

**資料78-2**

科学技術・学術審議会  
研究計画・評価分科会  
宇宙開発利用部会  
(第78回) 2023. 8. 29

# 磁気圏尾部観測衛星「GEOTAIL」の30年以上にわたる 観測運用での成果

令和5年（2023年）8月29日

宇宙航空研究開発機構

宇宙科学研究所長 國中 均

宇宙科学研究所 GEOTAIL プロジェクトマネージャ 齋藤 義文



1992年7月24日にISTPプログラムの一環として打上げられたNASAとISASの共同ミッション GEOTAIL は2022年11月28日に 30年間に渡る地球磁気圏尾部の観測を終了しました

Photo: JAXA  
Launch of GEOTAIL from  
Cape Canaveral (NASA photo)

ISAS  
The Institute of Space and Astronomical Science,  
Ministry of Education, Science and Culture

GEOTAIL打上げ時の様子

2022年11月28日運用終了時の集合写真

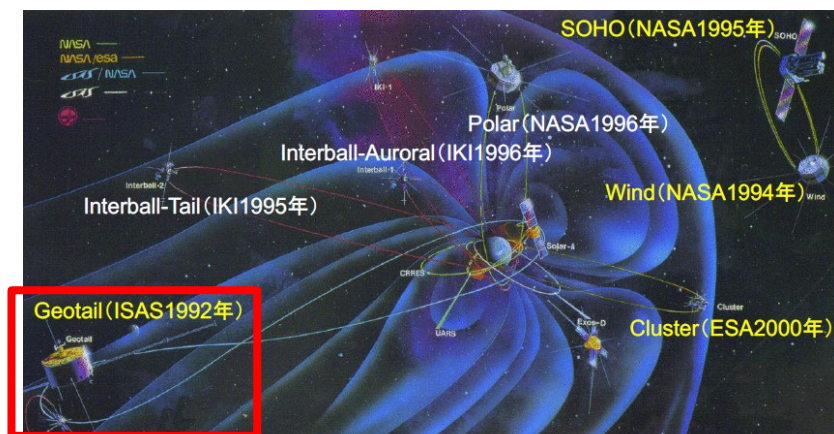


## • GEOTAILの概要：

- **ISTP (太陽地球系物理学国際共同観測計画)の一員として、米国NASA、欧州ESA、ロシアの衛星群に、日本としても衛星を投入し、世界的観測計画へ協力・貢献をする。日米共同開発による衛星。**
- 日米役割分担：衛星開発，追跡管制は日本。打ち上げは米国、データ取得は双方
- 打上げロケット：Delta II (アメリカ)
- 打上げ年月：1992年7月
- システム開発メーカー：日本電気株式会社 (NEC)
- 搭載機器開発メーカー：明星電気株式会社 他

## • GEOTAILの目的：

- 地球磁気圏尾部の構造やダイナミクスを明らかにする。
- サブストーム (オーロラ爆発に対応する磁気圏現象) や磁気圏のエネルギーバランスにおける遠尾部や地球近傍の尾部の役割を明らかにし、これらの現象と外部駆動機構との関係を理解する。
- 地球近傍尾部における磁気リコネクションの開始機構を調査し、磁気リコネクション領域でおきるエネルギー変換の素過程を観測する。
- 尾部プラズマシートの内側境界、磁気圏境界、バウショックなどの相互作用領域とその周辺領域でおきるプラズマの流入、高エネルギー化 (加速・加熱)、輸送過程を調査する。



