

【2019年度JKA機械振興補助事業】

「準天頂衛星「みちびき」の海洋分野での活用
促進に向けた調査研究」研究会

研究会報告書

一般財団法人

ニューメディア開発協会

2020年3月



競輪の補助事業

本研究は競輪の補助を受けて実施しました。
<http://hojo.keirin-autorace.or.jp>

2019 年度 JKA 機械振興補助事業

準天頂衛星「みちびき」の海洋分野での活用促進に向けた調査研究

研究会報告書

2020 年 3 月 26 日

国立大学法人東京海洋大学

目次

1. 総論	1
2. はじめに	2
3. 関連研究等の動向、準天頂衛星の補強データと技術課題の全容	4
3.1 関連研究調査	4
3.2 準天頂衛星の補強データ	8
3.2.1 CLAS	9
3.2.2 MADOCA PPP	13
3.2 技術課題の全容	15
4. 各種活用事例の紹介	17
4.1 着棧支援、自動化技術について	17
4.2 MADOCA を利用した波浪計測について	20
4.2.1 波浪計測	21
4.2.2 GNSS による可降水量の推定	23
4.3 船位保持システム (DPS) について	24
4.4 海洋土木事例について	26
4.5 船舶識別 (AIS) 技術について	31
4.6 船舶での GNSS の利用について	34
4.7 活用事例のまとめ	36
5. 海上実証実験について	41
5.1 海上実験 1 (汐路丸、夏季、東京湾館山付近まで)	41
5.1.1 CLAS の評価結果	43
5.1.2 MADOCA PPP の評価結果	47
5.2 海上実験 2 (小型船やよい、夏季、東京湾河川付近)	51
5.2.1 CLAS の評価結果	53
5.2.2 MADOCA PPP の評価結果	57
5.3 海上実験 3 (汐路丸、冬季、東京湾館山付近まで)	60
5.3.1 CLAS の評価結果	63
5.3.2 MADOCA PPP の評価結果	67
5.4 海上実証実験のまとめ	70
5.5 CLAS の初期収束時間について	71

【参考資料】

- 参考資料 1 : 高精度衛星測位情報を用いた新たな活用事例 松岡委員 (SPAC)
- 参考資料 2 : 国研の安全への取り組み (着棧支援、自動化技術)
斎藤委員 (海上技術安全研究所)
- 参考資料 3 : MADOCA システムの波浪計測 五百竹委員 (GPAS)
- 参考資料 4 : 船位保持システム (DPS) 檜野委員 (川崎重工)
- 参考資料 5 : 海洋土木事例について (深淺測量) 栗原委員 (アカサカテック)
- 参考資料 6 : 海洋土木事例について (海外事例含む) 菊池委員 (東洋建設)
- 参考資料 7 : 船舶識別 (AIS) 技術 近藤委員 (古野電気)
- 参考資料 8 : 船舶位置情報把握 高良委員 (日本無線)

1. 総論

準天頂衛星「みちびき」の海洋分野での活用促進に向けた調査研究において、特に cm 級の補強信号の実験及び評価、それら評価結果に対する議論、今後社会において実用化が期待される分野等について報告がなされた。研究委員会は 5 回行われ様々な議論がなされた。今回の調査結果がもちろん全てではないが、以下のような方向性を見出すことができた。

- ・みちびきの cm 級の補強信号を利用できる市販の評価受信機が複数社よりでてきた。さらにチップ化が進められており、本格的なマスマーケットへの導入が期待される。
- ・みちびきによる補強信号の実際の海上での性能は、CLAS は公称値に近い結果であった。MADOCA PPP も同様（収束後、水平 10cm 未満の精度）であったが、まだ実運用されていないため、公称値は示されていない。
- ・今後、日本全域かつ 1 年以上の長期に渡る性能評価結果が待たれる。
- ・委員会に出席された委員の方々より、高精度測位への利活用場面が確かにあることがわかった。すでに RTK という手法が現場で浸透していることもあり、RTK をすでに利用されている企業にとって、CLAS や MADOCA PPP で代用できるものかどうかに興味があり、もし代用できるのであれば、実際に導入に進むのではないかと予想される。
- ・一方、cm 級の高精度測位まで必要のない場面もあり（1m 未満程度で良い）、SBAS や次期 SBAS が期待されるアプリケーションも存在する。
- ・精度の面だけでなく、位置の信頼性が問われる時代になっていることがわかった。干渉や Spoofing に対する対処が必要となってくる。みちびきより認証信号を放送することが期待されている。

以上が本研究委員会での準天頂衛星「みちびき」の海洋分野での活用促進に向けた調査研究における方向性の結論である。実際に実運用で利用いただくためには、RTK や CLAS 及び MADOCA PPP に対応した受信機を開発及び販売している現場の方々にそれぞれの測位方式の違いを理解いただき、CLAS や MADOCA PPP で代用できるものであれば、ユーザに利用を促していただくことが重要である。あわせて、現在の評価受信機の形態では、まだコスト面等でおりあわないユーザもおられることが予想されるため、さらなる小型化と低コスト化が重要である。

2. はじめに

内閣府第3期海洋基本計画の「総合的な海洋の安全保障」や「海洋の産業利用促進」の施策を背景に、2018年11月から正式サービスが始まる準天頂衛星「みちびき」によるcm級の高精度測位情報を海洋で活用した、安全・安心社会の実現に向けた関連ビジネス展開への期待は大きい。高精度測位情報の活用が見込まれる例として、以下が挙げられる。

- ・様々な船舶において、自走操舵の可能性が高くなる
- ・接岸支援の操作者は、接岸作業においてより安全に操舵可能となる
- ・海洋での建設工事において、より正確な作業が可能となり、事故防止に繋がる
- ・プレジャーボートの操縦者は、より操作性の高い操縦が可能となる
- ・海洋調査事業者は正確な調査場所がわかり、精度の高い調査が可能となる

海洋ビジネス従事者にとって、高精度な測位情報は大きなポテンシャルを持っており、様々な活用により大きなイノベーションが期待でき、その活用領域の明確化が必要である。そこで、JKA補助事業として、「準天頂衛星による高精度測位情報の海洋分野での活用検討に向けて」という研究テーマをニューメディア開発協会が受託し、本研究委員会を2019年度に5回開催した。本テーマでは、準天頂衛星「みちびき」による高精度測位情報を海洋分野に適用する際の、活用適用領域、アプリケーション、課題等を検討・分析し、海洋での活用ビジネス領域を明確化し、ビジネス活性化に向けた取り組みについて議論した。実際の研究会の活動として、海洋での高精度衛星測位情報の受信、分析、評価を実証実験として行い、衛星測位情報の有効性を確認し、実践的な検討を行った。

本研究会に参加したメンバーと役割は以下の通りです。

所属	氏名	専門、領域
東京海洋大学	(委員長) 久保 信明	GNSS 全般
防衛大学校	(委員) 浪江 宏宗	GNSS 全般
静岡大学	(委員) 木谷 友哉	ITS、GNSS 全般
海上・港湾・航空技術研究所	(委員) 斎藤 詠子	船舶制御全般
一般財団法人衛星測位利用推進センター	(委員) 松岡 繁	GNSS 応用全般
株式会社アカサカテック	(委員) 栗原 由知	測量機器全般
川崎重工業株式会社	(委員) 檜野 武憲	船舶全般、DPS
グローバル測位サービス株式会社	(委員) 五百竹 義勝	GNSS 全般
東洋建設株式会社	(委員) 菊地 錬	海洋土木全般
日本無線株式会社	(委員) 高良 裕二	船用機器全般
古野電気株式会社	(委員) 近藤 仁志	GNSS 全般
マゼランシステムズジャパン株式会社	(委員) 永津 啓二	GNSS 全般

上記の専門家の方々より、各分野の話題提供を頂くことと合わせて、海上実証実験の結果を、本研究会で展開し議論を深めることができた。海上実証実験では、マゼランシステムズジャパン製受信機を利用することで、CLAS 及び MADOCA PPP の海上での実性能を把握することができた。特に、最後の 2020 年 1 月の評価結果では、3 日間の実験を通して、良好な結果を得ることができた。実験の時期を夏と冬で分けることで、電離層や湿度等の影響を評価することもねらいにあった。結果として冬の時期の測位性能が最も良好であったことから、対流圏や電離層の影響が少ない時期に性能が出やすかったといえるが、詳細な検証まではいかなかった。

参加された委員の方々からは、cm 級の高精度測位が必要とされるアプリケーションがあることが示され、みちびきの補強信号が、実運用レベルでの利用に耐えうるものかの判断の一助になったと伺っている。本研究会での検証だけでなく、様々な場所での評価結果の待たれるところであるが、社会実装に向けて、本研究会の成果が少しでもお役に立てばと考えている。

3. 関連研究等の動向、準天頂衛星の補強データと技術課題の全容

ここでは、みちびきの海洋分野での利活用調査結果と、みちびきの補強データに関して紹介する。

3.1 関連研究調査

内閣府のみちびきのホームページにみちびき最新情報が掲載されており、利活用事例も紹介されている。その中で、2018年度と2019年度に、みちびきの補強データを利用した実証実験の公募がなされ、企業の方々が応募し実際に各年で10件以上採択されていた。採択された実験を以下の表3.1（2018年度）と表3.2（2019年度）に示した。2018年度は、主にCLASの補強信号による実験が多く、2019年度はまどかPPPの補強信号による実験が多く見受けられた。海洋分野に目を向けると、2018年度は自動運航船システムの実現に向けた取り組みが紹介されており、2019年度は深淺測量・堆積ヘドロ測定に関するもの、プレジャーボートでの自動着岸、自動操舵に関するもの、そして浮体式波高計測システム等が紹介されている。いずれも、cm級の位置精度があって実現可能な利活用分野であり、今後の発展が期待されている。海洋では、通常のRTK測位方式では補正データが物理的に届かなかつたり、基準局からの基線長が数10kmを超えると、RTK測位自体できなくなるため、みちびきのように衛星から補正データを送信することに大きなメリットが存在する。特に遠洋では、まどかPPPのように、精密暦と精密クロックを送信することで、受信機側で数cmの精度を導くことが重要となってくる。もちろん、数cmの精度を必要とするアプリケーションがあればの話である。

表 3.1 みちびきを利用した実証実験公募に採択された実験名と企業名（2018年度）

No.	実証実験名	提案企業名（代表企業）
1	高精度位置情報を利用した排雪業務の高度化および実用化実証	雪国よこて排雪作業軽減対策コンソーシアム（代表企業：株式会社デジタル・ウント・メア）
2	みちびき・GNSSを利用した屋内における時刻・タイミング情報を利用するにあたっての信頼性、担保性確保の手法に関する実証実験	一般社団法人屋内情報サービス協会（TAIMS：The Association of Indoor Messaging Service）
3	自動運航船システムの実現に向けた「みちびき測位補強サービス」活用による洋上での高精度衛星測位の实証実験	川崎重工業株式会社
4	みちびきを利用した車両とドローンの複合物流	株式会社ゼンリンデータコム
5	位置認証の社会実装を想定したQZSS測位精度基礎技術実証	株式会社ゼンリン
6	列車制御を目指した準天頂衛星利用の実証評価研究	株式会社京三製作所
7	空のインフラ構築に向けたドローンによる効率的な空域利用の実証	株式会社ゼンリン
8	QZSSとSLAM技術を融合した高精度自律型BRDFスペクトル計測システムの実証	株式会社ポーラスター・スペース

表 3.2 みちびきを利用した実証実験公募に採択された実験名と企業名（2019 年度）

No. 実証実験名	提案企業名（代表企業）
1 連作障害防止アプリケーション「高精度農地管理システム」の開発・実証実験	アクリーグ株式会社
2 「みちびきのサブメータ級測位補強を付加した無線ICタグ」による物流管理	株式会社エクスプローラ
3 みちびき受信機と機械学習を活用した浮体式波高計測システムの実証実験	株式会社環境シミュレーション研究所
4 ‘みちびき’ のCM級補強サービス(MADOCA)の海外測量適用実証実験	国際航業株式会社
5 MADOCAを活用したアフォーダブルなドローン観測サービス構築実証実験	株式会社マイクロネットワークテクノロジーズ ※11月1日付で社名変更につき、表記変更いたしました。
6 みちびきを活用した深淺測量・堆積ヘドロ測定の実証実験	株式会社四門
7 MADOCA PPP高精度位置情報を使ったマイクロEV自動運転の実証実験	東海クラリオン株式会社
8 みちびきとセンサーフュージョンによる鉄道沿線の安全な位置検知の検討	西日本旅客鉄道株式会社
9 「みちびき」を利用した視覚障がい者のスポーツ介助支援システム	株式会社ニュージャパンレჯ
10 プレジャーボートの「ピタット自動着岸」、「入れ食い自動操舵」実証実験	ニュージャパンマリン九州株式会社
11 みちびきを活用した走行車両(モビリティ)における地震等災害対策に関する実証実験	三菱スペース・ソフトウェア株式会社

2016 年度に、私の所属する研究室の学生が国際学会（2016 年 9 月の米国航法学会）で発表した内容も海洋に関連するものであり[引用]、その目的は、これまで津波検知用に利用されている海洋ブイは RTK 測位方式が利用されていたが、PPP 測位が利用できれば、ブイを現状の 10-20km からさらに離すことができ、基線長の制約をうけない利用が可能となる。さらには、多くの船舶に設置することで、PPP 測位による cm 級の波高が把握でき、海洋気象の 1 つのセンサーとして利用できるのではないかという事の検証目的もあった。2015 年の夏季の 40 日間の日本からシンガポール及びオーストラリアまでの実験データを、海技教育機構の練習船である銀河丸を利用し取得した。解析に利用した PPP は、トリンプル社が運用する RTX（赤道付近の静止衛星であるオムニスター）とみちびきより放送されているまどか PPP の 2 つであった。図 3.1 にトリンプル社のシンガポールから神戸までの PPP ができた割合を示す結果を示す。図 3.2 にみちびきの MADOCA 信号によるシンガポールから神戸までの PPP ができた割合を示す結果を示す。いずれの方式でもほぼ 100%の割合で PPP ができており、商用の静止衛星そして、日本のみちびきから放送される PPP 用の補強データが受信できていることがわかった。シンガポールから神戸までの航海中の 24 時間分の両者の PPP 測位による楕円体高度の時系列結果を図 3.3 に示す。青色がトリンプル社の RTX による結果で、黄緑色が MADOXA の PPP による結果である。両者を比較するとよく一致していることがわかり、遠洋においても数 cm の精度で PPP 測位が可能であることがわかった。みちびきの場合、PPP の補正データを受信できる地域で、アンテナ設置場所がある程度開けていれば、船舶の精密高度計測ひいては、精密な海面高度計として利用できると考えられる。2020 年度時点で、みちびきは 4 機存在するため、補正データの受信という意味では、さらに利便性が改善されていることは間違いない。

http://www.denshi.e.kaiyodai.ac.jp/jp/assets/files/pdf/content/20160900_ION-GNSS_saito.pdf

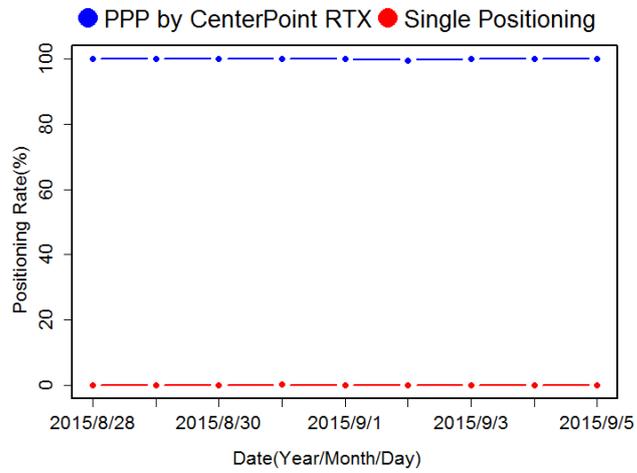


図 3.1 トリプル RTX でのシンガポールから神戸までの PPP 測位率

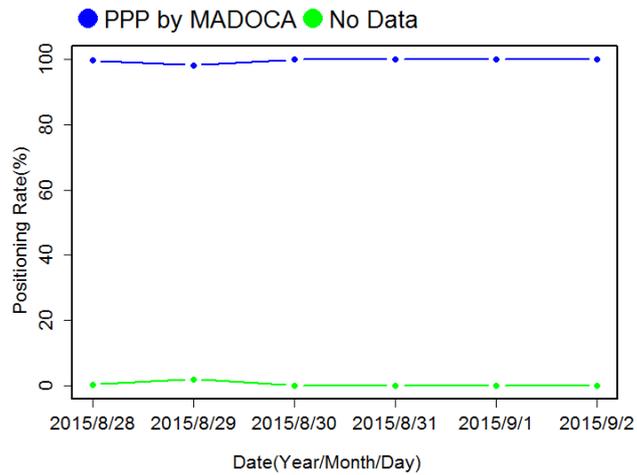


図 3.2 みちびき MADOCA でのシンガポールから神戸までの PPP 測位率

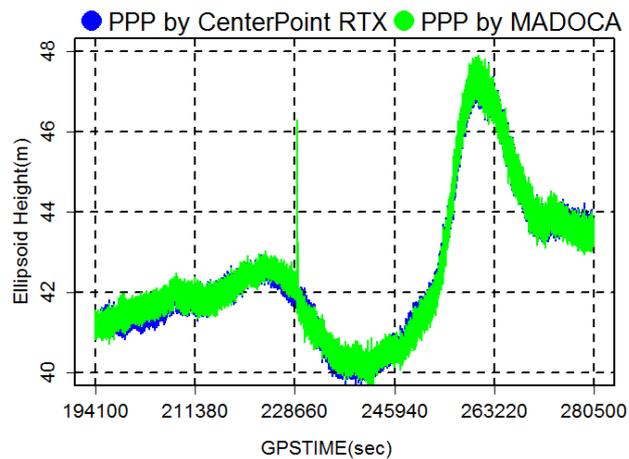


図 3.3 シンガポールから神戸までの航路の 1 日分の楕円体高度結果の比較

次に内閣府のみちびきのホームページに 2020 年 2 月 17 日付けで紹介されていた海洋でのアプリケーションを簡単に紹介する[引用]。みちびきの高精度測位に対応したブイでの海洋モニタリングを実現した事例である。図 3.4 に実証実験に利用した実際の海洋ブイと図 3.5 にその概要を示す。実証実験を行った環境シミュレーション研究所の伊藤氏によると、海洋モニタリングにみちびきの技術を導入するきっかけとなったのは、多くの漁業関係者から寄せられた要望であった。具体的には、船を出しても海が荒れて漁ができなければ大きな損失になるため、海の状況を安価でリアルタイムに把握できるシステムの実用化が期待されていた。気象庁の波高データは 5km メッシュのため、範囲が広すぎるため、コストをできるだけかけずにピンポイントで測定するため、直径が 40cm の小型ブイにみちびきの高精度測位に対応した受信機を搭載し、測位データをモバイル通信で送ることを考えたようである。特に標高データは、複雑な運動でも数値がダイレクトに出るので、波浪の状態を推定するのに有効である。みちびきを使ったシステムなら安価で小型に受信機を作れて、全国に数万個存在する小型ブイや、数万隻存在する漁船に搭載すれば、リアルタイムに広範囲の海域の波高データを収集できる。また海底地形データを精密に生成するために、船舶に搭載された高精度な測深機器とともに、船舶自身の高精度な絶対位置を、みちびきの高精度測位で得られた標高データを利用することができる。2020 年度中に、サブメータ級測位補強サービス対応モデル (SLAS) が約 35 万円、センチメータ級測位補強サービス対応モデル (CLAS) でも 100 万円以下で提供したいとのことであった。このような海洋ブイの実運用においては、取得結果をどのような通信で陸上へ送信するかと、どの程度の波まで対応できるかがキーとなると予想される。

https://qzss.go.jp/usage/userreport/esl_200217.html



図 3.4 センチメータ級とサブメータ級測位補強サービスの対応受信機を搭載した海洋ブイ

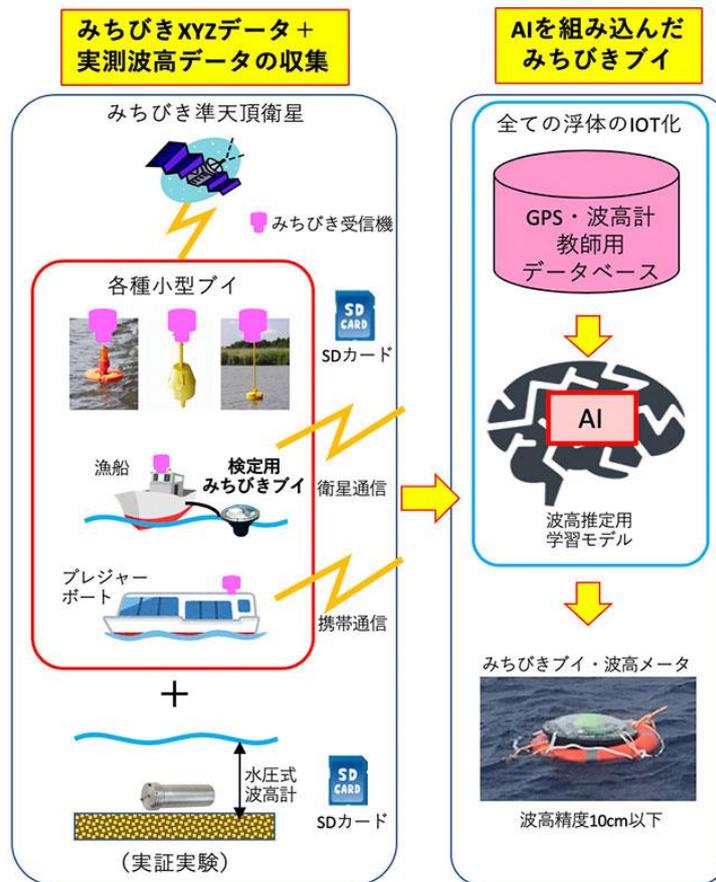


図 3.4 海洋モニタリングシステムの実証実験の仕組み

3.2 準天頂衛星の補強データ

準天頂衛星のセンチメートル級測位補強サービスが 2018 年 11 月 1 日より正式に開始された。また技術実証という形態ではアジア太平洋地域において高精度単独測位の補正データも放送されている。以下、この 2 つの補強サービスの実際の性能についてまとめた。

衛星測位では、補完と補強という語句が使われることが多く、補完は GPS に対して準天頂衛星を追加することで、衛星数が増えることによる効果をあらわしてる。一方、補強は、衛星数が増える効果ではなく、補正データを受信することで、その測位精度が向上する効果をあらわしている。ここでは、センチメートル級測位補強サービスを CLAS (Centimeter Level Augmentation Service)、高精度単独測位用補強サービスを PPP(Precise Point Positioning)と呼ぶ。どちらの補強データも準天頂衛星の L6 信号より放送されており、他の GNSS とは明確に異なるサービスである。CLAS は L6D チャンネル、PPP は L6E チャンネルと割り当てられている。この L6 帯の中心周波数は 1278.75MHz で、通常の L1, L2 帯の信号と異なる周波数のため、専用のデコード部が必要となる。本稿で紹介する実験結果は、この L6 帯の信号をデコードし、L1, L2 帯等の信号で高精度測位演算処理を行う機能のある市販受信機 (マゼランシステムズジャパン製) によるものである。

3.2.1 CLAS

CLAS は準天頂衛星の L6 信号を用い、補強情報サービスである RTCM(Radio Technical Commission for Maritime Service) SC-104 における RTK-PPP(Real Time Kinematic – Precise Point Positioning)に対応する補強情報を日本全土に送信するサービスである。日本の測地系に整合する位置情報をユーザーが得られるように、国土地理院の全国約 1300 か所に設置された電子基準点と、GEONET 中央局からなる GNSS 連続観測システムを利用した多周波の擬似距離と搬送波位相の観測データ、そして各電子基準点の位置を用いセンチメートル級の補強情報を生成する。

補強情報は衛星軌道誤差、衛星クロック誤差、衛星毎のコードバイアス、衛星コードバイアス、衛星位相バイアス、対流圏誤差、電離層誤差の情報が含まれ、利用者はこういった情報の受信後 1 分以内に L6 信号で補強し、センチメートル級測位を可能にする。補強情報に含まれるメッセージは RTCM STANDARDS 10403.x section 3.5.12 の SSR メッセージを衛星送信用に圧縮した Compact SSR メッセージとして定義される。

SSR(State Space Representation)とは、電子基準点の観測データから推定される各誤差成分の表現方法のことで、従来の DGNSS や RTK 測位が基準点を基準とした相対的な補正データであるのに対し、基準点に依らない絶対量の補正データである。SSR によって衛星クロック誤差、衛星軌道誤差、衛星信号バイアス、電離層伝搬誤差、対流圏伝搬誤差に対する補正データ配信のフォーマットが規定され、CLAS では日本全土に配置された電子基準点の連続観測データから SSR データを生成し、センチメートル級の補正情報を配信する。ここで補正信号の内容である誤差要因の基本的な内容についてそれぞれ確認する。

衛星クロック誤差

GNSS 受信機では GPS 衛星が放送している測位信号を受信して位置の計算を行うが、GPS のように電波によって距離を測定する場合、送信時刻と受信時刻の差を正確に測位する必要がある。ただし、測位の際に、電波の到着した時間を正確に求めることと送信機(GNSS 衛星)と受信機の間で正確な時計を共有することが必要である。電波の到着した時刻を正確に求めるには、電波の位相を用いる手法がとられる。位相の想定精度はおおよそ 1 周期の波長の 1/100 程度であり、使用する電波の波長の 1/100 程度の精度で距離を算出できる。

また、送信機と受信機の間で正確な時計を共有するには両方で正確な時計を備えていることが必要となるが、GNSS 衛星には原子時計を搭載することでこの問題を解決している。原子時計とは、セシウムやルビジウム等の原子が発する光の波長を利用して精度 10^{-12} 程度を得る。GNSS 衛星に搭載された原子時計の時刻誤差はそれぞれ測定されていて、受信機側でこれを補正することで、より正確な時刻情報を得ることが可能となる。受信機側でも原子時計を搭載すれば、正確な時計を共有できるが原子時計は高価で扱いが難しいため、通常の受信機では受信機の持つ誤差を想定して距離を測定し位置を計算している。

衛星軌道誤差

GNSS 衛星を利用して位置を測定する場合、衛星の位置を事前に求めておく必要がある。この時に衛星の位置情報に誤差があると、それが直接測位結果の誤差につながる。GNSS 衛星の軌道は正確に予測されて航法メッセージとして放送されているが、時間の経過とともに精度に数 m~10m 程度の誤差が出てしまう。現在は精密軌道暦という精度約 5cm のものを IGS(international GPS service)という国際的な機関が作成しているが精密な測位を行う際には、逐一補正情報で補う必要がある。

電離層遅延

電離層を通過する際も衛星からの信号に遅延が生じる。大気圏では気体分子が X 線や紫外線などの影響で電離することで、電離層と呼ばれる自由電子の密度が高いプラズマ状の空間が発生する。電離層の状態は太陽活動の活発さや季節、時刻、場所などの要素によって変化し、GNSS 衛星からの信号はこれらの要因によって大きく影響を受ける。一般に電離層遅延は、TEC と呼ばれる受信機と衛星間の視線方向の総電子数（視線方向の電波の伝播経路に沿って積分した値）に比例し、搬送波位相の周波数の 2 乗に反比例することが知られている。

対流圏遅延

GNSS 信号は乾燥空気(窒素や酸素など)および水蒸気などからなる地球大気の下層部分によっても屈折の影響を受ける。電離層ではその遅延は搬送波周波数の 2 乗に反比例に依存するが、対流圏での遅延つまりその屈折率は周波数に依存しない。この遅延量は GNSS 信号から求めることができない為、モデルを用いることが必要となる。信号に含まれる対流圏遅延量はその経路に沿った気体の屈折率に依存する。気体の屈折率はその気体の密度に依存しており、乾燥大気成分と水蒸気成分の密度の合計として表わされる。大気中の乾燥大気と水蒸気はそれぞれ衛星からの信号に影響を与えるので別々にモデル化される。乾燥大気での屈折率は緯度、季節及び高度に依存しており比較的安定している。しかし、水蒸気中のモデル化は、水蒸気の密度が地域ごとの天候に左右されやすく短い周期で変化するため非常に難しい。だが、幸いにもほとんどの対流圏での遅延量は予測可能な乾燥大気によるものである。

