

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 18 日現在

機関番号：31101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K06364

研究課題名(和文) 航空需要に対応する海上設置型ローカライザの設置条件に関する研究

研究課題名(英文) Study on the conditions of offshore installation type localizer adapted to aviation demand

研究代表者

中田 和一 (NAKATA, WAICHI)

青森大学・薬学部・教授

研究者番号：00244898

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,800,000円

研究成果の概要(和文)：スケールモデル(1/87)を用いた海上設置型ローカライザ(LOC)の実験設備を屋内電波暗室内に構築した。実験と理論解析から、LOCアンテナ設置用カウンターポイズからの回折波、模擬海面領域からの反射波、滑走路端での回折波がLOC放射界へ及ぼす影響について明らかにした。一様幾何光学回折理論(UTD)と物理光学回折理論(PO)を併用した電磁界解析手法の有用性を確認した後に、現用のLOC施設を海上に設置する場合の条件について、海面状態、海面領域の範囲、カウンターポイズ寸法などが、遠方DDM(変調度差)特性に及ぼす影響について数値解析から考察を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

沿岸部に位置する空港では、航空需要の増加に伴い、新たなローカライザ施設を設置する領域の確保が、地形的・経済的に困難な場合があるため、これを解消する技術として、海上設置型LOCの実用化を検討することの学術的な意義は大きい。海上に設置される際に、LOC設置カウンターポイズや、海面波浪状態、前方滑走路端等の誘導電波品質に与える影響について、構築したスケールモデルを用いた実験結果と各種電磁界解析手法の適用から明らかにし、基本的なLOC置条件についてシミュレーションによる検討が可能となった。

研究成果の概要(英文)：An experimental facility for a sea-based localizer (LOC) using a scale model (1/87) was built in an indoor anechoic chamber. From the experiments and theoretical analysis, the effects of diffracted waves from the counterpoise for LOC antenna installation, reflected waves from the simulated sea surface area, and diffracted waves at the runway edge on the LOC radiation field were clarified. After confirming the usefulness of the electromagnetic field analysis method that uses the uniform geometrical theory of diffraction (UTD) and the physical theory of diffraction (PO), the conditions for installing the current LOC facility on the sea, the influence of the range of the area, the counterpoise size, etc. on the distant DDM (modulation depth difference) characteristics was discussed from the numerical analysis.

研究分野：工学

キーワード：ILS ローカライザ 物理光学回折理論 一様幾何光学回折理論 DDM

1. 研究開始当初の背景

航空機の着陸誘導を行う ILS (Instrument Landing System: 計器着陸誘導システム) では、方位方向の誘導をローカライザ (LOC) と呼ばれるアレイアンテナシステムで行っている。現在、沿岸部に位置する羽田国際空港では、国際便の発着数の増加に伴う航空機の処理能力を高めるため、従来の進入コースに加え反対方向からの進入を可能にする双方向誘導で対応するシステムが検討され、新たな LOC 用領域の確保が技術課題となった。用地の確保が困難な場合、独自に LOC を海上設置するという方法も、将来の沿岸部空港での展開を念頭に置くと、検討する余地がある。通常の LOC システムは、送信電波の大地反射波と、送信直接波の空間合成で誘導電界パターンを形成しているが、周囲を海で囲まれた海上のカウンターポイズ (CP: LOC 設置架台) 上に設置する LOC アンテナに関しては、前方の滑走路終端とアンテナ間に存在する海面領域の反射波が潮位や波浪といった自然条件の変化で送信信号に影響を与える、いわゆる海上フェージング現象や、その他、沿岸に接する滑走路端に設けられる防潮堤での回折波の影響や、海上を移動する大型船舶等からの散乱波の影響も懸念される。これらの検討課題に対して、知見を得るための具体的なスケールモデル実験の実施と、これに基づいた電磁界シミュレーション技術の確立によって、海上設置型 LOC の実現に必要な設置条件を整理しておくことが急がれていた。

2. 研究の目的

本研究は、海面からの反射波フェージングや、大型構造物による回折・散乱波が、LOC 誘導コース信号に及ぼす影響を、屋内電波暗室環境下のスケールモデル実験と電磁界シミュレーション解析から検証し、問題の程度を明らかにすること、かつ障害を最小化する対策の検討を目的としている。海上設置型 LOC のモデルアンテナおよび海水反射面モデルや、防潮堤、大型航空機などの周辺構造物モデルを電波暗室空間内に構成して行う実験から得られる知見を基にして、実用化における問題点を整理し、障害が懸念される要因については、例えば遮蔽フェンス等による障害対策の可能性を、理論と実験の両面から検証し、海上設置 LOC の設計に関する具体的な工事要件の提案を行うものである。

