

地球常時自由振動：
GPS-TEC による観測

The Earth's background free oscillations：
Observations by GPS-TEC

北海道大学 理学部 地球科学科 (地球物理)

宇宙測地学研究室

大関 優

Masaru Ozeki

2009 年 1 月 30 日

要旨

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だと思われてきた。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こっていることが観測された。その後 Nishida et al. (2000) は地球の固有振動の基本モードである spheroidal mode のうち $0S_{29}$ (3.7 mHz) ・ $0S_{37}$ (4.4 mHz) の2つの周波数の振幅が目立って大きいことを見出した。これら2つの mode の振動数が大気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（谷本, 1999）。一方稠密地震計アレーの解析から Rhie and Romanowicz (2004) は冬の海洋が励起源であると考えた。

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と、電離圏にも影響があると考えられる。本研究では、GPS で観測・取得した電離圏の全電子数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した。その結果 $0S_{29}$ (3.7 mHz) ・ $0S_{37}$ (4.4 mHz) に明らかなピークが見られた。また 5.5 mHz 付近にも未知のピークが見られた。また振動の振幅を海域と陸域、および異なる季節で比較することにより、地球自由振動の励起源がどこにあるのかを議論する。

目次

1	はじめに	3
1-1	地球自由振動 (Earth's free oscillation)	3
1-1-1	地球の固有振動の基本モード	4
1-1-2	固体地球と大気の共鳴周波数 ($0S_{29} \cdot 0S_{37}$)	5
1-1-3	大気による励起	6
1-1-4	海洋による励起	8
1-2	電離圏 (Ionosphere)	9
1-3	GPS (全地球測位システム : Global Positioning System)	11
1-3-1	GPS のシステム	11
1-3-2	GPS 観測による TEC の導出	13
1-3-3	TEC の観測例	15
2	観測・解析方法	16
2-1	Blackman-Tukey 法	17
3	観測・解析結果	19
3-1	夏・大陸上空の結果	19
3-2	夏・海洋上空の結果	21
3-3	冬・大陸上空の結果	23
3-4	冬・海洋上空の結果	25
3-5	大陸上空の季節変化	27
3-6	海洋上空の季節変化	30
4	考察	33
5	結果・課題	36
6	謝辞	36
7	参考文献	37

1 はじめに

当研究の目的は、地球自由振動を超高層大気の振動として観測することである。以前から地球の常時自由振動は超伝導重力計(Nawa et al.,1998) や地震計アレー(Nishida et al.,2000) など固体地球側に設置された計測器により直接観測されてきた。地球自由振動とカップリングしている大気自由振動は電離圏の全電子数 (Total Electron Content : TEC) にも影響しているだろう。GPS は電離圏の全電子数の時間変化を観測することができる。当研究では、GPS (全地球測位システム : Global Positioning System) のデータから得られた TEC の時系列をスペクトル解析する。

1-1 地球自由振動 (Earth's free oscillation)

あらゆる物体にはその大きさ・形と固さによって決まる振動しやすい特有の周期があり、それを固有周期と呼ぶ。また、この固有周期における振動を固有振動と呼ぶ。地球にもその大きさに見合う波長の固有振動が存在し、これを「地球自由振動」と呼ぶ。従来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だと思われてきた。しかし、Nawa et al. (1998) は 3 年間の昭和基地での超伝導重力計の観測により、地球自由振動がわずかな振幅ながら地震のない時期でも常時起こっていることを見出した。また、その励起源として大気の乱流運動の可能性をあげた。Nawa et al. (1998) と Nishida et al. (2000) が大気に励起源があるとしたのに対し、稠密地震計アレーの解析から Rhie and Romanowicz (2004) は冬の海洋が励起源であると考えた。

1-1-1 地球の固有振動の基本モード

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 はその振動パターンの例である。

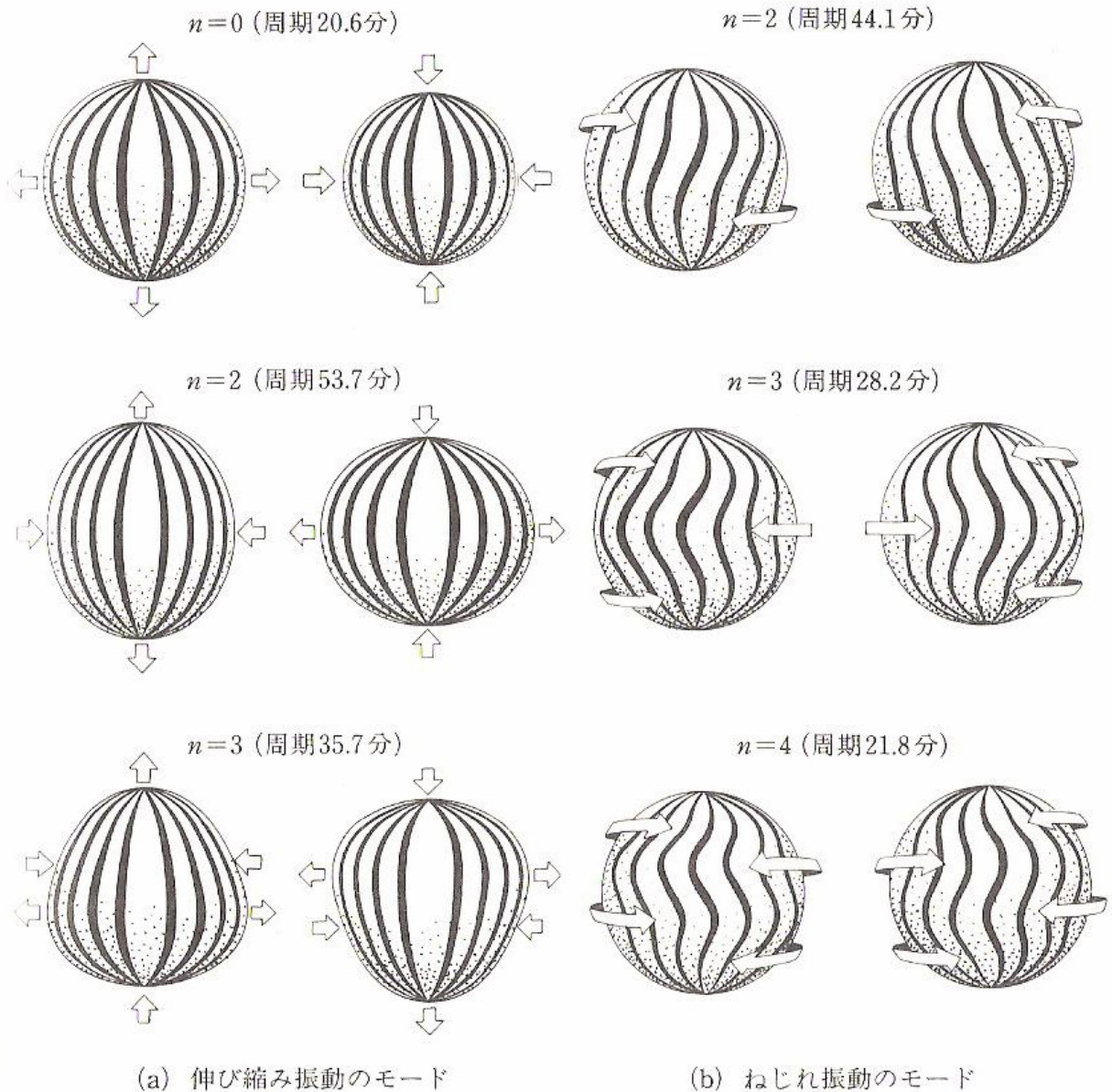


図 1-1 地球固有振動モードの例 (川崎他, 1993)

固有モード mS_n という表現のあとの添字 n は緯度方向の節の数を、最初の添字 m は深さ方向の節の数を表す

1-1-2 固体地球と大気の共鳴周波数 ($0S_{29}$ ・ $0S_{37}$)

Nishida et al. (2000) は地震計アレーによる 10 年間の観測により、地球自由振動はある周波数範囲に含まれるすべてのモードで起こっているが、中でも $0S_{29}$ (3.7 mHz)・ $0S_{37}$ (4.4 mHz) の 2 つのモードの振幅が大きいことを明らかにした (図 1-2)。

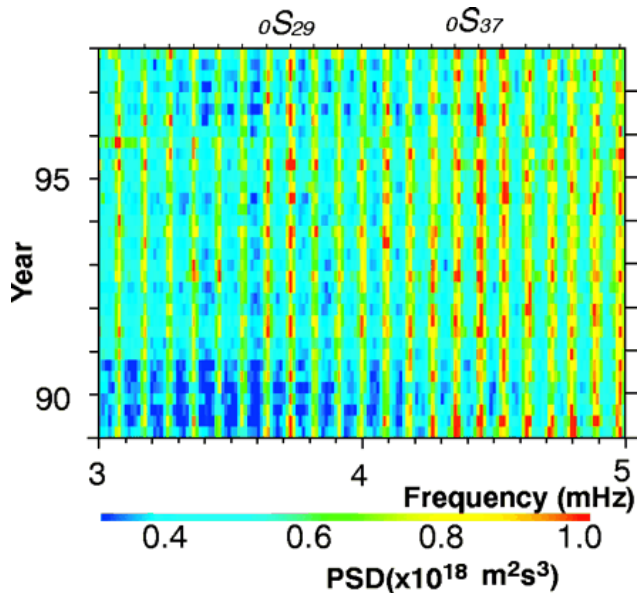


図 1-2 常時地球自由振動の
スペクトログラム
(Nishida et al., 2000)

この 2 つのモードは大気の固有振動数でもあり、固体地球と大気の間で振動が大きく共鳴する窓口であると言われている (e.g. Kanamori and Mori, 1992)。また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ことを示すことも見出された。

1-1-3 大気による励起

Nishida et al. (2000) は、地球自由振動のスペクトルのピークが北半球の夏季にあることから、地球自由振動の振幅と地球からの赤外放射の地球平均の季節変化との関係性に着目した (図 1-3)。

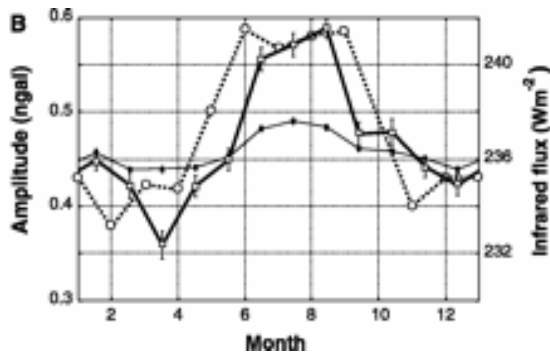


図 1-3 地球自由振動の振幅と赤外放射の地球平均の季節変化との関係性 (Nishida et al., 2000)

- 太線—0S29 の振幅の季節変化
- 細線—0S29 を除いた 0S20～0S45 の平均振幅の季節変化
- 点線—1994 年の大気上部における赤外放射の地球平均の季節変化

これによると、地球自由振動の振幅と赤外放射の季節変化のそれぞれのピークは、北半球の夏で一致している。赤外放射は暖められた空気が対流的な乱流運動によって大気上部までどのくらい効率的に運ばれるかを表す量である。よって赤外放射が大きいということは、乱流運動も活発であることを示している。また、南半球では海の影響により赤外放射の季節変化が穏やかになる。

以上のことから、地球自由振動の励起源の候補として大気の乱流運動が考えられた(図 1-4)。

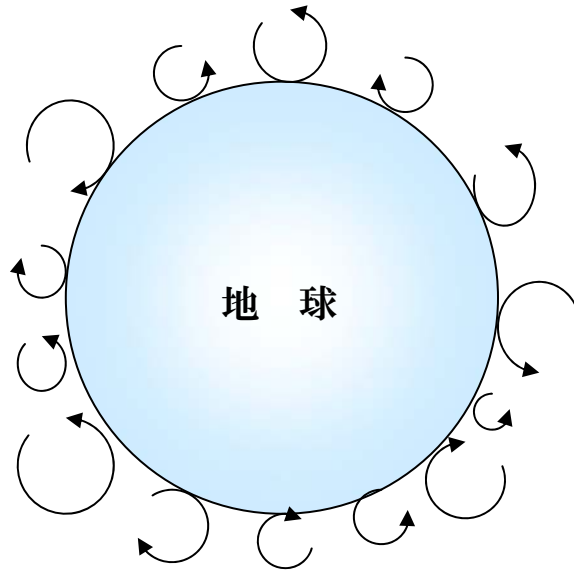


図 1-4 大気による地球自由振動励起のモデル
固体地球は表面を大気の常時乱流運動による風によって叩かれている。
(e.g. 谷本, 1999)

1-1-4 海洋による励起

Rhie and Romanowicz (2004) は FNET と BDSN の 2 つの地震計アレーを使って、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 (図 1-5)。

