

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月28日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21740358

研究課題名（和文） 多点衛星観測を用いた磁気圏境界層渦乱流の時空発展の解明

研究課題名（英文） Revealing spatiotemporal evolution of eddy turbulence in the magnetospheric boundary layer with multi-spacecraft measurements

研究代表者

長谷川 洋（HASEGAWA HIROSHI）

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教

研究者番号：50435799

研究成果の概要（和文）：無衝突である太陽風プラズマがいかに地球磁気圏に侵入するのか解明するために、磁気圏境界層で発生する渦乱流の特性を、複数衛星観測のデータを解析することにより調査した。非線形段階まで成長したケルビン・ヘルムホルツ渦をその場観測から同定する手法を確立し、渦乱流の発生の仕組みや非線形発展、その帰結について新たな知見をもたらした。その結果、太陽風の磁気圏流入という観点からは、乱流渦は最重要ではない可能性が出てきた。

研究成果の概要（英文）：The nature of eddy turbulence induced in Earth's magnetospheric boundary layer is examined by using data from multi-spacecraft measurements, with a view to revealing the mechanism by which collisionless solar wind plasma is transported into the magnetosphere. The methods have been established for identification from in situ measurements of Kelvin-Helmholtz vortices developed to the nonlinear phase, and new insights have been obtained regarding the excitation and nonlinear evolution of the vortices and their consequences. The vortices may not be the major player in the solar wind entry itself.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	2,500,000	750,000	3,250,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・超高層物理学

キーワード：地球惑星磁気圏、宇宙プラズマ、ケルビン・ヘルムホルツ不安定、プラズマ輸送

1. 研究開始当初の背景

(1) 惑星磁気圏の低緯度わき腹の境界層では、速度勾配を自由エネルギーとするケルビン・ヘルムホルツ（KH）不安定と呼ばれる流体不安定が成長しうる。反太陽方向に流れる太陽風プラズマと磁気圏内のプラズマとの間に、速度差があるからである。これまでの

衛星観測から、地球磁気圏のわき腹では KH 不安定が非線形段階まで成長し、巻き上がった渦が形成されることが知られていた。しかし、KH 渦の発生の仕組みや成長過程、発達した乱流渦が磁気圏や無衝突プラズマにおいて果たす役割については、不明な点が多かった。特に、太陽風磁場が北向きの成分を持つ

ている時に、KH 渦が太陽風プラズマの磁気圏侵入の過程において、重要な役割を演じているのかどうかは、磁気圏物理学の大問題であった。

(2) 速度勾配層は、惑星磁気圏や太陽圏の境界層、太陽風中の高速流と低速流の接触面、高重力天体から放出される宇宙ジェットと周辺ガスとの相互作用領域など、宇宙プラズマ中の様々な場所に存在する。特筆すべきは、地球磁気圏境界層は、人工衛星によって直接・詳細観測できる速度勾配層の代表であるということである。近年充実してきた多点・編隊衛星観測ネットワークを利用すれば、無衝突プラズマ中の乱流渦の実態を明らかにすることができると考えた。

2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は、「無衝突宇宙プラズマにおける異常輸送現象に寄与しているとされる渦乱流の時空発展を、地球磁気圏の境界領域で得られた多点衛星観測データの解析によって明らかにすること」である。異常輸送とは、荷電粒子間の衝突を伴わない粒子や磁場の拡散のことであり、これが磁気リコネクションの発生・維持や、プラズマの大規模輸送における鍵となっている可能性がある。異常輸送の理解は、宇宙空間における魅力的かつダイナミックな現象の謎—オーロラ粒子の起源や、磁気圏内にプラズマの大規模構造が生まれる仕組み—を解き明かすことにつながる。本研究では、特に以下の問題を解決することを目指した。

① KH 不安定はいかに発生しているか？

観測される KH 波の周期・波長は、理論から予想されるよりも長い場合が多いが、その理由は不明である。KH 波の励起メカニズムの謎に迫るために、磁気圏昼側の境界層において渦がいかなる特性を持っているのか調査する。

