

# はじめに

セールが風をはらんだ瞬間、船が音もなくすっと滑り出すその一瞬の感動が、多くのヨット乗りをこの世界に引きずり込んだ魅力なのではないだろうか。風と一体になって走る心地よさは、心の琴線に触れるものを感じさせる。また、風の流れをそのまま表すようなセールの曲面と、鋭い船首で水を切り、丸みをおびた船尾で水面から離れていく船体の曲面の美しさも大きな魅力の一つであろう。セーリングヨットの魅力は我々を捉えて放さない。

その一方で“同じ風を使っている”からこそ、“どうしてあの船よりも遅い？”という素朴な疑問が湧いてくる。動力船であれば“エンジンの大きさが違うから仕方がない”と気にもならないようなことだが、“同じ風を使っているのに”というこの思いは不思議な競争心を駆り立てる。特に同じようなサイズの船が並んで帆走しているときにジリジリと離されていくと、セールの調整が悪いのか？ などとあちこちじり始めるのが人の常のようである。しかしながら帆走性能に差が出るのにはそれなりの理由がある。それではセーリングヨットの帆走性能を良くするにはどうすればいいのであろうか？ 本書はこのような疑問に答えることを目的として記したものである。

帆走工学という学問分野は明確に定義されたものではない。セーリングヨットは当然、船なので、基本的には造船学もしくは船舶工学の分野に含まれると考えるのが妥当であろう。しかし、その主な推進力源であるセールに関しては船舶工学ではあまり扱われず、むしろ機械工学や航空工学の流体力学分野の対象とされることが多い。また、通常の船舶はプロペラによって推進されるので、定常状態は前後方向の1次元的な釣り合いだけで求めることができる。これに対して、セールに作用する風の力を推進力とするヨットは、横に傾き、横流れしながら走るので、定常状態といえども3次元的な釣り合いを考える必要がある。このような観点からすると、セーリングヨットはむしろ船というよりも飛行機に近いといえよう。したがってその学問分野として、船舶工学と機械工学および航空工学の学際的な領域として、帆走工学と名付けたものである。

筆者は機械工学の分野で流体力学を学んだが、船に関する知識はほとんどなかった。それでもどうしてもセーリングヨットの設計建造に携わりたいと思い、ヨット設計事務所の門を叩いた。横浜ボート(有)社長で熊澤舟艇研究室主宰の熊澤時寛氏に師事し、設計の基本から建造の実際にわたって勉強をさせていただいた。しかしながら船舶工学出身ではないため、設計事務所で勉強を始めた当初はかなり苦労した。船舶工学特有の専門用語がわからないという問題もあったが、とにかく手頃なテキストが見つからなかった。船舶算法という排水量計算について解説した入門書の他には、有名な「理論船舶工学」[1]という3巻の大著があったが、これはいきなり飛びついても歯が立たなかった。この他に手に入るものとしては、当時の造船学会のシンポジウムのテキストがあったが、船舶工学初学書としてはさらに難解であった。

幸い、筆者は後日、大阪大学工学部造船学科(当時)の野本謙作教授のもとで内地留学をする機会を得ることができた。このときに、いわゆる船舶工学科で行われている講義を受講するにおよんで、ようやくこの溝を埋めることができた。すなわち、船舶工学科の講義を受講したり、配布資料をもらったりすることによって、初めて理解できる部分があまりにも多かったのである。このこと

は、船舶工学科に入学する機会がなければ、船舶工学の勉強にアプローチすることが非常に難しいことを意味している。これは、種々のテキストを容易に入手することができ、独学でも勉強可能な機械工学やさらには航空工学といった分野に比べると大きな違いがあると言わざるをえなかった。近年、ようやく船舶工学の分野でもこのようなテキスト [2] が刊行されるようになってきたが、これによって船の勉強に取り組んでみようという人の裾野が広がることを期待したいところである。

