

水遊び (ヨットとボート) の力学と浮体力学

木下 健 (東京大学生産技術研究所 人間・社会部門 教授)

ご紹介頂きました木下でございます。所長のお話にありましたように、なるべく文化的な講演になるように心がけますが、きっとそうならないと思います。お許し下さい。

講演の題目として、ここに挙げますようにヨットとボートに関する私がやっております研究と、多分本来の私の本職というべき浮体力学というものについて少しお話し致します。

海事流体力学

波浪中係留浮体

変動波漂流力、波漂流減衰力

→ 波浪中係留浮体の一般理論

確率密度関数と統計量についての一般理論

水波工学

浮消波堤、海洋波集波レンズ → 水質浄化

小型舟艇

双胴水中翼ヨット (Twin Ducks)

競漕艇 (VPP、新船型)

(スライド2)

(スライド2)

この研究所で私は専門分野として海事流体力学という言葉を標榜しております。それがカバーする分野としまして、波浪中係留浮体の運動の体系化ということ、もう一つは、水波工学というものを発展させるということ、三つ目に、小型舟艇に関する研究をする、その三つのことを、もうかれこれ25年になりますが、研究しております。

波浪中係留浮体の運動に関しては、今までに変動波漂流力だとか波漂流減衰力というようなことをやりまして、それを発展させる形で現在、波浪中係留浮体に働く流体力の一般理論の研究をしています。何が一般理論かと申しますと、波浪中の係留浮体というのは波の中を係留系の固有周期でゆっくり運動していて、そういう状況をそのまま扱うような一般理論というもの実はまだなかった。それを、いま構築中である、そういうお話をしたいと思います。それ以前に、確率過程として波浪中係留浮体の非線形応答を扱う一般理論というものは、もう10年ぐらい前に一応作

り上げたと思っております。

次の水波工学というのは、われわれの敬愛する先輩の防衛大にいらした別所先生が推奨なさったものです。これは凄く面白いから、いろいろとアイデアを閃かして、いろんなことをやると楽しいぞということを20年ぐらい前から提唱されていて、私も信者の一人として、なるべくこういうものを発展させたいと思っております。今までに浮消波堤で新しいタイプのものを開発したり、海の波を一点に集めるようなレンズというものを完成させています。これからは、こういうものを水質浄化につなげるような形で、今後の研究課題としたいと思っております。

三つ目は、なんとなくちょっとタイプが違うかもしれないけれども、小型舟艇の話がここで出てきます。きょうはそちらの方のお話を中心に水遊びの力学として話そうと思っているのですが、何となく一つ目、二つ目とタイプが違う感じがしないでもないと思いますが、私の気分としては同じなのです。何とかもっと楽しく海を利用して海を楽しみ場所にしてみたいという事が、私が海事流体力学でやっているモチベーションでありまして、そこに何となく文化を感じ取って頂けると大変うれしいわけです。

なぜ海があまり親しまれていないかというと、遊び道具があまりにも省みられていないためだと思います。もう少し現在の技術として、タンカーとかコンテナ船とかいうようなものよりはボートとかヨットというような小型舟艇の世界にもう少し光を当てて科学技術の目を向けてやったら、もう少し新しい道具ができて、人々がもう少し海に親しみを感じて、若い世代が海に遊ぶようになって、自然環境とか地球環境にもう少し目を向けるようになって、世の中が良くならないかなと、そういうことを考えて、三大柱の一つとして小型舟艇を取り上げて、ここ10年以上やっております。今日は、この黄色で書いてある三つのことについてざっとお話を致します。

(スライド3)

まずこれが、一番初めにお話し致します、今までの皆さんが目になさっているヨットの4倍速いヨットで、今日地階のピロティにあります舟そのものですが、この舟のお話



(スライド3)



(スライド4)



(スライド5)



(スライド6)

でございます。
これは帆走しているところです。

(スライド4)

後ろから見るとこんな感じで、見て頂きたいのは双胴船
だということ。双胴船というのは二つハルがあるというこ
と。もうひとつここに下駄みたいなのを履いて水中翼にな
って浮いているということです。

(スライド 5)

これはもう少し近くから撮った写真で、わりあい迫力があって、こういう感じで、こういうものが手近にあれば楽しいと思いませんか。

見て頂きましたように、ちょっと柄が大きいのですが、一応車の上に乗るようになっていて、年間 1,000 台つくる気持ちになれば 100 万円から 150 万円ぐらいで販売できる程度の、わりあい手軽な遊び道具であります。

(スライド 6)

これも同じような写真であります。

双胴水中翼ヨット (Twin Ducks)

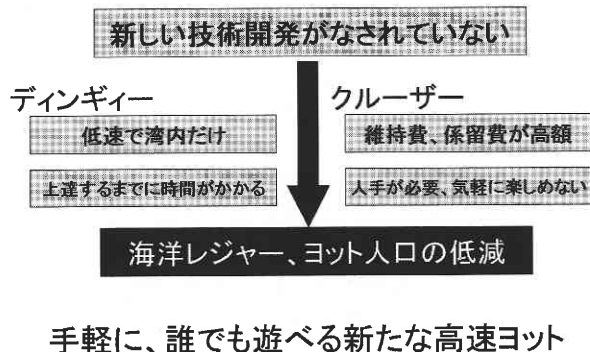
- 開発中の新型双胴水中翼ヨット (Twin Ducks) の概要
- 何故従来のヨットより 4 倍速いのか？
- 水中翼の性能向上により、離水性能、風上への帆走性能、艇速が更に一層向上している

(スライド 7)

(スライド 7)

さて、この舟のことを「Twin Ducks」と名づけておりますが、なぜ従来の舟よりも 4 倍速いのかということと、これをやり始めて 5 年近くになりますが、去年も同じような話を聞いたけれど、今年はどのぐらい良くなっているのかという事をお話します。

■ 背景



(スライド 8)

(スライド 8)

なぜこういうことをやるかということ、先ほどから申しているように、新しい技術開発がなされていないので、もう少し手をかけてやれば海洋レジャーが盛んにならないかなと、こういう一言に尽きるわけです。

■ 開発コンセプト

- 1 並みの風速 (5~6m/s) で離水できる
- 2 20kt 前後での帆走ができる
- 3 アマチュアの日曜セーラーにも気楽に楽しめる
- 4 車の上に載せて手軽に運搬できる

(スライド 9)

(スライド 9)