② 境界層渦はいかなる乱流状態まで発達するか？

KH 渦がプラズマの輸送・混合を引き起こすためには、渦が巻きあがり非線形効果が現れるまで成長する必要がある。磁気圏のどこで、どのような状態まで KH 渦が発達するのか明らかにする。

③ 渦中にいかなる局所構造・非 MHD 現象が発生しているか？

プラズマ輸送は、磁気リコネクションなどの非 MHD 過程が関与して初めて起こる。異常輸送の鍵となる微小時空スケールの構造や現象が、渦中あるいは渦周辺で観測されるかどうか、観測されるとすればいかなる特性を

持っているのか、明らかにする。

3. 研究の方法

(1) クラスタ衛星 (同型 4 機で編隊観測を行っている ESA-NASA 共同ミッション)、テミス衛星 (同型 5 機で多点観測を行っている NASA のミッション)、ジオテイル衛星 (ISAS/JAXA-NAXA 共同の磁気圏探査ミッション) 等が、磁気圏境界層および周辺宇宙空間において、その場同時観測を行った際に取得されたプラズマおよび電磁場のデータを解析する。これにより KH 波・渦を同定し、磁気圏昼側の境界層における KH 波の性質、磁気圏わき腹の境界層における渦乱流の特性、およびそれらの朝夕非対称性の有無を調査する。

(2) その場観測によって得られた時系列データからプラズマ速度場の 2 次元像を再現するためのデータ解析手法 (図 1) 等を利用して、乱流渦の波長や振幅 (構造の空間スケール)、渦の成長特性 (例えば、渦の合体や分裂が起きているか) を調査する。

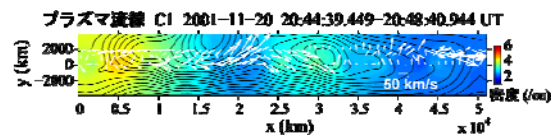


図 1. 流線関数についてのグラッド・シャフノフ型方程式を用いて、観測データから再現された流線 (黒線). 白い矢印はクラスタ衛星によって実際に観測されたプラズマ速度ベクトル.

(3) 高時間分解能の電磁場、および電子観測のデータを利用して、渦乱流中に形成されることが期待される電流層の構造 (例えば、電流密度、電流層の厚み、磁気フラックスロープや高速流の有無など) を解析する。これにより、渦中で非 MHD 過程が起きているかどうか調査する。

4. 研究成果

(1) KH 不安定は、太陽風プラズマの磁気圏流入という観点からは、最重要の物理過程ではないことが推察された。その理由は、(i) KH 渦の成長に伴って磁気圏のわき腹で駆動される磁気リコネクションは、非常に局所的であり、大規模なプラズマ流入を引き起こしそうにないこと、(ii) テミス衛星による磁気圏境界層の多点同時観測により、KH 不安定とは関係なく発生する磁気リコネクションを介して昼側で磁気圏に流入する太陽風プラズマの量自体は、磁気圏の夜側に存在するプラズマシートを満たすのに十分であること、が明らかになったからである。

しかし、昼側で流入したプラズマがいかに

真夜中付近まで輸送され、プラズマシートを形成するに至るのことは未だ理解されておらず、この過程において KH 不安定が関与している可能性は残されている。今後は、太陽風の運動量輸送という観点からも KH 不安定の役割を実証的に解明していく必要がある。

(2) KH 渦の成長に伴って薄い電流層が形成され、その電流層中で磁気リコネクションが発生することを実証した (図 2)。これは、計算機シミュレーション研究によって予測されていた KH 不安定の発展に伴う非 MHD 過程の発動を、観測的に証明したという意味で、価値ある成果である。

