

実習生の操舵特性に関する研究*¹

川崎潤二*²・下川伸也*²・鎌野 忠*³・酒井健一*⁴・濱口正人*²

A Study of the Characteristics of Manual Steering by the Student

Junji Kawasaki*², Shin-ya Shimokawa*², Tadashi Kamano*³,
Ken-ichi Sakai*⁴, and Masato Hamaguchi*²

The purpose of this study is to consider the learning processes of the students, who are undergoing the training of ship handling techniques. Safety at ship handling depends on the skills, which can only be acquired by careful attention to details and by experiences. An investigation was made on manual steering of ship's course keeping. Yaw and rudder angle were measured simultaneously while students, who are on board training, steer the training ship "Tenyo-maru" (716GT). Also on board experiment were carried out by using "Konpeki" (12GT). As the results, the response times of the steering correspond to changing the yaw angle were estimated and the differences in ability among students could make clear. The characteristics of these differences could be classified into 4 patterns. These results indicate the possibility put to practical use for the training of ship handling techniques.

1 緒 言

船舶運航において、一定針路を保持して航海するという状況では、一般にオートパイロットが用いられる。しかし、船舶が輻輳する海域の航行や出入港時の操船においては、運航の安全性を確保するために熟練した操舵手による確な操舵が欠かせない。手動操舵中には、操舵手は船首方位変化を注意深く監視し、波浪や風等の外力に対して当て舵を取るなど、操舵がたえまなく行われており、操舵手が経験的、感覚的に取得した技能であるということが出来る。

船舶運航に関する教育訓練において、操縦、すなわち計画航路に対して操舵、主機操作等により針路、速力、船位制御を行う技術は、訓練対象技術として重要視されている¹⁻³⁾。しかし、実習生または教官側においても、訓練の目標とする技術内容や技術レベルについて主観的判断に基づいているのが現状である。その主な理由として、冒頭で

述べたような経験的、感覚的に取得された技術については、指導を行なう際に具体的な指標を提示するのが難しいことが挙げられる。また、効果的な訓練方法を検討する上で、実習内容の理解度や技術習得状況に、実習生毎の個人差があることを十分考慮する必要がある。

設定針路に対し偏差を小さくする、つまり一定針路を保持するという目的で、自動操舵に関する研究が多く行われており、自動操舵技術開発の過程で手動操舵との比較もされている^{4, 5)}。しかし、人間(操舵手)と機械(自動操舵)の特性、言い換えれば、操舵手の技能と自動操舵技術の比較において、偏差の大小という性能評価に重点が置かれており、操舵手の技能を対象に分析した研究は少ない⁶⁻¹⁰⁾。これは、操舵手が経験的あるいは感覚的に取得した、操舵に関する技能の全体像を解明することは容易ではないからであろう。

本報告では、水産大学校練習船及び小型実習艇による実習航海の途次に、保針操舵を対象に実船実験を行い、実習

2002年11月8日受付。Received Nov. 8. 2002.

* 1 本報の要旨は平成13年度日本水産工学会学術講演会において発表した。

* 2 水産大学校海洋生産管理学科運航システム学講座 (Laboratory of Nautical Science, Department of Fisheries science and Technology, National Fisheries University).

* 3 水産大学校練習船耕洋丸 (Koyo-maru, National Fisheries University).

* 4 水産大学校練習船天鷹丸 (Tenyo-maru, National Fisheries University).

生の操舵特性について解析した結果、前述の指標並びに個人差に関連して、若干の知見が得られたので報告する。

2 実験方法

実験は、水産大学校練習船“天鷹丸”による海洋生産管理学科3年生を対象とした実習航海（第107次航海，平成12年8月22日～同年9月9日），及び同校実習艇“紺碧”による同学科4年生を対象としたセミナーにおける関門海峡通峡航海（平成13年5月28日，同年6月11日）で行った。“天鷹丸”及び“紺碧”の主要目をTable 1に示す。

“天鷹丸”での実験は，下関港を出港し，東シナ海でトロール操業，海洋観測を経て石垣港までの往復航海中，船橋当直に入った実習生を対象に，手動操舵中の舵角（ δ ）と船首方位（ θ ）を計測，記録した。舵角の測定には舵角指示器からの電圧信号を用い，船首方位は磁気方位センサ（株式会社トキメック，TMOS-2010G5型）を用い測定を行った。1回の操舵時間を15分間とし，一定針路を保持中のデータを扱った。また，実習生との比較を行うため，同練習船の操舵手（Q/M）による操舵についても同様な実験計測を行った。実験により得られたデータは，実習生44名，延べ222計測，操舵手3名，延べ15計測の計237計測であった。実験時の風力は，237計測中，ビューフォート風力階級で風力1が4計測，風力2が27計測，風力3が92計測，風力4が95計測，風力5が19計測であり，相対風向は向い風（船首に対して $-30^\circ \sim +30^\circ$ ）であった場合が161計測，斜め向い風（ $-60^\circ \sim -30^\circ$ ， $30^\circ \sim 60^\circ$ ）が57計測，横風（ $-120^\circ \sim -60^\circ$ ， $60^\circ \sim 120^\circ$ ）が19計測であった。実験は，乗船した実習生全員を対象に行ったが，甲板作業や操業・観測など課業の都合により，Table 2に示すように実習生の訓練回数は各人によって異なり，2回～8回となった。同表においては，訓練回数が2回目のデータ数が計44，そして訓練回数が2回であった実習生が44名の内3名といったように，訓練回数毎のデータ数と実習生毎の訓練回数か示してある。訓練中，他船に対する避航動作や，実習生の手動操舵により目標針路からの偏差が大きくなり当直士官や操舵手により指導が行われるなど，針路保持以外の目的で操舵される場合があった。そのようなデータ区間を除いて，15分計測の内，約7分間（ $N=2048$ ， $\Delta t=0.2$ （sec））を解析対象とした。ここで N はデータ数， Δt はサンプリング間隔を示す（以下同じ）。

