

(昭和 45 年 11 月日本造船学会秋季講演会において講演)

異常現象を伴う船の操縦性の一解析

正員 元 良 誠 三* 正員 高 木 又 男**
 正員 国 米 昭 久** 正員 加 藤 洋 治*
 正員 小 山 健 夫*

An Analysis of the Maneuverability of a Ship Associated with
 Unusual Characteristics under Steerage

by Seizo Matora, *Member* Matao Takagi, *Member*
 Akihisa Kokumai, *Member* Hiroharu Kato, *Member*
 Takeo Koyama, *Member*

Summary

In this paper, the authors deal with the maneuverability of a ship which was reported to have shown an excessive yawing and rudder motion under automatic control. Result of spiral test has also shown that the ship responds quite capriciously at small rudder angle ; i.e. the ship sometimes switched direction of turn without any change of rudder angle, and most of cases, periodical yawing of about 90 seconds was superposed. The authors, having assumed these phenomena to be induced by unsteady hydrodynamic forces caused by separation of the boundary layer, conducted experimental investigations using a free running model as well as a restrained model. Flowline observations have also been conducted on an image model in a wind tunnel. Analysing results obtained, the authors proposed a hydrodynamic explanation of this unusual behavior of the ship that it must be caused by a combination of periodic change of hydrodynamic yawing moment and an abrupt change of yawing moment on the drift angle basis.

1 緒 言

近年タンカーが急速に肥大化してきたのに伴つて、境界層のはくりによるものと思われるような現象が現われて来た。抵抗、推進性能関係ではいわゆる不安定現象¹⁾であり、操縦性ではいわゆる異常現象^{2,3)}と呼ばれるものがそれである。特に操縦性の異常現象は最近まで模型にのみ現われ、実船では起こらないために模型実船の相関を著しく困難なものとした。

巨大タンカーでは、操縦性能に対する異常現象は、旋回角速度の余り大きくない範囲で、進路安定性が著しくよくなるという形で主として現われ、その流体力学的な説明も試みられたが、未だ完全に現象が説明されるには至っていない。

一方巨大船のみならず、漁船やその他の小型船でも、やや異つた形でやはりはくり現象によると考えられる操縦性の異常が発見されている。その一つは漁船で、小舵角に対する反応が気まぐれで一定せず、又舵角を一定にしているのにヨーイングをすること、および船尾のボシングのやや前方に、水平のヒレをつけることにより、小舵角に対する反応の不確定さが著しく改善されたことが報告されている⁴⁾。

著者等は、最近セメント運搬船でこれと類似の現象がおこつたことを試運転結果で知つたので、その対策を含めて、異常な現象の起こるメカニズムを模型実験により、流体力学的に考察して見た。その結果、一応定性的につじつものあう程度の説明ができたように思われるので、取敢えずここに発表し、大方のご批判を仰ぐ次第であ

* 東京大学工学部船舶工学科

** 日立造船技術研究所

る。

もとよりこの種の問題は極めて複雑且つ多岐にわたる問題で、短時間で完全な解明をすることはとうてい不可能である。本論文が、現象の説明の一つの試みという形で問題を提起することにより、より正確な解明への導火線となれば幸いである。

2 実船における現象

2.1 オートパイロット作動時の操縦性

まず問題提起の直接の動機になった実船における現象について述べるが、その船の主要目等は Table 2.1 に正面線図は Fig. 2.1 に示してある。

本船程度の船型、舵面積等ではオートパイロットによる保針性が運航上問題になるとは従来の常識からは予測し難かつたのであるが、満載状態のオートパイロットによ

Table 2.1 要目表

L	100.0 m
B	16.4 m
d	7.0 m
Cb	0.746
V	12 kt
AR/Ld	1/56

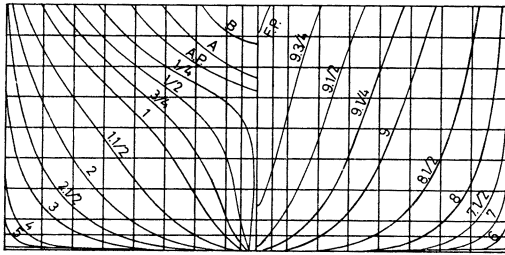


Fig. 2.1 正面線図

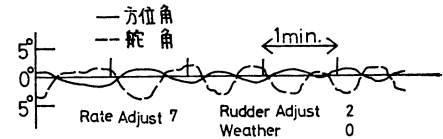


Fig. 2.2 オートパイロットによる直進記録

る直進時に振巾の大きい周期的なヨーイングが起り、オートパイロットの各調整を変えても振巾をほぼ 3° (両振巾) より小さくすることはできなかった。また舵角調整の如何に拘らず周期はほぼ 90 秒であった。Fig. 2.2 は船の方位角と舵角の記録の一部を示したものである。

Fig. 2.3 のブロックダイアグラムに示す本船のオートパイロットによる自動制御系の特性を調べるため、航走中に自動変針用の針路設定ノブを周期的に左右にまわし、その時の舵角および方位角を計測し、設定針路と実際針路の差(偏差)を入力、実際針路を出力とする一巡伝達函数の

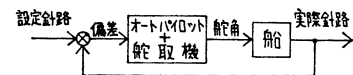


Fig. 2.3 自動操舵系のブロックダイアグラム

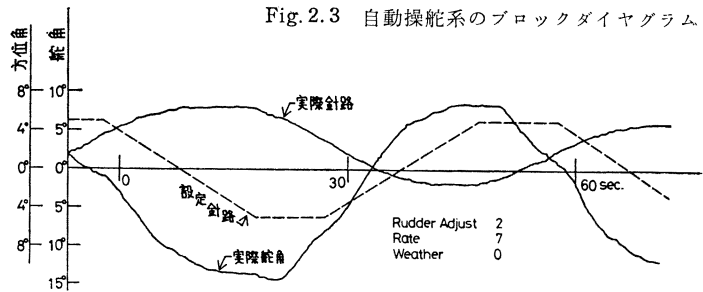


Fig. 2.4 台形波入力による周波数応答試験の記録例

周波数応答を求めてみた。計測例は Fig. 2.4 に示すが、針路設定ノブは正弦波状の代りに図に点線で示したように周期的に台形波状にまわして基準入力とした。なお解析は等価線型化法によつた。台形波状の設定針路の振巾としては 3° 、 5° (片振巾) の2通りについて行つたが、解析結果において両者の間に殆んど差は見られなかつたので両者を特に区別することなく、ゲインおよび位相差を周波数に対して置点したのが Fig. 2.5 である。設定針路を周期的に変動させることは船に周期的な強制外力が作用することに相当すると考えられ、この場合には Fig. 2.5 からわかるように位相余裕はほぼ 50° で自動制御系は安定になっていることを示している。

