



Title	極域電離圏上部におけるイオン上昇流の観測
Author(s)	佐藤, 創我; SATO, Soga; LIU, Huixin 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 70, 13-25
Issue Date	2007-03-15
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.70.13
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/20432
Type	departmental bulletin paper
File Information	70-3.pdf



極域電離圏上部におけるイオン上昇流の観測

佐藤 創我・LIU Huixin・渡部 重十

北海道大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻

小川 泰信

国立極地研究所

(2006年12月15日受理)

Ion upflow observed in the polar ionosphere

Soga SATO, Huixin LIU, Shigeto WATANABE

Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University

and

Yasunobu OGAWA

National Institute of Polar Research

(Received December 15, 2006)

Ion upflow has been investigated by use of ESR (EISCAT Svalbard Radar), SuperDARN, ACE satellite and CHAMP satellite. The field-aligned ion upflows were observed by ESR, which occurred in night-time between 16 and 17, April 2002, and 19 June 2004. However, ESR didn't show remarkable increase of electron density, electron temperature and ion temperature, which are generated by auroral particle precipitation or frictional heating. The Solar wind parameters were obtained by ACE satellite. SuperDARN showed variation of convection electric field depending on By component of Interplanetary Magnetic Field. CHAMP satellite observed also variations of neutral density, neutral wind, ion density and electron temperature along the satellite orbits. At the time, ESR was in the polar cap region. Our analyses may suggest that the ion upflow observed by ESR was generated in the upwind region of plasma convection in the high-latitude ionosphere and was moving to ESR station by the convection.

I. はじめに

極域電離圏では、電離圏から磁気圏へのプラズマの流出が起きている。ポーラーウィンドやコニクスなどの超音速流などが観測されており (Abe et al., 1996; Sharp et al., 1997; Wahlund et al., 1992; Foster et al., 1988), 地球脱出速度 (約 11km/s) を超えるようなイオン流出 (ion outflow) は磁気圏プラズマの重要な供給源の一つである (Andre et al., 2004). また、電離圏高

度でオーロラによる加熱やジュール加熱に伴う数 10m/s～数 100m/s の速度をもつイオン上昇流 (ion upflow) が観測されており (Ogawa et al., 2000; Liu et al., 2001; Liu et al., 2004), イオン流出のソースとして重要だと考えられている (Semeter et al., 2003).

電離圏にはプラズマと中性大気の両方が存在しているが, 相対的な速度差が生じると衝突による摩擦加熱が生まれる (Davies et al., 1997).

極域電離圏対流は, 二つのセルに分かれた極域電離圏プラズマの対流構造のことである. 太陽風と地球磁場が接触する昼側の磁気圏界面で, 太陽風の磁力線と地球の磁力線が再結合した磁力線が高緯度の領域を夜側に向かって横切り, さらに朝側と夕側に分かれて昼側へと戻る. この対流模様は静電ポテンシャルの構造と等しく, 朝側のセルが高ポテンシャル, 夕側のセルが低ポテンシャルとなっている. プラズマは電場と磁場に垂直な方向に $(\mathbf{E} \times \mathbf{B})/B^2$ ドリフトをするため, 電離圏対流と同等の軌跡を描いている (Cowley, 1982).

イオン上昇流と極域電離圏対流等について, レーダーや衛星, モデルとの比較による多角的な研究は詳細に行われていない. 本研究では, 欧州非干渉散乱(EISCAT)スバルバルレーダー (ESR), SuperDARN レーダー, ACE 衛星, CHAMP 衛星のデータを用いて, 極域電離圏で見られるイオン上昇流と極域電離圏対流, 太陽風, さらに中性大気との相互関係を調査し, 比較・検討を行った. イオン上昇流が起きていた時間帯に ESR で観測された電子密度・温度, イオン温度に顕著な変化が無いデータに着目し, イオン上昇流発生の原因を考察した.

II. 観測機器

ESR (EISCAT Svalbard Radar) は, スバルバル諸島ロングイヤービーエン (地理座標北緯 78.2°, 東経 15.8°, 地磁気座標北緯 74.7°, 東経 129.1°) に位置し, 高度約 100km から 800km まで (電離圏 E 層, F 層に相当) の, 沿磁力線方向の電子密度, 電子温度, イオン温度, イオン速度を観測している (Buchert et al., 1999). 非干渉散乱レーダーは, 上空に向けて発射した電磁波のうち電離層中の電子によって散乱された非干渉散乱波を受信し, その受信スペクトルから物理量を導出している (Hapgood and Lanchester, 1987).

SuperDARN は, 極域に配備された干渉散乱短波レーダーにより磁気緯度 60° 以上の電離圏 F 層のプラズマ運動速度を観測している (Greenwald et al., 1985). 配備された短波レーダーそれぞれから得られる視線方向のプラズマ対流速度を合成することにより, 2次元のプラズマ対流速度を導出している (Greenwald et al., 1985). また導出されたプラズマ対流から, 極域の静電ポテンシャル分布も導出できる (Ruohoniemi and Baker, 1998).

ACE 衛星は L1 Lagrangian Point (地球から約 150 万 km, 太陽から約 1 億 4850 万 km で両者の及ぼす重力がほぼ均衡している) に位置し, 太陽風の磁場や速度などを観測している (Garrard et al., 1998).

CHAMP 衛星は高度 400km で約 90 分かけて地球を一周する極軌道衛星である. 熱圏・電離圏の中性大気密度, 軌道に対して垂直成分の中性風速度を観測している (Liu et al., 2005).