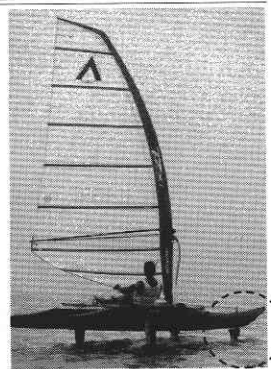
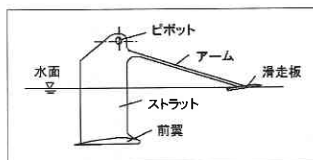
開発コンセプトとしては、並の風、5m で離水してくれる。今日のそよ風が、私の勘では 5m ぐらいだと思います。次が、20 ノット前後で帆走できる。20 ノットの帆走というのがどんなに速いかと言うと、10 ノットの帆走でヨットに乗りますと、とっても気持ちよく走る感じです。そのとっても気持ちのいいものの倍走ったらもっと気持ちが良いだろう、そういうことです。

アマチュアの日曜セーラーにも気楽に楽しめる。いままですべて大西洋横断だとか、速度記録用のいろんなものは作られたことがあるのですが、そういうものではなくて、もともと

■ ツインダックスの特徴 (1)

前翼ハイトセンサ

前翼の小型滑走板が船首の高さを調節する



(スライド 10)

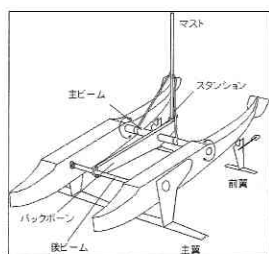
と文化的にやっておりますので、なるべく広くやって頂くためには素人が乗れるような形にしたい。そういうことも含めてヨットハーバーを借りないで自分の家に舟をしまっておけるという形を考えています。

(スライド 10)

メカニズムの一番重要な点は、ここにあります前翼の部分で、滑走板を持っていて、これがいつも水にさわっている。ここにピボットがあって回転する。これが非常に大きな特徴であります。

■ ツインダックスの特徴(2)

振れ自由構造



風下側 頭上がり
正の迎角
上向きの力

風上側 頭下がり
負の迎角
下向きの力

横傾斜モーメントに対抗

(スライド 11)

(スライド 11)

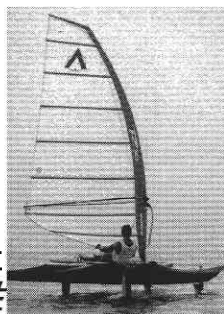
二つ目の特徴は、ねじれ自由構造で、左右のハルが独立して水面からの浮上高さを自動調節する。従って、ヒールモーメントが自動的につぶされるわけであります。

■ Twin Ducks 開発の経過

模型テスト 原理の確認



実船建造 水中翼ヨットの可能性



(スライド 12)

(スライド 12)

開発の経緯は、5年前に我々の敬愛する別の先輩で、元ヤマハの堀内浩太郎さん、ヤマハのボート事業部のスタートからやられた方ですが、その方がヤマハを退職なさったときに、やり残した事として、こういうアイデアがあるのだよと。そんなことがございまして、その中の一番大きなものがこれで、いまご説明したようなアイデアで面白いと思うと、でももう研究室はなくなったしということで『舵』誌に書かれたのです。それで、じゃあ取り上げてやりましょうよということで堀内さんと始めたのが5年前であります。

4年前には5分の1の模型船を作りまして、確かにいま申し上げたようなメカニズムがうまく働くということを確認しました。それで3年前に実物の模型を作りまして、すべて学生の手づくりで作っております。

■ 課題

[1] ヘルムと主翼迎角の最適化

→ 高速化 風上帆走

[2] 前翼システムの見直し

→ 安定走行 風上帆走

[3] 翼の揚抗比の向上

→ 高速化 風上帆走

(スライド 13)

(スライド 13)

昨年度は何をしたかといいますと、確かに機能というか、思っている機構は働くのだけれども、必ずしもすごく乗り易いわけでもない。どちらかという乗りにくい面もあるし、離水がなかなかうまくいかないことも多い。なぜだろうということで、ヘルムと主翼の迎角の最適化を、ヘルムというのは舵をとることをいまして、あるいは運動学というヨーイングのバランスのことです。

前翼システム、この船は前翼が舵の働きもするし、高さ調節の機能もするし、すべて前翼がやります。大きな力は主翼が持つのですが、それ以外のコントロールをすべて前翼が担っていて、前翼がちょっとしんどい感じになっているのですが、もう少し性能を見直してやらなければいけないということです。究極は、それをすべて克服した上で翼の抗力を減らして揚力を増やす、これに尽きるわけですが、それを徹底する。そんなことを去年やりました。

■ 新規水中翼製作のねらい

主翼

・翼型抵抗・スプレー抵抗をへらす

主翼翼型 NACA4412→Selig S8052

主ストラット翼型 NACA0012→NACA0009

前翼

・取付抵抗・翼型抵抗・スプレー抵抗をへらす

前翼翼型 NACA0012→NACA0009

前ストラット翼型 NACA0012→NACA0009

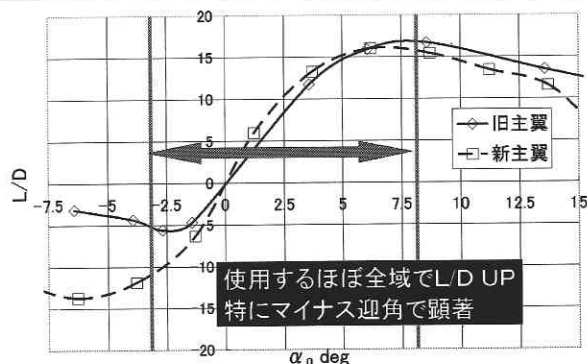
(スライド 14)

(スライド 14)

具体的には、実物がありますから、そんなに大きくありませんので、分力計で実物の力を、いわゆる相似則を心配することなく測ることが出来ます。ただ検力計は新しく開発して特別なものを作りました。こうやって測ってやると、主翼はNACAからSeligに変えれば、もう一寸良くなるとか、ストラットの翼厚は、12ではなくて9に減らして大丈夫とか、いろいろと抵抗を減らすように考えている。

特に前翼の場合、取り付け抵抗というのがかなり大きな成分としてあるということが分かりましたので、この取り付けの仕方を工夫して、要するに垂直の翼と水平の翼との取り合い、その取り合いを上手にすることで取り付け抵抗を相当減らしています。あと翼型も変えております。

■ 新規主翼L/D



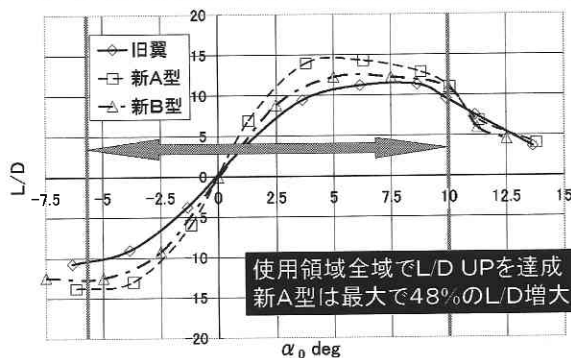
(スライド 15)

