

他衛星データ解析への積極的参加

Geotail の成果は、それがもたらした知見はもちろんのこと、それが契機となった新しい問題意識、それが生み出した新しいデータの見方にもある。したがって、*Geotail* ・データ解析で活躍した者が、その後、他衛星データ解析に積極参加し、「*Geotail* 文化」を継承・発展させる中心となったことは当然である。*Geotail* 文化が確立した頃に世界初の編隊衛星観測ミッション・*Cluster-II* (ESA) が打ち上がり、その新しい手法との相乗効果から宇宙プラズマ物理に新しい地平が切り拓かれつつある。

ケルビン・ヘルムホルツ渦の発見

“現実の宇宙空間で、巻き上がった渦は存在するのか？”

磁気圏わき腹で駆動されうる磁気圏への太陽風流入メカニズムとして、ケルビン・ヘルムホルツ不安定を介した輸送がある。近年の数値シミュレーションから、この不安定が巻き上がった渦を形成する非線形段階まで成長すればプラズマ輸送は必ず起きるとの予想がされていた。また、*Geotail* の結果は、その状況証拠を提示していた。Hasegawa et al. (2004) は、三次元 MHD シミュレーションによる予測と、ヨーロッパ宇宙機関 (ESA) と NASA の共同ミッションである *Cluster-II* 衛星による 4 機の編隊観測データ

の解析とを組み合わせ、(1) 北向き太陽風磁場の時に、磁気圏境界で渦が巻き上がった状態にあること、(2) 巻き上がった渦中でプラズマが混合され、太陽風プラズマが磁気圏に侵入していること、を初めて明らかにした (図 2.9-1)。これは、北向き太陽風磁場における分厚い境界層の形成につながる物理過程の同定に成功したという意味で磁気圏物理学上の重要な結果であり、また渦による無衝突プラズマ輸送を観測的に実証したという意味で、宇宙プラズマ物理学上の大きな成果である。本成果は、英国科学誌「*Nature*」に掲載された。

