

1988年11月30日～12月1日の電離圏擾乱現象

5. HF ドップラー法で観測された電離圏の変動

貝沼 昭司*¹ 稲森 康治*² 石橋 弘光*³磯辺 武*⁴ 小川 忠彦*¹

(平成元年9月27日受理)

IONOSPHERIC DISTURBANCES DURING NOVEMBER 30~DECEMBER 1, 1988

5. IONOSPHERIC OSCILLATIONS REVEALED BY HF
DOPPLER MEASUREMENT TECHNIQUE

By

Syouji KAINUMA, Kohji INAMORI, Hiromitsu ISHIBASHI,
Takeshi ISOBE, and Tadahiko OGAWA

The Communications Research Laboratory HF Doppler network detected some ionospheric oscillations during a medium-scale geomagnetic storm on November 30 through December 1, 1988. In association with the storm sudden commencement (SSC) at 1700 JST on November 30, HF Doppler frequency deviations belonging to an SCF (+-) type, which is believed to be caused by the westward and subsequent eastward ionospheric electric fields, were observed. Large-scale traveling ionospheric disturbances detected on the night of November 30 by the ionosondes ($h'F$) also appeared in the HF Doppler data.

1. ま え が き

JJY 標準電波を用いた短波 (HF) のドップラー周波数偏移の観測は日本国内で広く行われてきた。このデータをもとに、太陽フレア放射線による電離圏異常電離⁽¹⁾、極域電離圏で励起された大規模移動性電離圏擾乱 (TID: Traveling Ionospheric Disturbance)、未だ原因がよくわかっていない中規模移動性電離圏擾乱⁽²⁾、そして地震や日食による大気波動現象などが研究されてきた⁽³⁾⁽⁴⁾。

1988年11月30日から12月1日にかけて発生した地磁気嵐は、柿岡地磁気観測所の報告によると、地磁気水平成

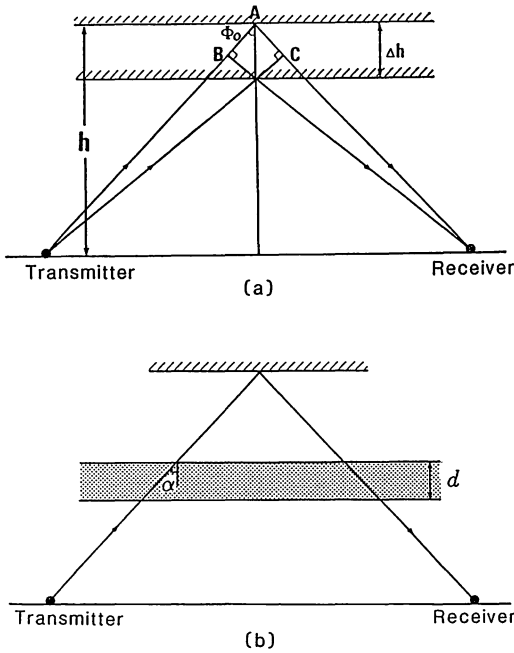
分の最大変化量 (ΔH) は -170 nT で、規模的にはそれほど大きくなかった。しかし電離圏への影響は大きく、本特集号でも述べられているように、日本各地における短波帯からマイクロ波帯までの電離圏伝搬は大きな影響を受けた。

本論文では、この期間の JJY 標準電波 5 MHz のドップラー偏移データをもとに、地磁気データや電離圏データと比較しながら、電離圏の変動の様子を考察する。

2. HF ドップラー測定法

HF ドップラー測定では、HF 帯 (3—30 MHz) の標準電波の電離圏反射波を連続受信して、受信周波数と送信周波数とのわずかな差を検出することにより、反射高度の変化や反射高度以下の電子密度の変化などを知る⁽⁵⁾。よく知られているように、ドップラー周波数偏移 $4f$ は送信周波数 f 、光速を c とすれば、次式で与えら

