

# STP データからの異常検出法の開発

## ~substorm precursor 検出への応用

徳永 旭将[1], 中村 和幸[2], 樋口 知之[3], 吉川 顕正[1], 魚住 禎司[4], 池田 大輔[5], 藤本 晶子[1], 森岡 昭[6], 湯元 清文[4], CPMM group

[1]九州大学理学部地球惑星科学専攻; [2]明治大学先端数理インスティテュート; [3]統計数理研究所; [4]九州大学宇宙環境研究センター; [5]九州大学システム情報; [6]東北大学惑星大気プラズマ研究センター

### 1. はじめに

太陽地球系科学の分野(以下、STP 分野と記載)においては、太陽-惑星-間空間-磁気圏-電離圏-地上での同時観測が可能となり、大規模なデータ群が蓄積されつつある。これらのデータセットから変数間の依存関係を抽出することは、太陽風-磁気圏-電離圏間の相互作用を理解する上で、とりわけシミュレーションによる再現が困難な領域間のダイナミクスに関する知見を獲得する上で、非常に重要である。また、蓄積されたデータ群を駆使することで、地球周辺のプラズマ環境の推移を経験的に予測する、データ駆動型の宇宙天気研究の発展が期待される。ところが、現在までの宇宙天気研究においてはこれら大量データセットを十分に活用仕切れていないのが現状である。それは、STP 分野におけるデータ解析には独特の難しさが伴うからである。我々が対象としているシステムの特徴として、(1)システム全体のスケールが巨大、(2)システムが非定常な太陽風により駆動（データが非定常）、(3)磁気圏・電離圏など異なる領域が連動する（システムが動的）、(4)ヘテロなデータセット、(5)変数の数が多い、の 5 点が挙げられる。データ駆動型の宇宙天気研究を実現するためには、このような「動的・ヘテロ」なシステムで生成される多変量データを総合的に処理することの出来る枠組みの構築が必要である。

## 2. Substorm precursor 検出への応用

我々は、前節で言及したSTPデータからの異常検出の応用の先駆けとして、地上磁場データからのsubstorm precursor検出の問題に取り組んでいる。Substormとは、夜側地球磁気圏から磁力線に沿って降り込んだプラズマ粒子が地球の中性大気と衝突し、夜側オーロラ帯の広範囲でオーロラを発光させる現象である。とりわけ、オーロラの発光強度が1分程度の間爆発的に増強する現象はauroral breakup(以後、breakup と記載する)と呼ばれ、その後数十分にわたって発光領域が拡大して行く期間は、substormの爆発相と呼ばれる。Breakup は地球磁気圏と太陽風の相互作用の結果生じるエネルギーの蓄積・解放プロセスであると考えられているが、その詳しい発生機構は未だよく解っておらず、STP分野における最大の難問とされている。

Substorm の発生機構が解明されない要因の1つとして、substorm 発生時刻同定の難しさがある。Substorm の時間発展は、その特徴から成長相、爆発相、回復相の3つのステージに分類されている [Akasofu, 1964]。一般にsubstorm の開始時刻は、auroral breakupに始まる爆発相の開始時刻で定義されることが多い(以後、これを”main onset”と呼ぶ)。Main onset時には、オーロラの真下では substorm negative bayと呼ばれる、急激な磁場変動が開始する。一方で、breakup が始まる1-3分前からオーロラの発光強度が緩やかに増強し始めることも分かっており、これはオーロラのinitial brightening と呼ばれる。過去の研究では、initial brighteningとほぼ同期して、夜側オーロラ帯の地上磁場南北成分 (以後、H成分と記載する) が緩やかに減少し始めることが報告されている [Groot-Hedlim and Rostoker, 1987]。また、Morioka et al.,[2008]は、Polar衛星で観測されたAKR (auroral kilometric radiation) スペクトルを解析することで、breakup数分前に高度4,000-6,000km付近にオーロラ粒子加速域が形成されることを明らかにした。また、彼らは低高度AKRの出現に伴って、オーロラ帯地上磁場にDC的な挙動が見られることも報告した。本研究では、breakupの数分に見られる低高度AKRの増強と同期して観測されるDC的な地上磁場辺変動を、「地上磁場で見られるsubstorm precursor」と定義する。本論文では、このオーロラの発光強度(もしくはそれに伴う地上磁場変動)の初動の開始時刻を”precursor onset”と呼ぶことにする。これら2つのsubstorm onset (precursor onsetとmain onset) の時刻同定が、substormに関わる磁気圏・電離圏でのエネルギー解放プロセスを解き明かす上で避けては通れない問題である。しかしながら、現在までのsubstorm研究では、研究者によって異なる基準で開始時刻が決定されて来たのが実状であり、未だ有効な解決策は確立されていない。

