

東北地方太平洋沖地震に伴う電離圏変動の数値シミュレーション

松村充^{1,2}, 品川裕之³, 津川卓也³,
齊藤昭則¹, 大塚雄一⁴, 家森俊彦⁵

¹京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻

²日本学術振興会特別研究員DC

³情報通信研究機構

⁴名古屋大学太陽地球環境研究所

⁵京都大学大学院理学研究科附属地磁気世界資料解析センター

1. 導入

2011年東北地方太平洋沖地震 (M9.0) の直後に電離圏全電子数 (TEC) の変動が観測された [Saito et al., 2011; Tsugawa et al., 2011]. 震央付近で観測された変動の周波数のうち, 最も振幅が大きかったのは4.5mHzで, 次に振幅が大きかったのは3.7mHzと5.3mHzであった [Saito et al., 2011]. これらの周波数は地表と熱圏下部の間で捕捉される音波の共鳴振動数に対応し, 捕捉された音波が高高度に漏れ出したものがこのTEC変動を引き起こしたことを示している.

また, 震央付近から同心円状に伝播するTEC変動も観測された [Tsugawa et al., 2011]. その位相速度は140-780m/sであった.

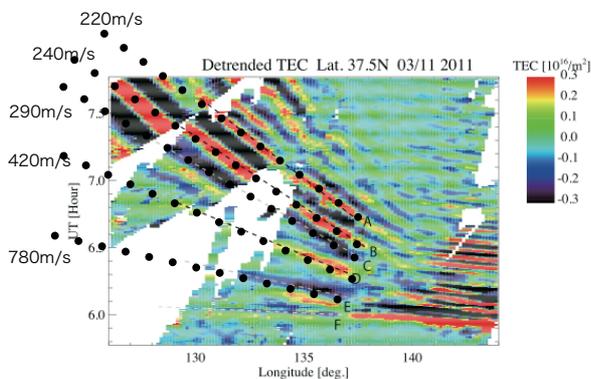


図1 : 観測されたTEC変動 [Matsumura et al., 2011]. 緯度は同心円状の波面の中心と同じ.

本研究の目的は, 観測された現象を数値シミュレーションで再現することにより, 現象の物理的なメカニズムを明らかにし, また波源の情報を推定することである. 今回の観測では時間的にも空間的にも高い分解能で電離圏変動の情報が得られたことから, この現象を精密に再現できるようなモデルは, 他の現象に適用した場合にも高い再現性を得られることが期待される.

2. モデル

本研究ではShinagawaら [2007]の2次元の中性大気圏-電離圏結合モデルを改良し3次元に拡張した. 計算領域は高度方向に0~600km, 緯度・経度方向にそれぞれ2000~2000kmとした. 格子幅は高度方向に1km, 緯度・経度方向にそれぞれ50kmとした. 計算領域の中心は震央の位置 (北緯38°, 東経143°) とした. 平衡状態をつくった後, 高度0kmで擾乱を与えることにより, 地震後の大気-電離圏変動を再現した.

中性大気モデルは非線形非静力学圧縮性流体方程式系で構成されている. 流体はO, N₂, O₂から成る1流体である. 基本場の密度, 温度・組成は経験モデルNRLMSISE-00から与えた. 日時は地震発生時, F10.7=121, AP=37に設定した. 基本場は水平方向に一様で時間的に一定とした. 背景風, コリオリ力, イオンドラッグは無視した.

電離圏モデルのイオンはO⁺のみから成る. イオン生成率は太陽天頂角に依存しないと仮定した. イオン・電子温度は中性大気の基本場と等しく, 電子密度はイオン密度と等しいと仮定した. イオンはほぼ磁力線に沿って動くことと仮定し, 磁力線は双極子型とした. 電場の影響は無視した.

波源は震央付近の海面変動を想定し, 周期10秒, 最大振幅1m/sの正弦波型の鉛直速度変動を直径250kmの領域内に与えた. さらに震央から伝播する津波も波源になっている場合の計算も行った. 津波として, 周期2000秒, 波長400km, 最大振幅10cm/sの正弦波型の鉛直速度変動を与えた. 周期と波長は津波としては典型的な値である [Occhipinti et al., 2006; Hickey et al., 2009].

