

1. はじめに

1) 地球自由振動とは?

あらゆる物体には大きさ・形と固さによって決まる振動しやすい特有の周期(固有周期)がある。固体地球にも固有周期が存在し、これを「地球自由振動」と呼ぶ。

地球の固有振動には、伸び縮み振動の基本モードである「spheroidal mode」と、ねじれ振動の基本モードである「torsional mode」が存在する(図1-1)。

1990年代後半までは、地球自由振動は大きな地震(マグニチュード7~8以上)によってのみ励起されるものと思われてきた。しかしNawa et al. (1998)の超伝導重力計観測により、地球自由振動は地震に関わりなく常時起きていることが見いだされた。地球自由振動の励起源は以下の異なる2つの仮説が唱えられている。



2) 大気による励起

Nishida et al.(2000)は地震計アレーを使い、

1) 地球の固有振動のうち s_{29} (3.7 mHz)・ s_{37} (4.4 mHz)の2つの周波数が目立って大きい(図1-2)

2) それらの振幅の季節変化は、陸地の多い北半球の夏季に大きくなる

またこれらの超過振幅を示す mode の振動数が大気の固有振動数に近いことから、地球自由振動の励起源が大気の乱流運動であると考えられた(図1-3)。

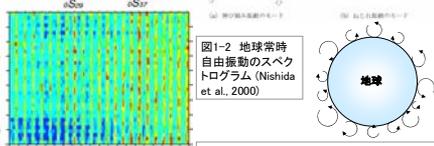


図1-2 地球常時自由振動のスペクトログラム(Nishida et al., 2000)

3) 海洋による励起

Rhie and Romanowicz (2004)は地震計アレーの解析から地震が発生していないときに観測される周期4~5分程度(エアリーフェーズ)のレーリー波の到来方向を求め、2000年において地球自由振動の励起源がどこにあるのかを調べた。

その結果、
1) 冬は北太平洋、夏は南極海に励起源がある
2) その季節における地球自由振動の振幅の大きい位置と波の高い位置が一致する

ことが見出された。つまり地球自由振動の励起源が海洋の擾乱であることを示唆している。

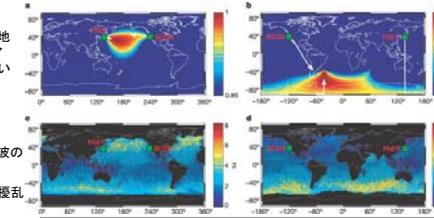


図1-3 大気による地球常時自由振動の励起のモデル(e.g. 谷本, 1999)
固体地球は表面を大気の常時乱流運動の風によって叩かれている。

4) 本研究の目的

地球常時自由振動に伴って大気も自由振動しているとする、電離圏にも影響があると考えられる。本研究では、GPS(全球測位システム: Global Positioning System)で観測した電離圏の全電子数(Total Electron Content: TEC)の時間変化のデータをスペクトル解析することにより、地球と大気の共鳴周期における振動を熱圏大気の振動として観測することである。

これらの結果により、大気の固有振動数でもあり地球常時自由振動の中でも振幅が大きい s_{29} (3.7 mHz)・ s_{37} (4.4 mHz)の2つの周波数などにピークが見られるかどうかを検証する。また振動の振幅を海域と陸地、および異なる季節で比較することにより、地球自由振動がどこで励起されているのかを議論する。

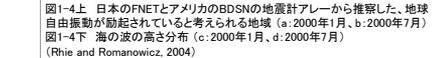


図1-4上 日本のFNETとアメリカのBDSNの地震計アレーから推察した、地球自由振動が励起されていると考えられる地域。(a: 2000年1月、b: 2000年7月)
図1-4下 海の波の高さ分布(c: 2000年1月、d: 2000年7月)(Rhie and Romanowicz, 2004)

2. 観測・解析方法

1) TECの観測方法

GPS衛星から発信される周波数の異なる2つの電波(L1: 1.2 GHz, L2: 1.5 GHz)が、電離圏を通過する際に電子の影響で異なった量の遅延を受ける。この遅延差は、視線に沿って電子密度を積分したものの、すなわち電離圏全電子数(TEC)に比例する。本研究ではGPS生データ(RINEX file)を国土地理院のウェブサイトからダウンロードし、L1, L2の位相差に経験的な係数を掛けてTECに変換した。また得られたTECの時系列にフィットさせた多項式を差し引くことにより、日変化や仰角変化に伴うゆっくりとした変動成分を取り除く。

TECは、衛星と受信機との間の視線(Line-of-site: LOS)に沿って存在する全電子数であり、1 TECU(テックユニット)は1平方メートルあたりの電子数が 10^{16} 個であることを意味する。

