

2. WAMにおける性能改善方式の評価

監視通信領域 ※島田 浩樹*, 宮崎 裕己, 古賀 禎, 松永 圭左, 角張 泰之, 本田 純一, 二瓶 子朗
(* 現 国土交通省 航空局)

1. まえがき

我が国の将来の航空交通システムの構築にあたり、航空交通量の増大等のニーズに対応するために効率的な航空サービスの実現と更なる安全性の向上が求められている。例えば、平行滑走路を有する成田空港では空港容量を増大させるために、同時着陸/同時出発方式という運用方式を導入しているが、好天時の視程が良好な場合に限定して運用されている。現行の二次監視レーダー（SSR: Secondary Surveillance Radar）では、位置の更新頻度が低いことや空港近傍で性能が低下するなどの課題があるため、低視程時においてもこのような運用を実施するためには近接して飛行する航空機の位置を高頻度かつ高精度で測位する航空機監視システムの導入が必要不可欠となる。もう一つは CARATS^④の中で示されている将来の航空交通管理の運用概念に、軌道ベース運用（TBO: Trajectory Based Operation）がある。これは、全ての航空機の出発から到着までの全飛行フェーズにおいて、時間管理を導入した4次元軌道によって航空交通管理を行うものである。このTBOを実現するためには、シームレスかつ高性能な航空機監視が要求されている。これらを実現可能とする新しい航空機監視システムの一つに広域マルチラテレーション（WAM: Wide Area Multilateration）が挙げられている。

このような背景から当研究所では、WAM技術の確立ならびに監視覆域を効率的に拡大する技術の開発・評価を進めている。これまでWAM実験装置（以下、実験装置とする。）を試作し、東京国際空港（以下、羽田空港と称する。）の空域を対象に設置して、主に基本性能に関する評価を実施してきた^{④⑤}。当該評価においては、受信局配置の外側となる遠方での性能低下が確認されており、原因の一つとして、性能が受信局の配置に依存することが挙げられる。また、昨年度は高度情報を活用した2次元測位方式について検

証し、遠方において測位誤差が減少することを報告したが、この方式でも受信局配置に依存することは避けられないため、十分遠方では大きな改善効果は期待できないという課題がある。今後、WAMを航空路監視に適用していく場合、受信局をより広く配置することで覆域の拡大が可能となるが、この方法では整備・維持費用の増大を招くことや、海岸線沖合では受信局を配置できないなどの制約が発生するため、遠方での性能低下を改善できる測位方式の開発が重要となる。その候補として、質問機能を活用して得られる測定距離を位置算出に利用する測位方式（Ranging測位と呼称する。）が挙げられる。本稿では、このRanging測位方式について、実験装置を用いた評価結果を基に報告する。

2. WAMの概要

WAMは、航空機に搭載されたトランスポンダが送信するSSRの応答信号および航空機衝突防止装置（ACAS: Airborne Collision Avoidance System）のスキッタ信号から、航空機の位置を算出する受動型監視システムである。モードSトランスポンダは、図1に示すSSRモードS信号形式^⑥の応答信号を送信する他に、同様の信号形式

