

舟艇の操縦性評価へのGPS利用について

寺尾 裕^{*1} 工藤 君明^{*2} 増山 豊^{*3}

GPSを海洋の研究開発に応用する基礎研究の一部として、舟艇の操縦運動の中でも変針運動が急激で、これに伴う速度低下が著しいヨットのタッキング性能評価にGPSを利用することを検討した。クローズホールド間のタッキングにおいて、風の高さを大きくする操船、すなわち風上に向かう速度の低下を小さくし、またこれを速やかに回復する操舵及び操帆が重要とされている。34フィートヨットにGPS受信機(MX4200)を搭載して、タッキング中の位置を計測することにより、タッキングの航跡・速度や方位の変化を解析することができた。タッキング試験時の他の計測データや操船者の評価と照合すると、舵をきり過ぎて旋回半径が小さくなり過ぎても、また操舵がゆっくりで旋回半径が大きくなり過ぎても、風上に向う速度の回復が遅くなること、また良いタッキングとは、船首が目標上り角を一旦超えるようにした後、ふたたび目標コースに戻すような滑らかな操船であることが分かった。このようなタッキング法はヨットマンにとって常識的なものであると思われるが、操船記録とヨットの航跡からタッキングの良否判定、さらにはタッキング操作の練度向上に役立つ基礎資料を得ることができた。

タッキング試験は平成3年8月上旬に能登半島の七尾北湾で行った。この期間中のGPS測位精度はきわめて安定していたが、単独測位精度がある程度劣化しても、ヨットのタッキングなどのごく短時間の現象を追跡するためであれば、GPSの単独測位でも十分に高精度の利用が可能であると思われる。

キーワード：GPS, ヨット, タッキング, 風の高さ

* 1 東海大学海洋学部船舶工学科 (海域開発研究部 客員研究員)

* 2 海域開発研究部

* 3 金沢工業大学機械工学科

* 4 School of Marine Science and Technology, Tokai University
(Visiting Researcher of JAMSTEC)

* 5 Marine Development Research Department

* 6 Department of Mechanical Engineering, Kanazawa Institute of Technology

GPS Application for Evaluating Controlling Performance of a Watercraft

Yutaka TERAO*⁴ Kimiaki KUDO*⁵

Yutaka MASUYAMA*⁶

GPS was used to evaluate the tacking performance of a sailboat. In a closehailed course, handling both the rudder and the sail to increase a distance to windward, that is, not to lose the windward speed and to recover it swiftly, is essential.

Tacking trajectories were measured by the GPS receiver (MX4200) mounted on the 34-foot boat, and the changes in both speed and course angle were postanalysed. Comparing with the other data and the skipper's estimate, good tacking control seems to let the boat to overshoot at first and then turn it back to an aimed course.

Key words : GPS, Yacht, Tacking, Distance to windward

1 はじめに

海洋科学技術センターでは、GPS（人工衛星利用の全地球測位システム）を海洋の研究開発に応用するための基礎研究を進めている。ここではGPSを舟艇の運動解析、特にヨットのタッキング運動解析に適用した例を報告する。

舟艇は一般の大型船舶に比べ小型で旋回半径が小さく、また各種操作への応答時間が短いという特徴がある。このような舟艇の操縦性能を評価するためには、旋回性能や操舵特性などを明らかにする必要がある。しかし、実船の旋回半径などを簡易かつ精度良く計測することはこれまで非常に困難であった。

ヨットは風力を利用して帆走を行うので、一般の動力船とは異なり、直接風に逆らい航行することは物理的に不可能であるが、タッキングを繰り返すことで風上航行が可能となる。帆走技術のなかでもレーシングヨットで重要なクローズホールドでは、風に向かう角度のコントロールが微妙で難しく、さらにタッキングはクローズホールドの間に繰り返し行われることが多く、最高速度を達成することが要求されるクローズホールドのタッ

キング技術の差が、風上航行時の艇速の差となる。レーシングヨットではタッキング性能が全てといってよく、これに劣れば、どのような操船技術があろうとも勝利を望むことはできない¹⁾。

タッキングは重要な操船技術でありながら、その性能及びメカニズムについてこれまで定量的に研究された例は少ない。これにはさまざまな要因が考えられる。まず第一に、艇速に応じた舵取り速度、舵角度、セイルのトリミングとタイミング、このような操船に伴う流体力のダイナミックな変化、さらには海面の波浪状態・風速等、タッキングに関係するパラメータが多いために、定量的なデータに基づいた解析が出来にくかったということがある²⁾。より重要なこととして、タッキング航跡を絶対座標の変化として測定出来る精度の高い計測器がなく、またたとえあったとしても、ヨットに取り付けられるほど小型・軽量かつ高性能なものが、これまで利用できなかったことによる。

今回、高性能の小型GPS受信機（MX4200）が利用できるようになったので、ヨットのタッキング試験時にGPS受信機を搭載して航跡を計測した。タッキング試験では艇速（対水速度）、横

流れ角，相対風向・風速，ジャイロによるピッチとロール，方位角，舵角を同時に計測しているが，この報告では，GPSによるタッキング航跡を主として解析し，タッキングの性能評価への利用可能性について考察したので報告する。

2 タッキング試験の概要

2.1 使用舟艇及び試験海域

タッキング試験に使用したヨットは金沢工業大学所有の34フィートヨット「Fair V」(写真1)である。このヨットの主要目を表1に示す。このヨットは外洋ヨットレースに参加できる艇体仕様であるが，ハンディキャップルール³⁾に基づくようなデフォルメのない素直な船型であり，共著者の一人(増山)が，波浪中の動揺特性や抵抗増加を計測することを念頭において設計したもので，特に重心位置や環動半径に注意を払って施工されたものである。

タッキング試験は能登半島の七尾北湾で行った。この海域は夏には波がほとんどなく，潮流や海流の影響も受けにくい場所である。使用舟艇の基地はこの湾の北部に面する金沢工業大学能登穴水湾自然学苑にあり，鉄筋4階建の学苑寮の屋上にGPS陸上基準局を設置した。GPS基準点の座標は近くの三角点から光波測距したものである。

2.2 GPS受信機システム

ヨットのタッキング航跡はGPS受信機システムによる船位の記録である。GPS受信機システムはGPS受信機(MX4200)，GPSアンテナ及びデータロガー用のパソコンからなる。なおこのシステムは，海洋科学技術センターが開発したGPS精密測位漂流ブイの一部を使用したものである。GPSアンテナは付図に示すように，ヨットの右舷後方に設置したので，タッキングなどで旋回すると艇の方位や傾斜の影響を受けて，GPSアンテナの軌跡とヨット重心の航跡は一致しない。他の計測データから必要に応じてヨット重心航跡に変換することができる。

GPS測位は地上局及び移動局で同時計測を行った。本受信機は1秒毎に生データと測位結果を出力できるので，全データを1秒毎に計測し記録した。ヨットのタッキングにおける変針時間は，およそ20秒であり，このサンプリング間隔であれ



写真1 タッキング試験に使用したヨット
Photo. 1 Sailboat used for tacking test

表1 試験に使用したヨットの主要目
Table 1 Principal dimensions of the sailboat

全長	L O A	10.68 m
水線長	L W L	8.55 m
最大幅	B max	3.04 m
水線幅	B W L	2.42 m
排水量	△	3.6 ton
喫水 D e p t h		
船体深さ	d body	0.41 m
キール深さ	d keel	1.95 m
帆面積 S a i l A r e a		
メインセー	Main	31.26 m ²
ジブセー	Jib	20.65 m ²

