

宇宙から捉える大きな地震の前駆現象

小山孝一郎^{1,2,3}、児玉哲哉⁴

¹台湾国立成功大学, プラズマ宇宙科学研究所, ²九州大学宇宙天気科学・教育センター、
³(株) アジア宇宙環境研究機構、⁴日本宇宙航空研究開発機構

Satellite observations of ionosphere disturbance prior to large earthquake

Koichiro Oyama^{1,2,3}, and Tetsuya Kodama⁴

1. Institute of Plasma and Space Science, National Cheng Kung University, Taiwan
2. International Center for Space Weather Study and Education, Kyushu University, Fukuoka, Japan
3. Asia Space Environment Research Consortium,
4. Japan Aerospace Exploration Agency

Key Words: Ionosphere disturbance, Earthquake, Satellite constellation

Abstract

This paper reports ionosphere disturbance which is observed by satellite before large earthquakes. Ionosphere disturbance caused by large earthquakes shows different features, depending on local time, height, epicenter location, and distance from the epicenter. When satellite altitude is high, the effect of large earthquakes does not appear right over the epicenter, but appears over geomagnetic equator and in higher latitude. While the identification of the epicenter location and day of earthquake might be possible for the satellite orbit height of 300 Km. Most probably the mechanism of the disturbance is electric field, but other reason such as variation of neutral composition might be possible. In order to grab global morphology of earthquake disturbance and to find mechanism of ionosphere disturbance, constellation of tiny satellite is essentially needed.

1. 目的および背景

大きな地震発生前にみられることのある電離圏プラズマ密度擾乱に関してはこれまで主に地上から得られた最大電子密度、および全電子数を用いた統計的研究¹⁾、および個々の地震に関する解析結果²⁾が数多く報告されてきている。ここでは著者らが解析した数少ない衛星観測データの例を示す。これまでの解析から確実に言えることは以下のようなものである。地震発生前の電離圏擾乱は高度により異なる。震源を特定するには衛星は高度300km以下を通過する必要がある。より高い高度では日本で発生した地震では震源上空での変化は見られず、むしろ震源緯度より北の緯度、および磁気赤道上空にその兆しが現れる。

擾乱を引き起こすものと思われる電場の生成については未だ不明であるが、ここでは内部重力波あるいは音波により単に高度100km付近の昼間のダイナ

モ電場が強くなるか、あるいは導電率そのものが減少するとする考えを示した。

少なくとも経度方向約80度、緯度方向約40度の広範囲に亘る大地震(M>6.5)による電離圏前駆擾乱を統一的に把握し、擾乱のメカニズムを解明するには、複数小型衛星による観測に期待せざるをえない。

2. 衛星観測

2. 1 DE-2 による知見³⁾

1981年に打ち上げられた米国DE-2衛星は近地点約309km、遠地点約1012kmの極軌道衛星で電離圏の電子密度、イオン密度、イオン組成、プラズマドリフト、中性ガス組成、中性風速度を測定した。観測は主に極域に限られたため、地震の多い中低緯度の観測は極めて少ない。衛星が軌道にあった1年半の間に地震発生前後5日間にわたって系統的データが得られた地震のケースは1981年10月16日0325UTにチリで発生した地震(西経33.1度、南緯

73.1 度、M=7.5、震源の深さ 33 km) で、この場合、普通昼間に地磁気赤道にみられる酸素原子イオン密度の極小とともにこれを挟んで南北約 15 度のその極大がみられる赤道異常 (Equatorial Ionization Anomaly, EIA と呼んでいる) と同じような現象が震源上空で見られた¹⁾。これを我々は Precursor Ionization Anomaly (PIA) と名づけた。EIA の酸素原子イオン密度極小の位置は、地震発生日に近づくにつれ、同じく極小をしめす震源に近づく。従って 2 つの酸素原子イオン密度の極小の位置を縦軸に、日にちを横軸にしてプロットすれば 2 つの酸素原子極小イオン極小が重なる日と場所が、地震発生日と震源位置が示す。震源上空の酸素原子イオン密度は周囲の擾乱を受けていない領域の酸素原子イオン密度に比べ最大約 20% の減少を示した。注目すべきは酸素原子イオン密度の振る舞いは震源を中心として東西ほぼ対象であることである。

DE-2 衛星により得られたもう一例は、上記の例が自然の東向き電場が強い時間帯に得られたのにたいし、東向き電場が殆どゼロの明け方に発生した例でこの場合震源上空で酸素原子イオン密度の極大が見られた。前者の地震が酸素原子イオン極小を示したのに対し、後者が極大を示す酸素原子イオン密度の振る舞いの違いは、現時点では地震起源の電場の強度の差であろうと解釈している⁴⁾。