ISTP (太陽地球系物理学国際共同観測計画)を構成する衛星群

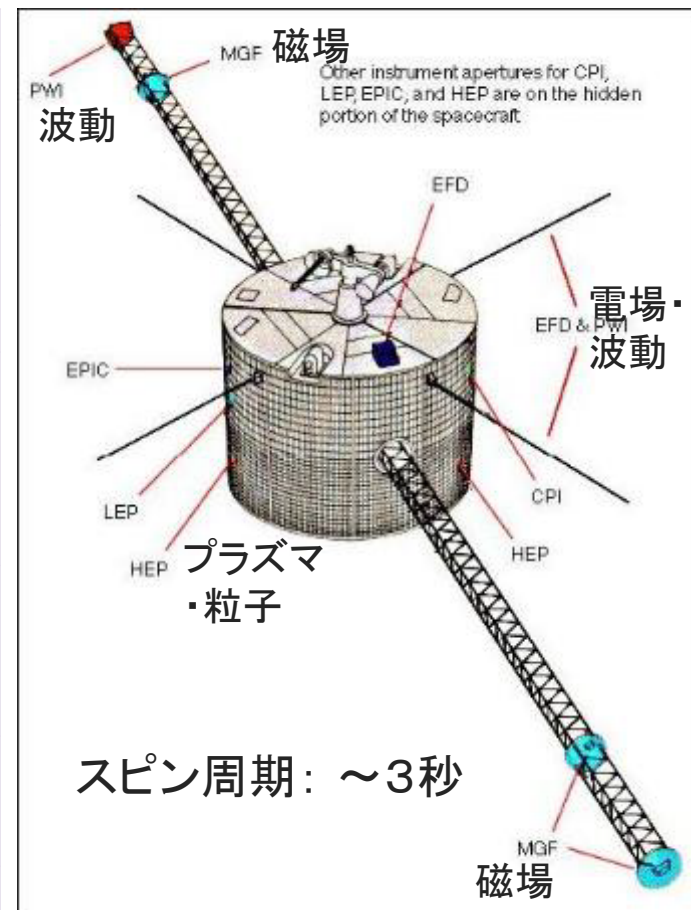


GEOTAIL衛星実機



## 日米の観測機器を搭載し、米国ロケットで打ち上げた、日米共同事業のさきがけ

観測対象	観測機器（開発取りまとめ：赤-日本、青-米国）
電場 ●	<b>Electric Field Experiment (EFD):</b> 64 samples/sec 球形プローブアンテナ、ワイヤアンテナ 電子ブーメラン法
磁場 ● ●	<b>Magnetic Field Measurement (MGF)</b> フラックスゲート磁力計: 16 samples/sec サーチコイル磁力計: 128 samples/sec
プラズマ ●	<b>Low Energy Particle Experiment (LEP)</b> イオン/電子3次元速度分布分析器: 32-39000 eV/Q、5 samples/min 太陽風イオン分析器: 140-8000 eV/Q イオン質量/エネルギー分析器
プラズマ ●	<b>Comprehensive Plasma Instrument (CPI)</b> 高温プラズマ分析器: 1-50000 eV/Q 太陽風イオン分析器: 150-7000 eV/Q イオン質量/エネルギー分析器
高エネルギー粒子 ● ● ●	<b>High Energy Particle Experiment (HEP)</b> 低エネルギー粒子検出器、イオン/電子バースト検出器、中間・高エネルギーイオン分析器
高エネルギー粒子 ●	<b>Energetic Particle and Ion Composition Instrument (EPIC)</b> イオン荷電状態、質量・エネルギー分析器 イオン質量・エネルギー分析器
プラズマ波動 ● ●	<b>Plasma Wave Instrument (PWI) (日米)</b> 周波数掃引型スペクトル分析器（電場10 Hz-400 kHz、磁場: 10 Hz-10 kHz） 多チャンネルスペクトル分析器、波形捕捉器



# GEOTAILの運用終了とそれまでの経緯



- 2022年6月に搭載データレコーダA系が故障し、2012年に故障した搭載データレコーダと合わせ、搭載データレコーダ両系が故障した。この結果、十分な理学的成果の創出が難しくなったとJAXAとして判断し、NASAの合意の下、GEOTAILの運用終了（停波処置）を行うこととした。
- 実際の運用終了（停波処置）は2022年11月28日に実施した。
- 海外機関関係者を含めた成果を取りまとめるシンポジウムを2023年3月28日～31日にかけて東京大学小柴ホールにて開催。100人規模の参加者があった。

時期	内容
1983年9月	NASA OPEN計画GTLとISASのOPEN-J計画が統合されGEOTAIL計画が誕生
1992年7月24日	米国フロリダ州ケープカナベラルのケネディ・スペースセンターからデルタII型ロケットで打ち上げ
1993年9月1日	月の日陰通過時に衛星電源のオフオンを行い、打ち上げ後の初期試験時にラッチアップを起こした搭載観測装置LEPの回復オペレーションを実施
2003年7月	HEP 検出器の劣化により運用終了
2006年11月23日	MGFの1つのセンサー（MGF-FO）のゲインレンジコントローラが故障し、冗長系をなすもう1つのセンサー（MGF-FI）を主観測装置に切り替え
2007年2月15日	EFD Editor-Bデータのテレメータ出力が回路故障によって停止
2007年	運用延長判断
2011年	運用延長判断
2012年12月25日	搭載データレコーダーB系の故障
2015年	運用延長判断
2018年	運用延長判断
2021-2022年	運用延長判断
2022年6月28日	搭載データレコーダーA系の故障
2022年11月28日	運用終了（停波処置）

