

平成30年6月5日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26420224

研究課題名(和文)地球スケール電磁環境問題のための数値電磁界解析手法の確立

研究課題名(英文) A study on computational electromagnetics for global electromagnetic compatibility

研究代表者

安藤 芳晃 (Ando, Yoshiaki)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号：30323877

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、地球スケールの電磁環境問題である自然電磁気現象の電磁界解析手法の確立を目的とした。まず、球座標系の一部で適用できる吸収境界条件であるPMLを開発した。数値計算から開発したPMLは効果的な吸収性能を示すことが分かった。次に、VLF大地-電離圏導波管伝搬を用いた電離圏D層の電子密度同定問題を検討した。同定に用いるパラメータを適切に選べば十分に電子密度を近似できることが分かった。最後に、地殻内電磁波伝搬の数値解析法として重みつきラゲール多項式(WLP-)FDTD法を検討した。WLP-FDTD法はこの問題で極めて高い性能を示し、従来のFDTD法に比べ3000倍高速であることが分かった。

研究成果の概要(英文)：In this research, simulation techniques for natural electromagnetic phenomena are developed. First, I developed a perfectly matched layer (PML) to absorb waves at boundaries of a computational domain with the shape of spherical sectors. The numerical measurements show that the developed PML has effective absorbing performance. Second, I developed an identification method of electron density profile in the D-region of the ionosphere by using the VLF/LF waveguide propagation simulation. If the identification parameters are appropriate, approximated profiles can be obtained. Third, the weighted Laguerre polynomial finite difference time domain (WLP-FDTD) method was considered as an effective simulation for electromagnetic wave propagation in the lithosphere. The WLP-FDTD method shows extremely high performance for the simulation, and is about 3000 times faster than the conventional FDTD method.

研究分野：計算電磁気学

キーワード：自然電磁気減少 計算電磁気学 電磁界解析 VLF/LF大地-電離圏導波管伝搬 地殻内電磁波伝搬

1. 研究開始当初の背景

自然電磁気現象を調べることは、地球物理を解明し、自然災害に対する知識を増やす有効な手段である。雷放電による電磁パルス観測による位置と規模の推定や、降雨レーダ、地下探査など自然現象の同定、また近年では大規模災害に関わる自然変動の観測などが注目されている。そしてその調査のためには、コンピュータ上で現象をモデル化する「電磁界シミュレーション技術」の確立が必須である。

回路やアンテナといった人工物は、それを使用する周波数や材質など人間の取扱い易い形状や物質定数で使用されており、これまで開発されてきた電磁界シミュレーション技術(有限要素法、モーメント法、有限差分時間領域法など)もその取扱い易い形状に基づいたものであった。

一方、「自然電磁気現象」は解析する対象が人工物ではなく、ランダムに近い不均質性や、波長に比較して極端に大きい/小さいなどの性質があり、これまでの電磁界シミュレーション技術をそのまま適用しても非効率であったり、不安定性から計算不可能な場合もあった。

従来は簡略化されたモデルを用いて主に解析的に検討されてきた自然電磁気現象を、近年の計算機技術の発展を取り入れた高精度解析をもとに再検証することは、災害にもなう社会的損失の軽減にもつながる重要かつ喫緊の課題となっている。

2. 研究の目的

本研究では、これまで開発が遅れている「地球スケールの環境電磁工学」である自然電磁気現象を解析対象とした電磁界解析手法を確立することである。特に、自然が持つ複雑な不均質性や、波長と解析対象の構造スケールの極端な差などを、効率的に解析できる計算手法の検討、および解析するための各種個別技術を開発することである。

特に、これまで開発されていない(1) VLF/LF 帯(3~300 kHz)における大地-電離圏導波管伝搬の高精度解析の実現とそれを用いた電離圏電子密度分布の同定、および(2) ULF 帯(数 Hz 以下)における効率的電磁界解析手法の確立に重点をおく。

3. 研究の方法

3.1 VLF/LF 帯における大地-電離圏導波管伝搬の高精度解析のための個別技術開発

VLF/LF 帯は大地と電離圏の間を反射しながら伝搬してゆくが、その形状は球殻状であることから、モデル化においては球座標系を用いるのが精度よく解析するために必要である。また、電離圏や大地のもつ複雑性を考慮するには有限差分時間領域(Finite Difference Time Domain; FDTD)法を用いるのが適当である。

しかし、球座標系の FDTD 法の場合、計算

領域端部での反射を抑制する吸収境界条件が一部しか開発されておらず、計算領域が球全体でないと効力を発揮できなかった。しかしながら、VLF/LF 帯伝搬では「球の一部」の形状の解析となるため、新たに吸収境界条件を開発することが必要となる。そこで、本研究では球座標系の一部の形状で動作する、高性能な吸収境界条件である Perfectly Matched Layer (PML)を開発する。

