

3-4 オーロラ予報「オーロラ・アラート」

3-4 Aurora Forecast – Aurora Alert –

坂口歌織

SAKAGUCHI Kaori

夜空を覆うオーロラは、目に見えない宇宙嵐の発生を大気に映し出す鏡と言われている。宇宙天気予報研究の一環としてオーロラ予報システムを開発し、2012年よりウェブサイト「オーロラアラート」<<https://aurora-alert.nict.go.jp>> から今後の出現予報を公開している [1]。本稿では、ウェブサイトで公開しているアラートレベルの定義、レベルごとのオーロラの出現率、予報手法、予報精度についてまとめる。

Aurora forecast system has been developed as a part of space weather forecast services, and it has been in operation as “Aurora Alert” on web since 2012[1]. This paper summarizes the definition of the alert levels, appearance rates of aurora for each level, forecasting methods, and forecasting accuracy.

1 まえがき

オーロラは、宇宙天気の乱れに伴い発生する超高層大気の発光現象である。最近では宇宙飛行士等によって宇宙から撮影された地球を覆う美しいオーロラの写真が SNS 等に投稿されているのを見る機会も増えた。もちろんオーロラは、宇宙へ行かずとも地上や飛行機からも（天候が良ければ）観測可能であり、宇宙天気予報センターにはオーロラ観測を目的とした人々から通年多くの問い合わせがある。

オーロラが観測可能な地域は、磁気緯度67度付近の「オーロラ帯」と呼ばれる磁極を取り巻く地域である。北半球のオーロラ帯は、カナダ・アラスカ・シベリア・北欧などの地域を含む。文献 [2] によるとオーロラ帯は年間に80～100日程度オーロラが観測される地域として定義されている。しかしながらオーロラ帯に滞在していても、一晩に見えるオーロラの明るさや形状は時々刻々変化する。全く見えないこともあれば、雲との見分けが難しい程度にぼんやりとしたオーロラ（ディフューズオーロラ）が現れることや、明るく鮮明なアーク・カーテン形状のオーロラ（ディスクリートオーロラ）が見えることもある。また、ディスクリートオーロラの一部が増光し、数十分程度で急激にオーロラが夜空一面に広がり、その後数時間にわたり頭上全域で踊る様に光り輝くオーロラが発生することもある。これはオーロラ爆発と呼ばれる現象であり、太陽と地球の相互作用によって突発的に発生する自然現象

である [3]。オーロラ爆発は非常に神秘的な光景であり、その発生機構は未だ解明されていない部分も多く、世界中の科学者が取り組む研究課題である。この現象に出会うことができれば、それは生涯の思い出になるかもしれない。

2 オーロラの明るさ

オーロラは、磁気圏から電離圏へ降下したプラズマが超高層大気に衝突した時に発生する大気の励起光である。主成分は電子であるため、電流として考えると電離圏から磁気圏に向かって流れる沿磁力線電流の電離圏側で発生する現象である。オーロラの発生に伴い電離圏に水平電流（オーロラジェット電流）が流れると地上では強い磁場変動が観測される。オーロラは高度数百 km に出現する現象であり、出現していても雲などにより天候によっては地上からは観測できないことがある。そこで、オーロラアラートでは天候に作用されずに観測可能な地磁気変動（AL 指数）をオーロラの活動度の指標としてモニタしている。AL 指数は、京都大学地磁気世界資料解析センターが準リアルタイムで算出している Auroral Electrojet (AE) 指数の一種であり、オーロラ帯全域の地磁気の水平成分の最大減少値を示す [4]。

