

電離圏・磁気圏系での電場結合

前 田 坦*

Electric Field Coupling in the Ionosphere-Magnetosphere System

Hiroshi MAEDA*

Abstract: Because of the high electrical conductivity along geomagnetic field lines, the ionosphere and the magnetosphere are closely coupled. After an introductory presentation of some evidence of this coupling, the method for mathematical modeling of the ionosphere-magnetosphere system is discussed.

要旨. 地球磁力線に沿う高い電気伝導度のため、電離圏と磁気圏とは電氣的に密接に結合されている。このことに関するいくつかの証拠を示した後、電離圏・磁気圏系の数学的モデリングに対する方法について述べる。

1. 電 場 の 原 因

電離圏・磁気圏系の電場 E の主な原因は次のようである。(1) 電離層の風によるもの、(2) 地球の回転によるもの、(3) 太陽風によるもの、(4) 磁気誘導によるもの、(5) 磁氣的ドリフトによるもの。これらのうち、定常的または準定常的なものとして、ここでは特に (1), (2), (3) に注目したい。(4), (5) は、磁気嵐などの非定常現象に対してより重要な役割を果たすものと考えられる。

(1) 熱的および重力的原因による電離層の潮汐振動は電場を誘導し電流を流すが、電気伝導度の不均一のため電荷分布も不均一となり、分極電場を生じる。(2) 下部電離層領域は大気まきつによって地球と共に回転できるが、地球磁場の存在によって誘導電場を生じ、極地方は赤道地方より常に 80 kV ほど高電位にある。このような電位分布が地球磁場に沿って伝わるとすると、磁気圏赤道面内で常に地球に向かうような分極電場が存在することになる。(3) 太陽風が地球磁場と相互作用する場合、いくつかの機構によって磁気圏内に分極電場が生じる。たとえば、運動量の輸送による磁気圏対流の結果としての分極電場、開いた地球磁場を太陽風が吹き抜けることによる誘導電場、太陽風磁場と地球磁場との相互作用（たとえば再結合）による惑星間空間電場の侵入などが主なものである。

* 京都大学理学部地球物理学教室, Department of Geophysics, Faculty of Science, Kyoto University, Kitashirakawa Oiwake-cho, Sakyo-ku, Kyoto 606.

2. Coupling の証拠

2.1. 電離層に原因する E

(1) の電離層風によって生じた分極電場が地球磁力線に沿って磁気圏に伝わった時の効果は MAEDA (1964) によって指摘され、その効果の 1 つとしての放射線帯の歪みの証拠は DE-WITT and AKASOFU (1964) によって示された。また、ほかの効果としての磁気圏潮汐運動の証拠は CARPENTER (1978) によるホイスラー path の運動によって示された。

(2) の地球回転による電場が磁気圏に伝わると、磁気圏プラズマは $E \times B$ ドリフトをおこし、電場伝搬に減衰がなければこのドリフト速度は地球回転速度と等しい(共回転)。プラズマ圏界面の存在とその形は、このような電場の伝搬を示すものである。

2.2. 磁気圏に原因する E

(3) の太陽風によって生じた分極電場は磁気圏対流と因果関係にあり、磁気圏内に広く分布しているが、ring current の影響によって、その inner edge で大きく減衰する(たとえば VASYLIUNAS, 1972)。このため磁気圏電場が直接にプラズマ圏まで侵入することは非常に難しい。しかし、それに対する 1 つの可能性は、外部磁気圏から高緯度 (60° 以上) に伝わった電場が、電離層-地球間空洞を赤道まで伝わり得るため (KIKUCHI *et al.*, 1978)、中低緯度磁力線に沿ってプラズマ圏へも伝わり得ることである。CARPENTER *et al.*, (1972) によって観測されているプラズマ圏内の電場の原因は、このような方法で伝えられたものかもしれない。

