

平成 21 年 5 月 30 日現在

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2006～2008

課題番号：18760212

研究課題名 (和文) 雷害リスク低減のための確率的雷分布同定システムの研究

研究課題名 (英文) Identification of averaged lightning distribution

研究代表者

安藤 芳晃 (ANDO YOSHIAKI)

電気通信大学・電気通信学部・准教授

研究者番号：30323877

研究成果の概要：

本研究では、雷放電による放射電磁波を観測し、観測波形から雷放電位置を同定することを目的としている。従来開発した、同定法である、チホノフの正則化を用いた逆問題に、正則化パラメータを適切に選ぶ手法である GCV を導入し、衛星観測との比較により、精度向上を確認できた。また、近傍雷の同定を行うための時間領域解析手法として、FDTD 法に E-J 法と NPML を導入することで、VLF 帯までの時間領域解析を開発した。さらに、将来に更に広域の電磁界解析を行うための新しい手法として CIP 法に着目し、CIP 法で電磁界問題を解く際に必要な TF/SF 境界を開発、精度よく平面波を解析領域に伝搬させることに成功した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,400,000	0	1,400,000
2007年度	1,100,000	0	1,100,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
総計	3,200,000	210,000	3,410,000

研究分野：電磁界解析

科研費の分科・細目：電気電子工学 電力工学・電気機器工学

キーワード：電磁界解析、計算電磁気学、FDTD 法、逆問題、雷放電、CIP 法、電気・電磁環境

1. 研究開始当初の背景

雷が人間活動に及ぼす被害は時に甚大であり、現在では気象情報会社を中心に落雷位置評定システムが運用されている。しかしながら、これらと気象レーダーなどを組み合わせた雷被害予測を行っても、最適な判断は現在でも極めて困難である。また、このような決定論的な手法では落雷同定に失敗する場合も多く、例えば北陸の冬季雷の補足率は 60%程度であると報告されている。

特に、雲間放電は規模が小さく近傍でも高周波で個別に捉えるには弁別が困難である。しかし、これらは全て空電雑音として存在し、

1Hz-1kHz という低周波の帯域ではこれら全てが重畳されたものが観測される。特に、低周波の電磁波は、電離層を透過することができないため、大地と電離層間を伝搬する。特に、数 Hz 程度の ELF 帯の電磁波は、長波長であるために地球を何周も伝搬することが可能であり、そこを空洞共振器とする共振現象 (シューマン共振; Schumann resonance) を起こすことが知られている。

そこで本研究は、落雷に先行して発生する小規模な雲間放電を ELF 帯電磁界で観測し、そのスペクトルから逆問題を解くことで、リアルタイムの落雷確率分布を求めようとする。

るものである。

2. 研究の目的

本研究では、インダクション・コイル型の磁気センサーを用いて低周波磁界を観測、観測波形を数値計算によって得られた基本スペクトル列に分解し、雷分布が観測点からどの程度の距離に存在するかを同定することが目的となる。また、近傍雷同定には時間波形から直接求めるため、時間領域の電磁界解析結果から、このためには以下の3点が重要となる。

①観測スペクトル及び時間領域波形計算のための電磁界解析手法の開発

②観測波形から観測点-波源距離同定のための逆問題手法の開発

③観測波形に信号処理を施し、ノイズ除去

このうち③は、北海道の母子里に設置したセンサーで4kHz サンプリングで収録した連続波形データを線形予測フィルタを用いて観測点近傍の対地雷による大きなパルスを取り除き、FFTを用いて数分毎の周波数スペクトルを取得する手法を2005年1月に発表しており(Y. Ando, P. Maltsev, et al., J. Atmos. Electr., vol. 25, no. 1, pp. 29-39, 2005)、現時点で十分な信号処理法が開発されている。

そこで本研究の中心となる目的は、雷放電により発生する電磁波の電磁界解析によるシミュレーション手法の確立と、観測点のスペクトルより Tikhonov の正則化を用いて波源である雷の統計的な分布再構成の空間解像度の向上である。

