

## 5. ADS-B 位置検証技術の実用化に向けた考察

監視通信領域 ※長縄 潤一，宮崎 裕己

### 1 まえがき

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、航空交通管理における変革に向けて、軌道ベース運用を中核とした8つの方向性が示されている[1]。その1つは地上・機上での状況認識能力の向上である。地上での状況認識の提供は航空機監視システムの役割であり、代表的なものとして二次監視レーダ（SSR: Secondary Surveillance Radar）が使われている。しかしながら、軌道ベース運用のような高度な運用方式へ対応し、安全性や効率性のさらなる向上を実現するために、より高性能な航空機監視システムが求められている。

そこでSSRよりも高性能な航空機監視システムとして放送型自動従属（ADS-B: Automatic Dependent Surveillance—Broadcast）が検討されている。ADS-Bは航空機が自身の位置などを自発的に放送し、それを地上側で受信することで航空監視を実現するものである。ADS-Bは地上側設備をシンプルに構成できる一方で、監視情報を航空機からの自己申告に頼っていることから、なりすまし等による不正な位置情報への対策が求められる[2]。

本稿では、不正な位置情報への対策を実現するための位置検証技術について、実用化に向けた考察を述べる。なお、本稿では、種々の位置検証技術のうち、信号到達時刻差（TDOA: Time Difference of Arrival）を用いた手

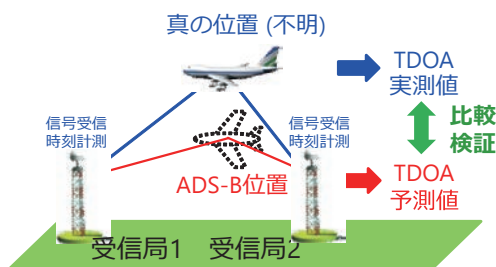


図1 信号到達時刻差(TDOA)によるADS-B位置検証法

法（以下、TDOA法）に着目する。まず、2章ではTDOA法による位置検証技術の概要を説明し、電子航法研究所（以下、当所）の研究を紹介する。3章では実用化に向けた考察を述べる。

### 2 TDOA法による位置検証

#### 2.1 判定の動作 [3]

TDOA法はADS-B信号に含まれる位置情報の正当性を確かめるものである。まず、受信局2局によりADS-B信号を受信し、受信時刻を測定する。受信時刻の差が信号の到達時刻差TDOAである。また、信号に格納されたADS-B位置を読み出す。すると、ADS-B位置と受信局の位置関係からTDOAの予測値が計算できるので、予測値を実測値と比較して矛盾が無いかどうかを調べる。以上によりADS-B位置の正当性を検証できる。

図2にはTDOA法による判定をより詳しく説明する。TDOA実測値は送信源の存在する双曲線を示す。一方、ADS-B位置から計算さ

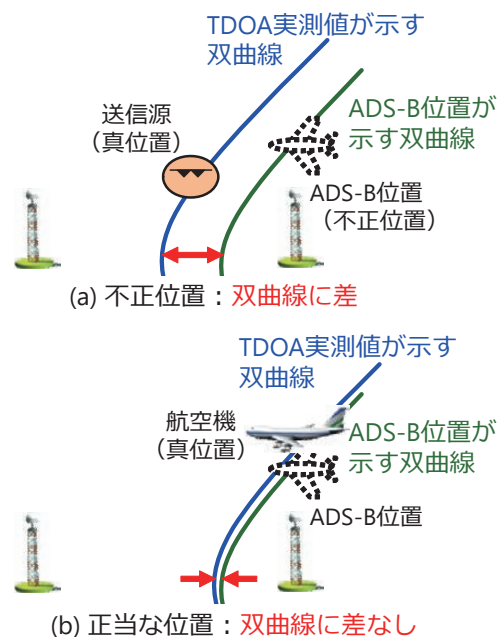


図2 TDOA法による判定の様子：(a) 不正な位置の場合、(b) 正しい位置の場合

れた TDOA 予測値は ADS-B 位置を通る双曲線を示す。図 2(a)に示すように位置が不正のときは双曲線の差が大きくなり、同図(b)のように位置が正当なときは双曲線の差が小さくなる。したがって、双曲線差すなわち TDOA 差（以下、検定量）をしきい値判定すれば位置検証ができる。

