オーロラ爆発のしくみ*

Mechanism of Auroral Breakup

海老原 祐 輔**
EBIHARA Yusuke

Abstract Auroral breakup is the term used to describe a transient phenomenon in which brightness of aurora suddenly increases and the bright aurora expands rapidly. When the auroral breakup takes place, the magnetosphere and the ionosphere are highly disturbed. The ultimate cause of the auroral breakup is the Sun, but intermediate processes between them remained unsettled. The global magnetohydrodynamics (MHD) simulation developed by Prof. Emer. Takashi Tanaka is shown to reproduce well the sequence of the auroral breakup. Here, we show the intermediate processes leading to the auroral breakup on the basis of the results obtained by the MHD simulation.

Keywords: Auroral breakup, Space plasma physics, Magnetosphere, Ionosphere, Substorm, Magnetohydrodynamics simulation

1. 緒 言

明るいオーロラが狭い領域に突然現れ、一気に拡大するオーロラ爆発という現象がある。Fig. 1 は人工衛星が撮影したオーロラ爆発で、極を取り囲むように光るオーロラ・オーバルの一部が明るくなり、拡大していく様子がわかる。オーロラ爆発は数十分から 1 時間程度続き、多いときには一日のうちに十回程度おこることもある。

オーロラ爆発の究極の原因は太陽にある。太陽

から放出された高速のプラズマ流（太陽風）が双極子型の強い固有磁場と濃い大気を持つ地球に吹き付けており、その状況は Fig. 2 のように抽象化することができる。一見するとシンプルだが、オーロラ爆発という突発現象がこの状況のもとでおこるのである。その発生原因については良くわかっておらず、長らく議論の的となっている。

その難しさの要因の一つとして、人工衛星観測や地上観測の対象領域が限られていることがあ

Fig. 1 Evolution of auroral breakup as seen from space. Time goes from left to right. (Courtesy of NASA)

* 2019.7.31 受付

** 京大大学生存圏研究所 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄

TEL: (0774)38-3844 FAX: (0774)31-8463 E-mail: ebihara@rish.kyoto-u.ac.jp

げられる。個々のオーロラ爆発は変則的で多様性があるため、多くの事例を寄せ集めて全体像を帰納的に描くことは困難である。一方、高性能な計算機とシミュレーションの高度化によって磁気圏を詳細に再現できるようになりつつある。中でも田中高史九州大学名誉教授が開発した最新の電磁流体シミュレーション (REPPU) はオーロラ爆発の発達を詳細に再現できるという特徴を持つ[1]。Fig. 3 はシミュレーションで求めたオーロラ爆発の例で、現実のオーロラ爆発をよく再現していることがわかる。再現性が高いということはオーロラ爆発に至るまでの過程を演繹的に調べることが可能になったことを意味する。ここではシミュレーションの結果から導かれたオーロラ爆発の発生メカニズムについて紹介する。

Fig. 2 General relationship between Sun and Earth.

2. オーロラとサブストーム

はじめにオーロラについて簡単に説明したい。20 世紀のはじめ、ノルウェーの研究者ステルマーはオーロラを多地点で同時に撮影し、オーロラは 90 キロメートル以上で光ることを割り出した。中には高さ 1,100 キロメートルにも達する背の高いオーロラもあると報告している。オーロラが光る領域は熱圏と呼ばれている。大気の一部が電離していることから電離圏とも呼ばれる。気圧は地上の数百万分の一以下と希薄で、温度は数千度と高温である。熱圏の外側には宇宙空間が広がって

