

空港面に適した VHF 帯ハイブリッド電波伝播解析

須賀 良介^{†a)} 毛塚 敦^{††} 橋本 修[†]

Hybrid Propagation Analysis Suitable for Airport Surface in VHF Band

Ryosuke SUGA^{†a)}, Atsushi KEZUKA^{††}, and Osamu HASHIMOTO[†]

あらまし 本論文では、空港面における VHF 帯の電波伝播解析に適したフルウェーブ解析とレイトレース法のハイブリッド電磁界解析手法を提案する。まず、空港面と想定している無線システムの特徴を整理した上で、提案手法の概要を述べる。そして、3次元フルウェーブ解析による全領域解析との比較により、提案手法の有効性を示す。

キーワード 空港面, GBAS, VDB, フルウェーブ解析, レイトレース法, VHF 帯

1. ま え が き

現在、航空機の着陸誘導のために Instrument Landing System (ILS) と呼ばれるシステムが用いられている [1]。ILS は 1947 年に国際標準化された誘導システムであり、滑走路付近に設置された 2 組のアンテナから上下/左右に変調度の異なるビームをそれぞれ放射し、航空機に搭載された受信機ではその変調度に比例した進入経路からの偏差を把握することができる。しかし、上記のようにビームにより進入経路を形成しているため、同システムは滑走路に対して直線的かつ片側からの進入経路のみサポート可能である。このため、風向きにより滑走路への進入方向が変わった場合には、同システムを使用することはできず、更には複数滑走路が存在する場合でも、設置した滑走路以外の滑走路では使用することができない。そこで空港の高効率な運用や騒音問題を避けるため、両方向からの進入及び曲線的な着陸経路に対応可能な誘導システムが要求されている [2]。

近年では、GPS を用いたフレキシブルな着陸経路を

サポート可能な Ground Based Augmentation System (地上型衛星航法補強システム: GBAS) が開発され、その導入に関する検討が進められている [3], [4]。GPS には電離層や衛星配置に起因する測位誤差が生じるため、GBAS では地上に設置された VHF Data Broadcast (VDB) と呼ばれる装置からその誤差の補正情報を 100MHz 帯 (108~118MHz) の水平偏波を用い航空機に向けて放送する。また同時に、パイロットへのシステム異常の通知や、システムの完全性 (インテグリティ) を高めるためのモニタ情報や経路情報も送信している。ILS と比較して、同システムでは空港周辺の任意の位置で受信できる GPS と VDB 信号を用いるため、単一の GBAS システムを設置するだけで全ての滑走路における両方向の進入に対するサポートが可能となる [5]~[7]。更に GBAS による自動着陸をサポートするためには、滑走路周辺空域だけではなく、滑走路 3.6m (12ft) においても -72dBm 以上の VDB の覆域が要求される [8]。

この要求を満たす VDB アンテナの設置位置の探索には、空港面という特殊な環境における繰り返し実験は困難であることから、電磁界解析が有効である。しかし空港面のような波長に比べて極めて大規模な空間に電磁界解析を適用する場合、フルウェーブ解析では膨大な計算コストがかかるため現実的ではない。また GHz 帯における電波伝播解析には一般的にレイトレース法が用いられるが、建物の寸法及びそれらの間隔が数波長以下となる 100MHz 帯を用いた VDB では、建物の密集する領域を含む場合では解析誤差が生じ

[†] 青山学院大学理工学部, 相模原市

College of Science and Engineering, Aoyama Gakuin University, Sagami-hara-shi, 252-5258 Japan

^{††} 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所電子航法研究所航法システム領域, 調布市

Electronic Navigation Research Institute, National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology, Chofu-shi, 182-0012 Japan

a) E-mail: rsuga@ee.aoyama.ac.jp

る [9], [10]. この種の問題に対し, 従来からフルウェーブ解析とレイトレス法のハイブリッド解析手法が提案されている [11]~[13]. これらの手法では, 解析領域中において散乱体の多い領域のみをフルウェーブ解析により, またその他の自由空間とみなせる領域における電波伝播をとレイトレス法によって全領域の電磁界を効率良く導出できる. しかし, これらの手法では両手法の解析領域の境界において電磁界を受け渡す必要がある. そのため, 電波が到来する境界面を波長に対して充分小さな領域に分割し, その各領域に到来角度を考慮した電磁界を与えなければならない.