## 2.2 電子航法研究所における研究

当所では TDOA 法について理論検討[4,5]や実験[6,7]を用いて多角的に研究を進めてきた。理論検討では、受信局配置といった事前情報から、性能を概算するモデルを構築してきた。これは実装前の事前検討、実装後の動作検証、性能に影響する要因の考察などに有益である。実験では、TDOA 法の有効性の実証、実装に向けた知見の獲得、理論の検証を行ってきた。

まず、当所における実験の一例を紹介する。図 3 には実験の模式図、図 4 には実験に用いた装置写真を示す。3 台の受信機を使っているが、受信機 A' と A'' は仮想的に 1 台と見なし、2 局の受信局を模擬している。これらに対して模擬した成りすまし送信源からの不正な信号を入力するとともに、在空機からの信号を受信させた。受信信号は中央処理装置で蓄積し、TDOA 法を適用することで、分析・評価を行った。受信局は調布と那須塩原（日本電気株式会社殿の所有）である。2 局間の距離は 143.0 km である。成りすまし送信源は筑波山頂にあることを想定した。不正な信号に含まれる ADS-B 位置は格子状に生成した。

図 5 には実験結果を示す。図 5(a)は不正判定された航跡である。プロットの都合上、列状に見えているものが、格子状に生成した不正な信号に相当する。これらは TDOA 法により適切に不正な信号だと判定できた。一方で、格子状でないものは、在空機信号である。在空機信号が一部誤って不正判定されている。しかしながら、そのようなケースは限定的である。図 5(b)は正当判定された航跡を示しており、ほとんどの在空機信号は正当だと判定された。

