

# 第17回西海防セミナー

## 船舶の操縦性能について

日時：平成28年12月15日（木）  
場所：ハイアットリージェンシー福岡  
講師：九州大学大学院工学研究院  
海洋システム工学部門  
教授 古川 芳孝 氏



### ◆自己紹介

ご紹介いただきました九州大学の古川と申します。  
本日はよろしくお願いたします。

目次 1

- 自己紹介
- 船舶の操縦性能の一般的な傾向
- 船舶の操縦性能の評価法
- 船体に作用する流体力の計測
- 計測された流体力の解析と数式表現
- 針路安定性の評価
- 狭水路航行中の船体に作用する力
- 近接して航行中の船体に作用する力
- 船舶海洋性能工学実験棟の実験施設の紹介

九州大学 大学院工学研究院 海洋システム工学部門

海洋システム工学部門の紹介 4

- システム計画学
- 船舶海洋流体工学
- 船舶海洋運動制御工学
- 機能システム工学
- 構造システム工学
- 生産システム工学
- 船舶設計・海洋環境情報学
- 海洋エネルギー資源工学

- 造船中核人材育成寄附講座  
- 川崎重工, JMU, 三井造船

<http://www.nams.kyushu-u.ac.jp/>

九州大学 大学院工学研究院 海洋システム工学部門

こちらが本日お話しさせていただく主な目次になりますが、最初に自己紹介として、九州大学の組織も含めて簡単に紹介させていただきます。

現在の組織名は、海洋システム工学部門となっておりますが、元は工学部の造

船学科として、船舶の設計から建造までの一連の教育を行っていた組織が母体となっています。現在は船だけではなく、海洋工学関連にも教育研究の分野を広げており、20年ほど前に海洋システム工学部門という名前に組織変更して学生の教育研究をおこなっています。

私の専門は船舶の操縦性として、模型船を使って水槽実験をしたり、そのデータに基づいてシミュレーション計算をしたりと船の運動関係の研究を行っています。船体に作用する力をコンピューターでどう推定するか、そのデータを使って運航の自動化といったものに应用できないかなどを研究しています。

教育については、私たち教員は海洋システム工学部門に属していますが、大学院生は大学院工学府に所属して名前は一緒ですが海洋システム工学専攻となります。学部の学生は、昔は造船学科で非常に分かりやすかったのですが、現在は工学部地球環境工学科、昔でいう造船と土木と資源工学が一つの学科になりまして、その中に船舶海洋システム工学コースと建設都市工学コース、昔でいう土木工学科、そして、地球システム工学コース、昔でいう資源工学科の旧3学科が一つになった大きな学科の中で、造船と海洋工学関係といったものの教育研究を行っています。

現在、研究室は8研究室ありますが、本年10月から1研究室、寄附講座が増えました。造船に従事する学生の教育に力を入れようと、川崎重工・ジャパンマリンユナイテッド・三井造船さんからご寄附をいただいて、船舶の設計から建造、海洋工学関連に従事する人材育成を目的とした寄附講座を開設しました。

現在、九州大学は箱崎キャンパスから西の伊都キャンパスに移転の最中でして、私どもの工学部は平成18年に移転を終えています、平成31年度には残りの学部の移転も完了する予定です。

ここから本題に入らせていただきます。

## ◆船舶の操縦性能

船舶の操縦性能(1)	船舶の操縦性能(2)
<ul style="list-style-type: none"><li>針路保持の性能<ul style="list-style-type: none"><li>舵角を固定したまま、船舶の針路をどの程度そのまま保持できるか。</li></ul></li><li>針路変更の性能<ul style="list-style-type: none"><li>所定の針路に方向を変える場合、どの程度の大きさの舵をとり、またその舵角をどの程度保持すればよいか。</li></ul></li><li>緊急回避の性能<ul style="list-style-type: none"><li>衝突回避のために大舵角で急旋回した場合、どの程度針路を変更できるか。</li></ul></li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>針路を変更・保持する性能<ul style="list-style-type: none"><li>変針・保針性能</li></ul></li><li>緊急回避の性能<ul style="list-style-type: none"><li>旋回性能</li><li>停止性能</li></ul></li></ul> <p>互いに相反する性能</p> <ul style="list-style-type: none"><li>一方の性能が優れた船舶は、他方の性能が悪くなる傾向あり。</li></ul>

まず船舶の操縦性について、ご存知の方も多いかと思いますけれども改めて船舶の操縦性がどのような傾向にあるのか、こういったところを評価するのかについて、お話をさせていただきます。

船の操縦性能について考えるときに、こういったことを考えないといけないかという、先ずはその針路を保持する性能です。これは舵角を固定したまま操船者の意図に沿って針路を保持することですが、これが船型によっては直進するのが難しいといったことが起きてきます。

もう一つは針路変更の性能で、危険を察知し、或いは航路を変更するという場合に、どの程度の舵角をとり、その舵角をどの程度保持すればよいか、これも操船者の意図通りにちゃんと曲がってくれるかということです。直進はよくするけれども曲がりにくいとか、或いはよく曲がるけれどもなかなか真っすぐに進まないとか、大体片方を追求すると片方が悪くなるといった性能になります。

針路変更は緊急回避にも関係し、大きな舵角を切った時にそれにすぐ反応して急旋回してくれる。これら三つの性能をバランスよく船体設計にいかすことが非常に重要になって参ります。

先程申し上げましたけれども、この針路を変更・保持する性能と旋回・停止性能とは大体片方を追求すると片方が悪くなる傾向がありますので、これをどこまで許容するかと言ったところで、各造船会社さんは設計段階で事前に推定し、或いは水槽で模型を作って実験をし、確認するといったことを常に行っているところです。

船舶の操縦性能：船型の影響(1) 9

- 船舶の運動
  - 水面下の船体に作用する流体力が大きく影響
  - 水面下の船体の形状に大きく依存
- 操縦性能の一般的な傾向
  - 客船やコンテナ船等の薄せた船型
    - 針路安定性：良い
    - 旋回性能：悪い
  - タンカー等の肥えた船型
    - 針路安定性：悪い
    - 旋回性能：良い

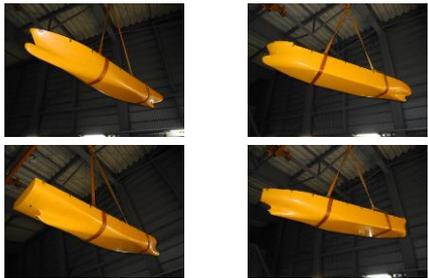


<https://www.jmuc.co.jp/press/2016/nyk-eagle.html>

<https://www.jmuc.co.jp/press/2014/4c-qq0b-dream.html>

九州大学 大学院工学研究院 海洋システム工学部門

船舶の操縦性能：船型の影響(2) 10



コンテナ船 VLCC

九州大学 大学院工学研究院 海洋システム工学部門

船の性能は何で決まるかと言うと、水面下の船体の形状に大きく依存しています。その理由は向きを変えるとといった船の運動を引き起こすきっかけは舵の力、舵力になりますが、その舵力が発生して曲がろうとした時に、今度は船体に斜航、旋回が生じ、船を回転させる力のモーメントであったり、横に押す力といったものが働いてきます。それが船型によって大きく違っており、そのことが船ごとの固有の操縦性能となって現われてきます。

一般的な傾向で言いますが、客船や写真のようなコンテナ船など、細い船というのは、針路安定性は良くて直進は非常にやりやすい。ただ、旋回するとき、タンカーのようなものと比べると、横方向に回転する方向の抵抗が大きくなりなかなか曲がりにくいことになります。それに対して、写真のタンカーのような太った船型になりますと、旋回性能は非常に良いのですが、得てして針路安定性が悪く、直進航行が難しくなるという傾向があります。従って、水面下の形状の善し悪しが最終的な運動性能、操縦性能に効いてくることになります。

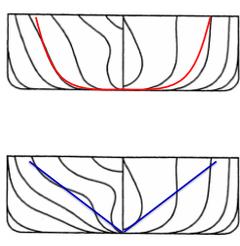
コンテナ船やタンカーの水面下の形状をご覧になる機会は少ないと思いますが、こちらは私どもが使っている模型船を吊り上げ、下から撮った写真です。左側がコンテナ船の模型船、右側がV L C Cの模型船になります。コンテナ船はこのように割と細く、船首や船尾がぐっと絞られたような形になっていますが、タンカーの場合は、もう船首、船尾から直ぐに膨らみ始めて、真ん中あたりではほぼ直方体の様な形になっています。こういったところが船を回転させたり、横移動するときの抵抗の違いとなって現われ、それが曲がりやすい、曲がりにくいといったところに効いてくることになります。

私どもは、38.8m×24.4mの大きなプールみたいな水槽の中で、電車と呼ばれる装置でこのような模型船を引っ張り、斜航角や回頭角速度を変えながら、どういう力が働くかを計測しています。そのデータを使って、後でシミュレーション計算をして運動を評価するかという様なことを行います。

### 肥大船の船尾形状の変化

11

- 船尾プロファイル
  - 逆G型
  - マリナー型
  - 船尾バルブ付マリナー型
- 船尾フレームライン
  - U型フレームライン
    - 推進性能上有利
    - 針路不安定となる傾向
  - V型フレームライン
    - 船体抵抗を軽減
    - 針路安定となる傾向



### 船舶の操縦性能：船尾形状の影響

13

- 船尾形状が操縦性能に及ぼす影響に関する研究  
(小瀬ら、西部造船会々報、第78号、1989)
  - 船首形状共通
  - 逆G型
  - マリナー型の船尾
  - スターンバルブ付マリナー型
- 操縦運動時の船体周囲流場に関する研究  
(日本造船研究協会第221研究部会、1996)
  - 船首形状共通
  - V型船尾フレームライン：SR221A 船型
  - U型船尾フレームライン：SR221B 船型

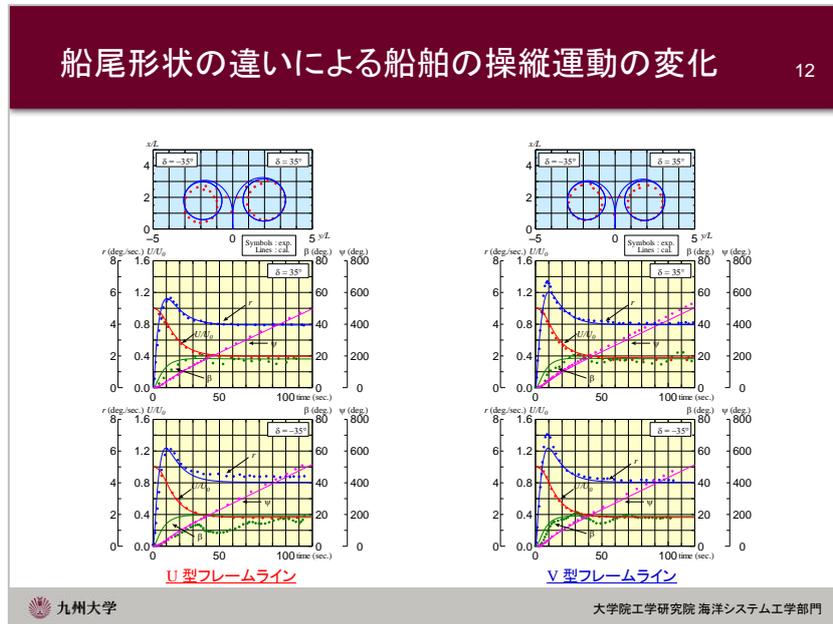
肥大船の船尾形状は、時代によって設計が変わってきています。図11は、20年ぐらい前の日本の研究プロジェクトから、ちょっと拝借していますが、船尾の形が時代によって、だんだん変わってきており、昔は逆G型と呼ばれ舵の下を支える部材がありました。それがなくなってマリナー型、その後船尾にバルブがついたバルブ付マリナー型になってきました。この図は船体を輪切りにした時にどんな形になっているかを表すボディプランという図面になりますけども、右半分が船首側の形を表し、左半分が船尾側の形を表しています。

