

8. 広域マルチラレーションの評価試験

通信・航法・監視領域 ※宮崎 裕己, 上田 栄輔*, 角張 泰之, 二瓶 子朗, 島田 浩樹
機上等技術領域 古賀 禎
(*: 現国土交通省航空局)

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、これらの整備に加えて高度な運用方式の導入も必要であり、離発着のタイミングが滑走路間で依存し合う井桁運用や、平行滑走路の同時離着陸などが実施または計画されている。

これらの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、ターミナルレーダー（ASR: Airport Surveillance Radar）を利用して行われているが、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、ASRの課題を解決できる監視技術が必要とされており、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。このためWAMの早期の導入が待たれており、諸外国においても評価・導入が積極的に進められている。

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、これを実現可能とする新しい監視技術も求められている。その候補としてADS-B（Automatic Dependent Surveillance-Broadcast）が期待されている。

このような背景から当研究所は、我が国において必要となる監視技術としてWAMとADS-Bを開発する研究^①を実施している。本研究では、WAMの課題となる「少ない受信局数での信頼性の確保」を重点目標として開発を進めている。

これまでに本研究では、ADS-B技術を併せ持つWAM実験装置（以下、実験装置とする）を製作して、東京国際空港（以下、羽田空港とする）周辺の空域を対象に実験装置を設置している。そして、実験装置の基本性能確認を目的としたWAM技術の初期評価を進めている。

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WAM初期評価の結果を報告する。

2. WAMの概要

2.1 測位原理

図1にWAM測位の概要図を示す。WAMでは、航空機に搭載されたトランスポンダが送信する航空機衝突防止装置（ACAS: Airborne Collision Avoidance System）の捕捉スキッタや二次監視レーダー（SSR: Secondary Surveillance Radar）の応答^②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。3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。

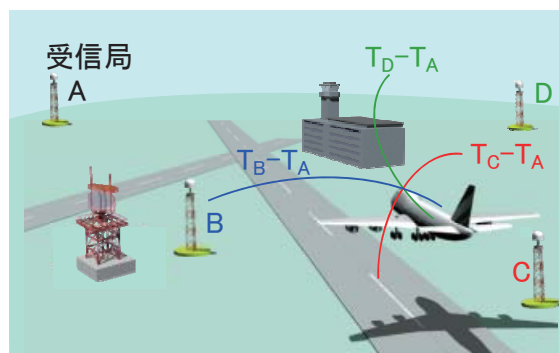


図1 WAM測位の概要図

2.2 WAMの特徴

(1) SSR が持つ課題を改善できる

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。一方 WAM は、1 秒平均での位置更新が可能である。また、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) ADS-B との共用性

図 2 に ADS-B 測位の概要図を示す。ADS-B では、航空機が自機の位置情報を GNSS (Global Navigation Satellite System) から取得して、放送型データリンクを利用して送信する。送信された位置情報は、地上に設置された ADS-B 受信局で検出され、この情報を基に監視が行われる。

このように、ADS-B では GNSS により測位された位置情報を直接利用するため、高機能および高性能な監視を実現できる。ADS-B では、拡張スキッタと呼ばれる放送型データリンクを利用して情報が送信される。拡張スキッタはモード S トランスポンダから送信され、図 3 に示すように WAM が利用する捕捉スキッタや SSR モード S 応答と同じ信号形式である。このため、WAM の地上側装置に ADS-B 情報の解読機能を持たせることで、WAM と ADS-B の共用が可能となる。

