

なぜオーロラ爆発が起こるのか

海老原 祐輔^{1*}, 田中 高史²

Why do auroral breakups occur?

Yusuke Ebihara^{1*} and Takashi Tanaka²

概要

明るいオーロラが急に現れ、短時間のうちに極方向及び西方向に広がるオーロラ爆発(auroral breakup)と呼ばれる現象がある。オーロラが最も明るくそして激しく舞う瞬間である。オーロラ爆発は磁気圏物理学最大の謎の一つであったが、大規模な数値シミュレーションによってそのメカニズムが明らかになりつつある。本稿では、最新のシミュレーションで得られたオーロラ爆発の基本メカニズムについて解説する。

1. はじめに

オーロラは常に地球のどこかで現れている。普段のオーロラは微弱で動きが緩慢であるため鑑賞するには退屈である。ところが、オーロラがある狭い処から急に明るく光りはじめ、明るく華麗なオーロラが極方向そして西方向に広がっていくことがある。これをオーロラ爆発(auroral breakup)と呼ぶ。図1にオーロラ爆発直後に現れるオーロラの一例を示す。このとき、オーロラを流れる強力な電流によって地磁気が大きく乱れ、地球近くの宇宙空間(磁気圏)も大きく変動する。オーロラ爆発に伴う一連の擾乱をサブストームと呼ぶ。地球規模で見ればサブストームは珍しい現象ではない。多いときには一日に5~6回起こることもある。しかし、オーロラ爆発は真夜中より少し前の時間帯で起こりやすく、オーロラが現れる緯度は常に変わるので、地上にいる人がオーロラ爆発に巡りあう機会はそう多くはない。

赤祖父俊一博士らはオーロラ爆発の発達過程を整理し、オーロラ・サブストームの概念を提唱したり。それから半世紀近く経つが、オーロラ・サブストームの原因については統一的な見解が得られておらず、磁気圏物理学の最大の謎の一つとなっている。また、オーロラを流れる電流が送電網などの導電体に誘導電流を流し、変電所の変圧器を損傷させるリスクが指摘されている。生存圏の安心・安全を担保し、豊かな社会を維持・発展させるためにもオーロラ爆発の原因を理解することは重要と言えよう。

明るいオーロラの直接的な原因は宇宙空間から降り注



図1：オーロラ爆発直後に見られる渦巻型のオーロラ（スウェーデン・キルナ郊外にて海老原撮影）。

2016年8月8日受理.

¹〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所生存科学計算機実験分野.

* E-mail: ebihara@rish.kyoto-u.ac.jp

²〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 九州大学 国際宇宙天気科学・教育センター.

ぐ電子である。シャワーのように降り注ぐ電子が超高層大気を構成する原子や分子にエネルギーを与え、原子や分子が放つ光がオーロラの実体である。降り注ぐ電子の量が多いほど発光が増すので、オーロラ爆発のときにはバケツをひっくり返したように電子が大量に降っていることになる。電子の進む向きと電流の向きは逆であるから、電子が降り注ぐということは電流が上向きに流れていることを意味する。よって、「なぜオーロラが急に光り出すのか」という問題は「なぜ電流が上向きに急に流れ始めるのか」という問題に置き換えることができる。

電流は必ず閉じなければならない。明るいオーロラに伴って上向きに流れる電流は高さ約 100 km にある電離圏を經由し、下向きに流れる電流とどこかで接続していると考えられている。とくに明るいオーロラ中の電離圏を水平方向に流れる電流はジェット電流と呼ばれ、地磁気を大きく乱す²⁾。地磁気の急激な乱れもオーロラ爆発の特徴である。オーロラ爆発の肝は宇宙と出入りする電流であるが、この電流はどこから来るのだろうか。宇宙空間を流れる電流線を計測することはそもそも難しい。右ねじの法則で知られるアンペールの法則によって人工衛星が観測した磁場から近傍の電流を求めることができるが、広大な宇宙空間を3次元的に流れる電流線を観測によって把握することは殆ど不可能である。1970年代、オーロラ爆発が発生したときの観測データを詳細に解析することで、マックフェロンたちは楔（くさび）型電流系を提案した³⁾。図2左はその模式図である。常に磁気圏尾部を流れている電流が何らかの理由で寸断されると、余った電流が磁力線に沿って地球に流れ込むというものである。朝側で下向き、夕側で上向きの電流が流れ、上向きに流れている電流の根元で明るいオーロラが光ると考えられている。構造がシンプルで観測を説明しやすいため楔型電流系は広く支持されており、現在では「何が電流を寸断するのか」という問題に焦点が当てられている。微視的な不安定性が電流を寸断するという説⁴⁾や磁気圏の尾部からプラズマの泡が到来して電流を等価的に寸断するという説⁵⁾などがあり、激しい議論が今なお続いている。