Table 1. Principal particulars of “Tenyo-maru” and “Konpeki”.

	“Tenyo-maru”	“Konpeki”
L_{oa} (m)	62.60	15.55
L_{pp} (m)	56.50	13.35
B (m)	10.40	3.40
D (m)	6.45	1.49
W (ton)	1,337.81	17.48
d_f (m)	2.92	0.62
d_m (m)	3.95	0.74
d_a (m)	4.98	0.85
Trim (m)	0.95 aft.	0.23 aft.
Rudder area ratio	1/ 37.55	1/ 20.72
C_b	0.596	0.456
C_p	0.684	0.725

Table 2. Number of measurements in each student on board training “Tenyo-maru” and “Konpeki”.

Times of training	Students		No. of measurements	
	“Tenyo-maru”	“Konpeki”	“Tenyo-maru”	“Konpeki”
1	—	—	44	7
2	3	—	44	7
3	1	2	41	7
4	14	4	40	5
5	10	1	26	1
6	6	—	16	—
7	9	—	10	—
8	1	—	1	—
Total	44	7	222	27

“紺碧”による関門海峡通峡航海は，水産大学校棧橋～関門航路内釜床ノ瀬の往復航海であり，航海計画立案から実航海に至るまでを，実習生が自力で達成することを目標に行っている¹³⁾。同航海中，一定針路を航行中に，実習生の手動操舵における舵角（ δ ）と船首方位（ θ ）を計測記録した。舵角及び船首方位は，“天鷹丸”での実験時と同様に，それぞれ舵角指示器からの電圧信号，磁気方位センサにより測定した。そして，漁具や他船に対する避航，あるいは針路修正のための操舵が行われた区間を除くデータ（ $N=600$ ， $\Delta t=0.2$ （sec））を解析対象とした。Table 2に示すように，平成13年度に実施した2回の航海によるデータ数は27計測であった。実験時の気象海象は，5月28日，6月11日共に風向Nth，風力1，海況1であり，関門海峡通峡に際しては潮流の影響の少ない転流時に実験を行った。なお，解析の対象とした実習生計7名全員が，平成12年度の天鷹丸による実習航海に乗船している。

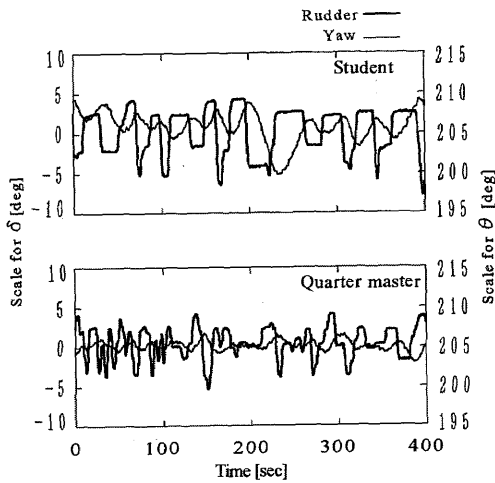


Fig. 1. Time series data with yaw and rudder angle. Steering by student and quarter master of the training ship "Tenyo-maru".
 Note θ : Angle of ship's head (Yaw)
 δ : Rudder angle (Rudder)

3 結果

3.1 計測例及びデータのばらつき

計測例として、Fig. 1に操舵手及び実習生による操舵時の舵角と船首方位の時系列データを示す。同図において横軸は経過時間、縦軸は舵角及び船首方位を表す。これら2つの計測例は、実習生が操舵を行った後、引き続き操舵手が操舵を行った例で、設定針路は共に305°、風浪を船首方向から受けている状態、風速は10.5m/sであった。実習生、操舵手の操舵を比較すると、実習生は舵角を概ね左右5°以内で操舵を行っているが、船首方位の変動に合わせてゆっくりとしたペースで操舵している。また、設定針路からの偏位が比較的大きく離れてから操舵を行う傾向がある。これに対し操舵手による操舵は、船首方位変化への対応が早く、船首方位の振幅は実習生と比較してかなり小さく抑えられていることが分かる。

