

地表面の変位による
電離層擾乱の研究
～電離層を伝わる地震波～

佐藤 真悠

**Perturbations in Ionospheric layer
by Ground movement**

Shinyu Sato

宇宙測地学研究室

2005/01/28

要旨

現在、GPS (Global Position System) など様々な観測方法を用いて、電離層内の電子数やその変化を観測することができる。最近の研究では、地表面の変位が、電離層の電子密度に変化をもたらしていることが観測されている。地表面の変位を引き起こす主な要因に、地震、火山の噴火、津波などがある。地表面で発生した変位は、大気中に 2 種類の波を励起する。それは、音波と重力波である。この 2 つの波が、電離層に到達して伝播することで、電子密度に影響を与え、それが空間を移動していくのである。地震や津波によって引き起こされた地表面での振幅は非常に小さいものであるが、その振幅は電離層に到達するまでの間に、その振幅は増幅され、観測可能な大きさになる。

電離層の擾乱を調べるのにも、様々な方法がある。GPS ネットワークを駆使した総電子量を計測する方法。地面にある局から電波を上方に送信し、その反射で調べるドップラーサウンディング法などである。これまで地震のレイリー波による擾乱の様子や、津波によって発生させられる重力波、浅い地面下での大規模な爆発による電子密度の変化などによる電離層擾乱が観測されている。

本研究では、2003 年 9 月 26 日に起きた十勝沖地震 2003 (M8.0) に伴う地殻変動が励起した電離層の擾乱を観測した。その際、日本の稠密な GPS ネットワークを使用した。その結果、精密な走時ダイアグラムを作成することに成功し、電離層擾乱の正確な伝播速度を決定することができた。また、2004 年 12 月 26 日にスマトラ島沖で発生した地震後の電離層の状態の観測も行い、地震の規模による電離層擾乱の大きさの比較も行った。

目次

1 : イントロダクション	1~18
2 : GPS 衛星による電離層の擾乱の観測方法	19~26
2-1 TEC の計算	19
2-2 衛星の軌道	21
2-3 SIP (Sub-Ionospheric Point)	25
3 : 結果	27~33
3-1 走時ダイアグラム	27
3-2 伝播の様子とスマトラ島沖地震の Data	31
4 : 考察	34~35
参考文献	36
謝辞	

1 イントロダクション

地球を取り巻く大気の中に、電離層と呼ばれる層が存在する。上空約 80 km ~ 500 km の高度に存在し、太陽光線や X 線などの宇宙光線によって、大気を構成している分子・原子がイオン化され、電離している層のことである。現在、GPS (Global Position System) など様々な観測方法を用いて、この電離層内の電子数やその密度が変化していることを観測することができる。太陽の影響や夜と昼のイオン化の割合などにおける一日の長周期の変化はもちろんだが、最近の研究では、地表面に生じた変動が、電離層の電子密度やその状態に変化をもたらしていることが観測されている。電離層に擾乱を与える地表面の変動としては、地震時の地殻変動、地震に伴う表面波、火山の噴火、津波などが考えられる。例えば地震に伴う地殻変動で地表面に変位が生じた際、大気中へ 2 つの波が励起される。それは、音波と重力波である。この 2 つの波が、電離層に達することで、電子密度に影響を与え、擾乱を引き起こしているのである。地震や津波によって引き起こされた地表面での振幅は非常に小さいものである。しかし、その変位が伝播する波となり、電離層に到達するまでの間に、その振幅は約 10^5 倍に増幅される。これは運動エネルギー保存則による。高度が上がるにつれて大気の密度が低くなるので、エネルギーを保存するために伝播する音波の振幅が大きくなるのである。例えば、地表面で最大振幅が 1mm あまりだった波があったとする。その波も上空 150km 地点に到達するときには、その振幅は約 100m にまで増幅されることが電離層観測から得られている。そのため電離層の擾乱の様子を調べることで、非常に小さい地上の変位も知ることができるのである。この論文では、2003 年 9 月 26 日に起きた十勝沖地震 2003 によって引き起こされた日本の上空の電離層擾乱の様子を観測した結果を示す。さらに従来 of 電離層擾乱の観測例を示し、その結果と本研究結果を比較することで今後の研究の展望を示す。

地上での変位が大気を伝播し、電離層まで届くメカニズムを知るために、大気中の波の状態を表す式を示す。これらの研究は、Hines(1960)に展開されており、Artru et al(2004)などでも簡潔に示されている。

等温大気の静水状態の大気は、下記の方程式を満たす。

$$\text{連続の式} : \frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \rho = -\rho \nabla \cdot \mathbf{v}$$

$$\text{運動方程式} : \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} = \mathbf{g} - \frac{1}{\rho} \nabla p \quad (1 \cdot 1)$$

$$\text{熱力学の式} : \frac{\partial p}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla p = C_s^2 \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \rho \right)$$

ρ : 密度 p : 気圧 \mathbf{v} : 中性ガス速度 \mathbf{g} : 重力加速度 C_s : 音速

平衡状態において、 $\mathbf{v}_0 = 0$ では、 ρ_0 、 p_0 は $\exp(z/2H)$ に比例する。ここで、

$$H = C_s^2 / \gamma g \quad (1 \cdot 2)$$

γ : 定積比熱と定圧比熱の比

は密度のスケールハイトである。また、ここで、 \mathbf{v} 、 ρ_1 、 p_1 を、微小振動かつ、 y によらないとすると、これらの方程式から調和振動解を得ることができ、 ρ_1 / ρ_0 、 p_1 / p_0 、 \mathbf{v} が

$$\exp\{i(\omega t - k_x x - k_z z)\} \quad (1 \cdot 3)$$

に比例することが示される。そして、

$$k_z' = k_z + i/2H \quad (1 \cdot 4)$$

を定義すると、以下の関係を導くことができる。

$$\left(\omega^2 + \omega_a^2\right) + \left(\frac{\omega_g^2}{\omega^2} - 1\right) k_x^2 C_s^2 - k_z^2 C_s^2 = 0 \quad (1.5)$$

ただし、 $\omega_a = \gamma g / 2C_s$

$$\omega_g = \sqrt{\gamma - 1} \frac{g}{C_s} \quad (1.6)$$

ω_a は音波のカットオフ振動数で、これ以上低い振動数の音波は伝播しない。 ω_g は Brunt-Vaisala 振動数で、これ以上高い周波数の重力波は伝播しない。(Fig1-1)。

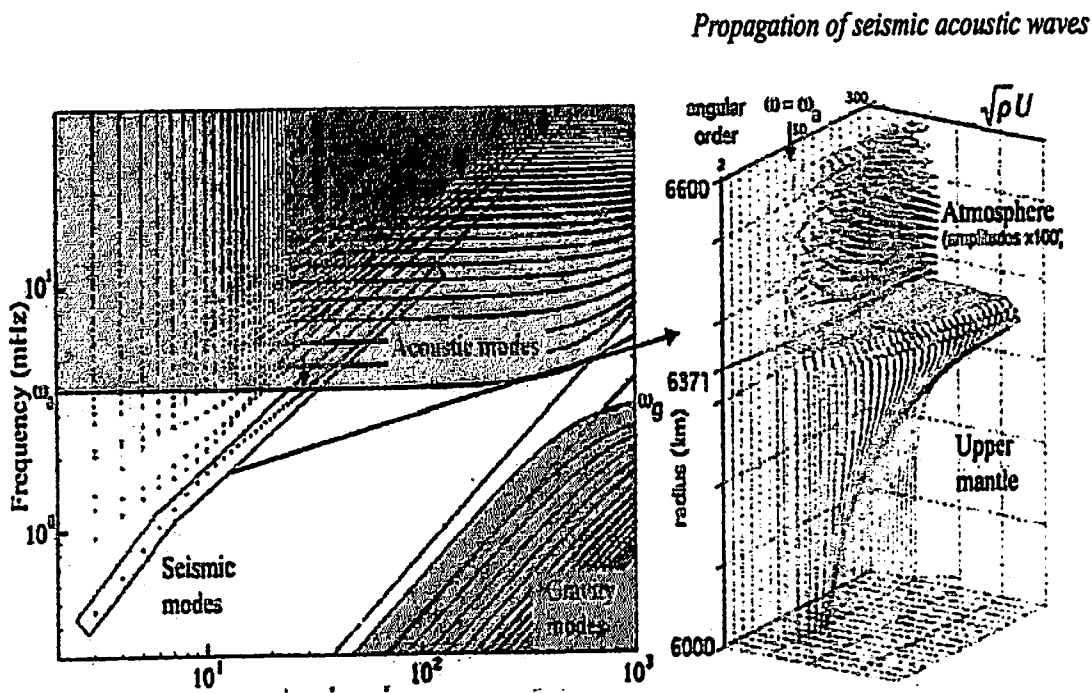


Fig1-1 左は周波数と角度の関数による音波・重力波の範囲を表している。振動数、 ω_a より高いところでは音波となり、 ω_g より低いところでは重力波となる。中間は空白域である。ここで与えられている ω_a は 368mHz である。右の図は左図の次数が 2~200 における基本固体モデルのエネルギー関数を表している。

Ducic et al (2003) は、2002 年 11 月 3 日にアラスカで起きたデナリ地震 (M7.9) について、そのレイリー波によって励起されたと考えられる電離層の擾乱の、南カリフォルニアの稠密 GPS 網による観測例を報告した。その際用いられた観測方法は GPS の 2 周波の位相差を用いた TEC (Total Electron Content) の測定である (2 参照)。デナリ地震について、TEC の時間変化をグラフ化したものが Fig1・2 である。

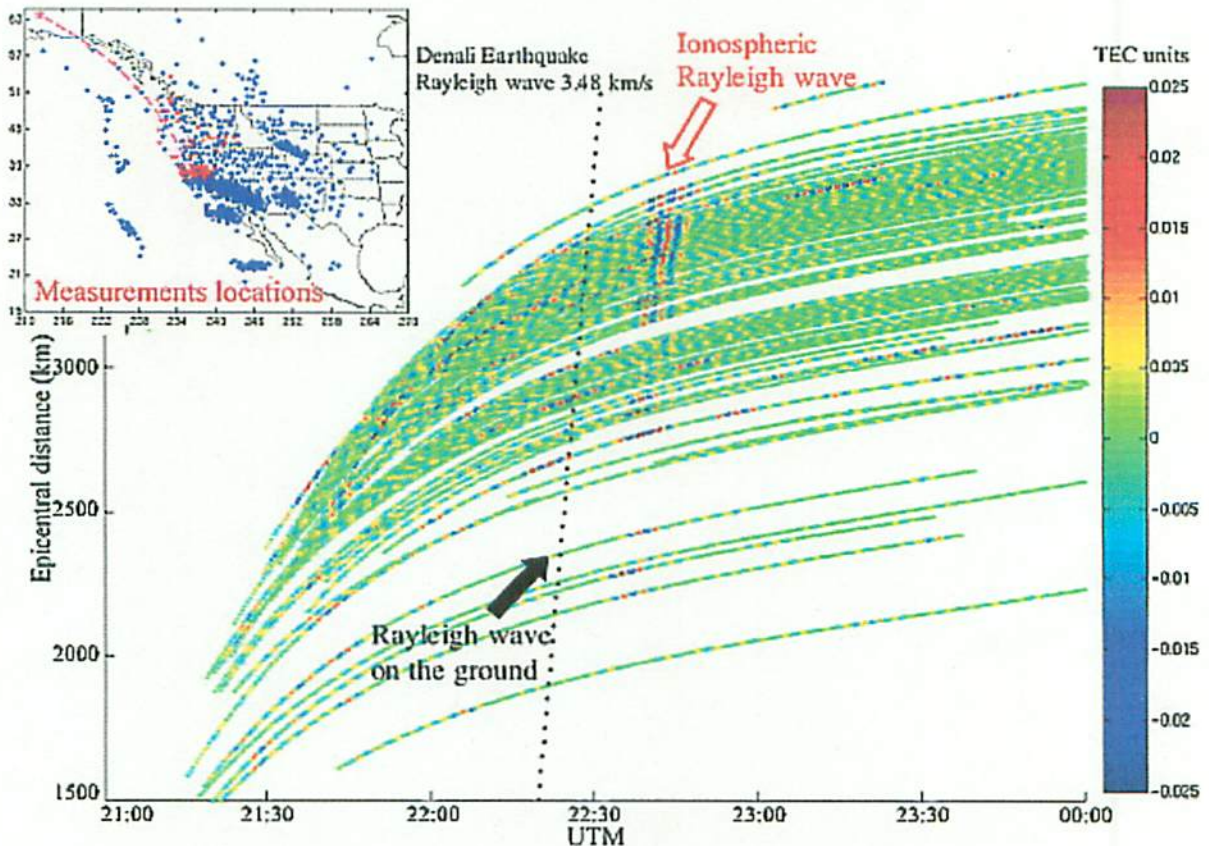


Fig1・2 横軸に時間、縦軸に震央からの距離、色で TEC の変化を表したグラフ。点線はレイリー波の伝播の様子を表している。周期 150s から 350s の信号を取り出すバンドパスフィルターを用いている。左上の図は、SIP (Sub-Ionospheric Point) の分布図 (2・3 参照)。TEC の単位として用いられた TEC Unit は視線方向に積分した電子数が 1m^2 あたり 10^{16} 個あることに相当する。

わずかながら TEC の変化が震源からある速度を持って伝播する様子が見て取れる。このグラフから計算された TEC の擾乱の水平伝播速度は 3.5km/s となった。そして TEC 伝播の様子を地図上に投影したものが Fig1・3。このように地表面の変位による電離層擾乱の様子は観測されている。

