

CIROS 衛星

共回転相互作用領域観測衛星 (corotating interaction region observation satellite)

防衛大学校 航空宇宙工学科 渡辺聡一 高野泰典

1. 開発の背景

1.1 宇宙空間におけるプラズマ観測の重要性

宇宙空間はイオンと電子からなるプラズマの流れ（太陽風、宇宙線）で満たされている。プラズマの振る舞いは宇宙環境を大きく変動させ、その影響は惑星にも及ぶ。例えば地球においては強い太陽風が地球磁気圏に衝突することによって磁気嵐やデリンジャー現象が発生すると、人工衛星の電子機器の破損、宇宙飛行士の被爆、地上における通信障害、送電障害などが引き起こされる。また強い磁気圏を持たない金星、火星などは大気中の分子が宇宙空間に弾き飛ばされ、大気の流失・拡散が発生し、その惑星環境を変動させる。このように、宇宙環境について研究を行うためにはプラズマに関するデータが重要なものとなる。

1.2 太陽風観測の盲点 CIR 観測

現在計画中的のものも含めて、宇宙空間のプラズマを観測している人工衛星は多数あるが、共回転相互作用領域(CIR)と呼ばれる場所のプラズマについて観測を行っている衛星は存在しない。例えば、太陽風(主にコロナ質量噴出 CME 等)を対象としたものであれば、地球ラグランジュ点 L1 に配置された SOHO 衛星(NASA、ESA)・ACE 衛星(NASA)、または、太陽周回軌道を回る STEREO 衛星(NASA)がある。また地球磁気圏を対象としたものには、THEMIS 衛星(NASA)、磁気リコネクション探査が目的の GEOTAIL 衛星(JAXA)などの多数の衛星が運用中であり、またフォーメーションフライトを利用した「SCOPE」衛星(JAXA)、小型化を図った ERG 衛星(JAXA)といった野心的な衛星の開発も計画されている。太陽圏末端領域においてはボイジャー1.2 号(NASA) が到達して太陽圏の遷移層のプラズマについて観測を行っている。また、超新星爆発等の太陽圏外現象に関しては、多くの宇宙望遠鏡衛星が X 線などを通して間接的に観測を行っている。しかし、現在のところ CIR を対象としてその場観測を実施している衛星は存在しない。過去に CIR のその場観測を行った衛星に Ulysses(NASA、ESA)がある。しかし Ulysses は太陽の極軌道を回る衛星であるので、太陽圏の低緯度を中心として展開する CIR の観測には非効率的であった。さらに Ulysses は 1990 年に

表 1 各領域における主な観測衛星

距離	対象領域	観測されるイベント	主な観測衛星
< 1AU	太陽	太陽フレア CME	SOHO・ACE STEREO
1~1.5AU	地球磁気圏	バウショック 磁気リコネクション	GEOTAIL SCOPE (計画中)
1.5~50AU	CIR	共回転衝撃波	なし
50~160AU	太陽圏末端領域	末端衝撃波	ボイジャー1.2 号
160AU <	太陽圏外	超新星爆発	Chandra 宇宙望遠鏡 (その場観測ではない)

打ち上げられて以来 18 年間も稼動し続けているため故障が相次ぎ、現在のところ必要最低限の装置だけを作動させて延命処置を講じている最中であり、CIR の観測は事実上不可能な状態にある。また、NASA、ESA、JAXA の将来の宇宙探査衛星の開発計画に CIR を対象とした科学衛星は存在しない。

1.3 共回転相互作用領域(CIR)とは何か

共回転相互作用領域(CIR、流れの接触面)とは、太陽風の低速領域に後から放射された高速領域が衝突することによって太陽風が圧縮され、プラズマ密度の増加と磁場の強化が起こっている領域のことである[3]。これは太陽が自転していることによって、太陽風と磁場があたかもスパイラル状に放射しているかのような状態になっていることから発生する。CIRの成長は太陽圏の緯度と太陽からの距離に関係がある。緯度は 20° ~ 30° 付近で最も発達し[4]、太陽から遠ざかるほど発達して1.5~2AU付近で衝撃波が発生し、次第にその幅が広がり、ついに前後のCIR同士が衝突して新たなCIRを形成する。この結果、太陽圏の遠方は複雑な磁場構造を持つようになる(図3参照)[5]。

