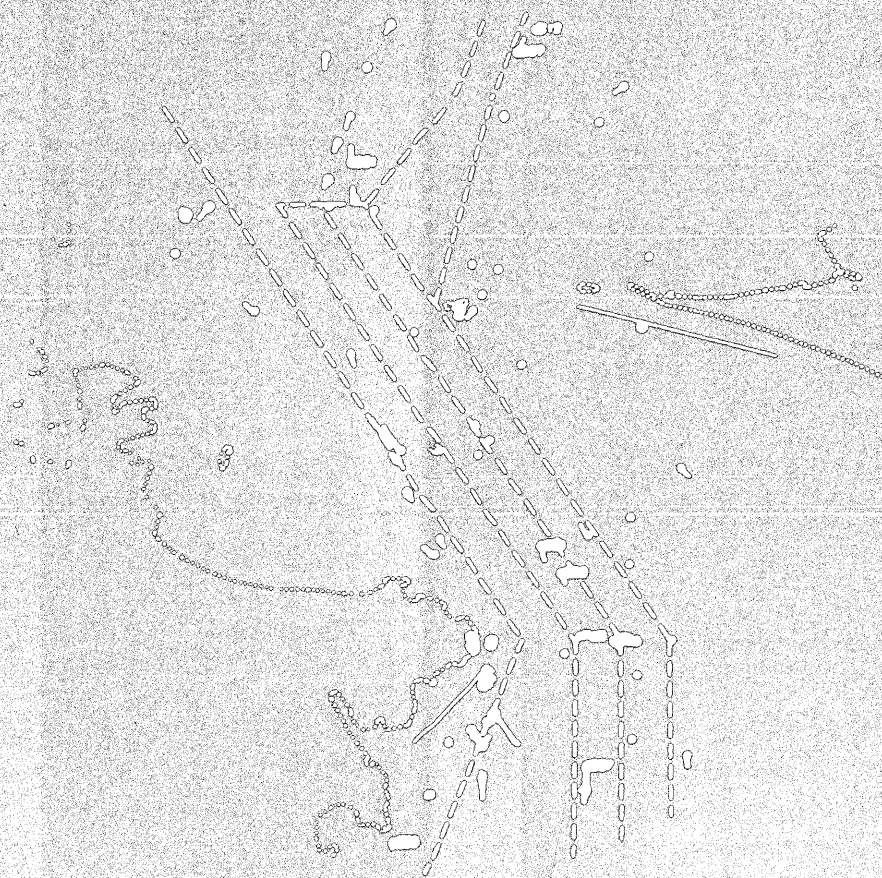


ISSN 0287-6450

Denpa kōhō

ELECTRONIC NAVIGATION REVIEW

電波航法



JACRAN. **54**

2012

電波航法研究会 発行

Published by the Japanese Committee-
for Radio Aids to Navigation

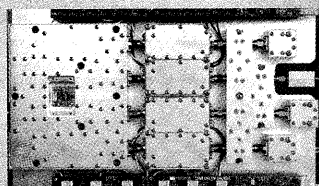
港湾・沿岸の安心安全に貢献する 東京計器のソリューション



サーバー・コンソール

レーダーシステム

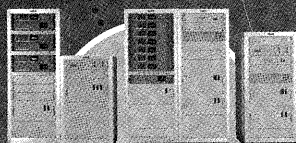
最先端のマイクロ波技術で実現
14GHz帯固体化レーダー装置が登場



GaNハイパワーアンプ



カメラ装置



無線システム



AISシステム

映像、通信、無線などあらゆる情報を高次元に統合し、
多様なシステムニーズにお応えします。

東京計器株式会社

www.tokyo-keiki.co.jp/

電子事業部 海上交通部

〒144-8551 東京都大田区南蒲田2-16-46 TEL.03-3737-8630 FAX.03-3737-8669

※2013年4月1日より、「電子事業部」は「電子システムカンパニー」に名称変更いたします。

— 目 次 —
CONTENTS

巻頭言「教えない教育」	会長 林 尚 吾.....(1)
	Chairman Shogo HAYASHI

講演の記録

[衛星測位]

「マルチGNSSの動向と我が国の取り組み」	安田 明 生.....(3)
	Akio YASUDA
「ソフトウェアGNSSの開発と周辺」	久保 信 明.....(15)
	Nobuaki KUBO
「準天頂衛星「みちびき」のL1-SAIF信号」	坂 井 丈 泰.....(24)
	Takeyasu SAKAI

[海洋レーダ]

「海洋レーダの原理及び海洋レーダの利用による分野」	古 川 恵 太.....(32)
	Keita FURUKAWA
「津波に対するレーダ観測活動の調査（その2）」	渡 辺 康 夫.....(37)
	Yasuo WATANABE

特別研究会報告

「特別研究会 防衛省技術研究本部電子装備研究所の見学」	事 務 局.....(54)
	Secretariat

臨時研究会報告

「臨時研究会 次世代AIS国際標準化のためのワークショップの パネルディスカッション参加報告」	事 務 局.....(58)
	Secretariat

電波航法研究会事業報告（平成24年度）	事 務 局.....(64)
	Secretariat

教えない教育

電波航法研究会

会長 林 尚吾

Chairman Shogo HAYASHI

冒頭から私事で恐縮ではありますが、この3月で約40年間勤務した大学教員を退職します。この間を振り返り、思い出とともにお伝えしたいことがあります。

大学に就職して、間もないころの小生の講義は「矢つぎ早に喋る余裕のない講義」でした。学生の理解度を聴いている学生の顔で判断する余裕もなく、ひどいものであったと深く反省しています。その後長い年月の繰り返しでの進歩が、教授法にも徐々に現れてきました。

まず、その一つが「講義の開始時と終了時の挨拶」です。社会や高校までの学校生活では当然のことではありますが、大学で行っているところは、少なくとも小生の勤務する大学においては皆無だそうです。幼稚園から始まり、高等学校に至るまで、基本は挨拶から始まったといえると思います。しかし、大学に入りますとそれぞれの講義の前に「気をつけ！ 礼！」をする教員はいなくなってしまう。教員に自信がないのではないかと思います。小生も「挨拶なんかにはこだわらない進歩的な教師の振り」がしたかった時期もあります。自分の講義を「礼」を持って始めることができなかったことは、はっきり言えば自信が無いか、矜持が無いか、だったと思います。

学生諸君の評価アンケートでは、「始めの開始の挨拶の無い講義は、休憩時間との境目もなくダラダラと講義に移り、私語は絶えないままに終了時刻の前に終わってしまう」と書いてありました。そして「挨拶の効果」は「休憩時間との切り替えが出来て、気を引き締めて講義を聴講すること、私語も絶え、教授の言葉を理解するように努め、考えるようになった」という絶大な効果を書いてありました。中には「これぞ！大学の講義！」と受講したことを喜んだ学生の評価や、就職の採用面接の際に、「君は他の学生よりも挨拶が良かったから採用した」と言われた学生の報告を受けたこともありました。

挨拶は会社では当然のことではありますが、青春期の大切な時期を「挨拶」の重要性を知らずに通り過ぎてしまう学生たちがどれほどに多いものか。挨拶に厳しい体育会系の学生が就職活動で有利なことにも関係しているかもしれません。

現在の講義では、挨拶に続き、学生が板書（今はパワーポイント）の転記を終了してから説明する方法をとっています。学生からは「集中して説明が聴けるので理解度が高まります」と好評でした。自分の学生

時代のことを反映して講義の方法を変えた次第です。

もうひとつ、お伝えしたいのは「教えない教育」です。

「教えない教育」という教育法が北欧のフィンランドにあります。これは、教えられた知識はすぐに忘れてしまいますが、「自分で考えて得た知恵は一生もの」で生涯忘れないものです。教室での講義は「知識を授ける」ことになりますが、私は「教えない教育」を学生実験で実践しました。受講する学生には課題の予習レポートを提出させ、その内容に関して一人ずつ口頭試問を行ってきました。大学生のレポートは全てが本人の責任であることを自覚させた上で、そのレポートの内容を小中学生にも理解できるように簡明に説明させますが、やさしく説明できるためには本質を理解していなくては難しいことです。学生がわからない場合にも決して解答は教えず、ヒントだけを与えます。このヒントを与えることを何度でも繰り返します。学生が考えて、考えて、自分の力で正しい答えを導きだすまで指導しました。この過程を繰り返して10課題のレポートを完成させた時、全ての学生に大きな達成感と「生涯忘れる事のない知識」が縦横の繋がりを持った織物のように獲得されています。学生らの感想には「これまで考えることをしていませんでした」、「考えることの重要性を学びました」、「考えれば難しく見えたことも理解できることを知りました」、「この授業で初めて大学生らしい勉強をしました」、さらには「考えることがこれほどに楽しいこととは知りませんでした」と、に大きな感動が

残ったことをほとんどの学生が述べていました。

ここに至るまでには授業時間数の何倍もの時間がかかり、「鬼の林」と言われていたようですが、多くの卒業生からは思い出話とともに「感謝」が伝わってきます。後輩達にも引き続き「鬼の林」であり続けることを願われています。

小生にも大きな感動と喜びを与えてくれた学生諸君の言葉は小生の宝物であり続けています。

日本が世界一であり続けるために、「これから、考えて、考えさせて」、未知の世界を開拓し、世界に冠たる研究・開発を進めて下さることを電波航法研究会の諸賢に願ってやみません。

マルチ GNSS の動向と我が国の取り組み

東京海洋大学名誉教授

安田 明生

1 はじめに

2010年代は衛星測位界の動きから目を離せない10年となろう。我が国では2010年9月11日の準天頂衛星（QZSS）初号機「みちびき」の打ち上げ後、1年余りの実証試験の高評価により、実用システムとして2010年代の後半に向けて7機体制の自律衛星測位システムの構築に向けて動き始めた。隣国中国では2012年末には静止衛星（GEO）5機、傾斜型地球同期軌道衛星（IGSO）5機、中軌道周回衛星（MEO）4機をそろえて、アジア地区への測位サービスを開始した。さらに、2020年までには35機でグローバル化すると宣言している。一方、開発宣言後早くも10年以上経過したGalileoも2016年のFOCに向けて、遅まきながら整備が加速し始めた。インドのIRNSSはまだ初号機も上がってはいないものの2015年には7機体制の地域衛星測位システムを完成させるとしている。GPSとGLONASSも近代化に向けて着実に歩を進めている。

本稿では、世界的なGNSSの現状と新たな開発動向を概観し、我が国の測位システム開発状況とアジア・オセアニア地区におけるMGAキャンペーンの展開、人材育成の取り組み、近隣国の研究活動状況などを概観する。

2 世界のGNSS

現在運用されている全地球航法衛星システム（GNSS）は米国によるGPSとロシア連邦によるGLONASSの二つで、欧州連合によるGalileoは展開途上、中華人民共和国によるBeiDou/COMPASSは静止衛星を含めて14機でアジア地区での運用を2012年の12月に開始した。これらのシステムの概要と現況を表1にまとめた。以下各システムについて解説する。

2.1 GPS

2.1.1 GPSの生い立ち

1973年、米空軍と海軍は統合して、新しい衛星測位システム開発を目指してJPO（Joint Program Office）を設立した。それまでの衛星航法システムは海軍が開発して運用するNNSS（Navy Navigation Satellite System）で、1～2時間に一回、数百mの誤差で位置が求められるのみであった。

1978年2月22日にブロックⅠと呼ばれる実験GPSシステム第一号機が打ち上げられ、1985年までに11機を打ち上げ、実験を続けた。その後、実用機ブロックⅡ、ブロックⅡAを打ち上げ、軌道上に18機が揃った1993年12月8日に初期運用（IOC）開始宣言がなされ、地球上どこでもいつでも100m以下の誤差での測位が可能となった。その後、ブロックⅡR、ブロックⅡM、ブロックⅡF、ブロックⅢ（2014

表1 GNSSの概要

	GPS	GLONASS	Galileo	BeiDou
衛星機数	MEO24機 (4機×6軌道面)	MEO24機 (8機×3軌道面)	MEO30機 (10機×3軌道面)	MEO 27機 GEO 5機 IGSO 3機
現行衛星数	31機	24機	実証衛星4機	GEO 5機 MEO 4機 IGSO 5機 アジア地区FOC
設計寿命	7.5年-15年	7年-10年		
軌道半径	26,561 km	25,510 km	29,980 km	27,905 km (MEO)
周回周期	12恒星時間 (約11時間58分2秒)	11時間15分40秒	14時間21分36秒	12時間53分12秒
軌道傾斜角	55°	64.8°	56°	55°
搬送波周波数	L1=1,575.42MHz (10.23MHz×154) L2=1,227.6MHz (10.23MHz×120) L5=1,176.45MHz (10.23MHz×115)	G1=1,602+K× 0.5625MHz G2=1,246+K× 0.4375MHz K=-7～24	E1=1,575.42MHz E5=1,191.795MHz E6=1,278.75MHz	B1=1,561.098MHz B1-2=1,589.742MHz B2=1,207.14MHz B3=1,268.52MHz
多重方式	CDMA	FDMA	CDMA	CDMA
測距信号（民生用のみ）	L1C/A : code 1023 Chip rate : 1.023Mcps L2C : 511.5kcpsTDM CL: Pilot 76250, CM:10230+50bps L5: code 10230, Chip rate : 10.23Mcps	G1:code 511.5, Chip rate: 511.5kcps	E1A:BOCcos(15,2.5) E1B/C:BOC(1,1) Data + Pilot E5: AltBOC(15,10) chip rate: 10.23Mcps E6: BOC(10,5) BPSK(5)	QPSK B1: chip rate 2.046Mcps B2 :chip rate 1.2046Mcps Q:10.23Mcps B3: chip rate 10.23Mcps
精度	SIS RMS URE 0.9m	SIS RMS URE 2.8m		7-10m (RMS)

年開始予定）と性能向上を図りながら、進化し続けている。

2.1.2 GPSの概要

GPSではシステム全体を三つの部分（セグメント）に分割して定義しており、衛星群はスペース・セグメント、監視システムをコントロール・セグメント、受信機を含めシステムを活用する部分はユーザ・セグメントと呼んでいる。

スペース部分であるGPS群は昇交点経度が60度ずつ異なり、傾斜角55度の6軌

道面に各々4機の衛星が配置されて、24機で全地球上をカバーして、上空が開けていれば24時間連続的に誤差数mの測位が保証される。軌道半径は26,561km、地球の半径は6,400km弱なので、約高度2万kmの上空を1/2恒星日（11時間58分2秒）に地球を一周する。すなわち一恒星日（約23時間56分：地球が360度回転する時間）で地球を2周回するので、同一地点で同じ衛星配置が前日より4分ずつ早く、上空に出現することになる。設計寿命は7.5年と言われているが、現在最も長いもので23

表2 GPS稼働衛星数

GPSブロック番号	衛星数	打上数(打ち上げ年)
Block I	0	11 (1978～1985)
Block II	0	9 (1989, 1990)
Block II A	9	19 (1990～1997)
Block II R	12	13 (1997～2004)
Block II R-M	7	8 (2005～2009) : L2C追加
Block II F	3	2 (2010～) : L5追加
稼働衛星数合計	31	(2013年1月16日現在)

II F-4 2013年5月打上予定, II F-5, 11月打上予定

GPS III (L1C追加) は2014年以降 (II F 12機打上後)

年目に入った古い衛星も使用されている。すべての衛星が同一の周波数で測位用の電波を発信しているが、それぞれが異なるPRNコードで変調されており、CDMAという方式で受信機での識別が可能となっている。基準発振器の周波数は10.23MHzで、その154倍の1,575.42MHzがL1帯と呼ばれ、民生用に無料開放されている。C/Aコードと呼ばれ、コード長1,024、チップレートは1.023Mcpsで、周波数スペクトルの主成分の帯域は2MHzである。表1にGPSはじめ世界のGlobal測位システム(計画中を含む)の軌道と信号を示す。

基準周波数の120倍のL2 (1,227.6MHz)帯は、ブロックII Rまでは軍用のP(Y)コード(帯域幅20 MHz)のみで、民生ユーザには公開されていない。P(Y)コードはL1帯にも重畳されている。ブロックII R-MからはL2帯にL2Cと呼ばれる民生コードが付加され、民生ユーザもL1とL2の二周波数の信号を用いることができるようになったが、2013年1月現在、GPS10機とQZS1機の11衛星のみで、いつでも測位に利用できるわけではない。ブロックII Fからは、115倍のL5 (1,176.45 MHz)帯にチップレート10.23 Mcpsが追加されたが、これも現在

GPSとQZS併せて4機のみである。

コントロール・セグメントのモニタ局は当初はOCS (GPS Operational Control System) 5か所(ハワイ、ケープカナベラル、アセンション、ディエゴガルシア、グエゼリン)であったが、NGA (National Geospatial- intelligence Agency)の11モニタ局が追加され、衛星軌道の決定の精度が向上している。

衛星に関わる誤差は、軌道とクロックで、これをSIS (Signal In Space) エラーと呼ぶが、2001年のすべてのGPS衛星の平均目標値がRMSで6m、2008年のそれが4mであったが、2001年に1.6m、2010年で0.9mを達成している。単独測位の精度の基となる数値である。モニタ局の追加が効果を發揮しているものと考えられる。

2013年1月現在、利用可能なGPS衛星は1990年から打ち上げが開始されたブロックII A衛星19機の内9機、II Rが12機、II R-Mが7機、II Fが3機、計31機が運用中である。この後はII F-4号機が2013年5月、5号機が11月に打ち上げが予定されている。II Fが12機打ち上げられた後に、ブロックIIIの打ち上げが始まるが、2014年以降とされている。ブロックIIIではL1

帯にGalileo互換のL1C (BOC(1,1)) が追加される。表2に衛星数一覧を示す。設計寿命が7.5年にも拘らず、20年以上稼働している衛星が存在する。

2.1.3 GPSの近代化

これは、遅れてはいるものの当時のゴア米副大統領の1998年3月30日のGPS近代化宣言に従って進められている。その内容は「2005年打ち上げ予定のブロックⅡFからL2帯による民生コードの送信と第3の周波数を民間用に追加する。」というものであった。ブロックⅢからのL1Cの追加は、後述のGalileoが送信するBOC(1,1)を相互運用性のために採用することになったためである。

近代化のメリットとしては

- 1) 3周波数による電離層遅延量の測定
- 2) 3周波数により耐干渉性
- 3) 送信出力アップによるC/N比の向上
- 4) 長コードによる分離性能向上
- 5) L5 (高チップレート) によるマルチパスの軽減
- 6) Ambiguityの高速決定
(L2, L5のエクストラ・ワイドレイン)
- 7) 軌道誤差、時計誤差の縮減
などが挙げられている。

2.2 GLONASS

2.2.1 GLONASSの歴史

GLONASS (Global Navigation Satellite System) は旧ソ連軍により1976年から開発が開始され、1982年2月にITUに周波数申請され、その全貌が明らかになった。1982年10月、第一号機が打ち上げられ、1995年末には24衛星でFOCの宣言がなさ

れた。しかし設計寿命が3年と短かったことと経済の停滞により1999年末には9機まで減少していた。その後、ロシア経済の復興と衛星の長寿命化が進み、2007年末には14機まで復活し、2011年末には24機体制のFOCが復活した。その後、2013年1月まで新たな打ち上げは無いもののFOCを維持している。現在は5機が軌道にスペアーとして待機している。その間、2007年5月17日の大統領令により公的機関のGLONASSの利用が義務づけられた。また2012年10月18日には、今後15年間のサービスの無償提供宣言がなされた。

2.2.2 GLONASSの概要

GLONASSは軌道半径25,510kmで、高緯度に位置する国土を考慮して昇交点傾斜角64.8度の3軌道面に各8衛星を配し、計24機でFOCとするものである。軌道半径はGPSより小さく、周回周期は11時間15分40秒である。GPSのL1帯相当のG1帯は中心周波数1,602MHzで各衛星の識別はGPSと異なり、PRNコードはすべての衛星に同一のM系列で、0.5625MHz間隔の異なる周波数を割り当てるFDMA方式である。GPSのL2近傍に中心周波数1,246MHzにG2帯を持っているが、これは軍事用で非公開である。2011年2月26日には実験用に、CDMA信号をG3帯 (GPSのL5帯近傍) に載せたGLONASS-K1衛星の一号機が打ち上げられた。次世代のGLONASS-K2衛星には、G1とG2にもCDMA方式が追加され、他のGNSSとの互換性が改善されることになる。従来のFDMA信号は下位互換性から継続送信されるとされており、2014年頃から打ち上

げを開始するとしている。

2.2.3 GLONASSの測位精度

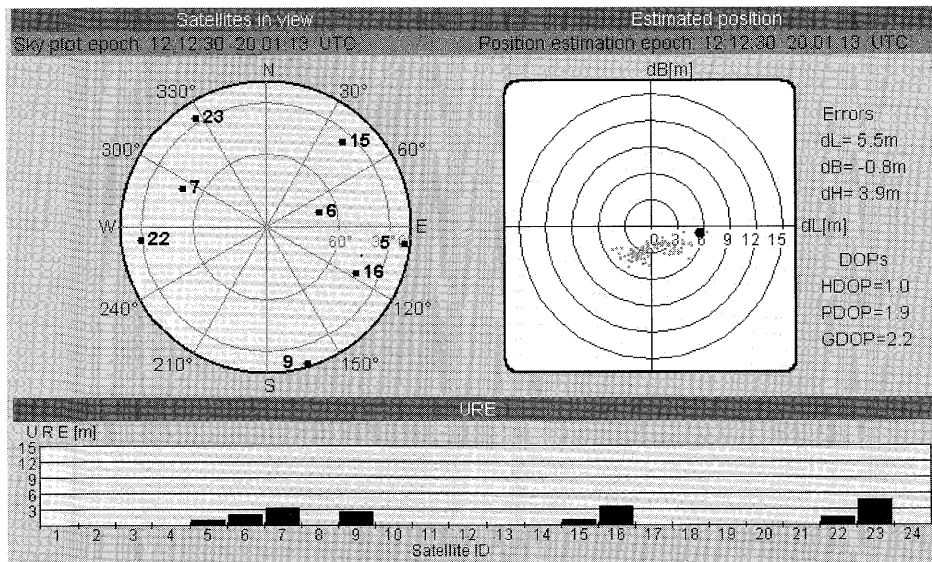
モスクワ郊外（北緯55.9度、東経37.8度）にあるIAC（Information Analytical Center）ではGLONASSとGPSの測位結果を公表している。図1aはGLONASSのもので左の円が上空の衛星配置を示す。右の正方形が30秒ごと約1時間の測位結果をプロットしている。下の棒グラフは各衛星の測距誤差UREを示す。仰角の低い衛星はUREが大きく出ているのは合理的である。図1bは同じサイトでのGPSの測位結果である。表3にGPSとGLONASSの測位精度を同サイトの30秒ごとの測位結果を用いて比較した。約30分の測位値の真値に対するオフセットと標準偏差を求めたものである。DOPに大きな差は無いものの測位誤差には大きな差が見られる。（図1のプロットとは対応していない。）

表3 GPSとGLONASSの測位誤差の比較(m)

		GPS	GLONASS
東西	平均	0.11	2.53
	標準偏差	0.5	1.82
南北	平均	0.57	-0.73
	標準偏差	0.34	0.79
上下	平均	0.17	-1.33
	標準偏差	0.81	8.7

