

地磁気擾乱日の中緯度における成層圏水平電場*

小川俊雄**・川本洋人**

概要

1973年10月16～17日, 1975年10月6～7日, 1977年10月3～4日および1978年10月4日に, 三陸沖の成層圏において水平電場を観測した. 観測日は, いずれも地磁気擾乱日であった. 観測された水平電場の大きさは約8 mV/mで, 方向は時計回りに時間変化した. これらの水平電場を他の地球電磁気現象と比較して, 中緯度における電場の起源と伝搬について考察した.

1. はじめに

中緯度における重要な大規模水平電場として, 大気電場, Sq電場, オーロラ電場およびプラズマ圏対流電場等が考えられる. このうち, 大気電場は全地球的な雷活動によるものであり, 主として赤道近傍の発雷地域を発電源として, 電離層と地球表面を含むグローバルな電気回路中の電場である. 最近の計算[1]によると, 中緯度でのこの原因による水平電場の大きさは0.1mV/mのオーダーである. Sq電場は地磁気の静穏太陽日変化の原因となるもので, 主として太陽の熱による下層大気の潮汐運動が電離層に伝わり, 磁力線を横切って $\mathbf{V} \times \mathbf{B}$ の発電をすることができる電場である. 計算[2], [3]によると, この電場の大きさは1～3mV/mである. 極域の電離層では, オーロラで代表されるように, 磁気圏と電離層の結合による現象が顕著であり, 数10mV/mの水平電場が観測されている[4], [5], [6][7]. プラズマ圏対流電場については, 地球と共回転している地球周辺のプラズマ状大気が, その外側の磁気圏プラズマの対流となんらかの相互作用をして運動し, 磁力線を横切って $\mathbf{V} \times \mathbf{B}$ の発電作用をし, 等電位と仮定される磁力線に沿って電離層に伝わってくるとする電場である[8].

上記のように, 中緯度の成層圏には種々の大規模水平電場が存在する可能性があるにもかかわらず, 観測例が極めて少ないため, それらの実態はまだ謎にまつまれている. ここでは, 三陸における気球観測からこれまでに得られた水平電場のデータを, 他の地球電磁気現象と比較し, また, これらの電場を磁力線に沿ってプラズマ圏の赤道面に投影し, そこでのプラズマ大気のドリフト速度($\mathbf{V} = \mathbf{E} \times \mathbf{B} / B^2$)を計算することによって, 電場の起源と伝搬について考察した.