球座標は一般に(r, θ, ϕ)の3つのパラメータを用いて座標を表すが、これまでの PML では r 方向のみ、電磁波を吸収することが可能であった。本研究では、それを拡張し、 θ, ϕ 方向にも吸収できる PML を開発する。

一般座標系の吸収境界条件には、複素座標へと変換する手法が一般的である。そこで、 θ, ϕ 方向にも近似的に複素座標変換した PML を開発する。

3.2 VLF/LF 帯大地-電離圏導波管伝搬を用いた電子密度同定手法の検討

地球スケールの環境電磁気学における重要なテーマとして、上空 80km 以上に存在する「電離圏」の電子密度計測がある。電子密度計測のうち、およそ 100km 以上については HF 帯の電磁波を用いてイオノゾンデが経常的に行われているが、高度 100km 以下の D 層については安定した計測方法が存在しない。

そこで本研究では開発した VLF/LF 帯電磁界シミュレーションを用いて、電離圏電子密度同定問題へと適用を行った。

まず、電離圏電子密度の分布を仮定し、そのときの地表面における電界強度を仮想的に計測する。この電界強度を E_1, E_2, \dots, E_N とする。 N は観測点数である。

電子密度分布を推定するため、高度方向および電子密度を離散化し、それをバイナリコードで表現する。遺伝的アルゴリズムを用いて、電子密度に相当するバイナリコードで最適化を行う。最適化する評価関数は、最初に与えた電子密度がつくる電界強度と、同じ観測点における探索解が作る電界強度 e_1, e_2, \dots, e_N との二乗誤差

$$\sum_{i=1}^N |E_i - e_i|^2$$

である。

また、この同定をする際の最適なパラメータについて検討を行う。

3.3 地殻内 ULF 帯電磁波伝搬に適した電磁界解析手法の検討

地殻内の電磁波伝搬問題は、地殻内電磁波放射の物理解明や、電磁波を用いた地下探査など、今後重要になる要素技術である。しかしながら、地殻内の電磁波伝搬の数値解析はこれまでほとんど研究されていない。その理由は FDTD 法といった、これまで開発された電磁界解析手法が地殻内伝搬解析に対して非効率であり、計算時間がかかるためである。

そこで本研究では、地殻内電磁波伝搬に効率的な解法を検討する。特に、FDTD法から派生した、各種「無条件安定」手法に着目する。ここではそのうち、Weighted Laguerre Polynomial (WLP-) FDTD法を説明する。

WLP-FDTD法は、時間領域の電磁界について、時間を変数とする重みつき Laguerre 関数

$$\varphi_p(t) = e^{-t} L_p(t)$$

で展開する手法である。ここで、 $L_p(t)$ は p 次の Laguerre の多項式である。2次元 TMz 波について展開を行うと

$$E_z(\mathbf{r}, t) = \sum_{p=0}^P E_z^p(\mathbf{r}) \varphi_p(t)$$

$$H_x(\mathbf{r}, t) = \sum_{p=0}^P H_x^p(\mathbf{r}) \varphi_p(t)$$

$$H_y(\mathbf{r}, t) = \sum_{p=0}^P H_y^p(\mathbf{r}) \varphi_p(t)$$

となるが、これを Maxwell の方程式に代入し、 $\varphi_p(t)$ との内積をとる。また、位置については有限差分を用いることで、展開係数 E_z^p に関する連立一次方程式を得る。

WLP-FDTD法は、通常の FDTD法や、他の ADI-FDTD法といった無条件安定 FDTD法と異なり、時間ステップを更新するものではなく、行列を解くことで展開の次数を上げてゆく手法である。重みつき Laguerre 関数の次数程度までの任意の時刻が常に得られており、展開次数を上げることでその精度を高めることとなる。

4. 研究成果

4.1 VLF/LF 帯における大地-電離圏導波管伝搬の高精度解析のための個別技術開発

個別技術として、球座標系における PML を開発した。

図1は開発した PML を用いて、球の一部分の計算領域中央に電流源を置いた時の電界の強度分布を、時刻の経過とともに示した図である。見てわかるとおり、中央で発生した電磁波は $n = 180$ ステップあたりで r 方向に垂直な PML に到達して吸収されている。また、 $n = 250$ ステップあたりで θ 方向に垂直な PML に到達してこれも吸収されている。 $n = 320$ ステップではすべて吸収されて、反射波は見えなくなっていることがわかる。ここから、本手法で開発した球座標系 PML が高い性能を持っていることがわかる。

図2は、開発した PML の反射誤差の入射角度依存性である。PML の層数として8および16層について示している。見てわかるとおり、16層 PML であれば 100dB 以上に反射が抑制されており、十分な吸収性能を持っていると言える。 r 方向に垂直な PML (内側を r_i , 外側を r_o で示している)は、入射角度が大きくなると吸収性能が悪くなるが、これを適用する VLF/LF 大地-電離圏導波管伝搬においては、大地表面または電離圏上部となり、使用しないので大きな問題とはならない。

