

## オーロラ嵐を駆動する発電機とエネルギーの源

海老原祐輔（京都大学生存圏研究所）

### 1. オーロラ爆発

オーロラは超高層大気の発光現象である。宇宙から降り注ぐ粒子によって超高層大気を構成する原子や分子が励起し、基底状態に戻ろうとするとときに光を放つ。カーテン状のオーロラをはじめ、肉眼で見ることができるオーロラの殆どは宇宙から降り注ぐ電子によるものである。オーロラを代表する緑と赤の光はともに超高層大気に含まれる酸素原子が放つ光で、緑のオーロラは高さ 100 km 付近で、赤のオーロラは高さ数百 km で光る。図 1 の写真を見ると高さによって色が異なることが分かる。



図 1：地上から見たオーロラ（筆者撮影）

オーロラが突然明るくなり、明るいオーロラ（サージ）が急速に広がる現象がある（図 2）。オーロラ爆発(auroral breakup)と呼ばれ、一連の擾乱をサブストーム(オーロラ嵐)と呼ぶ。サブストームは成長相、拡大相、回復相の順で進行し、そのハイライトがオーロラ爆発である。オーロラ爆発がおこると高さ 100 キロメートル付近の電離圏ではジェット電流が流れ、数千億ワットもの膨大なエネルギーが消費される。なぜオーロラが突然明るく光り始めるのだろうか？なぜサージは起こるのだろうか？膨大なエネルギーはどこからどのように運ばれてくるのだろうか？これらは宇宙空間物理分野における大きな謎となっている。私たちはスーパーコンピュータを使ったシミュレーションを用い、謎解きに挑んでいる。

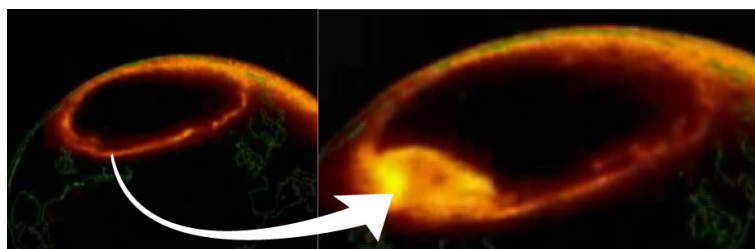


図 2：宇宙から見たオーロラ爆発。オーロラ・オーバルが輪のように北極を取り囲み、真夜中付近で明るいオーロラ（サージ）が拡大している。太陽光の影響を受けているため、右上の領域では明るくなっている。(NASA, アイオワ大学提供)

## 2. 電磁流体シミュレーション

田中高史九州大学名誉教授が開発したグローバル電磁流体シミュレーション[1]はオーロラ・サブストームの発達をよく再現することができる。その一例を図3に示す。北極を取り囲むオーロラ・オーバルの一部から明るいオーロラが西向きに広がるというオーロラ爆発の特徴をよく再現している。このシミュレーションは、サブストームの成長相から回復相に至るまでオーロラの大規模構造や地磁気変化を良く再現するばかりでなく、人工衛星で観測されるような磁気圏変動も良く再現することができる。シミュレーションで再現できたということはサブストームを理解したことと同然と思われるかもしれない。しかし、数千万から数億もの格子に散在する8つの物理量（密度、圧力、磁場ベクトル、速度ベクトル）の変遷を読み取り、分かりやすい言葉で理解する作業は困難を極める。私たちは現象の根幹をなす軸を設定し、シミュレーション結果の解析を進めた。ここではそうして得られたオーロラ・サブストームの発達過程の姿を紹介したい。