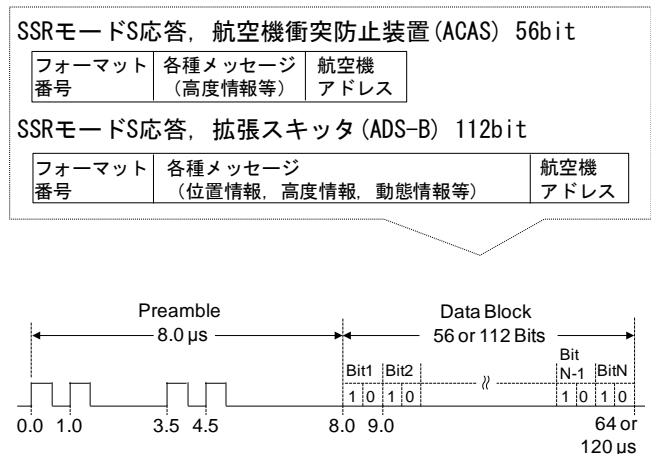


図1 SSRモードS信号形式

であるスキッタ信号を自発的に送信する。ACASは、その構成要素としてモードSトランスポンダを持ち、大部分の旅客機に搭載が義務付けられている。このためWAMの利用において、航空機側に追加装備を必要としない利点がある。WAMはスキッタ信号を含む全ての信号を測位に利用することで、高頻度な位置検出が可能となる。更に、新しい航空機監視方式である放送型自動位置情報伝送・監視機能（ADS-B：Automatic Dependent Surveillance-Broadcast）⁷⁾において利用される拡張スキッタ信号がある。ADS-BとはGNSS（Global Navigation Satellite System）から取得された自機の位置情報を送信するもので、WAMでは、この信号も測位に利用できるとともに、信号内容を解読してADS-B位置情報を取得することも可能である。一方、WAMはSSRモードA/C信号を利用した測位も可能である。このモードA/C信号は、自発的に送信されないため、安定した測位を行うためには、WAMから積極的に質問を行い、応答を得る必要がある。

図2に、WAMの測位原理を表した概略図を示す。測位原理は、初めに地上に配置した複数の受信局が信号到達時刻を測定するとともに信号内容を解読する。次に、同じ航空機からの信号をまとめて、その信号同士の到達時間差（TDOA：Time Difference Of Arrival）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、距離差が一定という条件からなる双曲面同士の交点を求めることで3次元による航空機の位置を算出する。このためWAMでは、4局以上の受信局で

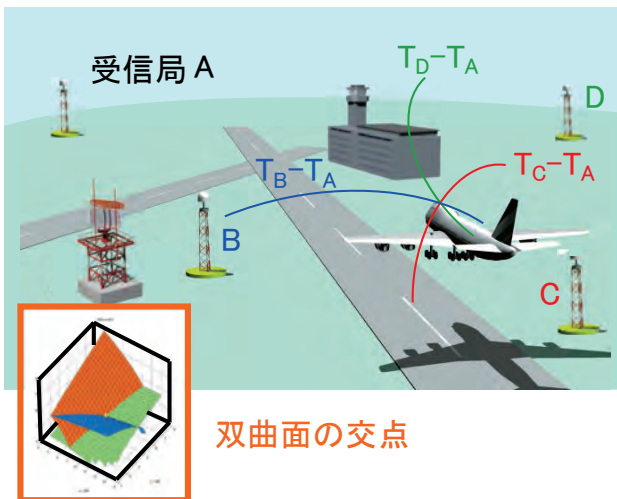


図2 WAMの測位原理を表した概略図

信号検出することが必要となる。

ところで、WAMにおける監視では3次元の位置情報が要求されるが、高度はSSRと同様に航空機からダウンリンクされた高度情報が使用されるため、測位結果は水平方向のみ利用される。WAMは基本的に受動型監視であるため、SSRの高度要求に対する応答信号が得られない場合は、高度情報を更新していくことができない。よって、積極的に高度情報を取得できる手段が必要である。また、信号干渉などの理由で測位ができなかった場合、積極的に質問信号を送信して、得られた応答信号から測位を行う手段も必要である。これらの理由から、WAMにおいてもSSRと同等の質問信号を送信できる送受信局を備える必要があり、これを装備することで高性能かつ安定した航空機監視を行うことが可能となる。また送受信局は、SSRと同様に航空機までの距離を測定することができ、後述するRanging測位にも活用することができる。

3. WAMの測位性能と課題

前章において、WAMのTDOAによる測位と水平方向の測位結果の利用について記述した。ここで、測位とは移動体（航空機）を様々な計算方法によって推定した位置を算出することであり、真の位置と測位位置は少なからず誤差を有する。本章ではWAMの測位性能を決定する要素である測位誤差とその課題を説明する。

通常のTDOA測位における測位誤差 σ_p は、距離差（信号到達時間差）の測定誤差 σ_d と、航空機と受信局の位置関係で決まる精度劣化指数（DOP：Dilution Of Precision）⁸⁾を乗じることで概算でき、一般的に式(1)で表される。

$$\sigma_p = \sigma_d \times DOP \quad \dots (1)$$

ここで、 σ_p と σ_d は標準偏差の値である。 σ_d は時刻検出の正確さに依存し、良好な値を得るには、信号検出のサンプリング周波数を増加させて高い時刻分解能を得ることで、各受信局間の時刻を正しく同期させることが重要である。 σ_d は時刻測定誤差に伴い大きくなり、時刻誤差1ナノ秒は約0.3mの誤差に相当する。一方DOPは、水平方向のDOPであるHDOPが指標となる。HDOP値

