

Geotail の成果とは何か

宇宙科学研究所 藤本 正樹

(Geotail プロジェクト・サイエンティスト)

民間人（非 ISAS メンバー）として最初に Geotail の衛星運用を担当したのは、実は、私である。1992 年の秋冬、Geotail は遠尾部（地球半径の 100 倍以上、反太陽方向に地球から離れた位置）にあって、夜間は連続して見えているため、夜を徹しての運用ではそれまでほとんど探査されたことのない領域からの貴重なデータが受信される様子を、クイック・ルック画面で見守ったのだった。ロジは他に部屋が無かったため、ツインベッドがある夫婦用寝室で運用の相方（10 歳ほど先輩にあたる方）と昼過ぎまで寝て過ごした。当時の ISAS メンバーは職人気質丸出しであり、衛星開発に直接関わることなく理論研究で学位を取得して大学の助手となったばかりの私は、中学のサッカー部以来のシゴキを受けたのだった。

そんな私も、どういうわけか ISAS メンバーとなり（先日の研究所会議で「この部屋にいるメンバーで唯一、エレクトロニクス・ショップを知らないひと」という名誉ある言及を所長からされた）、Geotail のプロジェクト・サイエンティストを務めている。20 年以上も（シゴキが無くなる等、その形態を変えつつも）運用が続けられる Geotail であるが、今でも磁気圏を観測する国際共同衛星群のひとつとしてしっかりと存在感を示している。今でも年に何度かは Geotail 関連で国際会議へと引っ張り出され、あるいは、Geotail で得た人脈を使って日本でのシンポジウムに海外からひとを呼びつけたりしている。この、宇宙空間物理分野の国際学界におけるプレゼンスは、衛星群を成す他の衛星よりも一足先に打ち上げられ、新しい成果や新しい考え方を先に提示し、研究の方向性を先導したことによるものが大きいと思う。

ここでは、少しだけ具体的に「Geotail の成果とは何か」ということを解説しておきたい（プロジェクト・サイエンティストなので）。改めて振り返った上で、一言で言い切ってしまうと、「高性能データが研究者に考える勇気を与え、そこから実際に新しい考え方が生まれ、それが後続のミッションへと伝染していった」ということになる。

そもそも、磁気圏とは何か。地球は固有磁場を持っており、太陽からは太陽系空間に向けて太陽風と呼ばれる電離したガスが吹き出ている。太陽風は地球までやってくると、その固有磁場とぶつかることになる。このダイナミックな相互作用から、地球周辺の宇宙空間に「磁気圏」と呼ばれる、地球の磁力線が籠のようになって包み込む空間が生まれる。その出自から想像できるように、磁気圏は電離したガスと磁場が支配する世界であり、ダイナミックな世界であり、その活動の一部は極域のオーロラという目に見える形となっている。

(A) 遠尾部の観測：地球から反太陽方向に 100 地球半径程度離れた領域は、磁気圏の構造を決定する上で重要なのだが、観測データは極めて限定的であった。Geotail は、この領域において充

実した観測を実施し、その姿を明らかにし、基本的に「磁気圏対流」という考え方が正しいことを実証した。特に、地球大気を起源とする酸素イオンがこの領域で見つかったことは驚きであり、磁気圏内でどのように電離ガスが対流するのかを理解する上で大きなヒントとなった。

(B) 磁気リコネクションの物理：宇宙空間は爆発的な現象で満ちている。磁気リコネクションは爆発を可能にする物理現象の一つであり、磁場という形で蓄えられたエネルギーを急速にガスの運動エネルギーへと変換する。磁気リコネクションは宇宙において普遍的に重要なプロセスであり、多くの理論研究も為されている。そして、Geotail チームにおいて高性能観測データが理論系研究者に流し込まれたことで新しい研究スタイルが生まれた。マルチ・スケール物理の観点からデータと数値シミュレーション結果との比較ということが行われ、磁気リコネクションに対する理解が実証を伴ってアップグレードした。また、この研究スタイルはその後の海外のミッションにおいても継承された。

