



量 (ne-neo) の空間分布 (neo はシミュレーション開 始時の初期密度、Loは南北方向の震源域の長さ)

巨大地震前の電離層電子密度 (TEC) 異常現象のシミュレーション研究

理論・シミュレーションチーム 古河裕之 山中千博 大阪大学大学院理学研究科 (株)コンポン研究所 近藤斎、杉浦繁貴

でのマグニチュード8級以上の地震について震源上空 のTECを解析し、磁気嵐の時期を除いた過去18回のす べての例で、地震発生直前数十分以内にTEC異常が あったことを示した²⁴⁾。日置TECと呼ばれるこの現象 を説明できる物理モデルはまだ存在しておらず、根拠 となるモデルの構築が求められている。日置TECの原 因については、われわれはTEC異常が大地震直前に発 生するという時間的なずれを考慮し、この現象に地球 - 電離層間の電磁気的作用が関与するものと考えてい る。観測面から見ると、この現象と地震との関連がな い類似現象との区別を行う必要があり、解析に時間が かかるのが現状であるため、シミュレーションによる 研究手法は電磁気的作用が電離層に与える影響を検証

次ページへつづく

■はじめに

当研究所では、大阪大学大学院理学研究科、(株)コ ンポン研究所と共同で、地球上の非定常電荷が電離層 に及ぼす影響を明らかにすることを目標とした理論・ シミュレーション研究を進めている。2011年3月11日 の東北地方太平洋沖地震(マグニチュード9.0)におい て、北海道大学の日置(へき)教授により、地震発生40 分前から震源上空の電離層総電子数(TEC: Total Electron Content)の増大があったことが報告された¹⁾。 測位衛星から地上局に向けて発する電波が、電離層電 子によって遅延を受けることを利用し、その視線方向 の総電子数を算出する手法(GPSTEC法)を用いて見 いだされた現象である。日置は、1994年から2015年ま

公益財団法人レーザー技術総合研究所 レーザー・クロス



する有効な手段であると考えられる。

本研究ではこれまで、現象のモデル化とそれを記述 できる基礎方程式の導出、シミュレーションコードの 開発および結果についての評価を行ってきた⁵⁾。本稿 では、電子-中性粒子、電子-イオン間衝突モデルの 見直しを行い、2流体シミュレーションコードを改良 した結果について報告する。改良したコードを用いて 地球上の非定常電荷分布に対してシミュレーションを 行うことで、電磁気的作用の電離層への影響を評価し た。

■電離層電子密度分布シミュレーション

計算を簡素化するため、初期条件として平面地球、 プラズマの成分は電子と水素のみ、擾乱(じょうらん) のない静かな電離層を仮定し、地球磁場はBearth = 25000 nTとした。シミュレーションの開始時から電荷 量が単調増加するような分極電荷を地球上に与え、こ の非定常分極電荷が作る電磁場の時間発展をビオサ バールの法則により求めることで、電離層への影響を 評価した。電離層では主に太陽紫外線により中性粒子 が電子と正イオンに電離される。このため電離層は地 球上空で最も自由電子密度が高い領域である。オーム の法則はほぼ成り立つが、電気伝導度は地磁気の影響 で非等方となる。

表紙図に、電離層電子密度の初期密度(n_{e0})からの変 化量(n_e-n_{e0})の空間分布を示す。電子-中性粒子、電子-イオン間衝突モデルを見直した改良2流体シミュレー ションコードを用いた結果、高度600kmから800km 程度の範囲に新たに2層構造の電子密度分布が生成さ れた。この結果は改良前のシミュレーション⁵よりも



日置の測定結果³⁾をよく再現している。TECの時間発 展(図1)においても、40分経過時にTECが最大となる など測定結果により近い挙動が見られた。また40分 経過時における電気伝導度分布(図2)では、国際標準 電離圏 (International Reference Ionosphere; IRI) モデルによる計算結果と同程度の電気伝導度が得られ ることがわかった。

■まとめ

本研究では、地球上の非定常電荷が電離層に及ぼす 影響について検証するため、改良した2流体シミュ レーションコードを用い、電離層電子密度の初期密度 (ne0)からの変化量(ne-ne0)の空間分布を求めた。その 結果、上空に2層構造の電子密度分布が新たに生成し、 改良前のシミュレーションよりも日置の測定結果をよ く再現できることがわかった。また、TECが最大とな る時点での電気伝導度分布を求め、IRIモデルによる 計算結果と比較したところ同程度の値が得られた。こ れらの結果は、TEC異常の要因に地上-電離層間の電磁 気的作用が関与するというわれわれの予測を支持する ものであり、今後も研究を発展させていく予定である。 参考文献