2. オーロラ爆発の基本的なしくみ

私達のアプローチは、大規模な数値シミュレーションによってオーロラ爆発を詳細に再現し、全体を俯瞰することでオーロラ爆発の全容を明らかにしようというものである。私たちが用いている電磁流体シミュレーションはオーロラ爆発に伴って現れる特徴的な時空間変動を良く再現することができることが確かめられている⁶⁾。シミュレーションで再現したオーロラ爆発の例を図3に示す。磁極を取り囲むようにオーロラがリング状に現れている（図3左）。これをオーロラ・オー

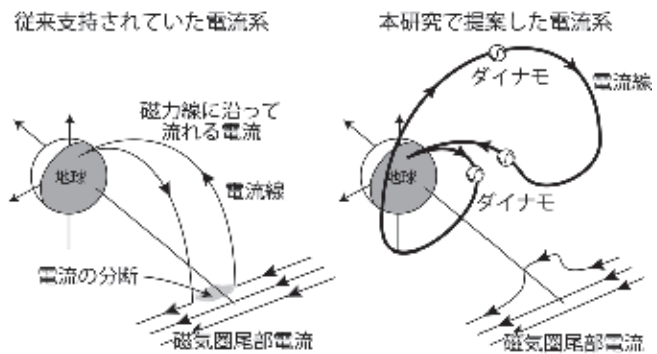


図2: オーロラ爆発の原因となる電流系の模式図。
(左) 従来から支持されている楔型電流系。(右) シミュレーションの結果に基づき提案した電流系。

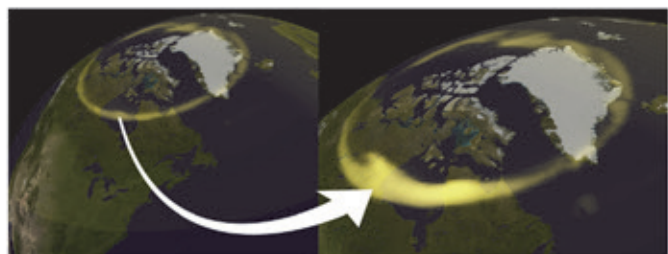


図3: オーロラ爆発のシミュレーション結果。オーロラ・オーバルの一部が急に明るくなり、極方向と西方向に明るいオーロラが広がっていくというオーロラ爆発の特徴が再現できている。

バルと呼び、シミュレーションでも再現することができる。やがて真夜中付近のオーロラ・オーバルの一部が急に明るくなり、明るいオーロラが極方向そして西方向に広がるというオーロラ爆発の特徴もよく再現されている（図3右）。シミュレーションの結果を詳しく解析することで分かったオーロラ爆発を含むオーロラ・サブストームの基本的なメカニズムを以下に紹介する。

2.1 静穏期

太陽に起源を持つ磁場を惑星間空間磁場と呼ぶ。惑星間空間磁場の南北成分が殆どゼロか北を向いているときは目立ったオーロラ活動や地磁気活動は見られない。よって磁気圏は静穏だと考えられている。ところが磁気圏と電離圏が電磁氣的に結合しているため、レイリー・テイラー型の流体的な不安定性によって磁気圏プラズマの構造がゆっくりと微細化してゆくことがシミュレーションでわかった。水にインクを垂らすとインクがキノコ状に落下していくように、比重の異なる液体に重力が働くときにその特徴を見ることができる。宇宙空間のプラズマには重力の代わりに電磁的な力が作用することで、レイリー・テイラー型の不安定性が成長すると考えられる。このようにして微細化したプラズマ圧力構造は細かい上向き電流を作り、地上では南北方向あるいは太陽方向に伸びた細長いオーロラ・アークとなって現れると考えている⁷⁾。静穏時の磁気圏では基本的に何も起こらないと考えがちなが、磁気圏ではプラズマ圧力の微細化が「静かに」進行しているようである。

2.2 成長相

成長相のオーロラは、高緯度からオーロラ・オーバルに向かってゆっくり移動する南北アークあるいは東西アークが特徴である。成長相のきっかけは惑星間空間磁場が南を向くことにある。南向きの惑星間空間磁場と北向き地球磁場の磁気圏前面で互いに向き合うことで磁力線が繋ぎ換わり、大規模なプラズマの対流が促進されるからである。静穏期に微細化したプラズマ圧力構造は活性化した対流によってゆっくりと赤道面方向に運ばれてゆく。地上では低緯度に向かって移動する南北アークや東西アークとなって現れると考えている⁷⁾。シミュレーションで再現したオーロラの形や動きは実際に成長相で観測されるオーロラとよく似ている。こうした高緯度域でおこるプラズマ圧力構造の運動とは独立に、磁気圏尾部ではプラズマの圧力が高まってゆく。すると地球の磁力線が夜側に向かって大きく引き延ばされ、ついには地球の南半球から出た磁力線と北半球に向かう磁力線が再結合するようになる（図4①）。