これまでに我々は, 滑走路までの距離すなわち伝搬距離がアンテナ設置高と比較して非常に長く, かつ滑走路周辺には建物が存在しないという空港面の特徴に着目し, 空港面における電波伝播解析に適したハイブリッド電磁界解析手法を提案している [14]. 本手法では, 上記のような電磁界の明示的な受け渡しが必要であり, レイトレーシング解析は大地反射による減衰の導出のみに用いるためアルゴリズムも非常に平易である. 本論文では, 空港面の特徴と提案手法について説明した上で, 大地が平坦なモデルを用いた全領域フルウェーブ解析との比較により本手法の有効性について議論する.

2. 空港面と VDB の特徴

図 1 に空港面における建物や滑走路配置の一例を示す. 同図に示すように, 空港面は旅客ターミナルや管制塔, 倉庫といった建物が密集する領域 (以降 Building area と称す) と, それ以外の滑走路, 誘導路及びエブ

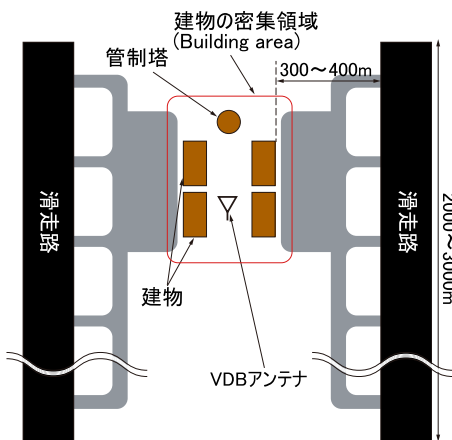


図 1 一般的な空港における建物等の配置

ロンからなる建物が全く存在しない比較的平坦な領域から構成される.

滑走路上にも VDB の覆域を形成するためには, そのアンテナ設置位置を適切に定める必要があるが, 滑走路に対して一定の離隔距離が必要であり, また一つのシステムで複数滑走路をサポート可能な GBAS の特徴 [5] を活かすために, 滑走路の間にある Building area が VDB アンテナ設置位置の有力な候補となる. また VDB アンテナを高所に設置すると, 直接波と大地反射波の干渉によって滑走路上空にサービス不能箇所が発生することがわかっており, VDB アンテナは低い位置に設置される. その場合, 滑走路全体を VDB アンテナから直接見通すことはできなくなり, 密集する建物の影響を強く受けることを考慮したアンテナ位置の決定が必要となる.

図 2 に, 空港面における VDB アンテナと滑走路上に配置された受信アンテナ間を伝搬する直接波及び大地反射波の伝搬経路を示す. 本論文では, 同図に示す直接波及び大地反射波にはそれぞれ建物における回折波を含むものとし, 両者の違いは大地反射の有無と定義する. 同図に示すように, 滑走路までの伝搬距離は 300~3000m 程度, また航空機に設置される受信アンテナ高は 3.6~10.8m であり [8], VDB アンテナの設置高さを 5m とした場合, 伝搬距離は送受信アンテナ高に対して非常に長くなる. これにより大地における反射点は Building area から離れた位置となり, その入射角度はおおよそ 90 度と非常に大きくなるため, 水平偏波であることを考慮すると大地における反射係数は -1 に近似できる. 更に二つの光線はおおよそ平行となることから, 両者の建物端における回折係数や経路長はおおむね等しくなる. すなわち伝搬距離が長くなるにつれ直接波と大地反射波の経路差は小さくなり, 両波の干渉により到達する電力は小さくなる.

なお, 本論文では建物建物上面を回り込む水平偏波の回折波が非常に小さくなる状況を想定しており, こ

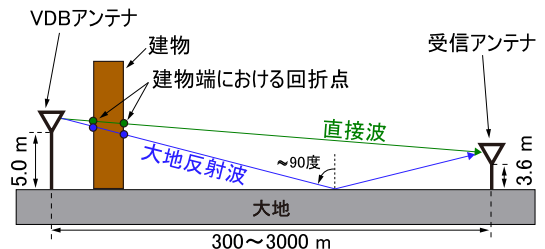


図 2 直接波と大地反射波

れを満足する条件を下記に示す。

- (1) VDB アンテナは建物が密集したエリアに設置されていること。
- (2) 建物上面の回折波を無視できる程度に、VDB アンテナに対して建物が高く、また航空機に搭載された受信アンテナの設置高が低いこと。

