

オーロラで探る宇宙生存圏の現在・過去・未来

海老原 祐輔^{1*}

Present, past, and future of space humanosphere as investigated through aurora

Yusuke Ebihara^{1*}

概要

オーロラは百～数百キロメートルの高さでおこる超高層大気の発光現象である。オーロラの直接の原因は宇宙から降り注ぐ粒子にあり、オーロラの形や色は降り込む粒子の分布や大気の組成で決まる。その究極の駆動源は太陽から吹き付ける太陽風（高速プラズマ流）と磁場にある。両者の勢いが増すと地球磁場との相互作用を通して磁気嵐やサブストームが起こり、オーロラは極めて明るく活発になる。すなわち、オーロラは太陽の影響を強く受けているのである。本稿では、最新の研究によって明らかになったオーロラの詳細な姿とその変動、古文書に残されているオーロラの記録から推定した過去の巨大磁気嵐、磁場が弱くなった将来の地球におけるオーロラの姿について俯瞰する。

1. はじめに

約 2600 年前の古代バビロニアの粘土板にはオーロラと思われる記録が刻まれている（図 1）¹⁾。世界各地でオーロラの記録は数多く残されており、オーロラは衆目を集めていたことがわかる。オーロラの原因はながらく謎であり、中世では遠くで起きている火事や刀と刀がぶつかったときの火花、天空に浮かぶろうそくなどがオーロラの原因として考えられていた²⁾。17 世紀にはオーロラに対する科学的考察がはじまり、ガリレオ、デカルト、ハレーなど多くの科学者がオーロラの謎に挑んでいる。写真技術が高まった 20 世紀初頭、ノルウェーのステルマーはオーロラを多点で同時に撮影し、三角測量の原理でオーロラは 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 1100 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³⁾。オーロラが光る高さは熱圏と呼ばれる大気層の最上部にあたり、気圧は地上の数百万分の一、温度は数千度と過酷な環境である。今ではオーロラ



図 1：紀元前 567 年 3 月 12/13 日に発生したオーロラを記録していると考えられる（くさび）文字。VAT 4956, with the earliest datable auroral record in 12/13 March 567 BCE. (Yasuyuki Mitsuma's tracing of the photographs © Hisashi Hayakawa, taken courtesy of the Staatliche Museen, Berlin).¹⁾

は宇宙空間から地球に向かって降り注ぐ粒子からエネルギーを得た原子や分子が放つ光の集合だと理解されている。本稿では、オーロラに関する最新の知見を紹介するとともに、過去のオーロラを調べることでわかってきた宇宙の大変動、そして変わりゆく地球磁場のもと、予想される将来のオーロラと宇

2020 年 7 月 22 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

宙環境について俯瞰したい。

2. 現在のオーロラの理解

オーロラは大気が自ら光を放つ発光現象であり、その意味においては雷に似ている。虹は太陽の光が反射することによっておこる現象で、オーロラとは仕組みが全く異なる。オーロラの代表的な色である緑や赤は酸素原子が放つ光で、青や紫は窒素分子イオンが放つ光である。緑や赤のオーロラが現れるのは、地球の大気に酸素が豊富に含まれているからである。酸素は地球誕生当初から豊富にあったわけではない。太古の地球に出現したシアノバクテリアなどの微生物が光合成によって酸素分子を作り出した結果だと考えられている⁴⁾。悠久の時を経て作られた酸素分子は約百キロメートルの高さに昇り、紫外線を受けて原子状の酸素となり、宇宙からやってくる粒子からエネルギーをもらい緑や赤の光を放つのである。オーロラと生物の間には間接的ながら繋がりとあると言えよう。

オーロラの形には様々な種類がある。東西方向にほぼまっすぐに伸びるアーク、やや不規則な構造を持つバンド、形をもったパッチ、空全体に広がるヴェイル、空高く上る筋状のレイなどがある。さらにバンドの一部が折りたたまれたフォールド、一部が巻き付いたカール、大規模な渦巻き構造を持つスパイラルもある⁵⁾。カーテン状のオーロラを真下から見ると一点からオーロラ広がって見えることがあり、コロナ・オーロラと呼ばれている。カーテン状のオーロラがたなびいたり次第にフォールド状に変わったりオーロラは様々に形を変えるが、そのしくみはよくわかっていない。

一枚に見えるカーテン状のオーロラは幾重ものカーテンから成っていることもある。その一枚一枚のオーロラの厚みはとても薄く、70メートル程度であるという報告もある⁶⁾。ボロフスキーはオーロラの形を作る原因として考えられている22の説を検証したが、どの説も70メートルの薄さを説明できないと結論づけている⁷⁾。オーロラの動きだけでなく、その薄さも大きな謎となっている。明るいカーテン状のオーロラの中には激しく明滅を繰り返す構造が埋め込まれていることがある。1秒間に3〜15回もの速さで明滅するものもあり、フリッカリング・オーロラと呼ばれている⁸⁾。最新の高感度カメラで撮影したところ、少なくとも1秒間に80回という速さで明滅している構造も見つかっている⁹⁾。電磁イオンサイクロトロン波と呼ばれる電磁波によって電子が変調を受けていると考えられている¹⁰⁾。