(スライド 15)

そんなことで、実際、これは主翼の揚抗比ですが、特にその前に使っていたのは、ヒールモーメントをつぶすため

に風上側のハルを下向けに、ふつう水中翼というのは揚力で持ち上げるのですが、この翼は、風上側はずっと水のほうに引っ張り込むわけです。その引っ張り込む力のところの性能があまりよくなかったのを、それに適したものになっている。あるいはこの普通のところでの揚力も増しているということで狙い通り良くなっています。

■ 新規前翼L/D

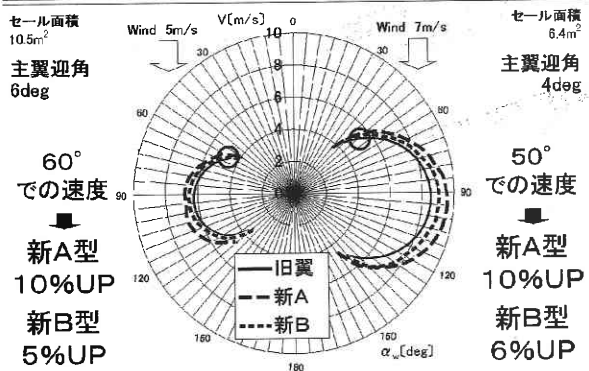


(スライド 16)

(スライド 16)

これは前翼のほうですが、前翼を二つ作りましたが、その両方とも性能向上がかなりある。特にA型というのは30～40%の揚抗比の向上が見込まれる。逆にいうと、最初作ったのが悪すぎるではないかと言われると、ちょっと悲しいわけですが、最初は何とか作ってみたいということがあります。

■ 新規水中翼による性能向上



(スライド 17)

(スライド 17)

ということで、結果としては7mの風に対して横風だと9m以上で走ります。1.4倍ぐらい風よりも速く走るといふわけです。これがアメリカズ・カップの舟でも風の

90%そこそこ、ふつうの舟はそのまた風の半分ぐらいの速さですから、トータルすると4倍の速さで走るヨット、こういう話になるわけです。

あと、風上の上り性能が1号艇はそんなに良くなかったのですが、それも45度とか50度とかいうところで風速の80%ぐらいの速さでは上れています。これは計算ですが、実験は、これに対して、これよりもうちちょっと内側に乗るような形で立証をしております。

■ 実海域実験

実海域実験

清水市三保海岸にて

- ① 高速化
 - ② 安定した走行
 - ③ 風上への帆走
- を確認した

(スライド18)

(スライド18)

実海域で今のことを確認しました。そういうのが昨年度の進捗状況でございます。

漕艇用VPP(艇速予測プログラム)

- 漕艇用VPPというものを開発し、従来、経験的に改良が加えられてきたオール、漕法の改良を試みる。すなわち、a)ブレード性能、b)大きさ、c)長さ、d)オールの剛性等のオールに関する改良と、e)脚と上体、腕を使う組合わせのタイミングや、f)キャッチを強調か、ミドルまたはフィニッシュを強調か、そして、g)フォワードの仕方など漕法に関する改良により、微妙な変化で機械効率が数パーセント変化することがあることを説明する。

(スライド19)

(スライド19)

次がローイングの話でございます。ヨットは、大学を卒業して大学院に入ってから自分のデインギーを持って始めて、そのあと更にクルーザーも手に入れたのですが、ローイングのほうは学生時代にやっていました。ローイングのほうは、ヨットに比べると研究らしい研究がありません

されてないのが現状です。そこで、アトランタオリンピックぐらいから研究を開始して、抵抗を測ってみたい運動を測ってみたい、基礎的データを積み重ねておりました。ある意味で究極的にはローイング用のペロシティブレディクションプログラムという、どういう用具で、どういうふうな漕いだら、どんなに舟が走るのだというようなことのブレディクションが出来るようになることが良いではないかと考えるようになりました。今まではアイデアがあって、オールの形をちょっと変えてみて、しばらく漕いでみて、こっちのほうが良いぞというように、エジプト時代とそう変わらない方法で改良を積み重ねていたと思われるのですが、それを超えるにはこういう方式がいいのではないかと、こう思ったわけであります。



(スライド20)

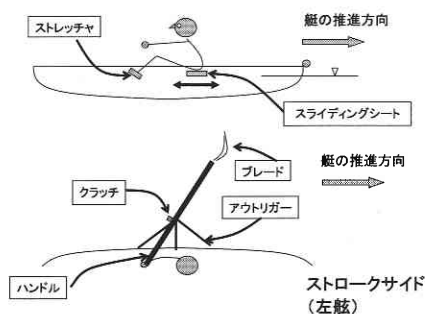
(スライド20)

これはオリンピックに3回出た阿部さんという日本ボート協会のオールジャパンチームのコーチの方に漕いで頂きまして、

(スライド21)

そのときのクラッチに加わる力とか、あるいは足で蹴飛

Rowing Boatの構成



(スライド21)

ばすストレッチャーの力だとか、あるいはオールのパディングモーメントであるとか、あるいは振れ角であるとか艇速であるとか、そういうものを計測して、それを再現するような力学モデルを計算する形でシミュレーションしよう、そういう方式であります。

ちなみになぜ阿部さんにやってもらうかというと、これは水槽実験とか風洞実験ではありませんので、それに匹敵するぐらい安定して漕ぐ、これが良いと思った動きを100%再現できる人である必要があるわけで、そういう意味で阿部さんが最適だということで阿部さんでやったわけです。

実艇実験

- Single Scull を用いて戸田漕艇場で実験
- 被験者として元五輪代表の阿部氏に協力を頂く
- オールのハンドルを引く力
 - ・クラッチに加わる力
 - ・ストレッチャを蹴る力
 - ・オールの振り角
 - ・艇の加速度
- 平均艇速毎に4つのグループ(Group A ~ D)に分け、各グループで数本のストロークを計測した

	Group A	Group B	Group C	Group D
平均艇速[m/s]	3.097	3.394	3.571	3.698

(スライド 22)

(スライド 22)