図 6 には上記の判定の根拠となった検定量（TDOA 予測値と TDOA 実測値の差）を示す。図中の色は検定量の数値を示しており、高いほ

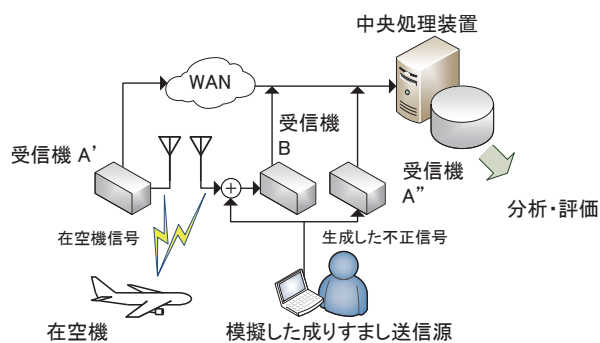


図 3 実験の模式図

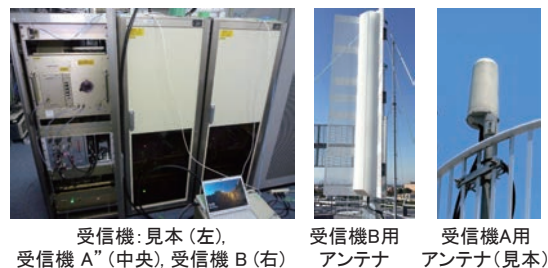


図 4 実験で用いた装置の写真

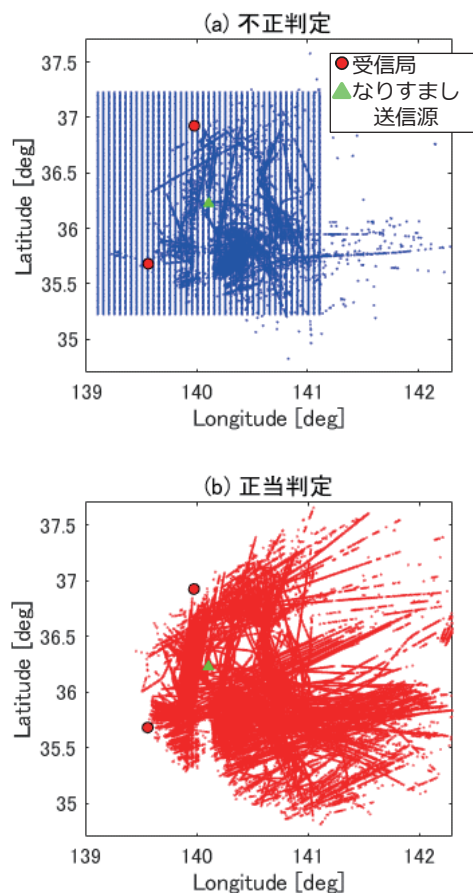


図 5 実験結果：(a) 不正判定 (b) 正当判定

ど不正である可能性が高いことを意味する。実際に、格子状に生成した不正信号はおおむね高い数値（濃い赤色）を示している一方、在空機の信号はおおむね低い数値（青色）となっている。これにしきい値判定（1019.4 nsec）を適用して、前述の判定結果を得ている。なお、しきい値の検討方法は 3.4 節で説明する。以上から、TDOA 法の有効性を実証できた。

次に、当所の理論検討において構築している性能概算モデルについて紹介する。本モデルは受信局位置、成りすまし送信源の位置、ADS-B 信号の位置などの条件を設定すると、検出率および誤検出率と呼ばれる性能指標（詳しくは 3.2 節で後述）を計算するものである。具体的な計算式は紙面の都合上割愛するが、本モデルを使うことで、不正な ADS-B 信号のうち、TDOA 法により不正検出が期待できるものと、見逃される可能性があるものを予想できる。これを前述の実験条件に対して計算し、実験結果と比較したものを図 7 に示す。図中の青丸（理論）および赤丸（実験）が、不正見逃しの可能性がある信号を示す。両者の良好な一致を確認できた。このように、実験を通じたモデルの妥当性を行っている。

### 3 実用化に向けた考察

本節ではこれまでの当所における研究から得られた考察を述べる。

#### 3.1 WAM インフラを用いた効果的実装

TDOA 法を効果的に実装するために、広域マルチラテレーション（WAM: Wide Area Multilateration）のインフラを活用することができる。TDOA 法に必要な信号受信・時刻測定・データ収集という機能は、WAM の受信局・通信回線を共用できる。したがって、原理的には、中央処理装置の増設またはソフトウェアの改修のみで実現が可能である。実際に 2.2 で述べた当所実験システムは、主に WAM 用の実験システムとして構築したものであったが、受信局等はそのままに、中央処理装置を新規に増設することで TDOA 法を実現している。