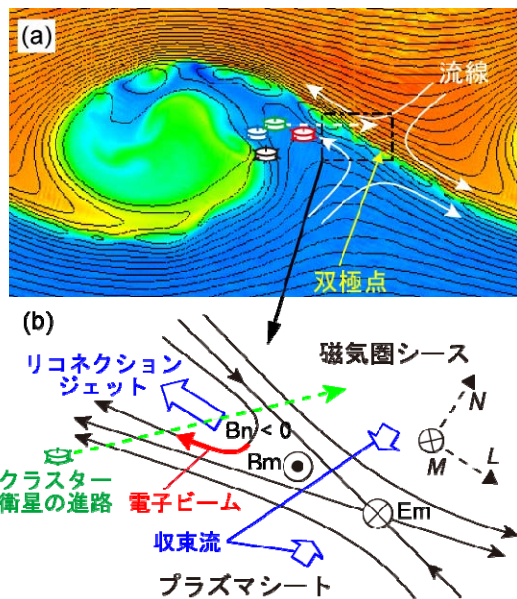


図 2. (a) 二流体シミュレーションによって予測されていた KH 渦の端で発生する磁気リコネクションと、(b) クラスタ衛星によって同定された磁気リコネクションの証拠の模式図 (黒線は磁力線)。

(3) プラズマや磁場のその場観測のデータから、非線形段階まで成長した巻き上がった KH 渦を同定する方法を確立した。電磁流体の運動方程式、および計算機シミュレーションの結果を利用して、多次元的な構造を有する KH 渦の特徴を明らかにし、単一衛星観測、または編隊観測を用いて、KH 渦を検出するための手法を開発した。本研究で確立した方法は、今後の KH 不安定についての観測的研究や、惑星探査ミッション等において、地球磁気圏以外の宇宙空間に存在しているかもしれない KH 渦を同定・解析する際に、役立つと期待される。

(4) クラスタ衛星とジオテイル衛星による磁気圏両わき腹の同時観測から、KH 渦は両わき腹で巻き上がる段階まで成長すること、その大規模構造は朝夕で類似した様相を有

することを明らかにした (図 3)。後者は、KH 波が昼側で励起され、両わき腹に伝搬していくとともに成長していることを示す結果である。一方で、渦中で観測されたイオンのエネルギー Spektral には朝夕非対称性が確認された。これは、渦中で起きていると考えられるプラズマ輸送・混合の仕組みが、朝側と夕方側で異なる可能性を示唆する興味深い結果である。

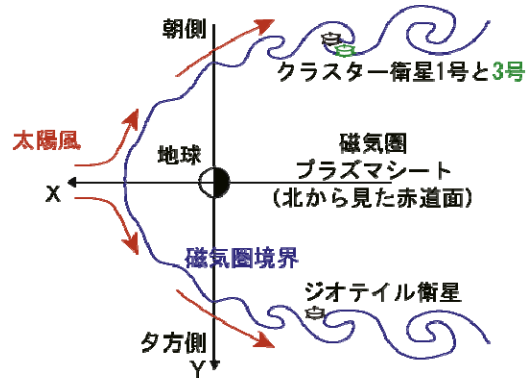


図 3. 同時衛星観測により、ほぼ朝夕対称的に成長する事が確認された境界層 KH 渦の模式図。

(5) 昼側の磁気圏境界層の観測に基づいて、実際の境界層では、理論から予測される最も成長しやすい周期・波長の KH 波が励起されているわけではなく、外部駆動あるいは内部駆動により強制的に、理論予想よりも長い周期の KH 波が励起されていることを提唱した。駆動源の実態については、まだ不明な点が多く、上のシナリオは今後の研究による検証を要するものである。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 20 件)

- ① Nakamura, T. K. M., H. Hasegawa, I. Shinohara, and M. Fujimoto, Evolution of an MHD-scale Kelvin-Helmholtz vortex accompanied by magnetic reconnection: Two-dimensional particle simulations, J. Geophys. Res., 査読有、116、A03227、2011、DOI:10.1029/2010JA016046
- ② Nishino, M. N., H. Hasegawa, M. Fujimoto (以下 6 名), A case study of Kelvin-Helmholtz vortices on both flanks of the Earth's magnetotail, Planet. Space Sci., 査読有、59、502-509、2011、DOI:10.1016/j.pss.2010.03.011
- ③ Owen, C. J., O. Amm, R. Bruno (以下

