

GPS の脆弱性

海上・港湾・航空技術研究所 電子航法研究所
航法システム領域 副領域長 坂井 丈泰

衛星航法システム GPS (Global Positioning System : 全地球測位システム) は、その名の通り地球上のどこでも自分の現在位置を知るためのシステムです。もともとは米軍が開発した軍用システムですが、一部の機能については民生用途に開放されており、幅広いユーザを得ているのは周知のとおりです。代表例はカーナビゲーションと言えますが、船舶や航空機の航法にも利用され、近年は多くの携帯電話にも内蔵されています。

GPS は便利な装置ですが、実はセキュリティ上の観点からは脆弱性があることが知られています。GPS の脆弱性を考えるうえでポイントとなる性質は次の 3 点です。

(1) 信号が微弱 : GPS 衛星が送信している電波の電力は、実は 100 ワットの電球と同じ程度です。2 万 km 彼方にある 1 個の電球ですから、GPS 受信機に入ってくる GPS 信号はたいへん微弱で、GPS 信号よりも強い電波を出すのは難しくありません。

(2) 信号の仕様が公知 : GPS 衛星が送信している民生用信号については仕様が公開されています。これにより GPS 受信機は誰でも製作できるわけですが、同様に誰でも GPS 信号を作り出すことができます。

(3) 送信者を確認できない : これは GPS 信号に限った問題ではありませんが、無線通信においては、特別な仕組みがない限り受信した信号を誰が送信しているのかわかりません。GPS 信号の内容は公知で、送信者を確認するための仕組みもありませんので、GPS 衛星以外の誰かが GPS 信号を偽造していても、受信機はそれと知ることができません。

こうした脆弱性により不具合を生じるシナリオとしては、意図しない原因によるものもありますが、意図的な（悪意の）攻撃も含めて次のように整理できます。

(1) 意図しない原因によるもの

2007 年 1 月、米国サンディエゴ市一帯で GPS が突然利用できなくなりました。原因調査の結果、海軍船舶の通信機に不具合があり、GPS が使用している周波数帯域(1.6GHz 帯)に不要な電波を放射していたことが判明しました。原因はこの通信機の不具合ですが、問題はこの程度のことで広範囲に GPS を使用できなくなってしまった事実といえます。

このような意図しない電波による影響は、干渉（interference）と呼ばれます。数年前にドイツの空港でやはり GPS が異常な位置を示す事例が報告され、この原因は航空機格納庫に取り付けられていた GPS リピータによる電波が漏れていたことでした。リピータというのは、屋内でも GPS を利用できるようにするため、屋外のアンテナで受信した GPS 信号を屋内に再送信するものです（図 1）。リピータによる信号を受信した GPS 受信機はすべて、リピータの受信アンテナの位置を示すことになります。電波は目に見えませんが、こうした事象が起きていても当事者にはわからない場合があります、原因調査には専用の機材と多くの手間がかかります。最近では、外国製のウェブカメラによる干渉の例があります。

（２）意図的な妨害

次に、何らかの意図をもって GPS を利用できなくする場合があります。2010 年頃から現在にかけて、韓国のソウル周辺で航空機が GPS を使用できなくなる事例がたびたび報告されています。影響範囲は次第に拡大してきており、北朝鮮による妨害活動だと言われています。

米国では、しばらく前まで PPD（Personal Privacy Device）と称して GPS ジャマーが市販されていました（図 2）。これは GPS が使用している周波数帯で意図的な妨害波を発するものです。例えば、運送業では運行管理に GPS が使われることがありますが、これを嫌う運転手が自車の GPS を妨害して使えないようにするのです（このため、安価な GPS ジャマーはシガレットソケットに挿し込むタイプが多いようです）。前述のとおり GPS の電波は微弱ですから、妨害（jamming）するのは簡単です。航空機が GPS を使用する場合の危険性などを考慮して、現在はこのような機器は米国でも違法となっています。

妨害波が強いほど広い範囲の GPS 受信機を妨害できますが、一方で送信源を特定することは容易になります。発見されないためには、なるべく微弱な電波を使用するのが有効です。電波の形式によっても GPS 受信機に対する影響は異なってきますが、もっとも効率的に GPS 受信機を誤動作させることができるのは、実は GPS 信号そのものです。単純な形式の電波よりも、本物の GPS 信号を使えば微弱な電波でも効果的に GPS を妨害できます。先のリピータの例もある通りで、これは技術的にさほど難しいことはありません。GPS 信号をそのまま、あるいは多少の細工をして再送信することによる妨害を、ミーコニング（meaconing）と呼びます。

最近では携帯通信機器の開発向けに RF レコーダが市販されています。これは無線信号を直接受信・記録し、さらに再生することができる機材ですから、過去の（他の場所の）GPS 信号を記録しておけばいつでも再生できます。送信用のアンテナを付ければ、ミーコニングデバイスとして利用できるようになります。

（３）なりすまし

さらに手の込んだ妨害はスプーフィング（spoofing：なりすまし）攻撃と呼ばれます。これは、偽物の GPS 信号を作り出して、GPS 受信機を欺くことを指します。GPS 衛星が送信している民生用信号の仕様は前述の通り公知ですから、GPS 受信機は誰でも製作できますが、同様に誰でも GPS 信号を作り出すことができます。GPS 信号では送信者を確認する仕組み也没有ありません。

実際に GPS シミュレータと呼ばれる製品もありますし、最近は図 3 のような市販の安価（数万円程度）なソフトウェア無線デバイスで GPS シミュレータを製作することが可能になっています。図 4 は、実験用に試作したシミュレータを使って GPS 受信機を欺いた例です。実験室にいるのに GPS 受信機は石垣島の位置を示し、次の瞬間には東京湾内を円状に移動し、さらに突然仙台空港から離陸しました。時刻はほとんど変わっていないのですから、実際にはこのような移動は不可能なのですが、特に何のエラーになることもなく、シミュレータが生成した GPS 信号がそのまま処理され、現在位置として出力されました（すべての GPS 受信機でこのようになるとは限りません）。

広い範囲にわたるスプーフィングは難しいのですが、攻撃対象を絞ればスプーフィングは可能です。無人機に対するスプーフィング実験も行われていますし、スプーフィングにより船舶を誤った進路に誘導したとの実験結果も報告されています。最近では、実際に黒海周辺で多くのスプーフィングとみられる現象が報告されており、航空機の運航に影響しています。

（４）位置情報の偽装

以上は GPS 信号に対する干渉あるいは妨害でした、GPS 受信機の出力に対して意図的な操作を加える手法も知られています。GPS 受信機が出力する位置情報は標準フォーマット（NMEA-0183 等）によることが多く、インターフェースもシリアル通信あるいはイーサネットによるものが普通ですから、物理的な偽装は可能です。

最近では、ソフトウェアによる偽装も知られるようになりました。例えば、位置情報ゲーム「ポケモン Go」では、スマートフォン内部の API（application programming interface）を操作して現在位置が偽装されることがありました。もともと、GPS 情報を使用するアプリケーションの開発者向けに位置情報を操作するソフトウェアもありますから、このようなことは比較的容易に可能です。特に高価なハードウェアを必要とするわけでもありませんから、位置情報を使用するアプリケーションの運用には注意が必要といえるでしょう。



図 1 GPS リピータの製品例（イネーブラー株式会社）



図 2 市販されていた PPD の例



図 3 ソフトウェア無線デバイス（nuand 社 bladeRF）



図4 スプーフィングの例

GNSS とは？

GNSS は Global Navigation Satellite System の略称で日本語では全球測位衛星システム、人工衛星を利用して位置を把握するシステムの総称です。

よく知られている GPS も、次の章で紹介される「みちびき」も GNSS の一種で、米国や日本をはじめ、各国各機関が独自の GNSS を運用しています。

- ・ アメリカ GPS (Global Positioning System)
- ・ 日本 みちびき
- ・ EU Galileo
- ・ インド NavIC (Navigation Indian Constellation)
- ・ 中国 BNS (BeiDou Navigation System)
- ・ ロシア GLONASS

準天頂衛星システム「みちびき」による セキュリティ機能付き測位サービス（信号認証サービス）について

内閣府 宇宙開発戦略推進事務局 準天頂衛星システム戦略室 企画官 和田 弘人

1. セキュリティ機能付き測位サービスが必要とされる背景

コンピュータやスマートフォン、ワイヤレス通信・衛星通信といった ICT・ネットワークの進展で、世界のあらゆるモノ（人、製品、サービス、機関等）が常時接続されて、相互に作用するデジタルでコネクティッドな社会が到来しています。その中で、位置・航法・時刻（Positioning, Navigation and Timing）を提供する PNT サービスは、各客体の活動を支える不可欠な基盤情報・電子インフラとなっています。

我が国の準天頂衛星測位システム「みちびき」を含む各国の衛星測位サービスは、測位信号の精度と安定性の向上と共に、新たなサービスの拡張や対象エリアの拡大を進めています。一方でこれらを利用するユーザ環境下では、測位信号の脆弱性を悪用した「スプーフィング（なりすまし）」が社会課題になりつつあります。スプーフィングとは、図1のとおり偽の測位信号により GNSS 受信機を騙す行為であり、騙された受信機によるナビゲーションシステムは利用者に予期せぬ位置を伝えることとなります。このスプーフィングへの対策は、紛争地域に限らず平時における一般的な経済社会の中でも考慮すべきものとなりつつあります。これには、スプーフィングを実行するための機器が非常に安価に手に入るようになったことや、自動運転車両に対するスプーフィング実証事例報告などから、衛星運用側としてのセキュリティ対策の必要性が認識されたことから、内閣府は 2021 年度から開発に着手し、2023 年度の試験配信を経て、2024 年度から信号認証サービスを開始しました。



現在みちびきは、民生分野、公共分野それぞれにセキュリティ機能を付与したサービスを展開しています。なお、公共専用測位サービスは、政府が認めた高度な安全保障を担う公的機関（防衛省、海上保安庁）だけが利用できる秘匿・暗号化された信号（図2）を提供していますが、本稿では利用実証が進む民生分野のサービスの概要と取組事例を紹介します。

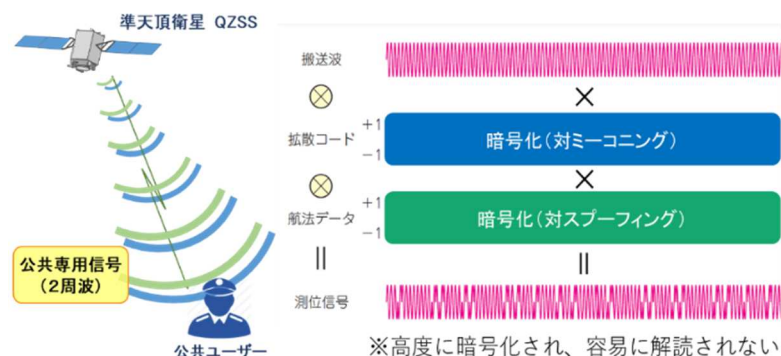
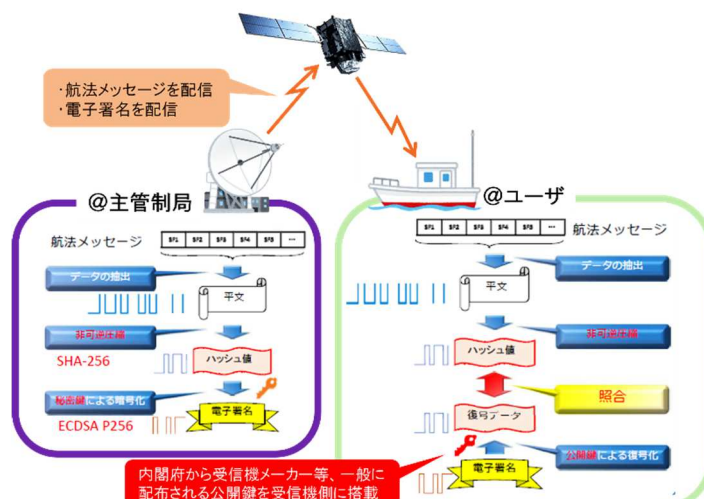


図2：ミーコニングとスプーフィングに耐性のある公共専用信号

2. みちびきが提供する信号認証サービスのしくみ

公共分野と異なり、民生分野で使われる測位信号の仕様は一般に公開されているため、第三者が偽の信号を生み出すことができる一方で、この偽の測位信号と実際の測位信号を区別する仕組みがありません。そこで信号認証サービスは図3に示すように、電子署名認証技術を活用し、測位信号の真正を検証できる仕組みを提供します。具体的には、みちびきの主管制局で、「秘密鍵」を用いて電子署名データを生成し、測位信号情報（航法メッセージ）に含め、みちびきの各衛星から配信します。



NMA方式の概要：

- ① みちびきの主管制局にて、航法メッセージからデータを抽出し、これに内閣府が厳重に管理する秘密鍵を用いて暗号化し、電子署名を作成する。
- ② 作成した電子署名を航法メッセージのすき間を利用し配信する。
- ③ ユーザー側で、航法メッセージから抽出したデータと電子署名を復号して得られたデータを照合し、一致すれば測位信号が正しく、欺瞞（ぎまん）されていないことが証明される。

図3：みちびきの信号認証サービスのしくみ

みちびきでは、測位信号（L1、L5、L1C）にその信号の発信者が内閣府であることを確認するための電子署名を埋め込みます。また、米国 GPS と欧州 Galileo の信号も認証対象とするため、その信号が GPS または Galileo から発信された信号であることを確認するための電子署名をみちびきの補強信号（L6）を用いて配信します。認証対象に、みちびきだけでなく GPS や Galileo も含めることで、現在のマルチ GNSS 測位環境下での位置と時刻情報取得の可用性を向上します。認証対象の具体的な航法メッセージを表 1 に示します。

測位ユーザ（GNSS 受信機）は、予め入手した公開鍵、受信した電子署名データ、航法メッセージ（ハッシュ値）を用いた演算処理により航法メッセージの改竄の有無を検証します。これによって当該測位信号が真正であることを確認できます。

この仕組みによって、ユーザは正当なマルチ GNSS 衛星（みちびき、GPS、Galileo）からの真の測位信号を識別することが可能となり、スプーフィング耐性を高めた測位サービスを利用することができます。

認証対象のGNSS	認証対象の航法メッセージ	備考
QZSS	LNAV (L1C/A、L1C/B) CNAV (L5) CNAV2 (L1C)	各航法メッセージに電子署名を含める
GPS	LNAV (L1C/A) CNAV (L5) CNAV2 (L1C)	QZSSのL6E信号にて航法メッセージに対応する電子署名を配信
Galileo	E1 b、E5a	