* 宇宙研特別事業費による研究論文

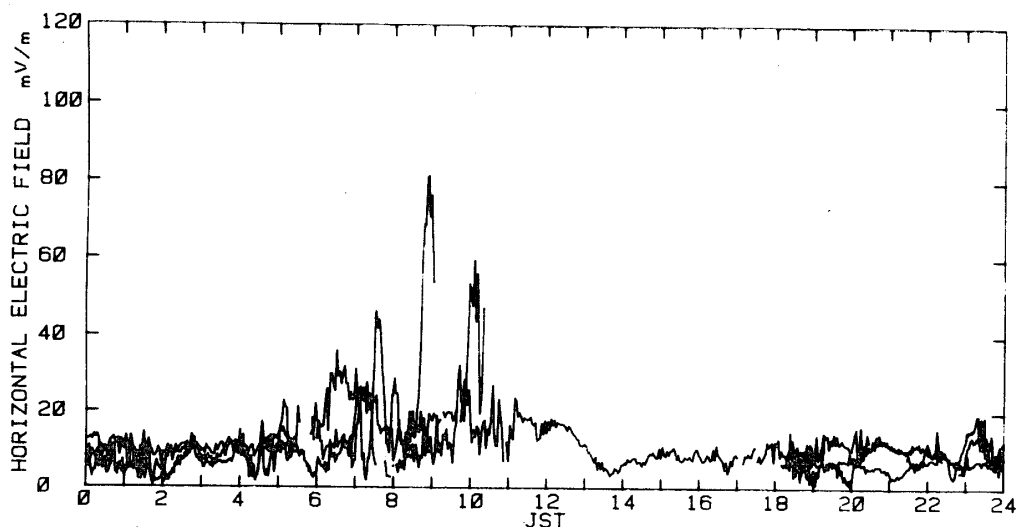
** 京都大学理学部

2. 水平電場

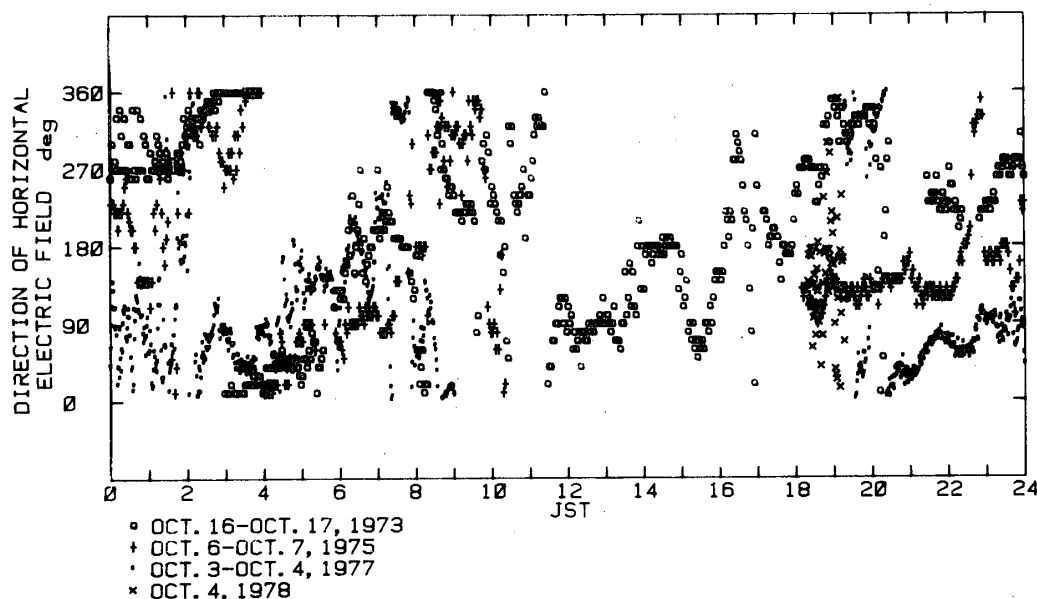
観測は、三陸大気球観測所(39° 09' 30" N, 141° 49' 30" E)において、1973年10月16日の日本標準時21時頃から17日の20時頃までの約1日間、1975年10月6日の18時頃から7日の10時頃までの約半日間、1977年10月3日の19時頃から4日の9時頃までの約半日間、および1978年10月4日の18時頃から19時頃までの約1時間の、計4回おこなわれた。1978年10月4日の観測は、気球がレベル・フライトに達した後破裂したので観測時間が短い。他の3回の観測は、高度約27 kmにおけるレベル・フライトの間におこなわれた。いずれの観測も周期約20秒でアンテナ系全体を回転させ、水平電場の出力の振幅から大きさを、また、地磁気センサーの出力と水平電場の出力の位相差から水平電場を求めた。1973, 1975年度は2.5分毎に、1977, 1978年度は1分毎に水平電場の大きさと方向を求めた。図1は上記4回の観測によって得られた水平電場の大きさを日本標準時の1日について重ね合わせたものである。6時から11時にかけて、周期が1時間以内で、大きさ数10 mV/mの電場がいくつか観測されているが、これらはいずれも局所的な荷電雲の影響である。このことは同時に観測した垂直電場成分との比較や、地上の天気図の解析の結果明らかになった。図2は、同様に、各年度の観測毎に、記号をかえてプロットした水平電場の方向である。1978年10月4日の電場の方向が、角度の広い範囲にわたって散らばっているのは、データが主として気球上昇中に得られたためである。図1で電場の大きさが約10 mV/m以下である部分については、図2で電場の方向が左下から右上に、すなわち時計回りの時間変化をしていることが特徴である。

3. 他の地球電磁気現象との比較

図3(a), (b), (c), (d)は、観測した期間を含む各年度の地磁気の擾乱の程度をあら



第1図 1973, 1975, 1977, 1978年度の観測結果を日本時間の1日について重ね合わせた、水平電場の大きさの時間変化。

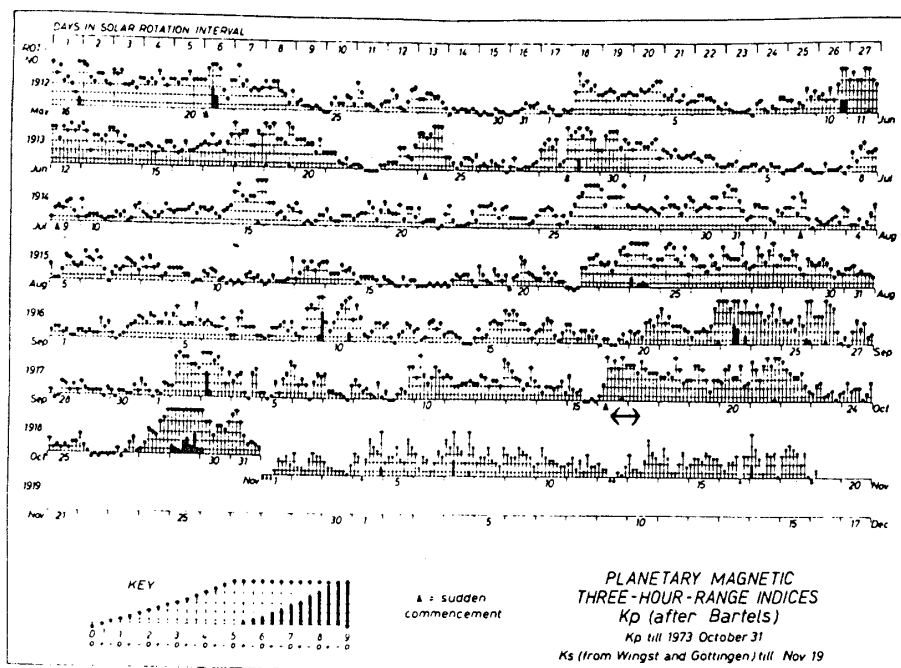


第2図 図1と同様に、各年度の観測毎に記号をかえて重ね合わせた水平電場の方向の時間変化

わす K_p 指数である。観測は4回とも地磁気の擾乱日におこなわれた。図3(a)においては、1912番目の太陽周期の18日から右下に向かい大きな地磁気嵐のくりかえしがみられ、1973年度の観測はその6番目のくりかえし中におこなわれた。図3(b)においても、1943番目の太陽周期の10日から右下に向って同様の擾乱のくりかえしがみられ、1975年度の観測はその2番目のくりかえし中におこなわれた。1973, 1975年度の観測時におけるこれらの地磁気嵐は、太陽表面のコロナ・ホールからの高速プラズマ流によるものである。図3(c), (d)の1977, 1978年度の地磁気擾乱は、1973, 1975年度とは異なり、太陽フレアによるものである[9], [10]。