- 1) K. Heki, Geophys. Res. Lett. 38. L17312. (2011)
- K. Heki and Y. Enomoto, J. Geophys. Res. Space Phys., 120, 7006-7020, (2015).
- 3) K. Heki, Parity, 33, No.2 (2018) (in Japanese).
- L. He and K. Heki, J. Geophys. *Res. Space Phys.*, **122**, 8659–8678 (2017).
- 5) Laser Cross No.380 (2019).



【図2】シミュレーション開始から40分経過後の電気伝 導度の空間分布(Loは南北方向の震源域の長さ)

高速動作デフォーマブルミラーの開発に向けた 構造シミュレーション

レーザープロセス研究チーム 稲田順史、コスロービアン ハイク

■はじめに

当研究所では、高出力レーザーの遠距離伝送システ ムを開発するため、要素技術の一つであるデフォーマ ブルミラー(可変形鏡)の開発を進めている。可変形鏡 とは、薄く柔軟性のある鏡の背面に縦方向に伸縮する 駆動素子を複数配置することで、鏡面の形状を変化さ せることが可能な反射鏡のことを指す。可変形鏡によ り大気のゆらぎなどに起因するレーザーの波面乱れを 補正できれば、高いエネルギー効率での遠距離レー ザー伝送が可能となる。本誌ではこれまで、駆動素子 にピエゾアクチュエータ(以下ピエゾ)を用いた小型可 変形鏡の試作(Laser Cross No.390.2020 Sep.)、制御 手法の開発(Laser Cross No.393,2020 Dec.)について 報告してきた。本稿では、可変形鏡の動作を構造シ ミュレーションにより解析した結果について報告す る。鏡面形状や過渡振動の解析を行うことにより、鏡 面基板の素材や厚さ、駆動素子の物性値と配置などの 条件を具体的に決定し、可変形鏡の設計指針となる知 見を得ることが目的である。

■可変形鏡構造モデル

図1に、可変形鏡の3次元構造モデルを示す。ベース プレート上に固定した19本のピエゾで2インチ径の鏡 面基板を支持した。ピエゾの配置は外周部12本、内部 7本とした。鏡面基板とピエゾの間には薄い接着剤層 を入れた。有限要素解析を行うため、構造全体にメッ シュを切ってある。電圧印加によりピエゾを伸縮させ ることで、鏡面の形状を変化させる。シミュレーショ ンでは、過渡応答電場解析ソフトウェア(PHOTO -VOLT、フォトン社)を用いて電圧波形印加時のピエ ゾ素子内の電場分布を解析したのち、弾性応力解析ソ フトウェア (PHOTO-ELAS、フォトン社)を用いて電 場から生じる圧電効果によるピエゾの伸縮を解析する 連成解析を行う。これにより、可変形鏡動作時の鏡面 の変位や応力とそれらの時間変化を解析する。硬さ(ヤ ング率)などの物性値の設定により、鏡面基板の材料 を石英ガラスやサファイアガラスなどへ変更すること も可能である。

■波面形成シミュレーション

波面乱れの数学的解析に用いられるのがゼルニケ (Zernike)多項式である。ゼルニケ多項式は単位円上 で定義された直交関数列で、以下の式で表される。

$$Z_n^m(
ho,arphi) = egin{cases} R_n^m(
ho)\cos(m\,arphi) & m\geq 0 \ R_n^{|m|}(
ho)\sin(|m|\,arphi) & m<0 \end{cases}$$

ここでnは負でない整数、mは $n \ge |m|$ となる整数、 ρ は動径($0 \le \rho \le 1$)、 ϕ は偏角、 $R_n^m(\rho)$ は動径多項式を示し、nの増加に伴い関数列も増加していく。図2に波面



[【]図1】可変形鏡(ピエゾ19本支持)構造モデル



【図2】ゼルニケ多項式の最初の15項(2次元表示)

