

2-2 L5 ミッションと惑星間空間 CME の観測

2-2 L5 Mission and Observation of Interplanetary CME

秋岡真樹 大高一弘 長妻 努 丸橋克英 三宅 互

AKIOKA Maki, OHTAKA Kazuhiro, NAGATSUMA Tsutomu, MARUHASHI Katsuhide, and MIYAKE Wataru

要旨

通信総合研究所 (CRL) では宇宙天気予報及び宇宙天気現象の観測のための L5 ミッションの研究を実施している。地球に向かって噴出する CME (Coronal Mass Ejection) は宇宙環境擾乱の最も重要な要因である。L5 ミッションは、太陽から地球に向かって伝播する CME を横から観測することにより、CME を太陽から地球に到達するまでを追跡する初めての試みである。多数の宇宙ミッションによる太陽-地球間の総合的な観測ネットワークを構築する国際的な連携プログラムが 2002 年に立ち上がったところである (International Living with a Star)。L5 ミッションはこのプログラムの重要な構成要素として海外から大きな期待が寄せられており、宇宙科学研究所の研究者や宇宙開発事業団とも協力して L5 ミッションの検討を進めている。CRL では、L5 ミッションの重要な開発要素である広視野カメラ及び高性能ミッションプロセッサの研究を先行的に進めている。本稿では、L5 ミッションの概要と広視野カメラ、ミッションプロセッサの開発状況を紹介します。

CME (Coronal Mass Ejection) is one of the most important drivers of space environment disturbances. The "L5 mission" is the first challenge to track propagating CME toward the earth by side-view observation from the 5th Lagrangian point of the sun and the earth system. On 2002, international corporation program for construction space weather observation network with space missions (International Living with a Star). Our L5 mission plan is expected as an important component of the program and CRL will promote the plan under collaboration with ISAS scientists and NASDA. Study and BBM development for wide field of view camera and high performance mission processor are already started in CRL. In this article, overview of the plan and the status of the development are briefly introduced.

[キーワード]

L5 ミッション, 宇宙天気, 広視野光学系, 宇宙用データ処理装置

L5 mission, Space weather, Wide field camera, Data processor for space application

1 はじめに

20 世紀後半、人類はその活躍の舞台を広大な宇宙空間に拡げつつある。宇宙は、人類の知的興味の対象から本格的な活動の舞台になりつつあり、21 世紀の新たな産業を生み出す重要な分野の一つと期待されている。しかしながら、宇宙空間では高エネルギー粒子や太陽 X 線による被ばくや材料劣化など宇宙環境の苛酷さに起因する様々な困難を克服する必要がある。また、

太陽活動に伴う地球超高層大気の変動は低軌道衛星の軌道に影響を与える。宇宙環境の状態は太陽面現象や太陽活動度に伴いダイナミックに変化する。近年、宇宙における放射線環境の変動をはじめとする太陽に起因する宇宙環境とその変動を総称して宇宙天気 (Space Weather) と呼ぶことが多い。人類の宇宙への進出や、衛星による通信・放送の発展に見られるような社会インフラにおける宇宙システムの役割の重要性の急速な高まりに伴い、宇宙天気現象の研究とそ

の予報の研究の重要性が急速に増しつつある。

L5ミッションは太陽地球間空間を見渡すことができるL5点に観測ミッションを展開し、太陽で発生した擾乱の伝播と相互の関係性を明らかにし、宇宙環境擾乱の予報を可能にすることを目的としている。図1に太陽を源とする様々な宇宙環境擾乱現象の相互の関係を示す。太陽表面の運動エネルギーが表面磁場に様々な形で蓄積され開放されるのがフレアやCMEと呼ばれる現象である。フレアはX線や太陽宇宙線を発生させ、デリンジャー現象(一時的な短波通信障害)や宇宙機、宇宙飛行士等の被ばくをもたらす。CMEはその伝播途中で太陽宇宙線を加速するとともに、地球に到達して地磁気嵐を発生させ、放射線帯の変動をもたらす。コロナホールから吹き出す高速太陽風も地磁気擾乱の源である。宇宙天気現象は太陽から惑星間空間、地球磁気圏・電離圏・熱圏にわたる領域が関係するダイナミックかつ複雑な現象である。

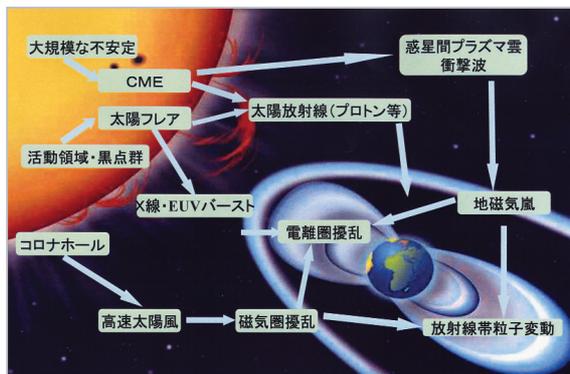


図1 太陽と様々な宇宙環境擾乱

宇宙天気現象の理解とその予報のためには、これら広範な領域にわたる様々な手法による観測が必要であり、地上観測も含めた多様なミッション／観測装置の広範な観測ネットワークを構成する必要がある。このため、国際協力、機関間協力を前提とした大規模な観測ネットワークを構築し、これを有機的に運用できることが宇宙天気現象の研究と予報のために必要不可欠である。宇宙開発先進国の一角を占める日本は、適切なミッション計画の推進と実現により国力に応じた応分の貢献をするべきである。また、IACGの宇宙科学分野の国際的イニシアティブにおいてもL5ミッションの果たす役割は重要であ

ると指摘されており、IACG等海外の関係者から高い期待が寄せられている。

L5ミッションは、国際的な枠組みを視野に入れた総合的な観測ネットワークとの協調・連携がミッションの成果を上げるために不可欠であるとともに、観測ネットワークの重要な観測点を分担することにより、宇宙分野における重要な国際貢献を行うことに大きな意義がある。L5ミッションの一つの主要目的は太陽地球間空間を伝搬するプラズマ雲を横から観測することにより、太陽から地球の方向に伝播するプラズマガスが地球磁気圏に衝突するまでを遠隔計測により追跡することである。惑星間空間の直接計測や地球磁気圏の直接計測データと組み合わせることができれば、単独でのミッションに比べ得られる成果ははるかに大きなものとなる。また、地球近傍の衛星ミッションや地上観測と連携することにより、太陽の黒点群上空を立体的に観測することができる点も重要である。