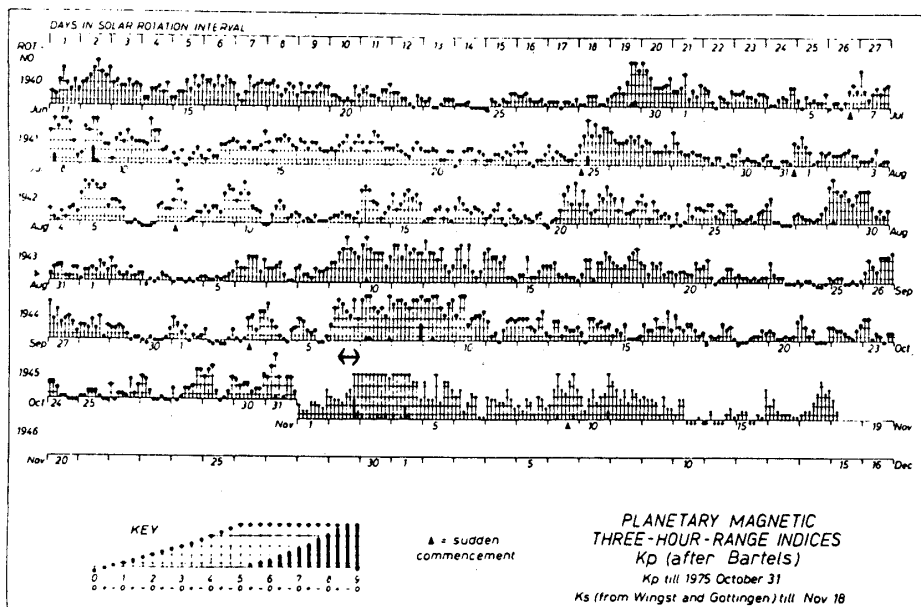
以下に、1973, 1975, 1977年度の3回の観測結果について、水平電場を北向き成分 E_n と西向き成分 E_w に分けて表示し、他の地球電磁気現象のデータと世界時で時間を合わせて比較した。荷電雲の影響をのぞくため、水平電場の大きさが 20 mV/m 以上のところは E_n , E_w をプロットしていない。

1973年10月16~17日の観測結果についておこなった比較を図4に示す。図4の上から、科学衛星 HEOS の観測による惑星間空間磁場 (IMF B_z , GSM 座標系で上が北向きで1時間平均値)、高緯度の地磁気観測から得た AU, AL (AU はオーロラの東向き電流, AL は同じく西向き電流の強さに対応する磁場 2.5 分値)、柿岡 ($36^\circ 13' 51'' \text{ N}$, $140^\circ 11' 21'' \text{ E}$) の地磁気3成分 (H, Z, D, 各々図の上向きが水平成分, 下成分, 偏角で, 3分毎の値)、国分寺 ($35^\circ 42' \text{ N}$, $139^\circ 29' \text{ E}$) における F2 層の臨界周波数 ($f_o F_2$, F2 層の電子密度をあらわす 15 分毎の値)、Dst の時間微分および Dst (低緯度の地磁気観測から得た赤道環電流の強さをあらわす指数で 1 時間平均値) である。Dst の時間微分は、Dst の 1 時間毎の変化量を示したものである。図4において、10月16日の13時に IMF B_z が南を向き、AL が発達した (下向きに変化した) 時、地磁気3成分に変化が見られる。電場は南西向きであっ



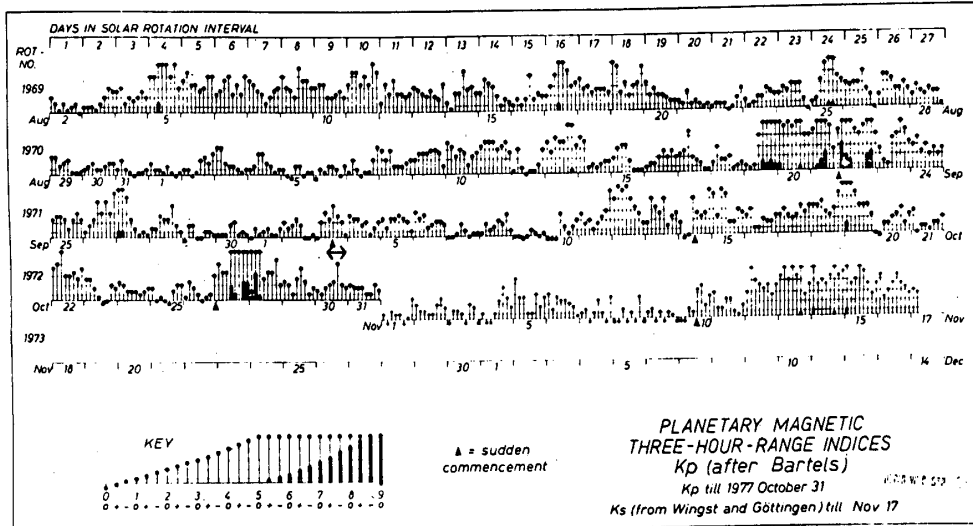
(a)

第3図 (a) 1973



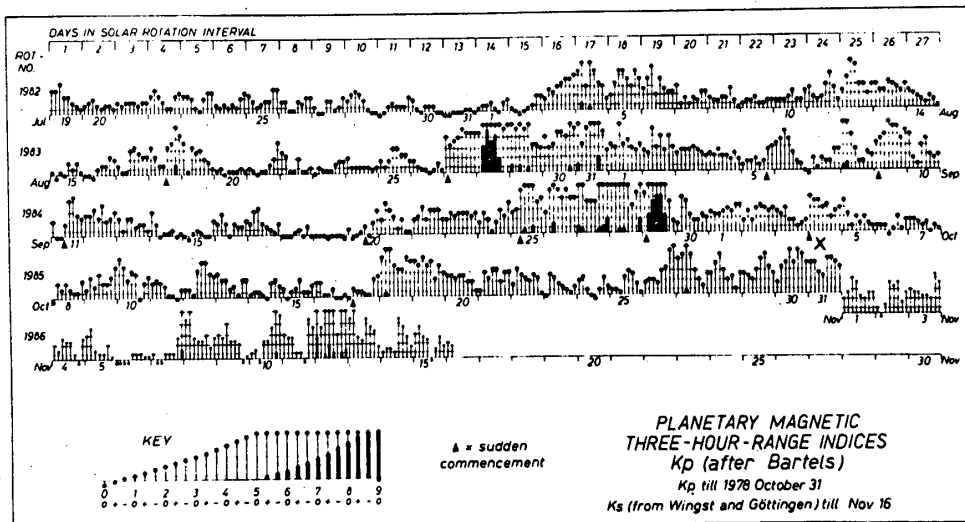
(b)

