

GPS-TEC 法による地球物理学

日置 幸介¹, 菅原 守^{1,2}, 大関 優¹, 岡崎 郁也¹

¹北海道大学理学院自然史科学専攻

²NTT データ基盤システム事業本部

(2010年6月24日受付, 2010年9月14日改訂, 2010年9月24日受理, 2011年2月25日出版)

Geophysics with GPS-TEC

Kosuke Heki¹, Mamoru Sugawara^{1,2}, Masaru Ozeki¹ and Ikuya Okazaki¹

¹Dept. Natural History Sciences, Hokkaido University,
N10 W8, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido 060-0810, Japan

²System Engineering Business Unit, NTT Data Corporation
Toyosu Center Bldg. Annex, 3-9, Toyosu 3-chome, Koto-ku, Tokyo 135-9671, Japan

(Received June 24, 2010; Revised Sep. 14, 2010; Accepted Sep. 24, 2010, Published Feb. 25, 2011)

Abstract

Two carrier frequencies, L_1 and L_2 , used in Global Positioning System (GPS) can be used to isolate ionospheric total electron contents (TEC) by taking the phase differences between the two carriers (L_4). Here we review technical aspects of geophysical applications of TEC measurements. Topics include conversion of standard format raw GPS data files into L_4 and TEC, and numerical techniques to isolate disturbance signals with various time scales. We also introduce typical examples of TEC change signatures of variety of geophysical phenomena, e.g. volcanic eruptions, earthquakes, solar flares, ionospheric hole formation by rockets and missiles, solar eclipse, and elusive precursory TEC changes before earthquakes.

1. はじめに

全地球測位システム(Global Positioning System, GPS)は, 衛星が発射する L バンドのマイクロ波を地上局で受信し, その搬送波位相の変化から高精度の測位を行うシステムである。

我が国では地殻変動の計測を目的とした稠密な連続観測網 GEONET (GPS Earth Observation Network) が国土地理院によって展開されている。搬送波は 1.5 GHz (L_1)および 1.2 GHz (L_2) の二つの周波数が同時に用いられる。電離圏と呼ばれる超高層大気では、太陽放射によって大気分子・原子の一部が電離しており、電子がマイクロ波の伝搬を遅延（電離圏遅延）させる。GPS 受信機は、二周波を同時受信することにより、周波数の二乗に逆比例する電離圏遅延を除去しているのである。その時に用いられる L_1 と L_2 の線形結合 (Ionospheric-free Combination, しばしば L_3 と呼ばれる) はそれぞれの搬送波周波数を f_1 , f_2 とすると、

$$L_3 = f_1^2/(f_1^2-f_2^2) L_1 - f_2^2/(f_1^2-f_2^2) L_2 \quad (1)$$

であらわされる。ここで L_1 , L_2 は、観測された位相に波長を掛けて長さ(m)の単位にしている。一方 L_1 と L_2 の単純な差 (ここでは L_4 と呼ぶ) は、電離圏の情報のみを含んでおり、中性大気遅延や衛星位置、局位置などの情報は差をとった時点で除かれている。そのため Geometry-free Combination (幾何学的要素が含まれない線形結合) と呼ばれる。

$$L_4 = L_1 - L_2 \quad (2)$$

L_4 は視線に沿って積分した電子の数に比例するため、主に電離圏研究に用いられてきたが、地震や火山噴火などの固体地球に関連した現象に起因する電離圏擾乱の研究も盛んになりつつある。本稿では、これまで地殻変動の計測のために GPS を用いていた研究者や大学院生に L_4 の地球物理学的応用を普及させることを目指し、GPS 生データから L_4 時系列を作成する方法を解説する。また観測対象の時間スケールによって擾乱信号の最適な取り出し方が異なるため、それらの解析手法の詳細について個々に説明する。

2. RINEX ファイルからの L_4 の作成

GPS データの解析は、衛星や局の位置、地球回転、潮汐、中性大気遅延等の様々な要因をすべて考慮する必要があるため、概して複雑で個人レベルでのプログラム作成は難しい。一方 L_4 では、これらの要因のすべてが(2)式で差を取る時に取り除かれているため、データ解析は本質的に簡単である。そのため、既存の GPS 解析ソフトウェアで L_4 に相当する量を出力させて解析に用いることも可能だが、共通フォーマット (Receiver Independent Exchange format, or RINEX format) の GPS 生データのファイルを直接読んで L_4 の時系列を作るのが手っ取り早い。

第一著者のウェブページで RINEX ファイルを入力して L_4 に変換するフォートランプログラム `rdrnx.f` を公開している (<http://www.ep.sci.hokudai.ac.jp/~heki/software.htm>)。そのプログラムでは、最初に RINEX ファイルのヘッダー (#/TYPES OF OBSERV の行) を読みこみ、様々

な種類のデータの順番を確認する。例えばオンライン公開されている GEONET の RINEX データには L_1/L_2 の位相である “L1, L2”, P コードを示す “P2” や C/A コードの “C1”, また昨今は L_1/L_2 の信号対雑音比を表す “S1/S2” など含まれる。次にデータ本体部分をエポック毎 (GEONET では 30 秒毎) に読み込み, 様々な衛星で得られた L_1 と L_2 の位相を取り出す。位相にそれぞれの波長を掛けて単位をラジアンから長さに変換し, (2)式の差をとって L_4 を求め, 衛星毎にソートした時系列を出力する。本プログラムでは L_4 (単位 m) に(3)式のようなファクターを掛けて, 視線方向の電子数を積分した全電子数 Total Electron Content (TEC, しばしばテックと発音される)に換算してある。

$$\Delta\text{TEC} = (1/40.308) f_1^2 f_2^2 / (f_1^2 - f_2^2) \Delta L_4 \quad (3)$$

TEC の単位は TECU (TEC unit, 1 TECU は視線に沿った底面積 1 m^2 の円柱に 10^{16} 個の電子が含まれることを意味する)を用いている。日本列島では, 太陽静穏時の昼間の TEC はおおむね 10-20 TECU 程度であり, 夜間は数 TECU に下がる。