2) スペクトル解析するTECデータの条件

まず適当なGPSとGPS衛星をそれぞれ1つ選び、一ヶ月間毎日同じ電離圏(電子密度が最も濃い高度300 km)の位置を上記の方法でTECを観測する。得られたTEC振動に対して、スペクトル解析の方法のうち一つ、Blackman-Tukey法で解析し、スタックする。ただし同じ電離圏の位置のデータを取得するためには、観測する時刻を毎日4分ずつ早める必要がある。観測する時間帯において、中規模広域性電離圏擾乱(Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbance: MSTID)が発生する日本の夏の夜はスペクトル解析に影響を与えると考え、影響が大きいTECの時系列に関しては除外した。

また高度300 kmの電離圏では中性大気がすくないため、電子の移動はローレンツ力によって地磁気方向に拘束される。よってTECの振動をうまく観測するためには、GPSとGPS衛星のLOSと地磁気(電子の波面)が直角に近い角度で交わる電離圏を観測する方が良く考えた(図2-1)。よって、観測条件として、

- 1) LOSと地磁気が垂直に交わりやすく、
 - 2) 電波が電離圏を斜めに突き抜けTECの振幅が大きくなり
- LOSと水平面との角度(仰角)が低い時を狙った。これにより本研究では、解析する毎日のTECデータはGPS衛星が地平線から昇った直後(あるいは沈む直前)の40分とした。

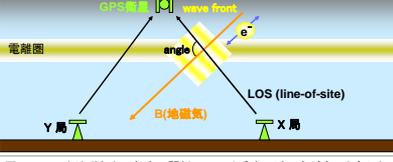


図2-1 LOSと地磁気との角度の関係。angleは垂直に近い方が良く考えた。この図ではX局で観測する方がよい。

3. 観測・解析結果

1) 夏・大陸上空の結果

図3-1は2008年8月に27番衛星で観測された結果である(ここの毎日のTECデータはGPS衛星が地平線から昇った直後40分間のもの)。

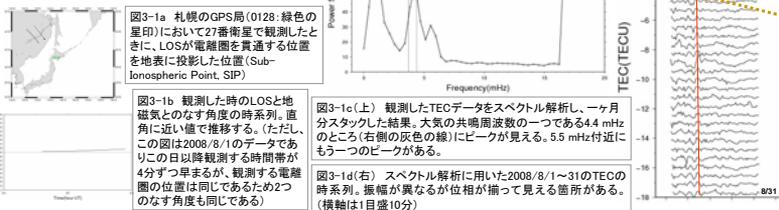


図3-1a 札幌のGPS局(O128:緑色の星印)において27番衛星で観測したとき、LOSが電離圏を貫通する位置を地図に投影した位置(Sub-ionospheric Point: SIP)

図3-1b 観測した時のLOSと地磁気とのなす角度の時系列。直角に近い値で推移する。(ただし、この図は2008/8/1のデータでありこの日以降観測する時間帯が4分ずつ早まるが、観測する電離圏の位置は同じであるため2つのなす角度も同じである)

図3-1c(上) 観測したTECデータをスペクトル解析し、一ヶ月分スタックした結果。大気の共鳴周波数の一つである4.4 mHzのところ(右側の灰色の線)にピークが見える。5.5 mHz付近にも3つほどのピークがある。

図3-1d(右) スペクトル解析に用いた2008/8/1~31のTECの時系列。振幅が異なるが位相が揃って見える箇所がある。(横軸は1日昼10分)

2) 夏・海洋上空の結果

図3-2は2008年8月に16番衛星で観測された結果である(ここの毎日のTECデータはGPS衛星が地平線から昇った直後40分間のもの)。

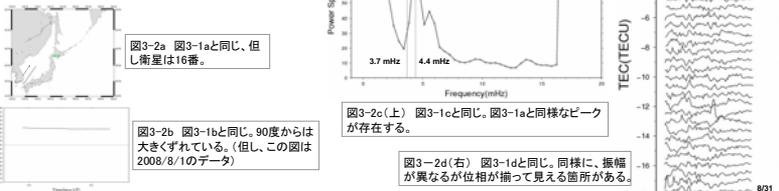


図3-2a 図3-1aと同じ、但し衛星は16番。

図3-2b 図3-1bと同じ、90度からは大きくずれている。(但し、この図は2008/8/1のデータ)

