

TUMSAT-OACIS Repository - Tokyo

University of Marine Science and Technology

(東京海洋大学)

船舶運航者の高精度測位に対する意識調査および海上における高精度単独測位の精度評価と防災対策への応用提案

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2016-12-13 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 齊藤, 詠子, Kubo, Nobuaki メールアドレス: 所属:
URL	https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/1334

修士学位論文

船舶運航者の高精度測位に対する意識調査および
海上における高精度単独測位の精度評価と
防災対策への応用提案

平成 28 年度

2016 年 9 月

東京海洋大学大学院

海洋科学技術研究科

海運ロジスティクス専攻

齊藤 詠子

目次

第1章 序論.....	1
1.1 背景.....	1
1.2 研究の流れ.....	2
1.3 研究目的	2
1.4 研究の寄与.....	3
第2章 GNSS と PPP.....	4
2.1 GNSS の測位方式	4
2.2 PPP の測位方法	5
2.2.1 精密暦と精密衛星時計	5
2.2.2 二周波観測値による電離層フリー結合	6
2.2.3 全地球電離層分布図.....	7
2.2.4 対流圏遅延量.....	9
2.2.5 衛星側のコードバイアス	9
2.2.6 位置計算	10
2.3 各種誤差の推定による単独測位の高精度化についての検証.....	10
2.3.1 陸上の定点測位実験.....	10

2.3.2	実験結果と考察	12
2.4	PPPの検証	17
2.4.1	PPPにおいて考慮すべき誤差要因	17
2.4.2	PPPの課題	18
2.4.3	陸上の定点測位実験	18
2.4.4	実験結果と考察	19
2.5	2章のまとめ	26
第3章	船舶運航者の高精度測位に対する意識調査	27
3.1	はじめに	27
3.2	アンケートによる船舶運航者への意識調査	27
3.3	調査結果と考察	28
3.3.1	役職(船長・一等航海士・二等航海士・三等航海士)	28
3.3.2	避航操船で使用する航海計器	28
3.3.3	レーダとECDISに表示される情報	32
3.3.4	双眼鏡から得られる情報	38
3.3.5	GPSの海上における応用性	43
3.3.6	GPSの海上における応用性についてのアイデア	52

3.4	3章のまとめ	54
付録	実際のアンケート	56
第4章	船舶によるPPPの精度評価	59
4.1	はじめに	59
4.2	静止衛星OmniSTARを利用したPPP	59
4.2.1	実験結果と考察	59
4.3	QZSSを利用したPPP	71
4.3.1	QZSSの概要	71
4.3.2	LEX信号	73
4.3.3	MADOCAによる軌道とクロックの推定	74
4.3.4	実験結果と考察	74
4.4	4章のまとめ	83
第5章	海上への応用提案	85
5.1	はじめに	85
5.2	海上ブイと船舶との比較	85
5.3	海上ブイの代替・データ補間	86
5.4	錨泊中の船舶による防災・減災対策	87

5.5	5章のまとめ	88
第6章	結論	89
6.1	結論	89
6.2	今後の課題	89
	謝辞	91
	参考文献	92
付録1	GEONETのF3解とVRSで使用される座標値の違いについて	95
	はじめに	95
	GEONETのF3解	95
	VRSで使用される座標値	95
	F3解とVRSで使用される座標値の違い	95
	セミ・ダイナミック補正	96
	参考文献	96
付録2	PPPとRTKに生じる系統誤差について	97
	はじめに	97
	RTKの測位法	97
	PPPの測位法	97

錨泊中の船上測位実験による検証	97
航行中の船上測位実験による検証	100
参考文献.....	103
付録3 精密暦で使用される座標系	104
はじめに.....	104
精密暦で使用される座標系	104
参考文献.....	104

第1章 序論

1.1 背景

船舶運航者にとって、離着棧操船や狭水道航行時、または瀬取り(STS: Ship to Ship 船舶が互いに接舷して積荷を移設する作業)といった、大型船への正確な位置情報の提供が必要とされる場面では、GPS(全地球測位システム: Global Positioning System 以下、GPS)の示す正確な位置情報は安全運航に有益な情報といえる。昨今、GPS/GNSS(全地球航法衛星システム: Global Navigation Satellite System 以下、GNSS)による衛星測位は技術発展が進み、数 cm 以内の測位精度を達成する。自動車や航空機は運航者や操縦士の特性を踏まえた上で、高精度な GPS の情報を活用した自動走行システム⁽¹⁾やオートパイロット⁽²⁾の実証が進んでいるといえる。船舶においても無人船⁽³⁾の研究は行われているが、船舶運航者の特性を踏まえた自動運航の実証は進んでいるとはいえない。また、GPS/GNSS による高精度測位の利用に関する先行研究の多くは自動車⁽⁴⁾や農業⁽⁵⁾分野といった陸上をフィールドとしており、海上での GPS/GNSS の高精度化に向けた研究は極めて少ない。海上における高精度測位の利用例として、海上ブイがあげられる。海上ブイは、波浪や潮位を計測できるため、海面変動を計測する目的として日本沿岸に整備が進められている⁽⁶⁾。東日本大震災では、海上ブイの計測結果が津波警報の更新に役立ったという報告⁽⁷⁾もあり、海面変動計測は防災・減災や環境問題の観点からも注目されている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。しかし、海上に建設するため建設費用・期間、電源確保および保守整備などに課題がある⁽¹⁰⁾。海上ブイを建設する際は、事前に GPS/GNSS の高精度測位に必要な基準点からの信号の受信可否を調査してから建設することができるため、基準点を利用した高精度測位が可能である。一方、船舶において、航行海域はそれぞれ異なり、一様ではないため、基準点からの信号を受信できるとは限らない。船舶が海上ブイの機能の一部を持ち合わせることができれば分析データの増加が見込め、より高精度な海面変動計測につながり、防災・減災対策の実現が期待できる。本研究においては、第5章で海上における高精度測位の利用例として、湾内に錨泊している船舶を対象とした防災・減災対策についての提案を行った。湾内に錨泊している船舶を対象とした防災・減災対策に関する検討は、湾内に錨泊していた船舶を対象として、地震の感知の有無、津波第1報の入手の有無、錨泊船が退避行動を取り、避難できたかどうかなどについて、地震・津波体験をふまえた船長へのアンケートを行ったという程度であり、十分とはいえない⁽¹¹⁾。地震を感知し自ら避難行動を開始した船舶は27%にとどまり、避難行動をすぐに開始しなかった理由として、避難の必要はないと思ったという回答が75%に上る。しかし、津波の第1報を得れば、避難を開始する船舶は20%増加するというアンケート結果も存在する⁽¹¹⁾。そこで、湾内に錨泊している船舶が津波警報の第1報に代わるようなきっかけを得ることができれば、迅速かつ安全に船舶の避難行動を行うことが可能であると考える。すなわち、船舶自身が高精度な海面変動を計測することができるようになれば、錨泊中の船舶を対象とした防災・減災対策の実現にも期待できる。本研究では、高精度測位において、基準点に依存しないPPP(高精度単独測位: Precise Point Positioning 以下、PPP)に着目している。船舶を用いたPPPについての研究は既に行われている⁽¹²⁾⁽¹³⁾。先行研究では、単独測位の誤差(1σ)を1m以内まで低減させるためにすべき事柄をまとめ、実際のデータを利用して単独測位の高精度化の可能性について検証した⁽¹²⁾事例が存在し、東京海洋大学所有の「やよい」により、東京湾を航行時のデータの検証結果が報告されている。また、航行中の測量船で収録したKGPSデータを使用してITと

PPPにより解析⁽¹³⁾を行った事例も存在する。しかし、湾内に錨泊している船舶に対する検討や単独測位の高精度化を活用した船舶での応用例についての検討は十分とはいえない。

1.2 研究の流れ

本論文の流れを各章の順で簡単に説明する。

まず、第2章では、GNSSの測位方式とPPPの測位原理について説明する。GNSSの測位方式の概要に始まり、PPP測位で使用する精密暦や測位モデルについて、実データを交えながら紹介する。搬送波位相を使用しない擬似距離ベースのPPPについても言及する。

第3章では、GNSS測位の高精度化に対する船舶運航者の意識をアンケートにより調査したので、その結果を報告する。船舶運航者の高精度測位に対する意識を調査することにより、GNSSによる高精度測位の海洋利用がどのような場面に应用できるか分析することが、本調査の目的である。本調査では、船長や航海士を対象として実施したアンケート調査の項目を示すとともに、アンケート結果からみられた船舶運航者の高精度測位に対する意識を考察し、船舶運航者をサポートする海洋利用システムについて検討した。

第4章では、高精度な海面変動の計測が必要となる海上ブイの代替またはデータ補間および船舶による防災・減災対策を目的とした新たな応用提案の可否を判断するため、静止衛星OmniSTARとQZSSから得られる精密暦を用いて、陸上定点と錨泊中・航行中それぞれの状態における船舶(海技教育機構練習船銀河丸、総トン数:6,185)でのPPPの精度評価を比較検討した。なお、船舶の実験海域は東京湾をはじめとして、日本・ケアンズ(オーストラリア)・シンガポールを航行した遠洋航海時においても、PPPに必要な補正データが受信できるかどうか、各海域の受信率を算出することにより検証を行った。

第5章では、錨泊中の船舶による海上ブイの代替またはデータ補間と防災・減災対策につながる提案を行うことを目的とする。5.1節では、現状の海上ブイと船舶との比較を行い、船舶が海上ブイと同様の機能を有するために必要な課題について説明する。5.2節では、船舶が海上ブイの代替機能を有するために船舶自身が実装すべき仕組みについて述べる。5.3節では、錨泊中の船舶による防災・減災対策として、船上でのPPPから得られる高精度な情報を利用し、船員へ異常を通知するシステムの概要について述べる。

1.3 研究目的

本研究では、GPS/GNSSを活用した船舶運航者の特性からGNSSの高精度化に対する船舶運航者の意識を調査し、船舶運航者の意識からみえたGPS/GNSSの海洋利用可能性について分析することを第一の目的とする。さらに、第一の目的を踏まえ、高精度測位において、基準点に依存しないPPP(高精度単独測位: Precise Point Positioning 以下、PPP)に着目し、陸上定点と船舶(海技教育機構練習船銀河丸、総トン数:6,185)でのPPPの精度評価を比較検討することにより、錨泊中の船舶による海

上ブイの代替またはデータ補間と防災・減災対策につながる提案を行うことを第二の目的とする。

1.4 研究の寄与

本研究では、第5章において錨泊中の船舶でのPPPの例として、海上ブイの代替またはデータ補間と防災・減災対策に向けての応用提案を行っている。湾内には多数の船舶が錨泊しており、外部からの情報に頼らない自船で完結できる防災・減災対策システムは船舶および船員という貴重な財産を守るためにも必要であり、海上輸送の安全確保や全ての船員の安全、さらには船員に限らず詳細な海上情報を必要とする者に対しても寄与するといえる。

第2章 GNSS と PPP

2.1 GNSS の測位方式

図 2-1 のように、GNSS の測位方式は単独測位・DGPS・PPP の 3 つに分けられる⁽¹⁴⁾。

単独測位は GPS 信号のみを用いて衛星からの擬似距離を測定し、擬似距離と各衛星位置をもとに測位を行う。基準局は使用せず、受信者が衛星から直接得られた情報を用いて、単独で測位を行う仕組みである。

DGPS は補正情報を利用した測位であり、地上にある多数の基準局で測位誤差を測定し、測位誤差のデータを中央局に持ち寄り、補正情報を総合的に求める。そして、算出された補正情報を基準局あるいは衛星から直接受信者へ伝送する仕組みである。受信者は補正情報を受信することにより、測位精度を向上させることができる。DGPS はコード DGPS と搬送波位相 DGPS の 2 つに分けられる。コード DGPS は擬似距離を用いることで測位精度を向上できるものであり、狭域 DGPS と広域 DGPS の 2 つに分けられる⁽¹⁴⁾。狭域 DGPS は、算出された補正情報を基準局から直接受信者へ伝送する仕組みであり、海上保安庁が船舶向けとして全国 27 箇所に DGPS 局を配置し、中波ビーコンにより擬似距離の補正情報を配信⁽¹⁵⁾している。国際航海に従事する 300 総トン数以上の船舶(以下、大型船)に搭載されている GPS 機器は、DGPS に対応しており、日本沿岸 200km 以内の海上であれば、中波ビーコンによる補正情報を受信することができ、1m 程度の測位精度が得られる。これは、大型船のように低速で海上を航行する移動体では十分な測位精度であるといえる。しかし、補正情報は基準局から配信される仕組みであり、基準局のサービスエリア圏外ではそもそも補正情報を受信できないこと、さらには地形などの影響による不感地帯や瀬戸内海などの一部では基準局からの補正情報を受信できない場合があるなど課題がある⁽¹⁶⁾。広域 DGPS は、算出された補正情報を衛星から直接受信者へ伝送する仕組みであり、船舶では、前述の狭域 DGPS に加え、近年では、広域 DGPS も利用可能になりつつあるものの補正情報を受信するには静止衛星の仰角が 40~45 度程度必要であり、サービス範囲が限定され

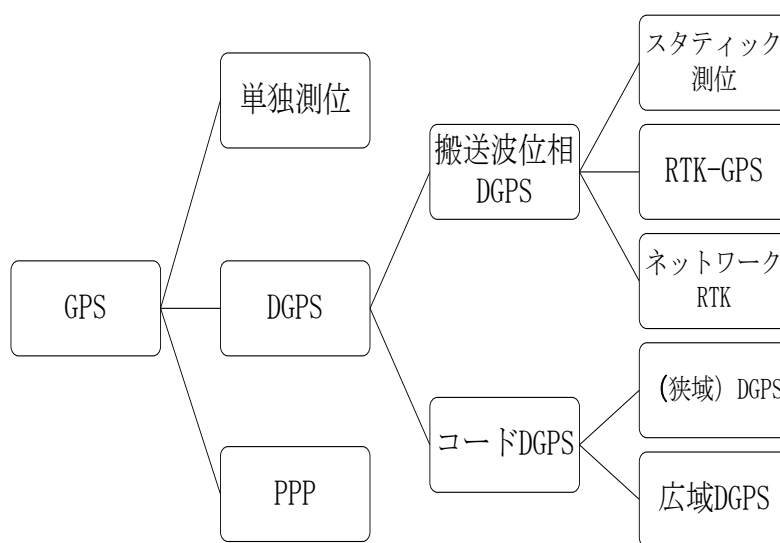


図 2-1 GNSS の測位方式

る⁽¹⁷⁾。更に、測位精度が数 m 程度であることや地域によって測位精度にばらつきがみられるなどの課題⁽¹⁸⁾があり、航行海域が一樣でない船舶においては必ずしも適した測位方法とはいえない。一方、搬送波位相 DGPS は補正情報として擬似距離に加え搬送波位相を用いるものであり、コード DGPS と比較し高精度な測位が可能である。搬送波位相 DGPS はスタティック測位、RTK-GPS、ネットワーク RTK の 3 つに分けられる⁽¹⁴⁾。しかし、コード DGPS と比較し更なる高精度を可能とする測位方法であるため、種別の異なる補正情報を要することや基準局を固定する必要があるなど、海上を航行するような船舶での利用には適さない。

PPP は、擬似距離に加え、搬送波位相を使用する測位であり、精密計算用の情報が必要となる⁽¹⁴⁾。PPP は基準点に依存せず測位が可能でありながら、cm 程度の測位精度が得られる技術である。

2.2 PPP の測位方法

PPP は基準点に依存せず測位が可能でありながら、cm 程度の測位精度が得られる技術である。cm 程度の測位精度を達成するには、GPS/GNSS による衛星測位において発生する各種誤差をできるだけ正確に推定しなければならない。しかし、PPP では誤差要因のうち、衛星位置・衛星時計・電離層遅延量の推定を正しく行うことにより、従来の単独測位より測位精度を向上させることが可能である。以下に本研究で用いた各種誤差の推定方法についてまとめた。

2.2.1 精密暦と精密衛星時計

現在 GPS/GNSS 衛星から放送されている航法メッセージにより求める衛星位置には、2～3m 程度の誤差が生じている。しかし、近年 IGS(国際 GNSS 事業：International GNSS Service 以下、IGS)や JAXA(宇宙航空研究開発機構：Japan Aerospace eXploration Agency 以下、JAXA)が提供する GPS や QZSS(準天頂衛星システム：Quasi-Zenith Satellite System 以下、QZSS)の精密衛星軌道⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾⁽²¹⁾は数 cm の誤差のみであり、衛星位置の不確かさによって生じる測位誤差を抑えることができる。

精密衛星軌道(精密暦)は、ECEF 座標系における 3 次元座標値により、衛星の正確な位置が IGS や JAXA によって提供されている。IGS の精密暦(表 2-1)はサービスの遅延と精度の違いにより、Ultra Rapid(リアルタイム可能)、Rapid、Final と区別される。全種類の精密軌道は 15 分あるいは 5 分間隔の衛星位置を与え、高精度化かつ短時間化へ努力した結果、リアルタイムでも 10cm 以下の精度が得られている。精密暦は SP3 というフォーマットのファイルに 15 分あるいは 5 分といった特定の時間間隔で衛星暦が格納されるため、測位で使う時に、内挿により観測エポックに応じた衛星位置を求めなければならない。本研究においては Neville アルゴリズムを利用した⁽²²⁾。

表 2-1 IGS の精密衛星軌道

タイプ	精度	遅延	更新頻度	サンプリング間隔
Ultra Rapid (予測)	～10cm	リアルタイム	1 日 4 回	1 日 4 回
Ultra Rapid (実測)	<5cm	3 時間	1 日 4 回	1 日 4 回
Rapid	<5cm	17 時間	毎日	毎日
Final	<5cm	13 日	毎週	毎週

表 2-2 IGS 精密衛星時計

タイプ	精度	遅延	更新頻度	サンプリング間隔
Ultra Rapid (予測)	~5ns	リアルタイム	1日4回	1日4回
Ultra Rapid (実測)	~0.2ns	3時間	1日4回	1日4回
Rapid	0.1ns	17時間	毎日	毎日
Final	<0.1ns	13日	毎週	毎週

衛星の時計については、航法メッセージにより補正できるが、擬似距離に 2m 程度の誤差を生じる。一方、IGS や JAXA は GPS や QZSS の精密暦と同時に精密衛星時計補正データも同じ SP3 ファイルで提供している。この時計補正データの誤差は 0.1ns (約 3cm) 程度に抑えられることから、測位精度を更に向上することができる。IGS の精密衛星時計(表 2-2)も Ultra-Rapid、Rapid、Final の三種類が存在している。リアルタイムが可能な Ultra-Rapid の精度は 5ns (約 1.5m 相当) と公表されている。

2.2.2 二周波観測値による電離層フリー結合

2000年5月2日に SA (Selective Availability) が解除されて以来、電離層遅延量は GPS 最大の誤差要因と言われており、電離層による遅延は、二周波信号測定値を用いて消去するのが良いとされている。従来の単独測位で用いられる Klobuchar モデルは、補正されていない電離層遅延量による測位誤差の RMS (Root Mean Square 以下、RMS) 値を約 50% 低減できると考えられるが、天頂方向の遅延として残る誤差は数 m に達するので、PPP においては無視できない⁽²³⁾。一方、二周波信号の測定値を用いた場合、電離層遅延量による測位誤差は最大 1cm におさめることが可能であり、ここでは、PPP で用いられる電離層フリー結合について説明する。

電離層は地球大気上層の分子、原子が太陽光線を受けイオンと電子に電離したもので高度約 50~1000km に分布している。高次項を無視すると、GPS/GNSS の測位信号で使われる L 帯マイクロ波における電離層遅延 I (m) は以下のように表すことができる。

$$I = \frac{40.3}{f^2} \int N dl = \frac{40.3 \times 10^{16}}{f^2} TEC$$

ここで f は搬送波周波数 (Hz) である。TEC は電離層に存在する電子密度 N を電波伝搬経路に沿って積分した値で総電子数 (TEC : Total Electron Content) と呼ばれる。電離層遅延 I は擬似距離測定においては群遅延としてプラスの影響、搬送波位相測定においては位相が進むことによりマイナスの影響を与える。

電離層遅延はほぼ搬送波周波数 f の二乗に反比例する。したがって、二周波の搬送波位相に適切な係数を掛けて加算することによりその影響の大部分を消去できる。この線形結合を電離層フリー線形結合 (Ionosphere-Free Linear Combination) と呼ぶ。L1、L2 搬送波位相の電離層フリー結合 LC (m) の定義と観測モデルを以下に示す。

$$LC \equiv c_1 L_1 - c_2 L_2 = \rho + c(dt - dT) + T + N_{LC} + \varepsilon_{LC}$$

$$C_1 = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2}$$

$$C_2 = \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}$$

$$N_{LC} = C_1 \lambda_1 N_1 - C_2 \lambda_2 N_2$$

ここで、 L_1 と L_2 はそれぞれL1 とL2 の搬送波位相 (m)、 ρ は衛星と観測点間の幾何学的距離(m)、 c は真空中での光速(m)、 dt は受信機時計誤差(sec)、 dT は衛星時計誤差(sec)、 T は対流圏遅延 (m)、 N_{LC} は電離層フリー線形結合搬送波位相バイアス(m)、 ε_{LC} はマルチパスを含んだ観測誤差(m)である。

2.2.3 全地球電離層分布図

本研究においては、2.2.2 で説明した二周波観測値による電離層フリー結合に加え、CODE (Center for Orbit Determination in Europe) が提供するGIM (全地球電離層電子分布図 : Global Ionosphere Maps 以下、GIM) を使い、GPS/GNSS 信号の経路にある総電子数による電離層遅延の補正を試みた⁽²⁴⁾。

1996年に、IGSの解析センターであるCODEはIGS局のデータに基づき、24時間全地球の電離層電子数を計算し、グリッド状のデータをインターネット上にIONEX (IONosphere map Exchange 以下、IONEX) ファイルという名前で配布し始めた。IONEXファイルはRapidとFinalの2種類(表2-3)があり、精度や遅延、提供頻度がそれぞれ異なる。GIMでは、地球上空に自由電子からなる極めて薄い殻が存在するとみなし、電離層のVTEC (垂直電子数 : Vertical TEC 以下、VTEC) を2次元グリッドの形により記述する。一般的に、この仮想した電子層の高さは450kmであり、これを元に2時間ごとに、経度方向5度ずつ、緯度方向2.5度ずつ描かれた線からグリッドを作り、交差点の所における垂直電子数が与えられる。このデータより、時間及び空間に関して内挿し、さらにマッピング関数(天頂方向から衛星仰角に応じた値に変換)を掛け合わせて、実際に測位に使用する衛星の伝搬経路における電離層遅延量を計算する。

表 2-3 IONEX ファイルの種類

種類	精度	遅延	提供頻度	サンプル間隔
Rapid	2-9 (TECU)	24 時間	1 日ごと	1 時間 : 5(経度)*2.5(緯度) (度)
Final	2-8 (TECU)	11 日	1 週間ごと	1 時間 5(経度)*2.5(緯度) (度)

$$\text{TECU} = (\text{TEC Unit}) = 1 \times 10^{16} \text{ electron/m}^2$$

時間に対する内挿アルゴリズムを行う場合、ある時刻におけるVTECは前後の2つのエポックにより与えられる。すなわち、緯度 β 、経度 λ 、時刻 t におけるVTECは以下のように表される。

$$E(\beta, \lambda, t) = \frac{T_{i+1} - t}{T_{i+1} - T_i} E_i(\beta, \lambda'_i) + \frac{t - T_i}{T_{i+1} - T_i} E_{i+1}(\beta, \lambda'_{i+1})$$

ただし、

t : 時刻($T_i \leq t \leq T_{i+1}$)

β : 緯度

λ : 経度 ($\lambda'_i = \lambda + (t - T_i)$)

T_i, T_{i+1} : GIM の隣接エポック

E_i, E_{i+1} : T_i, T_{i+1} における VTEC の関数

電離圏内の電子数の変化は太陽の位置と相関があるので、時刻 T_i から t へと変化するうちに、GIMは地球に相対的に回転すると考えられる。したがって、 λ'_i 、 λ'_{i+1} は以下のように表される。地球はおよそ1日で 360° 回転しているので、時間の単位は日とする。

$$\lambda'_i = \lambda + (t - T_i) \times 360$$

ただし、 $\lambda'_i > 360$ の場合、 $\lambda'_i = \lambda'_i - 360$

$$\lambda'_{i+1} = \lambda + (t - T_{i+1}) \times 360$$

ただし、 λ'_{i+1} の場合、 $\lambda'_{i+1} = \lambda'_{i+1} - 360$

一方、空間に対する内挿アルゴリズムは T_i, T_{i+1} におけるVTECを計算する必要がある。GIMは2次

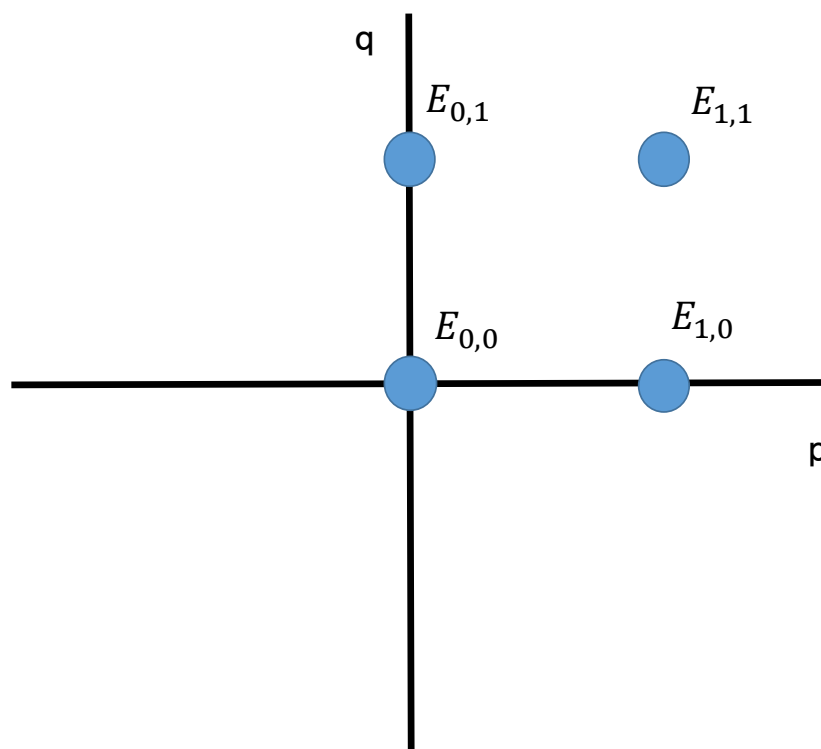


図 2-1 空間に対する平面内挿アルゴリズム

元マップであるため、平面に対する内挿となり、総電子数は図 2-1 のように 4 箇所のグリッド交点により算出される。ここで、 $E_{a,b}$ の緯度、経度はそれぞれ λ_a, β_b である。たとえば、 $E_{0,0}$ は (λ_0, β_0) である。p, q はそれぞれ (λ_0, β_0) から (λ, β) までの緯度、経度の距離である。 $\Delta\lambda, \Delta\beta$ はそれぞれ GIM の経度と緯度方向の幅とすると、以下の関係式が成り立つ。

$$\begin{aligned}\lambda &= \lambda_0 + p\Delta\lambda \\ \beta &= \beta_0 + q\Delta\beta \\ 0 \leq p \leq 1 \quad \text{または} \quad 0 \leq q \leq 1\end{aligned}$$

よって、平面内挿アルゴリズムは図 2-1 と以下により表される。

$$E(\lambda_0 + p\Delta\lambda, \beta_0 + q\Delta\beta) = (1-p)(1-q)E_{0,0} + p(1-q)E_{1,0} + p(1-q)E_{0,1} + pqE_{1,1}$$

2.2.4 対流圏遅延量

GPS/GNSS 信号は乾燥空気及び水蒸気から構成される地球大気の仮想部分によって屈折され、対流圏遅延効果が現れる。信号の伝搬経路に沿った圧力、温度、湿度の情報から、その経路に沿った屈折率と対流圏の遅延量を正確に決定することができる。本研究において、対流圏遅延量は従来の単独測位と同様に、モデルによって計算を行った。天頂方向の対流圏遅延量は、Saastamoinen による算出式⁽²⁵⁾ (乾燥項と水蒸気項に分けて計算)を行い、それぞれのマッピング関数としては、Niell のマッピング関数⁽²⁵⁾を用いて計算を行った。

天頂方向の対流圏遅延は乾燥空気(dry あるいは hydrostatic)及び水蒸気(wet)による遅延量から以下のように構成される。

$$d_{z,trop} = d_{z,dry} + d_{z,wet}$$

ただし、

$d_{z,trop}$: 天頂方向の対流圏遅延

$d_{z,dry}$: 乾燥大気遅延

$d_{z,wet}$: 水蒸気遅延

2.2.5 衛星側のコードバイアス

異なる種類のコードと周波数は、異なるハードウェアバイアスを引き起こすため、これらのバイアスを考慮する必要がある。

衛星から放送される航法メッセージと精密暦等の時計のタイミングは、P1(L1 帯の P コード)と P2(L2 帯のコード)の電離層フリー結合に依存しているため、以下に示す 2 つのバイアスを考慮しなければならない。

①上記の電離層フリー結合のタイミングと P1 のタイミングとのバイアス

(P1-P2 DCBs : DCB→Differential Code Bias)

②P1 のタイミングと L1C/A(L1 帯の C/A コード)のタイミング差とのバイアス

(P1-C1 DCBs)

P1-P2 DCBs 値は IONEX ファイルの先頭に出力される。一般的に、P1-P2 DCBs は $\pm 4\text{nsec}$ ($\pm 1.2\text{m}$)程度の範囲で変化しており、無視すると大きな誤差を生じてしまう。航法メッセージで放送される群遅延量は、この値とほぼ同じであることが知られている。P1-C1 DCBs は最大で 60cm 程度であり、毎日 0.05nsec の範囲内で微小な変動が発生している。CODE はインターネット上で 1 か月に 1 回、GPS 衛星ごとの P1-C1 DCBs を公開しており、十分な精度が得られることが知られている。なお、QZSS は L1 帯において P コードは送信しておらず、C/A コードのみ送信しているため、衛星側のコードバイアスを考慮する必要はない。

実際のコードバイアスは衛星側のみならず受信機側でも発生している。しかし、受信機側は受信機時計誤差にこのコードバイアスが含まれており、このバイアスは誤差推定時に同時推定されるため、問題にならない。

2.2.6 位置計算

位置計算は測位演算の最後に行うものであり、位置計算の手法は通常的位置計算と同様に最小二乗法を用いる。ただし、通常の単独測位の場合、1m 程度の誤差は測位結果の精度に埋もれて目立たない場合があるが、PPP では 1m 以内の精度を目指すため、衛星の位置を計算する際の時刻を正確に算出することに注意しなければならない。位置計算では、衛星から電波が発射された時刻の衛星位置が必要となるので、できるだけ正確に求めた擬似距離(受信機時計誤差も考慮)よりその時刻を求める必要がある。具体的には、衛星位置計算と位置計算を反復して求める手法があり、本研究においてもその手法を用いた⁽²⁶⁾。

2.3 各種誤差の推定による単独測位の高精度化についての検証

前項で述べた各種誤差要因は、高精度測位のためには必要な誤差推定値である。本研究では、前項で述べた各種誤差要因を考慮した場合の単独測位が、従来の単独測位に比較しどの程度測位精度が異なるのか検証するため、陸上の定点測位実験を行った。

2.3.1 陸上の定点測位実験

2016 年 1 月 3 日(実験 1)と 2016 年 6 月 6 日(実験 2)に、表 2-4 に示す実験機材・条件において、東京海洋大学越中島キャンパス第 4 実験棟を定点とし、24 時間(実験 1)と 14 時間(実験 2)の測位実験を行った。実験 1 は L1 帯と L2 帯による二周波を用いた測位であり、実験 2 は L1 帯のみによる一周波を用いた測位である。なお、電離層は実験 1 においては 3 つのケースに分けて行った。Case 1. は従来の単独測位で使用される Klobuchar Model、Case 2. は 2.2.2 で説明した二周波観測値による電離層フリー結合、Case 3. は 2.2.3 で説明した全地球電離層分布図の IONEX Final を用いて、電離層の補正を試みた。一方、実験 2 における電離層は一周波のため、Case 1. と Case 3. の 2 つのケースに分けて行った。Case 1. は従来の単独測位で使用される Klobuchar Model、Case 3. は 2.2.3 で説明した全地球電離層分布図の IONEX Final を用いて、電離層の補正を試みた。

本実験のデータ取得方法は、アンテナ(Trimble Zephyr Geodetic 2)と受信機(実験1はTrimble NetR9、実験2はu-blox M8T)を接続し、受信機から出力されるデータをパソコン上で記録する方法とした。また、実験環境はオープンスカイ環境(図2-2)とした。



図 2-2 陸上定点測位の実験環境

表 2-4 実験機材・条件

受信機	実験1: Trimble NetR9 実験2: u-blox M8T
アンテナ	Trimble Zephyr Geodetic 2
使用衛星	GPS , QZSS
使用周波数	実験1: L1 と L2 の二周波 実験2: L1 のみの一周波
測位時間	実験1: 24 時間 実験2: 14 時間
測位間隔	1 秒
仰角マスク	15 度
CN(Carrier to Noise)のスレッシュヨルド	30 dB
使用精密暦、クロック	QZSS Final
電離層	Case 1. Klobuchar Model Case 2. 電離層フリー結合 Case 3. IONEX Final

2.3.2 実験結果と考察

本稿では Case 1. から Case 3. について、相対測位解との比較を行った。相対測位解は、東京海洋大学越中島キャンパス第4実験棟屋上設置(受信機: Trimble 社 NetR9、アンテナ: Trimble 社 Zephyr Geodetic 2)の基準点(F3 解⁽²⁷⁾) (2014年12月14日計算)を使用するとともに、表 2-4 に示した使用周波数(L1 と L2 の二周波)、測位時間(24時間)、測位間隔を同一とし、RTK(Real Time Kinematic 以下、RTK)の FIX 解を使用することとした。

実験で得られたデータと相対測位解(RTKのFIX解 以下、FIX解)を比較するため横軸にGPS時刻、縦軸にFIX解との差とし散布図を用いて分析を行った。実験1において、Case 1. (図 2-3)では、全方向の差に大きな変動がみられ、最大10mの誤差がみられた。Case 1. では、測位演算の過程で最新のエフェメリスデータが利用できておらず、古いエフェメリスデータの使用が測位誤差の増大に影響したと考える。Case 2. (図 2-4)は Case 1. に比較し、全方向の差が小さくなっており、高さ方向の

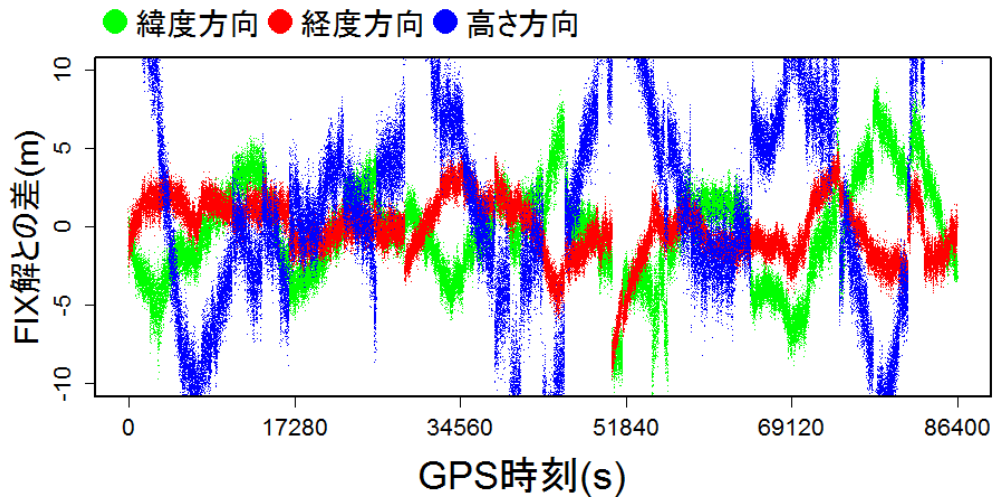


図 2-3 Case 1. と相対測位解との比較(実験 1)

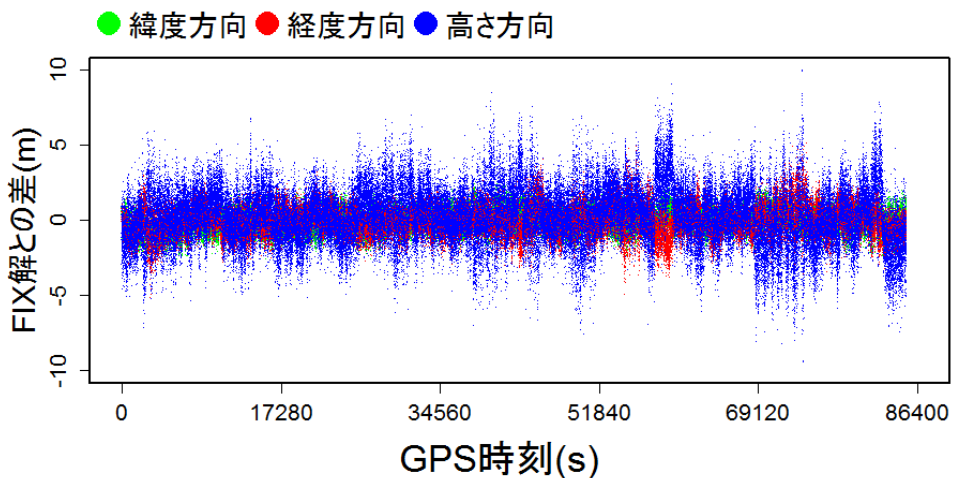


図 2-4 Case 2. と相対測位解との比較(実験 1)

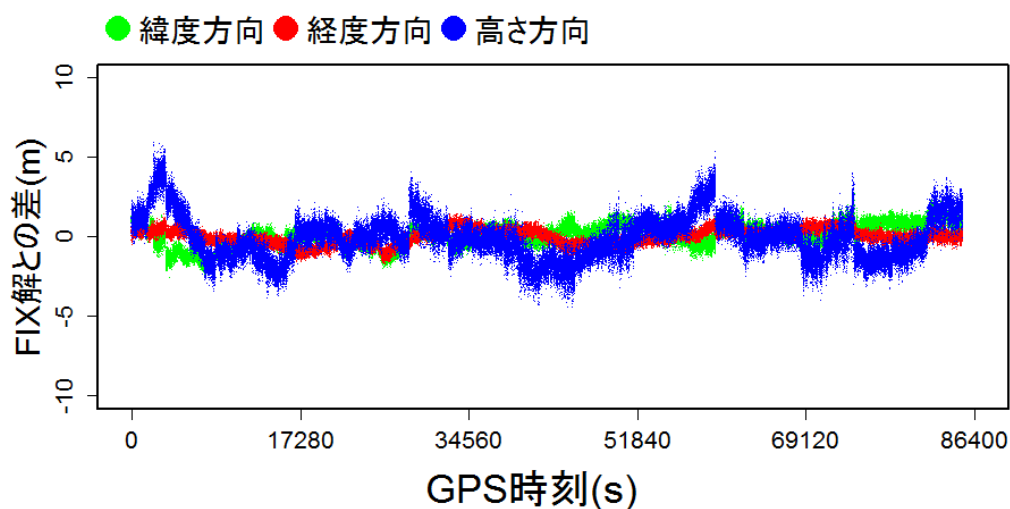


図 2-5 Case 3. と相対測位解との比較(実験 1)