表 1：信号認証サービスが対象とする信号（航法メッセージ）

3. 信号認証サービスに関わる利用実証の取組

スプーフィングは、測位ユーザに対する外部からの妨害だけではなく、ユーザが自身の位置情報や経路を隠したい（自己欺瞞）場合にも用いられます。このため、信号認証サービスは、外部からの妨害活動への対抗策としての活用だけではなく、近年の消費者の環境問題への関心の高まりやフェアトレード等の観点から、製品の価値を比較し決定する上で、生産場所やその後の輸送経路に関わる情報の公開と透明性が求められる中、輸送経路の真正性を担保し、自己の記録の正当性を証明する場面での活用も見込まれます。

内閣府は信号認証サービスを活用したユースケース創出のため、企業による様々な場面における実証支援を行っています。例えば、現在政府が進める「デジタルライフライン全国総合整備計画」ではドローン輸送の社会実装に向けた取組が進んでいます。これらドローン輸送は予め定められた航路に沿った自律飛行を前提としており、航路の安全性・信頼性の向上のための方策の一つとして、信号認証サービスの利用が想定されます。株式会社コアは、

センチメートル級測位補強サービス（CLAS）による LTE 圏外でのドローンの自律飛行の実現と共に、信号認証機能を備えた GNSS 受信機の開発を行い、これを搭載することで、ドローン自身がスプーフィングを検知し、安全運航を継続するための実証実験を行いました（図 4）。これら実証により、信号認証サービスが自律飛行するドローンに対するスプーフィング攻撃によるセキュリティの脆弱性の低減に貢献できることを示しました。

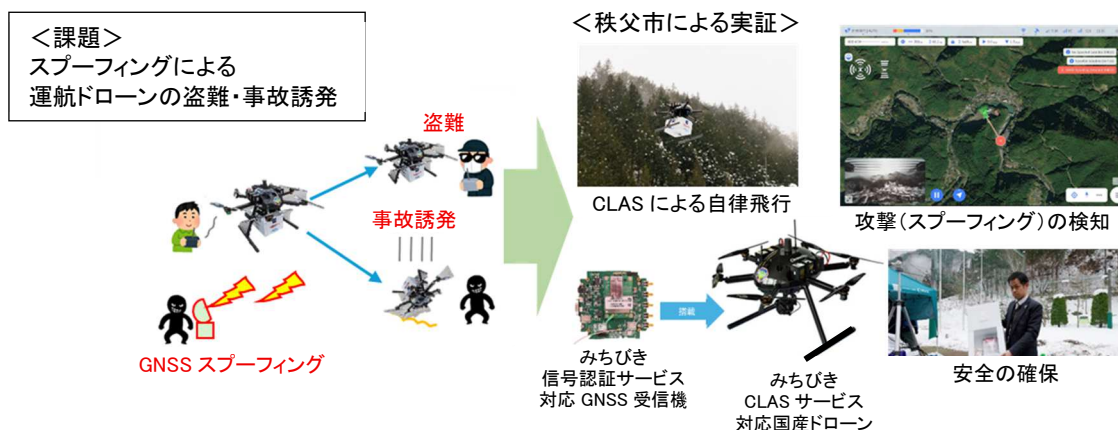


図 4：自律型ドローン輸送へのスプーフィング妨害の検知

自己の記録の正当性の証明が求められる現実の場面としては、例えば伐採した木材の流通に関して、どこの地域の山林で木材を伐採・加工し出荷が行われたか等の、合法性の確認に必要な情報の提供が必要になります。このため、証明に関わる活動の一貫・効率的な記録取得のため、伐採に関わる重機や運搬車両に信号認証サービス対応の受信機を搭載し、得られた位置と時刻情報をブロックチェーン技術と組み合わせることで、屋外での活動、伐採や運搬に関わる一連の活動の記録を、自己欺瞞が行われていない・非改竄の情報として提供するしくみの一部として活用する実証が行われています（図 5）。

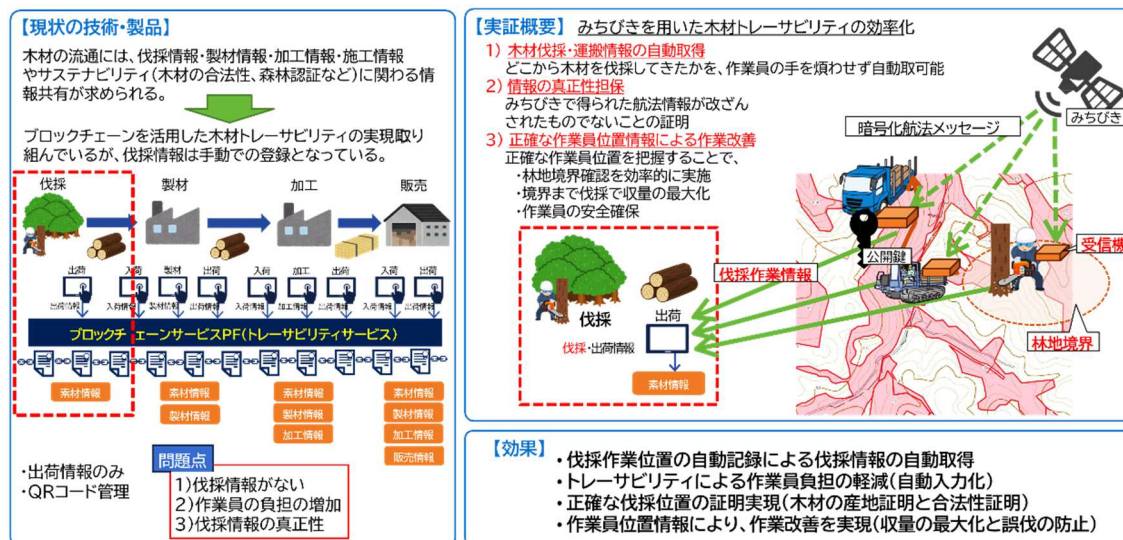


図 5：木材の搬出場所の記録による産地・生産証明

また海上での取組では、みちびきサービスの海外展開の一つとして、オーシャンソリューションテクノロジー株式会社がインドネシア海洋水産省へ、高精度測位と信号認証サービスを組み合わせた水産資源の管理のしくみ構築の提案を行い共同での実証を進めています（図6）。

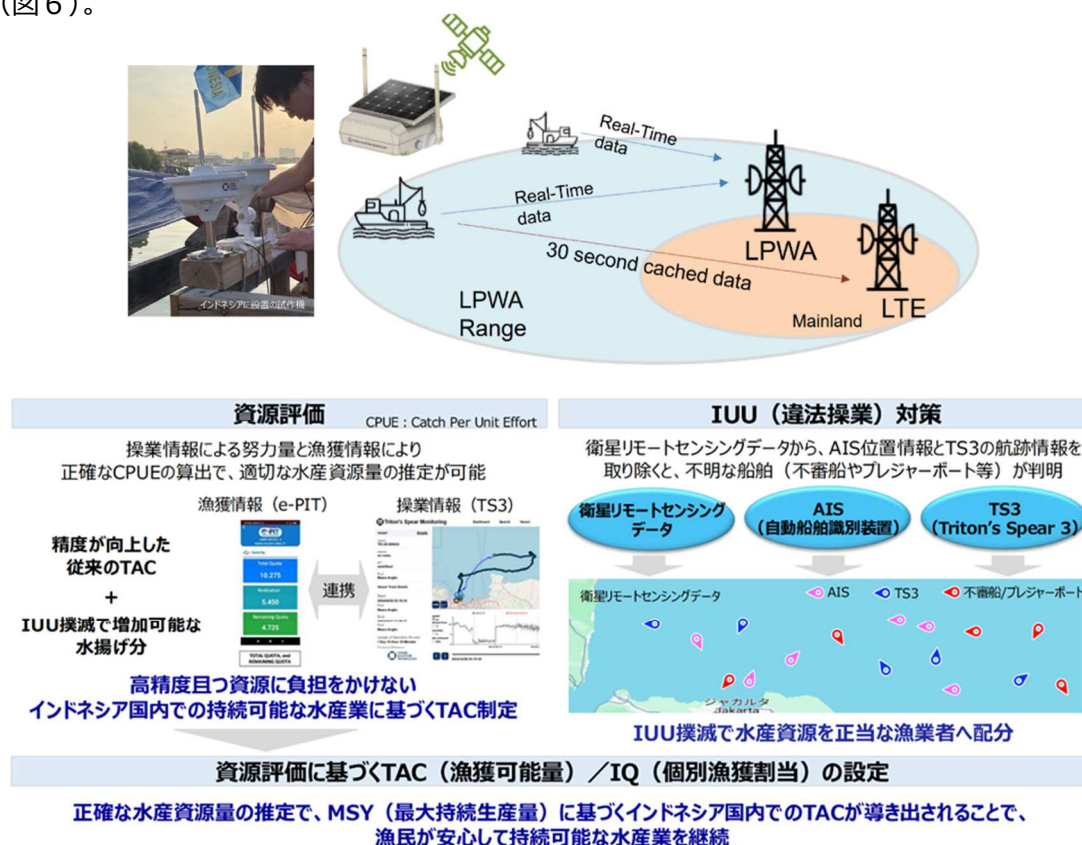


図6：漁船の航跡情報の管理による水産資源管理と違法操業等対策への適用

この取組の背景には、東南アジア各国の漁業現場における水産資源の評価や違法操業対策等を実施する際の、個別の漁船の操業実態の把握に関わるニーズがあります。これら多面的なニーズへの対応として、高精度測位と信号認証サービスを用い、VMS よりもリアルタイム・安価に高精度な漁船の位置・速度・時間等のデータを高頻度に収集、通信網を経由してクラウドへ格納し、漁業者や行政機関向けに操業データを提供するサービスの構築を目指しています。将来的に自国船籍の小～中型の漁船へみちびきのサービスに対応した安価なデータ送信機能付きのGNSS受信機の搭載を義務付けることで、違法操業の手段の一つである船舶の自己位置の隠蔽・欺瞞を監視・排除しつつ、高精度な航跡データから、許可された操業領域での詳細行動（船舶そのものの挙動解析により、漁法や労務時間の推定、瀬取りなど不審な動きの検出）や、船舶の漁港への入出港時間等の確認・証明に利用する等、水産資源管理のための基盤データの収集と違法操業対策の両面での活用を考えています。

4. みちびきの提供する信号認証サービスのこれから

将来のスマート社会において、みちびきが提供する高精度な位置と時刻の情報の安定的な提供は、今後本格的に社会実装が進む新たなインフラ・サービス、各種自律型のモビリティサービスの自動運転やドローン物流、ロードプライシングなどの発展と維持に寄与すると考えられますが、その際にユーザからは、みちびきを含めた GNSS 全体に対して、測位の高精度・安定化に加え、なりすまし以外の欺瞞信号等や妨害電波への抗たん性に対する安全・信頼性の確保と向上策も今まで以上に求められると考えられます。

現在の信号認証サービスの対象は GNSS に共通の測位信号を対象とする一方で、みちびき独自の測位補強サービス、CLAS のための信号 (L6D) は対象となっていません。そのため、CLAS メッセージに対しても 2026 年度を目途に、L6E 信号を活用した信号認証サービスの開始を目指しています。

現在、米国 GPS それ自体にはまだ信号認証機能がそなわっていない一方で、欧州 Galileo は、みちびき同様、2024 年より Galileo 衛星自身からの信号認証の配信を開始しています。また、Galileo の高精度測位補強情報においても信号認証情報を付与する動きがあり、各国 GNSS を共有して使えるマルチ受信機の開発負担を低減させていくため、みちびきの補強情報の信号認証と、欧州の Galileo とのそのフォーマットの互換性など、欧州との更なる連携を進めていく予定です。

参考サイト：

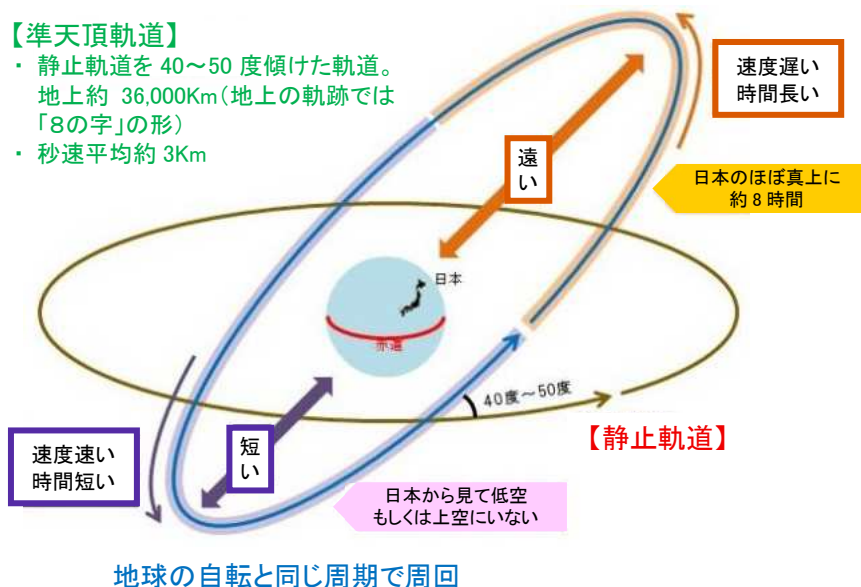
- ・ 衛星測位に関する取組方針（内閣府、2025）：
<https://www8.cao.go.jp/space/qzs/houshin/houshin.html>
- ・ みちびきを利用した実証事業：
<https://qzss.go.jp/ex-demo/>

みちびきの描く "8 の字軌道"（準天頂軌道）とは 【編集部】

人工衛星は地球の周りを、地球の引力と遠心力のバランスを保ちながら一定の軌道を描いて周回しています。そのうち、赤道上空を地球の自転と同じ方向・角速度で緯度を変えずに周回しているものもあり、これらは地球上からは止まって見えるため「静止衛星」と呼ばれています。ここまではなんとなく分かっているところですが、みちびきが描く「準天頂軌道」とはどんな軌道なのでしょう？ 以下は、本稿投稿者である宇宙開発戦略推進事務局準天頂衛星システム戦略室から頂いた資料を基に、編集部で作成したものです。

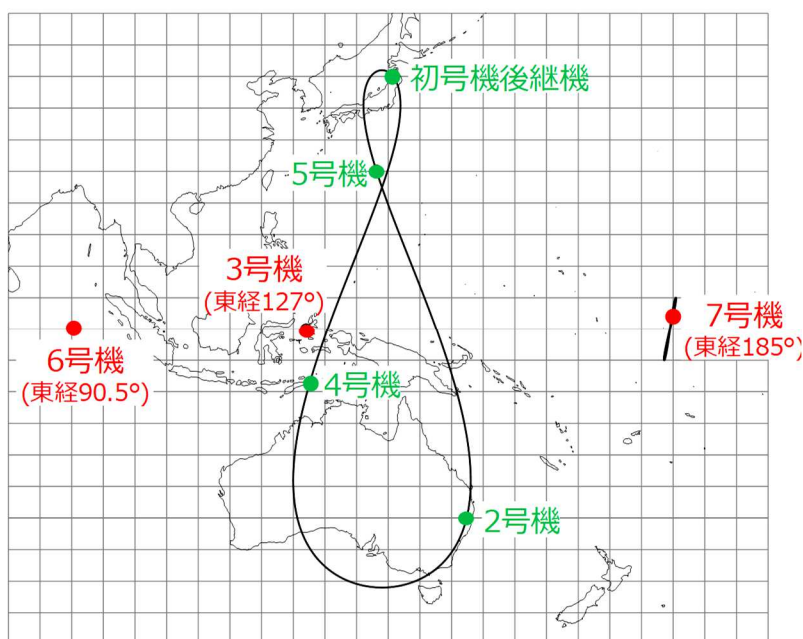
※ 本号が発刊される 12 月にみちびき 5 号機が、来年 2 月には 7 号機が打ち上げられ 7 機体制となります。以下はその前提で書かれています。（なお、みちびき 6 号機は今年 2 月に先行して打ち上げられています。）

実はみちびき全機が準天頂軌道を周回している訳ではなく、一部は静止軌道を周回しています。下の図は地球と準天頂軌道・静止軌道の位置関係を示したものです。



衛星は地球の自転と同期して周回し、常に日本上空（及び南方）を飛行しており、地上に投影された航跡は下の図のような8の字を描きます。（静止衛星は静止して見える）。

準天頂軌道は南半球に比べ北半球で地球から遠くなっているため、北半球にいるときは速度が遅く（ケプラーの第二法則*）、日本上空で長時間（約 8 時間）滞在するようになっています。衛星はオーストラリアの南まで南下しますが、高度 36,000 キロ上空を飛んでいるため東京以南では常時水平線上に見えます。



左下の図はみちびき各機の配置を示します。地上から見ると4機（緑）の衛星が準天頂軌道を8の字を描いて周回し、3機（赤）の衛星は赤道上空の決まった経度上に静止しています。南半球のほうが広いエリアをカバーしているように見えますが、これは先ほど述べた日本上空での滞在時間を延ばすために設定した軌道によるものです。

※ 準天頂軌道は、赤道面から40～50度の角度ですが、7号機はこの角度を小さくしています。このためわずかに南北に動くように見えます。厳密に言えば7号機は「準静止衛星」に分類されます。

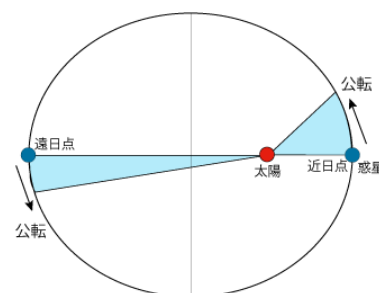
今までは測位に他国のGNSSが必要でしたが、みちびき7機体制になれば、みちびきだけで位置が求められるようになります。日本のセキュリティが高められたことはとても喜ばしいことです。



【ケプラーの第二法則*】

惑星と太陽を結ぶ線が一定時間に描く面積（水色の部分）は等しい。

- このため太陽から近い所では速く、遠い所では遅く動く。
- 面積速度一定の法則とも言う。



（クレジット：国立天文台）

右上の図の太陽を地球に、惑星をみちびきに置き換えると、みちびきは地球から近い位置では速く、遠い位置では遅く飛行します。みちびきの準天頂軌道は上図の「遠日点」を日本上空とすることで日本上空での滞在時間を長くすることができる訳です。

なぜ、日本上空での滞在時間を長くする必要があるのでしょうか？ それは、衛星が日本上空ではない（日本から見えるが水平線に近い）と、衛星からの発射された電波が長い大気圏を通過する間に劣化し、誤差の要因となるからです。このため質の高い位置情報を得るには、日本上空（測定者の真上近辺）に（4機以上の）衛星が存在していることが必要なのです。

準天頂衛星システム「みちびき」は準天頂軌道衛星、静止衛星、準静止衛星、計7機のベストな組み合わせで、効率良く日本とその周辺に電波を届けているのです。

進化する MSAS とメッセージ認証

国土交通省 航空局 航空管制技術調査官 中井谷 幸治

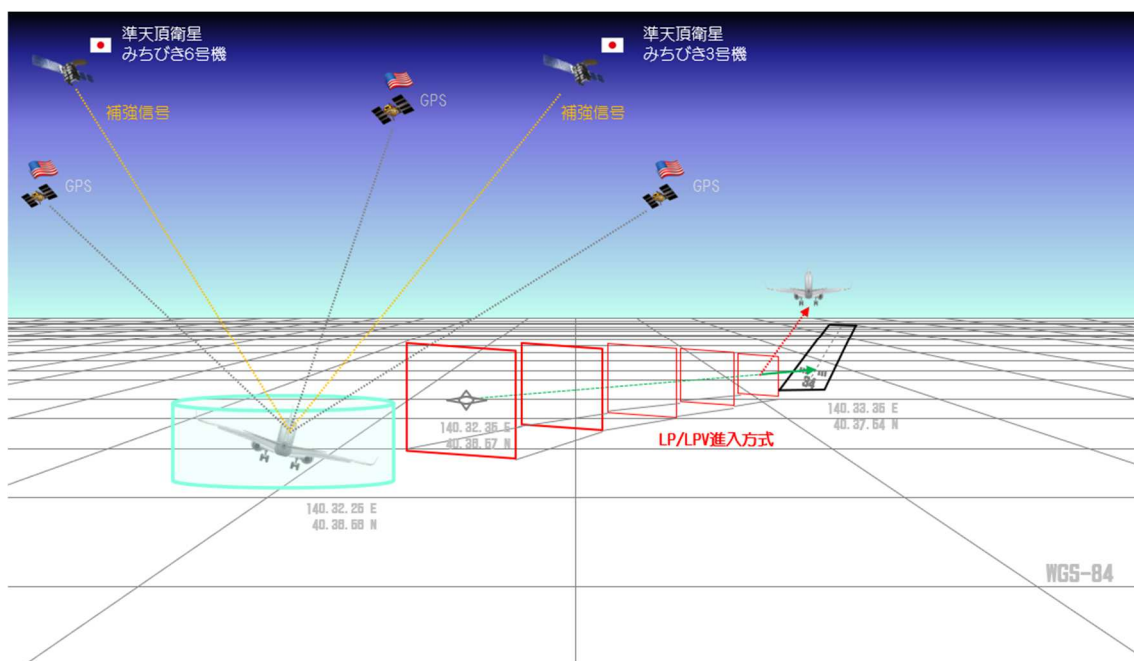
■はじめに

古来、生命体にとって「ナビゲーション」は極めて重要な問題で、自分の位置情報がわからなく、居住地に帰ることができなければ、生命体は命を落とす危険がありました。また、効率的に移動し、食料調達などの目的が達成できなければ、これもまた、命を落とす危険にさらされることを意味し、「ナビゲーション」能力は生命体の DNA に刷り込まれています。

他の生命体と違って、人間は、星の動きを把握できるようになり、移動範囲を飛躍的に拡大しました。これは天文学を基礎とした天文航法の発展によるものです。天文台では、大掛かりな装置で星の動きを観察し、その星の見え方に関する情報を紙に詰め込み、一方、船舶においては、天文台で作られた星の情報と、簡易な装置で星の観測を行い、位置情報を求め、時計を眺めながら地図と照らし合わせて航海を続けました。この天文台で作られた星の見え方に関する情報をアルマナックと呼びます。（今でも主要な天文台で作られています）

■究極のナビゲーション

1970 年頃に産声をあげた GPS は、星ではなく「人工の星」を利用しているもので、基本的な考え方は天文航法と変わりません。GPS の航法統制局で、人工衛星の動きを観察して、その人工衛星の見え方に関する情報（アルマナック）を、人工衛星から電波に乗せて地球に降らせています。しかも、極めて正確な時刻情報とともに。航空局が運用する MSAS は、その GPS を補強するシステムですので、究極の「ナビゲーション」という事になります。MSAS システムは、航空機が間違った位置情報を使っていないか GPS や測位誤差要因となる電離層を常に監視し、間違いを見つけたら（間違いではないかと判断したら）航空機に速やかに、確実に通知し、正確な位置情報のみを使ってもらうことで「位置情報の保証（インテグリティ）」を実現します。これにより、MSAS を用いた航空機の着陸が実現しています。MSAS システムは、GPS 測位の誤差要因を因数分解し、①GPS 軌道誤差、②GPS クロック誤差、③電離層誤差を区別してユーザーに伝えることで、広域を補強できる特徴を持っています。これは、日本及び周辺地域においてサービス提供が可能であることから、就航便数の少ない地方空港や離島空港においても、均一な着陸能力の提供ができることを意味します。これが意味するところは、経済合理性だけではなく社会的課題の解決に繋がる可能性を秘めているということです。

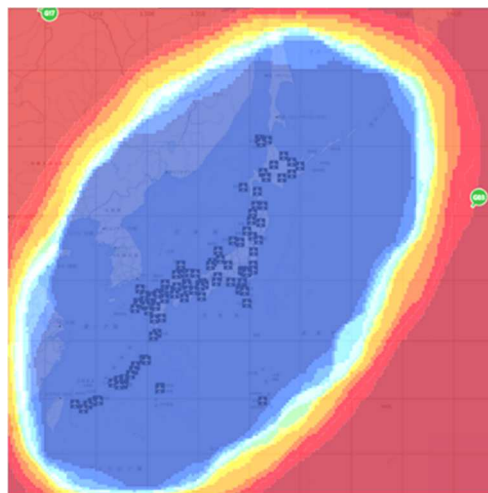


MSAS を用いた航空機の着陸イメージ

■ MSAS の M は「みちびき」の M

～ Michibiki Satellite-based Augmentation Service ～

広域を補強するために必要な伝達手段となる衛星として、準天頂衛星システム「みちびき」の3号機（127°E）、6号機（90.5°E）が使用されており、今後打ち上げられる7号機（太平洋上空）も使用予定となっています。電波は全地球表面積の半分程度のエリアで受信可能ですが、補強サービスエリアは、MSAS 監視局の配置場所に依存します。よって、所定の精度が得られるのは、監視局のある日本及び周辺地域となります。（実力値 水平精度 1.5m 程度、垂直精度 2m 程度 * 電離圏活動の活発なエリアはこの限りではありません）



MSAS サービスエリアイメージ

我が国の MSAS（エムサス）以外にも、北米 WAAS（ワース）、欧州 EGNOS（イグノス）、インド GAGAN（ガガン）、韓国 KASS（カス）が運用され、各々のサービスエリアにおいて GPS 補強サービスが提供されています。これらのサービスは相互運用性が確保されており、1つの受信機で、どのエリアでも、同じサービスが受けられます。長距離を移動する移動体にとっては特に重要な要素ですので、毎年、各国の担当が集まり相互運用性会議が開催され

ています。計画中のものとして、豪州・NZ の South PAN（サウспан）、中国の BDSBAS（ビーディーエスバス）、ロシア SDCM（エスディーシーエム）、アフリカ地域の ANGA（アングア）、パキスタンの Pak-SBAS（パックスバス）があり、2028 年頃から少しずつ運用に入るとの情報が示されています。これらのシステムは国際民間航空機関（ICAO）の SBAS（エスバス）標準を具現化したものになります。SBAS は、航空用途に開発されましたが、世界標準であることから、航空機だけではなく、船舶、自動車、農業用トラクター、ドローン、鉄道等においても広く使用されています。また、GPS 以外のコア衛星を補強できる ICAO 標準も作られていますので、今後、複数のコア衛星を補強する SBAS サービスが出現することが見込まれています。大方の船舶においては SBAS 装備がなされていることもあり、国際海事機関（IMO）において船舶用 SBAS 受信機性能標準の作成に係る動きが見られ、海事利用がさらに進むことが見込まれています。



SBAS 相互運用性会議（2024 夏@京都）

■ 偽物のアルマナック（スプーフィング）

空を飛ぶこと、大海を航海することは人間の認知能力の限界を大きく超えているため、操縦士はアルマナックや、衛星航法がもたらす情報、計器に依存して、それを成し遂げています。スプーフィングの脅威は、まさに『人間の認知領域に入り込まれる脅威』に他なりません。スプーフィングを受けている場合には、操縦士が正しい判断ができるよう、現実の世界に引きずり出してあげる必要があります。そのため、スプーフィングを検知してお知らせする新たな機能「SBAS メッセージ認証機能」に係る ICAO 標準化が進められています。航空局の施設で生成された“正統な”MSAS 信号なのか、スプーファークが生成した“偽物”の MSAS 信号なのか、これを区別させるために、正統な MSAS 信号のメッセージに『検体』と『検査キット』が追加されることとなります。具体的には、GPS 補強に必要な「メッセージの一

部（検体）」を「鍵（検査キット）」で暗号化されたものと、その後に「鍵」が“少し遅れて”受信機に届けられます。受信機では、MSAS メッセージがしばらく保存され、遅れてきた「鍵」で「メッセージの一部」が元に戻され、保存されていたメッセージと一致すれば、「認証 OK」（健康）と判断されて、MSAS メッセージが測位に使用されます。逆に「認証 NG」（不一致）となれば、スプーフィング検知と判断されます。「保存」⇒「認証」⇒「使う」が繰り返して行われます。一度、スプーファに「鍵（検査キット）」がバレてしまうと、これを真似され「偽物の信号」「その検体」「ゾンビ用検査キット」が作られ、検知機能をすり抜けてスプーフィングが成功してしまいます。ですので、検査キットは毎回違うものが使われますし、どの検査キットが次に使われるかも推定できないよう、計算量（数学効果）的に推定不可になっています。ICAO では、SBAS の専門家会合（パネル）と認証に係る専門家会合（パネル）が連携して標準化に当たっており、スプーファとの頭脳戦となっています。

コア衛星についても、同様な認証機能の ICAO 標準化が進められており、GALILEO OSNMA（Open Service Navigation Message Authentication）と呼ばれ、これは Galileo 信号をスプーフィングから保護するものです。この OSNMA の機能強化（第2世代）も検討されていて、クロスコア認証が計画されています。このクロスコア認証とは、本家 Galileo に加え、丸裸な GPS についても認証ができてしまうという革新的な機能です。

位置情報、時刻情報は、航法、着陸、対地接近防止、周辺トラフィックの把握、搜索救難の主要な役割を担っており、海で、空で、丘で必須の情報となっています。人間の能力（海馬と腹時計）を超えて活動するにあたり、本紙で触れたインテグリティや認証機能が、スプーフィングが常態化している現状と将来を洞察する一助となれば幸いです。