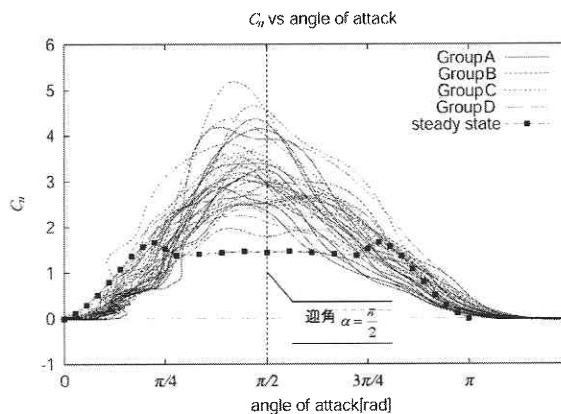
これが測った項目です。こんなふうな感じです。

阿部さんにはライトパドルというゆっくりしたレートからレースパドルまでやってくれと言ったのですが、レートが速くなると再現性が悪くなるということで、レースレートよりはちょっと低いところぐらいまで4種類、ローインググレートというのは1分間にいくつ漕ぐかということです。それを4種類の漕ぎ方でやってもらいました。こういうのを、これでやってくれというと、ハイといってやってくれるのが上手な人なわけです。やってみるけど、結果はどうなるか分かりません、そういうのではなかなか実験にはならないわけです。

(スライド 23)

流力をやる人間としてまず面白いのは、ブレードに加わる流体力というのはどういうふうになっているのか、これが見つめないことにはプレディクション出来ないわけです。そこで、 C_n というのはブレードに加わる力を、 ρu の二乗、 u は相対流速、あとブレードの面積で無次元化する。力は、ノーマルホースで定義する。そういうものがあります。それを振れ角ごと、オールを振る角度ごとにプロットしてやる。それでどういう様子になっているかを全体

実艇実験から推定した流体力係数

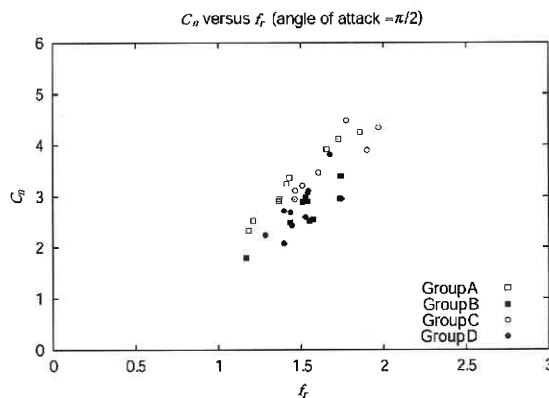


(スライド 23)

状況を知ろうというわけです。

そうすると、そういうすごく上手な人に漕いでももらったにもかかわらず、猛烈にばらつくわけです。もっと何よりも最初驚いたのは、このステディステイトという、ある状況で、ある一定の迎角でブレードを固定したときに加わる力ですが、それに比べて3倍も、それ以上もの力がある時には加わっているということが分かったことです。

Reduced frequencyに対するCnの変化



(スライド 24)

(スライド 24)

では何故?というわけです。それで見方をちょっと変えて今度は、一番ローイングで重要な振り角が $\pi/2$ の、ちょうどオールが真横にきたときの流体力係数を取り上げてみて、その値を縦軸にして、横軸として今度はリデュースト・フリークエンシーといって、過渡的な影響を考慮した形、言い方を変えと、オールを漕いでいる時にできる、周りの渦の状態とブレードの幾何学的な形状との兼ね合いの係数、それをそろえた形で書いてやるとローイングレートが

変わっても、この係数を合わせた形に並べ直してやるとかなりまとまる、こういうわけです。そうすると、なるほど3倍にもなるのは、リデュースト・フリークエンシーの影響なのだということが分かってまいりました。

Reduced frequency (換算周波数)

- 翼の運動1周期ごとの対翼弦長比速度

$$f_r = \frac{2\pi c}{TU}$$

U : 流速、 T : 振動の代表周期

c : 翼弦長

- 類似現象の指標として、Keulegan-Carpenter number K_c 、泳動数 S_w 、ストローハル数 S_0 などがある。

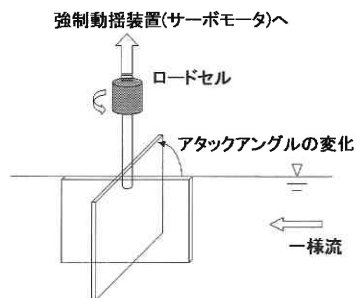
(スライド 25)

(スライド 25)

これがリデュースト・フリークエンシーの定義でございます。ローイングレートが変わっても、この係数を合わせた形に並べ直してやるとかなりまとまる、こういうわけです。

あるいはボートを少し知ってらっしゃる方の言い方ですと、この T という振動周期の代表値、要するに水中を漕ぐ速さによって係数自身が、水中をなるべく速くしてこの T を小さくしてやると f_r が大きくなりますから、さっきの絵ですと右上がりですので、係数が大きくなる。要するにボートという競技は水中をなるべく短く漕げと教えるわけですが、そのことがいま言った右上がりのあの値の絵の説明になるわけでありす。

試験装置概略



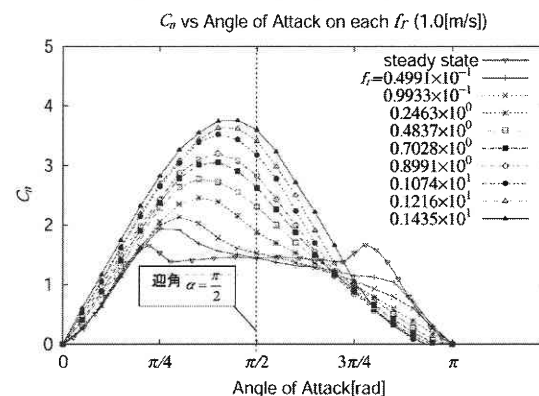
(スライド 26)

(スライド 26)

でも、本当にそうかなということを今度は水槽試験で確

認してやろうというわけで、回流水槽の中で、ブレードの代わりに平板をアタックアングルゼロからぐるっと180度回転するような強制動揺の過渡的な C_n の計測実験を行いました。

動的な直圧力係数の変化

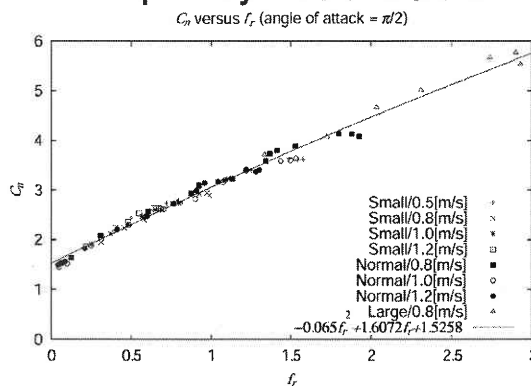


(スライド 27)

(スライド 27)

そうしますと狙い通りリデュースト・フリークエンシーに従って値が大きくなるような傾向のものが出て、なるほどブレードというのはこういう性質が中心になってオールの反力が決まっているということが分かりました。これを上手に使えば、漕いでいる時の推進力の一番中心的なものが模擬できるだろうというわけでありす。

