

肥大船の特異な操縦性能に関する研究

第二報 実船の性能とその制御

正員 小 瀬 邦 治*
 正員 長谷川 和 彦*
 正員 石 山 忠 治**

Study on the Unusual Manoeuvring Characteristics of Full-Bodied Ships (2nd Report)

—On the Results of Full-Scale Trial and the Control of the Ship—

by Kuniji KOSE
 Kazuhiko HASEGAWA
 Tadaharu ISHIYAMA

Summary

In the first report¹⁾, the unusual phenomena appeared on two full-bodied ship models are investigated.

In this report, the unusual phenomenon appeared on a real ship is analyzed and the countermeasures of the phenomenon are discussed from the view point of control. The ship is the real ship whose model was treated in the first report.

The main conclusions obtained in this report are as follows:

- (1) The manoeuvring characteristics of the full-loaded ship is initially unstable and besides overlapped by an unusual phenomenon.
- (2) The real ship is less stable than her model ship. The fundamental features of the unusual phenomena are equal but the behaviours are slightly different between the ship and her model.
- (3) The response equation of manoeuvre proposed in this report can simulate the ship motion fairly well.
- (4) In the consideration of the auto-piloting system of unstable ship with unusual phenomenon, cares should be taken not only to the stability of the system, but also to the unusual phenomenon.
- (5) The nonlinear control method of auto-pilot, proposed in this report, is effective and promising for ships with unusual phenomena.
- (6) The smaller the L/V of a ship with unusual phenomenon is, the more difficult can a human operator keep the course. Therefore in smaller or faster ships, designers should pay possible attentions to avoid the unusual phenomena.

| Condition | W. (m) | W. (m) | W. (m) |
|-----------|--------|--------|--------|
| 1 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 2 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 3 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 4 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 5 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 6 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 7 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 8 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 9 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 10 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |

1. 緒 言

肥大船型は一般に針路安定性に欠ける場合が多い。また、ある程度以上、船尾の肥大化が進んだ船型で、異常現

* 広島大学工学部

** 広島大学大学院工学研究科

象と総称される特異な操縦性能を示す例が少なくない。

この異常現象のなかには、微少運動中の針路安定性が改善されるタイプがあり、これらの船では操船がむしろ容易になるといわれている。一方、大きな蛇航の原因となり操縦性能上のトラブルに結びつく例もある。筆者らが別の機会に報告した漁業調査船³⁾は、舵角を零に保つたまま、左右交互に大きな回頭運動が生じ、保針が著しく困難になった例である。

本研究は、鉾石運搬船に現われた異常現象を検討したものである。この船の模型船の操縦性能は、第一報ですでに報告している³⁾。すなわち、微少舵角時の船の回頭はランダムに変動し、比較的大きな操舵時には、落ちついた二つの定常旋回状態が得られる。本研究の目的の一つは縮率の異なる実船で、この異常現象がどう現われるかを調べることにある。

もう一つの目的は、異常現象の生じた船の針路制御に関する検討である。この現象は船尾の右舷または左舷に生じる流れの剥離に起因し、この剥離の引き金はプロペラや舵の上部の間隙を通る横方向の流れであるから、これを遮断するセンターフィンの装着が一つの対策となる。しかし、この対策は常に可能ではないから、制御面での工夫によって異常現象による操縦性能上の不都合を緩和することを考える。すなわち、異常現象の生じた船に対するオートパイロットの調整法、効果的な非線型パイロットの形式、さらに、人間による保針の可能性について論ずる。

2. 実船の操縦性能とそのモデル化

2.1. 操縦性試験結果

本研究の供試験船は第一報³⁾における A 丸の実船であり、その主要目を Table 1 に、船尾形状と正面線図を Fig. 1 に示す。この実船の操縦性能を調べるために、バラストと満載の二状態についてそれぞれ Z 試験を行なった。試験海域はインドネシア東部のバンダ海で、外海ではあるが赤道無風地帯(南緯 5° 附近)に属し、波、風がほとんどない極めて穏やかな海象のところであつた。

Table 1 Principal Particulars of the Ship

| Condition | Ballast | Full |
|------------------------|--------------|--------|
| D.W. (ton) * | 25.670 | 38.570 |
| Lpp (m) | 183.0 | |
| B (m) | 30.0 | |
| df (m) * | 4.70 | 10.2 |
| da (m) * | 5.50 | 10.6 |
| dm (m) * | 6.30 | 10.4 |
| v (m ³) ** | 45,200 | |
| L/B ** | 6.10 | |
| B/d ** | 2.97 | |
| Cb ** | 0.814 | |
| Cp ** | 0.817 | |
| Cm ** | 0.996 | |
| lcb (%) ** | -2.14 (fore) | |
| AR/Ld ** | 1/65.4 | |

*) Estimated values at the trial

**) Designed values

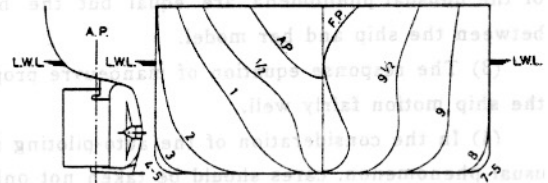


Fig. 1 Body Plan and Stern Profile of the Ship

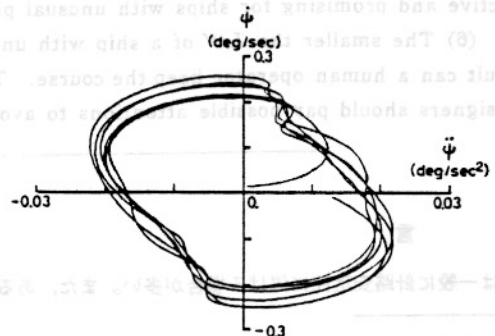


Fig. 2 $\dot{\phi}$ - $\ddot{\phi}$ Phase Plane Trajectory of 10°-0.2°/s Y. R. Z. (Ballast)