明確な形を持つオーロラはディスクリート・オーロラと呼ばれ、地球向きに加速された電子が原因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近い。ブラウン管は電子銃によって加速した電子を蛍光物質が塗られた面に照射して像を写し出す装置である。同じようにディスクリート・オーロラの上空には天然の電子銃があり、放たれた電子が大気というスクリーンに照射され、蛍光物質の面の代わりに大気が光るのである。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な機能をもつ状態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のに、なぜその機能を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。ディスクリート・オーロラを詳しく見ると、非常に薄いオーロラで構成されていることがある。この薄い構造は慣性アルベン波と呼ばれる電磁波によって加速されているという指摘もあり¹¹⁾、複雑な構造が重なりあっている可能性を示唆している。

電子銃とは別の原因で光るオーロラもある。ディフューズ・オーロラと呼ばれ、明滅を繰り返す脈動オーロラはこれに分類される。ディフューズ・オーロラはぼんやりと広がったオーロラで、はっきりとした形がないことが多い。脈動オーロラは雲のような形をしていて1秒から30秒の周期で点滅する。ディフューズ・オーロラは宇宙空間を飛び交う電子が散乱を受け、超高層大気に落ちた結果であると考えられている¹²⁾。散乱の原因としてホイッスラーモード・コーラス波動と呼ばれる電磁波が

有力視されている。人工衛星の観測によると電磁波の「オン」・「オフ」と脈動オーロラの「オン」・「オフ」がよく対応していることがわかっている¹³⁾。なぜ電磁波が周期的に発生したり消えたりを繰り返すのか、雲のような形は何が決めているのかについて明確な答えはなく、ディフューズ・オーロラも多くの謎に包まれている。

ブラック・オーロラと名付けられた奇妙なオーロラがある¹⁴⁾。オーロラが黒く光るわけではない。ディフューズ・オーロラの一部が欠落しているために黒く見えるのである。ブラック・オーロラは通常のオーロラと同じようにアーク状だったり筋状だったり時には渦をまいたりと様々な形がある。ブラック・オーロラが現れるということはオーロラがそこだけ「光らない」ことを意味する。「光らない」原因として二つの説が提唱されている。一つ目は逆向きの電子銃が電子の降り込みを阻害しているという考え方である¹⁵⁾。東北大学を中心とする研究チームは「れいめい」衛星で降り込み電子とブラック・オーロラを同時に観測することに成功し、電子の散乱が局所的に抑制されることで「光らない」領域が現れるという説を提唱している¹⁶⁾。

図2は宇宙からみたオーロラで、オーロラが冠のように極を取り囲んでいるのがわかる。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、おおまかには南北ではほぼ対称であることが分かっている。オーロラ・オーバルは広がったり縮んだりするが、消えることはなく、オーロラは地球上のどこかで常に光っているようである。オーロラ・オーバルの内側（オーロラ・オーバルの高緯度側）や外側（低緯度側）でもオーロラは現れる。内側に現れるオーロラは極冠オーロラと呼ばれ、太陽の方向に沿って広がる筋状のオーロラ「太陽沿いオーロラ」¹⁷⁾や、ギリシャ文字の θ のように見える「シータ・オーロラ」¹⁷⁾、雨のように極冠全体に電子が降り注ぐことで光る「極雨オーロラ」¹⁸⁾などが知られている。一方、オーロラ・オーバルの外側（低緯度側）では、オーロラ帯本体から切り離されたアーク状のオーロラ¹⁹⁾やパッチ状のオーロラ²⁰⁾、ほとんど動かない縮れ雲のようなオーロラ²¹⁾や枝分かれ状の奇妙な形を持つオーロラ²²⁾が見つかった。



図2：人工衛星が撮影したオーロラ・ブレイクアップの発達 (Courtesy of NASA)。

図2のようにオーロラ・オーバル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・ブレイクアップと呼ばれる現象がある²³⁾。オーロラ・ブレイクアップ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。様々なオーロラがあるなかで最も華麗でオ