図3-2c(上) 図3-1cと同じ。図3-1aと同様なピークが存在する。

図3-2d(右) 図3-1dと同じ。同様に、振幅が異なるが位相が揃って見える箇所がある。

3) 冬・大陸上空の結果

図3-3は2008年11月に8番衛星で観測された結果である(ここの毎日のTECデータはGPS衛星が地平線から昇った直後40分間のもの)。

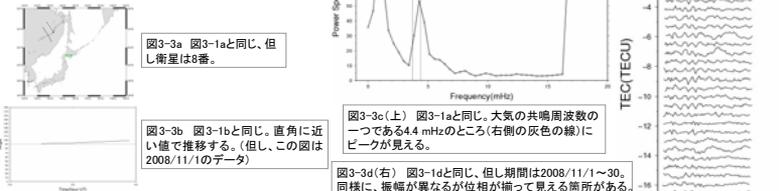


図3-3a 図3-1aと同じ、但し衛星は8番。

図3-3b 図3-1bと同じ。直角に近い値で推移する。(但し、この図は2008/11/1のデータ)

図3-3c(上) 図3-1aと同じ。大気の共鳴周波数の一つである4.4 mHzのところ(右側の灰色の線)にピークが見える。

図3-3d(右) 図3-1dと同じ、但し期間は2008/11/1~30。同様に、振幅が異なるが位相が揃って見える箇所がある。

4) 冬・海洋上空の結果

図3-4は2008年11月に8番衛星で観測された結果である(ここの毎日のTECデータはGPS衛星が地平線から昇った直前40分間のもの)。

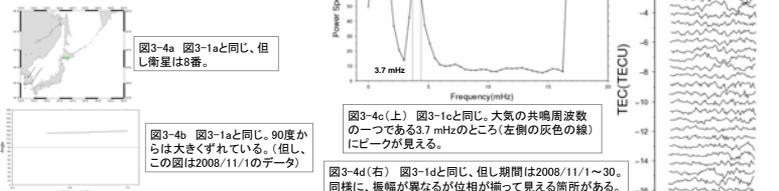


図3-4a 図3-1aと同じ、但し衛星は8番。

図3-4b 図3-1aと同じ、90度からは大きくずれている。(但し、この図は2008/11/1のデータ)

図3-4c(上) 図3-1cと同じ。大気の共鳴周波数の一つである3.7 mHzのところ(左側の灰色の線)にピークが見える。

図3-4d(右) 図3-1dと同じ、但し期間は2008/11/1~30。同様に、振幅が異なるが位相が揃って見える箇所がある。

5) 大陸上空の季節変化

図3-5は2008年4~11月に27番衛星で観測された結果である(ここの毎日のTECデータはGPS衛星が地平線から昇った直後40分間のもの)。

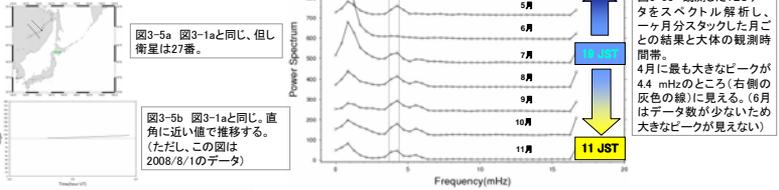


図3-5a 図3-1aと同じ、但し衛星は27番。

図3-5b 図3-1aと同じ。直角に近い値で推移する。(ただし、この図は2008/8/1のデータ)

図3-5c 観測したTECデータをスペクトル解析し、一ヶ月分スタックした結果と大気の観測時間帯。4月に最も大きなピークが4.4 mHzのところ(右側の灰色の線)に見え、5月以降データ数が少ないため大きなピークが見えない

図3-5d(右) 図3-1dと同じ、但し期間は2008/11/1~30。同様に、振幅が異なるが位相が揃って見える箇所がある。

6) 海洋上空の季節変化

図3-6は2008年4~5, 7~11月(6月はMSTIDの影響が大きいためスペクトル解析がうまくできなかった)に23番衛星で観測された結果である(ここの毎日のTECデータはGPS衛星が地平線から昇った直前40分間のもの)。

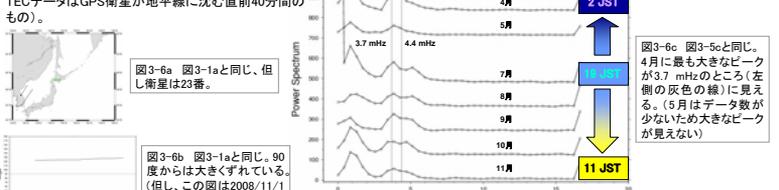


図3-6a 図3-1aと同じ、但し衛星は23番。

図3-6b 図3-1aと同じ。90度からは大きくずれている。(但し、この図は2008/11/1のデータ)