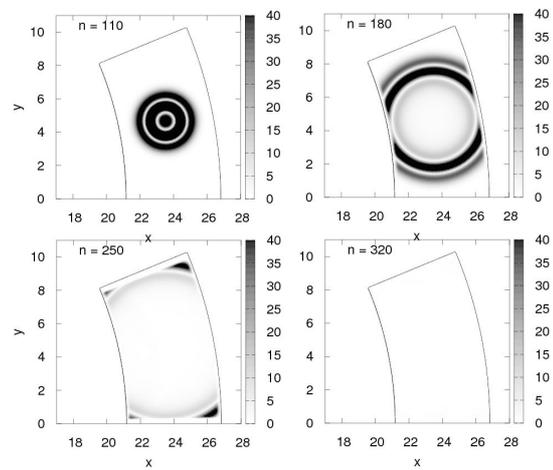


図1. 開発した PML の吸収の様子

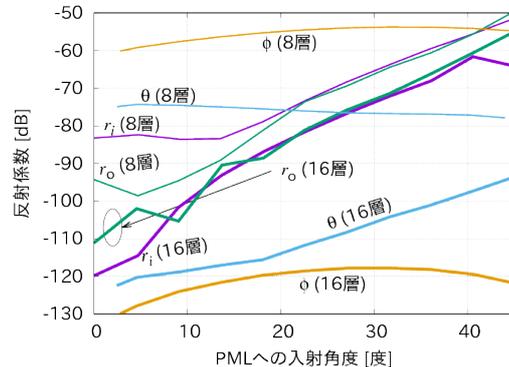


図2. 各座標に垂直な PML からの反射誤差の入射角度依存性

従って、本研究で VLF/LF 帯導波管伝搬解析に用いることができる高性能 PML が開発できたと言える。

4.2 VLF/LF 帯大地-電離圏導波管伝搬を用いた電子密度同定手法の検討

まず、電子密度同定のためにはどの程度の観測点が必要かについて考察する。電子密度プロファイルとして International Reference Ionosphere (IRI) 2007 を用いる。北緯 35° 、東経 139° の位置で、2015年1月1日のローカルタイムが7時のパラメタで電子密度プロファイルを求めた。この電子密度が作る地表面電界強度に、平均0、標準偏差が 1.5 dB のガウシアンノイズを加えたものを観測電界強度とした。

図3に観測点間距離 Δd が、 $= 2$ km (399点)、10 km (79点)、50 km (15点)としたときの探索結果の地表面電界強度を示す。特に、 $\Delta d = 50$ km のときに用いられた観測点については点でプロットしている。また、その点におけるノイズを含めた真の解の電界強度を円 () で示している。図から分かる通り、 $\Delta d = 50$ km とした場合には観測点では真の解の電

界強度をよく近似していることが分かる。しかし、観測点以外では真と解とは外れており、これが電子密度を同定できない原因となる。一方で $\Delta d = 2 \text{ km}$ および 10 km の結果では、観測点が十分にあることから、ノイズの存在も平均的に打ち消され、真の解を十分に近似していることが分かる。従って電子密度を同定するためには、多数の観測点を置くか、一点における観測の信号雑音比を高くする必要があると言える。

また、このときの同定された電子密度プロファイルを図4に示す。図から分かるように、 $\Delta d = 2 \text{ km}$ および 10 km では真の解のプロファイルと一致しているものの、 $\Delta d = 50 \text{ km}$ の結果から誤差が大きくなっていることが分かる。

4.3 地殻内 ULF 帯電磁波伝搬に適した電磁界解析手法の検討

WLP-FDTD 法が地殻内放射による電磁波伝搬に効果的であるかを数値的に検証する。図5に示すように $200 \text{ km} \times 200 \text{ km}$ の計算領域の空間を 100×100 セルに分割し、導電率 0.01 S/m の地下領域を $200 \text{ km} \times 120 \text{ km}$ とする。地表面から深さ 20 km のところに波源を置き、以下の電流パルスを与える

