

船舶の運動特性把握のための K-GPS の応用に
関する研究

Application of K-GPS to Capture Motion
Characteristics of Ships

平田 法隆

2012年3月

目次

第1章 緒言	1
1.1 はじめに	1
1.2 GPSについて	2
1.3 既往の研究	4
1.4 本論文の目的	5
1.5 本論文の構成	5
第2章 GPSの位置精度と姿勢計測	6
2.1 K-GPSの精度検証	6
2.2 姿勢計測用GPSの精度検証	7
2.3 座標変換	8
2.3.1 楕円体座標から直交座標への変換	9
2.3.2 距離と角度	10
2.4 K-GPS 1台と針路による運動計測	10
2.5 K-GPS 2台による運動計測	10
2.6 K-GPS 3台による姿勢計測	12
2.7 運動計算	12
第3章 操縦性能試験へのK-GPSの利用について	14
3.1 はじめに	14
3.2 船位計測へのK-GPSの適用	15
3.3 試運転へのK-GPSの利用	19
3.3.1 アンテナ間距離	20
3.3.2 速力試験	22
3.3.3 最大舵角の旋回試験	23
3.3.4 Z試験	25
3.3.5 その他の試験	26
3.4 本章のまとめ	27
第4章 練習船「豊潮丸」の操縦性に及ぼすトリム影響に関する実船試験	34
4.1 はじめに	34
4.2 「豊潮丸」の概要	34

4.3	海上試験	35
4.3.1	GPS の概要	36
4.3.2	試験環境	37
4.4	試験結果と考察	37
4.4.1	座標系	37
4.4.2	傾斜試験結果	40
4.4.3	速力試験	40
4.4.4	旋回試験	48
4.4.5	Z 試験	50
4.5	水槽試験：針路安定性に及ぼすトリム影響	54
4.5.1	模型船	54
4.5.2	試験の概要	55
4.5.3	CMT 試験結果	55
4.5.4	針路安定性の検討	58
4.6	本章のまとめ	58
第 5 章	K-GPS による OP 級ヨットの運動計測	60
5.1	はじめに	60
5.2	OP 級の概要	60
5.3	試験内容	61
5.3.1	海上試験	61
5.3.2	実験機材	62
5.4	解析方法	64
5.5	解析結果	65
5.6	ポーラーダイアグラム	72
5.7	本章のまとめ	72
第 6 章	潮汐影響のある河川の水深計測について	74
6.1	はじめに	74
6.2	水深計測の概要	75
6.3	GPS 計測した水面高度について	79
6.4	計測した水深について	80
6.4.1	距離補正	80
6.4.2	潮汐補正	82
6.5	本章のまとめ	90
第 7 章	結論	93
7.1	まとめ	93
7.2	今後の課題	96

付録 A Appendix	103
A.1 旋回試験結果における外乱補正	103
A.2 重心位置ベースの線形微係数	104

目 次

2.1	GPS antennas allocation	7
2.2	Coordinate Systems	11
2.3	Calculate attitude by using exterior product	12
3.1	Accuracy of K-GPS on manouvering (Kojima)	16
3.2	Time histories of speed and height (Kojima)	17
3.3	Fore and aft sinkages (Kojima)	18
3.4	Coordinate Systems	20
3.5	Accuracy of K-GPS on zig-zag test (Shoyo-Maru)	21
3.6	Trajectories of speed trial	23
3.7	Time histories of speed trial	24
3.8	Result of turning test	25
3.9	Results of 10/10° zig-zag test	29
3.10	Results of 20/20° zig-zag test	30
3.11	Ship trajectories and time histories of motion by bow thruster	31
3.12	Maneuvring trajectory by joy-stick	32
3.13	Time histories of ship maneuvering and operations by joy-stick	33
4.1	Side view of “Toyoshio-Maru”	35
4.2	Settings of GPS antennas on “Toyoshio-Maru”	38
4.3	Track log of “Toyoshio-Maru” in 19/Nov./2009	39
4.4	Coordinate systems	39
4.5	Measure heel angle for calculate GM	40
4.6	Compare speed with manual steering and autopilot	42
4.7	Time histories of speed trial by manual steering on EK	43
4.8	Time histories of speed trial by autopilot on EK	44
4.9	Time histories of speed trial by autopilot on TS2	45
4.10	Time histories of \dot{u} , \dot{v} , \dot{r}	47
4.11	Relation of δ and \dot{r} , \dot{v}	47
4.12	Comparison of turning trajectories	49
4.13	Comparison of A_D and D_T ($BA = 16^\circ$)	50
4.14	Comparison of time histories of u , v , r and ϕ in turning test	51

4.15	Performance of steady turning test	52
4.16	Time histories of zig-zag test	53
4.17	Comparison of 1st and 2nd overshoot angles in zig-zag test ($BA = 16^\circ$)	54
4.18	Circular Motion Test results X'	56
4.19	Circular Motion Test results Y'	56
4.20	Circular Motion Test results N'	57
5.1	Optimist Dingy	60
5.2	Layout of Kan-non marina	61
5.3	Picture of the trial zone	62
5.4	Measurement equipments	63
5.5	Optimist Dinghy	63
5.6	Arrangement of GPS antennas	63
5.7	Coordinate Systems	64
5.8	Approximation of three conditions	65
5.9	Time history of abeam 2nd lap (Skipper A)	66
5.10	Relation between speed and trim angle	70
5.11	Relation between speed and heel angle	70
5.12	Comparison of 2 skipper ' s track log	71
5.13	Polar diagram	72
6.1	Transport wood and coal using barges at Mahakam River	74
6.2	Survey route on Mahakam River (Google Earth®)	76
6.3	Measurement System	77
6.4	Base Station at Samarinda port office	77
6.5	Patrol ship for survey on Mahakam River	78
6.6	Equipments on the patrol ship	78
6.7	Patrol ship speed over the ground measured by K-GPS	80
6.8	Time history of water level measured by K-GPS	80
6.9	Comparison of water level measured by K-GPS	81
6.10	River depth measured by sounder	81
6.11	The way of polyline fitting	82
6.12	The way of polyline fitting	84
6.13	The tracklog compare with the fitted polyline	84
6.14	River depth on the approximated distance o polyline	84
6.15	Measured water level and height of river bed approximation	85
6.16	Tidal point of BlueChart®	85
6.17	Tide prediction by BlueChart®	86
6.18	Compare with tide table and BlueChart®at Muara Bayor on 2nd Aug. 2006	86

6.19	Approximation as a sine wave	87
6.20	Estimation of tide level at survey route	88
6.21	Measured water level and height of river bed with corrected distance	89
6.22	Estimated chart datum	89
6.23	Measured water level and height of river bed with corrected distance	90
6.24	River depth in consideration of tidal effect	91

表 目 次

2.1	Distance between base and fixed rover GPS antennas (24hours) . . .	6
2.2	GPS position accuracy	8
2.3	D-GPS position accuracy	8
2.4	K-GPS position accuracy on main antenna	8
2.5	K-GPS position accuracy on aux1 antenna	8
2.6	K-GPS position accuracy on aux2 antenna	9
2.7	Accuracy of distance from main antenna	9
2.8	GPS attitude accuracy	9
2.9	K-GPS attitude accuracy	9
3.1	Principal dimensions of "Kojima"	15
3.2	Tide prediction at Kure port on 28th September 1996	15
3.3	Principal dimensions of "Shoyo-Maru"	19
3.4	K-GPS base location	19
3.5	Result of speed trial	22
3.6	Result of turning test	25
3.7	Result of side thruster test	26
4.1	Principal dimensions of "Toyoshio-Maru"	35
4.2	Trial conditions	36
4.3	Date and environmental conditions of trial tests	37
4.4	Result of speed trial	41
4.5	Result of manual steering and autopilot on EK	46
4.6	Hydrodynamic force derivatives on maneuvering	57
4.7	Linear derivatives and course stability criterion	58
5.1	Principal dimensions of Optimist Dinghy	61
5.2	Characteristics of Skipper	62
5.3	Accuracy of distance between antennas in sailing	64
5.4	Averaged values measured in abeam condition (Skipper A)	67
5.5	Averaged values measured in close hauled condition (Skipper A)	67
5.6	Averaged values measured in running condition (Skipper A)	67

5.7	Averaged values measured in abeam condition (Skipper B)	68
5.8	Averaged values measured in close hauled condition (Skipper B) . .	68
5.9	Averaged values measured in running condition (Skipper B)	68
5.10	Averaged values of lap, track length, speed etc.	71
5.11	Specifications of OP and 470	73
6.1	The points of polyline	83
6.2	The comparizon of tide level	87
6.3	Tide Level	88
6.4	Estimated chart datum from water level and tide	91
A.1	Parameters for calculation of linear derivatives	104

第1章 緒言

1.1 はじめに

米国国防総省によって1970年代に開発が開始されたGPS (Global Positioning System : 全地球的測位システム) は1993年12月に正式運用が開始され、軍用のみならず民間用途にも開放されている。GPSの運用開始と共に、船用の電波航法装置はロラン、オメガ、デッカから扱いやすく精度の高いGPSに急速に移行した。そして、GPS受信機の低価格化に伴い、小型船舶のGPSプロッターや乗用車のカーナビゲーションシステムが開発され、さらに、小型化、高感度化が計られ、携帯電話やデジタルカメラにも内蔵されるようになった。

民生利用に開放されているSPS (Standard Positioning Service) においては、当初、故意に精度を劣化させるSA (Selective Availability) によって100m程度の誤差が有った位置精度も2000年5月2日にSAが停止された[1]ため、10m程度に改善され、普及に拍車がかかっている。

また、GPSだけでは、精度、信頼性が欠けるため、様々なGPS補強・補完システムが開発されてきた。船舶用には、既知の基準点から誤差情報を得て補正する相対測位であるD-GPS (Differential GPS) 用の中波ビーコン送信局が各国の沿岸警備隊等によって整備され、日本においても、1998年に海上保安庁が日本沿岸をカバー[2]し、誤差を1~5m程度まで改善できるようになった。そして、航空機用に、静止衛星を用いたWAAS (Wide Area Augmentation System), EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay System), MSAS (MTSAT-based Satellite Augmentation System) によるSBAS (Satellite-Based Augmentation System) が稼働[3]しており、SBAS対応の受信機単体で世界中のあらゆる地域で、D-GPS精度の位置計測が可能になった。

以上のGPSおよびその補強、補完システムは、GPS衛星から送られてくる電波に乗せられた測位用のデータを元に測位を行っており、その精度は良いものでも1メートル程度であり、GPSアンテナ位置での速度は得られても、船体の姿勢や加速度成分を求めるには精度が不足している。しかし、上記のような高精度化以上に精度を要求する、地殻変動観測や測量の分野では、GPS電波の搬送波位相を使用する高精度相対測位である静止測量が用いられ、数センチメートル、長期間観測で数ミリメートルの精度が得られているが、これを移動中も観測できるようにしたK-GPS (Kinematic GPS), 更に、実時間で解が得られるRTK-GPS (Real-Time Kinematic GPS) が開発され、移動体の運動計測を位置精度数cmで行えるように

なった。K-GPS や RTK-GPS を利用するには D-GPS 同様、基準点を設置する必要があるが、日本国内においては、自前で基準点を設置しなくとも、国土地理院が全国に設置した電子基準点の GPS データを使用して、任意の場所に仮想基準点を設置する VRS(Virtual Reference Station) 方式の RTK-GPS もできるようになっている。

そこで、複数台の K-GPS や RTK-GPS を用いて、実船の操縦運動を計測し、姿勢や重心位置の速度、加速度を求め、船舶の操縦性能を把握することを試みた。また、風や操縦者の体重移動によって姿勢が大きく変化するヨットの姿勢と性能の関係や、絶対高度を得られることから、潮汐によって水面高度が変化する河川の基本水準面と水深の計測に応用した。

1.2 GPS について

GPS はスペースセグメントとコントロールセグメント、ユーザーセグメントの三つのセグメントから構成されている。スペースセグメントは GPS 衛星、コントロールセグメントは地上の運用管理部門で、ユーザーセグメントは GPS 受信機である。

スペースセグメントである GPS 衛星は軌道傾斜角 55° 、軌道半径 26,561km の円軌道を周回周期 0.5 恒星日 (11:58:02) で周回しており、6 個の軌道に 4 機、計 24 機の衛星によって全地球をカバーしている。衛星には原子時計が搭載されており、非常に精度の高い時刻を基準にして、L バンド¹の搬送波周波数 L1(1575.42MHz) と L2(1227.60MHz) の 2 種類の電波で測位情報を送信している。L1 C/A(Coarse / Acquisition code) が民生用、L1 P(Precision encrypted code) と L2 P が国防総省が許可した限定ユーザー用の高精度信号である。送信されている信号は測距コードと航法データで、航法データには時刻情報、衛星クロック補正、エフェメリス、電離層モデル、アルマナックなどがある。エフェメリスとアルマナックは共に軌道情報であるが、アルマナックは可視衛星を探索するために使用する、おおよその軌道情報、エフェメリスは 2 時間おきに更新される測位に使用するための軌道情報である。また、各衛星は同一周波数の電波を使用しているが、衛星ごとに固有の C/A コードや P コードの疑似ランダム雑音で変調されているため、干渉しないようになっている。現在、民生用に解放されているのは、L1 C/A コードのみであるが、次世代の GPS では L5(1176.45MHz) が追加され、民生用でも電離層補正が行える二周波による高精度測位が可能になる予定 [4] である。

GPS 受信機のみで測位する単独測位の原理は三辺測量と同じで、既知の衛星位置と各衛星から送信された電波が届くまでの時間から距離を求めることによって現在地が得られるのであるが、GPS 受信機の時計は普通の水晶時計であるため、距離を計算できるほど時刻は正確でない。そこで、三次元位置 X, Y, Z と時刻の 4 個

¹L バンド : 1GHz-2GHz の周波数帯で UHF(300MHz-3GHz) の一部

の未知数を4個以上のGPS電波を受信することによって求めており、3衛星しか捕捉できない場合は、高度を固定した二次元測位を行っている。そのため、GPSは位置(Position)と正確な時刻(Time)を得ることができる。このことによって、遠隔地の時刻同期が非常に簡単にできるようになった。また、高速で飛行する衛星から送信される電波はドップラーシフトしており、このシフト量からGPS受信機の移動速度(Velocity)が得られるようになっている。このように、GPSは受信機単独でGPS衛星からの電波を受信できるところであれば、どこでも位置・速度・時刻(PVT)を得ることができる。

GPSの誤差による位置の変動はゆっくりしており、近距離では同じような変動パターンになっている。したがって、既知の地点で誤差を求め、その誤差情報を測定点に伝送して誤差分を差し引けば位置精度が良くなる。これが相対測位D-GPSの原理である。海上保安庁の中波ビーコンでは半径200kmをサービスエリアとして、位置誤差そのものではなく、衛星からの距離の誤差と誤差の速度成分を衛星ごとに求めて送信している。

上記の単独測位と相対測位はGPS衛星から送信される測位情報を元に測位を行っており、これではメートル級の精度しか得られない。一方、GPS電波の波長はL1で0.19m、L2で0.24mであり、位相の分解能は1/100程度であるので、ミリメートル級の精度が得られる。この搬送波位相技術を利用するのがK-GPS等の精密測位である。

先にも述べたように、単独測位の場合、3衛星を捕捉すると二次元測位、4衛星以上で三次元測位が可能であるが、SAが解除された今日において、民間用のGPS受信機はL1 C/Aで10mの位置精度が得られる。D-GPSは、通常5m、精度の良いものでサブメートルの位置精度があり、速力計測や試運転の航跡図を描くには十分な精度がある。しかし、時々刻々の姿勢変化や加速度を求めるためには、精度が不足している。

K-GPSやRTK-GPSの場合も測位には最低4衛星が必要で、K-GPSはL1のみで測位可能であるが、L1、L2の2周波が利用できると、電離層遅延の除去ができるので、電離層の影響が現れる10km以上離れた場所でも精度良く測位できる。今回使用したGPSは2周波に対応しているが、RTK-GPSはL1のみで測位するため、10kmから15kmが測位限界であった。また、OTF(On-The-Fly)と呼ばれる測位を行いながら初期化を行う方法では初期化に2周波、5衛星が必要となる。移動体の場合、位置や向きによっては計測中に衛星を捕捉できなくなることがあるので、常に初期化に必要な5衛星、できれば6衛星以上が捕捉できる時に計測を行う必要がある。更に、測位精度向上や、OTFの収束時間を短縮するためには7衛星以上利用できることが望ましい[5]。

K-GPSやRTK-GPSでは自前で基準局を設置しなければならないが、特にRTK-GPSを使用して海上試験を実施する場合、基準点からの距離が制約となって、試験海域をカバーできるところに基準点を設置することが困難であることが多い。内海や湾内であれば、VRS方式を採用すると、たとえ海上であっても試験海域の

中心に仮想基準点を設置できるので、RTK-GPS の実用性がかなり高くなる。さらに、2010 年に打ち上げられた日本独自の準天頂衛星 (QZSS) 「みちびき」 [6] が実用化すると基準局が不要となる。「みちびき」独自の信号である LEX 信号には日本全国の補正情報を載せることができるように設計されており、これを使用すると、RTK-GPS のための補正情報を得るための通信手段が不必要となり、対応した受信機のみで PPP-RTK と呼ばれる高精度測位が可能 [7] となる予定である。現在は試験用の 1 機のみのため、1 日の内 8 時間程度しか使用できないが、2010 年代後半を目標に 4 基体制とし、将来的には 7 基体制を目指すことが 2011 年 9 月に閣議決定しており、3 基以上で、日本上空の高仰角に常時 GPS 補完・補強衛星が存在するようになり、ビルの谷間や山間部での測位率が向上する。そして、7 基体制になれば、アジア・オセアニア地域限定ではあるが、「みちびき」のみで測位が可能となる。

なお、現在、衛星測位システムは GPS とその補強、補完システム以外にも、ロシアの GLONASS が運用されており、さらに、EU の Galileo や中国の COMPASS、日本の QZSS、インドの IRNSS がシステムの開発、展開、計画されており、これらを総称して GNSS(Global Navigation Satellite System) と呼んでいる。

1.3 既往の研究

日本国内においては 1996 年頃より船体の運動計測に K-GPS や RTK-GPS を用いた研究成果が発表されるようになり、シンポジウム「GPS/DGPS 利用技術の展望」も同年に開催され、その後、「GPS シンポジウム」、「GPS/GNSS シンポジウム」と名を改めて毎年開催されている。このシンポジウムの実行委員長である安田は浪江他と RTK-GPS の高度の精度に着目し傾斜計への応用 [8] や近藤他とメガフロートの計測 [9] を行い、芋生等と船体に 3 台の RTK-GPS 受信機を搭載して三次元姿勢測定 [10] を実施して、RTK-GPS の精度検証から有用性について述べているが、測位そのものに重点が置かれており、船体の運動については言及されていない。

次に、高橋等は TSL の着棧運動を 2 台の RTK-GPS を用いて計測し、着棧時の位置と姿勢をリアルタイム表示させ [11]、着棧システムとして十分な精度を持っていることを示した。

西部造船会技術研究会性能部会シンポジウム「IMO 操縦性基準の動向とそれへの技術的対応」 [12] では、D-GPS を使用した既製品と、D-GPS と Moving Base RTK-GPS を組み合わせた場合、K-GPS を用いた場合の比較を行い、それぞれのメリット、デメリットについて論じている。

以上のように、高精度 GPS を用いた既往の研究はあるものの、姿勢や航跡を得ることに重点が置かれており、模型実験で求めた操縦運動モデルとの比較であるとか、K-GPS や RTK-GPS の特長を生かした研究成果はほとんど公表されていない。

1.4 本論文の目的

本論文では、複数台の K-GPS もしくは RTK-GPS 装置を船舶に設置して、速力試験、旋回試験、Z 試験、その場旋回、ジョイスティック操船等の船舶操縦性試験を実施し、時々刻々の各 GPS の位置関係から、船舶の姿勢も含めた運動を求め、船の運動特性を求めることを目的とする。

また、小型軽量化した姿勢計測用 GPS 受信機を使用し、基線長が十分に確保できない小型ヨットの実船試験を実施し、風向き毎の姿勢と速度の関係を明らかにして、操縦者の技能アップのための情報を提供する。

さらに、K-GPS の船舶への応用例として、GPS は原理的に水平方向より垂直方向の精度が劣るが、D-GPS とは桁違いに精度の良い K-GPS の高度情報を利用することによって、潮汐影響のある水深の浅い河川において、既存のインフラを利用することなく深淺測量を行えることを示し、特にインフラ整備が遅れている東南アジア等における河川輸送の安全性向上に寄与する。

1.5 本論文の構成

第 1 章は緒言で、研究背景と既往の研究をまとめ、本論文の目的と構成を記している。

第 2 章では、K-GPS の精度の検証と、緯度、経度から平面座標への変換方法、また、船舶に K-GPS を 1 台、2 台、もしくは 3 台搭載して船体運動を求めるための基礎式について述べる。

第 3 章では、船舶に 1 台もしくは 2 台の K-GPS を搭載して海上公式試運転の計測を行った結果について述べる。また、ジョイスティック操船では RTK-GPS によって前進速度、横速度、回頭角速度をリアルタイムにモニターし、調整を行い、RTK-GPS の有用性についても述べる。

第 4 章では、姿勢計測用 GPS 装置を使用し、アジマス型の首振り式電気推進器を搭載した広島大学の練習船「豊潮丸」の、トリムを変化させた操縦性能試験を実施し、「豊潮丸」の特性およびトリム影響を明らかにすると共に、実船計測結果を模型実験から求めた操縦運動モデルの検証に用いた。

第 5 章では、ヨットの中でも最も小型の分類に所属する OP 級ヨットの姿勢と性能の関係を把握するために姿勢計測用 GPS 装置を使用し、GPS アンテナ間の距離を十分に確保できない小型船でも姿勢が計測可能であることを示すと共に、姿勢と帆走性能の関係について述べる。

第 6 章では、K-GPS の船舶への応用例として、インフラの整っていない東南アジアの潮汐影響のある河川において、安全航行に欠かせない基本水準面からの水深を推定するために、K-GPS の高度の精度が高いことを利用した深淺測量の方法について報告する。

第 7 章では、本論文のまとめと今後の課題について述べる。

第2章 GPSの位置精度と姿勢計測

2.1 K-GPSの精度検証

K-GPSの計測精度を確認するために、Trimble社製の測量用GPS受信機4000SSEとCompact L1/L2アンテナを使用し、1996年10月から翌年1月にかけて、広島大学工学部A2棟の屋上において定点観測を行った。基準局から約7m離れた場所に移動局を固定して、24時間連続計測を9回実施し、K-GPS方式での計測可能時間、GPS衛星配置とアンテナ間の見通し距離の関係など基本的な性能把握を行った。その結果、1日に2%程度測位不可能な時間帯があるものの、その時間帯を除けばTable 2.1に示すように標準偏差6mm以下で測位が可能であることが分かった。なお、計測日ごとにアンテナを設置しなおしているため、アンテナ間の見通し距離は多少違っている。ただし、これは1996年の結果であって、現在では、使用できる衛星数が減少して精度が低下する時間帯はあっても、海上や屋上などの空が開けた場所で測位不可能になることはない。また、本結果はSAが解除する以前のデータであるが、K-GPSにSAの影響はないので、現在も同程度の精度である。なお、GPS衛星から送られる航法メッセージには放送暦と呼ばれる衛星の軌道暦が含まれており、それから、ある日時、場所における衛星数や衛星配置がおおよそ求められるので、計測に適している時間帯は予測可能である。

Table 2.1: Distance between base and fixed rover GPS antennas (24hours)

Date	Average (m)	Maximum (m)	Minimum (m)	Std. Dev. (m)
1996/10/24	7.042	7.073	7.018	0.004
1996/10/30	7.056	7.103	7.021	0.004
1996/11/04	7.037	7.060	6.993	0.005
1996/11/08	7.032	7.060	6.987	0.005
1996/11/09	7.032	7.053	7.006	0.005
1997/01/07	7.037	7.067	7.011	0.006
1997/01/09	7.036	7.050	7.016	0.004
1997/01/16	7.030	7.049	7.002	0.004
1997/01/17	7.037	7.059	7.007	0.004

2.2 姿勢計測用 GPS の精度検証

第4章の「豊潮丸」と第5章の「OP 級ヨット」の計測には, 運動計測に GPS アンテナを3個使用して1台の受信機で姿勢が得られ, 本体のメモリーにデータを記録できる Septentrio 社製の PolaRx2@を使用した。この GPS は Fig. 2.1 に示すようにアンテナを設置し, 二周波の Main アンテナで位置を求め, その前方に設置する一周波の Aux1 アンテナとの関係から針路とピッチ角, 右横に設置する一周波の Aux2 アンテナとの関係からロール角を求めるようになっている。なお, Aux2 アンテナは真横に設置した方が良いが, そうできなくても解の収束に時間がかかるだけで姿勢は得られる。

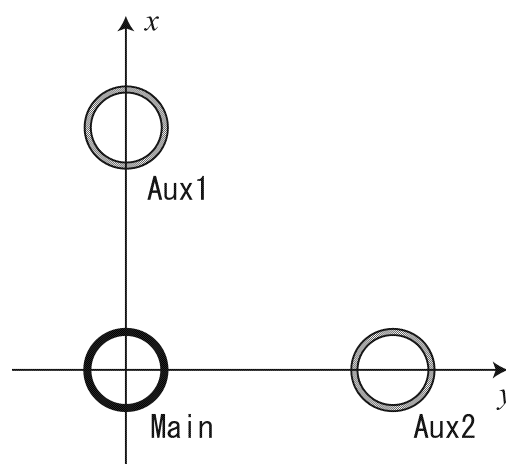


Fig. 2.1: GPS antennas alocation

2009年10月28日に, 精度確認のために, この GPS を 4000SSE と同様, 広島大学工学部 A2 棟の屋上に設置し, 定点観測を行った。Main アンテナを屋上の北西端に設置し, Main アンテナの東側約 5.5m に Aux1, 南側約 5.5m に Aux2 アンテナを配置した。基準局には Trimble 社製の MS-750 を使用し, Micro Centered L1/L2 with GP アンテナを Main の南側約 7m に設置した。基準局の位置は国土地理院の電子基準点データ提供サービス [17] から「熊野 940078」, 「東広島 A 061151」, 「安芸津 960768」の電子基準点データを使用して求めた。

GPS の二周波の単独測位の位置精度を Table 2.2, 海上保安庁の中波ビーコンを用いた D-GPS の位置精度を Table 2.3, K-GPS の位置精度をそれぞれのアンテナごとに Main は Table 2.4, Aux1 は Table 2.5, Aux2 は Table 2.6 に示す。単独測位と D-GPS をそれぞれ約 1 時間実施し, その間, 連続して K-GPS 用の RAW データを記録し, 後処理の解析には Trimble 社製の Trimble Total Control を使用した。これより, 二周波の単独測位や D-GPS では東西, 南北の標準偏差が数 10cm で, 一般的な D-GPS の数 m より精度が良いことがわかる。一方, K-GPS の標準偏差は 3mm で, D-GPS より誤差が 1/100 程度になっていることがわかる。また, 二周波の Main アンテナだけでなく, 一周波の Aux1, Aux2 アンテナも同等の精度を持っていることが確認できたので, GPS の姿勢データを使用しなくても, 3 台の GPS を使用する従来通りの方法で, それぞれのアンテナ位置を後処理で求めて, 姿勢を得ることができることがわかった。そこで, アンテナ間距離を求めたところ, Table 2.7 に示すように個々の GPS アンテナの位置精度より良いことが分かった。これは, 各アンテナの位置変動に同相成分があるためと考えられる。

次に, 姿勢データの誤差を Table 2.8, K-GPS データから求めた後処理による姿

Table 2.2: GPS position accuracy

	N-S	E-W	Height
Std. Dev.(m)	0.454	0.219	0.895
Min.(m)	-1.242	-0.619	-2.197
Max.(m)	1.151	1.030	1.957

Table 2.3: D-GPS position accuracy

	N-S	E-W	Height
Std. Dev.(m)	0.314	0.181	0.567
Min.(m)	-1.370	-0.686	-2.152
Max.(m)	1.058	0.858	1.494

Table 2.4: K-GPS position accuracy on main antenna

	N-S	E-W	Height
Std. Dev.(m)	0.003	0.003	0.008
Min.(m)	-0.015	-0.007	-0.024
Max.(m)	0.005	0.010	0.028

Table 2.5: K-GPS position accuracy on aux1 antenna

	N-S	E-W	Height
Std. Dev.(m)	0.003	0.003	0.007
Min.(m)	-0.017	-0.006	-0.032
Max.(m)	0.007	0.010	0.031

勢の誤差を Table 2.9 に示す。船舶に GPS アンテナを設置する場合、左右対称に設置することは比較的簡単であるが、針路に合わせて縦方向に設置することは困難な場合が多い。そこで、第 3 章の 3.3 に示すように、後処理の K-GPS では左右のアンテナを基準にして運動を求めている。しかし、今回の姿勢計測用 GPS が出力する方位角は前後のアンテナを基準にしているため、角度の絶対値が異なっているが、標準偏差、誤差の最大値共に後処理の方が良いことがわかる。ただし、今回の計測は基準点と計測点との距離（基線長）が短い、K-GPS の水平精度は 1cm+基線長の 1ppm、垂直精度は 2cm+基線長の 2ppm と言われており、基線長が長くなった場合、K-GPS ではすべての基線長が長くなるが、GPS の姿勢データの方は 3 台の GPS アンテナとの相対位置関係で決まるため、基線長は短いまま変わらない。そのため、精度が基線長に依存する K-GPS の方が精度は悪くなる可能性がある。ただし、位置計測用の GPS アンテナ Main は二周波であるので電離層補正によって数 10 km 以上の長基線が観測可能である [18] が、姿勢用の補助アンテナ Aux1, 2 は一周波であるため、長基線では K-GPS が使用できない。

2.3 座標変換

K-GPS で得られるデータは WGS-84 楕円体に準拠した時々刻々の緯度、経度と高さである。これを平面座標に変換し、移動した距離や針路などを計算しなければならない。地図では、UTM 図法 (Universal Transverse Mercator's projection) が用いられており、第 6 章の水深計測では、赤道直下で歪みが少ないことと、地図と重畳させる可能性があったことから、UTM 図法を使用した。しかしながら、高緯度では、基準となる中央子午線から外れると、歪みが生じて、北が上を向かなくなり、針路とずれるため、あたかも斜航しているかのような不都合が生じる。そこで、操縦性能試験の解析には、文献 [19] を参考にして、局所的な直交座標系を用いた。

Table 2.6: K-GPS position accuracy on aux2 antenna

	N-S	E-W	Height
Std. Dev.(m)	0.004	0.002	0.006
Min.(m)	-0.017	-0.005	-0.032
Max.(m)	0.007	0.011	0.029

Table 2.7: Accuracy of distance from main antenna

Antenna	Aux1	Aux2
Average(m)	5.518	5.460
Std. dev.(m)	0.002	0.003
Min.(m)	-0.007	-0.007
Max.(m)	0.010	0.008

Table 2.8: GPS attitude accuracy

(deg)	Heading	Pitch	Roll
Average	90.824	-0.370	-0.036
Std. dev.	0.043	0.075	0.093
Min.	-0.289	-0.291	-0.387
Max.	0.088	0.369	0.216

Table 2.9: K-GPS attitude accuracy

(deg)	Heading	Pitch	Roll
Average	90.143	0.300	-0.112
Std. dev.	0.020	0.057	0.071
Min.	-0.061	-0.191	-0.234
Max.	0.066	0.217	0.269

2.3.1 楕円体座標から直交座標への変換

経度 λ , 緯度 ϕ , 楕円体高 h で表されるときに 3次元直交座標 (X, Y, Z) は, 地球の回転軸方向を Z 軸, グリニッジ子午線面と赤道面との交線を X 軸, これらの 2軸と右手系をなすように Y 軸をとると,

$$\begin{aligned}
 X &= (N + h) \cos \phi \cos \lambda \\
 Y &= (N + h) \cos \phi \sin \lambda \\
 Z &= (N(1 - e^2) + h) \sin \phi
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

で表される。ただし, 準拋楕円体について, a を赤道半径, b を極半径, f を扁平率, N を卯酉線曲率半径, e を離心率として,

$$\begin{aligned}
 N &= a / \sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi} \\
 e^2 &= f(2 - f) \\
 f &= (a - b) / a
 \end{aligned}$$

で与えられる。なお, GPS に使用される WGS-84 測地系では,

$$\begin{aligned}
 a &= 6378137.0 \\
 f &= 1/298.257223563
 \end{aligned}$$

と定義されている。

2.3.2 距離と角度

次に、2点 $P_1(x_1, y_1, z_1)$, $P_2(x_2, y_2, z_2)$ 間の距離 s は、 $s = \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2}$ で表される。ただし、 $dx = x_2 - x_1$, $dy = y_2 - y_1$, $dz = z_2 - z_1$ とする。また、 $P_1(\lambda_1, \phi_1, h_1)$ から見た、 $P_2(\lambda_2, \phi_2, h_2)$ の方位角 az , 高度角 al は

$$\begin{aligned} u &= -\sin \phi_1 \cos \lambda_1 dx - \sin \phi_1 \sin \lambda_1 dy + \cos \phi_1 dz \\ v &= -\sin \lambda_1 dx + \cos \lambda_1 dy \\ az &= \arctan(v/u) \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} h &= \cos \phi_1 \cos \lambda_1 dx + \cos \phi_1 \sin \lambda_1 dy + \sin \phi_1 dz \\ al &= \arcsin(h/s) \end{aligned} \quad (2.3)$$

で表される。したがって、 P_1 を原点に P_2 を平面直角座標に変換すると、

$$x = s \cos az \quad (2.4)$$

$$y = s \sin az \quad (2.5)$$

となる。

2.4 K-GPS 1台と針路による運動計測

GPSは時々刻々の位置と速度と時刻 (PVT) を得る装置であるので、運動の向きを知ることはできるが、アンテナの向き (針路) を得ることはできない。したがって、GPS1台の場合、船体重心位置の運動を求めるには、別途、針路を記録する必要がある。第3章の「翔陽丸」の計測1日目の旋回試験はこの方法で航跡を求めた。

船体固定座標系における2点のアンテナ位置 $a(x, y, h)$ が空間固定座標系で、 $A(X, Y, H)$ にあり、針路が ψ であるとする、船の重心位置 (X_G, Y_G) は次式で表される。

$$\begin{aligned} X_G &= -x \sin \psi - y \cos \psi + X \\ Y_G &= -x \cos \psi + y \sin \psi + Y \end{aligned} \quad (2.6)$$

2.5 K-GPS 2台による運動計測

通常、操縦性能試験ではピッチング運動が問題となるような海象条件では実施しないので、針路とロール運動を計測するために、GPSアンテナを船体横方向に配置すればよい。第3章の「翔陽丸」の計測2日目と第6章のパトロールボートでは船体の両舷に左右対称となるようGPSアンテナを設置した。

座標系を Fig. 2.2 に示す。船体固定座標系における2点のアンテナ位置 $a_L(x_L, y_L, h_L)$, $a_R(x_R, y_R, h_R)$ が空間固定座標系で、 $A_L(X_L, Y_L, H_L)$, $A_R(X_R, Y_R, H_R)$ にあるとす