Ⅲ. 観測例1:16-17, Apr '02

2002年04月16日21:00UT頃から17日02:30UT頃にかけて沿磁力線方向のイオン上昇流がESRによって観測された。Fig. 1(a)は、沿磁力線方向の(i)電子密度、(ii)電子温度、(iii)イオン温度、(iv)イオン速度の高度・時間変動を示している。縦軸は高度で100kmから800km、横軸は16日17:00UTから17日07:00UTまでの14時間を表している。観測地点(ロングイヤーパーエン)の時刻は、磁気地方時(MLT)で表記すると、 $MLT=UT+2:45(2\text{時間}45\text{分})$ である。観測されたイオン上昇流は、(iv)の①-③に示すように大きく3つに分けられる。(1)高度約150km付近から上昇流が起り始めている。(2)イオン上昇流と同時刻におけるイオン温度(iii)は高度200-500kmにかけて約500K上昇している。(3)電子温度(ii)は①と③の時間帯に高度300km以上で約500K上昇している。しかし電子密度(i)には顕著な変化は見られない。また、電子温度やイオン温度は、上昇流が発生していない時間帯も上昇流発生時と同程度もしくはそれ以上増加している。そこで、なぜFig. 1の時間帯を通して電子温度・密度、イオン温度には特に顕著な変動が見られないにもかかわらず、①②③の時間帯だけイオン上昇流が起きていたのかが問題となる。

Fig. 1(b)は、ACE衛星によって観測された太陽風の磁場と速度をGSM (geocentric solar magnetic)系で示している。GSM系は、x軸が地球の中心と太陽を結んだ直線で太陽方向が正であり、y軸は地球の双極子磁場の軸とx軸に垂直な直線で夕方方向が正である。z軸はx軸とy軸に垂直な軸であり、つまり双極子磁場の軸と同じ定義である。Fig. 1(b)は上から(i)磁場x成分、(ii)y成分、(iii)z成分、(iv)Cone Angle、(v)Clock Angle、(vi)磁場の大きさ、(vii)太陽風の速度、(viii)ACE衛星が観測した時間(UT)と位置(GSM系)を示している。ACE衛星の位置(223.5Re, 28.5Re, -10Re)と太陽風の速度(-345km/s, $\pm 5\text{km/s}$, $\pm 5\text{km/s}$)より、ACE衛星で観測された太陽風が地球磁気圏(~10Re)に到達するまで約60分かかるので、Fig. 1(b)はFig. 1(a)に対して60分ずらしている。太陽風磁場のBy成分(ii)が16日19:33UTに、それまで負であったが大きく正に変化している。その後、正と負の変化が数回続き16日23:30UT以降再び負の値が続いた。一方Bz成分(iii)は17日01:15UTまではほぼ負の値(南向き)が続いていた。ただし16日21:50UT頃と22:35UT頃にゼロに近づいている。ESR上空でイオン上昇流が発生している時刻とACE衛星のデータを比較してみると、By成分が正に変化した時刻から1回目のイオン上昇流(Fig. 1(a)中の①)が起き始めた様にも見える。しかしながら、その後の上昇流②や③がBy成分の変動と1対1に対応しているとは言えない。またBz成分の変動とイオン上昇流との間にも良い対応関係は見られない。

Fig. 2は同時刻のSuperDARNによる電離圏対流である。プラズマ対流の速度と静電ポテンシャルの分布が描かれている。16日20:50UT頃から17日00:20UTにかけて極域電離圏対流の二つの中心の位置が変動を繰り返していることが分かる。これは、惑星間空間磁場(IMF)By、Bz成分の正負の変化に伴った極域電離圏対流の形状の変化(Heelis, 1984)とよく一致している。

