

3-3-3 TEC の実時間導出とバイアス推定

3-3-3 *Derivation of Near Real-time TEC for Monitoring Ionospheric Disturbances*

三宅 互 陣 英克

MIYAKE Wataru and JIN Hidekatsu

要旨

GPS 受信網の整備とデータの早期公開により、電離圏全電子数 (TEC) の定常的なモニタリングが可能となっている。情報通信研究機構では、国土地理院の GEONET データから迅速に TEC を導出するシステムを開発し、2005 年以降、日本上空の電離圏の定常的な監視に利用している。この監視システムは、TEC 確定値からのずれが 1–2 TEC unit 以内で、1 度に 3 時間分のデータを、1–3 時間程度の時間遅れで、日本上空の TEC の値を 5 つの緯度帯に分けて、提供・表示するものである。さらに、2008 年以降は、日本全土の TEC 値のマップ形式での表示が加えられ、細かい空間構造をもつ現象の検出も可能となっている。この監視システムは、電離圏嵐をはじめとするさまざまな電離圏じょう乱の発生・伝播・衰退をモニターするのに優れ、きわめて有効である。現在は太陽活動が低調で、大きなじょう乱現象は起きていないが、次期太陽活動極大期において、その活用が期待される。このリアルタイム TEC のプロットと 2 次元マップは、<http://wdc.nict.go.jp/IONO/> にて公開されている。

We have developed a system of the rapid derivation of the total electron content (TEC) of the ionosphere from GEONET (a dense GPS receiver network in Japan), which offers unique opportunities for a permanent monitoring of the ionosphere. The latest TEC values (with a delay of 1–3 hours) are obtained every 3 hours, and most of the values are within 1–2 TEC units of the actual TEC. We have found the system quite powerful for continuously monitoring the progress of ionospheric storms. In addition to the plot of TEC temporal variation at 5 latitude regions over Japan, we have used a two-dimensional TEC map since 2008. The TEC map can detect the ionospheric disturbances over Japan, including large-amplitude traveling ionospheric disturbances, and plasma bubbles intruding over Japan, with high resolution. The development of the near real-time monitoring system of TEC enables us to monitor large ionospheric disturbances, ranging from global- to small-scale disturbances, expected in the next solar maximum. The plot and maps are open to the public and are available on <http://wdc.nict.go.jp/IONO/>.

[キーワード]

電離圏全電子数, 実時間モニタリング, 電離圏嵐, 計器バイアス

Total electron contents, Real-time monitoring, Ionospheric storms, Instrumental bias

1 はじめに

人間の作った宇宙や地上の基幹システムに影響を与える宇宙環境の変動を、地上の天気とのアナロジーで「宇宙天気」と呼んでいる。その社会的影響を軽減する試みとして行われているのが、宇宙天気予報システムの研究開発(例えば、[1])である。この予報システムにおいては、予報アルゴリズム

の開発と並んで、宇宙天気の迅速な現況把握が不可欠な要素であり、様々な観測値のリアルタイムでのデータ収集・高次データ処理の高速化などが重要な課題となっている。

宇宙天気のうち主要なもの1つが、通信・放送・測位に影響を与える電離圏の様々なじょう乱現象である。電離圏嵐の発達や太陽フレアの発生により、短波帯の通信途絶が生じることはよく知

られている。スプラディック E 層の発生により、VHF 帯の電波までが異常伝播し、防災無線やテレビ放送に混信を引き起こすことがある。さらに、近年になって重要視されているのが、GPS 衛星などを利用した衛星測位における影響である。電離圏全電子数 (Total Electron Content: TEC) の上昇は衛星—地上間の電波伝播遅延を引き起こし、また、電子密度の不規則構造はシンチレーションを発生させたりする。

この報告においては、電離圏の重要なパラメータである TEC の準リアルタイムでの導出システムと、それを利用した日本上空の電離圏じょう乱の監視について紹介する。欧米ではすでに、準リアルタイムでの TEC の導出・監視システムが実用化されており、一般にも公開されている (例えば、[2][3])。ここで紹介するのは、情報通信研究機構が独自に開発した、日本で初めての類似のシステムである。この準リアルタイム TEC による電離圏監視システムには、従来のイオノゾンデ観測にはない特徴があり、両者を合わせて補完しあうことにより、強力な電離圏監視体制が構築されている。

2 準リアルタイム TEC の導出

2.1 導出手法

GPS 衛星から地上への電波伝播は、途中で通過する電離圏の全電子数 (TEC) により、伝播速度に遅延が生じる。遅延時間は周波数の自乗に逆比例するため、TEC の値は 2 周波 GPS 観測値の伝搬遅延から算出することができる。しかし、2 周波の信号には各々異なった計器遅延バイアスが存在し、TEC の計算精度に大きく影響する。したがって、TEC の導出には、計器バイアスの見積もりが不可欠になる。計器バイアスは、衛星ごとに異なる衛星バイアスと受信機ごとに異なる受信機バイアスの両者からなる。

GPS 衛星バイアスと受信機バイアスの見積もり手法に関して、世界各国で多くの研究がなされてきた。日本においては、国土地理院が設置した GPS Observation Network (GEONET)[4] の GPS 受信機が日本各地に数多くある。そのデータから、Otsuka et al. [5] は計器バイアスを見積もり、TEC の絶対値を導出し、 $0.15^{\circ} \times 0.15^{\circ}$ の緯度経度の分解能で TEC2 次元マップを作製した。しかし、彼

らの手法では衛星バイアスと受信機バイアスが分離・区別されてはいなかった。

これに対し、Ma and Maruyama[6] は、1 日分の GEONET データの統計的な処理により、この 2 種のバイアスを分離して TEC とともに導出するアルゴリズムを開発した。日本全土の上空を、図 1 に示したような $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ の緯度経度の 32 領域に分割し、各領域の中では TEC の値は一様であると仮定した。また、衛星バイアスと受信機バイアスは、1 日のうちには変化せず一定値をとるとした。このアルゴリズムは、1997 年以降の GEONET データに適用され、32 領域における 15 分ごとの TEC の値、1 日ごとの各々の衛星バイアスと各々の受信機バイアスが導出され、データベース化されてきた。導出された TEC のデータは、電離圏嵐などの研究に使用され、多くの成果をあげてきた (例えば、Maruyama et al.[7])。

Ma and Maruyama[6] のアルゴリズムは TEC を正確に求めるものであるが、1 日分の GEONET データ蓄積と多くの計算時間を要し、リアルタイムでの TEC の導出には適したものではなかった。衛星バイアスと受信機バイアスは、時間とともに変化していくが、数日程度では、その変動は小さいことが Ma and Maruyama[6] により確かめられている。Miyake[8] は、この事実