3. 研究の方法

以下の順に、研究を行った。

- (1) 海上に設置する LOC アンテナ (110MHz 帯) を模擬する X 帯 (9.6GHz 帯) スケールモデル (約 1/87.3 スケール) のほか、海水反射面モデル、滑走路端の防潮壁モデルを構築し、実験用スケールモデルとしての有効性を検証する。方位方向と鉛直方向での近傍放射電界特性を測定し、電磁界シミュレーションの解析結果と比較し有用性を確認する。
- (2) 海上に設置された LOC からの誘導信号に対する海面反射波の変動の影響や、滑走路端の防潮堤による回折波の影響等の、反射・散乱波を発生させる自然環境、周辺構造物環境の要因を整理し、それぞれに対応した電磁界解析シミュレーション技術 (PO: 物理光学回折理論、UTD: 一様幾何光学回折理論、レイトレーシング法、モーメント法、フェージング理論) を開発する。LOC 設置位置や設置高と、反射海面や周辺構造物からの反射・散乱波による航空機誘導電波の擾乱の相関について数値解析から明らかにする。

4. 研究成果

(1) CP 上に設置する LOC スケールモデルアンテナ (9.6GHz) 用の試作マイクロストリップ LPDA (対数周期ダイポールアレイ) 素子の放射特性を図 1-1 に示す。LPDA の設計は FDTD (時間領域差分法) で実施し、単体利得 9.5dB でビーム幅は、ほぼ設計値通りとなり、現用の 110MHz 帯の LPDA と近似する値となっている。これを、模擬 CP (LOC 前方から CP 端までの距離 $C_p=5$, 10) 上に高さ $H=1.15$ で設置した時の垂直面特性を図 1-2 に示す。図中に、CP エッジでの回折効果を UTD で計算した時の結果も併記した。距離 C_p が長いほど、俯角領域のカットオフ特性が向上することが確認でき、測定値と理論値は概ねよく一致していることから、CP の影響を考慮した仰角方向放射特性や、俯角方向の海面反射成分を推定する場合に UTD が有効であることが確認された。

(2) 実験電波暗室内に、図 2 に示すような、CP 上に置かれた LPDA アレイ (4 素子) と海面領域および前方の滑走路をアルミ合板で模擬した海上設置型 LOC の実験スケールモデルを構築した。電磁界解析手法として、CP および滑走路 (RW) 領域およびそのエッジ回折波は UTD を、海面領域はベクトル PO を適用して受信界を算出した。図 3 に RW エッジの有無による、ディレクショナル系受信界ハイトパターン ($C_p=0.15m, R_{wf}=1.0m, R_w=2.0m$) の変化を示す。模擬海面はアルミ製で鏡面反射の状態となっている。RW が無い場合、LOC からの直接波と CP のエッジ回折波、

海面反射波で形成されるハイトパターンは $z=0.4\text{m}$ と 0.95m 付近で Null 点を有しており、RW が存在する場合は、この特性に RW エッジ回折波が重畳する形で振動する Null が現れている。この Null 振動は、RW との距離が大きくなるほど短周期の干渉フェージングとして変化することが数値計算で確認されている。実験結果と理論値は、こうした Null 変動を含め概ね良く一致しており、解析方法の有効性が確認された。

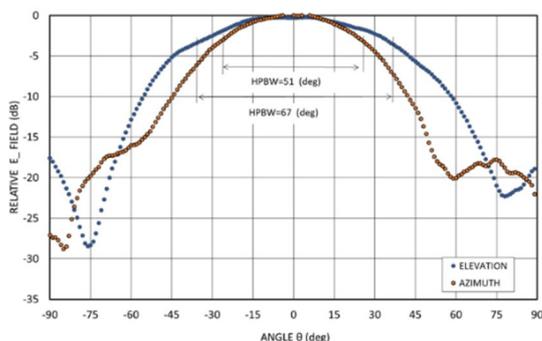


図 1-1 試作 LPDA アンテナの放射特性

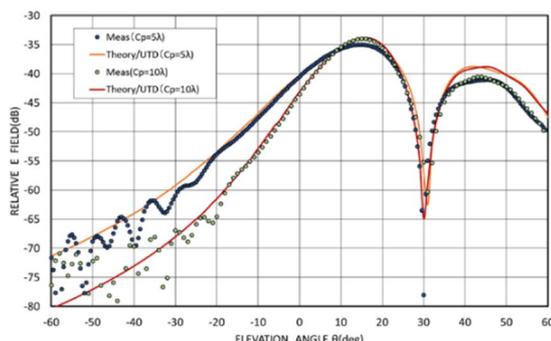


図 1-2 カウンターポイズ上の試作 LPDA アンテナの垂直面放射特性

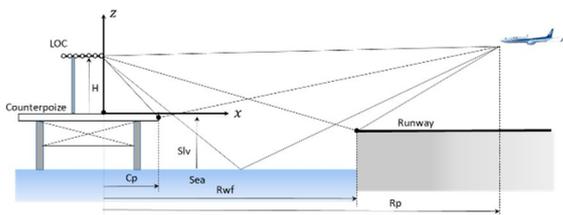


図 2 海上設置型 LOC の電波伝搬経路概略

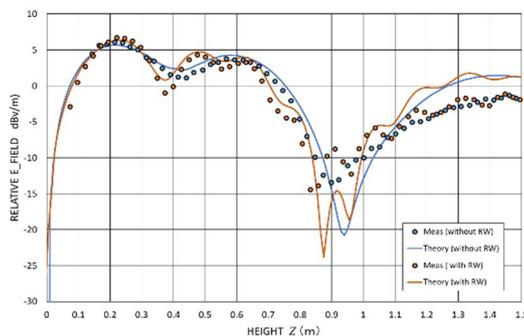


図 3 海上設置型 LOC の垂直面特性 (RW 端の回折の影響)

図 4 は、RW が存在する状態で、CP から模擬海面までの距離 Slv を変化させた場合の、水平 y 方向でのディレクショナル系 (Dir) とサイドバンド系 (Sb) の電界強度の変化を示している。実験では $Slv=36, 23, 13\text{mm}$ で最大 0.8 ほど高低差となっている。受信点は LOC 原点から見て 4.0° の仰角方向にある。海面領域 y 方向の範囲を $-1 \sim 1\text{m}$ とし、海面領域に対してベクトル $P0$ を適用し、海面入射波による海面電流分布を求めて反射界の計算を行っている。各素面電流による放射界の RW エッジでの回折波も考慮している。模擬海面までの距離 Slv が長い程、受信強度が強くなり、模擬海面の上昇とともに受信強度が低下する。実験では約 2dB 程度の変動差があり、Dir 系、Sb 系共に変化の傾向は同様である。理論値は、実験結果とよく一致しており、 $P0$ を用いた海面反射波の推定が有効であることが確認された。ただし、後述の様に、 Slv に対する受信強度の変動特性は Cp, Rwf の条件によっても異なる。横断方向での海面反射波が航空機誘導信号変調度差 DDM に及ぼす影響は、主に方位角 0° 近傍での Dir、Sb 方位電界特性の非対称化に依存するが、模擬海面の変動状態に応じた $P0$ を適用することによって航空機進入コース上の DDM 変動について数値計算による推定の可能性が示された。

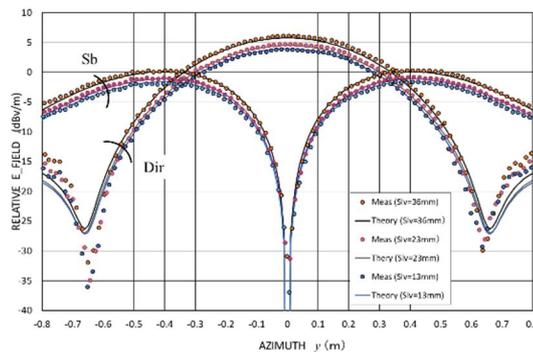


図 4 模擬海面深 Slv による Dir、Sb 水平電界の変化 ($Rp=2.0\text{m}$, 仰角 4.0°)

(3) モデル実験結果と解析結果の照合による電磁界解析手法の有効性が確認できたことを踏まえ、現用の LOC 施設 (24 素子アレイ, $H=3\text{m}$, 110MHz) を例に、数値解析による考察を行った。図 5 は、カウンターポイズ $Cp=10\text{m}$ の時の、異なる RW-Cp 間距離 (すなわち異なる $P0$ 海面領域) での、 Cp から海面までの距離 Slv の変動に伴う、進入コース上 ($Rp=10\text{km}$) での Dir 系電界

強度変動である。明らかに、海面領域が広がると Slv 変動の影響も大きくなるのがわかる。さらに、図 6 の $C_p=20m$ の場合は、海面を叩く LOC 放射界強度が低下し、遠方電界変動も $C_p=10m$ の約半分まで抑えられることが確認できる。また、海面領域が拡大すると、海面からの LOC アンテナ位置の上昇（すなわち Slv の増大）に伴い、直接波と海面反射波で合成された垂直ビームが低仰角側に移動し、コース（仰角 3° ）方向の電界強度が増加する特徴が強く現れることが確認できる。

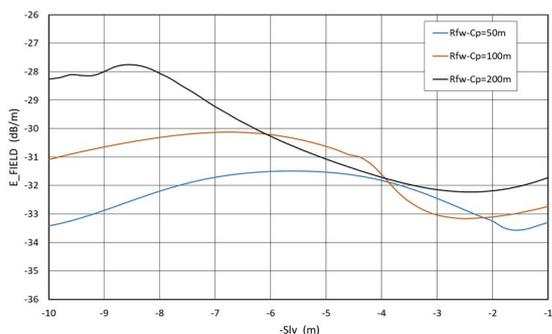


図 5 異なる海面領域による、Slv 変化に伴う遠方電界強度の変化 ($C_p=10m$)