ると、船の重心位置 (X_G, Y_G) , 針路 ψ , ヒール角 ϕ , 速力 U , 前後速度 u , 横速度 v , 回頭角速度 r , 斜航角 β は, 次式を用いて求めることができる。なお, 左右の GPS アンテナは船首尾線に対し左右対称に設置しているので, $x_R = x_L = \overline{MA}$, $y_R = -y_L$, $h_R = h_L = \overline{KA} - \overline{KG}$ である。

$$\psi = -\frac{\pi}{2} + \tan^{-1} \left(\frac{Y_R - Y_L}{X_R - X_L} \right) \quad (2.7)$$

$$\phi = -\tan^{-1} \left(\frac{H_R - H_L}{\sqrt{(X_R - X_L)^2 + (Y_R - Y_L)^2}} \right) \quad (2.8)$$

$$X_G = \frac{X_R + X_L}{2} + (\overline{MA} - x_G) \cos \psi + (\overline{KA} - \overline{KG}) \sin \psi \sin \phi \quad (2.9)$$

$$Y_G = \frac{Y_R + Y_L}{2} + (\overline{MA} - x_G) \sin \psi - (\overline{KA} - \overline{KG}) \sin \psi \cos \phi \quad (2.10)$$

ただし, 船底からアンテナまでの高さを \overline{KA} , 重心高さを \overline{KG} , 船体中央からアンテナまでの船体縦方向の距離を \overline{MA} としている。

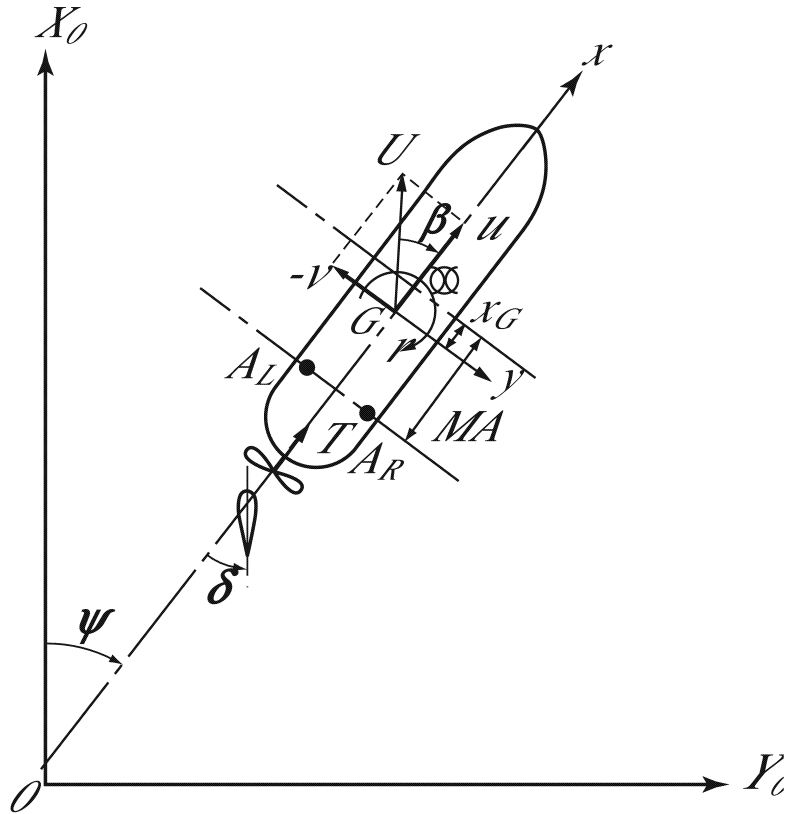


Fig. 2.2: Coordinate Systems

2.6 K-GPS 3台による姿勢計測

船舶の試運転等でGPSを設置する場合、MainとAux1を左右対称に設置することはできても、Aux2を直角三角形や二等辺三角形を構成できるような場所に設置することは困難であることが多い。そこで、Aux2の設置場所に依存しない姿勢ベクトルの計算方法を考案した。

Fig. 2.3に示すように、重心を G 、3点のGPS位置を左舷後方のMainを O 、右舷後方のAux1を A 、船尾のAux2を B とすると、姿勢ベクトル \overline{GP} は

$$\begin{aligned}\overline{OC} &= \overline{OA} \times \overline{OB} \\ \overline{OD} &= \overline{OC} \times \overline{OA} \quad (2.11) \\ \overline{GP} &= \overline{OD} + \overline{OG}\end{aligned}$$

で表される。このように、3点のGPSの緯度、経度、高度より外積を使用して姿勢ベクトルを求め、重心位置と針路 ψ 、ヒール角 ϕ 、トリム角 θ を得た。

なお、今回の実験ではAux2アンテナの高さが異なるので、それによって生じるトリム角 θ_0 をあらかじめ計算しておき、姿勢を補正した。 $\triangle OAB$ が直角三角形や二等辺三角形であれば、姿勢を簡単に求めることができる[10]が、本手法を使用すると、このような制約がなくても左右のアンテナ位置を基準に簡単に姿勢を得ることができる。

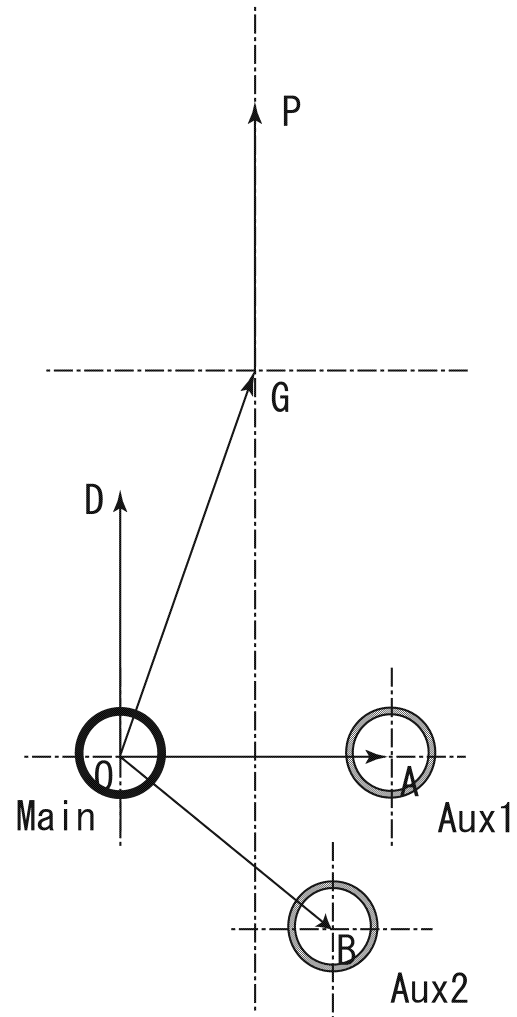


Fig. 2.3: Calculate attitude by using exterior product

2.7 運動計算

上記の方法によって得られた時々刻々の位置 (X_G, Y_G) 差分から、式(2.14) - (2.18)により、の速度ベクトルを求め、速力 U と斜航角 β を得る。計測の時間間隔を dt とすると、

$$dx = X_{G_i} - X_{G_{i-1}} \quad (2.12)$$

$$dy = Y_{G_i} - Y_{G_{i-1}} \quad (2.13)$$

$$U = \frac{\sqrt{dx^2 + dy^2}}{dt} \quad (2.14)$$

$$r = \frac{\psi_i - \psi_{i-1}}{dt} \quad (2.15)$$

$$u = \frac{dx \cos \psi + dy \sin \psi}{dt} \quad (2.16)$$

$$v = \frac{-dx \sin \psi + dy \cos \psi}{dt} \quad (2.17)$$

$$\beta = \psi - \tan^{-1} \left(\frac{-v}{u} \right) \quad (2.18)$$

第3章 操縦性能試験へのK-GPSの利用について

3.1 はじめに

新造船に対して行われる海上公式試運転(以下,海上公試という)では,速力試験や旋回試験,前後進試験,Z試験等を実施している。しかし,海上では位置を精度良く求めることは困難であるので,これらの計測は,マイルポスト,ブイ,投板,コンパス,ストップウォッチなどを使用して行い[13],多くの人手と時間を必要とするのみならず,精度の向上も課題となっていた。また,運動は加速度計やジャイロを組み合わせで計測しているが,低速で運動する船舶では加速度や角速度の値が小さいため感度が高く,計測時間が長くなるためドリフトや積分誤差が少ない,非常に高価な計測器が必要となっている。

昨今では,人工衛星を用いた測位システムであるGPSの自動車や船舶への搭載が進んでいる。GPSは時々刻々の地球に対する絶対位置が得られるため,積分誤差が生じないという大きな利点を持っている。特に,船舶においては,日本の海上保安庁をはじめ世界各国がGPSの補正情報を送信する中波ビーコン局を整備しているため,D-GPSが普及している。また,海上公試においてもD-GPSによる計測結果を使用することが認められたため,D-GPSを使用した海上公試の試験結果を解析し報告書を作成する装置が市販されている。しかし,D-GPSの位置精度は1-5m程度であり,平均的な速力や旋回径を求めるような試験には問題ないものの,詳しい操縦性能把握に必要な姿勢変化や加速度成分を得るにはD-GPSでは精度が不足している。

本研究では測量分野で実用化され,cmオーダーの位置精度が得られると言われている,GPSの搬送波の位相を用いて位置を決定する干渉測位型のGPS[14]を,移動体に適用できるようにしたK-GPSの測位精度に注目し,その精度を検定すると共に,海上公試の諸試験に適用し,試運転時の性能把握を飛躍的に向上させる見通しを得たので報告する。また,K-GPSと同程度の測位精度を実時間で得られるRTK-GPSによる計測も同時に行い,その有効性についても検討した。

3.2 船位計測へのK-GPSの適用

第2章で述べたように、静止時には非常に高精度測位が可能であることが分かったので、海上保安大学の練習船「こじま」(総トン数 2,950ton)の船首と船尾にK-GPSアンテナを設置し、1996年9月28日に呉の海上保安大学校から広島港へ移動する際の船位計測を行った。「こじま」の主要目をTable 3.1に示す。表中、 L_{pp} は垂線間長、 L_{oa} は全長、 B は幅、 d は平均喫水を表す。また、当日の呉港の潮位推定値をTable 3.2に示す。干潮は午前4時頃で0.29m、満潮は午前10時過ぎで3.91mであった。広島港は呉港より満干潮の時刻が2分早く、振幅が数cm小さいので、広島港と呉港の潮汐は同じと見なした。なお、海上保安大学校は呉港より約2km広島港寄りにあるので、潮汐は等しい。「こじま」の計測は8:07から8:33であった。この時の潮位はTable 3.2より8:00から9:00の1時間で0.61m上昇していることがわかる。

Table 3.1: Principal dimensions of "Kojima"

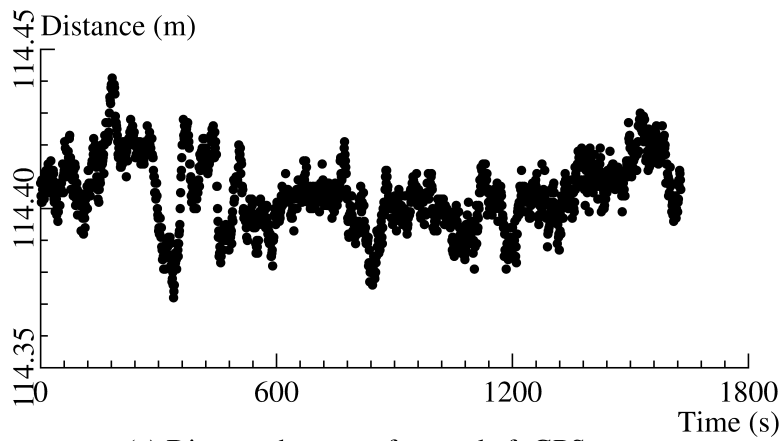
L_{pp} (m)	107.0
L_{oa} (m)	115.0
B (m)	14.0
d (m)	7.3

Table 3.2: Tide prediction at Kure port on 28th September 1996

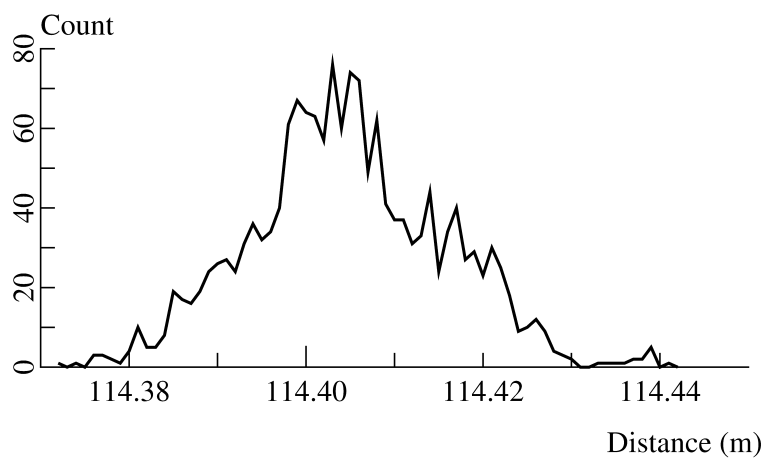
Hour	0	1	2	3	4	5	6	7
(m)	2.76	2.03	1.37	0.69	0.29	0.58	1.41	2.23
Hour	8	9	10	11	12	13	14	15
(m)	2.88	3.49	3.91	3.75	3.07	2.33	1.69	1.03
Hour	16	17	18	19	20	21	22	23
(m)	0.49	0.55	1.24	2.07	2.72	3.28	3.75	3.76

計測精度確認のため、船首と船尾に設置した2つのGPSアンテナの位置から移動中のアンテナ間の見通し距離を求めたところ、静止時と同様に誤差はほぼ $\pm 0.02\text{m}$ 以内に収まり、標準偏差は0.011mという結果が得られた。Fig. 3.1(a)にアンテナ間隔の時系列、(b)に距離の分布を示す。

Fig. 3.2に(a)航走時の速力、(b)に船首と船尾のGPSアンテナ高さの時系列を示す。これより、船首と船尾のアンテナ高さは複雑に変動しながら徐々に高くなっていることがわかる。まず、約13.5ktで等速で航行している450秒から1,190秒の区間に注目すると、その間は両方のアンテナ高さが同じように変動しながら徐々に高くなっており、一定のトリムを保って高くなっていることから、潮汐の影響を受けていることがわかる。次に、速力が等しい530秒と1,490秒の高度に注目すると、



(a) Distance between fore and aft GPS antenna



(b) Histogram of distance

Fig. 3.1: Accuracy of K-GPS on manouvering (Kojima)

21分間で高度が約0.275m上昇している。1時間あたりに直すと0.79mとなり、潮位の変化の0.61mと比較して高度の変化の方が29%大きくなっていた。また、速力に変化している区間では、前後のアンテナ高さが独立して変化していることが見て取れる。

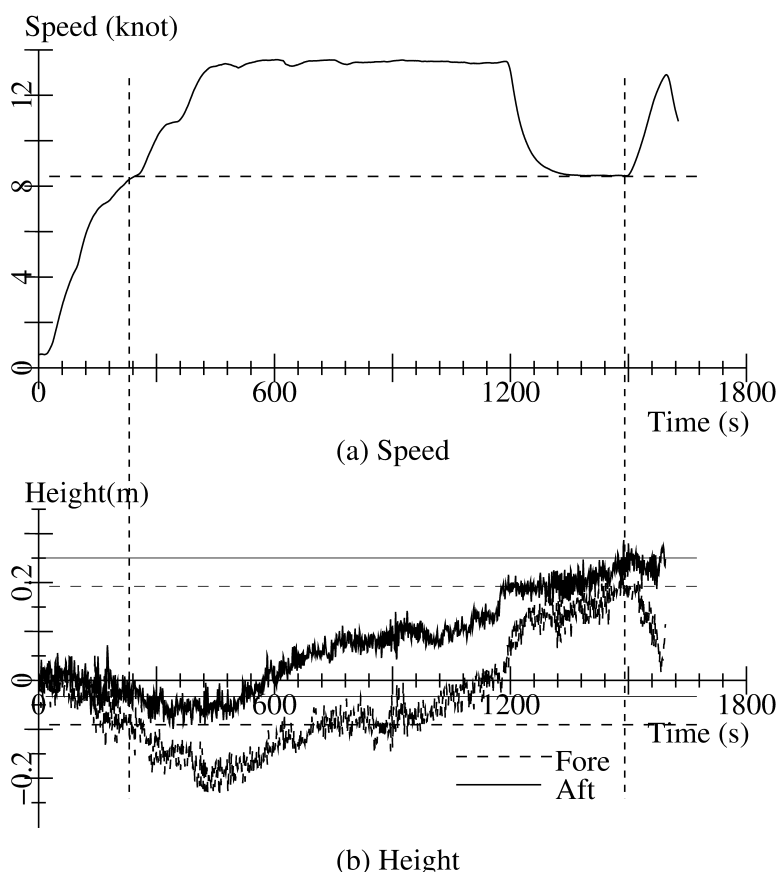


Fig. 3.2: Time histories of speed and height (Kojima)

計測時間が30分ならずと短時間であるので、潮位が直線的に増加すると仮定して、潮位の変化分をアンテナ高さから差し引き、船首と船尾の沈下量を求めた。なお、沈下量は上向きを正としている。Fig. 3.3(a)に沈下量を垂線間長で除した時系列、(b)に沈下量と速力の無次元値 F_n の関係を示す。Fig. 3.3(a)より、潮位の影響が取り除けているものの、速力一定でも上下に変動していることがわかる。

Fig. 3.3(b)より、実船計測では値が大きく変動しているものの、13.5kt相当の $F_n = 0.215$ で、平均するとF.P.で $-0.24\%L$ 、A.P.で $-0.11\%L$ であった。日本造船技術センターが実施した5.25m模型を使用した「こじま」の抵抗試験では、沈下量がF.P.で $-0.17\%L$ 、A.P.で $-0.04\%L$ となっており、模型試験より実船の方が沈下量は大きいものの、トリムは $-0.13\%L$ で等しい事がわかる。ただし、K-GPSの高度の精度は5cm程度であるため、アンテナ間隔が100mでも $0.05\%L$ 程度の誤差が生じることから、実船のトリムを高精度で求めるにはK-GPSの高度の精度は不足してい

ることがわかる。また、沈下量については、さらに潮汐影響が加わるので、海面高度を計測する必要があり、実船の沈下量を精度良く求めるのは難しい。とはいえ、実海域での喫水計測は波の影響で変動するため、目視で喫水を高精度で求めるのは困難であるし、航走中は外部から観測できたとしても航走波によって水面形状が変形しているため計測できないので、K-GPSによるトリムや沈下量の計測は非常に有効な手段であると言える。

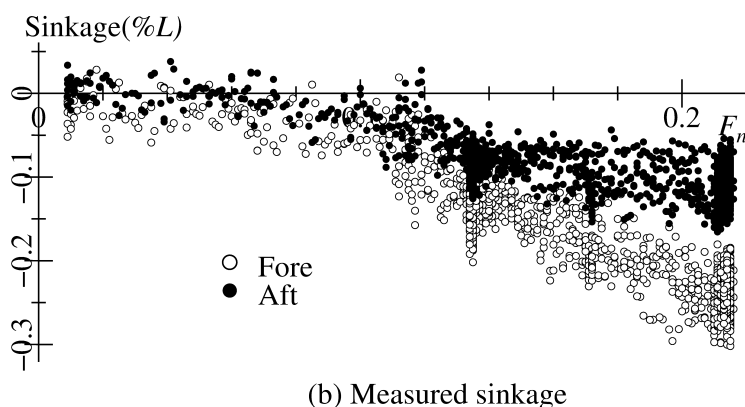
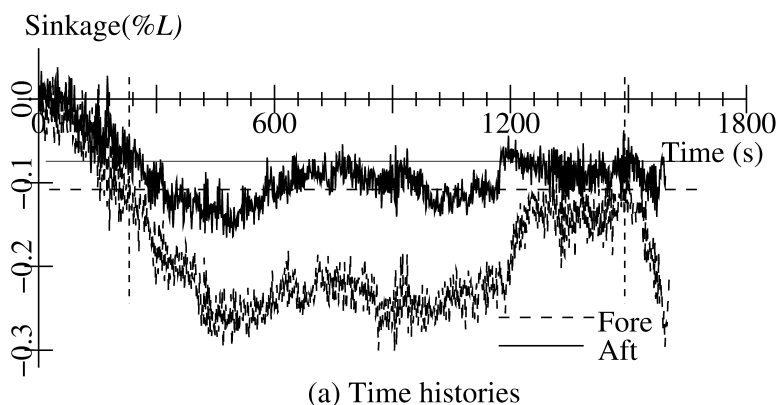


Fig. 3.3: Fore and aft sinkages (Kojima)

以上のことより、海上においての高度計測は、潮汐影響、速力変化に伴うトリムや沈下量の変動を考慮する必要があり、計測領域によっては、ジオイドの影響も現れてくるため、目的に応じて、速力を一定に保つ、潮位を実測するといった配慮が必要となることがわかる。なお、ジオイドの影響は1度通っただけで判断することは難しいが、毎回、その場所で同じような変動が現れるようであれば、ジオイドの影響であると考えられる。

3.3 試運転への K-GPS の利用

「こじま」に K-GPS を搭載し、航海中に計測を行ったところ、移動中においても、静止時とほぼ同様の精度が得られることが確認できたので、K-GPS を使用して、海上公試の計測を行った。計測した船舶は統合操船ブリッジを装備した内航近代化船「翔陽丸」である。翔陽丸の主要目を Table 3.3 に示す。満載排水量は 2496.4ton である。海上公試はマイルポスト (距離 2,040.5m 方位 314°53') のある広島県安芸郡沖美町 (現江田島市沖美町) 大黒神島沖合で行った。基準局の位置は Table 3.4 の通りである。GPS は地球を地球重心に原点をおく回転楕円体で近似した WGS-84 測地系を用いており、必要に応じて他の測地系に変換する。GPS は通常、緯度、経度と楕円体高を時々刻々出力するので、これを平面座標に変換し、さらに、船体固定座標での前進速度や横速度といった運動を求めなければならない。今回の解析では座標原点を入鹿鼻の基準局にとり、「2.3 座標変換」に示す方法を用いて、原点からの方位角と距離を求め、更に極座標から直交座標に変換した。

Table 3.3: Principal dimensions of "Shoyo-Maru"

L_{pp}	70.00m
B	12.00m
d	7.12m

Table 3.4: K-GPS base location

	Irukabana	Hiroshima Univ.
Latitude	N34°13'37.36678"	N34°24'00.39581"
Longitude	E132°23'17.66555"	E132°42'49.36787"
Altitude	164.646m	286.325m

1997年1月23日に速力試験、旋回試験、前後進試験、同29日にZ試験、バウスタスター試験、ジョイスティック試験を行った。23日は船上にK-GPS受信機を1台設置し、アンテナは船橋右舷に取り付けた。また、基準局は約50km離れた東広島市の広島大学工学部に設置した。

29日は針路やロール角もGPSで計測するためにK-GPS受信機を2台設置し、船橋両舷にアンテナを取り付けた。これは、今回の実験海域は平穏な海域であり、ピッチングを考慮する必要はなかったので針路とロール角を求めるためである。アンテナ高さはいずれも船橋甲板から2.20mで、重心からの高さは10.49mであった。そして、基準局は沖美町の入鹿鼻と広島大学の2カ所に設置し、入鹿鼻の基準局からは400MHz帯の特定小電力送信機を使用してRTK-GPS用の補正データを送って、船体運動をモニターするために、RTK-GPSでも計測を行った。特定小電力の微弱電波でも、受信側のアンテナを高利得タイプにすることにより、海上の場合7-8km

の通信が可能で, 条件によっては10km以上届くこともある。また, 舵角, 主機回転数, プロペラピッチ, サイドスラスト回転数等の操船情報もブリッジコンソールから2秒間隔で取得した。なお, GPSアンテナ間距離は約10.6mであったので, 相対誤差が2cmとして方位の確度は約 0.1° となり高性能ジャイロとして機能することが分かる。垂直方向は水平より2倍程度精度が悪いため, ロール角の確度は 0.2° 程度となる。

29日の解析には左右のGPSによるRTK-GPSによるデータを使用した。座標系をFig. 3.4に示す。

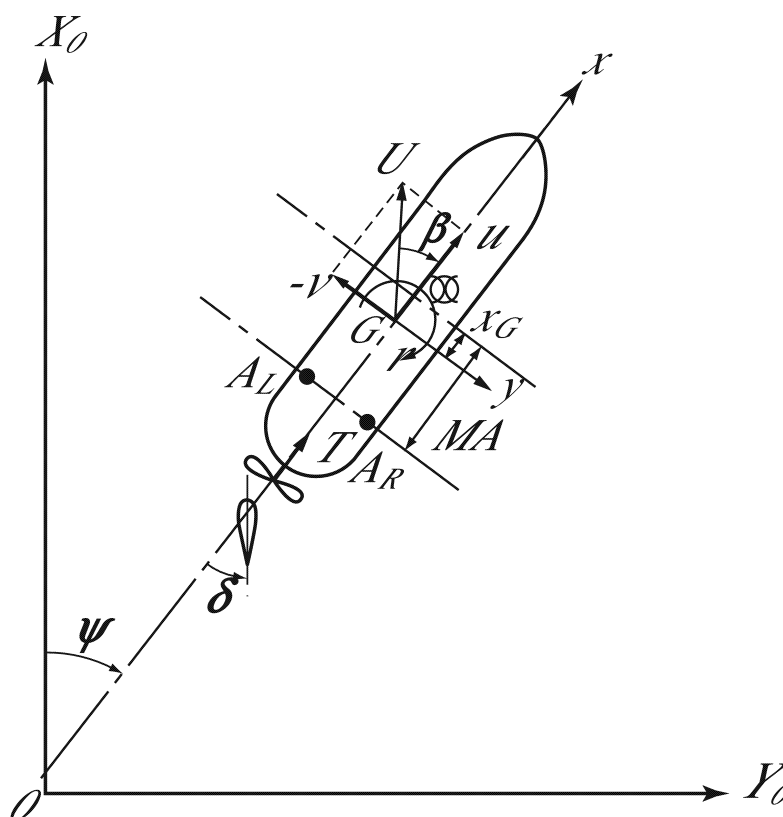
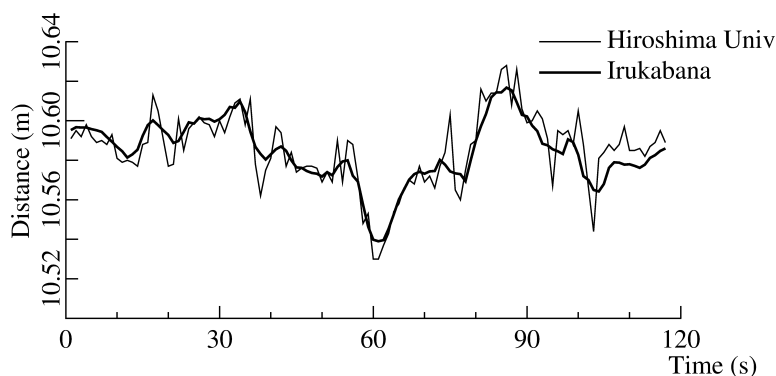


Fig. 3.4: Coordinate Systems

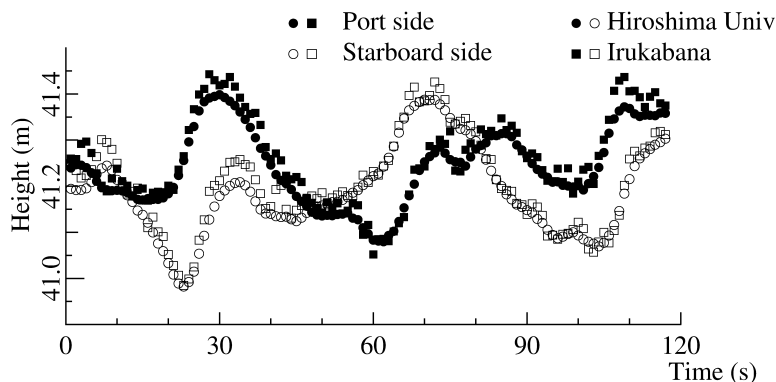
3.3.1 アンテナ間距離

Fig. 3.5(a)に今回行ったZ試験時のアンテナ間距離 $|A_R - A_L|$, Fig. 3.5(b)に高度 H_R, H_L の変動を表す。入鹿鼻を基準としたときの距離の平均は10.585m, 標準偏差は0.018mで, 広島大学を基準としたときは平均が10.584m, 標準偏差が0.019mであった。また, Z試験の操舵によって生じるロールによって両舷に設置したGPSアンテナの高度が変化していることが分かる。なお, 入鹿鼻を基準とした方が約4cm高くなっているのは計測時か解析時に基準局のアンテナ高さを間違えたため

と思われる。しかしながら、運動を求める場合、測量と異なり絶対位置が必要ではないので相対的なずれは問題とはならない。これらの図から分かるように基準局の違いによる測位誤差は少なく、K-GPS では基準局との距離による影響は小さいと言える。また、Fig. 3.5(a) で 60 秒と 85 秒付近では 5cm 程度変動しているが、この時、右舷側に設置した GPS 受信機が捕捉する衛星数は 7 のままであったにも拘わらず左舷側は 7 から 6 に減少していたことから、船体が衛星を遮って精度が悪化したと思われる。その他のところでは、ほぼ $\pm 2\text{cm}$ 以内に収まっており、高精度の計測が期待できることがわかる。



(a) Distance of two antennas



(b) GPS Antenna Height

Fig. 3.5: Accuracy of K-GPS on zig-zag test (Shoyo-Maru)

「こじま」の時と比較して短時間にも関わらず測位精度が劣った原因は主に、アンテナの取り付け方法、取り付け位置によると思われる。「こじま」は船尾にヘリポートを装備した巡視船型で船首、船尾に障害物がなく、K-GPS のアンテナは測量用の三脚に取り付け動かないように固定した。しかし、「翔陽丸」では船橋両側の手摺りにポールを使って取り付けた。揺れ防止のためステーは張ったものの十分

ではなく船体の振動や風によって揺れが生じていた。また、レーダーの影響を避けるため、アンテナ高さを上げることができず、船橋甲板から2.2mとしたが、マルチパスや電波の遮断等、衛星電波の取得に障害物の影響がでて精度が低下したと考えられる。

3.3.2 速力試験

速力試験は、主機負荷を2/4, 3/4, 85%, 4/4と変化させ、Fig. 3.6に示すように、針路を135°と315°に取り、マイルポスト間(2,040m)を通過する時間を計測する従来法とK-GPSによる結果を求めた。速力試験はほぼ直進しているため、測定結果にGPSアンテナ位置による影響は無視できる。従来方法では、マイルポスト間の通過時間を0.1秒単位で計測しているが、GPSは1秒ごとの位置を出力するため、従来方法で計測した入標時刻と出標時刻を秒単位で四捨五入し、その時のK-GPSにより得られた位置の差と通過時間から速力を求めた。従来方法とK-GPSで得られた速力をTable 3.5に示す。K-GPSにより求めた速力の方が従来法と比較して0.1%程度遅くなった。これは、距離2m、時間0.3秒程度の誤差であり、マイルポストの重なりを肉眼で確認する従来方法でこの程度の誤差が生じるのは致し方ないと言える。

Table 3.5: Result of speed trial

Engine Load	No.	Begine (H:M:S)	Time (M:S)	Length (m)	Speed (kt)	Std. Dev.	Mile Post (kt)	Error (%)
2/4	1	10:27:39	5'28"	2040.19	12.091	0.046	12.098	-0.06
2/4	2	10:43:20	5'25"	2041.76	12.212	0.056	12.232	-0.16
Average					12.152		12.165	-0.10
3/4	1	11:00:03	4'57"	2044.30	13.381	0.064	13.369	0.09
3/4	2	11:14:56	4'57"	2037.68	13.336	0.071	13.365	-0.22
Average					13.358		13.367	-0.07
85/100	1	11:31:10	4'50"	2043.34	13.698	0.080	13.697	0.01
85/100	2	11:48:03	4'52"	2038.05	13.568	0.088	13.594	-0.19
Average					13.633		13.646	-0.10
4/4	1	12:03:28	4'40"	2041.37	14.173	0.062	14.186	-0.09
4/4	2	12:19:38	4'44"	2035.85	13.935	0.064	13.962	-0.19
Average					14.054		14.074	-0.14

速力試験では入標から出標までの時間と直線距離で速力を求めるが、Fig. 3.7に示すようにGPSを使用すると速度変動や設定方位から見たGPSアンテナの移動方向のデータが得られる。この変動は、わずかな潮流への速力の追従とか保針中の蛇行の影響と考えられるが、23日には舵角や主機回転数などのデータを取得しておらず、しかも、GPS装置を1台しか積んでいなかったため、この原因が何であるかは分からない。

