

ISSN 0287-6450

Denpa Kōhō

ELECTRONIC NAVIGATION REVIEW

# 電波航法



JACRAN. 53

2011

電波航法研究会 発行

Published by the Japanese Committee  
for Radio Aids to Navigation

## 最先端の技術と英知を駆使し、船舶航行の安全を守る



SV型レーダービーコン



灯台用アンテナ



灯浮標用アンテナ

本装置は、船舶に搭載されているレーダーからの電波を受信後、局識別コードを発射し、船舶のレーダー画面上に表示させ、船舶が安全で効率的な航海ができるように情報を提供する装置です。

- 船用レーダー波帯のXバンド専用で周波数アジャイル方式を採用
- 応答符号は遠近によりパルス幅の切替えが可能
- 気密性はIP67規格を満足しており、通常運用下においてメンテナンスフリーが可能
- 保守用端末により、レーダービーコンの動作休止間隔、感度及び局識別コードを設定可能
- レーダービーコンの性能に関わる運用状況と周波数精度を監視する自己診断機能
- 空中線は、耐紫外線と耐候性にすぐれたレードームを採用
- 軽量でコンパクトな設計により、低消費電力を実現



# S-VANS セナーアンドバーンズ株式会社

本 社 〒144-0041 東京都大田区羽田空港 1 丁目 6 番 6 号  
TEL)03-5708-7300 FAX)03-5708-0151

札幌営業所 〒005-0004 北海道札幌市南区澄川 4 条 2-10-17  
TEL)011-823-2250 FAX)011-823-2258

神戸営業所 〒650-0023 兵庫県神戸市中央区栄町通 3 丁目 6 番 7 号  
TEL)078-331-7292 FAX)078-331-7381

北九州営業所 〒802-0001 福岡県北九州市小倉北区浅野 1-2-39  
TEL)093-533-5371 FAX)093-533-5372

— 目 次 —  
CONTENTS

巻頭言「空想物語－西暦2037年－」…………… 会長 林 尚吾 ……(1)  
Chairman Shogo HAYASHI

講演の記録

[交通運行支援]

「Vessel Traffic Management (VTM) について－その誕生、成長そして終焉－」  
…………… 野口 英毅 ……(3)

Hideki NOGUCHI

「航空交通管理 (ATM) について」…………… 長岡 栄 ……(8)  
Sakae NAGAOKA

[電子海図]

「新しいENC製品仕様S-101の開発状況」…………… 菊池 眞一 ……(21)  
Shinichi KIKUCHI

「電子海図 (ENC) の国際動向について」…………… 小森 達雄 ……(31)  
Tatsuo KOMORI

[車々間通信]

「車々間通信による衝突事故防止に向けて ～高密度端末環境でのアクセス方式の提案～」  
…………… 三浦 龍 ……(36)

Ryu MIURA

小花 貞夫

Sadao OBANA

[地震予知]

「地震予知研究の現状とVLF/LF電波を用いた地震予測の実用化」…………… 早川 正士 ……(47)  
Masashi HAYAKAWA

[津波探知]

「津波に対するレーダ観測活動の調査」…………… 渡辺 康夫 ……(60)  
Yasuo WATANABE

[波浪観測]

「船舶用レーダ波浪観測装置」…………… 平山 圭一 ……(74)  
Keiichi HIRAYAMA

馬場 満徳

Mitsunori BABA

特別研究会紀行

「特別研究会 宇宙航空研究開発機構相模原キャンパスの見学及び  
講演 小型ソーラー電力セル実証機「IKAROS」の聴講」…………… 事務局 ……(80)  
Secretariat

電波航法研究会事業報告 (平成23年度) …… 事務局 ……(84)  
Secretariat

## 空想物語 — 西暦2037年 —

電波航法研究会

会長 林 尚吾

Chairman Shogo HAYASHI

2037年2月、フィリピン・ボラカイ島は快晴。暑い陽射しに照りつけられた真っ青な海が眩しい。椰子の木陰の爽やかなそよ風に髪を梳かれつつ眺めている。何もかも今から25年前、2012年に初めて旅した時と同じである。ただし、当時は成田から6時間の空路の旅を必要とした。今はシステムの準備時間だけで同じ空間を満喫している。明日はイースタ島のモヤイ像を眺めながら朝食にしたいと計画している。こんな贅沢な選択ができるようになったのは、超環境提供システム（仮想）の普及によるものだ。映画やテレビで遠方の映像が眼前に提供されるようになってから100年以上と久しいが、現在では没入型となって自分の周りに広がっている。もちろん風、音、温度も制御して空間を再現している。

さて、私（空想上の某個人）が2012年に東京海洋大学の大学院を卒業してから25年が経った。学生時代、H教授の講義で「25年先のナビゲーション技術」を当時の科学技術と自分なりの予測をもとにまとめる課題があったことをふと思い出した。未来を考える前に過去を調べてみよう、と、H教授に25年前のこと、つまり50年前について尋ねてみた。昭和から平成に年号が変わる頃で、H教授はまだ助教授。電波航法研究会

や日本航海学会が創立40周年という時代だ。日本の造船界では「高度知能化船」というプロジェクトが動いていた。その当時、5年間をかけて各要素技術の開発を行い、海外の港まで完全無人化で大型船を航行させるという企画であった。当時記録されたビデオテープをDVDに焼きなおしたのを見た。今では信じられないがプラスチックの円盤にデータを記録する。直径12センチもあるのにたった4GBしか記録できない代物である。さらにその前のメディアであるビデオテープにいたっては、磁性粉体が塗布されたとしてつもなく長いプラスチックフィルムに情報を磁気の向きで細かく記録するものだそうだ。歴史上の資料として国立科学博物館に展示されている。

話を本論にもどそう。我々学生への課題は、2012年時点で25年先の航海技術を予測することだった。当時の、私の同級生の発想をまとめると次のようなものであった。

1. 現在、情報端末機器の進歩により小型のタブレット式パソコンが主流である。将来はこのような端末を船内の無線LANでリンクし、各航海計器の情報を船内のどこでも手元で見えるようにするユビキタス性を高め、安全性と船員の省力化を高める

システムが確立される。

2. 通信の進化による変化がもたらされる。たとえば船舶管制のグローバル化、公海に浮かぶ巨大なオフィス空間、船上と陸上の差異の解消が実現する。また遠隔制御の航海水先システムの出現やレーダネットワークによる海域全体の映像化と鳥瞰図方式の自船周囲の映像供給システムが普及する。

3. 化石燃料の価格の高騰を考慮したエネルギー対策が重点的に進められる。風力エネルギーを併用した帆走商船の話は2004年に実船評価されたが、試験船にとどまっている。太陽電池や電気動力船なども省エネルギーとはまだいえない状況である。しかし、これまでの25年の発展を振り返れば、25年後に実用化される可能性は充分にあると思う。

4. 電力を産む新しいエネルギーとして、地熱エネルギーによる発電が主流になっているだろう。日本の技術はすでに外国で実用化されている。このエネルギー源は1000年後でも枯渇することは無い。使いすぎによる地球全体の温度バランスの不均衡が心配だが、近い将来には地球全体の温度制御システムの研究成果が得られるだろう。

5. 沖合いの「海の駅」と「海上線路」による完全無人運航が実用化されている。往来する船舶は人工衛星に管制された「海上線路」上を運航し衝突などの事故は起きない。海の駅と港ターミナルまでは、エスコート船が先導するのでプレジャーボートとの事故の危険性もない。

6. 漁業形態も変わり養殖主体になるだろう。これまでは天然ものが珍重されてきた魚介類だが、これからは飼料を厳しく管

理された養殖ものの「食の安全性」が重視されるようになる。そのため養殖漁業作業船は、定刻運行で定められたルートをしつかり管理されて通航するようになり、衝突や接触といったことがなくなる。

これらが2012年の大学院生が考えた2037年の世界だった。

この他に1点、こんな予測もあったことを特筆したい。

戦争で飛躍的に発展してきた電波航法は、1940年代にレーダなどが開発され、1990年代にはその当時の全ての電波航法システムがGPS (GNSS) に置き換えられた。しかし衛星への依存度が安全保障上の問題となり、慣性航法システムに振り戻される。充電式の小型携帯可能な慣性航法システムによる自律航法が実用化されているだろう、というものだった。

さて2037年、実現された技術はどれだろう。「答えを教えることは簡単ですが、まずは考えてみてください」と誰かが言う。目覚めるとそこは海辺でも2037年でもなく、2012年の我が家。超環境提供システムにはほど遠い3次元テレビジョンが消し忘れられていた、

と、空想するのも楽しいですね。そして未来を予想するだけでなく、過去と現在を検証することも大切だと思います。

会員諸賢も25年後を想像してみませんか？ そして25年後に日記を読み返すのも面白いと思います。

# Vessel Traffic Management (VTM) について

## —その誕生、成長そして終焉—

海上保安庁交通部整備課安全システム開発室

主任安全システム開発技術官

野口 英毅

### 1 はじめに

Vessel Traffic Management (VTM) という言葉は、ちょうど国際海事機関 (IMO) で、船舶航海における情報の収集・統合・交換及び表示について将来の姿をどのようなものにするかという、いわゆる e-Navigation の検討が始まった直後、国際航路標識協会 (IALA) の VTS 委員会で誕生した。それは、e-Navigation の議論が進むと共に IALA の中でも検討が進み、2010 年の IALA 総会では一つのテーマとして扱われるまでになった。しかし、IMO の e-Navigation の議論の場に VTM の言葉が出ると共に多くの障害に会い、結局、2011 年に IALA は VTM の用語の使用をあきらめることとなる。

本論では、VTM という概念の誕生とその成長、そしてなぜ IALA が VTM をあきらめたかまでを追う、今後の e-Navigation の発展に資することを目的とする。なお、本論で述べられた見解は著者個人のものであり、公式のものではないことを留意されたい。

### 2 VTM の誕生

2005 年 12 月の IMO 第 81 回海上安全委員会 (MSC) において、日本、マーシャル諸島、オランダ、ノルウェー、シンガポール、イ

ギリス及びアメリカが、e-Navigation の戦略を作成するという新規作業提案を提出した。それは、AIS、ECDIS、ARPA、INS 等電子化が進む航海計器を、全体的・システム的な方法で活用するための戦略を作成し、より事故やエラーの少ない安全な航海を達成しようというものであった。そして、これらの航海計器と共に、陸側の主要要素として Vessel Traffic Service (VTS) が上げられることとなった。

そして、この IMO の動きと呼応する形で、IALA の VTS 委員会でも従来の VTS の内容をさらに拡大した新たな業務を検討する動きが始まった。2006 年 9 月の第 24 回 IALA VTS 委員会は、VTS の導入以後船舶の監視が世界的に広がっていること、安全保障や経済効率の観点から船舶動静を VTS 範囲の外から知る必要性が増していること等から、従来の VTS より高いレベルで船舶交通の流れを見る必要があるとの結論を出し、これを行うものを VTM としたのである。そして、従来の VTS は VTM の中心として新たに位置づけることとした。この第 24 回 VTS 委員会で誕生した VTM の定義は以下のようなものであった。

○VTM is a collection of global activities supported by information services

which, improve the safety, security, efficiency and environmental protection of vessels and cargo.

図1に2006年に提出されたVTMの概念図を示す。

そして、VTS委員会は、IALA理事会にVTMの概念をさらに具体的なものにしていくべく、委員会の中にVTMを専門で検討していく新たな作業部会の設置を申請し、これが認められた。

### 3 VTMの成長

しかし、VTMは新しくかつ包括的な概念であることから、なかなか定義が定着しなかった。例えば、2007年の第42回IALA理事会では、以下のような定義を当てている。

○VTM is the strategic provision of a network of measures and services. The

purpose is to enhance safety, efficiency and security of shipping, protection for the marine environment and functions of VTS. These services and measures may be available globally.

このように定義や概念で様々なものが提案されては消えていく中で、VTM作業部会は徐々に仕事を進めると共に、IALAの中でもVTMの重要性が話題になるようになる。そして2010年3月の第17回IALA総会では、技術発表セッションの一つとして「From VTS to VTM」という題で、多くの最新研究の発表が行われた。この中で最も中心となったのはVTM作業部会議長の行った発表「The Global Concept of Vessel Traffic Management (VTM) and its Benefits to All Stakeholders Within the Maritime Domain」である。この中でVTMの定義は以下のように紹介された。

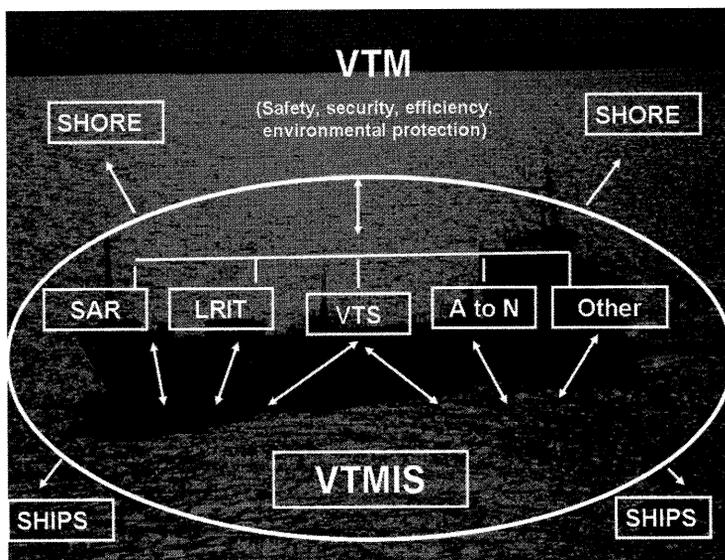


図1 VTM概念図 (2006年)

○Vessel Traffic Management is the functional framework of harmonized measures and services to enhance the safety, security and efficiency of shipping and the protection of the marine environment in all navigable waters.

VTS : A service implemented by a Competent Authority, designated to improve the safety and efficiency of vessel traffic and to protect the environment. The service should have the capability to interact with the traffic and to respond to traffic situation developing in the VTS area.

図2に2010年新たに定義されたVTMの概念図を示す。また、図3にVTMとe-Navigationの関係を示す。

この新たに定義されたVTMをVTSに関するIMO決議A.857(20)と比較してみる。

つまり、下線部で示したように、VTSが「Service」という単なる業務であるのに対し、VTMは「Functional Framework」と大きな枠組みであるとされた。さらに、その範囲をVTSが「in the VTS area」であるのに対し、VTMは「in all navigable water」と広く全ての航行可能水域としたのである。このように、VTMは非常に広い概念として捉えられ、また、図3が示すようにe-Navigationは技術的枠組み、VTMは機能的枠組みとして区別されることと

VTM : Vessel Traffic Management is the functional framework of harmonized measures and services to enhance the safety, security and efficiency of shipping and the protection of the marine environment in all navigable waters.

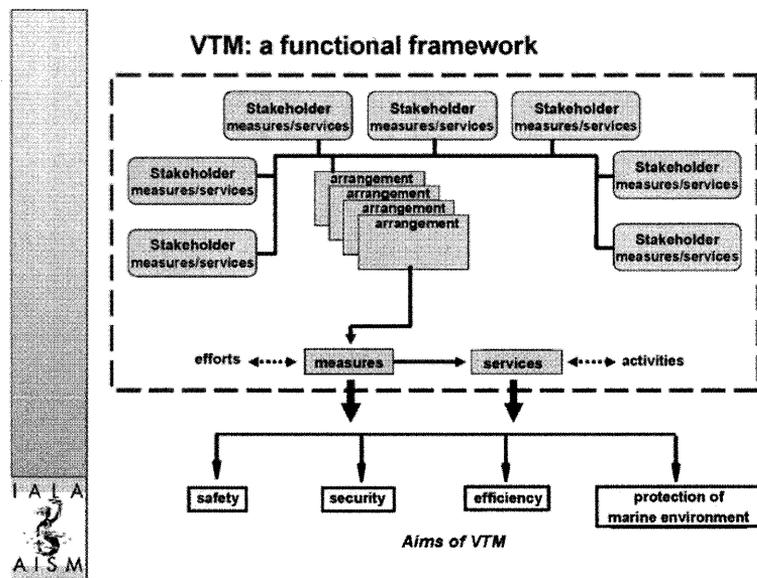


図2 VTM概念図 (2010年)

なった。

#### 4 VTMの終焉

IALA総会では、IALA関係者のみならず、多くの海事関係者が出席しその発表を聞いている。このVTMの発表に対し、多くの聴衆から疑問の声が上がった。その多くは「Management」とは何を指すのか良く分からないというものであり、これに対する明確な回答はなかった。

そして、このことは、2010年6月に行われたIMOの第56回航行安全小委員会(NAV)で提出されたe-Navigation報告案に、IALAから提案されたVTMの概念が取り込まれてきたために、さらに大きな混乱を呼ぶこととなる。それは、本来「航行の自由」が原則である公海において、なぜ「Management(管理)」を受けなければいけないのか、という疑問の声であった。このため、NAV議長の総括によりVTMに関

する議論をしばらく中止し、e-Navigationの作業はユーザーニーズに集中することになったのである。

この混乱を受けて、IALAではVTMについて慎重に扱うこととし、特別な作業チームを編成し特に以下の観点からの検討を進めることとした。

- ✓ VTMという用語の妥当性
- ✓ VTMという概念をIALAが扱うことの妥当性

後者の観点は、VTMは航路標識、VTS関係者のみでなく、他の海事関係者、税関、治安、警備当局関係者も含むことから、IALAの所掌範囲を大きく超えることへの懸念である。

そして、当別作業部会の検討の結果、「management」という言葉は一般的には「control and direction」を想起させ、

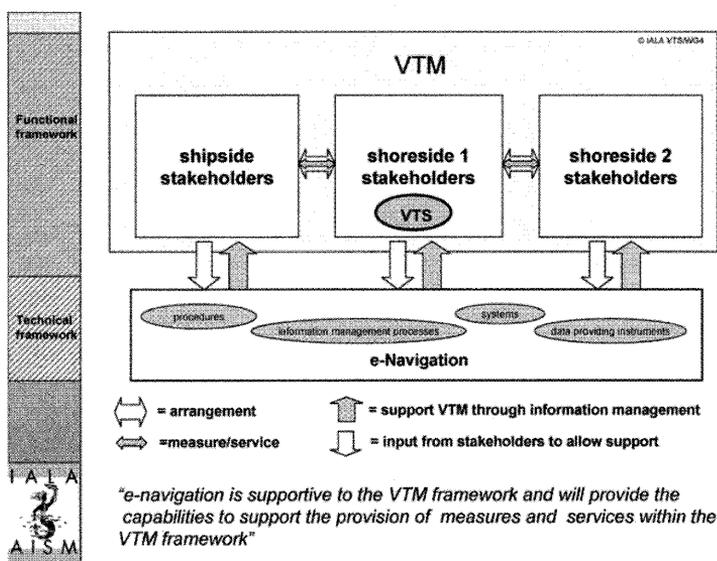


図3 VTMとe-Navigation

VTMの真の意図は違うところにあるものの、VTMでは船舶交通の管理と指示を意味すると捉えられかねないことから、VTMに代わる言葉を作成することとなった。そして、MATCH (Maritime Transportation Collaboration and Harmonization) という言葉を提案し、その定義を以下のように定めた。

○MATCH is the functional framework of harmonized arrangements, measures and services supporting the collaboration between stakeholders within the maritime domain to enhance the safety, security, and efficiency of shipping and the protection of the marine environment in all navigable waters

これにより、VTMという言葉は終わりを迎えたのである。

## 5 まとめ

現在、IALAではMATCHについてさらに検討中であり結論を出すには至っていない。しかし、IMOでの議論を見る限り、VTMという言葉が復活することは困難であろう。航空の世界では、すでに2005年に国際民間航空協会 (ICAO) から「Global Air Traffic Management Operational Concept」が出され、ATM (Air Traffic Management) という言葉は定着した。ICAOではATMを

○ATM is the dynamic, integrated management of air traffic and airspace

- safely, economically and efficiently - through the provision of facilities and seamless services in collaboration with parties

と定義しており、VTMとは異なるものではあるが、多くの関係者 (parties) による安全・経済的・効率的な運航を目指すという点では共通している。

その意味からVTMの概念は間違っただけではなかった。時期が早すぎたのと、伝統にとらわれずより広い海上交通を論議する場所がなかったのが、問題だったのである。

# 航空交通管理 (ATM) について

電子航法研究所／東京海洋大学連携大学院

長岡 栄

## 1 まえがき

イカロスの神話の時代から、飛行は長年の人類の夢であった。1903年のライト兄弟の初飛行から約100年で、航空機は我々の社会生活に欠かせぬ存在となっている。

航空機数が少ないうちは、空は自由で広い空間であった。しかし、今やこの瞬間にも、わが国の空域を数十から数百機が飛行していると思われる。我々の生活にはパターンがあり、特定時刻に多くの航空機が空港に集中するため、航空交通の渋滞も発生しうる。また航空機の輻輳が進むと航空機どおしの空中衝突の可能性も高まる。

こうした問題に対処するのが航空交通管制 (Air Traffic Control : ATC)<sup>(14)</sup> である。この目的は衝突の防止と航空機の円滑で秩序ある流れの維持と促進である。旅客機など後述するIFRで飛行する航空機は、四六時中、航空管制機関の指示に従って飛行せねばならない。

航空交通の交通量の増大に伴い、担当空域を中心とした局所的な航空交通管制だけでなく、出発から到着までの全ての運航過程を考慮した航空交通の管理が必要になってきた。そこで、航空交通管理 (Air Traffic Management : ATM)<sup>(2)(11)(12)</sup> が行われるようになってきている。

本稿では、まず航空交通管制の概要を説明し、航空交通管理への移行の動向を紹介する。そして、将来の航空交通管理の運用



図1 地上走行中の航空機

概念の例や、主要な技術の動向などに触れる。

## 2 航空管制

### 2.1 航空交通管制と航空交通業務<sup>(3)(14)(15)</sup>

航空機の飛行方式は図2のように有視界飛行方式 (VFR) と計器飛行方式 (IFR) とに大別される。我々が利用する旅客機はIFRで運航されている。すなわち、出発から到着まで管制機関の指示に従って (サービスを受けて) 飛行している。

航空交通管制の目的は大別すると次のようになる。

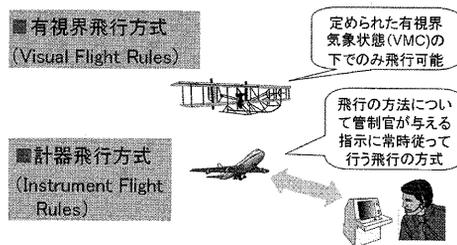


図2 有視界飛行方式と計器飛行方式

- ①航空機の衝突防止（航空機相互間、飛行場内の航空機および障害物との）
- ②航空交通の秩序だった流れの維持と促進

この業務を航空交通管制（ATC）と称している。航空機の運航には、これらに加えて、

- ③安全かつ効率的な飛行に役立つ助言および情報の提供
- ④捜索救難の援助を要する航空機に関して適当な機関への通知および必要であればその機関への支援

などが必要である。③は飛行機に、気象情報、航法援助施設の運用状況、飛行場などの状況、交通情報などを知らせるサービスで飛行情報業務と呼ばれる。④は警急業務と呼ばれている。これらのサービスの総称が航空交通業務（Air Traffic Services : ATS）<sup>(5)</sup>である。わが国ではこれらを航空保安業務と称している<sup>(3)</sup>。

## 2.2 航空交通システム

図3に航空交通システムの概念図<sup>(1)(11)(12)</sup>を示す。これは多くの構成要素から成る複雑で大規模なシステムである。これは、機能で大別すると、表1のように、通信（Communication）、航法（Navigation）、監視（Surveillance）、航空交通管理（ATM）などのサブシステムから成る。

通信には、有線回線に加え短波（HF）／超短波（VHF）または衛星回線が用いられる。音声通信とデータによる通信がある。航法ではVOR/DMEや計器着陸装置（Instrument Landing System : ILS）などの航法援助システム<sup>(2)</sup>、機上装置では、GPSやIRSなどの各種センサーや飛

行管理システム（Flight Management System : FMS）<sup>(2)</sup>などがある。現在では、監視システムはレーダーか自動従属監視（Automatic Dependent Surveillance : ADS）が主流である。ADSは、GPSなどの、機上で取得した測位データを地上に伝送し、これを監視に利用するものである。また、航空交通管理の用途では、意思決定や業務遂行を容易にするため、様々な情報処理や管制支援などのシステムが使われている。

航空交通システムには、様々な施設、装置などのハードウェア、規則、基準、情報などのソフトウェア、組織や人（パイロット、管制官、運航・整備・航空保安要員など）

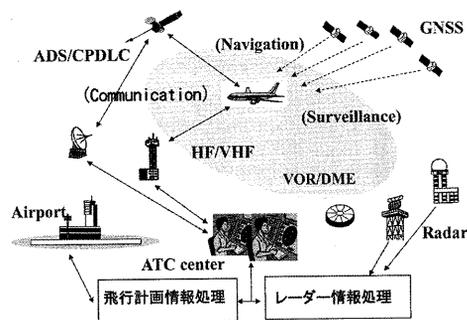


図3 航空交通システム（管制を中心にして）の概要

（GNSS:全世界衛星航法システム、VOR:VHF全方向式無線標識、DME:距離測定装置）

表1 サブシステムの機能と代表的システム

機能	内容
通信	情報の送受、管制指示の伝達（管制官-パイロット、管制官-管制官、パイロット-航空会社）
航法	航空機の制御・誘導（機上システム、航法援助システム）
監視	近傍の交通状況の把握（位置通報、レーダ、自動従属監視（ADS）、ADS-B）
航空交通管理	全体の交通状況の把握と管理（管制情報処理システム（飛行データ、飛行計画データ、レーダデータ処理など）、交通流管理システム、管制支援システム）

表2 ICAOのシカゴ条約付属書の種類

番号	題名	番号	題名
1	航空従事者の免許	10	対空通信
2	航空規則	11	航空交通業務
3	気象業務	12	捜索救難
4	航空図	13	航空機事故調査
5	測定単位	14	飛行場
6	航空機の運航	15	航空情報業務
7	航空機国籍及び登録記号	16	環境保護
8	航空機の耐空性	17	保安
9	出入国簡易化	18	危険物の安全輸送

が関わっている。また、こうしたシステムの運用には、世界共通の多くの規則、方式などが細かく規定されている。これらは、国際民間航空機関 (International Civil Aviation Organization : ICAO) の国際標準・勧告方式 (SARPs) に準拠している。これらの詳細は国際民間航空条約 (シカゴ条約) の付属書に定められている。表2に各付属書の題名を示す。なお、航空交通業務に関するものは第11付属書である。

## 2.3 航空管制の実際

### 2.3.1 飛行過程と航空交通管制

空には航空交通管制 (以下、管制と呼ぶ) 業務が提供される空域 (管制空域) とそうでない空域 (非管制空域) がある。空港周辺を除く陸上では、非管制空域は概ね高度600m未満の空域である<sup>(15)</sup>。管制空域と管制業務も幾つかに細分化されている。管制業務はその飛行段階に応じて、航空路管制、飛行場管制、進入管制、ターミナルレーダー管制、着陸誘導管制などに分類される<sup>(14)(15)</sup>。

IFRで飛行する航空機は図4のように出発から到着まで管制機関の指示に従って飛行する。この業務を行うのが航空交通管制官 (以後、管制官とよぶ) である。管制官の能力には限界があるので、管制業務は担当する空間が業務毎に分割されている。

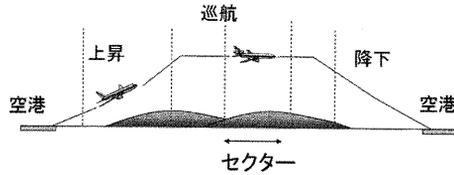


図4 航空機の飛行過程

また、同じ航空路管制でも広い担当空域を、セクターと呼ばれる幾つかの小領域に分割して管制を行っている。航空機の移動とともに管制業務の担当部署が異なり、管制の権限がリレーされてゆく。このため、円滑な管制のためには隣接セクター間での管制の移管のための調整が必要である。

### 2.3.2 制御系としての航空管制

航空交通管制の系は、図5に示すような一種の制御系と見なせよう。ここで、航空機相互間に安全な間隔を設定するのは、パイロットではなく、管制官である。パイロットは管制の指示に従って航空機を操縦している。この指示は通信系を介して、音声またはデータで伝達される。

この制御系では、図5のように、利用可能な監視情報に基づいて、管制官が適切な判断により指示を出す。それがパイロットに正しく伝達され航空機が操縦されて、始

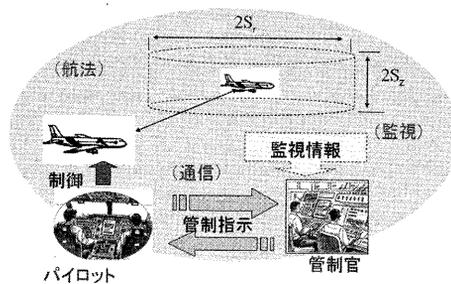


図5 航空管制システムのモデル

めて管制官の意図通りに制御される。これには情報は正確に出来るだけ速やかに伝達される必要がある。

### 2.3.3 管制間隔基準

空中衝突を防止するため航空機相互間に一定以上の間隔を設定して飛行させる。この間隔の基準を管制間隔基準と呼ぶ。レーダーによる監視下では航空機を中心とする図5の円筒状の空間内に他機を入れないように管制する。因みに $S_1$ は3NM (1NM = 約1.9km) または5NM、 $S_2$ は1,000ft (約300m) の場合が多い。

当然ながら、監視や通信の性能によりこの大きさや形状は異なる。例えば、洋上の航空路などでは形状は直方体となる。前後に30NM ~ 120NM、左右が30NMから100NM程度、上下 ( $S_z$ ) は1,000ftまたは2,000ftである。この空間が狭いほど多くの航空機を飛行させられるが衝突のリスクは増える。また、離着陸時には先行機の後方乱気流の影響などを考慮した管制間隔基準が用いられる<sup>(14)(15)</sup>。

## 3 航空交通管理

### 3.1 航空交通管制と管理

航空交通の始点と終点は空港で、ここでは三次元空間から滑走路という一次元の線上に航空機を並べることになる。空港周辺では、しばしば、時間帯によって輻輳が発生する。空港近傍の空域では航空機相互間に安全な間隔をとる (Spacing) ために時間の調整が必要になる。航空機間の間隔を調整するには、いずれか一方の航空機の経路 (または針路) か速度を変えてやる。場合によっては、管制機関の許可が得られる

まで、特定地点近傍の空域を一定の方式に従って飛行する待機 (Holding)<sup>(15)</sup> が必要となる。

こうした輻輳への対応には、セクターを担当する管制官による現場での対処 (局所的、戦術的) と、事前に渋滞が起こらないように交通量を調整する仕方 (大局的、戦略的) がある。前者による対応では限界があるため、航空交通の管制は、最近では、セクターを中心とした局所的な管制から、出発から到着までの全飛行過程を考慮した大局的な航空交通の管理の方向に向かいつつある。管理対象は航空交通と空域である。燃料消費やリスクの観点からも、事後の対処よりも事前の計画的対応のほうが望ましい。

