

6. 空港面監視用マルチラレーションについて

通信・航法・監視領域 ※上田 栄輔*, 宮崎 裕己, 角張 泰之, 二瓶 子朗
機上等技術領域 古賀 禎

(* : 現国土交通省航空局)

1. はじめに

我が国においては、東京国際空港を始めとする主要空港の拡張が進められており、複雑化する飛行場管制業務への支援および誤進入対策としてマルチラレーションの運用および整備が進められている。

マルチラレーションとは、現用の空港面探知レーダー（ASDE : Airport Surface Detection Equipment）で指摘されている問題点を克服できる特徴を持つ監視システムである。

このマルチラレーションにおいて十分な性能を発揮させるためには、導入する空港のレイアウトに対応した適切な位置に受信局アンテナを配置することが極めて重要である。また、マルチラレーションには時刻同期に必要な基準送信局の配置や、空港面で特に発生しやすいマルチパス対策など他にも重要なファクターがあり、これらを包括して検討する必要がある。

電子航法研究所では、これまでに東京国際空港、成田国際空港、関西国際空港において導入に向けた事前評価を実施してきており、これらの評価結果からマルチラレーションで十分な性能を得るために必要な技術要件等について検証を行ってきた。そして、電子航法研究所ではこれらの技術要件を取りまとめた技術資料を作成しており、本稿ではこれをもとにマルチラレーションに関する歴史、技術、評価について説明する。

2. マルチラレーション開発の歴史^{[1][2]}

第 2 次世界大戦後、民間航空需要は右肩上がりに増加して、空域および空港面における航空機の過密化が問題となった。空域については、レーダーの整備や航空機衝突防止装置の義務化などで安全性に大きな役割を果たしてきた。

一方、空港面管制では従来から管制官が音声通信および目視で確認して、航空機に指示を行う方式で行ってきた。ASDE の導入により安全性に対

して一定の効果が得られたが、1 次レーダーの特性上、雨天時に性能が低下することや、航空機を識別できないことなどの課題が指摘されてきた。

このような状況下において、テネリフェ空港の滑走路上でボーイング 747 型機同士の衝突により乗客乗員 583 人が犠牲となる大惨事が発生した。事故発生時は、濃霧により管制官およびパイロットそれぞれが目視による確認ができない状況にあった。

米国連邦航空局（FAA : Federal Aviation Administrator）は、空港内における事故発生を防止するため、リンカーン研究所に滑走路状態表示灯（RWSL : Runway Status Light）の研究開発を課した。RWSL で重要となるのは、航空機の位置を把握するためのセンサーであり、高い性能を必要とするため実現が容易ではなかった。

1974 年、Bendix 社はローガン国際空港で高い精度の監視センサーを実証した。この評価では、約 4.6m の位置精度が報告された。当時の航空機は、モード A/C だけで運用されており、センサーからの質問信号に対して、航空機が一斉に応答信号を送信するため誤解釈が多く発生した。Bendix 社は、地理的条件により選択的に質問する大きなアンテナを使用することで問題を解決した。そして、空港周辺に受信局を 3 局以上配置して、双曲線の交点により航空機の位置を求めた。このシステムがマルチラレーション（以下 MLAT とする）と呼ばれている。しかしながら、アンテナが非常に高価であるため導入されることはなかった。この後、国際的にモード S トランスポンダおよび ACAS（Airborne Collision Avoidance System）の導入が進められ、これらの技術の確立によって MLAT 開発が加速されることとなる。

1994 年、リンカーン研究所は Cardion 社とともにアトランタ国際空港でウィスパー/シャウト機能を備えた新型 MLAT 装置の実験を行った。

この実験では多くの成果を収め、導入に向けて大きく前進した。Sensis 社は、Cardion 社からこの技術を取得して、改良を加えた MLAT 装置の実験をダラス・フォートワース空港で行った。この実験では、6 局の受信装置を使用した。評価の結果、覆域が空港全体の 96.8%となり、MLAT 運用に向けて大きな成果が得られた。

