

3-2-9 東アジア経度の高密度 GPS 受信機網による磁気嵐時スーパーバブルの観測

3-2-9 A Storm-Time Super Bubble as Observed with Dense GPS Receiver Network at East Asian Longitudes

馬 冠一 丸山 隆

MA Guanyi and MARUYAMA Takashi

要旨

TEC が局所的に大きく減少するプラズマ・バブルが 2000年 2月 12 日の日没後に磁気嵐の主相で中緯度 (~30–34°N, ~130–134°E) において観測された。その磁気嵐は、嵐の急始後に IMF Bz が南に向きを変えることで特徴づけられた。GPS 衛星信号のロック・オフと ROTI マップの解析から、バブルは磁気嵐の初期の成長段階に分岐 (bifurcate) したものと見られた。バブルが地球磁場の磁力線に沿った構造として発達・上昇すると仮定したとき、その上昇速度はもっとも大きいときで磁気赤道上の値に換算して 300 m/s (赤道高度 2,150 km) と見積もられた。時間が経過して高度が増すとともに上昇速度の低下が観測された。バブルは緯度方向に異常に拡大して 36.5°N (磁気緯度 31.5°N) の中緯度にまで達し、これは磁気赤道で最高点の高度が 2,550 km に対応する。発達の過程でバブルは最大 50 m/s の速度で東方向に移動した。緯度方向に並んだイオノゾンデ・チェーンによって得られた F 層の最大電子密度高度と最大電子密度の変化は、磁気圏電場の低緯度への浸入がスーパー・バブルの発生を助けたことを示していた。

A post sunset plasma bubble manifested by TEC depletion was observed at midlatitudes (~30–34°N, ~130–134°E) during the main phase of a geomagnetic storm on 12 February 2000. The storm was characterized by southward turning of IMF Bz preceded with storm sudden commencement. With loss of lock and ROTI maps, the bubble was seen to bifurcate at the early growth phase of the storm. When the bubble was assumed to be the field-aligned geometry, the maximum upward drift speed was estimated at ~300 m/s at the equatorial height of ~2150 km, and the upward drift velocity decreased with increasing altitude and time. The bubble had unusually large latitudinal extension reaching midlatitude of 36.5°N (31.5°N magnetic latitude), indicating an apex height of ~2550 km at the magnetic equator. In process of the evolution, the bubble drifted eastward at a speed of ~50 m/s. The F region peak height and density obtained by a meridional ionosonde chain suggested a prompt penetrating magnetospheric electric field helped to trigger the super bubble.

[キーワード]

プラズマ・バブル, 磁気嵐, ROTI マップ, ロック・オフ, GPS
Plasma bubble, Magnetic storm, ROTI map, Loss of lock, GPS

1 はじめに

プラズマ・バブルは、不規則構造の強い夜間の赤道域電離圏の低密度プラズマ領域である。プラズマ・バブルの動的プロセスと空間的形態は電波・光学観測、ロケットによる測定及び数値シ

ミュレーションによって研究が行われてきた[1]–[7]。プラズマ・バブルは、F 層の底部から非線形レイリー・テイラー不安定によって発達し、電離圏の最大電子密度高度より上まで上昇すると一般的には理解されている。とくに日没後の時間帯には電場、中性風及び地球磁場の複雑な相互関係のため

に赤道域の F 層が不安定になることが多い。宵の間に不安定な底部での密度ゆらぎが非線形的にバブルにまで成長する。バブルは、内部の密度が周囲と同じになるところまで浮力(分極電場による $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフト)で上昇する。地球磁場の磁力線に沿う形で発達するプラズマ・バブルは、上昇しながら磁気赤道から離れて緯度方向にも拡大していく。経度方向に関しては、南北に長く伸びた「くさび」構造になって東に移動することが多い。基本的なシナリオは明らかになっているが、プラズマ・バブルのシーディング(最初のきっかけ)といくつかの発達条件についての問題が未だ残されている [8] - [10]。

電離圏を通過する L バンド信号により、全地球測位システム(GPS: Global Positioning System)は電離圏の不規則構造を研究するための優れた手段を提供している。不規則構造に起因するシンチレーションは、GPS 衛星信号の振幅と位相の変動を記録することによって観測することができる [11] [12]。GPS 信号の伝播効果により、電離圏の全電子数(TEC: total electron content)を測定することも可能であり [13]、プラズマ・バブルは衛星から受信機への電波伝播経路に沿った TEC の減少として検知することができる [14]。さらに、ROT と呼ばれる TEC の変動率、あるいは ROTI と呼ばれる ROT の標準偏差が電離圏不規則構造の研究に利用されている。これらのパラメータが不規則構造の影響としての GPS 信号の位相変動を特徴付けているからである [15] - [17]。GPS はさまざまな目的に利用できるため、地上の GPS 受信機やそれによる受信網が世界的規模でますます増加している。これによって、広い地域や地球規模での電離圏の研究が可能になり、プラズマ・バブルの時間的発達と空間的構造を詳しく調査することができる [16]。

高密度の GPS 衛星受信機網(GEONET: GPS Earth Observation Network)が 1994 年から日本に設置されている。これは 1,200 台を超える二周波 GPS 受信機で構成されている [18]。近年、中緯度電離圏のさまざまな事象が GEONET の観測によって研究されている [19] - [21]。最近、GEONET の観測を利用して ROTI (> 0.1 TECU/min) の統計分析が行われ、2000 年 2 月 12 日の夜中磁気嵐後の電離圏について二次元の ROTI マップが

出された [22]。本稿では磁気嵐時の赤道プラズマ・バブルが GEONET の TEC 観測によって発見され、DMSP-F14 衛星によるイオン密度測定によって確認されたことについて述べる。このバブルの特徴で顕著なのは、その中緯度までの拡大である。これは、バブルの発達に GEONET ROTI を用いて調査された初めてのケースである。GEONET から作成された ROTI マップにより、他のどの観測手段よりもはるかに大規模に不規則構造を研究することが可能になった。