図1はオーロラ発光強度（緑線）と AL 指数（黒線）の時間変化を示す。これは2001年12月12日の夜間に米国アラスカ州フェアバンクス近郊のアラスカ大学ボー

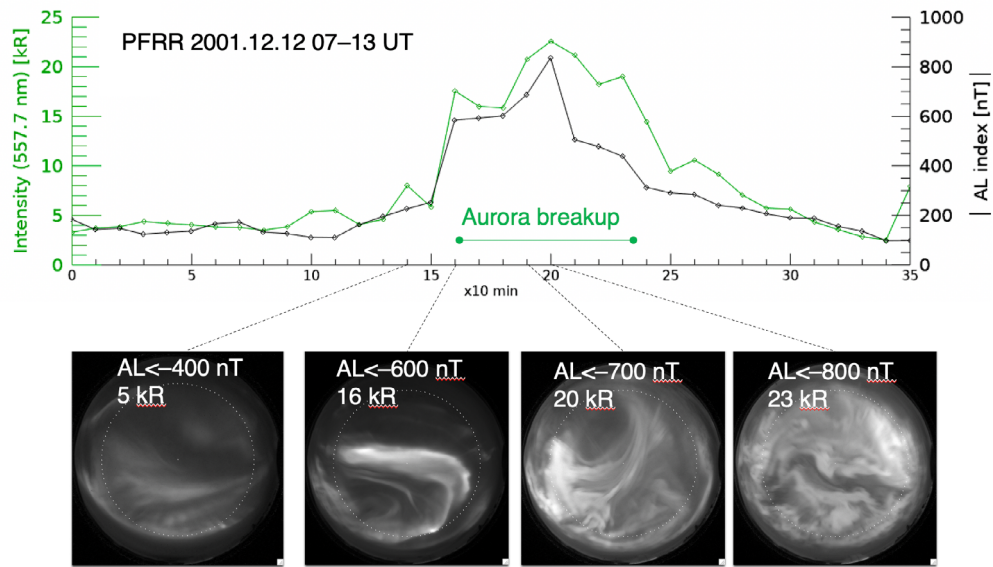


図1 2001年12月12日07:00-13:00 UTのオーロラの明るさ(緑)とAL指数(黒)の時間変化 アラスカ大学フェアバンクス校PFRRの全天イメージャによる波長557.7 nmの観測値に基づく。画像は各時間のオーロラの様子。

カーフラットリサーチレンジ (PFRR) の全天分光イメージャ [5] で観測された波長 557.7 nm の酸素原子の発光強度の時間変化である (360 度の視野のうち天頂角 30 度以上の平均発光強度を示す)。オーロラ発光強度の増加と同時に AL 指数の絶対値が増大しており、AL 指数がオーロラの明るさの尺度として利用できることが分かる。画像は各時間の全天の様子であり、オーロラ爆発 (aurora breakup) 発生中は視野全体にオーロラが広がっている。

オーロラの光の源は超高層大気に存在する原子・分子・イオンの励起光であり、複数の輝線が発光した場合は、その重ね合わせにより色味の変化を示す。可視オーロラの代表的な発光輝線は、酸素原子の緑色 (OI 557.7 nm) と赤色 (OI 630.0 nm)、窒素分子イオンの青色 ($N_2^+ 1\text{ NG}$ 427.8 nm) である。表 1 は、AL 指数 (絶対値の 10 分平均値) の各範囲 ($100 < |AL|$ 、 $100 \leq |AL| < 300$ 、 $300 \leq |AL| < 500$ 、 $500 \leq |AL|$) に対する、オーロラの明るさの平均強度を示す。AL 指数の絶対値が 100 nT 未満の場合は、緑・赤・青すべてのオーロラの明るさは平均 1 kR 以下である。これは、オーロラが上空に全く存在していない、または、存在していても見えないほど暗いということを意味する。つまり $|AL| < 100$ nT の条件はオーロラの観測には適していないことを表す。AL 指数の絶対値が 100 nT 以上 300 nT 未満の範囲の場合、緑色のオーロラの明るさは平均 3 kR 程度である。これは肉眼で、ぼんやりしたオーロラが観測できる程度の明るさである。オーロラを見慣れていない場合は、雲との区別が難しいかもしれない。しかし、カメラ等で長時間露光撮影をすれば綺麗なオーロラ写真の撮影を楽しむことができるはず

表 1 オーロラ予報レベルの基準

AL index	< 100 nT	100-300 nT	300-500 nT	>500 nT
557.7nm (OI)	<1 kR	~3 kR	5 kR	~10 kR
427.8nm ($N_2^+ 1\text{ NG}$)	<1 kR	<1 kR	<1 kR	~2 kR
630.0nm (OI)	< 1kR	<1 kR	~1 kR	~2 kR
Level	 1 ほとんど見えない	 2 緑のオーロラがぼんやり見えるかも	 3 緑や赤の明るいオーロラが見えるよ	 4 色とりどりのオーロラが夜空を舞うよ