これは船体を、例えば船首から船尾まで10分割します。その時にスライスした形がどう見えるかというのを表しています。船首のバルバス・バウのあたりで切るとこのような形になっています。真ん中あたりではほぼ直方体の四角形のような形になり、船尾になるとだんだんと断面の形が絞られてきて、このあたりにプロペラシャフトがあるという様なことを表した図面になります。

この二つの船は船首は同じ形で船尾だけを変えた、実際には存在しなくて研究用にデザインされた船ですけれども、昔の船は、断面の形状がU型フレームラインということで、一般的な傾向としてこの部分がU型だったのですが、これがこの20年ぐらい前のことです。

推進性能を向上させていくと、ここら辺にプロペラが来るのですが、そこに流れをスムーズに送るために、だんだんここが絞り込まれ、トータルで見ると割となだらかだった船型を表すラインが、このように直線的にV字型になってきました。

この船は、推進性能は向上したのですが、操縦性能では針路不安定となり、なかなか操船が難しいというような現象が現れてきました。それがどういうメカニズムで起こるかについて、この20年ぐらいの研究プロジェクトで調べられています。



そこで長さや排水量などを全部同じにし、ただ船尾の形だけをちょっと変えました。それが結構、性能の違いとして現れてきました。図12はその時の実験で求められた結果を表していますけれども、1番上が左右の旋回航跡を表しています。左側がU型フレームラインの結果、右側がV型フレームラインの結果

で、旋回航跡で言いますと、若干V型の方が、小さめになっています。

この図は、ちょっと見づらいのですが、横軸が時間を表し、縦軸にはラインが四つあります。この赤い線が船速を表しており、上が右旋回、下が左旋回ですが、旋回する過程では船速がだんだんと落ちることを表しています。直進している時を1とすると、舵角35度で旋回すると、大体、4割くらいまで船速が落ちることを表しています。

紫色の線は回頭角を表していて、船の向きが変わると回頭角は一周半位していますので、500何十度位まで曲がっていることを表しています。青い線は回頭角速度を表しています。このU型とV型を比較していただくと、10秒あたりこの最初の旋回運動の発達仕方が船型によってちょっと差が出ていて、細かく見ると微妙に現われています。緑の線は、斜航角で船が進んでいる方向と船首の方向がどれ位ずれているかを表しています。

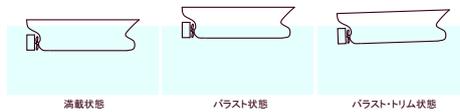
ここで、点で示しているのが実験結果で、ラインで描いているのが、実験データに基づいてシミュレーション計算を行った結果です。こういったものが実験を行わなくてもシミュレーションでできるようにならないかを研究しています。

船尾の形が変わるとどうなるかについては、過去にもいろいろな研究がなされています。こちらは、広島大学名誉教授の小瀬先生の論文から引用させていただきましたけれども、先程と同じように船首の形状が同じで、船尾を逆G型、マリナー型、スターンバルブ付マリナー型に変えたら、船に働く力や操縦性能がどう変わるかを研究されたものです。

こちらの操縦運動時の船体周囲流場に関する研究は、今ご紹介させていただいた図面のもとになりますが、日本造船研究協会の第221研究部会、SR221と呼ばれるところで、先程のU型、V型がここでいうA船型、B船型となりますけれども、こういったものが日本の造船所各社と研究機関、大学を含めて検討された例がございます。

これまで申し上げたように船型が違えば当然性能が変わってきますが、同じ船であっても周りの環境条件が変わると性能もまた変わってきます。

まず船舶の姿勢の影響ですが、満載状態、バラスト状態そしてバラスト状態のトリムによって操縦性能が変化します。何故かと言いますと最初に申し上げたように、どんな力が船体に働くかが船の運動を決めていますので、満載で船が沈んでいる状態とバラストで浮いている状態とでは、当然水面下の形が異なっていますので、同じ舵を切っても運動状態で働く力が変わってきます。また、トリムしているかしてないか、舵の部分の没水しているかしてないかによって、船体に働く力も当然変わりますので、こういったものが操縦性能の違いとして現れてきます。



- 同じ船であっても操縦性能は変化する。
- 姿勢によって水面下の船体の形状が異なる。
- 船体に作用する流体力が変化する。

载荷状態の違いによる船舶の操縦運動の変化

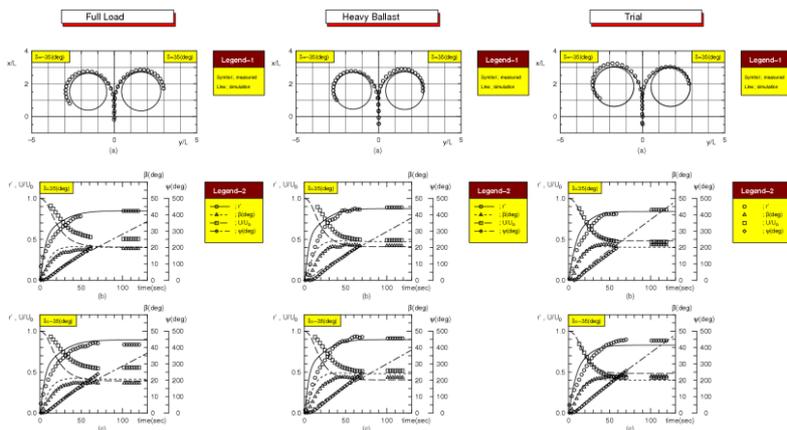
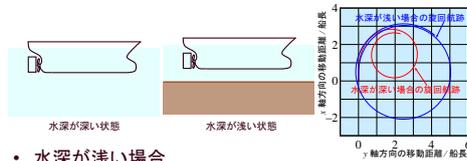


図 15 は、私どもが行なった古い結果ですけれども、満載とヘビー・バラスト、そしてトライアル、これはトリム付きの状態です。この船は大きな差はないのですが、ここらあたりで船速の低下率と斜航角の開き具合が、カーブの傾向としては徐々に変わっているというのが、お分かりいただけると思います。

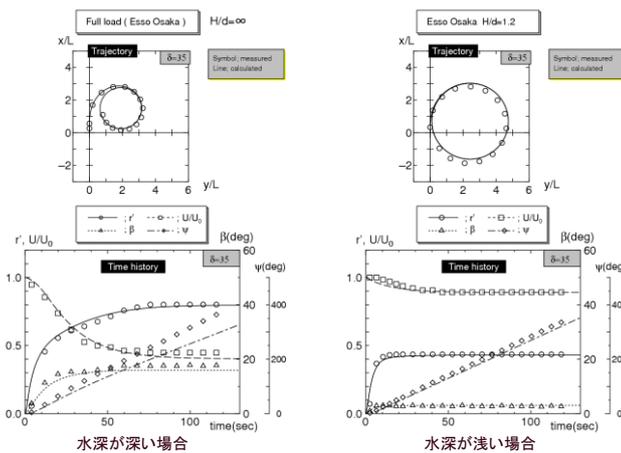


- 水深が浅い場合
  - 船底と水底の間隔が狭い。
  - 旋回抵抗が増大
  - 旋回半径が増大

次は、環境としての水深の影響です。

大洋航海中の場合と水深が浅い場合とでは、これも運動が変わってきます。と言うのは、船底と水底の間隙が少なくなることによって、ここを流れる水が流れにくくなり、それが旋回する時の横方向の抵抗や力のモーメントとして作用してきます。これも船によって傾向が違いますけれども、一般的な傾向としては浅くなるに従って旋回航跡はどんどん大きくなります。旋回するとき抵抗が大きくなりますので、同じ舵力で曲がろうとしても、船体がなかなか曲がってくれないということが起きます。船によってはそれほど大差ないものもあれば、その曲がり始めが遅れて行き、足が伸びるなど船型によっていろんな傾向が現われてきます。

## 水深の違いによる船舶の操縦運動の変化



こちらにも実験とシミュレーション計算の例ですけれども、水深が浅いと旋回航跡が大きめになります。その代わりに、船速の低下はそれ程でもありません。

水深が深い場合はぐるっと回りますので、抵抗も大きくなって船速が大きく落ちるといった違いが出てきます。

## ◆船舶の操縦性能の評価方法

**船舶の操縦性能の評価方法**
19

- IMO 操縦性基準
  - 1993年 操縦性暫定基準 Res. A.751(18)
  - 2002年 操縦性基準 Res. MSC.137(76)
  - 長さ100m以上の船に適用
  - 操縦性能の評価指標に対する基準値を設定 (深水域, 満載状態)
- 操縦性能を四つの性能で評価
  - 旋回性能 : 旋回試験, スパイラル試験, 逆スパイラル試験
  - 初期旋回性能 : 10°/10° Z 操舵試験
  - 変針・保針性能 : 10°/10° Z 操舵試験, 20°/20° Z 操舵試験
  - 停止性能 : 緊急停止試験

九州大学 大学院工学研究院 海洋システム工学部門

**旋回試験**
20

- 旋回性能を評価
- 計測項目
  - 航跡, 回頭角, 回頭角速度
- 評価項目
  - 旋回縦距
    - 船長の4.5倍以下
  - 旋回横距
    - 船長の5倍以下
  - 値が小 → 旋回性能良好
- 計測方法
  - DGPS を利用

九州大学 大学院工学研究院 海洋システム工学部門

以上のように、船の形が変わったり、或いは環境条件、姿勢も含めて変わると、操縦性能もいろいろ変化しますので、それをどのように評価するかということで、評価方法がいろいろあるのですけれども、現在は建造する段階ではこのIMO・国際海事機関の操縦性基準というのが一つの目安になっています。

こちらは1993年に暫定基準として策定され、その後9年ほど暫定期間中に、各国がデータを持ち寄って議論した後、2002年に暫定が取れて操縦性能基準として発効しています。この基準は長さ100メートル以上の船に対して適用されます。

この操縦性能基準の中では、深水域かつ満載状態で、こういう基準の数値を満たしていないといけませんよということが決められています。

操縦性能を評価する四つの性能として、旋回性能、初期旋回性能、変針・保針性能、停止性能が書かれています。これらをこういう試験を実施して確認をなさйтеということ、それぞれに対して評価するパラメータが決まっております、それに基準値が設けられています。

まず、旋回試験ですけれども、これはある一定の舵角、IMOの操縦基準の場合は舵角35度を取って旋回します。最大舵角で旋回したときのこのアドバンス、旋回縦距で舵を切ったところから原針路に対して直角方向に回頭したときのこの直進距離ですが、これがどれ位になるか。このアドバンスが、船長の4.5倍以下でないといけないというのが一つ基準になっています。そしてトランスファー、旋回横距があり、更に旋回を続けて船が原針路に対して180度、完全に反対方向を向いたときに、元の航路からどれ位横にずれたか、これをタクティカル・ダイアメータ、旋回圏と言いますが、これが船長の5倍以下でないといけない。これよりも大きい船というのは、最大舵角を取っている

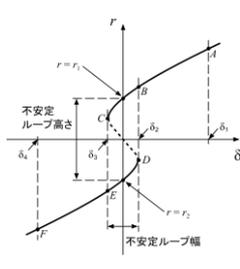
にもかかわらず、なかなか曲がらない船ということになります。場合によっては危険を察知しても避けることができないということに繋がりがねませんので、これが一つの基準値として定められております。最近ではGPSなどによって試運転時の正確な航跡が得られるようになっております。

ただ試運転の場合には、波浪とか潮流などいろんな外乱の影響が入ってきますので、それらを取り除いて評価する必要があるということと、基準値が満載状態で定められていますが、試運転は普通バラスト状態で行われることが多いので、それをどう換算して評価するかということも一つの研究テーマであります。