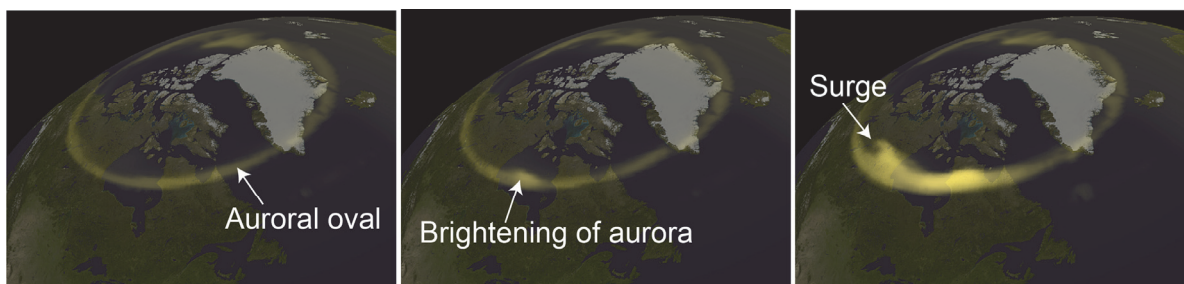


図3：シミュレーションによって再現されたオーロラ・ブレイクアップの発達。

オーロラ現象のハイライトと言えよう。オーロラ・ブレイクアップの継続時間は数 10 分程度と短く、この間に 100 万アンペアの電流が流れ 1000 億ワットものエネルギーが一気に電離圏で消費される²⁴⁾。オーロラ・ブレイクアップはオーロラ嵐ともよばれ、その発生原因について何十年も議論が続いているが、いまだ決着がついていない。最新の数値シミュレーションによってオーロラ・ブレイクアップを詳細に再現することが可能になり（図 3）、その理解が格段に進んでいる^{25,26)}。詳細については日本語のレビュー²⁷⁾を参照いただくとして、ここでは簡単にオーロラ・ブレイクアップが発生する仕組みを説明したい。

オーロラ・ブレイクアップを駆動する究極のエネルギー源は太陽にある。太陽から放出される太陽風は毎秒 400 キロメートル以上の速さを持つ荷電粒子の流れである。図 4 に示すように電磁エネルギーの流れ（破線）は磁気圏と呼ばれる地球磁場が支配する領域に向かうが、太陽風が持つエネルギー（実線）は磁気圏を避けるように流れ去ってしまうため、直接的には磁気圏に入ることはできない。ところが、惑星間空間磁場が南を向くと、太陽風が持っていた運動エネルギーは磁気圏境界付近で磁場エネルギーに効率よく変換され、磁気圏に効率的にとりこまれていく。シミュレーションによると、磁気圏にとりこまれる磁場エネルギーのうち 33-88%は太陽風が持つ運動エネルギーに由来するようである²⁸⁾。

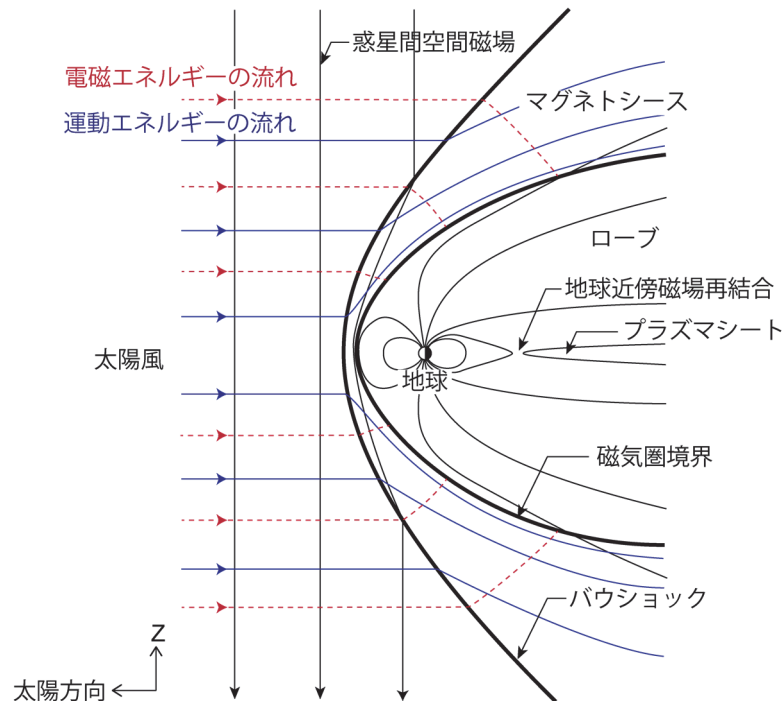


図 4：磁気圏の構造と磁気圏に至るエネルギーの流れの模式図。²⁸⁾

図 5 の白い線は磁場エネルギーの流れを示している。磁気圏にとりこまれた磁場エネルギーは大きな螺旋を描きながら地球に向かう²⁹⁾。螺旋を描くのは磁気圏対流があるためで、地球方向に向かうのは大規模な沿磁力線電流があるためである。つまり、沿磁力線電流と対流が一体となって磁場のエネルギーが磁気圏を循環し、地球に向かって進むのである。地球の夜側では磁気圏対流の一部が淀むため、磁力線が大きく引き延ばされていく³⁰⁾。図 5 左はブレイクアップ開始 15 分前（サブストーム成長相）の様子を示している。このとき磁気圏尾部では引き伸ばされた磁力線がつなぎ替わる磁気再結合はまだ起きていないが、取り込まれた磁場のエネルギーは磁気圏を循環していることが分かる。サブストーム成長相では対流が盛んになるという観測と調和的である。磁気圏尾部で磁気再結合が起こ