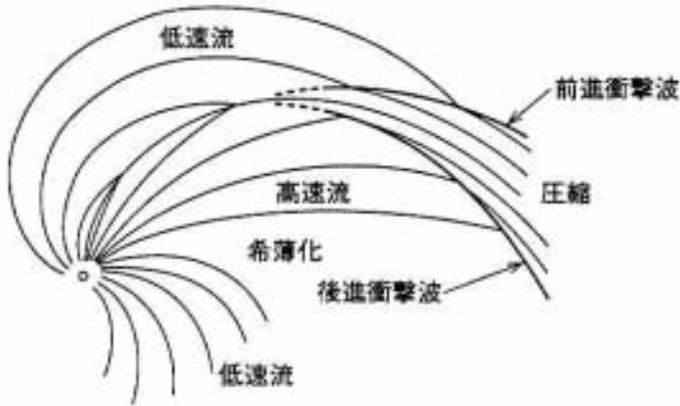


図1 CIR概念図[3]

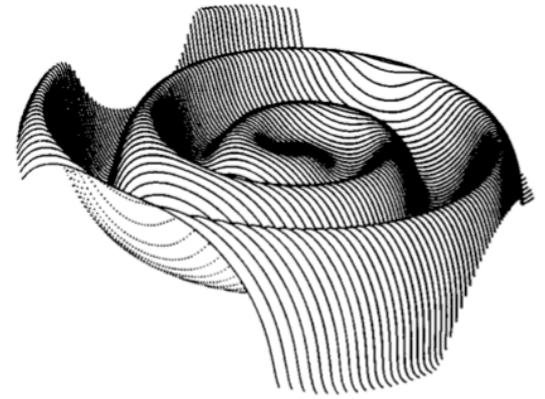


図2 CIRの3次元構造[6]

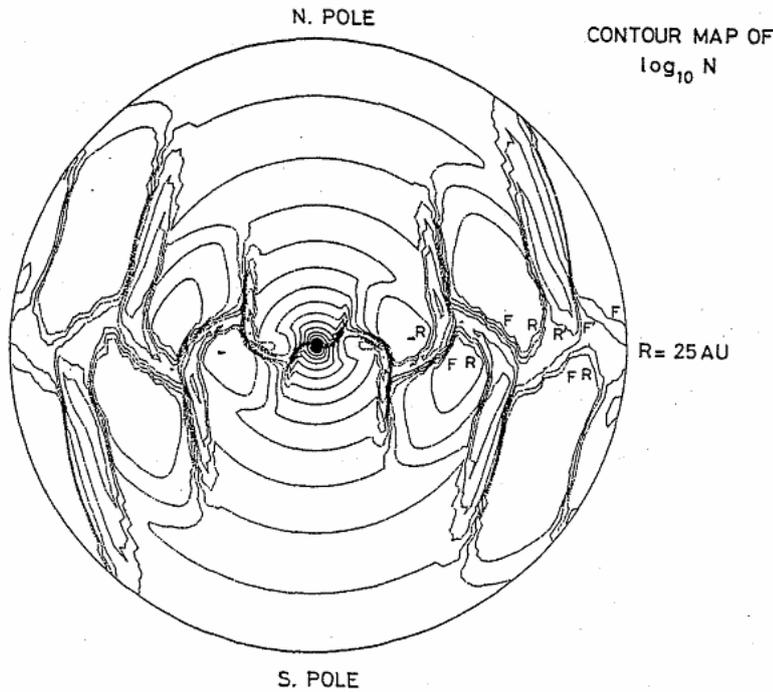


図3 MHD シミュレーションで得られた25AU以内の太陽圏における太陽風密度のContour Map[5, p413]。図中記号 F が Forward Shock, Rが Reverse Shockを表す。CIRの発達により複雑な太陽圏磁場構造が作られている。