である。AL 指数の絶対値が 300 nT 以上 500 nT 未満の範囲の場合、緑色のオーロラの明るさは平均 5 kR、赤色のオーロラの明るさは平均 1 kR である。明るさの強度値は低い、これは全天の平均値であるため、空の一部に明るいオーロラの固まりが見られるはずである。例えば、図 1 の左端の画像のような明るいカーテン状のオーロラを観測できる可能性が高く、場合によっては赤色のオーロラも観測できるかもしれない。AL 指数の絶対値が 500 nT 以上の場合、緑色のオーロラの明るさは平均 10 kR、赤色のオーロラは平均 2 kR、青色のオーロラは平均 2 kR である。三波長すべての輝線の明るさの平均値が 1 kR を超え、図 1 の右から 3 つの画像のように空一面に、非常の明るいオーロラが観測できることが期待できる。

オーロラアラートでは上記の、2001 年から 2002 年の 2 年間の PFRR における観測による、AL 指数と色ごとの明るさの関係に基づき、アラートレベルを以下

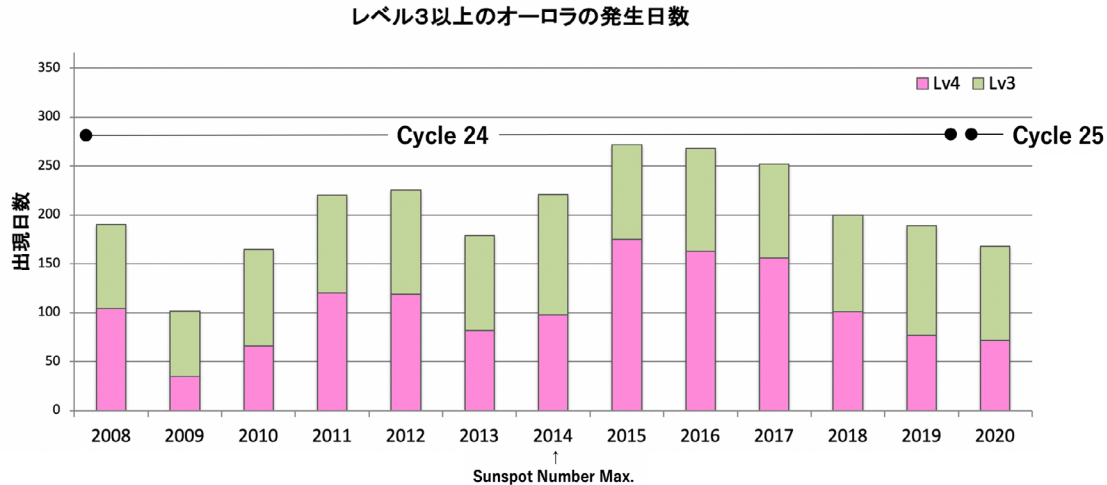


図2 レベル3以上のオーロラの出現実績

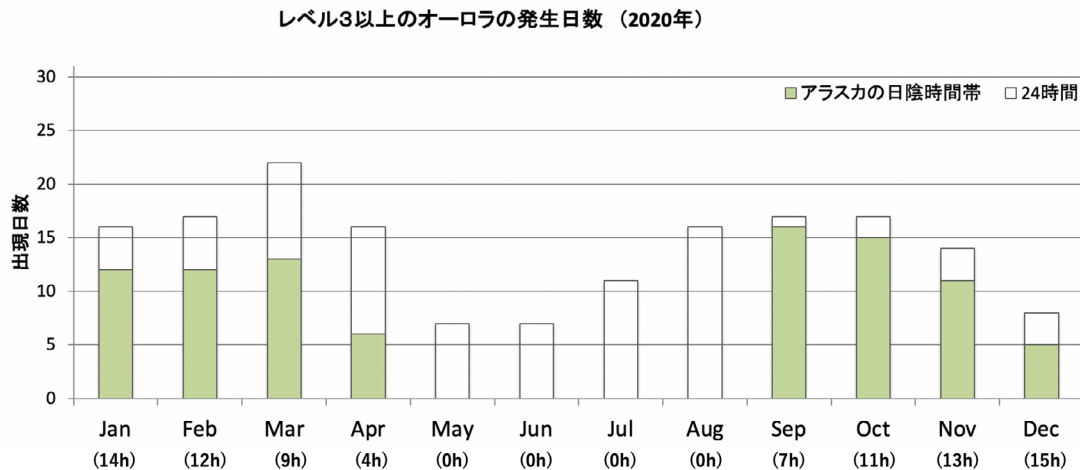


図3 レベル3以上のオーロラの出現実績とアラスカの日陰時間

の4レベルに分類している。

- ・Lv. 1：ほとんど見えない
- ・Lv. 2：緑のオーロラがぼんやり見えるかも
- ・Lv. 3：緑や赤の明るいオーロラが見えるよ
- ・Lv. 4：色とりどりのオーロラが見えるよ

3 出現率

オーロラの出現率は季節や11年周期の太陽活動に伴い変化する。米国SWPC/NOAA (Space Weather Prediction Center, National Oceanic and Atmospheric Administration)によると、前太陽活動サイクル24は2008年に開始し、その後極大期を2014年に迎え、2019年末に終了したことが報告されている。図2に2008年以降のレベル3・レベル4のオーロラの出現日数を積み上げ棒グラフで示す。年間のオーロラ発生日数は太陽活動度の増減とほぼ同期しており、図2からもサイ

クルの開始時期及び終了時期は出現日数が少ないことが分かる。例えば、この期間で最も出現日数が多かったのは極大期の1年後の2015年であり、レベル3以上のオーロラ発生日数が270日を超えていた。これは、ほぼ毎日(約70%)オーロラ帯のどこかで明るいオーロラが出現していたことを意味する。一方、最も少なかったのは極小期の1年後の2009年であり、年間発生日数は100日程度(約27%)であり、2015年と比べると1/3程度の出現日数であった。新しい太陽活動サイクル25は2020年から始まった。まだオーロラの発生日数の増加は見られないが、今年以降は今後の太陽活動の増大に伴うオーロラ出現日数の増加が期待される。