$C_n(\alpha = \pi/2)$ の reduced frequency に対する変化



(スライド 28)

(スライド 28)

こういう水槽実験に対してリデュースト・フリークエンシーを横軸にして取り直すとこんな形になって、水槽実験で

すから再現性が良いですから、きれいな形に一本の線になるということが確認できます。

漕艇シミュレーションの研究

- 林(1990,1991)、鈴木(1996)、土井(1999)らによる、漕艇運動のシミュレーション。

- オールブレードに加わる力の推定の際は流場の定常状態を仮定

⇒ 水槽試験により、非定常な過渡影響を考慮して推定

- 漕手の運動を質点の運動で近似

⇒ 漕手の身体の動きのモデル化

- 漕手の重心移動およびオール振り角を入力条件としている。

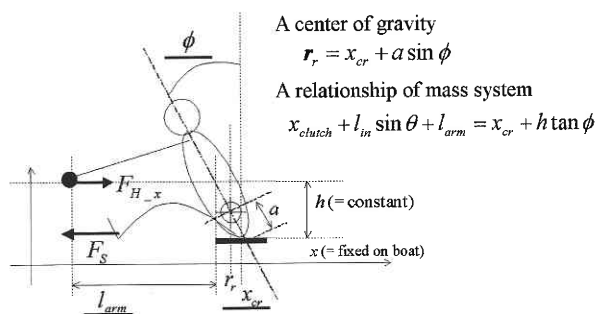
⇒ 漕手の出力する力を入力条件として、運動を解く

(スライド 29)

(スライド 29)

次は、シミュレーション全体を組み立てるわけですが、今までいくつかの研究はこういう形であるのですが、今回、まず一番最初としては流体力に非定常な影響、いま申しあげたことを考慮してやる。二つ目は、漕手を質点系で考えていたものを、体の動きをモデル化した形にしてより実際に合う形にしています。もう一つは、運動方程式を、従来は重心移動とかオールの振り角を入力としているのを、それは出力にして、漕手の出す力と体の動かし方を入力して、実際の漕ぐときの意識しているものと合わせました。

漕手の動きのモデル化

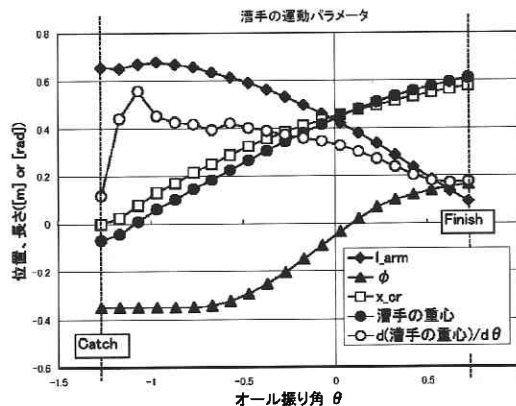


(スライド 30)

(スライド 30)

これが漕手の動きのモデル化であります。足を伸ばして、腰を伸ばして、手を曲げて漕ぐ、こういう三つの動作の組み立てで体を表現します。

漕手の動き

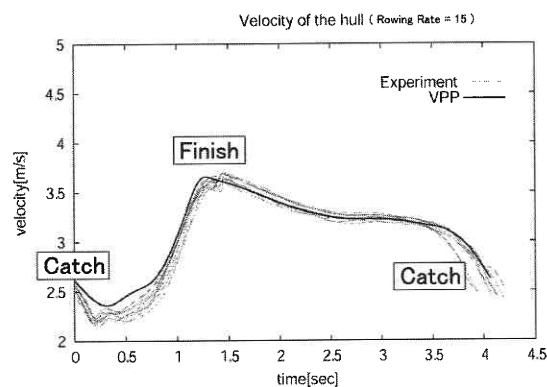


(スライド 31)

(スライド 31)

それを阿部さんの漕ぎ方に合わせてアイデンティフィケーションをして、これはマニュアルで行いまして、だいたいの体の動きというものを得ました。

計算結果の例——船体速度

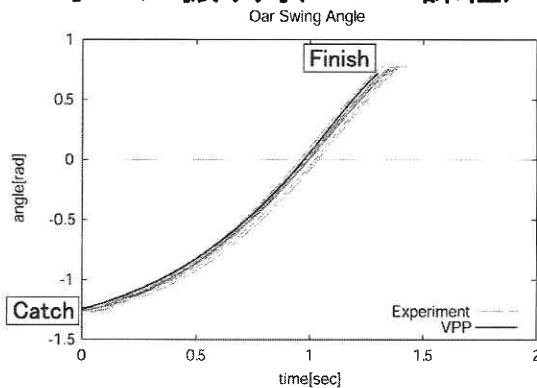


(スライド 32)

(スライド 32)

それを入力にして、あと漕手とオールとハルとの三体問題を計算するわけです。そうすると結果として狙いどおり時々刻々の船体速度がピッタリ合う。先ほど阿部さん、あんなにばらつくという話でしたが、実際艇速で比較しますとこのぐらいきれいに、ものすごくまとまるわけです。これだけ上手に再現性があって漕げるというのがすごいわけです。この赤が何本もあるのは、同じレートで漕いで下さいといったグループに対してこのぐらい再現してくれているわけです。

計算結果の例--- オール振り角(Stroke課程)

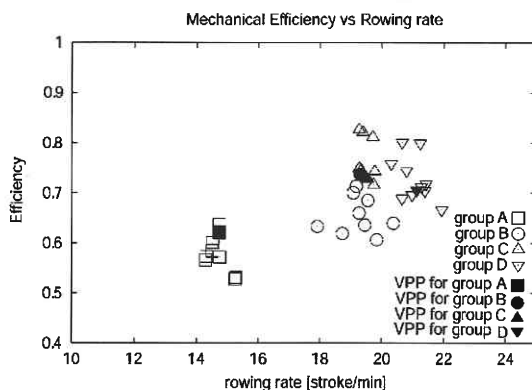


(スライド 33)

(スライド 33)

これはオールの振り角。ぎゅっと漕いでいるのがぴったりと合っていますから、これでうまくシミュレーションできている。

機械効率 vs rowing rate

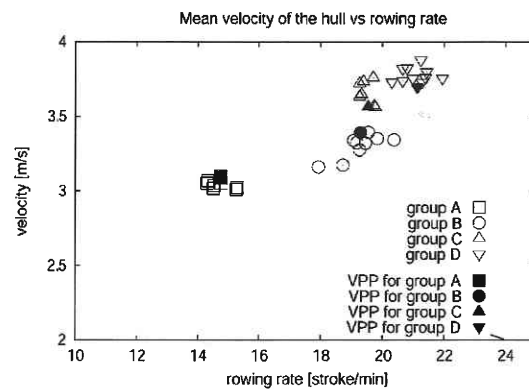


(スライド 34)