1.4 CIR 観測の理学的意義

1.41 宇宙環境物理学上の未解決問題：衝撃波加速理論の標準モデルの決定

1970年代以降、宇宙線物理学の発展により、宇宙空間には通常では考えられないような莫大なエネルギーを持つ粒子が飛び交っていることが発見された[1]。この粒子は宇宙空間に存在する様々な衝撃波、すなわち

1)太陽フレアにより CME 衝撃波、2)惑星磁気圏の前面に形成する定在衝撃波(バウショック)、3)CIR 衝撃波、4)太陽圏末端衝撃波、5)超新星爆発による衝撃波が起源であることが観測によって明らかになった。しかし、なぜそのような粒子が存在するのか分からなかった。例えば超新星爆発の残骸である SN1006 の場合、その衝撃波の速度は 3000km/s 程度であるため、電子が持つエネルギーは数十 KeV に過ぎないはずである。しかし観測の結果、電子は数 TeV まで加速されていた[1]。つまり宇宙空間では、私たちが普段目にする熱的な仕組み以上に非熱的な加速機構が働いているということが判明した。その加速機構が何であるのかを解明するために衝撃波統計加速という新しい理論が生まれた。この理論はイオンや電子といったプラズマ粒子の運動が磁場との相互作用により決定されるという電磁流体力学(MHD)の理論を適用し、宇宙空間に存在する衝撃波の遷移層における乱流磁場[2]および粒子自身が励起するプラズマ波動が、粒子にエネルギーを与えているということを導いた。その際、多くの粒子加速の標準モデルが提唱されたが、それは単純化のために幾つかの仮定を含んでおり、如何にその仮定を排除し現実のモデルに近づけるかという研究が衝撃波統計加速理論の中心課題となった。

1.42 CIR における粒子加速モデルの実証と加速プロセスの謎

CIR 観測は、標準モデルの仮定のひとつである粒子の注入仮定を解決した。粒子の注入とは、衝撃波で加速されるためには予めその粒子自身がある値以上のエネルギーを持っている必要があり、それは元々与えられていると仮定するものである。しかし、何がエネルギーを事前に与えているのかは分からなかった。

CIR においてイオンが数 MeV まで加速されることは 1970 年代後半に G. Gloeckler らによって指摘されていたが[7]、それが実際に確かめられたのは 1991 年の探査機 Ulysses による観測からである。

この観測によって、宇宙線異常成分(ACR)の原因粒子であると考えられていた星間空間起源のピックアップイオン(PUI)が、太陽圏末端衝撃波で加速されるために必要なエネルギー 1 MeV を CIR に突入することによって得ているということが初めて判明した。そのことから低エネルギー粒子が衝撃波の通過を重ねるごとに高エネルギー粒子になるという衝撃波統計加速理論の加速モデルが実証された。

しかし同時に、観測結果を分析すると CIR に関係する粒子加速の様相はこれまで考えられてきた理論と矛盾することが判明した。例えば CIR を囲む前縁衝撃波と後縁衝撃波では粒子の加速のされ方が違うことが分かっている。それによると後縁衝撃波では、粒子の加速は衝撃波の遷移層よりもむしろ CIR 内部で起こっている[4]。これは CIR 内部の激しい磁場変動とプラズマ波動の励起が原因であると考えられているが、現在それを実際に観測することはできない。なぜならば、1.2 節で記したとおり、CIR のその場観測を実施する人工衛星が存在しないからである。

1.5 CIR 観測の必要性

CIR は衝撃波統計加速理論に関する重要な情報を得ることのできる領域であり、さらに太陽圏磁場構造の基盤となりうるものである。したがって CIR 観測は、プラズマ粒子の加速といったマイクロなスケールから太陽圏全体というマクロなスケールまで、宇宙環境を包括的に研究するために重要な役割を演じる。しかし、現在の宇宙プラズマ観測は広大な宇宙空間の現象を説明するためには局所的に偏りすぎている。ゆえに、その場観測が実施されていない CIR を対象とした人工衛星の開発が必要である。