次に、図3は2020年の月別のオーロラの出現日数を示す。棒グラフの高さは、昼夜全てを含めた24時間でレベル3以上のオーロラが最低1回出現した日数を示す。春分・秋分付近でオーロラ出現日数が多くなっていることが分かる。これは、地球と太陽の位置関係による

影響によるもので2020年に限らず、毎年同じ傾向が現れることが知られている (Russel-McPherron 効果) [6]。図3のグラフの横軸のラベル下の括弧内の数字は、その月のアラスカ地域の平均日陰時間を示す。また、緑色の棒グラフの高さは、アラスカの日陰時間帯にオーロラが出現した日数を示す。観測者のいる時間帯が昼の場合、太陽光の影響でオーロラを見ることはできない。特にオーロラ帯が位置する緯度では、高緯度であるために夏至前後約4か月間(5～8月)は白夜期となり、オーロラを観測することができない。太陽が沈んでいる時間が長い冬はオーロラを観測できる時間も長くオーロラ観測に最適のように思われるが、先述した Russel-McPherron 効果や冬の寒さを考えると、オーロラ観測に最適なのは春分の前・秋分の後の時期となる。

4 予報モデルと精度

4.1 数時間先の予報

オーロラの主なエネルギー源は地球磁気圏内に侵入する太陽風であり、特に太陽風の電場と AL 指数には強い相関関係があることが先行研究により示されている [7]。2021 年現在、太陽風のリアルタイム観測を行っている人工衛星は ACE とその後継機の DSCOVR のみである。これらの人工衛星は、地球から太陽方向に約 150 万 km 離れた太陽と地球のラグランジュ点 L1 で太陽風プラズマ、磁場等を常時計測している。太陽風は L1 地点を通過後、磁気圏前面に到達するまで数十分～1時間程かかる。さらに太陽風が地球磁気圏に侵入しオーロラの明るさや形状に変化をもたらすに至るまでには数十分～1時間の時間を要する。オーロラアラートでは、これらの時間差と太陽風と AL 指数の相関に基づく経験モデルを利用して、数時間先の AL 指数を計算している。本システムで利用している多変量自己回帰モデルを式 (1) に示す。

$$\mathbf{Y}(t) = \sum_{n=1}^m \mathbf{A}(n) \mathbf{Y}(t-n) + \mathbf{v} \quad (1)$$

