

編隊飛行衛星による連携観測模擬実験システムの開発

竹中 悟^{†a)} 笠原 禎也^{†b)} 小嶋 浩嗣^{††} 井町 智彦^{†††}

Development of a Co-operational Observation Simulator for Formation-Flying Mission

Satoru TAKENAKA^{†a)}, Yoshiya KASAHARA^{†b)}, Hirotsugu KOJIMA^{††}, and Tomohiko IMACHI^{†††}

あらまし 複数衛星による磁気圏の編隊観測を行う際には、地上局からの制御のみではなく衛星に自律制御機能を実装することが望ましい。更には衛星間の情報交換が効果的である。本研究では、将来ミッションである「SCOPE」に実装される衛星間通信に着目し、親衛星に情報を集約することで準リアルタイムに観測モードを切り換える手法を提案する。提案手法では小容量のデータを相互にやり取りするため、非常に限られた通信容量の中でも実現できるというメリットがある。機上データ処理の挙動を模擬する実験システムを開発し、提案手法の評価を行った。評価結果から、衛星間の相互通信を利用した連携観測を行うことで、従来の個別観測に比べ優れたデータが取得できるということを報告する。

キーワード 編隊飛行衛星, 衛星間通信, 連携観測, シミュレーション, プラズマ波動観測

1. ま え が き

現在、科学衛星による地球磁気圏観測の分野では複数衛星による同時多点観測が主流となっているが、編隊飛行するそれぞれの衛星は独立して、地上局からの制御で運用されている。既存の知識に基づいて観測ターゲットとする既知の現象を捉えるだけであれば、この方法は確実であり妥当といえる。一方、未知の現象に対して、地上局からのコマンド制御では即時性に問題が生じる。かといって、極めて発生確率の低い現象を捉えるために、あらゆるデータを取得することは、地上への伝送可能容量や電力・データレコード等の衛星リソースの制約上困難である。これを解決するためには、衛星に自律制御機能を実装することが考えられ、

より適切な意思決定を行うには衛星間での情報交換が効果的である。

地球磁気圏の観測を目的とする科学衛星は世界中で開発され、宇宙プラズマ物理の解明に貢献している。日本においては、1989年打上げの「あけぼの (EXOS-D)」[1], [2], 1992年打上げの「GEOTAIL」[3]が現在もなお運用中で、日々観測データを取得している。更に将来計画として、編隊飛行により電磁プラズマ現象の三次元的観測を行う「SCOPE」[4]が検討されている。

人工衛星による観測は、1点観測であることから、時間空間変化の切分けが困難で複数衛星による同時多点観測の必要性は以前から指摘されてきた。欧米においては、既に複数衛星による同時観測ミッションが実現しており、「Cluster」(ヨーロッパ宇宙機関, ESA) [5]や「THEMIS」(アメリカ国立航空宇宙局, NASA) [6]による観測は編隊飛行観測の有効性を示している。これに対し、日本が計画中の「SCOPE」では新たに衛星間の相互通信による高度な連携観測と衛星間距離の異なる複数衛星を用いることで同時マルチ・スケール観測を行う予定となっている。磁気圏物理現象の規模は、電子スケール、イオンスケール、流体スケールの三つに分類される。宇宙プラズマダイナミックスは

[†] 金沢大学大学院自然科学研究科, 金沢市
Graduate School of Natural Science and Technology,
Kanazawa University, Kakuma-machi, Kanazawa-shi, 920-1192 Japan

^{††} 京都大学生存圏研究所, 宇治市
Research Institute for Sustainable Humanosphere (RISH),
Kyoto University, Gokasho, Uji-shi, 611-0011 Japan

^{†††} 金沢大学総合メディア基盤センター, 金沢市
Information Media Center, Kanazawa University, Kakuma-machi, Kanazawa-shi, 920-1192 Japan

a) E-mail: s-take@cie.is.t.kanazawa-u.ac.jp

b) E-mail: kasahara@is.t.kanazawa-u.ac.jp

様々な現象がスケールの相違を乗り越えて相互作用するということが近年知られるようになり、したがって根源的理解には異なる規模の観測を同時に行うことが必要となる。

本研究では、将来の編隊飛行衛星に適用できるような、衛星間通信による連携観測の手法を提案する。また、手法の評価を行うため、複数コンピュータによるシミュレーションシステムを開発した。シミュレーションによる評価実験の結果から提案手法の有効性を示す。

本研究では、現在、検討が進められている「SCOPE」衛星の相互通信機能を想定したモデルで検討を行うが、本研究で提案する実験システムは「SCOPE」に限らずその他将来の編隊飛行衛星ミッションに対しても拡張可能である。

2. では SCOPE ミッションで提案されている観測計画と、その計画を実現するために検討が進んでいる観測機器及び衛星間通信の概要を紹介する。3. では開発した模擬実験システムの構成と設計を述べる。4. で編隊飛行衛星に適用する連携観測の手法を提案し、5. でシステムの動作確認を行った後、6. で評価実験の結果を示す。最後に 7. でまとめと今後の展開について述べる。

2. SCOPE ミッション

SCOPE は精密な「その場」観測と、5 衛星による広範囲での多点観測を同時に行う (図 1)。宇宙ダイナミクスにおけるスケール間相互作用の理解を深める目的である。また、日本初の編隊衛星観測でもあり、新規技術の実証に対する期待も大きい。