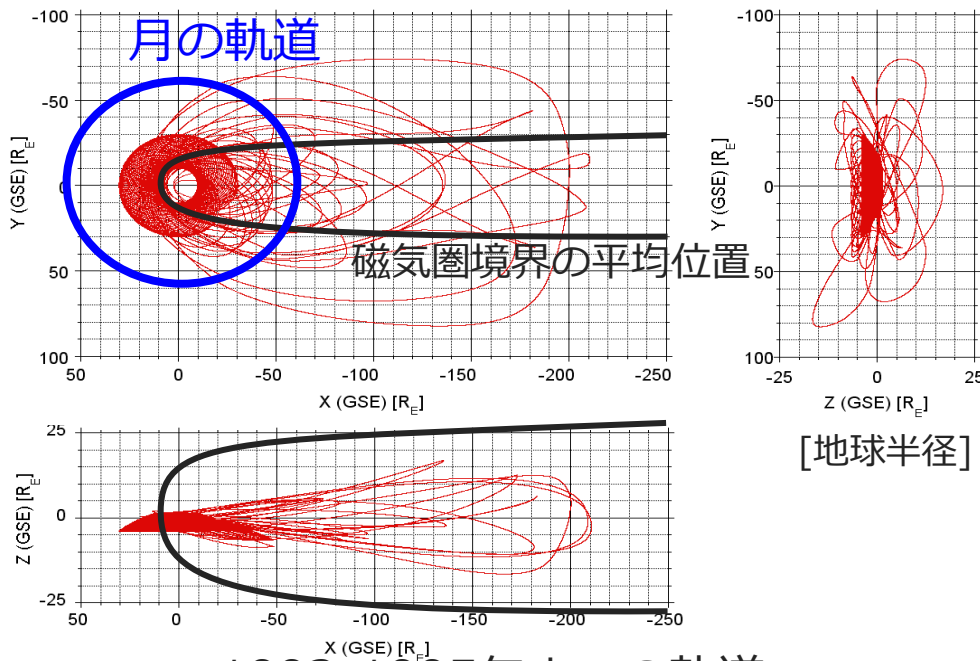
# 磁気圏尾部観測衛星「GEOTAIL」の工学的成果



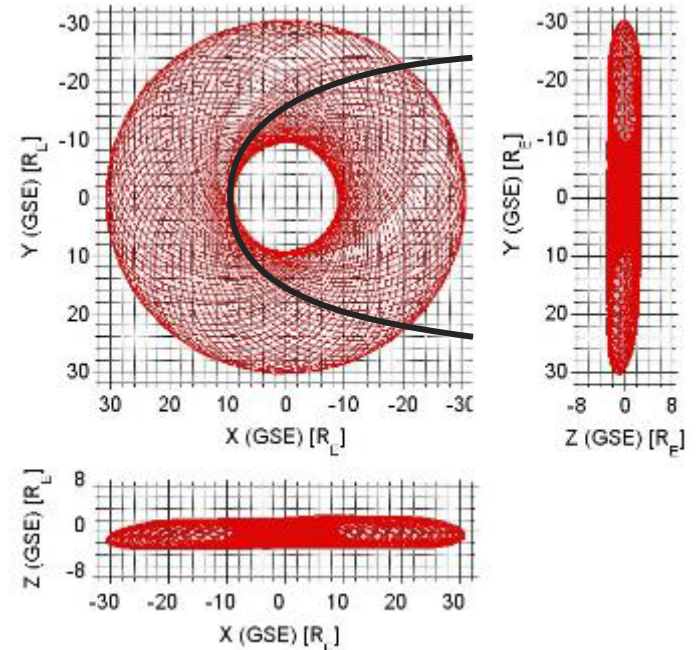
GEOTAILの目的：地球磁気圏尾部の構造やふるまい（ダイナミクス）を明らかにする。  
⇒ 地球磁気圏尾部を直接探査する特殊軌道へ投入する必要があった。

そこで、**二重月スイングバイ（Double Lunar Swingby）**による軌道投入を実施。  
Double Lunar Swingbyの技術は日米共同プロジェクトだったからこそ、米国側（ファー  
カー博士）からもたらされたものであり、「ひてん」・GEOTAILで獲得された月・惑星  
Swingby技術はその後の惑星ミッションに活かされている。

また、**30年間の長期の運用を達成した。**



1992-1995年までの軌道



1999年の軌道 (8 x 30地球半径)

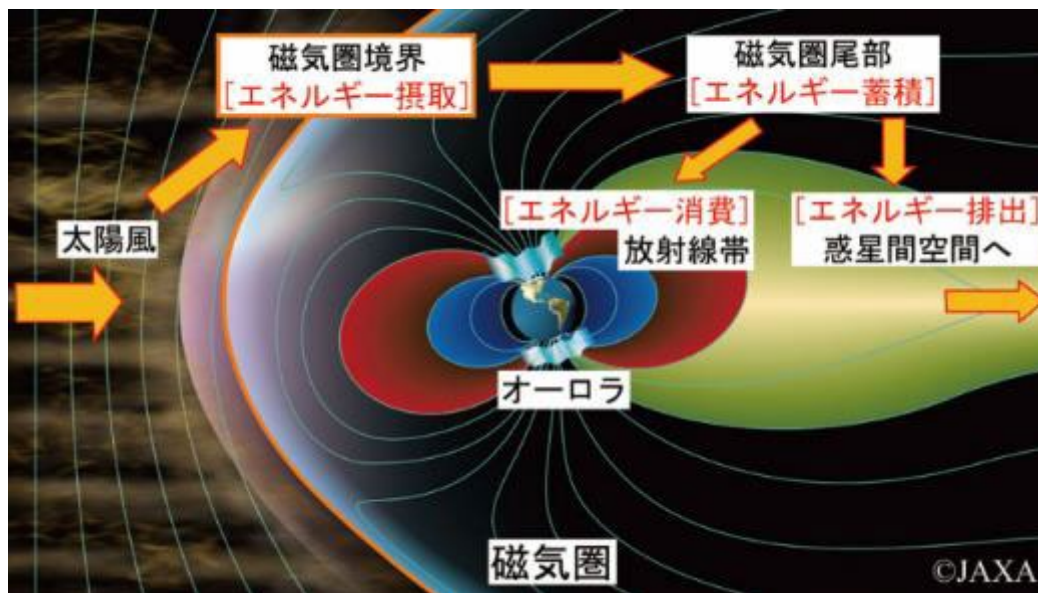




- 太陽からは超音速のプラズマ(電荷を帯びた粒子)が流れだしており、太陽風と呼ばれる。一方で、地球は磁場を持つ。
- 地球磁気圏とは、太陽風との相互作用により、宇宙空間の中で地球が持つ磁場の勢力が届く領域を指す。
- 広い地球磁気圏の構造とそこで起こるダイナミックな現象を理解するためには1機の衛星ではわからないことも多く、多数の衛星による同時観測が必要。
- 1990年代にはISTPと呼ばれるNASA、ESA、ISASが協力して複数のミッションを集結し、太陽-地球宇宙環境の共同観測を行うというプログラムが実施された。
- GEOTAILはISTP衛星群の衛星の1つでその地球磁気圏のその場観測を行い、多くの画期的な成果をあげた。