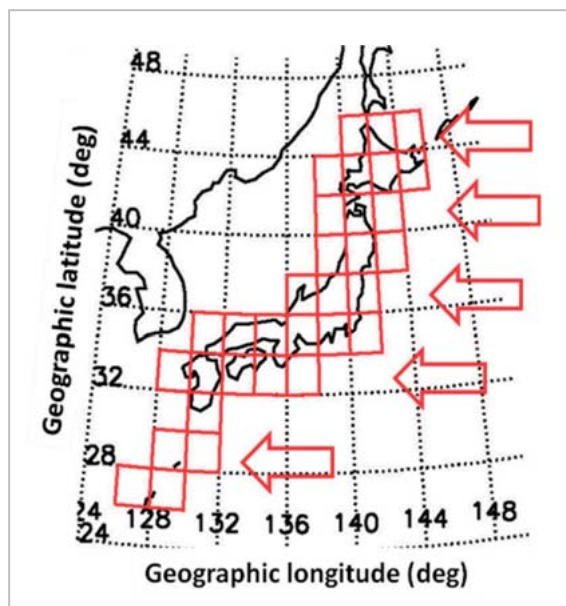


図 1 TEC と受信機・衛星バイアスを導出するための $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ のメッシュ

準リアルタイム TEC プロットで使用した 5 つの緯度帯 (45° 、 41° 、 37° 、 33° 、 29°) を矢印で示す。

着目し、2-3日前のバイアスを使用して、TECを迅速に求めることに成功した。個々のGPS衛星と受信機のバイアスが分離決定され、すべて既知であれば、どのような衛星-受信機の組み合わせに対しても、TECは以下の式から簡単に導出される。

$$TEC = (TECS - Br - Bs) \cos \chi \quad (1)$$

ここでTECSはその衛星-受信機ペアで計測される電波伝播経路上のslant TEC、Brはその受信機バイアス、Bsはその衛星バイアス、 χ は衛星天頂角である。この(1)式からTECを導出するには、全てのBrとBsが決定されている必要があり、Ma and Maruyama^[6]のアルゴリズムによるBrとBsの導出の基盤の上に、ここで述べる手法は可能となったのである。

一方で、それまでは、1日分のGEONETデータが2-3日遅れで公開されていたものが、3時間ごとに直近の6時間分の速報値が即時公開されるようになった。これにより、この速報値を直ちにftpにより取得し、Ma and Maruyama^[6]のアルゴリズムで数日前のデータを用いてあらかじめ求めておいたバイアス値を適用して、TECがほぼリアルタイムで求められるようになった。国土地理院よりftpされたGEONETデータからは、通常のPCを使用して、10分以内の処理時間でTECが導出される。

2.2 準リアルタイム TEC の誤差評価

導出されたりアルタイム TEC の値は、数日後にMa and Maruyama^[6]のアルゴリズムで厳密に求められた TEC の値と比較することができる。そのような比較の例を図2に示す。上から順に、図1に矢印で示した5つの緯度帯、45°、41°、37°、33°、29°における4日間のTECの変動をプロットしたものである。縦軸はTEC unit ($\times 10^{16}$ electrons/m²)であり、準リアルタイム TEC を赤線で、後日に求めた厳密な TEC を黒線で示した。4日間にわたって、特にじょう乱もなく、静穏時の日変化を繰り返した時期であるが、準リアルタイム TEC の値は厳密な値と大差なく推移しており、モニタリングシステムとしては十分な精度であることがわかる。