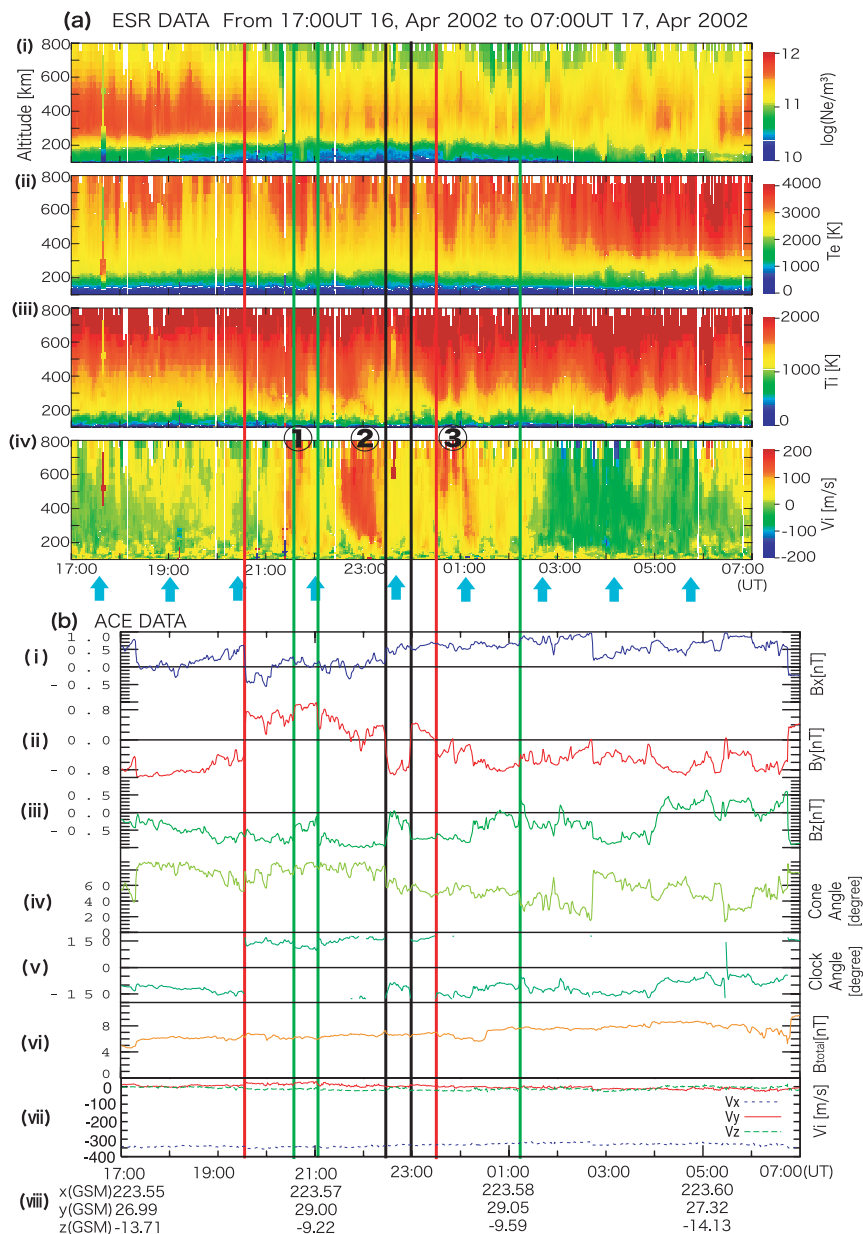


Fig. 1. (a) ESR observations of topside ionospheric (i)electron density, (ii)electron temperature, (iii)ion temperature and (iv)field-aligned velocity (positive outward) for 16 and 17 April 2002. ①, ② and ③ indicate the time when ion upflow were observed. Arrows indicate the time when CHAMP satellite was in the polar region.

(b) ACE satellite observations of Solar wind magnetic field (i)x, (ii)y, (iii)z component, (iv)Cone angle, (v)Clock angle, (vi)total strength, (vii)velocity and (viii)observation time (UT) and the position of ACE satellite. (Data are shifted 60min. The red line is the time of remarkable B_y variation, green is B_z , and black is both of B_y and B_z .)

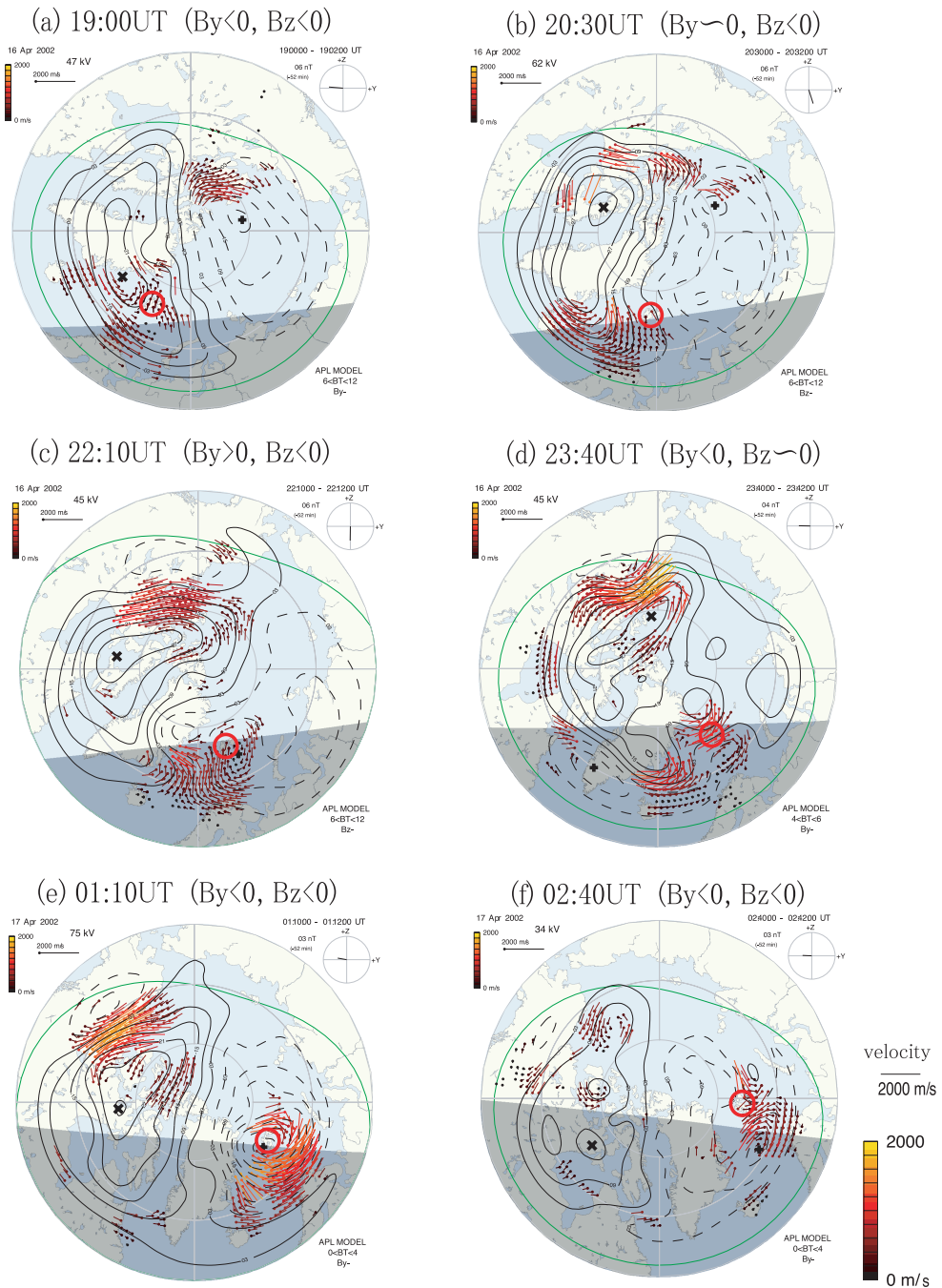


Fig. 2. The ionospheric plasma convection and the potential observed by SuperDARN. The plasma velocity vectors and the electrostatic potential contours between 60 and 90 latitude are described on the geomagnetic coordinates. The red circle represents the ESR radar location. UT time and B_y and B_z components of IMF are given on each map.