CRLにおいては、1999年より宇宙天気予報研究のための宇宙環境観測衛星システムの研究の一環として、表1に示す観測装置を搭載し太陽地球系の第5ラグランジュ点に展開するL5ミッション計画を提案し、必要な研究を推進してきた。中でも、技術的に新規性の高いサブシステムの研究については、試作機の開発も含めた研究開発を先行的に実施してきた。以下の節では、L5ミッションの概要、目的等ミッション全体を概説するとともに(2)、先行的に実施してきた広視野コロナ撮像装置(3)及び高機能機上データ処理(ミッションプロセッサ)(4)の研究について解説する。最後に、小型衛星による軌道上実証計画も含めた今後の計画について簡単に述べる(5)。

表1 L5ミッションの搭載観測装置の候補

広視野コロナ撮像装置	広視野可視光カメラによるCMEの追跡
高エネルギー粒子計測装置	高エネルギー粒子の直接計測
磁力計	惑星間空間磁場の直接計測
高分解能コロナ撮像装置	CMEの高空間分解能観測
EUV撮像装置	EUVによる太陽の大規模プラズマ構造撮像
太陽全面撮像装置	可視光望遠鏡による太陽全面撮像
太陽風プラズマ計測装置	太陽風プラズマの直接計測
惑星間プラズマ波動観測装置	太陽電波及び惑星間電波の観測

2 L5ミッションによる観測と研究課題

2.1 L5ミッションによる宇宙天気予報実験

大規模な地磁気嵐や電離圏嵐の多くは、太陽面で発生したフレアやCMEにより放出された磁場を帯びたプラズマ雲が高速で惑星間空間を伝搬し、地球磁気圏に衝突することにより始まる。大規模なCMEであっても、地球とは異なる方向に放出されれば、地球近傍の宇宙環境への影響は全くないか小さな影響にとどまる。現在は地球直前のL1点(太陽と地球を結ぶ線上で地球から太陽側に約100万キロ離れた場所)に配置されたACE衛星の太陽風観測データにより、地磁気嵐の発生を予測することが実用になりつつあるが、これによって予測できるのは、高速プラズマ雲が地球磁気圏に衝突するわずか1時間前である。十分なlead timeをもって擾乱の発生を予測するには、太陽地球間空間の遠隔観測により、伝搬するCMEそのものを観測・追跡できるようにすることが必要である。

CMEは、太陽光がCME中の電子により散乱される(トムソン散乱)ことにより光っている。

この場合、散乱の角度依存性から、光源と散乱電子を結ぶ線に対して直角(すなわち真横)方向から観測することが必要である。このため、太陽と地球を結ぶ線を横から見る観測点からの観測が、地球方向に到来するCMEの観測のためには必要である。また、L5点での観測と内部太陽圏を周回する探査機(例えば、NASAで計画中のInner Heliosphere Sentinel)のその場計測データと合わせることで、地球より内側の太陽風の速度構造や密度分布を遠隔計測により精度よく推定する技術が確立できれば、擾乱の到来時刻や擾乱の規模を推定することが可能になる(図2)。

第2の目的は、太陽面の活動領域(黒点群)の危険度に関する先行的評価である。太陽プロトンの発生可能性を十分に前もって評価することができれば、有人宇宙飛行における放射線被ばくも含めた様々な宇宙システムの運用リスクを軽減することができる。現在の太陽物理においては、太陽フレアやプロトン現象の発生機構は未解決の問題であり、太陽面の観測から適切に発生予測を行うことは困難である。黒点群は東から西へと自転していくが、太陽プロトンは太陽を起点とするらせん状の惑星間空間磁場に沿って伝搬するため、太陽の自転により黒点群が西側半球に達した場合にその影響が大きくなる。したがって、黒点群がまだ太陽面東側もしくは中央付近にある間にプロトン発生の有無を直接

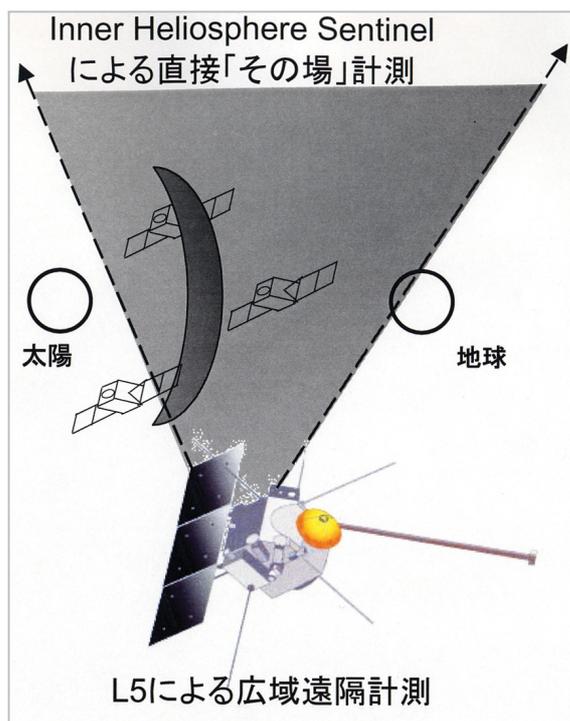


図2 遠隔計測と「その場」計測の組合せによる太陽-地球間空間のマッピング

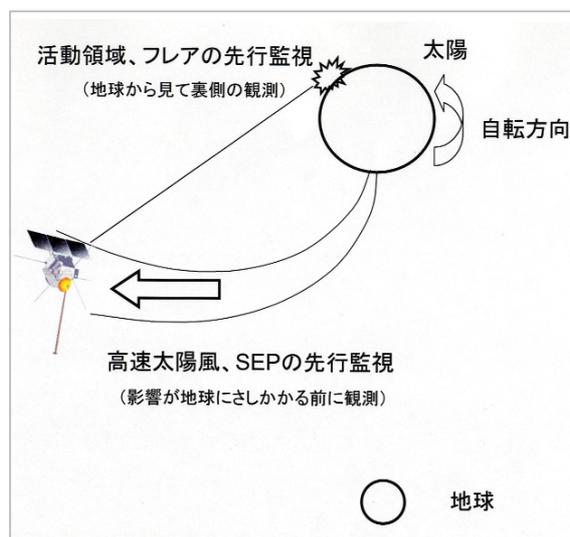


図3 宇宙環境擾乱の先行監視のイメージ

観測により評価できれば、地球近傍にその影響が到達する3-4日前に危険性を評価できることになる。これにより、例えば有人宇宙飛行における船外活動の延期や中止等、運用計画の変更による適切な対処を十分な余裕を持って実施することが可能となる。また、L5点からは地球からみて太陽の裏側にある段階から観測できることになり、その活動状況のデータから太陽フレアによる電波伝搬異常等を「予報」することが可能になる(図3)。