観測軌道は、近地点高度 4000 km (仮)、遠地点距離 30 Re (Re は地球半径) をノミナルとする。ノミナルミッションライフは 3 年である。衛星間距離は最小 10 km 以内から最大 5000 km まで、ミッション期間の

中で徐々に衛星間距離を広げていく観測計画を立てている。その中で、100 km 以内のミッション期間では、より緊密な連携観測の実現のために衛星間通信が用いられる。また、編隊形状は遠地点で正四面体となるように調整を行う。観測対象とする主な領域は反太陽側 30 Re を中心とする磁気圏尾部 (Tailbox) と呼ばれる領域である。

2.1 搭載される観測機器

SCOPE には大別して、高性能プラズマ/粒子計測器、DC/AC 磁場・電場計測器、波動-粒子相関器が搭載される予定である。磁場・電場計測器を含むプラズマ波動観測装置 (PWI) は、波形受信器とスペクトル受信器で構成され、我々はこれらの受信器ソフトウェア開発の一端を担っている。波形受信器は 0~100 kHz、スペクトル受信器は 10 Hz~30 MHz の範囲を観測する。

これらの観測器で取得したデータは機上で処理して地上に送る必要があり、SCOPE では機上ソフトウェアを実装する CPU 上にリアルタイム OS が搭載される。

2.2 通信方式

SCOPE は親衛星 1 機と子衛星 4 機で構成され、親衛星を中心に据えるスター型ネットワーク構造により親子衛星間を接続する。親衛星の主な役割は、衛星間距離の精密な測定と時刻同期に基づいて、編隊衛星にそれぞれ搭載された観測器による同時多点観測の制御を行うことである。子衛星はそれぞれの位置でプラズマ粒子や、DC 電場・磁場、プラズマ波動などを観測し、親衛星経由若しくは直接地上へデータ伝送する。

SCOPE 計画では親子間通信に、S 帯による時分割多重方式を用いたバースト通信を採用することが検討されている。親子衛星間の距離が 100 km 以内のとき親子間でデータ通信を行う。100 km 以上離れる場合は測距のみを行う。全子衛星は親衛星の TDMA スロットと同期し、1 秒間のシーケンスを親子衛星間通信用に四つ、子衛星間測距用に一つの計五つに等分割する [7]。本研究で想定する衛星間及び衛星-地上間通信

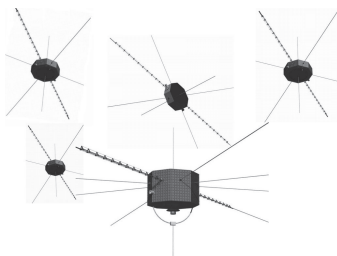


図 1 SCOPE 衛星 (京都大学生存圏研究所提供)

Fig.1 SCOPE mission. ((c) RISH, Kyoto University)

表 1 想定する衛星間及び衛星-地上間通信容量
Table 1 Assumed specification of communication lines.

親 → 子	1 [kbit/s]
子 → 親	40 [kbit/s] (1 子機当りの平均レート)
親 → 地上	4 [Mbit/s]
子 → 地上	400 [kbit/s]

の容量を表 1 に示す。現在、SCOPE 計画における通信方式やアンテナ特性は、電力・重量等の衛星全体のリソースを踏まえて検討途上であるが、本研究ではそのベースラインとされる通信容量に基づいて値を設定している。

また、子衛星の観測データを地上に降ろす方法は大きく分けて 2 通り検討されている。一つ目のパターンは各子衛星の観測データを全て親衛星経由で地上局に下すというものである (図 2)。それぞれの親子間では先程述べた S 帯を使って時分割多重通信を行い、同時に親衛星は子衛星との通信とは異なる X 帯で地上局に観測データを下ろす。このパターンでは親子間の相互通信を利用することで各衛星間で高精度の時刻同期が可能であり、更に親衛星が全子衛星の状態を把握できるため、単独衛星では実現できないより高度な連携観測が可能となる。二つ目のパターンは、観測データをそれぞれ個別に下す形となり、地上局は向きを変えながら各衛星と 1 対 1 で通信を行う (図 3)。このパターンでは一つの子衛星が地上局と通信可能な時間は短くなるが、通信帯域が広がる。例えば 1 地上局で、8 時間/日の可視運用が可能と仮定すると、各子衛星からダウンリンク可能なデータ量は、

$$\frac{\text{運用パターン 2}}{\text{運用パターン 1}} = \frac{2 [\text{hour}] \times 400 [\text{kbit/s}]}{8 [\text{hour}] \times 40 [\text{kbit/s}]} = 2.5$$

となり、捕そくする衛星の切換に必要なオーバーヘッド

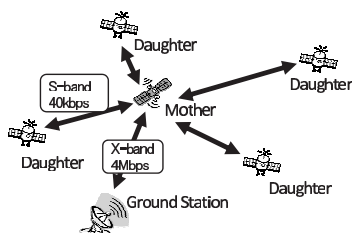


図 2 運用パターン 1: 親衛星経由でダウンリンク
Fig. 2 Operation pattern 1: Downlink through the mother satellite.