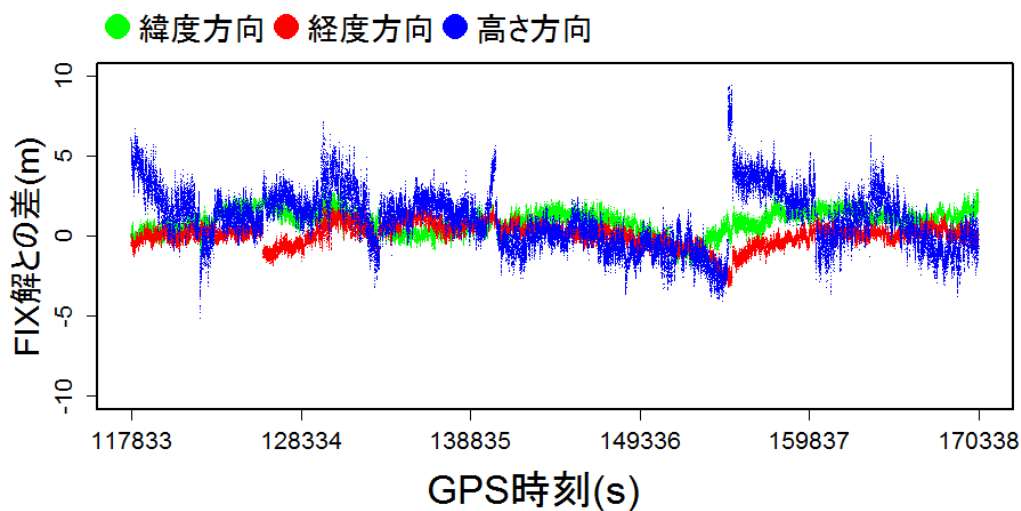


図 2-6 Case 1. と相対測位解との比較(実験 2)

変動は大きいものの、水平方向は最大 5m 程度におさまっている。Case 3. (図 2-5)は、Case 1. と Case 2. に比較し全方向の差が小さくなっており、高さ方向の変動はみられるものの、全体として測位誤差は 5m 以内におさまっている。各種誤差を考慮することで、従来の単独測位に比較し測位誤差を軽減することが可能であるといえる。電離層の補正は、Case 3. の測位誤差が最も小さかったことをふまれば、全地球電離層分布図による VTEC を用いることで、電離層による誤差を最大限低減できるといえる。一方、実験 2 において、Case 1. (図 2-6)では、実験 1 に比較し変動はみられなかったものの、高さ方向の変動は大きく、最大 10m 程度の測位誤差がみられた。水平方向は変動が小さく、最大

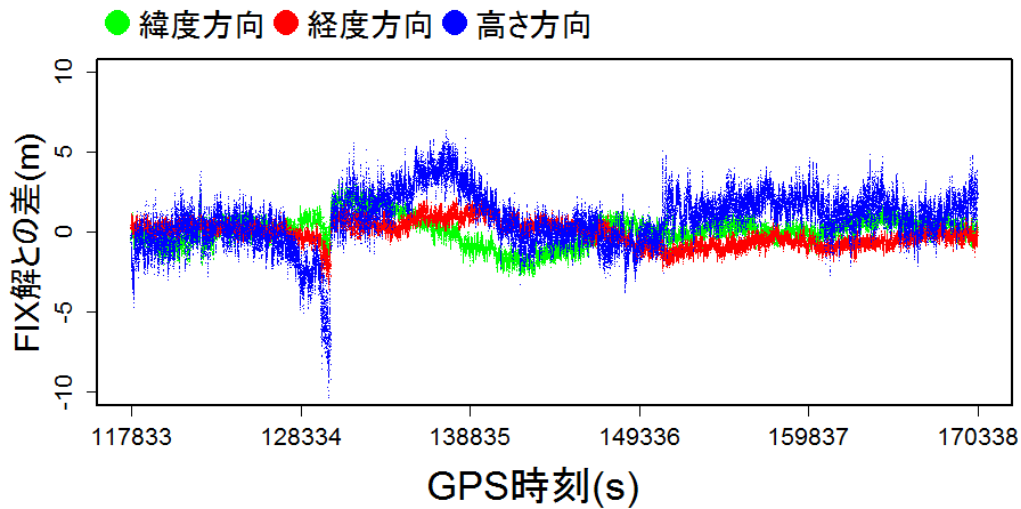


図 2-7 Case 3. と相対測位解との比較(実験 2)

3m 程度の測位誤差におさまっている。実験 1 における Case 1. の結果をふまえ、実験 2 の Case 1. では最新のエフェメリスデータを読み込む構造に修正を試みたため、実験 2 の Case 1. は実験 1 の Case 1. に比較し測位誤差が軽減されたといえる。一方、Case 3. (図 2-7)において、水平方向の誤差は最大 3m 程度におさまっているものの、高さ方向の変動は水平方向に比較し大きく、最大 10m 程度の誤差がみられた。Case 3. の場合、実験 1 と実験 2 において、水平方向の変動はほとんど同じようにみえるが、高さ方向は実験 1 が実験 2 に比較し変動が少ないことから、二周波による単独測位は一周波による単独測位に比較し、各種誤差の推定により誤差を低減することが可能であることが分かった。一周波受信機は周波数がひとつであるため、一般ユーザーは安い価格で手に入れることが可能である。そのため、安い価格の受信機によって高精度測位を行うことができれば、一般ユーザーに幅広く高精度測位を利用してもらうことが期待できる。しかし、実験 1 と実験 2 における Case 3. の結果をみると、一周波を用いた各種誤差推定による単独測位の高精度化によって、二周波を用いた各種誤差推定による単独測位の高精度化に測位精度を近づけるには限界があると考えられる。また、横軸を経度方向の誤差、縦軸を緯度方向の誤差とし、実験 1 と実験 2 における Case 1. から Case 3. までの水平方向測位誤差分布を示す(図 2-8、図 2-9)。実験 1(図 2-8)において、従来の単独測位では各象限に群が広がり、ばらつきが大きい。一方、Case 2. と Case 3. の場合、中心に集約した 1 群のみが確認され、最大誤差は緯度方向 4m 以内、経度方向 2m 以内におさまっており、いずれも Case 1. に比較し測位精度が向上している。Case 3. は Case 2. に比較し群が小さく、測位誤差が小さいことから、全地球電離層分布図に示される VTEC を用いた補正は二周波観測値による電離層フリー結合に比較し電離層遅延に起因する測位誤差を低減し、測位精度を向上させることが可能であるといえる。一方、実験 2(図 2-9)において、Case 1. も Case 3. も中心に集約した 1 群のみが確認され、最大誤差は緯度方向、経度方向ともに 4m 以内におさまっている。Case 3. は Case 1. に比較し群にやや広がりがみられる。実験 1 と実験 2 における Case 3. に着目すると、実験 1 は実験 2 より中心に集約した 1 群の大きさが小

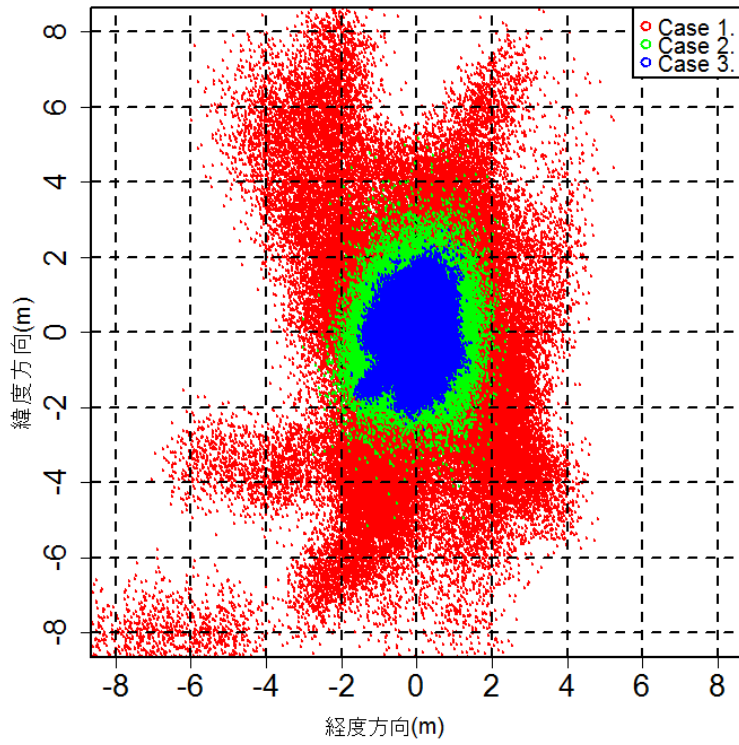


図 2-8 水平方向測位誤差分布(実験 1)

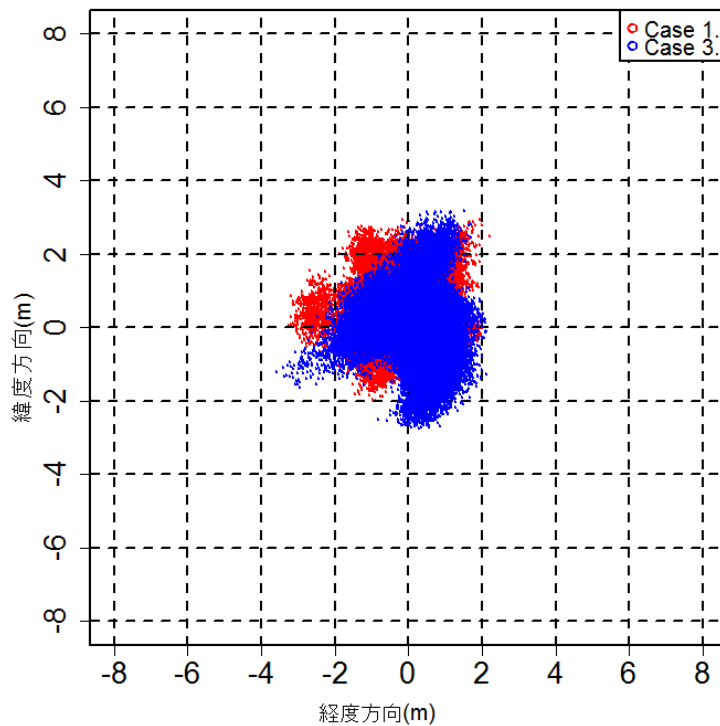


図 2-9 水平方向測位誤差分布(実験 2)

さく、二周波を用いた各種誤差推定による単独測位の方が一周波を用いた各種誤差推定による単独

表 2-5 Case 1. から Case 3. までの測位精度 (実験 1)

実験 1	評価項目	緯度方向 [m]	経度方向 [m]	高さ方向 [m]
Case 1. Klobuchar Model	標準偏差	3.148	1.867	8.48
	平均値	-0.326	-0.163	2.962
	RMS	3.165	1.874	8.982
Case 2. 電離層 フリー結合	標準偏差	0.639	0.871	1.799
	平均値	-0.059	-0.045	0.255
	RMS	0.642	0.873	1.817
Case 3. IONEX Final	標準偏差	0.693	0.463	1.36
	平均値	0.099	-0.016	-0.089
	RMS	0.700	0.463	1.363

測位よりも測位誤差を低減することができるといえる。しかし、一周波の場合も各種誤差を推定できれば、二周波に近い測位結果を計算することが可能であると考えられる。さらに、表 2-5 に実験 1 における Case 1. から Case 3. までの測位精度を標準偏差、平均値、RMS (Root Mean Square 以下、RMS) により示す。Case 1. は Case 2. と Case 3. に比較し、標準偏差、平均値が大きく、測位精度は悪いといえる。また、RMS 値より、最大 9m 近くの系統誤差が生じており、この系統誤差は Case 2. や Case 3. に比較し大幅に大きい値であった。この場合、最新のエフェメリスデータを使用しなかったことも測位精度が悪化した一要因と考えられるが、Klobuchar Model にともなうバイアスも中には含まれていると考えられる。Case 2. と Case 3. は標準偏差より、いずれの方向においても Case 1. に比較しばらつきが小さく、水平方向の測位精度は 1m 以内におさまっている。また、Case 3. は Case 2. に比較し、いずれの方向においても標準偏差が 20~40cm 程度小さく、平均値も緯度方向は Case 2. の方が小さいものの他の方向は Case 3. が小さく、高精度であるといえる。RMS 値より、Case 2. と Case 3. の系統誤差も緯度方向を除き Case 3. の値が小さいことから、全地球電離層分布図の適用により、ある程度の測位精度を提供することができるといえる。次に、表 2-6 に実験 2 における Case 1. と Case 3. の測位精度を標準偏差、平均値、RMS により示す。実験 2 の場合、Case 3. は Case 1. に比較し高さ方向を除きばらつきが大きいものの、平均値は緯度方向を除き小さいことが分かった。系統誤差においても、経度方向は Case 2. の方が小さかったものの、その差はわずかであり、全体としては Case 3. の方が小さいことが分かった。すなわち、Case 3. は Case 1. に比較し正確な測位が行われているといえる。水平方向は測位精度 1m 程度を達成しており、サブメートル級の測位精度を達成している。両実験の Case 3. に注目すると、実験 1 は実験 2 に比較し、標準偏差よりばらつきが小さく、平均値も小さいことに加え、RMS 値より系統誤差も小さいことが分かったことから、二周波を用いた各種誤差推定による単独測位は一周波を用いた各種誤差推定による単独測位に比較し高精度かつ正確な測位が実現されているといえる。今後、長期間の観測データから評価を行うことにより、二周波と一周波それぞれにおいて各種誤差を推定した単独測位の測位性能を解明することが課題と考える。

高精度測位を行う場合、擬似距離に比較し高精度な測位を可能とする搬送波位相も併せて用いる

表 2-6 Case 1. と Case 3. の測位精度(実験 2)

実験 2	評価項目	緯度方向 [m]	経度方向 [m]	高さ方向 [m]
Case 1. Klobuchar Model	標準偏差	0.709	0.733	1.807
	平均値	0.037	0.858	1.017
	RMS	1.129	0.71	2.074
Case 3. IONEX Final	標準偏差	0.741	0.895	1.701
	平均値	-0.085	0.072	0.809
	RMS	0.899	0.745	1.884

が、搬送波位相を使用せずとも、各種誤差を考慮すれば、サブメートル級の測位精度の達成が可能であるといえる。

2.4 PPP の検証

2.4.1 PPP において考慮すべき誤差要因

前項までは、各種誤差を推定した単独測位の高精度化について検証を行った。各種誤差を考慮した単独測位では搬送波位相を使用しなかったものの、PPP では搬送波位相を使用する。また、PPP は基準点に依存せず、cm 程度の測位精度が得られる技術であることから、前項までで議論した各種誤差の推定に加え、さらに考慮が必要な 1cm 級の誤差要因⁽²⁵⁾の推定が必要となる。このような誤差要因としては、以下に示す位相windアップ(phase wind-up)補正と衛星アンテナ偏差、アンテナ位相特性の3つがあげられる。

・位相windアップ(phase wind-up)補正

衛星は右旋円偏波(電波の進行方向に向かって右に回転する場合)の電波を送信する。したがって、測定される搬送波位相は衛星及び受信機のアンテナの相対的姿勢へ依存する。どちらかのアンテナをそのボアサイトを中心に1回転させると、搬送波位相測定値は1サイクル変化する。衛星は太陽電池パネルの法線が太陽方向を向くよう姿勢制御される。それに伴って、アンテナも普段は穏やかに回転しているが、30分で半回転に達するような急回転を示すこともある。このようなことがないように行う補正が位相windアップ(phase wind-up)補正である。

・衛星アンテナ偏差

衛星の軌道はその重心に作用する力のモデルを用いて計算される。IGSの高品質軌道情報も衛星重心を基準としている。これに対し、コード及び搬送波位相測定値は衛星アンテナ位相中心(APC : Antenna Phase Center)を基準とした測定値である。測位計算に必要な情報は、各衛星のアンテナ位相中心偏差(phase center offset)の大きさ及び軌道上における偏差ベクトルの方向である。これを無視すると10cm級の測位誤差を生じる。

・アンテナ位相特性

アンテナ位相特性(PCV：Phase Center Variation)は、測定時間間隔ごとに受信機が受信する GNSS 衛星からの電波の入射角に応じて受信位置が変化することを言う。この変化量はアンテナ機種によって異なり、アンテナ位相特性と呼んでいる。PPP においても、アンテナ位相特性を考慮する必要がある。

2.4.2 PPP の課題

PPP は基準点に依存せず測位が可能でありながら、cm 程度の測位精度が得られる技術である。しかし、PPP は二重位相差を使った相対測位とは異なり、搬送波位相バイアスの整数化が難しいため、解が収束するまでに時間を要する傾向がある。解の収束時間については、地殻変動監視のような連続固定点測位では問題にならないと思われるが、測量等に使用する場合、測定時間がかかるという点では不利になる場合が考えられる。

2.4.3 陸上の定点測位実験

現在、基準点を利用せず、衛星から補正情報を得ることができる手段としては OmniSTAR⁽²⁸⁾と QZSS⁽²¹⁾の利用があげられる。OmniSTAR は、全陸地の 90%以上で補正情報を得ることができ、単独測位の精度向上が見込めるサービスのひとつである。一方、QZSS は GPS 補強(測位精度の向上や信頼度の改善)および次世代の測位基盤技術の確立を目的とした QZSS 独自の実験用信号⁽²⁸⁾である LEX(L バンド実験信号：L-band experiment 以下、LEX)を用いた MADOCA(複数 GNSS 対応高精度軌道時刻推定

表 2-7 実験概要・機材

受信機	OmniSTAR (実験 1・実験 2) : Trimble SPS855 MADOCA (実験 3・実験 4) : JAVAD DELTA
アンテナ	OmniSTAR、MADOCA 共に Trimble Zephyr Geodetic 2
使用衛星	OmniSTAR (実験 1・実験 2) : GPS, GLONASS, QZSS, BeiDou MADOCA (実験 3・実験 4) : GPS, GLONASS, QZSS
使用周波数	OmniSTAR、MADOCA 共に L1 と L2 の二周波
測位時間	精度評価 : 24 時間 収束時間 : 1 時間
測位間隔	1 秒
仰角マスク	OmniSTAR : 10 度 MADOCA : 15 度
実験場所	東京海洋大学第 4 実験棟屋上



図 2-10 陸上の定点測位実験

ツール：Multi-GNSS Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock Analysis 以下、MADOCA) の利用があげられる。従来の MADOCA は LEX 信号を経由して MADOCA プロダクトを配信していたため、QZSS が上空にある可視時間のみの利用に限られていたが、2014 年 9 月 11 日より、MADOCA で作成したプロダクトのインターネット配信を開始した。これにより、より多くのユーザーが MADOCA プロダクトを用いた高精度な測位を利用できることが期待されている。

本研究では、PPP の測位精度と解の収束時間を検証するため、2015 年 1 月から 9 月にかけて、OmniSTAR と MADOCA プロダクトのインターネット配信によって得られる精密暦、クロックを用いて表 2-7 に示す実験をそれぞれ 2 度行った。なお、OmniSTAR から得られる精密暦、クロックを用いた PPP では、搬送波位相バイアスの整数化が行われているが、MADOCA プロダクトから得られる解は、搬送波位相バイアスの整数化は行われていない。さらに、2.3 節で示したように、二周波を用いた各種誤差推定による単独測位は一周波を用いた各種誤差推定による単独測位に比較し高精度であったことから、本研究では、二周波を用いた PPP に着目し、実験を行った。

本実験のデータ取得方法は、アンテナ(Trimble Zephyr Geodetic 2)と受信機(Trimble SPS855)を接続し、受信機から出力されるデータをパソコン上で記録する方法とした(図 2-10)。

2.4.4 実験結果と考察

PPP の精度評価は PPP 測位率および相対測位解との比較により行った。相対測位解は 2.3.2 で示した基準点より得られた RTK の FIX 解を使用することとした。

PPP 測位率は、実験で得られた出力データ中における PPP フラグ(OmniSTAR:state_flag 5、MADOCA:state_flag 3)が立っている割合とした。PPP 測位率は OmniSTAR で 100%(実験 1・実験 2)、MADOCA で 99.5%(実験 3)、99.8%(実験 4)であった。OmniSTAR による PPP 測位率は実験 1・実験 2 いずれも 100%であったので、陸上の定点測位において PPP に必要な補正データは全て受信できたといえる。一方、MADOCA による PPP 測位率は 99.5%(実験 3)、99.8%(実験 4)であり、いずれも 99%以上の測位率は達成されているが、データ抜けが発生し PPP が行われなかった時間帯が存在したため、100%の測位率が達成されなかった。本実験では、インターネットにより配信された MADOCA プロダクトを使用しているため、

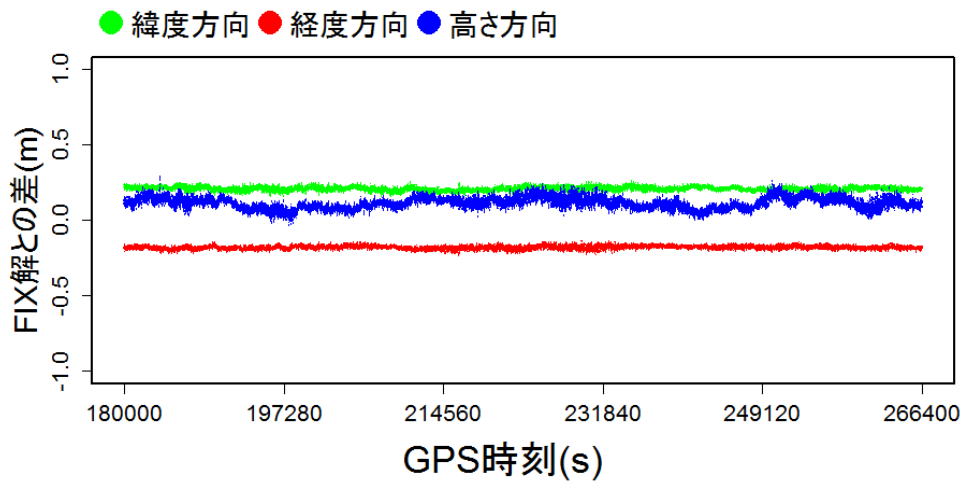


図 2-11 OmniSTAR による PPP の相対測位解との比較(実験 1)

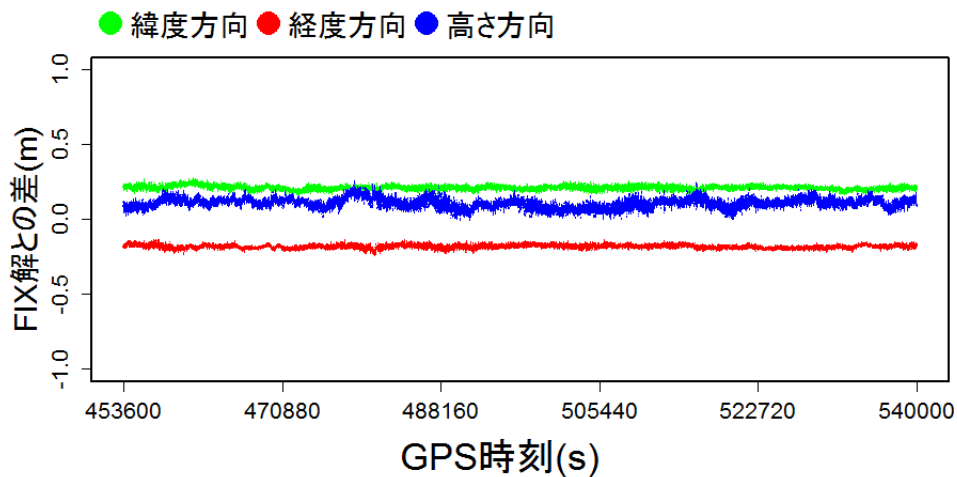


図 2-12 OmniSTAR による PPP の相対測位解との比較(実験 2)

QZSS の可視時間外であっても補正情報は受信可能であったはずであるが、一時的な通信障害の発生により、補正情報が受信できない時間が発生したと考える。しかし、いずれの PPP においても、測位率は 99%以上と非常に高い割合を示しており、船上での利用が期待できるといえる。

次に、実験で得られたデータと FIX 解を比較するため横軸に GPS 時刻、縦軸に FIX 解との差とし散布図を用いて分析を行った。なお、解が収束する前の測位結果は不定となるため、収束時間後の測位結果について分析を行った。OmniSTAR による PPP(図 2-11、図 2-12)では、FIX 解との差が実験 1、実験 2 いずれも緯度方向+0.2m 付近、経度方向-0.2m 付近、高さ方向が 0~0.2m 付近で推移しており、大きな変動はみられなかった。一方、MADCOA による PPP(図 2-13、図 2-14)では、実験 3、実験 4 いずれも一部の測位結果において FIX 解との差が 1m 以上となり、測位誤差に変動がみられたものの、

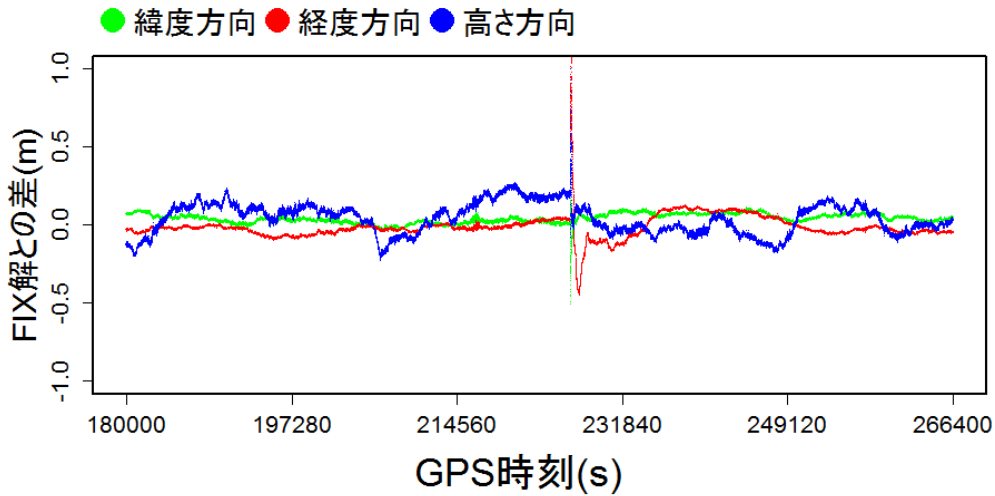


図 2-13 MADOCA による PPP の相対測位解との比較(実験 3)

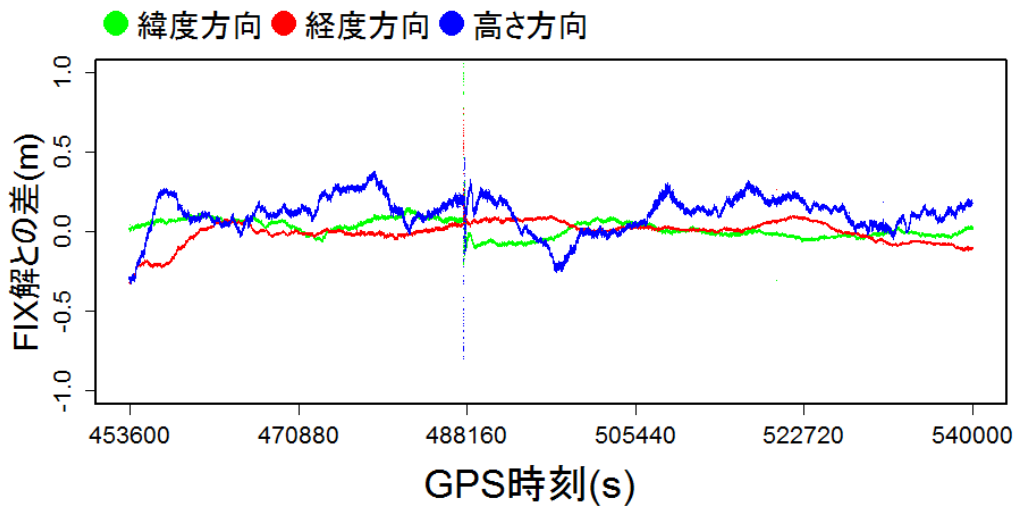


図 2-14 MADOCA による PPP の相対測位解との比較(実験 4)

全体として FIX 解との差は 50cm 以内に収まっている。測位率は 99% 以上であり、OmniSTAR の場合は送信される精密暦が全て受信できたことから、陸上の定点測位実験において、PPP による高精度測位は可能であるといえる。また、横軸を経度方向の誤差、縦軸を緯度方向の誤差とし、図 2-15 に OmniSTAR による PPP の水平方向測位誤差分布を、図 2-16 に MADOCA による PPP の水平方向測位誤差分布を示す。OmniSTAR による PPP は実験 1、実験 2 いずれも集約した 1 群のみが確認されたものの、集約した 1 群は第二象限に集中しており、中心から緯度方向 20cm 程度、経度方向 -20cm 程度ずれている。実験 2 は実験 1 に比較し水平方向の測位誤差に広がりが見られる。一方、MADOCA による PPP は、中心から

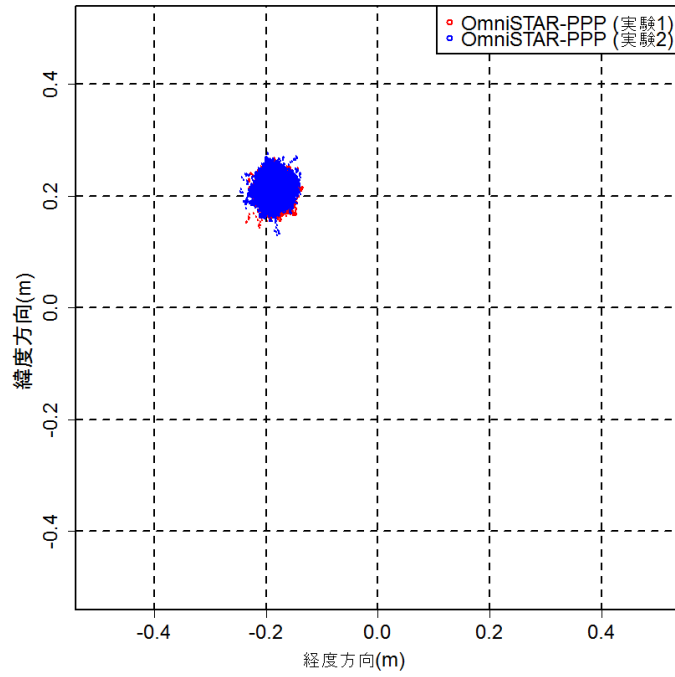


図 2-15 OmniSTAR による PPP の水平方向測位誤差分布(実験 1、実験 2)

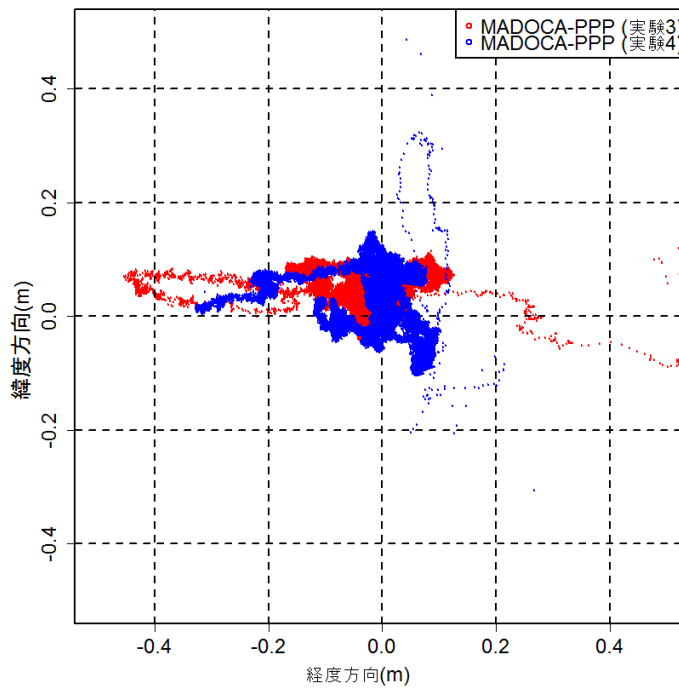


図 2-16 MADOCA による PPP の水平方向測位誤差分布(実験 3、実験 4)

左右に測位誤差がみられ、1つの群を中心に測位誤差にばらつきがあるが、全体として中心に測位結果は集まっている。OmniSTAR による PPP は MADOCA に比較し、測位結果のばらつきは小さいものの、

表 2-8 OmniSTAR および MADOCA による PPP の測位精度

実験	評価項目	緯度方向 [m]	経度方向 [m]	高さ方向 [m]
OmniSTAR 実験 1	標準偏差	0.013	0.011	0.037
	平均値	0.208	-0.181	0.113
	RMS	0.208	0.182	0.119
OmniSTAR 実験 2	標準偏差	0.014	0.012	0.032
	平均値	0.209	-0.183	0.107
	RMS	0.210	0.183	0.112
MADOCA 実験 3	標準偏差	0.030	0.080	0.100
	平均値	0.040	-0.015	0.041
	RMS	0.050	0.081	0.108
MADOCA 実験 4	標準偏差	0.057	0.071	0.121
	平均値	0.016	-0.003	0.111
	RMS	0.060	0.071	0.164

バイアスが発生していることが分かる。一方、MADOCA による PPP は OmniSTAR に比較し、測位結果のばらつきは大きいものの、バイアスは小さく、正確な測位結果となっている。

表 2-8 に、OmniSTAR および MADOCA による PPP の測位精度を標準偏差、平均値、RMS にて示す。全実験結果より、OmniSTAR による PPP は MADOCA による PPP に比較し、ばらつきが小さく、RMS が大きかったことから、精密な測位が行われているといえる。標準偏差より、測位精度は 5cm 以内を達成しており高精度である。また、RMS より、系統誤差が最大 20cm 程度発生している。先行研究によれば、この系統誤差は PPP と相対測位における測位法の差に起因するものであると報告されている⁽²⁹⁾。先行研究と本実験では実験環境や条件が異なり、単純な比較はできないものの、本実験においても相対測位解との比較において系統誤差が発生しており、PPP と RTK の測位法の差に起因するものと考えられる。一方、MADOCA による PPP は OmniSTAR による PPP に比較し、ばらつきが大きく、RMS が小さかったことから、正確な測位が行われているといえる。2つの PPP の標準偏差を測位精度として定義し、測位精度のみに着目すれば、測位精度は 10cm 程度を達成しており、高精度であるといえる。

続いて、OmniSTAR と MADOCA による PPP の収束時間の分析を行った。OmniSTAR による PPP は先行研究⁽³⁰⁾をもとに 1 時間実験を行った結果、1 回目の実験では図 2-17 のように、測位開始後 15 分で FIX 解との差が緯度方向 22cm、経度方向-20cm、高さ方向 20cm となった。2 回目の実験では図 2-18 のように、測位開始後 15 分で FIX 解との差が緯度方向 22cm、経度方向-8cm、高さ方向 18cm となった。多少の変動はみられるものの、1 回目と 2 回目ではほとんど同じ傾向を示している。また、測位開始後 30 分では 1 回目の実験において、FIX 解との差が緯度方向 21cm、経度方向-19cm、高さ方向 13cm となり、安定した解が得られた。また、2 回目の実験では、緯度方向 22cm、経度方向-19cm、高さ方向 13cm となり、安定した解が得られた。こちらも、多少の変動はみられるものの、1 回目と 2 回目では

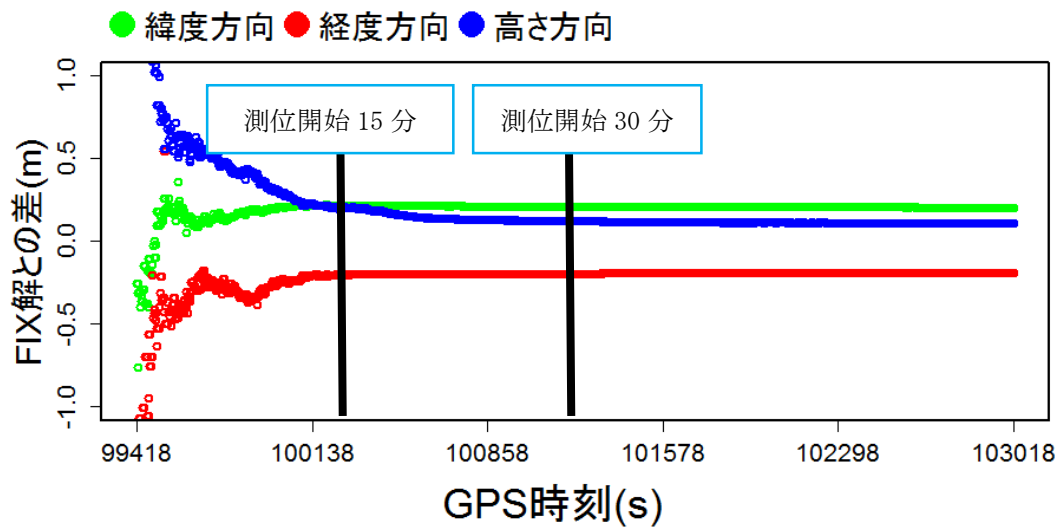


図 2-17 OmniSTAR による PPP の収束時間検証(1 回目)

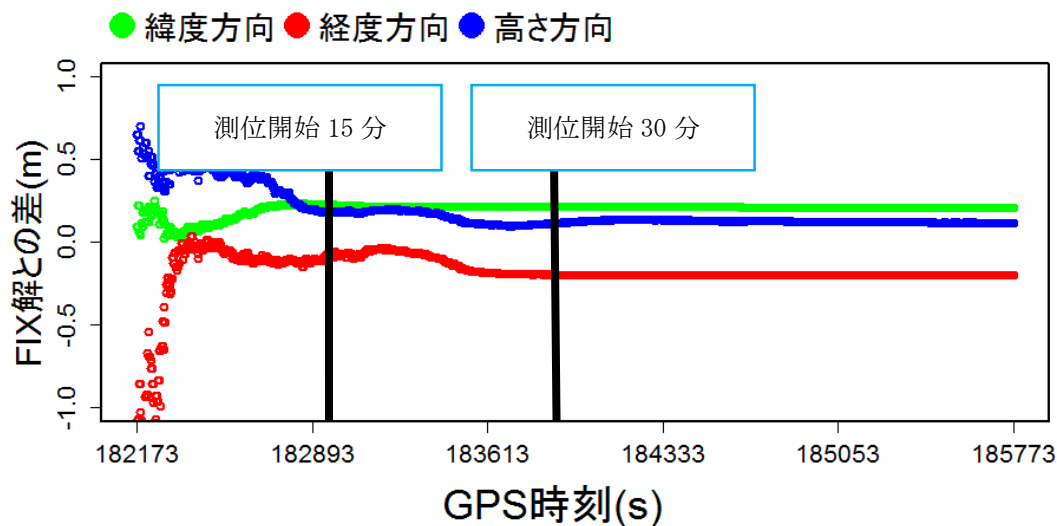


図 2-18 OmniSTAR による PPP の収束時間検証(2 回目)

とんどの傾向を示している。先行研究と本実験では、実験環境や実験条件が異なり、単純な比較はできないものの、測位開始後 30 分で測位結果が安定したことをふまえ、本実験では測位開始後 30 分を収束時間とした。一方、MADCOCA による PPP は先行研究⁽³¹⁾をもとに 1 時間実験を行った結果、1 回目の実験では図 2-19 のように、測位開始 15 分後では FIX 解との差が緯度方向 5cm、経度方向 29cm、高さ方向 72cm となり測位結果が変動していた。2 回目の実験では図 2-20 のように、測位開始 15 分後で FIX 解との差が緯度方向 18cm、経度方向 38cm、高さ方向 -21cm となり、こちらも測位結果が変動していた。多少の変動はみられるものの、1 回目と 2 回目ではほとんど同じ傾向を示している。また、1 回目の実験において、測位開始 30 分後で FIX 解との差が緯度方向 -2cm、経度方向 15 分、高さ

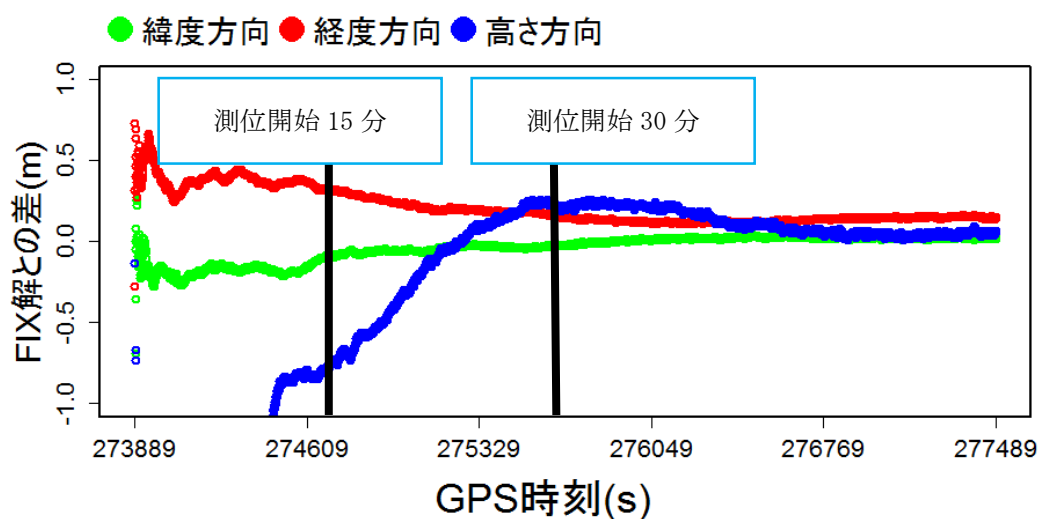


図 2-19 MADOCA による PPP の収束時間検証(1 回目)