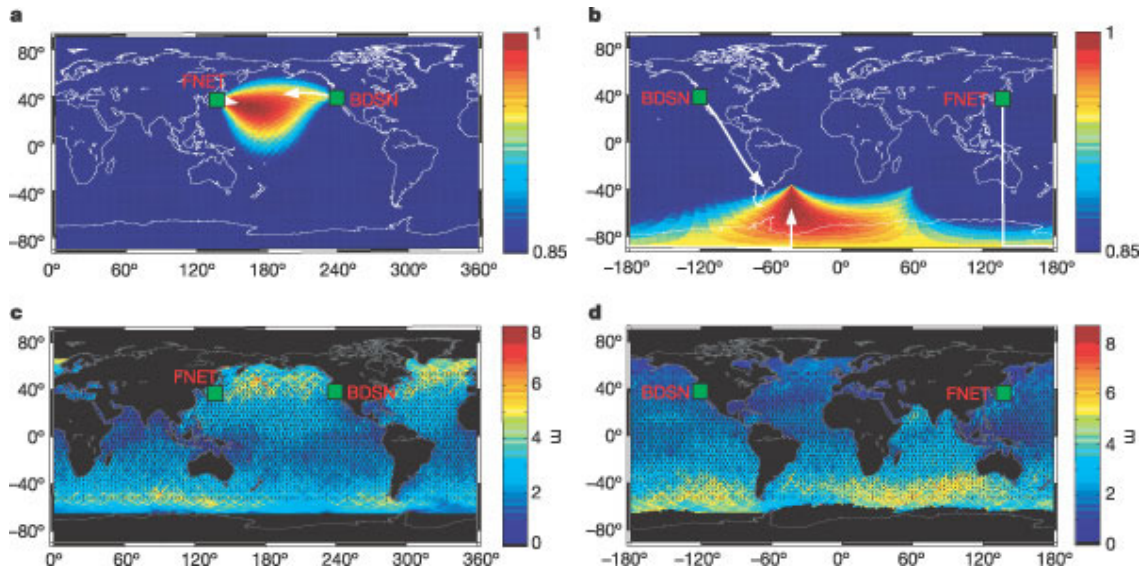


図 1-5 上 日本の FNET とアメリカの BDSN の地震計アレーから推察した、地球自由振動が励起されていると考えられる地域

(a : 2000 年 1 月、b : 2000 年 7 月)

図 1-5 下 海の波の高さ分布 (c : 2000 年 1 月、d : 2000 年 7 月)

(Rhie and Romanowicz, 2004)

その結果によると、冬 (南半球夏季) は北太平洋、夏 (南半球冬季) は南極海に励起源があることがわかった。またその季節における海の波の高さと励起源との位置に着目すると、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。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。これは夏の大陸域に励起源があるとする Nishida et al. (2000) の主張と全く異なる。

1-2 電離圏 (ionosphere)

地球は高さが 100 km 以上になると大気が非常に薄くなり、一部の大气分子は太陽の放射エネルギーによって電離するようになる (塩川他, 2005)。この荷電粒子を含む大気は、高さ 100 ~ 600 km 付近で地球を取り巻いており、電離圏 (または電離層) と呼ばれている。電離圏ができる理由は太陽の光である。ここでは窒素や酸素の原子・分子が太陽光線に含まれる波長約 0.1 μm 以下の紫外線を吸収し、その光のエネルギーが原子核のまわりを回転している電子を原子からはじきとばして、電子とイオンに分けてしまう。これを光が原子をイオン化する光電離 (photoionization) の作用であり、形成された電子やイオンのことをプラズマと呼ぶ。

電離圏には電子数密度が特に大きい 3 つの層があり、下から順に E 層、F₁ 層、F₂ 層と名づけられている (図 1-6)。例えば、高さ約 100 km にある E 層では、1 m³ の容積の中に約 10¹¹ 個の電子がある。しかし、この高さでは空気の原子や分子がまだ約 10¹⁹ 個 m⁻³ も存在し、それらの 1 億個について 1 個程度が電離しているにすぎない。しかし電離の割合は高さとともに急増し、300 km では 1,000 個に 1 個くらいの割合になり、500 km では 100 個について 1 個くらいになる。

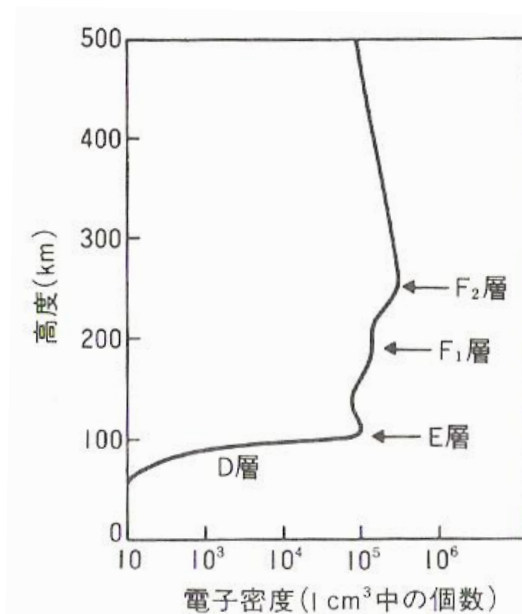


図 1-6 電子数密度の高度分布 (小倉, 1999)

また、E層の下にも弱いながら電離状態にあるD層がある。太陽から放射された紫外線は地球大気中に入ってくると次第に吸収され、この層に達するころにはかなり弱くなっている。そのため上層ほど電子数は多いがD層では少なく、太陽からの紫外線の照射がない夜間にはD層は消滅してしまう。しかし、この層の高さの空気密度は、E層やF層に比べると非常に大きいため、同じ強さの紫外線に照射されれば、D層のほうが電子の数が多くなる。

上記のかねあいでは、電子数密度はある高さの層で極大になり、その上下で減少することになる。これに加えて、紫外線で生成された電子が、電子を失った分子・原子（すなわちイオン）と衝突して結合し、もとの分子・原子に戻るということも起こっている。この現象を、再結合（recombination）と呼ぶ。すなわち電子数密度の高さによる違いは、その高さで電子がどのくらいの割合で生成され、かつ消滅するかに依存するのである。

1-3 GPS（全地球測位システム：Global Positioning System）

GPSはアメリカが20年以上の歳月と100億ドル以上の国費をかけて開発した、人工衛星による位置決定（測位）システムである。1978年からアメリカ国防総省によって打ち上げが始まったGPS衛星は、1993年に完全運用を開始し、現在高度2万kmを約12時間の周期で周回する30機程の衛星群から成っている。これらの衛星群からマイクロ波を受信することにより、受信点位置や現在時刻を知ることができる。もともとは軍の航法支援のために開発されたシステムであるが、最近では自動車のカーナビをはじめ、船舶・航空機の運行管理、測量、地殻変動観測などの民生分野で利用が急増し、世界的な情報社会基盤になりつつある。

1-3-1 GPSのシステム

GPSのシステムは、宇宙部分・利用者部分・制御部分の3つから構成される。ここでは、宇宙部分と利用者部分を簡単に紹介する。

宇宙部分（衛星）

GPS衛星は昇交点赤経が 60° ずつ異なる6つの軌道面に4個ずつ、合計24機（予備を含めて30機程）の衛星が配備されている。軌道の離心率は $0 \sim 0.01$ なので、その形状はほとんど円軌道である。軌道長半径は約26,600 kmで、11時間58分（=0.5恒星日）の周期で地球を公転する。また太陽日の1日は24時間なので、地上からみた衛星の出没パターンは毎日4分ずつ早くなる。このように24機もの衛星が地球の周りに配置されているのは、地上のどこでも常に最低4個の衛星が地平線上にあることを保証するためである。

GPS衛星には周波数標準として高い安定度を持つ原子時計（セシウム及びルビジウム時計）が搭載されている。この原子時計の基本周波数 f_0 （=10.23 MHz）を154及び120倍にして、L1及びL2バンドの搬送波周波数をつくる。ただし、軌道上の重力に対応した相対論的補正のため、実際の f_0 は10.23 MHzより0.00455 Hzだけ低めてある。

また、全ての衛星は L1 及び L2 の同一周波数で送信するが、それでも混信しないのは、信号が各衛星固有の疑似乱数符号 (PRN : Pseudo Random Noise) によって変調されているからである。疑似乱数符号には、公開された C/A (Coarse/Acquisition) コードと、軍用の P (Protected) コードがある。前者は 1023 ビットの 0 と 1 の繰り返しからできていて、繰り返し周期は 1ms、パターンは全部で 36 種類ある。P コードの周期は 37 週間であるが、1 週間毎に分割して各衛星に割り振られている (表 1-1)。

	搬送波	C/A コード	P コード
L1	1575.42 Mhz (19.0 cm)	1.023 MHz (293 m)	10.23 MHz (29.3 m)
L2	1227.60 Mhz (24.4 cm)	なし	10.23 MHz (29.3 m)

表 1-1 GPS の搬送波とコード (辻, 1998)

利用者部分 (受信機)

受信機は、衛星からの信号を受信するアンテナと信号を解読・記録する本体からなる。

単独測位用の受信機では、内部で衛星と同じ C/A コードパターンを再生し、受信した C/A コードと最大相関が得られるまで、再生 C/A コードを時間的にずらせる。もし衛星と受信機の時刻が完全に同期していれば、最大相関が得られたときの時間的ずれが、衛星から出たコードが受信機に到着するのに要した時間ということになる。したがって、これに光速を掛ければ、衛星と受信機間の距離が得られる。しかし実際には衛星と受信機の時計を完全に同期させるのは困難なので、得られた距離には時計のずれによる距離測定誤差も含まれている。このため、この距離は、疑似距離 (pseudo range) と呼ばれる。

一方、干渉測位用の受信機では搬送波の位相そのものを測定している。コードによって変調された信号は周波数拡散を受けており、そのままでは測定できないが、コードパターンがわかっているならば位相を再生できる。したがって干渉測位の原理をみるときは、あたかも衛星から正弦波が送り出されていると考えればよい。

1-3-2 GPS 観測による TEC の導出

TEC (Total Electron Content) とは、GPS衛星と受信機間のLOS (line-of-site) 上の電子の数の合計で、単位は el / m^2 かTECU ($= 10^{16} \text{el} / \text{m}^2$) である。TECはLOS (経路 s) に沿って電子密度 n_e を積分することで表すことができる。

$$TEC = \int_{\text{receiver}}^{\text{satellite}} n_e(s) ds \quad (1)$$

n_e : 電子密度 (el / m^3)

GPS から TEC を導出するには、マイクロ波の特性を利用することが重要になってくる。

GPS 衛星を出発したマイクロ波は、地表付近で電離圏や対流圏に遭遇するが、このときにマイクロ波の伝搬速度や経路が変化して、距離測定に影響を及ぼす。電離圏の影響は遅延時間の周波数依存を利用することで補正ができる。

これを逆に利用して、L1 と L2 の 2 つの周波数の遅延差を調べることで電離圏の電子数を計算することができる。

まず電離圏の屈折率 N_I は、電子密度と搬送波の周波数 f を用いて以下の式で近似できる。

$$N_I = 1 - \frac{a n_e}{f^2} \quad (2)$$

a : 定数

さらに電離圏によって引き起こされるマイクロ波の遅延 Δt は電離圏の屈折率 N_I を使って以下の式で表すことができる。

$$\Delta t = \int_{\text{receiver}}^{\text{satellite}} (N_I - 1) ds \quad (3)$$

(3)式に(1)式、(2)式を代入するとマイクロ波の遅延 Δt は結局、

$$\Delta t = -\frac{a}{f^2} TEC \quad (4)$$

$$a = 4.03 \cdot 10^{17} \text{ms}^{-2} \text{TECU}^{-1}$$

となる。

ここで GPS 衛星から発射された L1 と L2 のマイクロ波が受信機に到達する時間をそれぞれ t_1 と t_2 とすると、それらは GPS 衛星から受信機までの距離と光速から求められる時間 t と電離圏による遅延(4)式を使って表すことができる。

$$t_1 = t - \frac{a}{f_1^2} TEC \quad (5)$$

$$t_2 = t - \frac{a}{f_2^2} TEC \quad (6)$$

(5)式、(6)式より TEC は GPS で得られるデータを使い、次の計算式で求めることができる。

$$TEC = \frac{t_1 - t_2}{a} \cdot \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (7)$$

$$a = 4.03 \cdot 10^{17} \text{ms}^{-2} \text{TECU}^{-1}$$

1-3-3 TEC の観測例

(7)式を使って、TEC を計算すると下図のようになる。

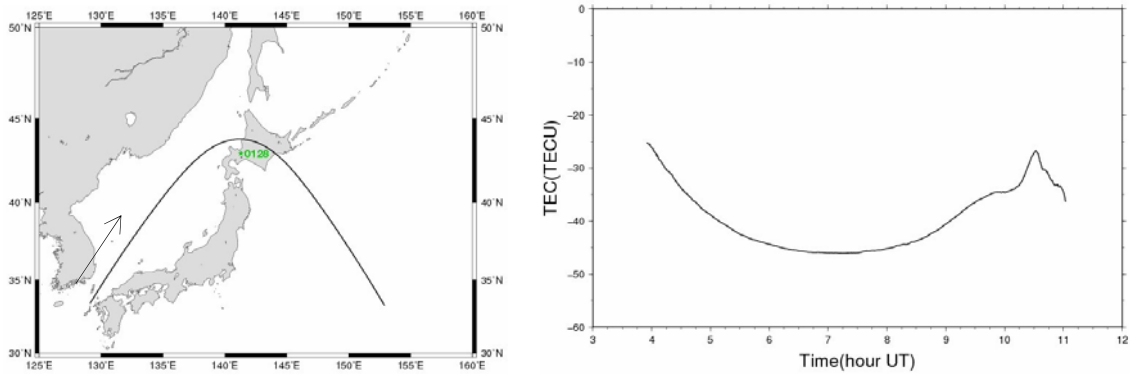


図 1-7 左 札幌の GPS 局 (0128) の位置 (緑色の星印) と、2008/8/1 に札幌の GPS 局から 16 番衛星で電離圏を観測したときに、LOS が電離圏で最も電子密度の濃い高度 300 km を貫通する位置を地表に投影した位置 (Sub-Ionospheric Point, SIP)

