

操縦性における異常現象について

正員 小 瀬 邦 治* 正員 長谷川 和 彦*
正員 吉 川 正 嗣**

On the Unusual Phenomena in Manoeuvrability of Ships

by Kuniji Kose, Member Kazuhiko Hasegawa, Member
Masatsugu Yoshikawa, Member

Summary

It has been passed more than ten years since so-called unusual phenomena in manoeuvrability were first reported by Nomoto¹⁾. At the early stage of research, the phenomena were regarded as the unusual scale effect, because it appeared only in model ships. According to the tendency of growing the fullness of ships, however, these phenomena slid even into real ships. Besides, quite many types or varieties were appeared from the results of free-running tests.

For these several years authors have treated many cases appeared on either model ships or real ships, carrying out free-running tests, captive model tests or full-scale trials. Some of these results were published^{2),3)}.

Through the detail examination of these experiences, the comprehensive explanation of the phenomena is made as the main purpose in this paper.

It is known from the captive model tests that in model ships with the phenomena the measured hydrodynamic forces contain two different characteristic forces: one is the ordinary force proportional to the motion of ships and the other is the abnormal force which appears only in ships with the phenomena. This abnormal force is found to originate from the flow separation at either side of the stern by the flow observation and divided into two main types; binary type and breakline type (see Fig. 5).

Although this abnormal force is the direct cause of the phenomena, such many types of the phenomena don't seem to be derived from only the two types of the abnormal force. Another factor closely relative to the phenomena is directional stability of ships. Almost all the unusual phenomena ever found are shown to be well explained by the combinations of directional stability with two types of abnormal force.

1 緒 言

船舶操縦性の領域で異常現象が話題になってすでに久しい¹⁾。この現象の発端となったのは、船型肥大化の過程で針路安定性を危惧して模型試験を行ったところ、予想に反して超安定な性能が得られたという経験である。これは船型肥大化が針路安定性を低下させるという船型要素と操縦性の一般的な関係に反する現象であり、この意味で異常現象あるいは異常安定と呼ばれる。また、模型においては異常安定であるにもかかわらず、実船では針路不安定になる例が少なくないところから、unusual scale effect と呼ばれることもある¹⁾。

その後、いっそう、肥大した船型において極めて特異な挙動を示す例が報告されるに至った。定常旋回特性が二つあるような性能を示すもの²⁾、舵中央に保ったままで左旋と右旋を交互に繰返し、自励発振をするもの³⁾、さらにはダブルループと呼ばれる定常旋回特性をもつもの⁴⁾などである。これらもまた、異常現象と呼ばれている。

この異常現象の解明は、それ自体が操船上のトラブルに直結する例があるために、あるいは船型要素と操縦性の関係や操縦性における尺度影響の研究にとって隘路となるゆえに極めて重要である。また、異常現象の生じた船型でしばしば経験する自航要素の変動は実船の馬力推定を困難にし、抵抗推進の領域で不安定現象と呼ばれ、検討されている。

この異常現象に関してはすでに多くの研究実績があ

* 広島大学工学部

** 国際航業(株) (研究当時、広島大学大学院工学研究科在学)

り、筆者らも漁船船型や³⁾ 鉱石運搬船船型²⁾ の例について検討している。しかし、異常現象がみかけ上、極めて多種多様であるところから、多くの場合、ケーススタディにとどまっていることが多い。

この現象に対する包括的な説明を試みた例として、日本造船学会第2回操縦性シンポジウムにおける元良、藤野の報告⁵⁾あるいは第14回にITTCにおけるL. Wagner Smittの論文⁶⁾などがある。特に前者においては、資料の乏しい時期にもかかわらず、“船尾の非対称剥離”による“異常モーメント”の概念を導入し、この現象の解釈を試みており、今日もなお示唆するところが多い。