航空交通の大局的かつ計画的管理の例として、出発空港での出発時刻を制御する航空交通流管理 (Air Traffic Flow Management : ATFM)<sup>(22)</sup> がある。

空域については与えられた空域を最大限有効利用することを目指す空域管理がある。例えば、訓練空域の時分割利用 (訓練が無い時間帯を一般利用に開放する) などがある。

### 3.2 航空交通流管理とATMセンター

航空交通流管理 (ATFM)<sup>(14)(15)(22)</sup> は安全かつ秩序だって効率的な交通流の形成を目的として、航空交通量を管制処理容量に適合させる業務である。混雑が予想される空域や空港への航空機の進入を制限するため、出発時刻を遅らせたり、代替経路を推奨したりする。すでに空中にある場合は、空中待機、速度調節、経路変更などにより到着時刻を調整する。

ATFMは、わが国では1994年に福岡

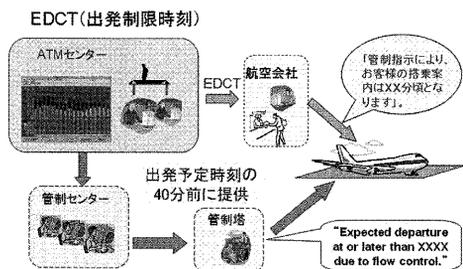


図6 出発制限時刻 (EDCT) の発出過程の例

に設置された航空交通流管理センター (ATFMC) で実施されてきたが、2005年からは航空交通管理センター (ATMセンター) で行われている<sup>(3)(22)</sup>。図6に航空交通流管理における出発制限時刻 (Estimated Departure Clearance Time : EDCT) の発出過程を示す。ATMセンターでは空域や空港での到着予定時間を予測し、ある時間帯の予測交通量 (または作業負荷) と所定の管制処理容量とを比較する。予測交通量が容量を超えないように前述の方法により交通流を調整する。なお、ATMセンターではATFMに加え、空域管理、そして洋上空域の管制を行っている<sup>(3)(15)</sup>。

### 3.3 航空交通管理の定義の変遷

2000年代前半までは航空交通管理 (ATM) は航空交通業務、航空交通流管理、空域管理の総称とされていた。図7にICAO文書中のATMの定義の変化を示す。左はICAOの航空業務方式 (PANS-ATM : 2001年版) の表現、右は2005年に刊行された全地球的ATM運用概念マニュアル<sup>(4)</sup>のものである。なお、2007年版PANS-ATM<sup>(5)</sup>の定義では、下線部が追加され次のようになっている。

「機上と地上の機能を含めた、関係者間

の協力による便宜の供与と継ぎ目の無いサービスを介した、(安全、経済的かつ効率的な)、航空交通と空域の動的かつ統合的管理」

最近のATMの定義には「関係者間の協力」、「継ぎ目の無い」、「動的かつ統合的管理」などのキーワードが見られる。これらは、ICAOの全地球的ATM運用概念<sup>(4)</sup>の特徴でもある。そして、この運用概念は、欧米などで推進中の2020年頃を目指した、後述するATMの近代化計画の基礎となっている。

## 4 全地球的航空交通管理

全地球的ATMの概念では、ATMシステムとは、航空交通管理を提供するシステムである。これは2章の航空交通システムの一部でもある。ATMは、空中、地上、衛星に基づく通信、航法、監視で支援された、人間、情報、技術、施設およびサービスの協調的な統合を通じて行われる。

このシステムでは以下を前提としている<sup>(4)(11)</sup>。

- ①安全が最優先事項
- ②人間が中心的役割を果たす
- ③技術については特定しない
- ④ATM関係者間で情報を共有し協調的意思決定 (Collaborative Decision

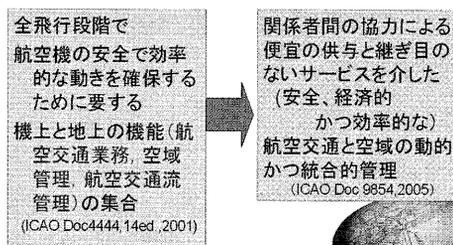


図7 ATMの定義の変化

Making : CDM)

⑤様々なサービスにおいて協調して意思決定

⑥サービスの連続性（不測の事態に対応）

ここで、ATM関係者とはATMシステムの計画、開発、使用、規則、運用、保守に参画、協力、協働する組織、機関、人など意味する。上記の④、⑤は、様々な拘束のなかで、できるだけ空域利用者（運航者）の希望に沿うような、最適な運航を目指すことに他ならない。

図8に運用概念図を示す。運用概念の7つの構成要素を表3に示す。コンフリクトとは航空機が安全間隔を喪失する（間隔が管制間隔基準以下になる）状態のことである。コンフリクト管理は安全な間隔設定が主になる。

表3中のトラジェクトリ(Trajectory)は軌道とも呼ばれる。軌道は、地上および空中における航空機の動きの記述で、位置、時刻、少なくとも計算により、速度、加速度などを含む。航空交通管理の基礎データとなるものである。現在、管制に用いられている飛行計画情報は粗い軌道情報でもある。

表3で④の交通同期は交通流管理の目的を戦術的に達成するもので、③と⑤とも深

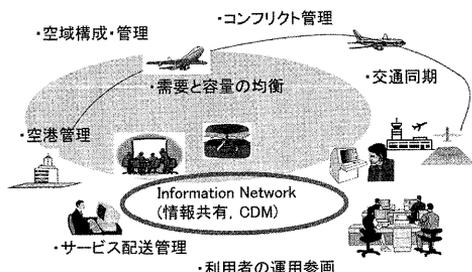


図8 全世界的ATM運用概念

表3 全世界的ATM運用概念の7つの構成要素<sup>(4)(11)</sup>

要素	内容
①空域構成・管理	空域の動的・柔軟な管理
②空港運用	地上インフラ提供、空港の空側の容量の効率的な使用
③需要と容量の平衡	航空交通流管理と等価
④交通同期 (Traffic Synchronization)	安全、効率的で秩序ある交通流の戦術的促進と維持
⑤空域ユーザー運用	飛行運用のATM関連側面 (情報共有、CDM)
⑥コンフリクト管理	安全間隔の設定、衝突防止 (戦略的および戦術的に)
⑦ATMサービス配 送管理	様々なサービスにおける調整、トラジェクトリに関する調整 (最適化)、CDMによるATMシステム設計

く関連している。飛行場周辺や交差航空路のような交通の合流点および交差点の交通流の管理に関わる。地上と空中における待ち行列の管理を含み、需要と容量の平衡や間隔の設定とも関わる。

表3の⑦は全てのATMサービス提供者間のサービスの調整が主となる。

このシステムではATM関係者間の協調的意思決定 (CDM) が行われる。従来はATMに係る意思決定や情報所有の主体はATS提供者であったが、CDMは、これらに空域利用者をはじめとしたATM関係者を参加させるというものである。情報管理システムは、従来のサブシステム毎に個別なものではなく、ATM関係者を繋ぐ全システムを統合化した情報ネットワークを構築する。この情報管理は System Wide Information Management (SWIM) と呼ばれている。

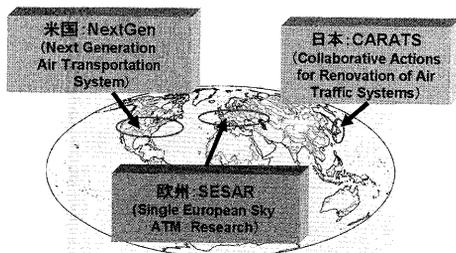


図9 ATMの近代化計画／ビジョン

## 5 今後の航空交通管理

### 5.1 ATMの将来計画／ビジョン

欧米では2000年代の中頃に2025年頃を目標にしたATMシステムの近代化計画を作った。米国のそれはNextGen<sup>(10)</sup>、欧州のそれはSESAR<sup>(9)(16)</sup>と呼ばれる。これらに同調して、最近、わが国でも「将来の航空交通システムに関する長期ビジョン(CARATS)」が策定されている<sup>(13)</sup>。

図9に日米欧のATM近代化計画／ビジョンを示す。これらは何れも、ICAOの全地球的ATM運用概念に準拠している。安全性や効率性の向上、交通量増大への対応、環境負荷の軽減などの数値目標を設定し、これらを実現するための概念や計画に関するものである。しかし、目標や計画等には、地域的な差異がみられる。

欧州では多くのサービス提供機関(ANSP)からなり、共通の均一の航空交通業務を提供することが望まれている。米国では、テロ等の脅威に対応するセキュリティや航空界のリーダーシップなどの目標も含めている。CARATSでもわが国の航空交通の特徴を考慮したビジョンを作っている。因みにCARATSの構成は以下のようになっている<sup>(13)</sup>。

①将来システム構築に向けた基本的考え方

- ②将来システムの目指す(性能の)目標
- ③現行のシステムにおける課題
- ④ATM運用概念とCNS(通信・航法・監視)技術基盤の変革の方向性
- ⑤実現にむけた段取り

### 5.2 SESARの運用概念<sup>(16)</sup>

ATM近代化計画として、欧州のSESARの例を紹介する。SESARにおける運用概念<sup>(16)</sup>は、従来の分割された空域を基本としたATMから変わって、出発から到着までの軌道を基本としている。これには次の要素が含まれる。

- a. システム情報管理(SWIM)ネットワーク：全ての主要な過程を支える
- b. 協調的意思決定(CDM)：ネットワークで飛行計画(計画軌道)を定めたり、軌道の変更の交渉を支援
- c. 軌道管理の環境(空域管理の環境ではなく)
- d. 自動化による支援を多用：作業負荷の軽減のため(しかし、管制官は管理者として管制の中心にいる)
- e. 新しい管制間隔モード：進んだ航法能力を有する航空機の利用とパイロットに管制業務の一部を委任
- f. 航空機とATMシステムの“ATM能力レベル”
- g. ATMネットワークに統合された空港  
ここでは、予測性、安全性、容量を改善したり、パイロットと管制官の作業負荷の分かち合い、状況認識の改善のために、周辺交通のコックピット表示器や精密な軌道データを用いている。

### 5.2.1 SWIM<sup>(16)</sup>

a 項のシステム情報管理 (SWIM) は運用概念に必須で、そのネットワークは IP (Internet Protocol) ベースのデータ伝送システムである。現行の ATM 関係者の二点間を結ぶシステムに置き換わり、航空機も移動するノードとなる。これにより、意思決定のための最新の正確な情報を利用でき、決定の結果を他の利用者に通知できる。関係者の誰もが必要なときに必要な情報にアクセスできるようなものである。

### 5.2.2 CDM

b 項の CDM は、意思決定の結果が全ての関係者に見える環境とされている<sup>(16)</sup>。CDM では飛行の進捗に関する情報とこの情報へのアクションに関連する情報が必要である。欧州の多くの空港ですすでに行われているが、SESAR ではこれを航空路を含めた全ネットワークに拡張する。

### 5.2.3 軌道管理<sup>(16)</sup>

航空機の正確な軌道情報を関係者が共有し、利用できることで、CDM、計画と解析、システムの自動化などがし易くなる。以下では軌道の計画過程を説明する。

空域利用者 (航空会社、軍、国、個人など) は、まず飛行希望 (事業/使命の意図) を (軌道という形で) 定め関係者と共有する。この軌道は明らかになった拘束条件 (容量、空域、制限など) を考慮して、関係者との調整 (CDM 過程) を経て、必要に応じ修正される。利用可能となる情報に対応し継続的に修正が入る。何度も繰り返す協調による計画で、空域利用者の需要と ATM 資源とのバランスをとることを目指してい

る。最終的には、空域利用者が飛行を、そして航空業務提供者と空港がサービスに同意した計画軌道で、管制機関の承認を受け、飛行の実施に入る。これらの軌道は時刻を含めた 4次元 (4D) 情報で記述される。

軌道は、通常、航空会社の運航センター (FOC) の飛行計画システムで定められる。また、小さな航空会社、ビジネス航空会社、GA機の代りに代理店やパイロットが作成したり、要求されれば (軍から) ANSP が作成することもある。基本的には、システムには、ある飛行について幾つかのバージョンの軌道があるが、ATM ネットワークで用いるのは唯一で正確な 4D 軌道だけである。

離陸前には、軌道データの使用は計画目的のみに限られる。離陸後は時刻が正確になり、ネットワークで継続的に共有され利用可能となる。要求されるいかなる変更も、原則として CDM により行われる。

### 5.2.4 自動化による支援<sup>(16)</sup>

主として容量は管制官の作業負荷で決まる。大まかには作業負荷は航空機数  $N$  に比例する定常的作業と、 $N$  の二乗で増大する戦術的作業からなる。安全間隔の設定などに関係するのが後者である。SESAR では作業負荷を増大させないため以下を考えている。

- (a) 管制官のデータ入出力とデータ管理のより良い方法による支援自動化
- (b) コンフリクトへの対処を支援する自動化
- (c) 戦術的な介入頻度の軽減 (コンフリクト回避方法の採用と介入作業の一部をパイロットにまかせる)

### 5.2.5 新たな管制間隔モード<sup>(16)</sup>

SESARでは管制官の作業負荷軽減の方法として、従来の管制間隔に加え、次の2つのモードを設けている。

① ANSP管制間隔モード：精密軌道承認 (Precision Trajectory Clearances : PTC) による管制間隔

② 機上管制間隔モード：航空機を含み、間隔設定は、委任によるか、基準によりパイロットが行う。

①の精密軌道承認は、地上からの速度調整による軌道管理では2Dルート（横方向含有率）または3Dルート（横と垂直含有率）、コントラクト期間中の4次元の含有率が指定される4Dコントラクトがある。この精密軌道の目的は予測位置の不確定性の軽減である。

②の機上間隔モードでは機上システムを用いてパイロットに間隔付けを任せる。これには3つの段階が考えられる。パイロットに次のことを求める。

- 1) 特定の航空機を認識し、それからの指定された距離を維持する

表4 SESARにおけるATMの能力レベルの分類<sup>(16)</sup>

能力レベル	内 容
ATM-0	ATM-1能力を満たさない
ATM-1	現存する能力および“従来 (Legacy) の能力”を持つ2012/2013までに配備されるシステムの能力
ATM-2	2020年の要求を完全には満たさぬが新能力を有する2013年から配備・稼動するシステムの能力
ATM-3	2020年のSESAR目標日までに要求される主要な能力
ATM-4	SESARの最終目標、特に非常に高い容量を達成するための手段を提供する高度な能力。達成時期2025年以降

2) 特定の航空機を認識し、それとの間隔を自分でとる

3) 自機の近傍の全ての航空機との間隔を自分でとる責任をもつ

### 5.2.6 ATM能力レベル

ATMの地上、機上、地対地システムの増進を効果的に進めるためATM能力レベルを表4のように定めている。なお2013年は後述するADS-B義務化の年でもある。

### 5.2.7 空港

SESARでは空港はネットワークのノードとして統合されている。CDMは計画全般にわたり行われる。滑走路の有効利用を目指した待ち行列管理のため、空域利用者、ANSP、そして空港（到着、出発、空港面管理のツールを用いて）の間で行われる。

空港では、占有時間の減少、到着機と出発機の間隔の減少、後方乱気流の予測、そして空港面誘導システムの改良などにより、滑走路処理能力を向上できよう。安全面では、空港面近傍の状況認識させたり、管制官を介さず、直接に乗員に警報を発するコックピット表示機で安全性を強化できるとされている。

軌道管理、機上間隔ツール、精密航法技術を組み合わせることで、機上や地上での待機を軽減でき、SESARの到達目標にある航空機毎の環境への排出物や騒音を軽減できる連続降下進入 (CDA) が可能となるとしている<sup>(16)</sup>。

## 6 主要な技術

前述の運用概念の実現には幾つかの技術

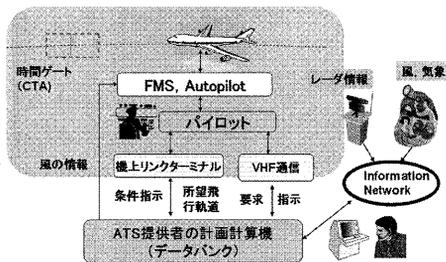


図10 軌道管理における空地部分の例 (CTA : Controlled Time of Arrival)

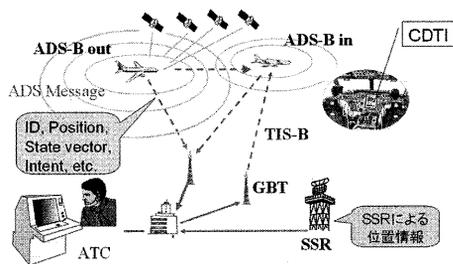


図11 ADS-B の概念

的課題があるが、そのうち、軌道管理や機上間隔ツールに関わる主要なものを示す。

### 6.1 軌道管理の運用

現行のATMは、航空機の飛行計画とレーダー等で測定した位置の情報に基づいている。ただし、飛行計画における軌道情報は幾つかの地点の通過予定時刻、高度などの粗いものである。軌道管理、すなわち軌道情報に基づく管理では、この情報の精緻さが重要である。このため、計画された軌道情報の予測精度の向上が課題となる。

図10に航空機と地上との軌道情報の調整の概念を示す。軌道情報は図10のように航空機側と地上の関係者で共有し、航空機はある地点に、指定された時刻範囲内に到着することが求められる。このため、航空機に時刻を指定して正確に飛行する能力が必要である。また、状況の変化などに伴う計画の変更にも即座に対応できる（関連する全ての軌道情報を更新する）必要がある。

軌道管理に向けた研究<sup>(19)(20)</sup>は、欧米のみならず、電子航法研究所でも行われており<sup>(17)</sup>、軌道の予測精度の検討結果の報告<sup>(18)</sup>などもある。

### 6.2 ADS-B

今後の、機上間隔ツールや監視システムの中心となる技術が放送型自動従属監視 (Automatic Dependent Surveillance System-Broadcast : ADS-B) である。自動従属監視 (ADS) は、航空機側にGPSによる測位データなど (位置、速度、便名、航空機の型、飛行の意図 (旋回、上昇、下降など)) を地上に送信し、この情報に基づき監視する仕組みである。この名称のとおり、機上から自動的に送信される従属 (航空機に依存した (機上で計測した) 情報に基づく) 監視方式である。

このうち、送信相手を特定せず、一定周期 (1秒に2回程度) で放送するものが放送型自動従属監視 (ADS-B) である。図11にADS-Bの概念図を示す。機上装置が送信機能だけのものをADS-B out、送受信機能とコックピット交通情報指示器 (CDTI) を有するものをADS-B inと呼ぶ。GPSによる測位データを用いているため、従来のレーダーよりも精度が良い。地上局は受信システムだけでADS-B搭載機の監視が可能で、レーダーに比べ廉価で設置可能である。ただし、監視可能な航空機はADS-B機上装置を搭載したものに限られる。このため、有効活用には搭載義務化が必要とな

る。

### 6.3 ADS-B の応用

ADS-B in 機能を有する航空機に対しては、地上局（Ground-Based Transceiver：GBT）に情報のアップリンク機能を持たせれば、次のような高度な機能を持たせることができる。

#### (1) 放送型交通情報サービス（TIS-B）

ADS-B で受信した航空機情報に加えて、二次監視レーダー（SSR）等で取得したADS-B 非搭載機の情報を地上からADS-B in 搭載機に放送すれば、機上で周辺の交通状況を把握できるようになる。このため、パイロットの状況認識能力が向上し航空交通の視認が容易になる。

#### (2) 放送型飛行情報サービス（FIS-B）

これは地上から空への気象情報と航空情報

表5 各国におけるADS-Bの実施／計画状況<sup>(6)</sup>

地域／国	実施状況／計画
欧州	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 初期運用能力: ADS-B-out (2008)、ADS-B-in (2011)</li> <li>- ADS-B-out 義務化: 2013 (forward-fit)、2015 (Retro-fit) から</li> </ul>
米国	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Segment 1 (2006-2009): 一部配備と自由意志による装備</li> <li>- Segment 2 (2010-2014): NAS 全域にわたり地上局の配備</li> <li>- Segment 3 (2015-2020): 2020年までADS-out 能力を義務化</li> </ul>
豪州	FL300 より上の高度で全土がADS-B 覆域内
カナダ	2009 年に運用（主にノンレーダー空域）
中国	中部地域（8局）、UAT 使用
スウェーデン	全国的なネットワーク（12 地上局、運用中（2007））、VDL Mode 4 使用

の送信サービスである。このADS-B in 搭載機では周辺の交通状況を把握できる可能性がある。

このため、将来的には、現在、IFR で管制官が担当している間隔の設定にも、応用できる可能性がある。この応用は機上間隔支援システム（Airborne Separation Assistance System：ASAS）<sup>(21)</sup>と呼ばれている。ただし、こうした応用には安全性を考慮した運用基準などの策定が前提となる。

現在、ADS-B で用いているデータリンクには、SSR モードS の拡張スキッター（1,090MHz）、UAT（Universal Access Transceiver）とVDL4（VHF Data Link Mode4）の3種類がある。UAT は米国で小型機に、VDL4 は北歐で使用されているが、1,090MHz 拡張スキッターが最も良く使われている。

表5に各国におけるADS-B の実施／計画の状況<sup>(6)</sup>を示す。現在、ADS-B は幾つかの国で運用されている。オーストラリアではFL300 より上の高度では全域で使用され、欧州ではADS-B out は2013年から搭載が義務化されている。わが国では、電子航法研究所でモードS 拡張スキッターを用いたTIS-B が開発されている<sup>(7)(8)</sup>。

## 7 まとめ

本稿では、まず航空交通管制の概要を説明し、航空交通管理への移行の動向を紹介した。さらに、将来の航空交通管理を欧州のSESARの運用概念の例で説明した。そして、これらを実現する技術の例として、軌道管理やADS-Bの開発状況などを示した。

ATMの近代化に向けた研究開発は欧米を中心に精力的に進められている<sup>(19)</sup>。これらの研究はATM SeminarのWebサイト<sup>(20)</sup>から入手可能であるので参照されたい。

## 参考文献

- (1)長岡 栄：“航空交通システムの安全設計”、日本設計工学会誌、Vol.45、No.11、pp.536-541、2010.
- (2)飛行機の百科事典編集委員会編：「飛行機の百科事典」、丸善株式会社、2009.
- (3)国土交通省HP：(航空保安業務とは)  
[http://www.mlit.go.jp/koku/15\\_bf\\_000317.html](http://www.mlit.go.jp/koku/15_bf_000317.html)
- (4)Global Air Traffic Management Operational Concept, ICAO, Doc 9654 AN/456, 2005
- (5)Procedures for Air Navigation Services: Air Traffic Management (PANS-ATM), ICAO Doc 4444 ATM/501, 2007.
- (6)S. Nagaoka: "A Survey on Communication, Navigation and Surveillance System for Global Air Traffic Management: - The Current Status of Communication and Surveillance Systems -", IEICE Technical Report, SANE2010-88, Oct. 2010.
- (7)大津山卓哉、小瀬木 滋、塩地 誠、三垣允彦：“拡張スキットによるTIS-Bの開発・評価”、第10回電子航法研究所研究発表会講演概要、pp.51-54、平成22年6月.
- (8)塩地 誠、小瀬木 滋、三垣允彦、大津山卓哉：“航空機へ周辺情報を送信するTIS-B”、第9回電子航法研究所研究発表会講演概要、pp.55-58、平成21年6月.
- (9)European Air Traffic Management Master Plan, SESAR Joint Undertaking, Ed.1, March 2009.
- (10)FAA's NextGen Implementation Plan, FAA, March 2011.
- (11)長岡 栄：“航空管制システムにおける今後の展望と課題”、電子情報通信学会誌、Vol.93、No.3、pp.228-232、2010年3月.
- (12)長岡 栄：“航空交通管理(ATM)の動向”、日本航空宇宙学会誌、Vo.56、No.649、pp.7-11、2008年2月.
- (13)将来の航空交通システムに関する長期ビジョン：  
[http://www.mlit.go.jp/koku/koku\\_CARATS.html12](http://www.mlit.go.jp/koku/koku_CARATS.html12)
- (14)中野秀夫：「航空管制のはなし」、成山堂書店、平成17年.
- (15)AIM-j：Aeronautical Information Manual,2008年後期版、日本航空機操縦士協会、2008.
- (16)The Concept of Operations at a Glance, SESAR consortium：  
[http://www.eurocontrol.int/sesar/gallery/content/public/docs/ConceptofOperations\\_02.pdf](http://www.eurocontrol.int/sesar/gallery/content/public/docs/ConceptofOperations_02.pdf)
- (17)蔭山康太：“電子航法研究所におけるトラジェクトリ管理の研究計画”、第9回CNS/ATMシンポジウム、2009年2月。  
<http://www.atsri.or.jp/cns.atm/symposium/9sympoMS/3ENRL.pdf>
- (18)福田 豊、白川昌之、瀬之口 敦：“飛行

- 速度調整による時間管理の検討"、第11回電子航法研究所研究発表会講演集、pp.64-68、平成23年6月.
- (19)長岡 栄："国際学会に見る航空交通管理（ATM）研究の動向"、日本航空宇宙学会、第49回飛行機シンポジウム講演集、2A9、2011年10月.
- (20)USA/Europe ATM SeminarのURL  
<http://www.atmseminar.org/indexatm.cfm>
- (21)伊藤恵理："ASASに関する調査報告書1: ASASの概念とPackage1の応用方式"、電子航法研究所技術資料、2007.  
[http://www.enri.go.jp/report/gijutu/pdf/2009\\_asas.pdf](http://www.enri.go.jp/report/gijutu/pdf/2009_asas.pdf)
- (22)大屋文人："The Flow Control",「航空管制」、No.4、pp.18-31、2008.

# 新しいENC製品仕様S-101の開発状況

日本水路協会

菊池 眞一

## 1 はじめに

国際水路機関 (IHO) は新しい航海用電子海図 (Electronic Navigational Chart : ENC) の基準「S-101 ENC製品仕様」の開発に取り組んでいる。S-101はe-navigationに役立つ電子海図をめざしたものである。基準開発は作業部会 (TSMAD、DIPWG) によって進められており、日本財団助成事業により継続的にWG会議に参加してきた<sup>(1)</sup>。S-101は開発途上にあり、不確定であるが、国際的なENCの動向を知る上で有用であると考え、開発状況を報告することとした。

## 2 S57 ENCの基準

各国水路機関が作成しているENCはS57 ENCと呼ばれる。IHO基準S-57の付録「ENC製品仕様」に従って作成されたものであるからその名がある。S57 ENCは全世界で作成されており、国際航海に使用される英国水路部紙海図を超える情報がS57 ENCによって提供されている。

表1 IHOのECDISとS57 ENCの主な基準

現行版	基準名
S-57 Ed.3.1 (2000年11月)	Transfer Standard for Digital Hydrographic Data
S-52 Ed.6.0 (2010年3月)	Chart Contents and Display Aspect of ECDIS
PresLib Ed.3.4 (2008年1月)	Presentation Library for ECDIS (Annex A to S-52)
S-64 Ed.1.1 (2008年12月)	Test Data Sets for ECDIS

2011年10月12日現在

S57 ENCとECDISの主な基準は表1に示すとおりである。ENCは各国水路機関が作成し、表示ソフトウェアは航海計器メーカーが作成している。S-57は多くの水路機関と企業が関与する基準であるため、Ed.3.1となったときに凍結された (最近になって一部の基準凍結を解除した。)

IHO 基準 S-52 “Specifications for Chart Contents and Display Aspect of ECDIS” はENCの内容と表示について規定しており、IMO ECDIS性能基準と対応している。ENCデータはS-52付録 IHOプレゼンテーションライブラリー (PL; デジタル版) を使用してS-52に従ってECDIS上に表示される。

## 3 S-101 ENCと関連基準の動き

### 3.1 国際GIS規格とIHO基準S-100

陸上の地図は、海図に比較して、ユーザーも作成機関/企業も圧倒的に多く、デジタル地図である地理情報システム (Geographical Information System : GIS) は、国際標準化機構 (ISO) TC211委員会によって、国際GIS規格「ISO 19100シリーズ (Geographic Information)」の開発が進行している<sup>(2)(3)</sup>。国際GIS規格はすでに骨格となる規格を含む56件の規格を完成している。国際GIS規格は詳細かつ厳密なものであるが、そのまま実用できる規格ではなく、あくまでも「概念規格」として開発されている。国際GIS規格を実装するために

は、個々の業務に適する部分を取捨選択して「製品仕様 (Product specification)」を作成する。

IHO基準S-57を維持開発していたIHO関係者の間では、1996年11月にS-57 Ed. 3.0を完成したときに、今後はISO19100シリーズを水路業務デジタルデータ基準のベースに置くことがコンセンサスとなっていた。拡張が進むデジタル基準の開発・維持コストがIHOの負担を超えるものとなることを容易に理解できた。

IHOは2001年にデジタル水路データ新規規格を作業項目とし、9年間かけて、2010年1月、IHOユニバーサル水路データモデル (S-100: IHO Universal Hydrographic Data Model) を完成した<sup>(4)</sup>。S-100はISO 19100シリーズの基本的な考え方、技術を引用してコンパクトに作成したもので、IHO加盟国がISO規格を容易に利用できるようにするための橋渡しの基準である。

IHO基準S-100は329ページの大きな基準であるが、水路業務デジタル製品の「概念規格」と位置づけられる。デジタル製品を実際に作成／利用するためには、それぞれの製品仕様を参照する必要がある。S-101 ENC製品仕様は、S-100から派生する最初の製品仕様である。S-102の文書コードは「水深データ」に割り当てられており、他の製品仕様は仮文書コードS-10xを付記して作業している。S101 ENCの表示装置は「S100 ECDIS」と呼ばれ、必要なS10xのデジタル製品を円滑に表示できることとなる。

### 3.2 IHO S-100レジストリー

IHOは、S-100デジタル製品の作成／開発を支援するために、インターネット上

で、S-100地理空間情報レジストリー (S-100 Geospatial Information Registry: S-100レジストリー\*)を運用している。S-100レジストリーは実データ以外の水路デジタル製品の全て情報が登録されており、レジストリーの情報を利用してデジタル製品とそのアプリケーションソフトウェアを作成／開発することができる。IHOレジストリー運用基準 (IHO Geospatial Information Registry - Structure, Organization and Management: S-99) は2011年1月に刊行された。S-99は、国際GIS規格の1つISO 19135に沿って作成されたものである。GISレジストリーは業務分野ごとに設立されるものでS-100レジストリーはECDIS、ENCを含む水路業務分野とその周辺のコミュニティの需要に応えるものである。

S-100レジストリーに登録された情報から、水路業務デジタルデータ製品のデータ作成やアプリケーションソフトウェア開発に必要な全ての情報を知ることができる。レジストリーは公開されており、閲覧だけでなく、メンバー登録すればレジストリーに新規項目を提案／登録することも可能である。水路機関以外にも海事関係者、航海計器メーカー等の水路関連分野の人も広く参加できるように運営されている。

