

変化点検出を応用した時系列データからの 突発現象の前兆検出アルゴリズム

徳永旭将^{†1} 池田大輔^{†2} 中村和幸^{†3}
樋口知之^{†4} 吉川顕正^{†1} 魚住禎司^{†5}
藤本晶子^{†6} 森岡昭^{†7}
湯元清文^{†5} CPMN Group

一般に、前兆現象は突発現象にそのものに比べて非常に目立ちにくく、その開始時刻は曖昧である。従来よく用いられてきた変化点検出法を適用した場合、このような微小で緩慢な変化は見逃されやすい。Tokunaga et al.¹⁾では、Ide and Inoue²⁾の提案した特異スペクトル分析を応用した変化点検出法 (SST) を、多次元データを用いたアルゴリズム (MSST) へと拡張することで、鋭敏に前兆現象の開始時刻を推定出来ることを示した。MSST は、緩慢な変化も検出できる鋭敏な手法であるが、実データへの適用では誤検出が問題になる。本稿では、突発現象の大まかな開始時刻を予め検出し、さらに検出された時刻の前後で前兆現象の開始時刻と終了時刻を個別に探索することで、誤検出を劇的に減少させることができることを示す。

^{†1} 九州大学理学府

^{†2} 九州大学システム情報

^{†3} 明治大学先端数理インスティテュート

^{†4} 統計数理研究所

^{†5} 九州大学宇宙環境研究センター

^{†6} 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

^{†7} 東北大学惑星プラズマ大気研究センター

1. はじめに

地震や竜巻、集中豪雨など、突発的に発生する自然災害は予測が難しく、時として深刻な被害を与えることがある。このような自然現象の多くは、限界まで蓄積されたエネルギーが急激に解放されることによって発生する。それゆえに、突発性現象の発生前には、何らかの前兆現象 (precursory phenomena) が観測されることが多い。もし、リアルタイムで取得されたデータからこの前兆現象を検出することが出来たなら、突発現象の被害を未然に防ぐ、あるいは被害を最小にすることが可能となると考えられる。

ここで、時系列データにおける前兆検出の定義について述べる。一般に前兆現象とは、突発的に発生する激しい変動の前に付随して見られる、微小な変動のことを指す。図 1 に示すように、突発的な激しい現象の開始時刻を main onset、前兆現象の開始時刻を precursory onset と呼ぶことにする。すると、時系列データから前兆現象を検出することは、precursor onset から main onset までの期間を同定する問題と定義することができる。

次に、時系列データからの前兆検出について、変化点検出という立場から論ずる。一般に、データの動的特性が急激に変化する時刻は変化点と呼ばれる。また、時系列データから変化点の時刻を決定する問題は変化点検出と呼ばれ、数多くの先行研究が存在する。代表的なものとしては、Fourier 解析や Wavelet 解析を用いたもの^{3)–5)}、AR モデルを用いたもの^{6),7)} などがある。より最近のものとしては、テキストマイニングによるもの^{8)–10)}、クラスタリングによるもの¹¹⁾、あらかじめ決めた前兆パターンによるもの¹²⁾ などがある。前兆現象は「点」ではなく、一定の期間継続する現象である。しかしながら、前述の定義を用いるなら、時系列データからの前兆検出は precursor onset と main onset という 2 種類の変化点を検出する問題と置き換えることができる。

前述の通り、前兆現象は突発現象に比べ微小な変動である。ゆえに、時系列データを見ても、どこから始まっているのか定義することは簡単ではない。これまでの変化点検出法は、そのような微小で曖昧な変化点を捉える問題を取り扱って来なかった。それに対し、近年、Tokunaga et al.¹⁾ は、特異スペクトル分析を応用した変化点検出法である SST (Singular Spectrum Transformation)²⁾ を MSST (Multivariable SST) へと改良し、微小で曖昧な変化を捉えることができる sensitive な手法として提案した。MSST は従来の変化点検出法と比べて極めて sensitive な手法であるが、その分ノイズの影響を受けやすいという短所もある。従って、実データを用いたオンライン前兆検出では、誤検出が頻発し実用的とは言えない。また、MSST のスコアは変化を観測した時刻を過ぎると素早く 0 レベルに戻る性質があ