この研究は筆者らの行った多例の拘束操縦性試験や船尾流場観察、あるいは実船や模型による自航操縦性試験の経験をベースにして、今日までに報告されている多種多様な異常現象の包括的な解釈を試みたものである。まず拘束操縦性試験結果から、異常現象を呈する船には操縦運動や舵角の大きさにおよそ比例するような普通の船で経験する流体力に加えて、船尾部の剥離に起因する異常な流体力が作用していることを示す。そして、この異常な流体力を二つの基本タイプに分類するとともに、これを生む船尾流場の特徴を紹介する。最後に、この異常な流体力と船本来の針路安定性を組合せると、今日までに存在が確認されている異常現象の多様な事例のほとんどが説明できることを示す。

2 異常現象を呈する船に働く流体力と船尾流場の特徴

緒言で触れたように、異常現象はみかけ上、全く多種多様のようにみえる。しかし、自由航走時の挙動が大幅に相違する船の拘束操縦性試験を行ったとき、計測される流体力の性質にさほどの違いはみられない。広島大学におけるPMM試験結果によると、異常現象を呈する船に作用する流体力は二つのタイプに大別できるようにみえる。二値的なものと折れ線的なものである。以下、この二つのタイプの異常な流体力とそれを生む船尾流場の特徴について述べる。

2.1 二値的な異常流体力と船尾流場

漁業調査船および鉱石船型の斜航試験で得られた重心まわりのモーメントをFig. 1に示す。横方向の力など、試験の詳細は別稿^{2),3)}を参照いただくとし、ここではこれらの流体力の基本的な特徴について述べる。

この特徴として、計測される流体力が一つに定まらず明瞭に二値に分かれていることを指摘できる。しかも、斜航角が変わって

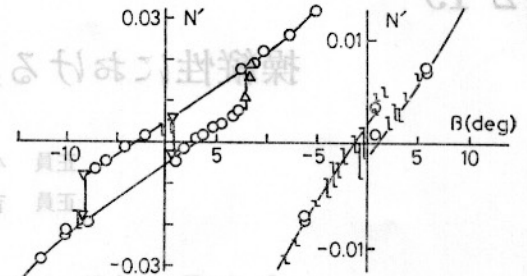


Fig. 1 Yaw-moment acting on models of fishery boat (left) and ore-carrier (right) towing obliquely

も、この二値の差はほとんど一定である。しかし、二値を取る点では両者は一致しているが、その現われ方には相違がある。漁業調査船の場合、流体力の計測値は落ちついており、斜航角を緩やかに変化させる試験を行うと明瞭なヒステリシスをもつことがわかる。鉱石運搬船では流体力は一方から他方の特性にほとんどランダムに移るのみならず、一方の特性上にある場合も多分にふらつきを含んでいる。

このような異常な流体力はどのような船尾流場に対応しているのだろうか。異常現象を最初に指摘した野本は旋回時、フェイズ側船尾に剥離が生じていると述べている。その後、各方面で行われた流場観察はこの野本の指摘を裏付けつつある。この漁業調査船³⁾の船体近傍の流れを微小な空気泡で観察した結果をFig. 2に示す。この流場は斜航角 4° のものであるが、プロペラや舵の上部の間隙を通る強い横方向の流れとフェイズ側船尾の水面近くにてきた剥離が特徴的である。別に報告した鉱石運搬船の流場²⁾もこれと大同小異であり、これらの調査を通じて次のことを指摘できる。

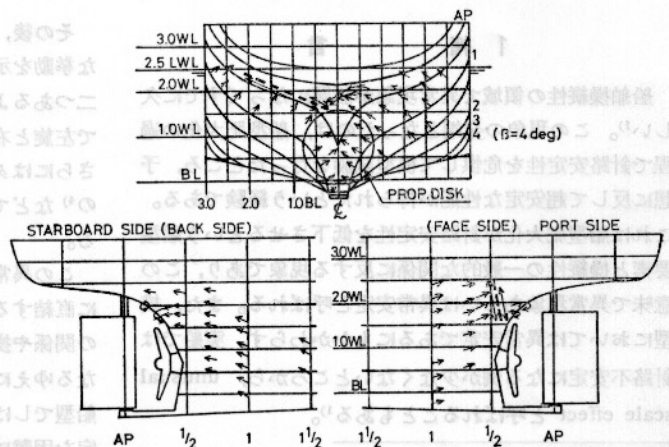


Fig. 2 Flow pattern along the stern of model of fishery boat (drift angle = +4 deg)