位相データには一般的に整数値の不確かさがあるため, 実際には L_4 の絶対値に意味はなく, 衛星の観測開始から終了までの時間変化にのみ意味がある。(3)式で ΔL_4 および ΔTEC となっているのはそのためである。上記のページには入力ファイル (RINEX 形式) と出力ファイルの見本も置いてある。RINEX ファイルに二周波の P コード情報 (P1/P2) が含まれている場合は, それらの差を取ることで整数値不確かさのない L_4 相当量 (P_4) を求めることもできるが, 電離圏擾乱の大きさに比べてノイズが大きいため, ここで取り上げるような研究目的には実用的ではない。昨今ではサイクルスリップ (整数値不確かさのとび) の発生は稀であるが, このプログラム中ではサイクルスリップの検出も行っている。ただし見つけたスリップを修復せず, 単にサイクルスリップの無い最も長いデータの部分を取出して出力する。

Figure 1 にはこうして得られた鹿児島県屋久島の GPS 点での 2009 年 7 月 22 日の TEC 変化を衛星毎に曲線で示している (衛星毎の時間変化にのみ意味があり, 縦軸の絶対値には意味がない)。左半分で U 字型の変化が顕著であるが, これは主に昇って沈む衛星の仰角変化に伴って視線ベクトルが貫通する電離圏の厚さが変化するためである (斜めに視線が貫く場合の TEC を Slant TEC と呼ぶ, 詳細は 3.2 章参照)。U 字型の変化の大きい部分が電子密度の高い昼間, 小さい部分が電子密度の低い夜間に相当する。この日は皆既日食が起こっており, UT で 2 時頃を中心に TEC が少し下がっているのが, 生の TEC 変化でも見ることができる (これについては後に詳しく議論する)。

多くの電離圏擾乱は比較的小さいため, 衛星の仰角変化や TEC の日変化等の長い時間スケールの変化と何らかの方法で区別する必要がある。地震や火山による擾乱のような数分程度の短い時間スケールの変動では, 軌道情報を必要としない単純なハイパスフィルターが便利である (3.1 章参照)。一方地震の前兆としての TEC 日変化の振幅変化を問題とする

ような場合は、TEC の絶対値を最小自乗法で推定する必要が生じる (3.5 章参照)。この場合は視線が電離圏を貫く角度の情報を用いるため、地球固定座標系における衛星の位置を知る必要がある。擾乱の信号を取り出すのに適切な手法は時間スケールに応じてかなり異なる。次の章では、対象とする様々な現象について解析手法を解説する。

3. 様々な擾乱信号とその抽出

3.1. 地震と火山噴火：特定の衛星に生じる短期的振動

火山噴火に伴う電離圏擾乱は、爆発的噴火で発生した音波が熱圏に達して F 領域の電離圏に電子密度の濃淡を生じさせたものである。Heki (2006) は 2004 年 9 月の浅間山噴火の際に生じた電離圏擾乱から火山爆発のエネルギーを推定している。その後 Dautermann *et al.* (2009) は、西インド諸島 Montserrat 島火山の 2003 年の爆発的噴火に関して同様の研究を行っている。2009 年十月に発生した桜島火山の爆発的噴火に伴う TEC 変化の例を Figure 2 に示す (Figure 1 と同様時間変化のみに意味がある)。Peak-to-peak で最大 0.2-0.3 TECU 程度の擾乱が熱圏の音速で南に伝搬してゆく様子がわかる。擾乱は音波が熱圏に達するのに要する 10 分程度経過してから現れ、2 分弱の周期を持つ。

地震に伴う電離圏の擾乱 (CID, Coseismic Ionospheric Disturbance) (e.g. Heki and Ping, 2005) には、表面波 (ラーリー波) による地表の上下運動が作った音波が熱圏に達してもたらす擾乱と、震源近くの地表の地殻上下変動が作った音波が直接熱圏に達して起こす擾乱の二種類がある。前者は表面波の伝搬速度 (4 km/sec 程度) で伝わるため、大きな地震では熱圏での音速 (1 km/sec 以下) で伝わる後者と明瞭に区別できる (Astafyeva *et al.*, 2009)。Figure 3 は 2008 年 6 月の岩手宮城内陸地震によって生じた電離圏擾乱である。伝搬速度が遅いので、表面波起源のものではなく直達音波による擾乱であることが分かる。地震や津波が励起した大気の内重力波による電離圏の擾乱は、我が国で発生した地震に関してはまだ検出例はない。

Heki *et al.* (2006) はスマトラ・アンダマン地震に伴う電離圏擾乱を解析して、断層すべり量や破壊伝搬速度を拘束する試みを行っている。また Astafyeva and Heki (2009) は、直達音波による電離圏擾乱の初動の増加と減少の分布が、地震波の P 波の初動の押し引き分布のように地震の発生機構を反映していることを見出した。Figure 3 の 2008 年岩手宮城内陸地震の例は正の TEC 変化で始まっているが、これは逆断層地震の特徴である。直達音波による擾乱は距離に伴う幾何減衰が大きく、この擾乱も震源から 300 km 程度で見えなくなっている。擾乱の周期は約 4.5 分で火山噴火による擾乱に比べて長い。これは大気の共鳴周波数 (e.g. Nishida *et al.*, 2000) の中で最も周期の長いものに一致している。

地震、火山噴火いずれの例でも擾乱の周期は十分短いため、Figure 1 でみるような衛星の仰角や太陽天頂角の変化に伴う長周期の変化と混同する危険性は少ない。この場合は、生の TEC 変化を多項式近似したものを引き去るといった簡便なハイパスフィルターで効率よく

信号を取り出すことができる。Figure 2 と 3 の例では、それぞれ 4 次および 5 次の多項式を用いている。多項式の次数はデータを見ながら最適なものを選ぶことになるが、一般に時間窓を長くとるほど高次の多項式による近似が必要となる。なお対象とする擾乱の周期が既知の場合はウェーブレット変換も有効である(Heki and Ping, 2005)。また、地震や火山噴火に伴う電離圏の擾乱が南に選択的に伝搬してゆくのは、超高層での電子の動きが地磁気の方に拘束されるため、北向きの音波が選択的に減衰されることを反映している(Heki and Ping, 2005)。