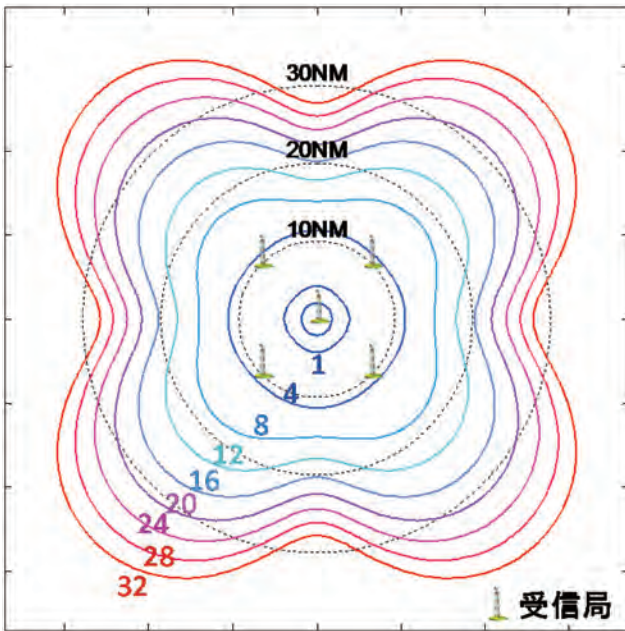


図3 HDOP 分布図 (高度 10,000feet)

は図3の分布図が示すように、受信局が航空機を取り囲む内側では小さい値となり、外側では大きい値となる。HDOPは受信局配置に依存して決定される値であり、また信号検出された受信局数によっても変化する。基本的に受信局配置の外側ではHDOPは増加していくため、遠方になるほど測位誤差が増加する。このため、広い覆域に対して良好なHDOPを確保するには、受信局を広範囲に設置することが必要になる。しかしながら、監視対象空域に海上が含まれるなど、受信局を理想的に配置することは困難となる場合が発生する。この場合、受信局配置の外側となる遠方での原理的な性能低下を改善する解決策の一つとして、送受信局による測定距離を位置算出に活用するRanging測位が提案されている。図4-1ならびに図4-2にRanging測位原理の概略図を、簡単のため双曲線と真円を用いて示す。Ranging測位は、TDOAにより描ける複数の双曲線に、送受信局を中心とした測定距離より描ける真円を加えて、複数の双曲線と真円との交点を推定位置として算出するものである。遠方では双曲線同士がほぼ平行に交わるため、交点の移動範囲が大きくなり、測位誤差が増大する。一方、真円は双曲線とほぼ直交するため、交点の移動範囲を限定できることから、増大する測位誤差の抑制が可能となる。