みちびきではセンチメートル級補強情報として L6 信号を配信している (CLAS は L6D チャネル)。L6 信号は伝送帯域 2kbps と少ないため L6 信号として配信するには、SSR データを 1/1000 程度に圧縮する必要がある。以下の表 3.3 に補強情報とその間隔を示す。

表 3.3 補強情報と更新間隔

項目	更新間隔
衛星軌道補正	30 秒
衛星クロック補正	5 秒
対流圏伝搬補正	30 秒
電離層伝搬補正	30 秒

衛星クロック誤差は5秒ごとで更新し、衛星軌道誤差、電離層伝搬補正情報、対流圏伝搬補正情報は30秒毎に更新される。また、日本全土の電離層伝搬補正情報、対流圏伝搬補正情報を一度に送信するのはビットレートの制約上できないので、日本全土を約50km間隔でグリッドに区切り、そのグリッド毎のそれぞれの補正情報を送信する。こうした圧縮によって生成されたCompact SSRのメッセージ伝送容量は付加情報を含めて2kbpsとなる。ユーザーは準天頂衛星からのL6信号を受信することによって既知の基準点を設置する必要なしにセンチメートル級測位補強サービスを受けることができる。受信機はセンチメートル級測位補強メッセージを受信したのちに圧縮データを伸長して測位計算を行う。以下の図3.5で補正情報の処理フローについて示す。

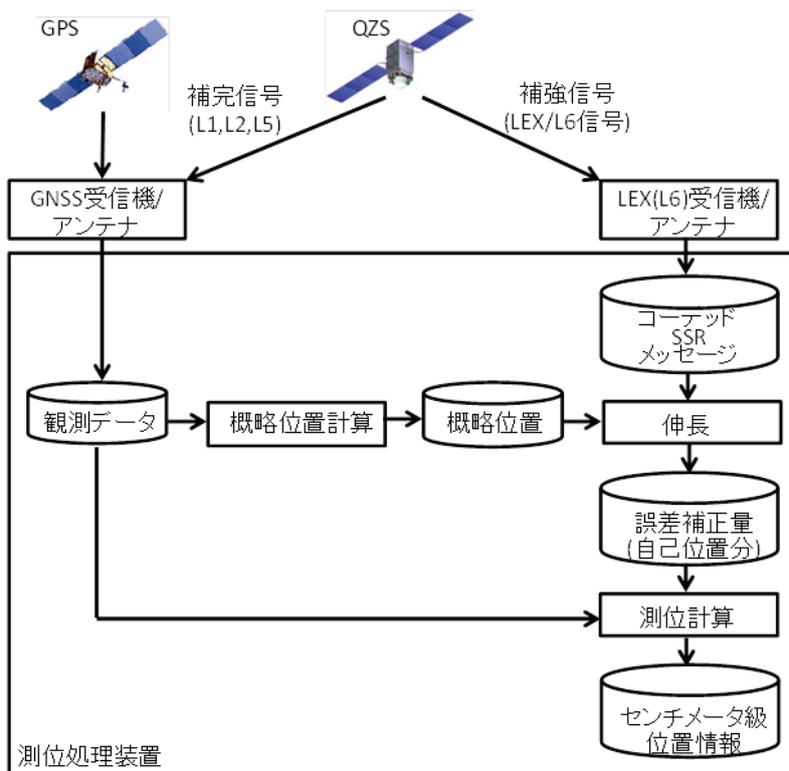


図 3.5 補正情報処理フロー

まず、従来と同様に GNSS 衛星から観測データを受信する。受信した観測データから位置計算を行い、大まかな位置を特定する。同時に L6 信号を受信可能な受信機を利用して補強信号を受信する。受信した Compact SSR メッセージを、観測データから計算した概略位置を利用して伸長し、誤差補正量を生成する。CLAS で利用されている技術は、RTK の二重差であるため、上記で述べた誤差補正量を受信し最終的には二重位相差の RTK で測位を行い、センチメートル級測位を実現する。

CLAS のサービス範囲を以下の図 3.6 に示した。CLAS はいわゆる RTK 方式のため、日本全国にちりばめられている電子基準点のデータを選択して利用し補正データを生成している。従って、サービス範囲は日本列島全体となる。CLAS のおおよその精度は静止状態の水平方向で約 6cm、移動体の水平方向で約 12cm となっている。CLAS の場合は、RTK 方式のため 1 分程度で上記の精度を満足するように設計されている。表 3.4 に CLAS の公称精度を示した。

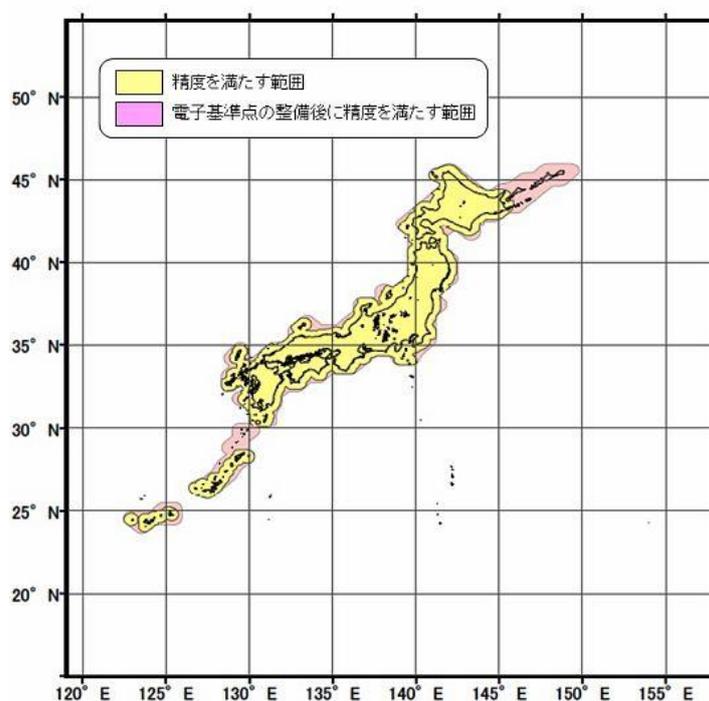


図 3.6 CLAS のサービス範囲 (内閣府 WEB みちびきサイト)

表 3.4 CLAS の精度 (内閣府 WEB みちびきサイト)

種別	測位誤差		備考
	水平	垂直	
静止	<6cm (95%)	<12cm (95%)	(※1)
	(3.47cm (RMS))	(6.13cm (RMS))	(※2)
移動体	<12cm (95%)	<24cm (95%)	(※1)
	(6.94cm (RMS))	(12.25cm (RMS))	(※2)

(※1) 補強後のユーザレンジ精度 (SIR-URE; Signal In Reference User Range Error) は、以下を満足する。

- SIR-URE $\leq 0.08\text{m}$ (95%)

(※2) ユーザセグメントにおける精度を満足するための利用条件は、以下を想定している。

- PPP-RTK 測位演算では、L6D メッセージに含まれる補強対象として有効である全ての衛星及び GNSS を使用している。
- 観測データ (搬送波位相) で、サイクルスリップが発生していない補強対象の衛星が 5 衛星以上である。
- 仰角マスクが 15° である。
- 補強対象衛星による平均的な測位精度劣化係数 (DOP; Dilution of Precision) が以下の環境である。

水平 : 1.1 以下

垂直 : 1.8 以下

- マルチパス誤差 (環境に起因するユーザ測距誤差) が、以下の環境である。

コード : 34cm (RMS) 以下 (衛星毎)

搬送波位相 : 0.75cm (RMS) 以下 (衛星毎)

- 受信機ノイズが、以下の精度である。

搬送波位相 : 0.30cm (RMS) 以下 (衛星毎)

- アンテナ位相中心誤差が、0.30cm(RMS)以下 (周波数毎) である。

3.2.2 MADOCA PPP

MADOCA PPP も準天頂衛星を利用した精密測位の 1 つである。MADOCA (Multi-GNSS Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock Analysis) とは内閣府が行う複数 GNSS に対応した高精度軌道・時刻推定のためのソフトウェアであり、精密単独測位である PPP を行うのに必要な補正情報を準天頂衛星からの L6 信号及びインターネット経由で配信される。L6 信号に関しては、補正情報から L 信号を生成する機能によって L6 フォーマットとして準天頂衛星の地上システムであるマスターコントロールステーションから、追跡管理局(Tracking & Control Station)を経て準天頂衛星に送信され私たちユーザー側に PPP 用補強情報がリアルタイムで配信される。また、インターネット経由に関しては、補正情報を RTCM SSR(Ratio Technical Commission for Maritime services / State Space Representation)フォーマットとして NTRIP(Networked Transport of RTCM via Internet Protocol) Caster 経由で配信される。以下の図 3.7 に MADOCA PPP のシステム概要について示した。2020 年度時点で、GPS、QZSS、GLONASS の精密暦と精密クロックが放送されている。

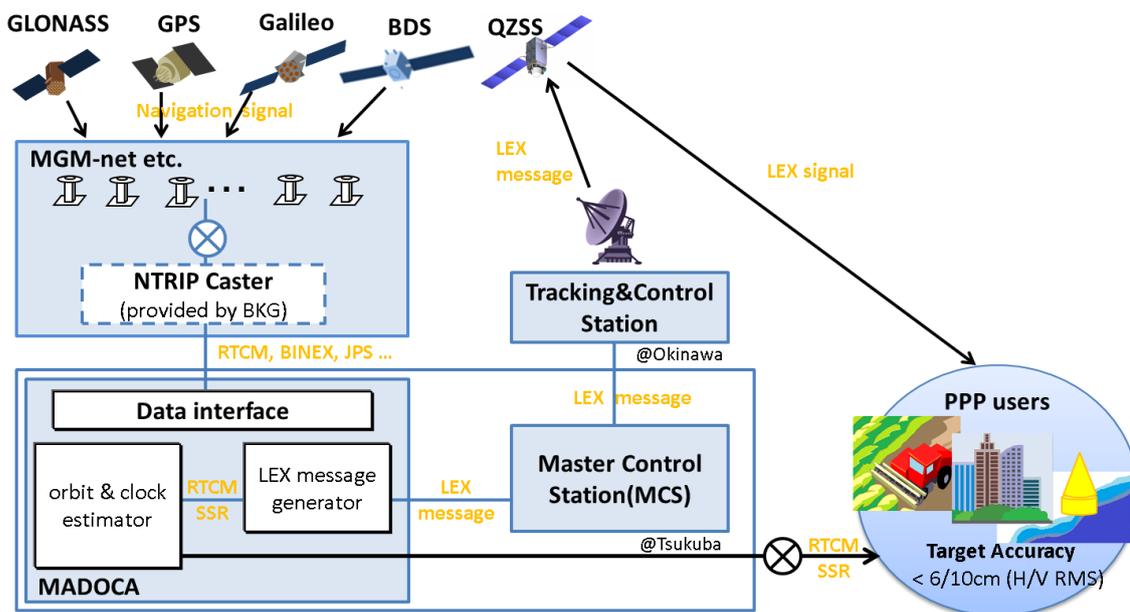


図 3.7 MADOCA PPP のシステム概要

次に PPP 測位について説明する。PPP(Precise Point Positioning)とは、受信可能な全衛星の精密軌道暦とクロックデータを衛星から補強情報として送信し、受信機と衛星間を搬送波で直接測定するものである。PPP には厳密には、精密軌道暦と、衛星クロックデータを入手し、衛星軌道誤差と衛星クロック誤差のみを解消する方式だが、電離層伝搬遅延や、対流圏伝搬遅延の誤差解消にも対応したのもでてきている。さらに PPP でも搬送波位相のアンビギュイティを解くバージョンもあり、PPP AR と呼ばれる。なお初期化時間を短縮し、再初期化を瞬時にを行う手法も一般的には、単に PPP と呼ばれることも多い。RTK などの高精度測位との最大の相違点は、近傍に基準局の設置の必要がないことである。また、GNSS の精密衛星軌道暦と、衛星クロックデータは、全世界共通なので、PPP は全世界で利用が可能のため、後処理解析で、インターネット配信された補正データを利用して PPP 測位を行うことも可能となる。この方式を実現するためには、全世界に観測局 (GNSS Reference Station) を配備して、過去と現在の衛星配置を監視し、現在と未来の衛星配置情報、つまりは「精密軌道」を高い精度で計算し、計算結果を衛星にアップリンクすることで、衛星からユーザ側の受信機へ配信することが可能となる。精密軌道と、衛星のクロック情報を静止衛星から提供することで、PPP アルゴリズムが搭載され、2 周波の搬送波位相による測位が可能で、GNSS 受信機であれば、10cm 未満の精度を実現可能となる。

表 3.5 に MADOCA の精密暦と精密クロックのおおよどの精度を示した。1ns は光速で 1 秒間に約 30cm 進む間隔である。なお、MADOCA PPP の実際の運用を想定した働きかけは、グローバル測位サービス株式会社が担当している (<https://www.gpas.co.jp/service.php>)。

表 3.5 MADOCA のおおよその精度（精密暦と精密クロック）

Product	オフライン			リアルタイム		
	GPS	GLONASS	QZSS	GPS	GLONASS	QZSS
暦	3cm	7cm		6cm	9cm	
クロック	0.1ns	0.25ns		0.1ns	0.25ns	

https://ssl.tksc.jaxa.jp/madoca/public/public_index_en.html

3.2 技術課題の全容

技術課題の全容を述べる前に、国内の高精度測位サービスの概要と各測位サービスの特徴を以下にまとめた。図 3.8 は高精度測位サービスの概要をまとめたものである。日本測量協会が運用されている VRS サービスに始まり、みちびきからは数年前より、PPP の補正情報が試験的に放送されていた。2018 年になり CLAS/SLAS が正式に運用開始となり、それと同時期に携帯電話の会社より、携帯基地局に設置した GNSS 基準局からの RTK 測位サービスが開始された。数は少ないが、ライバルがひしめいている状況である。図 3.9 に各測位サービスの特徴について、その精度と収束時間の観点より示した。RTK 測位は収束時間と精度の観点よりこれに勝てるものではなく、近くに基準点と通信環境さえあれば、誰でも利用できるサービスである。VRS は近くの基準点がなかったときに有効なサービスで、現在では RTK 測位サービスと競合しているものと予想される。CLAS と PPP は上記でも述べてきた通りで、無料で放送されているため、価格の面では有利である。一方、これら 2 つのサービスで満足できるアプリケーションがどの程度あるかが重要となってくる。もちろん有料の RTK 測位サービスや VRS のサービスとの競争も考えられる。

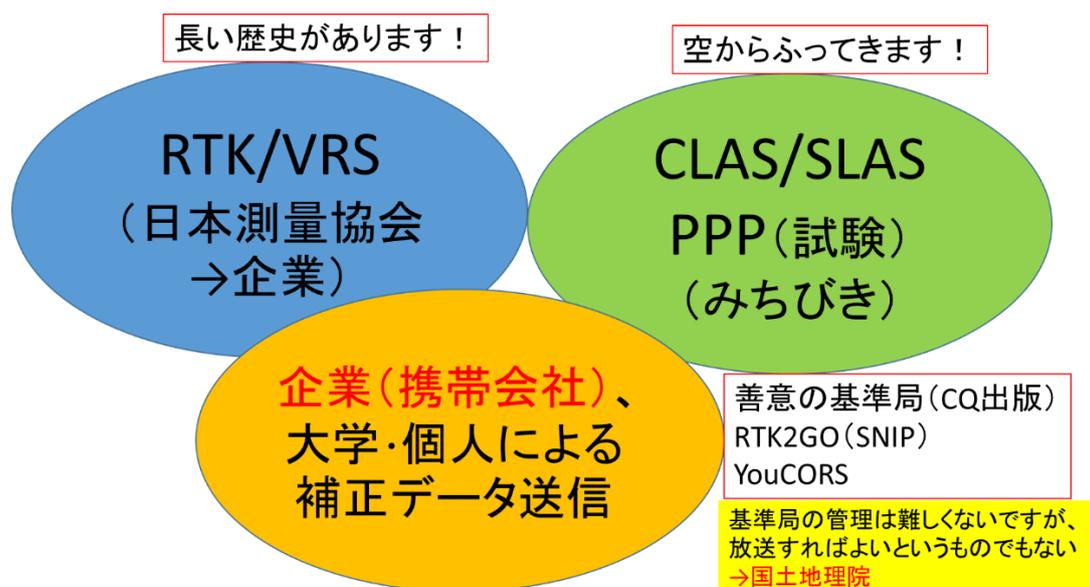


図 3.8 国内の高精度測位サービスの概要

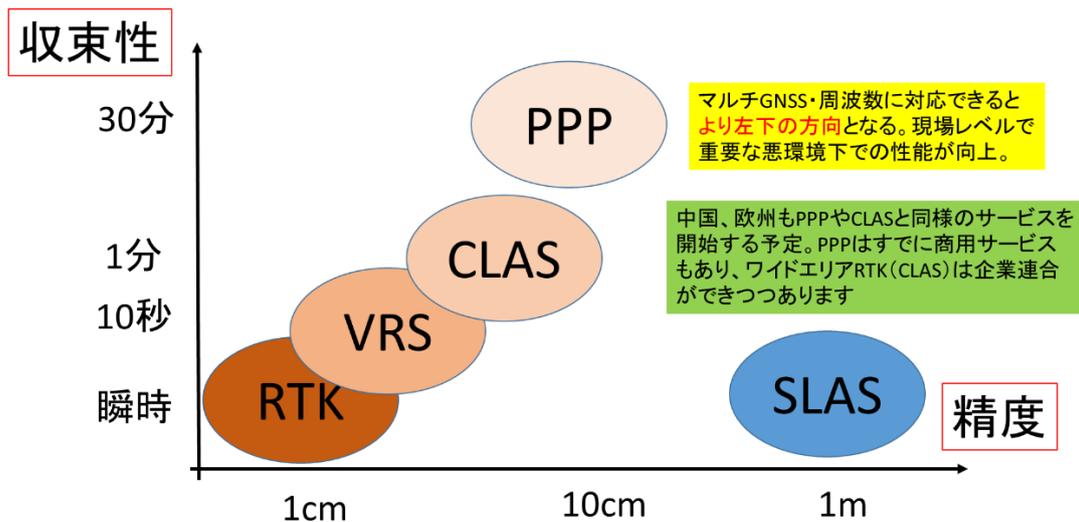


図 3.9 各種測位サービスの特徴

CLAS 及び MADOCA PPP における技術的な課題について、それぞれ以下に列挙する。

CLAS の課題

- ・ CLAS は国内の電子基準点を利用したサービスであり、国外での利用ができない。自動車メーカー等は、国内よりもむしろ国外での競争力が重要となるため、国内のみでのサービスでは、訴求力が弱い。一方、国内での実証実験や実際の CLAS でのサービスを通して、内容を改善していくことで、国外に一定の基準点がある場合は、このシステムをそのまま流用できる。
- ・ 本報告書では、東京湾を中心とした実験結果であり、比較的安定した精度がでているが、実際には、国内のすべての地域かつ長期間で評価を実施する必要がある。国内のすべての地域かつ長期のデータで安定した性能（カタログスペック）を出せることが重要である。
- ・ 現時点において利用できる衛星数は、おおむね 11 機程度といわれている。オープンスカイで 11 機程度となるため、もし自動車や農機で障害物の近くを通る場合は、十分な衛星数を確保できない可能性が高い。L6 信号より放送できるデータ量に限りがあるなかで、いかに放送できる衛星数を増やせるかが重要である。
- ・ 現在、国内では携帯電話会社が、各社の基地局に GNSS 基準点を設置することで、RTK のサービスを開始している。これらサービスと CLAS はもろにライバル関係にあり、これら RTK サービスに対抗する必要がある。

MADOCA PPP の課題

- ・ MADOCA PPP の課題は、以前から言われているように、数 cm の精度になるまでの収束時間が長いことである。電離層や対流圏による正確な遅延量が手元にないと、15 分から 30 分要する。用途によっては、利用できるアプリケーションもあるが、特に移動するものに対しては、

使い勝手が悪い状況である。逆に収束時間以外の課題はそれほどなく、PPPに適したアプリケーションを見つけることが大事である。

・現時点で、みちびきからのMADCOCA PPPの補正メッセージには、PPP ARを実現するための情報が含まれていない。またGPSとみちびき、GLONASSには対応できているが、GALILEOとBDSの精密暦や精密クロックはまだ放送されていない。

4. 各種活用事例の紹介

ここでは、委員会に参加されたメンバーの方々の方々の発表資料をベースに、海洋分野でのGNSS高精度位置の活用例について紹介する。あわせて、私の所属する研究室で実施してきた内容についても部分的に付加している。

4.1 着岸支援、自動化技術について

ここでは、国研の海上技術安全研究所での取り組みを中心に紹介する。自動運航技術、輸送システムはこの研究所の重要研究課題の1つである。自動運航船の研究において、考えられる項目は5つ挙げられている。

- ・機械による自動操船
- ・遠隔からの操船支援
- ・自動離着岸操船
- ・機関の監視
- ・故障の予知

上記の中でも、自動離着岸操船は高精度測位技術の活用が不可欠な機能と考えられている。離着岸操船は、船舶を岸橋から離し、湾内まで到着させること。着岸操船とは、湾内に到着した船舶を岸橋に接岸させることをそれぞれ意味する。このとき、プロペラ・舵・スラストという2つのアクチュエータを用いて、船舶の進路・速力・船首方位を制御する。着岸操船の一例を以下の図4.1に示した。この図に示したように、操船者は、自身の経験をもとに離着岸操船を行う。比較的小型の船舶では、風等の外力の影響を受けやすく、操船者には高い技量の操船が要求される。内航船では、航海距離が短く頻りに離着岸操船を行うため、操船者への負担が大きい。そのような背景のもと、操船者の負担を減らし、船舶の安全運航の向上に資する技術として期待できるのが、離着岸操船の支援と自動化である。船舶の正確な位置・進路・速力を連続的に把握しながら船舶を誘導させるためには、高精度な位置・進路・速力が必要となる。離着岸操船の自動化については、日本郵船や三井造船、川崎重工のような大手船会社で検討が開始されており、以下では、支援システムについて紹介する。上述のとおり、支援システムとは、操船者の経験に頼らずとも、操船が可能となる支援のことである。本研究所で提案されているシステムの概要を図4.2に示した。操船支援のための重要な情報の予測には、実験とシミュレーションが必要となる。実際に小型実験船による着岸操船実験を実施した結果を以下の図4.3に示した。このとき、風はほとんど吹いておらず、実験船は、50度～80度の進路で減速して、着岸地点に接近・停止した。

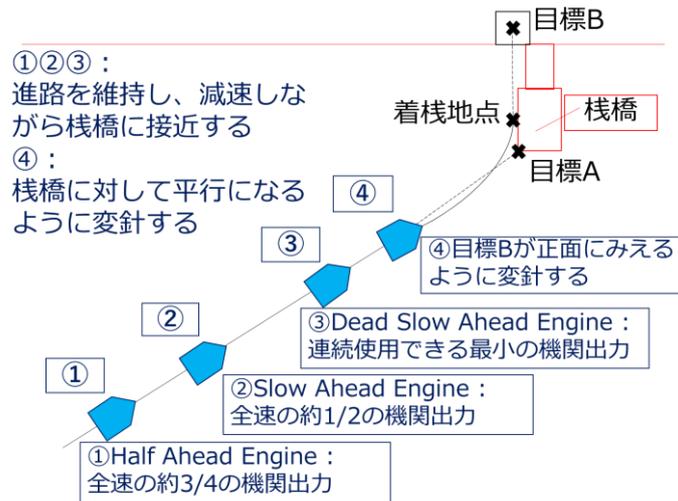


図 4.1 着棧操船の流れ

- ①着地点から200m地点で、
着地点までの速力や進路
を予測し操船者に知らせる
- 100m地点での位置・進路・
速力を予測し、知らせる
- ②100m地点では、減速開始
位置や左転開始位置を予測
し、知らせる
- ③減速開始を知らせる
- ④左転開始を知らせる

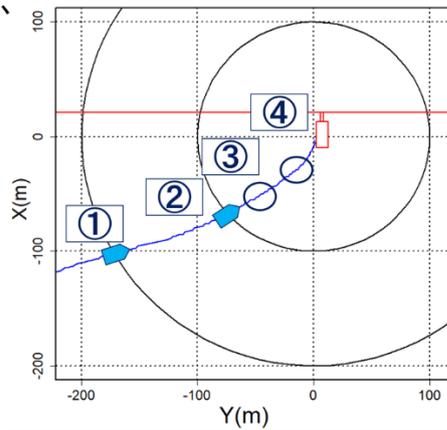


図 4.2 支援システムの概要

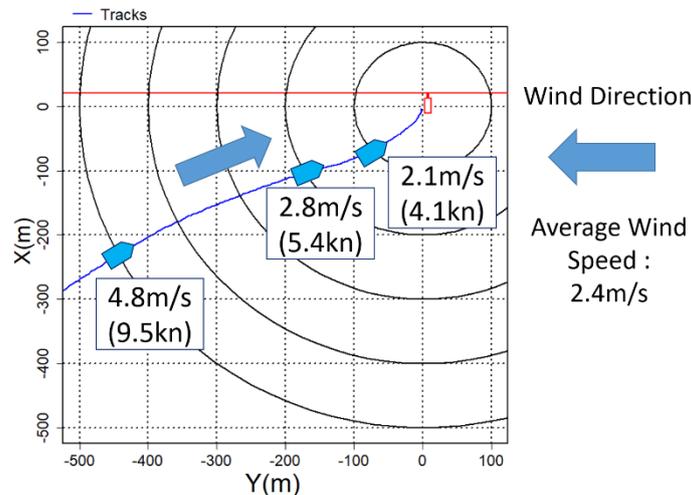


図 4.3 着棧操船実験の結果

このあと、着岸操船時の操縦運動モデルを作成し、その操船運動モデルを用いてシミュレーションを行い、実船実験結果との比較から、着岸操船支援システムを開発するために解決すべき課題を明らかにする。操縦運動モデルの生成やシミュレーションの検討部分は、専門領域のためここでは省略する。図 4.4 に実測結果とシミュレーションによる検証結果の比較結果を示した。航跡に多少の差はあるが、小型船舶の操縦運動に関する全体的な傾向が一致していることがわかる。今後の課題としては、低速時における操縦性能の推定、減速のモデル化とシミュレーション、進路と船首方位との関係の明確化、着岸直前の操縦性能の推定などがあげられる。

小型船舶の場合、10 cm レベルの位置精度、速度精度、1 度未満の進路及び船首方位が求められることが想定される。その際に、本稿の主題である高精度測位技術が重要な役割を果たすのではないかと考えられる。

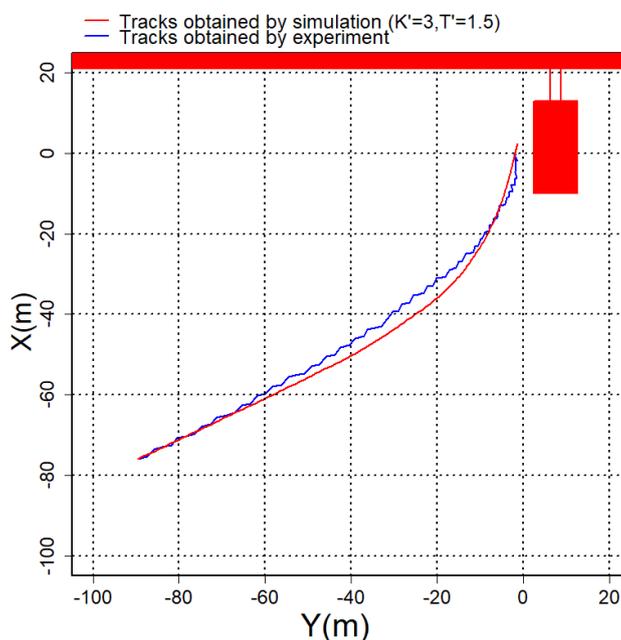


図 4.4 シミュレーションによる検証結果

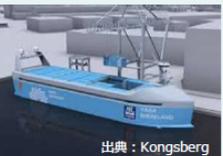
上記の研究とは別に、離着岸支援の 1 つで、船舶を上空からみた俯瞰図を高精度地図とあわせて示すものがある。実際に三井造船グループで実証実験が繰り返されており、船長のヒアリングでも前向きなコメントが得られている。俯瞰図には、自船位置・海域施設・目標位置・移動速度ベクトルなどを図示するとともに、船首・船尾・船中央の任意位置の速度・岸壁との残距離・海気象情報を提供する。これらの情報の位置や速度、距離は 1m の精度ではなく、CLAS や MADOCA PPP のように 10 cm 以内の精度が求められている。