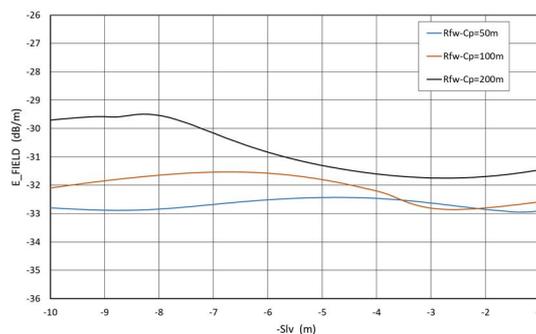


図 6 異なる海面領域による、Slv 変化に伴う遠方電界強度の変化 ($C_p=20m$)

(4) LOC の変調度差 DDM のコース特性（通常 $DDM=0$ ）は、Sb 電界特性の方位角 0° 方向ヌル点の偏移や方位角 0° を中央とする Car および Sb 放射電界特性の非対称化によって悪化する。これは横断方向（LOC アレイ列方向）海水面の勾配変化により、海面反射波位相が方位方向で変動することに起因する。図 7 は、 $C_p=10m$ における、Slv を平均水位として異なる波高 h_0 （波高勾配 2° ）の海面波（三角波近似）が、連続して横断方向で横切っている時の、コース遠方（10km）における最大 DDM 変動値の解析結果である。波高の増大とともに、DDM が悪化し、潮位によっても DDM 変動値が周期的に変わる傾向が確認できる。海面領域が拡大すると、同一波高でも更に DDM が悪化することも数値解析から確認されている。図 8 は $C_p=20m$ の場合であるが、海面に入射する電界レベルの低下によって、DDM 変動を $1/3$ 程度に抑えられていることがわかる。海上 LOC の設置条件は、遠方 DDM が ICAO（国際民間航空機関）基準を逸脱しないように、LOC 設置予定の沿岸潮位変化や波浪の情報を基に、アンテナ高 H や距離 C_p 、 $Rwf-Cp$ 間距離等のパラメータを数値解析で最適化することになるが、本研究によって基本的なシミュレーション技術が確立できたものとする。今後、海面状態の統計的な扱いによる海面反射波でのフェージングの程度を推定し、コース上を進入する航空機の受信 DDM 変動を確率論的に予測する技術へ繋げる必要がある。

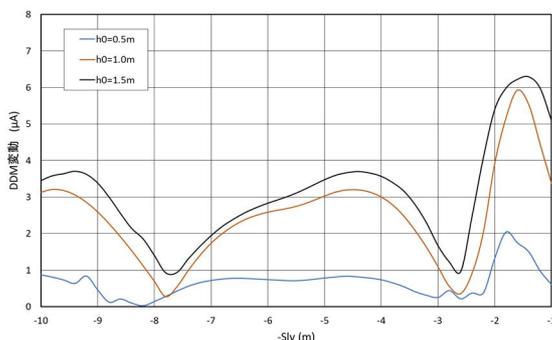


図 7 異なる海面波高 h_0 （波高勾配 2° ）での、Slv 変化に伴う遠方 DDM の変化 ($C_p=10m$ 、 $Rwf-Cp=50m$)

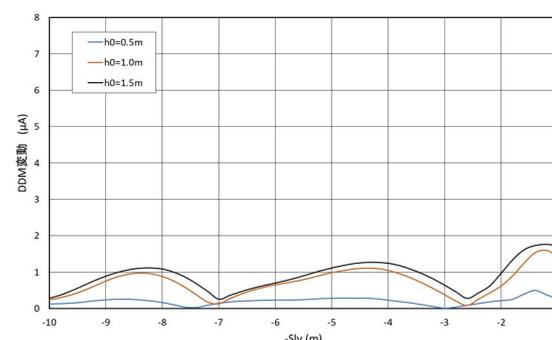


図 8 異なる海面波高 h_0 （波高勾配 2° ）での、Slv 変化に伴う遠方 DDM の変化 ($C_p=20m$ 、 $Rwf-Cp=50m$)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 田嶋裕久・本田純一・ニツ森俊一（電子航法研）・中田和一（青森大）	4. 巻 118
2. 論文標題 ILS LOC前方反射面障害の遮蔽フェンスによる改善	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 電子情報通信学会技術報告	6. 最初と最後の頁 35-38
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
研究分担者	田嶋 裕久 (TAJIMA HIROHISA) (10392763)	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・研究員 (82627)	
研究分担者	本田 純一 (HONDA JYUNICHI) (10643348)	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・研究員 (82627)	