3.2. 太陽フレアに伴う TEC 変化：全衛星に現れる短期的上昇

太陽面での爆発に伴って増加した太陽放射に対する電離圏の応答として、太陽に照らされた半球で TEC が急増することを SITEC (Sudden Increase of TEC) と呼ぶ。Figure 4 に、2006 年 12 月 5 日と 13 日に生じた二つの X クラス（静止衛星で監視している太陽からの X 線の放射量に基づいて決められるフレアの規模、地震のマグニチュードのようなもの）の太陽フレアについて、フレア発生を含む約 1 時間の TEC 時系列を示す。ここでは高度 300 km の層を貫くときの角度を用いて、鉛直方向に貫いた場合の TEC (斜めに貫いた場合の Slant TEC と区別するために Vertical TEC, VTEC と呼ばれる) に換算してある。

地震や火山噴火による擾乱では、たまたま視線が震源や火山の上空南側の電離圏を貫く GPS 衛星のデータでのみ擾乱信号が見られる。また視線は波面（地表から伝搬してきた音波がつくる面状の電子の濃淡）に浅い角度で交わる必要がある。一方太陽フレアの場合は、昼側全体が同時に影響をうけるため、すべての GPS 衛星で TEC が同時刻に増加するという顕著な特徴がある。また太陽フレアによる TEC 上昇の時間スケールは数分程度と短いため、地震や火山噴火に伴う擾乱の解析と同じ手法（多項式近似によるハイパスフィルター）が使用可能である。

一般にフレアに伴って硬 X 線（波長が 1 オングストロームより短い X 線）と極端紫外線 (EUV) の放射量が数分の時間スケールで増え (impulsive component), その後に軟 X 線を中心とする放射が数十分継続する (slow component)。12 月 5 日のフレアには 12 月 13 日のフレアに見られるような急峻な立ち上がりがみられない。これは、このフレアが太陽の縁辺部で発生したため、impulsive な成分が太陽大気に吸収されて、軟 X 線を主成分とする slow な成分に対する応答が選択的に強調されたからである。

Impulsive な成分による電子密度増加は、通常の電子密度の高度分布の相似性を保ちつつ全高度にわたって生じるが、slow 成分による電子密度増加は高度 100 km 内外の E 領域に選択的に生じる (Donnelly, 1976)。日置(2006)は、2003 年 10 月に生じた大規模太陽フレアに関して、昼夜境界線の夜側で境界線から様々な距離にある GPS 局における SITEC の量を比較することによって、フレアによる電子密度増加の高度分布を求めようとした。境界線から遠い局ほど高い高度の電子密度上昇を反映するという幾何学的な関係を利用したのである。しかし地球大気による吸収のモデル化が難しく精度よく高度分布を求めることができな

った。今後は、GPS 受信機を搭載した低高度衛星による GPS 掩蔽観測(e.g. Kursinski *et al.*, 1997) を併用し、地上の GPS 受信機ではわからない電子密度変化の高度分布を求める必要があるだろう。

3.3. ロケット（ミサイル）打上に伴う TEC 変化：急激な減少とゆっくりした回復

ロケットや弾道ミサイルの排気ガスに含まれている水分子、水素分子、二酸化炭素等は、電離圏 F 領域の酸素イオンから正電荷を奪い、電子と解離性結合することによって電子の枯渇をもたらす(Mendillo *et al.*, 1975)。こうしてできる電離圏の「穴」は宇宙開発の初期段階から知られていたが、HII-A ロケットの打ち上げに伴って生じた穴を GEONET が捉えたことから測地学研究者にも知られるようになった(Furuya and Heki, 2008)。また 2009 年 4 月 5 日には、北朝鮮から東に向かって発射された、大陸間弾道ミサイル（北朝鮮政府発表では衛星の打ち上げ）と考えられるテポドン 2 号の航跡が GEONET によって捉えられ、稠密 GPS 連続観測網の新たな応用として注目された(Ozeki and Heki, 2010)。

この現象の特徴は、TEC の急激な減少（1-2 分で減少が完了）と数十分かけたゆるやかな回復である。この回復過程はこれまでに述べた地震や火山噴火、太陽フレアなどによる擾乱に比べて時間スケールが長く、多項式近似によるハイパスフィルターでは回復過程をうまく取り出すことができない。以下に我々がテポドンによる TEC 変化の解析に用いた手法を紹介する。まず地球に固定された座標系における衛星の位置を別途求めておく（詳細は 4 章を参照）。次に時々刻々の視線ベクトルが電離圏を貫く天頂角 ζ を計算する（電離圏高度は 265 km としている、詳細は Ozeki and Heki (2010)参照）。TEC (Slant TEC)は時刻 t と ζ の関数であるが、それらは鉛直方向の TEC (VTEC)と衛星毎に異なるバイアス d を用いて

$$\text{Slant TEC}(t, \zeta) = \text{VTEC}(t)/\cos\zeta + d, \quad (4)$$

と表せる（電離圏の空間構造は無視している）。VTEC には仰角変化による変動分がない分、時間変化が Slant TEC より単純でモデル化しやすい。実際の VTEC は日変化するが、数時間の間の変化であれば時間の二次関数として、

$$\text{VTEC}(t)=at^2 + bt + c. \quad (5)$$

のようにモデル化できる。(5)を(4)に代入したものを観測方程式とし、 a, b, c, d を最小二乗法で推定すれば、3.1.や 3.2.で用いた単なる時間の多項式より、少ないパラメータで近似度の高いモデルができる。Figure 5 で濃いなめらかな曲線で示したモデルはこのようにして求められたもので、TEC の約二時間にわたる時間変化を忠実にモデル化している。ただし単一の衛星から推定した a, b, c から(5)式で復元した VTEC の値は、パラメータ間の相関が高い場合あまり信頼できない。VTEC そのものの絶対値を精度よく求める目的には、次の章で

述べるように複数衛星から共通の値を推定する必要があるが、特定の衛星で観測された擾乱を効率よく取り出すための手法としては本章の方法で十分である。ミサイルによって形成された電子の穴を GPS 衛星と受信局を結ぶ視線ベクトルが通過することによって生じる TEC 減少は、このようにして推定したモデルと実際の TEC の差として取り出すことができる(Figure 5 の下部の黒い曲線)。なお、類似の現象は宇宙から地球熱圏に突入する彗星（主成分は水の氷）によっても生じると思われる。小彗星仮説(e.g. Frank and Sigwarth, 1993)によると日本列島上空にも 20 トン規模の彗星が連日複数個突入していることになるが、まだ明らかな検出例は知られていない。