(スライド 34)

機械効率。これはとても興味があるわけです。ああいうオールでものを漕ぐと、どのぐらいの機械効率で漕いでいるのだろうと。プロペラだったら七十%とかあります。それがどのくらいか誰も実は知らない、測られたことのないことなのですが、それを測りましたし、シミュレーションでもやってみました。効率の良いところで80%近いということで、流体機械としては非常に優秀な流体機械だということが分かりました。

平均艇速 vs rowing rate



(スライド 35)

(スライド 35)

これは艇速です。艇速もシミュレーションとして十分な精度で出ているだろうと思われます。

精度にすごくこだわるのは、最終的に欲しいことは、1%以下の優劣を知りたいからです。1%違うと10mぐらいレースで違います。ですから、コンマ何パーセントの違いで、どう漕いだほうが良いということを議論するためには、こころのシミュレーションが、そういうものを議論する程度まで合っていないといけない。少なくとも上下関係とかが合っていなければいけない、こういうことなので、非常に細かい精度で合わせるということに注意しています。

パラメータの変更による 機械効率・平均艇速の変化

- オールの振り角の範囲
- オールのアウトボードの長さ
- オールブレードの面積・流体力係数
- オールハンドルの引き方(パターン)
- オールハンドルを引く力
- ストローク過程での漕手の重心移動
- フォワード過程での漕手の重心加速度

(スライド 35)

(スライド 36)

このシミュレーションを使って、ここに書いたようないろんなパラメータに対する優劣を評価しております。

(スライド 37) (スライド 38)

そこで、例えば、水中はなるべく速く引いたほうが良い

結論---VPPによるオール・漕法の改良について

- 振り角のレンジを広くする
- アウトボードの長さを広くする
- 流体力係数 C_R の改善
 - ・改善に際してはストローク過程前半の C_R が向上することが後半の向上よりも効果的である。
- オールのハンドルを引く力は後半を重視した引き方の方が機械効率が向上
- ハンドルを引く力を大きくすると、機械効率は低下するが、平均艇速は向上する。

(スライド 37)

結論---VPPによるオール・漕法の改良について

- 漕手の重心移動
 - ・ストローク過程においては早めに上体を起こす漕ぎ方
 - ・フォワード過程においてはFinish直後から身体を船尾方向に移動させない漕ぎ方が全体的に機械効率を向上させる傾向にあるが、rowing rate によっては必ずしも異なる場合もある。
- 漕手の重心移動は艇速やオールの運動に大きな影響を及ぼすが、確実に改善の方向に寄与するような変更指針は今のところ得られていない。

(スライド 38)

とか、フォワードはラッシュしてはいけないとか、そういうことはこのシミュレーションで評価することが出来ます。

アテネ五輪用スカル開発 (日本ボート協会医科学委員会)

- 低抵抗リガー
- オール(高効率ブレード、低抵抗シャフト)
- 低抵抗スカル船型

独立行政法人海洋技術安全研究所
(平田信行氏、日夏宗彦氏)と共同研究

(スライド 39)

(スライド 39)

それ以外に、ボートがらみでは、アテネオリンピック用に医科学委員会というのが日本ボート協会の中にできました、アテネ五輪用の用具の開発をやりましょうということ

で、抵抗の少ないリガーの開発をしております。あともう一つ、いまのシミュレーションを使ってオール効率の良いブレード、あるいは抵抗の少ないシャフトの開発をしております。

もう一つ、スカルの船型を見直して、抵抗の少ないものを探しています。CFDでいろんなことが今では計算できるし、実験との比較とか信頼性も相当上っておりますので、これをやっていますので、最後にこれを少し話します。

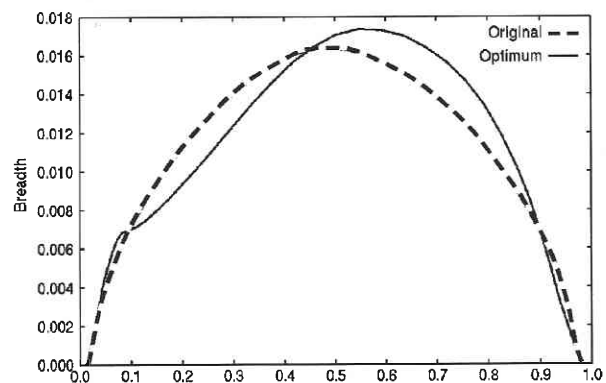
船型最適化(母型:wm2x)

- 排水量一定
- 横メタセンター一定(横安定は保持)
- 船長、最大喫水一定(次の段階で考察)
by CFD(NEPTUNE)
非線形最適化手法(GA)
船型表現(Bezierのsurface net)

(スライド 40)

(スライド 40)

これは排水量一定とか、あるいは漕ぎ易さということで横安定を一定にして、あるいは船長とか最大喫水とかいろんなものを一応束縛条件にした上でCFDを使って非線形最適化手法、船型表現をこういうふうにして最適化の作業もしております。

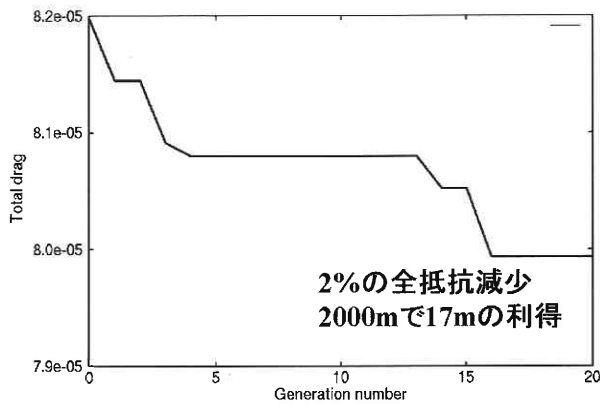


(スライド 41)

(スライド 41)

具体的に申しますと、途中経過ですが、黒いのが変更前の、いま手に入る、販売されている船ですが、それに対して前方を少し痩せさせる形に、前半のウェーターラインを狭める形にして、後半は逆にフラットな形で水線面積を広くする形、こういうものを見たことがある方だと、従来のシェルのローイングボートから、どちらかというとアメリカ

カズ・カップみたいなヨットぐらいの感じに変更したような船型, そうすると, 1.5%とか2%ぐらいのゲインが得られることが現在すでに得られています。



(スライド 42)

(スライド 42)

