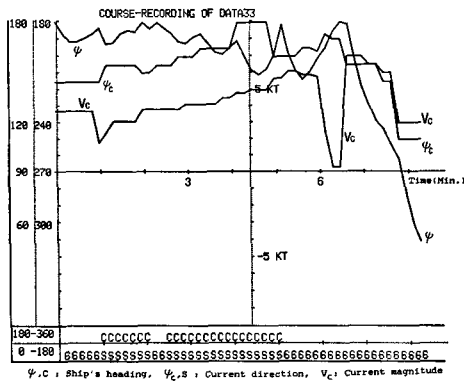


Fig. 19. Time histories of course-unstable ship's heading and affected tidal stream (Ex. No. 33: at the highest speed) on southward-bound navigation in Naka-Suido.

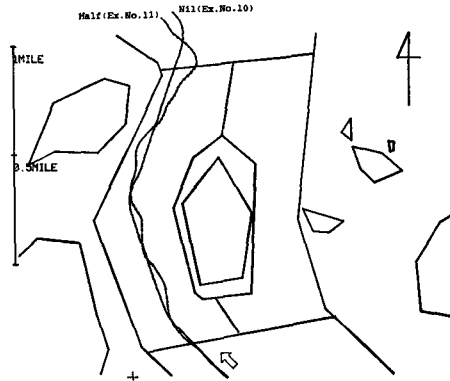


Fig. 20. Course-unstable ship's trajectories of northward-bound navigation in Nishi-Suido at nil (Ex. No. 10) and half (Ex. No. 11) of the highest speed of tidal stream.

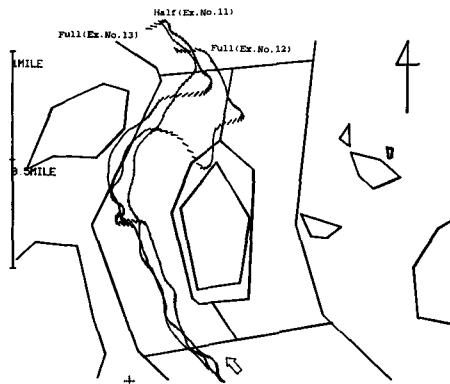


Fig. 21. Course-unstable ship's trajectories of northward-bound navigation in Nishi-Suido at half (Ex. No. 11) and full (Ex. No. 12, 13) of the speed highest of tidal stream.

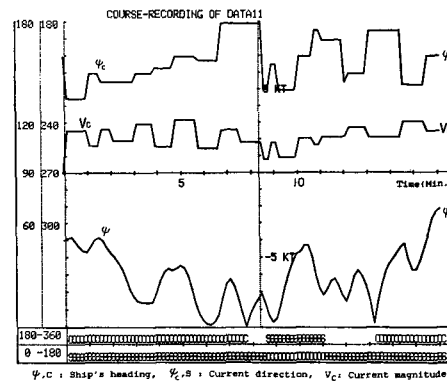


Fig. 22. Time histories of course-unstable ship's heading and affected tidal stream (Ex. No. 11: at half of the highest speed) on northward-bound navigation in Nishi-Suido.

り)を通過後、高瀬に針路を向け、潮流の弱い海域を予め左回頭に対する当舵を行って抜けて行ったケース (図 12, 15) とがある。いずれの場合も小さな蛇行を行って中水道へ突入し、その後に高瀬付近で左回頭モーメントを受けている。

中水道・南航・南流の実験

- 憩流中では馬島・中渡島間の最狭部で少し西寄りの略中央を一直線に南下している (図 16)。
- 1/2 最強流 (順潮) 中では船首針路に対し緩やかに左舷方向に流され乍ら水路最狭部の中央を通った後、小さな蛇行をして通過している (図 16, 17, 18)。
- 最強流 (順潮) 中では水路最狭部付近で針路が大きく馬島の方 (210度) を向いて通過後、左舷回

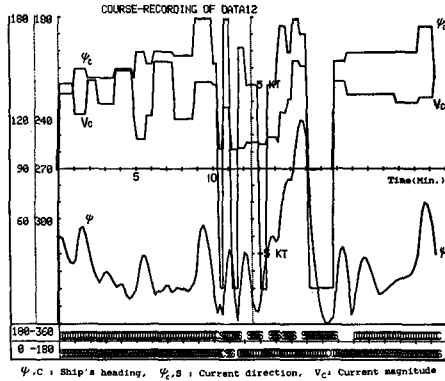


Fig. 23. Time histories of course-unstable ship's heading and affected tidal stream (Ex. No. 12: at the highest speed) on northward-bound navigation in Nishi-Suido.