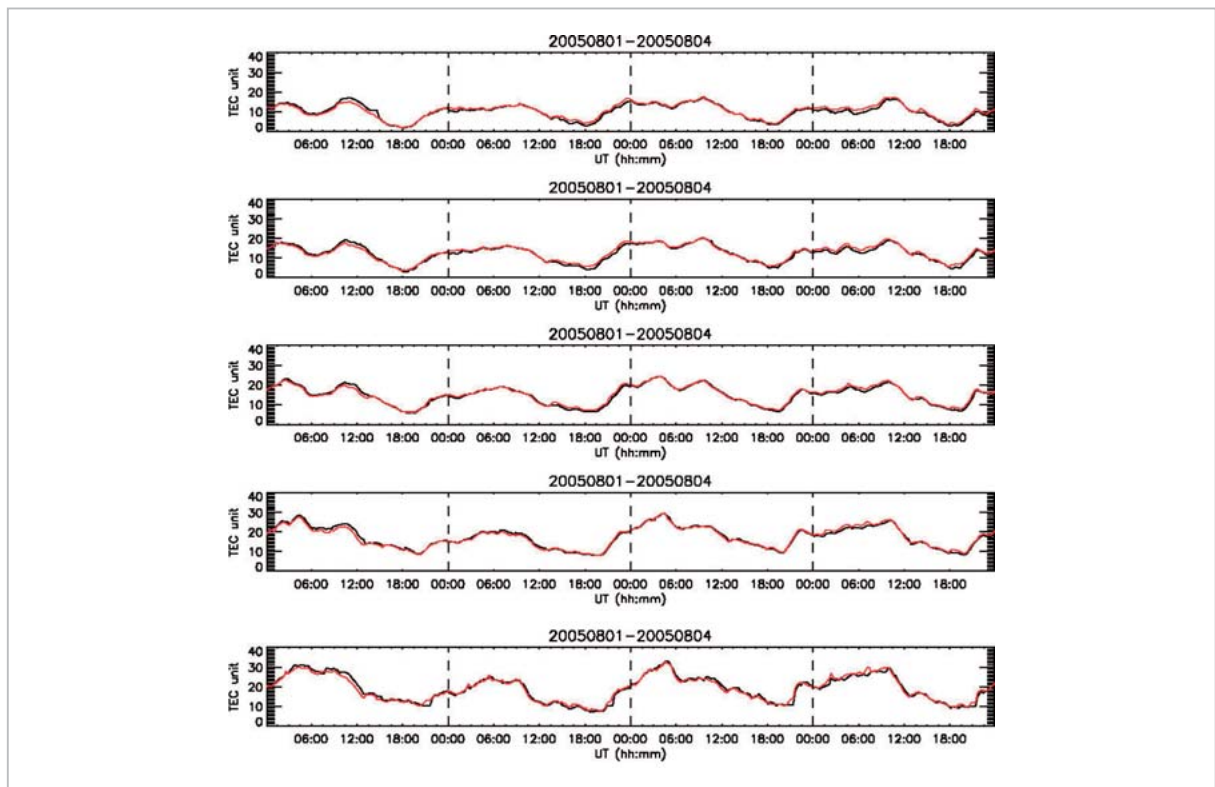


図2 準リアルタイムで導出されたTEC(赤線)と後日厳密に求められたTEC(黒線)の比較

上のパネルから45°、41°、37°、33°、29°の緯度帯についてである。

図3には2005年後半の半年間の準リアルタイム TEC の値と厳密な値との差を統計的に調べた結果を示した。前述した5つの緯度帯に分けて、誤差の頻度分布をみたものであるが、どの緯度帯においても、誤差はおおむね±1-2 TEC unit 以内に収まっていることがわかる。ここで誤差とは、準リアルタイム TEC の値から厳密な値を差し引いたものと定義した。この誤差分布の自乗平均を求めてみると、高緯度から順に、2.3、1.6、1.0、1.2、1.7 TEC unit となり、中間の緯度帯 37° で最小となる。単純に考えると、この緯度帯に設置されている受信機のバイアス変動が小さいからと解釈されるが、受信機バイアスを調べてみると必ずしもそうとは言い切れない。むしろ、この誤差に大きな影響を与えているのは、各緯度帯(2°×2°の各領域)に含まれる受信機の数と考えられる。

それぞれの緯度帯に含まれる TEC のデータ数は、衛星の位置が移動するに従い、時々刻々変化しているが、基本的には地上に設置された受信機数によっている。図2と図3の TEC は、各時刻においてそのデータ数で割った平均値である。個々の受信機バイアスは、数日の間に正に変化するものもあれば負に変化するものもあり様々である。式(1)から明らかなように、受信機バイアス Br が正(負)にずれれば、その分だけ TEC は負(正)に誤差が出る。その領域のデータを与える受信機数が1ならば、その受信機バイアスの誤差がそのままその領域の TEC の誤差となる。しかし、仮に、もう1台受信機があり、その受信機バイアスの誤差が逆符号ならば、TEC の平均値をとる段階で2台の受信機バイアスの誤差の効果は相殺され、TEC の誤差は小さくなる。受信機の数が多ければ多いほど、この相殺の結果はゼロに近くなるが、受信機数が小さいと、この相殺がうまく働かない場合(すなわち、バイアスのずれが同符号に偏る場合)がでてくると予想される。

実際に各領域での平均をとるデータ数を調べてみると、図3の期間の場合、もっとも誤差が小さい緯度帯 37° の各領域では平均データ数は33であるのに対し、緯度帯 45° では15と半数以下である。これは地上の受信機数を反映している。受信機数が多い本州中部では、統計的な効果により、ずれたバイアス値を採用したことによる TEC の誤差が抑えられている。さらに、ある1つの領域

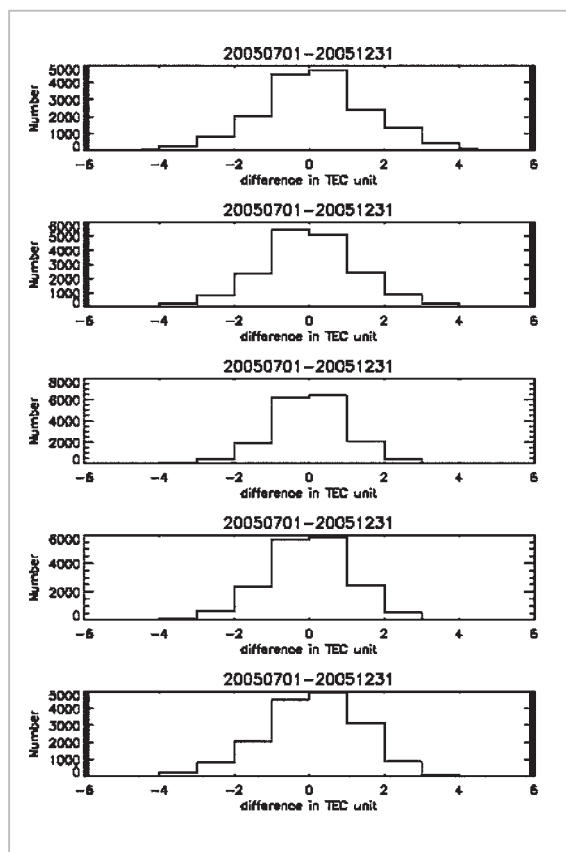


図3 2005年後半の6ヶ月間について、準リアルタイムで導出された TEC と後日厳密に求められた TEC の差の頻度分布を5つの緯度帯で示した。ほぼ2 TEC unit 以内に誤差は収まっている。

に注目し、衛星の移動によるデータ数の増減と TEC の誤差との対応関係を調べても、データ数が少ない場合に TEC の誤差が大きい場合が出てくることが確認されている。

3 TEC 導出システムの経年変化

2005年から現在まで4年間にわたり、準リアルタイム TEC 導出システムが連続稼働され、電離圏監視に利用されてきた。ここでは、その4年間の経年変化について簡単にまとめておく。まず、前述した5つの緯度帯での準リアルタイム TEC の値と厳密な値との差の、4年間にわたる推移を図4に示す。それぞれの年の前半・後半の半年間について、差の自乗平均をとったものである。ほぼ、1-2 TEC unit の誤差で推移していることが分かる。また、緯度別にみると、誤差の大小関係は、どの期間でも同じで、緯度帯 45° が最も大き

く、緯度帯 37° が最も小さい。これは、前述したようにこの誤差の大小関係が各緯度帯の受信機数を反映したものならば、当然である。さらに、すべての緯度帯で、2007 年前半までは誤差は比較的大きく、2007 年後半以降、誤差は減少する。このような全緯度帯における同時の変化は、受信機側の原因では考えられず(受信機バイアスの変動はそれぞれの受信機で様々であり、全国で一致した変動は考えにくい)、なにか別の理由があるはずである。

図 5 に、衛星バイアス(実線)と受信機バイアス(破線)の変動の 4 年間の推移を示す。半年間にわたって、全ての衛星と全国の全ての受信機について、各々の変動の自乗平均をとったものである。