2.3 Galileo

Galileoは欧州連合で独自に開発・運用を目指す衛星測位システムを持つべく1999年頃から準備を開始した。2005年12月28日にはロシアのバイコヌール基地から実験衛星GIOVE-A（Galileo In-Orbital Validation Element-A）を打ち上げ、二号機GIOVE-Bは2008年4月14日に打ち上げられ、テストが続けられた。現在は2011年10月21日と2012年10月13日に各々2機ずつ打ち上げられたIOV（Galileo In-Orbit Validation）衛星4機が実用衛星として軌道面上に存在し、2013年に6機、2014年に8機、2015年に8機が追加される予定で、2014年にIOC、2018年にFOCと予定されている。当初PPP（Public Private Partnership）と称して、民間の参加を計画していたがビジネス化は困難との見方から民が手を引き、資金的に行き詰まっていたが、2007年11月末にすべての経費をEU予算で賄うことが決まった。当初は2008年の運用開始を予定していたが、10年遅れることになった。GPSよりやや高い3軌道面上に30衛星を配置し、Lバンドの3周波の搬送波で測距信号を送信しようとするものである。L1帯は周波数と変調レートはGPSのC/Aコードと完全に重なるが、BOC(1,1)と呼ばれる変調方式で、GPSのBPSK(1)の周波数帯域のディップにピークを重ねて、GPS L1C/A信号との干渉を抑えている。相互運用性からGPSⅢ衛星にはこの信号が追加される予定である。（QZSからはすでに送信されている。）また、E5帯ではAltBOC(15,20)とよばれる測距性能が高い、新しい信号が送信されている。基本的な測位サービスは無料であるが、高精度を求めるユーザのた



Information Analytic Center @モスクワ55.9° North 37.8° East
 図1a モスクワにおけるGLONASS測位結果の毎30秒プロット (2013/01/20)
 右端Errorsの値は図中の●の位置

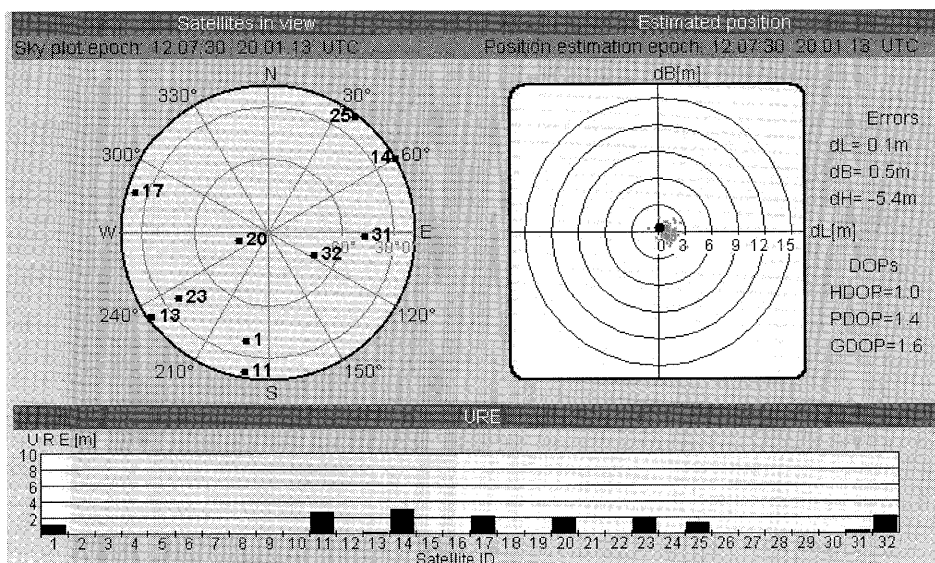


図1b モスクワにおけるGLONASS測位結果の毎30秒プロット (2013/01/20)
 右端Errorsの値は図中の●の位置。UREの縦軸がGLONASSの図と異なることに注意。

めに有料サービスが計画されている。

2.4 BeiDou (COMPASS)

中国では2000年頃から北斗 (Beidou) と呼ばれる静止衛星を用いた測位システムを軍事目的で開発を始めた。BeiDou-1として最初の2機は2000年10月31日と、2000年12月21日に80度Eと140度Eに打ち上げられた。3機目のBeiDou-1Cは2003年5月25日に110.5度Eの軌道に投入された。2006年には、GPS等と同じように地球を周回するMEOを用いた衛星測位システム構築のアイデアが打ち出され、2007年4月に第一号機を打ち上げ、BeiDou-2の展開を開始した。

中国はGalileo計画に出資しており、衛星測位に関するプロジェクトにはGalileoの名前が冠されていた。しかし、他の国のシステムへの相乗りに飽き足らず、独自の衛星測位システムの開発に踏み切ったことにより、国力の誇示をしているように見える。Galileoから多くを学んだことが推察される。

2012年末、14機にてアジア地域でBeiDou-2のサービスを開始した。BeiDou単独測位でUEREが2.1～2.4m、PDOPが2.3、RMS測位エラーで7.0～9.6mとの報告がある。2020年までに35機にて、BeiDou-3をグローバル展開するとしている。

2.5 準天頂衛星測位システム (QZSS)

準天頂衛星初号機「みちびき」は2010年9月11日に、種子島より打ち上げられた。静止衛星は赤道上空に位置し、地球の自転周期と同周期で地球の周りを周回するため、地上から見ると静止しているように

見える。その軌道を赤道に対して角度を持たせるとその角度に相当する南北緯度の間を8の字を描くように地球と同じ周期で飛行する。さらに楕円軌道にすることにより日本上空での滞空時間を延ばすことができる非対称8の字軌道となる。(図2参照)このような衛星を3機以上用意すれば、代わる代わる次々と日本上空に飛来し、いつでも頭上からもう1機のGPSとして測位信号(補完機能:GPS近代化後の新信号を含む)とその補強信号(補強機能:我が国独自の衛星だからこそ我が国に適した補強信号を作成し、送信可能)を送信できる。よってビルの密集した都市や険しい山間部の多い我が国では衛星測位の測位率の向上や精度の向上に役立つことが期待されている。「みちびき」はほぼ天頂まで飛来するので、準天頂衛星(QZSS:Quasi Zenith Satellite System)と呼ばれており、近隣諸国、東南アジア諸国およびオセアニア諸国などでも利用が可能になるので、これらの国々からも期待が寄せられ、後述のようにMGA(Multi GNSS Asia Campaign)キャンペーンが2009年に開始された。

2011年9月には、2010年代後半(最近、2017年と決定)までに、さらに3機の追加打ち上げが決まり、将来的には静止衛星と組み合わせて、我が国周辺ではGPSに頼らずに測位が可能となる。

地域的な測位システムとしては、インドが7機(東経34度、83度、131.5度に静止衛星、東経55度と111度を通る2つのIGSO軌道に各2衛星)で構成されるIRNSS(Indian Regional Navigation Satellite System)を計画しており、2015年には運用を開始するとしているが、打ち上げはまだ開始されて

いない。

図3に2013年1月31日13時に東京上空の測位衛星のプロットを示す。仰角30度以上でも19機が利用可能であることがわかる。

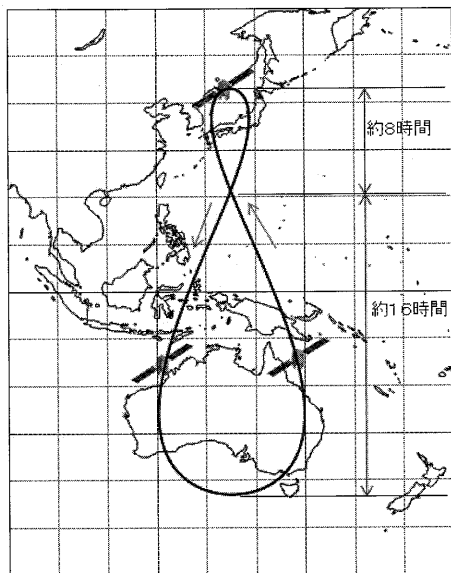


図2 非対称8の字衛星(QZS)の地上軌跡
(離心率0.075、傾斜角 41°)

3 MGA

これまで述べてきたように2020年までにはグローバルには現在FOCのGPS（米国）、GLONASS（ロシア）に続いて、Galileo（欧州）、BeiDou（中国）が、アジア地区にはIRNSS（インド）がフルサービスを開始し、さらには東アジア・オセアニアには我が国のQZSSの中4機がサービスを開始することになっている。地域システムを含めるとアジア・オセアニア地区が世界中で最も多くの測位衛星を利用できる地域となる。このような背景のもとに、アジア・オセアニア地域のマルチGNSSの利用推進を目的に利用実証の共同研究を推進する枠組みを2010年に立ち上げた。この組織をマルチGNSSアジア（MGA）キャンペーンと称する。以下に概要を述べる。

3.1 MGAの組織

MGAは運営委員会の下に、ネットワーク小委員会と4つのワーキンググループが有り、事務局はJAXAが運営委員会により選定され、務めている。

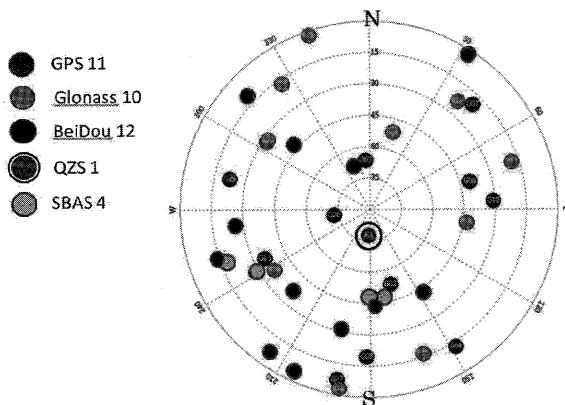


図3 2013年1月31日、13時頃の東京上空における可視測位衛星分布（スカイプロット）。

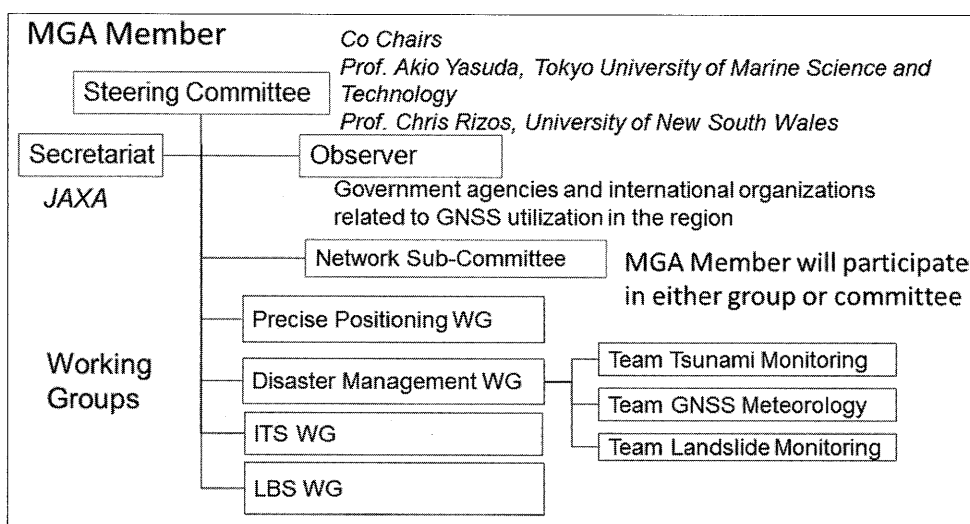


図4 MGAの組織図

運営委員会の議長は、豪州New South Wales大学のChris Rizos教授と安田が務め、各小委員会とワーキンググループのリーダーとICGの代表が運営委員会の委員となっている。

各グループのリーダーはそれぞれ

- ・ Disaster Mitigation and Management Working Group
加藤照之教授（東京大学地震研）
- ・ Precise Positioning Working Group
野口 伸教授（北海道大学）
- ・ ITS Working Group
Narupiti Sorawit教授（タイChulalongkorn大学）
- ・ LBS Working Group
神武直彦准教授（慶應義塾大学）
Ahmad Noordin氏（マレーシア・宇宙局）
となっている。

MGA参加者としてはアジア・オセアニア地域でGNSSの利活用に関心を持つ組織、例えば：政府機関／大学／研究機関／

国際組織／受信機メーカ／サービス提供社／GNSSプロバイダー等を想定し、参加を呼びかけている。

現在まで、以下の機関が参加登録している。

1. Beach Building & Civil Group (BBCG), Australia
2. RMIT University (RMIT), Australia
3. Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)
4. University Putra Malaysia (UPM), Malaysia
5. National Cheng Kung University (NCKU), Taiwan
6. Asian Institute of Technology (AIT) Thailand
7. Chungnam National University (CNU), Korea
8. SINGAPORE LAND AUTHORITY (SLA), Singapore
9. The University of Nottingham Ningbo

- China(UNNC), Republic of China
10. Tokyo University of Marine Science and Technology (TUMSAT), Japan
 11. National Electronics and Computer Technology Center (NECTEC), Thailand
 12. Ministry of Science and Technology (MOST), Vietnam
 13. National Agriculture and Food Research Organization (NARO), Japan
 14. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo (ERI), Japan
 15. Research Faculty of Agriculture, Hokkaido University (AGHU), Japan
 16. Toyama National College of Technology (TNCT), Japan
 17. National Space Agency of Malaysia (ANGKASA), Malaysia
 18. Hanoi University of Science and Technology (HUST), Vietnam
 19. Growing NAVIS (GNAVIS), Europe
 20. Malaysian agricultural research and development institute (MARDI), Malaysia
 21. University of New South Wales (UNSW), Australia
 22. Keio University, Japan

運営委員会の役割は以下の通りである。

- ・ MGA の運営手続きと機能を定義するとともに組織規約 (Terms of Reference) の管理
- ・ キャンペーン活動の管理
- ・ マルチ GNSS 共同実証実験のテーマ選定と受信機貸与の調整

3.2 MGA の活動

MGA の活動は主に以下の 3 つである。

3.2.1 MGM (Multi-GNSS Monitoring) ネットワークの構築

主として QZSS の軌道・時計監視のために現在 33 局を選定し、一部設置を開始した。さらに、今年度中に全世界で 60 局のモニタ局の設置をめざしている。これはマルチ GNSS のすべての衛星の軌道と時計の監視を自前のモニタ局群で行えるようにするためである。NTRIP Caster によりインターネット経由でデータを収集して、解析に供しようとしている。現在、JAXA を中心に MADOCA (Multi-gnss Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock Analysis) と呼ばれる解析プログラムを開発している。2011 年一年間の GPS、GLONASS の軌道とクロック誤差を解析した結果、世界的に定評のある Bernese や GAMIT などの軌道解析プログラムよりもすぐれていることが確かめられている。

3.2.2 マルチ GNSS 利用実証共同実験

マルチ GNSS の効果を確かめるための共同実験を実施する。現在は一昨年の第 3 回 AOR-WS において認められた次の 8 件が実行中である。

1. “Evaluation of Multi-GNSS for Precision Agriculture in Korea,” (NCKU), Korea
2. “Sustainable Resource Utilization by Precision Farming of Oil Palm Plantation; RTK-Auto Guided Oil Palm Planter; On-the-Go Soil ECa Mapping,” (UPM), Malaysia
3. “Automated Rice Transplanter Guided

by Using Multi-GNSS Including QZSS,” (NARO), Japan

4. “Joint QZSS/GPS Positioning Using L1/L5 Band Signals,” (NCKU), Taiwan
5. “Multi-GNSS Experiment at RMIT University in Melbourne”, RMIT University, Australia
6. “Evaluation of QZSS-LEX and L1-SAIF Signals Based Positioning Compared to DGPS and IGS PPP, Positioning for Thailand” (AIT), Thailand
7. “Exploiting the Use of QZSS and GNSS for Navigational and High Precision Applications and Their Performance Assessment,” (UNNC), China
8. “Development of Driver Behavior Measurement Method for Level of Safety Estimation from High Precision and High Resolution Global Positioning System with Quasi-Zenith Satellite System (QZSS),” (NECTEC), Thailand

これらの成果は2012年12月8-10日に開催されたAOR-WSで紹介され、研究を継続することが確認された。

同ワークショップでは以下の6項目の実施が追加承認された。

1. “WARTK test in Vietnam for enabling precise positioning for landsliding applications”, NAVIS Centre – HUST, Vietnam
2. Field Evaluation of the Japanese QZSS LEX receiver for the Malaysian paddy Field in Precision Rice Farming, MARDI, Malaysia
3. Enhancement of multi-GNSS positioning solutions for Precision Agri-

culture using multiple QZSS signals and ground infrastructure, QUT and UNSW, Australia

4. Proposal for landslide monitoring test under vegetated slope in Malaysia using multi-GNSS, JKR (Ministry of Construction of govt. of Malaysia), Malaysia
5. Improvement of GPS tracking accuracy for traffic information platform for Asia mega city, TTET, Thailand
6. Identifying of needs within Asia Oceania Region for emergency messages from QZSS with Demonstration, NTT data, Japan

3.2.3 AOR-WSの運営

アジア・オセアニアGNSS地域ワークショップ（AOR-WS）の目的はMGMネットワークを含む現行の共同プロジェクトの状況や結果の報告、新たな共同プロジェクト模索のための討論、情報の交換と共有であり、事務局のJAXAがSPACの協力を得ながら開催している。

第一回は、バンコクにおいて2010年1月25-26日、195名の参加で、第二回はメルボルンにおいて同年11月21-22日、101名の参加で、第三回は済州島において2011年11月1-3日、86名の参加で行われた。2012年は第四回で、マレーシアのクアラルンプールにおいて12月8-10日に開催され、17ヶ国136名の参加を得、ここでは前項の利用実証参加組織からの報告及び2013年に向けて新しい実証実験の提案が行われた。

これまでのワークショップの概要は

GNSSの現状紹介、利用実証（各WGにおける、日本のGNSS利用事例紹介等）、応用開発、計画中のプロジェクトの紹介等であった。主にSPAC協力企業が参加し、実証例等の報告、オーストラリア・アジア地域から利用事例等の紹介が行われてきた。

4 まとめ

本稿では世界の衛星測位システムの展開状況を述べ、MGAの活動を示すことにより、我が国の海外展開の動きを紹介した。

MGAは、マルチGNSS時代の到来に備え、QZSS衛星測位システムの打ち上げを機に、打ち上げ以前の2009年度末に立ち上げられ、早くも4年目を迎え、マルチGNSS時代の到来に向けて着々と準備が進められている。MGMネットワークの展開はアジア地区では発展途上国へのモニタ局設置が必要不可欠で、受信機やデータ端末の扱い、取得データの共有化によるデータ解析手法の習得など教育・指導に関わる活動も不可欠なろうとしている。現在、発展途上国の若者のみならず、我が国の将来の衛星測位・地理空間情報社会を牽引する人材養成のために、位置取得に必要なGNSS教育、その位置の有効活用に関する教育、新しいビジネス展開のためのマネージメント教育を組織的に実施できる組織を立ち上げるべく検討会を立ち上げた。その成果として、平成24年度から3年間、宇宙インフラ活用人材育成プロジェクトが文科省の宇宙利用促進調整費の課題に採択された。さらには、平成25年度の測位航法学会の事業として、内外の学生・若手の研究者・技術者のためのGNSS国際サマー・セミナー開催の準備が進められており、

MGAと連携しながらの国際協力の推進に期待が掛かっている。

一方、隣国中国ではBeiDou/COMPASS衛星測位システムの急速な立ち上げを機にAPSCO（Asia-Pacific Space Cooperation Organization：中国が推進する宇宙機関連合）加盟国の学生に奨学金を支給して受け入れ、修士レベルのGNSS教育を2012年9月から開始した。また、我が国のMGAの中で、MGMとAOR-WSに相当するiGMAS（international GNSS Monitoring & Assessment Service）とBADEC（BeiDou/GNSS Application Demonstration & Experience Campaign）を立ち上げて、2012年から活発な国際展開を開始している。その他、韓国、台湾、オーストラリアでも多くの大学が参画して、GNSSに関わる研究を強力に推進している。

我が国のGNSS教育・研究体制創りは緒についたばかりで、周辺国に大きく後れを取っている。国際貢献を軸にこの動きを加速させねばならない。

皆様のご理解とご協力を切望する次第です。

ソフトウェア GNSS の開発と周辺

東京海洋大学

久保 信 明

1 はじめに

ソフトウェア GNSS 受信機のコンセプト自体は、10 年以上前より存在するが、実際に大学等での研究に役立つようになってきたのは、PC の性能向上にあいまってここ数年である。現在では、マルチ衛星マルチ周波数用のソフトウェア GNSS 受信機で、リアルタイムで動作する市販製品が存在する。一方、メーカーの視点から見ると、ソフトウェア GNSS 受信機は、チップメーカーの開発部隊としては当たり前のコンセプトであり、PC を使用しないとしても、FPGA 等で様々な条件でのテストを行ってきたことが容易に想像される。よって、ソフトウェア GNSS 受信機自体は新しいものではなく、これまでメーカーの開発部隊でしか評価出来なかった受信機の内部処理を、一般の大学研究者等が利用できるようになったことが注目出来る点である。

本研究では、ソフトウェア GNSS 受信機の概要とともに、研究用に本研究室（東京海洋大学情報通信工学研究室）で開発しているソフトウェア GPS 受信機について簡単に紹介し、その観測データの精度等を評価した結果を報告する。擬似距離や搬送波位相の精度を他の受信機と比較して評価することにより、今後の研究でどの程度利用できるかのめどをたてることができると考えた。その中で、ソフトウェア GNSS 受信機が存在しないと、解析できなかった内容

についても言及した。参考文献については、これまで参考にしてきた教科書をいくつか列挙した。

2 ソフトウェア GNSS 受信機の概要

2.1 これまでの開発の流れ

本研究室では、2001 年頃より開発に着手してきたが、本格的に開始したのは 2005 年に本学の博士課程に進学した近藤らが L2C の信号追尾に取り組んだ頃からである。最初は参考文献[1]の MATLAB ソースをベースに開発を進め、現在では C 言語でも動作している。最近では、JAXA 殿との共同研究もあって、マルチ衛星 (GPS+QZSS+GLONASS+GALILEO) マルチ周波数 (L1+L2+L5) の信号追尾も可能となっている。なお QZSS については、GPS と信号形式等が同様であるため、ソフトウェア受信機上での取り扱いは GPS と同様で容易である。BEIDOU の ICD も 2012 年 12 月末に公開されたため、順次対応する予定である。本研究室以外でも、ソフトウェア GNSS 受信機を利用されている研究機関がいくつか存在し、その中でも JAXA の辻井殿のグループでは、INS を利用して PLL のロバスト性を向上させるテーマに取り組んでいる。

2.2 ソフトウェア GPS 受信機

以下に本研究室の 1 周波用ソフトウェア

GPS受信機の概要を示す。図1に示すように、GPSアンテナより受信した信号をフロントエンドでIFデータに変換し、その生データをUSB経由でPCにストックする。ストックされた生データを、PC上のソフトウェアを用いて解析する。解析処理の流れを図2に示した。本報告では、後処理の解析がメインで、また20-30分程度のデータを解析することを前提としているため、信号の再捕捉や高速化等の処理ルーチンを含んでいない。解析の流れは、図2の通り、信号捕捉、信号追尾、航法メッセージ解読、エフェメリス生成であり、信号追尾を継続できている衛星について擬似距離や搬送波位相の情報を計算することになる。さらにそれらの観測データを用いて航法演算を行う。本報告で利用したフロントエンドはIP-Solutions社製である。帯域は約4MHz、サンプリング周波数は約16MHzそしてIF周波数は約4MHzである。市販されているフロントエンドとして、他にもNSL社のSTEREOやFraunhofer社のTriband-Frontend等がある。これら2つは、サンプリング周波数や帯域を高くすることが可能で、マルチ衛星マルチ周波数に対応可能である。