いることから、オーロラは地球大気と宇宙の境でおこる現象といえよう。

オーロラは宇宙空間から降り込む粒子からエネルギーをもらった大気中の原子や分子が放つ光の集合である。大気が自ら光を放つ発光現象であるという点で雷に似ている。様々な色があるという点で虹と似ているが、オーロラのスペクトルは離散的であり、連続スペクトルを持つ虹とは全く異なる。オーロラの代表的な色は緑で、その次に赤、紫が続く。テレビで映し出されるオーロラのほとんどが緑である。緑と赤のオーロラは酸素原子が放つ光であり、紫のオーロラは窒素分子イオンの光である。オーロラが激しく舞うときにはオーロラのカーテンの裾がピンク色に見えることもある。これは窒素分子が放つ赤と青の光が混ざるためである。

宇宙からやってくる粒子は大気との衝突によってエネルギーを失いながら降りてくる。もし、降り込んでくる粒子に十分なエネルギーがなければ途中でエネルギーを失い、先に進めなくなる。緑のオーロラが見えるということは、比較的能量が高い粒子が低高度まで降り込んでいることを意味する。

明瞭な形を持つ明るいオーロラはディスクリット・オーロラと呼ばれている。ディスクリット・オーロラの原因は地球向きに加速された電子だと考えられている。その仕組みは一昔前のテレビで用いられていたブラウン管に似ている。ブラウン管は蛍光物質が塗られた面に向かって電子銃から電子を照射し像を写し出す装置である。同じようにディスクリット・オーロラの上空には天然の電子銃があり、大気というスクリーンに向かって電子を放出していると考えられている。オーロラの形は電子銃の配置で決まり、オーロラの明るさは天然の電子銃から放射される電子の総量

Fig. 3 Evolution of auroral breakup simulated by global magnetohydrodynamics simulation. Time goes from left to right.

におよそ比例する。ゆらめくオーロラはモノが動いているのではなく、電子銃がゆらゆらと動いているのである。もちろん実際の宇宙空間には電子銃のような機械仕掛けの装置はない。地表から数千キロメートルから数万キロメートルの高さで電子銃と同じように静電的に電子を加速する仕掛けが自然に作られているのである。そのような状態はとても不安定で壊れやすいものの、なぜその機能が長時間にわたって維持できるのかについてはよくわかっていない。

Fig. 1 のように宇宙から地球を見るとオーロラが冠のように極を取り囲んでいることがわかる。この冠のことをオーロラ・オーバルと呼ぶ。オーロラ・オーバルは北半球と南半球にあり、南北ではほぼ対称である。太陽風の状態によってオーロラ・オーバルは広がったり縮んだりするが、消えることはないようである。

オーロラ爆発を含む一連の過程にはある一定のパターンがあることが 1960 年代にわかり、サブストームと名付けられた[2]。現在では「成長相」「拡大相」「回復相」の順でサブストームが発達すると理解されている。成長相では東西に延びるカーテン状の淡いオーロラ（オーロラ・アーク）がゆっくりと南側（赤道方向）に移動する。このとき極域の地磁気もゆっくりと変動を始める。やがてオーロラ・アークの一部が突然明るく光り出し、明るいオーロラが広がる。オーロラ爆発であり、拡大相のはじまりを告げる。オーロラ爆発がおこると明るいオーロラが激しく舞い、カーテンの裾がピンク色に染まることもある。様々なオーロラのなかで最も華麗で、オーロラ現象のハイライトと言えよう。このとき宇宙空間では大変動がおきている。磁気圏では引き延ばされていた磁力線が急に縮み、電離圏ではジェット電流が流れ 10^{11} ワットものエネルギーが消費される。回復相にはいるとオーロラは次第に暗くなり、準周期的に明滅する脈動オーロラが現れる。

オーロラ爆発は拡大相を特徴づけるもので、そのはじまりは突発的である。オーロラ爆発のトリガー機構としていくつかの説が提唱されているが、未だ決着がついていない。トリガー機構だけでなく、なぜ明るいオーロラが拡大するのか、膨大なエネルギーはどのように運ばれてくるのか、という問いにも十分答えられていなかった。