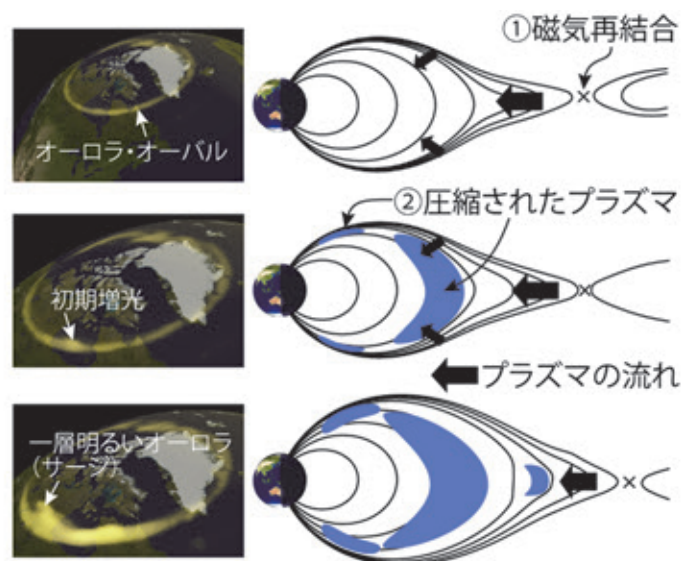


図4：(左) シミュレーションで再現したオーロラと (右) 磁気圏構造の模式図（線は磁力線を示す）。

2.3 初期増光

オーロラ・オーバルの一部が急に明るく光り出すことを初期増光と呼ぶ。ここでは初期増光をオーロラ爆発の始まりとみなす。初期増光のきっかけは、夜側磁気圏尾部での磁場の再結合にある。

夜側の磁気圏尾部で磁気再結合が起こると、磁力線には自ら縮もうとする性質があるために磁力線は元の双極子型に戻ろうとする。磁気圏の構造が3次元的に変わり、ローブと呼ばれる高緯度域から内部磁気圏に向かってプラズマが一気に流れ込む。内部磁気圏のプラズマも強く圧縮される(図4②)。プラズマ圧力の高い領域ではプラズマの流れが変わり、上向きの電流と下向きの電流が作られる。これらの電流が電離圏に接続した瞬間、初期増光が始まると考えている⁸⁾。シミュレーションでは電流の3次元分布も得られるので、電流線を辿ることができる。初期増光につながる電流線を辿ってみると、磁気赤道面を経由せずに高緯度にあるダイナモ領域に接続しているようである(図2右)。シミュレーションで得られた電流系は従来支持されていた楔型電流系(図2左)と大きく異なるが、それは以下の理由による。楔型電流系は電離圏と磁気赤道面の間を磁力線に沿って電流線が繋がっていると仮定している。ところが、直前に起こった磁場の再結合によって内部磁気圏ではプラズマの圧力が既に高い。高いプラズマ圧力は磁力線に垂直方向に流れる電流が強いことを意味している。すなわち、磁力線に垂直方向に流れる電流が強いため、電流線は磁力線に沿って流ることができない。その結果、電流線は磁力線から離れてゆく。観測的にもこの段階では内部磁気圏のプラズマ圧力が高まっていることが知られており、電離圏と磁気赤道面の間を磁力線に沿って電流線が繋がるような楔型電流系が存在するのは難しいようである。楔型電流系はサブストーム時における内部磁気圏の磁場変化を説明するためにも用いられているが、図2右の電流系でも合理的に説明できることを確認している。

2.4 拡大相

拡大相のオーロラの最大の特徴は、明るいオーロラが極方向・西向きに拡大してゆくことにある。拡大するオーロラの先端部分は特に明るく、オーロラ・サージと呼ばれている。シミュレーションによると、このとき内部磁気圏ではプラズマ圧力は一層高まり、高圧領域は真夜中から夕側と朝側に向かって広がっている。電離圏を出入りする上向きの電流と下向きの電流は一層強まり、明るいオーロラ中をジェット電流が流れるようになる。ジェット電流が流れるのは、宇宙空間から供給される電流が増え、且つ宇宙空間から降り込む電子が超高層大気を電離して電気が通りやすくなっているため(電気抵抗が下がっているため)である。電流の流れやすさがオーロラの明るさによって異なるということは、明るいオーロラの周囲では電気の過不足が生じることを意味する。シミュレーションによると、明るいオーロラの極側あるいは西側では電気が余り上向きの電流が強まる。すなわち、明るいオーロラが更に極側あるいは西側で光るようになる。一方、その反対側では電気が不足し下向きの電流が強まる(上向きの電流が弱まる)。すなわち、明るいオーロラの東側あるいは赤道側ではオーロラが弱まる。これを繰り返すことで極方向・西向きに動く明るいオーロラ・サージになると考えている⁹⁾。つまり、ひとたびオーロラが明るく光り始めると明るいオーロラが自発的に現れ、サージとして移動してゆくのである。逆説的に言えば、すでに電気抵抗がほぼ一様に下がっていて、オーロラによって電流の流れやすさに違いが現れない場合にはサージは発達しにくいと考えられる。白夜が続く夏の極域電離圏や磁気嵐の時のように継続して粒子が降り込んでいるときにこれに該当すると思われる。実際、磁気嵐のときにはオーロラ・サージが現れにくいという報告があり¹⁰⁾、本結果と調和的である。

