

彩層と電離圏のパラメータ比較と物理アナロジー整理

磯部洋明

京都大学宇宙総合学研究ユニット

Email: isobe@kwasan.kyoto-u.ac.jp

概要

太陽彩層と地球電離圏は、共に部分電離プラズマであること、上空の希薄な大気（太陽コロナ／地球磁気圏）と磁力線を介して結合していること、下層大気（太陽対流層・光球／地球対流圏・成層圏・中間圏）からの波動によるエネルギー輸送があることなど、様々な物理的類似点があり、両者の比較から有益な知見を得られる可能性がある。本論文では彩層と電離圏の物理パラメータと類似点、相違点を整理し、主に太陽物理の立場から見て有益な比較研究の可能性のあるいくつかの物理現象を挙げる。

1. イントロダクション

彩層とは、可視光で見た太陽の表面である光球と、高温希薄な大気であるコロナとの間の、厚さ数千 km 程度の領域を指す。近年特に「ひので」衛星可視光望遠鏡の観測により、磁気リコネクションに伴うジェット現象(Shibata et al. 2007; Katsukawa et al. 2007)、アルフベン波的な（横波で圧縮性の弱い）磁気流体波動(Okamoto et al. 2007; Okamoto & DePontieu 2011)、乱流的な微細磁場の浮上(Ishikawa et al. 2007)など、それまで考えられていたよりも活発な磁氣的活動現象が彩層で起きていることが明らかになってきた（図 1）。彩層は、光球下の非熱的エネルギー（対流の運動エネルギーと磁場のエネルギー）が磁場を介して上空のコロナ・太陽風に輸送される際の通り道であるが、強い重力成層のためわずか数千 km の間に密度やプラズマベータが大きく変動するので、衝撃波の形成や波動のモード変換など、エネルギー輸送の形態が大きく変化する領域でもある。従って彩層の物理過程を理解することは、コロナの加熱、太陽風の加速、フレアの発生など、太陽の磁氣的活動現象を理解する上で重要である。

地球電離圏は電離度が低く中性粒子とプラズマの相互作用が重要であること、上空の高温希薄なプラズマ（磁気圏）と磁力線を介して結合していること、下

層（対流圏・成層圏・中間圏）からの波動によるエネルギー輸送があることなど、太陽彩層といくつかの類似点があり、両者の比較研究は何らかの有益な知見をもたらすのではと期待される。実際、電離圏で考えられているような中性粒子によるダイナモ作用を太陽フレアのモデルに応用するといった研究が80年代頃まではいくつかあったが(例えば Sen & White 1972; Kan, Akasofu & Lee 1983)、「ようこう」衛星の活躍などにより太陽フレアの磁気リコネクションモデルがほぼ確立してからは、むしろ磁気圏のサブストームと太陽フレアの比較が盛んに議論されるようになってきた(例えば Terasawa, Shibata & Scholer 2000; Lin, Cramer & Farrugia 2008)。しかし、上述のように太陽彩層の研究に大きな進展が見られ、特にその弱電離プラズマといった側面が注目されるようになってきていることからすれば(例えば Khomenko & Collados 2012)、再び電離圏との比較を試みることは意義のある事であろう。本論文ではまず彩層と電離圏の物理パラメータを整理し、その類似点と相違点をまとめて、主に太陽物理の立場から見て、比較研究が有益な可能性のあるいくつかの物理現象を議論する。