2 観測結果

GEONET の各受信機は、二周波 GPS 信号の搬送波位相と擬似距離を 30 秒間隔で提供する。衛星と受信機間の TEC は、2 つの信号の擬似距離または位相の間の差から求めることができる。GEONET 受信機群から分布が均一になるように抽出した約 300 台の GPS 受信機を使用し、15 分の時間分解能、経度・緯度で $2 \times 2^\circ$ (TEC セル) の空間分解能で日本上空の TEC を算出した [23]。TEC の計算に用いられた同じ受信機による位相測定から、ROTI 値を高度 400 km の電離圏貫通点(IPP: ionospheric piercing point)から地球に投影して、ROTI マップを作成した。まず、一般に天頂から離れた位置にある衛星に対して伝播路に沿った「斜め TEC」を差分位相から 30 秒間隔で求め、次に、2 つの連続する時間での斜め TEC の変化から ROT を決定した。ROTI は ROT の標準偏差として定義され、5 分ごとに $\sqrt{\langle \text{ROT}^2 \rangle - \langle \text{ROT} \rangle^2}$ で与えられる [16]。TEC と ROTI を計算するときのマルチパスの影響を少なくするため、仰角が 30° より大きな衛星からのデータだけを用いた。電子密度の変化が急激であると、受信機は GPS 信号の変動を追跡できないことがある。これをしばしばロック・オフと呼ぶ。ここでは、強い不規則構造の存在の指標として ROTI と並んでロック・オフの有無も情報として用いる。

DMSP は、地球環境を調査するために太陽同期軌道に複数個打ち上げられている。軌道の高度は約 840 km から 880 km までである。これらの衛星が測定したイオン密度がプラズマ・バブルを識別するための直接的な手段を提供している。

もう一つの別のデータとして、沖縄 (26.3°N, 127.8°E; 磁気緯度 20.7°N)、国分寺 (35.7°N, 139.5°E; 磁気緯度 30.0°N) 及び稚内 (45.4°N, 141.7°E; 磁気緯度 40.5°N) での定常的なイオノゾンデ観測結果を用いる。電離圏臨界周波数、 f_oF_2 、及び 3,000 km の距離で使用可能な最大周波数の指標である $M(3000)F_2$ がイオノグラムから直接読み取られる。これにより、最大電子密度、 N_mF_2 を

$$N_mF_2 \text{ [m}^{-3}\text{]} = 1.24 \times 10^{10} (f_oF_2)^2 \text{ [} f_oF_2 \text{: MHz]}$$

から求めることができる。また F 層最大電子密度高度、 h_mF_2 が経験式

$$h_mF_2 = -176 + 1490/M(3000)F_2$$

から推定できる [24]。

地磁気の状態を表すために用いられるデータは、ACE 衛星 (Advanced Composition Explorer)

によって観測された惑星間磁場(IMF)の Bz 成分、環電流の経度非対称指数 ASY-H と対称指数 SYM-H 及び地磁気指数 K_p である。ASY-H はオーロラ・サブストーム活動のよい指標であり、SYM-H は基本的に D_{st} 指数と同じである。

2.1 磁気嵐の概観

図 1 の ASY-H/SYM-H のグラフに示したように磁気嵐の急始 SSC は 2000 年 2 月 11 日の 23:53 UT に起こった。約 8 時間後の 2 月 12 日の 08:00 UT に IMF Bz は突然南方向に向きを変え、磁場 (SYM-H) は単調に減少し始め、その変化の割合は 08:35 - 09:04 UT で -95 nT/hr、09:53 - 10:08 UT では -144 nT/hr であった。12:00 UT には減少し始めて 4 時間で -165 nT と減衰が最大に達した。このときに IMF Bz は北に向きを変えている。その 1 時間後に IMF Bz は再び南に向きを変えたが、地磁気指標が示すように磁気嵐が強まることはなかった。