バラスト状態で行なつた $10^{\circ}-0.2^{\circ}/s$ 回頭角速度 Z 試験の結果を位相面軌跡の形で表現し、Fig. 2 に示す。横軸が回頭角加速度 $\ddot{\psi}$ 、縦軸が回頭角速度 $\dot{\psi}$ である。この軌跡の $\dot{\psi} = 0$ 附近の傾斜から判断すると、バラスト状態で本船は十分に針路安定であることがわかる。

他方、満載状態における $10^{\circ}-0.3^{\circ}/s$ 回頭角速度 Z 試験の結果を Fig. 3 に示す。軌跡の傾斜はバラスト時と逆で、針路不安定のようにみえる。ところが、満載時の運動を詳しく観察すると、通常の針路不安定船では生じない現象がある。

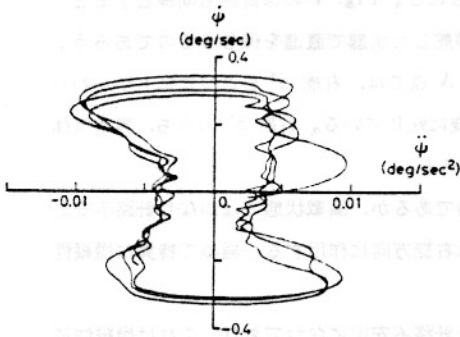
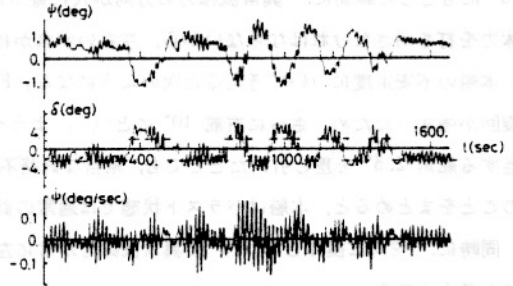


Fig. 3 $\dot{\psi}$ - $\ddot{\psi}$ Phase Plane Trajectory of $10^{\circ}-0.3^{\circ}/s$ Y. R. Z. (Full)



$K_D=2 \quad T_D=11 \quad 2\theta_b=0.5$

Fig. 4 Example of Course Keeping by Auto-Pilot (Full)

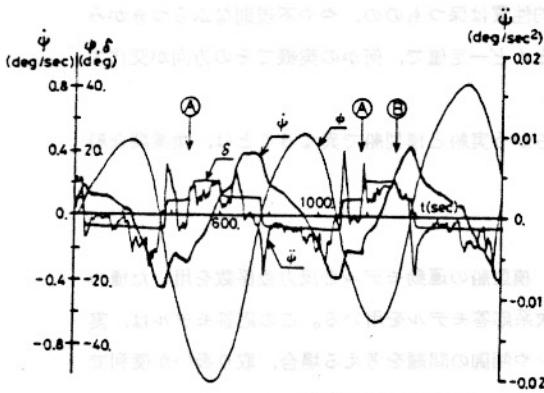


Fig. 5 Time Histories of 5° Z (Full)

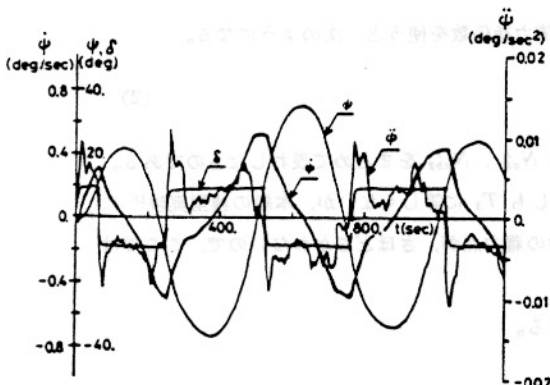


Fig. 6 Time Histories of 10° Z (Full)

Fig. 4 はオートパイロットで保針中の回頭角 ψ 、舵角 δ および回頭角速度 $\dot{\psi}$ のタイムヒストリの例である。この場合、左舵 2.5° 、右舵 2.5° でそれぞれ直進しているのがわかる。通常の針路不安定船は、不安定釣り合いの点で、左右の操舵を小刻みにくり返すことによって、針路を保つことができる。しかし、この時、直進を保つに要する平均舵角は一つであり、本船のように、ある時は右舵 2.5° 、ある時は左舵 2.5° で直進するということはない。

Fig. 5, Fig. 6 に Z 試験のタイムヒストリを示す。また、この 5° Z 試験中の回頭角速度の追従のようすを拡大して Fig. 7 に示す。ここにも

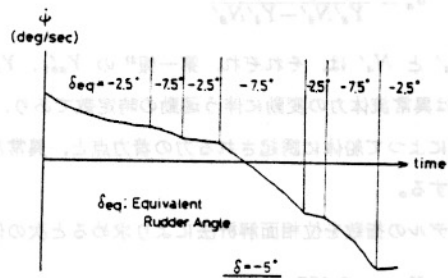


Fig. 7 Enlarged Figure of Rate of Turn in 5° Z (Full)

通常の船にない特徴が現われている。Fig. 7 では、舵角を一定に保つているにもかかわらず角速度の追従か折線状になつており、角加速度が跳躍している。图中、各区間に -2.5° とか -7.5° と記入してあるのは、実際には -5° の舵角をとつているのに、それぞれ舵角 -2.5° や -7.5° とつた時に相当する追従運動をしていることを示す。このことから、本船には、操舵によつて生じる通常の力の他に、舵角 $\pm 2.5^\circ$ に相当する附加的な流体力が作用していると推定できる。以後、この附加的な流体力を第一報³⁾ 同様、異常流体力と称する。

