

12. 広域マルチラレーションの評価試験結果

※島田 浩樹，宮崎 裕己，古賀 禎，角張 泰之，二瓶 子朗（監視通信領域）

1. まえがき

東京国際空港や成田国際空港では、滑走路の増設や延伸、新たな誘導路やターミナルビルの整備により空港容量の拡張が進められている。空港容量を拡張するには、これらのインフラ整備に加えて高度な運用方式の導入も必要であり、成田国際空港では、平行滑走路の同時離着陸を行う運用方式の導入が進められている。

このような高度な運用方式を実施するには安全性の確保が最も重要であり、空港周辺の空域を飛行する航空機を高精度かつ高頻度で監視することが必要不可欠となる。現在、空港周辺空域の監視は、二次監視レーダー（SSR: Secondary Surveillance Radar）を利用して行われているが、空港近傍で性能が低下することや位置の更新頻度が遅いなどの課題が指摘されている。このため、SSRの課題を解決できる監視技術が必要であり、その候補として広域マルチラレーション（WAM: Wide Area Multilateration）が挙げられている。

一方、我が国における「将来の航空交通システムに関する長期ビジョン（CARATS）」では、変革の方向性として、軌道ベースの運用（TBO: Trajectory Based Operation）への移行が示されている。このTBOでは、航空機の現在位置と将来位置（空間、時間）を「正確に把握」することが最重要であり、これを実現する監視技術としてもWAMの活用が期待されている。

このような背景から当研究所は、我が国で導入が期待されているWAM技術の確立を目的として、WAM実験装置（以下、実験装置とする）の試作・評価を進めている⁽¹⁾。本実験装置は、WAMの課題となる「高信頼性化」を最重点目標として試作・評価を進めている。これまでに、東京国際空港（以下、羽田空港とする）周辺の空域を監視対象として実験装置を配置して、WAM諸機能の確認と（最小構成での）基本性能

の検証を目的とした初期評価を実施した⁽²⁾。そして現在は、初期評価の結果を踏まえて、性能向上を図るために実験装置を拡張して、更なる評価試験を進めている。

本稿では初めに、WAMの測位原理や課題等の概要を述べる。次に、実験装置の特徴や配置について説明する。そして、これまでに行った評価試験の結果を、前年度に報告した初期評価の結果と比較して示す。

2. WAMの概要

2.1 測位原理

図1にWAM測位の概要を示す。WAMでは、航空機に搭載されたトランスポンダが送信するSSRの応答やスキッタ信号⁽³⁾を複数の受信局で検出して到達時刻を測定する。次に、測定した到達時刻から受信局間の到達時刻差を求めて、航空機と各受信局との距離差に変換する。そして、「距離差が一定」との条件からなる楕円双曲面同士の交点を求めることで航空機の位置を算出する。三次元の測位を行うには、最低4局の受信局で信号を検出することが必要となる。

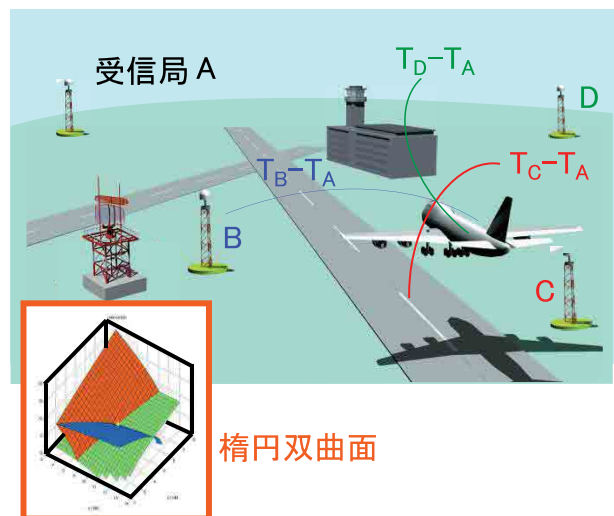


図1 WAM測位の概要

2.2 WAMの特徴

(1) SSR が持つ課題の改善

SSR が持つ課題として、位置更新が遅い(4秒)ことや、航空機を検出できないブラインドエリアが存在すること、低高度で性能が低下することなどが挙げられる。これらに対して WAM は、1秒平均での位置更新が可能なことや、受信局の配置を工夫することで、ブラインドエリアの発生や低高度での性能低下を克服できる特徴を持つ。