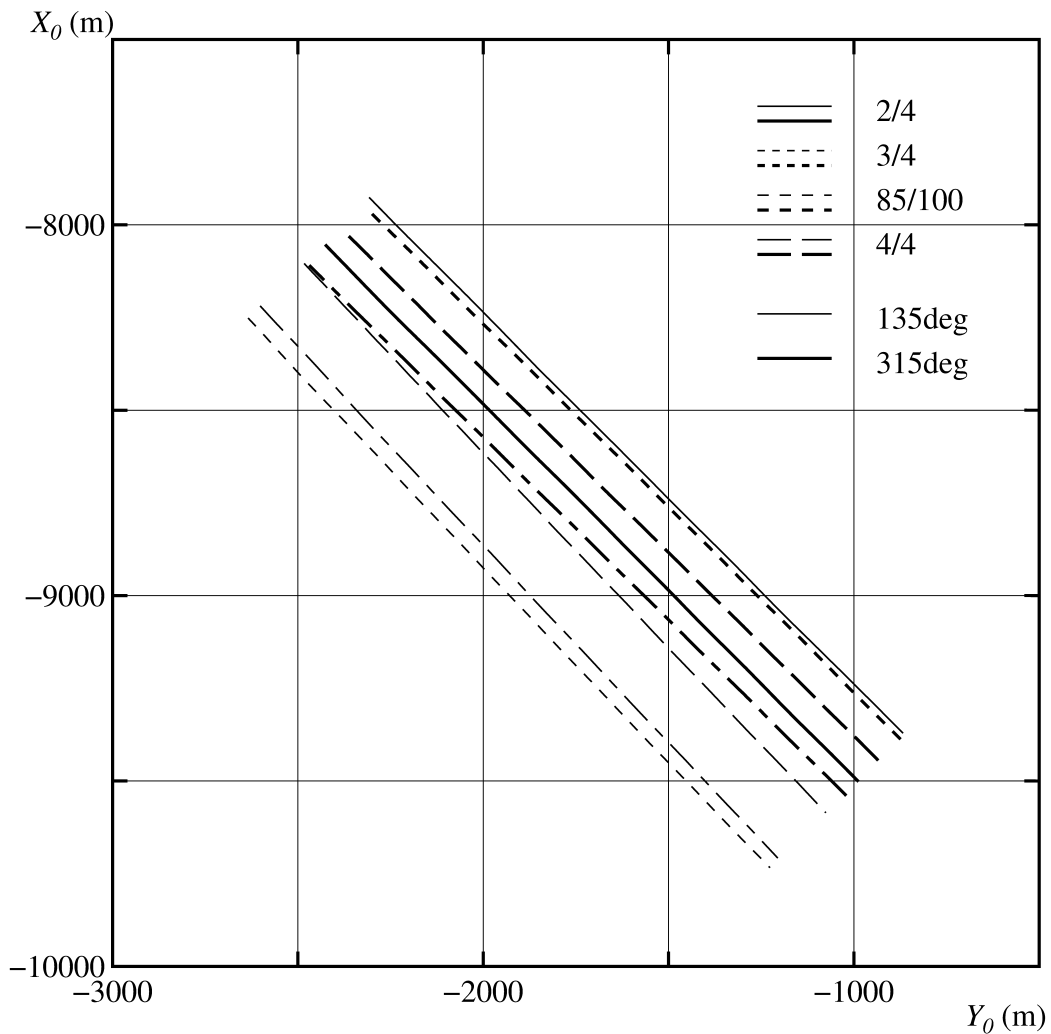
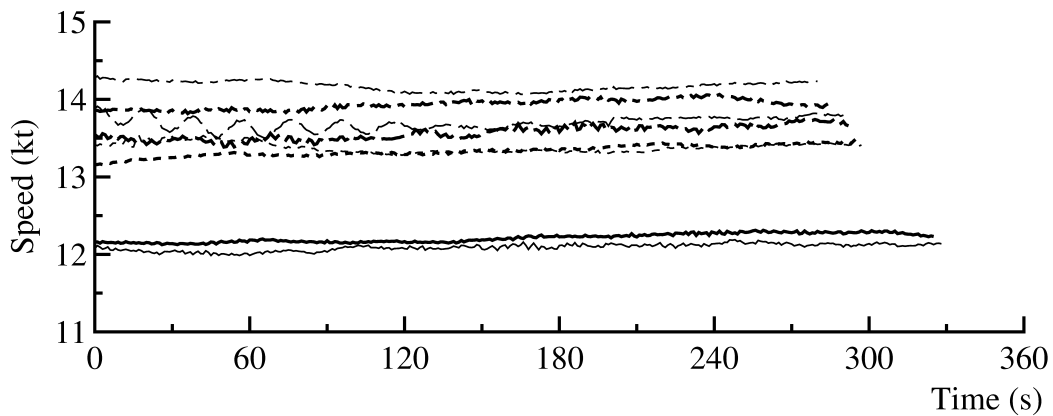


Fig. 3.6: Trajectories of speed trial

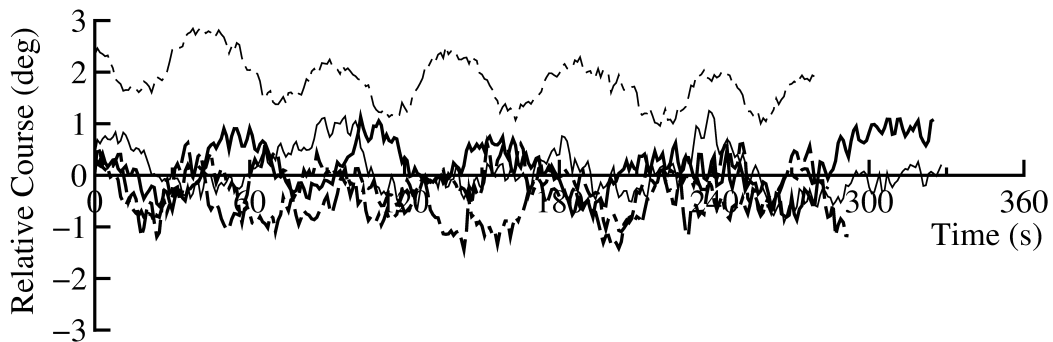
速力試験は往復で対地速力を計り、潮流修正を加えて対水速力を求める試験であるが、GPS で得られるのも対地速力であるので、K-GPS を用いれば、潮流の影響を考慮して海域を選んだり、往復でテストして対水速力を求めれば良いので、マイルポストのないところでも、速力試験を実施できるようになる。また、今回の試験では利用していないが、RTK-GPS を用いると速度が整定しているか、斜航していないか等が試験中に確認できるようになるので、速力試験には RTK-GPS が有効であると考えられる。

3.3.3 最大舵角の旋回試験

全速前進で針路静定後、舵角を $+35^\circ$ と -35° にとり 360° 旋回させた。左旋回試験の結果を Table 3.6, Fig. 3.8 に示す。旋回試験の計測は GPS 受信機 1 台で行った



(a) Speed



(b) Relative course

Fig. 3.7: Time histories of speed trial

ので、GPS アンテナの位置の変化からアンテナの運動のベクトルは求められても船体重心位置の運動は求められない。そこで、ジャイロコンパスの回頭角の目読値を用いてアンテナ位置から重心位置を求めた。また、旋回試験は対水速度を元に測定すべき試験であるが、GPS では対地速度しか得られないので潮流による補正が必要になる。今回は潮流がわずかであると想定されるので補正を行っていないが、540° 旋回を行って潮流影響を補正する必要がある。潮流補正の方法は A.1 に示す。

今回の試験では 1 台の K-GPS 受信機とジャイロコンパスの針路データから旋回航跡を求めたが、2 台以上の K-GPS 受信機を設置すれば、GPS データのみで重心位置の運動が得られるので、船内計器と独立して試験データの解析ができるようになる。

Table 3.6: Result of turning test

Turning direction	Left			Right		
Survey	K-GPS	Old	Ratio	K-GPS	Old	Ratio
Approach speed (kt)	13.81	13.99	-1.3%	13.76	14.19	-3.0%
Advance (A_D)(m)	177.76	205.90	-13.7%	195.16	219.45	-11.1%
Tactical diameter(D_T)(m)	175.95	212.09	-17.0%	183.38	209.13	-12.3%
A_D/L_{pp}	2.54	2.94		2.79	3.14	
D_T/L_{pp}	2.51	3.03		2.62	2.99	

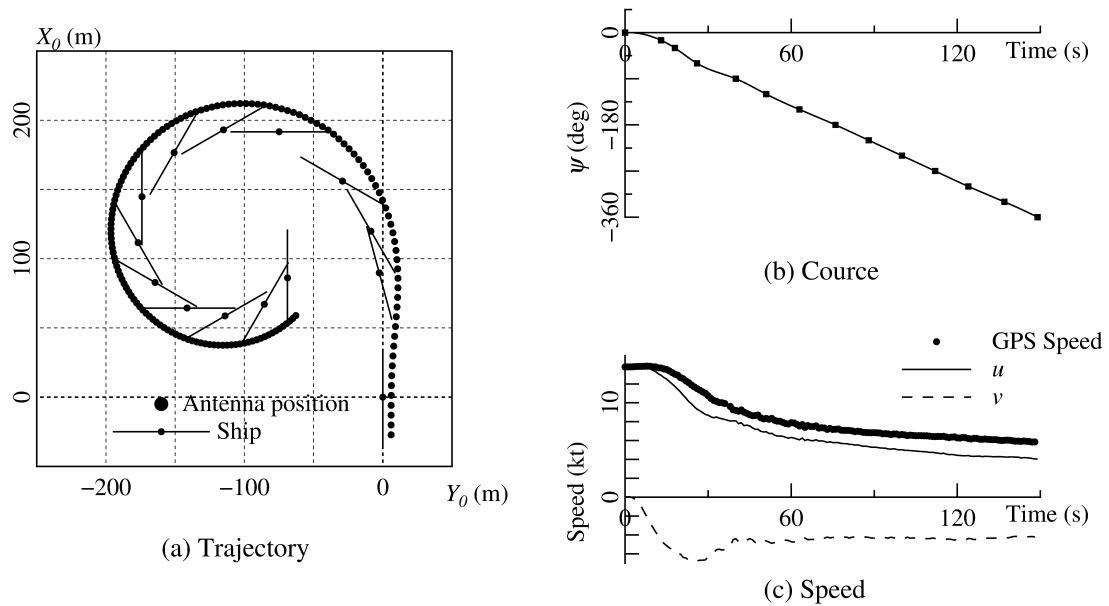


Fig. 3.8: Result of turning test

3.3.4 Z 試験

$\pm 10/10^\circ Z$ 試験と $\pm 20/20^\circ Z$ 試験を行った。その内から, Fig. 3.9 に $+10/10^\circ Z$ 試験, Fig. 3.10 に $+20/20^\circ Z$ 試験の結果を示す。Fig. 3.9 は広島大学を基準局, Fig. 3.10 は入鹿鼻を基準局として位置を求めている。舵角の記録が2秒ごとに行っているため操舵開始時刻, 終了時刻の決定がやや困難であった。船体座標系におけるアンテナの位置は既知であるので座標変換によって重心位置の運動を求めている。Fig. 3.10(d) に示すように, $20/20^\circ Z$ 試験では最大約 2° ロールしていたので, 重心から GPS アンテナまでの高度差の影響を考慮しないと実際の航跡より 35cm 横にずれることになり, 正確に横運動を推定する場合には K-GPS の精度が生かされないことが分かる。ロールの影響は, Fig. 3.9(b), Fig. 3.10(b) に示すように, 横速度に現れているが, ロールの影響を考慮して重心位置の運動を求めることによって固有振動の影響が減少していることが分かる。

3.3.5 その他の試験

Table 3.7にバウスラスター試験の結果を示す。このように時々刻々の回頭角だけで求められる、Z試験やバウスラスター試験は従来の方法とK-GPSで良く一致した。航跡をFig. 3.11に示す。図中の船は回頭角が0, 5, 10, 15, 30, 60, 90°の船の位置を示している。バウスラスター試験では右回頭開始時に横速度が残っていることに気がつかなかったため、航跡が流れされていることがわかる。また、0.5m/s以下という低速時でもK-GPSでは速度がスムーズに計測できた。回頭角速度は±0.1°程度振動しており、方位の確度と一致した。

Table 3.7: Result of side thruster test

Left			Right		
Heading (deg)	Time (s)		Heading (deg)	Time (s)	
	K-GPS	Old		K-GPS	Old
-5	17	17	5	22	22
-10	27	25	10	31	31
-15	33	33	15	40	40
-30	52	52	30	62	64
-60	87	88	60	103	105
-90	121	121	90	139	141

ジョイスティック試験では、ジョイスティックによる前進、後進、横移動、旋回のテストを行った。Fig. 3.12に左横移動の航跡、Fig. 3.13にその時の時刻歴を示す。航跡には30秒ごとの船の位置を記している。なお、300秒付近でCPPの翼角が大きくなっているのはパワーアップモードにしたため、制御によるものではない。このような横移動のジョイスティック操船の場合、現在のシステムでは速度のフィードバックが困難であるから、横移動や後方への移動の場合には特殊な操作を必要とする。

本船のジョイスティックでは、バウスラスタと舵による横方向の力で船首方位を制御するが、CPPの発揮する推力の多くが大舵角のベッカーラダーでキャンセルされるとはいえ、総てではなく前進推力が残るから、船は前進することになる。これを避けるために、一定時間このモードで操船して前進が生じるとCPPを後進にして前進運動を抑え、再び前進に戻して横運動の制御を行う形で横移動を可能にしている。真横にジョイスティックのレバーを倒したとき、ちょうど真横に移動するためには、CPPの前進後進の割合を実船の試験で調整する必要があるが、沖合いで行う試験ではわずかな前進運動を検出することが難しく、この調整が困難となる。

本船の場合も、最初に目視で横移動を試みたが、前後運動の調整が困難であった。Fig. 3.12に示す例の場合は、RTK-GPSによる前後運動のデータを参考にして調整を行っている。前後進を繰り返しながらバウスラスタによって針路を維持して

いることが分かる。まだ、十分に真横に移動するには至っていないが、詳しく前後進の様子がモニターできるので、このような調整が十分に可能であることが分かった。なお、多少の Yawing はこの制御のためである。このような目的に RTK-GPS を用いる場合、GPS が出力する緯度、経度で表現される船位を変換して、船体固定座標系で表示できるようなディスプレイが必要になる。

別の見方をすると、リアルタイムで速力を参照できることは、このシステムを用いると速力フィードバックが実現できることが分かる。港内操船等の性能を改善する上で大変に有力な手段となることが結論される。

このジョイスティック試験の海域は基準局から約 2km と近く、補正信号が途絶えることなく RTK-GPS が可能であったが、それでも、TSL の RTK-GPS[11] と同様に、5 秒に 1 回と、時折数秒データが欠落することがあった。モニターには差し支えなかったが、RTK-GPS を制御や離着舷に使えるようにするためには、通信の信頼性向上が必要である。

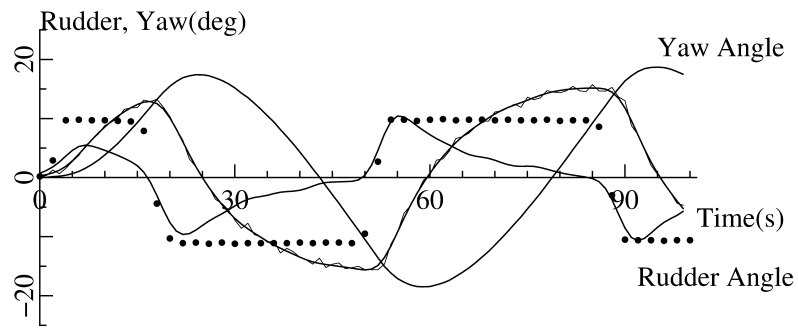
3.4 本章のまとめ

本研究では、K-GPS という高精度測位技術の精度を検討するとともに、それを試運転計測に用いる試みを行った。本研究で得られた主な結論は次のとおりである。

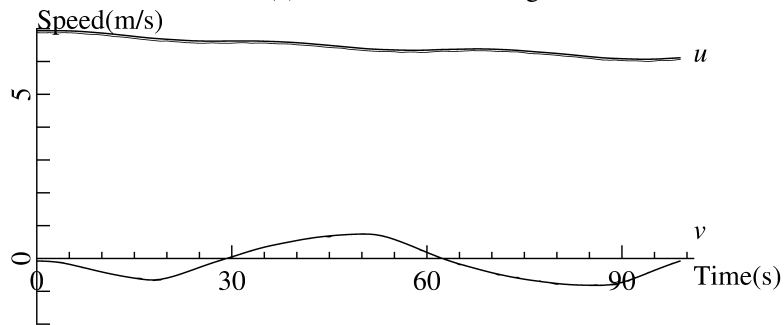
- K-GPS の位置計測精度は船体運動中であっても、水平 2cm、垂直 5cm 以内と非常に高いことが分かった。しかし、マルチパスや電波遮断によって生じるサイクルスリップは測位精度を悪化させることがあるのでアンテナの設置位置に注意を払う必要がある。
- K-GPS は非常に高精度で位置を求めることができるが単体では向きが求められないので組み合わせて角度を求める必要がある。したがって、1 台の場合は、時々刻々の針路と組み合わせて、ロールの影響はあるが重心位置の運動が求められる。
- 船体の前後に 1 台ずつ GPS アンテナを設置すると、トリム変化やピッチング運動を求めることができる。しかし、GPS は水平方向と比較して垂直方向の精度は 5cm 程度で、しかも高さには潮汐やジオイドの影響が含まれるため、トリムを $0.01\%L$ のオーダーで求めたり、水面からの相対高度である沈下量をセンチメートルの精度で求めるのは難しい。
- 船体の両舷に 1 台ずつ GPS アンテナを設置すれば、GPS データだけで、ロールの影響を考慮した重心位置の運動を求めることができる。
- 仕様書通りの速度が得られるか否かは契約上非常に重要な項目であるので、速力試験において 0.1% の誤差は決して小さくない。K-GPS や RTK-GPS であれば航走距離が 1 マイルでも問題ないが、速力試験に D-GPS を使用するの

であれば、使用する D-GPS の位置精度に応じて、航走距離を長くする必要はある。

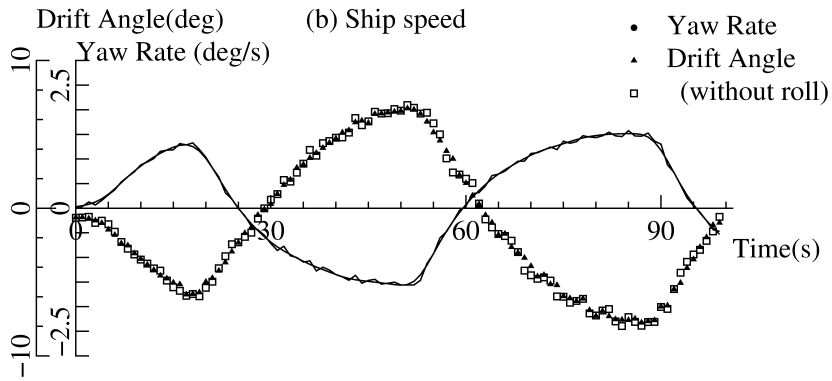
- K-GPS を最低 2 台用いて操縦性能試験の計測を行うと、時々刻々の運動が得られる。その結果、前進速度、横速度、旋回角速度、斜航角といった操縦性能推定に必要な情報が精度よく求められることが分かった。
- 実験結果がリアルタイムに表示できる RTK-GPS は非常に有用であった。しかし、通信手段が問題で、データの欠落や最悪不通になるので、現状では実験のモニターとして使用し、解析には K-GPS のデータを使用する方がよい。しかも、RTK-GPS の場合、通信手段が確保できても基準局と移動局間の距離が 10–15km を越えると解が収束しにくくなって、精度が劣るという欠点があり、基準局の設置場所、試験海域が制限される。



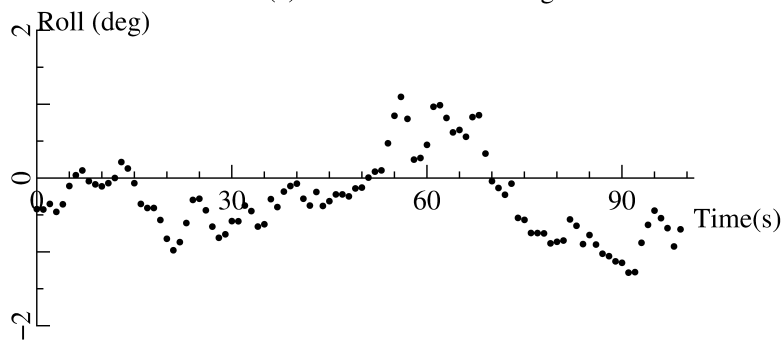
(a) Rudder and Yaw angle



(b) Ship speed

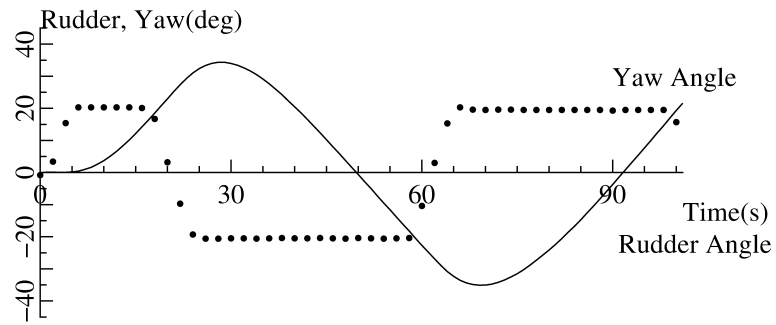


(c) Yaw rate and drift angle

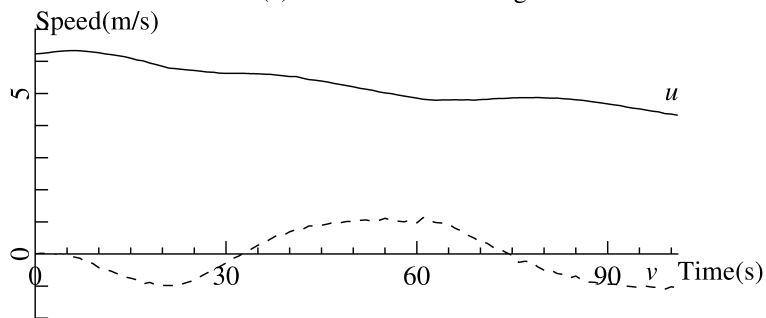


(d) Roll angle

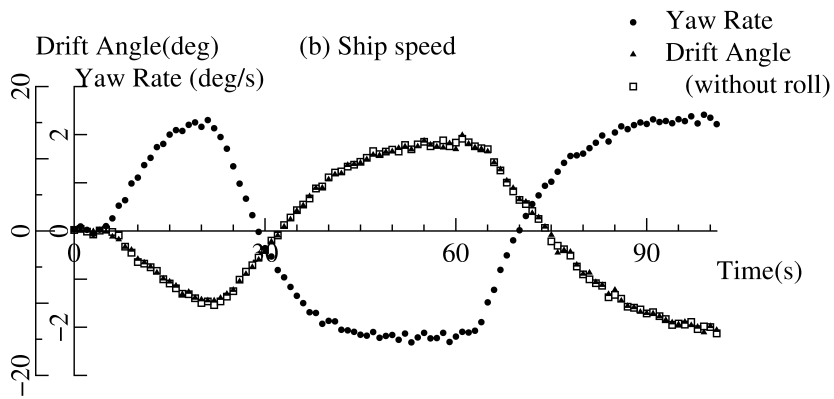
Fig. 3.9: Results of 10/10° zig-zag test



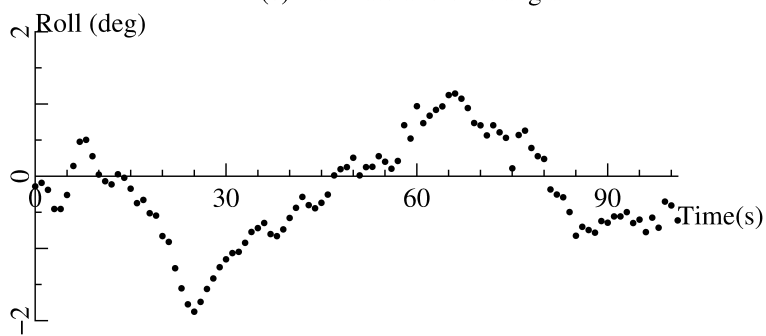
(a) Rudder and Yaw angle



(b) Ship speed



(c) Yaw rate and drift angle



(d) Roll angle

Fig. 3.10: Results of 20/20° zig-zag test

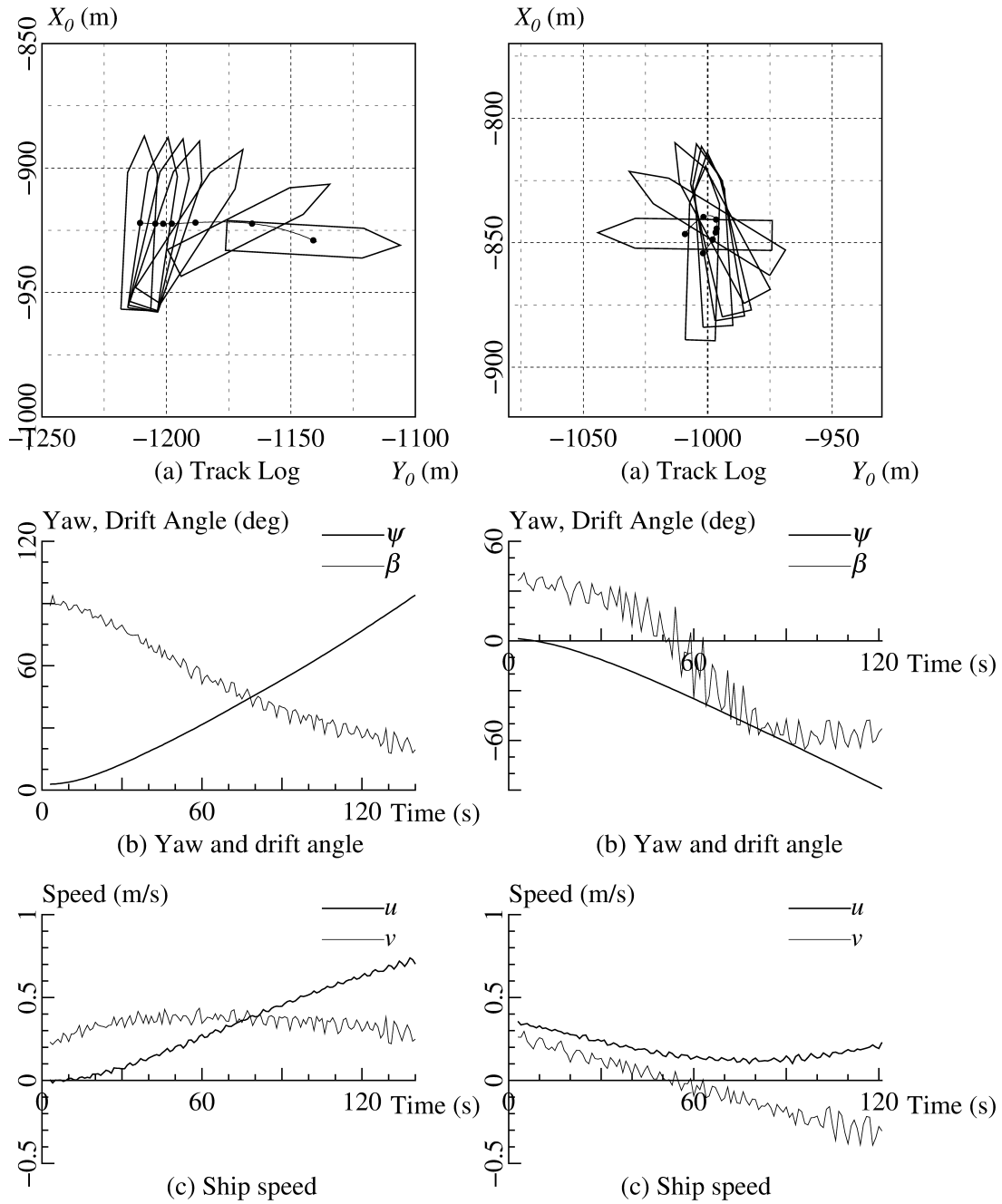


Fig. 3.11: Ship trajectories and time histories of motion by bow thruster

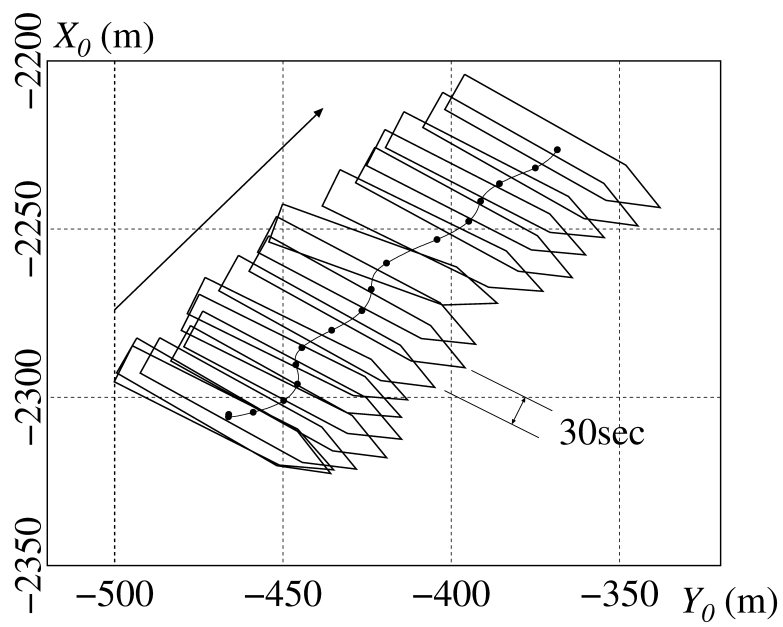


Fig. 3.12: Maneuvring trajectory by joy-stick

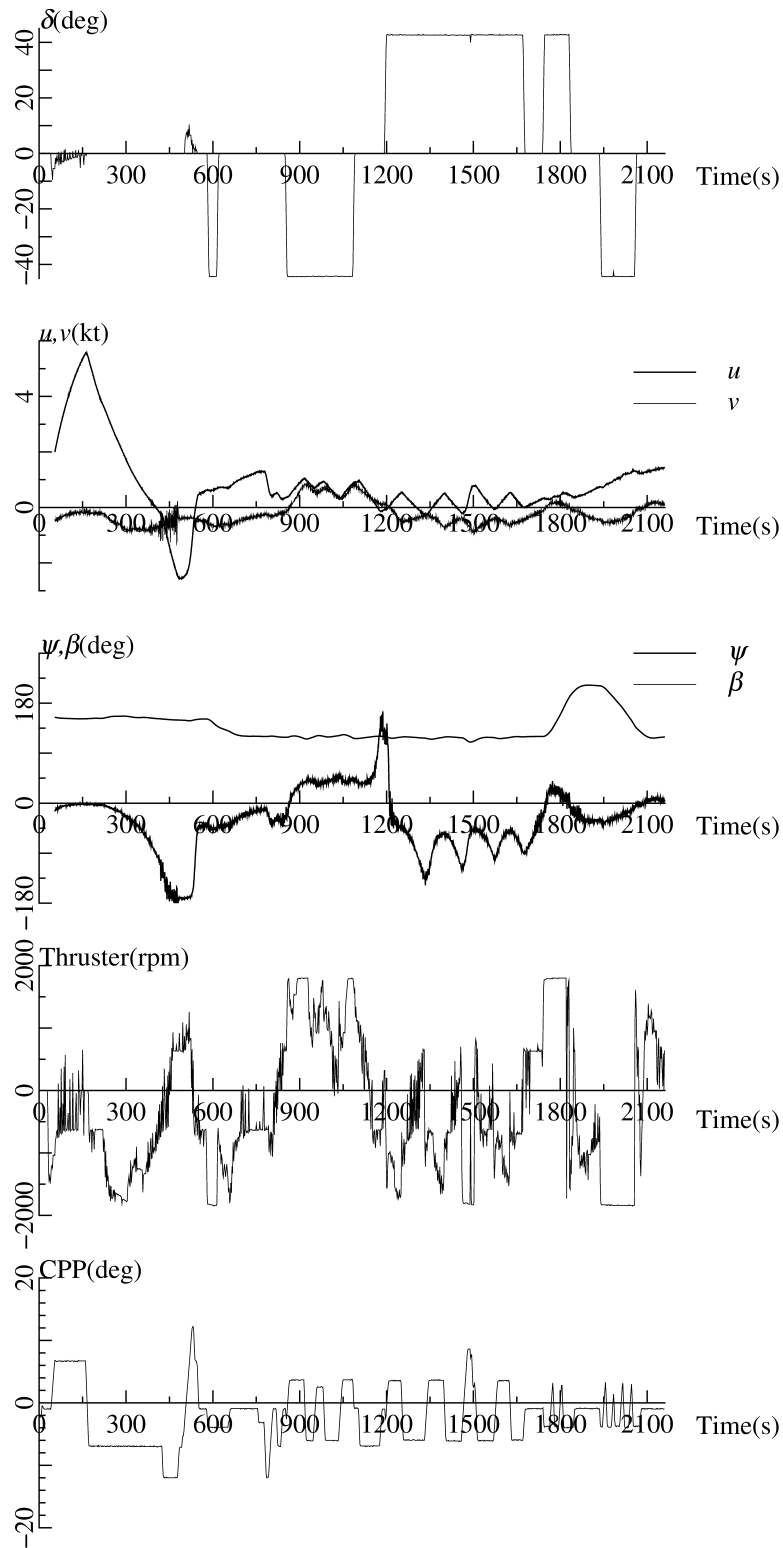


Fig. 3.13: Time histories of ship maneuvering and operations by joy-stick

第4章 練習船「豊潮丸」の操縦性に及ぼすトリム影響に関する実船試験

4.1 はじめに

船の操縦性能に及ぼすトリムの影響は大きく、船尾トリムを付けることにより船の針路安定性が改善されることが知られている。しかしながら、船尾トリム等による船の姿勢変化によって、船の操縦性がどのように変化するのか、模型船を用いた自由航走試験や実船試験において、その影響を定量的に報告した例はないように思われる。

近年のGPS技術の発達により、実船試験において船の操縦運動を精度良く計測することが可能となった。著者等のグループにおいても、前章で述べた高精度なK-GPSを用いて、実船の操縦運動を精度良く計測し、操縦運動シミュレーションモデルの検証を行っている[15]。本研究においては、船の操縦性に及ぼす船体姿勢の影響を定量的に把握するために、高精度GPSを用いた実船試験を実施した。対象とする船は、広島大学生物生産学部が保有する電気推進型の練習船「豊潮丸」である。本船は、アジマス型の首振り式推進器(POD推進器と呼ぶ)を2台備えており、舵は持たない。本研究では、操縦運動に及ぼすトリムの影響の把握とともに、POD推進器を備えた電気推進船の操縦運動の実船データの取得を目的とする。

さらに、広島大学工学部曳航水槽にて、トリムを変更した拘束模型試験を実施して、船体の操縦流体特性を計測し、針路安定性に及ぼすトリムの影響を把握した。

4.2 「豊潮丸」の概要

本研究では、2006年に建造されたPOD推進器を2台装備した広島大学生物生産学部の練習船である「豊潮丸」を対象とする[16]。「豊潮丸」に搭載されているPOD推進器は可変ピッチプロペラ(CPP)が使用されている。また、船型は従来船型に比べて抵抗が少ないと言われるバトックフロー船型が採用されている。なお、2007年に針路安定性改善のため、オリジナルの船に対して、センターステグを 1.9m^2 拡張している。Table 4.1に本船の主要目、Fig. 4.1に本船の側面図を示す。なお、Table 4.1中、 L_{oa} は全長、 L_{pp} は垂線間長、 B_{mld} は型幅、 D_{mld} は型喫水、 d は

Table 4.1: Principal dimensions of “Toyoshio-Maru”

L_{oa} (m)	40.50
L_{pp} (m)	35.50
B_{mld} (m)	8.50
D_{mld} (m)	3.70
d (m)	3.12

平均喫水である。

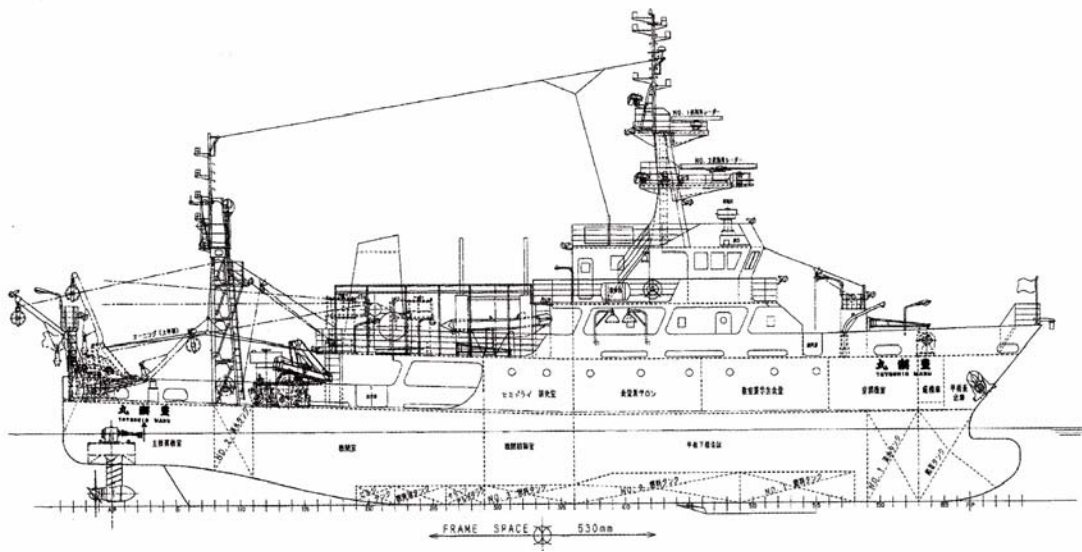


Fig. 4.1: Side view of “Toyoshio-Maru”