Fig. 5 の B 点では、右舵 10° を 5° にもどしているが、角速度の追従のようすはほとんど変化しない。これは、舵角を 5° にもどした瞬間に、異常流体力の方向が入れ替つたと考えられる。Fig. 4 の保針例も同様とすると、異常流体力を打ち消さなければならないから、左右いずれかに 2.5° 操舵した状態で直進を保ちうるのであろう。

なお、本船の不安定度について考えると次のようになる。Fig. 5 の A 点では、右舵 5° をとつたにもかかわらず、左旋回が強まつたため、さらに右舵 10° にとつて、ようやく、右旋に転じている。右舵 5° のうち、異常流体力に相当する舵角 2.5° を差し引いたとしても、相当な針路不安定船である。

以上のことをまとめると、本船はバラスト状態では通常の針路安定船であるが、満載状態ではかなり針路不安定になり、同時に、舵角に換算して 2.5° の異常流体力が常に左あるいは右旋方向に作用する、極めて特異な操縦性能をもつと考えられる。

さて、第一報で示した模型船の場合³⁾ と比べると、実船の方がかなり針路不安定になつており、これは操縦性における縮率影響の一般的傾向と合致する。本船の場合、この針路不安定に異常現象が付加された性質が現われているが、模型船と実船ではその現われ方はやや異なる。模型船では大舵角旋回時、異常流体力がほとんど一定で、旋回特性は明瞭に二つの値をとる。また、微小運動時にはその基本的性質は保つものの、やや不規則なふらつきがみられる。これに対し、実船の場合、微小運動時も異常流体力はほとんど一定値で、何かの契機でその方向が交代する。また、異常流体力は、模型船より、多少大きいようである。

流れの剝離の大きさや位置、交代条件などが、Reynolds 数のちがう実船と模型船で異なることは、漁業調査船の例²⁾ にもみられる。

2.2 運動モデルとその検証

本船の操縦性能を表現する運動モデルを考える。第一報³⁾ では、模型船の運動モデルを流力微係数を用いた横力およびモーメントの形で整理し、示した。しかし、ここでは、二次系応答モデルを用いる。この応答モデルは、実船でも操縦性指数の同定が容易で、また、運動のシミュレーションや制御の問題を考える場合、取り扱いが便利である。多賀野ら⁴⁾ や著者ら³⁾ も、以前、類似のモデルを使用した。ここでは次のモデルを用いる。

$$T_1 T_2 \ddot{\psi} + (T_1 + T_2) \dot{\psi} + \psi = K(\delta \pm \delta_a) + K(T_3 \dot{\delta} \pm T_4 \delta_a) \quad (1)$$

上式中、 δ_a は異常流体力を舵角に換算したもので、第一報³⁾ の流力微係数を使うと、次のようになる。

$$\delta_a = \frac{Y_a' N_a' - Y_a' N_g'}{Y_g' N_g' - Y_g' N_a'} \quad (2)$$

ただし、 Y_a' と N_a' は、それぞれ、第一報³⁾ の Y_{ab1} 、 Y_{ab2} と N_{ab1} 、 N_{ab2} をまとめて表わしたものである。一方、 T_a は異常流体力の変動に伴う運動の時定数であり、必ずしも T_3 に等しくないが、本船の模型実験³⁾ によると、操舵によつて船体に誘起される力の着点と、異常流体力の着点が、さほどちがわないので、ここでは同一値を使用する。

この応答モデルの指数を位相面解析法により求めると次の値をうる。

$$K = -0.137 \text{ sec}^{-1}$$

$$T_1 = -286 \text{ sec}$$

$$T_2 = 6.4 \text{ sec}$$

$$T_3 = 16.0 \text{ sec}$$

$$\delta_a = 2.5 \text{ deg}$$

(3)

なお、非線型項の係数 α は、今回の実験の範囲では決めるのが難しいので、以後、 $\alpha = 0$ として線型モデルで考えることにする。

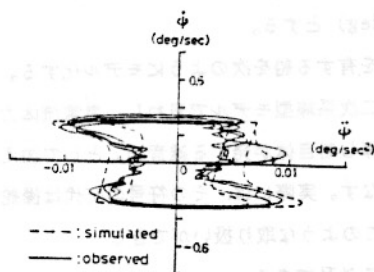


Fig. 8 Simulated $\dot{\psi}$ - $\ddot{\psi}$ Phase Plane Trajectory of $10^\circ-0.3^\circ/\text{s}$ Y. R. Z. (Full)

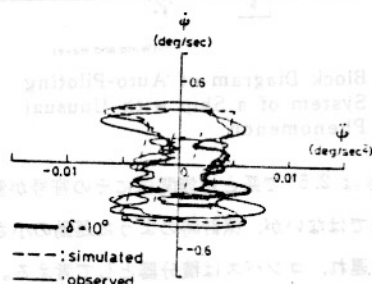


Fig. 9 Simulated $\dot{\psi}$ - $\ddot{\psi}$ Phase Plane Trajectory of 5° Z (Full)

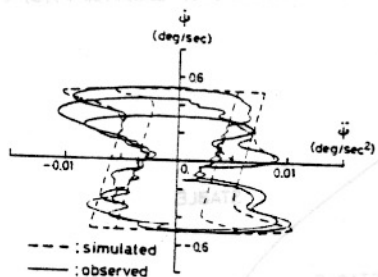


Fig. 10 Simulated $\dot{\psi}$ - $\ddot{\psi}$ Phase Plane Trajectory of 10° Z (Full)