3. 研究の方法

3. 1. 基本原理

雷放電により発生する低周波の電磁波は、電離層を透過することができないため、大地と電離層間を伝搬する。特に、数 Hz 程度の ELF 帯の電磁波は、長波長であるために地球を何周も伝搬することが可能であり、シューマン共振を起こすことが知られている。このシューマン共振のスペクトルは、雷放電位置と観測点間の距離で主に定まることが分かっており、逆の観点からは、観測したスペクトルを分解することで波源の位置を推定することが可能となる。本研究ではこれを利用し、観測スペクトルを個別の雷放電による応答スペクトルに分解することが研究の中心となる。

3. 2. 雷放電により発生した電磁波の電磁界解析

(1) 有限差分周波数領域法 (Finite-Difference Frequency Domain; FDFD 法)

FDFD 法を用いて、地球全体の大地-電離層間の電磁波伝搬をシミュレーションする。これにより、大地-電離層間を空洞共振器とするシューマン共振のシミュレーションが可

能となる。球をモデル化した内円の半径を r_i 、電離層中の適当な高度で打ち切ってその半径を r_o とおき、そこで完全導体とする。下部電離層の影響で上空では十分に反射・減衰されているので吸収境界は必要ない。地球-電離層間の解析領域を微小セルに区切り、 r 、及び θ 方向のセルのサイズをそれぞれ、 Δr 及び $\Delta \theta$ とする。波源として Δl の長さを持つ微小ファイラメントが、 $(r, \theta) = (r_i + \Delta r/2, 0)$ において、 $+r$ 方向を向いて存在している。解析領域中の比誘電率は φ 方向には依存しないものとする、この問題は r, θ のみに依存する2次元問題に帰着できる。そこで、離散化された座標は次式で表されるものとする。

$$(r, \theta) = (r_i + \{i-1\}\Delta r, \{j-1\}\Delta \theta) \equiv (i, j)$$

ここで、 $i=1, \dots, N$ 、 $r_o = r_i + N\Delta r$ 、 $j=1, \dots, M$ 、 $M\Delta \theta = \pi$ とする。また、この形状において、 φ 方向に関する TE モード、即ち E_r 、 E_θ 、及び H_φ 成分のみが励振され、これらの成分を Yee セルのように配置する。即ち、

$$\begin{bmatrix} E_r(i, j) \\ E_\theta(i, j) \\ H_\varphi(i, j) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_r(r_i + \{i-1/2\}\Delta r, \{j-1\}\Delta \theta) \\ E_\theta(r_i + \{i-1\}\Delta r, \{j-1/2\}\Delta \theta) \\ H_\varphi(r_i + \{i-1/2\}\Delta r, \{j-1/2\}\Delta \theta) \end{bmatrix}$$

このとき、有限差分式は磁界の成分を用いて次式で表される。

$$\begin{aligned} & c_1 H_\varphi(i + \frac{3}{2}, j + \frac{1}{2}) + c_2 H_\varphi(i - \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}) \\ & + c_3 H_\varphi(i + \frac{1}{2}, j + \frac{3}{2}) + c_4 H_\varphi(i + \frac{1}{2}, j - \frac{1}{2}) \\ & + c_0 H_\varphi(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}) = b \end{aligned}$$

$$c_1 = \frac{(1 - \delta_{i,N})R(i + \frac{3}{2})}{\varepsilon_r(i + 1, j + \frac{1}{2})R(i + \frac{1}{2})}$$

$$c_2 = \frac{(1 - \delta_{1,i})R(i - \frac{1}{2})}{\varepsilon_r(i, j + \frac{1}{2})R(i + \frac{1}{2})}$$

$$c_3 = \frac{(1 - \delta_{j,M})S(j + \frac{3}{2})\Delta r^2}{\varepsilon_r(i + \frac{1}{2}, j + 1)\{R(i + \frac{1}{2})\Delta \theta\}^2 S(j)}$$

$$c_4 = \frac{(1 - \delta_{1,j})S(j - \frac{1}{2})\Delta r^2}{\varepsilon_r(i + \frac{1}{2}, j)\{R(i + \frac{1}{2})\Delta \theta\}^2 S(j)}$$

$$c_0 = k_0^2 \Delta r^2 - \left[\frac{1 - \delta_{i,N}}{\varepsilon_r(i + 1, j + \frac{1}{2})} + \frac{1 - \delta_{1,i}}{\varepsilon_r(i, j + \frac{1}{2})} \right]$$