1) 流体力が左舷側の特性上にある場合、プロペラや舵の上部の間隙を通して、右舷側の流れが左舷側にまわりこみ、左舷側水面近くに剥離を生じる。右舷側の特性上にある場合は全くこの逆となる。

2) この剥離の形成には船尾上方部の流場不安定が関係している。この部分の流場不安定は船尾上方部の肥大やプロペラの強いサクションによって、船側あるいは船底からこの部分に至る流れが遮断されるためである。

3) プロペラや舵の上部の間隙を通る横方向の流れが許されるとこの流場不安定はいずれかの舷側の剥離に発達しやすい。この剥離はいずれの舷にでも生じるが、フェイズ側の方が生じやすい。この横方向の流れの生じやすさは間隙の大きさ、この部分の船底のフラットさなどに関係する。また、この間隙が十分に大きいとき、剥離はプロペラの回転方向の影響をほとんど受けないが、間隙が小さくなるにしたがって、右回りプロペラの場合、右舷の剥離が生じやすくなる。

4) 操舵をするとその効果を減じる方向の流体力をもたらす側の舷に剥離が生じやすくなる。例えば右舵の場合、左舷側に剥離が生じやすくなる。

5) 斜航角を変化させても、この剥離の位置はほとんど変わらない。これは計測される流体力の二つの値の差がほぼ一定値を取ることに対応しているようである。

6) 片舷に剥離が生じている場合、プロペラサクションの強さが両舷で異なっている。剥離の生じた舷ではサクションの及ぶ範囲が広く、その分を反対舷からまわりこむ流れが補っているように見える。

以上が二値的異常流体力をもたらす船尾流場の特徴である。この片舷にできる剥離を防止するには種々の対策が考えられる。根本的な対策は船側あるいは船底から船尾上方部への流れを妨げないようなフレームライン形状を選ぶことであろう。それが難しい場合、プロペラや舵の上部の間隙を塞ぐセンターフィンを取りつけ、片舷にできる大きな剥離の発生を抑制する方法がある。実船建造後であれば、この対策が有効であろう。しかし、このセンターフィンは片舷にできる大きな剥離を抑えるのみで、船尾上方部の流場不安定を消すものではないから、流体力に多少のふらつきが残る場合がある。

これまでに述べた異常現象は満載に近い状態で生じたものであるが、バラスト状態でも同様な現象がある。多賀野、浅井¹⁾は SR61 船型のバラスト状態で、プロペラに吸いこまれる“downward stream”²⁾を観察している。ただ、操縦性という立場から考えた場合、downward stream 自体ではなく、それが生じたときの左右舷の流場の相違が重要といえる。おそらく、船体表面圧力の顕著な非対称性から判断すると、本稿で述べたのと類似の流場が存在しているのであろう。²⁾downward stream 防

