

保針操舵における針路不安定の 許容限界に関する考察

正員 小山 健夫* 正員 小瀬 邦治**
正員 長谷川 和彦**

A Study on the Instability Criterion of the Manual Steering of Ships

by Takeo Koyama, Member Kuniji Kose, Member
Kazuhiko Hasegawa, Member

Summary

A proposal to specify the permissible instability in the manual steering of ships was made in this paper.

It had been considered that ships should be course stable to be steered by human operators. However, our experience shows this concept is true only in the case of small ships. In the case of large ships, which are usually course unstable, it is not so difficult to steer them. Then, our new problem is to find the criterion how ships can be unstable in order to be steered by human operator without excessive difficulty. In addition, the criterion should hopefully be applied for any size of ship.

The concept of "Phase to be Compensated" was employed in this study to specify the instability criterion. This concept was of course deduced from the Nyquist stability criterion in the control theory.

According to this concept, the behavior of human operators can be explained reasonably well and the difficulty in steering of any size of ships can be expressed on the same basis.

Several important conclusions were obtained by simulator studies:

- (1) "Phase to be Compensated" should be less than 30 degrees.
- (2) Human operators select the cut-off frequency of the feed-back loop at the most favorable point when they steer unstable ships.
- (3) The time constant of steering gears must be small enough for small size vessels.

1 緒 言

近年、多数建造された肥大船型では一般に針路安定性の劣化が顕著である。肥大化に伴って針路不安定な船が増えるとすると、造船設計上、どのような針路不安定まで許容されるかが問われることになる。しかし、複雑多様な操舵の局面を考慮して、この問題に総合的な評価を与えることは極めて困難であり、多方面での研究の蓄積を必要とする。そこで、まず、最も基本的な操舵の局面に限って、この問題を考えてみるのが実際的である。

この研究は、保針において許容される針路不安定の程度を求める一つの方法について検討したものである。この保針の問題は操舵機、船、コンパス、そしてオートパイロットや人間という制御装置から成りたつ閉ループ制

御という観点から把える必要がある。コントローラの能力の如何によって、保針の是非は大幅に異なるからである。ここでは、まず、人間による保針を考えることにするが考え方自体は自動操舵の場合にも拡張できるであろう。

保針における人間の制御動作には、パンパン制御、零つきパンパン制御、線型制御といういくつかのパターンがあることが知られている¹⁾。このうち、パンパン制御の場合には保針限界を与える方法が既に提案されている^{2),3)}。この方法は針路不安定な船の保針は微小振幅の自動ヨーイングを維持する形で行なわれると考え、操舵周期、ヨーイング振幅、人間の角速度識別能力等によって保針可能な船の性能の範囲を与えるものである。

ところで、線型制御 (PD 制御) は外乱の顕著な海象下とか、厳密にコースを維持する必要があるような局面で屢々使用される操舵法である。見方を変えると、パン

* 東京大学工学部

** 広島大学工学部

パン制御や零つきパンパン制御も量子化された線型制御と考えることができる。このように、人間の保針操舵を線型制御として取り扱うことは相当の一般性をもつと考えられるから、本研究ではこの観点で議論をすすめる。

保針中の船や操舵機の特性能線型とみなしうるから、この制御系は線型と考えてよい。この場合、まず考えるべきことは制御系の安定判別であろう。この安定判別は種々の方法で行なうことができるが、人間による保針の場合には位相関係に着目するのが妥当であろう。船の針路制御系では舵という大変効率的な手段の故にゲイン特性は比較的容易に変えられるが、位相特性の変更は難しいというのがその理由である。

この研究では、まず針路不安定な船の位相特性について調べる。続いて、コントローラとしての人間の制御特性を保針操舵シミュレーション結果を解析して求める。この両特性を関連づけることによって、針路不安定船における人間の保針操舵の特徴を明らかにし、保針の難易が制御対象である船と操舵機の位相遅れの大きさに関係していることを指摘する。最後に、保針操舵シミュレーションにおける制御成績がこの位相遅れの考えで整理できることを示す。

2 針路不安定な船の制御特性

一般に船の針路制御系は Fig. 1 に示す構成をもつ。制御系を構成する要素のうち、コントローラが人間の場合がこの研究の主題である。この人間の特性については今日なお、未知なところが多い。しかし、それ以外の要素の特性はおよそわかっている。

まず、微小運動中の船の操舵性は野本による2次系の応答モデルで十分正確に表現できる。積分計器であるコンパスの特性を含めると、操舵に対する船の応答は次式で表わしうる。