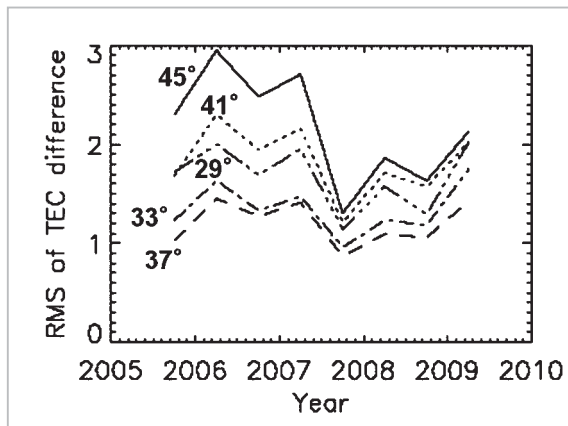


図4 準リアルタイムで導出された TEC と後日厳密に求められた TEC の差の自乗平均を 4 年間にわたって 5 つの緯度帯について示した。縦軸の単位は TEC unit である。

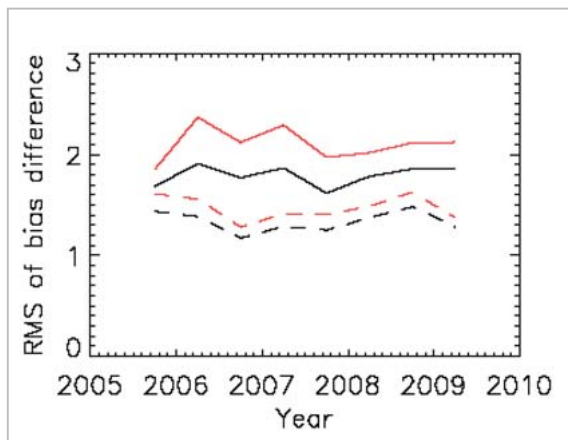


図5 衛星バイアス(実線)と受信機バイアス(破線)の変動の自乗平均の 4 年間の推移

黒線が 2 日間の変動、赤線が 5 日間の変動を表わす。縦軸の単位は TEC unit である。

縦軸の単位は TEC unit である。黒線が 2 日間の変動、赤線が 5 日間の変動を表わす。衛星と受信機、双方のバイアス値はともに日がたつにつれてずれが大きくなり、赤線が黒線よりも大きい。

この準リアルタイム TEC の導出システムの運用が開始されたばかりの 2005 年後半は、国土地理院の GEONET のサーバーや、当機構内のネットワーク、そしてこの導出システム自体の運用が安定しない等、種々の要因が重なり、導出システムで使用されたバイアス値は、最も多い場合で 3 日前、平均では 4.8 日前のものを使用していた。これに対し、これらの不安定要因は次第に解消され、2007 年前半では、導出システムで使用されたバイアス値は、最も多い場合で 2 日前、平均でも 3.0 日前のものとなっている。したがって、図 5 の 2 つの色の線の間にはほとんどのバイアスのずれが収まるとみてよいことになる。

図 4 と図 5 を比較すると、全ての緯度帯で共通に、準リアルタイム TEC の値と厳密な値との差の 4 年間にわたる増減は、衛星バイアス変動の経年変化と類似していることに気づく。これに対し、受信機バイアス変動の経年変化と対応しているようには見えない。(1)式から分かるように、衛星バイアスのずれは、すべての緯度帯のデータに、等しく一定の誤差として入ってくる。また、1 度に観測される衛星は多くても 3 つ、少ない場合は 1 つであり、個々の衛星バイアスの誤差が、多くの同時観測データを平均することにより相殺される効果は期待できない。これが受信機バイアスに起因する誤差との大きな相違点となる。

この準リアルタイム TEC 導出システムの特徴は、異なる日の衛星・受信機バイアスを採用したことにより、これでリアルタイム導出が可能となった。一方で、異なる日のバイアスを使用したことにより生じる TEC 導出の誤差に関しては、以下のようにまとめられる。

- (1) 準リアルタイム TEC の誤差は、おおむね 1 - 2 TEC unit である。
- (2) 個々の受信機バイアスの変動が様々であるため、本州中央部のように受信機数の多い領域では、受信機バイアスの変動の効果は平均をとれば相殺し、準リアルタイム TEC の値には、わずかな影響しか及ぼさない。
- (3) 本州以外の領域では、受信機数が少ないた

め、この相殺の効果が十分ではなく、誤差が大きく出る傾向がある。

- (4) 衛星バイアスの影響については前述の相殺効果はなく、その変動がそのまま準リアルタイム TEC の誤差になる。準リアルタイム TEC の誤差の経年変化は衛星バイアス変動の大きさを反映したものとなっている。

4 電離圏じょう乱の監視

4.1 電離圏嵐

電離圏の変動には、太陽活動、季節、日変化などの定常的変動と、地磁気じょう乱に伴う電離圏嵐などの突発性の変動がある。定常的変動成分から突発性の変動を分離表示するため、直近の7日間のデータについて同時刻での平均値をとり、平

均的日変化を求める。2006年12月12日から15日までの4日間のデータについて、図6にその例を示す。一番上のパネルは地磁気活動の Kp 指数を示し、以下の5つのパネルは、図2と同じく、5つの緯度帯 (45°、41°、37°、33°、29°) の準リアルタイム TEC の値を示している。縦軸は TEC unit ($\times 10^{16}$ electrons/m²) であり、黒い破線が平均的日変化、赤い実線が観測値である。1-3日目は、各緯度帯ともに、2つの線がほぼ重なっており、特にじょう乱もなく、平均的な日変化をしていたことが分かる。4日目になり、全緯度帯で観測値が平均値よりも大きく上昇し、突発的な変動が発生したことが明瞭である。Kp 指数と比較すると、この TEC の異常な増大が、地磁気活動の活発化に対応していることがわかる。