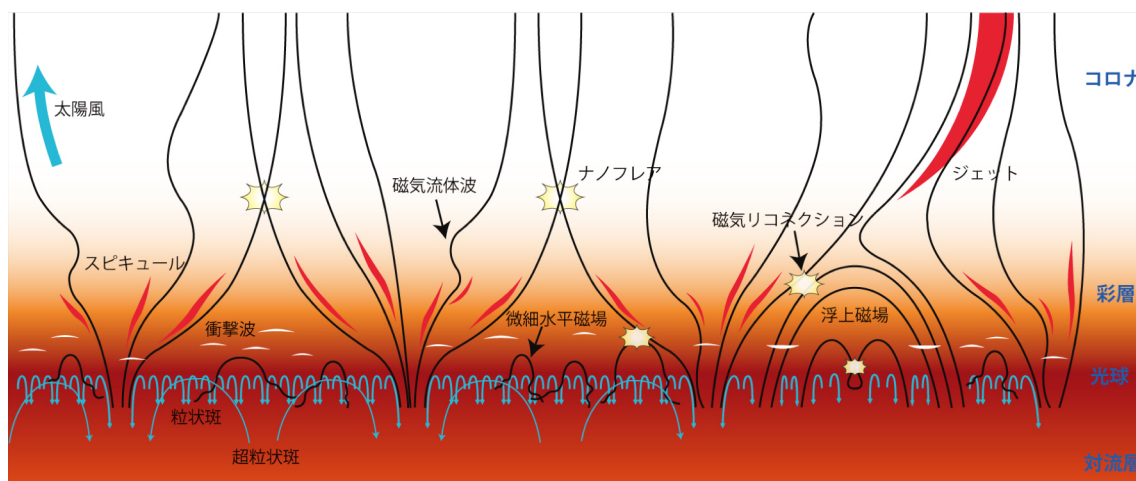


図1 太陽大気の様式図

2. 物理量の比較

図2に太陽大気と地球高層大気の典型的な温度分布を示す。後述のように太陽大気ではコロナといえども衝突が比較的頻繁なので、電子、イオン、中性粒子の温度はほぼ同じであると考えられる。(ただしコロナ中では、特にフレア直

後などは電子とイオンの温度は異なり得る。cf. Imada, Hara & Watanabe 2009) 一方電離圏では一般に電子、イオン、中性粒子の順に温度が高い。

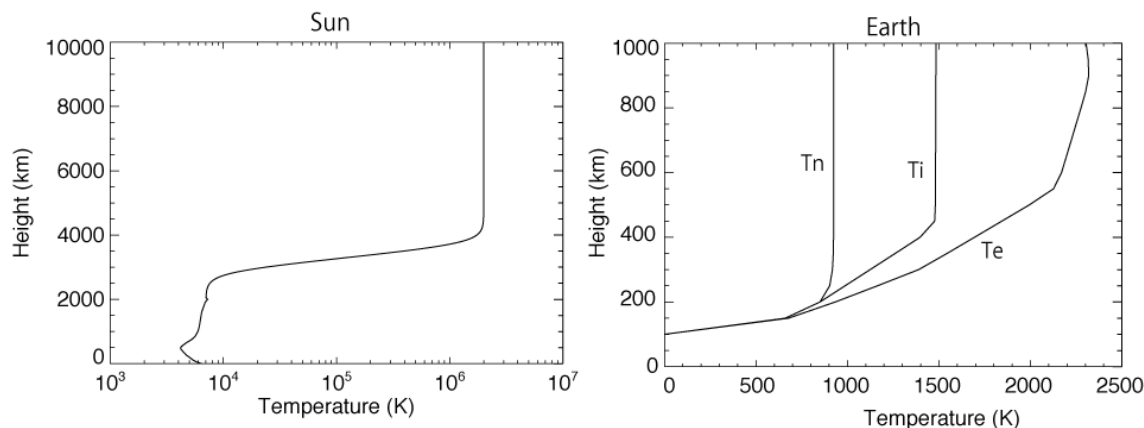


図 2：太陽大気（左）と地球高層大気（右）の高度方向の温度分布。

図 3 には密度分布を示す。太陽大気の密度分布は、高さおよそ 2000km の彩層までは VALC モデルを用い、上空は図 2 のような温度分布での静水圧平衡を仮定して計算した。まず彩層、電離圏ともに電離度の低い弱電離プラズマであることがわかる。ここで太陽大気の組成は、個数密度（質量）比で水素が 91(7.0.5)%、ヘリウムは 8.9(27.5)%、残りが 1(3)%未満であり、場所によらずほぼ一定である。重元素は微量にしか存在していないが、彩層から遷移層の放射冷却や彩層中の電子の供給には、これらの微量な重元素が大きく寄与している。一方電離圏では様々な種類の分子、イオンが存在していて、その存在比は高度によって大きく変化する。

