

レベルセット法とスペクトルエントロピー法を用いた 脈動オーロラ領域検出の改善

井上 智寛¹ 尾崎 光紀^{1,a)} 八木谷 聡¹ 今村 幸祐¹ 塩川 和夫² 三好 由純² 片岡 龍峰³

受付日 2020年2月28日, 採録日 2020年9月10日

概要: 地球周辺の磁気圏では、波動粒子相互作用によって数 keV～数百 keV のプラズマ粒子が波動を励起し、励起した波動によって数百 keV のプラズマ粒子が MeV のエネルギーまで加速されることがある。また、このような加速と同時に、波動粒子相互作用により、広いエネルギー帯 (keV～MeV) のプラズマ粒子 (高エネルギー粒子) が散乱され、地上に向かって降下する。この高エネルギー粒子は、人工衛星などに不具合を引き起こすため、高エネルギー粒子の振舞いを知ることは、宇宙開発において非常に重要となる。高エネルギー粒子は、高層大気と衝突することで脈動オーロラという発光現象を発生させ、それを観測することで間接的に磁気圏の高エネルギー粒子の振舞いを観測できるが、他のオーロラや白色雑音などの雑音が含まれるため、脈動オーロラの時空間解析が困難であった。本論文では、雑音低減処理として輝度値の非線形関数による補正や雑音を推定するスペクトルエントロピー法を用い、領域抽出処理として大津の二値化やレベルセット法を提案した。脈動オーロラを模擬したテスト動画を作成し、テスト動画の SNR を変化させたとき、白色雑音を付加していないテスト動画の検出領域を基準とする正規化相互相関値で領域検出精度を比較した。スペクトルエントロピー法とレベルセット法において、SNR が小さい (−5 から 0 dB) ときに相関値が約 0.96 と高い値を示し、脈動オーロラの時空間解析が可能になった。

キーワード: 脈動オーロラ, レベルセット法, スペクトルエントロピー法, 大津の二値化

Improving the Detection of Pulsating Auroral Region Using Level Set Method and Spectral Entropy Method

TOMOHIRO INOUE¹ MITSUNORI OZAKI^{1,a)} SATOSHI YAGITANI¹ KOUSUKE IMAMURA¹
KAZUO SHIOKAWA² YOSHIZUMI MIYOSHI² RYUHO KATAOKA³

Received: February 28, 2020, Accepted: September 10, 2020

Abstract: Plasma waves accelerate plasma particles (several eV) to high-energy particles (several MeV) via wave-particle interactions in the magnetosphere. A part of accelerated particles precipitate down to the ionosphere along the magnetic field lines. Then, pulsating aurora is observed on the ground. In order to understand magnetospheric dynamics, the spatio-temporal analysis of the pulsating aurora is important. However, the spatio-temporal analysis of the pulsating aurora was difficult because observed auroral images included noises. In this study, we propose the spectral entropy method and the correction by nonlinear function as the noise reduction method, and the level set method and the Otsu's method as the auroral region extraction. We make a test movie of pulsating aurora and evaluate the region detection accuracy with ZNCC (Zero-mean Normalized Cross-Correlation) corresponding to the SNR of the test movie. The ZNCC calculates the correlation value with the region detection of the test movie without white noise. The results in the spectral entropy method and the level set method show the high correlation of 0.96 when the SNR is small (−5 to 0 dB).

Keywords: pulsating aurora, level set method, spectral entropy method, Otsu's method

¹ 金沢大学
Kanazawa University, Kanazawa, Ishikawa 920–1192, Japan
² 名古屋大学
Nagoya University, Nagoya, Aichi 464–8601, Japan

³ 国立極地研究所
National Institute of Polar Research, Tachikawa, Tokyo 190–8518, Japan
a) ozaki@is.t.kanazawa-u.ac.jp

1. はじめに

地球周辺の宇宙環境を利用した科学実験・研究が増えており、気象衛星やGPS衛星などの商用衛星は我々の生活においてなくてはならないものとなっている。地球周辺の宇宙は主に太陽光で電離したガス状のプラズマ大気を含む領域（電離圏：高度90km以上）と電離圏より外側の地球固有磁場の影響が及ぶ領域（地球磁気圏：高度500km以上）に分けられており、これらの領域を調査するという事は宇宙開発にとって重要である。磁気圏で、サブストームや磁気嵐と呼ばれる擾乱が起きると内部磁気圏にある数keVから数百keVのプラズマ粒子が自然電磁波 [1], [2] (数Hz~100kHz) を励起し、発生した自然電磁波によって数百keVのプラズマ粒子がMeVのエネルギー [3] まで加速されることがある。また、このような加速と同時に、波動粒子相互作用により、広いエネルギー帯 (keV~MeV) のプラズマ粒子 (高エネルギー粒子) が散乱され、地上に向かって降下する。降下した高エネルギー粒子は、商用衛星の故障や船外活動をしている人体への被曝を引き起こすことが懸念されている。そのため、宇宙開発を円滑に進めるためには、高エネルギー粒子の振舞いを知ることが重要となっている。

波動粒子相互作用は地球磁気圏で起こるため、その観測は科学衛星でのその場観測 [4], [5], [6] が主であった。しかし、衛星観測は機器による通信制限などによって連続での高時間分解能観測が難しい。さらに、衛星はその場観測であるため高エネルギー粒子の空間変動をとらえられないため、高エネルギー粒子が加速されるメカニズムについて完全に解明されていない。高エネルギー粒子は、波動粒子相互作用が起きると地球の磁力線に沿って地上に降下し、高層大気と衝突することでオーロラ (脈動オーロラ [7]) が発光する。そのため、我々は脈動オーロラを地上で動画として観測することで、間接的に磁気圏における高エネルギー粒子の振舞いについて調査している。地上観測は、連続での高時間分解能観測が行えるため、衛星観測では観測できなかった高エネルギー粒子の詳細な振舞いが観測可能になる。さらに、衛星観測では不可能である脈動オーロラの空間的広がりを調査することで、磁気圏における高エネルギー粒子の空間的振舞いが観測できる。

脈動オーロラの地上観測動画には、その他のオーロラや星などの発光成分、白色雑音やスパイクノイズが重畳される。そのため、脈動オーロラの領域検出は難しく、従来は解析者が目視で領域を検出し、空間解析を行っていた。しかし、その解析は解析者の主観的な結果が含まれる。脈動オーロラの空間変動は高エネルギー粒子の空間的振舞いを表し、高エネルギー粒子の生成に重要な解析であるため、主観的ではなく客観的な観測結果が求められる。本研究では、動画像処理技術を用いて脈動オーロラ発光領域の検出

手法を提案する。動画像処理によって脈動オーロラの空間解析が可能になり、客観的な解析結果が得られることが期待できる。

2章では脈動オーロラを地上観測した画像とその特徴について説明する。3章では、観測画像の雑音除去手法や脈動オーロラの領域検出手法などの脈動オーロラ領域検出手法について述べる。4章では、雑音除去手法や領域検出手法のシミュレーションによる評価を行い、脈動オーロラの領域検出で有効な手法を調べる。5章では、脈動オーロラ領域検出手法を実観測動画へ適用する。最後に、6章でまとめと今後の課題を述べる。

2. 脈動オーロラの地上観測

脈動オーロラは、磁気圏での波動粒子相互作用によって高エネルギー粒子 (keV~MeV) が散乱され、地球の磁力線に沿って超高層大気まで降下し、中性大気粒子と衝突することで発光する。電子の降下による発光は脈動電子オーロラ [8]、イオンの降下による発光は脈動陽子オーロラ [9], [10] と呼ばれる。このとき、波動粒子相互作用によって脈動オーロラは一定の周期で発光すると考えられており、この脈動成分をとらえることは、波動粒子相互作用の解明に重要である。

本研究では、カナダのアサバスカ (北緯54.7度、西経115.0度) で観測された脈動オーロラのデータを用いる。脈動オーロラの撮像には、全天高速EMCCDカメラを使用しており、視野角は全天で128×128の画素 (16bitで量子化) で画像化され、110Hzの高時間分解能でオーロラの高解像度な観測が可能である [11]。本研究の全天高速EMCCDカメラには、特定の波長の発光のみを通すようにフィルタをかけている。BG3フィルタを用いることで、電子と酸素イオンの衝突による発光のうち発光寿命が比較的に長い成分 (波長: 557.7nm, 630.0nm) を取り除き、脈動電子・陽子オーロラのような電子やイオンと窒素分子の衝突による発光 (波長: 427.8nm など) を観測している。2015年11月12日7時40分から8時40分でアサバスカにおいて脈動陽子オーロラを全天高速EMCCDカメラで撮像した魚眼画像を図1(a)、図1(a)を地理座標系に変換した画像を図1(b)、図1(b)の地理経度-112.0度の画素を時系列に並べたケオグラムを図1(c)に示す。本研究では、地理座標変換によって128×128の画像は200×200の画像とし、経度は-119.5~-110.5度、緯度は52.45~56.95度の範囲で表示した (観測地点高度: 0.5km, オーロラ発光高度: 110kmを仮定)。図1(b)の楕円型の発光領域 (パッチのような形状) が脈動オーロラであり、そのほかにも周辺に他の種類のオーロラや星の光、迷光なども確認できる。さらに、図1(c)を見ると、脈動オーロラの特徴である一定の周期で脈動していることも確認できる。脈動陽子オーロラの場合は100秒程度 [10], [12]、脈動電子