(b) 1975



(c)

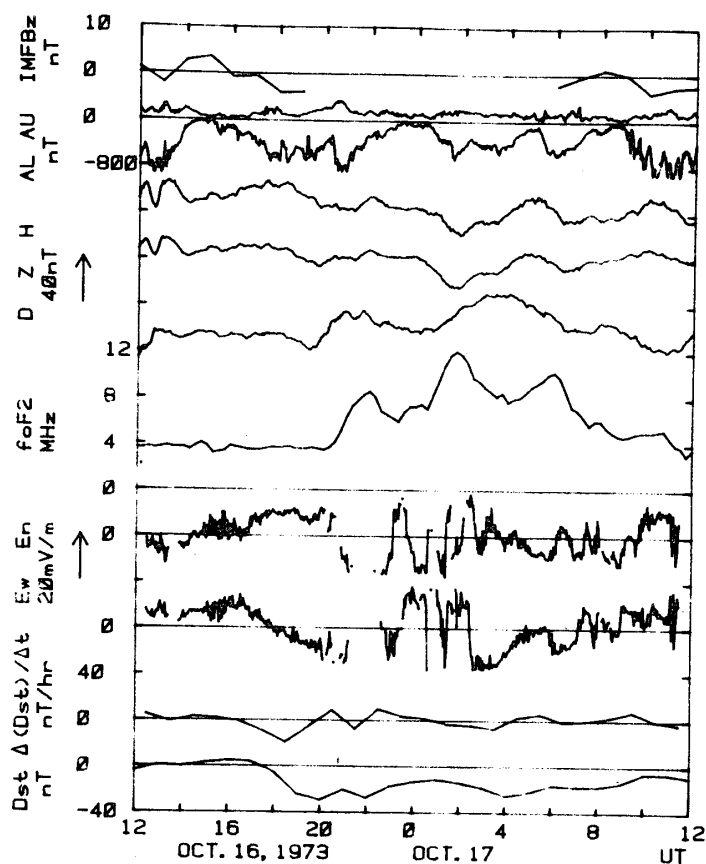
(c) 1977



x ↔ BALLOON FLIGHT

(d)

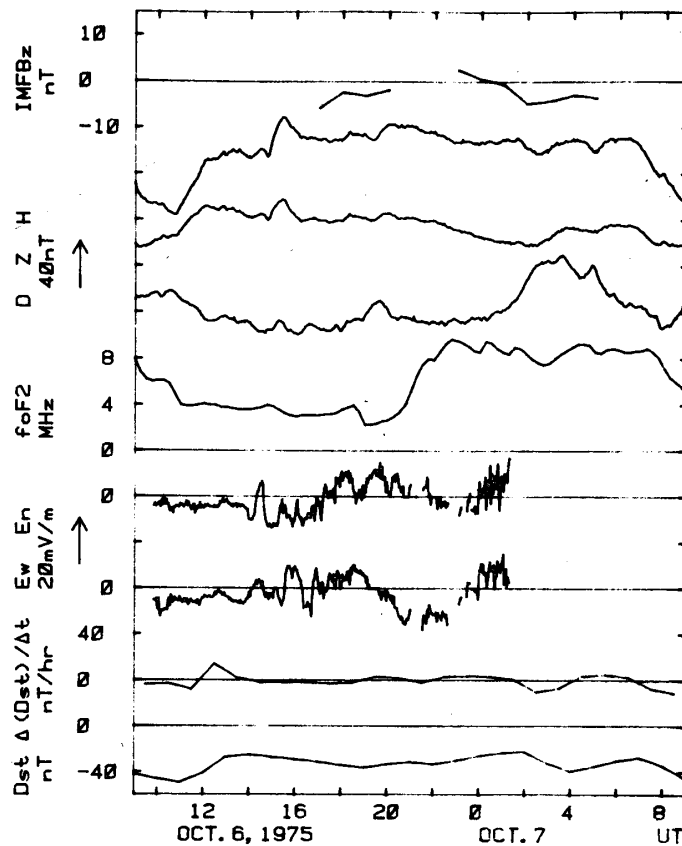
(d) 1978年度の観測日を含む Kp 指数



第4図 1973年度の水平電場の成分と他の地球電磁気象との比較. 記号については本文を参照のこと.

た. 10月16日の16時から19時までIMF Bz が南を向き,これに対応して, AL が発達し, 少しおくれてDst が発達した. 電場は北西から北東方向に変化した. 10月16日の20時からfoF2が増え, 10月17日の08時に減っているのは, 日射による電離効果のためである. この間, 大きな変化が3回あり, それぞれ電場の変化に対応しているように見える. 10月17日の00時からALが発達し, 少しおくれてDstも発達した. 地磁気3成分にも対応した変化が見られる. これらに対応してfoF2が増加し, 電場は南西から北西向きに変化した. 10月17日の06~07時の間, IMF Bz が南を向き, 地磁気3成分が対応して変化した. foF2は減少し, 電場は北東向きであった. 10~12時の間, IMF Bz が南を向き, ALが発達した.これに対応して地磁気3成分とfoF2に変化が見られる. 電場は北西向きであった.