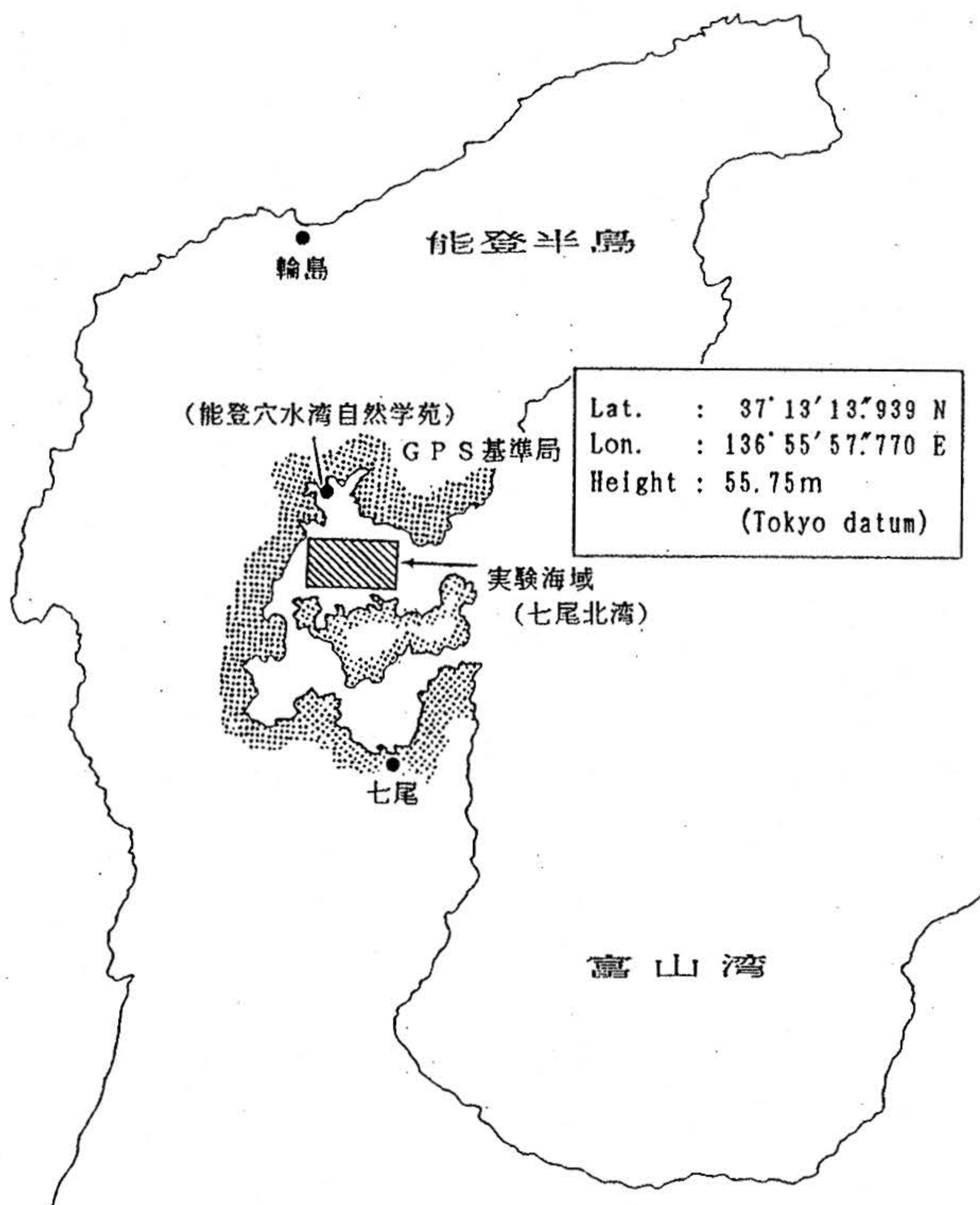


図1 実験海域 (七尾北湾)
Fig. 1 Test site (Nanao-kita Bay)

ば、この間の位置データから速度などを安定に解析することが可能となった。

2.3 タッキング試験

ヨットの実船海上試験は、計測機器等の準備を完了して、平成3年8月6日より10日まで実施した。この間タッキング試験を総計165回行った。風速は日により多少変化した。ほぼ6~10m/sで推移した。タッキング試験の他に、Z試験、旋回試験、ゼロスタート加速試験、直進減速試験、回頭試験も行い、これらすべてにGPSによる航跡解析を利用したが、以下ではタッキング試験についてのみ検討する。

3 GPSによる航跡解析

3.1 GPSの測位誤差

GPS測位は、GPS衛星とGPSアンテナとの距離を信号到達時間から観測し、4衛星の位置と時刻に基づいて、アンテナ位置と受信機時計の遅れを解析するものである。したがって、GPS衛星から送出された信号が地上に到達するまでに、電離層や大気圏で遅延することが絶対的な誤差限界となっている。しかし、海上における測位では相対誤差の安定性がむしろ重要となる場合が多く、衛星の配置が良くないことによる幾何学的精度低下(DOP)、衛星組み合わせの変更による座標

位置の不連続的変化が主たるノイズ源となっている。また、衛星時計や衛星位置の精度を意図的に狂わせる利用者選択 (SA) も大きな誤差要因となっている⁴⁾。

GPS 測位精度及び安定性を以下の解析により評価した。タッキング試験の前後 120 秒間に GPS 基準点で計測した測位データを取り出す。基準点の座標値は時刻とともに振れ回るが、タッキング開始から終了までの 120 秒間に振れ回る座標値から平均位置の回りの相対誤差を、解析しておく。もし相対誤差、すなわち振れ回り誤差が大きいようであれば、そのタッキングは評価解析からはずすことにした。

全タッキング試験の GPS 測位における相対測位誤差を頻度分布として図 2 に示す。誤差の評価はタッキングの物理的な意味を考えて

$$\Delta r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ (X_i - X_g)^2 + (Y_i - Y_g)^2 \right\}^{1/2}$$

ただし、 X_i , Y_i は、GPS 基準点での測位座標値であり、

$$X_g = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i, \quad Y_g = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i$$

(n : サンプル数)

とし、変位量の平均値からの相対誤差として評価した。相対誤差の平均値は 0.63m であるが、大部分のものは誤差 1 m 以内に入っている。

計測誤差 1 m 以内のデータを用いればタッキング解析には十分な精度がある。毎秒均等に発生した誤差の積み重ねとして得られたと考えると、120 秒間で 1 m の誤差は、誤差直径 2 m の内にあるわけだから、

$$2 \text{ m} / 120 \text{ sec} = 0.017 \text{ m} / \text{sec}$$

の誤差内で移動速度を検出したことになる。なお、タッキングの旋回は 20m 程度のオーダーの円内におさまる、船の前進速度は 3 m/sec 程度となっている。

3.2 タッキング評価

従来のタッキング評価では、操船者の評価基準を用い、操舵操帆パターンが分析された。タッキングの動作は主に操船者の恣意的な操舵パターンから組み立てられ、操舵を中心に全ての動作が連動して行われる。タッキングにおける操帆は、操舵と共に風上に切り上がる船首と相対風速に合わせ、メインセイル及びジブセイルを反対舷に張り替える作業となる。クルーザーではこの動作はヘルムスマン (操舵者) が行うことはなく、操帆手が行うのが普通である。操帆パターンは操帆者の練度により異なり、主に動作のタイミングにより成功や失敗と評価されるが、熟練者になれば最適