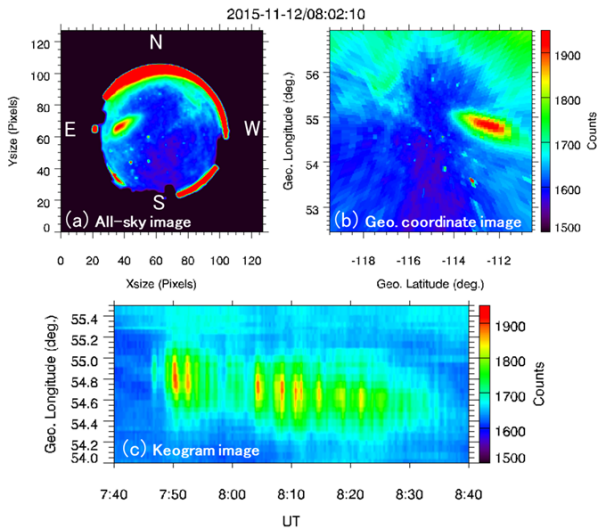


図 1 2015 年 11 月 12 日の脈動陽子オーロラ地上観測データ, (a) 全天画像, (b) 地理座標変換後の画像, (c) 地理経度 -112.0 度のケオグラム

Fig. 1 Selected pulsating proton aurora event on 21 November 2015. (a) All-sky image, (b) Geographic coordinate image, and (c) Keogram image.

オーロラの場合は 10 秒程度 [13], [14] の周期で脈動する。本研究では、脈動オーロラの発光周期が他のオーロラより速いという特徴に着目し、脈動オーロラとその他の発光成分の分離を行い、雑音低減処理手法と領域検出手法の検討を行った。

3. 脈動オーロラの領域検出法

従来、脈動オーロラの研究では、観測者の主観に基づき、画像の領域分割や解析が行われていた。従来の脈動オーロラの領域検出は、観測画像に対して観測者が大まかな範囲指定と閾値処理（観測者が閾値を決める方法や大津の二値化）を用いるのが一般的であった [11]。対象外のオーロラに埋もれていない脈動オーロラは、範囲指定と閾値処理によって領域検出が可能であったが、解析者の負担が多く、非効率的であった。対象外のオーロラに埋もれている脈動オーロラは、脈動オーロラの領域検出が困難であった。

本研究では、脈動オーロラ領域検出法を開発することで客観的に脈動オーロラを発見し、さらに対象外のオーロラに埋もれている脈動オーロラも検出可能にすることを目的としている。脈動オーロラ領域検出アルゴリズムを図 2 に示す。判別処理 (Discrimination process) では、脈動オーロラの発光成分と対象外の発光成分に分離を行い、処理後の画像に対して、雑音低減処理 (Noise reduction) と領域抽出処理 (Region extraction) を行い、脈動オーロラの領域を検出する。

3.1 判別処理 (Discrimination process)

脈動オーロラを観測した画像は、他のオーロラや迷光、

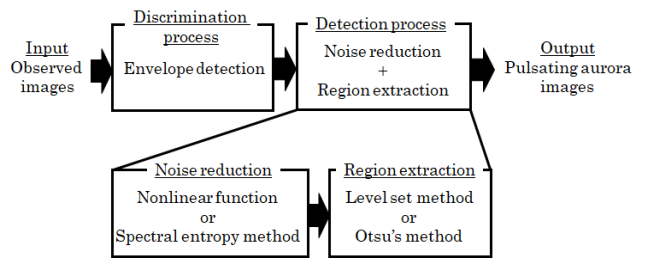


図 2 脈動オーロラ領域検出アルゴリズム

Fig. 2 Detection algorithm of pulsating auroral region.

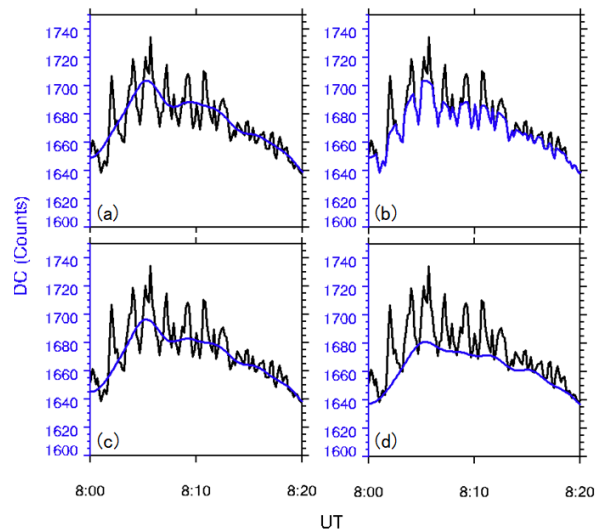


図 3 包絡線検波の方法

Fig. 3 Envelope detection.

星の光などの発光成分が存在している。そのため、判別処理を行わず領域検出処理を行うと脈動オーロラだけでなく、対象外の発光成分も検出される。脈動オーロラの脈動する特徴を利用し、各画素の輝度変化から包絡線検波を用いることで速い周期成分（脈動オーロラの発光成分）と遅い周期成分（対象外の発光成分）の分離を行う。図 3 が本研究で用いる包絡線検波（下端）の計算過程である。(a) の黒の実線が脈動オーロラの発光成分が含まれている画素の輝度変化、青の実線が黒の実線の Low-pass filter 後の変化である。(b) の青の実線は、黒の実線の輝度値が青の実線より小さい (黒 < 青) 区間を黒の実線で上書きを行う。(c) の青の実線は、(b) の青の実線を (a) のときと同じ Low-pass filter をかけることで求める。(a) から (c) を 10 回ループした結果が (d) の青の実線である。Low-pass filter のカットオフ周波数は、 0.005 Hz とした。脈動オーロラの発光成分画像を AC 画像、対象外の発光成分画像を DC 画像と呼称する。2015 年 11 月 12 日 7 時 40 分から 8 時 40 分の観測データ (図 1) に判別処理を行った結果を図 4 (a: AC 画像, b: DC 画像) に、脈動オーロラの発光成分が含まれている画素の輝度変化 (黒) と DC (青), AC (赤) 成分を図 4(c) に示す。図 4(c) を見ると、脈動オーロラの脈動発光成分のみ AC 画像に分離できているのが確認でき

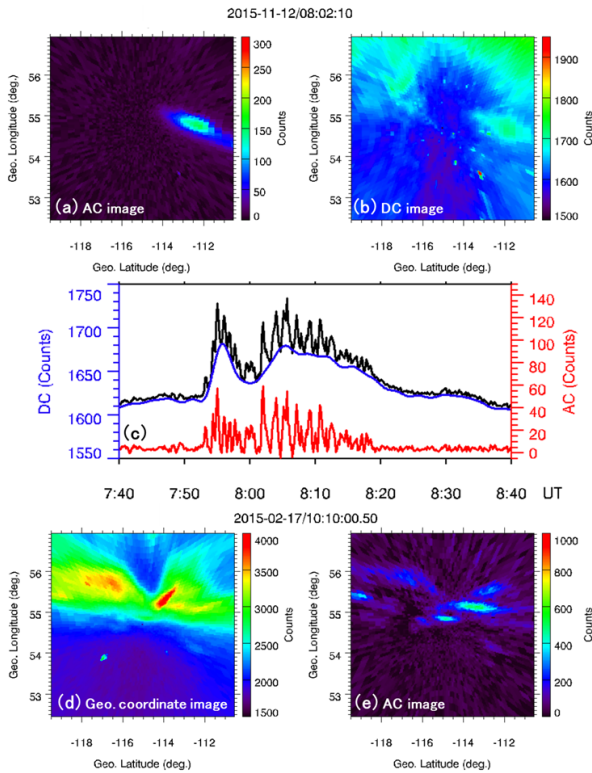


図 4 判別処理結果，2015 年 11 月 12 日 08 時 02 分 10 秒の観測データ：(a) AC 画像，(b) DC 画像，(c) AC と DC 成分の輝度変化，2015 年 2 月 17 日 10 時 10 分の観測データ：(d) 全天画像，(e) AC 画像

Fig. 4 Results of classification process. (a) AC image, (b) DC image, and (c) AC and DC intensity for selected proton aurora event on 12 November 2015. (d) Geographic coordinate image and (e) AC image for selected electron aurora event on 17 February 2015.