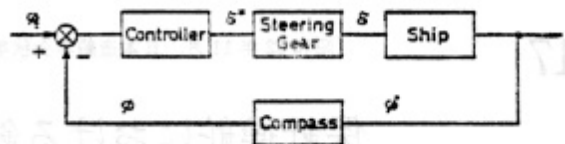


Fig. 1 Block diagram of the course control system

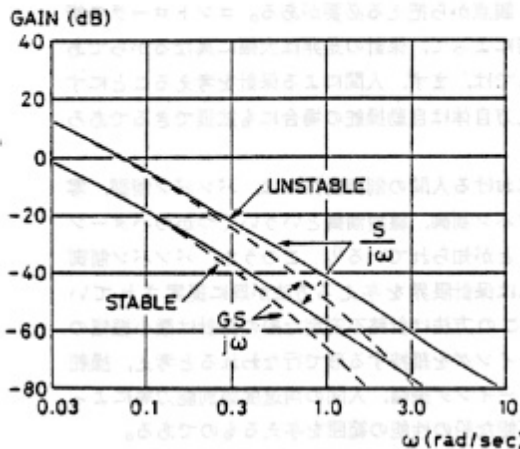
$$S(j\omega) = \frac{\psi(j\omega)}{\delta(j\omega)} = \frac{K(1+j\omega T_3)}{j\omega(1+j\omega T_1)(1+j\omega T_2)} \quad (1)$$

操舵機の特性能、操舵速度制限を無視すると次式で表現できる。

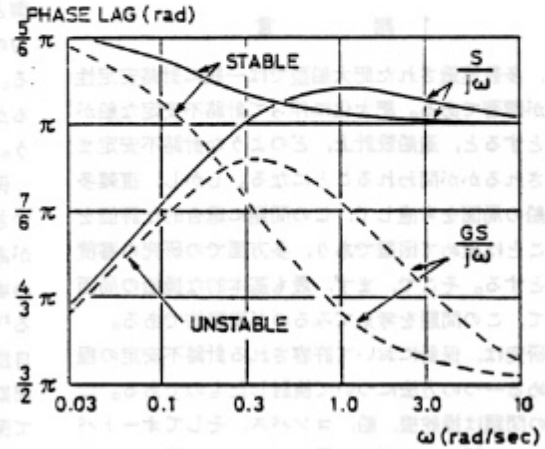
$$G(j\omega) = \frac{\delta(j\omega)}{\theta^*(j\omega)} = \frac{1}{1+j\omega T_g} \quad (2)$$

ここで、針路安定船と不安定船の応答特性を比べてみよう。針路安定な船では K , T_1 , T_2 , T_3 はいずれも正の値をとる。しかし、不安定な船では K , T_1 が負となり、その絶対値は一般に $|T_1| > T_3 > T_2$ である。両者のゲインと位相の特性を比較したものが Fig. 2 である。図中の実線が船の特性を表わしている。針路安定な船と不安定な船とで、ゲイン特性はあまり違わないが、位相特性には顕著な差のあることがわかる。針路安定な船の場合、位相遅れは $\pi/2$ に始まり、周波数の増加に従って π に落ちつく。しかし、針路不安定な船では $3\pi/2$ から始まって π の方へ近づく。一般の船では T_2 より T_3 が大きいために、これが位相進みの役を果たし、 T_1 の絶対値が T_3 よりも十分に大きければ、一度位相遅れが π より小さくなり、さらに ω が大きくなると再び π に収束する。

さて、制御系の安定性を判定する方法として、位相余裕の考えがある。この方法では一巡伝達関数のゲイン(ループゲイン)が1になる周波数(カットオフ周波数)において、一巡伝達関数の位相遅れが π 以内であれば制



(a)



(b)

Fig. 2 Difference between stable and unstable ships in the gain and phase characteristics

御系は安定であると判定する(付録参照)。従って、針路安定な船では、後述する操舵機の遅れを無視して考えると、カットオフ周波数の如何にかかわらず、単なる比例制御で制御系は安定になる。針路不安定な船でも、不安定の程度が小さければ T_1 の絶対値が T_2 より十分に大きくなるから、船の位相遅れが π より小さい領域ができる。この周波数域にカットオフ周波数来るようにループゲインを調整すると、この場合も比例制御のみで制御系は安定になる。緒言で述べたように、船の針路制御系では位相補償が必ずしも容易でないことを考えると、上記の現象は大変ありがたい。しかし、船の針路不安定の程度が大きくなると、 T_1 の絶対値が小さくなり、 T_2 に近づくから、船の位相遅れが大きくなり、 π 以内になる周波数域はなくなる。このような船では微分制御を加える等で位相進みを与えない限り、制御系は不安定になる。