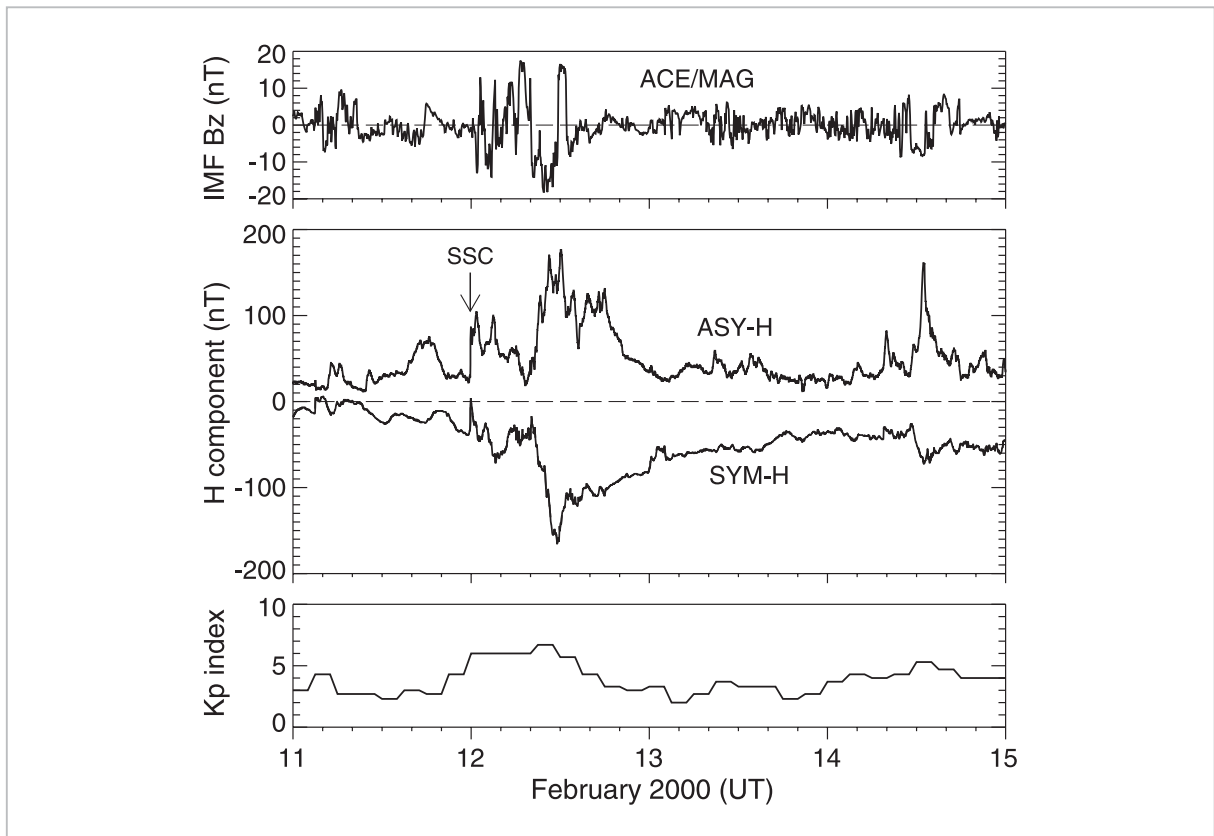


図1 2000年2月11日から15日までの IMF Bz と地磁気指標

IMF Bz は、ラグランジュ点 (L1) から磁気圏まで測定速度 500 km/s で太陽風が伝播することを考慮し、50 分間時間を遅らせてプロットしてある。

2.2 嵐時プラズマ・バブル

赤道プラズマ・バブルは TEC の減少として検知することができる。図 2 は、2000年 2月 12日の中・低緯度での TEC を示す(線でつながれた黒丸)。実線は比較のための静穏日の平均 TEC を表している。磁気嵐に対応して 2月 12日の 08:00 UT 頃から TEC が増大するのが観測され、静穏日より高い状態が約 16 時間持続した。注目するのは、10:30 から 15:00 UT にかけて TEC が大きく上昇し、その間 11:15 から 13:15 UT の縦の破線で表示されている期間に一時的な TEC 減少が(31°N, 131°E)を中心に見られたことであ

る。減少は、最大でバックグラウンドより 30 TEC unit に達した。このとき DMSP-F14 衛星が TEC 減少域の上空を通過していた。図 2 の下のグラフに示されているように、11:14 から 11:21 UT に磁気赤道(8°N, 141°E)と西太平洋の低緯度(27°N, 137°E)との間の衛星高度 850 km でイオン密度(N_i)が低下したことを記録している(太線)。これは、TEC の減少が赤道バブルに関係していたことを示している。参考として、同じ衛星が近くを通過したときの前日の N_i も示されている(細線)。磁気嵐時の N_i は静穏時よりも高く、TEC の観測結果と一致している。

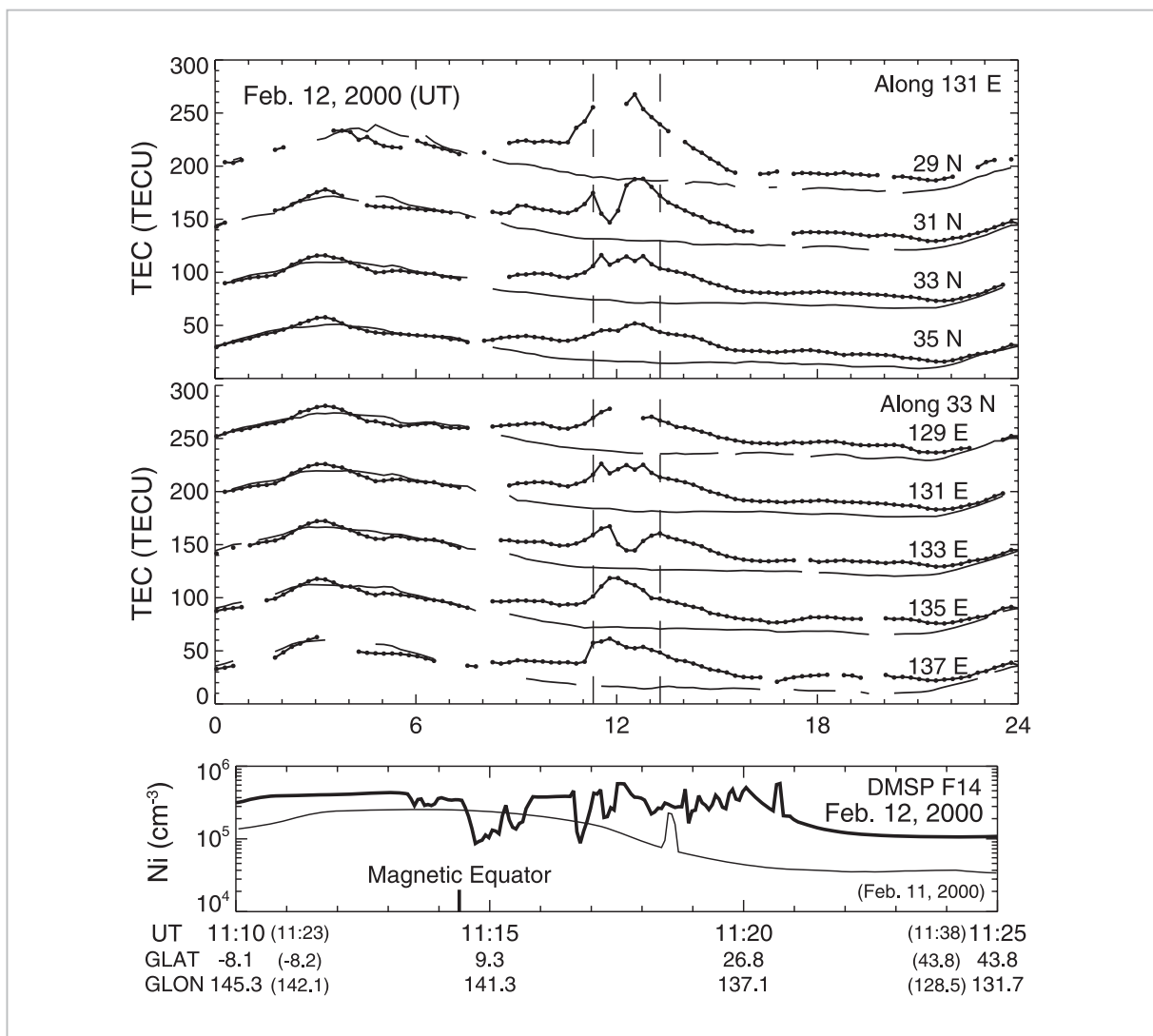


図2 全電子数の時間変化(上段)と DMSP 衛星によるイオン密度の緯度変化(下段)