2. シミュレーション

2.1 基礎方程式と境界条件

本稿ではグローバル電磁流体シミュレーション REPPU [1]の結果を紹介する。電磁流体シミュレーションの基礎方程式は以下のとおりである。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left[\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} \right] = -\nabla P + \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{V} \times \mathbf{B}) \quad (3)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \nabla \cdot [(U + p) \mathbf{V}] = 0 \quad (4)$$

未知数は ρ (質量密度)、 $\mathbf{V}$ (速度)、 $\mathbf{B}$ (磁場)、 U (エネルギー) の 8 つである。ただし、 p はプラズマの圧力、 $\mathbf{J}$ は電流密度、 U は全エネルギーである。

$$\mathbf{J} = \frac{1}{\mu_0} \nabla \times \mathbf{B} \quad (5)$$

$$U = \frac{p}{\gamma - 1} + \frac{\rho V^2}{2} + \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (6)$$

ここで、 μ_0 は真空の透磁率、 γ はポリトロピック係数である ($=5/3$)。

シミュレーションの外側境界には太陽風に見立てた一様流をおく。シミュレーションの内側境界では以下のように電離圏と電氣的に接続する。

1. 磁気圏内側境界におけるプラズマの密度、温度、電流を電離圏に見立てた球面上に投影する。
2. 投影された密度、温度、電流をもとに電離圏の電気伝導度を与える。電磁流体シミュレーションでは電子の運動を解くことができないので、磁気圏から電離圏に降下する粒子による超高層大気の電離を模擬する。
3. 磁気圏から電離圏に流れる電流が電離圏を水平方向に流れる電流によって閉じるために必要な電場ポテンシャルを計算する。電離圏電流が流れるのは数十キロメートルの薄い層に限られることから薄層近似を行う。高さ方向に積分した電気伝導度テンソルを Σ 、磁力線方向の電流（沿磁力線電流）を $J_{\parallel}$ 、電場ポテンシャルを Φ とすると、電流の連続性を担保する式 $\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$ から次式が得られる。この楕円型

偏微分方程式を解き、 Φ を求める。

$$\nabla \cdot (\Sigma \nabla \Phi) = J_{\parallel} \quad (7)$$

4. 得られた電場を磁気圏内側境界に投影し、電場に対応するプラズマの速度を内側境界として与える。

以上を繰り返すことで磁気圏と電離圏の電氣的な結合を実現している。

2.2 沿磁力線電流の起源

オーロラは磁気圏から電離圏に向かって降り注ぐ粒子によって作られる。とくに明るいオーロラは（上向きの）準静電的によって（下向きに）加速された電子によって作られていることが知られている。上向きの準静電場は上向きの沿磁力線電流領域に埋め込まれていることが観測的に分かっている。つまり、なぜオーロラ爆発がおこるのかという問いは、なぜ上向きの沿磁力線電流（ $J_{\parallel}$ ）が局所的に急増するのかという問いに置き換えることができる。

沿磁力線電流がなぜ急増するのだろうか。この問いに答えるため、電磁気学の基礎方程式であるアンペールとファラデーの両法則に立ち返った[3, 4]。両法則を組み合わせると沿磁力線の時間変化を表す以下の式が導かれる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial J_{\parallel}}{\partial t} &= -\frac{1}{\mu_0} (\nabla \times \nabla \times \mathbf{E})_{\parallel}, \\ &\equiv \frac{1}{\mu_0} \mathbf{B} \cdot \nabla \Omega_{\parallel}. \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、 $\mathbf{E}$ は電場、 $\Omega_{\parallel}$ は次式で定義される磁力線方向の渦度である。

$$\Omega_{\parallel} = \frac{\mathbf{B}}{B} \cdot (\nabla \times \mathbf{V}) \quad (9)$$

(8)式は渦度が磁力線に沿って勾配があるときに沿磁力線電流が発生することを意味する。渦度によって生じる電荷分離を解消するために電流が磁力線方向に流れると解釈することもできる。

Fig. 4 は一本の磁力線まわりの渦度と沿磁力線電流の関係を示している。(a)は磁気圏側（下側）からプラズマに対して渦度を与えた場合、(b)は電離圏側（上側）から渦度を与えた場合である。渦度の向きは異なるが渦度の勾配はどちらも下向きである。(8)式に従うとどちらも磁力線とは反対向きの沿磁力線電流が流れることになる。

Fig. 4 Generation of field-aligned current. (a) The magnetic flux tube is twisted from the magnetosphere (high altitude), and (b) the flux tube is twisted from the ionosphere (low altitude). In both cases, the field-aligned current flowing upward is generated.