TDOA測位の計算方法としては、ニュートン法により収束演算を行うとともに最小自乗法を利

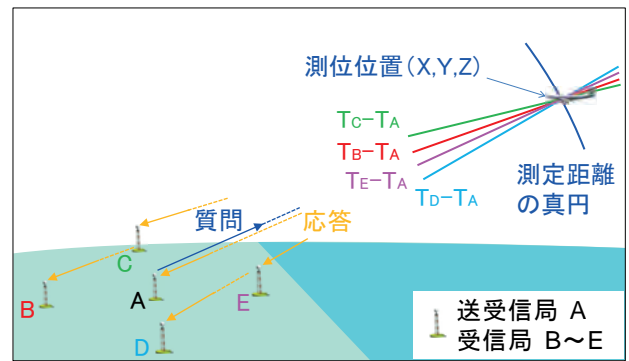


図 4-1 Ranging 測位原理の概略図 1

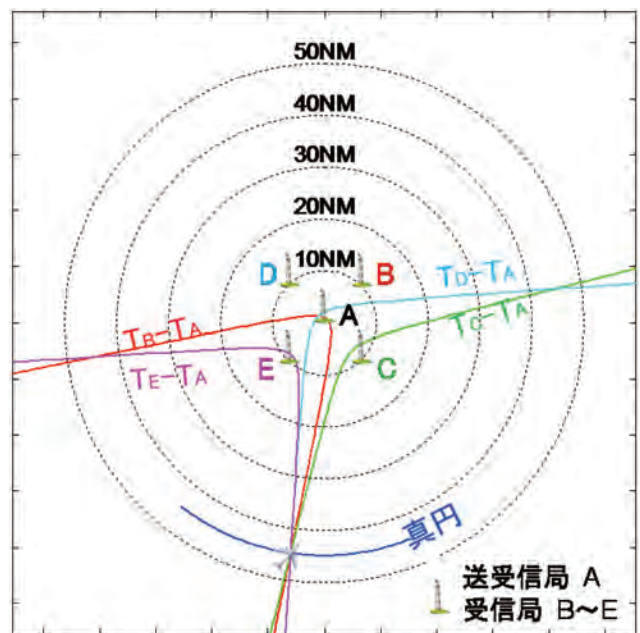


図 4-2 Ranging 測位原理の概略図 2

用して計算している [9],[10]。Ranging測位も同様の収束演算方式で、TDOAの計算式に、送受信局による測定距離の計算式を連立させて計算するシンプルな方法である。詳細は参考文献[11]を参照願いたい。

4. 実験装置の概要

本章では、電子航法研究所の実験装置について、装置の構成、各装置の機能概要および配置状況を説明する。

4.1 装置の構成

図5に装置の構成を示す。装置は受信局、送受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。

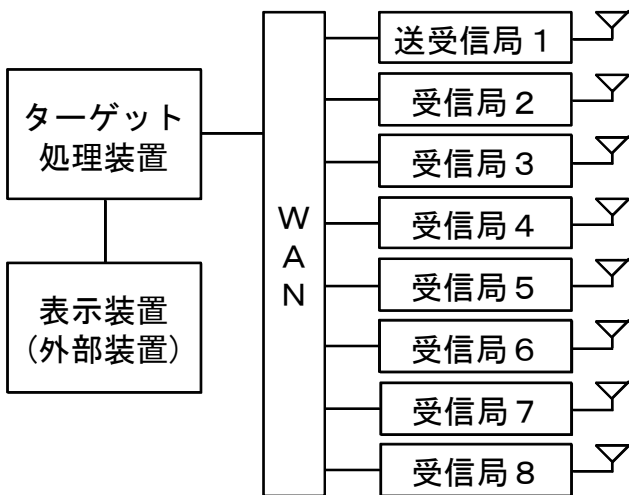


図5 装置の構成

なお、受信局6～8は当研究所が共同研究を行っている日本電気株式会社の設備品である。

4.2 各装置の機能概要

4.2.1 受信局

受信局は、SSR 応答信号やスキッタ信号を受信して、信号到達時刻測定および信号内容の解読を行い、ターゲット情報として送出する。主要な機能に最低受信感度の設定を有しており、微弱な信号にも対応できる。受信アンテナは最大 9dB のアンテナ利得を持つ無指向性アンテナを使用している。なお、信号検出においては、時刻分解能に 2 ナノ秒のサンプリング周波数を採用しており、一般的な分解能（10 ナノ秒程度）よりも高精細な時刻検出が可能となっている。

4.2.2 送受信局

送受信局は、送信部と受信部の2つの機能に分けられる。送信部では、ターゲット処理装置からの質問制御に従って、航空機に対してSSR質問信号を送信する。なお、送受信アンテナには受信局と同等の無指向性アンテナを使用している。一方、受信部では受信局と同等の動作に加えて、質問信号と応答信号の関連付けを行っている。

4.2.3 ターゲット処理装置

ターゲット処理装置は、受信局および送受信局から送出されたターゲット情報を航空機毎にまとめて測位計算処理を行う他、送受信局への質問

制御、受信局間の時刻同期制御および追尾処理等を行っている。また、ADS-B解読機能を実装しており、ADS-B搭載機から放送された位置情報を出力する。受信局間の時刻同期制御方式には、一般的なGPS（Global Positioning System）方式よりも高い同期精度が実現できるGPSコモンビュー方式を採用している。GPSコモンビュー方式とは、受信局間で同一のGPS衛星からの信号を同時に受信することにより、衛星が持つ時計誤差を相殺して高精度な時刻同期を図る方式である。

4.3 各装置の配置状況

図6に受信局および送受信局の配置図を示す。また、図中の等値線は、本配置において受信局間の時刻誤差を 50 ナノ秒としたとき想定される測位誤差の分布（10,000feet）を示す。羽田空港に送受信局を、図中の各所に受信局を配置した。