このモデルの妥当性を確かめるために行なったシミュレーション結果を Fig. 8~Fig. 10 に示す。図中、破線は、(3) 式の指数を使って模擬した位相面軌跡で、異常流体力が舵角に換算して $+2.5^\circ$ の場合と -2.5° の場合の両方を示している。実際には、異常流体力の方向が変わる毎に $T_a \delta_a$ の項で示される異常流体力の変動に比例した運動を伴いながら、一方の軌跡から他方の軌跡へ移っているのがわかる。 5° Z 試験で、舵角 10° をとつても変化が顕著でないのは、その時、 -2.5° 相当の異常流体力が働いたためであり、 $10^\circ-0.3^\circ/\text{s}$ 回頭角速度 Z 試験や 10° Z 試験で転舵直後の運動が大きいのは、その時、 $+2.5^\circ$ 相当の異常流体力が働いたためである。このシミュレーション結果は、これらの運動をうまく表現しており、以後、(1) 式で、木船の運動を考える。

3. オートパイロットによる異常現象を有する船の制御

船尾の肥大した船型で、異常現象が生じる時の根本対策としては原因となる船尾の右舷または左舷に生じる剥離を抑制することであり、船尾部の肥大度を制限し、フレームライン形状や配置を工夫することが重要といえる。また、前述のように、プロペラや舵の上部の間隙を塞ぐセンターフィンの装着も有効な対策である。

いまひとつの対策は、異常現象そのものはその性質がわかっているものとし、操縦性能上の不都合を制御の面で補償することである。ここでは、この観点からの対策について考える。

3.1. 制御系のモデル化

制御の面から対策を考えるにあたり、Fig. 11 に示す制御モデルを考える。

オートパイロットは、PD 制御に天候調整を加えてモデル化した。現在、実際に使用されているオートパイロットの線型部分は、単純な PD 制御装置ではなく、積分制御機構やローパスフィルタ等を含んだ、相当、複雑なシステムになっている。したがって、オートパイロットの特性を決める際、注意が必要である。しかし、こまかい仕様

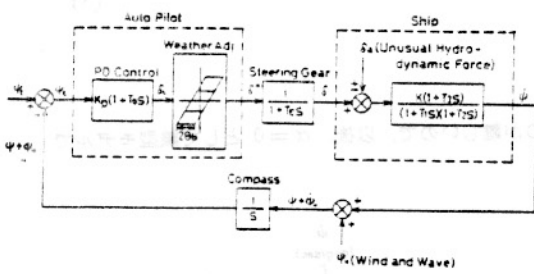


Fig. 11 Block Diagram of Auto-Piloting System of a Ship with Unusual Phenomenon

は各メーカーによつてもちがうから、ここでは簡単のため一括して、PD制御とする。ここで、比例および微分制御の常数をそれぞれ K_p および $T_D(\text{sec})$ とする。また、オートパイロットに含まれる天候調整機構はバックラッシュとし、そのバックラッシュ幅を $2\theta_0$ (deg) とする。

異常現象を有する船を次のようにモデル化する。船を通常の二次系線型モデルで表わし、異常流体力を舵角に換算し船自体が発する雑音 θ_e として加える。

δ_a の大きさは 2.5° で系とは無関係にその符号が変わる二値雑音とみなす。実際には、その符号の交代は操舵や運動に無関係ではないが、保針時のように運動の小さい範囲に限れば、このような取り扱いができる。

操舵機は一次遅れ、コンパスは積分器として考える。 ψ_e は風や波による外乱である。

3.2. 制御系の安定性

本船のように針路不安定な船は、操舵に対する船の追従が悪いから、制御の面でこれを補償する必要がある。

オートパイロットをPD制御と考え、自動制御の分野で使われる Hurwitz の安定条件を用いる。この条件を本船

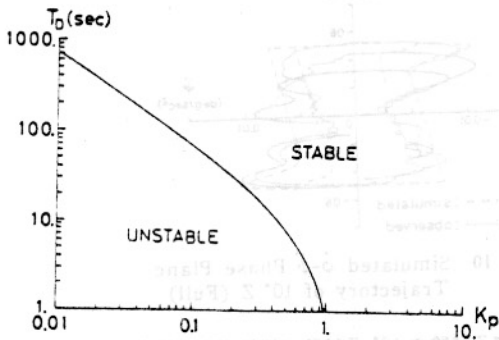


Fig. 12 Permissible Region of Course Stability of the Ship (Full)

に適用し、オートパイロットの常数 K_p と T_D の関係にして示したのが Fig. 12 である。(APPENDIX 参照) 本船の場合、比例制御の常数 K_p が1以上であれば、わずかの微分制御を加えるだけで、系を安定化できる。

しかし、実際のオートパイロットには、Fig. 11 にも示したように、PD制御の他に、天候調整機構という一種の「遊び」があり、線型の範囲で安定であつても、このために、系が発振することが知られている⁹⁾。Fig. 13 は、その一例で、片振幅約 2° 、周期約 200 秒の蛇航をしているのがわかる。

なお、Fig. 13 には、上に回頭角 ψ (設定コースを 0° とする)、回頭角速度 $\dot{\psi}$ 、舵角 δ のスペクトラム、下にそれぞれのタイムヒストリが示してある。

船の針路制御系の発振振幅および周期は、記述関数法を用いた Kochenburger の方法⁹⁾ で計算できる。この方法によると、閉ループ制御系に含まれる線型要素を逆数の形で、非線型要素を記述関数の形で複素平面上に描く