- 17名、10番目)、IMPALAS: Investigation of MagnetoPause Activity using Longitudinally-Aligned Satellites - a Mission Concept proposed for the ESA M3 2020/2022 Launch, Exp. Astron.、査読有、33、365-401、2012、DOI:10.1007/s10686-011-9245-2
- ④ Sibeck, D. G., V. Angelopoulos, D. A. Brain (以下17名、9番目)、ARTEMIS science objectives, Space Sci. Rev.、査読有、165(1-4)、59-91、2011、DOI:10.1007/s11214-011-9777-9
- ⑤ Sonnerup, B. U. Ö., and H. Hasegawa, Reconstruction of steady, three-dimensional, magneto-hydrostatic field and plasma structures in space: Theory and benchmarking, J. Geophys. Res.、査読有、116、A09230、2011、DOI:10.1029/2011JA016675
- ⑥ Hasegawa, H., J. Wang, M. W. Dunlop (以下12名)、Evidence for a flux transfer event generated by multiple X-line reconnection at the magnetopause, Geophys. Res. Lett.、査読有、37、L16101、2010、DOI:10.1029/2010GL044219
- ⑦ Hasegawa, H., B. U. Ö. Sonnerup, and T. K. M. Nakamura, Recovery of time evolution of Grad-Shafranov equilibria from single-spacecraft data: Benchmarking and application to a flux transfer event, J. Geophys. Res.、査読有、115、A11219、2010、DOI:10.1029/2010JA015679
- ⑧ Nakamura, T. K. M., H. Hasegawa, and I. Shinohara, Kinetic effects on the Kelvin-Helmholtz instability in ion-to-magnetohydrodynamic scale transverse velocity shear layers: Particle simulations, Phys. Plasmas、査読有、17、042119、2010、<http://dx.doi.org/10.1063/1.3385445>
- ⑨ Sonnerup, B. U. Ö., and H. Hasegawa, On slowly evolving Grad-Shafranov equilibria, J. Geophys. Res.、査読有、115、A11218、2010、DOI:10.1029/2010JA015678
- ⑩ Hasegawa, H., J. P. McFadden, O. D. Constantinescu (以下14名)、Boundary layer plasma flows from high-latitude reconnection in the summer hemisphere for northward IMF: THEMIS multi-point observations, Geophys. Res. Lett.、査読有、36、L15107、2009、DOI:10.1029/2009GL039410
- ⑪ Hasegawa, H., A. Retinö, A. Vaivads (以下11名)、Kelvin-Helmholtz waves at the Earth's magnetopause: Multi-scale development and associated reconnection, J. Geophys. Res.、査読有、114、A12207、2009、DOI:10.1029/2009JA014042
- ⑫ Eriksson, S., H. Hasegawa, W.-L. Teh (以下9名)、Magnetic island formation between large-scale flow vortices at an undulating post-noon magnetopause for northward IMF, J. Geophys. Res.、査読有、114、A00C17、2009、DOI:10.1029/2008JA013505
- ⑬ Lavraud, B., J. E. Borovsky, V. Genot (以下22名、9番目)、Tracing solar wind plasma entry into the magnetosphere using ion-to-electron temperature ratio, Geophys. Res. Lett.、査読有、36、L18109、2009、DOI:10.1029/2009GL039442
- [学会発表] (計54件)
- ① 長谷川洋、Reconstruction of three-dimensional, magneto-hydrostatic plasma and magnetic field structures from multi-spacecraft data, AGU 2011 Fall Meeting, 2011年12月9日、モスコウニ会議場 (サン・フランシスコ)
- ② 長谷川洋、複数衛星観測を用いた三次元平衡磁場構造の再現、地球電磁気・地球惑星圏学会第130回講演会、2011年11月3日、神戸大学 (神戸)
- ③ 長谷川洋、Reconstruction of magnetopause and boundary layer structures, The Sonnerup symposium, 2011年9月29日、Hanover (USA)
- ④ 長谷川洋、Structure of the magnetospheric boundary layers: A multi-spacecraft perspective, ESLAB 2011/Cluster 21th Workshop, 2011年9月21日、Brugge (Belgium)
- ⑤ 長谷川洋、Three-dimensional, Magneto-hydrostatic Structures in Space from Two-point Measurements, AOGS 2011, 2011年8月10日、台北国際会議場 (台北)
- ⑥ 中村琢磨、Mechanisms of solar wind entry into the Earth's magnetosphere related to the Kelvin-Helmholtz vortex: Particle simulations, AOGS 2011, 2011年8月10日、台北国際会議場 (台北)
- ⑦ 長谷川洋、Reconstruction of magnetopause structures in spacetime from multi-spacecraft measurements, EGU General Assembly 2011, 2011年4