(2) 長期的に有効な監視技術

将来の高度な運用方式においては、パイロット自身が自機周囲の交通状況を認識する必要性が指摘されている。これを実現する監視技術として、ADS-B (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast) が挙げられる。図2に ADS-B 測位の概要を示す。ADS-B とは、航空機が自機の位置情報を GNSS (Global Navigation Satellite System) から取得して、その情報を放送型データリンクにより送信する監視技術である。放送型データリンクとしては、拡張スキッタ³⁾が国際的に広く利用されている。この拡張スキッタはトランスポンダから送信され、図2に示すように SSR モード S と同じ信号形式であり、WAM においても測位可能である。このため、WAM の受信局に ADS-B 情報の解読機能を持たせることで、WAM と ADS-B の共用 (同時運用) が可能となる。

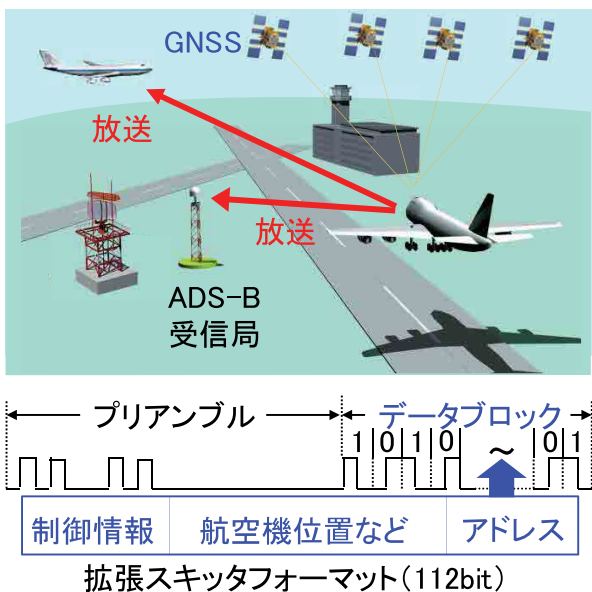


図2 ADS-B 測位の概要

大部分の旅客機や貨物機は既にモード S トランスポンダを装備しているため、WAM は直ちに運用を開始できる。一方 ADS-B は、航空機側に新たな機材の装備を必要とするため、運用開始は航空機側の対応状況に依存する弱点を持つ。

この弱点に関して、前述した WAM と ADS-B の共用性を活用して、WAM 導入時に ADS-B 機能を実装しておくことで、ADS-B への効率的な(二重投資を避ける)移行が可能となる。さらに WAM は、ADS-B の運用開始後も ADS-B 位置情報(が正しいか)の検証に必要とされ、長期的に有効な監視技術として位置づけられている。

(3) 高い性能を得るには

WAMの位置精度は主として、信号検出時刻の測定精度(σ_t)と、航空機と受信局アンテナの位置関係で決まるDOP (Dilution Of Precision) に依存しており、以下の式(1)で表せる。

$$(\text{位置精度}) = \sigma_t \times \text{DOP} \dots (1)$$

信号検出時刻の測定精度は、時刻検出の分解能で決まる。高い分解能を得るには、信号検出のサンプリング周波数を増加させることが必要である。一方DOPは、図3のDOP値の分布例が示すように、受信局アンテナが航空機を取り囲む配置となる場合に良好な(低い)値が得られる。このため、広い覆域に対して良好なDOPを確保するには、受信局を広範囲に配置することが必要となる。

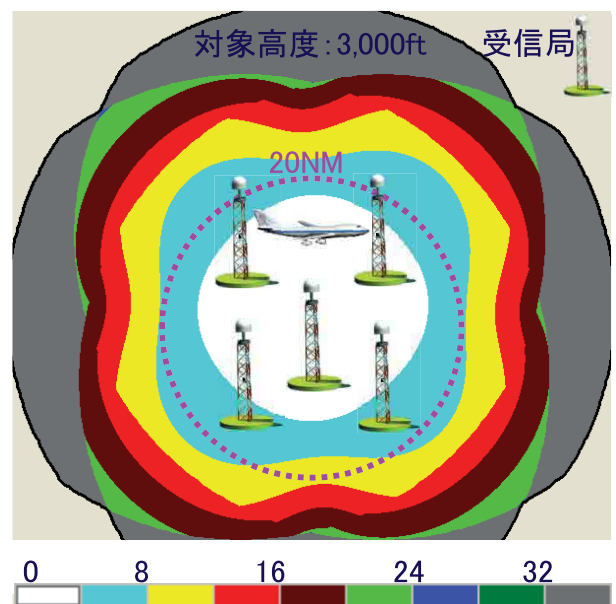


図3 DOP値の分布例

2.3 WAMの課題

WAMは、名前が示すとおり、広い覆域が要求される。すなわち、遠方の航空機が送信する微弱な信号を検出する必要がある。このため、WAMでは受信局の最低受信感度を鋭敏に設定するが、この場合、ノイズや他機からの多数の信号も受信してしまう。特に、微弱な信号に近傍航空機からの強力な信号が重畳（干渉）した場合、微弱な信号を正常に検出することは非常に困難となる。信号の重畳により検出時刻を誤測定した場合は測位精度が低下する。また、信号内容を誤解読した場合は検出率が低下する。これらの状況から、WAMの課題は、遠方からの微弱な信号を如何に正確に検出するか、と言い表せる。