実線で結んだ黒丸は 2000年 2月 12日の磁気嵐の日に GEONET から得られた TEC、実線は 2000年 2月 9～11日について平均した静穏日を代表する TEC。縦の破線は TEC の一時的な減少が見られた時間帯を示す。下のグラフに示されているのは、DMSP-F14 衛星が観測した高度 850 km における軌道に沿った全イオン密度変動である。GLAT と GLON は地理緯度と地理経度を指している。カッコ内に示されているのは、同じ衛星の前日の時間と位置のパラメータである。

ロック・オフに起因するデータの欠落が、幾つかのGPS衛星でTEC減少域の中やその周辺で起こった。1台のGPS受信機が複数の衛星を捕捉し、配置されている受信機の密度が高い区域ではロック・オフは2度ごとのセル平均TECの導出には影響せず、この研究ではよく見られる事例である。

2.3 バブルの発達

TECの減少が観測された期間についてROTIマップを描いた。図3は、11:05から13:40 UTまでの9つの異なる時間のROTIマップで、不規則構造の発達と減衰のプロセスを見ることが

できる。図中のカラー・バーは、6段階で不規則構造の程度を示している。白は $0 \leq \text{ROTI} < 0.5$ 、水色は $0.5 \leq \text{ROTI} < 1$ 、青は $1 \leq \text{ROTI} < 1.5$ 、紫は $1.5 \leq \text{ROTI} < 2$ 、黄は $2 \leq \text{ROTI}$ であり、赤はロック・オフを表している。この場合のロック・オフは衛星-受信機間のTECが求められなかったことに対応し、 L_1 及び L_2 のいずれか片方または両方の信号でロック・オフが発生した可能性がある。実際には、ほとんどのケースで L_2 信号のロック・オフが起こり、 L_1 については擬似距離だけが測定されている。これは、これまでの研究結果とも一致している[25]。