表2 S-100 レジストリーの構成

FCD(フィーチャーコンセプト辞書)レジストリー
描画(Portrayal)レジストリー
メタデータレジストリー
製品仕様レジストリー
作成者コードレジストリー

レジストリーに登録されている、フィーチャー (feature) は地図の記号に相当す

\*S-100 地理空間情報レジストリー URL: [http://registry.iho.int/s100\\_gi\\_registry/home.php](http://registry.iho.int/s100_gi_registry/home.php)

るGISの処理単位で、「地物」と訳されることもある。フィーチャーコンセプト辞書はフィーチャーの定義とその特性記述に使用する属性が記載されている。描画レジストリーはフィーチャーを画面表示するための記号パターン、色彩、表示条件を記述している。メタデータは「データに関する情報を記述するデータ」を意味する。英語だと“data of data”と簡潔に説明することがある。ENCについていうと、作成者、作成年、最新維持日等の情報がメタデータとなる。水深には基準面、測量精度等のメタデータが付与される。メタデータはファイルや1又は2以上のフィーチャーに関する情報を記述する。特に、ファイルのメタデータはデスクバリメタデータ（discovery metadata）という。

メタデータレジストリーはメタデータのフォーマット、データ項目の定義が登録される。なお、実データである「ENCデスクバリメタデータ」はそれぞれのENCデータセットに記載されており、IHOは全世界のENC作成者から提供された全世界の「ENCデスクバリメタデータ」をIHOサイトで閲覧できるように準備している。

資料：WEND WG1-03 Establishment of a standardised IHO ENC metadata resource

### 3.3 IHO基準 S-52の改訂

S-52は2010年3月にEd.6.0に改訂されたばかりであるが、2011年5月にソウルで開催されたTSMAD22でUKHOから改訂版の構成案が提出された（図1参照）。S-52はECDISテスト基準（IEC 61174）に反映されるのでECDISメーカーの関心が高い仕

様である。

S-52の“Display”の章は国際GIS規格に準拠する仕様の書き方になるが、表示される記号、色彩に大きな変化はない。新たに追加される、補助ファイル（auxiliary files）はENCデータと一緒に使用するファイルでECDIS画面の重畳情報もこれに含まれる。

現行S-52の「アラームとインディケータの表示」に関する基準は対象項目を並べるだけの簡素なものである。アラームとインディケータのECDIS上表示は2011年5月にソウルで開催されたTSMAD22/DIGWG3において、ユーザーフレンドリーでなく、表示の改善と標準化がユーザーから要望されていることが報告された（例：2011年9月にロンドンで開催された「ECDISステークホルダー会議」）。

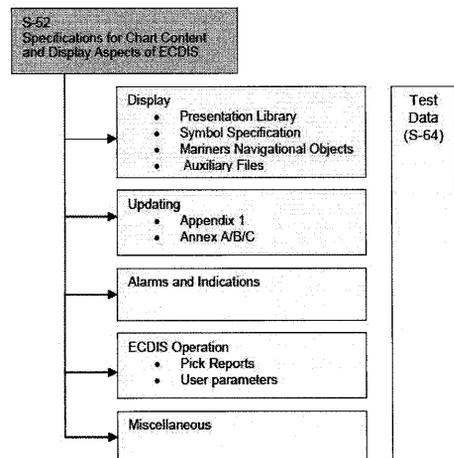


図1 S-52の構成案（TSMAD22 / DIPWG3-08.8A）

ピックレポートとユーザーパラメータ（船舶情報）は、ECDISの表示を改良するための指針である付録「ECDIS

Operation」に含まれる。ENCテストデータは現行ではS-64として独立しているが、S-52に付属させることも提案されている。  
資料：TSMAD22/DIPWG3-08.8A

Proposal to Produce a New Version of S-52

#### 4 S57 ENCからS101 ENCへ

IHO基準S-57 Ed.3.1 ENC製品仕様の前身となるEd.3.0が完成した1996年ころは、まだインターネットが普及しておらず、GPSの民間利用が普及してECDIS実用化の基盤が整ったばかりのときであった。時代は大きく変わり、S-101は高度に発達したIT技術の導入により、安全で効率的な航海を実現するためのe-navigationをターゲットにして開発している。S-101の主な改良点もe-navigationのコンセプトに沿ったものとなっている。

##### 4.1 データハンドリングに関する改良点「航海目的」から「表示縮尺」へ

ENCデータは経緯度線に平行する四辺を持つ矩形のセルに区切られて作成される。セル内のデータが存在する範囲はアメーバ状の図形「データカバレッジ」で与

えられる。

S57 ENCはENCを6種類の「航海目的 (navigation purpose)」によって分類され、同一航海目的のENCデータ (データカバレッジ) が重複することを禁止している。紙海図は海域によって航海に必要な海図を複数の縮尺で刊行している。海上交通が輻輳する海域ほど、縮尺が異なる多くの海図でカバーされる。その結果、一つの航海目的に複数の紙海図が含まれることになり、データカバレッジのルールを満たすために、同じ航海目的のENCに相当する紙海図データのうち小縮尺のものから大縮尺紙海図の範囲を削除することになる。日本ENCは削除した部分に大縮尺紙海図のデータを埋め込むようにして作成しているが、国によっては、縮尺ごとに別なセルとして、より大縮尺紙海図データと重複する部分を削除してドーナツのようなデータカバレッジにしているENCもある。意地の悪い言い方をすれば、「紙海図で出ている縮尺の海図情報がENCとして提供されない。」こととなっている。

##### 表示縮尺による表示制御

S-101 ENCは「航海目的」を海図カタログにだけ使用する情報とし、代わりに同一「表示縮尺 (data display)」のENCのデータカバレッジ重複を制限することになる。表示縮尺はレーダーレンジに対応する標準セットが検討されている (表3参照)。標準セットだけでも11種類あり、紙海図データの一部をくり抜くような不自由さは解消される。表示縮尺は、最適表示縮尺 (optimum display scale)、最小表示縮尺 (minimum display scale) 及び最大表

表3 ENCの標準表示縮尺

Standard RADAR Range	Display Scale	航海目的 (日本ENC)	紙海図 (東京湾の例)
200 NM	<1:3,000,000	概観	1:3,500,000 W1004B
96 NM	1:3,000,000		12,500,000 W1001
48 NM	1:1,500,000		1:1,200,000 W1072
24 NM	1:700,000	一般航海	1:500,000 W61B
12 NM	1:350,000		1:200,000 W80
6 NM	1:180,000	沿岸航海	1:100,000 東京湾
3 NM	1:90,000		1:50,000 東京湾北部
1.5 NM	1:45,000	アプローチ	1:25,000 浦賀水道
0.75 NM	1:22,000		
0.5 NM	1:12,000	入港	
0.25 NM	1:8,000		1:1,000 横浜
	1:4,000	停泊	
	>=1:4,000		

示縮尺 (maximum display scale) があり、表示優先度ルール (メカニズム) が合意されている。

表4 表示縮尺と表示ルール

表示縮尺 (DSC)	ENCデータ	Overscale warning
DSC < MINDSC	—	—
MAXDSC >= DSC >= MINDSC	D/I	—
DSC > MAXDSC	D/I	D/I

D/I: ENCデータに表示優先権があるときに表示。

表示縮尺によるENCデータ表示ルールは表4に示すようなシンプルなルールである。①ECDISの表示縮尺が最小表示縮尺より小さくなるとENCデータは表示されないこと、②最大表示縮尺よりも大きくなると、overscale warning (縦縞) がENCデータに示されること及び、③最適表示縮尺が大きいデータが小さいデータよりも優先して表示することが表示ルールとなっている。ENCデータはメタデータとして3種類の表示縮尺が付与され、単純なメカニズムで表示が制御される。これにより、表示装置のアプリケーションソフトの複雑さの解消や処理負荷の軽減が期待される。

資料: TSMAD 23-4.4.1A IHO ENC Product Specification Draft 0.2.0 Oct. 2011

#### 4.2 サポートファイルの改良点

S57 ENCは外部ファイルとして、テキストや画像ファイルをENCに添付することができたが、詳細な基準や指針がなく、ほとんど利用されていなかった。

S101 ENCは、外部ファイルの名称を「サポートファイル (support file)」に改

め、デスクバリーメタデータ (SUPPORT\_DSC.XML) の基準を新たに作成した。サポートファイルはENCデータセットの一部であり、ENCを活用するためにテキスト、XML、HTML及びTIFFのファイルを添付することができる。サポートファイルの用途は当面はピクレポートで参照する使用法が多いと思われる。

サポートファイルは、S57 ENCの外部ファイルを改良する案として2008年5月にオタワで開催されたTSMAD18/DIPWGIにおいて提案された。論議の中で不確定であるが、サポートファイル内容の作成者をENC作成者に限ることをしない方向で開発することを了承した。ENCと一緒に提供したいENC作成者以外の情報をENCデータに添付することも可能になると思われる。表5の「OEM」はIHOデータ保護スキーム (S-63) 利用をIHOに登録している表示装置メーカーであり、「その他作成者」はIHO又はENC作成機関に登録したサポートファイル作成者である。

表5 サポートファイル作成者コード

ファイル作成者	コード例
1 ENC作成者	2桁 例) JP△△
2 OEM	3桁 例) XXX△
3 その他作成者	4桁 例) JPXX

△: space又はnull

サポートファイル名の最初2桁をENC作成者コード、3～13桁を作成者が任意に使用できる案となっている (2012年3月現在)。

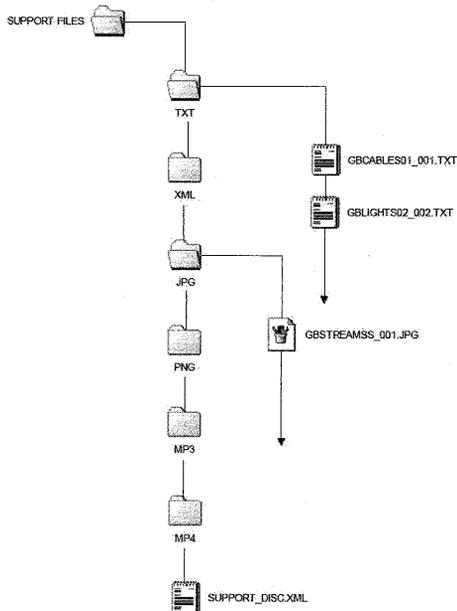


図2 サポートファイルの構造  
TSMAD18-16.3H

資料：TSMAD18-16.3H S-101 - Formatting and Management of ENC Support Files  
TSMAD22/DIPWG3-11.9A Support Files

#### 4.3 画面混雑回避のための改良点

##### ピックレポート

パソコン上でマウスをクリックするとサブウィンドウに表示される情報をピックレポートと呼んでいる。S57 ENCは、データ記録に使用しているコードをそのまま表示したり、有効数字を無視して小数点以下のゼロがたくさん並んだり、ユーザーに使い勝手がよいものでなかった。

ピックレポートはS-52付録ピックレポートの表示仕様を開発中である。表示仕様案は平易な基準、単位付与等の指針を示して

いる。

ピックレポートの当初の目的は紙海図のテキスト情報をECDISの表示するルールを開発することにあった。ピックレポートは「Floating point information」方式によりクリックした点の同一地点又は近傍の関連する情報を捜して整理して表示する。従って、情報の概略を最初に表示し、必要に応じて詳細を表示する構造をとっている(図3参照)。航路標識等の画像情報がサポートファイルとして提供され、ピックレポートに引用表示されることとなる。

ピックレポート表示仕様は、ユーザーからの様々な苦情やコメントを受けての試作/改訂が繰り返され、DIPWGの会議には会期の途中で複数回バージョンアップされたものが提出されている。ピックレポートはマリナーのトレーニングに深く関係するので、船員教育機関からのコメントが歓迎されると考える。なお、仕様案最新版TSMAD22/DIPWG3-08.4Aよりも提案文書TSMAD20/DIPWG2-16.2Aの方が理解しやすい。

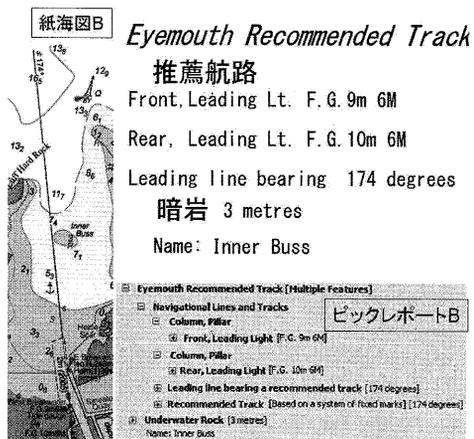


図3 ピックレポート：導灯の例

資料：TSMAD20/DIPWG2-16.2A A  
 Proposal for Improving & Standardising  
 the ECDIS/ECS Pick Report  
 TSMAD22/DIPWG3-08.4A  
 rev1: Specifications for Implementing  
 the Cursor Enquiry and Pick Report  
 in ECDIS

#### 地図学的属性 (Cartographic attribute)

ECDIS表示画面の混雑はフィーチャーの属性情報としてSCAMINを付与することによって改善される。SCAMINは個々の水深にも付与され、ズームアウトしていくと指定された表示縮尺になると画面に表示されなくなる。日本ENCも2011年5月に全ENCにSCAMIN付与を完了した。新たに追加される地図学的属性はSCAMINによっても画面混雑が解消されないようなケースに適用され、紙海図と同じレベルの見やすさをめざしている。

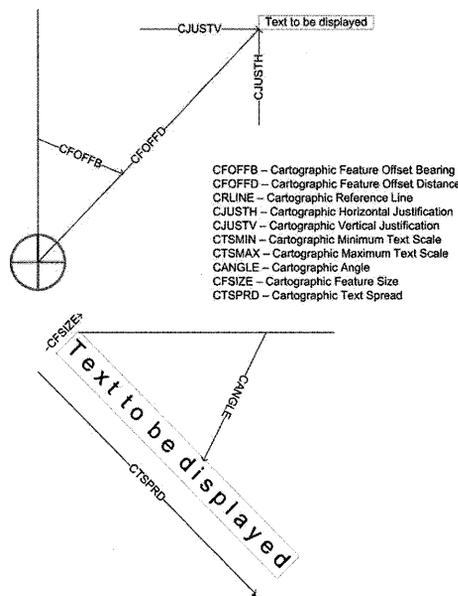


図4 テキストの配置を指定する属性

2009年4月にオタワで開催されたTSMAD18/DIPWG1においてスウェーデンからECDIS画面に表示される灯浮標の情報等のテキストを他のフィーチャーと重ならないように指定することが提案された。S57 ENCではテキスト表示の配置を調整することは禁止されていた。提案では図4に示すようなテキスト配置のパラメータを属性として付与することができる。仕様詳細は決まっていないが、表示調整パラメータ付与は画面を視認しながらの編集作業が必要なので、船舶輻輳海域等に適用が限定されると思われる。

資料：TSMAD18/DIPWG1-16.3C S-101  
 Text Placement

#### 4.4 他の情報とのインターフェースの改良点

S-101 ENC製品仕様開発に併行して、ECDIS上でのENCデータと他のデータとのインターフェースとなるテンプレート開発がTSMADで提案されている。このインターフェースの整備により、ENC情報と他の情報を結びつけて使用することが容易になる。インターフェースにはECDISユーザーの要望を反映する必要があり、IMOとの連携も提案されている。インターフェースの開発も入口に入ったばかりであるが、e-navigationとの関連で重要な課題であり、S-101を完成したあとに論議が本格化されると思われる。

#### 航海補助グリッドデータ製品

2009年5月にカナダ オタワで開催されたTSMAD18/DIPWG1においてカナダの企業から提案されたグリッド水深データ製品

仕様案の論議の結果、カナダ案を拡張して ENCに重畳表示する航海補助情報の製品仕様として開発することが合意された。

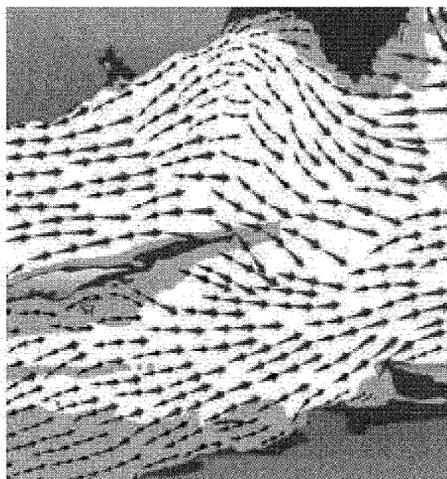


図5 潮流ベクトルのグリッドデータ

2010年5月にドイツ ロストックで開催されたTSMAD20/DIGWG2に航海補助グリッドデータ製品仕様の作業方針と仕様試案が提出された。ENCに重畳させることが期待されているデータはグリッドデータのものが多い。高密度水深、流況、海氷、風向風速、環境保護、災害情報等が例示されている。

資料：TSMAD20/DIPWG2-18B Proposed Specification for Auxiliary Information Layer Integration for use with ENC S.10x

#### ユーザーパラメータ（船舶情報）

ENC情報は船舶の大きさと目的地によって必要度が大きく違っている。S-101で取り扱うこととなる水路誌の情報はその度合いが高い。水路誌記事は画面上で「iの字」アイコンで情報所在を示すので、ECDISに

表示画面にアイコンが氾濫し、情報選択に困ることが予想される。そのため、デジタル水路誌の標準化を検討しているIHO作業部会SNPWGで船舶情報をフィルターとするENCデータ表示選択について論議されている。

SNPWGの論議を経て、2010年カナダ ビクトリアで開催されたTSMAD21にECDIS内で使用するために、船舶情報とそれを水路図誌情報と関連づけるための仕様をS-100に追加することが提案された。例えば、航行ルールも個別船舶の適用条件に応じて“mandatory”、“excepted”、“recommended”に分けてECDIS内に保存され、必要に応じて表示される仕組みになっている。資料はGIS専門家が作成したもので、日本財団助成事業により日本からSNPWG参加した日本水路協会金澤輝雄氏に背景説明を聞くまで理解し難かった。船舶情報はS-52改訂案にはECDISオペレーションのユーザーパラメータとして取り入れられる（図1参照）。

資料：TAMAD21-4.2.1 Associations

2012年1月にニュージーランドで開催されるTSMAD23の「ルート情報交換仕様」に関する文書は、ENCや水路誌情報をECDIS内に記録するための仕様「Route Exchange Specification」の開発をTSMAD作業項目にすることを提案している。提案趣旨はECDIS間のデータ交換としているが、ユーザーパラメータの一つとして水路誌情報の選択に使用することができる。図6に示したフロー図は筆者の想定したもので、会議に提出されたものでない。航海補助情報は東京湾や伊勢湾といった広い海域を対象とするものとルート沿いに点

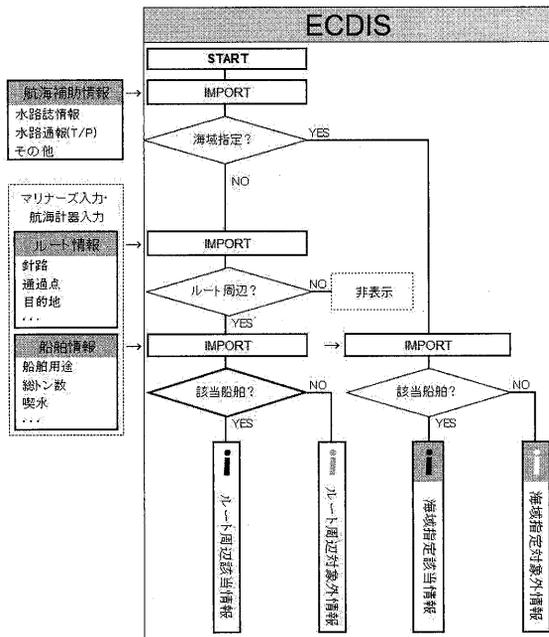


図6 ルートと船舶の情報による航海補助情報選択

在するものに分けて処理するものとして作図した。

ENCや水路誌の情報を表示する際に船舶・ルート情報をENC／水路誌情報の選択・表示の条件とすれば、ECDISはより見やすく、使いやすくなるものと期待される。この仕組みを実用化するための製品仕様を作成するときに海事関係者と広く連携をとる必要がある（図1参照）。

資料：TSMAD23-5.1.1 S-100 Route Exchange Specification

## 5 今後の動き

S101プロジェクト計画は2014年1月にS-101 Ed.1.0を刊行することを目標にしている。それまでTSMADは年2回、DIPWGは年1回のペースで開催される。また、S100 ECDISが市場に出てS100 ENCが実際に使

用される時期はEd.1.0刊行後1～2年後と見る意見がTSMAD参加者の見通しである。

## 6 おわりに

新しいENC製品仕様S-101はS57 ENCの10年間の経験からユーザーとECDISメーカーの意見を取り入れて開発を進めている。現在はS57 ENCが登場した時代と比べてコンピュータ技術と通信技術が格段に進歩している。S-101の論議は北米と北海沿岸のヨーロッパの水路機関が主導権をとり進行している。欧米流の「哲学が先で骨格がほぼ固まってからおもむろに実用化に入る手法」は日本と大いに異なる。S-101とS-52改訂版は高度で複雑な製品仕様

なものとなると予想される。「基準をにぎるものは全てを制する。」時代である。日本からも関係技術者がS-101の論議に参加することを期待して本報告をまとめたものである。

## 参考文献

- (1) 菊池真一：「電子海図製品仕様S-101の開発」、水路、No. 157、PP.29-34、日本水路協会、2011
- (2) Henry Tom, Charles Rowell："Standards Guide -ISO/TC 211 Geographic Information/ Geomatics", p 98, 2009
- (3) 国土交通省国土地理院：「地理情報に関する国際標準の概要」（英語版仮訳）、国土地理院技術資料 A・1-No.357, p 99, 2010

- (4) Robert Ward, Lee Alexander, Barrie Greenslade : “IHO S-100 : The New IHO Hydrographic Geospatial Standard for Marine Data and Information”, International Hydrographic Review, 44-55, 2009

資料として引用したIHO基準と会議資料は、IHOのStandards & Publication 及び Committee & WG のサイトで公開されており、自由にダウンロードできる。

IHO URL: <http://www.iho.int/srv1/>

# 電子海図 (ENC) の国際動向について

海上保安庁海洋情報部技術・国際課海洋研究室

小森達雄

## 1 はじめに

2012年7月から順次予定されている電子海図表示装置 (ECDIS) の搭載義務化に向けて、各国において、ECDISに表示する電子海図 (ENC) をめぐる動きが活発化している。本発表では、ENCの国際動向について紹介する。

## 2 電子海図について

海上保安庁は、国際水路機関 (IHO) が定める規格 (IHO S-57) で作製した電子海図 (ENC) を、1995年に世界で初めて刊行した。その後、各国水路機関によって刊行が進められ、2011年2月現在では世界の重要港湾800港とそれらを結ぶ航路の80%以上においてENCが整備されている。ENCは、紙の海図の単なる代替物ではなく、これを電子海図表示装置 (ECDIS) に表示させることにより、海図上での自船位置の表示、危険水域に接近時の警報機能、レーダー画像との重畳表示、他の航海計器との連携等が可能となり、操船者の迅速・効率的な意志決定を支援することができる。

「1974年海上における人命の安全のための国際条約」(SOLAS条約) では、従来から船舶に海図の搭載を義務づけてきたが、ENCの整備が全世界的に進んできたこと、ECDISが乗り上げ事故を減少させる効果があるとの定量的な報告などを背景にし

て、2009年6月に同条約の改正が国際海事機関/海上安全委員会 (IMO/MSC) で採択され、2012年7月から、国際航海に従事する500トン以上の旅客船及び3,000トン以上の貨物船 (現存する貨物船 (タンカーを除く。)) は10,000トン以上) に対して、ECDISの搭載が順次義務化されることとなった。

IHOでは、ECDISの搭載義務化を推進するため、各国によるENCの整備を促進するとともに、各国が作製するENCの一貫性確保や情報充実を図ってきている。

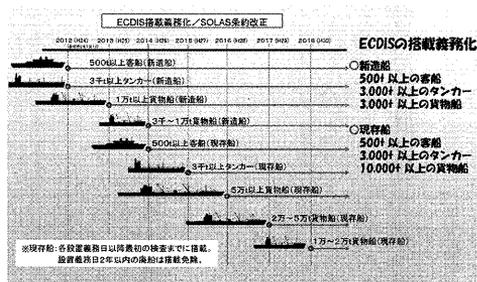


図1 ECDIS搭載義務化のスケジュール

## 3 ENCの空白域解消に向けた取組

ECDISは、1台数百万円程度の航海計器だが、ECDISだけを設置しても表示させる海図データが整備されていなければただの箱となる。IMOにおけるECDISの搭載義務化の議論では、当初、高速船以外の船舶に対して2010年から義務化を開始するとの提案もなされたが、ENCの未整備地域



#### 4 ENCの一貫性確保に向けた取組

ECDISの搭載義務化を目前に控え、各国ともENCの刊行を急ピッチで進めており、未刊行区域については着実に減少している。一方で、隣接する国同士のENCの重複が拡大しており、大きな問題となっている。ENCの規格 (IHO S-57) では、作製者 (国) の異なるENCであっても同一航海目的の中でのデータの重複はないこととなっていることから、一部でENCの重複に向けた国際的な取組が行われている。

東アジア水路委員会は、南シナ海とそれに面する陸部を包含する「一般航海」目的の電子海図を、2005年から関係国で共同刊行を行い、2008年に改版を行っている (図3)。これは多国間協力の下で刊行されたENCとしては世界初である。これにより、各国の領有権が交差する海域での重複のないENC刊行に成功するとともに、スーパータンカー等の大型船舶が輻輳する海域でのENCの早期刊行が実現した。

現在東アジア水路委員会では、東アジア全域におけるENCの空白域及び重複の解消並びに各国ENCのデータの一貫性の確保を、国際協力の下で実現するため、毎年

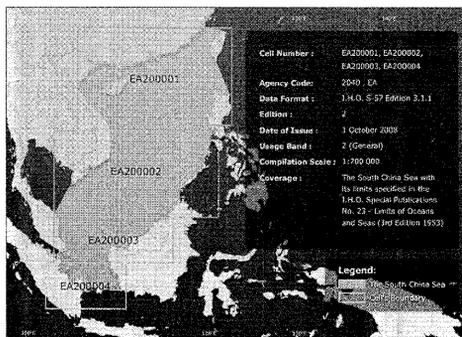


図3 多国間協力の下で刊行された「南シナ海ENC」の包含区域

数回ENCタスクグループ会合を開催して活発な議論を行っている。

#### 5 ENCの情報充実にに向けた取組

ENCの普及を図るためには、ENCの整備海域の拡充を図ることが喫緊の課題であったため、当初日本を含めほとんどの国では、既に存在している紙海図をそのままデジタル化してENCを作製してきた。しかし現在では、多くの先進国でENCの整備が完了したことから、次のステップとして、ENCの情報を充実させ、紙海図の単なるコピーではない高付加価値のENCを作製しつつある。

##### 5.1 SCAMIN属性の付与

前述のとおりENCの国際規格は、最大6種類の航海目的 (縮尺) のデータを作製することが可能である。しかし、ECDISによっては20段階以上の表示縮尺の切り替えが可能なものもあるため、表示縮尺によっては表示が混雑して、操船者がその内容を判別しづらいという状況が生じていた。そこでENCには、表示縮尺を小さくしていったときに、水深や灯台などの個々のシンボルを、優先順位に応じて非表示とする機能がある。この機能を使うためには、個々のシンボルに、非表示にする縮尺値をデータとして入力しておく必要がある。この縮尺値を最小表示縮尺 (SCAMIN) 属性という。

これまでSCAMIN属性の付与はあまり行われてこなかったが、ENCの高付加価値化の流れの中で、そのニーズが高まり、2008年にIHOから、SCAMIN属性に係る編集指針が勧告された。海上保安庁でも平成22年度からSCAMIN属性の付与を開始し

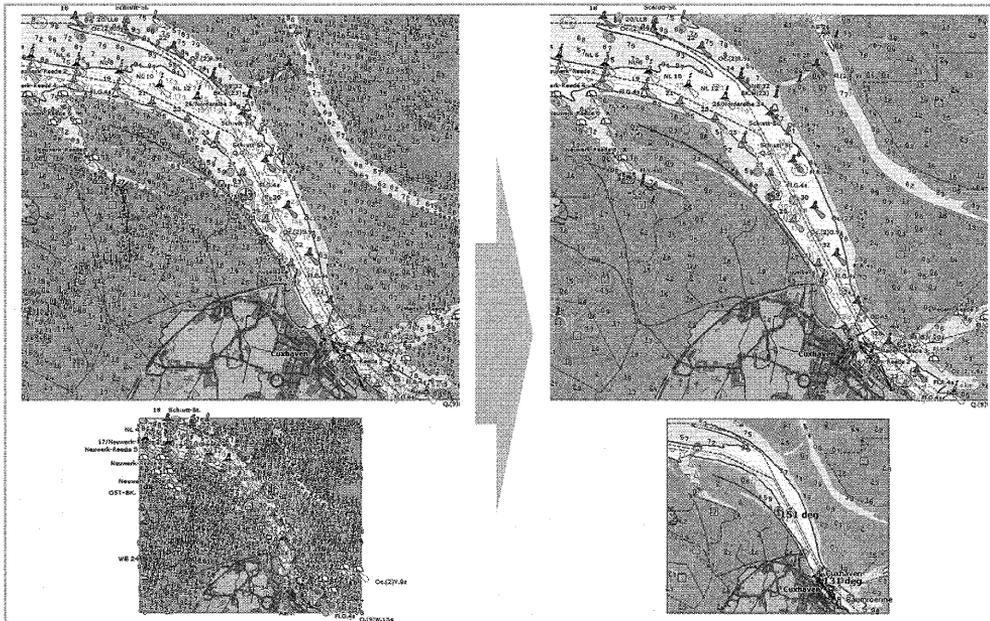


図4 SCAMIN属性を付与することによる見易さの向上

たところである。

## 5.2 CATZOC属性の付与

新たな水路測量が実施されるとその成果（測量原図）は速やかに海図に反映される。しかし水路測量は全ての海域で一様に行われているわけではない。重要港湾などで定期的に掘り下げ工事等が行われる海域では、水路測量も頻繁に実施されるため海図には最新の測量成果が採用されている。一方でそれ以外の海域では、錘のついたロープを垂らして一点一点水深を測定した古い時代のデータが採用されていることがある。新しい測量が行われた海域では、未発見の浅所が存在する可能性が比較的小さいため、船舶の航路設定の自由度が高く、効率的な航行が可能となる。そのためIHOは、ENCに精度情報（CATZOC）属性を付与することを奨励している。これまで海上保

安庁では、過去に実施された約6,500枚の測量原図について、区域ごとの測量精度の評価を行ってきた。この評価結果を基に、平成23年度からCATZOC属性のENCへの付与を開始している。