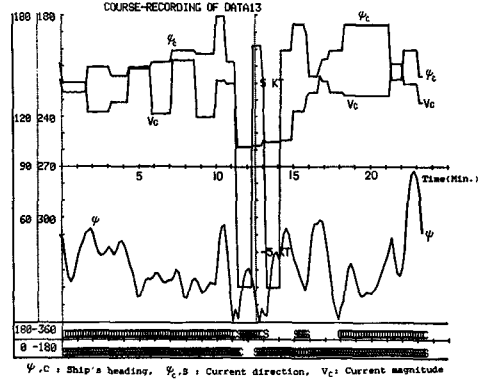


Fig. 24. Time histories of course-unstable ship's heading and affected tidal stream (Ex. No. 13: at the highest speed) on northward-bound navigation in Nishi-Suido.

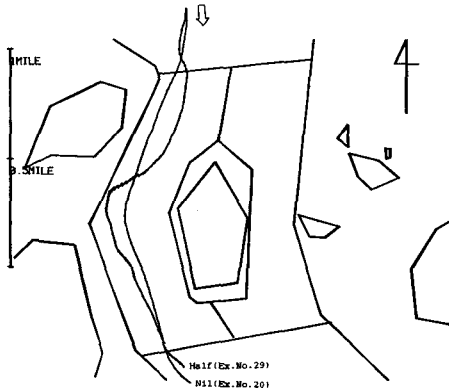


Fig. 25. Course-unstable ship's trajectories of southward-bound navigation in Nishi-Suido at nil (Ex. No. 20) and half (Ex. No. 29) of the highest speed of tidal stream.

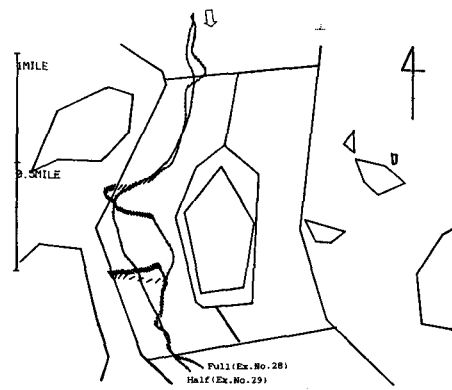


Fig. 26. Course-unstable ship's trajectories of southward-bound navigation in Nishi-Suido at half (Ex. No. 29) and full (Ex. No. 28) of the highest speed of tidal stream.

頭に転じている。これは1/2強流中の船跡を少し強調したものになっている(図17, 19)が、最後の場面で中渡島の歪流に巻き込まれ、大きく左回頭している。

西水道・北航・南流の実験

○憩流中では略折線的に航過して、オコラ崎までは航路の真中を、それ以降は小島の東島尻鼻沖のコノ瀬に接近して通過している(図20)。

○1/2最強流(逆潮)中では馬島カンネノ鼻西方で潮向の変化により西に流され、次いで馬島オコラ崎西方でもやはり潮向の変化により西に流されている。その後、小島の歪流域に入って流れの影響少なく航行しているが、その歪流域を出た小島東島尻鼻の南方の位置から本流域に入り込み、左舷

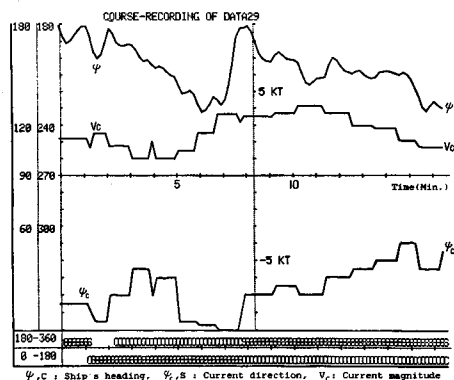


Fig. 27. Time histories of course-unstable ship's heading and affected tidal stream (Ex. No. 29: at half of the highest speed) on southward-bound navigation in Nishi-Suido.