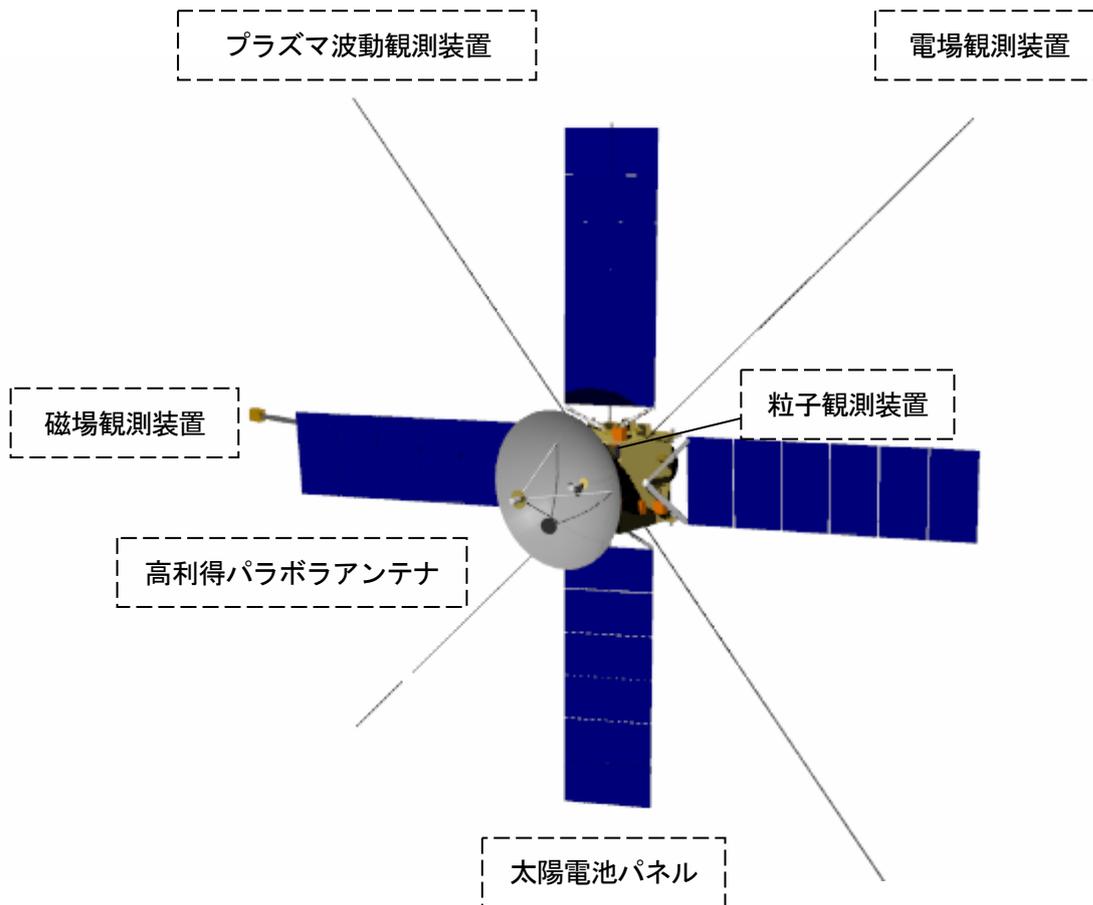
2. 開発計画

2.1 ミッション目的

太陽周回軌道を回りながら、搭載した粒子・電磁場・プラズマ波動観測装置を用いて CIR 内のプラズマを観測することによって、衝撃波統計加速理論を始めとする宇宙物理学の研究に資する。

2.2 衛星外観

図3 衛星外観



2.3 衛星諸元

表2 衛星の諸元

ミッション	CIRにおけるプラズマ流の観測
寸法	縦4m×横4m×奥行き1m
質量	500kg(含燃料)
主要ミッション機器	粒子・電磁場・プラズマ波動観測装置
推進系	2液式500Nエンジン
電源系	太陽電池パネル
通信系	高利得パラボラアンテナ