ると、地球近傍に向かってプラズマが動きはじめ、磁気圏の構造は大きくかわる。磁場エネルギーが運動エネルギー（あるいは熱エネルギーを経て運動エネルギー）に変わり、狭い領域で磁場エネルギーに再び変わる。このとき、強い沿磁力線電流が局所的に発生する。図5右はブレイクアップがおきた時（サブストーム拡大相開始時）の磁場エネルギーの流れを示しており、図5の左図と比べると夜側で流れ方が大きく変わっていることがわかる。白い線が青くなっている領域では磁場のエネルギーが作られており、ここでは沿磁力線電流が作られている。シミュレーションでは、この沿磁力線電流が地球に到達したときにオーロラ・ブレイクアップが始まっている^{26,31)}。

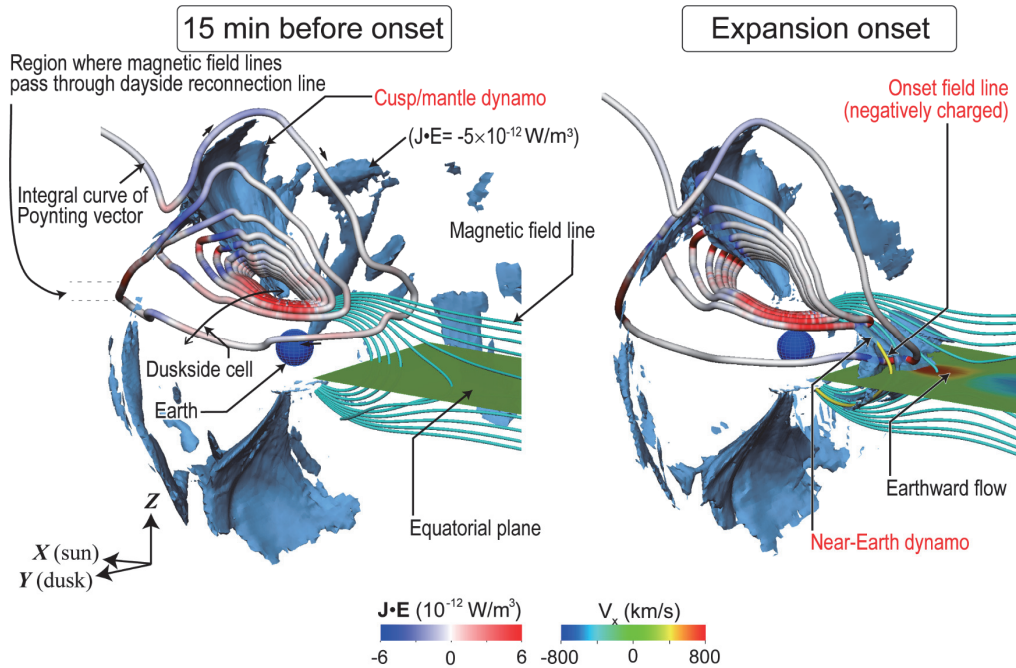


図5：シミュレーションによって描かれた磁気圏内のエネルギーの流れ。球は地球を、白い線は磁場エネルギーの流れを示す。陰のある立体的な領域は磁場のエネルギーが生成されている領域を示す。左はオーロラ・ブレイクアップの直前、右はブレイクアップ時を示す。²⁹⁾

3. 過去のオーロラ

大きな磁気嵐がおこると日本でもオーロラが見えることがある。北の空が赤く染まったという報告が多く、極地方で見られるカーテン状のオーロラとは性質が全く異なる³²⁾。通常、オーロラは上のほうでは赤く、下のほうでは緑に見える。下のほうで光る緑のオーロラが地平線より下に隠れてしまい、上のほうで光る赤のオーロラが選択的に見えるようになる。これが北の空が赤く染まる理由とされている³³⁾。1990年頃や2001年頃を中心に北海道でオーロラが観測されたが³⁴⁾、この頃は11-12年周期で変動する太陽活動の極大期にあたり、巨大フレアが頻発し、磁気嵐が多発していたのである。

過去はどうであっただろうか。たとえば日本書紀や明月記、寺社などに伝わる古文献にはオーロラを思わせる記述が多く見つかる。日本や中国では赤気という名で登場する。磁気嵐のときに低緯度地方に現れる赤くぼんやりとしたオーロラを連想させる趣のある言葉ではないか。なかには火事のような局所的な事象を記録したものもあるだろうが、多くの史料によって広い範囲でほぼ同時に目撃されていることが確認できれば地球規模の発光現象すなわちオーロラであると判断することができる。例えば、1770年9月には北は松前藩から南は薩摩藩まで、そして中国大陆の各地でも赤気が記録されていることからオーロラが低緯度まで広がっていたことはほぼ間違いない³⁵⁾。特筆すべきことは、10日

間近くほぼ連続して日本からオーロラが見え、そして手許の文字が読めるくらいオーロラが明るかったことである。（もちろん、オーロラが見えるのは夜間に限られる。）ここ数十年の間に日本で見たオーロラ³⁴⁾は肉眼で見えるか見えないか程度の明るさであり、継続時間は長くても2日間³⁴⁾だったことと比べるとその異常さがわかる。