図 1-7 右 2008/8/1 に左図の位置で札幌から 16 番衛星を使って観測された TEC の変化 (ただし TEC の値はこの衛星で観測された最初の TEC との差であるので、絶対値ではない)

(図 1-7 右) において TEC が U 字に変化しているのは、GPS 衛星が地平線から昇る (に沈む) 時に電波が電離圏を斜めに突き抜けるため TEC が大きくなり、GPS 衛星の仰角が高いほど電波が電離圏を垂直に近い角度で突き抜けるため TEC が小さくなるからである。

2 観測・解析方法

まず適当な GPS 局と GPS 衛星をそれぞれ 1 つ選び、国土地理院の全国連続 GPS 観測網 (GEONET) のデータから TEC を計算する。得られた TEC 振動に対して、Blackman-Tukey 法を用いてスペクトル解析を行う。振幅が受けるランダムなノイズの影響を小さくするために、一ヶ月間同じ GPS 局と GPS 衛星を使い、毎日同じ電離圏 (高度 300 km) の位置の TEC 振動をスペクトル解析し、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 (1-3-1 : 参照)。観測する時間帯において、中規模伝搬性電離層擾乱 (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少ない (1-2 : 参照) 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 局と GPS 衛星の LOS と地磁気が直角に近い (電子の波面と垂直な) 角度で交わる電離圏を観測する方が良いと考えた。そのため、観測する電離圏の位置は LOS と地磁気が垂直に交わりやすい、LOS と水平面との角度 (仰角) が低い時を狙った。また仰角が低い時は、電波が電離圏を斜めに突き抜けるため TEC が大きくなり、TEC の振動の振幅も大きくなると考えられる。なお、地磁気データは国際標準地球磁場 (International Geomagnetic Reference Field : IGRF) のデータを使用した。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 (最初のデータ) 直後の 40 分もしくは沈む (最後のデータ) 直前の 40 分とした。

これらの結果により、大気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 $0S_{29}$ (3.7 mHz) ・ $0S_{37}$ (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検証する。また振動の振幅を海域と陸域、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。

2-1 Blackman - Tukey 法

現実の様々な現象のスペクトル解析に際して、誤差論に基づいた合理的なスペクトル計算法として最初に（1950年代後半に）提案されたのが通信理論に基づく Blackman-Tukey 法 (B-T 法) である。今日ではいささか古い方法となっているが、計算の原理が明確でプログラム上もとくに困難な点がない上、分解能がやや低くなり勝ちではあるが安定したスペクトル推定が可能である。プログラムは、以下のフローチャートに沿って進められる (図 2-1)。

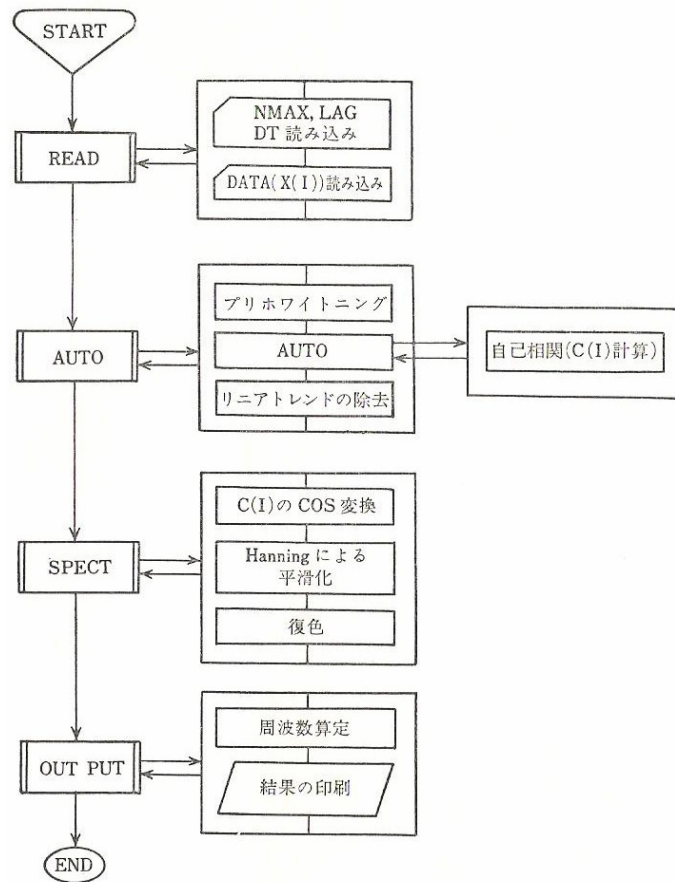


図 2-1 B-T 法による計算手順 (日野, 1984)

READ

B-T 法ではまずデータの読み取り間隔 (DT) やデータ長 (NMAX) の決定が必要である。ここでは TEC データの間隔は 30 (sec) で、一回ごとの TEC データは 40 分であるからデータ長は 80 となる。また相関関数を求める最大のずらしの数 (maximum number of correlation lag : LAG) はデータ長の半分の 40 とした。

AUTO

観測しようとする現象の周波数よりもはるかに低周波数の変動成分をトレンドまたはドリフト (trend, drift) という。トレンドがある場合には、フィルターによって、低周波数成分を除去する。

また解析しようとする現象に強い周期性がある、もしくは対象とする周波数範囲のエネルギーレベルの変化が大きい場合には数値化されたデータにプリホワイトニング (prewhitening, 白色化) の操作をほどこして、あらかじめスペクトルを平坦化するようにする。

その後、自己相関関数を計算する。

SPECT

自己相関関数のフーリエの有限離散 cosine 変換を行う。

次に、ハニングあるいはハミングなどスペクトルウィンドーによりスペクトルの平滑化を行い、スペクトル推定誤差を少なくする。

前段階において、プリホワイトニングの操作を行ったならば、元のデータのスペクトルを得るための修正すなわち復色 (recolour) を行う必要がある。

OUT PUT

最後に周波数ごとのパワースペクトルを算出する。

3 観測・解析結果

以下の TEC の観測はすべて国土地理院の全国連続 GPS 観測網 (GEONET) の札幌 (北海道) の GPS 局で観測した結果の一例である。

3-1 夏・大陸上空における結果

図 3-1 は 2008 年 8 月に 27 番衛星で観測された結果である (ここでの毎日の 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)。

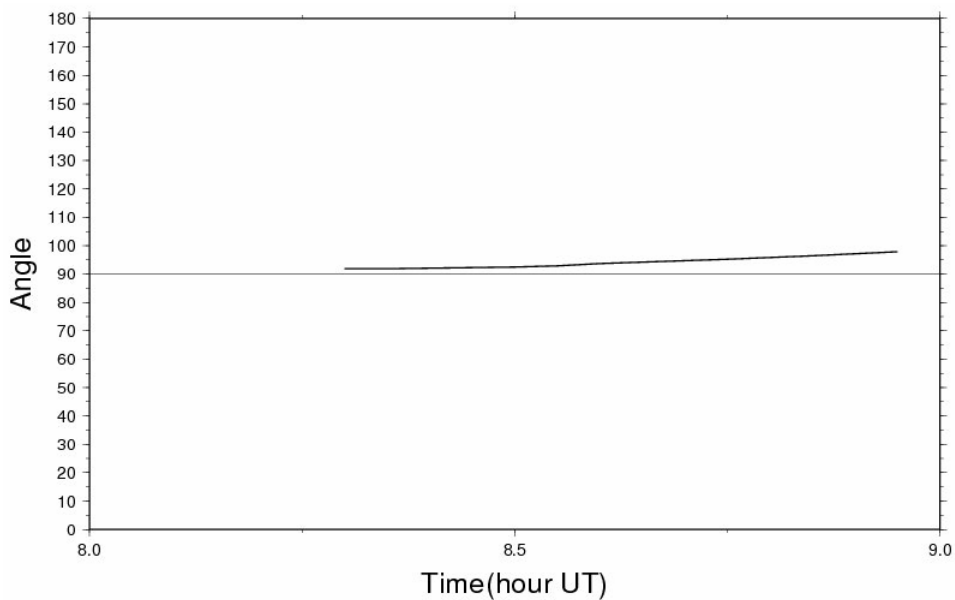
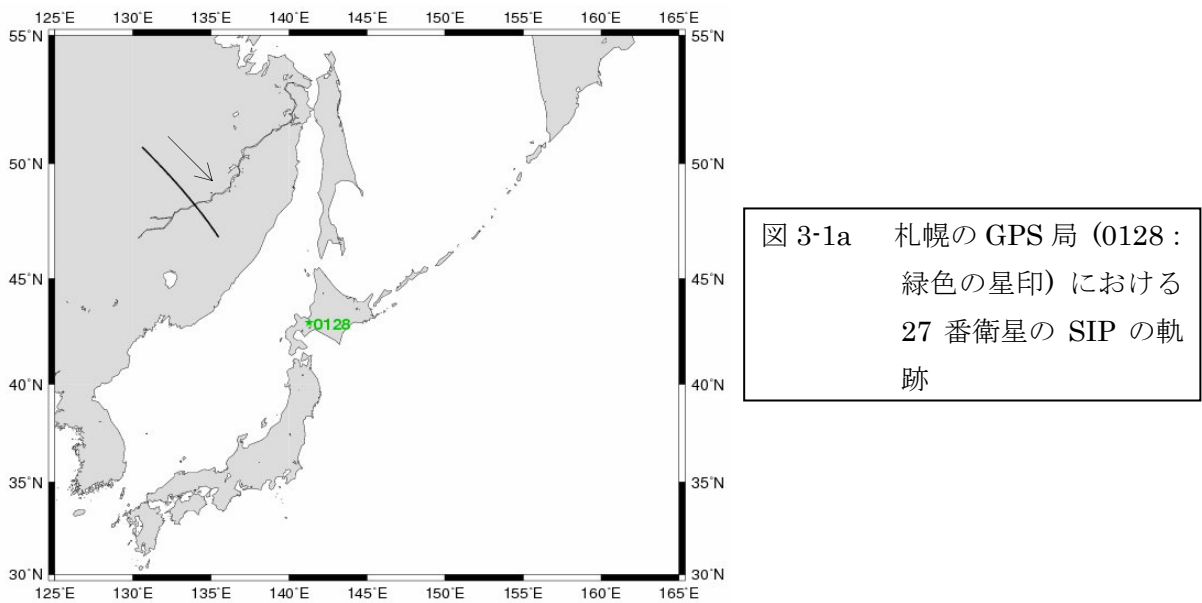


図 3-1b 観測した時の LOS と地磁気とのなす角度の時系列

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)

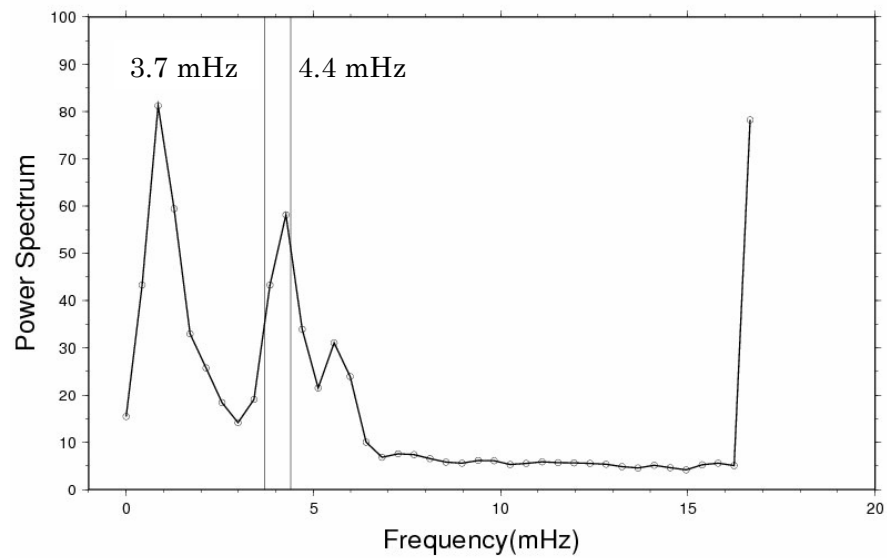


図 3-1c 観測した TEC データをスペクトル解析し、一ヶ月分スタックした結果
大気の共鳴周波数の一つである 4.4 mHz のところ (右側の灰色の線)
にピークが見える。5.5 mHz 付近にもう一つのピークがある。