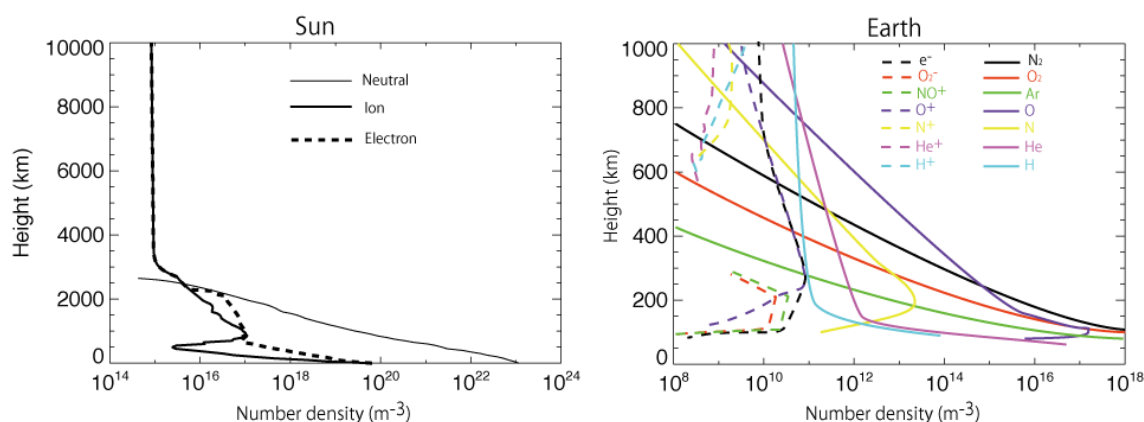


図 3：太陽大気（左）と地球高層大気（右）の高度方向の密度分布。地球高層

大気の密度分布は MSIS90 大気モデル（中性）と IRI95 大気モデル（イオン）によっており、太陽活動が低い時に相当する。

図 4 にはイオン-中性衝突周波数 ν_{in} 、電子-中性衝突周波数 ν_{en} 、イオンサイクロトロン周波数 Ω_i 、電子サイクロトロン周波数 Ω_e の高度分布を示す。太陽大気の衝突周波数は VALC モデルから、サイクロトロン周波数は光球（高度 $h=0\text{km}$ ）での磁場強度を 1500G として、磁場がガス密度の 0.3 乗に比例するようなモデルを用いて計算している。実際には磁場強度は場所によって大きく変動するので、図中の値はあくまで平均的な値である。

図 4 から分かるように、太陽では光球から彩層低部にかけて（ $h<1000\text{km}$ ）、地球では電離圏低部（ $h<125\text{km}$ ）の領域では、 $\nu_{in}>\Omega_i$ であるからイオンは中性との衝突により磁場への凍結が破れて中性大気に引きずられる一方、 $\nu_{ie}<\Omega_e$ であるから電子は磁場に凍結している。従って、中性粒子の運動がイオンと電子の運動のずれを引き起こし、電流（Hall 電流）が流れる。これは地球では電離圏ダイナモとしてよく知られた現象であるが、太陽でこれに起因する現象が観測的に同定されたことはない。