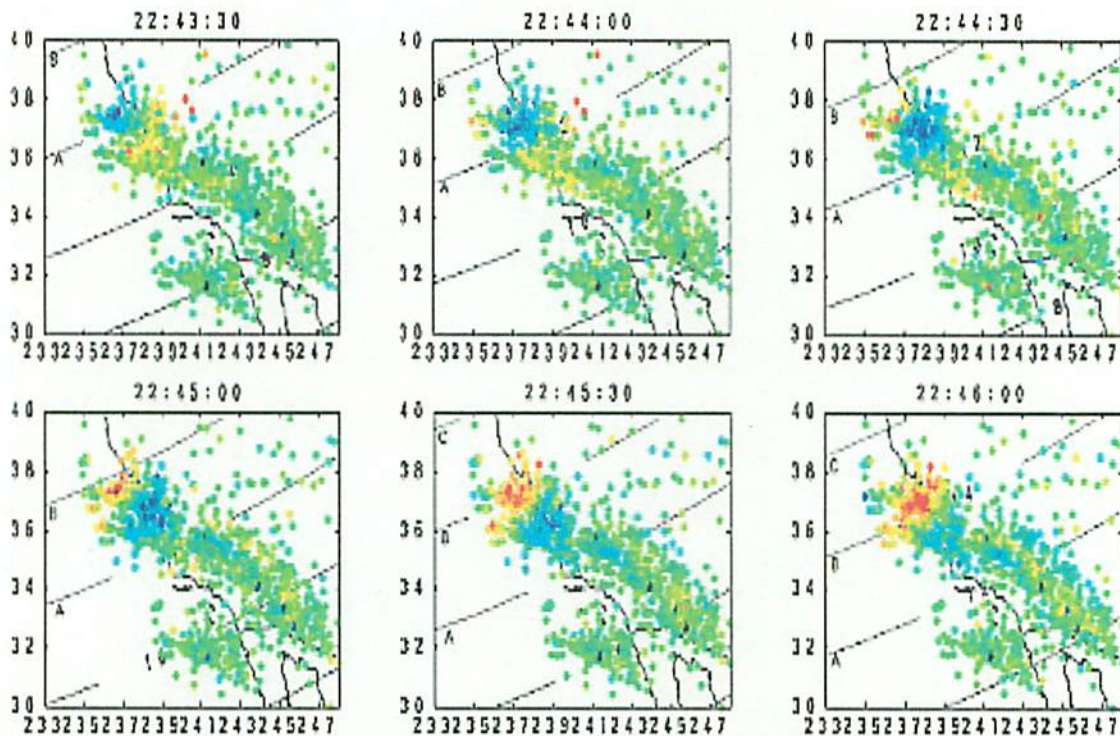


Fig1・3 電離層の擾乱を、30 秒毎に視線が電離層を突き抜ける点の地上投影点 (Sub-ionospheric Point,SIP) で、色の変化としてプロットし、TEC 擾乱の伝播の様子を示したもの。色のスケールは Fig1・2 と同じ。青い部分が南東に向けて伝播している様子が見て取れる

GPS 衛星によって観測された TEC の変化で興味深い例の一つを示す。Calais et al(1998)は、アメリカの Black Thunder 炭鉱の発破によって引き起こされた電離層の擾乱の様子を観察した。1996 年 8 月に 3 度、Black Thunder 炭鉱で火薬による人為的な爆発が行われたが、その炭鉱と GPS 受信機の位置を図示したものが Fig1・4、爆発の後、Bill・Murphy's Ranch・Casper のそれぞれの局で TEC を計算し、時系列をプロットしたものが Fig1・5 である。

WYOMING'96 Regional Deployment

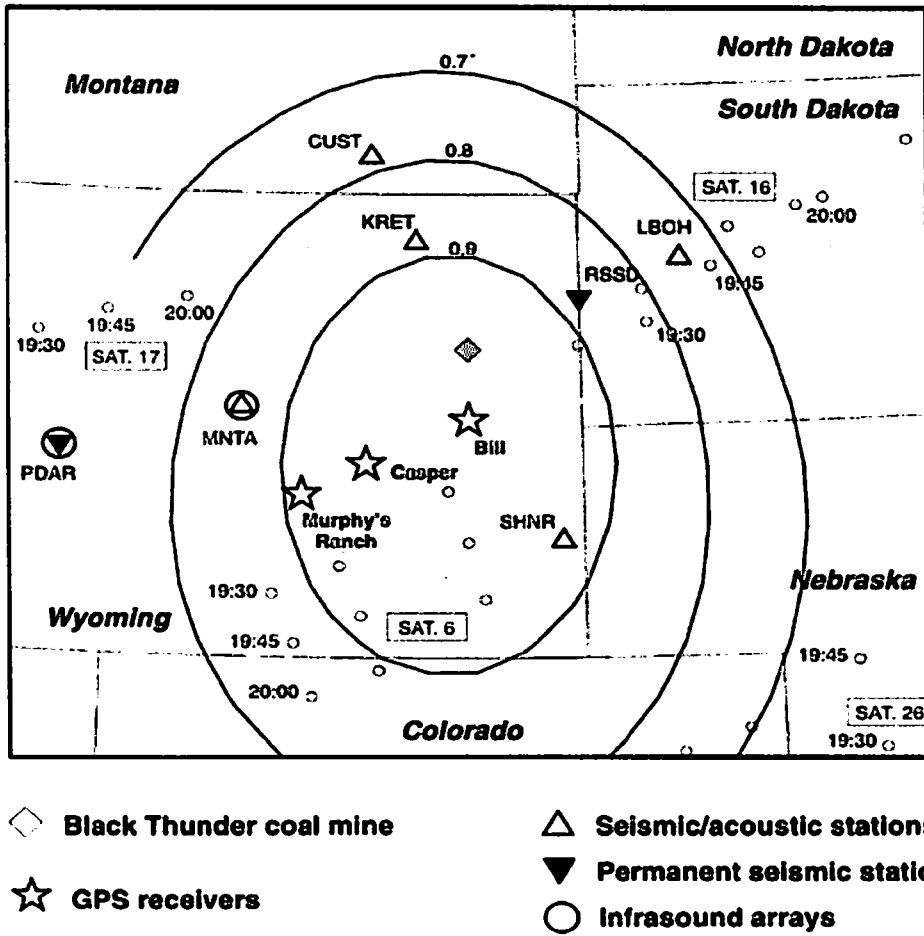


Fig1-4 Calais et al(1998)による。◇は Black-Thunder 炭鉱の位置。☆が GPS の受信局、△地震と音波の観測局、▼常在の地震局、○は SIP (Sub-ionospheric Point) を表している。

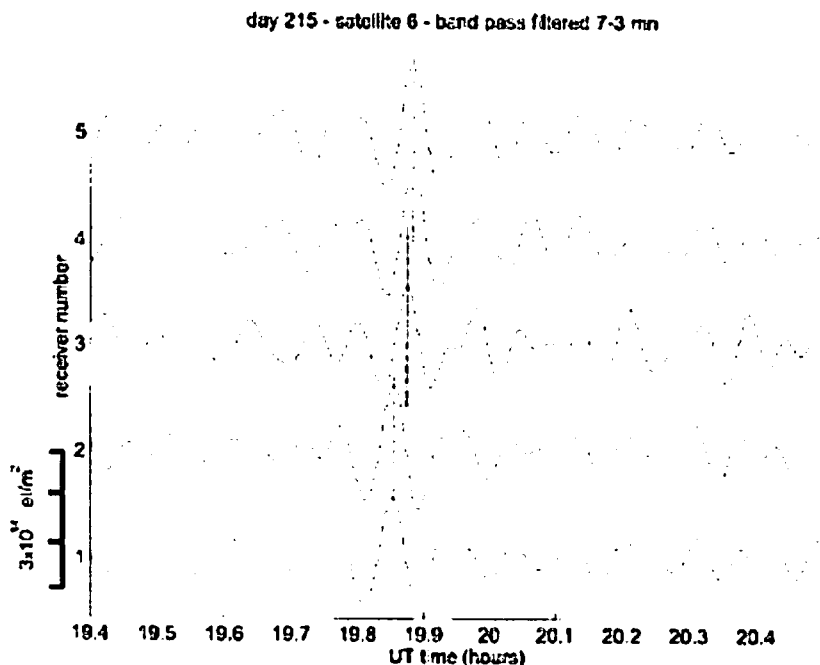
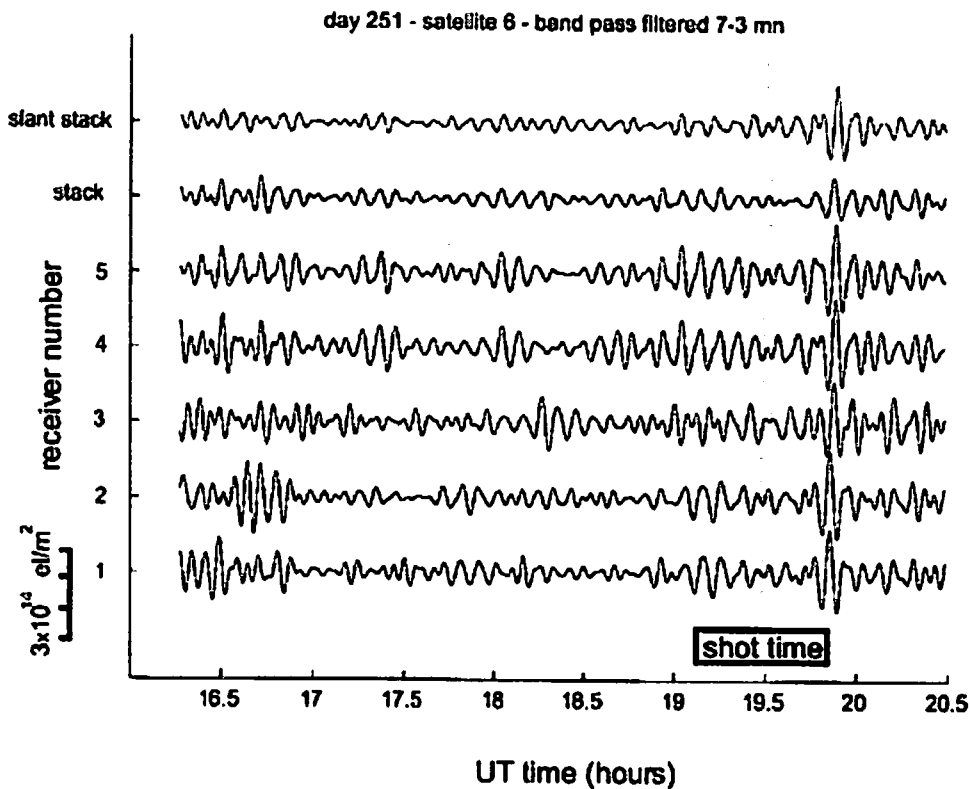


Fig1-5 Calais et al(1998)より。横軸は時間（爆発時刻が shot time として示されている）、縦軸は各受信機の位置関係を表しており、下から順に、炭鉱に近いところとなっている。上図の一番上で各局の波形を単純にスタックしたものと擾乱の到着時刻のずれを考慮してスタックした波形を示してある。下の図は上図の 20:00 付近を拡大したもの。衛星は 6 番を用いている。

Fig1-5を見ると、時刻 20:00 近辺で TEC が劇的に変化しているのを見て取ることができる。異なる受信局で振幅の最大が到達した時刻の差よりその水平方向の伝播速度を計算すると、約 1200m/s となった。地震時のマグニチュードに換算すると非常に小さい値にしかならないような爆発にも関わらず、電離層にその擾乱が現れたのは非常に興味深い。今回の爆発では、爆発の規模は小さいものの、非常に浅い部分で起きた現象であるため、地面の変位ではなく爆発が直接大気中の波動を励起して、電離層の擾乱を引き起こしたと考えられる。つまり、火山の噴火や、地下浅部での人工的な爆発も GPS ネットワークの技術で、TEC の擾乱が検出される可能性を示唆している。

また、この観測例で使用された 6 番以外の衛星や、他の爆発が起きた場所の北方にある受信機の組み合わせを見た場合、その変化の様子は、南側の GPS 局で見られた電離層の擾乱の様子と対称性を示さなかった。この非対称性は、地球の地磁気が電離層において、TEC の擾乱の発生と伝播に影響を与えていることを示唆する。

電離層における電子の速度を V_n とする。すると、磁力線方向の電子の移動速度 V_1 は、

$$V_1 = V_n \cos(\alpha) \quad (1 \cdot 7)$$

で表すことができる。このとき、 α は波の進行方向と地磁気の磁力線との角度である。Fig1-4 には、 $\cos(\alpha)$ の等高線が示してある。SIP (2-3 参照) が爆発地点より南の場合に TEC の変化が検出され、逆に、北にある場合では、その変化はほとんど見ることはできなかった。音波などが上空に伝播する際、その密度の変化によって、屈折を起こす。ほぼ垂直に上昇し始めた波が、徐々に水平方向に曲がっていくのである (Fig1-6)。SIP が北方にある場合、地球における地磁気の角度と音波の上方伝播の屈折の関係より、音波の伝播方向と、地磁気の磁力線が垂直に交わる点が必ず存在する。磁場の中を電子が移動する場合、以下のローレンツ力が働く。

$$\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (1 \cdot 8)$$

つまり、電子の速度が磁場に垂直なら、ローレンツ力は電子の進行方向と垂直になってしまう。そのポイントにおいて、電子はサイクロトロン状に螺旋運動を行い、それ以上波として伝播できなくなってしまう。よって、北半球においては、北へ伝播する地上からの音波は、GPS 衛星の TEC 観測技術では観測することができず、反対に南半球では南へ伝播する音波は観測することができないであろうと推測される。