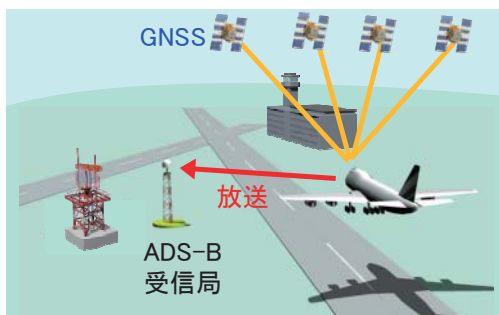


図 2 ADS-B 測位の概要図

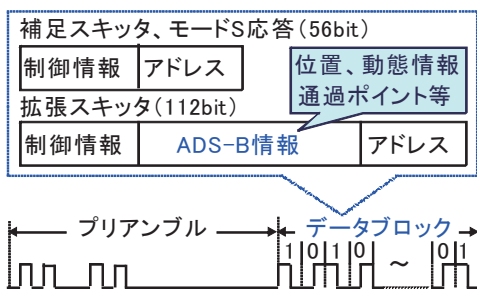


図 3 信号波形とデータブロックの構成

(3) 長期的に有効な監視技術

WAMは、大部分の旅客機や貨物機がモードS トランスポンダを既に装備しているため、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、WAMは前述のADS-Bとの共用性を持つため、WAM導入時にADS-B機能を実装しておくことで、ADS-Bへの効率的な移行を可能とする。さらにWAMは、ADS-Bの運用開始後も位置情報の検証等に必要とされ、長期的に有効な監視技術として位置づけられている。

2.3 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、受信局間の時刻同期精度と時刻検出の分解能で決まる。高い分解能を達成するには、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4のDOP値の分布例で示されるように、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、広い領域に対して良好な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。

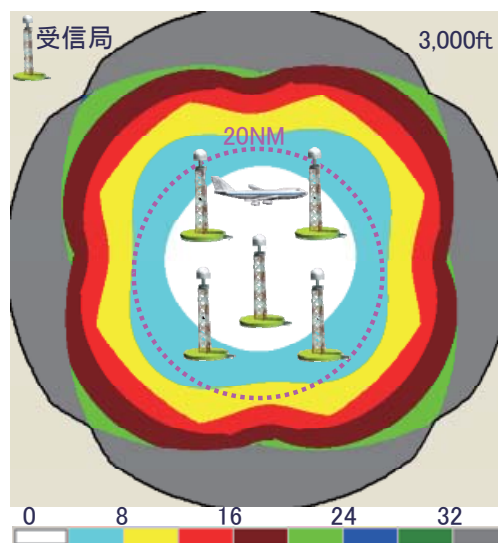


図4 DOP値の分布例

2.4 WAMの課題

WAMの性能を低下させる主な要因は信号干渉である。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。一方、信号内容を誤解読した場合は、検出率が低下する。空港面監視と異なり、WAMは遠方の航空機が送信する微弱な信号を検出する。微弱な信号に強力な干渉信号が重畳した場合、当該信号を正常に検出することは非常に困難となる。信号干渉の対策としては「受信局配置に冗長性を持たせる」ことが一般的である。この対策は、ある受信局で信号干渉が生じた場合、代替りの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、受信局数の増加は弊害も招く。まず、受信局が出力する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。加えて、整備や維持に係る費用の増大をもたらす。WAMは受信局を広範囲に配置するが、遠隔地等は電源や通信線の確保が容易でない。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の高額となり、諸外国において課題となっている。

実運用装置の導入では現実的に費用面の制約があり、理想的な受信局配置を形成することは困難が想定される。以上のことからWAMの課題は、「少ない受信局数での信頼性の確保」となる。

3. WAM実験装置

3.1 実験装置の特徴

少ない受信局数でも信頼性を確保できるように、実験装置に以下の特徴を持たせた。

(1) 信号検出時刻の高精度な測定

WAMの位置精度は、前章の式（1）に示されるように、信号検出時刻の測定精度とDOP値の積で決まる。すなわち、信号検出時刻を高精度で測定できれば、DOP値が良好でないエリアでも相対的に位置精度を維持できる。このため実験装置は、高精度で検出時刻を測定する設計とした。まず、時刻検出の分解能は2ナノ秒（通常10ナノ秒程度）とした。また、受信局間の時刻同期には、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得られる。

(2) 質問機能の活用

WAMは基本的に受動監視方式であるが、質問機能を活用して性能改善を図る。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、得られた応答から再測位を行うことで検出率の改善を図る。加えて、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の改善を図る。これら質問機能による測位補完は、DOPの悪いエリアに対して特に有効である。