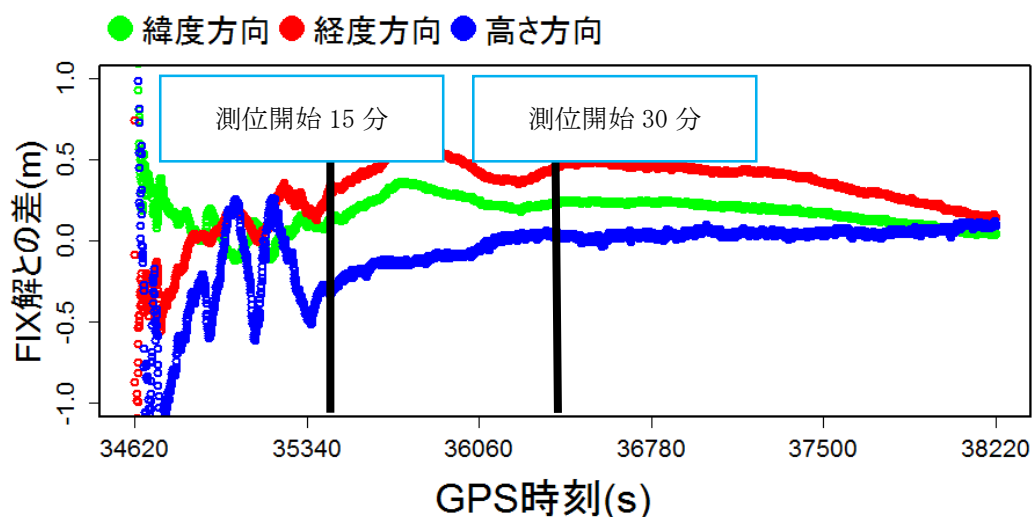


図 2-20 MADOCA による PPP の収束時間検証(2 回目)

方向 19cm となり、15 分後に比較し測位結果の変動は少ないものの、若干の変動がみられた。2 回目の実験では、緯度方向 24cm、経度方向 48cm、高さ方向 3cm となり、測位開始 15 分後に続き、変動がみられた。さらに、1 回目の実験では、測位開始 1 時間後に FIX 解との差が緯度方向 2cm、経度方向 15cm、高さ方向 6cm となり、安定した解が得られた。2 回目の実験では緯度方向 5cm、経度方向 15cm、高さ方向 10cm となり、ようやく安定した解が得られた。先行研究と本実験では、実験環境や実験条件が異なり、単純な比較はできないものの、測位開始後 1 時間で測位結果が安定したことをふまえ、本実験では測位開始後 1 時間を収束時間とした。すなわち、PPP は解が収束するまで 30~1 時間程度を要し、今後は収束時間の低減へ向けた手法が課題であるといえる。

2.5 2章のまとめ

本章では、PPPの測位原理を理解するために必要な技術である、GNSS測位の各種誤差推定について説明し、実データを用いて各種誤差の推定による単独測位の高精度化について検証した。検証の結果、各種誤差を推定することで、擬似距離のみの測位であっても測位精度を1m以内におさめることが可能であるということが分かった。PPPは基準点に依存せず測位が可能でありながら、cm程度の測位精度が得られる技術であるため、測位にあたっては各種誤差の推定が重要となる。PPPの場合、擬似距離に加え搬送波位相を使用するが、搬送波位相を使用せずとも、擬似距離のみで1m以内の測位精度を達成できることから、搬送波位相やアンテナ位相中心といったさらに考慮が必要な1cm級の誤差要因も推定することで、cm級の測位精度の達成が可能であると考えられる。また、実データを用いてPPPの測位精度と課題についても検証した。検証の結果、PPPの測位率は99%以上を達成し、測位精度は10cm程度を達成しており、高精度であるといえる。一方で、PPPには初期収束時間が長いという課題があり、本章では実データを用いて収束時間について検証した結果、15分以上の時間を要することが分かった。初期収束時間の短縮化は今後の課題といえよう。PPPは基準点に依存しないため、世界中での利用が可能であり、基準点からの信号が受信するのが難しい場所では、さらなる高精度化により、様々な産業での利用が期待されている。本研究では海上におけるPPPの精度評価と応用提案について検討しており、第4章と第5章で述べる。

第3章 船舶運航者の高精度測位に対する意識調査

3.1 はじめに

GPS/GNSSによる衛星測位は、数cm以内の測位精度を達成する。自動車や航空機は運転者や操縦士の特性を踏まえた上で、高精度測位を活用した自動運転やオートパイロットの実証が進んでいるといえる。船舶においても、無人船の研究は行われているが、船舶運航者の特性を踏まえた自動運転の実証は進んでいるとはいえない。そこで、本調査はGPSによる位置情報を活用した船舶運航者の特性からGPS/GNSS測位の高精度化に対する船舶運航者の意識を調査し、自動運転の実証へ向けた課題を示すとともに、高精度測位の海洋利用がどのような場面に応用できるか分析することを目的とする。

3.2 アンケートによる船舶運航者への意識調査

海技教育機構の船舶運航者(51名)へアンケート用紙を送付し、意識調査を行った。質問内容は、船橋内に設置の各航海計器を活用する避航操船時に焦点をあて、レーダ、ECDIS(電子海図表示システム: Electronic Chart Display and Information System 以下、ECDIS)、AIS(船舶自動識別装置: Automatic Identification System 以下、AIS)といったGPSの情報を基に動作する航海計器に加え、GPS、さらには目視で使用する双眼鏡を選択肢とし、下記の通りとした。

(1) 役職(船長・一等航海士・二等航海士・三等航海士)

(2) 避航操船で使用する航海計器

避航操船時、レーダ・ECDIS・AIS・GPS・双眼鏡の中で、最も優先して使用する航海計器を第1位とし、第5位まで順位をつけてもらうこととした。

(3) レーダとECDISに表示される情報

レーダとECDISでは、どのような情報に着目して操船するか、方位・距離・針路・速力・最接近時間・最接近距離の中で最も優先して使用する情報を第1位とし、第5位まで順位をつけてもらうこととした。なお、方位・距離・針路・速力は真/相対距離を含むこととした。レーダとECDISに表示される情報はGPSの示す情報を基に動作しており、これらの情報から運航者がどのような情報を活用しているか分析するため、本設問を設定した。なお、AISもGPSの示す情報を基に動作しているが、AISの提供する情報は船舶における動的情報・静的情報・航海関連情報⁽³²⁾であり、情報量がレーダやECDISに比較し多く、中には船舶のIMO番号や船の喫水⁽³²⁾といった船舶運航時には直接使用しない情報も存在するため、AISは調査対象としていない。

(4) 双眼鏡から得られる情報

船舶運航時において、運航者はGPSのみならず、目視により得られた情報を用いて操船を行う場面も多く存在する。そこで、運航者が目視から得る情報について分析するため、双眼鏡の見張りからどのような情報を得て操船するのか、自由記述にて記入してもらうこととした。

(5) GPSの海上における応用性

将来GPSの高精度化が進んだ場合、海洋ではどのような分野で活用されるのが望ましいか、船舶運航・海洋開発・環境モニタリング・防災対策・洋上監視の中から最も望ましい分野を第1位とし、第5位まで順位をつけてもらうこととした。

(6) GPS の海上における応用性についてのアイデア

GPS の海上における応用性は(5)に示した分野のみならず、どのような分野に活用できる可能性があるかと考えるか、アイデアを自由記述にて記入してもらうこととした。

3.3 調査結果と考察

アンケートについて、回答者 39 名(回収率 76.5%)、有効回答数 34 名(有効回答率 66.7%)であった。質問項目ごとに結果と考察を示す。

3.3.1 役職(船長・一等航海士・二等航海士・三等航海士)

有効回答数 34 名のうち、船長 11 名、一等航海士 12 名、二等航海士 4 名、三等航海士 7 名であった。一等航海士の回答が最も多く、次いで船長、三等航海士、二等航海士という結果となった。

3.3.2 避航操船で使用する航海計器

船舶運航者全体が各航海計器に示した優先順位ごとの使用割合を示す(図 3-1)。また、回答理由と

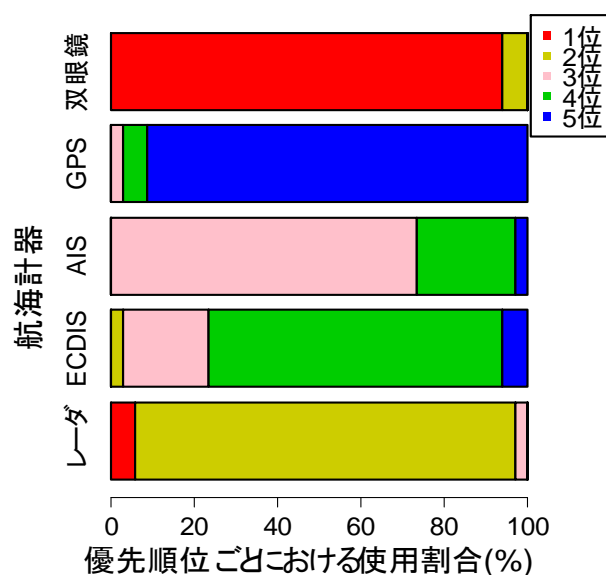


図 3-1 避航操船に使用する航海計器の優先順位(船舶運航者全体)

表 3-1 各航海計器の優先順位の相関(船舶運航者全体)

	レーダ	ECDIS	AIS	GPS	双眼鏡
レーダ	1				
ECDIS	-0.28	1			
AIS	0.28	-0.75	1		
GPS	-0.03	-0.27	-0.34	1	
双眼鏡	-0.83	0.10	-0.15	0.08	1

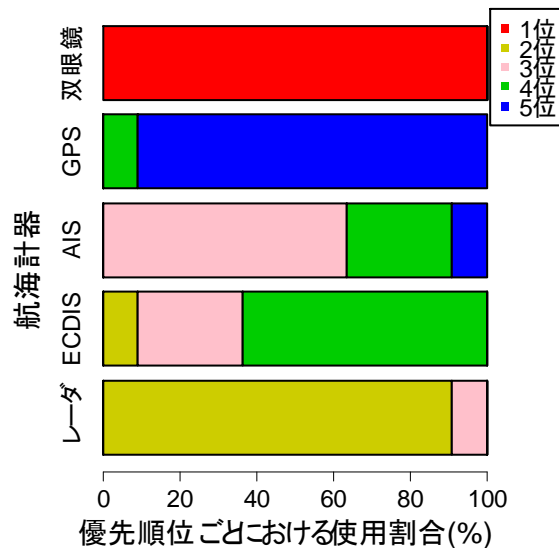


図 3-2 避航操船に使用する航海計器の優先順位(船長)

して、船長 1 名より、「様々な状況が想定され、それにより順位が変わりますので、回答が困難です。」という記述があった。避航操船を行う場合、船舶の輻輳海域や船舶の少ない沖合航行時などの様々な状況が想定され、その都度優先順位が変化することは留意すべきと考える。しかし、様々な状況が想定されるにも関わらず、図 3-1 より、船舶運航者全体において、双眼鏡を第 1 位に使用する割合は 94%にのぼり、双眼鏡の第 1 位の優先順位は最も高いことが分かった。一方、GPS の第 5 位の使用割合は 91%にのぼり、GPS の使用優先順位は最も低いことが分かる。すなわち、船舶運航者は全体として、目視により避航操船に必要となる相手船や周囲の状況を把握し、目視により得られた情報から自身の経験を加味しつつ操船を行う場合が多いと推察する。現状の船舶運航において、GPS の示す情報は緯度・経度の数値であり、数値情報のみでは船舶運航者の必要とする相手船との位置関係や周囲の状況を視覚的にとらえるのが難しいと考える。次に、船舶運航者全体における各航海計器の優先順位の相関をスピアマンの順位相関により求め、相関行列により示す(表 3-1)。表 3-1 より、双眼鏡とレーダ(1 位と 2 位)、AIS と ECDIS(3 位と 4 位)のように、優先順位に近い航海計器同士の相関は強く、双眼鏡と GPS(1 位と 5 位)のように、優先順位が遠い航海計器同士の相関は弱いことが分かった。中でも、AIS と ECDIS の相関は強いといえる。ただ、この 2 つの航海計器はいずれも順位が 3 位から 5 位といった比較的下位に集中している。本調査では下位の順位には着目せず、上位の優先順位に着目することとする。すると、双眼鏡とレーダは相関が強く、2 つの航海計器の優先順位はいずれも 1 位、2 位といった上位に集中していることが分かる。これは、目視での確認が可能な近距離は双眼鏡を、目視での確認が難しい広範囲の距離はレーダを用いることで情報を得ていることによると考える。ただし、船舶運航時に考える目視は自動車のように肉眼でみえる数 m~数百 m ではなく、数千~数万 m という距離を想定している。一方、GPS と双眼鏡はほとんど相関がみられなかったことから、GPS と双眼鏡は避航操船時、一緒に使用される場合が少ないといえる。

続いて、役職ごとの調査結果と考察を順に示す。

はじめに、船長が各航海計器に示した優先順位ごとの使用割合を示す(図 3-2)。図 3-2 より、船長

表 3-2 各航海計器の優先順位の相関(船長)

	レーダ	ECDIS	AIS	GPS
レーダ	1			
ECDIS	-0.59	1		
AIS	0.35	-0.95	1	
GPS	0.10	0.35	-0.59	1

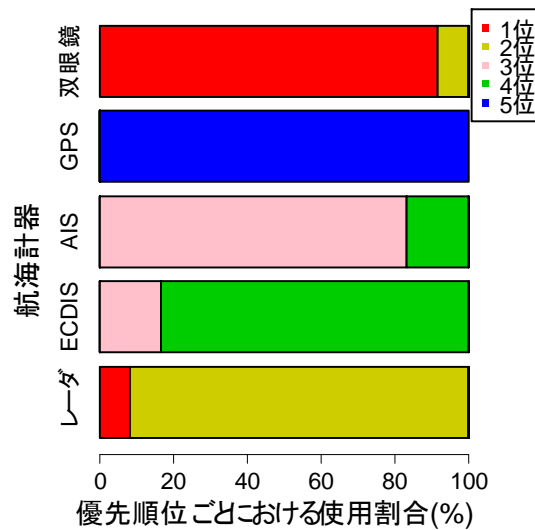


図 3-3 避航操船に使用する航海計器の優先順位(一等航海士)

は全員が双眼鏡を第 1 位と回答しており、双眼鏡の優先順位は最も高いことが分かる。また、GPS の第 5 位の使用割合は 91%にのぼっており、GPS の使用優先順位は最も低いことが分かる。これは、船舶運航者全体と多少の変動はみられるものの、ほとんど同じ傾向を示している。また、船長における各航海計器の優先順位の相関をスピアマンの順位相関により求め、相関行列により示す(表 3-2)。表 3-2 より、AIS と ECDIS は相関が強いものの、2 つの航海計器はいずれも優先順位が 3 位から 5 位といった下位に集中していることが分かる。また、レーダと ECDIS は相関がみられた。これは、目視での確認が難しい広範囲の情報をレーダと ECDIS という 2 つの航海計器を使用することにより情報を得ていることに起因すると推察する。

次に、一等航海士が各航海計器に示した優先順位ごとの使用割合を示す(図 3-3)。図 3-3 より、一等航海士の双眼鏡の第 1 位の使用割合は 92%にのぼっており、双眼鏡の優先順位は最も低いことが分かる。これは、多少の変動はみられるものの、船長と同じ傾向を示している。また、一等航海士における各航海計器の優先順位の相関をスピアマンの順位相関により求め、相関行列により示す(表 3-3)。表 3-3 より、AIS と ECDIS、双眼鏡とレーダはそれぞれ完全な相関がみられた。中でも双眼鏡とレーダは優先順位が 1 位や 2 位という上位に集中していることが分かる。これは、目視での確認が可能な近距離は双眼鏡を、目視での確認が難しい広範囲の距離はレーダを用いて情報を得ていることによ

表 3-3 各航海計器の優先順位の相関(一等航海士)

	レーダ	ECDIS	AIS	双眼鏡
レーダ	1			
ECDIS	-0.14	1		
AIS	0.14	-1	1	
双眼鏡	-1	0.14	-0.14	1

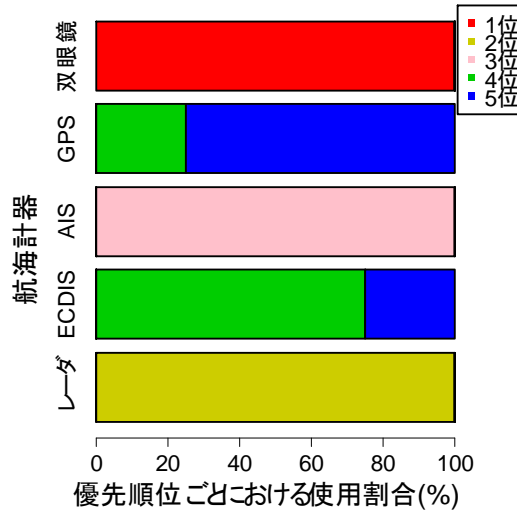


図 3-4 避航操船に使用する航海計器の優先順位(二等航海士)

ると考える。

次に、二等航海士が各航海計器に示した優先順位ごとの使用割合を示す(図 3-4)。二等航海士の年齢層は 20 代後半から 30 代前半であり、船長や一等航海士とは異なる傾向を示すと予測していた。しかし、図 3-4 より、実際は二等航海士全員が双眼鏡を第 1 位、レーダを第 2 位、AIS を第 3 位と回答していた。また、GPS においても、1 名を除き 3 名が第 5 位と記述しており、GPS の優先順位は最も低いことが分かる。こちらも、多少の変動はみられるものの、船長や一等航海士とほとんど同じ傾向を示していることが分かる。

最後に、三等航海士が各航海計器に示した優先順位ごとの使用割合を示す(図 3-5)。三等航海士の年齢層は 20 代前半から 20 代後半であり、いわゆるスマホ世代といわれる年齢層である。そのため、電波航法計器の優先順位が最高になると予測していた。しかし、実際は双眼鏡の使用割合が 86%にのぼった。すなわち、三等航海士においても、双眼鏡の使用優先順位は最も高いことが分かる。また、GPS の第 5 位の使用割合は 86%にのぼっており、GPS の使用優先順位は最も低いことが分かる。これは、多少の変動はみられるものの、船長や一等航海士とほとんど同じ傾向を示していることが分かる。すなわち、船舶運航の経験が豊富な船長や一等航海士から、船舶運航の経験が浅い三等航海士まで、大きな差はみられなかったといえる。また、三等航海士における各航海計器の優先順位の相関をスピアマンの順位相関により求め、相関行列により示す(表 3-4)。表 3-4 より、双眼鏡とレーダには完全な

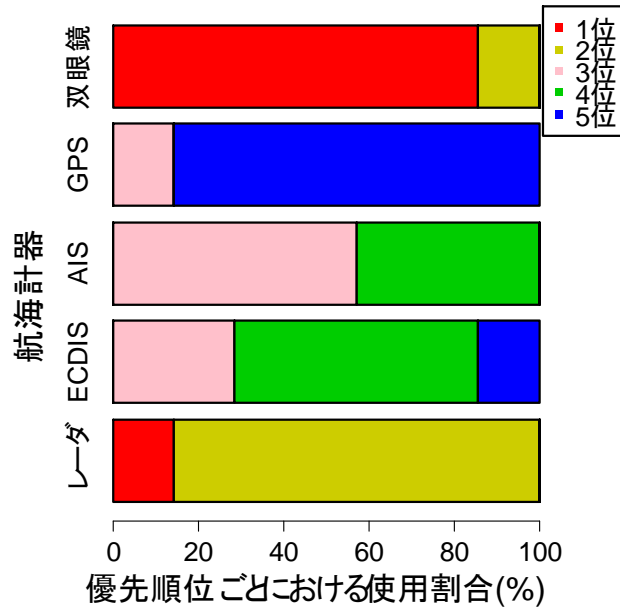


図 3-5 避航操船に使用する航海計器の優先順位 (三等航海士)

表 3-4 各航海計器の優先順位の相関 (三等航海士)

	レーダ	ECDIS	AIS	GPS	双眼鏡
レーダ	1				
ECDIS	-0.11	1			
AIS	0.35	-0.32	1		
GPS	-0.17	-0.68	-0.47	1	
双眼鏡	-1	0.11	-0.35	0.17	1

相関がみられた。これは、先に示した通り、目視での確認が可能な近距離は双眼鏡を、目視での確認が難しい広範囲の距離はレーダを用いることにより、避航操船に必要な情報を得ていることによると推察する。また、GPS と ECDIS の相関はみられたが、2つの航海計器はいずれも優先順位が下位に集中していることが分かる。

このように、役職ごとの特徴をみてきたが、近距離の確認が可能な双眼鏡と広範囲の距離が確認可能なレーダから得られる情報を高精度な GPS により体現することができれば、GPS も安全運航の達成に寄与する航海計器の一つとなりうることが考えられる。

3.3.3 レーダと ECDIS に表示される情報

船舶運航者全体が各表示情報に示した優先順位毎の使用割合を示す(図 3-6)。距離の第 1 位の使用割合は 41%にのぼり、優先して使用する割合が最も高いことが分かる。次いで、方位の第 1 位の使用割合が 29%であり、距離と方位を使う割合が高いといえる。また、最接近距離の第 1 位の使用割合も 18%となっており、船舶運航者は全体として距離の情報を優先して使用する機会が多いことが分かった。すなわち、相手船との距離間を意識しながら、操船を行う場合が多いと推察する。一方、最接近

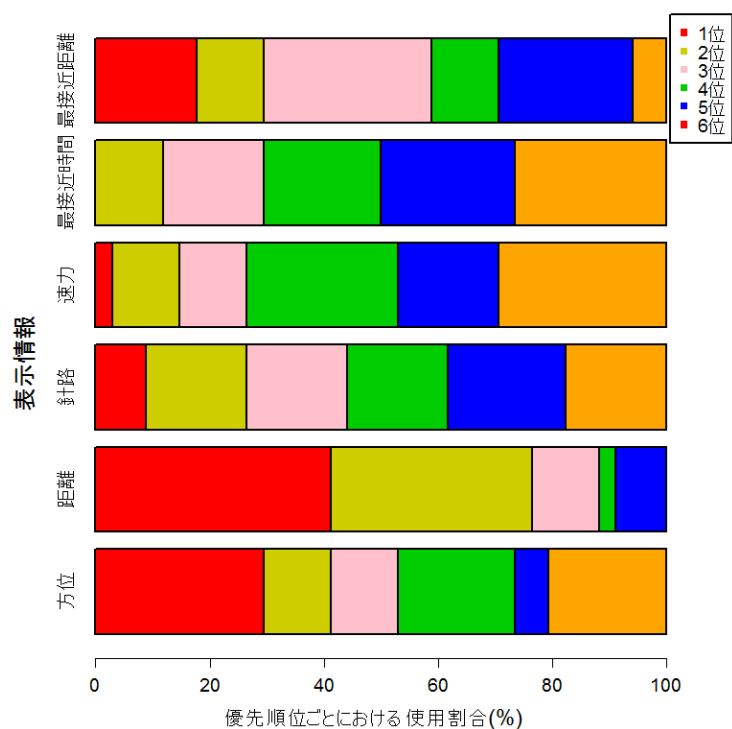


図 3-6 各表示情報に示した優先順位ごとにおける使用割合(船舶運航者全体)

表 3-5 各情報の優先順位の相関(船舶運航者全体)

	方位	距離	針路	速力	最接近時間	最接近距離
方位	1					
距離	-0.10	1				
針路	0.12	-0.28	1			
速力	-0.38	0.26	-0.06	1		
最接近時間	-0.45	-0.31	-0.49	-0.30	1	
最接近距離	-0.67	-0.23	-0.49	-0.16	0.76	1

時間や速力はそれぞれ第 6 位で使用する割合が最も多く、30%近くへのぼり、最接近距離や速力を優先して使用する割合は低いといえる。順位を付けた回答者の中で、「全ての情報を総合して判断するので、順位付けをするのは難しいと感じました。」という記述があり、運航者が操船を行う場合は選択肢に示した情報を統合し、判断していることも考慮すべきといえる。しかし、距離情報を優先して使用するケースが多いという結果をふまれば、運航者が選択肢に示した情報を統合する際、相手船や物標との距離間を基に情報を統合することが多いと考える。

次に、船舶運航者全体における各表示情報の優先順位の相関をスピアマンの順位相関により求め、相関行列により示す(表 3-5)。最接近距離と方位、最接近時間はそれぞれ相関が強い。いずれの表示情報も優先順位が第 1 位から第 6 位まで多岐に渡るものの、方位を第 1 位や第 2 位という上位に選

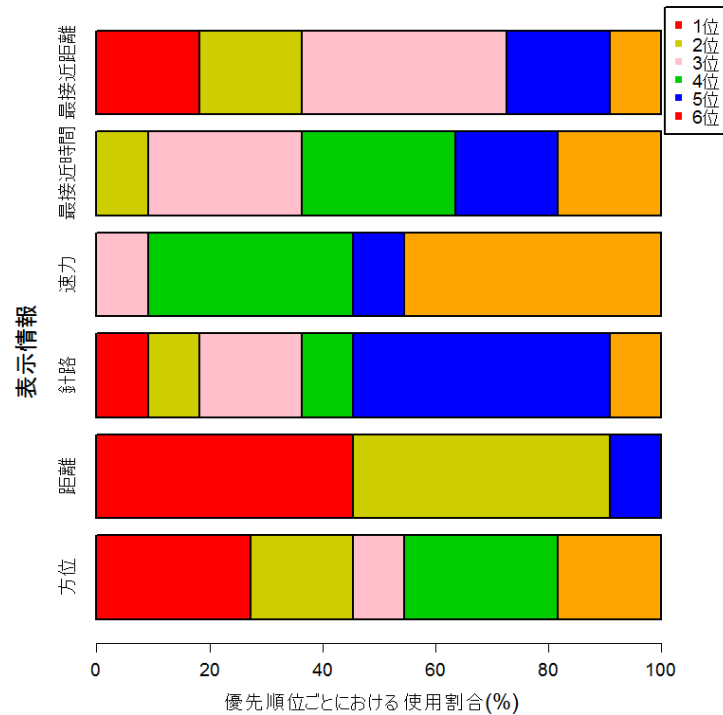


図 3-7 各表示情報に示した優先順位ごとにおける使用割合(船長)

択した場合、最接近距離を第 5 位や第 6 位という下位に選択している運航者が多いことが分かった。また、最接近時間は第 4 位から第 6 位の下位に、最接近距離は第 1 位から第 3 位の上位に優先して使用する割合が多いものの、最接近距離を第 3 位に使用する場合は最接近時間を第 4 位に使用するということ、最接近距離と最接近時間の優先順位は近く、優先順位が近い情報の相関は強いといえる。

方位はジャイロコンパスを用いて確認することも可能であるが、距離や最接近時間、最接近距離といった情報はジャイロコンパスや双眼鏡から得ることができず、レーダや ECDIS からのみ得られる情報であり、これらの航海計器では距離情報を数値のみならず視覚的にとらえることができる。すなわち、船舶運航者はレーダや ECDIS を使用する際、これらの航海計器からしか得られない情報を優先的に使用するが多いといえる。

続いて、役職ごとの調査結果と考察を順に示す。

はじめに、船長が各表示情報に示した優先順位ごとの使用割合を示す(図 3-7)。距離を第 1 位に優先して使用する割合が 45%にのぼり、船長は距離の情報を優先して使用するが多い。次いで、方位の第 1 位の使用割合が 27%であり、距離と方位を使う割合が高いといえる。また、最接近距離の第 1 位の使用割合も 18%となっており、船長も距離の情報を優先して使用するが多いことが分かった。一方、速度は第 6 位で使用される割合が高く、45%にのぼる。これは多少の変動はみられるものの、船舶運航者全体とほとんど同じ傾向を示している。

次に、船長における各表示情報の優先順位の相関をスピアマンの順位相関により求め、相関行列により示す(表 3-6)。方位と最接近時間・最接近距離、さらには最接近時間と最接近距離は相関が強い。

表 3-6 各情報の優先順位の相関(船長)

	方位	距離	針路	速力	最接近時間	最接近距離
方位	1					
距離	-0.04	1				
針路	-0.16	-0.29	1			
速力	-0.11	0.30	0.32	1		
最接近時間	-0.65	-0.21	-0.43	-0.31	1	
最接近距離	-0.66	-0.35	-0.37	-0.38	0.89	1

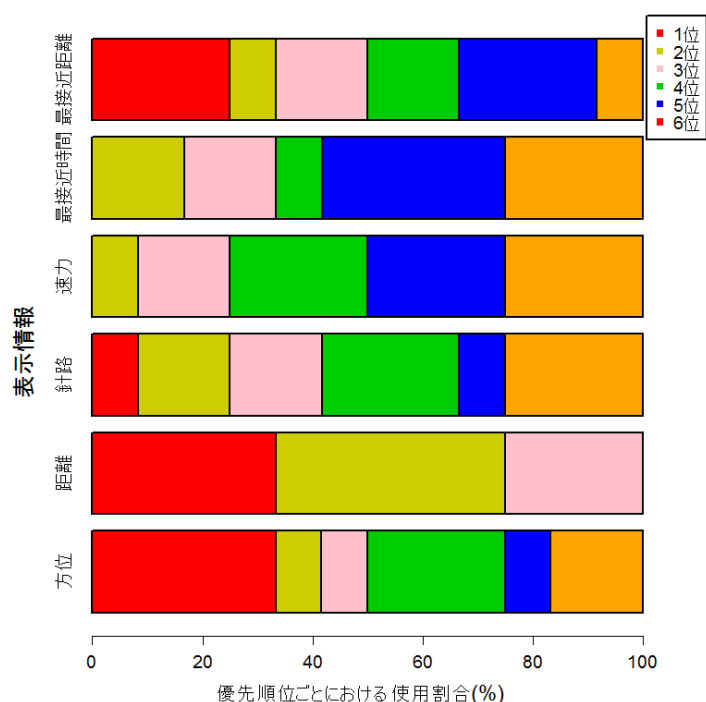


図 3-8 各表示情報に示した優先順位ごとにおける使用割合(一等航海士)

中でも最接近時間と最接近距離は相関が非常に強い。この2つの情報は優先順位が上位・下位に集中せず、順位に広がりが見られたが、最接近距離を第1位に使用する場合は最接近時間を第2位に使用するというように、最接近距離と最接近時間の優先順位は近く、優先順位に近い情報の相関は強いといえる。方位と最接近時間・最接近距離の優先順位もそれぞれ同じ傾向が見られた。

いずれにせよ、船長は船舶運航者全体と同様に、距離情報を最も優先して使用する割合が高く、この情報を数値のみならず視覚的にとらえ、操船に生かしているといえる。

次に、一等航海士が各表示情報に示した優先順位ごとにおける使用割合を示す(図 3-8)。一等航海士の場合、方位と距離を第1位に使用する割合がいずれも33%にのぼり、距離に加え方位の情報も優先して使用する割合が多い。ただし、距離情報を第2位に使用する割合は42%、第3位に使用する割合は25%にのぼり、各情報の中でも距離は第1位から第3位という上位に集中していることが分か

表 3-7 各情報の優先順位の相関(一等航海士)

	方位	距離	針路	速力	最接近時間	最接近距離
方位	1					
距離	-0.17	1				
針路	0.23	0.03	1			
速力	-0.34	0.84	0.03	1		
最接近時間	-0.45	-0.45	-0.68	-0.43	1	
最接近距離	-0.58	-0.43	-0.66	-0.36	0.79	1

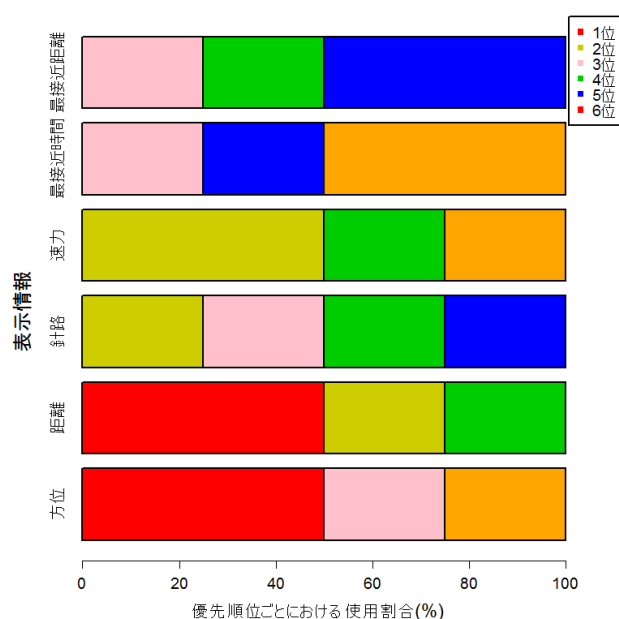


図 3-9 各表示情報に示した優先順位ごとにおける使用割合(二等航海士)

る。一方、速力・最接近時間・針路は第 6 位に使用される割合が 25%にのぼる。中でも、速力は第 6 位に使用される割合が最も高く、優先して使用される割合が少ないといえる。

次に、一等航海士における各表示情報の優先順位の相関をスピアマンの順位相関により求め、相関行列により示す(表 3-7)。距離と速力、針路と最接近時間・最接近距離、最接近時間と最接近距離は相関が強く、中でも距離と速力は相関が非常に強い。この 2 つの情報は優先順位が上位・下位に集中せず、順位に広がりが見られたが、距離を第 1 位に使用する場合、速力を第 2 位または第 3 位に使用するように、距離と速力の優先順位は近く、優先順位が近い情報の相関は強いといえる。針路と最接近時間・最接近距離、最接近時間と最接近距離もそれぞれ同じ傾向が見られた。

いずれにせよ、一等航海士は距離情報に加え方位を最も優先して使用する割合が高く、この情報を数値のみならず視覚的にとらえ、操船に生かしているといえる。

続いて、二等航海士が各表示情報に示した優先順位ごとにおける使用割合を示す(図 3-9)。二等航海士の場合、方位と距離を第 1 位に使用する割合がいずれも 50%にのぼり、距離と方位を優先して使

表 3-8 各情報の優先順位の相関(二等航海士)

	方位	距離	針路	速力	最接近時間	最接近距離
方位	1					
距離	-0.89	1				
針路	0.74	-0.95	1			
速力	-0.89	1	-0.95	1		
最接近時間	0.06	-0.50	0.63	-0.50	1	
最接近距離	-1	0.89	-0.74	0.89	-0.06	1

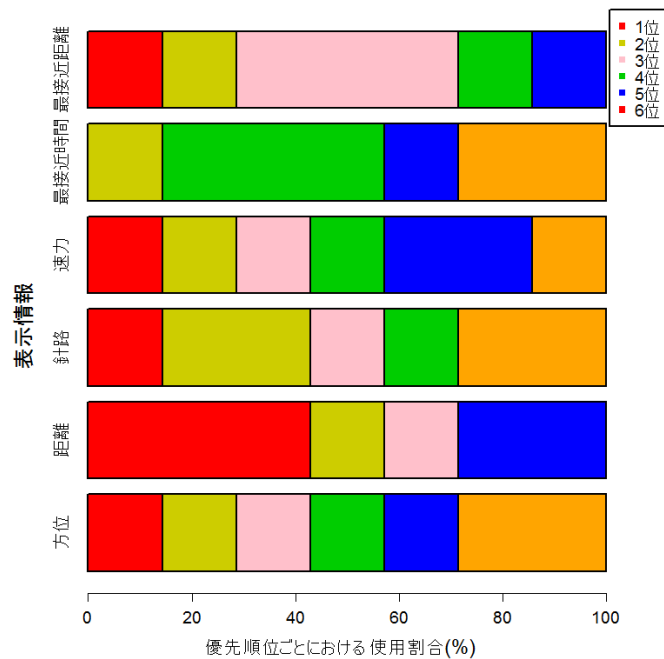


図 3-10 各表示情報に示した優先順位ごとにおける使用割合(三等航海士)

用する割合が最も多い。距離は第1位、第2位、第4位に集中しているのに対し、方位は第1位、第3位、第6位に集中しており、距離は方位に比較し優先順位が高いといえる。一方、最接近時間は第6位に使用される割合が50%にのぼり、優先して使用される割合が少ないといえる。

次に、二等航海士における各表示情報の優先順位の相関をスピアマンの順位相関により求め、相関行列により示す(表 3-8)。距離と速力、方位と最接近時間はそれぞれ完全な相関がみられた。全体的に相関が強い情報同士が多いが、二等航海士の回答者は4人であり、他の役職の運航者に比較し人数が少なかったことも影響していると考えられる。

いずれにせよ、二等航海士は一等航海士と同様に、距離情報に加え方位を最も優先して使用する割合が高く、この情報を数値のみならず視覚的にとらえ、操船に生かしているといえる。

最後に、三等航海士が各表示情報に示した優先順位ごとにおける使用割合を示す(図 3-10)。三等航海士の場合、距離を第1位に使用する割合が43%にのぼり、距離を優先して使用する割合が最も高

表 3-9 各情報の優先順位の相関(三等航海士)

	方位	距離	針路	速力	最接近時間	最接近距離
方位	1					
距離	0.43	1				
針路	0.28	-0.23	1			
速力	-0.60	-0.57	-0.41	1		
最接近時間	-0.72	-0.22	-0.79	0.50	1	
最接近距離	-0.88	-0.37	-0.51	0.45	0.91	1

い。一方、方位・針路・最接近時間は第6位の割合がいずれも29%であった。ただ、方位と針路は第1位に使用する割合が14%となり、順位に広がりが見られる。しかし、最接近時間は第4位から第6位という下位に集中しており、優先して使用される割合が少ないといえる。

次に、三等航海士における各表示情報の優先順位の相関をスピアマンの順位相関により求め、相関行列により示す(表3-9)。最接近距離と方位、最接近時間は非常に強い相関がみられた。3つの情報は順位が上位や下位に集中せず、広がりが見られたが、方位を第2位に使用する場合、最接近距離を第3位に使用するよう、優先順位に近い情報の相関は強いといえる。最接近距離と最接近時間にも同じ傾向がみられた。

いずれにせよ、三等航海士は船舶運航者全体や船長と同様に、距離情報を最も優先して使用する割合が高く、この情報を数値のみならず視覚的にとらえ、操船に生かしているといえる。

役職ごとの特徴をみてきたが、船舶運航者は全体として、レーダとECDISからは近距離あるいは広範囲に限らず、距離情報に着目していることが分かった。レーダやECDISはGPSの情報を基に動作しており、GPSはこのような航海計器へ正確な位置の情報提供という役割を果たしていると考えられる。

3.3.4 双眼鏡から得られる情報

本設問は自由記述により回答頂いたものであり、船舶運航者全体の記述内容を下記に示す。

- ・他船の存在、他船の方位変化、他船の針路、他船の船種、障害物(漁具等)の有無、目標(ブイ等)の早期発見
- ・視程、相手船の方位、距離、ベアリングの変化、位置関係
- ・相手船の向き、(夜間は灯火の見え方)、大きさ、信号(旗、灯火、形象物等)、漁具、ブイ等障害物
- ・相手船の針路・船種・速力の有無、ブイ・漁具・漂流物等
- ・他船の進行方向、船種、海上障害物の発見、目標物の発見、視程、陸明か船の灯火かの判断、船名
- ・船名、船籍港、船橋当直人数、ステムが造る波の大きさ
- ・航行中か否か、航行中・停泊中等の船舶の向き
- ・進路及びその変化
- ・見合い関係、船種(漁船の漁法や操縦性能制限船)
- ・どのような(近づく?遠ざかる?)物標かどうか、相手船の向き・船種・曳航物件があるかどうか、