る。脈動オーロラがその他のオーロラに重なっているときの観測画像（2015 年 02 月 17 日 10 時 10 分から 10 時 12 分）を図 4(d) に、判別処理後の AC 画像を図 4(e) に示す。図 4(d), (e) を見ると、対象外のオーロラに重なっている脈動オーロラも分離できているのが確認できる。このように、従来の観測者による判別では検出できない脈動オーロラが検出可能になる。

3.2 雑音低減処理 (Noise reduction)

AC 画像には、スパイクノイズや白色雑音などが付加されているため、雑音を低減させる処理を行う。スパイクノイズに対しては、 $15 \times 15 \text{ km}$ の Median filter 処理で除去を行う。白色雑音に対しては、非線形関数 (Nonlinear function) による補正とスペクトルエントロピー (Spectral entropy) 法の比較を行った。

非線形関数による補正では、各画素の輝度値に式 (1) で補正を行う。 x_i は x 軸方向の各画素番号、 y_j は y 軸方向の各画素番号、 $h(x_i, y_j)$ は AC 画像の画素、 $g(x_i, y_j)$ は非線形関数による補正後の画素 (雑音低減後画像の画素) で

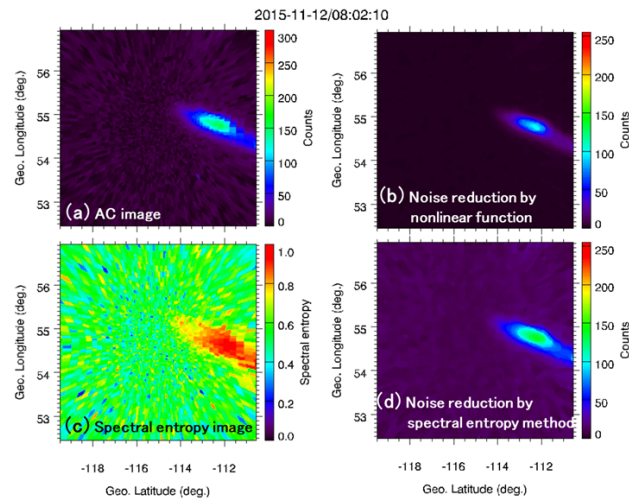


図 5 雑音低減処理後の AC 画像，(a) AC 画像，(b) 非線形関数による補正で雑音低減した AC 画像，(c) スペクトルエントロピー画像，(d) スペクトルエントロピー画像で雑音低減をした AC 画像

Fig. 5 AC images after the noise reduction. (a) AC image, (b) Noise reduction for AC image by nonlinear function, (c) Spectral entropy image, and (d) Noise reduction for AC image by spectral entropy method.

ある。

$$g(x_i, y_j) = h(x_i, y_j)^2 \quad (1)$$

これによって、主に脈動オーロラである輝度値が高い画素は伸長され、白色雑音や迷光などの輝度が低い画素は、脈動オーロラである輝度値と相対的に縮小される。AC 画像 (図 5(a)) に対して Median filter と非線形関数で補正し、0~255 に正規化した結果を図 5(b) に示す。脈動オーロラの輝度が伸長されて、白色雑音や迷光が低減されているのが確認できる。しかし、輝度値が小さい脈動オーロラのみ部分の発光成分も縮小させるという欠点もある。

スペクトルエントロピー法 [15] は雑音を推定する手法であり、信号のスペクトルを確率分布として考え、信号区間と定常雑音区間を判別する手法である。スペクトルエントロピーは、式 (2) によって算出される。 H はスペクトルエントロピー、 p_k は k 番目の周波数の存在確率、 X_k は k 番目の周波数のパワーである。また、 f_1, f_2 は処理対象の周波数帯域の下限値と上限値である。白色雑音のようなスペクトルが均一である信号ではスペクトルエントロピーは低くなり、信号のようなスペクトルが不均一な信号では高い値となる。

$$H = \sum_{k=f_1}^{f_2} p_k \log_2 p_k \quad (2)$$

$$p_k = \frac{X_k}{\sum_{i=f_1}^{f_2} X_i}$$

スペクトルエントロピーを各画素に対して算出し、0~1 に正規化する。図 5(a) のスペクトルエントロピー画像を

図 5(c) に示す. このとき, f_1 と f_2 は, 0.0 と 2.0 Hz とした. 脈動オーロラが出現している領域はスペクトルエントロピーが高くなり, その他の領域は小さくなることを確認できる. Median filter をかけた AC 画像に対してスペクトルエントロピー画像をマスク処理 (画像間での掛け算処理) し, 雑音低減処理を行う. 図 5(a) にマスク処理を行った結果を図 5(d) に示す. 非線形関数による補正と異なり, 脈動オーロラの領域が縮小することなく雑音を低減できる.

3.3 領域抽出処理 (Region extraction)

判別処理と雑音低減処理を行った画像に対して, 領域抽出を行う. Median filter を適用できない画素は, 領域抽出されないようにした. 本研究では, 動的輪郭モデルの一種であるレベルセット法 (LSM: Level set method) [16], [17] と一般的な二値化で用いられる大津の二値化 (OTSU: Otsu's method) [18] の比較を行った.

レベルセット法は動的輪郭モデルの一種であり, 領域の分離や結合を自然な形で表現できる. レベルセット法は曲線の状態 (収縮, 膨張, 曲率変化など) を偏微分方程式で表し, 境界の進行を偏微分方程式の解として表すものである. レベルセット法は, 対象としている空間 (2次元空間) に対して 1つ次元が高い空間 (3次元空間) を想定し, 検出する境界をその高次元空間で定義された補助関数の断面として考える. 図 6 のように, 2次元空間上で時刻 t において検出領域 Ω を考える. このとき, レベルセット法ではこの領域を, 図 6 に示すような 3次元空間で定義された補助関数 Φ のゼロ等高面 $\Phi = 0$ とする. 次に, 次時刻 $t + \Delta t$ において, この補助関数 Φ を移動や変形の更新を行う. $\Phi = 0$ をゼロ等高面として, その時刻の領域 Ω_{T1} と Ω_{T2} を検出する. これを繰り返して, 自然な形で境界の分離, 結合が表現できる. 2次元画像での輪郭線の検出を考える. 時刻 t での境界線を $C(\mathbf{p}, t)$ とする. \mathbf{p} を輪郭線上の点とし, 移動速度 $F(\kappa)$ で境界線の法線方向 \mathbf{N} に移動

すると考える. この κ はその点での境界線の曲率である. そのため, 以下の式が成り立つ.

$$C_t = F(\kappa) \mathbf{N} \tag{3}$$

$$C(\mathbf{p}, 0) = C_0(\mathbf{p}) \tag{4}$$

$F(\kappa)$ は成長速度と呼ばれ, C_t は境界 C の時間変化, $C_0(\mathbf{p})$ は初期曲線である. ここで補助関数 $\Phi(x_i, y_j, t)$ を導入し, 境界線 $C(\mathbf{p}, t)$ はその一部とする. 点 $\mathbf{p}(t)$ が境界線 $C(\mathbf{p}, t)$ 上に存在するため,

$$\Phi(\mathbf{p}(t), t) = 0 \tag{5}$$

と表される. 式 (5) を偏微分すると,

$$\Phi_t + \nabla\Phi(\mathbf{p}(t), t) \mathbf{p}_t = 0 \tag{6}$$

となる. 曲線上の単位法線ベクトルは

$$\mathbf{N} = \frac{\nabla\phi}{|\nabla\phi|} \tag{7}$$

と表される. さらに, 成長速度 $F(\kappa)$ は境界 $C(\mathbf{p}, t)$ の法線方向速度であるから,

$$\mathbf{p}_t \cdot \mathbf{N} = F(\kappa) \tag{8}$$

となる. これにより式 (6) は次のように書ける.

$$\Phi_t = -F(\kappa) |\nabla\Phi| \tag{9}$$

$$\Phi(C_0(\mathbf{p}), 0) = 0 \tag{10}$$

また, 境界線の曲率である κ は, 式 (11) と表せる.

$$\kappa = \nabla \cdot \left(\frac{\nabla\Phi}{|\nabla\Phi|} \right) \tag{11}$$

このように境界 $C(\mathbf{p}, t)$ を直接的に移動する代わりに, 式 (9) によって補助関数 $\Phi(x_i, y_j, t)$ を更新し, $\Phi(x_i, y_j, t) = 0$ を満たす線を新たな境界線とすることで, 境界の分離に対応した領域追跡が可能である. 成長速度 F は, 次の式 (12) とした.

$$F = -G(I) - \alpha G(I) \kappa + \beta \frac{\nabla G(I) \cdot \nabla\Phi}{|\nabla\Phi|} \tag{12}$$

$$G(I) = \frac{1}{1 + |I|^m} \tag{13}$$

I は画像情報, α は 1.0, β は 0.4, m は 3 とした.