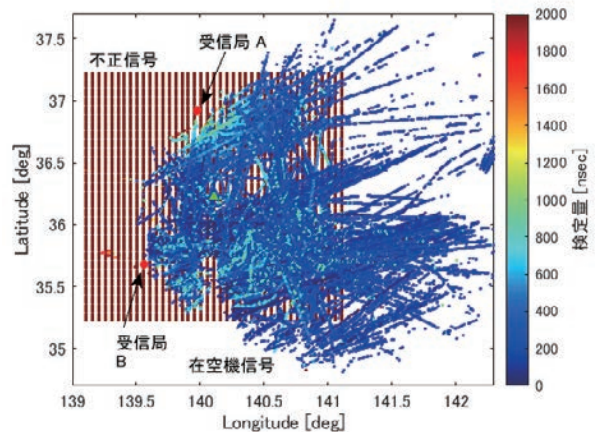


図 6 判定に用いた検定量の分布

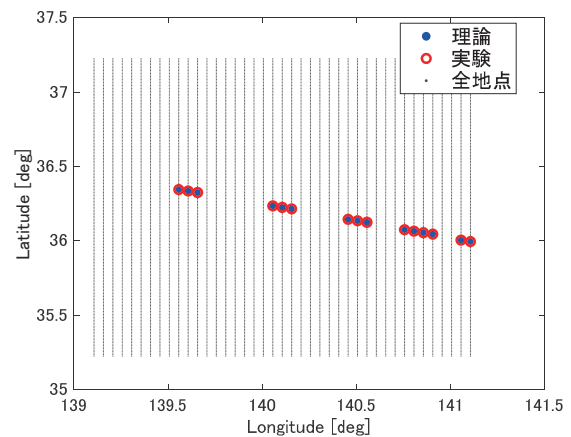


図 7 検出見逃しの可能性がある信号

#### 3.2 性能指標：検出率・誤検出率

位置検証システムで重要となる性能指標を考えると、まず、(不正の) 検出率と誤検出率が挙げられる。検出率は不正な位置を不正だと検出する確率である。検出率が高いほど良い。なお、不正な位置の見逃しである未検出率とは、「未検出率=100%-検出率」の関係がある。誤検出率は正当な位置を不正だと誤って判定する確率である。誤検出率は低いほど良い。一般的に、検出率と誤検出率にはしきい値で決まるトレードオフの関係がある。しきい値を小さくすれば、検出率は上がるが誤検出率も上がる。しきい値を大きくすれば、誤検出率を下げられるが検出率も下がる。しきい値の検討方法については 3.4 節で考察する。

また、検出率と誤検出率は、受信局の位置、監視覆域（ADS-B を取得する位置）、なりすま

し送信源の位置関係によっても変化する。受信局位置と監視覆域については、従来の監視システムでも考慮されていた項目であるが、なりすまし送信源は TDOA 法特有の項目となる。位置関係の検討方法については 3.3 節で考察する。

なお、位置検証における検出率と誤検出率については、現在のところ国際的な標準は定まっていない状況である。2.2 節で述べた実験条件においては、しきい値 1019.4 nsec により誤検出率 0.048 (4.8%)、検出率 0.998 (99.8%)を達成している。なお、これ以降、確率の 0%~100% を 0~1 の数値範囲で表現することとする。

### 3.3 位置関係の検討方法

位置関係を検討するための手法として、WAM で知られている DOP (Dilution of Precision) のような図があれば有益である。ここでは 2.2 節で述べた検出率のモデルを使った方法を提案する (図 8)。まず、受信局位置、送信源の想定範囲、監視覆域を設定する。そして、ある監視覆域内の 1 点に対して、なりすましによって航跡を表示させることを試みるとし、このときの検出率を計算する。ただし、送信源の位置を事前に正確に設定することは不可能であるため、想定範囲に均一な出現確率があると考えて平均的な検出率を計算する。

計算例を図 9(a)に示す。受信局位置は 2.2 節の実験と同様 (調布, 那須塩原) であり、内陸の受信局をイメージした条件となっている。図中の紫色で囲ったエリアが送信源の想定範囲であり、出現確率は一様であると仮定した。プロットの丸印は、ADS-B 監視覆域の 1 地点を表し、色の違い (青~赤) により平均的な検出率を示している。検出率にわずかではあるが空間的な変化が見られる。

送信源の想定範囲を狭めた場合を図 9(b)に示す。検出率の空間的な変化が明瞭となった。これは、送信源範囲が狭くなったことから、影響を受ける覆域地点も限定されたためである。

さらに、図 10 に島嶼をイメージした計算例を示す。受信局 2 局を同一の島内に設置する場合、離隔距離が狭くなると考えられ、一例として約 6.5 km の設定となっている。さらに、送信源の想定範囲も島の周囲に限定した。図 9 と