$$+ \frac{S(j + \frac{1}{2})\Delta r^2}{\{R(i + \frac{1}{2})\Delta \theta\}^2} \left[\frac{A_{1,j}}{\varepsilon_r(i + 1, j + \frac{1}{2})} + \frac{A_{j,M}}{\varepsilon_r(i + \frac{1}{2}, j + 1)} \right]$$

$$b = \frac{4I\Delta l\Delta r\delta_{1,i}\delta_{1,j}}{\varepsilon_r(i + \frac{1}{2}, 1)\pi\{R(i + \frac{1}{2})\Delta \theta\}^3}$$

であり、 k_0 、 $\delta_{m,n}$ 、 $R(i)$ 、及び $S(j)$ は真空中の波数、クロネッカーのデルタ、 $R(i) = r_i + (i-1)\Delta r$ 、 $S(j) = \sin\{(j-1)\Delta \theta\}$ で

あり、さらに

$$A_{1,j} = \begin{cases} 1/S(j), & (j \neq 1) \\ 4/S(j + \frac{1}{2}), & (j = 1) \end{cases}$$

$$A_{j,M} = \begin{cases} 1/S(j+1), & (j \neq M) \\ 4/S(j + \frac{1}{2}), & (j = M) \end{cases}$$

である。

大気・電離層パラメタ ELF 帯の伝搬損失は下部電離層において、主に電離した粒子間や中性粒子との衝突によるものである。大気圏下部ではほぼ導電率として近似でき、導電率の高度分布のモデルとして次式が与えられている。

$$\frac{1}{\sigma(z)} = \sum_{\eta=1}^3 D_{\eta} \exp(-B_{\eta}z)$$

ここで、

$$\left(\frac{D_{\eta}}{10^{12} \Omega \text{m}}, \frac{B_{\eta}}{\text{km}^{-1}} \right) = (46.9, 4.527)_{\eta=1},$$

$$(22.2, 0.357)_{\eta=2}, (5.9, 0.121)_{\eta=3}$$

である。高度 60 km 以上の大気圏上部では電子による影響が支配的であり、次のように定式化できる。比誘電率を損失性のプラズマとし、

$$\varepsilon_r = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\{\omega - j(\nu_{en} + \nu_{ei})\}\omega}$$

で与える。ここで、 ω_{pe} 、 ν_{en} 及び ν_{ei} はそれぞれ電子のプラズマ周波数、電子と中性大気及び電子とイオンとの衝突周波数である。電子と各イオンの密度は IRI モデルより求めることが可能である。

(2) 有限差分時間領域法 (Finite-Difference Time Domain; FDTD 法)

近傍の雷放電からの電波を受信するには周波数領域でなく、時間領域波形で比較することが重要である。また、周波数帯も VLF 帯までを用いる方が都合がよい。現在まで時間領域波形の計算は、電離層の持つ分散性や異方性までを考慮したものではなく、一方で時間領域波形に与える影響からこれらの性質を考慮することは焦眉の課題であった。本研究では、各種技法を導入することで電離層の性質をフルに考慮した手法を提案する。

考慮する技法としては、有限差分法において電界とプラズマ電流を同じ位置、空間に配置する E-J 法と、空間変数変換を行うことで吸収境界を実現する Nearly Perfect Matched Layer (NPML) である。E-J を導入することで、差分式は陰解法となり、連立一次方程式を解く必要があるが、安定条件に影響を与えず、従来法に比べて高い高度までの電離層を考慮に入れることが可能となる。また、異方性

でありかつ分散性である媒質中の PML は従来開発されていなかったが、今回 NPML を導入し、任意の媒質中での吸収性能を上げることを試みる。

電離層中の電磁場の支配方程式は、プラズマ電流を考慮し、

$$\nabla \times \mathbf{H} = \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \sum \mathbf{J}_m$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}$$

$$\frac{\partial \mathbf{J}_m}{\partial t} + \nu_m \mathbf{J}_m = s_m \omega_{cm} (\mathbf{J}_m \times \hat{\mathbf{b}}) + \varepsilon_0 \omega_{pm}^2 \mathbf{E}$$