4.3 海上試験

海上試験として、速力試験、旋回試験、Z試験を実施した。試験の種類は以下のとおりである。

- 速力試験：0.5NM 往復, CPP 翼角 7,16,21.5°
- 旋回試験：POD 首振り角 (舵角) $\delta = \pm 5, \pm 10, \pm 20, \pm 35^\circ$, CPP 翼角 16,19°
- Z試験：舵角/転舵方位角は $\delta = \pm 5, \pm 10, \pm 20^\circ$, CPP 翼角 16,19°

以上の試験を、2009年11月19日にはほぼ等喫水の状態“Even Keel”(EK), 2009年11月20日に船尾トリムを付けた状態“Trim by Stern”(TS1)で実施した。EKを1Hzで計測したところ、「豊潮丸」の応答が速かったため、翌日のTS1はGPSを

Table 4.2: Trial conditions

	EK	TS1	TS2
Displacement W (ton)	554.3	538.6	553.1
Fore draft d_f (m)	2.77	2.30	2.46
Aft draft d_a (m)	2.95	3.18	3.19
Mean draft d_m (m)	2.86	2.74	2.83
Trim (m)	0.18	0.88	0.73
GM (m)	0.68	0.67	0.66
Speed trial	○	○	○
Turning test	○	—	○
Zig-zag test	○	○	○

2Hzにして計測することにしたが、2HzではK-GPSの解がFixしない時が多く、特に針路や姿勢が大きく変化する旋回試験では解析することができなかった。そのため、2011年5月13日に再び“Trim by Stern”(TS2)による試験を実施した。TS2では旋回試験を始め、上記の試験を全て実施した。なお、旋回試験とZ試験のCPP最大翼角が速力試験の 21.5° より小さい 19° で実施したのは、2009年の試験時、3台の発電機の内1台が故障していたため、2011年の試験も比較のため同じ条件で実験を行った。Table 4.2にEK, TS1, TS2の3パターンにおける排水量・喫水状態と実施した試験をまとめる。

この試験用に取り付けたGPS装置だけでも姿勢を得ることはできるが、位置は単独測位であるので、3台のアンテナ位置をそれぞれ後処理で求め、その相対位置関係を用いて、船体の重心座標 X_G, Y_G 、前進速度 u 、横流れ速度 v 、回頭角速度 r 、方位角 ψ 、ヒール角 ϕ を算出した。また、「豊潮丸」の船内計器より風向、風速、波高、POD推進器の首振り角(舵角) δ 、プロペラ回転数 n_P 、CPP翼角 BA を得た。

4.3.1 GPSの概要

基準点には、Trimble MS-750を使用し、広島大学生物生産学部附属練習船基地管理棟の屋上に設置した。基準点の位置は国土地理院の電子基準点「江田島960666」、
「熊野940078」、
「倉橋021036」、
「蒲刈021035」のデータ[17]を使用して求めた。

Fig. 4.2に「豊潮丸」におけるGPSアンテナの設置位置を示す。GPSアンテナは電波の障害が起きにくく安全上問題のない場所に設置した。MainとAux1は左右対称に設置できたが、Aux2を直角三角形や二等辺三角形を構成できるような場所に設置することはできなかった。そこで、「2.6 K-GPS3台による姿勢計測」に示す方法を用いて、3点のGPSの緯度、経度、高度より外積を使用して姿勢ベクトルを求め、重心位置と針路 ψ 、ヒール角 ϕ 、トリム角 θ を得た。なお、今回の実験ではAux2アンテナの高さが異なるので、それによって生じるトリム角 θ_0 をあらか

Table 4.3: Date and environmental conditions of trial tests

	EK	TS1	TS2
Date	2009/11/19	2009/11/20	2011/5/13
Wave height (m)	0.1 – 0.5	0.1 – 0.5	0.3 – 0.7
Wind velocity (m/s)	1 – 2	1 – 2	5 – 10
Water temperature (°C)	19.5	19.5	17.5

じめ計算しておき、姿勢を補正した。

次に、式 (2.14) – (2.18) により、時々刻々の位置の差分から速度ベクトルを求め、速力 U と斜航角 β を得た。

4.3.2 試験環境

Table 4.3 に、海上試験の実施日と試験環境状況を示す。EK での試験は 2009 年 11 月 19 日に、TS1 での試験はその翌日 20 日に実施した。その後、TS2 での試験を 2011 年 5 月 13 日に行った。各日とも天候は晴れて、EK, TS1 の試験においては、風波ともに小さいものであったが、TS2 の試験は比較的風が強い状況でのものとなった。試験は瀬戸内海の宮島南沖で実施した。Fig. 4.3 に 2009 年 11 月 19 日に母港である呉港を出港し、宮島南沖にて海上試験を実施した際の本船の全航跡を示す。TS1, TS2 も同じ海域で試験を実施した。

4.4 試験結果と考察

4.4.1 座標系

Fig. 4.4 に本論文で使用する座標系を示す。空間固定系 $O-X_0 Y_0 Z_0$ と船体固定系 $G-xyz$ の 2 つの座標系を考える。 G は船の重心位置にとり、船首方向に x 軸、鉛直下向きに z 軸、横方向に y 軸を取る。 β は重心における斜航角である。ヒール角 ϕ は、船尾から船首方向を見て、右に傾斜する方向を正とする。なお、船の航跡等の試験結果の記載に当たっては、速力試験では出港時の位置を原点にし、北を X_0 軸に取ったが、旋回運動や Zig-zag 運動の開始地点を原点に、開始時の船首方位に X_0 軸をとり、船の方位角 ψ はこの X_0 軸からの船首の向きとした。また、風向については、 X_0 軸に対して、逆方向からの風向き (向かい風方向) を 0° とし、追い風方向を 180° とする。右手方向から吹き込む風向きを 90° と定義する。



Fig. 4.2: Settings of GPS antennas on “Toyoshio-Maru”

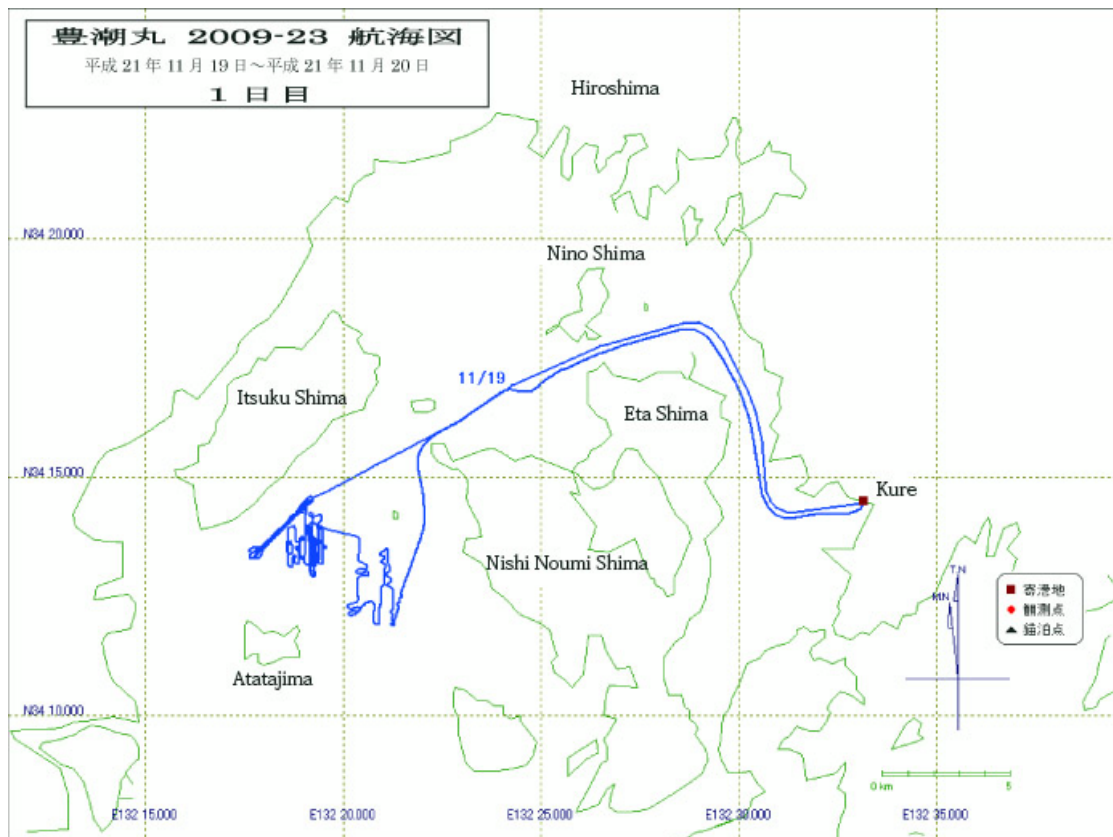


Fig. 4.3: Track log of “Toyoshio-Maru” in 19/Nov./2009

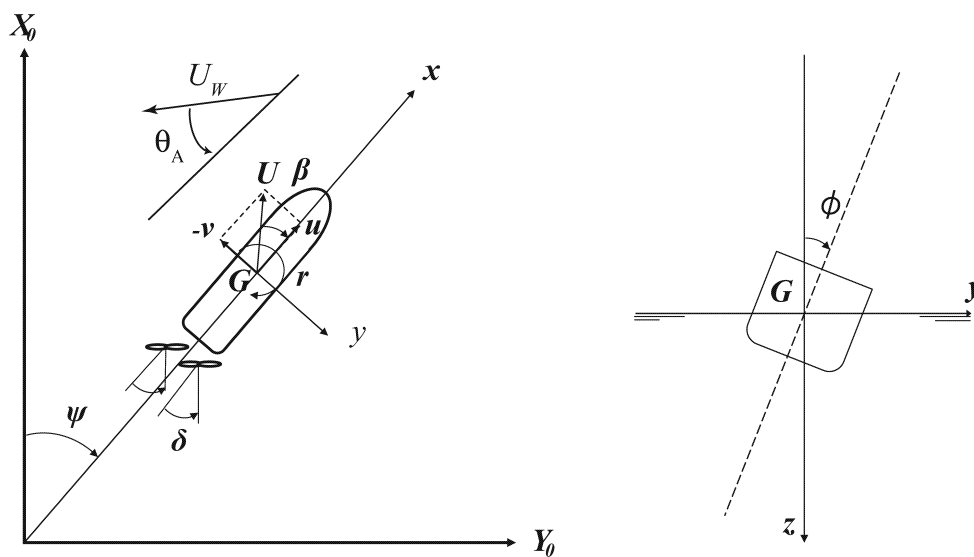


Fig. 4.4: Coordinate systems

4.4.2 傾斜試験結果

GM は排水量等の計算シートによって求め、その結果を Table 4.3 に示しているが、TS1 では、出航する前に、港湾内で乗員を左舷と右舷を移動させ、その時の傾斜角を 60 秒間ずつ GPS で計測し、平均値を求めた。Fig. 4.5 に計測結果を示す。これより、傾斜角 $\theta = 1.25^\circ$ が得られた。この時、移動した乗員の体重の合計 w は 973kgf、移動距離 l は 8.1m で、排水量 W は 538.6ton であったので、

$$\overline{GM} = \frac{wl}{W \tan \theta}$$

より、 $\overline{GM} = 0.67\text{m}$ となり、Table 4.3 に示す計算シートの結果と一致した。

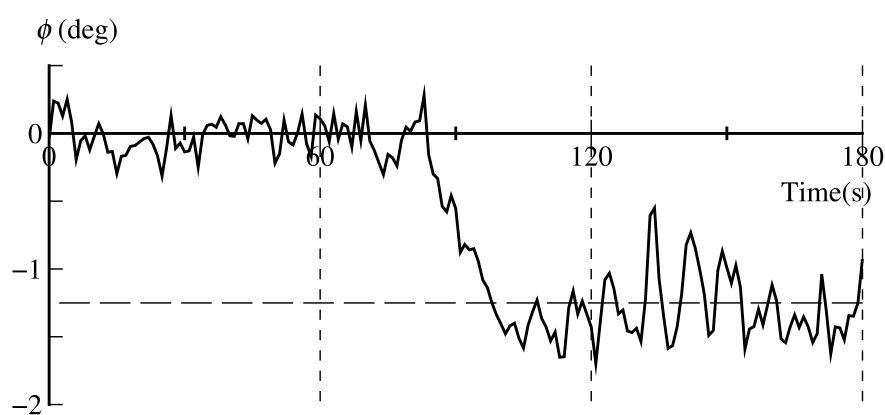


Fig. 4.5: Measure heel angle for calculate GM

4.4.3 速力試験

ψ を 225° と 45° に取って、0.5NM の助走後、0.5NM 航走し、入標時刻とその位置および出標時刻とその位置から、かかった時間と直線距離を求め、速力を得た。そして、往復の速力を平均している。EK と TS1 は手動操舵で、CPP 翼角 21.5° のみオートパイロットでも試験を実施した。TS2 はすべてオートパイロットで試験を行った。

トリム影響

Table 4.4 に速力試験結果を示す。EK と比較して TS1, TS2 の速力が遅いことがわかる。同翼角における速力を比較すると、TS2 の方が 5-7%程度速力が低下しており、本船に船尾トリムを付けることは、推進性能を損ねることが分かる。しかし、TS1 と TS2 では、TS1 の方がトリムが大きいにもかかわらず速力が速くなっており、今回の試験結果からはトリム角と速力の関係を明らかにすることはできなかった。これは、海水温や排水量の違いが影響しているのではないかと思われる。

Table 4.4: Result of speed trial

CPP(deg)	EK (kt)	TS1 (kt)	TS2 (kt)
7.0	4.85	4.69	4.57(A)
16.0	8.79	8.34	8.19(A)
21.5	10.66	10.32	10.20(A)
Auto	10.73	10.41	—

操舵影響

先にも述べたように、EK と TS1 では、CPP 翼角 21.5° の時、手動操舵とオートパイロットの両方で速力試験を実施した。EK における、その時の航跡と時系列データを Fig. 4.6 に示す。これより、ほぼ同じ海域を往復しており、 $\psi = 45^\circ$ より $\psi = 225^\circ$ の方が速力が大きいことがわかる。また、手動操舵よりオートパイロットの方が速力が速いことと、 $\psi = 225^\circ$ の速力変動が大きいことがわかる。

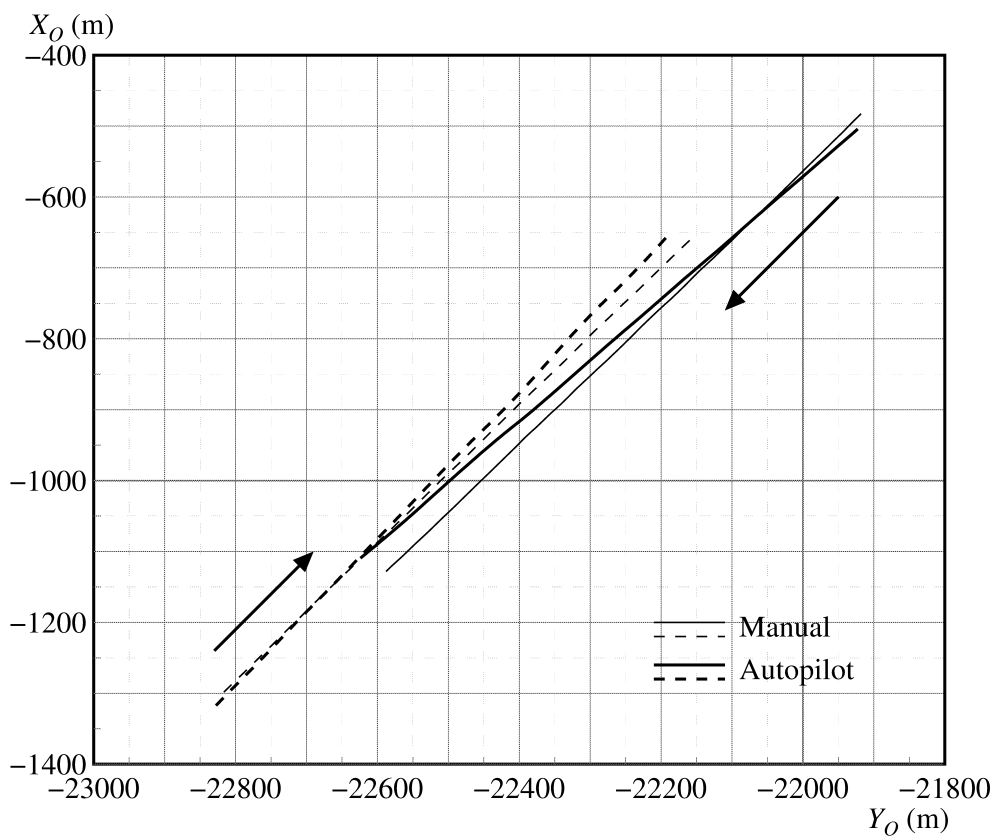
そこで、操舵や CPP の翼角と速力の関係を調べた。Fig. 4.7 に手動操舵時の速力 U 、左右の舵角 δ 、左右の CPP 翼角の時系列の時系列を示す。(a) は $\psi = 225^\circ$ 、(b) は $\psi = 45^\circ$ のデータである。 δ のグラフから保針のために頻繁に操舵していることがわかる。また、(a) では、徐々に速力が上昇しているものの、大きな速力変動が現れた。速力低下が発生している時は、右舷側の CPP 翼角が 0.3° 小さくなっており、翼角の減少が速力低下の原因であることがわかる。翼角が変化していなければ、時系列データから、10.90kt 程度の速力が得られていたと考えられる。(b) では、翼角が一定に保たれており、変動は少ないが、(a) とは逆に速力は徐々に低下し、出標時には入標時より 0.5% 遅くなっていた。

Fig. 4.8 にオートパイロット時の時系列を示す。Fig. 4.7 と比較して、操舵の舵角、回数とも少なく、適切な制御が行われていることがわかる。 $\psi = 45^\circ$ では、手動操舵時より 0.1kt 程度速くなっており、操舵による速力低下を防ぐことができている。しかし、 $\psi = 225^\circ$ では、手動操舵時以上に翼角減少が発生して、大きく速力が変動した。片側の POD の翼角 0.3° 減少したことによって、速力が約 0.3kt 低下しており、翼角が変化していなければ、10.95kt 程度の速力が得られていたと考えられる。

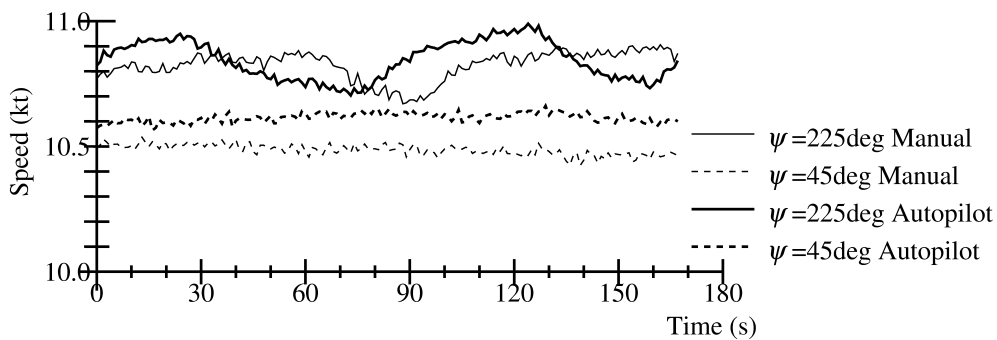
翼角が変動した理由は不明であるが、TS1 や TS2 ではこのような症状は現れなかった。

Fig. 4.9 に TS2 の CPP 翼角 21.5° の時系列データを示す。(a) が $\psi = 225^\circ$ 、(b) が $\psi = 45^\circ$ である。往復の速力はどちらもほぼ等しくなっているのは、ちょうど試験が干潮の時刻と重なっており、潮汐による潮流影響が小さかったためであることがわかる。また、CPP 翼角が一定に保たれており、速力の変動も小さくなっている。

次に、手動操舵ではオートパイロット時と比較して、頻繁に操舵していたので、舵角の標準偏差を求めたところ、Table 4.5 に示すように、平均で 7 割程度大きくなっ



(a) Trajectories



(b) Time histories

Fig. 4.6: Compare speed with manual steering and autopilot

ていた。特に、翼角が変動していない $\psi = 45^\circ$ では、操舵の標準偏差は3割程度しか変わらないにもかかわらず、速力は1%以上異なっており、操舵の影響が大きいことがわかる。逆に、 $\psi = 225^\circ$ では操舵より翼角減少の影響の方が大きく、手動操舵の操舵量が大きいにもかかわらず、オートパイロットとあまり速力差が現れなかった。

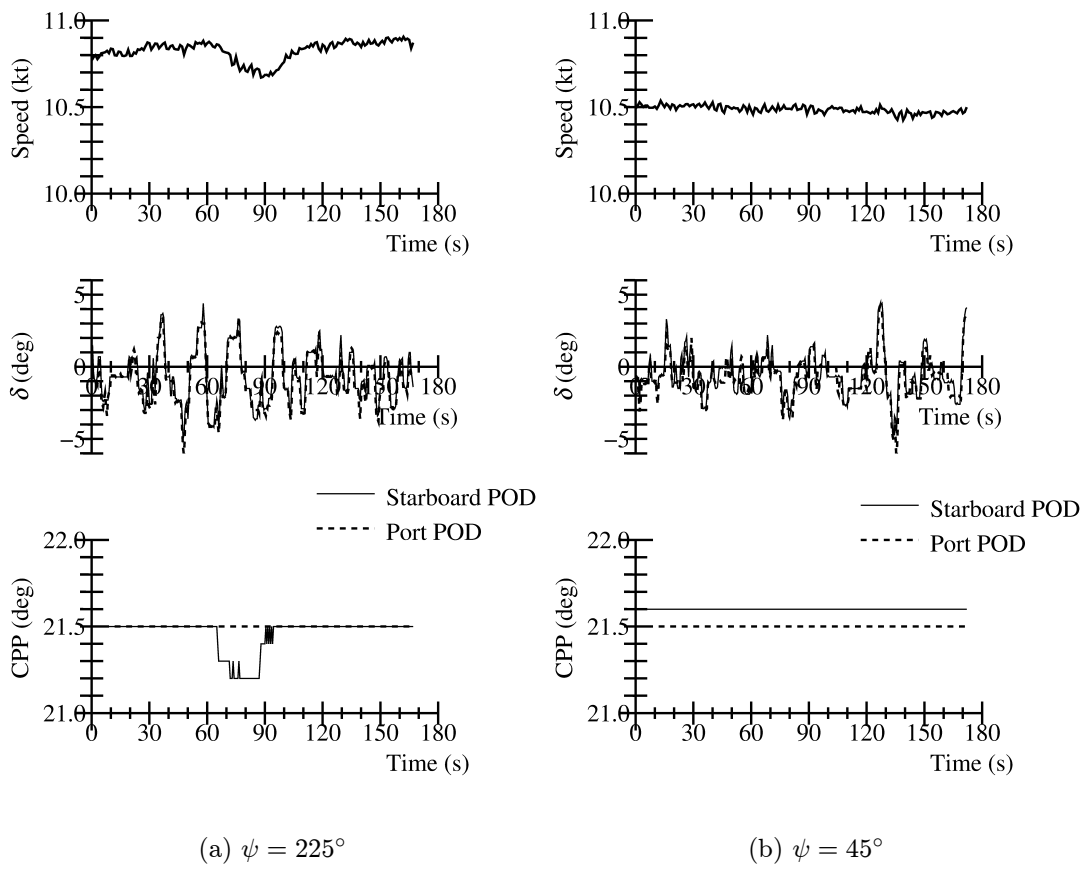
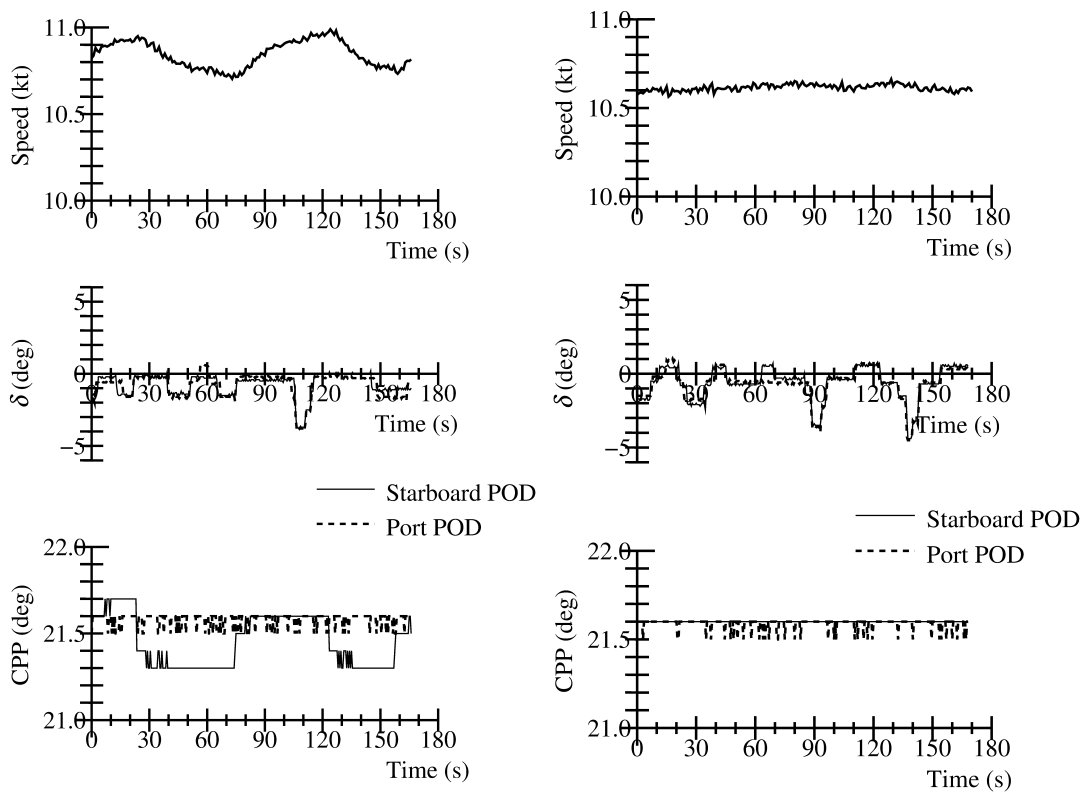


Fig. 4.7: Time histories of speed trial by manual steering on EK



(a) $\psi = 225^\circ$

(b) $\psi = 45^\circ$

Fig. 4.8: Time histories of speed trial by autopilot on EK

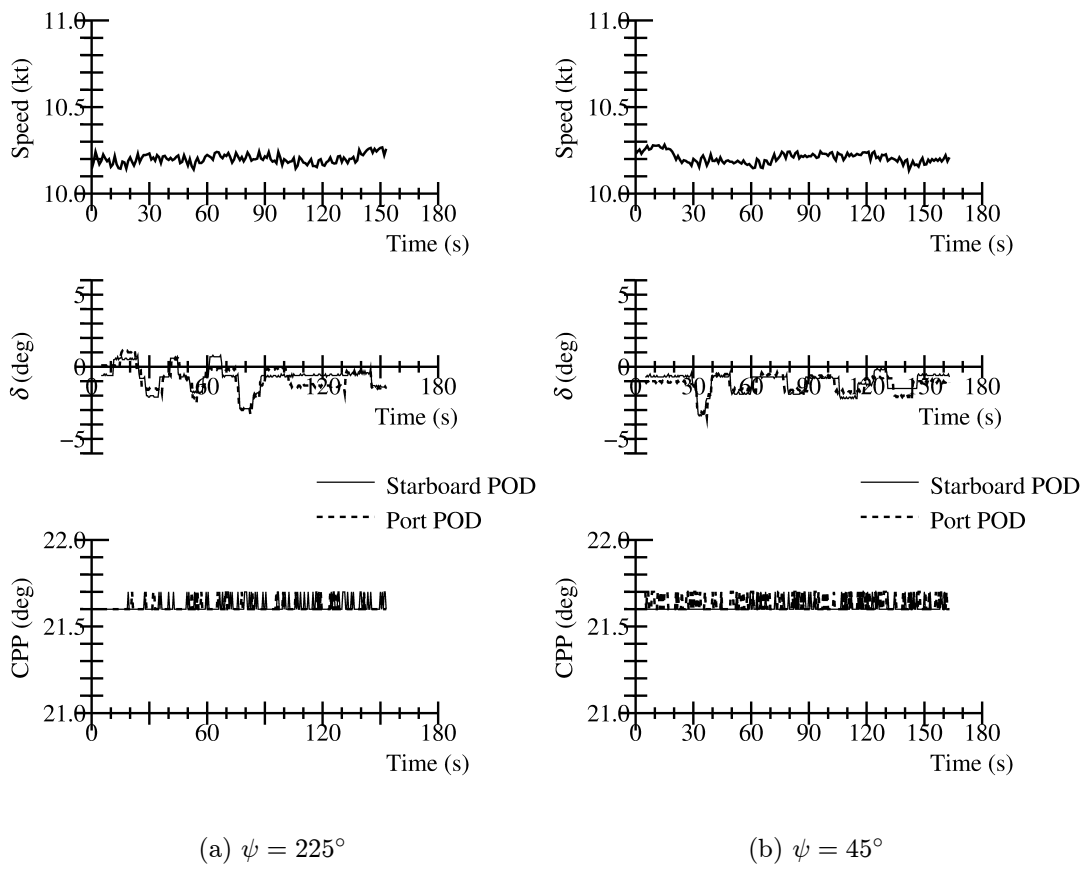


Fig. 4.9: Time histories of speed trial by autopilot on TS2

Table 4.5: Result of manual steering and autopilot on EK

Manual steering on EK

ψ (deg)	Interval (sec)	Distance (NM)	Speed (kt)	Std. Dev. δ (deg)	CPP (deg)
225	167	0.5021	10.824	1.82	21.48
45	172	0.5010	10.486	1.45	21.55
Average			10.66	1.64	21.52

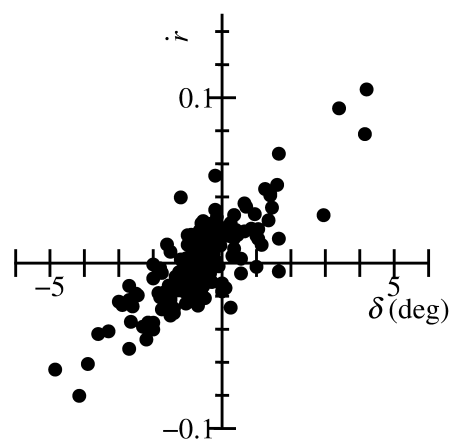
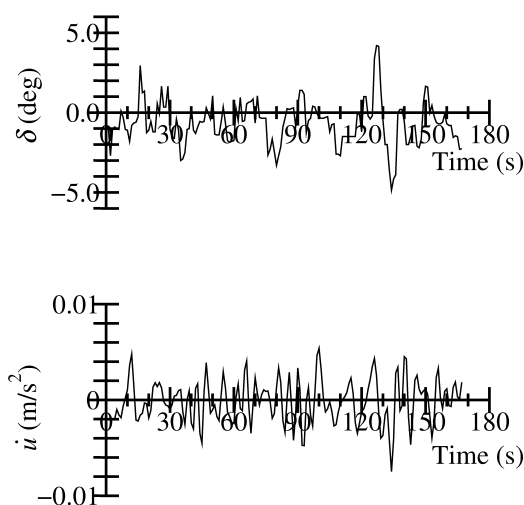
Autopilot on EK

ψ (deg)	Interval (sec)	Distance (NM)	Speed (kt)	Std. Dev. δ (deg)	CPP (deg)
225	153	0.4335	10.845	0.82	21.52
45	163	0.4621	10.613	1.09	21.59
Average			10.73	0.96	21.56

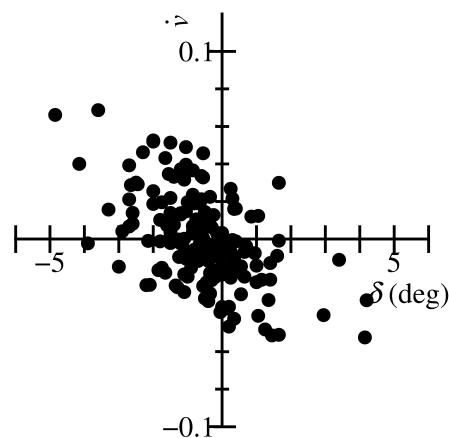
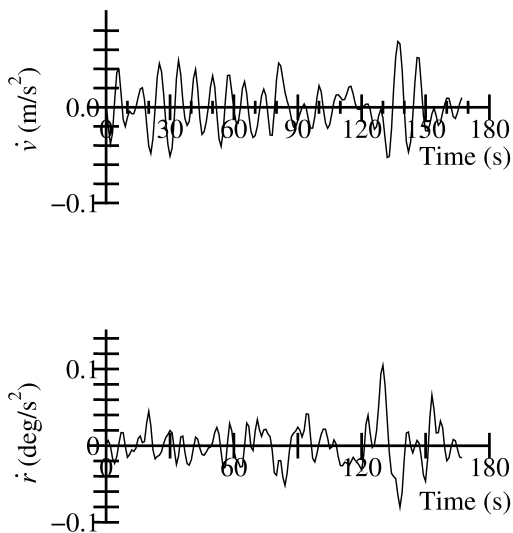
Autopilot on TS2

ψ (deg)	Interval (sec)	Distance (NM)	Speed (kt)	Std. Dev. δ (deg)	CPP (deg)
225	166	0.5001	10.200	0.87	21.61
45	170	0.5012	10.206	0.63	21.62
Average			10.20	0.75	21.62

操舵影響を詳しく調べるために、前進速度 u 、横速度 v 、回頭角速度 r から数値微分フィルター [20] を使用してそれぞれの加速度 $\dot{u}, \dot{v}, \dot{r}$ を求め、 δ との関係求めた。時系列データを Fig. 4.10 に示す。なお、 δ は左右の舵を同時に動作させているので平均値を使用した。CPP 翼角が変化せず、小刻みに操舵していた手動操舵 $\psi = 45^\circ$ で相関を調べたところ、 δ と \dot{u} は相関がなく、操舵と速度低下の関係は得られなかったが、 \dot{r} は操舵と同時、 \dot{v} は 1 秒後の値と最も強い相関が得られ、Fig. 4.11 に示すように、その時の相関係数は \dot{r} が 0.83、 \dot{v} が -0.53 であった。このことから、操舵と回頭角加速度には強い相関があり、操舵によって旋回力が発生し、旋回し始めると横力が発生することがわかる。