セーリングヨットの帆走性能の解析や設計法などについては、我が国でもこれまでにいくつかの成書がある。例えば、横山晃氏の「ヨットの設計（上），（下）」[3] や、「ヨットの科学」[4]、Larsson の「ヨットデザイン原論（大橋且典訳）」[5] などがある。また、英文であるが Marchaj による有名な *Sailing Theory and Practice* [6] などが入手可能である。

本書は筆者がこれまでに取り組んできた実験や解析をもとに、セーリングヨットの帆走性能の解析の仕方や性能向上のための考え方について述べたものである。ある程度の船舶工学や流体力学の知識も必要となるが、これらを学んでいない人でも理解できるよう、なるべく噛み砕いて記述したつもりである。なお数式の導出や、理論的に複雑な点は【解説】に詳細を示すので、興味のある人はぜひ取り組んでみていただきたい。

本書がヨットの設計をやってみたいと思う人の入門書となるとともに、ヨット乗りの皆さんが日頃、自艇の性能について「どうしてだろう？」「何とかしたい」と思っている疑問に応えることができ、性能向上に少しでもお役に立つことができれば望外の幸せである。

2018 年 4 月

増山 豊



図 1.4 風神の海上帆走時の様子

## 1.2 本書の構成

本書はセーリングヨットの帆走性能解析を行う手順に従って述べており、船舶工学などの専門的な知識がなくても読み進めることができるようにした。一方、専門的な内容や数式の導出などについては適宜各章の【解説】において詳しく説明するようにした。この内容は船舶工学に興味を持つ人や、船舶工学の初学者にとっても参考になるのではないかと考えている。

第2章において、まず船体の設計手法の概要とラインズの作成の仕方について述べる。ここでこの作業の雰囲気味わってもらうために、Excelを用いたラインズの簡易作成システムが利用可能であるので (p.1 の\*1 を参照)、試してみたい。

次に船体形状を表す上で重要な排水量計算などについて説明する。また、船体形状に関する係数とその求め方についても述べるが、これらは第3章の船体性能を求める上で必要になるので、十分に理解しておいていただきたい。

第3章において船体に作用する流体力について述べる。船体に作用する抵抗成分について説明するとともに、これらを求めるための水槽試験の手法と具体的な計測例を示す。また、水槽試験を行うことができない読者のために、Delft シリーズによる船体抵抗の計算式について説明する。さらにセーリングヨットの場合は、ヒールして横流れするのが定常状態となるので、フィンキールやラダーに作用する揚力と抗力も重要な流体力成分となる。これらの算定手法を示すとともに、水槽試験結果との比較を示す。

# 第2章

## 船体の設計と排水量計算

### 2.1 船体形状の設計法

船体の滑らかな曲面はどのようにして生み出されるのであろうか。まず、この曲面の作図法から説明しよう。図 2.1 に筆者が設計し、本書の主な解析対象とする KIT-34 級 (FAIR V, 今後この船を FAIR V と呼ぶことにする) の船体設計図を示す。このような図をラインズと呼んでおり、上から正面線図 (Body Plan), 側面線図 (Buttock Lines), 平面線図 (Waterlines) の 3 つからなっている。平面線図は船体を上から見て水平面で切った断面図であり、この曲線を Waterlines と呼んでいる。側面図は船体を横から見て、前後の船体中心線に平行な鉛直面 (水平面に垂直) で切った断面図であり、この曲線を Buttock Lines と呼んでいる。また、正面図は船体を前から見て、左右の船体中心線に平行な鉛直面で切った断面図であり、この曲線を Body Plan と呼んでいる。