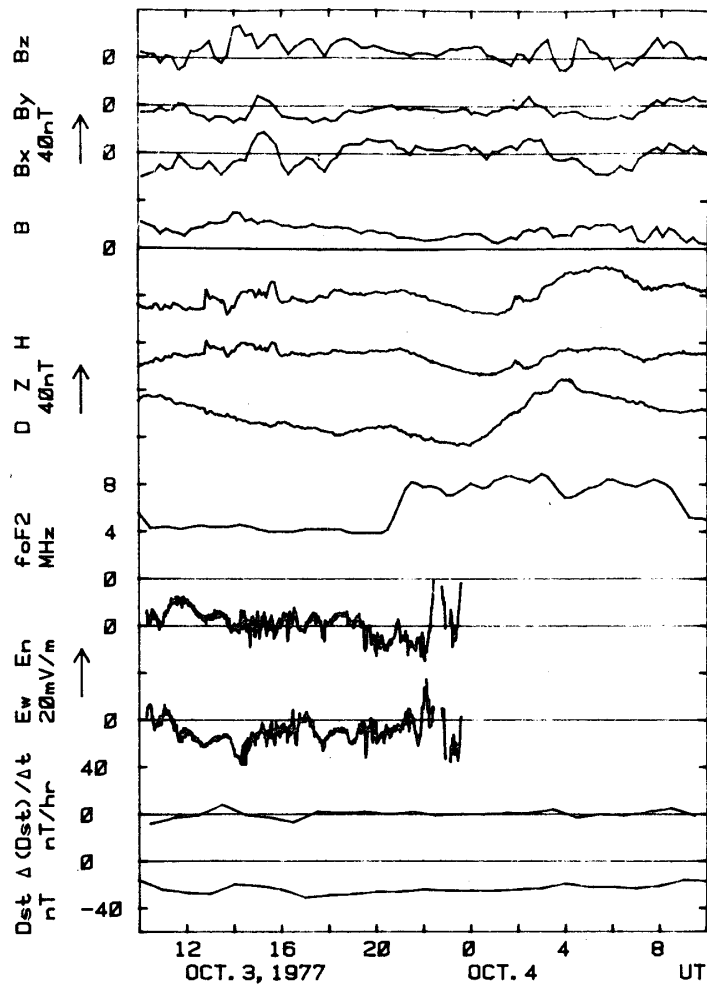
図5は, 1975年10月6~7日の観測について同様の比較をおこなったものであるが, AU, ALのデータがない. IMF Bzの観測は, 1973年度と同様, HEOSによるものである. 10月6日の14時から地磁気のHとZの2成分に約30分間, 約10nTの正の変化があり, これに対応して, 電場はそれまで南東向きであったものが, 北西向きに変化した. この直後に, やはりHとDの2成分に約20分間, 約10nTの負の変化があり, これに対応してfoF2が約



第5図 1975年度の水平電場の成分と他の地球電磁気現象との比較。記号については本文を参照のこと。ただしAU, ALがない。

1 MHz 増え、電場は南東向きに変化した。この後15時から、約1時間半にわたって地磁気3成分に変化があった。これに対するfoF2とDstの対応は明らかではないが、電場は変化している。10月6日の17~20時の間、IMF Bzが南を向き、foF2と地磁気3成分にわずかの増減が見られ、電場は北西向きであった。10月7日の01~02時の間、IMF Bzが南を向いたが、この時、電場は荷電雲の影響を受けたため、比較できない。

図6は、1977年10月3~4日の観測について同様の比較をおこなったものであるが、IMF Bz, AU, ALのデータがなく、代わりに夜側の磁気圏境界域における科学衛星Explorer 50による磁場観測のデータと比較した。B, Bx, By, Bzは、各々全磁力、GSM座標系でのx, y, z成分の15分間平均値である。10月3日の12時50分に、地磁気嵐急始部が見られる。この時、電場は北東向きであったが、大きさ、方向ともに急な変化はなかった。10月3日の10~14時の間、Bzの変化とEe(-Ew)の変化、およびBの変化とEs(-En)の変化が対応しているように見える。10月3日の14時30分から17時までEn, Ewに短周期の変化があるのは、その間気球が上昇していたからである。14時30分以前の観測は高



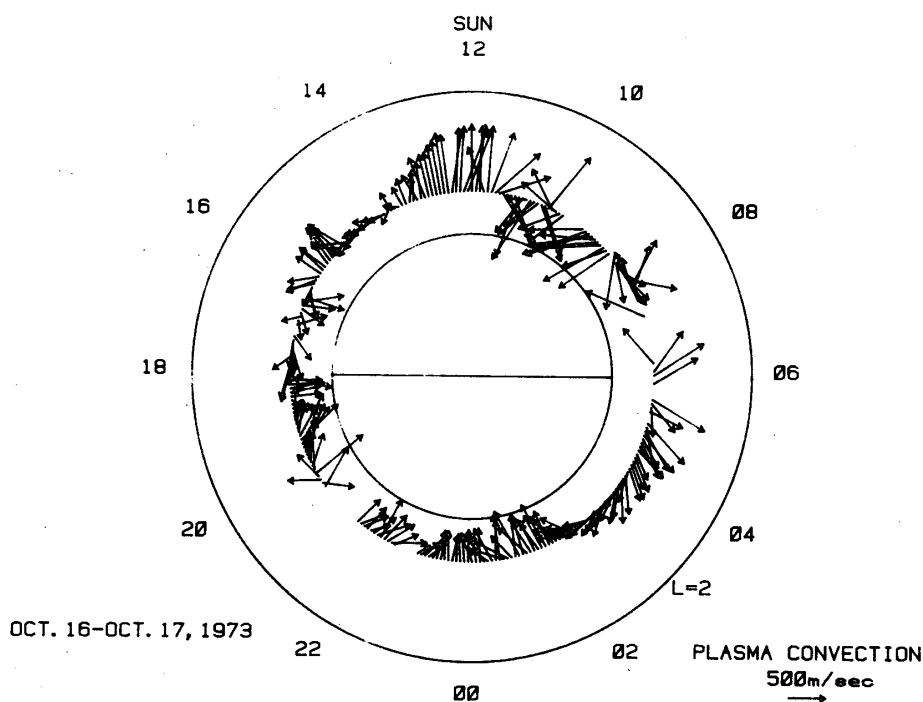
第6図 1977年度の水平電場の成分と他の地球電磁気現象との比較. 記号については本文を参照のこと. ただし IMF Bz, ALの代わりに磁気圏境界域の磁場を示した.

度約 20 km でおこない, 17 時以後は高度約 26 km でおこなった. 10 月 3 日の 22 ~ 24 時までの間, 水平電場は荷電雲の影響をうけた.