船速あり？なし？

- ・海上における他船・浮遊物の発見と確認(動き、見合い等)
- ・方位変化を確認する前の他船の動静
- ・相手船のアスペクト・進行方向、夜間であれば灯火の見え方、漁船であれば操業の有無・漁具の有無
- ・相手船の姿勢(動静(方位変化)はレピータコンパスによる)、船種、ターゲットの姿(船かその他か)、形象物・灯火、船籍、会社名(ファンネルを含む)
- ・船の見え方(マスト灯の間隔等)-相手船の針路、見合い予測、網を引いているかどうか、船首の波(走っているかどうか)、ファンネルからの煙(エンジン始動)、船、漁網、ブイ、海上漂流物、岩、潮目、海面の色の変化(海図情報にあるものは元より、海図情報にないものに対する警戒)、冰山、流氷、他、海面に存在するものの把握
- ・船種・船型、載貨状態、視程・海面の状況、漁具等の有無
- ・動静・針路(相手船)、気象・海象の変化、陸上物標の早期把握
- ・他船の針路(どちらを向いているか)、海面上の障害物の有無、航路標識の情報
- ・他船の動向
- ・相手船の向き(どちら舷が見えるか？夜間であれば舷灯の色、マスト灯の間隔)
- ・船種、行先、方位変化、速力、針路、パイロットの有無、離着岸、投抜錨の用意
- ・視界の把握のため、水平線辺りのターゲット捕捉のため
- ・船舶の向き、灯火の識別、漁具・漁船の位置又はその動向
- ・レーダでは写らない漁船やブイなどを見つけて避航したり、他船の灯火の見え方など
- ・見合い関係(行会い、横切り、追い越し)の判断、マスト灯の開きでおおよそのアスペクトを推定
- ・相手船のアスペクト(夜間、灯火の見え方)、漁具・障害物の確認、夜間時ブレアの確認
- ・相手船の向いている方向
- ・見合い関係の確認(横切り船、反航船、同航船、追い越し船、停留船の別)、船種の理解(大型商船、内航船、漁船、特殊船・・・)、標識・陸上物標の確認(灯台、浮標式、山、岬、島・・・)、視程・障害物・漂流物・漁具の有無
- ・相手船の見え方、ベアリングの変化
- ・他船の存在、船種、アスペクト
- ・他船のマストの開き・アスペクト比、夜間においては灯火の見え方(航海灯の見え方)、見え方に応じた推定距離、旗流信号や形象物・錨泊船の錨鎖の状態、パイロット乗下船の確認
- ・進行方向における障害物(ブイ、流木等)の有無、他船の向き(船首方位)、他船の動静(引き波や投げ網の有無)、停留中か否か等
- ・他船の動向を確認し、その後、衝突のおそれを判断するため、方位変化を得る
- ・船種、大きさ、アスペクト、航走波、レーダ使用の有無、信号旗の有無、パイロットラダーの用意状況、ファンネルからの煙、プロペラ水流、黒球、ホースパイプ洗浄水、船首配置の有無、係留索状況、網取放しの有無、タグのS/B、エスコートの有無など、沖合・内海・港内・湾内・狭水道時、避航時の状況により変わります
- ・漂流物、他船の見え方(舷灯、マスト灯など)

- ・他船の見え方(含灯火)、レーダに映っていない他船(たとえば漁船)、その他の障害物の存在の有無
- ・他船の動向、灯火、気象海象
- ・船舶のアスペクト(マスト灯や舷灯を含む)

上述した記述より、他船の存在や動向、漁具等の障害物の有無やブイ等の目標物の早期発見、航走波やステムが造る波の大きさ、気象海象や視程の把握が多いことが分かる。中でも、他船の方位、距離、ベアリングの変化やアスペクト比、灯火・形象物等の信号に関する記述が中心であった。方位や距離、ベアリングの変化はレーダやECDIS といった電波航法計器でも確認可能であるが、向きや大きさ、アスペクト比は実際の船舶を直接把握しなければ確認することができない。避航操船を行う場合、単に相手船と衝突しない方向へ操舵するのではなく、船舶の大きさや向きによって操舵のみならず、機関や汽笛の操作が必要となることが考えられる。どのような動作を行うかどうか決めるには、相手船との位置関係や動向に限らず、大きさやアスペクト比といった他船の規模を考慮することが安全運航の達成に不可欠であると考え。また、ブイはレーダ画面上に映る場合もあるが、漁具や漂流物はレーダ画面上に映らず、早期発見を行わなければ衝突し、船体損傷が発生する恐れがあり、船舶運航に支障をきたすことが考えられる。障害物の有無は双眼鏡からのみ把握可能であり、このような情報も安全運航の達成に不可欠であると考え。航走波や波の大きさを知ることにより、他船の航走状態の把握はもちろんのこと、気象の変化に伴う海面の船底への打ち込みを把握も可能となる。他船の航走状態はレーダやECDIS 上に示される速力情報からも把握可能であるといえるが、3.3.3 で示したように、船舶運航者は全体として速力情報を優先して使用する割合が低いことから、速力の数値を優先して使用するのではなく、自分の目で直接航行状況を確認することにより、他船の航走状態を把握することに重点を置いていると考え。また、気象の変動に伴い波高が変化し、波高が高くなると海面が船底に打ち込み、機関や操舵を調整しない限り船体の損傷の発生が予想される。このような損傷の発生を防止するためにも、海面状態の直接把握は必要な動作であると考え。さらに、気象の変化により視界が制限されると、周囲の見え方が変化し、自船の近くを航行・錨泊する船舶の把握すら難しくなることが予想される。そのため、レーダやECDIS による方位や距離の情報の把握に加え、周囲の状況を目視により直接確認することで、現在の視程をふまえた避航動作の選択を可能としていることが考えられる。

レーダや ECDIS から示される情報は他船や周囲の状況を数値で提供するものが多く、避航動作をどのような形で実施するか考えるには、数値情報のみならず、視覚的な情報の取得が不可欠であると考え。他船や周囲の状況に関する情報を視覚的に得るためには、他船の規模や航行状態に関する常用を目視により直接確認することが重要であると考え。また、レーダや ECDIS といった電波航法計器のみでは取得できない情報もいくらか存在する。こうした情報を目視により確認し、避航動作につなげていると考え。

続いて、役職ごとの記述について示し、考察する。はじめに、船長の記述を下記に示す。

- ・相手船の向き、(夜間は灯火の見え方)、大きさ、信号(旗、灯火、形象物等)、漁具、ブイ等障害物
- ・船名、船籍港、船橋当直人数、ステムが造る波の大きさ
- ・見合い関係、船種(漁船の漁法や操縦性能制限船)
- ・方位変化を確認する前の他船の動静
- ・相手船のアスペクト・進行方向、夜間であれば灯火の見え方、漁船であれば操業の有無・漁具の有

無

- ・相手船の姿勢(動静(方位変化)はレピータコンパスによる)、船種、ターゲットの姿(船かその他か)、形象物・灯火、船籍、会社名(ファンネルを含む)
- ・船の見え方(マスト灯の間隔等)-相手船の針路・見合い予測、網を引いているかどうか、船首の波(走っているかどうか)、ファンネルからの煙(エンジン始動)、船、漁網、ブイ、海上漂流物、岩、潮目、海面の色の变化(海図情報にあるものは元より、海図情報にないものに対する警戒)、冰山、流氷、他、海面に存在するものの把握
- ・見合い関係(行会い、横切り、追い越し)の判断、マスト灯の開きでおおよそのアスペクトを推定
- ・他船の存在、船種、アスペクト
- ・他船の動向を確認し、その後、衝突の恐れを判断するため、方位変化を得る
- ・船種、大きさ、アスペクト、航走波、レーダ使用の有無、信号旗の有無、パイロットラダーの用意状況、ファンネルからの煙、プロペラ水流、黒球、ホースパイプ洗浄水、船首配置の有無、係留索状況、綱取放しの有無、タグのS/B、エスコートの有無など、沖合・内海・港内・湾内・狭水道時、避航時の状況により変わります

上述した記述より、船長も相手船との位置関係や動向、漁具やブイ等の障害物の有無に着目している場合が多いことが分かった。ただ、相手船との位置関係に関して、「方位変化を確認する前の他船の動静」「相手船の姿勢」というように、相手船のどのような動きに着目しているのか具体的な記述がみられ、着目した動きを注視し、避航動作につなげているといえる。また、「避航時の状況により変わります」という記述がみられた。避航操船を行う場合、船舶の輻輳海域や船舶の少ない沖合航行時などの様々な状況が想定され、その都度注目する情報は変化することは考慮すべきといえる。しかし、様々な状況が想定される中でも、相手船との位置関係や動向、漁具やブイ等の障害物の有無に関しては記述が多かったことから、これらの内容は目視により確認する重点的な情報であると考え。一方、ファンネルからの煙に着目している船長も多いことが分かった。ファンネルから煙が出ればエンジンが始動していることを確認できる。エンジンが始動しているかどうかを直接確認することで、他船の速力変化に対する予測が可能になるといえ、他船の速力変化に応じた避航動作の検討も可能であると考え。他船の速力変化に関する予測はレーダやECDISといった電波航法計器の場合、速力情報の継続監視により行うことが可能であるが、ファンネルから煙は継続監視を行わずに即座に把握が可能であることから、双眼鏡を用いた目視によりこのような情報を得ていると推察する。

次に、一等航海士の記述内容を下記に示す。

- ・相手船の針路・船種・速力の有無、ブイ・漁具・漂流物等
- ・航行中か否か、航行中・停泊中等の船舶の向き
- ・進路及びその変化
- ・どのような(近づく?遠ざかる?)物標かどうか、相手船の向き・船種・曳航物件があるかどうか、船速あり?なし?
- ・海上における他船・浮遊物の発見と確認(動き、見合い等)
- ・船種・船型、載貨状態、視程・海面の状況、漁具等の有無
- ・動静・針路(相手船)、気象・海象の変化、陸上物標の早期把握
- ・他船の針路(どちらを向いているか)、海面上の障害物の有無、航路標識の情報

- ・他船の動向
- ・相手船の向き(どちら舷が見えるか?夜間であれば舷灯の色、マスト灯の間隔)
- ・相手船の向いている方向
- ・見合い関係の確認(横切り船、反航船、同航船、追い越し船、停留船の別)、船種の理解(大型商船、内航船、漁船、特殊船・・・)、標識・陸上物標の確認(灯台、浮標式、山、岬、島・・・)、視程・障害物・漂流物・漁具の有無
- ・船舶のアスペクト(マスト灯や舷灯を含む)

上述した記述より、一等航海士も船長と同様に相手船との位置関係や動向、漁具やブイ等の障害物の有無に着目している場合が多いことが分かった。また、一等航海士の場合、気象・海象の変化や視程・海面の状況にも注目している。さらには、「船種の理解」という記述もあり、大型商船あるいは漁船といった船種を確認することにより、船の形状を把握できることから、船の形状も考慮し避航動作を考えているといえる。

次に、二等航海士の記述内容を下記に示す。

- ・他船の存在、他船の方位変化、他船の針路、他船の船種、障害物(漁具等)の有無、目標(ブイ等)の早期発見
- ・船種、行先、方位変化、速力、針路、パイロットの有無、離着岸、投抜錨の用意
- ・他船のマストの開き・アスペクト比、夜間においては灯火の見え方(航海灯の見え方)、見え方に応じた推定距離、旗流信号や形象物・錨泊船の錨鎖の状態、パイロット乗下船の確認
- ・進行方向における障害物(ブイ、流木等)の有無、他船の向き(船首方位)、他船の動静(引き波や投げ網の有無)、停留中か否か等

上述した記述より、二等航海士も船長や一等航海士と同様に相手船との位置関係や動向、漁具やブイ等の障害物の有無に着目している場合が多いことが分かった。また、二等航海士の場合、「パイロットの有無」や「パイロット乗下船の確認」といったパイロットに関する記述がみられた。パイロットの有無については、沖合や遠洋航行時には問題にならないが、港内や湾内、内海、狭水道航行時はパイロットによる操船が行われているので注目する必要がある、パイロットの乗船状況を確認しながら自船の操船を行うのではないかと推察する。さらに、「投抜錨の用意」や「錨泊船の錨鎖の状態」といった錨泊中の船舶に関する記述もみられた。投錨時、船舶は錨地に向けて減速を続け、錨を海底へ下ろす準備を行う。自船の航行する針路が他船の錨地であった場合、他船は自船と同じ方向へ航行を続けつつ、投錨のため減速を始める。しかし、同じ針路の場合、自船が避航動作を取らなければ衝突の危険が生じる可能性があることに加え、投錨中の船舶に近づいた場合、錨鎖が船底に絡まる等の危険もあるため、他船の状況を注意深く見守る必要があると考える。他船が減速しているかどうかの状況はレーダや ECDIS といった電波航法計器の数値情報から確認が可能であるが、錨を海底に下ろす作業準備を行っているかどうかは電波航法計器の情報からでは確認できず、双眼鏡による目視が必要となる。一方、抜錨時、船舶は錨を海底から揚げた後、錨地から航行針路へ向け増速する。増速開始後の針路が自船と同じ場合、自船が避航動作を取らなければ衝突の危険が生じることはもちろんのこと、抜錨中の船舶に近づいた場合、錨鎖が船底に絡まる等の危険もあり、他船の状況を注意深く見守る必要があると考える。抜錨作業時の状況は電波航法計器の情報からでは確認できず、双眼鏡

による目視が必要となる。いずれにしろ、航行中の船舶のみならず、錨泊中の船舶の動静も目視を通じて把握しているといえる。

最後に、三等航海士の記述内容を下記に示す。

- ・視程、相手船の方位、距離、ベアリングの変化、位置関係
- ・他船の進行方向、船種、海上障害物の発見、目標物の発見、視程、陸明か船の灯火かの判断、船名
- ・視界の把握のため、水平線辺りのターゲット捕捉のため
- ・船舶の向き、灯火の識別、漁具・漁船の位置又はその動向
- ・レーダでは写らない漁船やブイなどを見つけて避航したり、他船の灯火の見え方など
- ・相手船のアスペクト(夜間、灯火の見え方)、漁具・障害物の確認、夜間時ブレアの確認
- ・相手船の見え方、ベアリングの変化
- ・漂流物、他船の見え方(舷灯、マスト灯など)
- ・他船の見え方(含灯火)、レーダに映っていない他船(たとえば漁船)、その他の障害物の存在の有無

上述した記述より、三等航海士も船長や一等航海士、二等航海士と同様に相手船との位置関係や動向、漁具やブイ等の障害物の有無に着目している場合が多いことが分かった。また、三等航海士の場合、灯火を含んだ他船の見え方に関する記述が多く、他船の見え方から自船との位置関係を捉え、避航動作につなげていることが考えられる。

大型船や内航商船はレーダや ECDIS といった電波航法計器の画面上に映るが、漁船や小型船はレーダ画面上で捕捉できない場面が多く、電波航法計器のみの情報に頼った場合、これらの船舶に気づくのが遅れ、衝突等の海難事故を誘発することが考えられる。そこで、レーダ画面上で捕捉するのが難しい船舶を早期発見すべく、双眼鏡を用いた目視により周囲の状況を確認しているといえる。また、レーダ画面上での捕捉が可能な大型船や内航商船であっても、位置関係を理解するには画面上に示される数値のみでは限界があり、実際に動静を確認することが必要である。さらに、船舶の規模や形状も避航動作の選択に大きな影響を及ぼし、これらの情報は運航者の目視からのみ把握可能であることから、大型船や内航商船といった電波航法計器で捕捉可能な船舶であっても、双眼鏡を用いた目視による確認が行われていると考える。船舶に限らず、漁具や浮遊物といった障害物も船体に衝突した場合、運航を妨げることが予想される。このような障害物も当然のことながらレーダや ECDIS といった電波航法計器により探知することは不可能であり、運航者の目視が頼りとなる。

現状の GPS の情報は、レーダや ECDIS といった電波航法計器への情報提供という形で用いられているが、双眼鏡による目視で運航者が得る情報は電波航法計器からでは得られない情報が中心であり、目視により得ている情報を GPS に加え画像処理技術等の他の技術と複合した技術により提供できれば、運航者の目視にかかる負担を軽減することになると考える。

3.3.5 GPS の海上における応用性

船舶運航者全体が各応用分野に示した望ましい順位毎の割合を示す(図 3-11)。質問 2 の結果より、船舶運航者が避航操船時に最も優先して使用する航海計器は双眼鏡である一方、GPS の使用割合は最も低いことが分かった。そのため、GPS の高精度化が進んだ場合であっても、船舶運航の分野で活用されるのが望ましいという回答は少ないと予想していた。しかし、第 1 位が最も集中した分野は船舶運航であり、38%にのぼる。ただし、船舶運航を第 5 位と回答した運航者も 32%で最も多く、船舶運

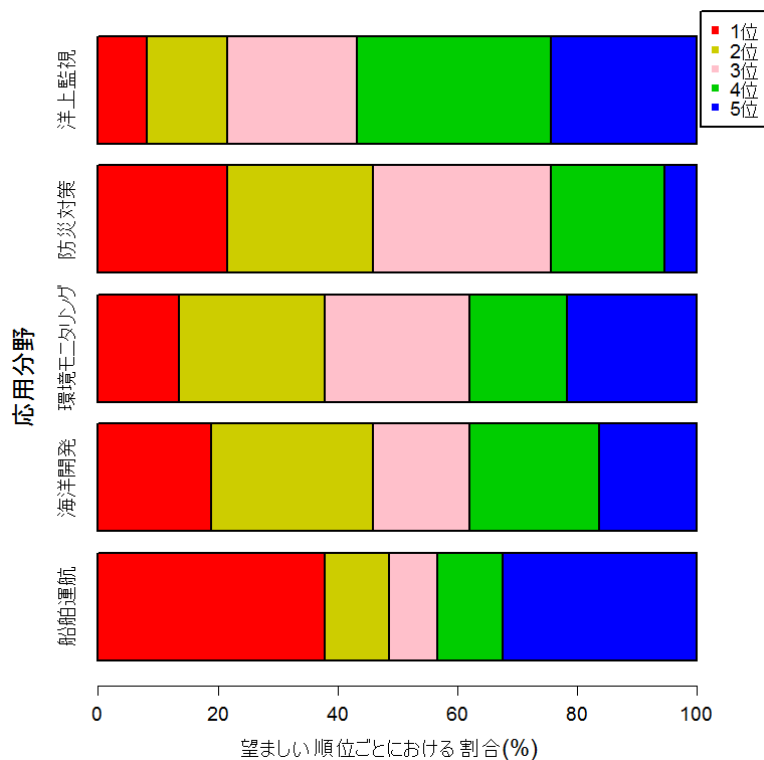


図 3-11 各応用分野の望ましい順位における割合(船舶運航者全体)

航分野は運航者の中でも意見が分かれる結果となった。現状の船舶運航において GPS の示す情報は緯度・経度情報の数値であり、数値情報のみでは船舶運航者の必要とする相手船との位置関係や周囲の状況を視覚的にとらえるのが難しいと考える。しかし、GPS の示す情報は非常に高精度であり、正確な位置/速度情報をどのような形で活用すれば、船舶運航の分野で GPS が役立つか考える必要があるといえる。船舶運航者が業務を行う上で必要となる情報をその都度提供できれば、GPS も安全運航の達成に寄与する航海計器の一部になりうると考える。また、防災対策分野を第 1 位と回答した運航者は 22%にのぼり、船舶運航者に次いで第 1 位と海洋している割合が高い。防災対策の分野では、正確な情報に基づいた予測や観測が不可欠であり、海洋における防災対策として、海面変動に基づく津波の検知が考えられる。本研究では、錨泊中の船舶による海面変動の計測を活用した津波の検知について 5 章で議論している。当初、最も望ましい分野として環境モニタリングや海洋開発の割合が多くなると予測していたが、この 2 つの第 1 位の割合はそれぞれ 14%と 19%となり、それほど高い割合ではなかった。環境モニタリングや海洋開発の分野は、現在はあまり注目されていないものの、将来利用拡大が期待される分野であり、GPS の高精度情報が活用されるべき業務の開拓を行う必要があると考える。また、洋上監視の第 1 位の割合は 8%にとどまり、最も期待が小さい分野であるといえる。ただ、離島や無人島といった人間の立ち入りが難しい場所において、洋上監視の果たす役割は大きいといえ、洋上監視での GPS の活用方法は今後検討する必要があるといえる。

次に、船舶運航者全体における各分野の順位の相関をスピアマンの順位相関により求め、相関行列

表 3-10 各分野の順位の相関(船舶運航者全体)

	船舶運航	海洋開発	環境モニタリング	防災対策	洋上監視
船舶運航	1				
海洋開発	-0.21	1			
環境モニタリング	-0.57	-0.03	1		
防災対策	-0.44	-0.31	0.05	1	
洋上監視	-0.14	-0.49	-0.23	-0.02	1

により示す(表 3-10)。表 3-10 より、全体として相関の強い分野同士はみられなかったものの、環境モニタリングと船舶運航、防災対策と船舶運航、海洋開発と洋上監視の3つはいずれもやや相関がみられた。環境モニタリングと船舶運航はいずれも上位、下位といった特定の順位に集中せず、順位に広がりが見られる。ただ、船舶運航を第1位と回答した場合、環境モニタリングを第2位と回答する船舶運航者が多かったことから、望ましい分野の順位が近い相関はやや強いと考えられる。防災対策と船舶運航においても、上位、下位といった特定の順位に集中せず、順位に広がりが見られる。ただし、船舶運航を第1位と回答した場合、防災対策を第2位と回答する運航者が比較的多く、望ましい分野の順位が近い相関はやや強いと考えられる。海洋開発は上位、下位といった特定の順位に集中せず、順位に広がりが見られる。一方、洋上監視の場合、第4位と第5位の合計が56%となり、全体として下位に集中していることが分かる。海洋開発を第2位あるいは第3位と回答した場合、洋上監視を第4位あるいは第5位と回答する運航者が多く、やはり、望ましい分野の順位が近い相関はやや強いと考えられる。

続いて、役職ごとの分析と考察を示す。

はじめに、船長が各応用分野に示した望ましい順位毎の割合を示す(図 3-12)。図 3-12 より、船舶運航を第1位と回答した船長は40%にのぼり、船舶運航分野が第1位に最も集中している。ただし、船舶運航を第5位と回答した船長も30%で洋上監視を第5位と回答した割合とならび最も多く、船舶運航分野は船長の中でも意見が分かれる結果となった。この傾向は船舶運航者全体とほとんど同じであった。また、海洋開発・防災対策・洋上監視を第1位と回答した船長はいずれも20%となった。現在、海洋においてGPSの高精度情報が活用されている場面は、レーダやECDISといった電波航法計器の動作補助といった船舶運航分野が中心であり、海洋開発や防災対策といったフィールドにおいて、GPSの活用事例は非常に少ない。今後、現在GPSの活用事例が少ない分野においても、活用の仕方次第では、GPSの高精度情報が利用されるようになるのではないかという考えがアンケート結果につながったと考える。洋上監視は第5位と回答した船長が30%であり、第4位と回答した船長も40%にのぼることから、順位が下位に集中しており、GPSの海洋における応用分野としての期待は他の分野に比較し少ないといえる。しかし、離島や無人島といった人間の立ち入りが難しい場所において、洋上監視の果たす役割は大きいといえ、洋上監視でのGPSの活用方法は今後検討する必要があるといえる。

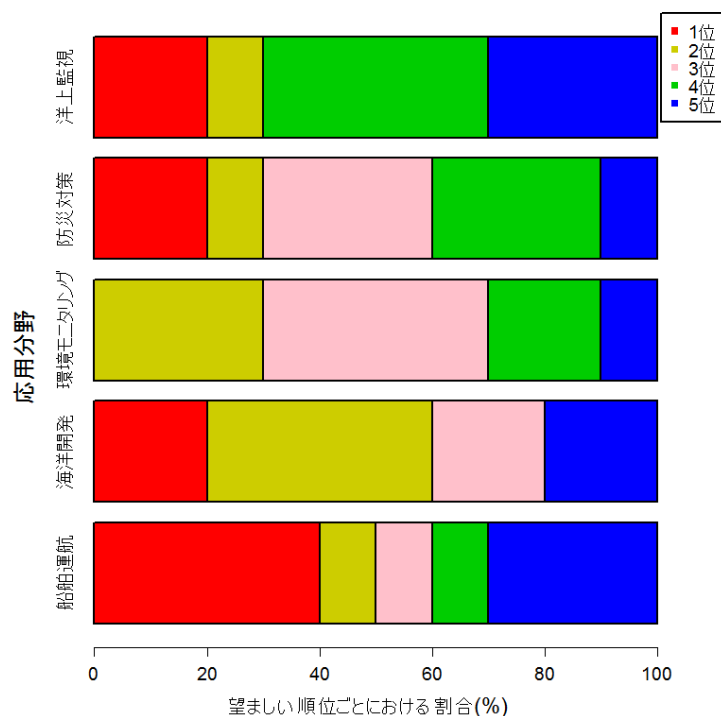


図 3-12 各応用分野の望ましい順位における割合(船長)

表 3-11 各分野の順位の相関(船長)

	船舶運航	海洋開発	環境モニタリング	防災対策	洋上監視
船舶運航	1				
海洋開発	-0.29	1			
環境モニタリング	-0.57	0.52	1		
防災対策	-0.31	-0.28	-0.19	1	
洋上監視	-0.27	-0.57	-0.18	-0.12	1

次に、船長全体における各分野の順位の相関をスピアマンの順位相関により求め、相関行列により示す(表 3-11)。全体として相関の強い分野同士はみられなかったものの、環境モニタリングと船舶運航、環境モニタリングと海洋開発、洋上監視と海洋開発はそれぞれやや強い相関がみられた。環境モニタリングを第1位と回答した船長はいなかったものの、第2位と回答した船長は30%であった。また、第4位と第5位と回答した船長は30%となり、環境モニタリングは上位・下位といった特定の順位に集中せず、順位に広がりが見られた。また、船舶運航においても、第1位と回答した船長は40%にのぼるものの、第5位と回答した船長も30%となり、船舶運航は上位・下位といった特定の順位に集中せず、順位に広がりが見られた。ただし、船舶運航を第1位と回答した場合、環境モニタリング

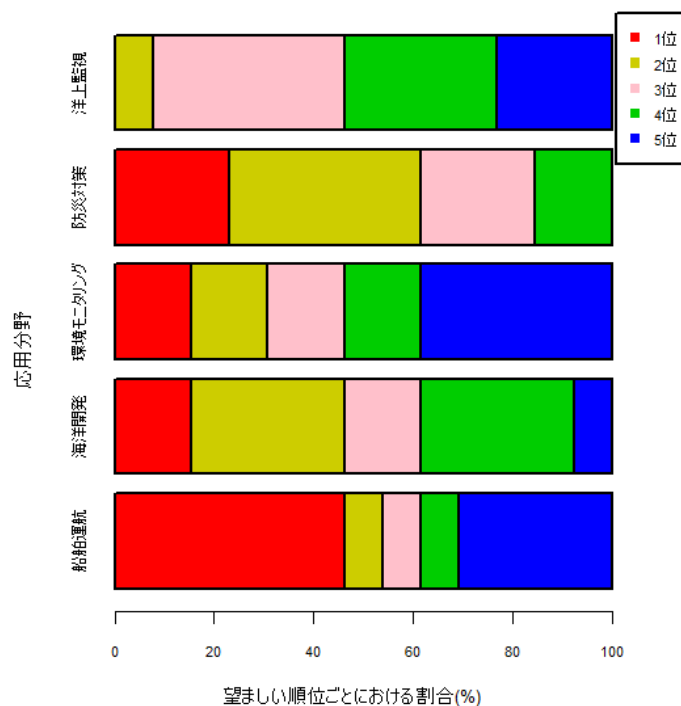


図 3-13 各応用分野の望ましい順位における割合(一等航海士)

を第3位と回答する場合や環境モニタリングを第3位と回答した場合、船舶運航を第5位と回答する場合のように、環境モニタリングと船舶運航は望ましい分野の順位が近く、望ましい分野の順位が近い相関はやや強いと考えられる。海洋開発を第1位と回答した船長は20%であったものの、第2位と回答した船長は40%にのぼり、海洋開発分野は上位に集中していることが分かる。ただし、海洋開発を第1位と回答した場合、環境モニタリングを第2位と回答する場合や、海洋開発を第2位と回答した場合、環境モニタリングを第3位と回答する場合のように、環境モニタリングと海洋開発は望ましい分野の順位が近く、望ましい分野の順位が近い相関はやや強いと考えられる。洋上監視を第1位・第2位と回答した船長は30%にとどまった一方、第4位・第5位と回答した船長は70%にのぼり、下位に集中していることが分かる。一方、海洋開発は順位が上位に集中しており、上位・下位といった特定の順位に集中している分野同士の相関もやや強まると考えられる。

船長は全体として船舶運航分野での活用を期待する回答が多く、この傾向は多少の変動はみられたものの、船舶運航者全体と同じであったといえる。

次に、一等航海士が各応用分野に示した望ましい順位毎の割合を示す(図3-13)。図3-13より、船舶運航を第1位と回答した一等航海士は46%にのぼり、船舶運航分野が第1位に最も集中している。ただし、船舶運航を第5位と回答した一等航海士も30%となっており、第5位の割合の中では環境モニタリングに次ぎ多く、船舶運航分野は一等航海士の中でも意見が分かれる結果となった。一方、洋上監視を第1位と回答した一等航海士はならず、第4位と第5位に回答した一等航海士が54%にのぼり、洋上監視は順位が下位に集中していることが分かった。この傾向は船長とほとんど同じであった。

表 3-12 各分野の順位の相関(一等航海士)

	船舶運航	海洋開発	環境モニタリング	防災対策	洋上監視
船舶運航	1				
海洋開発	-0.11	1			
環境モニタリング	-0.67	-0.17	1		
防災対策	-0.59	-0.45	0.36	1	
洋上監視	-0.001	-0.54	-0.36	0.20	1

船舶運航に次いで第1位の割合が多かったのは防災対策であり、23%であった。この傾向は船舶運航者全体とほとんど同じであった。一等航海士の場合、第5位の割合が最も多かった分野は環境モニタリングであり、38%にのぼる。現状、環境モニタリングを船舶で行った事例は少ないため、船舶を用いた環境モニタリングをどのような目的で実施するか検討した上で、具体的な環境モニタリング技術の構築が必要であり、具体的なモニタリング技術構築の検討過程において、GPSの高精度情報の活用は議論されるのが望ましいと考える。

次に、一等航海士全体における各分野の順位の相関をスピアマンの順位相関により求め、相関行列により示す(表 3-12)。全体として相関が強い分野同士はみられなかったものの、環境モニタリングと船舶運航、防災対策と船舶運航、洋上監視と海洋開発はそれぞれやや相関がみられた。環境モニタリングを第1位と回答した一等航海士は15%であった一方、第5位と回答した一等航海士は38%にのぼり、環境モニタリングは順位が下位に集中していることが分かった。また、船舶運航において、第1位と回答した一等航海士は46%にのぼるものの、第5位と回答した一等航海士も31%となり、船舶運航は上位・下位といった特定の順位に集中せず、順位に広がりが見られた。ただし、船舶運航を第1位と回答した場合、環境モニタリングを第4位あるいは第5位と回答した一等航海士が多いことが分かった。また、防災対策を第1位と回答した一等航海士は23%であり、第2位と回答した一等航海士も38%にのぼる。防災対策を第5位と回答した一等航海士がいなかったことや、第4位と回答した一等航海士が15%にとどまったことを踏まえれば、防災対策は上位に集中していることが分かった。船舶運航を第1位と回答した一等航海士は、防災対策を第2位あるいは第3位と回答している場合が多く、防災対策と船舶運航は望ましい分野の順位が近く、望ましい分野の順位が近い相関はやや強いと考えられる。洋上監視は第1位と回答した一等航海士がおらず、第5位と回答した一等航海士は23%であったことに加え、第4位と回答した一等航海士が31%であったことをふまえれば、洋上監視は下位に集中していることが分かる。また、海洋開発は第1位と回答した一等航海士は15%であったものの、第2位と回答した一等航海士は31%にのぼり、海洋開発は上位に集中していることが分かる。このように、上位・下位といった特定の順位に集中している分野同士の相関もやや強まると考えられる。

一等航海士は全体として船舶運航分野での活用を期待する回答が多く、この傾向は多少の変動はみられたものの、船舶運航者全体や船長と同じであったといえる。

次に、二等航海士が各応用分野に示した望ましい順位毎の割合を示す(図 3-14)。図 3-14 より、二

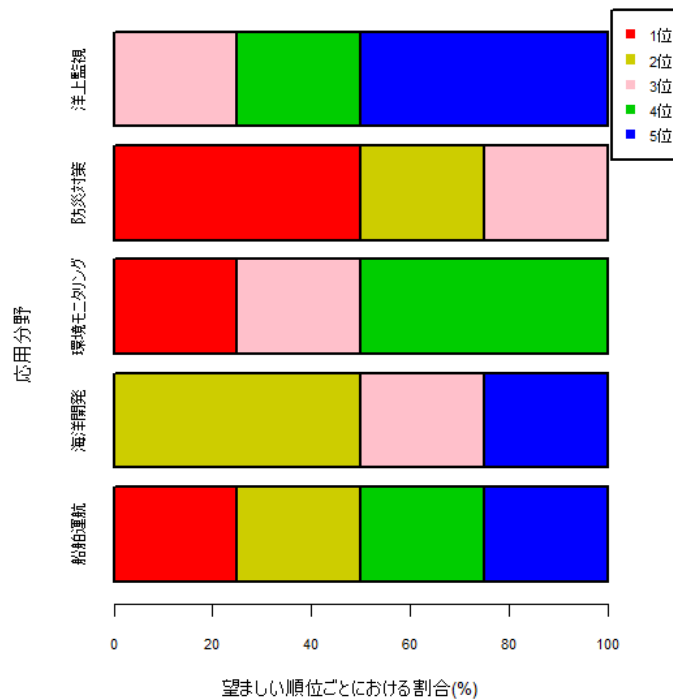


図 3-14 各応用分野の望ましい順位における割合(二等航海士)

等航海士は防災対策を第1位として回答した割合が最も多く、50%にのぼる。海上における防災対策の例として、津波検知と検知した津波情報の提供があげられるが、津波を検知するには高精度かつ正確な情報の利用が不可欠であり、現在、実海域で使用されるGPS津波計はGPSにより高さ方向を計測し、計測した高さ方向の測位結果を周期により分類することで津波を検知している。GPS津波計のように、GPSの高精度情報を多様なニーズに応じて活用できれば、防災対策の分野において、GPSの利用拡大が期待できる。現在、海上における防災対策としては津波検知が主流であり、海上においてどのような防災対策を実践すれば、一人でも多くの人命を救助できるか検討することから始めることが必要だと考える。環境モニタリングと船舶運航は、防災対策に次いで第1位の回答割合が多く、25%であった。ただ、環境モニタリングの場合、第2位と第5位を回答した一等航海士はいなかったものの、第4位と回答した一等航海士は50%となった。そのため、環境モニタリングは順位が比較的下位に集中しているといえる。また、船舶運航は第3位と回答した一等航海士がいなかったことや、第3位を除くすべての順位における回答の割合が25%であったことをふまえれば、順位は上位・下位といった特定の順位に集中せず、順位に広がりが見られた。洋上監視の分野では、第1位、第2位を回答した一等航海士はいなかった一方、第4位と回答した一等航海士は25%であったことに加え、第5位と回答した一等航海士は50%にのぼる。そのため、洋上監視は順位が下位に集中しており、最も期待が低いということがいえる。ただ、離島や無人島といった人間の立ち入りが難しい場所において、洋上監視の果たす役割は大きいといえ、洋上監視でのGPSの活用方法は今後検討する必要があるといえる。

次に、二等航海士全体における各分野の順位の相関をスピアマンの順位相関により求め、相関行列により示す(表 3-13)。環境モニタリングと船舶運航、防災対策と船舶運航、洋上監視と防災対策は

表 3-13 各分野の順位の相関(二等航海士)

	船舶運航	海洋開発	環境モニタリング	防災対策	洋上監視
船舶運航	1				
海洋開発	-0.11	1			
環境モニタリング	-0.74	0.06	1		
防災対策	-0.63	-0.39	0.06	1	
洋上監視	-0.21	-0.50	-0.39	0.89	1

いずれも強い相関がみられた。環境モニタリングを第1位と回答した二等航海士は25%であったものの、第4位と回答した二等航海士は50%にのぼり、順位が下位に集中していることが分かる。船舶運航は第3位を除いた全ての順位に回答した割合が25%であったことから、上位・下位といった特定の順位に集中せず、順位に広がりが見られた。ただし、二等航海士の回答を見ると、環境モニタリングと船舶運航は望ましい分野の順位が近く、望ましい分野の順位に近い相関は強いと考えられる。また、防災対策は第1位と回答した二等航海士が50%で最多であったことに加え、第2位と回答した二等航海士が25%であったことから、順位が上位に集中していることが分かる。ただし、こちらも環境モニタリングと船舶運航との場合と同様に、望ましい分野の順位が近く、望ましい分野の順位に近い相関は強いと考えられる。また、洋上監視は第5位と回答した二等航海士は50%で最多であったことに加え、第4位と回答した二等航海士は25%であったことから、順位が下位に集中している。防災対策は順位が上位に集中していることから、上位・下位といった特定の順位に集中している分野同士の相関も強まると考えられる。

二等航海士は全体として防災対策分野での活用を期待する回答が多く、この傾向は船舶運航者全体や船長、一等航海士とは異なる傾向を示したといえる。

最後に、三等航海士が各応用分野に示した望ましい順位毎の割合を示す(図 3-15)。図 3-15 より、三等航海士は船舶運航と海洋開発を第1位と回答した割合が33%にのぼり、最も多いことが分かった。しかし、船舶運航については、第5位と回答した三等航海士が44%にのぼり、船舶運航分野は意見が分かれる結果となったものの、第2位と回答した三等航海士はいなかったことに加え、第4位と回答した三等航海士は11%存在したことから、比較的下位に集中していることが分かる。現状の船舶運航において、GPSの示す情報は緯度・経度情報の数値のみであり、この情報のみでは船舶運航支援を行うには限界があると考ええる。GPSの示す高精度な情報を船舶運航時に幅広く活用するために必要な検討が必要ではないかと推察する。海洋開発においても、第1位と回答した割合は最も多かったものの、第4位と回答した三等航海士は44%にのぼったことに加え、第5位と回答した三等航海士も11%存在したことから、比較的下位に集中していることが分かる。海洋開発分野におけるGPSの活用事例は非常に少ないが、将来、利用拡大が期待される分野であり、どのような形でGPSを活用すべきか検討することが必要と考ええる。防災対策は第1位と回答した三等航海士はいなかったものの、第2位と回答した三等航海士は22%であった一方、第4位の回答割合は22%であり、第5位の回答割合は11%であったことから、順位は比較的下位に集中していることが分かる。

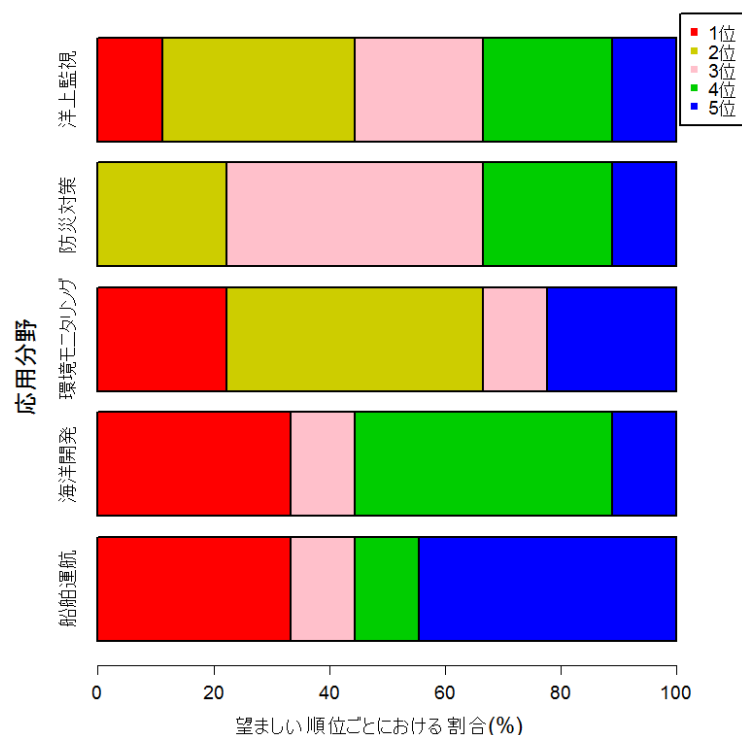


図 3-15 各応用分野の望ましい順位における割合 (三等航海士)

表 3-14 各分野の順位の相関 (三等航海士)

	船舶運航	海洋開発	環境モニタリング	防災対策	洋上監視
船舶運航	1				
海洋開発	-0.20	1			
環境モニタリング	-0.32	-0.35	1		
防災対策	-0.76	-0.27	0.21	1	
洋上監視	-0.03	-0.52	-0.39	0.34	1