### スパイラル試験, 逆スパイラル試験

21

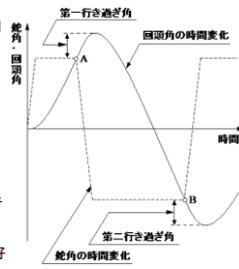
- 舵角と回頭角速度の関係 (スパイラル曲線)
  - 不安定ループ幅
  - 不安定ループ高さ
- スパイラル試験
  - 設定舵角に対する回頭角速度の定常値を求める。
- 逆スパイラル試験
  - 設定回頭角速度に対する舵角を求める。



### Z 操舵試験 (ジグザグ試験)

22

- 変針・保針性能を評価
  - 初期旋回性能の評価にも利用
- 操舵角により2種類
  - 10°/10° Z 操舵試験
  - 20°/20° Z 操舵試験
- 計測項目
  - 回頭角, 舵角, 航跡
- 評価項目
  - 10°/10° Z, 20°/20° Z の第一行き過ぎ角
  - 10°/10° Z の第二行き過ぎ角
  - 値が小 → 変針・保針性能良好



次に、スパイラル試験、逆スパイラル試験ですが、これらは針路の安定性を評価するとき用いられる評価基準になります。

図21の見方ですけれども横軸が舵角  $\delta$  を表し、縦軸がそのときの旋回角速度  $r$  を表しています。例えばこの  $\delta_1$  という舵角を取ったとき、船が旋回をしている時の旋回角速度がどれ位になるか、舵角と旋回角速度の関係をプロットしたのになります。普通、針路安定性の良い船については、本来のカーブはこの原点を通過して  $\delta$  と  $r$  が一対一に対応するのが望ましい状態ですけれども、船によっては一つの舵角に対して、二つの  $r$  がある、この図では  $\delta_2$  と  $\delta_3$  の範囲にある舵角に対して二つの曲線が現れているということになります。

このことは例えば、 $\delta_2$  と  $\delta_3$  の間の舵角、極端な話では舵角が0度であるのに、場合によっては右旋回する場合もありますし、また別の機会には左旋回するかもしれないということを示します。これはその直前に船が右に旋回していたのか、左に旋回していたのか直前の運動の影響が効いてきて、結局この範囲では、取った舵角に対してどちらに動くか分からないという不安定な領域が生じるということを示しています。この領域が余りに広いと、操船する方がいくら技術で補おうとしても、なかなか船のコントロールが難しいということが起こり得るということになります。

スパイラル試験、逆スパイラル試験と呼ばれる試験を行ってこのようなカー

ブを描いて、不安定ループの幅や不安定ループの高さ、ここの旋回角速度の差がどれ位になるかということですが、これをどれ位持った船なのかということも事前に評価して、本来これはあってはいけないものなのですけども、それがあつたとしても事前に情報として知っているのと知らないのではまた違ってきますので、こういったものをきちんと評価していることが必要になります。

次にZ操舵試験と呼ばれるものがあります、これはジグザグ試験とも呼ばれています。このZはジグザグ (zigzag) のZです。これも変針・保針性能の評価で、舵を切ったときに船がどれ位追従する性質を持っているかを調べるための試験になります。

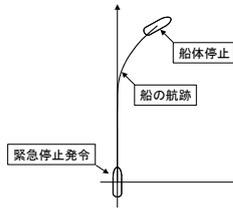
図 22 で横軸は時間を表しています。線が 2 本書いてありますけれども、直線で描いている方が舵の舵角の動きを、曲線が船首の回頭角を表しています。

ジグザグ試験のやり方は、大体、舵角を 10 度に切る場合と 20 度に切る場合があり、例えばこの+10 度、-10 度の場合は、最初に舵を舵角 10 度に切りそのままキープしておきます。舵を切ると船はだんだん向きを変え始めますので、船の船首の方向、回頭角が変化します。船の向きがだんだん旋回し、原針路に対して 10 度傾いたとき、舵角と回頭角が一致した状態になると舵を反対舷 10 度に切ります。今右旋回しているとしますと、舵を反対舷に切ったからといって直ぐに左旋回を始めるかとなると、それは船型によってまた特性が変わるということで、一般的な船は直ぐには向きは変わらず、しばらく元の向きに回頭した後、徐々に回頭運動が収まって、逆向きに曲がり始めます。このとき、応答性能が良い船というのは、舵を切ったからの行き過ぎ量、これを第一行き過ぎ角と言いますが、これが割と小さく、本来曲がるべき方向に回るのですけれども、応答性能が悪い船はこの行き過ぎ量がずっと延びて、舵は右に切っているのに、左旋回がしばらく続くことになって、それは操船上なかなか難しいということになります。最初の行き過ぎ角、2 番目の行き過ぎ角の後も同じことを繰り返しますが、この行き過ぎ角は基準値が決まっており、この数値内に収めることが定められています。20 度/20 度 Z というのは、同じく、個々の舵角を 20 度に切ることになります。

## 緊急停止試験

23

- 船舶の停止性能を確認
  - 船舶の巨大化に伴い、停止性能が低下する傾向
  - 衝突等の危険防止
- 計測・評価項目
  - 主機への燃料供給を停止してから、船舶が完全に停止するまでの航走距離
    - 船長の15倍以下
- 計測方法
  - DGPSを利用



次が緊急停止試験です。これは船の停止性能を確認することで、船はブレーキがある訳ではありませんので、プロペラを逆転させて止めることとなりますけども、そのときにどれくらいの距離で止まるか、基準としては船長の15倍以下ということになっています。ただ、一部の船については、監督官庁の許可を取ったうえで、船長の20倍ということもありますが、基本的には、船長の15倍以下ということで、船の長さが200m、300mとかになりますと2km、3kmのオーダーで止まればOKというような基準ですので、いかに止まりにくいかがお分かりいただけるかと思えます。

## 船舶の操縦性能の評価と予測

24

- 操縦性能を評価する方法
  - 設計段階
    - 模型試験
    - 過去のデータベース
    - シミュレーション計算
  - 建造後
    - 海上試運転
- 操縦性能予測の必要性
  - 船舶が完成した後の操縦性能の改良は困難
  - 建造前に模型試験やシミュレーション計算に基づいて十分に検討
  - 優れた操縦性能を持つように設計することが不可欠

## 船舶の操縦運動の推定(1)

25

- 船舶の設計段階における操縦運動の推定と操縦性能の評価
  - 操縦性能不足に起因する海難事故の防止
  - 海洋環境の汚染や破壊の防止
  - IMO(国際海事機関)による操縦性基準
- 船舶の操縦運動の推定法
  - 模型実験に基づく方法
  - 過去の実績船のデータベースに基づく方法
  - シミュレーション計算に基づく方法
    - 各種流体力を表現するための数学モデルが必要

以上、操縦性能の評価パラメータとそれをどう評価するかについてご説明しましたけれども、造船所で船を造った後に試運転で実際にこれらを確認し、ある性能が満足していませんでしたということになりますと、その時点で船型を変えることはほぼ無理ですので、設計段階である程度のその船の性能を把握しておくことが必要となります。それではそれをどうやって性能評価しましょうかということですが、大きな区分けをしますと、まず模型試験をやって造ろうとする船と相似な形の模型をつかって、実際に水槽の中でラジコンで動かし、運動を計測したり力を測るといったようなことをやるのが一つの方法です。

造船所であれば、これまでに自社で建造した船のデータが蓄積されています

ので、例えば以前建造した船を少しマイナーチェンジした船を建造したとすると、船型や舵を変えた影響がどう効いてくるかを推定して、過去のデータベースに基づいて、性能の変化を予測するという方法が使えます。

あと一番できると嬉しいのが、シミュレーション計算です。コンピューターの中で、船型等のデータを入れると、こんな結果が出ますよということになれば、一番手間もかからないのですが、現在なかなかそこまで精度良い方法はありませんので、こういう三つの方法を組み合わせて各社で検討されていますし、大学ではシミュレーション計算の精度をいかに上げるかといったところを研究しています。

次に建造後は、先程申し上げた海上試運転でいろいろ定められた試験を実施して性能を確認することになりますが、船を造ってしまった後の操縦性能の改良は困難であり、事前の検討が不可欠ということになります。何故必要かと言いますと同じような話が続きますが、船というのは一度事故が起こると周囲の環境に与える影響が非常に大きいこと、その環境汚染や破壊を防ぐIMOの基準を満足することも、お客さんとの契約で非常に重要になってきますので、こういった方法で推定する必要があります。

船の操縦運動を推定する方法としてどのようなものがあるかと言うと、大きく二つの方法がございます。

一つに応答モデルと呼ばれる考え方があります。これは船というものは基本的に舵を切ったら運動が変化するので、船に対して、ここは人が絡んで指令を出す訳ですけれども、ある舵角を与えたらこんな運動が起きた、また舵角の条件を変えたら運動がこう変わったという関係が得られます。入力と出力が舵角と運動ということで、それぞれデータを集めていくと対応関係が分かってきますので、これを解析することによって、この舵角と運動を結びつける関係を明らかにして、そこからその対象としている船の運動性能を評価するのが応答モデルと呼ばれる考え方になります。

船舶の操縦運動の推定(2) 26

- 応答モデル
  - 応答方程式を用いて船舶の操縦運動を取り扱う。
    - 物理系の力学的なモデルには触れない。
  - 船舶の運動を一つの閉ループの制御系として考える。
    - 制御入力: 操舵
    - 出力: 船舶の運動
    - 船型や舵面積等の違いにより異なる応答特性を示す。

船舶の軌路、速度、回頭角、回頭角速度等の情報

九州大学 大学院工学研究院 海洋システム工学部門

船舶の操縦運動の推定(3) 27

- 流体力学モデル
  - 流体力学的な立場から船舶に作用する流体力を考慮して運動方程式を取り扱う。
  - 外力に対して、船舶がどのような力学的なメカニズムで運動するか注目する。
    - 船型が持つ流体力学的な特性(流体力学特性)に注目
- 操縦運動シミュレーションのための数学モデル
  - 「流体力学モデル」の考え方に基づく。
  - 我が国において現在広く利用されている。

九州大学 大学院工学研究院 海洋システム工学部門

ここに書いてある物理系の力学的なモデルには触れないというのは、先程い

いろいろ実験をやって力を測ると言いましたけれども、このような運動をしている時にはこんな力がかかっているというのは応答モデルでは表面上は現われてこなくて、舵を切ったら船に働いている力が変わり、結果としてこのような運動が出たという入ったところと出たところに注目して評価をするというのが、この応答モデルの基本的な考え方になります。操舵が入力で出力が運動です。

当然船の形が変わると同じように舵を切っても、運動の出方が変わりますので、これを結びつける関係は船特有のものということになります。

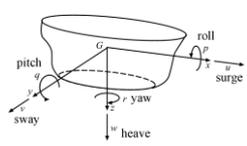
もう一つ考え方が流力モデルという考え方で、こちらは物理でやっている運動方程式を解いて運動を推定するものです。その力を流体力学的な考え方で表現するため流力モデルと言います。

これは船の姿勢が変わると、水から受ける力が変わる、舵を切ると舵の力がこう変わる。その結果として、運動がどう変わるというのを全部、数式で表しておいて、そこに使う係数が船ごとによって変わってきますので、その係数をうまく取り換えれば同じプログラムで別の船の運動を推定できるということになります。このような計算を行うのですが、結局、この力をどう表現するかということが、推定される運動の評価の精度にも効いてきます。

現在、船の運動シミュレーションをやろうとするときには、基本的にはこの流力モデルの考え方が主流で使われています。ただ、応答モデルが使われてないかというところでもなくて、オートパイロットの設計やそれほど大きく舵を切らない運動であれば、応答モデルであっても評価パラメータを正確に行っていれば十分な精度で計算できます。

この流力モデルというのはどんな考え方で成り立っているのかについて、少し数式が出てきますが、簡単に説明させていただきます。

船舶の運動 28



- 並進運動
  - 前後揺れ (surge)
  - 左右揺れ (sway)
  - 上下揺れ (heave)
- 回転運動
  - 横揺れ (roll) 高速航行する船舶  
GMが小さい船舶
  - 縦揺れ (pitch)
  - 船首揺れ (yaw)

