

## Grad-Shafranov 方程式による太陽風磁気ロープ再構築方式に関わる問題

#丸橋 克英<sup>1)</sup>, 塩田 大幸<sup>2)</sup>, 久保 勇樹<sup>3)</sup>, 長谷川 洋<sup>4)</sup>, 徳丸 宗利<sup>5)</sup>

(<sup>1</sup> 情報通信研究機構, (<sup>2</sup> 情報通信研究機構, (<sup>3</sup> 情通機構, (<sup>4</sup> 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, (<sup>5</sup> 名大 ISEE

### Resolving a problem in the analysis of flux ropes based on Grad-Shafranov equation

#Katsuhide Marubashi<sup>1)</sup>, Daikou Shiota<sup>2)</sup>, Yuki Kubo<sup>3)</sup>, Hiroshi Hasegawa<sup>4)</sup>, Munetoshi Tokumaru<sup>5)</sup>

(<sup>1</sup>National Institute of Information and Communications Technology, (<sup>2</sup>National Institute of Information and Communications Technology (NICT), (<sup>3</sup>National Institute of Information and Communications Technology, (<sup>4</sup>Institute of Space and Astronautical Science, (<sup>5</sup>Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University

The reconstruction method based on Grad-Shafranov equation is widely utilized in analyzing the structures of interplanetary magnetic flux ropes. This method is valid only under the two conditions: (1) that the flux ropes are essentially of 2-dimensional structure, and (2) that the observed magnetic field variations are due to spatial structure with no temporal variations involved. Actually, however, many flux ropes are expanding along their propagation from the Sun, that is, they must be taken as the time-varying structures.

Though this problem has been studied by Hasegawa et al. (JGR, 2014), the method has not been applied to sufficient number of the observed flux ropes. We developed a method to derive the spatial change along the spacecraft orbit for the flux rope expanding in a self-similar fashion, for which it is valid to apply the Grad-Shafranov (GS) method (SGEPSS, 2022; JpGU, 2023). The present study is aimed at making clear the problem in the traditional GS method and the merit of the new GS method. For easy comparison between the two methods, we analyze the theoretically calculated magnetic field variations associated with the flux ropes with various expansion rates by the two methods and examine the results from the two methods. So far, we have found the following:

- (1) Two methods yield different results for the direction of the flux rope axis, with larger difference as the strength of the expansion.
- (2) The Grad-Shafranov (GS) equation gradually lose the validness as the expansion effect becomes stronger.
- (3) For even stronger expansion effects, the conditions for the GS equation collapses.

Though at the present stage, we don't analyze the observed flux ropes sufficiently, the above results suggest that we may need careful examination about the analysis results based on the traditional GS method.

太陽風磁気ロープの内部構造を Grad-Shafranov 方程式から決定する方法（ここでは GS 法と呼ぶ）が広く使われている。この方法が成立するためには、磁気ロープが 2 次元的な構造であり、内部を通過する衛星が観測する磁場変化が空間構造を表している（構造は時間変化を含まない）という 2 条件が必要である。実際は、磁気ロープは膨張していることが多く、時間的に変化する構造と考えなければならない。この問題に対処する理論が考案されているが（Hasegawa et al., JGR, 2014）十分な成果をあげていない。我々は、観測データから膨張の効果をとり除いた上で GS 法を適用する方法を考案し、SGEPSS - 2022 秋、JpGU-2023 で、その有効性を示すことができた。今回は、新方式 GS 法の有用性と、従来方式の GS 法の問題点を考察するために、理論モデルから計算される太陽風磁場の疑似観測データをいろいろに選びながら、2 つの方式が与える違いを解析した。これまでに明らかになったことを簡単に書くと、

- (1) 膨張の効果が強くなるに従って、求められる磁気ロープ軸の方向に差が現れてくる。
- (2) 膨張の効果が強くなるに従って、Grad-Shafranov 方程式の根拠が失われてくる。
- (3) さらに膨張率が大きくなると、従来方式の GS 法では計算が破綻してしまう。

現在はまだ、磁気ロープの観測例の解析には至っていないが、上記の結果は従来方式の GS 法による解析結果については一定程度の吟味が必要になることを示唆している。