第3の目的は、高速太陽風の先行観測である。L5では、惑星間空間磁場や太陽風が定常状態であると仮定できる状態においては、地球磁気圏に到来する惑星間空間磁場や太陽風の状態を約4日程度早く観測することが可能である。このリードタイムを活用することで、磁気嵐や放射線帯粒子変動を予測できる可能性がある。

2.2 L5ミッションによる宇宙天気現象の観測

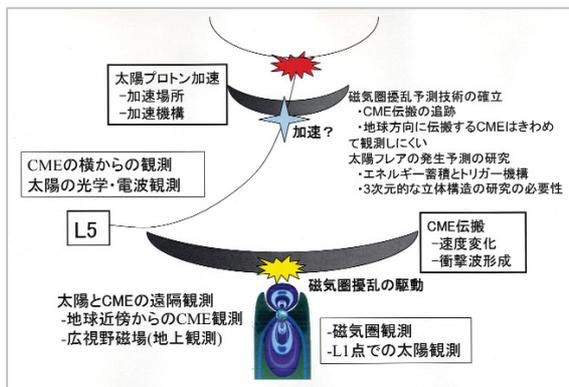


図4 L5ミッションによる宇宙天気現象の観測

L5ミッションは、宇宙天気予報のみならず、太陽地球間物理学や宇宙天気現象、内部太陽圏の理解に画期的な進展をもたらすと期待できる。主な研究及び観測課題を以下に簡単にまとめる(図4)。

〈フレア/CMEの発生機構(エネルギー蓄積と解放)〉

「ようこう」衛星によりフレアは磁気リコネクションによって発生するという証拠が多数得られ、コンセンサスがほぼ得られたと言える。リコネクションによるエネルギー蓄積と解放過程の解明が次のステップの課題である。また、なぜ磁気リコネクションが発生するのかという問

題がその先にあり、フレアに伴う粒子加速の問題も、重要な未解決課題である。

宇宙天気の観点からは、広範囲にわたって不安定化するタイプのフレア(ダイナミックフレアやツーリボンフレア等と呼ばれる)の重要性が高い。また、大規模なフレアは広範囲の太陽大気(磁気ループ)の急激な変化を伴う。したがって、コロナ磁場の大規模な3次元構造とその変化を明らかにしていき、リコネクションが発生する状況がどのように生まれるかを観測的にアプローチすることが必要である。フレア/CMEビルドアップの過程を見るためには、活動領域上空コロナの磁気ループの立体構造とその変化に注目した観測が有効である。このためには、活動領域全体が視野に収まる比較的広視野なコロナ観測と彩層の立体観測が鍵を握るであろう。

〈高エネルギー粒子の加速過程〉

太陽高エネルギー粒子(SEP)には、大きく分けてimpulsive eventと呼ばれるものとgradual eventと呼ばれる2種類がある。その起源については、impulsive イベントは、太陽フレア時のコロナで加速された粒子が磁力線に沿って直接伝搬すると考えられているのに対し、gradual eventでは、フレア/CMEに伴い発生したコロナ/惑星間空間衝撃波が粒子加速に重要な役割を果たしているのではないかと考えられている。しかしながら、空間的な拡がりやその起源となるCMEも含めて理論的考察に十分な観測がなされたプロトン現象はほとんどない。継続時間の長いgradual SEP eventの主たるドライバーが太陽フレア自身ではなくCMEであるという考え方は比較的新しいものであり、SEPの直接観測と関連するフレア/CME観測を包括する観測と研究は今後の大きな課題の一つと言える。

惑星間空間衝撃波とフレア、粒子加速の関係を明らかにするためには、惑星間空間衝撃波/CMEの伝搬とそれに伴う空間構造の変化を観測する手段が重要である。また、フレア領域やCMEの発生領域と磁力線でうまくつながった場所で観測した場合、現象のかなり早い時期に既にヘリウムや重イオンの比率が高いという観測がある[1]。これに関連して、ヘリウムや重イオンの比率の高い太陽コロナ中(フレアサイト)で初期の粒子加速が起こり、フレアサイトで加速さ

れた粒子が磁力線に沿って惑星間空間衝撃波に供給され、更に加速されるアイディアも提唱されている[2]。このような加速領域への粒子の供給メカニズムの解明には、衝撃波/CMEの空間構造とその変化の観測を可能にし、フレア領域との関係を明らかにする必要がある。

これらの問題を解決するためには、太陽地球間空間を広視野のカメラで追跡観測し、太陽で噴出されたCMEガスが地球近傍まで伝搬する様子を観測し、CMEにより生成される衝撃波の発達とその構造を理解することが重要なアプローチであると考えられる。可視光のカメラは、太陽からの距離とともに急速に輝度が落ちて観測が困難になるCMEガスを1AUまで追跡できる十分に高い感度が必要である。また、CME内部や衝撃波近傍の物理状態の詳細を知るためには、方探機能を有する電波センサーや、内部太陽圏を周回するその場のプラズマパラメータを計測する探査機との共同観測が有効である。

〈太陽風プラズマの多点観測〉

太陽風プラズマは、地球磁場を閉じ込めて磁気圏を形成するとともに、その磁気圏の活動を支配するエネルギー源である。CME等により引き起こされる太陽風中の擾乱やコロナホールからの高速太陽風により、地球磁気圏中では磁気嵐に代表される擾乱が引き起こされる。これらの磁気圏擾乱要因の同定において、太陽風プラズマ観測は必須である。