(a) Correlation with δ and \dot{r}



(b) Correlation with δ and \dot{v}

Fig. 4.10: Time histories of \dot{u} , \dot{v} , \dot{r}

Fig. 4.11: Relation of δ and \dot{r} , \dot{v}

4.4.4 旋回試験

旋回航跡

次に、旋回性能について考える。Fig. 4.12 に $BA = 16^\circ$, (a) $\delta = \pm 10^\circ$, (b) $\delta = \pm 20^\circ$, (c) $\delta = \pm 35^\circ$ における旋回軌跡を示す。EK と TS2 の航跡を比較するとやや異なる傾向が見られる。TS2 は定常旋回 (定常的な円運動) 状態に比較的早く達するのに対して、EK は旋回による円運動の航跡の半径が徐々に小さくなるような (とぐろを巻くような) 航跡を示している。しかし、定常旋回時の半径は、EK と TS2 と同程度であり、トリムによる差異はあまり大きくないことが分かる。このような傾向は、 $\delta = 10, 20, 35^\circ$ において、共通するものである。

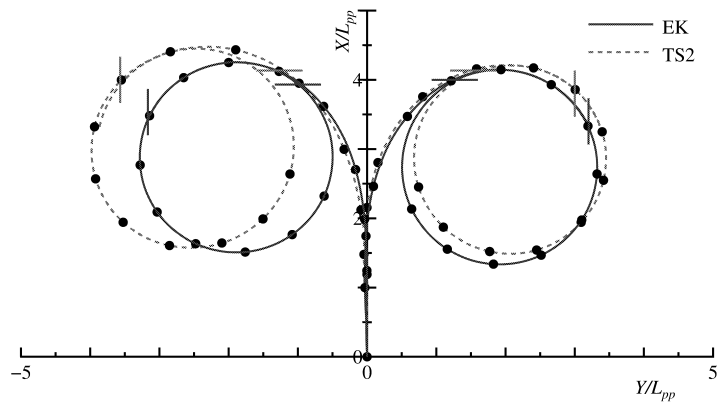
Fig. 4.13 に $BA = 16^\circ$ における舵角に対する旋回性能指標 A_D (Advance) と D_T (Tactical diameter) の無次元値の計測結果を示す。本船は IMO 基準値が適用される船舶ではないが、 $\delta = 35^\circ$ において A_D が $4.5L_{pp}$ 未満、 D_T が $5.0L_{pp}$ 未満であり、EK, TS2 とともに満足している。 A_D については、舵角の絶対値が大きなところで TS2 の方が小さな値を示す傾向にあり、旋回性能により優れていることが分かる。 D_T については、大舵角 $|\delta| > 20^\circ$ において大きな違いは見られないが、小舵角 $|\delta| < 10^\circ$ において EK の方が小さな値を示し、TS2 に比べて旋回性能に優れる。本船の D_T は、EK, TS2 とともに、 $\delta = \pm 10^\circ$ でおおよそ $3.0L_{pp}$, $\delta = \pm 20^\circ$ でおおよそ $2.5L_{pp}$, $\delta = \pm 35^\circ$ でおおよそ $2.0L_{pp}$ と、通常の船舶と比較して、非常に優れた旋回性能を有することが分かる。これは POD 推進器が大きな操舵力を発生するためであると考えられる。

時刻歴結果の比較

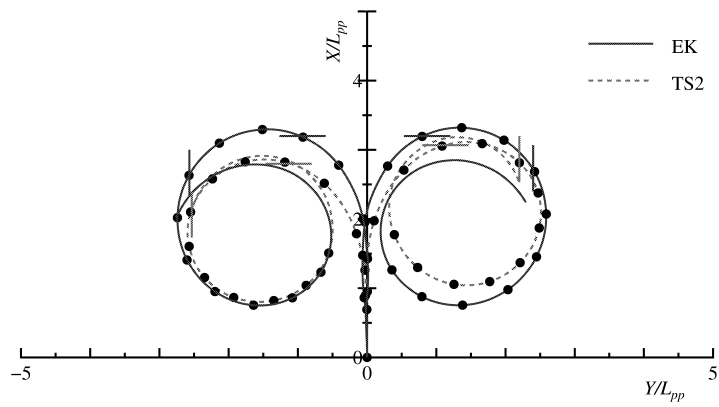
Fig. 4.14 に翼角を 16° にとり、(a) $\delta = 10^\circ$, (b) $\delta = 20^\circ$, (c) $\delta = 35^\circ$ 旋回試験時の前進速度 u , 横流れ速度 v , 回頭角速度 r , ヒール角 ϕ の時刻歴結果を示す。EK と TS2 は、どれについても似たような傾向を示すが、 v において定量的な差異を見ることができる。TS2 の v の絶対値は、EK のそれと比較して、約 40% 程小さい。EK と TS2 の r には大きな差はないことから、旋回運動に及ぼす船尾トリムの影響は、横流れ速度 v に関する流体力特性の差異によるものである可能性が示唆できる。また、TS2 のヒール角 ϕ の絶対値は、EK のそれと比較して、特に旋回の初期 (20s-30s) において小さくなっているのが分かる。

定常旋回特性

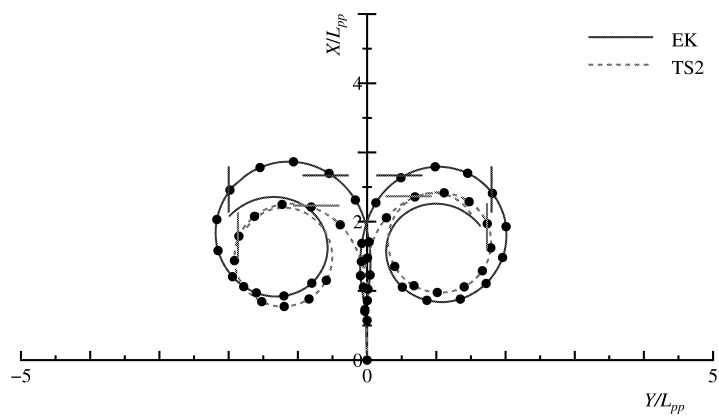
Fig. 4.15 に横軸に舵角 δ をとり、翼角 16° における定常旋回時の u , v , r , ϕ を示す。前述の通り、 $|\delta| \geq 20^\circ$ において外乱による補正は不要であったが、小舵角 ($\pm 5, 10^\circ$) 時においては航跡の横流れが見られたため、付録 [21] の方法に従い、 u, v についてのみ補正を行った。具体的な補正の方法は付録 A.1 として末尾に示す。前進



(a) $BA = 16^\circ \delta = \pm 10^\circ$



(b) $BA = 16^\circ \delta = \pm 20^\circ$



(c) $BA = 16^\circ \delta = \pm 35^\circ$

Fig. 4.12: Comparison of turning trajectories

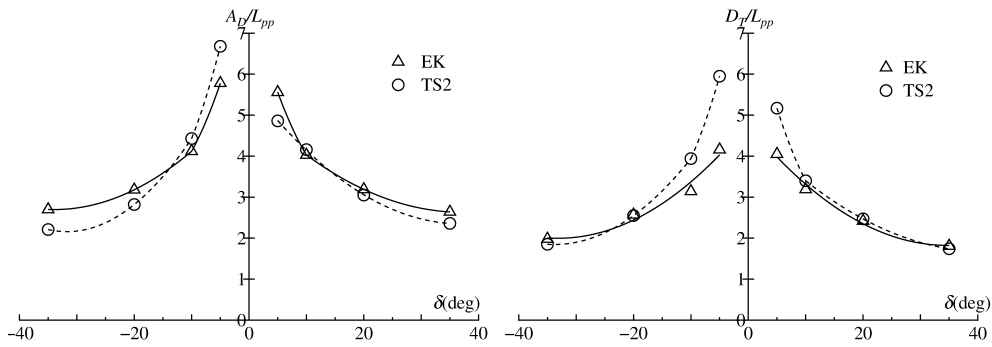


Fig. 4.13: Comparison of A_D and D_T ($BA = 16^\circ$)

速度 u は $|\delta| = 5^\circ$ のとき TS2 の方が EK よりも約 18% 大きい値を示した。 $|\delta| \geq 10$ ではトリムによる大きな違いは見受けられなかった。また横流れ速度 v は TS2 の方が EK よりも全体的に平均約 40% 小さくなっている。つまり EK は TS2 と比較して大きくドリフトを行いながら旋回していることが分かる。回頭角速度 r は $|\delta| = 5^\circ$ のとき TS2 が EK よりも約 24% 低い値を示した。ヒール角 ϕ は TS2 の方が全般的に低く、その傾向は特に小舵角で顕著である。船尾トリムの付加は定常旋回時の横傾斜の抑制効果があることが分かった。 ϕ は ϕ の絶対値が大きいほど小さくなる傾向があり、通常の船舶とは傾向が異なる。 $|\delta| = 5, 10^\circ$ における定常旋回時のヒール角は $2\text{--}5^\circ$ と大きな値であった。本船の GM は格別に小さいとは言えないことから、本船 POD 推進器の推力成分によって発生する横傾斜モーメントが大きいことがその理由と考えられる。

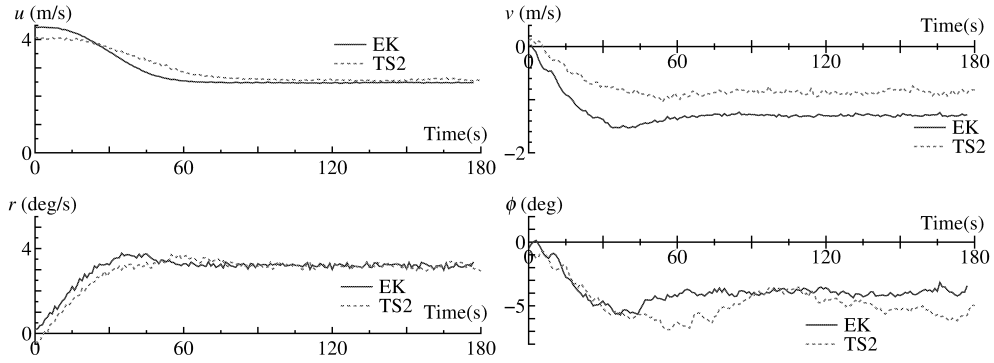
4.4.5 Z 試験

Z 試験結果：時刻歴結果

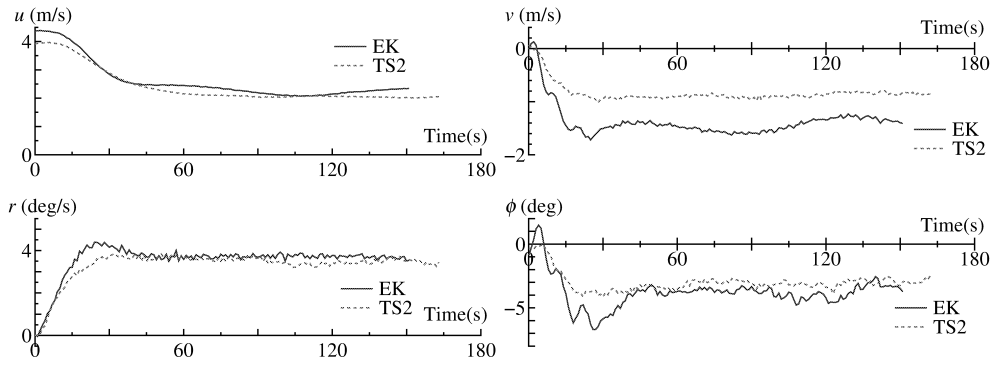
Fig. 4.16(a) に $BA = 16^\circ$ における $\pm 10/10Z$ 試験の方位角 ψ と舵角 δ の時刻歴結果を、また、(b) に $\pm 20/20Z$ 試験の時刻歴結果を示す。船尾トリムの影響について見てみると、 $10/10Z$, $20/20Z$ 試験結果の両方において、EK, TS2, TS1 の順に第一行き過ぎ角 (1st OSA) ならびに第二行き過ぎ角 (2nd OSA) が、小さくなっており、トリム角が大きいほど、操舵応答が改善されていることが分かる。これは、速力試験とは傾向が異なる。

行き過ぎ角

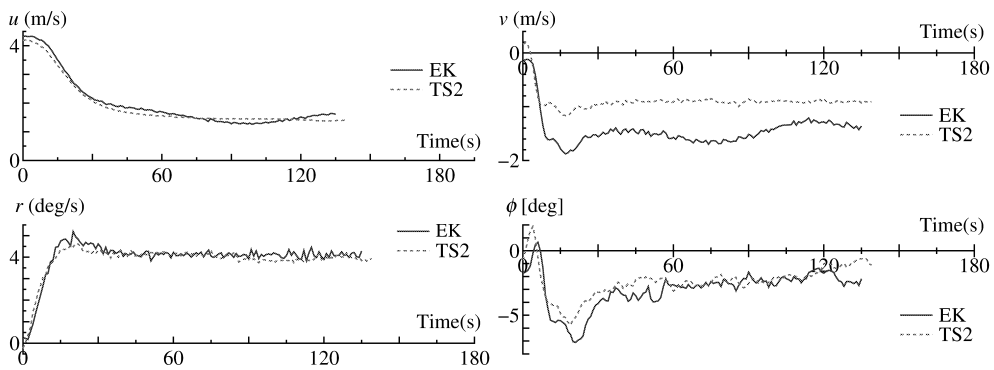
Fig. 4.17 に $\pm 5/5Z$, $\pm 10/10Z$, $\pm 20/20Z$ の 1st OSA ならびに 2nd OSA と舵角の関係を示す。1st OSA, 2nd OSA とも、TS1, TS2 の方が EK よりも小さいことが分かる。1st OSA に関しては、EK に対して、TS1 が平均約 53%, TS2 が平均約 42% 低



(a) $BA = 16^\circ$, $\delta = 10^\circ$

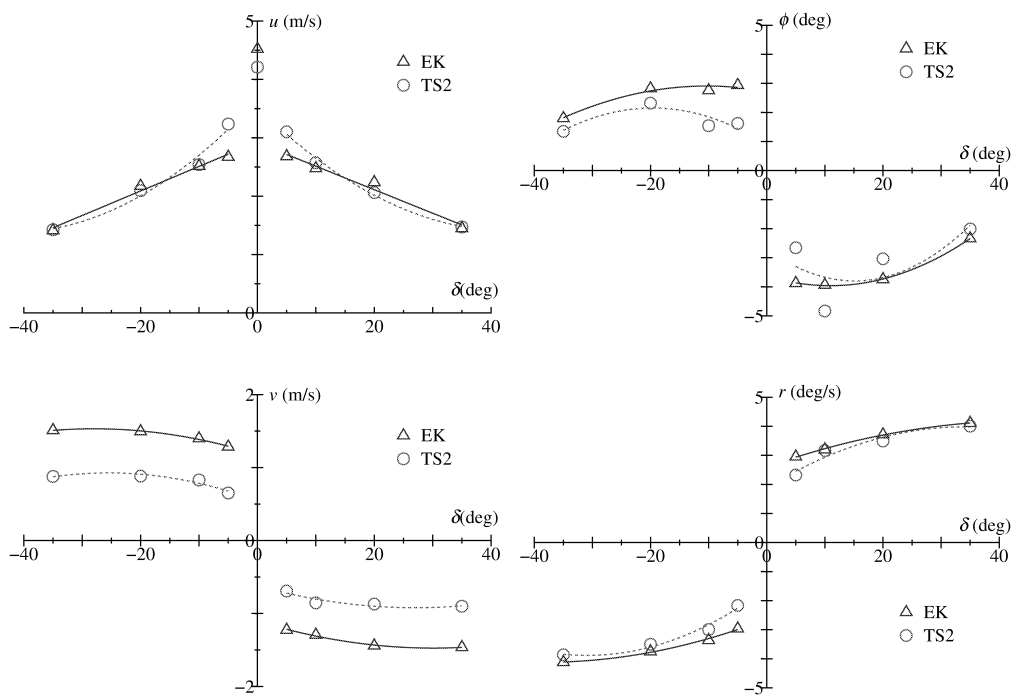


(b) $BA = 16^\circ$, $\delta = 20^\circ$



(c) $BA = 16^\circ$, $\delta = 35^\circ$

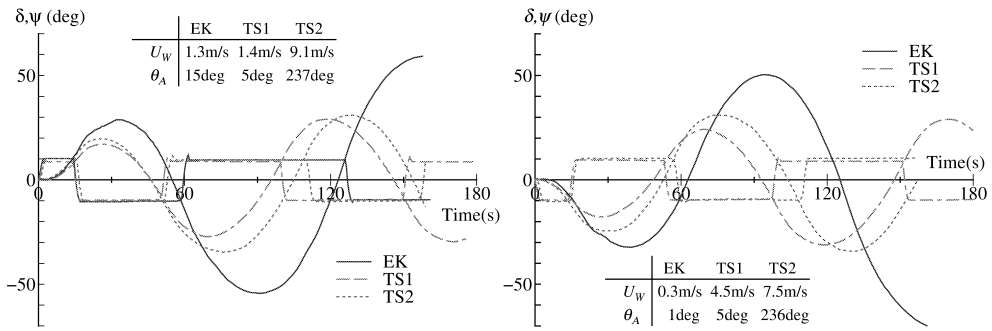
Fig. 4.14: Comparison of time histories of u , v , r and ϕ in turning test



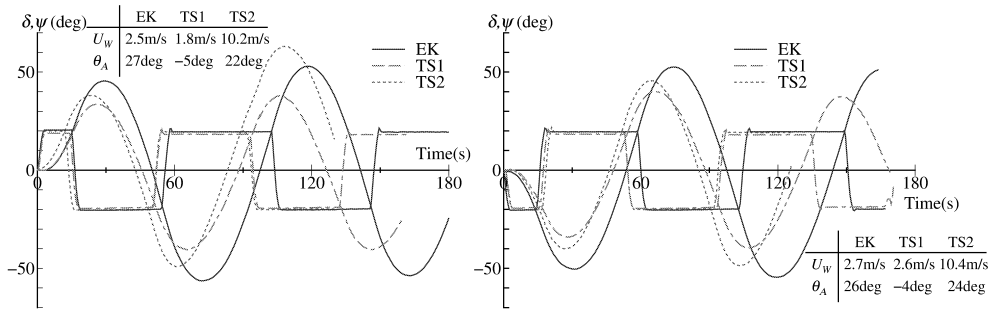
(a) u and v

(b) ϕ and r

Fig. 4.15: Performance of steady turning test



(a) 10/10 zig-zag test



(b) 20/20 zig-zag test

Fig. 4.16: Time histories of zig-zag test

減, 2nd OSA に関しては TS1 が平均約 59%, TS2 が平均約 50% も低減している。特に 2nd OSA の小舵角において大きく改善されていることが分かる。また TS1 と TS2 を比較すると, TS1 の OSA がより小さいことが分かる。これは, TS1 の船尾トリム量が TS2 よりも 0.16m 大きいためであると考えられる。このように, 船尾トリム角が大きいほど, OSA が小さく, 針路安定性に優れることが分かる。

実船試験で得られた行き過ぎ角を用いて, IMO 基準値をもとに本船の保針性能の評価を行う。本船は元々 IMO 基準については対象外であるが, それを適用するとすれば, Z 試験の基準値は次のようになる。

- 10/10Z 試験において 1st OSA < 10°, 2nd OSA < 25°
- 20/20Z 試験において 1st OSA < 25°

本船が EK の場合には IMO 基準値を満たしていないが, TS1 では基準を満たしており, 針路安定性を改善する方法として, 船尾トリムで航行することは有効であることがわかる。

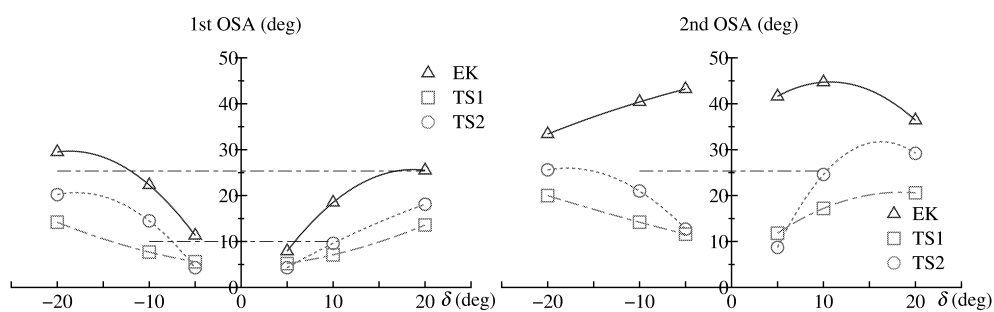


Fig. 4.17: Comparison of 1st and 2nd overshoot angles in zig-zag test ($BA = 16^\circ$)

4.5 水槽試験：針路安定性に及ぼすトリム影響

針路安定性に及ぼす船尾トリムの影響を把握するために, 拘束模型試験を広島大学工学部船型試験水槽で実施した。

4.5.1 模型船

使用した模型船の縮尺比は 1/11.88 であり, 模型船の船長は 2.99m である。試験では, 模型船に POD 推進器模型 2 台載せるものの, プロペラは付けず, すなわち, POD 推進器のストラットだけが付いた状態で試験を実施した。

姿勢変化による影響を調べるため, Even Keel(EK), Trim by Stern(TS1) の 2 パターンで実施した。これらは実船試験における状態に一致させている。

4.5.2 試験の概要

CMT 試験を実施した。CMT 試験とは“Circular Motion Test” のことであり、模型船を定常的に斜航もしくは旋回運動させ、その時船体に作用する流体力を求めるものであり、3 分力計を船体中央部に設置し、船体に働く前後力 X 、横力 Y 、ミドシップまわりの回頭モーメント N を計測する。計測時の船速 U は、実船の航海速度 10.2kt に相当する 1.516m/s とした。無次元化された回頭角速度 $r' (= rL/U)$ については、 $r' = 0$ 、 $r' = \pm 0.1$ 、 $r' = \pm 0.2$ と変化させた。また、ミドシップ位置での船体斜航角 $\beta = -25^\circ$ から 25° までを 5° 刻みで変化させて、計測を行った。

4.5.3 CMT 試験結果

EK と TS1 の CMT 試験結果を示す。無次元値 X' を Fig. 4.18、 Y' を Fig. 4.19、 N' を Fig. 4.20 にミドシップにおける斜航角 β ベースに図示する。EK が (a)、TS1 が (b) である。計測された船体に働く前後力 X 、横力 Y 、ミドシップまわりの回頭モーメント N は以下の方法で無次元化している。

$$X', Y' = X, Y / \frac{1}{2} \rho L d U^2$$

$$N' = N / \frac{1}{2} \rho L^2 d U^2$$

なお、 X' 、 Y' の計測値には遠心力に基づく成分が混入していることに注意が必要である。遠心力に基づく成分を除いた流体力成分 (X'_H, Y'_H, N'_H) は次のような微係数で表示し、

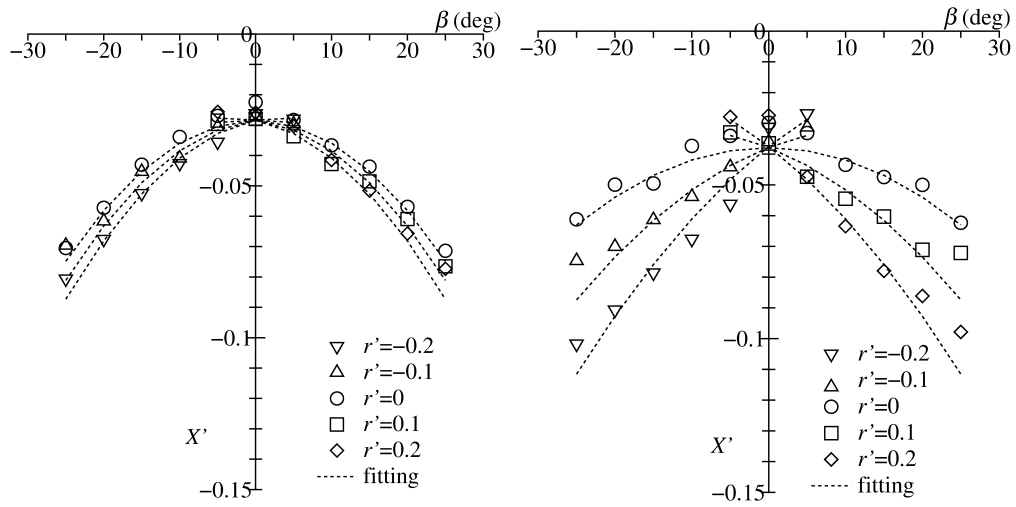
$$X'_H = X'_0 + X'_{\beta\beta} \beta^2 + X'_{\beta r} \beta r + X'_{rr} r^2$$

$$Y'_H = Y'_\beta \beta + Y'_r r' + Y'_{\beta\beta\beta} \beta^3 + Y'_{\beta\beta r} \beta^2 r + Y'_{\beta r r} \beta r^2 + Y'_{r r r} r^3$$

$$N'_H = N'_\beta \beta + N'_r r' + N'_{\beta\beta\beta} \beta^3 + N'_{\beta\beta r} \beta^2 r + N'_{\beta r r} \beta r^2 + N'_{r r r} r^3$$

それによる計算結果を破線 (fitting と表示) で示している。 $X'_{\beta\beta}$ や Y'_β 等の操縦流体力微係数は、計測結果を元に最小自乗法で決定する。なお、今回の試験では、 r' の変更幅が狭く、 r' に関する非線形項を精度良く求めることができないため、 $Y'_{\beta r r}, Y'_{r r r}, N'_{\beta r r}, N'_{r r r} = 0$ とした。Fig. 4.18, 4.19, 4.20 から、求めた微係数による Fitting の精度は十分であることがわかる。

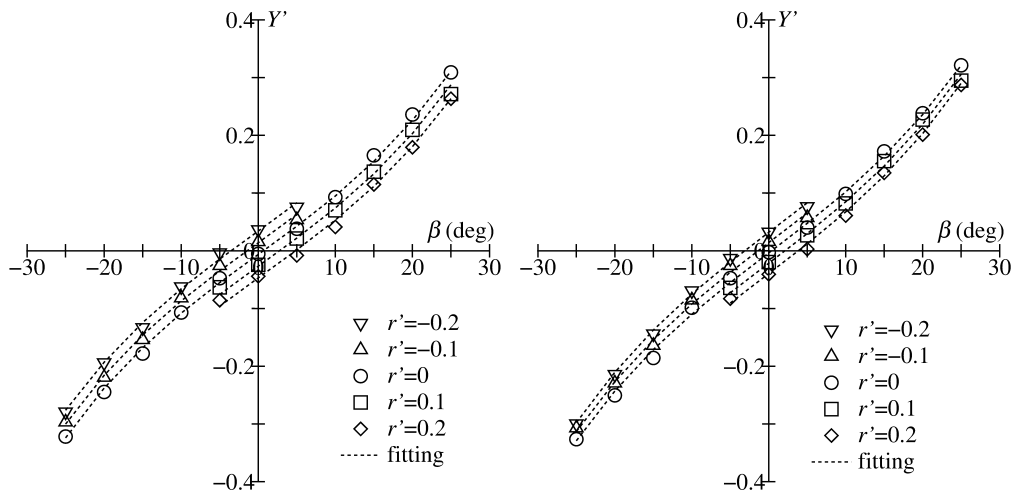
CMT 結果から求めた操縦流体力微係数を Table 4.6 に示す。 X' における EK と TS1 の違いは、主に $X'_{\beta r} - (m' + m'_y)$ に現れている。線形の微係数に関しては、EK から TS1 への変化に対し、 Y'_β は増加、 $Y'_r - (m' + m'_x)$ の絶対値は減少、 N'_β は減少、 N'_r の絶対値は減少している。これらの変化は、 N'_r を除いて、すべて針路安定側への変化である。



(a) Even keel

(b) Trim by stern

Fig. 4.18: Circular Motion Test results X'



(a) Even keel

(b) Trim by stern

Fig. 4.19: Circular Motion Test results Y'

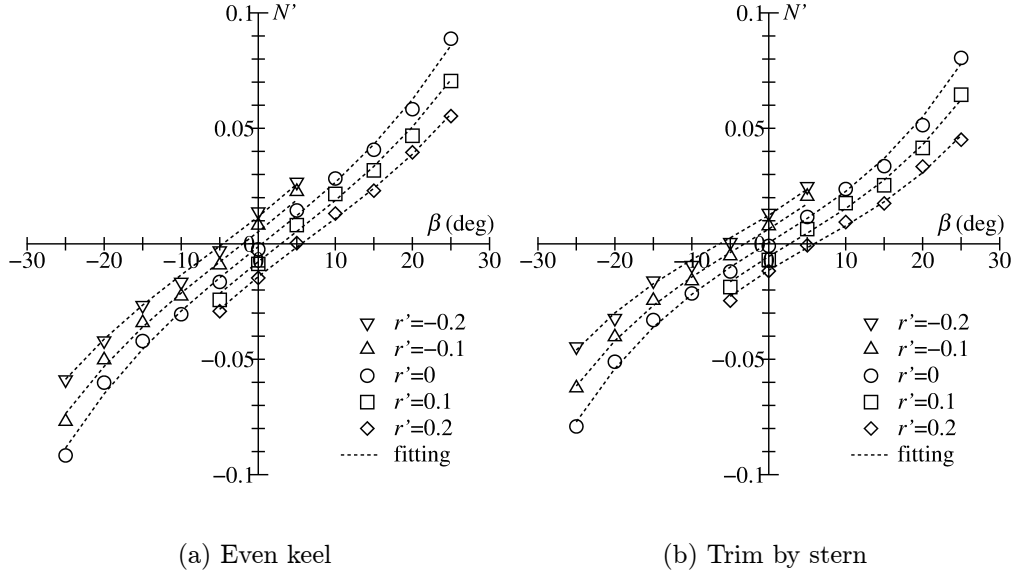


Fig. 4.20: Circular Motion Test results N'

Table 4.6: Hydrodynamic force derivatives on maneuvering

	EK	TS1
$X'_{\beta\beta}$	-0.243	-0.132
$X'_{\beta r} - (m' + m'_y)$	-0.145	-0.561
X'_{rr}	0.004	0.010
Y'_{β}	0.552	0.581
$Y'_{r} - (m' + m'_x)$	-0.203	-0.178
$Y'_{\beta\beta\beta}$	0.925	0.858
$Y'_{\beta\beta r}$	-0.197	0.124
N'_{β}	0.152	0.118
N'_{r}	-0.065	-0.060
$N'_{\beta\beta\beta}$	0.251	0.312
$N'_{\beta\beta r}$	-0.440	-0.504

4.5.4 針路安定性の検討

計測された流体力の結果から、線形微係数を取り出し、次式を用いて針路安定性係数 C を計算する。

$$C = \frac{N'_r}{Y'_r - (m' + m'_x)} - \frac{N'_\beta}{Y'_\beta} \quad (4.1)$$

$$m', m'_x = m, m_x / (1/2)\rho L^2 d$$

m_x : x 方向の付加質量係数

式 (4.1) において $C > 0$ のとき針路安定であり、 $C < 0$ のとき針路不安定である。なお、ここで使用する線形微係数は、ミドシップではなく重心をベースとしたものであることに注意が必要である。付録 A.2 に示した方法で、推進器の影響を考慮して、重心まわりの線形微係数を求めた。

重心まわりの線形微係数と針路安定性指数 C の計算結果を Table 4.7 に示す。EK, TS1 とともに C の値は負であり、針路不安定であることがわかる。船尾トリムを付けても、完全に針路不安定性が払拭されたわけではない。ただ、船尾トリムの付いた TS1 の C は EK のそれよりも大きく、針路安定性が改善されていることがわかる。これは、小舵角時の応答改善がなされた実船試験の結果と同じものである。針路安定性の改善には、旋回に関わる微係数 N'_r と $Y'_r - (m' + m'_x)$ ではなく、斜航に関わる微係数 Y'_β の増加と N'_β の減少によって式 (4.1) 右辺第 2 項が減少したことが大きく寄与していることがわかる。これは、船尾トリムの付加が旋回運動時の斜航角の絶対値を大きく減少されるという実船試験結果を裏付けするものと考えられる。

Table 4.7: Linear derivatives and course stability criterion

	EK	TS1
Y'_β	0.603	0.632
$Y'_r - (m' + m'_x)$	-0.204	-0.192
N'_β	0.152	0.132
N'_r	-0.079	-0.072
C	-0.096	-0.065

4.6 本章のまとめ

操縦性能に及ぼすトリム影響を調査するために、K-GPS を用いて「豊潮丸」の実船運動計測を行った。その結果、次のような知見が得られた。

- 「豊潮丸」は等喫水状態で航行すると針路不安定性の傾向があるが、船尾トリムを付けることにより、針路安定性が大きく改善される。船尾トリムの付

加は、本船の場合、旋回運動時の斜航角の絶対値を大きく減少させるという特徴を持つが、それによる旋回性能の悪化はほとんど見られなかった。

- 船尾トリムを付けると、同一のプロペラ翼角において6%程度速力が低下した。
- 頻繁に操舵すると速力が低下するので、速力試験ではなるべく操舵しないようにした方がよい。
- 直進時の保針のための操舵と運動計測から δ と \dot{r} には強い相関があることがわかった
- 「豊潮丸」は優れた旋回性能を有し、船尾トリムの付いた状態での D_T は、 $|\delta| = 10^\circ$ で約 $3.0L_{pp}$ 、 $|\delta| = 35^\circ$ で約 $2.0L_{pp}$ であった。これは通常の船舶における舵角 35° が本船の 10° に匹敵するものである。これはPOD推進器が大きな操舵力を発生するためであると考えられる。
- 船尾トリムを付けると、主に船体斜航角に関する微係数 Y'_β と N'_β が針路安定側へと変化し、その結果、本線の針路安定性が改善されることが水槽試験よりわかった。

第5章 K-GPSによるOP級ヨットの運動計測

5.1 はじめに

OP級は、15才以下の子供に使用されるもので、強風下でも姿勢が保たれ、容易に操縦できることから、ヨットの入門艇として活躍している。

これまでのヨット研究の中で、OP級の研究はほとんど行われておらず、帆走性能が把握できていない状況にある。2007年に広島県ヨット連盟からOP級の推進性能向上を図りたいとの依頼により、広島大学船型試験水槽においてOP級の実船を用いて姿勢を変化させた抵抗試験を実施し、船速1.5m/sあたりから造波抵抗が増加することと、トリムなしでヒールさせると船体抵抗が小さくなることが分かった [23]。そこで、更に帆走性能の把握を行うため、姿勢計測が可能な小型K-GPS受信機を使用し、海上で実船試験を行って、風向、風速および姿勢と速力の関係が明らかになったので報告する。