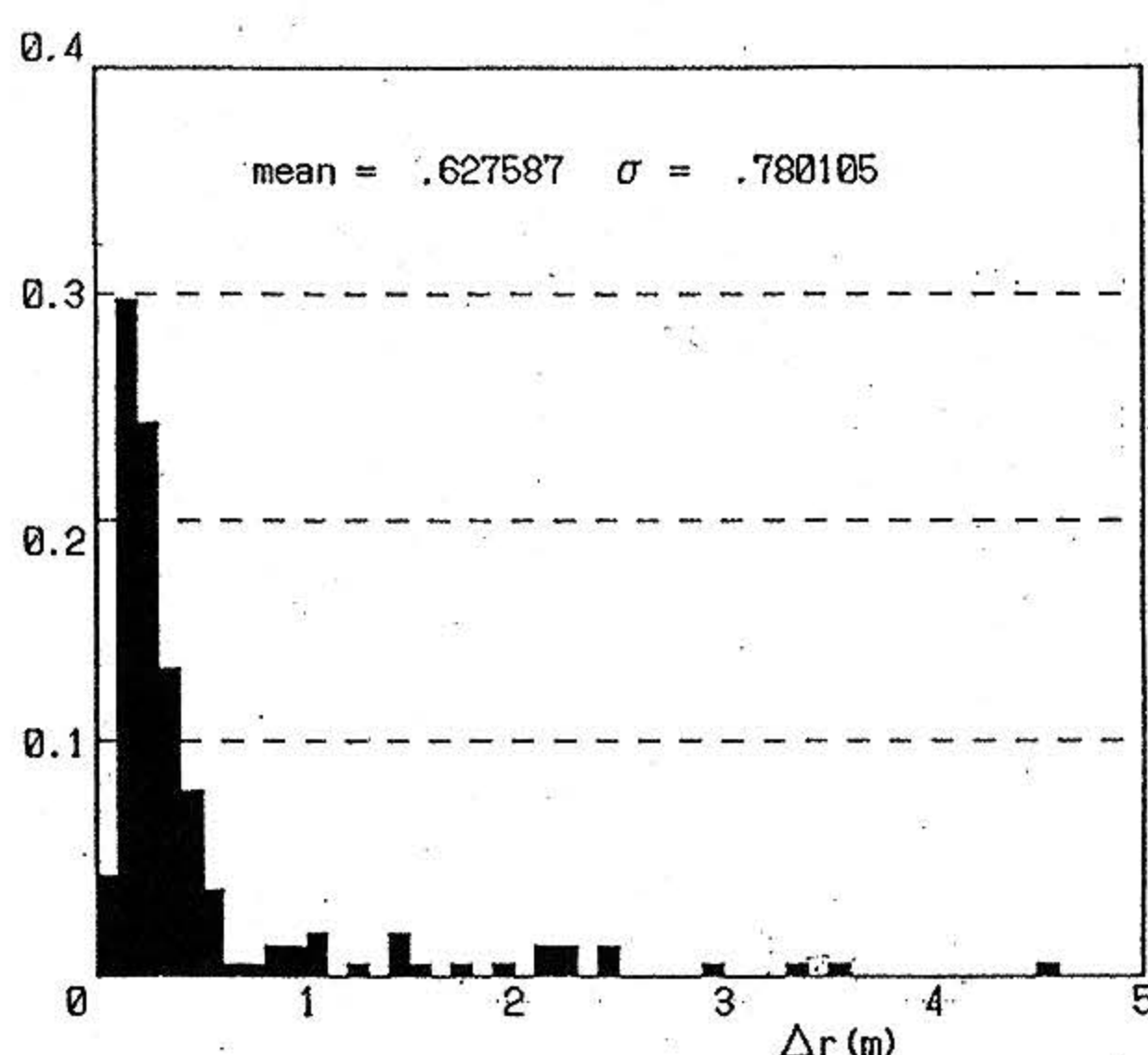


図 2 各タッキング試験時に GPS 基準局で計測した相対測位誤差 (120 秒間の標準誤差) の頻度分布
Fig. 2 Frequency distribution of relative positioning errors at the GPS reference point, which are standard deviations of positioning errors analysed for 120 seconds at each tacking test.

な操帆が行われると考えてよい。よってヘルムスマンの意志どおりに操帆されるという仮定の上で、タックの過程評価がなされている。

本報では、タッキングの評価に GPS を応用するために、もう一つの評価法を導入する。ヨットのクローズホールドにおいてタッキングの良し悪しを評価するものに VMG (Velocity Made Good) がある。風速・風向が振れ回る海域における評価としては最も適切なものであり、風上に最大切り上げられる速度を意味する。しかし、ここでは「風の高さ」という評価を用いることにする。これはタッキングの一定時間における、風上方向への遡上距離と定義する。この定義によれば、風速・風向の変化が小さいならば、GPS を用いた絶対座標系で距離を計測でき、定量的な評価が下せるからである。

タッキング概説図を図 3 に示す。風向を Y 軸負方向に取る。タッキングの開始から終了までを含めた 40 秒間に遡上した Y 軸方向の距離が「風の高さ」に相当し、より風上にある方を「風の高さが大きい」と定義する。

3.3 タッキング解析方法

GPS 受信機システムにより受信収録した生データ総量は、陸上基準局及び移動局を合わせると 80MB に達した。このなかから 150 回以上あるタッキング部分のみを自動的に判別し、必要な部分を切り出すソフトを開発した。データ切り出しと同時にファイル名を個別に付け、それぞれのタッキングをファイルに記録し区別した。さらに、個々に切り分けられたタッキングファイルから航跡をプリンタにハードコピーし、その中で正常なタッキングと見なされるものを識別して、詳細に解析

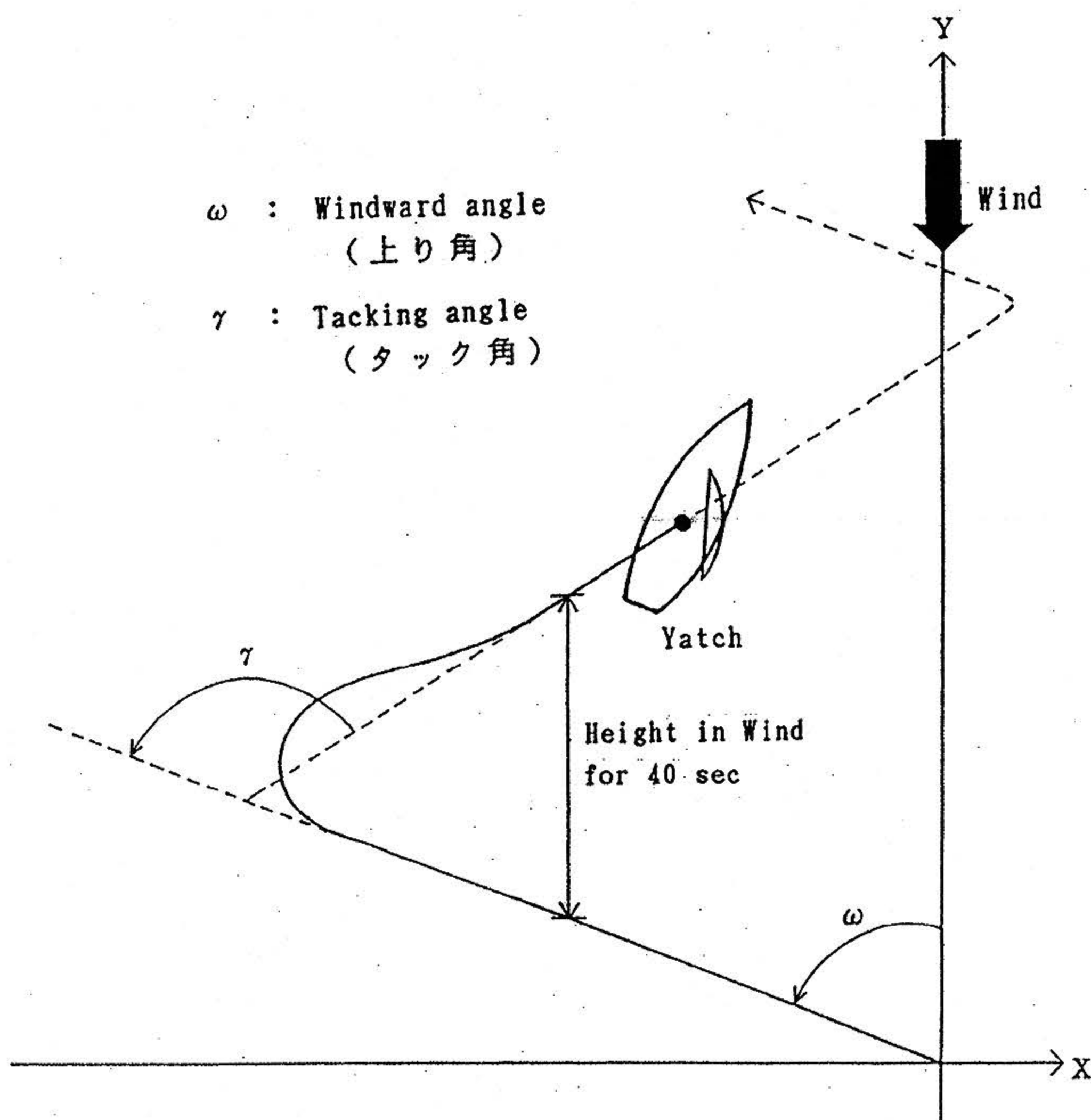


図 3 タッキング概説図

Fig. 3 Sketch to illustrate the tacking parameters

した。

陸上基準局のGPS測位誤差を調べ、誤差の大きいものを省くようにしたが、タッキング航跡の解析からも、SAなどの影響は小さいことが分かった。これはタッキングの開始から終了までの時間がわずかに40秒程度であり、この間の相対誤差変動はかなり小さく、解析結果に及ぼす影響も小さくなっているためと考えられる。

さらに、タッキング解析には船の相対位置が分かれば良いので、解析に都合の良い座標系を取り解析を進めることとし、以下の処理を加えた。

- ①表示時間は、タッキング前後40秒、 $240\text{m} \times 240\text{m}$ の枠内に表示し、 $40\text{m} \times 40\text{m}$ の補助線を書く。
- ②風向をY軸負にとり、表示開始点は原点となるように座標変換を行う。
- ③風向はタッキング前の艇速及びタッキング終了後の艇速が定常となったところより逆に算出する。GPSの軌跡より得られる移動速度をUとし、風向に合わせてとったx-y座標への分速度を U_x 、 U_y と表わす。

3.4 解析結果

タッキング試験最終日である平成3年8月9日の航跡図を図4に示す。メッシュの間隔は1kmである。図中に実験日の風向・風速を書き入れているが、風向はやや南寄りの東風であった。タッキングのうち黒丸で示したものについて以下考察する(図5~7)。これらはタッキング操船者の評価が、優、良、不良となった三種類である。前進速度はラフィング(船首をさらに風上に向ける操船)と共にスターボードタックからポートタックのタッキング(図5)ではわずかに増加し、ついで減少し、その後は元の前進速度に回復する。ポートタックからスターボードタックへのタッキング(図6、7)では、前進速度は変化しないか微増であり、ついで減少し、その後は元の前進速度に回復する。しかし、タッキング中のラフィングによる船速変化はGPSアンテナの取付位置が艇体右後部にあったため、船首回頭角速度の影響を受け、右タックではいわゆるキックにより旋回時に船尾が振出され、逆に左タックでは減速されるように作用したためと推察される。

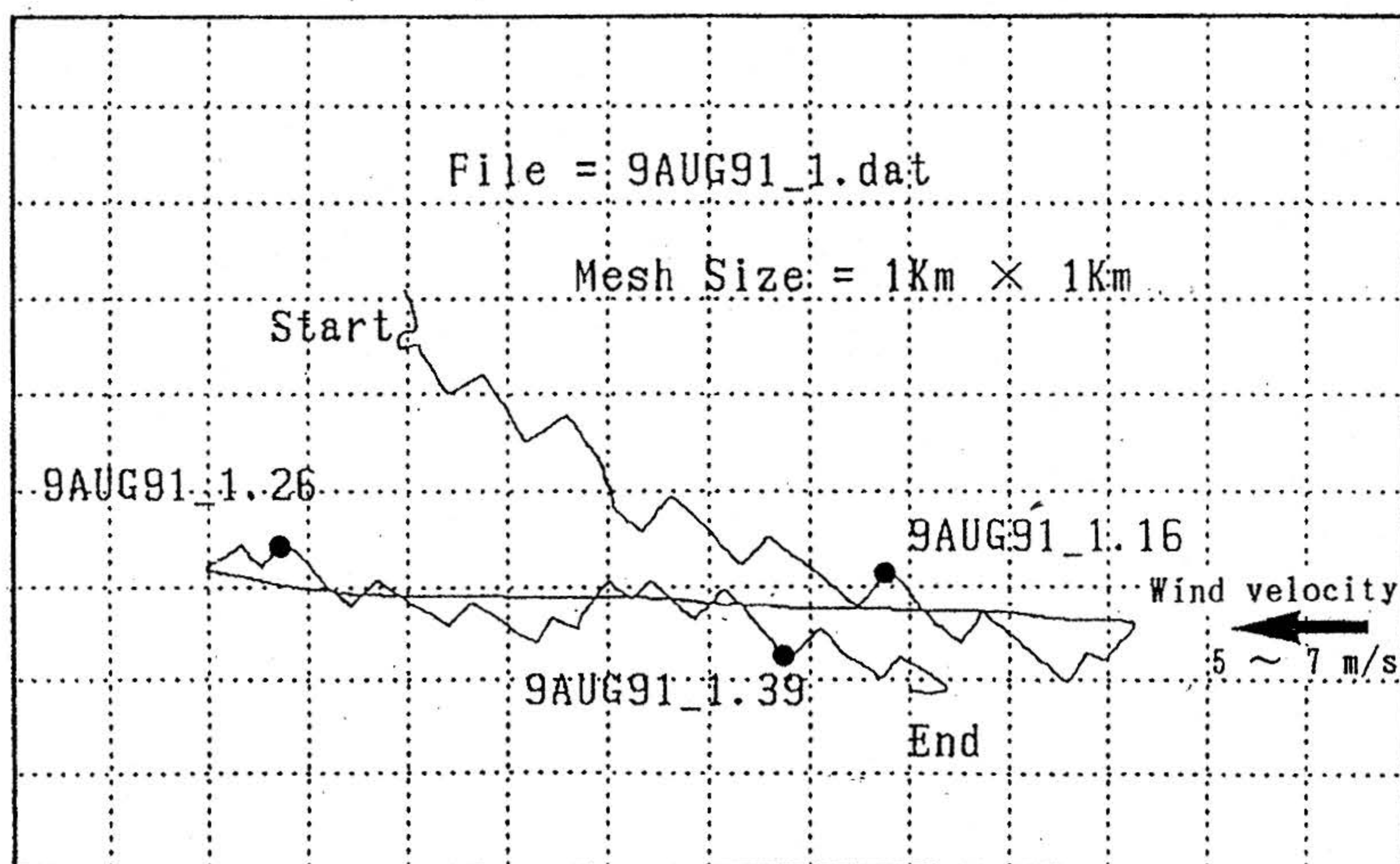


図4 タッキング試験時の全航跡図(平成3年8月9日第1回)
Fig. 4 Full trajectory of tacking (9 Aug. 91 1st)

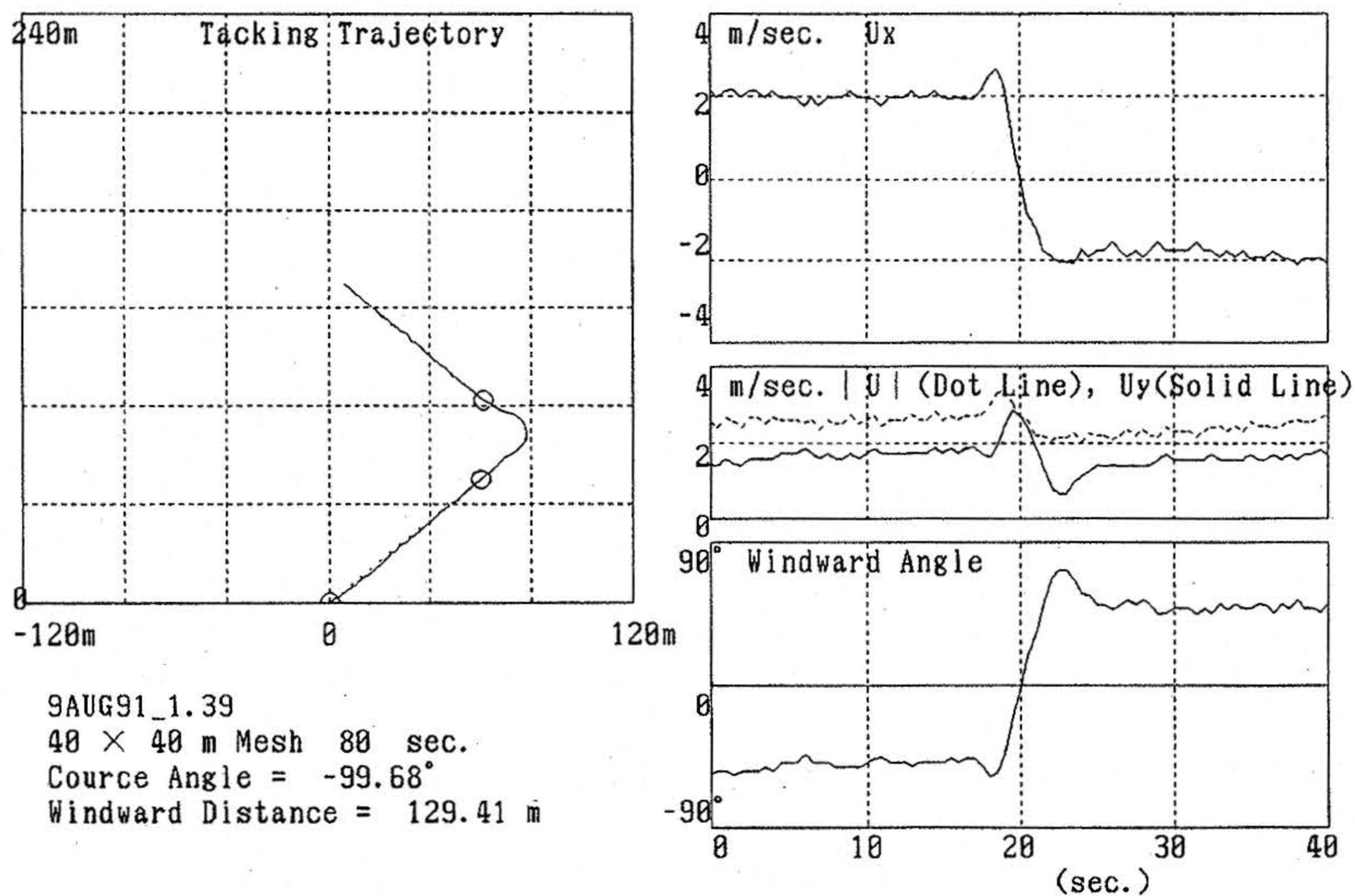


図5 タッキング航跡図及び速度と上り角の変化 (評価: 優)

Fig. 5 Tacking trajectory, changes in velocity and shift of windward angle (Estimate Very Good)

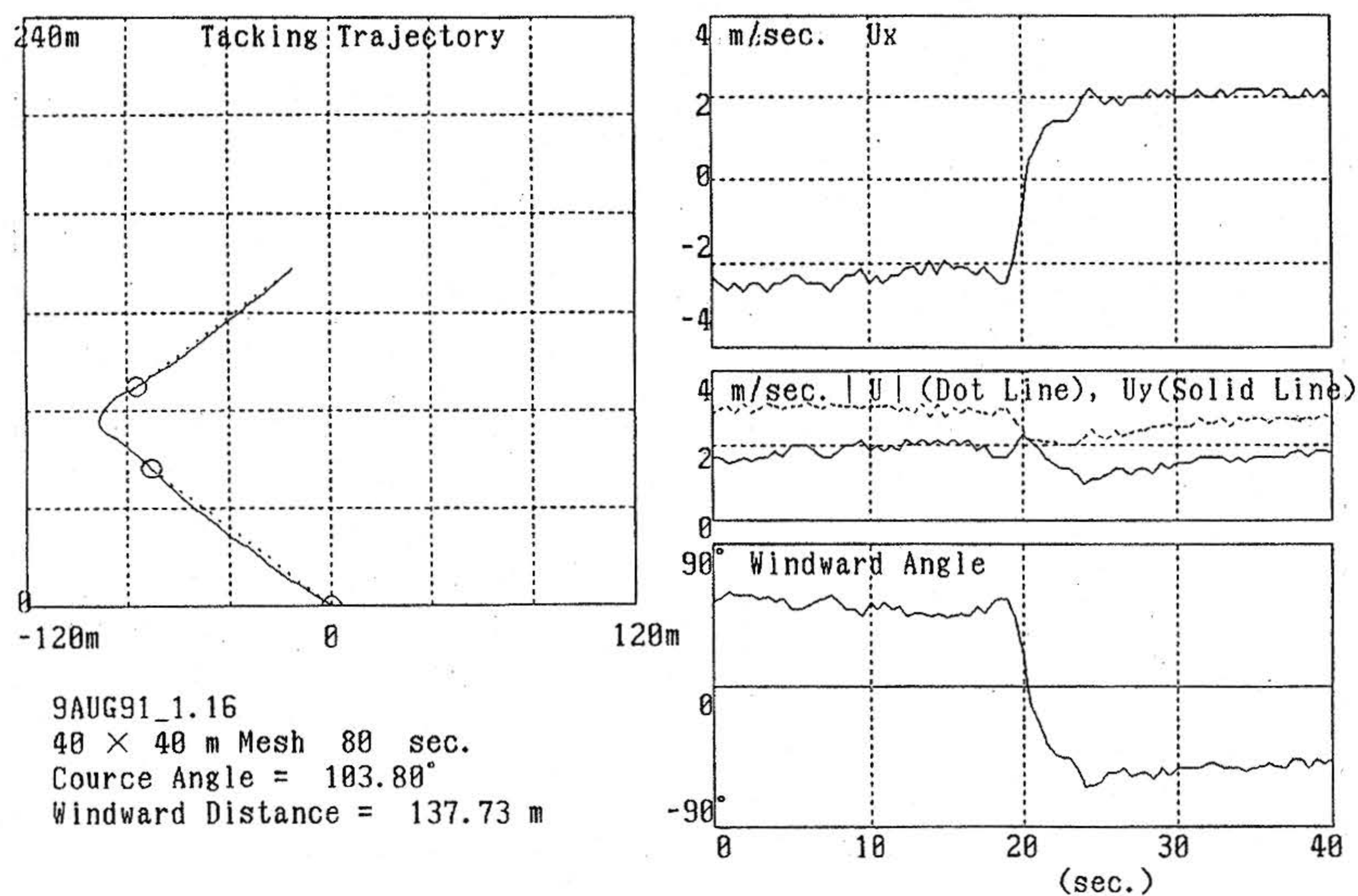


図6 タッキング航跡図及び速度と上り角の変化 (評価: 良)

Fig. 6 Tacking trajectory, changes in velocity and shift of windward angle (Estimate: Good)

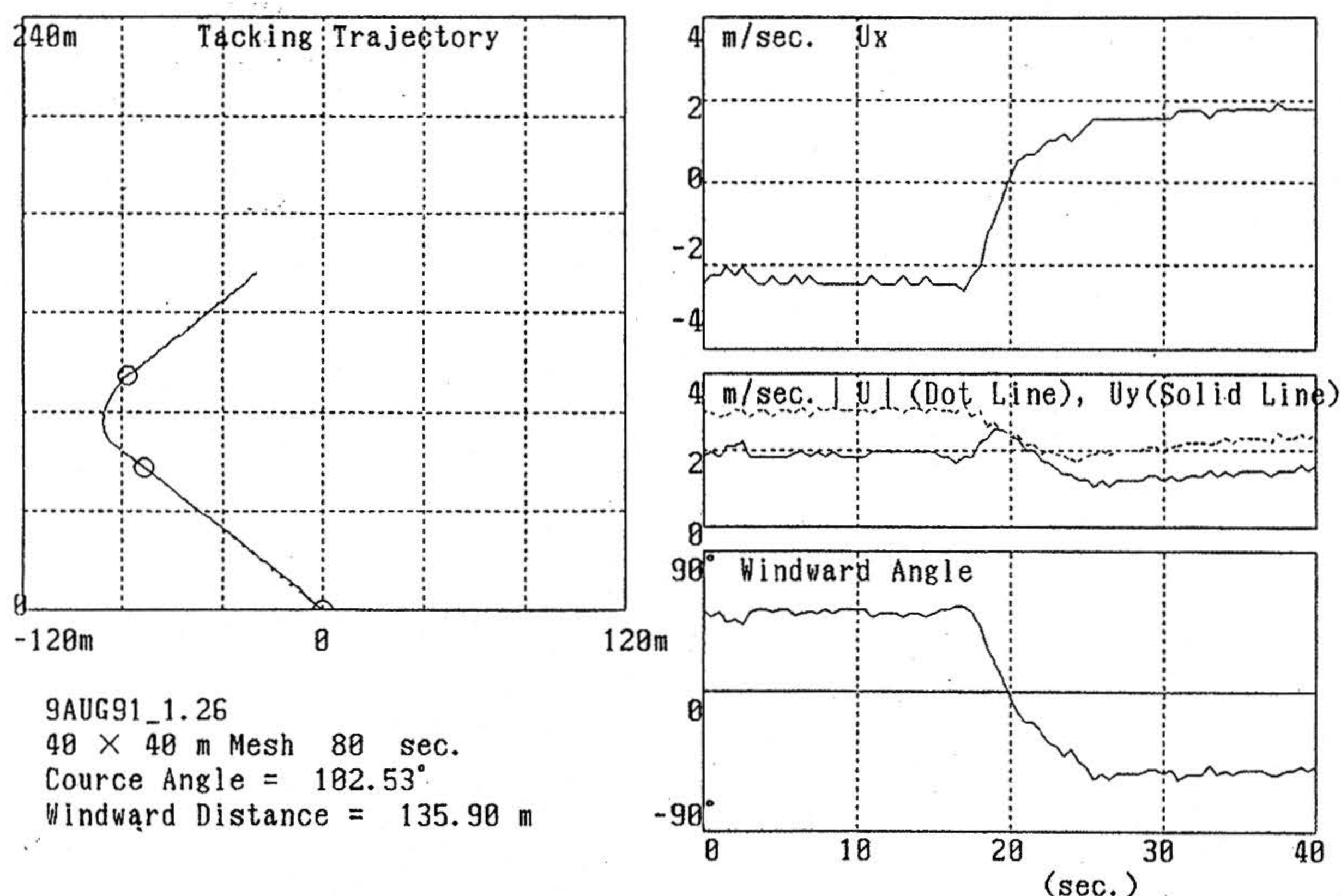


図7 タッキング航跡図及び速度と上り角の変化 (評価: 不良)

Fig. 7 Tacking trajectory, changes in velocity and shift of windward angle (Estimate: Not Good)

ラフィング後の船速低下は、帆による推進力が一時的に作用しなくなったこと及びこの時には舵取り角度が最大となり、水中の流体抵抗が最大となることから、船速低下を引き起こしたためと考えられる。なおこの量は、今までの流速計を用いる方法では精度良く計測出来なかったものである。

その後、タッキングが完了し、ヨットの進路が次のクローズホールドとなり静定すれば、タッキング前の船速に戻る。

この船のタッキングのなす角度は92度から95度である。

3.5 考察

タッキングに関する考察をヘルムスマンの評価を基に進める。図5には評価: 優, 図6には評価: 良, 図7には評価: 不良のタッキング航跡図及び速度と上り角の変化を示す。それぞれGPSで得られた情報とヘルムスマンの評価を比較する。

図5からは前進速度 U (実際はGPSアンテナの移動速度)がタッキング終了後、速やかに回復しているのが分かるばかりでなく、 U_y つまり風に向かう速度の回復も早い。 U_x は急激に方向変

換を行い、タック後一度速度低下の後、定常速度におちつく。上り角度では一度船首を風下に落としてから、次のコースに乗せる操船を行っていることが分かる。

図6からは上り角度をオーバーシュートさせることなく、次のコースに乗せる操船を行なっていることがわかる。このときの U_y の速度低下は図5より大きい。このために風の高さを失うことになっている。また U も回復が遅い。

図7からは航跡の描く円弧の曲率が大きいために直ちにわかる。このような大きな曲率で旋回運動を行なうと、セールに作用する推進力のロスが大きいため U の速度低下及び U_y の速度低下は著しく、また速度回復も遅いことが見て取れる。これは舵取り速度をゆっくり行なったことにより、速度低下をきたした例だと判断することができる。

これらのGPSによる航跡のみでは艇体姿勢の細部はわからないので、ヨットに取り付けた傾斜計と方位計を用いて、ヒール角と船首方位を解析したものが図8及び図9である。GPSアンテナの軌跡から船体重心運動の軌跡に変換する計算は

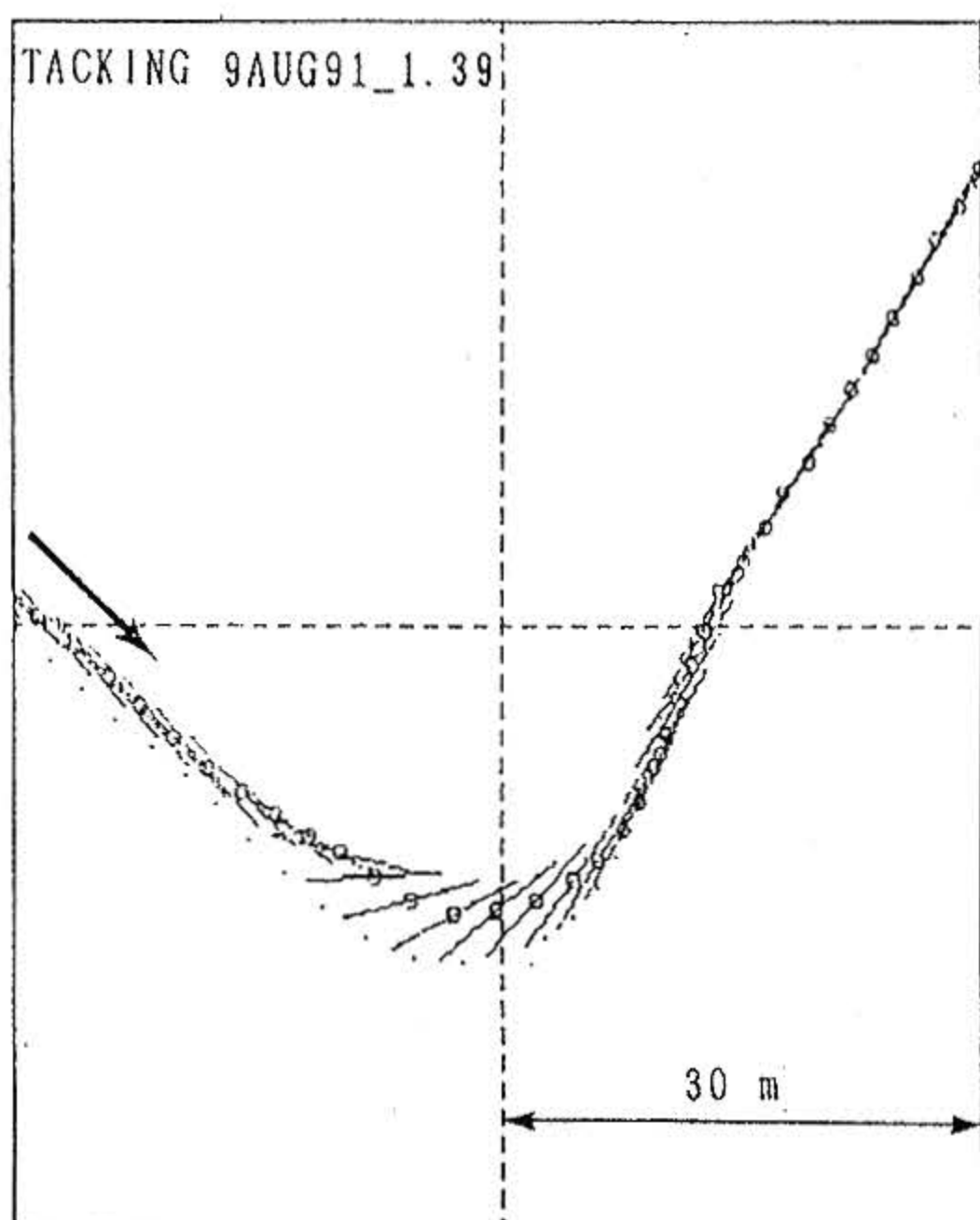


図8 非常に良いタッキングにおけるヨットの位置変化 (間隔: 1 秒, バー: ヨット中心線, 白丸: ヨット重心, ドット: GPS アンテナ)