3.4. TEC 絶対値の推定：皆既日食による TEC 減少の例

太陽フレアと対照的に、日食は月の影によって太陽の放射が遮られるため、昼間の半球上で月の影が広がる広範な地域で TEC の減少が見られる。皆既日食の起こる地点の TEC は、月の半影に入った時からゆっくり減少し、皆既日食時に最小となった後に徐々に回復する。このような数時間かけた現象は、TEC の日変化や衛星仰角の変化に伴うゆっくりした変化と分離できない。これらを解析するには、仰角の異なる複数の衛星の TEC 変化から、TEC の絶対値を推定する必要がある。

前章の(4)式は、ある程度長い時間同一衛星を観測して、視線が電離圏となす角度 ζ が大きく変化しないと、バイアス d と VTEC がパラメータとして分離しにくいことを示唆する。そのため個々の衛星から別々に得られた TEC は一般に大きくばらつくが、すべての衛星に共通の値を推定することによって安定な推定が可能になる。また東の空と西の空を飛ぶ GPS 衛星において、視線が電離圏を通過する点の経度と観測点の経度の差を、時刻差に変換する(同じ空間パターンの TEC 分布の下を日本列島が西から東に動いてゆくと仮定している)と、さらなる解の安定化を図ることができる。

VTEC の時間変化のモデルとして、前章の例のように対象とする時間幅が数時間と短い場合は(5)式のように時間の多項式が適当である。しかし数時間以上の時間スパンで TEC の変化を調べる場合、1 時間毎の値を推定して折れ線で時間変化を近似する方法が適している。Figure 6 は、皆既日食のあった 2009 年 7 月 22 日とその前後 1 日の合計 3 日間の TEC 絶対値を一時間毎の折れ線で推定したものである。通常の日変化に加えて、皆既日食を迎えた UT 2 時を中心に部分日食が生じた前後数時間にわたって全電子数が減少していることがわかる。

3.5. 地震前兆としての TEC 日変化の異常

最後に TEC 日変化の異常を地震発生と関連付けた最近のいくつかの研究を紹介する。Liu *et al.* (2001) は、1999 年に台湾で発生した集々地震の 4-5 日前に、TEC の日変化の振幅が異常に小さくなったことを見出し、地震の前兆の可能性を示唆した。地震の数日前に TEC 日変化の振幅が小さくなることは、その後 2008 年四川地震を始め複数の地震で報告されてい

る (Liu *et al.*, 2009). 磁気赤道において大気潮汐によって生じた東向きの電場と北向きの磁場に、電子が相互作用して鉛直上方に高度千 km 付近まで移送され(*EXB* ドリフト), それらが磁場に沿って電離圏 F 領域に降りてきて赤道の南北両側磁気緯度 15 度付近に電子密度の濃い地帯を形成するのが赤道異常である. これらの前兆を示した地震はいずれも赤道異常の直下に震源域を持っているが, Liu *et al.* (2009) は, 地震に先立つ岩石破壊が東向きの電場を何らかの原因で弱めることによって, 赤道異常の位置と強さが変わり TEC 日変化の振幅に異常が生じると考えた.

2008 年岩手宮城内陸地震は, 日本列島内陸浅部で生じた地震としては比較的大きく, かつ太陽活動の最小期に発生している. 我が国において, 地震の前兆として台湾のような TEC 変化が見られるかを確認するには絶好の条件がそろっている. ここでは震源近傍の岩手県奥州市胆沢の GPS 点において, 地震を含む六週間の期間をとり, 前の章で述べた手法で TEC 絶対値を 1 時間毎の折れ線で求めた (Figure 7). 一般に RINEX ファイルは UT で一日毎に別ファイルになっており, VTEC の絶対値の推定も一日毎に行われる. しかしそのようにして求めた時系列を複数日ならべると, 零時で不自然な不連続がしばしば見られる. 一方日の境界をまたいでも (4)式にある衛星毎のバイアス d は変わらない. したがって, 零時の VTEC 不連続を防ぐために, 複数日のデータを結合し, 日をまたぐ衛星の TEC 時系列からは一つのバイアス値を推定する必要がある. ここでは, TEC 変化を求めたい日の前後の日のデータを結合して三日間の TEC 変化を一度に推定し, その真ん中の日のデータだけを取り出した. このようにして求めたデータを並べてゆけば, Figure 7に見られるように日の境界でも自然な連続した変化を見せる.

異常の判定は Liu *et al.* (2009)に倣い, 過去 15 日間の median (中央値)を取り, median と quartile の差の 1.5 倍を自然な揺らぎと仮定してそれを超えるものを異常値とした. 地震の一日後に見える大きな正の異常は, 偶然に発生した磁気嵐によるもので地震とは無関係である. Figure 7をみると, Liu *et al.* (2009)が主張する地震 4-5 日前の TEC の減少は負の異常として確かに見えている. しかしその異常の量はわずかであり, 地震と関係ない時にもしばしば起きている程度の異常である. ここでは前兆の有無は議論しないが, 条件が良いと思われる 2008 年岩手宮城内陸地震でも TEC 日変化の振幅異常がこの程度の大きさであれば, 地上 GPS による TEC の監視を我が国で地震予知に役立てるのは難しそうである.

4. 視線ベクトルと電離圏の交点

L_4 は geometry-free であり, 局位置や衛星位置などの幾何学的なことは「ほぼ」無視できるが, 例外的に幾何学的な計算が必要になる場合がある. それは, ある局で受信したある GPS 衛星の電波から求めた TEC が, 地理的にどのあたりの電離圏を見ているかを求める場合である. 実際の電離圏は上下に幅を持っているが, 便宜的に最も電子密度の高い高度 (日本では 300 km 程だが, 場合によっては電子密度の重心として, より高い 400 km 程度を仮定することもある) に薄い層を仮定し, 衛星と受信機を結ぶ視線ベクトルがその層と交わ

る点(IPP, Ionospheric Penetration Point), およびその地表への投影点(SIP, Sub-ionospheric Point)を求めて、「緯度何度, 経度何度の電離圏を見ている」とすることが多い。

既に紹介したウェブサイト(<http://www.ep.sci.hokudai.ac.jp/~heki/software.htm>)では, RINEX形式の軌道情報ファイルを読み, そこに含まれているケプラー要素から, 諸衛星の地球固定系における位置を三分ごとに計算するプログラム `rdeph.f` が提供されている. そこから, 特定の時刻の衛星位置を内挿して求めれば, あとは局位置と衛星位置を結ぶベクトルが特定の高度の層を貫く点の座標を初等的な数学で計算することができる. Figure 2, 3 の SIP の座標はこのようにして求めたものである. なお SIP はその定義から本質的に高精度で求める必要がない. 様々な高度に分布した電子を高度 300 km で代表させた点ですでに大幅な近似だからである. 従って軌道精度も放送暦以上のものを追求する必要はない.