3. 提案手法

3.1 解析プロセス

本手法では前節で述べたように空港面における VDB 伝搬の特徴として、Building area の外部に建物がないこと、また直接波と大地反射波の経路長はおおむね等しく更に大地における反射係数は約 -1 であるため、大地の影響は主に減衰とみなせることに着目する。

図 3 に提案手法における (a) フルウェーブ解析及び (b) レイトレース解析の概念図を示す。提案手法では、まず同図 (a) に示す建物及び送信アンテナのみをモデル化した赤枠で示す Building area のフルウェーブ解析により、建物による回折波を含んだ直接波レベル P_d を解析する。ここで、大地反射波による影響は後述のレイトレース法によって別途求めるため、解析領域の境界 6 面には吸収境界条件を適用し、Near-far 変換により滑走路に到達する直接波を導出する。次に同図 (b) に示す建物を無視したモデルについてレイトレース法を適用し、直接波のみの受信レベルと直接波及び大地反射波の合成レベルをそれぞれ計算する。次に両者の比すなわち大地反射波による直接波レベルの

変動率 ΔP を求め、フルウェーブ解析により求めた直接波レベル P_d に乗算する。すなわち式 (1) により所望の受信電力 P_{sum} を求めることができる。

$$P_{\text{sum}} [\text{dBm}] = P_d [\text{dBm}] + \Delta P [\text{dB}] \quad (1)$$

これにより提案手法においては、両手法間における電磁界の明示的な受け渡しが不要であり、更にフルウェーブ解析の解析領域を Building area のみに限定することで解析時間の短縮を図ることができる。

なお、厳密にはレイトレース法における送信アンテナは、フルウェーブ解析で求めた等価波源の位相中心に配置すべきであるが、アンテナ高と波長に対して伝搬距離が非常に長い場合、レイトレース法における送信アンテナ位置が数波長程度変化しても解析結果に大きな影響はない。本論文では、両解析における送信アンテナ位置は同位置であるとして議論を進める。

先に述べた特徴から、提案手法においては下記の点について留意する必要がある。

- 滑走路までの伝搬距離はアンテナ高と比較して極めて長く、Building area における大地反射波は受信アンテナに到達しないため、Building area のフルウェーブ解析における解析空間の境界条件には吸収境界条件を適用する。
- 直接波と大地反射波の伝搬経路長がおおむね等しくなる程度まで送受信アンテナ間距離を離す。
- 大地反射モデルを用いたレイトレース解析における大地の反射係数を -1 とする。

3.2 受信アンテナ高依存性

先に述べた航空機への受信アンテナの設置高を考慮し、受信アンテナ高を $3.6 \sim 10.8 \text{ m}$ の範囲で変化させ、次章の有効性評価において検討すべき受信アンテナ高を決定する。

図 4 に、送信電力で規格化した合成波の送受信アンテナ間距離に対する直接波及び直接波と大地反射波の受信電力を示す。同図からわかるように、送受信アンテナ高の差の変化は数 m 程度と伝搬距離に対して小さいため、直接波の受信電力の受信アンテナ高依存性は無視できる。一方で、受信アンテナ高が低くなるにつれて両波の経路長は等しくなり、逆相同振幅に近づくため合成波電力は減少し、受信アンテナ高 3.6 m と 10.8 m の場合を比較すると約 10 dB の差が生じることがわかる。図 5 に送受信アンテナ間距離に対する直接波の変動率 ΔP 、すなわち直接波と合成波の比を示す。同図から明らかなように、受信アンテナ高が低くなる