ICAO 本部のあるモントリール（カナダ）の街並

GPS ジャミング・スプーフィング対策機器

商船三井テクノトレード株式会社 情報通信・電装事業部

技術専任部長 村石 明裕

マネージャー 山守 志門

アシスタントマネージャー 三橋 俊

1 GNSS を取り巻く環境について

1-1) GNSS とは

GNSS とは、Global Navigation Satellite System の略語であり、日本語直訳では全球測位衛星システム と呼ばれます。

複数の測位人工衛星（一般には 4 個以上）から送信される情報を元に、受信地点の位置や絶対時刻を演算によって導き出します。

アメリカの GPS、EU の Galileo、ロシアの GLONASS、中国の BeiDou（北斗）が全球対応になりますが、他に自国周辺だけをカバーする 日本の「みちびき」、インドの NavIC が有り、これらを総称して GNSS と呼ぶことが多いです。

これらの測位人工衛星の稼働総数は、現在 120 機を超えています。

1-2) GNSS の本来の目的

上述のとおり、地球上の現在位置における正確な位置情報（緯度・経度・高度）および正確な絶対時刻情報を得ることが主な目的です。

用途としては、民間用・研究開発用・軍事用などに分類されます。

また使用する電波の周波数帯域は、1,100MHz 帯から 1,600MHz 帯まで幅広く利用され、この周波数帯域を L バンドと呼ぶことから L1 から L6 など用途や実用化の順番に応じた区分の呼称が使われます。

更に GNSS の使途によっては、データの符号化復号化方式が複数存在しており、民間では主に L1 C/A, L2 C などが現在多く利用されています。

1-3) 昨今の GNSS 環境 (ジャミング/スプーフィング)

GNSS は、船舶や航空機などの安全航行の目的や、カーナビゲーション、スマートフォンなどの民間用途にも幅広く普及しており、現在では極めて一般的な航法支援方式として世界中で広く利用されています。

しかし昨今、残念ながら世界の複数地域では軍事的な紛争が起こっています。

これらの環境では、相手の情報を攪乱させる目的で、GNSS 信号を妨害したり、意図的に情報を改竄する場面が散見されるようになりました。

人工衛星から送信される GNSS の電波信号出力は 数 10 ワット程度と比較的低電力であり、これが地球上に到達するまでには更に減衰され、極めて微弱な電波信号となっています。

このため、これらを意図的に妨害などする場合は、地表 または 海洋上、さらには低高度の上空から正規の微弱な電波を上回る程度の電力の妨害電波を発射すれば比較的簡単に妨害行為が実現できてしまいます。

GNSS の正規の電波信号を単純に大きな妨害電力で被せて事実上消滅させてしまう事を一般に ジャミングと呼びます。

一方 GNSS の正規の信号情報を別の情報に意図的に書き換える（改竄）ことを スプーフィング（成りすまし）と呼びます。

ジャミングと スプーフィングは完全に独立した事象ではなく、どちらも正規の GNSS 電波信号に被せて大きな電力を発射することから、ジャミングの中の一部の事象が スプーフィングであるとも言えます。

次項以降では GNSS 受信機の例や、GNSS に対する ジャミング／スプーフィングへの対策事例に関して解説して行きます

#2 GNSS 受信機とは

2-1) 機器の紹介（大枠の紹介）

GNSS 受信機は、大まかな構成分類によると、a) 受信アンテナ b) 高周波受信部 c) 信号処理・表示器部 などに分かります。

2-2) 原理／問題点

構成機器間の接続はメーカーにより相違はありますが、GNSS の受信に関わる信号の流れは概ね次のようになります。

- ① アンテナ部にて GNSS 人工衛星からの高周波信号を受信する
- ② アンテナに併設される LNA（ローノイズアンプ）にて信号を増幅する
- ③ 高周波信号から大元の送信情報となるデジタル信号を復調する
- ④ 復調された信号を元に必要な情報を内部演算により算出し表示器に表示する
- ⑤ 記録計など他の機器に必要な情報を通信回路によって出力する。この通信には一般に NMEA 2000、NMEA 0183 と云った信号形式が用いられます。

地表で受信される GNSS 信号は極めて微弱な電波となるため、先述のように意図的に GNSS 信号が妨害（ジャミングおよびスプーフィングの総称、以下同様）された場合には、

正確な GNSS 情報を得ることが出来なくなります。

このため、船舶や航空機、自動車などの航法に影響が生じます。

#3 ジャミング スプーフィング対策機器

ここでは、GNSS 信号に対するジャミングおよびスプーフィングを検知または回避する機能を有する機器の一例を紹介します。

3-1) 例 1：アンテナ（原理）

ここでは FRANCE SAFRAN 社製の ジャミング信号抑圧型アンテナの例を紹介します。

正規の GNSS 信号は、地表から約 20,200km の高高度から発射されます。一方、妨害電波は地表または低高度の上空から発射されます。

アンテナの垂直面指向特性を利用して、水平方向付近から到来する妨害電波の電力を著しく抑圧させる原理で妨害電波に関する対策を実現しています。



SAFRAN 社
8230AJ アンテナ

3-2) 例 2：GPS ドーム（原理）

FRANCE SAFRAN 社製の ジャミング信号抑圧補助装置に関して紹介します。

この機器はアンテナのアダプティブアレイ方式の原理を応用したもので、まず妨害電波の到来する方角を特定しこの方角から到来する妨害電波の電力を著しく抑圧させる原理で妨害電波に関する対策を実現しています。



SAFRAN 社
GPS dome

3-3) 例 3：セキュアシンク（原理）

FRANCE SAFRAN 社製の ジャミング信号検知、スプーフィング事象の検知機能を持つ GNSS 受信装置を紹介します。

ジャミングおよびスプーフィングの検知判定には、同社独自開発のソフトウェアアルゴリズムによって実現しています。更に、ジャミング等によって GNSS からの高精度の絶対時刻情報を失った場合に備え、高精度高安定度を有する基準時計発振器を付属しており、絶対時刻情報の喪失を回避しています。



SAFRAN 社 Secure Sync 2400

3-4) 例 4 : BS nano (原理)

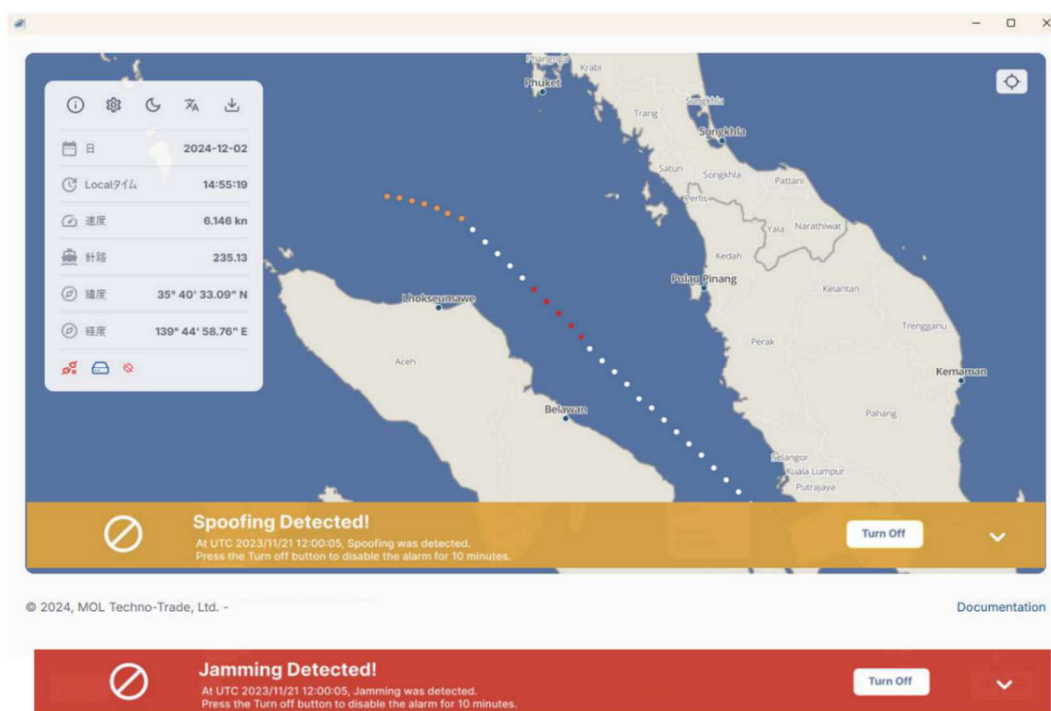
FRANCE SAFRAN 社製の ジャミング信号検知、スプーフィング事象の検知機能を持つ GNSS 受信装置の 2 例目を紹介します。

例 3 の機器と同様に、同社独自のソフトウェアアルゴリズムによってジャミングおよびスプーフィングの検知判定を実現しています。



SAFRAN 社
Broad Sense NANO

3-5) 例 5 : アプリ (原理・機能)



当社は、GNSS 人工衛星からの位置情報と絶対時刻情報を取り込み、更に妨害事象の検知・表示・通報を目的としたアプリケーションソフトウェアを独自に開発しました。その機能および動作の概要は以下のような物です。

- ① システムに接続される GNSS 受信機出力データから、現在地点の緯度経度高度情報を取得する。
- ② 同時に絶対時刻情報を取得する。
- ③ システムを装備搭載している交通手段（主に民間船舶）が通行する経路を、①②の情報を基にして地図上に軌跡描画化する。
- ④ システム内の妨害検知機能を持つ受信機が妨害を検知・判定した場合には画面とサウンドによるアラートを発報する。

- ⑤ ④と同時に、③の経路軌跡描画にもアラートを示す表示を付加する。
- ⑥ これらの一連の情報を、システム内のストレージメモリに蓄積して行く他、過去に蓄積されたデータの再生を行う事もできる。
- ⑦ 以上の取得データは、複数のクライアントシステムからの物を集約して一元データベース化させる事ができる。

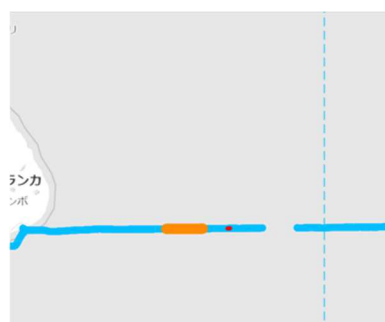
冒頭の図は、本アプリケーションによって妨害を検知・判定した際の、アラート発報画面の一例です。

#4 ジャミングスプーフィング実証実験の結果例

4-1) 実船搭載実験における検知結果の例



ジャミングとして検知した航跡の例
(水色が航跡、赤色がジャミング検知の例)



スプーフィングとして検知した航跡の例
(水色が航跡、橙色がスプーフィング検知の例)

#5 まとめ

これまで、GNSS 人工衛星の普及環境下において、それらが妨害（ジャミングおよびスプーフィングの総称）される事象が漸増している事を説明しました。

また、こういった妨害行為に対して、妨害を検知したり回避する機能を有する機器が開発され普及し始めている事にも触れました。

しかしながら、妨害の検知や回避に関しては、対策機器による効果だけでは完全なものには至っていません。

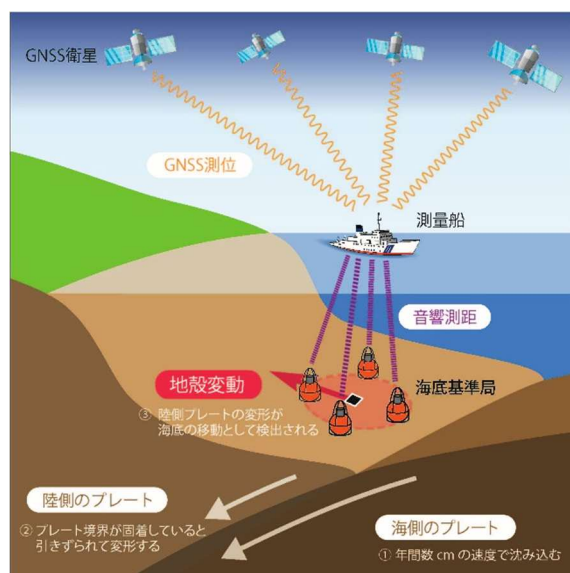
現在の技術レベルでは、妨害検知および回避を目的とする機器類の導入に加え、既存のGNSS 受信システムが持つアラーム発報機能の取り込みや、海上・航空・陸上交通における統計的な経験則などに基づいて妨害事象を掌握する事も有益です。

更に、同一エリア付近を往来する他の民間移動体と情報交換を密にし、これらの情報を総合的に判断して妨害事象などに対応して行く事が重要と考えます。

海底の動きを測る

「海と安全」前号では海上保安庁測量船「拓洋」取材しました。

拓洋はマルチビーム音響測深機や自律型潜水調査機器を装備し、海中・海底の多様な測量を行います。海底地殻変動観測装置は海底の動きを測定するもので、センチメートル単位の精度が求められます。この正確な位置を得るため GNSS による測位をしているのです。



出展 海上保安庁 海洋情報部

Hope for the Best, Prepare for the Worst.