最も大きな成果として、

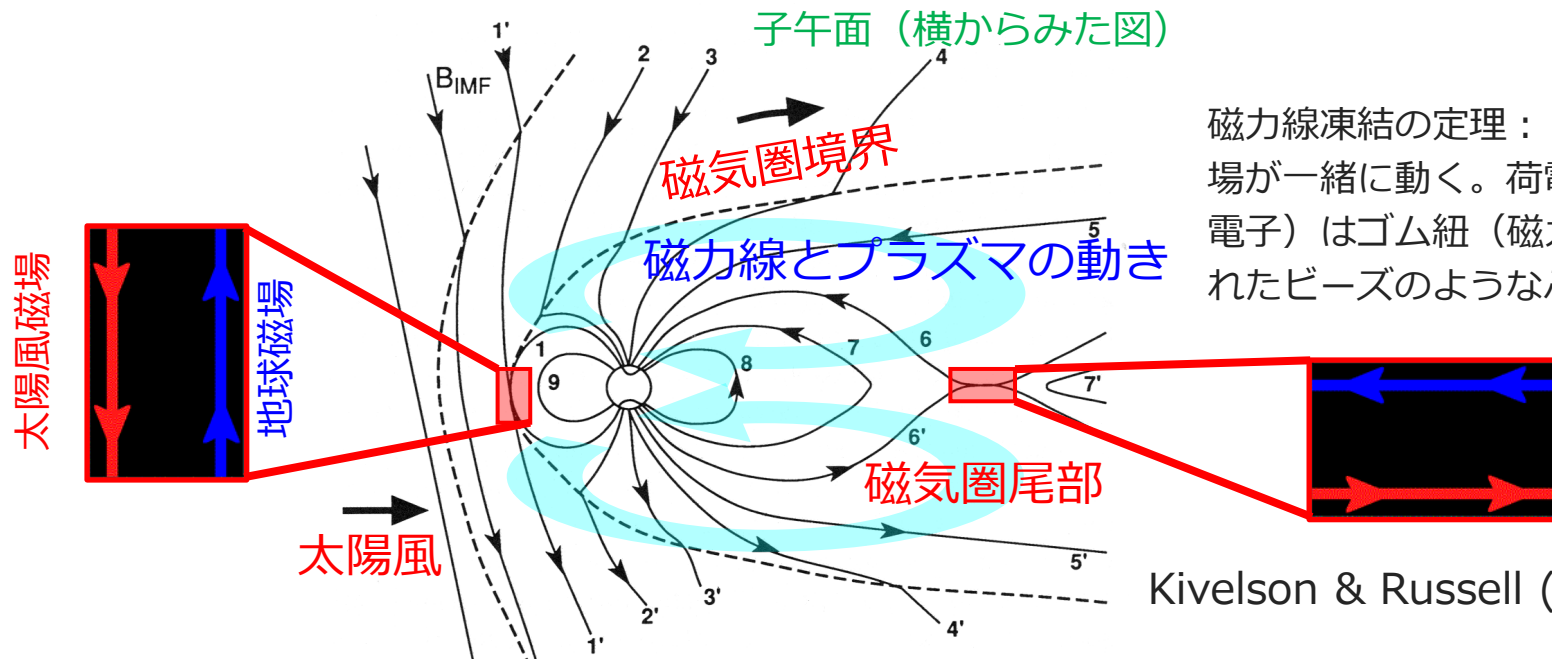
**「GEOTAILは磁気リコネクションの存在を実証しその様子を明らかにした」**



### 磁気リコネクションとは？

⇒地球磁気圏の構造やふるまい（ダイナミクス）を理解する上で要となる概念

⇒磁気リコネクションの存在はGEOTAILの打上げまで予想されていたが存在が明らかではなかった



磁力線凍結の定理：プラズマと磁場が一緒に動く。荷電粒子（イオン、電子）はゴム紐（磁力線）でつながれたビーズのようなふるまいをする。

Kivelson & Russell (1995)

磁気リコネクションについて、以下のことが解明された。

- 磁力線をつなぎかえて、磁場のエネルギーをつかってプラズマを加速する
- 磁気圏では、**磁気圏境界**（太陽風のエネルギーとプラズマを摂取）と、**磁気圏尾部**（エネルギーの解放と消費）で磁気リコネクションがおこる。
- 磁気圏境界では、太陽風中の磁場に南向きの成分がある場合におきる。
- 磁気圏尾部では、磁気嵐、サブストーム（オーロラ爆発）時に激しくおきる。





## GEOTAILの目的

「地球磁気圏尾部の構造やふるまい（ダイナミクス）を明らかにする。」

プロジェクト実施において、具体的には以下の4つの目的が設定された。

- 地球磁気圏尾部と遠尾部でプラズマ、電場、磁場の総合観測を行い、その全体像を明らかにする。 ✓ **GEOTAILの大きな成果 2**
- サブストーム（オーロラ爆発に対応する磁気圏現象）や磁気圏のエネルギーバランスにおける遠尾部や地球近傍の尾部の役割を明らかにし、これらの現象と外部駆動機構との関係を理解する。 ✓
- 地球近傍尾部における磁気リコネクションの開始機構を調査し、磁気リコネクション領域でおきるエネルギー変換の素過程を観測する。  
✓ **磁気リコネクションの存在実証とその様子の観測（GEOTAILの大きな成果 1）**
- 尾部プラズマシートの内側境界、磁気圏境界、バウショックなどの相互作用領域とその周辺領域でおきるプラズマの流入、高エネルギー化（加速・加熱）、輸送過程を調査する。 ✓