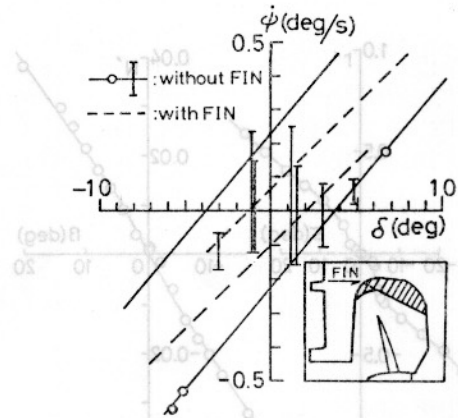


Fig. 3 Turning characteristics of bulk carrier with and without fin

止用に装着されたフィンも筆者らの用いたセンターフィン^{2),3)}の効果をもたらすと想像される。

あるバルクキャリアの試運転状態における異常現象例を Fig. 3 に示す。前述の漁船船型や SR61 船型同様の自動発振がみられ、二値的異常流体力の存在が確認できる。この船にプロペラ上部の間隙を狭めるセンターフィンを取りつけると、同図中の点線で示す特性をうる。異常現象自体は残っているが、その程度は顕著に改善されており、センターフィンが有効であることがわかる。このフィンは垂直な板であり、downward stream 防止という意味の効果は期待できないから、本稿で述べた剥離を抑制したと考えるべきであろう。以上の例はバラスト時においても、満載状態と同じ現象が生じうることを示す例である。

さて、このような船に作用する流体力の記述はどうしたらよいであろうか。まず考えられることは、計測される流体力の二つの値の平均値を旋回や横流れの強さ、舵角の関数として表現し、それに剥離の移動によって生じる変化分（以下、二値的異常流体力 $\pm Y_a$, $\pm N_a$ と称する）をつけ加えることであろう。このように流体力を分離して扱うと、前者は船型主要目などに、後者は局部的な剥離の状態に依存すると大雑把に考えることができ種々便利である。なお、この二値的異常流体力の発生あるいは交代の仕方は剥離を含む船尾流場の落ちつき方に対応し多様な場合がありうる。Fig. 1 の例はヒステリシスをもつタイプと一方から他方の値へとランダムに移るタイプである。

2.2 折れ線の異常流体力

緒言で述べたように、微小運動中の操縦性能が超安定になるタイプの異常現象がある。この性能をもつ小型タンカーの定常旋回特性を Fig. 4 (A) に示すが、小舵角時にも旋回運動のふらつきなどは見られず、ほぼ理想的な

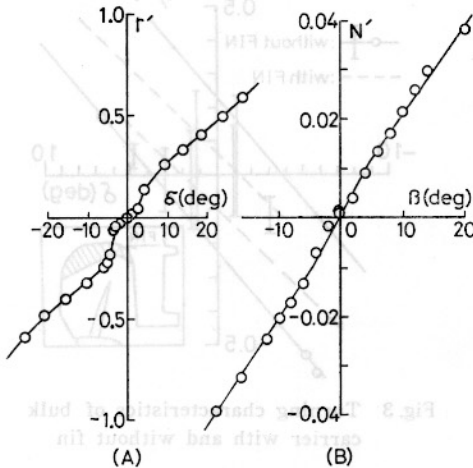


Fig. 4 Turning characteristics (left) and yaw-moment (right) of model of small tanker

操縦性能になっている。

このタンカー船型の斜航試験で得られたモーメントを Fig. 4(B) に示す。本船においては、流体力が二値をとったり、ふらついたりする現象は見られないが、斜航角が $2^{\circ} \sim 3^{\circ}$ 以内で折れ線的な特性を持っているのがわかる。前節で述べた二値的異常流体力が操縦性能上のトラブルに結びつくことが多いのに対して、この折れ線特性は好結果をもたらしており、この意味で両者を区別して扱うことにする。

さて、多田納⁸⁾は肥大船の自航操縦性試験結果から微小運動時の針路安定性とプロペラや舵上部の間隙の大きさが有意な相関をもち、しかも瘦せた船とは逆に、間隙が小さいほど針路不安定化することを示している。この事実から、超安定をもたらす折れ線の異常流体力も、この間隙を通る横方向の流れに関係していると考えられる。

小型タンカーの流場調査を試みたところ、プロペラ上部の間隙を通る横方向の流れらしいものが認められた。

しかし、現象自体が緩かであるために、二値的異常流体力の場合のような流場を明瞭に確認するには至らなかった。そこで、一種の傍証として、間隙を狭めるセンターフィン装着し、斜航試験を行った。この結果、フィンは折れ線特性を消す機能をもっていることがわかった。

同様な結果は多賀野⁷⁾の報告に示されている。原型の場合、舵中央で自励発振をする SR61 船型に downward stream 防止用のフィンをつけると、超安定な性能に転じている。