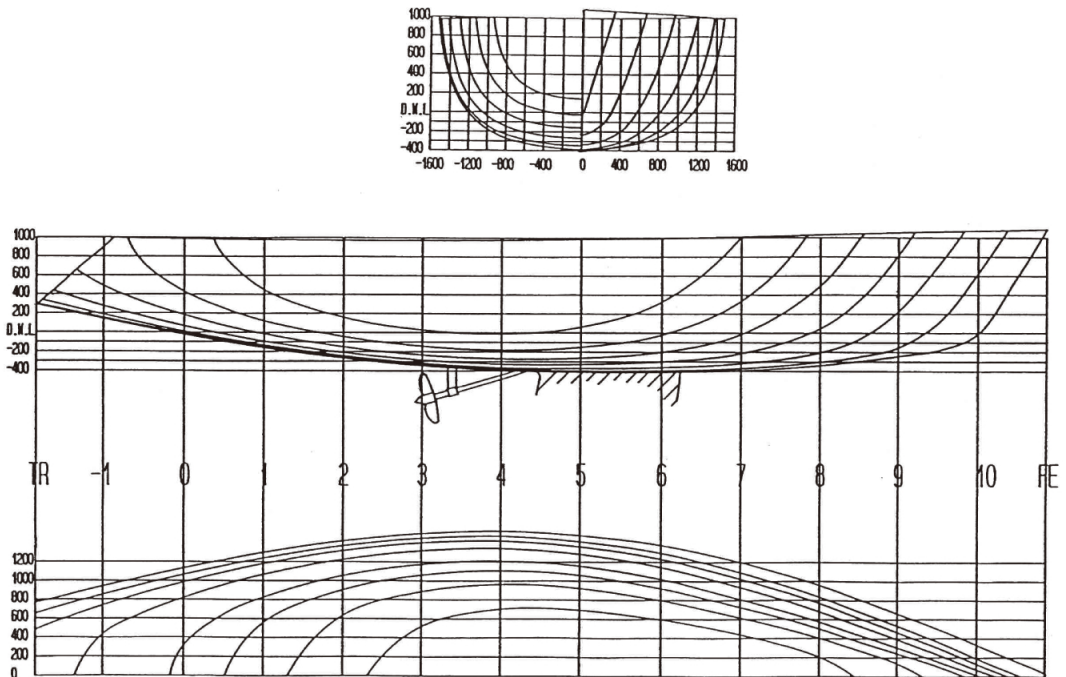


図 2.1 KIT-34 級 (FAIR V) のラインズ

## (3) 風神の例

上記の DSYHS と FAIR V の計測は、曳航水槽において比較的大型の模型を用いて行ったものである。これらのデータを補強するために、金沢工業大学の回流水槽を用いて計測を行った例を以下に示す。この水槽は筆者が常用しているもので、概要を図 3.35 に示す。全長 6.25 m、全幅 3 m の