2.2 スパイラルテスト

実船のスパイラルテストの結果は Fig. 2.6 に示してある。この試験は舵角を一定に保持して得られる定常旋回角速度を計測したも

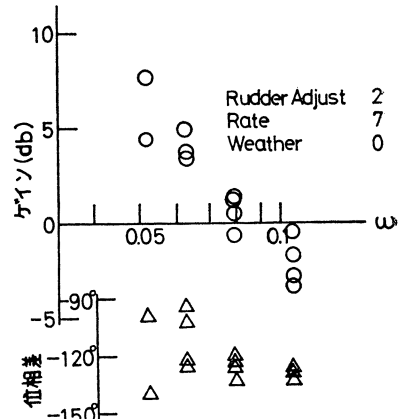


Fig. 2.5 一巡伝達関数の周波数特性

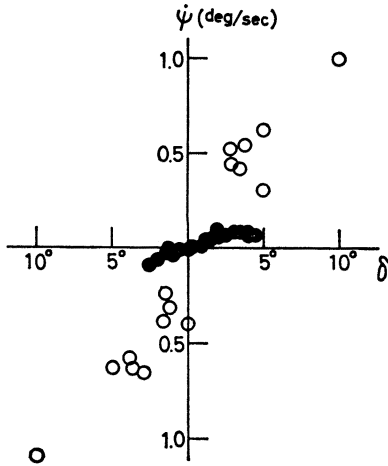


Fig. 2.6 スパイラルテスト（舵角固定方式）

Fig. 2.6 の黒丸印はこのような現象が現われたものについて Fig. 2.7 の点線で示すような平均的角速度を読み取り表示したもので、小舵角においては平均的な進路安定性は強いことを表わしているが、回頭角速度が変動する意味では不安定である。(Fig. 2.6 の白丸印は旋回角速度が変動しないで一定値に収まったものを示す) これらの現象は肥大船型の模型船でしばしば現われるものと同質のものと考えられる^{2,3)}。

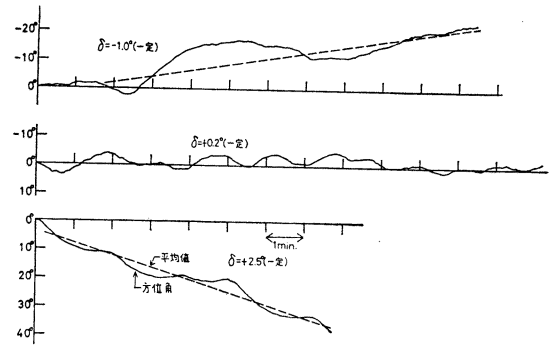


Fig. 2.7 実船のスパイラルテスト時の方位角記録例

のであるが、小舵角の場合は Fig. 2.7 の方位角の計測記録に見られるように角速度は一定値に収まらず周期的（ほぼ 90 秒）に変動する現象が生じ、旋回方向が急に変わることもあった。

3 模型船における現象

3.1 原型のスパイラルテスト

実船における異常現象の究明と、それを改善するための方策を求める手段として、模型実験に信頼がおけるとすれば便利である。そこでまず、模型船によつて実船に起きた異常現象が再現できるかどうかを調べるためにスパイラルテストを行なつた。

使用模型は $L_{PP}=263$ cm の木製模型で、1 パルスにより 1° 操舵できる無線操舵航機を装備し、船内に積んだ蓄電池を電源として $V_m=92$ cm/sec で自航する。使用水面は東大航海性能水槽で、屋根付きであるため無風が保証され、条件は極めて良好であつた。水面が狭いため、1 回の実験で 1 点のプロットに止まるが、始め実験舵角より大きな舵角をとつて初期角速度を与えたのち、所定の舵角に戻す方法をとつた。記録は模型船内の記録器に角速度と舵角を記録した。

求めた結果を Fig. 3.1 に示す。図中点を矢印で結んだ所があるが、これは舵角一定にも拘わらず角速度がその範囲で変動していることを示す。この変動は一見ランダムであるが、ときどき実船で見られたような非常に周期的な変動をする場合があり、とくに $1^\circ \sim 3^\circ$ の小舵角をとつたときよく起きるようであつた。この周期的変動の一例を Fig. 3.2 に示す。周期は約 8 秒、振幅は $0.4^\circ/\text{sec}$ 程度で注意していれば模型が揺れていることが目視によつても判別できた。

以上から、実船と全く同じ現象であると云えるかどうかはともかくとして、かなり良く似た現象が模型でも起

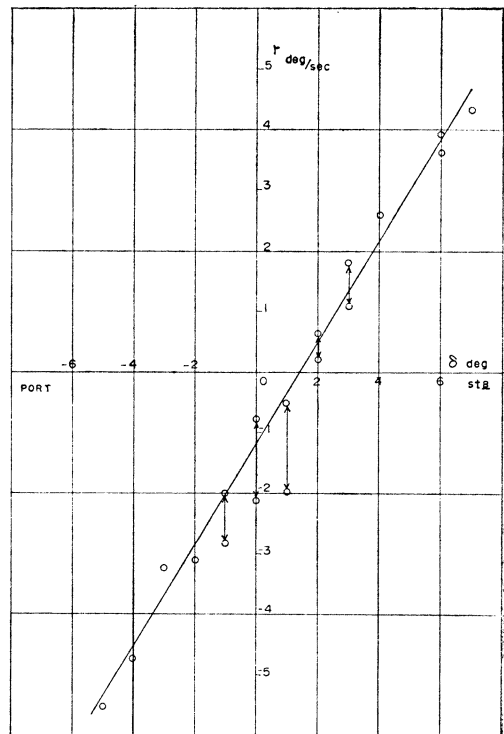


Fig. 3.1 原型のスパイラルテスト

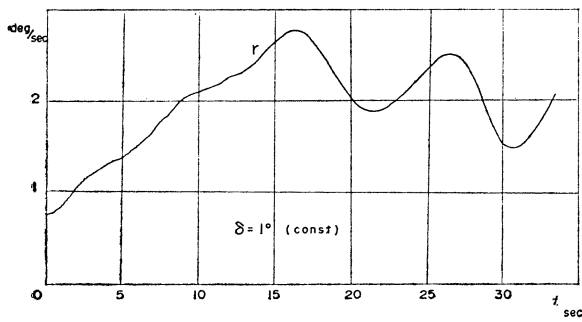


Fig. 3.2 角速度の周期的変動

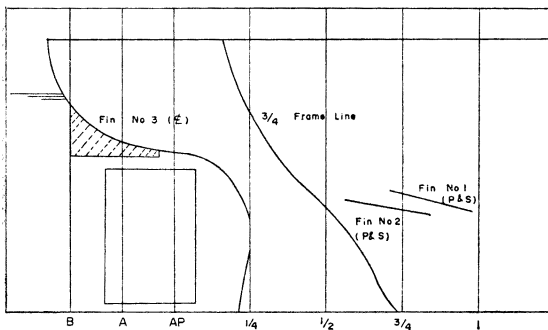


Fig. 3.3 各種フィンの位置

きると考えてよいであろう。

3.2 各種フィンの効果

このような異常現象を防止する方法として従来船尾の両側面にフィンをつけるとある程度効果があるということが知られている⁴⁾。しかし、フィンの効果がどのような機構で現われるのかについての定説はない。そこで当面の対策も考慮しつつ Fig. 3.3 に示すような3種類のフィンをつけてそれぞれについてスパイラルテストを行なってみた。結果を Fig. 3.4~3.6 に示す。