沿磁力線電流には磁場エネルギーを磁力線に沿って運ぶという重要な役割がある。そのエネルギーはプラズマがローレンツ力（ $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ ）に対して仕事をすることで与えられる。すなわち、次式が示すように $\mathbf{J} \cdot \mathbf{E} < 0$ のときプラズマの運動エネルギーが磁場のエネルギーに変換されることになる。これはまさしくダイナモである。

$$\mathbf{J} \cdot \mathbf{E} = \mathbf{V} \cdot (\mathbf{J} \times \mathbf{B}) \quad (10)$$

沿磁力線電流が生成する現場では $\mathbf{J} \cdot \mathbf{E} < 0$ であるが、逆は必ずしも真ではない。

3. サブストームの発達過程

3.1 磁気圏の基本構造

太陽からは水素イオンを主成分とする太陽風が常に吹き付けており、地球から伸びる磁力線は Fig. 5 に示すように太陽とは反対側に流されていく。地球の固有磁場が支配する領域を磁気圏と呼び、その外側は太陽の磁場が支配する太陽圏である。磁気圏と太陽圏の境界を磁気圏境界と呼ぶ。太陽風は Fig. 5 の破線（V 曲線）のように磁気圏を避けるように流れるため、太陽風の運動エネルギーは基本的には磁気圏に入力できない。太陽風は超音速の流れであるため、磁気圏境界の前面に弓形の衝撃波（bow shock）が現れる。また、太陽か

らは惑星間空間磁場 (Interplanetary Magnetic Field) と呼ばれる磁場も引き出されている。

Fig. 5 Structure of the magnetosphere, and flow of magnetic energy (S-curve, solid and red line) and kinetic energy (V-curve, dashed and blue line). The Sun is to the left.

3.2 成長相

南向きの IMF (Fig. 5 の $-z$ 方向の磁場) が到来すると昼側の磁気圏境界で磁力線の再結合がおこる。すると IMF が持つ磁場のエネルギー (Fig. 5 の S 曲線) が磁気圏に取り込まれていく。また、太陽風の運動エネルギー (Fig. 5 の V 曲線) の一部は磁気圏境界付近で磁場エネルギーに変換され、そのエネルギーは磁気圏に入ることが可能となる[5]。このように運動エネルギーから磁場エネルギーに姿を変えて磁気圏に流入するエネルギーは大きな割合を占めている[6]。磁気圏境界付近ではこの変換に付随した強い渦度が発生し、巨大な沿磁力線電流が流れ、磁気圏を循環するようなプラズマ流を駆動する。この磁気圏規模のプラズマの流れが成長相を特徴づけるオーロラ (上向きの沿磁力線電流) の原因となる[7]。

3.3 拡大相開始

拡大相は東西に伸びるオーロラ・アークの一部が急に明るくなることで始まる[2]。電磁流体シミュレーションでは、その引き金となっていたのは太陽とは反対側 (夜側) に引き延ばされた磁力線

の再結合であった[1] (Fig. 5 の near-Earth reconnection)。磁気再結合がおこると引き延ばされていた磁力線が磁気張力によって急速に縮もうとする。プラズマの流れ方も大きく変わる。その流れは Fig. 6 に示したとおり二種類に分けられる。一つはローブ (lobe) と呼ばれる磁力線が開いた領域から磁気赤道面を経由して地球に向かう流れ (equatorial path) で、もう一つはローブから直接地球に向かう流れ (off-equatorial path) である。どちらの流れも地球に近づくとき地球磁場とプラズマの圧力によって遮られ、プラズマの圧力が上昇する。Fig. 6 の濃い領域はプラズマ圧力が高いところを示している。

Fig. 6 Stream lines of plasma in the meridional plane at expansion onset [8]. The shaded region stands for the region where the plasma pressure is high.