$$I(t) = \frac{t - 6S}{S} \exp\left(-\frac{\{t - 6S\}^2}{2S^2}\right)$$

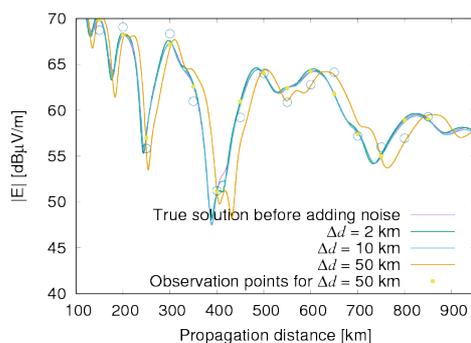


図3. 探索された電子密度プロファイルにおける VLF 伝搬の地表面電界強度

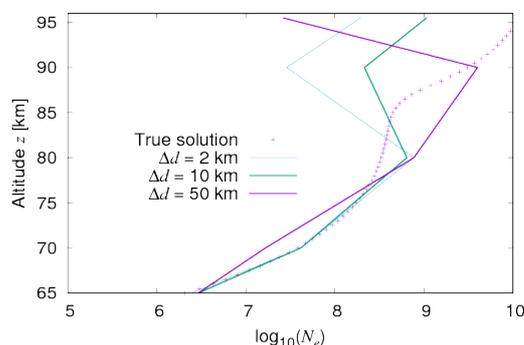


図4. 観測点間距離を変えた時の同定された電子密度プロファイル

ここでは $S = 0.083$ とした。計算領域境界には Mur の 1 次吸収境界条件を与えている。

波源直上の地表面で計測した波形を図6に示す。同様の構造を FDTD 法と本研究で着目している WLP-FDTD 法の二つで計算している。WLP-FDTD 法の展開次数は 200 次とした。赤い実線が FDTD 法、青い点線が WLP-FDTD 法の結果である。図から見てわかるとおり、WLP-FDTD 法の計算結果は FDTD 法とよく一致し、同程度の精度を持っていることがわかる。

表1に、図6のシミュレーションに要した時刻の比較を示す。FDTD 法の反復回数とは、時間更新回数であり、安定条件から決まる時間ステップから 15 秒間を求めるために必要な回数である。WLP-FDTD 法の反復回数とは、展開の次数を求めるために行列を解く回数である。ただ、行列は次数には依存しないため、最初に LU 分解を行っておけば、あとは上下三角を解くのみであり、大きな計算量ではない。

表からわかるとおり、計算時間は圧倒的に WLP-FDTD 法の方が早く、本手法が地殻内電磁波伝搬の数値解析に極めて効率的な手法であることがわかる。

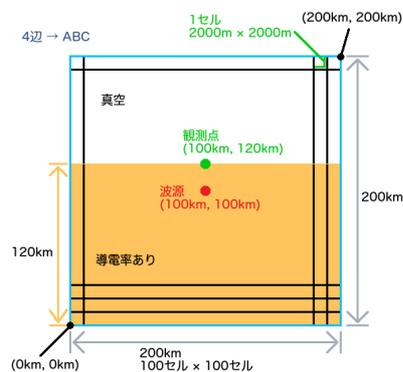


図5. 2次元地殻モデル

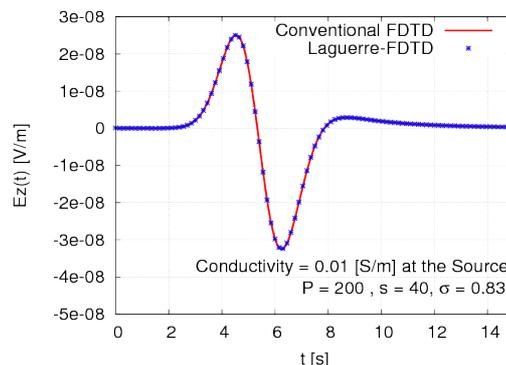


図6. FDTD 法と WLP-FDTD 法における地表面観測点での電界の計算結果

表1. 計算に要した時間

	反復回数	計算時間[s]
FDTD 法	3.2×10^6	1357
WLP-FDTD 法	201	0.4

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 2件)

[1] 安藤芳晃, 伊藤仁, "VLF帯大地-電離圏導波管伝搬を用いた電子密度同定問題における適切なパラメタ選択", 電気学会 A 部門誌, vol. 136 (2016), no. 5, pp. 304-309, 査読有, DOI: 10.1541/ieejfms.136.304

[2] 矢部洋司, 西川功, 中田一紀, 守川知行, 関屋大雄, 安藤芳晃, 田中久陽, "注入同期のロックレンジを最大化する入力信号波形-CMOS リングオシレータを例として-", 電子情報通信学会論文誌 C, vol. J99-C (2016), no. 6, pp. 298-313, 査読有.

〔学会発表〕(計 1件)

[1] 金澤璋吾, 芳原容英, 安藤芳晃, "VLF/LF帯電波の多点観測及び3次元FDTD法を用いた金環日食に伴う電波伝搬特性の解明に関する研究", 日本地球惑星科学連合 (JpGU)2018, Chiba, Japan, 2018.5.20-24

〔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〕

6. 研究組織

(1)研究代表者

安藤 芳晃 (ANDO, Yoshiaki)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・
准教授

研究者番号： 3 0 3 2 3 8 7 7

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし

(4)研究協力者

なし