磁気圏のじょう乱に伴い、極域オーロラ帯への

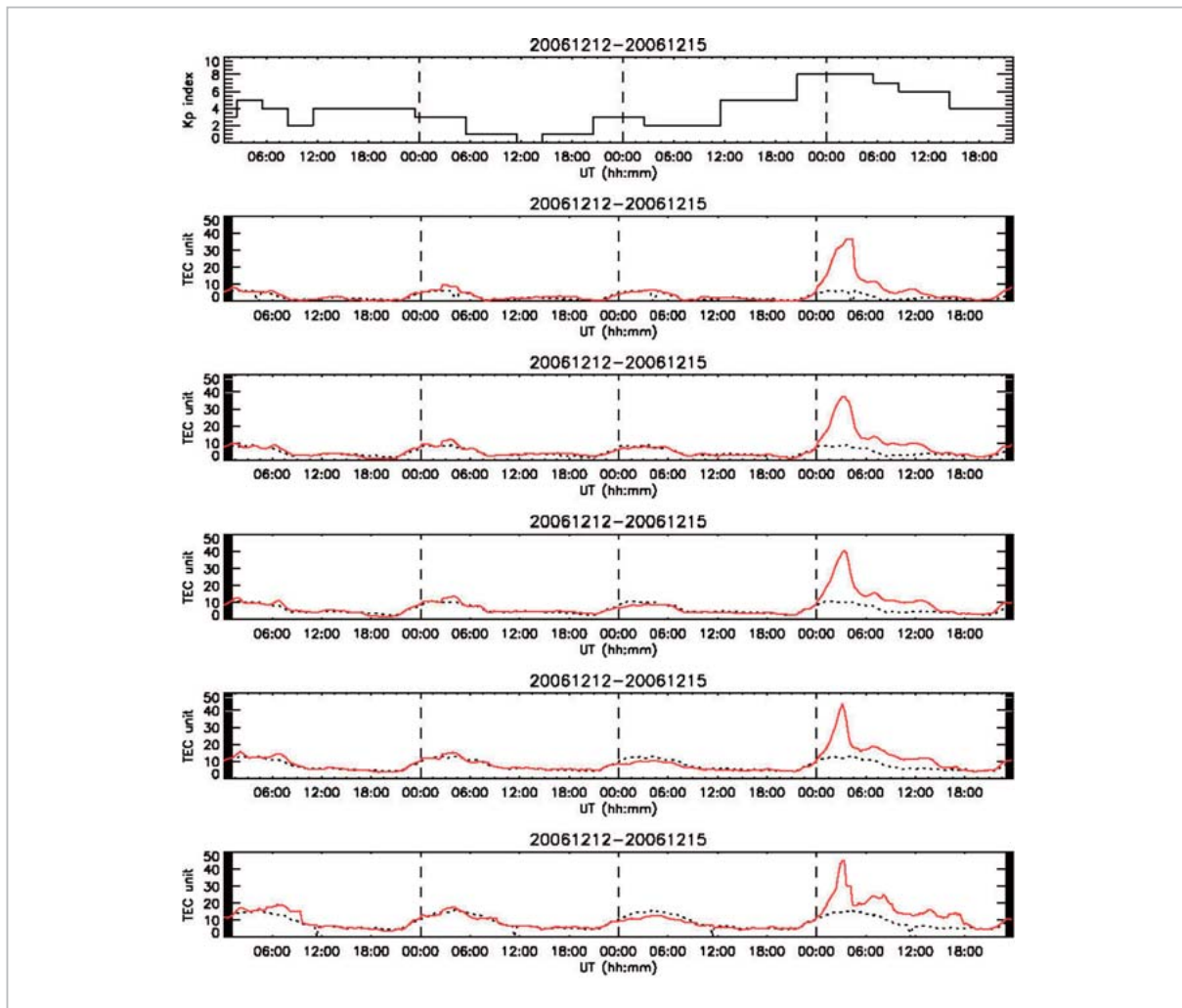


図6 地磁気じょう乱時に正相電離圏嵐が発生したときの TEC 変動の例

最上段は Kp 指数であり、以下、5つの緯度帯について TEC の変動を4日間にわたって示した。

エネルギー入力が増大し、超高層大気の大規模な変動を引き起こす(例えば、[9][10])。N₂などの分子密度の増大が中・低緯度まで及ぶと、F領域での主イオンであるO⁺との間で解離再結合反応が加速され、電離圏の電子密度は低下し、負相電離圏嵐となる。短波帯の使用可能な最大周波数(MUF)は低下し、通信途絶となる。一方、極域から赤道に向かう風が増大したり、東向きの電場が増大したりするとき、電離圏は上方へと持ち上げられる。高度が上昇するとO⁺を消滅させるN₂などの分子の密度が低下するため、再結合が起きず、日照の条件下では電子密度は上昇する。これが正相電離圏嵐である。

電子密度の高度についての積分値であるTECは、基本的には、電子密度のもっとも大きいF領域の電子密度の増減をそのまま反映して変動している。図6の4日目で生じたTECの増大は、まさに、正相の電離圏嵐であり、3日目の後半からKp指数が増大し、大きな地磁気じょう乱が発生し、これに対応して、電離圏のTECが日照条件下で、異常に増大したわけである。ここでは例は示さないが、負相電離圏嵐の発生も、準リアルタイムTECのこのプロットで平均的日変化からのずれにより、同様に監視が可能であり、Miyake[8]に具体例がいくつか紹介されている。

この準リアルタイムTECによる電離圏監視システムには、いくつかの利点がある。準リアルタイムTEC以外による監視方法としては、イオノゾンデによる観測があり、この準リアルタイムTECの監視システムが稼働する以前から、長く使用されてきた。イオノグラムからは電離圏臨界周波数(f_oF₂)をはじめとして多くの電離圏に関する情報もたらされ、きわめて有効な観測手段である。しかし、その一方で、いくつかの弱点も存在する。日本においては、夏季を中心としてスポラディックE層が頻繁に発生する(例えば、[11])。そのようなときは、F層からのエコーが得られず、電離圏嵐が発生・発達している状況でも、その現況が把握できない場合がよくある。また、X線フレアによる短波帯の異常吸収(SWF)が発生している状況下でも、F層からのエコーは得られない。また、短波帯の通信の混入により、エコーの読み取りに障害も起こりえる。GPS衛星からの送信波は、はるかに周波数が高く、これらの影響は準リ

アルタイムTECには存在せず、常時、電離圏F領域の連続監視が可能となっている。

地磁気じょう乱が発生した時、正相電離圏嵐が起こるか、あるいは負相電離圏嵐が起こるかは、長年の研究にもかかわらず、いまだ正確に予測することはできていない。現状で我々に可能なことは、リアルタイムで電離圏嵐の発生と発達を監視し、早期の警報を出すことである。また、電離圏嵐は、正相と負相が途中で入れ替わる例もあり、その推移を注意深く連続して監視する必要がある。この点からも、リアルタイムTECにより、他のじょう乱現象の同時発生・重累に関係なく、電離圏嵐によるF領域の変動の連続監視が可能となったことには大きな意義がある。