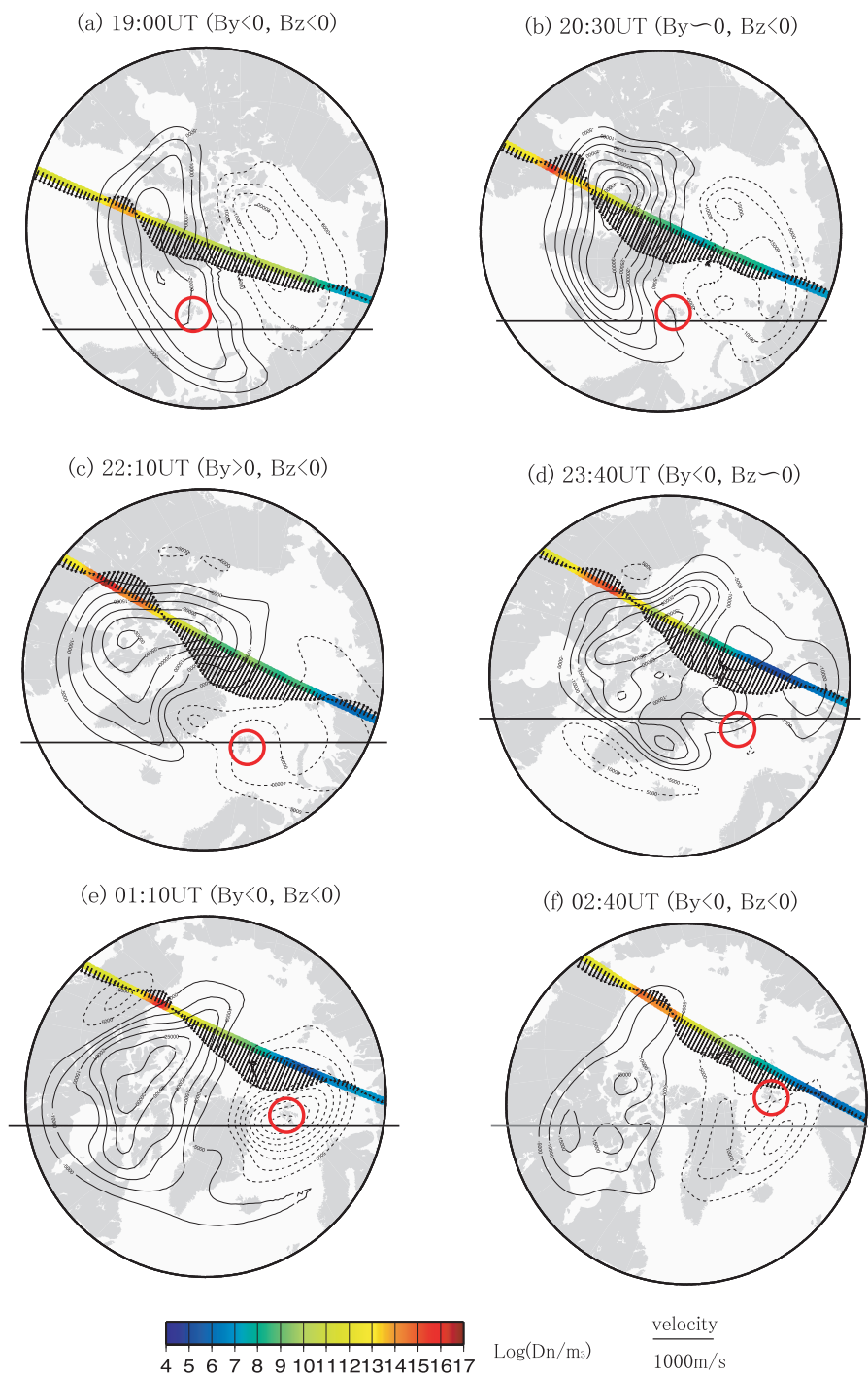


Fig. 3. CHAMP satellite observations of neutral density and the cross-track wind velocity. The coordinate of this map is geographic, but the center is magnetic pole (79.8N, 71.8W). The satellite altitude is approximately 400km. The top is dayside and the horizontal line is the terminator. The red circle represents the ESR radar location.

Fig. 2 の(a)(e)(f)は IMF 南向きで $B_y < 0$ のとき, (c) は $B_y > 0$ のときである. 図の(a)(e)(f)から, 静電ポテンシャルの二つの中心のうち電位の低い方は夕側に, 高い方が朝側にある. (e)を見ると (a)(e)(f)に比べて電位の低い方が夕側から昼側へ, 高い方が朝側から夜側へと移動している様子が分かる. また, (d)は B_z 成分がゼロに近いので対流は複雑な形状をしている (Cowley, 1982).

Fig. 3 は CHAMP 衛星が観測した高度 400km の中性大気密度と, 軌道に対して垂直水平成分の風速である. また, SuperDARN から得られた電離圏対流の静電ポテンシャルも描かれている. この図から, 中性風の向きがプラズマ対流の向きとよく一致していることが分かる. また, ほとんどの軌道において, 対流の外側で周りより高い大気密度を観測している.

IV. 観測例 2: 19, Jun '04

2004 年 04 月 19 日 00:00UT から 23:00UT にかけて沿磁力線方向のイオン上昇流が合計 9 回 ESR によって観測された. Fig. 4(a) は 19 日 00:00UT から 24:00UT にかけての(i)電子密度, (ii)電子温度, (iii)イオン温度, (iv)イオン速度の時間変動を示している. 電子温度とイオン温度の増加を伴うイオン上昇流 (Fig. 4(a)中の A-D) と, 温度増加を伴わないイオン上昇流 (Fig. 4(a)中の ①-⑤) がある. イオン上昇流(A)-(D)が発生している時, 電子温度とイオン温度は高度 200-500km で約 500K 上昇している. また, イオン温度が顕著に変動しているのは, (A)-(D)の時間帯だけである. ESR の磁気緯度と MLT から, (A)(B)(C)はカस्प付近での観測で, それ以外は主に極冠域もしくは夜側オーバルの高緯度側での観測である.