2. 2. DEMETER 衛星による知見⁵⁾

フランスの衛星 DEMETER (高度約 600 km、太陽同期) で得られた電子密度を解析した。このような高い高度では震源上空に特徴ある現象を見出すことは出来なかったが、2007-2010年に日本で発生した M7 以上の 7 個の地震のうち 5 個の地震に磁気赤道上空でプラズマ密度が増えることが見られた。地震のマグニチュードが大きくなるにつれ、現象は地震発生より、より早期にみられる。この手法は震源の経度を同定するのに応用できるかもしれないと期待している。

2. 3 DMSP による知見⁶⁾

2011年3月1日に発生した太平洋東北沖地震に供されうる衛星データは米国の軍事衛星 DMSP(Defense Meteorological Satellite Program 高度やく 800 km、太陽同期) と台湾の Formosat 3/COSMIC 衛星の 2 個のみである。DMSP で測定された酸素原子イオン密度をプロットすると、地震発生の約 1 週間前より、中緯度トラフが発生し始め、このトラフの位置は 3 月 1 日に近づくに低緯度側にシフトし、地震発生後また高緯度へシフトし、消滅す

る。3 月 1 日は地磁気擾乱の指標である D_{ST} が最小値を示した日でもあるが、例えば 2007 年 3 月 25 日に緯度 37.3 度、経度 136.41 度、深さ 40 km で発生した M=6.9 の地震でも同じようなトラフの発生消滅がみられること、また JPL (Jet Propulsion Laboratory) から提供されている全電子数の経度一緯度分布において震源より北側でみられる全電子数の増加は DMSP の酸素原子イオンの解析でもみられること。日本で発生した地震の影響は、高緯度、および酸素原子イオン密度の増加が磁気赤道でみられることは DEMETER 衛星による解析と同じである。ハバロフスクでの地上の電離圏観測装置から得られた最大電子密度 (NmF2) の夜間の 2 日周期の増減などの理由により、我々はこの現象を地震に伴うものと結論した³⁾。このようなデータ解析手法は将来の地震予知に繋がられるかも知れないという淡い期待を抱かせる。

台湾衛星 FORMOSAT-3/COSMIC により取得されたデータ点は本研究には不十分で、本地震の研究には供せられなかったが、観測場所が限られるとはいえ、その高度プロファイルは詳細に研究する価値はあると考える。

2. 4 ひのとり衛星による知見⁷⁾

1981 年の 2 月から約 1 年半高度約 600 km、軌道傾斜角 30 度の円軌道にあった日本の初代太陽表面観測衛星には本衛星のマネジャーであった当時の宇宙科学研究所、田中靖男教授のご厚意により、電子密度測定のためのインピーダンスプローブ、電子温度測定のための電子温度プローブが搭載された⁶⁾。

フィリピン近海で生じた 3 個の地震で、普通みられる午後の電子温度上昇 (Afternoon overshoot) が部分的に、あるいは完全に見られなくなることが見出された。すなわち普通見られる筈の午後の電子温度上昇は地震発生前約 5 日より消えはじめ、地震発生日頃完全に消滅、そしてまた数日後に回復する。電子温度上昇が消滅し始める日は、2. 2 で述べた DEMETER データの解析結果と同じく、地震が大きいほど発生日よりより前になる。

3. 議論

著者が電離圏の前駆現象の研究を始めてから 10 年が過ぎた。最初は解析手法も手探りで、ひのとり衛星による電子温度の解析結果を公表するまで 4 年を費やした。これまでの既存の衛星データは決して電離圏の前駆現象の研究には最適ではないが地震の前駆現象の研究手法は徐々に確立されつつあると思わ

れる。

しかしながら、電離圏の地震前駆現象を引き起こすものと考えられる電場の正体がいまだ不明である。これまで、岩石圧縮に伴う酸素原子イオンの生成による地上での電場が電離圏に影響するとする説^{8,9)}、また、ラドン発生による大気電離を種とする雨滴の生成に伴う、潜熱の放出に伴う波動の生成がある¹⁰⁾。