2.4 ミッション機器

非熱的粒子は電磁場・プラズマ波動と相互作用しながら運動するため、人工衛星にはそれらを観測する装置を搭載する必要がある。以下は本衛星に搭載する観測装置とその諸元であり、粒子観測装置の原理・構造は図5に示す。

表3 CIROS衛星に搭載するミッション機器

磁場観測装置	
センサ	3軸フラックスゲート方式
ダイナミックレンジ	± 65536
Quantitative steps	0.125 nT (20 bit)
サンプリング率	64 Hz
フラックスゲート型の装置を用いて3成分のベクトル磁場を計測する。衛星本体からの干渉を除去するために5mの進展マストの先に機器を設置する。	

電場・プラズマ波動観測装置	
センサ	電界：ワイヤアンテナ 磁界：3軸サーチコイル
高周波モード	15 KHz~15 MHz
低周波モード	10 Hz~15 KHz
サンプリング率	64 Hz
計4本のアンテナを用いて電場とプラズマ波動を計測する。プラズマ波動観測装置の高周波モードは太陽風用、低周波モードは背景磁場用である。	

高エネルギーイオン観測装置	
観測範囲 E/q	50 KeV/q~20 MeV/q
サンプリング率	0.3 Hz
対象粒子	非熱的イオン 重イオン(α 粒子等)

低エネルギーイオン観測装置	
観測範囲 E/q	0.5 ~50 KeV
サンプリング率	0.3 Hz
対象粒子	熱的イオン(プロトン)

高エネルギー電子観測装置	
観測範囲 E/q	50 ~700 KeV/q
サンプリング率	0.3 Hz
対象粒子	非熱的電子

低エネルギー電子観測装置	
観測範囲 E/q	0.05 ~50 KeV/q
サンプリング率	0.3 Hz
対象粒子	熱的電子 弱い非熱的電子

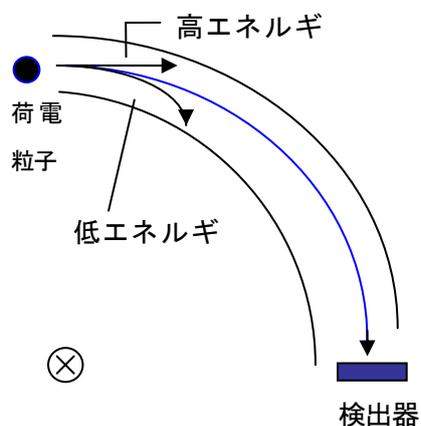


図5 円筒型静電粒子観測装置の原理[8]

円筒型静電分析器を用いて、衛星周辺の粒子を分析器内に導き、検出器に到達する粒子軌道と印加した静電界の関係から、粒子の E/q (エネルギー/電荷) を求める。高すぎる、または低すぎる E/q を持つ粒子は検出器までたどり着くことができない。

2.5 運用軌道

本衛星は遠点が太陽から2.5AUの距離を持つ楕円軌道に配置する。遠点距離を2.5AUとした理由は、CIR 衝撃波の形成位置が1.5~2AU以上であるので、それよりも遠い場所に衛星を位置する必要があるからである。逆にそれ以上の距離に配置しない理由は、1) 2.5AU点から数AUほど離れてもCIRの構造が本質的に変わることはないと考えられ、2) 地球との通信能力および太陽電池の発電量を確保するためである。