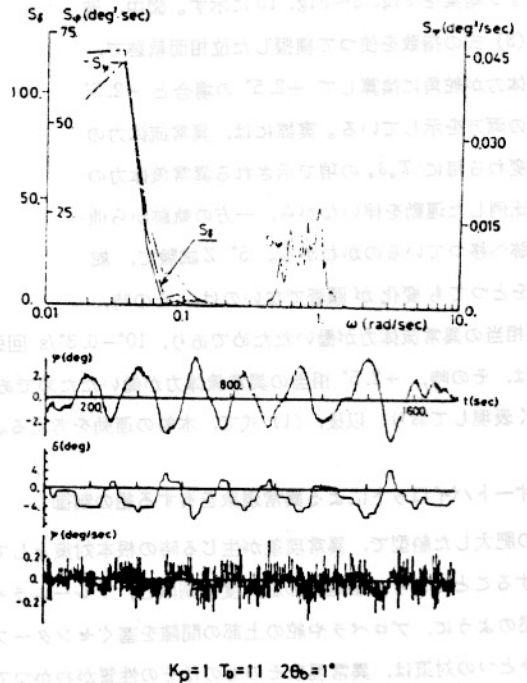


Fig. 13 Example of Self-Sustained Yawing by Auto-Pilot (Full)

と、両者の関係から、系の安定性が判別できる。この方法を用いて求めたのが Fig. 14 である。図中、原点から放射線上にのびた曲線群は、PD制御の常数を種々に変えた系の線型部分で、円周波数 ω (rad/sec) がパラメータとなつている。他方、原点から -1.0 に至る半円状の曲線はバックラッシュの記述関数で、

$$b = \frac{\theta_b}{\delta_L} \quad (4)$$

がパラメーターである。ただし、 $\overline{\delta_L}$ はオートパイロットの線型部分の出力信号を正弦波とみなした場合の振幅である。本船の場合、オートパイロットの常数にかかわらず、両者は一つの交点をもつから、この交点で与えられる周期と振幅で自動発振する。この発振周期は約 200~300 秒で Fig. 13 の実例と対応している。この発振を軽減するには、天候調整のバックラッシュ幅は極力小さく調整しなければならない。

一方、本船の航海中、こうして計算した発振周期に比べはるかに短い周期 (約 60 秒) の発振がしばしば観察された。Fig. 15 がその一例で、これは天候調整機構による発振として説明できない。

保針中の抵抗増加は、およそ舵角と針路誤差の自乗平均値を用いて評価できるが、それぞれの自乗平均値の 70~90 % は、この周期約 60 秒の発振に起因している。したがって、抵抗増加という観点から考えると、この周期の発振の究明が大切である。そのためには、天候調整機構のみならず、従来あまり重要視されていないパワー・ユニットやコンパスのガタなど系全体に含まれる発振要素に対する見なおしが必要である。ここでは、本稿の主題からはずれるので、指摘するにとどめる。

3.3. 本船の異常現象に対する対策

異常現象を有する船がオートパイロットにより保針している状態を考える。前掲の Fig. 4 によると本船は右あるいは左舵 2.5° で直進しているが、PD制御のオートパイロットの場合、この当舵 2.5° は針路誤差が存在してはじめて操舵される。つまり、この場合の比例制御の常数 K_p は 2 であるから、針路誤差 $2.5^\circ/2 = 1.25^\circ$ が必要になる。結局、直進するために必要な当舵量をうるため、オートパイロットがわざわざ針路誤差を作り出している。これをいかに少なくするかが本船のような異常現象を有する船の制御の要点である。

もし、異常流体力の方向がほとんど交代しないとすると、オートパイロットに積分制御を加えて、直進に必要な当舵を与えることができる。したがって、目標針路に沿って保針できるので、この場合には、異常流体力の分だけ舵角は増すが、制御上、問題は少ない。

問題となるのは、異常流体力の方向が比較的容易に交代する場合である。積分制御を強めることも一つの対策と

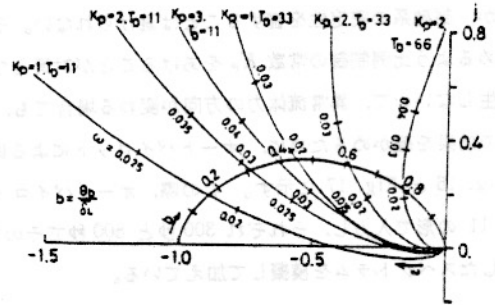


Fig. 14 Nyquist Diagram Using Kochenburger's Method (Full)

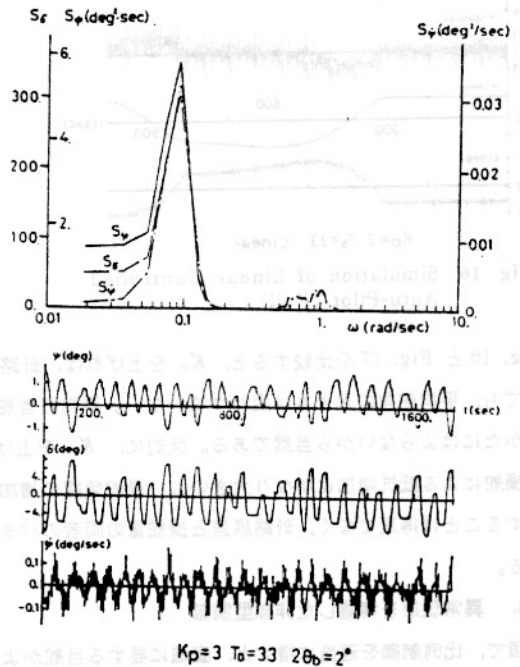


Fig. 15 Example of Self-Sustained Yawing by Auto-Pilot (Full)

なるが、制御系の安定性を害することは避けられない。そこで、多少の針路誤差は許容するが、その量をわずかにとどめるよう比例制御の常数 K_p をあげることが対策となりうる。針路誤差が少なければ、実用上の不都合はほとんど生じないので、異常流体力の方向が変わる場合でも、変わらない場合でも、この方法は効果が期待できる。

この効果を確かめるために、オートパイロットによる保針運動を Runge-Kutta-Gill 法によつて計算し、それを Fig. 16 と Fig. 17 に示す。この際、オートパイロットは PD 制御とし、天候調整機構は含まない。 δ_a は、Fig. 11 の形で入力し、それぞれ 300 秒と 800 秒でその符号を変えている。外乱 $\dot{\psi}_v$ は本船の保針時の記録より推定したスペクトラムを模擬して加えている。