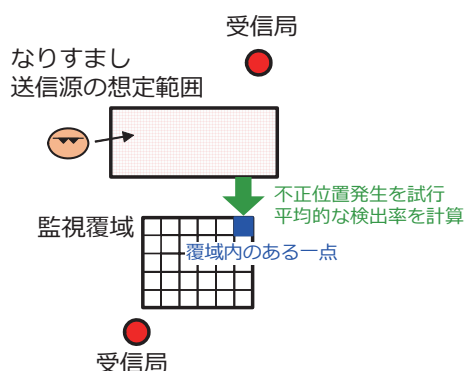


図 8 位置関係の検討方法：平均的な検出率の計算

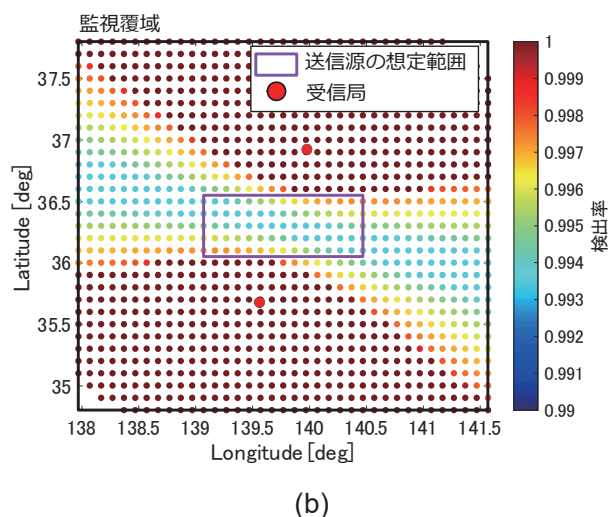
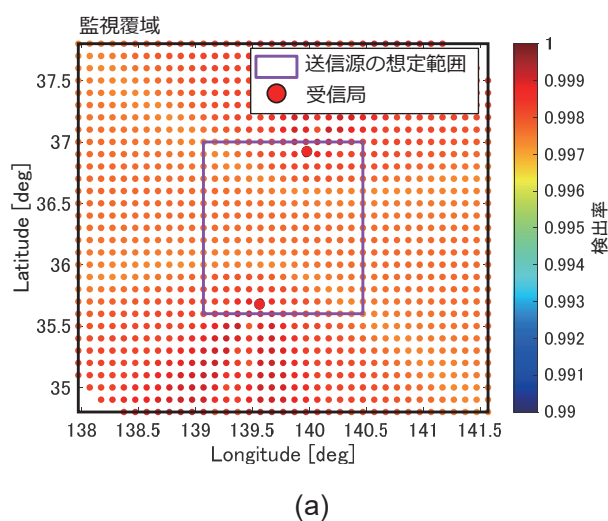


図 9 平均的な検出率の計算例：(a) 基本条件 (b) 送信源の想定範囲を狭めた場合

図 10 を比較すると、検出率は全体的に低下した。これは狭い離隔距離のためと考えられる。しかしながら、0.94 以上の値は見込まれており、一定の性能は期待できる。このように、図 9 および図 10 では、TDOA 法の性能と位置関係を図示することができた。このような図は実装への検討に有益だと考えられる。

### 3.4 しきい値の検討方法

ここではしきい値の検討方法を考察する。3.2 節で検出率と誤検出率にはしきい値で決まるトレードオフがあると述べた。まず、レーダ等の考え方を参考にすれば、誤検出率を一定にするようなしきい値を設定するのが自然である。そこで、誤検出率に影響する要因を整理すると[4,5]、1 つ目に ADS-B 位置の誤差がある。機上での測位誤差のほか、測位から ADS-B 信号放送までの遅延により、真位置と ADS-B 位置には誤差を生じる。この誤差が検定量の数値として現れる。2 つ目に位置関係がある。受信局近くや航空機の移動方向によっては、前述の位置誤差の影響が高めに出る傾向が分かっている。3 つ目に、受信局の時刻検出性能があり、性能が良いほどしきい値が小さくて良い。