このように、針路制御系の位相特性は保針の難易に密接な関係がある。すると、操舵機の遅れも重要になる。操舵機の時定数 T_E の実績値を Table 1 に示す。操舵機の遅れには、この一次遅れの他にポンプの容量等で定まる速度制限がある。これらの遅れはルールとの関係もあり、船による変化が比較的少ない。この研究では $T_E = 2.5 \sim 3$ 秒として取り扱う。大型船ではこの程度の遅れは無視しうるが、運動のテンポの速い小型船では、 T_E と T_2 の値が大同小異になるから、この遅れは無視できない。Fig. 2 の破線は操舵機特性を考慮した伝達特性を示すが、位相遅れはあらゆる周波数域で π 以上となっている。船の応答の位相遅れが大きくなると、その分だけコントローラが位相補償を強くしなければならない。

以上の考察に従うと、制御系を安定化するためにコントローラに要求される位相補償量を保針の難易を評価するパラメータと考えてよいように見える。この位相補償量の大きさは次の諸点によって決まる。

- (i) T_1 の絶対値が T_2 に比べてどの程度大きいのか。

- (ii) T_1 と T_2 の比がどの程度大きいのか。

- (iii) T_E が T_2 に比べてどの程度小さいのか。

3 保針における操舵員の制御特性

閉ループ制御系の制御対象の性質が明らかになったところで、コントローラとしての人間の特性について考えることにしよう。まず、緒言で述べた通り、ゲイン特性は比較的簡単に変更できることを指摘するべきであろう。これを人間の側から見ると、舵輪を多少沢山回すだけのことである。もちろん、船の側から見ると操舵機の稼働量の増大になるにはなるが、その馬力は僅かであり、たいした問題ではない。一般のプロセス制御ではコントローラのゲインを変更することは必ずしも容易でないが、緒言で触れたように舵という効率的な手段はこの点で大層ありがたい。

これに対して、位相の調節は容易でない。外乱が加わると、人間の微分制御能力は低下し、操舵の位相進みを殆んど与えられないといわれている。人間の成し得るこの位相進みの大きさについては後に、検討することにするが限られた量でしかない。そこで問題は、限られた位相補償しかなし得ない人間が実際にどうして針路不安定な船の保針をなしうるのかということになる。

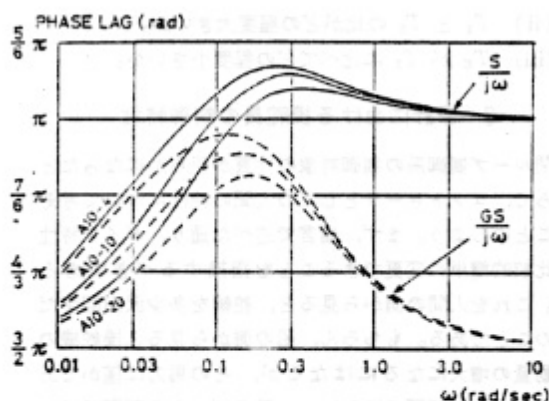
さてここで、人間は制御対象の性質に応じて、自らの特性を調節できるということに着目したい。船の操縦においても、人間は自分の特性を多少変えながら様子を見ており、巧く保針できた時の制御動作を覚え、その後はその要領で操舵すると考えるのが自然である。事実、野本らは操舵時間の増大に従って、保針成績が向上することをシミュレータスタディの結果から指摘している⁴⁾。

それでは、人間はどのように制御するのであろうか。これに答える為には実際に人間がどのように操舵しているかを観察するのが先決である。そこで、広島大学の操縦シミュレータによって、保針操舵のシミュレーションを行ない、人間の制御特性の調査を行なった。

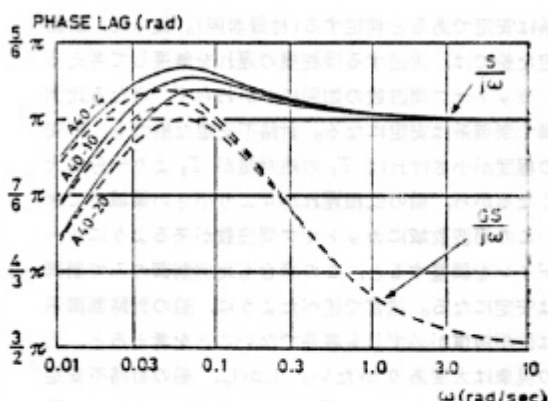
シミュレーションに用いた供試船はいずれも針路不安定であり、その特性を Table 2 に示す。供試船名につけた二つの数字は、はじめが L/V (秒) を終りが不安定ループ幅を示す。この供試船の位相特性を Fig. 3 に示す。実線は船のみ、破線は操舵機特性を考慮したものである。シミュレーション中、Fig. 4 に示すような外乱を加えた。低域の外乱は風、高域のそれは波浪によって誘起されたものであり、その算定の要領は省略させていただく。この外乱は風速 16m の海象下の大型肥大船を想定したものであり、相当に大きい。これは以後に述べる人間の特性の同定を効果的に行なうために、外乱が大きいと人間の制御動作が PD 制御に近づくという性質を考慮した結果である。