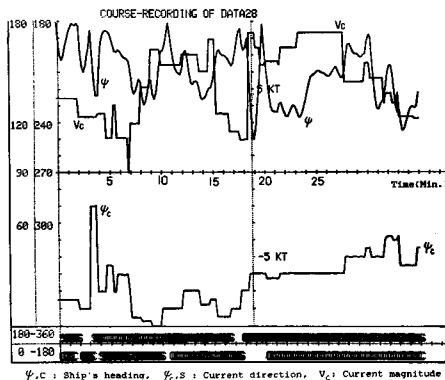


Fig. 28. Time histories of course-unstable ship's heading and affected tidal stream (Ex. No. 28: at the highest speed) on southward-bound navigation in Nishi-Suido.

前方より大きな角度で7~8ノットの潮の影響を受けて右舷方向に流されている。蛇行しながらでも概ね憩流中での船跡を辿っている(図20, 21, 22)。

- 最強流(逆潮)中では小島の東島尻鼻の南方の歪流域から本流に突入した時に、本流に押し戻されて馬島へ押し寄せられたケース(図21, 23)と小島に接近しすぎたケース(図21, 24)の二例がある。いずれの場合に於てもカンネの鼻からオコラ崎にかけての海岸線に沿って平均4ノットの潮流に抗して平行に針路をとっているが、オコラ崎の西方海域で右舷前方40度近くからの潮流を受けて左回頭と同時に西方へ急速な横流れをしている。その後、船首を立て直し小島南方の歪流に船を誘導して、再びそこから東の本流(8.5ノット)に突っ込むと大きな右回頭を受け乍ら東方へ大きく横流れしている。

西水道・南航・北流の実験

- 憩流中ではコノ瀬に接近して水道に入り込み、馬島オコラ崎より先では航路の略中央を通過して折線的に航過している。前述の北航の場合を逆行したコースを概ね辿っている(図25)。
- 1/2最強流(逆潮)中ではコノ瀬近辺で急激な潮向の変化により左舷回頭した後、船首を立て直し水路の真中を通過しているが、馬島スノ崎西方で左舷より潮流を受けて西方へ大きく横流れをしている。オコラ崎西方で船首を立て直した後は馬島西岸に沿って平行に航過している(図25, 26, 27)。
- 最強流(逆潮)中ではコノ瀬からオコラ崎西方にかけての船跡は1/2最強流中と同じコースを辿っている。しかしオコラ崎西方で7ノットに近い潮流を略船首方向から受け、それに抗しながら横流れしてオコラ崎に接近している。その後カンネ鼻に接近しつつある際にその北西海域にて左舷前方より8ノットを超える潮流を受けて急激な右回頭と右舷方向への横流れ(500m程度)をしながら船首を立て直しているが、その直後、今度は左舷方向への横流れで元の位置へ戻っている。左右に大きく蛇行していると言うよりはむしろ横移動しながらの水道航過である(図26, 28)。

2. 針路安定船の実験

前述の針路不安定船での実験では、屈曲のある西水道で特に危険が大きかった。そこで船の操縦性能がずっと優れている場合には、はたして海峡の通過は容易になり、且つ、可能になるであろうかの

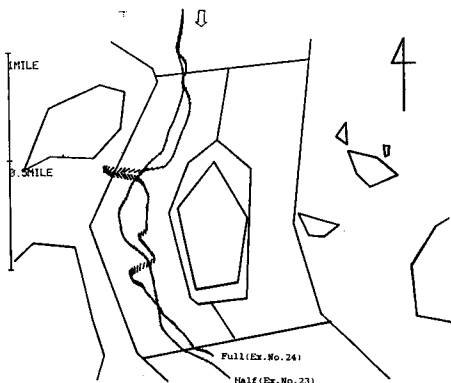


Fig. 29. Course-stable ship's trajectories of southward-bound navigation in Nishi-Suido at half (Ex. No. 23) and full (Ex. No. 24) of the highest speed of tidal stream.

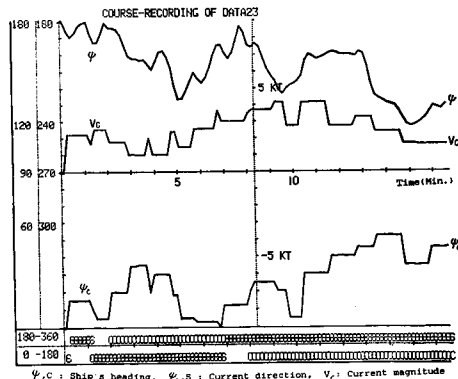


Fig. 30. Time histories of course-stable ship's heading and affected tidal stream (Ex. No. 23: at half of the highest speed) on southward-bound navigation in Nishi-Suido.

