PLAIN News
宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部
科学衛星運用・データ利用センター
http://www.isas.jaxa.jp/docs/PLAINnews/
Center for Science-satellite Operation and Data Archive
SODA ISAS/JAXA
2009.4.17 / No. 186

サブストーム開始に伴う磁気圏尾部の時間発展の最新描像

宮下　幸長（名古屋大学 太陽地球環境研究所）

背景：サブストームとは

オーロラは、極域の超高層大気中で発生する現象である。しばしば、真夜中付近で突然、明るくなり、激しく動き、爆発的に広がる。この現象は、オーロラ爆発と呼ばれ、この時、地上では地磁気の乱れが生じ、磁気圏でも激しい変動が見られる。

これらの擾乱のもとになるエネルギーは、太陽から太陽風によって運ばれてくる。太陽風の磁場と地球の磁場が昼側の磁気圏前面で相互作用をすることにより、太陽風のエネルギーが地球の磁気圏の中に入る。このエネルギーは、磁気圏尾部と呼ばれる、磁力線が尾のように引き伸ばされた夜側の領域に、いったん蓄えられる（図１参照）。ある程度蓄積され、磁気圏尾部で何かが起こると、エネルギーは急激に解放される。一部のエネルギーは地球の方にもやって来て、オーロラ爆発を引き起こす。この一連のエネルギー解放の過程をサブストーム（オーロラ嵐）と言い、平均して一日に数回、発生する。

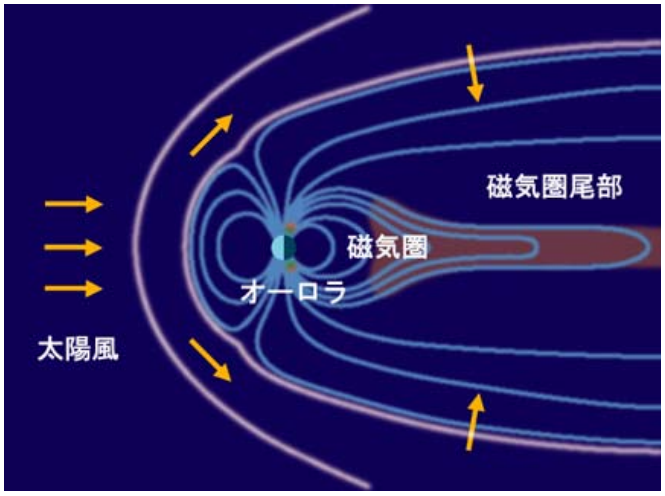

図 1. 地球磁気圏全体の模式図

サブストームが磁気圏尾部のどのような物理現象によって引き起こされるかは、磁気圏物理学における未解決の大問題の一つである。数十年にわたって研究され、様々な説が提唱されてきたが、現在も激しい論争が続いている。

統計解析

そこで、このサブストーム発生機構に関する問題の解決に向けて、サブストーム開始前後の磁気圏尾部全体の時間発展を調べた。ここでは、3787 例ものオーロラ爆発前後の、Geotail、Polar、GOES 衛星によって得られた磁気圏尾部・内部磁気圏におけるプラズマ流・磁場・電場・全圧力などの様々な物理量を統計的に解析した。これらの数値データは、Geotail グループや NASA の CDAWeb から全観測期間分をあらかじめ手元に用意しておいて、自分のパソコンを用いて対象時間帯のデータを処理した。オーロラ爆発の事例は、Polar、または、IMAGE 衛星によって得られた紫外線オーロラの画像をもとに目で見て選ばれたものを使用した。今回の統計解析は、10 年にも及ぶ長年のデータの蓄積（特に Geotail）があったからこそ、成し得たものである。

解析結果

この解析により、以下のような結果を得た。図 2 は、主な解析結果である。図 3 は、本研究で得られた結果のまとめである。

(1) サブストーム開始の少なくとも 2 分前に、地球から反太陽方向に地球半径の 20 倍の距離だけ離れた場所（X ～－ 20 R_E）よりも尾部側で、プラズモイドに伴って磁場南北成分が減少し始めた（図 2 中）。この領域では、尾部方向の高速プラズマ流はサブストーム開始直後に顕著に発達した（図 2 左）。