また、太陽風プラズマは、磁気嵐を引き起こす太陽風中の衝撃波や共回転相互作用領域を維持・伝播させているバックグラウンドの媒質としての側面もある。CMEに伴う衝撃波や擾乱は、先行する太陽風と相互作用しながら、地球軌道にまで到達する[3]。例えば、この相互作用により、衝撃波の速度は太陽近傍から地球軌道に到達するまでに減速することが知られている。このような擾乱の伝播のモデル化・予測にバックグラウンドの太陽風構造の把握が大切になってくる。

太陽風プラズマ計測による太陽風の全体構造の理解のためには、多点で同時にその場計測を実施することが重要である。これは、単一ミッションでは実施が困難であるが、国際協力の枠組みの中で他国のミッションと歩調を合わせて同時期に実施することにより実現が可能である。

L5ミッションは、地球近傍や内部太陽圏を周回する米国等の探査機との連携を視野に入れ、重要度の高いL5点に観測ミッションを展開することにより、太陽風構造の観測と理解に貢献する。

3 広視野コロナ撮像装置

3.1 WCIの要求

広視野コロナ撮像装置(Wide field Coronal Imager:以下WCI)は、太陽から噴出するCMEが内部太陽圏空間を地球近傍まで伝播する様子を観測する。太陽から噴出したCMEの伝搬や粒子加速、衝撃は形成等はよく分かっていない。これは、これまで伝搬中のCMEの構造やその変化、伝搬の様子を観測する有効な手段がなかったことによる。このため、太陽地球間をカバーすることのできる広視野が必要になる。太陽地球間の空間は、背景となる黄道光の輝度が太陽近傍と地球近傍で一桁以上異なること等から、一台のセンサーでそのすべてをカバーすることは得策ではない。このため、太陽地球間の空間を2台のカメラでカバーする計画である。

惑星間空間に飛び出したCMEの輝度は、CMEが太陽から離れるにつれて急速に暗くなっていき、1AUまで伝搬したプラズマの輝度は太陽の $10E-15$ 程度まで淡くなるといわれている。加えて、WCIは黄道光を背景として観測することになるため大きなダイナミックレンジを必要とするが、WCIの場合、これは光学系の不要光によるコントラスト低下も含めたSNR(信号対雑音比)で決まる。1AU近傍においては、背景光である黄道光と星明りは、観測対象であるCMEガスの輝度の100倍以上の明るさがある(図5)。仮にCMEガスの10%の輝度揺らぎを検出しようとした場合、センサーのS/N比は2100必要になる。3%程度の揺らぎの検出には7000程度のSN比が必要になる。このような淡くかつ背景光である黄道光に埋もれた観測対象であるため、信号を取り出すに十分なSNRを持つ検出器と、太陽光及び明るい星による光学系自身による不要光の発生をどれだけ押さえ込めるかがポイントになる。

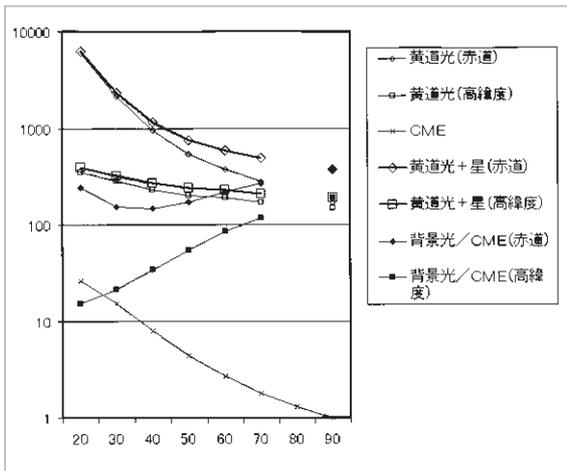


図5 背景光とCME輝度の比の太陽離隔依存性

3.2 WCIの光学系

背景光(主に黄道光)の成分は、太陽に対する離隔の増大に従って急激に減少する。赤道/黄道近傍の黄道光の落ち方は劇的であり、例えば離隔2度と60度では3000倍の違いがある。したがって、一台の光学系で要求視野を確保することは得策ではなく、類似のカメラ2台で要求視野をカバーすることとする(太陽側:WCI-N、地球側:WCI-W)。2台のカメラの視野割り振りは今後の最適化の課題であるが、現状はWCI-Nを30度角、WCI-Wを60度角程度としている。これにより、例えばWCI-Wにおいては、太陽側の視野端(離隔30度)と地球近傍(離隔60度)における背景光(黄道光+星明り)の明るさの差はおおよそ4倍弱となり、現実的な数字となる。

黄道光に加えて、背景の星の光も無視できない。星は輝点として観測されるため、十分な明るさを持った星は拡がりを持ったCMEガスと区別できると考えられる。しかし、暗い星や銀河面のように星の密集度の高い領域では、一つ一つの点として分離することは困難で、背景光として評価する必要がある。このため、光学系の結像性能は検出器のピクセルサイズに匹敵する十分な分解能を確保する必要がある。しかしながら、光学系表面で発生する散乱光等人為的な背景光を極力抑さえ、ダイナミックレンジが失われないようにする必要から光学系の構成面数(レンズ枚数)を極力少なくする必要がある。一般的に、広視野で十分な結像性能を確保しようとするとレンズ枚数を増やして結像性能を上

げる結果となることが多く、広視野と少ないレンズ枚数はまったく相反する設計要求となる。これを回避するためには、非球面光学系の採用が有力な解決策の一つであり、現在その適用可能性について実験機の試作も含めて検討を進めているところである。

図6に現在検討中の非球面光学系の設計例を示す。この場合、5枚(10面)のレンズで視野角84度にわたりスポット径13.5ミクロン(= CCDの1ピクセル)以下という良好な結像性能を達成している。ただし、色収差の影響を低減し、設計解を無理なく成立させるため、有効波長域を必要最小限とし、かつ分散特性の点から最終的な色収差が小さいと期待できる800nm前後に設計波長を設定している。さらに、放射線による硝材の劣化を緩和するため、宇宙空間に直接暴露される先頭のレンズを石英とし、放射線防護の効果を持たせる配慮をしている。この設計においては、3面の非球面を取り入れて結像性能を確保している。非球面レンズの製造可能性、特に散乱光を必要以上に発生させないようにマイクロラフネスを小さく加工できるかが一つの課題である。