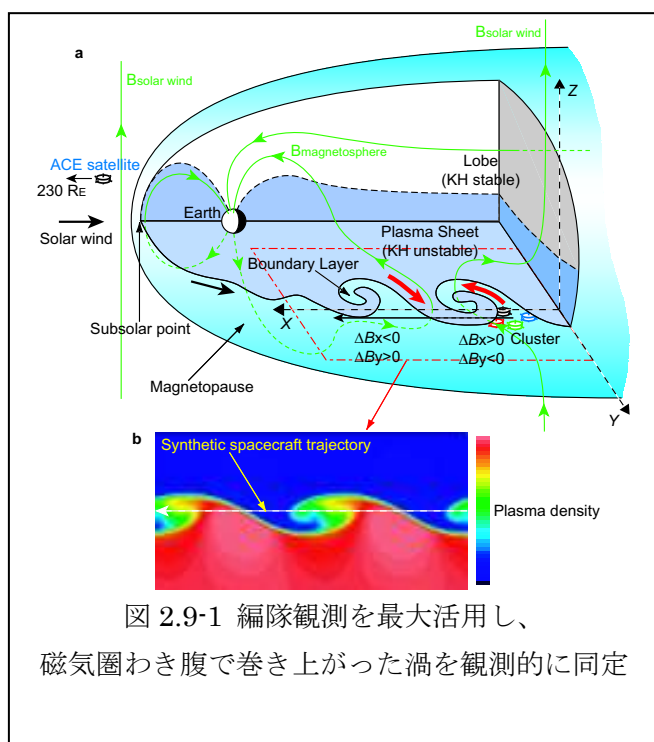


図 2.9-1 編隊観測を最大活用し、
磁気圏わき腹で巻き上がった渦を観測的に同定

磁気圏尾部電流層の観測

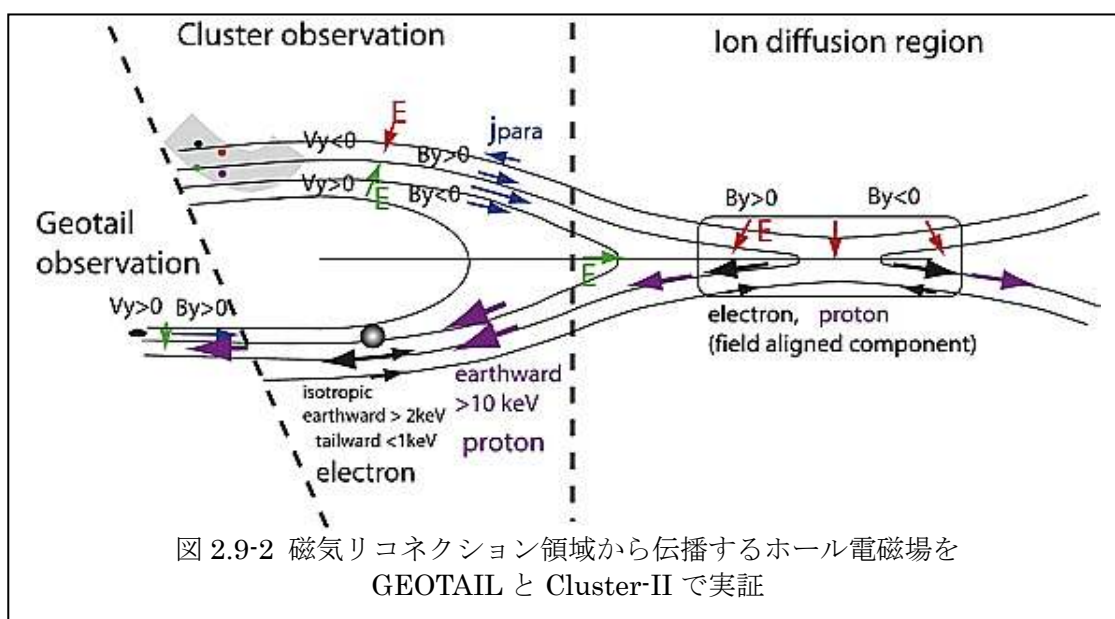
“磁気圏尾部の薄い電流層中では何が起きているのか？”

磁気圏尾部の電流層構造の変化が磁気圏サブストームや磁力線再結合の発生メカニズム及び発展に大きな関連がある。2000年にESAが打ち上げた4機編隊飛行による衛星観測プロジェクト・Cluster-IIは磁気圏尾部において正四面体に近い相対配置を取り、電流層の空間構造の解明に威力を発揮している。Geotailの成果は、電子・イオンスケールという非MHDスケールを意識してデータ解析を行う実行可能性と重要性を確立した。この意識はCluster-IIに引き継がれ、磁気圏サブストーム時の電流層では200kmというイオン慣性長より十分薄い電流層の存在も報告された一方で、静穏時やサブストームのオンセット前などは多くの場合イオン慣性長に比べ十分な厚みを持った電流層がよく観測されている。また、1、2衛星での観測限界から従来一次元的な近似がなされていた電流層がしばしば大きく磁気赤道面から傾いたり、特にプラズマの高速流に伴って大きく波打ったりすることが定量的に示された。更にGeotailによる観測で存在が示された二股電流層及び中心に局在する電流層構造に関しては、やや薄い電流層ではしばしば見られることが確認された(Asano et al., 2005、Nakamura et al., 2006、Runov et al., 2006)。

磁気圏尾部での電子加速の観測

“磁気リコネクションは如何にして非熱的電子を作り出すのか？”

磁気リコネクションによる高エネルギー電子加速は重要な研究テーマである。Imada et al. (2005)では、磁気拡散領域での電子加速に加え、磁気拡散領域から少しはなれた磁気リコネクションジェット下流の磁場が密になった領域での加速が非熱的電子生成に重要であることをGeotail・データをもとに統計的に示した。空間構造をより明快