大津の二値化は, 画像の輝度値ヒストグラムの分布を閾値で 2つのクラスに分割する手法である. このとき, 2つのクラスの分散の平均 σ_W^2 と 2つのクラスの平均間の距離 σ_B^2 の比を用い, 比が最大になるような閾値 th を決める. クラス内分散 σ_W^2 とクラス間分散 σ_B^2 は,

$$\sigma_W^2 = \frac{\omega_1 \sigma_1^2 + \omega_2 \sigma_2^2}{\omega_1 + \omega_2} \tag{14}$$

$$\sigma_B^2 kl = \frac{\omega_1 \omega_2 (M_1 - M_2)^2}{(\omega_1 + \omega_2)^2} \tag{15}$$

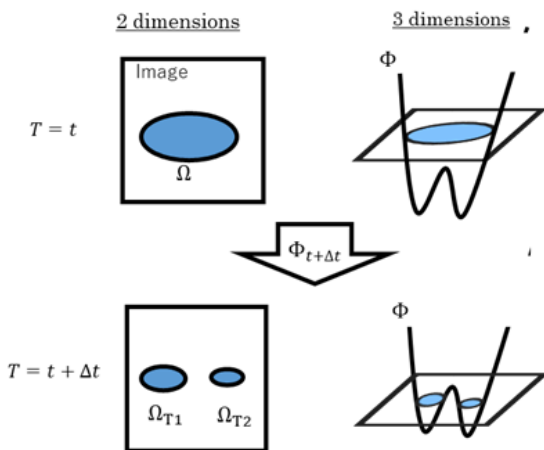


図 6 レベルセット法
Fig. 6 Level set method

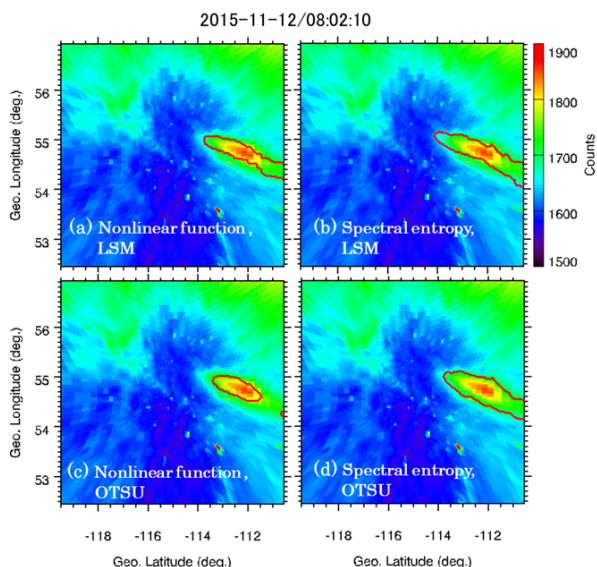


図 7 領域抽出処理の結果. (a) 非線形関数による補正とレベルセット法, (b) スペクトルエントロピー法とレベルセット法, (c) 非線形関数による補正と大津の二値化, (d) スペクトルエントロピー法と大津の二値化

Fig. 7 Results of region extraction. (a) Nonlinear function and LSM, (b) Spectral entropy method and LSM, (c) Nonlinear function and OTSU, and (d) Spectral entropy method and OTSU.

で与えられる. 分割したクラス i ($i = 1, 2$) の画素, 分散, 平均輝度値を ω_i, σ_i, M_i とする. 全画素の輝度値の分散を σ_T^2 とすると, 平均値の分散とクラス内分散の比は,

$$\frac{\sigma_B^2}{\sigma_W^2} = \frac{\sigma_B^2}{\sigma_T^2 - \sigma_B^2} \quad (16)$$

となる. 全分散 σ_T^2 は定数であるため, 式 (16) を最大にするには, σ_B^2 を最大にする閾値 th を選択する.

図 5 (b), (d) に対してレベルセット法を用いて脈動オーロラのパッチ領域を抽出した結果を図 7 (a), (b), 大津の二値化を用いた場合を図 7 (c), (d) に示す. 図 7 は観測された画像に脈動オーロラの領域輪郭 (赤枠) を重ねている. 図 7 (a) から (d) の右下側にある赤い点は, 星明かりであり, 輝度値が大きいため赤色で表示されているが, Median filter によって除去を行っているため, 脈動オーロラの領域 (赤枠) としては検出されない. 大津の二値化は, 画像内の輝度ヒストグラムから閾値を決めて輪郭を検出しているため, 図 7 (c), (d) のように雑音低減処理の手法の違いで, 輪郭が大きく影響を受けやすいが, レベルセット法は, 輝度値だけでなく曲率などの曲線の状態から輪郭を検出しているため, 図 7 (a), (b) のように雑音低減処理の手法の違いで, 輪郭に影響を受けない.

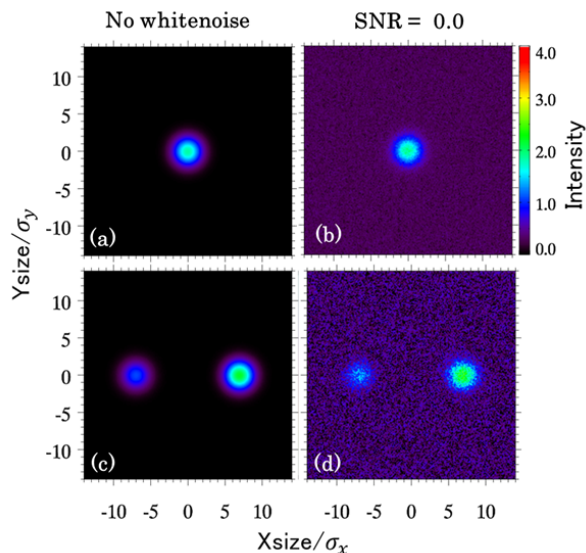


図 8 テスト画像と白色雑音付加後の画像, (a) 脈動オーロラパッチが 1 つのテスト画像, (b) テストデータ (a) に $SNR = 0$ dB の白色雑音を付加, (c) 強度差を持つ脈動オーロラパッチが 2 つのテスト画像, (d) テストデータ (c) に $SNR = 0$ dB の白色雑音を付加

Fig. 8 Test images and white noise added test images. (a) Single patch of pulsating aurora, (b) White noise added test image (SNR: 0 dB), (c) Double patch of pulsating aurora, and (d) White noise added test image (SNR: 0 dB).

4. 脈動オーロラ領域検出手法の評価シミュレーション

4.1 脈動オーロラ自動検出法の精度評価方法

3 章で説明した脈動オーロラ領域検出手法において, 雑音低減処理として非線形関数による補正とスペクトルエントロピー法, 領域抽出処理としてレベルセット法と大津の二値化をそれぞれ用いた場合, どの組合せが脈動オーロラの領域分割に有効かをシミュレーションにより評価した. 評価を行うために脈動オーロラパッチを式 (17) の 2 次元のガウス分布で模擬したテスト動画を制作した.

$$g = A \exp \left(-\frac{1}{2} \left(\frac{(x - \mu_x)^2}{\sigma_x^2} + \frac{(y - \mu_y)^2}{\sigma_y^2} \right) \right) \quad (17)$$

$$A = \frac{\sin(2\pi ft)}{\sqrt{2\pi\sigma_x^2\sigma_y^2}}$$

g はテスト動画, t は時間, f は脈動オーロラパッチの脈動周波数とした. 平均 μ_x, μ_y と分散 σ_x^2, σ_y^2 で脈動オーロラパッチの位置と大きさを決める. これらの動画に白色雑音を付加し, 様々な SNR の動画を作成し, 脈動オーロラ自動検出法を適用する. このとき, 脈動オーロラパッチの振幅が最大時の SNR をテスト動画の SNR とし, SNR はオーロラパッチの中心から 3σ の範囲で計算を行った. 図 8 に単体の脈動オーロラパッチの画像 (a) (振幅が最大時) と強度

表 1 テスト動画の作成パラメータ
Table 1 Parameters of test movie.

	f (Hz)	σ_x	σ_y	μ_x	μ_y
(a), (b)	0.1	0.63	0.63	0	0
(c), (d)	0.1	0.63	0.63	-7, +7	0, 0

差 (2倍と3倍) を持つ複数の脈動オーロラパッチのテスト画像 (c), 図 8(a) と (c) に SNR = 0 dB の白色雑音を付加したときの画像を図 8(b) と (d) に示す. 表 1 に図 8(a), (b) と (c), (d) の作成に用いたパラメータを示す.