Table 1 Examples of the time constant of steering gears

Ships	T_E (sec)
Coast Guard Cutter	1.20
Car Ferry	2.29
do.	1.26
Container Carrier	2.00
V.L.C.C.	1.30
do.	2.90
do.	2.72
do.	1.15



(a)



(b)

Fig. 3 Phase characteristics of the simulation models

Table 2 Steering parameters for the simulation models

Ship	sec L/V	deg 2*δ _c	sec ⁻¹ K	sec T ₁	sec T ₂	sec T ₃	sec T ₂	rad θ _c *
A10-4	10	4	-0.219	-51.9	3.20	8.0	3.0	0.106
A10-10	10	10	-0.104	-26.3	do.	do.	do.	0.242
A10-20	10	20	-0.057	-15.9	do.	do.	do.	0.387
A40-4	40	4	-0.059	-207.6	12.8	32.0	do.	-0.201
A40-10	40	10	-0.026	-105.2	do.	do.	do.	-0.107
A40-20	40	20	-0.014	-63.6	do.	do.	do.	-0.091

* Phase angle to be compensated

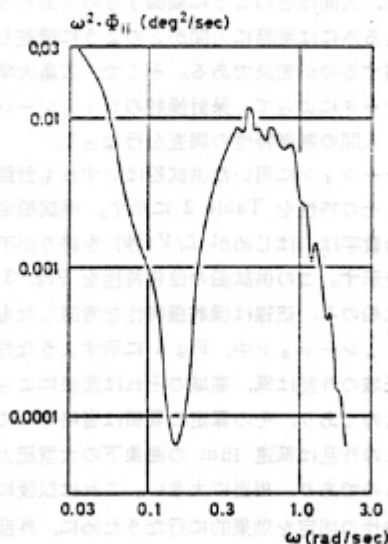


Fig. 4 A noise spectrum for the simulation

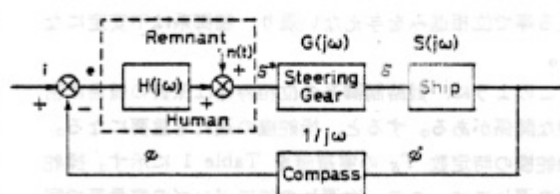


Fig. 5 The concept of helmsman's model in a course control system

人間の制御動作は、機械の場合のように固定された制御則にしたがうものでないことは当然であるが、その取扱いを簡単にするため、Fig.5のように平均としての固定された線型部分 $H(j\omega)$ と、それでは表現できない remnant と呼ぶ $n(t)$ の部分とに分け、 $n(t)$ を制御の本質から見て第二義的な一種の雑音とする方法がとられることが多い^{(5),(6)}。

Fig.5 に示すような閉ループ系の中に組みこまれた人間の記述関数を求めるのは一般には困難であるが、船に加わる外乱をこの制御系の入力とみなし、外乱のランダム性を活用した解析法が利用できる。外乱 $i(t)$ と人間の出力とのクロススペクトル密度は次式で表現できる。

$$\Phi_{ie}(j\omega) = \frac{H}{1+GSH} \Phi_{ii}(j\omega) + \frac{1}{1+GSH} \Phi_{in}(j\omega) \quad (3)$$

ここで、 $\Phi_{ii}(j\omega)$: 外乱 $i(t)$ のオートスペクトル密度
 $\Phi_{in}(j\omega)$: レムナント $n(t)$ と外乱のクロススペクトル密度

$H(j\omega)$: 人間の特性の記述関数

$GS(j\omega)$: 船と操舵機の応答関数の積

続いて、外乱と針路誤差 $e(t)$ のクロススペクトル密度は次式で表わせる。

$$\Phi_{ie}(j\omega) = \frac{1}{1+GSH} \Phi_{ii}(j\omega) - \frac{Y_S(j\omega)}{1+GSH} \Phi_{in}(j\omega) \quad (4)$$