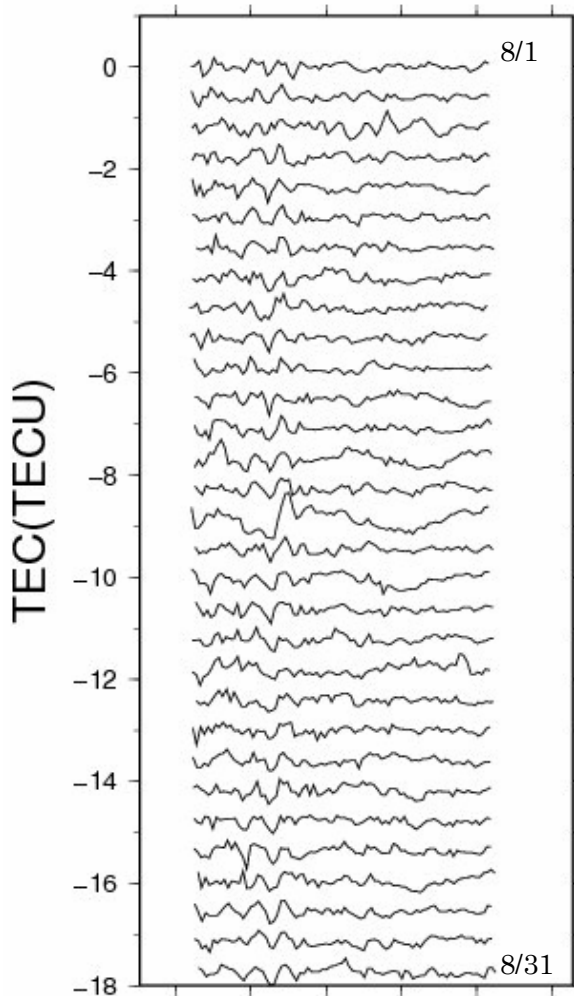


図 3-1d スペクトル解析に用いた 2008/8/1～
31 の TEC の時系列
振幅が異なるが位相が揃って見える
箇所がある。
(多項式近似で長周期成分は取り除
いている)(横軸は 1 目盛 10 分)

3-2 夏・海洋上空における結果

図 3-2 は 2008 年 8 月に 16 番衛星で観測された結果である（ここでの毎日の 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）。

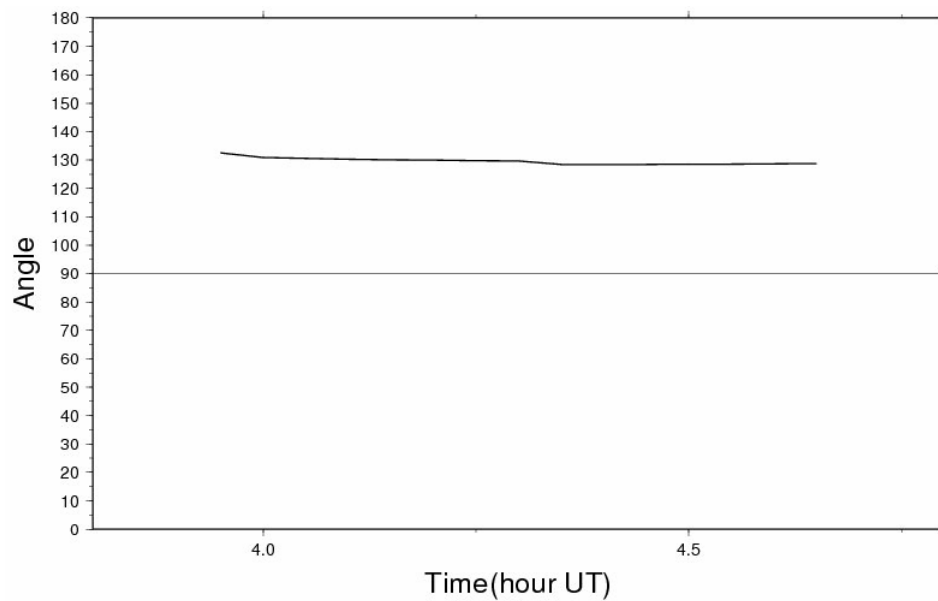
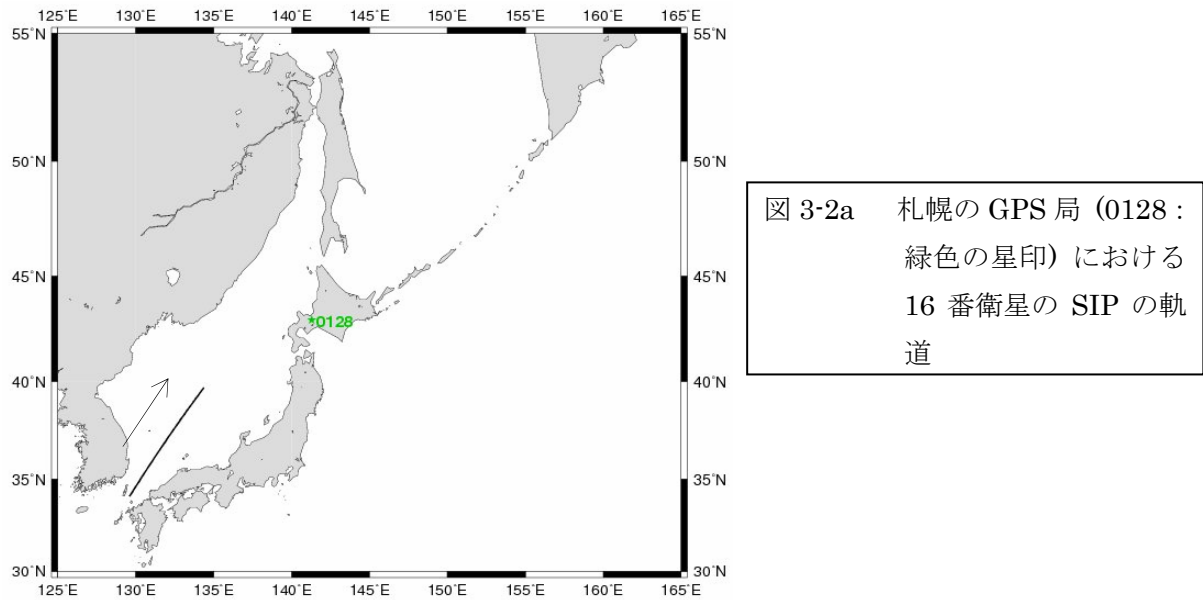


図 3-2b 観測した時の LOS と地磁気とのなす角度の時系列
90 度からは大きくずれている。(ただし、この図は 2008/8/1 のデータでありこの日以降観測する時間帯が 4 分ずつ早まるが、観測する電離圏の位置は同じであるため 2 つのなす角度も同じである)

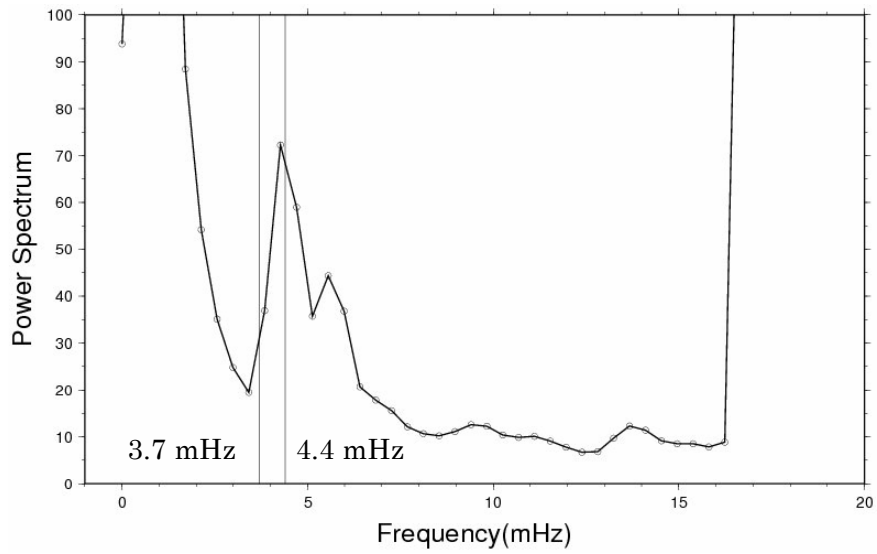


図 3-2c 観測した TEC データをスペクトル解析し、一ヶ月分スタックした結果
 図 3-1c と同様なピークが存在する。

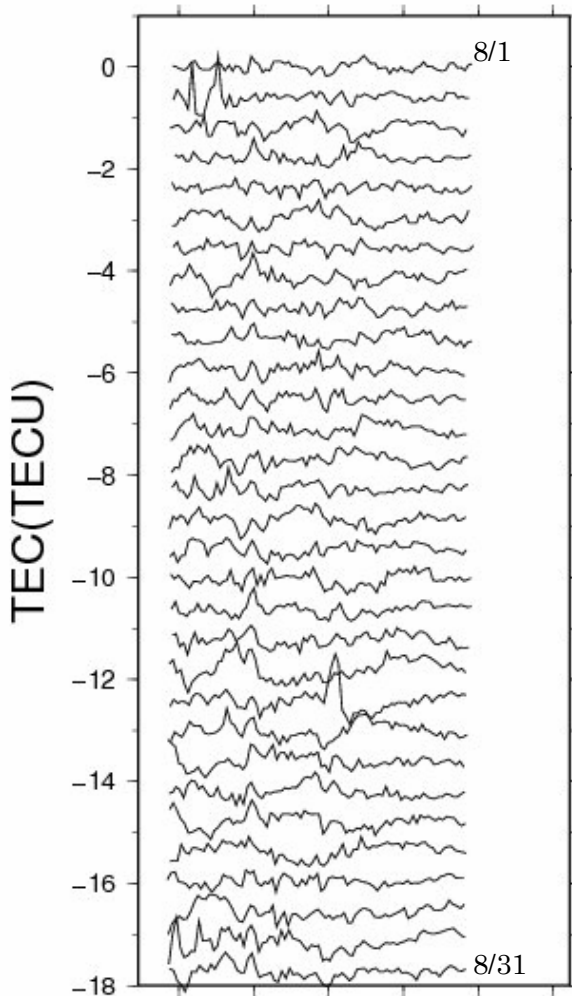


図 3-2d スペクトル解析に用いた 2008/8/1 ~31 の TEC の時系列
 図 3-1d 同様、振幅が異なるが位相が揃って見える箇所がある。
 (多項式近似で長周期成分は取り除いている)(横軸は 1 目盛 10 分)

3-3 冬・大陸上空における結果

図 3-3 は 2008 年 11 月に 8 番衛星で観測された結果である（ここでの毎日の 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）。

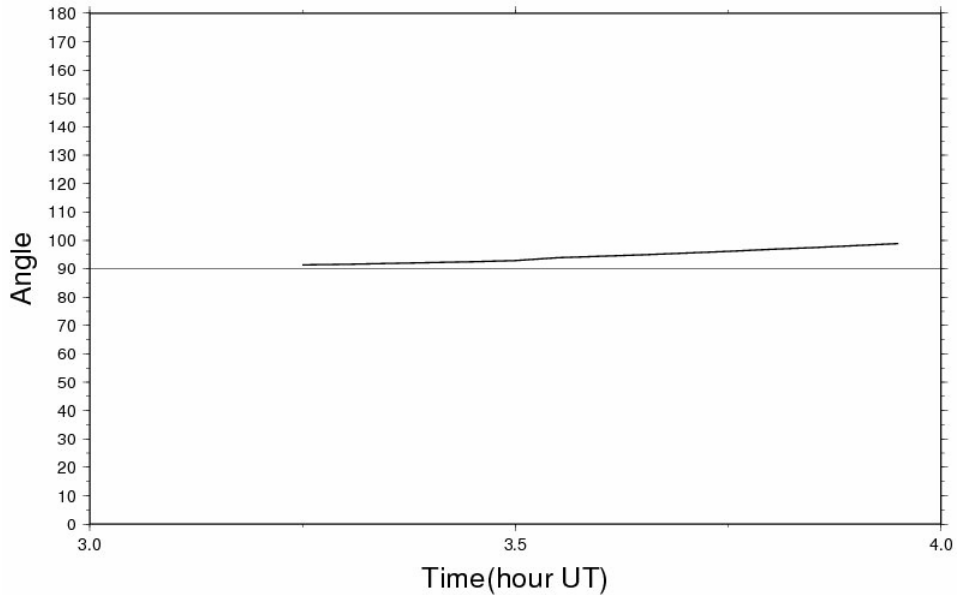
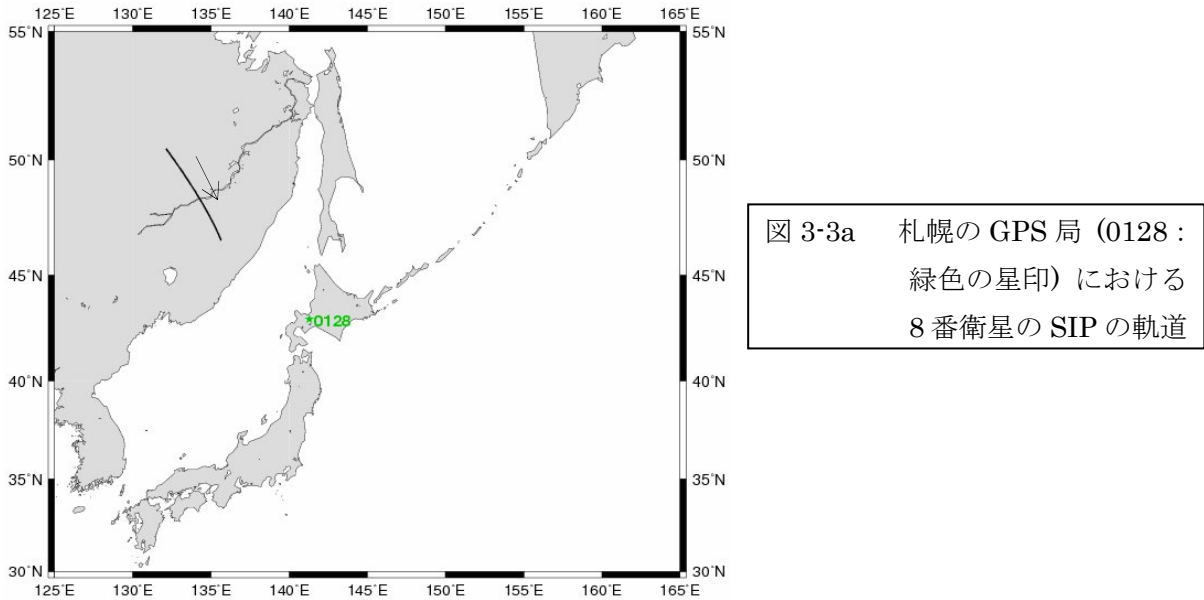