3. 結果と考察

図1はシミュレーションで得られた震央付近のTEC変動で, 500秒の移動平均を引いたものである. 0-30分, 30-50分に明瞭な波束が見られる. 図3(a)

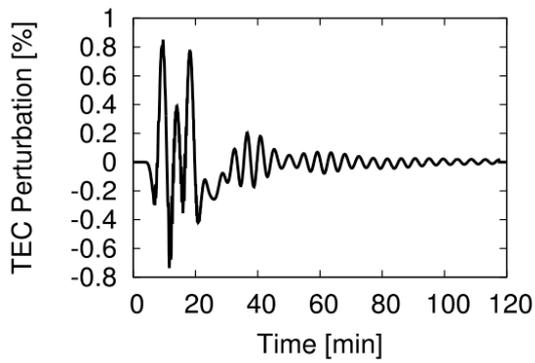


図2：500秒の移動平均を引いたTEC変動.

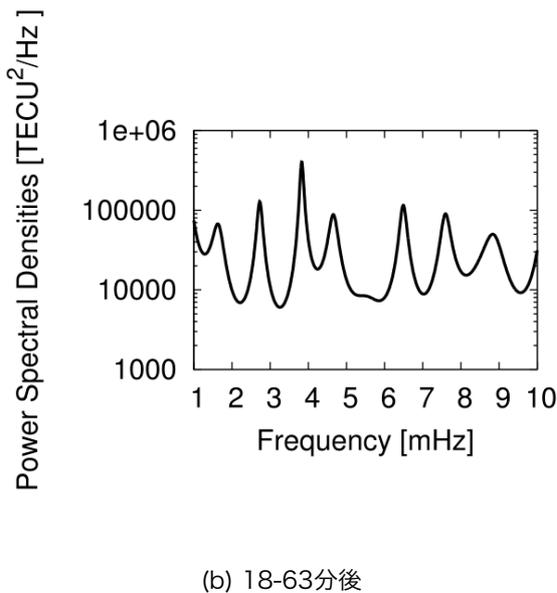
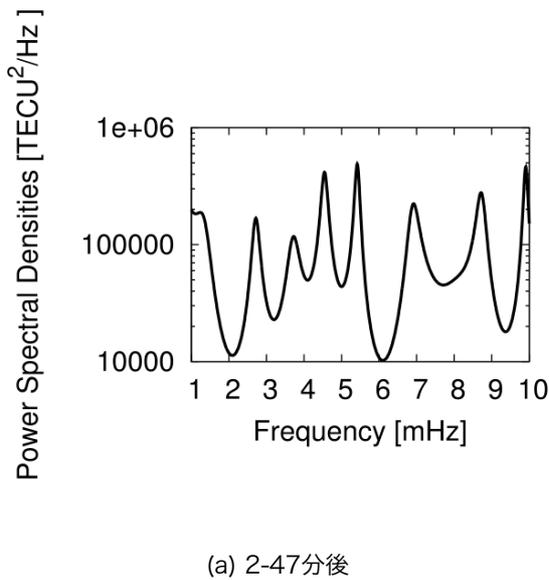


図3：TEC変動のパワースペクトル.

(b)はTEC変動のパワースペクトルで、図3(a)は計算開始後2-47分、図3(b)は計算開始後18-63分後のものを表している。図3(a)では5.4mHzおよび4.5mHzに、図3(b)では3.8mHzにピークが見られる。これらはいずれも地表と熱圏下部の間で捕捉される音波の共鳴周波数に対応しており、観測と同様に捕捉された音波が高高度に漏れ出したものがこのTEC変動を引き起こしたと考えられる。図2で見られた波束は共鳴モード間のうなりと考えられる。高周波側の共鳴モードが先に現れることは Rollandら[2011]の観測結果とも調和的である。音波共鳴モードは高周波のモードの方が音波の捕捉が弱く、高高度に漏れやすいことが理論的に知られており[Kobayashi, 2007]、シミュレーションの結果はそれによるものと考えられる。