これは2%減っていますが, そうすると17m利得があるということです。武田選手はここのところずっと良い成績を残してまして, ゴールで17mのハンデを上げるとすると彼はもしかしたら優勝してしまいます。コーチだった古川さんいわく, これは最後にくれたら優勝できるけれど, 最初からじわじわ少しずつ貰うから, さぼるかも知れない。なるほどコーチは, また別の目で見るとは思いました。それはそれとして大変に得であることは間違いありません。

これも最終的に2%とか3%とかいうゲインを, 全部合わせると5%ぐらいのゲインが得られるのですが, 遠慮して, その中の何%はうまくいなくなるかも知れないとして, 最悪の場合でも2%, 17mは選手に差し上げますよという用具を提供しようというふうに考えているわけであります。

(スライド 43)

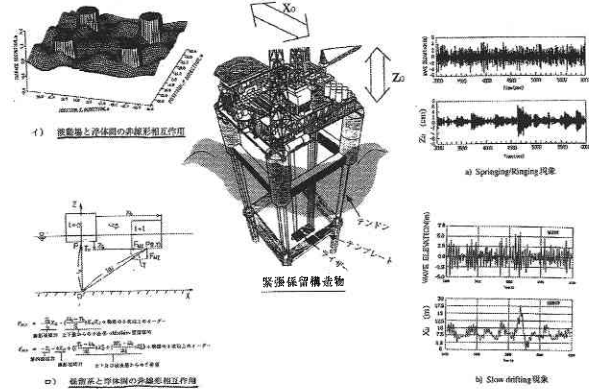
最後は本職と称する浮体力学ですが, こういうプラットホーム, これは石油用のプラットホームですが, こういうものが海の中にある。係留系の固有周期がありますから, フーラフラ揺れます。このフーラフラ揺れるのが平水ではなくて波の中でフーラフラする。

(スライド 44)

そういうことをきっちり考えたものを, 要するに波の周波数と係留の固有周波数との二つの時間スケールを考えて干渉を考えます。座標系は長周期運動とともに移動するものと考えて, 入射波の二乗のオーダーで, 長周期運動の一乗のオーダー, あるいはこれも二乗の流体力とか, こうい

Springing/Ringing現象及びWave drifting現象の説明図

(参考資料2)



(スライド 43)

波浪中係留浮体の一般理論

- 入射波周波数 ω と係留系固有周波数 σ の2つの時間スケールを考え、干渉を取り入れる
- 長周期運動とともに移動する座標系
- 入射波振幅 ζ_a と σ を2つの微小量と仮定し、摂動展開する
- 波漂流減衰力(ζ_a^2, σ)、波漂流付加質量(ζ_a^2, σ^2)を求める

(スライド 44)

ようなものを考える一般理論というのをいま展開中でございます。

(スライド 45)

そうすると何が面白いのか, いろんなものが出てくるのですが, 一番学問として面白いと私が思っているのは, Radiation Conditionが, こうなるとヨット好きの方, ボート好きの方は, 何を言っているのかと思われるかも知れませんが, 一, 二分辛抱して頂きます。要はポテンシャルというか, ラプラスの方程式をどう解くかというような話になっておりまして, そうすると境界値問題ですので, 境界条件をどう設定するかということが問題になります。摂動法でやりますと各々の問題は線形になりますから, 数学的, 物理的によく考えないといけないのが, Radiation Conditionの取り方になるわけです。

(スライド 46)

そこで Radiation Conditionというのは線形理論に出てくる皆さんよくご存じのものですが, 一般理論を展開しますと, Sommerfeld Condition以外の別の形のものがたく

Order	Potential	Free surface condition	Radiation condition	Far field behavior
$\zeta_0^0 \sigma^1$ r^{-1}	ϕ_{01}	$\frac{\partial \phi_{01}}{\partial z} = 0$	$\nabla \phi_{01} \rightarrow 0$	r^{-1}
$\zeta_0^0 \sigma^0$	ϕ_{10}	$\frac{\partial \phi_{10}}{\partial z} - \nu \phi_{10} = 0$	Sommerfeld condition $\lim_{r \rightarrow \infty} \sqrt{r} (\partial \phi_{10} / \partial r - i k_0 \phi_{10}) = 0$	$r^{-\frac{1}{2}} e^{i k_0 r}$
$\zeta_0^0 \sigma^1$	ϕ_{11}	$\frac{\partial \phi_{11}}{\partial z} - \nu \phi_{11} = f_{11}$	$\partial \phi_{11} / \partial r - i k_0 \phi_{11} \sim \tilde{A} r^{-\frac{1}{2}} e^{i k_0 r}$	$r^{\frac{1}{2}} e^{i k_0 r}$
$\zeta_0^0 \sigma^2$	ϕ_{12}	$\frac{\partial \phi_{12}}{\partial z} - \nu \phi_{12} = f_{12}$	$\partial \phi_{12} / \partial r - i k_0 \phi_{12} \sim (\tilde{A}_1 r^{\frac{1}{2}} + \tilde{A}_2 r^{-\frac{1}{2}}) e^{i k_0 r}$	$r^{\frac{3}{2}} e^{i k_0 r}$
$\zeta_0^2 \sigma^0$	ϕ_{20}	$\frac{\partial \phi_{20}}{\partial z} = f_{20}$	$\nabla \phi_{20} \rightarrow 0$	$\log r$
$\zeta_0^2 \sigma^1$	ϕ_{21}	$\frac{\partial \phi_{21}}{\partial z} = f_{21}$??	?

(スライド 45)

Forcing terms in the free surface conditions:

$$\begin{aligned}
 f_{11} &= -2i \partial \phi_{10} / \partial x_j - 2\kappa_j \phi_{10} \\
 &\quad + 2i \nabla \phi_{0j} \cdot \nabla \phi_{10} - i \phi_{10} \partial^2 \phi_{0j} / \partial z^2 \\
 f_{12} &= 2\nu \phi_{11} - i \partial \phi_{10} / \partial x_j - \kappa_j \phi_{10} \\
 &\quad + 2i \nabla \phi_{0j} \cdot \nabla \phi_{10} - i \phi_{0j} [\partial^2 \phi_{10} / \partial z^2 - \nu^2 \phi_{10}] \\
 f_{20} &= \text{Re} \left\{ i \omega / (2g) \phi_{10} \partial^2 \phi_{10}^* / \partial z^2 \right\}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 f_{2j} &= \text{Re} \{ (2g) \{ \omega (\phi_{10}^* \phi_{11zz} - \phi_{10zz}^* \phi_{11}) - 3\nu^2 (\phi_{10}^* \phi_{10xz_j} - \phi_{10}^* \nabla \phi_{10} \cdot \nabla \phi_{0j}) \\
 &\quad - 2\nu^2 \phi_{10} \phi_{0jzz} + 2\nabla \phi_{10}^* \cdot \nabla \phi_{10xz_j} - \phi_{10xz_j}^* \phi_{10} + i \kappa_j \phi_{10} \phi_{10zz} + \phi_{10zz}^* \nabla \phi_{10} \cdot \nabla \phi_{0j} \\
 &\quad - \nabla \phi_{10}^* \cdot \nabla (\nabla \phi_{10} \cdot \nabla \phi_{0j}) + \frac{1}{2} (\phi_{0jzz} \nabla \phi_{10} \cdot \nabla \phi_{10}^* - \nabla \phi_{0j} \cdot \nabla (\nabla \phi_{10} \cdot \nabla \phi_{10}^*)) \\
 &\quad + \delta_{j0} (\nabla \phi_{10} \cdot \nabla \phi_{10}^* - \frac{1}{2} \nu^2 \phi_{10} \phi_{10}^*) \} \}
 \end{aligned}$$