次に、三等航海士全体における各分野の順位の相関をスピアマンの順位相関により求め、相関行列により示す(表 3-14)。防災対策と船舶運航には強い相関がみられた。防災対策と船舶運航はいずれも比較的下位に順位が集中している。この2つの場合、望ましい分野の順位が近く、望ましい分野の順位に近い相関は強いと考えられる。

三等航海士は船舶運航と海洋開発分野での活用を期待する回答が多かったものの、全体的には意見が分かれる結果となった。この傾向は船舶運航者全体や船長、一等航海士、二等航海士とは異なる傾向を示したといえる。

役職ごとの特徴をみてきたが、船舶運航者全体としては船舶運航分野での活用を期待する回答が多かったものの、選択肢に示した他の分野における GPS の活用方法も検討する必要があると考える。また、船長や一等航海士といった運航経験の長い運航者と二等航海士や三等航海士といった運航経

験の浅い運航者では期待する分野に異なる傾向がみられたことから、運航経験の違いにより期待する分野に変動があることが分かった。いずれにせよ、GPS の高精度情報は幅広い分野で活用されることにより、今後の海洋での応用性が拡大すると考える。

3.3.6 GPS の海上における応用性についてのアイデア

本設問は自由記述により回答頂いたものであり、船舶運航者全体の記述内容を下記に示す。

- ・位置情報ゲーム(主要灯台等を利用した陣取合戦のものや海戦ものなど)、海流情報等の迅速な提供(Present のデータの提供)
 - ・RTK では、高度も高精度で計測が可能だったと記憶している。巨大船等、船体数か所に受信機を設置することで、トリム・ヒール・ Hog ・サグの他、船体のたわみ等も計測が可能になると考える。
 - ・GPS、ECDIS、AIS を応用して、モニター画面上に他船の航海計画(予定進路等)を表示することにより、他船の今後の行動をより詳細に把握し、自船の操船に生かす。
 - ・GPS 内蔵ライフジャケット(溺者発見のため)
 - ・車のようなシステムが出来ればありがたいと考えます。
 - ・救命胴衣灯に GPS を内蔵し、遭難者の発見を容易にする。
 - ・すでに構築されているかもしれませんが・・・、港の離陸時刻による到着予定時刻に応じた荷物の到着予定時刻の集出(船+陸の運送を考慮)
 - ・費用対効果にもよるが、ライフジャケット・ライフブイ等に組み込みその位置情報が分かるようにする、自動着棧(精度が向上すれば可能と考える。一部は実証済みであるが)
 - ・海上・海底障害物に受信機を設置し、高精度測位を用いた偏位を観測し、安全運航の一助とする
 - ・船の運航場面を考えると、人が船を操船する範囲であれば、GPS は、現状の精度で十分と考えます。
- GPS の高精度化が活かせるとするならば、自動制御(無人化)ではないでしょうか。
- ・日本近海の交通流情報を解析することにより、船舶交通の整流化を画る研究
 - ・GPS を用いて船位決定をすることで、陸上より船舶の遠隔操作を行うこと
 - ・大洋航海中においても、高精度 GPS 情報はほしいところです。遠洋航海中も日本丸・海王丸の帆走性能をより高精度で測定したい。帆船の場合、マスト・ヤードの干渉によって精度が低下している点も改善できればと思います。帆走効率(速力率)に影響する要素は風向・風速に加えて波があります。大洋の波高・波向等の情報が正確かつ詳細に提供されれば帆走商船のウェザールーティングに役立つと思います。
 - ・外力の影響、操縦性能を精測する。ライフジャケット等に内蔵し、落水による行方不明者救助に役立てる。
 - ・入出港の可否を判断する際の岸壁前の長周期波侵入状況を提供することは可能でしょうか。
 - ・GPS を利用した自動離着棧支援システムの開発・・・GPS の精度がより向上するならば、離着棧時のタグやスラストの制御を自動化し、本船の船首尾の横方向の速力や回答角速度を検知しそれに応じたタグ・スラストの応答により、安全かつ効率的に作業を実施するというもの。

全体として、多様なアイデアについて記述があった。中でも、ライフジャケットに GPS を内蔵し、溺者発見や落水による行方不明救助に役立てるというアイデアに関する記述が多くみられた。現状の船舶運航において、落水者への対応は運航者の目視が頼りとなり、運航者が落水者を見失った場合、

救助が難しくなり、落水者の命を救うことが厳しくなると推察する。そこで、落水者の位置を容易に把握するため、GPS の高精度位置情報を活かすことにより、一人でも多くの命を救うきっかけになると考える。例えば、落水者の位置を常時レーダ画面上に表示できるようライフジャケットに GPS を内蔵することや、落水者がライフジャケットを着用していない場合は落水者の近くに GPS 内蔵型のセンサーを投入し、落水者の位置を追尾できるようにするといったシステムの導入により、落水者の救助に加え、運航者の救助操船に掛かる負担を軽減することにつながると考える。また、GPS の高精度化を活かせる技術として、自動着棧や自動制御(無人化)といった自動運航に関するアイデアの記述も多くみられた。このアイデアに関し、「GPS の精度がより向上するならば、離着棧時のタグやスラストの制御を自動化し、本船の船首尾の横方向の速力や回答角速度を検知しそれに応じたタグ・スラストの応答により、安全かつ効率的に作業を実施するというもの。」という記述があった。このアイデアは単に自動運航をすすめて運航者の業務を軽減するという意味ではなく、GPS の高精度な情報を運航者の安全かつ効率的な業務の実施につなげるという内容であり、安全かつ効率的な業務の実施のためにどのような形で GPS を活用すべきか考慮する必要があると考える。さらに、外力の影響や船体運動、海洋上のデータ提供についてのアイデアもいくらか記述がみられた。これらのデータを GPS によって計測することは可能であるが、高精度な GPS をどのような形で活用するかは今後の検討課題であると考えられる。

続いて、役職ごとの記述について示し、考察する。はじめに、船長の記述を下記に示す。

- ・ RTK では、高度も高精度で計測が可能だったと記憶している。巨大船等、船体数か所に受信機を設置することで、トリム・ヒール・ホグ・サグの他、船体のたわみ等も計測が可能になると考える。
- ・ GPS 内蔵ライフジャケット(溺者発見のため)
- ・ 費用対効果にもよるが、ライフジャケット・ライフブイ等に組み込みその位置情報が分かるようにする、自動着棧(精度が向上すれば可能と考える。一部は実証済みであるが)
- ・ 海上・海底障害物に受信機を設置し、高精度測位を用いた偏位を観測し、安全運航の一助とする
- ・ 船の運航場面を考えると、人が船を操船する範囲であれば、GPS は、現状の精度で十分と考えます。GPS の高精度化を活かせるとするならば、自動制御(無人化)ではないでしょうか。
- ・ 大洋航海中においても、高精度 GPS 情報はほしいところです。遠洋航海中も日本丸・海王丸の帆走性能をより高精度で測定したい。帆船の場合、マスト・ヤードの干渉によって精度が低下している点も改善できればと思います。帆走効率(速力率)に影響する要素は風向・風速に加えて波があります。大洋の波高・波向等の情報が正確かつ詳細に提供されれば帆走商船のウェザールーティングに役立つと思います。
- ・ 入出港の可否を判断する際の岸壁前の長周期波侵入状況を提供することは可能でしょうか。

全体として多様なアイデアについて記述があったが、中でも、帆走性能について具体的に知りたいデータと併せて詳細な記述があった。帆走時、運航者は自身の感覚や計測データを頼りに操船を行うため、帆走時において GPS の情報が活用される場面はほとんど少ない。ただ、このアイデアによれば、帆走効率に影響する風や波のデータを高精度な GPS を用いて計測することにより、正確な情報を提供することで帆走に活かせるということで、今まで GPS の活用事例が少ない運航現場にも GPS を取り入れることにより、運航者の業務にかかる負担を軽減し、より効率的な運航につながると考える。

次に、一等航海士の記述を下記に示す。

- ・車のようなシステムが出来ればありがたいと考えます。
- ・救命胴衣灯に GPS を内蔵し、遭難者の発見を容易にする。
- ・すでに構築されているかもしれませんが・・・、港の離陸時刻による到着予定時刻に応じた荷物の到着予定時刻の集出(船+陸の運送を考慮)
- ・外力の影響、操縦性能を精測する。ライフジャケット等に内蔵し、落水による行方不明者救助に役立てる。

一等航海士全体としてアイデアに関する記述は少なかったが、遭難者や落水による行方不明者救助に役立てるアイデアが多くみられた。また、港の到着予定時刻に応じた荷物の到着予定時刻の集出についての記述がみられた。船舶は入港後、すぐに荷役を行うが、荷役が完了した荷物が目的地にいつ届くのかどうか把握できれば、海上と陸上における運送の効率化につながると考える。

次に、二等航海士の記述を下記に示す。

- ・日本近海の交通流情報を解析することにより、船舶交通の整流化を画する研究
- ・GPS を利用した自動離着岸支援システムの開発・・・GPS の精度がより向上するならば、離着岸時のタグやスラストの制御を自動化し、本船の船首尾の横方向の速力や回答角速度を検知しそれに応じたタグ・スラストの応答により、安全かつ効率的に作業を実施するというもの。

二等航海士の場合、船舶交通の整流化や自動着岸支援システムといった船舶の運航支援に関する記述が多くみられた。現状の船舶運航においても GPS の情報は活用されているが、ここに示されているアイデアで GPS を用いるとすれば、これまでとは異なる形での活用が期待できると考える。

最後に、三等航海士の記述を下記に示す。

- ・位置情報ゲーム(主要灯台等を利用した陣取合戦のものや海戦ものなど)、海流情報等の迅速な提供(Present のデータの提供)
- ・GPS、ECDIS、AIS を応用して、モニター画面上に他船の航海計画(予定進路等)を表示することにより、他船の今後の行動をより詳細に把握し、自船の操船に生かす。
- ・GPS を用いて船位決定をすることで、陸上より船舶の遠隔操作を行うこと

三等航海士全体として、アイデアに関する記述は少なかったが、船舶運航の支援に関するアイデアが多くみられた。また、位置情報ゲームという研究分野にとらわれない自由な発想もみられた。

役職ごとの特徴もみてきたが、全体として様々なアイデアについて記述があり、船舶運航者は船舶運航の支援や落水者の救助、海洋情報の提供といった多様な分野での活用を期待していると考えられる。

3.4 3章のまとめ

本章では、GPS による位置情報を活用した船舶運航者の特性から GPS/GNSS 測位の高精度化に対する船舶運航者の意識を調査し、自動運航の実証へ向けた課題を示すとともに、高精度測位の海洋利用がどのような場面に応用できるか分析を行った。調査結果より、GPS の高精度化が進んでいるにもかかわらず、船舶運航者は避航操船時、双眼鏡を優先して使用する割合が最も高いことが分かった。すなわち、GPS 測位の高精度化に対する船舶運航者の意識は低いといえる。双眼鏡やレーダから得られる情報の具現化といった船舶運航者の特性を高精度な GPS からの情報でサポートすることができれば、GPS の船舶運航時における幅広い利用に寄与し、自動運航の実証につながると考える。また、船舶運航者は GPS の海上における応用性に関し、多様なアイデアを持っていることが分かった。しか

し、全体としては船舶運航分野での応用を最も期待しており、船舶運航者が業務を行う上で必要となる情報をその都度提供できれば、GPS も安全運航の達成に寄与する航海計器の一部になりうると考える。GPS の示す情報は非常に高精度であり、正確な位置/速度情報をどのような形で活用すれば、船舶運航の分野でGPS が役立つか考える必要があるといえる。日本は周囲を海に囲まれた島国であり、多様な分野でGPS が活用されることによって、船員や船舶のみならず、人々の生活を豊かにする結果が生まれることが望ましいと考える。

付録 実際のアンケート

実際に海技教育機構の船舶運航者へ送付したアンケートを下記に示す。

海上における GPS の高精度化に関するアンケート

はじめに

本アンケートは運航者が避航操船時、GPS をはじめとする航海計器や目視からどのような情報に着目しているのか、また、GPS の高精度化がもたらす海洋への応用性は何かを調査研究することを目的として作成したものです。本アンケートは、皆様が日頃行っている業務内容をもとにお答え頂くものであり、業務内容に関する試験を行うものではありません。また、本アンケートにご記入頂いた内容はアンケートの集計のみに使用し、集計後の統計資料はアンケート趣旨である研究活動以外の目的には一切使用せず、本アンケートにより個人情報を知ることはありません。業務などにより大変お忙しい中恐縮ですが、アンケート調査にご協力頂きますよう、どうぞよろしくお願い申し上げます。

本アンケートに関し、何かご意見・ご質問等ございましたら、下記の連絡先までご連絡頂ければと思います。

齊藤詠子(東京海洋大学大学院) m145020@kaiyodai.ac.jp

質問 1 あなたの役職を教えてください。

下記の記号から、あなたの役職に丸を付けて下さい。

航海科専任教官→ア

次席/三席/四席の名前付き→その名前に入る役職 ex. 次席三等航海士→エ

休暇中→休暇前の役職

ア 船長

イ 一等航海士

ウ 二等航海士

エ 三等航海士

質問 2 避航操船で使用する航海計器についての質問です.

避航操船時、下記の航海計器で最も優先して使用する計器を第一位とし、第五位までア～オの記号で順位を付けて下さい.

- ア レーダ
- イ ECDIS
- ウ AIS
- エ GPS
- オ 双眼鏡

第一位
第二位
第三位
第四位
第五位

質問 3 レーダと ECDIS に表示される情報についての質問です.

レーダと ECDIS では、どのような情報に着目して操船しますか？下記の情報で最も優先して使用する情報を第一位とし、第六位までア～オの記号で順位を付けて下さい.

- ア 方位
 - イ 距離
 - ウ 針路
 - エ 速力
 - オ 最接近時間
 - カ 最接近距離
- 注)ア・イ・ウ・エはいずれも真/相対を含むこととする.

第一位
第二位
第三位
第四位
第五位
第六位

質問 4 双眼鏡から得られる情報についての質問です.

双眼鏡の見張りを通じ、どのような情報を得て操船しますか？下記に記入して下さい.

質問 5 GPS の海上における応用性についての質問です。

将来 GPS の位置/速度情報の高精度化が進んだ場合、海洋ではどのような分野に活用されるのが望ましいと思いますか？現在考案されている応用分野を下記に示しますので、最も望ましい分野を第一位とし、第五位までア～オの記号で番号を付けて下さい。

- ア 船舶運航 (ex. 離着岸操船、狭水道航行時の操船)
- イ 海洋開発 (ex. 海底工事、洋上発電)
- ウ 環境モニタリング (ex. 海水温度、気象予測)
- エ 防災対策 (ex. 津波探知、地震予測)
- オ 洋上監視 (ex. 離島、遠洋航行船)

第一位
第二位
第三位
第四位
第五位

質問 6 GPS の海上における応用性について、アイデアをお願いします。

GPS の情報を活用した応用性は質問 5 に示した分野のみならず、どのような分野に活用できる可能性があると考えますか？あなたのアイデアを教えてください。

参考までに陸上での GPS の活用研究事例を示します。陸上では精密測位法 (RTK : Real Time Kinematic) の技術発展が進み、現在、GPS の精密測位を用いた車の自動運転に関する研究が始まっています。GPS による測位が不可能な都市部の高層ビル街や高架橋の下でどのように位置/車速を求めるか等、課題は山積していますが、GPS の高精度測位を用いた場合の車の測位精度は非常に良く、将来の実用化が期待されています。

以上でアンケートは終了です。ご協力頂き、どうもありがとうございました。

第4章 船舶によるPPPの精度評価

4.1 はじめに

船舶は航行海域を特定できないため、高精度測位に用いられる基準点を利用できるとは限らない。しかし、現状の単独測位では測位精度が約10m程度であり、海面変動のように数cm単位の精度での計測を要する用途としては、十分な精度を満たしていないといえる。一方、第2章でも示したように、基準点を利用せず、衛星から補正情報を得ることができる手段としてはOmniSTARとMADOCAの利用があげられる。

本研究では、高精度な海面変動の計測が必要となる海上ブイの代替またはデータ補間および錨泊中の船舶による防災・減災を目的とした新たな応用提案の可否を判断するため、OmniSTARとMADOCAから得られる精密暦を用いて、陸上の定点と錨泊中・航行中の船舶でのPPPの精度評価を比較する実験を行った。

4.2 静止衛星OmniSTARを利用したPPP

第2章でも示したように、OmniSTARは、全陸地の90%以上で補正情報を得ることができ、単独測位の精度向上が見込めるサービスの一つである。2015年7月から9月にかけて、東京と神戸に寄港した国内航海に加え、東京湾からケアンズ(オーストラリア)、シンガポール、神戸までの遠洋航海を行った銀河丸で測位実験を行った。本実験においても、2.4.3に示した陸上の定点測位実験と同一の実験機材・接続構成(表2-7)とし、パソコン上にデータの記録を行った(図4-1)。

4.2.1 実験結果と考察

本節では、船上測位実験で得られたPPP測位率およびPPPと相対測位解との比較を行うことで、海上におけるPPPの精度評価を行った。

PPP測位率は、実験で得られたデータ中におけるPPPフラグ(state_flag 5)が立っている割合とした。一方、相対測位解は、東京海洋大学越中島キャンパス第4実験棟屋上設置(受信機:Trimble NetR9、



図4-1 船上測位実験

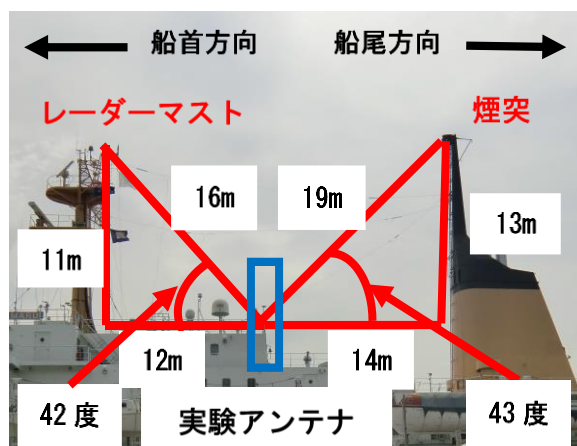


図 4-2 船上測位の実験環境

アンテナ：Trimble Zephyr Geodetic 2)の基準点(F3 解)(2014 年 12 月 14 日計算)を使用するとともに、2.4.3 の測位条件(表 2-7)と使用衛星、使用周波数、測位時間、測位間隔、測位モードおよび仰角マスクを OmniSTAR による PPP と同一とし、RTK の Trimble 社の基線解析ソフト⁽³³⁾より得られた RTK の FIX 解を使用することとした。

図 4-2 は船上の実験環境を示したものである。陸上の定点測位実験では、アンテナ近傍にアンテナ高を超えるような構造物はなく(図 2-2)、オープンスカイ環境であるといえる。一方、錨泊中の船上測位実験では、船上におけるアンテナ設置に対する安全面を考慮し、煙突などの上部にアンテナを設置することを避けたことによりアンテナ近傍にアンテナ高を超える煙突やレーダマストといった船上特有の構造物が存在する(図 4-2)。このような構造物のアンテナ近傍への存在に加え、陸上定点の実験にはない、海面反射に起因するマルチパスの発生により、陸上の定点測位実験と比較し PPP 測位率が低いと予測していた。図 4-3、図 4-4、図 4-5 はそれぞれ東京からケアンズ、ケアンズからシンガポール、シンガポールから神戸までの PPP 測位率の推移を示す。2015 年 9 月 2 日の場合、PPP 測位率は 99%であったものの、単独測位の時間帯は存在せず、測位そのものが行われなかった時間帯が存在した。PPP 測位が行われなかった時間帯は 2015 年 9 月 2 日を除き、単独測位に切り替わっており、PPP 測位率が減少している場合、単独測位の測位率が増加していることが分かる。銀河丸は 2015 年 7 月 25 日 05:00(UTC)に東京港を出港し、14 日の航海を経て 2015 年 8 月 7 日 23:55(UTC)ケアンズ港に入港した。図 4-3 は東京出港時を起点として、24 時間ごとの測位率を求めたものである。ただし、2015 年 8 月 6 日は停泊時間を除いたため、19 時間分のみの測位率とした。東京からケアンズまでの航海中において、東京出港直後から 6 日間は 100%の測位率を達成しており、この間、OmniSTAR から得られる補正データは受信できたといえる。一方、100%の測位率が達成できていない日にちも存在し、最低 95%まで減少していた。しかし、PPP 測位率は 95%以上で推移しており、測位率全体としては高いといえる。

銀河丸は 2015 年 8 月 12 日 04:00(UTC)にケアンズ港を出港後、12 日間の航海を経て、2015 年 8 月 24 日 01:50(UTC)にシンガポール港に入港した。図 4-4 はケアンズ出港時を起点として、24 時間

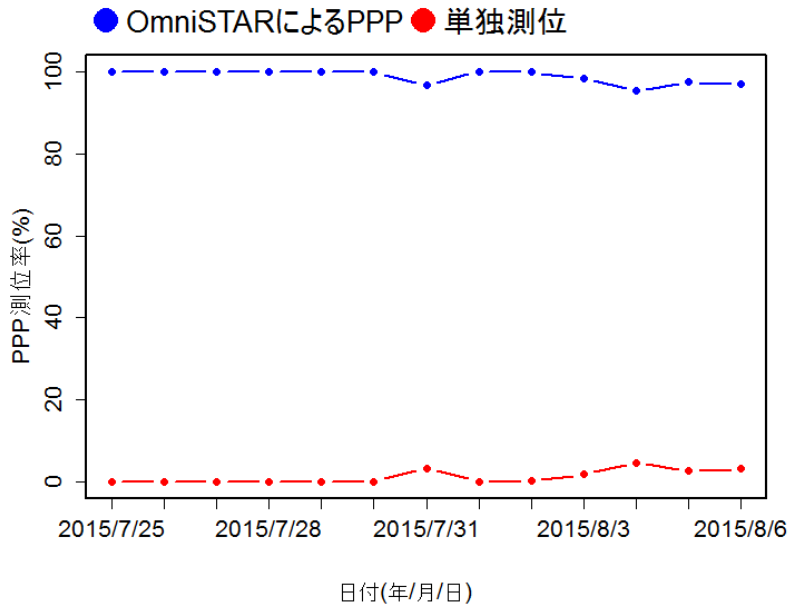


図 4-3 PPP 測位率の推移(東京～ケアンズ)

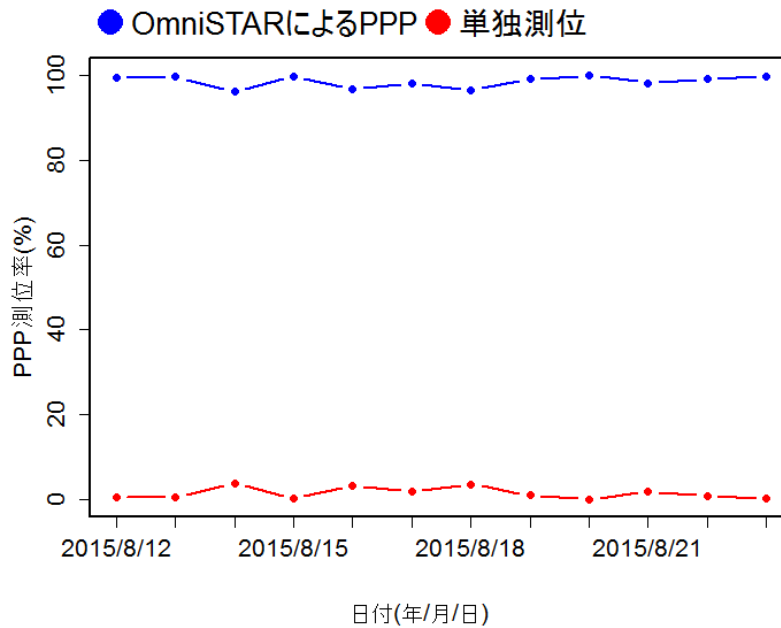


図 4-4 PPP 測位率の推移(ケアンズ～シンガポール)

ごとの測位率を求めたものである。ただし、2015年8月23日は停泊時間を除いたため、22時間分のみの測位率とした。この航海中において、PPP測位率は96%から100%であり、非常に高い割合で推移していることが分かる。しかし、この航海中にPPP測位率100%を達成したのは1日のみであり、PPP測位率は96%以上で高い割合であったものの、ところどころ単独測位に切り替わる時間がみられたた

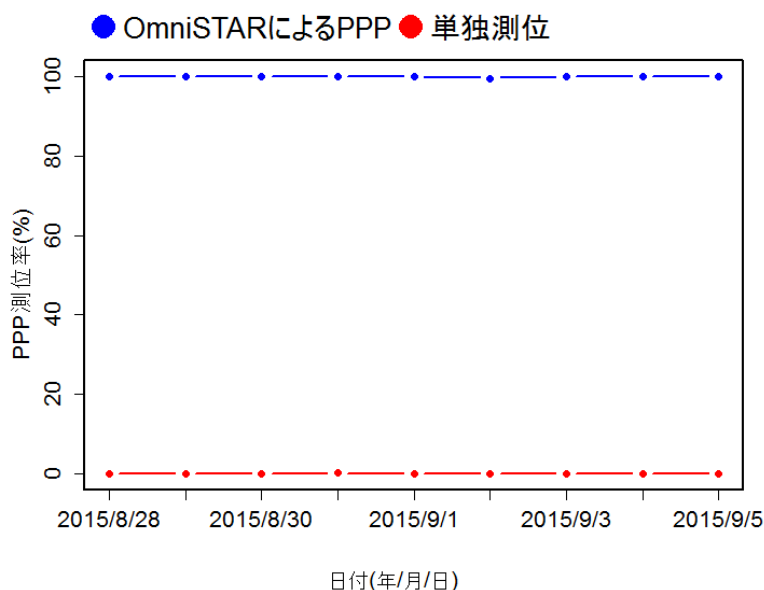


図 4-5 PPP 測位率の推移(シンガポール～神戸)

め、OmniSTAR から得られる補正データ全ては受信できていないといえる。

銀河丸は 2015 年 8 月 28 日 05 : 00 (UTC) にシンガポール港を出港後、2015 年 9 月 8 日に神戸港へ入港した。図 4-5 はシンガポール出港時を起点として、24 時間ごとの測位率を求めたものである。この航海中において、PPP 測位率はシンガポール出港直後から日本列島に近づくまでの間、ほとんどの日で 100% を達成し、残りの日も PPP 測位率は 99% 以上であり、非常に高い割合で推移していることが分かる。

PPP 測位率は全航海中で 95% 以上となり、非常に高い割合で推移しているものの、陸上の定点測位実験(100%)に比較し低いという結果となったことから、図 4-2 に示した船上特有の構造物や海面反射に起因するマルチパスの発生が影響し、船上では PPP 測位率が減少したと推察する。自動車などの移動体では、建物や移動体自身の構造物を要因とするマルチパスの発生は測位精度の低下に留まらず測位そのものが成立しないなどの課題がある。本実験では、船上のアンテナ設置場所を可変しての実験は行わなかったものの、船上での安定した PPP の成立には、アンテナ設置位置をできるだけ煙突やレーダーマストなどから離し、高位置に設置するなど、自動車などの移動体と同様に船上特有の構造物への考慮に加え、マルチパスの発生への考慮は必要であると考え。すなわち、アンテナを船橋上部のフライングブリッジ(約 18m)に設置したことで、海面から適度な距離を保つことができたこと、可能な限り船上特有の構造物から距離を離れた場所へアンテナを設置したことが、本実験において船上での高い PPP 測位率の達成に繋がったと考える。

2015 年 9 月 2 日において、PPP 測位率は高かったものの、測位そのものが行われなかった時間帯が存在した。2015 年 9 月 2 日における衛星数の推移を示す(図 4-6)。GPS 時刻で 359, 324~359, 730 秒の間、測位そのものが行われず、データ抜けの状態となった。図 4-6 より、データが抜けている時間帯において、衛星数は 15 機以上で推移している。一方、データが抜けている時間帯を除いた時刻は全て PPP が行われており、平均衛星数は 18.1 機と多いものの、GPS 時刻が 280, 500~297, 780 秒の間は衛星数

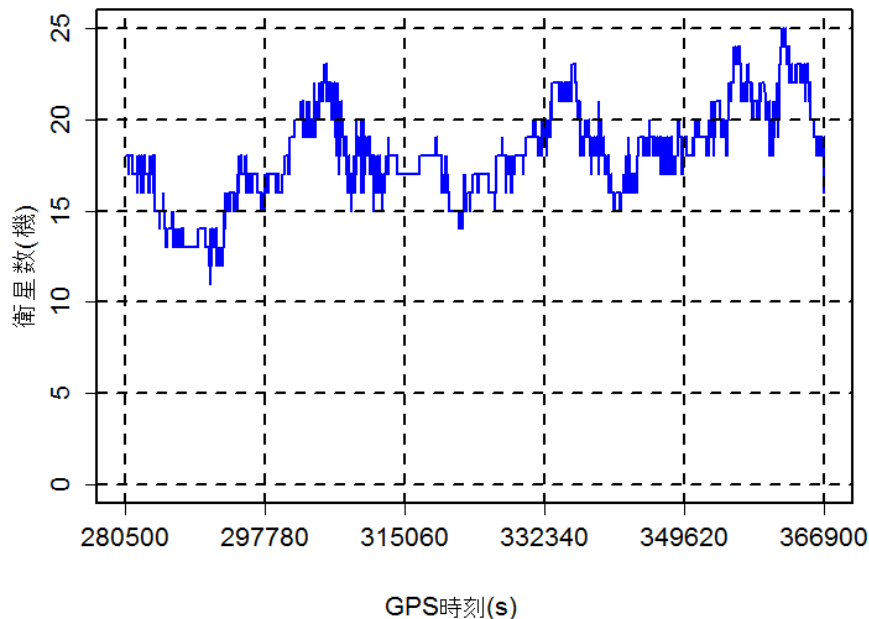


図 4-6 衛星数の推移(2015 年 9 月 2 日)

が平均衛星数を下回っていることに加え、衛星数はデータ抜けには影響していないと推察する。

PPP 測位率が最も低かったのは 2015 年 8 月 4 日の 95%であり、PPP 測位が行われない時間帯は全て単独測位に切り替わっていたため、測位モードと衛星数との間に関係があると予測した。2015 年 8 月 4 日における測位モードと衛星数の関係を示す(図 4-7)。図 4-7 より、衛星数が 10 機以下に著しく減ると、測位モードが PPP から単独測位に切り替わることが分かる。PPP が連続的に行われている間、衛星数は最も少ない場合を含んでも 10 機以上で推移しており、PPP が行われている間の平均衛星数は 19.8 機と多いことが分かった。すなわち、PPP から単独測位に切り替わる一要因として衛星数の減少があげられると推察する。

2015 年 7 月 29 日において、PPP 測位率は 100%であり、衛星数の推移を示す(図 4-8)。図 4-8 より、衛星数は 10 機以上で推移しており、平均衛星数は 19.7 機であった。船舶の場合、図 4-2 のようにレーダーストや煙突といった船上構造物がアンテナ設置位置より高い位置に存在するため、船上構造物上に配置された衛星が多くなり、PPP 測位率が 100%を達成するのは難しいと予測していたが、実際は 100%を達成した場合がいくらか見られたことに加え、衛星数も 10 機以上と多いことが分かった。

次に、錨泊中の船上測位実験で得られたデータと FIX 解を比較するため横軸に GPS 時刻、縦軸に FIX 解との差として散布図を用いて分析を行った。なお、この分析は FIX 解を用いた比較になるため、2015 年 7 月 3 日(実験 1)と 2015 年 7 月 5 日(実験 2)の東京湾錨泊中に実験を行った。船舶は、錨を入れ、動きを止めた錨泊中であっても、気象海象の影響を受け海面を振れ回るため、船首方位次第で OmniSTAR からの補正データが受信できなくなり、測位精度が陸上に比較し悪くなると予測していた。錨泊中の船上測位実験では、船首方位は実験 1 において最大 246.8 度(図 4-9)、実験 2 において最

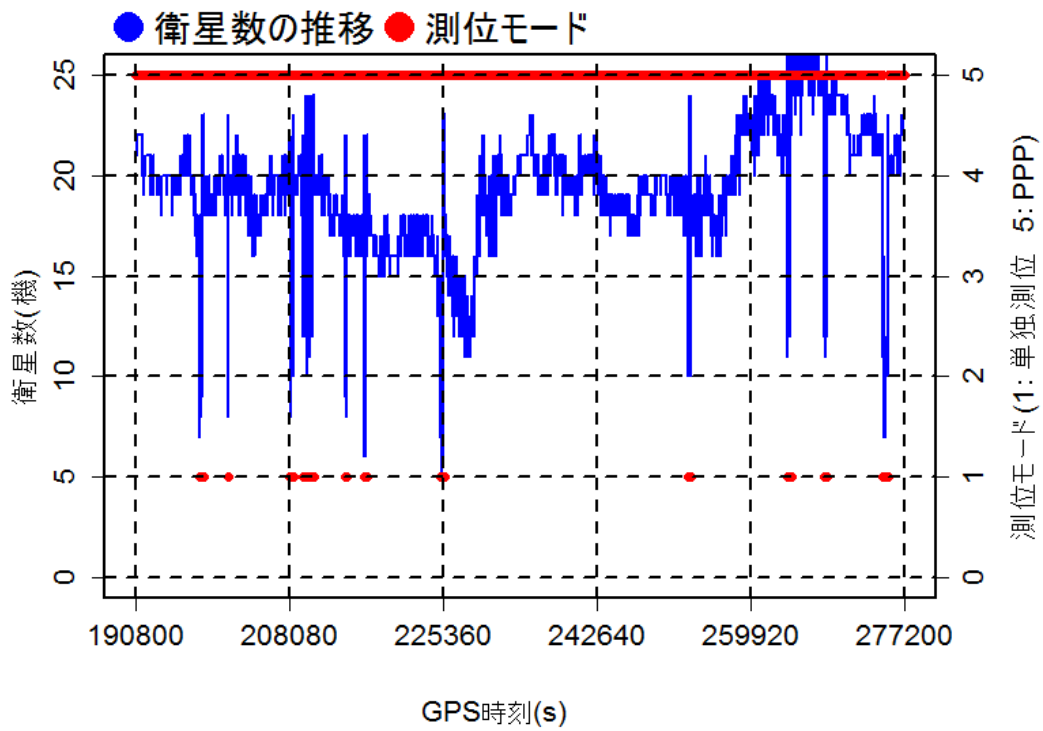


図 4-7 測位モードと衛星数の関係(2015 年 8 月 4 日)

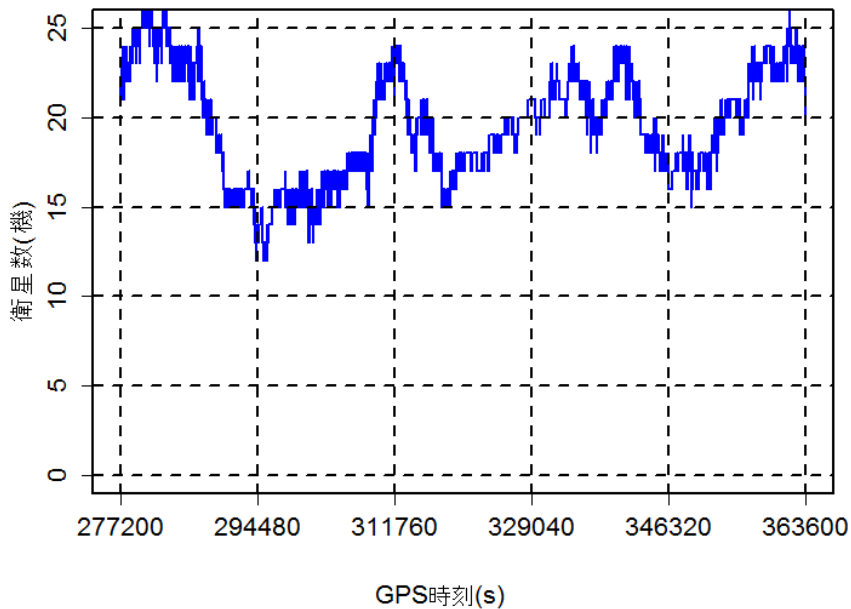


図 4-8 衛星数の推移(2015 年 7 月 29 日)

大 360 度 (図 4-10) の範囲で変位することが確認された。しかし、実験 1・実験 2 の場合、PPP 測位

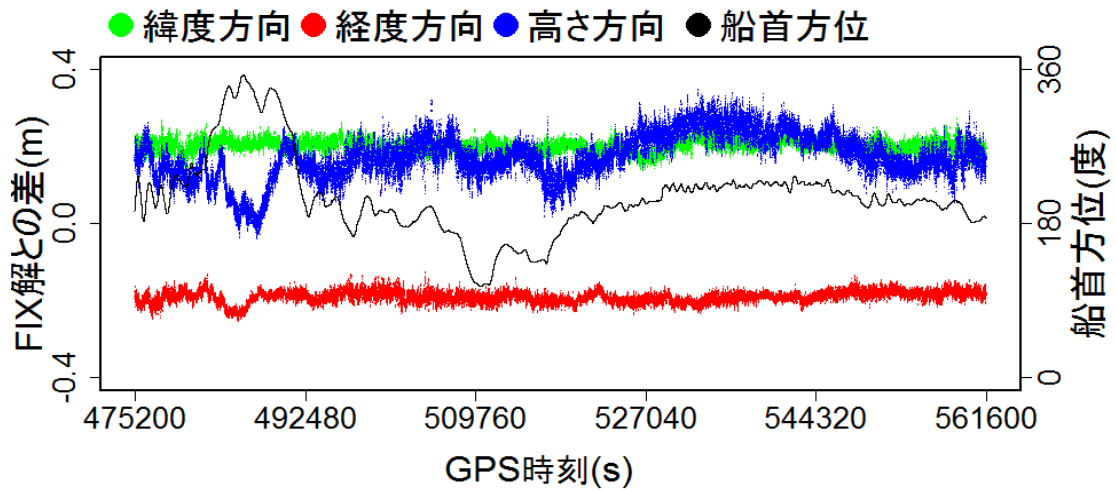


図 4-9 錨泊中の船上での相対測位解との比較(実験 1)

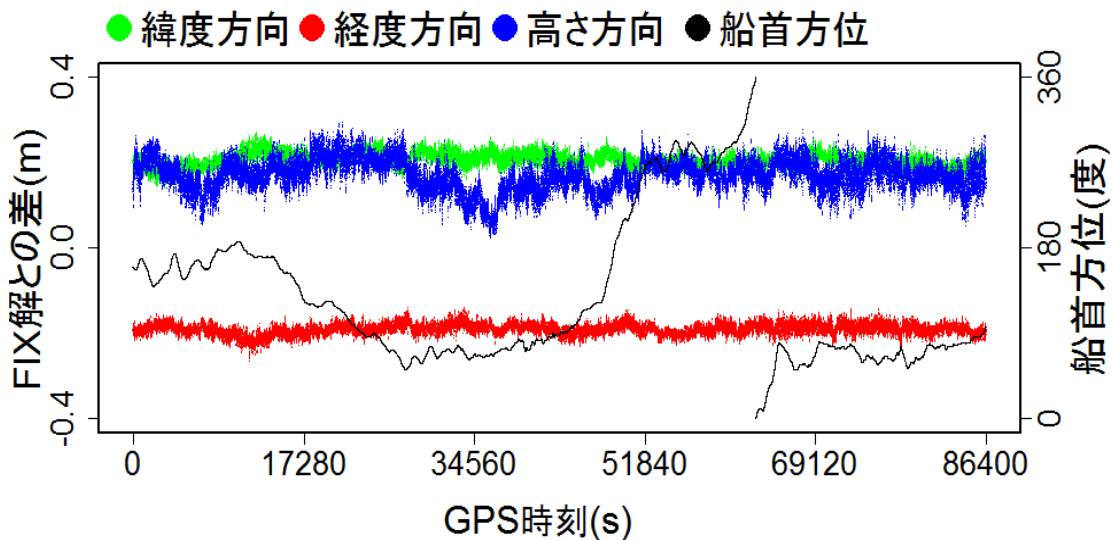


図 4-10 錨泊中の船上での相対測位解との比較(実験 2)