図 3-3b 観測した時の LOS と地磁気とのなす角度の時系列

直角に近い値で推移する。(ただし、この図は 2008/11/1 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)

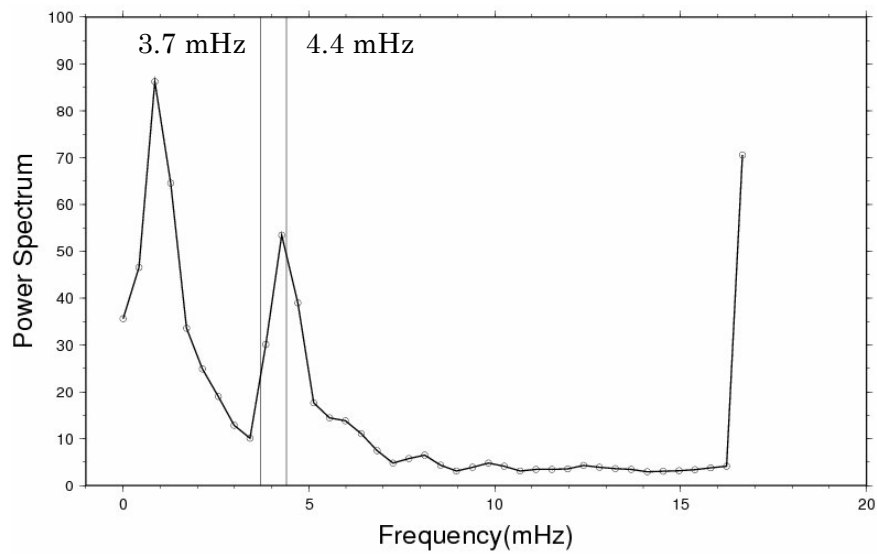


図 3-3c 観測した TEC データをスペクトル解析し、一ヶ月分スタックした結果
大気の共鳴周波数の一つである 4.4 mHz のところ (右側の灰色の線) にピークが見える。

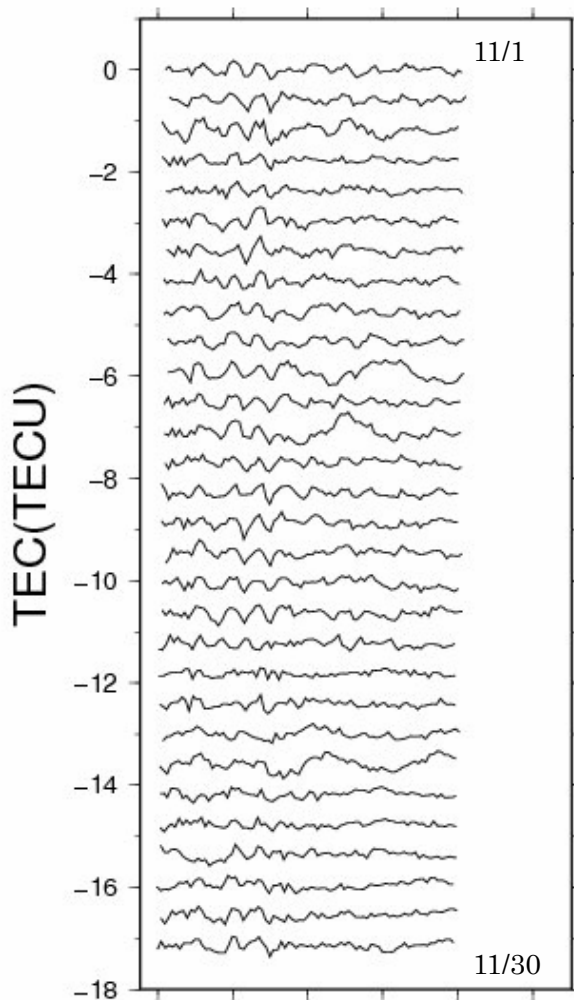


図 3-3d スペクトル解析に用いた 2008/11/1 ~30 の TEC の時系列
図 3-1d 同様、振幅が異なるが位相が揃って見える箇所がある。
(多項式近似で長周期成分は取り除いている) (横軸は 1 目盛 10 分)

3-4 冬・海洋上空における結果

図 3-4 は 2008 年 11 月に 8 番衛星で観測された結果である（ここでの毎日の TEC データは GPS 衛星が地平線に沈む直前 40 分間のもの）。

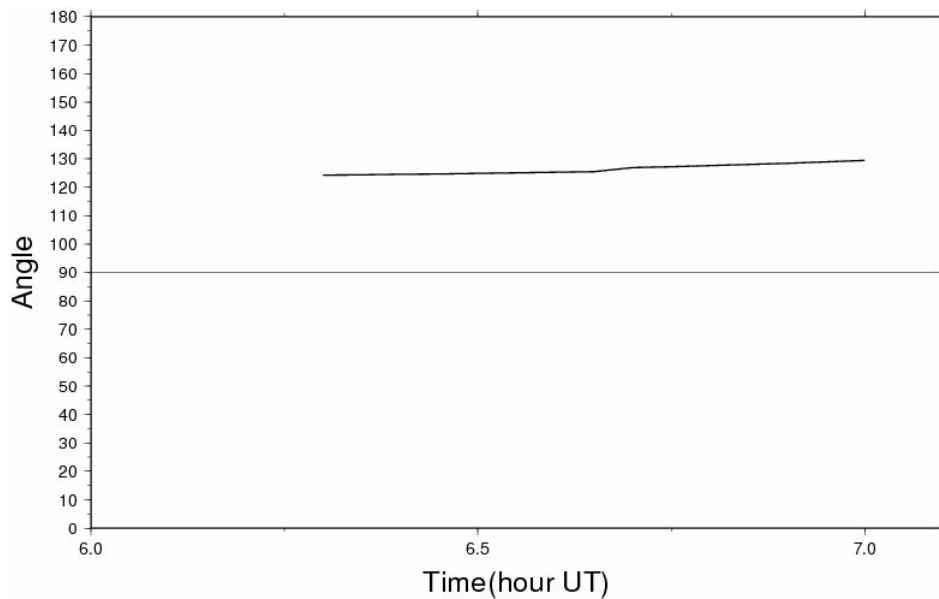
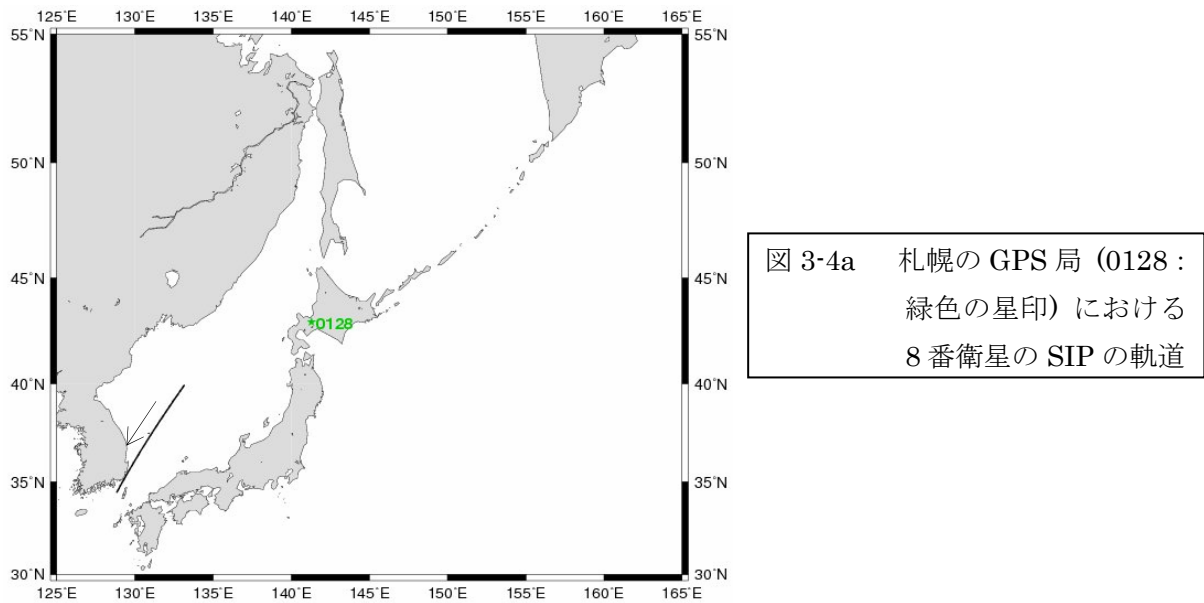


図 3-4b 観測した時の LOS と地磁気とのなす角度の時系列

90 度からは大きくずれている。(ただし、この図は 2008/11/1 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)

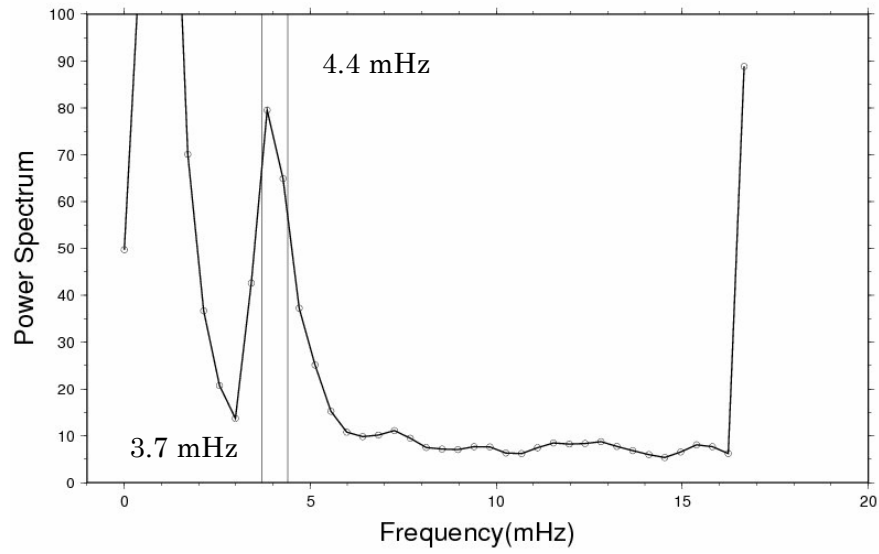


図 3-4c 観測した TEC データをスペクトル解析し、一ヶ月分スタックした結果
大気の共鳴周波数の一つである 3.7 mHz のところ (左側の灰色の線) にピークが見える。

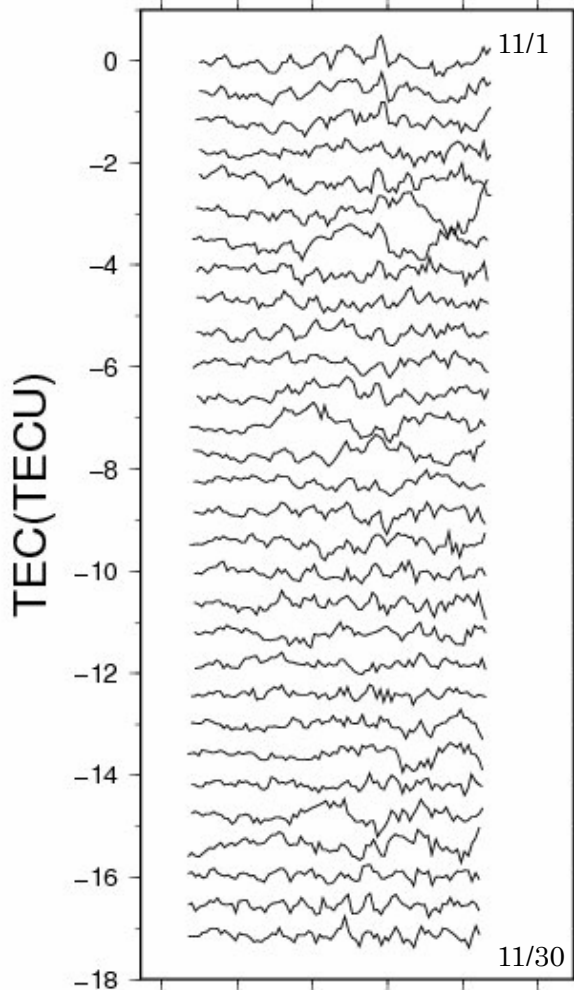


図 3-4d スペクトル解析に用いた 2008/11/1 ~30 の TEC の時系列
図 3-1d 同様、振幅が異なるが位相が揃って見える箇所がある。
(多項式近似で長周期成分は取り除いている) (横軸は 1 目盛 10 分)

3-5 大陸上空における季節変化

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（ここでの毎日の 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）。