Fig. 4(b)の ACE 衛星による太陽風データをみる. ACE 衛星の位置(240Re, -25Re, 10Re)と太陽風速度(-450km/s , $\pm 10\text{km/s}$, $\pm 10\text{km/s}$)より, ACE 衛星で観測された太陽風が地球磁気圏 (~10Re)に到達するまで約 60 分かかるので, Fig. 4(b)は Fig. 4(a)に対して 60 分ずらしている. 太陽風磁場の(ii) B_y 成分は 00:25UT 以降ほとんど正の値である. (iii) B_z 成分は正と負の値が交互に続いている. B_z が負のときとイオン上昇流発生の時刻が重なるものもある (Fig. 4(a)中の (B)(C)(D)と②). しかしながら, 全てのイオン上昇流は B_z が負と対応しているわけではない.

Fig. 5 の SuperDARN による極域電離圏対流は, B_z 成分が正のときには二つの中心を持つ対流構造が少し崩れるが, B_y 成分がほとんど正の値を保っているので, 全体として対流の位置は大きく変化していない.

Fig. 6 の CHAMP 衛星によって観測された中性大気のパラメータは, 観測例 1 の場合と同様に中性風の向きがプラズマの対流とよく一致している. また, 大気密度も対流の外側で周囲より高い値を観測している.

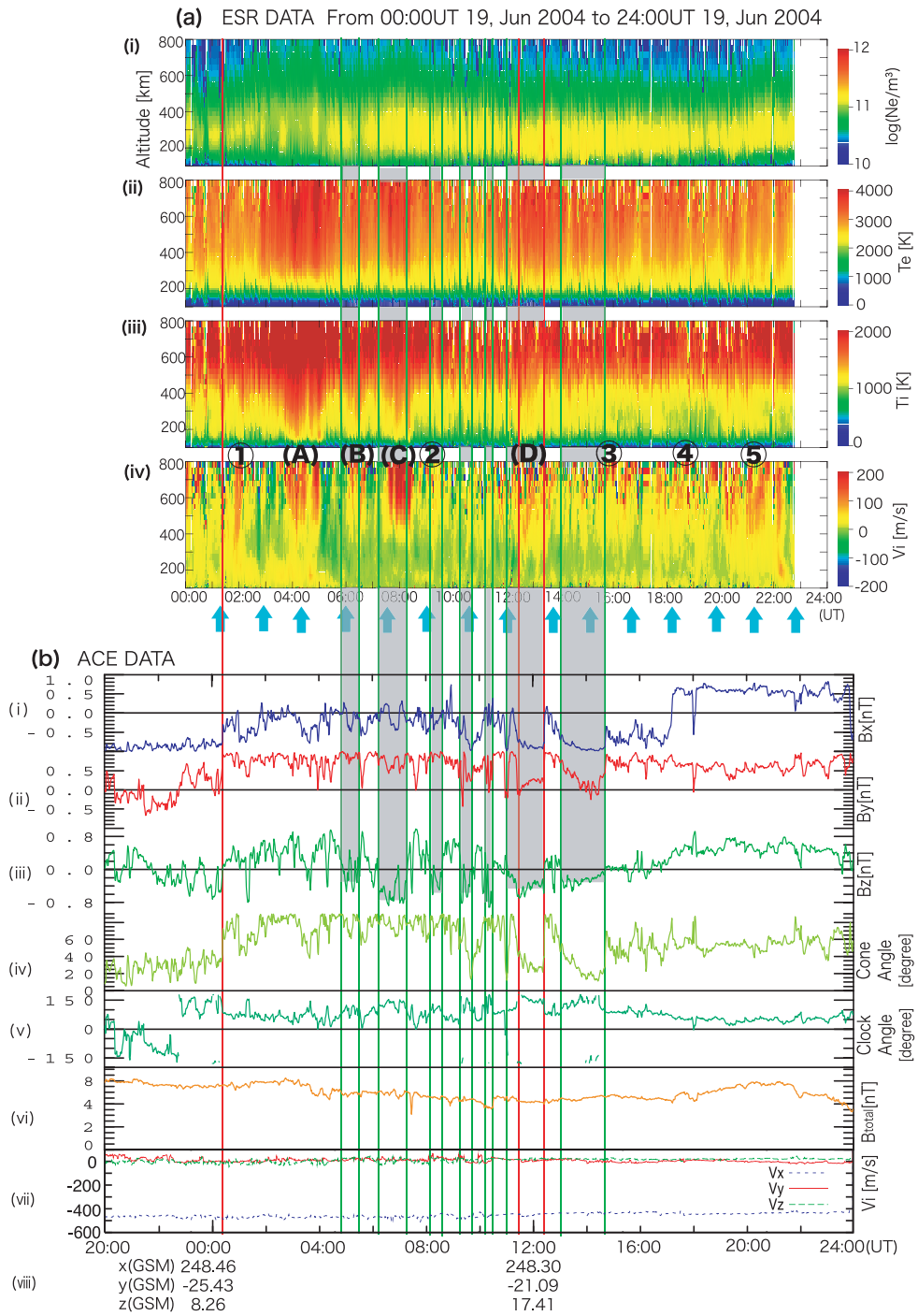


Fig. 4. (a) same as Fig. 1(a), (b) same as Fig. 1(b).