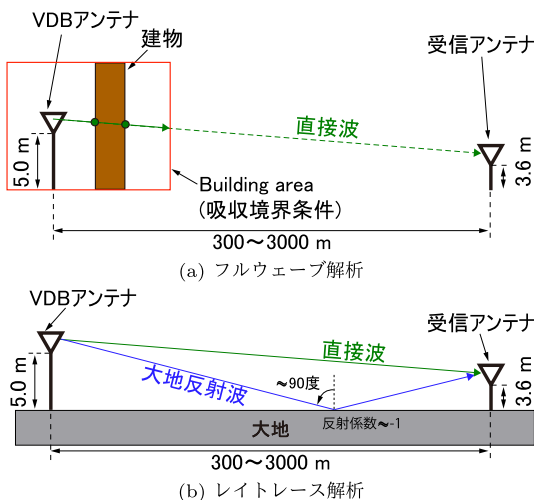


図 3 提案手法

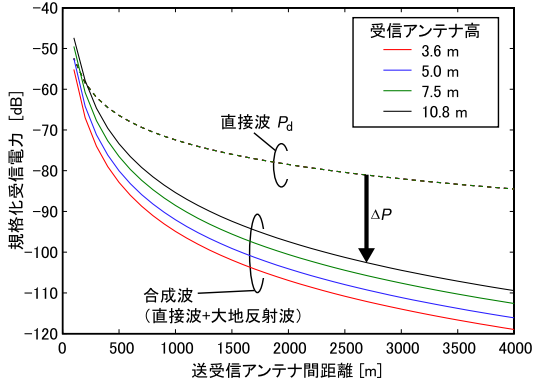


図 4 送受信アンテナ間距離に対する直接波及び直接波と大地反射波の合成波の規格化受信電力 (送信アンテナ高 5.0m)

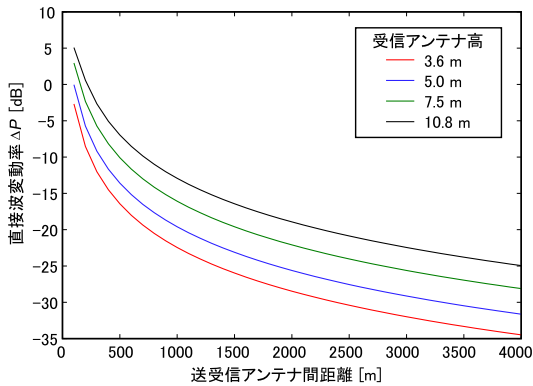


図 5 送受信アンテナ間距離に対する直接波の変動率 ΔP (送信アンテナ高 5.0m)

につれて大地反射波による影響は大きくなり、受信アンテナ高 3.6m かつアンテナ間距離 4000m の場合には大地反射波により -35dB 程度の変化が生じることがわかる。そこで本論文では、最も大地反射波の影響が大きい受信アンテナ高 3.6m の場合について議論を進めることとする。

4. 全領域フルウェーブ解析との比較による有効性検証

本章では、提案手法の有効性検証のために、滑走路を含む全領域の電磁界をフルウェーブ解析により求め、提案手法と比較考察する。全領域フルウェーブ解析に用いたワークステーションの物理メモリや解析時間の制約から、本節では実際の空港より小さな領域を用いて議論する。なお本論文におけるフルウェーブ解析には、有限要素法に基づく 3 次元電磁界シミュレータ

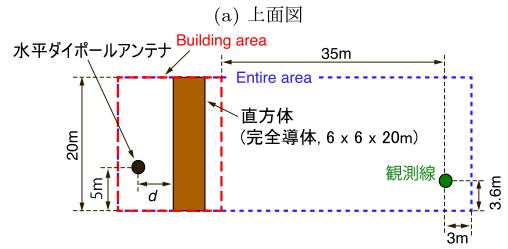
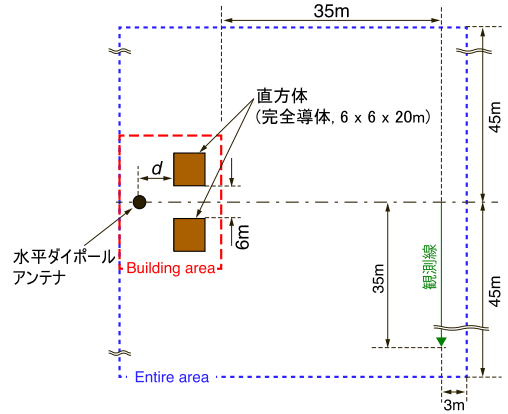


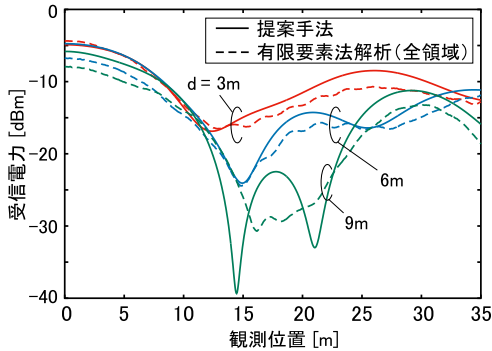
図 6 解析モデル (建物 2 棟の例)