*¹ 電波部 電磁圏伝搬研究室*² 標準測定部 校正検定課*³ 稚内電波観測所*⁴ 犬吠電波観測所



第1図 JJY標準電波周波数が電離圏変動によりドップラー偏移をする二つの場合。(a) 反射点の変動, (b) 反射点高度以下での電子密度分布の変動。

れる⁽¹⁾⁽⁶⁾。

$$\Delta f = -\frac{f}{c} \frac{dP}{dt} \quad \dots\dots(1)$$

ここで P は位相通路長で, s を電波の伝搬路長, n を媒質の屈折率とすると, $P = \int_s n ds$ で与えられる。位相通路長 P は

- 1) 反射点の変動
- 2) 反射高度以下の電子密度分布の変動

により変化するので, (1)式から Δf が変動することになる。

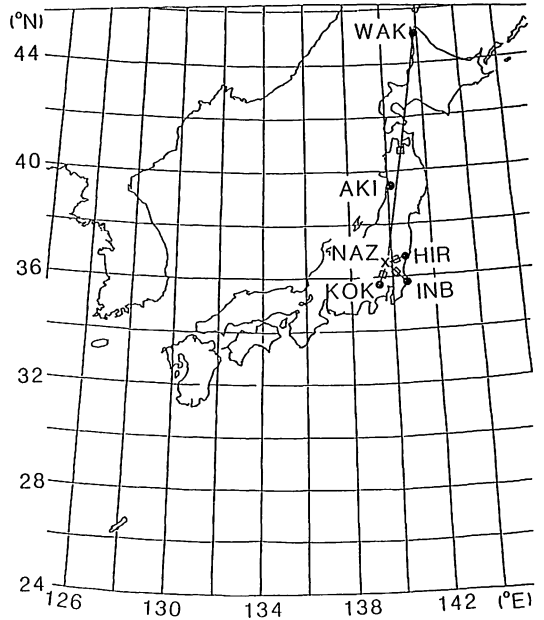
第1図(a)に示すように, 送信機から出た電波が入射角 ϕ_0 で電離圏に入り, A点で反射され受信機に到達するとする。今, 反射高度が微小量 Δh だけ低くなったとすると, 反射点付近では $n \approx 0$, それ以下では $n \approx 1$ と仮定できるので, ΔP は

$$\Delta P = BA + AC = 2\Delta h \cos \phi_0 \quad \dots\dots(2)$$

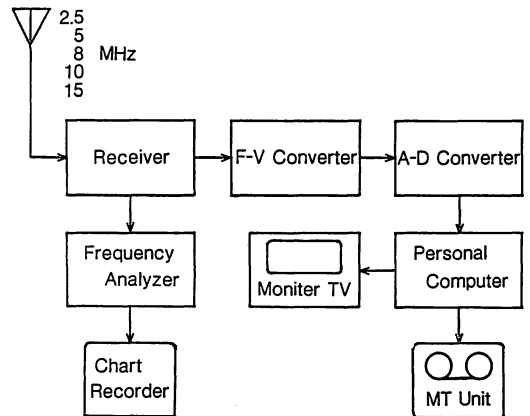
と近似できる。ここで, 地球半径 a と送信機と受信機間の伝搬路が地球中心に張る角 θ を用いると ϕ_0 は

$$\tan \phi_0 = \frac{\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}{1 + \left(\frac{h}{a}\right) - \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad \dots\dots(3)$$

と表わせる。したがって, 1)の反射点の変動によるドップラー変化 Δf_1 は, (1)と(2)式から



第2図 JJY標準電波送信点(名崎)と各HFドップラー観測点。(NAZ=名崎, WAK=稚内, HIR=平磯, INB=犬伏, KOK=国分寺)。



第3図 HFドップラー観測システムブロック図。

$$\Delta f_1 = -\frac{2f}{c} \frac{dh}{dt} \cos \phi_0 \quad \dots\dots(4)$$

で与えられる。2)の場合については(第1図(b)参照), 次式で与えられる。

$$\Delta f_2 = \frac{k}{cf} \frac{dN}{dt} d \sec \alpha \quad \dots\dots(5)$$

ただし, $k = 8.06 \times 10^{-11} (\text{MHz}^3 \cdot \text{m}^3)$, そして d は第1図(b)に示すように反射高度以下に存在する無偏倚吸収層の厚さ, α は吸収層への入射角, N は電子密度である。

測定されるドップラー周波数は $\Delta f = \Delta f_1 + \Delta f_2$ となるので, 測定から Δf_1 と Δf_2 を分離することは不可能で

ある。しかし、TID 等のような、主として F 層の現象に対しては Δf_1 が、太陽フレアで誘起される E, D 領域における電子密度の急増に対しては Δf_2 が効く。また、ひとつの現象をいくつかの周波数で観測すれば、 Δf が f に比例するか反比例するかにより、 Δf_1 と Δf_2 を区別できる。

第2図に JYJ 標準電波送信点 (名崎: NAZ) と各受信点 (稚内: WAK, 平磯: HIR, 犬吠: INB, 国分寺: KOK) の配置を示す。観測周波数は 2, 5, 8, 10, 15 MHz (国分寺は 15 MHz を除く) であるが本論文では稚内, 犬吠, 国分寺の 5 MHz のデータのみを用いる。各周波数に対するドップラー変動量 ($\Delta f/f$) は 10^{-7} 以下であるので、観測で用いる基準信号の周波数変化はこの値より小さくなければならない。我々は約 10^{-10} 以上の安定度を有する基準信号を用いた。また、ドップラー変化の正負を判別するために、国分寺では上記各周波数のドップラー偏移到 2, 4, 6.4, 8 Hz の周波数を、それ以外の観測点では 1, 2, 3.2, 4, 6 Hz をオフセットとし

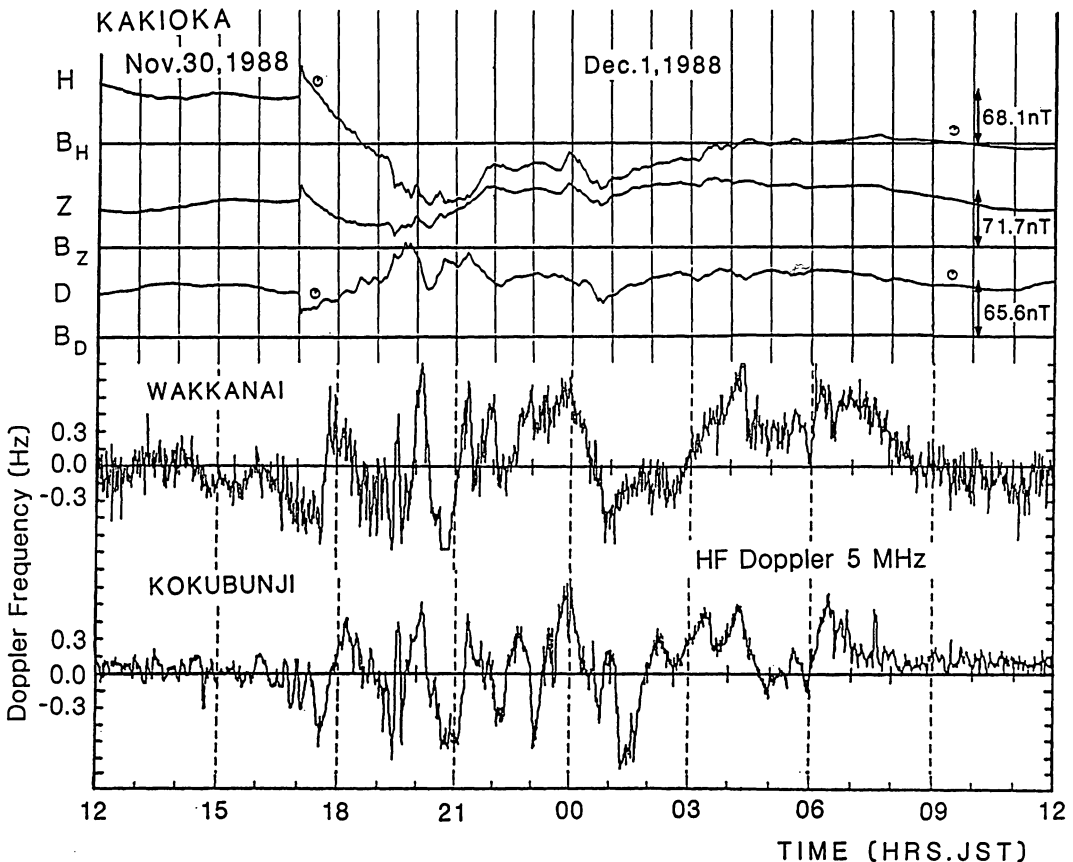
て加えた。第3図に観測システムのブロック図を示す。観測されたドップラー偏移量は実時間周波数解析装置を通った後に放電記録紙上に記録された。また、同量は A/D 変換されてデジタル値としてカセット MT に記録された。カセット MT のデジタルデータは1次処理されて大型計算機に蓄積された。

3. 観測結果

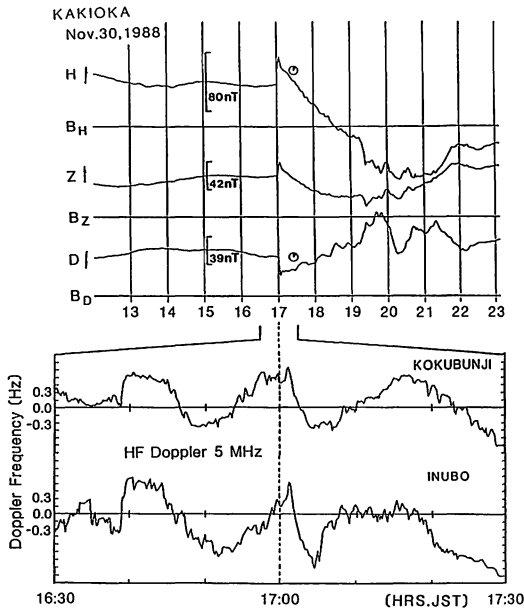
第4図は1988年11月30日~12月1日に柿岡地磁気観測所で観測された地磁気3成分 (H, D, Z 成分) の変化と、稚内と国分寺の 5 MHz ドップラー周波数の変化 (30秒毎のデジタル値) を示す。この図から、地磁気嵐の発生前、初相、主相、終相の各段階における HF ドップラーの全体的様子を眺めることができる。

3.1 SSC によるドップラー変化

地磁気嵐急始(SSC)が起こった11月30日 1700 JST 付近の地磁気3成分と国分寺, 犬吠の 5 MHz のドップラー周波数の時間変化を第5図に拡大して示す。両ドッ



第4図 1988年11月30日~12月1日に観測された柿岡の地磁気3成分と稚内, 国分寺の 5 MHz ドップラー周波数の変化。ドップラーデータは30秒毎の値がプロットしてある。なお、 B_H, B_Z, B_D はそれぞれ水平分力, 鉛直方向分力, 偏角のベースラインである。



第5図 1988年11月30日の柿岡の地磁気3成分と国分寺、犬吠の5MHzドップラー周波数の変化。ドップラーデータは10秒毎の値がプロットしてある。

プレー観測データとも、1702 JST 付近の鋭い増加の後に減少し、その後徐々に回復しているのが見られる。これらのデータには互いに位相差がないことから TID のようなものではなく、SSC に伴う現象であることがわかる。

ところで、SSC 時のドップラーの変化 (SCF: SSC-associated frequency deviation) はドップラー周波数の増加 (+) と減少 (-) の組み合わせにより、SCF (+-), SCF (-+), SCF (+), SCF (-) の4タイプに分類されている⁽⁸⁾⁽⁷⁾。ここで+, -の符号はそれぞれ西向き, 東向きの電離圏電場によって生じる周波数偏移の向きを表わしている。これらの分類によると、1700 JST の SSC 時に、国分寺、犬吠で観測されたドップラー変化は SCF (+-) に対応している。(+) は急激な磁場増加に伴う西向き電場による電離圏プラズマの下降運動に起因し、これに引き続く (-) はE層電流に付随する東向き電場による上昇運動に起因していると考えられる⁽¹⁾⁽⁸⁾。SSC によるこのようなドップラー変化 (SCF (+-)) は日中に発生しやすいという統計結果と一致する⁽¹⁾。

3.2 11月30日 1700 JST~2200 JST の現象

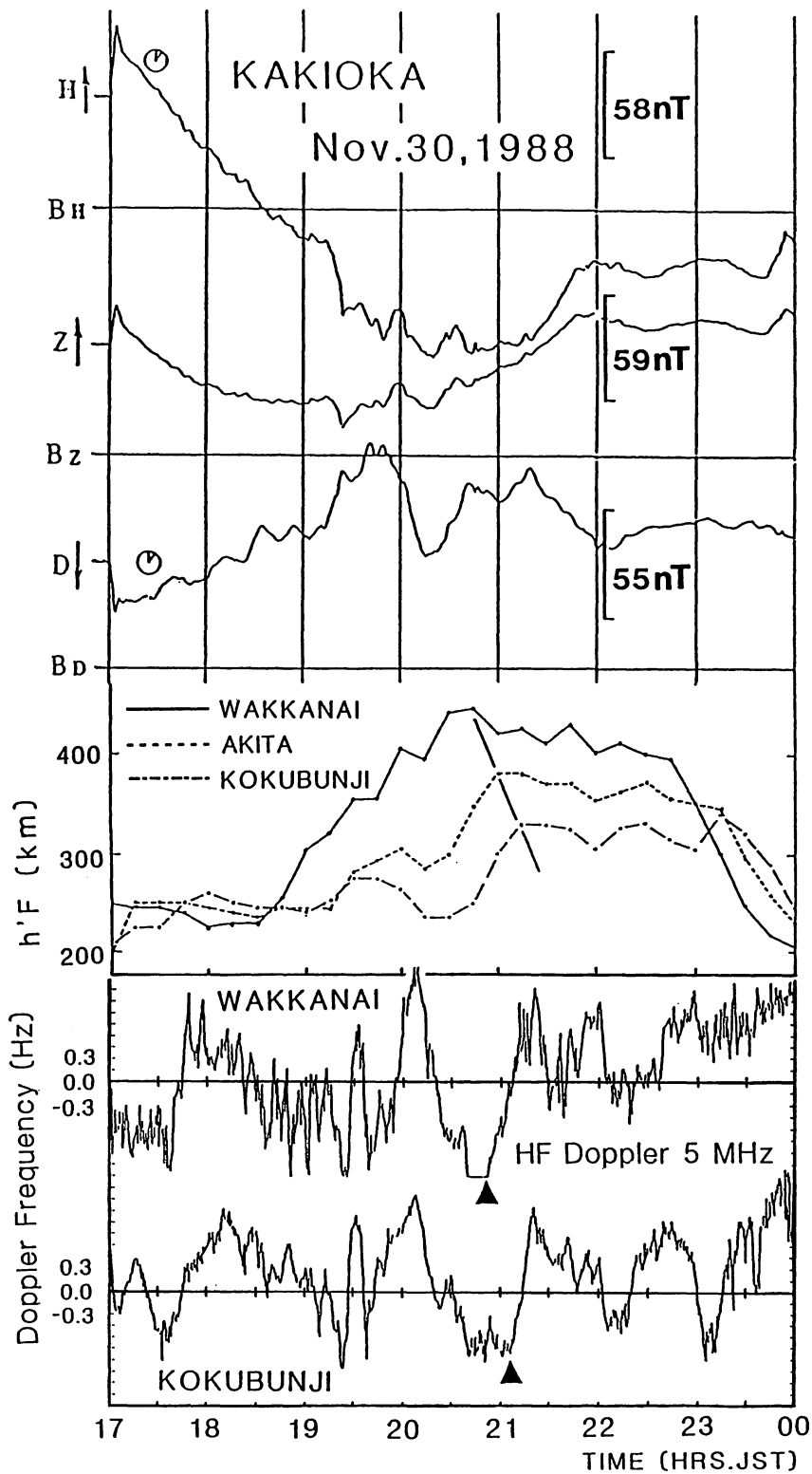
第6図は、上から順に柿岡の地磁気3成分、電離圏 $h'F$ データ、そして稚内と国分寺の HF ドップラーデータを示す。地磁気擾乱が最も発達し始めた 1915 JST 頃

から稚内、秋田、国分寺で $h'F$ の増加が見られる。特に秋田、国分寺において、1915~2015 JST にほとんど同時に $h'F$ に小さなコブが現れ (稚内で対応するピークが見られないのは既に $h'F$ の上昇が始まっているためであろう)、次の山へと増加している⁽⁹⁾。

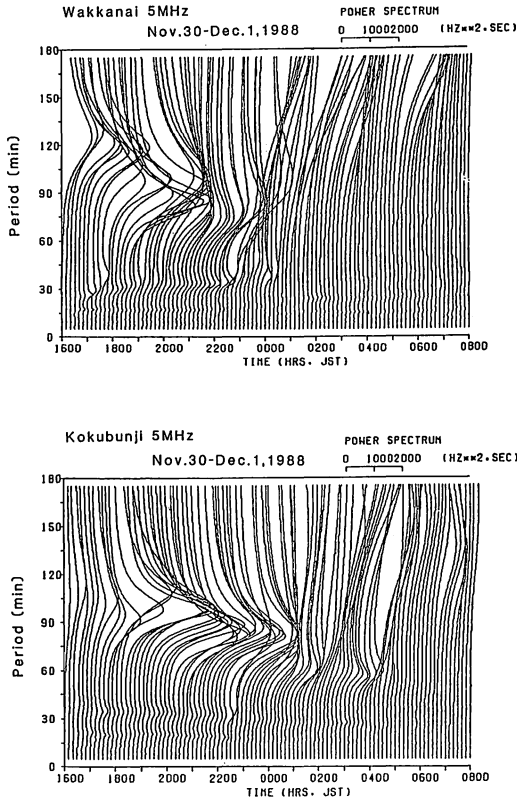
1925 JST 頃から約10分間にわたって、稚内と国分寺でのドップラーの急激な上昇がほぼ同時に現れている。現象の同時性から西向き電場による反射点の下降運動によるものと思われるが、 $h'F$ にはそれに対応する部分がない。このようなドップラー周波数の急激な変動は $h'F$ の増加が極大値に達した時しばしば現れる現象と言われているが⁽¹⁰⁾、詳しい原因は不明であり、今後地磁気データなどを見比べながら調査する必要がある。

2000 JST 付近のドップラーの変化については、稚内より国分寺のほうが時間的に早く上昇している部分 (1940~2000 JST) がある。この部分は赤道異常の効果が国分寺付近までに及び、そのため電子密度が上昇し⁽¹¹⁾、見かけ高が下がったことにより起こったものと考えられる⁽¹⁰⁾⁽¹²⁾。

2045 JST に現れた稚内 $h'F$ の極大値は斜線で示すように、ほぼ一定の時間遅れ (15分) を持って秋田、そして国分寺へと移っていった。各観測所の緯度差が約5度の間隔で位置していることを考えると、この変化は北から南へ伝搬する波動 (大規模 TID) によるものと考えられる。稚内と国分寺の距離 1,090 km を30分で伝搬する南向きの波の速さは 605 m/s である。同じ時間帯のドップラー変化を見ると、2100 JST 付近 (▲印) において稚内と国分寺の位相に約15分の時間差が見られる。名崎-稚内の反射点と名崎-国分寺との反射点の距離 504 km (第1図参照) を約15分で波動が伝搬したことを考慮すると、この波動は速度約 560 m/s で南向きと見ることができる。この波動は、極域に強いジェット電流が流れたために中性大気が加熱されたことによる大気波動であろうと思われる。ちなみに、これら稚内と国分寺のドップラー変動を周期解析したものが第7図である。各時刻のスペクトルは、その時刻を中心とする120分間について30秒毎のデータを用いて最大エントロピー法 (MEM) で計算した。この大気波動が観測された2100 JST 付近では、両観測結果とも約80分の振動周期が卓越しており、大規模 TID によるものと思われる。スペクトル図には80分以上の長周期振動が見られるが、このような振動による稚内と国分寺のドップラー波形には位相差がはっきりとは見られない。これは、ドップラー周波数の変化の中には色々な短周期の変動も含まれていることによる。



第6図 1988年11月30日の柿岡の地磁気3成分の変化(上), 稚内, 秋田, 国分寺の $h'F$ の変化(中)及び稚内, 国分寺の5MHz ドップラー周波数の変化(下).



第7図 1988年11月30日1600 JST～12月1日0800 JSTにおける稚内と国分寺の5MHz ドップラー周波数の変化を周期解析したもの。

4. む す び

1988年11月30日1700 JSTに発生した地磁気嵐により、HF ドップラー法で SSC 効果や大規模 TID が検出された。SSC によるドップラー変化は SCF (+) のタイプが観測された。SCF の分類によると、正に続く負のドップラー周波数偏移はそれぞれ西向きと東向き電場によって生じていると考えられる⁽⁸⁾。地磁気擾乱が最も発達し始めた11月30日 1925 JST 頃に稚内と国分寺の両観測所ではほぼ同時に約10分にわたるドップラーの増加があった。現象の同時性から電離圏高度での西向き電場による下降運動によるものと思われるが、これは1930 JST の $h'F$ 電離圏観測データからは確認できない変化である。

地磁気嵐時の極域へのエネルギー流入が極域から赤道方向に伝搬する大気波動(大規模 TID)を励起するとされているが、この様な大規模 TID が稚内、秋田、国分寺の電離圏 $h'F$ データと稚内、国分寺のドップラーデータで検出された。伝搬速度は500～600 m/s であった。このような極域から赤道方向のエネルギーの流れとは逆

に赤道異常による現象と思われる電離圏擾乱の伝搬が国分寺付近まで起こっていることも検出されたが、これについてはさらに他のデータとの比較検討が必要である。

謝 辞

適切な御指導いただいた電波部田中主任研究官に感謝します。周期解析には関東支所平磯宇宙環境センター丸橋センター長のプログラムを使用させて頂いた。電離圏データは当所世界データセンター C2 (電離層) から、また地磁気データは気象庁地磁気観測所から提供されたことを記して謝意とします。

参 考 文 献

- (1) 菊池, 杉内, 石嶺, 前野, 本間, “1982年6月～9月の太陽地球間擾乱現象 IV. 電離圏擾乱 11. HF ドップラー観測”, 電波季, 31, 特2, pp. 171-183, 1985.
- (2) J. A. Waldock, and T. B. Jones, “Source Regions of Medium Scale Travelling Ionospheric Disturbances Observed at Mid-Latitudes”, J. Atmos. Terr. Phys., 49, pp. 105-114, 1987.
- (3) T. Okuzawa, T. Shibata, and H. Yasui, “On the Ionospheric Effect of Near-Source Earthquakes around the Islands of Japan Detected by the HF-Doppler Technique”, J. Geomag. Geoelectr., 35, pp. 391-397, 1983.
- (4) J. E. Salah, W. L. Oliver, J. C. Foster, J. M. Holt, B. A. Emery, and R. G. Roble, “Observations of the May 30, 1984, Annular Solar Eclipse at Millstone Hill”, J. Geophys. Res., 91, pp. 1651-1660, 1986.
- (5) T. Ogawa, “Frequency Variations in Short-Wave Propagation”, Proc. IRE, 46, pp. 1934-1939, 1958.
- (6) K. Davies, J. M. Watts, and D. H. Zacharisen, “A Study of F2-Layer Effects as Observed with a Doppler Technique”, J. Geophys. Res., 67, pp. 601-609, 1962.
- (7) Y. -N. Huang, K. Najita, and P. Yuen, “The Ionospheric Effects of Geomagnetic Sudden Commencements as Measured with an HF Doppler Sounder at Hawaii”, J. Atmos. Terr. Phys., 35, pp. 173-181, 1973.
- (8) Y. -N. Huang, “Modeling HF Doppler Effects of Geomagnetic Sudden Commencements”, J. Geophys. Res., 81, pp. 175-182, 1976.

- (9) 丸山, 岡本, “電離圏シンチレーションの発生と東向き電場の役割”, 通信総研季, 36, 特9, pp. 53-62, 1990.
- (10) T. Tanaka, “An Important Role of Electric Field Reversals for the Initiation of Gigahertz Scintillations at Midlatitude during Geomagnetic Storms”, J. Geomag. Geoelectr., 39, pp. 659-676, 1987.
- (11) 皆越, 岡本, 満留, 西牟田, “ETS-II 衛星による電離圏シンチレーションと全電子数の観測”, 通信総研季, 36, 特9, pp. 83-91, 1990.
- (12) 田中高史, “磁気圏擾乱と電離圏擾乱の関係”, 通信総研季, 36, 特9, pp. 47-52, 1990.
- (13) T. Kikuchi, T. Ishimine, and H. Sugiuchi, “Local Time Distribution of HF Doppler Frequency Deviations Associated with Storm Sudden Commencements”, J. Geophys. Res., 90, pp. 4389-4393, 1985.
- (14) T. Ogawa, S. Kainuma, and C. Katoh, “HF Doppler Oscillations during the Geomagnetic Storm of February 6-9, 1986”, Proc. Research Institute of Atmospherics, Nagoya Univ., 36, No. 2, 1989.



The first part of the report deals with the general situation in the country. It is noted that the economy is still in a state of stagnation and that the government has failed to implement the necessary reforms. The report also mentions that the population is suffering from poverty and unemployment.

The second part of the report discusses the political situation. It is noted that the government is still in power and that there is no significant opposition. The report also mentions that the government has failed to address the needs of the people and that there is a growing sense of dissatisfaction.