3. 異なる起源の電場の分離

以上に述べたように電離圏・磁気圏のいずれの領域においても、それぞれの起源の電場が重なっていることに注意しなければならない。

3.1. 電離層での電場

電離層の研究においては通常、地球と共に回転する系からみることが多いので、上述の (2) の影響は考えなくてもよい。それゆえ、(1) と (3) が主な原因とみられる。最近、いろいろな方法で電離層領域の電場が測定され、その結果が議論されているが(たとえば KAMIDE, 1979)、観測された結果は (1) と (3) の合成であることに注意しなければならない。観測結果を 2 つの異なる原因の部分に分離することを考える前に、それぞれの部分について若干考察しておく。

3.1.1. 電離層風による電場

電離層の風は主として熱起源のものであるが、定常項・一日項・半日項とも日々の変化があるため、電場の分布も毎日かなり異なっているものと思われる。しかし、グローバルなパターンはよく似ている（たとえば MATSUSHITA, 1969）。大きな特徴は中緯度の朝方と夕方に source と sink をもつような分布をしていることである。このような一般的な特徴は風の日々の変化によって大きく変わることはない。

3.1.2. 太陽風による電場

太陽風に原因する磁気圏電場の電離層への影響は 2 つの方法で計算されてきた。1 つは極地電離層で観測されるような朝-夕型の電場分布に基づいて、準定常的な定電圧電源を仮定する方法であり、他は磁力線沿い電流 (J_{\parallel}) の観測に基づいて、定電流電源を仮定する方法である。しかしいずれの場合にも、電離層電気伝導度の非等方性・不均一性に関連する 2 次的電場分布が磁気圏に及ぼす影響のはね返りの効果が無視されているので正確な方法とは言えない。より正確な方法は、次節に述べるように電離圏および磁気圏を含めたものでなければならない。電場分布の一般的なパターンは、極地では朝方から夕方（時にはその逆）に向かうものであるが、中低緯度では J_{\parallel} の 2 重構造にも関連して、パターンがほぼ逆転する可能性に注目したい (MAEKAWA and MAEDA, 1978)。

このように全世界的なパターンは両方でかなり異なるものであるが、いずれもポテンシャル場であって、定量的に分離することは大へん難しい。1 つの可能性は、地上および電離層上部で全世界的な磁場観測が行われた場合、観測された変化磁場を地球内部、電離層、磁気圏に分離できるかもしれない。この場合、電離層と磁気圏との間には電流が常に流れているので、分離の方法はかなり工夫を要するであろう。しかし、もし分離ができれば、そのような磁場変化の原因に関連して、電場の分離が可能と思われる。

3.2. 磁気圏での電場

磁気圏の研究においては、静止座標系を用いる方が便利なが多い。それは、磁気圏のうちほぼ地球と共回転している部分はせいぜいプラズマ圏の内部に限られるからである。プラズマ圏の内部においては共回転座標系を用いるなら、電場の原因は電離層風によるものと、高緯度から伝わった磁気圏起源のものとの合成とみられる。しかし、これらの部分を分離することは一般には難しい。さらに外部磁気圏については、共回転電場は非常に小さく、主として太陽風起源のものと考えられるが、ring current の領域では電離層風起源の電場も

無視できないように思われる。しかしこの場合にも、これら两部分を分離することは容易ではない。

特に磁気圏の場合には、前述の (4) や (5) の影響がかなり大きく、常は無視できないことに注意する必要がある。

4. 電離圏・磁気圏系のモデリング

このように電離圏と磁気圏とは電氣的に結合されており、一方だけを切り離してこの問題を解くことは正確ではない。従来から行われてきた電離圏のみの取り扱いや、磁気圏のみの扱扱いは、最初のスタートとして理解されなければならない。それらが第一近似として許されるかどうかは、全体の系のモデリングの結果と比較して初めて言えることである。

電離圏・磁気圏系のモデリングは 1960 年代から何人かの人々によって試みられてきたが、少なくとも定量的にはきわめて不十分な状況にある。ここでは FEJER (1964), SWIFT (1967), VASYLIUNAS (1970, 1972) の方向に沿って、数学的取り扱いのすじ道を述べる。この場合にも磁気圏を 2 つに分ける方が考えやすいので、外部と内部 (プラズマ圏) とに分ける (図 1)。