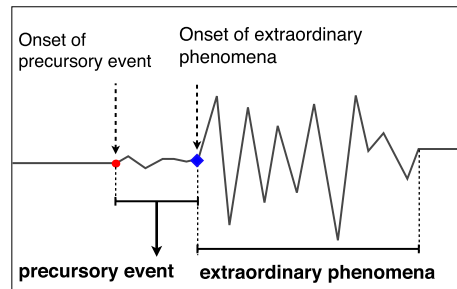


図 1 時系列データ中の前兆現象 (precursory event) の概念図。前兆現象は、precursor onset から main onset までの区間として定義できる。

る。言い換えれば、変化が始まる「点」を検出する上では強力な手法であるが、前兆現象の「期間」を検出することには不向きである。

我々は上記の問題を克服するため、性質の異なる複数の変化点検出法を組み合わせることで、オフラインによる効率的な前兆検出が可能なアルゴリズムを提案する。本提案手法は、初めに突発現象の大まかな時刻を予め推定し、そこから時間を遡って precursor onset と main onset の時刻を決定する、という枠組みに基づくものである。4.1 節において、今回新たに導入する変化点手法により、突発現象の大まかな開始時刻を検出する枠組みを示す。4.2 節で、MSST による precursor onset を検出する枠組みを、4.3 節で¹³⁾ による、Bayes 推定を用いた変化点検出法により、main onset を検出する枠組みを示す。

2. オーロラサブストーム

本稿では、前兆検出アルゴリズムの実データへの適用例として、オーロラサブストームの前兆検出問題を取り上げる。オーロラサブストームは、夜側高緯度においてオーロラの発光強度が爆発的に増強し、その 1 時間程度擾乱が継続する現象である。サブストームは、太陽風と地球磁気圏の相互作用によって発生することが分かっているが、特に夜側磁気圏尾部におけるエネルギーの蓄積解放過程が重要な役割を果たしているとされる。その研究は、地上における光学観測、磁場観測とともに、現在では人工衛星による磁気圏での直接観測も行われている。

表 1 本稿で使った CPMN 地上磁場観測点の地理座標。

Station	地理緯度	地理経度
CBI (父島)	27.15	142.30
KAG (鹿児島)	31.48	130.72

図 2(a) は、1997 年 1 月 4 日に Polar 衛星によって光学観測された、北半球のオーロラのスナップショットである。15:45:08UT (Universal Time) から 15:46:22UT の途中で、真夜中付近で急激なオーロラの増光が始まっていることが分かる。この現象がオーロラブレイクアップである。一方で、15:42:04UT から 15:44:50UT の間で、オーロラ発光強度の増加が緩やかに始まっていることが見て取れる。この現象は、オーロラのイニシャルブライティングと呼ばれ、しばしばオーロラブレイクアップとは区別される¹⁴⁾。統計的には、オーロラブレイクアップの 1–3 分前からイニシャルブライティングが開始するとされている。つまり、イニシャルブライティングはオーロラブレイクアップの前兆現象であると解釈することができる。

次に、光学観測とは別の観測データから、オーロラサブストームの前兆現象について述べる。図 2(b) は、同じく Polar 衛星の Plasma Wave Instrument (Polar/PWI) によって観測された、オーロラサブストーム発生時のプラズマ波動のスペクトルである。サブストーム発生時には、夜側高緯度帯上空 2,000–16,000km 付近で、AKR (auroral kilometric radiation) と呼ばれる 30–800kHz 帯のプラズマ波動が観測されることが知られている。AKR は、オーロラの急激な増光のもとになるオーロラ粒子の加速域を、リモート観測するためのツールとして用いられている^{15),16)}。図 2(b) から、15:46UT 付近で、低周期の AKR 強度が爆発的に増強していることが分かる。一方で、15:42UT 前後から高周期の AKR が緩やかに開始していることも見て取れる。これまでの研究から、高周期の AKR は、オーロラのイニシャルブライティングの開始と同期して始まることが分かっている^{17),18)}。この高周期 AKR の緩やかな開始も、低周期 AKR の爆発的増強の前の前兆現象であると解釈できる。