各受信局の最低受信感度を-85dBm（受信距離：100NM）に設定することで、羽田空港を中心とした 60NM 以上の覆域が得られることを確認した。特に、羽田空港から見て南側方向においては多くの出発／到着機の飛行ルートとなっており、図6の誤差分布が示すとおり、この方向の位置検出には有効な配置としている。

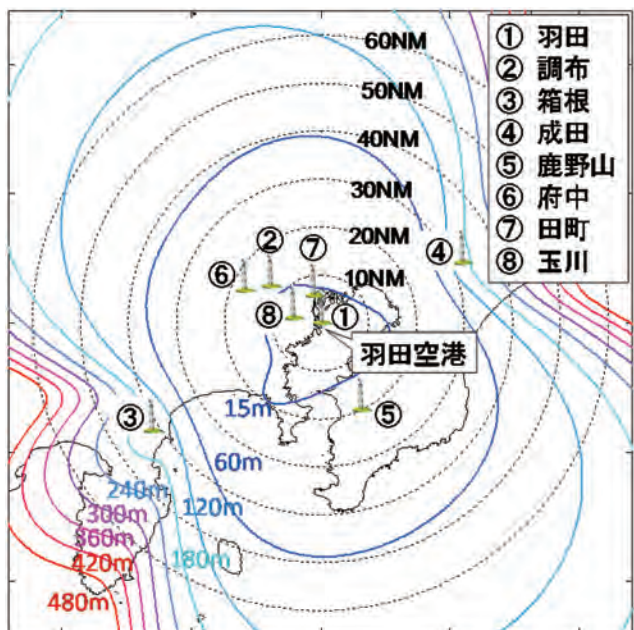


図6 受信局および送受信局の配置図
 想定される測位誤差の分布
 （受信局間時刻誤差 50 ナノ秒・高度 10,000feet）

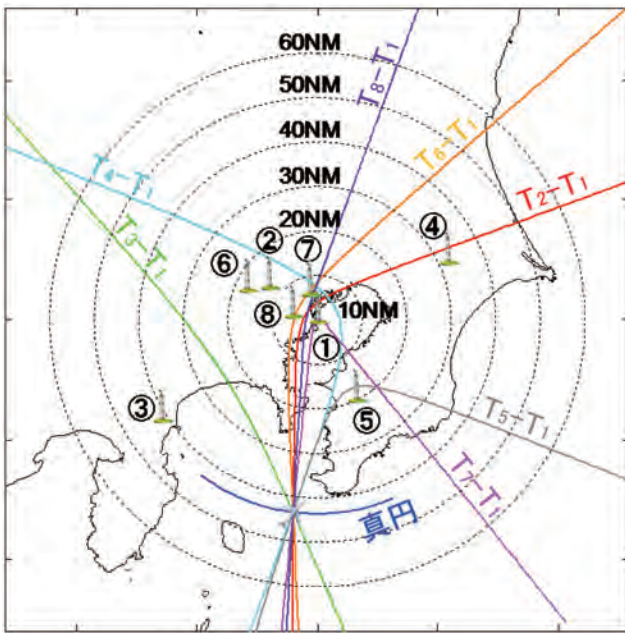


図7 実際の配置における Ranging 測位の概念図

図7に実際の配置における Ranging 測位の概念図を示す。これは、航空機が45NM付近の沿岸部上空を航行中に、Ranging 測位を行った場合を想定して描いた図である。双曲線に対して真円が直交する形となっており、高精度な Ranging 測位が期待できる。

5. 評価

5.1 評価方法

評価対象航空機は、昼間と夜間における羽田空港の南側から進入する到着機（ADS-B 搭載機）とした。実験装置でモードS 応答信号による実測データを取得して、計算機を用いたオフライン計算にて TDOA 測位および Ranging 測位を行い、比較評価を実施した。なお、Ranging 測位では、ICAO 規定¹⁰からトランスポンダ内の処理遅延時間 132.75 マイクロ秒を考慮して測位計算している。また、送信可能覆域については、送受信局を中心とした半径 50NM までの設計になっているが、実際に送信すると 70NM 弱まで質問に対する応答が得られることを確認できた。送信する質問信号は、モードS 質問（UF4：高度要求）であり、送信周期は1秒間隔とした。