1770年9月17日に日本各地で目撃されたオーロラを計算機シミュレーションによって再現した³⁶⁾。直近30年間に北海道で観測されたオーロラ^{33,34,37)}からの類推で、上側が赤く、下側が緑のオーロラを想定した。当時の記録どおりの背の高い赤いオーロラを説明しようとする下の方で光る緑のオーロラが観測者に見えてしまい、当時の記録と矛盾する。一方、緑のオーロラを北の地平線より下に隠そうとすると背の高いオーロラを再現することができない。多くのパターンについて計算を繰り返したところ、上から下まで全身が赤いオーロラでなければ古文書にある記述と絵画を説明できないことがわかった。このような全身が赤いオーロラはエネルギーが極端に低い電子が選択的に降り注いでいれば発生が可能である。巨大磁気嵐に人工衛星が中緯度で観測した降り込み電子のスペクトルを参考に、1770年9月17日当日の電子スペクトルを推定した。オーロラの光によって文字が読めたという記述を説明するためには、これまで人工衛星が中緯度で観測した電子を10倍以上多い量の電子が降っていないかならなければならなかった。計算によって推定した当時のオーロラ・オーバルの位置を図6に示す。青森県津軽ではオーロラがほぼ真上に見えたという記録や、京都では地平線から少なくとも約35度の高さまでオーロラが広がっていたという記録³⁵⁾と調和的である。

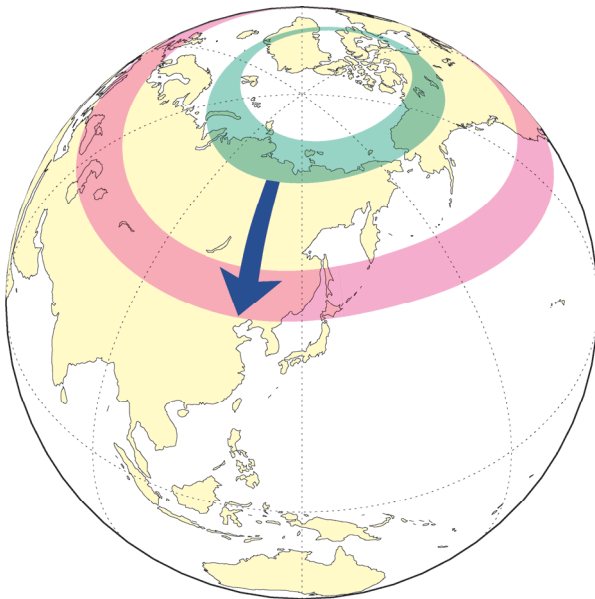


図6：1770年9月に発生した磁気嵐時のオーロラ・オーバルの推定位置。

巨大な磁気嵐がおこるとオーロラ帯は低緯度の方向に広がる。同時に磁気圏や電離圏を流れる電流量も増える。磁気圏や電離圏を流れる電流は地面に誘導電流を流し、ときには停電を誘発することがある。実際にカナダやスウェーデンでは巨大磁気嵐に伴い大規模な停電が起きている^{38,39)}。このような宇宙由来の災害を減らすためには、大規模な磁気嵐の発生頻度を把握しておく必要がある。しかし近代的地磁気の測定が始まったのは約200年前にすぎず、それ以前に発生した巨大な磁気嵐はわからない。過去のオーロラの記録を調べてオーロラ・オーバルの低緯度境界を推定し、経験則⁴⁰⁾を援用して磁気嵐の規模を推定すると、少なくとも1582年⁴¹⁾、1730年⁴²⁾、1770年³⁵⁾、1859年⁴³⁾、1872年⁴⁴⁾、1909年⁴⁵⁾、1921年⁴⁶⁾に巨大磁気嵐が起きていたようである。つまり、長期的にみると巨大磁気嵐はまれな現象ではなく、むしろ過去100年間は巨大磁気嵐の発生頻度が異常に低かった可能性がある。

4. 未来のオーロラ

地球の磁場（地磁気）はオーロラを極地方に局在化させてオーロラ・オーバルを作るとともに、多様なオーロラの遠因となっている。現在、地球磁場は双極子成分が卓越している。双極子型磁場は棒磁石が作る磁場と同じで、二つの極がある。双極子の軸が地表と交わる点を地磁気極と呼び、グリーンランド北方の北極海にある。しかし、地球の歴史と比べると非常に短い時間スケールで地磁気極は移

動しており、西暦 1000 年から 1300 年にかけては地理的な北極点から東アジアの方向にあったようである⁴⁷⁾。このとき東アジアはオーロラ・オーバルに比較的近かったようで、中国大陸ではオーロラが多く報告されている⁴⁸⁾。今後、どのように磁極が動くのかについては誰もわからない。もし再び東アジアの方に地磁気極が移動すると日本でもオーロラがよく見えるようになるかもしれない。