2002 年、英国ヒースロー空港で Sensis 社製の MLAT 装置が世界で初めて運用され、その後米国、独国など世界中の空港で導入されることとなった。

わが国では、電子航法研究所にて 2001 年より MLAT 装置の開発・評価に着手して、2003 年に仙台空港で基礎実験を行った。本実験の MLAT 構成は、基準送信局 1 局、受信局 3 局、送受信局 2 局であり、滑走路と一部の誘導路で基本機能の検証を行った。評価結果として、位置精度 4.2m、検出率 100%が得られたが、一部のエリアではターゲットの欠落や追尾停止などが発生して、更なる検証を行う必要があった。2004 年には受信局を追加して、設置方法やパラメータの見直しなどでターゲットの欠落や追尾停止が大きく改善された。そして、2005 年より東京国際空港への導入評価を開始した³⁾。翌年には MLAT 評価および ASDE 装置と統合した相互補完機能について検証が行われ、いくつかの課題が確認されたが、改善策を適用することでほぼ全てのエリアで欧州の性能要件⁴⁾を満たす事を確認した。

そして、国土交通省航空局にて東京国際空港および成田国際空港への MLAT 導入が決定された。

3. マルチラレーション技術

3.1 マルチラレーションの特徴

MLAT は、ASDE において指摘されている問題点を克服できる特徴を持つ。以下に MLAT の主な特徴を示す。

- ①コールサインの画面表示を可能とする
- ②悪天時でも性能が劣化しない
- ③ASDE の非検出エリアを補完できる
- ④航空機側に追加装備を必要としない

3.2 マルチラレーションの構成

MLAT の構成は、時刻同期方式やメーカーの設計指針で異なるが、一般的に図 1 に示すように

受信局、ターゲット処理装置、動作監視装置、基準送信局で構成される。必要な受信局数は、空港の規模やレイアウトにより異なる。また、時刻同期がトランスポンダ方式の場合、基準送信局が必要である。この基準送信局は、システムの動作状態を常時監視するモニタ局としても利用される。MLAT の測位計算、ターゲットレポート出力などはターゲット処理装置で行う。本装置では、算出位置を基に追尾処理を行い、平滑位置を最終的なターゲットレポートの位置として出力する。追尾処理は、カルマンフィルタを採用しており、ターゲットに対して静止、加速、等速運動などの状態を判断して最適な追尾処理を行う。この追尾処理により、現在位置から次の位置を予測して、予測位置を中心に一定範囲のゲートをかける。そして、MLAT 測位位置が予測ゲートの範囲に収まらない場合には棄却される。ターゲットレポートは、欧州の EUROCONTROL が監視用データとして統一した ASTERIX フォーマットで管制システムへ送信する。

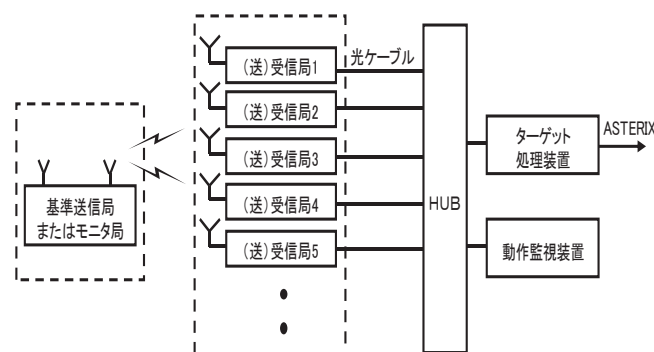


図 1 MLAT の一般的な構成

3.3 マルチラレーション測位原理

図 2 に MLAT の測位原理を示す。MLAT は、航空機のトランスポンダから送信されるスキッタや二次監視レーダー（SSR）のモード S 信号を 3 カ所以上の受信局で受信し、受信局間の受信時刻差を各受信局と航空機との距離差に変換して、距離差が一定である条件からなる双曲線同士の交点を求めることで航空機の位置を算出する。また、MLAT の性能は時刻同期、信号検出および測位対象と受信局アンテナとの幾何学的な位置関係からなる 3 つのファクターに依存する。以下にそれぞれの概要について説明する。

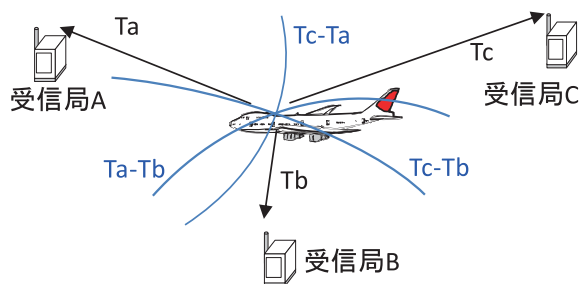


図 2 マルチラレーションの測位原理

3.3.1 時刻同期

MLAT は、各受信局の検出時刻差から航空機の位置を算出するため、受信局間の時刻同期性能が測位精度に直接反映する。MLAT の時刻同期は、以下の 3 方式に大別される。