評価項目は測位誤差（水平方向）および検出率、質問信号に対する応答信号の取得率の3項目とし、昼間と夜間の比較を行った。1つめの測位誤

差については、誤差を算出する際の真位置には、航空機が放送する ADS-B 位置情報を利用して、二乗平均誤差値（RMS：Root Mean Square）で算出した。この誤差を算出するに当たり、誤目標（誤目標排除条件：ADS-B 位置に対して1,000m 以上離れた測位結果および前回の測位位置から計算される速度 500m 毎秒以上の測位結果）は排除している。なお、ADS-B 位置情報は GNSS 測位自体の誤差や位置情報を送信するまでの時間的遅延等による誤差が含まれるため、本測位誤差は参考値である。2つめの検出率については、更新時間内における測位結果（誤目標を排除した測位結果）の有無から算出した。3つめの質問信号に対する応答信号の取得率については、質問信号と応答信号の関連付けを行って、質問数と応答数を計上し、取得率を計算した。なお、WAM の性能は受信局配置に依存するため、全ての項目について羽田空港を中心とした距離区分毎に算出した。規定値として、欧州が策定した WAM 監視性能要件¹²を参照している。

5.2 評価結果

5.2.1 測位誤差（水平誤差）

はじめに Ranging 測位で性能改善が期待される測位誤差の評価結果について述べる。図8に夜間の評価対象機における各測位結果の航跡図を示す。なお、図8上図は ADS-B 航跡および TDOA 測位による WAM 航跡、Ranging 測位による WAM 航跡を重ねて表示しており、下図では拡大表示において各測位結果をマーカー別に示した。下図に示すとおり、Ranging 測位は TDOA 測位よりも真位置（ADS-B 位置）により近い位置で測位されている。また、表1および表2に昼間と夜間の評価対象機における距離区分毎の測位誤差（RMS）を示す。各測位結果の誤差値を比較すると、2~30NM ではあまり差は見られなかったが、30~70NM では Ranging 測位の方が大幅に改善されることを確認した。また Ranging 測位は、60NM 以内の空港用エリアでは 150m 以下、60NM 以上の航空路用エリアでは 350m 以下の性能要件を満足する結果となった。一方、送受信局から近傍の距離区分では Ranging 測位による大幅な改善は得られていない。この理由として、トランスポンダ内における質問受信から応答