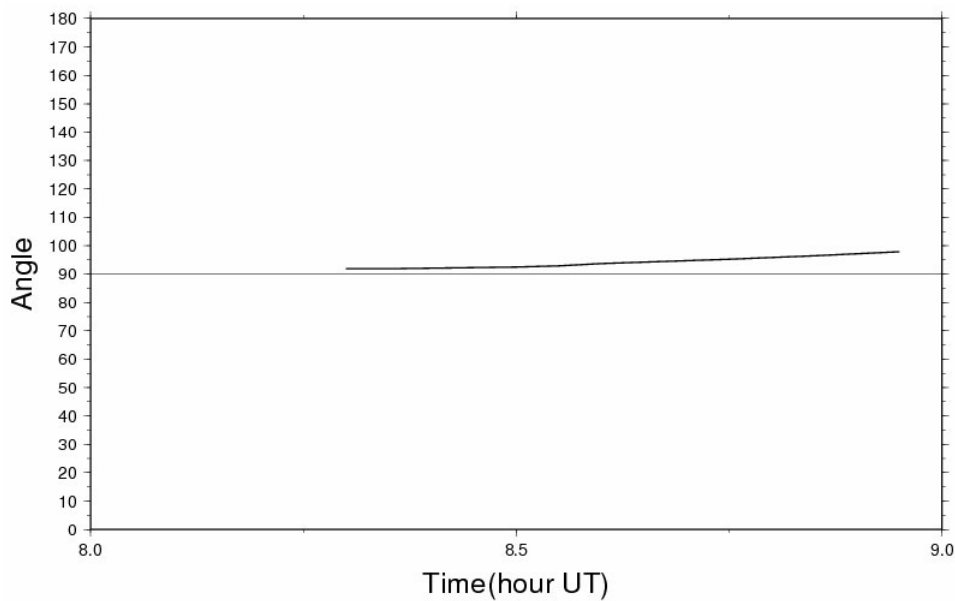
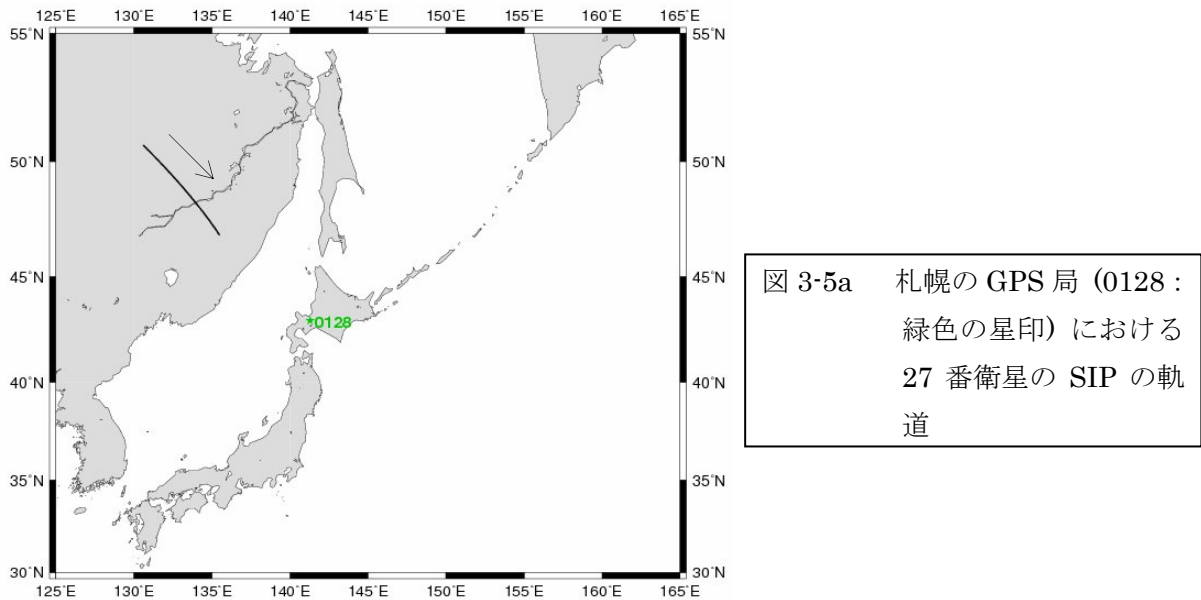


図 3-5b 観測した時の LOS と地磁気とのなす角度の時系列

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外は観測する時間帯がずれているが、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)

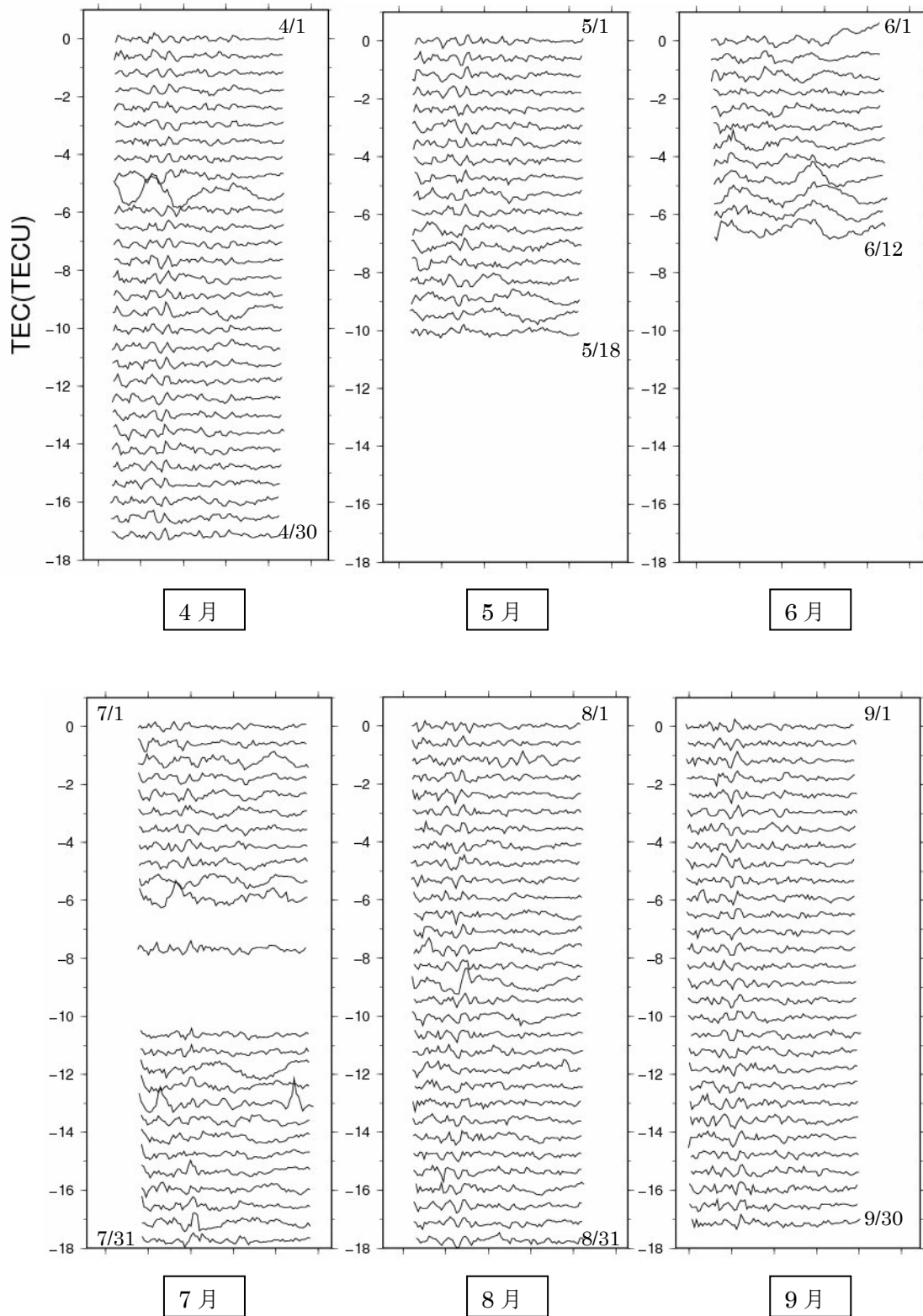


図 3-5c スペクトル解析に用いた 2008/4~11 の TEC の時系列 (次ページに 10,11 月分掲載)
 振幅が異なるが位相が揃って見える箇所がある。
 (多項式近似で長周期成分は取り除いている) (横軸は 1 目盛 10 分)
 (5~7 月は MSTID がでる時間帯の TEC のため、スペクトル解析に影響が出る日のものは取り除いた)

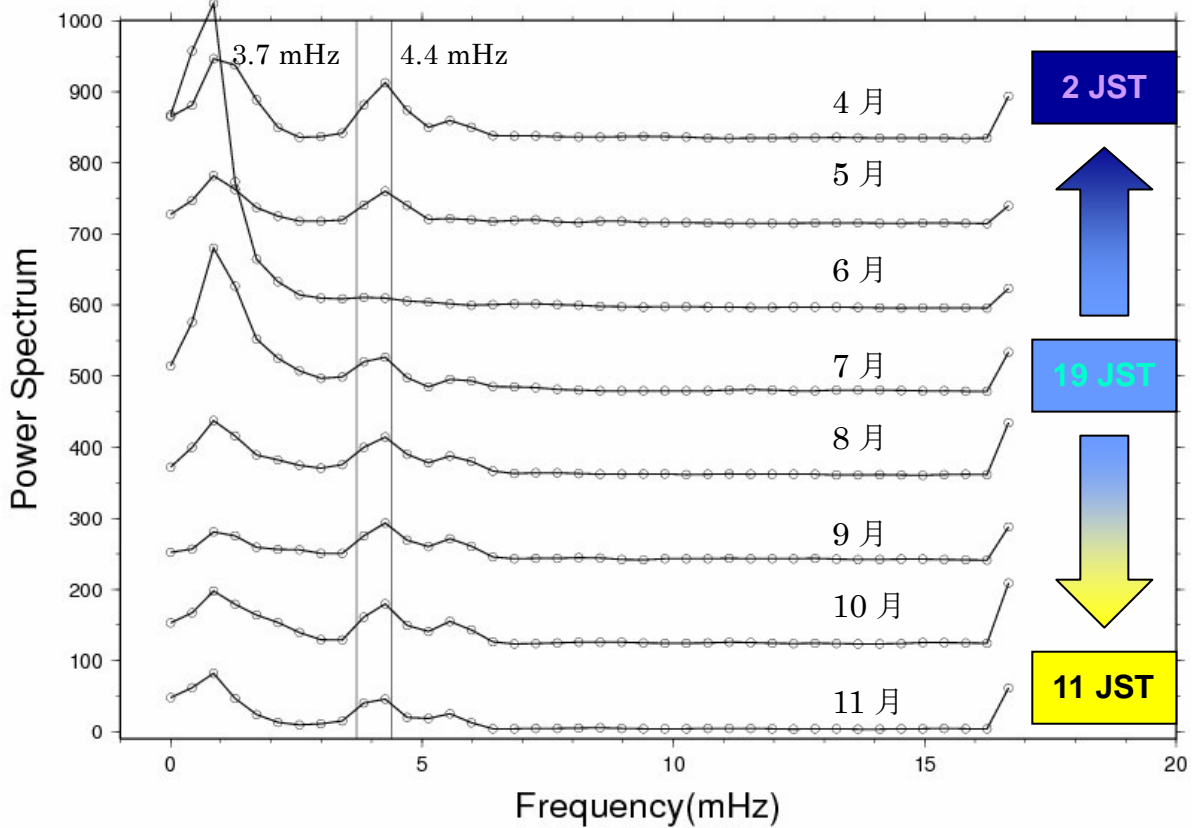
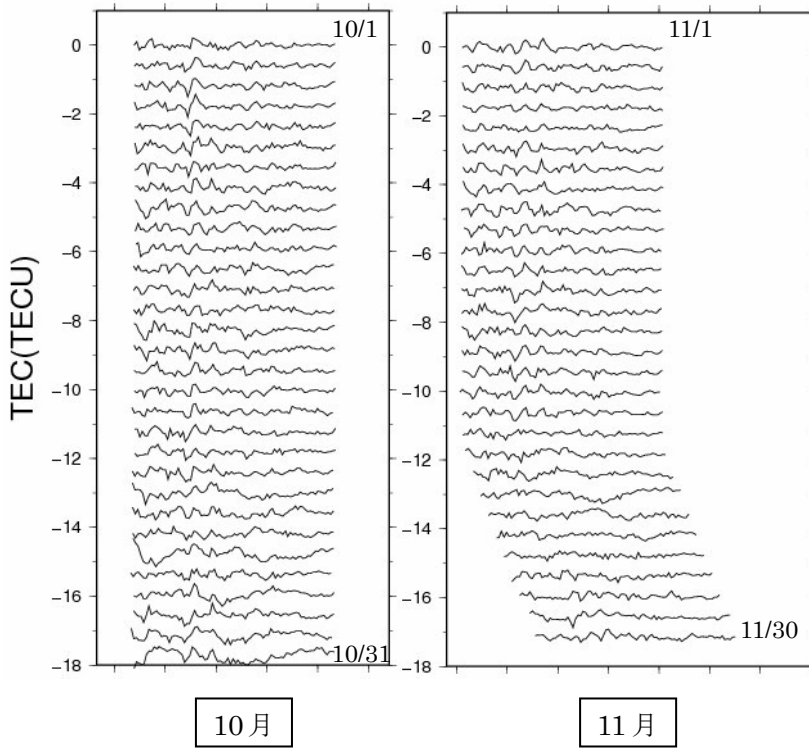


図 3-5d 観測した TEC データをスペクトル解析し、一ヶ月分スタックした月ごとの結果と大体の観測時間帯
 4月に最も大きなピークが 4.4 mHz のところ (右側の灰色の線) に見える。(6月はデータ数が少ないため大きなピークが見えない)