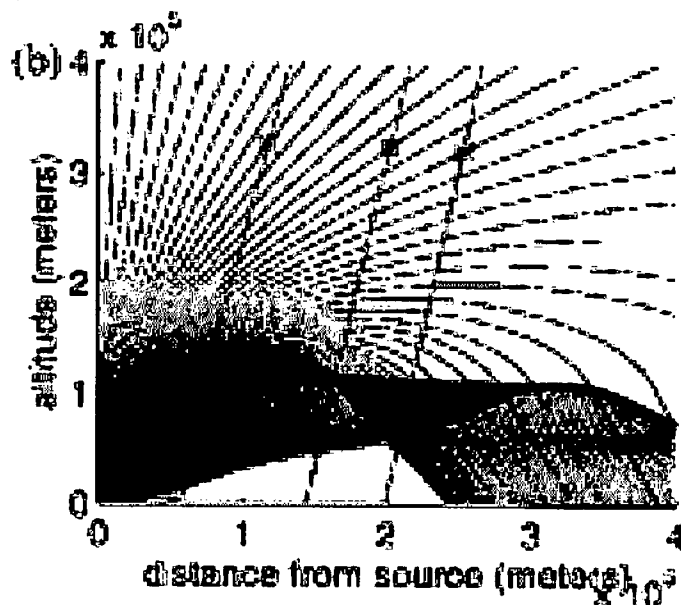


Fig1-6 Calais et al(1998)による、音波の波線追跡の結果。横軸が距離、縦軸が高度を表している

Artru et al(2004)は、地震で励起される表面波（レイリー波）と電離層擾乱の関係性を調べるために、フランス国内の短波による電離層のドップラーサウンディング（地上から発射された短波の電離層での反射波の周波数のずれから電離層下面の上下速度を観測する手法）ネットワークを用いた観測を 1999 年 9 月 20 日の台湾における Chi-Chi 地震をメインに様々な地震で行った。GPS を用いた TEC の検出では、 $M > 7.5$ の地震でしか観測できない TEC の擾乱も、 $M > 6.5$ の地震で調べることができる。ここで用いられたドップラーサウンディングネットワークは CEA (Commissariat a l'Energie Atomique) と呼ばれる。一つの電波送信機 FRC(Francourville)と、送信機から 50~80km はなれた 3 つの受信機 (LBD, BRN, BLC) からなり、2 つの異なる周波数 (3,849・4,624MHz) を使うことで、異なる高さの電離層の上下速度を測定できる。反射波のドップラーシフト (Δf) を計算することで、電離層の状態を知ることができる (Fig1-7)。電離層での上方伝達速度は以下のようにになる。

$$v = -\frac{\Delta f}{2F} \frac{c}{\cos\theta} \quad (1 \cdot 9)$$

c : 真空での光の速度 F : キャリアの周波数

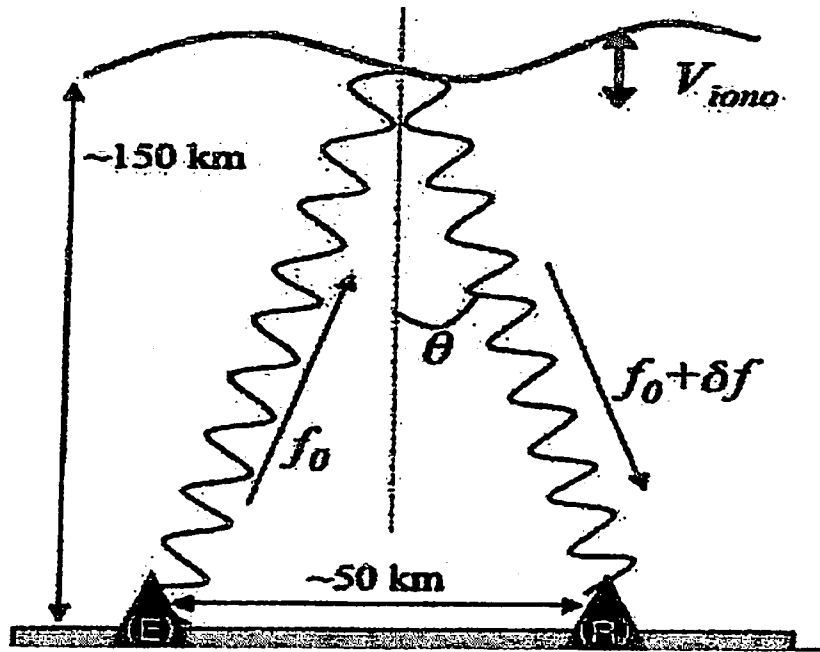


Fig1-7 Artru et al(2004)による電離層のドップラーサウンディングの原理。
(E) が送信局 (FRC) を、(R) が受信局の一つを表している。

ここで、 $1/\cos\theta$ は無視して考えると、2 つの異なる周波数の電波のドップラーシフトはそれぞれ次のような電離層の上下速度に相当する。

$39,3 \pm 0,5 \text{ m/s}$ (3,849MHz)

$32,7 \pm 0,4 \text{ m/s}$ (4,624MHz)

このドップラーサウンディングの技術を用いると、地震によって生じる電離層の擾乱の水平方向伝播と、地震計で直接見る地表の表面波の伝播を比較することができる。1999年8月20日のコスタリカ地震 (M6.9) のデータを用いて伝播の様子を調べた結果、まず、地上の表面波の伝播は震源に最も近い FRC-BRN のポイントで見つかった。電離層内の伝播速度は、震源と地震の到達時間の関係から計算でき、20~35s 周期の波で、3,3km/s となり、これは、地

上で伝播するレイリー波の伝達速度とほぼ等しい結果となった。このとき、ドップラーサウンディングの電波が反射される高度はイノグラムによって決定した。イノグラムとは、電離層の臨界反射周波数の高度分布を表すものである。さらにグラフにしたもので比べると、計算の結果とよく一致することが分る (Fig1・8)。

地震学の波形解析では、しばしばノーマルモードが用いられる。地震波を基本モードに分けてその伝播を計算した後に足し合わせることで、より正確な地震波の伝達や、地球内部構造の 1-D、3-D モデルを知ることができる。最近の研究では、固体地球に中立大気モデルを加えたもの等も計算されている。これらのモデルを用いることで、地震のメカニズムから、地震波形を合成することができる。そして、これらの地球モデルと、大気における音速、密度を用いて、固体地球と大気間のカップリングなどを考察する。

Fig1・9、1・10 は、フランスの地震観測波形とドップラー観測による電離層下面の上下速度を比較したものである。ノーマルモードを合成した波形と実際の波形はやや食い違っているが、3-D シミュレーションによる計算結果ではよりよい一致が見られ、そのグラフが Fig1・9 の一番下のグラフで示されている。これによって、実際の電離層の擾乱が地震波とともに伝播してきている様子が伺える。波形の復元には、現在計算時間の関係で、1-D シミュレーションを主に行っているが、将来は 3-D シミュレーション方法を行うことでより実際の波形に近い波形を合成できるだろう。

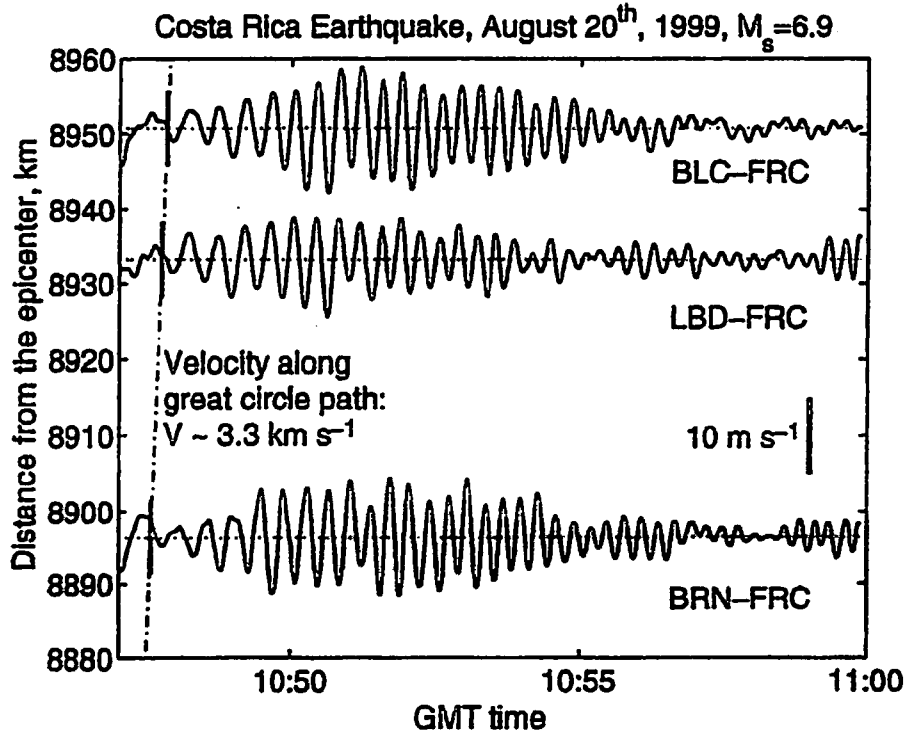


Fig1・8 Artru et al(2004)による、Costa Rica 地震の3つの局による電離層下面の上下速度の観測。横軸が時間を表している。

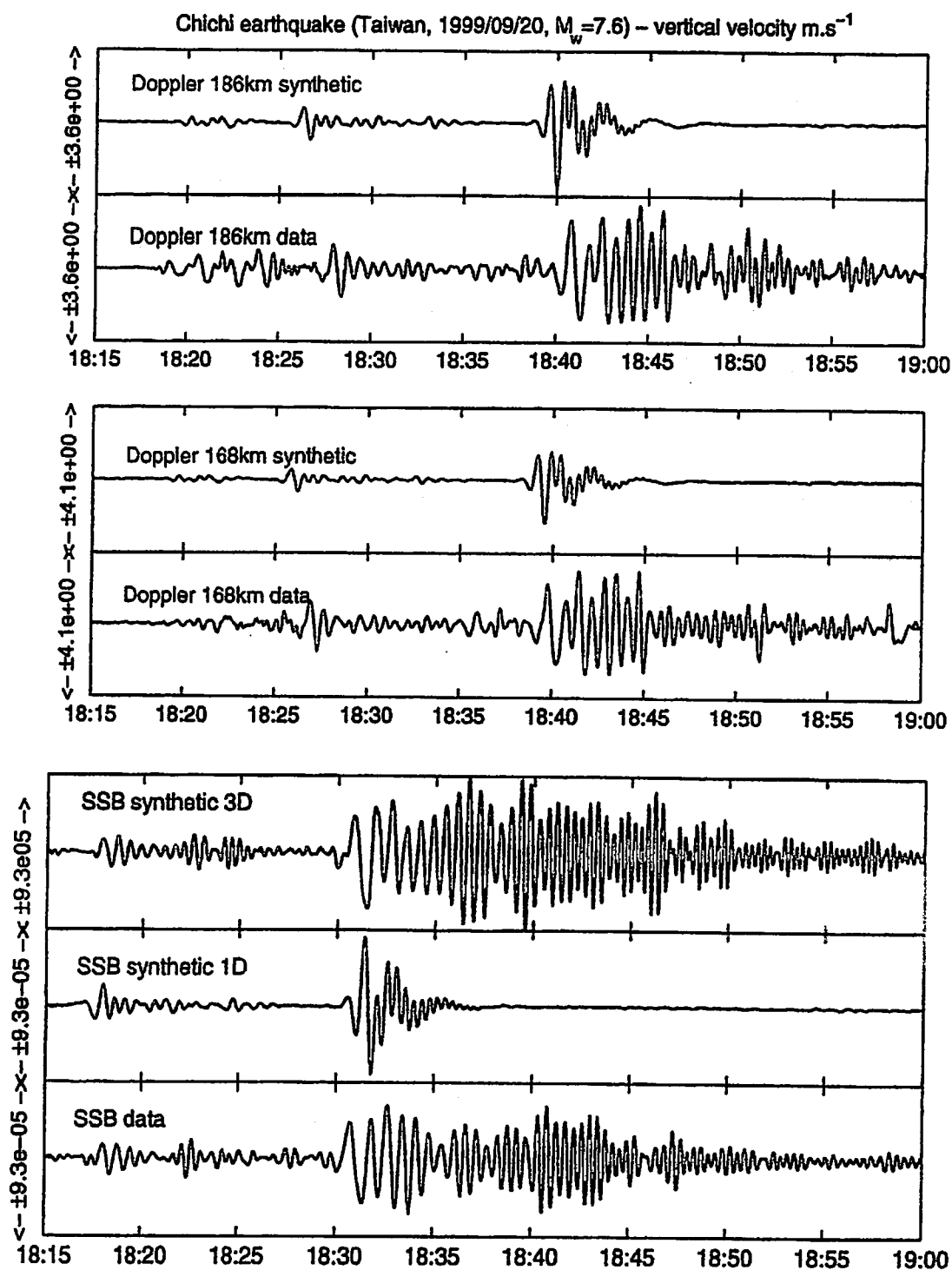


Fig1-9 Artru et al(2004)による、Chi-Chi地震 ($M7,6$) の1-50mHzの広地域地震波形。2つのドップラーサウンディング高度の168kmと186kmについて示したものである。上の2つの図において、下は実際のData。上はノーマルモードによって計算された値。下の図では、上から3Dモデル、1Dモデル、実際のDataを示す。