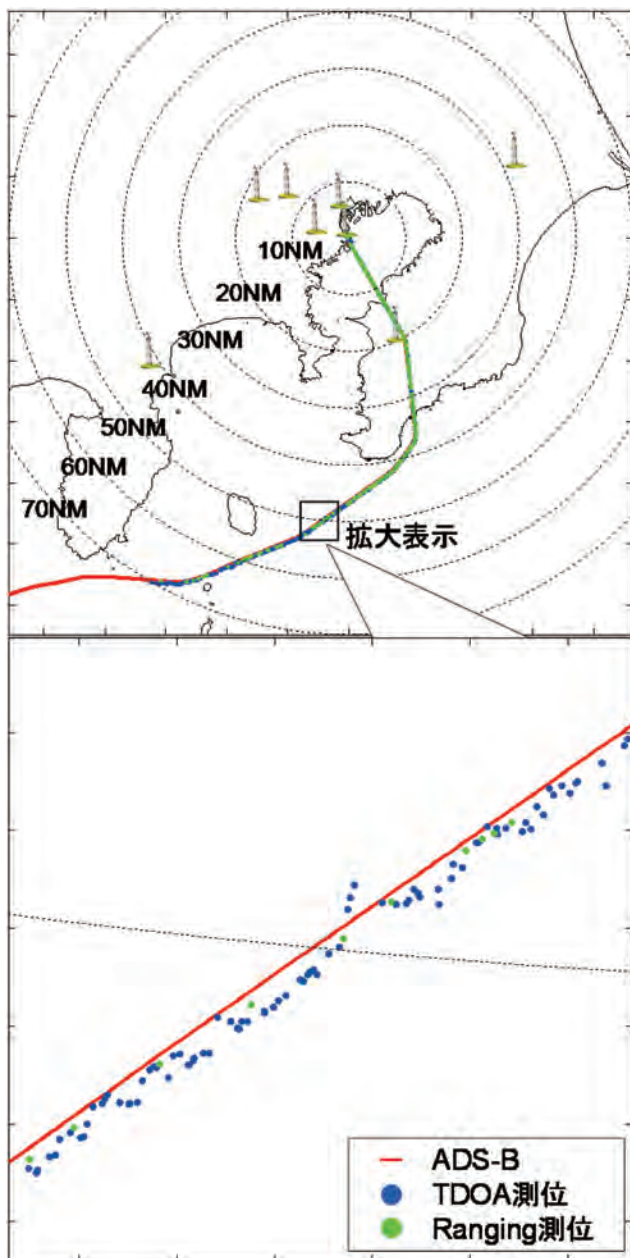


図 8 各測位結果の航跡図（夜間）

送信までの処理時間のバラツキ等が挙げられる。このバラツキは測定距離の誤差、すなわち真円を描く線の幅となる。このため、双曲線と真円との交点は相応の移動範囲を有する。これに対して、送受信局から近傍の区分、すなわち受信局配置の内側では、双曲線同士の交点の移動範囲は狭いことから、Ranging 測位の効果が得られない。一方、遠方における双曲線同士の交点の移動範囲と比較すると、真円を描く線は大幅に狭い。このため、前述したとおり、Ranging 測位による測位誤差の改善効果は高く、実際に有効性が確認できた。

表 1 距離区分毎の測位誤差 (RMS) (昼間)

距離区分	TDOA 測位	Ranging 測位
2~10NM	36.6 m	28.7 m
10~20NM	58.1 m	58.8 m
20~30NM	127.7 m	112.7 m
30~40NM	183.1 m	113.8 m
40~50NM	152.6 m	119.8 m
50~60NM	248.6 m	109.8 m
60~70NM	366.2 m	135.0 m
性能要件	空港用 150 m (RMS) 以下 航空路用 350 m (RMS) 以下	

表 2 距離区分毎の測位誤差 (RMS) (夜間)

距離区分	TDOA 測位	Ranging 測位
2~10NM	35.1 m	32.7 m
10~20NM	52.6 m	43.9 m
20~30NM	87.0 m	80.1 m
30~40NM	118.8 m	84.7 m
40~50NM	132.5 m	99.4 m
50~60NM	249.0 m	145.5 m
60~70NM	511.8 m	160.1 m
性能要件	空港用 150 m (RMS) 以下 航空路用 350 m (RMS) 以下	

5.2.2 検出率

次に、検出率の評価結果について述べる。更新間隔の規定は空港用で 5 秒以内、航空路用で 8 秒以内となっており、本評価では空港用の更新間隔で算出した。表 3 および表 4 に昼間と夜間の評価対象機における距離区分毎の検出率を示す。検出率においても測位誤差と同様に各測位結果の比較で検証した。表に示すとおり、TDOA 測位では、スキッタ信号等により多数の検出が得られるため、全ての区分で性能要件の 97%以上を満足した。一方、Ranging 測位では、大半の区分で性能要件を満足しない結果となり、遠方になるほど検出率は減少した。Ranging 測位においては、質問信号と応答信号を対で利用するため、質問信号に対する応答信号の取得率が低いと測位数自体が減少してしまうことが原因と考えられる。WAM 全体の性能向上のためにも Ranging 測位の検出率を向上させることが課題となる。次の項目で検出率にも関係する、質問信号に対する応答信号の取得率について評価を実施した。

表 3 距離区分毎の検出率（昼間）

距離区分	TDOA 測位	Ranging 測位
2～10NM	100 %	75.0 %
10～20NM	100 %	73.5 %
20～30NM	100 %	61.5 %
30～40NM	100 %	65.3 %
40～50NM	100 %	83.3 %
50～60NM	100 %	58.6 %
60～70NM	100 %	42.4 %
性能要件	空港用 97%以上 航空路用 97%以上	

表 4 距離区分毎の検出率（夜間）

距離区分	TDOA 測位	Ranging 測位
2～10NM	100 %	93.0 %
10～20NM	100 %	100 %
20～30NM	100 %	90.6 %
30～40NM	100 %	100 %
40～50NM	100 %	86.8 %
50～60NM	100 %	58.6 %
60～70NM	100 %	38.4 %
性能要件	空港用 97%以上 航空路用 97%以上	