2.4 一般的な対策

微弱な信号を正確に検出する一般的な対策の一つは、高度な信号処理技術の適用と信号検出時刻の高精度な測定である。具体的には、プリアンブルパルスの正確な判定方法と時刻検出、データビットの誤り訂正方式の改良である。この対策はある程度は有効であるが、その効果に限界がある。そして、受信局配置に冗長性を持たせることも挙げられる。この対策は、ある受信局で検出ロスが生じた場合、冗長的に配置した（当該信号を検出した）受信局を利用して測位する手法であり、高い信頼性を確保できる利点を持つ。

しかしながら、冗長的な配置（受信局数の増加）は弊害も招く。まず、受信局からのターゲットレポート数が増えるため、処理装置の負荷が増大する。空港面監視と比較してWAMは扱う航空機数が多いため、この傾向が顕著に現れる。これに加えて、整備や維持に係る費用の増大をもたらす。受信局を広範囲に配置するWAMは、電源や通信線の確保が遠隔地では容易ではない。特に通信線は、広域ネットワーク（WAN）を利用するため回線維持費用が高額となり、大きな課題となっている。

冗長性が十分に確保された理想的な受信局配置を形成することは、費用等の制約から現実的に困難と想定される。以上のことから、WAMでは「高信頼性化」、言い換えれば、少ない受信局数での高性能（覆域、検出率、位置精度）の達成が要求される。

2.5 高信頼性化への対策

少ない受信局数で高信頼性化を図るにあたり有効と考えられる対策を以下に示す。

(1) 質問機能の活用

WAMは基本的に受動監視方式であるが、質問機能を活用した性能改善が可能である。具体的には、信号干渉により検出ロスが発生した場合、当該航空機に質問して応答を引き出し、再測位を行うことで検出率の向上が可能である。

(2) 測位計算方式の改良

前項の質問機能に関連して、質問送信から応答受信までの時間を測定して、求めた距離も利用して位置算出を行うことで位置精度を改善できる。この測位補完はDOPの悪いエリアに対して特に有効である。また、航空機が送信する気圧高度情報を利用した二次元（3局）測位を行うことで、遠方での検出率改善が期待できる。

(3) 追尾機能の活用

悪いDOP値となる受信局の組み合わせや、信号干渉により検出タイミングが正確でない場合の測位結果は大きな測位誤差が生じる。この場合、当該測位結果を棄却することや、平滑処理を利用して誤差を軽減することが有効である。

3. WAM実験装置

3.1 実験装置の構成

図4に実験装置の構成を示す。実験装置は受信局、送信局、およびターゲット処理装置から構成され、各装置は広域ネットワーク（WAN）で接続される。前年度に報告した初期評価は、最少の受信局構成となる4局（受信局1～4）で実施したが、性能低下が生じるエリアが確認された。このため、当該エリアの性能改善（冗長性の確保）を図るために、受信局（受信局5～8）を4局追加して実験装置を拡張した。

なお当研究所は、日本電気株式会社と共同研究契約を締結して、WAMを用いたモードA/Cトランスポンダ搭載機の監視に関する研究を進めている。実験装置の受信局6～8は、本共同研究で整備した日本電気株式会社の設備品である。