舵角と船首方位のばらつき度の指標として標準偏差を求めた。Fig. 2の散布図において、横軸に舵角、縦軸に船首方位を示す。同図の操舵手による操舵では、舵角が1°~2.5°の範囲において、船首方位は1.5°以下の低い値に抑えられているのに対し、実習生の操舵による舵角と船首方位のばらつきは大きく、船首方位の標準偏差では5°を超える計測もあった。

3.2 操舵特性の検討

舵角と船首方位の変動の相関性について相互相関係数により検討を行った。ここでは舵角(δ)と船首方位(θ)

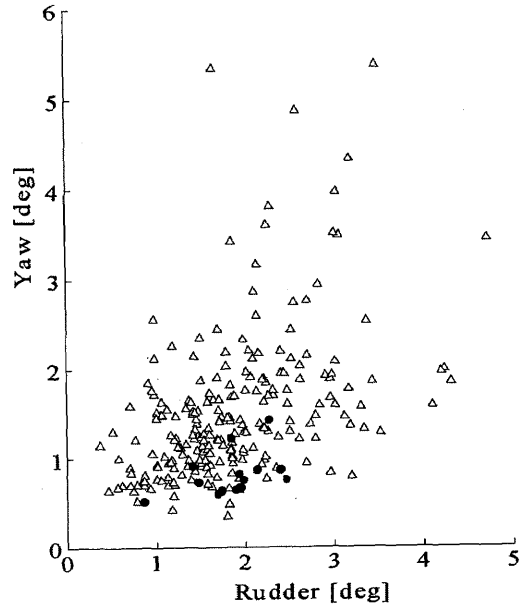


Fig. 2. Standard deviation of yaw and rudder angle.
 Note \triangle : Students (N=222)
 \bullet : Quarter master (N=15)

の変動において、船首方位を入力、舵角(操舵)を応答出力とした入出力関係を次式により定義した。

$$\rho_{\theta\delta}(\tau) = \frac{\overline{\delta(t+\tau)\theta(t)}}{\sigma_{\delta}\sigma_{\theta}} \quad (1)$$

ここに、 $\theta(t)$: 船首方位(θ)の時系列

$\delta(t)$: 舵角(δ)の時系列

$t : 1, 2, \dots, N$ (Nはデータ数)

τ : lag数

$\sigma_{\theta}, \sigma_{\delta}$: θ, δ の時系列の標準偏差

— : 時間平均

従って $\rho_{\theta\delta}(\tau)$ は、船首方位と舵角の時系列変化において、 τ 時間へだたった変化の相関性と考えることができ、この値が高いほど一連の動作が継続されていたことになる。Fig. 3は、Fig. 1に示した操舵手のデータを解析した結果である。 $N=2048, \Delta t=0.2$ (sec)のデータに対し、同図では相互相関係数を求める最大ラグ数 τ を±100(±20秒)としてある。針路保持のために、操舵者は船首方位の変動に対して、これを抑えるように操舵をする必要がある。Fig. 3に示すピーク①の横軸は、船首方位の変動に対する操舵の応答時間差、ピーク②においては過去の操舵に対する船首方位変化の相関、即ち同図においては10.8 (sec)前の操舵に船首方位の変動が相関を持っていると解釈することが出来る。

これら相互相関におけるピーク値についての計算結果を、Fig. 4-1及びFig. 4-2に示した。Fig. 4-1ではFig. 3

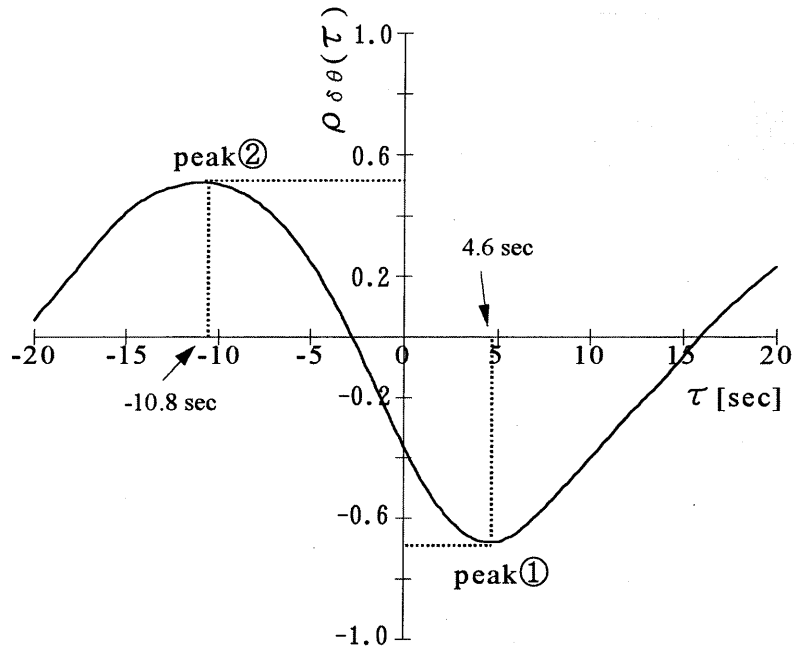


Fig. 3. Cross correlation function for characterization steering to the change of angle of ship's head.
 Note $\rho_{\delta\theta}(\tau)$: Cross correlation Coefficient with τ .
 θ : Yaw
 δ : Rudder angle
 τ : Time lag