フィンの位置による特性の変化は驚異的であり、とくに Fin No. 1 と Fin No. 2 とでは、取付位置の僅かな差により信じられないほどの差が出た。Fin No. 1 の場合は典型的な不安定船であるが、性質としては異常ではなく“素直な不安定”といえる。Fin No. 2 の場合は原型とほとんど変わらず、かえって異常さが強くなるようである。

Fin No. 3 の場合は限界安定程度で異常現象も弱まっているが、左右の非対称性が目立つ。船尾フィンは通常では安定化に役立つも

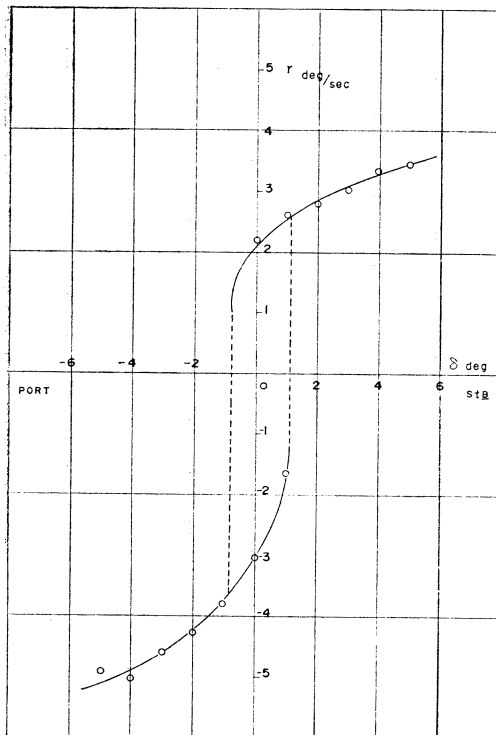


Fig. 3.4 スパイラルテスト Fin No. 1

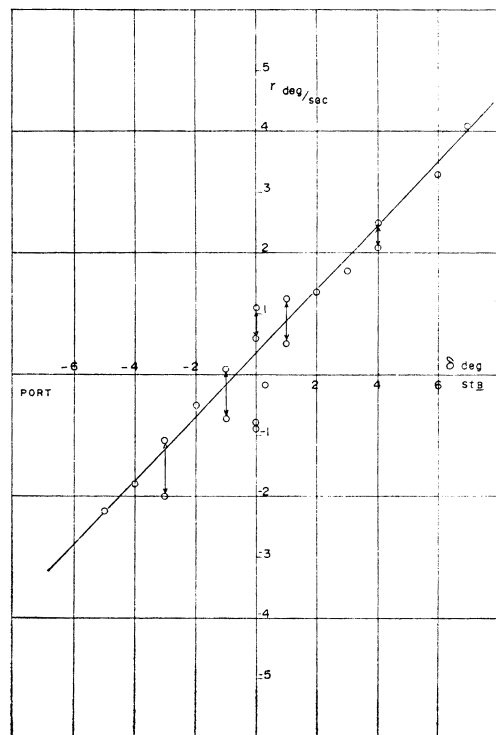


Fig. 3.5 スパイラルテスト Fin No. 2

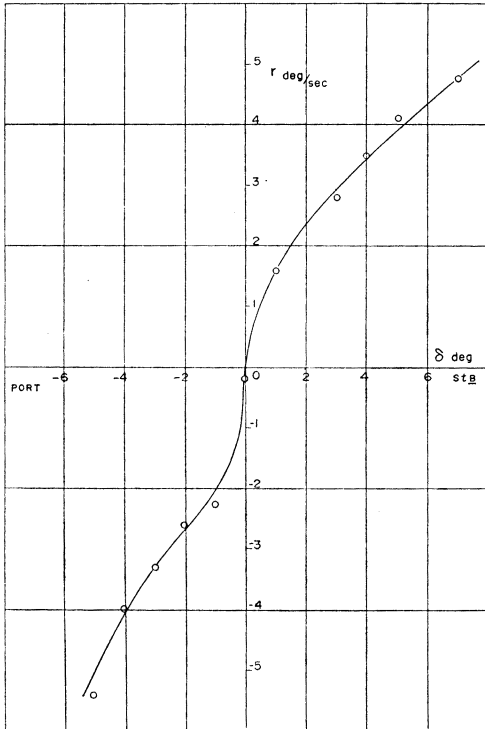


Fig. 3.6 スパイラルテスト Fin No. 3

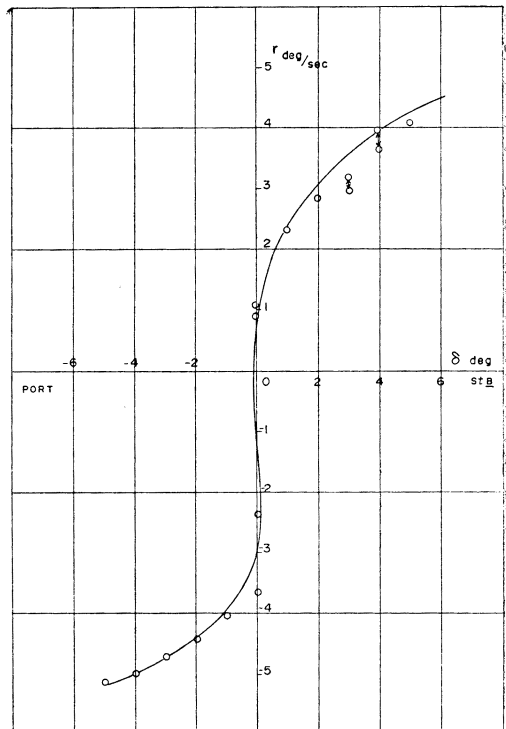


Fig. 3.7 スパイラルテスト Fin No. 1+Fin No. 3

のと考えられているが、このような結果になった事は注目すべきであろう。Fig. 3.7 に Fin No. 1 と Fin No. 3 をつけた場合の結果を示す。舵角 0° のとき点がかかなりばらついているが、総じて素直な特性と云えよう。

以上の実験結果から、当面の対策としては Fin No. 1 の効果には興味があるにしても、僅かな位置の変化により特性に大きな差が出る以上、実際に使用するには危険があると考え、実船には一応 Fin No. 3 のみを取りつけることにした。