## 5.3 一時関係通報の電子海図への採用

上記以外の国際的な動向として、一時関係の通報をENCに取り込む動きがある。紙海図の世界では、既に印刷された海図を更新する手段として、「水路通報」というシステムが国際的に確立している。水路通報には「小改正」と「一時関係等」があり、海図を恒久的に補正する情報は小改正として提供され、この情報を基に航海者が海図を修正していく。一方で、射撃訓練や港湾工事など一時的に有効な情報等は一時関係通報として、紙媒体又はPDFファイルで提供されている。

これらのうち小改正については、当初から電子水路通報に採用されENCに取り込まれてきたが、一時関係通報については、編集方法に関する国際的基準が確立していなかったことなどにより、多くの国でENCに採用されてこなかった。そこでIHOは、2009年2月1日にIHO S-65「電子海図コード化指針」を改正し、一時関係通報を電子水路通報に採用するための指針を追加したところである。海上保安庁では、平成24年1月から、一時関係通報を電子海図に採用することとしている。

## 6 むすび

現在のENCは、IHOが1996年に策定した規格（IHO S-57 Ed.3）に基づいて作製されている。しかし、IHO S-57 Ed.3の刊行後に、国際標準化機構（ISO）において地理情報標準ISO 19100シリーズが整備され、GISデータの国際標準としての地位が確立されると、その後のGIS技術はISO 19100標準の下で発展してきた。そのため、IHOでは2001年から、ISO 19100シリーズに準拠した新たな基準の開発を開始し、2010年1月1日に「水路データ標準モデル」（仮訳、IHO S-100）を刊行した。この基準に基づき、IHOでは、ENCの製品仕様（IHO S-101）の完成を2012年頃に予定するとともに、航行警報、水路書誌、潮汐情報、水路測量成果等の新たなデジタル化製品仕様についても、計画又は検討がなされている。

国際海事機関（IMO）では、海上の安全及びセキュリティの確保並びに海洋環境の保護の観点から、最新の情報通信・電子技術を活用して、船橋における各種情報の収集、統合、交換、表示及び解析を実現す

る「e-Navigation」戦略を2008年に採択し、2012年の実行を目指して検討を進めている。e-Navigationを支えるデータの規格は、IHO S-100シリーズが大きな役割を担うことが想定されている。

現在海洋情報部で提供している情報のうち、操船者が船橋で処理できる形式でのデジタルデータは、ENC及びその更新のための電子水路通報だけである。しかし、上記のIHO S-100シリーズの整備や、IMOのe-Navigation戦略が実現すれば、航行警報、水路書誌、潮汐情報等の提供についてもデジタル化が実現し、船橋のペーパーレス化・ワンウィンドウ化がさらに前進するのではないかと予想されている。

# 車々間通信による衝突事故防止に向けて ～高密度端末環境でのアクセス方式の提案～

情報通信研究機構/ATR適応コミュニケーション研究所

三浦 龍

電気通信大学/ATR適応コミュニケーション研究所

小花 貞夫

## 1 はじめに

無線通信により車両間で位置情報等を交換することで出会い頭での車両同士の衝突や右折時における直進車両との衝突などの交通事故を削減することをめざし、車両間で通信を行う車々間通信システムの標準化と実用化が欧米や日本で進められている。そのようなシステムでは、衝突の危険が迫った時に遅滞なく確実にドライバーに危険を知らせる必要がある。しかし、周辺に同様な電波を送信する車両が多数存在し、かつ建物などによる遮へいが多数発生するような環境に加え、使用できる周波数帯域が限られている条件下では、通信パケット同士の衝突が頻発し情報が相手に到達しなかったり（パケットロス）、大きな到達遅延が発生しやすい。

現在パソコンや携帯電話において広く利用されている無線LANでは、他に送信している端末が周囲に存在しないことを確認してから送信する「キャリアセンス」をベースとしたチャンネルアクセス方式であるCSMA/CA（Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance：衝突回避機能付き搬送波感知多重アクセス方式）が使われている。この方式はデバイスが広く市場に出回っているため導入が比較的容

易であり、車々間通信へも適用される予定である。欧米を中心に車々間通信および路車間通信（道路脇に設置した固定の基地局と車両との間の通信）用として標準規格化が進められているIEEE802.11pで採用されているほか、日本のITS情報通信システム推進会議でも車々間通信システムの実験用ガイドラインRC-005（5.8GHz帯）、RC-006（700MHz帯）において基本方式となっている<sup>(1)(2)</sup>。

一方、将来車々間通信システムの車載機が普及した場合、都市部などでは多数の車両による高密度な端末環境と建物などの遮へいに伴う隠れ端末問題（障害物による遮へい等によってキャリアセンスができなくなることにより、チャンネルが空いていると判断して送信してしまい信号間干渉が起こる問題）や信号を再送するため生じる遅延時間の増大が想定されるが、そのような環境ではCSMA/CAは衝突防止に求められる高信頼で低遅延な条件を満たさない可能性のあることはよく知られている。このため、これを克服するためのさまざまな特性改善方法が検討されているが、完全な問題解決には至っていない。

こうした背景のもと、ATR適応コミュニケーション研究所では、高密度端末環境

で抜本的にパケット衝突による特性劣化を避ける通信方式として、自律分散型のCDMA（Code Division Multiple Access：符号分割多重アクセス方式）をベースとした方式を検討してきた。

本報告では、提案方式の概要とともに、具体的な衝突事故防止シナリオ及び車々間通信の候補周波数の1つである5.8GHz帯への適用を想定し、従来方式であるCSMA/CAとの比較評価例を紹介する。

一方、交通死亡事故全体の約3割は歩行者事故であると言われ、自転車事故も含めると5割近くを占めると言われている<sup>(3)</sup>。このため、総務省では歩車間通信の技術基準策定をめざした調査検討が始まっている。歩車間通信は、車々間通信に比べさらに高い通信端末密度が想定され、車々間通信の方式をそのまま適用することは望めない。ATRでも歩車間通信に適したアクセス方式に関する検討を開始しており、その概要にも簡単に触れる。

## 2 車々間通信による衝突事故防止シナリオ

車々間通信により位置情報や速度情報を車両間で交換し、衝突事故を防止するシナリオを図1と図2に示す。衝突事故モデルとして、ここでは交通信号がなく、一時停止標識のみがある見通しの悪い十字交差点での出会い頭衝突および右折衝突を取り上げる。これらのモデルは国土交通省や自動車メーカー等から構成される先進安全自動車（ASV）検討会<sup>(4)</sup>が取りまとめている。

図1の出会い頭衝突防止シナリオでは、B車が優先道路を直進し、A車はその交差点より交差点に進入するケースを想定している。A車からB車方向へは見通しが悪

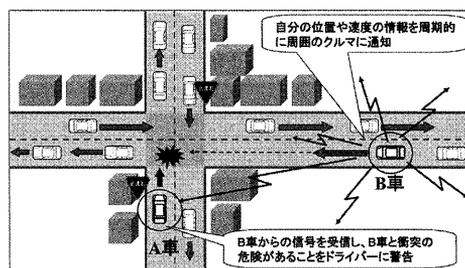


図1 出会い頭衝突防止シナリオ

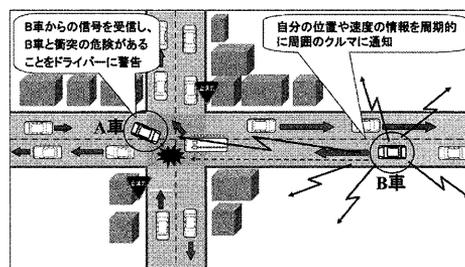


図2 右折衝突防止シナリオ

く、不注意により交差点に進入し、B車と接触する。この時車々間通信システムでは、B車は自車の位置情報や速度情報等を含んだ通信パケットを定期的に周囲に向けて送信し、それをA車が受信することによりA車のドライバーに音声や画面などでB車接近の注意喚起を行い、ドライバーに停止を促す。

また図2の右折事故防止シナリオでは、B車は優先道路上を交差点で直進し、A車はその対向車線を反対側から交差点に進入し右折しようとしているケースを想定している。A車から見て、対向車線（B車からみて前方）で右折待ちをしている別の車両により見通しが悪い場合や、目測誤りなどによりA車が右折を開始するとB車と接触する。この時車々間通信システムでは、出会い頭衝突防止の場合と同様、B車が定期的にパケットを送信し、それをA車が受信することによりA車のドライバーにB車接近

の注意喚起を行う。

### 3 高密度端末環境での無線アクセス方式

一般に車同士の衝突などの交通事故において、当事者となる車両は比較的近くの車両であることが多い。こうした事故の危険を直前に運転者に知らせるには、近接した車両間で確実にパケットを届かせる必要がある。しかし、無線LANなどで一般的な無線アクセス方式であるCSMA/CAの場合、車両の数が増えてくると、キャリアセンスが働いて周囲の他の車両が発信するパケットに邪魔をされ、近くの車両であっても必要なタイミングでの確実なパケット配信が困難になる。隠れ端末が発生している場合は、逆にキャリアセンスが働かず、パケット衝突が発生してやはりその配信が困難になる。

一方、提案している方式がベースとしているCDMA方式は、第3世代携帯電話にも広く使われている通信方式であり、適当なスペクトル拡散符号系列を情報信号に重畳することにより信号を直交化してパケット衝突を避ける。スペクトル拡散しているために、同じ周波数帯域幅であっても送れるデータレートは低下する（同じ情報量を送るためにはパケット時間長が長くなる）が、CSMA/CAのようなキャリアセンスのための待ち時間やバックオフ時間（パケット衝突を避けるために設定されるランダムなパケット送信タイミング遅延時間）が基本的に不要なので、レスポンスが速い。ところが、CDMA信号には近くから送信された電力の大きな信号に遠くから送信された電力の小さい信号が抑圧される遠近効果の問題があることがよく知られている。携

帯電話ネットワークではこれを克服するため、携帯電話からの送信電力を電話機ごとに調整し、基地局での受信電力が均一になるようにするなどの対策（送信電力制御）が取られている。しかし車々間通信の場合は基地局のない自律分散環境のため、送信電力制御を行うことができず、当事者ではない他の送信車両（たとえばすぐ隣の車線を走る車など）を越えて相手車両に信号を届かせるのが一般に困難となる。

ATRではこの問題に対処するため、複数の車両間でパケットをバケツリレーのように転送するマルチホップ転送制御や進行方向の異なる車線ごとに周波数チャネルを配分する等の技術を検討し、これらを適切に組み合わせる方式を考案して特性評価を行ってきた。その結果、CDMA信号のもつ遠近効果を逆に有効活用して隠れ端末による干渉を抑制することが可能となり、近接した車両間で確実にマルチホップ転送を行うことで高いレスポンス性と信頼性を両立できる可能性が示された。この方式は、“MM-SA（Multi-carrier Multi-code Spread Aloha：複数キャリア・複数符号拡散アロハ方式）”と名付けられた<sup>(5)(6)</sup>。

CSMA/CAとCDMAの特徴を分かりやすく比較するため、1つの広い部屋にたくさんの方がいる場合に例えて考える。図3はCSMA/CAの原理を示している。話し言葉は全員日本語で、BさんがAさんに話をしているものとする。この時、他の人は聞き耳を立てており、Bさんが話を終えるまでは、どの人も黙っている。これがキャリアセンスである。一方、CさんはBさんから遠く離れており、Bさんの声が聞こえないものとする。すると、Cさんは誰も話し

ている人はいないと勘違いし、Aさんに対し話を始めてしまう。Aさんは、BさんとCさんの声を同時に聞いてしまうため、どちらの話もよく聞き取れなくなってしまう。この時、CはBから隠れ端末となつてくる。すなわち、CSMA/CAでは、人数が増えてくると、なかなか話ができるタイミングがとれず、待ち時間が増えるだけでなく、隠れ端末による混信も増える。

図4は提案方式がベースとするCDMAの原理を示している。話し言葉は日本語だけでなく、英語やフランス語、ドイツ語など多様である。これはスペクトル拡散信号の拡散符号に対応づけたものである。このとき、大勢の人が同時に話をして、言語が異なれば、ある程度日本語のみを識別して聞き取ることができる。これが拡散符号によるパケット衝突の軽減である。しかし、BさんとCさんが異なる言語でAさんに話をした場合、CさんがBさんよりも遠い場所にいる場合には、Bさんの話は理解できてもCさんの話はBさんの声にかき消されてしまい、Aさんはよく聞き取れなくなる。これが遠近効果である。この時、AさんとCさんの間にいる人に伝言してもらえば、Cさんの話はAさんに確実に届く。これがマルチホップである。この場合、周囲の同時に話をする人の人数が増えても、それらの人の話は遠近効果で抑圧されるため、混信にはならない。CDMAは、マルチホップと組み合わせることにより、通常は問題となる遠近効果を逆に利用して、隠れ端末干渉を抑制し、通信の信頼性を高めることが可能となる。またキャリアセンスが不要なため、送信開始までの待ち時間をほぼゼロにすることができる。

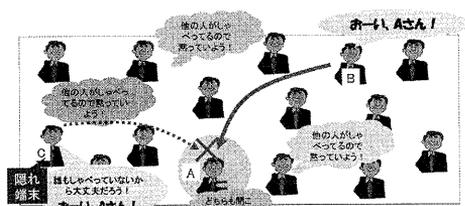


図3 従来方式がベースとするCSMA/CAの原理



図4 提案方式がベースとするCDMA+マルチホップ通信の原理

#### 4 MM-SA方式の概要

与えられたサービスエリア内で高いレスポンス性とパケット到達率を両立させるために考案されたMM-SAは、CDMAがもつ遠近効果のマイナス面を抑制するとともにプラス面を有効に活用したアクセス方式であり、車々間通信への適用を想定したパラメータの最適化と評価が行われてきた。この方式は、CDMAにマルチホップ転送制御、送信タイミング制御、および周波数チャネル制御の3つのコア技術を組み合わせで成り立つ。以下に各コア技術の概要を述べる。

##### (1) マルチホップ転送制御

周囲に多数の送信車両が存在したとしても、近隣の車両間では確実に信号が届くCDMAの性質を活用し、複数の車両間でマルチホップ転送ができれば遠くに信号を届かせることが可能となる。またこの時、伝搬路の途中に電波を遮へいする障害物があっても、適切な位置に中継端末が存

在すれば障害物を越えて相手車両端末に信号を届かせる確率が増えることとなる。しかし、無制限に各車両がパケット転送を行えば、転送パケットの数が膨れ上がって嵐のようになり、通信効率が急激に低下する、いわゆるブロードキャストストームという現象が発生しやすくなる。MM-SAでは、GPSから得られる自車両の位置情報を利用してパケットの発生元からの相対的な転送エリア（例えば道路に沿った前方100m×幅10m）を設定し、それ以外の場所にいる車両端末には転送させないエリアベース転送方式を採用している。その他、すでに受信したパケットと同一のパケットは転送しない、一定の時間を過ぎた古いパケットは転送しない、などのルールを設定し、マルチホップによるブロードキャストストームを効率的に回避している。

### (2) 送信タイミング制御

マルチホップ転送を行う場合、自車両の位置情報等を含むパケット（オリジナルパケット）と他車両から届いたパケット（転送パケット）は、タイミングが重なるとやはり遠近効果によってどちらかのパケットが失われる可能性がある。このため、うまく両者のタイミングをずらす方法をとる必要がある。MM-SAでは、直近の前方車両がオリジナルパケットを送信したら、その時点からある一定の間隔（たとえば2パケット分）をおいて自車両のオリジナルパケットを送信するタイミング制御を行う。このタイミング制御では、車両間の厳密な同期は必要ない。この方法により、ある一定の範囲内にいる車両間の間では、オリジナルパケットと転送パケットを含むパケット間の衝突を回避することができる。

### (3) 周波数チャンネル制御

送信タイミング制御は、同一方向を進む同一車線の車両同士の間では容易に実現できるが、対向車線を反対方向に進む車両や交差道路を走行する車両も含めてのタイミング制御を行うとなると、複数の異なる車両間で送信タイミングがちょうど一致してしまう確率が増え、パケット衝突が大幅に増加する。このため、MM-SAでは車両の進行方向により4つの異なる周波数チャンネルを使用することによりこうした干渉を回避している。例えば東西南北で交差する十字交差点の場合、東西方向の上り下り車線にそれぞれ1チャンネルずつ、南北方向の上り下りにそれぞれ1チャンネルずつ、計4チャンネルを割り当てる。自車両がどの周波数チャンネルを使用すればよいかは、基本的には自車両の進行方向により決定し、右左折などで方向が変わった場合にはそれに合わせて周波数チャンネルを切り替えるといった方法が考えられる。

## 5 出会い頭衝突防止シナリオでの通信特性

実際のアプリケーションに近いモデルとして、図1に示した出会い頭衝突事故防止シナリオに自動車の狭域通信システム（DSRC）に割り当てられている5.8GHz帯無線周波数を適用した場合を想定し、CSMA/CAとMM-SAの特性を比較評価した例について以下に紹介する。

図5に評価のためのモデルを示す。電波を遮へいするコンクリートの壁で両側を囲まれた片側1車線の道路の十字路交差点を想定し、右方向から優先道路を進んでくる第2当事者車両が交差道路より進入する第1当事者車両に出会い頭衝突するというシナ

リオである。第2当事者車両が100mSごとに送信する位置情報等を含む定期パケットを第1当事者車両が受信し、そのドライバに注意喚起する。

シミュレーション条件を表1に示す。伝搬経路には道路わきの壁による非見通し経路が含まれ、コーナーのエッジによる回折と壁や地面による5回までの反射を考慮したレイトレース解析の結果を利用している。

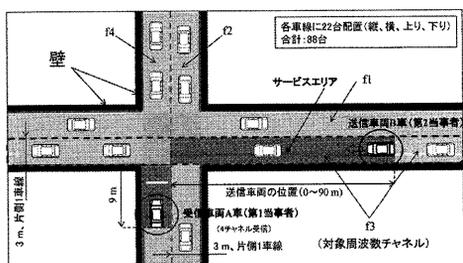


図5 出会い頭衝突シミュレーションモデル

表1 シミュレーション条件

項目	シミュレーション条件
送信周期 (msec)	100
パケット長 (bit)	1112
拡散率 (倍)	7 (CDMAの場合)
誤り訂正符号	CDMA: なし CSAM/CA: ターボ符号 (符号化率 1/3)
マルチホップ転送	あり
道路周辺の壁材	コンクリート
伝搬モデル	レイトレーシング法 (5回までの回折, 反射を考慮)
送信電力	10 dBm
受信感度	-86 dBm
変調方式	BPSK (ヘッダ) QPSK (ペイロード)

通信のサービスエリアとしては、ASV検討会が示したサービスエリア基準の1つである交差点中心から優先道路上で第2当事者車両が接近する90mまで範囲を想定している。なお、このサービスエリアおよび後述する通信要件 (パケット到達率80%以上と規定) については、ASV検討会が

2008年の時点で規定した数値であり、その後、これらの基準は随時修正が行われている。また、道路わきの壁による遮蔽を越えてサービスエリア全体での通信を確保するため、CSMA/CAおよびMM-SAともに、途中の他車両によるマルチホップ転送が行われるものとしている。車両は互いに交差する長さ550mの道路上に合計88台がランダムに配置されている。周波数はMM-SAの場合、前述のように車両の進行方向ごとに合計4チャンネル (f1 ~ f4) を割り当てているが、公平に比較するため、便宜上CSMA/CAでもMM-SAと同じチャンネル割り当てを仮定した。なお、シミュレーションは、ネットワークシミュレータQualNetを用い、パケット1つ1つについて送受信動作を評価する方法で行っている。

シミュレーション結果を図6 ~ 9に示す。

図6は、5.8GHz帯におけるCSMA/CAのパケット到達率特性例、図7は同じくパケット到達遅延特性例である。第2当事者車両が交差点中心からの距離0m ~ 90mの位置にある場合の第1当事者車両へのパケット到達率の最悪値は頻繁にASV検討会が規定した通信要件である80%を下回っている。これは隠れ端末などによる影響が原因となっていると考えられる。またパケット到達遅延は、20mS ~ 60mSとなっている。

図8は、5.8GHz帯におけるMM-SAのパケット到達率例、図9は同じくパケット到達遅延特性例である。送信車両位置0m ~ 90mのほぼ全域にわたって100%のパケット到達率が得られ、隠れ端末などの影響をほとんど受けず、ASVの通信要件が達成されることが示されている。またパケット到達遅延はほぼ2mS ~ 4mS程度で収まっ

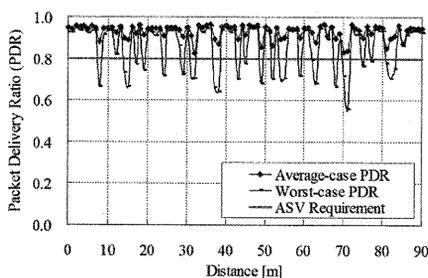


図6 CSMA/CAでのパケット到達率特性例 (出会い頭衝突シナリオ)

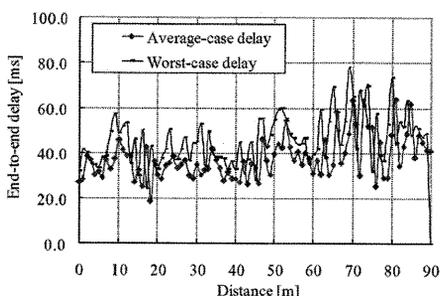


図7 CSMA/CAでのパケット到達遅延特性例 (出会い頭衝突シナリオ)

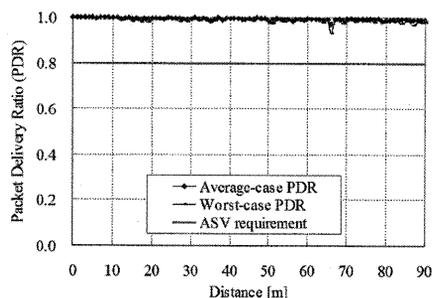


図8 MM-SA方式でのパケット到達率 (出会い頭衝突シナリオ)

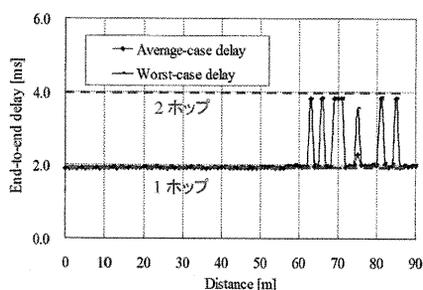


図9 MM-SA方式でのパケット到達遅延 (出会い頭衝突シナリオ)

ており、CSMA/CAでの遅延に比べて10倍以上の改善がみられている。5.8GHz帯では、非見通しでのパケット到達率は通常1ホップでは急激に低下するが、2ホップを許容することにより、ほとんどのパケットが救われていることがわかる。なお、ここでは割愛したが、右折衝突事故シナリオでも同様の結果が得られている。

## 6 大規模都市モデルでの比較評価

次に通信トラフィック環境がより厳しくなると予想される東京のような大規模な都市を想定した通信特性評価例を紹介する<sup>(7)</sup>。図10は2km四方のエリアに50mの間隔で片側1～3車線の道路が格子状に分布する都市モデルを示している。ここを合計2万台ほどの車両 (図中黒点で表示) が定期パケットを送信しながら走行している状況を想定し、その中のある1つの交差点における出会い頭衝突シナリオでのパケット到達率を評価している。車々間通信のサービスエリアは図5と同じ交差点中心から90mまでの範囲としている。シミュレーションの方法は、前節と同じレイトレース伝搬モデルを用いたネットワークシミュレータによる方法では著しく計算負荷が重くなり、現実的な計算環境では数100m四方、数百台規模までの評価が限界と見られている。このため、ATRでは改良星型伝搬モデル (図10左上に表示) およびマルチエージェント型のシミュレーションプラットフォーム Netlogoによる統計的解析手法を開発している。改良星型伝搬モデルは、建物の遮蔽は考慮するが建物のエッジによる回折を考慮しない従来の星型伝搬モデル<sup>(8)</sup> に対し、建物のエッジによる回折を1度だけ考慮し

たモデルである。図10の色の濃い部分がそれによるある瞬間の電波の到達エリアを表している。この解析手法におけるCSMA/CAおよびMM-SAのモデル構築方法の詳細については文献(7)を参照されたい。MM-SAについて、マルチホップ転送(最大ホップ数2)、送信タイミング制御、周波数チャネル制御を簡単なモデルに置き換えて組み込んでいる。その結果、計算時間は大幅に短縮され、2km四方に車両台数2万台のモデル、100移動点、1移動点当たりの平均回数20回の計算をラップトップPC(Windows XP)で行う場合、約6時間半となっている。

評価結果の例を図11に示す。ここで、CSMA/CA方式の物理層は欧米での採用が検討されているIEEE802.11pを参照している。すなわち、周波数帯域は10MHzおよび20MHz(各々、送信電力は19.2dBm、22.2dBm)を想定している。このため、日本で規定された5.8GHz帯車々間通信の実験用ガイドラインであるRC-005(帯域4MHz、送信電力10dBm)に比べてパケット時間長が短いことによりパケット衝突確率が少なく、また送信電力も大きいため、より遠方まで電波が届きやすい特性となっている。これに対し、MM-SAの送信電力は10dBmである。またCSMA/CAではマルチホップ転送有り/無しの両方で評価している。

評価結果を見ると、マルチホップ転送無しCSMA/CAでは、建物の遮蔽により電力が急激に減衰する交差点中心からの距離30m~40m付近以遠ではパケット到達率も急激に低下するが、マルチホップ転送有りとしてもパケット到達率は80%を頻繁に下回っている。一方、MM-SAは大規模

都市環境でもサービスエリアの全域でほぼ100%の到達率が達成できており、高密度端末環境に極めて強い方式であることが示されている。

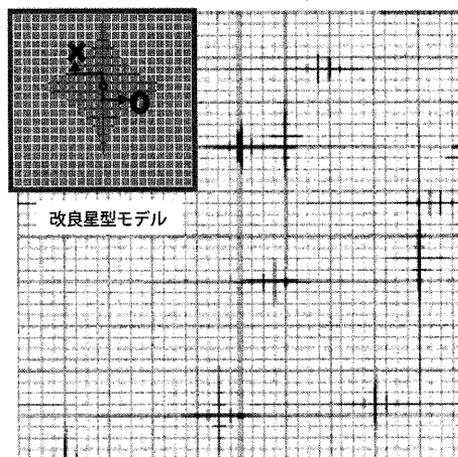


図10 大規模都市モデル(2km四方)と同時送信電波のスナップショット(車両台数2万台)

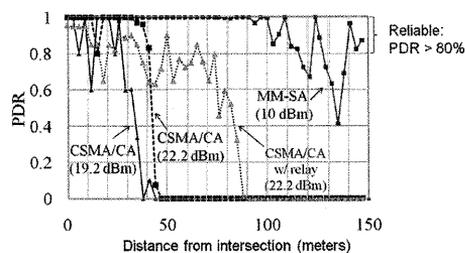


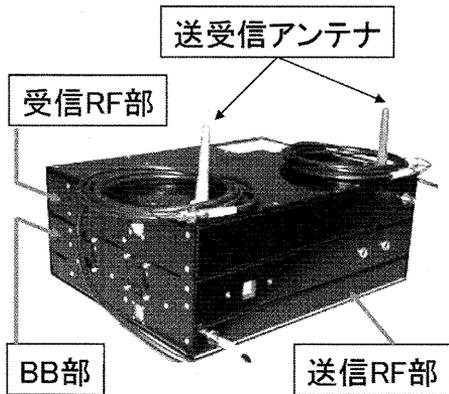
図11 大規模都市モデルでのパケット到達率評価例(出会い頭衝突シナリオ)

## 7 プロトタイプの開発とフィールド実証実験

提案したMM-SA方式の基づく車々間通信の有効性を実際の道路環境で評価するため、車載装置のプロトタイプおよびドライバに注意喚起を行うための車内ディスプレイによるユーザインタフェース(GUI)を開発し、車両に搭載して都内において

フィールド実験を行った<sup>(9)</sup>。図12にプロトタイプの外観、図13に車内ディスプレイへの実装の様子を示す。ディスプレイ上では、カーナビ地図の上に周囲の他車両を表示し、自車にそれらが接近すると注意喚起の表示を行う。注意喚起はディスプレイとともに、音声によっても行われる。

図14は、フィールド実証実験を行った場所（東京・東銀座）と実験の様子を示している。実験の結果については文献（9）を参照されたい。



サイズ: 320(W) x 258(D) x 125(H)

図12 MM-SA車載装置プロトタイプ (BB : base band, RF: Radio Frequency)

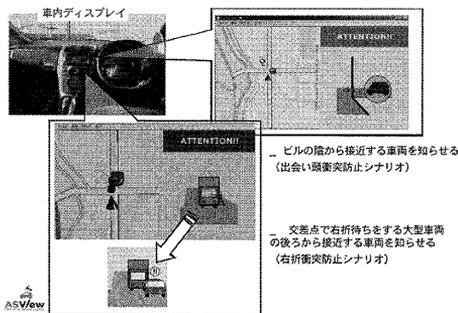


図13 車内ディスプレイによる注意喚起

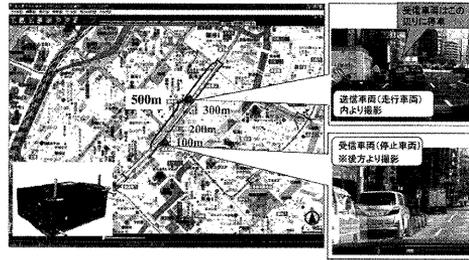


図14 フィールド実証実験の様子

### 8 歩車間通信におけるアクセス方式

歩行者と車両との間の接触事故を防ぐための歩車間通信では、歩行者が何らかの無線端末を携帯し、車々間通信と同様に、車両端末と歩行者端末の間で位置情報等を交換し、双方に対して注意喚起を行うシステムが想定される。その場合、道路周辺に分布する歩行者端末の数は、都市部などでは車載機の数に比べてさらに多くなると考えられるが、実際はほとんどの歩行者は事故に遭遇する確率が極めて低いことが多い。このため、いかにそれら危険度の低い歩行者端末を注意喚起対象から除外し、通信の混雑を抑制するかが確実な事故防止を実現する上で重要となる。

また使用する周波数帯によっては、端末をもつ本人自身や周辺の他の人の人体による遮蔽などにより信号が大きく減衰することも想定される。さらに、歩行者はわずかな位置の違いにより危険性が大きく異なる場合も考えられ、GPSによる位置検出精度を従来のそれに比べてさらに改善する必要がある。特に、大きな建物等によるGPS信号のマルチパスによる誤差増大の回避が不可欠である。

近年、急速にスマートフォンが普及している。スマートフォンはGPSや加速度セン

サ、歩数計などを内蔵している場合が多く、これらの各種センサを組み合わせることで活用することにより、歩行者の危険度を推定できる可能性がある。また、高齢者等がもつ杖や子供用防犯ブザーなどに内蔵あるいは外付けされた無線端末の使用も考えられる。