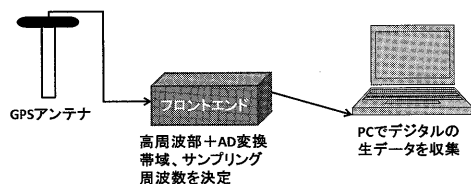


図1 Rawデータの収集イメージ

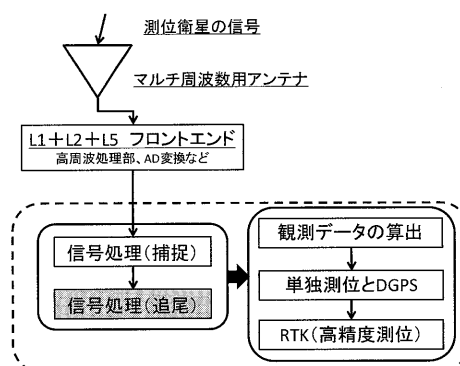


図2 本解析処理の流れ

図3に帯域の違いによる相関波形の違いを示した。左が4MHz、右が10MHzである。フロントエンド部の帯域を広げることで、よりシャープな信号追尾が可能になる。また、古野電気製のSQM（Signal Quality Monitor）受信機（電子航法研究所所有）を利用して、東京丸の内の高層ビル街で取得した相関波形の5つのショットを図4に示した。これらは、マルチパスによって歪められた特徴的な相関波形を取り出している。高層ビル街では、直接波よりもマルチパス波が支配的になるケースがあることがよくみてとれる。

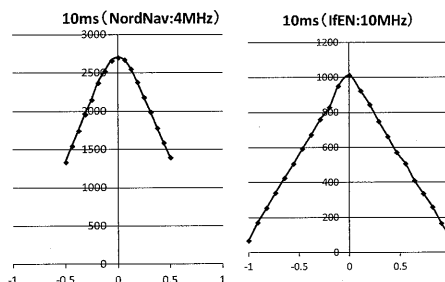


図3 帯域の違いによる相関波形の違い

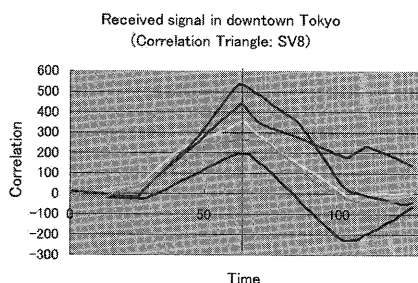


図4 高層ビル街の相関波形の代表例

2.3 信号処理の概要

GNSS受信機の信号処理は、大きく信号捕捉と信号追尾の2つに分けられる。信号追尾までできた信号については、航法データを取り出すことや擬似距離を計算することが可能となる。測位計算は、品質の良い擬似距離や搬送波位相が存在して初めて精度が保証されるものであるため、利用者にはブラックボックスであるが、信号処理部分の開発（ノウハウ）が重要であるといえる。実際に、精度向上に重要な役割を果たすマルチパス低減技術については、アンテナの特性以外では、この信号処理部分での工夫がメインである。

2.3.1 信号捕捉

信号捕捉の役割は、その名の通り衛星から降り注いでいる電波信号を捕捉することになる。電源を入れた瞬間は、事前情報がないければどの衛星が受信できるかもわからない状態である。ここでは、電波に乗って流れている「コードの先頭」とその「周波数」を補足する。GPSを例に挙げると、CDMAのため、衛星側のコードのレプリカがわかっているため、そのレプリカを利用して相関をとることができる。つまり

コードの先頭を探索することができる。信号捕捉では、ある程度の精度でコードの先頭と周波数を捕捉できればよい。ここでの周波数とは、まさに衛星と受信機間で生じているドップラ周波数に相当する。信号捕捉では数100Hzの精度で周波数を探索する。準天頂衛星の実際の信号捕捉例を図5に示した。サンプリング周波数が16MHzのため、1ms分の信号捕捉で16000個のレゾリューションがある。その16000個のどこに先頭があるかをピークが示している。下の図は、横軸を拡大した図である。16000個のうちの2800手前にコードの先頭があることがわかる。

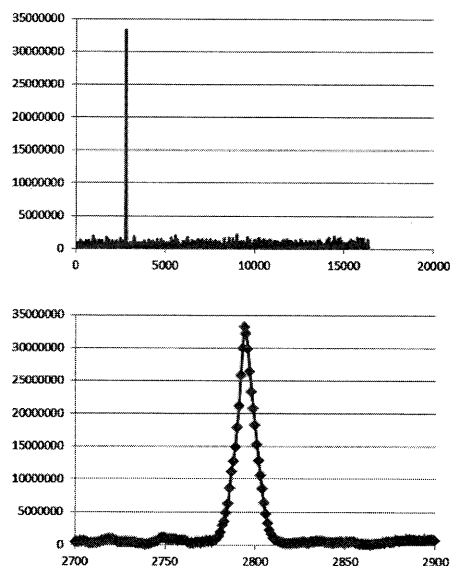


図5 信号捕捉の例

2.3.2 信号追尾

信号追尾の役割は、信号捕捉で得た情報をもとに、信号を追尾することにある。信号捕捉と同様に、コードの先頭とドップラ周波数を追尾ループで継続して追尾でき

るように調整する。信号捕捉との違いは、追尾する際の誤差をより小さく点にある。コードの先頭は距離に換算して数m以内、周波数は数Hz以内で追尾する。信号追尾のもう1つの大きな特徴は、位相を追尾できる点にある。航法メッセージ等を取り出す際にも、位相を追尾する必要がある。位相は周波数よりもさらに精度が高く360度の数10分の1程度で追尾が可能である。GPSのL1帯の波長は約19cmであるため、数mmの精度で観測できる理由はここにある。図6に準天頂衛星の実際のI相とQ相の値を示した。位相を追尾することにより、I相に信号を取り出すことができていたことがわかる。図6の横軸がI相値、縦軸がQ相値を示している。

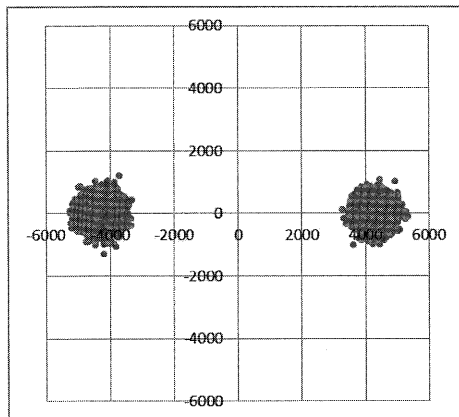


図6 信号追尾の状況 (I相とQ相)

3 精度評価実験

以下の3節と4節では、本研究室のソフトウェアGPS受信機で、実際のL1-C/A信号を利用して観測データを算出し、それらの精度を検証した結果を報告する。精度を評価するにあたって静止データを利用した。観測データの精度を正しく評価するために、同じアンテナから2つの受信機へ分配

し、二重位相差、DGPS、そして速度情報を計算することで評価した。この計算では、2つの受信機の電波経路が完全に一致するため、通常消去が困難なマルチパスを含め、受信機の雑音以外の誤差が完全に消去されるという特徴がある。実験では、基準受信機を2周波高精度用のノバテルOEMV2とした。評価に用いた受信機はReference用のOEMV2を含めて4台とした。他の3台は、ノバテルOEM4 (2周波)、ublox-4T、研究室のソフトウェアGPS用フロントエンドであり、スプリッターで分岐して接続した。Referenceに対する、これら3台の結果を比較することにより、観測データの精度の評価を行った。図7に配線図を示した。二重位相差やDGPSを行うためには、必ず基準局が必要となるため、ノバテルのOEMV2を基準局とした。他の3台の受信機は全て比較するためのものである。なお、ノバテル受信機2台のキャリアスムージング効果は100秒と設定した (ループフィルターを0.01Hzに設定していることに相当)。解析エポックの間隔は2Hzとした。

4 静止データでの評価

2010年5月31日に東京海洋大学の情報通信工学研究室屋上で10分程度データを取得した。データ収集の都合で、10分を2回取得し、各受信機の結果を比較した。アンテナ周囲は開けており、この時間帯で仰角15度以上に8機の衛星が観測されていた。8機のうち仰角が43度付近であった6番衛星について、擬似距離及び搬送波位相の二重位相差の結果を以下に示した。なお、二重位相差の基準衛星は最も仰角の高い31番衛星とした。

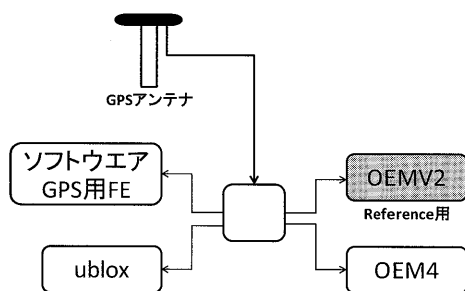


図7 データ取得時の配線

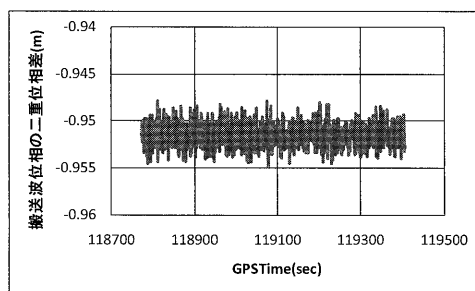


図9 搬送波位相の二重位相差 (OEMV2-OEM4)

4.1 OEMV2-OEM4間の二重位相差

図8の擬似距離雑音の精度は 1σ で12.2cmであった。また平均値はほぼ0であった。この値は、2つの受信機の観測データが混在した結果であるが、カタログに示されている擬似距離の雑音精度に近く、実際にその性能が出ていることがわかる。また、図9の搬送波位相の雑音精度は、1.2mmであった。注目すべき点として、両者の差よりわかるように、ちょうど5つの波長分の差 ($19.03\text{cm} \times 5\text{波長} = 95.15\text{cm}$) が見られた。これは搬送波位相の二重位相差のアンビギュイティが5であることに相当している。メーカーでRTKが可能と公表されている受信機については、おおむねこのような結果になると思われる。

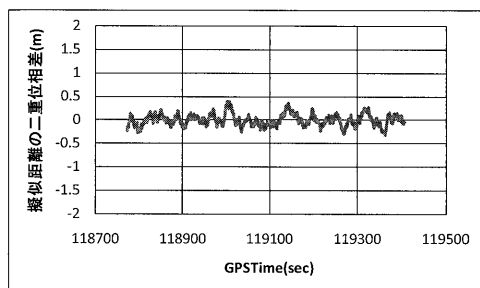


図8 擬似距離の二重位相差 (OEMV2-OEM4)

4.2 OEMV2-ublox間の二重位相差

図10及び図11を見ると、120300秒の直前にオフセットが見られるが、これはublox受信機が時計をオフセットしたためである。また傾きもみられるが、これは上記とも関係し、受信機が観測データを出力するタイミングが基準側のOEMV2の時刻に同期していないためと予想される。これを完全に一致させる必要はないが（受信機間の時計誤差は二重位相差で取り除けるため）、少なくとも受信機から出力する擬似距離と搬送波位相等の観測値は、完全に同一のタイミングで出力する必要がある。擬似距離の二重位相差から搬送波位相の二重位相差を差し引くと、4.1項の結果と同様に、搬送波位相の二重位相差のアンビギュイティを求めることができるが、雑音が大きいために正確な数値を出すことは困難であった。これは、まさにRTKを目的とする受信機と、RTKを目的としない受信機の差とも言える。なお、ubloxの場合の擬似距離雑音の精度は 1σ で約30.5cmであった。

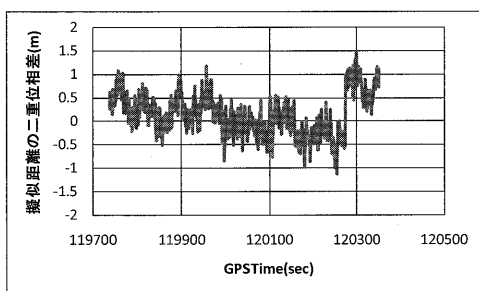


図10 擬似距離の二重位相差
(OEMV2-ublox)

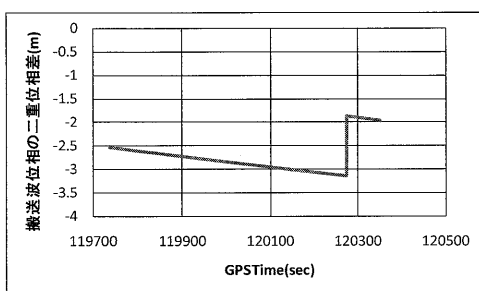


図11 搬送波位相の二重位相差
(OEMV2-ublox)

4.3 OEMV2-ソフト受信機間の二重位相差

図12の結果から、明らかに雑音が大いことがわかる。この時のDLLのループフィルターは0.5Hz、PLLのループフィルターは15Hz、また擬似距離を算出する際のTrackingループのインテグレーションは10msとした。この時の擬似距離雑音の精度は 1σ で約1.72mであった。OEM4やubloxと比較して雑音が非常に大きい最大の理由は、擬似距離算出部が未完成である点とキャリアエイドのDLLを用いていないためと思われる。図9に示すように、PLLから算出した搬送波位相の二重位相差は、傾きを持つが、その精度は擬似距離より格段に高いものであった。実際に、1秒毎の搬送波位相値の差分量は、非常に正

確で、後で擬似距離をスムージングすると、大幅な精度改善出来ることを確認している。これと同様の操作をTrackingループの段階でキャリアエイドDLLとして組み込むことで、ubloxと同程度の雑音低減が十分可能と思われる。また、図13に見られる傾きの問題は、4.2項の評価でも述べたように、観測値を出力するGPS時刻のタイミングが、ノバテルOEMV2と比較して100ms程度ずれていたためである。RTKを行うためには、擬似距離と搬送波位相の傾きを同じにする必要がある（同一タイミングで観測値を出力する）。ソフトウェアGPSは、未だチューニングを行っておらず、観測データを出力するタイミングを整数秒としていない。

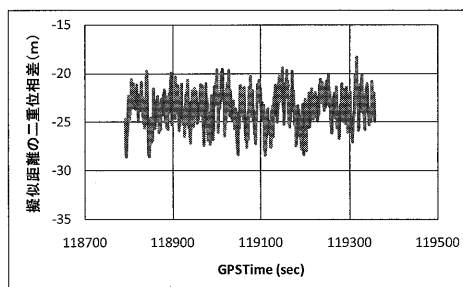


図12 擬似距離の二重位相差
(OEMV2-ソフト受信機)

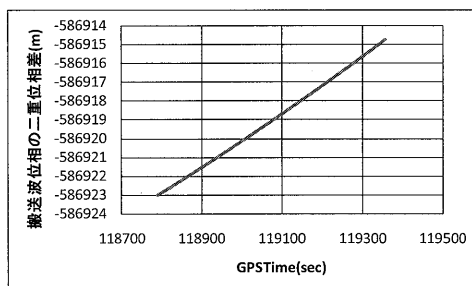


図13 搬送波位相の二重位相差
(OEMV2-ソフト受信機)

4.4 DGPS測位結果

4.1項から4.3項で評価したデータを利用して、DGPSを行った。各受信機による結果を下に示した。図14より図16の結果を見るとわかるように、これまでの観測データの精度を反映したものになっている。それぞれの水平1 σ は、順番に11.9cm、35.4cm、1.86mであった。これらの結果は、ほぼ観測データの雑音によるものであるため、全衛星の観測データの精度を把握するには良い指標と考えている。4.3項でも述べたように、ソフトウェアGPSにおけるDGPSの精度改善には、雑音をなんらかの方法で低減する必要がある。

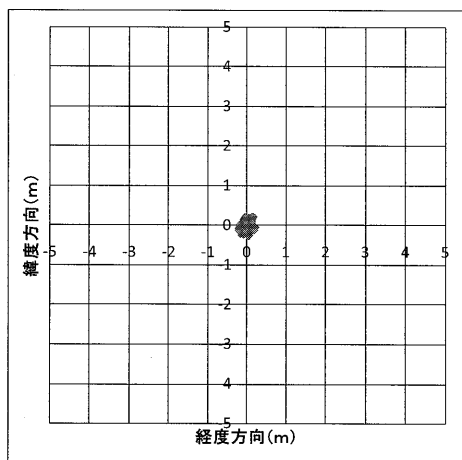


図14 DGPS測位結果
(OEMV2→OEM4)

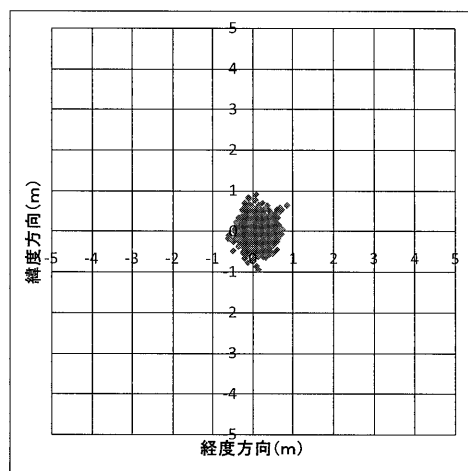


図15 DGPS測位結果
(OEMV2→ublox)

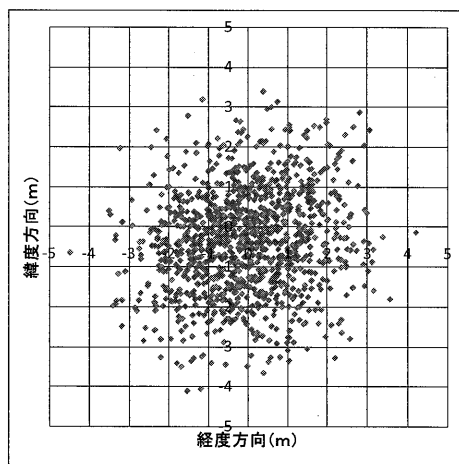


図16 DGPS測位結果
(OEMV2→ソフト受信機)

4.5 速度情報結果

4.1項から4.3項で評価したデータを利用して、ここでは、ドップラ周波数からの速度情報を算出した。OEM4とubloxは受信機にFLLが存在することが予想されるため、FLLの出力によるドップラ周波数か

ら、速度を計算した。一方、ソフトウェアGPSでは、現在FLLを動作させていなかったため、PLLで求めた周波数よりドップラ周波数を求め、それから速度を計算した。速度は地球中心の3軸方向で最初に求め、その情報を水平方向に分解した結果を以下に示す。

図17から図19を見るとわかるように、これまでの傾向と異なり、ソフトウェアGPSの精度がubloxよりも良いことがわかる。それぞれの水平方向の1 σ は2.2cm、8.1cm、3.5cmであった。ソフトウェアGPSでは、PLLからの周波数をドップラ周波数として利用しているため、精度が高くなることは容易に予想される。PLLでの周波数を出力する際のインテグレーションは50msとした。OEM4とubloxはFLLの出力であると予想されるが、ubloxに関しては、最近の高感受信機の特徴である、精度は10cm/s程度で追尾を継続する能力を高めているため、このような結果になったと予想される。

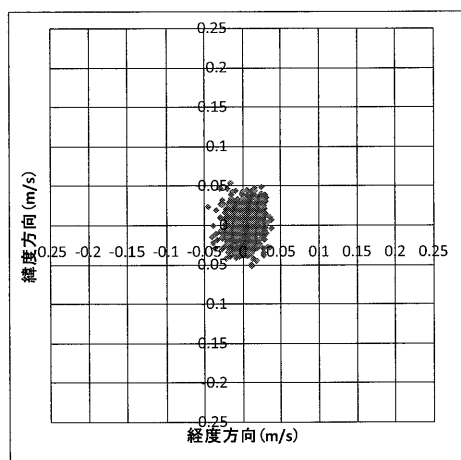


図17 水平速度結果 (OEM4)

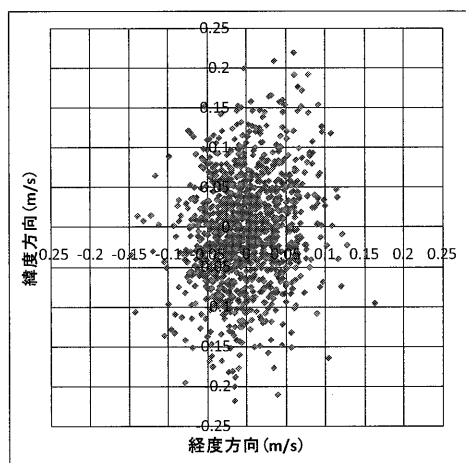


図18 水平速度結果 (ublox)

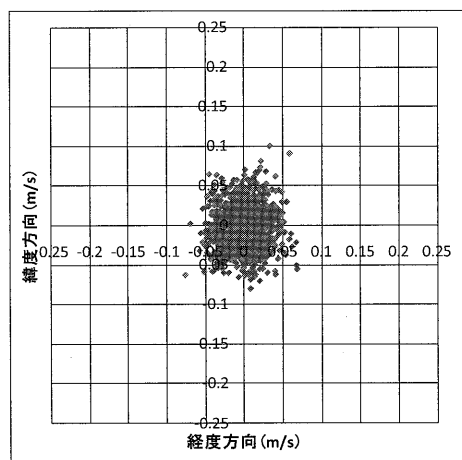


図19 水平速度結果 (ソフト受信機)

5 まとめ

本研究報告では、ソフトウェアGNSS受信機の概要と合わせて、ソフトウェアGPS受信機のL1-C/A観測データの精度検証を中心に行った。結果は、予想範囲内のものであり、これから改善すべき項目も明らかとなった。特にキャリアエイドによるコードループの改善が重要である。また、本稿

では紙面の都合上で紹介できなかったが、信号処理部の様々なパラメータを変更させることによる観測データへの影響を知ることができた。これはソフトウェアGPSがないとできなかった事であり、今後の融合研究に役立たせたいと考えている。また、これからGNSSひいては無線通信を学ぶ学生にとって、このソフトウェアGNSS受信機は、非常に良い題材になると考えており、現在学生用の教材を開発中である。

文献

- (1) K. Borre, D.M. Akos, N. Bertelsen, P. Rinder, S.H. Jensen: "A Software-Defined GPS and Galileo Receiver: A Single-Frequency Approach", Birkhauser Boston, 2007.
- (2) James Bao-yen Tsui: "Fundamentals of global positioning system receivers: a software approach", Second Edition, A John Wiley & Sons, 2004.
- (3) Elliott Kaplan and Christopher Hegarty: "Understanding GPS: Principles and Applications", Second Edition, Artech House Mobile Communications, 2005.
- (4) Pratap Misra, Per Enge (測位航海学会訳): 「精説GPS 基本概念. 測位原理. 信号と受信機」, 測位航海学会, 2010.
- (5) 久保信明, 「GPS/GNSS国際シンポジウム2003」 pp.125-140, 2003年11月