① 共通クロック方式

共通クロック方式は、各受信局で受信した信号を 1 箇所に集めて検波、信号検出処理を行う方式である。各受信局からは光伝送によって送られるため、処理装置側で伝送遅延を補正することで共通のタイムスタンプを付与することができる。この方式では、受信した搬送波などを一定時間で伝送する必要があるため、光ケーブルによる伝送が不可欠となる。一方、各受信局では信号検出やタイムスタンプ処理を行う必要がないため、各受信局の構成を大幅に簡素化することができる。

② トランスポンダ方式

トランスポンダ方式は、既知の位置から送信する時刻同期用のスキッタ信号を連続的にモニタすることで時刻同期を行う。各受信局は、スキッタ信号を検出して測位を行う。この時、測位値が既知の位置になるよう強制的に各受信局の検出時刻をオフセットする。本方式では、全ての受信局でスキッタ信号を検出することが必要となるため、設置場所の選定を慎重に行う必要がある。一方、モニタ局としての機能を併せ持つことができ、比較的良好な同期性能が得られることから、わが国においても東京国際空港や成田国際空港などで採用されている。

③ GPS 方式

GPS 方式は、各受信局が GPS 時刻と同期する単独 GPS 方式と、各受信局が同一の GPS 衛星による時刻同期を行う GPS コモンビュー方式がある。単独 GPS 方式は、実装が容易であるが同期

精度が劣る欠点を持つ。一方で GPS コモンビュー方式では、各受信局から衛星情報を送信することで同一の GPS 衛星と同期するコモンビュー処理を行う必要があるが、衛星が持つ誤差を相殺して高い同期性能を得ることができる。わが国においても、大阪国際空港で導入される予定である。

3.3.2 信号検出

MLAT で使用する 1090MHz 帯域は、モード S とモード A/C 信号が混在しており、用途についてもレーダー、ACAS、ADS-B など多岐にわたるため厳しい信号環境にある。このため、米国 RTCA⁵⁾ではスキッタ信号の検出に厳しい条件を設定している。MLAT においてもスキッタ信号を検出して測位を行うことから、RTCA に準じた信号検出技術が利用されている。空港面を監視する MLAT は、建造物や航空機によるマルチパスが多発することから、DMTL (Dynamic Minimum Trigger Level) を利用して弱い干渉波を除去する。図 3 に DMTL の概念を示す。図 3(a) に示すように、MTL は一般的にユーザーにより一定の閾値に設定され、この値を超える全ての信号について検出を行う。

一方、モード S 信号は全パルスのレベル差が $\pm 2\text{dB}$ 以内と規定されているため、これを超えるものは干渉信号によるものと考えられる。

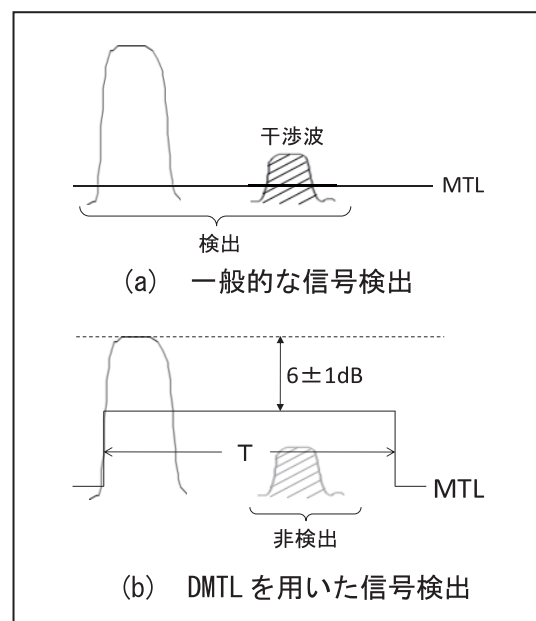


図 3 DMTL の概念

このため、DMTL は図 3(b)に示すように先頭電力から-6dB に MTL を動的に変化させることでレベルの低い干渉波を除外する。本図における変化時間 T は、検出パルスにより異なり単パルスで 5~8 μ s, プリアンプルでは 115~120 μ s となる。

このように MLAT は、DMTL を用いて弱い干渉波を除去して誤検出を防ぐとともに、2つの信号が重畳した場合、分離して検出・解読を可能としている。そして、プリアンブルのリーディングエッジ (LE) を検出することでタイムスタンプを付与する。プリアンブル検出についても、いくつかの厳しい条件が定められている。