一般社団法人 日本船長協会 常務理事 滝浦 文隆

はじめに

近年、海上では GPS 妨害 (Jamming) や偽装 (Spoofing) が大きな問題となっている。特に中東などの特定海域では、意図的な GNSS 障害が頻発し、船舶運航の安全性に影響を及ぼし、実際に海難も発生している。ここでは、実際の現場での体験や各社の対応事例をもとに、実務者の視点から GNSS 障害への対応と今後の課題についてまとめます。



GNSS 妨害が懸念される中近東から原油を輸送するタンカー
注 写真と本文は関係ありません

現場の体験と衛星測位

2023 年、私は自動車船に乗船していました。アジア諸港を巡りパナマ運河経由の北米航路とスエズ運河を経由する欧州航路でした。その際、Yantien や紅海を航行中に GPS Data Low となったことがありました。ただし、これらは悪意ある妨害行為ではなく、単に自然環境などの地域特性による一時的な障害でした。そのため、本寄稿は弊社法人会員や関係海事団体から共有いただいた情報を参考にして現場での対応を思い出しながらまとめたものとなることをご容赦下さい。さて、私が船に乗り始めた 1990 年代の衛星航法は米国海軍が開発した NNSS でした。全地球をカバーしている GNSS とは違い、極軌道衛星であった NNSS では、測位出来るのは多くて 1 時間に数回でした。海域によっては何時間も測位が出来ない場合もありました。沿岸航海は紙海図と目視による位置確認が当たり前でしたが、大洋、沿岸航海ともに適度な緊張感のもと長年の経験と技術で安全に航海をしていました。しかし、常時正確な船位情報が得られる便利な GNSS

```
131426Z OCT 25Ⓔ  
HYDROPAC 2632/25(GEN).Ⓔ  
PERSIAN GULF.Ⓔ  
RED SEA.Ⓔ  
STRAIT OF HORMUZ.Ⓔ  
GPS, GNSS AND AIS INTERFERENCE REPORTEDⒺ  
IN VICINITY OF NORTH AND CENTRAL PERSIANⒺ  
GULF, STRAIT OF HORMUZ AND RED SEA.Ⓔ
```

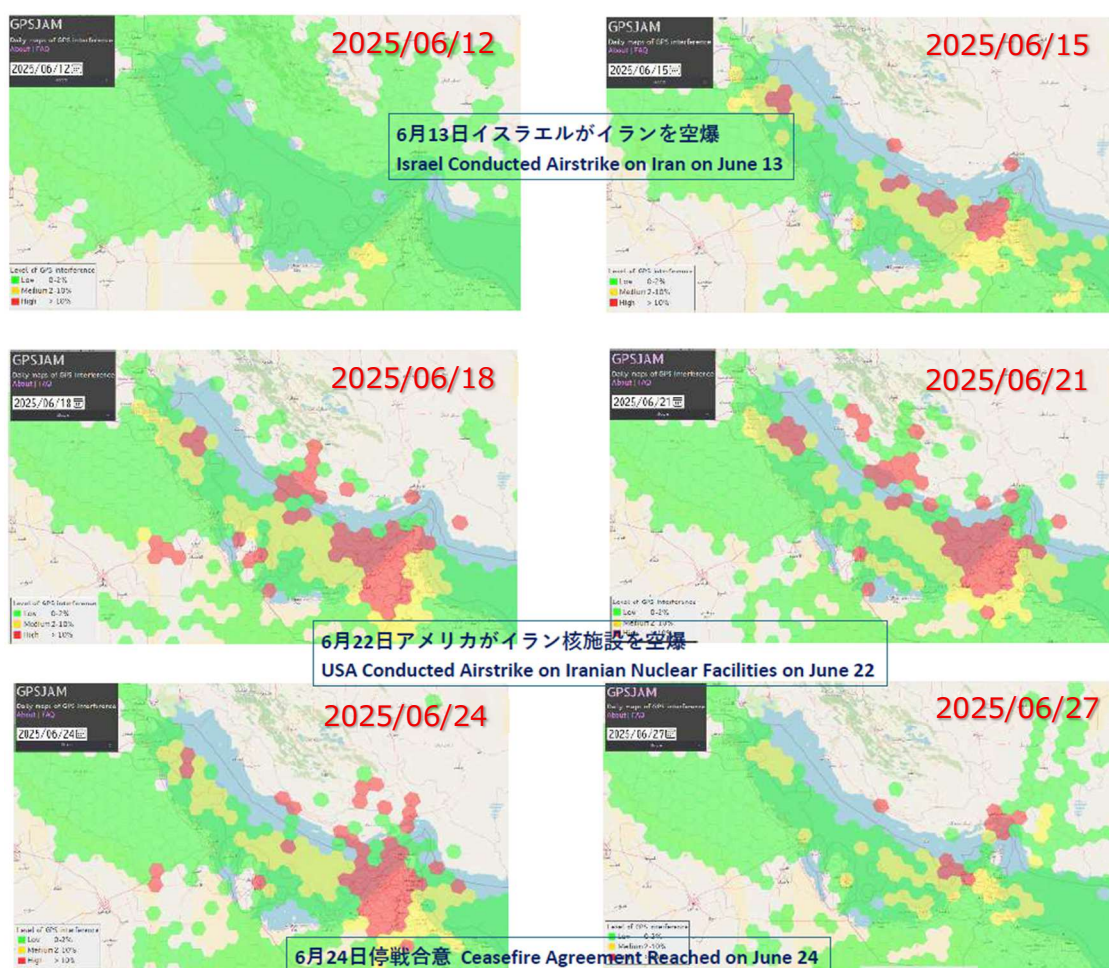
Navigation warning 例

がある現代では、突然の信号喪失と各機器からの突然のアラーム音にびっくりさせられます。そのような事態に冷静に対応できるように船舶管理会社からの安全情報や、航行警報に注意を払い、最悪な事態に備えなければなりません。

GNSS 障害の現状と情報共有体制

UKMTO（英国王立海軍が後援する組織）などの関係機関では、GNSS 障害に遭遇した本船に対し報告を促し、それら報告内容を取り纏めてホームページで公開しています。また、海域を管轄する関係機関（日本であれば海上保安庁）も周辺海域を航行する船舶に対して航行警報を適宜発信し注意喚起をしています。

今年 6 月のイスラエルとイラン間の軍事衝突時や、アメリカによる核施設攻撃の際は、ペルシャ湾、紅海、地中海東部などで GNSS 障害が多く発生し、多数の障害報告がありました。最近ではその影響が軍事衝突前と変わらないレベルまで減少、落ち着いています。



2025 年 6 月 12 日～27 日までの GNSS 信号障害状況の変化
電波障害の程度： 緑色 LOW、黄色 MEDIUM、赤色 HIGH

一方で、ペルシャ湾のようなハイリスク海域ではないバルト海でも GNSS、AIS、レーダーへの影響があったと報告があったり、10 月初めにはカタール近辺で GNSS 障害の報告があったりと、まだまだ注視していく必要はあるようです。

021100 UTC JUL

BALTIC SEA NAV WARN 026/25

SOUTHERN, SOUTHEASTERN, CENTRAL AND NORTHERN BALTIC, GULF OF FINLAND, GULF OF RIGA AND SEA OF AALAND.

GNSS, AIS, RADAR AND DGPS INTERFERENCE OBSERVED IN AREA.

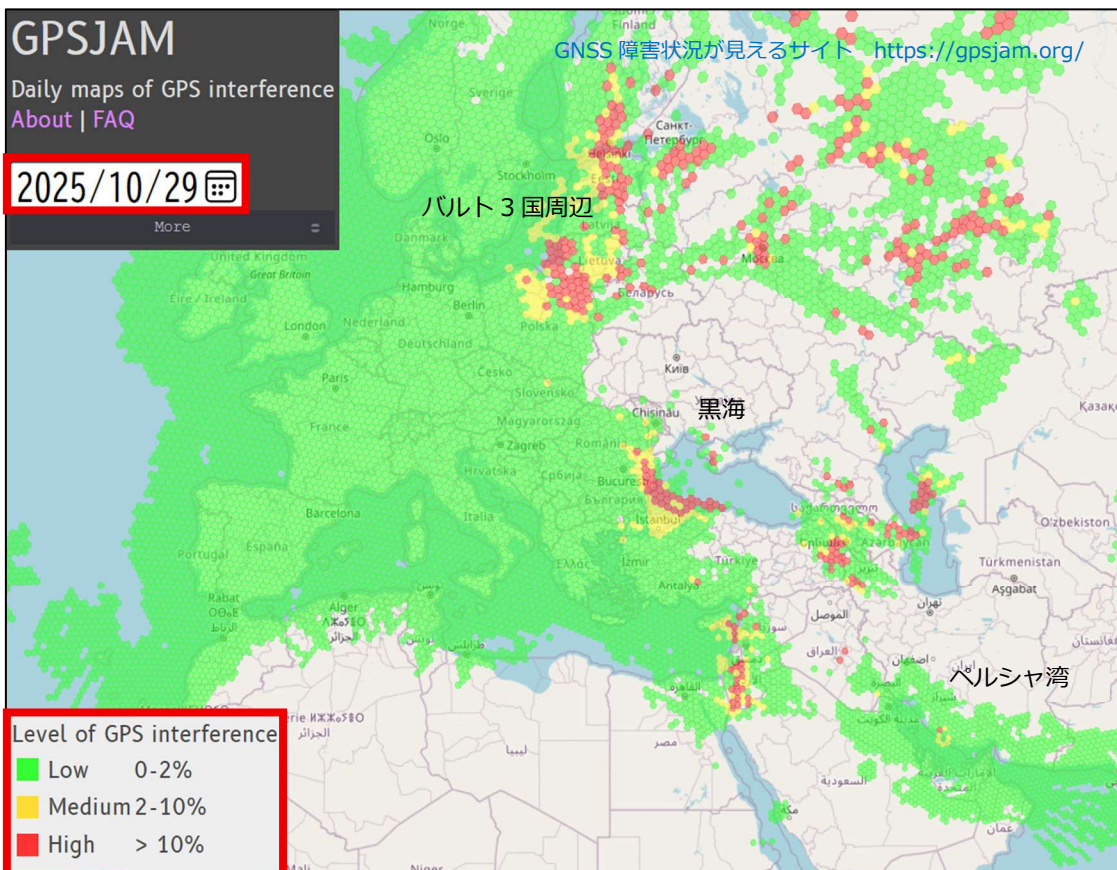
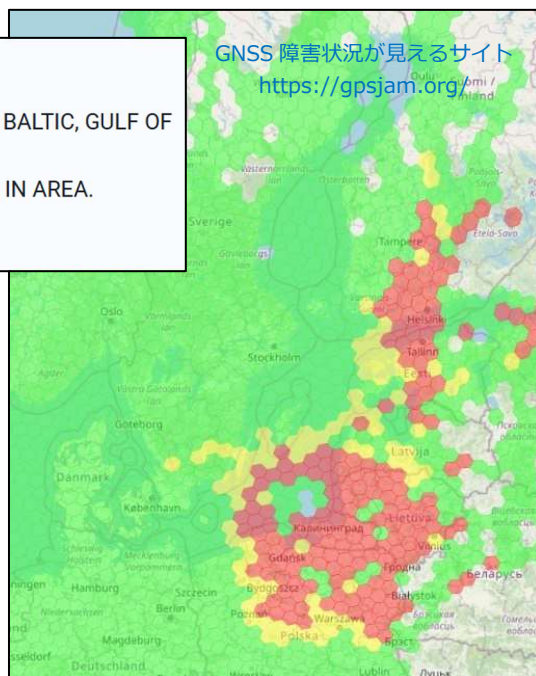
MARINERS ADVISED TO EXERCISE CAUTION

AND BE PREPARED FOR NAVIGATION IMPACTS.

NAVTEX 情報 (上) と
バルト 3 国周辺の障害状況 (右)
2025 年 7 月 2 日

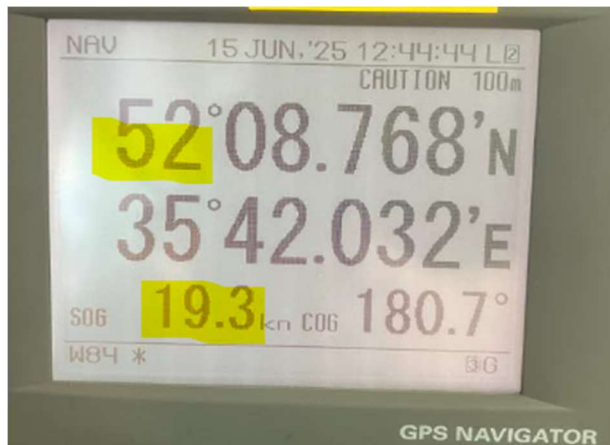
執筆時最新 (下)

2025 年 10 月 29 日

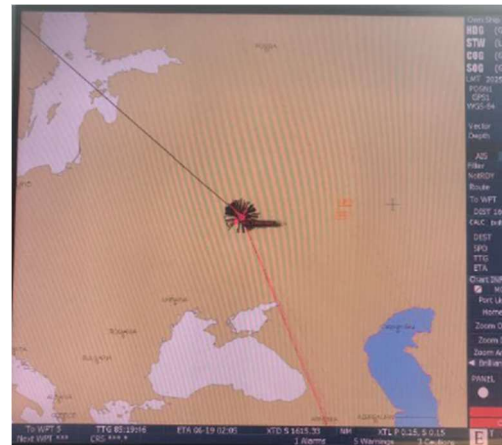


■ 現場での対応事例

- AIS が正常に作動している場合は、汎用 PC にインストールされている簡易電子海図表示装置（主に航海計画等で船長や航海士が利用）を活用する。
- ECDIS 使用中に GNSS 信号不具合が出た場合は、GNSS 信号をオフとし、DR（Dead Reckoning：針路と航程による推測位置）又は EP（Estimated Position：推測位置に風や潮流の影響を考慮した位置）を選択する。また「Manual Fix Position」とする。GNSS 信号が復活した場合を考慮し、1 台は GNSS 信号を切らず使用、もう 1 台は完全に紙海図モードとして使用する。
- レーダーの活用（電子海図表示装置オーバーレイやパラレルインデックスなど）
- 機関部入直及び GNSS 障害が長時間となる場合は、機関をスタンバイとし、必要に応じて減速、停止することも検討する。
- 当直者は GNSS 信号異常を見落とさないように適切に見張りを行い、GNSS 障害が疑われる場合はすぐに船長へ知らせる。
- アラームに対しては、視覚聴覚により適切に管理する。
- GNSS 障害が発生した場合、状況を記録し、会社及び関係機関へ報告する。
- 他船の動向にも十分に注意を払う。



緯度経度と速力が明らかに違う情報を表示



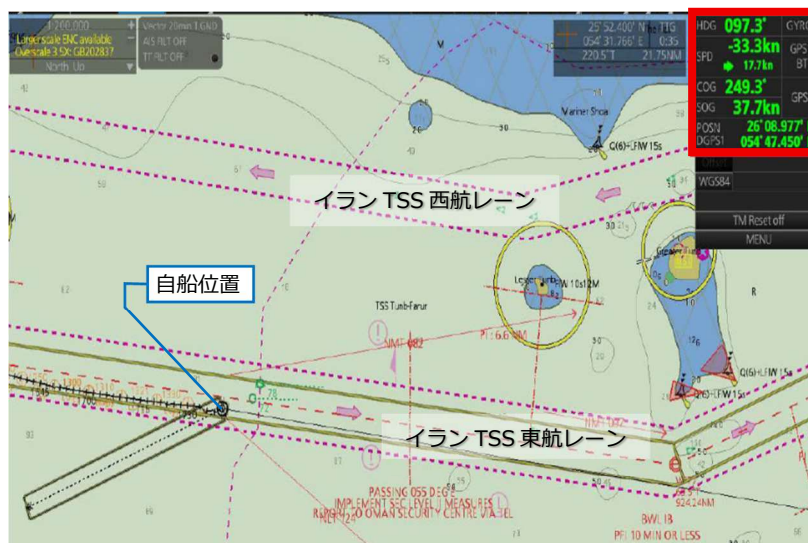
ユーラシア大陸上に船位が変位

7 月初旬にペルシャ湾内を航行した船長報告例

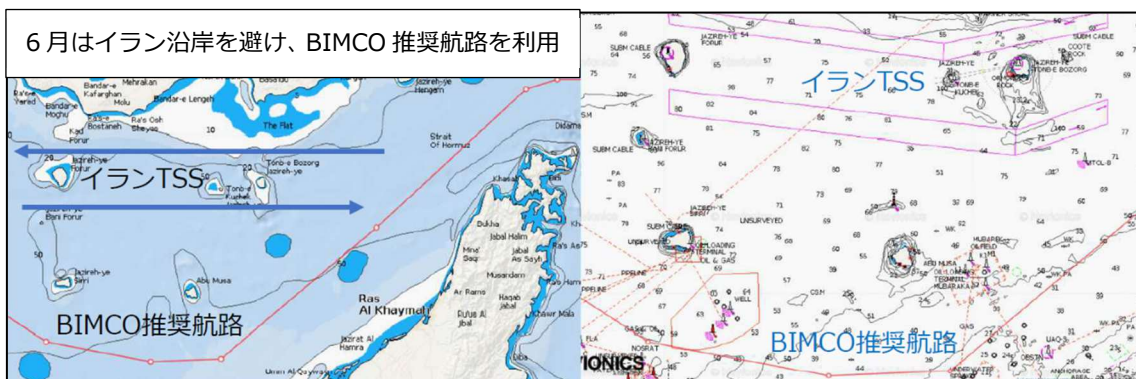
- ペルシャ湾内の交通量は特に混乱した様子にはなかった。
- INM-C 無線機器のアラームはほぼ発生しなかった。
- Sealink および Starlink に異常はなかった。