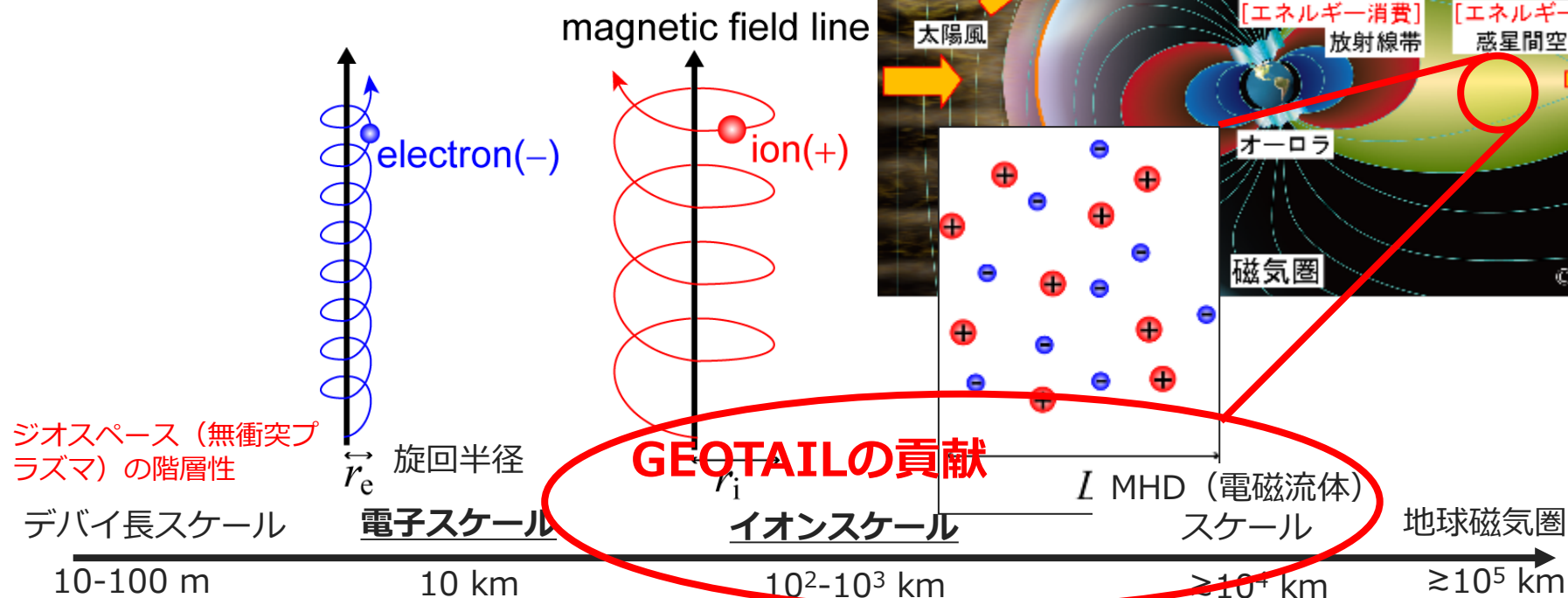
**JAXA内プロジェクト終了審査において4つの目的全てを達成したと評価した。  
特に顕著な成果として、次頁以降において上記2つの大きな成果を紹介する。**



## 磁気リコネクション観測におけるGEOTAILの貢献

磁気圏尾部におけるプラズマ、電場、磁場の総合観測によって磁気リコネクションの存在を実証したGEOTAIL。リコネクションのメカニズムの解明に迫る成果である、階層構造を持つ磁気リコネクションの中間的なスケールの構造（イオンスケールの構造）を観測的に初めて明らかにし、さらに、次の階層であるさらに小さなスケールの構造（電子スケールの構造）がある場所をデータから探りあてた。

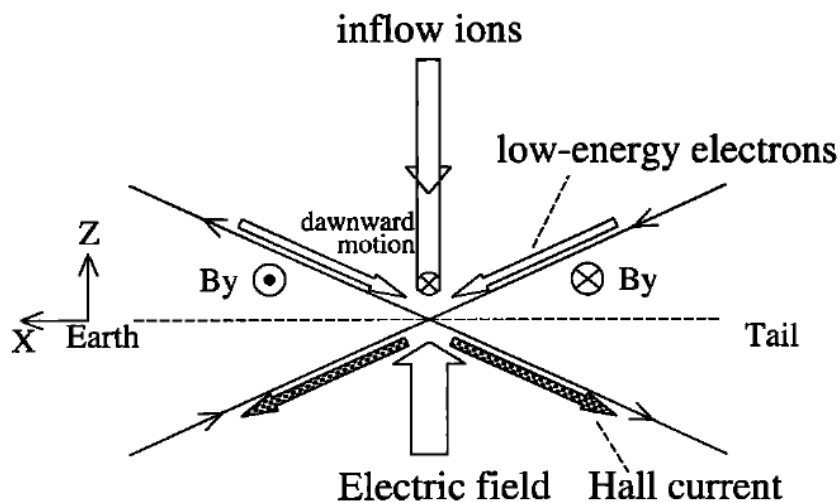
### 磁気圏ダイナミクスと階層性



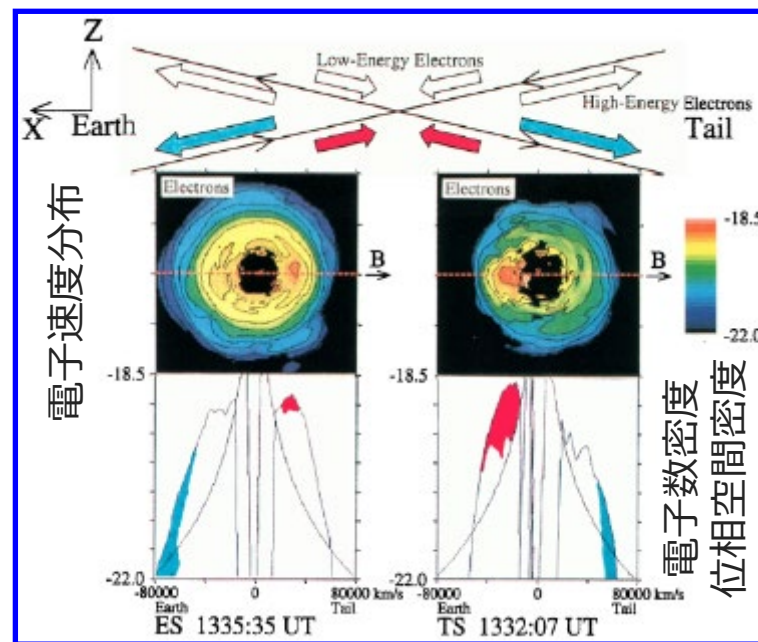
**GEOTAILは磁気圏尾部において、イオンスケールまでの観測を行うことに初めて成功。また、世界で初めて電子スケール領域の同定に成功。**