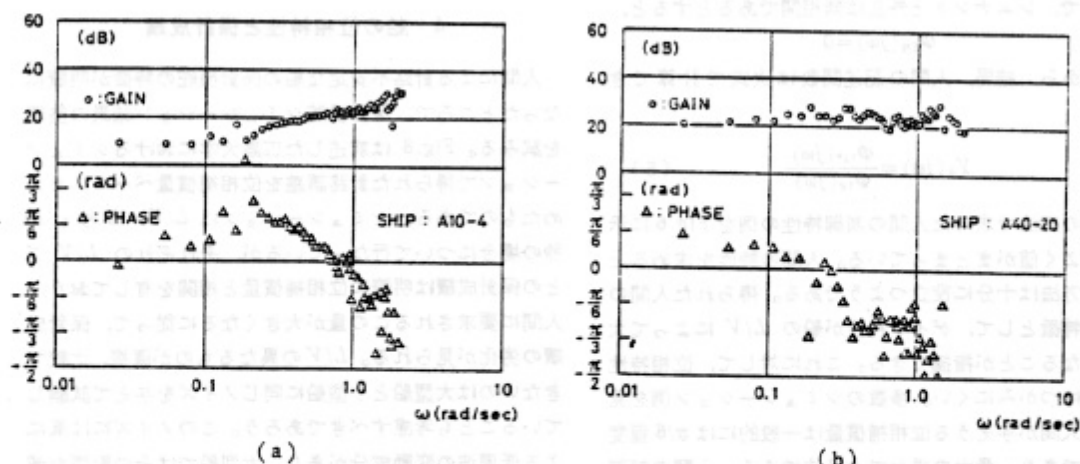


Fig. 6 An example of the quasi-linear transfer function of helmsman

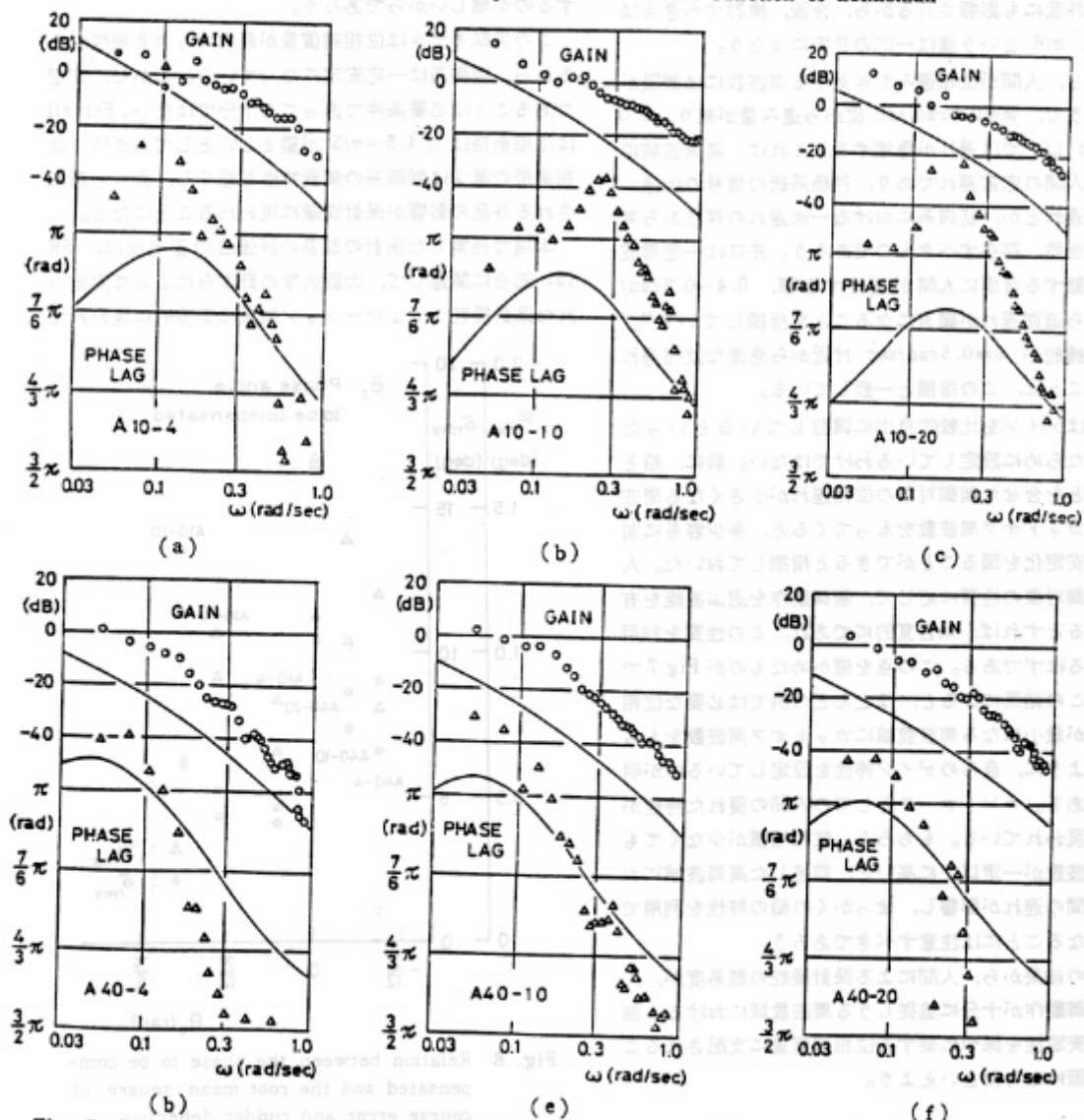


Fig. 7 Examples of the loop gain and phase lag of course control system under manual steering