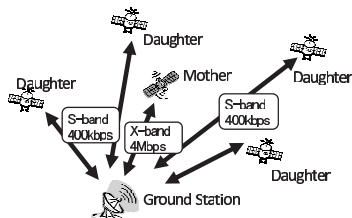


図 3 運用パターン 2: 直接地上にダウンリンク
Fig. 3 Operation pattern 2: Individual downlink.

を考慮しても運用パターン 2 の方が地上に下ろせるデータ量が 2 倍以上増える。しかし子衛星のデータの地上伝送に S 帯を使用する間は親子間通信が確立できないため時刻同期や高度な連携観測は実現できない。両者比較すると、データの質と量がトレードオフの関係にあることが分かる。本研究では、前者のパターンにおける親子間通信を用いた連携観測の手法を検討し、両運用パターンの得失を実験的に評価できる手法を確立する。

2.3 本研究における検討項目

親子衛星間の回線を利用することで自律的に親衛星から子衛星にコマンドを送って編隊衛星全体が組織的に観測動作を行うことを期待している。子衛星はそれぞれの位置でプラズマ粒子や、DC 電場・磁場、プラズマ波動などを観測し、親衛星経由若しくは直接地上へデータ伝送するが、単に複数衛星が独立に観測データを取得するのみでは、時々刻々変化する宇宙環境に即応できない。そこで我々は高度な連携観測として、観測データから抽出した機上データを親衛星に集約し、集まったデータをもとに親衛星が編隊の状態を把握し指揮を執る方法の実現性の可否を検討している。このような複雑な観測システムを机上検討のみで議論することは困難なため、複数のデスクトップ PC を LAN で結び、地上実験を行うシミュレータを構築した。

3. 模擬実験システム

3.1 使用目的

我々が提案する連携手法を評価するため、時々刻々と変化する観測条件下における連携観測の挙動を調べることが主目的とする。特に我々の研究グループが長年研究開発に携わってきた波動観測に焦点を絞っての机上処理の検討を行う。

衛星上の限られたリソースでは全周波数帯域を最大分解能で観測することは不可能である。机上処理では、観測データをテレメトリで送る処理に加え、観測領域の特徴に合わせて、周波数・時間分解能や観測頻度、更には受信器のゲインなどのパラメータ (以下、観測モード) を適応的に変化させる必要がある。これによって個々の領域に最適なゲインで観測を行うだけでなく、科学的に重要な領域では観測分解能を上げて重点的に観測し、その他の地域ではサーベイ的な観測のみを行うなど、限られたデータ伝送容量を有効に活用することが可能となる。

本研究では個々の衛星が独立して上述の机上処理を

行うのではなく、各衛星の情報を親衛星に集約し、親衛星の判断に基づいて全衛星が最適な観測モードで観測を行う連携観測機能を機上処理に付加する。このような連携観測について議論する際には衛星間通信の伝送容量や機上処理遅延なども考慮する必要がある。ここでいう機上処理遅延とは、親衛星が子衛星の情報を収集し、その情報をもとに親衛星の意思決定情報が、全衛星に周知、観測動作に反映されるまでにかかるタイムラグのことである。同処理に要する遅延時間は、親衛星の意思決定に従って、どれだけ素早く有用な観測データを取得できるかを決定する重要なパラメータとなる。また伝送容量は、有用な観測データをどれだけ取得し、地上まで伝送できるかを決定するパラメータとなる。そこで我々は衛星間の科学データの情報交換について実現性と優位性を検討するために、連携観測模擬実験システム（以下、シミュレータと呼ぶ）を開発することにした。

3.2 システム構成

編隊をなす各衛星には、その機上処理のための専用CPUを個別に搭載する。しかし、シミュレータを構成する各衛星の処理を衛星搭載用のCPUやOSに準拠した小型コンピュータで行うには制約が多く扱いづらいため、本研究ではシミュレータの開発にあたって汎用のデスクトップPCを採用した。また衛星間通信部はデスクトップPC間をLANで結ぶことで模擬することとした。今回の研究に限っては、機上のデータ処理を検討するのが目的であり、衛星システム自体を厳密に模擬する必要性はないため汎用PCでも問題ないと判断した。開発したシステムの構成を図4に示す。

図4にある「Space-PC」は、宇宙空間における通信環境を模擬する役割を担い、通信容量、伝送遅延や誤りなど、通信回線に関する処理を全て模擬できる設計とした。つまり、Space-PCが衛星間通信回線を模擬する各パラメータを設定する。通信容量はそれぞれ任意に設定可能であるが、今回は表1で示した値で検討を行った。また、機上処理は数秒単位（例えば衛星スピン周期の4秒程度）に機上処理タスクを繰り返すことを想定している。機上処理の呼出し間隔が秒オーダーであるのに対して、デスクトップPC間の通信にかかる実遅延時間は数百マイクロ秒オーダーと十分小さいため、模擬実験を行うにあたって実用上問題ない。

次に、親衛星及び子衛星の役割は一般的なPC（以下、Satellite-PC）に担わせる。これらは、将来的に必要なが生じたときに衛星部分を現物のシステムに近い

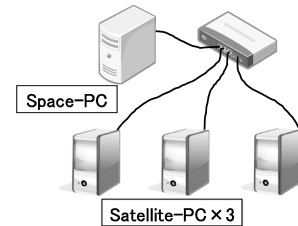


図4 ネットワーク構成
Fig. 4 Network configuration.