最後に、地上磁場データから、オーロラサブストームの前兆現象について述べる。オーロラサブストームは、地球規模の磁場変動によっても特徴づけられる。図 2(c) は、日本の KAG(鹿児島) および CBI(父島) で観測された地上磁場 H 成分 (北向き成分) の時間変化である。地上磁場データは、九州大学宙空環境研究センターが収集・管理する、環太平洋地磁気観測網 (CPMN) にて得られたものである¹⁹⁾。地上磁場観測点の地理座標を、表 1 に示す。図 2(c) において、15:46UT 付近から突発的な振動成分が始まっていることが見て取れる。このよ

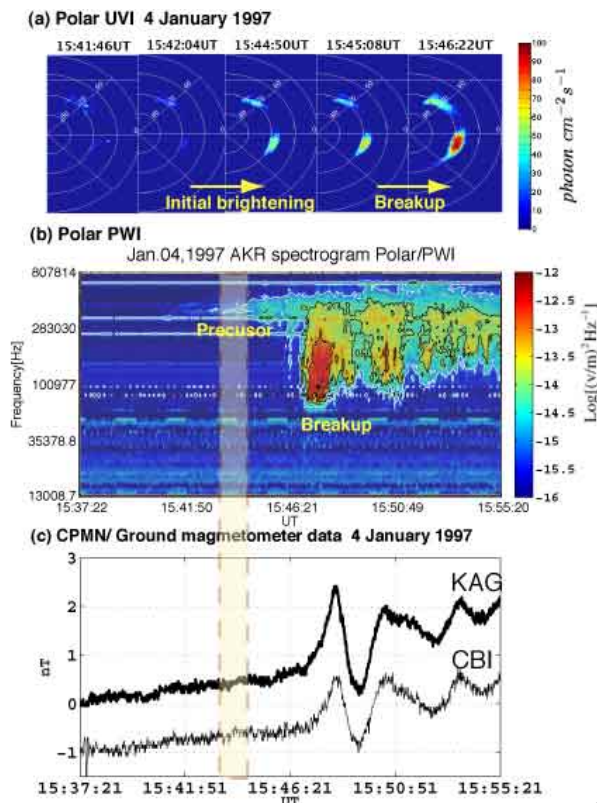


図2 (a)1997年1月4日にPolar衛星で撮影された N_2 Lyman-Birge-Hopfield bands (1400-1600Å) におけるUVI(ultra violet imager). (b)1997年1月4日にPolar衛星で観測された, AKR(auroral kilometric radiation) スペクトル. (c)環太平洋地磁気観測網(CPMN)のKAG(鹿児島)およびCBI(父島)で観測された, オーロラサブストーム発生前後の地上磁場の時間変化.

うな突発的な磁場の振動成分は, Pi 型の地磁気脈動と呼ばれている. 特に, オーロラサブストームと連動して発生する Pi は, Pi 2 型地磁気脈動と呼ばれる²⁰⁾. オーロラサブストームは, 真夜中付近のオーロラアークが突如増光(ブレイクアップ)することで始まる²¹⁾. 過去の研究から, オーロラブレイクアップと地上磁場の Pi 2 型地磁気脈動は, 良い対応関係にあることが分かっている²²⁾⁻²⁴⁾. さらに, 15:42UT 頃から, 地上磁場 H 成分のベースラインが徐々に増加していることが見てとれる. このような, オーロラサブストームの発達に伴って

見られる磁場の増加現象は, bay 型変化と呼ばれている. Bay 型変化は, 夜側地球磁気圏と夜側高緯度電離層を結ぶ電流系の影響によって引き起こされると考えられている. この電流系は, サブストームカレントウェッジと呼ばれ, 現在までにほぼ確立された概念である(図2参照)²⁵⁾. 光学観測やプラズマ波動観測と同様に, 地上磁場データにおいても, この bay 型変化の開始は, オーロラサブストームの前兆現象と解釈することができる.