評価方法は, 白色雑音を付加していないテスト動画 (図 8(a), (c)) と SNR を変化させたテスト動画 (図 8(b), (d)) における検出領域の相関値を求めることで評価を行った. このとき, 白色雑音を付加していないテスト動画と SNR を変化させたテスト動画に判別処理, 雑音低減処理, 領域抽出処理を適用し, 検出領域はバイナリ画像 (1: 脈動オーロラ領域の検出領域, 0: 検出領域以外) として得られる. 相関値は, 式 (18) の正規化相互相関 (計算範囲: 3σ) を用いた. $I(x_i, y_j)$ は評価する画像, $T(x_i, y_j)$ は目標の画像, RZ は正規化相互相関値である. このとき, 脈動オーロラパッチの中心から 3σ の領域で計算を行うため, 脈動オーロラパッチ (ガウス分布) の中心から半径 3σ 内の画素集合を $C_0 = C(\mu, 3\sigma)$ とした. そのため評価時の画像サイズ S は, $x_i, y_j \in C_0$ の画素数となる. レベルセット法の収束条件は, ゼロ等高面が 8 回連続で変化しなかったときのゼロ等高面を抽出領域とした.

$$RZ = \frac{SR_{TI} - R_T R_I}{\sqrt{(SR_{I2} - R_I^2)(SR_{T2} - R_T^2)}} \quad (18)$$

$$R_{TI} = \sum_{(x_i, y_j) \in C_0} T(x_i, y_j) I(x_i, y_j)$$

$$R_T = \sum_{(x_i, y_j) \in C_0} T(x_i, y_j)$$

$$R_I = \sum_{(x_i, y_j) \in C_0} I(x_i, y_j)$$

$$R_{T2} = \sum_{(x_i, y_j) \in C_0} T(x_i, y_j)^2$$

$$R_{I2} = \sum_{(x_i, y_j) \in C_0} I(x_i, y_j)^2$$

4.2 1つの脈動オーロラパッチ

脈動オーロラパッチが1つときのテスト動画を用いて, 正規化相互相関値のシミュレーションを行った. シミュレーションの試行回数を 20 回行い, 各 SNR の正規化相互相関値の平均を求めた結果を図 9(a) に示す. そのときの, SNR が -5 dB のときの領域検出結果を図 9(b), (c), (d), (e) に示す. 図 9(b) が非線形関数による補正とレベルセット法, (c) がスペクトルエントロピー法とレベルセット法, (d) が非線形関数による補正と大津の二値化, (e) がスペクトルエントロピー法と大津の二値化の領域検出結果であ

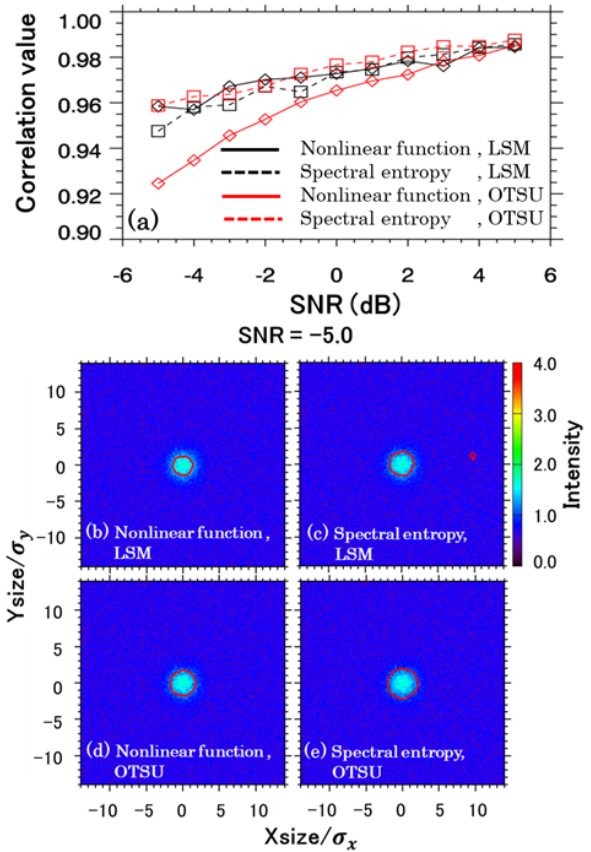


図 9 脈動オーロラパッチが1つときの正規化相互相関結果, (a) 正規化相互相関値, (b) 非線形関数による補正とレベルセット法, (c) スペクトルエントロピー法とレベルセット法, (d) 非線形関数による補正と大津の二値化, (e) スペクトルエントロピー法と大津の二値化

Fig. 9 Correlation results of single patch. (a) Normalized cross-correlation, (b) Nonlinear function and LSM, (c) Spectral entropy method and LSM, (d) Nonlinear function and OTSU, and (e) Spectral entropy method and OTSU.

る. 図 9(c) において, パッチから離れている場所に領域抽出されているが, シミュレーションの SNR が -5 dB と実観測のデータより高いことが原因である. 非線形関数による補正とスペクトルエントロピー法 (図 9 の (b) と (c), (d) と (e)) を比較すると, 3σ の領域では, 非線形関数による補正がスペクトルエントロピー法より小さく領域が検出された. これは, 非線形関数による補正によって脈動オーロラパッチの発光領域内で輝度差が大きくなり, 領域が小さく検出されるためである. スペクトルエントロピー法の場合は, 雑音を推定することで雑音低減を行っており, 脈動オーロラパッチの発光値に対して雑音が支配的な画素のみ圧縮されるため, 検出領域が小さくなることはない. 図 9(a) より, レベルセット法のとときの雑音低減処理は非線形関数による補正とスペクトルエントロピー法のどちらの手法でも, 正規化相互相関値が 0.94 以上であることが得られた. 大津の二値化では, 雑音低減処理が非線形関数に

よる補正のとき SNR が -2 から -5 dB 小さくなる (雑音電力成分が大きくなる) とき, 正規化相互相関値が 0.95 から 0.92 と他の組合せ手法と比べて相関値が低くなる. これは SNR が小さい (-2 から -5 dB) とき非線形関数での補正により雑音電力も伸長され, 大津の二値化のような閾値で領域を抽出する手法では雑音の影響を受けてしまい, 相関値が小さくなる (0.95 から 0.92). レベルセット法のような曲線の状態を用いて領域を抽出する手法では雑音の影響を受けにくいいため, 相関値が高くなる (約 0.96). スペクトルエントロピー法は, 雑音を推定しエントロピー値から補正をしているため, SNR が小さい (-2 から -5 dB) 場合でも雑音の影響を受けにくく, どちらの領域抽出手法でも相関値が高くなる (0.96 から 0.95).

実際の観測の SNR は, 0 dB 以下であるため, 単体の脈動オーロラパッチにおいて, 雑音を推定しているスペクトルエントロピー法と曲線の状態を用いるレベルセット法を含む組合せ (非線形関数による補正とレベルセット法, スペクトルエントロピー法とレベルセット法, スペクトルエントロピー法と大津の二値化) が, SNR が 0 dB 以下で目標画像との相関値が高く (約 0.96), 脈動オーロラパッチの領域検出に有効となる.

4.3 強度差を持つ 2 つの脈動オーロラパッチ

次に, 強度差を持つ 2 つの脈動オーロラパッチのテスト動画を用いて, 抽出面積誤差率と正規化相互相関値のシミュレーションを行った. シミュレーションの試行回数を 20 回行い, 左と右の脈動オーロラパッチそれぞれで正規化相互相関値の平均を求めた結果を図 10 (a) に示す. このとき, 左の脈動オーロラパッチの強度を 1 倍, 右の脈動オーロラパッチの強度を 2, 3 倍と変化させた. SNR が -5 dB で左の脈動オーロラパッチの強度を 1 倍, 右の脈動オーロラパッチを 3 倍したときの領域検出結果を図 10 (b), (c), (d), (e) に示す. 図 10 (b) が非線形関数による補正とレベルセット法, (c) がスペクトルエントロピー法とレベルセット法, (d) が非線形関数による補正と大津の二値化, (e) がスペクトルエントロピー法と大津の二値化の領域検出結果である. 図 10 を見ると, 非線形関数による補正と大津の二値化では左のパッチが検出できず, SNR が -5 dB ではスペクトルエントロピー法と大津の二値化でも左のパッチ領域が検出できなかった. レベルセット法は, どの SNR でも左と右のパッチの領域を検出できており, SNR が小さくなる (0 dB 以下) につれてスペクトルエントロピー法の方が非線形関数による補正より正規化相互相関値が 0.05 高くなる. 大津の二値化で輝度値の弱いパッチを抽出できないのは, 輝度が高いパッチと低いパッチの差が大きくなると, その間で分離度 (平均値の分散と各クラスの分散の比) が大きくなり, 輝度が高いパッチと低いパッチの間で閾値が設定されるためである. 一方でレベル

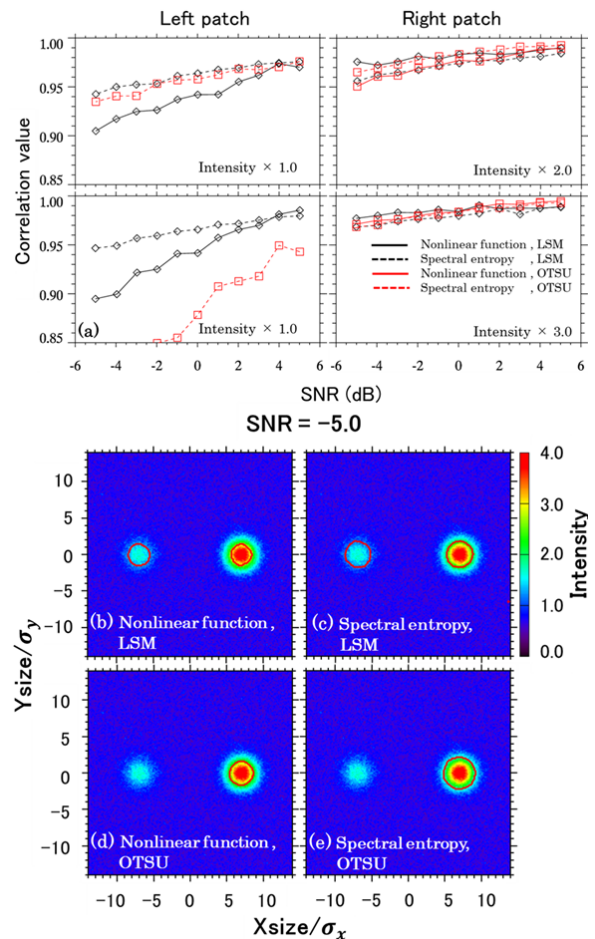


図 10 強度差を持つ脈動オーロラパッチが 2 つのときの正規化相互相関結果, (a) 正規化相互相関値, (b) 非線形関数による補正とレベルセット法, (c) スペクトルエントロピー法とレベルセット法, (d) 非線形関数による補正と大津の二値化, (e) スペクトルエントロピー法と大津の二値化

Fig. 10 Correlation results of double patch images. (a) Normalized cross-correlation, (b) Nonlinear function and LSM, (c) Spectral entropy method and LSM, (d) Nonlinear function and OTSU, and (e) Spectral entropy method and OTSU.