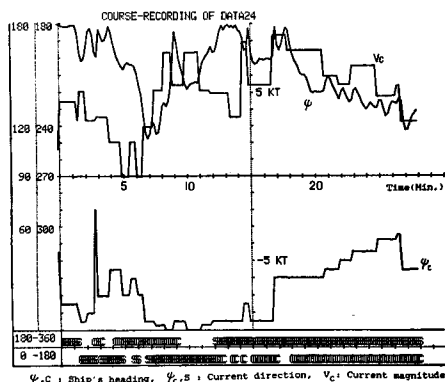


Fig. 31. Time histories of course-stable ship's heading and affected tidal stream (Ex. No. 24: at the highest speed) on southward-bound navigation in Nishi-Suido.

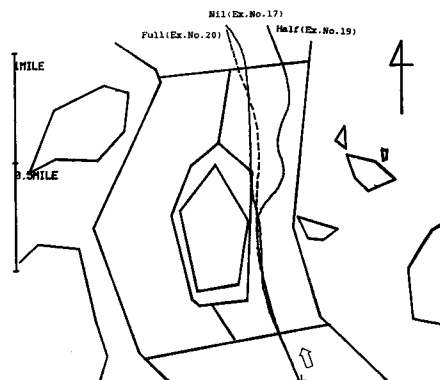


Fig. 32. Course-ultra-unstable ship's trajectories of northward-bound navigation by W1 deck officer in Naka-Suido at nil (Ex. No. 17), half (Ex. No. 19) and full (Ex. No. 20) of the highest speed of tidal stream.

疑問に答えるため、前と同一の操船者で針路安定船による実験を実施した。前述の実験中最も操船の難しかった西水道・南航について本船で試みた。憩流中では針路不安定船でも十分満足できる船跡で通過できていたので、こゝでは1/2最強流と最強流の逆潮中について実施した。

西水道・南航・北流の実験

○1/2最強流(逆潮)中では針路不安定船と大きくは違わない船跡で航過しているが、馬島北端スノ崎の西方海域での右舷方向(西)への横流れは、針路不安定船ほどには大きくならない程度に押えられている。その結果、馬島のオコラ崎とカンネノ鼻にかけての岸沿いの航路では、その略中央を

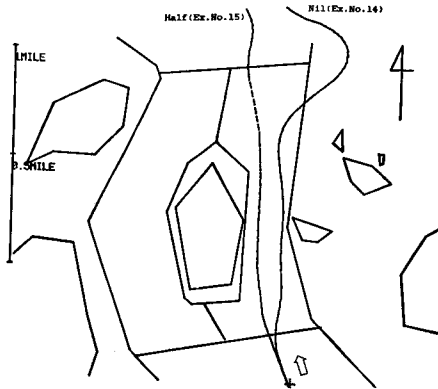


Fig. 33. Course-ultra-unstable ship's trajectories of northwardbound navigation by W2 deck officer in Naka-Suido at nil (Ex. No. 14) and half (Ex. No. 15) of the highest speed of tidal stream.

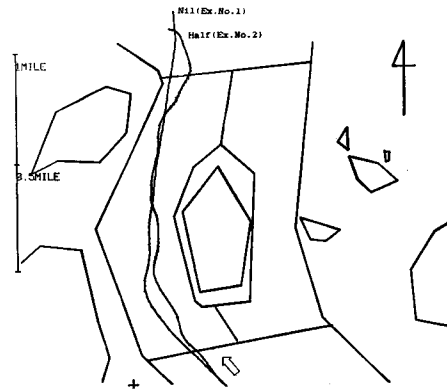


Fig. 34. Course-ultra-unstable ship's trajectories of northwardbound navigation by W1 deck officer in Nishi-Suido at nil (Ex. No. 1) and half (Ex. No. 2) of the highest speed of tidal stream.