## GEOTAILの大きな成果（1） - イオンスケールの成果 磁気リコネクション領域の粒子ダイナミクスの解明

サブストーム（オーロラ爆発に対応する磁気圏現象）時の磁気圏近尾部の観測によって、磁気リコネクションの近傍領域でイオンと電子が別々の運動を（電磁流体力学が破綻）していることに起因する、無衝突プラズマに特有の電流系「ホール電流系」の証拠（電子速度分布、ホール磁場）が発見された。

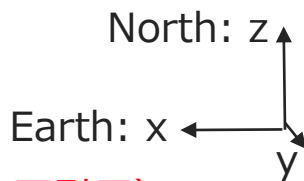


Nagai+, JGR, 1998 (458回引用)  
Nagai+, JGR, 2001 (278回引用)



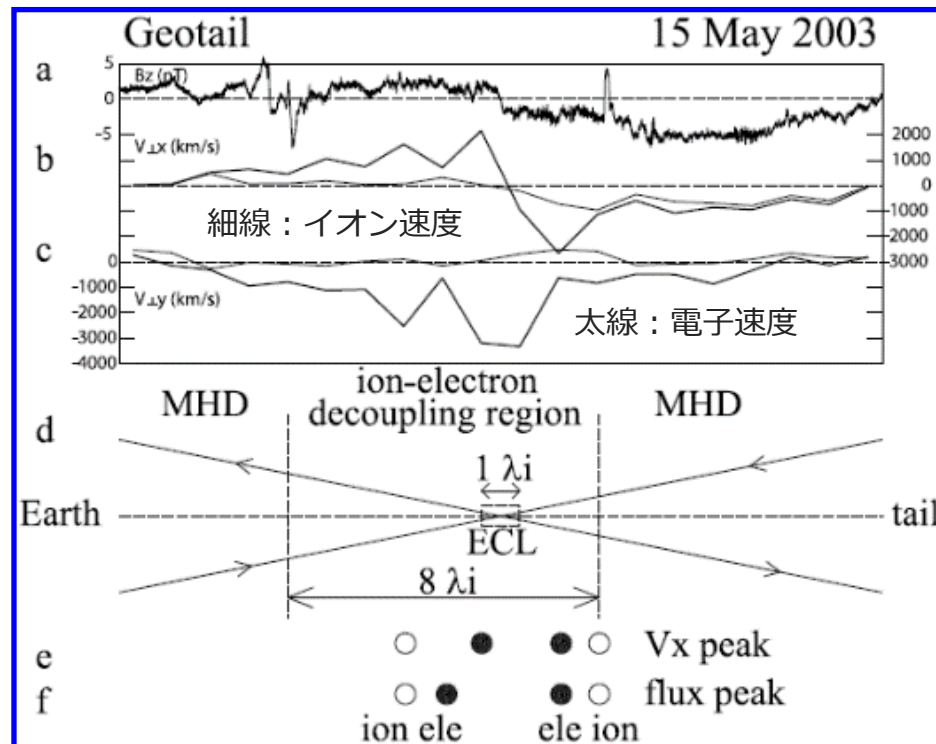
## GEOTAILの大きな成果（1） - 電子スケールの成果 世界初の磁気リコネクションの中心領域の観測

- 磁気圏尾部で観測された磁気リコネクションイベントの分析によって、磁力線がつながり変わる電子スケールの領域（電子拡散領域：磁力線凍結の定理が電子についても破れた領域）を世界で初めて同定
- NASA磁気圏編隊観測衛星「Magnetospheric Multiscale (MMS)」(2015年打上げ)に先駆けた成果



Nagai+, JGR, 2011 (56回引用)

Zenitani+, GRL, 2012



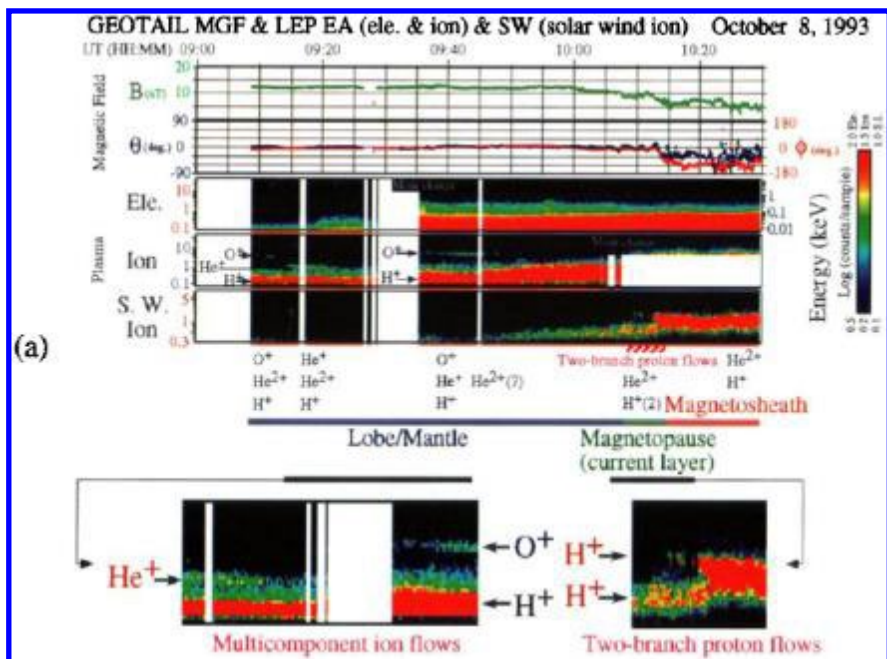
この成果で道が開けた電子スケール構造の詳細な解明というタスクは、観測時間分解能を100倍近く向上して設計された、NASAのMMS衛星が引き継いで、現在観測を行っている。