セット法は輝度値だけでなく曲線の状態からも領域を判断しているため, 高い輝度に影響されることなく検出が可能である. SNR が 0 dB 以下で非線形関数による補正を用いた相関値がスペクトルエントロピー法より低くなる (0.93 から 0.90) 原因は, 非線形関数による補正では雑音電力成分も伸長してしまうためである. それに対してスペクトルエントロピー法は, 雑音成分を推定したエントロピー値から低減処理を行っているため, 相関値は高くなる (0.96 から 0.95).

よって, 雑音低減処理に対してスペクトルエントロピー法, 領域抽出処理に対してレベルセット法を採用することで, SNR が 0 dB 以下で雑音を効果的に低減でき, 強度差を持つパッチが複数同時に発生しても脈動オーロラパッチの領域が抽出可能となる.

5. 実観測データへの適用

5.1 実観測データへの領域検出

4章の脈動オーロラ領域検出法を用いて、実際に観測された脈動オーロラ（陽子、電子）の領域検出を行った。2015年11月12日7時56分10秒と7時58分40秒の脈動陽子オーロラ実観測データに対する領域検出結果を図11に示す。(a)から(d)は7時56分10秒の脈動陽子オーロラが発光している時間の画像、(e)から(h)は7時58分40秒の脈

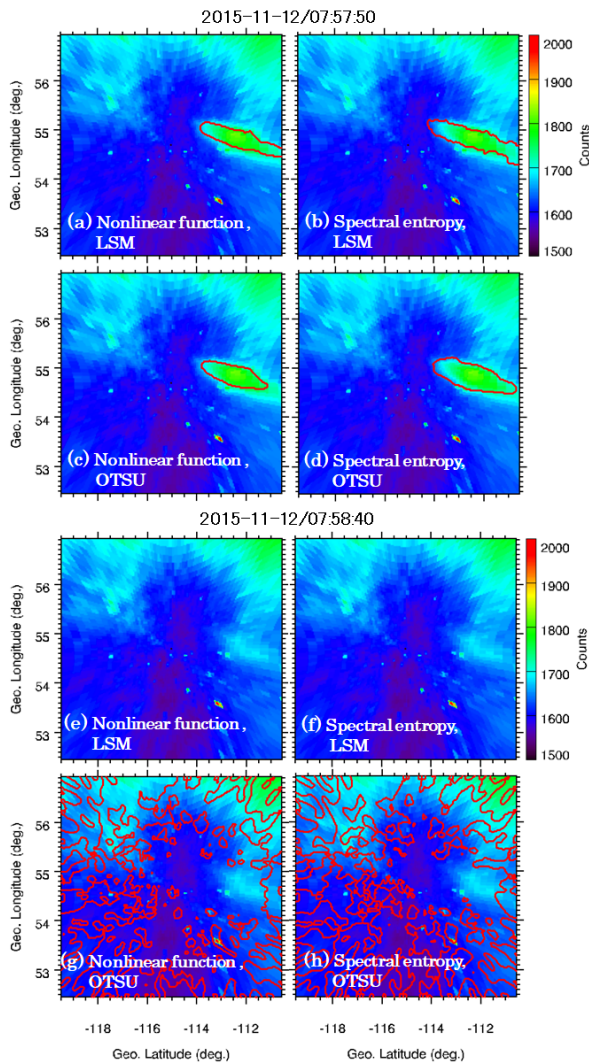


図11 2015年11月12日7時57分50秒と7時58分40秒の脈動陽子オーロラ観測画像に領域検出結果、((a)と(e))非線形関数による補正とレベルセット法、((b)と(f))スペクトルエントロピー法とレベルセット法、((c)と(g))非線形関数による補正と大津の二値化、((d)と(h))スペクトルエントロピー法と大津の二値化

Fig. 11 Detection results of pulsating auroral region for selected proton aurora event on 12 November 2015. ((a) and (e)) Nonlinear function and LSM. ((b) and (f)) Spectral entropy method and LSM. ((c) and (g)) Nonlinear function and OTSU. ((d) and (h)) Spectral entropy method and OTSU.

動陽子オーロラが発光していない時間である。(a)と(e)が非線形関数による補正とレベルセット法、(b)と(f)がスペクトルエントロピー法とレベルセット法、(c)と(g)が非線形関数による補正と大津の二値化、(d)と(h)がスペクトルエントロピー法と大津の二値化の領域検出結果である。脈動陽子オーロラが発光している画像((a)から(d))と発光していない画像((e)から(h))を比較すると、レベルセット法を用いた画像は、脈動陽子オーロラの明滅をはっきりと検出できているのに対し、大津の二値化を用いた画像は、脈動陽子オーロラが発光していない時間帯で対象外の成分を検出している。大津の二値化は、脈動オーロラの発光成分を含んでいない画像の輝度ヒストグラムに対して二値化を行ってしまうのが原因である。雑音低減処理で非線形関数による補正を用いた画像とスペクトルエントロピー法を用いた画像を比較した結果、実観測データに対してもスペクトルエントロピー法より非線形関数による補正の方が、検出した脈動オーロラの発光領域が小さくなる傾向が得られた。これらのことより、脈動オーロラの領域検出には、雑音低減処理としてスペクトルエントロピー法を用い、同時に領域抽出処理としてレベルセット法を用いたとき、脈動オーロラの領域検出で効果的であることが得られた。

さらに、本研究の手法（スペクトルエントロピー法とレベルセット法）と従来の手法（範囲指定と閾値処理）による脈動オーロラの領域検出を行った結果を図12に示す。

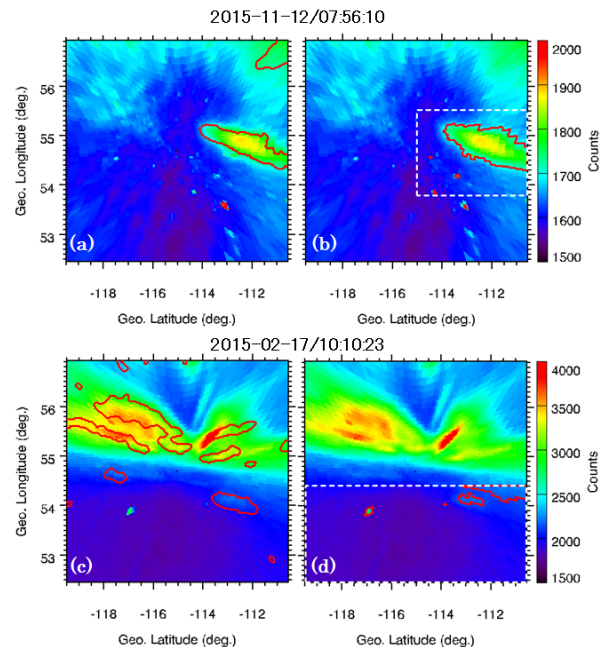


図12 本研究と従来の手法による脈動オーロラの領域検出結果、((a)と(c))本研究におけるスペクトルエントロピー法とレベルセット法による検出結果、((b)と(d))従来の研究における範囲と閾値指定による検出結果

Fig. 12 Detection results of pulsating aurora. ((a) and (c)) Spectral entropy and level set method, ((b) and (d)) Conventional method.

(a) と (b) が 2015 年 11 月 12 日 7 時 56 分 10 秒の脈動陽子オーロラ, (c) と (d) が 2015 年 02 月 17 日 10 時 10 分 00 秒の脈動電子オーロラに対する領域検出結果である. (a) と (c) は本研究の手法, (b) と (d) は従来の手法である. 白点線は観測者によって範囲指定した解析領域である. (b) は, 経度 -115.0 度から -110.6 度, 緯度 53.8 度から 55.5 度の領域内で, 輝度値が 1700 の閾値で領域検出し, (d) は, 緯度 54.4 度以下の領域で, 輝度値が 2500 の閾値で領域検出した結果である. 本研究と従来の手法による脈動オーロラの領域検出結果を比較してみると, 従来の手法では脈動オーロラの発光成分以外にも, 対象外のオーロラや迷光, 星光などの発光成分も検出されているのが分かる. 本研究の手法は, 判別処理を用いることで図 12 (c) のように対象外のオーロラ (脈動しないオーロラ) に重なっている脈動オーロラの領域検出が可能であり, 従来で解析が困難であった詳細な脈動オーロラの時空間解析が可能になった.