(2) X ～－ 20 R_E よりも地球側では、サブストーム開始前後に地球方向のプラズマ流は少ししか見られなかった（図 2 左）。

(3) プラズモイド形成・発達とほぼ同時のサブストーム開始 2 分前に、X ～－ 7 R_E から X ～－ 10 R_E の領域では、磁場双極子化に伴い、磁場南北成分が増加し始める。その後、磁場双極子化の領域は、尾部方向、朝夕方向、地球方向の四方に拡大していく（図 2 中）。

(4) 全圧力（イオン圧と磁気圧の和）は、サブストーム開始 2 分前に、X ～－ 16 R_E から X ～－ 20 R_E の真夜中前の領域で最初に減少し始め、その後、周囲の領域でも減少する（図 2 右）。最初に全圧力が減少する領域は、X ～－ 5 R_E から X ～－ 20 R_E の真夜中前側に広がる、かなり引き伸ばされた磁力線の領域（図 2 中で、サブストーム開始前に磁場南北成分が大きく減少している領域）や強い尾部電流層の尾部側の端に対応する。一方、X ～－ 10 R_E よりも地球側では、全圧力

［裏へ続く］

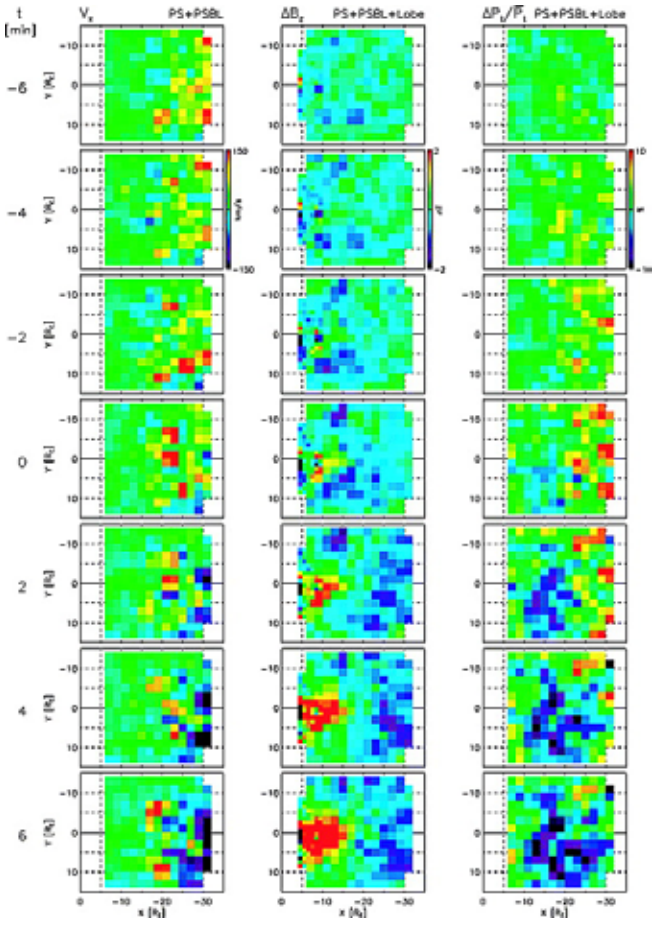

図 2. 地球尾部方向のプラズマ流（左）、磁場南北成分の変化量（中）、および、全圧力の変化の割合（右）

時刻 t=0 は、サブストーム開始（オーロラ爆発）である。変化量は、サブストーム開始 10 分前付近の値を基準にしている。座標原点は地球中心で、X 軸の右方向は太陽・地球から離れる方向（反太陽方向）、Y 軸の下方向は地球の夕方側に向かう方向にとってある。座標の値は、地球から地球半径（RE）の何倍の距離かを表している。

は増加する（図 2 右）。さらに詳しく調べた結果、磁場双極子化に伴って高エネルギー粒子の寄与が増加するためであることがわかった。

(5) 全圧力の減少、すなわち、エネルギー解放は、最初の全圧力減少と最初の磁場双極子化の間の領域、つまり、X ～－ 12 RE から X ～－ 18 RE で顕著である。