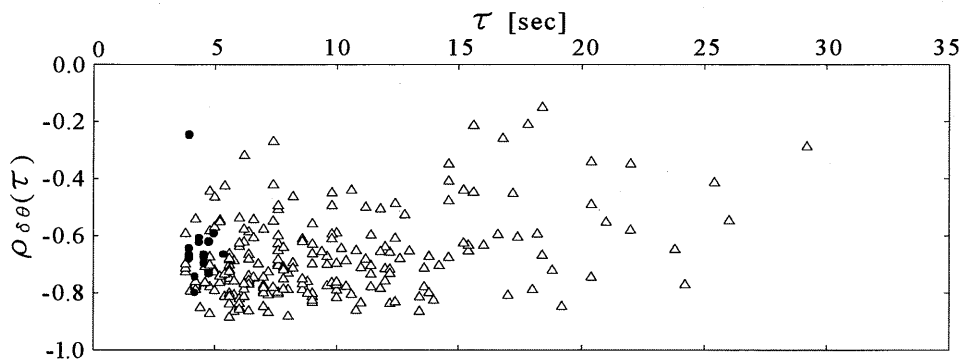


Fig. 4- 1. Time lag and cross correlation coefficient of the peak① in Fig. 3.
 Note \triangle : Students (N=222)
 \bullet : Quarter master (N=15)

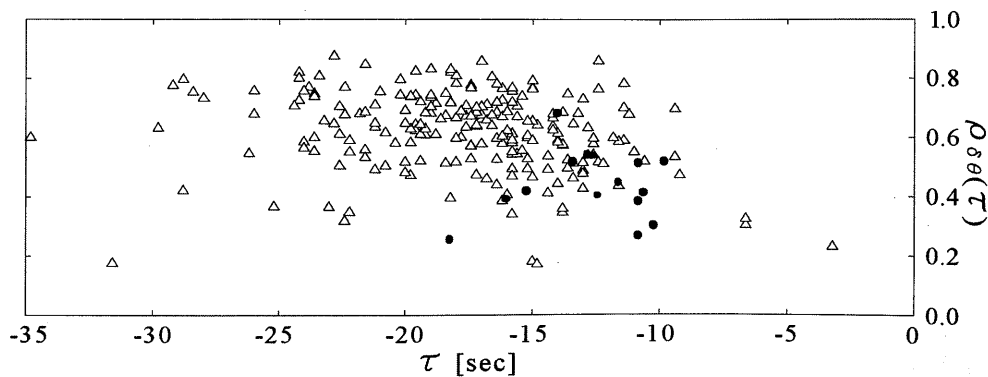


Fig. 4- 2. Time lag and cross correlation coefficient of the peak② in Fig. 3.
 Note \triangle : Students (N=222)
 \bullet : Quarter master (N=15)

におけるピーク②を、Fig. 4-2 ではピーク②の値を示す。同図において、横軸は応答時間差 (Fig. 4-2 では時間差)、縦軸は相関係数の値となっている。Fig. 4-1 に示すように、操舵手の応答時間差が4~5秒で一定しているのに対し、実習生の応答時間差は4秒から25秒の間に大きくばらついている。上述した応答時間差に関する解釈から、操舵手は船首方位の変動を予測し、迅速な操舵によりこれに対応しているのに対し、実習生は迅速な操舵を行っている場合と、対応に時間がかかる場合とがあることになる。Fig. 4-2 の操舵に対する船首方位変化の時間差は、Fig. 4-1 の応答時間差と比較して長くなっており、10~15秒とばらついている。以上のことから操舵特性について考察すると、手動操舵による針路保持は、船首方位の変化に対し、舵をとるまでの時間 (応答時間差) に適正值 (ここでは4~5秒) が存在する。そして船首方位の設定針路に対する偏角の大きさ、または操舵による船首方位の変化の度合いを観察し、舵を戻すタイミングを変化させていると考えられる。

3.3 学習効果及び個人差

操舵訓練における実習生の学習特性を調べるために、Fig. 4-1 に示したピーク①を実験回数毎に並べ替えたのがFig. 5である。横軸が実験回数、縦軸が応答時間差となっている。ここで、実験回数毎の計測数は表2に示すように

個人によって異なることから、訓練回数が増えるにつれ計測数は少なくなっている。同図において、応答時間差の長い10~20秒のデータ数の割合は、回数を重ねるにつれ減少傾向にあるが、20秒前後のデータがばらつくなど計測データ全体としては顕著な変化はみられない。そこで個人による特性を見るために、訓練回数が5回以上であった実習生26名について、訓練回数毎の応答時間差の変化について調べた結果、Fig. 6 に示すように学習特性をパターン化することが出来た。すなわち、応答時間が4~10秒以内に安