2015 年 11 月 12 日 7 時 50 分から 8 時 20 分の脈動陽子オーロラの観測動画に対して, スペクトルエントロピー法とレベルセット法を用いたときの領域検出結果を図 13 に

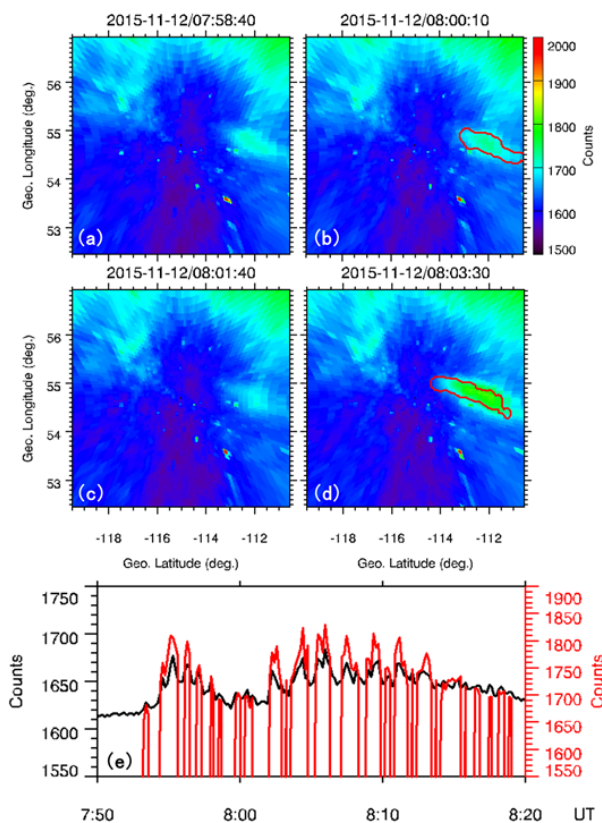


図 13 2015 年 11 月 12 日の脈動陽子オーロラ観測画像にスペクトルエントロピー法と LSM を適用した結果. (a) 7 時 58 分 40 秒の画像, (b) 8 時 00 分 10 秒の画像, (c) 8 時 01 分 40 秒の画像, (d) 8 時 03 分 30 秒の画像, (e) 輝度変化

Fig. 13 Detection results by spectral entropy and level set method for selected proton aurora event on 12 November 2015. (a) 7:58:40 UT, (b) 8:00:10 UT, (c) 8:01:40 UT, (d) 8:03:30 UT, and (e) Auroral intensity.

示す. 図 13 (e) に本研究の精度を調査するため, 従来と本研究の手法における脈動陽子オーロラの輝度値の時間変化を比較した結果を示す. 図 13 (e) の黒実線は, 従来の検出手法 (図 12 (b) と同じ範囲指定のみ) で輝度の平均を計算し, 赤実線は, 本研究における検出領域の範囲で平均を計算したものである. 従来の検出方法 (黒実線) は, 脈動陽子オーロラが発光している時間帯の区別が見分けにくかった. 本研究の検出手法 (赤実線) は, 発光しない時間帯は輝度値が 0 となり, 脈動陽子オーロラの明滅を検出が可能である. さらに, 黒実線の脈動オーロラが発光していると思われる時間帯 (輝度値が局所的に増加している時間帯) では, 赤実線で検出できており, 本研究の検出手法によって, 脈動陽子オーロラの時空間変動の検出が可能になった.

5.2 領域抽出処理における処理時間の検証

2017 年 02 月 17 日 10 時 10 分 00 秒~10 時 12 分 00 秒の観測動画 (時間分解能: 1.0 Hz サンプリング, 120 枚) に対して, レベルセット法と大津の二値化の画像 1 枚あたりの平均処理時間を比較した結果, レベルセット法が 171 sec, 大津の二値化が 0.05 sec であった (計算機の仕様: CPU 3.00 GHz, メモリ 128 GB). レベルセット法は, 逐次計算を行っているため計算コストが大きい. そのため, レベルセット法の処理時間を短くするため, レベルセット法の初期輪郭線の形状を変えることで, 処理時間と脈動オーロラの輪郭が変化するか比較を行った. 従来は, 画像全体を囲む広い初期輪郭線 (中心から 1 辺 170 ピクセルの範囲) を設定するが, 本研究は, 最大輝度ピクセルを中心に 1 辺 50 ピクセルの狭い初期輪郭線を設定することで, 収束する時間の短縮を図った. 図 14 に従来と本研究の初期輪郭線

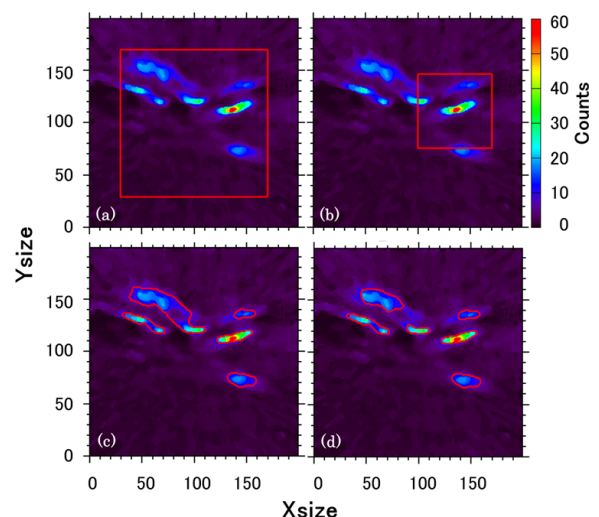


図 14 LSM 初期輪郭線, (a) 中心から 1 辺 170 ピクセルの初期輪郭, (b) 最大輝度から 1 辺 50 ピクセルの初期輪郭, (c) (a) の収束時の輪郭線, (d) (b) の収束時の輪郭線

Fig. 14 ((a) and (b)) Initial contour of LSM. ((c) and (d)) Extracted contour images.

((a), (b)) と収束後の輪郭線 ((d), (e)) を示す。(a) は画像の中心ピクセルを中心に1辺が170ピクセルの初期輪郭線を設定, (b) は画像内の最大輝度ピクセルを中心に1辺が50ピクセルの初期輪郭線を設定した図である。図14(a)の初期輪郭線は, 処理時間が179secであったが, 図14(b)の初期輪郭線では, 処理時間が35.3secとなり, 低減率が80%の高速化が図れた。図14(a)のような初期輪郭線は, 脈動オーロラが発生していない低い輝度ピクセルを多く含んでいるため, そのピクセル分だけ収束に処理時間を要する。しかし, 図14(b)のような初期輪郭線は, 収束までの処理時間が短い, 図14(d)のように輝度の低い画素を含む脈動オーロラパッチが抽出できず, 1つの脈動オーロラパッチが2つの脈動オーロラパッチに分離してしまう。

6. 総括・今後の課題

本研究では, 地上観測された脈動(電子・陽子)オーロラの領域検出アルゴリズムの検討を行った。脈動オーロラ領域検出アルゴリズムは判別処理, 雑音低減処理, 領域抽出処理で構成されている。判別処理では, 脈動オーロラの発光成分(AC)とその他の発光成分(DC)を分離し, 雑音低減処理では, AC画像に対してスパイクノイズと白色雑音の除去を行い, 領域抽出処理では, 雑音低減処理後のAC画像に対して, 脈動オーロラの領域を抽出する。雑音低減処理では, 白色雑音を低減するために非線形関数による補正とスペクトルエントロピー法を, 領域抽出処理では, レベルセット法と大津の二値化の2つの手法を提案し, それぞれシミュレーションで評価を行った。シミュレーションの結果, 雑音低減処理はスペクトルエントロピー法, 領域抽出処理はレベルセット法を用いた場合, 脈動オーロラの領域検出で効果的であることが得られた。さらに, 初期輪郭線を小さくすることで処理時間が80%の低減が図れた。脈動オーロラ領域検出手法は, 電子と陽子オーロラのいずれにも適用可能であり, 従来では調査が困難であった脈動オーロラの詳細な時空間解析を可能にする手法である。

初期輪郭線を小さくすることで処理時間の高速化が図れたが, 画像1枚あたりは約35秒かかっており, 統計解析などの大量のデータを処理する解析では不向きである。本論文の脈動オーロラ領域検出手法は, 脈動オーロラが発生していない区間の処理を行っているため, 前処理として脈動オーロラが発生している時間をだまかに高速で分類し, 脈動オーロラが発生している時間帯にのみ脈動オーロラ領域検出手法の処理を行うことで, 解析の効率化を図る。脈動オーロラが発生している時間を高速で分類する方法としては, 機械学習を用いる分類方法を現在検討中である。

謝辞 本論文の研究をするにあたり, 多くのご助言をうけたまわりましたカナダのアサバスカ大学 Martin Connors 教授に感謝の意を表します。本研究は JSPS 科研費 15H05747, 15H05815, 16H06286, 17K06456, 20H02162