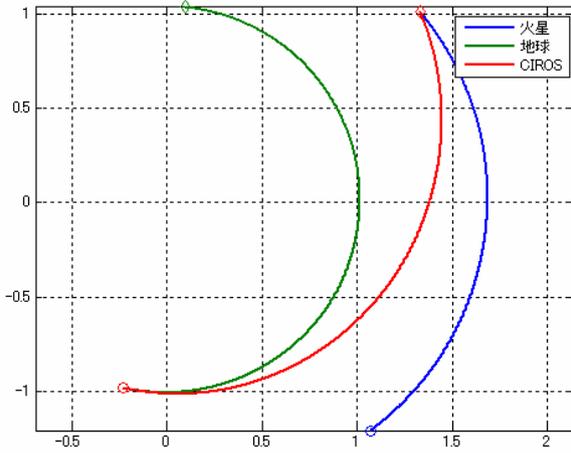


図6 火星までの準ホーム軌道

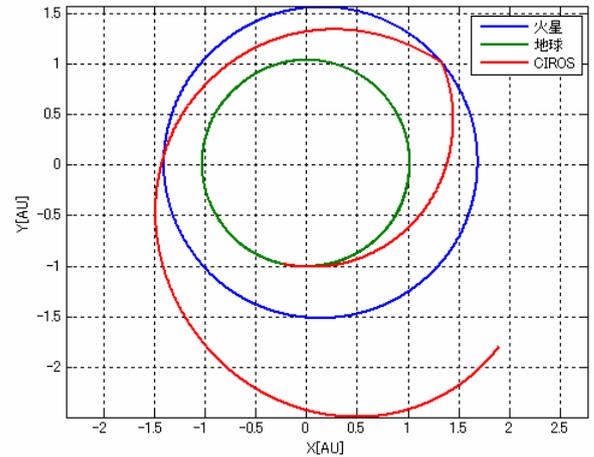


図7 火星スイングバイ後の軌道

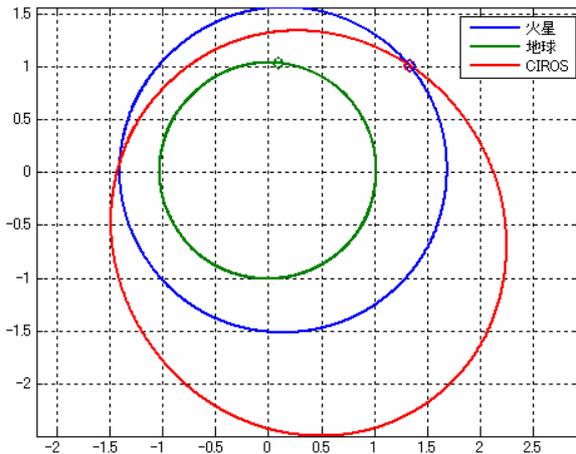


図8 CIROS 衛星の軌道

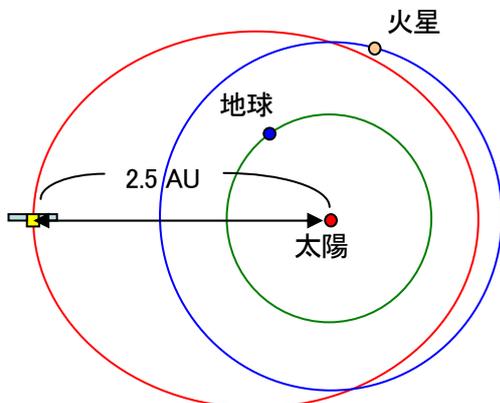


図9 軌道模式図

探査機を目標軌道へ移行させるまでのシナリオを以下に示す。

- 1 地球と火星の初期位置角が 55° となる時期に、H II ロケットによって加速度 $\Delta v_1=4.24(\text{km/s})$ を与えて準ホーム軌道で火星に向かう。移行期間は約 191 日である。(図 6)
- 2 火星中心から 1 万 km の位置においてスイングバイを行い $\Delta v_2=1.23(\text{km/s})$ を得る。これにロケット噴射による $\Delta v_3=2.50(\text{km/s})$ を併せて遠点 2.5 AU の太陽周回軌道に移行する。(図 7)
- 3 軌道の周期は約 987 日であり、そのうち CIR 衝撃波が発生する 1.5AU 以上の距離に衛星が配置されるのは約 795 日間である。太陽の自転に伴い CIR の周期は約 25 日であるため、衛星が軌道を一周する間に同一の CIR を 31 回観測することができる。(図 9、10)