Fig. 8 Changes in sailboat position of "Very Good" tacking (Interval: 1 sec, Bar: Center line, Circle: Gravity center of boat, Dot: GPS antenna)

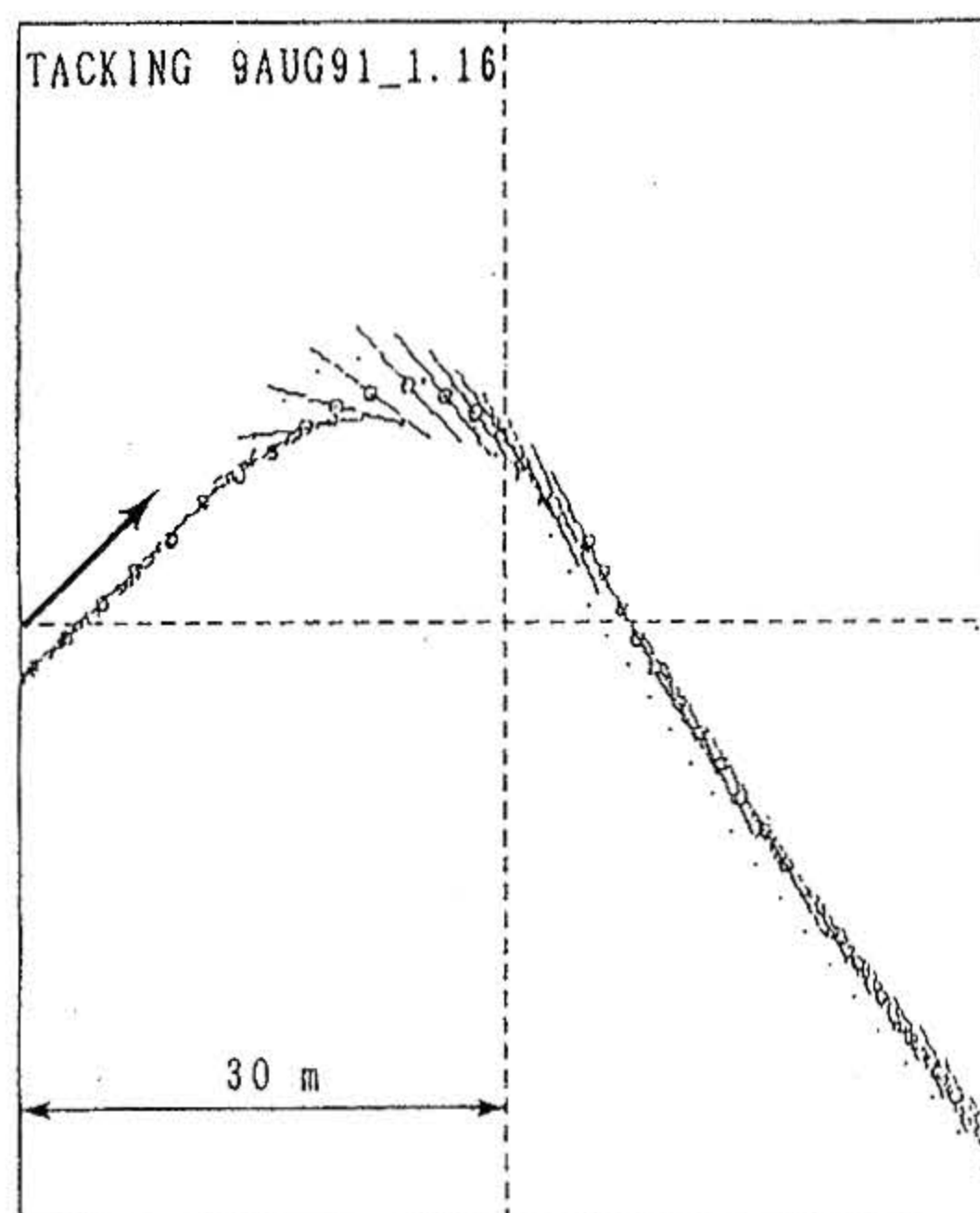


図9 良いタッキングにおけるヨットの位置変化 (図8 参照)

Fig. 9 Changes in sailboat position of "Good" tacking (see Fig. 8)

付図のように行う。

図8は図5に対応しており, 評価が優の場合である。ややゆっくりと回頭した後, 船首を少し風下へ落として前進速度を回復させながら, 次のコースに乗せている様子がよくわかる。横流れ角も前進速度の回復とともに減少していることがわかる。またタッキング中に, 船首が風の方 (図中では右から左) を越えて次のタックに入った後も, 船体が横流れを続けていることがはっきりと示されており, この大きさも船速低下に大きな影響を与えているものと考えられる。

図9は図6に対応しており, 評価は良で, 回頭速度が速く, 旋回半径も小さい場合である。回頭中の横流れ速度が大きいことがわかり, 速度低下の大きい理由を示しているものと考えられる。またオーバーシュートさせなかったこともあって速度の回復が遅く, 次のコースに入ってから横流れが続いていることがわかる。

以上のことから, 良いタッキングとは適正な円弧で旋回を行い, タッキング後, 直ちに十分なキールによる揚力発生をもたらすような操船パターンが望ましいことがわかる。これはヨットの操船者には常識であるが, 今回の GPS による計測によりこれらのことが定量的に評価することができた。

4 おわりに

共著者のうち, 寺尾と増山は1992年に行われる第28回アメリカズカップに日本から初めて挑戦するニッポンチャレンジアメリカ杯1992委員会の船型委員を勤め, ヨットの性能向上にとくに関心をもっている。アメリカズカップは海のF1とも呼ばれ, 国の威信を賭けたハイテク船建造競争ともなり, またヨットマンの技量を競う最高のレースとも呼ばれている。しかも, 参加するのはクラブ単位というアマチュアリズムも残されており, 興味深い競技である。レースはマッチレース形式により2艇で争われ, タッキングマッチ, ジャイビングマッチ等操艇技術を尽くし争われる。このうち, クローズホールド間で行われるタッキングはコースの変化が大きく, また艇速が低下するために操船技術がとりわけ難しいものである。戦術を別にしても, どのようなタッキングが良いか