こうした事実から、二つのタイプの異常流体力は本質

的には同じ剥離に起因しており、その剥離の生じ方がやや異なると考えることもできる。例えば、微小運動中には斜航角に応じて剥離位置が移動するが、その位置には制限があるといった流場モデルが想像される。しかし、折れ線の異常流体力と肥大船船尾の縦渦の関係⁹⁾も指摘されており、目下のところ速断はできない。本研究の供試船である漁船や鉱石船船型においても、斜航角のわずかな変化による縦渦の急激な消長が観測されている。ただ、これらの供試船の場合、縦渦の挙動と異常現象の直接的な関係は認められないようである。いずれにせよ、この縦渦と操縦性との関連は今後の課題であろう。

さて、この折れ線特性の流体力を記述する際も、二値的な場合と同様に考えるべきであろう。異常な流体力の部分は一定斜航角に達するまではそれに比例し、以後は一定値を保つとみなす。この残りの部分が運動の強さや舵角におよそ比例する普通に経験する流体力である。

3 異常現象のモデル化

緒言でも触れたように、大変、多様な異常現象例が報告されている。しかし、拘束試験結果をみる限り、船に作用する流体力にそれほどの多様さは認められず、前章で述べた二つの基本タイプが存在するのみである。この事実から、異常現象を解釈する際、異常な流体力の挙動に着目するだけではなく、別な要素を勘定に入れるべきことがわかる。この要素として、肥大船の操縦性を特徴づける針路安定性がまず、考慮されるべきであろう。

さて、異常現象の生じる船に作用する流体力は船尾部の剥離に起因する異常流体力と、運動の強さや舵角によって決まる普通の流体力の重ね合わせで表現できるという前述の結論を以後の議論の立脚点とする。こうすると、異常流体力のタイプと針路安定性とを組合せて、多様な異常現象のモデルを導くことができる。

まず、異常流体力のタイプについて考える。基本的なものが二値的および折れ線的タイプであることは前章の議論から明らかであろう。この二つをベースに種々の派生的なタイプを考え、Fig. 5 に示す。図の縦軸は異常な流体力(ここではモーメントのみを示しているが、横方向の力も符号が異なるのみで同じ性質をもつ)であり、横軸は船尾部の横流れ角 β_s ($=\beta+0.5r'$) である。以後の議論は異常流体力はこの β_s で決まるとして進めるが、実際には舵角も強い影響を有している。

派生的なタイプを導くには、前章で述べたところから剥離の交代の仕方と流場自体の不安定さを考慮すべきである。まず、二値的異常流体力の場合、二つの値の交代がヒステリシスを有する場合とランダムに生じる場合があり、これを考慮した二つのタイプが得られる。図中の \uparrow は矢印の方向だけ、 \downarrow は両方向に流体力の値が交

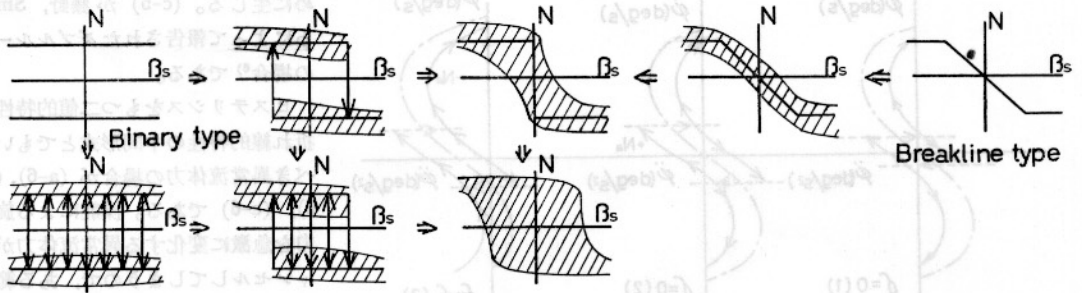


Fig. 5 Basic patterns of abnormal moment

代することを示す。さらに、ヒステリシスをもつがその内側でランダムに流体力の値の交代があるタイプを考える。これはランダムな交代が生じるタイプの普通の姿と考えてよい。