4 実船におけるフィンの効果

前章の理由により模型の No. 3 フィンとほぼ同じものを実船に取付けたが、その効果を調べるための 2, 3 の実船計測を実施する機会を得たのでその結果について簡単に述べる。

オートパイロットによる直進時のヨーイングの大巾な減少は認められなかったが、両振巾で 1.5° 程度には押えることができ、実際の運航上の支障は無くなったようである。Fig. 4.1 にオートパイロット作動時の方位角の記録を示す。

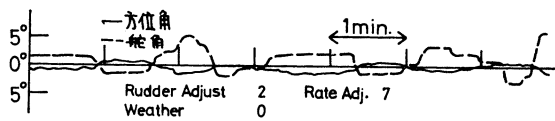


Fig. 4.1 オートパイロットによる直進記録 (フィン付)

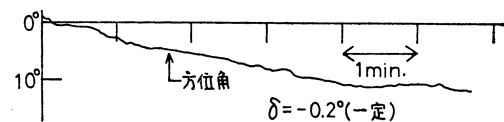
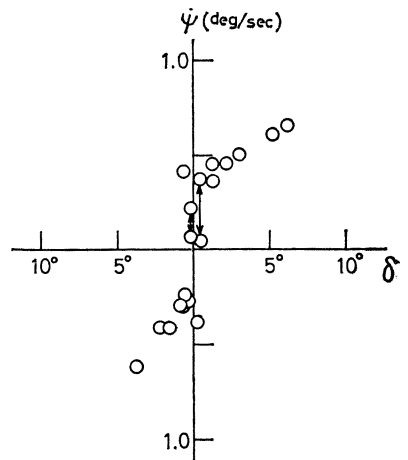
Fig. 4.3 スパイラルテスト時の方位角記録例
(フィン付で異常現象の現われたもの)

Fig. 4.2 実船のスパイラルテスト (フィン付)

次に Fig. 4.2, 4.3 に示したスパイラル試験結果であるが、微少舵角での変動する現象が完全に消滅したわけではなく僅かに残っているが、その現象の発生する舵角の範囲は極く狭くまた角速度の変動量も相当小さくなっている。したがって Fig. 4.2 に示す舵角対角速度の関係は異常現象を伴わない通常の船の場合の形に非常に近くなっている。なお参考のためフインの有無による Z 試験結果を対比して Fig. 4.4 に示す。小舵角においてフインの効果が現われ、平均的な進路安定性は減じている。

5 現象の解析

5.1 異常現象の総括

本章では種々の運動論的モデルを提起し前章までに述べた諸現象を説明することを試みるわけであるが、叙述の便宜上、説明すべき異常現象を総括すれば次のとおりである。

(イ) 実船のスパイラルテストで小舵角附近の計測点がちらばり、逆履歴的な傾向をみせることがしばしばある。また、ちらばつた点を平均すると安定化の傾向がみられる。

(ロ) 実船のスパイラルテストで舵を固定（小舵角）しているにも拘らず旋回中 90 秒程度の周期で角速度が変動する。

(ハ) 小舵角での実船のスパイラルテスト中に旋回方向が変わることがある。

(ニ) オートパイロットをかけて直進中に $3^{\circ}\sim 5^{\circ}$ の両振巾の周期的ヨーイング運動をする。この運動はオートパイロットの角速度制御などによつてはこれ以上制止できない。

(ホ) 模型船に No.1 のフインを附けてスパイラルテストを行うと角速度が変動する現象はなくなり、船の操縦性はループを持つて強い“すなおな不安定”を示す。

(ヘ) No.2 のフインを付けたときは、原型とほぼ同じように船の操縦性は異常安定の性状を示すが、旋回中に角速度が変動する性質は原型より強まる。

(ト) No.3 のフインをつけると角速度変動現象が殆んどなくなり、スパイラルテストの結果はフイン No.1 の場合に近づいて限界安定程度になる。

5.2 仮説的モデルの提起

本報告に述べたような小舵角の運動中に異常復原モーメントが発生し、船の操縦性が安定化する現象はかなり前から知られており^{2,3)}、流体の三次元的はくり現象が原因であろうと推定されていた。ここでは、これまでに行われてきた流れの観測に関する実験あるいは回転体のまわりの流れについての研究⁵⁾などを参考にして、以下に述べるような3つのモデルを考えた。

5.2.1 原点を中心とした異常モーメントを持つ系

船体には通常の流体モーメントの他に Fig. 5.1 に示すような異常モーメントが作用するとする。ただし、ここに M は異常モーメントであり、 β は船体後半部への流

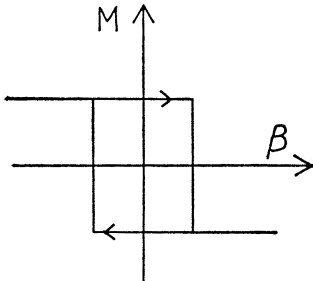


Fig. 5.1 異常モーメント

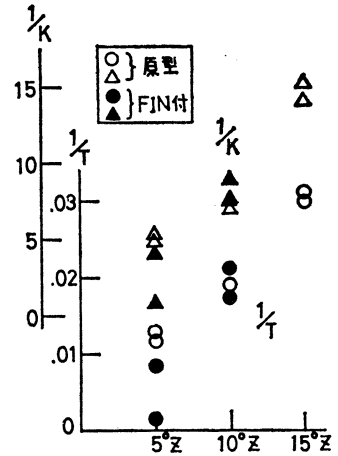


Fig. 4.4 実船の Z 試験結果

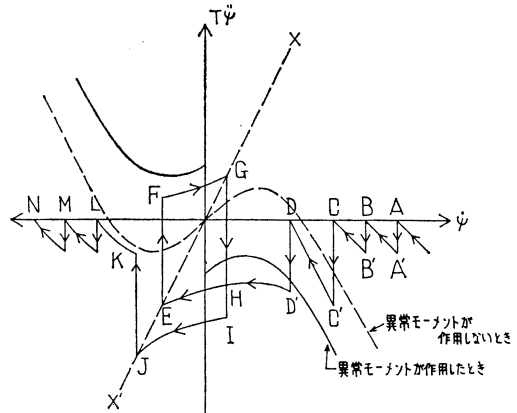


Fig. 5.2 スパイラルテスト時の位相面

入角を示す。このような異常モーメントが作用するときに舵角を固定してスパイラルテストを行なうと、Fig. 5.2 のような経過をへて Fig. 5.3 のような結果が得られる。Fig. 5.2 は位相面を示し、船の運動方程式は一次系近似

$$T\dot{\psi} + f(\psi) = K\delta$$

で表わしている。ただし、 $f(\psi)$ は旋回抵抗で $\dot{\psi}$ について非線型と考えている。点線および実線は舵角が 0 のときの $\dot{\psi}$ と ψ の関係を示す。また、AA'/BB'……はスパイラルテストが行なわれた経過を示し、D'点では定常状態に達せず、HEFG なるリミットサイクルを作ること示している。ただし、異常モーメントの符号は XX' 上の位相点で変るものとしている。Fig. 5.3 で角速度が変動している部分の平均値をとつたとき、その勾配がゆるくなり、実船のスパイラルテストの結果と似ているのが興味深い。