4. プラズマ圏でのプラズマ・ドリフト

前節で述べた事実より, 地磁気嵐時における中緯度の水平電場は, 磁気圏での大規模な電磁気現象と関係している可能性がある. そこで, 観測された水平電場を, 地球磁場を双極子磁場とした磁力線に沿って 5 分毎に赤道面に投影し, その場所でのプラズマ・ドリフト速度 ($\mathbf{V} = \mathbf{E} \times \mathbf{B} / B^2$) を計算した. 1973, 1975, 1977 年度の結果を, それぞれ, 図 7, 8, 9 に矢印であらわした. 三陸沖の L 値は約 1.3 である.

図 7 において, 1973 年 10 月 16 日の 21 時から 10 月 17 日の 02 時頃まで, 10 月 17 日の 08 時頃から 11 時頃まで, および, 17 時頃から 20 時頃までプラズマ・ドリフトは内向きで



第7図 1973年度の観測結果から求めたプラズマ圏赤道面におけるプラズマのドリフト速度。

あり、その他の時間はほぼ外向きである。

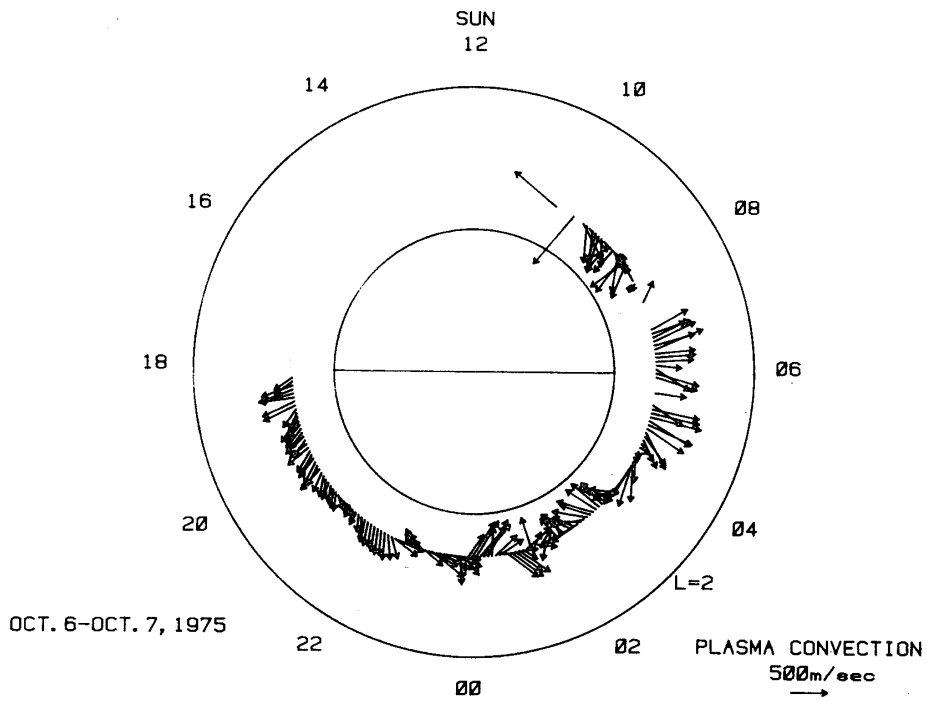
図8において、1975年10月7日の00時頃から03時頃まで、および08時頃から10時頃までプラズマ・ドリフトは内向きであり、その他の時間はほぼ外向きである。

図9においては、1977年10月3日の19時頃から10月4日の08時頃までプラズマ・ドリフトは外向きであるが、10月4日の00時頃から03時頃まで外向きの成分が減少している。

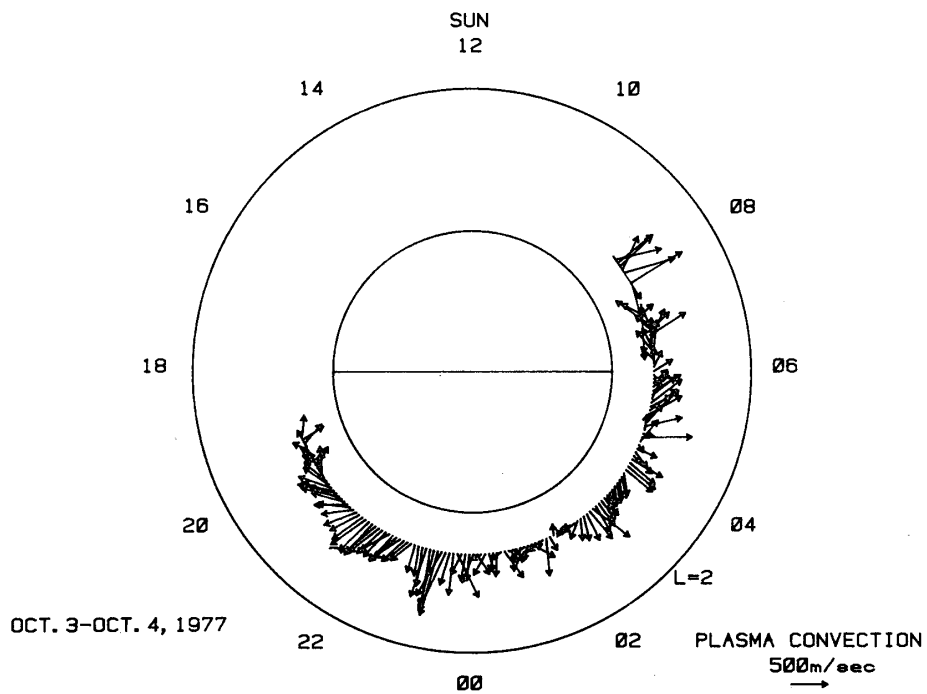
図7, 8, 9を通じて共通している特徴は、00時頃より04時頃までの間にプラズマ・ドリフトが内向きになるか、または外向きの速度が減少する傾向があることである。