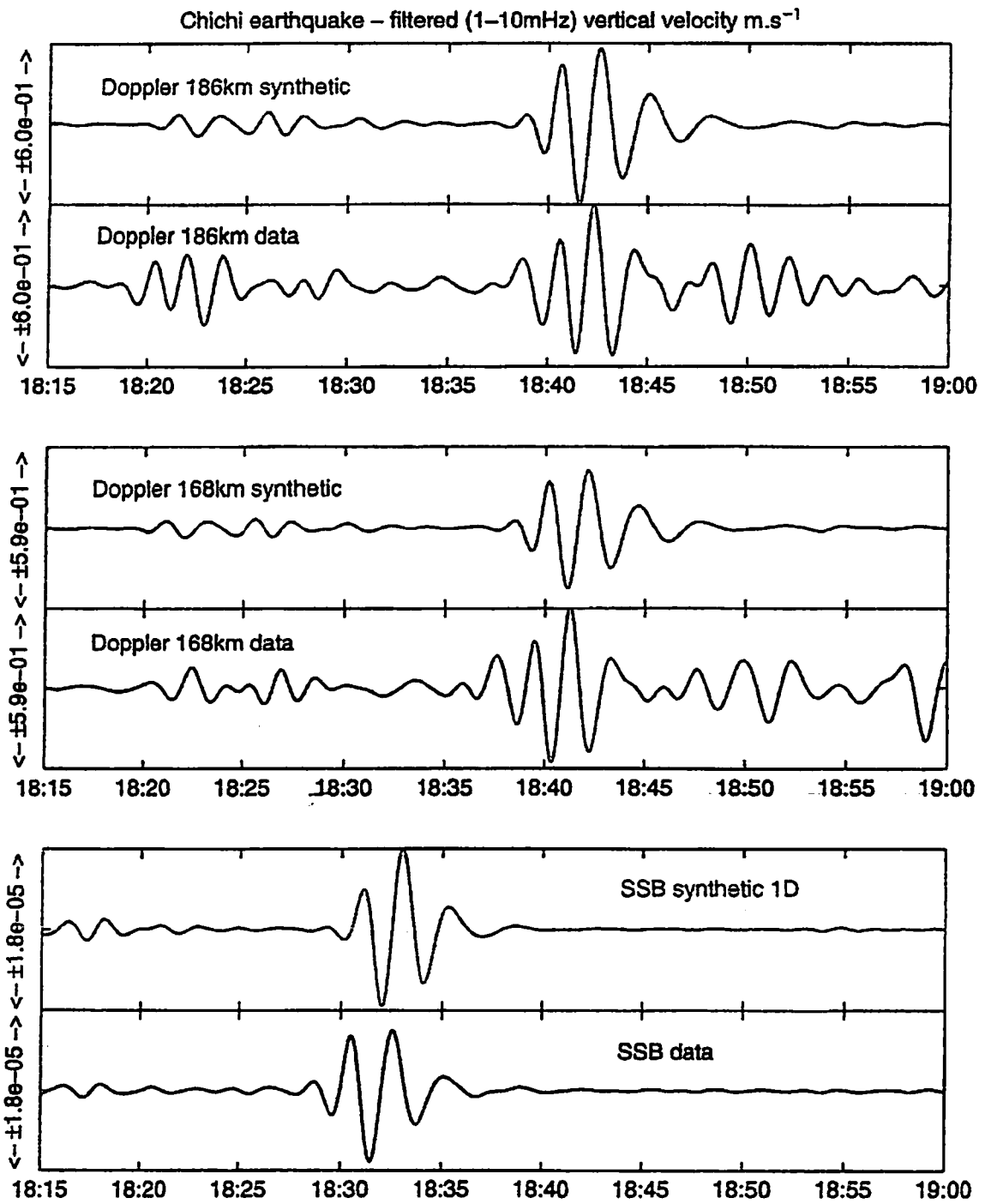


Fig1・10 Fig1・9と同様だが、長周期成分のみを取り出したもの。1~100mHzのバンドパスフィルターをFig1・9にかけた。

レイリー波以外の原因でも電離層の擾乱は引き起こされる。2001年6月23日に起こったペルー地震 (M8.2) によって発生した津波がもたらした電離層擾乱の観測結果が Artru et al(in press)によって報告されている。津波は、地震や地すべり、海底の爆発などで発生するが、200kmを超える長い波長と小さい振幅で、特徴付けられる。津波が重力波を引き起こすことは、Paltier&Hines(1976)に示唆された。津波によって生じた重力波は斜め上方に伝播していく。そして、運動エネルギー保存の法則にしたがって、振幅が拡大し、電離層に到達すると擾乱を引き起こすのである。従来海上での電離層観測の困難、津波の影響と他の影響を見分けることの困難さの双方が観測を難しいものとしていたが、近年さらに密になりつつある GPS ネットワークの出現によってこの問題は解消された。ペルー地震による津波による電離層擾乱は、日本の稠密 GPS ネットワークで観測された。ペルー地震による津波の規模は大変大きく、高さにして2~5mで、太平洋を渡り、日本の海岸でも観測できるほどであった。開けた海ではその振幅は1~2cmだったが、日本に到着した時点では10~40cmの値で観測された。地震が起きてから日本で津波を観測できたのは約21~23時間後であった。津波による重力波の伝播の様子を知るために、津波と大気のカップリングを検討する。

津波は、分散性のない波でありその伝播速度 v は、重力加速度 g 、海の深さ d と浅水方程式を用いて、

$$v = \sqrt{gd} \quad (1 \cdot 11)$$

で表される。周期は、600 s ~ 1800 s ほどである。

重力波の群速度を V_g 、221m/s の速度を持つ津波の周期を 20min とし、また、等温での音速を 340m/s、重力加速度を 9.8m/s²、比熱比を 1.4 とすると、群速度の水平、鉛直成分 V_{gx} 、 V_{gy} は、

$$v_{gx} = 210.5 \text{ m/s}$$

$$v_{gy} = 43.2 \text{ m/s}$$

となる。これより、重力波は水平方向に、ほぼ津波と同じ速度で伝播することがわかる。Fig1・11は津波による大気の擾乱の様子を断面で表したものである。

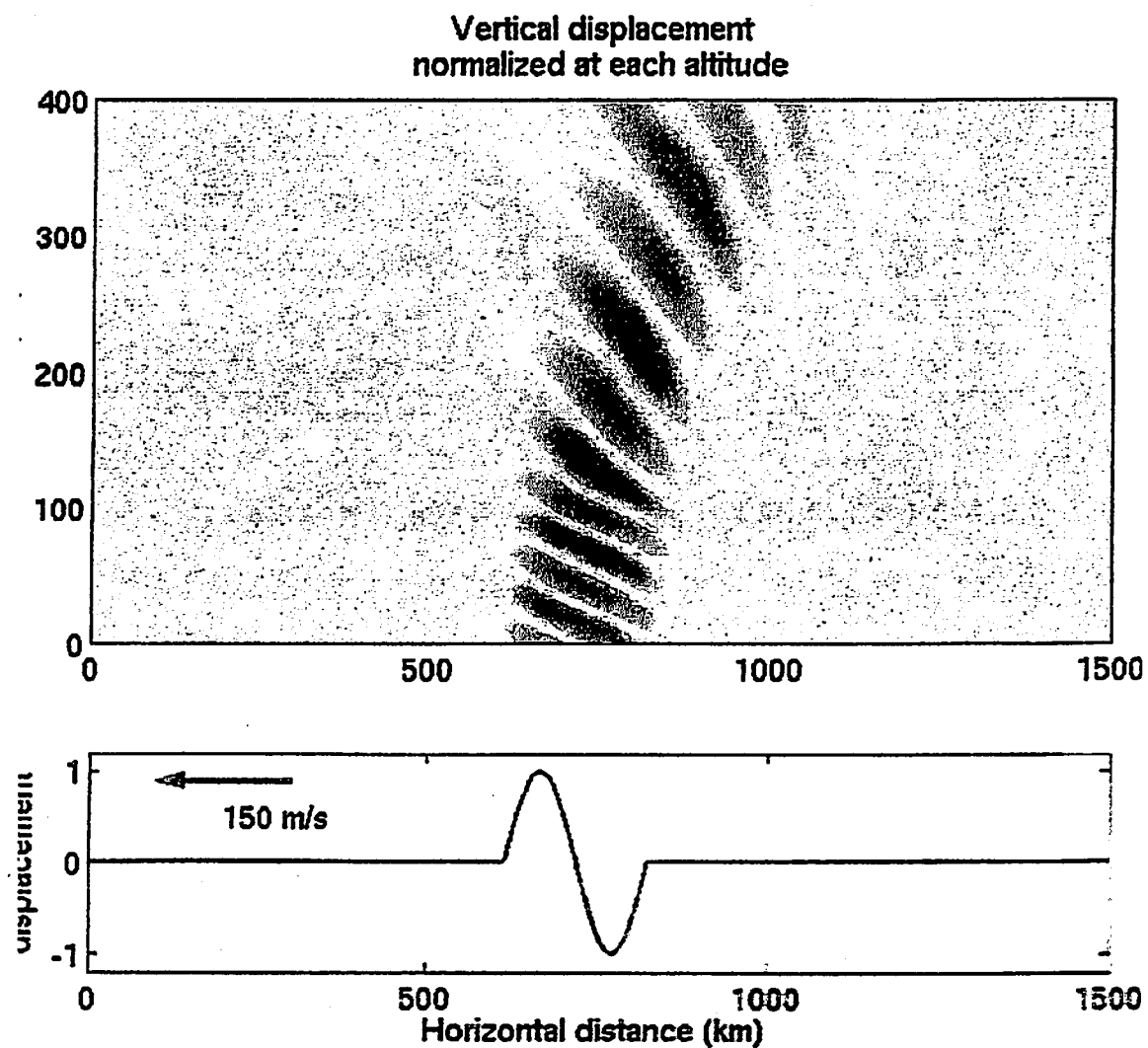


Fig1・11 下の図は横軸が距離、縦軸がその変位の大きさを単位は cm。矢印が津波の伝播方向を示している。津波の速さは 140m/s。上の図は、電離層と大気の様子を断面を表したもの。色の違い（ここでは白黒）でその変化を表している。

この研究は、津波が生成してから数時間後になるが、震央から遠く離れたところでもその擾乱を調べることができることを示しており、今後の津波観測に新たな観測手法ができたことを意味する。重力波が電離層まで到達すると、音波の場合と異なったメカニズムで電離部分と相互作用を起こす。磁場内でのローレンツ力の効果や、イオン中性子の衝突などを考慮に入れた考え方が必要である。この大気重力波と電離層の相互作用はオーロラ帯で発生して南に伝播する、いわゆる移動性電離層擾乱、TIDs (Travelling Ionospheric Disturbances) の主な原因でもある。

ペルー地震の津波による電離層の観測に戻ると、日本で津波を観測できたのは地震発生後約 21~23 時間後で、丁度重力波の水平伝播速度から期待される伝播時間であり、かつ重力波の鉛直速度で電離層に到達するのに十分な時間であった。(到達時間は 6/24 の 17:30~19:00GMT、もしくは Local time で 2:30~4:00)。一日かけて伝播してきた津波と TEC の様子を SIP の地表投影点に色で表示したものが Fig1・12 である。

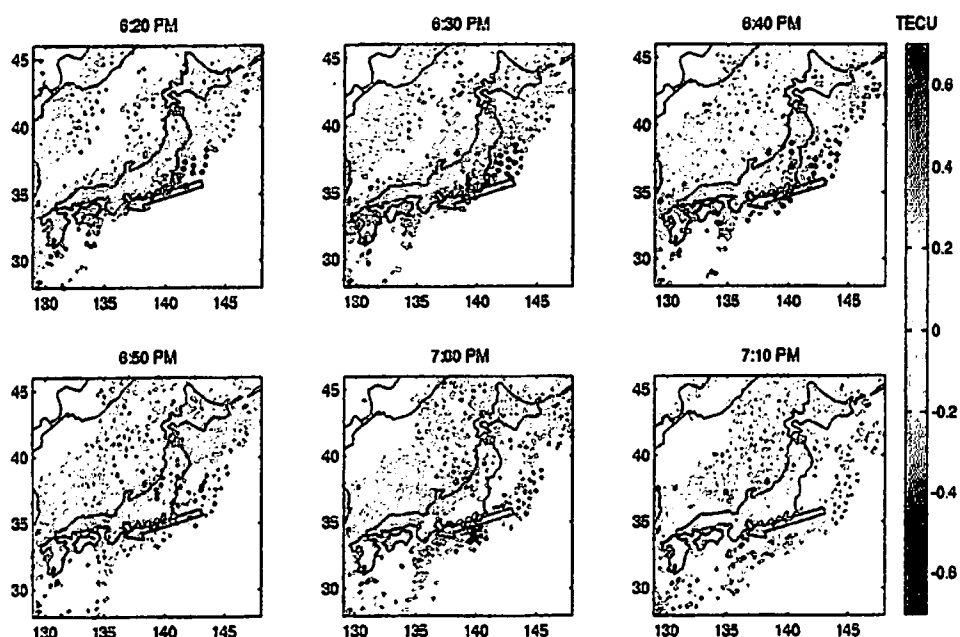


Fig1・12 図の上に記されているのが時間。TEC の変化が本州の海岸の沿って西南方向へ進んでいるのがわかる。

また、Fig1・13 で見られるように、西南西方向に伝播する TEC の擾乱の到達時刻、波長、群速度ともに計算によって求められた電離層の擾乱伝播の予測と一致する。このときの最大振幅は 1 TECU であった。