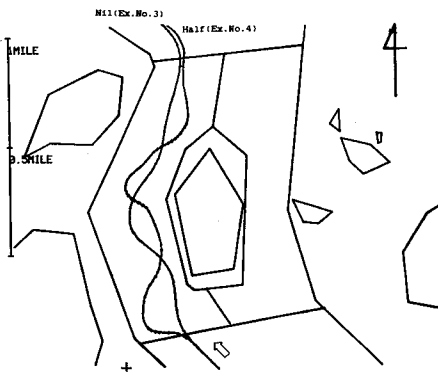


Fig. 35. Course-ultra-unstable ship's trajectories of northwardbound navigation by W2 deck officer in Nishi-Suido at nil (Ex. No. 3) and half (Ex. No. 4) of the highest speed of tidal stream.

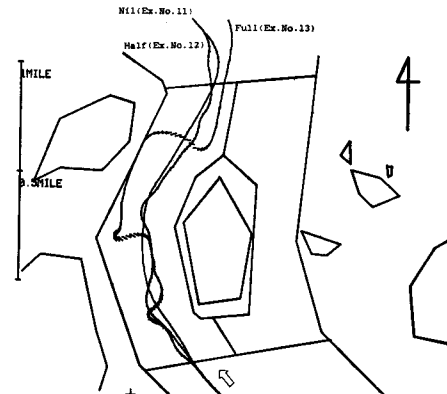


Fig. 36. Course-ultra-unstable ship's trajectories of northwardbound navigation by W3 deck officer in Nishi-Suido at nil (Ex. No. 11), half (Ex. No. 12) and full (Ex. No. 13) of the highest speed of tidal stream.

蛇行しながら約3ノット強の潮流に抗して通過している (図 29, 30)。

- 最強流 (逆潮) 中では針路不安定船と同様な航跡を残してオコラ崎西方海域で右舷方向への大きな横流れを行っているが、それ以降におけるカンネノ鼻西方での横流れは左程大きくはなく、前述の1/2 最強流の船跡に接近して通過している。

3. 針路超不安定船の実験

前述の2種の実験では、操船者は同一の人物であった。この操船者が別人物と代ればその技量も変

鳥野：不均一潮流中での船体操縦に関するシミュレータ実験

わり、その結果、水路航過の様子も変わったものになるであろうから、その影響も調査しておく必要がある。操船者の技量の差を顕著に出そうとすれば、操縦の難かしい船を対象とすれば良いであろうし、また操縦性能が特に悪い船舶も海峡を通過していないとも限らないので、これら二点を考慮して針路超不安定船での実験を試みてみた。定常旋回特性で不安定ループ幅が ± 6.5 度（舵角）のものを用意し、操船には神戸商船大学練習船（360GT）の経験者3名（W1氏、W2氏、W3氏）が当たった。実施した実験は中水道・北航・北流および西水道・北航・南流についてである。

中水道・北航・北流の実験

- W1 航海士に於ては憩流、1/2 最強流および最強流中の3種の潮流について実験を行った。いずれの場合にも馬島・中渡島間の最狭部でかなり西方（馬島ナガセ鼻）に寄った地点を通過しており、それ以降の船跡は憩流および最強流中では略同じコースを、また1/2 最強流中では航路の東寄りと略中央を蛇行して通過している（図32）。
- W2 航海士に於ては憩流中で航路から東へはみ出る船跡を画いており、次いで1/2 最強流中では航路の西寄り略中央をスムーズに通過している（図33）。

西水道・北航・南流の実験

- W1 航海士に於ては憩流および1/2 最強流中の潮流について実験を行った。憩流中にては折線に近い船跡を画いている。また1/2 最強流中中にも憩流中の船跡の略近くを小島の東島尻鼻あたりまで辿り、そこからは潮で東へ流された船跡を画いている（図34）。
- W2 航海士に於ては憩流と1/2 最強流中での実験を行った。憩流中にては馬島オコラ崎あたりまでの初期の操船では蛇行を行っているが、その後の船跡は直線に近い。1/2 最強流中にては憩流中の船跡を縫うような蛇行をしている（図35）。
- W3 航海士に於ては憩流、1/2 最強流および最強流中での3種の実験を行った。憩流中にては折線コースというよりはむしろ滑らかな曲線と言える船跡を画いている。また1/2 最強流中にては憩流中の船跡と大きく違わない航路を辿っている。しかし、最強流中では馬島オコラ崎沖での西方への大きな横流れ及び小島南方の歪流を出た途端の東方への大きな横流れがあり、この船跡は針路不安定船の場合と同じ様子を呈して航過している。なお、W3 航海士とその操舵員の一組は、練習船専属の熟練した乗組員であることを付しておく（図36）。