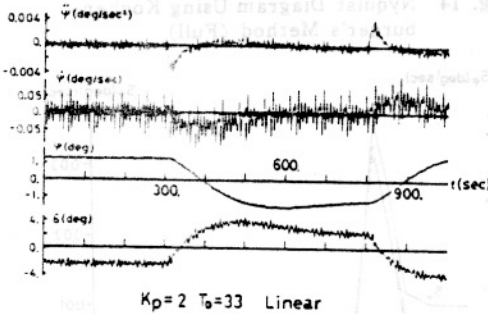


Fig. 16 Simulation of Linear Controlled Auto-Pilot (Full)

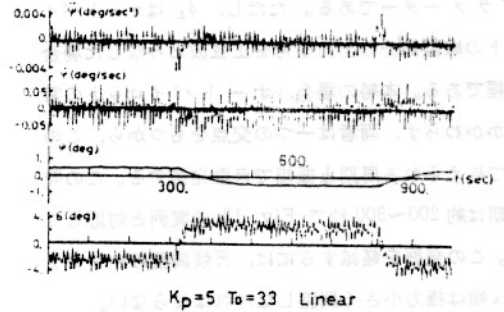


Fig. 17 Simulation of Linear Controlled Auto-Pilot (Full)

Fig. 16 と Fig. 17 を比較すると、 K_p を上げれば、針路誤差はその分だけ小さくなっている。しかし、 K_p を上げて、平均舵角の大きさは変わっていない。平均の当舵は船固有の性質によつて決まり、外乱の大きさや制御のしかたにはよらないから当然である。反対に、 K_p を上げた分だけ、一つ一つの外乱に対する操舵は増えている。操舵による抵抗増加はかなり大きいし、操舵頻度の増加は操舵機にとつて有害であるので、 K_p をむやみに大きくすることは得策でなく、針路誤差と操舵量の両者のバランスを考えて、オートパイロットの調整を行なう必要がある。

3.4. 異常現象を考慮した非線型制御

前項で、比例制御を適当に増すと、直進に要する当舵がより少ない針路誤差で与えられることを示した。反面、ゲインの増した分だけ、外乱に対し無益な操舵をする。この矛盾を解決するためには、非線型制御を導入して、必要なところだけゲインを増せばよい。

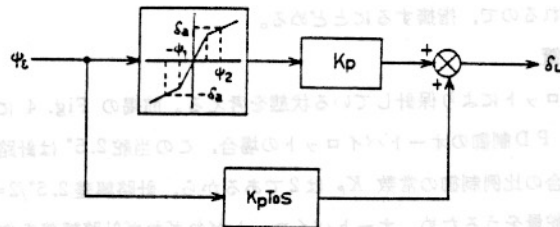


Fig. 18 Block Diagram of Proposed Nonlinear Controlled Auto-Pilot for Unusual Phenomena

このような非線型制御の例を Fig. 18 に示す。図中の非線型要素は、針路誤差が $\pm\psi_1$ 以内ではゲインを十分大きくとり、その外側では 1 のゲインをとる。こうすれば、わずかな針路誤差で直進に要する当舵が得られ、直進中は与えられた小さなゲイン K_p で保針する。ただし、 $\pm\delta_a$ を与える針路誤差 $\pm\psi_2$ は、 $\psi_2 - \psi_1$ を波浪による yawing 振幅以上にとる。これは、外乱に追従する操舵を軽減するためである。

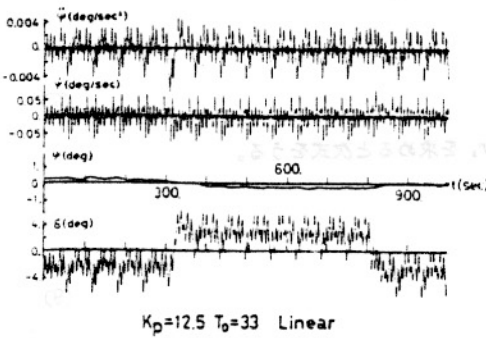


Fig. 19 Simulation of Linear Controlled Auto-Pilot (Full)

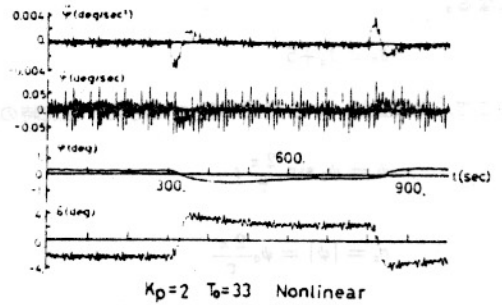


Fig. 20 Simulation of Nonlinear Controlled Auto-Pilot (Full)

Fig. 19 と Fig. 20 は、この非線型パイロットの効果を確かめたシミュレーション結果である。Fig. 19 は、前述の K_p を上げる方法で針路誤差が $\pm 0.2^\circ$ になるようにしたもので、Fig. 20 はここで提案した新しい非線型制御を加えて、針路誤差を同じく $\pm 0.2^\circ$ になるようにしたものである。微分制御の常数 K_p や外乱などは、両者とも同じである。

双方とも平均舵角は等しいが、この非線型制御を加えた場合、舵角の変動量ははるかに小さいことがわかる。また、Fig. 20 を Fig. 16 と較べると、 K_p が同じであれば、この非線型制御を使うと、操舵量はほとんど変わらず、針路誤差をはるかに小さくできる。

4. 操舵員による異常現象を有する船の制御

前節では、異常現象を有する船のオートパイロットによる保針について述べてきたが、狭水路や港湾域における操船では、操舵員が舵をとらなければならない。したがって、人間が異常現象の存在する船を、どこまで操舵できるのかについて考える。