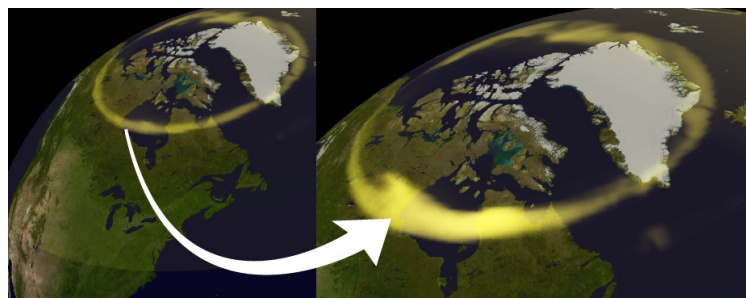


図3：電磁流体シミュレーションで再現したオーロラ爆発。

## 3. なぜオーロラが突然明るく光り始めるのか？（サブストーム拡大相開始の問題）

明るいオーロラは超高層大気に大量の電子が降り注ぐことが原因である。電子が磁力線に沿って下向きに降り込むということは磁力線に沿って上向きに電流が流れていることを意味する。従って、「なぜオーロラが突然明るく光り始めるのか」という問いは「なぜ上向きの電流（以下、上向きの沿磁力線電流と呼ぶ）が突然流れ始めるのか」という問いに置き換えることができる。従来、電流の連続性に着目して沿磁力線電流の発生を理解しようという研究が主流であった。つまり、電流のつなぎ替えで理解しようというアプローチである。しかし、電流の連続性はいわば拘束条件であって沿磁力線電流が生じる理由を説明したことにはならない。そこで私たちは電磁気学の基本則であるアンペールの法則とファラデーの法則に立ち返り、沿磁力線電流が生成する場所を調べた。結果を図4に示す。ある時、地球から見て夜側の磁気圏で磁力線が再結合を始める。すると図の上部からやってくるプラズマの流れがプラズマ圧力の高い領域（白い面）で向きを変え、東および西向きに進む。ここで鋭い剪断流（シア）が現れる。荷電粒子の集合であるプラズマの剪断流は電荷の分離を生み、沿磁力線電流を作ることができる。ここで発生した沿磁力線電流が地球に到達した

瞬間にオーロラが突然増光すると考えている[2]。従来、磁気赤道面で発生した沿磁力線電流が突然増光の原因だと考えられていたが、シミュレーションによると磁気赤道面で発生した沿磁力線電流は途中で別の電流と接続してしまい、地球まで到達することは難しいようである[2], [3]。

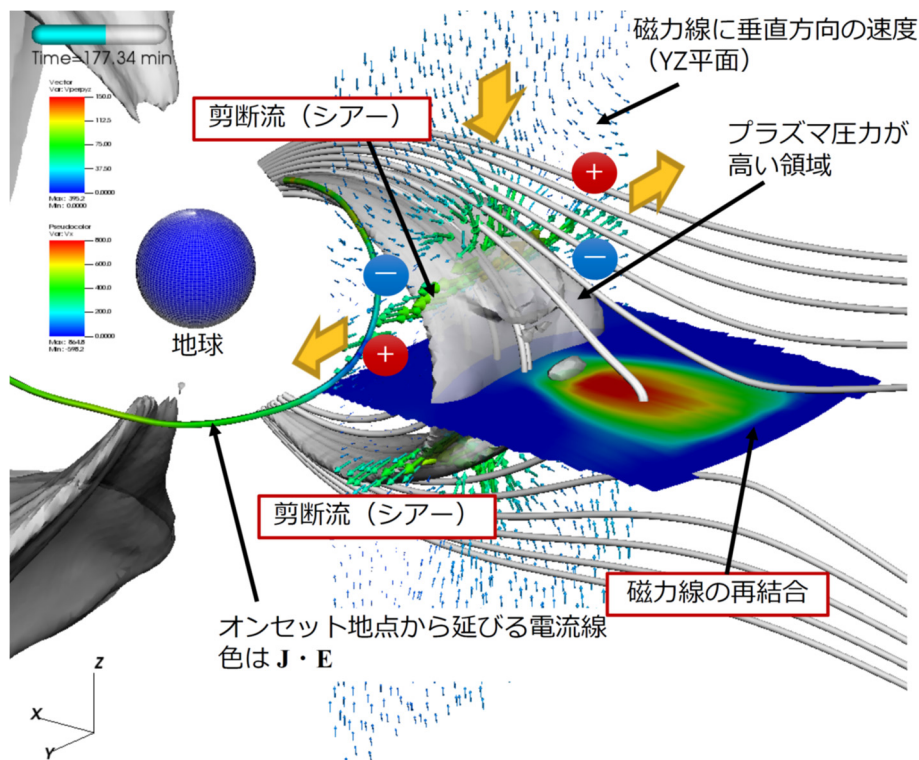


図 4：オーロラ爆発発生時の磁気圏構造。白い線は磁力線、白い面はプラズマ圧力が高い領域、矢印はプラズマの速度（磁力線に垂直方向）を示している。色つきの面は磁気赤道面で、色は太陽方向のプラズマの速さを示している。