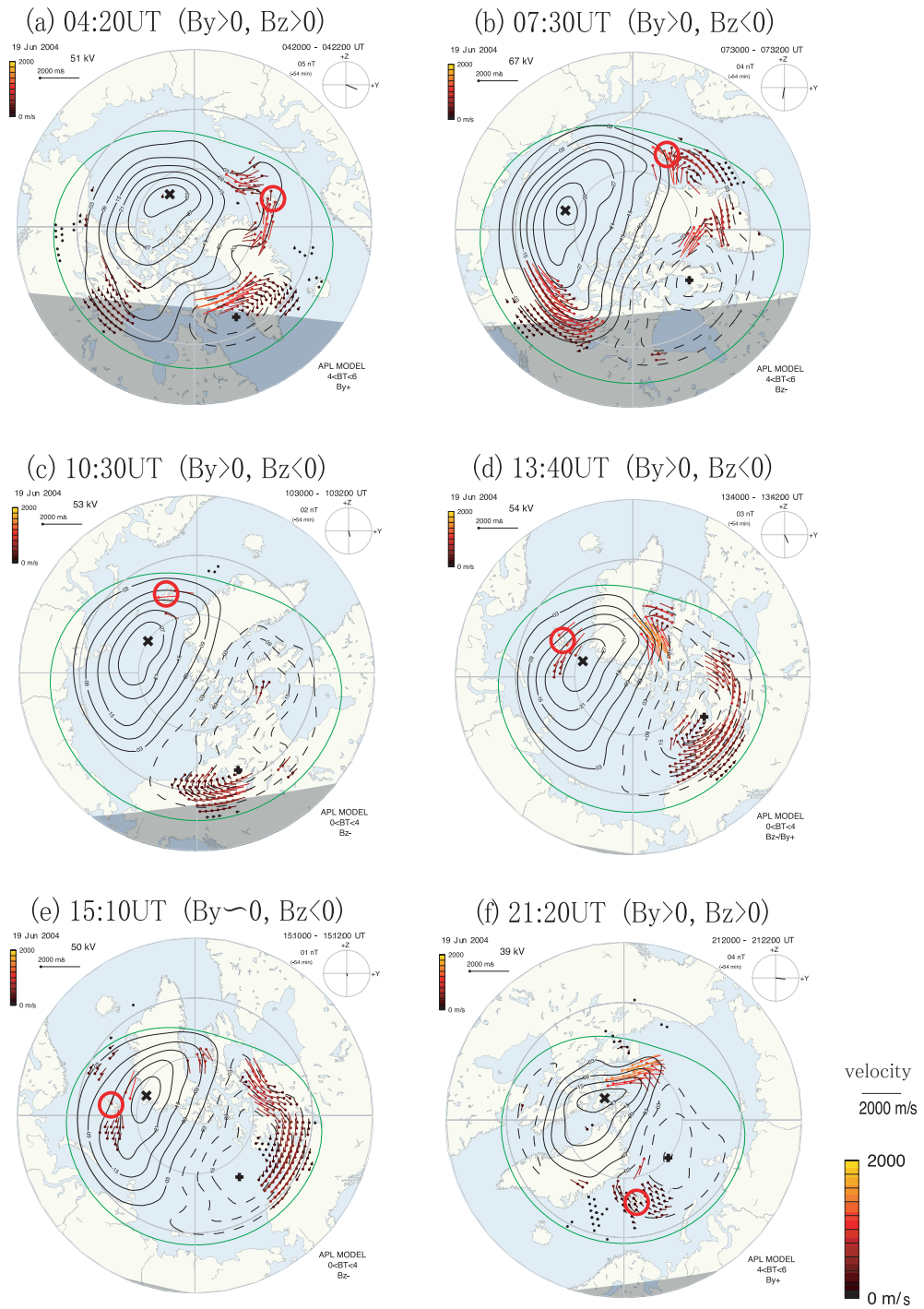


Fig. 5. Same as Fig. 2.