ATRでは歩行者端末のもつ各種センサの組み合わせによる歩行者の事故危険度の判定方法やそれを積極的にCSMA/CAや自律分散型のCDMAに取り入れたアクセス制御方式<sup>(10)</sup>、人体等による信号減衰を克服するためのマルチホップ通信による歩行者端末間協調技術、ならびに歩行者端末測位の高精度化技術<sup>(11)</sup>などの検討を行っている。なお、必要な処理をバッテリー駆動の携帯端末で高い負荷を伴わずに行うためのアルゴリズムの工夫も重要な課題である。

## 9 おわりに

安全運転支援のための車々間通信に適用する通信方式の研究動向について、ATRで行われた研究を中心に紹介した。この方式は国内外で検討が進められている車々間通信の標準規格とは一線を画しているが、その高いレスポンス性と信頼性を生かし、将来のロボット間通信等への応用も期待される。

また、歩車間通信の検討状況についても簡単に触れた。これも早期実用化の要望が高いが、まだ困難な課題が多く研究要素も強い分野であると考えられる。国、研究機関、自動車メーカー、通信機メーカー、および通信事業者等の連携による今後の進展に期待したい。

なお、本研究の一部は、情報通信研究機構の民間基盤技術研究促進制度に基づく研

究委託により実施したものでありここに感謝する。

## 参考文献

- (1)ITS情報通信システム推進会議：「5.8GHzを用いた車々間通信システムの実験用ガイドライン（1.0版）」、2007年5月
- (2)ITS情報通信システム推進会議：「700MHz帯を用いた運転支援通信システムの実験用ガイドライン（1.0版）」、2009年2月
- (3)<http://www.npa.go.jp/toukei/koutuu48/home.htm>
- (4)<http://www.mlit.go.jp/jidosha/anzen/01asv/>
- (5)H. Yomo, O. Shagdar, T. Ohyama, M. Miyamoto, Y. Kondo, J. Hasegawa, T. Sakai, R. Miura, and S. Obana：「Development of CDMA Inter-Vehicle Communications System for Safety Driving Support」, IEEE Wireless Communications Magazine, Vol.16, Issue6, pp.24-31, Dec. 2009
- (6)O. Shagdar, T. Ohyama, M. N. Shirazi, H. Yomo, R. Miura, S. Obana：「Safety Driving Support using CDMA Inter-Vehicle Communications」, Journal of Information Processing Special issue of "Intelligent Transportation Systems and Mobile Communication for Safe and Secure Society", Vol.51, No.1, pp.101-115, Jan. 2010
- (7)P. Davis, T. Ohyama, O. Shagdar, H. Yomo, R. Miura, and S. Obana：「Comparison of CSMA/CA and

CDMA Based Inter-Vehicle  
Communication for Collision  
Warnings in Large Scale Road  
Systems], ITS World Congress 2010,  
Oct. 2010

- (8)伊藤健二、田所幸浩、鈴木徳祥、原田知育、尾口健太郎、伊藤修朗：「車車間通信による安全運転支援システムの性能評価」、情報処理学会研究報告、2007-ITS-30 (10), pp. 57-64, Sep. 2007
- (9)筒井英夫、大山卓、三浦龍、小花貞夫：「安全運転支援車車間通信方式MM-SAの実証実験」、信学総大A-17-2, 2010年3月
- (10)筒井英夫、大山卓、三浦龍、小花貞夫：「歩行者事故低減のための歩行者コンテキスト推定の基礎検討」、信学ソ大A-17-18, 2010年9月
- (11)湯素華、筒井英夫、大山卓、三浦龍、小花貞夫：「車車間通信ネットワークにおける高精度相対測位手法の提案」、信学ソ大A-17-12, 2010年9月

# 地震予知研究の現状とVLF/LF電波を用いた地震予測の実用化

電気通信大学、(株)早川地震電磁気研究所、  
地震解析ラボ (インフォメーションシステムズ(株))

早川正士

## まえがき

2011年3月11日東日本大震災はその被害のほとんどは津波によるものであったが、地震予知の重要性を全世界に知らしめることとなった。地震の短期予知とは地震の数日から1～2週間前に「いつ、どこで、どの位の大きさ（マグニチュード）の」地震が来るかを予測することである。地震観測に基づく地震予知が長年にわたり行われてきたが、その限界が明らかになって来た。神戸地震後、力学的手法に代わって、電磁気現象が地震前兆（予兆）として極めて有望であることが分かってきた。新しい電磁気手法の登場である。特にVLF/LF送信局電波を活用した電離層擾乱の観測は国内ネットワークを用いて約15年続けられ、電離層擾乱と地震（マグニチュード6以上、浅い（40km以下））との有意な因果関係が近年得られた。このVLF/LF法を用いた手法は実用化され、地震予測を配信するベンチャー会社を我々は設立し、定常的情報発信をスタートしている。

## 1 地震短期予知の定義

ここで言う「地震予知」とは、地震の数日から数週間程度前に地震を予知することであり、地震の短期予知は、日本のような地震国では社会的要請の強い課題である。

地震災害を軽減するという目的のためには予知研究よりは防災の方がより直接的であることから、建造物の耐震性等を高めることが必要であることは論を待たない。しかし、地震予知ができれば人的損失の著しい軽減だけでなく、防災上からも大変重要であることから、地震予知研究は国民的関心も高く、また学問的に見ても地球科学に残された最大のフロンティアの一つと言っても良いと考える<sup>(1)~(4)</sup>。

地震学での中期・長期予測ではない。中期とは数年から数10年オーダ、又長期とは100年以上のオーダのタイムスケールでの予測である。中期予測とは「○○地方にはここ30年にてマグニチュード○の地震が起こる確率はXX%」という如きもので、過去の地震統計に基づいてその地域は地震が起こり易いか否かということを示すだけで、いつ起こるのかという情報は与えない。

## 2 地震予知不可能論の不毛

過去50年間地震予知は地震学のテーマとして取り扱われてきたが、その歴史の迷走ぶりは上田 (2011)<sup>(5)</sup> に詳しく記されている。「現在の科学では地震予知は出来ない」という見解はかなり一般的のようである。しかしここで注意すべき点がある。第一は地震予知の定義である。「いつ、

どこで、どの程度の大きさ（マグニチュード）の地震が起こるか（地震予知の三要素という）を事前に知る」というのが至極当然の定義と思われる。それには観測可能な何らかの前兆現象と地震との間に科学的関連があるか否かの確立が最重要であり、ひとたびそれが確立されたら原理的には地震予知は出来たことになる。前兆現象と地震との関連についての物理学的究明が科学的地震予知といえ、現在多くの前兆現象はこの段階にあるといえよう。

「実用的地震予知」となると話は違ってくる。地震予知の三要素を、「役立つ精度」で社会に伝えるという条件が加わるからだ。ここで重要なのは「役立つ精度」が単義的でなく、地震予知が出来る出来ないという議論を不毛にしがちな原因の一つはここにある。「東京に一週間程度後に比較的大きな（マグニチュード（M）6以上）の地震があるかも」（これは短期予知）から「南関東地域に十年以内にM8の地震の恐れあり」（これは中期予知（予測）と言えよう）など「役立つ精度」はいろいろあり得る。ところが地震学者の中には、初めから著しく厳しい条件を課し、それに適合しない予知は予知ではないとする否定論者が多いようである。その種の立場からは、「社会・経済損失が大きいから、絶対確実ではない予知はむしろ有害だ」といった議論までもが出るに及んでは何をか言わんやである。「東海地方ではこれこれの異常事象がおきているから、当分の間警戒した方がいい」といった程度でも「役に立ち」得るのではないか。更に、「東京地区には来週は地震はなさそう」でも大いに有用ではないか。それすらも失敗することもある。し

かし、数回失敗が続いたからといって諦める必要はない。科学・技術は失敗と成功を重ねて育つものであることを忘れてはならない。しかも以下に述べるように実際は地震予知研究は既にかんりのレベルまで到達している。未完成の度合いを含めて、社会に実状を知らせるのが重要と考え、本レポートを書いている。

過去地震学者が用いてきた力学的地震予知法は、基本的には地殻の変動を地震計、ひずみ計等によって測定するものである。大地震（本震）の前にその前触れのような小さな地震（前震という）が起こることがある。この情報が地震の直前予知に貢献した例（例えば、中国海城地震）はあるが、如何せん前震を伴う地震の割合は2～3割にとどまるため、極めて有用な地震予知法とは言えない。これらの状況や過去の前兆研究を踏まえ、1998年文部省（当時）の測地学審議会は「地殻変動測定（地震測定）では地震予知は不可能である」とする報告書を公表した。その後、地震予知不可能論が地震学者、メディアでの強い風潮となっており、更に前兆、予知という言葉を使用することすら憚れることもある。

### 3 地震予知学と地震学

地震学とは、地震が起こった後にその地震のいろいろなマクロな（巨視的）特性（どの断層と関係していたとか、どれだけのずれたとか等）を調べることにより、地震の発生メカニズムを解明する学問である。地震観測はもともと地震予知には不向きで、将来の地震についての情報を得ることは出来ない。

それに対し我々が提案するのが「地震予

知学」である。地震を予知するためには、その前兆(予兆)現象を探ることに尽きる。震源での高まるストレスにより発生する如何なる前兆現象でも良く、なまずでも良いのだ。ただし、その前兆と地震との因果関係が得られれば、実用化に大きく前進することになる。前兆現象のほとんどは非地震現象で、いろいろな電磁気現象がここ15～20年にて発見されている。従って、地震予知学は学問的には地震電磁気学とも言える。

#### 4 地震電磁気学の創成

地震観測による地震予知が困難であるとすれば、非地震観測に基づく新しい手法を模索することになろう。この新しい手法として登場したのが“電磁気的手法”である。電気、磁気、電磁気(電磁波)現象の観測に基づくもので、神戸地震後著しい発展を遂げている<sup>(1)～(7)</sup>。地圏内では震源付近の圧力上昇に伴い微小岩石破壊(マイクロフラクチャという)が必ず地震に先行し、電気/電子工学ではお馴染みの摩擦電気、圧電効果等のメカニズムにより電荷分離(プラス、マイナスの電荷の発生)(即ち、電流)が発生することとなる。この電流がいろいろな電磁気現象の源となる。これらの地圏内のマイクロな(微視的)情報が地震予知では重要となる。一旦電磁気現象が起これば、その効果は周波数にもよるが、数10km～100km地圏内を伝達し、地表近くでも受信され得る。この前兆性と遠隔性が電磁気的手法(非地震観測)が力学的手法に対して決定的に優れている点である。勿論、基本的には地圏内でのマイクロフラクチャというマイクロな力学効果が原因ではあ

るが。

電磁気現象が地震の短期予知において近年注目されるようになったのにはいくつかの理由があるが、以下ではそれらを具体的に述べよう。第一の理由は、地震に伴う興味ある現象の発見である。先ず、第一は大地震(M7、8程度の)の前兆としてULF(ultra-low-frequency、周波数1Hz以下)電磁放射が検出された。1988年旧ソ連グルジア共和国でのスピタク地震とその一年後の1989年のカリフォルニア・ロマプリエタ地震の際に、極めて類似のULF電磁放射が発見された。その後1993年グアム地震に対して早川らは全く新しい信号解析法を開発し、前兆ULF電磁放射の検出に成功した<sup>(6)(7)</sup>。続いて、地上高度60～70kmに存在する電離層までもが地震に伴って擾乱されていることが神戸地震(1995年)の際早川らによって明瞭に発見され、世界的な注目を集めた<sup>(6)(7)</sup>。ULF電磁放射は地圏からの直接的な放射であり、比較的受け入れ易いものであったが、電離層が地震の影響を受けることは地圏の何らかの効果が大気圏を通して電離層まで伝達されることを示唆し、にわかには認めがたい発見であった。第二の理由は神戸地震後日本政府(旧科学技術庁)による地震総合フロンティア計画の実施である。二つの研究機関、理化学研究所と旧宇宙開発事業団(NASDA)に対して「電磁気現象を用いた地震予知の可能性を追究せよ」との要請があった。早川は後者のフロンティアを担当し、幾多の成果を挙げたが、最も重要なものの一つとして地震電磁気研究分野での国際的活動母体を創出したことであろう。過去4回(1994、1997、2000、2005年)電気通信大学におい

てIWSE (International Workshop on Seismo Electromagnetics) (地震電磁気現象と地震予知) という国際会議を開催し、国際的研究活性化に寄与している。日本のフロンティア研究の成功に刺激され、台湾、インド、イタリア、ロシア、メキシコ等の国でも、地震電磁気に関する国家プロジェクトが採択されている。最後の理由として、仏国による地震電磁気専用人工衛星 (DEMETER) が2004年6月29日に打ち上げられたことを挙げる事ができよう。早川は当初よりこの衛星計画に深く関わってきたが、我々も含め各国の研究者がGuest Investigatorとして参加し、興味ある結果が出始めている。この種の衛星観測は地上観測との同期連携観測により地圏・大気圏・電離圏結合メカニズムの解明には不可欠の手段である。この状況を概念的に描いたのが図1である。以上述べた様に、地震予知の可能性を追究する地震予知学は、地震電磁気学という極めて学際的な新しい学

問分野として創成されつつある。

## 5 地震予知学の最前線

すでに前節で述べたように、地震電磁気学は、(i) 地圏内からの直接的効果 (例えば、ULF電磁放射) だけでなく、(ii) 大気圏での擾乱、(iii) 電離層プラズマの擾乱のように広い領域にわたる現象を対象とし、各々の領域での現象の存在とその検証だけでなく、地圏の効果が如何に大気圏、電離圏まで伝達されるかという「地圏・大気圏・電離圏結合」の解明にまで研究が広がっている<sup>(6)(7)</sup>。図1からわかるように、観測手法も地下探査などの地上観測だけでなく、人工衛星による観測も不可欠となっている。

### 5.1 ULF電磁放射の成果

すでに地震予知の観点から有望と目されているのが、(1) ULF電磁放射と(2) 電離層擾乱のモニタである<sup>(6)(7)</sup>。我々の代表

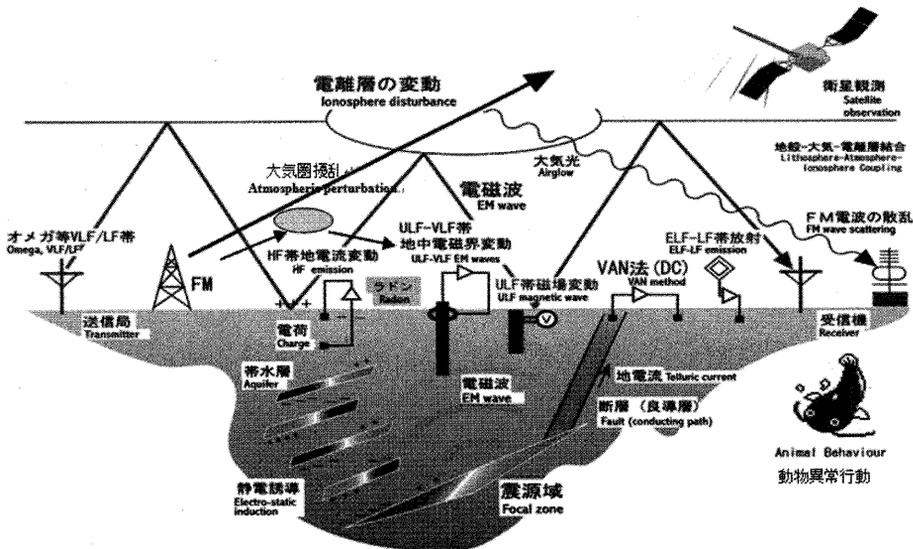


図1 地震に伴う各種電磁気現象とその観測手法  
現象は地圏だけでなく、大気圏や電離圏にも及ぶ。

的な成果を紹介しよう。学術的記述が多くなることをご容赦願いたい。先ず、ULF電磁放射に関する例を述べる。すでに我々は関東地区内にULF電磁放射の観測ネットワークを構築し<sup>(6)(7)</sup>、15年来観測を続けているが、この間の最大のイベントは2000年の三宅島噴火に伴う地震活動に先行して出現したULF電磁放射である。図2は伊豆半島でのULF放射観測網を示している。伊豆半島および房総半島では磁界3成分(水平磁界 $H_{NS}$ (南北成分)、 $H_{EW}$ (東西成分)と鉛直磁界 $H_z$ )を測定するアレー観測(50または12.5Hzサンプリング)を実施している。2000年6月末より三宅島で地震活動が活発化し、噴火活動が始まった。同時に三宅島だけでなく、その周辺でも極めて活発な群発地震活動が発生した。7月上旬にはM6クラスの複数の地震が発生した。

ここでは主成分解析(Principal Component Analysis: PCA)と呼ばれる手法を伊豆に展開している地磁気アレー観測のデータに適用した結果<sup>(8)</sup>を紹介する。空間的に近接した3地点(清越、賀茂、持越)

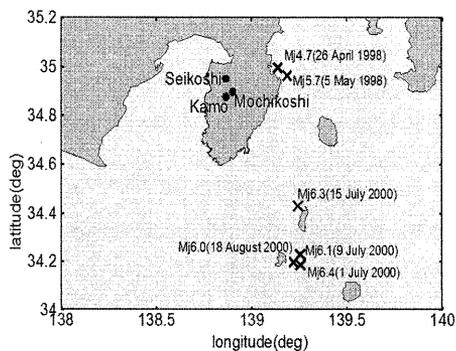


図2 伊豆半島でのULF電磁放射観測ネットワークと2000年伊豆諸島群発地震の震央(参考のため、1998年の群発地震も表示した)。

に展開された磁力計のデータを用いたため、原理的にこのPCA解析では3個の信号(雑音)源を分離することができる。ある観測点で受信される地磁気変化は一般に、(1) 超高層(磁気圏/電離圏)の地磁気変動の効果、(2) 人工ノイズ、(3) それ以外のもの(地震活動に関連する変化を含む)の合成であると考えられ、PCA解析によりこれらの雑音を分離抽出しようとするものである。世界ではじめての試みである。各観測点の時系列データをもとに周期100

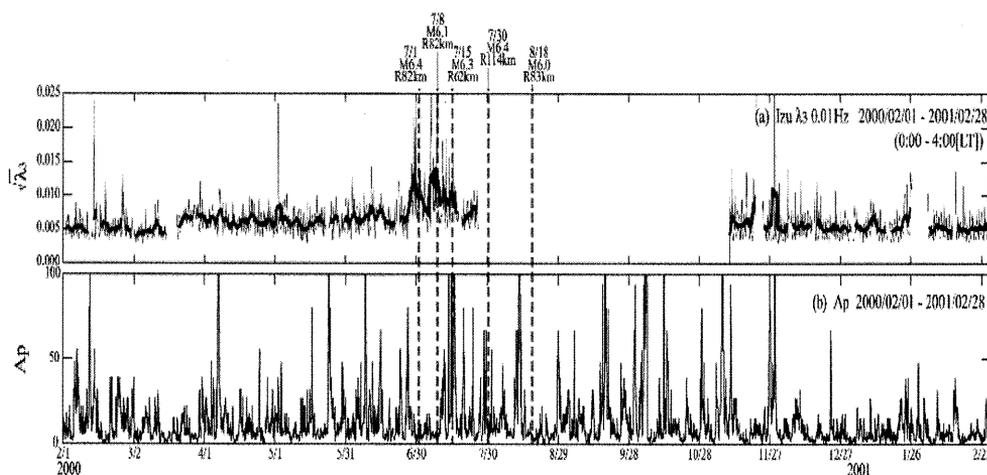


図3 2000年伊豆諸島群発地震の際のULF電磁放射の時系列変化  
上図は第3主成分( $\lambda_3$ )の強度。下図は比較のための地磁気活動( $A_p$ 指数)。

秒前後の変動に注目して固有値解析を行い、その固有値  $\lambda_n$  ( $n=1\sim 3$ )、即ち各雑音強度の時間変化を追跡した。解析の結果、第1主成分の  $\lambda_1$  (第1主成分の電力を反映する) (図示していないが) は地磁気活動度指数  $A_p$  と極めて良い相関を示し、超高層の地磁気の効果であると推測される。同様に図示していないが、第2主成分の  $\lambda_2$  は24時間周期をもち、昼間大きく、夜間小さいという特徴から、人間活動に起因するノイズと判断される。図3の上図は第3主成分の  $\lambda_3$  の時系列変化で、存在するとすれば地震に伴う微弱な放射が含まれている可能性のある成分である。群発地震活動の始まる前の4月下旬から  $\lambda_3$  のレベルがやや上昇し、特に7月上旬のM6クラスの3つの地震の数日前から顕著に  $\lambda_3$  値が上昇していることが確認された。この時系列パターンはカリフォルニア・ロマプリエタ地震の際の時系列変化とよく似ており、我々はこの変動が地殻活動起源のものであった可能性が極めて高いと考えている。

## 5.2 VLF/LF送信局電波による電離層擾乱の観測

VLF/LF送信局電波を用いた電離層擾乱の観測例を次に示そう。最近の大地震である2004年インドネシアスマトラ地震<sup>(9)</sup>、2004年新潟中越地震<sup>(10)</sup>等の事例解析もあるが、更に、複数の統計解析も併行して行っているが<sup>(11)~(14)</sup>、最新の統計結果(Hayakawa et al., 2010)<sup>(15)</sup>を紹介する。

神戸地震後我々は徐々にVLF/LF観測点を増やしてきたが、2001年の地震フロンティアの枠内での旧宇宙開発事業団(NASDA)の地震リモートセンシングフ

ロンティアが終了した後は、財政的困難さのため、観測点は縮小してきた。図4は現時点でのVLF/LF観測(受信)ネットワークの状況で、国内では北から北海道母子里(MSR)、東京調布(CHF)、愛知春日井(KSG)、岡山津山(TYM、図中でのTYMは千葉館山で、現在は閉鎖されている。新しいTYM(津山)は表示していない)に観測点を置いている。外国にはロシアカムチャカ(KCK)と台湾(TWN)観測点があるが、台湾だけは現在機器修理中である。すでに神戸地震後15年以上にわたる連続観測を続けているが、長期間にわたり連続的に良質のデータを得ることは至難の業である。同上の論文では、7年間(即ち2001年1月から2007年12月までの期間)のデータを採用し、又すべての伝搬パスのデータを詳細にチェックした結果、良質のデータが得られた以下の6つの伝搬パスを

HAYAKAWA ET AL.: SEISMO-IONOSPHERIC PERTURBATIONS

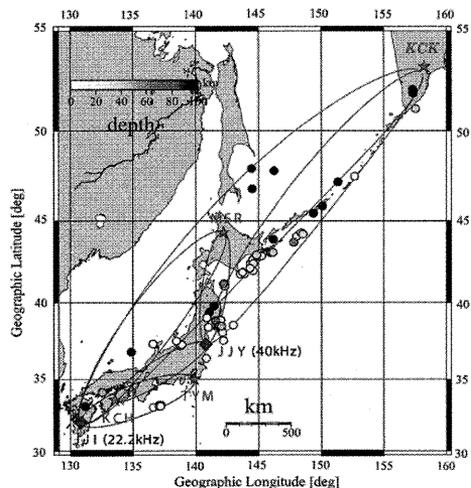


図4 VLF/LF観測データに基づく地震に伴う電離層擾乱(VLF/LF伝搬異常)観測  
用いた6伝搬パスのフレネルゾーン(感知領域)と解析した地震(丸印にて表示、色は深さを示す)。

用いている。

- (1) JYJ-KCH
- (2) JYJ-MSR
- (3) JYJ-KCK
- (4) JJI-TYM (千葉の館山、現在の岡山津山でない)
- (5) JJI-MSR
- (6) JJI-KCK

受信するVLF/LF送信局は国内の2局で、一つは福島にあるJYJ局 (40kHz) で、電波時計のための標準電波である。他方、JJI局 (22.2kHz) は海上自衛隊所有のもので、潜水艦との交信のためのものである。勿論、各観測点では外国の3局 (NWC局 (オーストラリア)、NPM局 (ハワイ)、NLK局 (シアトル、米国)) も同時に受信している。

次に、取り扱う地震についてはマグニチュード6.0以上と厳しい条件を課し、また伝搬パスの感知領域 (フレネルゾーン) 内に発生したものという条件を課した。図4を参照されたい。すでに、我々の以前の研究<sup>(11)~(14)</sup>により、電離層擾乱はマグニチュード5.5以上の時には明らかに発生することが分かっているからである。

VLF/LF信号解析について次に述べよう。我々は解析法として二つの方法、即ち、ターミネータ・タイム法と夜間ゆらぎ法を開発している<sup>(14)</sup>が、ここでは後者の“夜間ゆらぎ法”を採用する。

$$dA(t) = A(t) - \langle A(t) \rangle$$

という差分を用いる。A(t)はある日のある時刻tでの振幅を、 $\langle A(t) \rangle$ は同時刻tでのその日の前後10日間の平均振幅を示す。夜間としてUT=10時~20時 (LT=19時~5時の夜間)の時間帯を対象とした。夜間振幅の2つの物理量；(1)夜間平均振幅 (トレンドと名付ける)、(2)分散 (振幅のゆらぎ)を1日毎に評価する。図5がLF伝搬異常、即ち電離層擾乱と地震との因果関係をSuperimposed epoch analysis (SEA)を用いて得られた結果である。(a)はトレンドに関する結果、(b)は分散に関する結果である。縦軸はそれぞれの物理量 (トレンドと分散)をそれぞれの標準偏差 ( $\sigma$ )にて規格化した量である。横軸の零日は地震日を、マイナスは現象が地震の前に、プラスは地震後に発生することを意味している。ここで用いたSEAは何10ヶの地震に対する結果を地震日 (零日)を中

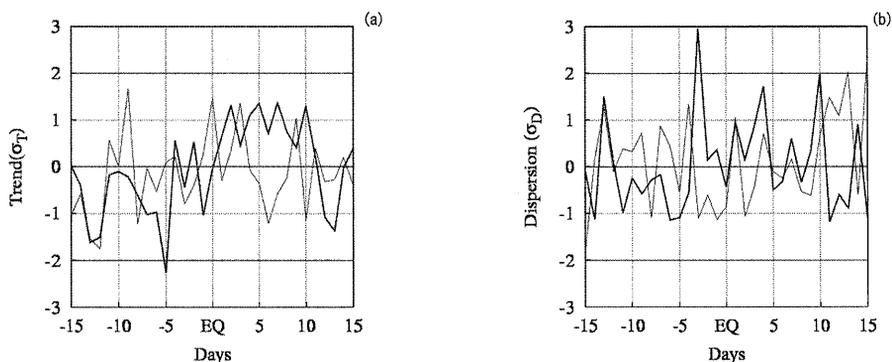


図5 Superimposed epoch analysisによる地震と伝搬異常 (電離層擾乱) との因果関係 (a)はトレンド、即ち平均夜間振幅、(b)は分散。EQは地震の日、-は地震の前、+は地震の後を示す。縦軸は標準偏差 ( $\sigma$ )にて規格化している。

心としてスタックすることにより、現象をより明確に表示できるものである。

更に、地震の深さが重要な役割を果たすため、深さを二つに分割し、深さ40km以下の浅い地震（図では太線にて表示）と深さ40km以上の深い地震（図では細線にて表示）に分類して議論している。先ず、図5 (a)、(b) を見て気づくことは、深い地震（細線）においては、トレンド、分散とも $2\sigma$ という基準には全く到達しない点である。それに対して、太線にて表示している浅い地震は全く対照的な変化をしていることが理解される。即ち、トレンド、夜間平均振幅は地震5日前に有意に、 $-2\sigma$ を超えて減少している。換言すると、地震の約1週間前に夜間の振幅が有意に低下すると言える。同時に、振幅の変動の度合いを示す分散は地震の前に $2\sigma$  ( $3\sigma$ にも接近)を超えて著しい上昇を示すことがわかる。以上をまとめると、マグニチュード6以上の、しかも浅い陸域地震とVLF/LF伝搬異常（電離層擾乱）との間には統計的に有意な因果関係があることが証明されたことになる。結論として、地震の約1週間前に前兆的電離層擾乱が観測されることになる。

それでは2011年3.11東日本巨大地震の前兆について述べよう。1995年の神戸地震は陸域での地震でもあり、宏観現象も含め多くの前兆（予兆）が報告されていた。然るに、今回の3.11地震は海域での地震ということが主原因であろうが、前兆現象は極めて少ない状況であった。そんななか我々は事前にこの前兆を見ていたこともあり、情報発信が出来なかったことが大変残念でならない。

図6はNLK（米国シアトル）-CHF伝搬パ

スと震央の場所とを対比してプロットしたもので、図7はNLK-CHFパスの伝搬特性をまとめたものである。上段はトレンド、即ち夜間の平均振幅、下段は分散の結果で、ともに $\sigma$ にて規格化されている。図7の上図を見て下さい。2011年1月1日からのデータですが、この3ヶ月間においてトレンドの著しい低下は見られず、明瞭な異常は3月5日と6日に出現しているだけである。特に、3月5日のトレンドは $-3\sigma$ を超え、 $-4\sigma$ にも接近する大きな異常です。対応する分散も上昇している。これが今回の3.11地震の前兆と考えられます。従来我々は陸域での地震を対象としてきており、陸域地震に対しては多くの事例と経験をすでに持っているが、海域での地震は我々にとって初めての経験である。図7より、海の中で地震が発生しそうであることは分かるが、場所の特定は他の伝搬パスの情報がないため困難である。この為、予測を出すことは出来なかったというのが我々の実情である。

## 6 地震予測情報の配信

VLF/LF送信局電波を用いた電離層擾乱の観測は多年の実績があり、2010年米国地球物理学会誌（J. Geophys. Res.）に、電離層擾乱（VLF/LF伝搬異常）と陸域地震（マグニチュード6以上の、しかも浅いもの）との間には有意な因果関係があることを証明している。即ち、この手法が各種の有望な電磁気手法のうちでも最も信頼できると言える。両者の因果関係が確立したという事は実用化に大きく近づいたと言える。

我々は一昨年（2010年）にこの原理に基づいた地震予測情報を配信するベンチャー

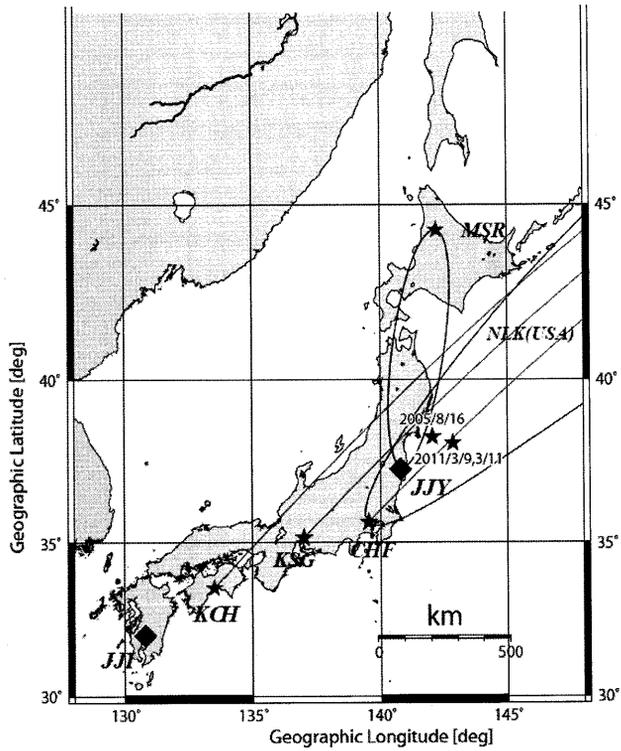


図6 2011年3月11日の巨大地震の震央と解析した伝搬パス  
(CHF (調布)-NLK局 (シアトル、米国)、JFY局 (福島)-MSR (母子里))