小山は、操舵員による針路不安定船の保針に一つのモデルを与えた⁷⁾。これによると、人間による保針制御は、一定の角速度になると反対舷に操舵する、いわゆる、角速度バンバン制御であるとしている。この制御によつて、船は小さい自動発振をしながら目標針路を保つ。そして、この発振振幅に制限を加えると操舵員にある負担が要求される。人間に過度の要求はできないから、この結果より、人間の保針可能限界が得られる。この操舵員の負担を表わすものとして操舵時間間隔をとる。種々の経験により、この操舵時間間隔が15秒以上であれば人間の負担として許容できるとしている。

野本は二次系の操縦応答モデルを使つて、この自動発振周期を求める式を導いた⁸⁾。これによると、転舵する時の角速度を r_s (deg/sec)、一定舵角を ψ_0 (deg) とした時、発振周期 τ (sec) を次式で求めている。

i) $\tau/2 T_2 > 2, \tau/2 |T_1| < 1$ の時、

$$\tau = \frac{4T_1}{T_1 - T_3} \left\{ \frac{r_s}{K\delta_0} (T_1 - T_2) \cdot (T_3 \cdot T_2) \right\} \quad (5)$$

ii) $\tau/2 T_2 < 2, \tau/2 |T_1| < 1$ の時、

$$\tau = 4T_1 \frac{r_s T_2}{K\delta_0 T_3} \quad (6)$$

異常現象を有する船を人間が保針する時にも、この角速度バンバン制御を操舵の基本型と考えることができる。しかし、通常の船とちがひ、 $\pm \delta_0$ の範囲では、針路が反転しないことがありうるので、 $\pm \delta_0$ だけ余分に操舵すると考えられる。

そうすると、通常の船で行なうバンバン制御の舵角を 5° とすれば、異常現象を有する船では、この舵角は次の

値になる。

$$\delta_0 = \delta_s + 5 \tag{7}$$

ここで、発振振幅 ψ_0 と発振周期 τ を与え、転舵時の角速度 r_s を求めると次式をうる。

$$\psi = \psi_0 \sin \frac{2\pi}{\tau} t \tag{8}$$

$$r_s = |\dot{\psi}| = \psi_0 \frac{2\pi}{\tau} \tag{9}$$

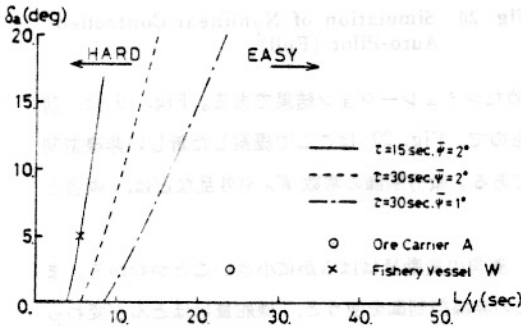


Fig. 21 Permissible Region of δ_s Versus L/V

(7) 式、(9) 式と τ を前述の (5) 式あるいは (6) 式に代入すれば、その時、許容される δ_s が求まる。

Fig. 21 は、こうして求まった δ_s を、本船の無次元操縦性指数を用い L/V を横軸ととして計算したものである。図中、発振周期 15 秒、発振振幅 2° の線より左側では、まず、保針不可能であり、発振周期 30 秒、発振振幅 2° ではかなり保針が困難、そして、発振周期 30 秒、発振振幅が 1° の線の右側では保針が楽になると考えてよい。また、(5)、(6) 式によると、周期が十分に短い時には、針路安定性のちがいはこの

限界値にあまり影響がないことがわかる。したがって、人間が異常現象を有する船を保針できるかどうかは、ある程度、針路安定性とは別に、独立に判断できる。

図中、○印は本船の実績を示すが、保針は容易という領域にはいつている。事実、本船は保針に特に困難は認められない。他方、×印は、前述の漁業調査船²⁾の例であるが、その保針は極めて困難であった。

このようにみると、本稿で示した人間による異常現象を有する船の保針の難易を評価する方法は、実際の経験とよくあっているようである。すなわち、 L/V の小さい船ほど異常現象が保針の困難に結びつく可能性が強い。異常現象を有する、 L/V が 10 ないし 15 秒以下の船の場合、 δ_s の大きさや現象のあらわれ方にもよるが、制御面での対策を考えるより、センターフィン等の対策をとつて現象そのものをなくすことに努めるべきといえる。

5. 結 言

第一報の模型実験に引き続き、実船実験を行ない、その操縦性能を確認するとともに、異常現象を有する船の制御のあり方について検討した。本研究で得られた主な結論は次のとおりである。

- (1) 本船は満載時、針路不安定を基本的性質とし、それに異常現象がつけ加わつた特異な操縦性能を有する。本船には舵角に換算して $\pm 2.5^\circ$ 相当の異常流体力が作用しており、ランダムにその方向が交代する。
- (2) 実船の操縦性能は模型船に較べて針路不安定になっている。一方、異常現象は基本的には両者が同じであるが、その現われ方は微妙にちがっている。
- (3) 本稿で提案した異常現象を有する船の二次系操縦応答モデルは、本船の操縦性能をよく表わしている。
- (4) 異常現象を有する船のオートパイロットの調整は、制御系の安定性等に対する一般的注意事項の他に、3.3.、3.4.で述べた異常現象に対する配慮が必要である。
- (5) 3.4.で提案した新しい非線型制御は、異常現象を有する船の制御に対して有効であり、効果が期待できる。
- (6) 異常現象を有する船を人間が操舵する時、 L/V が小さい船ほどその保針が困難となるから、小型船、高速