前段落で言及したように、初動が緩慢な地磁気現象の開始時刻 (オンセットタイム) を精密に同定する問題は、STP分野における最重要課題の一つである。古くからSTP分野においては、ウェーブレット解析や帯域通過フィルタを用いたオンセットタイムの決定法が用いられて来た。しかし、これらの「手荒い」解析手法では、データが持つ微細かつ本質的な構造を損ねてしまう可能性が高く、緩慢に始まる現象の開始時刻を精密に同定する目的には適していない。むしろ、観測された生の時系列データの時間構造の変化を直接取り扱えるようなアプローチこそが、substormの問題を解決するのに極めて重要な要素である。

Fukuyama et al.,[2004] は、substormと連動して地上観測される Pi 2 型地磁気脈動の開始時刻を、最尤法とベイズ推定を用いて同定する枠組みを構築した。Pi 2 型地磁気脈動(以後、Pi 2と記載)とは、substormのmain onsetとほぼ同時に、汎世界的に地上観測される、40-150 秒程度の周期を持つ突発的な地磁気の振動現象である[Saito, 1969]。福山らの手法は、夜側低緯度で観測される Pi 2の信号としての特徴を時系列モデルで表現することで、情報量規準に基づき緩慢な現象の開始時刻を客観的に精密同定する枠組みを示した。著者らの仕事は、main onset 時刻の客観的同定という問題に対して、極めて大きな一石を投じたと言える。しかしながら、breakupの1-3分前に夜側オーロラ帯の地上磁場変動に現れるとされる初動 (precursor)は、時系列の構造そのものがよく解っておらず、その挙動を時系列モデルで表現することは現状では難しい。すなわち、precursor onsetの同定には、背後に直接状態空間モデルを仮定しない、柔軟かつ汎用的な方法で時系列の構造変化を検出することが必要である。

近年、工学システムの異常検知などの問題に、特異スペクトル分析 (Singular Spectrum Analysis。以下、SSAと略す) を応用した変化点検知法が応用され始めている。時系列データにおける変化点検知は、ネットワーク侵害の検知や工学システムにおける異常検知、あるいは 動画中の不規則性発見など、広い領域における応用が期待される問題である。変化点とは時系列の構造が急激に変化する時点を意味し、工学的に重要な情報が含まれるとされる。SSAは時系列の主要な構造をデータから再構成する手法であるが、このSSAを利用した変化点検知は、背後に状態空間モデルを直接的には仮定しないノンパラメトリックな手法である。そのため、unknownな構造変化をするprecursor onsetの時刻を捉えるのにも有効であると期待される。

SSAは非線形時系列解析の文脈において発展した理論であり、主に気象学や海洋学の分野で応用されて来た。SSAでは、時間領域で部分時系列を埋め込んで生成したL-軌道行列を特異値分解することで、時系列の主要な構造を抽出する。特に、観測データからのトレンド除去やノイズ除去、振動成分とトレンド成分の同時抽出などに大きな力を発

揮する手法である。SSAによる代表パターンの抽出および変化度の計算については、Ide and Inoue[2004]で示された枠組みに沿って行う。大まかな手順としては、(1)現在時刻を $t$ とした時、現在時刻よりも過去側の区間(これを参照区間と呼ぶ)から部分時系列を切り出し、 $L$  軌道行列を作成する。なお、参照区間から切り出して来る部分時系列の長さ  $K$  および埋め込み次元  $L$  は、事前に決めておく必要がある。(2)(1) で生成した $L$ -軌道行列を特異値分解する。(3)(2)で得られた左特異行列(これを参照行列という)を、「過去の代表パターン」とし、このパターンが張る解空間を変化度の基準となる部分空間とする。(4)現在時刻  $t$  より未来側から部分時系列を切り出し、(1) (3)までと同様の手順により、未来側の代表パターンを抽出する。未来の代表パターン抽出に用いる区間を「テスト区間」と呼び、テスト区間から生成した  $L$ -軌道行列を特異値分解して得られる左特異行列を、「テスト行列」と呼ぶ。特に、テスト区間から抽出した代表パターンのうち、最大固有値に属する特異ベクトルを「テストベクトル」と呼ぶ。(5)参照行列が張る部分空間とテストベクトルが張る部分空間同士の角度を $\theta$ とすると、 $z = 1 - \cos\theta$ により変化度を定義する。Ide and Inoue [2004] の記述に従い、本論文でも各自国の変化度の値を「変化度スコア」、時系列から変化度の時系列への変換を「特異スペクトル変換 (Singular Spectrum Transformations。以下、SSTと略す。)」と呼ぶことにする。我々の目的は、時系列が急激な構造変化を始める時刻を推定することである。本研究では、変化度スコアが事前に設定した閾値を超えた場合に「変化あり」と判断し、変化度スコアが閾値を超えかつ極大となる時刻を「変化点」と定義する。図1に、環太平洋地磁気観測網(CPMN)[Yumoto et al.,2001]のKTNで観測された地上磁場データに、SSAを応用した変化点検出法を適用した結果を示す。