表2 PCのスペック
Table 2 Specification of PCs.

Space-PC	
CPU	Pentium Dual-Core E2220 2.4 GHz
Mem	2 GByte
OS	Fedora 7
Satellite-PC	
CPU	Core 2 Duo E4600 2.40 GHz
Mem	1 GByte
OS	Fedora 7

CPUとOSを搭載した小型コンピュータに置き換えて実験を行うことを視野に入れている。各装置のスペック及びOSを表2に示す。

実際の衛星通信プロトコルにはCCSDS方式[8]が用いられる。CCSDS方式では可変長データを処理でき、非同期かつ可変長データが発生するモデルに適した方式となっている。また、高度な誤り制御をサポートしており回線品質が低い場合でも使用できるという特徴がある。

一方、我々が開発するシミュレータで試験するのは、衛星間通信システムそのものではなく連携観測を目的とする機上データ処理部の動作である。したがって、来るべきタイミングでデータの受渡しができる扱うデータが実質的に同じであれば、通信プロトコルが実際と異なるものであっても実用上問題ではない。そこで当システムでは通信プロトコルにTCP/IPを用いることとし、機上データ処理部と通信回線のインタフェースとして別途通信用モジュールを開発した。また、衛星間の通信容量は、TCP/IPのオーバーヘッドを考慮し、衛星間でやり取りする実質的なデータ容量で定義している。

SCOPEミッションではノミナルで衛星5機の編隊飛行を行うことになっているが、当システムではSatellite-PCは3台で構築した。今後PCの数を増やすことで模擬する衛星の数を増やすことも可能である。また、詳しくは後述するが、現状の台数でも衛星5機

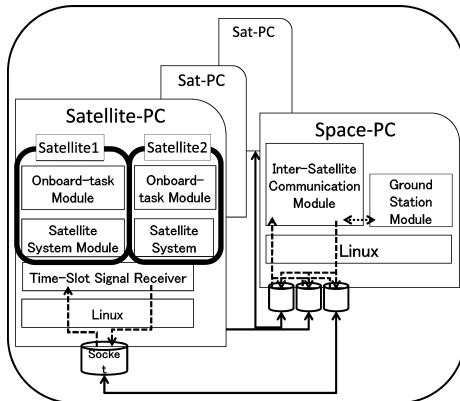


図5 開発したシステムのモジュール構造
Fig.5 A design of developed software modules.

を模擬できるようにシステムを設計している。

3.3 設 計

TCP/IP を用いた通信システムから機上データ処理まで全て C 言語で開発を行った。今回は波動観測器の機上処理を主に検討するが、粒子観測など他の観測器の動作も模擬できるように設計した。当システムは各モジュールを階層構造化して実現している。モジュール間の階層構造の関係を図5に示す。

Inter-Satellite Communication Module は、時分割多重通信制御と衛星間通信の伝送速度制御を行う。当システムにおいて時分割のスロット切替は宇宙 PC の内部クロックをもとに決定し、タイムテーブルは本モジュールが管理する。衛星間のデータ通信は全て宇宙 PC を介す方式をとり、Inter-Satellite Communication Module はそれらのデータを中継する際に伝送速度の制御を行う。各 PC 間の同期は本モジュールがスロット切替シグナルをブロードキャストすることで実現した。

Satellite System Module は、衛星の通信システム及びコマンドテレメトリ処理に相当する部分を担当する。Onboard-task Module から送信要求のあったデータを保管し、Space-PC から送られてくるスロット切替シグナルをもとに適切なタイミングでパケット送信を行う。また、Space-PC を中継して送られてくるパケットを解釈して得たデータを Onboard-task Module へ引き渡す。

近年の日本の科学衛星では、搭載観測機器と衛星システムとは、パケット通信によるデータのやり取りが採用されている。また、各観測機器は専用の CPU を

もち、そこで動作しているユーザプログラムが、観測機器の制御、観測データの機上処理及び、衛星システムヘデータを伝送するためのパケット生成などの役割を担っている。Onboard-task Module は実際の衛星における観測器のユーザプログラムに相当する。そして Onboard-task とは、観測データを衛星機上で解析するユーザプログラムのプロセスのことを指す。シミュレーション実験を行うにあたって、本モジュールが扱う観測データには、我々の研究グループが所有する「かぐや」[9], [10] が観測した実データの一部を利用した。編隊が自律的な連携観測を行うために親衛星が行う意思決定についても本モジュールが担当する。

Time-Slot Signal Receiver は、Space-PC から送られてくるスロット切替シグナルを各衛星システムモジュールに分配する役目を果たす。このモジュールを介すことにより単一の PC で複数の衛星を模擬することが可能となり、システムの汎用性が向上した。

最後に Ground Station Module は地上局の役割を担い、地上局からのコマンドの送信や衛星から送られてくる観測データの受信を行う。

4. 連携手法の提案

従来欧米で開発された編隊飛行衛星は、個々の衛星が独立に観測データを生成し、地上処理において、データの相互比較を行うことで同時多点観測データの解析が進められてきた。それに対し我々は、親子間の相互通信により準リアルタイムに系全体の観測モードを適切に変更することで各観測領域に適応した最適な観測モードで連携観測を行う手法について検討している。