双極子の強さは過去 2000 年間で約 30%、150 年間で約 9% も減っている⁴⁹⁾。このまま地球磁場が弱まるとオーロラ・オーバルはどうなるのだろうか。双極子の強さが現在の約 70% になったとき、つまり今から約 800 年後のオーロラを計算機によって予測した。その結果、太陽風から磁気圏に取り込まれるエネルギーは減り、オーロラ帯は低緯度に移動することが分かった。これは地球磁場の勢力範囲が狭くなることに対応している。興味深いことに、地球磁場が弱まると電離圏の導電率が上がり、オーロラ・ジェット電流がよく流れるようになった (Ebihara and Tanaka, 投稿中)。更に双極子成分が弱まると四重極子成分が卓越するようになり、地球磁場の構造が大きく変わるという指摘がある⁵⁰⁾。そうすると現在のオーロラ・オーバルは大きく変わり、異質なオーロラが現れるかもしれない。また、地球の磁場は宇宙線など生物に有害な粒子が大気へ直接降り注ぐのを防いでいる。地球の磁場が弱まるとそのバリアーとしての役割は弱まり、大気の組成や、気候変動にも影響を及ぼすかもしれない。地球磁場が大きく減ったとき、人類は生存できるだろうか。変わりゆく地球を受け入れ、人類の持続的な発展と生存のために今から対策を練りはじめても遅すぎるということはないだろう。

参考文献

- 1) H. Hayakawa, Y. Mitsuma, Y. Ebihara, and F. Miyake, "The Earliest Candidates of Auroral Observations in Assyrian Astrological Reports: Insights on Solar Activity around 660 BCE," *The Astrophysical Journal*, vol. 884, no. 1, 2019, doi: 10.3847/2041-8213/ab42e4.
- 2) S. Odenwald, *Solar Storms: 2000 Years of Human Calamity*. USA: Createspace Independent Pub, 2015.
- 3) C. Störmer, *The Polar Aurora* (International Monographs on Radio). Oxford University Press, 1955.
- 4) H. D. Holland, "The oxygenation of the atmosphere and oceans," *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, vol. 361, no. 1470, pp. 903-15, Jun 29 2006, doi: 10.1098/rstb.2006.1838.
- 5) T. J. Hallinan, "Auroral spirals. II- Theory," *Journal of Geophysical Research*, vol. 81, no. 22, pp. 3959-3965, 1976, doi: 10.1029/JA081i022p03959.
- 6) J. E. Maggs and T. N. Davis, "Measurements of the thicknesses of auroral structures," *Planetary and Space Science*, vol. 16, no. 2, pp. 205-209, 1968, doi: 10.1016/0032-0633(68)90069-x.
- 7) J. E. Borovsky, "Auroral arc thicknesses as predicted by various theories," *Journal of Geophysical Research*, vol. 98, pp. 6101-6138, 1993, doi: 10.1029/92JA02242.
- 8) R. Beach, G. R. Cresswell, T. N. Davis, T. J. Hallinan, and L. R. Sweet, "Flickering, a 10-cps fluctuation within bright auroras," *Planetary and Space Science*, vol. 16, no. 12, pp. 1525-1529, 1968, doi: 10.1016/0032-0633(68)90064-0.
- 9) Y. Fukuda *et al.*, "First evidence of patchy flickering aurora modulated by multi-ion electromagnetic ion cyclotron waves," *Geophysical Research Letters*, vol. 44, no. 9, pp. 3963-3970, 2017, doi: 10.1002/2017GL072956.
- 10) M. Temerin, J. McFadden, M. Boehm, C. W. Carlson, and W. Lotko, "Production of flickering aurora and field-aligned electron flux by electromagnetic ion cyclotron waves," *Journal of Geophysical Research*, vol. 91, no. A5, 1986, doi: 10.1029/JA091iA05p05769.
- 11) J. Semeter, M. Zettergren, M. Diaz, and S. Mende, "Wave dispersion and the discrete aurora: New constraints derived from high-speed imagery," *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 113, no. A12, pp. n/a-n/a, 2008, doi: 10.1029/2008JA013122.
- 12) C. I. Meng, B. Mauk, and C. E. McIlwain, "Electron precipitation of evening diffuse aurora and its conjugate electron fluxes near the magnetospheric equator," *Journal of Geophysical Research*, vol. 84, no. A6, 1979, doi: 10.1029/JA084iA06p02545.