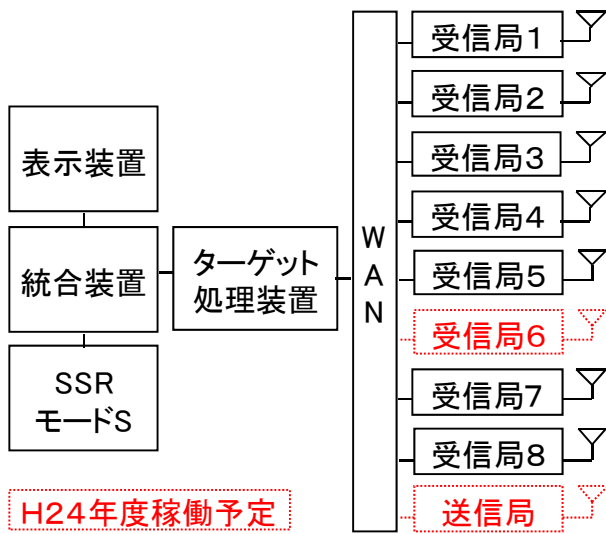


図4 実験装置の構成

3.2 各装置の機能概要

(1) 受信局

受信局は、SSR 応答とスキッタを受信して、信号検出時刻を測定するとともに信号内容をデコードする。これらの情報をターゲットレポートにまとめて処理装置に出力する。図5に受信局の外観を示す。WAM 課題への対策を踏まえ、高精度で検出時刻を測定する設計とした。時刻検出の分解能は2ナノ秒(通常10ナノ秒程度)である。

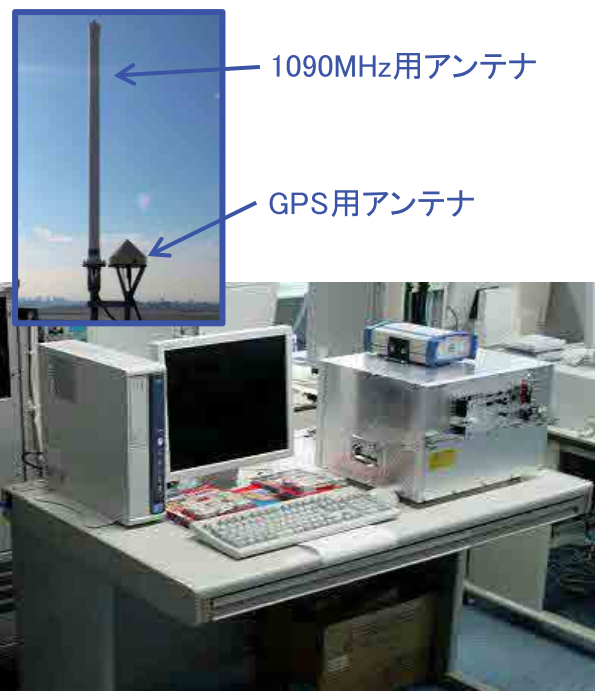


図5 受信局の外観

受信局間の時刻同期も重要であり、高い同期精度が実現できるGPS Common View方式を採用した。本方式は、通常のGPS同期方式と比較して、2~4倍程度の同期精度が期待できる。また、信号干渉対策として、プリアンプル検出と誤り訂正処理に関して、高度な信号処理技術⁽⁴⁾を適用した。

(2) 送信局

送信局は、2.5項で述べた質問機能の活用や測位計算方式の改良を行うため、航空機に対してSSR質問を送信する。高信頼性化への対策を踏まえ、実験装置は送信機能を活用する設計とした。なお、送信局は平成24年度に実装する計画である。

(3) ターゲット処理装置

ターゲット処理装置は、受信局から送信されるターゲットレポートを相関処理してMLAT測位、追尾処理、および送信局への質問制御などを行う。ターゲット処理装置は当研究所内に設置した。実験装置間のWANには、NTT東日本が提供する光サービスを利用している。なお、2.5項で述べた高信頼性化への対策に関する機能は平成24年度に実装する計画である。

3.3 受信局の配置

実験装置は、羽田空港周辺の空域を対象に受信局を配置している。設定覆域は空港用SSRと同等の60NMである。図6に受信局配置を示す。写真中の矢印はアンテナ設置位置を示し、数字はアンテナ設置高(海拔高)を表す。前年度に報告した初期評価は、4局の受信局構成(羽田, 成田, 大和, 調布)で行った。初期評価の結果、性能が低下するエリアが確認されたので受信局を追加した。房総半島方面の30NM以遠で測位精度の低下が発生したので、鹿野山に受信局5を追加した。一方、羽田空港の近傍では、低高度で飛行する進入機に対して検出率の低下が発生したので、田町と玉川に受信局7と8を追加した。さらに、北西方面の受信局配置に冗長性を持たせるため、府中に受信局6を追加した。地図中の色分けはDOP値(5,000ft)の分布を表しており、各色内の数値(青字)はDOP値を基に想定される位置精度を示す。ただし現在は、府中を除いた7局の受信局構成で実施している。

