

# 圧力勾配駆動沿磁力線電流におけるプラズマ対流の役割

渡辺正和<sup>1</sup>

<sup>1</sup>九州大学大学院・理学研究院・地球惑星科学部門

## Role of plasma convection in relation to pressure gradient-driven Birkeland currents

Masakazu Watanabe<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Sciences, Kyushu University

It is well known that field-aligned currents (FACs) play an important role in that they transfer electromagnetic energy and momentum from the magnetosphere to the ionosphere. The research on FACs has a long history both in observations and theoretical considerations. A convectional way to formulate FACs is to solve the charge continuity equation ( $\text{div}(\mathbf{J}) = 0$ ) using the momentum (stress balance) equation [e.g., Sato and Iijima, 1979; Vasyliunas, 1984]. In ideal magnetohydrodynamics (MHD), the electromagnetic force ( $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$  force) balances with the pressure gradient force or the inertia force. Over decades, there have been discussions on which force is responsible for FACs. Recent global MHD simulations indicate that in almost all cases the pressure gradient force is the major factor [Tanaka, 2003, 2007]. The inertia force becomes appreciable only in very special cases such as the preliminary impulse (PI) in sudden commencements (SCs) [Fujita et al., 2003]. Thus the pressure gradient mechanism is working universally in steady-state systems and is more essential than the inertia mechanism in magnetospheric physics. Meanwhile, in the above-mentioned conventional formulation, plasma flow does not appear in the pressure gradient-driven FACs. Convection and FACs seem to have no relation. This is a wrong view, however. In fact, convection plays a vital role in energy conversion. In order to maintain a stationary current system, a dynamo is necessary in which plasma thermal energy is converted to electromagnetic energy. This dynamo is generated by a plasma flow that is compressed in the transverse direction ( $\text{div}(\mathbf{v}_\perp) < 0$ ) and expands in the parallel direction ( $\text{div}(\mathbf{v}_\parallel) > 0$ ). In terms of the three basic MHD wave modes, that dynamo process is interpreted as the expanding ( $\text{div}(\mathbf{v}) > 0$ ) slow mode, as seen in the so-called slow-mode expansion fan [e.g., Siscoe et al., 1969]. In addition, the slow mode disturbances responsible for the dynamo must be converted to Alfvén mode disturbances that are associated with FACs and a shear motion of the plasma. These two processes occur contiguously in space. We discuss this novel idea showing examples of global MHD simulation.

磁気圏－電離圏結合系において、沿磁力線電流はエネルギー・運動量を運ぶという重要な役割を担っており、その研究の歴史は古い。よく使われる沿磁力線電流の定式化は、電荷保存の式（電流の非発散）と運動量保存の式（ストレスバランス）を連立するやり方である [例えば Sato and Iijima, 1979; Vasyliunas, 1984]。理想 MHD では、電磁気的力（アンペールの力）と釣り合うものは圧力勾配力と慣性力しかなく、どちらが沿磁力線電流を作っているかという議論がされてきた。近年のグローバル MHD シミュレーションによれば、大規模沿磁力線電流系をつくる力はほとんどすべての場合圧力勾配であって [Tanaka, 2003, 2007]、慣性力が効くのは sudden commencement (SC) における preliminary impulse (PI) [Fujita et al., 2003] のようなごく特殊な場合のみである。このように、圧力勾配が駆動する沿磁力線電流には普遍性があり、より本質的であると思われる。ところで、上述の定式化では圧力勾配が駆動する沿磁力線電流にプラズマ対流は現れない。沿磁力線電流とプラズマ対流は一見無関係であるように思える。しかしこの考えは誤りである。実際プラズマ対流はエネルギー変換において重要な役割を担っている。定常電流系を維持するためには、プラズマの熱エネルギーを電磁エネルギーに変換する機構（ダイナモ）が必要で、これを作っているのが発散を伴うプラズマ対流である（磁力線方向には発散、垂直方向には収束）。この過程は、MHD 波動の 3 つの基本モードでいうと、膨張する slow mode 擾乱に対応する（これと似た現象にはいわゆる「slow-mode expansion fan」 [Siscoe et al., 1969] がある）。さらに、沿磁力線電流が生成されると、よく知られているようにプラズマの回転運動が生じ、これは Alfvén mode 擾乱に対応する。以上の一連の過程は、slow mode が Alfvén mode に変換される過程と解釈される。この斬新な考え方について、グローバル MHD シミュレーションの例を挙げながら説明する。

## References

- Fujita et al. (2003), *J. Geophys. Res.*, 108(A12), 1416, doi:10.1029/2002JA009407, 2003.  
Sato and Iijima (1979), *Space Sci. Rev.*, 24, 347–366.

Siscoe et al. (1969), *J. Geophys. Res.*, 74(1), 59–69.  
Tanaka (2003), *J. Geophys. Res.*, 108(A8), 1315, doi:10.1029/2002JA009668.  
Tanaka (2007), *Space Sci. Rev.*, 133, 1–72, doi:10.1007/s11214-007-9168-4.  
Vasyliunas (1984), in *Magnetospheric currents* edited by T. A. Potemra, pp. 63–66.

### **Acknowledgements**

This work was supported by Japan Society for the Promotion of Science (JSPS) KAKENHI Grant Numbers 24540479 and 23540513, and by JSPS Core-to-Core Program, B. Asia-Africa Science Platforms.