図中、ハッチングした領域は流場の落ちつきが劣るために、その範囲で流体力がふらつくことを示す。この流体力のふらつき方にも種類があるようで、ほぼ一定周期の正弦関数的変動を示すものや全く規則性のないものが観察されている。流体力のふらつく範囲が広がると、微小運動中、流体力が全く任意の値をとるようなタイプが生じる。

折れ線の異常流体力の場合、流体力の変動がほとんど見られないものがあり、この場合、操縦性が改善される。しかし、平均的には折れ線的特性になるが、多分に変動を含む場合も少なくないようで、この変動の範囲が広がると二値的異常流体力の同様なタイプと同じものになる。

以上が異常流体力の種々のタイプである。なお、一般的には、この異常流体力は旋回運動を妨げる方向の値が生じやすいようで、二値的タイプの場合もこの傾向が明瞭である。前述したことではあるが、操舵の影響も同様であり、操舵の効果を減じる方向の異常流体力が生じやすい。

さて、異常流体力の種々のタイプが得られたので、これに船の針路安定性を組合せ、どのような異常現象が生じるかについて考察しよう。なお、以後の考察は船の操縦性能の特徴を端的に表現する定常旋回特性を中心にするにすることにする。

まず、二値的異常流体力が作用した場合の定常旋回特性を Fig. 6 に示す。図中の1点鎖線は異常流体力が存在しない場合の定常旋回特性を示し、ここでは針路安定なもの不安定なものについて考える。また、実線が異常流体力が存在する場合の定常旋回特性である。

典型的な二値的特性の場合、(a-1)、(c-1) に示すように完全に二つの定常旋回特性がえられる。漁船船型²⁾の

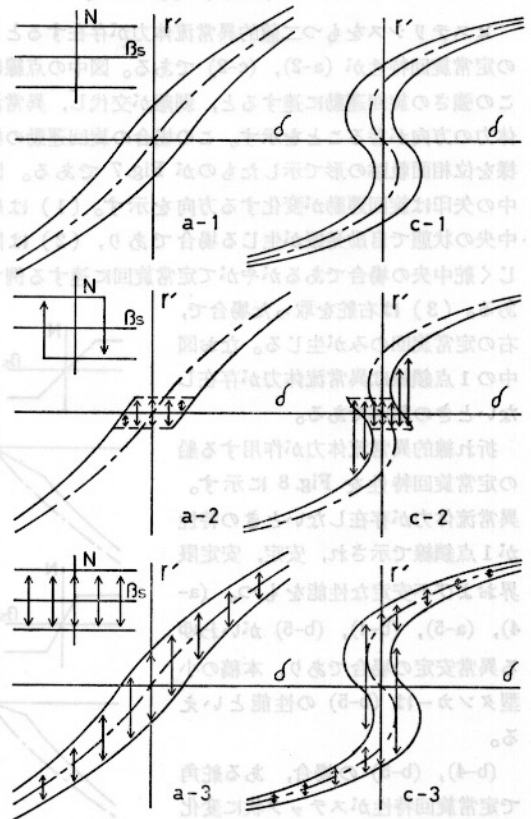


Fig. 6 Schematic diagrams of turning characteristics under combinations of directional stability with abnormal moments (binary type)

模型がこのタイプの例である。ランダムに異常流体力の値が交代する場合には、(a-3)、(c-3) の特性をうる。図中、縦方向の矢印は運動の交代が生じることを示す。従って、この場合、船はある強さの定常旋回をしているかと思うと、次には別の定常旋回に転じる結果となる。鉱石運搬船の大舵角時²⁾ の特性がこれに該当する。