次に、このような異常モーメントによつてオートパイロットをかけて航行する船がリミットサイクルを作つてジグザグ運動をする可能性があることを付録に示す。

5.2.2 偏角に関し原点对称型の異常モーメントを持つ系

このモデルでは Fig. 5.1 に示すような異常モーメントが船尾への流入角がある値の範囲にあるときに発生し、Fig. 5.4 に示すようになる。

またこのとき異常モーメントは図に示すような履歴現象を伴うものとする。

この異常モーメントが本来進路不安定である船に作用すると、舵角が小さい所では不安定なので角速度が増大または減少し、A または B に至つ

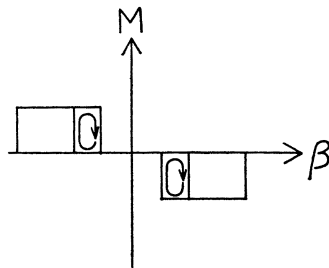


Fig. 5.4 原点对称型異常モーメント

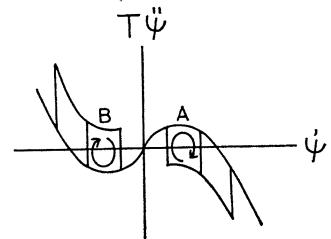


Fig. 5.5 原点对称型異常モーメントを持つ場合の位相面

てリミットサイクルを生じ、周期的な運動をするが、風や波によつて外乱をうけると A ⇄ B と移動する可能性がある。大角度になりその舵角に相当する角速度がはかり点をこえると、もはやリミットサイクルは生ぜず、一定角速度で旋回する。安定ヒレなどをつけて安定化してやれば、異常モーメントが発生しても異常現象はおきない。

5.2.3 原点对称の異常モーメントと周期的外力を持つ系

このモデルでは、船がスパイラルテスト中あるいはオートパイロットをかけて直進中に角速度が変動する現象をするために、異常モーメントとして前項で考えた非線型なモーメントの他に、周期的流体力を考えている。但し、この場合は特に履歴を持つ必要はない。

このモデルでは 5.2.2 と同様に (イ), (ロ), (ハ) の現象を容易に説明することができる。また 5.2.2 で説明できなかったオートパイロットで直進中に起るヨーイングをオートパイロットの調整で減らし得ないことも説明できる。後者の理由を簡単に述べれば次のとおりである。

即ちこのヨーイングの周期 90 秒という値は制御系にとつては $5^\circ Z$ の時定数が 80 秒であることからみて相当短い周期で、外乱を抑制する効果がなくなるあるいはかえつて拡大される周波数範囲にあたる。そのためオートパイロットの調整をかえても微分制御を非常に強くかける以外にはこのヨーイングを減ずることはほとんど不可能である。

5.3 モデルの適合性の検討

上述のように、異常現象を説明するために 3 つの仮説的モデルを挙げたが、これらが 5.1 で述べた諸現象を矛盾なく説明できるかどうかを運動論的に検討し、適合するモデルがあればさらに流体力学的に検討してみる。

5.3.1 運動論的検討

(1) 原点を中心とした異常モーメントを持つ系

この場合 5.2.1 に示したように、(イ)、(ロ) および (ニ) の現象はその理由を説明することができる。また、No. 1 のフィンをつけるとはくりが抑制され異常モーメントが消えるものとするれば、(ホ) の現象も説明できる。No. 3 フィンの効果ははくりの抑制と通常の意味のフィン効果にあるものと思われる。また No. 2 のフィンは境界層外の流れとの位置関係から、はくりに対する抑制作用がなく、原型とほぼ同じ操縦性能を示すものと考えられる。以上のようにこのモデルは、異常現象を全般的にかなりよく説明しているが、(ハ) の現象を説明できない。

(2) 原点对称型の異常モーメントを持つ系

このモデルは前項のものと異なり、流体力学的な説明が常識的で受入れ易いものであり、実船のスパイラルテストに現われた種々の異常現象をよく説明できるが、小舵角付近の不安定を前提としているためオートパイロットによつて運動系を安定化したときのことを想定すると(ニ)の現象を説明することができない。

(3) 原点对称の異常モーメントと周期的外力を持つ系

前述した 2 つのモデルに対し、このモデルでは(イ)～(ト)の現象を比較的容易に説明することができる。特にオートパイロットによる直進時の振動の周期が、舵角比を変えてもかわらないということは、制御系のループの外から何らかの周期的外力が働いていると考えざるを得ず、またこのことは 2.1 で述べたオートパイロットの応答試験で強制外力によつて応答を求めたときは系が安定であつたが、自航状態ではリミットサイクルを生ずることによつても示唆されていると言える。従つて、非線型力に周期的な外力を加えたこのモデルが最もよく実際の現象を説明できる。

5.3.2 適合モデルの流体力学的考察

前項で述べたように運動のモデルとしては 5.2.3 のものが、もつとも適合していることが明らかになったが、このためには原点を中心として船尾流入角のある範囲の間で非線型な復原モーメントおよび周期的流体力が発生することが必要であつた。ここではこれらの発生機構を流体力学的に考察してみる。

まず非線型な復原モーメントについては Nonweiler⁵⁾ が回転体について考察したところから従つて次のように推定する。一般に細長体では最大横切面積を持つ断面より後方では迎角が小さいときは face 側よりも back 側の圧力が高くなるので、cross flow が境界層内部で逆流し、cross flow を止める方向の流れを誘導する縦渦を生ずる。この渦は大迎角の場合と異なり face 側の流れに影響を与え streamwise flow を物体の face 側ではくりさせ、流れは全体として face 側後部で三次元的にはくりにて縦渦を放出する。この時 cross flow に逆らう誘導速度のために、船体後部では face 側、back 側の圧力差は減少し、縦渦を発生しない場合を基準にすれば、揚力を生じたと考えられる。またこの揚力は重心まわりに安定モーメントを生ずることになる。

上に述べたような流れでは縦渦の発生と streamwise flow のはくりの発生がそれぞれ助け合い (face 側の streamwise flow のはくりは船体形状を非対称にし有効迎角を増したような働きをする。)、いつたんこのような組合せが発生すると縦渦はある強さまで発達し、大迎角になつた時、渦は完全に back 側に押しやられて異常モーメントが消えるものと思われる。