Fig. 7 は電磁流体シミュレーションに基づき描いたプラズマの流れ (太い破線) と電流 (太い実線) を示している[8]。磁気再結合 (near-Earth reconnection) が起きている領域から赤道面に沿って地球に向かう流れ (equatorial path) と、ローブから直接地球方向に進む流れ (off-equatorial path) が描かれている。前者は数百 km/s に達し、オーロラ爆発がおこるときにはよく観測されている。この高速流は地球に近づくとき減速し、西または東に向きを変える。このとき強い渦度 $\Omega_{\parallel}$ (shear B) が生じ、沿磁力線電流が作られる。従来、この沿磁力線電流が地球に伝わることでオーロラ爆発がはじまると考えられていたが[9]、シミュレーションの結果を見るとそう単純ではないようである。この領域ではプラズマは強い圧縮を受け、必然的にプラズマの圧力が高まる。高圧領域の周囲には反磁性電流という磁力線に垂直方向の電流が流れ、沿磁力線電流を含むすべての電流ベクトルを重ね合わせて電流線を描くと Fig. 7 の実線

のようになる。Shear B に付随したこの電流線は地球には届かない。赤道面付近で沿磁力線電流は反磁性電流と接続してしまうことが原因であり、またアルペン波としても電離圏に伝わりにくい。

一方、磁気赤道面から離れたところでは背景磁場（地球磁場）が強く、反磁性電流は相対的に小さい。そのため、後者の流れ (off-equatorial path, shear A) に伴って作られる沿磁力線電流は地球に到達することが可能である。シミュレーションでは、ここで作られた上向きの沿磁力線電流が地球に到達した瞬間にオーロラ爆発が始まっていた。つまり、磁気再結合をきっかけとしてプラズマの流れ方が 3 次元的に変わり、 Ω_i の空間勾配が現れ、Fig. 4 の左に示されているような形で沿磁力線電流が発生していた。

Fig. 7 Plasma flow (dashed line) and current line (solid line) at expansion onset [8].

3.4 拡大相

拡大相のオーロラの特徴は明るいオーロラが主に西向きに進む「サージ」である。電磁流体シミュレーションの結果を解析すると、以下の連鎖が起きていることが分かった。①前節で説明したように、地球近傍でおこる磁気再結合をきっかけとして shear A が発生し、これに付随した沿磁力線電流によってオーロラの一部が明るくなる。②電離圏では中性気体との衝突が顕著であるため水平方向に電流が流れる。その電流には電場方向に流れる電流（ピダーセン電流）と電場に対して

垂直方向に流れる電流（ホール電流）がある。明るいオーロラの中では周囲と比べて電気伝導度が高く、強いホール電流が流れる。③明るいオーロラの先端部分ではホール電流が溢れ、余剰な電荷がたまる ($\nabla \cdot \mathbf{E} > 0$)。④明るいオーロラの後端部分ではホール電流が不足し、電荷が足りない ($\nabla \cdot \mathbf{E} < 0$)。

Fig. 8 (a) Field-aligned current and (b) electric conductivity in the ionosphere. The contour lines indicate the ionospheric electric potential. The solid (yellow) contour represents the region where $\nabla \cdot \mathbf{E} > 0$, and dotted (red) contour represents the region where $\nabla \cdot \mathbf{E} < 0$ [4].