著者等は2011年3月11日に発生した太平洋東北沖地震の詳細な研究から、電離圏擾乱は、もともと自然に存在している東西電場が単に強められるとの考えを出した^{6,11)}。電場を強めているもともとの原因は地震発生前に発生する微小振幅の内部重力波、あるいは音波であり、これらが高度100 km付近で惑星波と相互作用した結果ではないかと考える。地震発生前の波動は多く報告されている^{12,13)}。また内部上重力波の影響^{14,15)}、あるいは惑星波と内部重力波との相互作用を論じた理論的論文は過去にある¹⁶⁾。しかしながら、内部重力波が地震前の微小な地面の振動によるものか、あるいは上記したように震源付近上空の大気温度上昇¹⁷⁾によるものか不明である。

地震発生前に電離圏電子密度が2日周期(準2日周期、quasi 2 day oscillation)で数回変動することは我々の統計的研究で確認されている¹⁸⁾。電離圏電子密度の準2日周期の変動はごくたまに起こることが過去にも報告されている¹⁹⁾。上記のことを考えると高度100 km付近の風系が変形することによるダイナモ電場の変調のみでなく、熱圏の組成も変化している可能性があり、大気力学の計算機シミュレーションが必要である。

ラドンの放出を原因として、大気電離、水クラスターイオン、そして雨滴の生成による潜熱の放出の結果としての大気擾乱に関しても計算機シミュレーションが必要である。

4. 結論

電離圏の大地震前の擾乱は現時点ではすべての地震とは言えないが確実に存在する。今後は全世界の地震について、電離圏の擾乱の存在を研究し、現象論をまず確立する必要がある。また擾乱のメカニズムを探るには震源の経度、緯度を中心に狭くてもそれぞれ約80度、および40度にわたる電離圏電子密度をほぼ同時刻に測定する必要がある。このためには複数の衛星による観測は根本的に必要である²⁰⁾。すでにいくつかの国で衛星観測計画が進められている。日本では残念ながら具体的な動きは見られない。

詳細な衛星観測計画に関しては、別稿に譲る。

前駆現象は電離圏のみでなく地上磁場観測データ、VLF受信電波にも現れている筈である。電離圏擾乱はその一つにすぎず、擾乱の現象は複雑であるので多くの分野の研究者の貢献が必要である。たとえば、現時点ではここで著者の提案した電離圏擾乱の機構に更なる証拠を示すために大気力学研究者による地上-熱圏下部までの計算機シミュレーションがほしい(地表面での重力波、および音波源から始まり、電離圏までの計算機シミュレーションはZettergren, M. D., and J. B. Snively¹³⁾により報告されている)。またSQ電流系の解析、具体的にはSQ電流系の変形を探る必要がある。

地震の電離圏前駆現象に関する研究は歴史が浅く、いまだ多くの研究者が懐疑的であるが、少なくとも本研究は社会に大きく貢献する可能性を持っていると思われる。1920年代に始まった基礎研究としての電離圏研究は、大きな地震発生前の電離圏擾乱の研究により、新たな研究課題を提供するかもしれない。更に多くの研究者が本研究に取り組むことを期待し、今後の本研究への理解と支持をお願いする次第である。

謝辞

本研究の一部は三菱財団自然研究助成金により国際共同研究として行われた。科学研究費では研究費取得が期待できないような先端的な研究に理解を示してくださった三菱財団に深甚の謝意を表するとともに、以下に共同研究者諸氏の名前を記して謝辞を表したいと思う。

Bankov, L., Chen, C. H., Devi, M., Liu H., Liu, J. Y., Ryu, K.

参考文献

- 1) Liu, J. Y., Y. J. Chuo, S. J. Shan, Y. B. Tsai, Y. I. Chen, S. A. Pulinets, and, S. B. Yu, Pre-earthquake ionospheric anomalies registered by continuous GPS TEC measurements, *Ann. Geophys.*, 22, 1-9, 2004.
- 2) Pulinets, S. A., V. G. Bondur, M. N. Tsidilina, and M. V. Gaponova, Verification of the concept of seismionospheric coupling under quiet heliogeomagnetic conditions, using the Wenchuan (China) earthquake of May 12, 2008, as an example, *Geomagnetism and Aeronomy*, 50, 231-242, 2010.
- 3) Oyama, K.-I., Y. Kakinami, J. Y. Liu, M. A. Abdu, and C. Z. Cheng, Anomalous Ion Density Latitudinal Distribution as a precursor of large earthquake, *J. Geophys. Res.*, 116, A04319, doi:10.1029/2010JA015948, 2011