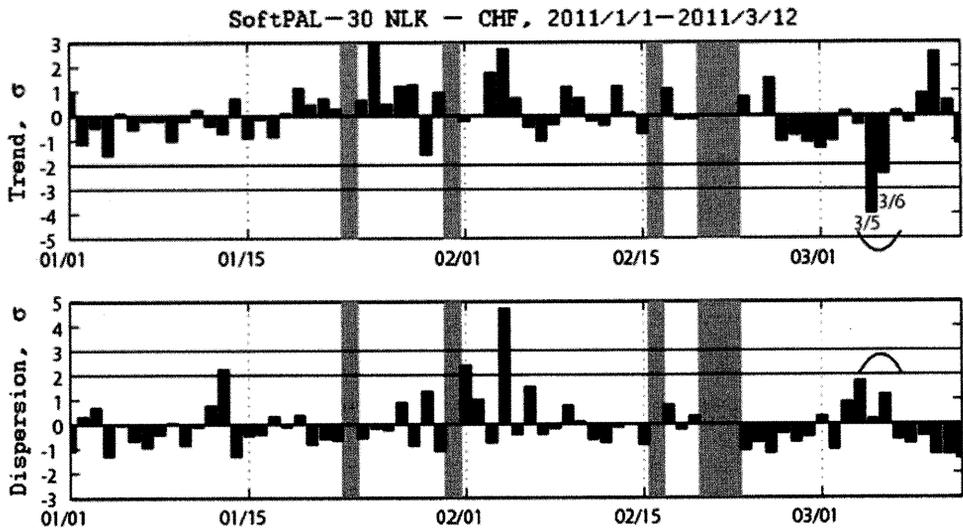


図7 3.11地震に伴う前兆的電離層擾乱  
3月5日、6日にトレンド (上図) の著しい低下 ( $-3\sigma$  を超えて) と同時に分散 (下図) の著しい上昇が見られる。

カンパニーを設立した。インフォメーションシステムズ(株)、地震解析ラボである。一昨年は試験として無料で地震予測情報配信を行ったが、その結果は地震解析ラボのホームページに予測と結果のアーカイブが掲載されている。3.11地震後事業の将来が著しく危ぶまれたが、その後の外国局電波の諸特性の集中的調査により我々の心配もぶっ飛ぶこととなった。即ち、外国送信局(NLK局、NWC局、NPM局)電波の伝搬特性について調べた結果、余震活動と考えられる海域での地震も従来の国内二局(JJY局、JJI局)からの電波特性と外国3送信局電波の伝搬特性の融合により実によく予知できる事が分かって来たのです。この結果に勇気づけられ、我々は数ヶ月前より地震予測情報の有料配信したわけです。個人でも、法人にも。皆様の御支援も徐々に高まり、本年(2012年)1月にはiPhone、携帯電話より我々の情報が流れ始めている。

## 7 地震予知学のすすめとその将来

地震予知研究は神戸地震後の日本グループの輝かしい貢献により、日本が完全に世界をリードする学問となっている。又、各国の地震電磁気研究も急速に進んでいることは頼もしい限りである。今までの経験で確かなことの一つは、事前であれ、事後であれ、予知科学的に意味のあることが言えたのは、何らかの具体的な観測事実があった時に限るということである。当たり前の事で、科学的根拠を確立し、そのことを広く科学者コミュニティや社会一般に納得してもらわなければならない。

しかし、科学革命はそう簡単ではない。

いくら当事者が正しいと主張してもそう簡単には受け入れられない。この地震予知学(地震電磁気学)の歴史もすでに15年以上あり、本レポートで紹介した結果を含め、前兆と思われる報告例は充分であると我々は考える。ところが、一歩他分野(例えば地震学)に踏み出すと、まだほとんど興味を持たれていないことに気付かされる。不思議といえば不思議だが、当然とも言える。その最たる例が地震に伴う電離層の擾乱かも知れない。地殻活動が如何に電離層まで影響するのは大変考えにくい。我々のように永らく電離層研究に従事していた者ですらそうであるから、地圏の研究者には予想だにしないものであろう。

ここで、地震予知研究の将来の方向性について述べよう。先ず、地圏内現象にせよ、大気圏擾乱、電離圏擾乱にせよ、事例の数を著しく蓄積し(百例、千例)、擾乱と地震との間に明確な因果関係があることを証明することが急務である。既に、我々の電離層擾乱に関してはVLF/LF手法の積分観測という利点を最大限に活用し、本報告で述べた様な統計解析により、両者の間に有意な因果関係を確立している。しかし、他の観測項目に関してはその段階には至っていないのが現状である。前述した様に、地圏、大気圏、電離圏が結合したシステムとして機能していることが理解された以上、地震電磁気現象の信憑性を高めるために、「独立な観測事実の相互整合性」について工夫できることがあるのではないか。複数の研究グループが各種の連続観測を、同じ観測場所で同時に行うというような総合観測も有効であろう。同時に理論のモデル造りとモニタリングの連携プレーも緊急に望

まれよう。一つの地震に対して多種多様の観測結果を得ることは、単なる信憑性の向上を超えて何が実際に起きたのかを解明する科学にとっても本質的な意義がある。

また、各観測点での観測物理量のより詳細な情報を得ることも不可欠である。例えば、いろいろな周波数での電磁放射を例に取れば、その詳細な波動特性（周波数スペクトル、放射源等）を把握するための多点アレイ観測などの実施も不可欠である。

続いて地震電磁気学は種々の現象の観測量の連続観測データに基づいており、いつも時系列データが我々の主たる情報源である。しかし、従来の現象の存否は我々が通常用いる $2\sigma$ 基準等の純粋な統計的手法によっていたが、統計的手法でも予測概念を取り入れた手法や我々が提案している様なフラクタル解析等の適用により地圏内の非線形過程（自己組織化臨界性）を確認するなどの物理的手法の使用も不可欠である。

地震学者の多くは地震予知とは関わりのうすい研究に従事しており、彼らの力だけでは地震予知は不可能であることを知っている。ところが「地震予知」に地震と言う言葉がついているので、自他ともに彼らの仕事ということになる。そして、誰かが予知を行えば、「我々地震学者が出来ないことが素人（非地震学者）が出来るはずがない」と判断する。地震予知学と地震学とは全く異なるものであるということを、地震学者にも、社会にも、政府にも理解していただきたい。地震予知学は非地震測定、即ち、電磁気現象が主役であることは前述した通りである。この地震電磁気学は実は極めて学際的な学問分野であることも強調し

たい。即ち、電磁気学のほか、電波理工学、大気電気学、プラズマ物理学、大気物理化学、超高層物理学、信号処理学等が重要な役割を果たすのに対して、地震学、地質学は地圏の基礎的情報を提供するという位置付けである。勿論、地圏内での力学運動と関連付けた電磁気現象のモデリングも今後考えなければならないが。

これらの地震電磁気現象のメカニズムや地圏・大気圏・電離圏結合メカニズムの解明により、科学的地震予知の段階から実用的地震予知への大きな発展も期待される。

#### あとがき

最後に一言述べる。先ず、小生の著書<sup>(16)</sup>「地震は予知できる」では、地震予知学の最前線としてVLF/LF電波を用いた電離層擾乱の詳細を述べ、地震予知学と地震学が別ものであることも強調している。更に、早川監修の「地震予知研究の最前線」<sup>(17)</sup>は、日本人10人と外国人20人の研究者によるレビューを収集した大作である。各グループの得意とする分野での研究活動をまとめている。地圏、大気圏、電離圏での現象をすべて網羅している。地震予知学に従事する世界中の研究者の数は極めて少ないにも関わらず、彼らが献身的に努力している姿を皆様に伝えたいと考える。地震予知学の世界的高まりを国民の皆様に御理解いただきたいのです。

#### 文献

- (1) 早川正士, 最新・地震予知学（電磁波異常でわかる, その前兆）, 祥伝社, 1996年.
- (2) 上田誠也, 地震予知はできる, 岩波科

- 学ライブラリ 79, 岩波書店, 2002年.
- (3) 早川正士, なぜ電磁気で地震の直前予知ができるか, 日本専門図書出版, 2003年.
  - (4) 早川正士, 地球環境とノイズの意外な関係 (地震、大気、宇宙の声をきく), 技術評論社, 2009年.
  - (5) 上田誠也, どうする! 日本の地震予知, 中央公論, 4月号, 196-208, 2011年.
  - (6) 早川正士, 地震電磁気現象の計測技術と研究動向, 電子情報通信学会論文誌, vol. J89-B, No. 7, 1036-1045, 2006.
  - (7) Molchanov, O. A., and M. Hayakawa, Seismo Electromagnetics and Related Phenomena: History and latest results, TERRAPUB, Tokyo, 189 p., 2008.
  - (8) Gotoh, K., Y. Akinaga, M. Hayakawa, and K. Hattori, Principal component analysis of ULF geomagnetic data for Izu islands earthquakes in July 2000, J. Atmos. Electr., vol. 22, No. 1, 1-12, 2002.
  - (9) Horie, T., S. Maekawa, T. Yamauchi, and M. Hayakawa, A possible effect of ionospheric perturbations associated with the Sumatra earthquake, as revealed from subionospheric very-low-frequency (VLF) propagation (NWC-Japan), Int' l J. Remote Sensing, vol.28, No.13, 3133-3139, 2007.
  - (10) Hayakawa, M., K. Ohta, S. Maekawa, T. Yamauchi, Y. Ida, T. Gotoh, N. Yonaiguchi, H. Sasaki and T. Nakamura, Electromagnetic precursors to the 2004 Mid-Niigata Prefecture earthquake, Phys. Chem. Earth, vol. 31, 356-364, 2006.
  - (11) Rozhnoi, A., M. S. Solovieva, O. A. Molchanov and M. Hayakawa, Middle latitude LF (40 kHz) phase variations associated with earthquakes for quiet and disturbed geomagnetic conditions, Phys. Chem. Earth, vol. 29, 589-598, 2004.
  - (12) Maekawa, S., T. Horie, T. Yamauchi, T. Sawaya, M. Ishikawa, M. Hayakawa, and H. Sasaki, A statistical study on the effect of earthquakes on the ionosphere, based on the subionospheric LF propagation data in Japan, Ann. Geophysicae, vol.24, 2219-2225, 2006.
  - (13) Kasahara, Y., F. Muto, T. Horie, M. Yoshida, M. Hayakawa, K. Ohta, A. Rozhnoi, M. Solovieva, and O. A. Molchanov, On the statistical correlation between the ionospheric perturbations as detected by subionospheric VLF/LF propagation anomalies and earthquakes, Natural Hazards Earth System Sci., vol. 8, 653-656, 2008.
  - (14) Hayakawa, M., VLF/LF radio sounding of ionospheric perturbations associated with earthquakes, Sensors, vol.7, 1141-1158, 2007.
  - (15) Hayakawa, M., Y. Kasahara, T. Nakamura, F. Muto, T. Horie, S. Maekawa, Y. Hobara, A. A., Rozhnoi, M. Solovieva, and O. A. Molchanov, A statistical study on the correlation

between lower ionospheric perturbations as seen by subionospheric VLF/LF propagation and earthquakes, J. Geophys. Res., vol. 115, A09305, doi:10.1029/2009JA015143, 2010.

- (16) 早川正士, 地震は予知できる, KKベストセラーズ, 2011年12月.
- (17) 早川正士監修, 地震予知研究の最前線, 日本専門図書出版(株), 2012年2月.

# 津波に対するレーダ観測活動の調査

前日本工業大学教授

渡辺 康夫

## 1 はじめに

2004年12月26日、スマトラ・アンダマン地震の1時間55分後、海洋観測衛星Jason-1がインド洋を西方に向かって伝播中の津波の第一波の上空を偶然に通過し、マイクロ波（Ku及びC帯）電波高度計によってdeep oceanを伝搬する津波の波高のプロファイル及びレーダ後方散乱強度を初めて明瞭に計測した。Jason-1とタンデム航行していたTOPEX/Poseidonも6.5分後に同様に計測した。さらに、Envisat及びGeosat Follow-On (GFO) も津波データを収集した。2011年3月11日の東北太平洋沖地震においては、北海道、紀伊水道、カリフォルニア及びチリのHFレーダが岸に押し寄せる津波のocean surface currentを初めて計測した。以上の二件は電波センシングにとって津波信号のsignatureを初めて記録したエポックメイキングな観測であった。本発表ではこの二件を中心に、先行研究及びフォローオン研究を含めて文献を調査した結果を報告する。

第2章においては、スマトラ沖津波を観測したJason-1の電波高度計の性能を紹介したあと、まずGowerの津波波高のプロファイルの分析を紹介する。次にHayashiが提言した、波高の基準値に含まれる誤差を低減する方法のmultisatellite time-space interpolationを紹介する。続いてGodinのtsunami shadowsの分析を紹介する。第3、4、5章の主題はHFレーダによる3/11津波の

観測である。第3章ではBarrick及びLipa等の津波の探知活動を紹介する。HFレーダの観測対象であるwater particle velocityについての研究を紹介し、続いて北海道及びカリフォルニアのHFレーダによる3/11津波の観測を紹介する。第4章ではハンブルグ大学グループの津波探知活動を紹介する。津波探知研究の内容を紹介したあと、チリのHFレーダによる3/11津波の観測を紹介する。第5章ではHinata等の3/11津波の観測を紹介する。第6章に結論を述べる。重要な資料の欠落については、取得に努め充実したい。

## 2 2004年のスマトラ沖津波と衛星搭載電波高度計

### 2.1 Jason-1 及びTOPEX/Poseidon の電波高度計

1992年に打ち上げられたTOPEX/Poseidonの電波高度計（Poseidon-1）及び2001年打ち上げのJason-1の電波高度計（Poseidon-2）の計測目的はSeasatミッション<sup>(1)</sup>と基本的に同じで、sea level、significant wave height (SWH)、レーダ後方散乱係数（sigma zero）である。Poseidon-1はSeasat（1978年打ち上げ）及びGeosat（同1985年）の技術を踏まえて設計された。高度計測の要求精度は1秒インターバルのとき $2mH_{1/3}$ の環境下で4.2cm以下である<sup>(2)</sup>。Poseidon-2はPoseidon-1の特徴を引き継いで、信号処理の改良、固体半導体

回路化、小型化、信頼性改善等がなされた。周波数と帯域はKu帯が13.575GHz/320MHz、C帯が5.3GHz/320MHz及び100MHzで、変調はlinear FM chirpである。Dual frequency modeのときの1secのレンジノイズは、要求値の2.5cmに対してflight testの結果は1.8cmであった<sup>(3)</sup>。

2002年に Corsica及びBass Strait（オーストラリア）において実フライト中の Jason-1及び TOPEX/Poseidon（T/P）の absolute calibrationが行なわれた<sup>(4) (5)</sup>。Geoid等の実環境におけるGPSブイを基準にしたabsolute biasは、CorsicaにおいてはT/Pが $6 \pm 3$ mm、Jason-1が $120 \pm 7$ mmであった。Bass StraitではT/Pが $-10 \pm 9$ mm、Jason-1が $131 \pm 21$ mmであった。

## 2.2 スマトラ沖津波の観測データ

### 2.2.1 NOAA, EOS紙及びScience誌の報告

(1) NOAAは2005年1月10日付で津波の伝播図と4基の衛星の計測データを図1のように発表した<sup>(6)</sup>。

(2) EOS紙（American Geophysical UnionのEarth and Space Sciences 関係の新聞）は2005年1月25日付で Institute of Ocean Sciences の Jim Gower による下記の記事を載せた<sup>(7)</sup>。

「衛星の電波高度計は過去に一度だけ、1999年のOkal等の論文<sup>(8)</sup>がそれであるが、比較的振幅の小さいmid-ocean tsunami wavesを探知した。2004年12月26日の津波は70年代に衛星による高度計測が始まって以来最大のものである。現在軌道を周回中の電波高度計は洋上5km円のsea surface heightを平均して分解能2、3cmで計測する。Jason-1は偶然にもright timeにright

placeに位置していた」。観測の内容は後述のGowerの分析と重複する。

(3) Science誌は2005年5月20日号でスマトラ・アンダマン地震を特集した<sup>(9)</sup>。衛星の計測に関する内容は上記の資料(1)、(2)と概ね同じである。

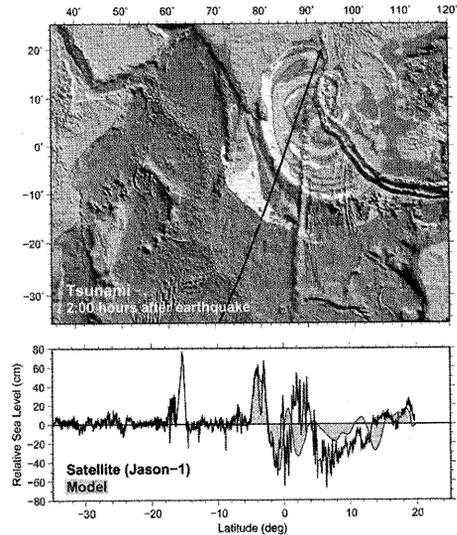


図1 2004 Indian Ocean Tsunami propagation

(上図) Epicenter: (3.2N, 94.2E), 00:58:53UT, 26 Dec. 2004.

Jason-1: Indian Ocean, (4.56S, 84.12E), 02:53:51UT.

Bay of Bengal, (13.15N, 90.56E), 02:59:53UT.

(下図) Measurement by Jason-1. [NOAA News Online, 10 January 2005]

### 2.2.2 Gowerの分析：波高プロファイル

Gowerは2007年にJason-1、TOPEX/Poseidon、Envisat、GFOのデータ分析の結果を発表した<sup>(10)</sup>。

#### (1) Jason-1の電波高度計データ

計測されたsea surface height anomaliesを図2に示す。データは1秒間の平均値である。電波高度計のfield of viewは1秒間に海上を5km移動する。地震は2004年12月26日朝 00:58:53UT に起きた。スリランカの南1,500kmにあって北東のベンガル湾

方向に進んでいたJason-1は02:53:51UTに4.56°S、84.12°Eにおいて津波フロントのhalf-height position上空を通過した。電波高度計の値は直前、直後サイクルの計測平均値を70cm超えて上昇した。続いて平均値から下に30~40cmドロップしたため、波高の山谷のトータル差は約1mになる。直前直後のサイクルの値を差し引くことによって、10日以上続くmesoscale eddiesやocean tideによるパラツキの低減を図った。波長は図2の5°Sから3°Nまでのデータから580kmと求められる。速度はエピセンターを原点として観測位置と観測時刻から739km/hと求められる。続いて衛星は13.15°N、90.56°Eにおいてベンガル湾に向かう津波フロントのhalf-height position上空を通過し、シーレベルが20cmドロップしていることを計測した。この海域では津波フロントはシーレベルがドロップした状

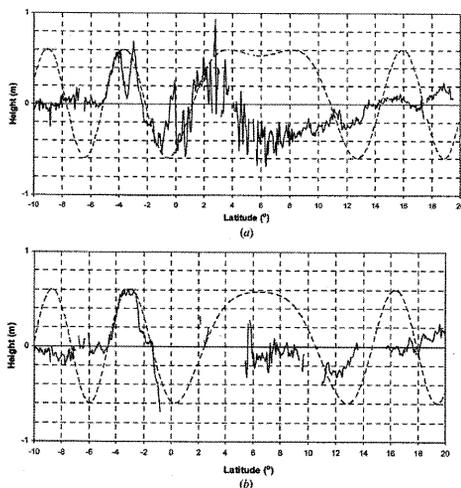


図2 Sea surface height anomalies

実線: データ。基準値は直前直後サイクルでの平均値。点線: Sine waveモデル ( $\lambda=580\text{km}$ ,  $A_m=0.6\text{m}$ )。 (a) Jason-1データ: (1) 波高は70cm-(30-40)cm, (2) 波長は5S-3Nのデータから580km, (3) 速度は震源からの距離と時間から739km/h, (4) 周期は(2)(3)より47min, (5) 実測値とモデルは一周期にわたり一致, (6) 13.15N点の波高は-20cm (wave frontはsea levelがドロップした状態で伝播)。 (b) TOPEX/Poseidonのデータは間欠的。 [Gower, Int. J. Remote Sensing, July 2007.]

態で進んでいたことを示している。

図2には計算値を重ねてある。計算モデルは波長580kmのsine波がエピセンターから速度739km/hで伝播するとし、振幅は60cmとしている。計算モデルの位相は津波のリーディングエッジに合わせた。実測値と計算値はフルサイクルにわたってよく一致し、津波は正弦波波形で伝播したことを示している。周期は波長と速度から47minとなる。6°N以北はshallow water 海域で、モデルにはこれが考慮されていないため実測値と計算値は離れている。また、3.5°S付近で波長100kmのコンポーネントが認められる。

## (2) その他の衛星の電波高度計データ

TOPEX/Poseidon及びEnvisatからも津波フロントのデータが得られた。TOPEXのデータは間歇であった。GFOは地震発生後9時間近くたってベンガル湾上空を赤道に向かっていた。この時既に津波フロントは南インド洋に移動していたためamplitudeは著しく減少していたと考えられ、また、相当大きなeddy activity海域に入っていた。GFOからは津波フロントを示すデータは得られなかった。(GFOのデータは後述のHayashiの分析で活用される。)

## 2.2.3 Hayashiの分析: multisatellite time-space interpolation

電波高度計のデータには津波信号のほか、様々なocean phenomenaや観測技術及び信号処理等のエラーが含まれる。これらのnontsunami effectを低減する方法として、Hayashiは2008年にmultisatellite time-space interpolationを提案して実データに適用した結果を報告した<sup>(11)</sup>。この提案方

法は、複数の衛星の電波高度計の計測データに計測ポイントと津波ポイントとの距離差と時間差に応じた重み付けを与え、これ等の重み付けられた計測データの平均値を津波ポイントの基準値と定め、この基準値を津波ポイントの計測値から差し引く方法である。この方法によってRMSE (rms error) は4~5cmになり、Jason-1の電波高度計のミッションゴール (2.5cm以下) に近い精度が得られたため、信頼性の高いしかも明瞭なtsunami-height profileが得られたと報告した。

#### 2.2.4 Godinの分析：Tsunami shadows

過去の津波において、津波フロントの背部の海面にtsunami shadowsと呼ばれるフロントと平行した濃い色の帯状の領域ができ、これがフロントとともに岸に向かって進む光景が目撃されている。Godinは2004年に、津波の山と谷の間にエアフローの乱れが最大となる領域ができ、この領域の海面のroughnessが増すことによりレーダ後方散乱強度 $\sigma^{\circ}$ が変化することを明らかにし、このtsunami shadowsを津波探知に応用することを提案した<sup>(12)</sup>。

Godin等は2009年にJason-1のデータを分析し、tsunami shadowsを確認した<sup>(13)</sup>。計測されたSSH (sea surface height) と $\sigma^{\circ}$ データのうち、津波フロントが含まれる6°Sから2°Sまでのものを図3に示す。図3aはSSH, 図3bはKu帯の $\sigma^{\circ}$ 、図3cはC帯の $\sigma^{\circ}$ である。図中のデータ (1) は直前のサイクル、データ (2) は津波当日、データ (3) は直後のサイクルのデータである。注目すべきは、図3b、3cにおいて $\sigma^{\circ}$ は $\pm 1$ dB変化している。海上10mの風速は、5°Sにお

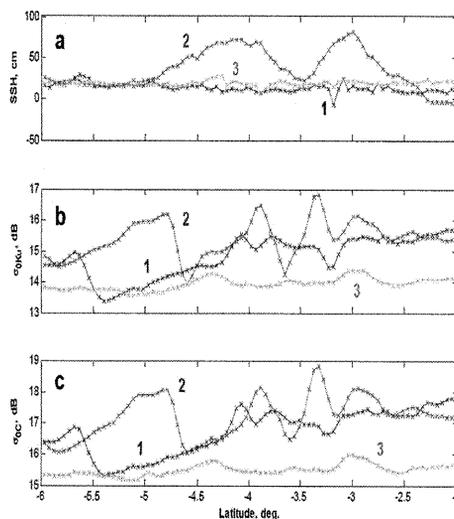


図3 Jason-1 data (from 6° to 2°S)

(a) Sea surface height, (b) Ku-band radar backscattering strength, (c) C-band radar backscattering strength. (1) Data days before, (2) Data with cycle 109, (3) Data 10days after. Estimated  $\sigma^{\circ} = \pm 1$  dB under the conditions of wind above 10m as 2-4m/s, tsunami period as 35-45min, and SSH as (0.6-0.7m) ~ -(0.4-0.5m). [Godin et al., Natural Hazards and Earth System Sciences, 2009.]

いて計測された値から、2~4mと推定される。この風速と、津波周期を35~45min、SSHの最大値~最小値を(0.6~0.7m) ~ -(0.4~0.5m) とすると、 $\sigma^{\circ}$ の変化は計算モデルから $\pm 1$ dBと見積もられ、計算値と計測値は合致すると報告した。海面のroughnessの存在は津波信号の有用な特徴と考えられ、これにより津波を真上からだけでなく、広い監視swathをもつ航空機・衛星搭載SARやマイクロ波radiometerによって遠方から探知できる大きな利点があると強調した。

### 3 2011年3月11日の東北太平洋沖地震の 津波とHFレーダ:Barrick,Lipa等の報告

#### 3.1 HFレーダの津波信号

##### 3.1.1 Bragg echoとwater particle velocity

Surface current がない海面をHFレーダで観測すると、レーダ波長の1/2の波長をもつ波 (Bragg wave) のエコー (Bragg echo or 1st-order echo) が観測される。レーダ周波数が25MHzのときBragg waveの波長は6mである。このような比較的短い波長の波の伝播速度は  $(g \lambda_w / 2\pi)^{1/2}$ 、( $g$ は重力加速度、 $\lambda_w$ は波の波長)、で与えられる<sup>(16)</sup>。この速度をドップラー周波数の公式にあてはめると、Bragg waveのドップラー周波数 $f_B$ は $f_B = \pm (g / \pi \lambda_r)^{1/2}$ 、( $\lambda_r$ はレーダ波長)、となる。レーダ周波数が25MHzのとき $f_B$ は $\pm 0.510$ Hzであるから、受信信号のドップラースペクトラムには $\pm 0.510$ HzのBraggピークが観測される。このようにレーダ周波数に対してBragg周波数は一義的に与えられる。

津波は shallow-water ocean wave として特徴づけられる。Bragg waveの典型的な周期が1.5~4.5 s であるのに対し、津波の周期は25~50minで、波長は周期に対応して400~800kmである。Shallow-water ocean waveには (water) particle (or orbital) velocityが伴う。Water particleの軌道は、波の波長が水深に比べて短いときは、波高値を半径とする円を描く。波長が水深に比べて長い津波の場合は楕円軌道となり、さらにvery-shallow limitにおいては水平方向にback-and-forth trajectoryを描く。この水平方向の速度がparticle velocityである。HFレーダから見ると、

Bragg waveはこの速度でトランスポートされるためドップラーシフトが附加される<sup>(19)</sup>。

レーダ周波数が25MHzで、particle velocity がレーダに向かって周期的に $\pm 50$ cm/sの変化をするとき、2本のBraggピークは予測値から共に $+0.083$ Hzシフトし、次に $-0.083$ Hzシフトすることを繰り返す。Particle velocityは深海部においてはHFレーダの検知レベル以下であるが、大陸棚に入り水深が200m程度になると速くなるため、津波の接近を探知することができる。津波の波高はHFレーダでは探知できないが、particle velocityの計測値から計算によって求められる。海面の位置(距離と方位)の計測はレーダごとに工夫がなされる。

##### 3.1.2 津波に関する計算式

津波の波長は水深よりはるかに長いいため、津波の諸元は線形理論で与えられる。重力加速度を $g$ 、水深を $d$ 、周期を $P$ 、水深4000mにおける津波の波高を $h_{4000}$ とすると、津波の速度 $v_{ph}(d)$ 、波長 $\lambda(d)$ 、波高 $h(d)$ 、particle velocity  $v_0(d)$  は次式で与えられる<sup>(15)(17)</sup>。

$$v_{ph}(d) = (gd)^{1/2} \quad (1)$$

$$h(d) = h_{4000} (4000/d)^{1/4} \quad (2)$$

$$v_0(d) = v_{ph}(d) h(d) / d = (g/d)^{1/2} h(d) \quad (3)$$

$$= h_{4000} (g^{1/2} 4000^{1/4}) / d^{3/4} \quad (4)$$

$$\lambda(d) = P(gd)^{1/2} \quad (5)$$

津波の速度は水深4000m (open sea) では時速数百キロ以上であっても、shallow waterに入ると $d^{1/2}$ でスローダウンする。周期は変わらないものの、波長は $d^{1/2}$ で縮む。波高は $d^{-1/4}$ で増大する。particle velocityは波高以上に $d^{-3/4}$ で急速に増大する。波高

は $v_0$ から (3)式により直ちに計算される。

津波は水深の輪郭を表すdepth contour (bathymetry contour) に対して直角に進む性質がある。Depth contourは海岸線に平行と見做されるため、津波は海岸線に向かって直角に進むと考えられる。海岸線から直角方向の距離 $x$ と時刻 $t$ における surface current velocity  $v(x, t)$  は、particle velocity、津波の波長及び周期を用いて次のような正弦波波形の伝播波の式で表すことができる<sup>(17)</sup>。

$$v(x, t) = v_0(d) \sin 2\pi [x/\lambda(d) + t/P] \quad (6)$$

時刻を固定したときの surface current のスナップショットは図4のように描ける<sup>(15)</sup>。津波の波長はdeep oceanでは数百キロであったものが、水深が200m前後になると30kmにまで短くなる。Particle velocityは波高の山の位置において岸に向かって最大となり、波高がゼロの位置では速度もゼロになり、半波長先の波高の谷の位置では逆向きに最大となり、1波長先の山で再び岸に向かって最大値をとる。これをレーダで観測すると、ドップラーシフトは距離とともに +、0、-、0、+、…と変化する。今度は距離を固定してドップラーシフトの時間変化を観測すると、surface currentは図4の波形を保ったまま岸に向かって進むため、ある時刻でプラス最大、1/4周期後にゼロ、半周期後にマイナスの最大値、3/4周期後にゼロ、1周期後に再びプラス最大となる。

レーダはparticle velocityのレーダ方向成分 (radial current) を計測する。このためレーダが2基あれば、それぞれのレーダで計測されたradial currentからsurface currentのベクトル (速度と方向) を得ることができる。このようにして得られた海

域のcurrent分布をtotal current (velocity) map (or field)と呼んでいる。レーダが1基のときでもsurface currentのベクトルを推定することができる。前述のとおり津波はdepth contourに対して直角に進む性質があるため、radial currentが計測された位置のdepth contourが分かれば、surface currentはradial currentからdepth contourに垂直な成分として計算される。このようにして得られたsurface currentをradial current component perpendicular to the depth contour あるいは velocity component あるいは surface current (velocity) と呼んでいる<sup>(17)</sup>。

津波が shallow water に入って wave energyが大量の水を岸側にトランスポートする surge 状態になると非線形解析が

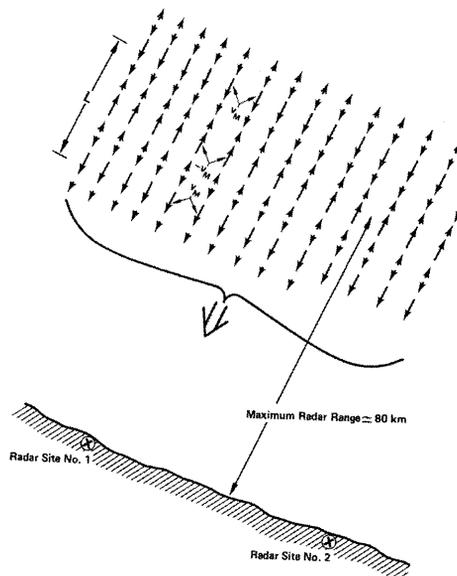


図4 Surface current induced by particle (orbital) velocity of tsunami wave approaching coast line

Temporal period: 20min, Spatial period L:30km, Depth: 100m,  $v_0$ : max particle velocity. [Barrick, Remote Sensing of Environment,1979.]