準天頂衛星「みちびき」の L1-SAIF 信号

電子航法研究所

坂井 丈泰

1 はじめに

我が国で最初の実用衛星測位実験を行う準天頂衛星 (quasi-zenith satellite) QZS-1 は、2010年9月11日に宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 種子島宇宙センターから打ち上げられ、「みちびき」との愛称が付けられた。準天頂衛星を使用する衛星測位システムである準天頂衛星システム QZSS (quasi-zenith satellite system) の特長の一つはユーザに対する衛星の仰角を高くできることで、都市部や山間部における通信・測位に有効である。この性質を利用して広い範囲にわたるユーザに対して高仰角から測位信号を放送することで、アベイラビリティが高く、かつ測位精度及び信頼性にすぐれた測位システムとすることを目指している⁽¹⁾。

QZSSが放送する測距信号のうち、サブメータ級の補強信号である L1-SAIF (submeter-class augmentation with integrity function) については、国土交通省の委託を受けて当所が研究開発を進めてきた。信号形式については ICAO (国際民間航空機関) による補強信号の国際標準規格 SBAS (satellite-based augmentation system: 静止衛星型衛星航法補強システム) をベースとして、GPS L1 信号と同一の周波数にて広域補強情報を放送する。

当所では、「みちびき」の打上げ後、初期機能確認試験に続いて技術実証実験を実

施した。以下、L1-SAIF 信号の概要及び当所が整備した L1-SAIF 実験局 (L1SMS: L1-SAIF master station) を述べるとともに、技術実証実験の概要を報告する。

2 L1-SAIF 信号の概要

L1-SAIF 信号は GPS と同一の L1 周波数 (1575.42 MHz) にて準天頂衛星 QZS より放送され、GPS と同じ C/A コードによる拡散変調方式が採用されている (PRN 番号は 183 ~ 192、変調速度も GPS と同じ 1.023 Mcps)。ただし符号化速度は GPS の 50 sps に対して 500 sps と高速化されており、符号化率 1/2 の畳込み符号が用いられているためデータ速度は 250 bps となる。すべての L1-SAIF メッセージは 250 ビットから構成されており、毎秒 1 メッセージが放送される。

L1-SAIF メッセージには 0 ~ 63 のタイプが定義されており、それぞれのフォーマットに従って補正情報が収容される。タイプ 0 ~ 28 及び 62 ~ 63 は SBAS と同一の内容であり、ディファレンシャル補正情報は高速補正・長期補正・電離層遅延補正に分けられ、それぞれ衛星クロック (変化の速い成分)、衛星軌道及びクロック (変化が遅い成分)、電離層伝搬遅延の補正に用いる。タイプ 52 ~ 60 は L1-SAIF で追加してあるメッセージで、大気遅延補正の高精度化や QZS 自身の軌道情報を放送するた

めに用いる。

L1-SAIF 信号の詳細な仕様は、他の補完信号とともに IS-QZSS として規定されている⁽²⁾。IS-QZSS には、信号形式及びメッセージ内容の定義に加えて、ユーザ受信機側の処理アルゴリズムも記載される。これは補正情報の利用手順をあらかじめ詳細に定めることで補正情報の解釈に関する誤りを防止するため、GPS IS や SBAS SARP s と同様である。

L1-SAIF はその名のとおりサブメータ級の測位性能を提供するものであるが、IS-QZSS で定義したメッセージによりこの目標が達成可能であることを、オフライン試験などにより確認している⁽³⁾⁽⁴⁾。

3 L1-SAIF 実験局

準天頂衛星は L1-SAIF 信号を放送する機能を持つが、これに乗せる補強メッセージについては地上実験局にて生成し、衛星にアップリンクする。このために当所実験室に整備した L1-SAIF 実験局 (L1SMS) について、概要を述べる。

3.1 全体構成

L1SMS の目的は L1-SAIF 補強信号に乗せる補強メッセージを生成することである。生成したメッセージは JAXA 筑波宇宙センターに設置されている準天頂衛星の主制御局 (MCS : master control station) に送信する必要があり、商用通信回線により接続している。また、GPS 測定データは国土地理院の電子基準点ネットワーク (GEONET) から取得する。データ配信拠点である日本測量協会とは IP-VPN 回線により接続しており、当所実験室までリアル

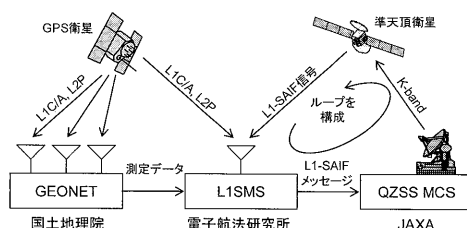


図1 L1-SAIF 実験系の全体構成

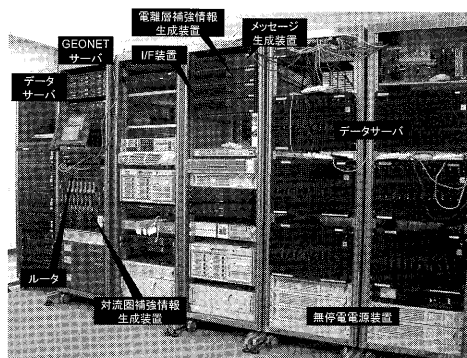


図2 L1-SAIF 実験局 (L1SMS) の外観

タイムに測定データが伝送される。

全体の構成は、図1のとおりである⁽⁵⁾。L1-SAIF 実験局はGEONETのGPS測定データを受信・処理し、生成した補強メッセージをリアルタイムにJAXA MCSに送信する。このメッセージはL1-SAIF信号に乗せられてユーザに向けて放送され、また同時にL1-SAIF実験局もこれを受信する。

当所実験室に整備したL1-SAIF実験局の外観を図2に示す。

3.2 L1-SAIF プロトタイプ受信機

準天頂衛星が放送するL1-SAIF信号を受信するための装置として、L1-SAIFプロトタイプ受信機を開発した (図3)。この受信機は、補強のないGPS信号のみによる測位結果と同時に、L1-SAIF補強メッ

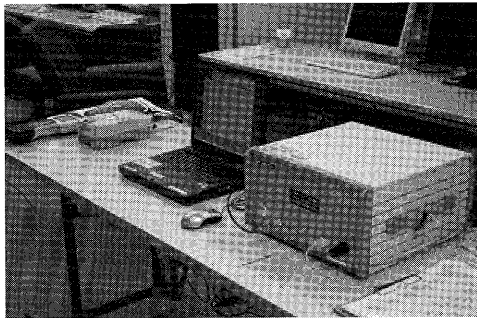


図3 L1-SAIF プロトタイプ受信機

セージによる補強処理が施された測位結果を出力する機能をもつ。また、実験局の評価・試験に使用するため、GPSアンテナからL1-SAIF信号を受信する以外にも、EthernetポートからTCP/IP接続にてL1-SAIFメッセージを入力し、これを処理させることが可能である。

3.3 事前試験の概要

L1-SAIF実験局の動作については、「みちびき」の打上げ前にリアルタイム試験などにより確認していた⁽⁶⁾。主要な評価結果について以下に紹介する。

図4は、2008年1月19～23の4日間にわたりL1-SAIF実験局を動作させ、性能評価を行った例である。同図には、L1-SAIFメッセージを適用した場合のユーザー側の測位誤差を表示してある。具体的にはGEONET高山局(940058)をユーザー局とみなして評価した結果で、4日間にわたる測位精度は水平方向で0.292 mであった(RMS値)。

また、2006年12月18日に打ち上げられた技術試験衛星Ⅷ型(ETS-Ⅷ=きく8号)については、通信・測位技術実証実験のほかに、大学や研究機関が参加する利用実験

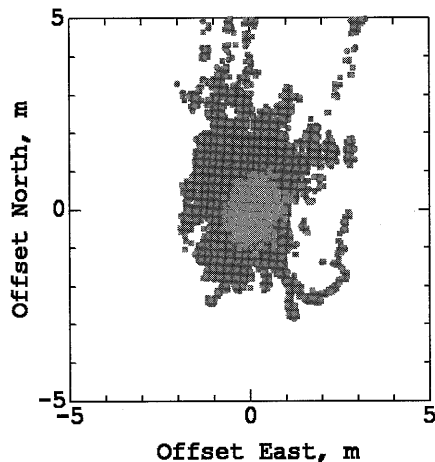


図4 ユーザ測位誤差の評価例
(濃灰色：L1-SAIF適用前
薄灰色：L1-SAIF適用後)

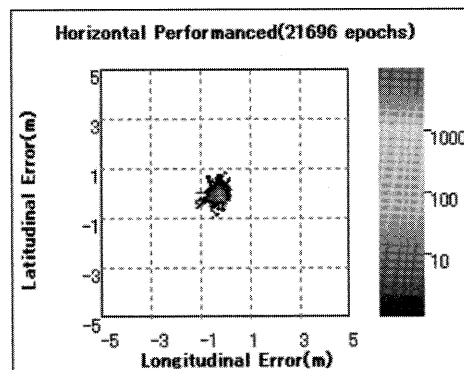


図5 L1-SAIFメッセージ適用後の
ユーザ測位誤差(ETS-Ⅷ利用実験)

が実施された。当所はこれに参加し、2009年2月17～18日に衛星回線を使用したL1-SAIF実験局の動作試験を行った。

当所実験室(東京都調布市)のL1-SAIF実験局からETS-Ⅷ実験用端末装置を用いて補強メッセージをアップリンクし、当所岩沼分室(仙台空港内)に設置した端末装置にてこれを受信、L1-SAIFプロトタイプ受信機に入力する構成とした。本実験によ

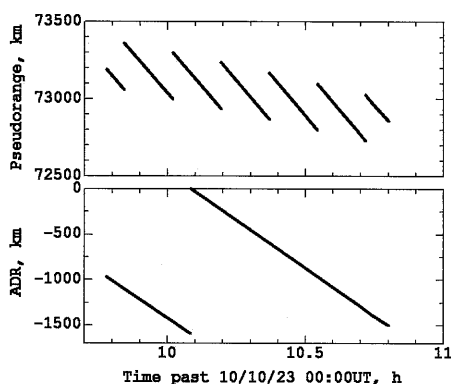


図6 L1-SAIF試験信号による
擬似距離の測定例

り、衛星回線を介してL1-SAIFメッセージを伝送して正常に動作することを確認した。実験結果の例としては、補強後の測位誤差が図5のように得られている。

4 技術実証実験

準天頂衛星「みちびき」は2010年9月11日にJAXA種子島宇宙センターから打ち上げられ、9月27日までに所定の軌道に投入された。その後は初期機能確認試験が行われ、10月19日にL1-SAIF信号の送信が開始された⁽⁷⁾。特に大きなトラブルはなく初期機能確認試験は完了し、12月13日に定常運用に移行するとともに各研究機関による技術実証実験が開始された。

4.1 L1-SAIF試験信号による距離測定

2010年10月19日に送信が開始されたL1-SAIF試験信号は、IS-QZSSにもとづく通常のユーザ受信機は受信できないが、当所のL1-SAIFプロトタイプ受信機はこれを受信する機能をもっている。そこで、当所岩沼分室（仙台空港内）に常置したL1-SAIFプロトタイプ受信機を利用して、試

験信号の受信を試みた。

10月23日09:46～10:48の1時間にわたり測定された擬似距離は図6のとおりであって、上段はコード位相による、また下段は搬送波位相による擬似距離である。

コード位相擬似距離は定期的に約300km（光速×1ms）のジャンプを繰り返す三角波のような形状となっているが、これは測定エポックをGPS時刻に合わせるために受信機が受信時刻を1ms単位で調整することによるもので、GPS受信機では一般的な動作である。

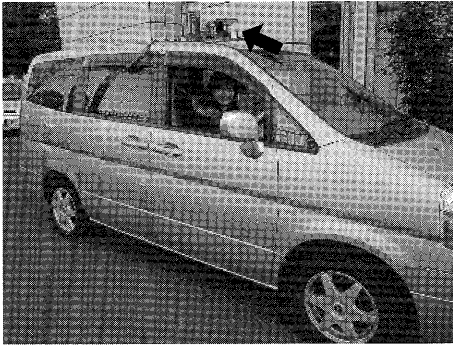
搬送波位相による擬似距離ではこの測定エポックの調整による影響は顕著ではないが、測定値が有限のビット数で表現されていることからオーバーフローにより大きなジャンプを生じていることがわかる。これも受信機の仕様によるもので、特に問題があるわけではない。

4.2 「みちびき」による補強実験

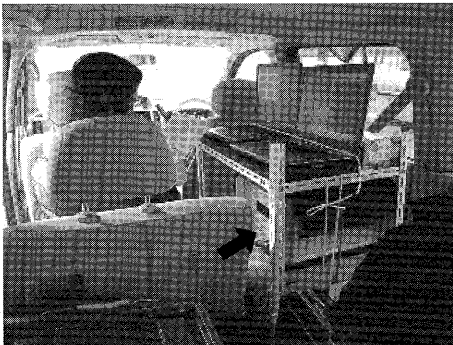
「みちびき」の初期機能確認試験完了後、定常運用の開始と同時に当所においても技術実証実験を開始した⁽⁸⁾。

図7に、技術実証実験に使用した車両の外観及び受信機の搭載状況を示す。実験用車両には二周波GPSアンテナを搭載し、L1-SAIFプロトタイプ受信機のほか基準位置算出用の測量用二周波受信機に接続した。また、アンテナ付近にIMU装置を搭載しており、GPS信号を受信しにくい環境下においても基準位置を算出できるよう配慮した。

予備実験によりいくつかの走行ルートを選定したうえで、2010年12月～翌年2月にかけて3回の実験を実施した。各実験で



(a) 実験車両の外観



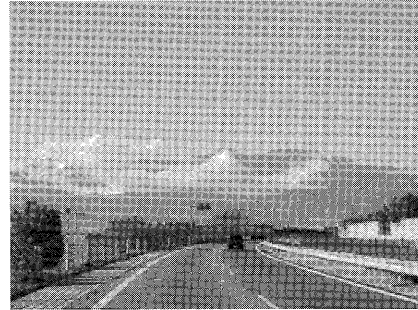
(b) L1-SAIFプロトタイプ受信機

図7 実験車両の状況

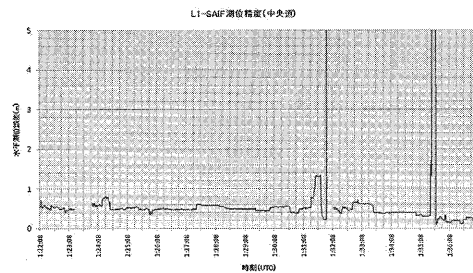
は4～5日間程度にわたり走行し、測定データを収集した。走行後には基準位置の算出を事後処理により行っており、これには走行ルート付近にある国土地理院の電子基準点（GEONET）を利用した。

実験結果の代表例として、中央道及びつくば市における状況をそれぞれ図8～9に示す。技術実証実験の期間中、「みちびき」は実験実施時間帯に比較的高仰角にあった。

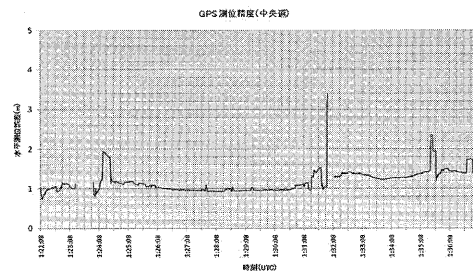
中央道では、郊外の高架道路における実験例として甲府盆地付近の平坦なルートを10kmほど走行した。代表的な風景は図8



(a) 走行ルートの代表的風景



(b) L1-SAIF補強あり



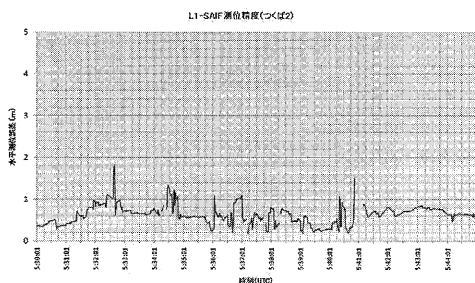
(c) GPSのみ（補強なし）

図9 中央道での実験結果

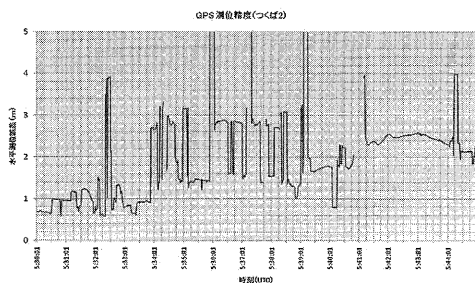
(a) のとおりで、周囲の障害物は少ない。12月14日に実施した実験について、同図(b) にL1-SAIF信号による補強がある場合、(c) には補強なしの場合の水平測位誤差を表示してある（同一の15分間）。この例では、補強のないGPSでは1m程度以上の測位誤差が継続するが、補強情報の適用によりこれを0.5m程度に抑えられることを確認した。



(a) 走行ルートの代表的風景



(b) L1-SAIF補強あり



(c) GPSのみ(補強なし)

図10 つくば市での実験結果

つくば市においては、一般道における実験例としてつくば市西部の県道を6kmほど走行した。図9(a)が代表的な風景であり、低層建築物のほか、架空線や電柱、看板などの障害物がある。(b)及び(c)には12月16日の実験について15分間にわたる水平測位誤差を表示してあるが、補強のないGPSの場合に1～2m以上になる測位誤差が、補強情報により0.5～0.8m程度

に抑えられている。

なお、補強信号を適用することで以上のように測位誤差を抑えることができるが、遮蔽物やマルチパス波の影響により瞬間的に測位誤差が大きくなる事例が散見される。

こうした現象への対策としては、受信機側のフィルタ及び信号捕捉・追尾性能の改良や、マルチパス除去技術の改善が必要と考える。

5 L1-SAIF信号のレンジング機能

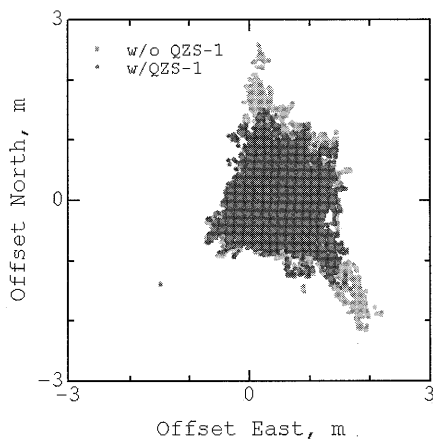
先に述べたとおりL1-SAIF信号の構造はGPS L1 C/A信号と同一であるから、GPS信号と同様に測距信号として使用して擬似距離を測定することができる。帯域幅も20 MHzが確保されているから、GPSと同等の測距性能が期待できる。

5.1 エフェメリス情報の提供

受信機側でL1-SAIF信号を測距信号として使用して位置の計算に用いるためには、擬似距離を測定できるのみならず、QZS-1のクロック補正値及び軌道情報を含むエフェメリス(ephemeris)情報を提供する必要がある。このためにL1-SAIFメッセージの一つとしてメッセージタイプ(MT) 58「QZSエフェメリス」を定義した。

MT58では、衛星の軌道情報をECEF直交座標値で表現する。これはGLONASSと同様であって、メッセージにはエポック時刻における位置・速度・加速度が記載されている。受信機側では、数値積分により所望の時刻における衛星位置を計算する。

MT58を作成・放送するには、JAXAの補完信号(QZS L1 C/A)により放送され



L1-SAIF レンジング	測位精度(RMS)	
	水平	垂直
あり	0.636 m	0.763 m
なし	0.674 m	0.819 m

図10 L1-SAIF補完の有無と測位誤差
(JAXA小金井局, 2011年8月18日)

ている情報を利用することとした。すなわち、L1-SAIF実験局はQZS L1 C/A信号で放送されているエフェメリス情報を受信・解読し、これにより準天頂衛星の位置・速度・加速度を計算してMT58の形式に編集する。

なお、この方式ではQZS L1 C/A信号とL1-SAIF信号の送信アンテナの違いにより1m程度のオフセット誤差を生じるが、L1-SAIF信号のユーザにとっては補強情報に含まれるディファレンシャル補正情報によりこれは補正されるから、特に影響はない。両信号は同一の信号原子周波数標準をもとに生成されるから、クロック補正情報は同一でよい。

5.2 測位実験とその結果

MT58の放送機能をL1-SAIF実験局に組

み込んだうえでL1-SAIFメッセージを生成し、これによる補強性能を確認する実験を行った⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。補強情報を生成するためにはL1-SAIF実験局にも準天頂衛星対応受信機によるモニタ局ネットワークが必要となるが、これにはJAXAモニタ局(4局)から送られてくる観測データを使用した。

ユーザ側の測位性能を調べた結果の例を図10に示す。評価対象としてはJAXA小金井局の準天頂衛星対応一周波数受信機を用いており、実験期間は2011年8月18日02:10:14～23:59:59である。

L1-SAIFのレンジング機能を使用しない場合と使用する場合の測位誤差を表示しており、いずれもL1-SAIFメッセージによる補強処理(ディファレンシャル補正処理)は施されている。図中の表のとおり、RMS値では大きな違いはみられないが、最大誤差については0.6～1mの改善がみられた。

6 まとめ

当所で開発を進めてきた準天頂衛星L1-SAIF補強信号について、信号及び実験局の概要を述べるとともに、技術実証実験の概要を報告した。事前に実施していた各種実験に加えて、技術実証実験においてもL1-SAIF補強情報の適用によりユーザ測位誤差を改善でき、当初の目標であるサブメータ級測位を実現できることを確認した。また、L1-SAIF信号には擬似距離を測定するレンジング機能があるが、これが有効であることを確認した。

現在は、L1-SAIF信号による補強機能をさらに効果的なものとするために、GPS衛星に加えてGLONASS衛星を補強対象と

する実験を実施中である。

参考文献

- (1) 宮野智行 他：QZSSの可能性、日本航海学会GPS/GNSSシンポジウム、Nov. 2004.
- (2) IS-QZSS, Version 1.1, July 2009.
(<http://qzss.jaxa.jp/is-qzss/index.html>)
- (3) 坂井丈泰・福島莊之介・新井直樹・伊藤憲：GPS広域補強システムのプロトタイプ評価、電子情報通信学会論文誌、vol. J89-B, no. 7, pp. 1297～1306、July 2006.
- (4) T. Sakai, et. al.: Augmentation Performance of QZSS L1-SAIF Signal, ION NTM, San Diego, CA, Jan. 2007.
- (5) 坂井丈泰・福島莊之介・武市昇・伊藤憲：準天頂衛星L1-SAIF実験局の構成、第8回電子航法研究所研究発表会、June 2008.
- (6) 坂井丈泰・福島莊之介・伊藤憲：準天頂衛星L1-SAIF実験局の性能確認、第9回電子航法研究所研究発表会、June 2009.
- (7) 寺田弘慈：準天頂衛星システムの状態について、測位航法学会GPS/GNSSシンポジウム、Nov. 2010.
- (8) 坂井丈泰・福島莊之介・伊藤憲：準天頂衛星L1-SAIF補強信号の技術実証実験、第11回電子航法研究所研究発表会、June 2011.
- (9) T. Sakai, et. al.: Ranging Quality of QZSS L1-SAIF Signal, ION ITM, Newport Beach, CA, Jan. 2012.
- (10) 坂井丈泰・山田英輝・伊藤憲：準天

頂衛星L1-SAIF補強信号のレンジング機能、第12回電子航法研究所研究発表会、June 2012.