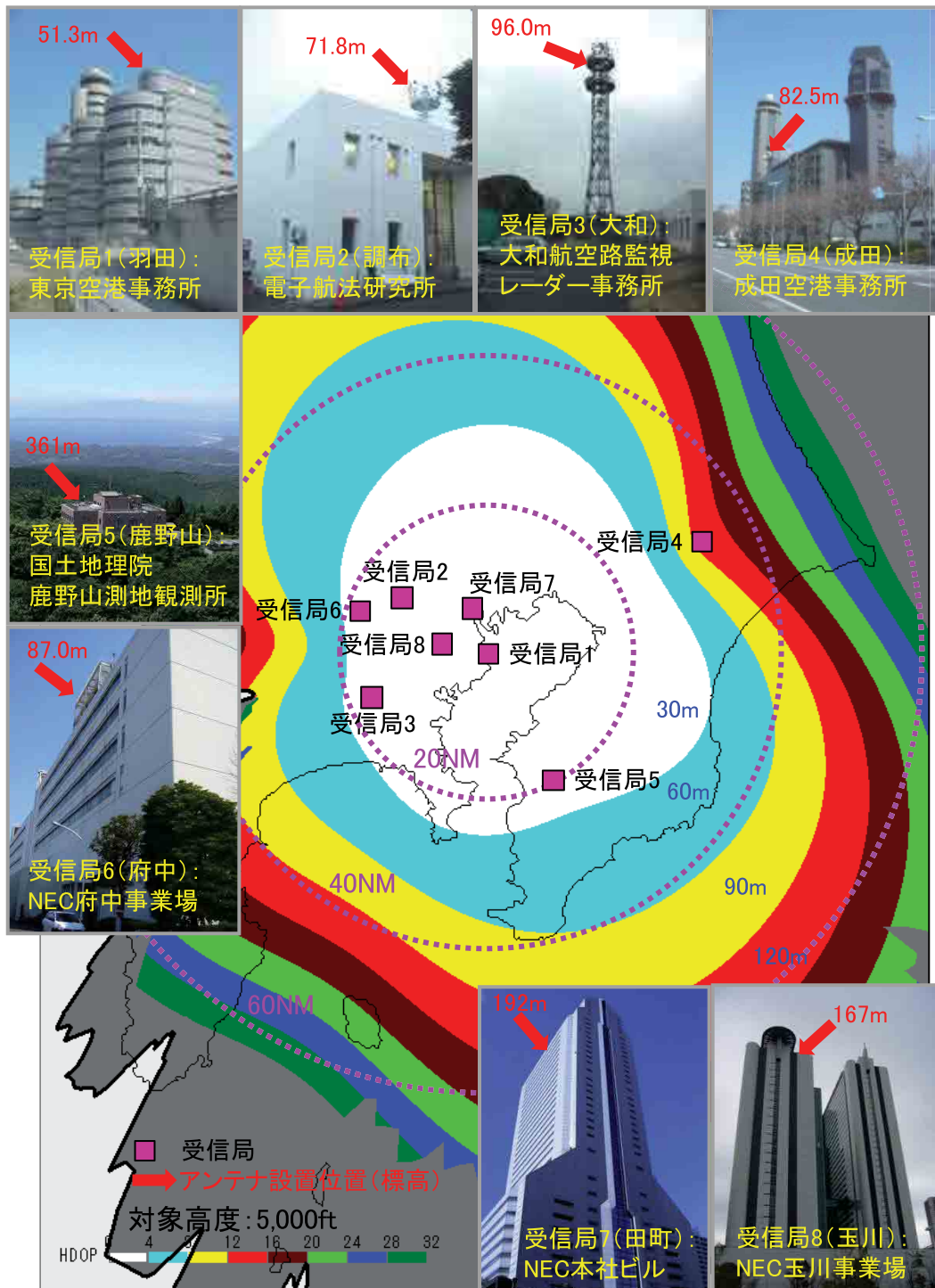


図6 受信局配置

4. WAM の評価試験

4.1 評価方法

評価項目は監視覆域, 位置精度, 検出率とした。図7に実験装置の拡張前(受信局4局構成)と拡張後(受信局7局構成)の配置に対する, 想定される監視覆域とDOP値に基づく位置精度を示す。

なお, 拡張前における受信局の最低受信感度は -81dBm (受信距離: 60NM に相当) に設定していたが, 拡張後は -85dBm (受信距離: 100NM に相当) に変更した。受信感度を変更した理由は, 実験装置の監視覆域目標値を, 空港用 SSR と同等の 60NM に設定したためである。