上記の要因を考慮して、しきい値を決める方法として大きく 2 通りの手法が考えられる。1 つ目は、測定データに基づく方法（経験的な方法）である。在空機・飛行検査機などに対して検定量のデータを収集し、誤検出率を一定とするしきい値を決める。この方法はデータさえあれば簡便にしきい値を決められる。しかしながら、システムが既設であることが前提である。なお、2.2 節で述べた実験のしきい値（1019.4 nsec）は誤検出率 0.05 を達成する値を測定データに基づき設定したものである。不正信号に関するアラートを出す場合はより低い値が好ましいと考えられる。

2 つ目の方法は、理論的なものである[4,5]。受信機性能ならびに ADS-B 位置の誤差（遅延や測位）といったパラメータを誤検出率の理論式に代入することでしきい値を決める。パラメータ設定に難しさがあるものの、実システムを必要としない利点がある。また、様々な要因を切り分けた上でしきい値に織り込める利点が

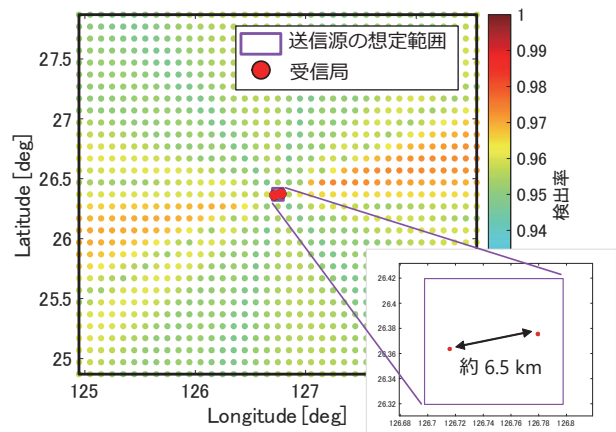


図 10 平均的な検出率の計算例：島嶼を想定した場合

ある。

### 3.5 位置更新確率・更新間隔への影響

TDOA 法を導入することによる、ADS-B の性能指標である更新確率と更新間隔[8]への影響を考察する。更新確率は、ある決められた更新間隔の時間内において、ADS-B 信号を受信し、ターゲットレポートを生成する確率である。更新確率と更新間隔にもトレードオフの関係がある。更新間隔を長く設定すれば、ADS-B 信号を受信する機会が増え、更新確率を高めることができる。一方で、更新間隔が長いことは位置情報の頻度の低下を許容することを意味する。

更新確率と更新間隔が重要である理由は、TDOA 法の有無によって両者が変化することにある。TDOA 法では判定を行うために 2 局同時に ADS-B 信号を受信できる必要がある。一方、TDOA 法が無い場合は 2 局のうち 1 局で ADS-B 信号を受信すれば十分である。つまり、TDOA 法がある場合は、TDOA 法が無い場合と比較して、更新確率と更新間隔が劣化する。

更新確率と更新間隔がどのように決まるかについては、これまでの当所の研究成果を参考にできる[9,10]。これによれば、信号を受信できる確率（以下、信号検出率）を用いることで、更新確率と更新間隔の関係性をモデル化できる。TDOA 法にあてはめれば、次式となる。

$$P_u = 1 - (1 - P_{1,t}P_{2,t})^u (1 - P_{1,b}P_{2,b})^u \quad (1)$$

ここで  $P_u$  は更確確率,  $u$  は更新間隔,  $P_1$  および  $P_2$  は受信局 1 および 2 における信号検出率, 添え字  $t$  および  $b$  はトランスポンダアンテナの区別 ( $t$ : 機体上部,  $b$ : 機体下部) を示す。なお, 送信頻度が 1 秒間に約 2 回である性質を用いている。