4.1 イベント検出

本研究では各衛星が、地球磁気圏内に存在するマグネトポーズやプラズマシートなど特性が異なる領域間の境界通過などのイベント検出機能をもつことを仮定する。編隊飛行するそれぞれの衛星は自衛星が領域間の境界を通過したことを検知すると、そのイベント情報を親衛星に報告し、親衛星はそれをもとに系全体の観測モードを、次に突入することが予想される領域、あるいは狭い境界領域でドラスティックに変化する電磁プラズマ環境の変化の瞬間を捉えるために必要な計測に最適化したものに変更するというのが基本的な連携観測の考えである。

各子衛星から送られる全データを親がモニタして意思決定するのは非現実的なので、個々の衛星で自身の

状態を判定し、親はそのステータスのみを集約・判断する方式を提案する。提案手法では、子から親へのイベント検知情報の通知、親から子への最適観測モードの指示が、数 bit 程度で表現できるイベントのタイプ情報だけで交換できるため、低容量の通信回線で実現可能である。なお、イベント検出機能は機上処理の一部としてシミュレータの Onboard-task Module に実装する。

4.2 親衛星における意思決定

各衛星が検出したイベントに対応する観測モードのうち、最も優先度の高いものをその時刻における編隊全体の最適な観測モードと仮定し、その仮定に従った意思決定を行う。イベントを検出した衛星だけでなく編隊全体が同一の観測モードで運用する。これは、現象領域の内外で同時に観測を行うことで現象の空間構造を把握するためである。それぞれの観測モード（厳密にはイベント）にはタイムアウト値を設定し、タイムアウトしたら以前の観測モードに戻す。ただし、過半数の衛星が同一のイベントを検出した場合には、タイムアウトなしで観測モードを持続させる。イベントにタイムアウト値を設けるのは、各衛星のイベント検出が必ずしも正しいとは限らないこと、イベントの多数派を尊重した方が総合的に見てもっともらしい観測モードで運用できることを想定しているためである。

親衛星の Onboard-task Module に搭載するアルゴリズムを図 6 に示す。観測モードはイベントのタイプと対応している。また、タイムアウト判定のためのサブモードとして、多数派モード、少数派モードという内部状態をもつ。タイムアウトの判定は、以下の考えに従う。

- 各衛星について、報告された最新のイベント検知情報だけをバッファに記録する
- バッファにはイベントの種類と検出時刻をセットで記録する
- イベント検出時刻からの経過時間を確認して、タイムアウト値を超えたイベント情報はバッファから削除する
- タイムアウト値はあらかじめ決めたものに従う
- 現在の最適観測モードと合致するイベントがバッファに三つ以上ある場合、多数派モードに移行する
- 多数派モードとなっているときに、現在の観測モードと対応するイベントがある場合、そのイベント情報は以降タイムアウトなしで永続的にバッファに保

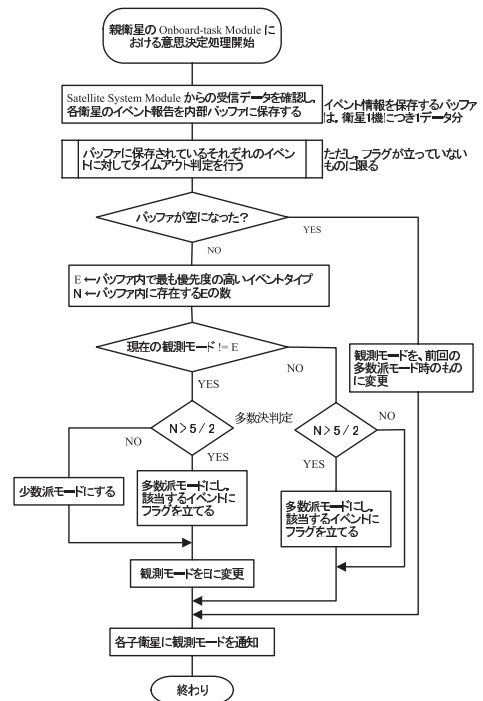


図 6 意思決定アルゴリズムの流れ図

Fig. 6 Decision making algorithm onboard mother satellite.

存するフラグを立てる

- 上記フラグが立ったイベント情報は、同衛星から別タイプのイベント報告があった場合に書き換えられる

5. 擬似イベントによる動作確認

各機上データ処理部に表 3 のような時系列の擬似イベントを与え、動作の確認を行った。実験結果を図 7 に示す。横軸は時間、縦軸は観測モードとなっている。この実験では意思決定過程の動作を分かりやすく示すため、観測モードを 3 種類、それに対応したイベントも 3 種類に設定している。例えばイベント 1 が検出されたときには観測モードを 1 に変更することとする。また、各イベントの優先度は 3 が最も高く、1 が最も低いと設定した。なお、本実験においては観測モード及び擬似イベントは単なる数値であり、それぞれに対応する具体的なパラメータや現象は想定していない。また、イベントのタイムアウトを 100 秒とした。実際の運用を想定した場合には最適なタイムアウト値を検討する必要があるが、タイムアウト値の決定法につい

表 3 シミュレータに与えたイベントデータ
Table 3 An example of event data given to the simulator.