HFSS [15] を用いた。

4.1 解析モデル

図 6 に空港面を模擬した解析モデルの (a) 上面図、(b) 側面図を示す。本モデルでは大地面から 5m の高さに送信用水平ダイポールアンテナを配置し、送信アンテナから距離 d 離れた位置に、建物を模擬した 6m 四方の完全導体 (PEC) の直方体オブジェクトを二つ配置した。フルウェーブ解析における解析時間や使用メモリ削減の観点から、Building area の寸法は可能な限り小さくする必要がある。本モデルにおいては、十分な吸収境界条件の吸収性能が得られるよう Building area を設定する必要がある。送信アンテナと直方体オブジェクトを含む各オブジェクトから $1/4$ 波長離れた図中の赤点線で示している空間を Building area とした。更に、この Building area から 35m 離れた高さ 3.6m の位置に滑走路を想定した観測線を配置した。また、前述のように建物上面からの回折波は無視できるため、直方体オブジェクトの高さは解析空間と同じ 20m としている。

このモデルの水平ダイポールアンテナに 100MHz、30dBm を入力した場合の観測線上の電力分布を、提案手法及び青点線で示す全領域 (Entire area) の有限要素法解析によってそれぞれ求めた。提案手法における

図7 建物とアンテナ間距離 d による受信電力の変化

大地反射波はレイトレース法により求めるため、先に述べたように有限要素法解析における Building area の周囲境界は全て吸収境界条件とし、また全領域の有限要素法解析では、大地面のみ完全導体、その他には吸収境界条件を適用した。また、受信アンテナは無指向性アンテナとしている。

4.2 建物とアンテナ間距離の影響

図7に $d=3, 6, 9\text{m}$ とした場合における、両手法による観測線上の電力分布の解析結果を示す。同図より、 d に依存せず提案手法による解析結果は全領域フルウェーブ解析の傾向と良好に一致していることがわかる。また $d=6\text{m}$ の場合における提案手法の解析時間は、全領域フルウェーブ解析の1/5程度と大きく短縮できた。一方で、 $d=9\text{m}$ と大きくした場合において受信電力が低下する部分で差異が見られる。これは、評価の基準となる全領域フルウェーブ解析において解析領域が大きくなることによる精度劣化と考えられる。送信アンテナから観測線までの距離に対して Building area が大きくなることによる提案手法の誤差であるとも考えられるが、実際の空港における Building area と滑走路の距離は本モデルよりも10倍以上大きく、Building area と滑走路との距離に対する Building area の大きさは相対的に小さくなるため、提案手法の誤差は小さく考えられる。

4.3 建物の棟数

次に建物を模擬した直方体オブジェクトの数に対する解析精度について検討する。図8に、送信アンテナの位置は変更せず(a)3棟、(b)4棟の直方体オブジェクトを配置した場合における Building area 内の配置を示す。同図に示すように、6m四方の直方体オブジェクトを6m間隔で観測線に対し平行に配置し、 $d=6\text{m}$ とした。なお、その他の解析条件は前節までと同様で

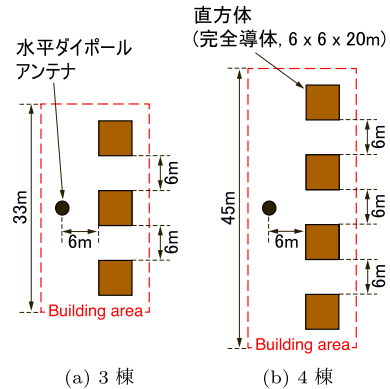


図8 Building area における建物の配置

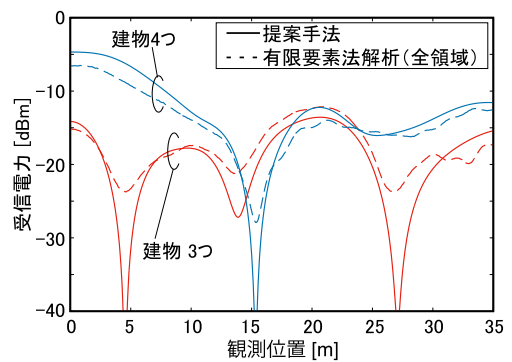


図9 建物の棟数による受信電力の変化

ある。

図9に電力分布の解析結果を示す。同図より、低い電力レベルにおける差はあるものの、棟数に依存せず両手法による受信電力分布の傾向は良好に一致していることがわかる。このことから、建物の棟数を変化させた場合においても、本手法が有効であることを示した。