信号検出率については受信電力と信号干渉の影響を受けることが分かっており, 図 11 にはその測定・分析結果を示す。丸印は実験データ, 色付きの面は曲面のあてはめを示している。横軸は受信電力の効果を表すリンクマージン (検出しきい値と受信電力の差) および信号干渉の支配的な原因となるモード A/C 信号数である。図 11 から分かるように, 信号検出率は受信電力が低い場合や信号干渉が多い場合に低下する。ひいては, 更新確率と更新間隔の劣化の原因となる。したがって, 実装にあたっては, 上記要因を考慮に入れる必要がある。

#### 4 むすび

TDOA 法による ADS-B 位置検証技術の実用化に向けた考察として, WAM インフラを用いた効果的実装, 性能指標, しきい値と位置関係の検討方法, 更新確率等への影響について述べた。今後, 考察を深めるとともに, 性能向上策の検討を行う予定である。

#### 謝辞

本研究にご協力を頂いている関係者の皆さまに深く感謝申し上げます。

#### 参考文献

- [1] “将来の航空交通システムに関する推進協議会,” [https://www.mlit.go.jp/koku/koku\\_fr13\\_000006.html](https://www.mlit.go.jp/koku/koku_fr13_000006.html) (参照, Aug. 2020)
- [2] M. Strohmeier, et al (2015), “On the Security of the Automatic Dependent Surveillance-Broadcast Protocol,” IEEE Commun. Surveys Tuts., vol.17, no.2, pp. 1066-1086.
- [3] 長縄ほか, “ADS-B 位置検証技術の評価,” 令和元年度 (第 19 回) 電子航法研究所研究発表会 講演概要, pp.19-24, 令和元年 6 月。

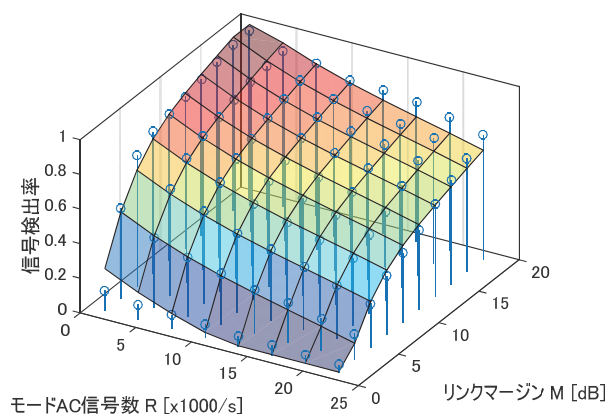


図 11 信号検出率の測定・分析結果

- [4] J. Naganawa and H. Miyazaki, “Performance Model of ADS-B Position Verification by TDOA,” Int. Symp. on Enhanced Solutions for Aircraft & Veh. Surveillance Appl., Berlin, Germany, Oct. 2018.
- [5] 長縄, 宮崎, “TDOA を用いた ADS-B 位置検証における遅延の考慮,” 信学技報, SANE2018-44, pp.1-6, 2018 年 10 月。
- [6] 長縄, 宮崎, “TDOA を用いた航空機位置検証法の実験的評価,” 信学技報, SANE2019-75, pp. 29-34, 2019 年 11 月。
- [7] J. Naganawa and H. Miyazaki, “Experimental Evaluation on TDOA-based Aircraft Position Verification,” 14th European Conf. on Antennas & Propag. (EuCAP 2020), Copenhagen, Denmark, Mar. 2020.
- [8] EUROCAE (Mar 2016), “Technical Specification for A 1090 MHz Extended Squitter ADS-B Ground System,” ED-129B.
- [9] 長縄, 宮崎, 田嶋, “WAM 受信局配置設計に向けた信号検出率測定,” 平成 28 年度 (第 16 回) 電子航法研究所研究発表会講演概要, pp. 98-103, 2016 年 6 月。
- [10] J. Naganawa, et al (Oct 2017), “Measurement-based Evaluation on Detection Probability of Extended Squitter for Air-to-Ground Surveillance,” IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 66, no. 10, pp. 8883-8894.