Time[sec]	M	D1	D2	D3	D4
0	1	1	1	1	1
60	-	2	-	-	-
80	-	-	2	-	-
100	-	-	-	2	-
120	-	-	-	-	2
140	2	-	-	-	-
250	-	3	-	-	-
400	-	-	3	-	-
460	-	-	-	3	3
580	1	1	1	1	1
640	-	2	-	-	-
820	-	-	2	-	-
880	-	-	-	3	-

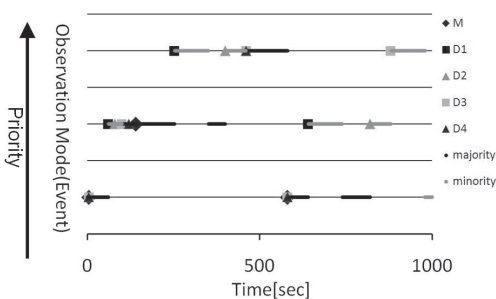


図 7 シミュレータの動作試験結果
Fig. 7 A result of a function test of the developed simulator.

ては今後の課題とする。図 7 において、M と D はそれぞれ親衛星と子衛星に与えた擬似イベントをプロットしており、majority, minority と書かれたラインが最適観測モードに関する意思決定の結果をプロットしている。majority は過半数の衛星が検出したイベントに基づいて決定されたモードを表し、minority は過半数に満たない衛星に基づいたものとなっている。

全衛星に初期値としてイベント 1 を与え、観測モードが 1 に設定された状態で実験開始している。Time = 60 [s] からそれぞれの衛星に順次イベント 2 を与えている。これは同一の報告が過半数になった時点でタイムアウトなしの majority モードに移移する挙動を確かめるためである。順番に見ていくと子衛星 1 から報告があった時点で観測モードは 2 に変更されているが、minority モードとなっている。子衛星 3 が検出した時点で過半数となり majority モードに推移している様子が分かる。そしてタイムアウト値である 100 [s] を超えても観測モードが維持されていることが確認できた。反対にタイムアウトが正しくなされるか

を調べるため、Time = 250 [s] で子衛星 1 にイベント 3 を与えている。優先度の関係から、イベント報告があった直後に観測モードが 3 に変更されている。その後、minority のまま 100 秒経過し、タイムアウトして観測モードが 2 に戻る様子が確認できた。

6. 実 験

前章でシステム及び意思決定の動作が設計どおりであることを述べた。次に実観測データを使い模擬実験を行った結果を示す。

6.1 使用したデータ

今回、各衛星に与える観測データには「かぐや」搭載の自然波動観測装置 (WFC: waveform capture) [10] で得られた実観測データを使用した。WFC は 100 Hz から 1 MHz の周波数帯を観測できる。また、「かぐや」は月をほぼ 2 時間の一定周期で周回している。そこで、近接した周回の軌道が類似性はあるが完全同一ではない性質を利用し、各衛星に 1 周回分ずつずらした自然波動スペクトル観測データを与えることで、それぞれ空間的に異なる位置で観測を行う編隊を模擬した (図 8 参照)。図 8 の上のグラフは、各時刻における電界強度を周波数ごとに表示したものである。横軸は時刻、縦軸は周波数、色の濃淡で電界強度を表している。

「かぐや」の実観測データに見られる典型的なイベントとしては、月の日照領域と日陰領域の切り替わりがある。日照領域は月に向かって高速のプラズマ流である太陽風が吹きつける領域なのに対し、日陰側は月によって太陽風が遮へいされる領域にあたる。そのため、日照域と日陰域は観測される波動の特徴が大きく異なり、電子プラズマ周波数 (20 kHz) 付近の電界強度を調べることで日照日陰を判別することができる。「かぐや」のデータには日照・日陰のような大域的な領域変化だけではなく、月面に局所的に点在する磁気異常領域上空で多く見られる BEN (Broadband Electrostatic Noise, 広帯域静電ノイズ) という局所的な現象が存在する [11]。BEN のデータは月の磁気異常を解明するために重要なものであり、今回の実験では 3 kHz 以下の電界強度を監視することで BEN イベントを検知する。本研究では、スペクトルデータから日照・日陰・BEN の検出機能を各衛星に相当する各衛星モジュールに実装し、領域境界通過イベントを親衛星に通知する方式で各領域に適した観測モード切替を行う連携手法の検討を行った。

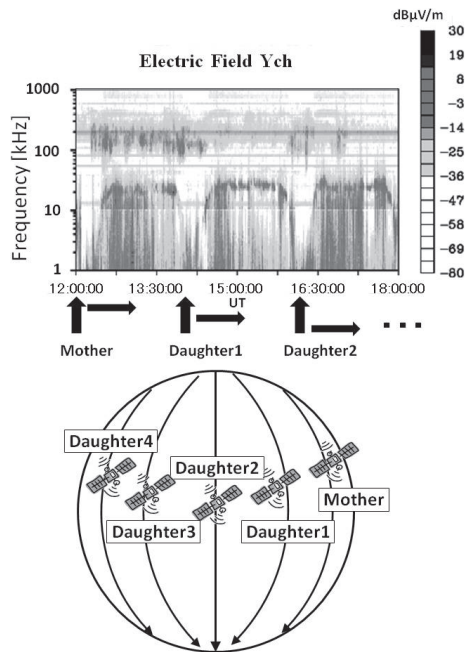


図 8 シミュレーションに使用したかぐやデータ
Fig. 8 An example of wave data and trajectories of satellites.