3.3.3 幾何学的な位置関係

MLAT は、双曲線の交点により航空機の位置を算出するため、双曲線同士が直交するような場合、すなわち受信局アンテナで航空機をより広く取り囲む配置が良好となる。しかしながら、アンテナ配置には多くの制限があるため、選定場所や設置方法を十分考慮する必要がある。

3.4 モード S トランスポンダの概要

モード S 信号は、モード A/C 信号と比較して信号干渉に強く、識別率が非常に高いため、航空機の位置検出率が大きく向上する。

また、モード S トランスポンダは、地上面で送信する信号を限定している。表 1 に SSR 質問信号に対するモード A/C トランスポンダおよびモード S トランスポンダの応答区別を示す。飛行中ではモード S 一括質問、モード A/C 質問などに応答するが、地上面では個別質問に限定して応答する。加えて、モード S トランスポンダは TCAS 用のスキッタ信号を平均 1 回/秒で自発的に送信する。このため、MLAT では航空機に対して個別質問を行うが、一括質問は行わない。このため、現用のモード A/C レーダーに影響を与えることなく MLAT 装置を運用することができる。

このような背景から、MLAT ではモード S 信号による測位を主眼に置いた設計となっている。MLAT 導入の背景には、時刻同期性能や信号分解能などシステム単体の機能向上に加えて、モード S トランスポンダや TCAS 搭載機の普及によるものが大きい。

表 1 質問信号へのトランスポンダ応答区別

	モード S トランスポンダ		モード A/C トランスポンダ
	地上面	飛行中	
モード A/C 質問	×	○	○
モード A/C 一括質問	×	×	○
モード A/C/S 一括質問	×	○	○
モード S 一括質問	×	○	×
モード S 個別質問	○	○	×
スキッタ送信	△	△	×

○：応答する ×応答しない

△：質問の有無に関わらず自発的に送信する

4. 評価試験

4.1 評価方法

MLAT で性能確認を行うためには、実際の航空機もしくは車両による走行試験を行う必要がある。わが国では、評価方法および MLAT に求められる性能要件について、欧州 EUROCAE^[4]を参考にしている。評価項目は、主として位置精度および検出率であり、求められる性能値はエリアによって異なる。表 2 に MLAT の性能要件をエリアごとに示す。

評価試験は、車両（又は、航空機）にキネマティック GPS (KGPS) およびモード S トランスポンダを搭載して対象エリアを走行することで行う。位置精度は、KGPS で得られた基準位置と MLAT 測位位置との差を誤差として、95%信頼度から求める。また、KGPS と MLAT の位置検出時刻は同期しないため、近似曲線を用いて位置誤差を算出する。

一方、検出率は一定時間の間隔内で位置が検出された場合を「検出」として、一定時間を超えても位置検出ができない積算時間を減算して、全時間に対する検出時間の割合を求める。

表 2 各エリアで必要な性能値

	位置精度	検出率*1
滑走路・誘導路エリア	7.5m 以下	99.9%以上
エプロン誘導路エリア	12m 以下	98%以上
エプロンエリア	20m 以下	99.9%以上

※1 エプロンエリアは 5 秒間隔の検出率、他は 2 秒間隔

4.2 データ解析と改善策

4.2.1 東京国際空港における導入評価

東京国際空港における評価対象エリアは、A 滑走路、B 滑走路、C 滑走路、J2&J3 誘導路および J9&J10 誘導路であり、エプロンエリアの評価は実施していない。図 4(a)は、初期評価時の受信局配置（合計 9 局）および飛行検査機による航跡記録例を示す。受信局の配置は、各エリアに対して受信可能局数を 5 局以上とする冗長性を考慮した。

初期評価の結果、位置精度は L-TWY を除いて規定値を超えていた。また、検出率は C 滑走路と J9 誘導路で規定値を満たしていないことが確認された。性能低下の原因として、C 滑走路南側では受信局の不足と配置による DOP (Dilution of Precision) の悪化が挙げられる。このエリアは、受信局 3 の外側に位置するため DOP が悪化する。初期評価では、費用面や時間的な制約等から空港の南側に対して十分な受信局の配置ができなかった。

また、C 滑走路北側および J9 誘導路における性能低下の原因として、受信局 6 の信号検出ロスが挙げられる。この受信局では、C 滑走路に対して 48%、J9 誘導路に対して 43%の信号検出ロスが発生している。この要因としては、図 5 に示すようにアンテナ設置高の不足（3m）が挙げられる。受信局 6 の位置では、転移表面の制限により十分なアンテナ設置高が得られなかった。このた

