

# 宇宙科学研究所報告

第 112 号

探査機異常監視・診断システム (ISACS-DOC)

橋本正之・長木明成・早川 基・向井利典  
中谷一郎・西郡直実・水谷光恵

2000年10月

宇宙科学研究所

この報告書は宇宙科学研究所が、研究成果を公表するために発行する不定期継続刊行物です。

本報告についてのお問い合わせは下記にご連絡下さい。

宇宙科学研究所 管理部庶務課法規・出版係

## 探査機異常監視・診断システム (ISACS-DOC)

橋本正之\*・長木明成\*・早川基\*・向井利典\*・中谷一郎\*  
西郡直実\*\*・水谷光恵\*\*\*

(2000年9月7日受理)

## Monitoring and Diagnostic Expert System for Spacecraft (ISACS-DOC)

By

Masashi HASHIMOTO\*, Akinari CHOKI\*, Hajime HAYAKAWA\*, Toshifumi MUKAI\*,  
Ichiro NAKATANI\*, Naomi NISHIGORI\*\* and Mitsue MIZUTANI\*\*\*

**Abstract:** Scientific spacecraft are becoming more sophisticated to satisfy the more complicated requirements from onboard scientific instruments. The operators who control the spacecraft are also required to have wider and deeper knowledge. The demand for operators who have such deep professional knowledge of the spacecraft and also the ground support systems is not necessarily attainable under strict restriction of budget and personnel. A monitoring and diagnostic system with expert technique in which professional knowledge from many experts in various fields was integrated in the computer system to solve this problem was developed. This system called ISACS-DOC watches automatically the condition of the spacecraft to keep the operation safe. Two ISACS-DOC systems are presently in operation to keep the magnetospheric observation satellite GEOTAIL and the Mars probe NOZOMI running safely. These systems are located at Sagami-hara Spacecraft Operation Center (SSOC) of the Institute of Space and Astronautical science (ISAS).

### 要 旨

人工衛星や探査機が年々複雑で高精度化するにつれて、打ち上げ後の運用においても広範囲でより深い知識が要求されるようになってきている。一方、この状況に対応するために多くの高度な各分野の専門知識を持つ人を長期にわたって運用室に拘束することは人材の有効利用の観点からもコスト抑制の観点からも実際的ではない。この問題を解決する1手段として、各分

---

\*宇宙科学研究所 Institute of Space and Astronautical Science

\*\*富士通株式会社 Fujitsu Limited

\*\*\*株式会社富士通アドバンスソリューションズ Fujitsu Advanced Solutions Limited

野の専門家の知識を広く集め、これをコンピュータ上に利用し易い形で有機的に集積し、定常運用においてはこれに衛星、探査機の状態を監視させるエキスパート型の診断システムを構築した。ISACS-DOC と呼ばれる本システムは宇宙科学研究所の相模原管制室に設置され、現在、磁気圏観測衛星「GEOTAIL」と火星探査機「のぞみ」の異常監視・診断に利用され、同衛星・探査機の日々の安全な運用に貢献している。

重要語：異常監視，異常診断，エキスパートシステム，のぞみ，ISACS，ISACS-DOC，GEOTAIL，PLANET-B.

## 1. はじめに

宇宙科学研究所（ISAS）が打ち上げてきた各種衛星や探査機は要求ミッションの高度化に伴って、次第に複雑で高機能になってきている。このため、打ち上げ後の運用に対しても、より複雑で高度な広範囲の知識が要求されるようになってきた。このような状況において、従来の形態で安全な運用を継続するためには、より多くのしかも高度で広範囲の知識を有する運用者が必要とされる。しかし、実際には運用人員や運用経費を増やすことは昨今の状況では現実的ではない。そこで運用に必要な様々な情報をそれぞれの分野の専門家から集め、これをコンピュータ上に有機的に集積し、必要に応じてこれを自動的に参照して運用を支援するエキスパート型の人工知能技術を導入し、上記事情に対応することとした。本システムの最初の構築は1992年7月に打ち上げられた地球磁気圏観測衛星「GEOTAIL」を対象に行われた。本システムはIntelligent Satellite Control Software（ISACS）と命名され、その後様々な改善を経て現在も日々の運用で定常的に使われている。このISACSは基本的に2つの構成要素から成り、それぞれISACS-PLN（ISACS-Planner）、ISACS-DOC（ISACS-Doctor）と名付けられている。前者は衛星／探査機にセットされるコマンド列を様々な制約条件下で自動的に生成する機能を有し、衛星運用の省力化に貢献している。後者は衛星／探査機の状態を自動的に監視・診断するものである。本システムは最初の「GEOTAIL」衛星対応のものに続いて、その経験から得た多くの改善を施した火星探査機「のぞみ」対応のものが開発された。現在これら2つのシステムは共に宇宙科学研究所の衛星管制室において実運用に定常的に使われている。本論文では上述のISACS-PLN、ISACS-DOCのうち後者の衛星・探査機異常監視診断システム（ISACS-DOC）について述べる。

## 2. 開発過程

### 2.1. 「GEOTAIL」対応ISACS-DOCの開発

1992年7月に打ち上げられた磁気圏観測衛星「GEOTAIL」は当時宇宙科学研究所が保有していたM-3SⅡ型ロケットでは打ち上げ不可能な大型で重い科学衛星であった。また衛星には観測内容の充実を図るために日米双方の英知を結集した観測機器が多数搭載されることになった。このような状況下で、打ち上げはNASAの責任で、また衛星はISASの責任で進められることとなった。また打ち上げ後の運用についてもその基本運用はISASの責任で行われるものの、衛星からのデータ受信についてはNASAの深宇宙局（DSN局）が全面的に支援する事となり、この体制は現在も継続中である。