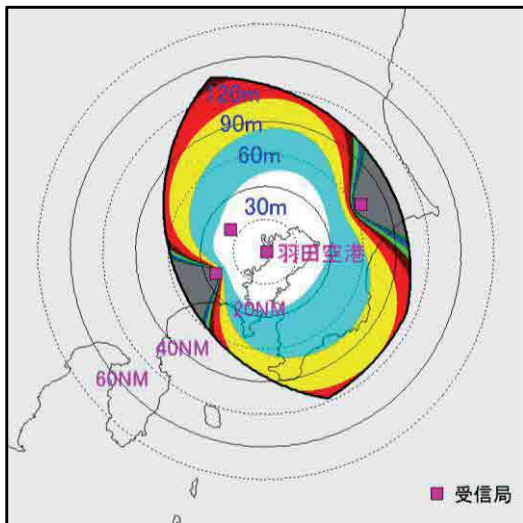
位置精度と検出率は、欧州が策定した WAM の性能要件⁽⁶⁾を参照した。位置精度を算出する際の真位置には、航空機から送信される ADS-B 位置情報を利用した。ADS-B 位置は GPS (Global Positioning System) を利用して測位された情報であり、WAM と比較して高精度である。しかしながら GPS 単独の測位結果であり、相応の誤差が含まれるため、位置精度は参考値である。

性能要件は、ターミナル WAM 用に設定された規定値を採用した。位置精度は二乗平均誤差から算出した。検出率は4秒間隔で算出している。監視データはエアライン機を利用して取得した。

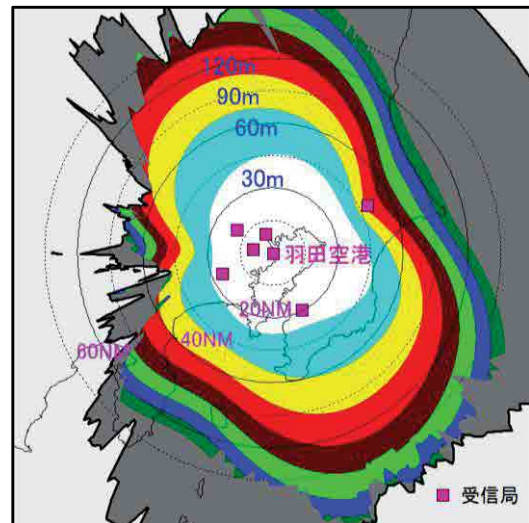
4.2 評価結果

(1) 監視覆域

図8に約1時間分の取得航跡を拡張前後で比較して示す。青色の航跡は WAM、緑色は ADS-B を表す。拡張後の WAM 覆域は、想定される覆域（図7）が概ね得られており、特に南西方面に対しては監視覆域が大きく拡大していることが分かる。想定覆域は対象高度 5,000ft で計算しているが、実際の飛行高度は 10,000ft 以上になるため、想定覆域より遠方でも航跡が得られている。実験装置の拡張により、設定覆域（60NM）が得られることを確認した。