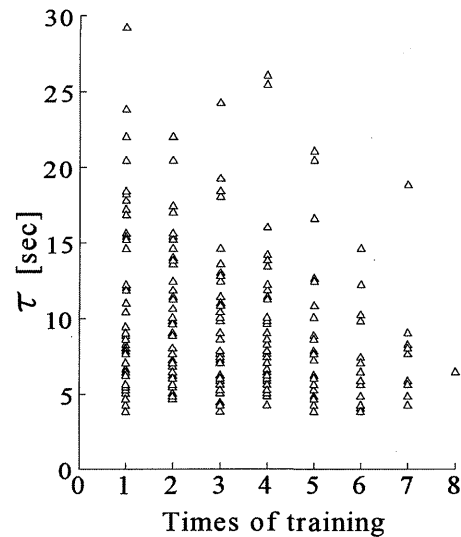


Fig. 5. Time lag τ in each times of training.

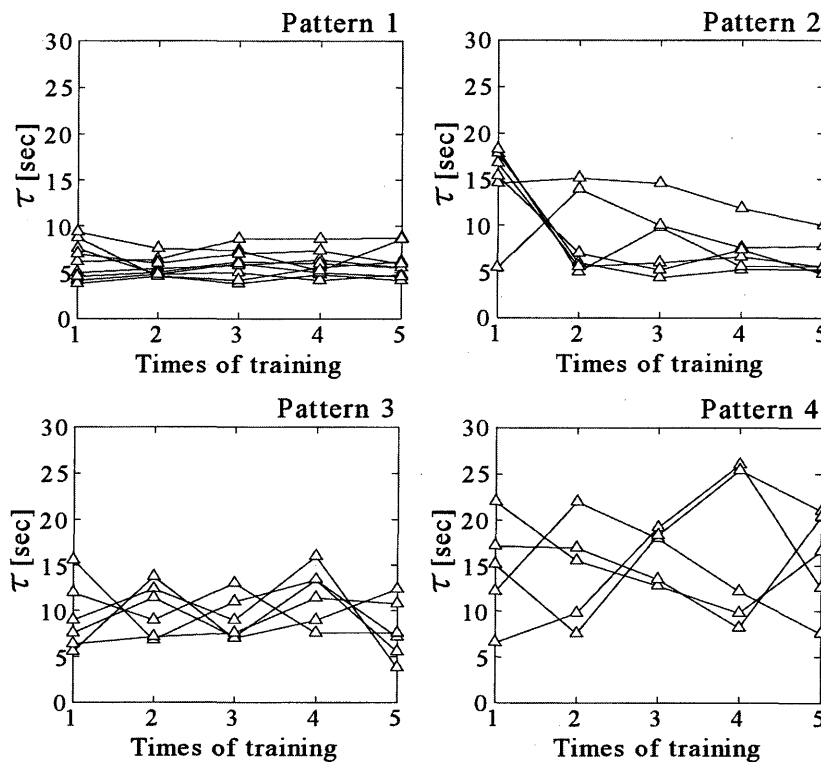


Fig. 6. Characteristics of learning process in each student classified into 4 patterns.

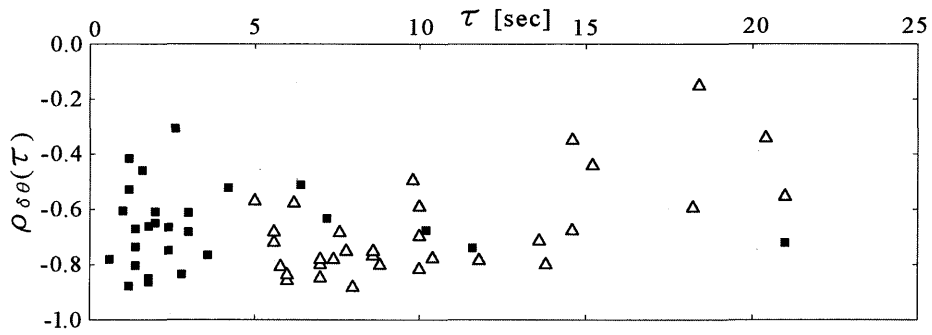


Fig. 7. Comparison of the response characteristic (peak① in Fig. 3) of students between in “Tenyo-maru” and in “Konpeki”. Students (7 persons) are the same in the two ships.
 Note \triangle : “Tenyo-maru” (N=33)
 \blacksquare : “Konpeki” (N=27)