5. おわりに

測地学の専門知識を持つ教員が所属する日本の大学では, GPS を用いた研究を大学院の学位論文や学部の卒業研究のテーマとすることが多い. それらのテーマは, 最近発生した地震に伴う地殻変動に関する研究であったり, 地震間の地殻変動の解析から地下における断層固着部分を推定する研究であったりと多彩である. また大気遅延から可降水量を求めて, その時間変化と気象現象の関連を探る GPS 気象学的な分野にも様々な興味深い研究テーマがある(小司他, 2009). しかし, それらの研究を自分で作成した計算機プログラムによって行うことは困難であり, 既存の GPS データ解析ソフトウェアをブラックボックスとして利用することが多い.

L_4 の解析は本質的に簡単で, 大学院生や卒論生が気軽にプログラムを作成して RINEX ファイルからそれらの情報を抽出することができ, 努力に対する教育効果が高い. また本文中で紹介したプログラムを使用すれば, すぐに解析に取り組むこともできる. データの扱いが簡単であるにも関わらず, 本論文で紹介したように L_4 の解析による研究対象はバラエティに富み, 未開拓の領域もまだ多いと考えられる. 今後は様々な大学や研究所で GPS-TEC 法による地球物理学研究が普及し, 新たな発展を見せることを願っている.

謝辞

匿名の査読者に多くの適切なコメントをいただいた.

参考文献

- Astafyeva, E. and K. Heki (2009): Dependence of waveform of near-field coseismic ionospheric disturbance on focal mechanisms, *Earth Planets Space*, **61**, 939-943.
- Astafyeva, E., K. Heki, V. Kiryushkin, E. Afraimovich, and S. Shalimov (2009): Two-mode long-distance propagation of coseismic ionosphere disturbances, *J. Geophys. Res.*, **114**, A10307, doi:10.1029/2008JA013853.

- Dautermann, T., E. Calais, and G. S. Mattioli (2009): Global Positioning System detection and energy estimation of the ionospheric wave caused by the 13 July 2003 explosion of the Soufrière Hills Volcano, Montserrat, *J. Geophys. Res.*, **114**, B02202, doi:10.1029/2008JB005722.
- Donnelly, R.F. (1976): Empirical models of solar flare X ray and EUV emission for use in studying their E and F region effects, *J. Geophys. Res.*, **81**, 4745-4753.
- Frank, L. A. and J. B. Sigwarth (1993): Atmospheric holes and small comets, *Rev. Geophys.*, **31**, 1-28.
- Furuya, T. and K. Heki (2008): Ionospheric hole behind an ascending rocket observed with a dense GPS array, *Earth Planets Space*, **60**, 235-239.
- 日置幸介(2006): 太陽フレアに伴う電離層全電子数上昇のGPS観測, *測地学会誌*, **52**, 319-328.
- Heki, K. (2006): Explosion energy of the 2004 eruption of the Asama Volcano, Central Japan, inferred from ionospheric disturbances, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L14303, doi:10.1029/2006GL026249.
- Heki, K. and J.-S. Ping (2005): Directivity and apparent velocity of the coseismic ionospheric disturbances observed with a dense GPS array, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **236**, 845-855.
- Heki, K., Y. Otsuka, N. Choosakul, N. Hemmakorn, T. Komolmis, and T. Maruyama (2006): Detection of ruptures of Andaman fault segments in the 2004 Great Sumatra Earthquake with coseismic ionospheric disturbances, *J. Geophys. Res.*, **111**, B09313, doi:10.1029/2005JB004202.
- Kursinski, E. R., G.A. Hajj, J.T. Schofield, R. P. Linfield, and K. R. Hardy (1997): Observing Earth's atmosphere with radio occultation measurements using the Global Positioning System, *J. Geophys. Res.* **102**, 23429-23466.
- Liu, J. Y., Y. I. Chen, C. H. Chen, C. Y. Liu, C. Y. Chen, M. Nishihashi, J. Z. Li, Y. Q. Xia, K. I. Oyama, K. Hattori, and C. H. Lin (2009): Seismoionospheric GPS total electron content anomalies observed before the 12 May 2008 Mw7.9 Wenchuan earthquake, *J. Geophys. Res.*, **114**, A04320, doi:10.1029/2008JA013698.
- Liu, J. Y., Y. I. Chen, Y. J. Chuo, and H. F. Tsai (2001): Variations of ionospheric total electron content during the Chi-Chi earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 1383-1386.
- Mendillo, M., G. S. Hawkins, and J. A. Klobuchar (1975): A sudden vanishing of the ionospheric F region due to the launch of Skylab, *J. Geophys. Res.*, **80**, 2217-2225.
- Nishida, K., N. Kobayashi, and Y. Fukao (2000): Resonant oscillations between the solid earth and the atmosphere, *Science*, **287**, 2244-2246.
- Ozeki, M. and K. Heki (2010): Ionospheric holes made by ballistic missiles from North Korea detected with a Japanese dense GPS array, *J. Geophys. Res.*, A09314, doi:10.1029/2010JA015531.
- 小司禎教・岩淵哲也・畑中雄樹・瀬古 弘・市川隆一・大谷 竜・萬納寺信崇 (2009): GPS気象学: GPS水蒸気情報システムの構築と気象学・測地学・水文学への応用に関する研究,