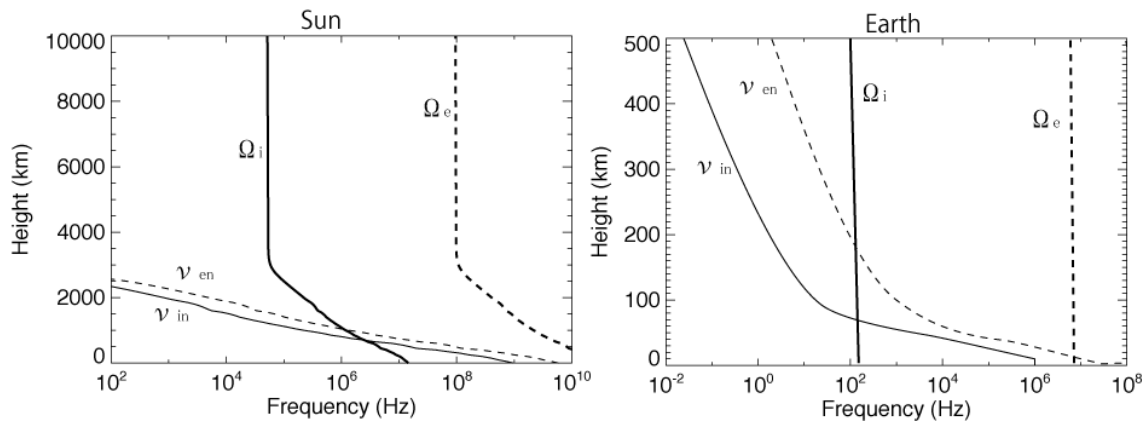


図 4：太陽大気（左）と地球高層大気（右）のイオン-中性衝突周波数 ν_{in} 、電子-中性衝突周波数 ν_{en} 、イオンサイクロトロン周波数 Ω_i 、電子サイクロトロン周波数 Ω_e の高度分布

図 5 に平均自由行程とスケールハイトを示す。彩層の平均自由行程が高々 1m 程度なのに対し、彩層観測されている現象のスケールは 1000~10000km 程度あるので、彩層は完全衝突プラズマであることが分かる。一方コロナ中の電子

の平均自由行程は数千 km あり、フレア中など密度が高くなる場合はさらに短くなる。一方コロナ中の磁気ループの長さは典型的には数万 km、ループの太さは数千 km であるため、コロナは平均自由行程と現象のスケールに大きな差がなく、微妙に衝突が効くようなレジームにある。ただしスケールハイトに比べれば平均自由行程は常に小さいため、重力成層という観点からは連続的な流体として扱うことができる。一方、電離圏上部ではスケールハイトよりもイオンの平均自由行程が大きくなることから、この領域では熱拡散が支配的となる。

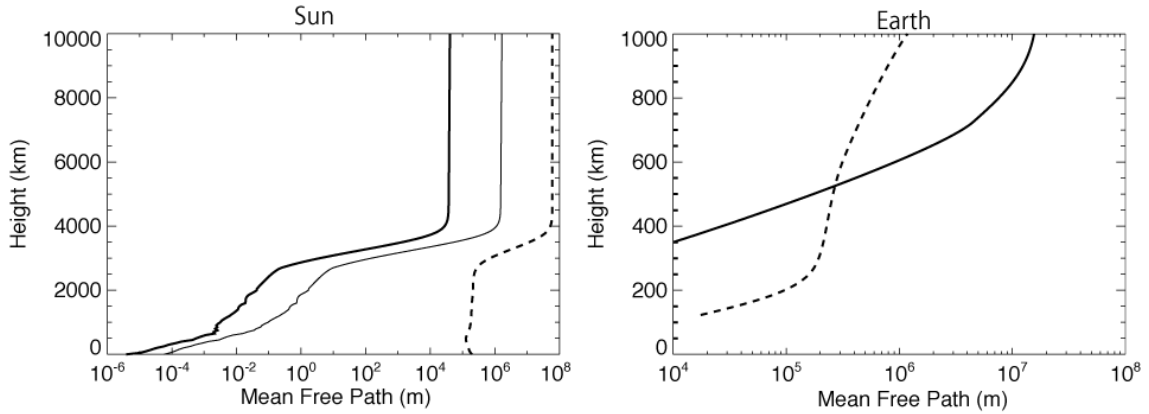


図5：太陽大気（左）と地球高層大気（右）のイオン平均自由行程（太実線）、電子平均自由行程（細実線）、スケールハイト（破線）。ただし地球高層大気の電子平均自由行程は示されていない。