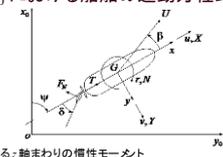
九州大学 大学院工学研究院 海洋システム工学部門

船舶の操縦運動の解析(1) 29

- 前後揺れ、左右揺れ、船首揺れの連成運動
- 空間固定座標系  $o_0-x_0y_0z_0$  における船舶の運動方程式

$$m \ddot{x}_0 = X_0$$

$$m \ddot{y}_0 = Y_0$$

$$I_z \ddot{\psi} = N_0$$


$m$  : 船舶の質量  
 $I_z$  : 船体固定座標系  $G-x_0y_0z_0$  における  $z$  軸まわりの慣性モーメント  
 $\ddot{x}_0, \ddot{y}_0$  :  $x_0, y_0$  軸方向の加速度  
 $\ddot{\psi}$  :  $z$  軸まわりの回転角加速度  
 $X_0, Y_0$  : 船舶に作用する  $x_0, y_0$  軸方向の力  
 $N_0$  : 船舶に作用する  $z$  軸まわりの回転モーメント

九州大学 大学院工学研究院 海洋システム工学部門

船は水の上に浮いて運動していきまして、このような 3 軸の座標系を考えますと、それぞれの軸方向に動く運動が前後揺れ、左右揺れ、上下揺れというもの、今度はこの軸回りの回転運動が横揺れ、縦揺れ、船首揺れとなりますけれども、操縦性と呼ばれる分野で扱うのは、主にこの前後・左右揺れと船首揺れという

この水線面の  $x$  軸と  $y$  軸で構成される面内の運動で前後の動きと横の動き、そしてこの船首を左右に振る動きが主な研究対象になります。

ただ、高速船やコンテナ船のようなGM（メタセンター高さ）が小さい船、復原力が割と小さい船になりますと、舵を切って旋回する途中で横傾斜を生じたりしますので、その場合は回転運動の横揺れの影響も考えておかないといけません。垂直に浮いているときと左右に傾斜しているときとは、水面下の船の形状が変わっていきますので、船にかかる力が変わり、それが今度は旋回航跡の差となって現われることがあります。これは状況に応じて使い分けますが、基本的にはこの前後・左右揺れ、船首揺れで、状況によって横揺れが付加されると考えて下さい。

船舶の操縦運動の解析(2) 30

- 船体固定座標系  $G-xyz$  を用いて、速度、加速度、船舶に作用する力を表した場合の運動方程式

$$\begin{aligned} (m+m_x)\dot{u} - (m+m_y)vr &= X \\ (m+m_y)\dot{v} + (m+m_x)ur &= Y \\ (I_x + i_x)\dot{r} &= N \end{aligned}$$

$m_x, m_y$  :  $x, y$  軸方向の船舶の付加質量  
 $i_x$  : 軸まわりの付加慣性モーメント  
 $u, v$  :  $x, y$  軸方向の速度  
 $r$  : 軸まわりの回転角速度  
 $X, Y$  : 船舶に作用する  $x, y$  軸方向の力  
 $N$  : 船舶に作用する 軸まわりの回転モーメント

九州大学 大学院工学研究院 海洋システム工学部門

船舶に作用する流体力の表現 31

- 船舶に作用する流体力
  - 船型、運動状態、載荷状態や航行海域の水深等によって大きく変化
- 船舶の操縦運動の正確な推定
  - 船舶に作用する流体力を精度良く表現することが不可欠
- 操縦運動方程式の右辺に現れる船舶に作用する外力  $X, Y, N$  の表現方法
  - 異なる考え方に基づく二つの数学モデル
    - Whole Ship モデル (regression 型モデル)
    - MMG モデル (module 型モデル)

九州大学 大学院工学研究院 海洋システム工学部門

これは船舶の運動方程式ですが、基本的には、先程の三つの運動を考えていますので、三つの運動に対する運動方程式があります。

質量×加速度が船に働く力と釣り合っていますので、上の二つが前後方向と横方向の力のつり合いで、最後が重心回りの回転運動の釣り合いということになります。ここで船の質量とか、慣性モーメントは、船型が決まるとある程度見積ることが出来ます。式の右側は、水・流体からどんな力を受けているかを示しており、ここをいかに正確に表現するかが方程式を解いて得られる運動の推定結果の精度に結びついてきます。

途中は省略しますがけれども、中身を分類すると図 30 の式が船の操縦運動方程式として、一般的に教えられているものになります。

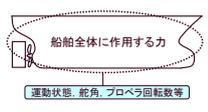
運動方程式の右側が主に姿勢によっていろいろ変わってくる力を表しますので、ここを実験や流体力学で計算したりして何とか正確に表し、運動を推定するということになります。

右辺の  $X, Y, N$  は、船に働く力ですが、先程から申し上げているように船型が変わると形が変わりこの力も変わります。また、同じ船であっても、載荷状態が変わると水面下の形が変わりますので力も変わります。更に直進しているのか、斜航しているのか、旋回しているのかによっても、当然、周りの水の流

れが違うので力が変わります。また、海域が変わって、水深が深いか浅いかによっても変わりますので、このような全部のパラメータを含めて、ある瞬間に船にどんな力が働くのかを数式で正確に表現しておかないと、運動方程式を頑張っても出てきた結果には何の意味もないということになります。

**Whole Ship モデル (regression 型モデル) (1)** 32

- 船体, プロペラ, 舵で構成される船舶全体に作用する流体力を多項式で表現
  - 船速  $u, v$
  - 回頭角速度  $r$
  - 舵角  $\delta$
  - プロペラ回転数  $n$  等



船舶全体に作用する力

運動状態, 舵角, プロペラ回転数等

$$\left. \begin{aligned} X &= X(u, \dot{u}, v, \dot{v}, r, \dot{r}, \delta, \dot{\delta}, n, \dots) \\ Y &= Y(u, \dot{u}, v, \dot{v}, r, \dot{r}, \delta, \dot{\delta}, n, \dots) \\ N &= N(u, \dot{u}, v, \dot{v}, r, \dot{r}, \delta, \dot{\delta}, n, \dots) \end{aligned} \right\}$$

※ 運動方程式は重心を原点とする船体固定座標系で記述  
 ※ 添字 "G" の表記は省略 (以降の数学モデルも同様)

Crane : Maneuvering Trials of 278,000 DWT Esso Osaka in Shallow and Deep Water, Trans. of the SNAME, Vol.87 (1979)

九州大学 大学院工学研究院 海洋システム工学部門

**Whole Ship モデル (regression 型モデル) (2)** 33

- 拘束模型試験により, 各種流体力係数を算出
  - PMM (planar motion mechanism) 試験
  - CMT (circular motion test)
  - 旋回腕試験 (rotating arm test) 等
- 係数の選び方
  - 各研究機関ごとにさまざまな数学モデル
  - パラメータとして含まれる変数やその次数が異なる。
- 利点
  - 流体力計測のための拘束模型試験が実施された運動状態の範囲においては, 船舶に作用する流体力の特性を極めて正確に表現することができる。

九州大学 大学院工学研究院 海洋システム工学部門

それではその船に働く力をどうやって表現するかですが、これにも大きく分けて二つの考え方があります。一つが Whole ship モデルというもの、もう一つがMMGモデルと呼ばれるものです。

船を大きくパーツに分けると船体とプロペラと舵で構成されています。この Whole ship モデルは、一つの船全体を考えて、ただそのときに、船は運動状態によってプロペラの回転数が違う、舵角が中立なのか大きく舵を取っているか、トリムしているかどうか、その時の船の運動状態や姿勢を表すパラメータを多数選びまして、その全部の組み合わせで、とりあえず船を引っ張って力を測ってしまうものです。膨大なパラメータの組み合わせで実験を何回も何回も繰り返し、データが十分集まった時点で、その中のパラメータの組み合わせを数式でうまく表しておきます。運動方程式を解いて、ある瞬間の船の姿勢がこうですよということが分かれば、この船にはこんな力が働いていますということが決まるので、それを使い、そこから時間がまた経過すると船の姿勢がどう変わるか、その結果として力がどうなるか、それをひたすら繰り返していくことによって、運動の推定ができるということになります。

これはPMM試験やCMTなどの模型試験によって計測することになります。研究機関によっては、このパラメータは要らないとか、これを入れた方が良いというのがあって、研究機関によって細かい表現はいろいろ差があるのですが、実験を繰り返すと、何らかのモデルが定まります。

MMG モデル (module 型モデル) (1) 34

- Whole Ship モデルの欠点
  - 数学モデルに含まれるパラメータが異なる場合
    - 実験結果の比較が困難
  - 広範囲の運動状態に適用する場合
    - 膨大な実験が必要
  - 船型や舵等を部分的に変化させる場合
    - 実験のやり直しが必要となり、適用性が乏しい。
- より合理的な数学モデルの構築
  - 操縦運動の数学モデル検討グループ(略称 MMG)設置
    - 昭和 51 年 試験水槽委員会第 2 部会内
  - 数学モデルに関する詳細な検討

九州大学

MMG モデル (module 型モデル) (2) 35

- 船舶に作用する流体力を船舶を構成する各要素ごとに分離して表現
  - Module 型モデル
  - 通称 MMG モデル

$$\left. \begin{aligned} X &= X_H + X_P + X_R \\ Y &= Y_H + Y_P + Y_R \\ N &= N_H + N_P + N_R \end{aligned} \right\}$$

九州大学

メリットとしては、実験を行なうと結局膨大なパラメータの組み合わせになりますので、その中に普通の船の運動はだいたい含まれることになります。その実験を行った範囲の中の運動であれば、非常に正確な船の力が得られるということで、それを使って計算すれば、船の運動がすごく良い精度で推定できるということになります。デメリットとしては、実験を行うときのコンディション条件の組み合わせが非常に多いため、かなり膨大な実験をやらないといけないことです。実験さえすればできるのですが、そのためには非常に労力がかかります。

実験を色々やっているうちに、どうも旋回性能が悪いために舵をもう少し大きくしようとなりますと舵の要目が変わりますので、結局また膨大な実験を繰り返さないと評価ができないということになります。船型が決まった状態では非常に良いのですが、船型が定まっていない設計段階で、繰り返し行うにはなかなか使い勝手が悪いということで、30・40年前になりますけれども、日本の当時の研究者が集まって、もう少し使い勝手のよいモデルを作ろうということで検討されたのが、一方のMMGモデルと呼ばれるもので、MMGというのはこの研究グループの名称を取ったものです。

その考え方がどういうものかということ、船に働く力を船体、プロペラ、舵のパーツごとに分けて表現するもので、船体の形が変わったら船体に作用する力の中身を変えます。プロペラを変えたらプロペラの部分を、舵を変えたら舵の力を変えろということ、モジュール型とも呼ばれていますけれども、パーツを入れ替え可能な形で表現しておくのがMMGの基本的な考え方です。

ただ、単純に分けて扱えるかということそうではなくて、舵というのは船体の後ろのプロペラを通過してきた流れの中で動いていますので、舵に働く力は当然、船体とプロペラの影響が入ってきます。これは干渉力と呼ばれていますが、見かけ上はパーツごとに分かれていますけれども、プロペラとか舵には前にある船体とかプロペラの影響も含めてモデル化します。そのため、パーツを入れ替えたならその干渉のパラメータも一緒に評価し直すといったところまで含めて、推