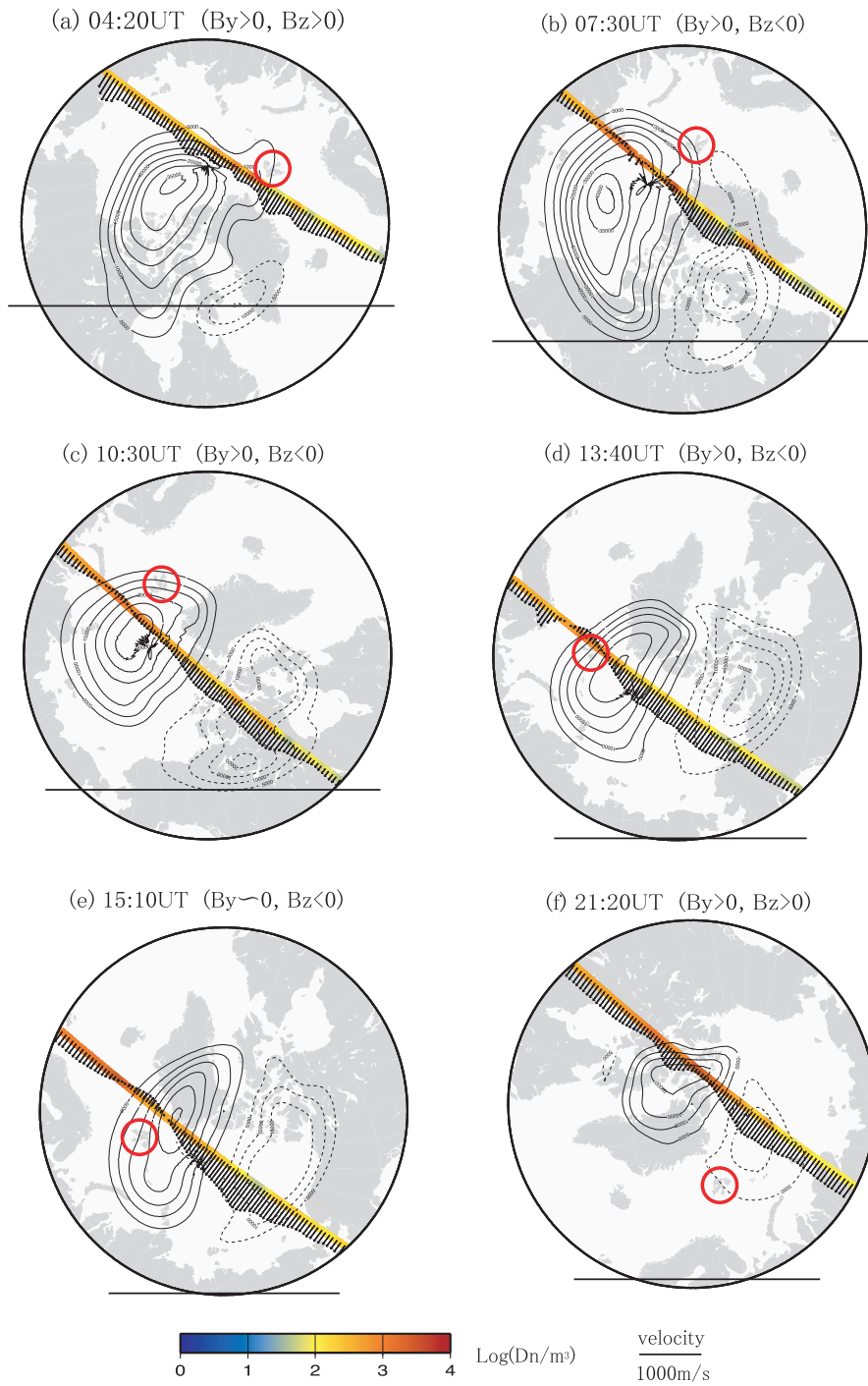


Fig. 6. Same as Fig. 3.

V. 考 察

観測例 1 において、Fig. 1(a)の①②③の時間帯に見られた電離圏 F 層のイオン温度の上昇（約 500K）は、Fig. 1(b)の惑星間空間磁場 B_y 成分が負から正に変わった時刻、つまり Fig. 2 の電離圏対流の構造が変化し始めた時刻とほぼ同時に始まっていることから、イオン温度が増加した理由の一つは、電離圏対流の変化に伴ってイオンと中性大気の間速度差が生じ、摩擦熱が起きたためと考えられる。

これまでイオン上昇流の地上観測は EISCAT レーダー等により多くなされてきたが（例えば、Keating et al., 1990）、Wahlund et al. (1992)は 1989 年と 1990 年に行った EISCAT レーダー観測から得られた結果から、イオン上昇流現象を 2 つに分類した。1 つは磁場に垂直な方向の電場が増大し、摩擦加熱によってイオン温度が大きくなるものである。高度方向にイオン温度の勾配があると結果的に圧力勾配が生じ、イオンや電子を上昇させる。2 つ目は電子の降り込みによって生じるイオン上昇流である。電子の降り込みによって高度約 200-300km の電子密度と温度が増大し、結果的に電子の圧力勾配が生じ電子が上昇する。さらに両極性電場を介してイオンが上昇する。観測例 2 のイオン温度（Fig. 4(a)中の(iv)）を見てみると、電離層 F 層でイオン温度が変動しているのは観測時間全体を通して(A)-(D)の時間帯にみられる約 500K の上昇のみである。これは、(A)-(D)の時間帯にかけて、磁場に垂直な成分の電場が増大し、それにより中性大気とイオンとの間に摩擦加熱が起きたためと考えられる。さらに、それによって高度方向にイオンの圧力勾配ができ、(A)-(D)のイオン上昇流が起きたと考えることが出来る。

しかしながら、観測例 1 では、全体を通して電子密度、電子温度、イオン温度に顕著な変化が無いにもかかわらず①②③の時間帯だけイオン上昇流が起きている。また、観測例 2 のイオン上昇流(A)-(D)は同時にイオン温度の増加を伴っているが、①-⑤のイオン上昇流は電子密度、電子温度、イオン温度に顕著な変化が無い。これらのイオン上昇流、観測例 1 の①-③や観測例 2 の①-⑤は、電離圏電場の増大もしくはオーロラ粒子の降り込みによってローカルに発生したものではない可能性がある。つまり、別の領域で発生したイオン上昇流が電離圏対流の流れに沿って、ESR 上空を通過した可能性もある。プラズマの塊が極域電離圏対流によって運ばれる現象には、ポーラーパッチがある。ポーラーパッチ (polar patch) とは、極域電離圏対流によって電離圏 F 層高度内を反太陽方向に輸送される密度の高いプラズマ塊である (Rodger et al., 1994)。夜側のオーロラ帯に達したポーラーパッチはオーロラブロボ (auroral blob) と呼ばれ、対流に乗って昼間側へ流れて行く (Ogawa et al., 1998)。

CHAMP 衛星は、ほとんどの軌道において中性大気密度の濃い箇所を観測している (Fig. 3 と Fig. 6)。そしてさらにその箇所はいつも電離圏対流の外側である。そこでは大気とプラズマの衝突が多くなることから、摩擦加熱によりイオン温度が高くなることが予想され、イオン上昇流が起きやすい環境である可能性がある。さらにプラズマ対流が、そのイオン上昇流が起きているプラズマ塊を輸送することも考えられる。この様なメカニズムによって ESR 上空でイオン上昇流が観測されたと考えている。