4.2 その他のじょう乱現象の例

電離圏嵐以外のじょう乱現象としては、赤道異常の発達や、移動性電離圏じょう乱、プラズマバブルなどが、このリアルタイムTECのモニタリングシステムでとらえることができる。図7は赤道異常が発達し、日本の緯度帯でもTECの増加が観測された例である。図6と同様に、一番上のパネルがKp指数、以下の5つのパネルが5つの緯度帯のTECの変動を赤の実線で、直近7日間の平均的な日変化を黒の破線で示している。図6の地磁気じょう乱に伴う電離圏嵐の場合とは異なり、Kp指数は4日間を通じて、低いままである。一方、TECは4日目に最南端の29°で異常な増加がある。これは赤道異常の発達によるもので、この緯度帯にまで赤道異常が張り出した事例である。

図6と図7に示したのは、同一緯度帯(幅2°)に入るTECの平均値であるが、個々の値を表示した例が図8と図9である。受信機-衛星の視線に沿って電離圏高度(350 km)に投影した位置に点を打ち、色でTECの値を示した。座標は地理的な緯度・経度である。電離圏嵐のように広い範囲で同時に変動が起こり、平常値からのずれで識別できる現象は、図6や図7のような表示がわかりやすい。しかし、空間的スケールが小さく、局所に限られた現象では、図8や図9のような2次元マップ表示が有効である。GEONETの受信機網は非常に密度が高く、このような局所的な現象の検出に優れている。このようなマップは5分

毎に1枚作成され、現象の時間発展を細かく追跡できる。2008年以降、このマップ表示が追加され、そのアニメーションとともに、一般にも公開されてきた。しかし、今までのところ太陽活動極小期であるため、目だった異常現象は生じていない。そこで、このリアルタイム TEC 導出システムによるマップ表示を、前極大期に起こった異常現象のときの GEONET データに適用し、どのように現象の発展が追えるかを調べてみた。

図8に示したのは、大振幅の移動性電離圏じょう乱(Traveling Ionospheric Disturbances : TID)(例えば、[12])の例である。北西 - 南東方向に波面を持つ TEC の構造が存在している。前後の時刻を見ると、この波状の構造は、北海道付近にあらわれて、南西方向に伝播していったことが分か

る。ここでは示さないが、従来の図6、7のような5つの緯度帯での TEC プロットでは、この波状構造とその伝播の様子は把握できない。極域へのパルス的なエネルギー流入・加熱による大気膨張は、しばしば、赤道方向へ向かう伝播性の大気じょう乱を発生(例えば、[13])する。この大規模な大気重力波は、電離圏高度の増減や、大気光強度増減や、TEC の増減の波状構造として観測されることになる。この波状構造の波長は数百 km であり、中規模 TID と呼ばれるものである。通常の TID の振幅は小さく 1 TEC unit 以下である。それに対し、この現象では異常に大きい振幅であることが分かる。

プラズマバブルは赤道域に発生し、プラズマ密度の大きな空間勾配を持つ密度減少の構造であ

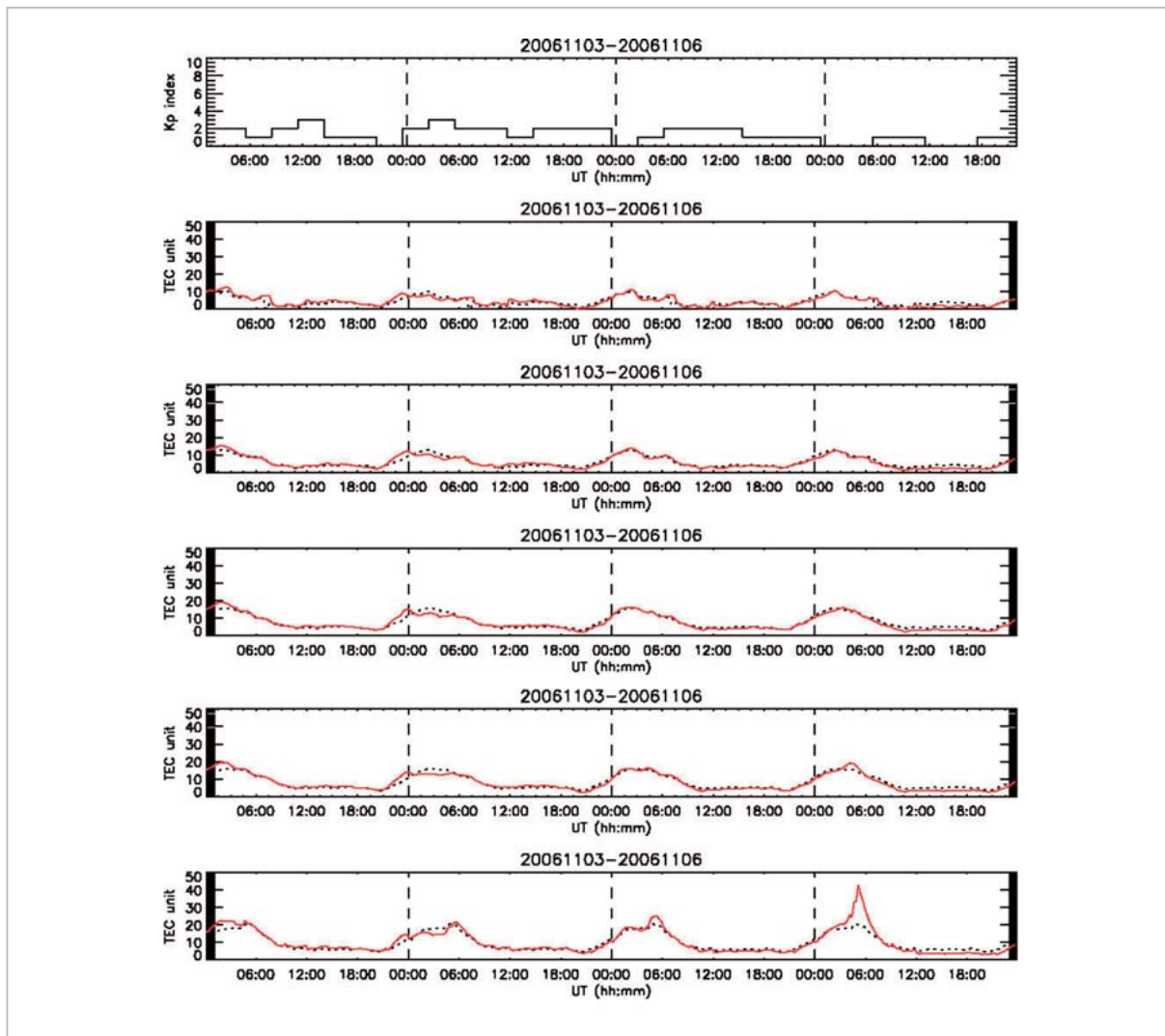


図7 赤道異常が発達し、緯度 29°(最下段)でも TEC の増大が観測された例

図のフォーマットは図6と同じである。

る。プラズマバブルは、F層下部で日没後に沿磁力線構造として発達し、上部電離層へと上昇していく。特殊な場合には、赤道での高度で2000 kmにも達し、このときその磁力線沿いの構造は日本の緯度帯にまで及ぶことになる[14][15]。プラズマバブルの側面では、その密度勾配が原因となり、より細かい不規則構造が発生し、衛星から地上への電波にシンチレーションを発生させ、宇宙環境擾乱の悪影響の最も深刻なものの1つである(例えば、[16])。このため、情報通信研究機構においても東南アジア地域に観測網を展開し、その発生・伝播機構を解明し、予測技術の開発へとつなげる研究が進行中である[17]。