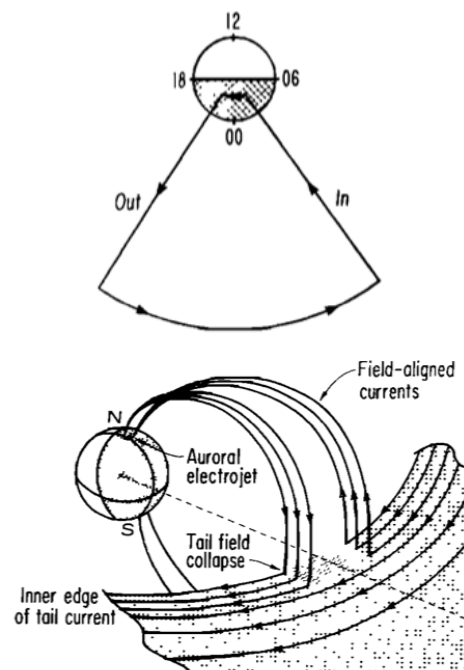


図3 サブストームカレントウェッジの概念図. 夜側磁気圏の尾部電流の一部が寸断されると, 磁力線に沿った電流が発生する²⁵⁾.

本稿では, 提案アルゴリズムにより地上磁場データからオーロラサブストームの前兆現象を効率的に検出できることを示す. 自然現象を対象にしたデータ解析では, 必ずしも正解が分からないため, 検出の精度を議論するのが難しい. しかし前述の通り, オーロラサブストーム研究に関しては, 光学観測, 磁場観測, 人工衛星による磁気圏での直接観測が行われている

ため、複数の観測データをつき合わせて判断することで、部分的に精度を議論することが可能である。一般に、人工衛星のデータはそのときの衛星の位置に激しく依存する。それに対し、地上では定常観測が可能である。さらに、現在では世界規模に展開したネットワーク観測が行われているため、かなりの地方時においてオーロラサブストームのリアルタイム監視が可能である。それらの理由により、本研究では地上磁場データからのオーロラサブストームの前兆現象検出を目指す。

3. オフラインによる前兆検出アルゴリズム

図 4 に、我々の提案する前兆検出アルゴリズム全体像を示す。アルゴリズムは次の 4 段階からなる。(1) 新たに導入した変化点演出法である SVT により、突発現象のオンセットタイム t_0 とオフセットタイム t_1 を検出する。(2) 現象に特化した基準により、event の screening を行う。(3) t_0 から時刻を遡って、MSST により precursor onset を検出する。(4) t_0 近傍で、¹³⁾ による Bayes 推定を用いた変化点検出法により、main onset を検出する。(3) と (4) については、順序を入れ替えても良い。

4. 適用結果

図 (4) に、本アルゴリズムによって検出された前兆現象の例を示す。データは、CPMN の KAG で観測された地上磁場 H 成分 (南北成分) と D 成分 (東西成分) である。赤丸が precursor onset (t_p)、左から見て最初の青丸が main onset (t_m)、左から見て 2 番目の青丸が SVT で検出したオフセットタイム (t_1 、図の中心の破線は SVT で検出したオンセットタイム t_0 を表す。各時刻の示すものは、図 5 を参照。

謝辞 We would like to thank J. Dowell of the University of Iowa for providing the Polar/PWI data, C. Meng and K. Liou of Johns Hopkins University for providing Polar/UVI data. We also thank all the members of the CPMN project (PI; K. YUMOTO) for their ceaseless support. The CPMN project is financially supported by the Ministry of Education, Science, and Culture of Japan (and Japan Society for the Promotion of Science) as the Grants-in-Aid for Overseas Scientific Survey (05041060, 0841105, 10041122, 12373003). The author (T. Tokunaga) was supported by the Japan Society for the Promotion of Science (JSPS) under Grant-in-Aid for Scientific Research 2005443. The author (D. Ikeda) was supported by the Japan Society for the Promotion of Science (JSPS) under Grant-in-Aid for challenging Exploratory Research 21650031.