- 13) Y. Nishimura *et al.*, "Identifying the driver of pulsating aurora," *Science*, vol. 330, no. 6000, pp. 81-84, 2010, doi: 10.1126/science.1193186.
- 14) T. N. Davis, "Observed microstructure of auroral forms," *Journal of geomagnetism and geoelectricity*, vol. 30, no. 4, pp. 371-380, 1978, doi: 10.5636/jgg.30.371.
- 15) G. T. Marklund *et al.*, "Temporal evolution of the electric field accelerating electrons away from the auroral ionosphere," *Nature*, vol. 414, no. 6865, pp. 724-7, Dec 13 2001, doi: 10.1038/414724a.
- 16) Y. Obuchi *et al.*, "Fine-scale dynamics of black auroras obtained from simultaneous imaging and particle observations with the Reimei satellite," (in English), *Journal of Geophysical Research-Space Physics*, vol. 116, pp. ---, 2011, doi: Artn a00k07 doi 10.1029/2010ja016321.
- 17) L. A. Frank, J. D. Craven, J. L. Burch, and J. D. Winningham, "Polar views of the Earth's aurora with Dynamics Explorer," *Geophysical Research Letters*, vol. 9, no. 9, pp. 1001-1004, 1982, doi: 10.1029/GL009i009p01001.
- 18) Y. Zhang, L. J. Paxton, and A. T. Y. Lui, "Polar rain aurora," *Geophysical Research Letters*, vol. 34, no. 20, 2007, doi: 10.1029/2007gl031602.
- 19) C. D. Anger, M. C. Moshupi, D. D. Wallis, J. S. Murphree, L. H. Brace, and G. G. Shepherd, "Detached auroral arcs in the trough region," *Journal of Geophysical Research*, vol. 83, no. A6, 1978, doi: 10.1029/JA083iA06p02683.
- 20) D. D. Wallis, J. R. Burrows, M. C. Moshupi, C. D. Anger, and J. S. Murphree, "Observations of particles precipitating into detached arcs and patches equatorward of the auroral oval," *Journal of Geophysical Research*, vol. 84, no. A4, 1979, doi: 10.1029/JA084iA04p01347.
- 21) M. Kubota, "Evening co-rotating patches: A new type of aurora observed by high sensitivity all-sky cameras in Alaska," *Geophysical Research Letters*, vol. 30, no. 12, pp. 12-15, 2003, doi: 10.1029/2002GL016652.
- 22) Y. Ebihara, T. Sakanoi, K. Asamura, M. Hirahara, and M. F. Thomsen, "Reimei observation of highly structured auroras caused by nonaccelerated electrons," *Journal of Geophysical Research-Space Physics*, vol. 115, 2010, doi: 10.1029/2009ja015009.
- 23) S. I. Akasofu, "The development of the auroral substorm," *Planetary and Space Science*, vol. 12, no. 4, pp. 273-282, 1964, doi: 10.1016/0032-0633(64)90151-5.
- 24) Y. Kamide, J. D. Craven, L. A. Frank, B. h. Ahn, and S. I. Akasofu, "Modeling substorm current systems using conductivity distributions inferred from DE auroral images," *Journal of Geophysical Research*, vol. 91, no. A10, pp. 11235-11235, 1986, doi: 10.1029/JA091iA10p11235.
- 25) Y. Ebihara and T. Tanaka, "Substorm simulation: Formation of westward traveling surge," *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 120, no. 12, pp. 10,466-10,484, 2015, doi: 10.1002/2015JA021697.
- 26) T. Tanaka, "Substorm Auroral Dynamics Reproduced by Advanced Global Magnetosphere-Ionosphere (M-I) Coupling Simulation," 2015, pp. 177-190.
- 27) Y. Ebihara, "Mechanism of Auroral Breakup," *Japanese Journal of Multiphase Flow*, vol. 33, no. 3, pp. 267-274, 2019, doi: 10.3811/jjmf.2019.T012.
- 28) Y. Ebihara, T. Tanaka, and N. Kamiyoshikawa, "New Diagnosis for Energy Flow From Solar Wind to Ionosphere During Substorm: Global MHD Simulation," *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 124, no. 1, pp. 360-378, 2019, doi: 10.1029/2018JA026177.
- 29) Y. Ebihara and T. Tanaka, "Energy Flow Exciting Field-Aligned Current at Substorm Expansion Onset," *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 122, no. 12, pp. 12288-12309, 2017, doi: 10.1002/2017JA024294.
- 30) T. Tanaka *et al.*, "Global simulation study for the time sequence of events leading to the substorm onset," *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 122, no. 6, pp. 6210-6239, 2017, doi: 10.1002/2017JA024102.
- 31) Y. Ebihara and T. Tanaka, "Substorm simulation: Insight into the mechanisms of initial brightening," *Journal of Geophysical Research A: Space Physics*, vol. 120, no. 9, pp. 7270-7288, 2015, doi: 10.1002/2015JA021516.
- 32) H. Miyaoka, T. Hirasawa, K. Yumoto, and Y. Tanaka, "Low latitude aurorae on October 21, 1989. I," *Proceedings of the Japan Academy. Ser. B: Physical and Biological Sciences*, vol. 66, no. 3, pp. 47-51, 1990, doi: 10.2183/pjab.66.47.