6.2 評価実験

提案手法をシミュレーションし、実際にシミュレータが選択した観測モードと個々の衛星のイベント検知に従って理想的にモード遷移が行われた場合の最適観測モードとの一致度（以後、評価値）を計測した。各衛星のイベント検出の結果からそれぞれの時刻における最適観測モードを求め、実際の観測モードと比較することで評価値を得る。つまり、イベント情報が観測モードに反映されるまでの遅延が評価値を減少させる原因となる。この遅延が前述した機上処理遅延である。用いたデータは衛星モジュール一つにつき、かぐや衛星 5 周回分である。今回の実験ではイベントの優先度を高い順から、BEN > 日照 > 日陰と定義している。

表 4 は、5 衛星それぞれで検出したイベントと最適観測モードとの一致度の平均をモードごとに示している。これは親子間通信を行わない場合にとり得る評価値の最大値と等価である。単独衛星での観測では全観測時間のおよそ 5 割で不適切な観測モードで運用することが分かる。また、BEN に限っては 2 割の時間帯しか最適な運用ができない。

表 5 は、衛星間通信を行うシミュレーション結果か

表 4 衛星間通信を使わない場合

Table 4 WITHOUT inter-satellite communication.

Night side	Day side	BEN	Total
87.3%	42.9%	20.4%	50.8%

表 5 衛星間通信を使った場合

Table 5 USING inter-satellite communication.

Night side	Day side	BEN	Total
97.9%	97.9%	91.1%	97.1%

表 6 観測モードの平均持続時間 [spin]

Table 6 Average durations of each mode [spin].

Night side	Day side	BEN
39.7	47.2	11.3

ら得たモードごとの評価値を示している。総合で見ると単独運用の 51%と比べて 47 ポイント大きい評価値を得ることができた。

以上の結果から、親子間通信を利用することで高品質な観測データを得ることが可能だといえる。

6.3 考察

表 5 が示す評価値がいずれも 100%となっていないのは、機上処理遅延が影響しているからである。いずれかの衛星が検出したイベントが観測モードに反映されるまでには、イベント情報を親衛星に知らせる通信、親衛星が全衛星に指示を出す通信が必要となり、これらの通信にかかる時間に加えて機上処理を行う間隔がオーバーヘッドとなる。

今回の実験では、イベント報告や意思決定などの機上処理をスピン単位（4 秒）で行っており、計算を簡略化するためここからはスピン単位で議論する。各観測モードの平均持続時間を表 6 に示す。平均持続時間はシミュレーション結果から得た実測値である。評価値の値がモードにより異なるのは、各モードの持続時間が異なるからである。理論的には、オーバーヘッドに対してモードの持続時間が小さくなればなるほど評価値は小さくなる。機上処理遅延によるオーバーヘッドはモードによらず一定である。本研究では各衛星は時刻同期しているという前提で、4 秒ごとにイベント検出と報告を行い、親衛星は 1 秒ごとに意思決定とコマンド送信を行う。コマンドは 1 シークエンス（1 秒）以内に各衛星に到達するのに対して、観測モードの切替は 4 秒ごとに行うので、ここで議論しているオーバーヘッドは 4 秒となる。計算を簡略化するため、オーバーヘッドを 1 [spin] とすると、評価値は理論的に以下で求められる。

$$\begin{aligned}\text{日陰モードの理論値} &= (39.7 - 1.0)/39.7 \\ &= 97.5\%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{日照モードの理論値} &= (47.2 - 1.0)/47.2 \\ &= 97.9\%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{BEN モードの理論値} &= (11.3 - 1.0)/11.3 \\ &= 91.2\%\end{aligned}$$

これらの理論値は表 5 の結果と大体一致しており，機上処理遅延が与える影響をシミュレーションでできていることが分かる．

今回はかぐや衛星の実観測データを用いて実験を行ったが，提案した連携観測のアルゴリズムは，観測イベントの特性に依存しない汎用度の高い方法のため地球磁気圏観測にも適用可能といえる．

7. む す び

地球磁気圏観測の現状と，複数衛星による「その場」観測の必要性，将来ミッションである SCOPE を簡単に紹介した．衛星間通信を用いた連携手法を提案し，デモによる動作確認を行った．そして模擬実験システムに実観測データを与えることで手法の評価を実施した．評価実験の結果から手法の有効性を示した．

例えば SCOPE ミッションでは，磁気圏境界層，磁気圏尾部，磁気圏尾部プラズマシート境界層，内部磁気圏などの探査領域ごとに異なる科学目標が設定されており，それぞれの領域に適したモードで観測を行うことが必要となる．そのような複雑な条件下で，更に具体的なシミュレーションを実施するには，単一衛星のデータを擬似的に複数衛星に割り当てるのではなく，THEMIS や Cluster などの複数衛星ミッションの実観測データを用いることが望ましい．今後は，実観測データの利用と併せて，提案手法におけるイベントのパラメータ（優先度やタイムアウト）最適化について検討を進めていく予定である．

謝辞 本研究は日本学術振興会科学研究費（基盤研究 (B) 課題番号 20360183）の助成を受けたものである．

文 献

- [1] I. Kimura, K. Hashimoto, I. Nagano, T. Okada, M. Yamamoto, T. Yoshino, H. Matsumoto, M. Ejiri, and K. Hayashi, "VLF observations by the Akebono (EXOS-D) satellite," *J. Geomagnetism and Geoelectricity*, vol.42, no.4, pp.459–478, 1990.
- [2] K. Hashimoto, I. Nagano, M. Yamamoto, T. Okada,

I. Kimura, H. Matsumoto, and H. Oki, "EXOS-D (Akebono) very low frequency plasma wave instruments (VLF)," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol.35, no.2, pp.278–286, 1997.