結果の考察

本論文に述べたシミュレータ実験の結果から考察すべき事項として、大きくは次の3項目が挙げられる。

- 1) 不均一潮流中の船体操縦運動の特質について
- 2) 潮流下での操船を模擬する操縦シミュレータのリアリティについて
- 3) 実験結果に基づいて評価される航過可能な操船と潮流限界について

先ず、船体運動について結果を考察してみる。本研究では実際の操船経験から出てきた来島海峡の順中逆西航法を取り上げてみた結果、直線コースでの順流中の操縦（中水道に関する実験）は対地船速が速いために操船者に十分な緊張感を与えたが、操船困難には落入らない場合が多かった。しかし、中水道・北航・北流の最強流中（図12）における様に順流航走中の操船では、右舷（又は左舷）からの潮流は右舷（又は左舷）前方からの船体への流れとなり、左回頭（又は右回頭）を誘起する場合がある。従って潮向の変化は大きな回頭運動と流れに伴う大きな船位変化を起すので余程の注意が必要である。

一方、屈曲コースでの逆流中の操縦（西水道に関する実験）は、大きな横流れ運動を誘起している。例えば西水道・北航・南流の最強流中（図 21）に於て左舷へ大きくシフトした。その第一原因は勿論のこと潮流である。しかしこの主要因の他に、本シミュレータでは船橋から潮の流れを察知できない状況下にあるために、実際とは違う操舵遅れも大きな原因の一つであろう。現実には潮の流れを可視できるので、この場合にも馬島に沿って流れる本流に抗して馬島を廻り込むように操船すれば航過は可能かもしれない。しかし、それにも十分な熟練度を要し、又一つ誤まれば危険に遭遇する可能性も大であり、安全な状況とは言い難い。西水道・南航・北流の最強流中の実験についても同様なことが言える。

こゝで述べたように、行った実験の操縦運動は最強流中に於て危険なものであった。この結果は、不連続な潮流分布の下では本当のものに近いかもしれないが、連続的な潮流分布に近い現実の流れの下では実際に近い操縦運動を表わしているとは言えないので、潮流分布の与え方および運動方程式に基づき計算法等についての検討を必要とする。

潮流と操船限界の関係について3船の実験結果を概観してみると、針路不安定船実験からは1/2最強流までの潮流では大きな支障なく航過できるようであった。針路安定船実験からは、前述の針路不安定船と比較して特に最強流中での操縦が楽になることが顕われた。1/2最強流以下の場合でも差があるのだろうが顕著でない。操縦性能の差は危険な限界状態で顕われてはいるが、それでも最強流下では危険を伴わない航過はできないようである。針路超不安定船実験からは適当な操船訓練を経れば概ね1/2最強流までは差支えなく航過できることが分った。しかし最強流下では最も熟練していると思われる操船者（W3）でさえも安全な航過は無理であった。こゝでも船舶操縦性能の差異は危険限界で顕われていることが他船の運動との比較によって検証されよう。又、操船者各個人においてシミュレータ操船への適応性や操船技量に多少の差はあっても航過の結果に大きな差はないようである。これは船の操縦性能の差の効果と同じく、危険限界以内では人間の適応能力・補償能力が優れているためであろう。

なお、本論文の船長50mの船舶について行ったシミュレータ実験は、来島海峡通過を例にとりて、それに与える 1) 潮流の影響 2) 順潮・逆潮の影響 3) 船の操縦性の影響 4) 操船者の熟練度の影響等について検討できる資料を得たが、シミュレータによる調査にはその装置の性能等が大きく作用するであろうから、今回使用のシミュレータに係わる次に述べる重要な実験条件（制約条件）は、実験結果に重大な影響を与えているであろう。

- 1) 潮流は格子状に分割された各海域内で一定として、不連続な分布をしている。
- 2) 潮流の分布に関する操船者への情報は、模擬船橋前方のビジュアル装置からも、また別の装置からも与えられていない。
- 3) 模擬船橋前方約1,000m以内の風景は見えず、視野は±45度以内であって、正横方向の景色情報は得られない。
- 4) 眼高は62mにある。
- 5) レーダ映像には、水路内の重要地点8点のみが表示される。