定精度を上げて、かつ使い勝手のよい形にしたのがモジュール型MMGモデルと呼ばれるものです。

MMG モデル (module 型モデル) (3)	MMG モデル (module 型モデル) (4)						
36	37						
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 右辺各項の添字の意味               <table style="margin-left: 20px; border: none;"> <tr> <td style="padding-right: 10px;">- <math>H</math> : 船体に作用する力</td> <td style="border-left: 1px solid black; padding-left: 10px;"><math>X = X_H + X_P + X_R</math></td> </tr> <tr> <td style="padding-right: 10px;">- <math>P</math> : プロペラ推力</td> <td style="border-left: 1px solid black; padding-left: 10px;"><math>Y = Y_H + Y_P + Y_R</math></td> </tr> <tr> <td style="padding-right: 10px;">- <math>R</math> : 舵力</td> <td style="border-left: 1px solid black; padding-left: 10px;"><math>N = N_H + N_P + N_R</math></td> </tr> </table> </li> <li>- 船体とプロペラ、舵の間に生じる流体力学的な干渉力も含めて表現される。</li> <li>- <math>Y_P, N_P</math> については省略されることが多い。               <ul style="list-style-type: none"> <li>• 通常の運動状態においては船舶の運動に及ぼす影響は小さい。</li> </ul> </li> </ul>	- $H$ : 船体に作用する力	$X = X_H + X_P + X_R$	- $P$ : プロペラ推力	$Y = Y_H + Y_P + Y_R$	- $R$ : 舵力	$N = N_H + N_P + N_R$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• MMG モデルの特長               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 船型や舵形状の変更等の部分的な変更にも対応することが可能                   <ul style="list-style-type: none"> <li>• 各項は船体、プロペラ、舵の要目や特性を考慮した船体要素と運動要素に基づいて表現される。</li> </ul> </li> <li>- 外力を容易に付加することが可能                   <ul style="list-style-type: none"> <li>• 風や波等による外力</li> <li>• スラスタ等の補助推進装置</li> <li>• それぞれの影響を考慮した数学モデルを構成することが可能</li> </ul> </li> <li>- 設計段階等において操縦性能推定を行う場合に、利用しやすい。</li> </ul> </li> </ul> <p style="font-size: small; margin-top: 10px;">小林、影本、古川：操縦運動の数学モデル。運動性能研究会第12回シンポジウム「操縦性研究の設計への応用」、日本造船学会(1995)</p>
- $H$ : 船体に作用する力	$X = X_H + X_P + X_R$						
- $P$ : プロペラ推力	$Y = Y_H + Y_P + Y_R$						
- $R$ : 舵力	$N = N_H + N_P + N_R$						
九州大学 大学院工学研究院 海洋システム工学部門	九州大学 大学院工学研究院 海洋システム工学部門						

図 36 の式で、プロペラの横力と回頭モーメントは割と小さいので、 $P$  がついた  $Y$  と  $N$  は省略されることが多いということになります。

後は  $X_H, X_P, X_R$  と  $Y_H, Y_R, N_H, N_R$  の中身をどう表現するかということになります。このようなパーツに分けておくと、例えば後で舵の形を変えたときは、舵のモデルだけを入れ替えます。また、風が吹いてきたので、風の影響の力 ( $W$ ) を付け足そう、スラスタがあるのでバウスラスタの力を付け足そうといったことを、モジュールを追加するような形でシミュレーションができます。当然、追加するモデル自体の精度が十分に検討されていることが前提になりますが、モデルを足したり引いたりすることがやりやすいというのが一つのメリットになります。

### ◆ 船体に作用する流体力の計測

先程から申し上げているように、船体、プロペラ、舵に働く力をどのように表現するか、結局これも運動状態によって変わってきますので、それを手っ取り早くやる方法としては模型試験を行うのが一番正確です。ただ手間はかかります。

水槽の中に模型船を浮かべて、電車と呼ばれるもので引っ張ると、水から受ける力を検力計で計測できますので、この斜航角のときにはこのような力がかかった、これに旋回角速度が加わるとどうなるか、これもある程度パラメータの組み合わせを繰り返して、いろんなデータを積み上げてモデル化することになります。

拘束模型試験 (captive model test) 40

- 検力計を介して模型船を試験装置に拘束
- 模型船に強制運動を与え、船体に作用する流体力を計測
- 計測値から慣性力を差し引いて、船体に誘起される流体力を算出
- 拘束模型試験の種類
  - 旋回腕試験 (rotating arm test)
  - CMT (circular motion test)
  - PMM (planar motion mechanism) 試験

九州大学 大学院工学研究院 海洋システム工学部門

旋回腕試験 41

- 円弧状のレールに沿って旋回腕を回転
- 旋回腕に模型船を拘束
- 定常旋回角速度  $r$  と斜航角  $\beta$  を設定

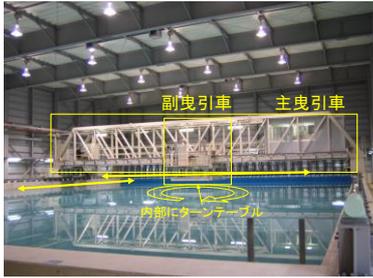


九州大学 旧船舶運動性能試験水槽  
九州大学 大学院工学研究院 海洋システム工学部門

これが実験装置の一例ですけれども、今はなくなってしまった移転前の箱崎キャンパスにあった水槽の写真になります。これはどういう装置かと申し上げますと、ここに円形のレールがあり、ここが円の中心になります。ここを中心に電車と言われるこの骨組み構造が旋回できます。このとき模型船を取り付けて回すと船があたかも旋回運動しているような状態を再現できます。その時、ある旋回角速度を与えるとどんな力とモーメントがかかるかを計測し、旋回角速度の条件や船の斜航角を変えて何回も実験を繰り返すと、その船の運動状態に応じた力が得られるということになります。

ただ、この装置は旋回運動に特化した実験装置で、ほかには使い勝手が悪い、と言うのは水槽の中に柱があるので、他の実験をやるときにこの柱が邪魔になっていましたが、伊都キャンパスでは、旋回運動に使いかつ他の実験にも使える水槽と電車を設置しています。

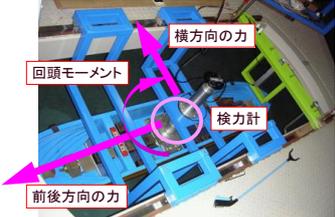
模型船曳引車の例(2) 44



九州大学 大学院工学研究院 海洋システム工学部門

模型船拘束装置の例 45

- 計測項目
  - 前後力
  - 横力
  - 回頭モーメント



九州大学 大学院工学研究院 海洋システム工学部門

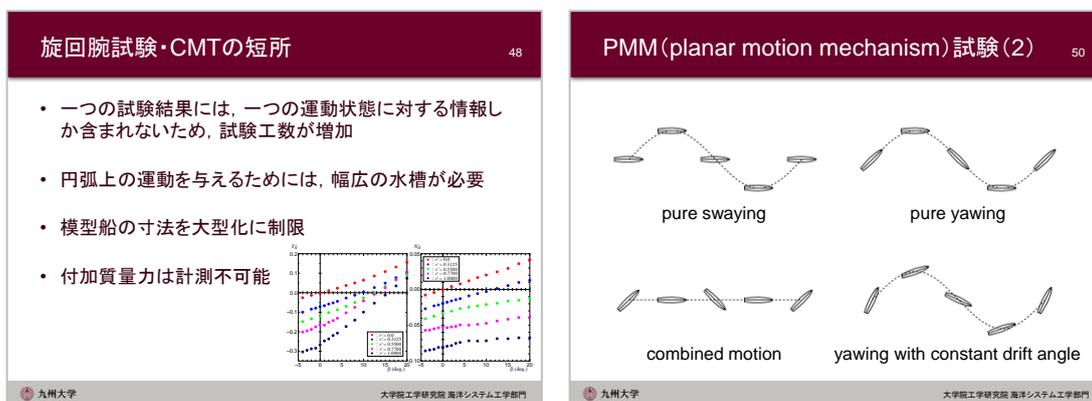
これが CPMC と呼ばれるタイプで、水槽は 38.8m × 24.4m で、これに橋げたようなものが乗っていますが、両サイドに新幹線と同じレールが引かれていまして、このレールにこの橋げた状のものが跨って載っている状態になります。模型船はここに取り付け、主曳引車がレールに乗かって、この図ですと手前から奥行き方向に自由に動くことができます。また、副曳引車が主曳引

車にぶら下がってしまっていて、これがこの図でいくと左右に動くことができます。この副曳引車の中にはターンテーブルという回転運動を起こす装置が付いていますので、先程のこの前後方向と横方向の動きと旋回させるような運動の三つの組み合わせを再現できます。

その他にも事前にどんな運動させたいかをプログラムしておけば、水槽内でジグザグに走らせたり、途中で急に向きを変えたりして、その時にどんな力がかかるのか、そういったものを条件に応じて計測ができるといった装置です。

図 45 が実験に使う模型船ですけれども、大体 2.5m ぐらいの模型を使いますが、これが検力計と呼ばれるもので、これを介して先程の模型船曳引車にガッチリ固定しています。この状態で電車が動くとき船が水から抵抗を受けて、この三つの力の成分が計測されるということになります。

大手の造船所や他の大学研究機関には、これと似たような設備があるのでありますが、これを使って実験を行なうとその旋回角速度と斜航角の組み合わせでどういう力が働くかを計測することができます。これは一定の運動状態をキープしますので、力がずっと一定に出てきますので、全部を平均すると精度良く力を計測できること、それとコントロールルームの設定次第で任意の旋回角速度、斜航角を組み合わせることができますので、実際に船が運動しそうな組み合わせで力を計測することができます。また、計測したデータを使い勝手のいいように整理するため微係数と呼ばれるものが使われます。あと特殊な船型であってもモデルさえ選べば、有効なデータを得やすい特徴があります。



デメリットとしては、先程も言いましたけれども、パラメータをたくさん変えて実験を繰り返さないといけませんので非常に時間がかかります。

図 48 で言いますと、横軸が斜航角で、色の違いが旋回角速度の違いを表していますが、横方向の斜航角の点が 20 個弱ありますので、回頭角速度が 5 パターンぐらいあると、この図を書くのに 100 回ぐらい実験をやらないとこの図は書けません。かつ問題は水の上で、船を動かして引っ張るので 1 回実験やると波が起きたり、水槽の中で水が回転したり、水自体が動いてしまうので、その水

の運動が収まるのを待たないといけませんので、1回の実験に最低でも15分から20分かかり、水深が浅くなると、水がなかなか止まらないので30分位かかります。1日8時間の実験やったとしても、1時間に2点で1日に16点とするところの図1個を書くには1週間以上は確実にかかります。非常に手間のかかる実験になります。

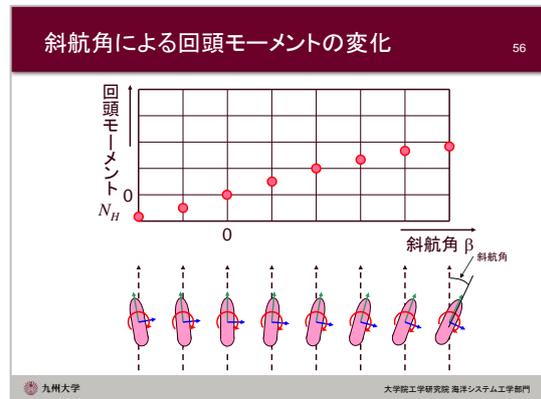
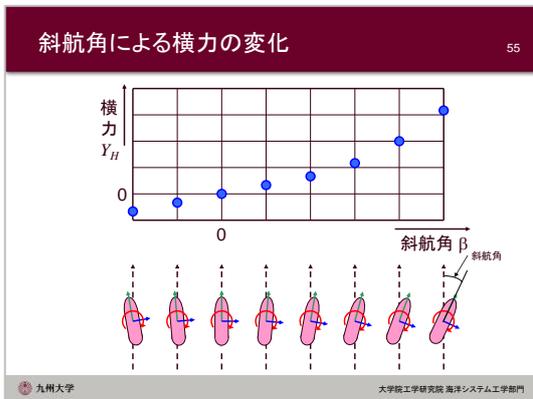
やってしまうと便利ですがけれども、実験にえらい手間がかかることと大型水槽等の特殊な設備が必要です。それと模型船は、本当は大きい程いいのですが、大きくなると旋回に必要な面積も増えますので、自ずと模型のサイズは制限されます。また、付加質量とともに加速度に関係する項は取れないというデメリットがあります。