イオン上昇流が発生した位置の特定は出来ていないが、例えば観測例 1 の場合はカस्प付近で発生して夜側の ESR で観測したと仮定して、イオン上昇流発生から観測までの時間を計算してみる。対流の速度を約 1000m/s としてカस्प（磁気緯度 75° ）から ESR（磁気緯度 75° ）まで直線の距離を流れてきたとすれば、距離は $2\pi R_e \times (30^\circ / 360^\circ) \sim 3349\text{km}$ となるので、イオン上昇流発生から観測まで、およそ 1 時間となる。そしてその間上昇流は継続していなければならない。イオン上昇流の継続時間はイベント毎に様々だが、例えば本研究の観測例 1 ②のイオン上昇流は高度約 300km-1000km にかけて速度約 150m/s の上昇流が約 1 時間継続している。また、Waulund et al. (1992)で議論されているイベントを見ると、高度約 500km 以上で約 500m/s のイオン上昇流が約 10 分足らず続くケースや、約 1 時間半続くケースも観測されている。しかしながらイオン上昇流の間、常に電子密度・温度もしくはイオン温度の上昇が見られ、先に述べたようにこれらのイオン上昇流は電場増大もしくは電子の降り込みによって発生している。つまり、常にイオン上昇流発生源も観測している。本研究で議論した観測例 1 の①-③や観測例 2 の①-⑤のイオン上昇流では同時に電子密度・温度やイオン温度の変動が観測されなかったので、輸送されてきたと考えると上昇流を引き起こすソースは既に無くなっていたはずである。

謝辞 本研究において、ACE の太陽風データ、SuperDARN の極域電離圏対流のデータを利用させていただきました。記して感謝いたします。

文 献

- Abe, T., S. Watanabe, B. A. Whalen, A. W. Yau and E. Sagawa, 1996. Observations of polar wind and thermal ion outflow by Akebono/SMS, *J. Geomagn. Geoelectr.*, **48**, 319-325.
- Buchert, S. C., A. P. van Eyken, T. Ogawa and S. Watanabe, 1999. Naturally enhanced ion-acoustic lines seen with the EISCAT Svalbard Radar, *Adv. Space Rec.*, **23**, 1699-1704.
- Cowley, S. W. H., 1982. The causes of convection in the Earth's magnetosphere: a review of developments during the IMS, *Rev. Geophys. Space Phys.*, **20**, 531-565.
- Davies, J. A., M. Lester and T. R. Robinson, 1997. Deriving the normalised ion-neutral frequency from EISCAT observations, *Ann. Geophys.*, **15**, 1557-1569.
- Foster, J. C., C. Del Pozo, K. Groves and J. P. St-Maurice, 1988. Radar observations of the onset of current driven instabilities in the topside ionosphere, *Geophys. Res. Lett.*, **15**, 160-163.
- Garrard, T. L., A. J. Davis, J. S. Hammond and S. R. Sears, 1998. The ACE Science Center, *Space Sci. Rev.*, **86**, 649-663.
- Greenwald, R. A., K. B. Baker, R. A. Hutchins and C. Hanuise, 1985. An HF phased-array radar for studying small-scale structure in the high-latitude ionosphere, *Radio Sci.*, **20**, 63-79.
- Hapgood, M. A. and B. S. Lanchester, 1987. A narrow auroral arc observed with EISCAT, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **49**, 49-55.
- Heelis, R. A., 1984. The effects of interplanetary magnetic field orientation in dayside high-latitude ionospheric convection, *J. Geophys. Res.*, **89**, 2873-2880.

- Keating, J. G., F. J. Mulligan, D. B. Doyle, K. J. Winser and M. Lockwood, 1990. A statistical study of large field-aligned flows of thermal ions at high-latitudes, *Planet. Space Sci.*, **38**, 1187-1201.
- Liu, H. and G. Lu, 2004. Velocity shear-related ion upflows in the low-altitude ionosphere, *Ann. Geophysicae*, **22**, 1149-1153.
- Liu, H., S.-Y. Ma and K. Schlegel, 2001. Diurnal, seasonal, and geomagnetic variations of large field-aligned ion upflows in the high-latitude ionospheric F region, *Geophys. Res.* **106**, 24, 651-24, 662.
- Liu, H., H. Luehr, V. Henize and W. Koehler, 2005. Global distribution of the thermospheric total mass density derived from CHAMP, *J. Geophys. Res.*, **110**, A04301.-A04301.11.
- Ogawa, T. and N. Nishitani, 1998. Antarctic HF radar observations of irregularities associated with polar patches and auroral blobs: A case study, *J. Geophys. Res.*, **103**, 26.547-26.558.
- Ogawa, Y., R. Fujii, S. C. Buchert, S. Nozawa, S. Watanabe and A. P. van Eyken, 2000. Simultaneous EISCAT Svalbard and VHF radar observations of ion upflows at different aspect angles, *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 81-84.
- Rodger, A. S., M. Pinnock and J. R. Dudeney, 1994. A new mechanism for polar patch formation, *J. Geophys. Res.*, **99**, 6425-6436.
- Ruohoniemi, J. M. and K. B. Baker, 1998. Large-scale imaging of high-latitude convection with Super Dual Auroral Radar Network HF radar observations, *Geophys. Res. Lett.*, **103**, 20797-20811.
- Semeter, J., C. J. Heinselman, J. P. Thayer and R. A. Doe, 2003. Ion upflow enhanced by drifting F-region plasma structure along the nightside polar cap boundary, *Geophys. Res. Lett.*, **30**, SSC3-1-SSC3-5.
- Sharp, R. D., R. G. Johnson and E. G. Shelly, 1997. Observation of an ionospheric acceleration mechanism producing energetic (keV) ions primarily normal to the geomagnetic field direction, *J. Geophys. Res.*, **82**, 3324-3328.
- Wahlund, J.-E., H. J. Opgenoorth, I. Haggstrom, K. J. Winser and G. O. L. Jones, 1992. EISCAT observations of topside ionospheric ion outflows during auroral activity: Revisited, *J. Geophys. Res.*, **97**, 3019-3037.