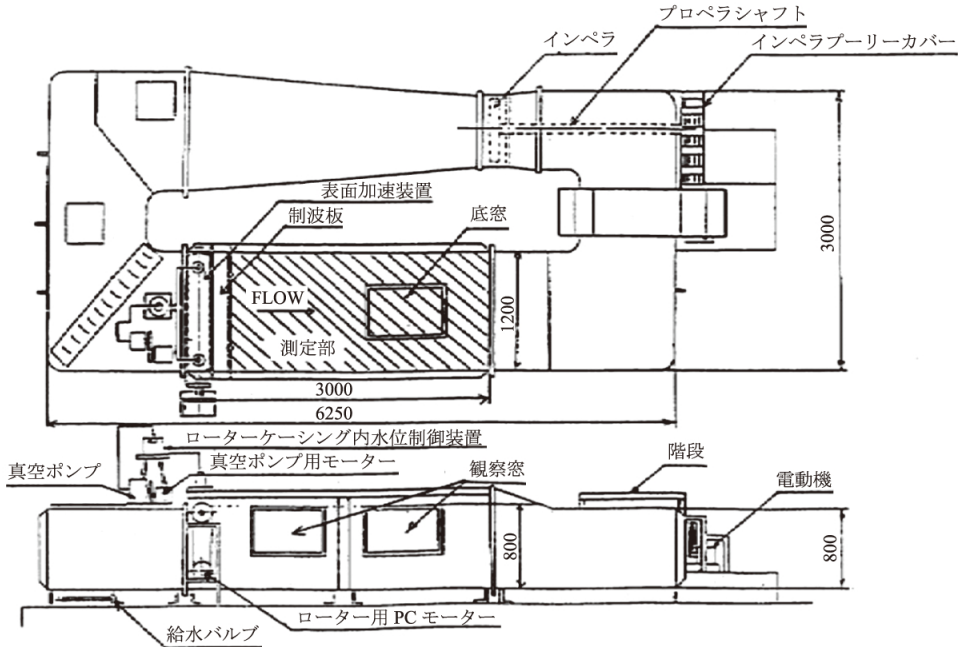


図 3.35 金沢工業大学回流水槽概要図



図 3.36 回流水槽における風神の水槽試験の様子

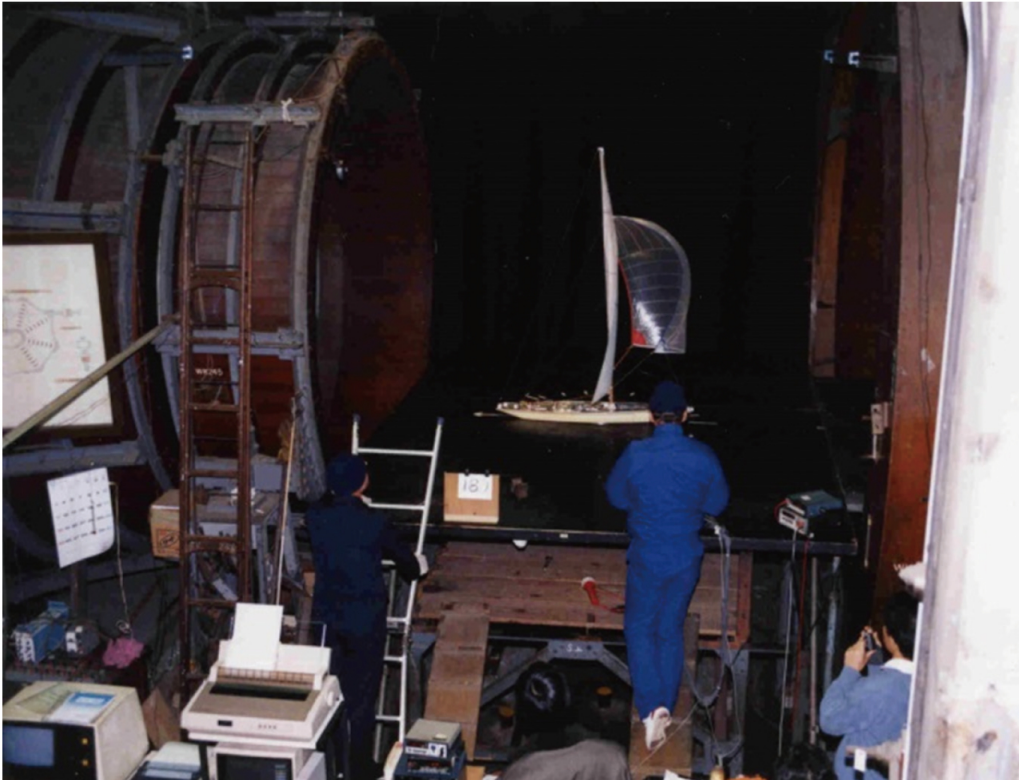
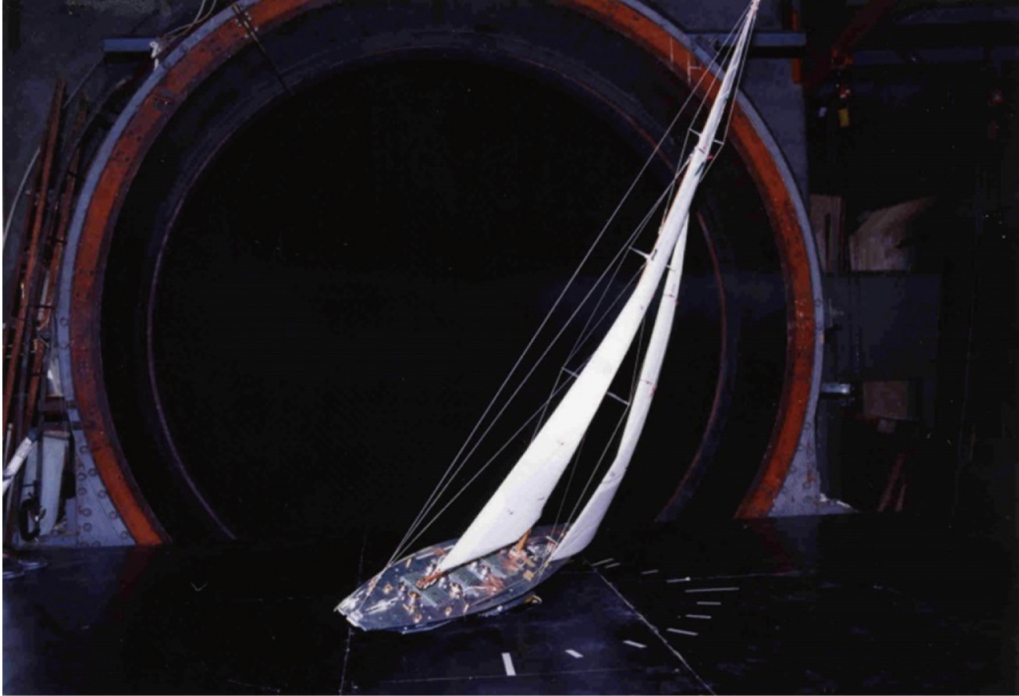