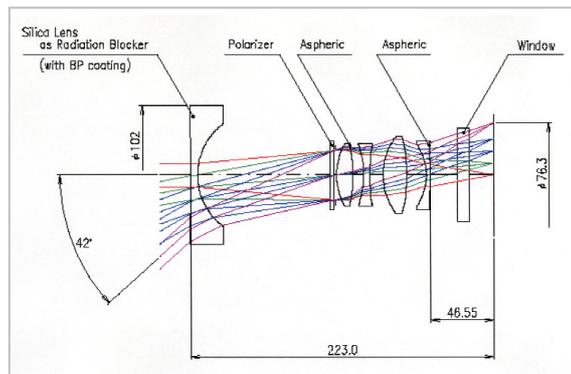


図6 WCIの光学系の概念

3.3 WCIの検出器

WCIの検出器は、その観測要求からCME本体を数パーセントの測光精度でとらえたいと考えている。しかしながら、CMEガスは黄道光や星明りなどの明るい背景光をバックに観測する必要があり、検出器にかなり大きなダイナミックレンジを確保する必要がある。強い背景光下での撮像観測におけるSNRは

$$SNR = (\text{観測対象による信号})^{1/2} \times (\text{観測対象の}$$

明るさ/背景光による明るさ)^{1/2}の関係があることが知られている[4]。ここで、検出素子としてはCCDを考えているため、観測対象による信号とはCCDに入射した光子により生成・読み出される光電子である。(観測対象の明るさ/背景光による明るさ)を我々が評価した最悪値である1/300とし、SNR=100を代入すると、観測対象による信号(光電子)を1E6個集める必要がある。CCDの1ピクセル当たりのフルウェル(蓄積できる最大の電子数)は2E5個程度であるが、その大部分は黄道光等の背景光の寄与である。背景光とCMEの明るさの比を1/300とすると、CCDに蓄積される電子のうちCME起源の光により生成される電子はフルウェルの1/300程度であり、6.7E2程度となる。したがって、CME起源の光による電子を1E6個集めるためには、1500ピクセル程度の信号を積算してやればよいことがこの簡単な勘定から分かる。このためには、十分に大きなフォーマット(画素数)のCCDを用いた精度の高い低雑音検出器を開発し、多数のピクセルを積算することにより統計的に雑音を減らす必要がある。同じ対象を何回も撮影して、その画像を重ね合わせてSNRの向上を図る方法(フレーム積算)が天文観測ではよく用いられるが、早いタイムスケールで移動するCMEにフレーム積算を用いることは適切ではないためこの方式は用いることができない。

現在検討中のCCDの主な仕様を表2に示す。想定しているCCDチップはMarconi製の裏面照射型CCD(44-82)で、これを二つ並べてモザイクCCDを構成し、1600万画素(4K×4K)を確保する。CCDのクロックパターン発生回路は、宇宙

用の放射線耐性を備えた2万ゲート程度のFPGAで構成できる見込みである。読み出しは2重積分方式を用い、16ビットADCでAD変換される。読み出しは低雑音化と要求時間分解能の兼ね合いを考えて100kHz程度としている。

AD変換器(ADC)については、L5ミッションには十分と考えられるトータルドーズ耐性を持つ16ビットADCが入手可能であることが、JPLにより公開されている試験データから分かっている。しかしながら、劣化に伴う性能変化等の詳細な特性データを取得するため、我々独自のトータルドーズ耐性に関する実験を予定している。また、レジタ部等についてシングルイベントアップセットの可能性のあるADCの例も報告されており、プロトン、重イオン等の照射試験についても検討中である。ADCは直接測定精度に影響する部分であり、高精度の16ビットADCについては十分な宇宙実績を持つものは少ないため、独自の実験を重ねて慎重に選定する計画である。

我々は、低雑音の読み出し回路の実現可能性とCCD素子の特性データを取得するため、主として民生部品を用いたBBM品の開発を行った(図7)。これは、冷凍機と真空チャンバーを備え、-100度以下まで冷却可能な仕組みとし、CCDの温度特性に関する実験も実施した。この結果、ダークカレントには二つの成分があることが分かった。一つはランダムな雑音的な性質を持つものであり、他方は緩やかな空間分布を持つ成分である。ランダムな雑音成分は、その発生がランダムであり温度とともに減少するという予想どおりの挙動が確認できた。一方、緩やかな空間成分を持つダークカレントの存在についても温度とともにその大きさが減少すること、-80度まで冷却すると急激に減少し、-100度程度で消失することなどがBBM品を用いた実験により分かった(図8)。この原因については不明であるが、素子の材質の非均一性などが原因ではないかと推定している。したがって、搭載品については-100度程度までCCDチップの冷却を行うこととし、現在そのための熱設計、熱解析等を進めているところである

表2 検出器の主な仕様

Fullwell	2E5 e/pix
QE at 500nm	90%@500nm 75%@700nm
有効ピクセル数	4096×4096 (2K×4K CCDのモザイク化)
ピクセルサイズ	15ミクロン
撮像エリア	61.7×61.7mm
暗電流(153K)	0.01 e/pix/hr
読み出し方式	2重積分方式
画素あたりのビット数	16ビット
CCD温度	摂氏-80度以下
読み出し速度	100kHz