### 3. 謝辞

本研究は特別研究員奨励費 20・05443の助成を受けたものである。

## 4. 参考文献

- [1] Akasofu, S. -I. (1964) "The development of the auroral substorm", In *Planet. Space Sci.*, 12, pp.273- 282.
- [2] Fukuyama, K., T. Higuchi, T. Uozumi, H. Kawano, K. Yumoto (2004) "Two Methods of Pi2 Onset Time Determination with Information Criterion based on the State Space and Bayesian Modelings", In *電子情報通信学会論文誌* 2004/12 Vol. J87-A No. 12.
- [3] Groot-Hedlin, C. D. and Rostoker, G.: Magnetic signatures of precursors to substorm expansive phase onset, *J. Geophys. Res.*, 92, 5845–5856, 1987.
- [4] Ide, T. and Inoue, K. (2005) "Knowledge Discovery from Heterogeneous Dynamic Systems using Change-Point Correlations", In *Proc. of 2005 SIAM Int'l Conf. on Data Mining (SDM 05)*, pp.571-576.,
- [5] Morioka A., Y. Miyoshi, F. Tsuchiya, H. Misawa, K. Yumoto, G. K. Parks, R. R. Anderson, J. D. Menietti, E. F. Donovan, F. Honary, and E. Spanswick (2008), *J. Geophys. Res.*, VOL. 113, A09213, doi:10.1029/2008JA013322.
- [6] Saito, T. (1969) "Geomagnetic pulsations", In *Space. Sci. Rev.*, 10, pp.319-412.
- [7] V. Moskvina and A. Zhigljavsky. An algorithm based on singular spectrum analysis for change-point detection. *Communications in Statistics— Simulation and Computation*, 2003.
- [8] Yumoto, K., and the CPMN Group(2001) "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.

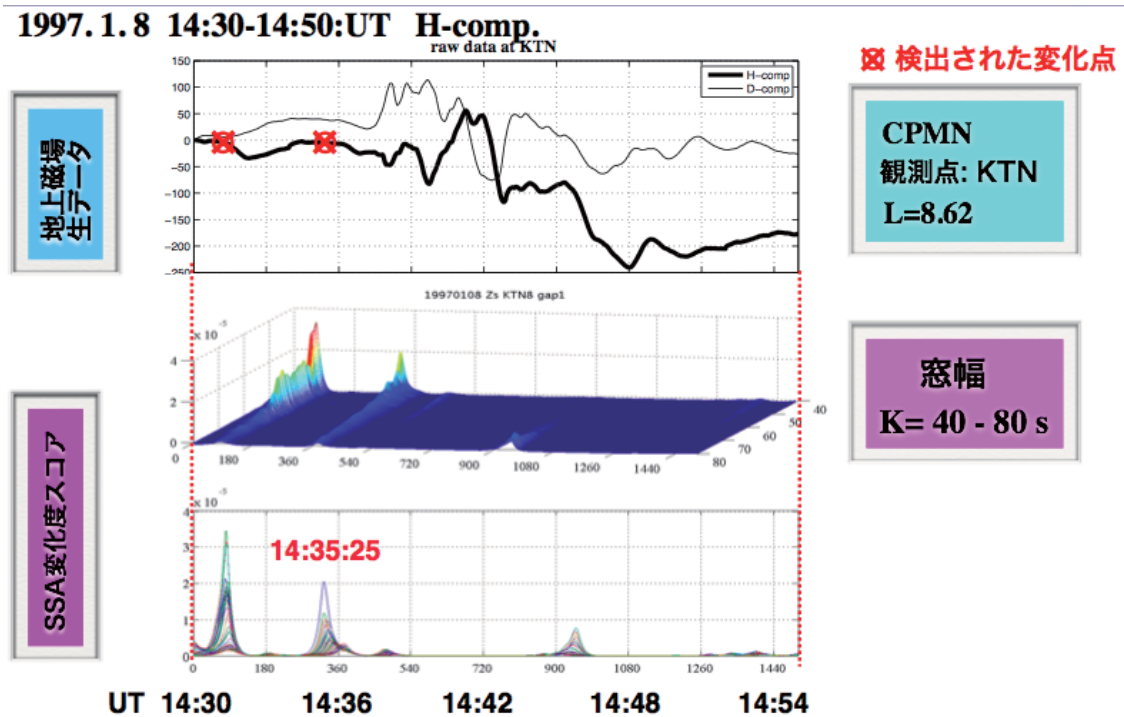


図1. (上図) オーロラ帯に位置するKTNで観測された地上磁場生データ (太線: 南北成分、細線: 東西成分。赤丸は変化度スコアが極大をとる時刻)。(中図) 地上磁場データから計算したSSA変化度スコア。(下図)部分時系列の窓幅を40~80秒まで変化させたときの変化度スコアを重ねてプロットしたもの。