図9に示したのは、日本上空にまで侵入してきたプラズマバブルに伴うTEC減少の例である。

矢印で示した領域でTECが減少しているのがわかる。日本には4か所のイオノゾンの観測所があり、その上空にプラズマバブルが存在すればスプレッドFとして検出可能である。しかし、この現象例では、ちょうど国分寺と山川の2つの観測所の上にプラズマバブルが位置しており、イオノゾンでは観測できていない。日本全国を切れ目なく高密度でカバーするGEONET受信機網に基づいた、2次元のTECマップによってこそ、このようなプラズマバブルの日本上空への侵入の常時監視が可能となる。ここで紹介したようなTECの2次元マップ表示による電離圏じょう乱のモニタリング例に関しては、Miyake and Jin[18]に詳しく述べられている。

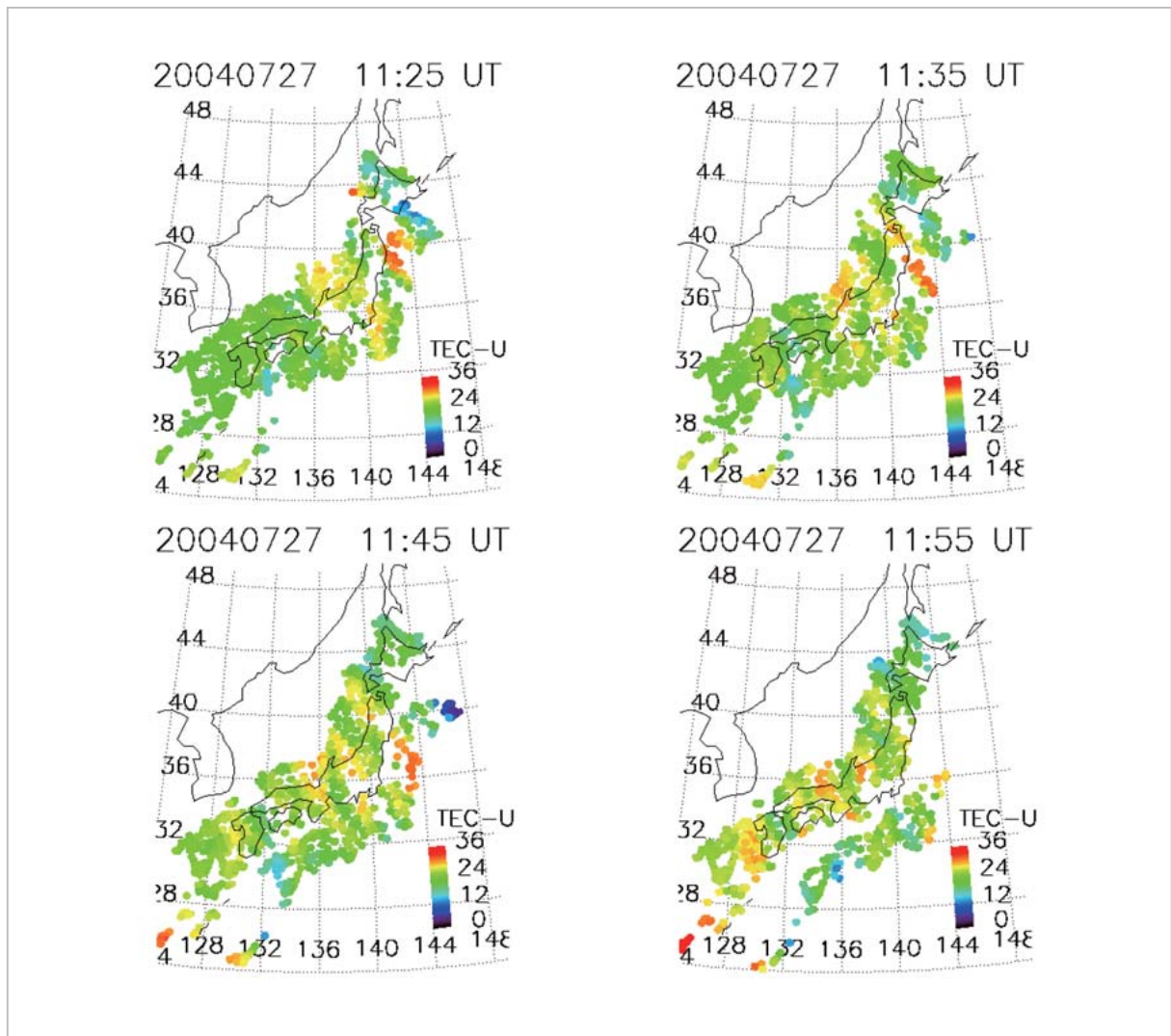


図8 日本上空を西南方向へ伝わる大振幅の伝播性電離圏じょう乱の例

色はTECの値を示し、右下のバーがスケールを与える。

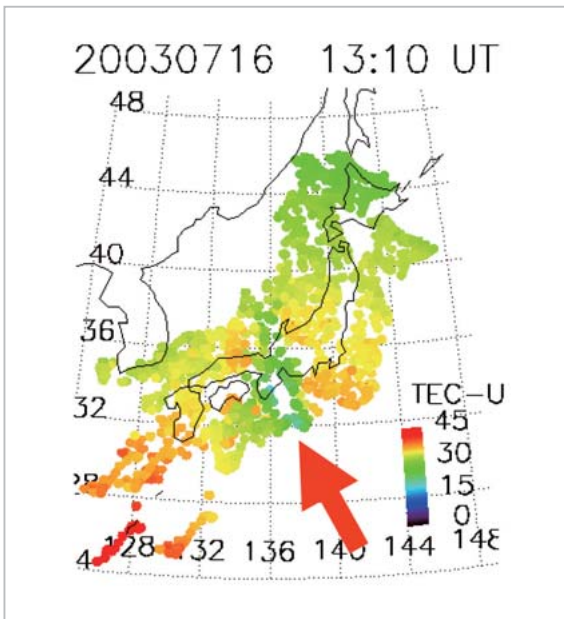


図9 日本上空に出現したプラズマバブルに伴う TEC 減少の例

5 おわりに

過去の電離圏監視・予報の重点の1つは、負相電離圏嵐の発生であり、短波帯の使用可能な最大周波数 (MUF) の低下による通信途絶が大きな関心事であった。最近の電離圏についての関心事は、衛星航法への影響である。TEC が衛星航法に与える影響としては、電波の伝播遅延と、電離圏シンチレーションによる衛星電波のロックはずれがあげられる。後者は空間的に強い TEC の勾配が存在するときに発生しやすい。また、伝播遅延量