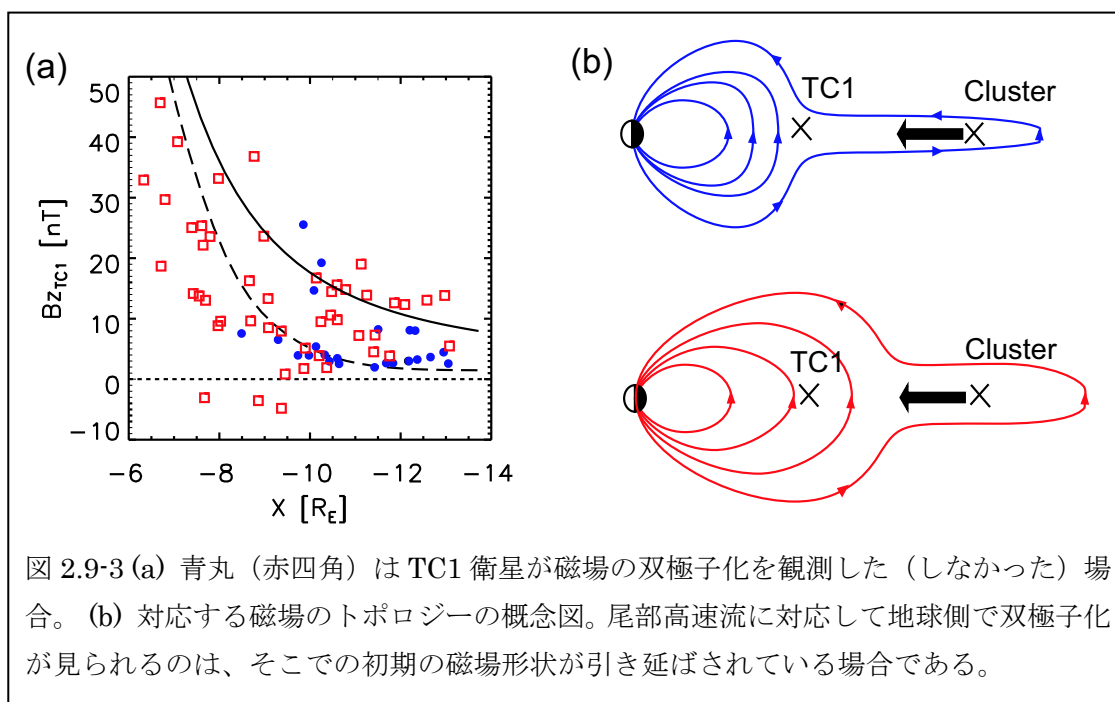


にするため、Cluster-II の編隊観測データにおいて、時間・空間発展を考慮しながら磁気リコネクション領域での高エネルギー電子加速の研究を行った (Imada et al. 2007)。この磁気リコネクション領域の構造推定をもとに、各衛星で観測された高エネルギー電子、及び磁場の時間発展を考察した結果、磁気リコネクションジェット下流の磁場は時間と共に密になり、磁場の時間発展と共に高エネルギー電子加速がさらに進行することが明らかになった。この結果は、非熱的電子のさらなる加速が磁気拡散領域から離れた場所で起こっている決定的な証拠である。

磁気リコネクションの大規模発展：Geotail-Cluster-II 2 点同時観測

“磁気リコネクション領域から擾乱はどのように伝播するのか？”

Cluster-II は毎年秋（8－10 月）に磁気圏尾部を観測する軌道となっている。2001 年 10 月 10 日に、真夜中前の同一子午面で Geotail 衛星は磁気圏尾部の南側、Cluster-II 衛星は磁気圏尾部の北側で観測する機会ができた。この位置は、サブストームにともなう磁気圏ダイナミクスを観測するのに最適の位置である。この時、南北共役な強い電場と地球向き的高速イオン流、さらに磁力線に沿った電流が、Geotail 衛星と Cluster-II 衛星で観測できた。さらに、プラズマシートの境界付近で電場南北成分のバイポール構造が観測された。これは、より地球より遠いところで起きた磁気リコネクションの中で、Hall 効果によってできた電場が、伝播してきたものと観測したと解釈できる。このように、Geotail 衛星と Cluster-II 衛星の同時観測は、変動現象がどのように伝播していくか、すなわち、現象の時間変動がどのような空間構造となっているかを立証することに役立つ (Nakamura et al., 2004)。



サブストーム時空発展の2点観測

“尾部での高速流と地球近くの双極子化との関係は？”

サブストーム現象において鍵となる現象は、静止軌道を含む比較的地球に近い領域で起こるカレントディスラプションと、尾部側で起こるとされているリコネクションである。Geotail の成果により、尾部で観測される高速流がリコネクションに関連して放出されていることが理解された。しかしながら、衛星の一点観測では、サブストームに伴うこれら2つの現象の因果関係を理解することは困難である。