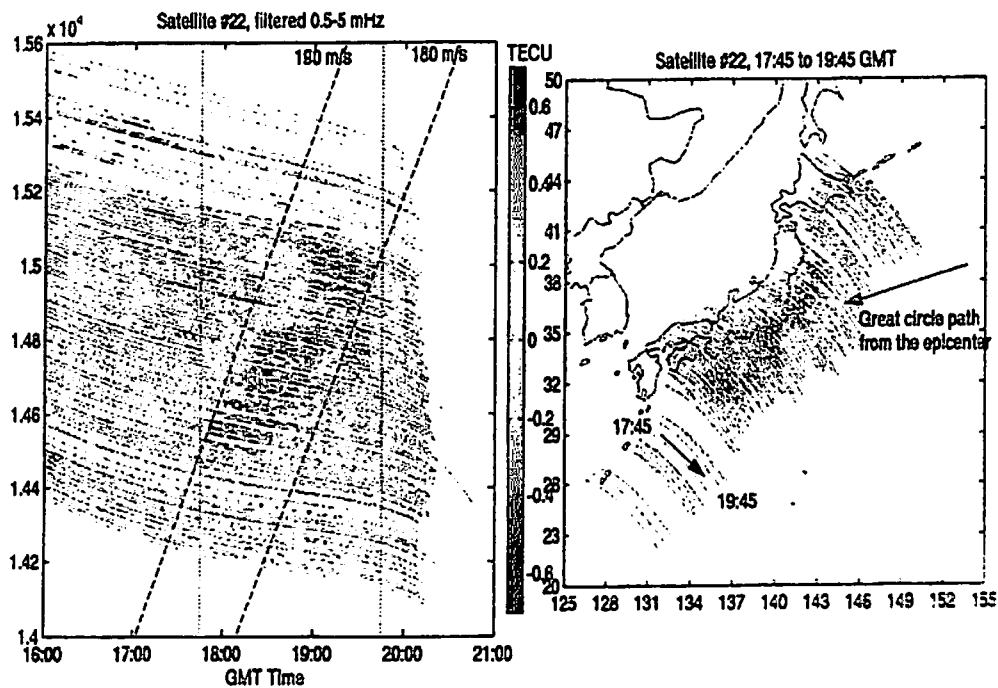


Fig1・13 Artru et al(in press)による、津波による電離層擾乱のGPSによる観測の様子。左の図は、横軸に時間、縦軸に震央からの距離をとったもの。色の濃くなっている部分がTECの変化が見られた部分。右の図は、その変化の様子を地図上に投影したもの

2 衛星による電離層擾乱の観測方法

現在の日本における GPS 観測網はとても密なものになっており、その受信機は全国に約 1000 個も配置されている。本件急では、十勝沖地震 2003 によって引き起こされた表面波が引き起こした電離層の擾乱が、日本の上空を伝播する様子をこの GPS ネットワークを用いてとらえた。この章では、実際にその様子を観測するために用いた計算方法やプログラムなどを示す。

GPS 衛星は、常に 2 つの異なる周波数の電波を地上に送信している。電離層は分散的な媒質であるため、通過する電波は、その周波数の 2 乗に反比例する遅延を受ける。そこで、その値を補正するために 2 つの異なる周波数の電波を送っているのである。しかし、本研究では、遅延を補正するのではなく、その遅延そのものを逆に利用し、電離層の様子を調べる。また、十勝沖地震発生時に震源域の上空を飛んでいた衛星の軌道の計算も行った。また、得られた軌道を用いて、受信電波が電離層を突き抜ける点の座標も求めた。すべての Data は各受信機から国土地理院に送られてきた GPS 衛星の Data が web 上で公開されているのをダウンロードすることによって得た。

2・1 TEC (Total Electron Content) を求める計算

GPS 衛星は、常に 2 つの異なる周波数の電波を地上に送っている。それぞれの周波数を f_1 、 f_2 とすると、

$$f_1 = 1.57542(\text{GHz})$$

$$f_2 = 1.2276(\text{GHz})$$

電離層は分散的な媒質であり、通過する電波は、その周波数の 2 乗に反比例する遅延を受ける。そこで、その 2 つの異なる周波数の電波が受ける時間遅延の差を調べることによって、視線上の電子の密度を積分したもの、つまり総電子量 TEC (Total Electron Content) が求められるのである。

まず、電離層遅延 Δt は、

$$\Delta t = A \cdot TEC / c \cdot f^2$$

$$TEC = \int_{\text{receiver}}^{\text{satellite}} N(z) dz \quad (2 \cdot 1)$$

A : 定数=40.3 c : 真空における光の速度 f : 電波の周波数

と表すことができる。ここで、GPS 衛星で観測された 2 つの周波数の位相に波長をかけた値 ρ_1, ρ_2 から全電子数を求める。まず、 ρ_1, ρ_2 を TEC、 f_1, f_2 を用いた式で表す。

$$\rho_1 = \rho + \frac{A}{cf_1^2} TEC$$

$$\rho_2 = \rho + \frac{A}{cf_2^2} TEC \quad (2 \cdot 2)$$

(2・2) 式より、 ρ を削除すると、

$$TEC = \frac{c}{A} (\rho_1 - \rho_2) \left(\frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) \quad (2 \cdot 3)$$

となる。以上のような計算で TEC が求められ、表す単位としては、TECU (TEC Units) が用いられる。

$$1TECU = 10^{16} e^-/m^2$$

地球の自転の影響で TEC の値は 10~80TECU ほどの日周辺動を示す。

。

2・2 衛星の軌道

1つの衛星を多数の受信機で観測した Data を用いると電離層擾乱の伝播速度を求めるのに都合が良い。電離層は地上から数百キロの上空にあるため、なるべく北海道で天頂に近い軌道を持つ衛星の観測 Data を得ることが震源直上の電離層の擾乱を調べるために重要である。そこで、十勝沖地震 2003 において、どの衛星からのデータを使用するのがよいか決定するために、GPS 衛星の軌道を衛星から送られてくる放送軌道（放送暦）を用いて計算した。国土地理院のページを利用し、札幌の GPS 受信機で取得した、衛星軌道情報の RINEX 形式ファイルをダウンロードすると、

M_0	: 元期の平均近点角
Δn	: 平均運動の補正值
ε	: 衛星軌道の離心率
$A^{1/2}$: 軌道長半径の平方根
Ω_0	: 元期の昇交点経度
I_0	: 元期の軌道傾斜角
ω	: 近地点引数
$\Omega \text{ DOT}$: 昇交点経度変化率
$I \text{ DOT}$: 軌道傾斜角変化率
C_{uc}	: 緯度引数に対する余弦補正係数
C_{us}	: 緯度引数に対する正弦補正係数
C_{rc}	: 軌道半径に対する余弦補正係数
C_{rs}	: 軌道半径に対する正弦補正係数
C_{ic}	: 軌道傾斜角に対する余弦補正係数
C_{is}	: 軌道傾斜角に対する正弦補正係数
T_{oe}	: 軌道の元期
$IODE$: 軌道の新しさを表す係数

以上の 17 の要素が得られる。この中には Kepler の 6 要素も含まれている。実際の衛星の軌道を求める際、様々な外力の影響で完全な楕円軌道とならないことを考慮し、正確な軌道を計算するために、Kepler の 6 要素以外にこのような多くの補正項を付随し計算する必要が生じる。以上の値を用いた衛星の軌道を求める計算は (2・4) のようになる。

$$\begin{aligned}
n_0 &= (\mu / A^3)^{1/2} \\
T_k &= T - T_{oe} \\
n &= n_0 + \Delta n \\
M_k &= E_k - e \cdot \sin E_k \\
\cos v_k &= (\cos E_k - e) / (1 - e \cdot \cos E_k) \\
\sin v_k &= (1 - e^2)^{1/2} \sin E_k / (1 - e \cdot \cos E_k) \\
V_k &= \arctan(\sin v_k / \cos v_k) \\
\phi_k &= v_k + \omega \\
\delta u_k &= C_{us} \sin 2\phi_k + C_{uc} \cos 2\phi_k \\
u_k &= \phi_k + \delta u_k \\
\delta r_k &= C_{RS} \sin 2\phi_k + C_{RC} \cos 2\phi_k \\
r_k &= A(1 - e \cdot \cos E_k) + \delta r_k \\
\delta I_k &= C_{IS} \sin 2\phi_k + C_{IC} \cos 2\phi_k \\
I_k &= I_0 + \delta I_k + (IDOT)T_k \\
x'_k &= r_k \cos(u_k) \\
y'_k &= r_k \sin(u_k) \\
\Omega_k &= \Omega_0 + (\Omega DOT - \Omega DOT_E)T_k - \Omega DOT_E T_{oe}
\end{aligned} \tag{2 \cdot 4}$$

μ : 地心重力定数 = $3986005 \times 10^3 \text{m}^3/\text{s}^2$

ΩDOT_E : 地球回転角速度 = $7292115 \times 10^{11} \text{rad/s}$

まず、平均運動の計算を行い、 n_0 を求める。元期からの経過時間 T_k を求めた後、平均運動の補正を行い n を求める。 T における平均近点角 M_k をケプラーの式に代入して離心近点角 E_k を求める。 E_k を求める際、超越方程式を数値的に解く必要がある。真の近点角 V_k と緯度引数 ϕ_k を求めた後、緯度引数、軌道半径、軌道傾斜角に対する補正をそれぞれ行い (u_k , r_k , I_k) 軌道面内での直交座標系を x_k , y_k で表す。昇交点に対する補正 Ω_k を求めた。

そして、(2・4)式で得られた値を用いて、GPS 衛星の軌道情報 (x_g, y_g, z_g) を求める式は、

$$\begin{aligned}x_g &= x'_k \cos \Omega_k - y'_k \cos I_k \sin \Omega_k \\y_g &= x'_k \sin \Omega_k + y'_k \cos I_k \cos \Omega_k \\z_g &= y'_k \sin I_k\end{aligned}\tag{2・5}$$

で表される。このとき求めた (x, y, z) は、地球の中心を原点とし、地軸を z 軸、原点から赤道上の経度 0° 地点に引いた直線を x 軸とするものである。以上の計算方法によって、十勝沖地震 2003 が発生した時間に札幌付近を飛んでいた GPS 衛星の軌道をプロットしたものが、fig2・1 である。この図から地震発生時には 24 番衛星がちょうど札幌の上空を飛んでいたのがわかる。これより今回の観測では、24 番衛星を用いることとした。

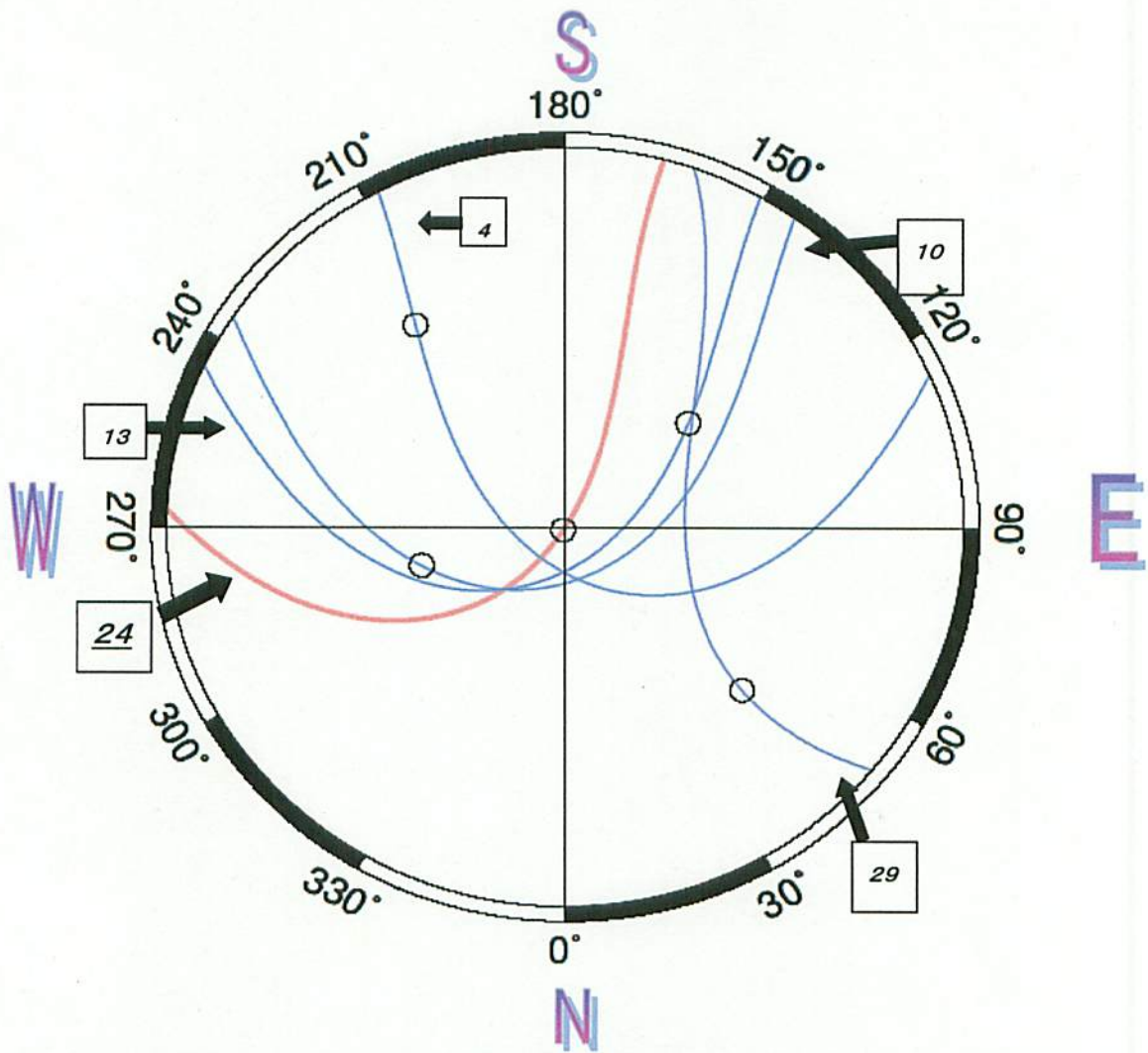


Fig2・1 札幌から北を向いた状態で天頂を見上げたときに見える GPS 衛星の軌道をプロットしたもの。単位は、仰角と方位角で表しており、図の中心が天頂（仰角 90 度）である。丸印がついているのが地震発生の時刻の衛星位置。また、各衛星についている数字は、その衛星番号を示している。