と表される。ここで、プラズマを構成する荷電粒子は複数考慮しており、第 m 種の荷電

粒子によるプラズマ電流を \mathbf{J}_m とした。 ω_{pm} 、 ω_{cm} はその荷電粒子のプラズマ周波数とサイクロトロン周波数、 s_m は電荷量の符号である。この式を差分化すると、 \mathbf{E} 及び \mathbf{J}_m に関する連立一次方程式が得られる。これは解析的に解くことは困難であるため、数値的に解くことで更新式を得ることができる。

また NPML においては、複素座標変換

$$\tilde{\nabla} \times \mathbf{H} = \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \sum \mathbf{J}_m$$

$$\tilde{\nabla} \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}$$

を用いる。ここで

$$\tilde{\nabla} = \frac{\partial}{\partial \tilde{x}} \hat{\mathbf{x}} + \frac{\partial}{\partial \tilde{y}} \hat{\mathbf{y}} + \frac{\partial}{\partial \tilde{z}} \hat{\mathbf{z}}$$

$$\partial \tilde{x} = \left(1 + \frac{\sigma_x}{j\omega} \right) \partial x$$

である。

(3) 新たな電磁界解析手法である CIP 法

大地-電離層間を完全にシミュレーションするには、有限差分時間領域法の場合、VLF 帯において約 1 km 程度の大きさのセルに区切る必要がある。しかし、このセルサイズの場合、数 GBytes のメモリのコンピュータでは伝搬距離を約 700 km 程度までしかとることができない。そこで、セルサイズを大きくとっても計算精度が損なわれない CIP (Constrained Interpolation Profile) 法を雷放電シミュレーションに応用することを目標として、その研究を行った。特に電磁界を解くための基本技術として、本研究では多次元の散乱問題に CIP 法を適用する方法を考える。

散乱問題は散乱体に平面波が入射したときの散乱波を計算する必要があるが、FDTD

法のような数値解法においては解析領域に平面波を入射させることは困難である。これは、解析領域周囲には吸収境界条件などを置くため、解析領域内で平面波を発生させ、かつ散乱波を測定する必要があるからである。一般にこの平面波入射のために、Total-Field/Scattered-Field(TF/SF)境界を用いる方法が有効である。しかしながら、CIP法ではまだTF/SF境界が開発されていない。そこで本研究では、CIP法に用いることができるTF/SF境界開発し、基礎的な問題として、完全導体四角柱による2次元散乱問題に適用する。

2次元CIP法におけるTF/SF境界の定式化を行う。限定された中央部にTF領域、それ以外はSF領域とする。全電磁場、散乱場のそれぞれについて、Maxwellの方程式の線形性より、CIP法の更新式は変更なく使用できる。このとき、TF/SF境界においては、Maxwellの方程式を満たすように更新式の修正が必要となる。また、方向分離をした際、2方向以上の移流も同様に入射場を考慮した更新式を導入すればよいが、入射場そのものも各方向に移流したものが必要となる。本研究では数値的に入射場を求めることでCIP法でのTF/SF境界を実現した。

3. 3. 観測波形からの雷分布同定逆問題～1次元逆問題～

シューマン共振スペクトルの計算により、逆問題を解くことで観測データから波源である雷分布を再構成することが可能となる。ここでは波源の強度と観測点からの距離のみの再構成をする逆問題を定式化する。

観測点からその地球表面上の反対側の点を Λ 分割し、その λ 番目の範囲における波源からの応答を $d_\lambda(f_\mu)$ とする。

$$d_\lambda(f_\mu) = \frac{1}{\Delta} \int_{\lambda\text{-region}} |h(r, f_\mu)|^2 dr$$