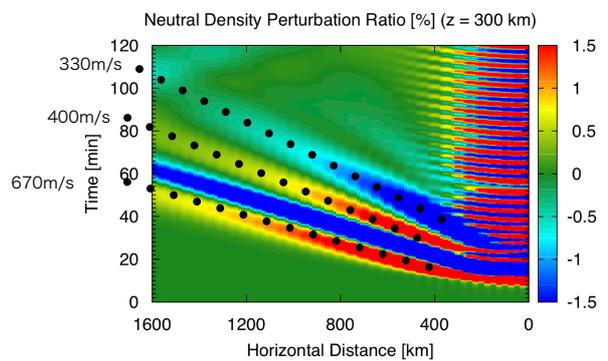
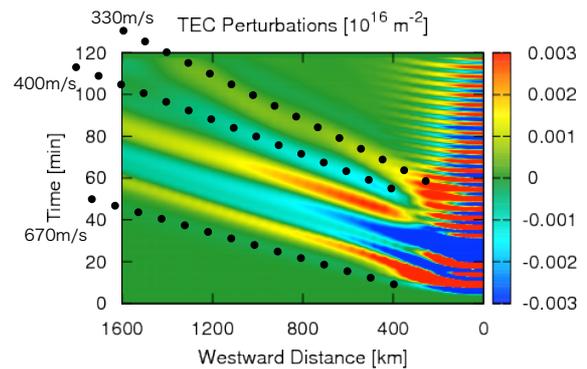


図4：(a)TEC変動と(b)高度300kmにおける中性大気密度変動.

図4は波源の中心と同じ緯度におけるTEC変動および高度300kmにおける中性大気密度変動の時間変化を表している。いずれも卓越する位相速度は330, 400, 670m/sであり、330m/sより遅いものの振幅は著しく小さい。図5は高度300kmで鉛直波数が0になるモードの波長と位相速度の関係を表している。この図は音波モードの場合は赤い曲線より上側のモードは鉛直伝播可能、下側のモードはevanescenceであることを、重力波モードの場合は緑の曲線より下側は鉛直伝播可能、上側はevanescenceであることを示している。この図を用いると、シミュレーションで得られた変動のうち、330, 400m/sのものは内部重力波モード、670m/sのものはevanescenceであることが示される。

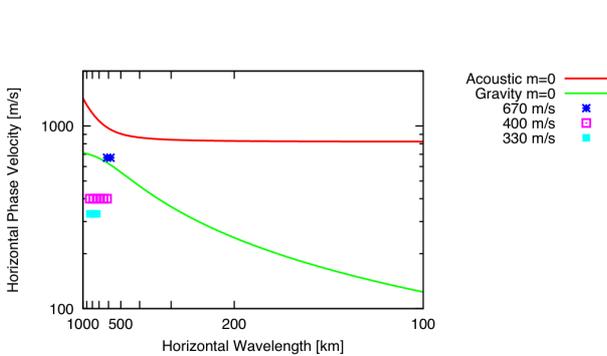


図5：高度300kmで鉛直波数が0になるモードの波長と位相速度の関係。

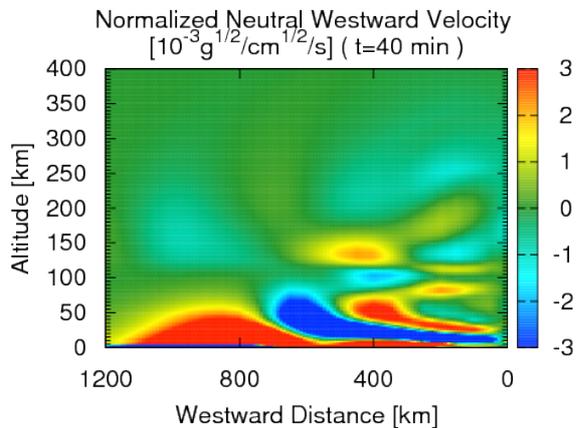


図6：基本場の密度の平方根で規格化された西向き中性風速の高度分布（40分後）。

これらのモードが下層大気から伝播してきたものか、熱圏で励起されたのかを確かめるために、波面

の鉛直断面を調べた。図6は基本場の平方根で規格化された西向き中性風速の高度分布を表している。時間は40分後である。この図から、高度100kmの上下で波面の連続性はないことが見て取れる。このことは、図4の変動を引き起こした波がいずれも高度100km以上で励起されたことを示している。

このシミュレーションでは330m/sより遅い波の振幅が小さいが、図1に見られるように観測されたTEC変動は330m/sより遅い波の方が振幅が大きい。この原因として、実際には津波によって励起された内部重力波も電離圏変動を引き起こしていることが考えられる。津波の位相速度はおよそ200m/sであり、それと同じ位相速度の内部重力波が大気中でも励起されることが過去の研究で報告されている[Occhipinti et al., 2006; Hickey et al., 2009]。