2・3 SIP (Sub-Ionospheric Point)

GPS衛星と受信機を結んだ直線が電離層と交わる点を Piercing Point とよび、その点を地上に投影した点を SIP (Sub-Ionospheric Point) とよぶ。電離層はある厚みを持っているが、便宜的に地上 350km の高さの薄い層として近似することが多い。電離層の中性大気は、太陽からの紫外線や X 線的作用によって、電子と陽イオンに電離し、自由電子が空間に存在している。その電子の存在密度は一定ではなく、高さによってピーク値を表す層に分かれており、下から、D 層、E 層、F 層 (F1・F2) と呼ばれている。その電子密度の代表的な高さ分布を表したのが fig2・2 である。

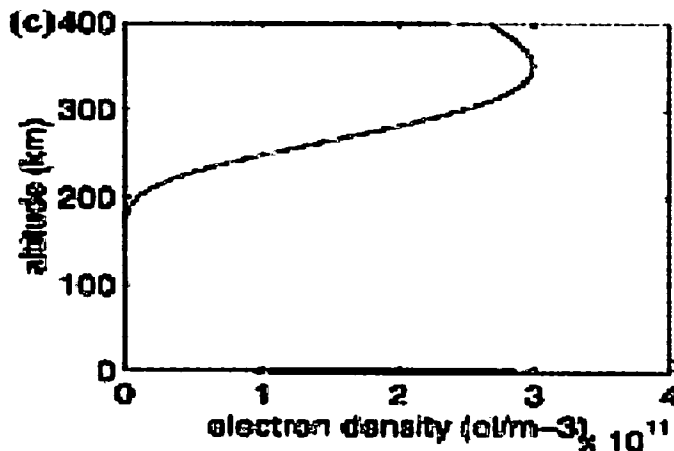


Fig2・2 Calais et al(1998)による。横軸に電子密度、縦軸に高度をとっている。

この図からわかるとおり、上空 350km 点が最も電子密度が高くなっている。そこで、TEC の擾乱が存在する層の高さを上空 350km と仮定し、それを地表面に投影することで、地震の震源域との地理的關係を把握することができる。SIP を求める計算式は、衛星の位置を (x_g, y_g, z_g) 、受信機の位置を (x_i, y_i, z_i) Piercing Point を (x, y, z) 、地球の中心から SIP までの距離を R (地球の半径に相当)、SIP から Piercing Point までの距離を r (電離層の地上からの高さ) とすると、

$$\begin{cases} (x, y, z) = [x_i - \varepsilon(x_g - x_i), y_i - \varepsilon(y_g - y_i), z_i - \varepsilon(z_g - z_i)] \\ x^2 + y^2 + z^2 = (r + R)^2 \end{cases} \quad (2 \cdot 5)$$

(2・5) 式より、解の公式を用いて、 ε を求め、衛星の位置(x,y,z)を求めた。十勝沖地震 2003 発生前後に札幌付近を飛んでいた衛星と札幌受信機の SIP をプロットしたものが Fig2・3。

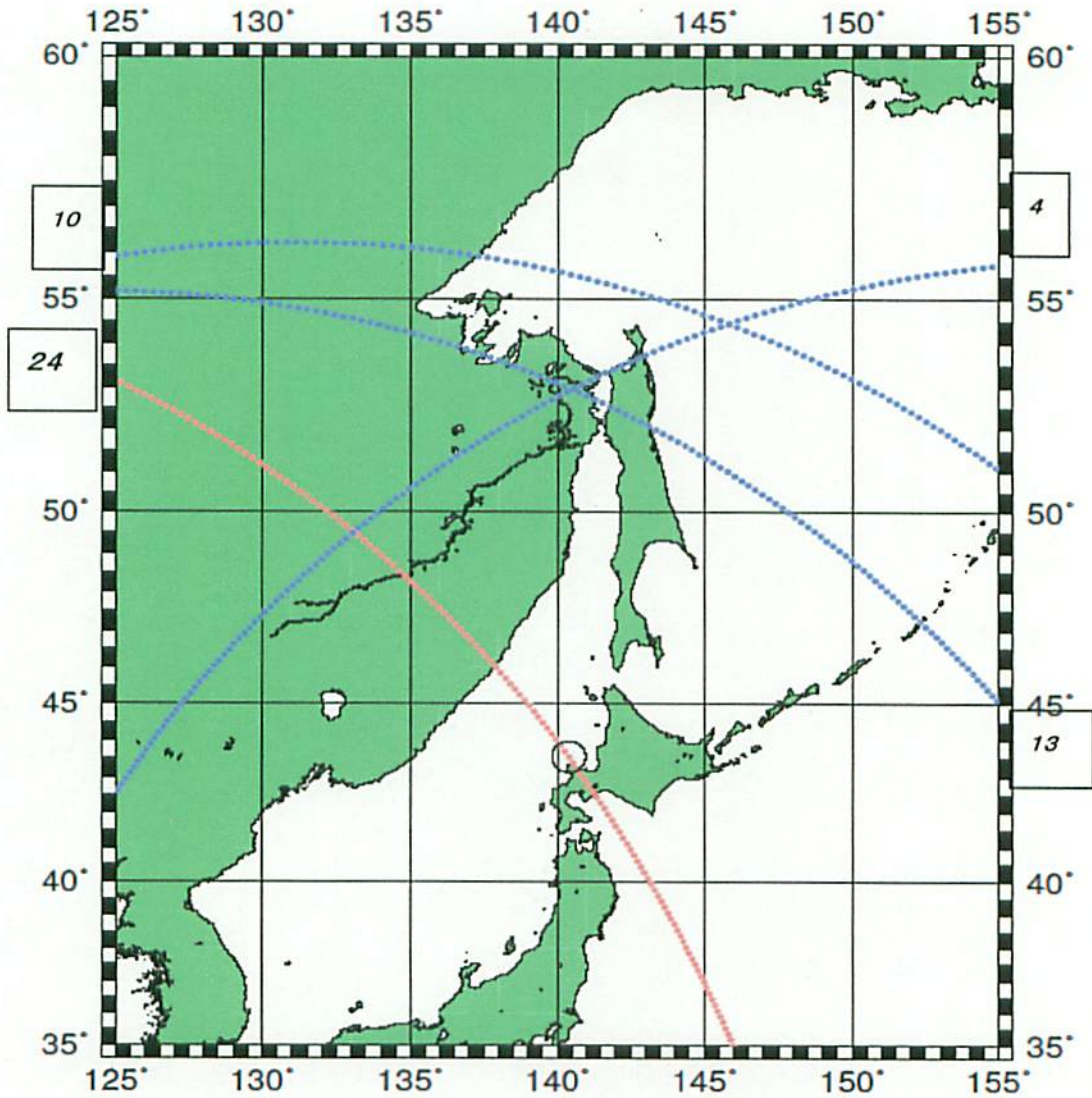


Fig2・3 30 秒毎の衛星と札幌で受信した GPS データの SIP の位置をプロットしたもの。番号はそれぞれの衛星の番号。地震発生時刻の前後に SIP が十勝沖の震源域の近くにあるのは 24 番衛星だということがわかる

3 観測結果

3・1 TEC の変化と走時ダイアグラム

2003年9月26日、日本時間の4:50 (GMT19:50) に十勝沖を震源とする M8.0 の地震が観測された。「2003年十勝沖地震」直後の日本上空の電離層擾乱の様子を GPS 衛星を用いて観測する。TEC の変化を見るために 24 番衛星を用い、震源から、北に位置する 6 つの受信機と、南に位置する 6 つの受信機において (Fig3・1)、TEC の時系列を求め、プロットしたものが Fig3・2 である。

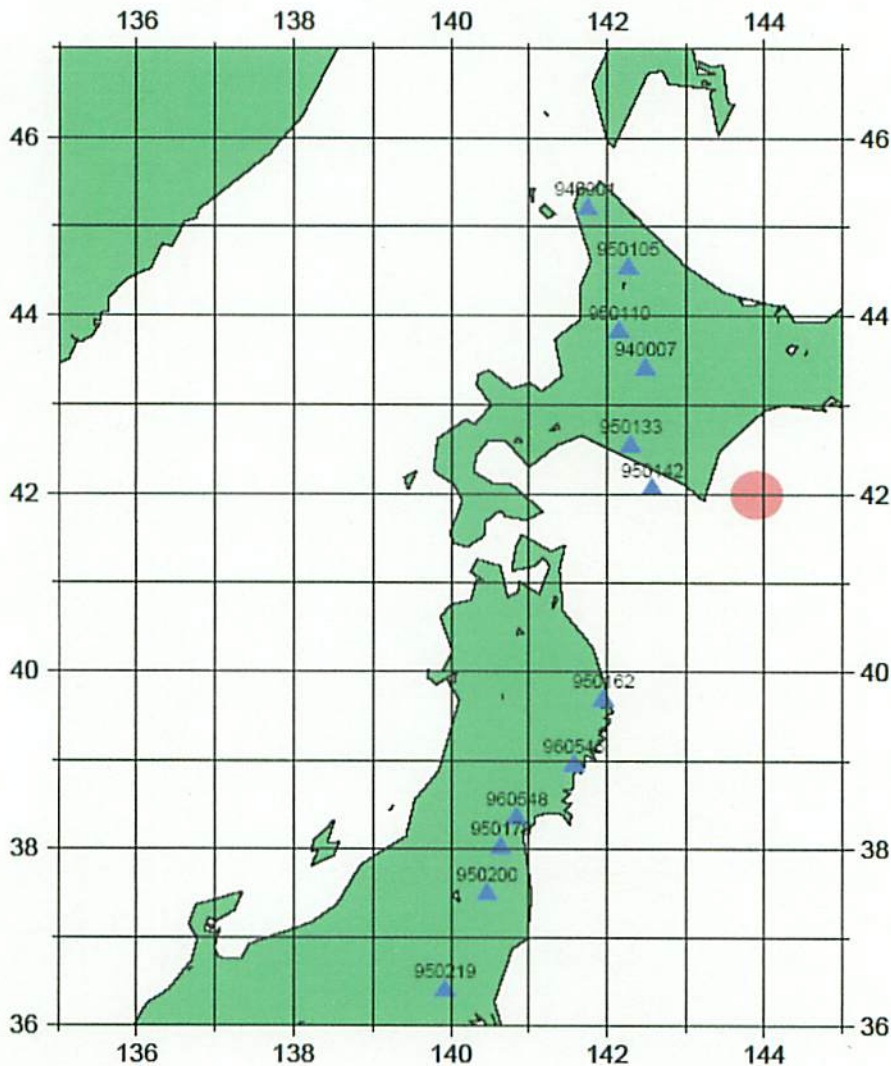


Fig3・1 青三角印が GPS 受信機の位置と番号。赤い丸は震源位置を示している

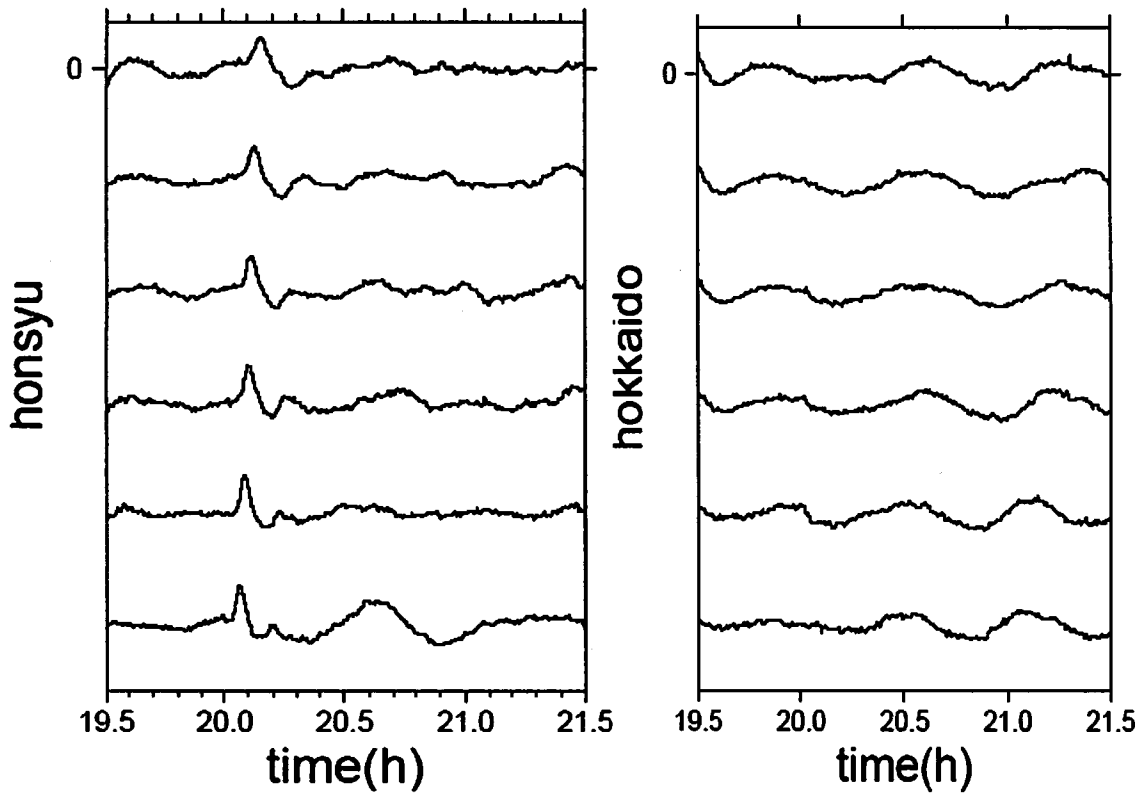


Fig3-2 左図が本州の GPS 局で得られた Data。右図が北海道の GPS 局で得られた Data。横軸が時間、縦軸が TEC の値。下の方から順に震源地から近いものとなっている