- 33) K. Shiokawa, C. I. Meng, G. D. Reeves, F. J. Rich, and K. Yumoto, "A multievent study of broadband electrons observed by the DMSP satellites and their relation to red aurora observed at midlatitude stations," *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 102, no. A7, pp. 14237-14253, 1997, doi: 10.1029/97JA00741.
- 34) K. Shiokawa, "Low-latitude auroras observed in Japan: 1999–2004," *Journal of Geophysical Research*, vol. 110, no. A5, pp. A05202-A05202, 2005, doi: 10.1029/2004JA010706.
- 35) H. Hayakawa *et al.*, "Long-lasting Extreme Magnetic Storm Activities in 1770 Found in Historical Documents," *Astrophysical Journal Letters*, vol. 850, no. 2, 2017, doi: 10.3847/2041-8213/aa9661.
- 36) Y. Ebihara, H. Hayakawa, K. Iwahashi, H. Tamazawa, A. D. Kawamura, and H. Isobe, "Possible Cause of Extremely Bright Aurora Witnessed in East Asia on 17 September 1770," *Space Weather*, vol. 15, no. 10, pp. 1373-1382, 2017, doi: 10.1002/2017SW001693.
- 37) K. Shiokawa, K. Yumoto, Y. Tanaka, T. Oguti, and Y. Kiyama, "Low-Latitude Auroras Observed at Moshiri and Rikubetsu ($L=1.6$) during Magnetic Storms on February 26, 27, 29, and May 10, 1992," *Journal of geomagnetism and geoelectricity*, vol. 46, no. 3, pp. 231-252, 1994, doi: 10.5636/jgg.46.231.
- 38) D. H. Boteler, "A 21st Century View of the March 1989 Magnetic Storm," *Space Weather*, vol. 17, no. 10, pp. 1427-1441, 2019, doi: 10.1029/2019sw002278.
- 39) A. Pulkkinen, S. Lindahl, A. Viljanen, and R. Pirjola, "Geomagnetic storm of 29-31 October 2003: Geomagnetically induced currents and their relation to problems in the Swedish high-voltage power transmission system," *Space Weather*, vol. 3, no. 8, 2005, doi: 10.1029/2004SW000123.
- 40) N. Yokoyama, Y. Kamide, and H. Miyaoka, "The size of the auroral belt during magnetic storms," *Annales Geophysicae*, vol. 16, no. 5, pp. 566-566, 1998, doi: 10.1007/s005850050626.
- 41) K. Hattori, H. Hayakawa, and Y. Ebihara, "Occurrence of great magnetic storms on 6–8 March 1582," *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 487, pp. 3550-3559, 2019, doi: 10.1093/mnras/stz1401.
- 42) H. Hayakawa *et al.*, "A great space weather event in February 1730," *Astronomy & Astrophysics*, vol. 616, 2018, doi: 10.1051/0004-6361/201832735.
- 43) H. Hayakawa *et al.*, "Temporal and Spatial Evolutions of a Large Sunspot Group and Great Auroral Storms Around the Carrington Event in 1859," *Space Weather*, vol. 17, no. 11, pp. 1553-1569, 2019, doi: 10.1029/2019sw002269.
- 44) H. Hayakawa *et al.*, "The Great Space Weather Event during 1872 February Recorded in East Asia," *The Astrophysical Journal*, vol. 862, no. 1, 2018, doi: 10.3847/1538-4357/aaca40.
- 45) H. Hayakawa *et al.*, "The extreme space weather event in September 1909," *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 484, no. 3, pp. 4083-4099, 2019, doi: 10.1093/mnras/sty3196.
- 46) J. J. Love, H. Hayakawa, and E. W. Cliver, "Intensity and Impact of the New York Railroad Superstorm of May 1921," *Space Weather*, vol. 17, no. 8, pp. 1281-1292, 2019, doi: 10.1029/2019sw002250.
- 47) R. T. Merrill and M. W. McElhinny, *The Earth's magnetic field: Its history, origin and planetary perspective*. London: Academic Press, 1983.
- 48) H. Hayakawa *et al.*, "Records of sunspots and aurora candidates in the Chinese official histories of the Yuán and Míng dynasties during 1261-1644," *Publications of the Astronomical Society of Japan*, vol. 69, no. 4, 2017, doi: 10.1093/pasj/psx045.
- 49) P. Olson and H. Amit, "Changes in earth's dipole," *Naturwissenschaften*, vol. 93, no. 11, pp. 519-42, Nov 2006, doi: 10.1007/s00114-006-0138-6.
- 50) J. Vogt *et al.*, "MHD simulations of quadrupolar paleomagnetospheres," *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 109, no. A12, 2004, doi: 10.1029/2003JA010273.

著者プロフィール



海老原 祐輔 (Yusuke Ebihara)

＜略歴＞ 1999 年総合研究大学院大学博士後期課程修了（博士（理学））／同年スウェーデン国立スペース物理研究所研究員／2001 年国立極地研究所助手／2003-2004 年 NASA ゴダード宇宙飛行センター訪問研究員／2006 年名古屋大学高等研究員特任講師／2011 年京大生存圏研究所准教授、現在に至る。
＜研究テーマと抱負＞宇宙の嵐と生存圏。