最後に自動運航船に関する国外の動向をまとめる。国土交通省の海事局より発表された資料をもとに紹介する。表 4.1 に海外での自動運航船に関する共同プロジェクトを示した。表 4.2 には個別プロジェクトを示した。すでに実証レベルではあるが、一部自動運航船での実運用が開始しているように見受けられ、日本も今後実運用に向けた整備がされていくものと予想される。

表 4.1 海外での自動運航船に関する共同プロジェクト

プロジェクト名	プロジェクト概要	実施主体	実施期間
MUNIN Maritime Unmanned navigation through Intelligence in Network  出典：MUNIN	<ul style="list-style-type: none"> 無人船の概念の構築及び実証実験の実施が目的のEU支援プロジェクト(総予算380万ユーロ) 調査の結果、10%以上の燃費の向上、衝突・沈没リスクは有人船より1桁低くなると評価 	EU (ドイツがとりまとめ、ノルウェー、スウェーデン、アイスランド、アイルランド) ※大学、研究機関、民間企業が参画	2012～2015年
AAWA Advanced Autonomous Waterborne Initiative  出典：ロールスロイス	<ul style="list-style-type: none"> 自動運航船を実現するために必要な経済・社会・法規制・技術要素について学術及び産業界が検討するフィンランド政府支援のプロジェクト(総予算660万ユーロ) コンセプト検討を踏まえた調査研究を実施し、最終目標はコンセプトの立証 	ロールス・ロイス DNVGL NAPA インマルサット フィンランド技術庁 タンペレ工科大学 等	2015～2018年
MASRWG Maritime Autonomous Systems Regulatory WG 	<ul style="list-style-type: none"> 自律航行システムの安全運航のための法的枠組みを民間のイニシアティブで検討 24m以下の自動運航船を対象にした包括的なガイドラインであるIndustry Code of Practiceを公表(2017/11) 	英国を中心に、産学官が参画	2014年～

表 4.2 海外での自動運航船に関する個別プロジェクト

プロジェクト名	プロジェクト概要	実施主体	実施期間
コングスベルグ  出典：Kongsberg	<ul style="list-style-type: none"> ノルウェーのヤラ・インターナショナル社は、コングスベルグ社と協同して、南部の3港間(ヤラ社工場・Brevik港・Larviki港)で自社の肥料を運搬する電気自動コンテナ船「ヤラ・ビルケラン」を就航予定 	ヤラ・インターナショナル コングスベルグ	2018年：竣工 2019年：遠隔操縦船による運航 2020年：完全自動運航
ロールスロイス  出典：ロールスロイス	<ul style="list-style-type: none"> ノルウェーのフィヨルドを横断するフェリーに自動運航システム(有人)を納入(2018年運航開始) 同社は、2030年に無人遠隔操縦船、2035年に完全無人船が実現するロードマップを公表 	ロールスロイス	

4.2 MADOCA を利用した波浪計測について

ここでは、MADOCA PPP の運用を検討しているグローバル測位サービス株式会社の資料をベースに、波浪計測と可降水量推定について紹介する。

4.2.1 波浪計測

図 4.5 に GPS 海洋ブイの概要を示した。従来からある RTK 測位技術を利用しており、沿岸より 20km 程度という制約がある。国土交通省の港湾局ですでに実運用されており、津波モニタリングとしても機能している。図 4.6 に GPS 波浪計の設置状況を示した。本設備は、実際に 2011 年の東北地方太平洋沖地震の際に、岩手県や宮城県沖の観測ポイントにおいて、リアルタイムの津波の波高を計測できた。岩手中沖のブイでは、最高 6.6m を計測しており、これら情報は気象庁の観測者に伝達され、沿岸部での津波の高さの情報修正がされたと聞いている。

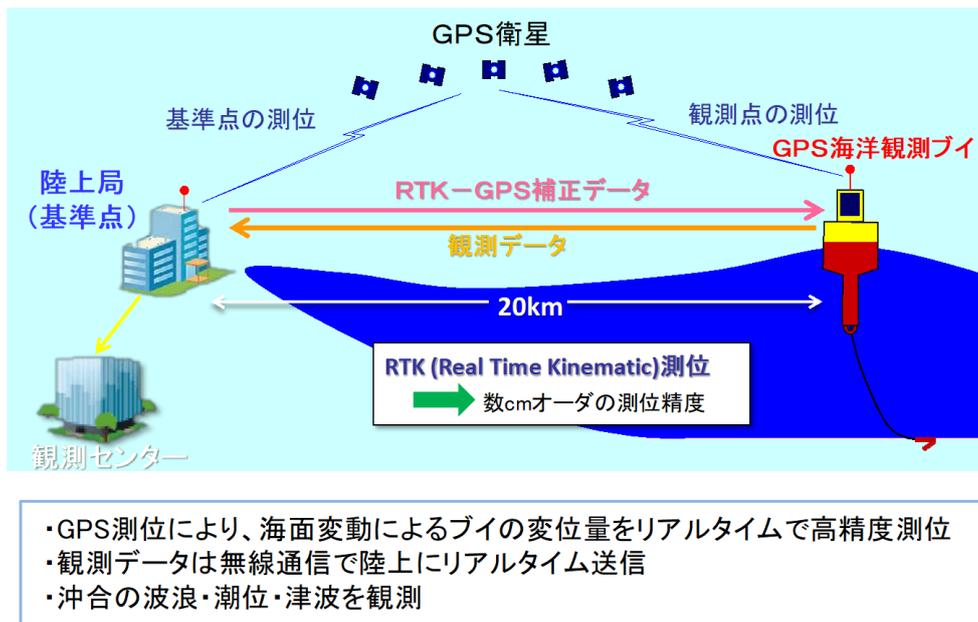


図 4.5 GPS 海洋ブイの概要

波浪観測を目的として
日本沿岸約20km沖に17基設置

- H18年度設置 (2基)
- H19年度設置 (6基)
- H20年度設置 (3基)
- H21年度設置 (1基)
- H22年度設置 (3基)
- H25年度設置 (2基)



出典：国土交通省HP

観測データはナウファスのWebサイトで公開されています。
<http://www.mlit.go.jp/kowan/nawphas/>

図 4.6 GPS 波浪計の設置状況

上記の実用化例は RTK 測位技術をベースにしたものであるが、海洋では、MADOCAPP のほうが適しているといえる。最大の理由は RTK 測位が基準点からの基線距離に限界があることで、さらには電離層の活動が活発になってくると、数 10km 離れた地点では、RTK 測位では容易に FIX しない現象がでてくるためである。図 4.7 に波浪計測に関する RTK 測位と PPP 測位の比較結果を示した。このデータは 2019 年 7 月に館山沖を航行中の船舶において、市販受信機で取得したデータであり、0 のラインが RTK 測位の結果で、MADOCAPP による時系列誤差を示している（マゼランシステムズジャパン製受信機）。

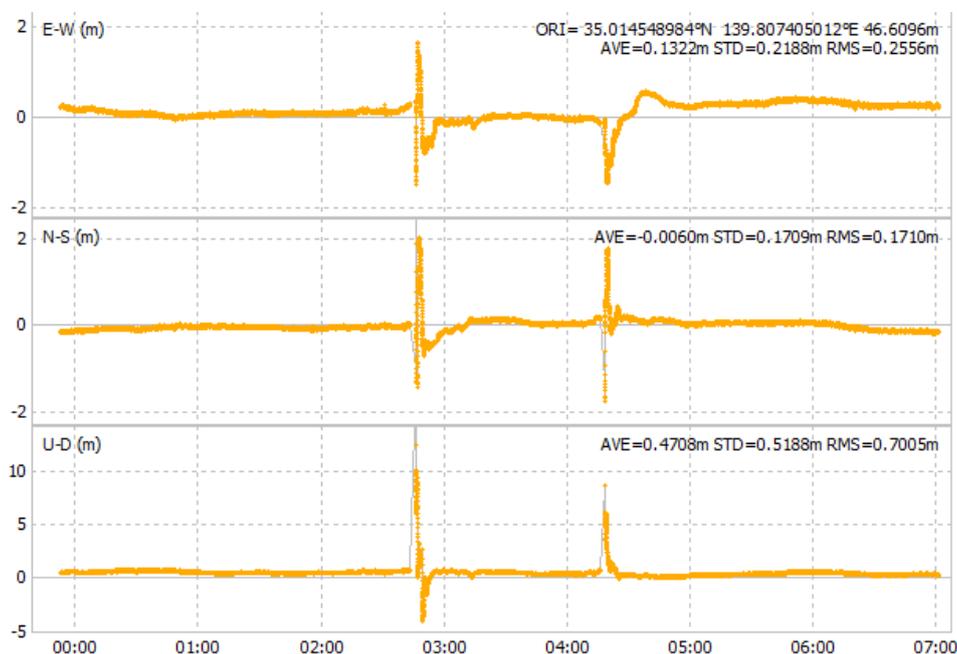


図 4.7 PPP 測位の実証（千葉県館山湾沖）

上記の RTK と PPP の結果を比較すると、受信機のファームウェアが安定していないこともあり、2 回大きな収束過程がみられるが、収束後の精度は 10cm 以内となっていることがわかった。本実験は、千葉県沖で実施したものであるが、PPP の場合、もちろん基線長によらない絶対測位がみちびきのサービス範囲であるかぎり、可能となる。図 4.8 にみちびきによる MADOCA PPP のカバーエリアを示した。日本だけでなく、アジア・オセアニアの広い地域で利用できることがわかる。

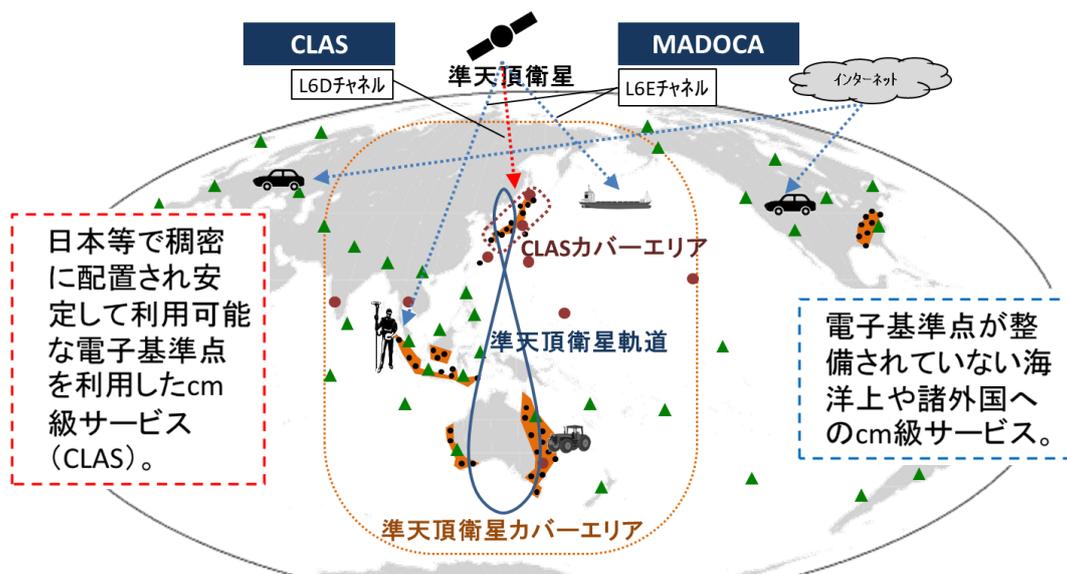


図 4.8 みちびきによる PPP のカバーエリア

4.2.2 GNSS による可降水量の推定

GNSS による可降水量の推定は、大学や気象研究所の研究者によって、長い間取り組まれてきた分野である。GPS 気象学という名前も生まれている。GNSS で可降水量 (PWV : Precipitable Water Vapor) を推定する手法を図 4.9 に示した。GNSS 衛星からの電波が待機を通過する際の遅延量と気象データをもとに、大気中の水蒸気量 (GNSS 可降水量) を計算するものである。全衛星の遅延量を観測局の真上に換算した値が最終値となる。図 4.10 には、GNSS による可降水量と実際の降水量との実データでの比較結果を示した (気象研の庄司様資料引用)。GNSS により天頂方向における対流圏遅延量を計測し、天頂遅延量から、気温と気圧の影響を考慮することで可降水量に変換する。この図は、実際に日本沿岸や太平洋を航行した際の実験データで、実ゾンデによる測定量と可降水量の分布に相関があることがわかる。

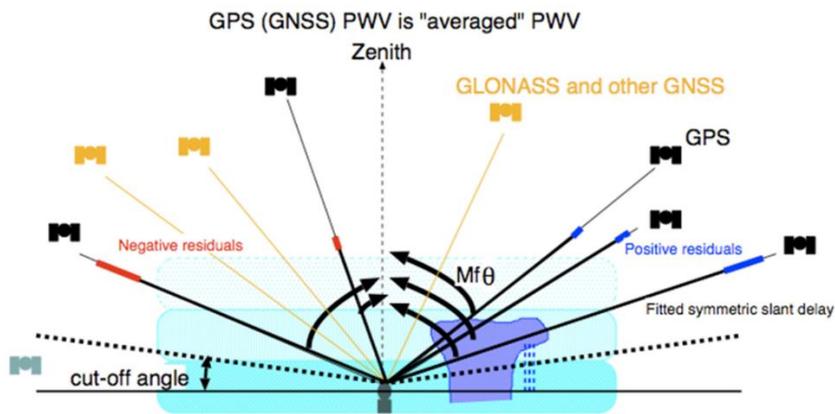


図 4.9 GNSS による可降水量推定の概要

JAXAのリアルタイム軌道 (MADCOCA)を用いた解析

Shoji et al. *Earth, Planets and Space* (2017) 69:153, DOI 10.1186/s40623-017-0740-1

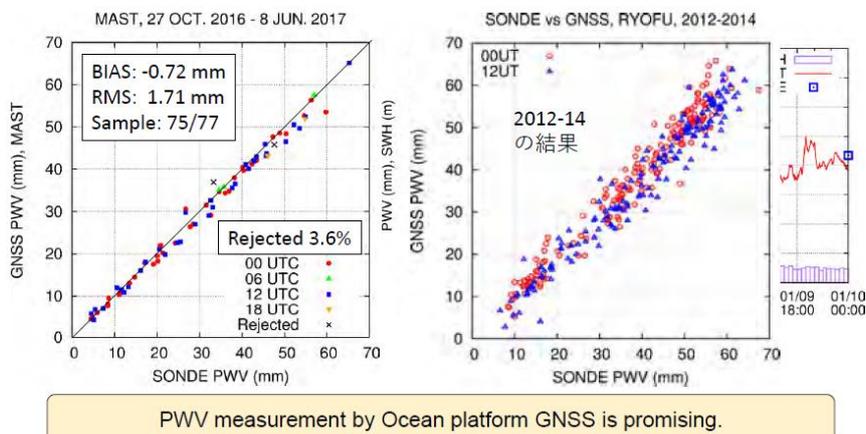


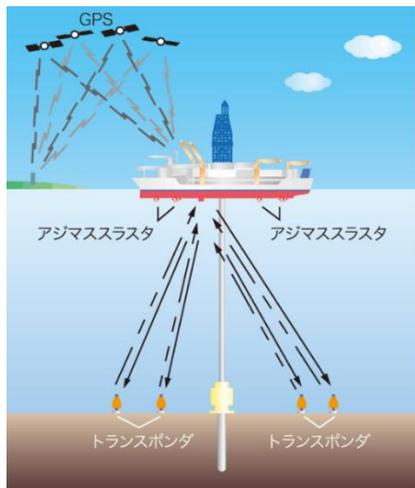
図 4.10 GNSS 可降水量と実際の降水量

上記の技術は海洋でも検討されており、海洋の可降水量の推定ができることで、日本本土での気象予測の精度が向上できると考えられている。上述のように海上での可降水量の推定結果が示されており、遜色ない推定精度が得られている。日本は海に囲まれているため、観測点の配置がいびつになっていることを否めず、コスト面での懸念はあるが、海洋での GNSS 観測の意義はあるといえる。海洋ブイだけでなく、遠洋を航行する大型船等への設置も検討されている。

4.3 船位保持システム (DPS) について

ここでは、衛星測位の高精度補正サービスの利用が期待される、船舶の DPS (Dynamic Positioning System) について、川崎重工業株式会社の資料をベースに紹介する。

DPS とは、衛星測位等のセンシング技術によって自船位置を把握し、複数の推進機を統括制御して船体の位置・方位を制御するシステムのことである。図 4.11 に概要を示した。自由に推進力の大きさと方向を変えることのできるアジマススラストに特徴があり、横方向への推進力を得ることができる。現場作業海域での定点保持を目的としたものが多いが、定点保持の機能は、そのままルートトラッキング (自動航行船) に必要な技術であることがわかる。また、4.1 で述べた、離着岸支援機能としても利用でき、幅広いアプリケーションが想定される。ゆえに、今後重要な技術要素であることは間違いない。DPS 制御の一般的な制御フローは図 4.12 に示したとおりである。海洋上での船体の動きは様々な外乱があるため、予測が非常に難しく、通常のフィードバック PID 制御の場合、潮流力や風力の影響を後追い制御するため、船体位置方位が動揺してしまう現象がある。最近の制御では、そのあたりを工夫され、潮流力や風力の影響を予測制御し、かつ、燃料消費量 (経済性) とのバランスも加味しつつ、船体位置方位を動揺させない制御が可能となってきている。製造メーカーの制御アルゴリズムやノウハウによるところが大きい。図 4.13 は、上述の通常のフィードバック PID 制御の場合とモデル予測最適制御での比較をしたものである。明らかにモデル予測最適制御が優れていることがわかる。



プロペラ推進方向を360度回転させ、自由に推力方向を変えることが可能なアジマススラスト

引用：JAMSTEC殿HP

図 4.11 DPS の概要

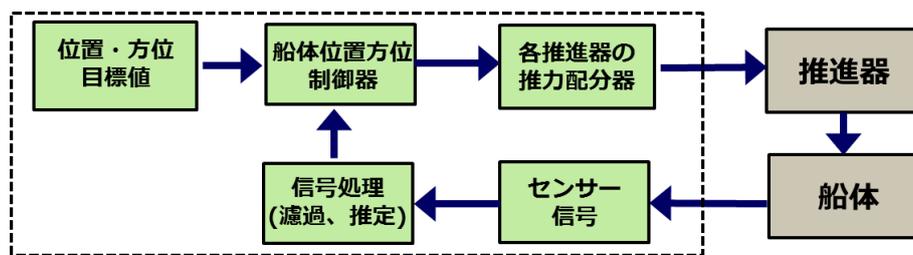
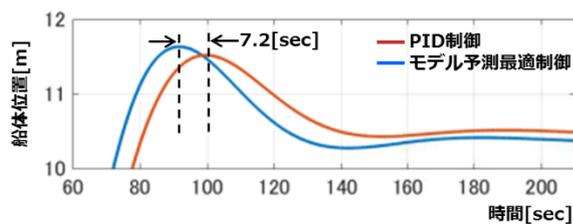


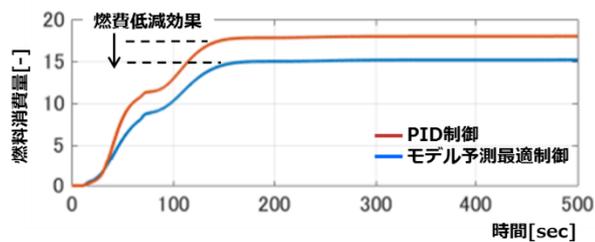
図 4.12 DPS の一般的な制御のフロー

■ モデルベース制御の特徴紹介 (シミュレーション)



- ✓ 洋上風車敷設船(SEP船)で着底用脚構造の長さを変化させた後に船体保持制御位置を変更 (注：制御位置をステップ変化)
- ✓ モデル予測制御では、船体流体特性の変化に対して制御応答性を自律的に自動チューニング

■ 最適制御の特徴紹介 (シミュレーション)



- ✓ 船体保持位置を変更する操船制御時に最適制御でのコスト関数として燃料消費量の最小化を設定
- ✓ モデル予測制御では、制御性能と経済性のバランスがとれた操船制御が可能

図 4.13 2つの DPS 制御の比較

衛星測位情報の利用の際の DPS における要求事項について、以下に列挙した。

- ・異なる手法の位置センシングの組み合わせ
 - 異なる測位手法の組み合わせ（例：DGPS と PPP/RTK の併用）
 - 衛星測位とレーザ測位/音響測位の組み合わせ
- ・必要測位精度：3m 以内（海外船級の推奨値）

現在の航海用 GNSS 受信機への要求精度は 10m 以内となっており、今後サブメータ級精度の確保が重要な課題である。マルチ GNSS による DOP 向上や、衛星選択の工夫による手法が検討されている。測位不能時には、慣性センサの利用や船体運動モデルからの推定も重要となる。また川崎重工殿のみちびきへの期待を図 4.14 に示した。ポイントはコストと高精度化にある。自動運航船のニーズが市場に高まっているため、これまで高精度が必要とされなかった、船舶においても必要とされる時代になっている。その意味において、補強信号が衛星より無料で利用できる CLAS と MADOCA PPP の性能が注目されるのは至極当然のことである。

■ コストアフォーダブルなセンチメータ級単独衛星測位

➤ 課題

- ✓ **DPSの将来市場としての自動運航船市場**
(日本財団：内航船の無人運航化による経済波及効果は1兆円@2040年)
- ✓ **港湾内での自動船位制御の要求精度はサブメータ級が想定され、
港湾航行用GNSS受信機への要求精度はセンチメータ級のニーズ**
(現在の外航航行用GNSS受信機への要求精度は10m@船舶設備規程)
- ✓ **港湾内の全ての船舶への搭載のためのコストアフォーダブル
な受信機製品**
(自動車自動運転技術の船用展開がカギ)

➤ 期待

- ✓ **準天頂衛星CLAS/MADOCAサービスの
船舶利用実証と
受信機製品市場の醸成による課題解決**

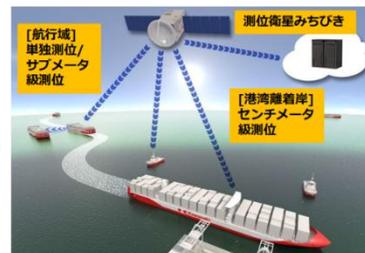


図 4.14 DPS 製造メーカーによるみちびきへの期待

4.4 海洋土木事例について

ここでは、海洋土木工事における GNSS の活用事例について。東陽建設株式会社と株式会社アカサカテックの資料をベースに紹介する。

海洋土木工事は、埋立・浚渫・護岸・防波堤築造、海底トンネル、橋梁基礎等の工事のことであり、特殊な作業船を駆使して工事を実施する。海洋土木工事での GNSS 利用に関して、「港湾設計・測量・調査等業務共通仕様書」(国土交通省港湾局)より、以下の規定がある。

- ・海上測位位置の精度は、特級水域では±2m、1級水域では±5m 以内
- ・工事区域で行った精度の確認結果を添えて使用申請を調査職員に提出し、承諾を得る必要がある
- ・RTK-GNSS を使用する場合に求められる精度は水平 20mm 以内である。「ネットワーク型 RTK-GNSS を利用する公共測量作業マニュアル(案)」(国土地理院 平成 17 年 6 月) より

浚渫工事の例を図 4.15 に示した。ポンプ浚渫船により、港湾・河川・運河などの底面を浚って土砂などを取り去る土木工事のことである。この図の施工管理システムはコンピュータに GNSS による位置データとラダー深度、喫水その他センサデータを入力する。RTK-GNSS による cm 級の位置を把握しながら作業を進めることができるため、操作者への負担を軽減することができ、より正確な工事が可能となる。

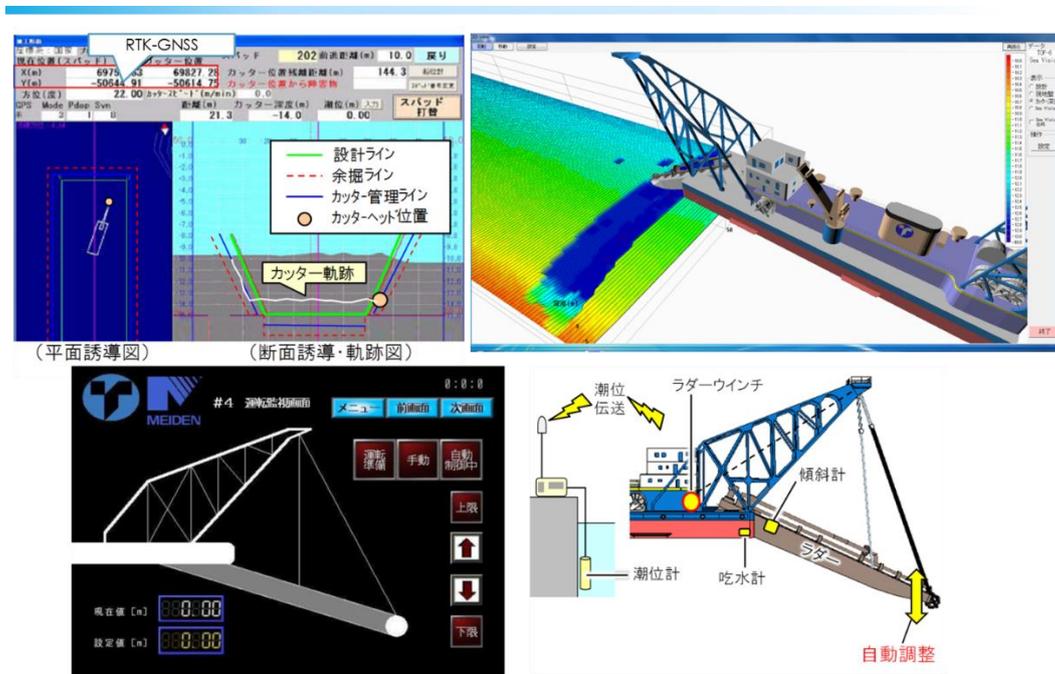


図 4.15 浚渫工事の例

次に漁場整備事業の例を示す。漁業整備とは、我が国の沖合域において、国が漁業整備を実施することにより、当該海域の水産資源の生産力を向上させ、水産物の安定供給の確保を図ることである。漁業整備事業の実際の概観を図 4.16 に示した。さきほど説明をした DPS が利用されている。



図 4.16 漁業整備事業の概観

次に漁業整備事業の一環として深浅測量システムについて紹介する。施工場所が島から沖合 50km の距離があり、RTK 方式の GNSS が使用できなかったため、高精度単独測位システムで代用した例である。水平方向の測位精度が向上することでナローマルチビームによる深浅測量におけるソナーの位置計測精度が向上する。ナローマルチビームによる深浅測量では、測線を複数回計測し、ソナーから得られた測深値を統計処理することで深浅値が得られる。このため、ソナーの位置計測精度が向上することで、複数回計測した値のばらつきが減り、その結果計測精度が向上すると考えられる。堆積形状を精度よく把握できると施工精度を向上できる。材料の投入前後の測量結果の差分から、石材運搬船 1 隻分の堆積形状の把握が可能となる。