図 4.12 ニッポンチャレンジによる国際 12m 級の風洞実験時の様子  
(東京大学先端科学技術研究センター 3m 風洞装置)

ところで、抗力係数  $D_S'$  の値と比較すると、 $120^\circ$  近くまで  $L_S'$  の方が  $D_S'$  よりも大きいことがわかる。これはセール表面の剥離していない部分で生ずる力（揚力）が、剥離によって生ずる力（抗力）よりも大きいことを意味しており、スピネカーといえども風をスムーズに流すことの重要性を示しているといえる。

一方、 $D_S'$  に関しては全体に計算値が実測値を下回っている。セール模型は、薄いセールクロスを開き合わせて製作しており、実際には合わせ面に微妙な凹凸がある。このようなセールクロス表面の粗さが、抗力係数に影響を与えているものと考えられるが、その大きさは未だはっきりしていない。これらは、数値計算手法の今後の課題といえよう。

$N_S'$  の実測値と計算値の絶対値は小さいものの、かなりよく一致しているといえる。これは両者の着力点がほぼ一致していることを意味しており、計算結果がセール表面全体の流れの様子をよく表していることを示しているものといえよう。

#### (5) セール表面流れの比較

セール表面にタフトをつけて流れの様子を見たものと、数値計算結果との比較を図 4.33 に示す。相対風向  $\gamma_A$  が  $90^\circ$  の例で、スピネカーの風下側の様子を示している。風は図の右側から流れており、実験ではセールのラフ側である右側のタフトが表面に沿って流れているが、左側や上部へ行く