#### 4. なぜサージが起こるのか？（サブストーム拡大相の問題）

オーロラが突然明るくなる理由は分かった。次に活発で明るいオーロラが西に向かって進むオーロラ・サージについて考えてみる。電磁流体シミュレーションでは、オーロラが突然明るく光ると西向きに明るいオーロラ広がるサージが発生する。シミュレーションの結果を解析すると意外なことに電離圏に原因があることが分かった。オーロラが明るいところでは超高層大気が電離され、周囲と比べて電気が流れやすくなっていることがポイントである。電離圏電流の流れやすさが空間的に変わり、明るいオーロラの周囲で電荷の過不足が生じるようになる。図 5 はオーロラ爆発が発達しているときの沿磁力線電流の大きさを示している。青い領域は上向きの沿磁力線電流を示していて、明るいオーロラに対応する。左上の端の近くにある青色の濃い領域がシミュレーションで再現されたサージの突端である。黄色のコンター線は空間電荷が正になっていることを示し、サージの突端では電荷が余っ

ていることがわかる。赤色のコンター線は負になっていることを示していて、サージの後端では電荷が不足している。この電荷の過不足を解消するため、今度は電離圏側の要請で荷電粒子の剪断流が作られる。この剪断流が強い沿磁力線電流を新たに作り、西向きに拡大する明るいオーロラの原因となる[4], [5]。

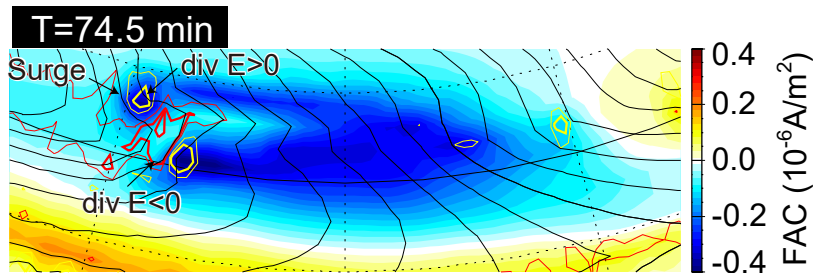


図 5：オーロラ爆発発生時に電離圏と磁気圏をつなぐ沿磁力線電流の分布。宇宙空間から地球を見下ろしている。青色は上向きの沿磁力線電流を示し、明るいオーロラに対応する。黄色のコンターは電荷が余っていることを、赤いコンターは電荷が足りないことを意味している。[5]

## 5. どのようにエネルギーが流れるのか？（エネルギー輸送の問題）

最後に惑星間空間から地球に至るエネルギーの流れについて触れたい。オーロラ爆発がおこると  $10^{11}$  W ものエネルギーが電離圏で消費されるが、その究極のエネルギー源は太陽にある。太陽からは様々な形態でエネルギーが放出されているが、そのうち荷電粒子（太陽風）の運動エネルギーと磁場のエネルギーが何らかの形で磁気圏に取り込まれ、地球に到達すると考えられている。太陽定数として知られる太陽の電磁放射エネルギーは地球に直達するが、粒子の運動エネルギーや磁場のエネルギーの伝搬経路は磁場の影響を強く受けるために単純ではない。

地球軌道上における太陽風の運動エネルギーは  $10^{-3}$  W/m<sup>2</sup> のオーダー、磁場のエネルギーは  $10^{-6}$  から  $10^{-5}$  W/m<sup>2</sup> のオーダーであり、太陽定数として知られる太陽の電磁放射エネルギーである  $1366$  W/m<sup>2</sup> と比べると格段に低い。単位面積あたりのエネルギーは低いが、地球の周囲に磁場の帆を大きく広げることによって実効的な面積を広げ、エネルギーを積極的に取り込むのである。惑星間空間磁場が南を向いているとき（z 軸の負の方向）の、粒子の流れと磁場エネルギーの