次に GNSS を利用した深浅測量システムについて紹介する。システム構成を図 4.17 に示した。

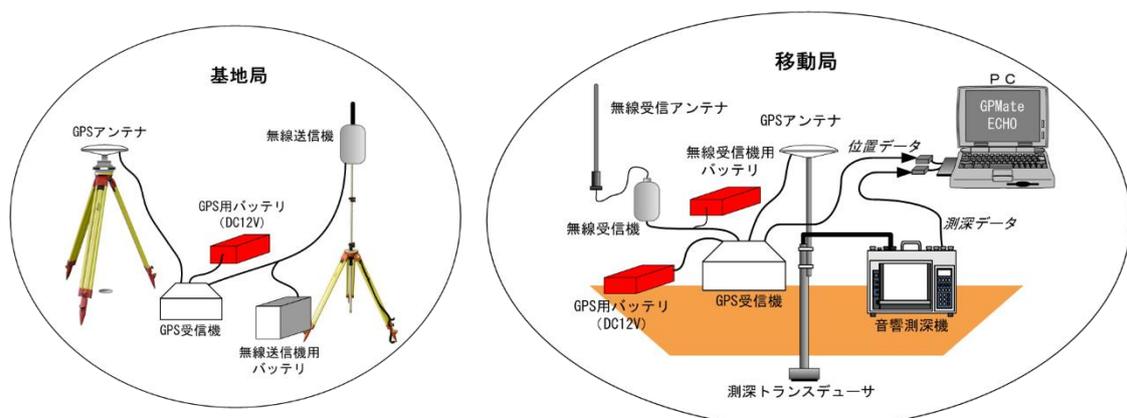


図 4.17 深浅測量システムの構成

移動局は、DGPS を利用する場合と RTK を利用する場合がある。DGPS の場合は、SBAS の補正データを衛星経由で入手し、RTK の場合は、VRS の補正データを、インターネット等を介して入手する。図 4.18 は計測画面の 1 例である。基本的には、GNSS による位置と音響測深機の測深データを同期させることで、水底部の地形を明らかにすることが目的である。

・計測中でも断面図を確認できる

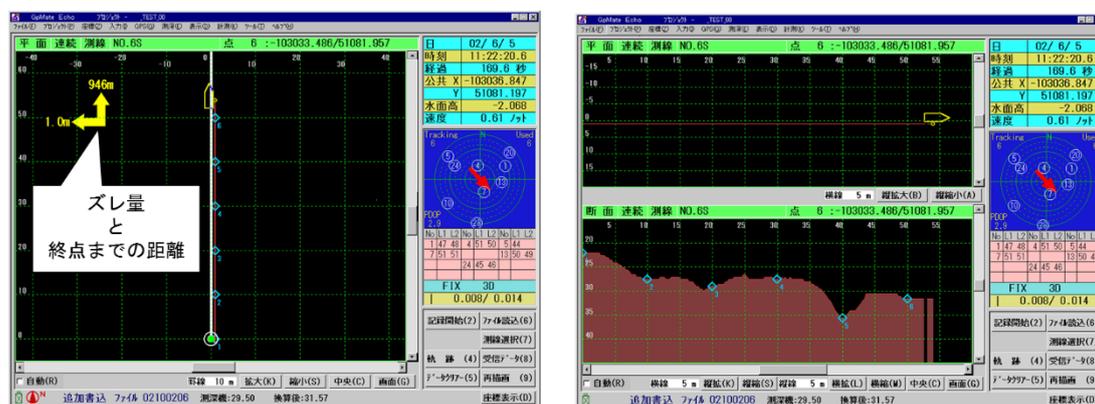


図 4.18 計測画面の例

上記のシステムはこれまで、SBAS や VRS のサービスが利用されており、本委員会の課題である、CLAS や SLAS 等の利用可能性についても検討されている。図 4.19 に CLAS の定点観測での結果を示した。受信機は三菱電機の AQLOC-VCX で FIX 解のみを示している。緑色のプロットが CLAS の FIX 解の結果であり、おおむね数 cm の水平精度であることがわかる。サブメータ級の精度でよい場合は、SBAS や SLAS が利用できる。SBAS は日本では MTSAT 衛星 (2 機) より放送されており (SBAS も今後みちびきより放送される予定)、SLAS はみちびきより放送されている。補正データの生成方法は異なるが、ターゲットとする精度はどちらもサブメータ級である。その比較結果を図 4.20 に示した。青色が SLAS による水平プロット結果で、水色が SBAS による水平プロット結果である。2drms と真値からのずれ量をみると、やや SBAS のほうが良いことがわかる。SLAS は日本列島に 10 数局の基準局を配備し、その地点での補正データをみちびきにアップリンクして放送するものである。本実験で SLAS の精度が SBAS より劣化している要因については、あくまでも可能性としての話しであるが、GPS とみちびきの両者での擬似距離のバイアスが移動局側である Trimble 製の受信機で発生していることが挙げられる。SBAS の詳細はここでは省略する。

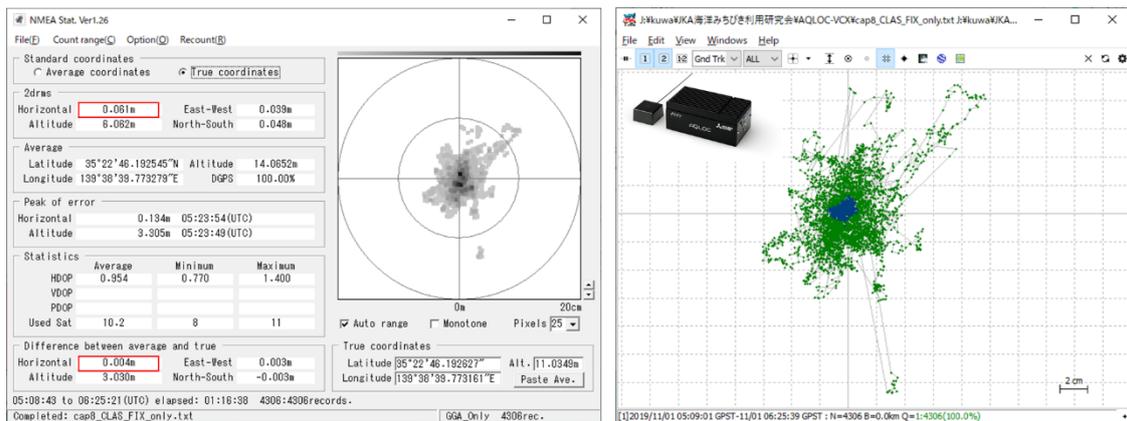


図 4.19 CLAS の定点観測の結果例

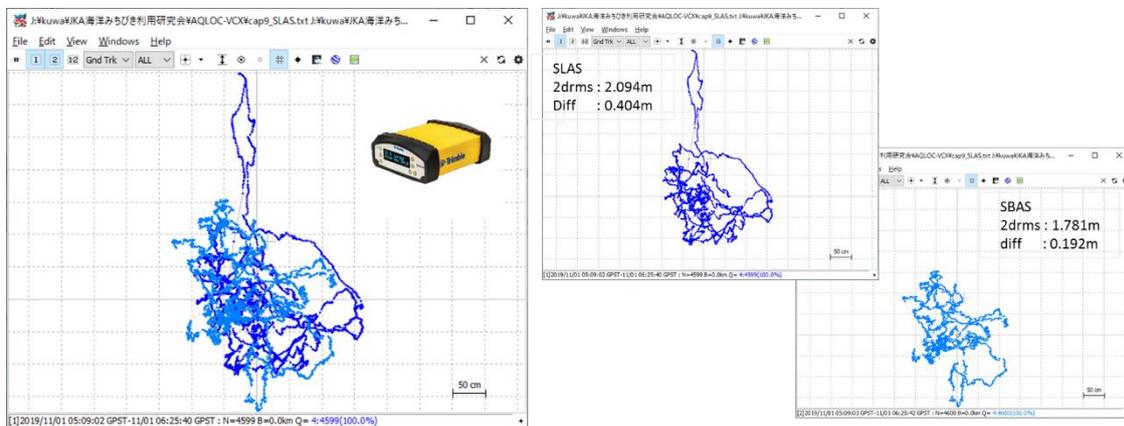


図 4.20 SBAS と SLAS の定点観測の比較結果

深淺測量等のシステムでの利用を想定した場合、今後の課題は以下の通りである。

CLAS について

- ・ FIX 解のみの解析だと水平の 2drms で 6.1cm となっており CLAS の性能水準にほぼ達している。
- ・ 真値との差も水平で 4mm となっており、とても良い結果である。
- ・ 定点観測にも関わらず Float 解が 0.5%、SINGLE 解が 5.9%出力されるケースがあり、これについては検証が必要である。

SLAS について

- ・ 2drms(水平)も、真値との差も、ともに SBAS よりも悪い結果となった。
- ・ 2drms = SLAS:2.094m, SBAS:1.781m
- ・ 真値との差 = SLAS:0.404m, SBAS:0.192m
- ・ GGA の” Age” が 2.0 秒~31.0 秒を繰り返している(補正情報の遅延による影響?)
- ・ 次世代 SBAS(L5 SBAS)などが予定されていく中、SLAS と SBAS の棲み分けは?

4.5 船舶識別 (AIS) 技術について

ここでは、AIS の紹介と GNSS の活用事例について、古野電気株式会社の資料をベースに紹介する。

図 4.21 は AIS のイメージを示したものである。洋上を航行する船舶同士が、航行情報を相互に交換するための装置で、以下のような 5 つの運用目的がある。

- ① 船舶を識別すること
- ② 目標物の追跡を支援すること
- ③ 航海情報の交換を容易にすること
- ④ 衝突防止に役立つ情報を提供すること
- ⑤ 無線電話による船舶通報を減らすこと

無線通信には VHF 帯が利用され、例えば東京湾内であれば、東京ラジオポートにおいて、地上受信局のアンテナでそれぞれの船舶の AIS 情報を受信し、無線で交通整理をしている。AIS は全ての船舶へ搭載義務があるわけではなく、500 総トン数以上の船舶や、国際航路に従事する船舶では 300 総トン数以上の船舶に義務づけられている。

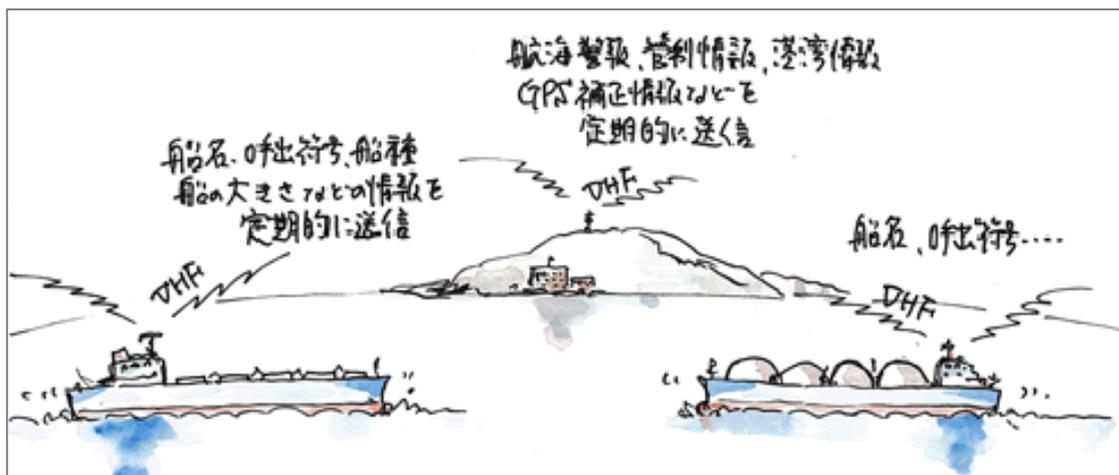


図 4.21 AIS のイメージ

実際の AIS の表示画面とレーダ画面上に AIS の情報を重畳した例を図 4.22 に示した。左のレーダ画面を見るとわかるように、方位や速度、目的地まで AIS 情報よりわかるため、レーダ画面上の船を乗組員が見分けなくとも、AIS との情報から、機器側が船舶情報まで付加していることがわかる。このような情報は、人間と機械の両方でチェックできることから、より信頼度を増す情報といえる。右の AIS 情報の表示画面例を見ると、上のほうに CLASS A と書かれている。この CLASS A とは、自身の航行情報（予定到着時刻、目的地など）を送信する機能を持つもので、送信出力も大きく、通常の AIS を指している、一方、予定到着時刻、目的地などは送信せず、自船の名称、自船の位置や速度、針路等を送信するだけの機器も存在し、CLASS B（簡易型 AIS）と呼ばれている。CLASS B の AIS 機器でも、CLASS A と CLASS B 両方の情報を受信すること

ができる。送信できる距離については、見通しのある海上で CLASS A は数 10km まで、CLASS B は 10km 程度までと思われる。実際の CLASS A の AIS 送受信機を図 4.23 に示した。

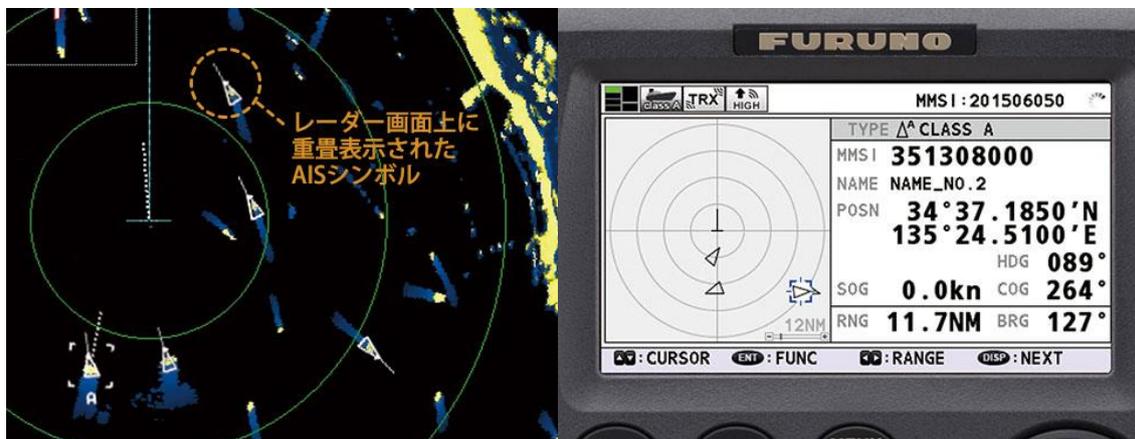


図 4.22 左がレーダ画面上での AIS 情報と右が AIS の表示機器
(古野電気 (株) ホームページより)

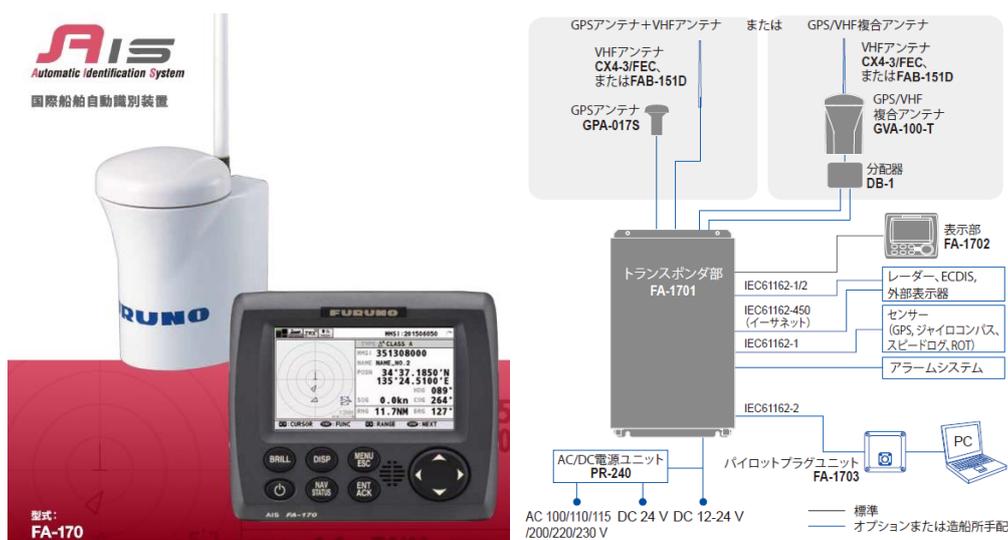


図 4.23 AIS の実物 (古野電気 (株) ホームページより)

最近では、バーチャル AIS という概念も実用化されており、その名の通り、AIS のシンボルマークにより、実際には存在しない航路標識をレーダ等の画面上に仮想表示させる。このような高度な使われ方がされるようになってきたことから、GNSS による位置の信頼性が重要であるといえる。また AIS 情報を正しく設定し発信し続けることが極めて重要で、もしこの情報入力を間違えると、逆に混乱を引き起こしかねない。例えば、千葉県館山湾より東京の勝どきへ向けて航行している船舶の目的値の入力を間違えて、横浜と入力してしまうと、近く他船から見ると、横浜に向かうべき航路と異なる航路を航行していることから、混乱してしまうことは容易に想

像できる。AIS 情報は正しく入力することが重要である。さらに言うと、漁船等は、操業中の自船の位置を通常知られたくないため、AIS の電源を切っている可能性が高い。また、AIS 情報を、悪意をもって変更する船も存在するかもしれない。例えば、違法な領域で操業している船は、自身の位置を知られたくないため、全く別の場所を AIS 情報にのせるような仕組みを細工している可能性もあるということである。ここで AIS の活用と留意点について、表 4.3 にまとめた。

最後に AIS の脆弱性について述べる。これまで AIS 機器にアクセスし使用する人はすべて正当なユーザであると想定されていた。AIS の思想は、すべての船舶、陸上基地、および AtoN が位置データなどを相互に自由かつオープンに送信できる必要性に基づいている。AIS は暗号化または認証メカニズムなしで開発された。これらのバックグラウンドを前提にすると、潜在的な AIS スプーフィング攻撃が可能となる。例として、AIS 情報は人為的に作成することが可能なため、実際に海上にいなくとも、あたかもある海域にある船が存在するように見せかけることが可能である。そこで、本研究課題の一部であるみちびきの活用の可能性について述べたい。GNSS 信号をスプーフィングしたり、偽りの AIS 信号が放送されたりしている時に、みちびきからのメッセージ認証サービスがあると、それら偽りの信号を見分けることが可能となる。概念図を図 4.24 に示した。

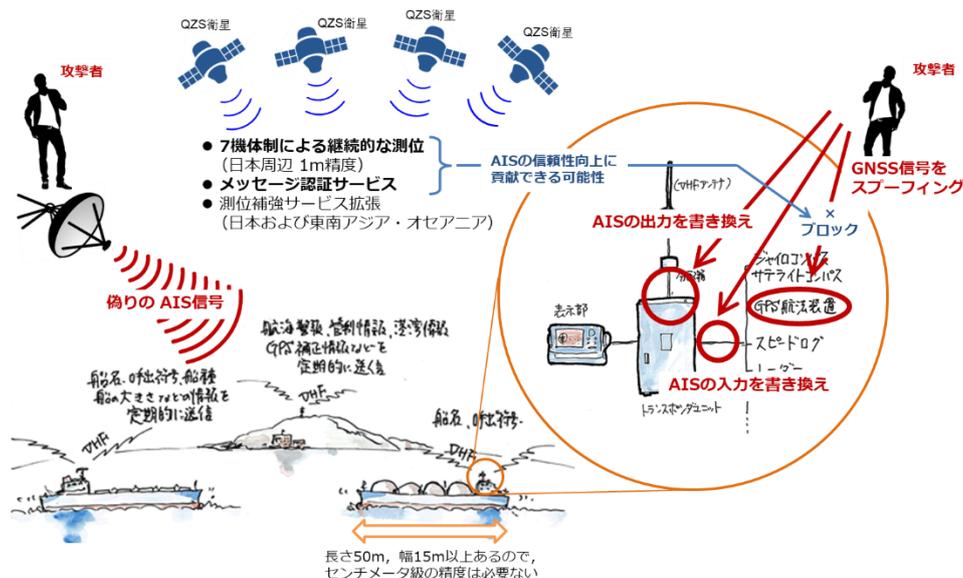


図 4.24 みちびきの活用の可能性 (古野電気 (株) AIS 製品カタログより)

4.6 船舶でのGNSSの利用について

ここでは、船舶でのGNSSの利用について、日本無線株式会社の資料をベースに紹介する。日本無線は古野電気と並び、国内のGNSS受信機の開発を長年にわたりリードしてきた会社であり、様々な分野でのGNSS利用を促進してきた。船舶、海洋に限っても多種多様なGNSSの用途がある。図4.25にGNSS航法装置に関連する船舶海洋機器を示した。

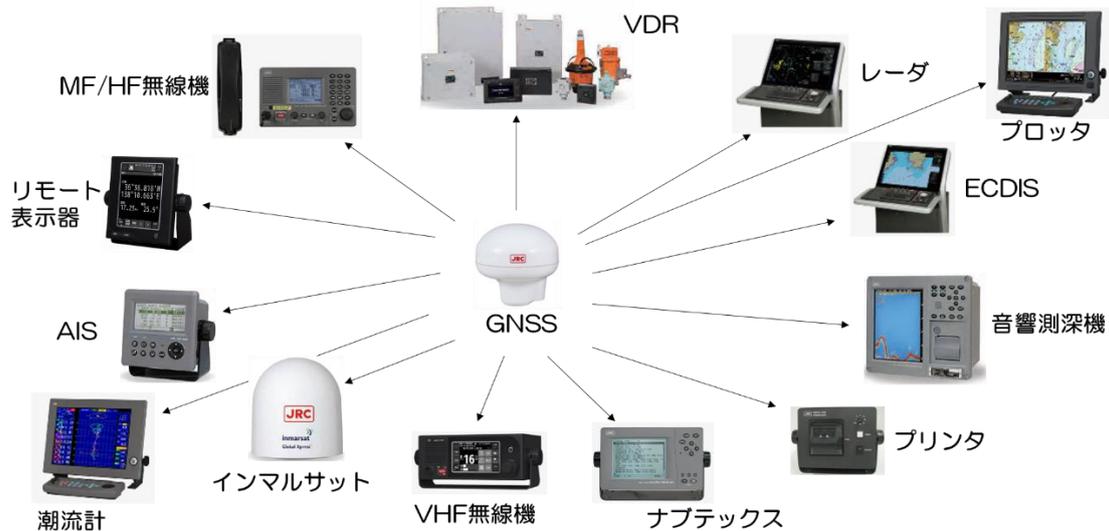


図 4.25 GNSS 航法装置と船舶海洋関連での各種機器 (添付 参考資料 7 より)

上記を見るとわかるように、極めて多くの製品がGNSS航法装置のなにかしらの結果を利用していることがわかる。本委員会で議論している高精度測位が世の中に出てくる前から、このように多くの製品が開発されてきたといえる。それだけ位置情報というだけではなくてはならないものであると考えられる。

高精度測位に関連する製品として、GNSSコンパスが挙げられる。すでに述べてきた船舶での高精度測位のアプリケーションにおいて、位置だけでなく正確な方位が必要なものが実は多い。GNSSコンパスの写真を図4.26に示した。これらGNSSコンパスの方位精度は2DRMSで0.2-3度のものがでてきており、洋上での正確な方位獲得手法として、今後も継続して利用されるであろう。

GPSコンパス(GPS、SBAS)



図 4.26 GNSS コンパス

最後に ECDIS について簡単に紹介する。ECDIS とは、電子海図表示システムのことで、公開用電子地図と自船の位置を同じ CRT 画面に表示するばかりでなく、他の情報（レーダ、予定航路等）を重ねて表示する機能を持っています。また危険な浅瀬等に近づいたりしたときに警報を発する機能も持っている。図 4.27 に ECDIS の概観を示した。電子海図表示システムの主な機能について、表 4.3 にまとめた。

https://www1.kaiho.mlit.go.jp/KOKAI/ENC/Japanese/about_enc.html （海上保安庁参照）

ECDIS画面



図 4.27 ECDIS の概観（日本無線製）

表 4.3 電子海図表示システムの主な機能

他の情報との組み合わせ	海図表示の要素	デジタル情報の特徴
<ul style="list-style-type: none"> ・ 自船の位置のプロット ・ 航路上の危険海域に対する警報 ・ レーダ映像との重ね合わせ 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 船橋の明るさに合わせた画面表示 ・ 海図の自動スクロール ・ 必要海図の自動ロード 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 表示内容の選択 ・ 表示内容の拡大・縮小 ・ 航海記録の保存・再現

なお、ECDIS の詳細については、WEB サイト等で検索するといくつかヒットする。例えば、古野電気の WEB サイトにも詳細がでており、わかりやすい内容となっている。ECDIS は 2012 年から 2018 年にかけて、国際航海に従事する 500 トン以上の旅客船、及び 3000 トン以上のタンカー、貨物船に対し段階的に ECDIS の搭載が義務化されている。本学の学生で船乗りを目指すものは、もちろん ECDIS の講習を実地も含めて長時間受けることになる。

<https://www.furuno.com/jp/merchant/ecdis/carriage/> （古野電気参照）

4.7 活用事例のまとめ

ここでは、活用事例のまとめということで、一般社団法人 衛星測位利用推進センターの資料をベースに、上記で紹介できなかった事例を中心に説明する。

位置測位のスマート漁業

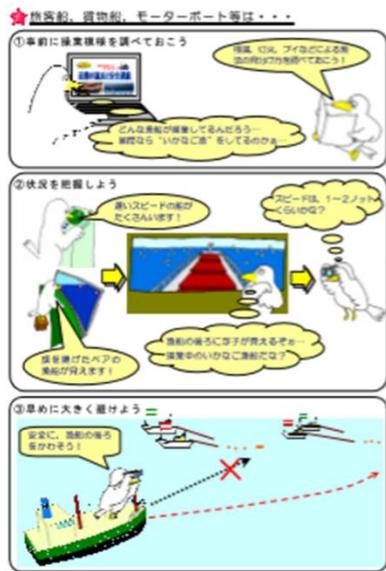
これまで、漁師の経験や勘に頼るところが大きく、漁獲高は天候や経験に大きく左右され、漁師の収入は不安定であった。そこで、漁業における様々な課題を「海洋ビックデータ」や「IoT」を活用してクリアするプロジェクトが総務省より立ち上げられていた。スマート漁業の概要を図 4.28 に示した。



図 4.28 スマート漁業の概要

海上浮遊物体（養殖いかだ等）位置識別

船の航路上、良好な漁場（様々な漁業が営まれています）と交錯する海域が多い。貨物船や旅客船等の主要な航路となっていることにより、漁船の衝突海難が後を絶たない状況にある。その海域では監視をしながらの操舵運航が求められている。位置発信を相互に設置することで、衝突等の海難事故を未然に防ぐ。船同士の衝突以上に、養殖いかだ、定置網等の海洋浮遊物体の識別を行うことが第一の目的である。図 4.29 に概要図を示した。

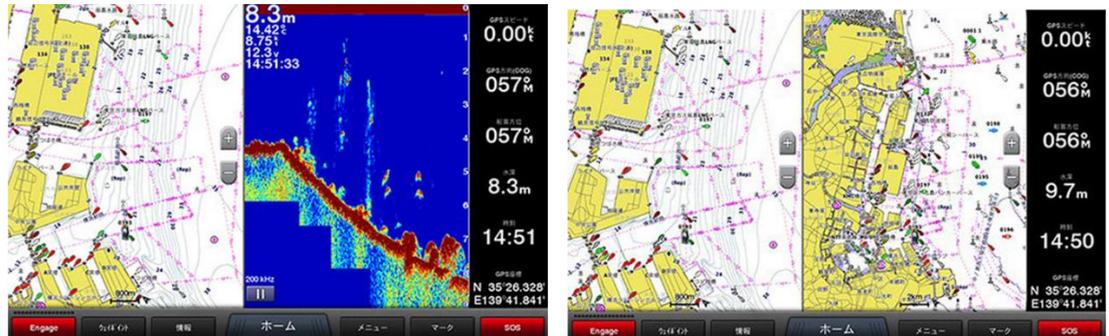


出典：神戸地方海難審判庁『近畿の漁法と安全運航』

図 4.29 海上浮遊物体位置識別

GPS プロッタ漁探

ボートに取り付ける一般的な GPS は、自船の緯度、経度などの 1 次的な数値情報をプロッタと呼ばれる海図画面を表示させる機器で、GPS プロッタと呼ばれている。それに加えて、過去の情報を蓄積でき、それを利用した様々な航法支援機能が備わっている。一方、魚群探知機（魚探）は、今やボートフィッシングを楽しむための必須機器で、この魚探なしでボートフィッシングをすることは考えられない。基本的には振動子から垂直に海底に向けて発振された超音波をセンサーで感知し、それをモニター表示することで海底の様子や、そこに生息する魚を把握することができるものである。この GPS と魚群探知機の 2 つの機能を一つのプロッタ画面に表示できるようにしたものが、一般的に「GPS プロッタ魚探」と呼ばれています。概要を図 4.30 に示した。