必要になる。線形理論の限界を示す水深は  $d_{\text{thresh}} = 1.38(4000/h_{4000})^{1/5} h_{4000}$  で与えられる。Open oceanにおける典型的な波高値の0.5mでは  $d_{\text{thresh}} = 4\text{m}$  である<sup>(17)</sup>。従って、津波が海岸に到達するまでのほぼ全域を線形理論で取り扱える。

### 3.1.3 HFレーダの津波探知距離と警報時間

式 (1)、(2) に基づき、津波速度、波高及び水深の関係を図5に示す<sup>(15)</sup>。灰色部分はparticle velocityが10cm/sのときの津波探知領域を示す。1979年当時、HFレーダの探知可能なparticle velocityは10cm/sと見積もられていた。図5の応用例として、 $h_{4000} = 60\text{cm}$  (2004年津波と同程度) に対する津波の探知距離を求める。式 (4) に  $v_0(d) = 10\text{cm/s}$ 、 $h_{4000} = 60\text{cm}$  を代入すると  $d = 180\text{m}$  が得られる。図において、( $h_{4000} = 60\text{cm}$ ,  $d = 180\text{m}$ ) のポイントは灰色部分の内側にあるため、この津波を十分探知できる。海底のスロープが3m/km

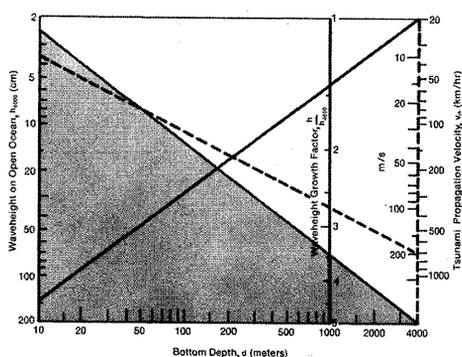


図5 Tsunami-height, velocity, and detection region versus bottom depth

Dashed line and axis: tsunami-wave velocity.  
Solid line and axis: wave height increase factor.  
Shaded area: radar detection of tsunami with particle velocity  $v_{\text{max}} = 10\text{cm/s}$ .  
Tsunami with height  $\geq 20\text{cm}$  on open ocean is detectable at the distance with depth 180m.  
[Barrick, Remote Sensing of Environment, vol. 8, 353-358, 1979.]

の場合、水深180mは距離60kmであるため、この距離で津波を探知できる。また、図より  $d = 180\text{m}$  のときの探知限界線に対応した  $h_{4000}$  は20cmであるため、open oceanで波高20cm以上の津波は水深180mの距離60kmで探知できる。

$x=L$ の地点で探知された津波が海岸に到達するまでの時間  $T$  は、 $T = \int dx/v_{\text{ph}}(x)$ 、 $0 \leq x \leq L$ 、である。海底のスロープが  $s[\text{m/km}]$  のとき、 $d = sx$  であるから  $v_{\text{ph}}(x) = (gsx)^{1/2}$  となり、 $T = 2(L/gs)^{1/2}$  を得る。 $L = 60\text{km}$ 、 $s = 3\text{m/km}$  のとき  $T = 47\text{分}$  となり十分な警報時間を確保できる。

### 3.1.4 Barrick, Lipa等の方位計測法

Barrick等はHFレーダCODAR (Coastal ocean dynamics application radar) を発展させてSeaSondeを開発した。SeaSondeのアンテナシステムは2個のループアンテナを直交させたcrossed loopsと1個のモノポールアンテナから構成される。2個のループアンテナの方位指向性(電圧)はそれぞれ  $\cos\phi$ 、 $\sin\phi$  である。このような広角ビームであるが、方位角が  $0.5^\circ$  離れたシーエコーの間には相関がない性質を利用して、次のような方法でradial currentの方位を計測する。

(a) レーダから等距離の円周上にあるレンジセル毎に、3個のアンテナ出力から1st-order spectrum領域の電圧信号  $V_i$ 、 $i = 1, 2, 3$ 、を計測し、クロススペクトラムの平均値  $\langle V_i V_j^* \rangle$  を計算する。

(b) Bragg ピークのシフト量を計測して、ラジアル速度を計算する。

(c) (a)、(b) の結果をleast-squaresにより<sup>(16)</sup>、またはMUSICにより<sup>(18)</sup> radial

currentの方位を計算する。

### 3.2 3/11津波の観測結果

#### 3.2.1 観測内容 (全般)

3/11津波の伝播状況はNOAAによって発表されている<sup>(14)</sup>。文献(19-20)では3/11津波を北海道(2サイト)及びカリフォルニア(5サイト)のHFレーダとそれぞれの地域のtide gaugeによって観測された結果が報告されている。これらは、(1) radial current velocity、(2) total current velocity mapと波高、(3) surface current velocityの距離・タイム別データ並びにtide gageのタイムデータ、(4) HFレーダとtide gageの計測開始時刻、(5) Bragg peak centroid frequencyのシフトから得られたcentroid radial current velocityとtide gageの水位、(6) Bragg peak frequency widthから得られたradial current velocityとtide gageの水位である。使用周波数は北海道サイトが42MHz、カリフォルニアの1サイトが5MHz、4サイトが13MHzである。レーダはパルス式で、データ処理時間は概して4分である。以上を表1にまとめる。

表1 Barrick等による3/11津波観測の概要

レーダ・ゲージ設置場所	諸元	計測内容
ウスジリ, キナオシ各1基 ゲージ: ハコダテ キナオシ南西35km	42MHz 0-15km	Radial current Total current map ゲージ水位
Bodega Bay, Calif. 1基 ゲージ: Ft. Reyes レーダの南40km	13MHz 0-8km	Radial current Surface current ゲージ水位
Trinidad River, Calif. 1基 ゲージ: Crescent City レーダの北70km	5MHz 0-16km	Radial current Surface current ゲージ水位
Bolinas, Calif. 1基 ゲージ: Ft. Point, Calif. レーダの南25km	13MHz 9km, 4-8km	Bragg peak shift Centroid velocity ゲージの水位
Commonweal, Calif. 1基 Montana, Calif. 1基 ゲージ: Golden Gate 両siteの中間30km	13MHz 9km	Bragg peak shift Bragg peak width radial current ゲージの水位

Lipa et al., Remote Sensing, 3 Aug. 2011  
Barrick and Lipa, IEEE Ocean-11, Sept. 2011

#### 3.2.2 Total current velocity mapと波高

ウスジリとキナオシの2基のレーダ周波数は42MHz、レンジセルは0.5km、トータルレンジは15km、セル分解能は0.5km×0.5km、処理時間は4minである。レーダ観測海域の水深は200m以下である。2基のレーダで計測されたradial current velocityから得られたtotal current velocity mapを図6に示す<sup>(19)</sup>。これは強いinward flowの場合である。速度のdivは40cm/sで、全域がこの1/2レベルの速度で覆われている。同図には計算から得られた波高が重ねられている。波高80cmレベルのエリアが広く見られる。

キナオシにおけるsurface current velocityとtide gageの水位を図7に示す。ゲージはレーダから南西35kmのハコダテに設置されている。currentデータは潮等の背景が含まれているが、peak-to-peakは最大で15cm/s、周期は40分程度である。キナオシのレーダがcurrentの振動を計測した時刻はゲージが水位の振動を計測した時刻より43分早かった<sup>(19)</sup>。

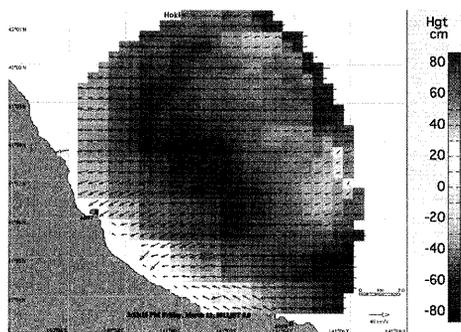


図6 Tsunami height superimposed on total current velocity field measured by radars at Usujiri and Kinaoshi

15:53 JST: Tsunami sweeping in.  $v_0$  div.: 40cm/s.  
[Lipa et al., Remote Sensing, 3 Aug. 2011]

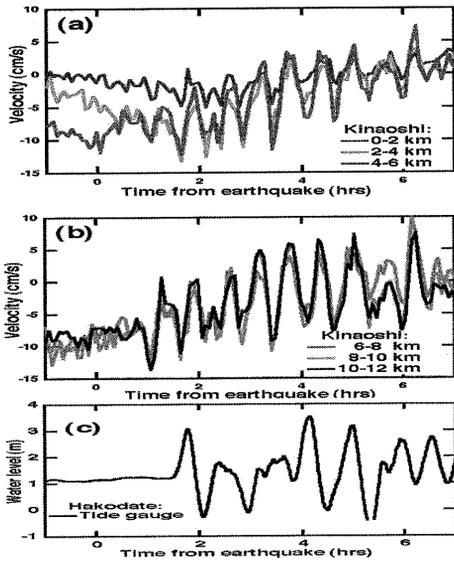


図7 Time series of velocity components from Kinaoshi radar, and water level observation from Hakodate tide gage

Radial velocity was resolved perpendicular to the shore, and averaged over bands 2km wide parallel to the depth contour. P=40min. Observation time difference: 43min. [Lipa, et al., Remote Sensing, 1663-1679, 3 Aug. 2011.]

### 3.2.3 Bodegaにおける観測

BodegaのレーダとPt. Reyesにおけるゲージの観測結果を図8に示す。レーダが観測したradial currentには岸に向かうフローとともにreverse flowも示されている。図9にvelocity componentとゲージの計測値を示す。レーダの第一波の観測時刻とゲージの観測時刻との差は12分である。

### 3.2.4 レーダとtide gageの計測開始時間差

レーダとゲージの計測開始時刻の差は北海道で43分、Bodegaで12分、Trinidadで14分、Boliniasで30分、Commonweal及びMontanaで30~40分である。このようにゲージの計測開始時刻はレーダから12~40分遅れる。この理由には次の点が考えられ

る<sup>(20)</sup>。

(1) 津波は洋上ではtravelling shallow-

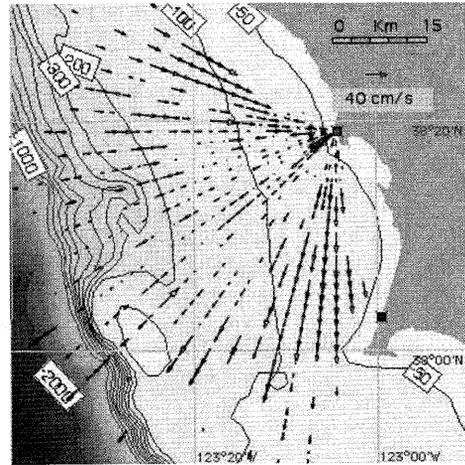


図8 Radar at Bodega Marine Lab., and radial velocity map

Radar: Bodega, 16:52UTC, 11 Mar.2011. F=13MHz, dr=2km. Tide gauge: Pt. Reyes, 42km south of radar. Reverse flow was generated in the inner range cells. [Lipa, et al., Remote Sensing, 3 Aug. 2011.]

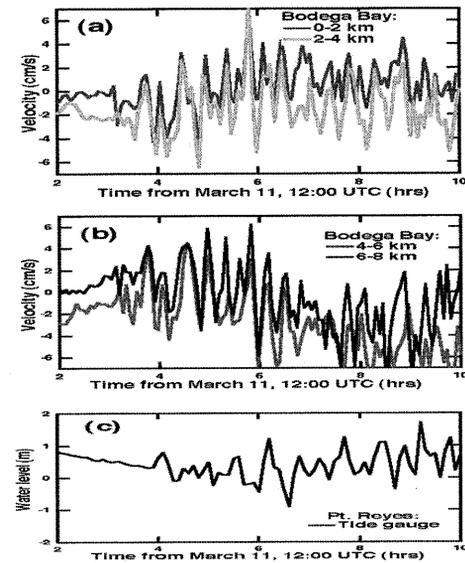


図9 Time series of velocity components from the radar at Bodega, and water level observations from the tide gauge at Pt. Reyes

Observation time difference: 12min. [Lipa, et al., Remote Sensing, 3 August 2011.]

water waveとして速度と波高が同相で進む。岸では逆向きの速度の反射波が生じてstanding waveに変わり、速度が波高に対して進むquadrature relationshipが起きる。津波の周期が40分ならば、波高は速度に対して10分遅れ、この分、ゲージのスタートが遅れる。

(2) レーダは比較的水深の深い地点で津波を探知する。津波はshallow waterに入ると速度が著しく落ちるため、ゲージに到達するまでの時間がかかる。

(3) 津波はdepth contourに対して直角に進む。特にハコダテのゲージまでの伝播路は大変曲がりくねっている。

このように津波の伝播はbathymetryに大きく左右される。

#### 4 2011年3月11日の東北太平洋沖地震の津波とHFレーダ:ハンブルグ大学の報告

##### 4.1 津波探知研究

ハンブルグ大学のグループは、(ア) ocean及びshelf研究用に同大学が開発した海洋工学ソフトHAMSOM (HAMBURG Shelf Surface Ocean Model) を利用して、沿岸へ進む津波によって引き起こされるocean surface currentを求め、(イ) ocean surface currentの速度に対応して変調された擬似津波信号を生成し、(ウ) 擬似津波信号をHFレーダWERAのアンテナ部に入力して、擬似津波信号を実レーダの受信信号に重畳させ、(エ) 受信信号のスペクトラム分析から津波を探知するシミュレーション実験を行った<sup>(22)</sup>。

WERA (Wellen Radar) は1996年にハンブルグ大学において開発された表面波を利用するフェーズドアレイHFレーダであ

る。周波数3~30MHz、出力30W、FMCW linear chirp、16素子アレイ、最大探知距離200km以上、方位角度範囲 $\pm 60^\circ$ である<sup>(21)(22)</sup>。最大探知距離の値は、船の探知、追尾、誘導、捜索及び救助、漁業、汚染物質分布モニター、海洋研究等への応用が考慮された。2004年12月26日の津波のあと、ドイツとインドネシアはインドネシアにGerman Indonesian Tsunami Early Warning System (GITEWS) を設置した<sup>(24)</sup>。GITEWS は2009年に最終調整段階に入ったが、沿岸レーダは設置されていない。ハンブルグ大学は津波探知研究がGITEWSの改善に貢献すると考えている。

##### 4.2 ハンブルグ大学による3/11津波の観測

日本から17,000km離れたチリのRumenaに海洋観測のためWERAが設置されている。変調はFMCW、出力20W、周波数22MHz、受信アンテナは8素子アレイ、最大探知距離70kmである。Conception大学の研究者は地震と津波のニュースを知ると、WERAを30s毎にリアルタイムデータを取得するfastest operation modeに設定した。地震発生の約22時間後、2m級の津波がチリの海岸に押し寄せた。

レンジ・ドップラースペクトラム例を図10に示す。22MHzに対応するBragg周波数は $\pm 0.48\text{Hz}$ である。Braggピークは40km付近から近づくにつれプラス側にシフトしている。10kmからマイナス側に極めて大きくシフトし、強いoutward flowであることを示している。なお、画面中央の横縞は干渉である。図11はradial current velocityのタイムデータである<sup>(23)</sup>。津波の特徴である周期的なcurrent velocityの変動が明

瞭に得られた。50km離れたtide gaugeの計測値との間にsignificant correlationが認められると報告されている。

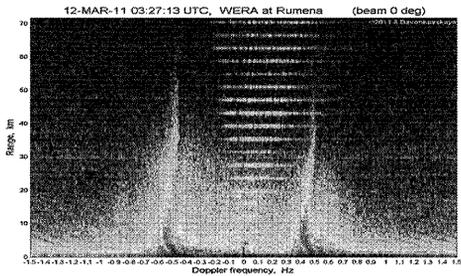


図10 HF radar power spectrum example  
F=22MHz, FB =±0.48Hz. [By courtesy of Dzvonkovskaya]

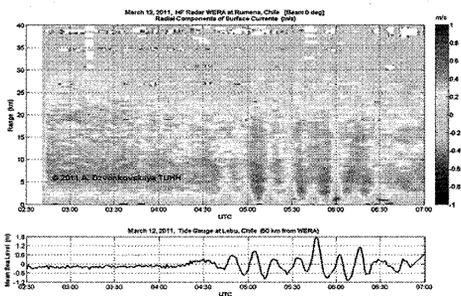


図11 Radial velocity of surface current and mean sea level

[F=22MHz, Dzvonkovskaya, et al., IRS2011.]

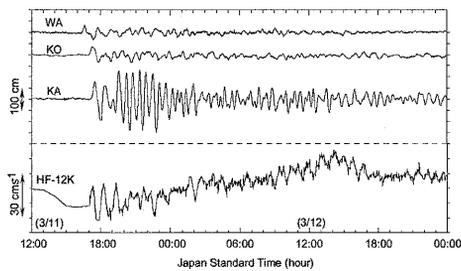


図12 Sea surface heights at WA, KO, KA and radial velocity at HF-12

HF-12: 12km offshore from radar. Time: from 12:00 on March 11 to 00:00 on March 12, 2011. Long-term variability found in the velocity record is mainly due to wind-driven current. [Hinata, et al., Estuarine, Coastal and Shelf Science, 95, 2011.]

## 5 2011年3月11日の東北太平洋沖地震の津波とHFレーダ：Hinata等の報告

紀伊水道に進んだ津波に対して、レーダ (24.515MHz) によって計測された距離12km地点のradial velocity のタイムデータを図12 (HF-12) に示す。津波は初めの3波は伝播波として現れていたが、その後は固有振動波に変化したこと等の特徴ある挙動が観測された<sup>(25)</sup>。

以上のHF帯の津波観測の他に、オーストラリアのHeron等はGreat Barrier ReefのHFレーダで津波の探知研究を行っている<sup>(26)</sup>。現時点で3/11津波の観測報告はされていないが、今後発表の可能性はある。sky waveによる津波の探知研究として、1974年にNajita等が報告した<sup>(27)</sup>。sky waveによる津波探知の研究は最近少なくなっているが、2004年の津波を機に研究が再び活発になるとの指摘がある。

## 6 おわりに

2004年にマイクロ波帯電波高度計がdeep oceanの津波を明瞭に探知し、波高のプロファイル及びtsunami shadowsのsignatureを明らかにしたこと、並びに2011年にHFレーダがcoastに押し寄せる津波を明瞭に探知し、surface currentのDoppler signatureを明らかにしたことは、レーダが津波の研究及び早期探知警戒のための有力なツールであることを示した。これらの成果は地球物理学や海洋工学等の科学技術知識とのシナジーなくしては得られなかった。今後も関連する科学技術とのinteractionを通じて、レーダが様々な気象海象下でも有効なツールへと発展すること、未開拓のsignatureが明らかにされる

ことが期待される。

## 引用文献

- (1) W. F. Townsend, "An initial assessment of the performance achieved by the Seasat-1 radar altimeter," IEEE JOE, vol. OE-5, No. 2, pp.80-92, April 1980.
- (2) A. R. Zieger, D. W. Hancock, G. S. Hayne, and C. L. Purdy, "NASA radar altimeter for the TOPEX/POSEIDON Project," Proc. IEEE, vol. 79, No. 6, pp. 810-826, June 1991.
- (3) G. Carayon, N. Steunou, J-L. Courrière, and P. Thibaut, "Poseidon 2 radar altimeter and in flight preliminary performances," IEEE Geoscience and Remote Sensing Symp. IGARSS'02, vol. 2, pp.774-776, 24-28, June 2002.
- (4) P. Bonnefond, P. Exertier, O. Laurain, Y. Ménard, A. Orsoni, G. Jan, and E. Jeansou, "Absolute calibration of Jason-1 and TOPEX/Poseidon altimeters in Corsica," Marine Geodesy, vol. 26, No. 3-4, pp.261-284, 2003.
- (5) C. Watson, R. Coleman, N. White, J. Church, and R. Govind, "Absolute calibration of TOPEX/Poseidon and Jason-1 using GPS buoys in Bass Strait, Australia," Marine Geodesy, vol. 26, pp. 285-304, 2003.
- (6) NOAA News Online, "NOAA scientists able to measure tsunami height from space," Jan. 10, 2005.  
<http://www.noaaanews.noaa.gov/stories2005/S2365.htm>
- (7) EOS, "Jason 1 detects the 26 December 2004 tsunami," vol. 86, No. 4, pp.37-38, 25 January 2005.
- (8) E. A. Okal, A. Piatanesi, and P. Heinrich, "Tsunami detection by satellite altimetry," J. Geophysical Research, vol. 104, No. B1, pp. 599-615, January 10, 1999.
- (9) T. Lay, H. Kanamori, C. J. Ammon, M. Nettles, S. N. Ward, R. C. Aster, S. L. Beck, S. L. Bilek, M. R. Brudzinski, R. Butler, H. R. DeShon, G. Ekström, K. Satake, and S. Siplin, "The great Sumatra-Andaman Earthquake of 26 December 2004," Science, vol. 308, pp.1127-1133, 20 May 2005.
- (10) J. Gower, "The 26 December 2004 tsunami measured by satellite altimetry," International Journal of Remote Sensing, vol. 28, No. 13-14, pp. 2897-2913, July 2007.
- (11) Y. Hayashi, "Extracting the 2004 Indian Ocean tsunami signals from sea surface height data observed by satellite altimetry," J. Geo. Res., vol. 113, C01001, 2008.
- (12) O. A. Godin, "Air-sea interaction and feasibility of tsunami detection in the open ocean," J. Geo. Res., vol. 109, C05002, 2004.
- (13) O. A. Godin, V. G. Irisov, R. R. Leben, B. D. Hamlington, and G. A. Wick, "Variations in sea surface roughness induced by the 2004

- Sumatra-Andaman tsunami," *Nat. Hazards and Earth Sys. Sci.*, vol. 9, pp. 1135-1147, 2009.
- (14) "Japan (East Coast of Honshu) tsunami, March 11, 2011," NOAA Center for Tsunami Research. <http://nctr.pmel.noaa.gov/>
- (15) D. E. Barrick, "A coastal radar system for tsunami warning," *Remote Sens. of Environment*, 8: 353-358, 1979.
- (16) B. J. Lipa and D. E. Barrick, "Least-squares methods for the extraction of surface currents from CODAR crossed-loop data: Application at ARSLOE," *IEEE J. Oceanic Engineering*, Vol. OE-8, No. 4, pp. 226-253, 1983.
- (17) B. J. Lipa, D. E. Barrick, J. Bourq and B. B. Nyden, "HF radar detection of tsunamis," *J. Oceanography*, vol. 62, pp. 705-716, 2006.
- (18) B. Lipa, B. Nyden, D. S. Ullman, and E. Terrill, "SeaSonde radial velocities: Derivation and internal consistency," *IEEE J. OE*, vol. 31, No.4, pp. 850-861, October 2006.
- (19) B. Lipa, D. Barrick, S. Satoh, Y. Ishikawa, T. Awaji, J. Largier, and N. Garfield, "Japan tsunami current flows observed by HF radars on two continents," *Remote Sensing*, 3, pp.1663-1679, August 2011.
- (20) D. Barrick and B. Lipa, "Japan tsunami detected by HF radars on two continents," *IEEE Ocean-2011*, Sept. 2011.
- (21) K.-W. Gurgel, G. Antonischki, H.-H. Essen, and T. Schlick, "Wellen radar (WERA) : a new ground-wave HF radar for ocean remote sensing," *Coast. Eng.*, vol. 37, pp. 219-234, 1999.
- (22) A. Dzvonkovskaya and K.-W. Gurgel, "Future contribution of HF radar WERA to tsunami early warning systems," *Euro. J. Navigation*, vol. 7, No. 2, pp.17-23, Aug. 2009.
- (23) A. Dzvonkovskaya, D. Figueroa, K.-W. Gurgel, H. Rohling, and T. Schlick, "HF radar observation of a tsunami near Chile after the recent great earthquake in Japan," *Int. Radar Symp. 2011*, September 7-9, 2011.
- (24) German Indonesian Tsunami Early Warning System (GITEWS) . [www.gitews.org/index.php?id=23&L=1](http://www.gitews.org/index.php?id=23&L=1)
- (25) H. Hinata, S. Fujii, K. Furukawa, T. Kataoka, M. Miyata, T. Kobayashi, M. Mizutani, T. Kokai, and N. Kanatsu, "Propagating tsunami wave and subsequent response signals detected by HF radar in the Kii Channel, Japan," *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 95, pp.268-273, 2011.
- (26) M. L. Heron, A. Prytz, S. F. Heron, T. Helzel, T. Schlick, D. J. M. Greenslade, E. Schulz, and W. J. Skirving, "Tsunami observation by coastal ocean radar," *Int. J. Remote sensing*, vol. 29, No. 21, pp. 6347-6359, 10 November 2008.

- (27) K. Najita, P. F. Weaver, and P. C. Yuen, "a tsunami warning system using an ionospheric technique," Proc. IEEE, vol. 62, No. 5, pp. 563-567, May 1974.