これに対して、もう少しお手軽にできる方法として、PMM試験というのがあります。先程の試験は、旋回とか斜航で普通の船が起こしそうな運動を組み合わせた試験でしたが、PMM試験は実際には起こり得ないけれども、後々の解析に便利な運動を強制的に船に与えて力を測ります。

Pure swayingの場合は、船首の向きは全然変わらないけれども、横方向に動いている状態で、こちらは斜航せずに常に船首の方向と船の進行方向が一緒の状態です。Combined motionの場合は、船は一直線に進むけれども、動いている過程で船首が右、左に振れている状態です。これらは実際の船では実現はできないのですが、こういう実験を注意しながら行くと有効なデータが得られ、先程のCMT試験と同じようなデータが得られます。

PMM試験ではそれ程面積が必要ではないので、いろんな造船所等が持っている曳航水槽と呼ばれる長い水槽でもちょっと装置を追加すると実験ができます。それと運動状態を無理やり動かしていますので、CMTでは取れなかった付加質量等も含めいろんなデータを一気に計測できます。ただ精度をちゃんと管理しておかないと、解析には難しかったり、計測されたデータが役に立たないということになりますので、そこら辺は向き不向きがございます。

## ◆ 計測された流体力の解析と数式表現



このようにしていろいろな実験を行ってデータを積み重ねていくと、後はそれをどう使い勝手よく表現するかという話になります。

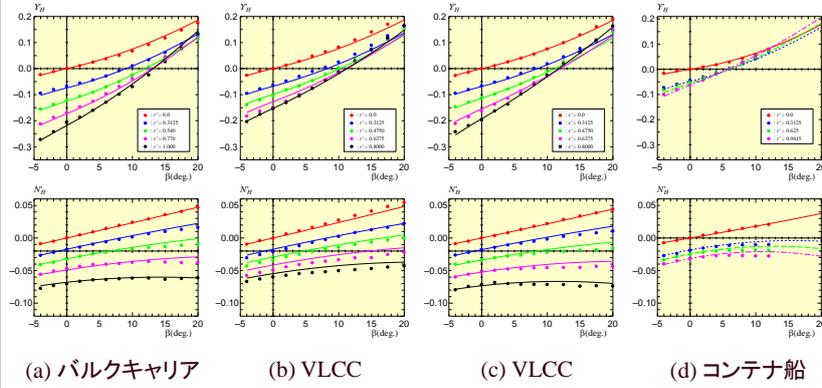
先程のパラメータの組み合わせですけれども、例えば、斜航角を変えて実験を行いますと直進する時には横方向には力が働いてないのですが、右舷側に斜航すると横方向にだんだん力が出てきますので、実験を行なうとこの点が幾つか得られます。ただシミュレーション計算をやらうとすると実験をやっていない途中での力も知りたいということになりますので、これを何か数式で表してやらないといけない。モーメントも同じように離散的に出てきます。

旋回運動しても力が変わってきますので、このように実験点が出てきてきます。これも船型や斜航角、旋回角速度によって大きく変わるのもあればそれほど大きく変わらないものもあり、船型によって違いがありますので、いろいろ数式で表して、かつその数式に含まれる係数を船ごとに決めるといったことを行う必要があります。

同じ船でも載荷状態によって違いが出てきます。満載の時には旋回角速度がつくと大きく力が変わったのが、積荷が軽くなってくるとこの変化具合が小さくなります。

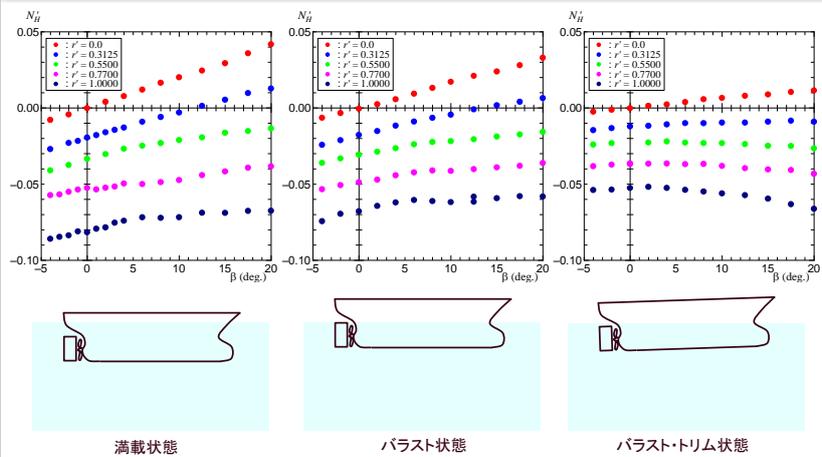
## 船型による横力・回頭モーメントの変化の例

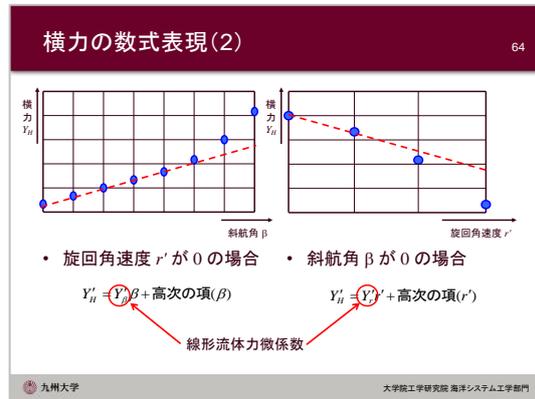
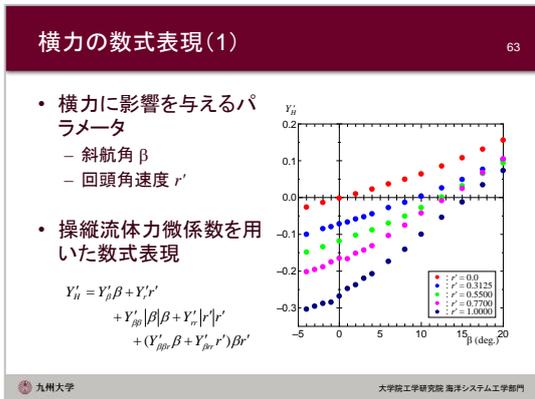
60



## 载荷状態による回頭モーメントの変化の例

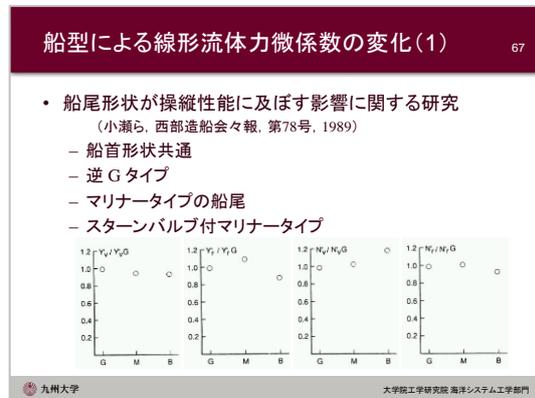
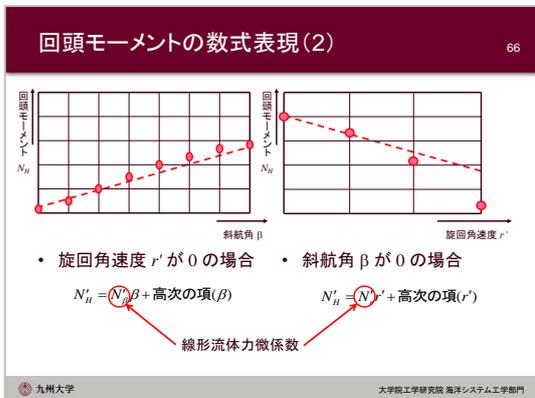
62





この横力を数式でどのように表すかと言いますと、少しごちゃごちゃした式になりますけども、図 63 のようになります。この微係数というのは、前に係る係数ですが、斜航角に力がどれぐらい比例するかとか、旋回角速度にどれぐらい比例するといったことを表しています。

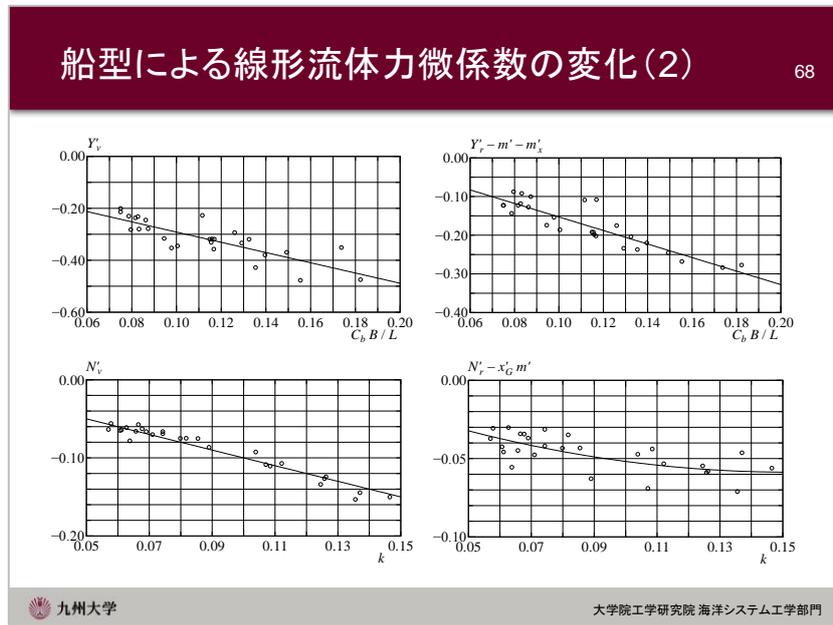
先程の実験点（図 64）で言うと、この項は斜航角が変わると力がこのような傾斜で変わることを表しています。ただ、これだけですと斜航角が大きくなってくると実験点とだんだんと合わなくなってきますので、ここの曲がっている部分は別の項を足して表すというのが追加項の意味になります。船ごとに繰り返して実験を行ってゆくと、微係数を決めることができます。



回頭モーメントについても同じように、先程の実験で 100 点ぐらいのデータが得られれば、あとは解析で使い勝手のよいデータが得られることになります。

微係数という係数でいろんな力を表すのですけれども、これは当然船の形が変わると違ってきます。最初に引用しました広島大学名誉教授の小瀬先生の論文からですけれども、逆Gの時の係数を 1 とすると、マリナータイプではだんだんこの係数は小さくなるか、この係数は大きくなるがバルブがつくと小さくなるというように、船首が同じでも船尾が違っていると係数が変わって、その係数の違いで船に働く力の特徴、それによって引き起こされる運動の特徴を表現

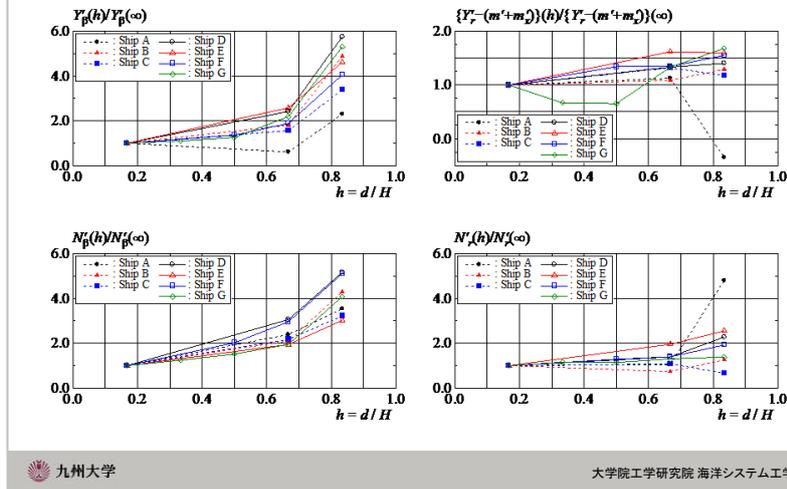
できるということになります。



船型によっても違うのですが、それを毎回実験で行うのも大変なので、例えば船の  $C_B$  (方形係数) とか幅、喫水が分かるとそこそこに推定できるのではないかということで、これは九州大学で行った実験データを整理したものですけれども、例えば先程の  $Y'_v$  というパラメータであれば、このような係数で整理するとこのような傾きで表せるとか、 $N'_v$ 、これは喫水と船長の比を表す係数になりますけれども、 $N'_v$  というのはほぼ一直線に並ぶと。こういったものの精度を上げていくと、実験を行わなくてもそこそこの力の推定ができ、シミュレーションを行うことができることになりますので、設計段階で使いやすくなります。