ここで、レムナントと外乱は無相関であるとする、

$$\Phi_{in}(j\omega) = 0$$

であるから、結局、人間の記述関数は次式で計算できる。

$$Y_k(j\omega) = \frac{\Phi_{is}(j\omega)}{\Phi_{ie}(j\omega)} \quad (5)$$

以上の方法で求めた人間の制御特性の例を Fig. 6 に示すが、よく値がままとまっている。人間の特性を求める上でこの方法は十分に役立つようである。得られた人間の制御の特徴として、ゲイン特性が船の L/V によって大幅に異なることが指摘できる。これに対して、位相特性の傾向はつかみにくい。多数のシミュレーション例を見ると、人間が与える位相補償量は一般的には $\pi/6$ 程度のものであり、最大の場合で $\pi/3$ 位である。人間の制御特性は外乱にも影響されるから、今後、検討すべき点が多いが、 $\pi/6$ という値は一応の目安になる。

しかし、人間が位相進みを与えうる周波数には制限があるようで、 $\omega = 0.5 \text{ rad/sec}$ 位から進み量が減り、 1.0 rad/sec 以上では遅れが増加する。これは、高周波域における人間の応答遅れであり、神経系の信号の伝達、判断の遅れとか、筋肉系における一次遅れの存在から考えて、当然、存在すべきものであろう。井口は一定周波数で変動する目標に人間が追従する際、 $0.4 \sim 0.5 \text{ rad/sec}$ から追従遅れが顕著なることを指摘している⁹⁾。人間の操舵が $\omega = 0.5 \text{ rad/sec}$ 付近から急激な位相遅れをもつことは、この指摘と一致している。

人間はゲインを比較的自由に調整しているといったが、でたらめに設定しているわけではない。前に、船と操舵機とを合せた制御対象の位相遅れが小さくなる周波数域にカットオフ周波数をもってくると、多少容易に制御系の安定化を図ることができる¹⁰⁾と指摘しておいた。人間が制御対象の性質に応じて、制御動作を選ぶ機能を有しているとすれば、無自覚的にであれ、この性質を利用しているはずである。この点を確かめたものが Fig. 7 である。この結果によると、ほとんどの例では必要な位相補償量が最小になる周波数域にカットオフ周波数をもってくるように、自らのゲイン特性を設定しているのが明らかである。コントローラとしての人間の優れた特性がここに現われている。もちろん、位相補償が少なくてもよい周波数が一定以上に高いと、前述した高周波域における人間の遅れが影響し、せっかくの船の特性を利用できなくなることには注意すべきであろう。

以上の結果から、人間による保針操舵の難易度が、人間の制御動作が十分に追従しうる周波数域における、制御系の安定性を保つに要する位相補償量に支配されること became 明瞭になったといえよう。

4 船の位相特性と保針成績

人間による針路不安定な船の保針操舵の特徴が明瞭になったところで、保針操舵シミュレーション結果の整理を試みる。Fig. 8 は前述した広島大学におけるシミュレーションで得られた針路誤差を位相補償量ベースにまとめたものである。シミュレーションは $L/V = 10$ 秒と 40 秒の場合について行なっているが、それぞれの L/V ごとの保針成績は明瞭に位相補償量と相関を有しており、人間に要求されるこの量が大きくなるに従って、保針成績の劣化が見られる。 L/V の異なるものが直接、比較できないのは大型船と小型船に同じノイズを与えて試験していることも考慮すべきであろう。このノイズには風による低周波の変動成分があり、大型船ではその影響を減ずるのが難しいからであろう。

この供試モデルは位相補償量が最大でも $\pi/8$ 程度であるから、制御系は一応安定になっている。しかし、安定であることは必要条件であっても十分ではない。Ferrell は位相余裕は $\pi/4.5 \sim \pi/3$ が望ましいとしており¹¹⁾、位相余裕の減少は制御系の減衰特性を悪くし、次々と誘起される外乱の影響が保針成績に現われることになる。

本稿で提案した保針の難易の評価法の妥当性は、SR 151 部会に関連して、大阪大学の野本らによって実施された保針操舵シミュレーション結果に典型的に現われて

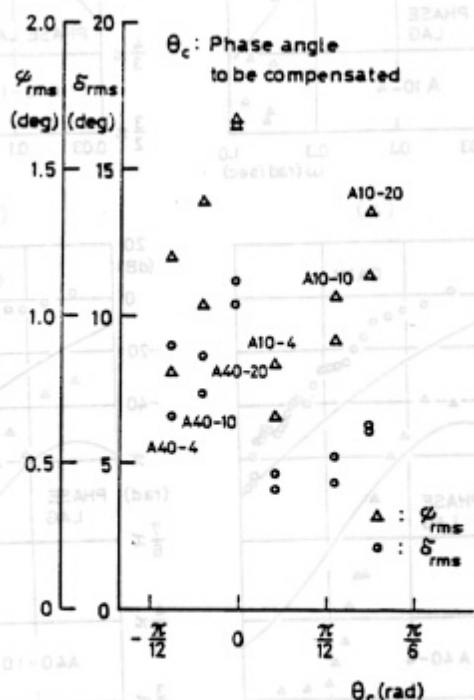


Fig. 8 Relation between the phase to be compensated and the root mean square of course error and rudder deflection