率はいずれも 100%であり、船首方位が大きく変位した場合でも OmniSTAR から得られる補正データは受信できたといえる。また、Trimble 社の基線解析ソフトから得られた全実験時間中における FIX 解の割合を FIX 率とすると、FIX 率は錨泊中の船上測位実験において、実験 1・実験 2 いずれも 100%であった。錨泊中の船上での測位結果は緯度方向が FIX 解との差+0.2m 付近、経度方向が差-0.2m 付近および高さ方向が差 0~0.2m 付近で推移しており、陸上定点での測位結果と同じ傾向を示していることがわかる。更に、PPP 測位率は 100%であり OmniSTAR から送信される精密暦が全て受信できたことから、本実験において、錨泊中の船上では、船舶の動きによらず、PPP による高精度測位は可能であるといえる。表 4-1 に、錨泊中の船上での PPP の測位精度を標準偏差、平均値および RMS により

表 4-1 OmniSTAR による PPP の測位精度(錨泊中の船上測位実験)

実験	評価項目	緯度方向 [m]	経度方向 [m]	高さ方向 [m]
OmniSTAR 実験 1	標準偏差	0.016	0.015	0.058
	平均値	0.201	-0.191	0.173
	RMS	0.202	0.192	0.173
OmniSTAR 実験 2	標準偏差	0.016	0.013	0.037
	平均値	0.205	-0.191	0.170
	RMS	0.205	0.191	0.173

示す。PPP は解の収束に時間を要し、収束前の測位結果は不定となるため、本実験においては実験開始後 30 分を収束時間とした。そして、実験開始後 30 分から 24 時間測定したデータを用いて、標準偏差・平均値・RMS を算出した。表 2-8 に示した陸上の定点測位実験での OmniSTAR による PPP (実験 1・実験 2) の標準偏差・平均値・RMS と比較すると、緯度方向の標準偏差では、陸上実験 1 では 0.013m、陸上実験 2 では 0.014m であり、錨泊中の船上測位実験の 0.016m の方が値は大きい。この傾向は、経度・高さ方向においても同様であった。すなわち、船上は陸上に比較し、ばらつき (=標準偏差) が大きいことを示している。錨泊中の船上は水平・高さ方向において、船首方位の振れ回りが大きく変位しても、基線長の変化は殆どないといえるが、FIX 解との差に開きが確認された。錨泊中での船首方位の振れ回りは、船上の構造物や海面反射に起因するマルチパスの発生をより複雑化させることが考えられる。本実験では、複雑化されたマルチパスの影響の大小について検証は行っていないものの、このようなマルチパスが船上における測位結果のばらつきに影響したことにより、船上は陸上に比較しばらつきが大きくなった一要因と考える。本実験において、船上構造物や海面反射に起因するマルチパスの発生が測位精度にどのように影響するのか分析することはできなかったものの、船体運動により船上構造物上に配置される衛星が除外されることに加え、船上構造物や海面反射に起因する複雑化されたマルチパスの発生と測位結果のばらつきには因果関係があると推察する。更に、高さ方向は水平方向と比較し、陸上および船上ともにばらつきが大きいといえる。これは、地平線以下に GPS 衛星からの信号が受信できないため、そもそも高さ方向は水平方向に比較し測位誤差が大きくなることに起因するといえる。しかし、船上の高さ方向は、陸上に比較しばらつきが大きいことが分かる。本実験において、陸上の定点測位実験では、実験期間中の天候はほとんど曇りであった。一方、錨泊中の船上測位実験では、実験期間中の天候はほとんど雨であり、有義波高は実験期間中の平均値で 0.13m であった。すなわち、船舶を定点に留めるための錨泊中であっても、気象海象の影響を受け、船首方位が変化するような複雑な船体運動時は、水平方向よりも高さ方向の測位に影響を与える傾向があったといえる。

更なる分析を行うことを目的とし、横軸を経度方向の誤差、縦軸を緯度方向の誤差とし、図 4-11 に錨泊中の船上測位実験の水平方向測位誤差分布を示す。錨泊中の船上測位実験の場合も陸上の定点測位実験と同様に OmniSTAR による PPP では、集約した 1 群のみが確認され、錨泊中の船上は陸上

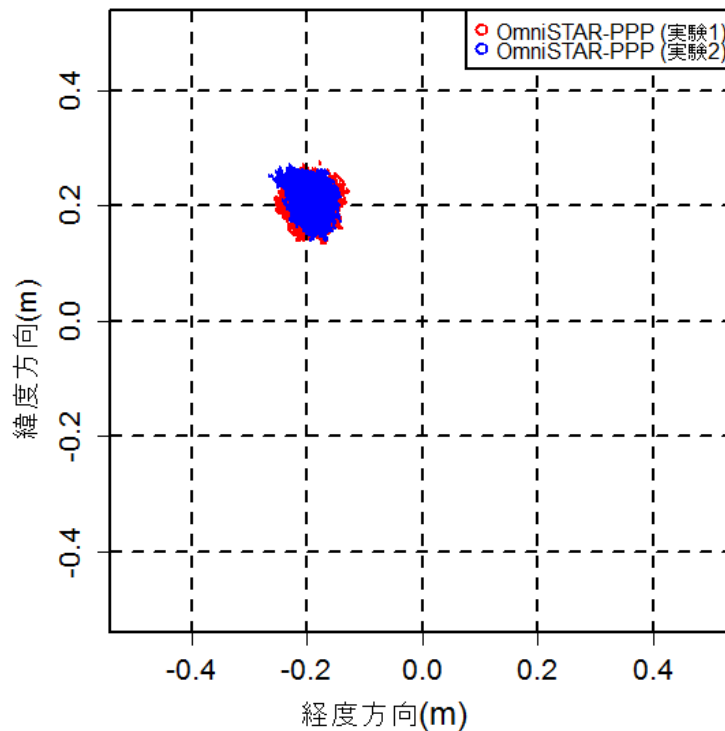


図 4-11 水平方向測位誤差分布(錨泊中の船上測位実験)

に比較し、水平方向の測位結果に広がりが見られた。これは、レーダーマストや煙突といった船上に固定されている構造物と船首方位の変動が影響しているものと推測した。錨泊中の船上測位実験において、実験 2 の船首方位は、実験開始直後 90 度から 180 度付近を変位し、24 時間で 360 度の変位が 1 回確認された(図 4-10)。一方、実験 1 の船首方位は、実験開始直後 180 度から 360 度付近を大きく変位し、その後、実験終了まで 180 度付近での変位が続き、全実験時間において 0 度から 90 度間の変位は確認されなかった(図 4-9)。すなわち、180 度から 360 度方向にかけて、船体運動や船上構造物といった測位精度を低下させる要素が存在し、実験 1 は実験 2 に比較し広がりが多くなった要因と考えたものの、本実験で得られたデータからでは、GPS 衛星の方位、船上構造物の方位などの関連性まで分析ができず決定的な要因であるとはいえない。アンテナ高より高い船上構造物として、船首方向に対しレーダーマストが約 0 度、煙突が約 180 度方向の存在があげられる。両実験の結果より、実験 2 でも実験 1 と同様に広がりがみられた。本実験では実際に確認することはできなかったものの、船体運動により船上構造物上に配置される衛星が除外され、測位精度低下の一要因になったと考える。すなわち、船上測位実験では陸上定点測位実験の結果とは異なり、一様な傾向が得られないということは、船上特有の構造物の影響と衛星配置との関係が、測位精度の低下やばらつき要因であることが推察される。

錨泊中の船舶は錨を入れ、動きを止めた状態であっても気象海象による外力の影響で振れ回る。風も外力のひとつであり、風速の変化により、船体運動の振れ回りが発生し、測位精度に影響があると予測していた。最大風速は 10.2m/s(実験 1)、3.1m/s(実験 2)であり、最小風速は 3.8m/s(実験 1)、

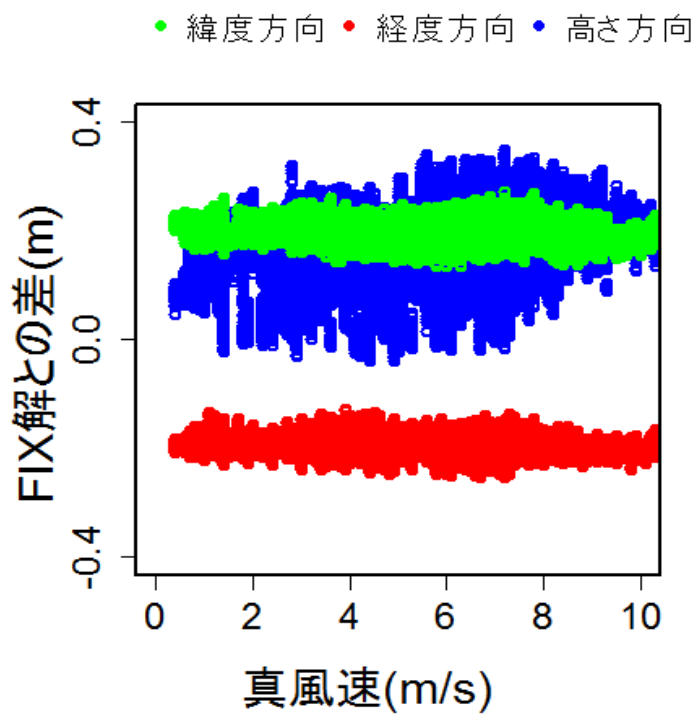


図 4-12 錨泊中の船上での測位結果と風速との相互関係(実験 1)

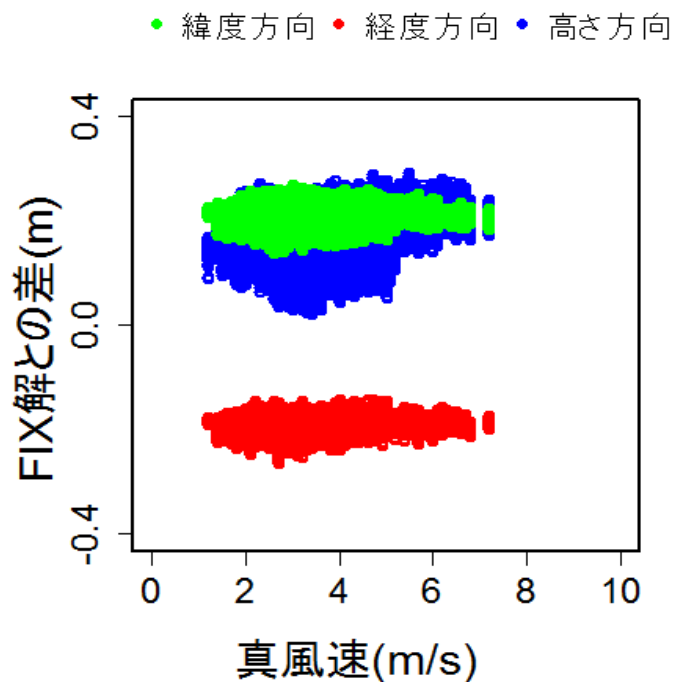


図 4-13 錨泊中の船上での測位結果と風速との相互関係(実験 2)

2.6m/s(実験 2)であった。すなわち、実験中における風速の変位差に違いを確認した。実験 1 は実験

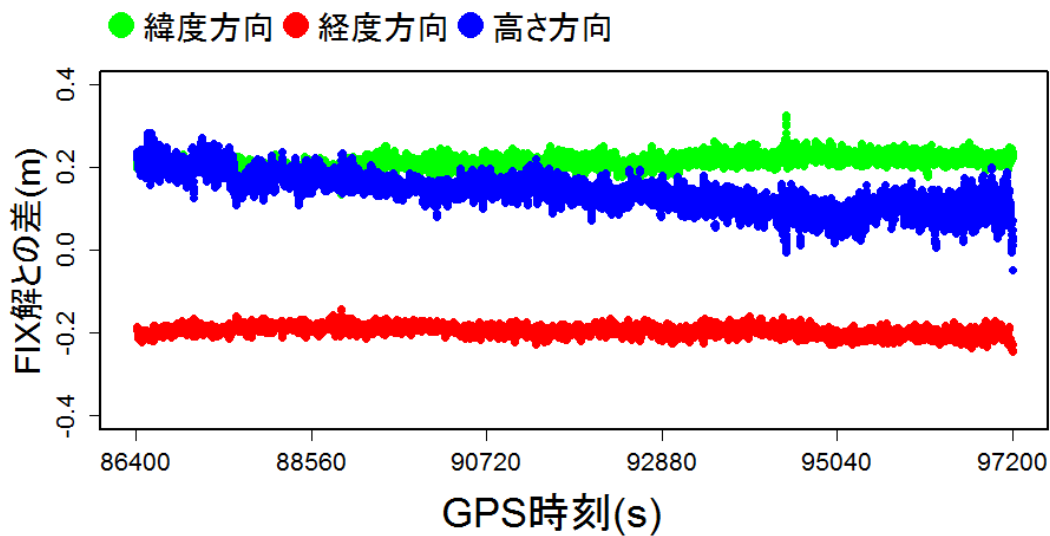


図 4-14 航行中の船上での相対測位解との比較

2 に比較し標準偏差が緯度・経度・高さ方向ともに大きく、ばらつきが大きいといえる(表 4-1)。図 4-12、図 4-13 は、緯度・経度・高さ方向と風速との相互関係を散布図により分析したものである。緯度・経度・高さ方向いずれも風速との間には相関関係は確認されないとともに、4つの要素は相互に無関係といえる。

表 4-1 より、錨泊中の船上は陸上の定点測位と同様に、RMS 誤差が 0.1~0.2m 程度発生し、系統誤差が生じていることが分かる。先行研究によれば、この系統誤差は PPP と相対測位における測位法の差に起因するものである可能性が高いが、詳細な原因は不明であると報告されている⁽²⁹⁾。先行研究と本実験では実験環境や条件が異なり、単純な比較はできないものの、本実験においても相対測位解との比較において系統誤差が発生しており、PPP と RTK の測位法の差に起因するものと考えられる。

しかし、2 回の実験の標準偏差を測位精度として定義し、測位精度のみに着目すれば、錨泊中の船上測位精度は水平方向約 2cm、高さ方向約 5cm であり、いずれも 10cm 以下を達成し、高精度であるといえる。したがって、船上での PPP は、本実験においては遠洋を含めても 95%以上の高い測位率を達成し、海面変動の計測地点となる船舶の錨泊位置を特定するには十分な精度であるとともに、海面変動の分析といった、高精度な高さ方向の計測が必要な分野への応用が期待できるものと考ええる。

次に、航行中の船上測位実験で得られたデータと FIX 解を比較するため横軸に GPS 時刻、縦軸に FIX 解との差として散布図を用いて分析を行った(図 4-14)。なお、この分析は FIX 解を用いた比較になるため、2015 年 7 月 6 日の東京湾から神戸沖へ向けた航行中の 3 時間、実験を行った。航行時の船舶は針路を一定の方向へ向けるため、錨泊時とは異なり海面を振れ回ることではないものの、気象海象の影響を受けるため、OmniSTAR からの補正データが受信できなくなり、測位精度が陸上に比較し悪くなると予測していた。この航海での PPP 測位率は 99.5%であり、補正データを全て受信することはできなかったものの、ほとんどの補正データは受信できており、高い測位率を示している。2015 年 7 月 6 日の天候は雨であり、有義波高は実験期間中の平均値で 0.13m であり、天候や波浪が船体運動に影響し、補正データが受信できない場合が生じたと考える。また、Trimble 社の基線解析ソフトか

表 4-2 OmniSTAR による PPP の測位精度(航行中の船上測位実験)

実験	評価項目	緯度方向 [m]	経度方向 [m]	高さ方向 [m]
OmniSTAR	標準偏差	0.016	0.012	0.043
	平均値	0.214	-0.194	0.141
	RMS	0.215	0.194	0.147

ら得られた全実験時間中における FIX 解の割合を FIX 率とすると、FIX 率は 100%であった。図 4-14 より、航行中の船上での測位結果は緯度方向が FIX 解との差+0.2m 付近、経度方向が差-0.2m 付近および高さ方向が差 0~0.2m 付近で推移しており、陸上定点での測位結果や錨泊中の船上での測位結果と同じ傾向を示していることが分かる。PPP 測位率は 99.5%であったため、OmniSTAR から送信される精密暦を全て受信することはできなかったものの、高い測位率を示したことをふまえれば、航行中の船上では、船舶の動きによらず、PPP による高精度測位はおおむね可能であるといえる。表 4-2 に、航行中の船上での PPP の測位精度を標準偏差、平均値および RMS により示す。PPP は解の収束に時間を要し、収束前の測位結果は不定となるため、本実験においては実験開始後 30 分を収束時間とした。そして、実験開始後 30 分から 24 時間測定したデータを用いて、標準偏差・平均値・RMS を算出した。表 2-8 に示した陸上の定点測位実験での OmniSTAR による PPP(実験 1・実験 2)の標準偏差・平均値・RMS と比較すると、緯度方向の標準偏差では、陸上実験 1 では 0.013m、陸上実験 2 では 0.014m であり、航行中の船上測位実験の 0.016m の方が値は大きい。この傾向は経度・高さ方向においても同様であった。しかし、表 4-1 に示した錨泊中の船上測位実験での OmniSTAR による PPP(実験 1・実験 2)の標準偏差・平均値・RMS と比較すると、緯度方向の標準偏差では、錨泊実験 1・実験 2 とともに 0.016m であり、航行中の船上測位実験の 0.016m と同じであった。経度方向の標準偏差では、錨泊実験 1 では 0.015m、錨泊実験 2 では 0.013m であり、航行中の船上測位実験の 0.012m の方が値は小さい。高さ方向の標準偏差では、錨泊実験 1 で 0.058m、錨泊実験 2 で 0.037m であり、航行中の船上測位実験の 0.043m と比較すれば、実験 1 より小さく実験 2 より大きいことが分かる。すなわち、航行中の船上は陸上に比較し、ばらつき(=標準偏差)は大きいものの、錨泊中に比較し、ばらつきが小さいといえる。航行中の船上は水平・高さ方向において FIX 解との差に開きが確認された。航行時は天候や波浪が船体運動に影響したことに加え、船上の構造物や海面反射に起因するマルチパスの発生が FIX 解との差に影響していると考えられる。本実験において、船上構造物や海面反射に起因するマルチパスの発生が測位精度にどのように影響するのか分析することはできなかったものの、船体運動により船上構造物上に配置される衛星が除外されることに加え、船上構造物や海面反射に起因するマルチパスの発生と測位結果のばらつきには因果関係があると推察する。また、航行時の船上測位においても、RMS 誤差より、0.1~0.2m 程度の系統誤差がみられた。これは、錨泊中の船上測位実験による PPP でも考察したように、PPP と RTK の測位法の差に起因すると考える。

更なる分析を行うことを目的とし、横軸を経度方向の誤差、縦軸を緯度方向の誤差とし、図 4-15 に航行中の船上測位実験の水平方向測位誤差分布を示す。航行中の船上測位実験の場合も陸上の定

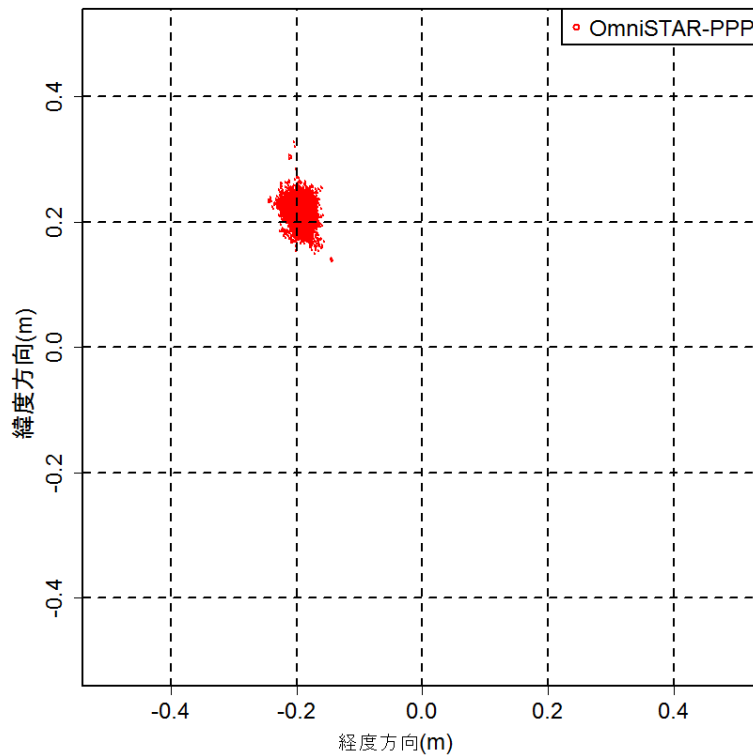


図 4-15 水平方向測位誤差分布(航行中の船上測位実験)

点測位実験や錨泊中の船上測位実験と同様に OmniSTAR による PPP では、集約した 1 群のみが確認され、陸上に比較し測位結果に広がりが見られた。

しかし、標準偏差を測位精度として定義し、測位精度のみに着目すれば、航行中の船上測位精度は水平方向約 1cm、高さ方向約 4cm であり、いずれも 10cm 以下を達成し、海面変動の計測地点となる船舶の位置を特定するには十分な精度であるといえる。

4.3 QZSS を利用した PPP

第 2 章でも示したように、QZSS を利用した PPP として MADOCA があげられる。本節では、QZSS と MADOCA について説明し、船上での実験結果を示す。2015 年 7 月から 9 月にかけて、東京と神戸に寄港した国内航海に加え、東京湾からケアンズ(オーストラリア)、シンガポール、神戸までの遠洋航海を行った銀河丸で測位実験を行った。本実験においても、2.4.3 に示した陸上の定点測位実験と同一の実験機材・接続構成(表 2-7)とし、パソコン上にデータの記録を行った(図 4-1)。

4.3.1 QZSS の概要

2010 年 9 月、日本では準天頂衛星 1 号機「みちびき」が打ち上げられた。QZSS は日本の RNSS(地域的衛星測位システム: Regional Navigation Satellite System)であり、QZSS の軌道は図 4-16 のように、大きな軌道傾斜角をもち、” high-inclined elliptical orbit (HEO)” として知られている。QZSS の軌道を日本からみると、約 1 日で同じ位置に戻る非対称の八の字軌道を描く⁽³⁴⁾。東京において、QZSS の仰角は 1 日 8 時間程度の間、75 度以上の高仰角で存在する⁽³⁵⁾。QZSS のシステムは、

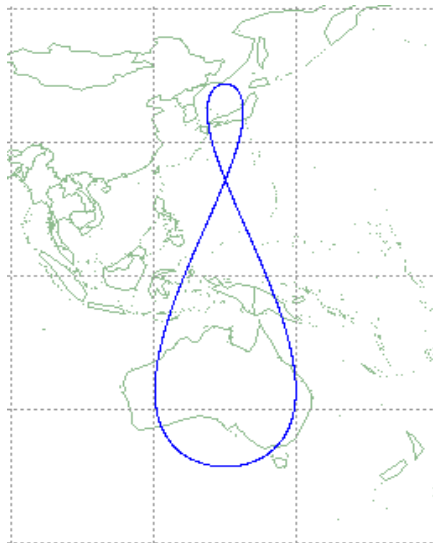


図 4-16 地球表面からみた QZSS の軌道

表 4-3 QZSS 運用予定

year	2015	2017	2018	2019	~2022	2023~
1st Michibiki	In-Operation					
QZSS 4-Sat.	Launch No. 2, 3, 4		Service			SBAS Service
QZSS 7-Sat.	Development/Design (Additional 3 Sats.)					Service

東アジアとオセアニアをカバーしており、すべての地域で高仰角から QZSS の信号を受信するために現在の軌道が設計されている。現在の「みちびき」に加え、QZSS は今後、準天頂軌道(QZ0)を通る 2 機の衛星と静止軌道(GEO)を通る衛星 1 機が新たに打ち上げられる予定である。表 4-3 に今後の QZSS 運用予定を示す。表 4-3 によれば、2018 年までに 4 機の衛星が新たに運用される予定である。また、2015 年 1 月、日本政府は 2023 年までに QZSS を 7 機体制にすることを決定した⁽³⁶⁾。QZSS は GPS の測位精度を利便性と信頼性のそれぞれから高めることが特徴である。QZSS は GPS 信号と互換性があり、相互運用にも使用可能な L1C/A、L1C、L2C、L5 信号の送信に加え、GNSS の測位精度を向上させるため L1-SAIF(Sub-meter Augmentation with Integrity Function)と LEX 信号の 2 つを送信している。L1-SAIF 信号は広域にディファレンシャル補正を提供し、サブメートルレベルの測位精度を可能とする。ここで、サブメートルレベルの測位精度とは、測位精度が 50~100cm 程度の場合を示し、センチ

メートルレベルの測位精度とは、測位精度が 1~10cm 程度の場合を示す。一方、LEX 信号の目的は、サブメートルレベルとセンチメートルレベルの両方の測位精度を達成することにより、精密暦等の補正情報を送信することで PPP に使用される。しかし、L1-SAIF と LEX 信号という 2 つのサービスは海洋向けのユーザには現在調査中である⁽³⁶⁾。

4.3.2 LEX 信号

LEX 信号のメッセージは、QZSS から直接リアルタイムで GNSS 衛星用の精密軌道・精密クロックの補正データを送信できるように設計されている。LEX 信号はセンチメートルレベルでの測位精度向上が期待されている。周波数は 1278.75MHz (Galileo の E6 と同じ) であり、L6 信号とも呼ばれる。LEX 信号は比較的大きなデータ容量を有する利点を持ち、航法メッセージのデータ送信レートは衛星ごとに異なる。表 4-4 に異なる航法メッセージのデータ伝送速度を示す。表 4-4 によれば、QZSS の LEX 信号は 2,000bps の容量を有し、従来の衛星ベースの補強信号の 8 倍の情報を送信することができる。すなわち、LEX 信号のメッセージは、他の GNSS 衛星から送信されたメッセージよりも大きなデータ容量を有するといえる。

LEX 信号から生成されるメッセージは数種類があげられる。JAXA は 2013 年 4 月に、LEX メッセージの新しい種類である MADOCA-LEX メッセージのテスト送信を開始した。MADOCA-LEX メッセージは RTCM (船舶電波技術委員会: Radio Technical Commission for Maritime Service 以下、RTCM) の SSR (State Space Representation) フォーマットにより、PPP ユーザ向けに衛星の精密軌道、精密クロックを提供している。表 4-5 は、LEX メッセージにより放送される予定の SSR メッセージリストを示す。表 4-5 によれば、LEX メッセージは軌道、クロック、衛星のコードバイアス、URA (user range accuracies) により構成され、メッセージの内容は GPS、GLONASS、QZSS、Galileo の統計指標である。2014 年 1 月の時点では、LEX メッセージは GPS、GLONASS、QZSS のみ放送しており、Galileo は準備段階である。軌道と URA のデータは 30 秒ごとに更新される一方、高速クロックデータは 2 秒ごとに更新され、高速な補正が行われる。コードバイアスのデータは日々更新され、更新間隔は広く、低速な補正が行われる。

表 4-4 異なる航法メッセージのデータ伝送速度

Message	Constellation	Carrier (MHz)	Data Rate (bps)
NAV	GPS	1575.42	50
SBAS	WAAS/MSAS/EGNOS	1575.42	250
C/NAV	Galileo	1278.75	500
LEX	QZSS	1278.75	2000

表 4-5 LEX メッセージで放送される予定の SSR メッセージリスト

SSR Packet	Message Number				Update Interval
	GPS	QZSS	Galileo	GLONASS	
Orbit Correction	1057	1246	1240	1063	30 s
Satellite Code Bias	1059	1248	1242	1065	1 day
URA	1061	1250	1244	1067	30 s
High-Rate Clock Correction	1062	1251	1245	1068	2 s

4.3.3 MADOCA による軌道とクロックの推定

JAXA はマルチ GNSS 対応の軌道とクロックの推定ツール(MADOCA)を開発し、2013 年 4 月 9 日に MADOCA-LEX 信号の送信試験を開始した。また、2014 年 9 月 11 日には、MADOCA プロダクトリアルタイムプロダクトのインターネット配信を開始した。MADOCA は最新の高精度測位モデルを取り入れており、オフラインとリアルタイム両方の解析が可能である。現在、MADOCA は GPS、GLONASS、QZSS には対応しているが、Galileo と BeiDou は研究段階であるため対応していない。

オフラインの軌道推定精度において、GPS は 1.81cm(3D-RMS)、GLONASS は 4.92cm(3D-RMS)を達成している。ここで、GPS と GLONASS はいずれも IGS 最終暦との比較である。QZSS についてはオーバーラップ法による結果、5.99cm(3D-RMS)を達成している。また、オフラインのクロック推定精度において、GPS は 0.131ns を達成している。すなわち、オフラインでの GPS と GLONASS の軌道とクロック推定精度はいずれも IGS とほとんど同じであることが分かる⁽³⁷⁾。一方、リアルタイムにおける軌道とクロックの推定精度は GPS の場合、IGS との比較でそれぞれ 3.44cm(3D-RMS)と 0.184ns であった。リアルタイムでの軌道とクロックの推定精度も、IGS とほとんど同じであることが分かる。

4.3.4 実験結果と考察

本節では、船上測位実験で得られた PPP 測位率および PPP と相対測位解との比較を行うことで、海上における PPP の精度評価を行った。

PPP 測位率は、実験で得られたデータ中における PPP フラグ(state_flag 3)が立っている割合とした。一方、相対測位解は、東京海洋大学越中島キャンパス第 4 実験棟屋上設置(受信機:Trimble NetR9、アンテナ:Trimble Zephyr Geodetic 2)の基準点(F3 解)(2014 年 12 月 14 日計算)を使用するとともに、2.4.3 の測位条件(表 2-7)と使用衛星、使用周波数、測位時間、測位間隔、測位モードおよび仰角マスクを OmniSTAR による PPP と同一とし、RTK の Trimble 社の基線解析ソフト⁽³³⁾より得られた RTK の FIX 解を使用することとした。

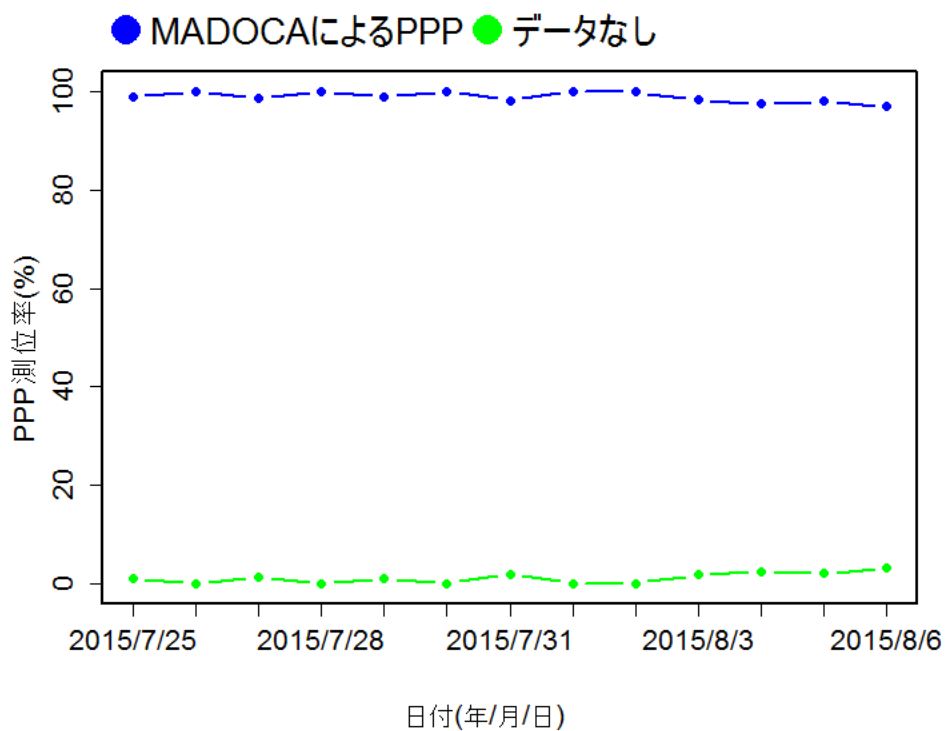


図 4-17 PPP 測位率の推移(東京～ケアンズ)

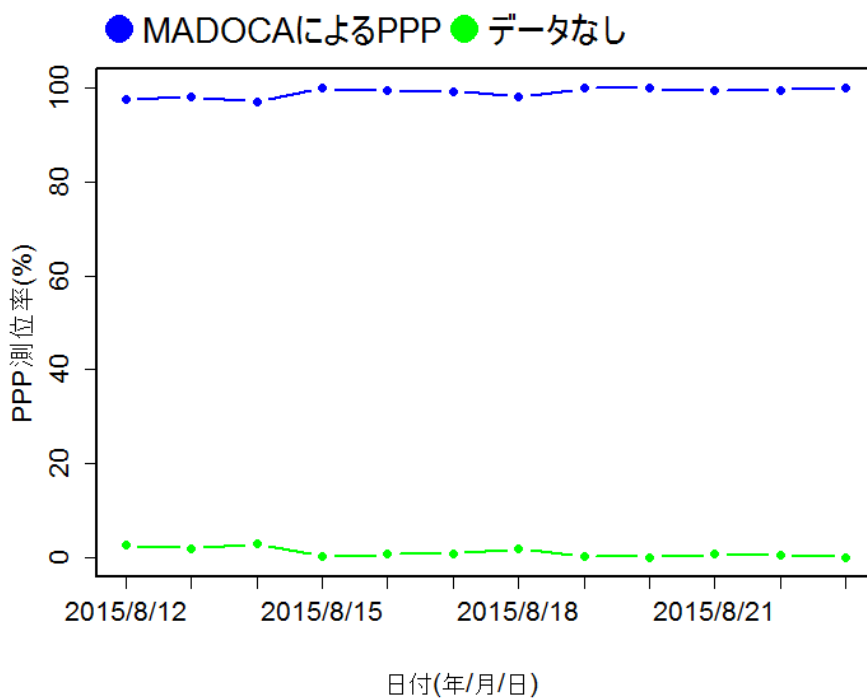


図 4-18 PPP 測位率の推移(ケアンズ～シンガポール)

図 4-17、図 4-18、図 4-19 はそれぞれ東京からケアンズ、ケアンズからシンガポール、シンガポ

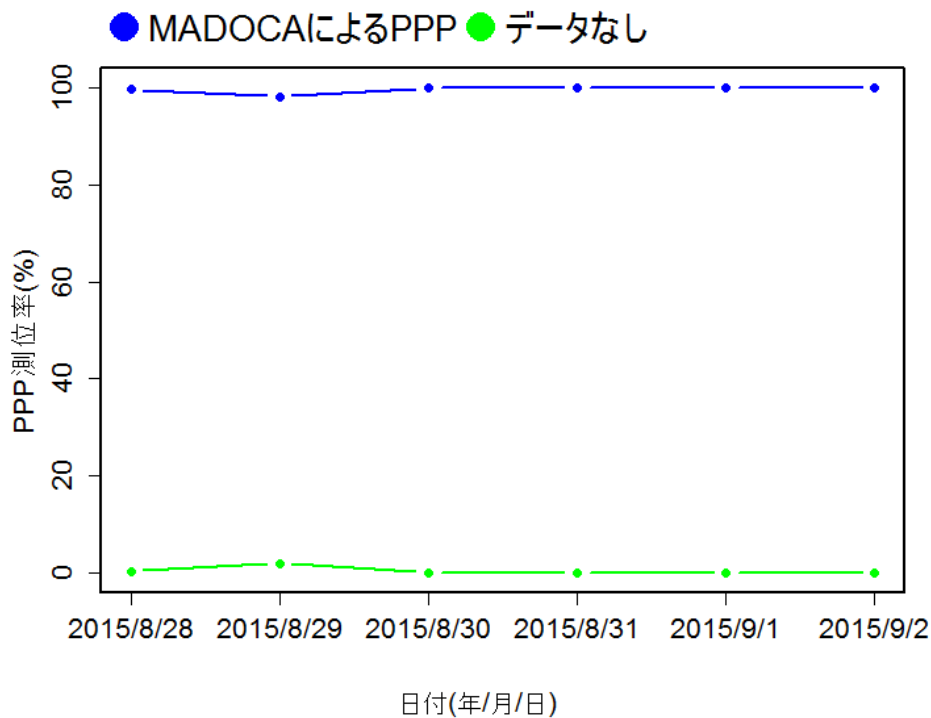


図 4-19 PPP 測位率の推移(シンガポール～神戸)

ールから神戸までの PPP 測位率の推移を示す。全実験航海中において、単独測位や DGNSS の測位モードに切り替わることはなく、MADOCA による PPP が行われていない時間帯は測位そのものも行われな
い時間帯が存在した。PPP 測位率が減少している場合、データなしの時間帯、すなわち測位そのもの
が行われない場合が増加していることが分かる。銀河丸は 2015 年 7 月 25 日 05 : 00 (UTC) に東京港を
出港し、14 日間の航海を経て 2015 年 8 月 7 日 23 : 55 (UTC) ケアンズ港に入港した。図 4-17 は東京出
港時を起点として、24 時間ごとの測位率を求めたものである。ただし、2015 年 8 月 6 日は停泊時間
を除いたため、19 時間分のみの測位率とした。東京からケアンズまでの航海中において、3 日間は
100%の測位率を達成しており、この間、QZSS から得られる MADOCA の補正データは受信できたといえ
る。一方、100%の測位率が達成できていない日にちも存在し、最低 98%まで減少したものの、測位率
全体としては高いといえる。

銀河丸は 2015 年 8 月 12 日 04 : 00 (UTC) にケアンズ港を出港後、12 日間の航海を経て、2015 年 8
月 24 日 01 : 50 (UTC) にシンガポール港に入港した。図 4-18 はケアンズ出港時を起点として、24 時間
ごとの測位率を求めたものである。ただし、2015 年 8 月 23 日は停泊時間を除いたため、22 時間分
のみの測位率とした。ケアンズからシンガポールまでの航海中において、2015 年 8 月 23 日は 100%の測
位率を達成しているものの、100%の測位率が達成できていない日にちの方が全体としては多く、デー
タなしの時間が存在したため、QZSS から得られる MADOCA の補正データは全て受信できていないとい
える。

銀河丸は 2015 年 8 月 28 日 05 : 00 (UTC) にシンガポール港を出港後、2015 年 9 月 8 日に神戸港へ
入港した。LEX 信号の実験スケジュールによれば、MADOCA リアルタイムプロダクトの LEX 信号による

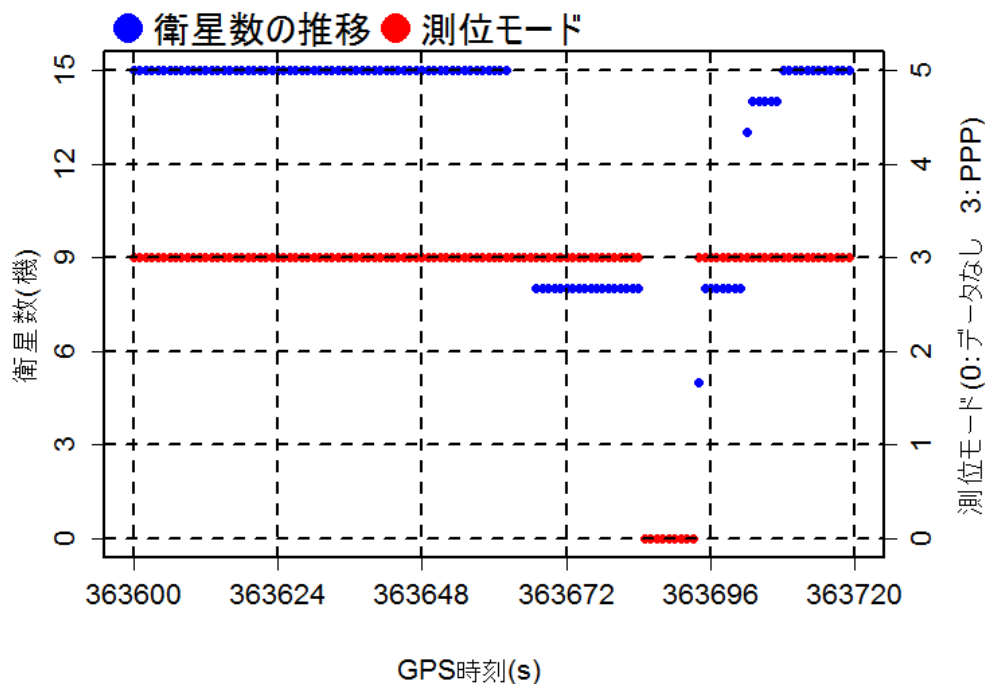


図 4-20 衛星数の推移と測位モードとの関係(2015 年 8 月 6 日)