を定量的に評価することが必要とされていたが、GPSを利用した今回のタッキング試験により、良いタッキングというものの指標を得ることができた。

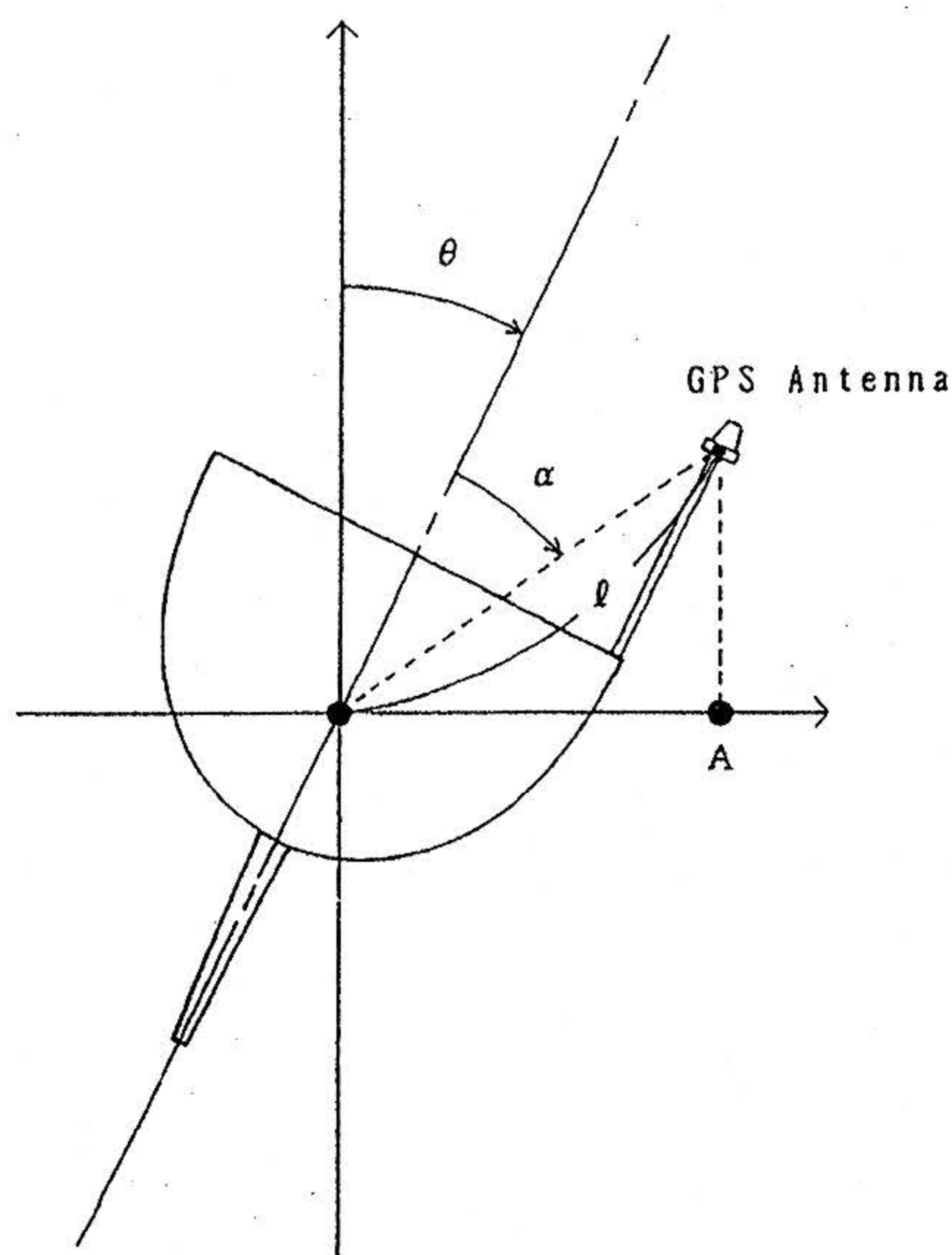
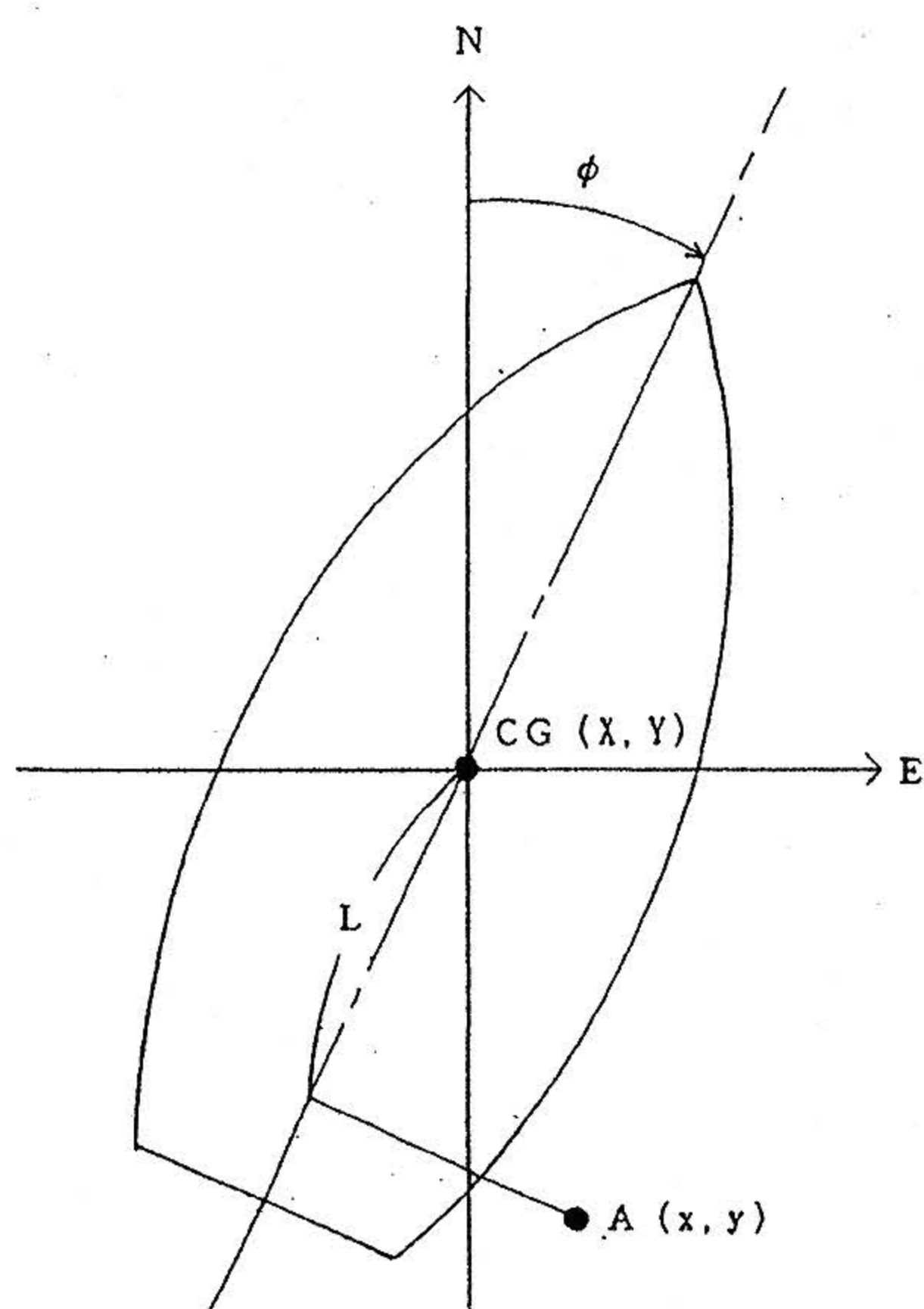
タッキング性能評価にGPSが利用され、より一層の技術向上に役立てられ、将来アメリカズカップで日本艇が優勝できることを期待したい。

参考文献

- 1) C.A. Marchaj : Aero-hydrodynamics of sailing, 2nd edition, Adland Coles (1988)

- 2) 元良誠三監修：船体と海洋構造物の運動学，成山堂書店（1982）
- 3) The Offshore Racing Council : International Offshore Rule, I.O.R. Mark III (1985)
- 4) 工藤君明，北野義信：GPSによる浮体運動計測技術（第2報：擬似距離誤差の特性について），海洋科学技術センター試験研究報告第23号，100-124（1990）

（原稿受理：1991年12月27日）



$$X = x - l \sin(\alpha + \theta) \cdot \cos \phi + L \sin \phi \quad (\text{増加はEへ})$$

$$Y = y + l \sin(\alpha + \theta) \cdot \sin \phi + L \cos \phi \quad (\text{増加はNへ})$$

X, Y : 船体重心の水平面座標
 x, y : GPSアンテナの水平面座標
 θ : ヒール角
 ϕ : 方位角
 $l = 3.047$ [m]
 $L = 3.861$ [m]
 $\alpha = 25.3$ [deg]

附 図 GPS アンテナ位置からヨットの重心位置への変換