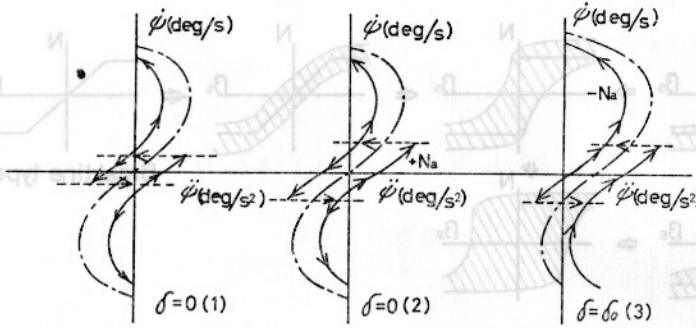


Fig. 7 Schematic diagrams of phase plane trajectory under combinations of directional stability with abnormal moments (binary type : c-2)

ヒステリシスをもつ二値的異常流体力が存在するときの定常旋回特性が (a-2), (c-2) である。図中の点線はこの強さの旋回運動に達すると、剥離が交代し、異常流体力の方向が替ることを示す。この場合の旋回運動の様相を位相面軌跡の形で示したものが Fig. 7 である。図中の矢印は旋回運動が変化する方向を示す。(1) は舵中央の状態では自励発振が生じる場合であり、(2) は同じく舵中央の場合であるがやがて定常旋回に達する例である。(3) は右舵を取った場合で、右の定常旋回のみが生じる。なお図中の1点鎖線は異常流体力が存在しないときの軌跡である。

折れ線の異常流体力が作用する船の定常旋回特性を Fig. 8 に示す。異常流体力が存在しないときの特性が1点鎖線で示され、安定、安定限界および不安定な性能をもつ。(a-4), (a-5), (b-4), (b-5) がいわゆる異常安定の場合であり、本稿の小型タンカーは (b-5) の性能といえる。

(b-4), (b-5) の場合、ある舵角で定常旋回特性がステップ状に変化している。これは異常な流体力の値に不連続性があるためではなく、針路安定限界の船の場合、微小運動中に、旋回運動が変化しても旋回抵抗がほとんど変わらないため、流体力のわずかな差が定常旋回角速度の大幅な違いをもたらすからである。

(c-4) は一見して針路安定限界のような特性になっている。これは微小運動中、不安定船の負の旋回抵抗

を異常流体力がキャンセルするために生じる。(c-5) が藤野, Smittらによって報告されたダブルループの場合⁶⁾ である。

ヒステリシスをもつ二値的特性と折れ線特性の中間形式ともいふべき異常流体力の場合が (a-6), (b-6), (c-6) である。操舵による旋回力を急激に変化する異常流体力がキャンセルしてしまうので、ある範囲で舵が効かない。

以上、多種多様な異常現象が二つのタイプの異常流体力と針路安定性の組合せで説明できることを示した。

ここでは省略したが、流場の落ちつきや欠如による流体力のふらつきを考慮すると、さらに多様な異常現象が考えられる。おそらく、今日までに報告されている異常現象のほとんどのタイプが、以上の例で網羅されていると思われる。