3. おわりに

振り返れば、地上観測から上空の構造を予測することから磁気圏研究が始まった。磁気圏を直接観測すればその予測が確かめられると思われていたように思われる。しかし実際に直接観測を行うと、部分から全体を予測するのもまた困難であることが認識されるようになった。本研究で示したように、解像度の高いグローバル・シミュレーションを行うと現実に近いサブストームが再現されるという結

論は、世界に流通している磁気圏物理学と逆のようである。磁気圏物理学は原理の科学ではなく、複合系の科学である。原理が複合化されて、観測される自然現象が発生する。磁気圏物理学において複合化を生み出すのは磁気圏のトポロジーである。このことは全ての地球科学で共通と言えるが、気象、海洋、地球内部などの分野では、複合化による原理からの飛躍はそれほどドラスティックでないかもしれない。磁気圏物理学を含む宇宙プラズマ科学では、より激しい複合性が示されるのが特徴のようである。この典型がサブストームといえる。

複合系の科学に立脚し、全体構造の変遷を俯瞰することで、静穏時から成長相そして拡大相に至るオーロラ・サブストームの変遷を初めて合理的に説明することができたと考えている。電磁流体力学という単一の枠組みでオーロラ爆発を含むオーロラ・サブストームの特徴を良く再現できるということは、オーロラ・サブストームの本質は巨視的な磁気圏構造の変更過程（状態遷移）であり¹¹⁾、オーロラ爆発はその必然であろうと考えられる。微視的な不安定性や正体が良くわからないプラズマの泡を持ち込まなくても、磁気圏構造の変更過程でオーロラ爆発が必然的に現れる。必要以上に多くを仮定すべきでないというオッカムの剃刀と呼ばれる指針があるが、現実的なシミュレーションを行うことで何が説明に必要十分であるかが明確になったかもしれない。複雑で理解することが難しい現象に対して数値シミュレーションが極めて有効な手段であり、部分だけではなく全体を俯瞰することが重要であることを示す一例となろう。

参考文献

- 1) Akasofu S.-I., The development of the auroral substorm, *Planet Space Sci*, **12**, 273-282, 1964.
- 2) Kamide Y, Akasofu S.-I., The auroral electrojet and global auroral features, *J. Geophys. Res.*, **80**, 3585-3602, 1975.
- 3) McPherron R.L., Russell C.T., Aubry M.P., Satellite studies of magnetospheric substorms on August 15, 1968: 9. Phenomenological model for substorms, *J. Geophys. Res.*, **78**, 3131-3149, 1973.
- 4) Lui A.T.Y., A synthesis of magnetospheric substorm models, *J. Geophys. Res.*, **96**, 1849-1856, 1991.
- 5) Chen C.X., Wolf R.A., Interpretation of High-Speed Flows in the Plasma Sheet, *J. Geophys. Res.*, **98**, 21409-21419, 1993.
- 6) Tanaka T., Substorm Auroral Dynamics Reproduced by Advanced Global Magnetosphere-Ionosphere (M-I) Coupling Simulation, In *Auroral Dynamics and Space Weather*. Hoboken, N.J., John Wiley & Sons, Inc, 2015, pp. 177-190.
- 7) Ebihara Y., Tanaka T., Substorm simulation: Quiet and N-S arcs preceding auroral breakup, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, **121**, 1201-1218, 2016.
- 8) Ebihara Y., Tanaka T., Substorm simulation: Insight into the mechanisms of initial brightening, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, **120**, 7270-7288, 2015.
- 9) Ebihara Y., Tanaka T., Substorm simulation: Formation of westward traveling surge, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, **120**, 10466-10484, 2015.
- 10) Hoffman R.A., Gjerloev J.W., Frank L.A., Sigwarth J.W., Are there optical differences between storm-time substorms and isolated substorms? *Ann. Geophys.*, **28**, 1183-1198, 2010.
- 11) Tanaka T., The state transition model of the substorm onset, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, **105**, 21081-21096, 2010.