(C) 磁気圏境界の物理：磁気圏内には太陽風との境界から太陽風ガスが流入し、地球起源のガスとともに磁気圏空間を満たしている。その流入方式に関しては「境界にある壁に穴を開けて行う」という考え方が主流であった。物理の言葉では、磁気圏境界で磁気リコネクションが起ることで太陽風の流入が起きる、となる。Geotail は、磁気圏境界での磁気リコネクションの理解を深めただけでなく、境界層の特性が太陽風の状態に応じて変化することを確定し、そこから、太陽風が磁気圏境界をかすめて通り過ぎつつ巻き上げる渦がガスの輸送に効果的であることを見出した。それ以前の数十年間で忘れられつつあったこのアイディアは Geotail で復活し、今では重要な研究トピックとなっている。

(D) 静電孤立波の発見：理論研究者は「非線形性と分散性がバランスすることで作り出される定常伝播構造としての孤立波」なんて難しそうな話が大好きである。その意味で、Geotail 波動観測器が孤立波を実際にデータとして捉え、連携するシミュレーション研究でその理由が明快な形で把握されたことは、お見事であった。それまでは「広帯域静電ノイズ」という、要するに周波数領域でのデータで見ているだけは「わからないもの」とされていた波動現象が、Geotail では波形（時系列）データにおいて捉えられたことがポイントであり、かつ、それを見て、すぐにシミュレーション研究を展開するメンバーが近くにいることが勝負を決した。

(E) 衝撃波の物理：太陽風は、実は、超音速流である。したがって、それが地球の磁場に衝突して磁気圏を形成する際に、その前面には衝撃波が形成される。そこでは、太陽風が急激に減速される。地上の流体力学の常識では、この急な遷移は粘性によってもたらされるのであるが、宇宙空間ガスでは、電磁場の揺動とガスとの相互作用から達成されるという複雑、かつ、ダイナミックなものである。Geotail の高性能データは、このような複雑な状況を読み解くことを成功させる上で大きな要因となった。衝撃波面で太陽風減速（ガス圧力上昇）を達成することの「おつり」として、一部の荷電粒子が高いエネルギーを得ることが宇宙空間では起きている。この衝撃波における粒子加速問題は、宇宙科学における重要問題のひとつであるが、Geotail はそこでも貢献をしている。

最後に、Geotail マインドを惑星探査データ解析へと展開することで成功した例を挙げておきたい。上で述べたように「衝撃波における粒子加速問題」は大きな問題であり、そこでは、超新星残骸衝撃波（星の最期に超新星爆発が起きた時、爆心から吹き出す爆風が作り出すもの）における粒子加速はどのようなものなのか、ということが大きな課題である。我々は、最近、土星探査機カッシーニのデータ解析からこの問題へのアプローチを提唱した。そこで大きな柱となったのは、Geotail における成功経験である。惑星探査データの性能は限られたものである（Geotail のような高性能はあり得ない）一方、扱う物理過程は複雑である。何ものなれば、そのアンバランスを理由にして、物理過程の詳細を読み解くというテーマ設定をしようとも思わないだろう。われわれのケースでは、土星では（地球と異なり）超新星で起きているものに近い事例があるはずという野心的アイデアと、複雑な事象であっても Geotail の経験に基づけば読み解くことができるという無謀な自信が、ハードルを突破していく上での駆動力となった。今後、惑星探査データのポテンシャルを引き出す上で Geotail で獲得した地力が発揮される機会が多いものと期待する：日欧共同水星探査計画ベピ・コロomboの水星磁気圏探査機 MMO の欧州（ESA）への搬出まで、あと約二か月、打ち上げまで二年を切ったところだ。「惑星データは性能がブアなので地球データでしか結果を出すことができない」という奴らに、サヨウナラ。