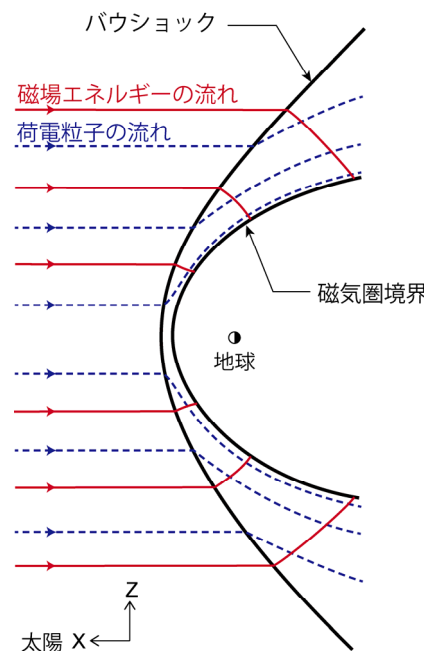


図 6：太陽に起源を持つ磁場エネルギーの流れ（赤）と荷電粒子の流れ（青）。

流れを図 6 に示す。磁場のエネルギーはバウショックを通過後に磁気圏に向かって進路を変え、磁気圏に流入する。一方、荷電粒子は磁気圏を避けるように流れて去ってしまうため、磁気圏に流入するのは容易ではない。電磁流体シミュレーションによると、太陽風の運動エネルギーは磁気圏境界付近で磁場のエネルギーに変換され、磁気圏に取り込まれていく。この変換は磁気圏マントル領域で行われるので、マントル・ダイナモと呼ばれている。マントル・ダイナモは惑星間空間磁場が南を向いたときに現れ、荷電粒子の運動エネルギーを積極的に磁場エネルギーに変換する[6]。

図 7 はオーロラ爆発発生時における磁場エネルギーの流れ（白く太い管）を示している[7]。太い管に青く色がついている領域はダイナモである。エネルギーの流れに沿って順に説明する。

1. 太陽風の運動エネルギーの一部が磁場のエネルギーに変換される。しかし、磁気圏に流入するエネルギーはわずかで、磁気圏は静穏状態となる。
2. 惑星間空間磁場に南向き成分が含まれると、上述のマントル・ダイナモが現れる。電磁流体シミュレーションによると、磁気圏に流入する磁場エネルギーのうち約 4 割から 9 割は太陽起源の荷電粒子が持つ運動エネルギーに由来するようである[7]。磁気圏に取り込まれた磁場エネルギーは螺旋を描きながら地球の極域に近づいていく[3]、[7]。磁場エネルギーが地球に近づくのは大規模な沿磁力線電流があるためである。最も巨大な沿磁力線電流はマントル・ダイナモが関わっているとされ[8]、磁気圏のエネルギー