Fig. 8 はサージ付近の沿磁力線電流と電気伝導度を示している。明るい実線のコンターは $\nabla \cdot \mathbf{E} > 0$ の領域を、明るい破線のコンターは $\nabla \cdot \mathbf{E} < 0$ の領域を表しており、サージのやや左上（北西側）の領域では電荷が余り、サージのやや右下（南東側）の領域では電荷が不足していることがわかる。⑤電荷が余るということは、発散型の電場 ($\nabla \cdot \mathbf{E} > 0$) が周囲に生じることを意味する。⑥発散型の電場が磁気圏に伝わるとプラズマが動く。⑦この動きは Fig. 4 の右に示すように電離圏側から渦度を作ることに相当し、上向きの沿磁力線電流をさらに強める。逆の過程が明るいオーロラの後端側でおこる。すなわち、電荷が不足することで収束型の電場 ($\nabla \cdot \mathbf{E} < 0$) が生じ、これに対応する渦度によって上向きの沿磁力線電流が減少する。つまり、上向きの沿磁力線電流が弱まり、オーロラが光らなくなる。上記の①から⑦までの過程を

繰り返すことでサージは左上（北東）方向、つまりホール電流の方向に進むことになる。Fig. 8の黒色のコンターは電場ポテンシャルを示している。電荷の過不足によって背景の電場ポテンシャルの分布は大きくゆがみ、ホール電流の向きは西向きに卓越することになる。したがって、サージは西向きに進む傾向がある。

サージが現れるためには次の二つの条件が必要のようである[10]。一つ目は電離圏電気伝導度の強い空間勾配である。磁気圏の尾部で磁気再結合がおこると3.4節で説明したようにオーロラが一旦明るくなり、この条件を満たすことができる。二つ目は強いホール電流で、電離圏の電場が十分強ければ満たされる。惑星間空間磁場が南を向くと磁気圏の尾部で磁気再結合がおこりやすくなり、電離圏の電場が強くなる。サブストームの発生条件として南向きの惑星間空間磁場が経験的に知られているが、その理由は上記で説明することができる。

3.5 太陽風から電離圏に至るエネルギーの流れ

オーロラ爆発がおこると電離圏で 10^{11} ワットものエネルギーがジュール加熱として消費され

る[11]。その究極のエネルギー源である太陽からどのようにエネルギーが運ばれてくるのだろうか。Fig. 9にその流れを示す[12]。白く太い線は次式で定義されるポインティング・ベクトル $\mathbf{S}$ の流線(S 曲線)である。

$$\mathbf{S} = \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{\mu_0} \quad (11)$$

電磁流体近似では低周波の現象を扱うため、電場のエネルギーは無視できる。すなわち、ポインティング・ベクトルは磁場エネルギーの流れを示す。等値面で示されているはダイナモ領域 ($\mathbf{J} \cdot \mathbf{E} < 0$) で、磁場エネルギーが生成されている現場である。S 曲線は太陽風から磁気圏に流入しているが、このとき太陽風の運動エネルギーが磁場エネルギーに変換され、IMF が持ち込む磁場エネルギーと合流する。磁気圏に流入した S 曲線は大きく螺旋を描きながら地球に向かう。螺旋を描きながら地球に向かうのは磁気圏規模の巨大な沿磁力線電流が流れているためである。成長相 (Fig. 9 左) ではこのようにして太陽風のエネルギーが地球に持ち込まれ、東西方向に伸びる弱いオーロラ

Fig. 9 Integral curve of the Poynting vector $\mathbf{S}$ (thick, white tube) and magnetic field line (thin, blue tube) just before the expansion onset (left) and during the expansion onset (right) [12].