- 4) Oyama, K.-I., Y. Kakinami, and M. A. Abdu, Precursor Ionization Anomaly (PIA) with and without dynamo E field, in preparation, 2016
- 5) Ryu, K., K. -I. Oyama, L. Bankov, D. Minakshi, C.H. Chen, J.Y. Liu, and H. Liu, Precursory Equatorial Ionospheric Density Enhancement: Contribution from Mid-latitude Large Earthquakes in the North-East Asian Region, *Adv. Space Res.*, 57, 268- 280, 2016
- 6) Oyama, K.- I., D. Minakshi, K. Ryu, C. H. Chen, J. Y. Liu, H. Liu, L. Bankov and T. Kodama, Modification of ionosphere prior to large earthquakes- Report from Ionosphere precursor study group-, *Geosciences Lett*, 1-10, 3:6, DOI 10.1186/s40562^016-0038-3. 2016
- 7) Oyama, K. -I., Y. Kakinami, J. Y. Liu, and M. Kamogawa, and T. Kodama, Reduction of electron temperature in low latitude ionosphere at 600km before and after large earthquakes, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2008JA013367, 2008.
- 8) Freund T. F., A. Takeuchi, and W. S. Lau, Electric currents streaming out of stressed igneous rocks – A step towards understanding pre-earthquake low frequency EM emissions, *Phys. Chem. Earth.*, 31, 389 - 396, 2006.
- 9) Kuo, C L., L. C. Lee, and J. D. Huba, An improved coupling model for the lithosphere-atmosphere-ionosphere system, *J. Geophys. Res.*, 119, 3189- 3205, DOI: 10.1002/2013JA019392, 2014.
- 10) Pulinets, S., and D. Davidenko, Ionospheric precursors of earthquakes and Global circuit, *Adv. Space Res.*, 54, 709-723, 2014.
- 11) Oyama, K.- I., D. Minakshi, K. Ryu, C. H. Chen, J. Y. Liu, H. Liu, T. Uozumi, and L. Bankov, Modification of Low to High Latitude Ionosphere by Large Earthquake in Japan, International Work shop of Earthquake prediction, Taipei, May 17, 2016.
- 12) Hayakawa, M., Y. Kasahara, T. Nakamura, F. Muto, T. Horie, S. Maekawa, Y. Hobara, A. A. Rozhnoi, A. A., M. Solovieva, and O. A. Molchanov, A statistical study on the correlation between lower ionospheric perturbations as seen by sub ionospheric VLF/LF propagation and earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 10.1029/2009JA015143, 2010.
- 13) Muto, F. Y. Kasahara, Y. Hobara, M. Hayakawa, A. Rozhnoi, M. Solovieva, and O. A. Molchanov, Further study on the role of atmospheric gravity waves on the seismo-ionospheric perturbations as detected by subionospheric VLF/LF propagation, *Nat. Hazards Earth Sys. Sci.*, 9, 1111- 1118, 2009.
- 14) Klimentenko, M. V., V. V. Klimentenko, I. V. Karpov, and I. E. Zakharenkova, Simulation of Seismo-Ionospheric Effects initiated by internal gravity wave, *Russian J. Phys. Chemistry B*, 5, 393- 401, 2011.
- 15) Zettergren, M. D., and J. B. Snively, Ionospheric response to infrasonic - acoustic waves generated by natural hazard events, *J. Geophys. Res.*, doi: 10.1002/2015SJA021116.
- 16) Karpov, I. V., and F. S. Bessarab, Model studying the effect of the solar terminator on thermospheric parameters, *Geomagn. Aeron.*, 48, 209-219, 2008.
- 17) Ouzounov, D., S. Pulinets, A. Ronamov, A. Ronamov, K. Tsybulya, D. Davidenko, M. Kafatos, P. Taylor, Atmosphere-ionosphere response to the M9 Tohoku earthquake revealed by multi-instrument space borne and ground observations: Preliminary results, *Earthq. Sci.*, 24, 557- 564, 2011.
- 18) Oyama, K.-I., C.H. Chen, and H. K. Fang, 2 days plasma density oscillation triggered before large earthquakes, in preparation, 2016.
- 19) Yue, J., W. Wang, A. D. Richmond, and H. Liu, Quasi-two day wave coupling of the mesosphere and lower thermosphere- ionosphere in the TIME- GCM: Two day oscillations in the ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 117, A07305, doi:10.1029/2012JA017815, 2012
- 20) Oyama, K. -I., Y. Kakinami, J. Y. Liu, T. Kodama, and C. Y. Chen, Micro/mini satellites for earthquake studies - toward international collaboration, *Advances in Geoscience*, 21, 251- 256, 2010