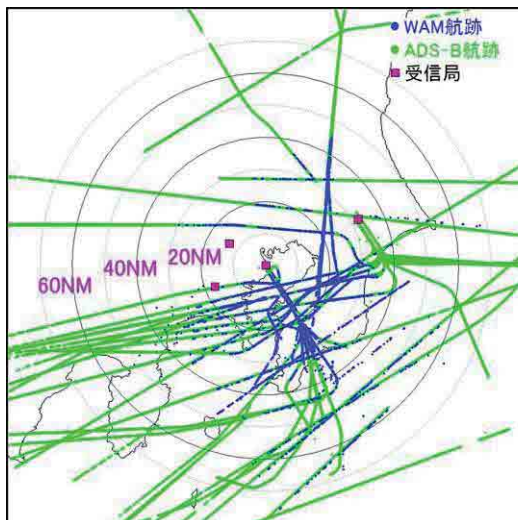


(a) 拡張前（受信局4局構成）

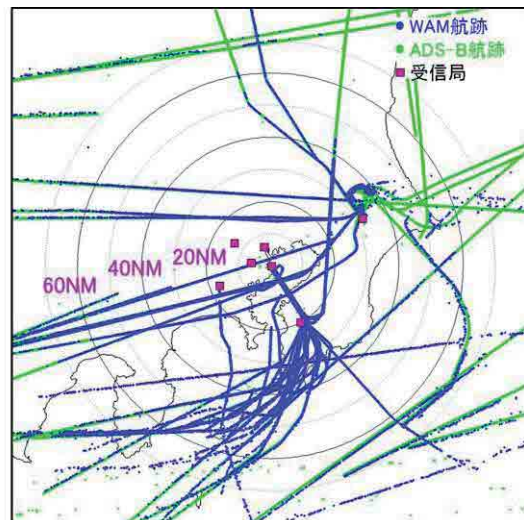


(b) 拡張後（受信局7局構成）

図7 想定される覆域と DOP 値に基づく位置精度（青字）



(a) 拡張前（受信局4局構成）



(b) 拡張後（受信局7局構成）

図8 WAM 監視覆域の比較

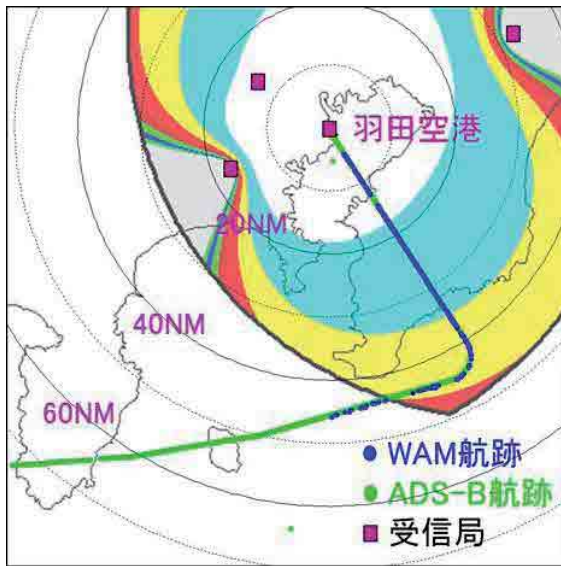
(2) 検出率

図9に北風運用時における到着機の航跡例を拡張前後で比較して示す。青色の航跡はWAMを、緑色はADS-Bを表す。拡張後は想定される60NM以上の良好な航跡が得られていることが分かる。また、表1に検出率を距離別に比較して示す。受信局の追加および最低受信感度の変更(-85dbm)により空港近傍ならびに遠方の覆域が拡張している。また、受信局配置に冗長性が得られたことから、拡張前は全体的に性能要件を満たしていないが、拡張後は50NMまで良好な検出率が得られている。50NM以遠では性能要件を満たしていないが、2.5項で述べた、質問機能の活用や気圧高度を利用した3局測位により検出率の改善が期待できる。

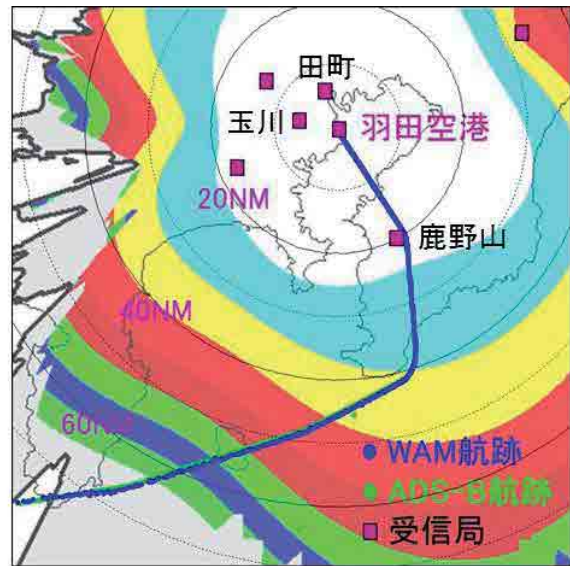
(3) 位置精度

表2に位置精度を距離別に比較して示す。拡張後の位置精度は40NMまで性能要件を満たしていることを確認した。しかしながら、拡張前と比較して測位誤差が増大している距離(エリア)が存在している。

10NM以内の空港近傍において拡張後の測位精度が悪化している。図10に空港から20NMまで距離に対する測位誤差の分布を示す。本図から、15NM付近から空港に近づくに伴い測位誤差が増加していることが分かる。この理由として、当該エリアはDOP値の変化が無い場合、最低受信感度の変更に伴う信号干渉の影響が想定される。現在、詳細な原因を調査中であるが、平滑処理などの対策が有効と考えられる。



(a) 拡張前（受信局4局構成）



(b) 拡張後（受信局7局構成）

図9 到着機航跡例

表1 検出率の性能値

距離	拡張前	拡張後	性能要件
～5NM	—	100%	検出率 97%以上
5～10NM	70.4%	100%	
10～20NM	70.0%	100%	
20～30NM	93.8%	100%	
30～40NM	90.3%	100%	
40～45NM	45.8%	100%	
45～50NM	—	100%	
50～60NM	—	93.9%	