周期的な外力の流体力学的な成因は、船体に対する cross flow が二次元流れで生ずるカルマン渦の発生と同じような非定常流場を作ることにあると考えるのである。このように考えれば非定常流場の周期は cross flow の有効平均速度をとつて作つた Strouhal 数が二次元流のときとほぼ同じ値で計算されるものと考えられ、実船の際の周期 90 秒前後の order 的な説明をすることができる。このような説明のほか face 側ではくりするとした上述のモデルにおいて、cross flow に逆らう流れが縦渦によつて誘導されるが、この誘導速度のために縦渦の強さも弱められ、誘導速度が小さくなつて再び縦渦自身が発達してくるというように、縦渦とその誘導速度が流場が不安定であるためにサイクリックに相関連し合つて、周期的流体力を発生するということも考えられる。

次にフィンの効果について考えてみる。船体のような回転体でない物体の流れでは、streamwise flow のねじれが考えられる。これは当然前述の縦渦の発生と関連があると思われる。No. 1 フィンではこのねじれ流の抑制効果が外部流との位置関係で有効な位置にあつたと考えられる。この他フィンが cross flow の境界層内での逆流を安定化し、上述の非定常流場発生を防止する役割をはたしているとも考えられる。No. 2 フィンではこれらの役割をはたすのに適切な位置でなかつたものと推定される。また No. 3 フィンが効果的であつたのは船尾付近の流場を流線化し、streamwise flow のはくりを防止することにあると考えられる。

以上述べたように本報告の異常流体力が肥大船の模型実験で見られた点と特に異なる点は周期外力の発生であ

Fig. 6.3 船尾附近の圧力分布

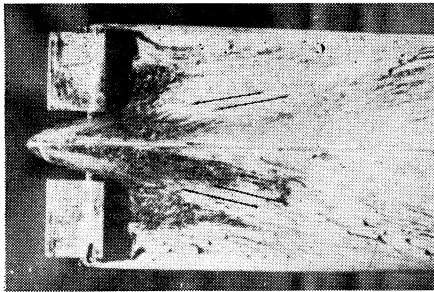
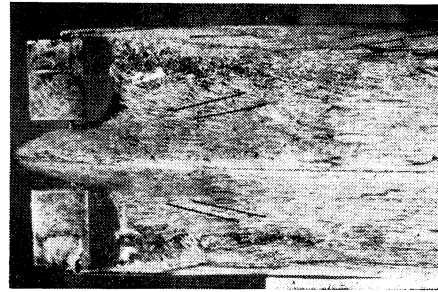
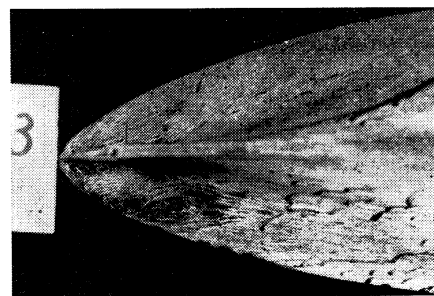
(a) 原型 $\beta=4^\circ$ face 側(b) 原型 $\beta=4^\circ$ back 側(c) No. 1 フィン付 $\beta=4^\circ$ back 側(d) No. 1 フィン付 $\beta=4^\circ$ (e) No. 2 フィン付 $\beta=4^\circ$ (f) No. 3. フィン付 $\beta=4^\circ$

Fig. 6.4 船尾附近の限界流線

さらに細かい測定を行わなくてはならない。またマノメータの応答が遅いため変動圧の測定はできなかった。

6.1.2 限界流線の観察

6.1.1 で使用した模型により船体まわりの限界流線を観察し流場の解明を試みた。限界流線を観察するには次の方法によった。流動パラフィンに油煙をまぜ、それを船体に塗布し風速 35 m/s 程度の風を 10 数分あてると Fig. 6.4 に示すように限界流線の方向が白い線で観察される。

写真はいずれも $\beta=4^\circ$ の場合で Fig. 6.4 (a) (b) はそれぞれ原型の face 側と back 側である。face 側の船尾付近には特徴的な黒い部分が見られる。この部分では表面付近の速度勾配が小さくはくりしやすい、あるいははくりしていることを示している。このようなはくりについては野本⁹⁾によっても報告されている。一方 back 側では大きな縦渦が発生するため船体表面の流れは下向きになっている。この流れに対し船体側面にとりつけられたフィンには 2~30° の迎角を持っている。No. 1 フィンをつけた場合の back 側の流れが Fig. 6.4 (c) に示されているが、このフィンによって下方に向う縦渦の流れが抑制されているのが知れる。Fig. 6.4 (d) (e) (f) はそれぞれ No. 1, 2, 3 フィンを取りつけた場合を船底方向から見たものである。いずれも下方が face 側、上方が back 側になっている。外見上フィンをつけた最も大きな変化は face 側に表われ、フィンの下方で流れが促進され下流ではくり部分がなくなっている。この効果は No. 1 フィンに最も著しく、No. 2 フィンと船尾につけた No. 3 フィンと比較すると No. 3 フィンの方がむしろ効果が大きいように見える。このことは 3 章で述べた操縦性試験の結果と同様であり興味深い。

6.2 周期的外力

5章に述べたように、異常現象には不安定な渦の発生等により、周期的な外力が働いている可能性もある。2, 3章で述べた 90 秒程度の周期の振動を発生させた原因がこのような周期的外力であるとすれば、その力の大きさは舵角に換算して $1^{\circ} \sim 2^{\circ}$ 程度のものであり、斜航試験を行なっても計測誤差の範囲に入ってしまうであろうし、事実斜航試験を行なってみたが、測定装置の精度の範囲内では顕著な変動は見られなかった。

風洞実験での圧力の変動も、普通のマノメータでは見られず、ベツツのマノメータでは変動圧は測定できないという難点があつて、周期的外力が働らくという裏付けは得られない。そこで、船尾渦を観察する目的で水槽にアルミ粉をまき、模型に迎角をつけて曳航したところ、新しい事実が判明した。