(3) 高度な信号処理技術の適用

拡張スキッタを利用するADS-Bでは、信号干渉の影響を軽減する手法として、高度な信号処理技術の適用を推奨している⁽⁴⁾。実験用装置では、プリアンブル検出と誤り訂正処理に関して、推奨される信号処理技術を適用している。

(4) 測位計算方式の改良

航空機位置を算出する測位計算に関して、複数の方式を採用しており、評価結果を踏まえて改良を進める。具体的には、航空機位置（DOP）に基づいて最適な受信局を選択する幾何演算方式と、信号を検出した全ての受信局を利用して計算する収束演算方式を実装している。また、航空機が送信する気圧高度情報の利用も検討している。

3.2 実験装置の構成

図5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WANにより接続される。WAMで得られた監視情報は統合装置に出力され、当研究所の実験用SSRからの監視情報と統合して表示される。受信局5と送信局は平成23年度に設置する計画である。

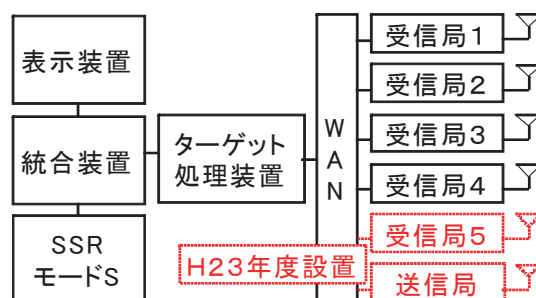


図5 実験装置の構成

3.3 実験装置の配置

実験装置は、羽田空港周辺の空域を対象に設置した。図 6 に受信局配置と各装置の設置状況を示す。受信局は、東京空港事務所、成田空港事務所、大和航空路監視レーダー事務所、および当研究所に設置している。今年度に設置を行う受信局は、木更津・君津付近に配置する計画である。受信局の設置場所は、国土交通省航空局が管理する施設を極力利用した。これは、設置場所や通信回線等

の確保が容易な環境にあるため、実導入時に近い配置での評価を考慮したものである。ターゲット処理装置は当研究所内に設置した。

実験装置間のネットワークには、NTT 東日本が提供するフレッツ光サービスを利用した。地図中の色分けは DOP 値 (3,000ft) の分布を表しており、各色内に記された数値は DOP に基づいて想定される位置精度を示す。ただし初期評価は、最小の受信局構成 (4 局) で実施している。



図6 受信局配置と各装置の設置状況

4. WAM の初期評価

4.1 評価方法

初期評価の目的は最小構成（受信局 4 局）における実験装置の基本性能を確認することである。評価項目は監視覆域、位置精度、検出率とした。

図 7 に初期評価の受信局配置に対して想定される監視覆域と DOP に基づく位置精度を示す。受信局の最低受信感度は-81dBm に設定した。この値を受信距離に変換すると約 60NM となる。この設定では、羽田空港から南東の房総半島方面へは約 40NM の覆域が期待できる。一方、北西方面に関しては、当研究所に設置した受信局で指向性アンテナを利用しているため、想定される監視覆域は期待できない。測位計算には、幾何演算方式を利用している。

位置精度と検出率は、欧州が策定した WAM の性能要件^③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。

性能要件にはターミナルエリア用の規定値を採用した。位置精度は二乗平均誤差から算出している。一方、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。