- [3] H. Matsumoto, I. Nagano, R.R. Anderson, H. Kojima, K. Hashimoto, M. Tsutsui, T. Okada, I. Kimura, Y. Omura, and M. Okada, "Plasma wave observations with Geotail spacecraft," *J. Geomagnetism and Geoelectricity*, vol.46, pp.59–95, 1994.
- [4] SCOPE 計画ワーキンググループ, "SCOPE 計画提案書," <http://sprg.isas.jaxa.jp/scope/pukiwiki/scope-proposal.pdf>, 2008.
- [5] M.G.G.T. Taylor, C.P. Escoubet, H. Laakso, A. Masson, and M.L. Goldstein, "The cluster mission: Space plasma in three dimensions," *The Cluster Active Archive, Studying the Earth's Space Plasma Environment*, ed. H. Laakso, M. Taylor, and C.P. Escoubet, *Astrophysics and Space Science Proceedings*, pp.309–330, Springer, 2010.
- [6] J.L. Burch and V. Angelopoulos, "The THEMIS mission," *Space Science Reviews*, vol.141, no.1-4, pp.5–34, 2008.
- [7] 馬場広志, 戸田知朗, 富木淳史, 富田秀穂, 小林岳彦, "複数編隊飛行衛星間の測距方式とその実験の評価," *信学技報*, SANE2008-60, 2008.
- [8] The Consultative Committee for Space Data Systems, "CCSDS.org," <http://public.ccsds.org>, 参照 Dec. 13, 2010.
- [9] T. Ono, A. Kumamoto, Y. Yamaguchi, A. Yamaji, T. Kobayashi, Y. Kasahara, and H. Oya, "Instrumentation and observation target of the lunar radar sounder (LRS) experiment on-board the SELENE spacecraft," *Earth Planets Space*, vol.60, no.4, pp.321–332, 2008.
- [10] Y. Kasahara, Y. Goto, K. Hashimoto, T. Imachi, A. Kumamoto, T. Ono, and H. Matsumoto, "Plasma wave observation using waveform capture in the lunar radar sounder on board the SELENE spacecraft," *Earth Planets Space*, vol.60, no.4, pp.341–351, 2008.
- [11] K. Hashimoto, M. Hashitani, Y. Kasahara, Y. Omura, M.N. Nishino, Y. Saito, S. Yokota, T. Ono, H. Tsunakawa, H. Shibuya, M. Matsushima, H. Shimizu, and F. Takahashi, "Electrostatic solitary waves associated with magnetic anomalies and wake boundary of the Moon observed by KAGUYA," *Geophysical Research Letters*, vol.37, L19204, 2010.

(平成 22 年 12 月 16 日受付, 23 年 3 月 11 日再受付)



竹中 悟

平 21 金沢大・工・情報システム卒。現在、同大大学院自然科学研究科在学中。衛星間通信を利用した編隊衛星群の連携観測法の研究に従事。



笠原 禎也（正員）

平元京大・工・電気第二卒。平 3 同大大学院修士課程了。平 4 同博士課程中退。同京大助手、平 14 金沢大准教授。平 21 より同大・総合メディア基盤センター教授。衛星搭載ソフトウェア受信器による機上信号処理、科学データベースからの知識発見、宇宙空間中のプラズマ波動の伝搬及び波動-粒子相互作用の研究に従事。博（工）。地球電磁気・地球惑星圏学会、情報処理学会、米国地球物理学会連合各会員。



小嶋 浩嗣（正員）

昭 62 京大・工・電気第二卒。平元同大大学院修士課程了。同年同大超高層電波研究センター助手、平 11 同大助教授、平 16 同大生存圏研究所助教授、平 19 同大生存圏研究所准教授、現在に至る。科学衛星による宇宙電磁環境の研究に従事。博（工）。地球電磁気・地球惑星圏学会、米国地球物理学会連合各会員。



井町 智彦（正員）

平 8 金沢大・工・電気情報工学卒。平 10 同大大学院工学研究科修士課程了。平 13 同大学院自然科学研究科博士課程後期了。同年 JSPS 特別研究員（PD）。平 15 金沢大学総合メディア基盤センタ助手。平 19 同大助教、平 20 同大総合メディア基盤センター准教授、現在に至る。コンピュータネットワーク及び科学衛星によるプラズマ波動の研究に従事。火星探査衛星のぞみ、月周回衛星かぐや、水星探査衛星 BepiColombo MMO 開発チーム。平 11 本会北陸支部学生優秀論文発表賞。博（工）。地球電磁気・地球惑星圏学会、米国地球物理学会連合各会員。