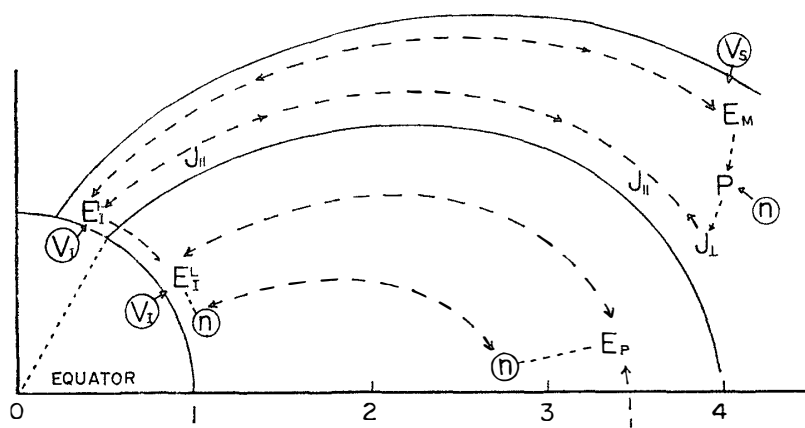


図 1 磁気圏外部および内部のモデリングの方法を示す略図

Fig. 1 Outline of modeling of the outer and inner magnetosphere

4.1. 外部磁気圏

Driving force は太陽風 V_s と電離層風 V_i とであるが境界条件として惑星間空間との粒子 n のやりとりが含まれよう。図のサイクルはどこからスタートしてもよいが、たとえば V_s からスタートすると次のようになる。

(a) V_s —(viscous interaction, merging, MHD dynamo)→ E_m

(b) E_m —(kinetic equation)→ P 境界条件 n

- (c) \mathbf{P} —(momentum conservation) $\rightarrow \mathbf{J}_\perp: \nabla \mathbf{P} = (\mathbf{J} \times \mathbf{B})/c$
 (d) \mathbf{J}_\perp —(current continuity) $\rightarrow \mathbf{J}_\parallel: \text{div } \mathbf{J}_\perp = \mathbf{J}_\parallel$
 (e) \mathbf{J}_\parallel と \mathbf{V}_I —(Ohm's law) $\rightarrow \mathbf{E}_I: \mathbf{I} = \Sigma \cdot (\mathbf{E}_I + \mathbf{V}_I \times \mathbf{B}), \text{div } \mathbf{I} = \mathbf{J}_\parallel \sin \phi$
 (f) \mathbf{E}_I —(generalized Ohm's law) $\rightarrow \mathbf{E}_M$: quasi-static なら potential drop のみ

このサイクルの最後に得られた \mathbf{E}_M が最初に求められた \mathbf{E}_M と一致しない時は、一致するまで計算が繰り返されなければならない。

4.2. 内部磁気圏

Driving force は \mathbf{V}_I だけであるが、磁気圏から高緯度に伝えられた \mathbf{E}_M の影響を考慮に入れる必要がある。この領域では $\nabla \mathbf{P}$ はそんなに大きくないので、 \mathbf{J}_\parallel への帰与は南北両半球の風および電気伝導度の差による電位差が主なものと考えられる。それゆえ、高緯度から伝搬可能とみられる \mathbf{E}_M 効果を含めたダイナモ方程式を、南北両半球で解くことから始め、たとえば次のような順序で計算が行われるかもしれない。