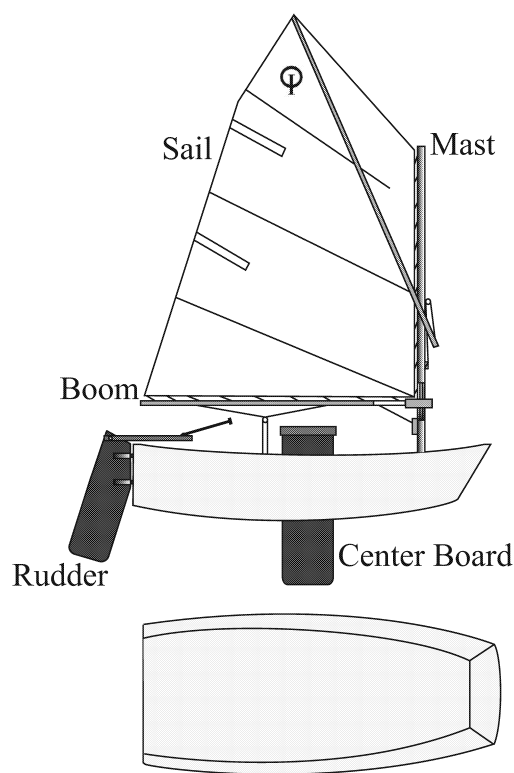


Fig. 5.1: Optimist Dingy

5.2 OP級の概要

OP級は Fig. 5.1 に示すように箱形の船型で、非常に大きな舵と出し入れできるセンターボードを持つ1枚帆のヨットである。本試験は実艇を用いて行った。OP級の主要目 (船長 L_{oa} , 幅 B , 重量 W) を Table 5.1 に示す。

Table 5.1: Principal dimensions of Optimist Dinghy

L_{oa} (m)	2.31
B (m)	1.13
W (kgf)	42.1

5.3 試験内容

5.3.1 海上試験

OP級の帆走性能を把握するため、2008年9月22日にFig. 5.2に示す広島市西区にある広島観音マリーナのヨットハーバー内で海上試験を行った。閉鎖された海域であるため、波・潮流の影響は少なく、風速は2~5(m/s)であった。



Fig. 5.2: Layout of Kan-non marina

Fig. 5.3に示すようにレースと同様に風上・風下・サイドの3点にブイでマークを打ち、操縦者がフラット・ヒール・トリムの3姿勢でそれぞれ3周ずつ(全9周)周回した。この3点のマークを周回することで、風上に向かって走るクローズホールド、後ろから風を受けて走るランニング、横から風を受けて走るアビームというヨットの基本的な帆走状態を測定した。なお、マークの間隔はハーバー内という制約のため、約40mとした。また、操縦者による違いを調べるため、大学生2人の操縦者に帆走してもらった。2人の操縦者の違いをTable 5.2に示す。また、センター

ボードはアビームとクローズホールドでは完全に下し、ランニングでは半分下した状態で航走している。



Fig. 5.3: Picture of the trial zone

Table 5.2: Characteristics of Skipper

Skipper	A	B
Weight(kgf)	69.5	66.5
Experience(year)	1.5	0.5

5.3.2 実験機材

実船計測に際し OP 級ヨットに設置した機材を Fig. 5.4 に示す。まず、マストの上部に超音波式風向風速計 (a) を設置し、GPS の時刻情報と共に PocketPC(b) に保存した。そして、GPS アンテナを船首中央 (c) と右舷と左舷の後方 (f) に設置し、後方のアンテナは船体より後方に張り出して取り付け、ブームに当たったり、操縦者を妨害したりすることのないようにした。GPS 受信機とバッテリーはセンターボードの横にすのこで船底から浮かし、熱暴走しないよう通気性を確保しながらカバーをかけてしぶきから保護した。また、マストの真下に防水パックに入れたビデオカメラ (d)、舵上部には小型防水カメラ (e) を設置して、帆と舵の角度を映像によって計測した。

基準点から計測地点までの基線長は 350m 程度であるので RTK-GPS も可能であったが、

- 搭載する機器の軽量化を図る
- 実験中に動作確認できないため、リアルタイム処理が不要である
- 補正情報を得るための通信に信頼性を確保することが困難である

- a: Wind Sensor
- b: Pocket PC
- c: GPS Antenna
- d: Video Camera
- e: Video Camera
- f: GPS Antenna

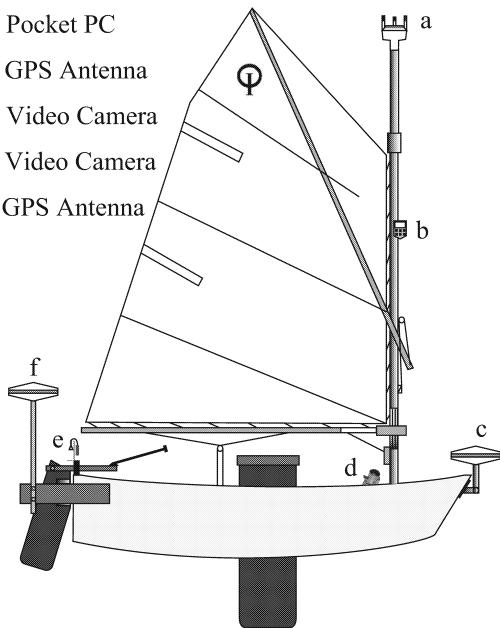


Fig. 5.4: Measurement equipments



Fig. 5.5: Optimist Dinghy

といった点から後処理方式の K-GPS を使用し、データは GPS 内蔵の CF カードに保存した。そして、後処理によってそれぞれの GPS アンテナの位置と高さを求め、船速や 3 次元的なヨットの姿勢を求めた。

OP 級のような小型の艇で船体中心線と平行に Main と Aux1 のアンテナを設置することは困難であり、Aux2 アンテナとの距離を確保することもできない。

そこで、Fig. 5.6 に示すように、Main アンテナを右舷後方、Aux1 アンテナを左舷後方、Aux2 アンテナを船首中央に設置した。また、後方のアンテナは船体より後方に張り出して取り付け、ブームに当たったり、操縦者を妨害したりすることのないようにした。

次に Table 5.3 に OP 級に取り付けた実験中のアンテナ間距離の精度を示す。Table 2.7 に示す静止時の標準偏差と比較して航海中は精度が悪化していることがわかる。これは、アンテナが振動す

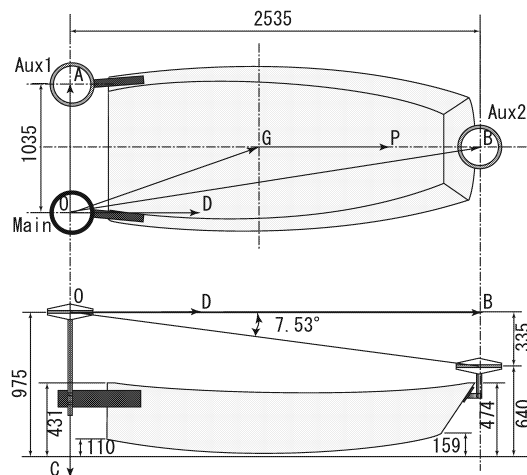


Fig. 5.6: Arrangement of GPS antennas

ることによってアンテナ間隔が変動したり、操縦者やセールやブーム、マストが障害物となったり、マルチパスが増加したことが原因であると考えられる。それでも、標準偏差は7mm であるので運動計測に与える影響は小さい。

Table 5.3: Accuracy of distance between antennas in sailing

Antennas	F-R	L-R
Average(m)	2.575	1.029
Std. dev.(m)	0.007	0.007

5.4 解析方法

Fig. 5.7 に座標系を示す。座標系は右手系で鉛直下向きに z 軸を取った。また、帆や操縦者の移動により重心が変化するため、船体固定座標系の原点は船体中央とした。 ψ は針路、 U は船速、 u は前進速度、 v は横速度、 β は斜航角 (リーウェイ)、 W_A は相対風速、 γ_A は相対風向、 W_T は真風速、 γ_T は真風向、 δ は舵角、 τ は帆角、 ϕ はヒール角、 θ はトリム角を表す。

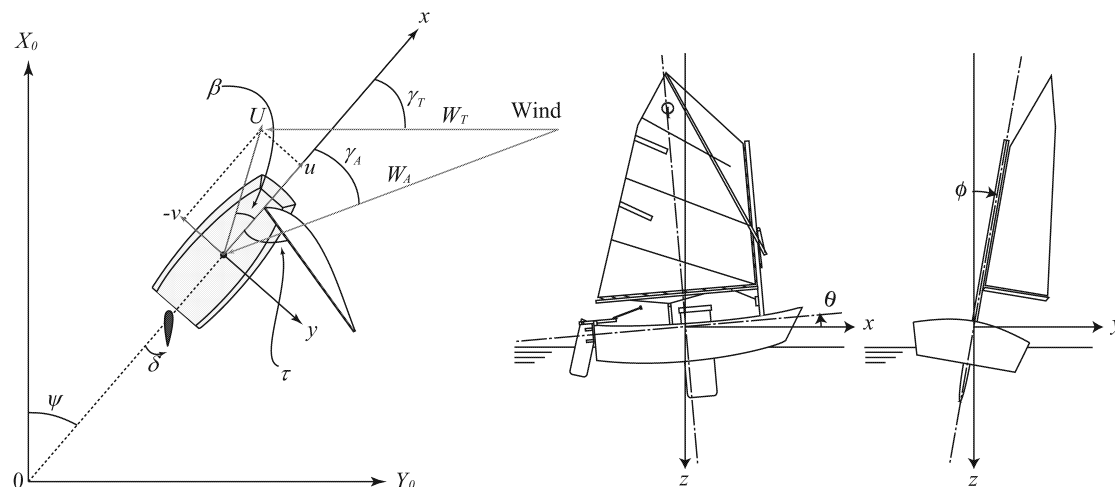


Fig. 5.7: Coordinate Systems

姿勢と運動の導出方法は「豊潮丸」と同様に「2.6 K-GPS3 台による姿勢計測」に示す方法を用いた。ただし、GPS アンテナは Fig. 5.6 に示すように、Aux2 を前方に設置したため、右舷が Main, 左舷が Aux1 となっている。そして、風向風速計により計測された相対風向 γ_A ・相対風速 W_A と船体運動のデータから、真風向 γ_T ・真風速 W_T を算出する。また、セール・ラダーのカメラから、ブーム角 τ と舵角 δ を計測する。解析には、計算により得られたデータの中で、Fig. 5.8 のように直線的に帆走している部分を取り出し、それぞれの平均値を使用した。

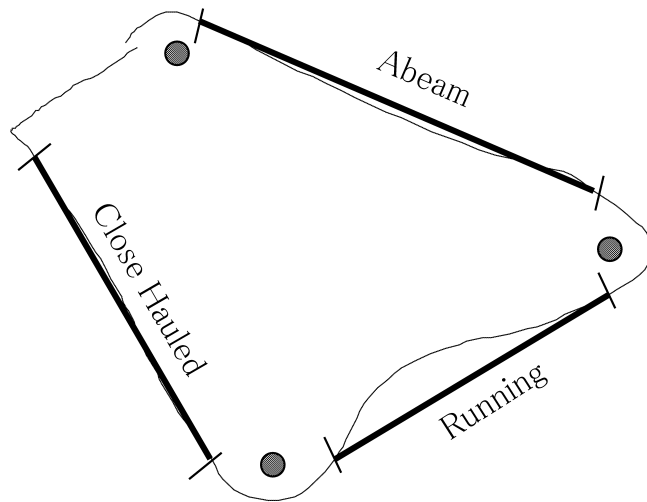


Fig. 5.8: Approximation of three conditions

5.5 解析結果

Table 5.4, 5.6, 5.5 に操縦者 A, Table 5.7, 5.9, 5.8 に操縦者 B のアビーム, クローズホールド, ランニング帆走時のデータを示す。9周しているのだから本来なら各データは9組ずつ得られるが, 変動が大きく平均できない部分は除いた。また, いずれの場合も U は 1.5m/s 以下で, 造波抵抗が増加し始めるより低い領域で帆走している。なお, 操縦者 B の計測の際, ビデオが動作していなかったため, τ と δ の計測ができなかった。

操縦者 A に注目すると, δ は 5° 以下であるので操舵の影響は小さく, Table 5.4 のアビームでは, 3周目を除き γ_T は 255° 前後, β は -5.5° 前後, Table 5.6 のランニングでは3周目を除き γ_T は 160° 前後, β は 3° 前後, Table 5.5 のクローズホールドでは γ_T は 60° 前後, β は 1° 前後と変動が少ない。また, ϕ は最大でも 10° 程度で, 帆の投影面積に与える影響は 1.5% と小さい。操縦者 B についても, A よりはばらつきが大きいものの, 大きな変動はない。そこで, 舵角や帆のヒール影響は無視して姿勢と船速-真風速比 U/W_T との関係について検討を行った。

Fig. 5.10 にトリム角 θ と U/W_T の関係, Fig. 5.11 にヒール角 ϕ と U/W_T の関係を示す。なお, 各々の図において (a) は風を横から受けるアビーム, (b) は風を斜め前方から受けるクローズホールド, (c) は風を後ろから受けるランニングの結果で, U/W_T の値が大きい程, 効率良く風速を船速に変換していることを表している。実線は操縦者 A, 破線は操縦者 B のデータを最小自乗近似したものである。

Fig. 5.10 を見ると, 操縦者 A(▲) はフラットか後ろトリム, 操縦者 B(■) はフラットか前トリムで帆走していることが分かる。Fig. 5.10(a) のアビームではトリム角 θ が 0° に近づくほど速度が速いことが見てとれる。また, 操縦者 A と操縦者

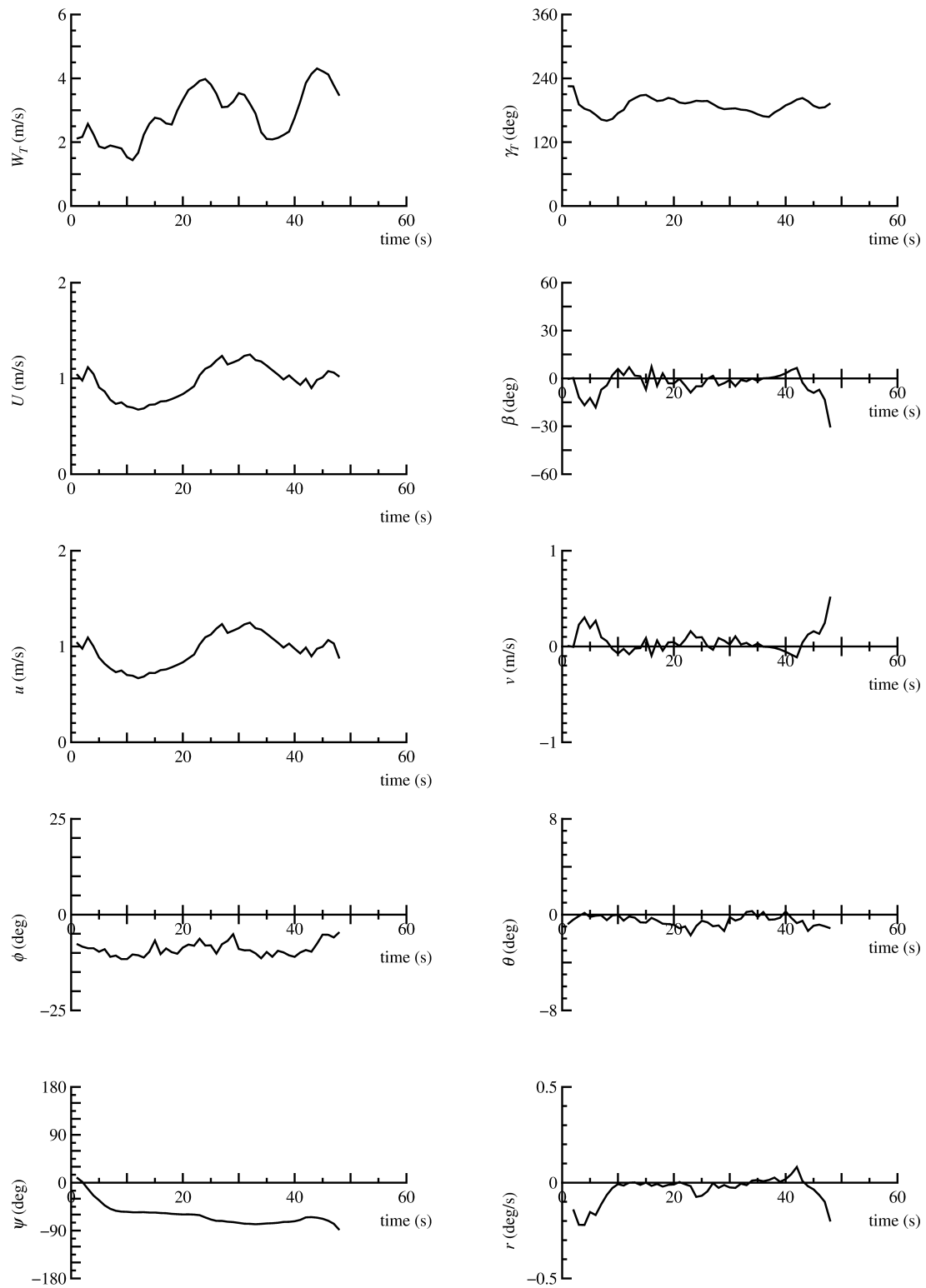


Fig. 5.9: Time history of abeam 2nd lap (Skipper A)

Table 5.4: Averaged values measured in abeam condition (Skipper A)

No.	ϕ (deg)	θ (deg)	U (m/s)	β (deg)	ψ (deg)	γ_A (deg)	γ_T (deg)	W_T (m/s)	τ (deg)	δ (deg)	U/W_T
2	4.0	0.4	1.2	-4.6	292	269	250	3.7	30	2.0	0.33
3	2.3	0.3	1.1	-2.8	297	252	229	2.5	35	3.0	0.42
5	5.5	0.5	1.2	-6.3	285	281	263	4.0	30	5.0	0.31
6	4.4	0.4	1.0	-5.5	295	272	251	2.7	35	5.0	0.36
7	0.6	0.3	1.5	-5.5	292	267	245	3.3	35	2.5	0.36
8	1.5	0.6	1.5	-4.1	292	276	255	4.1	40	2.5	0.36
9	2.3	0.3	1.2	-6.0	290	274	255	3.8	30	0.0	0.32

Table 5.5: Averaged values measured in close hauled condition (Skipper A)

No.	ϕ (deg)	θ (deg)	U (m/s)	β (deg)	ψ (deg)	γ_A (deg)	γ_T (deg)	W_T (m/s)	τ (deg)	δ (deg)	U/W_T
2	-3.7	0.5	0.8	-0.7	123	53	66	2.9	10	2.5	0.29
3	-3.5	0.2	1.2	0.8	138	44	57	3.5	20	0.0	0.34
4	-9.6	1.1	0.7	1.7	138	41	54	2.1	20	0.0	0.36
5	-10.2	1.0	0.8	1.1	139	43	54	2.7	15	0.0	0.29
6	-10.4	1.5	0.8	1.8	163	18	21	3.9	20	0.0	0.21
7	-4.3	0.3	0.9	-0.5	138	49	62	2.8	10	0.0	0.31
8	-6.7	0.7	0.6	-3.3	128	48	60	2.2	20	0.0	0.27
9	-6.3	0.1	1.3	1.1	140	45	61	3.4	15	0.0	0.39

Table 5.6: Averaged values measured in running condition (Skipper A)

No.	ϕ (deg)	θ (deg)	U (m/s)	β (deg)	ψ (deg)	γ_A (deg)	γ_T (deg)	W_T (m/s)	τ (deg)	δ (deg)	U/W_T
2	-1.6	0.8	1.4	-0.4	52	144	156	3.6	-60	-3.0	0.40
3	-1.3	0.4	1.2	-2.5	56	125	143	3.1	-60	0.0	0.39
4	-8.6	1.3	1.2	-3.6	42	153	163	3.3	-70	-5.0	0.37
5	-6.6	0.9	1.1	-2.9	53	156	164	3.0	-70	-5.0	0.38
6	-5.7	0.3	1.3	-3.5	46	146	161	2.9	-70	-3.0	0.44
7	-1.0	0.1	1.4	-3.5	51	142	157	3.3	-70	0.0	0.41
8	-3.7	0.0	1.2	-3.3	51	155	164	3.1	-60	0.0	0.38
9	-3.2	-0.1	1.2	-4.3	59	114	138	2.9	-65	0.0	0.44

Table 5.7: Averaged values measured in abeam condition (Skipper B)

No.	ϕ (deg)	θ (deg)	U (m/s)	β (deg)	ψ (deg)	γ_A (deg)	γ_T (deg)	W_T (m/s)	U/W_T
1	1.9	-0.3	1.2	-4.2	294	274	254	3.6	0.33
2	1.9	-0.6	1.3	-4.3	298	267	247	3.8	0.34
4	2.0	-0.7	1.2	-3.0	296	273	253	3.4	0.34
5	6.0	-0.4	1.3	-4.7	295	271	251	3.6	0.36
6	3.2	-0.7	1.2	-4.6	292	271	254	3.9	0.31
8	4.1	-0.4	1.5	-4.2	289	273	255	4.6	0.33
9	2.8	-0.1	1.1	-4.4	300	262	241	3.2	0.34

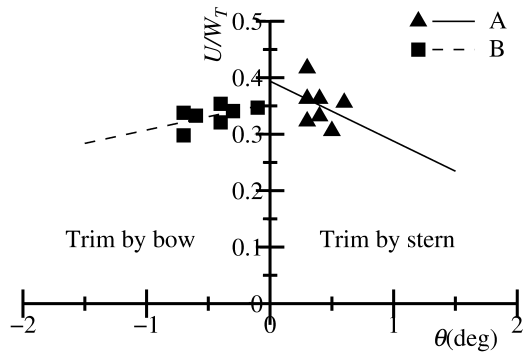
Table 5.8: Averaged values measured in close hauled condition (Skipper B)

No.	ϕ (deg)	θ (deg)	U (m/s)	β (deg)	ψ (deg)	γ_A (deg)	γ_T (deg)	W_T (m/s)	U/W_T
4	1.9	-1.0	1.3	-3.0	44	145	157	3.7	0.35
5	1.9	-0.9	1.4	-3.6	43	147	159	3.5	0.40
6	2.0	-0.8	1.6	-4.2	42	169	173	4.5	0.36
7	6.0	-0.6	1.3	-2.8	49	129	147	3.3	0.39
8	4.1	-0.5	1.4	-3.3	51	150	160	3.7	0.38
9-1	4.1	-0.5	1.4	-3.8	60	130	146	3.8	0.37
9-2	2.8	-0.2	1.3	-4.9	42	163	169	3.9	0.33

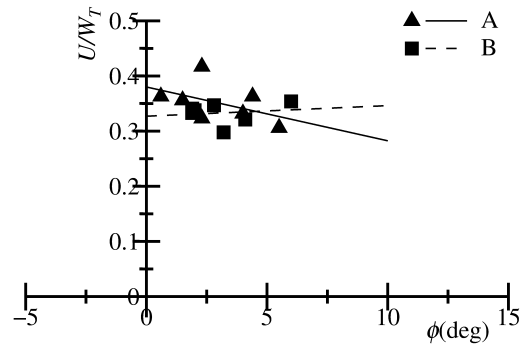
Table 5.9: Averaged values measured in running condition (Skipper B)

No.	ϕ (deg)	θ (deg)	U (m/s)	β (deg)	ψ (deg)	γ_A (deg)	γ_T (deg)	W_T (m/s)	U/W_T
1	-0.5	-1.4	0.9	-0.7	153	29	38	3.0	0.30
3	-2.1	-0.4	1.0	-1.5	149	31	41	2.9	0.34
4	-2.9	-0.6	0.9	-2.5	148	27	35	3.0	0.30
5	-1.3	-0.4	1.0	-3.7	146	36	48	3.0	0.33
6	-1.0	-0.3	1.0	-1.5	137	44	61	2.6	0.38
7	-2.4	-0.3	1.3	-0.4	146	33	45	3.4	0.38
8	-0.5	-0.1	0.7	1.6	145	40	53	2.1	0.33
9	-1.8	0.1	1.2	-0.8	147	36	47	3.4	0.35

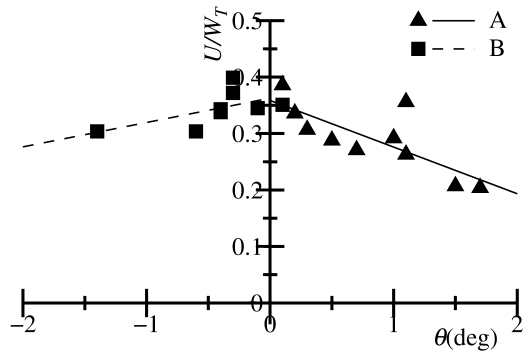
Bを比較すると後ろトリム気味の操縦者Aの方が速いことが分かる。以上のことから、アビームでは、姿勢はフラットで帆走するのがもっとも良く、前トリムよりは後ろトリムの方が良いと言える。次に、(b) クローズホールド、(c) ランニングについても同じ解析を行ったところ、操縦者Bのランニングでフラットの速度が特に遅いため近似直線が逆の傾向になっているものの、全体としては、どちらもアビームと同様に、フラットで帆走するのがもっとも良いという結果を得た。特に、アビームとクローズホールドではトリムの影響が大きいことがわかった。



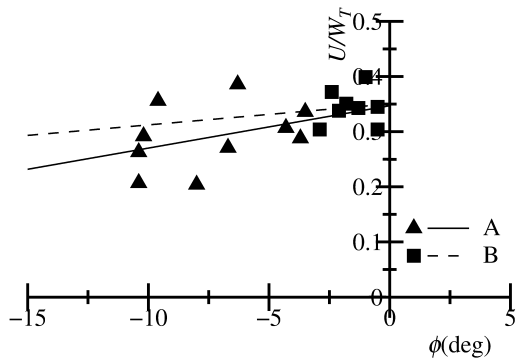
(a) Abeam condition



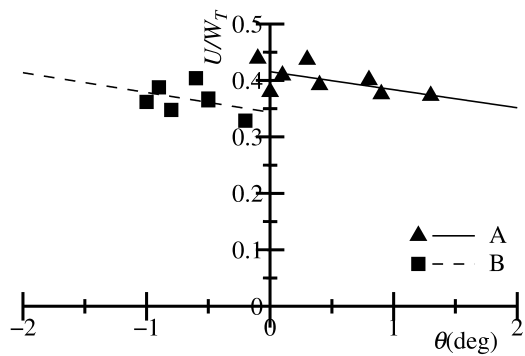
(a) Abeam condition



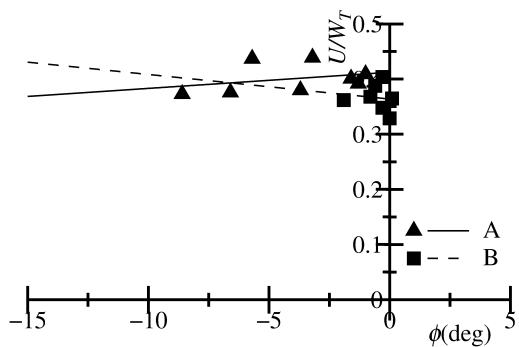
(b) Close Hauled condition



(b) Close Hauled condition



(c) Running condition



(c) Running condition

Fig. 5.10: Relation between speed and trim angle

Fig. 5.11: Relation between speed and heel angle

Fig. 5.11(a) に示したアビームにおいて、操縦者 A(▲) はヒール角 ϕ が 0° に近づくほど効率が良くなっている。しかし、操縦者 B の場合、 ϕ が大きくなるほど効率が良くなっているが、これは、 ϕ の大きい時にトリム角 θ が小さいためと考えられる。(b) のクローズホールドも同様にフラットの方が良い。しかし、 -10° あたりでは同じ ϕ で値がばらついており、個々に見ると U/W_T が小さい時は θ が大きくなっているため、 ϕ より θ の影響の方が大きいと考えられる。次に、(c) のランニングの場合、A は線形近似ではヒールさせた方が遅くなるが、フラットより 5° 程度ヒールさせた方が U/W_T が大きくなっており、ランニングではヒールさせた方が良いことがわかる。操縦者 B は ϕ の変化が小さいため、近似精度が悪い。

Fig. 5.12 に示す二人の航跡を比較すると、クローズホールドでの航路が大きく異なることが分かる。操縦者 A は、風向に対し約 60° を保ち帆走しているのに対し、操縦者 B は、風向に対し常に 45° を保ち帆走している。この航路差が周回タイムにどれほど影響しているかを調べるため、1 周分の周回タイムを平均により求めた。

周回タイムを Table 5.10 に示す。

Table 5.10 を見ると、操縦者 B より操縦者 A の方が、平均風速が遅いにもかかわらず平均船速は速く、1 年間の経験の差が現れていることがわかる。しかし、帆走距離が 18m 長いため、平均周回タイムが 14s 遅くなっている。そこで、今回計測したデータを基にポーラーダイアグラムを作成し、タイム差について考察する。

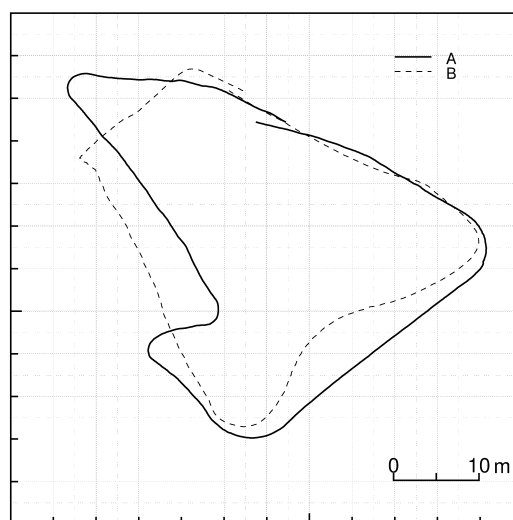


Fig. 5.12: Comparison of 2 skipper's track log

Table 5.10: Averaged values of lap, track length, speed etc.

Skipper	Lap(s)	Length	SPD(m/s)	Wind(m/s)
A	145	152	1.04	3.1
B	131	134	1.03	3.3

5.6 ポーラーダイアグラム

ポーラーダイアグラムとは、一定の風向風速の下で、真風向から見た船の進行方向 ($\gamma_T + \beta$) により変化する船速を図で表したものである。Fig. 5.13 に OP 級と真風速 5m/s の 470 級 [24] のポーラーダイアグラムを示す。Table 5.11 に示すように 470 級は全長が 4.7m と、OP 級の約 2 倍の大きさの 2 人乗りヨットである。Fig. 5.13 を見ると、風を約 90° で受けるアビームでの帆走が 470 級に比べ OP 級は大きく凹んでいて、アビーム、クローズホールド、ランニングともに、船速にあまり差がないことが分かる。

今回の操縦者は、普段 470 級やスナイプ級を操縦している。そのため、OP 級を 470 級やスナイプ級と同じポーラーダイアグラムと考え帆走したと考えられる。特に 1 人目は、風向に対し約 60° を保ち帆走しており、これは 470 級のポーラーダイアグラムから分かるように、船速を上げる事を意識して取った航路と言える。470 級の場合、1 人目のように、風向に対し約 60° を保ち帆走すると、風向に対し 45° を保ち帆走した 2 人目に比べ距離は長くなるが、速度が速いため、これほど大きなタイム差は生じない。しかし、OP 級のポーラーダイアグラムは、470 級と大きく異なり、アビーム、クローズホールド、ランニングともに、船速にあまり差がなかった。そのため、風向きを意識するより短い距離を帆走した B の方が経験は浅いが、速いタイムとなった。したがって、OP 級の特徴を知った上でのコース取りが重要となる事がわかる。

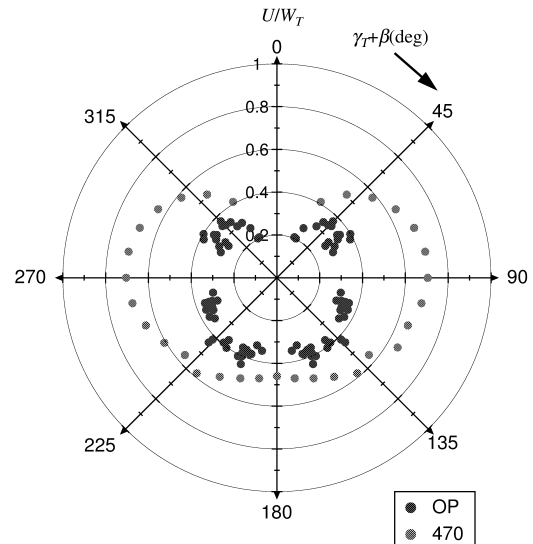


Fig. 5.13: Polar diagram

5.7 本章のまとめ

今回、K-GPS と超音波風向風速計を装備して OP 級の海上帆走試験を実施し、以下の知見を得た。

- アンテナ間隔を長くすることができない OP 級のような小型艇でも K-GPS で姿勢と運動を計測することが可能であることがわかった。
- 抵抗試験ではヒールさせた方が抵抗は小さくなったが、実船試験では、概ね、姿勢はトリム、ヒールともにフラットにした方が速い。

Table 5.11: Specifications of OP and 470

Class	OP	470
L_{oa} (m)	2.31	4.7
L_{pp} (m)	2.165	4.4
Weight(kgf)	42.1	120
Mast(m)	2.35	6.76
Sail Area(m ²)	3.30	12.70
Jib(m ²)	-	3.58
Main(m ²)	3.30	9.12
Spinnaker(m ²)	-	13

- 姿勢の影響はヒールよりトリムの方が大きく、特に前トリムになると速度が遅くなる。
- クローズホールドは特にトリムの影響が大きい。
- ランニングでは少しヒールさせた方が速い。
- OP 級は、アビーム、クローズホールド、ランニングともに、船速にあまり差がなく、風上 45° までであれば、最短距離のコースを取るのがよい。

実船試験で、明確な姿勢変化を付けることができなかつたため、姿勢に関する推定精度が良くなかつた。また、今回はポーラーダイアグラムの作成を念頭に置いた実験を行っていないため、ポーラーダイアグラムは 60-100° や 180° 付近が欠けており、詳細な特徴をつかむためには、さらに多くの計測が必要である。そして、今回計測できなかつたセンターボードの影響についても検討する必要がある。

さらに、今回は平均値解析のみであったが、タッキング等の動的な挙動も含め時刻歴データが取得できているので、水槽試験を実施してシミュレーションモデルを作成し、シミュレーションを行う際の検証データとしても利用していきたい。

第6章 潮汐影響のある河川の水深計測について

6.1 はじめに

本章では、K-GPSの船舶への応用例として、GPSやD-GPSとは桁違いに精度の良いK-GPSの高度情報を利用して、潮汐影響のある水深の浅い河川において、既存のインフラを利用することなく深浅測量が行えることを示す。

ミシシッピ川やエルベ、ドナウ川を有する欧米では河川輸送が発達している。東南アジアにおいても河川輸送に適した大きな河川が存在しており、ベトナムではメコン川とその周辺の運河を使用して盛んに河川輸送が利用されている。インドネシアにおいても、Fig. 6.1に示すように西カリマンタン・Kapuas川、東カリマンタン・Mahakam川やスマトラ・Musi川等で資源輸送に河川を利用している。



Fig. 6.1: Transport wood and coal using barges at Mahakam River

しかしながら、東南アジアの河川は、雨季に大量の土砂が堆積し、川床の形状が大きく変化する。さらに、乾季・雨季の季節変動のみならず、毎日の潮汐の影響も内陸側数百 km に及び、無視できないにも関わらず、インフラ整備が遅れているため、座礁や衝突等の事故が多発している。信頼のおける輸送手段として河川輸送を推奨するには安全性、信頼性の向上が不可欠であり、それには河川を輸送水路として活用するための環境整備にあたるパブリックセクターの機能と、個々の輸送業者