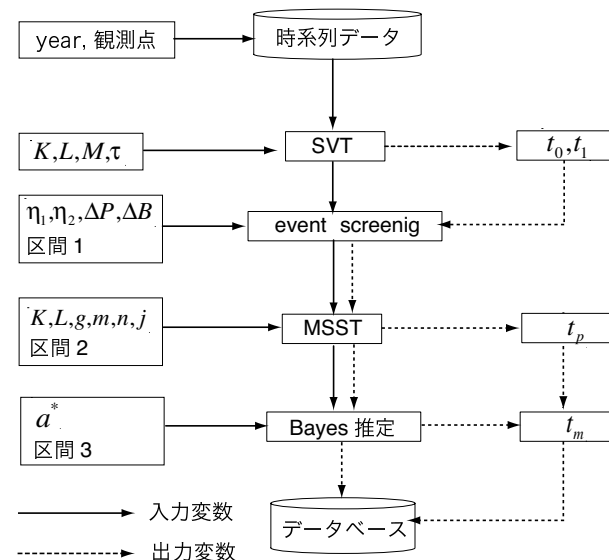


図 4 オフラインによる前兆検出アルゴリズム全体像。

参考文献

- 1) Tokunaga, T., Ikeda, D., Nakamura, K., Higuchi, T., Yoshikawa, A., Uozumi, T., Fujimoto, A., Morioka, A. and Yumoto, K.: Detecting Precursory Events in Time Series Data by an Extension of Singular Spectrum Transformation, *Proceedings of the 10th WSEAS International Conference on Applied Computer Science*, pp. 366–374 (2010).
- 2) Ide, T. and Inoue, K.: Knowledge Discovery from Heterogeneous Dynamic Systems using Change-Point Correlations, *In Proceedings of 2005 SIAM International Conference on Data Mining*, pp.571–576 (2005).
- 3) Takahashi, K., Ohtani, S. and Anderson, B.J.: Statistical analysis of Pi 2 pulsations observed by the AMPTE CCE spacecraft in the inner magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, Vol.100, pp.21929–21941 (1995).
- 4) Nose, M., Iyemori, T., Takeda, M., Kamei, T., Milling, D.K., Orr, D., Singer, H.J., Worthington, E.W. and Sumitomo, N.: Automated detection of Pi 2 pulsations using wavelet analysis: 1. Method and an application for substorm monitoring, *Earth, Planetary and Space Sciences*, Vol.50, pp.773–783 (1998).