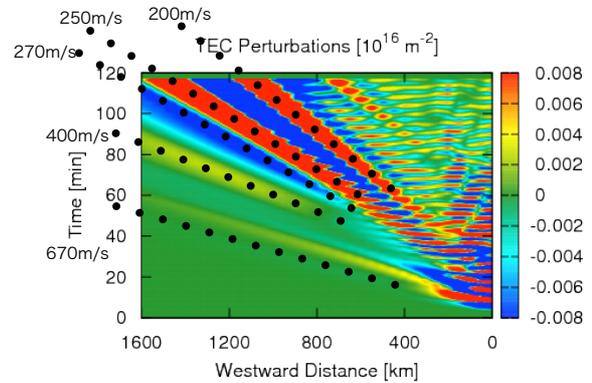


図7：津波を模した伝播性の波源を加えた場合のTEC変動。

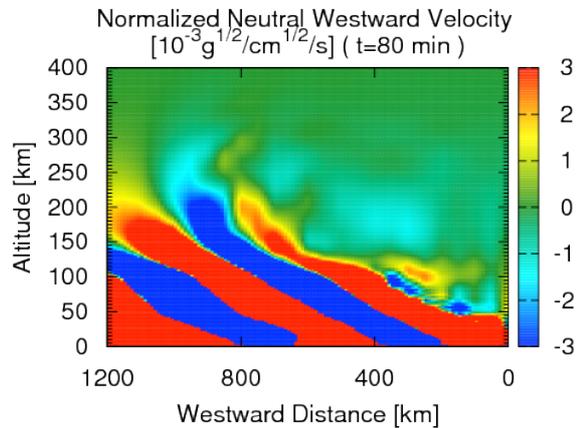


図8：基本場の密度の平方根で規格化された西向き中性風速の高度分布（伝播性の波源を加えた場合、80分後）。

そこで、津波の典型的な周期と波長を持った伝播性の波源を加えてシミュレーションを行ったところ、図7のようなTEC変動が得られた。200-270m/sの波の振幅が大きくなっていることが見て取れる。また、図8の水平風速の高度分布が示すように波面は高度0kmから伸びており、伝播性の波源によって励起された内部重力波が、位相速度の遅いTEC変動を引き起こしたと考えられる。

4.まとめ

3次元の中性大気-電離圏モデルを用いて2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震後の電離圏変動のシミュレーションを行った。震央付近で観測と同様に音波共鳴由来の3.8, 4.5, 5.4mHzの変動が見られ、4.5, 5.3mHzのモードが先に現れることを示した。また、震央付近から遠方に伝播する変動も再現され、このうち330-670m/sの変動は熱圏で励起されることを示した。200-270m/sの変動は、内部重力波が津波によって海面で励起され、電離圏まで伝播することによって引き起こされることを示した。

5.参考文献

- (1) Hickey, M. P., G. Schubert, and R. L. Walterscheid, The propagation of tsunami-driven gravity waves into the thermosphere and ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 114, A08304, doi: 10.1029/2009JA014105, 2009.
- (2) Kobayashi, N., A new method to calculate normal modes, *Geophys. J. Int.*, 168, 315–331, doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.03220.x, 2007.
- (3) Matsumura, M., A. Saito, T. Iyemori, H. Shinagawa, T. Tsugawa, Y. Otsuka, M. Nishioka, and C. H. Chen, Numerical simulations of atmospheric waves excited by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets Space*, 63, 885–889, 2011.
- (4) Occhipinti, G., P. Lognonné, E. A. Kherani, and H. Hebert, Three-dimensional waveform modeling of ionospheric signature induced by the 2004 Sumatra tsunami, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L20104, doi:10.1029/2006GL026865, 2006.
- (5) Rolland L. M., P. Lognonné, E. Astafyeva, E. A. Kherani, N. Kobayashi, M. Mann, and H. Munekane, The resonant response of the ionosphere imaged after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets Space*, 63, 853–857, 2011.
- (6) Saito, A., T. Tsugawa, Y. Otsuka, M. Nishioka, T. Iyemori, M. Matsumura, S. Saito, C. H. Chen, Y. Goi, and N. Choosakul, Acoustic resonance and plasma depletion detected by GPS total electron

content observation after the 2011 Tohoku earthquake, *Earth Planets Space*, 63, 863–867, 2011.

(7) Tsugawa, T., A. Saito, Y. Otsuka, M. Nishioka, and T. Maruyama, Ionospheric disturbance detected by GPS total electron content observation after the 2011 Tohoku earthquake, *Earth Planets Space*, 63, 875–879, 2011.