船では、異常現象を避けるよう設計上十分注意すべきである。

本研究は日本—オーストラリア—往復の間乗船して得た資料を基礎としている。この機会は、新和海運(株)、佐世保重工業(株)両社のご理解とご厚意により与えられたものであり、谷川典人船長をはじめとする関係各位に深く感謝する次第である。また、オートパイロットの調整、計測器との接続、あるいは、資料収集、情報交換に関して豊国産業(株)、(株)東京計器、(株)布谷計器製作所、(株)北辰電機製作所のご協力を得た。さらに、広島大学工学部、仲渡道夫教授、原田久明教授からは、折にふれ、種々の助言、指導をいただいた。本研究は、このように多くの人々のご援助とご協力によるものであり、関係各位に厚く御礼申しあげる。

なお、本研究の経費の一部は、昭和53年度文部省科学研究費補助金によること、ならびに、本研究の計算は、広島大学船舶工学教室のPANAFACOM U-300により行なつたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) Nomoto, K.: Unusual Scale Effect on Manoeuvrabilities of Ships with Blunt Bodies, Written Contribution of 11th ITTC, Tokyo, (1966)
- 2) 仲渡道夫他: 漁船船型の特異な操縦性能とその改善に関する研究, 日本造船学会論文集, 第143号, (1978年)
- 3) 小瀬邦治他: 肥大船の特異な操縦性能に関する研究, 西部造船会会報, 第54号, (1977年)
- 4) Tagano, H. et al.: On the Unusual Phenomena in Manoeuvring motions of a Full Ship Model, Mitsubishi Technical Bulletin, No. 116, (1976)
- 5) 野本謙作: 自動操舵の安定性について, 日本造船学会論文集, 第104号, (1959年)
- 6) Kochenburger, R. J.: Frequency Response Method of Analyzing & Synthesizing Contactor Servomechanisms, Trans. American Institute of Electrical Engineers (Part 1), (1950)
- 7) Koyama, T.: A Proposal of a Method to Specify the Permissible Region of Instability in the Steering Characteristics of Ships, I. S. P., Vol. 19, No. 213, (1972)
- 8) 野本謙作: 針路不安定船の保針可能限界に関する一計算, JTTC 第二部会資料, 第38回, (1974年)

APPENDIX: Hurwitz の安定条件と針路不安定船への適用

制御系の安定判別の方法には、ベクトル軌跡法、根軌跡法、Nyquistの方法等多数あるが、ここでは、特性方程式の係数のみで安定判別が可能なRouthあるいはHurwitzの安定条件(両者は同等)について述べ、これをPD制御を加えた針路不安定船の場合に適用する。

A. 1. Hurwitz の安定条件

Fig. A-1のようなフィードバック系を考える。閉回路伝達特性は、次式で与えられる。

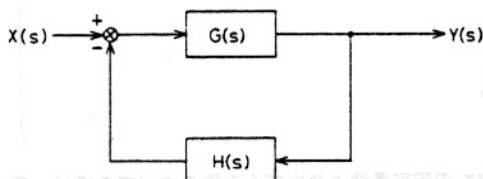


Fig. A-1 Block Diagram of Feedback System

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{G(s)}{1+G(s)H(s)} = \frac{b_n s^n + b_{n-1} s^{n-1} + \dots + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0} \quad (\text{A.1})$$

ただし、 $n \geq m$ で、ともに自然数である。

特性方程式は、

$$a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0 = 0 \tag{A.2}$$

であり、系が安定である条件は、特性方程式のすべての根が負の実根をもつことである。そのためは、次の(1)、(2)、(3)すべてを満足することが必要十分条件である。

- (1) a_n, a_{n-1}, \dots, a_0 の係数がすべて存在し、
- (2) 全部同符号で、
- (3) 次の行列式 (Hurwitz の行列式) が成り立つこと。

$$D_i = \begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} & \dots & a_{n-2i+1} \\ a_n & a_{n-2} & a_{n-4} & \dots & a_{n-2i+2} \\ 0 & a_{n-1} & a_{n-3} & \dots & a_{n-2i+3} \\ 0 & a_n & a_{n-2} & \dots & a_{n-2i+4} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_{n-i} \end{vmatrix} > 0 \tag{A.3}$$

ただし、 $i = 2, 3, \dots, n$ であり、 a_k は $k < 0, k > n$ なる整数の時 0 とする。

A. 2. 針路不安定船への適用

PD制御を加えた船の制御系に Hurwitz の安定条件を適用する。オートパイロット (ただし、天候調整機構は除く)、操舵機、船およびコンパスの特性は、Fig. 11 にしたがう。この時、特性方程式 (A. 2) 式は次のようになる。

$$s(1+T_1s)(1+T_2s)(1+T_Es) + K_P K(1+T_Ds)(1+T_3s) = 0 \tag{A.4}$$

この式を整理して、上述の Hurwitz の安定条件を求め、各指数の符号や大きさを考慮して整理すると、結局、次式をうる。

$$T_D = \frac{-\{q_2(-K_P K) - q_3\} + \sqrt{\{q_2(-K_P K) - q_3\}^2 - 4q_1\{q_4(-K_P K)^2 - q_5(-K_P K) + q_6\}}}{2q_1(-K_P K)} \tag{A.5}$$

ただし、

$$\begin{aligned} A &= T_1 T_2 T_E \\ B &= T_1 T_2 + T_2 T_E + T_E T_1 \\ C &= T_1 + T_2 + T_E \\ q_1 &= A - B T_3 \\ q_2 &= (2A - B T_3) T_3 \\ q_3 &= 2A - B C - B T_3 \\ q_4 &= A T_3^2 \\ q_5 &= 2A T_3 + B^2 - B C T_3 \\ q_6 &= A - B C \end{aligned} \tag{A.6}$$

(A. 5) 式が満たされる場合、Hurwitz の安定条件より出てくる他のすべての式は、常に成立する。Fig. 12 は (A. 5) 式を示したものである。