め、受信局 6 周辺に出発待機中の航空機が集中することで、監視対象である航空機自身が信号の遮蔽やマルチパスを誘発する原因となる。

そこで、性能低下の改善策として受信局を 4 局追加して合計 13 局にするとともに、図 5 に示すように受信局 6 を B 滑走路の進入灯橋梁に移設した。このように、B 滑走路の進入灯橋梁に移設することで、監視エリアをより広く囲めるとともに、滑走路端から遠方に位置するため、アンテナ高をより高く設置（12m）することができる。

これら改善策を適用したのち、飛行検査機による再評価を実施した。図 4(b)は、改善策適用後の受信局配置および飛行検査機による航跡記録例を示す。本図に示すとおり、改善策の適用によってほぼ全てのエリアで性能が改善された。この結果、J2 および J9 の一部を除く全てのエリアで性能要件を満たすことが確認できた。特に C 滑走路については、位置精度が 11m から 6.4m と大幅に改善した。そして、これらの評価結果から東京国際空港への MLAT 導入の見通しが得られた。

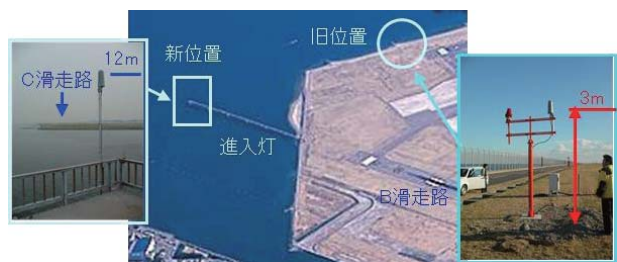
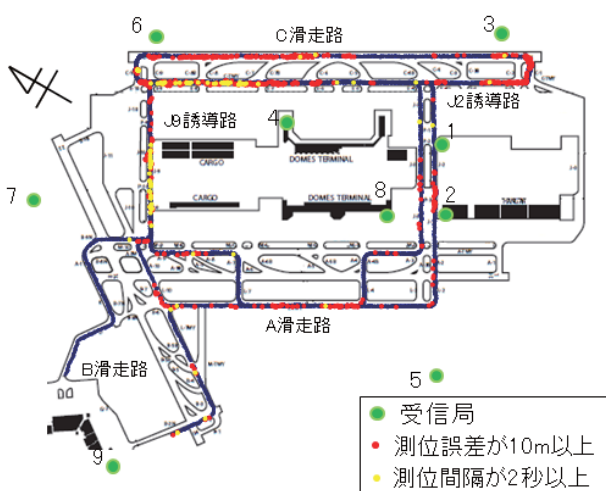
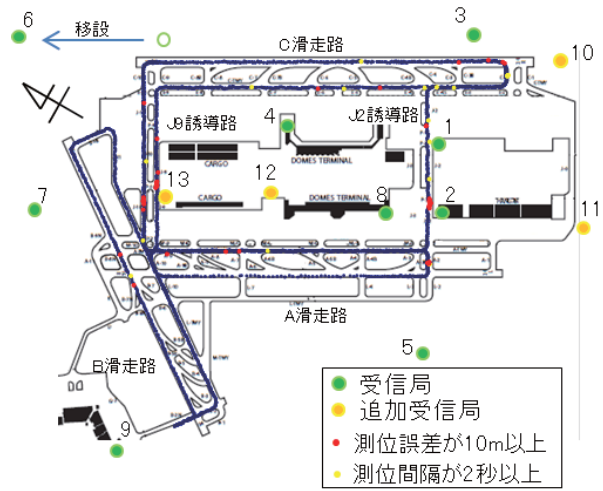


図 5 受信局 6 の移設場所とアンテナ設置状況



(a) 初期評価



(b) 改善策適用後

図 4 東京国際空港における MLAT 配置および飛行検査機による航跡記録例

4.2.2 成田国際空港における導入評価

成田国際空港では A 滑走路, B 滑走路, CD 誘導路に加えて, エプロンも評価対象エリアとした。図 6(a)は, 初期評価時の受信局配置 (26 局) および性能低下エリアを示す。初期評価時における受信局配置としては, 滑走路および誘導路の監視用として 13 局を配置し, 複雑なエプロンエリアの監視用として 13 局を追加した全 26 局構成とし, 全エリアに対して 4 局以上で囲む配置とした。