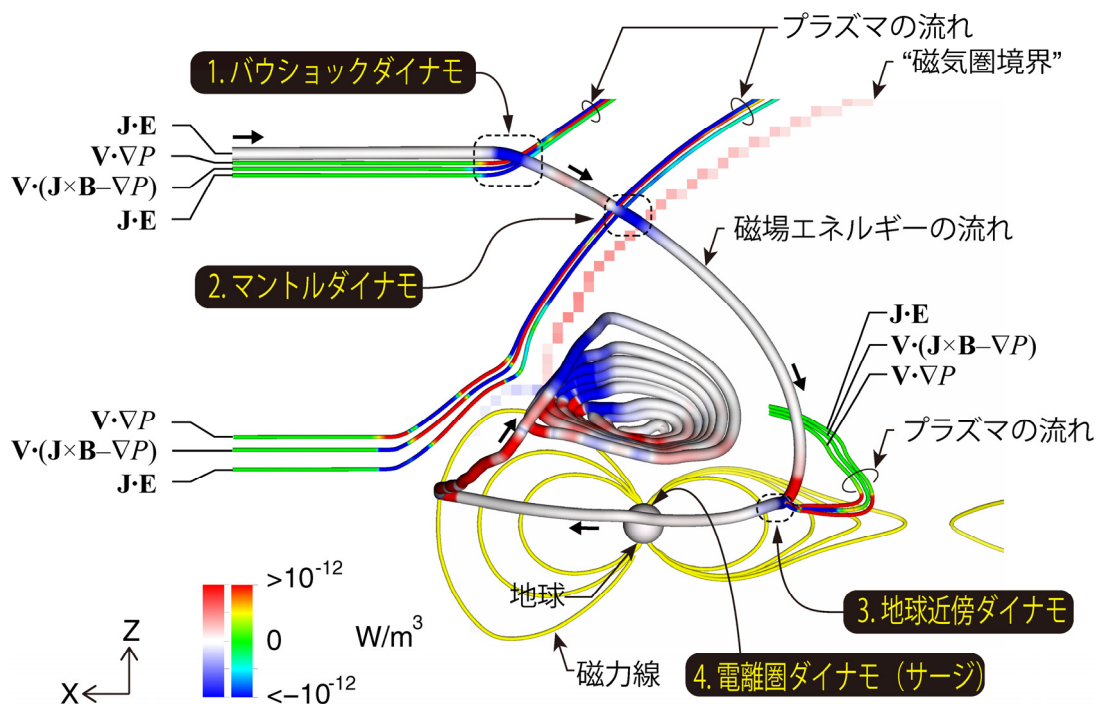


図 7：オーロラ爆発開始時における惑星間空間から地球に至る磁場エネルギーの流れ（太い管）。太い管の色が青いところで運動エネルギーから磁場エネルギーに変換が行われている（ダイナモ）。[7]

ーを地球に運ぶ重要な役割を果たしている。磁気圏に多くのエネルギーが流入し、磁気圏や電離圏が活性化する。サブストームの成長相に相当する。

3. 惑星間空間磁場が南を向き 40-60 分が経つと図 4 で示した磁力線の再結合が起こる。プラズマの流れ方が変わり、地球近傍ダイナモが現れる。地球近傍ダイナモはオーロラの急激な増光の原因となる沿磁力線電流と関わっており、磁場エネルギーを地球に一気に引き寄せる。サブストーム拡大相の始まりである。オーロラ爆発時、磁気圏に流入した磁場エネルギーのうち、約 2%が地球に到達するようである。
4. オーロラの一部が急に明るく光ると図 5 で示したように電荷の過不足が電離圏で生じる。この仕組みはダイナモとして働き、西に向かって進むサージを担う強い沿磁力線電流（明るいオーロラ）を作る。サブストーム拡大相に対応する。

## 6. むすび

オーロラ・サブストームは磁気圏で起こる代表的な突発現象である。サブストームの発達はダイナモの発達と対応している。その理由は明確で、磁気圏に取り込まれた磁場エネルギーを地球に運ぶためには沿磁力線電流が必要で、沿磁力線電流を作るためにはダイナモが必要だからである。つまり、オーロラ・サブストームの本質はダイナモの発生にあると言えるだろう。ダイナモの発生を理解するためにはプラズマの 3 次元的な運動を理解することが必要で、計算機の助けを借りなければその理解は難しい。電磁流体シミュレーションによってオーロラ・サブストームの発達過程の全体像がシームレスに得られるようになったが、個々のカーテン状のオーロラを作るようなマイクロな過程を電磁流体シミュレーションでは扱うことができない。マクロ過程とマイクロ過程を矛盾なく取り扱うことが今後の大きな課題である。

## 謝辞

電磁流体シミュレーションを開発された田中高史九州大学名誉教授に、多くの助言を頂いた西田篤弘宇宙科学研究所名誉教授に深く感謝申し上げます。

## 参考文献

- [1] T. Tanaka, “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, 2015, pp. 177–190.
- [2] Y. Ebihara and T. Tanaka, “Substorm simulation: Insight into the mechanisms of initial brightening,” *J. Geophys. Res. Sp. Phys.*, vol. 120, no. 9, pp. 7270–7288, Sep. 2015.
- [3] Y. Ebihara and T. Tanaka, “Energy Flow Exciting Field-Aligned Current at Substorm

- Expansion Onset," *J. Geophys. Res. Sp. Phys.*, vol. 122, no. 12, pp. 12288–12309, 2017.
- [4] Y. Ebihara and T. Tanaka, "Substorm simulation: Formation of westward traveling surge," *J. Geophys. Res. Sp. Phys.*, vol. 120, no. 12, p. 10,466-10,484, Dec. 2015.
- [5] Y. Ebihara and T. Tanaka, "Why does substorm-associated auroral surge travel westward?," *Plasma Phys. Control. Fusion*, vol. 60, no. 1, p. 014024, Jan. 2018.
- [6] T. Tanaka, "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, no. A7, pp. 12057–12074, 1995.
- [7] Y. Ebihara, T. Tanaka, and N. Kamiyoshikawa, "New Diagnosis for Energy Flow From Solar Wind to Ionosphere During Substorm: Global MHD Simulation," *J. Geophys. Res. Sp. Phys.*, pp. 360–378, 2019.
- [8] T. Tanaka, "Field-aligned-current systems in the numerically simulated magnetosphere," *Magnetos. Curr. Syst. Geophys. Monogr. Ser. vol. 118*, pp. 53–59, 2000.