「地図チャートと魚探画面を同時に表示 オプションで、詳細な海底地形図を表示

図 4.30 GPS プロッタ魚探の例（ヤマハ発動機資料）

現有港湾工事の要望事項

海上 GPS 利用推進機構は、広く市民に対し、GNSS 等の衛星を利用した高精度で安定した位置測定技術に関する普及促進を図り、GIS（地理情報システム）に代表される電子国土の構築に寄与するため、RTK-GNSS をはじめとした高精度測位技術の実用化を推進するための無線基準局の設置・運用、さらに関連技術の調査・研究・普及活動を行い、海上における測位技術の標準化、高度化、人材の育成を図ることによって、港湾及び空港における質の高いハード、ソフト両面におけるインフラストラクチャ実現に貢献することを目的とする特定非営利活動法人である。平成 17 年 7 月に設立された。

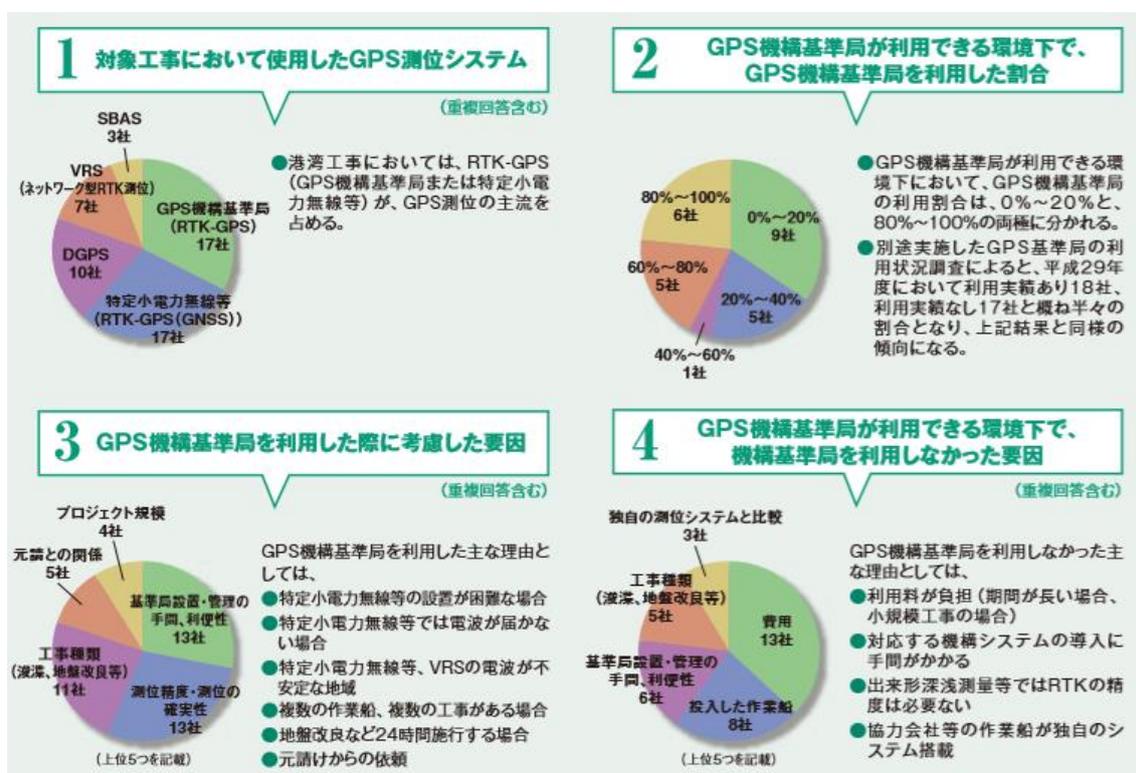


図 4.31 港湾工事での GNSS 利用におけるアンケート結果 (海上 GPS 利用推進機構)

上の図 4.31 に海上 GPS 利用推進機構が実施したアンケートの結果を示した。様々な要望があることがわかる。多くのマリンコンストラクションの会社においては、港湾工事において RTK-GNSS の精度が基本 (必要) であることがわかる。また、基準局の利用料が高いことや、サービスエリア内であるかどうか重要なポイントである。一方、出来高深淺測量等では、RTK までの精度を必要としていないことから、本委員会で議論してきた CLAS や MADOCA PPP の利用も想定されるのではないかと考える。特に沿岸部から遠くに離れた海域では、そもそもこれら基準局は利用できないため、MADOCA PPP 等で代用できるかどうか重要なポイントとなる。

海底地殻変動観測

GNSS の普及により、地殻変動観測が広く、かつ密に行われている。しかし、海底での地殻変動観測は技術的に難しく、これまでほとんど実施されてこなかった。例えば、GNSS の電波や光は海底までは届かないので、ある海底の地点の位置を決定するためには、測量船を介して、GNSS で測量船の位置を決定する（GNSS 測位）とともに、音波で測量船と海底の点との距離を測る（音響測距）、というように電波と音波を組み合わせた複雑な観測システムが必要である。音響測距では、測量船—海底間の音波の往復伝搬時間から距離を求める。そのためには海中の音速度（音波の伝わる速さ）を知ることが必要であるが、この音速度は水温や塩分濃度によって変化する。時々刻々と変化する海中の音速度を、時間的・空間的に正確に把握することはかなり困難である。このような状況の中で、海上保安庁では、「GNSS 測位」と「音響測距」を結合した手法による海底地殻変動観測システムを構築し、**更なる技術開発・海底基準点の展開及び観測を実施**している。図 4.32 に概要を示した。

この観測手法のアイデアは、オリジナルには米国カリフォルニア大学サンディエゴ校にあるスクリップス海洋研究所の Spiess 教授によるものである（海上保安庁 WEB サイト）。国内の大学でも実験観測が行われており、海上保安庁、名古屋大学、東北大学そして琉球大学の研究者らが変動観測を実施している。その概要を図 4.33 に示した。

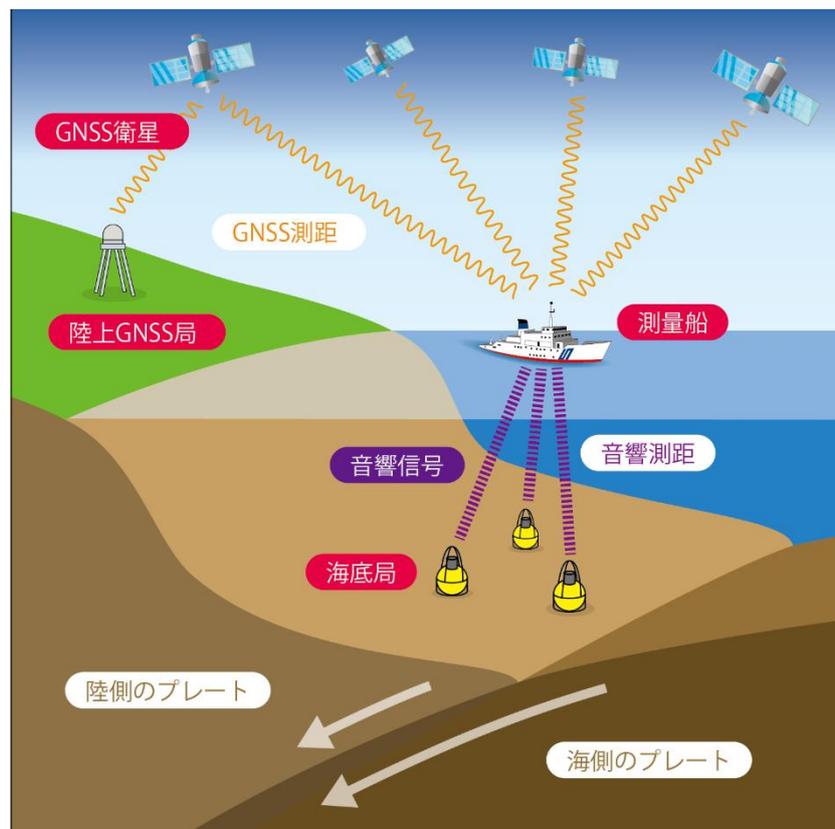


図 4.32 海底地殻変動観測の概念



図 4.33 国内での海底地殻変動観測の取り組み

(名古屋大学 大学院環境学研究科 地震火山研究センター 田所准教授より提供)

この観測において、船舶の位置は後処理キネマティック解析あるいは後処理 PPP 解析で算出されている。

5. 海上実証実験について

5.1 海上実験 1（汐路丸、夏季、東京湾館山付近まで）

第一回海洋実証実験は、東京海洋大学が保有する練習船汐路丸（以下、汐路丸）（図 5.1）に機器を設置し、測定を行った。今実験の目的は、マゼランシステムズジャパン製受信機による、海上及び沿岸における CLAS 方式と MADOCA 方式の測位精度の評価を行うことと、従来版受信機と小型版受信機（マルチ GNSS に対応したチップを搭載）の性能比較を行うことであった。3 日間の航路は、以下の通りであった。

- 1 日目（7月23日）：東京都中央区勝どきから出航し、千葉県館山沖へ航行。館山沖で錨泊
- 2 日目（7月24日）：館山沖周辺を航行し、館山沖で錨泊
- 3 日目（7月25日）：館山沖から勝どきへ航行し、帰港（図 5.2 に緑色で示した）

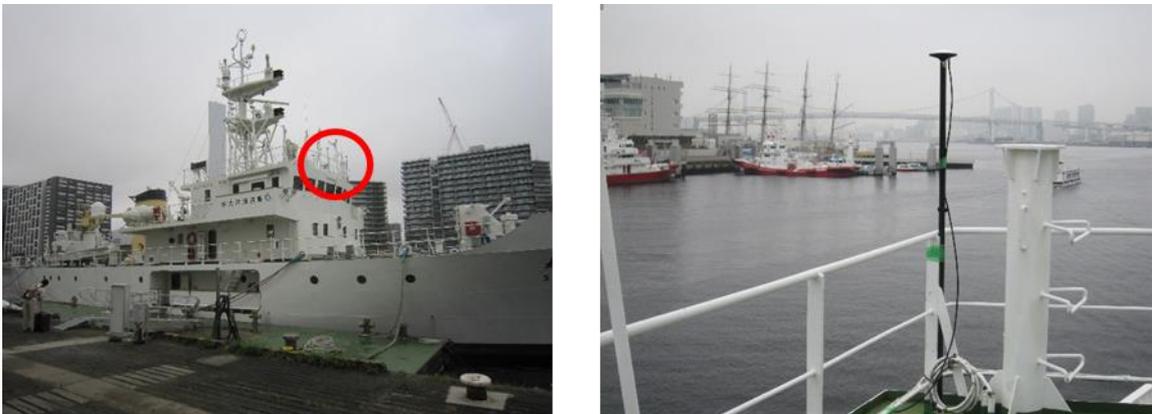


図 5.1 練習船汐路丸とアンテナ設定位置



図 5.2 第一回実証実験航路（3日目の例）

機器の配線を図 5.3 に示した。マゼランシステムズジャパン 社の多周波対応 GNSS アンテナから 5 つの受信機に分配した。従来版と小型版の性能を比較するため、CLAS 測位方式と MADOCA 方式それぞれを測位する受信機を設置した。今実験での受信機の L6 信号の捕捉設定は従来版の CLAS のみ衛星オート選択を設定した。他は衛星固定（みちびきの静止衛星）とした。アンテナは マゼランシステムズジャパン 社の多周波対応 GNSS アンテナを用いた。アンテナ設置環境は図 5.4 に示した。船体構造物が存在し、完全なオープンスカイ環境ではないことに留意されたい。

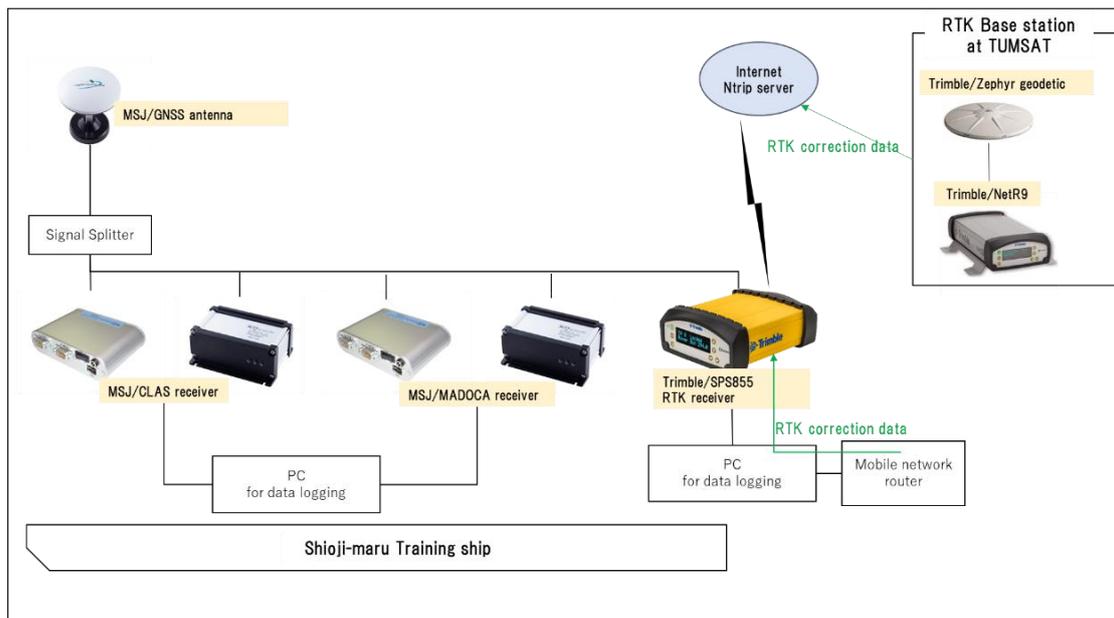


図 5.3 第一回実証実験配線図



図 5.4 アンテナ設置環境

5.1.1 CLAS の評価結果

ここでは、実証実験三日目の CLAS の結果を代表して示す。従来版受信機による水平プロット結果を図 5.5 に、小型版受信機による水平プロット結果を図 5.6 に示した。FIX 率は従来版が 64.2%、小型版が 92.2% であった。従来版はミス FIX が発生していることに注意されたい。プロット図の右上に示した真値からの平均と標準偏差をみると、標準偏差の値が緯度方向で 30cm を超えていることがわかる。これは、このプロット図に示していない領域の飛びが多くあることを意味している。小型版の結果は全般的に良好で、終始水平で 10cm 未満となる結果となった。従来版と小型版で FIX 率が大きく異なった理由は、みちびきからの補強信号を従来版はオート選択にしたのに対し、小型版はみちびきの静止衛星に固定していたことが考えられる。なお、両受信機のファームウェアは、本実験時、同じものを利用していった。真値となる RTK 測位 (F3 解に基づく海洋大基準局と移動側はトリンプル SPS855 受信機でリアルタイム測位の結果) の FIX 率は 93.5% であった。ゆえに、CLAS の精度を評価できる割合は 93.5% が最大となる。トリンプル SPS855 受信機による FIX 解は、館山湾における 70km を超える基線長においても水平で 1-2cm の精度が担保されていることを確認している。確認方法は、館山湾の近くに存在する国土地理院の基準点観測データを用いて後処理 RTK を行い、その結果とトリンプル SPS855 受信機の結果が 1-2cm のレベルで一致していることを確認した。

FIX 解の時系列での結果をそれぞれ図 5.7 と図 5.8 に示した。両結果ともに、高さ方向に正のバイアスが発生していることがわかった。水平方向の平均値とみると、F3 解ベースの RTK 測位結果とおおむね変わらないことがわかった。これは、CLAS が国土地理院の F3 解ベースの電子基準点をベースに補強信号を生成していることに合致した結果といえる。FIX 解の水平絶対誤差の累積割合の結果をそれぞれ図 5.9 と図 5.10 に示した。従来版の結果は、水平絶対誤差の 95% 値は 15cm 程度におさまっていたが、99% 値になると一気に 2m を超える結果となった。小型版のほうは精度が安定しており、99% 値でも 16cm となった。また途中で線が切れている箇所が水平の最大誤差のところで、1m を切る結果となった。

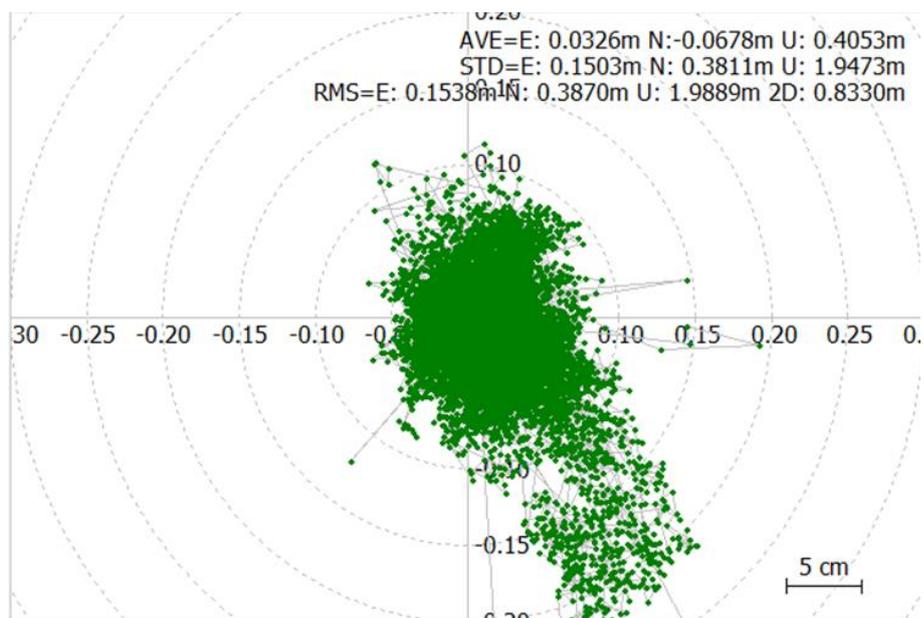


図 5.5 従来版受信機での CLAS 結果 (水平)

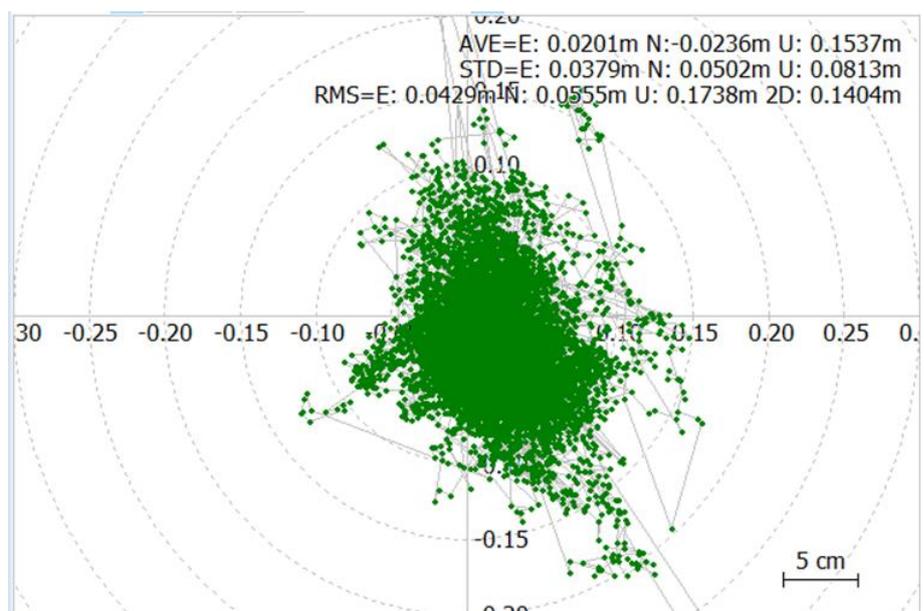


図 5.6 小型版受信機での CLAS 結果 (水平)

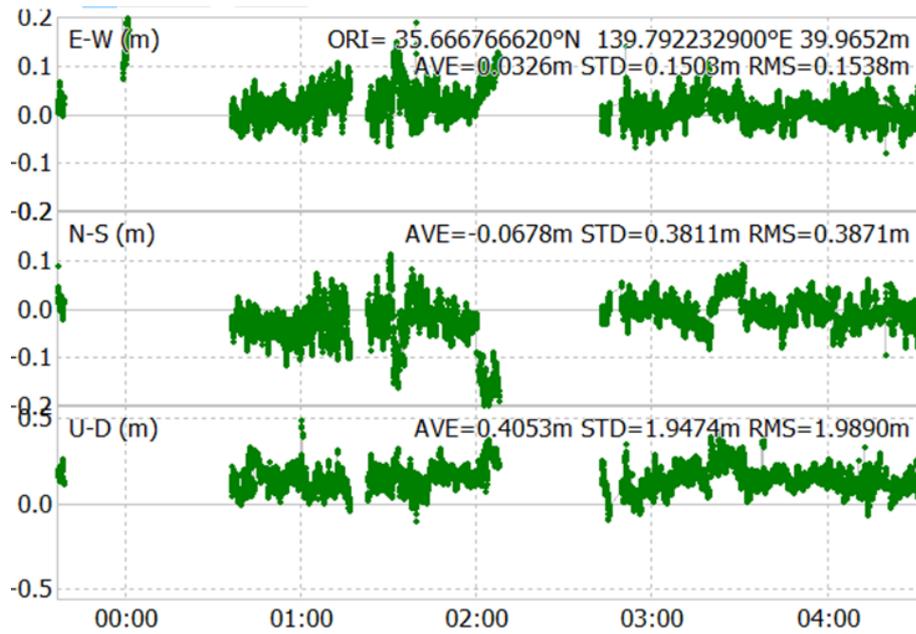


図 5.7 従来版受信機での CLAS 時系列結果

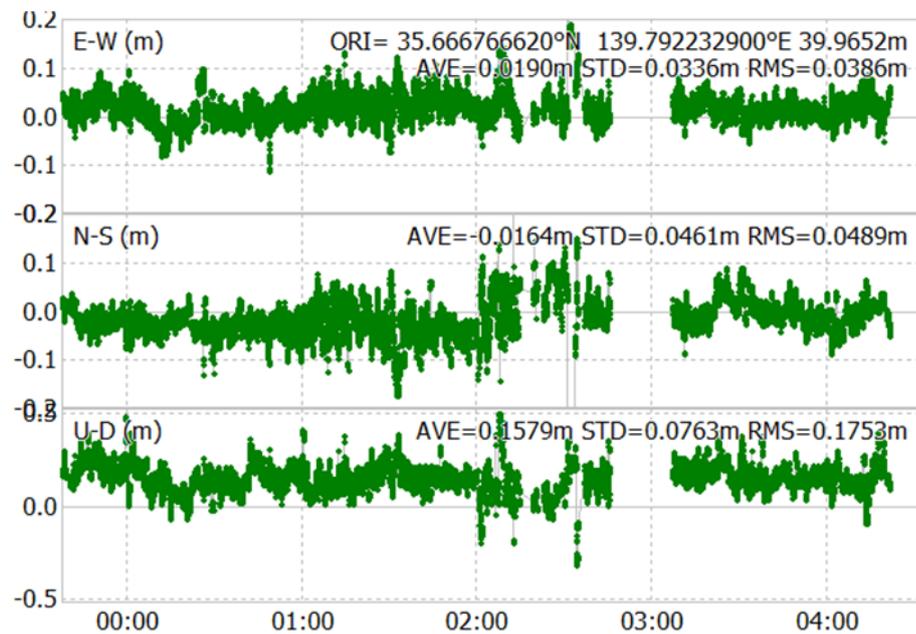


図 5.8 小型版受信機での CLAS 時系列結果

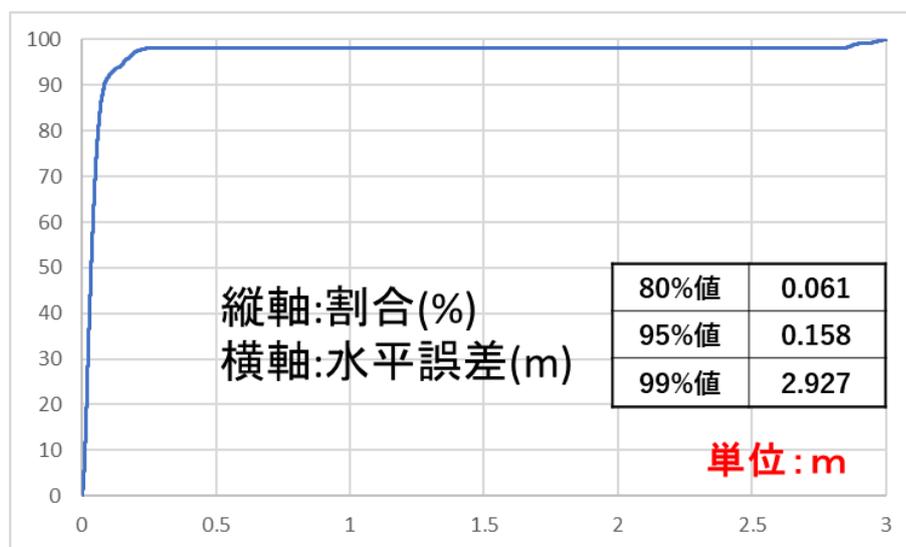


図 5.9 従来版受信機での CLAS 水平絶対誤差の累積割合

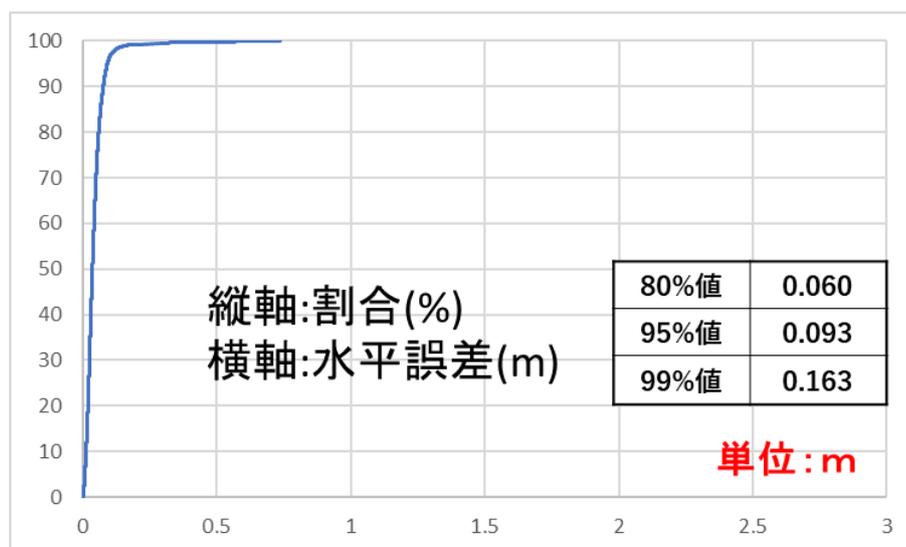


図 5.10 従来アンテナ位置での CLAS 水平絶対誤差の累積割合

上記の結果を平均値と標準偏差および95%値で表 5.1 と表 5.2 にまとめた。

表 5.1 従来版受信機による統計結果

	平均値	標準偏差	95%値
緯度方向誤差	-0.0643	0.3611	0.1334
経度方向誤差	0.0312	0.1489	0.0848
高度方向誤差	0.4059	1.9513	0.2978

表 5.2 小型版受信機による統計結果

	平均値	標準偏差	95%値
緯度方向誤差	-0.0236	0.0502	0.0757
経度方向誤差	0.0201	0.0379	0.0675
高度方向誤差	0.1537	0.0813	0.2761

5.1.2 MADOCA PPP の評価結果

CLAS と同様に実証実験三日目の MADOCA PPP の結果を代表して示す。水平方向の従来版受信機による水平プロット結果を図 5.11 に、小型版受信機による水平プロット結果を図 5.12 に示した。PPP 測位率は従来版が 99.5%、小型版が 99.5%であった。真値となる RTK 測位の結果は CLAS と同様に、トリプル SPS855 受信機のものを利用した。全体で 93.5%の FIX 率であったため、全体の時間の 93.5%分の評価となる。本 PPP 測位方式は、アンビギュイティ決定まで行っていないため、基本海上での測位率は 100%に近くなる。あわせて、時系列での結果をそれぞれ図 5.13 と図 5.14 に示した。海上で 10cm 程度の精度を期待されたが、残念ながら従来版と小型版ともに、安定しない結果となった。ところどころ 20-30cm を超える誤差が見られ、高度方向は 50cm を超える結果も多くみられた。上記の結果を平均値と標準偏差および 95%値で表 5.3 と表 5.4 にまとめた。水平絶対誤差の 95%値で、従来版は 40cm 台、小型版は 70cm 台となった。誤差自体が大きいため、平均値の評価を行うにはまだ早い結果となった。本実験時に、MADOCA PPP の補強信号を確実に受信できていたかを詳細に検証することはできていない。MADOCA PPP の補強方式での結果が良くなった理由の 1 つの可能性として、補強信号のデコードがきちんとできていたかも今後調査する必要がある。アンテナ設置場所は、船橋の上であるが、さらにその上にレーダや各種アンテナを設置する鉄塔が近接にあるため、補強信号のデコードが完全にできていなかった可能性が残されている。また MADOCA PPP の補強信号は CLAS と異なり、まだテスト配信のため、CLAS のように全ての衛星より放送されていないことに注意する必要がある。従来版受信機と小型版受信機について、性能差は特にみられなかった。