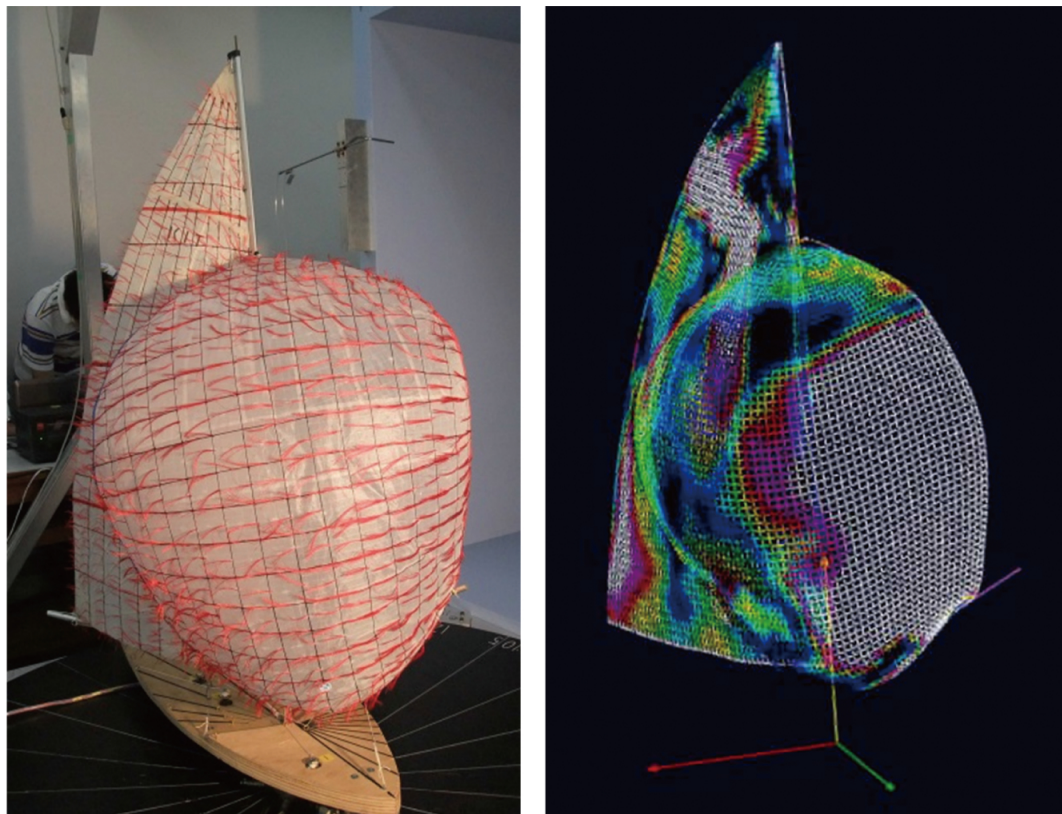


図 4.33 タフト法による表面流れの可視化と計算結果の比較（相対風向  $\gamma_A = 90^\circ$ ）

# 第5章

## 速度予測プログラム (VPP)

### 5.1 セーリングヨットの力の釣り合い

ある風向風速のもとで、セーリングヨットが何度ヒールして何ノットで帆走できるのかを求める方法について考える。これまで船体とセールに作用する力について述べてきたが、セールに働く力は船体重心よりもはるかに高いところに作用する。また、真追手の場合以外は力の向きが船の前進方向と一致していない。このためセーリングヨットは横傾斜し、横流れしながら走ることになる。さらにセールに作用する風の力と船体に作用する水の力の着力点の前後のずれによって回頭しようとするため、舵を切らなければならない。結局セーリングヨットが走っているときは直進時（定常状態）であっても、風下側に傾くとともに横流れしながら、少し舵を切った状態となる。これに対して、プロペラで推進する動力船が直進する場合は、よほどの強風時でない限りプロペラの推進力と船体抵抗のみについて考えればよく、横流れなどを考える必要はない。このような意味で、セーリングヨットの性能解析は、船というよりも飛行機の場合に近いと言える。

定常状態を求めることは、セーリングヨット全体に作用している力とモーメントが釣り合う点を求めることになる。この釣り合い点を求めるのが、速度予測プログラム（Velocity Prediction Program : VPP）である。本章では、このようなセーリングヨットの釣合状態の求め方と、VPP計算の具体例について述べる。

ところで、“力が釣り合っているのにどうして動いているの？”と疑問に思う人がいるかもしれない。力は「質量×加速度」で表されるので、“力が釣り合っている”ということは“加速度 = 0”であることを意味している。すなわち“速度が変わらない状態”を表しており、ある一定の速度で走っている場合も含まれる。これが定常状態を示していることになる。