11:05 UT ごろに GEONET によって不規則構

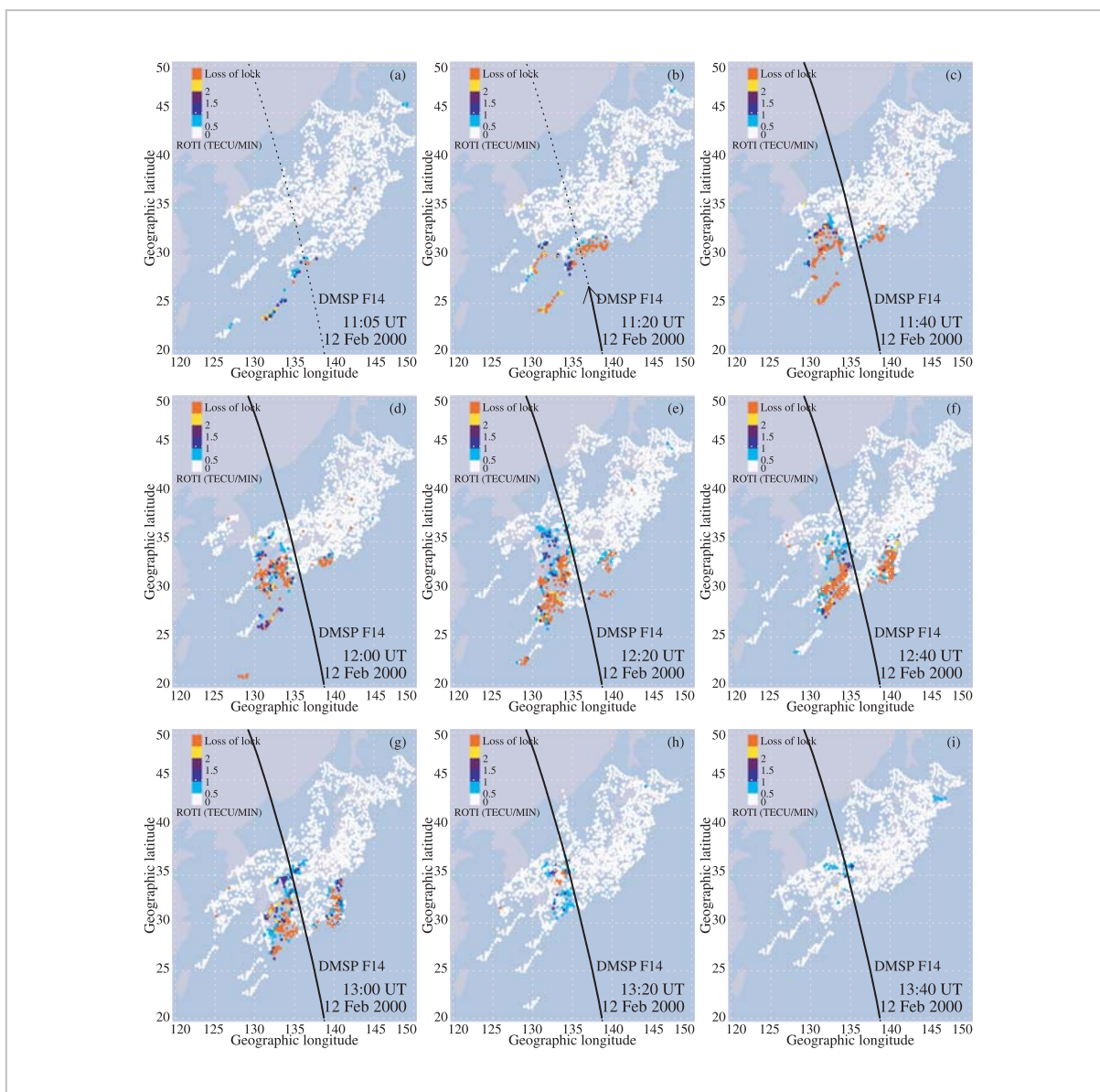


図3 プラズマ・バブルの時間的及び空間的発達を示すロック・オフとROTIマップ

造が最初に確認されたのは沖縄の東、(23°N, 131°E)と(30°N, 136°E)の間であった(図3a)。これらの経度での地方時は19:49から20:09 LTの間であった。その後、バブルは図3bに示されているように北に向かって拡大した。この図で黒線はDMSF-F14の軌跡を示し、矢印の先端は11:20 UTの衛星位置(27°N, 137°E)を示している。不規則構造の最高緯度は~32°N、ROTIが高度400 kmのIPPの状態を代表していると仮定して、このときの最高点の高さ(バブルの磁力線が赤道を横切る高度)は図4から1,800 kmであることが分かる。図3cに示されているように、11:40 UTには2つの別々の領域を表し始めており、これまで報告されていたようにバブル構造が枝分かれした(bifurcate)ものと思われる。西側のバブルは緯度が34.5°Nに、また東側のバブルは33°Nに到達した。このときの最高点の高さは2,150 km、また磁気赤道上に投影されたバブルの上昇速度は、連続する2つのROTIマップから300 m/sと推定された。12:00 UTには、図3dに示すように、東側と西側のバブルは緯度がそれぞれ33.5°Nと36°Nになった。また、最高点の高度は2,420 kmであり、上昇速度は230 m/sと推定される。図3e(12:20 UT)では、バブルがさらに北に移動し、東側と西側のバブルがそれぞれ34°Nと36.5°Nまで広がった。西側では最高点の高さ

が2550 kmに対応する(図4参照)。上昇速度は100 m/sまで減速した。同じようにして経度方向についてもROTIマップを比較すると、全体を通じた東向き移動速度は50 m/sと推定できる。

12:40 UTまでに(図3f)西側のバブルの北方向の拡大はで停止し、このとき東側は国分寺イオノゾンデがある35.5°N付近に到達した。また、バブルの東西方向の広がりも縮んだように見える。図3gの13:00 UTにおけるROTIマップは、バブルがさらに縮小しながら東方向に移動し続けたことを示している。13:20 UT(図3h)には西側の構造だけがマップに残っていた。注目すべきなのは、ロック・オフの区域が大幅に縮小したことである。東側の構造は、13:10 UTごろには図から姿を消している。日本の東方のデータが無いため、その領域が縮小したのか、さらに東方向に移動したのかを断言するのは難しい。13:40 UT(図3i)にはバブル構造は(35°N, 134°E)付近に僅かに残るだけとなり、ROTIの値はほぼ0.5~1.5で、ロック・オフは見られない。数個の水色の点だけになった構造は東方向に50 m/sの速度で14:30 UTまで移動を続けた(示されていない)。最後に、バブルが受信機のロック・オフを伴うような活発な状態にあった11:20-13:20 UTの時間帯が図2においてTECが減少した時間帯に一致していたことを指摘しておかなければならない。

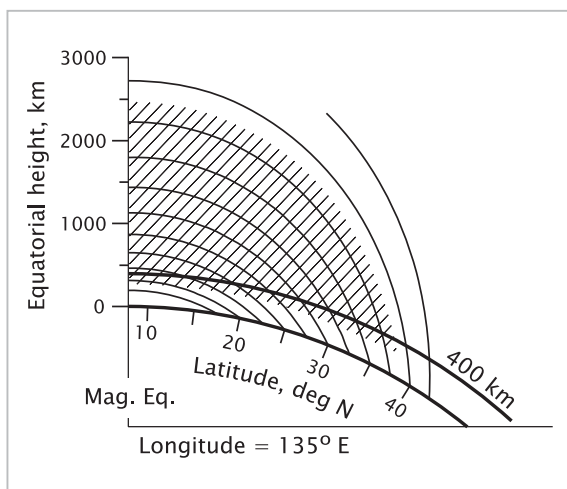


図4 GRFモデルから求めた日本の経度における地球磁場の形状とプラズマ・バブルの推定到達範囲

高度400 kmの線はTEC及びROTIを求めた際の薄殻近似(thin shell approximation)高度[23]で、GPS電波がこの高度を通過する点を電離圏貫通点(IPP: ionospheric piercing point)とする。

2.4 東向き電場の証拠

図5の上の二つのグラフは、2月12日の3か所のイオノゾンデ局での電離圏高度(h_mF_2)とF層の最大電子密度(N_mF_2)の変化を示し、下のグラフは隣接するセルのTECを示している。鎖線で示されているように、3つの局で h_mF_2 の上向きの偏位が19:00 JST(10:00 UT)ごろに始まり、1時間後の20:00 JST(11:00 UT)に終息した。高さの増分は沖縄で90 km、国分寺では40 km、また稚内では10 kmであった。F層が持ち上げられた少し後には、中央のグラフに示されているように沖縄で N_mF_2 が大きく増加した。国分寺では対応する増加は極僅かであり、稚内では全く変化が認められなかった。同様の結果は下のグラフのTECにも見られるが、国分寺でのTECは明らかに増加している。

F層高度の上昇と最大電子密度及びTECの増

加は、磁気嵐の主相の間に東向きの電場が浸入することで良く説明することができる。こうした電離圏の擾乱は、赤道域電離圏に及んだ東向き電場によって赤道異常が中緯度に向かって拡大したことを意味している。電場浸入現象の発