※なお、MMS衛星には、GEOTAILの開発成果を用いて、32台のプラズマ計測器（FPI）のうちイオン計測用の16台について、MMS衛星のPIが所属するSouthwest Research Institute（SWRI）が明星電気株式会社と契約し、ISASの技術提供等の下で製作し、搭載された。

# GEOTAILの大きな成果（2）

## 太陽活動静穏時の磁気圏遠尾部での地球起源酸素イオンの発見

電離圏起源O<sup>+</sup>イオンが磁気圏遠尾部（地球半径の200倍）まで到達することを発見。磁気圏へのプラズマ供給過程、地球大気進化過程に新たな制約を与えた（地球に限らない、磁場を持つ惑星の大気科学への貢献）。

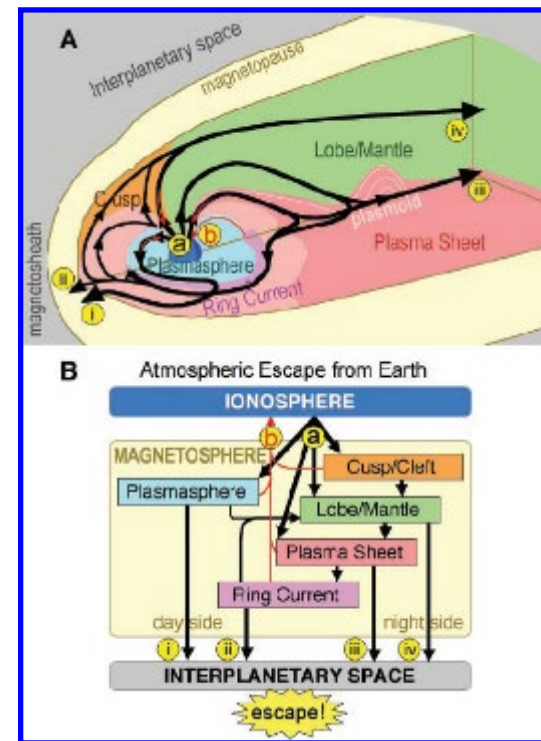


遠尾部を經由したO<sup>+</sup>流出率： $0.59 \times 10^{24}$  [s]

c.f. 太陽風流入率： $\sim 1 \times 10^{27}$  [s]  
(Sorathia+, JGR, 2019)

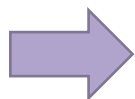
Seki+, JGR, 1998  
(87回引用)

Seki+, Science, 2001  
(104回引用)

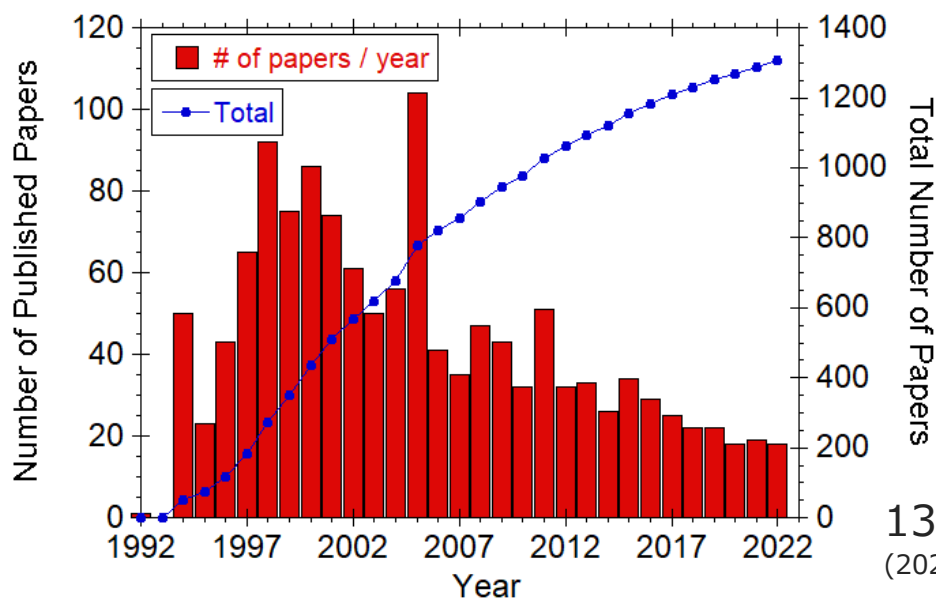




- 査読論文数：1307編（出典：Web of Science）
- 総引用回数：36,261回
- H-index：83
- 著名誌へ掲載された論文等も出版された。例として、「太陽活動静穏時の磁気圏遠尾部での地球起源酸素イオンの発見」に関してScience誌に掲載された論文があり、惑星大気科学への貢献がなされた（Seki et al., Science, 2001）（前頁で紹介）。「天体ガンマ線フレアのエネルギー量の推定」に関してNature誌に掲載された論文があり、天体物理学へも貢献がなされた（Terasawa et al., Nature, 2005）。2010年代に入っても、THEMIS衛星及びGEOTAIL衛星による共同観測により磁気圏尾部磁気リコネクションの発達過程を観測したことについてScience誌への掲載論文が出版された（Angelopoulos et al., Science, 2013）。