### 5.2 釣り合いの基礎式

このような釣り合い計算をするために、力やモーメントの向きなどを表す座標系を図 5.1 のように定義する。なお、この図は図 3.22 の再掲である。ここで用いている座標系は、3.5.1 項で定義されているとおり、 $x$  軸は船体中心線に固定しているが、船が傾いても常に  $y$  軸は水平面内、 $z$  軸は鉛直下方に向かうもので、船体固定水平座標系と呼ばれている。我々が知りたいのは水面上の船体の移動方向や姿勢なので、常にヒール角が変動するセーリングヨットの状態を表す上で便利な座標系である。座標系のプラス方向は、 $x$  軸は前向き、 $y$  軸は右舷向き、 $z$  軸は下向きにとるものとする。そして、それぞれの方向に作用する力を、 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  とし、 $x$  軸周りのヒールモーメントを  $K$ 、 $y$  軸周りのピッチングモーメントを  $M$ 、 $z$  軸周りのヨーモーメントを  $N$  と表すことにする。またヒー





図 6.2 FAIR V の原設計艇の計測時の様子



図 6.3 FAIR V の船内の計測機器の設置状況 (1991 年当時)  
(テーブル上にあるのはノートパソコンではなく、ラップトップコンピューター。手前の木枠の中にパーティカルジャイロを設置)

ラダーの有効迎角に与えるヨーイングの影響は、図 7.2 に示すように次式で表される。

$$\tan^{-1}\left(\frac{x_{GR} \cdot \dot{\psi}}{U}\right)$$

ここで、 $x_{GR}$  は船体重心からラダー着力点までの  $x$  座標（マイナス値）である。よって回頭運動中のラダーの有効迎角は、第 3 章の式 (3.30) で与えた式に、上式を加えることによって次のように表される。

$$\alpha_R = \beta - \varepsilon - \delta - \tan^{-1}\left(\frac{x_{GR} \cdot \dot{\psi}}{U}\right) \quad (7.5)$$

回頭運動中はラダー位置における横流れ角は  $30^\circ$  以上となるが、第 4 項目を考慮することによって有効迎角は非常に小さくなる。

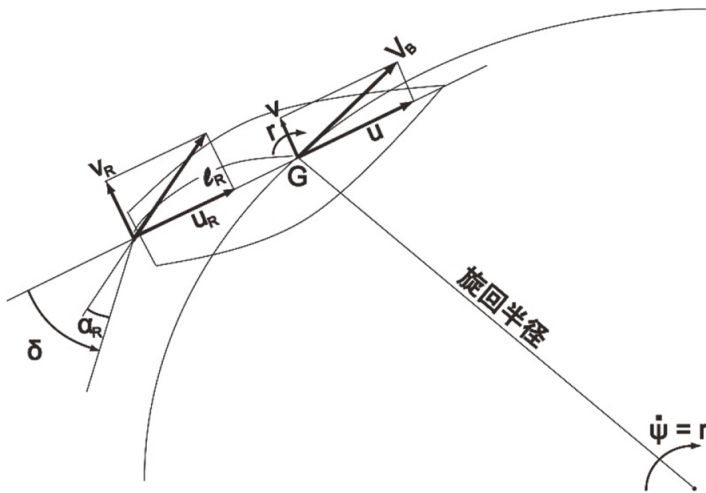


図 7.2 回頭運動中のラダーの有効迎角

## (2) ローリングによる流体力

ローリングによる流体力のうち、 $Y_{\dot{\phi}}$  は、ハルによるものは無視し、フィンキールとラダーの迎角変化によるものとして次式によって求めることにする。

$$Y_{\dot{\phi}} = \frac{1}{2} \rho V_B a_0 \int_0^D c(z) \cdot z dz \quad (7.6)$$

ここで、 $a_0$  : フィンキールまたはラダーの揚力傾斜

$c(z)$  : フィンキールまたはラダーの  $z$  座標における弦長

$D$  : フィンキールまたはラダーの下端の  $z$  座標

次に、ローリングの減衰係数  $K_{\dot{\phi}}$  は、解析的に求めるのは困難と考えられるので、FAIR V を用いたローリング試験結果から求めることにした。この結果を図 7.3 に示す。図 7.3 (a) はセール無し時の停止時、図 7.3 (b) はセール無し時の走行時 ( $F_n = 0.225$ )、図 7.3 (c) はセール有りの停止時の計測例である。