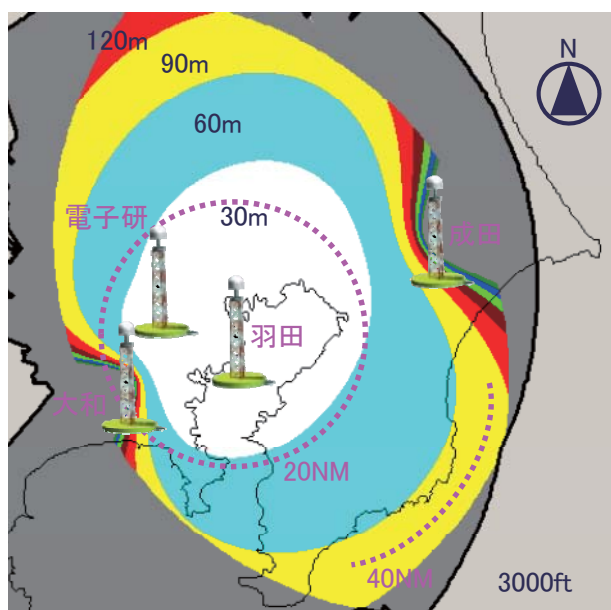
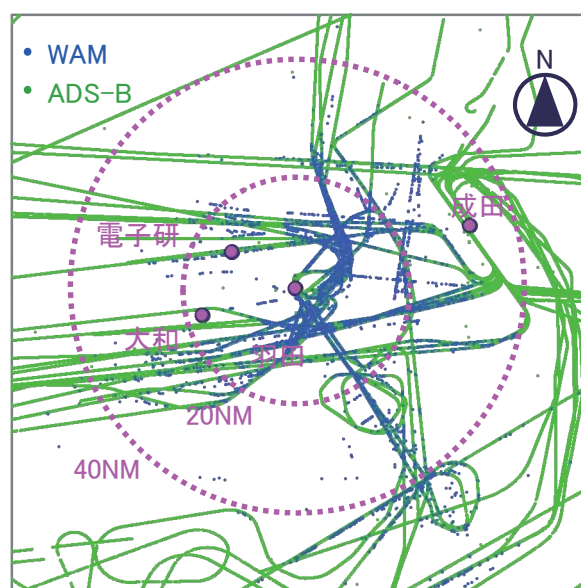


図 7 初期評価で想定される覆域と位置精度

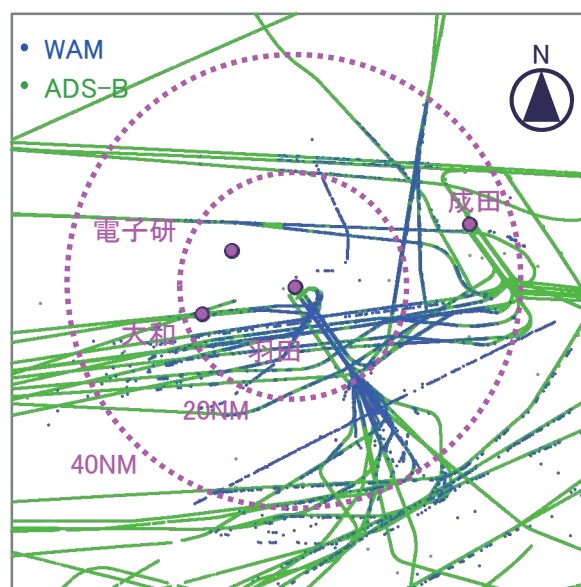
4.2 評価結果

(1) 監視覆域

図 8 に繁忙時間帯（18 時頃）と夜間（21 時頃）に取得した約 1 時間分の航跡例を示す。青色の航跡は WAM、緑色は ADS-B を表す。WAM の覆域は概ね想定される覆域（図 7）が得られているが、特に繁忙時間帯では検出ロスが多く、誤目標も発生している。当研究所から北西側は、指向性アンテナの影響から検出できていない。夜間のほうが安定した航跡が得られている理由は、繁忙時間帯より信号数が少ないためと考えられる。



(a) 繁忙時間帯



(b) 夜間

図 8 WAM と ADS-B の航跡例

(2) 位置精度・検出率

図 9 に北風運用時における到着機の航跡例を示す。青色の航跡は WAM を、緑色は ADS-B を表す。WAM は想定される約 40NM の航跡が得られていることが分かる。また、表 1 に WAM の検出率と位置精度を距離別に示す。WAM の位置精度は 30NM までは性能要件を満たしているが、30NM 以遠では精度が急激に低下している。また想定される精度に対しても、距離に依存して精度の差が広がっている。