TEC は毎日 10~80TECU 程度の日周変化をしている。また、衛星の仰角の変化によってみかけの TEC も変動する。Fig3・2 はその長周期の TEC の変化を除くために、多項式近似した後の残差を用いた。TEC の生 Data は非常に桁が大きく、そのまま計算した結果、桁落ちを生じ、正確に多項式近似を行うことができなかつたため、すべての値の平均を差し引いた後に多項式近似を行った。今回用いたのは 8 乗近似である。Fig3・2 を見ると分るとおり、震源から北に位置する、北海道の受信機では、その擾乱の様子はほとんどみてとれない。これは、第一章で述べたように、地磁気の影響によって、屈折した音波が、ローレンツ力によってサイクロトロン運動を引き起こし、電離大気に関する限り減衰してしまつたものと考えられる。それに比べ本州の受信機が得た TEC の値は、震源地から徐々にその擾乱が伝播している様子が明瞭に見える。

続いて、他の震源近くすべての GPS 受信機について多項式近似後の TEC 時系列を求め、その様子を震源より北と南にわけて、縦軸を震源距離に、横軸を時間に、TEC の値を色で表してプロットした (Fig3・3)。これ地震学における走時図に相当するものである。この図からも分るとおり、北の方向の TEC の擾乱には明確な静の初動がみられなかつた。本州のグラフに着目すると、プラスの変化が伝播している様子がよくわかる。

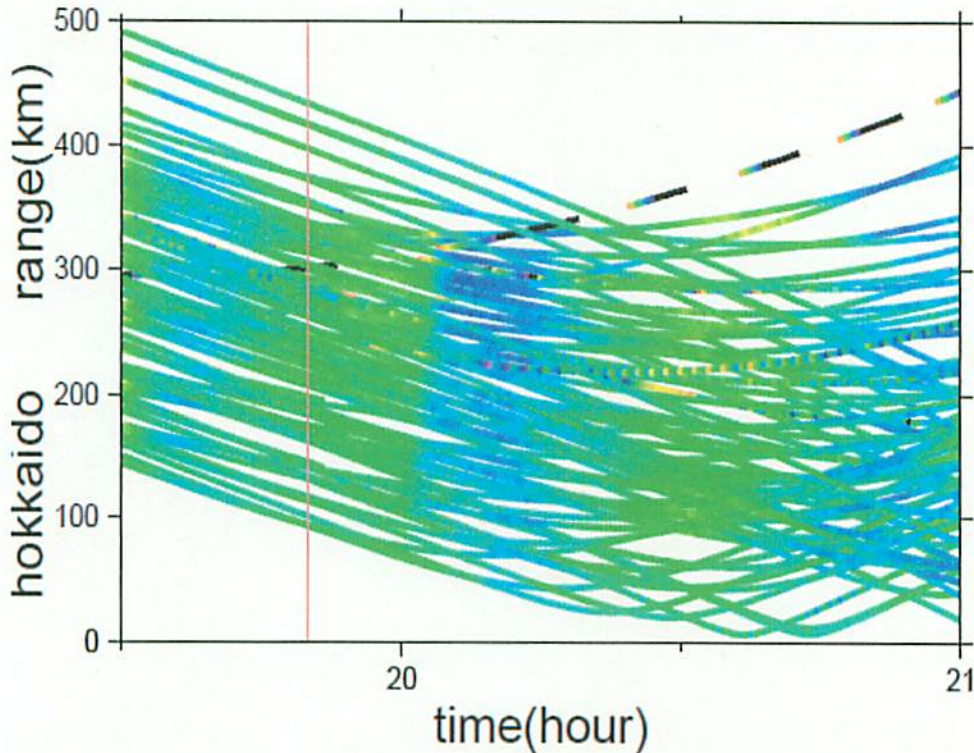


Fig3・3-1 北海道の局による観測

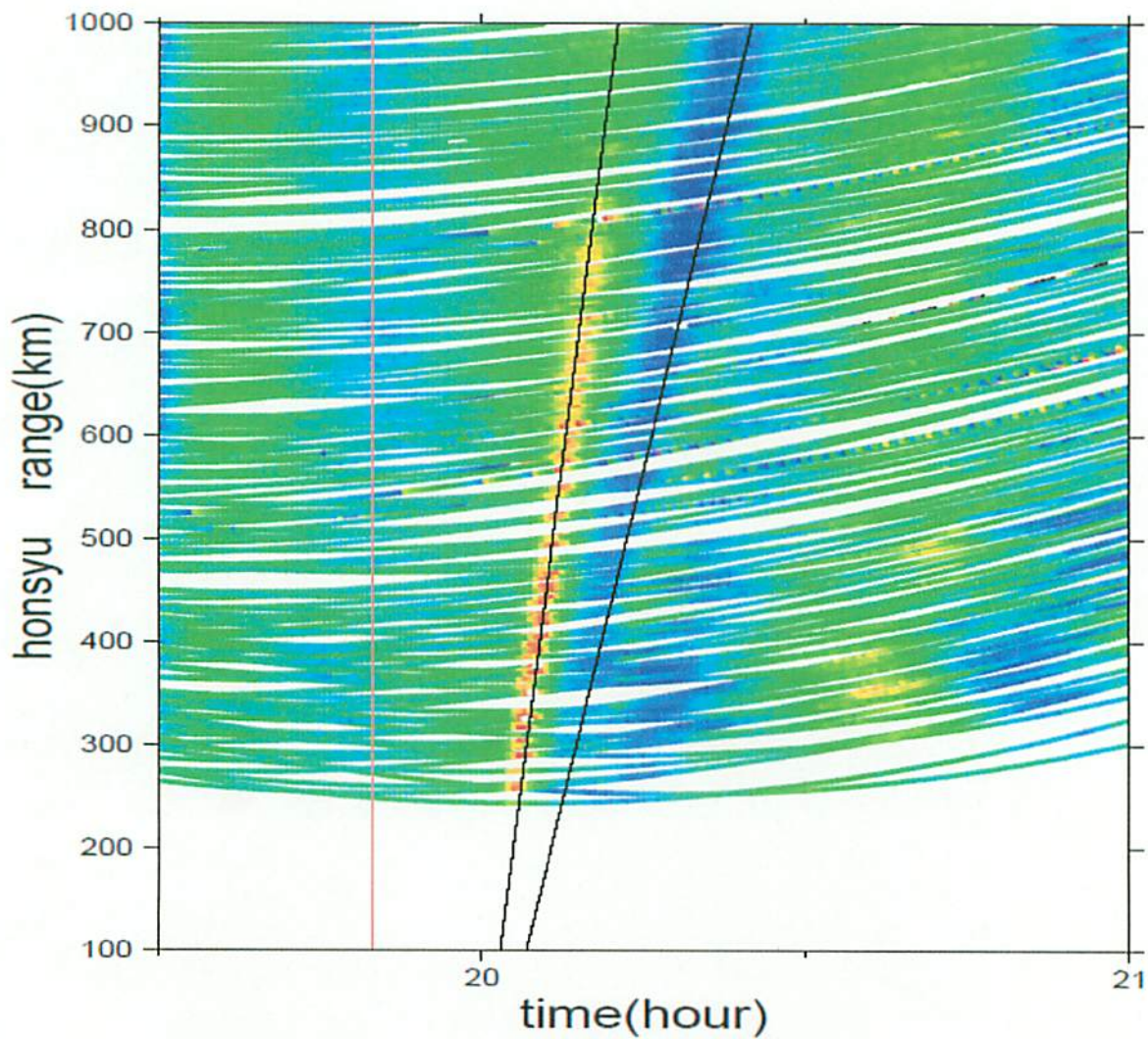


Fig3・3-2 横軸に時間、縦軸は震源と SIP の距離、色の変化で TEC の変化を表した。前ページの図も同様のグラフで北海道、このページは本州の受信局によるもの。赤の縦線が示しているのは地震発生の時刻。本州で擾乱が到着した箇所をつなげた直線が黒の直線であり、その傾きが擾乱の伝播速度になる。

3・2 伝播の様子とスマトラ島沖地震の Data

地表面での変位が地表面で音波に変わり、振幅が増幅されながら電離層まで伝播する時間を計算した。温度 T と音波の速度 C の関係は以下で表される。

$$C = \sqrt{\gamma RT / \rho V_0} = \sqrt{\gamma RT / M} \quad (3 \cdot 1)$$

γ : 気体の定圧比熱と定積比熱の比 R : 気体定数 M : 気体の分子量

モデルに基づく高度による大気の温度分布から、温度と音波の速度の関係式を用いて、高度と音波の速度の関係に換算した (Fig3-4)。このグラフから高度 10km 毎ごとに平均の速度を求め、350km 地点までの値を積分することで、地表から電離層まで音波が到達する時間を計算した。その値は約 10min となった。

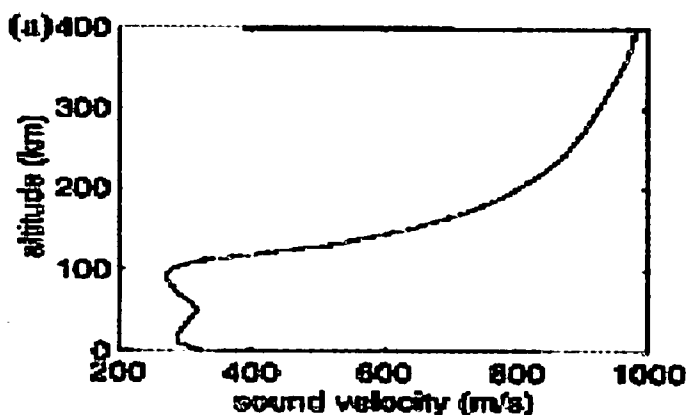


Fig3-4 横軸が音波の速度、縦軸が高度 (Calais et al, 1998)

Fig3-3 のグラフから、プラスの変化にフィットした直線の式を求めると、その速度 (傾き) は約 1.25km/s、x 軸切片は 20.02 となった。これは、震央上空の電離層の擾乱が、地震発生時間 (19:50) から約 10 分かかって地上から伝播してきた音波による、という計算結果とよく一致する。

また、さらに電離層の擾乱がその原因となる地震の規模の大きさとどのように結びついているのかを調べるために、昨年の 2004 年 12 月 26 日に発生したスマトラ島沖地震 (M9.0) での TEC の観測も行った。十勝沖地震の観測同様、衛星軌道から SIP を求め (Fig3-5)、TEC の値を計測した (Fig3-6)。