放送は 2015 年 9 月 2 日 24 : 00(UTC)までとなっており、図 4-19 はシンガポール出港時を起点として、2015 年 9 月 2 日までの 24 時間ごとの測位率を求めたものである。シンガポールから神戸までの航海中において、5 日間は 100%の測位率を達成しており、この間、QZSS から得られる MADOCA の補正データは受信できたといえる。

PPP 測位率は全航海中 97%以上という高い割合で推移しているが、データなしの状態、すなわち測位が行われない割合が最大 3%にのぼる。図 4-2 に示したように、船上測位実験の場合、船上におけるアンテナ設置位置に対する安全面を考慮し、煙突などの上部にアンテナを設置することを避けたため、アンテナ近傍にアンテナ高さを超える煙突やレーダーマストといった船上特有の構造物が存在する。このような構造物のアンテナ近傍への存在に加え、陸上定点の実験にはない、海面反射に起因するマルチパスの発生により、PPP 測位率が減少したと推察する。

2015 年 8 月 6 日の航海では、PPP 測位率は 97%であったものの、データなしの割合は 3%であり、測位そのものが行われない時間帯が最も多く存在した。2015 年 8 月 6 日における 2 分間の衛星数の推移と測位モードとの関係を示す(図 4-20)。図 4-20 より、PPP の測位モードが続いている間は衛星数が 13~15 機で推移しているが、データなし、すなわち測位が行われなくなる直前になると、衛星数が 9 機以下に減少していることが分かる。このように、衛星数の減少がデータなしの割合を増加させた一要因であると考えられる。

次に、錨泊中の船上測位実験で得られたデータと FIX 解を比較するため横軸に GPS 時刻、縦軸に FIX 解との差とし散布図を用いて分析を行った。なお、この分析は FIX 解を用いた比較になるため、

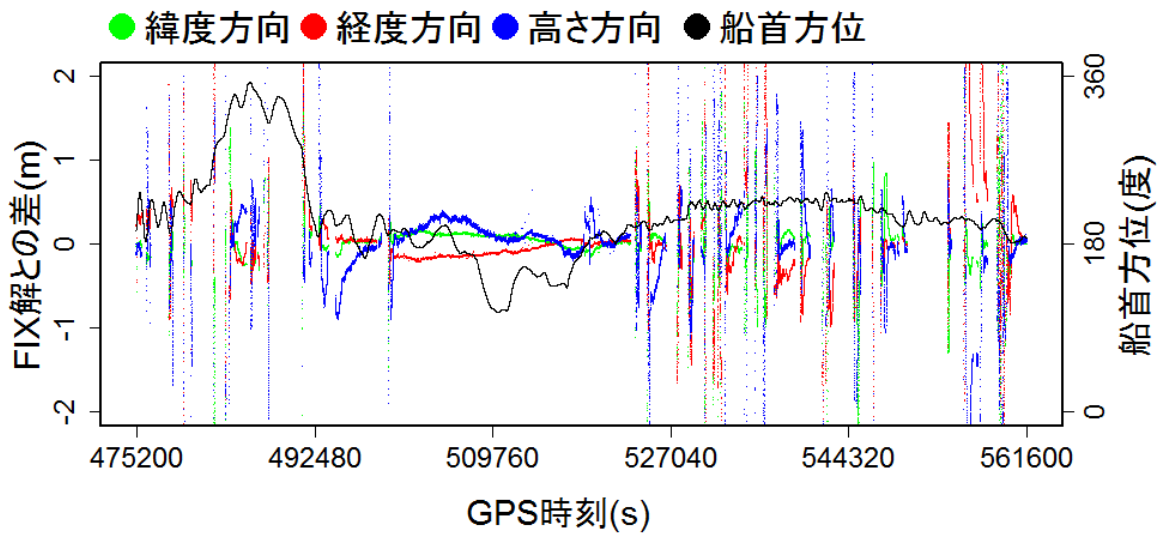


図 4-21 錨泊中の船上測位実験(実験 3)

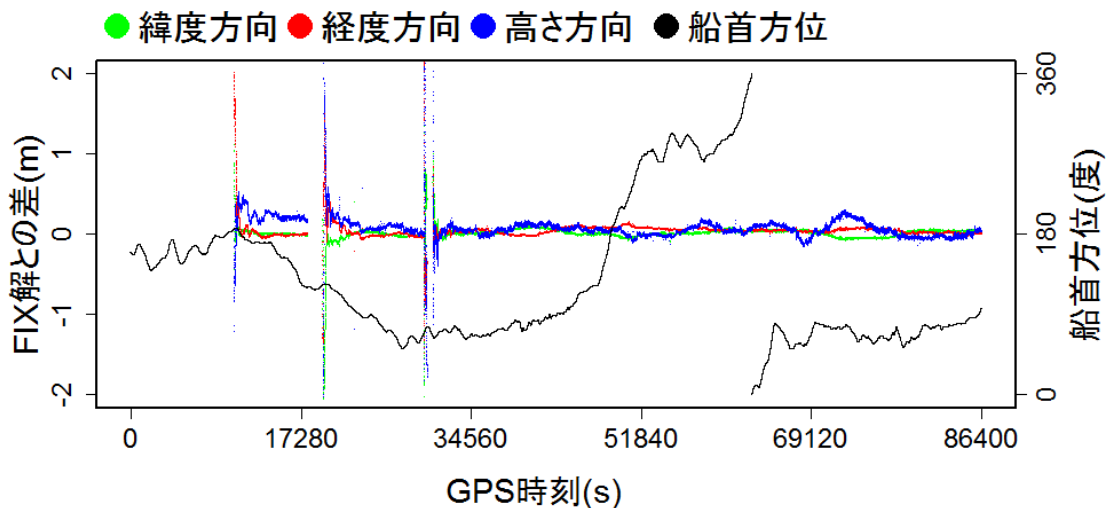


図 4-22 錨泊中の船上測位実験(実験 4)

2015年7月3日(実験3)と2015年7月5日(実験4)の東京湾錨泊中に実験を行った。なお、QZSSは日本上空では可視時間が9時間程度に限定され、QZSSから送信されるLEX信号を常時受信することができないため、船内にDOCOMO製のWi-Fiルータを設置することによりインターネット環境を構築し、MADUCAプロダクトのインターネット配信を利用することで補正情報の受信を試みた。陸上の定点測位実験では、実験3、実験4いずれも一部の測位結果においてFIX解との差が1m以上となり、測位誤差に変動がみられたものの、全体としてFIX解との差は50cm以内に収まっている。一方、錨泊中の船上測位実験では、実験3(図4-21)においては、FIX解との差が2m以上となり測位誤差の変動が大きく、測位結果は全体として不安定であった。実験3でのPPP測位率は55.9%であり、船内に

表 4-6 MADOCA による PPP の測位精度(錨泊中の船上測位実験)

実験	評価項目	緯度方向 [m]	経度方向 [m]	高さ方向 [m]
MADOCA 実験 3	標準偏差	0.388	0.624	0.771
	平均値	0.012	0.027	-0.023
	RMS	0.388	0.625	0.771
MADOCA 実験 4	標準偏差	0.106	0.114	0.169
	平均値	0.005	0.040	0.074
	RMS	0.106	0.121	0.184

においてはインターネット環境を構築するのが難しいため、船内におけるインターネット環境の構築は MADOCA の補正データを全て受信することができなかつた一要因と考える。実験 4(図 4-22)においても、FIX 解との差が 2m 以上となり測位誤差が大きい部分がいくらかみられたものの、実験 3 に比較し測位結果は比較的安定していた。実験 4 での PPP 測位率は 83.9%であり、実験 3 に比較し測位率は高かつたものの、船内におけるインターネット環境の構築が MADOCA の補正データを全て受信することができなかつた一要因と考える。実験 3、実験 4 いずれも通信状態の悪化や衛星数の減少などにより測位そのものが行われなくなった後、再度 PPP が実施されるまでに一定の時間を要し、再度 PPP が行われると測位結果の収束を経て、安定した測位結果が得られるようになることが分かつた。不安定な測位結果は、一度測位が行われなくなった後、再度 PPP の測位モードになり測位結果が収束するまでの状態であるといえる。両実験ともに、錨泊中の船上測位では同一傾向が図から読み取れるため、測位結果は安定している場面もみられたものの、全体として不安定であつたといえる。船舶は、錨を入れ、動きを止めた錨泊中であつても、気象海象の影響を受け海面を振れ回るため、船首方位次第で MADOCA の補正データが受信できなくなると予測していた。錨泊中の船上測位実験では、船首方位は実験 3 において最大 246.8 度(図 4-21)、実験 4 において最大 360 度(図 4-22)の範囲で変位することが確認された。また、PPP 測位率は陸上の定点測位実験では 100%であつたものの、錨泊中の船上測位実験では遠洋航海時を含め 100%を下回る場合が多く、MADOCA から得られる補正データは受信できていない場合があげられる。船首方位の変位が大きい場合、FIX 解との差が 2m 以上となり、測位結果が不安定になる場合がみられ、船首方位の大きな変位は MADOCA から得られる補正データが受信できなくなる一要因であると考えられる。また、Trimble 社の基線解析ソフトから得られた全実験時間中における FIX 解の割合を FIX 解とすると、FIX 率は実験 3、実験 4 ともに 100%であつた。

表 4-6 に、錨泊中の船上での PPP の測位精度を標準偏差、平均値および RMS により示す。PPP は解の収束に時間を要し、収束前の測位結果は不定となるため、本実験においては実験開始後 1 時間を収束時間とした。そして、実験開始後 1 時間から 24 時間測定したデータを用いて、標準偏差・平均値・RMS を算出した。表 2-8 に示した陸上の定点測位実験での MADOCA による PPP(実験 3・実験 4)の標準偏差・平均値・RMS と比較すると、緯度方向の標準偏差では陸上実験 3 では 0.030m、陸上実験 4 では 0.057m であつた一方、錨泊中の船上実験 3 では 0.388m、錨泊中の船上実験 4 では 0.106m の方が値は大きい。この傾向は、経度・

高さ方向においても同様であった。すなわち、船上は陸上に比較し、ばらつき(=標準偏差)が大きいことを示している。錨泊中の船上は水平・高さ方向において、船首方位の振れ回りが大きく変位しても、基線長の変化は殆どないといえるが、FIX 解との差に開きが確認された。錨泊中での船首方位の振れ回りは、船上の構造物や海面反射に起因するマルチパスの影響の大小についての検証は行っていないものの、このようなマルチパスが船上における測位結果のばらつきに影響したことにより、船上は陸上に比較しばらつきが大きくなった一要因と考える。本実験では、複雑化されたマルチパスの影響の大小について検証は行っていないものの、このようなマルチパスが船上における測位結果のばらつきに影響したことにより、船上は陸上に比較しばらつきが大きくなった一要因と考える。本実験において、船上構造物や海面反射に起因するマルチパスの発生が測位精度にどのように影響するのか分析することはできなかったものの、船体運動により船上構造物上に配置される衛星が除外されることに加え、船上構造物や海面反射に起因する複雑化されたマルチパスの発生と測位結果のばらつきには因果関係があると推察する。更に、高さ方向は水平方向と比較し、陸上および船上ともにばらつきが大きいといえる。これは、地平線以下に GPS 衛星からの信号が受信できないため、そもそも高さ方向は水平方向に比較し測位誤差が大きくなることに起因するといえる。しかし、船上の高さ方向は、陸上に比較しばらつきが大きいことが分かる。本実験において、陸上の定点測位実験では、実験期間中の天候はほとんど曇りであった。一方、錨泊中の船上測位実験では、実験期間中の天候はほとんど雨であり、有義波高は実験期間中の平均値で 0.13m であった。すなわち、船舶を定点に留めるための錨泊中であっても、気象海象の影響を受け、船首方位が変化するような複雑な船体運動時は、水平方向よりも高さ方向の測位に影響を与える傾向があったといえる。

更なる分析を行うことを目的とし、横軸を経度方向の誤差、縦軸を緯度方向の誤差とし、図 4-23 に錨泊中の船上測位実験の水平方向測位誤差分布を示す。錨泊中の船上測位実験の場合、MADOCA による PPP では、原点から上下左右に測位誤差が広がり、原点周辺に存在する群を中心に測位誤差にばらつきがみられる。陸上の定点測位実験では、全体として中心に測位結果は集まっているものの、錨泊中の船上測位実験では、陸上に比較し測位結果に広がりがみられる。

表 4-6 より、錨泊中の船上では RMS 誤差が最大で 80cm 近く発生し、系統誤差が生じていることが分かる。MADOCA による PPP の場合、陸上の定点測位実験では RMS 誤差は 20cm 以下におさまっており、錨泊中の船上測位における系統誤差は陸上の定点測位に比較し大きいことが分かる。これは、錨泊中の船上での測位誤差が陸上に比較し大きいことも要因と考えるが、OmniSTAR による PPP でも考察したように、PPP と RTK の測位法の差にも起因すると考える。

2 回の実験の標準偏差を測位精度として定義し、測位精度に着目すると、錨泊中の船上測位精度は水平方向約 30cm、高さ方向約 47cm であり、陸上に比較し測位精度が悪化していることもあり、船上においては高精度とはいえない。高精度化に向け、測位アルゴリズムの改良や船上環境での適応が今後の課題であると考ええる。

次に、航行中の船上測位実験で得られたデータと FIX 解を比較するため横軸に GPS 時刻、縦軸に FIX 解との差として散布図を用いて分析を行った(図 4-24)。なお、この分析は FIX 解を用いた比較になるため、2015 年 7 月 6 日の東京湾から神戸沖へ向けた航行中の 3 時間、実験を行った。QZSS は日本上空では可視時間が 9 時間程度に限定され、QZSS から送信される LEX 信号を常時受信することができないため、錨泊中の船上測位実験と同様に、船内に DOCOMO 製の Wi-Fi ルータを設置することに

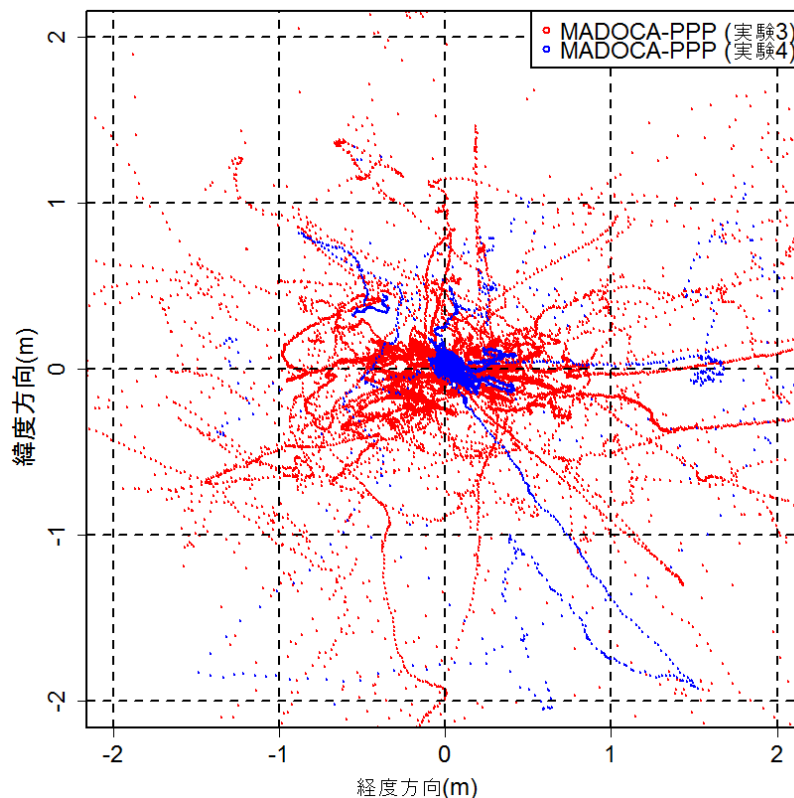


図 4-23 水平方向測位誤差分布 (錨泊中の船上測位実験)

よりインターネット環境を構築し、MADOCA プロダクトのインターネット配信を利用することで補正情報の受信を試みた。航行時の船舶は針路を一定の方向へ向けるため、錨泊時とは異なり海面を振れ回ることにはないものの、気象海象の影響を受けるため、MADOCA からの補正データが受信できなくなり、測位精度が陸上に比較し悪くなると予測していた。この航海での PPP 測位率は 88.7% であり、補正データを全て受信することはできなかったものの、ほとんどの補正データは受信できており、比較的高い測位率を示している。2015 年 7 月 6 日の天候は雨であり、有義波高は実験期間中の平均値で 0.13m であり、天候や波浪が船体運動に影響し、補正データが受信できない場合が生じたと考える。このような船体運動に加え、船内ではインターネット環境の構築が難しく、船内特有のインターネット環境も補正データの受信に影響したと考える。また、Trimble 社の基線解析ソフトから得られた全実験時間中における FIX 解の割合を FIX 率とすると、FIX 率は 100% であった。図 4-24 より、航行中の船上での測位結果は GPS 時刻が 88,560 秒近くのところで全体として測位誤差が 2m 以上となっている場合を除き、FIX 解との差が 0~0.5m 付近で推移しており、陸上定点での測位結果と同じ傾向を示していることが分かる。航行中の船上での測位誤差は錨泊中の船上に比較し低減されていることが分かる。本実験での PPP 測位率は 88.7% であったものの、遠洋航海中の PPP 測位率は 95% 以上を達成していることをふまえれば、航行中の船上では、船舶の動きによらず、PPP による高精度測位はおおむね可能であるといえる。表 4-7 に、航行中の船上での PPP の測位精度を標準偏差、平均値および RMS により示す。PPP は解の収束に時間を要し、収束前の測位結果は不定となるため、本実験におい

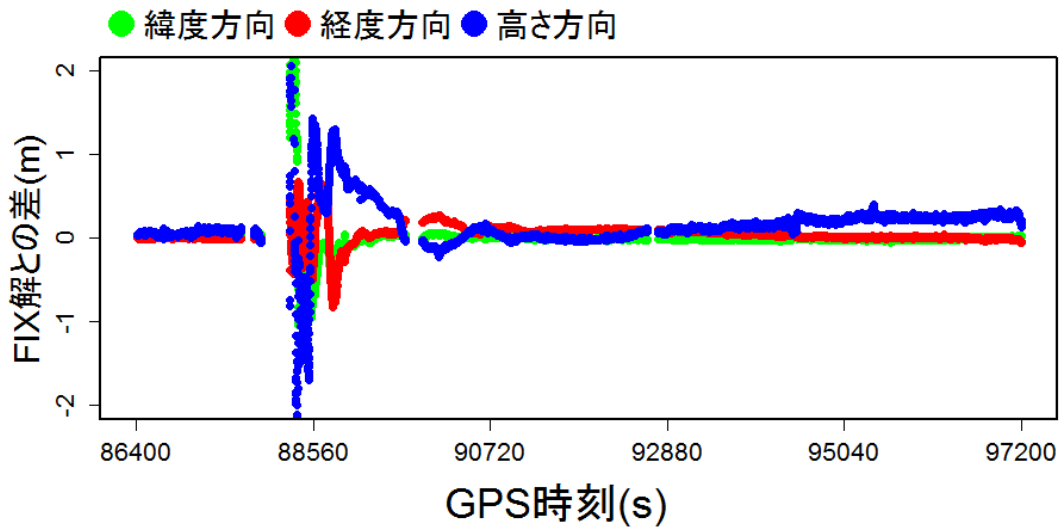


図 4-24 航行中の船上での相対測位解との比較

表 4-7 MADOCA による PPP の測位精度 (航行中の船上測位実験)

実験	評価項目	緯度方向 [m]	経度方向 [m]	高さ方向 [m]
MADOCA	標準偏差	0.226	0.118	0.387
	平均値	0.0008	0.049	0.170
	RMS	0.226	0.128	0.422

ては実験開始後 1 時間を収束時間とした。そして、実験開始後 1 時間から 24 時間測定したデータを用いて、標準偏差・平均値・RMS を算出した。表 2-8 に示した陸上の定点測位実験での MADOCA による PPP (実験 3・実験 4) の標準偏差・平均値・RMS と比較すると、緯度方向の標準偏差では、陸上実験 3 では 0.030m、陸上実験 4 では 0.057m であり、航行中の船上測位実験の 0.226m の方が値は大きい。この傾向は経度・高さ方向においても同様であった。しかし、表 4-7 に示した錨泊中の船上測位実験での MADOCA による PPP (実験 3・実験 4) の標準偏差・平均値・RMS と比較すると、緯度方向の標準偏差では、錨泊実験 3 では 0.388m、錨泊実験 4 では 0.106m であり、航行中の船上測位実験は 0.226m であったことを考えれば、錨泊実験 3 に比較し高精度である一方で、錨泊実験 4 に比較し精度が悪いという結果であった。この傾向は経度・高さ方向においても同様であったことをふまえれば、航行中は陸上に比較し、ばらつき (=標準偏差) は小さいものの、錨泊中のばらつきとはほとんど同じであると考えられる。航行時は天候や波浪が船体運動に影響したことに加え、船上の構造物や海面反射に起因するマルチパスの発生が FIX 解との差に影響していると考えられる。本実験において、船上構造物や海面反射に起因するマルチパスの発生が測位精度にどのように影響するのか分析することはできなかったものの、船体運動により船上構造物上に配置される衛星が除外されることに加え、船上構造物や海面反射に起因するマルチパスの発生と測位結果のばらつきには因果関係があると推察する。また、航行

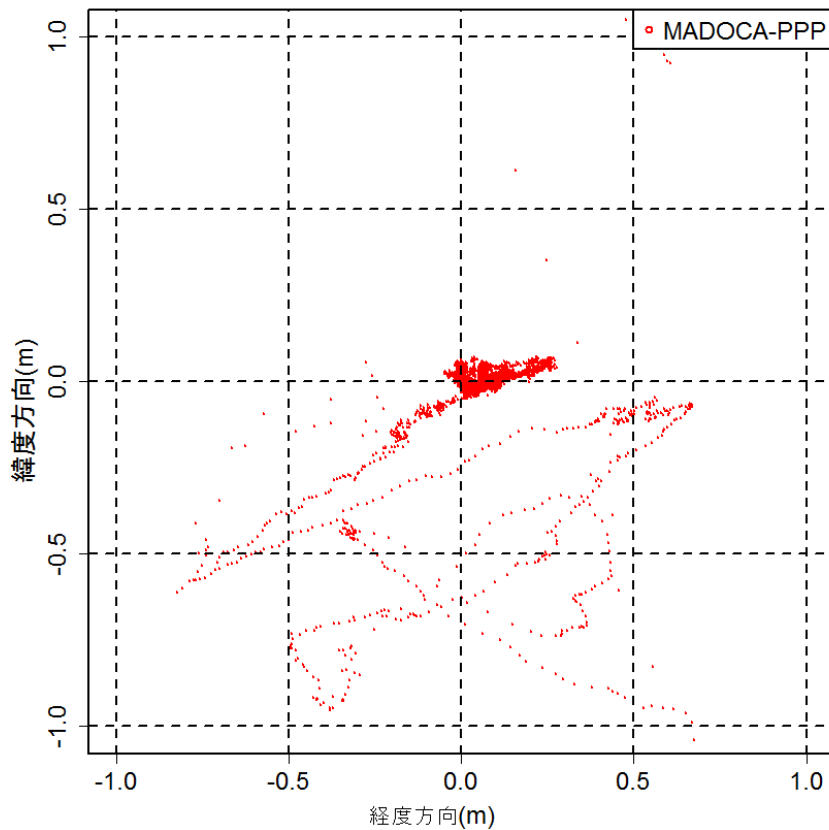


図 4-25 水平方向測位誤差分布(航行中の船上測位実験)

時の船上測位においても、RMS 誤差より、最大 42cm の系統誤差がみられた。MADOCA による PPP の場合、陸上の定点測位実験では RMS 誤差は 20cm 以下におさまっており、航行中の船上測位における系統誤差は陸上の定点測位に比較し大きいことが分かる。これは、航行中の船上での測位誤差が陸上に比較し大きいことも要因と考えるが、OmniSTAR による PPP でも考察したように、PPP と RTK の測位法の差にも起因すると考える。

更なる分析を行うことを目的とし、横軸を経度方向の誤差、縦軸を緯度方向の誤差とし、図 4-25 に航行中の船上測位実験の水平方向測位誤差分布を示す。航行中の船上測位の場合は陸上の定点測位実験や錨泊中の船上測位実験と同様に、中心から上下左右に測位誤差がみられ、1 つの群を中心に測位誤差にばらつきがみられる。しかし、上下左右の測位誤差は錨泊中の船上測位実験に比較し小さいことが分かる。

標準偏差を測位精度として定義し、測位精度のみに着目すれば、航行中の船上測位精度は水平方向約 17cm、高さ方向約 39cm を達成している。陸上に比較し測位精度が悪化していることもあり、船上においては高精度とはいえない。高精度化に向け、測位アルゴリズムの改良や船上環境での適応が今後の課題であると考えられる。

4.4 4 章のまとめ

本研究では、OmniSTAR と MADOCA から得られる精密暦を用いて、陸上の定点測位実験と錨泊中・航

行中の船上測位実験から PPP の精度評価を比較検討した。OmniSTAR による PPP においては、RTK との間に系統誤差は発生しているものの、錨泊中の船上では水平方向約 2cm、高さ方向約 5cm 程度の測位精度で測位が可能であることが分かった。これにより、海上ブイの代替またはデータ補間として利用可能であることが示唆されたといえる。また、航行中の船上でも水平方向約 1cm、高さ方向約 4cm 程度の測位精度で測位が可能であることが分かった。これにより、海面変動の計測地点となる船舶の位置を特定するには十分な精度であるといえる。一方、MADCOCA による PPP においては、錨泊中の船上では水平方向約 30cm、高さ方向約 47cm であり、航行中の船上でも水平方向約 17cm、高さ方向約 39cm となり、陸上に比較し測位精度が悪化していることもあり、船上においては高精度な測位が可能であるとはいえない。船上での更なる高精度化に向け、測位アルゴリズムの改良や船上環境での適応が今後の課題であると考え。船舶は機動性が高く固定された定点での観測にとどまらない。すなわち、基準点に依存しない PPP を利用することは広範囲の海域での計測を可能とし、より詳細な海面変動の分析が期待できる。一方、船上測位では陸上での定点測位に比較し、大きなばらつきや全体として数 10cm 程度の系統誤差が確認された。錨泊中の船上測位の振れ回りは、船上の構造物や海面反射に起因するマルチパスの発生をより複雑化させると考える。航行中においても、船上の構造物や海面反射に起因するマルチパスの発生が測位結果に影響すると考える。このようなマルチパスの発生に加え、船体運動により船上構造物上に配置される衛星の除外が船上における測位結果のばらつきに影響したことで、船上測位では陸上に比較し大きなばらつきが発生したと考える。また、数 10cm 程度の系統誤差は、PPP と RTK の測位法の差に起因するものと考えられる。しかし、これらの原因は本研究では明らかにすることができず、ばらつきを補正する手法と系統誤差軽減の検討は、今後の船上測位における、更なる精度向上へ向けた課題であるといえよう。

第5章 海上への応用提案

5.1 はじめに

第4章における錨泊中の船上測位実験結果より、船舶自身での精密な海面変動データの取得についての見通しが得られた。本章では、錨泊中の船舶でのPPPの例として、海上ブイの代替またはデータ補間と防災・減災対策につながる提案を行うことを目的とする。

5.2 海上ブイと船舶との比較

表5-1に、海上ブイと船舶におけるGPSの用途などについて示す。

海上ブイで計測できる代表的なデータは、波浪、潮位、津波、風向・風速、水温、流向・流速、気温および気圧⁽³⁸⁾である。また、海上ブイは計測データを陸上に伝送する手段(衛星通信設備)を備えており、より詳細な潮位データの分析を陸上で行うことができる。船舶も海上ブイと同様にGPSが搭載されているが、船舶におけるGPSの役割は、運航者が安全運航を行う上で有益となる自船の位置情報を得るためやAISのように自船の位置情報を要する航海計器と接続するなどの利用用途に留まる。海上ブイで計測できる代表的なデータは大型船での計測は可能であるが、総トン数20トン未満の船舶(以下、小型船舶)の場合、観測設備が少なく全てのデータを計測できる可能性は少ない。また、大型・小型問わず全ての船舶とすれば計測できるデータの種類および陸上への伝送手段(衛星通信)の有無で海上ブイの全ての機能を満たしているとはいえない。しかし、大型船では、GPSの搭載が義務付けられており、搭載率は100%といえる。また、小型船舶においても搭載義務はないものの、搭載率は98%⁽³⁹⁾に達しており、GPSの航海計器としての利用は多い。したがって、多くの船舶に搭載されているGPSの二次的利用の可能性は高いといえる。

表5-1 海上ブイと船舶との比較

比較項目	海上ブイ	船舶
GPSの用途	海面変動 気象・海象	位置情報 航海計器
データ伝送	衛星通信	大型船 搭載義務あり
		小型船舶 搭載義務なし
GPS搭載率	100%	大型船 100%
		小型船舶 98%

5.3 海上ブイの代替・データ補間

5.2節で示したように、海上ブイが計測している項目は海面変動(高さ方向)のみではない。船舶が海上ブイの代替機能を有するには、海上ブイで計測している全ての項目を計測できることが必要である。

銀河丸のような大型船は、気象観測装置が搭載されており、海上ブイの計測している項目と同様の項目は、既存の気象観測装置で計測可能であるといえる。また、海上ブイは計測した海面変動データを陸上へ伝送するため、衛星通信設備を搭載しているが、銀河丸のような大型船も衛星通信設備が搭載されており、陸上へのデータ伝送は既存の設備で対応可能であるといえる。東京湾を經由し、入溝する外航船は年間24,457隻⁽⁴⁰⁾あり、1日に約1,000隻近くに上るので⁽⁴¹⁾、気象海象や岸壁事情により東京湾内に入港前に錨泊する船舶は多いといえる。すなわち、湾内に錨泊する船舶は、海上ブイに比較し数が多く、湾内においては海上ブイのデータ補間は可能であると考ええる。また、船舶は航行海域を特定できないことにより、基準点からの信号を得られない場合が考えられるが、前述のような銀河丸と同様な装置を搭載した船舶であれば、RTKとの間に系統誤差は発生しているものの、基準点を要せずとも錨泊中の船上測位で高さ方向10cm程度の測位精度が得られたことにより、船舶でのPPPは海上ブイの代替またはデータ補間が期待できると考える。

図5-1に、船舶による海上ブイの補間の例を示す。海上の船舶でPPPによる緯度・経度・高さ方向の計測を行うとともに、船舶に搭載されている気象観測装置から気温、気圧、水温、風向・風速などのデータを取得し、衛星通信設備またはモバイルルータ通信により陸上のデータ分析機関へ送信する。錨泊中の多数の船舶からデータを取得することが可能となることにより、広範囲かつ観測点の増加が見込め分析データの増加へと繋がり、より詳細な防災・減災対策の検討を可能とする。

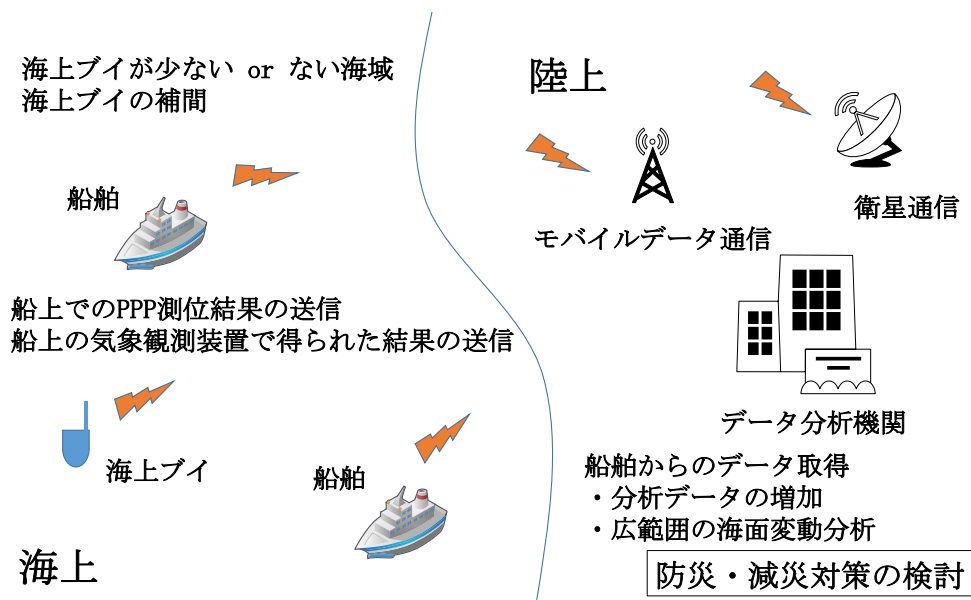


図5-1 海上ブイの補間

5.4 錨泊中の船舶による防災・減災対策

湾内では日本籍船に限らず、多数の船舶が錨泊している。本節では、データ収集と分析を目的として、船上での PPP から得られる高精度な情報を利用し、船舶自身がデータを分析し、船員へ異常を通知するシステムの概要について述べる。

図 5-2 にシステムのメイン画面を示す。本システムは、Visual Basic.NET で開発したものであり、特殊なサーバ機を要せず、事務用として一般的に利用される Windows OS 上で動作が可能である。銀河丸の実験で得たデータを利用し、陸上でシミュレーション環境を作成し、動作検証を行ったものである。PPP より得られた海面変動データを計測装置から船内設置のパソコンへ常時出力し、分析を行う。分析の結果、海面の異常変位を検知した際は、データ取得を継続しつつ、検知された異常変位データを船内全体で共有するため、異常の検知を当直航海士に通報する。通報を受けた当直航海士は船内指令装置から大きな音で警報や注意を促す通知を行う。一方、海面の異常変位が検知されない場合はデータ取得を継続しつつ、異常変位時に備える。津波発生の前兆として、大きく潮の引く現象が発生する場合があげられる。一方、断層のずれにより潮が引かずに津浪が発生する場合もある。いずれの場合においても、錨泊している複数の船舶が津浪発生前の現象も含め、データを分析できれば、陸上への早期通報が可能であると考ええる。なお、海面の異常変位を検知する方法は、PPP によって得られた高さ方向の測位結果を、海面高の変位として風波や津波のデータとすることにある⁽⁴²⁾。高さ方向の測位結果は波浪・潮位・津波によって発生した上下動が一つの時系列データとして送られてくる。それぞれの周期が波浪は数秒から数十秒程度、潮汐は半日から 1 日、津波は数分から数時間と異なっているので、送られてきたデータをその周期ごとにフィルターで分別することで津浪のデータを得ることができる。この計測は GPS 津波計⁽⁴³⁾と同じであり、高さ方向の測位結果から、周期により津浪を分別することは船上の PPP においても可能であると考ええる。

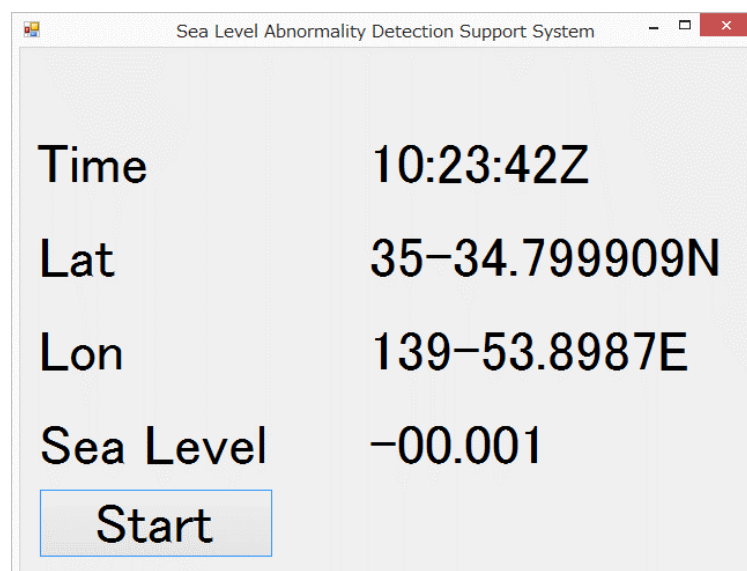


図 5-2 船舶自身による防災・減災対策システム

5.5 5章のまとめ

本章では海上への応用提案として、海上ブイの代替・データ補間を検討し、錨泊中の船舶による防災・減災対策システムの提案を行った。船舶は、海上ブイに比較し広範囲の海域かつ多点で海面変動を計測できることが示唆され、海上ブイの代替またはデータ補間と自船のみによる防災・減災対策へ向けた海面変動計測の可能性を得た。第4章で述べた錨泊中の船上測位実験結果や湾内における多数の錨泊船の存在により、船舶自身での精密な海面変動データの取得についての見通しが得られたことから、高さ方向の変動を錨泊中の船舶自身が分析することで、防災・減災対策のひとつとして運航者に警報や注意を促すシステムを提案できた。湾内には多数の船舶が錨泊しており、外部からの情報に頼らない自船で完結できる防災・減災対策システムは船舶および船員という貴長な財産を守るためにも必要と考える。

第6章 結論

6.1 結論

本研究では、GPS/GNSS を活用した船舶運航者の特性から GNSS の高精度化に対する船舶運航者の意識を調査し、船舶運航者の意識からみえた GPS/GNSS の海洋利用可能性について分析を行った。GNSS の高精度化は進んでいるものの、船舶運航者は避航操船時、双眼鏡を最も優先して使用する割合が高く、双眼鏡に次いでレーダを優先して使用する割合が高いという調査結果より、GPS 測位の高精度化に対する船舶運航者の意識は低いといえる。双眼鏡やレーダから得られる情報の具現化といった船舶運航者の特性を高精度 GNSS からの情報でサポートできれば、GPS/GNSS の船舶運航時における幅広い利用に寄与し、自動運航の実証につながると考える。船舶は航行範囲が広く、基準点からの信号を受信できるとは限らない。そこで、基準点に依存しない PPP に着目した船舶運航者をサポートするシステムが必要と考える。また、船舶運航者は GPS/GNSS の海上における応用性に関し、多様なアイデアを持っていることが分かった。GPS/GNSS の示す情報は非常に高精度であり、正確な位置/速度情報をどのような形で活用すれば、船舶運航の分野で GPS/GNSS が役立つか考える必要があるといえる。日本は周囲を海に囲まれた島国であり、多様な分野で GPS/GNSS が活用されることによって、船員や船舶のみならず、人々の生活を豊かにする結果が生み出されることが望ましいと考える。

また、本研究では船上の測位実験から PPP の精度評価を行った。RTK との間に系統誤差は発生しているものの、船上においても高精度な測位が可能であることが分かった。これにより、海上ブイの機能の一部である高さ方向の海面変動は、船舶を観測点とした場合、海上ブイと代替やデータ補間として利用可能であることが示唆されたといえる。船舶は機動性が高く固定された定点での観測にとどまらない。すなわち、基準点に依存しない PPP を利用することは広範囲の海域での計測を可能とし、より詳細な海面変動の分析が期待できる。

さらに、本研究では錨泊中の船舶での PPP の例として、海上ブイの代替またはデータ補間と防災・減災対策につながる提案を行った。錨泊中の船上測位実験結果や湾内における多数の錨泊船の存在により、船舶自身での精密な海面変動データの取得についての見通しが得られたことから、高さ方向の変動を錨泊中の船舶自身が分析することで、防災・減災対策のひとつとして運航者に警報や注意を促すシステムを提案できた。湾内には多数の船舶が錨泊しており、外部からの情報に頼らない自船で完結できる防災・減災対策システムは船舶および船員という貴重な財産を守るためにも必要と考える。

6.2 今後の課題

上記の課題を踏まえた今後の課題を以下に示す。

- ・各種誤差の推定による単独測位の高精度化において、擬似距離のみでは測位精度 1m 以内を達成した。今後は擬似距離に比較し高精度な測定が可能な搬送波位相を使用することにより、更なる高精度化を目指す。また、各種誤差の推定による単独測位の高精度化は、本研究では静止状態のみの検証であったが、今後は移動状態においても検証することにより、移動体の環境下での測位精度を分析する。
- ・船上測位では陸上の定点測位に比較し、大きなばらつきや全体として 10~20cm 程度の系統誤差が