結論

以上の観測結果から得られた結論は、次の通りである。

(1) 磁場南北成分の減少と全圧力の減少から、磁気リコネクションは、少なくともサブストーム開始 2 分前に、平均的に X ～－ 16 RE から X ～－ 20 RE の真夜中前の尾部で最初に発生する。磁気リコネクションの領域は、X ～－ 5 RE から X ～－ 20 RE の真夜中前側に広がる、かなり引き伸ばされた磁力線の領域や強い尾部電流層の尾部側の端に位置している。サブストーム開始直後に X ～－ 30 RE 付近でプラズモイドが大きく発達する。

(2) 磁気リコネクション発生とほとんど同時に（2 分時間分解能で）、磁場双極子化は、サブストーム開始 2 分前に、X ～－ 7 RE から X ～－ 10 RE の領域で始まり、その後、磁場双極子化の領域は四方に広がる。

(3) エネルギー解放は、磁気リコネクションと最初の磁場双極子化の間の領域で顕著である。この結果は、サブストーム発生機構の解明への手がかりとなるかもしれない。

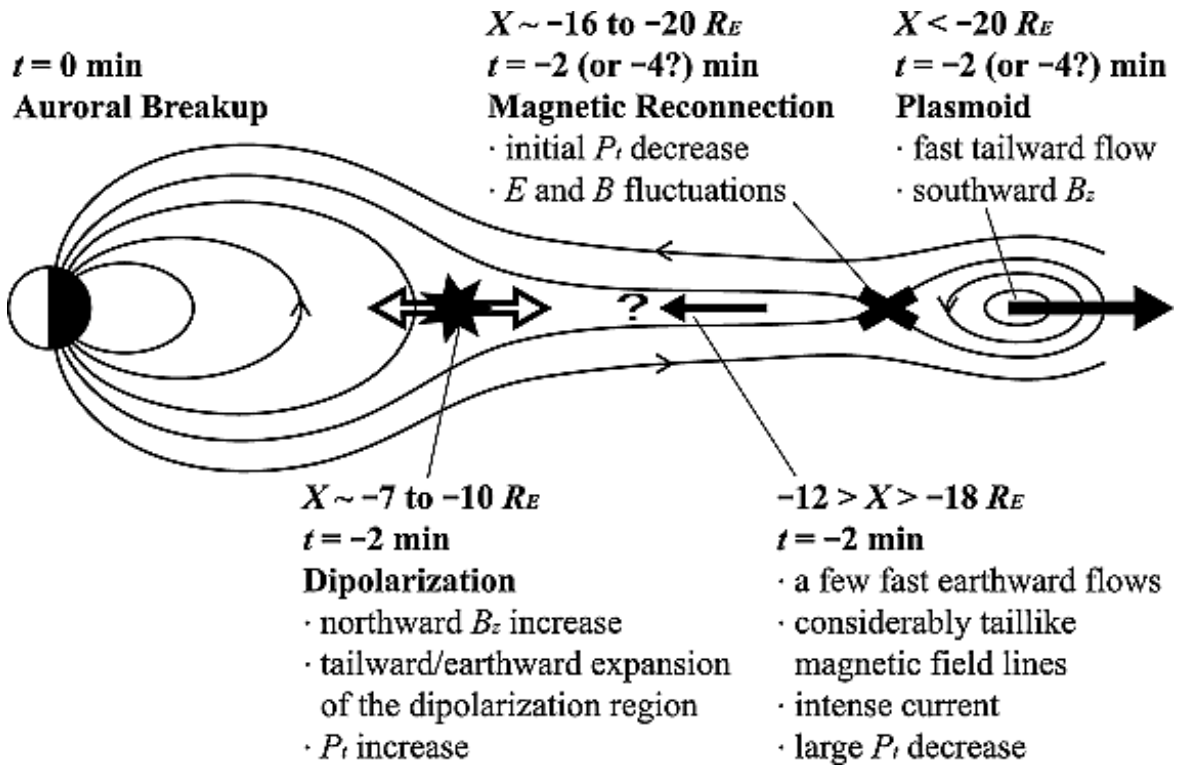

図 3. 本研究で得られた結果のまとめ

以上のように、本研究により、サブストーム開始に伴う磁気圏尾部と内部磁気圏の発展の全体像を確立させた。サブストーム発生に重要な磁気リコネクションと磁場双極子化の因果関係や両者の詳細な発生機構については、解明すべき大問題として残されているが、本研究で得た全体像は、今後の複数衛星の観測データに基づく、尾部発展や各物理過程の詳細な解析をする際、指針となる重要な結果である。

※参考文献：Miyashita et al., J. Geophys. Res., doi: 10.1029/2008JA013225, 2009.

