

地上観測された Pi 2 型地磁気脈動のグローバルな波動特性解析のための周波数領域独立成分分析の応用

徳永 旭将 [1]; 吉川 顕正 [2]; 魚住 禎司 [3]; 樋口 知之 [4]; 中村 和幸 [5]; 湯元 清文 [6]; MAGDAS/CPMN グループ 湯元 清文 [7]

[1] 九大・理・地球惑星; [2] 九大・理・地球惑星; [3] 九大・宇宙環境研究センター; [4] 統数研; [5] 明治大; [6] 九大・宇宙環境研究センター; [7] -

An application of frequency-domain ICA to analyze global wave characteristics of Pi 2 magnetic pulsations observed on the ground

Terumasa Tokunaga[1]; Akimasa Yoshikawa[2]; Teiji Uozumi[3]; Tomoyuki Higuchi[4]; Kazuyuki Nakamura[5]; Kiyohumi Yumoto[6]; Yumoto Kiyohumi MAGDAS/CPMN Group[7]

[1] none; [2] Earth and Planetary Sci., Kyushu Univ.; [3] SERC; [4] Inst. Stat. Math.; [5] Meiji Univ.; [6] Space Environ. Res. Center, Kyushu Univ.; [7] -

Ground-observed Pi 2 pulsations are mixtures of several components that are reflecting different geophysical phenomenon, such as propagations of fast and Alfvén mode waves, resonances of magnetic field lines and/or plasmaspheric cavity and oscillations of magnetosphere-ionsphere current systems [Yumoto et al., 2001]. However, even in the past five years studies, its generation and propagation mechanisms have been only partly understood. In the previous studies, many observational researches have been done in the magnetosphere and on the ground. The advantage of satellite observation is that we can obtain three-dimensional wave characteristics by in-situ observations. On the other hand, its disadvantage is that information provided by satellite observation is spatially-limited for the magnetospheric scale. The advantage of ground-based observation is that we can obtain comprehensive wave structures by using globally expanded ground-magnetometer chains. On the other hand, ground-observed Pi 2 signals have all informations that are associated with generation mechanisms and propagation mechanisms described above. In order to understand the generation and propagation mechanisms of Pi 2 pulsations, it is important to introduce some signal processing techniques that make it possible to redeem those disadvantages.

In the present study, we introduce Independent Component Analysis (ICA) to analyze Pi 2 pulsations. ICA is one of the multivariate statistical techniques that started to be used in the 1990s in the field of signal processing [e.g., Common, 1994]. With ICA, source signals are assumed to be non-Gaussian and statistically independent of each other and estimated by maximizing their statistical independence. It has been successful in resolving observed mixed signals including brain imaging data and voice signals into source signals.

Tokunaga et al. [2007] showed that ground-observed Pi 2 signals are decomposed into several independent components by using FastICA, one of most famous ICA algorithm, based on the assumption of instantaneous mixture model. They showed ground-observed Pi 2 signals can be decomposed into 7 significant patterns within the framework of so-called blind source separation. While, in recent years, it has been found that a new insight of the propagation mechanism of Pi 2 pulsations globally observed on the ground. Basing on the results of Uozumi et al. [2004], [2007], it is most likely reasonable to presume that ground-observed Pi 2 pulsations are spatio-temporal mixtures, and therefore, they should be decomposed into smaller number than the result of Tokunaga et al. [2007]. In this paper, we will extend the application of ICA to ground observed Pi 2 pulsations from blind source separation (spatio mixture ICA model) to the blind source deconvolution (spatio-temporal ICA model).