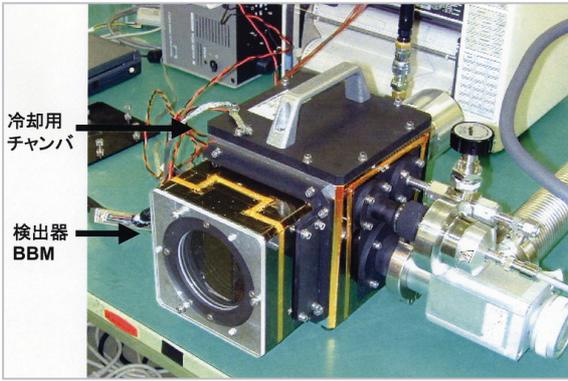


図7 WCI/BBMと冷却実験用チャンバ

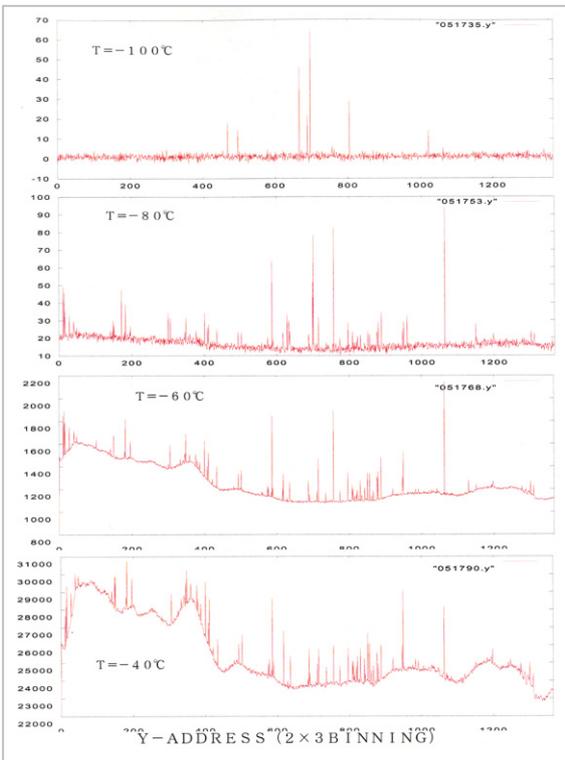


図8 CCD (44-82) のダークカレントの温度依存性

4 ミッションプロセッサ

4.1 高機能MPの必要性

L5ミッションにおいては、大フォーマット画像データの機上解析のために、従来の宇宙機用搭載計算機の水準をはるかに超える高機能、高性能なミッションデータ処理装置(MP)を搭載する計画である。しかしながら、障害発生が直ちにミッション全体の喪失につながり得る宇宙機側の処理装置に高い処理能力を要求する機上データ解析機能を配分することは現実的ではな

い。システム全体の制御(姿勢制御等)及びコマンド・テレメトリ関係の処理は十分な信頼性と宇宙実績を持つ宇宙機システム側の処理装置に割り振り、高性能で柔軟な運用の可能なミッションデータ処理装置をミッション側の装置として搭載し、ミッション系の機上データ解析及びミッション機器の観測・実験シーケンス管理等を分担する構想としている。CRLにおいてはMPに関する検討、概念研究をL5ミッションの研究における最優先の課題の一つと位置付け、その研究を実施してきた。

L5ミッションにおける高機能なMPの必要性は以下のように整理される。

●高機能テレメトリによるデータ伝送量の縮減

L5ミッションは、長大な通信距離によるテレメトリ資源の不足にもかかわらず、画像センサーによる連続観測のため発生データ量は膨大である。宇宙天気予報及び宇宙環境擾乱の観測という観点からは、すべてのデータを地上局に送信して詳細に解析することは必ずしも必要ない。したがって、重要現象発生時のデータに適切なウエイトをかけ、地球局へ伝送すべきデータの取捨選択及びデータ再生を適切にスケジューリングをすることにより、限られた通信資源をもって十分なミッションの成果を得ることが可能になる(図9)。このため、大フォーマットCCDデータの機上処理&解析を可能にする高性能のデータ処理装置が必要である。

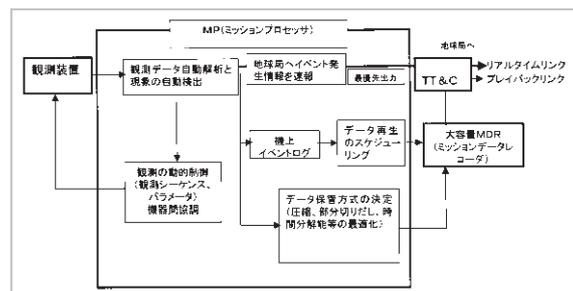


図9 高機能テレメトリの概念

●リアルタイムデータ伝送

L5ミッションの主要目的は、宇宙環境擾乱発生に関するデータや情報の即時的通報及び宇宙環境擾乱監視及びその予報・警報に必要な各種の実験である。L5ミッションでは通常のミッションリンクのほかに、比較的少量のデータを24

時間常に放送し続けるリアルタイムリンクを備える。

リアルタイムリンクで送信されるデータは、平均化処理を行ったキーパラメータデータ及びデータ解析の結果として得られる現象の発生情報及び現象を特徴付けるパラメータ等である。これらのリアルタイムデータは、L5ミッションを用いた宇宙天気予報実験に用いられるとともに、宇宙環境情報サービスの一環として宇宙環境情報を必要とする通信や放送、宇宙関係機関にも配信され活用される。さらに、リアルタイムリンクは、太陽面の変化に応じ適切に観測計画を実施し、ミッションの成果を最大限のものにするためにも有効である。

●観測ミッションの自律実行

L5ミッションは、その遠距離の故、リアルタイムコマンド運用には一定の制約がかかる。このため、観測装置の立ち上げや終了処理、異常からのリカバリ等の手順は、MPにあらかじめ登録しておき、かつ、各ステップのGO/STOPも機上で判断できるような高度な自動制御機能が必要になる。

●自律アラート実験

L5ミッションにおいては、機上データ処理による自律的警報発出のための軌道上実験もその重要なミッション目的の一つである。搭載センサのデータに基づき、一定以上の宇宙環境擾乱が見込まれる場合にSEUに対して耐性の高いモードに自律的に移行する機能(自律宇宙天気モジュール)の実験を検討中である。軌道上実験するためには、高度なデータ処理能力の実装とともに、軌道上でのソフトウェア更新・追加等、各種実験アルゴリズムの実験運用を可能にする運用環境が必要である。

4.2 ハードウェア

L5ミッションにおけるMPは、機上でCME画像の解析処理・現象検出等のデータ解析及びミッション機器の観測制御を分担する。したがって、高い演算性能と頑健性が要求される。しかしながら、宇宙用として用いられるデバイスやコンポーネントは、宇宙用として設計され、慎重なプロセスを経て宇宙用部品として認定されたものを用いるのが従来のやり方であった。ま

た、打ち上げ後の修理、改修が不可能であるため、設計やコンポーネントの選定は過去の実績を重視した保守的なものになりがちである。宇宙用として現在入手可能なCPUやOBC(オンボードコンピュータ)を調査した結果、大フォーマット(1600万画素)の2次元画像データの機上処理は従来の宇宙用OBCでは困難と考え、民生用のCPU及び周辺装置のサーベイを行った。その結果、CPUとして日本製のSH-4、内部バスとして近年産業用計算機用に拡大しつつあるCompact PCIを使用した高機能、高性能のミッションプロセッサの構想をまとめた。