※この成果は、毎日新聞の 2009 年 3 月 15 日付けの朝刊「理経白書」にも掲載されました。

宇宙情報システム講義第 2 部
これからの衛星データ処理システムはこうなる（第 11 回　搭載データ処理 2）

山田　隆弘（宇宙情報・エネルギー工学研究系）

今回は、衛星の中のデータ処理システムの話の 2 回目として、標準インタフェースの話をします。

前回お話ししたように、現在開発中の新しいデータ処理システムでは、物理的な要素と機能的な要素を別々に開発します。そして、個々の衛星のデータ処理システムは、それに必要な物理要素と機能要素を適当に組み合わせることによって構成します。このようなことを可能にするためには、物理要素間のインタフェース、機能要素間のインタフェース、物理要素と機能要素の間のインタフェースを個々の衛星や用途に依存しないように統一する必要があります。

これらの統一インタフェースは、「既存の標準規格に適当なものがある場合はそれを利用し、適当な標準規格がない場合は宇宙科学研究本部が開発する」という方針で選定しました。インタフェースの全体構成を図 1 に示します。

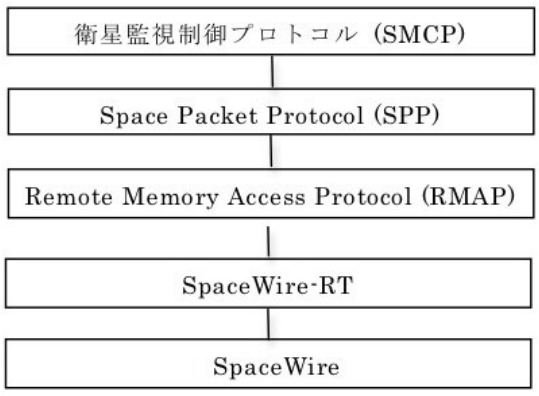

図 1　搭載データ処理システムのインタフェース構成

それでは、物理要素間の標準インタフェースから説明します。これには、「高速のデータ転送が可能である」ことと「必要な機能は備わっているが、不必要な機能は備わっていない」という理由によりヨーロッパで開発された衛星用のデータ回線標準規格である SpaceWire を採用することにしました。SpaceWire 規格と共に、SpaceWire 上のデータの流れを制御する SpaceWire-RT という規格と SpaceWire を用いてメモリの読み書きを行うための Remote Memory Access Protocol (RMAP) という規格も使用します。これからは話を簡単にするために、この三つの規格を総称して SpaceWire と呼ぶことにします。

衛星の中でデータ処理に関わる機器は、原則として全て SpaceWire により接続されます。衛星に搭載される計算機もセンサー等の機器も、ほとんどのものが SpaceWire で接続されるのです。これにより、別々に開発された機器でも簡単に接続できることになり、衛星毎にその衛星に適した機器を組み合わせて使用することができるのです。

次に、機能要素間の標準インタフェースを説明します。これには、この連載の第 2 部第 6 回で説明した衛星監視制御プロトコル (Spacecraft Monitor and Control Protocol, SMCP) を使用します。このプロトコルは宇宙科学研究本部で開発しました。このプロトコルを使うための前提として、各々の搭載機器の機能がこの連載の第 2 部第 3 ～ 5 回で説明した機能オブジェクトとして設計されていなければならないのですが、搭載機器の機能を機能オブジェクトとして設計していれば、その機能を監視し制御するために衛星監視制御プロトコルを統一的に使うことができるのです。

衛星監視制御プロトコルとともに、場合によって、この連載の第 1 部第 2 回で説明したパケットを使っても良いのですし、使わなくてもかまいません。地上と衛星との間のやり取りにはパケットが使われますので、パケットの処理が可能な場合は、パケットを使います。そうでない場合は、他の機器にパケットの処理を依頼するのですが、詳しい説明は省略させていただきます。ところで、このパケットは、Space Packet Protocol という国際標準規格で規定されているデータ単位なのです。