生が日没後であることから、TECが増加したのは赤道異常の及ぶ範囲に限られ、高緯度側には昼間のような正相電離圏嵐^[26]は発生していない。プラズマ・バブルが観測されたのは、東向き電場が強まった直後である。

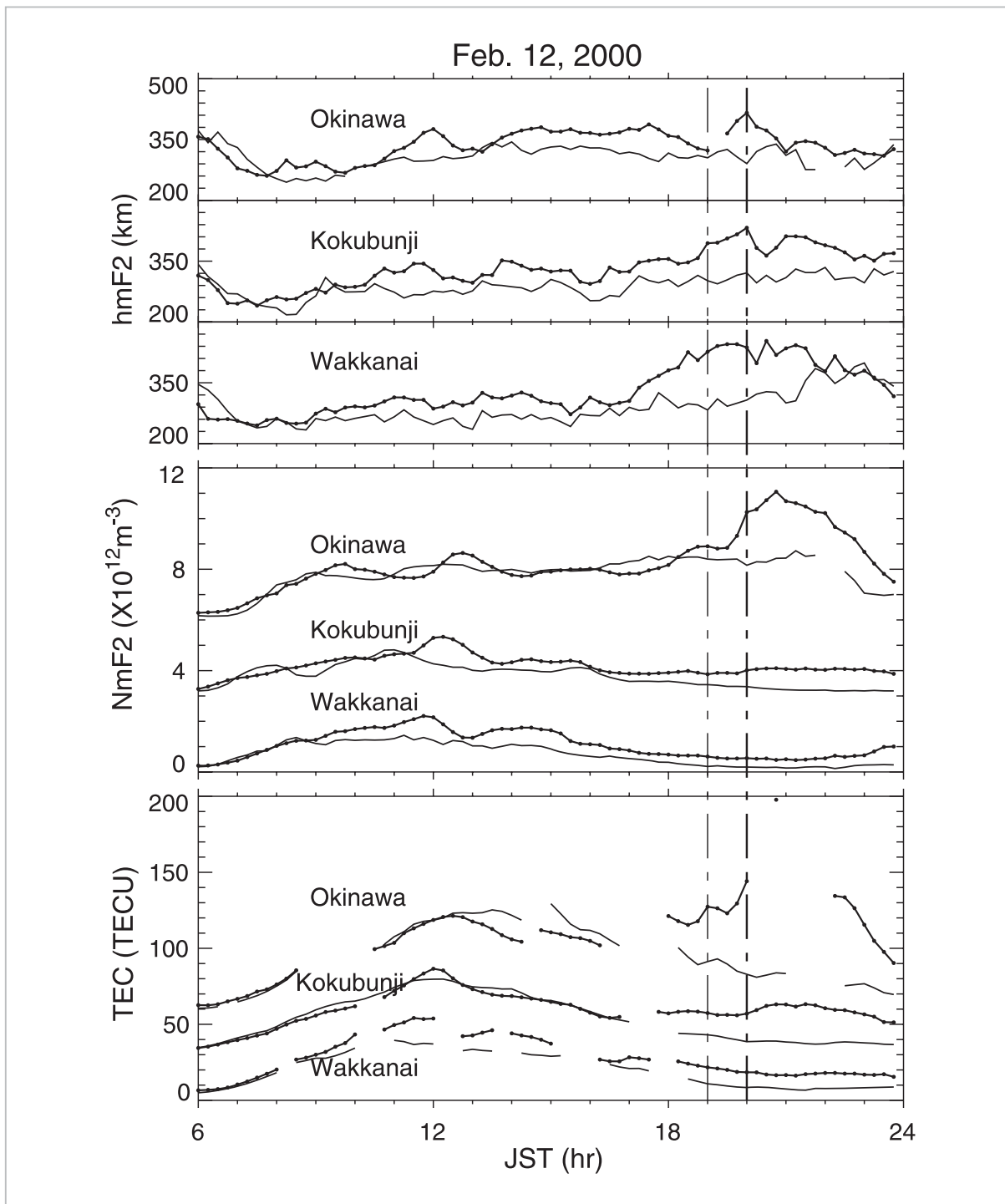


図5 上の2つのグラフは、南北に並んだ3つのイオノゾンデ局での電離圏の最大電子密度高度(h_mF2)と最大電子密度(N_mF2)の変動、下はその近傍のセルのTEC

線で結ばれた黒丸は2000年2月の磁気嵐の日の値、実線は2000年2月5日の静穏日の同じパラメータである。縦の鎖線は、F層高度が上昇した時間帯を示す。

3 考察

赤道プラズマ・バブルは、重力と東向きの電場によって駆動される一般化レイリー・テイラー不安定性が作用する F 層の底部で発生する。磁気擾乱の際に低緯度にかかる東向きの電場には (1) 磁気圏電場の浸入と (2) 擾乱ダイナモによる電場 [27] の可能性がある。浸入電場は非常に大きな場合があるが、持続時間は 1 時間程度とされている。また、磁気嵐によって引き起こされる熱圏風の擾乱によるダイナモ電場は高緯度電離圏に送られるエネルギーに比例し、寿命が長い [28]。 D_{st} の急激な変化は、高緯度電場の急速な浸入を表していることが多い [29] [30]。図 1 に戻ると、SYM-H の変化の割合は 09:53-10:08 UT に -144 nT/hr に達し、図 5 の上のグラフに示された 3 つの局での F 層高度の同時上昇と時間がよく一致する。3 つのイオノゾンデ局で観測された日没後の電離圏擾乱は、磁気圏の東向き電場の急速な浸入に起因していると結論付けることができる。