や比較的緩慢な地磁気変化を作り出す。夜側で磁気再結合がおこるともう一つダイナモが夜側に現れ (Fig. 9 右)、これがオーロラ爆発を促す強い局所的な沿磁力線電流を生み出している[3]。

4. まとめ

電磁流体シミュレーションによってオーロラ・サブストームの特徴を概ね再現できるようになった。オーロラ爆発の発達は電流系の発達として理解することができ、それを担うダイナモと渦度の時空間分布と原因も分かってきた。また、完全電離プラズマである磁気圏と中性大気との衝突が支配的な電離圏という性質の異なる媒質が電気的に結合することでオーロラ爆発を特徴づけるサージが現れることも示された。しかし、電磁流体近似には限界があり、キロメートル規模の微細な構造をもつオーロラや、明るいオーロラの直接の原因となる電子の加速過程との関係についてはよく分かっていない。電磁流体スケールの現象と電子スケールの現象の結合過程は今後の重要な研究課題の一つである。

謝 辞

田中高史九州大学名誉教授および西田篤弘宇宙科学研究所名誉教授から多くの助言をいただいた。京都大学生存圏研究所ミッション研究3の支援をいただいた。京都大学生存圏研究所の先端電波科学計算機実験装置 (A-KDK) を利用した。

参考文献

- [1] Tanaka, T., Substorm Auroral Dynamics Reproduced by Advanced Global Magnetosphere-Ionosphere (M-I) Coupling Simulation, in *Auroral Dynamics and Space Weather*, Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc, 177–190 (2015).
- [2] Akasofu, S.-I., The Development of the Auroral Substorm, *Planet. Space Sci.*, Vol. 12(4), 273–282 (1964).
- [3] Ebihara, Y. and Tanaka, T., Substorm Simulation: Insight into the Mechanisms of Initial Brightening, *J. Geophys. Res. Sp. Phys.*, Vol. 120 (9), 7270–7288 (2015).
- [4] Ebihara, Y. and Tanaka, T., Substorm Simulation: Formation of Westward Traveling Surge, *J. Geophys. Res. Sp. Phys.*, Vol. 120(12), 10466–10484 (2015).
- [5] Tanaka, T., Generation Mechanisms for Magnetosphere-Ionosphere Current Systems Deduced from a Three-Dimensional MHD Simulation of the Solar Wind-Magnetosphere-Ionosphere Coupling Processes, *J. Geophys. Res.*, Vol. 100(A7), 12057–12074 (1995).
- [6] Ebihara, Y., Tanaka, T. and Kamiyoshikawa, N., New Diagnosis for Energy Flow from Solar Wind to Ionosphere During Substorm: Global MHD Simulation, *J. Geophys. Res. Sp. Phys.*, Vol. 124(1), 360–378 (2019).
- [7] Ebihara, Y. and Tanaka, T., Substorm Simulation: Quiet and N-S arcs Preceding Auroral Breakup, *J. Geophys. Res. Sp. Phys.*, Vol. 121(2), 1201–1218 (2016).
- [8] Ebihara, Y., Simulation Study of Near-Earth Space Disturbances: 2. Auroral Substorms, *Prog. Earth Planet. Sci.*, Vol. 6:24 (2019).
- [9] Keiling, A., Angelopoulos, V., Runov, A., Weygand, J., Apatenkov, S. V., Mende, S., McFadden, J., Larson, D., Amm, O., Glassmeier, K. - H., and Auster, H. U., Substorm Current Wedge Driven by Plasma flow Vortices: THEMIS Observations, *J. Geophys. Res. Sp. Phys.*, Vol. 114(5), A00C22 (2009).
- [10] Ebihara, Y. and Tanaka, T., Why does Substorm-Associated Auroral Surge Travel Westward?, *Plasma Phys. Control. Fusion*, Vol. 60(1), 014024 (2018).
- [11] Sun, W., Ahn, B. H. and Akasofu, S. I., The Global Joule Heat Production Rate and the AE index, *Planet. Space Sci.*, Vol. 33(3), 279–281 (1985).
- [12] Ebihara, Y. and Tanaka, T., Energy Flow Exciting Field-Aligned Current at Substorm Expansion Onset, *J. Geophys. Res. Sp. Phys.*, Vol. 122(12), 12288–12309 (2017).