海洋レーダの原理及び海洋レーダの利用による応用分野

国土技術政策総合研究所沿岸海洋新技術研究官

古川 恵太

1 はじめに

世界の人口の5割以上が海岸から100km以内の沿岸部に住んでいる現状において、地球温暖化の進行による海面上昇の恐れ、干潟・も場・サンゴ礁に代表される沿岸生態系の喪失、劣化による生物多様性の深刻なる危機、2011年3月11日に発生した東日本大震災に伴う大津波による甚大なる被害の例を引くまでもなく、海洋環境の情報をより多く正確に集める必要性は高まるばかりである。

そうした海洋環境の基礎的な情報である流れを3-50MHz帯の短波から超短波帯の電波を用いて20-200km程度の範囲で広域的に測定することのできる海洋レーダは、環境モニタリング機器として、また津波に関連する情報を収集する防災機器としても有望なものであり、世界中で1970年代より実験局としての運用がなされてきていた。

我が国でも約50局の実験局が暫定的に運用されてきたが、本格的な運用に向けて、その前提となる国際的な周波数分配を得るための活動を2007年以降行ってきた。今般、国際的な無線通信規則の改訂にむけた世界無線通信会議（WRC-12）が、平成24年1月23日から2月17日にかけてスイス・ジュネーブで開催され、本会議において、海洋レーダへの国際的な周波数分配が確定した。

海洋レーダシステムについて解説するとともに、今後の展開について紹介する⁽¹⁾⁽²⁾。

2 海洋レーダの動作原理

海洋レーダは、3-50MHz帯の短波から超短波の電波を利用して海面情報（流れや波）を測る装置である。1955年に、ニュージーランドのCrombieがその動作原理を示し、1972年に、米国のBarrickが実用化に向けた試験機での観測に成功した。日本では、1988年に国内第一号機が郵政省通信総合研究所（現 独立行政法人情報通信研究機構）により開発されている。

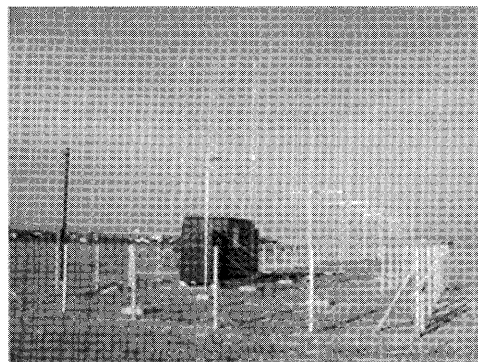


図1 24MHz帯の海洋レーダ
（国土技術政策総合研究所）

海洋レーダシステムの標準的な構成は、図2に示されるように、制御機・送信機・受信機・解析機・送受のアンテナ群からなる。

まず、送信機で発振した信号を周波数変調し、アンテナに送り海面に照射する。その反射波を受信アンテナで捉え、受信機で受信信号を分離し、解析機に送り信号処理をして流れのデータを抽出するものである。現在では、複数の受信アンテナからの信号を処理して、方向分解を行う Digital Beam Forming (DBF) 方式が主流となっている。こうしたシステム全体をコントロールするのが制御機の役割で、多くは解析機を兼ねてパソコンにより制御されている⁽³⁾。

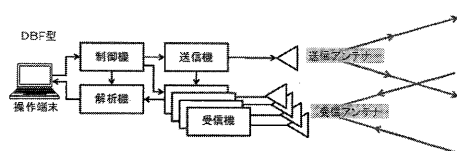


図2 海洋レーダのシステム例

送信アンテナから海面に照射された電波は、海面で散乱し、その多くのエネルギーは、前方に伝達され、一部が、後方に散乱される。その散乱した電波は、海面の2分の1波長に等しい波長を持つ波により、重なり合う山と山、谷と谷が重なることにより強められ、散乱共鳴波となり（ブラッグ散乱共鳴波と呼ばれる）反射波として受信される（図3）。

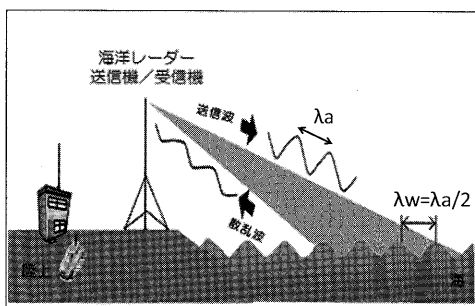


図3 海洋レーダの測定原理

この反射波には、共鳴した海面波の移動速度（波固有の伝達速度と表面流速の重ね合わせ）に対応したドップラーシフトが生じる。したがって、そのドップラーシフト量から推定される速度から、共鳴する海面波の伝達速度を減ずることで、表面流速の推定が可能となるのである。また、散乱共鳴は、照射-受信方向と一致する波による直接的な散乱の1次散乱以外にも、種々の方向や波長を持つ波の成分や、二重散乱などが上記のブラッグ散乱共鳴の条件を満たす場合に2次散乱として現われることが知られており、波の成分波や方向を推定するために用いることができる。

すなわち、基本的には短波帯から超短波帯域の表面波を利用した無線標定（レーダ）業務であり、平均的には40-200 Wの空中線電力を用いることで、20-200 kmの範囲の表面流速や、波の情報を収集することができる。

3 海洋レーダの運用状況

海洋レーダは、海面の波と散乱共鳴をしなければ受信信号が得られないので、実海域に存在する波の波長を参考に、適切な波長（送信周波数）を選択する必要がある。現在、実験・実用化されている短波海洋レーダの多くは、3MHz-50MHzの周波数を用いているのは、こうした理由による。これは、共鳴する海面の波長に直すと、さざ波より大きく、うねりより小さい50m-3mであり、海面波として比較的高いエネルギーを持つ領域に対応しているのである。

我が国で多く用いられている中心周波数24.5MHzのレーダの例で考えてみる。24.5MHzの波長は約12mであるので、散

乱共鳴波が6mである。この位相速度は深海波の条件で約3m/sであるから、前述のドップラーシフト量は、流れの無い場合で±0.5 Hzとなる。仮に、30cm/sの流速があった場合の周波数の変化量は0.05Hzということになる。

すなわち、流速測定精度は、受信周波数の分解能力に拠ることになる。非常に小さな周波数の「差」を検知しなければならないので、十分に長い時間（多くのデータ）のサンプリングが必要である。具体の必要時間は、個別のシステムに依存するが、1cm/sの精度で流速を測定しようとするならば、1ヶ所につき、5-10分程度の測定時間が必要とされている。

ITU-Rでは、3-50 MHz帯における海洋レーダと既存の固定局、移動局との共用検討を行った。その結果、海洋レーダ自身は、地上伝搬波のみを利用しているものの、低周波側（特に20 MHz以下）において海上伝搬する場合には、減衰が小さく、等価等方放射電力（EIRP: Equivalent Isotropically Radiated Power）において25dBW以下とすることが提唱された。

そうして受信した信号を距離毎に分解する方法として、パルス状の信号を送信する場合を考えると距離分解能を Δr とした時に、パルス幅 t は、伝搬速度（光速） c 、周波数 f_c を用いて

$$\Delta r = \frac{ct}{2} = \frac{c}{2f_c} \quad (1)$$

と表される。この、周波数 f_c は送信波（搬送波）を変調する周波数に対応する。すなわち、送信する電波に短い時間のパルスを乗せて送信しようとする、高い周波数で

変調する必要がある、その結果、変調周波数の分、その搬送波は周波数方向に広がり、帯域と呼ばれる幅を占有することになるのである。例えば、100kHzの帯域幅を持つ信号は、1.5kmの距離分解ができ、300kHzの帯域幅を持つ信号は、500mの距離分解ができる。

しかし、パルス信号は、高調波成分（ノイズ）を出しやすく、エネルギーの送信効率が悪いという弱点があり、多くは図5に示すようなFMCW（Frequency Modulated Continuous Wave）もしくは、FMCWを送受信を切り替えながら行うFMICW（Frequency Modulation Interrupted Continuous Wave）という周波数変調方式が用いられている⁽³⁾。

また、海洋レーダを特徴づけるひとつとしてアンテナシステムがある。日本で一番大きなアンテナを持つシステムは、情報通信研究機構の所有する9MHz帯の短波海洋レーダである。4分の1波長（約8m）を基準とする3素子の八木アンテナを送信用に1列、2素子の八木アンテナを受信用に16列並べている敷地は、海に面して横幅285m奥行き30mにもなる⁽⁴⁾。

このレーダに用いられている方向探査技術は、DBFと呼ばれ、全面海域に広く照射された送信信号の散乱共鳴波を一系列に並べたアンテナで個別に受信し、位相差等の情報から各アンテナで受信された信号を方角毎の信号に再構成する大変強力な手法である。同様の技術として、位相器で各アンテナに供給する電波に位相差を設けて指向性を持たせるフェーズドアレイ方式という日本における開発当初の24MHz帯のレーダが採用していたアンテナ形式もある。

4 海洋レーダの利用

海洋レーダを利用する形態としては、図4で示すように2局以上の海洋レーダ局が重なるようにレーダ波を照射し、それぞれの視線方向流速をベクトル合成することで平面流速分布を得るとというのが基本パターンである。そうした観測体制が確立すれば、実に多彩な活用方策が実現できる可能性が広がる。

海洋レーダの第一の利点は、時々刻々と変化する海面の平面的な流れを、空間的な広がりの中で認知することができるということである。24MHz帯、100W出力の短波レーダを用いると、およそ30-50kmの範囲を1.5km間隔で1時間毎に計測することができる。例えば、湾内の循環が南風が吹くことにより変化する様子や、黒潮が相模湾を通して東京湾に入ってくる様子などを連続的にとらえることも可能となる。

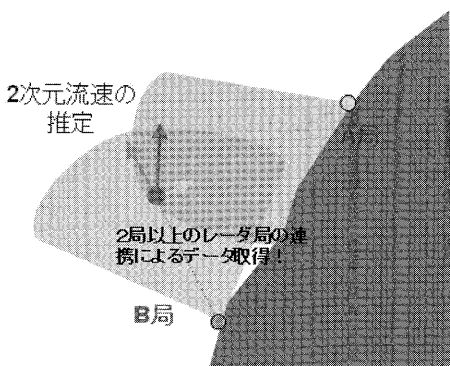


図4 2台の海洋用レーダで沿岸の表面流速を測定するイメージ図

前出の情報通信研究機構の9MHzの海洋レーダであれば、台風に伴う100km規模の表面海流の渦流化なども連続データとしてとらえることができる。こうした情報は、

海上設置型の機器では、点としての情報しか得ることができないが、海洋レーダで平面的なイメージとして全体像が俯瞰的に与えられるならば、船舶の安全航行に大きく寄与する追加情報としての活用が期待できる。

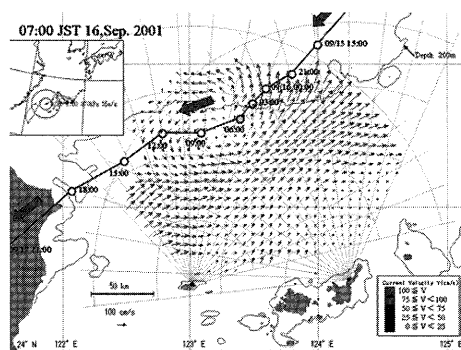


図5 平成9年台風10号が引き起こした海流の渦（情報通信研究機構）⁽⁴⁾

その他にも、流速の空間分布情報の二次的な活用法として、現在、浮遊ゴミ回収の効率化への応用が検討されている。東京湾においては、港湾区域外の一般海域において、地方整備局の環境整備船が通報や要請によりゴミ・油の回収が行われている。東京湾の潮流は、10-50 cm/s程度であり、仮に浮遊ゴミ発見の通報があってから3時間で現場に到着したとしても、当初の位置から1-5km程度移動していることになる。目視にて、5km離れた目標物を再発見するのは、とても困難であるし、海表面に半分沈みながら漂流する対象物を直接レーダで検知する術もない。そこで、海洋レーダで流れを推定し、対象となる漂流ゴミの移動経路を予測して追跡するシステム⁽⁵⁾や、漂流ゴミが潮目などに集まる性質を利用して、潮目のような海流の特異点を流れの情

報から抽出する技術⁽⁶⁾の開発が行われており、環境整備船の効率的運用に資することが期待されている。

5 おわりに

海洋レーダは、それ自体が非常に強力なツールであり、海洋調査・研究、防災・減災、環境保全、航行安全、海難救護など多くの分野への活用が期待されている。しかし、海洋の流れというのは、環境要素の一部でしかなく、それに伴って変化する数多の現象との関連を認識することが大切であることを忘れてはならない。すなわち、総合的なモニタリングシステム、情報提供システムの構築・整備が今後の課題として挙げられる。

例えて言うなら、「海の天気図」とでも呼ばれるような情報提供システムを目指すべきである。様々な関連情報を総合して、海洋レーダの情報が、「海の天気図」として提供されるならば、その情報の活用は、漁業、海運業、資源管理、エネルギーなどの産業分野にも波及する可能性を持っている。海洋レーダはそうした情報の核となる部分を提供することができるものである。

「海の天気図」は、海洋の状態を表す一次データであり、そこから、潮流や海流の状況、循環・滞留の発生、赤潮や青潮といった環境障害、生物のい集・移動といった二次的・三次的な情報を読み解く必要がある。それは、気象天気図と同様に読み解くのに様々な知識を必要とする情報であり、活用にも気象予報士のようなトレーニングや勉強が必要となるかもしれない。しかし、海洋国である日本において、それは、海洋に関する教育の充実の機会であり、海と人の

つながりを再構築する機会であるかもしれないのである。

参考文献

- (1) 古川恵太 (2012) : 海洋レーダ運用の現状と今後の展開. ITU ジャーナル, Vol.42, No.7, pp.21-25.
- (2) 藤井智史 (2008) : 電波で海を観る 海洋レーダの技術とこれからの展開. CDIT, 24, pp.18-21.
- (3) 土木学会海岸工学委員会研究現況レビュー小委員会編 (2001) : 陸上設置型レーダによる沿岸海洋観測, 212p.
- (4) 情報通信研究機構沖縄亜熱帯計測技術センター Web ページ <http://www2.nict.go.jp/y/y222/okinawa>
- (5) 榊原雅人・根木貴史・諸星一信・小山内英雄 (2007) : 海洋短波レーダを活用した浮遊ゴミ回収技術について、沿岸技術研究センター論文集、7、pp.55-58.
- (6) 片岡智哉・日向博文 (2011) : 東京湾における推定ゴミ流入量の水平拡散係数に対する依存性、国総研資料、第627号、15p.

津波に対するレーダ観測活動の調査（その2）

元日本工業大学教授

渡辺 康夫

1 はじめに

津波に対するレーダ観測活動の現状と動向について、2011年の報告に続き文献調査した結果を報告する。2011年の報告においては、2004年のスマトラ沖津波のとき、海洋観測衛星に搭載されたマイクロ波電波高度計によってopen oceanを伝播する津波の海面高度プロファイル及びレーダ後方散乱特性が初めて明瞭に観測されたこと、並びに2011年東北太平洋沖地震津波（3/11津波）のとき、北海道、紀伊水道、カリフォルニア及びチリに設置された短波レーダによって押し寄せる津波のsurface currentが初めて明瞭に観測されたことを報告した⁽¹⁾⁽²⁾。

2012年の調査結果の内容は次のとおりである。

- (ア) 衛星搭載電波高度計による3/11津波のmerging tsunamiの観測
- (イ) 衛星搭載電波高度計による3/11津波のnear real time detectionのフィージビリティスタディ
- (ウ) HFレーダによる3/11津波のarrival detectionのアルゴリズム
- (エ) 船搭載GPSによる2010年チリ津波の洋上観測
- (オ) 津波探知のためのGNSS-Reflectometryを応用したスペースセンサの研究

重要な論文等の欠落については、今後充実

に努める。

2 海洋観測衛星搭載電波高度計の津波観測

2.1 Song等の3/11津波における

merging tsunamiの観測

(1) 衛星の観測データ

Song等は2012年に、3/11津波に対するEnvisat、Jason-1及びJason-2の電波高度計の計測結果からmerging tsunamiを観測したことを報告した⁽³⁾。3基の衛星は図1のように同じ津波フロントのtsunami heightを別々の地点で計測した。図1(a)(b)(c)は夫々Envisat、Jason-1及びJason-2のパスと津波の伝播モデルである。黒色の矢印はmerging tsunamiの発生地点である。図1(d)(e)(f)の赤線は夫々Envisat、Jason-1及びJason-2の電波高度計の計測値(cm)で、黒い実線はモデルである。3基の計測値を比較すると、Jason-1の計測値(図1e)はEnvisat(図1d)及びJason-2(図1f)の約2倍である。Jason-1が計測したamplified tsunamiは、津波がocean ridgesやseamount chainsに沿って進むとき、海底のtopographic refractionによって幅狭い範囲に波高の高い津波がジェット流のように伝播する現象の一つであることがモデルシミュレーションによって認められた。津波の速度は水深が浅くなるほど遅くなるため、ocean ridgeの上を進む津波フ

ロントはスローダウンする。Ocean ridgeの両サイドを進む津波フロントは屈折効果によってocean ridge方向にカーブし互いに衝突しながら進む。この結果、ocean ridgeでは津波フロントがmerging（合併）

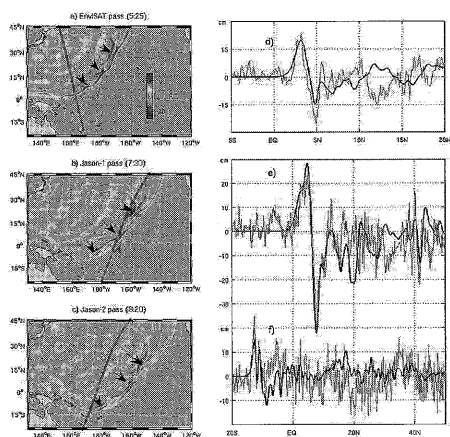


図1 Merging tsunami, 3 March 2011⁽³⁾

し、tsunami heightの形状は“A” shapeを保って、ジェット流のように伝搬する。

図2 (a) に3/11津波モデルの最大振幅の分布を示す。周辺より振幅が高い細い数本のjetsが特定の方向に進んでいる。図2 (b) に最大津波波高の等高線（青色）をbathymetry（カラーコード）に重ねて示す。津波jetsは夫々特定のtopographic featureから形成される（黒色矢印）。これらのfeaturesはEmperor Seamounts (ES)、northwest Hawaiian Ridge (nwHR)、Hawaiian Ridge (HR)、Mid-Pacific Mountains, Marshall Islands (MI)、Mendocino Escarpments (ME) 等である。津波jetsはこれらを過ぎてもお続き、津波の破壊力が特定の方向に向くことが示されている。Jason-1はMid-Pacific Mt.の

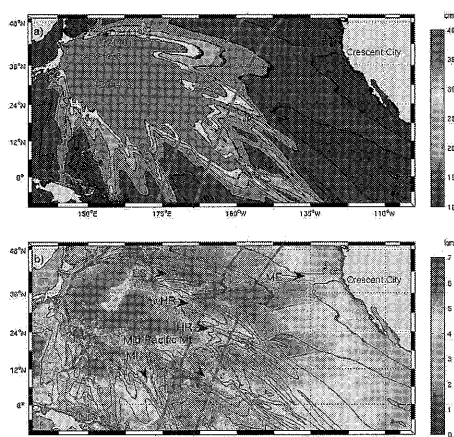


図2 (a) Model tsunami maximum amplitude (color bar in cm), and (b) the contours of the tsunami maximum overlay (blue lines) on the bathymetry⁽³⁾

真上の、merging tsunamiをキャッチするright locationにright timeに位置していたことになる。

Midocean ridgeが津波に対してwaveguideの役割を果たす例として、論文に引用されたTitovのスマトラ沖津波の伝播モデルがある⁽⁴⁾。津波がSouthwest Indian Ridge及びMid-Atlantic Ridgeに沿って大西洋に伝搬し、また、Southeast Indian Ridge、Pacific-Antarctic ridge及びEast Pacific ridgeに沿って太平洋へ伝搬する。津波はfar fieldにおいては等方向ではなく、ridgeによってfocusされ遠方にまで伝播することが示されている。

(2) GPS-derived津波モデル

Song等は次のステップで津波モデルを導いた。

- (a) seismometerによりエピセンターを求める。
- (b) 国土地理院のGPS networkで得られ

たland velocityを収集し、seafloor motionを推定する。

- (c) GPS-predicted seafloor motions 及び local topography から tsunami-source energyを計算する。

図3 (a) はGPSデータから得られた陸上のhorizontal displacement (ピンク色矢印) と海底のhorizontal displacementの推定値 (黒色矢印) である。図3 (b) はvertical directionの場合で、subsidence (緑色) 及びuplift (黒色)、並びにSatoのデータが併せて示されている。Song等は2007年以來この方法によって実測値と一致する津波モデルを導いてきた⁽⁵⁾。

2.2 Hamlington等の3/11津波に対する早期探知の研究

衛星搭載電波高度計の計測値から津波の探知を試みる従来の研究は、計測データに含まれる津波信号をretroactiveに検出するものであった。Hamlington等は2012年に、3/11津波に対するnear real time detectionの可能性について報告した⁽⁶⁾。

(1) Sea surface heightデータによる津波探知

Sea surface height (SSH) データに基づく探知には、先ずSSHデータからそれ以前のサイクルにおけるデータの平均値を取り除いた“filtered SSH”データを求める。その上でfiltered SSHデータとMOST (the Method of Splitting Tsunami) モデルデータについて、(ア)両者の相関値、(イ) RMS比 (MOSTモデルデータのrmsに対するfiltered SSHデータのrmsの比) を求める。同様に、historical data (過去のサイクルにおいて得られたSSHデータ) の

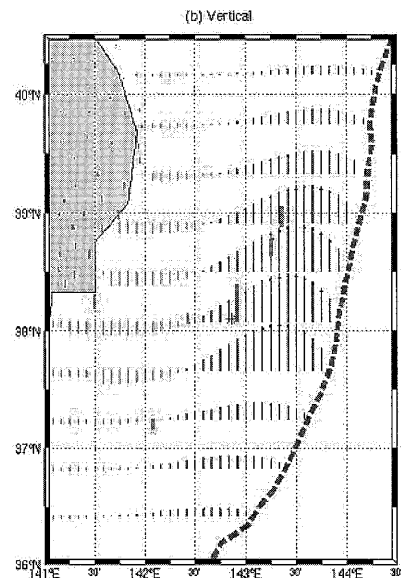
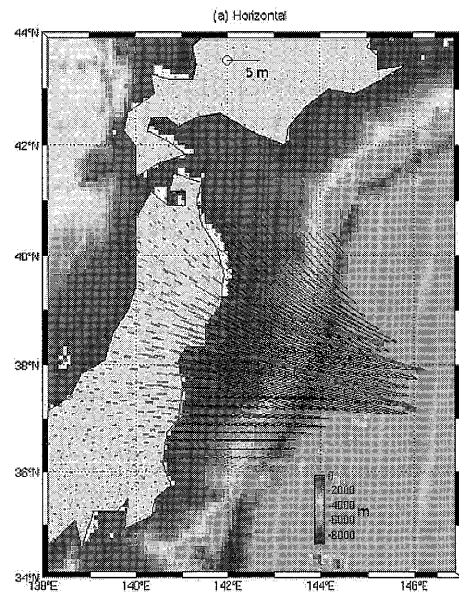


図3 (a) GPS horizontal displacement, and (b) same but for vertical direction⁽³⁾

filtered SSH データとMOSTモデルデータとの相関値及びRMS比を求める。これらの相関値及びRMS比がexceptionalであ

るか否かによって津波の有無を判断する。

図4はEnvisatのfiltered SSHデータ（赤線）、MOSTモデルデータ（点線）及びbest-fit MOSTモデルデータ（黒色の実線）である。MOSTモデルデータとfiltered SSHデータの間には明らかにtime discrepancyがあるため、両者の相関は低い。このためMOSTモデルデータを1min毎にアジャスト（lagging）して、filtered SSHデータに対するbest-fit MOSTモデルデータを得た。このようにして赤道から北緯15度の間の計測データを評価する。モデルと実測値が一致する理想的な場合には、lag timeは0、相関値は1、RMS比は1になる。実際にはlag timeが3minのときbest-fit MOSTモデルデータが得られ、相関値は0.72、RMS比は1.28であった。Historical dataに対しては、当該観測サイクル以前のサイクルにおいて相関値が0.6を超えるケースは存在しなかった。

Jason-1の場合には、best-fit MOSTは

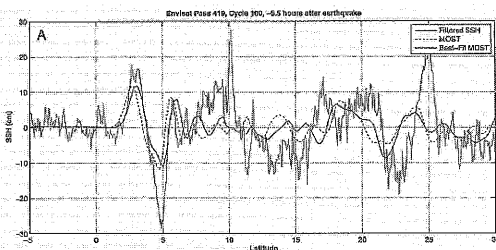


図4 Envisat搭載電波高度計のfiltered SSH、MOSTモデル及びbest-fit MOSTモデル⁽⁶⁾

5min-lagのときで、相関値は0.89、RMS比は0.85であった。当該サイクル以外で、0.8を超える相関値をもち、RMS比が1に近いケースは存在しなかった。このようにして津波をpositiveに探知できると報告した。

(2) Sea surface roughness randomization testによる津波探知

Godin等は衛星搭載電波高度計から見た海面のroughness variationをレーダ後方散乱特性（sigma-zero）のrms及びzero crossingによって特徴づけた。rmsをroughness variationの強さの指標とし、また、zero crossingの回数をroughness variationのspatial scaleの指標として、2004年のスマトラ沖津波及び2010年のチリ津波に適用して津波の認識を行った⁽⁷⁾⁽⁸⁾。3/11津波の場合、Envisatから得られたroughness variationは他の観測時のケースに比べてnot significantであった。Jason-1の場合は、計測されたroughness variationを他の観測時に計測するチャンスは1%以下であった⁽⁶⁾。

衛星搭載電波高度計のlatencyの短縮化、津波モデルの改善、historical dataのpre-computation等を図れば、さらに最近の津波研究によると、衛星搭載電波高度計がlarge, basin-wide eventsを発生後2-3時間以内に少なくとも1回計測する確率が高いと報告されているため、衛星搭載電波高度計はopen oceanにおける津波のnear real time detection systemとして期待されると報告した。

3 HFレーダによる3/11津波の観測：

Barrick and Lipa等のtsunami arrival time

3.1 Current velocity パターンの特徴

Barrickは1979年に、HFレーダによって津波のwater particle (or orbital) velocity (第3章ではvelocityという) を探知する方式のcoastal tsunami warning systemを提案し⁽⁹⁾、Lipa等と共に津波探知理論を進めた⁽¹⁰⁾。3/11津波に対しては、Lipa等は2011年に日米14基のHFレーダによる観測結果を報告した^{(11) (12)}。

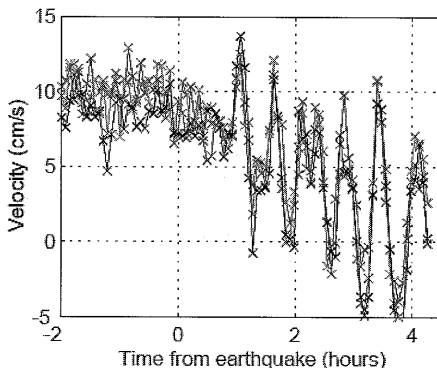


図5 Current velocity from Kinaoshi radar from 2hrs before the quake. Blue: 6-8km; red:8-10km; black:10-12km⁽¹³⁾

続いてLipa等は2012年に、HFレーダで観測された3/11津波のcurrent velocityのパターンを解析して、tsunami arrival signal (津波シグナル) アルゴリズムを提案した⁽¹³⁾。図5はキナオシのレーダ(42MHz)で観測された海岸線に直角に進むcurrent velocityの時間変化で、6-8km、8-10km、10-12kmの距離区間ごとの変化が示されている。3区間のcurrent velocityは地震発生から概ね1時間後に、津波が到

来したと考えられる特徴的な振動波形を示し始める。すなわち、

- (a) 波形はどれも似ていて、互いに強い相関があり、
- (b) 振動の振幅はバックグラウンドレベルを大きく越える。

3.2 q-factorと津波シグナル

上記の特徴的な波形のパターンに着目して、下記のように“q-factor” $q(t)$ を設定した。 $q(t)$ がしきい値を越えるとき、津波シグナルを発する。

$$q(t) = C(t) \cdot \Delta V(t) \cdot D(t)$$

ここで、 $C(t)$ は隣接3区間のcurrent velocitiesの相関で、三速度とも増加(又は減少)するとき100を与え、それ以外は1を与える。 $\Delta V(t)$ は隣接3区間の夫々のcurrent velocityの変化量を加算した値である。 $D(t)$ は隣接3区間の夫々についてcurrent velocityの平均値からの偏位をcurrent velocityの標準偏差で割って得られた三つの値を乗算した値である。

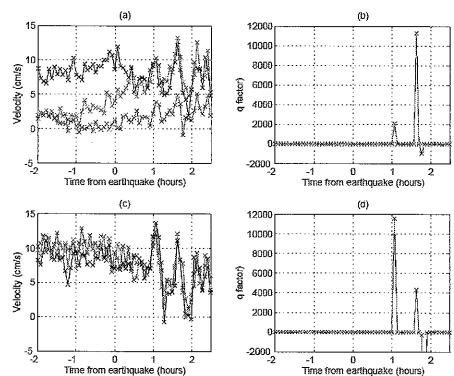


図6 キナオシのレーダから得られたvelocity componentとq-factor (a) (b) は距離0-6km、(c) (d) は6-12km⁽¹³⁾

キナオシの計測値と q -factor を適用した結果が図6である。図6 (a) はレーダから0-6kmにおける海岸線に向かう current velocity で、これに対応する q -factor が図6 (b) である。同様に、6-12kmにおける current velocity と q -factor が夫々図6 (c) (d) である。図6 (b) の場合、 $q(t)$ は地震発生約1時間後と、その40分後にピークが現れる。図6 (d) の6-12km の場合は1時間後に強いピークが現れる。 $q(t)$ はレーダから沖に遠ざかるほどクリアになる。また、津波フローは岸に近づくほど海岸線に平行な方向に転じるため、直角成分が減少することが図6 (a) から読み取れる。

レーダとゲージによる arrival time (JST) は、キナオシとウスジリレーダが夫々 15 : 49 と 15 : 34、ハコダテのゲージが 16 : 32 であった。米国西海岸におけるレーダの津波シグナルはゲージより平均15分先行した。

2012年4月11日にIndonesiaのAcehで発生した震度8.6の地震の津波は2004年のスマトラ沖津波や3/11津波に比べて大変小さかった。Lipa等はPadangのHFレーダ (14MHz) によって観測されたこの津波に対して q -factor を用いて tsunami arrival time を求めた⁽¹⁴⁾。

4 船搭載GPSによる津波観測

2010年2月27日にチリのMauleに震度8.8の地震が発生した。Foster等は2012年に、ハワイからグアムに向かって航行中のハワイ大学の海洋研究船Kilo Moanaの2基のGPSが概ね10cmの津波を検知したことを報告した⁽¹⁵⁾。図7に観測位置を示す。Ship-board tsunami detectionが初めて実



図7 津波の観測位置⁽¹⁵⁾

現された。

NOAAのreal-time tsunami model (RIFT) によれば、この船の位置における津波の最大振幅は第1波のピークで、予測値を modest maximum 9.4cm と示した。GPSにとってこのレベルの外乱は相対的に多い。このため外乱を除去しSNRを改善する方法として、RIFTの予測波形の第1波を含む初めの60min及び90minの波形に基づく matched filter を設計した。2基のGPSで得られた sea-surface height variations データと best-fitting adjusted matched filter 出力を図8に示す。

RIFTモデルと実測値を比較すると、両者は次のようによく一致する。

(a) Tsunami arrival time (UTC)

RIFTモデルの21 : 43に対して、GPS-1, -2の best-fitting adjusted matched filter 出力は夫々 21 : 46, 21 : 42 である。

(b) Peak-to-trough period

RIFTモデルの29minに対して、同様に夫々 36min, 38min である。

(c) 第1波のピーク値

RIFTモデルの9.4cmに対して、同様

に夫々 12.2cm、10.4cmである。

船搭載GPSは津波警戒に大きな役割を果たすと期待される。例えばVOS (Voluntary Observing Ship) がSAMOS (Shipboard Automated Meteorological and Oceanographic System) を備えてネットワークを組むと、航行中のこれらの商船群が低価格で大規模な津波探知システムを実現することになる。

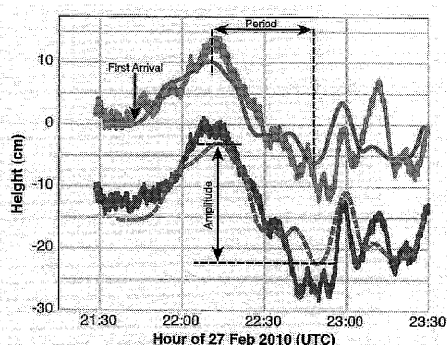


図8 GPS sea-surface height variations and best-fitting adjusted matched filters⁽¹⁵⁾

5 GNSS-Rを応用した津波探知の研究

5.1 GNSS-Rを応用した津波探知研究の経緯

(1) GNSS-Rの特徴

近年、リモートセンシングの分野において測位衛星 (Global Navigation Satellite System:GNSS) の地表反射波を利用する技術 (GNSS-Reflection:GNSS-R) が注目されている。図9のようにGNSS信号の受信機をLEO (low Earth orbit) 衛星に搭載し、GNSSとともに bistatic radarを構成すると、反射点が陸上ならばsoil moisture等を観測でき、海上ならば海面高度、波

浪、風速等を観測できる。このため、複数のGNSSとLEO衛星を constellationに構成すると実質的に multibeam radarが構成され、広範囲の地表を密に走査できる wide coverage能力をもつため、津波探知やリモートセンシングへの応用が期待される⁽¹⁶⁾。

さらにGNSSはGPSからGLONASS (ロシア)、Galileo (EU) へと発展増加していること、さらにQuasi-Zenith Satellite System (QZSS、日本)、Beidou/COMPASS (中国) 及びIndia's Regional Navigation Satellite System (IRNSS、インド) がスケジュール化されていること、しかもLEO衛星が比較的ローコストであること等から、GNSS-Rを津波の早期警戒に応用する研究が行われている。

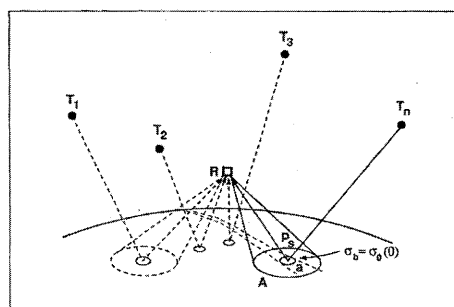


図9 Martin-NeiraのPARIS concept⁽¹⁶⁾

(2) GNSS-Rの主な解説文献

- (a) GNSS-Rの解説: IEEE Geoscience and Remote Sensing Society Newsletter, 15-21, March 2006⁽¹⁷⁾
- (b) Passive reflectometry and interferometry system (PARIS) を応用した津波探知のフィージビリティスタディの最終報告: Starlab, June 2005⁽¹⁸⁾

- (c) GNSSのremote sensing応用の動向：
Advances in Space Research, 47,
1645-1653, 2011⁽¹⁹⁾
- (d) GFZ（ドイツ地球科学研究センター）
におけるGNSS-Rを利用した津波探知
活動の紹介:IEEE IGRASS 2010, 3047-
3050⁽²⁰⁾
- (3) 津波探知に関わるGNSS-Rの研究論文
- (a) 1993年 Martin-Neira: PARISの概念
とocean altimetry応用の提案⁽¹⁶⁾
- (b) 2001年 Martin-Neira等: PARISの地
上実験⁽²¹⁾
- (c) 2002年 Lowe等: 航空機によるGPS
電波の海面反射波計測⁽²²⁾
- (d) 2002年 Rius等: PARISの航空機実
験⁽²³⁾
- (e) 2005年 Gleason等: LEO衛星による
GPS電波の海面反射波計測⁽²⁴⁾
- (f) 2005年 Martin-Neira等: PARISを応
用した津波探知の提案^{(25) (26)}
- (g) 2010-2011年 Stosius等: GNSS-Rによ
る津波探知シミュレーション^{(27) (28)}
- (h) 2011年 Martin-Neira等: in-orbit
demonstration (IOD) 用PARIS受信
機の報告⁽²⁹⁾

次節以降にこれらの研究の概要を述べる。

5.2 1993年 Martin-Neira PARISの提案

(1) PARIS海面高度の計測原理

Martin-Neiraは1993年にPassive Reflectometry and Interferometry System (PARIS)の概念とocean altimetryへの応用を提案した⁽¹⁶⁾。PARISの海面高度計測の説明用に、ここではRuffiniのcoastal altimetryの原理図を紹介する⁽¹⁷⁾。図10のようにGNSS

とGNSS受信機がbistatic radarを構成すると、反射点の高度は直接波と反射波との行路差と仰角から幾何光学的に求められる。

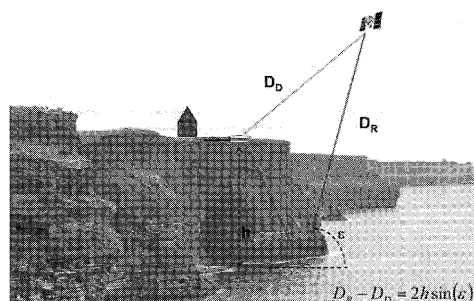


図10 PARISの海面高度計測の原理図⁽¹⁷⁾

(2) Iso-range (or delay) lines

送信機、受信機及び反射点の位置を図11のように置く。Iso-range linesは直接波と反射波の相対delayが一定な点の軌跡で、送信機と受信機を焦点とする楕円体面と地表とのintersectionで与えられる⁽¹⁶⁾。送信機が受信機の頭上にある場合、iso-range linesは同図右上のように受信機直下のspecular reflection point（幾何光学上の反射点）を中心とする同心円になる。送信機が受信機の斜め上空にある場合、同図右下のようにspecular reflection pointは送信機方向にシフトし、この点を中心にしたiso-range linesが形成される。

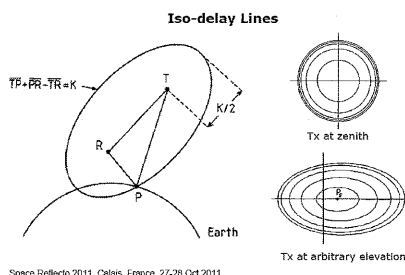


図11 Iso-delay line (Space Reflecto 2011)

(3) Iso-Doppler lines

送信機、受信機、反射点及びこれらの速度ベクトルを図12（左）に示す。直接波の経路のドップラー周波数と、反射波の経路のドップラー周波数との差が一定な点の軌跡がiso-Doppler linesである。送信機の高度が受信機よりはるかに高いとき（GPS及びLEOの高度は夫々24,000km、700km）、また、地表を平面と見做すと、iso-Doppler linesはSARと同じようにhyperbolic関数で与えられる。送信機及び受信機の運動は既知であるため直接波のドップラー周波数は計算で求められ、受信機における信号処理の段階でこれは差し引かれる。

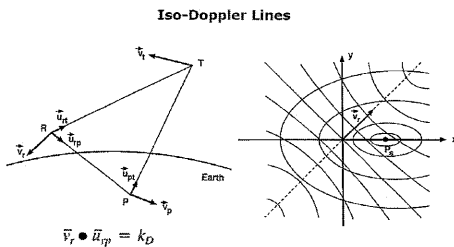


図12 Iso-Doppler line (Space Reflecto 2011)

海面の反射点とiso-range lines及びiso-Doppler linesの関係をまとめると図12（右）のようになる⁽¹⁶⁾。Specular reflection pointからの反射信号は真っ先に受信機に到達する。反射波信号のうちドップラー周波数がゼロのときの信号を取り出し、その時間特性を見ると、先ずspecular reflection pointからの信号が来て、続いてiso-Dopplerが0のラインと最初のiso-range lineとの交点からの反射が来て、続いて次のiso-range lineとの交点からの反射信号が次々に到来する。高度計測の場合

の直接波と反射波とのdelay差は、両出力信号のleading edgeの位置で比較する。

5.3 2001年 Martin-Neira等 PARIS地上実験

(1) 実験概要

GPS受信機を図13（上）のように海上のブリッジに配置して、直接波と反射波を夫々のアンテナで受信し、直接波に対する反射波のdelayを計測した⁽²¹⁾。GPS信号はL1 C/Aコードである（L1は1575.42MHz）。

(2) 海面高度計測のための信号処理

基本的な信号処理は、受信機サイドでGPSコードのレプリカ（clean replica）を生成し、これをIFにup-convertし、さらにGPSの運動に従ってドップラー周波数をプラスし、最後に反射波信号とのcross-correlation処理を行って“replica-reflected signal”を得る。同様に直接波信号に対しても“replica-direct signal”を得る。両相関波形のチップ差（時間差）よりdelayを求める。

(3) 計測結果

直接波及び反射波の夫々の相関出力を図13（下）に示す。波高計測値のrmsエラーは3.3mであった。これは計測位置と反射点の距離が短く、直接波と反射波の経路差がC/Aコードの1 chip以下であったこと等のためである。実験結果よりC/Aコードの10倍の速度のPコードを利用すれば、また、相関値のピーク位置を特定するためのfitting modelを工夫すれば、エラーを30cm程度にすることが可能である。

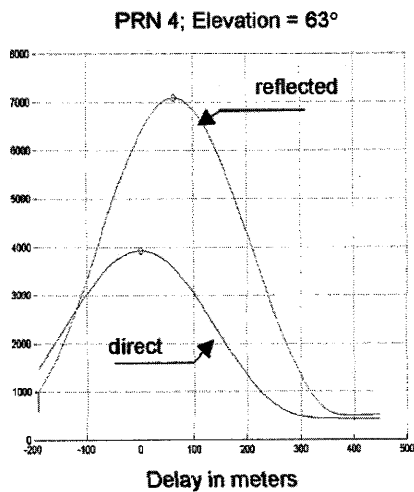
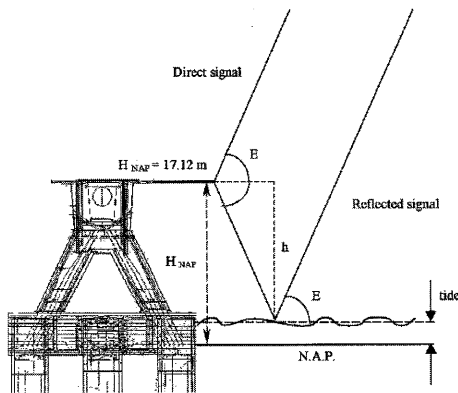


図13 地上実験構図及び海面高度計測値⁽²¹⁾

5.4 2002年 Lowe等 航空機によるGPS電波の海面反射波の計測: delay/Doppler waveform

Lowe等は海面高度計測精度5cmを目標にdelay/Doppler mapping receiverを開発し、航空機に搭載してGPS送信波の海面反射波を計測した⁽²²⁾。

(1) 開発したレシーバの特徴

- (a) Software GPS receiver: (ア) GPS信号のPRN (pseudorandom number) 及びドップラー周波数をもつモデル信号の生成、(イ) モデル信号と直接波信号及

び反射波信号とのcross-correlation。

- (b) Time resolution: 従来の10倍の50nsに向上。
 (c) Cross-correlation time: 従来の1msから125 μ sの任意の倍数值。
 (d) C/A-code及び10倍速度のY-codeの処理能力。

(2) 反射波のdelay-Doppler waveform

C/A-codeの時の反射波のdelay/Doppler waveformを図14に示す。横軸はドップラー周波数、縦軸はdelayである。反射波の強度は反射点の座標 (delay、Doppler) 上にカラー表示される。ドップラー周波数が0の軸上でdelayに対する反射波強度の変化を見ると、反射波強度はrising edgeにおいてシャープに立ち上がり、tailでは尾を引いている。Rising edgeは最初に到達するspecular reflection pointからの反射波によって形成されるためシャープになる。そのあと nonspecular reflection pointsからの反射波が重畳して到達するためtailの尾が形成される。尾の長さはspecular reflection point周辺の、風によって電波が散乱される領域 (glistening zone) についての情報を与える。Y-codeの

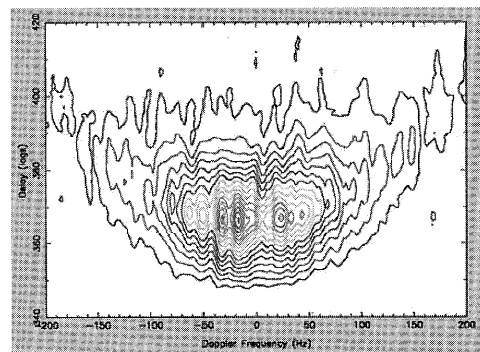


図14 C/A-codeの反射波のdelay-Doppler waveform⁽²²⁾

場合、rising edgeはよりシャープに、また tailの広がりも一層顕著に現れる。

(3) Bistatic synthetic aperture surface imaging

delay/Doppler waveformによって ocean salinity、ice等の分布をモニターできる。陸上の場合も計測し、soil moistureをモニターできることを示した。このようにGPSの反射波の利用によって海洋及び陸上の新しいremote sensingが期待される。

5.5 2005年 Gleason等 LEO衛星によるGPS電波の海面反射波の計測：delay-Doppler map

(1) 実験内容

Gleason等は高度700kmの極軌道のUK-DMC (United Kingdom's Disaster Monitoring Constellation Satellite) にGPS受信機を搭載して、図15のように複数の計測地点を対象に、風速及びPRN信号をパラメータとして、反射波のdelay波形及びdelay-Doppler signal mapを計測した⁽²⁴⁾。

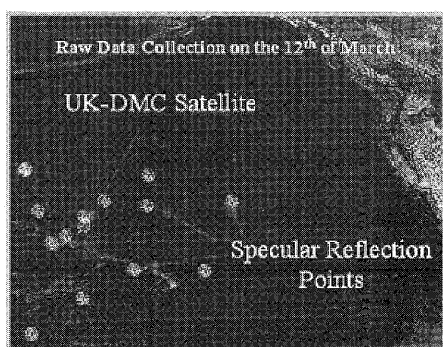


図15 太平洋で行われたLEO衛星によるGPS電波の海面反射計測位置⁽²⁴⁾

(2) 信号処理

信号処理プロセスを図16に示す。入力サンプルデータに対して、受信機で生成されるC/A-codeとドップラースhiftをもつレプリカと相関処理 (coherent integration、積分時間1ms) を行い、次にcoherent integrationの出力を積算 (noncoherent summation、最大積算時間1s) する。