3-6 海洋上空における季節変化

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 (ここでの毎日の TEC データは GPS 衛星が地平線に沈む直前 40 分間のもの)。

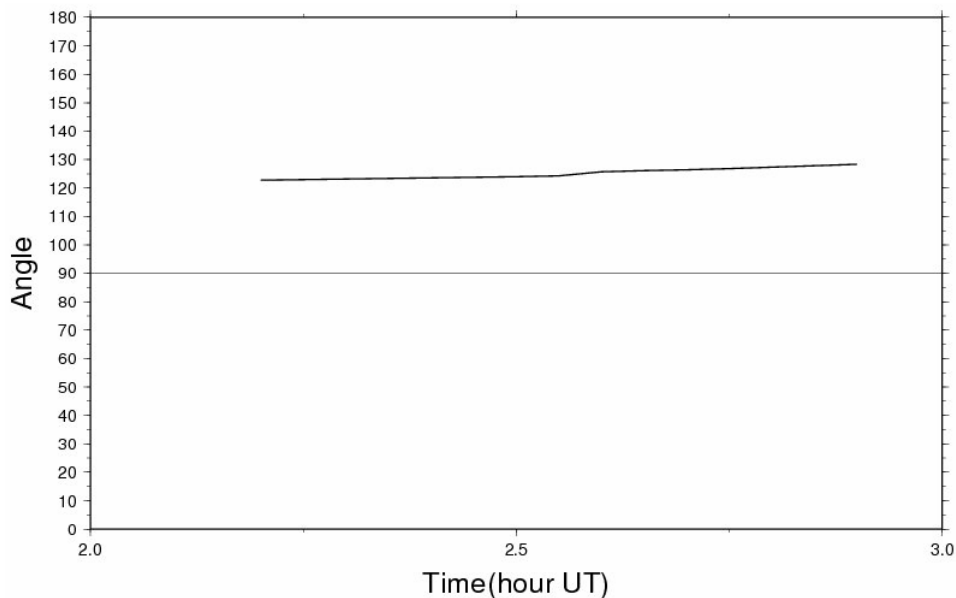
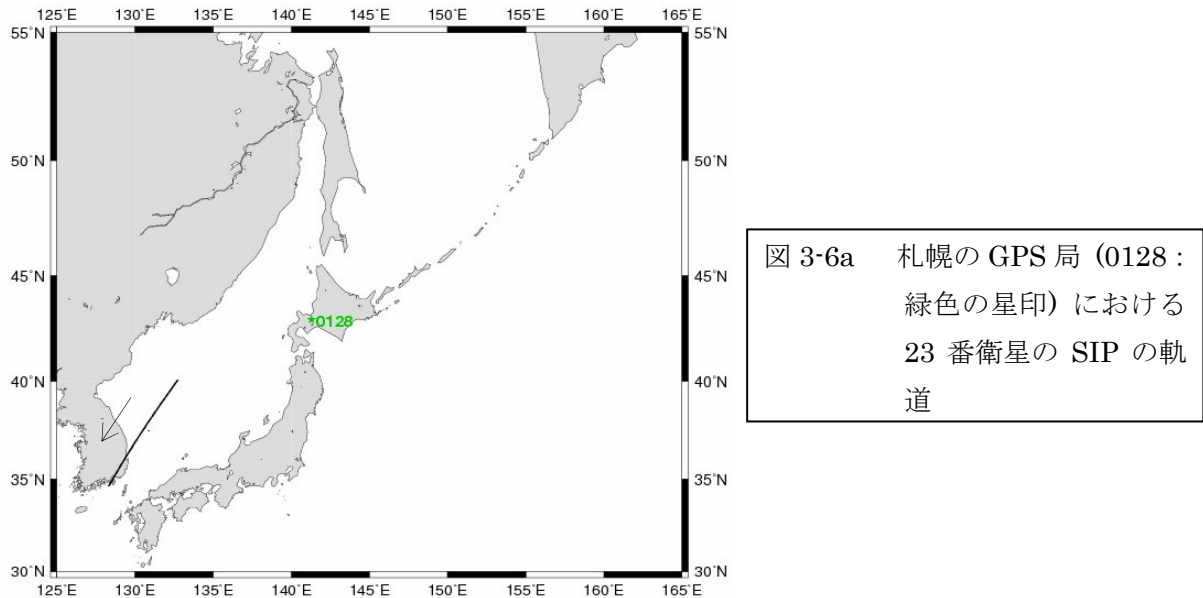


図 3-6b 観測した時の LOS と地磁気とのなす角度の時系列

90 度からは大きくずれている。(ただし、この図は 2008/11/1 のデータでありこの日以外は観測する時間帯がずれているが、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)

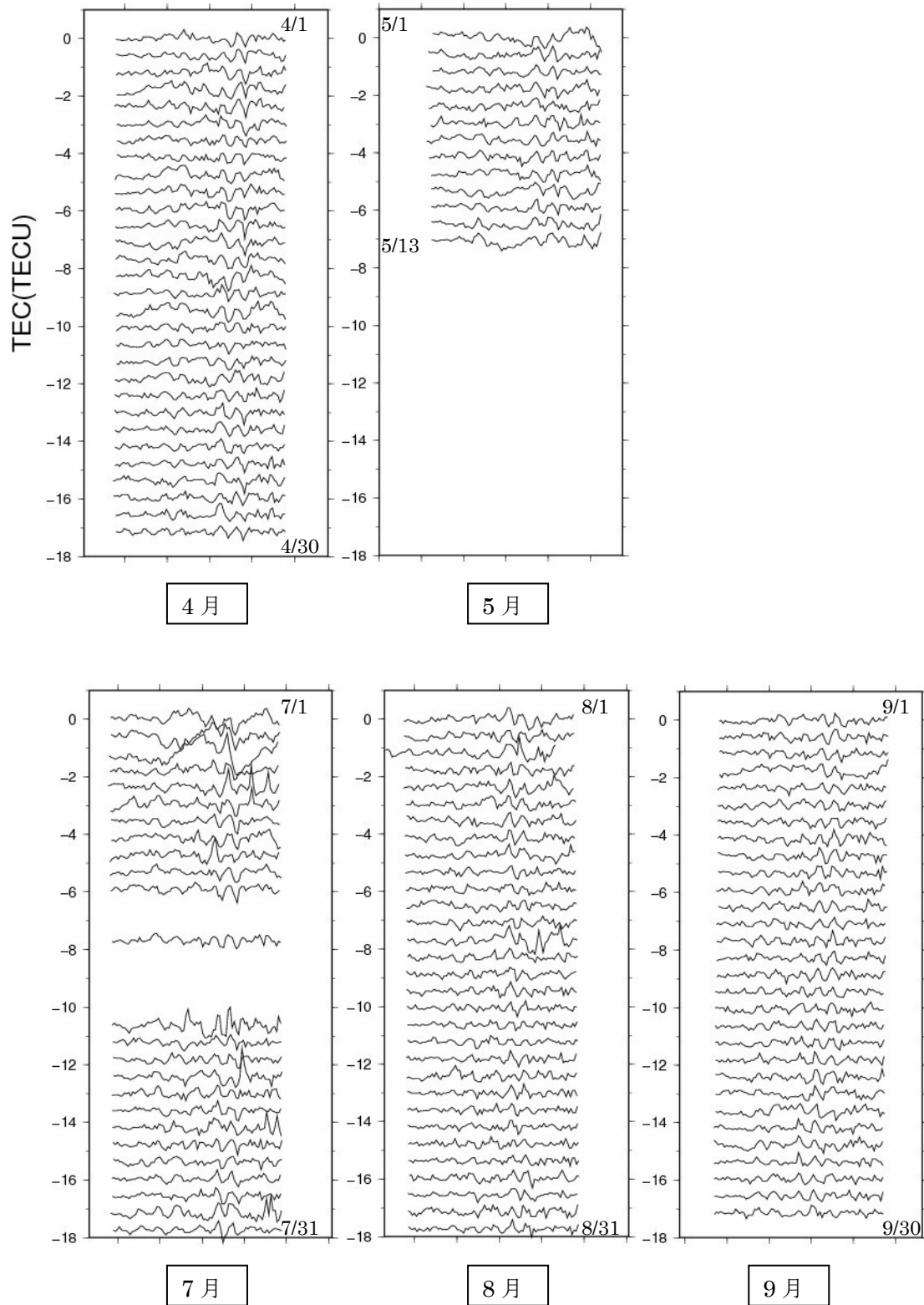


図 3-6c ペクトル解析に用いた 2008/4~11 の TEC の時系列

(ただし 6 月はなし、次ページに 10,11 月分掲載)

振幅が異なるが位相が揃って見える箇所がある。(多項式近似で長周期成分は取り除いている)(横軸は 1 目盛 10 分)(5~7 月は MSTID がでる時間帯の TEC のため、スペクトル解析に影響が出る日のものは取り除いた)

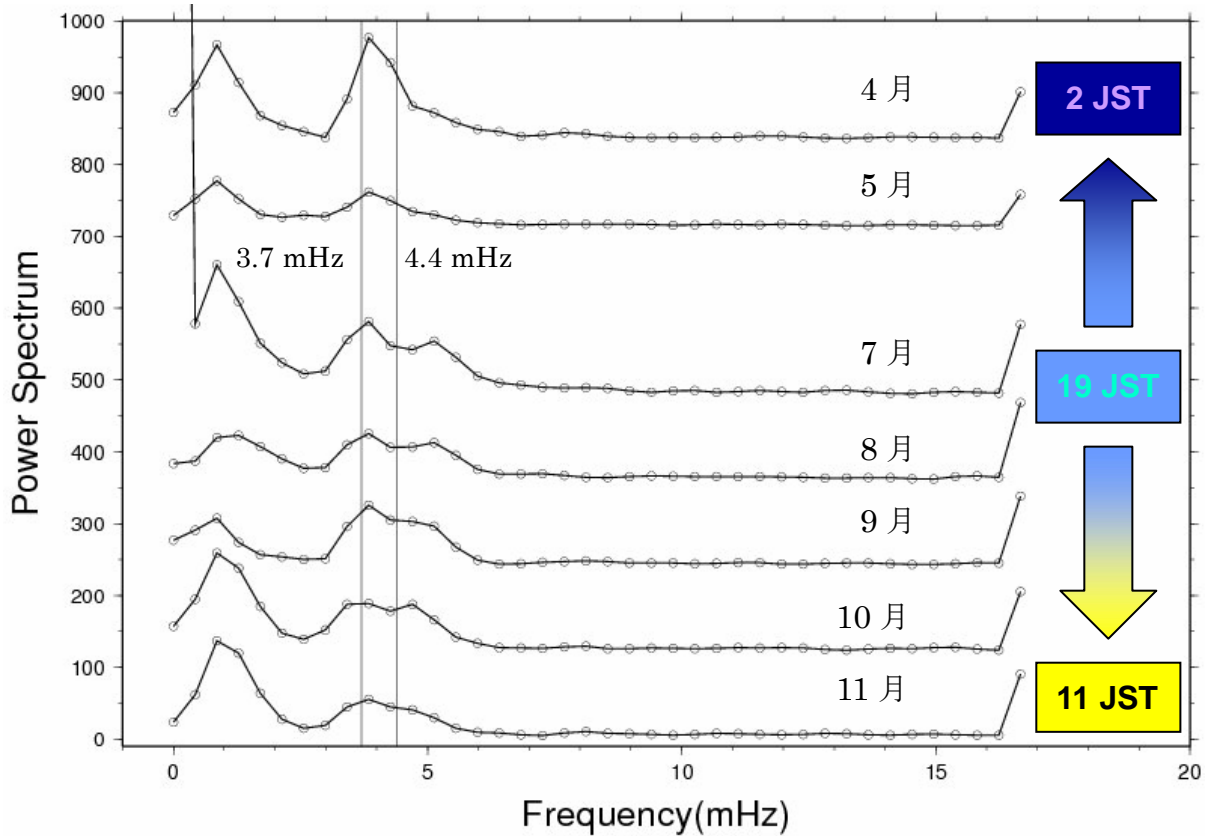
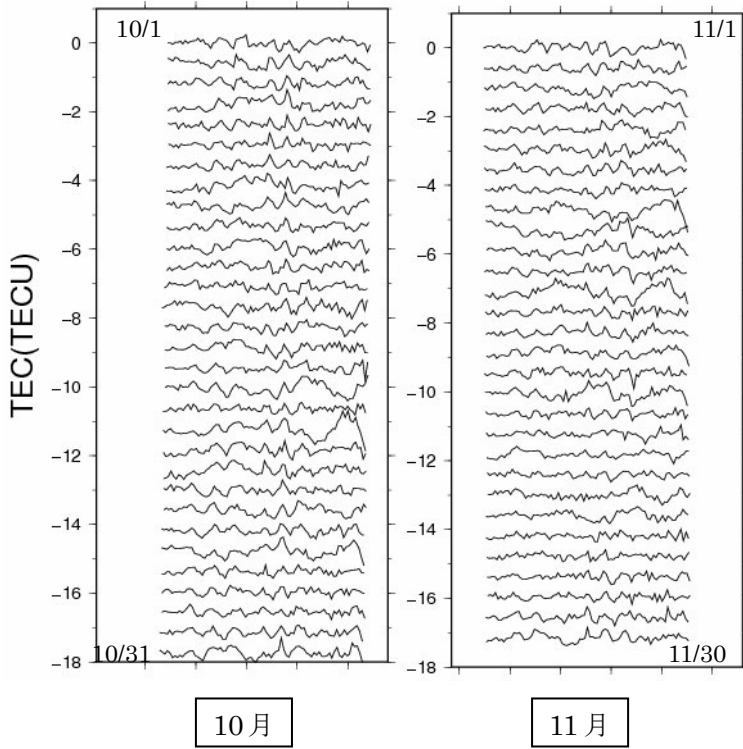