$\mathbf{Y}$ は時系列ベクトル、 $\mathbf{A}(n)$ は回帰次数 n の係数行列、 $\mathbf{v}$ はホワイトノイズベクトルである。 m は最大回帰数、 k は変数の数である。 $\mathbf{Y}(t) = [y_1(t), \dots, y_k(t)]^T$ に予測変数である AL 指数と説明変数である太陽風速度や磁場等のパラメータの時系列データを入力することで、直近のデータから未来が推定できる。

図4に AL 指数の予測値と観測結果の比較を示す。この例は、2020 年 11 月 1 日 13:10 UT 以前の観測値を黒線、予測計算結果を赤線、実際の観測結果を黒い破線で示す。この予測計算では 30 分後の 13:40 UT にアラートレベルが 3 になることを予報している。実際

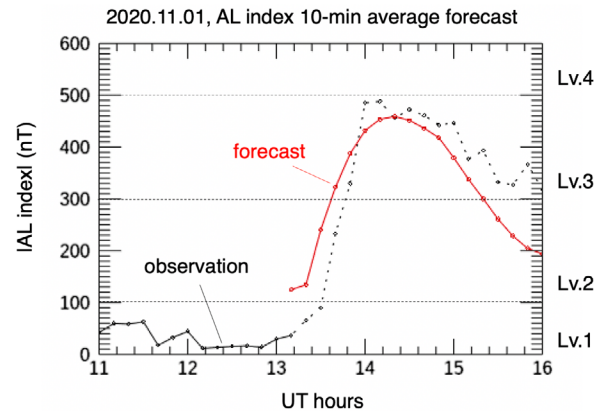


図4 予測値と実際の観測結果の比較

の観測では 40 分後の 13:50 UT にアラートレベルが 3 を超え、10 分の誤差で予測に成功していることが分かる。14 時 UT 付近に AL 指数はピークを迎え、その後は減少傾向になることも予報されている。オーロラ観測は寒さと眠気との戦いである。13 時時点で明るいオーロラに出会えていない観測者が、このあとは諦めて帰るかどうか迷っている時、この予報を見れば 1 時間後には明るいオーロラに出会えることを知ることができる。

4.2 数か月先の予報

オーロラ観測を計画する段階では、長期予報が知りたい人が多いはずである。その場合は、上記のリアルタイムの太陽風をベースとしたモデルはリードタイムが数時間のため全く足りない。長期予報は太陽風の起源である太陽をモニターすることが手掛かりとなる。特に、明るいオーロラの出現確率は、特に高速太陽風が地球に到来した場合に高くなる。太陽から高速風が吹き出す原因の一つは、太陽表面におけるコロナホール領域の形成である。コロナホールは太陽表面上の磁場の開いた領域であるため、磁力線に沿って高速太陽風が惑星間空間へ流出する。一度形成されたコロナホールは数か月以上に渡り存在することも珍しくない [8]。地球に対して太陽は約 27 日周期で自転しているため、地球に到来する高速太陽風にも 27 日周期の回帰性がある場合が多い。このため明るいオーロラの出現頻度にも約 27 日の回帰性がある。オーロラアラートでは、この回帰性を利用した 1 日～2 か月先の長期予報も公開している。これは、ある日の 0 時 UTC から始まる 24 時間のアラートレベルの最大値 $L_{V_{\max}}(n)$ は、27 日後・54 日後にも観測される、つまり $L_{V_{\max}}(n) = L_{V_{\max}}(n+27) = L_{V_{\max}}(n+54)$ とした非常に簡易な推定である。コロナホール以外にも、太陽フレアやフィラメント噴出等に伴うコロナ質量噴出 (CME) が発生し

た場合は、噴出後1～3日で地球に高速風が到来し明るいオーロラが観測される場合がある。このような一過性の現象発生による数日後のオーロラの明るさ増大予報には、オーロラアラートは現状対応できておらず、今後の課題である。