3. 彩層の理論的取り扱いと中性粒子の効果が発現するスケール

前章で見たように彩層は弱電離プラズマであるが、衝突によるプラズマと中性流体のカップリングが強いため、大局的なダイナミクスを記述する上では1流体と見なすことができる。このことを示すために、イオンの運動方程式で $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ 力と中性大気との衝突項のバランスを考える。

$$\mathbf{v}_{ni} \rho_n (\mathbf{V}_n - \mathbf{V}_i) \approx \frac{\mathbf{J} \times \mathbf{B}}{c} \quad (1)$$

この式を中性流体とイオン流体の相対速度について解いて、彩層の典型的な値を代入すると

$$\mathbf{V}_n - \mathbf{V}_i \approx \frac{B^2}{4\pi L \mathbf{v}_{ni} \rho_n} \approx 100 \left(\frac{V_A}{10 \text{ km/s}} \right)^2 \left(\frac{L}{100 \text{ km}} \right)^{-1} \left(\frac{\mathbf{v}_{ni}}{10^3 \text{ Hz}} \right)^{-1} \text{ cm/s} \quad (2)$$

となる。彩層中は常に 1km/s から 100km/s 程度の流れや波動が行き交っており、

それに比べて中性流体とイオン流体の間の約 100cm/s の相対速度は無視できるほど小さい。従って、彩層の大局的なダイナミクスを記述する上において、中性流体とプラズマはほぼ一体となって動くと考えてよく、1 流体の磁気流体力学 (MHD) がよい近似となる。

なおこのことと関係して、太陽物理学で彩層や光球のプラズマベータと言うとき、通常は $\beta = (\text{中性流体のガス圧} + \text{プラズマの圧力}) / \text{磁気圧}$ という定義を用いる。一方地球電離圏のコンテキストでは通常 $\beta = \text{プラズマの圧力} / \text{磁気圧}$ であり、中性流体の圧力は含まない。これはしばしば太陽物理学者と地球物理学者で議論する際の誤解の元となるので注意が必要である。

次に誘導方程式は以下のようなものがよく使用される (Krishan & Varghese 2008; Khomenko & Collados 2012)。

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times \left[V_n \times B - \frac{J \times B}{en_e} + \frac{(J \times B) \times B}{c v_{ni} \rho_n} - \frac{4\pi\eta}{c} J \right] \quad (3)$$

ここで右辺第 1 項は「中性流体による」移流項、第 4 項は通常のオーム拡散、第 2 項は Hall 効果である。第 3 項は中性流体とイオン流体の衝突に起因する項で、天文分野ではしばしば両極性拡散 (ambipolar diffusion) と呼ばれ、電離圏分野だとペダーセン抵抗に相当するものである。両極性拡散、Hall 効果、オーム拡散の比はスケールによらずプラズマパラメータだけで決まり、磁場強度にもよるが、多くの場合彩層の中部から上部では両極性拡散 >> Hall 効果 >> オーム拡散、彩層低部から光球では Hall 効果 > オーム拡散 >> 両極性拡散となる。