Figures

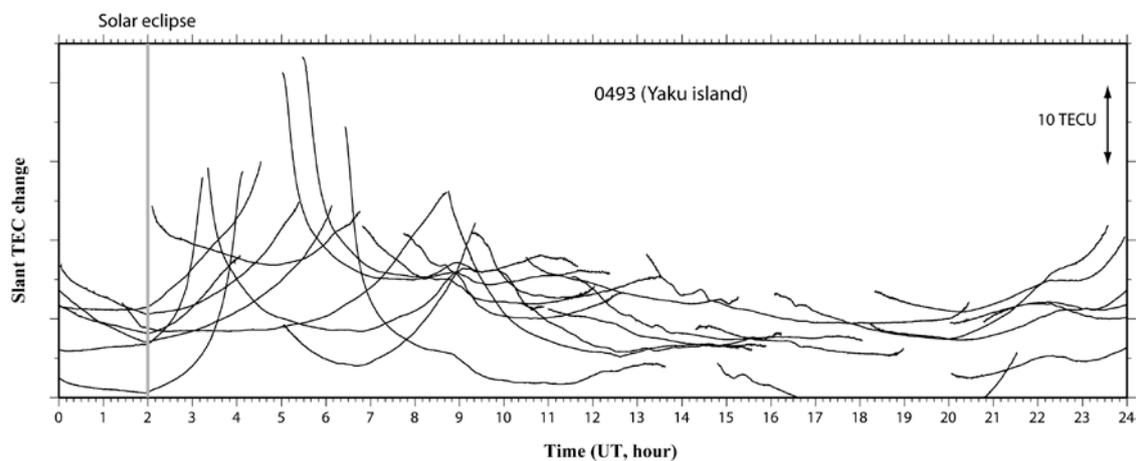


Figure 1. Time series of raw slant total electron content (TEC) at a station in the Yaku Island (950493), southern Japan, on 22 July, 2009. U-shaped changes reflect variations of GPS satellite elevation as it moves in the sky, i.e. line-of-sight vector penetrates thicker ionosphere when satellite elevation is lower. A small decrease of TEC due to a total solar eclipse is recognized at ~2:00 UT.

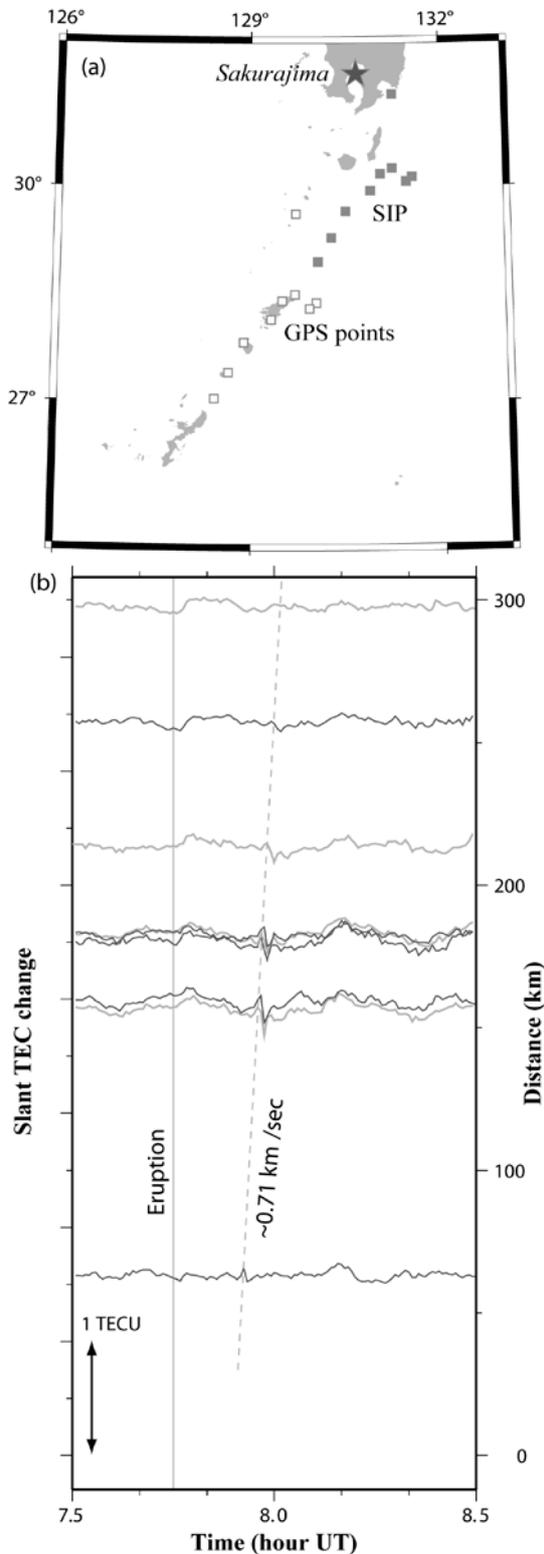


Figure 2. Time series of slant TEC changes at nine GPS stations in islands south of Kyushu, southern Japan, with GPS Satellite No.11 on 2 Oct, 2009. The Sakurajima volcano (star in (a)) exploded at ~ 7.75 UT, and TEC pulsation appeared ~ 10 minutes after the explosion and propagated southward by ~ 0.7 km/sec (b). The vertical axis shown at the right-hand side of (b) shows the distances of sub-ionospheric points (SIP) (a) from the volcano (black star). Open and solid squares in (a) shows GPS stations and their SIP at 8:00 UT.