確認された。錨泊中における船上測位の振れ回りは、船上の構造物や海面反射に起因するマルチパスの発生をより複雑化させると考える。この複雑化されたマルチパスの発生に加え、船体運動により船上構造物上に配置される衛星の除外が船上における測位結果のばらつきに影響したことで、船上測位では陸上に比較し大きなばらつきが発生したと考える。また、10~20cm程度の系統誤差は、PPPとRTKの測位法に起因するものと考えられる。しかし、これらの原因は本研究で明らかにすることができず、ばらつきを補正する手法と系統誤差軽減の検討は、今後の船上測位における、さらなる精度向上へ向けた課題であるといえよう。

謝辞

本論文の作成にあたり、久保信明准教授には研究内容全般から測位演算アルゴリズムの展開、適時のアドバイスから発表のまとめ方まで全面的に御指導頂きました。心より御礼申し上げます。

海技教育機構の霜田一将准教授には本研究の計画から始まり、研究内容全般から海上への応用提案に関し幅広く御指導頂き、練習船での実験では現場との調整を頂きました。心より御礼申し上げます。

安田明生名誉教授には、研究室のゼミ等において、発表のまとめ方に対する御指導を頂きました。また、測位航法学会で研究内容を発表させて頂く機会を頂き、心より御礼申し上げます。

情報通信工学研究室の川村雅志助手には、練習船での実験に際し、アンテナ設置等の準備で多々援助頂きました。情報通信工学研究室の皆様には日ごろの研究生活で多々援助頂きました。高須知二研究員には、MADCOCA-PPPの研究を行うにあたりアドバイスを頂きました。高須研究員の発表論文は、PPPを理解する上で大変役立ちました。博士課程の土倉弘子氏には、測位結果の比較プログラムの作成から研究内容に至るまで貴重なアイデアをご提供頂き、心より御礼申し上げます。

副査の松本洋平助教、藤坂貴彦准教授には研究内容に関するアドバイスを様々な視点から頂き、大変参考とさせて頂きました。心より御礼申し上げます。また、松本研究室の皆様には、研究内容に対するアイデアや測位演算プログラムの作成で援助頂き、心より御礼申し上げます。

本研究は海技教育機構との共同研究により実施した内容でもあり、海技教育機構の乾眞教授、熊田公信教授には研究の計画や研究アイデアをご提供頂きました。練習船で取得させて頂いたデータは本論文の作成には不可欠なものでした。心より御礼申し上げます。

海技教育機構の藤井肇教授、佐藤哲司教授、渡部翔助教には、乗船できない著者に代わり、毎度に渡り練習船内に設置した実験用パソコンからデータを取得し、データファイルを保存頂きました。保存頂いたデータは研究を進める上でとても貴重なものでした。心より御礼申し上げます。

宇宙航空研究開発機構の小暮聡氏、河手香織氏には銀河丸遠洋航海中の実験で多大なご協力を頂きました。拝借したGNSS受信機は、本研究では欠かせないものでした。心より御礼申し上げます。最後に、これまで暖かく見守ってくれた家族に感謝します。

参考文献

- (1) 小暮聡・吉川和宏：2014年内閣府SIP「自動走行システムの実現に向けた諸課題とその解決の方向性に関する調査・検討における衛星測位活用に向けた基礎評価に関する調査」概要，日本航海学会誌Navigation，第194号，p. 23，2015. 10.
- (2) 国土交通省：航空機のオートパイロットシステムに関する概要，
<http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/autopilot/pdf/02/9.pdf>，2016. 4.
- (3) Esa Jokioinen：Towards Remote Controlled Ships，MUNIN Workshop at SMM，2014. 10. 9.
- (4) 久保信明：都市部移動体におけるGNSS技術の測位精度と課題について，
<http://www.denshi.e.kaiyodai.ac.jp/jp/assets/files/pdf/content/200711-2.pdf>，GPS/GNSSシンポジウム，2007. 11.
- (5) 奥田重之・川原政範・渡邊泰夫：大規模農業インフラとしてのRTK位置精度検証について，
<http://www.gnss-pnt.org/taikai28/yoko28/H28全国大会研究発表予稿d-4.pdf>，平成28年度測位航法学会全国大会，2016. 4. 28.
- (6) 中田健嗣・西新三郎：ブイ式海底津波計の紹介，気象庁測候時報，第81巻，特別号，p. 101，2014.
- (7) 日立造船株式会社：新型GPS海洋ブイの実証試験を開始，
<http://www.hitachizosen.co.jp/release/2014/11/001453.html>，2015. 7.
- (8) 小林孝：GPS波浪計による沖合波浪の観測，建設の施工企画，715，p. 16，2009. 9. 25.
- (9) 林豊：GPS波浪計の長周期波形観測値による沿岸津波換算値を活用した津波即時情報，自然災害科学，29，3，p. 381，2010.
- (10) 防災分野でのGPS海洋ブイの取組み：海洋情報フォーラム，
<http://www.mlit.go.jp/common/001037641.pdf>，p. 15，2014. 3. 27.
- (11) 国土交通省海事局：東日本大震災における地震・津波の来襲時の船舶の避難対応について(アンケート結果とりまとめ)，
<http://www.mlit.go.jp/common/000212617.pdf>，2016. 3.
- (12) 久保信明・喬耘・安田明生：GPS単独測位高精度化の実現性について，日本航海学会論文集，114，pp. 259-266，2006. 3.
- (13) 笹原昇・浅倉宜矢・西下厚志・長野勝行・橋本崇史・泉紀明：ITによる長基線KGPS測位を基準としたMSAS・PPP・DGPSの精度評価について，海上保安庁海洋情報部技報，vol. 27，pp. 67-76，2009.
- (14) 坂井丈泰：広域DGPSとMSAS，GPS/GNSSシンポジウム2006チュートリアルセッション，p. 13，2006. 11. 15.
- (15) 海上保安庁：日本全国のDGPS局，
<http://www.kaiho.mlit.go.jp/soshiki/koutsuu/dgps/p2.html>，2016. 2.
- (16) 海上保安庁：ディファレンシャルGPS，
<http://www.kaiho.mlit.go.jp/soshiki/koutsuu/dgps/top.html>，2016. 2.
- (17) 毛利悠美子：日本版広域補正システムMSASの測位精度評価，
<http://www.denshi.e.kaiyodai.ac.jp/kubo/mouri.pdf>，2016. 2.
- (18) 安田明生：利活用を支える衛星測位技術動向，
<http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/gis->

- sangakukan/wg/dai2/siryou2.pdf, p. 14, 2016. 2.
- (19) IGS:GPS Satellite Ephemerides / Satellite & Station Clocks, <http://www.igs.org/products>, 2016. 6.
- (20) QZ-vision : Final Products 最終暦, <http://qz-vision.jaxa.jp/USE/ja/finalp>, 2016. 6.
- (21) JAXA : MADOCA Real-Time Products, https://ssl.tksc.jaxa.jp/madoca/public/public_index_en.html, 2016. 6.
- (22) M. Schenewerk : A brief review of basic GPS orbit interpolation strategies, GPS Solutions, Vol. 6, No. 4, pp. 265-267, 2003.
- (23) 久保信明・喬耘・安田明生 : GPS 単独測位高精度化の実現性について, 日本航海学会論文集, 114, p. 260, 2006. 3.
- (24) 劉秀 : 一周波の擬似距離単独測位を用いた電離層モデルに関する研究, 東京海洋大学修士学位論文, pp. 52-57, 2012. 3.
- (25) 安田明生(他 8 名) : 精説 GPS, Pratap Misra and Per Enge 原著, 測位航法学会訳
- (26) G. Blewitt : Basics of the GPS Technique, Geodetic Applications of GPS, Swedish Land Survey, pp. 13-14, 1997.
- (27) 国土地理院 : 電子基準点データ提供サービス, <http://terras.gsi.go.jp/>, 2015. 12.
- (28) QZ-vision : Latest QZSS LEX Data LEX, <http://qz-vision.jaxa.jp/USE/ja/lex>, 2016. 7.
- (29) 高須知二・笠井昌二 : GPS による精密単独測位 (PPP) 法の精度評価, 電子情報通信学会信学技報, vol. 105, no. 218, SANE2005-45, pp. 34-35, 2005.
- (30) Trimble : CenterPoint RTX, <http://www.trimble.com/Positioning-Services/CenterPoint-RTX.aspx>, 2016. 3.
- (31) Suelynn Choy・Ken Harima・Yong Li・Mazher Choudhury・Chris Rizos・Yaka Wakabayashi・Satoshi Kogure : High Accuracy Real-Time Precise Point Positioning using the Japanese Quasi-Zenith Satellite System LEX Signal, GSR_3Geospatial Science Research 3. School of Mathematical and Geospatial Science, RMIT University, 2014. 12.
- (32) 海上保安庁交通部 : AIS を活用した航行支援システム, http://www.kaiho.mlit.go.jp/syoukai/soshiki/toudai/ais/ais_index.htm, 2016. 4.
- (33) Trimble : Trimble Business Center -Your Complete Office Solution, http://www.trimble.com/survey/trimble-business-center_support.aspx, 2016. 3.
- (34) Masayuki Saito , Junichi Takiguchi and Takeshi Okamoto , “Establishment of Regional Navigation Satellite System Utilizing Quasi-Zenith Satellite System” , TECHNICAL REPORTS, Mitsubishi Electric ADVANCE, 2014.
- (35) Taro Suzuki, Nobuaki Kubo and Tomoji Takasu , “Evaluation of Precise Point Positioning Using MADOCA-LEX via Quasi-Zenith Satellite System” , Proc. of ION ITM 2014, 2014.
- (36) Yoshiyuki Murai, “Project Overview of The Quasi-Zenith Satellite System” , Proc. of ION GNSS 2015, Tampa, Florida, 14-18 September, pp. 1291-1332, 2015.
- (37) Tomoji Takasu, “Development of Multi-GNSS Orbit and Clock Determination Software “MADOCA” ” , The 5th Asia Oceania Regional Workshop on GNSS, December 1-3, 2013.

- (38) 日立造船株式会社：GPS 海洋観測システム，
<http://www.hitachizosen.co.jp/products/products029.html>，2015.7.
- (39) 社団法人日本航空宇宙工業会：平成22年度宇宙産業実態調査，ユーザー産業群規模及び日米欧宇宙産業比較調査報告書，p.7，2011.3.
- (40) 日本船主協会：わが国各港湾における入港船舶量および海上出入貨物量(2012年)，
<http://www.jsanet.or.jp/data/pdf/2014data80-1.pdf>，2015.12.
- (41) 國枝佳明・鹿島英之・岩崎裕行・熊田公信：東京湾航行に関する注意事例と活用，日本航海学会講演予稿集，132，p.1，2015.4.30.
- (42) 加藤照之・寺田幸博・木下正生・柿本英司・一色浩・森口壽久・神崎政之・高田美津雄・James M. Johnson：GPS 津波計の開発-大船渡市沖実用化実験-，電子情報通信学会論文誌，B Vol. J84-B, No. 12, p. 2228, 2001. 12.
- (43) 総務省：人工衛星を用いた津波観測システム「GPS 津波計」を開発「高知高専 寺田 幸博(てらだ ゆきひろ)教授」<<いち早く確実に津波情報を提供>>，
<http://www.soumu.go.jp/soutsu/shikoku/ict-jirei/chuumoku16.html>，2015.12.

付録1 GEONET の F3 解と VRS で使用される座標値の違いについて

はじめに

本付録では、GEONET の F3 解と VRS により算出された基準点位置の算出方法をまとめ、2 つの位置の違いについて考察した。

GEONET の F3 解

GEONET (GPS 連続観測システム : GNSS Earth Observation NETwork system 以下、GEONET) の F3 解は国土地理院の構築した GEONET の解析戦略 (第 4 版) の最終解である。解析戦略第 4 版では Bernese GPS software Ver. 5.0 ⁽¹⁾ を使用し、F2 解 と比べて①大気遅延勾配 (MacMillan, 1995) の推定 (1 日に 1 つの、時間の一次関数として推定)、②アンテナの絶対位相特性モデルの採用、③座標系の ITRF2005 への変更、④解析固定点 (電子基準点「つくば 1」) の座標の取り扱いの変更、⑤電離層遅延高次項の導入、等の改良が行われた。GEONET のデータ解析方法は、30 秒ごとに観測された受信機の観測データを用いて、IGS から取得した GNSS の航法データ (エフェメリス) を入力する。もし、IGS によってサポートされていないアンテナを使用する場合は、PCV (Phase Center Value) と PCO (Phase Center Offset) を入力しなければならない。座標系は ITRF2005 を使用しており、楕円体は GRS80 を使用している。解析で使用する Bernese GPS software Ver. 5.0 は、長基線の分析に適している。GEONET の F3 解は毎日測量され、解析が行われており、測位精度は 1 年間で mm 級とされている。

VRS で使用される座標値

VRS (Virtual Reference Station) で使用される座標値は、測地成果 2011 に基づいて算出される。測地成果 2011 は、元期において世界測地系と一致するローカルな座標系であり、世界測地系をある時点として、現実の地点と接点を持たせたものが測位成果 2011 である。ここで、測量では、ある時点の日本列島の位置に「固定」する。固定する地点が「日本経緯度原点」、固定する時点が「元期」である。座標系は ITRF2008 を使用しており、楕円体は F3 解と同様、GRS80 を使用している。測位地成果 2011 の元期は 2011 年 5 月 23 日である。VRS の座標値は測地成果 2011 により表されるため、算出される座標値は 2011 年 5 月 23 日時点での位置となっており、F3 解のように毎日測量され、解析が行われているわけではない。測位精度は 1 年間で数 cm 級とされている。

F3 解と VRS で使用される座標値の違い

上述したように、F3 解は Bernese GPS software Ver. 5.0 を用いて長期間の Static 測位により毎日算出されるため、随時発生する地殻変動にも対応した座標値を算出することができている。一方、VRS で使用される座標値の場合、座標値は測地成果 2011 に基づいて算出される。しかし、日本列島は世界的に地殻変動が大きな地域であり、時間の経過とともに基準点を載せた大地は徐々に変動することから、2011 年 5 月 23 日時点での位置を表す測地成果 2011 と実際の基準点の位置は少しずつずれていく。ここで、実際の基準点の位置は F3 解により与えられると仮定すれば、F3 解の測位精度は 1 年間で mm 級であり、VRS で使用される座標値の測位精度は 1 年間で数 cm 級であることから、F3 解と VRS で使用される座標値との間には、数 cm 程度の系統誤差が発生することが考えられる。測地

成果 2011 と F3 解との系統誤差は、特に水平方向の座標である経緯度について顕著となる。測量では 2 点間の相対的な位置関係が重要なので、このずれは直ちに問題とはならないが、長い年月が経つと基準点の測量成果(座標値)の改定が必要となる。また、現在でも広域で高精度な GNSS 測量を行う際に注意が必要な場合がある。定常的な地殻変動に起因する測量誤差を軽減する方法として、セミ・ダイナミック補正があげられる。

さらに、東日本大震災のような大地震が発生した場合、座標が最大で数 m ずれるため、VRS の座標値で使用される測地成果 2011 を用いると、実際の位置に比較し数 m 程度の系統誤差が発生することが考えられる。このように、測地成果 2011 をそのまま用いた場合、大地震発生時の座標変化に対応できないことが予想されるので、注意が必要であると考えられる。

セミ・ダイナミック補正

従来の測量では、測量の基準点の位置座標は時間によらず一定であったが、地殻変動の激しい日本列島は、活発な地殻変動(約 10cm/年)の影響で様々な方向に移動しているため、地殻変動の影響を取り除くために必要な措置を講じる必要がある。そこで、地殻変動の影響を計算で補正する考え方の一つがセミ・ダイナミック補正である。

セミ・ダイナミック補正とは、測量計算の過程で、位置の誤差となる地殻変動の影響を取り除くための計算であり、基準点の位置座標を元期(基準日)に固定し、補正量(地殻変動量)を定期的に更新する。補正量の求め方としては、リアルタイム観測を行っている電子基準点での変動量を求め、日本全国をカバーするグリッドを用意する。そして、電子基準点のデータからグリッド上での変動量を補間によって数学的に推定する。

参考文献

(1) Rolf Dach, Urs Hugentobler, Peter Walser : Bernese GPS Software Version 5.0, Tutorial Processing Example Introductory Course Terminal Session, 2011.9.

付録2 PPP と RTK に生じる系統誤差について

はじめに

第4章でも示したように、OmniSTARによるPPPでは、陸上定点測位実験と船上測位実験において、0.1~0.2m程度の系統誤差が発生している。高須らの先行研究によれば、この系統誤差はPPPと相対測位における測位法の差に起因するものである可能性が高いが、詳細な原因は不明であると報告されている。先行研究と本実験では実験環境や条件が異なり、単純な比較はできないものの、本研究においても相対測位解との比較において系統誤差が発生しており、PPPとRTKの測位法の差に起因するものと考えられる。第4章では東京湾周辺の船上測位実験に焦点をあてたが、本付録では、津名仮泊地(神戸沖)に錨泊中・航行中の船上測位実験に焦点をあて、OmniSTARによるPPPの系統誤差について考察した。

RTKの測位法

RTKは擬似距離に加え搬送波位相を使用した相対測位法のひとつであり、その測位精度はmm程度を発生する。RTKにおいては、二重位相差を取ることで衛星測位の誤差要因であるクロック誤差を相殺することが可能である。また、搬送波位相には擬似距離とは異なり搬送波位相バイアスと呼ぶ連続的な測定では固定値となるバイアスが含まれている。搬送波位相バイアスはRTKのような相対測位においては、搬送波位相の二重差をとることにより受信機および衛星初期位相の項が消去されて整数となる⁽¹⁾。RTKの測位法は付録1で示したF3解に準拠しており、使用される座標系や楕円体もF3解に準拠している。

PPPの測位法

PPPは基準点に依存せずcm程度の測位精度を達成するため、観測局の観測データのみを使って測位が可能であり、直接に世界測地基準座標系(ITRF)にしたがったグローバルな座標値が得られる。PPPの場合、相対測位とは異なり二重位相差をとることができないため、搬送波位相バイアスについては、初期位相及び受信機局発位相が加算され整数とはならない。すなわち、整数化による測位精度向上を行うことができないため、実数解として推定することになる。PPPで使用するモデルについては第2章に示した通りである。PPPで使用するモデルは、観測局の観測データを用いるが、観測局の位置はどのような測位方法によって算出されているのか明らかにされていないのが実態である。観測局の位置がF3解のように正確に算出されていない場合、観測データの観測値に誤差が発生することが予想され、PPPで使用するモデル計算に影響が出ることが考えられる。

錨泊中の船上測位実験による検証

本付録では、PPPに発生する系統誤差を検証するため、OmniSTARから得られる精密暦を用いて、津名(神戸沖)錨泊中の銀河丸で、2015年7月8日から2015年7月9日にかけて、表1に示す実験機材・条件において24時間の測位実験を行った。本実験においても、第4章で示したように、パソコン上でデータの記録を行った。

本稿では、津名錨泊中の船上測位実験で得られたPPP測位率およびPPPと相対測位解との比較を

表 1 実験機材・条件

受信機	Trimble SPS855
アンテナ	Trimble Zephyr Geodetic 2
使用衛星	GPS, GLONASS, QZSS, BeiDou
使用周波数	L1 と L2 の二周波
測位時間	24 時間
測位間隔	1 秒
仰角マスク	OmniSTAR : 10 度
実験場所	津名仮泊地 (神戸沖)

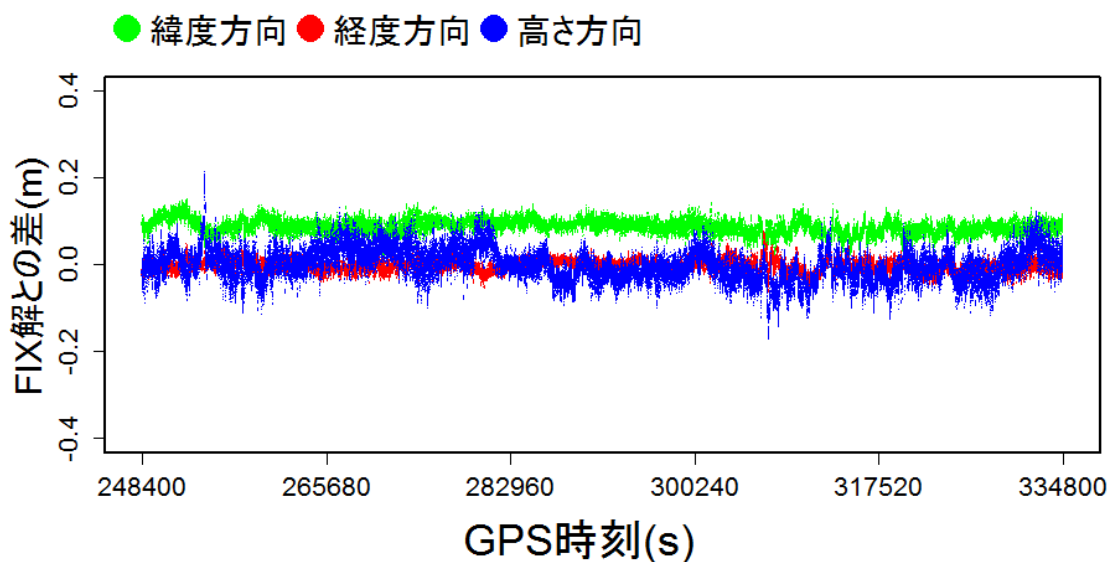


図 1 錨泊中の船上での相対測位解との比較(津名仮泊地)

行うことで、錨泊中の船上における PPP の精度評価を行った。

PPP 測位率は、実験で得られたデータ中における PPP フラグ(state_flag 5)が立っている割合とした。一方、相対測位解は、国土地理院提供の洲本電子基準点(兵庫県設置、受信機: Trimble NetR9、アンテナ: TRM59800.80 GSI)の基準点(F3 解)(2015 年 7 月 8 日計算)を使用し、Trimble 社の基線解析ソフトにより得られた RTK の FIX 解を使用することとした。なお、洲本電子基準点では、使用衛星は GPS、GLONASS、QZSS であり、BeiDou は使用していないことに加え、測位間隔は 30 秒ごとである。使用周波数、測位時間、測位モードおよび仰角マスクは PPP の測位条件(表 1)と同一とした。

PPP 測位率は 100%であり、東京湾錨泊中と同じ測位率であった。本実験においてもアンテナを船橋上部のフライングブリッジ(約 18m)に設置したことで、海面から適度な距離を保つことができたこと、

表 2 OmniSTAR による PPP の測位精度(錨泊中の船上測位実験：津名仮泊地)

実験	評価項目	緯度方向 [m]	経度方向 [m]	高さ方向 [m]
OmniSTAR	標準偏差	0.016	0.014	0.037
	平均値	0.087	-0.003	-0.002
	RMS	0.089	0.014	0.037

可能なかぎり船上特有の構造物から距離を離れた場所へアンテナを設置したことが、本実験において船上での安定した PPP 測位に繋がったと考える。

次に、船上の実験で得られたデータと FIX 解を比較するため横軸に GPS 時刻、縦軸に FIX 解との差とし散布図を用いて分析を行った(図 1)。陸上定点測位実験や東京湾錨泊中の船上測位実験では、緯度経度方向の差は直線的であり変動は少ない。一方、高さ方向では、緯度経度方向と比較すると FIX 解との差は小さいといえるものの変動がみられた。図 1 より、津名仮泊地錨泊中の船上においても、緯度経度方向の差は直線的であり変動は少ないことに加え、高さ方向においても緯度経度方向と比較すれば FIX 解との差は小さいとはいえるものの変動がみられた。この傾向は陸上の定点測位実験や東京湾錨泊中の船上測位実験と同一であるため、津名仮泊地においても、安定した測位結果が得られたといえる。Trimble 社の基線解析ソフトから得られた全実験時間中における FIX 解の割合を FIX 率とすると、FIX 率は本実験において 99.7%であった。陸上と東京湾錨泊中の船上において、測位結果は緯度方向が FIX 解との差+0.2m 付近、経度方向が差-0.2m 付近および高さ方向が差 0~0.2m 付近と同じ傾向を示した。一方、津名仮泊地錨泊中の船上において、測位結果は緯度方向が FIX 解との差+0.1m 付近、経度方向が差 0m 付近および高さ方向が差-0.2~0.2m となり変動がみられた。津名仮泊地錨泊中の船上における測位結果は陸上定点や東京湾錨泊中の船上と比較し FIX 解との差が小さいことが分かる。更に、PPP 測位率は 100%であり OmniSTAR から送信される精密暦が全て受信できたことから、錨泊中の船上では、船舶の動きによらず、PPP による高精度測位は可能であるといえる。

表 2 に、津名仮泊地錨泊中の船上測位実験での PPP の測位精度を標準偏差、平均値および RMS にて示す。PPP は解の収束に時間を要し、収束前の測位結果は不定となるため、本実験においては実験開始後 30 分を収束時間とした。そして、実験開始後 30 分から 24 時間測定したデータを用いて、標準偏差・平均値・RMS を算出した。緯度方向の標準偏差では、本実験では 0.016m となり、東京湾錨泊中の船上測位実験と同じ結果であった。一方、経度方向・高さ方向については東京湾錨泊中よりばらつきが小さい場合もあれば大きい場合も見られるが、おおむね同じような結果となった。ただし、陸上の定点測位実験と比較しばらつきはいずれも大きいことが分かる。すなわち、船上は陸上に比較し、ばらつき(=標準偏差)が大きいことを示している。また、RMS 値は全方向とも陸上定点と東京湾錨泊中の船上に比較し小さく、10cm 以内におさまっていることから、神戸沖で測定された系統誤差は東京湾に比較し小さいといえるものの、数 cm 程度の系統誤差は発生していることが分かる。この系統誤差は第 4 章でも考察したように、PPP と RTK の測位法の差に起因すると考える。

更なる分析を行うことを目的とし、横軸を経度方向の誤差、縦軸を緯度方向の誤差とし、図 2 に津

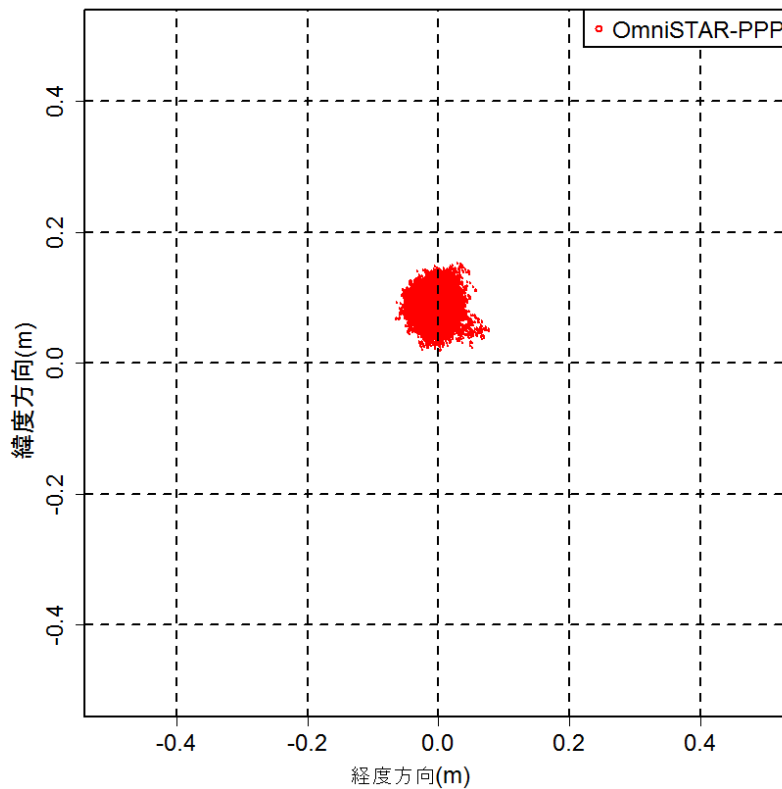


図2 水平方向測位誤差分布(錨泊中の船上測位実験：津名仮泊地)

名仮泊地錨泊中の水平方向測位誤差分布を示す。陸上定点や東京湾錨泊中の船上では、集約した1群のみが確認され、いずれも第二象限に集中していたため、津名仮泊地錨泊中の船上においても、同じ傾向がみられると予測していた。図2より、津名仮泊地錨泊中の船上においても、集約した1群のみは確認されたものの、集約した1群は第二象限には集中せず、原点(0.0, 0.0)より少し上部への集中がみられた。これは、陸上や東京湾錨泊中の船上に比較し、系統誤差が小さくなったことが原因と推察する。しかし、系統誤差は数cm程度発生しているため、系統誤差の発生原因を分析することが今後の課題であるといえる。

航行中の船上測位実験による検証

錨泊中の船上測位実験に加え、PPPに発生する系統誤差を検証するため、OmniSTARから得られる精密暦を用いて、神戸沖航行中の銀河丸で、2015年7月9日、表1に示す実験機材・条件において3時間の測位実験を行った。本実験においても、第4章で示したように、パソコン上でデータの記録を行った。

本稿では、津名錨泊中の船上測位実験で得られたPPP測位率およびPPPと相対測位解との比較を行うことで、航行中の船上におけるPPPの精度評価を行った。

PPP測位率は、実験で得られたデータ中におけるPPPフラグ(state_flag 5)が立っている割合とした。一方、相対測位解は、国土地理院提供の洲本電子基準点(兵庫県設置、受信機: Trimble NetR9、アンテナ: TRM59800.80 GSI)の基準点(F3解)(2015年7月8日計算)を使用し、Trimble社の基線解

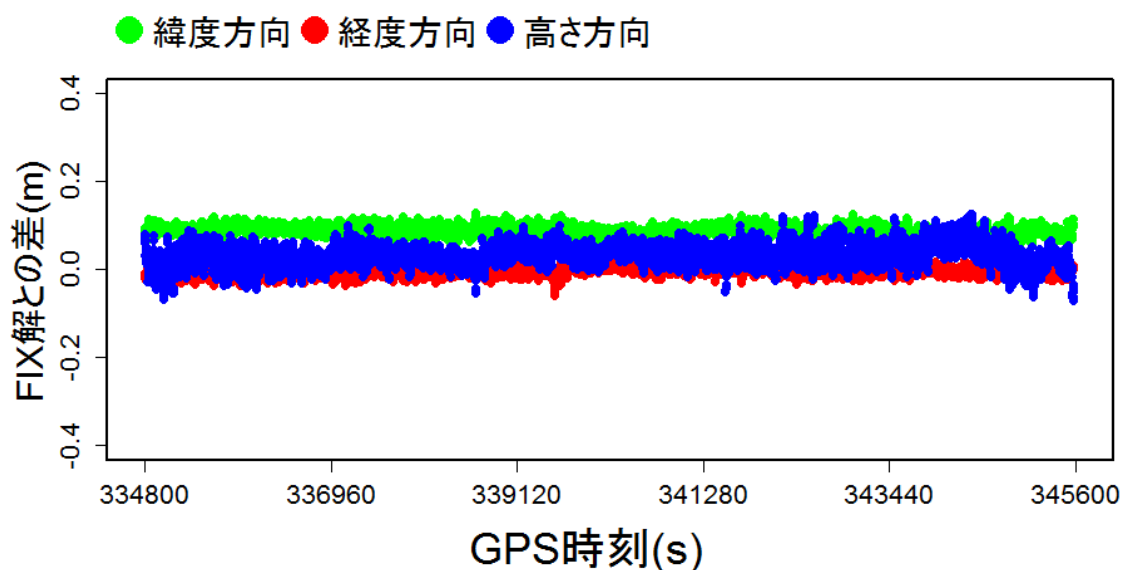


図3 航行中の船上での相対測位解との比較(神戸沖)

析ソフトにより得られた RTK の FIX 解を使用することとした。なお、洲本電子基準点では、使用衛星は GPS、GLONASS、QZSS であり、BeiDou は使用していないことに加え、測位間隔は 30 秒ごとである。使用周波数、測位時間、測位モードおよび仰角マスクは PPP の測位条件(表 1)と同一とした。

PPP 測位率は 100% であり、東京湾航行中と同じであった。本実験においてもアンテナを船橋上部のフライングブリッジ(約 18m)に設置したことで、海面から適度な距離を保つことができたこと、可能な限り船上特有の構造物から距離を離れた場所へアンテナを設置したことが、本実験において船上での安定した PPP 測位に繋がったと考える。

次に、船上の実験で得られたデータと FIX 解を比較するため横軸に GPS 時刻、縦軸に FIX 解との差とし散布図を用いて分析を行った(図 3)。陸上定点測位実験や東京湾航行中の船上測位実験では、緯度経度方向の差は直線的であり変動は少ない。一方、高さ方向では、緯度経度方向と比較すると FIX 解との差は小さいといえるものの変動がみられた。図 3 より、神戸沖航行中の船上においても、緯度経度方向の差は直線的であり変動は少ないことに加え、高さ方向においても緯度経度方向と比較すれば FIX 解との差は小さいとはいえるものの変動がみられた。この傾向は陸上の定点測位実験や東京湾航行中の船上測位実験と同一であるため、神戸沖航行中においても、安定した測位結果が得られたといえる。Trimble 社の基線解析ソフトから得られた全実験時間中における FIX 解の割合を FIX 率とすると、FIX 率は本実験において 99.7% であった。東京湾航行中の船上での測位結果は緯度方向が FIX 解との差 +0.2m 付近、経度方向が差 -0.2m 付近および高さ方向が差 0~0.2m 付近で推移していた。一方、神戸沖航行中の船上での測位結果は緯度方向が FIX 解との差 0.1m 程度、経度方向が差 0m 付近および高さ方向が差 -0.2~0.2m となり変動がみられた。神戸沖航行中の船上における測位結果は陸上定点や東京湾航行中の船上に比較し FIX 解との差が小さく、津名仮泊地錨泊中における FIX 解との差とほとんど同じ傾向を示していることが分かる。更に、PPP 測位率は 100% であり OmniSTAR から送信される精密暦が全て受信できたことから、航行中の船上でも、船舶の動きによらず、PPP による

表 3 OmniSTAR による PPP の測位精度 (航行中の船上測位実験：神戸沖)

実験	評価項目	緯度方向 [m]	経度方向 [m]	高さ方向 [m]
OmniSTAR	標準偏差	0.011	0.011	0.025
	平均値	0.090	-0.002	-0.033
	RMS	0.090	0.011	0.042

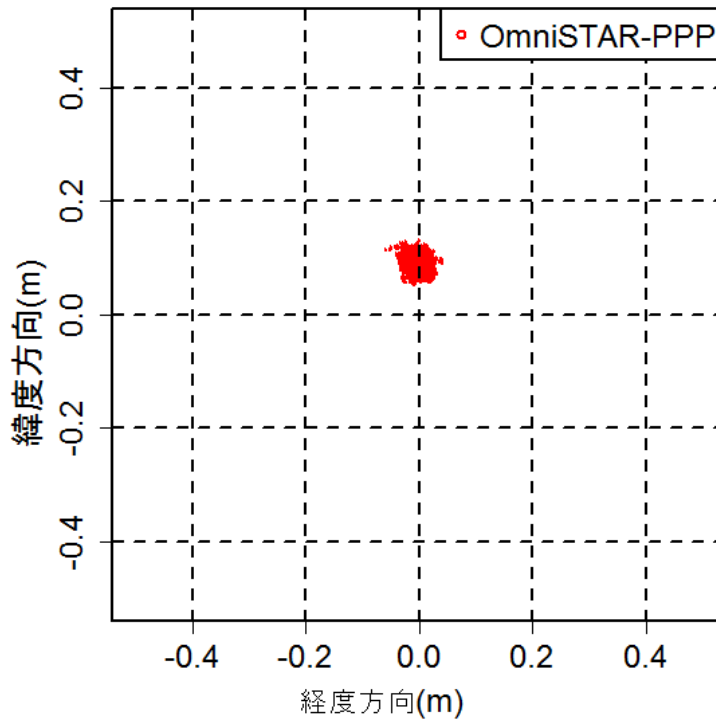


図 4 水平方向測位誤差分布 (航行中の船上測位実験：神戸沖)

高精度測位は可能であるといえる。

表 3 に、神戸沖航行中の船上測位実験での PPP の測位精度を標準偏差、平均値および RMS にて示す。PPP は解の収束に時間を要し、収束前の測位結果は不定となるため、本実験においては実験開始後 30 分を収束時間とした。そして、実験開始後 30 分から 24 時間測定したデータを用いて、標準偏差・平均値・RMS を算出した。緯度方向の標準偏差では、本実験では 0.011m となり、陸上定点や東京湾航行中の船上測位実験に比較しばらつきが小さいという結果であった。これは、経度方向・高さ方向も同じ傾向を示した。さらに、津名仮泊地錨泊中の船上測位実験に比較してもばらつきが小さいことが分かる。すなわち、神戸沖航行中の船上は陸上や東京湾航行中、錨泊中の船上に比較し、ばらつき (=標準偏差) が小さいことを示している。また、RMS 値は全方向とも陸上定点と東京湾航行中の船上に比較し小さく、津名仮泊地錨泊中とは同じような値であったが、10cm 以内におさまっていることから、神戸沖で測定された系統誤差は東京湾に比較し小さいといえるものの、数 cm 程度の系統

誤差は発生していることが分かる。この系統誤差は第4章でも考察したように、PPPとRTKの測位法の差に起因すると考える。

更なる分析を行うことを目的とし、横軸を経度方向の誤差、縦軸を緯度方向の誤差とし、図4に神戸沖航行中の水平方向測位誤差分布を示す。陸上定点や東京湾航行中の船上では、集約した1群のみが確認され、いずれも第二象限に集中していたため、神戸沖航行中の船上においても、同じ傾向がみられると予測していた。図4より、神戸沖航行中の船上においても、集約した1群のみは確認されたものの、集約した1群は第二象限には集中せず、原点(0.0、0.0)より少し上部への集中がみられた。これは、陸上や東京湾航行中の船上に比較し、系統誤差が小さくなったことが原因と推察する。津名仮泊地錨泊中の船上測位においても、集約した1群のみは確認されたものの、原点(0.0、0.0)より少し上部への集中がみられたことから、神戸沖航行中の船上測位は津名仮泊地錨泊中の船上測位とほとんど同じ傾向を示していることが分かる。しかし、いずれも系統誤差は数cm程度発生しているため、系統誤差の発生原因を分析することが今後の課題であるといえる。

参考文献

(1) 高須知二：搬送波位相測定値による精密測位の理論及び解析処理，
http://gpspp.sakura.ne.jp/tutorial/html/gps_symp_2005_2.htm, 2016.8.

付録3 精密暦で使用される座標系

はじめに

2.2.1において、精密暦の仕組みや精度について議論したが、本付録では、精密暦を作成する際に使用される座標系について、従来の単独測位で使用される航法メッセージ(エフェメリス)の座標系と比較し説明する。

精密暦で使用される座標系

IGSやMADOCAが提供する精密暦の座標系はITRF(国際地球基準座標系:International Terrestrial Reference System、ITRF)によって与えられている⁽¹⁾⁽²⁾。従来の単独測位では、各衛星からエフェメリスが送信されるが、エフェメリス生成時に使用される座標系は衛星ごとに異なる。GPSはWGS84(世界測地系84:World Geodetic System 1984 以下、WGS84)に準拠する一方、ロシアのGLONASSはPZ-20(Parametry Zemli 1990 以下、PZ-90)に準拠し、QZSSはJGS(日本衛星測位測地系:Japan satellite navigation Geodetic System 以下、JGS)に準拠しているように、使用される座標系は衛星ごとに異なる⁽³⁾。しかし、PZ-90はWGS84との変換パラメータより、地表で最大10mの差があることに加え、40cmの差があると報告されている⁽³⁾。WGS84は1cm程度の精度で一致している⁽³⁾ことを考えれば、GLONASSの航法メッセージには誤差が生じているといえる。一方、JGSの場合、GPSとの座標系オフセットは2cm以下であり、航法メッセージの誤差は小さい。しかし、衛星ごとのエフェメリス誤差はPPPのような高精度測位には大きな影響があるため、正確な衛星軌道の推定が必要である。基本的には、全衛星とも精密暦の座標系はITRFで統一されており、ITRFの精度はmm級であるため、精密暦の推定はどの衛星においても正しく行われているといえる。

参考文献

- (1) IGS : IGS Products, <https://igsceb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>, 2016.8.
- (2) 高須知二・遠藤邦治・中野将弥・三吉基之・河手香織・小暮聡 : MADOCAによるPPP-AR機能の拡張と評価, http://gpspp.sakura.ne.jp/paper2005/ukaren2015_ttaka_paper.pdf, 2016.8.
- (3) 国土地理院 : 表 3-1 各衛星系の準拠時刻系及び座標系の一覧表, <http://www.gsi.go.jp/common/000070971.pdf>, p.33, 2016.8.