いる。この実験の様子は別に詳しく報告されているので⁴⁾、結果のみを借用すると、Fig. 9, Fig. 10 のようになる。この供試船の中には位相補償量が $\pi/5$ から $\pi/3.5$

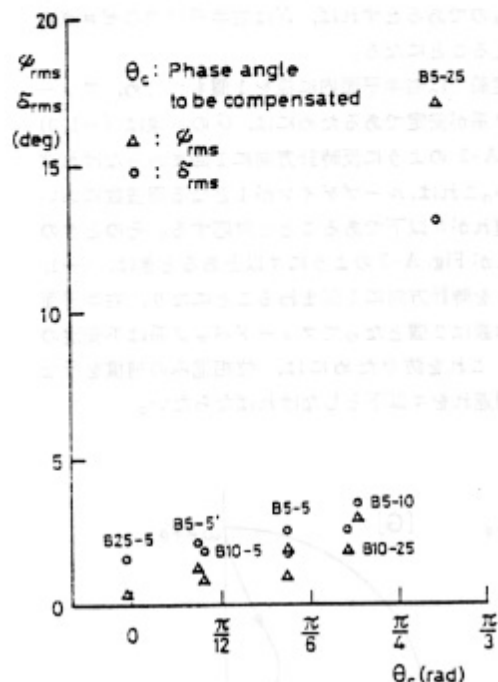


Fig. 9 Results of simulations at SR-151 (without noise)

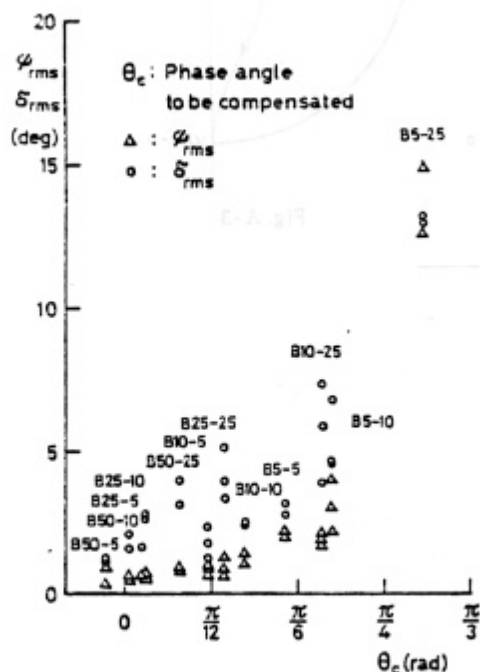


Fig. 10 Results of simulations at SR-151 (with noise)

のものが含まれており、前述した人間が成しうる位相補償量の目安である $\pi/6$ より大きい。この例では、位相補償量が $\pi/6$ 以上になると、ほとんど保針不可能になっている。

このシミュレーションにおいて加えた外乱は、前述の広島大学のものより小さく、比較的高周波の成分のみを与えている。この場合の人間の操舵はパンパン制御あるいは零つきパンパン制御が主である。しかし、線型制御の概念から導いた保針の評価法はこのような制御法の場合にも妥当性を有しているようである。

5 結 言

どのような針路不安定の船まで、人間が保針することができるかについて検討した結果、得られた主な結論は次の通りである。

- (1) 人間による針路不安定船の保針操舵は、位相進みを最大に与えつつ、船の位相遅れが最小になる周波数域にカットオフ周波数を一致させるように自らのゲイン特性を調節する形で行なわれる。
- (2) 人間の与えうる位相進みはおおよそ $\pi/6$ であり、 $\omega < 0.4$ rad/sec の周波数域で操舵機を含めた船の位相遅れが $(7/6)\pi$ 以上になると保針が困難になる。
- (3) 小型船では操舵機の時定数を小さくすると、保針性能の改善に役立つ。

この研究の一部は日本造船研究協会第 151 研究部会の事業に関連して行なわれたことを付記し、部会長の野本謙作教授をはじめ、関係者一同に感謝の意を表す。

また、この研究の過程で種々の協力を頂いた、広島大学 仲渡道夫 教授と船体運動学研究室の学生諸君にも重ねて謝す所である。なお、本研究で示した人間の動特性の計算は広島大学大学院、昭和 51 年卒 佐々木直人君の修士論文の一部であること、種々の計算には、広島大学計算センターの電子計算機を使用したことを付言する。