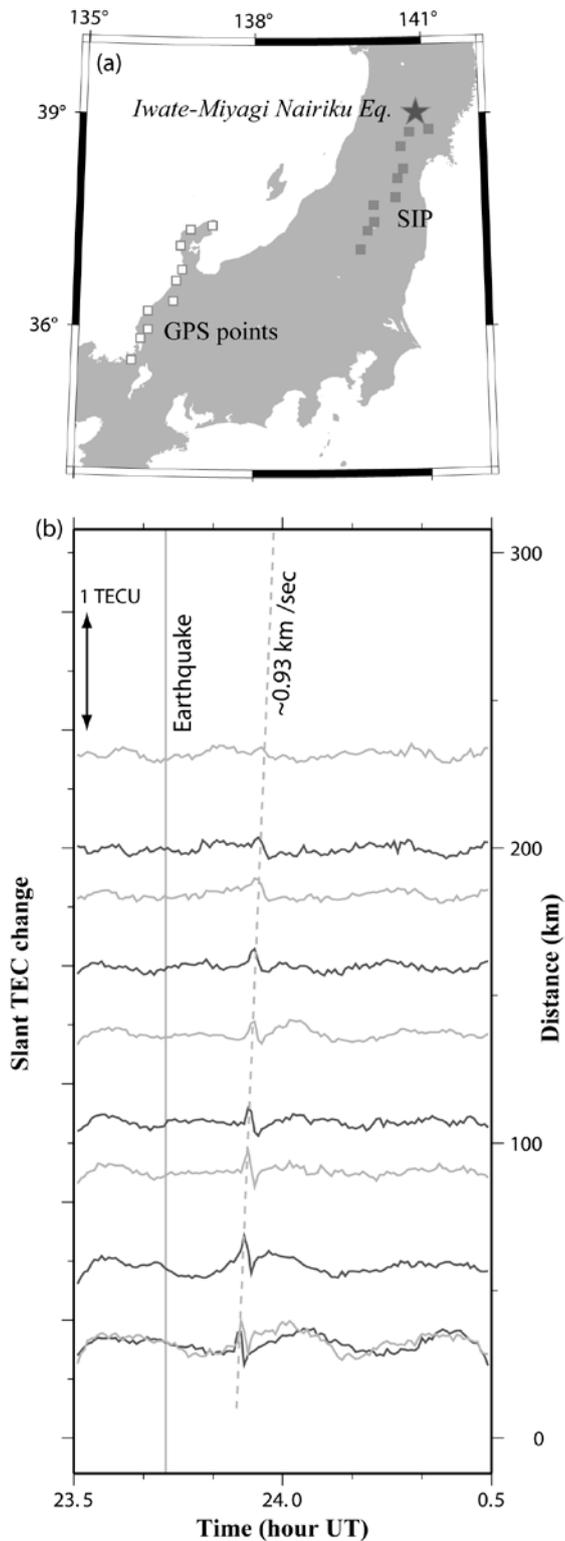


Figure 3. Time series of slant TEC changes at ten GPS stations in Honshu, central Japan, with GPS Satellite No.8, from 8:30 to 9:30 JST, 14 Jun, 2008 (from 23.5 UT 13 Jun. to 0.5 UT 14 Jun.). The 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake (M7.2) occurred at ~23.43 UT (a), and TEC oscillation appeared ~10 minutes after the earthquake and propagated southward by ~0.9 km/sec (b). The vertical axis shown at the right-hand side of (b) shows the distances of SIP at ~23.9 UT (a) from the epicenter (black star).

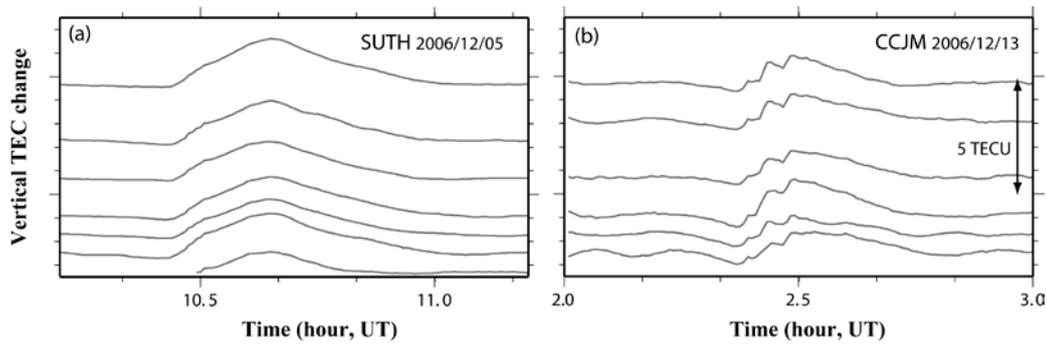


Figure 4. Time series of vertical TEC changes at the Sutherland, South Africa, GPS station (a) and the Chichijima, Japan, GPS station (b), on December 5 and 13, 2006, respectively. Solar flares of X9.0 and X3.4 occurred at ~10.5 UT and ~2.5 UT on these days, respectively. Sudden increases of TEC are seen for all the satellites simultaneously. The December 5 X9.0 flare occurred at the edge of the solar disk, for which we hardly see the impulsive component. The December 13 flare occurred near the center of the solar disk, and impulsive components are well recognized.

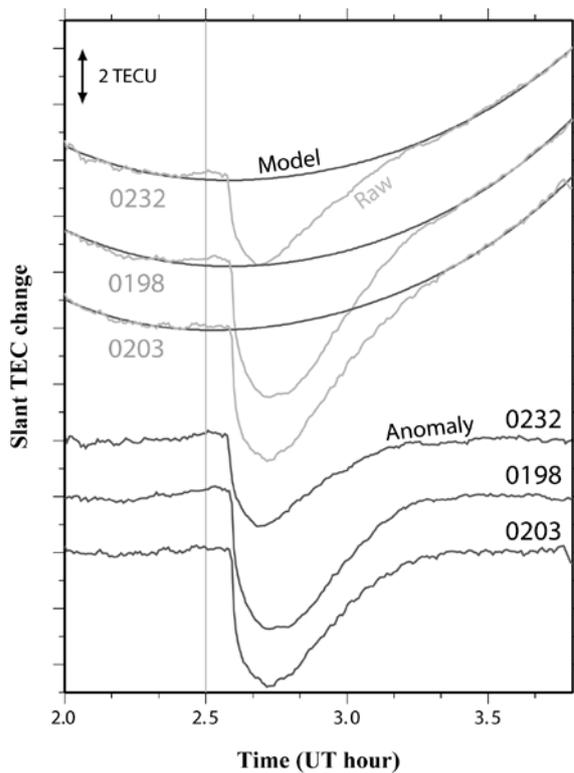


Figure 5. Time series of slant TEC changes at three GPS stations (950232, 950198, and 950203) in Honshu, central Japan, on April 5, 2009. Raw TEC time series (light gray curves) were modeled with vertical TEC changing as a quadratic function of time (black smooth curves, see equations 4 and 5). Anomalous TEC decrease (black curves) are defined as the difference between the model and the observed slant TEC. Sudden dips of TEC are caused by ionospheric hole formed by the exhaust plume of the Taepodong-2 ballistic missile from North Korea (Ozeki and Heki, 2010).