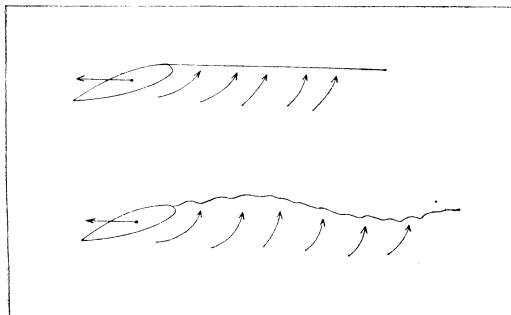


Fig. 6.5 航跡の比較 上：通常の船，下：異常現象を起す船

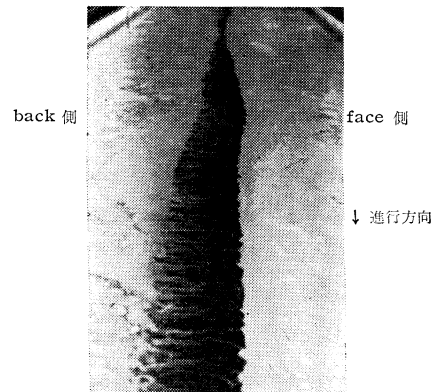


Fig. 6.6 異常航跡

すなわち異常現象を起す船の場合も、船尾付近には、特別な変化はないようであるが、航跡がかなり周期的に蛇行する。これは通常の船では見られない現象であつて (Fig. 6.5, Fig. 6.6), また Fin No. 1 をつけた場合蛇行した航跡はなくなる。この蛇行の波長は約 5.5m で、迎角、船速によらず、この波長を自航速度で割った値が 6 秒であり、3章の模型船の蛇行周期が約 8 秒であることは order としては良い一致であると考えられ、異常現象と深い関係があると思われるべきであろう。

以上の実験からみて、拘束して斜航させた模型からも異常な航路が発生する以上、異常現象の一部として渦等による何らかの周期的外力が働いていると考えるべきであろう。

6.3 検 討

6.1 で述べた船尾付近の限界流線の観察から、原型の cross flow を推定すると Fig. 6.7 のようになる。これは 5.3.2 で述べた回転体のまわりの流れと似ている。フィンをつけると流れに垂直にのびる縦渦が押えられ、特に back 側ではその効果が大きくフィンの上方の静圧が上昇することになる。また周期的な流体力については 5章で考察したもの内 cross flow によるカルマン渦的なものより、face 側での縦渦による流れと cross flow との相互作用によつて周期的流体力が発生するという方が確からしい。前節で述べた航跡の蛇行が face 側で特に顕著であり、またその周期が迎角によらないことも、このことを裏づける。そして適当な位置につけられたフィンがこの反対向きの流れを整流し、流場を安定化する働きを持つものと考えられる。

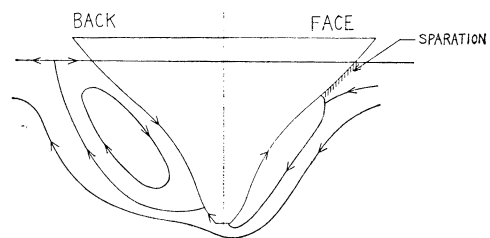


Fig. 6.7 推定される縦渦と cross flow

7 結 論

5.1 で挙げられたような操縦性の異常現象を実船および模型実験で示した船について、次のような流体力学的なモデルを考えれば、運動論的に一応現象を説明できることがわかった。又このモデルは模型水槽試験及び風洞実験により流体力学的にも、一応説明がつくことが確かめられた。

まず想定したモデルとしては

1) この船ははくり等の異常な流れがなければ、元々は進路不安定な船である。

2) 船の偏角が極く小さい範囲では、異常な流体力は発生しないが、ある限界の偏角以上になると、急に異常な流れが船尾付近にでき、そのため不安定モーメントが減少する方向のモーメントを生じる。このモーメントは偏角に対し原点对称である。異常な流れとは、cross flow により生ずる縦渦とそれにより導起される face 側のはくりであると考えられる。

3) 更に異常な流れが消長するために、周期的なモーメントを生じる。その大きさは舵角にして 1° 程度、周期は実船で 90 秒程度である。

このモデルを用いて現象を説明すると次のようになる。

4) 船は進路不安定のため直進できず旋回をはじめ 2) の異常モーメントのため、ある角速度で安定化して定常旋回に入るが、3) の周期的なモーメントのため周期 90 秒程度でヨーイングをする。又わずかの外乱で旋回の向きを変え、反対側の安定点で定常旋回に入り、旋回しながらヨーイングをする。この現象は舵角が $1\sim 2^\circ$ 程度のときも同様である。進路のふらつきを平均して見ると見掛上船は進路安定になつている。(5.1 (イ), (ロ), (ハ)の説明)

5) 周期的な異常モーメントは周期 90 秒程度で、オートパイロットで押えるには短周期すぎ、同程度の周期のリミットサイクルを生じる。従つてこのリミットサイクルの周期はオートパイロットの舵角のレートを変えてもあまり変化せず、レートコントロールもあまり有効でない筈で、実際と一致する。

6) 3.2 に示すよう船尾につけた水平な No.1 フィンは back 側の縦渦の発生を押え face 側の縦渦を安定化しそのため異常モーメントの生じる限界の偏角が大きくなる結果、船はほんらいの“すなおな進路不安定”な性質に戻る。(ホ)の説明)

7) フィンの前後、上下位置の影響は微妙で No.1 よりやや下後のフィン No.2 は原形とほとんど同じか、むしろ異常を助長する。(ヘ)の説明)

8) 船尾中心面につけたフィン No.3 は、やや異常モーメントの生じる限界を広げる作用があり、そのため普通ただ安定効果のある中心面フィンを付けたにも拘らず、船は原形よりは不安定になる。((ト)の説明)

以上のように一応の説明はつくが、なお不明な点が多く、特に流線観測では、フィンの影響が face 側に顕著に現われるのに対し、圧力の変化は face 側でほとんどなく back 側の方が顕著である点は充分な説明ができない。

又フィン No.1, No.2 が上下位置、前後位置とも余り大きな差がないにも拘らず驚異的な効果の差がある点もよく説明できない。恐らくごく局所的な船型の変化がはくり現象に大きく影響するものと思われるが、今後解明するべき問題である。

稿を結ぶに当つて、本研究の当初より有益な御討論をいただいた広島大学野本教授及び実船試験に関し理解と種々の便宜をいただいた近海郵船株式会社、瀬戸田造船株式会社、株式会社東京計器製造所に対し厚くお礼申し上げる。

又実船及び模型実験に際しては大阪大学小寺山亘氏、日立造船技術研究所引野正巳氏、東京大学航空学科高野研究室、東京大学船舶工学科高速力学研究室、運動性能研究室の諸氏のご協力をいただいたことを付記し深甚な感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 渡辺恭二：“肥大船の自航試験に現われる不安定現象について”，造船学会論文集 126 号，昭 44.12 月
- 2) 造船研究協会 SR 98 報告，昭 44.3 月
- 3) 野本謙作：“Unusual Scale Effect on Manoeuvrabilities of Ships with Blunt Bodies”，11th ITTC, Tokyo, Oct., 1966
- 4) 小山健夫：造船学会，水槽委員会第 2 部会資料，昭 43.10 月
- 5) T. Nonweiler：“A theoretical study of the boundary layer flow and side force on inclined slender-bodies”，Rep. Coll. Aero. Cranfield 115.
or B. Thwaites：“Incompressible Aerodynamics”，Oxford, 1960