民生用の電子部品、特にCPUやメモリ等の半導体部品を宇宙用に用いる場合、放射線、熱真空及び振動・衝撃等の宇宙環境耐性を持ち、十分な耐故障性を持っているかを設計に先立って慎重に検証しておく必要がある。特に放射線耐性についてはデバイスごとにその特性が大きく異なるため、地上試験において十分に検証しておく必要がある。コバルト60照射によるトータルドーズ試験、重イオン照射によるシングルイベント試験を実施し、L5ミッション及び軌道上先行実証(低軌道を想定)の軌道上環境で運用できる程度の耐性が十分に備わっていることが確認できつつある(図10)[5]。現在、より放射線環境の厳しいGTO軌道の衛星への適応性を検証するため、比較的低エネルギーの低いプロトンの照射実験を計画中である。

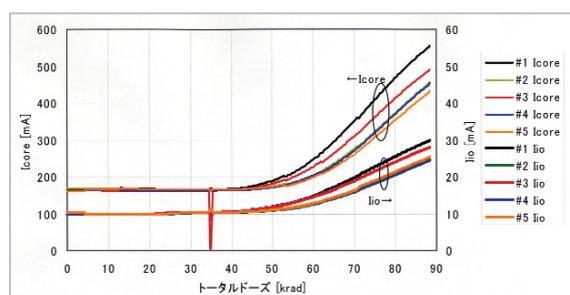


図10 SH4 トータルドーズ試験の結果

内部バスとして想定しているCompact PCIは、産業用途のデータバスとして従来のVMEに変わって普及しつつあるもので、基本的には民生用のPCIバスと類似のものである。Compact PCIバスそのものには宇宙飛行実績はまだないが、PCIバスコントローラは飛行実績のある2万ゲ

ト程度のFPGAで構成できる見込みである。また、衝撃・振動環境に十分耐えることのできる構造インターフェースの検討も進めている。一例として、本研究の一環として市販の民生品のCompact PCIバスに、Ariane-QTレベルでの振動加振実験を試みた。この結果、規定の加振実験後も正常に動作することが確認された。このことは、Compact PCIバックプレーン及びソケットの通常の民生品レベルの設計基準が、宇宙機の振動・衝撃に関する環境基準を満たしている可能性を示している。

4.3 オペレーティングシステム及びソフトウェア

オペレーティングシステムは、組み込み用途の処理装置に多数の使用実績のあるリアルタイムOS(RTOS)を選定して搭載する計画である。選択肢としては、マルチタスク型とマルチプロセス型の二通りが考えられるが、より安全と考えられるマルチプロセス型のOSを選定すべきと考えている。マルチプロセス型の場合、万一アプリケーションソフトウェアの不具合・不安定等により処理が停止した場合にも、当該アプリケーションのプロセスが停止するのみであり、プロセッサの他のプロセス、特にカーネルの停止には至らないと期待できる。また、データの機上解析や予報実験のための解析ソフトウェアは、関連研究者自身によって開発可能であることが望ましい。これらの観点から、QNXをターゲットとしてミッションプロセッサへの搭載可能性及び地上施設も含めた運用性等について詳細な研究を実施している。さらに、QNXは宇宙天気関連分野の地上観測装置の制御計算機における使用実績も増えており、サイエンスチームの研究者も実験用アプリケーションソフトの開発に参画する必要のあるL5ミッションにとっては大きな強みである。

しかしながら、いわゆる商用RTOSの宇宙適用は日本では初めての経験となる。したがって、最終的な選定及び衛星の開発に先立って徹底的な事前調査とBBMレベルのハードウェア及びミッションソフトウェアプロトタイプを用いた信頼性検証が必要と考えている。なお、この信頼性検証は、一又は複数のミッション機器のBBM

品やシミュレータも含めたEND to ENDで実施し、慎重を期す計画である。

観測装置やデータ記録装置、S/C側のコマンド・テレメトリ系との通信、基本的なデータ取得処理等、ミッションの基本的な機能を実現するためのソフトウェア(ミッションソフトウェア)については、従来の宇宙機用ソフトウェアの開発、検証において十分に実績のある標準的な手順に従い信頼性の極めて高いものとして開発する。一方、高度なデータ処理及び軌道上データ処理実験に供されるソフトウェアはアプリケーションソフトウェアとして管理され、ミッションソフトウェアよりも高いフレキシビリティを備えた運用を可能にする。アプリケーションソフトウェアによる処理の部分に問題が発生した場合でも、ミッションのミニマムサクセスは確保する計画である。

5 L5ミッションの実現に向けて

5.1 宇宙機バスと打ち上げ手段

我々は、宇宙開発事業団との共同研究として、L5ミッションのミッションプロファイル、宇宙機システム、打ち上げ手段等の検討を実施してきた。L5点へ投入するためのおおよそのシーケンスは、まず適当な打ち上げ手段によりいったん地球パーキング軌道に投入する。その後、3.4 km/s程度の増速を行い、地球の引力圏を離脱しL5周回軌道に投入する。これによって、宇宙機は地球よりやや膨らんだ軌道を航行しつつ、地球から徐々に取り残される運動をする。約1.2年の後にL5点を通過するため、このタイミングで

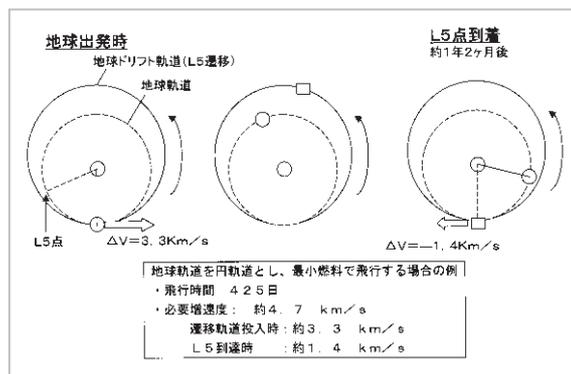


図11 L5点への投入軌道の概念

1.7km/s程度の減速を行ってやると、地球から見た場合のL5点に静止する[6] (図11)。

宇宙機バスは450 kg程度の比較的小型の機体でミッションを実行できる見込みである(図12)。また、地球周回軌道からL5点へ向かうL5遷移軌道に投入するための推薬や、L5点に到達した際にL5点に停留させるために必要な推薬等を見積もると、4トン程度のパーキング軌道(高度200 km程度の地球周回円軌道)への打ち上げ能力が必要になることが分かった。これは、日本の大型ロケットの打ち上げ能力の半分程度を必要とする。すなわち、H-2Aロケットによるデュアルランチもしくは中型ロケット程度の打ち上げ能力があれば実現するミッションであり、各種の大型技術試験衛星等に比べれば半分程度の規模で実現が可能である。