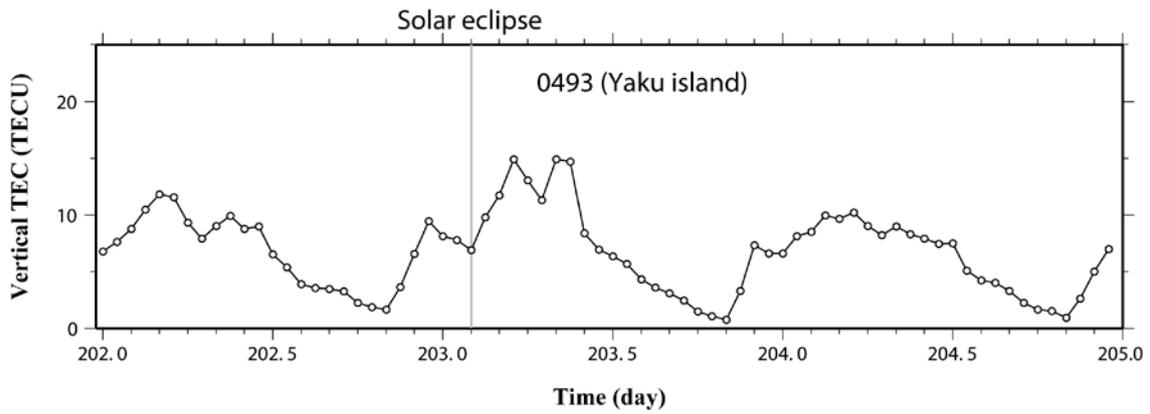


Figure 6. Time series of absolute vertical TEC at a GPS station (950493) in Yaku island, southern Japan, over a three-days period July 21-23 (day of the year 202-204), 2009, estimated every hour using all the available GPS satellites together with satellite-specific biases according to the equation (4). In addition to daily TEC changes, we see TEC decrease around ~02:00 UT (11:00 in the morning in local time) on the middle day, when the island experienced a total solar eclipse.

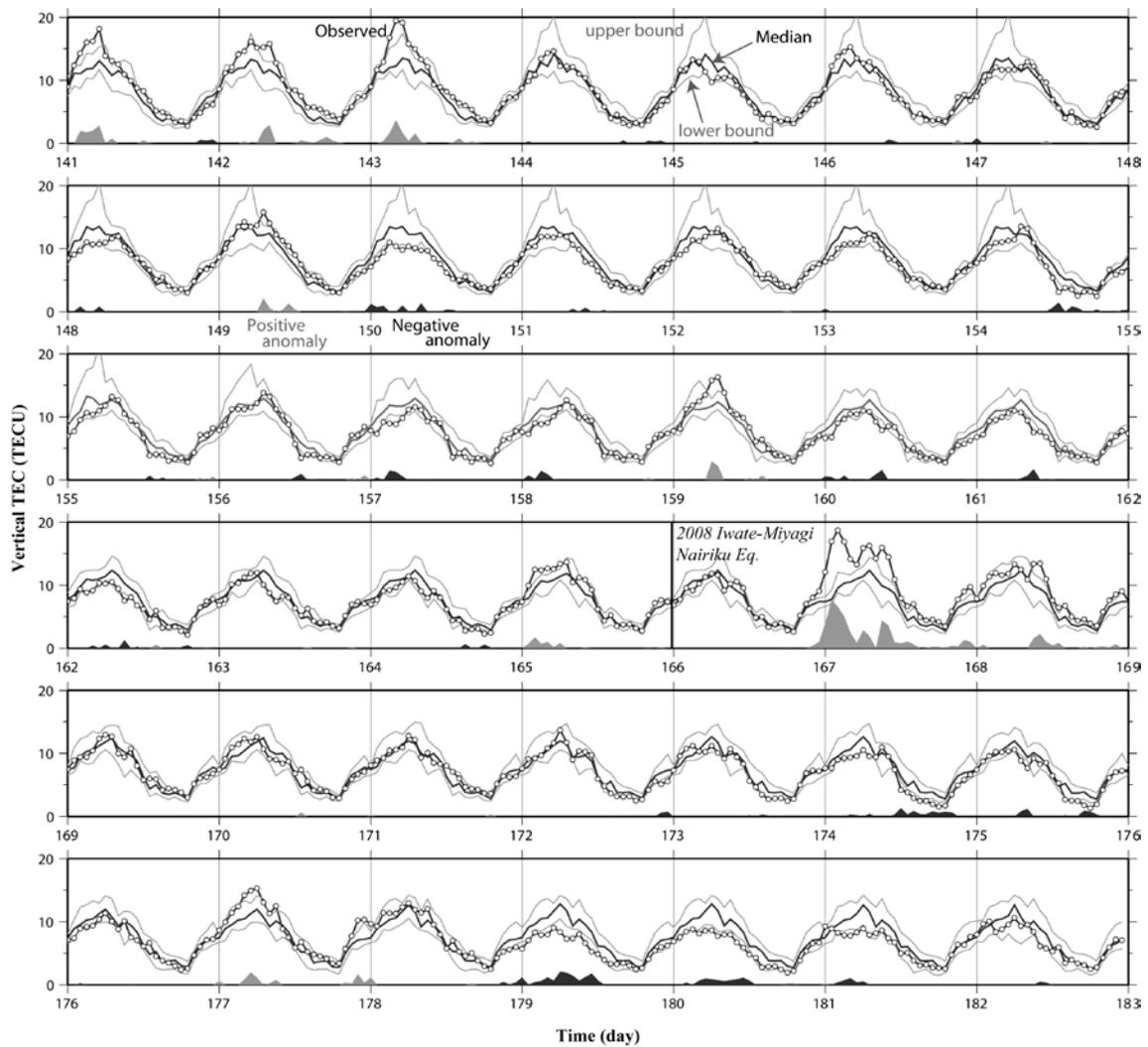


Figure 7. Time series of absolute vertical TEC (open circles connected with black lines) at the Isawa GPS station (970796) in the Iwate Prefecture, northeastern Honshu, over six weeks including the 2008 July 13 Iwate-Miyagi earthquake (day of the year 165 in UT, thick vertical line), estimated every hour with the same method as Figure 6. Thick black curve shows the median of the preceding 15 days with upper and lower bounds of natural variability (taken 1.5 times as far from median as quartiles) shown by thinner curves. Gray and black shades at the bottom show the amount of positive and negative anomalies (amount above/below the upper/lower bounds of natural variability). A large positive anomaly about one day after the earthquake is related to a geomagnetic storm. We can see negative anomalies 4-5 days before the earthquake. However, they are faint, and similar amount of anomalies occur regardless of earthquakes.