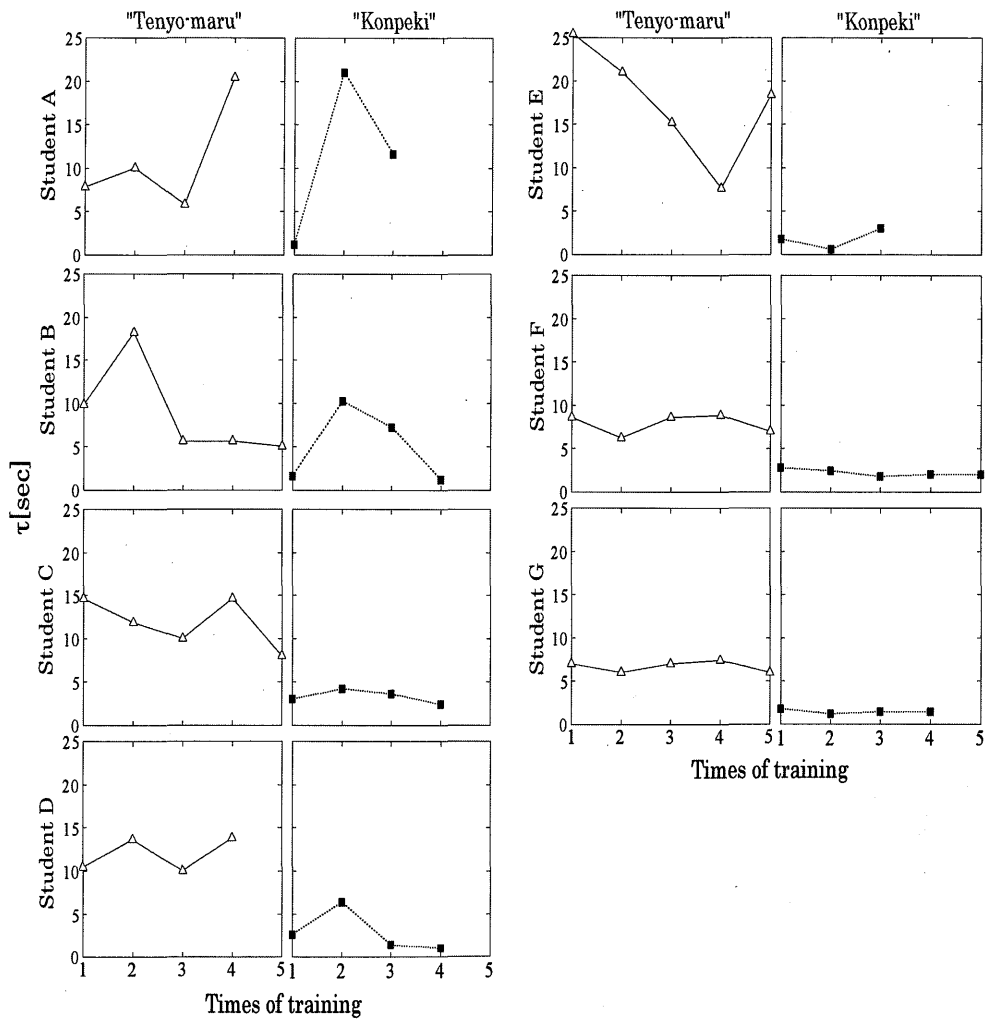


Fig. 8. Comparison of the characteristics of learning process of students between in “Tenyo-maru” and in “Konpeki” .

定して推移している“パターン1”（9名）。多少の増減はあるが操舵訓練を重ねるにつれ応答時間が短くなっている“パターン2”（6名）。訓練回数毎に応答時間が増減する“パターン3”（6名）。極端に応答時間が大きい“パターン4”（5名）、の計4パターンである。

3.4 船型の大小による操舵特性

船型の大小による実習生の操舵特性の相違について検討するため、“天鷹丸”と“紺碧”の実験結果を比較した。両船において計測の対象とした計7名の操舵特性をFig. 7に示した。ここで相互相関を計算する際，“紺碧”のデータは、 $N=600$ 、 $\Delta t=0.2$ とした。同図において“紺碧”では、応答時間差が10秒前後に数例がばらつくものの、概ね1秒から6秒であった。それに対し“天鷹丸”では、“紺碧”と比較して応答時間差が大きく、ばらつきも5秒から20秒と大きい傾向があり、船型の大小による船首方位変動の周期の違いが応答時間差に反映していることを示している。

7名の実習生をそれぞれ実習生A～Gとし、“天鷹丸”と“紺碧”での操舵訓練の学習特性について比較を行った。その結果をFig. 8に示す。実習生Aの学習特性は“パターン4”、実習生Bは“パターン2”、実習生F及びGが“パターン1”と、“天鷹丸”、“紺碧”の両船で同様の特性を示している。他の実習生においては、実習生C、Dは、“天鷹丸”では両者とも“パターン3”、実習生Eは“パターン4”の学習特性であるのに対し、“紺碧”では、実習生Cが“パターン1”、実習生Dが“パターン2”、実習生Eは“パターン1”と両船で異なった特性を示した。従って、比較の対象とした実習生7名中、船型の大小に関わらず、操舵訓練における学習特性が同じパターンを示す実習生が4名、船型が大きい“天鷹丸”では応答時間差が

大きい等、学習特性が劣っていた傾向を示したにも関わらず、船型の小さい“紺碧”では応答時間が短く安定している傾向を示す実習生が3名という結果であった。両船での操舵特性に変化が見られた実習生については、“天鷹丸”では3年生の乗船実習中に、“紺碧”では4年生時に操舵訓練を行っている。従って、両船で異なった学習特性を示した実習生については、“天鷹丸”での操舵訓練による学習効果が、“紺碧”での操舵訓練に反映していると考えられる。