## 水深による線形流体力微係数の変化

69



さらに水深が変わると係数が変わります。図 69 は、横軸が水深を表している右に行くほど浅くなるのですが、船に働く力が大きく変わってくる様子を表しています。水深が浅くなると深い時に比べて、係数によっては 4 倍、5 倍の違いがあり、これが運動の違いに結びついていることになります。

### ◆ 針路安定性の評価

針路安定性 (course stability) 71

- 直進中の船舶に外乱が作用して針路を逸れたとき、操舵しなくとも原針路に復帰する、あるいは原針路に近い状態となる性質
- 船型によって決まる船舶固有の性質
- 船体の慣性力と旋回抵抗の比率に支配される。
  - 慣性力 / 旋回抵抗: 大
    - 旋回運動の減衰が遅い。→ 針路安定性が悪い
- 旋回性能 (turning ability)
  - 旋回力 / 旋回抵抗: 大
    - 旋回半径: 小, 定常旋回角速度: 大 → 旋回性能が良い。

針路安定性の評価 (1) 72

- 針路安定性指数
 
$$\Delta = Y'_\beta N'_r - \{Y'_r - (m' + m'_y)\} N'_\beta$$
  - $\Delta < 0$  の場合: 針路安定
  - $\Delta > 0$  の場合: 針路不安定
- 舵角  $\delta$  と回頭角速度  $r$  の関係
 
$$r(t) = Ce^{-t/T} + K\delta$$
  - $T, K$ : 操縦性指数
    - $\Delta < 0$  の場合:  $K > 0$
    - $\Delta > 0$  の場合:  $K < 0$

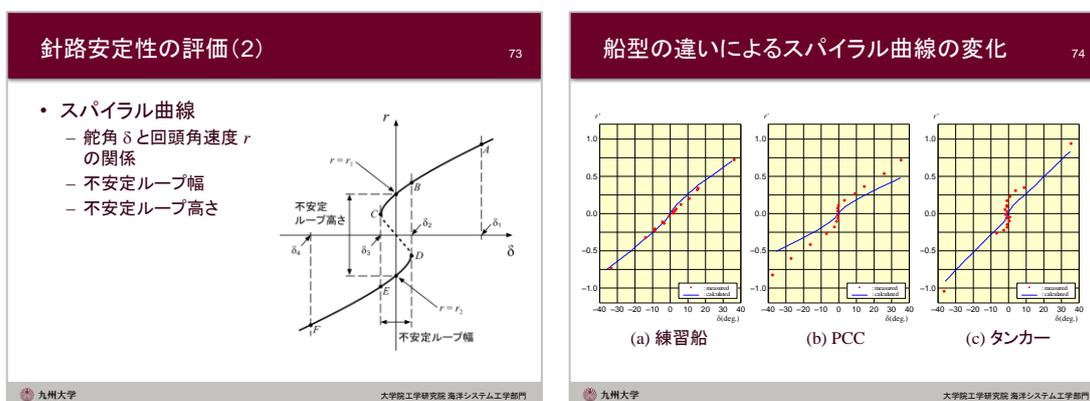
次に最初に申し上げました針路安定性の評価の話になります。不安定ループなどのお話をしましたが、針路安定性をもう 1 回整理しますと、直進中の船に風なり潮流なりの外乱が作用したときに針路がそれてしまいます。針路がそれてしまうきっかけとなった外乱が排除されたときに、元に戻りやすいかどうかを表しているのがこの course stability、針路安定性ということになります。

これは船体の慣性力と旋回抵抗の比率に支配されるのですが、図 71 の

図は縦軸が回頭角を表しています。このタイミングで外乱が生じて向きが変わり始めますが、外乱が直ぐになくなると、針路安定性の良い船というのは、ちょっと針路が変わったとしてもそれほど大きくずれない。それに対して、針路安定性が悪い船というのは、1回何かのきっかけで向きが変わると、外乱が無くなってもどんどん向きが変わってゆくというようなことが起こりかねない。これは旋回抵抗が大きいか小さいかによって変わってきます。旋回性能は舵力と旋回抵抗の比ということで、こちらも大小関係に注意していく必要があります。

図71がどこから出てきたかについて、もう少し詳しく説明していますが図72になります。針路安定性というのは、先程から出ている微係数という船に働く力を表す係数を使って評価することができます。

結論を言いますと、このような微係数を使って計算される針路安定性指数がマイナスになるとその船は針路安定が良い、プラスになると針路不安定であるということができ、安定性の良い船の場合は舵角と回頭角が一对一に対応します。しかし、不安定な船は舵を右に切っているのに、左に旋回しそうな傾向が数式上現れる、実際にそのようなことは起こらないのですけれども、その数式上に現れた結果がここですが、実際には存在しない運動の影響が、本来は一对一で対応するところに乗っかってきて、舵を右に切っているのに左旋回する、あるいは左に切っているのに右旋回するといったことに繋がってきます。



この場合、舵を右舵一杯からだんだん左側に切っていくと、ここでいきなりジャンプしてあるところまでは左舵をきっているのに右旋回していたのが、突然左に曲がり始める。逆に左舵一杯から右に切っていくと、舵角は右になっているのに左旋回しつつ、どっかのタイミングで急に右に曲がり始める。ここで運動のジャンプが生じて、これが操船上難しい原因の一つになることがあります。

図74は別の論文から引用したものですけれども、左の練習船は非常に素直な性能を持つ船型なのですけれども、タンカー等の船型によっては、ここに先程

のループの幅とか高さが出てきます。

船尾形状によるスパイラル曲線の変化(1) 75

- 船首形状共通
- 船尾フレームライン
  - U型フレームライン
    - ・ 推進性能上有利
    - ・ 針路不安定となる傾向
  - V型フレームライン
    - ・ 船体抵抗を低減
    - ・ 針路安定となる傾向

九州大学 大学院工学研究院 海洋システム工学部門

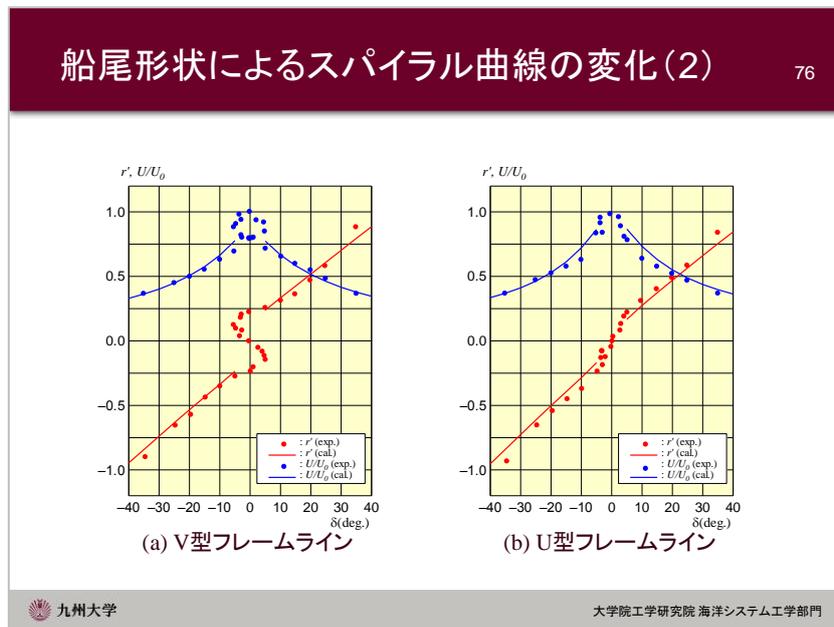
船尾形状による船体周りの流れの変化 78

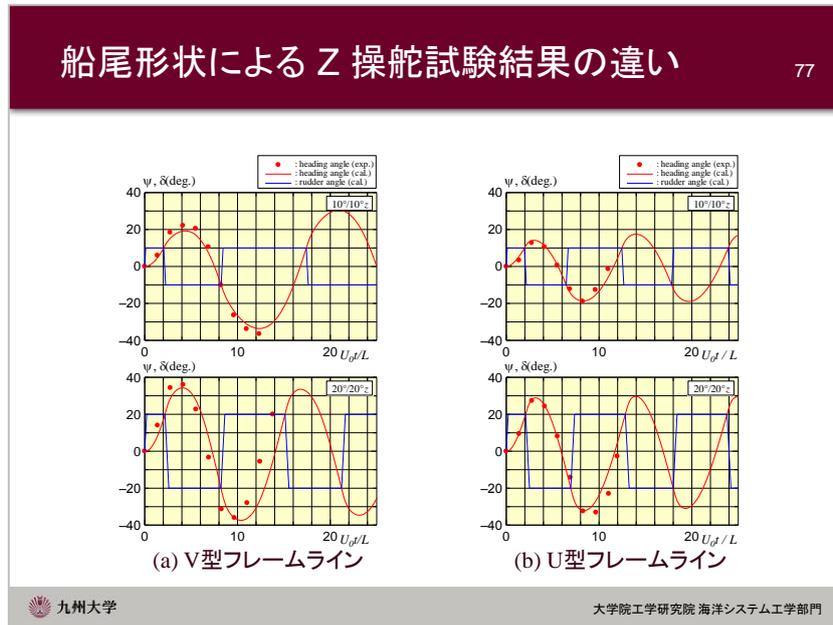
- SR221A 船型
  - V型フレームライン
  - 針路不安定
- SR221B 船型
  - U型フレームライン
  - 針路安定

斜航時の船尾周りの渦の様子

九州大学 大学院工学研究院 海洋システム工学部門

次に、最初に出てきた船尾形状の違いによるU船型、V船型についてですが、新しいタイプのV型は割とこういうのが現れやすくなっています。昔の船は素直な船型だったのですけれども船尾を変えるとこのような目立った特徴が現れることがあります。





このような違いが運動としてどう現われてくるかというと、図 77 がジグザグ試験の結果ですけれども、針路不安定になった V 型は舵角に対してなかなか運動の追従性が良くなって舵は逆に切っているのにまだ運動が発達し続けて、向きを変えるのに時間がかかります。それに対して、U 型は割ときびきびと反応するといった違いが出ており、針路安定性の違いというものを目で見ることができます。

図 78 は海上技術研究所の研究の結果ですけれども、船尾にできる渦のでき方が違って、これが船体周りの流れや力に影響して運動の違いとなって現われてくることになります。

### ◆ 狭水路航行中の船体に作用する力

以上が基本的な操縦性能評価に関するお話ですが、ここからは特殊な運動状態での船に働く力のお話しになります。



まず、狭水路とか運河、岸壁などを想定して、このような所を船が動くとうなるかについて、少し特殊な例ですけれども、九州大学の水槽の中に水路を作って、その中で船を走らせてどんな力が働くかについて実験をしたときの写真です。

この主曳引車、副曳引車が矢印方向に動き、その下に模型船が付いています。この時の実験では、水路幅を船長の 0.6 倍と船長くらいに取り、右側がかなり広くてあまり壁の影響がない状態で行いました。