一方移流項に対する Hall 効果や両極性拡散の相対的な大きさはスケールに依存する。上の式(3)で右辺第 1 項の移流項によりも第 3 項の両極性拡散項が大きくなる条件を長さスケールで表し、彩層の典型的な値を代入すると

$$L < \frac{V_{An} \rho_n}{v_{in} \rho_i} \approx 1-10 \text{ km} \quad (4)$$

となる。ここで $J \approx cB/4\pi L$ を用いた。Hall 効果が効くスケールは式(4)で v_{in} を Ω_i で置き換えることで得られ、数値的にはやはり 1-10km 程度である。観測されている彩層の現象のスケールは 1000-10000km 程度なので、中性粒子の効果が大局的なダイナミクスに効かないことはこの議論からも分かる。一方、磁気リコネクションや高周波波動など、小さいスケールが重要な現象では、Hall 効果や両極性拡散が重要な役割を果たしている可能性は高い。しかし、現在の太

陽観測の空間分解能は高いものでも 100km 程度なので、これらのスケールを分解して見ることは今のところできていない。

4. 物理アナロジー

本節では太陽と地球高層大気の間で物理的アナロジーがなりたちそうないくつかの現象について簡単に述べる。

4.1 太陽風と地球の極風

地球の極域からは極風(polar wind)と呼ばれるイオン流出が観測されている(Schunk & Nagy 2000; Ogawa et al. 2009)。太陽から流れ出るプラズマの代表的な例は太陽風だが、これ以外にフレア時に起こる彩層蒸発という現象がある。太陽風を加速するエネルギーが光球からアルフベン波などを介して上空へ伝わる、つまり「下から」来るのに対し、彩層蒸発はコロナ中で磁気リコネクションにより解放されたエネルギーが熱伝導や高エネルギー粒子により「上から」彩層へと伝わり、彩層を急激に加熱して上向きの圧力勾配を作ることで爆発的な上昇流が発生する現象である(Yokoyama & Shibata 1998)。

極風でも粒子の降り込みなどによる上空からのエネルギーが重要だとすると、太陽風よりも彩層蒸発の方により類似点があるかもしれない。ただし 2 節で述べたように、太陽大気ではスケールハイト>平均自由行程であるため圧力勾配による加速といった流体的描像が適用できるのに対し、電離圏上部ではスケールハイト<平均自由行程であるため、熱拡散が支配的で流体的描像が適用できないのが異なる点である。

4.2 下層からの波動：音波 or 重力波？

彩層中では、対流層・光球で発生した音波が強い重力成層により振幅が増大し、非線形効果で衝撃波となってプラズマの加熱や加速を引き起こす(Suematsu et al. 1982; Carlsson & Stein 1997; Kato et al. 2011)。一方で彩層中での内部重力波はまだはっきりした観測的証拠がない。一方地球大気では対流圏の上空に対流安定な大気があるという構造は同じであるにも関わらず、内部重力波による運動量輸送が上空のダイナミクスに重要な役割を果たしている一方、音波に関しては地震など限られた場合を除いてあまり議論されていない(Saito et al. 2011)。何がこのような違いを生んでいるのかは興味深い問題であ

る。

4.3 浮上磁場、プロミネンスバブルとプラズマバブル

プラズマバブルは地球の電子密度の低い「プラズマバブル」が電離圏上部まで上昇する現象で、地球の低緯度地方で起こるレイリーテイラー不安定に起因する現象と考えられている(Ossakow 1981; 丸山 2006)。太陽大気での磁場を伴うレイリーテイラー不安定現象としては、太陽の内部で作られた磁場が上空に浮上する現象(Isobe et al. 2005; 2006)がよく知られているが、この他に最近「ひので」の観測により、プロミネンス中でもレイリーテイラー不安定に起因するらしい「バブル」状の構造が見えてきている(Berger et al. 2011; Hillier et al. 2012)。