初期評価の結果, 図 6(a)に示すように多数の地点で性能低下が確認された。特に第 1 ターミナルと第 2 ターミナルのエプロンエリアで多くの性能低下が生じた。データを解析した結果, 信号が検出されるべき受信局で多くの信号検出ロスが確認された。本空港では, ターミナルビルの形状が複雑であり, 入り組んだ構造のスポットが多い。また, ターミナルビルに設置した受信局アンテナは建造物の構造上高く設置することが困難である。このため, 建造物の遮蔽やマルチパスなどにより信号検出ロスが多発し, 測位に必要な受信局数が不足して性能低下が発生したものと考えられる。

これらの改善策として受信局の更なる追加や, アンテナ高をより高く設置することが一般的に有効と考えられる。しかしながら, 受信局を追加した場合, 測位する受信局の組み合わせ数が増加して処理装置の負荷が増大するなど弊害も発生する。また, アンテナ高を高くするには支柱等の基礎をより頑強にする必要があり, 構造的もしくは費用的にも困難な場合がある。これらの課題の解決策として, 空港の中央付近の高い位置にアンテナを設置すると, 広範囲にわたって見通しが得

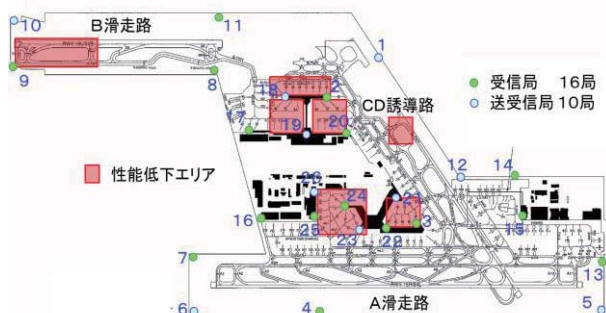
られるため, 受信局数の増加を防ぐことができる。更には, DOP の良好な領域が拡大することや, マルチパスの影響も受けにくいという利点も挙げられる。そこで, 受信局数の不足分を補う対策としてアンテナを管制塔の隣に位置するランプコントロールタワー上部に追加設置した。図 7 に管制塔およびランプコントロールタワーの外観を示す。

図 6(b)は, 改善策適用後の受信局配置および性能低下エリアを示す。再評価の結果, 本図に示すように性能低下エリアが大幅に減少していることが確認できた。性能低下が発生している一部のエプロンエリアや, CD 誘導路については実運用システムで管制塔上部にアンテナを配置することで性能要件を満たすことが可能なものと考えられる。

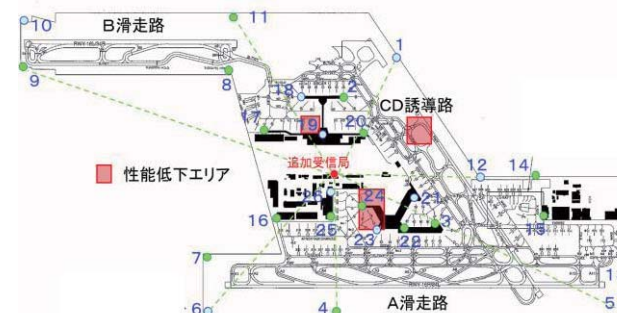
これらの評価結果から, 成田国際空港においても MLAT 導入の見通しを得ることができた。そして, 国土交通省航空局により東京国際空港, 成田国際空港への MLAT 導入が決定された。



図 7 管制塔およびランプコントロール外観



(a) 初期評価



(b) 改善策適用後

図 6 成田国際空港における MLAT 配置および性能低下エリア

4.2.3 関西国際空港における導入評価

図 8 は、初期評価時の受信局配置を示す。関西国際空港では、東京国際空港や成田国際空港で実施した導入評価の経験を踏まえて、空港の中心部に位置して空港全体の見通しが得られる管制塔上部に受信局を配置し、これを中心軸として滑走路やエプロンなど各エリアを 4 局以上の受信局で囲めるよう外側にアンテナを配置した。図 9 に初期評価時の航跡例を示す。初期評価の結果、B 滑走路の両端、J3&J4 誘導路、南ウイングエプロンなどで性能低下が確認された。そこで、取得したデータを解析した結果、時刻同期などは問題がなく、本来信号が検出すべき受信局で信号検出ロスが多発していることが判明した。J3&J4 誘導路、貨物地区では主に建造物の遮蔽による信号検出ロスが発生し、B 滑走路および南ウイングエプロンではマルチパスによる検出ロスが発生し