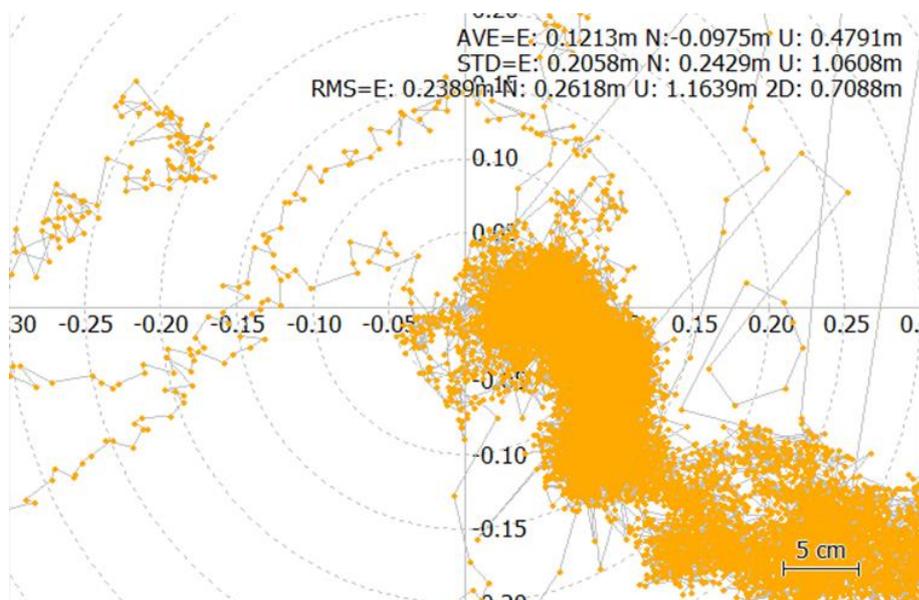


図 5.11 従来版受信機での MADOCA 結果 (水平)

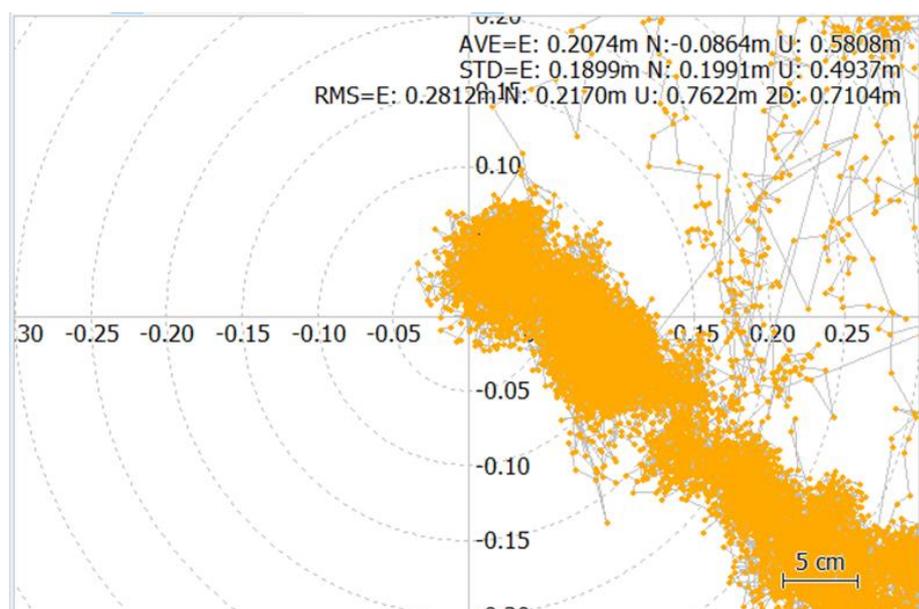


図 5.12 小型版受信機での MADOCA 結果 (水平)

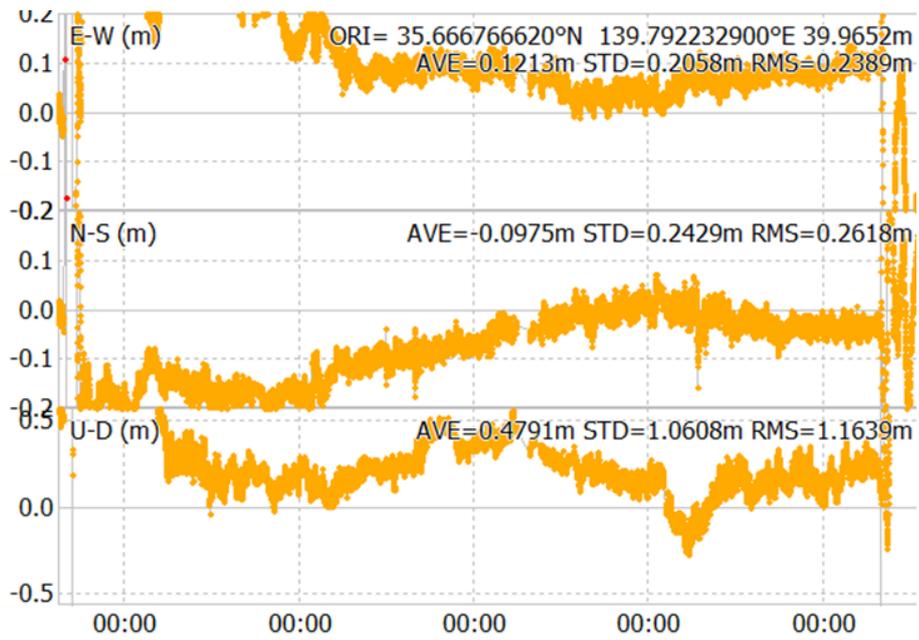


図 5.13 従来版受信機での MADOCA 時系列結果

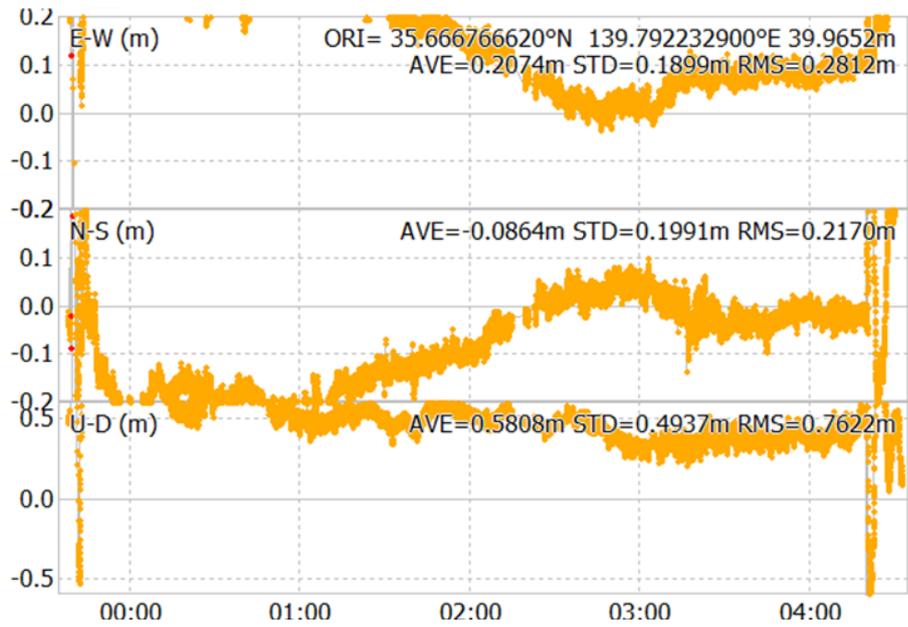


図 5.14 小型版受信機での MADOCA 時系列結果

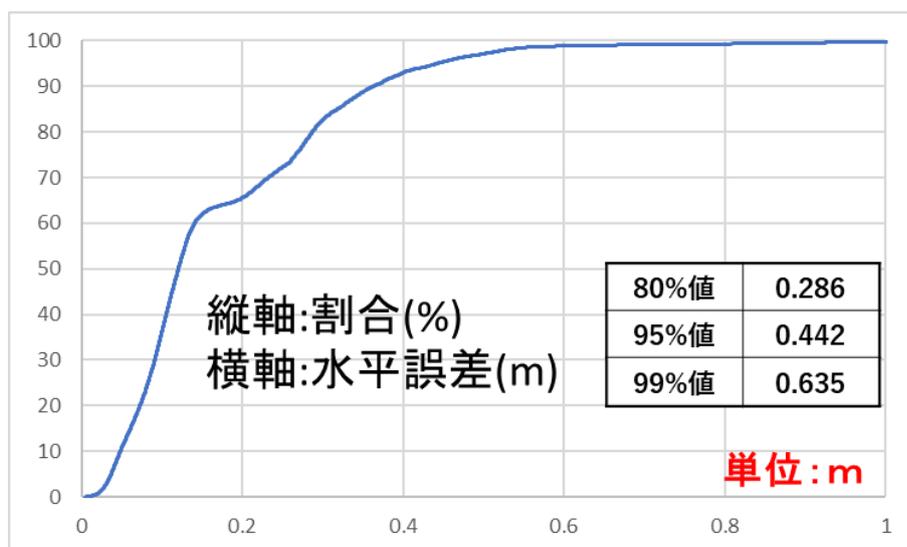


図 5.15 従来版受信機での MADOCA 水平絶対誤差の累積割合

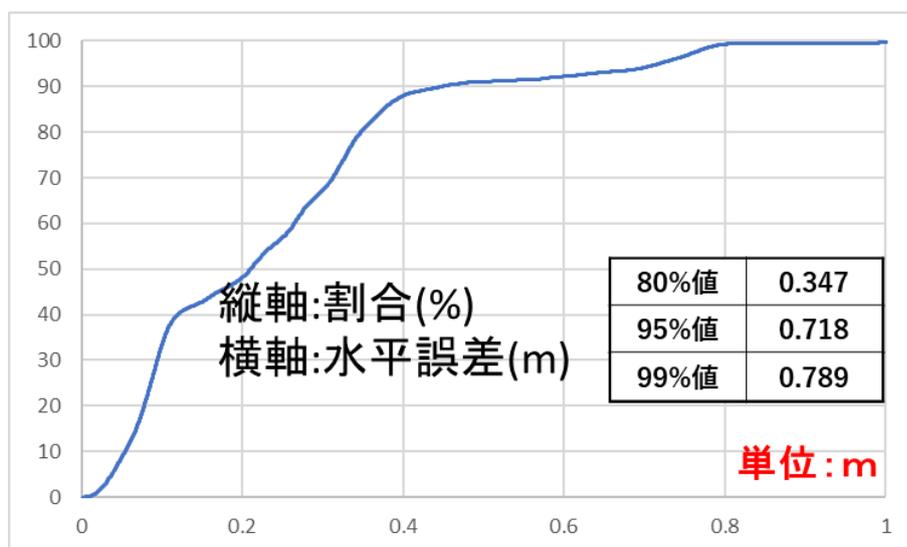


図 5.16 小型版受信機での MADOCA 水平絶対誤差の累積割合

上記の結果を平均値と標準偏差および95%値で表 2.7 と表 2.8 にまとめた。

表 5.3 従来版受信機による統計結果

	平均値	標準偏差	95%値
緯度方向誤差	-0.0975	0.2429	0.1963
経度方向誤差	0.1213	0.2058	0.3929
高度方向誤差	0.4791	1.0608	1.5085

表 5.4 小型版受信機による統計結果

	平均値	標準偏差	95% 値
緯度方向誤差	-0.0864	0.1991	0.2258
経度方向誤差	0.2074	0.1899	0.6940
高度方向誤差	0.5808	0.7622	1.2048

5.2 海上実験 2 (小型船やよい、夏季、東京湾河川付近)

第二回海洋実証実験は、東京海洋大学が所有する交通艇やよい（以下、やよい）に機器を設置し、測定を行った。今実験の大きな目的は、周囲の障害物のない海上ではなく、東京湾の中でも一部ビルや高架下の影響がある航路を航行し、その性能を検証することであった。海上実験 1 と同様に、CLAS 方式と MADOCAPP 方式の測位精度を評価した。また、従来版と小型版両方のデータを取得した。さらに、今回はファームウェアの更新により、すべての受信機において、補強信号を受信するみちびき衛星を固定にせず、オート選択機能とした。この機能により、基本的には信号レベルが高いみちびき衛星が選択されることになる。

今回は、東京海洋大学越中島キャンパス内のドックから出航し、羽田空港沖で折り返す航路である。この航行を二回（それぞれ約 1 時間の航海）実施した。航路には、橋梁下を通過する区間（図 5.18 の赤丸の 4 箇所）が存在する。この区間での Trimble SPS-855 での RTK 測位の FIX 率は 95.4% であったため、精度比較の際の真値として用いた。図 5.17 にやよいの外観と設置したアンテナを示した。基本的にアンテナ周囲にはアンテナより高い障害物が船自身にはない状況である。図 5.18 は実験航路の概要である。図 5.19 に実証実験時の配線図を示した。基本的に第 1 回の実験時と同様である。

第一回実証実験との変更点は以下の通りである。

①全ての受信機で、L6 補強信号の自動選択機能を実装した。

測位に利用する L6 信号を受信する衛星を固定化しないことで、現在利用している衛星との通信が遮られた場合でも他の衛星から補強信号を受け取り、高精度測位を継続することが出来る。

②船舶とアンテナ設置位置の差異

前回の実証実験で利用した汐路丸と比べ、やよいは船体が小さく、アンテナが低い位置に設置された。但し、やよいには高い船体構造物がなく、今回のアンテナ設置位置では、船体により衛星からの信号を遮ることはない。



図 5.17 交通艇やよいとアンテナ設置環境



図 5.18 第二回実証実験航路

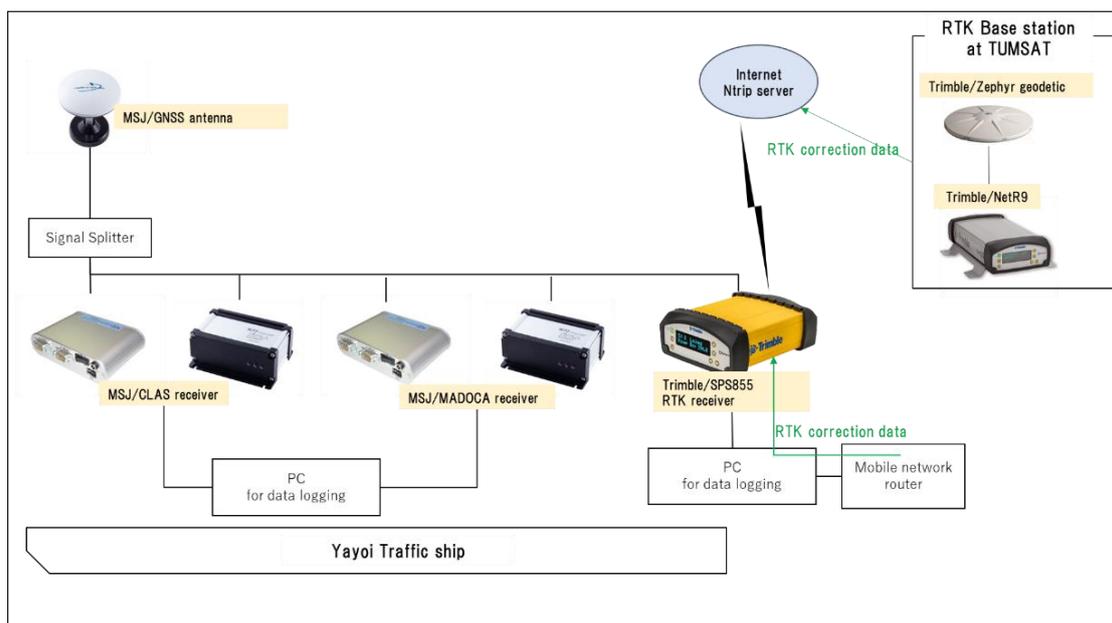


図 5.19 第二回実証実験配線図

5.2.1 CLAS の評価結果

ここでは、実証実験 2 回実施した結果のうち、1 回目の CLAS の結果を代表して示す。従来版受信機による水平プロット結果を図 5.20 に、小型版受信機による水平プロット結果を図 5.21 に示した。FIX 率は従来版が 62.1%、小型版が 60.0% であった。従来版、小型版ともに、一般的に FIX 率が低い結果となった。橋梁下を通過直後に FIX しない時間が存在することは問題ないが、1 分以上経過した後も FIX しない時間帯が多かった。真値となる RTK 測位 (F3 解に基づく海洋大基準局と移動側はトリンブル SPS855 受信機でリアルタイム測位の結果) の FIX 率は 95.4% であった。ゆえに、CLAS の精度を評価できる割合は 95.4% が最大となる。FIX 解の時系列での結果をそれぞれ図 5.22 と図 5.23 に示した。この結果をみると、FIX した箇所についてはおおむね 10cm 未満程度の精度がでていたことがわかった。FIX 解の水平絶対誤差の累積割合の結果をそれぞれ図 5.24 と図 5.25 に示した。これらの結果をみるとわかるように、水平絶対誤差の 80% 値は 10cm 未満の良好な結果であったが、95% 値では、2m 近くに飛んでいることがわかる。この結果より、図 5.22 と 5.23 で示されていない、大きなミス FIX の解が存在することがわかった。従来版、小型版で、同様の傾向の結果となっていることから、これら両受信機での性能差は少なく、CLAS のエンジンによる結果であることが予想される。なお、このときのマゼランシステムズジャパン製受信機の観測データと MADDOCA PPP 用の SSR データ (JAXA の HP より入手: 放送されているもののファイル版) を用いて、後処理で、公開されている CLASLIB による分析を実施したところ、FIX 率は 90% を超える結果となり、水平方向の誤差もおおむね 10cm 程度であったことを記載しておく。

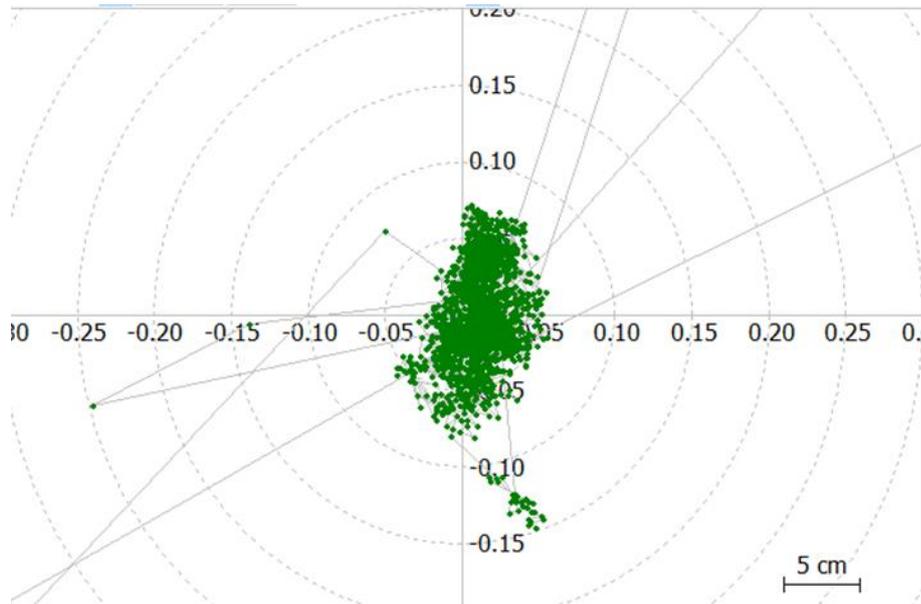


図 5.20 従来版受信機での CLAS 結果 (水平)

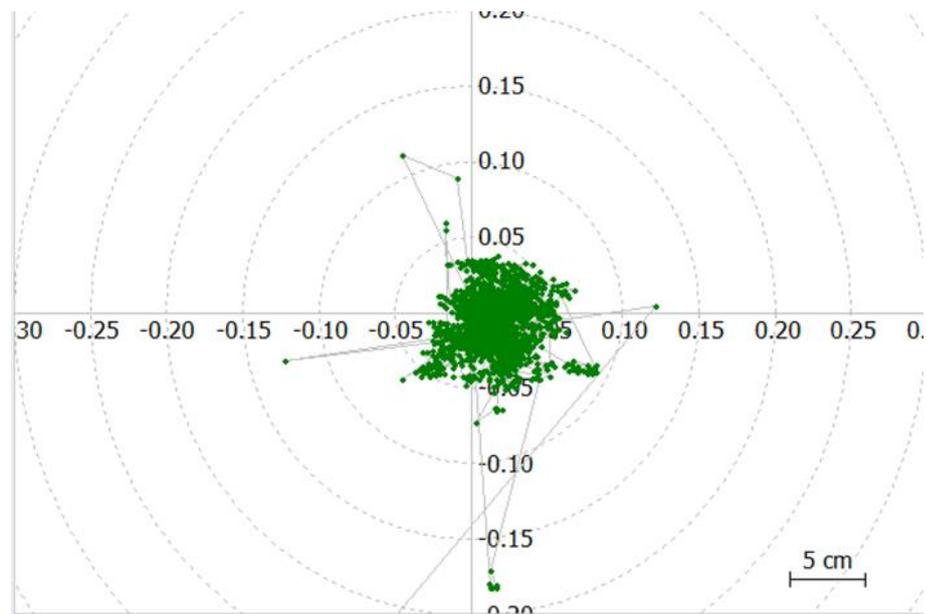


図 5.21 小型版受信機での CLAS 結果 (水平)

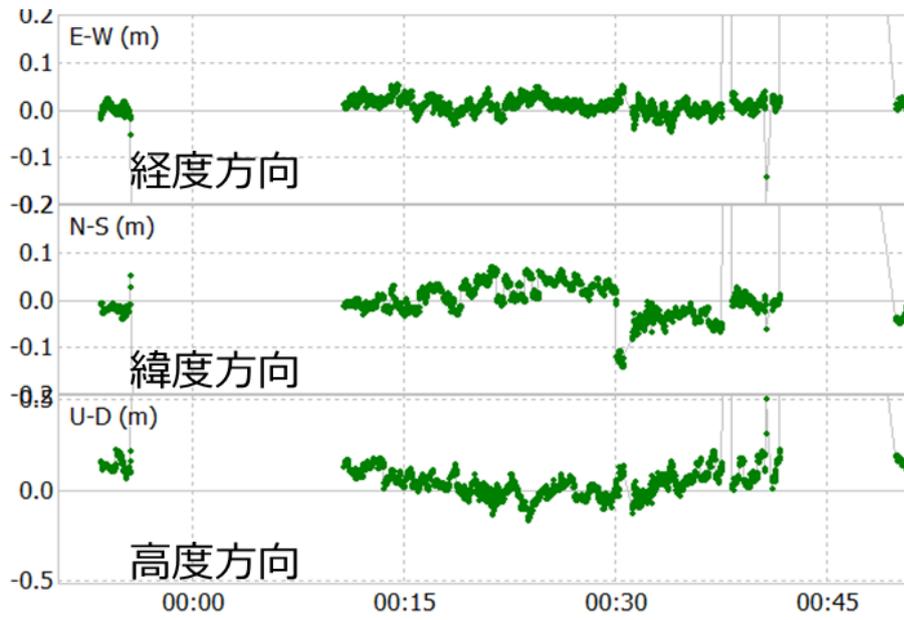


図 5.22 従来版受信機での CLAS 時系列結果

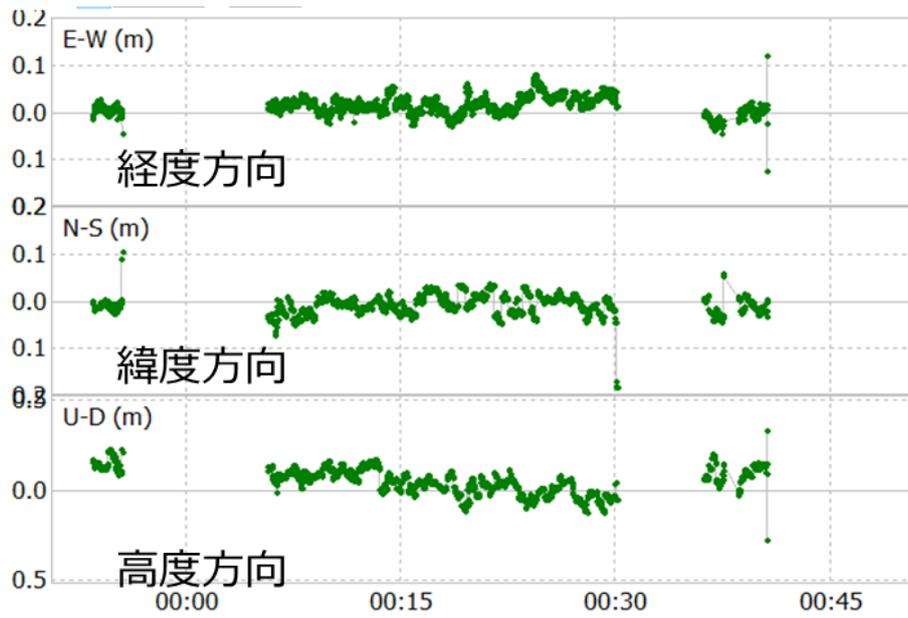


図 5.23 小型版受信機での CLAS 時系列結果

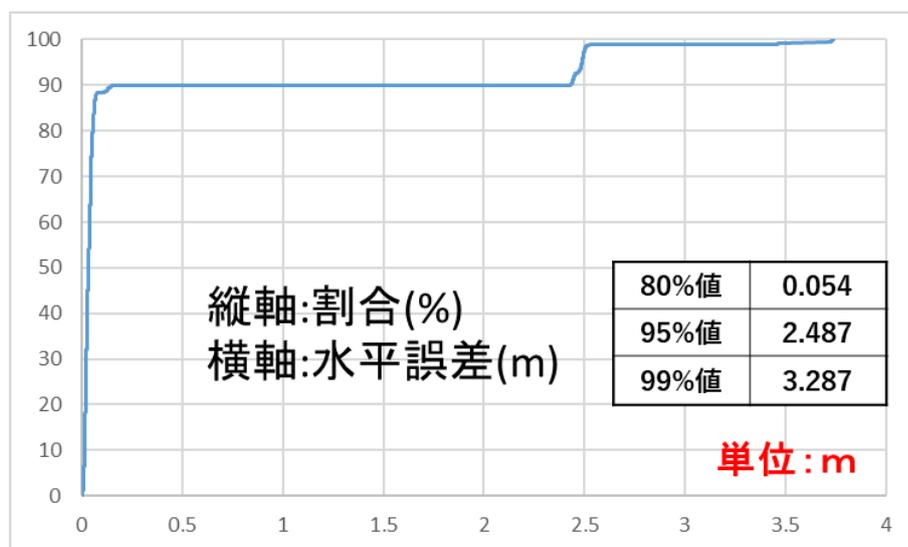


図 5.24 従来版受信機での CLAS 水平絶対誤差の累積割合

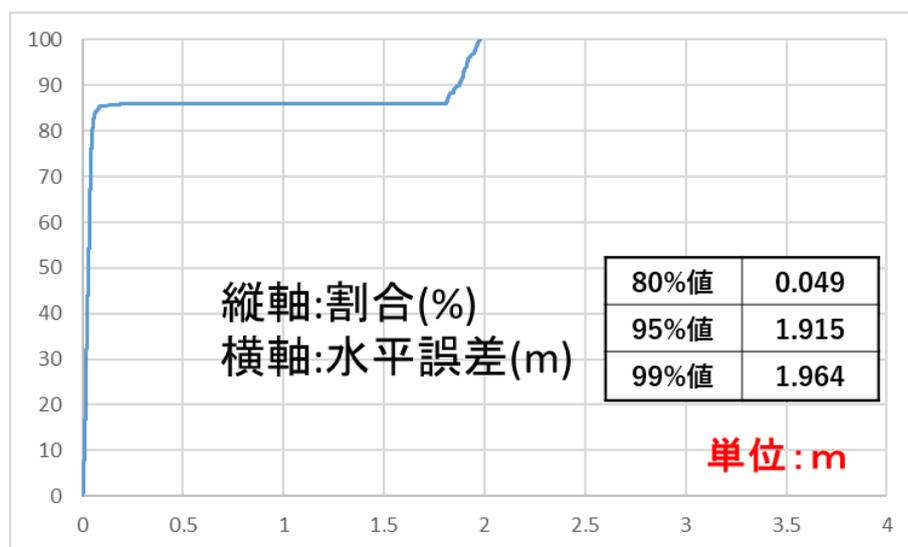


図 5.25 従来アンテナ位置での CLAS 水平絶対誤差の累積割合

上記の結果を平均値と標準偏差および95%値で表 5.5 と表 5.6 にまとめた。

表 5.5 従来版受信機による統計結果

	平均値	標準偏差	95%値
緯度方向誤差	0.0289	0.5179	1.0996
経度方向誤差	0.0796	0.6467	2.2466
高度方向誤差	0.5433	1.7506	3.7382