4.4 建物の形状

空港には管制塔などの円柱形状の建物も存在するため、円柱状の建物に対する本手法の有効性についても検討した。図10に、建物を円柱状にした際の Building area の配置を示す。同図は、図6に示すモデルにおいて $d=6\text{m}$ とし、建物を直径6mの円柱オブジェクトに変更したものである。

図11に電力分布の解析結果を示す。同図より、両者は3dB程度の誤差で良好に一致していることが分かる。このことから、管制塔のような円柱状の建物が存在する空港面においても、提案手法が有効であることを示した。

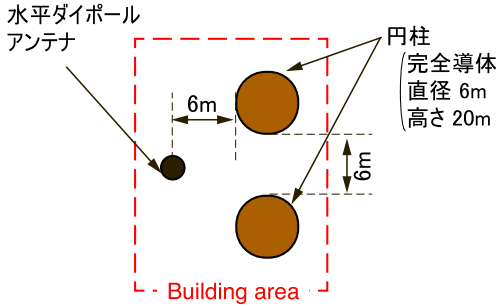


図 10 円柱状建物を配置した Building area 内の配置

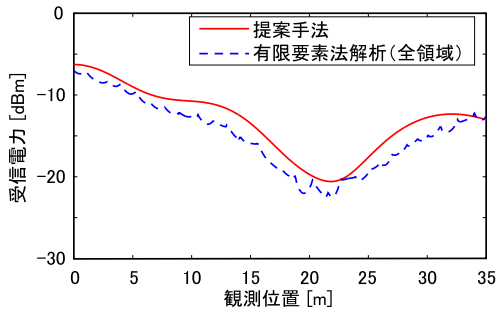


図 11 円柱状建物を配置した場合の受信電力

5. むすび

本論文では、空港面における VHF 帯の伝搬特性評価に適したフルウェーブ解析とレイトレース法のハイブリッド電磁界解析手法を提案し、フルウェーブ解析による空港面を模擬した全領域解析との比較により、本手法の有効性について検討した。その結果、建物と送信アンテナ間距離、建物数及び建物形状に依らず提案手法による受信電力分布は受信電力の低い部分における差はあるものの、フルウェーブ解析の結果とおおむね 3dB 程度の誤差で一致し、解析時間はおおよそ 1/5 程度まで短縮された。以上より、提案手法による滑走路上の受信電力解析への有効性を示した。今後の展望として、大地の起伏等のレイトレーシング法の適応領域が複雑な場合や提案手法の適用限界を示すことが挙げられる。