Spoofting 事例 1：ホルムズ海峡分離通行帯を抜けペルシャ湾内を西航中、偽の位置情報を表示
結果的に異常な航跡（画面中央赤破線枠内）となっている アラーム発生なし



Spoofting 事例 2：ペルシャ湾内イラン TSS 東航レーンを針路 097.3° で航行中、異常な進路速力を表示
進路 249.3° 速力 37.7kt（画面右上赤枠内）と表示されている アラーム発生なし



■ 現場の課題と備え

メーカーと機種、障害の程度によってアラームが吹鳴されるケースと吹鳴されないケースがあります。実際、アラームが鳴らなかった、との報告が少なくありません。アラーム本来の目的を考えれば、GNSS 障害が発生すれば警告音が鳴り、警告が表示されものと思います。一方で GNSS に紐づけられた関連機器からアラームが頻発する状況は、航海当直者の注意が妨げられたり、アラームの内容を確認しないまま咄嗟に消音したり、最悪の場合はアラームを解除してしまいアラームに対する警戒が無意識のうちに薄れることが危惧されます。対策としてはハイリスク海域を航行する場合、当直員を増員し、再点検、再確認が十分に行える体制とすることも時に重要です。今回の事象の発生により、改めて航法技術の継承や、組織的な教育・訓練の重要性も再認識されたものと思います。

■ 最後に

GNSS 障害だけでなく、海上を航行する船舶にあっても IT リスクと無縁ではなくなった昨今、あらゆるリスクに対して準備が必要です。最近では国内の保険会社が「船舶サイバー保険」を販売しているそうです。GNSS 信号の改ざん、AIS のなりすまし、これらに起因する座礁事故等に対して補償する商品だそうです。こういった備えも含め、実務者としては今回の「海と安全」の特集記事などから知識をアップデートし、また従来の航法技術を維持し、冷静な対応力の向上に努めていきます。日本海難防止協会様などの各種海事団体におかれましては、今後とも現場に有用な情報の発信をどうぞよろしくお願いします。

参考資料等

Jamming and Spoofing of Global Navigation Satellite Systems (GNSS), INTERTANKO
BMP Maritime Security, Maritime Security web site
GPSJAM, ADS-B Exchange
JMIC Weekly Dashboard for the Middle East, UKMTO Centre

電波航法の歴史

～ 無線羅針局から AIS 航路標識まで ～

「海と安全」 編集部

協力 東京海洋大学 明治丸海事ミュージアム

公益社団法人 燈光会

本号では GPS の脆弱性や対策について特集しましたが、GPS が航海に使えるようになった今日までに数々の電波標識・システムが生まれ、次の世代にバトンタッチしていきました。本稿では電波標識の誕生から現在に至るまでの歴史を辿ってみたいと思います。

無線方位信号所（無線羅針局 のちに 無線方向探知局）

我が国における電波標識の始まりは 1927 年（昭和 2 年）まで遡ります。当時日本の租借地であった大連湾口の円島に初の無線方位信号所が建設され、同年 12 月 20 日に当時逓信省の外局であった燈台局^{※1} によって方向探知業務が開始されました。船からの問い合わせにより、船が発する電波の方向を信号所で計測し、船に方位を知らせるものでした。

その後、1932 年には塩屋埼・金華山・野島埼・尻屋埼に無線方位信号所が新設されます。現在の日本国内に限定すれば、これらの信号所が運用を開始した 1932 年（昭和 7 年）2 月 11 日が我が国における電波標識の幕開け、ということになります。

地形や夜間空間波の影響、あるいは他船からの混信もあり、あまり精度は良くなかったようですが、視界不良時には船にとって頼みの綱でした。船との通信はモールス信号で行われましたから通信の資格を持った人を配置しなければならず、24 時間運用をするため有資格者の確保が大変だったそうです。



石廊崎無線方位信号所（出典 海上保安庁灯台部 海を照らして 150 年）
ハンドルを手で回してアンテナの方向を変え、電波が来る方位を測定した。

方向探知業務を行う無線方位信号所の数は 1960 年にピークを迎え、国内で 22 局が運用されましたが、船用の方向探知機が小型化して普及するにつれ、徐々に中波無線標識局に移行していきます。そして 1968 年、野島埼・石廊埼・八丈島を最後に 40 年に及ぶ方向探知業務は終了しました。

※1 このため古い灯台施設の所々に逓信省の「㊦」マークが残っている。

無線方位信号所（無指向性中波無線標識局）

前出、塩屋埼・金華山・野島埼・尻屋埼の各無線方位信号所では、方向探知業務とともに無線標識業務（信号所が電波を発し船がその方向を測定する）も行われていました。周波数は中波^{※2}、290～315KHz（5KHz 刻み）でした。当初は船からの要請により電波を発射していましたが、後に毎時の決められた時間に発射するように変更されました。この変更に伴い時計や自動送符器^{※3}が送信機に組み込まれ、自動化が進みました。文献に拠れば、当初は所員が市販の時計を改造し、自動送符器を自作して送信機に組み込んでいたそうですが、その後正規に装備されるようになりました。



※2 300KHz が中波と長波の境目であることから中長波とも呼ばれる

※3 自動的にモールス符号を打鍵する装置

船用無線方位測定機（明治丸海事ミュージアム蔵）

上段のダイヤルで周波数を合わせると、下段の CRT（Cathode Ray Tube）上に 2 翼のプロペラ状の画像が現れるので、ダイヤルを回し、カーソルをプロペラ像に合わせて信号所の方向を測定する。

さらに、中段の小さな CRT の画像で、プロペラ像のどちらの方向から電波が来ているかが分かる。

当初は大型で高価なものであったが、徐々に小型化され、漁船などでも搭載できるようになっていく。

無線方位信号所（ロータリービーコン）

船用の無線方位測定機の小型化は進みましたが、当時の技術では小型化にも限界があり、依然、多数の船は測定機を持っていませんでした。このため、これら小型船、漁船でも利用できる無線標識の研究が行われ、受信機（あるいは広域帯のラジオ）があれば方位を知ることができるロータリービーコンが誕生します。中波電波に方位符号（短音）を付加し、指向性を持たせた電波を水平方向に回転させて送信するものです。船側では受信機で短音の数を数えることにより信号所の方位を知ることができました。

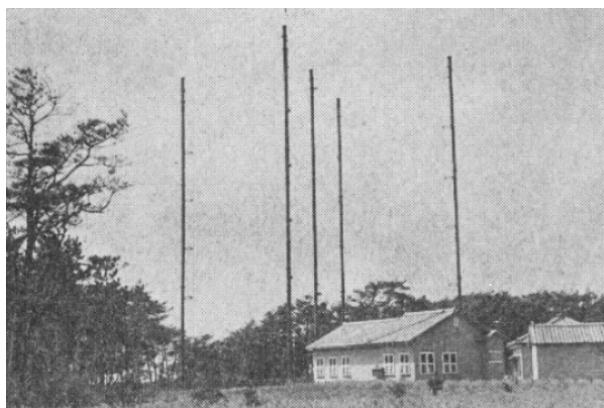
～ 中波ロータリービーコンをラジオで聞いて信号所の方位を調べる ～

- 1、ラジオを信号所の周波数に合わせる。
- 2、標識符号が 2 回聞こえるので目的の信号所を確認する。
- 3、開始符号（・ー）2 回に続き、2 度ごとに方位符号（・）が聞こえる。（“ポッポッポッ”という音）
- 4、方位符号は 10 回（20 度）に 1 回高い音がする。（“ポッポッポッピッ”という感じ）
- 5、方位符号の音が一番弱くなるまで方位符号の回数を数え、灯台表で方位を調べる。

- 局によって送信フォーマットが違っており灯台表で調べる必要があった
- 360 度にわたって送信する局などでは開始符号の前に 8 方位を知るせる信号を出すものもあった

昭和 30 年代になるとマイクロ波の研究が進み、地形や夜間空間波の影響を受けず、直進性と尖鋭性に優れた 9.31GHz ロータリービーコンが誕生します。中波では大型のアンテナを設置しなければなりませんでした。マイクロ波ではホーンアンテナとパラボラアンテナが使われ、小型化高精度化が図られました。

マイクロ波を使用したロータリービーコンは後に紹介するレーマークビーコンと仕組みは同じですが、レーマークビーコンがレーダー画面に表示されるものであるのに対し、マイクロ波ロータリービーコンは中波同様、受信機（ラジオ）で音を聞くものでした。



御前埼無線方位信号所 中波ロータリービーコンアンテナ

（出典 海文堂 社団法人橙光会 電波標識五十周年記念実行委員会編 電波の灯を守って）

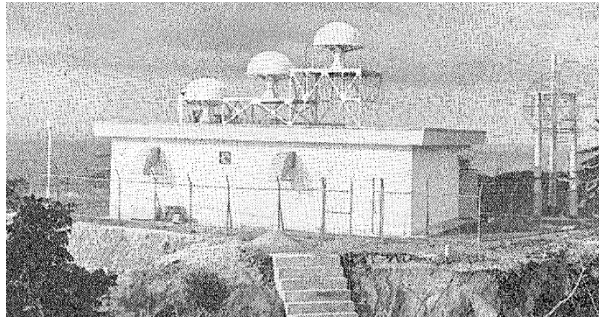
中波のアンテナは巨大なものであったが、マイクロ波のアンテナは船用レーダーのアンテナ程度の大きさ。

無線方位信号所（トーキングビーコン）

ロータリービーコンは方位符号（短音）の数を数えなければならず、音が弱くなる（あるいは無音の）範囲が広いときもあり、測定が難しいという利用者からの声がありました。これを改善するため、方位符号の代わりに度数を表す音声が聞こえるよう変更が行われました。トーキングビーコンの送信アンテナは船用レーダーと同じスロットアレイアンテナが使用され、船用レーダー同様、指向性の高い電波を出すことができました。

時は昭和 40 年、この年に日韓漁業協定が締結されることになり、それが発効する前にレーダーやロランを搭載しない数百隻に及ぶ小型漁船が、簡単な設備で簡便に位置を知ることができるよう求められた。この要望に対応するため、対馬の西岸に北・中・南、3 局のトーキングビーコン局が建設された。

北局は「あか」、中局は「くろ」、南局は「あお」という「局名」に続けて度数を表す「番号」が聞こえるので、海図上に印刷された赤・黒・青の番号の線が交わる点が自船の位置となる。



対馬トーキングビーコン局（出典 社団法人燈光会 日本燈台史）

各アンテナが 120 度ずつずれ、それぞれ 3 分間で 1 回転する。船舶は 1 分間に 1 回受信することができる。

無線方位信号所（コースビーコン）

両側に浅瀬があるような狭い水道を安全に進むため、光を使った航路標識（電波標識に対し光波標識といいます）では導灯や指向灯が使われ、これらの標識は関門海峡などで現在も使われています。コースビーコンは指向灯の電波標識版と言えます。

2 つのホーンアンテナが、安全な進路を中心に角度をつけて両サイドに設置され、それぞれが「・ー（A）」と「ー・（N）」のモールス符号音を流します。船が進路上を走っていれば両サイドの・ーとー・が重なって断続的な長音として聞こえます。コースから外れるとどちらかの音が強くなりコースから外れていることが分かります。「・・ー（U）」と「ー・・（D）」を使用する信号所もありましたが、この場合でもコース上を走っていれば断続的な長音が聞こえました。

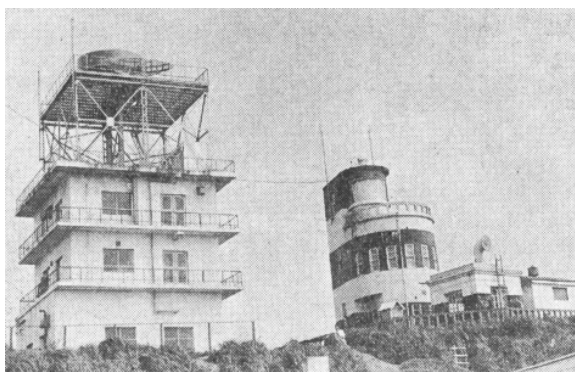
無線方位信号所（レーダー局）

これまで紹介したのは電波の方向を測定するものでしたが、レーダーの登場により方向と距離を測定することができるようになり、航路標識においても使われるようになりました。その頃はまだレーダーは大型船にしか搭載されていませんでしたので、無線羅針局と同じく、船からの問い合わせにより、信号所からの方位と距離を知らせることで自船の位置が分かるようになりました。今までは 2 つ以上の方位線がなければ自船の位置が分かりませんでしたから大きな進歩です。代表的なものは 1962 年に業務を開始した釧路港レーダー

局で、春先の霧が発生する季節には多くの漁船や小型船舶がハーバーレーダー（レーダー局のコールサイン）に問い合わせをしました。

これとは別に多くの船舶が行き交う海域で、航行安全のために設置されたものもあります。本牧や大阪のレーダー局は京浜港、大阪港を航行する船舶の動静を把握し、航行安全上必要な情報を伝えるために設置されました。大阪港レーダー局は1967年に業務を開始、本牧レーダー局は少し遅れ、1978年に業務を開始しています。

前者のタイプはレーダーが小型船にも普及したことによりその役割を終え、後者は船舶通航信号所（海上交通センター）として進化し、東京湾・伊勢湾・大阪湾・瀬戸内海・関門海峡においてVTS（Vessel Traffic Service）として現在も活躍しています。VTSの運用管制官は国際ライセンスが必要です。海上交通センターは船舶に位置情報を提供するものではありませんので、本稿での説明は省略します。