表2 位置精度の性能値

距離	拡張前	拡張後	性能要件
～5NM	—	38.4m	位置精度 150m以下
5～10NM	31.0m	42.9m	
10～20NM	59.0m	30.8m	
20～30NM	92.6m	105m	
30～40NM	212m	150m	
40～45NM	430m	395m	
45～50NM	—	538m	
50～60NM	—	765m	

また、20NM～30NMでも測位精度が悪化している。この理由として、DOP値が悪い受信局の組み合わせによる測位結果の存在が挙げられる。図11に21NM付近における拡張後航跡の拡大図を示す。図中の矢印は、成田局が受信できない場合の受信局の組み合わせにより測位された航跡を表す。また、図11中の色分けは、成田局を除外した6局の組み合わせに基づいたDOP分布を表す。本図から、これら6局の組み合わせでは、当該エリアで測位誤差が大きくなるのが分かる。この対策として、DOP値が悪い組み合わせによる測位結果は排除することや、追尾機能による平滑処理の活用が有効と考えられる。

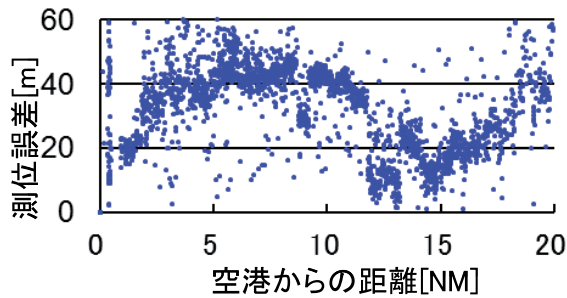


図10 距離に対する測位誤差の分布

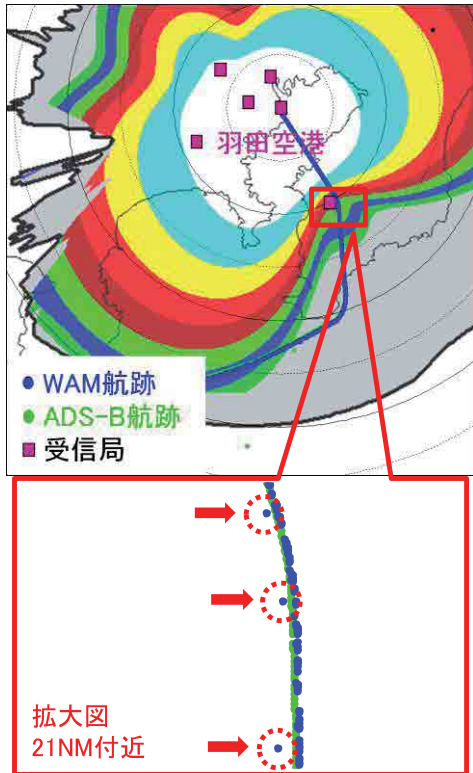


図11 拡張後航跡の拡大図（21NM付近）

5. まとめ

本稿では、WAMの特徴や実験装置の概要を説明するとともに、これまでに実施した評価試験の結果として、実験装置の性能値を拡張前後で比較して示した。評価試験の結果、実験装置の拡張（受信局の追加と冗長性の確保）により、想定される監視覆域が得られるとともに、検出率は大幅に向上することを確認した。一方で位置精度は、拡張により悪化した覆域が存在している。この理由として、信号を検出する受信局の組み合わせが重要な要因となっている他、最低受信感度を変更した影響も想定される。これらの要因に対しては、測位結果の排除や追尾機能の活用が有効と考えられる。また拡張後においても、遠方では検出率と位置精度ともに性能要件を満たしていない状況であるが、質問機能の活用等により、更なる性能向上が期待できる。

今後は、高信頼性化への対策で述べた機能を付加して評価試験を行い、実験装置の性能検証と必要受信局数の評価を進めていく計画である。

[謝辞]

実験装置の設置・調整、ならびに評価試験を実施するにあたり、多大なご協力をいただきました関係各位に深く感謝の意を表します。

[参考文献]

- [1] 宮崎他：“広域マルチラレーションの基礎実験結果”，第10回電子航法研究所発表会講演概要，平成22年6月
- [2] 宮崎他：“広域マルチラレーションの評価試験”，第11回電子航法研究所発表会講演概要，平成23年6月
- [3] ICAO：“Aeronautical Telecommunications”，Annex10 Volume IV, Fourth Edition, July 2007.
- [4] RTCA：“Minimum Operational Performance Standards for 1090MHz Extended Squitter ADS-B and TIS-B, RTCA/DO-260B, December 2009.
- [5] EUROCAE：“Technical Specification for Wide Area Multilateration (WAM) System”，Version 1.0, ED-142, October 2009.