模型船は 2.5m くらいですけれども、水深と喫水との比が 1.2 ですので、水槽の底と船底とが非常に近い状態です。この実験の時、船体は上下方向には動かないように固定していますけれども、これをフリーしておくと、場合によっては船体が沈下し、船首や船尾が海底に接して、事故の原因になるということもあります。実験中にそのようなことが起こると模型が壊れてしまいますので、上下方向には動かさないで、ただ前後方向に引っ張って実験を行った結果となります。

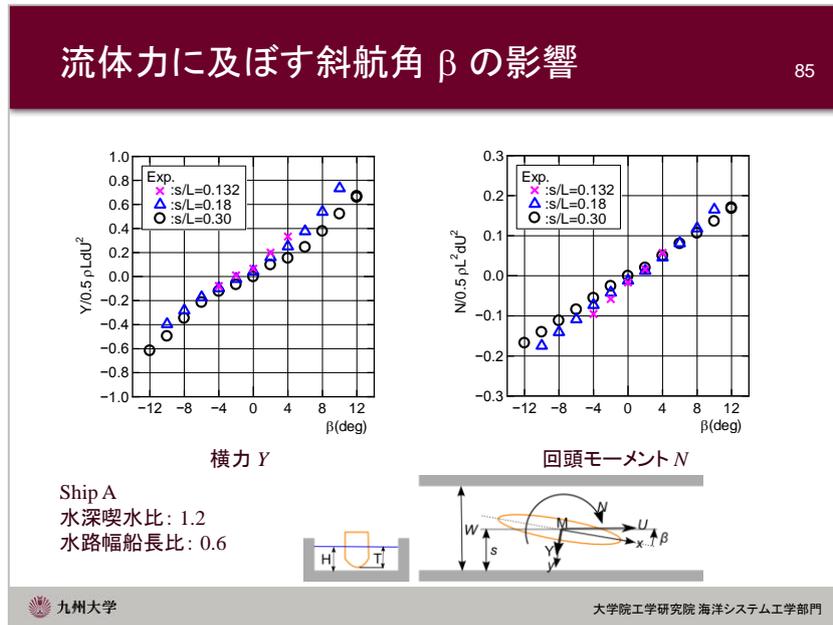
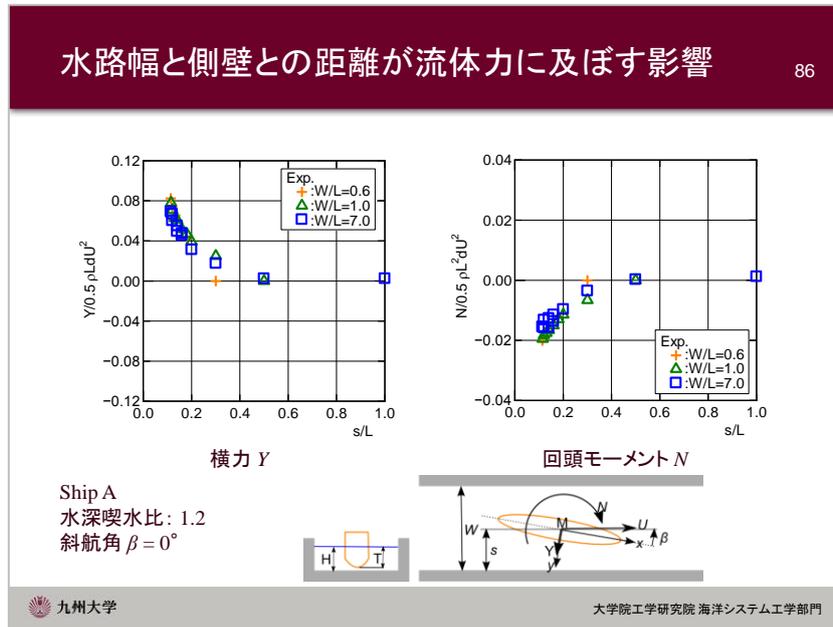
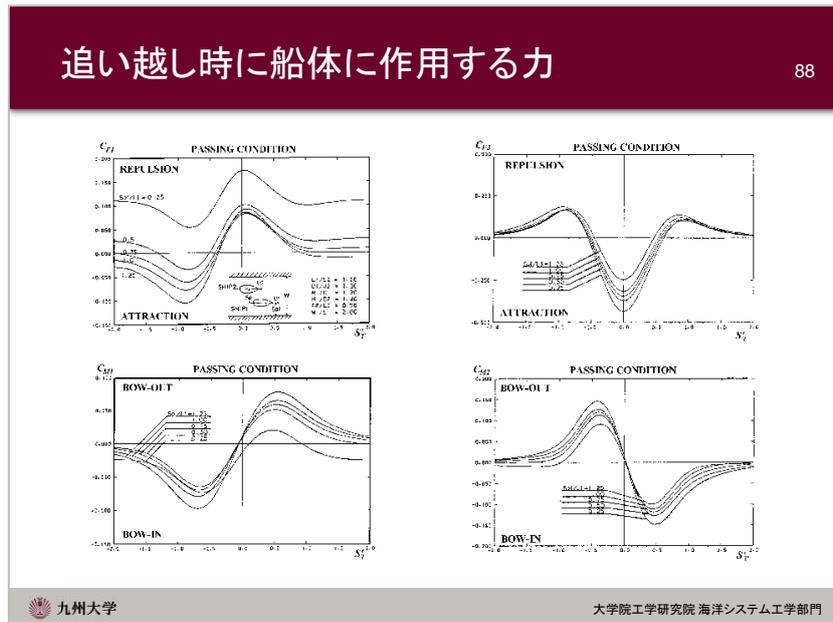


図 85 は水路に近づいた場合と離れた場合の結果ですが、水路幅が船長の 0.6 倍ですので、0.3 というのは水路のど真ん中を走った場合の力を表しています。横軸は斜航角を表しています。○（真ん中）から△、×になるに従って、船は壁に近づいていきます。壁に近づくと船に働く力がだんだんと大きくなります。これは岸壁からの吸引力、吸い寄せられる力となりますけれども、船の右側と左側の流れの状況が非対称となりますので、圧力差が生じて、船を吸い寄せる或いは壁に向かって回頭させるといった力が出てきます。それを実験によって確認しています。



今度は少し整理の仕方を変えて、船長に比べて水路幅が狭い場合、広い場合の横力とモーメントを表しています。水路幅が狭いと反対側の壁からも吸い寄せられますので、トータルでは力は少し小さくなったりします。片側が広いと、壁との距離が狭い側に特に吸い寄せられますので、壁に近づくにつれて急激に横力とかモーメントが大きくなっていくことが確認できます。

◆ 接近して航行中の船体に作用する力



もう一つ、これも特殊な状態ですが、船が近接して航行する場合です。

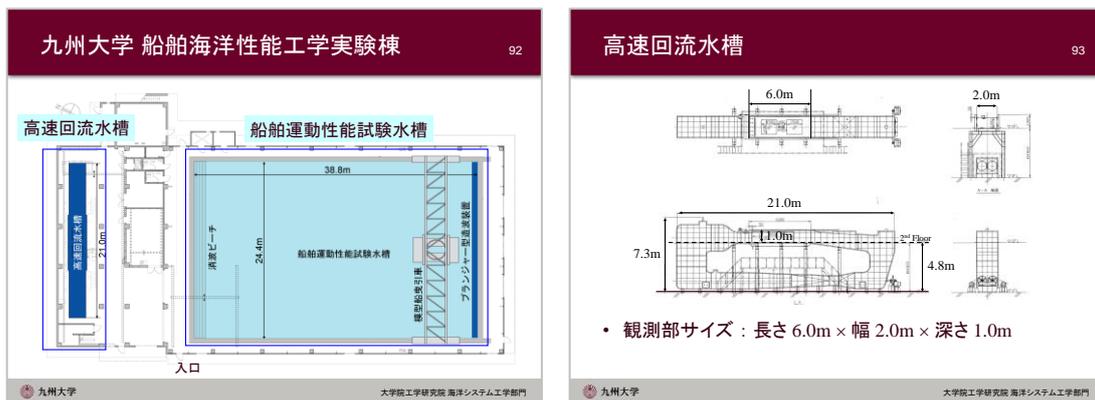
これは30年ぐらい前の実験結果になりますけれども、少し見にくいのですが水路の中で、一隻の船がもう一隻の船を追い越すときにどんな力が働くかということで、一隻の船 (Ship 1) が他船 (Ship 2) を追い越す場合に、船体に働く力を表しています。Ship 1 が横軸のマイナス側から Ship 2 に近づいて、 $S_T'$  が 0.0 のところで二船が真横に並びさらに追い越していく状態のとき、船体に吸引力や反発力が生じることを示しています。Ship 2 は先ずは反発する方向に働き、次に吸い寄せられてまた反発します。Ship 1 の場合には、追い越してきた船の方に船首が向きそうになりますけれども、横に並ぶと今度は船首を反対側に離す方向に働き、追い越されるとまた、追い越してきた船の方に向くなど、こういったことを計算できます。この時は実験も行っており確認しています。

こういうデータがあると、ship 2 を ship 1 が追い越していく場合について先程の力を入れてシミュレーション計算することにより、二船が互いに吸い寄せられたり、二船の距離がどんどん近づいてくると、場合によっては、操船を誤ると事故に至る可能性があるといった計算もできます。

以上、操縦性関係の基本的な考え方と最後は少し特殊な例をご紹介させていただきました。

#### ◆ 船舶海洋性能工学実験棟の実験施設の紹介

時間がもう少しありますので、九州大学の新しい水槽設備でどんな実験ができるかについて少しご紹介させていただきます。



これは途中で出てきました水槽の平面図ですけれども、先程は船舶運動性能試験水槽についてご説明しましたが、こちらに高速回流水槽というのがあります。高速回流水槽は、船の推進性能やプロペラの性能などを調べるのが主な目的の水槽になります。高速回流水槽を横から見るとこのような口の字になっており、この中に水が入っていて、このインペラで勢いをつけて2階に押し上げ、この図の左から右に水が流れていき、ずっと循環していることになります。

ここに模型船とかプロペラを固定していますけれども、水が循環して出てきますので、静止した水の中で船を動かすのではなく、船を固定しておいて、水を動かして様々な力等を計測する装置になります。観測部のサイズは長さが6m ぐらいですので、ここでは長さがだいたい 2m ぐらいの模型船を使っています。



この写真は、観測部を2階から見下ろしたときのものですが、これを中2階からで見上げますと、今度は船の底でどんな流れが起きているのかも観測できます。



もう一つ、水深が深い時には波を起こす造波装置がありまして、この青い部分ですが、断面は直角三角形になっていて、この直角三角形が水の中を出入りすることによって波が起こります。32個のパーツに分かれていますので、徐々にずらしていくと少しずつ斜めに進む波をつくることができ、全部をバラバラに動かすと実際の海の波のようなどちらに進んでいるか分からない、波高も不規則に変化している波を作ることができます。その中で模型船を引っ張ると波の中で船がどんな運動をするのか、どういう力が働いているのかといったことを調べることができます。

水深が浅い時に問題となるのは、水槽の底がデコボコしていると水深が浅く

なった影響なのか、水底がでこぼこしている影響なのか評価が難しくなりますので、できるだけ平坦に、±2 ミリぐらいの精度で作っていただいています。ただ模型船が 2m 半ぐらいですので喫水に対して模型の 2 ミリというのは結構大きいのですが、それでも水槽としては、比較的精度の良い仕上げをしていただいているということになります。

これまでは模型船を電車で引っ張っている話ばかりしたのですが、模型船自体はモーターとバッテリーを積み込めば自航できますので、この様に完全なフリーな状態で、操舵パターンをあらかじめ設定するとか、或いはパソコンで操舵信号を送ると直進しているところから舵を切ったときの船の動きを計測することもできます。ここに追尾用のカメラがついていますので、マーカーを付けておくとカメラが自動的にマーカーを追いかけて船の航跡として、データを蓄積していくというようなこともできます。

以上でご講演終わらさせていただきます。ご清聴ありがとうございました。

(以上、講演要旨を掲載)