釧路港レーダー局（出典 海文堂 社団法人橙光会 電波標識五十周年記念実行委員会編 電波の灯を守って）



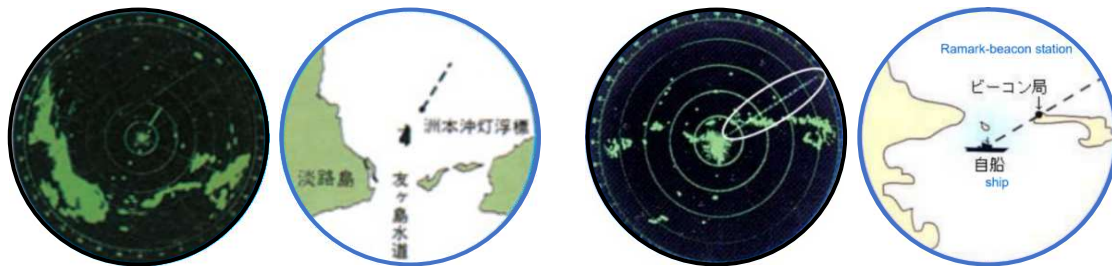
東京湾海上交通センター（出典 第三管区海上保安本部 東京湾海上交通センター利用の手引き）

無線方位信号所（レーダービーコン・レーマークビーコン）

地形が平坦であったり、島やブイ（灯浮標）が多数存在していると、レーダー映像だけでは場所が明確でなかったり、区別ができないことがあります。そのような場所にレーダービーコンやレーマークビーコンを設置すると、レーダー画面にその場所が表示されます。

レーダービーコンは信号所を基点としてモールス符号の輝線で表示されるので、信号所の方位と距離が測れます。レーマークは信号所を通る一本の輝線として表示されるで、信号所の方位と陸までの距離を測ることになります。

レーマークビーコン第一号は 1961 年の観音埼、レーダービーコンは 1969 年の布良鼻が第一号です。GPS や AIS の普及によりレーマークビーコンは 2009 年までに全廃。レーダービーコンは現在 14 基が運用中ですが、2028 年までに廃止される予定です。



レーダービーコン

レーマークビーコン

レーダー画像と説明図（出典 燈光会ウェブサイト 航路標識の話）

以上は電波が直進する性質を利用して位置を求めるものですが、利用できる範囲は限られており、沿岸を航行するには十分でしたが、沖合では利用できませんでした。それを補うため、複数の局が精密な時間、正確な周波数で電波を出し、船舶がそれらの電波の到達時間差や位相差を計測することで船位が得られるシステムが開発されます。海図上で時間差や位相差が同じである点をつなぐと双曲線になることから、これらは双曲線航法と呼ばれ、衛星を利用した測位システムが確立するまでの長い間、沖合を航行する電波航法の主流となります。

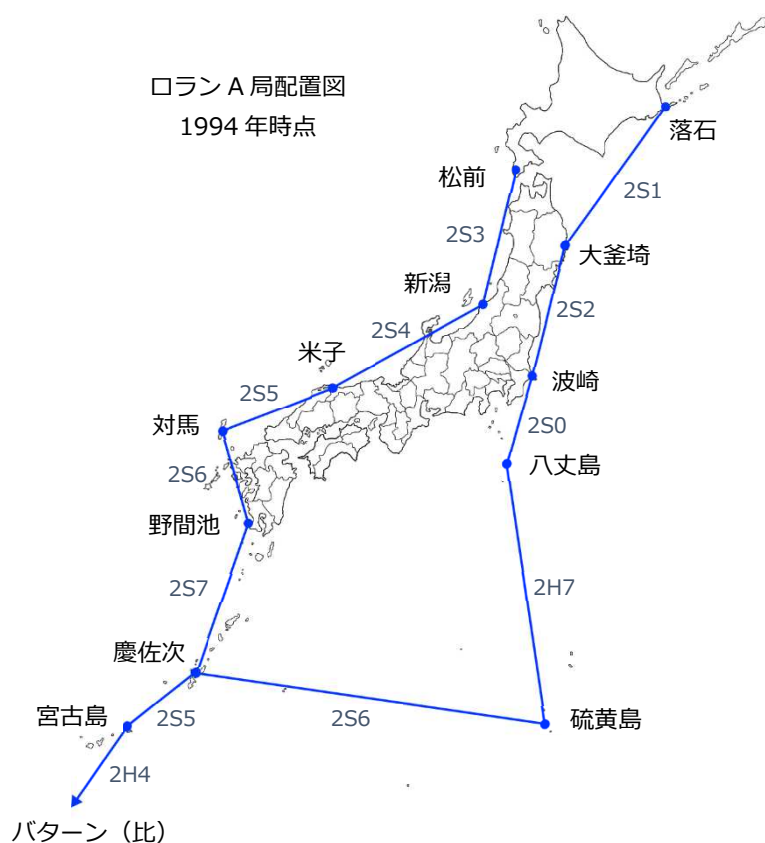
ロラン A・C (Loran A・C)

ロランは Long Range Navigation の略です。ロラン A は 2MHz 帯の中波、ロラン C は 100KHz の長波を使い、両者とも 2 局から発射されるパルス波の到達時間差を測って位置を決めます。有効範囲は A・C とも昼間約 750 海里、夜間は約 1,500 海里でした。

ロラン A は第二次世界大戦中（～後）に米軍（後に米沿岸警備隊）が、第二次世界大戦や朝鮮戦争のために設置・運用していたもので、日本及び付近では、硫黄島・伊計島・伊豆大島・松前・新潟・米子・野間池・宮古島・釜山（韓国）・バターン（比）に局が設置されました。その後、海上保安庁が落石・大釜崎・波崎に局を建設、波崎が伊豆大島と結ばれたことにより、北海道の北側を除く日本周辺をカバーするネットワークができあがりしました。

その後、米側が設置した局は海上保安庁に移管されていきますが、松前・新潟・米子は戦時に作られたもので局舎はバラック、空中線柱は木製でしたし、釜山は廃止されることになったため新たに対馬に局を設置することとなり、これら 4 局の設備を新設あるいは更新し

なければなりません。送受信機器はまだしばらく使えそうでしたので、米側の好意で無償供与されています。また、元々硫黄島と結ばれていた伊豆大島は波崎との局間が極めて短く、運用上不都合だったため八丈島に局を新設しました。その後、硫黄島が廃止されますが、次の図は硫黄島局廃止直前、1994 年の状況です。



ロラン A は当初米軍によって整備され、その後、海上保安庁によって 3 局が整備され、順次、日本側に移管が進みました。

ロラン A を日本側へ移管した理由は、海上保安庁が自力で維持することができるようになった、ということもありますが、戦争の終結やロラン C への移行といった側面もありました。

当時国内では多数の漁船がロラン A を利用していたため、米側に引き続き運用してくれるようお願いしたところ、米側から「アメリカ国民の税金を日本漁船のためには使えない」と言われた、ということが文献に残っています。

そして次第に利用者が減少していき、1997 年にその使命を終えました。1959 年に海上保安庁が初めてロラン A 局を建設してから 38 年の稼働期間でした。



落石ロラン局



慶佐次ロラン局（ロラン AC 両方の局があった）

（出典 ロラン A 開設 30 周年記念事業協賛会 ロラン A とともに）



ロラン A 受信器（明治丸海事ミュージアム蔵）

下部の3つのダイヤルでチェーンを選択し、上のCRT（丸い穴に見える部分）に映し出される複数の波形から静止している波（主従2波）を選び、2波の波形の立ち上がり部を合わせ、パルス波到達時間差を測る。計測には熟練を要した。

本品は初期のもので、ダイヤルを調整して時間差を測るタイプであるが、真空管からトランジスタ、さらにマイクロコンピュータの出現により、次のように進歩していった。

- 1、時間差が数字（二キシー管）で表示される
- 2、計測が自動的に継続される
- 3、ロラン C も計測できる
- 4、位置の計算が行われ緯度経度で表示される

日本におけるロラン C は A 同様米軍によって設置されましたが、ロラン A より遅く、1960 年代に慶佐次・十勝太・南鳥島・硫黄島の4局が建設され、韓国、中国、ロシアの局とも連携して運用されていました。ロラン A と同じくパルス波の到達時間差を計測するものですが、ロラン C は位相比較も行うため精度が良く^{※5}、局間の距離を長く取れるという利点もありました。

その後、ロラン A 同様、米側が運用から手を引くこととなり、海上保安庁が新たに千葉ロランセンターと新島ロラン局を整備、硫黄島ロラン局を南鳥島に移設し、5局で新北太平洋ロラン C チェーンを形成しました。そして2015年に廃止されました。

※5 ロラン C は位置の再現性が良いため多くの漁船が利用していた。つまり、魚がたくさん獲れた場所の数値（緯度経度ではなくパルス波到達時間差）を記録しておけば、その数値を頼りに前回大漁だった場所に正確に戻れる、という。編集子が旧灯台部に在職していたときに聞いた話です。



廃止時のロラン C 局の配置と有効範囲
（出典 三管本部 ロラン C 局の閉局式について）



南鳥島のロラン C アンテナ
（出典 海上保安庁 海上保安レポート 2010）

デッカ (Decca Navigator System)

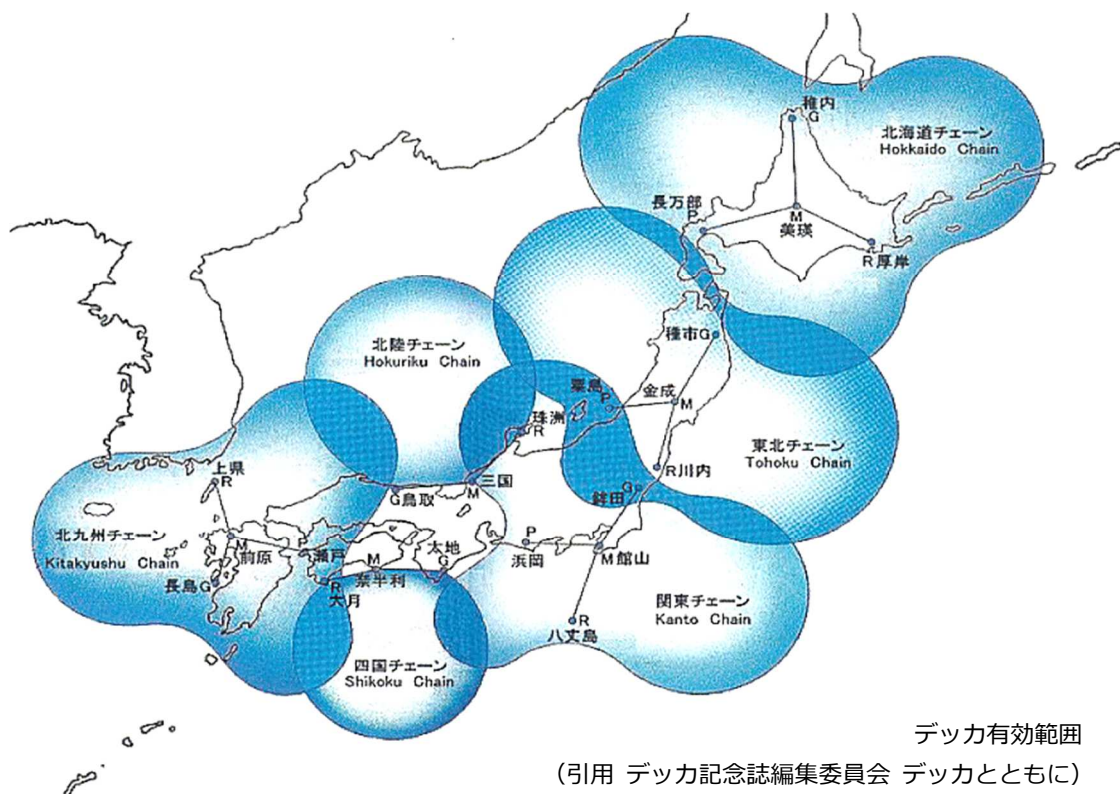
デッカは 70~130KHz の長波を使用し、主局、赤・緑・紫従局の 4 局で 1 つのチェーンを掲載するシステム。時間的に同期した連続波の位相差を測って位置を決めるシステムです。日本では北海道・東北・北陸・関東・四国・北九州チェーンが運用され、有効範囲は約 350 海里でした。サービスエリアの形状から、北陸・四国チェーンは紫従局がなく、南九州・北沖縄・南沖縄チェーンは当初計画にあったものの建設に至りませんでした。



デッカ受信器 (明治丸海事ミュージアム蔵)

下部の 3 つのメーター (赤・緑・紫 デコモーター) の数値を読み、デッカチャートに記載された各色のメーターが示す線の交点が自船の位置となる。

本品は初期型で、次第にメーターではなく数値で示されるようになり、最終的に操作しなくても緯度経度が表示されるようになった。小型漁船での使用も考慮し、潮風にも耐えられるよう、調整時以外は透明ガラスの蓋で閉められるようになっていた。



デッカ有効範囲

(引用 デッカ記念誌編集委員会 デッカとともに)

デッカはイギリスの会社で、Decca Navigator System は第二次世界大戦中ノルマンディ上陸作戦で使用され、有効性が実証されました。以後、イギリス政府とデッカ社がタイアップして勢力を広げ、ヨーロッパ地域で 40 近いデッカチェーンが形成されました。

送信装置も船用受信機もデッカ社製、受信機は同社関連会社からレンタルする方式がとられていました。そのレンタル料では日本漁船への普及が難しいと判断した日本政府は、デッカ社と長く困難な交渉の末、国の予算で特許を買い取り、日本側で送信装置を作成（ただし1チェーンを建設するごとに特許料を支払う）、日本側で船用受信機も作成（ただし1台あたり製造価格の4~2%の特許料を支払う）という契約が成立しました。

ある程度のノウハウは買い取ったものの、ほぼ一からの手作りとなり、日本のデッカ創成期には大きな苦勞がありました。また、局数が多い（最終的に20局）ことから、適した土地の選定から用地の取得まで、こちらもたいそう苦勞したことが文献に残されています。

デッカは、ロラン A の範囲が及ばない北海道チェーンから建設されましたが、当初は北九州チェーンから建設される予定でした。中国や韓国に接した海域であるため問題が多発しており、精度の高い測位システムが必要とされていたのです。ところがそのタイミングでロラン A の日本移管が決まったため、北海道を先に建設することになりました。

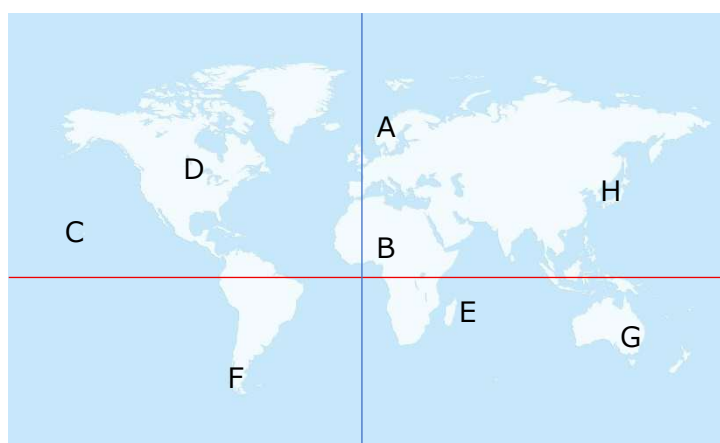
夜間空間波の影響で位置誤差が大きかったことに加え、ロラン A・C を使う漁船も多かったこと、さらにレンタルシステムに割高感を持たれたこともあり、GPS（後述）が一般に使用されるようになってくるに従いレンタル契約数が伸び悩み、1966 年に北海道で建設が始まった日本のデッカシステムは 2001 年に北海道で幕を閉じました。