**他分野への波及効果も含む質の高い理学的成果を多く創出した。**



1307編の査読論文  
(2022年12月現在)





- GEOTAILは二重月スイングバイに代表される工学的成果とNature誌への掲載論文等をはじめとした世界一級の理学成果を創出に加え、以下のアウトカム（波及的効果）も創出。
- のべ約1800人の学生が運用に関わり、大きな人材育成効果を上げた。GEOTAILの開発・運用に携わった当時の若手メンバーは、今の宇宙科学・探査分野を先導するメンバーとして第一線で活躍している。
- 米国のGEOTAILプロジェクトと協力して共同ミッションを円滑に遂行する事で、NASAとの良好な関係の維持に貢献し、本格的日米共同計画のさきがけとして、その後に続くNASAとの協力の礎となった。SEPAC（粒子加速器を用いたスペースシャトル搭載宇宙科学実験）、GEOTAIL、SFU（宇宙実験・観測フリーフライヤ）、ISS（国際宇宙ステーション）等の流れの中で、日米協力が深化し、法律的側面（日米クロスウェーバー協定、日・米宇宙協力に関する枠組協定の締結等）も整備が進んだ。
- GEOTAILで培われた各種機器・観測技術、データの解析から理学的成果を創出する人材が、ヴァン・アレン帯に存在する高エネルギー電子の生成過程を直接観測するための探査衛星ジオスペース探査衛星「あらせ」（ERG）の開発・運用において中心的役割を果たした。「あらせ」の観測データは、宇宙天気予報を行う上で有益であり、唯一無二のデータとして、実社会において活用されており、GEOTAILで積み上げた知見が実社会に還元されている。

- **GEOTAILは日本としての磁気・プラズマ観測計画の出発点であり、GEOTAILの開発は日本の当該分野での強みを培う原点**となった。
- 地球磁気圏を探查するGEOTAIL、「あらせ」(ERG)に続く衛星として、コミュニティは、将来計画として小型科学衛星による極域編隊探查計画FACTORSを構想している。
- **GEOTAILで培った観測機器技術や地球磁気圏への知見は、日本の惑星探查計画にも展開され、かぐや、Bepi Colombo/MMO、JUICE、MMXの搭載観測機器開発や他惑星の磁気圏への理解(比較惑星研究の興隆)につながっている。** 惑星磁気圏の理解が進むことで地球磁気圏の理解も進み、総合的な太陽系の理解深化につながる。

## 地球磁気圏探查 (太陽地球系)

変動する太陽に対する応答・大気からの影響を研究 → 宇宙天気予報の高度化(防災等)にも貢献

GEOTAIL  
(磁気圏尾部のその場観測)



惑星探查に応用

## 惑星探查

(太陽惑星系(太陽圏))

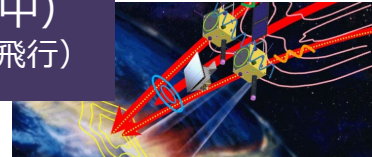
あらせ(ERG)  
(放射線帯(ヴァンアレン帯のその場観測))



知見を活用。  
高性能化・  
耐放射線化

知見を活用。  
複数機による編隊飛行を用いてより詳細なその場観測

小型科学衛星による  
極域編隊探查  
FACTORS(構想中)  
(複数機による編隊飛行)



かぐや  
(月周回衛星)



Bepi Colombo/  
MMO  
(水星磁気圏探查機)



JUICE  
(木星氷衛星探查計画)



MMX  
(火星衛星探查計画)



## 太陽系外の惑星系研究 へ展開

異なる  
恒星シ  
ステム  
の理解  
へ拡大

宇宙における  
中心恒星と惑  
星システムの  
総合的・普遍的  
理解へ

日本が得意とする観測機器・技術の繋がり、比較惑星研究の進展 → 太陽系の理解





GEOTAILの長年の運用にご協力頂きました関係各方面に、深甚の謝意を表します。

## Inner Heliospheric System Exploration from Sun to Earth/Mars

The collage features several key elements:

- SOLAR-C (L2028)**: A satellite with solar panels, labeled with *NAOJ/JAXA*.
- SUSANOO Heliosphere Simulation**: A 3D visualization of the heliosphere with a color scale from 1000 to 10000.
- 1.5AU MMX (L2024)**: A mission to the asteroid belt.
- 9 Rs: Parker Solar Probe**: A probe orbiting the Sun, with *NASA* and *JAXA* logos.
- Hinode**: A solar observation satellite.
- Solar Orbiter ESA/AOES**: A mission to observe the Sun from a closer distance.
- Akatsuki**: A Venus-orbiting mission.
- IPS Ground-based observations**: A ground-based observatory.
- 1 AU Arase**: A mission to study the Earth's magnetosphere.
- 0.28 AU: Solar Orbiter**: A mission to study the Sun.
- 0.3 AU (Mercury) BepiColombo: MPO/Mio**: A mission to study Mercury.

GEOTAILの打上げ後30数年を経て、内部太陽圏版ISTP Program が2020年代後半についに実現。