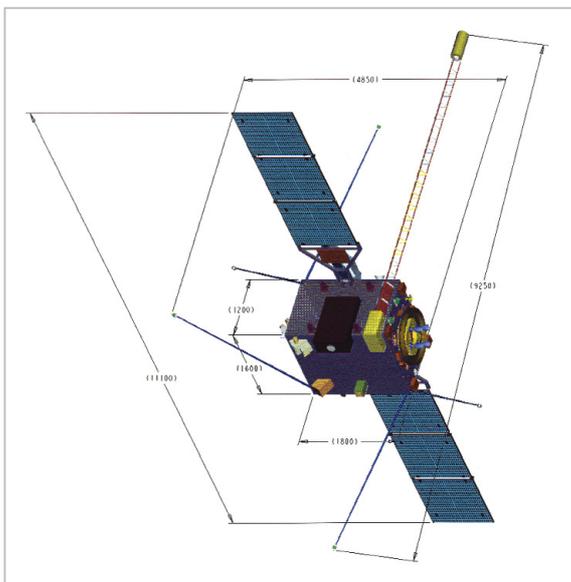


図12 宇宙機のコンフィギュレーション案

5.2 小型衛星等による軌道上実証

L5ミッションは、広視野コロナ撮像装置やミッションプロセッサ等、従来のセンサー技術及び宇宙機技術では全く実績のないサブシステムを搭載する。このため、何らかの形で軌道上実証の機会を確保する必要があると考えている。このため、太陽・太陽風グループでは無線通信部門先進衛星技術実証グループと連携して、新規性の高い宇宙技術、センサー技術のタイムリーな実験・実証機会を目的として、小型衛星による宇宙ミッションの研究を実施している。こ

の研究には、関心のある研究機関、宇宙機関とも連携するとともに、小型衛星の開発に関心の高いメーカーとも実質的な連携体制を構築し、オープンかつフレキシブルな体制で研究開発を実行していく計画である。

現在の構想では、小型衛星による実験の最初の試みとして、L5先行実証も含めた宇宙天気観測実験、軌道上サービス実験及び軌道上衛星間光通信実験を相乗りさせた2機の小型衛星を軌道上に展開させ、半年から1年程度にわたって実験を実施する。打ち上げは他の大・中型ミッションへの相乗りも想定する必要があるため検討中であるが、システム構想は静止遷移軌道もしくは低軌道を想定して進められている。



図13 小型衛星による軌道上先行実証のイメージ

5.3 L5ミッションのスケジュール

L5ミッションは、太陽や内部太陽圏、磁気圏等を観測する内外の衛星・探査機計画の動向を見ながら、それらと協調できるタイミングをねらう必要がある。また、宇宙環境擾乱の発生頻度、規模を考えると太陽活動極大期におけるミッション実現が望ましい。現在NASAが計画しているLiving with a StarのInner Heliosphere Sentinelのスケジュールは2011年から2012年ごろとされている。黄道面と傾いた軌道で南北方向から太陽を観測するSolar Orbiterを2011年頃打ち上げる計画を進めている。したがって、L5ミッションは2011-2012年頃の実現打ち上げを目指していく計画である。

6 おわりに

CRLは、旧電波研時代から電波伝搬の観測や警報を実用化し、業務として運用してきた実績を有している。さらに、太陽に起因する宇宙環境擾乱の監視と予報警報技術の研究においても日本の中心的役割を担ってきた。21世紀になり、人類の宇宙への進出はますます本格化しつつあり、通信放送や情報通信技術における宇宙インフラの重要性も、経済や産業、国の安全の確保の観点から今後ますます重要になってくるといえる。宇宙開発は必要となるリソースが膨大で

あるため、国際協力で進めていく必要の高い分野である。宇宙天気予報や宇宙天気観測ネットワークの構築も、人類の安全かつ低コストでの宇宙への進出に必要な戦略的な基盤研究の一つであり、宇宙開発先進国を標榜する以上更に積極的に取り組むべき研究課題である。我々は、電波伝搬や宇宙天気研究、電磁波を用いた環境計測技術に関するこれまでの実績を踏まえて、国際協力による宇宙天気観測ネットワークの構築においても中心的役割を果たしていく計画である。

参考文献

- 1 D. V. Reams, H. V. Cane, T. T. von Roseninge, Energetic particle abundances in solar electron events, *Astrophys. J.*, vol.357,259.
- 2 M. A. Lee, Particle acceleration and transport at CME-driven shocks, *Coronal Mass Ejection*, 227,1997.
- 3 N. Gopalswamy, A. Lara, P. Lepping, M. L. Kaiser, D. Berdichevsky, and O. C. St.Cyr, Interplanetary acceleration of coronal mass ejections, *Gephys. Res. Lett.*, vol.27,145,2000.
- 4 D. J. Schroeder, *Astronomical Optics*, 1987, 317pp.
- 5 秋岡眞樹, 岡本博之, 長田淳, 市販CPUの衛星搭載可能性—放射線試験結果—, 第43回宇宙科学技術連合講演会論文集, 99-1B5.
- 6 藤田辰人, 五家建夫, 歌島昌由, 對木淳夫, 秋岡眞樹, L5太陽定点観測衛星のミッション検討, 第43回宇宙科学技術連合講演会論文集, 99-1B6, 1999.



秋岡眞樹

電磁波計測部門太陽・太陽風グループ
リーダー 博士(理学)
太陽物理、光学システム、宇宙天気



大高一弘

電磁波計測部門宇宙天気システムグループ
研究員
宇宙天気予報



長妻 努

電磁波計測部門宇宙天気システムグループ
主任研究員 博士(理学)
太陽地球系物理学



丸橋克英

電磁波計測部門太陽・太陽風グループ
特別研究員 理学博士
太陽地球間物理学



三宅 亙

電磁波計測部門宇宙天気システムグループ
主任研究員 理学博士
宇宙天気