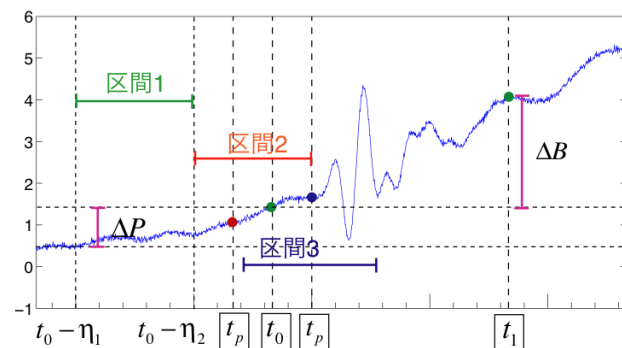


図5 探索する時刻 t_0 , t_1 , t_p および t_m の前後関係と前兆検出に関する付加情報のまとめ。

- 5) Murphy, R.K., Rae, I.J., Mann, I.R., Milling, D.K., Watt, C.E., Ozeke, L., Frey, H.U., Angelopoulos, V. and Russell, C.T.: Wavelet-based ULF wave diagnosis of substorm expansion phase onset, *J. Geophys. Res.*, Vol.114, No.A00C16 (2009).
- 6) Bello, G.D., Lapenna, V., Macchiato, M., Satriano, C. and Serio, C.: Parametric time series analysis of geoelectrical signals: an application to earthquake forecasting in Southern Italy, *Annali di Geofisica*, Vol.XXXIX, No.1 (1996).
- 7) Higuchi, T., Ohtani, S.-I., Uozumi, T. and Yumoto, K.: Pi2 onset determination with information criterion, *J. Geophys. Res.*, Vol.107, No.A4, p.1107 (2002).
- 8) Karamanos, K., Peratzakis, A., Kapis, P., Nikolopoulos, S., Kopanas, J. and Eftaxias, K.: Extracting preseismic electromagnetic signatures in terms of symbolic dynamics, *Nonlinear Processes in Geophysics*, Vol.12, pp.835–848 (2005).
- 9) Patankar, R.P., Rajagopalan, V. and Ray, A.: Failure precursor detection in complex electrical systems using symbolic dynamics, *International Journal of Signal and Imaging Systems Engineering*, Vol.1, No.1, pp.68–77 (2008).
- 10) Ohsawa, Y.: KeyGraph as Risk Explorer in Earthquake-Sequence, *Journal of Contingencies and Crisis Management*, Vol.10, pp.119–128 (2002).
- 11) Fukuda, K., Koganeyama, M., Shouno, H., Nagao, T. and Kazuki, J.: Detecting Seismic Electric Signals by LVQ Based Clustering, *International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications*, pp.1305–1311 (2001).
- 12) Huang, H.-M., Fan, H.-S., Bian, Y.-J. and Zou, L.-Y.: Investigation into the automatic recognition of time series precursor of earthquakes, *Acta Seismologica Sinica*,

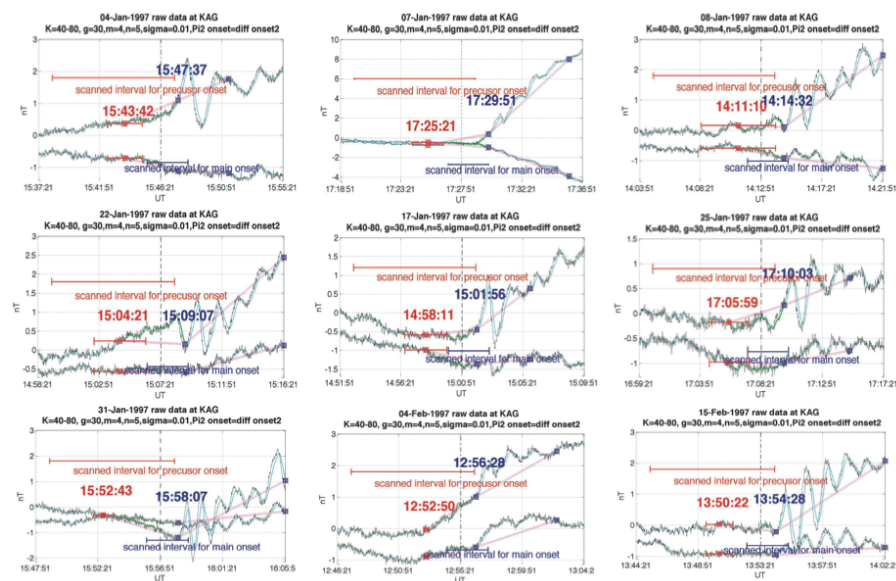


図6 検出された前兆現象の例。データはCPMNのKAGで観測された、地上磁場H成分(南北成分)とD成分(東西成分)である。赤丸がprecursor onset (t_p)、左から見て最初の青丸がmain onset (t_m)、左から見て2番目の青丸がSVTで検出したオフセットタイム(t_1 、図の中心の破線はSVTで検出したオンセットタイム t_0 を示す。

Vol.11, No.5, pp.605–614 (1998).