特に1)の潮流分布は船跡図における急激な船体の横移動等に直接影響しており、また2)の潮流情報は操舵遅れに影響しているようである。

以上のように今回使用の操縦シミュレータは定量的調査の目的からしては制約が大きく、その実験結果は現実と懸け離れている恐れもある。しかし定性的には諸々の事柄を説明しているであろうし、また現実には不可能に近い状況での操船が実験可能であるシミュレータの特長を考え併せると今後の改良によって有効な利用が考えられる。

操船における航過可能の評価についても客観的な評価が望まれるが、一般に操船自体が型にはまったものでなく操船者固有の方法で臨機応変に自由に行われるので評価基準を定めることが難しい。

今回の実験も操船者の自由裁量に任せる所が殆んどで、舵角・針路・変針位置等の規制を行わずに現実の操船条件で実施した。このため本論での航過に対する評価も客観性に欠いた主観的な評価に留まったが、今後規制を設けた実験と比較して検討する必要がある。

結 論

考察で述べたシミュレータ実験の条件下で得た来島海峡通過に関する結論は次のようになる。

- 1) 現在の順中逆西の航法に於ては、潮流の強さが最強流の 1/2 程度迄であれば無難に航過できるが、最強流中では危険である。
- 2) 操縦性能を針路安定船、不安定船および超不安定船の 3 種に変えた結果は、不安定性が増すほど蛇行する傾向にあるが、最強流の 1/2 程度迄の潮流では大差が顕われなかった。しかし最強流中では差が大きく出た。これは操船限界に近くなるまでは、人間は結構船の針路不安定性を補償する能力を発揮しているものと思われる。
- 3) 操船者の熟練度が変わっても最強流の 1/2 程度迄の潮流中では無事に航過できる。最強流中では小型船の操船に十分慣れている者でさえも操船困難であった。

以上のシミュレータ結果と対比して現実には最強流に近い潮流中に於ても船舶が通過している事実を考慮すると、今回のシミュレータ実験は実際と隔てる実験条件が厳しかったことを裏付けるのであろうか。その原因の一つと思われる不連続な潮流分布を連続的なものに改めた実験を今後試み、実際との対応を把握したいと考える。

終に臨み、設備使用に心よく御承諾戴き、また実験に際して御協力を惜しまなく下された神戸商船大学の各位および神戸海難防止研究会の各位に深甚の謝意を表したい。更に、本研究の遂行に当って十分な御配慮を下された当講座主任 高橋広弥先生に深く感謝する次第です。

文 献

- 1) 本田啓之輔・橋本 淳・松木 哲・間渕重昭・原 潔・三好雄一・鳥野慶一・小須田 敏 (1980). 狭水路操船シミュレータの試作研究. 神戸商船大学紀要 商船・理工学篇 28, 35-50.
- 2) 小川陽弘 (1977). 強潮流域における船の転覆について — Shear Flow 中の船体運動の計算による解析 —. 日本航海学会論文集 57, 119-128.
- 3) 小瀬邦治・湯室彰規・芳村康男 (1981). 操縦運動の数学モデルの具体化 — 船体, プロペラ, 舵の相互干渉とその表現法を中心に —. 日本造船学会第 3 回操縦性シンポジウム, 27-80.
- 4) 鳥野慶一 (1981). 規則波中の操縦運動シミュレーションとその応用 (1) — 潮流・波浪・風圧・曳索力下での運動方程式 —. 神戸商船大学紀要 商船・理工学篇 29, 9-19.
- 5) 海上保安庁 (1964). 来島海峡潮流図. 海図第 6208 号.
- 6) 木村久雄・宮原英治・須藤 茂・紫山煒彦・浜田徳一 (1971, 1972). 来島海峡潮流模型実験 (第 1 報, 第 2 報). 港湾技術研究所報告 10, 11, 3-66, 167-241.
- 7) 木村久雄・福森利夫・佐野喜久雄 (1974). 来島海峡潮流模型実験 (西水道). 港湾技研資料 182, 1-115.
- 8) 小瀬邦治・中渡道夫・佐伯敏朗 (1978). 加速・減速中の船に作用する流体力と操縦性. 第 53 回 JTTC 第 2 部会資料