4 考察

本報告では、操舵による船首方位変化への対応に関して、船首方位の変化を入力、操舵を応答出力とした応答系を定義し、入出力関係について練習船操舵手による操舵を分析した結果得られた数値を、実習生が目標とする指標とし、実習生の操舵結果と指標を対比させることで、実習生全体の傾向や個人差について検討を行った。ここで、練習船での訓練中、実習生は練習船操舵手の操舵を手本に訓練を重ねたという観点から、今回の解析では練習船操舵手の操舵を指標として取り上げた。

船首方位、または舵角の時系列データのパワースペクトルは、横揺れ、縦揺れなど他の船体運動と比較して、長周期の周波数帯にパワーを持つことが知られている¹⁹⁾。従って、保針操舵中の、舵角と船首方位の応答関係を周波数領域で考えた場合、パワーの大きい長周期帯での応答特性を検討することになる。操舵者は、周期的に変化する船首方位の変動をおさえるために、設定針路に対して船首方位との偏差が最大振幅になる前に舵をとる必要がある。今回行った解析では、船首方位と舵角の時系列間には一連の応答時間差（位相差）が発生していると考え、その応答時間差を

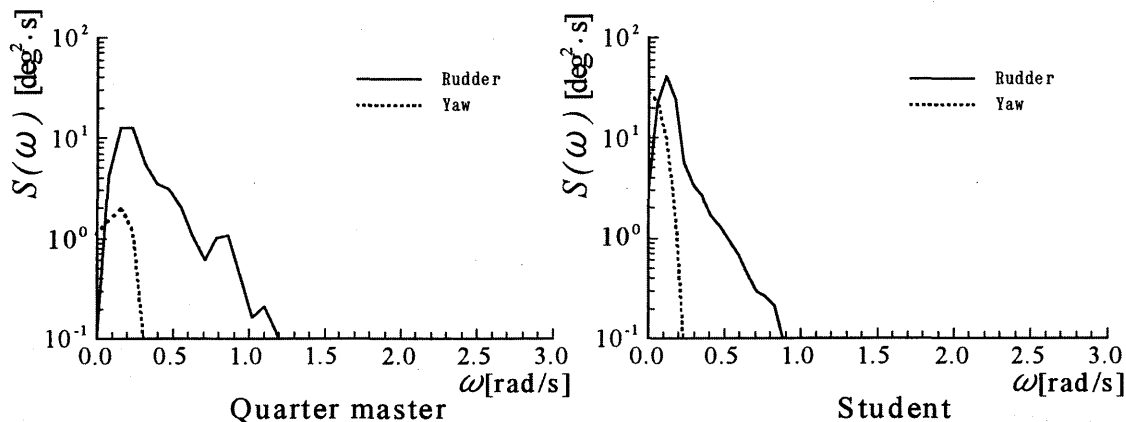


Fig. 9. Power spectrum of rudder angle and yaw.

定量的に捉えるために(1)式を定義し、応答関係の把握を試みた。今後、操舵特性の全体像を明らかにするには、前記した偏差の問題を含めて、様々な視点での分析が必要であろう。

ここで1例として、Fig. 1 に示した練習船操舵手と実習生の船首方位、舵角の時系列変化のパワースペクトルをFig. 9に示す。両者の操舵をパワースペクトルのピーク値で比較すると、練習船操舵手の舵角、船首方位共に、実習生に比べて長周期帯におけるエネルギーレベルが低く抑えられている。時系列データを見ても、実習生は船の回頭運動を抑えるために常時左右に舵をとっていること、そして舵角や船首方位変動は振幅が大きく、明らかな周期性を持っていることが確認できる。練習船操舵手は、針路が一定値以内にある時には舵を中央付近とし、一定値以上外れた時には、短時間のパルス状の操舵によって設定進路に船首方位を復帰させている。操船シミュレータを用いた実験結果として、針路保持における人間の操舵（制御）パターンにはバンバン制御、PD制御、零付バンバン制御といった、いくつかのパターンがあることが報告されている⁷⁾。ここでバンバン制御は、針路不安定な船や操舵の困難な船の操舵で観察されており、船の回頭運動を小さなリットサイクル状態に維持するように、左右の操舵を交互にとる操舵法であり、PD制御（比例+微分制御）は設定進路に船首方位を復帰させるためにコンパスの動きに追従して操舵を行うことから、操舵頻度が非常に高くなる傾向がある。また零付バンバン制御は、針路安定性の良い船で観察され、直進付近に安定釣合いの状態があり、この状態を維持することにより、比較的少ない回数の操舵で針路を保持する操舵法とされる。これら知見と照合すると、練習船操舵手は零付バンバン制御を行っているのに対し、実習生は直進付近の安定釣合いの状態を意識できずに操舵しており、船首方位と設定針路の偏差が一定の周期を持って大きくなるなど、結果として操船困難な船の操舵に見られるバンバン制御となっていると考えられる。