[Pi 2 型地磁気脈動]

地上で観測される Pi 2 型地磁気脈動の解析に ICA (独立成分分析) を応用する試みを続けている。Pi 2 型地磁気脈動はオーロラサブストーム爆発相開始時に地上の広い範囲で地上観測される、突発的な地磁気変動である Yumoto et al.[2001]。過去 50 年に渡る Pi 2 研究においても、その生成・伝播機構は未だ部分的にしか解明されていない。Pi 2 は夜側磁気圏尾部に震源領域を持ち、磁気流体波 (磁気音波および Alfvén 波) として途中の磁気圏を伝播し電離層まで到達すると考えられている。過去の Pi 2 研究において、地上および人工衛星による磁気圏での観測からの帰納的アプローチは数多く行われて来た。衛星観測のメリットは、3 次元的な波動特性が得られることである。その一方で衛星観測には、磁気圏のスケールに対し非常に局所的な情報しか得ることができないというデメリットも存在する。地上観測のメリットは、グローバルに展開された多点磁場観測網により、比較的広域的な波動特性を捉えることができることである。その一方で、振動的な磁場変動として地上で捉えられる Pi 2 信号には、Pi 2 の生成機構に関する情報と (磁気圏での) 伝播機構に関する情報が全て積分されていると考えられるため、それらの情報を上手く切り分けて解析する必要がある。これら地上観測及び衛星観測のそれぞれのデメリットを上手くフォローできるアプローチを導入することが、Pi 2 の生成・伝播機構の全容を帰納的立場から解明するための重要課題であると我々は考える。

[Pi 2 型地磁気脈動への ICA の応用]

我々は上記の問題に対し、独立成分分析 (ICA) という視点から新たな枠組みを与える。地上で観測される Pi 2 は、オー

ロラサブストーム発生に伴い夜側磁気圏尾部で発生した爆発的な磁場擾乱が、磁気圏および電離圏という未知のシステムにおいて変換された後、地上磁場変動として出力された信号であると解釈できる。従って、地上観測された Pi 2 から伝播機構と生成機構に関する情報を切り分けることは、出力信号のみから未知のシステムと未知の入力信号を同時に推定する問題と捉え直すことができる。入力信号が複数存在する場合、この問題は Blind Source Separation(BSS) と呼ばれる。ICA はこの BSS を工学的に実現する手法として、近年様々な分野での応用されつつある。線形でノイズ成分が 0 の観測モデルを仮定すると、前述の問題は $x = As$ において x から A と s を推定する問題へ帰着する(ただし、 x は出力信号、 s は入力信号を表すベクトル、行列 A は s を変換する混合行列とする)。ICA では、複数の入力信号が優ガウ斯的で相互独立であるという仮定のもと、数値的に入力信号間の独立性を最大化させることで入力とシステムを同定する。ただし A が定数行列の場合、磁気圏が「残響」の無い線形システムであると仮定していることになる。

[適用]

Tokunaga et al., [2007] では、地上多点観測された Pi 2 型地磁気脈動に上記の瞬時混合の観測モデルを当てはめることで、ICA により有意な情報分離ができる可能性を示した。その一方で近年、Pi 2 の伝播機構について新たな描像が得られつつある。Uozumi et al.,[2004] は、地上多点観測された Pi2 信号の伝搬遅延の空間特性についての統計的な解析を行った。また、Uozumi et al., [2007] では Uozumi et al.,[2004] で得られた結果をふまえ、磁気圏での Pi2 の伝搬時間についてのモデル計算を行った。彼らの一連の結果は、磁気圏を MHD 波として伝搬する Pi 2 には複数の伝搬経路が存在する可能性が高いことを示している。それゆえ、磁気圏での変換システムを表す混合行列 A は、有限な時間遅れを含むシステムを仮定して設計することが、我々にとってより現実的なアプローチであると考えられる。この場合、行列 A はいわゆるインパルス応答 (FIR) 行列であり、そのフーリエ変換は伝達関数である。一般に残響の効果が無視できない環境下においては、時間領域もしくは周波数領域で ICA を適用する方法がとられることが多い。本研究では、計算の簡便さから周波数領域で ICA を採用する。地上多点観測された Pi 2 信号から伝達関数として減衰係数と伝播遅延に関する情報を定量的に抽出することにより、Pi 2 の生成・伝播機構に関わる知見獲得を目指す。