ここで、 f_μ は離散化された周波数、 $h(r, f_\mu)$ は有限差分法の計算結果による地表面での磁界であり、観測点と波源の距離 r 、周波数を f_μ とした計算結果である。一方、観測された応答 $|\tilde{h}(f_\mu)|^2$ は各領域からの応答 $d_\lambda(f_\mu)$ の線形結合で表されるものとするが、ここで観測値に含まれるシューマン共振以外の雑音を考慮し、各周波数の観測値 $|\tilde{h}(f_\mu)|^2$ の標準偏差を σ_μ とすると、 $G_{\lambda\mu} \equiv d_\lambda(f_\mu)/\sigma_\mu$ 、 $\gamma(f_\mu) = |\tilde{h}(f_\mu)|^2/\sigma_\mu$ と定義し、その係数を $\xi_\lambda (\lambda=1,2,\dots,\Lambda; \xi_\lambda \geq 0)$ とする。即ち、

$$\gamma(f_\mu) = \sum_{\lambda=1}^{\Lambda} G_{\lambda\mu} \xi_\lambda$$

また、行列の形式で書くと $\boldsymbol{\gamma} = \mathbf{G} \cdot \boldsymbol{\xi}$ とかけ、ここで、 $\boldsymbol{\gamma} = [\gamma(f_1) \ \gamma(f_2) \ \dots \ \gamma(f_K)]^T$ 、 $\mathbf{G} = \{G_{ij}\}$ 、 $\boldsymbol{\xi} = [\xi_1 \ \xi_2 \ \dots \ \xi_\Lambda]^T$ であり、 K を観測する周波数の点数とする。この解をチホノフの正則化を行うことで得る。

$$\Pi(\boldsymbol{\xi}) = \|\mathbf{G} \cdot \boldsymbol{\xi} - \boldsymbol{\gamma}\|^2 + \alpha Y(\boldsymbol{\xi})$$

ここで、 $\Pi(\boldsymbol{\xi})$ はスムージングの汎関数であり、 α は正則化パラメタ、 $Y(\boldsymbol{\xi})$ は安定化汎関数であり、ここでは $Y(\boldsymbol{\xi}) = \|\boldsymbol{\xi}\|^2$ のように選ぶ。この解は(9)の汎関数の勾配が0となる点を探すことで得られ、即ち次式を非負の最小二乗で解くことで得られる。

$$\nabla \Pi(\boldsymbol{\xi}) = \mathbf{G}^T \cdot (\mathbf{G} \cdot \boldsymbol{\xi} - \boldsymbol{\gamma}) + \alpha \boldsymbol{\xi} = 0$$

本研究ではこの正則化パラメタを最適化するため、GCV (Generalized Cross Validation) を用いて評価を行った。

4. 研究成果

4. 1. 雷放電により発生した電磁波の電磁界解析

(1) FDTD法

ここでは、現実的な電離層の電子密度プロファイルとしてIRI (International Reference Ionosphere) - 2000を用いて電離層をモデル化し、22.2 kHzの放射特性について検討を行った。計算領域を90 km × 40 km × 40 kmとし、セルサイズは1 kmの立方体としている。地磁気として 4.5×10^{-5} Tを与えた。電離層プロファイルを昼夜間で変化させたときの計算結果を図1に示す。昼夜間の電子密度では反射高度に差が生じ、異なる電界分布が得られていることが分かる。

(7)

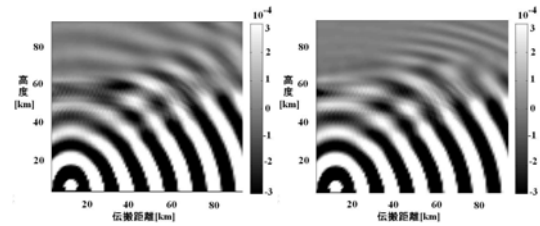


図1. FDTD法による計算結果(左が夜間の電子密度分布、右が昼間の分布)

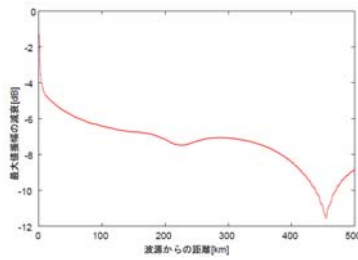


図2 地表面における電界強度分布

また、図2は伝搬距離方向の解析領域を500 kmまで拡張としたときの、地表面における電界強度分布を示したものである。図から分かる通り、VLF帯電波伝搬に特徴的なモード干渉が現れていることが分かり、本手法での数値計算が妥当性のあることが分かる。