中緯度で赤道バブルが観測されることは極めて稀で、僅かにバブルに似たプラズマの減少が報告されている [10] [31]。本稿で論じられた磁気嵐に伴うバブルは、緯度が 36.5°N (磁気緯度 31.5°N) に到達しており、バブルが沿磁力線構造をしていると仮定したときの最高点 (磁気赤道上) の高さは 2550 km に達している。バブルの成長を時間を追ってみると、磁気赤道に投影した上昇速度は 11:40、12:00、12:20 UT の各時刻に 300 から、 200 、 100 m/s と変化しており、時間を追って高度が高くなるとともに減速している。速度はこれまでのレーダー及び衛星観測と一致しているが、最高点の高さはこれまでの記録 [32] [33] よりもはるかに高くなっている。スーパープラズマ・バブルと名付ける十分な理由となっている。

通常、バブルの東西方向の動きは、一般的には 21:00 LT ごろに最大で東向きに約 150 m/s となる周囲のプラズマと熱圏中性大気風の速度に近づくため、その成長段階では東方向に加速される [9] [34]。このスーパーバブルは東方向にいくらか移動したが、その速度は通常の条件のときよりもはるかに遅い 50 m/s であった。その説明として考えられるのは、磁気嵐の際にオーロラ加熱によって発生した赤道に向かう風 (熱圏擾乱風) にコ

リオリの作用で西向き成分が加わることである。この熱圏風の擾乱は極方向の電場を発生する [27]。この極向き電場による $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトがバックグラウンドの静穏日ドリフト・パターンに重なり、東方向のバブル移動速度を低下させた。実際に図 5 の上のグラフでは終日 F 層高度が静穏日より高く、赤道に向かう熱圏風が強くなったことを示している。最近、磁気圏擾乱によって引き起こされたバブルが早朝まで西方向に移動するのがブラジル地区で観測され、ホール電場が考えられる原因として議論された [9]。さらに、いくつかのプロセスがほとんど同時に作用したと思われ、そのためにバブルが東方向にゆっくり移動した。磁気嵐時のスーパープラズマ・バブルの力学を明らかにするためには、モデル研究とさらに多くのケース・スタディが必要とされる。

4 結論

枝分かれ構造を持つ磁気嵐時夜半前のスーパーバブルの発達を GEONET による観測で得られる GPS 信号のロック・オフと ROTI マップによって明らかにされた。南北方向に並んだイオノゾンデ・チェーンによって得られた F 層パラメータは、磁気圏の東向き電場が赤道緯度に浸入することでバブルが発生したことを示した。磁気赤道上に投影されたバブルの上昇速度は赤道高度 $2,150$ km で最大 300 m/s と推定され、その後、時間が経過して高度が高くなるとともに減速した。バブルが到達した最高緯度は 36.5°N (磁気緯度 31.5°N) であり、磁気赤道に投影した最高点の高さは $2,550$ km であった。発達のプロセス全体を通してバブルは東方向に 50 m/s の速度で移動した。本稿では、世界で最も高密度の GPS 受信機網である GEONET が低緯度から中緯度に広がるバブルや中緯度で発生した不規則構造を高分解能の時間と空間で研究する独自の手段を提供することが示された。

謝辞

本研究は著者の 1 人 (GM) が独立行政法人情報通信研究機構に招聘されたときに行われた。イオノグラムのスケーリングについては Maho

Nakamura に感謝します。DMSF の熱プラズマデータの提供については米国ダラスのテキサス大学宇宙科学センターと米国空軍に感謝します。

参考文献

- 1 R. F. Woodman, and C. La Hoz, "Radar observations of F region equatorial irregularities", J. Geophys. Res., Vol.81, pp.5447-5466, 1976.
- 2 J. P. McClure, W. B. Hanson, and J. F. Hoffman, "Plasma bubbles and irregularities in the equatorial ionosphere", J. Geophys. Res., Vol.82, pp.2650-2656, 1977.
- 3 R. T. Tsunoda, "Magnetic-field-aligned characteristics of plasma bubbles in the nighttime equatorial ionosphere", J. Atmos. Terr. Phys., Vol.42, pp.743-752, 1980.
- 4 R. T. Tsunoda, R. T. Livingston, J. P. McClure, and W. B. Hanson, "Equatorial plasma bubbles: Vertical elongated wedges from the bottomside F layer", J. Geophys. Res., Vol.87, pp.9171-9180, 1982.
- 5 K. Shiokawa, Y. Otsuka, T. Ogawa, and P. Wilkinson, "Time evolution of high-altitude plasma bubbles imaged at geomagnetic conjugate points", Ann. Geophys., Vol.22, pp.3137-3143, 2004.
- 6 S. L. Ossakow, "Spread-F theories", J. Atmos. Terr. Phys., Vol.43, pp.437-452, 1981.
- 7 S. T. Zalesak, S. L. Ossakow, and P. K. Chaturvedi, "Nonlinear equatorial spread F – the effect of neutral winds and background Pedersen conductivity", J. Geophys. Res., Vol.87, pp.151-166, 1982.
- 8 R. F. Woodman, "Spread F – an old equatorial aeronomy problem finally resolved", Ann. Geophys., Vol.27, pp.1915-1934, 2009.
- 9 M. A. Abdu, I. S. Batista, H. Takahashi, J. MacDougall, J. H. Sobral, A. F. Medeiros, and N. B. Trivedi, "Magnetospheric disturbance induced equatorial plasma bubble development and dynamics: A case study in Brazilian sector", J. Geophys. Res., Vol.108, 1449, doi:10.1029/2002JA009721, 2003.
- 10 C.-S. Huang, J. C. Foster, and Y. Sahai, "Significant depletions of the ionospheric plasma density at middle latitudes: A possible signature of equatorial spread F bubbles near the plasmopause", J. Geophys. Res., Vol.112, A05315, doi:10.1029/2007JA012307, 2007.
- 11 A. J. Van Dierendonck, J. Klobuchar, and Q. Hua, "Ionosphere scintillation monitoring using commercial single frequency C/A code receivers", Proceedings of ION GPS-93, Salt Lake City, UT, September 1993, pp.1333-1342, 1993.
- 12 B. M. Ledvina, J. J. Makela, and P. M. Kintner, "First observations of intense GPS L1 amplitude scintillations at midlatitude", Geophys. Res. Lett., Vol.29, No.14, 1659, doi:10.1029/2002GL014770, 2002.
- 13 G. E. Lanyi, and T. Roth, "A comparison of mapped and measured total ionospheric electron content using Global Positioning System and beacon satellites observations", Radio Sci., Vol.23, pp.483-492, 1988.
- 14 C. E. Valladares, J. Villalobos, R. Sheehan, and M. P. Hagan, "Latitudinal extension of low-latitude scintillations measured with a network of GPS receivers", Ann. Geophys., Vol.22, pp.3155-3175, 2004.

