惑星電離圏フィードバック過程を考慮したMHDシミュレーションによるオーロラアーク構造の理解

平木 康隆 [1]
[1] 京大・エネ科

Studies on auroral arc structure formation with simplified MHD model including feedback processes of planetary ionosphere

Yasutaka Hiraki[1]
[1] Kyoto Univ.

We perform a three-dimensional MHD simulation in order to understand what controls the auroral arc structure and latitudinal-scale of oval, and how the transition region of arc and diffuse auroras at low latitude is balanced. These are fundamental problems in ionosphere-magnetosphere coupling region. For the progress our understanding in the spatial scale of oval we try to construct a simple model where an active and non-linear response of planetary ionosphere is treated. In contrast with a large-scale simulation to focus global feature of the system, this kind of modeling seems to be essential to focus fundamental physical processes. Watanabe et al. (1993) showed that in a quiet phase of Earth's magnetosphere a small-scale striation structure of arc is formed from a stable oval due to saturation in electron density through recombination process; it means that the closing scale of positive and negative field-aligned currents is very small. They also proposed that the inverted-V shaped resistivity is formed self-consistently through ion-acoustic instability due to strong field-aligned current and it affects largely the ionospheric potential pattern. These are defined as the feedback processes of planetary ionosphere.

We also try to compare characteristics of the feedback process and the arc structure in several planets as Earth and Jupiter. We can see the stable and co-rotated oval with some striation from observed images of auroral ultra-violet emission by the Hubble Space Telescope (Grodent et al., 2003) and of night-side visible emission by the Galileo spacecraft (Vasavada et al., 1999). The co-rotation of the structure is concerned with the relative position of its formation in a corresponding magnetosphere and is also one of fundamental problems. Nichols and Cowley (2004) proposed a simple one-fluid plasma model for Jupiter's auroral oval formation. They treat the conductivity change due to ionization caused by precipitated hot electrons as a feedback process. However, self-consistency of the model seems to be too weak to discuss the oval scale because of some constraints as axisymmetry and neglect of perturbed magnetic field.

Our purpose is to investigate dependence of the spatial scale of auroral arc structure (or oval) on several parameters characterizing ionosphere and magnetosphere by performing a similar MHD simulation as Watanabe et al. (1993). We neglect the curvature of magnetic field line and spherical morphology for simplicity and use the Cartesian coordinates with x and y being longitude and latitude, z direction being field-aligned; boundaries of z direction correspond to ionosphere and magnetic equator. Assuming the velocity and magnetic fields at magnetic equator we solve the equation of one-fluid incompressible plasma motion with resistivity and the induction equation. At ionospheric boundary the velocity field is assumed to be a combination of $E*B$ drift and collisional drift (Pedersen and Hall mobilities); the height-integrated continuity equation including recombination and ionization processes and the charge conservation equation are solved under the field. For application to Jupiter's case we firstly change the inherent magnetic field magnitude from Earth's case but consider possibility of several improvements of the formulation.

オーロラのアーク構造やオーバルの緯度方向のスケールは何によって規定されているのか、また、低緯度でのアークとディフューズ領域の境界ではどのように折り合いがついているのか、という単純だが根本的な問題を理解するべく、３次元 MHD シミュレーションを試みた。磁気圏電離圏結合が謳われる今日においても、“ 磁気圏側が仕掛け人で電離圏側はパッシブ ”という直感は大きな根を生やしているように思われる。我々の問題意識は、オーバルスケールの定性的理解をさらに深めることであり、そのために電離圏の“ アクティブで非線型な ”応答に焦点をあてたシンプルなモデル化を試みる。全体のシステムとしての理解や個々の観測の再現に注目する大規模シミュレーションと対極にある、このようなピンポイントの物理過程に注目する試みにも幾分意義があるはずである。Watanabe et al. (1993) は、電子-イオン再結合過程を通して電子密度がサチュレートすることによって、地球の静穏時の磁気圏対流によって与えられる安定なオーバルがより小さなアーク構造に砕けることを示した；つまり、正負の沿磁力線電流がより小さなスケールで閉じる。また、強い沿磁力線電流が流れるところで、イオン音波の不安定化を通して逆Ｖ型抵抗がセルフコンシステントに形成され、電離圏の電場のパターンに大きな影響を与えることも提案した。これらは惑星電離圏のもつフィードバック過程と位置づけられている。

我々のもう一つの問題意識は、比較惑星的なものである。ハッブル宇宙望遠鏡による紫外光オーロラ観測（Grodent et al. (2003)）やガリレオ探査機による夜側可視光オーロラ観測（Vasavada et al. (1999)）から、木星でも長時間安定なオーバルが維持され、かつ共回転していることがわかっている；いくつかのストリエートした構造も見られる。構造の共回転も、オーバル形成の相対的な位置に関わる重要な問題である。Nichols and Cowley (2004) によって、フィードバック過程として降下電子によるイオン化を考慮したシンプルな一流体プラズマモデルを用いて、オーバル形成問題が扱われている。しかしながら、軸対称性の仮定や摂動磁場の無視という強い要請のため、オーバルのスケールを議論する上での

セルフコンシステンシィが不十分なように思われる。

本研究の目的は、Watanabe et al. (1993) と同様な MHD シミュレーションを行い、オーロラアーク構造の空間スケールの惑星電離圏・磁気圏パラメータに対する依存性を調べることである。用いる MHD モデルの概要を説明する。解く系は、先行研究では球座標で緯度範囲を限定し、動径方向の外側境界に磁気赤道面を想定した系が設定されたが、ここではまず簡単のため直交座標系を設定する。つまり、磁力線の曲りだけでなく空間の曲りも本質的でないとみなした。解く方程式は、一流体運動方程式と誘導方程式で、抵抗を考慮し、流れの非圧縮性を仮定した。電離圏と磁気赤道を磁力線方向の境界面として設定し、磁気圏の流れ場はこちらから陽に与える。電離圏では、流れ場は$E*B$ドリフトと易動度で表現し、この下で高度積分された連続の式（再結合とイオン化を含む）と電流保存式を解く。強い磁場をもつ木星に適用する際に、いくつかの点でモデルの改良も検討したいと考えている。