(2) CIP法 – TF/SF境界の適用

開発したTF/SF境界の性能の評価を行う。性能評価に適切な問題は全電磁場領域に何の散乱体も設定せず、平面波を入射させることである。この場合、散乱波が生じないため散乱領域の場の値は常に0である必要があり、観測された0でない場(漏れ)はTF/SF境界の誤差として測定が可能となる。

図3はこの数値検証のための計算領域の構造を示している。計算領域は自由空間とし、100×100のセルを用意する。TF領域は64×64とし、計算領域の中心とする。TF/SF境界は図3で破線で示している。入射波の方向を矢印で示し、入射波の関数としてガウシアンパルスを考慮した。AからEの点は観測点を示している。

図4より、本研究で開発したTF/SF境界は正常に動作しており、ここからはSF領域への漏れは見られない。さらに詳細に定量的な評価を行ったところ、それらの誤差はおよそ0.2%程度である。特に、主軸に平行に伝搬した際の誤差は極めて小さいと言える。

4. 2. 観測波形からの雷分布同定逆問題

本手法では波源-観測点距離から同定した雷放電分布を、衛星観測であるLIS (Lightning Image Sensor)の観測結果との比較を行った。距離0が観測点であり、今回

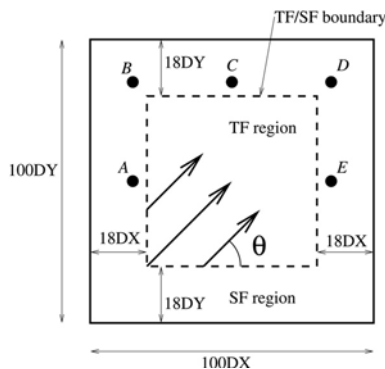


図3. 解析に用いた構造

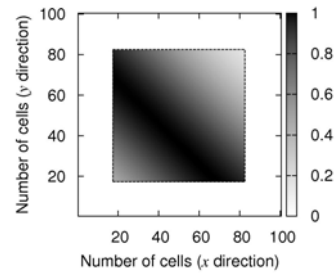


図4. 開発したTF/SF境界内を伝搬する平面波

は北海道の母子里で観測した、4 kHz サンプリングのデータを用いている。また、20 Mmにおいてちょうど地球の反対の極に対応する。図の太い実線が本研究による結果、細い実線が衛星観測による観測結果である。また、従来手法では正則化パラメータを経験的に選んでいたが、それによって選ばれたパラメータの解析結果もプロットしている。

この図から、今回GCVを導入したことにより、雷放電活動が盛んな12 Mm~16 Mm付近(北米およびアフリカに対応)での雷放電が極めて精度よく再構成されていることが分かる。

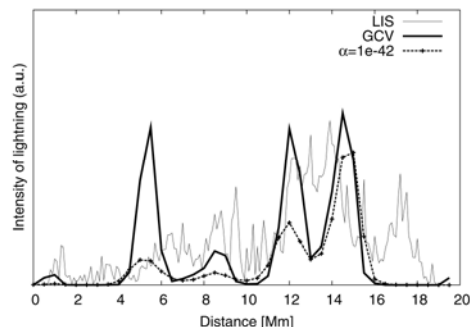


図5. 本研究で用いたGCVによる再構成結果

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

1. Y. Ando, H. Saito, and M. Hayakawa, "A nearly perfect total-field/scattered-field boundary for the one-dimensional CIP method," IEICE Trans. Electron., vol. E91-C, no. 10, pp. 1677-1683, 2008.、査読有
2. Y. Matsudo, T. Suzuki, M. Hayakawa, K. Yamashita, Y. Ando, K. Michimoto, and V. Korepanov, "Characteristics of Japanese winter sprites and their parent lightning as estimated by VHF lightning and ELF transients," Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, vol. 69, no. 12, pp.