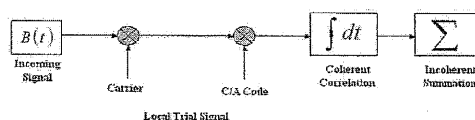


図16 受信信号の相関処理図⁽²⁴⁾

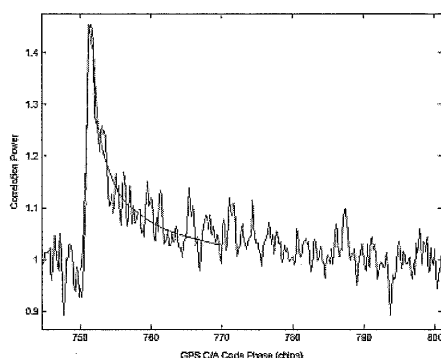


図17 反射波の相関出力
Wind: 9-16m/s; Model: 13m/s.
Coherent integration time及び
summation timeは夫々1ms及び1s⁽²⁴⁾

(3) 実験結果

反射波の相関出力特性を図17に示す。Bistatic radarのZavorotny/Voronovich ocean scattering model に風速 13m/s の sea condition を適用して得られた model-generated waveformが併せて示されている。Fitting modelは実測値とよく合致しているため、モデルから海上の風速を推定できる。

5.6 2005年 Martin-Neira等 PARISを 応用した津波探知の提案

Martin-Neira等 は2005年に、PARISの提案⁽¹⁶⁾、Rius等のPARIS-Alpha航空機実験⁽²³⁾及びGleason等のUK-DMC衛星実験⁽²⁴⁾等を踏まえて、global and long term coverage能力をもつ津波探知方法として、PARISコンセプトによるGNSSの海面反射波を利用することを提案した⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾。

図18のデータは提案根拠の一つで、PARIS-Alpha航空機実験において地中海 Cost Brava沖の上空1000mからC/A及びPコードを用いて海面高度を計測したデータである。この海域では海底(Palamos Canyon)のトレンチが海流を擾乱し、mean sea levelは100kmにわたって30cmのdipが生じている。この海面高度のプロファイルはopen oceanを伝播する津波をシミュレートしていると見做されている。実験では海面高度の変化をフォローする結果が得られた。

提案の構想は次の通りである。

- (a) PARISの典型的な高度分解能は5-10cm、距離分解能は20-50kmで、これは波高30-60cm、波長100kmクラスの津波を探知識別できる性能である。
- (b) PARIS受信機に12本の独立したtracking beamを持たせ、複数地点の波高の同時計測能力をもたせる。
- (c) PARIS衛星は複数のGNSS (typically 6 GPS and 6 Galileo) の直接波及び反射波を受信することにより、1000kmのswathが可能になる。このため、10-PARIS satellitesのconstellationをinclination 45°の軌道に配置すると、緯度45° Sから45° Nの間の人口が最も

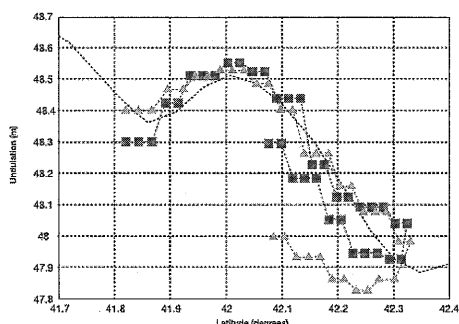


図18 PARIS-Alpha航空機実験⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾

集中する地域を1時間以内の revisit でカバーできる。

- (d) 10-PARIS satellitesのconstellationによって、津波発生後45分以内の警報に必要な津波探知を実現できる見通しがある。システムの主要課題はreal time on-board processingとdata downlinkである。
- (e) 広い海域をsynopticに観測するため、津波の早期警戒にとって重要なfalse alarm rateを低くできる。

5.7 2010-2011年 Stosius等 GNSS-R を応用した津波探知シミュレーション

(1) 研究の背景

2004年のスマトラ・アンダマン津波のあと、GITEWS (German-Indonesian Tsunami Early warning System) プロジェクトが立ち上げられた。この中で次世代津波探知システムのfeasibility studyが行われ、GNSSとLEO衛星のconstellationによる津波探知能力が分析された⁽²⁷⁾⁽²⁸⁾。このスタディが採り上げられた理由はGNSS-Rを応用した海面高度計測技術が革新的であること、1993年のPARISの提案以来実証研

究が重ねられてきたこと、及びGNSS-Rはパッシブ計測であるため比較的ローコストの利点があるため等であった。

Stosius等のスタディの前提は次の通りである。

- (a) PARISの次のステップのin-orbit demonstration用のPARIS海面高度計(PARIS-IOD)の開発が進められている。この計測精度は17cmと見積もられている。
- (b) GNSSの基数はEUのGalileoが運用されると次の10年間に80基を越える。
- (c) GLONASSは2010年に完成する見通しであるため、これも利用できる。
- (2) 2004年12月26日スマトラ沖津波に対する探知シミュレーション
GNSSとしてGPSだけを利用するケース⁽²⁸⁾を紹介する。

(a) 津波のシミュレーション

地震発生1時間後の津波のシミュレーション結果を図19に示す。黒色の楕円形は津波の広がりで、この内側で探知を試みる。

(b) 高度計の感度

20cmと仮定する。Sea roughnessや電離層等の誤差要因があるが、これらは考慮しない。

(c) GPSの高度及び基数

高度は20,200km。GPSの運用基数は当時の24基。

(d) LEOの高度及びconstellation

高度は900km。Constellation optimum spatial coverageを与えるWalker constellationとする。Walker constellationの構成はT/P/Fで表される。

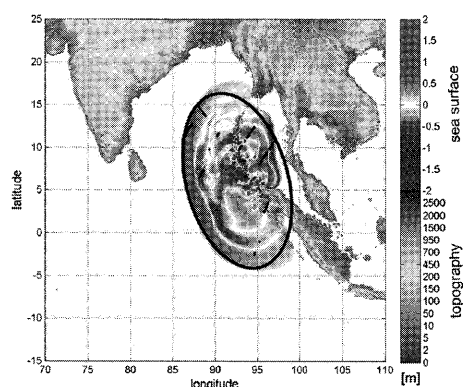


図19 スマトラ沖津波のシミュレーション：地震発生1時間後⁽²⁸⁾

P：同じinclination angleをもち、イーブンに配置されるcircular orbit planesの数。

T：circular orbit planeに均一に配置される衛星数。

F：隣接orbit planeの衛星とのphase shift factor。

例えば18/3/1 constellationは、

- ・3円軌道面に均一に配置される衛星が18基。すなわち、T/P=6であるから各円軌道面の衛星は6基。
- ・同じ軌道にある衛星間の角度は、 $360^\circ / (T/P) = 60^\circ$ 。
- ・隣接軌道の衛星との位相差は、 $F \cdot 360^\circ / T = 20^\circ$ 。F=1のとき、Fの記述は省略できる。

(e) LEO constellationのシナリオ

18/3、24/8、36/6、48/8、81/9。

- (f) 探知確率を図20に示す。18/3のとき、地震発生の15分後に80%の検知確率を得る。確実に検知となる時刻は53分後である。48/8の場合、確実な探知は15分後であるので早期警戒に必要な15分の時間を満たすことができる。

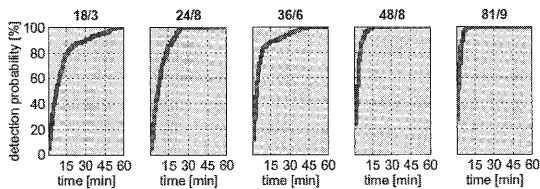


図20 探知確率. LEO: 18/3; GPS: 24
as on 26 Dec. 2004; detection
height: 20cm⁽²⁸⁾

5.8 2012年 Martin-Neira等 PARIS-IOD

現在in-orbit demonstration用のPARIS海面高度計 (PARIS-IOD) のcritical bread-boardの製作が進められている。図21はシステム概念図である⁽²⁹⁾。設計の大きな特徴の一つはinterferometric processingである。直接波と反射波間のdelayを計測するとき、従来はGPS信号のclean replicaを用いてcross-correlationを行っていた。IODでは受信される直接波そのものを用いて反射波とのcross-correlationを行う。この信号処理によってGNSSの広帯域周波数特性のコード信号を利用でき、高速度のchip rate cordの相関が可能になり、直接波と反射波間のdelayを精密に計測できる。高度計側の精度に及ぼす電離層等の影響を分析して、PARIS-IOD及び実運用型高度計の推定性能を表1のように示した。

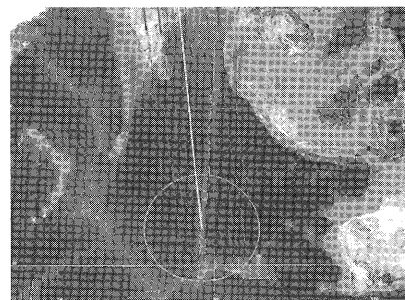
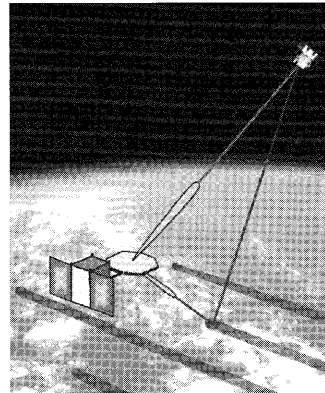


図21 (U) PARIS-IOD concept and (L) typical sampling characteristics⁽²⁹⁾

表1 PARIS-IOD及び運用システムの予測性能⁽²⁹⁾

Parameter	IOD	Operational
	Height Accuracy on 100km, G=23dBI, h=600km	Height Accuracy on 100km, G=30dBI, h=1500km
Instrument Noise and Speckle	12.5 cm	4.2 cm
Ionosphere	9.7 cm (2 frequencies)	4.8 cm (3 frequencies)
Troposphere (Wet and Dry)	5 cm	2 cm
Electromagnetic Bias	2 cm	2 cm
Skewness Bias	2 cm	2 cm
Orbit	5 cm	2 cm
Total RMS Height Accuracy	17 cm (13 cm at nadir)	7.5 cm (6 cm at nadir)

GNSS-Rの研究とは別のコンセプト段階のスペースセンサとして、高度20-100kmのnear-space に platform/sensor を置く NESTRAD (Near-space Tsunami Radarの構想⁽³⁰⁾がある。NESTRADは地震が起きてから僅かな時間に、例えば20-30分後に沿岸を襲う near-field tsunamiを早期に探知

するためのレーダセンサシステムである。レーダのターゲットシグナチャは津波によって引き起こされる radar cross section (RCS) の変化 (tsunami shadows⁽⁷⁾) である。この RCS の変化 (a few dB) は完全に理解されていないが、津波の orbital velocity が海面の風速に modulation を与えるため、short surface wave に擾乱が起こされるためと考えられている。Tsunami shadows を探知標的にする利点は、SAR、scatterometer、radiometry によって遠方から探知できること、及び tsunami shadows の伝播速度は他の現象の速度と明確に異なるため、津波の識別能力を高められる点等である。

NESTRAD のシステム構想は次のとおりである。

- (a) Platform の stratospheric airship 高度 20km、quasi-geostationary、無人、自立動力。
- (b) Sensor C band (5GHz) phased array radar (real aperture radar or SAR)。
- (c) Coverage Disk diameter 1000km。

6 おわりに

3/11 津波に対する衛星搭載電波高度計の観測によって、津波の波高が sea ridge に沿って増幅した状態で伝播する tsunami merge 現象が初めて確認された。ジェット流の進む方向に位置する沿岸部にとって、これは重要な情報である。また、衛星搭載電波高度計の 3/11 津波に対する探知能力の feasibility study が行われた。電波高度計の計測データ、津波モデル及び historical data を統計的に比較することにより、near real time の positive detection

が期待される報告がなされた。

HF レーダの分野では、3/11 津波の particle velocity のパターンから津波の到来を知らせる津波シグナルのアルゴリズムの提案と、3/11 津波及び 2012 年のインドネシア津波に適用した結果が報告された。

2010 年のチリ津波のとき、太平洋を航行中の船に搭載された GPS によって伝播する津波が観測された。船搭載 GPS による津波の洋上観測は初めてである。この結果は津波発生海域のシップレーンを航行する無数の商船がローコストの津波センサを搭載してネットワークを組むことによって、大規模な津波 sensor infrastructure を構築できることを期待させるものである。津波に対するスペースセンサとして、GNSS-R を応用した研究が進められている。これは LEO 衛星に搭載した GNSS 受信機によって GNSS の海面反射波を受信して、津波の海面高度を計測する新しい探知方法である。GNSS-R は新しいリモートセンシング技術としても注目されている。また、tsunami shadows をターゲットに津波を探知する構想も報告されている。

今後も津波に対するレーダ観測活動の調査を継続するとともに、レーダの視点から海外における津波早期警戒システムへの取り組みについても調査する。

文献

- (1) 渡辺康夫, “津波に対するレーダ観測活動の調査,” 電波航法, JACRAN, 53, pp. 60-73, 2011.
- (2) 渡辺康夫, “レーダによる津波観測のサーベイ,” 電子情報通信学会 2012 年総合大会, 災害対策に活用できる

宇宙技術(シンポジウムセッション),
BS-2-1, 2012年3月.

- (3) Y. Song, et al., "Merging tsunamis of the 2011 Tohoku-Oki earthquake detected over the open ocean," *Geophysical Research Letters*, 39, L05606, doi: 10.1029/2011GL050767, 2012.
- (4) V. Titov, et al., "The global reach of the 26 December 2004 Sumatra tsunami," *Science*, 309, 2045-2048, 2005.
- (5) Y. Song, "Detecting tsunami genesis and scales directly from coastal GPS stations," *Geophysical Research Letters*, 34, L19602, doi: 10.1029/2007GL031681, 2007.
- (6) B. D. Hamlington, et al., "Could satellite altimetry improved early detection and warning of the 2011 Tohoku tsunami?" *Geophysical Research Letters*, 39, L15605, 2012
- (7) O. A. Godin, et al., "Variations in sea surface roughness induced by the 2004 Sumatra-Andaman tsunami," *Natural Hazards and Earth System Science*, vol. 9, pp. 1135-1147, 2009.
- (8) B. D. Hamlington, et al., "On the feasibility of tsunami detection using satellite-based sea surface roughness measurements," *IEEE IGARSS*, 2010, 3035-3038.
- (9) D. E. Barrick, "A coastal radar system for tsunami warning," *Remote Sensing of Environment*, 8: 353-358, 1979.
- (10) J. Lipa, et al., "HF radar detection of tsunamis," *J. Oceanography*, 62, 705-716, 2006.
- (11) B. Lipa, et al., "Japan tsunami current flows observed by HF radars on two continents," *Remote Sensing*, 3, pp.1663-1679, August 2011.
- (12) D. Barrick, et al., "Japan tsunami detected by HF radars on two continents," *IEEE Ocean-2011*, 110421-063, Sept. 2011.
- (13) B. Lipa, et al., "tsunami arrival detection with high frequency (HF) radar," *Remote Sensing*, 4, 1448-1461, 2012; doi:10.3390/rs4051448.
- (14) B. Lipa, et al., "High frequency (HF) radar detection of the weak 2012 Indonesian tsunamis," *Remote Sensing*, 2012, 4, 2944-2956; doi:10.3390/rs4102944.
- (15) J. H. Foster, et al., "Improving tsunami warning using commercial ships," *Geophysical Research Letters*, 39, L09603, doi:10.1029/2012GL051367, 2012
- (16) M. Martin-Neira, "A passive reflectometry and interferometry system (PARIS): Application to ocean altimetry," *ESA Journal*, 17, 331-355, 1993.
- (17) G. Ruffini, "A brief introduction to remote sensing using GNSS reflections," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Society Newsletter*, 15-21, March 2006.
- (18) Starlab, A feasibility study of PARIS

- tsunami detection: Final report. June 2005. STERNA_Final_Report.pdf
- (19) S. Jin, et al., "Remote sensing using GNSS signals: current status and future directions," *Advances in space research*, 47, 1645-1653, 2011.
 - (20) R. Stosius, et al., "Tsunami detection from space using GNSS reflections: Results and activities from GFZ," *Proc. IEEE IGARSS- 2010*, 3047-3050, 2010.
 - (21) M. Martin-Neira, et al., "The PARIS concept: An experimental demonstration of sea surface altimetry using GPS reflected signals," *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 39, 1, 142-150, January 2001.
 - (22) S. Lowe, et al., "A delay/Doppler-mapping receiver system for GPS-reflection remote sensing," *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 40, 5, 1150-1163, May 2002.
 - (23) A. Rius, et al., "Sea surface state measured using GPS reflected signals," *Geophysical Research Letters*, 29, L15524, 2002.
 - (24) S. Gleason, et al., "Detection and processing of bistatically reflected GPS signals from low Earth orbit for the purpose of ocean remote sensing," *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 43, 6, 1229-1241, June 2005.
 - (25) M. Martin-Neira, et al., "Detecting tsunamis using the PARIS concept," *URSI-F, Art_4.3*, 2005.
 - (26) M. Martin-Neira, et al., "Tsunami detection using the PARIS concept," *PIERS-2005*, 22-26, 2005.
 - (27) R. Stosius, et al., "Simulation of space-borne tsunami detection using GNSS-Reflectometry applied to tsunamis in the Indian Ocean," *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10, 1359-1372, June 2010.
 - (28) R. Stosius, et al., "The impact on tsunami detection from space using GNSS-reflectometry when combining GPS with GLONASS and Galileo," *Advances in Space Research*, 47, 843-853, 2011.
 - (29) M. Martin-Neira, et al., "The PARIS ocean altimeter in-orbit demonstrator," *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 49, 6, 2209-2237, June 2011.
 - (30) T. Boerner, et al., "Concept study of radar sensors for near-field tsunami early warning," *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10, 1957-1964, 2010.

特別研究会 防衛省技術研究本部電子装備研究所の見学

電波航法研究会事務局

堀川 剛 司

1 はじめに

2012年11月16日に、電波航法研究会の特別研究会を実施した。本年は、32名が千葉県旭市にある防衛省技術研究本部電子装備研究所飯岡支所を見学した。

2 電子装備研究所飯岡支所の紹介

特別研究会当日は天候も良く、電子装備研究所飯岡支所職員の皆様が出迎えてくれた。案内された会議室で、小林雅志支所長から防衛省技術研究本部及び飯岡支所の業務紹介があった。

防衛省技術研究本部は、自衛隊が使用する車両、船舶、航空機、誘導武器及び各種装備品などの研究開発を行っており、航空装備研究所、陸上装備研究所、艦艇装備研究所、電子装備研究所の4つの研究所がある。電子装備研究所は、情報・通信、レーダ、光波などに関する防衛エレクトロニクス部門を担当し、自衛隊の各装備のハイテク化を支える研究所で、高出力レーザーシステムの研究や次世代警戒管制レーダの研究などが行われている。飯岡支所は、1964年12月に電波器材の試験研究施設として飯岡の地に新設され、何回かの組織改編を経て、現在は電子装備研究所に所属している。約20万㎡の敷地と周辺が開けた広大な環境が電波に関する屋外実験に適していることから、電波の伝播や反射の特性等についての研究が行われている。

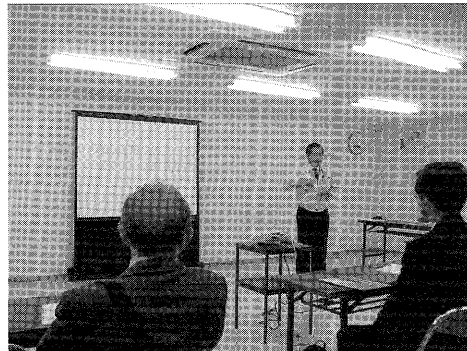


写真1 飯岡支所長から業務紹介

業務紹介終了後、参加者は2班に分かれて施設を見学した。支所長からの「あの小屋は撮影禁止です。」との注意に、飯岡支所で国防を左右する研究が行われていることを感じ、今回の見学は大変貴重なものであると実感した。

3 パッシブレーダの研究

初めに試験塔に登り、飯岡支所の施設及び周辺地域について紹介があった後、この塔で行われたパッシブレーダの研究について説明を受けた。

パッシブレーダとは、自ら電波を発射することなく、既存のレーダ波や放送波を送信源とし、受信のみで動作するレーダのことで、防衛面で抗堪性に優れており、近年では自ら送信しないことから省電力、省電波となる技術として注目されている。説明によると、送信局から受信局に直接伝搬

する直接波と、送信局から目標に当たり受信局に伝搬する散乱波との遅延時間によって送信局、受信局、目標の3点の距離関係がわかる。そして、散乱波が到来する方向を測定することで目標の位置が決まる（図1）。

飯岡支所の研究は、受信局を試験塔の屋上に設置し、送信局を東京タワーにして、発射される放送波を利用して成田国際空港に向かう航空機を捉える実験を行った結果、二次監視レーダの航空機位置情報と航跡が一致するデータを得たという。しかしながら、パッシブレダは技術的には可能なものの、演算処理に時間がかかるため、リアルタイムの情報が必要とする現場での実用化はこれからだそうである。リアルタイム性への課題を早く解決し、国防の強化に役立ててほしい。

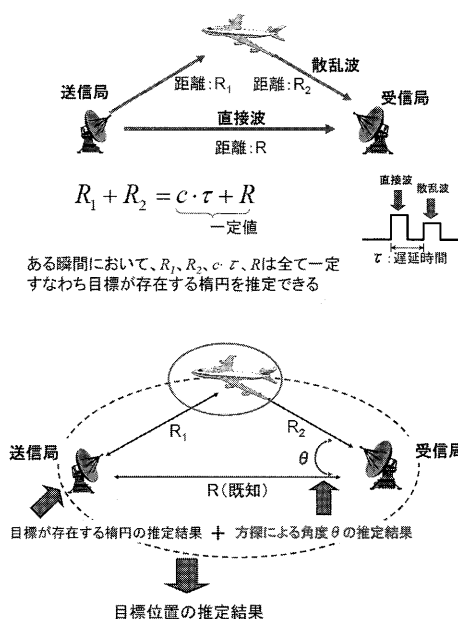


図1 パッシブレダによる目標位置推定 (飯岡支所提供)

4 電波反射特性評価技術

飯岡支所では写真2に示す電波反射特性評価装置を使って、実寸大の目標のレーダ反射断面積 (Radar Cross Section : RCS) 計測技術及びステルス設計に必要な高分解能 RCS 計測技術の研究が行われている。

当該評価装置から約 250m 離れた目標に向けて電波を発射し、その反射波を受信・計測することにより、目標の RCS 値や反射源分布を求めるという。

私は以前、電子航法研究所の電波暗室を見学したことがあり、上記のような計測は電波暗室のみで行われるものばかりと思っていたが、目標を屋外で計測することは自然環境下による影響の有無や測定値の変化を確認するためでもあることを知った。ま

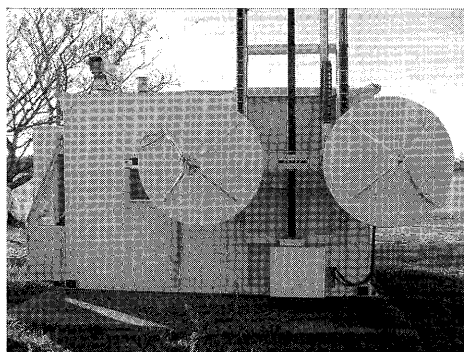


写真2 電波反射特性評価装置

た私は無線技術士の国家試験に向けて勉強中で、評価装置の説明時に大地反射波の影響を防ぐために遮蔽板を用いるなど教科書で学んだことが実際に応用されているのを見ることができ、大変良い経験をした。