5.2.3 質問信号に対する応答信号の取得率

最後に、質問信号に対する応答信号の取得率の評価結果を述べる。応答信号の判定方法として、質問信号から 1 ミリ秒の応答判定ゲートを設けて、航空機識別情報（アドレス）とモード S 応答フォーマット（DF4：高度監視）が一致し、かつゲート内に入る信号をカウントした。表 5 および表 6 に昼間と夜間の評価対象機における距離区分毎の質問信号に対する応答信号の取得率を示す。送受信局から距離が離れるほど取得率は低下し、また夜間は昼間と比較して約 5～20%良くなることが確認された。取得率が減少する原因として、1,090MHz の信号環境の影響が考えられる。現在の送受信局には無指向性アンテナを使用しており、覆域を拡大するため最低受信感度を高く設定しているが、近傍航空機の SSR 応答信号や使用周波数帯の近い DME（Distance Measuring Equipment）の強い信号を受信して、遠方の微弱な信号と重畳されると検出数が減少するもの

表 5 質問に対する応答の取得率（昼間）

距離区分	質問数	応答数	取得率
2～10NM	174 個	110 個	63.2 %
10～20NM	164 個	97 個	59.1 %
20～30NM	143 個	64 個	44.8 %
30～40NM	120 個	55 個	45.8 %
40～50NM	116 個	45 個	38.8 %
50～60NM	155 個	57 個	36.8 %
60～70NM	156 個	37 個	23.7 %

表 6 質問に対する応答の取得率（夜間）

距離区分	質問数	応答数	取得率
2～10NM	212 個	148 個	69.8 %
10～20NM	201 個	149 個	74.1 %
20～30NM	166 個	95 個	57.2 %
30～40NM	155 個	83 個	53.5 %
40～50NM	195 個	116 個	59.5 %
50～60NM	147 個	69 個	46.9 %
60～70NM	118 個	33 個	28.0 %

と考えられる。

取得率の向上は、SSR モード A/C 信号による WAM 測位においても改善すべき課題となっている。今後の対策として、送受信局にセクタ型空中線を使用し、送・受信における空中線利得を上げるとともに、他方向からの応答信号を抑制して、質問信号に対する応答信号の取得率ならびに検出率を改善させることを検討している。

6. まとめ

本稿では、WAM の概要を述べ、基本の TDOA 測位方式による受信局配置の外側において測位誤差が増大するという課題と、その解決策として質問機能を活用して得られる測定距離を位置算出に利用する Ranging 測位方式について説明した。そして、実験装置による実測データを用いた TDOA 測位および Ranging 測位を行って、項目毎に評価結果を示した。TDOA 測位では配置した受信局の外側、特に遠方のエリアになるほど測位誤差が大きくなるが、Ranging 測位方式では遠方になるほど測位誤差が大幅に改善できることを確認した。一方、検出率や質問信号に対する応答信号の取得率では、遠方のエリアでは十分な値が得られず課題となっている。

今後は、実験装置にセクタ型空中線およびその送受信局を追加して、監視対象空域の拡大を図るとともに、信号環境に配慮した効果的な質問・応答機能を具現化して、更なる性能向上と WAM の航空路利用に向けた評価を実施する計画である。

[謝辞]

実験装置の設置・調整，ならびに評価試験の実施において，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] 国土交通省，“CARATS 将来の航空交通システムに関する長期ビジョン”，将来の航空交通システムに関する研究会，2010.
- [2] 宮崎裕己他，“広域マルチラテレーシオンの基礎実験結果”，第10回電子航法研究所発表会講演概要，平成22年6月
- [3] 宮崎裕己他，“広域マルチラテレーシオンの評価試験”，第11回電子航法研究所発表会講演概要，平成23年6月
- [4] 島田浩樹他，“広域マルチラテレーシオンの評価試験”，第12回電子航法研究所発表会講演概要，平成24年6月
- [5] 島田浩樹他，“広域マルチラテレーシオンの評価試験結果”，第13回電子航法研究所発表会講演概要，平成25年6月
- [6] ICAO: “Aeronautical Telecommunications”, Annex10 Volume IV, Fourth Edition, July 2007.
- [7] RTCA: “Minimum Operational Performance Standards for 1090MHz Extended Squitter ADS-B and TIS-B, RTCA/DO-260B, December 2009.
- [8] 坂井丈泰，GPS技術入門，東京電機大学出版局，東京，2013.
- [9] 松山実，基礎数値解析，株式会社昭晃堂，東京，平成6年10月
- [10] 福島荘之介，“理解するためのGPS測位計算プログラム入門(その3) 測位計算のはなし”，航空無線 2003 第36号（夏期）
- [11] 島田浩樹他，“測定距離を利用した広域マルチラテレーション測位方式の評価結果”，IEICE Technical Report SANE 2013-123.

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