- 1431-1446, 2007、査読有
3. Y. Ando and M. Hayakawa, "Use of generalized cross validation for identification of global lightning distribution by using Schumann resonances," Radio Sci., vol. 42, no. 2, RS2S1, 2007、査読有
 4. Y. Ando and M. Hayakawa, "Implementation of the perfect matched layer to the CIP method," IEICE Trans. Electron., vol. E89-C, no. 5, pp. 645-648, 2006、査読有

[学会発表] (計21件)

1. 待井, 安藤, 早川, "3次元FDTD法によるELF/VLF帯大地-電離層導波管伝搬の解析," 電気学会電磁界理論研究会, EMT-08-118, 2008年11月20-22日、岐阜
2. 村越, 安藤, 早川, "CIP法によるTF/SF境界を用いた多次元散乱問題の解法," 電気学会電磁界理論研究会, EMT-08-137, 2008年11月20-22日、岐阜
3. 村越, 安藤, 早川, "CIP法によるTF/SF境界を用いた2次元散乱問題の解法," 電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-1-21, 2008年9月16-19日、神奈川
4. 待井, 安藤, 早川, "3次元FDTD法によるELF/VLF帯大地-電離層導波管伝搬の解析," 電気学会基礎・材料・共通部門大会, B-1, 2008年8月21-22日、千葉
5. 安藤, 早川, "2次元CIP法の数値分散に関する検討," 電気学会電磁界理論研究会, EMT-07-103, 2007年10月18-20日、愛媛
6. 小林, 安藤, 早川, "最適PML導電率プロファイルに関する検討," 電気学会電磁界理論研究会, EMT-07-137, 2007年10月18-20日、愛媛
7. 安藤, 早川, "5次元CIP法の数値分散に関する検討," 電子情報通信学会総合大会, C-1-19, 2008年3月18-21日、福岡
8. Y. Ando and M. Hayakawa, "Numerical dispersion of CIP method for electromagnetic problems", ISAP2007, 2007年8月20-24日、新潟
9. Y. Ando and M. Hayakawa, "A study on numerical dispersion of CIP method for EM problems," PIERS2007, 2007年8月27-30日, Prague, Czech Republic
10. Y. Ando and M. Hayakawa, "Numerical dispersion of CIP methods for EM problems," EMTS2007, 2007年7月26-28日, Ottawa, Canada
11. 齊藤, 安藤, 早川, "1次元CIP法における完全TF/SF境界," 電子情報通信学会総合大会, C-1-15, 2007年3月20-23日、名古屋
12. 安藤, 和田, 水柿, 陳, 早川, "2次元M型CIP法の数値分散に関する検討," 電子情報通信学会総合大会, C-1-16, 2007年3月20-23日、名古屋
13. 小林, 安藤, 早川, "最適PML導電率プロファイルパラメータ探索の検討," 電子情報通信学会総合大会, C-1-20, 2007年3月20-23日、名古屋
14. 小坂, 安藤, 早川, "適応アレーアンテナを用いた人体頭部曝露低減に関する検討," 電子情報通信学会総合大会, C-1-24, 2007年3月20-23日、名古屋
15. 安藤, 和田, 水柿, 陳, 谷井, "GAを用いた広帯域マイクロストリップ線路BPFの設計に関する一考察," 電子情報通信学会マイクロ波研究会, MW2006-195, 2007年3月7-9日、神奈川
16. 安藤, 早川, "2次元散乱問題へのCIP法の適用に関する検討," 電気学会電磁界理論研究会, EMT-06-115, 2006年10月26-28日、島根
17. Y. Ando and M. Hayakawa, "CIP method for electromagnetic scattering problems," KJJC2006, 2006年9月23-24日、石川
18. 安藤, 早川, "CIP法におけるTotal-Field/Scattered-Field境界の適用," 電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-1-3, 2006年9月19-22日、石川
19. 安藤, 早川, "シューマン共振現象による広域雷分布推定," 電気学会基礎・材料・共通部門大会, 2006年8月21-22日、熊本
20. Y. Ando and M. Hayakawa, "Total-Field/Scattered-Field boundary condition for CIP method," PIERS2006, 2006年8月2-5日、東京
21. 安藤, "CIP法におけるTotal-Field/Scattered-Field境界の適用," 電気学会電磁界理論研究会, EMT-06-38, 2006年5月27日、東京

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安藤 芳晃 (ANDO YOSHIAKI)

電気通信大学・電気通信学部・准教授

研究者番号: 30323877

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし