

## 電離層 $F2$ 領域における大規模 TIDs

前田佐和子\*・半田 駿\*\*

### Large-Scale TIDs in the $F2$ Region

Sawako MAEDA\* and Shun HANDA\*\*

**Abstract:** A study of the horizontal velocity dispersion of l.s. TIDs (large-scale traveling ionospheric disturbances), in the 50–150 min period range, was made by using observations recorded from November 1957 to July 1974 of  $f_oF2$  in  $f$ -plots at four ionospheric observatories distributed in Japan. The speeds and the azimuths of the Fourier components of these disturbances were calculated by performing the cross-spectral analysis to provide dispersion characteristics.

The range of horizontal phase trace velocities lies between 341 m/s and 976 m/s in a period of 150 min, between 293 m/s and 884 m/s in a period of 75 min and between 256 m/s and 745 m/s in a period of 50 min. The general tendency of the dispersion is such that the horizontal phase trace velocity increases with period. The direction of the wave propagation is mainly southward, and there is another wave group of which the direction of motion is about southwestward.

The polar magnetic activity is positively correlated with the horizontal phase trace velocity at 50 and 150 min components.

**要旨:** 日本国内4電波観測所の  $f_oF2$  を使って、周期50分から150分の大規模 TIDs (l.s. TIDs) の水平波面速度の分散特性を調べた。解析期間は1957年11月から、1974年7月までである。このデータをクロススペクトル解析することにより、各周期成分に対する速度と方向を算出した。その結果、水平波面速度は、周期150分で 341 m/s–976 m/s, 75分で 293 m/s–884 m/s, 50分で 256 m/s–745 m/s の範囲に分布した。一般的な分散特性としては速度が周期に対して正の相関をもつ傾向にある。波の伝搬方向は主として南向きである。さらに南西の方向に伝搬するもう1つの波群が存在する。周期50分と150分の成分では、極域磁場の活動度が高い時、水平波面速度が増大する。

### 1. はじめに

移動性電離層電子密度じょう乱 (TIDs) は、大気内部重力波が電離気体にもたらしたじょう乱であるという説は、さまざまな観測的、理論的研究の結果から支持されてきた。そのう

\* 京都大学理学部地球物理学教室。Geophysical Institute, Kyoto University, Kitashirakawa Oiwake-cho, Sakyo-ku, Kyoto 606.

\*\* 京都大学教養部地学教室。College of Liberal Arts, Department of the Earth Science, Kyoto University, Yoshida Nihonmatsu-cho, Sakyo-ku, Kyoto 606.

ち、周期が30分から2時間程度の長周期変動で、伝搬速度が 300 m/s から 1000 m/s に及ぶ大規模 TIDs (l.s. TIDs) は、極域磁場じょう乱との相関が顕著であり、周期30分以下の中規模 TIDs (m.s. TIDs すなわち medium-scale TIDs) と区別されている (GEORGE, 1968). 重力波の伝搬理論では、m.s. TIDs が非ダクト波である (FRANCIS, 1974) とされているのに対し、l.s. TIDs は、非ダクト波か (TESTUD, 1973) または上部熱圏のダクト波か (FRANCIS, 1973) 明らかでない。一般に、波動解析にあたってはその分散特性を調べることは基本的な課題であるが、ことに TIDs に関して、その分散特性を観測結果から決定し、伝搬機構を明らかにすることは重要である。ところで、HF ドップラーデータを用いて、HERRON (1973, 1974) および BROWNLIE *et al.* (1973) は主として m.s. TIDs の分散特性を得ている。しかし l.s. TIDs については、大きな空間距離をもつ多点観測が必要であることから困難が多く、その分散特性はいまだに得られていない。

我々は、日本国内での  $f_0F2$  データを使って l.s. TIDs の分散特性を調べた。 $f_0F2$  データをクロススペクトル解析することにより、周期50分から150分までのフーリエ成分に対する水平伝搬速度と伝搬方向を計算した。また、それらの結果と極光帯磁場変動との関係についても調べた。

## 2. データと解析方法

この解析に用いたデータは、稚内、秋田、国分寺、山川の4電離層電波観測所において得られたイオノグラムから読みとられた  $f_0F2$  である。4観測所は相互の水平距離が、最短で

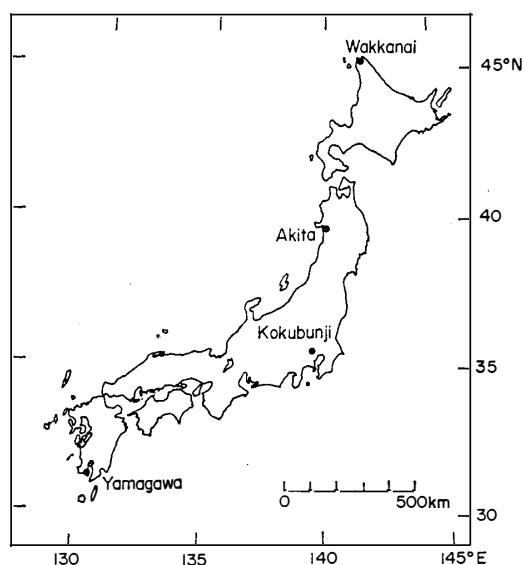


図 1 4電波観測所の地理分布  
Fig. 1. Geographic locations of four ionospheric observatories shown by solid dots.

473 km (国分寺—秋田間), 最長は 2087 km (稚内—山川間) で, ほぼ南北に細長い4つの三角形を構成している (図1). この配置は高緯度から伝搬してくる l.s. TIDs の検出にはき

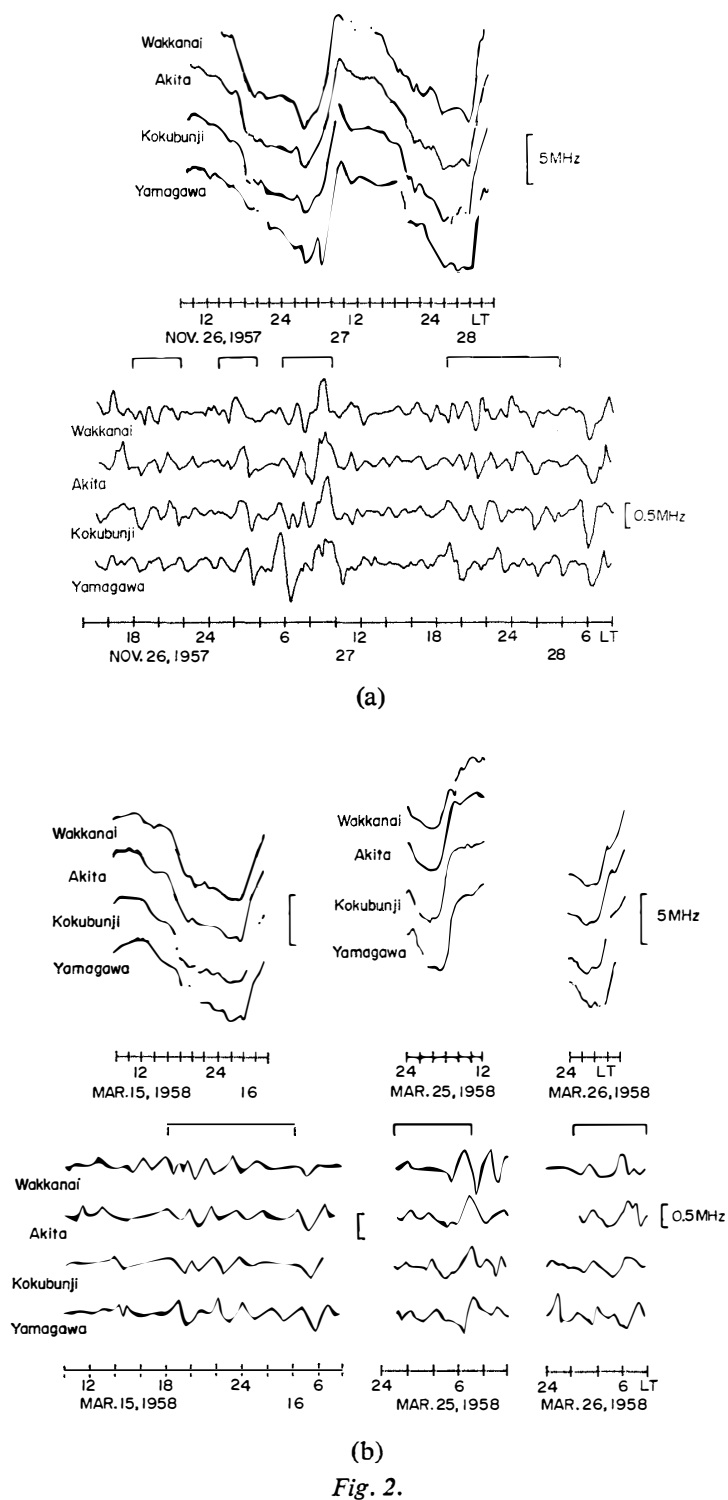


Fig. 2.

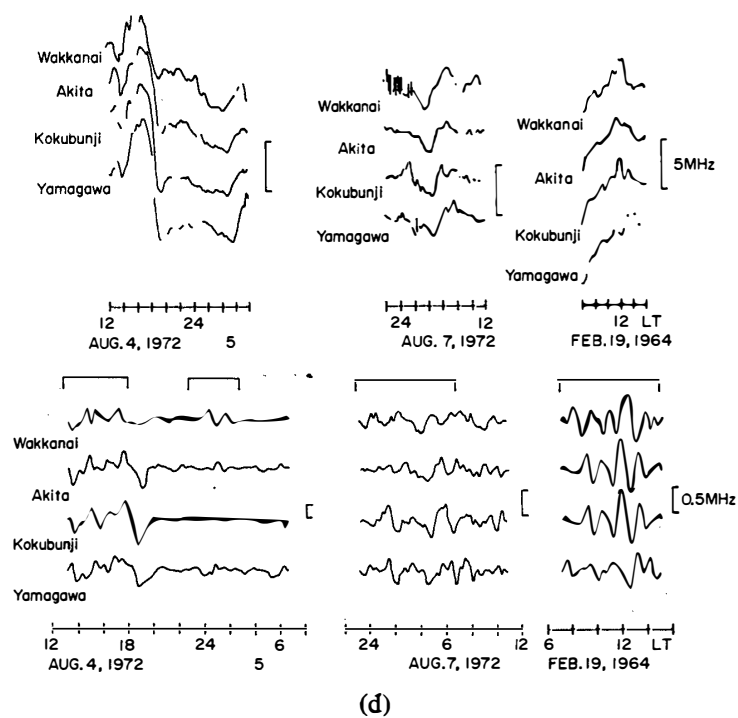
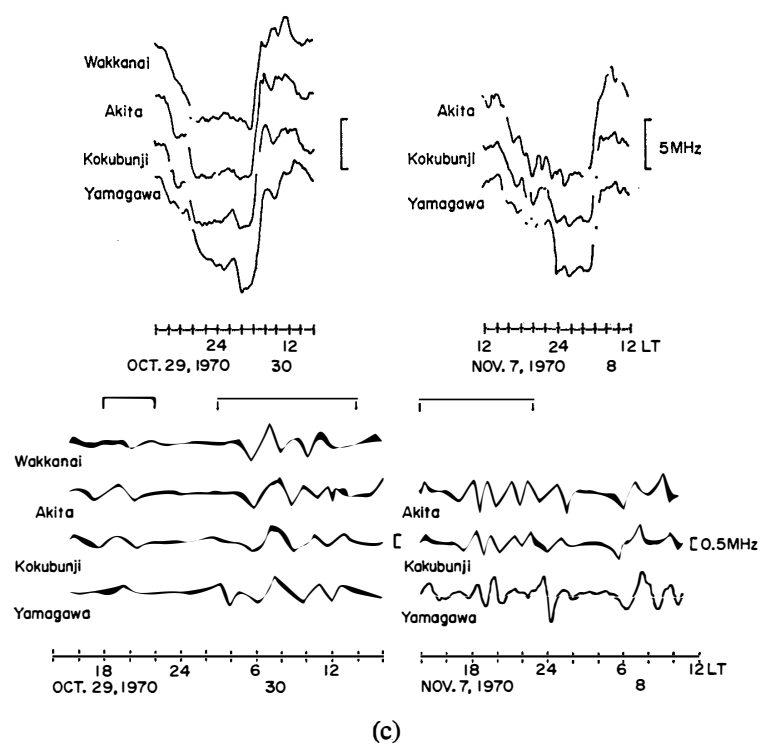


Fig. 2.

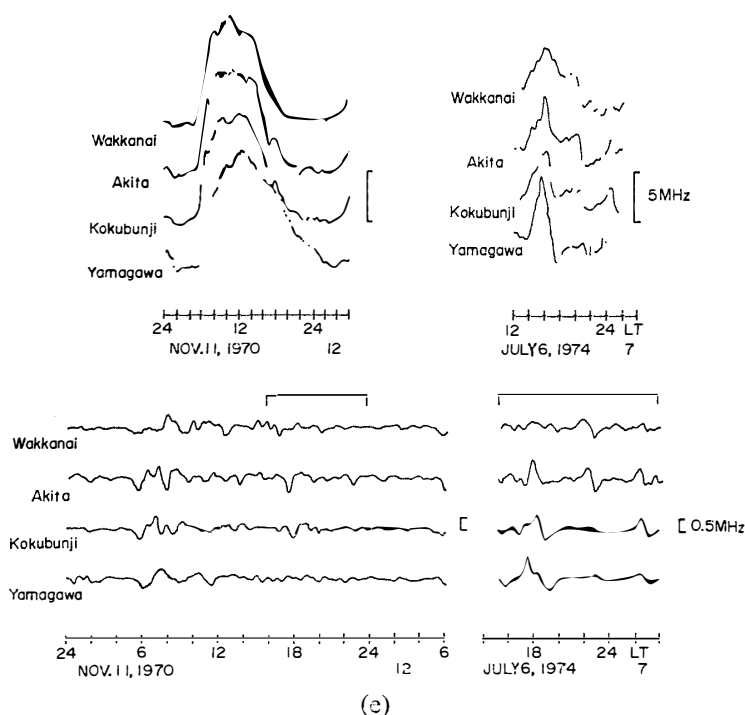


図 2 a-e. 解析に使用した期間の 4 観測所の  $f$ -プロット. フィルター処理をほどこした  $f_0F2$  は図の下部に示した. 活弧で示した期間は, 特に観測所間の相関が良く, 顕著な l.s. TIDs が観測される.

Fig. 2 a-e. The  $f$ -plots ( $f_0F2$ ) at four ionospheric observatories during the periods of which data are used in cross-spectrum analysis (top). The filtered  $f_0F2$  data (bottom) are also shown. The sections within the brackets have high coherencies between stations and the well defined l.s. TIDs can be seen.

わめて有利である. イオノグラムは 5 分間隔で得られており, 周波数分解能は 0.1 MHz である.

電離層は強い日変化を示すので, 周期 0.5-2 時間程度の変動に注目するため, 時系列に移動平均法によるフィルター処理をほどこした. フィルターは, 0.5-2 時間のバンドパス特性をもつ. 各観測所間の  $f_0F2$  時間変化が高い相関を有し, かつ l.s. TIDs が観測された期間の,  $f$ -プロット ( $f_0F2$ ) とフィルター処理をした  $f_0F2$  データを図 2 a-e に示した. ただし, スプレッド  $F$  や欠測等の期間は  $f_xF2$  から推測するか, または内挿して値を決定した. 図 2 で活弧で示した期間は, 各観測所での時系列の間に特に強い相関が存在する. この期間では, じょう乱の位相の進行がみられるので, それらが伝搬性のものであることが分かる.

これらのじょう乱の分散特性を調べるために, フィルター処理をした時系列に対して **B-T** 法によるクロススペクトル解析を行った (BLACKMAN and TUKEY, 1958). 稚内-秋田, 稚内

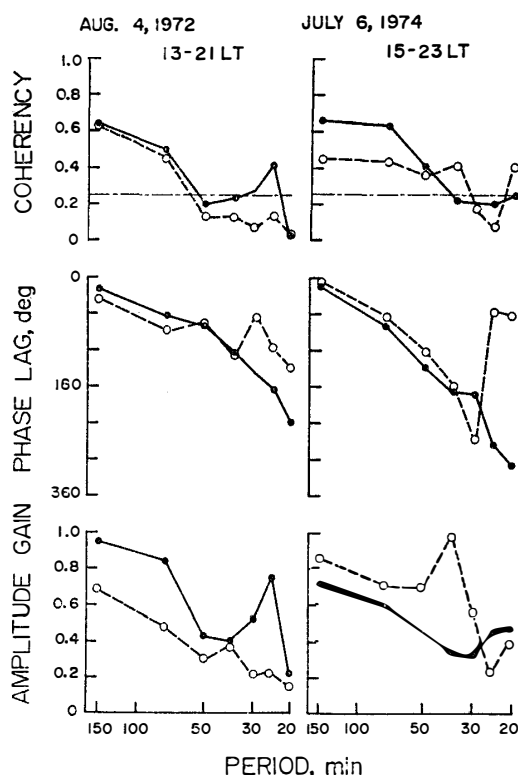


図 3 周波数応答関数の例。周期21分から150分までの振幅と位相を示した。実線は秋田—国分寺、破線は国分寺—山川に対する結果である。コヒーレンシは、信頼度 75% と設定すると、0.25 以上の場合に結果が統計的に有意である。

Fig. 3. Examples of frequency response functions. The amplitudes and phases of frequency response functions are shown in the 21–150 min period range. The continuous curves are the results for the pair of Akita and Kokubunji and the broken curves for the pair of Kokubunji and Yamagawa. Also shown are coherencies. There is a 75 per cent chance that coherencies above 0.25 are significant and not a statistical accident.

—国分寺，秋田—国分寺，秋田—山川，国分寺—山川の 5 対の時系列に対し，データ長を 8 時間とし，4 時間ずつずらしながら最大ラグ 75 分で解析した。この解析では信頼度を 75% と設定すると，得られた相互相関の結果については，コヒーレンシが 0.25 以上が統計的に有意である（赤池，1968）。解析の結果，各フーリエ成分に対する周波数応答関数（振幅，位相）およびコヒーレンシが得られた（図 3）。実線は秋田—国分寺，破線は国分寺—山川の時系列に対する結果である。図 3 で示されたコヒーレンシの周波数に対する変化は，いずれも長周期部分で増加している。この傾向は他の期間についても同じであるので，分散特性は周期 50 分，75 分，150 分の 3 成分について調べた。クロススペクトル解析において 2 つの時系列の間の位相差は， $2\pi$  の不確定性を有する。しかし，1.s. TIDs の水平波長はおおよそ 1000 km のオーダーであり，図 2 で見られる通り周期 30 分以上の変動については，各観測所

間の位相差は  $2\pi$  以下であることから、ここではすべて  $0-2\pi$  の値を採用した。

三角形を構成する 2 対の時系列の組に対し、コヒーレンシが共に 0.25 以上である場合に位相差から周期毎の伝搬速度ベクトルを計算した。伝搬速度ベクトルの算出は TAKENOSHITA *et al.* (1974) の方法を用いた。計算に際しては平面波を仮定している。L.s. TIDs の水平波長は非常に長く、地球の曲率を無視できるものではないが、長周期波動は地球の重力場の中で屈折を受けてほぼ一定高度で伝搬すること (FRANCIS, 1972)、波源とみなしうる極光帯電流が東西に長く、励起される波動も東西の波面をもつと考えられるので、上記の仮定は現実的である。構成される 4 個の三角形のうち、稚内—秋田—国分寺の組については南北に細長く、得られた速度、方向が大きな誤差をもつので除外した。同一現象について 2 つ以上の三角形から伝搬速度ベクトルが得られた場合は、ベクトル平均値をその代表値とした。

### 3. 解 析 結 果

解析は 89 の 8 時間時系列の組に対して行った。その結果、50 分以上の長周期部分で 2 つ以上の周期成分が前述の基準（コヒーレンシが 0.25 以上）を満足するものが 23 例あった。これらの期間は図 2 で示された期間に含まれている。得られた各周期毎の速度、伝搬方向を表 1 に示した。各期間の平均の伝搬方向 ( $\bar{\theta}$ ) は、各周期の伝搬方向の平均値である。さらに、各周期の伝搬方向の広がり ( $\Delta\theta$ )、AE 指数の 8 時間平均値 ( $\overline{AE}$ ) も表 1 に示した。

1957 年 11 月 26 日から 28 日の期間では全般的に約 600 m/s 以上の大きな速度で南に伝搬している。この期間は、各観測所の  $f_oF2$  変化が非常に高い相関を有し、夜間に顕著な l.s. TIDs が起こっている (図 2 a)。27 日 06–10 LT は電離層に日の出時特有の変化があり、ことに山川で 06 LT に特異な変動がみられる。しかし、極域磁場活動度も高く、表 1, No. 2, 3 にみる通りじょう乱の伝搬方向はほぼ完全な南向きであることから、この間の周期 1 時間前後の変化は極域で励起された l.s. TIDs であることが分かる。1958 年 3 月 25 日、26 日は日の出後、電離層電子密度が急激に増加している時大きな振幅をもつ変化があらわれた (図 2 b)。これは電離層がかなり不安定な状態にあり、TIDs が励起されやすく、かつその振幅も大きくなっているものと考えられる。同じ傾向は 1970 年 10 月 30 日、1972 年 8 月 7 日の期間でもみられた (図 2 c, d)。1964 年 2 月 19 日は磁気的には非常に静かであったが、電離層には周期 1 時間前後の準正弦波的な振動がみられる (図 2 d)。伝搬は各周期ともほとんど西向きであり、他の期間とはこの点で著しく区別される。このことは、稚内、秋田、国分寺では相関が非常に高いが、西にずれた山川では位相が遅れ、かつ減衰していることからもうかがえる。1970 年

表 1 解析結果の一覧表. クロススペクトル解析に使用したデータ期間. 各周期成分に対する水平波面速度と伝搬方向 (北から時計まわりに測る). 平均の伝搬方向 ( $\bar{\theta}$ ) は各周期成分の平均値.  $\Delta\theta$  は 3 周期成分の伝搬方向のばらつきを示す.  $\overline{AE}$  は AE 指数の 8 時間平均値. 23 例についての平均速度を下に示す.

Table 1. Summary of observations. Date and time of 8 hours record sections used in cross-spectrum analysis. Horizontal phase trace velocities and directions (clockwise from north) are given for each period band. The mean directions ( $\bar{\theta}$ ) are estimated by averaging the values for each period band.  $\Delta\theta$  is the spread in direction of motion over the period bands.  $\overline{AE}$  is the 8 hours average of AE-indices. Mean velocities of the 23 samples are given.

No.	Date	Time(LT)	Velocity (m/s) and direction			$\bar{\theta}$	$\Delta\theta$	$\overline{AE}$
			150 min	75 min	50 min			
1	Nov. 26, 1957	20-04	828 (235°)	785 (203°)		219°	32°	456
2	Nov. 27, 1957	00-08	798 (178°)	658 (179°)	708 (183°)	180°	5°	707
3	Nov. 27, 1957	04-12	913 (175°)	742 (180°)		178°	5°	664
4	Nov. 27, 1957	08-16	962 (190°)	756 (221°)	577 (234°)	215°	44°	542
5	Nov. 27, 1957	16-00		691 (197°)	687 (185°)	191°	12°	340
6	Nov. 27, 1957	20-04	728 (194°)	660 (212°)		203°	18°	268
7	Mar. 15, 1958	18-02	700 (194°)	675 (190°)		192°	4°	565
8	Mar. 25, 1958	01-09	796 (211°)	884 (202°)		207°	9°	456
9	Mar. 26, 1958	00-08	543 (228°)	637 (225°)		227°	3°	217
10	Feb. 19, 1964	07-15	630 (251°)	600 (258°)	567 (260°)	256°	9°	34
11	Oct. 29, 1970	19-03	674 (216°)		400 (245°)	231°	29°	127
12	Oct. 29, 1970	23-07	847 (216°)	551 (177°)		197°	39°	343
13	Oct. 30, 1970	03-11	492 (185°)	422 (183°)	256 (171°)	179°	14°	438
14	Oct. 30, 1970	07-15	395 (175°)	507 (182°)		179°	7°	295
15	Nov. 07, 1970	14-22	730 (171°)	528 (175°)	446 (179°)	175°	8°	817
16	Nov. 07, 1970	18-02	684 (190°)	549 (177°)	632 (188°)	185°	13°	803
17	Nov. 11, 1970	16-00	432 (224°)	293 (234°)		229°	10°	354
18	Nov. 11, 1970	20-04	467 (221°)	435 (213°)		217°	8°	328
19	Aug. 04, 1972	13-21	741 (184°)	628 (185°)	745 (189°)	186°	5°	774
20	Aug. 04, 1972	17-01	377 (146°)	398 (166°)	484 (195°)	169°	49°	483
21	Aug. 06, 1972	23-07	341 (197°)	409 (163°)		180°	34°	670
22	July 06, 1974	15-23	976 (156°)	678 (184°)	687 (173°)	171°	28°	714
23	July 06, 1974	19-03	807 (165°)	649 (162°)		163°	3°	837
Average velocity			676	597	563			

11月7日は  $\overline{AE}$  が 800 $\gamma$  に達し, 電離層はいわゆる 'negative storm' の状態にあった (図 2 c). 1972年 8月4日は午後側に周期 1 時間前後の正弦波的な変化があらわれ, 各点の相関も非常に良い (図 2 d). この期間の, 我々と同じ国内 4 点の  $f_0F2$  の 5 分間隔値を使って行われた

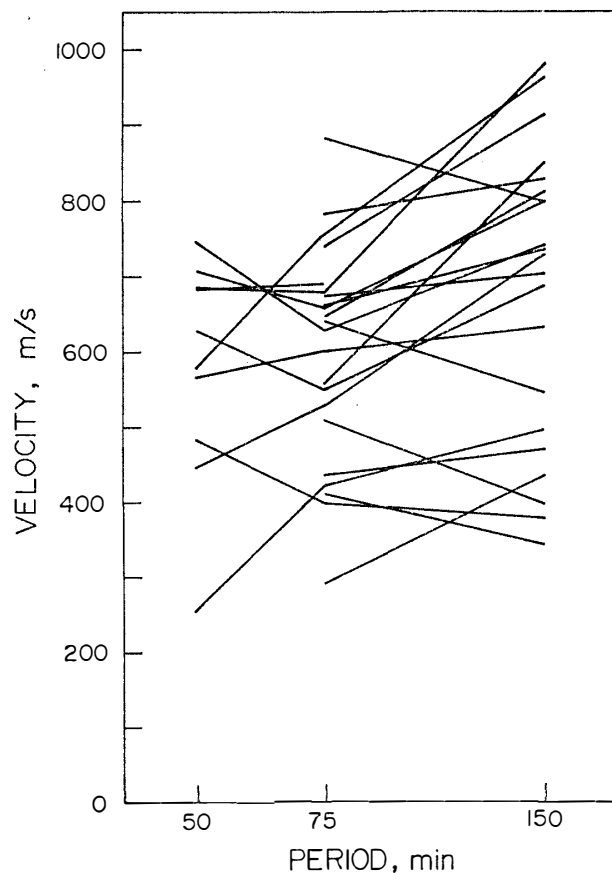


図 4 水平波面速度の分散曲線. 表 1 の No. 11 をのぞく 22 例についてプロットしたもの  
 Fig. 4. Plot of horizontal phase trace velocity vs. period for 22 samples listed in Table 1, except for No. 11.

l.s. TIDs の解析 (TAKENOSHITA *et al.*, 1974) で No. 2, 3 と名付けられた変動の速度と方向は, 本論文の表 1, No. 19 に相当し, 結果はよく一致している. それに対し, 表 1, No. 20 は速度が 400–500 m/s で, TAKENOSHITA *et al.* の No. 4, 5 (日没線から励起され西向きに伝搬しているとなっている) とほぼ同じ値であるが方向には大きなばらつきがみられる.

表 1 で示された水平伝搬速度を周期に対してプロットしたものが図 4 である. ただし, 表 1, No. 11 は周期 75 分についての値が得られていないので除外した. 水平伝搬速度は, 周期 150 分で 341 m/s–976 m/s, 75 分で 293 m/s–884 m/s, 50 分で 256 m/s–745 m/s の範囲に分布しており, 平均値はそれぞれ 676 m/s, 597 m/s, 563 m/s である. 周期 150 分と 75 分で速度が周期に対して正の相関をもつ場合が 17 例, 負の相関をもつ場合が 5 例, 周期 75 分と 50 分で同じく正の相関をもつ場合が 5 例, 負の相関をもつ場合が 5 例である. 以上の結果から, 平均

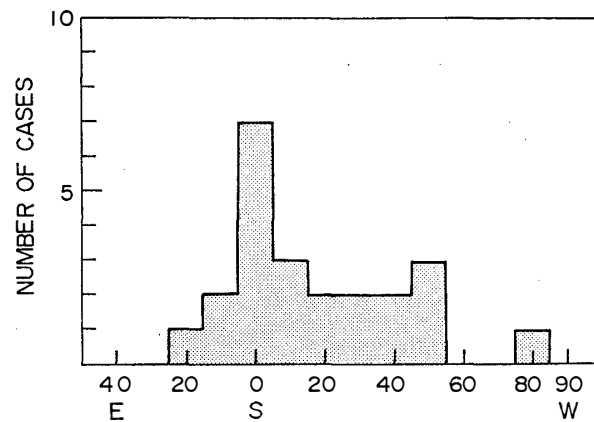


図5 じょう乱の伝搬方向の分布図. 表1の23例についての各々の平均の伝搬方向 ( $\bar{\theta}$ ) に相当する

Fig. 5. Histogram of distribution of average direction ( $\bar{\theta}$ ) for 23 samples listed in Table 1.

的には, 水平伝搬速度が周期に対して正の相関をもつことが分かった. なお, 周期150分と75分の平均速度差 79 m/s は母平均値の検定より統計的に有意であることが確かめられた.

図5に平均の伝搬方向 ( $\bar{\theta}$ ) の分布を示した. 表1, No. 10 をのぞけば全体として 17°E-51°W に分布している. 分布の状況から, 0°を中心として  $\pm 25^\circ$  の幅で南向きに伝搬している15例と, 他に, 40°W に中心をもつもう1つの波群が存在することが分かる.

#### 4. 考 察

クロススペクトル解析の結果, l.s. TIDs の分散特性は, 平均的には水平伝搬速度が周期に対して正の相関をもつことが明らかになった. この結果を内部重力波理論で説明する場合, 次の点に留意しなければならない. それは伝搬ベクトルの算出に当たって平面波近似をし, かつ,  $f_0F2$  高度が各観測所で一定と仮定していることから, 算出された速度が厳密には水平波面速度ではない点 (HINES, 1974a), および垂直方向の波動伝搬に関する情報が得られていないという点である. しかし内部重力波の基本的特性は波の位相速度が伝搬している高度での音速に近い値を有することである. 今回得られた 500-700 m/s の平均的な速度は F 層の音速にはほぼ一致しており, l.s. TIDs が重力波であることは明らかである.

ところで最も基本的な重力波理論 (HINES, 1960) で記述される水平波面速度  $V$  は,

$$V = C (\omega_g^2 - \omega^2 \cdot \sec^2 \phi)^{1/2} / (\omega_a^2 - \omega^2)^{1/2} \quad (1)$$

で与えられる. ただし,  $\omega_g$ ,  $\omega_a$ ,  $\omega$  はブラント周波数, acoustic cut-off 周波数, 波の周波数

であり、 $C$  は音速、 $\phi$  は波面の垂直軸からの傾きである。L.s. TIDs は高度が上がるにつれて波面は垂直に近づき、夜間  $F$  層上部で  $\phi$  は 0 に近い (KLOSTERMEYER, 1969)。また、 $E$  層から  $F$  層下部の観測で  $\phi$  は周期が長くなると一定値に近づき、周期 50 分以上でほとんど一定となる (HERRON, 1974)。式 (1) で  $\phi$  が周期に対して一定であれば水平波面速度は周期に対して正の相関をもち、今回の解析結果と傾向は一致する。

HF ドップラーデータによる m.s. TIDs の観測から分散特性を調べた BROWNLIE *et al.* (1973) の結果は、周期 20 分以上で速度は周期に対し正の相関をもち、我々の結果と一致する。同じく、HF ドップラーデータのクロススペクトル解析から、HERRON (1973, 1974) は、m.s. TIDs の分散は速度が周期に対して負の相関をもつことを示した。HERRON の解析では、3 時間（または 5 時間）のデータに対し最大ラグ 10% で相互相関をとっている。そのため最長周期成分 108 分（または 180 分）では、誤差は非常に大きいと考えられる。さらに各周期成分に対する位相差を最小 2 乗近似により平滑化している。しかし l.s. TIDs の場合はたとえば図 3 にみるごとく狭い帯域の波であり、この平滑化を行うと位相差は周期に対して一定値をとる傾向になる。その場合、みかけ上、速度が必然的に周期に逆比例することになる (HINES, 1974 b)。

解析した期間は、表 1 で示された通り 1 日の全時刻にわたっている。普通、電離層電子密度は強い日変化を示し、 $F2$  ピークが夜間は昼間より数十 km 上昇する。このような電離層の変化にもかかわらず、算出された速度、方向は夜と昼で顕著な違いはなかった。 $F$  層高度では中性大気温度はほぼ一定の値に達しており、 $F2$  ピークの大きな上下運動にもかかわらずピーク高度の媒質の音速はほとんど変化しない。したがって重力波の位相速度も夜と昼で大きな違いはでてこない。これは  $E$  層から  $F$  層下部の TIDs が昼夜で伝搬速度に非常に大きな差を示す (HERRON, 1973) のとは対照的である。

L.s. TIDs が極域磁場じょう乱と密接な関連をもつことは良く知られている (DAVIS, 1971)。表 1 でも No. 10, 11 以外はすべて極域磁場のじょう乱時である。その内で、 $\overline{AE}$  が  $600 \gamma$  以上の値をもつ 8 期間は、波の伝搬方向がほぼ完全に南向きである。このことから極域で励起された TIDs が低緯度へ伝搬してきたものであることは明らかである。南西方向に伝搬するもう 1 つの波群は、 $\overline{AE}$  が  $200 \gamma$ – $600 \gamma$  の間で、比較的小さい磁場じょう乱の期間である。磁氣的静隠時の No. 10 は完全な西向き伝搬であり、l.s. TIDs の励起源が極域の磁場じょう乱以外にも存在することを示している。伝搬速度の大きさは平均的にみて  $\overline{AE}$  と正の相関を示す。 $\overline{AE}$  が  $600 \gamma$  以上の 8 例について速度の平均をとると周期 150 分、75 分、50 分でそれぞ

れ 749 m/s, 605 m/s, 644 m/s となり周期75分以外は全平均に比べて約 80 m/s 大きい. L.s. TIDs の伝搬速度は磁気活動に依存しており, たとえば  $Kp$  指数と正の相関を示す (TAKENOSHITA *et al.*, 1974) ことが知られている. 今回の解析で, 周期によってその依存性が異なることが明らかとなった.

## 5. 結 論

1) 周期50分から150分までの l.s. TIDs は, 水平伝搬速度が 256 m/s から 976 m/s の範囲に分布し, 平均的には周期に対して正の相関をもつ. この l.s. TIDs の分散特性は, 内部重力波の分散特性で説明しうる.

2) 伝搬方向は, 大部分が南向きである. さらに南西に伝搬するもう 1 群が存在する. また磁氣的静隠時に西向き伝搬をする l.s. TIDs が存在する.

3) 非常に大きな極域磁場のじょう乱時には, 伝搬は完全に南向きになり, 伝搬速度は周期150分と50分で著しく増加する.

L.s. TIDs が, 極域磁場じょう乱によって励起され低緯度へ伝搬してきた内部重力波であることが明らかとなった. 極域磁場じょう乱以外にも源は存在する. 極域で磁気活動度が高い時の l.s. TIDs の速度増加に周期依存性がみられるが, この機構については今後検討する必要がある.

## 謝 辞

$f_0F2$  データの解析に当たり, 貴重なデータを提供していただいた郵政省電波研究所に心より感謝します. なお, この研究に際し, 京都大学理学部前田坦教授の適切な御指導を得たことを深く感謝します.

## 文 献

- 赤池弘次 (1968): スペクトル解析. 相関函数およびスペクトル, 磯部孝編. 東京大学出版会, 28-46.
- BLACKMAN, R. B. and TUKEY, J. W. (1958): The Measurement of Power Spectra. New York, Dover, 190p.
- BROWNIE, G. D., DRYBURGH, L. G. and WHITEHEAD, J. D. (1973): Measurement of the dispersion of waves in the ionosphere. *Nature: Phys. Sci.*, **244**, 123-124.
- DAVIS, M. J. (1971): On polar substorms as the source of large-scale traveling ionospheric disturbances. *J. Geophys. Res.*, **76**, 4525-4533.
- FRANCIS, S. H. (1972): Propagation of internal acoustic-gravity waves around a spherical Earth. *J.*

- Geophys. Res., **77**, 4221–4226.
- FRANCIS, S. H. (1973): Acoustic-gravity modes and large-scale traveling ionospheric disturbances of a realistic, dissipative atmosphere. *J. Geophys. Res.*, **78**, 2278–2301.
- FRANCIS, S. H. (1974): A theory of medium-scale traveling ionospheric disturbances. *J. Geophys. Res.*, **79**, 5245–5260.
- GEORGE, T. M. (1968): HF Doppler studies of traveling ionospheric disturbances. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **30**, 735–746.
- HERRON, T. J. (1973): Phase velocity dispersion of *F*-region waves. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **35**, 101–124.
- HERRON, T. J. (1974): Dispersion of ionospheric waves. *Nature*, **248**, 213–215.
- HINES, C. O. (1960): Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights. *Can. J. Phys.*, **38**, 1441–1481.
- HINES, C. O. (1974a): Propagation velocities and speeds in ionospheric waves: A review. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **36**, 1179–1204.
- HINES, C. O. (1974b): Observed ionospheric waves considered as gravity or hydromagnetic waves. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **36**, 1205–1216.
- KLOSTERMEYER, J. (1969): Gravity waves in the *F*-region. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **31**, 25–45.
- TAKENOSHITA, Y., ECHIZENYA, Y., KOIZUMI, T. and OHYAMA, H. (1974): Solar-terrestrial disturbances of August, 1972. *J. Radio Res. Lab.*, **21**, 385–397.
- TESTUD, J. (1973): Ondes atmosphériques de grande échelle et SOUS-Orages magnétiques. Thèse de Doctorat d'Etat. Université de Paris VI.

(1979年4月14日受理)