5. 考 察

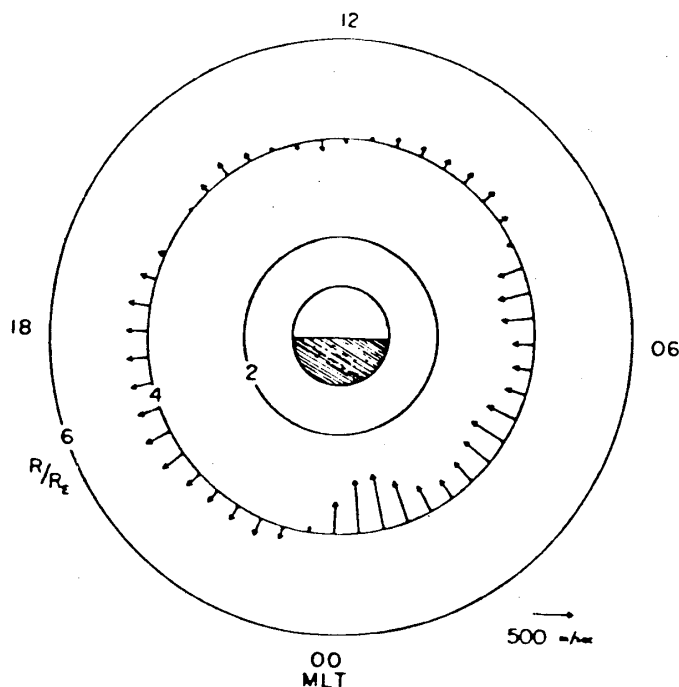
Boström and Fahleson [11], Mozer [12], Park and Dejnakarindra [13]によると、電離層の電場が、水平距離100 km以上の規模で、変化する周期が1秒以上であれば、ほとんど減衰することなく成層圏高度まで map down される。したがって、気球高度において電離層の電場を観測することができる。図1, 図2に示した、1973, 1975, 1977年度の観測のように、長時間にわたって大きさがほぼ一定で、方向も規則的に時間変化している電場は、電離層の電場である可能性が大きい。これらの電場の大きさは約8 mV/mであるから、電離層の電場であるとする、Sq ダイナモ説と関係して説明することはできない大きさである。中緯度の電場はIS レーダによって ([14], [15], [16], [17]), あるいは、バリウム雲放出実験によって [18], 研究されており、地磁気擾乱時には数 mV/m



第8図 1975年度の観測結果から求めたプラズマ圏赤道面におけるプラズマのドリフト速度.



第9図 1977年度の観測結果から求めたプラズマ圏赤道面におけるプラズマのドリフト速度.



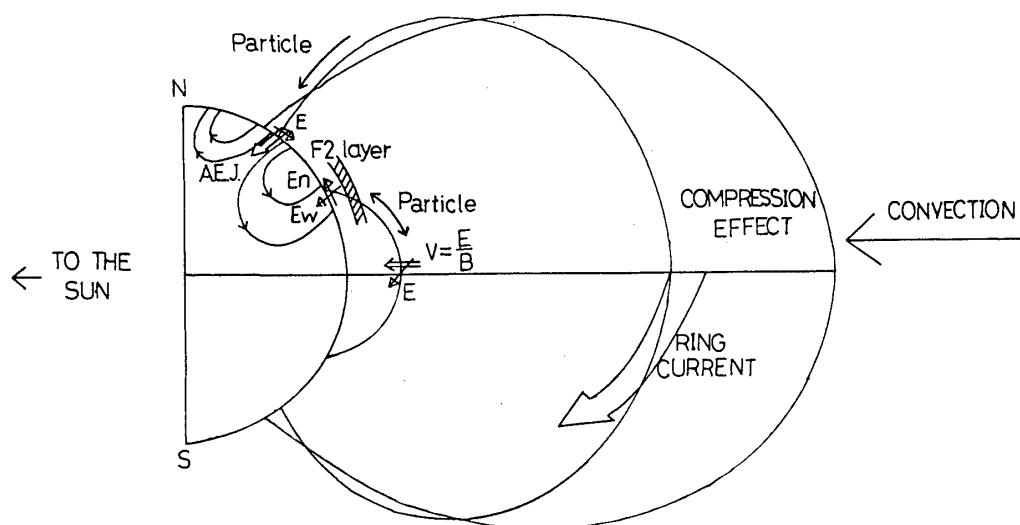
第10図 Cross-L プラズマ・ドリフト速度 [23]

以上の電場が観測されている。

プラズマ圏でのプラズマ・ドリフトはホイッスラー観測によって研究されており ([19], [20], [21], [22]), 地磁気擾乱時の観測から, プラズマ・ドリフトのモデルが作られている [23].

図10にホイッスラー観測によって求められた東西の電場から得られた $L = 4$ での “Cross-L プラズマ・ドリフト [23]” を示した。図10で00時から08時 (MLT) までの間内向きのドリフトがあり, 図7, 8, 9の場合とパターンが類似している。図7, 8, 9においては, 地球との共回転を考慮しておらず, 現実のプラズマ・ドリフトは, 接線方向に共回転の速度約 600 m/sec を加えたものとなる。しかし, これによって半径方向の成分は変化しない。図7, 8, 9と図10の類似性から, 磁気圏対流による電場が, プラズマ圏の内部に浸透してきていた可能性が考えられる [24].

中緯度の水平電場と電離層・磁気圏諸現象との関係を, 上に述べた事実から, 夜半球について示したものが図11である。惑星間空間磁場が南向きになると, 磁気圏内の対流が強まり [25], 赤道環電流が発達する。このときプラズマ圏が圧縮されると [19], 内向きのドリフトによる西向き電場 ($\mathbf{E} = -\mathbf{V} \times \mathbf{B}$) が磁力線に沿って電離層に伝わり, 成層圏で観測される。一方, 磁気圏におけるプラズマ対流が強まり, 磁気圏尾部から極域の電離層に, 磁力線に沿って粒子が降りこむと, 電離層における電離が増えて電気伝導度が大きくなり, オーロラにともなう西向き電流が発達する。この電流が, ホール電気伝導度によるものである



第11図 観測された水平電場と電離層・磁気圏における地磁気擾乱時の諸現象との関係を示す模型図.