4.4 共役オーロラとフレアリボン

地球の南北の極域で同じ磁力線につながっている領域では、時間空間的に類似したオーロラがしばしば観測され、共役オーロラと呼ばれる(Sato et al. 2005)。オーロラサブストームと太陽フレアの類似性はしばしば指摘されているが(Terasawa, Shibata & Shcoler 2000)、フレア時の彩層のツーリボン（フレア時の彩層はしばしば正負の磁極に対応する 2 本のリボン状に光る）でも、磁力線でつながった共役点が同じような時間的振る舞いをするということが知られている(Asai et al. 2003)。共役オーロラはオーロラサブストームのオンセットや、磁気圏-電離圏結合の物理に関する有益な情報をもたらすと考えられており、太陽フレアにもその知見が活かせる可能性がある。

5. まとめ：類似点と相似点

最後に彩層と電離圏の類似点と相似点を箇条書きにして整理する。まず両者に共通の類似点としては

- 弱電離プラズマであり、中性粒子とプラズマの相互作用が重要
- 強い重力成層により密度が何桁も変わる
- プラズマベータ（中性流体の圧力を含む）が $\beta > 1$ から $\beta < 1$ へ遷移する領域である
- 上空の完全電離、無衝突な領域（コロナ／電離圏）と磁力線を介して結合している

- 上空からの高エネルギー粒子の降り込みと上空へのプラズマの流出がある
- 下層からの波動によるエネルギー・運動量の供給がある。重力成層により振幅が増大して非線形効果が効くことが重要
- $\Omega_e > \nu_{en}$ はほぼ全体で成り立つ
- 上部は $\Omega_i > \nu_{in}$ であるのに対し、下部は $\Omega_i < \nu_{in}$ (ダイナモ領域) になっている

などが挙げられる。一方相違点としては

- 太陽大気の組成はほぼ水素でヘリウムが（個数で）10%程度でほぼ一定なのに対し、電離圏の組成は高さや物理状態により様々である
- コロナへは光球・彩層を通してエネルギーが供給されるのに対し、磁気圏への主なエネルギー供給源は太陽風
- 磁気圏と電離圏の磁場強度比は 1000～10000 程度あるのに対し、コロナと彩層の磁場強度比はせいぜい 100 でもっと小さい場合も多い
- 電離圏はより無衝突に近く、プラズマと流体の相互作用、中性流体の風によるダイナモ効果が重要なものに対し、彩層では 1 流体 MHD がよい近似
- 電離圏では流速<音速、太陽では流速～音速
- 下層からの波動の伝播は、地球は主に重力波、太陽は主に（磁気）音波。

などが挙げられる。

3章で議論したように、電離圏で見られるような中性粒子とプラズマの相互作用に起因する現象（例えば Hall 電流、ペダーセン電流を介した磁気圏-電離圏結合）は、太陽でも起きているが、恐らくそのスケールが現在の観測の空間分解能よりはるかに小さい。しかし、本格的に観測が始まりだした電波望遠鏡 ALMA(<http://alma.mtk.nao.ac.jp/j/>)では、0.01 秒角(～7km)の空間分解能で彩層下部の様子を観測できる可能性がある。電離圏と彩層の比較研究の一層の進展が望まれる。

参考文献

- Asai, A., Ishii, T. T., Kurokawa, H., Yokoyama, T., Shimojo, M. “Evolution of Conjugate Footpoints inside Flare Ribbons during Great Two-Ribbon Flare on 2001 April 10”, 2003, ApJ, 586, 624
- Berger, T., Testa, P., Hillier, A., Boerner, P., Low, B. C., Shibata, K., Schrijver, C., Tarbell, T., Title, A. “Magnetothermal Convection in Solar Prominences”, 2011,