5 コンパクトレンジRCS計測技術

本来、RCSの計測は平面波状態の電波を目標に当てる必要があり、電波が送信アンテナから発射されて平面波となるために必要な距離は、下記式で表わされる。目標が大きければ大きいほどその距離が長くなることがわかる。 $(\lambda=3\text{cm}(10\text{GHz})$ の場合、 $D=1\text{m}$ のとき R は66mで、 $D=10\text{m}$ のとき R は6.6kmとなる)

$$R = 2D^2 / \lambda \quad (\text{m})$$

R : 目標に平面波を当てるために必要な距離

D : 目標の大きさ

λ : 計測に使用する電波の波長

飯岡支所では、電波反射特性評価装置による屋外計測の他、小型、縮小模型等を対象とするコンパクトレンジRCS計測装置を保有している。本装置は、写真3のとおりホーンアンテナから発射された電波がパラボラリフレクタで反射することで平面波となり、限られた空間で計測することができる。

6 J/FPS-5固定式警戒管制レーダ装置 (開発試作機)

飯岡支所の敷地内に、航空自衛隊が管理しているレーダ装置がある(写真4)。レドームがガメラの甲羅模様に見えることからガメラレーダと呼ばれている。今回の施設見学ではガメラレーダは予定されていなかったが、飯岡支所長の働きかけで見学できることとなった。

本レーダ装置は試作機のため、三角柱状の構造物の2面に、フェーズドアレイレーダが設置されている。そして、監視対象の

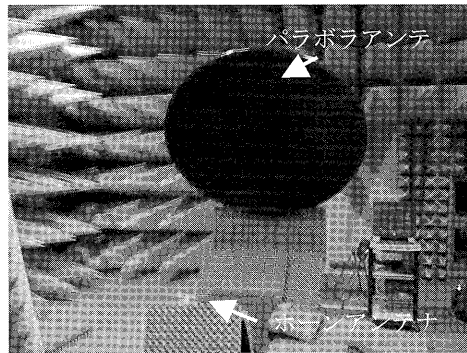


写真3 コンパクトレンジRCS計測技術

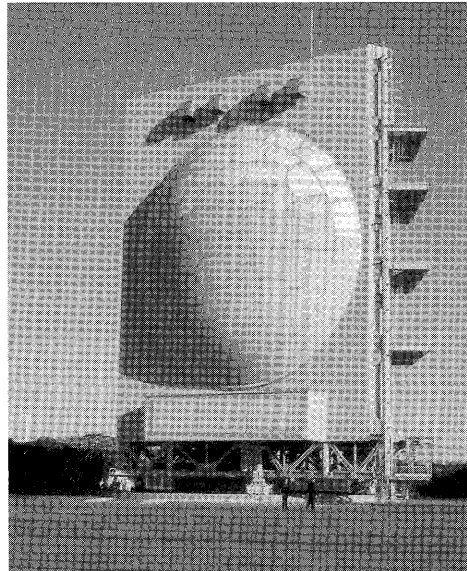


写真4 固定式警戒管制レーダ装置
(開発試作機)

捕捉・追尾が可能となるよう、構造物の足元には車輪がついており、構造物自体が回転可能な機構となっている。

7 おわりに

今回の特別研究会は、飯岡支所の各施設を見学した。職員皆様の説明が分かりやす

く、大変興味深い研究を知ることができ、非常に有意義なものとなった。

最後に、特別研究会のために施設見学の手配や説明をしてくださいました防衛省技術研究本部電子装備研究所の皆様にご心より御礼を申し上げます。

防衛省技術研究本部

電子装備研究所飯岡支所

- ・所在地

〒289-2702 千葉県旭市大字塙字三番割

- ・ホームページ

<http://www.mod.go.jp/trdi/>

(防衛省技術研究本部HP)

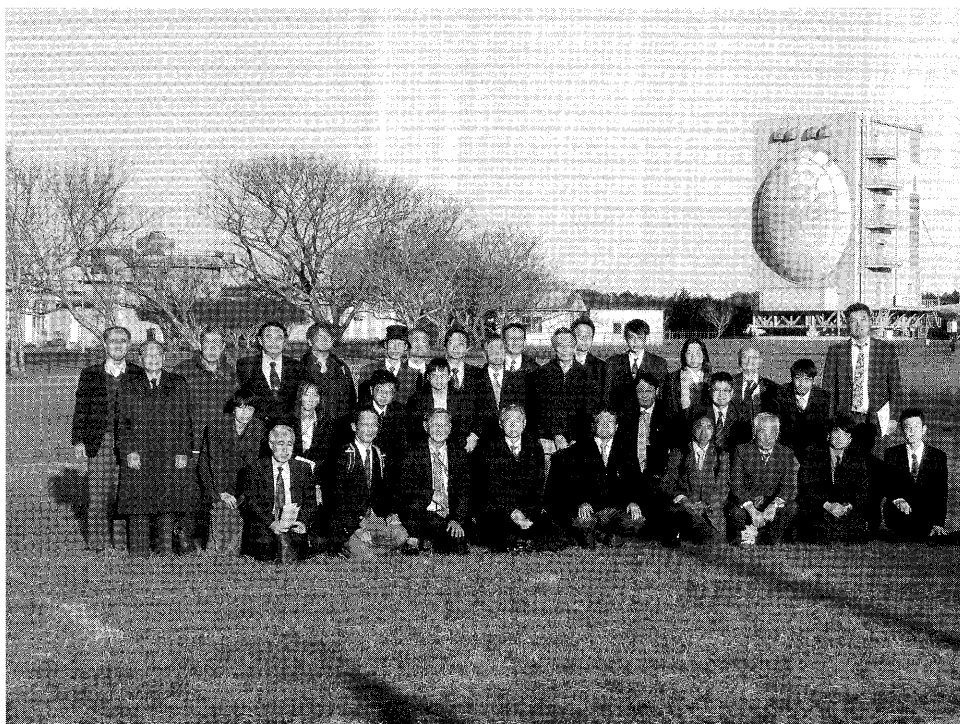


写真5 飯岡支所にて集合写真

臨時研究会「次世代 AIS 国際標準化のためのワークショップ」のパネルディスカッション参加報告

電波航法研究会事務局

堀 川 剛 司

1 はじめに

2012年12月3日から7日までの間、「次世代 AIS 国際標準化のためのワークショップ」が海上保安庁及び海洋政策研究財団により実施された。このワークショップは船舶自動識別装置（Automatic Identification System : AIS）の多目的な利用に関して、国内外の AIS 専門家、AIS 機器製造者、海事関係機関を集めて、次世代における AIS の必要要件について意見交換を行い、次世代 AIS の性能基準を作成することを目的とするものであり、ワークショップ期間中は会議のほかに、パネルディスカッションやテクニカルツアーが実施された。

電波航法研究会では、このパネルディスカッションを臨時研究会と位置づけ、会長をはじめ多数の会員が参加した。本稿ではその概要について報告する。

2 ワークショップ開催の背景

AIS は、2000 年 12 月に開催された国際海事機関（IMO）第 73 回海上安全委員会において、海上における人命の安全のための国際条約（SOLAS 条約）が改正され、一定の船舶に AIS の搭載が義務付けられ、2008 年 7 月 1 日までに全ての AIS 適用船舶に AIS が搭載された。

AIS は船舶の位置特定や衝突防止といった目的に使用され、船舶の安全航行に大き

く寄与することとなったが、技術の発達に伴い、航路標識 AIS、用途特定メッセージ、搜索救難用信号発信 AIS（AIS-SART）、衛星による AIS 搭載船舶の探知などへ利用が拡大した結果、船舶の運航効率の改善や海上治安の分野でもその有用性が認められるようになった。

このため、IMO では、より安全で効率的な船舶の航行を目指して現在検討中の e-navigation 計画において、AIS を主要な情報伝達手段の候補の一つとして挙げている。また、同じく IMO で検討中の GMDSS の見直し作業の中でも、遭難情報や海上安全情報の伝達手段としても有用と認識されている。

しかしながら、現行の AIS は、伝送速度が遅い、回線容量が限られる、VHF 波利用のため陸からの通信範囲が沿岸のみに限られる等、技術的な課題が存在している。

そこでこれらの課題を解決するとともに、我が国の国際地位の向上を期するため、我が国が率先して次世代 AIS の性能基準を作成することとし、ワークショップが開催された。

3 パネリストの紹介

パネルディスカッションのパネリストは以下のとおりである。

・ Ms. Jillian CARSON-JACKSON

(オーストラリア海上安全庁船舶交通・水先サービス課長)

- ・ Ms. Margaret Jean BROWNING
(exactEarth社上級販売部長)
- ・ Mr. Stefan Karl BOBER
(ドイツ連邦水路海運局技術研究部長)
- ・ Mr. Jan SAFAR
(イギリス総合灯台局電波航法研究所研究所員)
- ・ Mr. William David KAUTZ
(アメリカ沿岸警備隊無線通信課長、国際航路標識協会 e-Navigation 委員会 AIS 作業部会副議長)
- ・ Mr. Ross Walter NORSWORTHY
(アメリカ沿岸警備隊技術顧問)
- ・ 野口 英毅氏
(海上保安庁交通部整備課主任技術官)

4 パネルディスカッション概要

次世代AIS国際標準化のためのワークショップのパネルディスカッションは、2012年12月3日に日本財団ビル（東京都港区）で開催された。パネルディスカッションは海上保安庁職員の司会の下、前半はパネリストによるAISに関する講演、後半は

公開討論会が行われた。

4.1 AIS – looking to the future

Innovative uses of AIS

Ms. Jillian CARSON-JACKSON 講演

Carson-Jackson氏はオーストラリアにおけるAISの利用について4つの事例を示しながら講演を行った。

1つ目はヘリコプターにAIS機器を搭載することで船舶と連絡がしやすくなり、船舶側もヘリコプターの位置を把握できるようになったと述べた。

2つ目はAIS機器で海中転落者を容易に発見できるようにした落水者用AISユニット（AIS-MOB）の紹介を行った。

3つ目はAIS-MOBを応用したもので、グレートバリアリーフ沖でダイビングを楽しむダイバーが使用する潜水用AISユニットについて述べた。

4つ目はオーストラリア北端に位置するトレス諸島で取り組まれているグラブバッグプログラムを紹介した。トレス諸島の人々は日常の移動手段が小型船であり、仕事場や買い物などに行くときに1つのバッグを持って出発する。バッグには海難事故に遭った際に必要となる懐中電灯や毛布などのほかにAISメッセージが送信できる機器も含まれていて、AISが彼らの生活に大きく関わっていると話した。

CARSON-JACKSON氏は事例を通じてAISの新たな利用を述べた一方で、これらの利用を定める規則や基準を整備する課題が残っていると述べた。



写真1 会場の様子

4.2 Ship Tracking via AIS

ONE technology TWO problems

solved Collision Avoidance Tracking

Ms. Margaret Jean BROWNING 講演

BROWNING氏は衛星によるAIS搭載船舶の探知の概要について述べた。

衛星は概ね12時間で地球を1周し、船舶の検出確率は60～80%である。世界無線通信会議(WRC-12)で衛星AISのためにch75及びch76が割り当てられ、クラスAのAISやAIS-SARTなどの装置に使用することで効率的な船舶のトラッキングができるのではと話した。しかしながら、クラスBのAISについては低出力で送信時期が不定期、さらにクラスBのほとんどが沿岸域に密集していることから、衛星での受信が難しくなると述べ、この課題を検討する必要があると話した。

次にBROWNING氏は衛星AISの利用事例を紹介した。ある国では、船舶は岸から十分離れた場所でバラスト水を交換しなければならないところ、ある船長は岸に近い場所でバラスト水を交換した。航海日誌に偽装を施していたが、衛星AISによるトラッキング照会によって犯行が発覚したという。

また、定期航路上を航行するクルーズ船が海難に遭った事例では、クルーズ船の通信機能が完全に不能となり救助要請が出来なかった状況においても、AISデータのトラッキングによって定期航路から外れていることが判明し、無事救助されたとのことである。

このような事例をいくつか挙げ、講演を終えた。

4.3 AIS What do we have?

What do we need?

Mr. Stefan Karl BOBER 講演

BOBER氏はAISの総論について述べた。

AISの導入経緯、AIS搭載義務船舶以外の漁船やプレジャーボートなどでもAISが利用されていること、またAIS局が世界に100,000局以上あり、AIS-SARTや航路標識AISなどさまざまな利用方法が開発されていることなどを説明した。その中で、海域通知や船舶の乗員数など航海の安全に関わるデータを送信できる、用途特定メッセージ(Application Specific Message:ASM)が将来重要になると言及した。

最後に通信方式について述べ、衛星を経由したもの、HF波やWiMAXを使用したものなど数ある通信方式のうち、国際電気通信連合(ITU)のスタディグループではVHFデータ交換(VHF Data Exchange:VDE)の更なる開発が必要であると話していると説明した。

4.4 Communications for e-Navigation

Workshop on International

Standardization of AIS & Future VDE

Mr. Jan SAFAR 講演

SAFAR氏はe-navigationにおける通信について述べた。IMOが進めるe-navigationでは船-船間、船-陸上間の情報交換が重要であり、既存の機器同士に互換性を持たせつつ、新しく開発されるものにも対応可能なシステムである必要があると述べた。

また、ASMや航路標識AISなどもAIS



写真2 SAFAR氏の講演

を利用した情報交換であり、e-navigationのひとつであるから、効率的で安定したものにするにはAISの標準化をしっかりと推し進めていく必要があると述べた。VDEについては、ITU-R M.1371またはITU-R M.1842に基づいた効率的で安定したものが必要と述べ、SAFAR氏の考えでは2014年末にはIMOの承認を受け、2018年までにはVDEの標準化を終える必要があると説明した。

最後に、VDEの開発に当たっては1つの団体がリーダーとなって開発を進めていくのが一番良いのではないかと述べ、講演を終えた。

4.5 AIS and VHF Data Exchange

Mr. William David KAUTZ 講演

KAUTZ氏は、AISが安全情報の提供において強力なツールである一方、設計上、高速で大容量のデータ通信を行うには適していないと述べた。また、AISがe-navigationのデータ通信で大きな役割を果たすとされ、急速に発展していることから、AISの周波数1、2への過度な負荷が心配されると話した。

次に、AISで使用するチャンネルとその通信内容について、AIS1、2は航行安全のため今までどおりの船舶の位置報告や識別などに、WRC-12で割り当てられたch75とch76は衛星回線に、同じく割り当てられたch27とch28は今後新しく開発されるアプリケーションのために使用されると説明した。また、ch24、ch84、ch25、ch85、ch26、ch86がVDEに割り当てられ、高速で大容量の通信が可能になるであろうと話した。

最後に、KAUTZ氏が副議長を務める国際航路標識協会（IALA）e-Navigation委員会AIS作業部会においてVDEの開発が話し合われ、ITU-R WP5B、IMO航行安全小委員会、IMO/ITU合同専門家会合からも開発への支援を受けており、大変喜ばしいことであると述べ、講演を締めくくった。

4.6 Technical Considerations for the Integration of AIS and VDE

Mr. Ross Walter NORSWORTHY 講演

NORSWORTHY氏は、AISが開発された当時を振り返り、AISのための周波数を獲得するのに5年間要したことを話した。現在、AISに多くの周波数が割り当てられていることは大変素晴らしいことであり、有効利用のための計画が必要であると述べた。

次に、具体的な周波数の利用形態について触れ、25kHzの単一バンドで新しい変調方式を使えば現行AISの8倍の伝送速度を得ることができ、25kHzを4つ合わせて100kHzで行えば32倍の伝送速度が得られると説明した。

2015年開催のWRC-15までに、今回のような次世代AISを検討する会議が10箇所で開催されることから、それぞれの会議で次世代AISの方向性を明確に示し、更なる周波数の獲得を目指していかなければならないと述べ、講演を終えた。

4.7 AIS & VDE

Expectation for future

野口 英毅氏講演

野口氏は現在のAISの状況と次世代AISによって可能となるものについて述べた。現在のAISは船舶に関するデータのほかに衛星によるAISの検知、AIS-SART、AIS-MOBといったようなものにも利用されている。しかし、現在はAISの利用が増加しており、海上保安庁が日本で最も輻輳する海域に位置する観音埼AIS陸上局のAISスロット使用率を調べたところ、2008年8月5日朝のラッシュ時では約30%であったところ、2012年には40%と4年間で10%の増加が見られたという。IALAによれば、50%を超えると送信に影響が出てくるとされており、野口氏は次世代AISの開発が必要不可欠と訴えた。

一方、次世代AISの開発には技術的問題、法的問題、もしかすると財務的問題なども考える必要があり、開発は容易なものではないとも述べた。

次世代AISの利用については、通信が大容量になることから、詳細な船舶データの送信によって航行安全が向上したり、衛星を経由して北極海航路に仮想航路標識AISを設置したり、船舶で計測した気象データが世界の海洋環境モニターに利用されることなどが考えられる。ほかにも、船舶から

陸上に対して燃料や水を要求するなど商業的利用もあり、上記問題と同様に、どのような利用方法があるかについても議論していく必要があると述べた。

次世代AISの開発は長い時間をかけてしっかりと熟慮し、世界中の同意を得ながら進めていく必要があり、同時に我々の将来についても模索していく必要があると述べ、講演を終えた。

4.8 公開討論会

講演終了後、休憩を挟み、公開討論会が行われた。公開討論会は先ほどの講演者が登壇し、進行役の野口氏からの質問に答えるものであった。

最初の質問は、ネットワークや衛星で収集したAISデータのセキュリティーに関して、データを保護する規制や指針、データを拡散させないための方策があるかどうかであった。BROWNING氏は、AISはオープンシステムでありデータを保護する設計になっていないが、AISデータには商業的価値があることから、規制する必要があると述べた。ただし、AISがオープンシステムであるから、どの程度の保護が



写真3 公開討論会の様子

必要となるかは判断が難しいとも述べた。CARSON-JACKSON氏は、オーストラリアではAISデータをインターネットで広げることを禁止していると述べる一方で、AISデータ共有ネットワークと呼ばれるものがあり、政府、港湾関係機関、警察、レスキュー隊などがデータを共有し、海難救助や安全保障に使用していると述べた。討論の結果、AISデータのセキュリティーに関する規則が必要であるとまとまった。

続いての質問は、次世代AISやVDEの商業的利用は適切であるかどうかであった。パネリスト全員が、AISの本来の目的とする航海の安全に支障が無ければ、VDLが過負荷にならないければ、商業的利用は船主にとって良いモチベーションになるとした。また、商業的利用を成功させるためには、船主に対して明確なメリットを示す必要があるとした。BOBER氏は例示として、船舶と港湾間で次世代AISやVDEを使用することで情報のやりとりが容易となり、船舶は港の外で待機する時間が短くなるなど船舶の運航効率が向上し、また待機時間が短いと言うことは、待つ間の危険が軽減されるということで、航海の安全にもつながると話した。

5 おわりに

本ワークショップは、次世代AISの機能を具体的に検討するものとしては世界初の会議であり、そのワークショップにおけるパネルディスカッションに参加できたことは、国際的な最新動向を把握するうえで大変有益なものであった。パネルディスカッションの講演者を始め関係各位にこの場を借りて御礼申し上げます。

電波航法研究会 平成 24 年度事業報告

Record of work carried out by the Japanese Committee for Radio
Aids to Navigation in fiscal 2012

電波航法研究会事務局

Secretariat office of the JACRAN

総会

平成24年度総会は、平成24年5月18日14時15分から国立大学法人東京海洋大学越中島キャンパス越中島会館で開催された。会員総数91名のうち、出席者15名、委任状提出者39名の計54名であり規約第10条第4項の規定により総会は成立した。各議題の審議結果は次のとおりであった。

1. 平成23年度事業報告が事務局により行われた。
2. 平成23年度会計報告及び監査結果の報告が事務局から行われ、承認された。
3. 平成24年度会長選出に関して立候補者がいなかったが、水洋会 中村氏からの推薦で林会長の留任が満場一致で了承された。副会長については立候補者、推薦者がいなかったため、会長からの推薦で長岡栄氏及び池田保氏の両名の就任が了承された。なお、各幹事の委嘱については事務局案のとおり了承された。
4. 平成24年度事業計画案について事務局から説明が行われ、原案どおり承認された。
5. 平成24年度予算案について事務局から説明が行われ、原案どおり承認された。

研究会

1. 第1回研究会は、平成24年5月18日、国立大学法人東京海洋大学越中島キャンパス越中島会館で総会に引き続き開催され、海上保安庁交通部整備課長 五十嵐耕氏から「東日本大震災による航行援助施設の被害と復旧」及び、東京大学名誉教授 原島博氏から「コミュニケーション技術を100年単位で俯瞰する」と題する講演が行われた。出席者は35名であった。
2. 第2回研究会は、平成24年9月7日、国立大学法人東京海洋大学越中島キャンパス越中島会館で開催され、国土交通省国土技術政策総合研究所沿岸海洋新技術研究官 古川恵太氏から「海洋レーダの原理及び海洋レーダの利用による応用分野」及び、元日本工業大学教授 渡辺康夫氏から「津波に対するレーダ観測活動の調査（その2）」と題する講演が行われた。出席者は32名であった。
3. 第3回研究会は、平成25年2月15日、国立大学法人東京海洋大学越中島キャンパス越中島会館で開催され、慶応義塾大

学大学院システムデザイン・マネジメント研究科教授 春山真一郎氏から「可視光通信」及び、海上保安庁総務部海上保安試験研究センター航行援助技術課専門官 長野浩樹氏から「海上保安試験研究センター 可視光通信への取組み」と題する講演が行われた。出席者は31名であった。

特別研究会

平成24年11月16日に千葉県旭市の防衛省技術研究本部電子装備研究所飯岡支所を見学し、コンパクトレンジRCS計測システムをはじめとする研究の説明を受けた。参加者は32名であった。

臨時研究会

平成24年12月3日に海上保安庁及び海洋政策研究財団が開催した「次世代 AIS 国際標準化のためのワークショップ」のパネルディスカッションを臨時研究会と位置づけて参加した。

幹事会

幹事会は、平成24年4月27日、5月18日、9月7日、平成25年2月15日に開催され、事業計画、講演テーマ、会誌発行等について審議が行われた。

会誌等発行

会誌「電波航法」第54号を発行した。
ホームページで、研究会の案内及び資料等の掲載を行った。

会員数

平成25年3月31日現在

正会員 24名 46口

個人会員 10名

(10名のうち年会員6名、終身会員4名)

推薦会員 20名

特別会員 37名

計 91名

会員の異動

入会 推薦会員 今津 隼馬

電波航法 ————— ELECTRONIC NAVIGATION REVIEW —————

平成25年 3 月25日 印 刷 2012
平成25年 3 月31日 発 行 No.54

編集・発行 電波航法研究会
Japanese Committee for Radio Aids to Navigation

印 刷 北九州市門司区原町別院3-5
株式会社 福田印刷



航路標識のエキスパート“JANA”

安全で美しい海を

一般財団法人日本航路標識協会

“JANA” Japan Aids to Navigation Association

平成二十五年三月二十五日印刷
平威二十五年三月二十一日発行

電
波
航
法

電
波
航
法
研
究
会
発
行