の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Helliwell, A.R.: Low-Frequency Waves in the Magnetosphere, *Reviews of Geophysics*, Vol.7, pp.281-303 (1969).
- [2] Albert, M.J.: Evaluation of quasi-linear diffusion coefficients for EMIC waves in a multispecies plasma, *Journal of Geophysical Research*, Vol.108, No.A6, p.1249 (2003).
- [3] Breneman, W.A., Crew, A., Sample, J., et al.: Observations Directly Linking Relativistic Electron Microbursts to Whistler Mode Chorus: Van Allen Probes and FIREBIRD II, *Geophysical Research Letters*, Vol.44, No.11, pp.265-272 (2017).
- [4] Mitani, T., Takashima, T., Kasahara, S., et al.: High-energy electron experiments (HEP) aboard the ERG (Arase) satellite, *Earth, Planets and Space*, Vol.70, No.77, pp.1-14 (2018).
- [5] Miyoshi, Y., Shinohara, I., Takashima, T., et al.: Geospace exploration project ERG, *Earth, Planets and Space*, Vol.70, No.101, pp.1-13 (2018).
- [6] Kasahara, Y., Kasaba, Y., Kojima, H., et al.: The Plasma Wave Experiment (PWE) on board the Arase (ERG) satellite, *Earth, Planets and Space*, Vol.70, No.86, pp.1-14 (2018).
- [7] Kasahara, S., Miyoshi, Y., Yokota, S., et al.: Pulsating aurora from electron scattering by chorus waves, *Nature*, Vol.554, pp.337-340 (2018).
- [8] Miyoshi, Y., Oyama, S., Saito, S., et al.: Energetic electron precipitation associated with pulsating aurora: EISCAT and Van Allen Probe observations, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, Vol.120, No.4, pp.2754-2766 (2015).
- [9] Sakaguchi, K., Miyoshi, Y., Spanswick, E., et al.: Visualization of ion cyclotron wave and particle interactions in the inner magnetosphere via THEMIS-ASI observations, *Journal of geophysical research*, Vol.117, No.A10, p.A10204, 1-7 (2012).
- [10] Nomura, R., Shiokawai, K., Omura, Y., et al.: Pulsating proton aurora caused by rising tone Pc1 waves, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, Vol.121, No.2, pp.1608-1618 (2016).
- [11] Ozaki, M., Miyoshi, Y., Shiokawa, K., et al.: Visualization of rapid electron precipitation via chorus element wave-particle interactions, *Nature Communication*, Vol.10, No.257 (2019).
- [12] Ozaki, M., Shiokawa, K., Miyoshi, Y., et al.: Fast modulations of pulsating proton aurora related to subpacket structures of Pc1 geomagnetic pulsations at subauroral latitudes, *Geophysical Research Letters*, Vol.43, No.15, pp.7859-7866 (2016).
- [13] Nishimura, Y., Bortnik, J., Li, W., et al.: Multievent study of the correlation between pulsating aurora and whistler mode chorus emissions, *Journal of Geophysical Research*, Vol.116, No.A11, p.A11221 (2011).
- [14] Ozaki, M., Yagitani, S., Ishizaka, K., et al.: Observed correlation between pulsating aurora and chorus waves at Syowa Station in Antarctica: A case study, *Journal of geophysical research*, Vol.117, No.A8, p.A08211 (2012).
- [15] 片桐一浩: 雑音環境下で頑健な音声区間検出技術の開発, OKI テクニカルレビュー, Vol.79, No.219 (2012).
- [16] 倉爪 亮: レベルセット法とその実装法について, IPSJ SIG Technical Report, Vol.17, No.CVIM 156, pp.133-145 (2006).

- [17] Li, C., Huang, R., Ding, Z., et al.: A Level Set Method for Image Segmentation in the Presence of Intensity Inhomogeneities With Application to MRI, *IEEE Trans. Image Processing*, Vol.20, No.7, pp.2007-2016 (2011).
- [18] Otsu, N.: A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms, *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics*, Vol.SMC-9, No.1, pp.62-66 (1979).



井上 智寛

2016年金沢大学工学部情報工学科卒業。2018年同大学大学院修士課程修了。現在、同博士課程に所属。地球電磁気・地球惑星圏学会、日本地球惑星科学連合各会員。



尾崎 光紀

2004年金沢大学工学部情報工学科卒業。2005年同大学大学院修士課程修了。2009年同博士課程修了。博士(工学)。現在、金沢大学理工研究域准教授。自然電磁波動伝搬に関する研究に従事。2017年大林奨励賞。地球電磁気・地球惑星圏学会、日本地球惑星科学連合、IEEE、米国地球物理学学会各会員。

地球電磁気・地球惑星圏学会、日本地球惑星科学連合、IEEE、米国地球物理学学会各会員。



八木谷 聡

1988年金沢大学工学部電気・情報工学科卒業。1990年同大学大学院修士課程修了。1993年同博士課程修了。博士(工学)。同年同大学工学部電気・情報工学科助手。現在、同大学理工研究域教授。1997~1998年米国ミネソタ大学客員研究員(文部省在外研究員)。科学衛星およびシミュレーションによる磁気圏プラズマ波動解析の研究、低周波電磁波源位置推定の研究に従事。2001年産学連携推進いしかわ賞(奨励賞)受賞。地球電磁気・地球惑星圏学会、日本地球惑星科学連合、IEEE、米国地球物理学学会各会員。

科学衛星およびシミュレーションによる磁気圏プラズマ波動解析の研究、低周波電磁波源位置推定の研究に従事。2001年産学連携推進いしかわ賞(奨励賞)受賞。地球電磁気・地球惑星圏学会、日本地球惑星科学連合、IEEE、米国地球物理学学会各会員。



今村 幸祐

1995年長崎大学工学部電気情報工学科卒業。1997年同大学大学院修士課程修了。2000年同大学院博士課程修了。博士(工学)。現在、金沢大学理工研究域准教授。Matching Pursuitsを用いた高能率画像符号化、映像からの動オブジェクト抽出の研究に従事。2019 Best Paper Award (2019 IEEE International Conference on Internet of Things and Intelligence System)。電子情報通信学会、映像情報メディア学会各会員。

Matching Pursuitsを用いた高能率画像符号化、映像からの動オブジェクト抽出の研究に従事。2019 Best Paper Award (2019 IEEE International Conference on Internet of Things and Intelligence System)。電子情報通信学会、映像情報メディア学会各会員。



塩川 和夫

1988年東北大学理学部天文及び地球物理学科第二卒業。1990年同大学大学院修士課程修了。1994年名古屋大学大学院博士課程修了。博士(理学)。現在、名古屋大学宇宙地球環境研究所、国際連携研究センター教授。1996~

1997年ドイツマックスプランク研究員(文部省在外研究員)。宇宙空間物理学および超高層大気物理学、地上からのオーロラや大気光の光学観測・電磁場観測の研究に従事。1999年大林奨励賞、2009年田中館賞(地球電磁気・地球惑星圏学会)、2010年優秀レフェリー賞(米国地球物理学学会)、地球電磁気・地球惑星圏学会、米国地球物理学学会、日本気象学会各会員。



三好 由純

1996年東北大学理学部宇宙地球物理学科卒業。1998年同大学大学院修士課程修了。2001年同大学院博士課程修了。博士(理学)。現在、名古屋大学宇宙地球研究所、同大学大学院工学研究科、同大学低温プラズマ科学研究センター教授。放射線帯・プラズマ波動粒子相互作用に関するデータ解析、EMCCDやsCMOSを用いた高速撮像観測とデータ解析、数値宇宙天気予報の基礎研究に従事。2013年文部科学大臣表彰若手科学者賞、2015年地球惑星科学振興西田賞(日本地球惑星科学連合)、2017年田中館賞(地球電磁気・地球惑星圏学会)、2018年日本機械学会賞。地球電磁気・地球惑星圏学会、日本地球惑星科学連合、米国地球物理学連合、アジア・大洋州地球科学会、欧州地球科学連合、IEEE、日本機械学会、計測自動制御学会各会員。

放射線帯・プラズマ波動粒子相互作用に関するデータ解析、EMCCDやsCMOSを用いた高速撮像観測とデータ解析、数値宇宙天気予報の基礎研究に従事。2013年文部科学大臣表彰若手科学者賞、2015年地球惑星科学振興西田賞(日本地球惑星科学連合)、2017年田中館賞(地球電磁気・地球惑星圏学会)、2018年日本機械学会賞。地球電磁気・地球惑星圏学会、日本地球惑星科学連合、米国地球物理学連合、アジア・大洋州地球科学会、欧州地球科学連合、IEEE、日本機械学会、計測自動制御学会各会員。



片岡 龍峰

1999年東北大学理学部宇宙地球物理学卒業。2002年同大学大学修士課程修了。2004年同大学院博士課程修了。博士（理学）。現在、国立極地研究所研究教育係・宙空圏研究グループ准教授。宇宙空間物理学の研究に従事。

2009年大林奨励賞，2015年若手科学者賞（文部科学大臣表彰）。地球電磁気・地球惑星圏学会，米国地球物理学会，日本天文学会各会員。