を近隣の基地局から導出して位置補正するシステムも存在するが、同様に TEC の強い空間勾配が存在する場合は、基地局の補正情報は大きな誤差を含むことになる。短波通信の社会システムにおける比重の低下もあり、今後の電離圏監視の重点は、図8と図9で示したような TEC の大きな空間勾配を持つじょう乱現象へと移っていくであろう。そのような局在化した電離圏じょう乱の構造を把握するには、従来の国内4か所のイオノゾンデによる観測では不十分であり、リアルタイム TEC の2次元マップによる監視が必須となる。

現在のリアルタイム TEC のモニタリングシステムが本格的に稼働を開始して以来、太陽活動の極小期となっており、特に大きな電離圏じょう乱は発生していない。しかし、太陽活動サイクル24の極大期は目前であり、そこで発生する様々な異常現象に対して、我々の監視システムは十分な力を発揮するものと期待している。なお、これらのリアルタイム TEC のプロットと2次元マップは、<http://wdc.nict.go.jp/IONO/index.html> にて公開されている。

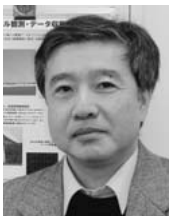
謝辞

本研究の遂行にあたっては、丸山隆博士のご助言をいただいた。ここに厚く御礼を申し上げたい。また、本システムの定常運用とプロットのWEB公開は、加藤久雄氏と馬場崎伊津子氏のご助力によっている。

参考文献

- 1 Watari, S., "Impact of space storms on technologies and space weather forecast", J. Plasma Fusion Res., Vol.82, No.11, pp.739-744, 2006.
- 2 Jakowski, N., S. M. Stankov, and D. Klaehn, "Operational space weather service for GNSS precise positioning", Ann. Geophysicae, Vol.23, pp.3071-3079, 2005.
- 3 Fuller-Rowell, T., E. Araujo-Pradere, C. Minter, M. Codrescu, P. Spencer, D. Robertson, and A. Jacobson, "US-TEC: A new data assimilation product from Space Environment Center characterizing the ionospheric total electron content using real-time GPS data", Radio Sci. Vol.41, RS6003, doi:10.1029/2005RS003393, 2006.
- 4 Miyazaki, S., T. Saito, M. Sasaki, Y. Hatanaka, and Y. Iimura, "Expansion of GSI's nationwide GPS array", Bulletin of the Geographical Survey Institute, Vol.43, pp.23-34, 1997.

- 5 Otsuka, Y., T. Ogawa, A. Saito, T. Tsugawa, S. Fukao, and S. Miyazaki, "A new technique for mapping of total electron content using GPS network in Japan", *Earth Planets Space*, Vol.54, pp.63-70, 2002a.
- 6 Ma, G., and T. Maruyama, "Derivation of TEC and estimation of instrumental biases from GEONET in Japan", *Ann. Geophysicae*, Vol.21, pp.2083-2093, 2003.
- 7 Maruyama, T., G. Ma, and M. Nakamura, "Signature of TEC storm on 6 November 2001 derived from dense GPS receiver network and ionosonde chain over Japan", *J. Geophys. Res.*, Vol.109, A10302, 2004.
- 8 Miyake, W., "Prompt derivation of TEC from GEONET data for space weather monitoring in Japan", *J. Atmos. Sol-terr. Phys.*, Vol.69, pp.803-816, 2007.
- 9 Prölss, G. W., "Magnetic storm associated perturbations of the upper atmosphere", in *Magnetic storms*, *Geophysical Monograph Ser.*, Vol.98, pp.227-241, 1997.
- 10 Buonsanto, M. J., "Ionospheric storms – a review", *Space Sci. Rev.*, Vol.88, pp.561-601, 1999.
- 11 Whitehead, J. D., "Recent work on mid-latitude and equatorial sporadic-E", *J. Atmos. Terr. Physics*, Vol.51, pp.401-424, 1989.
- 12 Saito, A., et al., "Traveling ionospheric disturbances detected in the FRONT campaign", *Geophys. Res. Lett.*, Vol.28, pp.689-692, 2001.
- 13 Hocke, K., and K. Schlegel, "A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982-1995", *Ann. Geophysicae*, Vol.14, pp.917, 1996.
- 14 Otsuka, Y., K. Shiokawa, T. Ogawa, and P. Wilkinson, "Geomagnetic conjugate observations of equatorial airglow depletions", *Geophys. Res. Lett.*, Vol.29, No.15, pp.1753-1756, 2002b.
- 15 Ogawa, T., E. Sagawa, Y. Otsuka, K. Shiokawa, T. I. Immel, S. B. Mende, and P. Wilkinson, "Simultaneous ground- and satellite-based airglow observations of geomagnetic conjugate plasma bubbles in the equatorial anomaly", *Earth Planets Space*, Vol.57, pp.385-392, 2005.
- 16 Kelley, M., J. Makela, and O. de la Beaujardiere, "Convective ionospheric storms: a major space weather problem", *Space Weather*, Vol.4, S02C04, doi:10.1029/2005SW000145, 2006.
- 17 Maruyama, T., "Ionospheric irregularities", *J. Commun. Res. Lab.*, Vol.49, pp.163-179, 2002.
- 18 Miyake, W., and H. Jin, "Near-real time monitoring of TEC over Japan at NICT (RWC Tokyo of ISES)", *Adv. Geosciences*, 2010, in press.



みやがわ 五郎
三宅 互

東海大学工学部航空宇宙学科教授
理学博士
宇宙環境科学



はら えいきち
障 英克

電磁波計測研究センター宇宙環境計測
グループ専攻研究員 理学博士
超高層大気物理