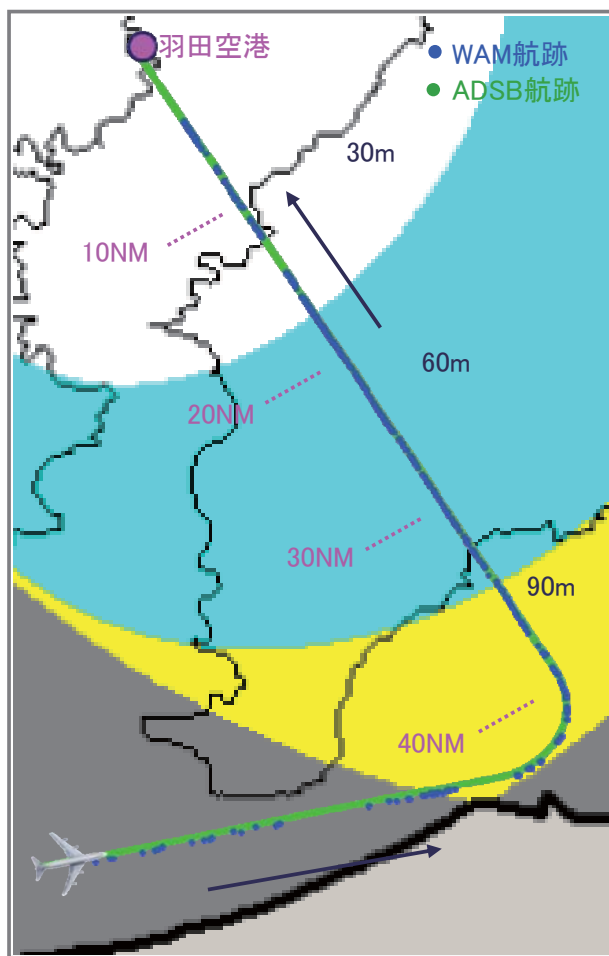


図 9 到着機航跡例

表 1 検出率の性能値

距離	位置精度	検出率	性能要件
～10NM	31.0m	70.4%	位置精度 150m 以下
10～20NM	59.0m	70.0%	
20～30NM	92.6m	93.8%	検出率 97%以上
30～40NM	212m	90.3%	
40NM～	430m	45.8%	

一方、検出率は全体的に性能要件を満足する値が得られていない。空港近傍で検出率が低下している理由は、航空機の高度が低いために、信号の遮蔽が生じて 4 局の受信局で検出できていないためである。このように、最終進入中の航空機を十分な性能で検出するには、空港近傍に受信局を配置することが必要不可欠となる。

これら性能低下の要因として、信号干渉による信号内容の誤解釈や検出時間の誤測定等の影響が考えられる。

5. まとめ

本稿では、WAM の特徴や実験装置の概要を説明して、基本性能の確認等を目的に実施した WAM の初期評価結果を報告した。

初期評価の結果、最小構成での受信局数における基本性能を確認できた。性能値は想定値と比較して、特に遠方において性能低下が発生している。これら性能低下の要因として、信号干渉の影響が考えられる。

今後は、受信局と送信局を設置して評価試験を行い、実験装置の高性能化と高信頼性化の評価を進める。

[謝辞]

実験装置を設置するにあたり多大なご協力をいただきました。東京航空局、東京空港事務所、成田空港事務所、および大和航空路監視レーダー事務所の関係各位に深く感謝の意を表します。

[参考文献]

[1] 宮崎他：“広域マルチラテ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] ICAO：“Aeronautical Telecommunications”，Annex10 Volume IV, Fourth Edition, July 2007.

[3] EUROCAE：“Technical Specification for Wide Area Multilateration (WAM) System”，Version 1.0, ED-142, October 2009.

[4] RTCA：“Minimum Operational Performance Standards for 1090MHz Extended Squitter ADS-B and TIS-B, RTCA/DO-260B, December 2009.