- 15 J. Arons, M. Mendillo, R. Yantosca, and E. Kudeki, "GPS phase fluctuations in the equatorial region during the MISETA 1994 campaign", *J. Geophys. Res.*, Vol.101, pp.26,851-26,862, 1996.
- 16 X. Pi, A. J. Mannucci, U. J. Lindqwister, and C. M. Ho, "Monitoring of global ionospheric irregularities using the worldwide GPS network", *Geophys. Res. Lett.*, Vol.24, pp.2283-2486, 1997.
- 17 S. Basu, K. M. Groves, J. M. Quinn, and P. Doherty, "A comparison of TEC fluctuations and scintillations at Ascension Island", *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, Vol.61, pp.1219-1226, 1999.
- 18 S. Miyazaki, T. Saito, M. Sasaki, Y. Hatanaka, and Y. Iimura, "Expansion of GSI's nationwide GPS array", *Bull. Geogr. Surv. Inst.*, Vol.43, pp.23-34, 1997.
- 19 A. Saito, S. Fukao, and S. Miyazaki, "High resolution mapping of TEC perturbations with the GSI GPS network over Japan", *Geophys. Res. Lett.*, Vol.25, pp.3079-3082, 1998.
- 20 Y. Sahai, K. Shiokawa, Y. Otsuka, C. Ihara, T. Ogawa, K. Igarashi, S. Miyazaki, and A. Saito, "Imaging observations of midlatitude ionospheric disturbances during the geomagnetic storm of February 12, 2000", *J. Geophys. Res.*, Vol.106, pp.24,481-24,492, 2001.
- 21 T. Maruyama, 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, doi:10.1029/2004JA010451, 2004.
- 22 Y. Otsuka, T. Aramaki, T. Ogawa, and A. Saito, "A statistical study of ionospheric irregularities observed with a GPS network in Japan", *Corotating Solar Wind Streams and Recurrent Geomagnetic Activity*, *Geophys. Monogr.*, AGU, Washington, D. C., 2006.
- 23 G. Ma, and T. Maruyama, "Derivation of TEC and estimation of instrumental biases from GEONET in Japan", *Ann. Geophys.*, Vol.21, pp.2083-2093, 2003.
- 24 T. Shimazaki, "World-wide daily variations in the height of the maximum electron density of the ionospheric F2-layer", *J. Radio Res. Lab.*, Vol.2, pp.85-97, 1955.
- 25 S. Datta-Barua, P. H. Doherty, S. H. Delay, "Ionospheric scintillation effects on single and dual frequency GPS positioning", *ION GPS/GNSS 2003*, Portland, Oregon, 2003.
- 26 丸山隆, 馬冠一, 中村真帆, "GEONET 観測による電離圏全電子数の変動 - TEC 嵐と SED -", 本特集号, 3-3-1, 2009.
- 26 M. Blanc, and A. D. Richmond, "The ionospheric disturbance dynamo", *J. Geophys. Res.*, Vol.85, pp.1669-1686, 1980.
- 27 B. G. Fejer, and L. Scherliess, "Time dependent response of equatorial ionospheric electric fields to magnetospheric disturbances", *Geophys. Res. Lett.*, Vol.22, pp.851-854, 1995.
- 28 S. Basu, Su. Basu, K. M. Groves, E. MacKenzie, M. J. Keskinen, and F. J. Rich, "Near-simultaneous plasma structuring in the midlatitude and equatorial ionosphere during magnetic superstorms", *Geophys. Res. Lett.*, Vol.32, L12S05, doi:10.1029/2004GL021678, 2005.
- 29 C. Y. Huang, W. J. Burke, J. S. Machuzak, L. C. Gentile, and P. J. Sultan, "DMSP observations of equatorial plasma bubbles in the topside ionosphere near solar maximum", *J. Geophys. Res.*, Vol.106, pp.8131-8142, 2001.
- 30 J. C. Foster, and F. J. Rich, "Prompt midlatitude electric field effects during severe geomagnetic storms", *J. Geophys. Res.*, Vol.103, pp.26,367-26,372, 1998.
- 31 R. T. Tsunoda, "Time evolution and dynamics of equatorial backscatter plumes: 1. Growth phase", *J. Geophys. Res.*, Vol.86, pp.139-149, 1981.
- 32 R. S. Dabas, and B. M. Reddy, "Equatorial plasma bubble rise velocities in the Indian sector determined from multistation scintillation observations", *Radio Sci.*, Vol.25, pp.125-132, 1990.

- 33 C. S. Lin, T. J. Immel, H. Yeh, S. B. Mende, and J. L. Burch, "Simultaneous observations of equatorial plasma depletion by IMAGE and ROCSAT-1 satellites", J. Geophys. Res., Vol.110, A06304, doi:10.1029/2004JA010774, 2005.

馬 冠一 (Ma Guanyi)

中国科学院国立天文台教授
博士(理学)
超高層大気物理、衛星通信測位

丸山 隆

上席研究員 博士(工学)
超高層大気物理

電離圏電波伝播に関する研究開発 / 電離圏不規則構造とSEA-LIONプロジェクト / 東アジア経度の高密度GPS受信機網による磁気嵐時スーパーバブルの観測