([26], [27]) とすると赤道向き電場をともなう. この電場が中緯度に伝わり, 北向き電場が成層圏で観測される. F2層については, 夜側でプラズマ圏から西向きの電場をともなった粒子の流入があるとすると, F2層の高さを低くし, 同時に電子密度が増加する可能性がある ([28], [29], [30]). このことに関しては, 磁気赤道におけるISレーダーの観測によって研究されている ([31], [32], [33]).

6. おわりに

以上述べてきたところから, 地磁気擾乱時には, 磁気圏のプラズマ対流による影響がプラズマ圏内部にまでおよんでおり, さらに電場が, 磁力線を通じて中緯度の電離層に投影されている可能性がある.

地磁気擾乱にともなう電離層・磁気圏の電場は, 擾乱の初期と終期に対応して, それぞれ異なる振舞をするものと思われる. プラズマ圏は初期には圧縮, 終期には拡張し, これらに対応して逆のプラズマ対流があるはずである. 電場も, したがって, 逆の振舞をすることが期待される. しかし, それらを区別して論ずるだけのデータがまだ得られていない. 今後同様の観測をくりかえしてデータを蓄積し, より詳細な解析によって, 中緯度の電場の振舞を総合的に解明したい.

この報告で用いた成層圏水平電場の観測には, 京都教育大学安原通博, 甲南大学理学部藤田晃両教授の協力を得た. 気球観測とテレメータ受信については, 東京大学宇宙航空研究所三陸大気球観測所西村純教授, 広沢春任博士, その他観測所の多くの方々の協力を得た. また, 1977年10月3~4日の衛星観測のデータは, 東京大学宇宙航空研究所西田篤弘博士よりお借りした. 衛星データの処理には, 京都大学理学部家森俊彦氏の協力を得た. ここに記して感謝いたします.

1980年3月31日

参 考 文 献

- [1] P.B. Hays and R.G. Roble: *J. Geophys. Res.* **84** (1979) 3291.
- [2] H. Maeda: *J. Geomag. Geoelectr.* **7** (1955) 121.
- [3] S. Matsushita: *Radio Sci.* **4** (1966) 771.
- [4] F.S. Mozer and R. Serlin: *J. Geophys. Res.* **74** (1969) 4739.
- [5] F.S. Mozer and R.H. Manka: *J. Geophys. Res.* **76** (1971).
- [6] F.S. Mozer and P. Lucht: *J. Geophys. Res.* **79** (1974) 1001.
- [7] Y. Tanaka, T. Ogawa and M. Kodama: *J. Atmos. Terr. Phys.* **39** (1977) 921.
- [8] T. Ogawa, Y. Tanaka, A. Huzita and M. Yasuhara: *Planet. Space Sci.* **23** (1975) 825.
- [9] Solar-Geophysical Data comprehensive reports, Data for October 1977 **404** (1978) 8.
- [10] Solar-Geophysical Data comprehensive reports, Data for October 1978 **416** (1979) 8.
- [11] R. Boström and U. Fahleson: TRITA-EPP-73-14 Roy. Inst. Tech. Stockholm (1973) 1.
- [12] F.S. Mozer: *PAGEOPH* **84** (1971/I) 32.
- [13] C.G. Park and M. Dejnakarindra: *J. Geophys. Res.* **78** (1973) 6623.
- [14] M. Blanc, P. Amayenc, P. Bauer and C. Taieb: *J. Geophys. Res.* **82** (1977) 87.
- [15] M. Blanc: *Geophys. Res. Lett.* **5** (1978) 203.
- [16] J.V. Evans: *J. Geophys. Res.* **77** (1972) 2341.
- [17] V.W.J.H. Kirchhoff and L.A. Carpenter: *J. Geophys. Res.* **81** (1976) 2737.
- [18] G. Haerendel and R. Lüst: in *Earth's Particles and Field*, edited by B.M. McCormac. Reinhold, New York (1968) 271.
- [19] D.L. Carpenter: *J. Geophys. Res.* **71** (1966) 693.
- [20] D.L. Carpenter, K. Stone, J.C. Siren and T.L. Crystal: *J. Geophys. Res.* **77** (1972) 2819.
- [21] D.L. Carpenter and N.T. Seely: *J. Geophys. Res.* **81** (1976) 2728.
- [22] C.G. Park: *J. Geophys. Res.* **83** (1978) 5773.
- [23] D.L. Carpenter, C.G. Park and T.R. Miller: *J. Geophys. Res.* **84** (1979) 6559.
- [24] F.S. Mozer: *Rev. Geophys. Space Phys.* **11** (1973) 755.
- [25] A. Nishida: *Space Sci. Rev.* **17** (1975) 353.
- [26] T. Ogawa, M. Morita, H. Fukunishi, T. Matsuo and T. Yoshino: *Antarctic Record* **63** (1979) 252 (in Japanese).
- [27] T. Ogawa, M. Kodama, H. Fukunishi, T. Matsuo and T. Yoshino: *Antarctic Record* **63** (1979) 276 (in Japanese).
- [28] C.G. Park and P.M. Banks: *J. Geophys. Res.* **79** (1974) 4661.
- [29] C.G. Park and P.M. Banks: *J. Geophys. Res.* **80** (1975) 2819.
- [30] C.G. Park: *J. Geophys. Res.* **81** (1976) 2283.
- [31] R. Woodman: *J. Geophys. Res.* **75** (1970) 6249.
- [32] B.G. Fejer, C.A. Gonzales, D.T. Farly, M.C. Kelley and R.F. Woodman: *J. Geophys.*

Res. 84 (1979) 5797.

- [33] C.A. Gonzales, M.C. Kelley, B.G. Fejer, J.F. Vickrey and R.F. Woodman: J. Geophys. Res. 84 (1979) 5803.