謝辞 本研究の推進に多大な協力を頂きました、本学大学院修了生の加藤涼氏に感謝の意を表します。

文 献

- [1] 岡田 實, 航空電子装置, pp.57-67, 日刊工業新聞社, 1972.
- [2] 杉本末雄, 柴崎亮介, GPS ハンドブック, pp.235-245, 朝倉書店, 2010.
- [3] 毛塚 敦, 齋藤 享, 吉原貴之, “石垣空港における GBAS VDB の滑走路面上覆域シミュレーション,” 信学技報, EST2015-56, Sept. 2015.
- [4] 工藤正博, 藤井直樹, 福島荘之介, 齋藤真二, 吉原貴之, 齋藤 享, 山康 博, 星野尾一明, “安全性解析のための GBAS プロトタイプに関する研究の概要,” 第 9 回電子航法研究所研究発表会, June 2009.
- [5] 福島荘之介, “GBAS (地上型補強システム) 入門 (その 1) GBAS の測位原理,” 航空無線誌, vol.59, pp.56-63, 2009.
- [6] S. Saitoh, S. Fukushima, and N. Fujii, “Flight experiment of GBAS in Japan,” Proc. ION GPS 2001, pp.1757-1765, Sept. 2001.
- [7] 福島荘之介, “GBAS プロトタイプ装置の関西国際空港への設置と B787 による飛行実証,” 航空無線誌, vol.71, pp.44-47, 2012.
- [8] ICAO International Standards and Recommended Practices Annex 10 (Aeronautical Telecommunication), Volume I, p3-70, Seventh Edition, July 2018.
- [9] 今井哲郎, “電波伝搬解析のためのレイトレース法の全て,” アンテナ・伝搬における設計・解析手法ワークショップ (第 50 回), pp.63-67, 2015.
- [10] V. Degli-Esposti, G. Doriana, M. Andrea, A. Pierfrancesco, and F. Franco, “An advanced field prediction model including diffuse scattering,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol.52, no.7, pp.1717-1728, July 2004.
- [11] Y. Wang, S. Safavi-Naeini, and S.K. Chaudhuri, “A hybrid technique based on combining ray tracing and FDTD methods for site-specific modeling of indoor radio wave propagation,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol.48, no.5, pp.743-754, May 2000.
- [12] B. Reichel and T.P. Stefanski, “Hybrid technique combining the backward ray tracing and the FDTD method,” 8th Eur. Conf. Antennas Propag., pp.1144-1147, April 2014.
- [13] Y. Wang, S.K. Chaudhuri, and S. Safavi-Naeini, “An FDTD/ray-tracing analysis method for wave penetration through inhomogeneous walls,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol.50, no.11, pp.1598-1604, Nov. 2002.
- [14] 加藤 涼, 須賀良介, 毛塚 敦, 橋本 修, “VHF 帯空港面電磁界解析手法の提案,” 信学論 (C), vol.J100-C, no.5, pp.236-238, May 2017.
- [15] ANSYS, HFSS, <https://www.ansys.com/ja-jp/products/electronics/ansys-hfss>, 参照 Aug. 1, 2018. (2018 年 8 月 13 日受付, 11 月 30 日再受付, 2019 年 5 月 17 日公開)



須賀 良介 (正員)

平 14 青学大・理工・電気電子卒。平 16 同大大学院修士課程了。平 20 同大大学院博士課程了。同年東工大理工学研究科電気電子工学専攻産学官連携研究員。平 23 青学大助手。平 24 同大助教。博士(工学)。アンテナ, ミリ波パッケージ, 熱電磁界錬成解析, マイクロ波・ミリ波回路, 環境電磁工学に関する研究に従事。平 16 電気学会優秀論文発表賞, 平 24 本会学術奨励賞, 平 25 IEEE MTT-S Japan Young Engineer Award, 平 26 本会通信ソサイエティBest Paper Award 各受賞。電気学会, IEEE 各会員。



毛塚 敦 (正員)

平 9 青学大・理工・電気電子卒。平 11 同大大学院修士課程了。同年日本無線株式会社(JRC)入社。平成 18 防衛庁防衛大学校博士課程了。平成 19 法政大・工学・情報電気電子工・兼任講師, 平成 23 より青学大・理工・電気電子・非常勤講師。平成 27 より青学大客員研究員。現在, 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所電子航法研究所主幹研究員, 博士(工学)。アンテナ伝搬, マイクロ波, 衛星追尾, 航空航法の研究に従事。平成 30 本会エレクトロニクスソサイエティ活動功労賞受賞。IEEE 会員



橋本 修 (正員:フェロー)

昭 51 電通大・電気通信・応用電子工卒。昭 53 同大大学院修士課程了。同年(株)東芝入社。昭 56 防衛庁入庁。昭 61 東工大大学院博士課程了。平 3 青学大助教授。平 6~7 アイリノイ大客員研究員。平 9 青学大教授。工博。環境電磁工学, 生体電磁工学, マイクロ波・ミリ波計測に関する研究に従事。平 2 防衛論文賞, 平 15 エレクトロニクス実装学会論文賞, 平 18 第 9 回エレクトロニクスソサイエティ賞等各受賞。本会マイクロ波研究専門委員会委員長, エレクトロニクスシミュレーション研究専門委員会委員長, エレクトロニクスソサイエティ会長等を歴任。主な著書に, 「電波吸収体の技術と応用」(平 15), 「高周波領域における材料定数測定法」(平 15), 「実践 FDTD 時間領域差分法」(平 18), 「ミリ波技術の基礎」(平 21), 「マイクロ波伝送・回路デバイスの基礎」(平 25) 等。電気学会(フェロー), エレクトロニクス実装学会, 日本建築学会, IEEE 各会員。