- (a)' $\mathbf{V}_I' + \mathbf{E}_I^{H'} \text{—(dynamo equation)} \rightarrow \mathbf{E}_I^{I'} \text{: 北半球}$
 (a)'' $\mathbf{V}_I'' + \mathbf{E}_I^{H''} \text{—(dynamo equation)} \rightarrow \mathbf{E}_I^{I''} \text{: 南半球}$
 (b)' $\mathbf{E}_I^{I'} \text{—(nearly equipotential)} \rightarrow \mathbf{E}_P'$
 (b)'' $\mathbf{E}_I^{I''} \text{—(nearly equipotential)} \rightarrow \mathbf{E}_P''$
 (c) $\mathbf{E}_P = (\mathbf{E}_P' + \mathbf{E}_P'')/2$
 (d) $\mathbf{E}_P \text{—(nearly equipotential)} \rightarrow \mathbf{E}_I^{I'*}, \mathbf{E}_I^{I''*}$
 (e) $\mathbf{E}_I^{I'} \text{ と } \mathbf{E}_I^{I'*} \rightarrow \mathbf{J}_\parallel$
 $\mathbf{E}_I^{I''} \text{ と } \mathbf{E}_I^{I''*} \rightarrow -\mathbf{J}_\parallel$ $\rightarrow (a)', (a)''$ へ含める。

この計算は前と同様、同じ結果にもとるまで繰り返される。 \mathbf{n} のやりとりはこれらの結果として考えられよう。

5. ま と め

電離圏や磁気圏で観測された電場について議論しようとする場合には、これらの系のモデリングが必要であるが、さらに広く電離圏や磁気圏のダイナミクスを論じるためにも、両圏の結合が無視できるかどうかについて十分検討が必要であろう。そしてこのことは、定常もしくは準定常から非定常の現象（たとえば嵐現象）になるほど、より重要になることはいうまでもない。

文 献

- CARPENTER, D. L. (1978). New whistler evidence of a dynamo origin of electric fields in the quiet plasmasphere. *J Geophys. Res*, **83**, 1558–1564.
- CARPENTER, D. L., STONE, K., SIREN, J. C. and CRYSTAL, T. L. (1972). Magnetospheric electric fields deduced from drifting whistler paths. *J Geophys. Res*, **77**, 2819–2834.
- DEWITT, R. N. and AKASOFU, S. -I. (1964). Dynamo action in the ionosphere and motions of the magnetospheric plasma I. Symmetric dynamo action. *Planet. Space Sci*, **12**, 1147–1156.
- FEJER, J. A. (1964). Theory of the geomagnetic daily disturbance variations. *J Geophys. Res*, **69**, 123–137.
- KAMIDE, Y. (1979). Recent progress in observational studies of electric fields and currents in the polar ionosphere. A review. *Nankyoku Shiryô (Antarct. Rec.)*, **63**, 61–231.
- KIKUCHI, T., ARAKI, T., MAEDA, H. and MAEKAWA, K. (1978). Transmission of polar electric fields to the equator. *Nature*, **273**, 650–651.
- MAEDA, H. (1964). Electric fields in the magnetosphere associated with daily geomagnetic variations and their effects on trapped particles. *J Atmos. Terr. Phys*, **26**, 1133–1138.
- MAEKAWA, K. and MAEDA, H. (1978). Electric fields in the ionosphere produced by polar field-aligned currents. *Nature*, **273**, 649–650.
- MATSUSHITA, S. (1969). Dynamo currents, winds, and electric fields. *Radio Sci*, **4**, 771–780.
- SWIFT, D. W. (1967). Possible consequences of the asymmetric development of the ring current belt. *Planet. Space Sci*, **15**, 835–862.
- VASYLIUNAS, V. M. (1970). Mathematical models of magnetospheric convection and its coupling to the ionosphere. *Particles and Fields in the Magnetosphere*, ed. by B. M. McCORMAC. Dordrecht, D. Reidel, 60–71 (Astrophys. Space Lib., Vol. 17).
- VASYLIUNAS, V. M. (1972). The interrelationship of magnetospheric processes. *Earth's Magnetospheric Processes*, ed. by B. M. McCORMAC. Dordrecht, D. Reidel, 29–38 (Astrophys. Space Lib., Vol. 32).

(1979 年 4 月 13 日受理)