が輸送船舶の安全な運航管理を行うというプライベートセクターの機能を系統的に整える必要がある。

パブリックセクターの機能は河川を輸送に用いる上で共通に必要な条件の整備を行うことで、多岐にわたる。大別すると、

- 水路条件に応じた航行船舶のサイズの制限とか、橋脚の高さや水深の確保という安全運航のための物理的条件
- 狭隘部での遭遇等を安全に保つための運航の調整、あるいは漁業者との水域利用の競合を調整するためのゾーニングといった人的社会的条件

の整備がある。このパブリックセクターの機能の明確化と整備がアジアの河川輸送の振興には大変に重要である。その中で最も重要なものが河川の水深に関するもので、水深状態を計測し、必要なら浚渫等を施すと共に、運航者に必要な水深の情報を提供することである。

本研究の目的はこの河川の水深を現代技術を用いて、正確に効率的に把握する手法を開発することである。海底の場合は、測量船によるマルチビーム音響測深機、透明度のある浅瀬や河川では、航空機を使用したレーザー測深機により、機動的な測量体制を構築している [25, 26] が、浅くて幅広の河川で、しかも濁っている場合、これらの機材は利用しづらい。本研究の目的は、近年、低コスト化したことで簡便に利用可能になった K-GPS が水平方向のみならず、垂直方向についても高精度で位置計測を可能にすることに注目して、K-GPS と超音波式測深器を組み合わせる水深測定システムを作り、アジアの河川で実用性を確認することである。この方法に河川毎に推定値が公表されている潮汐表を組み合わせると実用的な精度で基本水準面からの水深の推定が可能なることを確認したので報告する。

6.2 水深計測の概要

2006年8月2日にインドネシア共和国の東カリマンタンにある Mahakam 川において、Fig. 6.2 に示す、河口からおよそ 100km 範囲の水深計測を行った。なお、この時期は乾季のため、河川の水位はかなり低くなっている。

Fig. 6.3 に計測システムの概念図を示す。水深計測位置の測位には高度の計測精度が必要であるので K-GPS を使用した。使用機材は、以下のとおりで、すべて日本から国際宅配便で現地に輸送した。なお、今回使用したニコン・トリンプルの GPS 受信機は輸出管理令別表第 1 に該当するため、輸出許可申請を行っている。

基準局 GPS	ニコン・トリンプル 4000SSE Compact L1/L2 Antenna
移動局 GPS	ニコン・トリンプル MS-750(2台) Micro Centered L1/L2 Antenna
音響測深器	タマヤ計測システム TDM-9000A



Fig. 6.2: Survey route on Mahakam River (Google Earth®)

K-GPS 基準局は Fig. 6.4(a) に示すように Samarinda 港湾局の屋上に設置し, Fig. 6.4(b) に示す 4000SSE のデータをノートパソコンに記録した。基準局の位置はインターネット上で公開されていたジャカルタとシンガポールの電子基準点から静止測量によって位置を求めた。また, K-GPS の後処理解析には Trimble Total Station を使用し, 測地系は WGS84, 直角平面座標には海図との親和性を考慮し UTM を用いた。

水深計測に使用した船舶は, Fig. 6.5 に示す Samarinda 港湾局所有の警備艇で, 全長 20.5m, 全幅 5m の 2 軸 2 舵船で, 船速はおおよそ 7kt であった。

川床がほぼ水平であるとする, 船体が横揺れすると, 見かけの水深は深くなる。そのため, 計測した水深にも横揺れの補正を行う必要がある, この船の中央部両舷に K-GPS アンテナを Fig. 6.6(a) のように設置し, この 2 台のアンテナ位置から, 横揺れ角を求めた。そして, 横揺れ影響を補正した 1 秒ごとの船体位置と針路を得た。また, Fig. 6.6(b) に示すように右舷側の GPS アンテナ近傍に音響測深器の送受波器を設置して, Fig. 6.6(c) の装置で水深を計測した。河口から海へ出ると揺れが大きくなったが, 河川航行中に横揺れはほとんど無く, 最大でも $\pm 2^\circ$ 程度で, 水深に対する誤差は 0.1% 以下であった。しかも, 送受波器の指向角が $\pm 3^\circ$ であるので, 水深への横揺れ影響は無視した。

なお, K-GPS 基準局から個別に求めた船舶の 2 台の GPS アンテナ位置の相対距離の誤差は一部例外を除き $\pm 5\text{cm}$ 以内で標準偏差は基準局からの距離に関係なく約 1.5cm であったので, 水深計測の位置精度としては十分であったと考える。

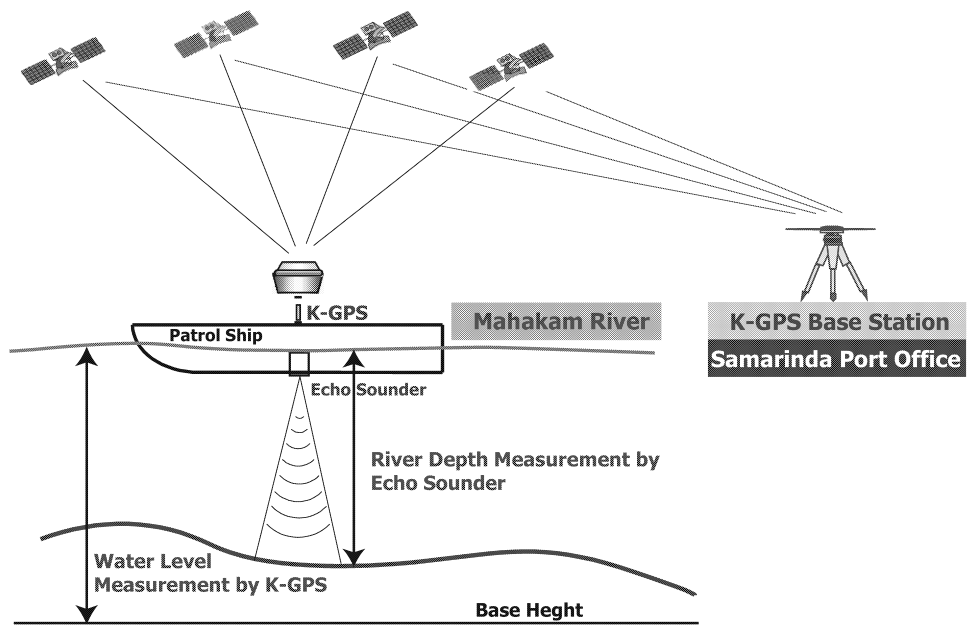


Fig. 6.3: Measurement System



(a) GPS antenna on the roof



(b) GPS receiver

Fig. 6.4: Base Station at Samarinda port office



Fig. 6.5: Patrol ship for survey on Mahakam River



(a) GPS antenna



(b) Echo Sounder



(c) GPS receiver and Echo Sounder

Fig. 6.6: Equipments on the patrol ship

6.3 GPS 計測した水面高度について

データを取得した範囲は下記の通りである。時刻は UTC で現地は+8 時間の時差がある。

1:37	-	6:43	(約 65km)	Samarinda	-	Muara Pegah 沖 (河口)
6:49	-	12:15	(約 65km)	Muara Pegah	-	Samarinda
12:15	-	18:33	(約 35km)	Samarinda	-	Tenggarong

GPSによって求めた位置の差分から得た対地速力を Fig. 6.7 に示す。Samarinda を出港して Muara Pegah までの下りには速力変動が見られるが、それ以降の上りはほぼ定速で航行している。「3.2 船位計測への K-GPS の適用」でも述べたように、速力によってトリムや沈下量は変化するが、GPS アンテナを船体中央に設置したのでトリムの影響は受けない。また、沈下量が船長の 0.2% としても変動は約 4cm であり、K-GPS の高度誤差と同程度であるので、速力変動による高度変化は無視した。

K-GPS で計測した水面の WGS84 楕円体高の時系列を Fig. 6.8 に示す。まず、Samarinda を出発して川を下っているにもかかわらず、3:10 までは水面高度が上昇している。その後、水面高度が下がり、河口付近では水面高度の振幅が大きくなっているが、これは波による影響であると思われる。それから、Samarinda に戻ると、水面高度が出発時より約 0.4m 下がっていた。それから約 1 時間は川を上っているにもかかわらず、高度がほぼ一定になっている。Tenggarong には 16:30 頃到着した。それ以降は、停泊しているにもかかわらず水面高度が変化しており、河口から 100km 上流でも潮汐の影響を受けていることがわかる。なお、Mahakam 川の流速は翌日 Tenggarong で行った旋回試験の結果、約 0.6m/s であった。旋回試験の他、Z 試験も試みたが、舵角指示器が故障しており、舵軸から直接舵角を読み取って見たものの、舵輪の回転角と舵角に再現性がないことが判明し、操縦性能試験を行うことはできなかった。この警備艇は Mahakam 川を航行するだけであるので、航海計器は不要で、唯一使用できたコンパスも普段はふたをして使用していなかった。

Fig. 6.9 は河口の南、約 15km の地点を原点として船の 1 秒毎の移動距離を積算した距離を横軸にしている。この図から往路と復路で水面高度が異なっており、最大で約 1m 違うことがわかる。また、横軸が船の移動積算距離であるため、河川の長さとは異なる。一部、往路と復路で異なる経路を航走していることもあり、Samarinda に到着した時点で約 3km 位置がずれた。また、85km 付近で高度に段差が現れているが、これは、そこで 30 分程度停泊し、その間に潮位が変化したためで、時系列で示した Fig. 6.8 に段差がないことからわかるように、計測上の問題ではない。翌朝、Tenggarong から Samarinda まで戻る際も計測を行ったが、基準点を設置した港湾局で停電があり、GPS が動作停止し、基準点のデータが欠落したため、解析できなかった。したがって、以降の解析は Samarinda から河口までの往復のみを扱う。

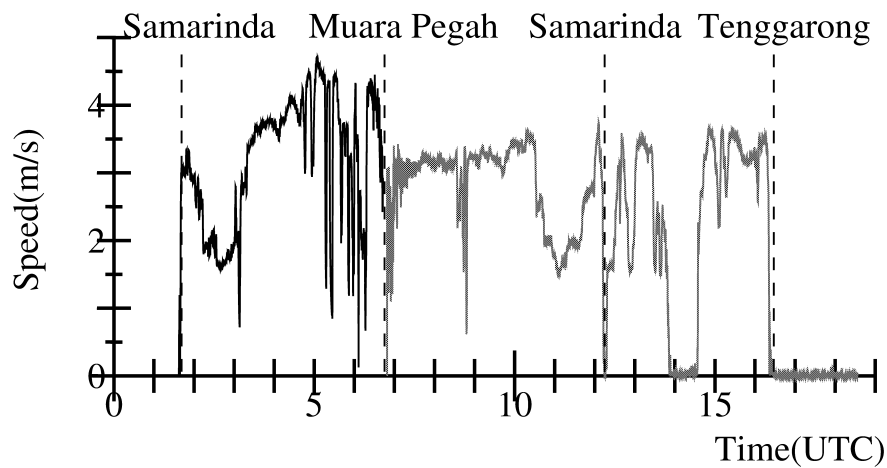


Fig. 6.7: Patrol ship speed over the ground measured by K-GPS

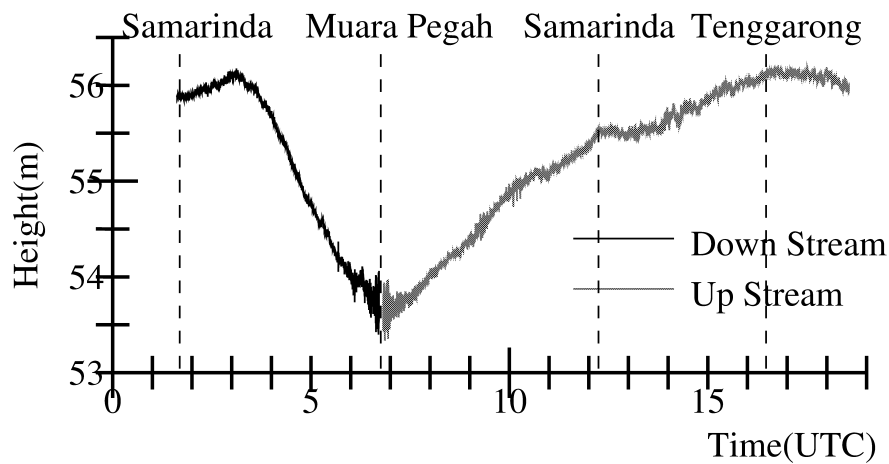


Fig. 6.8: Time history of water level measured by K-GPS

6.4 計測した水深について

6.4.1 距離補正

Fig. 6.10 に GPS で求めた河口から Samarinda までの航走距離と水深の関係を示す。本来は面的に水深を計測し、等高線図で表すべきであるが、単純に 1 往復計測しただけであるので、河川を線として取扱った。下りと上りで航走距離が異なっているため、同一地点にもかかわらず距離が異なっているとみなされ、水深の変化が一致していない。また、河口付近で水深が連続的に変化せず、2 倍程度の値になっている点が多数存在しているのは波浪によるロールの影響と、水深が浅いため、航路の部分のみ浚渫を行っており、余分な反射波を拾ったためと思われる。なお、Mahakam 川の川幅は 1km 程度であるが、Samarinda の川下側で川幅が 300m 程度に狭くなっているところがあり、水深が急激に深くなっているところと一致する。

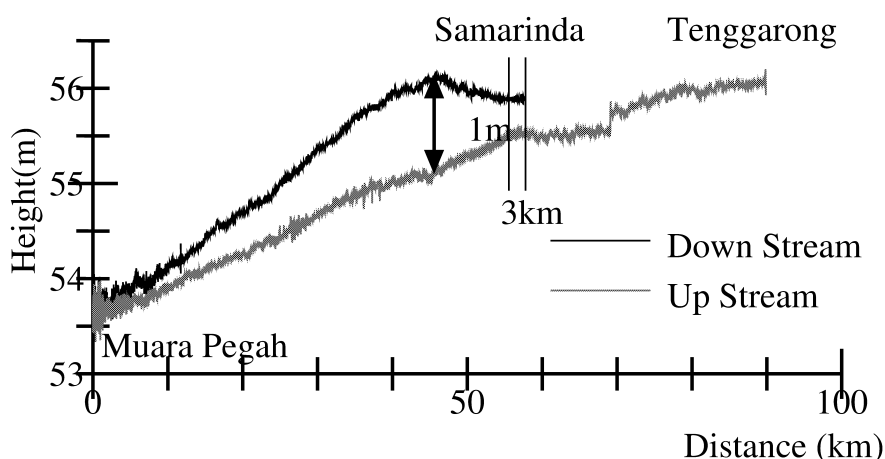


Fig. 6.9: Comparison of water level measured by K-GPS

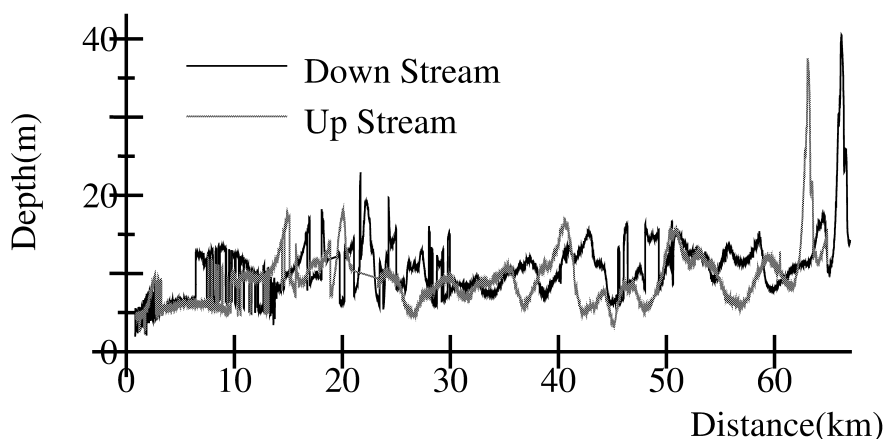


Fig. 6.10: River depth measured by sounder

下りと上りで航走距離が異なるため、航走距離では位置の同定ができない。そこで、河口からの距離で表現することを試みた。すなわち、Fig. 6.11に示すように河川を折線近似し、計測点から折線に垂線を下ろして交点を求め、航走距離の代わりに、河口から交点までの折線の線分長の合計を距離とし、その点における水深として扱うことにした。すなわち、計測点と折線との交点が i 番目の折線にあり、 j 番目の線分長が L_j で、 P_{i-1} からの距離が l であるとすると、距離 L は (6.1) 式で表せる。

$$L = l + \sum_{j=1}^{i-1} L_j \quad (6.1)$$

なお、今回の目的は、河川の距離を正確に求めるのが目的ではなく、往路と復路の距離を一致させるのが目的であるので、目視によって主観的に河川を折線で近似した。近似は、DAN 杉本氏のカシミール 3D [27] のルート生成機能を使用し、University of Maryland の Earth Science Data Interface [28] よりダウンロードした

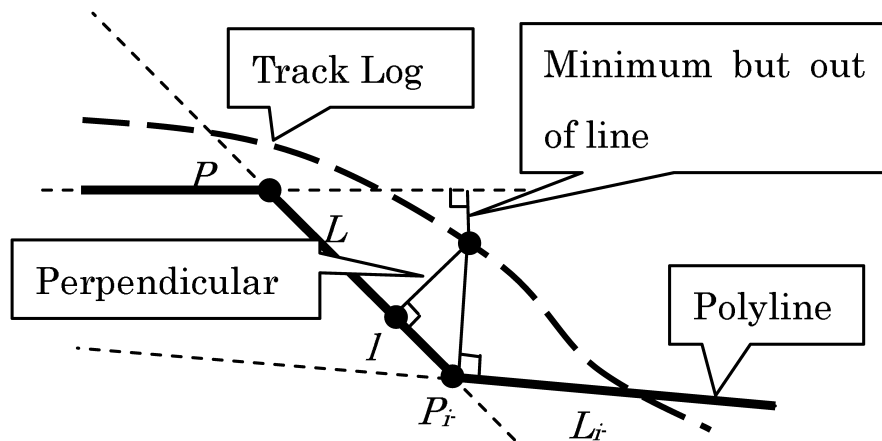


Fig. 6.11: The way of polyline fitting

Landsat 衛星画像を元に行った。近似した折線を Fig. 6.13 に、また、座標と距離を Table 6.1 に示す。なお、緯度が負になっているのは南緯であることを表している。45km 付近のトラックログを折線近似し、5 分間隔でプロットした例を Fig. 6.12 に示す。コースの異なる下りと上りが一本の折線上にプロットされている。

折線近似によって距離を修正した結果を Fig. 6.14 に示す。Fig. 6.10 に見受けられた位相のずれがなくなっており、位置のずれが補正されていることがわかる。

次に、修正した距離と水面高度および水面高度から水深を差し引いた川床の高度の関係を Fig. 6.15 に示す。水面高度が川上に行くに従って徐々に高くなっているが、潮汐影響のため往路と復路で水面高度が異なっていることがわかる。また、30km から 40km 付近は往復で近いところを通航しており、川床の形状が良く一致しており、GPS による水面高度と測深器の水深が打ち消され、潮汐の影響を受けていないことがわかる。しかし、25km 付近では、中州の西側と東側を通航し、45km から 50km にかけては、Fig. 6.12 に示すように、下りは水深の深い外回り、上りでは水深の浅い内回りであったため、川床の形状が大きく異なっている。

6.4.2 潮汐補正

Mahakam 川は河口から 100km 上流でも標高が数メートルしかなく、潮汐の影響を受けて水位が変動する。今回の調査では、検潮場の有無を確認しなかったため、水位の実測値を使用することはできなかった。また、インドネシア浚渫局で入手した潮汐表は Mahakam 川の東側の河口にある Muara Bayor のデータのみであり、情報として不十分であった。米国 Garmin 社 [29] の海図ソフトである BlueChart® の Asia Pacific 版に収録されている潮汐データは Fig. 6.16 に示すように Mahakam 川関係で 5 箇所あり、潮汐表と同じ Muara Bayor 以外に、今回の計測に関係する Samarinda と Tanjung Dewa, Muara Pegah の 3 点のデータを得ることができた。BlueChart® から得られた当日の 3 箇所の潮汐を Fig. 6.17 に示す。

Table 6.1: The points of polyline

No.	Latitude (deg)	Longitude (deg)	Lateral Distance(m)	Longitudinal Distance(m)	Distance (km)
MuaraPegah	-0.98308	117.31625	535182	9891349	0.000
1	-0.90747	117.30612	534055	9899705	8.432
2	-0.84715	117.30651	534099	9906372	15.099
3	-0.81543	117.29948	533318	9909878	18.691
4	-0.80731	117.29967	533339	9910775	19.589
5	-0.80215	117.29440	532753	9911346	20.406
6	-0.79913	117.29137	532415	9911679	20.881
7	-0.79184	117.28796	532036	9912485	21.771
8	-0.78403	117.28698	531927	9913348	22.641
9	-0.77872	117.28796	532036	9913935	23.238
10	-0.77231	117.29010	532274	9914644	23.986
11	-0.76668	117.29089	532362	9915266	24.614
12	-0.76184	117.29089	532362	9915801	25.149
13	-0.75465	117.29030	532297	9916595	25.946
14	-0.74763	117.28949	532207	9917371	26.727
15	-0.72339	117.29013	532278	9920050	29.407
16	-0.70637	117.29434	532747	9921931	31.346
17	-0.69528	117.29878	533241	9923157	32.667
18	-0.68778	117.30163	533558	9923986	33.555
19	-0.67887	117.30456	533884	9924971	34.592
20	-0.66934	117.30514	533948	9926024	35.647
21	-0.65981	117.30456	533884	9927077	36.703
22	-0.63715	117.30007	533385	9929582	39.256
TanjungDewa	-0.61657	117.29792	533145	9931856	41.543
24	-0.60325	117.29538	532863	9933328	43.043
25	-0.59637	117.29010	532276	9934089	44.003
26	-0.58778	117.28268	531450	9935038	45.261
27	-0.58262	117.27507	530603	9935608	46.282
28	-0.57700	117.25827	528734	9936230	48.252
29	-0.57200	117.22370	524888	9936782	52.138
30	-0.55747	117.18464	520542	9938388	56.771
31	-0.53278	117.15827	517609	9941117	60.777
32	-0.52356	117.15378	517109	9942136	61.912
33	-0.51590	117.15495	517239	9942983	62.769
34	-0.51231	117.15299	517021	9943380	63.221
35	-0.50731	117.14616	516261	9943932	64.161
Samarinda	-0.49978	117.13343	514845	9944764	65.804

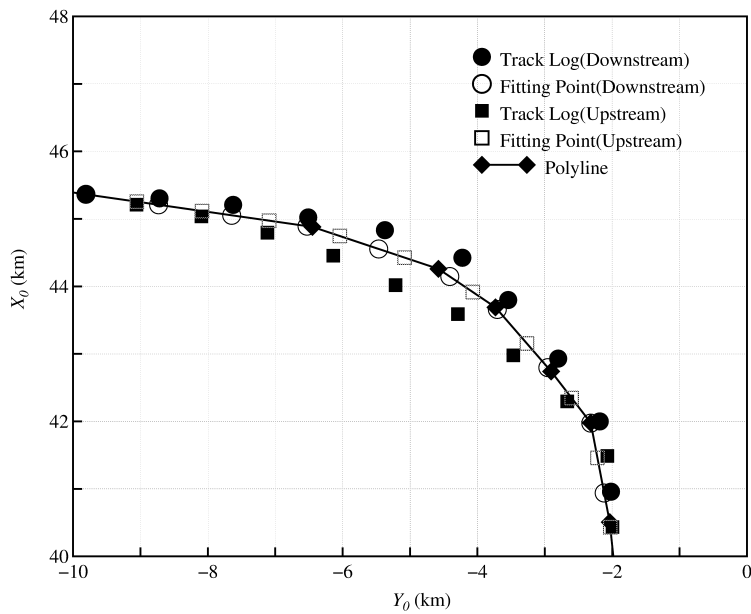


Fig. 6.12: The way of polyline fitting



Fig. 6.13: The tracklog compare with the fitted polyline

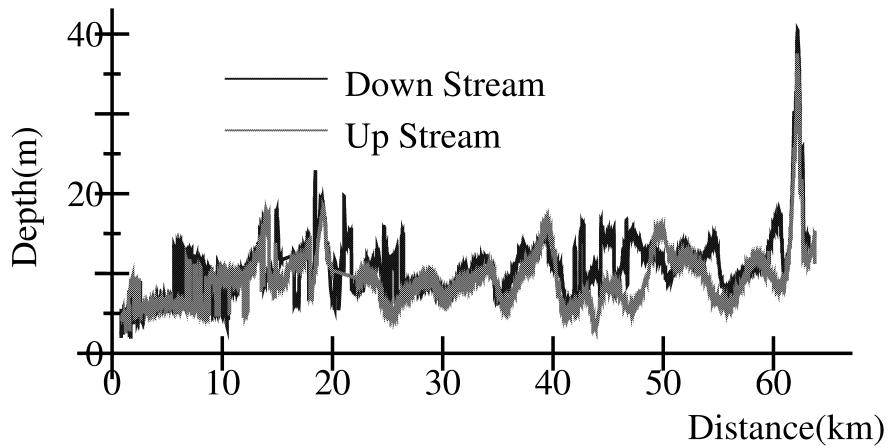


Fig. 6.14: River depth on the approximated distance o polyline

計測を行った2006年8月2日の Muara Bayor の潮汐表と BlueChart®から得た潮位を Table 6.2 に示す。両者を比較したところ Fig. 6.18 に示すように、BlueChart®の方が約 10cm 水位が高いものの、位相と振幅は良く一致しており、BlueChart®の潮汐データを使用できることが確認できた。また、潮汐は本来、月や太陽の影響による分潮の合成で表すが、Fig. 6.18 の BlueChart®のグラフを満潮と干潮間を半波長の正弦波で近似したところ、Fig. 6.19 に示すように、よく一致していた。そこで、他の地点でも同様の近似を行ってみたところ、Tanjung Dewa で誤差が最大

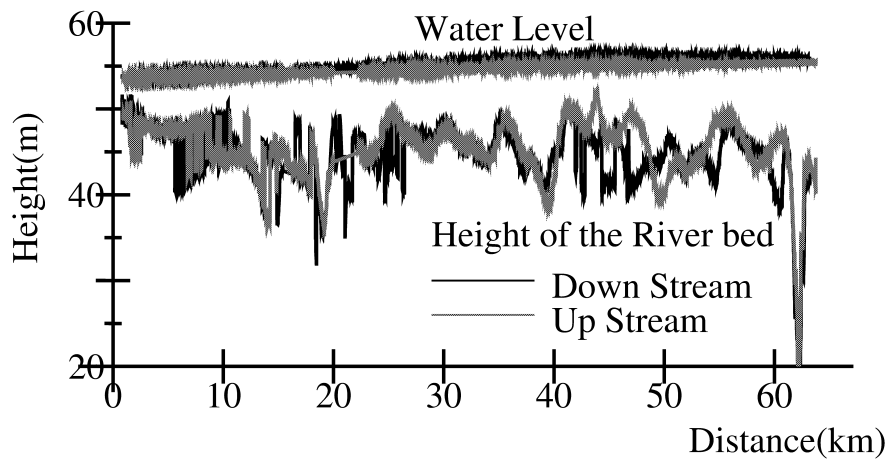


Fig. 6.15: Measured water level and height of river bed approximation

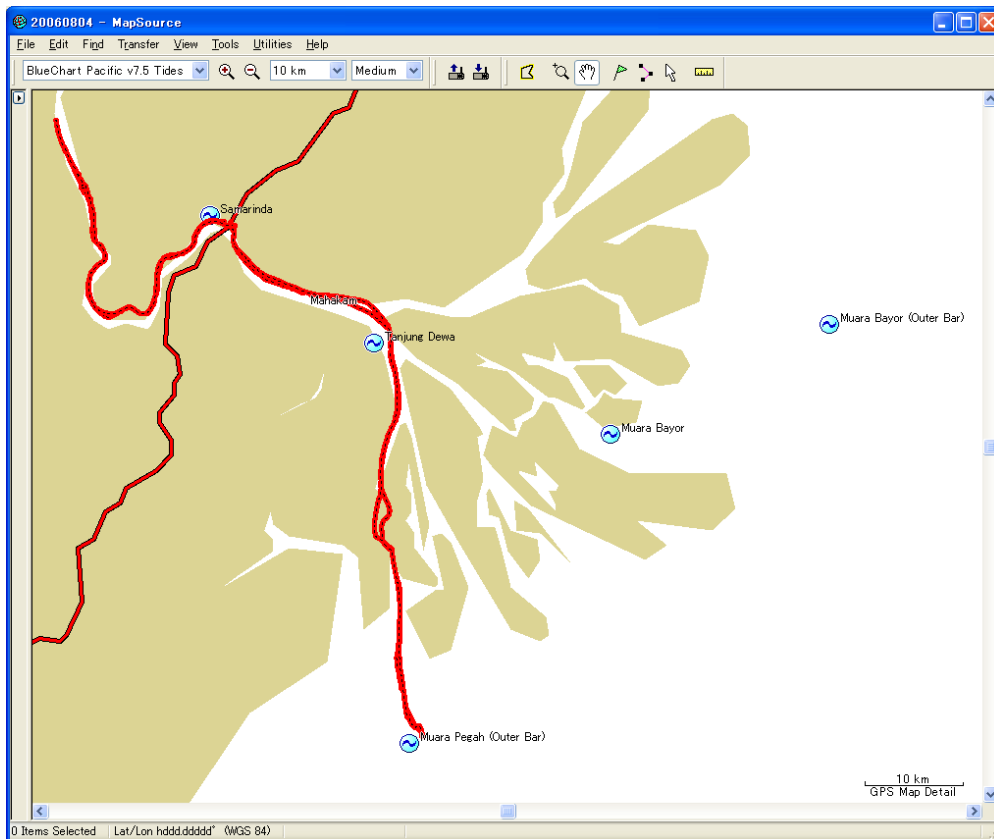
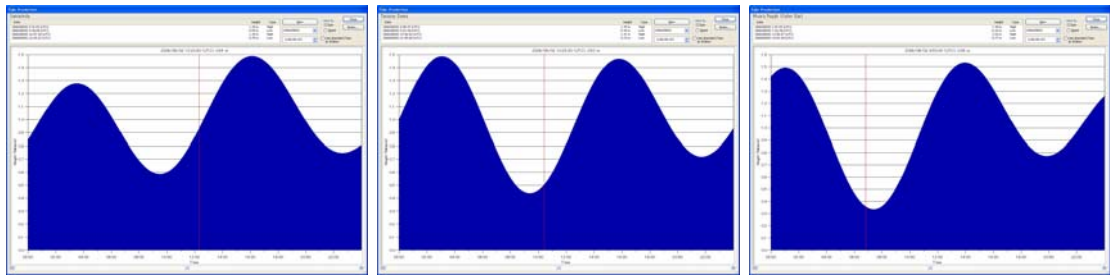


Fig. 6.16: Tidal point of BlueChart®

4cm で、他ではほぼ一致した。通常、潮汐表の表示は 10cm 単位であるので、実用上問題ないと考え、満潮と干潮の時刻と潮位のみを使用し、正弦波で近似して潮汐影響を補正することを試みた。すなわち、満潮や干潮の時刻を t_i, t_{i+1} 、その時の水位



(a) Samarinda

(b) Tanjung Dewa

(c) Muara Pegah

Fig. 6.17: Tide prediction by BlueChart®

を h_i, h_{i+1} として、水位 H を

$$H = h_i \sin \left(2\pi \frac{t - t_{0i}}{T_i} \right) + H_{0i} \quad (6.2)$$

ここで、

$$t_{0i} = (t_i + t_{i+1})/2$$

$$h_i = (h_i + h_{i+1})/2$$

$$H_{0i} = (h_{i+1} - h_i)/2$$

$$T_i = 2(t_{i+1} - t_i)$$

で近似することとした。

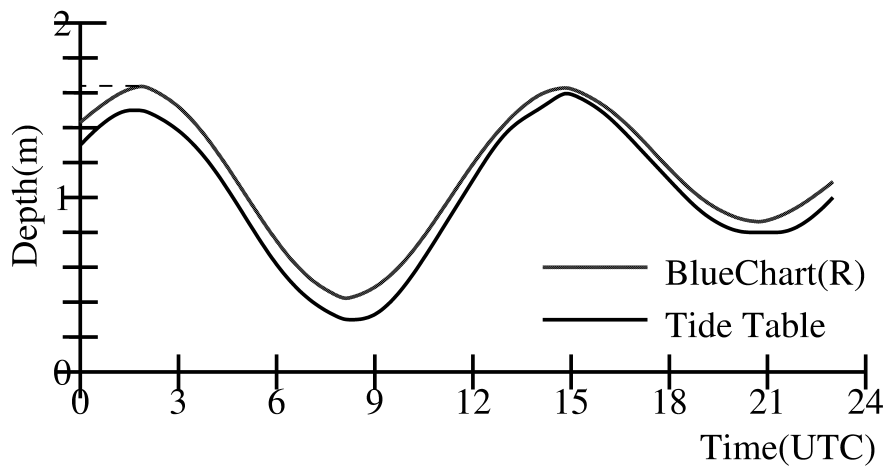


Fig. 6.18: Compare with tide table and BlueChart® at Muara Bayor on 2nd Aug. 2006

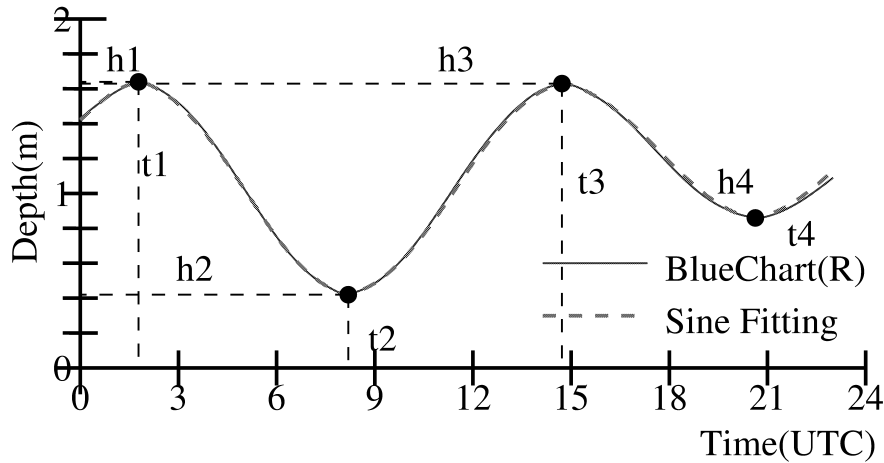


Fig. 6.19: Approximation as a sine wave

Table 6.2: The comparizon of tide level

Time(UTC)	0	1	2	3	4	5	6	7
BlueChart®(m)	1.43	1.59	1.64	1.54	1.32	1.03	0.74	0.52
Tide Table(m)	1.3	1.5	1.5	1.4	1.2	0.9	0.6	0.4
Time(UTC)	8	9	10	11	12	13	14	15
BlueChart®(m)	0.42	0.47	0.64	0.91	1.20	1.44	1.60	1.63
Tide Table(m)	0.3	0.3	0.5	0.8	1.1	1.4	1.5	1.6
Time(UTC)	16	17	18	19	20	21	22	23
BlueChart®(m)	1.54	1.37	1.16	0.98	0.88	0.86	0.94	1.09
Tide Table(m)	1.5	1.3	1.1	0.9	0.8	0.8	0.8	1.0