(スライド 46)

さん出てきます。こういうものをいま一生懸命やっていて、一番複雑なところを今まだやっている最中です。そういう条件を出して、正しく取り入れてやると唯一解が決まって答えが決まってくる。これは自由表面条件の非線形項が、いま問題にしている高次オーダーのものですと、大変複雑で見るのもうんざりなしろものです。しかも Radiation Condition で解析的な far field の性質を議論するの必要があります。

(スライド 47)

その Radiation Condition の求め方は、解の唯一条件ということから出すのですが、ポテンシャルをこんなふうに展開すると、結局展開した係数が唯一に決まるかどうかという条件を求めていけば、それが far field condition になるというストーリーです。

(スライド 48)

具体的にはこの関数が、大きな R に対してゼロになれば

解の唯一条件

(Condition to ensure the existence of the unique solution)

$$\phi_n(a, z) = A_{n0} Z_0(z) + \sum_{m=1}^{\infty} A_{nm} Z_m(z)$$

$$\begin{aligned}
 A_{n0} &= \frac{1}{k_0 a H'_n(k_0 a)} \left[2C_0 \left(F_n(a) - F_n(R) + a H_n(k_0 a) \int_{-h}^0 N_n(\zeta) Z_0(\zeta) d\zeta \right) \right. \\
 &\quad \left. - R (H_n(k_0 R) \partial \phi_n(R, 0) / \partial \rho - k_0 H'_n(k_0 R) \phi_n(R, 0)) \right]
 \end{aligned}$$

$$A_{nm} = \frac{2C_m}{k_m a K'_n(k_m a)} \left[- \int_a^{\infty} K_n(k_m \rho) f(\rho) \rho d\rho + a K_n(k_m a) \int_{-h}^0 N_n(\zeta) Z_m(\zeta) d\zeta \right]$$

(スライド 47)

If $F_n(R)$ tends to zero for large R, the potential will satisfy the Sommerfeld condition and the coefficients A_{n0} is uniquely determined.

Otherwise, a far field condition with a form as

$$\begin{aligned}
 H_n(k_0 R) \partial \phi(R, 0) / \partial r - k_0 H'_n(k_0 R) \phi(R, 0) \\
 = -2C_0 F_n(R) / R
 \end{aligned}$$

should be imposed on the potential to ensure the existence of the unique solution.

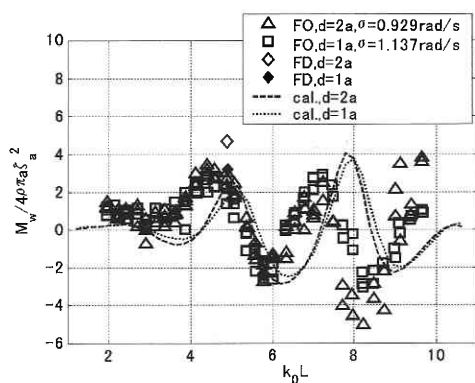
(スライド 48)

ば Sommerfeld になるのだけれども、その項が残っている場合には、こういう条件を課せれば良いわけです。そうすると、これが Radiation Condition になって、答えは唯一解として決まるわけです。

(スライド 49)

そんなふうなことを考えると何が難しいのかと申しますと、例えば、これはアディドマス、付加質量の話ですが、付加質量というのは、まず自由表面も何も無いときにはある常数です。それが自由表面があると、運動の周波数によって変化します。そこまではまあ古典的に良く知られていることですが、考えているのは、それが先ほど申し上げたように係留浮体の場合は平水中ではなくて、自由表面というのは平水中ではなくて入射波がある状況である。その入射波がある状況のために付加質量が変化するということを求めています。波漂流力による付加質量というのは、これは実験値ですが、4本のアレイ、プラットホームの脚が4本ある場合ですが、それだとこんなふうな形で測られます。いま、途中経過で点線が書いてあるのは、Radiation Condition がまだ決めかねていて、大変に複雑な項は省略している状態なのですが、まだ、もうちょっと位相が合わ

Effects of wave number on wave-drift added mass (cylinder array)



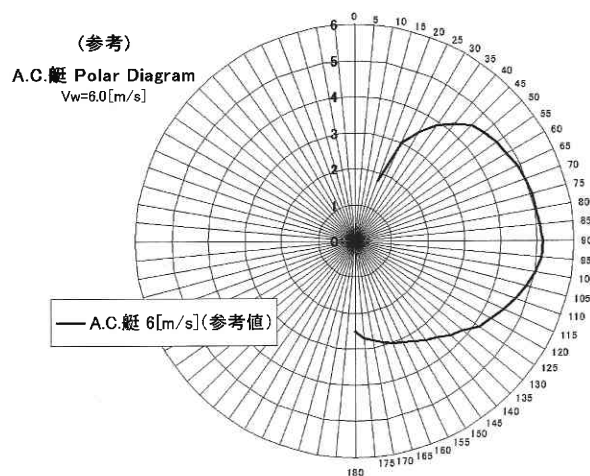
(スライド 49)

ない。これをちゃんと理論的に整合のとれた項を全部入れると、位相ずれが修正されて良く合うという段階で係留浮体の波浪中運動の一般理論は完成したと、私は称するつもりでいるわけでありす。

以上でございます。雑駁な話で恐縮でした。

(スライド 50)

最後に、Twin Ducks とアメリカズ・カップの舟とはどんなに違うかということですが、直接の比較にはなってないのですが、数を正確に見ていただくと、風が 6 m のとき



(スライド 50)

に、一番早いのがこのぐらいの角度（真横）で、これで 5 m ちょっと超えたぐらいというわけです。真横で風速の 9 割ぐらい。ただしこの舟が Twin Ducks よりも良いのは、上り性能、この性能が 35 度ぐらいまで、風上までキープするのです。これが特徴です。Twin Ducks だところら辺ですっと落ちてしまいます。値自体は良いのですが、ここら辺をすごく伸ばしているのが AC 艇の特徴です。

(了)