表 5.6 小型版受信機による統計結果

	平均値	標準偏差	95%値
緯度方向誤差	-0.1208	0.5541	1.6294
経度方向誤差	-0.1289	0.3573	1.0228
高度方向誤差	1.6254	3.8889	11.2705

5.2.2 MADOCA PPP の評価結果

CLAS と同様に実証実験 1 回目の MADOCA PPP の結果を代表して示す。水平方向の従来版受信機による水平プロット結果を図 5.26 に、小型版受信機による水平プロット結果を図 5.27 に示した。PPP 測位率は従来版が 99.5%、小型版が 99.5%であった。真値となる RTK 測位の結果は CLAS と同様に、トリプル SPS855 受信機のものを利用した。全体で 95.4%の FIX 率であったため、全体の時間の 95.4%分の評価となる。本 PPP 測位方式は、アンビグイティ決定まで行っていないため、基本海上での測位率は 100%に近くなる。あわせて、時系列での結果をそれぞれ図 5.28 と図 5.29 に示した。海上で 10cm 程度の精度を期待されたが、残念ながら従来版と小型版ともに、安定しない結果となった。ところどころ m オーダーの誤差も頻繁にみられる結果となった。図 5.30 と図 5.31 には、水平絶対誤差の累積割合をそれぞれの受信機で示しており、80%値で、すでに 1m 程度の誤差になっていることがわかる。

MADOCA PPP 方式は、1 回が 1 時間程度の航行であり、往路で橋梁下を通過してから、再度復路で橋梁下を通るまでの時間が 30 分程度しかなく、精度が収束するまでの時間が十分ではなかったといえる。羽田空港沖のオープンスカイ環境に限っては、安定した高精度測位を行うことができた。PPP 測位の弱点がもろにでる結果となった。

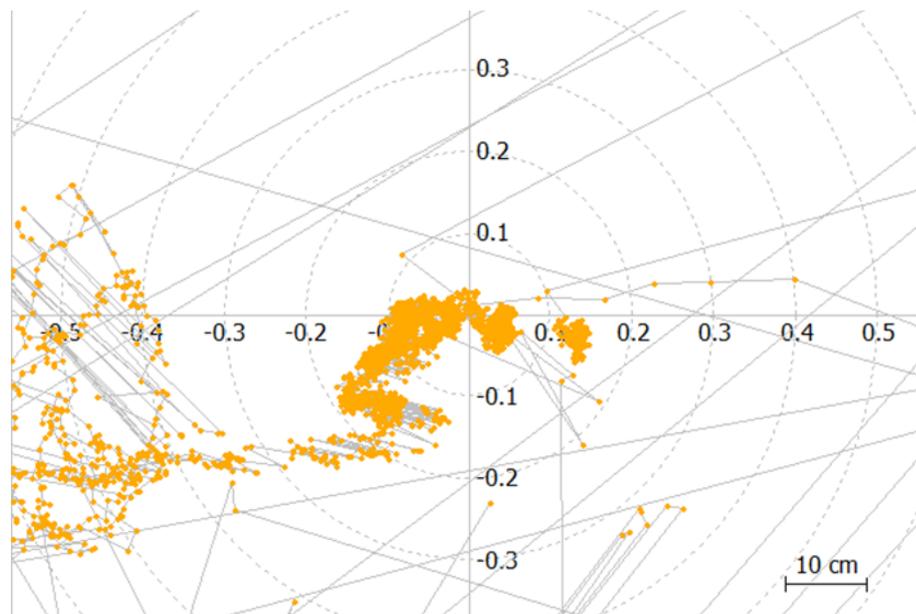


図 5.26 従来版受信機での MADOCA 結果 (水平)

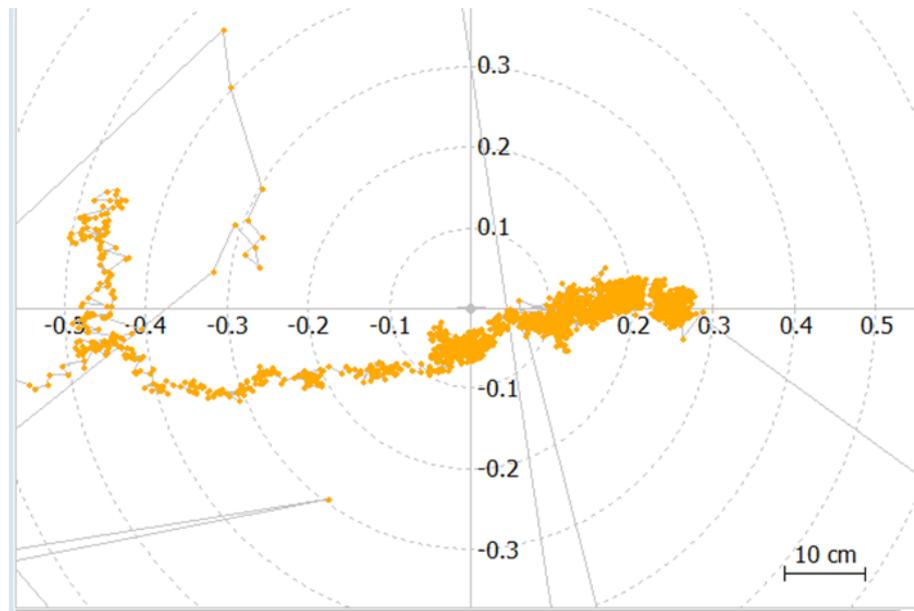


図 5.27 小型版受信機での MADOCA 結果 (水平)

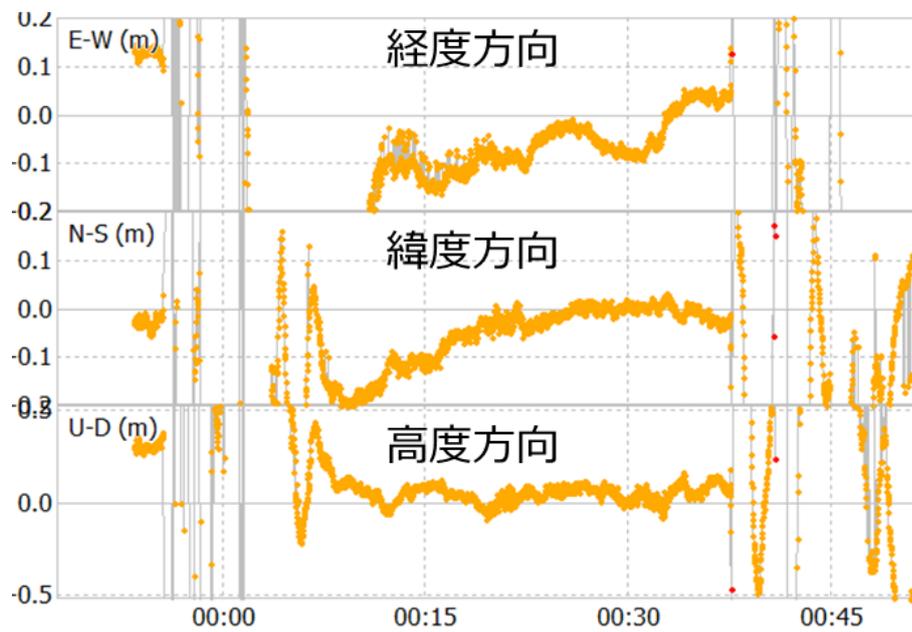


図 5.28 従来版受信機での MADOCA 時系列結果

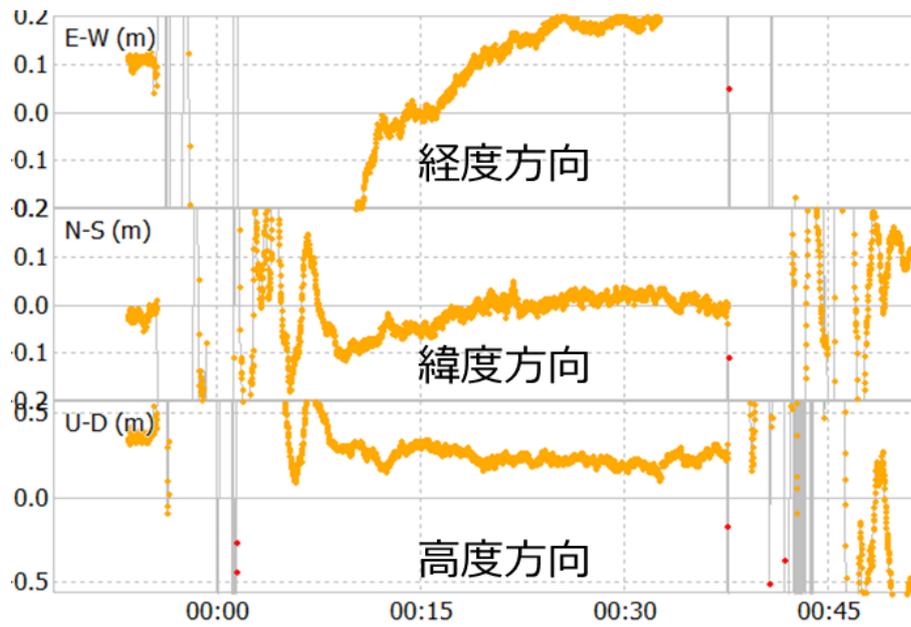


図 5.29 小型版受信機での MADOCA 時系列結果

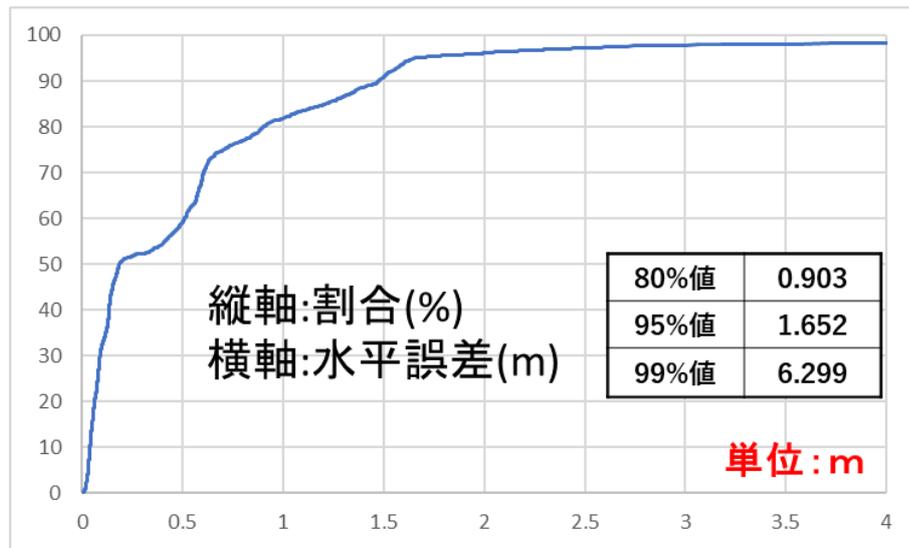


図 5.30 従来版受信機での MADOCA 水平絶対誤差の累積割合

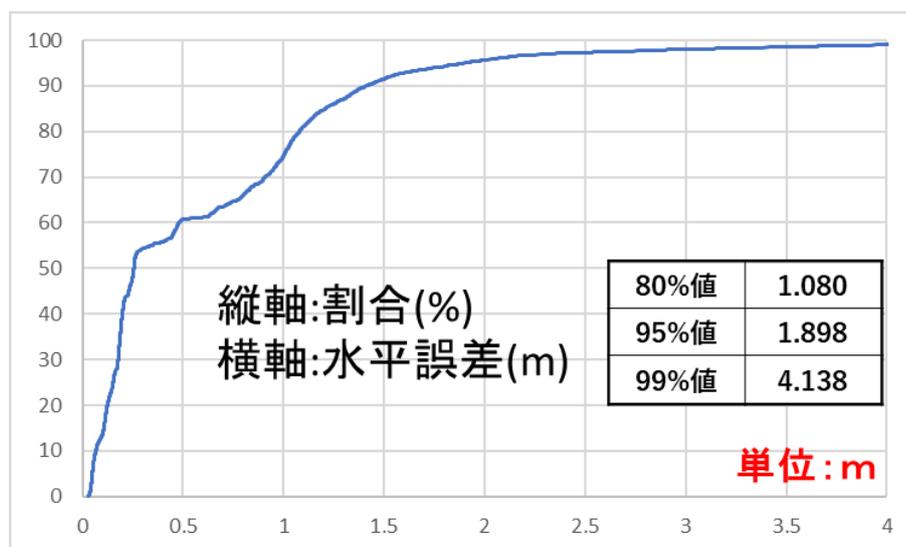


図 5.31 小型版受信機での MADOCA 水平絶対誤差の累積割合

上記の結果を平均値と標準偏差および95%値で表 5.7 と表 5.8 にまとめた。

表 5.7 従来版受信機による統計結果

	平均値	標準偏差	95%値
緯度方向誤差	-0.2864	1.2564	1.5086
経度方向誤差	-0.2700	0.6577	1.3392
高度方向誤差	0.5803	2.8661	4.1855

表 5.8 小型版受信機による統計結果

	平均値	標準偏差	95%値
緯度方向誤差	-0.1454	0.7360	1.4995
経度方向誤差	-0.3043	0.7204	1.3216
高度方向誤差	0.9337	2.1671	5.6132

5.3 海上実験 3 (汐路丸、冬季、東京湾館山付近まで)

第三回海洋実証実験は、第一回実証実験と同様に汐路丸に機器を設置し、測定を行った。今実験の目的は基本的に第 1 回と同様であり、1 点、アンテナの位置を 2 通りに分けて実施した。1 つのアンテナは、第 1 回と同じ場所に設置し、もう 1 つのアンテナは船橋よりさらに上の場所に設置し、船自身による障害物の影響をできるだけ少なくなるよう配慮した。なお本実験の 1 日目の航海は、気象の影響でおおしけでの実験となった。

3 日間の航路は、以下の通りであった。

- 1 日目 (1 月 15 日) : 東京都中央区勝どきから出航し、千葉県館山沖へ航行。館山沖で錨泊。
- 2 日目 (1 月 16 日) : 館山沖周辺を航行し、館山沖で錨泊。
- 3 日目 (1 月 17 日) : 館山沖から勝どきへ航行し、帰港 (図 5.32 に航路を示した)。

本実験では、これまで同様に Trimble SPS855 受信機 での RTK 測位をレファレンスとして評価する予定であったが、FIX 率が安定して 95% 程度なかったため (1月15日の往路: 上部アンテナ 85.5%、下部アンテナ 77.6% 1月17日の復路: 上部アンテナ 94.8%、下部アンテナ 85.5%)、レファレンスとして利用するには十分でないと判断した。現在原因を調査中であるが、スマホを利用したテザリングによる補正信号の遅延ではないことは確認した。ゆえに、取得した観測データを用いて当研究室で開発している中長基線用の RTK エンジンによる後処理結果を真値として用いた (1月15日の往路: 上部アンテナ 87.1%、下部アンテナ 99.6% 1月17日の復路: 上部アンテナ 100%、下部アンテナ 100%)。

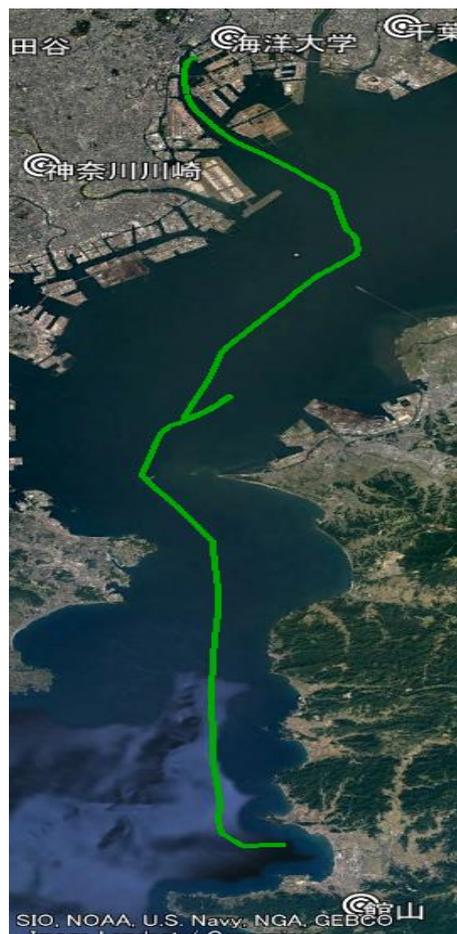


図 5.32 第三回実証実験三日目航路

機器の配線を図 5.33 に示した。2つのアンテナそれぞれから 3つの受信機に分配した。図 5.34 に 2つのアンテナの設置位置を示した。従来アンテナ位置と新規アンテナ位置での性能を比較するため、CLAS 測位方式と MADOCA 方式それぞれを測位する受信機を設置した。今実験での受信機の L6 信号の捕捉設定は全受信機すべて、利用条件のよい衛星を自動で選択するオート形式(測位に利用する L6 信号を受信する衛星を固定化しないことで、現在利用している衛星との通信が遮られた場合でも他の衛星から補強信号を受け取り、高精度測位を継続することが出来る)で補強情報を取得した。

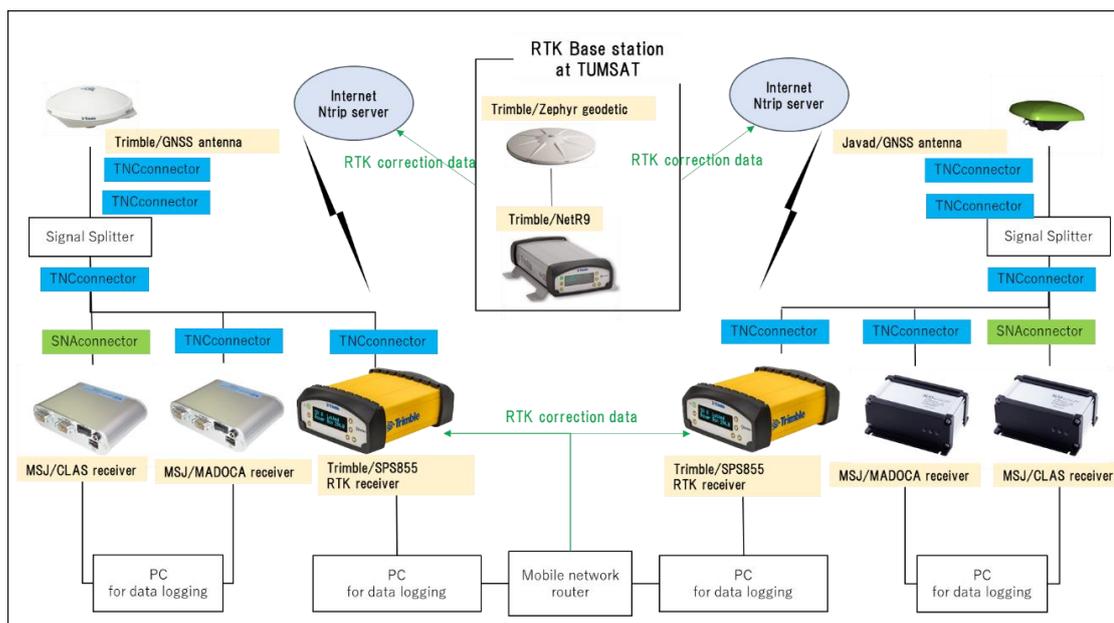


図 5.33 第三回実証実験配線図

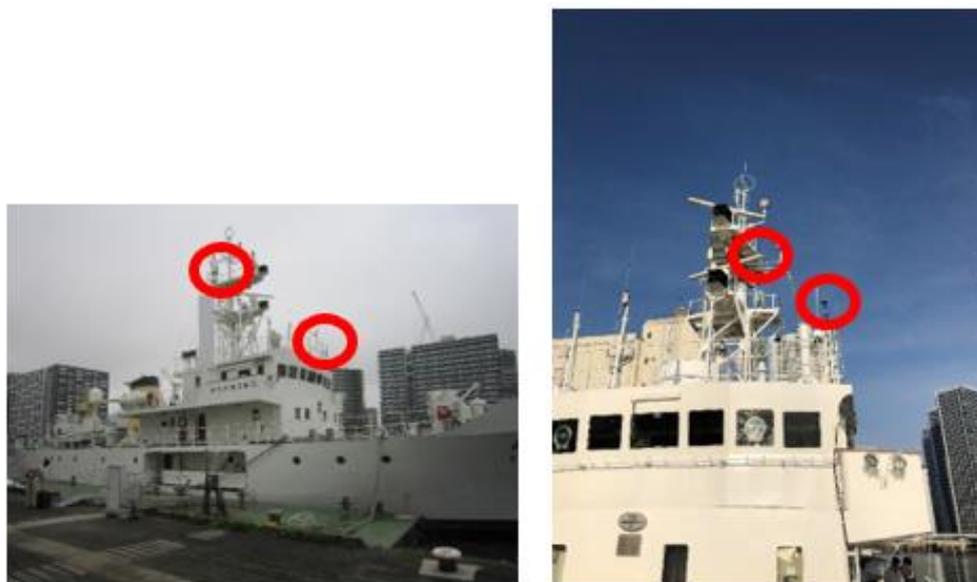


図 5.34 汐路丸における第3回海洋実証実験 アンテナ設置位置

図 5, 35 に実際にアンテナを設置した場所の様子を示した。図の左側が、従来より高い位置に設置したアンテナで、Trimble 社 Zephyr-IIとなる。従来の位置に設置したアンテナは図の右側で、JAVAD 社 G5T となる。機器の構成を 2 つに分け、高い位置に設置したアンテナと従来位置に設置したアンテナで測定を行う。なお、マゼランシステムズジャパン社のたゆみないファームウェアの更新があり、2019 年 9 月の第二回実験時のファームウェアと比較すると、細かな測位アルゴリズムの修正がなされていることに加え、CLAS 方式の初期化時間の改善が行われている。従来より高い新規のアンテナには小型版の受信機を、従来の位置のアンテナには従来版の受信機を接続し、CLAS および MADOCA PPP をそれぞれ評価した。

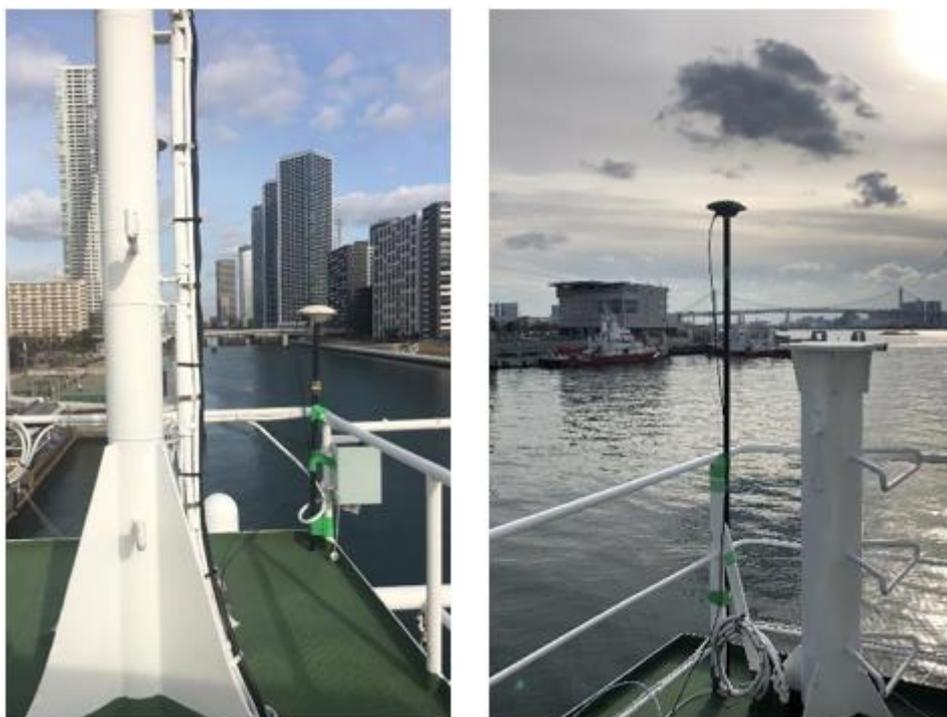


図 5.35 第三回実証実験のアンテナ設置位置

5.3.1 CLAS の評価結果

ここでは、実証実験三日目の CLAS の結果を代表して示す。新規アンテナ位置による水平プロット結果を図 5.36 に、従来アンテナ位置による水平プロット結果を図 5.37 に示した。FIX 率は新規アンテナ位置が 99.5%、従来アンテナ位置が 99.5% であった。両受信機とも全般的に良好で、終始水平で 10cm 未満となる結果となった。真値となる RTK 測位の FIX 率は 100% であった。ゆえに、CLAS の精度を評価できる割合は 100%が最大となる。

FIX 解の時系列での結果をそれぞれ図 5.38 と図 5.39 に示した。両結果ともに、水平高度とも安定した高精度の位置が得られていることがわかる。

FIX 解の水平絶対誤差の累積割合の結果をそれぞれ図 5.40 と図 5.41 に示した。両結果ともに、99%値でも 10cm 未満となっており、非常に良い結果であった。

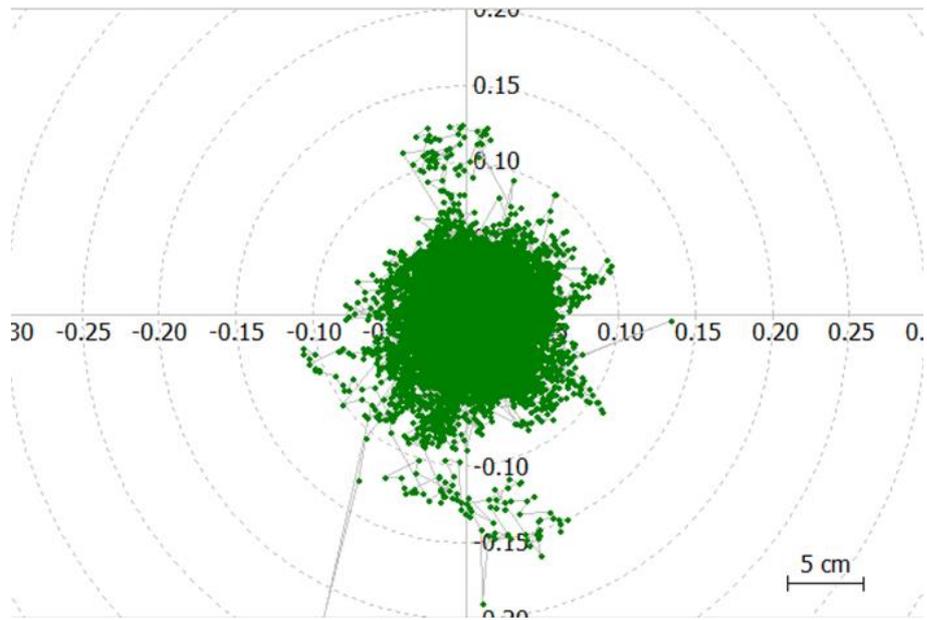


図 5.36 新規アンテナ位置での CLAS 結果 (水平)