図 3-6d 観測した TEC データをスペクトル解析し、一ヶ月分スタックした月ごとの結果と大体の観測時間帯
 4月に最も大きなピークが 3.7 mHz のところ (左側の灰色の線) に見える。(5月はデータ数が少ないため大きなピークが見えない)

4 考察

観測・解析結果より、陸域・海域に関わらず TEC 振動には oS_{29} (3.7 mHz)・ oS_{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の部分を見ている可能性が高い。しかし Nishida et al. (2000) によると、地球自由振動では oS_{29} (3.7 mHz) のピークが最も大きくなるはずだが、例えば図 3-1c など oS_{37} (4.4 mHz) 側の方に大きなピークになっている。どのような条件でどちらに大きなピークが出るかは大気の状態による可能性が高いが、詳細は不明である。そもそも 40 分のデータ長では 3.7 mHz と 4.4 mHz の分離そのものが困難であるのかもしれない。また図 3-1c や図 3-2c など 5~6 mHz にもう一つのピークが見られる場合があり、従来知られていない共鳴周期の存在を示唆する。この共鳴周波数は Nishida et al. (2000) では指摘されていないが、Kanamori and Mori (1992) ではピナツボ火山の噴火後に 5~6 mHz の成分が地震計で記録されており、より高次の大気の固有振動周波数である可能性が高い。

LOS と地磁気のなす角との関係

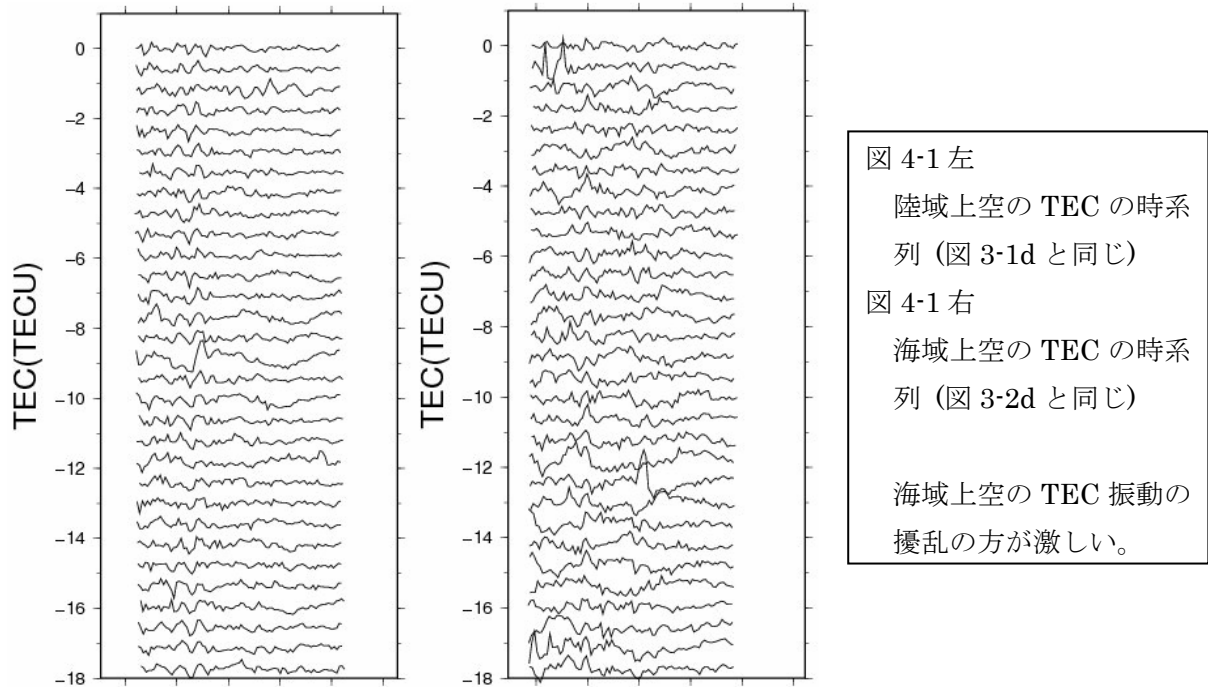
F 層の高度になると、電子の運動はローレンツ力の影響で地磁気の方に拘束されるため、振動の波面は地磁気に直交すると考えられる。一方振動が D 層や E 層などの比較的低い高度で起こっているなら、濃い中性大気のドラッグによって電子も振動するため波面と地磁気は必ずしも直交しないだろう。本研究の結果、図 3-2b や図 3-4b のように両者のなす角が 90 度から大きくずれている場合でも大気固有振動の周波数にピークが見られることがわかった。これは電子の振動が、電子密度が最大である F 層ではなく、中性大気によるドラッグの影響が強い低高度で起こっている可能性を示唆する。

季節による違い

今回の結果では、3-5 及び 3-6 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るため、17 UT (2 JST) の時間帯に最も励起されるという可能性もある。夏ではない深夜の時間帯であれば MSTID や太陽の紫外線による影響も少なく、うまく固有周期の振動を検出できるという可能性もあるが、この違いを解明するには長期間を通しての季節ごとのデータが必要となる。今後の研究では、おもな励起源が夏の大陸にあるのか (Nishida et al., 2000)、冬の海にあるのか (Rhie and Romanowicz, 2004) を決めることができるようなデータ解析手法を吟味する必要があるだろう。

陸域と海域上空での違い

陸域と海域上空それぞれのスペクトル解析の結果では、大気と固体地球共通の固有振動数である $0S_{29}$ (3.7 mHz)・ $0S_{37}$ (4.4 mHz) 近傍に明らかなピークが見られ、その振幅に陸域と海域で大きな差異はない。しかしスペクトル解析に用いた陸域と海域上空の TEC 振動の時系列を比べて見てみると（例えば下図 4-1）、海域上空の 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。



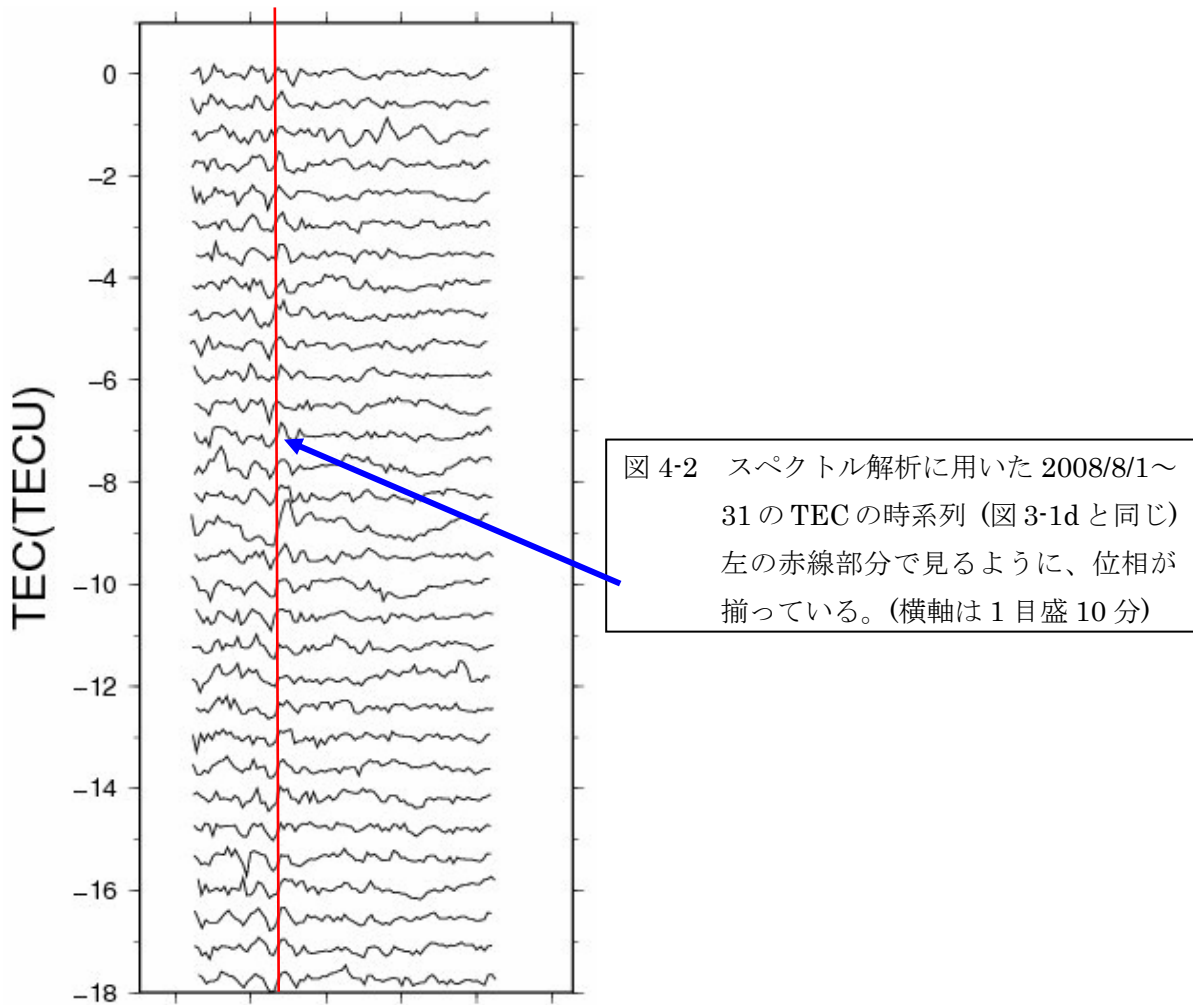
これは海域上空の TEC には固有周期以外の様々な周期の振動が伝わっていると考えられる。この結果の説明として、海洋の擾乱（波浪）が地球自由振動の励起源であると仮定した以下のような大気振動の伝搬が考えられる。

1. 海洋の擾乱は上空の大気 (TEC) に固有周期を含む様々な周期の振動を与える。
2. この後この振動が大気または固体地球を伝搬して陸域上空の大気 (TEC) を振動させる。
3. しかし大気の固有周期以外の振動は減衰してしまい陸域上空の TEC 振動には固有周期のみがきれいに残る。

このように海洋の擾乱が励起源とすると、海域上空の TEC 振動の擾乱が激しく、陸域上空は穏やかであることが説明できるかもしれない。しかし今回は陸域の観測位置も海からさほど離れておらず、海域観測位置も大陸近傍の日本海上空であるため、結論づけるにはデータが不十分である。また偶然の結果になった可能性もある。従って今後の解析では、陸域は大陸の中央で、海域は大洋の中央で得られたデータを用いる必要がある。よって地球自由振動の励起源が冬の海であるか夏の陸地であるかは今回の結果からは判断できない。

TEC振動の位相の一致

図 3-[1-6]d (例えば下図 4-2) 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きに同じ位相の 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討だが、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。仮に空間に固定されている定常波の腹の一つを見ているのだとしても、その腹での振幅の値は日ごとに正と負どちらに変化しても問題ないはずである。しかし図 3-[1-6]d を見ると、定常波の腹を見ていると考えられる部分はほぼすべて、毎日同一符号の変化であるのがわかる。GPS 衛星の軌道周期と大気の定常波の周期がうまく一致しているからという可能性もあるが、その原因は今後の研究課題のひとつである。



5 結果・課題

当研究から得られた結果によると、電離圏の TEC の振動をスペクトル解析することで oS_{29} (3.7 mHz)・ oS_{37} (4.4 mHz) に明らかなピークが見られた。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。

今後は、スペクトル解析の結果が、季節・時間による違い・陸域・海域の違い・LOS と地磁気のなす角度による違い、などによってどのように変化するか、そして 5~6 mHz の未知のピークがどのような条件でできるのかなど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。とく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、そろ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。

6 謝辞

当研究を実行するにあたり、多くの方々にご指導を頂きました。特に日置幸介教授には、面白いテーマの紹介から、貴重な時間を割いて研究の参考文献紹介、プログラムの作成など様々なアドバイスを頂き、誠に感謝しております。そして、同研究室の先輩方にも PC の設定やソフト・機器の使い方からプログラムの助言などを頂きました、ありがとうございました。また、GPS のデータを提供して下さった国土地理院のスタッフの方々にも感謝しております。

7 参考文献

- Beutler, G., H. Bock, E. Brockmann, R. Dach, P. Fridez, W. Gurtner, U. Hugentobler, D. Ineichen, J. Johnson, M. Meindl, L. Mervart, M. Rothacher, S. Schaer, T. Springer, R. Weber、2001、Bernese GPS Software Version 4.2、Astronomical Institute University of Berne.
- 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、浅田敏、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
- 小倉義光、1999、一般気象学【第2版】、東京大学出版会
- 大久保修平 編、2004、地球が丸いってほんとうですか？ 測地学者に50の質問、朝日新聞社
- 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、大気のでっぺん50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ゆれる？、パリテイ、vol.14、56 - 59
- 辻宏道、1998、GPS 気象学 第1章 GPS の原理 気象研究ノート第192号、日本気象学会
- 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/>】
- 宇宙測地学研究室 HP 北海道大学・理・自然史科学専攻、古屋智秋（卒論）
【http://www.ep.sci.hokudai.ac.jp/~geodesy/pdf/furuya_thesis.pdf】