2.6 通信系

本衛星の地球との最大距離は 3.5AU であるため、受信 G/T と衛星に搭載するパラボラアンテナの性能値から、十分な回線マージンを確保するために、ビットレートの最大値は 1.5[KBPS]以下であることが要求される。

ビットレートが小さいために、本衛星は取得したデータを衛星内のメモリに記録しておき、それを分割して地球に送信する。一例として衛星・地球間の距離が 3.5AU のとき、NASA の深宇宙探査機用パラボラアンテナを 1日に1時間使用できると仮定して、CIR を4日間観測する。表5に示すようにデータ量が大きい電磁場及びプラズマ波動観測装置は1日に30分、粒子観測装置は24時間作動させると、その全データ量は 3369600[bite/day]となる。本衛星の通信性能から全データ量を地球に送信する時間は約21日間必要となる。CIRの周期は太陽の自転周期と同様の25.5日であるので、本衛星は全データの送信終了後に前回観測したCIRに再び突入して観測を実施することとなる。

表4 CIROS 衛星の通信性能

パラボラアンテナ直径	[m]	1.5
送信周波数	[MHz]	8500
ビットレート	[KBPS]	1.5
地上局 受信 G/T	[dB/K]	63
最大距離	[AU]	3.5
回線マージン	[dB]	0.42

注：地上局は NASA DNS(Cat B)を利用

表5 CIROS 衛星の通信性能

観測機器	データ数 「c h」	Sampling rates 「Hz」	観測時間/日 「hour/day」	観測データ 「bite/day」
磁場	3	64	0.5	691200
電場	3	64	0.5	691200
波動	3	64	0.5	691200
高イオン	3	0.3	24	155520
低イオン	3	0.3	24	155520
高電子	3	0.3	24	155520
低電子	3	0.3	24	155520
時間	1	1	24	345600
衛星姿勢	1	1	24	518400
合計				3369600

3. 結論

宇宙環境物理学の研究の資とするために、太陽周回軌道を回り搭載した粒子・電磁場・プラズマ波動の観測装置を用いて共回転相互作用領域(CIR)内におけるプラズマ流を観測する人工衛星を提案した。本衛星は、現在のところ CIR のその場観測を専門的に実施する唯一の人工衛星であるため、取得したデータの理学的価値は大きいといえる。

参考文献

- [1] 寺沢敏夫：無衝突衝撃波における非熱的粒子加速, 研究の現状, 宇宙線・宇宙物理領域, 最近のシンポジウム, 2005
- [2] 岡 光夫, 寺沢敏夫：太陽圏における高エネルギー粒子加速:
- [3] 恩藤忠典, 丸橋克英：宇宙環境科学, オーム社, 2000
- [4] M. I. Desai, R. G. Marsden, T. R. Sanderson, D. Lario, E. C. Roelo, G. M. Simnett, J. T. Gosling, A. Balogh, R. J. Forsyth :
Energy spectra of 50-keV to 20-MeV protons accelerated at corotating interaction regions at Ulysses, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 104, NO. A4, PAGES 6705–6719, 1999年
- [5] 前沢 洸：太陽風と磁気圏のプラズマ, 核融合研究 第60巻第6号, 1988
- [6] J.T.Gosling, 松本拓磨：Corotating and transient solar wind flows in three dimensions , 太陽雑誌会, 2008
- [7] G. Gloeckler, D. Hovestadt, and L. A. Fisk : Observed distribution functions of H, He, C, O, and Fe in corotating energetic particle streams - Implications for interplanetary acceleration and propagation, The Astrophysical Journal, volume 230, part 2 (1979), page L191. 1979
- [8] 笠原慧：磁気圏探査に向けた中間エネルギーイオン分析器の開発, ISAS Research Note, 2006
- [9] 三宅 互, 風間洋一：L5 ミッション太陽風観測, 通信総合研究所季報 Vol.48 No.4 p23~38, 2002
- [10] SCOPE WG : <http://www.stp.isas.ac.jp/scope/index.html> 閲覧 ; 2008/10/20
- [11] 茂原正道・鳥山芳夫：衛星設計入門, 培風館, 2002年