乱れへの影響が大きい最初の15項を示す。色の 変化は、単位円内の座標から多項式を用いて計 算される関数値(規格化されたz軸方向の変位(Z 変位))を示している。多項式はそれぞれ、傾き を表すチップ・チルト(Z_1^1, Z_1^{-1})、ピントを表 すデフォーカス(Z_2^0)ほか、一般に非点収差 (Z_2^{-2}, Z_2^2)、コマ収差(Z_3^{-1}, Z_3^1)などと呼ばれる 基本的な波面収差の形状を表しており、任意の 波面はこれらの線型結合で表すことができる。 このことから可変形鏡でそれぞれの波面収差を 正確に再現できれば、その組み合わせで表され る波面乱れの補正も可能になると考えられる。

図3に、チルトの波面形成を目標としたシミュ レーション結果を示す。チルトのゼルニケ多項 式(Z_1^{-1})からそれぞれのピエゾ位置でのZ変位 を計算しておき、そのZ変位が得られる電圧を 各ピエゾに同時に印加した。高速動作を模擬す

るため印加電圧の立ち上がり時間は50 µsに設定し、 その後の電圧は一定として1ステップ10µsで500µsま での鏡面形状を計算した。鏡面基板の材料は合成石英、 厚さは1 mmとした。図3(a)は、チルトを与えた後約 500 µs後の鏡面形状を3次元表示したものである。図 中の点は鏡面基板のメッシュ構造の節点である。x軸、 v軸の単位はcm、z軸の単位はµmで、Z変位を拡大し て表示した。鏡面は平面性を保持したままチルトして おり、目標通りの鏡面形状が得られている。図3(b)は、 鏡面の中心部(位置①)、外周のピエゾ(⑥)および中心 部との中間点(⑤)、中心部からの距離が最外周のピエ ゾ位置と同じ位置(⑧)および外周のピエゾ位置との中 間点(⑦)におけるZ変位の経時変化である。中心部は 変位しない。他の位置では、ピエゾが動作した直後に 鏡面が振動する様子が見られた。この現象はピエゾと 基板の接着部以外にも表れており、ピエゾの伸縮によ り基板全体が過渡的な振動を示すことがわかった。た だし振動幅は変位量の5%以下と小さく、またピエゾ 動作後約250µs後には振動もほぼ消失するためkHzク ラスの高速動作は十分に可能であると考えられる。

他のシミュレーション例として、図4(a)、(b)にチルトを与えた時と同様の条件でデフォーカス(Z_2^0)、コマ収差(Z_3^1)を与えた際の鏡面形状をそれぞれ示す。ともに鏡面の中央部では理論値と同じ波面収差を形成できるが、鏡面の外周部においては理論値とシミュレー



ション結果に若干の不一致がみられた。また4次以降 の波面収差($Z_4^{-4} \sim Z_4^4$)では、形状がより複雑となる ため、鏡面外周部では理論値との差がさらに大きく なった。これは鏡面の大きさ(口径)に対するピエゾの 支持数が少ないことに起因する。今後ピエゾ数や配置 などの条件を変更したシミュレーションによる設計の 最適化を行う予定である。

■まとめと今後

(5)~(8)でのZ変位の時間変化

本研究では、可変形鏡の開発指針となる知見を得る ことを目的に、その動作を構造シミュレーションによ り解析した。口径2インチ、ピエゾ19本支持の可変形鏡 モデルにおいて、数kHzレベルの高速動作が可能であ ること、ゼルニケ多項式の3次までの項の波面収差をよ く再現できることが明らかとなった。一方で、鏡面の 端部ではZ変位に理論値との不一致がみられ、形状が複 雑な4次以降の波面ではその差が大きくなることがわ かった。当研究所では口径10 cmの大口径可変形鏡の 開発を最終目標としており、今後は鏡の口径、ピエゾ の数や配置、基板材料などの条件を変更してシミュ レーションを行い、設計の最適化を行う予定である。 謝辞:

本研究は、防衛装備庁安全保障技術研究推進制度 JPJ004596(研究課題「高速移動物体への遠距離・高 強度光伝送のための予測的波面制御の研究」)の支援の 下行われた。

http://www.ilt.or.jp

発行/公益財団法人レーザー技術総合研究所 編集者代表/谷口誠治 〒550·0004 大阪市西区靱本町1-8-4 大阪科学技術センタービル4F TEL[06]6443-6311 FAX[06]6443-6313 掲載記事の内容に関するお問い合わせは、編集者代表·谷口誠治(E-mail:taniguchi@ilt.or.jp)までお願いいたします。