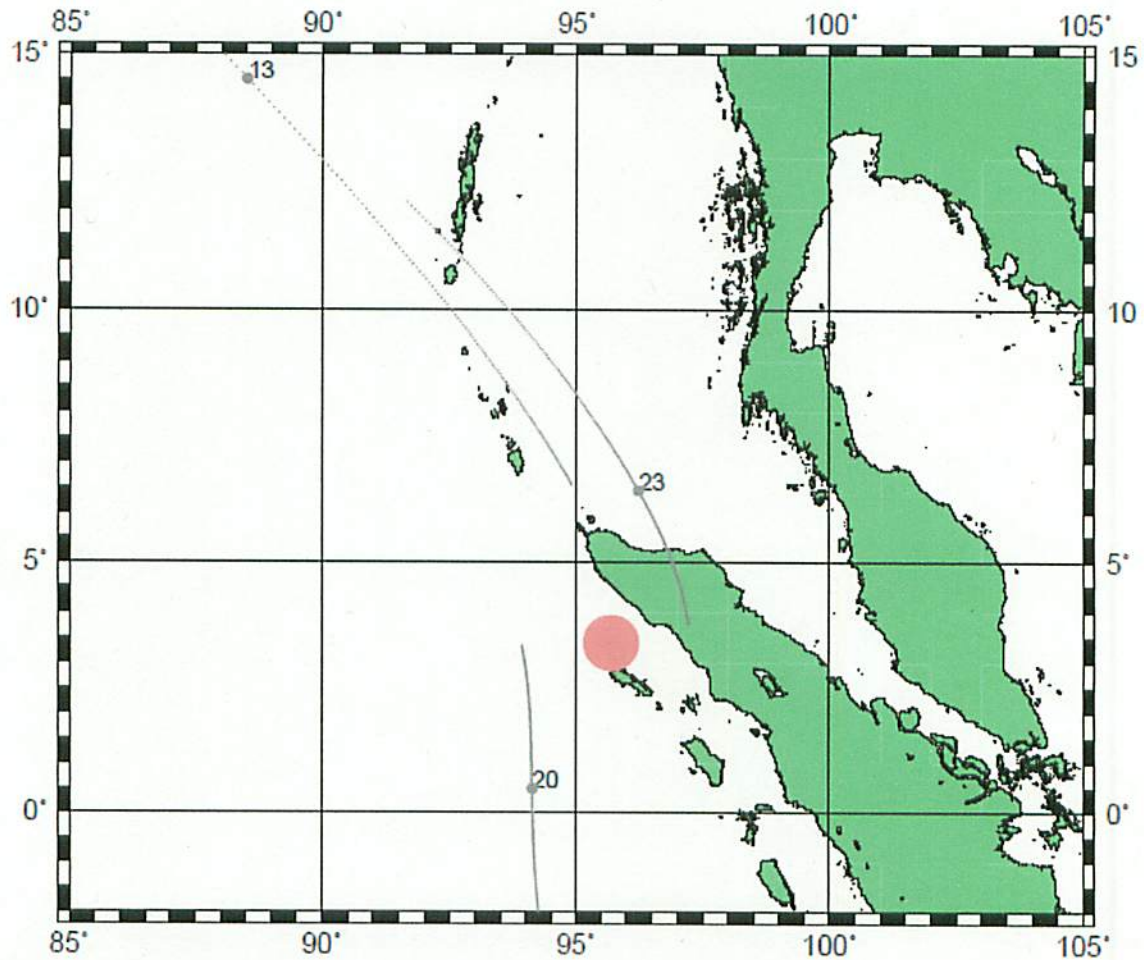


Fig3・5 衛星とスマトラ島の都市メダンの受信局での SIP の位置をプロットしたもの (30 秒毎)。それぞれ衛星番号がついている場所が、地震発生時刻の衛星の位置。赤い丸は震源。

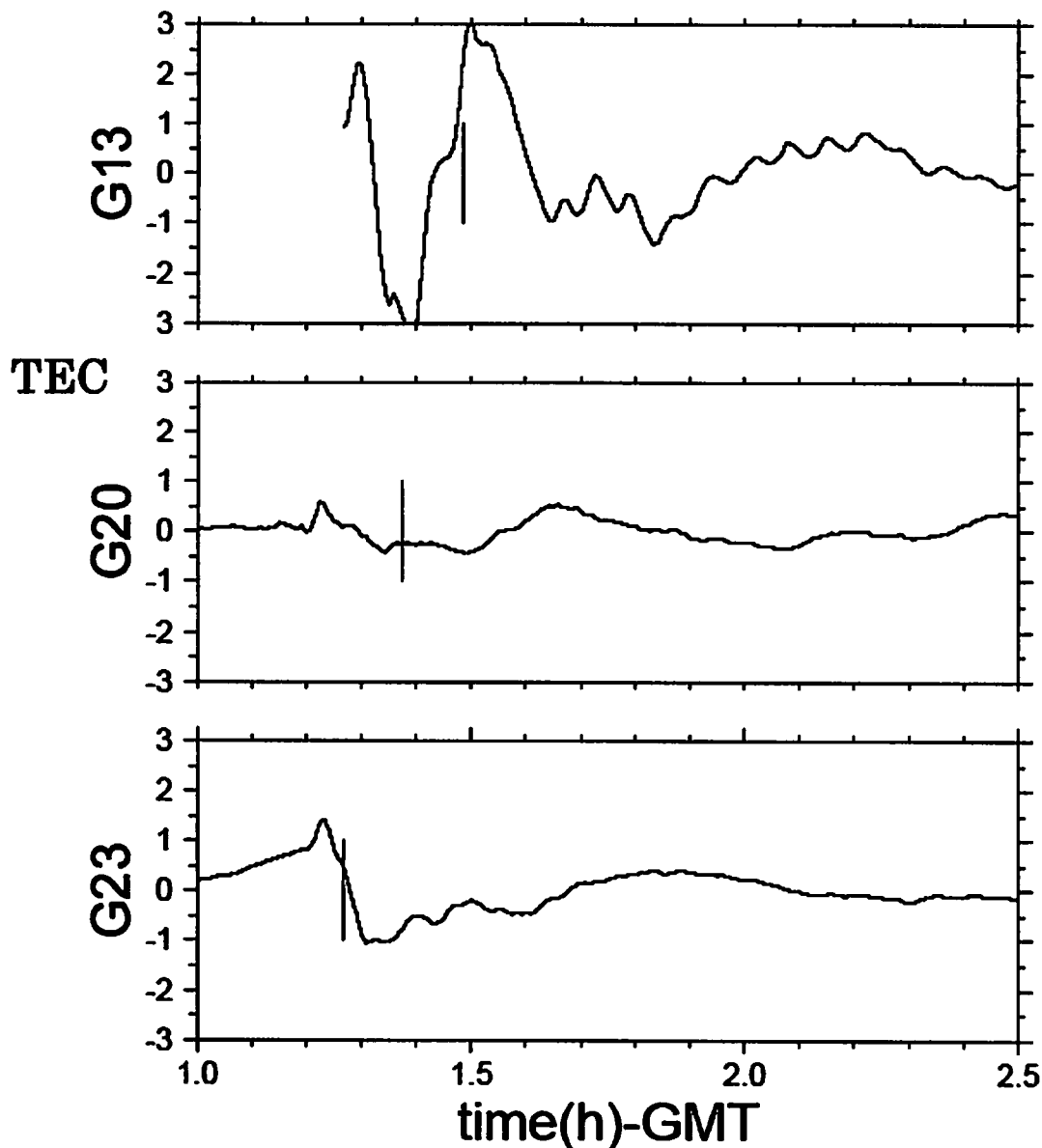


Fig3-6 横軸に時間、縦軸に TEC をとったグラフ。数字はそれぞれ衛星の番号を示している。図中の縦の線は、電離層内を音波が水平速度 1.25km/s で伝播すると仮定したときの音波の到達予測時間。

Fig3-6 と Fig3-2 を比較した場合、Fig3-2 において、その変化は 1 TECU にも満たない変化量であったが、スマトラ島沖地震の場合は、13 番衛星の Data では、約 3 TECU ほどの変化を示した。さらに、13 番衛星と 23 番衛星の Data より、その伝播の様子をみると、Fig3-3 で求めた伝播速度とほぼ一致した。20 番衛星の、到達時間と予測到達時間のずれは、地震が起きる際のプレートによる地面の変動が局地的ではないことが影響していると考えられる。

4 考察

この2003年十勝沖地震における日本上空のTECの観測では、1章で述べたように、地震の発生と電離層を伝わる擾乱の関係を観測することができた。地表面の変位は確かに電離層の擾乱を引き起こしていた。これは、スマトラ島沖地震の観測によるFig3・5からも明らかである。今回の観測において、求めた走時グラフより計算した電離層内の水平伝播速度は、約1.2km/sとなり、Fig1・5とほぼ同じ値を示した。この速度は、電離層高度における音波の伝播速度に近い値で、震央での変位が音波に変換され、一度上方に伝播し始めた音波が、大気との密度の関係で屈折し、水平方向に伝播している様子を観測したものと考えることができる。また、Fig3・3のグラフで、その擾乱の様子にフィットした直線から求められたx切片は20:02 (GMT) という値を示し、これは、地震の発生時刻の19:50 (GMT) から10分後となった。この時間は、地表面から電離層まで音波が到達する時間と考えられ、観測されたTEC変動が地震による信号であることを示している。さらに、震源から北方と南方の観測点でそれぞれ観測を行うことで、北へ伝播しないことが判明し、地磁気と電離層内の荷電粒子の運動の相互作用(ローレンツ力)の効果も確認することができた。

しかし、1章で述べたように、波がレイリー波や津波として地表を伝播した先々で間接的に大気の変動を励起しているといういくつかの観測例が報告されている。これに対し、本研究の結論は震源で励起された待機の変動が直接電離層を伝わって観測されたというものである。この2つの観測結果の違いは、震央から観測点までの距離だと考えられる。距離が近い場合は、減衰する前の屈折音波を観測できるのに対して、距離が遠くなると、震源で直接励起された待機の波動は減衰し、観測できないほどの値になっているので、地球表面を伝播する波が間接的に励起した大気の波動による電離層の擾乱が観測されているのだと考えられる。十勝沖の例でも近距離での観測でも地表を通じて間接的に伝播した音波による電離層の擾乱が見られてもよさそうだが、ここで報告した十勝沖地震2003の観測ではみることはできなかった。これは、両者の信号の到着時刻の差が小さいため、波形が重なり合っていたためかもしれない。

また、Fig3・3のグラフでは初動として見られた音波によると思われるTECのプラスの変化に遅れて、波長がやや長いマイナスの変化が現れている。両者の差は徐々に広がっているように見える。この2つの波の周期は、音波のカットオフ周期より明らかに長いことから、これは音波により伝播速度の遅い重力波によるものとも考えられる。震源から上方に伝播して電離層に到着した音波

が、そこで新たに重力波を励起し、それが電離層内を水平に伝播して、2 つ目の速度が遅く周期の長い擾乱が引き起こされたと考えることができる。さらに、Fig3・5 のスマトラ島沖地震の TEC 変化と十勝沖地震 2003 の TEC の変化の量を比べると、地震の規模の大きさによる TEC の変化量が見て取れる。地震のエネルギーが 倍になったことで、TEC の変化量は 倍になっていると考えられる。

さらに Fig3・5 で示すマグニチュード 9 のスマトラ島沖地震の TEC 変化とマグニチュード 8 の十勝沖地震 2003 の TEC 変化の量を比べると、地震の規模の大きさによる TEC の変化量が見て取れる。地震のエネルギーが 30 倍になったことで、TEC の変化も 1 桁大きくなっていると考えられる。電離層と地表面（海面）の変位の関係は、リアルタイム技術を取り入れることで、津波の早期警報などの力になるであろう。

謝辞

本研究を行うにあたり、ご指導くださった日置幸介教授に深く感謝いたします。また、国土地理院の RINEX データを使用させていただきましたことも、記して感謝いたします。

参考文献

E, Calais et al{1998} Ionospheric signature of surface mine blasts from Global Positioning System measurements. GJI. Vol.132,191-202

H,kanamori et al{1994} Excitation of atmospheric oscillations by volcanic eruptions. JGR. Vol.99,No.B11,21947-21061

J.Artru et al{2004}Acoustic waves generated from seismic surface wave:propagation properties determined from Doppler sounding observations and normal-mode modeling GJI. Vol.158,1067-1077

J.Artru et al{2000}Ionospheric detection of gravity waves induced by tsunamis (In press)

V.Ducic et al{2003} Ionospheric remote sensing of the Denali Earthquake Rayleigh Surface waves. GRL. Vol.30.No18,ab#S12A-0370

2004 年度 卒業論文発表会 プログラム

2005 年 1 月 31 日(月) 09:30 ~ 16:30

1. 楠瀬 友洋, 「2004 年 9 月 5 日の紀伊半島南東沖地震の津波解析」
2. 上田 満治, 「2003 年十勝沖地震による北海道の地殻変動と内陸部地震活動の関係」
3. 花房 瑞樹, 「渦位を用いた総観規模現象の診断」
4. 大城 正裕, 「線り込み群と臨界現象」
5. 栗山 悟, 「北大西洋の SST と北大西洋振動の変動と両者の関係 - レビュー」
6. 坂田 朋規, 「大気・海洋大循環モデルによる太平洋における十年変動のメカニズム - レビュー」
7. 大石 尊久, 「金星上層雲の構造と運動に関する研究」
8. 鈴木 健太, 「日本付近における降雪現象のタイプ」
9. 佐藤 流, 「火山性微動スペクトルの時間変化 - Montserrat 島 Soufriere Hills 火山の例 -」
10. 吉田 友香, 「ハイブリッド測地観測から推定されるマグマの挙動 - 2000 年新山の沈降 -」
11. 広瀬 佑介, 「水星の熱史と固有磁場の起源について」
12. 成田 悠一, 「氷河の質量収支評価法 - グローバルな観点から」
13. 太田 晴信, 「海岸部における地下水の塩水化機構」
14. 小川 涼子, 「非プレートテクトニクス起源の地球の大規模変形の検出」
15. 細田 伸一, 「ガンマ線バースト: その生物進化への影響の可能性」
16. 和田 知之, 「アフリカ高地帯における流出応答特性」
17. 新屋 雅之, 「北海道内陸地殻内地震による強震動の研究: 2004 年斜里岳南部地震 (M4.8)」
18. 二本柳 芳宣, 「太陽フレアによる電離層全電子数変化の定量的研究」
19. 高雄 文仁, 「有珠山頂火口原における熱活動のいま」
20. 藤原 忠誠, 「温暖前線上の巻雲フロントの検出と大気構造」
21. 中司 展人, 「断層周辺の地下水流動」
22. 石井 智, 「自転軌道結合の安定性について」
23. 佐藤 真悠, 「地震に伴う電離層の擾乱の研究」
24. 山口 剛司, 「2001 年中央崑崙地震 (Mw7.8) の破壊過程」
25. 東 龍介, 「北海道南方沖における海底地震観測から得られた 2000 年の地震活動」
26. 工藤 正則, 「全球凍結現象の簡単なモデルによる再現」
27. 佐藤 克成, 「海洋生態系と物質循環、及びそれらのモデリングに関するレビュー」
28. 江頭 亮太, 「札幌における大気エアロゾルの吸湿特性と化学組成との関係」