ていた。特に南ウイングエプロンは、多数の建造物に囲まれているため、マルチパスが発生しやすい環境にある。一方で、B 滑走路では見通しが良好であるにも拘わらず、複数のエリアで受信局 8, 9 における信号検出ロスが確認され、位置精度も 9.2m となって規定値を満たしていない。

これらの受信局は、B 滑走路を囲む外側に位置するが、図 10 に示すように滑走路や誘導路舗装面の鏡面反射によって信号検出ロスが発生して、測位対象エリアが受信局の組み合わせの外側となり、DOP が悪化して位置精度が低下したものと考えられる。

この改善策として受信局 8, 9 のアンテナ高を変更するとともに、信号検出ロスによる DOP の悪化を防ぐため、受信局を 2 局追加して冗長性を高めた。図 11 に追加受信局の設置場所および B 滑走路における受信アンテナの位置関係を示す。

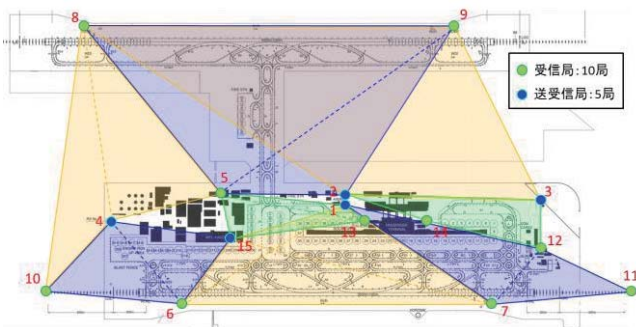


図 8 関西国際空港における初期配置

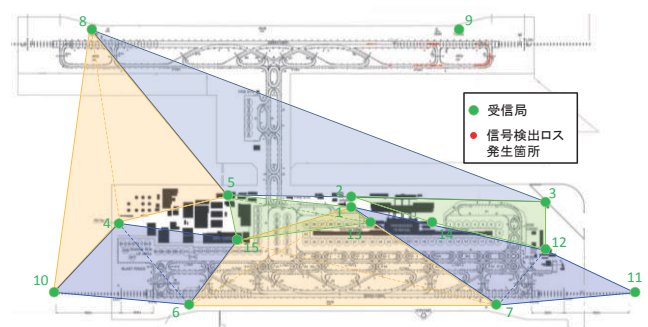


図 10 信号検出ロスと測位対象エリアの関係

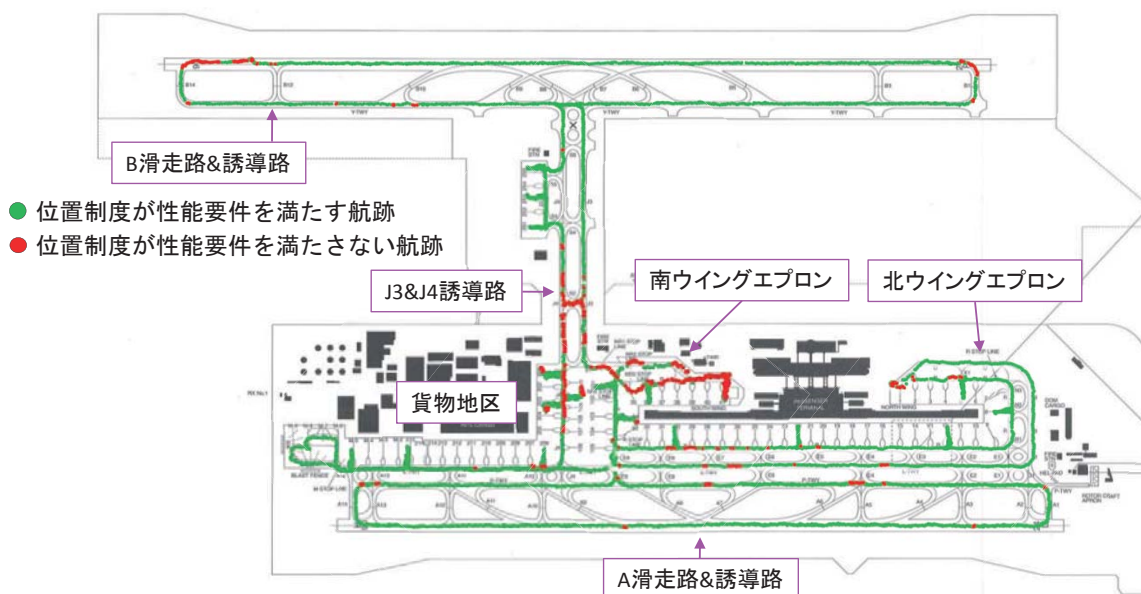


図 9 関西国際空港における MLAT 車両航跡例

改善策を適用した結果、DOP の悪化を防ぐことができ、B 滑走路については位置精度が 6.3m、検出率 100%となり、性能要件を満たす事を確認した。

このように、評価試験結果を解析して性能低下が発生した場合には、時刻同期に加えて信号検出状況、およびその結果生じる DOP の悪化など、性能低下の原因を総合的に判断する必要がある。

特に空港面を監視する MLAT においては、建造物等によりマルチパスが発生しやすい環境にある。マルチパスは、信号検出ロスの増加や誤検出を発生させ、MLAT の性能低下を引き起こす最大の原因となる。

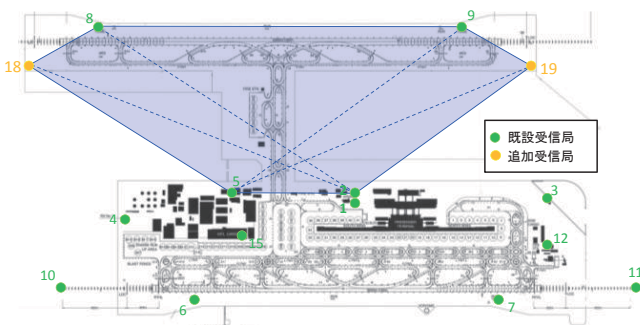


図 11 追加受信局と測位対象エリアの関係

5. まとめ

本稿では、我が国で導入が進められている空港面監視用マルチラレーションについて、開発の歴史、高い性能を得るために必要な技術、評価試験方法等について述べた。マルチラレーションは、モード S および ACAS の導入とともに発展しており、本稿ではモード S トランスポンダについても若干の説明を加えた。

マルチラレーションの性能は、時刻同期、信号検出、幾何学的な位置関係からなる 3 つのファクターに依存する。本稿では、これらについて述べるとともに、電子航法所が 3 空港で実施した評価試験結果の実例を示すことで、評価結果とこれらのファクターとの相関関係を示した。