参 考 文 献

- 1) 野本, 小減: 人間が操舵する船の操縦運動に関する実験的研究 (一), 日本造船学会論文集, 132 号, (昭和 47 年).
- 2) Koyama, T.: A proposal of a method to specify the permissible region of instability in the steering characteristics of ships, ISP 19-213, (1972).
- 3) 野本: 針路不安定船の保針可能限界に関する一計算, J. T. T. C. 第 2 部会資料, M 38-1.
- 4) 日本造船研究協会第 151 部会報告書 (50 年度, 51 年度).
- 5) McRuer, D. T. et al.: Human pilot dynamics

in compensatory systems theory, models and experiments with controlled element and forcing function variables, AFFDL-TR-65-15, (1965).

- 6) 後藤：手動制御系における操縦者の線型モデルについて，日本航空学会誌，21巻232号，（昭和48年）。
- 8) 井口：手動制御の研究，東大工学部学位論文，（昭和37年）。
- 9) 伊沢計介：自動制御入門，オーム社。

付録 不安定船のフィードバックの安定判別

フィードバック系の安定判別には Nyquist の方法が便利である。これは、一巡伝達関数を G としたとき、フィードバック系の伝達関数 $1/(1+G)$ の極、すなわち $1+G$ のゼロ点のうち、実数部が正となるものの有無を G の周波数特性から判別するものである。

Fig. A-1 のように、 s 平面の右半平面全体を一一周す

る軌道の G への写像、すなわち $\omega = -\infty \sim +\infty$ の周波数特性が、 $(-1, 0)$ の周りを時計方向に回る回数 N が $1+G$ の右半平面内のゼロ点と極の個数の差となることに着目する。また、 $1+G$ の極は G の極と一致するため所与のものであるとすれば、 N は右半平面内のゼロ点の数を与えることになる。

不安定船では右半平面内に極を1個もつため、フィードバック系が安定であるためには、 G の写像は $(-1, 0)$ を Fig. A-2 のように反時計方向に1回まわらなければならない。これは、ループゲインが1となる周波数において位相遅れが π 以下であることと対応する。そのときの位相遅れが Fig. A-3 のように π 以上あるときは、 $(-1, 0)$ の周りを時計方向に1回まわることになり、右半平面ゼロ点の数は2個となってフィードバック系は不安定となる。これを防ぐためには、位相進みの補償を行ない、位相遅れを π 以下としなければならない。

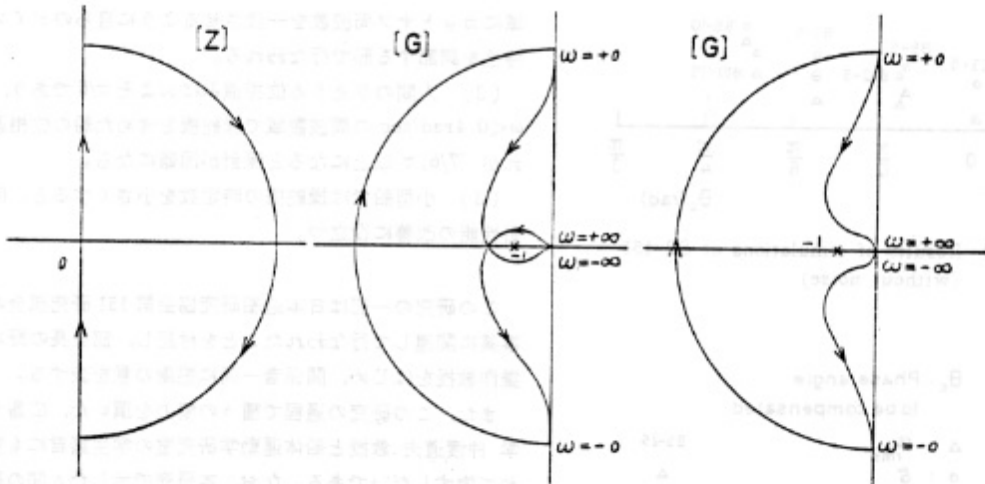


Fig. A-1

Fig. A-2

Fig. A-3

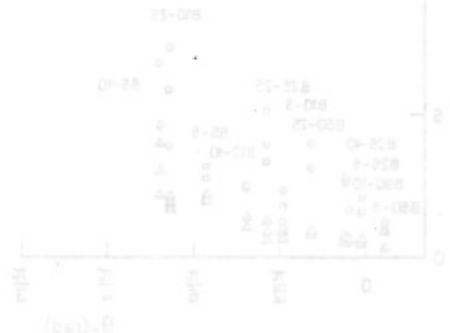


Fig. 10 Results of simulation at 2R-121 (with noise)