操舵訓練における実習生の学習特性（“パターン1”から“パターン4”までの4つのパターン）中、“パターン1”の実習生は、訓練中を通じて、船首方位の変動を注意深く観察し、船首方位の振れを予測しながら適切な舵をとっており、“パターン2”では、訓練を重ねるにつれ“パターン1”の実習生と同様、適切な操舵が行えるようになっていく。“パターン3”、“パターン4”の実習生は、操舵する上で波浪や風等、外力の影響や、船首方位変化の予測に基づいた、適切な操舵が出来ていない。しかも操舵訓練

による顕著な学習効果も観察されないことから、“パターン3”、“パターン4”の学習特性である実習生に対する訓練方法を再検討する必要がある。訓練方法としては、乗船実習で操舵訓練を行う前に、操船シミュレータで訓練を実施し、外力の影響や船首方位変化の予測など、操舵する上で必要な知識を熟知させることが有効であると考えられる。また、船橋で行われている他の作業に気を取られる、見張りをしている実習生と会話を交わすなど、操舵訓練中に注意散漫になる実習生は、“パターン3”、“パターン4”の学習特性を示す傾向にあった。このような実習生は、操舵を任されているという責任感を持つ必要があり、そのためには、まずは実習生自身が訓練に対する問題意識を高める必要がある。

今回行った実験では、“天鷹丸”では多くの計測が船首方向から風波を受けており、操舵特性と気象海象条件との関連については検討されていない。また、“天鷹丸”で計測を行った海域は陸地や物標等が視界に存在しない沖合海域であったのに対し、“紺碧”で計測を行った海域は沿岸域であったこと、特に関門海峡内では重視目標や灯浮標など、操舵を行う上で周囲に目標物があるなど、航行環境が実習生の操舵特性に及ぼす影響については明らかにできなかった。これら外力または航行環境の影響を含め、今後更に調査研究を行うことで、より効果的な教育訓練を実施する上での具体的な指標や訓練方法について明らかにする必要がある。

5 結 言

操船技術習得のための効果的な訓練方法を検討する上で、実習生の目標となる指標及び技術習得における実習生の個人差を把握することを目的に、実習航海での操船訓練を対象に実船実験を行い、操舵特性について分析を試みた。結果を要約すると次のようになる。

- 1) 時系列データの観察では、実習生と比較して操舵手による操舵は、船首方位変化への対応が早く、標準偏差による船首方位のばらつき度も小さく抑えられていた。
- 2) 船首方位変化に対応した操舵の特性を、応答時間差として把握することが出来た。すなわち“天鷹丸”での操舵訓練では、操舵手による操舵の応答時間差が4～5秒で一定しているのに対し、実習生は4～25秒の間に大きくばらついていた。
- 3) 操舵訓練における学習特性を把握するため、実習生26名を対象に訓練回数毎の応答時間差の変化を調べた結

果、学習特性を4パターンに分けることが出来た。

- 4) 船型の大小による実習生の学習特性は、船型の大小に関わらず、同じ特性を示すことが確認された。

文 献

- 1) 小林弘明, 坂口泰弘, 服部親明: 船舶操縦の訓練方法に関する研究, 日本航海学会論文集, **93**, 109-116 (1995)
- 2) 小林弘明 他: 操船技術の要素技術展開について, 日本航海学会論文集, **96**, 119-125 (1997)
- 3) 日本航海学会・操船シミュレータ研究会: 操船シミュレータによる教育訓練, 日本航海学会第2回操船シミュレータ・シンポジウムテキスト (2000)
- 4) 小山健夫, 野本謙作: 自動操縦について - 海上交通の制御 -, 日本造船学会第2回操縦性シンポジウムテキスト, 125-149 (1970)
- 5) 大津浩平, 北川源四郎, 堀籠教夫: 保針運動の統計的同定と最適操舵, 日本造船協会論文集, **139**, 31-43 (1976)
- 6) 高島末夫: 手動操舵中のヨーイングの性質, 航海学会誌, **28**, 69-77 (1962)
- 7) 野本謙作, 小瀬邦治: 人間が操舵する船の操縦運動に関する実験的研究 (一), 日本造船協会論文集, **132**, 211-221 (1972)
- 8) 小山健夫, 小瀬邦治, 長谷川和彦: 保針操舵における針路不安定の許容限界に関する考察, 日本造船協会論文集, **142**, 119-126 (1977)
- 9) 小瀬邦治, 岩崎寛希, 吉川賢治: 出入港時の要素操船性能について - II. - 保針操船とその限界 -, 日本航海学会論文集, **81**, 125-134 (1989)
- 10) 山口俊憲, 伊藤兼治: 動的状況下における船舶ナビゲータの認知行動シミュレーション, 人間工学, **36** (3), 119-130 (2000)
- 11) 川崎潤二, 下川伸也, 浜口正人: 小型舟艇による航海実習の教育的効果について - 関門海峡通峡を事例として -, 日本水産工学会講演論文集, 99-102 (1999)
- 12) 山内保文 監修: 不規則現象論, 海文堂, 263-310 (1986)