- 13) 福山恵子, 樋口知之, 魚住禎司, 河野英明, 湯元清文: 初動が緩慢な波動現象開始時点の精密同定: Pi 2 型地磁気脈動オンセットタイムの決定法, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J87-A, No.12, pp.1502–1510 (2004).
- 14) Morioka, A., Miyoshi, Y., Miyashita, Y., Kasaba, Y., Misawa, H., Tsuchiya, F., Kataoka, R., Kadokura, A., Mukai, T., Yumoto, K., Menietti, D.J., Parks, G., Liou, K., Honary, F. and Donovan, E.: Two-step evolution of auroral acceleration at substorm onset, *J. Geophys. Res.*, p.in press (2010).
- 15) Kaiser, M.L. and Alexander, J.K.: Relationship between auroral substorms and the occurrence of terrestrial kilometric radiation, *J. Geophys. Res.*, Vol.82, pp. 5238–5286 (1977).
- 16) A.Morioka, H.O. and Miyatake, S.: Terrestrial kilometric radiation observed by satellite Jikiken (Exos-B), *J. Geomag. Geoelectr.*, Vol.33, pp.37–62 (1981).

- 17) Morioka, A., Miyoshi, Y., Tsuchiya, F., Misawa, H., Sakanoi, T., Anderson, K. Y. R.R., Menietti, J.D. and Donovan, E.F.: Dual structure of auroral acceleration regions at substorm onsets as derived from AKR spectra, *J. Geophys. Res.*, Vol.112, No.A06245 (2007).
- 18) Morioka, A., Miyoshi, Y., Tsuchiya, F., Misawa, H., Yumoto, K., Parks, G.K., Anderson, R.R., Menietti, J.D., Donovan, E.F., Honary, F. and Spanswick, E.: AKR breakup and auroral particle acceleration at substorm onset, *J. Geophys. Res.*, Vol.113 (2008).
- 19) Yumoto, K. and the CPMN Group: Characteristics of Pi2 magnetic pulsations observed at the CPMN stations: A review of the STEP results, *In Earth Planets Space*, Vol.53, pp.981–992 (2001).
- 20) Saito, T.: Geomagnetic pulsations, *Space Science Review*, Vol.10, pp.319–412 (1969).
- 21) Akasofu, S.-I.: The development of the auroral substorm, *Planetary and Space Science*, Vol.12, pp.273–282 (1964).
- 22) Saito, T.: Oscillation of geomagnetic field with the progress of pt-type pulsation, *Sci. Rep. Tohoku Univ.*, Vol.13, pp.53–61 (1961).
- 23) Saito, T., Yumoto, K. and Koyama, K.: Magnetic pulsations Pi2 as a sensitive indicator of magnetospheric substorm, *Planet. Space Sci.*, Vol.24, pp.1025–1029

(1976).

- 24) Sakurai, T. and Saito, T.: Magnetic pulsations Pi2 and substorm onset, *Planet. Space Sci.*, Vol.24, pp.573–577 (1976).
- 25) Clauer, C.R. and McPherron, R.L.: Mapping the local time-universal time development of magnetospheric substorms using mid-latitude magnetic observations, *J. Geophys. Res.*, Vol.79, pp.2811–2820 (1974).

(平成 2010 年 11 月 18 日受付)

(平成 2010 年 月 日採録)



徳永旭将

2006 九州大学理学部地球惑星科学科卒。2008 九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻修士前期課程修了。現在、同博士課程に在学中。オーロラサブストームの発生機構に関する研究に従事。アメリカ地球物理学会、地球電磁気・地球惑星圏学会 各学生会員。