# 船舶用レーダー波浪観測装置

日本無線株式会社

平山 圭一

馬場 満徳

## 1 はじめに

一般に、航海に使用される船舶用レーダー装置では、船舶やブイなどの識別が主目的であるため、海面からの反射波（シークラッタ）を適切に除去することが性能を決定する重要なファクターとなっているが、ここで紹介するレーダー波浪解析装置は、そのシークラッタを解析し、波浪状況の判断基準となる、波向、波長、波速、波高をリアルタイムで算出して画面上に表示すると共に、これらの解析結果を出力するものである。

波浪情報は、船舶の安全かつ経済的な運航にとって必要不可欠なものであり、また、海洋環境に関する情報としても重要である。近年、船舶が排出するCO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>などの削減の研究に伴い、きめ細かな波浪状況の把握も求められている。しかし、一般に商船では乗組員の目視観測に頼らざるを得ないため精度やばらつきの点で問題があり、また、夜間の計測はむずかしい。

日本無線は、レーダービデオ信号を用いた波浪解析の研究を長年手がけ、2004年から陸上に設置した波浪解析装置を製品化した。本稿では、その技術をベースにして、移動体である船舶での波浪解析を可能にしたレーダー波浪観測装置の概要について報告する。

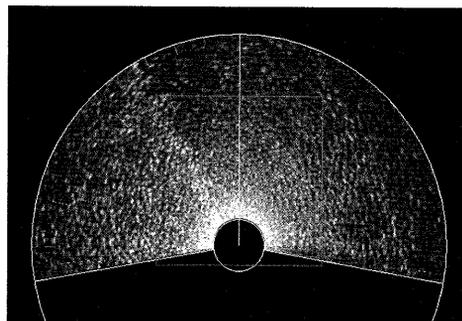


図1 シークラッタ

## 2 装置の概要と構成

### 2.1 装置の概要

レーダー波浪観測装置は、一般の船舶用レーダーをセンサとして使用している。レーダーで波浪を観測すると、図1に示すようにシークラッタが縞模様となって表示される。

本装置で行っている波浪処理は、そのシークラッタに対し、2次元FFT、クロススペクトルおよびスペクトル積分等の演算処理を行うことにより波向・波長・波速・波高を算出する。

### 2.2 装置の構成

船舶搭載型であるレーダー波浪観測装置は、船舶用Xバンドレーダーと波浪解析装置から構成されている、そのシステム構成を図2に示す。各部の役割は以下のようになっている。

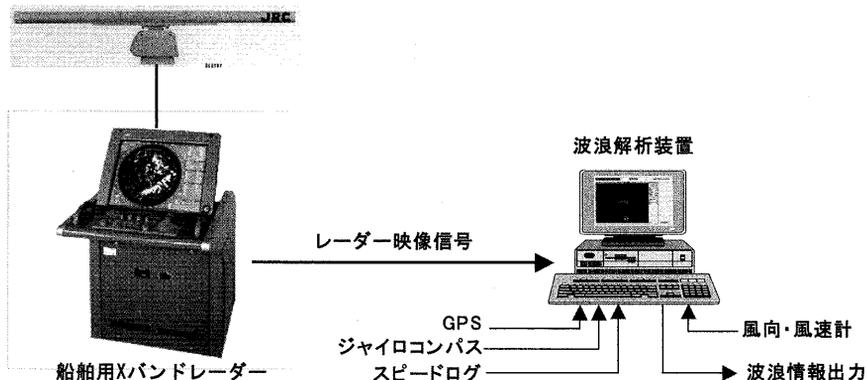


図2 船舶用レーダー波浪観測装置のシステム構成

■ 船舶用Xバンドレーダー

9GHz帯の電波を輻射し、海面で反射した電波を受信して、映像信号として波浪解析装置へ送る。

■ 波浪解析装置

レーダーから送られてきた映像信号を内蔵のビデオ取込みボードで受け、解析処理を行ない波向、波長、波速、波高を算出する。

■ 入力信号

● GPS航法装置

GPSから送られてくる正確な時刻を入力し、解析装置の観測時刻を補正する。

● ジャイロコンパス

船首方位を取得し、波浪解析時に船舶の移動補正を行なう。

● スピードログ

対水速度を取得し、波浪解析時に船舶の移動補正を行なう。

● 風向・風速計

算出した波浪情報を分析する際の参考情報として用いる（必須情報ではない）。

3 波浪解析装置の表示画面

図3に波浪解析装置の表示画面例を示す。波浪解析装置は、一辺が1,920mの解析エリア内のシークラッタについて解析処理を行う。

レーダー映像はヘッドアップモードで表示しており、自船後方の映像は、船が走ったことによってできる波の影響を避けるために、解析の対象からはずしている。

波高は有義波高を示している。また、レーダー映像の外側に50m間隔で同心円を表示しており、その上に表示された楕円形のマーカーの位置により波長が示される。そのマーカーは解析によって算出された波向きも示している。また、四角形のマーカーは、レーダー映像の相互相関によって導かれた波向きを示している。波向はすべて船首方位を基準とした相対波向である。

4 波浪解析処理<sup>(1)(2)</sup>

波浪は、空中線が1回転する時間（2～3秒）で移動するので、この連続したレーダー画像を1回転毎に集録し、時間、空間周波数解析を行い、波浪の波数と周期の関係か

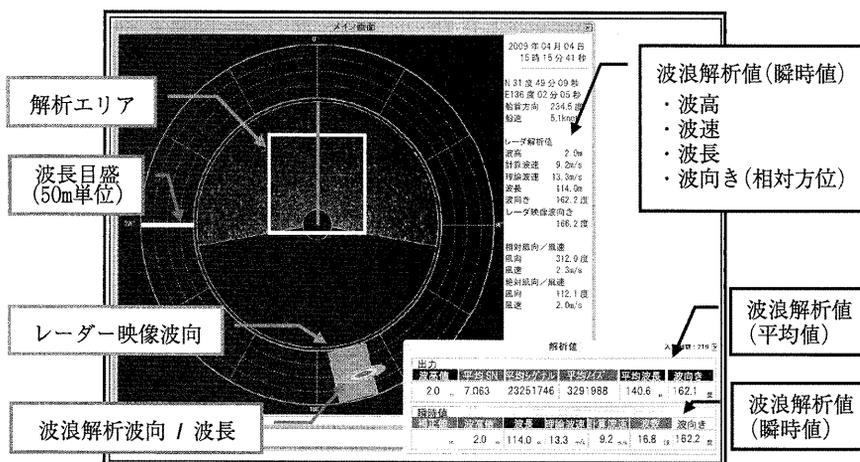


図3 波浪解析装置の表示画面例

ら実在する波浪を抽出して波浪の方向スペクトルおよび波高等を求める。図4に波浪解析処理フローを示す。

(1) 波浪測定海域

波浪処理は、波長40m程度の波から100～480m程度のうねりを対象とした解析性能を得るため1メッシュ7.5m×7.5mの256×256メッシュ、一辺1,920mの2次元領域を波浪測定海域とする。

(2) 受信信号の読み込み

送信パルス毎に受信するアナログのレーダービデオ信号をデジタル変換し、空中線の方位角信号および距離ゲート信号と共にメモリに格納する。

(3) 近距離エコーの抑圧

レーダービデオ信号の振幅成分から直流要素を取り除き、波の変動を強調する処理を行う。

(4) 極座標→直交座標変換

直流成分除去後のレーダー受信信号を空中線の方位角および距離ゲートから換算した波浪測定2次元領域の各々の座標

に格納する。

(5) 2次元FFT処理

格納したレーダー受信信号を2次元FFT処理により時間領域から周波数変換し、スペクトルを保存する。

(6) クロススペクトル・波浪計算

空中線1回転毎の2次元FFT スペクトルからクロススペクトルを計算する。このクロススペクトルと偏角から各波長のパワーと計算波速を算出する。波浪計算は、波長と重力加速度から求める理論的な波速とクロススペクトルの計算波速の比から波浪スペクトルとノイズスペクトルを分離し、分離したスペクトルから波向、波長、波速、波高の計算を行う。

(7) スペクトル積分・移動平均

2分間の移動平均値として、クロススペクトル50回分の積分によるSN比向上、うねり検出補正、波浪計算および移動平均を施し、品質の高い積算平均値とした上で波浪解析出力とする。尚、波高については、実験式から算出している。

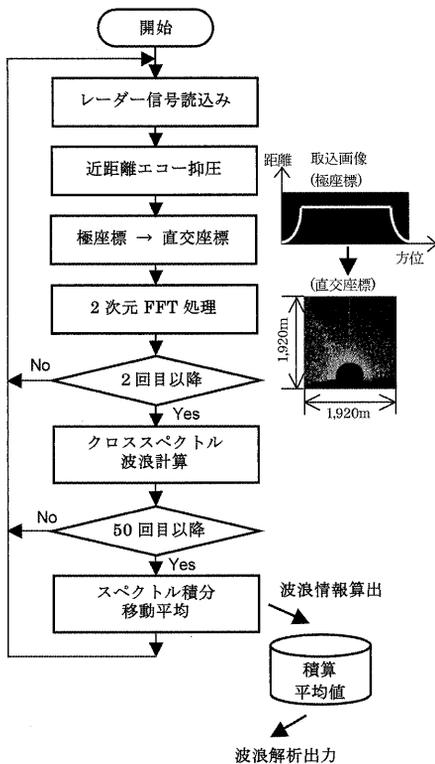


図4 波浪解析処理フロー

## 5 装置の主要仕様と出力および記録データ

### 5.1 Xバンドレーダー

以下にレーダーの諸元を示す。

- 水平ビーム幅：1.2°以下
- 垂直ビーム幅：25°以下
- 空中線回転数：24rpm
- 送信出力：10kW以上
- 繰返周波数：1,900Hz以上
- 送信パルス幅：約80nsec
- 空中線高さ：30m以上

### 5.2 波浪解析装置

以下に解析装置の諸元を示す。

- 計測範囲

距離：3.8km以内

方位：約190°

- 処理範囲：1,920×1,920m
- 解析対象波高：1m以上
- 解析対象波長：40m以上
- 解析出力
  - 有義波高 (m)
  - 相対波向き (°)
  - 波速 (m/sec)
  - 波長 (m)

尚、波浪を計測する際には、Xバンドレーダーのレンジを1.5NM、送信パルスをショートパルスに設定する必要がある。航海用のレーダーとは別に波浪観測専用にもう1台Xバンドレーダーを装備することを推奨する。

### 5.3 出力データと記録データ

波高、波向、波長、波速は、波浪解析結果として、2分ごとにシリアルデータが出力される。同時に、ハードディスクに記憶される。また、図5に示すような二次元波浪スペクトルデータをCSV (Comma

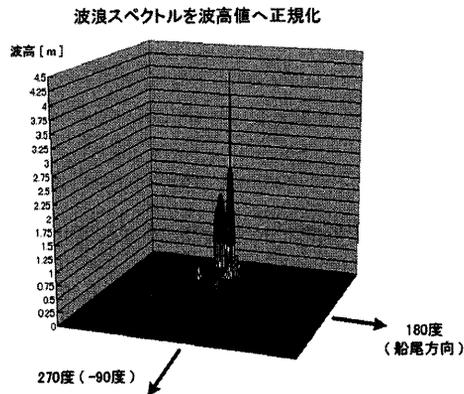


図5 二次元波浪スペクトル

Separated Values) 形式ファイルで2分ごとにハードディスクに記憶する。

## 6 波浪観測装置の観測例

レーダー波浪観測装置で観測した例を紹介する。3月から4月までの期間、コンテナ船に波浪解析装置を搭載し観測を行なった。観測海域は、ヨーロッパ - パナマ運河 - アメリカ西岸 - 日本 という航路である。実験期間中、データをハードディスクに記録し、実験終了後、陸上にて解析処理を行ない目視によって測定した値と解析結果の比較を行なった。図6に波高、図7に波向の目視観測と解析結果の相関グラフを示す。波高、波向ともに概ね良好な相関関係が得られた。また、図8に目視観測と解析結果を時系列に並べ比較したグラフを示

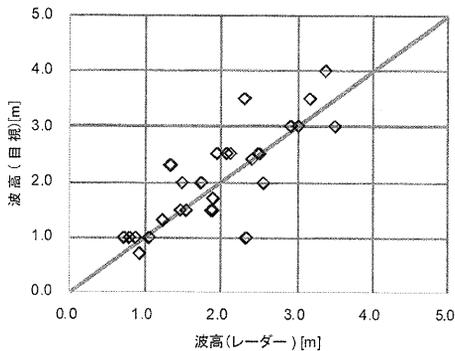


図6 目視波高と解析波高の相関

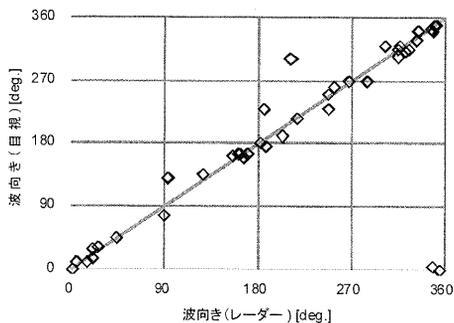


図7 目視波向きと解析波向きの相関

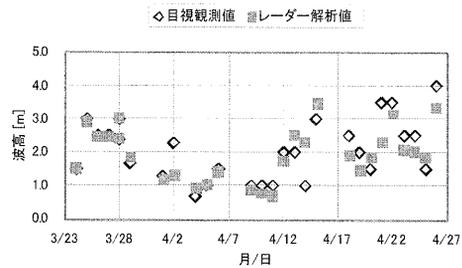


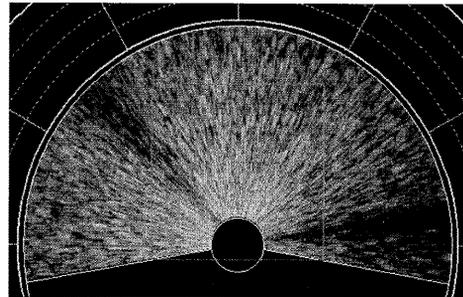
図8 目視波高と解析波高との比較

す。海域によって値が異なる場所もあるがこちらも概ね一致した結果となっていることがわかる。

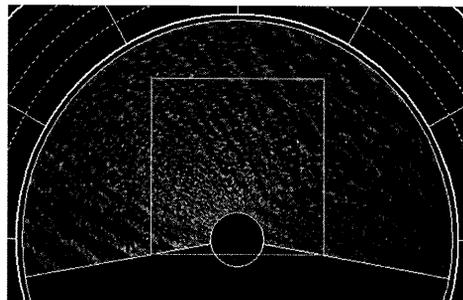
## 7 レーダーによる波浪計測の課題

現状、レーダーを用いた波浪計測には以下のような課題がある。

- 航行監視用のレーダーを波浪観測にも



12NM の場合



1.5NM の場合

図9 レーダーレンジの違いによる表示例

ちいることができるが、レンジを1.5NMにしなればならず、安全航行上の点から常時計測がむずかしい。常時計測する場合は、もう一台レーダーを装備する必要がある。図9に12NMレンジと1.5NMレンジでの表示例を示す。この図からも明らかなように12NMレンジでは、レーダーの出力パルスが長くなるため、分解能が悪くなり波をとらえることができない。

- 雨雲の影響を受けると図10のように波が隠れ波浪計測の精度が落ちる。

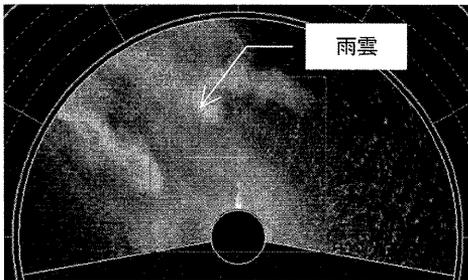


図10 雨雲による表示例

- うねりの計測がむずかしい。
- 正しい波高計測のためにパラメータの調整が必要である。

## 8 おわりに

本装置の実証実験において、目視波高、波向きと比較し良好な相関結果が得られ、レーダーを用いた波浪観測が有効であることを確認できた。しかしながら、7章に示したような課題もあり、今後それらの課題を解決するため、他のセンサから得られる情報も有効に活用し、継続的に評価を行ない、更なる精度の向上を図る。そしてリアルタイムで得られる波浪情報を「安全運航」、「燃費向上」などの面から有効に利用

できないかの検討も行なっていきたい。

## 謝辞

レーダー波浪観測データの収集、使用に際して、株式会社商船三井殿ならびにユニバーサル造船株式会社殿にご協力を賜りました。ここに厚く御礼申し上げますと共に、関係各位に深く感謝いたします。

## 参考文献

- (1) 馬場満徳・板垣隆博・高橋明彦・荒井文男・佐藤公規・荒井秀伸：レーダー波浪観測装置, 日本無線技報, No.48, 2005, pp.58-61
- (2) 平山圭一・馬場満徳：船舶用レーダー波浪観測装置, 日本無線技報, No.59, 2010, pp.30-33

# 特別研究会 宇宙航空研究開発機構相模原キャンパスの見学 及び講演 小型ソーラー電力セイル実証機「IKAROS」の聴講

電波航法研究会事務局

堀川 剛 司

## 1 はじめに

平成23年11月11日に、電波航法研究会の特別研究会を実施した。本年は、23名が神奈川県相模原市にある独立行政法人宇宙航空研究開発機構相模原キャンパスの見学（午前）及び小型ソーラー電力セイル実証機「IKAROS」の講演（午後）を聴講した。

## 2 宇宙航空研究開発機構相模原キャンパスの見学

### 2.1 宇宙航空研究開発機構相模原キャンパスの紹介

特別研究会当日、雨模様のなか、科学推進部広報・普及係の平田氏が出迎えてくれた。案内された会議室で、宇宙航空研究開発機構（Japan Aerospace Exploration Agency : JAXA）の活動をまとめたビデオを見た後、平田氏からJAXAの活動紹介があった。

JAXAは2003年10月に宇宙科学研究所、航空宇宙技術研究所、宇宙開発事業団の三つの組織が統合して、宇宙航空分野の基礎研究から開発、利用に至るまで一貫して行うことのできる機関として設立された。特に相模原キャンパスは宇宙科学研究所が担っていた、太陽活動や月、惑星の成り立ちなど宇宙に関する謎の解明に取り組んでいる。また、次世代の宇宙科学を担う若い研究者や技術者の人材養成のための大学院教育も行っている。



写真1 JAXAの活動紹介を受ける参加者

相模原キャンパスでは毎日、展示室を一般公開しており、展示室には日本初の人工衛星「おおすみ」の1/2縮尺模型や小惑星探査機「はやぶさ」の原寸模型などが展示されていた。屋外にはM-Vロケットの実機模型とM-3SIIロケットの原寸模型も展示されており、宇宙に関心の無かった私でも説明を受けて展示物を見たことで、宇宙に興味を持つことができた。

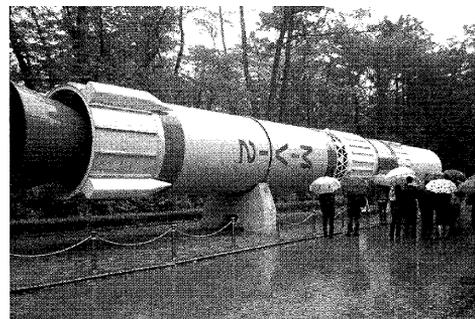


写真2 M-Vロケットの実機模型の展示

## 2.2 飛翔体環境試験棟の紹介

今回、JAXAのご好意により、通常の見学では入ることができない飛翔体環境試験棟の機械環境試験室と科学衛星組立室を見学することができた。

飛翔体環境試験棟は、科学衛星や観測ロケットを打ち上げるための一連の性能・機能を確認する試験を行う施設で、そのなかの機械環境試験室では振動、衝撃、動釣合などの試験が行われており、当日は観測ロケットの頭胴部の振動試験が行われるということで、JAXA職員2名が振動試験装置の調整を行っていた。通常、打ち上げた観測ロケットは垂直方向の振動が激しいことから、観測ロケットに関するものは垂直方向の振動試験が行われ、その振動試験は加速度7Gをかけた状態で5Hzから2kHzのランダム振動を80秒間かけるものであると説明があり、頭胴部の振動試験が見られると楽しみに待っていたが、見学時間内には行われず、見るができなかった。

科学衛星組立室は科学衛星や探査機を組み立てるところで、過去には金星探査機「あかつき」や小惑星探査機「はやぶさ」が組み立てられた。室内はクラス10万のクリーンルームに保たれており、見学時は作業員が防塵服を着て、水星磁気圏探査機（Mercury Magnetospheric Orbiter：MMO）で使用する電線ケーブルの組み立てを行っていた。水星磁気圏探査機（MMO）は2014年に打ち上げられ、2020年に水星に到着し、水星の磁場を観測する予定となっている。探査機の活躍を祈ると共に、活躍時には相模原キャンパスでこの探査機が組み立てられていたことを伝えたい。

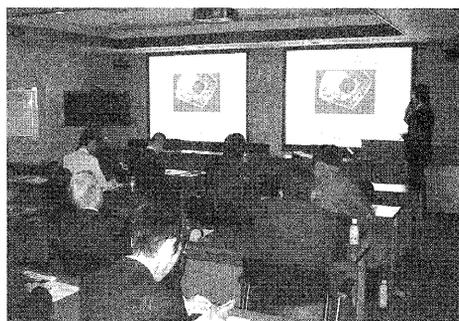


写真3 IKAROSの講演を聴講する参加者

## 3 小型ソーラー電力セイル実証機「IKAROS」の講演

午後からの特別研究会は、相模原キャンパスの会議室で、小型ソーラー電力セイル実証機「IKAROS」の作製に携わった月・惑星探査プログラムグループ研究開発室の船瀬開発員を講師に、IKAROSに関する講演を聴講した。

### 3.1 小型ソーラー電力セイル実証機「IKAROS」の紹介

小型ソーラー電力セイル実証機「IKAROS」（Interplanetary Kite-craft Accelerated by Radiation Of the Sun：IKAROS）は、「太陽光の圧力で加速する、惑星間航行ヨット」という意味で、2010年5月21日に金星探査機「あかつき」と共にH-II Aロケットで種子島宇宙センターから打ち上げられた。IKAROSの目的は、ソーラー電力セイルを用いた探査機の開発リスクを軽減するための技術実証であり、打ち上げから約6ヶ月間で実証のために用意していたミッションを達成した。これにより、世界で初めてソーラーセイルによる航行を実証し、高性能イオンエンジンなどを駆動させるための電力を確保する薄膜太陽電池

での発電も確認した。技術実証後は、新規の研究テーマを掲げて更なるデータを収集している。

また、薄膜太陽電池をソーラーセイルに取り付けていることから、IKAROSを小型ソーラーセイル実証機とは呼ばずに、小型ソーラー電力セイル実証機と呼ぶとのことである。

### 3.2 ソーラー電力セイルの概要

木星や土星などの外惑星探査をより効率的に行うには、燃料の節約と電力の確保の2つの課題を解決する必要があって、IKAROSの実証によって解決されたという。

今まではガスジェットエンジンの化学推進やイオンエンジンの電気推進で推進力を得ており、燃料が無くなれば推進力が得られなくなる問題があったが、ソーラーセイルであれば太陽光を受ける限り推進力が得られることが実証され、課題解決となった。因みにその推進力の大きさは、ソーラーセイルと太陽の距離が1天文単位\*である場合、セイル面積2,000㎡に対して2gの推進力が得られると計算されている。日常生活で感じる事のない太陽光圧が、宇宙開発では重要なものであることに感心し、宇宙の不思議を感じた。

JAXAは木星探査を計画しており、木星付近での太陽電池の発電量は地球での発電量の1/25となることから、電力の確保が課題となっていた。しかし今回、ソーラーセイルの一部に取り付けた薄膜太陽電池での発電が確認されたことから、今後は薄膜太陽電池の面積を増やすことで課題が解決となった。太陽電池といえば、住宅屋根に設



写真4 IKAROSの講演の様子

置するような重くて硬いイメージを思い浮かべるが、薄膜太陽電池が一体どのようなものか、機会があれば是非一度実際に見てみたい。

さらに講演では、技術実証のためIKAROSに用意されたミッションについて説明があった。さまざまなミッションの説明のなかで特にソーラーセイルの展開では、IKAROSの模型やパソコンによるCGが使われ、またソーラーセイルの素材であるポリイミド膜に直接触れることができ、深く印象に残っている。ポリイミド膜は厚さ7.5μmで、金箔のように薄くて光っていて、回転しているIKAROSの遠心力で、この膜が展開していくという説明も納得できた。このほかにもソーラーセイルによる軌道制御や姿勢制御の説明があったが、聴講して感じたことは、非常に薄い膜や太陽光圧という微々たる力を利用していることから、ソーラーセイルの展開で8日間もかかったことで分かる通り、IKAROSに動作をひとつさせるにも綿密な計算と長い作業時間が必要であると感じた。

\*地球と太陽間の平均距離を1とする単位。1天文単位は約1.5億キロメートル

### 3.3 ソーラー電力セイルの将来

JAXAでは、2010年代後半に高性能イオンエンジンを搭載した直径50m級のソーラー電力セイル探査機を打ち上げて、木星とトロヤ群小惑星を探査する計画を立てている。午前中に見学した水星磁気圏探査機(MMO)と同様に、探査機の活躍を祈ると共に、この講演で教えていただいたソーラーセイルの仕組みを友人等に伝えたい。

## 4 おわりに

今回の特別研究会は、施設見学では通常見られない場所を見学させていただき、また小型ソーラー電力セイル実証機「IKAROS」の講演では参加者全員から非常に分かりやすかったとの声があり、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、講演を開催してくださいました宇宙航空研究開発機構の皆様にご心より御礼を申し上げます。

### 宇宙航空研究開発機構 相模原キャンパス

・所在地

〒252-5210

神奈川県相模原市中央区由野台3-1-1

・ホームページ

<http://www.jaxa.jp>

・展示室の見学時間

午前9:45～午後5:30

# 電波航法研究会 平成23年度事業報告

## Record of work carried out by the Japanese Committee for Radio Aids to Navigation in fiscal 2011

電波航法研究会事務局  
Secretariat office of the JACRAN

### 総会

平成23年度総会は、平成23年5月13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92名のうち、出席者17名、委任状提出者46名の計63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22年度事業報告が事務局により行われた。
2. 平成22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23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23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23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23年5月13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、ATR適応コミュニケーション研究所スマートネットワーク研究室長 三浦龍氏から「安全運転支援のための車々間通信～高密度端末環境でのアクセス方式～」及び、電気通信大学特任教授 早川正士氏から「地震探知理論について」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23年8月26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、海上保安庁交通部計画運用課主任計画運用官 辰巳伸五氏から「海難防止のための新たな情報提供体制について」、前日本工業大学教授 渡辺康夫氏から「津波探知レーダの研究状況調査」及び、日本無線株式会社海上機器事業部海上機器技術部担当部長 平山圭一氏から「船舶用レーダー波浪観測装置」と題する講演が行われた。出席者は30名であった。

3. 第3回研究会は、平成24年2月17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、東京海洋大学特任教授 安田明生氏から「マルチGNSSの動向と我が国の取り組み」、東京海洋大学准教授 久保信明氏から「ソフトウェアGNSS受信機の開発」及び、独立行政法人電子航法研究所主幹研究員 坂井丈泰氏から「準天頂衛星「みちびき」のL1-SAIF信号」と題する講演が行われた。出席者は33名であった。

特別会員 37名

計 90名

#### 会員の異動

入会	推薦会員	渡辺 康夫
退会	正会員	小糸工業株式会社
退会	個人会員	大水 郁夫
退会	個人会員	柘植 茂二
退会	個人会員	宮地 正之

#### 特別研究会（見学会）

平成23年11月11日に神奈川県相模原市の独立行政法人宇宙航空研究開発機構を見学した。午後からは、小型ソーラー電力セル実証機「IKAROS」の講演を聴講した。参加者は23名であった。

#### 幹事会

幹事会は、平成23年4月22日、5月13日、8月26日、平成24年2月17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53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24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 19名

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

平成24年 3月18日 印 刷 2011

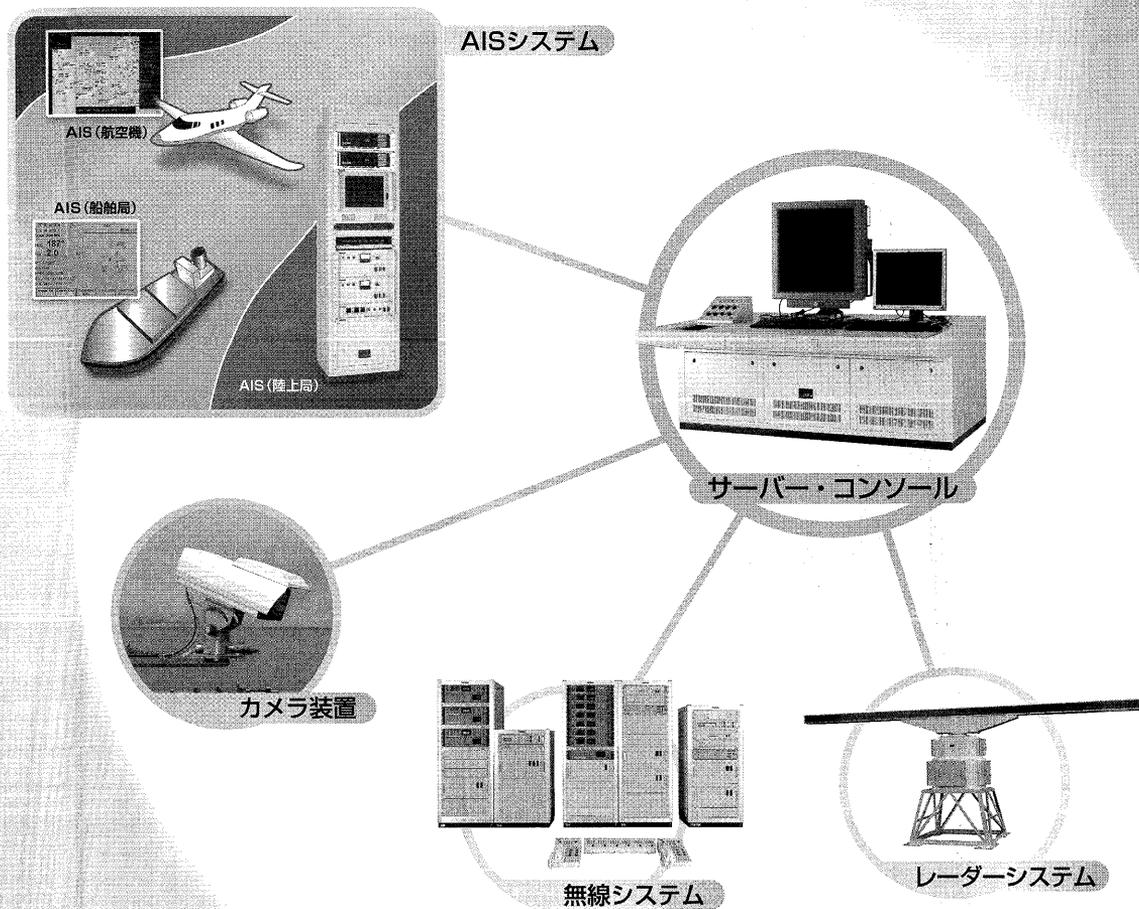
平成24年 3月25日 発 行 No.53

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

印 刷 東京都文京区小石川 1 - 3 - 7  
勝美印刷株式会社

---

## 海域の安全航行に貢献する 東京計器の監視システム



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/](http://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



# 航路標識のエキスパート“JANA”

安全で美しい海を

財団法人 日本航路標識協会

“JANA” *Japan Aids to Navigation Association*

海図・書誌・電子海図は私たちがサポートします!!

営業品目

- 日本版・英国版・米国版・中国版(海軍および海事局<MSA>)  
その他 諸国版海図および書誌・水路通報・トレーニング販売
- 新版・改版 ご案内、ならびに自動供給サービス(Auto Supply Service)
- 航海用電子海図(各国 ENC/AVCS/PRIMAR/JEPPESEN など)  
および電子書籍販売(ADP)
- 海図改補データ供給サービス
- 米国版海図 POD(Print On Demand) 供給サービス
- 国際海事機関(IMO) 刊行書誌販売
- ECDIS(電子海図表示情報システム)、およびECS(電子海図システム)販売

私たちは、次の機関の指定代理店  
です。安心の品質でお届けします。

- \* 海上保安庁海洋情報部
- \* 英国水路部(UKHO)
- \* ルウエー水路部(NHS/PRIMAR)
- \* 米国運輸省(NOAA)
- \* 米国国防省(NGA)
- \* 中国海軍航海保証部
- \* 国際海事機関(IMO) … など



**日本水路図誌株式会社**  
Japan Hydrographic Charts & Publications Co., Ltd

代表取締役 社長 伊藤 八壽彦

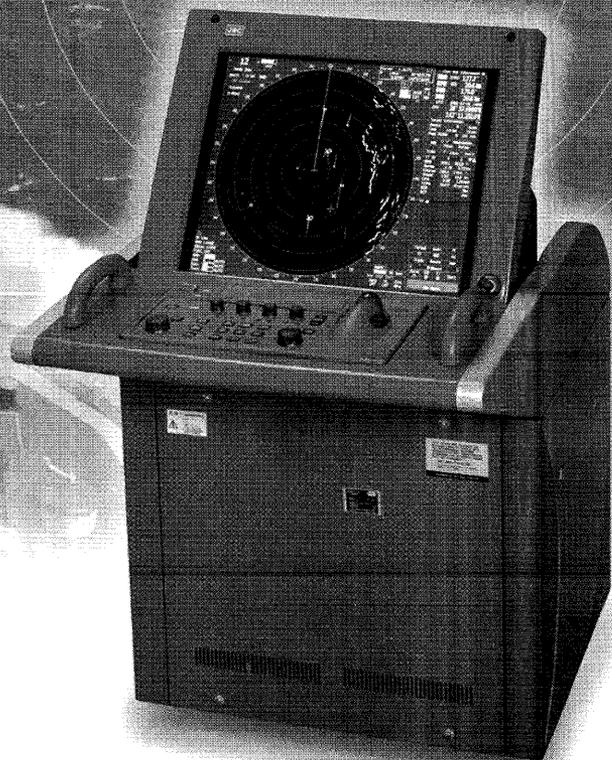
URL <http://www.jhchart.co.jp>

本店 東京都港区三田 3-11-36, 三田日東ビル 5F, 〒108-0073 / TEL.03-5439-1621 FAX.03-5439-1788  
営業所 神戸市中央区江戸町 85-1, ベイウイング神戸ビル8F, 〒650-0033 / TEL.078-331-4888 FAX.078-392-4684



積み重ねた経験と  
最先端の技術を結集。

新IMO性能基準に完全適合



世界の海に  
世界の船に

# ARPA付船舶用レーダー

## JMA-9100シリーズ

**JRC** 日本無線株式会社

<http://www.jrc.co.jp/>

海上機器営業部 〒167-8540 東京都杉並区荻窪4-30-16 藤澤ビル  
電話 (03) 6832-1807 (ダイヤルイン) ファックス (03) 6832-1844

平成二十四年三月十八日印刷  
平成二十四年三月二十五日発行

電  
波  
航  
法

電波航法研究会  
発行