機能要素間のインタフェースとしての衛星監視制御プロトコルの使い方を簡単な例を使って説明して

［裏へ続く］

みます。ある衛星にカメラが搭載されていて、それがミッションプロセッサという計算機によって監視制御されるとします。

カメラとミッションプロセッサとは物理的にはSpaceWireによって接続されるのですが、ミッションプロセッサ内のミッション機器管理機能とカメラ内のカメラ管理機能とは衛星監視制御プロトコルにより接続されます。ミッション機器管理機能は、衛星監視制御プロトコルを用いてカメラ管理機能オブジェクトという機能オブジェクトを監視制御することになります。

まずカメラを使うためにカメラを立ち上げます。カメラ管理機能オブジェクトにはSTARTというオペレーションがありますので、カメラを立ち上げるために、ミッション機器管理機能は衛星監視制御プロトコルを用いてSTARTオペレーションを起動するためのメッセージを送ります。このメッセージは、パケットが使われている場合は、パケットに入れられて送られます。このメッセージとパケットは物理的にはSpaceWireの機能によりミッションプロセッサからカメラに運ばれます。

カメラの立ち上がり状態を確認するためには、カメラ管理機能が持っているカメラの状態を示すアトリビュートの値をミッション機器管理機能が読み出すことによって行われます。これを行うにも衛星監視制御プロトコルが使われます。衛星監視制御プロトコルでアトリビュートの値を送る方法はいくつかあるのですが、詳しいことはこの連載の第2部第6回の解説を参照して下さい。

さらに、カメラが正しく立ち上がっているかどうかを判定するためには、次のようにします。機能オブジェクトの動作は、衛星の機能モデルに従って標準的な方式で定義されています。また、それは衛星情報ベース2(SIB2)に標準フォーマットで格納されています。そこで、ミッション機器管理機能はSIB2の内容の中で該当する部分を参照することによってカメラが正しく動作していることを確認することができるのです。そのためには、ミッションプロセッサはSIB2全部を持っている必要はなく、自分が使用する部分だけを自分に適した形で保有していればいいのです。

このような方法を採用することによって、ミッション機器管理機能を汎用化する、すなわち、あらゆる機器を統一的に管理するための機能を設計することが可能になります。相手がカメラでなく別の機器の場合は、SIB2内で参照すべき部分を変えればよいだけであり、ロジックを変える必要はないからです。

最後に、物理要素と機能要素の間のインタフェースについてですが、これはまだ標準規格ができていないのです。このような仕事に興味がある方は、私までご連絡下さい。ぜひいっしょに開発しましょう。ただし、謝礼は出ません。宇宙科学研究本部は貧乏なので。

これで、搭載データ処理の話はおしまいです。また、これからの衛星データ処理システムの話もおしまいです。

次回は、この連載の最終回になります。最終回には、今までに説明した方法を使うことによって衛星開発の方法がどのように効率化されるのかについて解説します。

平成20年度 宇宙科学情報解析シンポジウム報告

海老沢 研・山本 幸生（宇宙科学情報解析研究系）

2月23日に平成20年度宇宙科学情報解析シンポジウムを開催いたしました。

他の分野と比して開拓余地の多い「惑星科学と情報解析」をテーマに、最新技術的の動向やデータを取り巻く環境について幅広い発表が行われました。技術的動向では、データ解析手法、データマイニング、可視化技術など、具体的な活用例を元に活発な議論が行われました。またデータを取り巻く環境については、データ保護に関するセキュリティや、標準化に対する国際的動向、また他分野とのシステム統合に関する話題など、幅広い観点からの検討結果が発表されました。講演して頂いた皆様、参加して頂いた皆様には、この場を借りまして厚く御礼申し上げます。発表資料につきましてはPDFによるダウンロードを予定しております。

編集発行：宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部 科学衛星運用・データ利用センター
〒229-8510 相模原市由野台3-1-1 Tel.042-759-8767　住所変更等 e-mail：news@plain.isas.jaxa.jp
本ニュースはインターネットでもご覧になれます .http://www.isas.jaxa.jp/docs/PLAINnews

●編集後記：満開の桜を見る前にパリ出張、成田経由でそのままボストンへ。日本に戻って来たらすっかり桜が散っていました。（K.E.）