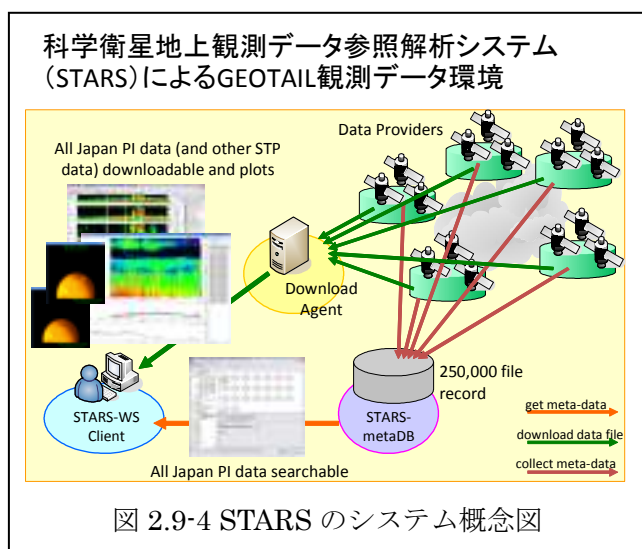
欧州宇宙機関（ESA）の Cluster-II と ESA・中国国家航空局の双星衛星は、経度に同期した軌道をとることにより、尾部プラズマシートでの同時観測を定期的に行っている。同時観測データを使用して、磁気圏尾部の高速流と内部磁気圏での磁場の双極子化現象を統計的に比較した。結果として、高速流の影響は空間的に限定的であり、サブストーム前の内部磁気圏磁場の双極子化具合に依存することなどを示した（図 2.9-3）（Takada et al., 2006）。

STARS の構築

“効率よく多くの衛星データを調査するのはどうすればよいのか？”

Geotail・データは海外の多くの研究者に活用されている。Geotail・チームのメンバーは Cluster-II・データなど海外機関のデータ解析を積極的に行っている。そして、これからの磁気圏観測においては多点観測が基本である。「国内外の多くの研究機関が」

「分散してデータを管理しており」「ユーザはそれらを一元的に取得して」「プロットや解析を行いたい」という現状を背景に、愛媛大学では、Geotail を契機に開発が開始された分散データベース技術を活用したデータ処理システム STARS の構築を進めている。STARS の技術は宇宙科学研究本部の DARTS システムにも応用されており、今後もセマンティック Web の構築などの発展が期待される。



[参考文献]

- [05-20] Imada et al. (2005), Geophys. Res. Lett.
[04-35] Nakamura et al. (2004), J. Geophys. Res.

- Asano, Y., R. Nakamura, W. Baumjohann, A. Runov, Z. Vörös, M. Volwerk, T. L. Zhang, A. Balogh, B. Klecker, and H. Rème, How typical are atypical current sheets?, *Geophys. Res. Lett.* 32, L03108, doi:10.1029/2004GL021834, 2005.
- Hasegawa, H., M. Fujimoto, T. D. Phan, H. Rème, A. Balogh, M. W. Dunlop, C. Hashimoto, and R. TanDokoro, Transport of solar wind into Earth's magnetosphere through rolled-up Kelvin-Helmholtz vortices, *Nature*, 430, 7001, 755-758, 2004.
- Imada S., R. Nakamura, P. W. Daly, M. Hoshino, W. Baumjohann, S. Mühlbachler, A. Balogh, and H. Rème, Energetic electron acceleration in the downstream reconnection outflow region, *J. Geophys. Res.* 112, CiteID A03202, doi:10.1029/2006JA011847, 2007.
- Nakamura, R., W. Baumjohann, Y. Asano, A. Runov, A. Balogh, C. J. Owen, A. N. Fazakerley, M. Fujimoto, B. Klecker, and H. Rème, Dynamics of thin current sheets associated with magnetotail reconnection, *J. Geophys. Res.* 111, A11206, doi:10.1029/2006JA011706, 2006.
- Runov, A., V. A. Sergeev, R. Nakamura, W. Baumjohann, S. Apatenkov, Y. Asano, T. Takada, M. Volwerk, Z. Vörös, T. L. Zhang, J.-A. Sauvaud, H. Rème, and A. Balogh, Local structure of the magnetotail current sheet: 2001 Cluster observations, *Ann. Geophys.* 24, 247, 2006.
- Takada, T., R. Nakamura, W. Baumjohann, et al., Do BBFs contribute to inner magnetosphere dipolarizations: Concurrent Cluster and Double Star observation, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L21109, doi:10.1029/2006GL027440, 2006.