表2に長期予報の精度を示す。2020年1月からの1年間でオーロラのアラートレベルの最大値が3以上になった日は合計132日、最大値がレベル2以下の日は合計234日であった。アラートレベルの観測値の最大が3以上であった132日のうち、27日前にレベル3以上と予報していたのは67日であった。この結果は27日前予報の適中率が51%であることを意味する。逆に、アラートレベルの観測値の最大が2以下であった233日のうち、27日前にレベル2以下と予報していたのは165日であった。これは見えない予報の敵中率が71%であることを示す。表1の対角部分は、「見逃し」と「空振り」の確率を示す。オーロラアラートでオーロラが観測に適しているレベル3以上が予報された135日のうち、実際はレベル2以下となったケースは68日あった。これは「空振り」の確率が50%であることを意味する。またオーロラがレベル2以下と予報されていたが、実際はレベル3以上となったのは231日中65日であった。これは「見逃し」の確率が28%であることを意味する。表2の括弧内の数値は54日前の予報に対する精度評価であり、27日前の予報に比べて、敵中率は減り、見逃し・空振りは共に増える。CMEの発生やコロナホールの形状変化等を考慮できていないため予報精度はまだ高いとは言えないが、今後更なる精度向上を目指し研究開発を進める予定である。

謝辞

オーロラアラートの運用を開始して約10年が経ちました。多くの皆様にご利用・応援いただき感謝しております。アラスカのオーロラ光学観測データは久保田実氏(現 NICT ソーシャルイノベーションユニッ

ト・ユニット長)にご提供いただきました。本システムの運用に欠かせない、太陽風のリアルタイム観測データを提供していただいている National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) 及び AE 指数を提供して頂いている京都大学地磁気世界資料解析センター及び関連機関に深く感謝致します。

【参考文献】

- 1 坂口歌織, “オーロラ自動予報システムの開発,” NICT NEWS, 独立行政法人情報通信研究機構, no.417, 2012.
- 2 E. H. Vestine, “The Geographic Incidence of Aurora and Magnetic Disturbance, Northern Hemisphere,” Terr. Magn. Atmos. Electr., vol.49, no.2, pp.77–102, 1944.
- 3 S.-I. Akasofu, “The development of the auroral substorm,” Planetary and Space Science, vol.12, Issue 4, 1964.
- 4 M. Nose, T. Iyemori, M. Sugiura, and T. Kamei, “World Data Center for Geomagnetism, Kyoto,” Geomagnetic AE index, 2015. doi:10.17593/15031-54800
- 5 M. Kubota, M. Ishii, K. Shiokawa, M. K. Ejiri, and T. Ogawa, “Height measurements of nightglow structures observed by all-sky imagers,” Adv. Space Res., vol.24, pp.593–596, 1999.
- 6 Russell, C. T. and R. L. McPherron, “Semiannual variation of geomagnetic activity,” J. Geophys. Res., vol.78, pp.92–108, 1973.
- 7 Newell, P. T., T. Sotirelis, K. Liou, C.-I. Meng, and F. J. Rich, “A nearly universal solar wind-magnetosphere coupling function inferred from 10 magnetospheric state variables,” J. Geophys. Res., vol.112, A01206, 2007. doi:10.1029/2006 JA012015
- 8 I. M. Hewins, S. E. Gibson, D. F. Webb, R. H. McFadden, T. A. Kuchar, B. A. Emery, and S. W. McIntosh, “The Evolution of Coronal Holes over Three Solar Cycles Using the McIntosh Archive,” Solar Phys., vol.295, article number.161, 2020.



坂口歌織 (さかぐち かおり)

電磁波研究所
電磁波伝搬研究センター
宇宙環境研究室
主任研究員
博士(理学)
磁気圏物理学、超高層大気物理学

表2 長期予報の精度

	27日前予報 (54日前予報)	
	Lv.3以上 135日 (142日)	Lv.2以下 231日 (224日)
観測 Lv3以上 132日	敵中率 51% (45%)	見逃し 28% (32%)
観測 Lv2以下 234日	空振り 50% (58%)	敵中率 71% (64%)