- 月 5 日、ウィーン・オーストリアセンター (ウィーン)
- ⑧ 長谷川洋、Evidence for a flux transfer event generated by multiple X-line reconnection at the magnetopause、AGU 2010 Fall meeting、2010 年 12 月 16 日、San Francisco (USA)
- ⑨ 長谷川洋、その場観測を用いた二次元平衡構造の時間発展の再現、地球電磁気・地球惑星圏学会第 128 回講演会、2010 年 11 月 1 日、沖縄
- ⑩ 長谷川洋、Plasma transport at the flank magnetopause under northward IMF、The 10th Cluster Anniversary Workshop、2010 年 9 月 30 日、Corfu island (Greece)
- ⑪ 長谷川洋、Recovery of evolution of two-dimensional magnetohydrostatic structures from single-spacecraft data、The 10th Cluster Anniversary Workshop、2010 年 9 月 28 日、Corfu island (Greece)
- ⑫ 長谷川洋、On the identification of magnetopause Kelvin-Helmholtz waves from in-situ observations、2010 Western Pacific Geophysics Meeting、2010 年 6 月 24 日、台北 (台湾)
- ⑬ 長谷川洋、Kelvin-Helmholtz instability: Observations, identification, excitation, and evolution、Workshop on magnetopause processes、2010 年 6 月 9 日、Toulouse (France)
- ⑭ 長谷川洋、A flux transfer event generated by multiple X-line reconnection at the magnetopause: THEMIS observations、日本地球惑星科学連合 2010 年大会、2010 年 5 月 26 日、幕張メッセ国際会議場 (千葉)
- ⑮ 長谷川洋、Boundary layer plasma flows from high-latitude reconnection in the summer hemisphere for northward IMF: THEMIS multipoint observations、AGU 2009 Fall Meeting、2009 年 12 月 14-18 日、San Francisco (USA)
- ⑯ 長谷川洋、Boundary layer plasma flows from high-latitude reconnection in the summer hemisphere for northward IMF: THEMIS observations、地球電磁気・地球惑星圏学会第 126 回講演会、2009 年 9 月 27-30 日、金沢
- ⑰ 長谷川洋、Simultaneous THEMIS observations of magnetospheric ULF waves and magnetopause Kelvin-Helmholtz waves for northward IMF、地球電磁気・地球惑星圏学会第 126 回講演会、2009 年 9 月 27-30 日、金沢
- ⑱ 長谷川洋、Excitation, development, and

roles of Kelvin-Helmholtz waves at the magnetopause、AOGS 2009、2009 年 8 月 11-15 日、Singapore

- ⑲ 長谷川洋、Structural development of Kelvin-Helmholtz vortices at the Earth's magnetopause、日本地球惑星科学連合 2009 年大会、2009 年 5 月 23-28 日、千葉
- ⑳ 長谷川洋、Excitation and multi-scale development of Kelvin-Helmholtz waves at the Earth's magnetopause、17th Cluster Workshop、2009 年 5 月 12-15 日、Uppsala (Sweden)

[その他]

ホームページ等

- ① http://www.igpp.ucla.edu/public/THEMIS/SCI/Pubs/Nuggets/2010_nuggets/hasegawa/hasegawa_10.html
- ② http://sprg.isas.jaxa.jp/researchTeam/spacePlasma/results/0909_hase.html
- ③ http://sprg.isas.jaxa.jp/researchTeam/spacePlasma/results/0912_hase.html
- ④ http://sprg.isas.jaxa.jp/researchTeam/spacePlasma/results/1008_hase.html
- ⑤ http://sprg.isas.jaxa.jp/researchTeam/spacePlasma/results/1012_hase.html
- ⑥ http://sprg.isas.jaxa.jp/researchTeam/spacePlasma/results/1111_hase.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長谷川 洋 (HASEGAWA HIROSHI)
独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教
研究者番号：50435799

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：