4 結 言

本研究は自航模型や拘束模型を用いた操縦性試験ある

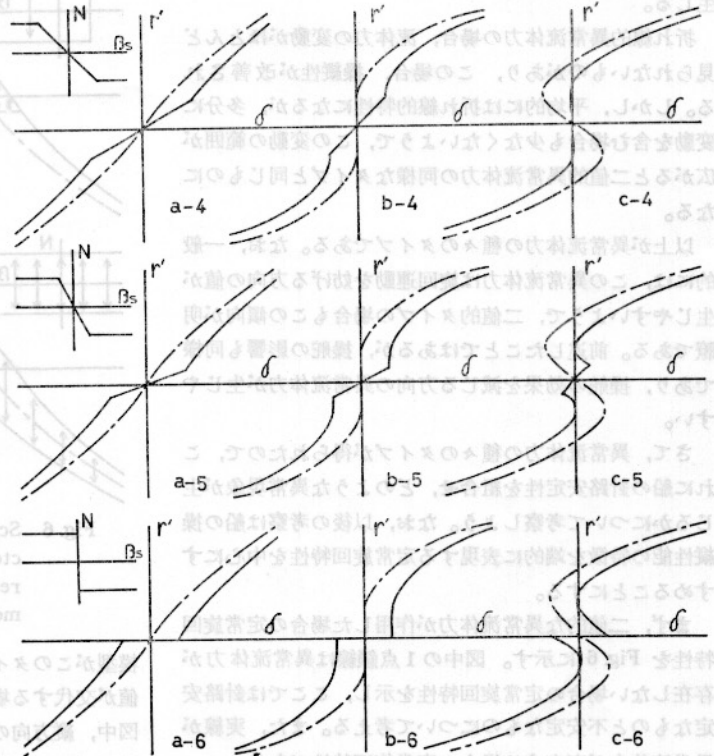


Fig. 8 Schematic diagrams of turning characteristics under combinations of directional stability with abnormal moments (breakline type)

いは実船試験の経験から、操縦性における異常現象について、可能な限り包括的な解釈を試みたものである。この結果、得られた主な結論は次の通りである。

1) 異常現象を呈する船には二値的あるいは折れ線の異常流体力が作用している。この流体力は船尾上方部の片舷にできる剥離によって生じる。

2) 二つの基本的なタイプの異常流体力と船の針路安定性を組合せると、極めて多種多様な異常現象が推定できる。今日までに報告されている異常現象はほぼこの考えて説明できる。

船型要素と操縦性の関係やスケール影響などを研究するうえで、船固有の針路安定性と異常流体力の影響（これはしばしば平均的に船の操縦性能を針路安定化する）を分離することが必要になる。前者が主に主要目や舵面積に支配されるのに対して、後者は流場の特徴から予想される通り、船尾上方部の肥大度やプロペラ、舵上部の間隙の大きさなど、局部的な船型要素に依存するからである。本研究がこのような研究の進展に寄与できれば幸いである。

謝 辞

この研究の過程で多くの方々の御助言や御援助をいただいた。大阪大学、野本謙作教授、多田納久義助手からは、模型船や多量の貴重な資料の提供のみならず、有意義な御討論をいただいた。また、広島大学、仲渡道夫教授、原田久明教授の御指導、御配慮も忘れることができない。ここに深甚の謝意を表す次第である。

また、この研究に卒業研究として参加された広大 54 年卒、荒木敏夫君、丸山文隆君の貢献にも厚くお礼申し

上げたい。

最後に、本研究に関連して、科学研究費補助金の交付を受けたこと、および広大計算センターの HITAC8700 を使用したことを付記する。

参 考 文 献

- 1) K. Nomoto : Unusual Scale Effect on Manoeuvrabilities of ships with Blunt Bodies, 11th ITTC, Tokyo, 1966.
- 2) 小瀬他：肥大船の特異な操縦性能に関する研究，西部造船学会報，54号，57号，58号，1977～1979.
- 3) 仲渡他：漁船船型の特異な操縦性能とその改善について，日本造船学会論文集，143号，1978.
- 4) L. W. Smitt : The Reversed Spiral Test-A Note on Bech's Spiral Test and Some Unexpected Results of its Application to Coasters, Hy-10, 1967.
- 5) 元良他：針路不安定な船の特質，第2回操縦性シンポジウム，日本造船学会，1970.
- 6) L. Wagner Smitt : Influence on Steering from Special Flow Phenomena on Full-Bodied Ships, 14th ITTC, 1975.
- 7) H. Tagano et al. : On the Unusual Phenomena in Manoeuvring Motions of a Full Ship Model, MTB, No. 116, 1976.
- 8) 多田納他：船尾プロファイルが肥大船の進路安定性に及ぼす影響について，関西造船協会誌，162号1976.
- 9) 柏谷他：肥大船の針路安定性と流体力に関する実験的研究，関西造船協会誌，167号，169号，1977～1978.