次に、川は一様で、潮汐は河口から上流へ一定の速度で変化すると仮定すると、2地点間の満潮および干潮の時刻とその時の水位は線形関係とみなせるので、線形補間によって通過地点の満潮および干潮の時刻とその時の水位を求め、(6.2)式より正弦関数で近似して、そこを通過する時刻の潮位を得た。すなわち、Fig. 6.20において、潮汐が既知の地点 A, B の距離が L であるとすると、満潮および干潮の時刻 $t_{A1}, t_{A2}, t_{B1}, t_{B2}$ における●の4点から、距離 l の通過地点 P の満潮および干潮の時刻 t_{P1}, t_{P2} とその時の水位 h_{P1}, h_{P2} は l/L で線形補間して、●の2点となる。この2点間を (6.2) 式を用いて正弦波で近似し、通過時刻 t における○の潮位を求めた。

$$t_{P1} = \frac{L-l}{L}t_{A1} + \frac{l}{L}t_{B1}$$

$$t_{P2} = \frac{L-l}{L}t_{A2} + \frac{l}{L}t_{B2}$$

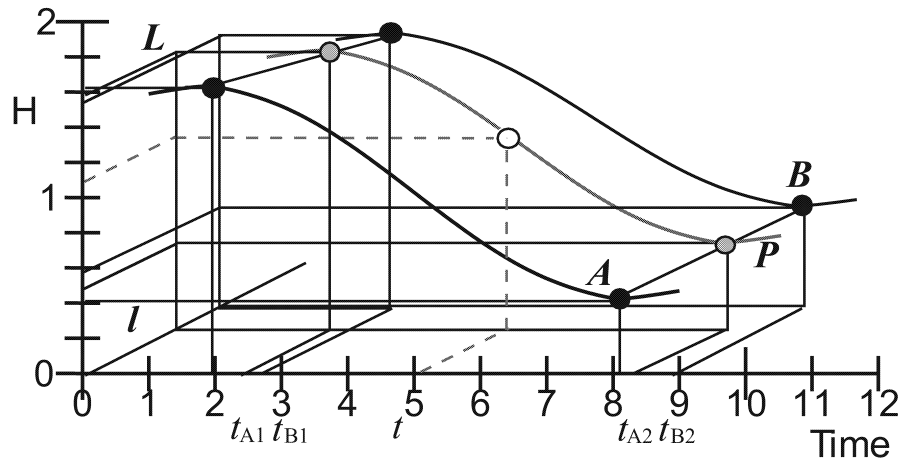


Fig. 6.20: Estimation of tide level at survey route

$$\begin{aligned}
 h_{P1} &= \frac{L-l}{L}h_{A1} + \frac{l}{L}h_{B1} \\
 h_{P2} &= \frac{L-l}{L}h_{A2} + \frac{l}{L}h_{B2} \\
 H &= h \sin \left(2\pi \frac{t-t_0}{T} \right) + H_0
 \end{aligned} \tag{6.3}$$

ここで,

$$\begin{aligned}
 t_0 &= (t_{P1} + t_{P2})/2 \\
 h &= (h_{P1} + h_{P2})/2 \\
 H_0 &= (h_{P2} - h_{P1})/2 \\
 T &= 2(t_{P2} - t_{P1})
 \end{aligned}$$

このようにして推定した観測船通過時の潮位を Fig. 6.21 に示す。Table 6.3 に示す Samarinda, Tanjung Dewa, Muara Pegar の 3 地点の潮汐データより求めている。6時過ぎの Muara Pegah の手前で段ができていたが、これは、船がいったん逆戻りをしたために生じている。

Table 6.3: Tide Level

Tide	Muara Pegar		Tanjung Dewa		Samarinda	
	Time	Level (m)	Time	Level (m)	Time	Level (m)
High	1:01:52	1.49	3:05:37	1.49	3:31:52	1.28
Low	7:22:30	0.33	9:22:30	0.44	9:30:30	0.59
High	13:58:07	1.53	15:24:22	1.47	16:07:30	1.49

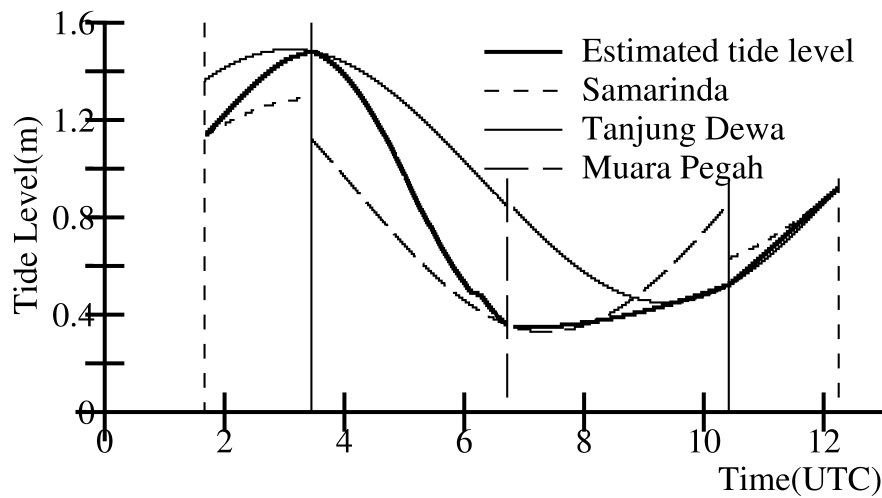


Fig. 6.21: Measured water level and height of river bed with corrected distance

計測した水面高度から推定した潮位を差し引いて、基本水準面を求めたところ、Fig. 6.22 に示すように、往路と復路でほぼ等しくなっており、潮汐の影響を取り除けていることが分かる。潮汐表の予報精度は一般に潮時で 20~30 分以内、潮高で 30cm 以内とされており [30]、日本の各港湾における調査でもそのような範囲に収まっている [31]。Tanjung Dewa と Samarinda の通過時刻における GPS による水面高度と潮汐データによる潮位から求めた基本水準面を Table 6.4 に示す。

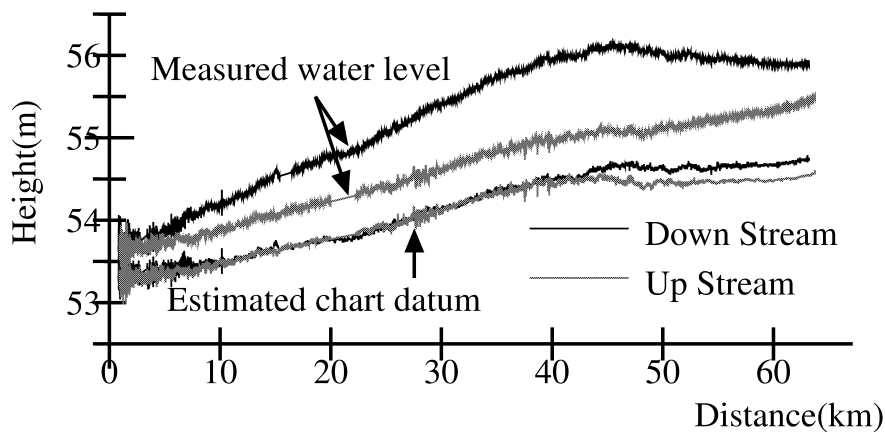


Fig. 6.22: Estimated chart datum

Fig. 6.23 に推定した基本水準面と川床高度を示す。Fig. 6.15 と比較し、Tanjung Dewa では往路と復路の通過時刻における基本水準面高さが良く一致しているが、Samarinda では誤差が 20cm 有ることが分かる。したがって、42km 以降の誤差は Samarinda の潮汐表の値が実際と異なっていたためと考えられ、精度を上げるためには、検潮場を設けて実測する必要がある。また、誤差が Samarinda に向かって線

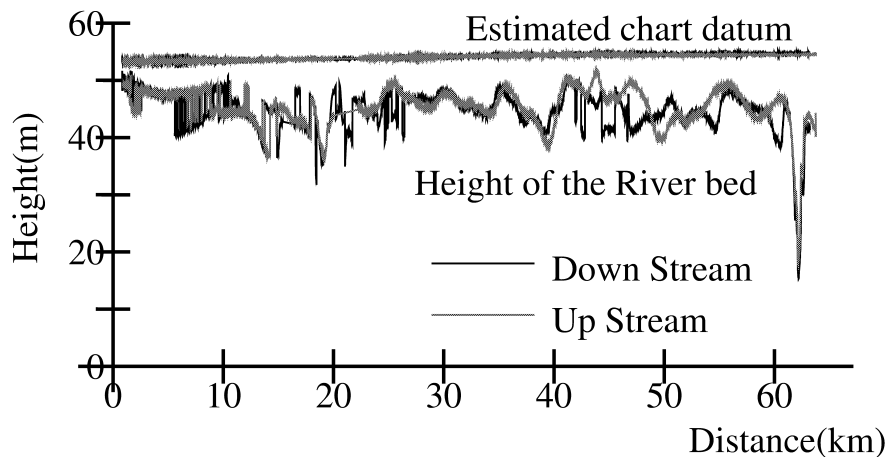


Fig. 6.23: Measured water level and height of river bed with corrected distance

形に増加するのではなく、一様に異なっている。これは、

- 潮汐が上流へ伝播する速度と船速が近い
- Tanjung Dewa の上流で川が東と南に分岐しており、位相が少し異なる潮汐が混じる
- Samarinda の下流に川幅が狭くなっているところが有るため、(6.4) 式の仮定から若干外れた挙動を示している

等の原因が考えられる。

Fig. 6.24 に潮汐影響を取り除いた基本水準面からの水深データを示す。下りと上りで近いところを航走した 30km から 40km 過ぎまでは Fig. 6.23 と比較し値が良く一致しており、潮汐影響が取り除けていることが分かる。

以上のことより、数ヶ所に検潮場を設置すれば、検潮データから基本水準面は推定できるので、水面高度を計測する必要はないことがわかった。しかも、水路確保のための浚渫作業にはセンチメートルの位置精度は不要であるので、D-GPS と測深器で対応できる。しかしながら、計測結果の妥当性を吟味するには水面高度が必要であるので、位置計測には K-GPS を用いる方が望ましい。

6.5 本章のまとめ

インドネシアの東カリマンタンにある Mahakam 川で K-GPS と測深器を使用した水深計測を行い、以下の知見を得た。

- 潮汐の影響を受ける河川であっても、K-GPS と測深器を使用することにより、川床の高度、形状を得ることができた。

Table 6.4: Estimated chart datum from water level and tide

(a) Tanjung Dewa

Pass time (UTC)	Water level(m)	Tide (m)	Chart datum(m)
03:28	56.01	1.48	54.53
10:25	55.06	0.50	54.56
Difference	0.95	0.98	-0.03

(b) Samarinda

Pass time (UTC)	Water level level(m)	Tide (m)	Chart datum(m)
01:45	55.88	1.14	54.74
12:05	55.42	0.88	54.54
Difference	0.46	0.36	0.20

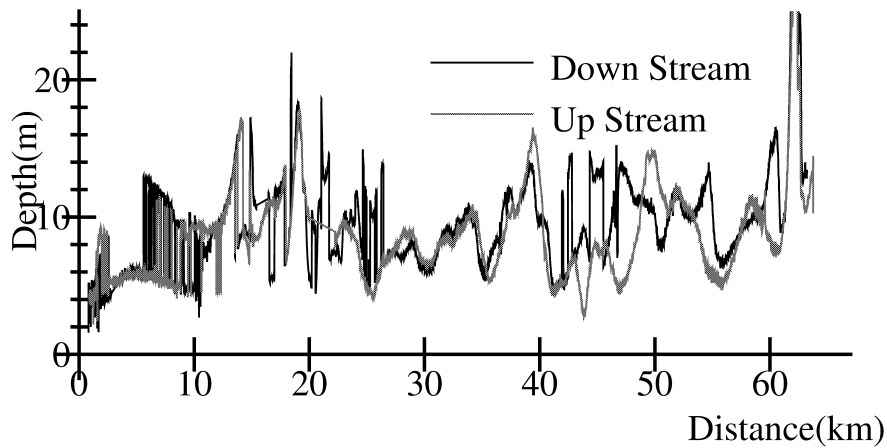


Fig. 6.24: River depth in consideration of tidal effect

- K-GPSにより潮汐影響のある水面高度を計測し、数ヶ所の潮汐データより計測地点の計測時刻における水位を推定することにより、河川の基本水準面を求めることができた。
- 潮汐データを使用した補正が有効であるので、補正によって、水深を 20cm 程度の誤差範囲内で精度良く推定することができた。
- 今回は潮汐の計測データが得られなかったため、潮汐表を元に補正を行ったが、実際の潮位と潮汐表の潮位には誤差があるので、精度向上を図るためには、検潮を実施する必要がある。

なお、計測に使用した船舶の速力が変動するとトリムや沈下量が変化するが、使用した船舶が小型で、速力変動も少なかったため、喫水は一定であると見なした。さらに、船体が傾くと水深に誤差が生じるため、船体傾斜時の補正用に K-GPS アンテナを両舷に設置し、横傾斜角の計測を行ったが、河川航行中の傾斜角は最大でも $\pm 2^\circ$ 程度で、測深機の指向角 $\pm 3^\circ$ より小さかったため、傾斜補正は行わなかった。

また、Tenggarong の川幅が広いところで警備艇の操縦性能試験を試みたが、舵角指示器が故障しており、操舵輪の回転角と舵角の関係も再現性が無かったため、実施することはできなかった。ただし、定常旋回試験の航跡のドリフト量から川の流速が約 0.6m/s で有ることは得ることができた。

今回の計測は乾季の水量の少ない時期に行ったが、雨季の間に大量の土砂が運ばれ、河川床の形状が変わるため、深浅測量と浚渫は乾季に入って水位が下がる前に行う必要がある。そこで、水量の多い時期においても潮汐データによる補正が有効であるかどうか確認する必要がある。

第7章 結論

本章では、本論文のまとめと今後の課題について述べる。

7.1 まとめ

第2章では、K-GPSの精度の検証をおこない、位置精度が数cm以内、姿勢精度がアンテナ間隔5.5mで標準偏差がヘディング 0.05° 、傾斜 0.1° 以内であることを確認した。そして、緯度、経度から平面座標への変換を行い、複数のK-GPS受信機を使用することによって重心位置の運動を得るための定式化を行った。

第3章では、船に1台もしくは2台のK-GPSを搭載して海上公式試運転の計測を行い、以下の結論を得た。

- K-GPSは非常に高精度で位置を求めることができるが単体では向きが求められないので組み合わせて角度を求める必要がある。ピッチングが無視できる場合、船の両舷に1台ずつGPSアンテナを設置すればロールの影響を考慮した重心位置の運動を求めることができる。更に、1台でも時々刻々の針路が取得できればロールの影響はあるが重心位置の運動が求められる。
- 船体の前後に1台ずつGPSアンテナを設置すると、トリム変化やピッチング運動を求めることができる。しかし、GPSは水平方向と比較して垂直方向の精度は5cm程度で、しかも高さには潮汐やジオイドの影響が含まれるため、トリムを $0.01\%L$ のオーダーで求めたり、水面からの相対高度である沈下量をセンチメートルの精度で求めるのは難しい。
- 仕様書通りの速力が得られるか否かは契約上非常に重要な項目であるので、速力試験において 0.1% の誤差は決して小さくない。K-GPSやRTK-GPSであれば航走距離が1マイルでも問題ないが、速力試験にD-GPSを使用するのであれば、使用するD-GPSの位置精度と速力に応じて、計測時間を長くする必要はある。しかしながら、長くしすぎると、外乱影響を一様と見なすことができなくなる可能性があるため、時々刻々の対地速度の変動に注意を払う必要がある。
- K-GPSを最低2台用いて操縦性能試験の計測を行うと、時々刻々の運動が得られる。その結果、前進速度、横速度、旋回角速度、斜航角といった操縦性能

推定に必要な情報が精度よく求められることが分かった。

- 実験結果がリアルタイムに表示できる RTK-GPS は非常に有用であった。しかし、通信手段が問題で、データの欠落や最悪不通になるので、現状では実験のモニターとして使用し、解析には K-GPS のデータを使用する方がよい。しかも、RTK-GPS の場合、通信手段が確保できても基準局と移動局間の距離が 10-15km を越えると解が収束しにくくなって、精度が劣るといふ欠点があり、基準局の設置場所、試験海域が制限される。

第 4 章では、アジマス型の首振り式電気推進器を搭載した広島大学の練習船「豊潮丸」を使用して、トリムを変えて操縦性能試験を実施し、次のような知見を得た。

- 「豊潮丸」は等喫水状態で航行すると針路不安定性の傾向があるが、船尾トリムを付けることにより、針路安定性が大きく改善される。船尾トリムの付加は、本船の場合、旋回運動時の斜航角の絶対値を大きく減少させるという特徴を持つが、それによる旋回性能の悪化はほとんど見られなかった。
- 船尾トリムを付けると、同一のプロペラ翼角において 4% - 7% の速力が低下した。
- 頻繁に操舵すると速力が低下するので、速力試験ではなるべく操舵しないようにした方がよい。
- 直進時の保針のための操舵と運動計測から δ と \dot{r} には強い相関があることがわかった
- 「豊潮丸」は優れた旋回性能を有し、船尾トリムの付いた状態での D_T は、 $|\delta| = 10^\circ$ で約 $3.0L_{pp}$ 、 $|\delta| = 35^\circ$ で約 $2.0L_{pp}$ であった。これは通常の船舶における舵角 35° が本船の 10° に匹敵するものである。これは POD 推進器が大きな操舵力を発生するためであると考えられる。
- 船尾トリムを付けると、主に船体斜航角に関する微係数 (Y'_β , N'_β) が針路安定側へと変化し、その結果、本船の針路安定性が改善されることが水槽試験よりわかった。

第 5 章では、ヨットの中でも最も小型の分類に所属する OP 級ヨットの姿勢と性能の関係を把握するために K-GPS を使用し、姿勢と帆走性能の関係について以下の知見を得た。

- OP 級のような小型艇でも K-GPS で姿勢と運動を計測可能であることがわかった。
- 抵抗試験ではヒールさせた方が抵抗は小さくなったが、実船試験では、概ね、姿勢はトリム、ヒールともにフラットにした方が速い。

- 姿勢の影響はヒールよりトリムの方が大きく、特に前トリムになると速度が遅くなる。
- クローズホールドは特にトリムの影響が大きい。
- ランニングでは少しヒールさせた方が速い。
- OP 級は、470 級と異なり、アビーム、クローズホールド、ランニングともに、船速にあまり差がなく、風上 45° までであれば、最短距離のコースを取るのがよい。

第 6 章では、K-GPS の高度の精度が高いことを利用して、インフラの整っていない東南アジアの河川において、安全航行に欠かせない基本水準面からの水深を推定するために、インドネシアの東カリマンタンにある Mahakam 川で K-GPS と測深器を使用した水深計測を行い、以下の知見を得た。

- 潮汐の影響を受ける河川であっても、K-GPS と測深器を使用することにより、川床の高度を得ることができた。
- 数ヶ所の潮汐データにより、河川の基本水準面を求めることができた。
- 潮汐データを使用した補正が有効であるので、補正によって、水深を精度良く推定することができた。
- 今回は潮汐の計測データが得られなかったため、潮汐表を元に補正を行ったが、精度向上を図るためには、検潮を実施する必要がある。

なお、計測に使用した船舶の速力が変動するとトリムや沈下量が変化するが、使用した船舶が小型で、速力変動も少なかったため、喫水は一定であると見なした。さらに、船体が傾くと水深に誤差が生じるため、船体傾斜時の補正用に K-GPS アンテナを両舷に設置し、横傾斜角の計測を行ったが、河川航行中の傾斜角は最大でも $\pm 2^\circ$ 程度で、測深機の指向角 $\pm 3^\circ$ より小さかったため、傾斜補正は行わなかった。

また、Tenggarong の川幅が広いところで警備艇の操縦性能試験を試みたが、舵角指示器が故障しており、操舵輪の回転角と舵角の関係も再現性が無かったため、実施することはできなかった。ただし、定常旋回試験の航跡のドリフト量から川の流速が約 0.6m/s で有ることは得ることができた。

今回の計測は乾季の水量の少ない時期に行ったが、河川床の形状は雨季の間に変わるため、深浅測量と浚渫は乾季に入って水位が下がる前に行う必要がある。そこで、水量の多い時期においても潮汐データによる補正が有効であるかどうか確認する必要がある。

7.2 今後の課題

船舶の姿勢や運動の計測に K-GPS や RTK-GPS は非常に有効な手段であることがわかった。従来の計測法では主にジャイロや加速度計を組み合わせた慣性航法装置を用いており、低速で運動する船舶では加速度や角速度の値が小さいため感度が高く、計測時間が長くなるためドリフトや積分誤差が少ない、非常に高価な計測器が必要となっていた。また、傾斜角の計測においても、運動が加わると加速度や遠心力の影響が含まれたが、GPS は時々刻々の地球に対する絶対位置が得られるため積分誤差や干渉が生じないのは大きな利点である。しかしながら、船舶の運動は対水であり、潮流補正を行う必要がある。現在は、潮流が準定常であると仮定して、速力試験では往復で計測し平均速力を求めたり、旋回試験では A.1 に示す方法で漂流量を補正しているが、瀬戸内海のように複雑な地形の海域では潮流が一樣ではないので、それを考慮した補正方法を作成する必要がある。

次に、本論文では、ほとんどの解析に K-GPS を使用したが、RTK-GPS が実用的に使用できれば、その場で試験結果を確認できるようになり、実船の操縦性能試験には非常に有効である。しかし、RTK-GPS は、基準局からの距離に 10km 以内という制限があり、さらに通信手段を確保する必要があるため、基準局を設置しやすく、距離も限られている入出港には利用できても、操縦性能試験に使用するには、基準局の設置場所と試験海域との兼ね合いで導入は困難であった。

VRS 方式は基準点を任意の場所に設置できるので、試験海域の中心に仮想基準点を設置すれば、半径 10km の海域で試験ができるようになる。以前はモデムを介して携帯電話の音声回線で補正データを受信していたため、補正データが途切れることがあったが、最近ではインターネット配信が利用できるようになったので、通信の信頼性が向上し、通信にかかる費用も安くなっていると思われる。そこで、VRS 方式の RTK-GPS を操縦性能試験への適用を検討していきたい。

一方、実船の操縦性能推定については、CMT や PMM といった拘束模型試験から得られた操縦流体力微係数を使用してシミュレーションを実施しているが、実船試験結果と比較する [15] と、傾向は得られるものの、必ずしも良い一致を得るまでは至っていない。他方、K-GPS を用いて船体運動を計測して、時間について 2 回微分することにより加速度項を得るところまではできるが、 v と r の項の分離が困難で、実船試験から操縦流体力微係数を直接得るところまでは至っていない。

本研究の最終目標は実船試験から操縦流体力微係数を直接得ることであるが、実船試験を頻繁に行うことは不可能であるし、拘束模型試験結果と実船試験結果が揃うことは減多になく、検討するためのデータそのものが不足している。そこで、縮尺影響等を考慮する必要のない拘束模型試験と同一条件の、模型船を用いた自由航走試験を実施し、その位置情報を元にした運動計測からカルマンフィルターや粒子フィルター等を用いて操縦流体力微係数を求め、拘束模型試験結果と比較検討することによって操縦流体力微係数を同定する手法を開発する。そして、開発した手法を、実船試験もしくは一般航行中の船舶に適用して、実船の操縦流体力微係数の同

定を試みる。

また、時々刻々の姿勢と運動が得られることから、現在、問題になっている実海域における船舶の性能を計測するための装置としてGPSは有用であると考えられる。そこで問題になるのが、波の計測であるが、最近、レーダー波高計の開発や画像処理技術を利用した三次元計測が急速に進んでおり、それらを組み合わせることによって、船舶の実海域性能の把握を行っていきたい。

謝辞

本研究を遂行するに当たり、多くの方から懇切なる御指導と御教示ならびに貴重な御意見を賜りました。心より感謝申し上げます。

本論文作成に際しまして、広島大学大学院工学研究院教授安川宏紀先生より、終始適切なる御指導と御鞭撻を賜り、また、研究遂行上のあらゆる便宜をお図り頂きましたこと、深く感謝すると共に、厚く御礼申し上げます。

すでに退官されてしまいましたが、広島大学名誉教授小瀬邦治先生には、在職中長き期間にわたって御指導と御鞭撻を賜りました。小瀬先生在職中には間に合いませんでしたが、こうして、本論文が作成できたのは、先生のおかげであると感謝しております。

広島大学大学院工学研究院教授濱田邦裕先生には小瀬先生御退官後、輸送・環境システム総合工学研究室の教授として、日々、御指導と御助言を賜りました。謹んで心より御礼申し上げます。

広島大学大学院工学研究院教授岩下英嗣先生、ならびに准教授田中進先生には、本論文の御校閲に貴重な時間を割いて頂き、細部にわたる御指導と御討論を賜りました。謹んで心から御礼申し上げます。

広島大学工学部元助手の平尾三郎先生には実験に際し適切なる御助言と御協力、そして、日頃から暖かな御激励を頂戴しました。心より謝意を表します。

大阪大学大学院工学研究科教授長谷川和彦先生には東南アジアにおける河川調査やインドネシア BPPT/LHI の水槽実験をはじめ、様々な機会に御協力と御助言を、また、北海道大学大学院水産科学研究院教授芳村康男先生にはヨットや実験装置について幅広く御助言と御指導を御頂戴いたしました。心より感謝いたします。

さらに、広島大学工学部第四類事務室と船型試験水槽の歴代の職員の皆様、特に土橋誠技術員には研究全般にわたり便宜を図って頂いたことに厚く御礼申し上げます。

また、輸送・環境システム総合工学研究室と海上輸送システム研究室の学生諸君や多くの卒業生に支えられて研究を続けることができました。感謝申し上げます。

そして、実船試験に際しましては、海上保安大学校、(株)中谷造船、広島大学生物生産学部、(財)広島県ヨット連盟、インドネシア共和国の応用技術評価庁 BPPT と運輸省海運総局、および、ニコン・トリンプル(株)の御協力を頂きました。ここに、深甚の謝意を表します。

なお、「翔陽丸」の実験は(財)シップアンドオーシャン財団の補助事業、「内航

船近代化の実証試験」の一部として実施し、第6章は日本学術振興会の拠点大学交流事業「海上輸送の総合的研究」および文部科学省科学研究費基盤研究(B)(海外学術調査)：アジアの河川輸送の現状と開発戦略に関する調査研究(広島大学大学院工学研究科教授(当時)小瀬邦治代表)の一部として行いました。ここに記すことによって謝意を表します。

参考文献

- [1] SA 解除の大統領声明 <http://www.navcen.uscg.gov/?pageName=gpsSelectiveAvailability>
- [2] 海上保安庁 DGPS センター <http://www.kaiho.mlit.go.jp/syoukai/soshiki/toudai/dgps/index.htm>
- [3] 国土交通省航空衛星 http://www.mlit.go.jp/koku/15_bf_000870.html
- [4] Pratap Misra and Per Enge 著, 日本航海学会 GPS 研究会訳: 精説 GPS 第 2 章 GPS の概要, 正陽文庫, (2004), pp.25-55.
- [5] 兪 豊・安田明生: キネマティック GPS における衛星配置と測位精度について, 日本航海学会論文集, 第 94 号 (1996), pp.131-135.
- [6] 準天頂衛星のすべて <http://qz-vision.jaxa.jp/READ/qz-navi01.html>
- [7] 高須知二・海老沼拓史・安田明生・小暮聡・宮野智行: QZSS LEX 信号の概要、評価と拡張, GPS/GNSS SYMPOSIUM 2009, (2009), pp.88-94.
- [8] 浪江宏宗・安田明生・岡村知則: リアルタイムキネマティックの傾斜計への応用, 日本航海学会論文集, 第 94 号 (1996), pp.125-129.
- [9] 近藤英治・田中直人・安田明生・岡本耕一: 大型浮体モデル上での RTK-GPS 計測, 日本航海学会論文集, 第 99 号 (1998), pp.21-28.
- [10] 芋生周作・浪江宏宗・安田明生: RTK-GPS による船体の三次元姿勢測定, 日本航海学会論文集, 第 98 号 (1998), pp.1-7.
- [11] 高橋宏直・萩原秀樹・井潤健二・木阪恒彦: RTK/OTF GPS による TSL 着棧システムに関する研究, 日本航海学会論文集, 第 95 号 (1996), pp.79-85.
- [12] 日向泰彦・松本大輔・森哲也・大和邦昭: 実船操縦性能試験の方法, 西部造船会技術研究会性能部会シンポジウム「IMO 操縦性基準の動向とそれへの技術的対応」, (2002), pp.11-29.
- [13] 佐々木紀幸: 試運転の実際, 日本造船学会誌, 第 793 号 (1995), pp.8-14.

- [14] 土屋 淳・辻 宏道著, GPS 測定の基礎 第6-8章, 日本測量協会, 1995, pp.135-250.
- [15] 安川宏紀, 平田法隆, 小瀬邦治, 世登順三: 練習船「広島丸」の操縦運動シミュレーション(第二報: 実船試験結果との比較), 西部造船会々報第109号(2005), pp.115-125.
- [16] 「豊潮丸」のホームページ, <http://home.hiroshima-u.ac.jp/toyoshio/>
- [17] 国土地理院電子基準点データ提供サービス, <http://terras.gsi.go.jp/ja/index.html>
- [18] 土屋淳・辻宏道: GPS 測定の基礎 第5章 5.2.5b L2 帯の P コードロックによる電離層補正, 日本測量協会, (1996), pp.124-125.
- [19] 中根勝見著, 測量データの3次元処理, 初版, 東洋書店, (1994).
- [20] 野本謙作・小瀬邦治・芳村康男: Z 試験の新しい解析法, 日本造船学会論文集, 第134号(1973), pp.183-192.
- [21] 松本光一郎, 飯田 隆: 第4章 操縦性基準と線形設計, 操縦性研究の設計への応用, 運動性能研究委員会第12回シンポジウム, 日本造船学会(1995), pp.135-174.
- [22] 安川宏紀, 平田法隆, 田中進, 小瀬邦治: 首振り型推進器を有する船の操縦性に関する研究, 日本船舶海洋工学会論文集第9号(2009), pp.155-165.
- [23] 平田法隆・安川宏紀: OP 級ヨットの抵抗性能について, 舟艇技報, No.101, pp.17-19, 2010.1.
- [24] 増山豊: 470 級の帆走性能解析, JSAF 技術委員会, <http://www.jsaf.or.jp/gi-yutu/2006/sim470/index.html>, 2006.4.
- [25] 海上保安庁: 海洋調査に迫る, 海上保安レポート 2007, 2007.
- [26] 日本水路協会: K-GPS を用いた水路測量効率化の研究 その3, 日本水路協会, 調査研究資料 112, 2003.
- [27] <http://www.kashmir3d.com/>
- [28] <http://glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>
- [29] <http://www.garmin.com/>
- [30] 市川義文・石田廣史: 余裕水深決定のための潮汐表の精度-I, 航海学会論文集, 第93号, pp.27-33, 1995.

- [31] 市川義文・石田廣史：余裕水深決定のための潮汐表の精度－II, 航海学会論文集, 第95号, pp.27-33, 1996.

付録 A Appendix

A.1 旋回試験結果における外乱補正

旋回試験における外乱影響は回頭角速度の小さな小舵角において顕著であった。そのため小舵角 ($\delta = \pm 5, 10\text{deg}$) における旋回試験結果 (航跡位置 x, y , 前進速度 u , 横流れ速度 v) には外乱補正を施した。

外乱補正法は次の通りである。方位角 90deg から 180deg までの間における船の位置と 450deg から 540deg までの間における船の位置との間の漂流量から、漂流速度の平均値を求める。方位角が 360deg だけ異なる 2 つの対応する計測点を、時刻 t_{1i} における船位 (x_{1i}, y_{1i}) と時刻 t_{2i} における船位 (x_{2i}, y_{2i}) とするとき、2 点間の単位時間当たりの漂流を表すベクトル v_i は次式で求められる。

$$v_i = \frac{(x_{2i} - x_{1i}, y_{2i} - y_{1i})}{t_{2i} - t_{1i}}$$

対応する計測点が n 組あったとすると、漂流速度の平均ベクトルは次式で得られる。

$$v_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(x_{2i} - x_{1i}, y_{2i} - y_{1i})}{t_{2i} - t_{1i}}$$

この漂流速度の平均ベクトルを用いて各時点 t における計測座標 x から風、波、潮流といった外乱による漂流量を次式で修正する。

$$x' = x - v_c t$$

このような方法で、旋回航跡や前進速度ならびに横流れ速度の補正を行った。

A.2 重心位置ベースの線形微係数

水槽試験で計測して得られた操縦流体力微係数は、ミドシップベースで求められており、その上、推進器の影響が考慮されていない。したがって、針路安定性指数 C を計算するときの操縦流体力微係数には、推進器の影響を考慮して、重心位置で定義されたものを用いる必要がある。推進器の影響は、文献 [22] を参考に次式を用いて計算する。

$$\Delta Y'_\beta = 4(1 + a_Y) \frac{b_1 \gamma}{J_0} \frac{D_p^2}{Ld} \quad (\text{A.1})$$

$$\Delta Y'_r = -4(1 + a_Y) x'_R \frac{b_1 \gamma}{J_0} \frac{D_p^2}{Ld} \quad (\text{A.2})$$

$$\Delta N'_\beta = 4(1 + a_N) x'_R \frac{b_1 \gamma}{J_0} \frac{D_p^2}{Ld} \quad (\text{A.3})$$

$$\Delta N'_r = -4(1 + a_N) x'^2_R \frac{b_1 \gamma}{J_0} \frac{D_p^2}{Ld} \quad (\text{A.4})$$

この式は推進器の影響による微係数の変化を計算するものであり、これらを Table 4.6 に示す 4 つの線形の微係数に加えればよい。実際の計算には Table A.1 に示した値を文献 [22] を参照して決定し用いた。

Table A.1: Parameters for calculation of linear derivatives

a_Y	0.168
a_N	0.181
b_1	0.33
J_0	0.4
γ	0.4
$D_p^2/(Ld)$	0.0328
x'_R	-0.5

さらに、重心位置をベースとした微係数に変換する必要がある。その変換は次式を用いた。

$$Y'_{Gr} = Y'_r + x'_G Y'_\beta \quad (\text{A.5})$$

$$N'_{G\beta} = N'_\beta - x'_G Y'_\beta \quad (\text{A.6})$$

$$N'_{Gr} = N'_r - x'_G Y'_r + x'_G (N'_\beta - x'_G Y'_\beta) \quad (\text{A.7})$$

添字 G を付けたものが重心ベースの微係数である。式中、 x'_G は浮心位置を示す。なお、 Y'_β は重心位置においてもミドシップ位置においても変わらない。