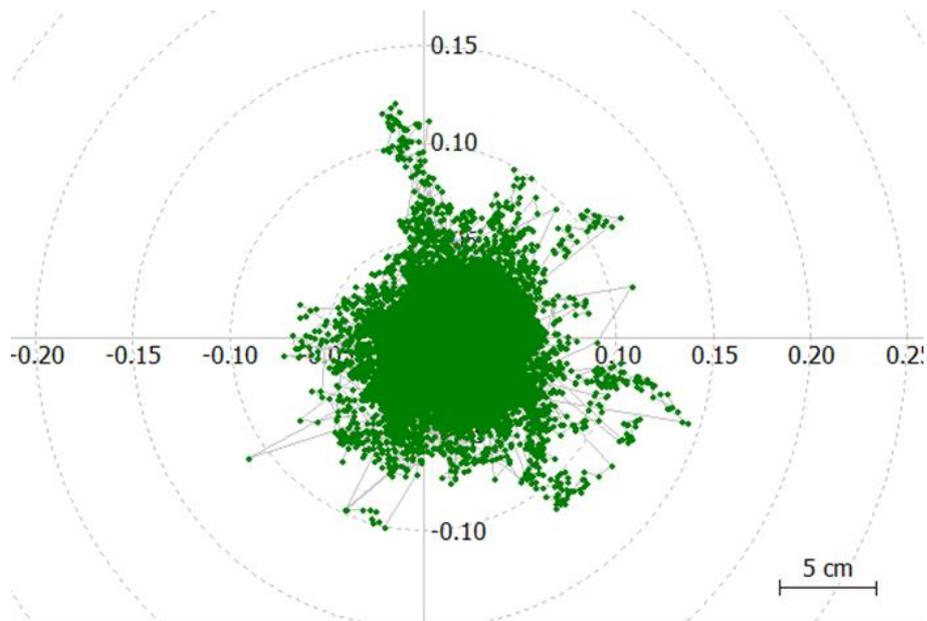


図 5.37 従来アンテナ位置での CLAS 結果 (水平)

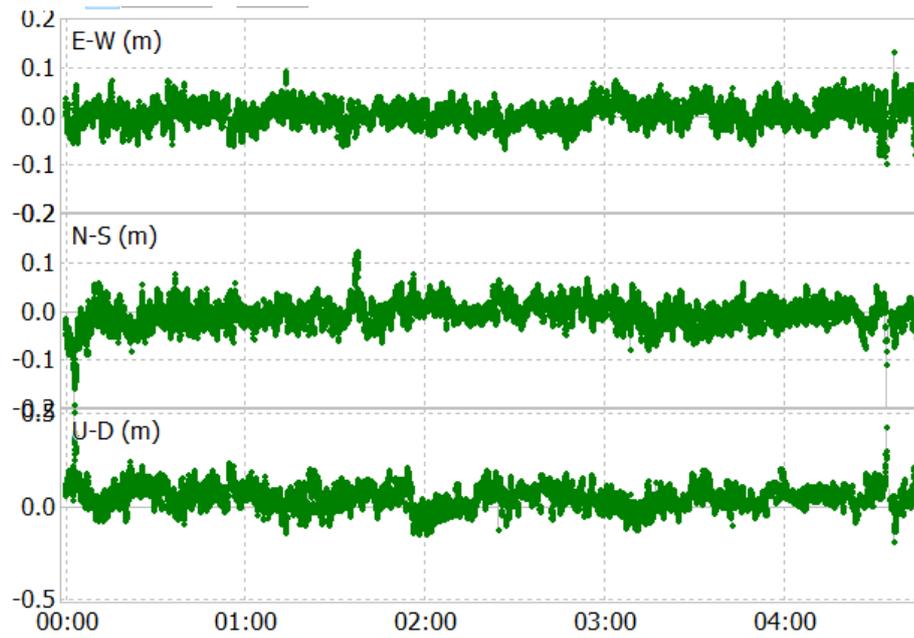


図 5.38 新規アンテナ位置での CLAS 時系列結果

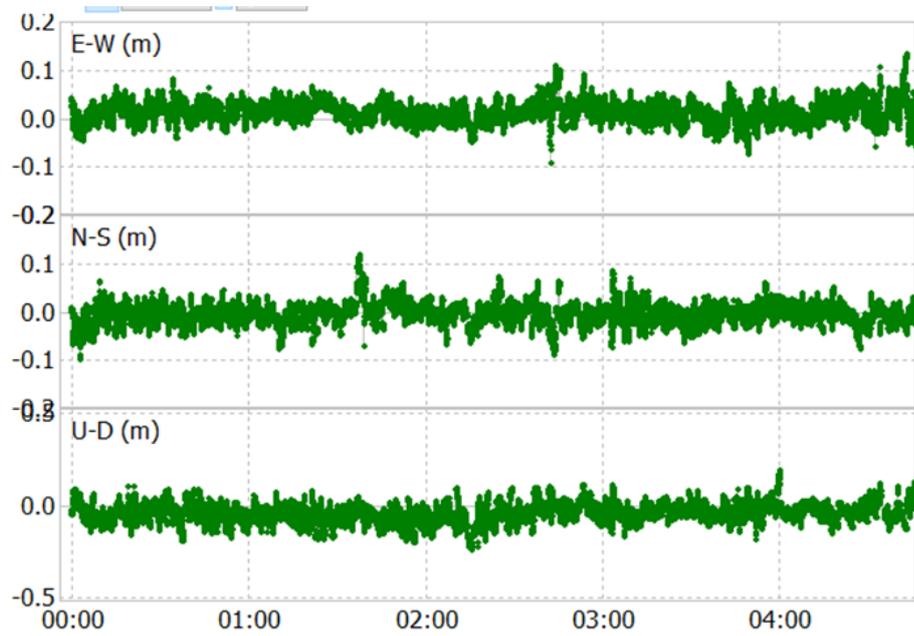


図 5.39 従来アンテナ位置での CLAS 時系列結果

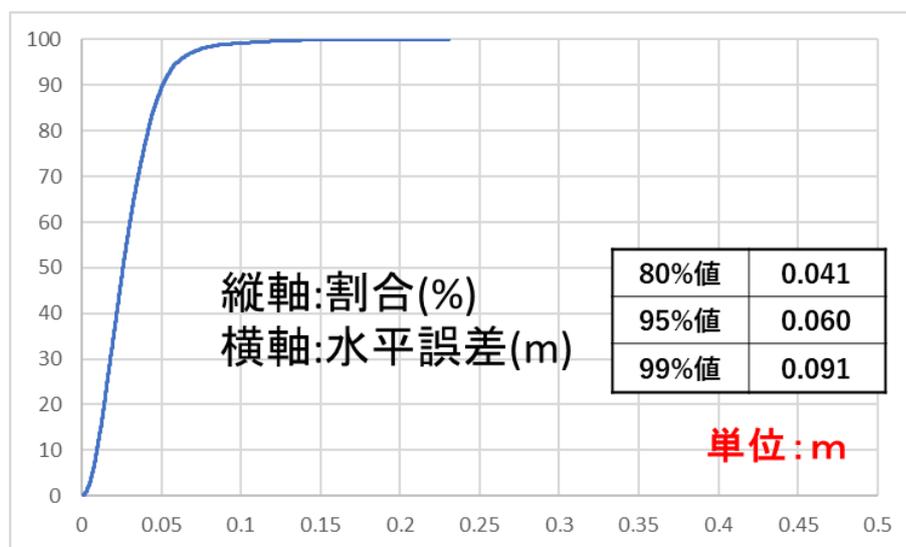


図 5.40 新規アンテナ位置での CLAS 水平絶対誤差の累積割合

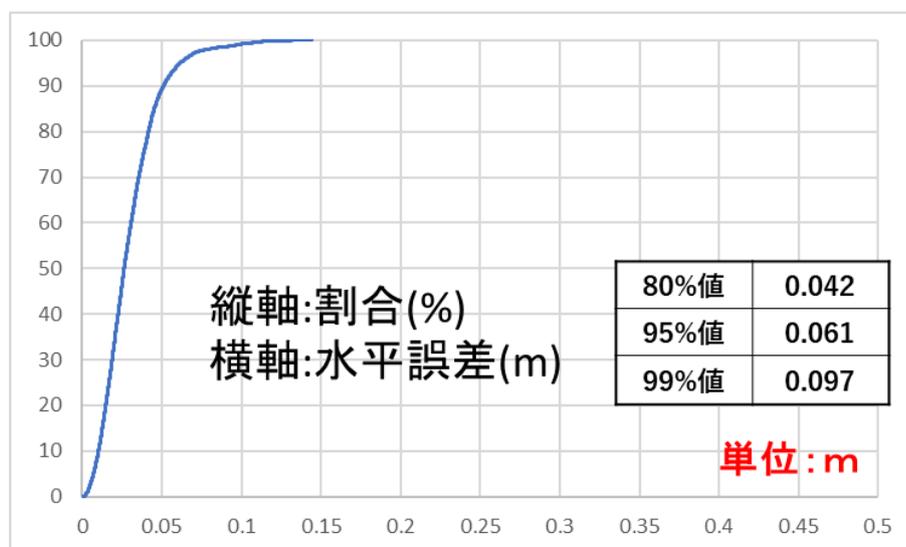


図 5.41 従来アンテナ位置での CLAS 水平絶対誤差の累積割合

上記の結果を平均値と標準偏差および95%値で表 5.9 と表 5.10 にまとめた。上述の結果のとおり、非常に良い結果であることがわかる。

表 5.9 新規アンテナ位置による統計結果

	平均値	標準偏差	95%値
緯度方向誤差	0.0032	0.0255	0.0486
経度方向誤差	0.0065	0.0218	0.0449
高度方向誤差	0.0554	0.0635	0.1540

表 5.10 従来アンテナ位置による統計結果

	平均値	標準偏差	95%値
緯度方向誤差	-0.0028	0.0263	0.0458
経度方向誤差	0.0154	0.0272	0.0493
高度方向誤差	-0.0351	0.0514	0.1239

5.3.2 MADOCA PPP の評価結果

CLAS と同様に実証実験三日目の MADOCA PPP の結果を代表して示す。水平方向の新規アンテナ位置による水平プロット結果を図 5.42 に、従来アンテナ位置による水平プロット結果を図 5.43 に示した。PPP 測位率は従来版が 99.9%、小型版が 99.8%であった。真値となる RTK 測位の結果は CLAS と同様に、トリプル SPS855 受信機のものを利用した。全体で 100%の FIX 率であったため、全体の時間の 100%分の評価となる。

あわせて、時系列での結果をそれぞれ図 5.44 と図 5.45 に示した。新規アンテナ位置である障害物の少ないほうの結果では、10cm を超える誤差はみられるものの、安定して 10cm 程度の精度が得られていた。一方、従来のアンテナ位置の結果では、ところどころ数 10cm の飛びがみられた。

図 5.46 と図 5.47 には、水平絶対誤差の累積割合をそれぞれの受信機で示しており、95%値で、新規アンテナ位置では、10cm レベル、従来アンテナ位置では、60cm 台の結果であった。これまでの 2019 年 7 月及び 9 月の実験結果と比較すると、新規アンテナ位置の結果は、ベストな性能であった。これは CLAS と同様の傾向であった。マゼランシステムズジャパン社のファームウェアの更新による部分が大きいと予想される。

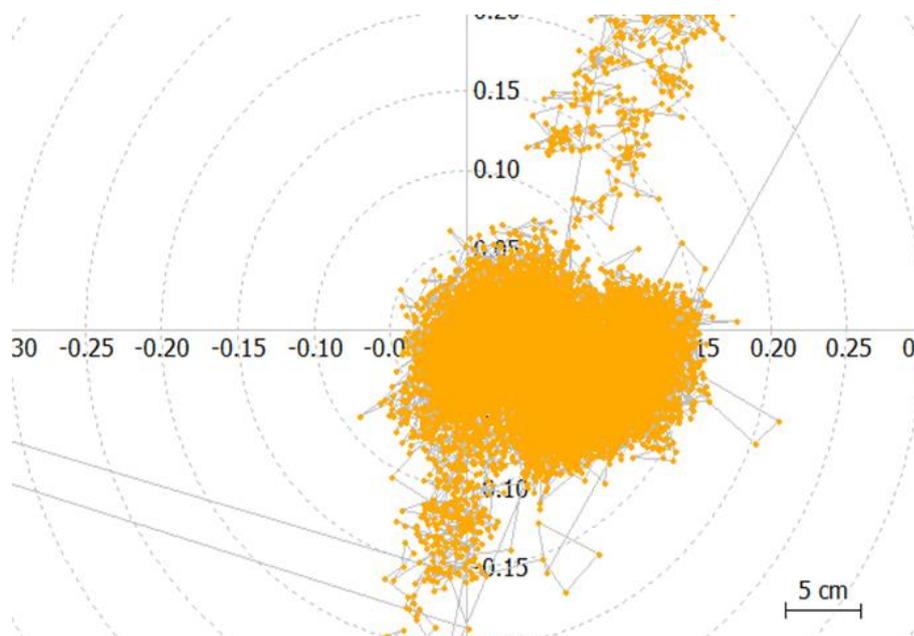


図 5.42 新規アンテナ位置での MADOCA 結果（水平）

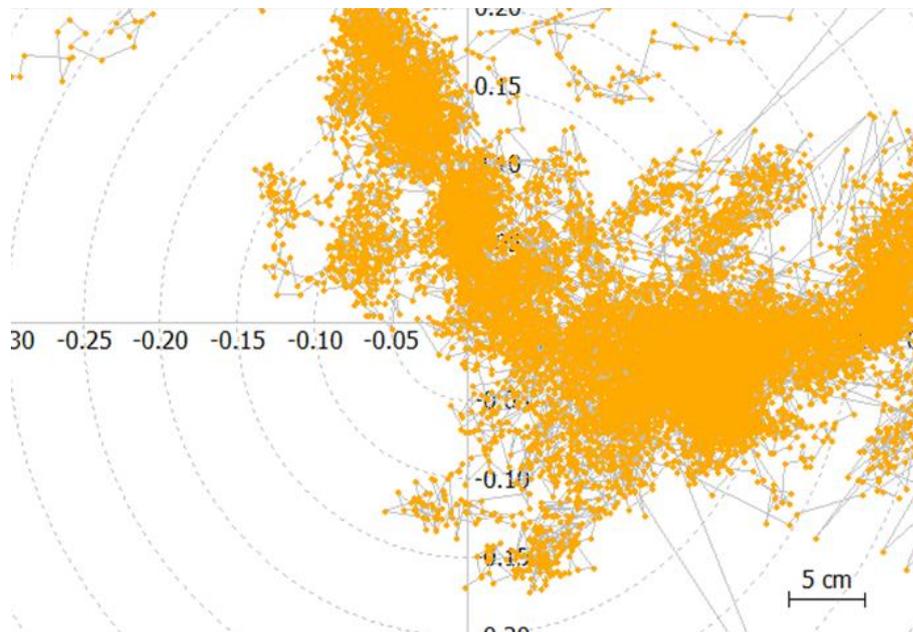


図 5.43 従来アンテナ位置での MADOCA 結果 (水平)

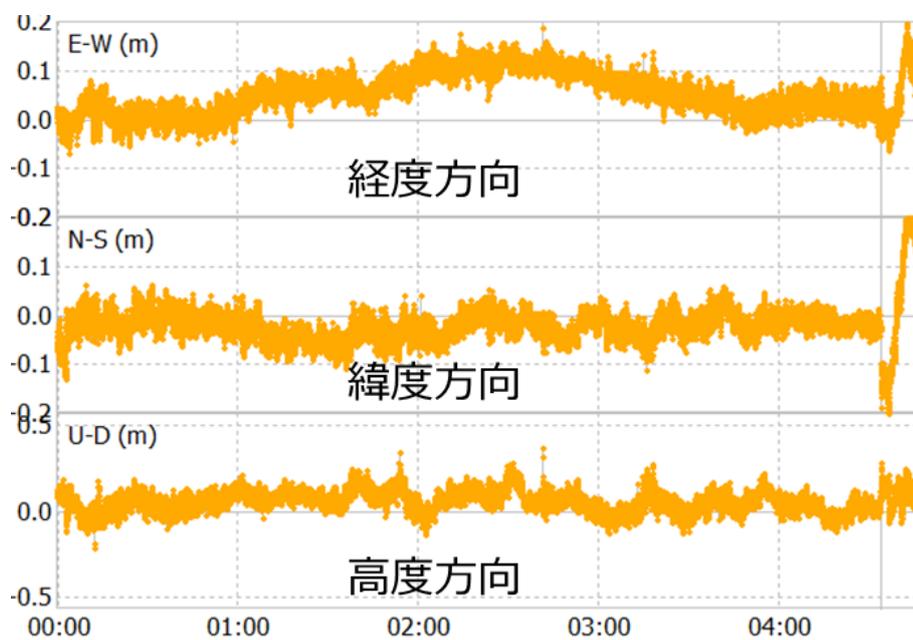


図 5.44 新規アンテナ位置での MADOCA 時系列結果

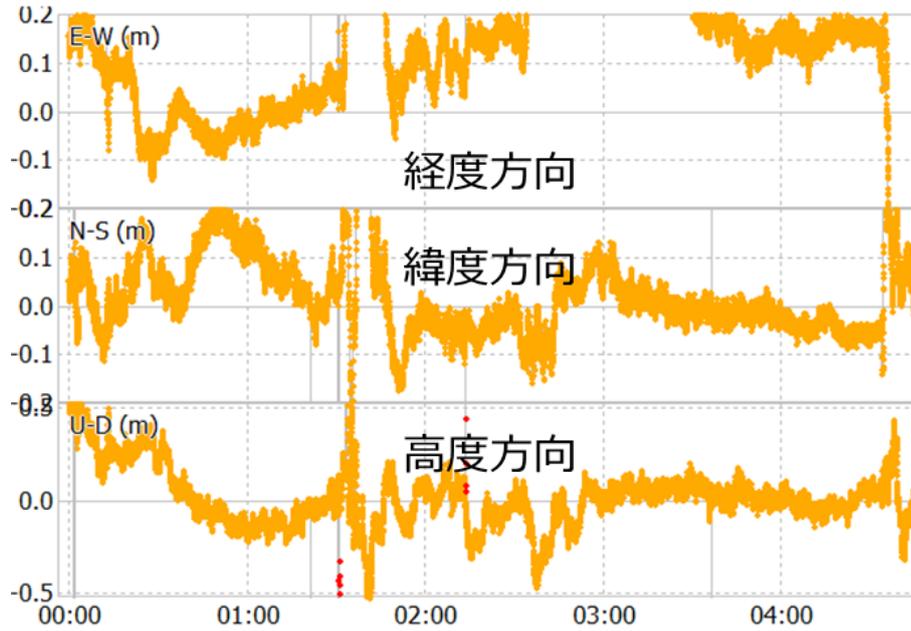


図 5.45 従来アンテナ位置での MADOCA 時系列結果

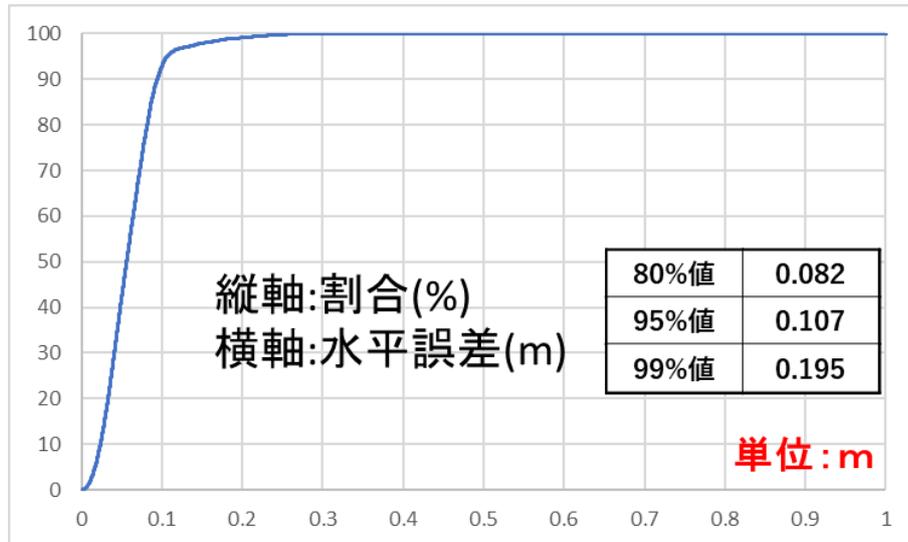


図 5.46 新規アンテナ位置での MADOCA 水平絶対誤差の累積割合

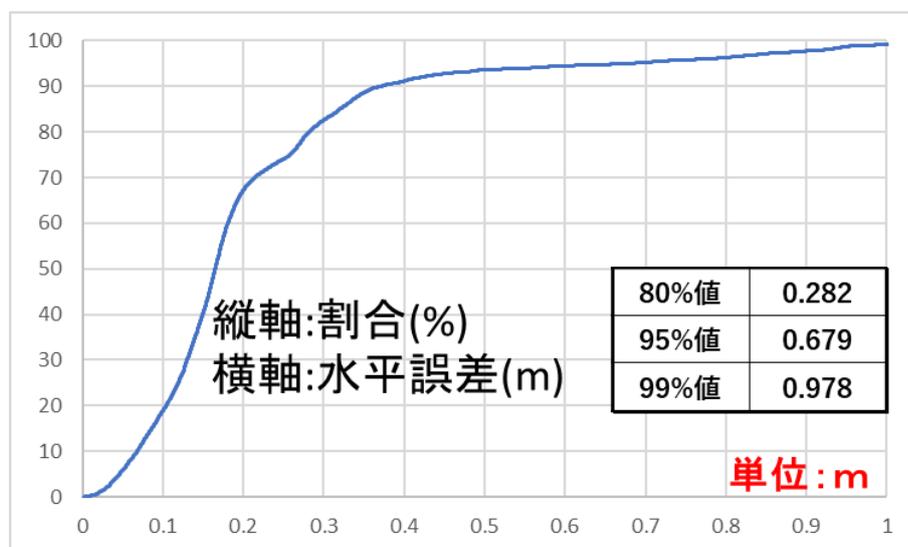


図 5.47 従来アンテナ位置での MADOCA 水平絶対誤差の累積割合

上記の結果を平均値と標準偏差および95%値で表 5.11 と表 5.12 にまとめた。

表 5.11 新規アンテナ位置による統計結果

	平均値	標準偏差	95%値
緯度方向誤差	-0.0032	0.0554	0.086
経度方向誤差	0.0129	0.0471	0.0855
高度方向誤差	0.0789	0.1358	0.1819

表 5.12 従来アンテナ位置による統計結果

	平均値	標準偏差	95%値
緯度方向誤差	0.0231	0.0917	0.1795
経度方向誤差	0.1267	0.2393	0.6163
高度方向誤差	0.0183	0.1636	0.3521

5.4 海上実証実験のまとめ

3回の実証実験を通して、最後の2020年1月の実証実験では、CLAS、MADOCA PPPともに、期待される測位精度が達成されていた。ただし、MADOCA PPPの結果において、アンテナの場所が鉄塔で遮られる影響により、測位精度が劣化する時間帯があった。期待される測位精度とは、水平でCLAS、MADOCA PPPともに10cm未満を意味する。通常のRTK測位は、cm級が求められるが、実際のアプリケーションにおいて、cm級まで必要なく10cmレベルでも十分なものも多い。

マゼランシステムズジャパン社は 2019 年度を通して、受信機のファームウェアの更新を複数回実施しており、その更新による性能向上が要因の 1 つであると予想される。また、1 回目と 2 回目の実証実験が夏場であったことから、3 回目の実証実験と比較して、対流圏遅延量の水蒸気分の変動が、3 回目の実証実験では少なかったと予想される。その影響が 3 回目の実験での性能向上寄与しているかもしれない。また電離層遅延量の推定の影響については、一般的に春や秋に電離層の擾乱が起こることが多く、本実験の実証時期とは重なっていない。

CLAS 方式について、第 2 回の実証実験以降、みちびきからの補強信号を自動選択する機能が、利用した測定用受信機全てに実装されたことにより、橋梁下を通過するなど、衛星を捕捉することが困難な場所以外は、みちびきからの補強信号を早期に捕捉し、測位利用することができていた。測位精度については、オープンスカイ環境であれば CLAS 測位の仕様を満たす精度で測位できた。但し、高層ビルに囲まれた河川や遮蔽物になりうる建造物の多い沿岸などでは、測位に利用できる衛星が確保できず、収束時間や測位精度が安定しない結果となった。また、測位環境の条件が悪い場合、ミス FIX が発生することも確認された。ただし、ファームウェアを更新したことにより、これらの課題が克服されている可能性があることに注意された。

MADOCA 方式は、CLAS 方式と同様に、第 2 回の実証実験以降、みちびきからの補強信号を自動選択する機能が、利用した測定用受信機全てに実装されたことにより、橋梁下を通過するなど、衛星を捕捉することが困難な場所以外は、みちびきからの補強信号を捕捉し、測位利用することができた。測位精度については、オープンスカイ環境であれば cm オーダーで測位することができた。しかし、高度方向の精度のバラつきが発生する場合は散見された。CLAS 方式と異なり、高精度の測位を行うために収束時間を要するため、河川を航行中の場合など、測位環境が十分でない場合は測位精度が安定しないことが確認できた。

5.5 CLAS の初期収束時間について

海上での高精度測位を想定すると、沿岸部では CLAS、遠洋では MADOCA PPP の利用が期待される場所である。MADOCA PPP の利用にておいは、もともと初期収束時間に 10 分以上要するもののため、ある程度用途を限定したアプリケーションが想定され、移動体には利用しにくい側面がある。一方、CLAS は移動体を想定した補正方式で、初期収束時間は 1 分以内を目標としている。さらには、再補足時の収束時間は実際に数秒という結果もでており、ここでは、CLAS に絞って、海洋上での初期収束時間を調査した結果を報告する。実験データは、上述の 2020 年 1 月に取得したものとした。補強信号 1 周期分の情報を受信完了し、補強信号を使用して、補強対象衛星の測位信号に含まれる搬送波位相のアンビギュイティを決定するまでの時間を測定した。測定毎に受信機を立ち上げなおし、計測した。また、測定中は千葉県館山沖を航行中（2020 年 1 月 16 日）であり、オープンスカイ環境であるが移動中である。CLAS 方式の初期収束時間の仕様は、60 秒（95%）以下である。アンビギュイティの決定までに 300 秒以上を要した結果は、Time Out と記載した。平均算出の際に Time Out した解を含まずに計算していることに留意

されたい。表 5.13 にその結果をまとめた。

結果を見るとわかるように、両アンテナともに、平均値は 60 秒未満となった。Zephyr-II は見通しがよりよい場所で、G5T ANT は見通しが少し制限される場所に設置したものである。見通しが良い場所に設置したアンテナのほうが、初期収束時間が短い結果となった。

表 5.13 CLAS の初期収束時間のチェック（館山湾沖で実験中のデータ）

N	Zephyr-II ANT	G5T ANT	N	Zephyr-II ANT	G5T ANT
1	44[s]	54[s]	16	40[s]	40[s]
2	63[s]	40[s]	17	40[s]	40[s]
3	190[s]	72[s]	18	Time Out	40[s]
4	49[s]	40[s]	19	40[s]	40[s]
5	Time Out	40[s]	20	41[s]	65[s]
6	62[s]	40[s]	21	Time Out	40[s]
7	82[s]	60[s]	22	42[s]	40[s]
8	40[s]	41[s]	23	65[s]	40[s]
9	43[s]	95[s]	24	40[s]	40[s]
10	40[s]	40[s]	25	40[s]	40[s]
11	40[s]	40[s]	26	130[s]	40[s]
12	40[s]	40[s]	27	40[s]	40[s]
13	44[s]	40[s]	28	40[s]	40[s]
14	41[s]	40[s]	29	40[s]	40[s]
15	40[s]	40[s]	Average	54.46[s]	43.69[s]

—禁無断転載—

2019年度JKA機械振興補助事業

「準天頂衛星「みちびき」の海洋分野での活用
促進に向けた調査研究」研究会

研究委員会報告書

2020年3月