Nature, 472, 197

- Carlsson, M., Stein, R. F. “Formation of the Solar Calcium H and K Bright Grains”, 1997, ApJ, 481, 500
- Hillier, A., Berger, T., Isobe, H., Shibata, K. “Numerical Simulations of the Magnetic Rayleigh-Taylor Instability in the Kippenhahn-Schlüter Prominence Model. I. Formation of Upflows”, 2012, ApJ, 746, 120
- Imada, S., Hara, H., Watanabe, T. “Ion Temperature and Non-Thermal Velocity in a Solar Active Region: Using Emission Line of Different Atomic Species”, 2009, ApJ, 705, L208
- Ishikawa, R. et al. “Transient Horizontal Magnetic Fields in Solar Plage Regions”, 2008, A&A, 481, L25
- Isobe, H., Miyagoshi, T., Yokoyama, T., Shibata, K. “Filamentary structure on the Sun from the magnetic Rayleigh-Taylor instability”, 2005, Nature, 434, 478
- Isobe, H., Miyagoshi, T., Yokoyama, T., Shibata, K. “Three-Dimensional Simulation of Solar Emerging Flux Using the Earth Simulator I. Magnetic Rayleigh-Taylor Instability at the Top of the Emerging Flux as the Origin of Filamentary Structure”, 2006, PASJ, 58, 423
- Kato, Y., Steiner, O., Steffen, M., Suematsu, Y. “Excitation of Slow Modes in Network Magnetic Elements Through Magnetic Pumping” 2011, ApJ, 730, +24
- Katsukawa, Y., et al. “Small-Scale Jetlike Features in Penumbral Chromosphere”, 2007, Science, 318, 1594
- Khomenko, E., Collados, M. “Heating of the Magnetized Solar Chromosphere by Partial Ionization Effects” 2012, ApJ, 747, 87
- Krishan, V., Varghese, B. A. “Cylindrical Hall-MHD Waves: A Nonlinear Solution” 2008, Sol. Phys., 247, 343
- Lin, J., Cranmer, S. R., Farrugia, C. J., “Plasmoids in Reconnecting Current Sheets: Solar and Terrestrial Contexts Compared”, 2008, JGR, 113, A11107
- Ogawa, Y., Häggström, I., Buchert, S. C., Oksavik, K., Nozawa, S., Hirahara, M., van Eyken, A. P., Aso, T., Fujii, R., “On the Source of the Polar Wind in the Polar Topside Ionosphere: First Results from the EISCAT Svalbard Radar”, 2009, GRL, 36, L24103
- Okamoto, T. J., De Pontieu, B. “Propagating Waves Along Spicules”, 2011, ApJ, 736, L24
- Okamoto, T. J. et al. “Coronal Transverse Magnetohydrodynamic Waves in a Solar

Prominence”, 2007, Science, 318, 1577

- Shchunk, R. W., Nagy, A. F. “Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry” 2000, Cambridge University Press
- Ossakow, S. L. “Spread-F theories – A review” 1981, J. Atmos. Terr. Phys. 43, 437
- Saito, A., Tsukawa, T., Otsuka, Y., Nishioka, M., Iemori, T., Matsumura, M., Saito, S., Chen, C. H., Goi, Y., Choosakul, N. “Acoustic Resonance and Plasma Depletion Detected by GPS Total Electron Content Observation after the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake”, 2011, Earth Planets Space, 63, 863
- Sato, N., Kadokura, A., Ebihara, Y., Deguchi, H., Saemundsson, T. “Tracing Geomagnetic Conjugate Points Using Exceptionally Similar Synchronous Auroras”, 2005, GRL, 32, L17109
- Shibata, K. et al. “Chromospheric Anemone Jets as Evidence of Ubiquitous Reconnection”, 2007, Science, 318, 1591
- Suematsu, Y., Shibata, K., Nishikawa, T., Kitai, R. “Numerical Hydrodynamics of the Jet Phenomena in the Solar Atmosphere I – Spicules”, 1982, Sol. Phys., 75, 99
- Terasawa, T., Shibata, K., Scholer, M. “Comparative Study of Flares and Substorms”, 2000, Adv. Space. Res., 26, 573
- Yokoyama, T., Shibata, K. “A Two-Dimensional Magnetohydrodynamic Simulation of Chromospheric Evaporation in a Solar Flare Based on a Magnetic Reconnection Model”, 1998, ApJ, 494, L113