オメガ（Omega Radio Navigation System）

電波航法の最終形という意味でギリシャ文字の最後の文字「Ω」の名が付けられたシステムは、全世界を8局でカバーし、各局（A~H 局）を運営するそれぞれの国の協力で成り立っていました。周波数は 10KHz 帯の超長波が使われ、基線（局間の距離）は数千海里に及んでいました。各局は 10 秒のサイクルで 3 種類の電波を順次発射し、デッカと同じく位相差を測定して位置を求めました。各オメガ局の発射のタイミングは次のページの表とおり、各局が正確なタイミングで電波を発射する必要がありました。

A	ノルウェー（アルドラ島）
B	リベリア
C	アメリカ（ハワイ）
D	アメリカ（ノースダコタ）
E	フランス（仏領レユニオン島）
F	アルゼンチン（南極）
G	オーストラリア（南東部）
H	日本（対馬）

オメガ送信局



1 サイクル	10.0sec							
セグメント	1	2	3	4	5	6	7	8
電波送信秒数	0.9	1.0	1.1	1.2	1.1	0.9	1.2	1.0
10.2Khz	A	B	C	D	E	F	G	H
13.6KHz	H	A	B	C	D	E	F	G
10.2KHz	G	H	A	B	C	D	E	F
各セグメント間に 0.2 秒の休止時間が設けられ、10 秒間で一周する。								
2 つの電波発射秒数を測ればどのセグメントかが分かり、周波数でどの局の送信電波かが分かる。								

各局の電波送信スケジュール

超長波は海面下 10m 程度まで利用可能なため、潜水艦がその深度まで浮上、あるいはアンテナを延ばせば位置が測定できることから当時の国会では軍事用ではないかと議論になりましたが、ロランが利用できない海域では依然として天測が行われており、そのような海域を航行する船舶や航空機にとってはとても貴重な道しるべであった訳です。

150Kw の出力を送信するアンテナ鉄塔の高さは 455m に達し、スカイツリー（461m）が建設されるまでは日本一高い建造物でした。ただし、自立はしておらず、16 本の傘型アンテナを含む多数のワイヤーで支えられ、ワイヤー基部の面積は 1 キロ四方に及び、その一部は隣の島まで延びていました。

日本では 1975 年に運用を開始したオメガですが、ロラン A の運用停止と同じ年、1997 年に運用を終えました。1975 年から 1997 年までの間、日本ではロラン A・C、デッカ、オメガ、4 つのシステムが同時に運用されていました。



対馬オメガ局（出典 海上保安庁 30 年史）

NNSS／トランシット（Navy Navigation Satellite System / Transit）

時代は地上から発せられる電波から人工衛星が発する電波に変わりつつありましたが、現在使用されている GPS の前に NNSS／トランシットというシステムがありました。これは米ソの宇宙開発競争の産物です。

当時ソ連（現ロシア）はアメリカに先んじて人工衛星を打ち上げ、アメリカはそれを追跡するため衛星から発射される電波のドップラー効果^{※6}を利用して位置を把握していました。

そして、逆に衛星の位置が分かっていたら、発する電波のドップラーの偏移量を測定して地球上の位置が分かるのではないかと推測しました。当時はまだオメガが始まっておらず、1959 年、アメリカは測位衛星トランシットを打ち上げます。1967 年には民間にも開放されましたが、ドップラーの偏移量を長時間連続して測定しなければならないこと、また低緯度では衛星が接近する頻度が低く、あまり有効でなく※7 1996 年に運用を終えています。

※6 救急車のピーポー音が、接近するときは音が高く、遠ざかるときには音が低くなるのがドップラー効果。この現象は音波のみならず電波でも（光でも）発生する。

※7 編集子は沖縄県石垣島で 1987 年から 1989 年まで乗船勤務をしたが、NNSS 受信機が安定して電波を受信したことはなく、表示された緯度経度は誤差が大きく実用に即さなかった。

GPS (Global Positioning System)

1990 年代に入ると NNSS に代わり GPS が登場します。GPS は高度約 2 万 Km の 6 つの軌道に各 4 個の衛星を配置し、どの場所でも常に 4 つの衛星から発する電波が受信できるようになっており、常時測位することができます。

衛星は非常に正確な時計、原子時計※8 を持っており、電波の発信時刻と到着時刻が分かれば電波の速度（約 $3 \times 10^8 \text{m/s}$ ）を掛けることで衛星と自分の距離が分かります。電波には衛星の軌道データも含まれているので、3 つの衛星の電波を拾えば自分の位置を得ることができます。

ただし受信機（皆さんがお使いのカーナビやスマホなど）は原子時計を持っておらず、正確な時刻データを持っていません。このため 4 つめの衛星電波を受信して時刻の補正を行い、正確な位置を計算しているのです。（なぜ 4 つ目の電波を受信すると正確な時刻が得られるかについては説明が難しくなるので割愛します。） スマホなど小さな機器でも瞬時に計算し、私たちに正確な位置を教えてくれるのは IT 技術の発展の賜物です。



GPS 衛星軌道概念図
出典：みちびきウェブサイト
https://qzss.go.jp/overview/column/gps_170831.html

GPS は軍事目的が主のシステムです。このため軍事用の P コードと民生用の C/A コードという 2 種類の電波が出されています。当初、P コードは 10m の精度、C/A コードは 100m の精度でしたので、車なら隣の道路を走ってしまいますし、船舶でも航路や狭水道を航行する場合には GPS の位置は頼りになりません。このため位置誤差を補正するため DGPS (Differential GPS) という手段が用いられました。これは前出、中波無線標識の電波を利用し全国 27 の DGPS 局から補正情報を送出するものでした。その後、C/A コードについても 10m の精度が保証※9 されたことにより、DGPS は 2019 年に廃止されました。

- ※8 原子は固有の共鳴周波数を持っており、同一周波数のマイクロ波を当てると共鳴する。この性質を利用して正確な周波数のマイクロ波を維持し、正確な 1 秒を作り出す。日本では、情報通信研究機構にあるセシウム（Cs）原子時計により日本標準時を作っている。セシウム原子の共鳴周波数は 9,192,631,770Hz なので、共鳴周波数の 1 サイクル分の時間の 9,192,631,770 倍が 1 秒となり、7,000 万年に 1 秒しかずれない精度を持つ。ちなみに人類が誕生して 200 万年しか経っていない。
- ※9 正確には、今まで行ってきた位置の精度をわざと落とす措置を以後行わないこととしたもの。

準天頂衛星システム「みちびき」

センチメートルレベルの高精度な測位を実現する日本の衛星測位システムです。2018 年 11 月にサービスを開始。精度だけでなく GPS への妨害対策としても注目されています。（既に説明されているのでこれ以上の説明は省略します。）

AIS 航路標識

AIS は船舶が自船の位置、針路速力、船名等を VHF の電波で発信するシステムです。これを受信すればレーダーの航跡を観測しなくても針路速力が分かり、船名も分かりますのでなにかあれば VHF で相手船を喚呼することもできます。さらにレーダーの電波が届かない岬の反対側にいる船の動向も知ることができる優れたものです。これを航路標識としても利用することとなり、IMO（国際海事機関）で仕様とシンボルマークが承認されました。



AIS 航路標識を洋上風力発電設備などに設置することにより、存在がより明確化され、また灯浮標が設置できないような水深が深い海域で推薦航路を示すためにも使用されています。バーチャル AIS 標識は実体がない※10 ので衝突事故が起きず、操船する側もストレスが生じないという利点があります。ただし AIS が無い船には認識できないということを認識しておく必要があります。

伊豆大島西方海域の推薦航路で運用されている AIS 航路標識（バーチャル AIS）
（出典 海上保安庁／「海と安全」2025 春号より）

※10 バーチャル AIS は仮想の航路標識、陸上から発せられた AIS 信号により AIS が表示できるレーダーや電子海図表示装置に位置が表示される（上図参照）。実際になにも存在しないので、そこを航行しても事故は起きない。シンセティック AIS は、実体はあるが AIS 電波は陸上から発信される。電力が確保できない航路標識にも使える。リアル AIS は、実体があり、そこから AIS 電波が発信されている。風力発電などの大型施設に設置される。

本項の作成にあたり、東京海洋大学 明治丸海事ミュージアムと公益社団法人 燈光会からご協力を頂きましたので、ここで紹介したいと思います。

東京海洋大学 明治丸海事ミュージアム

東京海洋大学（越中島キャンパス）の始まりは私立三菱商船学校として誕生した明治 8 年に遡ります。その後変遷を経て昭和 32 年に東京商船大学となり、さらに東京水産大学（現東京海洋大学 品川キャンパス）と統合し、現在に至っています。

明治丸は明治 7 年にイギリスで建造された燈台巡廻用船で、一等客室やサロンを備えた豪華な新鋭船。ロイヤルシップの役割も担っていました。明治 9 年には明治天皇が東北・北海道巡幸の帰途乗船され、7 月 20 日に横浜に安着されています。この日を記念して「海の記念日」が制定され、のちに「海の日」となります。明治 29 年に明治丸は係留練習船となり、昭和 53 年には国の重要文化財に指定されました。

～ 明治丸は船内を見学することができます！ ～

明治丸海事ミュージアムには明治丸のほか百周年記念資料館があり、古来よりの航海計器の実物が展示されています。本稿ではミュージアム内で撮影した写真を使わせていただきました。お台場にあった船の科学館が閉館した今、日本国内では神戸大学海事博物館と並び、貴重な海事の博物館となっています。最寄駅は JR 越中島、東京メトロ 門前仲町です。

<http://www.kaiyodai.ac.jp/overview/facility/meijimaru/>



左上：ロラン送受信機 右上：デッキ運用卓と受信機
左下：六分儀 右下：海事ミュージアムから見た明治丸

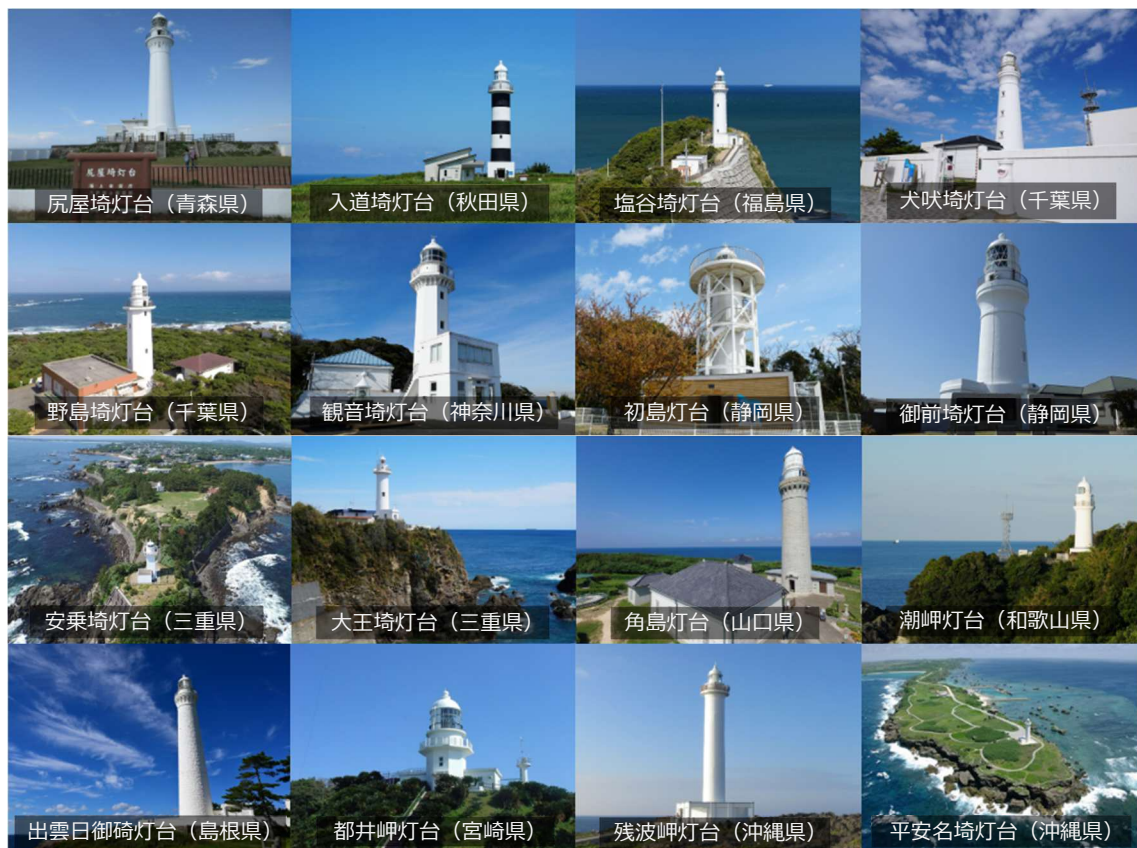


公益社団法人 燈光会

一般の方にはあまり馴染みのない名前かもしれませんが。皆さんは岬に立つ灯台に登ったことはないですか？ 灯台は航路標識の一種で海上保安庁が運用しています。海上保安庁の許可を得て灯台の参観業務を行っているのが燈光会です。全国で 16 の灯台を参観することができます。

近くにお寄りの際は是非灯台に登ってみてください。(水平線が丸く見える、、かも)

<https://www.tokokai.org/> ～ 燈光会ウェブサイトは灯台資料の宝庫です ～



のぼれる灯台 16 (引用：公益社団法人燈光会 ウェブサイト)

荒天などで参観が一時休止となった場合には同サイトにリアルタイムで表示されます。

参考文献

海上保安庁 海を照らして 150 年
海上保安庁 海上保安庁 30 年史
海上保安庁 海上保安レポート 2010
第三管区海上保安本部 東京湾海上交通センター利用の手引き
第三管区海上保安本部 ロランC局の閉局式について
公益社団法人燈光会 日本燈台史
公益社団法人燈光会ウェブサイト 航路標識の話、航路標識技術の変遷一覧表
海文堂 公益社団法人燈光会 電波標識五十周年記念実行委員会編 電波の灯を守って
ロランA開設 30 周年記念事業協賛会 ロランAとともに
デッカ記念誌編集委員会 デッカとともに
総務省 みちびきウェブサイト