図3-6c 図3-5cと同じ。4月に最も大きなピークが3.7 mHzのところ(左側の灰色の線)に見え、5月以降データ数が少ないため大きなピークが見えない

図3-6d(右) 図3-1dと同じ、但し期間は2008/11/1~30。同様に、振幅が異なるが位相が揃って見える箇所がある。

4. 考察・課題

本研究の結果より、場所に関わらずTEC振動には s_{29} (3.7 mHz)・ s_{37} (4.4 mHz)近傍に明らかなピークが見られる。これら2つのmodeは大気の固有振動数に近いことから、地球常時自由振動の大気部分を見ている可能性が高い。これにより地球と大気の共鳴周期における振動を熱圏大気の振動として観測できたこととなり、地球自由振動の常時励起を高層大気で検出した最初の例として意義が大きい。また図3-1cや図3-2cなど5~6 mHzももう一つのピークが見られる場合があり、従来の知られていない共鳴周波数の存在を示唆する。

LOSと地磁気との関係

図3-2bのようにLOSと地磁気とのなす角が90度からずれている場合でも大気固有振動の周波数にピークが見られることがわかった。これは、電子の振動がローレンツ力により地磁気方向に拘束される高度ではなく、中性大気によるドラッグの影響で電子が地磁気方向以外にも振動する低高度で起こっている可能性を示唆する。

季節による違い

季節変化の結果からは4月に最も大きなピークが検出された。しかし、今回は季節ごとに観測する時間が異なっていたため、17UT(2JST)の時間帯に最も励起されるという可能性も考えられる。

陸域と海洋上空での違い

陸域と海洋上空でのスペクトル解析の結果にはそれぞれ s_{29} (3.7 mHz)・ s_{37} (4.4 mHz)近傍にピークがみられ、その振幅に大きな差異はない。よって、地球自由振動の励起源が冬は海であるか夏は陸地であるかは今回の結果からは判断できない。しかしスペクトル解析に用いた陸域と海洋上空のTEC振動の時系列を比べて見ると(例えば陸域の例: 3-1dと海洋の例: 3-2d)、海洋上空のTEC振動の擾乱の方が激しく陸域上空は穏やかであることが分かる。これは海洋の擾乱が励起源と仮定し、海洋上空のTECには固有周期以外の様々な周波数の振動が伝わり、そこから大気を通して陸域上空のTECには固有周期の振動しか伝わらなかったと考えたと説明がつくかもしれない。

TEC振動の位相の一致

図3-1(1-6)d(例えば図3-1d)をみると、日々のTEC振動に振幅の大きさは異なるが位相が揃って見える箇所が多々見られる。これは受信機、衛星、大気の幾何学的関係が同じとすると同じ位相のTEC振動が見えることを意味する。この物理的な意味は未検証だが、電離圏が影響を受けている大気の乱流運動が定在波であり、腹や節が空間に固定されていることを反映しているのかも知れない。しかし、なぜ腹の振幅が毎日同じ正(負)の向きに変化しているかは説明することはできない。

今は、スペクトル解析の結果が、上記のような違いなどによってどのように変化するのか、そして5~6 mHzの未知のピークの正体を見極めるために、さらに多くのデータを取得・解析してゆきたい。特に励起源はどの時期のどの場所にあるのか、TECの振動を担う電子がどの高度にあるのか、そらった位相は何を意味するのか、という三点を明らかにしたい。

5. 参考文献

- ・日野幹雄, 1984, スペクトル解析, 朝倉書店
- ・Kanamori, H. and J. Mori, 1992, Harmonic excitation of mantle Rayleigh waves by the 1991 eruption of Mount Pinatubo, Philippines, Geophys. Res. Lett., vol.19, p721-724
- ・川崎一朗, 島村英紀, 浅田誠, 1993, サイレント・アースクエイク 地球内部からのメッセージ, 東京大学出版会
- ・Nawa, K. N. Suda, Y. Fukao, T. Sato, Y. Aoyama, and K. Shibuya, 1998, Incessant excitation of the Earth's free oscillations, Earth Planets Space, vol.50, p3-8
- ・Nishida, K., N. Kobayashi, Y. Fukao, 2000, Resonant Oscillations Between the Solid Earth and the Atmosphere, Science, vol.287, p2244-2246
- ・Rhie, J. and B. Romanowicz, 2004, Excitation of Earth's continuous free oscillations by atmosphere-ocean-seafloor coupling, Nature, vol.431, p552-556
- ・塩川和夫, 大村純子, 野田ゆかり, 2005, 大気のとっぴん500のなぜ, 太陽出版株式会社
- ・谷本俊郎, 1999, 地震がなくても地球は揺れる?, ハリテイ, vol.14, 56-59

- ・GEONET(http://terras.gsi.go.jp/gps/geonet_top.html)
- ・IAGA V-MOD Geomagnetic Field Modeling: International Geomagnetic Reference Field IGRF-10(<http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html>)
- ・国土交通省国土地理院(<http://www.gsi.go.jp/>)