附録 オートパイロット船のリミットサイクルに関する考察

1. 運動方程式

M を異常モーメントとすれば、船の運動方程式は

$$\left. \begin{aligned} A\ddot{\psi} + B\dot{\psi} + C\beta &= D\delta + M \\ a\dot{\beta} + b\beta + c\dot{\psi} &= d\delta \end{aligned} \right\} \quad (\text{A} \cdot 1)$$

ただし

$$\left. \begin{aligned} A &= n\left(\frac{L}{V}\right)^2, \quad B = C_{M\omega}\left(\frac{L}{V}\right), \quad C = -C_{M\beta}, \quad D = C_{M\delta} \\ a &= m_Y\left(\frac{L}{V}\right), \quad b = C_{Y\beta}, \quad c = -(m_x - C_{Y\omega})\left(\frac{L}{V}\right), \quad d = C_{Y\delta} \end{aligned} \right\} \quad (\text{A} \cdot 2)$$

(A・1)の2つの式から β を消去すれば

$$T_1 T_2 \ddot{\psi} + (T_1 + T_2) \dot{\psi} + \dot{\psi} = K\delta + K T_3 \dot{\delta} + \frac{a}{bB - cC} \dot{M} + \frac{b}{bB - cC} M \quad (\text{A} \cdot 3)$$

を得る。 T_1, T_2, T_3, K は通常与えられるものである。

2. リミットサイクルの必要条件

(A・2)式で

$$-\delta = K_1 \dot{\psi} + K_2 \psi \quad (\text{A} \cdot 4)$$

なるオートパイロットがかけられているものとする。このとき一次系近似を行なえば

$$\left. \begin{aligned} \ddot{\psi} + \left(\frac{1 + KK_1}{T}\right) \dot{\psi} + \frac{KK_2}{T} \psi &= \frac{M_1}{T} \dot{M} + \frac{M_2}{T} M \\ M_1 &= \frac{a}{bB - cC}, \quad M_2 = \frac{b}{bB - cC} \end{aligned} \right\} \quad (\text{A} \cdot 5)$$

以下、等価線型の考えに従うものとして M を正弦函数とする。(A・5)式の右边を M_E とおき、任意の函数 F の位相を $\arg F$ とかけば

$$\left. \begin{aligned} \arg M_E &= \arg M + \alpha \\ \alpha &= \tan^{-1} \frac{M_1 \omega}{M_2} = \tan^{-1} \frac{a\omega}{b} = \tan^{-1} \frac{m_Y \omega'}{C_{Y\beta}} \end{aligned} \right\} \quad (\text{A} \cdot 6)$$

またその振幅は

$$\text{amp. } M_E = \sqrt{\left(\frac{M_1}{T}\right)^2 + \left(\frac{M_2}{T}\right)^2} \cdot \text{amp. } M \quad (\text{A} \cdot 7)$$

ここで(A・5)式が周期解を持つには、 M_E に $\left(\frac{1 + KK_1}{T}\right) \dot{\psi}$ と同じ位相成分のものがなければならない。 $\frac{1 + KK_1}{T} < 0$ の場合には非線型 damping 項があるから、リミットサイクルを作るのに M は必要でない。ここでの興味の対象は $\frac{1 + KK_1}{T} > 0$ の場合にリミットサイクルを作る必要条件を求めることにある。

$$\arg M = \arg \dot{\psi} + \delta \quad (\text{A} \cdot 8)$$

とすれば、 M_E のなかに $\dot{\psi}$ と同じ成分を持つためには

$$\frac{\pi}{2} > \alpha + \delta > -\frac{\pi}{2} \quad (\text{A} \cdot 9)$$

でなければならない。

3. $\dot{\psi}$ と β の関係

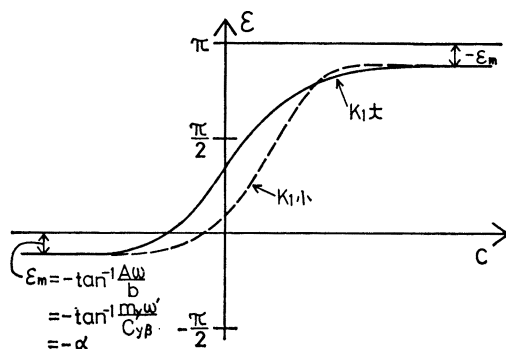
(A・9)式を具体的に考えるまえに、 $\dot{\psi}$ と β の位相関係を明らかにしておく。

$$\dot{\psi} = \dot{\psi}_0 \cos \omega t$$

$$\beta = \beta_0 \cos(\omega t + \epsilon), \quad \pi > \epsilon > -\pi$$

とおけば

$$\left. \begin{aligned}
 \cos \varepsilon &= \frac{K_2 d a \omega - \omega b c + b K_1 d \omega}{P^{1/2}} \\
 \sin \varepsilon &= \frac{a \omega^2 c + a \omega^2 K_1 d + K_2 d b}{P^{1/2}} \\
 \beta_0 &= \frac{P^{1/2} K_2}{K_2 (a^2 \omega^2 + b^2) + 2 a b K_1 \omega^2} \\
 P &= \sqrt{(K_2 d a \omega - \omega b c + b K_1 d \omega)^2 + (a \omega^2 c + a \omega^2 K_1 d + K_2 d b)^2}
 \end{aligned} \right\} \quad (A \cdot 10)$$

Fig. A.2 ε と係数 c の関係

(A・10) 式の位相特性を左右するのは c である。

4. 外力の位相

(イ) $\dot{\psi}$ に関して異常復原モーメントができた場合

履歴を考慮すると $\alpha_{\dot{\psi}}$ なる位相遅れが考えられる。

(ただし $\frac{\pi}{2} \geq \alpha_{\dot{\psi}} > 0$) 従つて

$$\delta = -\alpha_{\dot{\psi}} + \pi \quad (A \cdot 11)$$

となり, (A・9)式を満足できないから $\dot{\psi}$ の位相で生じた異常モーメントは履歴を考慮してもリミットサイクルを作ることとはできない。

(ロ) β に関して異常復原モーメントができた場合

合

履歴を考慮すると α_{β} の位相遅れを生ずるから

$$\delta = \varepsilon - \alpha_{\beta} \pm \pi$$

となり, (A・9)式に代入し $\pi - \alpha \geq \varepsilon$ を考慮して

$$\pi - \alpha > \varepsilon > \frac{\pi}{2} - \alpha + \alpha_{\beta} \quad (A \cdot 12)$$

のときリミットサイクルの可能性がある。

以上のことから

$\alpha_{\beta} \rightarrow 0$ のとき

$\alpha \rightarrow \text{大}$ または $\omega' m_Y \gg C_Y \omega$ のとき

$c \rightarrow \text{大}$ のとき

リミットサイクルを起し易いことがわかる。このとき $K_1 \rightarrow \text{大}$ は事情を改善できないことが Fig. A.2 から うかがわれる。