

# サブストームトリガー機構のトポロジー構造

Topological structure of the substorm triggering process

## 研究代表者：研究代表者名

田中高史（九州大学・名誉教授）

[takashi.tanaka.084@m.kyushu-u.ac.jp](mailto:takashi.tanaka.084@m.kyushu-u.ac.jp)（令和5年度報告）

## 研究分担者：研究分担者名

無し

## 研究目的 (Research Objective):

この研究で目的としているのは、**initial brightening** だけに注目するサブストームではない。オンセットの前には、成長相がある。この時は **quiet arc (QA)** が存在し、**Harang discontinuity (HD)** が発達する。QA は薄化したプラズマシートの中の粒子散乱、HD はプラズマシート中の正負電荷のドリフトの違いから説明されることが多いが、この研究では対流構造の変動として説明する。QA はオーロラアークであって、拡散型オーロラではない。沿磁力線電流 (FAC) とダイナモを必要とする構造である。これが対流構造の変動から QA を説明することの意味である。

**Initial brightening** は必ず QA の赤道側から開始する、また HD の崩壊を伴って発生する。**initial brightening** の後にはアークの極方拡大、**westward traveling surge (WTS)** が起こる。これまでに、これらは一連のサブストーム現象が、磁気圏における対流変動の電離圏への投影構造として、理解可能であることを示してきた。

以上の考察から、**interplanetary magnetic field (IMF)** が北から南に変わる時に、対流が如何なる変動を示すかを明らかにすることが、サブストームの理解に必要であることが分かる。

## 計算手法 (Computational Aspects):

太陽風—磁気圏—電離圏結合系のダイナミクスを研究するために、**REPPU (REProduce Plasma Universe)** コード開発がされている。このコードでは、従来のレベル6、レベル7、レベル7SFに加え、本年度ではレベル8が完成した。ただしレベル8については、計算量が大きいため、応用はまだ限定されている。また派生版として木星用のバージョンを開発した。ここでは地球のバージョンに加え、惑星回転、プリセッション、Io ソース考慮されている。

## 研究成果 (Accomplishments) :

サブストームは磁気圏対流の変動とすれば、サブストームを理解する前提として、IMF 北の時の磁気圏構造及び対流構造を知る必要がある。北向き IMF の時の磁気圏構造といっても、一概には理解できない。少なくとも真横に近いとき、斜め北の時、真北の時の3種では様相は異なる。この中で、斜め北の時がもっとも一般的な場合であるので、これを理解しなければ、サブス

トームは理解できないであろう。

3種の内一番よく理解できているのは、真北の時である。この時は interchange cycle (Watanabe et al., 2018)によって対流構造はほとんど決まってしまう。真北の IMF の時は、昼側リコネクションでは double リコネクションというアイデアがあり、これは北カスプと南カスプで同時にカスプリコネクションを想定するものである。しかしこれは誤りであり、昼過ぎで北カスプがわずかに先で、南カスプはこれにわずかに遅れてリコネクションを起こし、昼前では南カスプがわずかに先で、北カスプはこれにわずかに遅れてリコネクションを起こす場合、もしくは昼過ぎと昼前で逆になる場合の2ケースになる。南北の構造は共に Interchange cycle である。2ケースはサイクリックに交代し、定常状態は作れない。

斜め北向き IMF は、最難問である。昼側は Interchange cycle であり、これは Watanabe et al. (2018)に示されているとおりである。問題は夜間に発生するセルである。これを理解しようとする研究は未だに行われていない。本年度の研究から、この問題がある程度明らかになった。北向き IMF とローブ磁場のリコネクションは、交換型リコネクションである。これに対して、北向き IMF とプラズマシート磁場でリコネクションが起これば、Dungey 型になる。本年度では、このような Dungey 型リコネクションが可能であり、これによって夜間セルの再現が出来ることを示した。夜間セルの構造中には、夜間セパレーターリコネクション、プラズマシートの形成が含まれていることが示された。しかしこのような構造がある瞬間に存在することは示されたが、これが定常構造として安定的に存在するかどうかはまだ明らかでない。

IMF が北から南に変わった時に、当然対流構造も変わる。この時の非定常動作に対して、磁気圏尾の散逸分布がどのように関連するかについても、研究を進めた。磁気圏尾で一様な散逸、地球から遠ざかるにつれて増大するような散逸、また無散逸の場合などで、オンセットの様相が変わることが見られる。無散逸ではサブストームにならない。一様散逸では、オンセット位置が合わないなどが分かってきた。しかし実際に観測されるオンセットの様相をもっともよく再現する散逸の分布についてはまだ明確でない。

REPPU コードを木星にも適用し、木星磁気圏について研究を進めた。内部磁気圏 (<20 R<sub>J</sub>) で I<sub>o</sub> プラズマの輸送・拡散に対して、交換不安定が作用することは、良く知られているが、この交換不安定は、対流でもあることを示した。この対流は、太陽風-磁気圏相互作用と木星回転で形成される磁気圏の主要部とは、切り離された内部磁気圏領域に存在することとなる。交換不安定に伴う磁気圏運動に付随する FAC が、電離圏に伝達されると、電離圏でポテンシャル電場を発生し、その電場が交換不安定の運動と一致するようになることが可能である。これによって交換不安定は大きな渦運動に成長することが出来る。この渦運動に対するコリオリ力が、東に延びる finger の原因となることが分かった。

## 公表状況 (Publications) :

### (論文)

Tanaka, T., Y. Ebihara, M. Watanabe, S. Fujita, and R. Kataoka (2023). Radial transport of I<sub>o</sub> plasma from the inner magnetosphere to the tail, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 127, 2022JA030891