東京国際空港における導入評価では、転移表面の規定によるアンテナ設置高の不足が挙げられたが、アンテナをより高く設置できる既存施設に移設して広く囲むことが有効であった。また、離陸機が集中する滑走路入口付近などアンテナ周囲の航空機が信号の遮蔽やマルチパスを誘発す

る構造物となることが挙げられたが、受信局を追加して冗長性を持たせることが有効である。

成田国際空港における導入評価では、監視対象エリアを外側から囲む形に受信局を配置するにあたって、管制塔など空港の中央付近の高い位置に受信局を設置すると、広範囲にわたって見通しが確保されて受信局の増加を防ぐことができ、更には DOP の良好な領域が拡大することや、マルチパスの影響が受けにくいという利点も確認できた。

関西国際空港における導入評価では、滑走路や誘導路周りなど見通しが良好なところでも、舗装面の鏡面反射によって信号検出ロスが発生して DOP の悪化による位置精度の低下が確認された。このような DOP の悪化に対しては、受信局を追加して冗長性を持たせることが有効であることを確認した。

最後に、MLAT の導入評価に向けた事前評価を実施するにあたりご協力いただいた国土交通省航空局および関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- [1]M.Loren Wood,MIT Lincoln Laboratory : “Multilateration System Development History and Performance at Dallas/Ft.Worth Airport” ,IEEE, 2000
- [2]James R.Eggert,et al : “Operational Evaluation of Runway Status Lights”,Lincoln Laboratory Journal,Volume16 Number1,2006
- [3]宮崎, 古賀, 上田, 角張, 二瓶 : “空港面マルチラレーションの導入評価結果” 電子航法研究所報告 No.125, 平成 22 年 8 月
- [4]EUROCAE : “Minimum Operational Performance Specification for Mode S Multilateration Systems for Use in Advanced Surface Movement Guidance Control System (A-SM-GCS)” ,ED-117,November,2003
- [5]RTCA : Minimum Operational Performance Standard for 1090MHz Extended Squitter Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) and Traffic Information Service-Broadcast (TIS-B) ,RTCA/DO-260A,April 10,2003