衛星の運用をこのような複雑な状況下で長期間にわたり限られた人数で安全に行うためには、例えば人工知能技術を適用した何らかの支援ツールが必要であると判断し、基本的な検討が開始された。人工知能技術の宇宙分野への応用研究は米国NASAのジェット推進研究所（JPL）、ゴダード宇宙飛行研究所（GSFC）、エイムス研究所（ARC）等を中心に1980年代後半から精力的に進められ、科学衛星、探査機分野においても惑星探査機

Voyager, Galileo, 赤外線天文衛星COBE, 紫外線観測衛星EUVE等の運用システムに応用された [1-5, 11], また最近ではESAも運用センターに導入を検討している [23].

宇宙科学研究所での開発は1.でも触れたように, 衛星に設定されるコマンド列を自動的に生成するISACS-PLNと衛星の健康状態を常時監視し, 異常時には直ちにその状況を知らせるISACS-DOCの2つについて進められた.

本論文で述べるISACS-DOCについては, 開発開始時点でいわゆる人工知能を使っての実運用を目指したシステム構築は少なくとも宇宙科学研究所では全く未経験であったため, この技術が実用になるのか否かは半信半疑であった. そこでリスクを避ける目的で, 開発は以下の3段階のステップを踏んで実施する事とした.

#### (1) 手入力通信系診断ソフト

初めにエキスパート技術とはどんなものかを知るための評価用ソフトを作成した. 具体的には「GEOTAIL」の通信系に限定した監視・診断ソフトを構築し, その有用性の評価を試みた. 診断に必要な情報の入力は全て手入力であったが, 知識そのものは後に本格開発を進めることになった場合にも役立つ内容とした. この段階の終わりの時点までにエキスパート技術は衛星の異常監視・診断システムに何とか使えるかもしれないという前向きの感触を得ることが出来た.

#### (2) 手入力全域診断ソフト

次のステップとしては「GEOTAIL」衛星の全領域を包含する診断ソフトを構築してみることにした. 具体的には「GEOTAIL」衛星の電源系, 通信系, データ処理系, 軌道・姿勢制御系, 熱制御系, 観測系の全ての領域をカバーする内容のものであった. 知識データベースの構築に当たってはそれぞれの専門分野の方々から多大なる協力を頂いた. 出来上がったシステムは実際に衛星の管制室に仮設置し, その動作を確認した. この結果, エキスパート技術を利用した異常監視・診断システムは十分に実用になり得るとの確信を持つに至った.

#### (3) 自動入力診断システム

(2)で述べた手入力診断ソフトは診断に必要な全情報を手入力するもので, 発行される質問に対する答えを容易にするために選択方式での回答や発行される質問の順番, デフォルト値の設定などに細心の注意が払われたが, それでも全ての質問の回答には30分以上もの時間を要した. 手入力方式としたのはこの段階を終えるまではエキスパート方式の実用性に関して十分な確信がなく, 自動入力化への無駄な投資を避けるためであった. 実際にこの手入力システムを使ってみて, 実用になる監視・診断システムでは自動入力化が必須であることを再認識した. そこで実際の日々の「GEOTAIL」衛星の運用に実用になるシステムを目指して, 自動入力診断システムの構築に取りかかった. この結果, 衛星のテレメータ装置により送られてくる全情報と局運用など幾つかの地上支援システムからの情報入力の殆どはオンライン化することが出来た. 本システムは実際の運用で様々な修正を施した後, 現在も定常的に「GEOTAIL」衛星の運用に使われている.

### 2.2. 「GEOTAIL」対応ISACS-DOC開発で学んだもの

「GEOTAIL」衛星用ISACS-DOCはISASがエキスパート技術を実運用の異常監視・診断システムに適用した初めての経験であった. このためその開発に当たっては様々な紆余曲折があった. 出来上がったシステムは現在定常運用で有効に使われており, 何度も異常又はその兆候を運用担当者に迅速に知らせることに成功している. 今になって考えれば必ずしも洗練されているものとは言いがたいが, この開発を通してエキスパート技術を利用した異常監視・診断システム構築上の数多くの知見を得た. その中で特に基本的な事柄と考えられるものは以下の通りである.

(1) 診断の内容を充実し, かつその信頼度を上げるためには衛星/探査機からの情報のみではなく, 地上受信局の情報や運用に使われる軌道・姿勢決定ソフト等多方面からの情報収集能力が重要である.

一例として探査機へのコマンド通信回線の評価には探査機での使用アンテナ, アンテナパターン等の情報が必要な以外に, 地上局情報として送信電力, アンテナ利得, 軌道情報からは探査機-地上局間距離, さらに姿勢決定ソフトウェアからは軌道情報と探査機姿勢情報の両方から決まる探査機スピン軸方向と地球方向間の角度等が

必要となる。

(2) 省力化要求の下で監視・診断システムが有効利用されるためには可能な限りの自動化が必須である。

「GEOTAIL」対応ISACS-DOC開発時点では現在「のぞみ」対応ISACS-DOCが使用しているLANシステムとは異なるアーキテクチャーであったため、例えば地上局送信電力等は手入力にせざるを得なかった。しかし運用管制室の担当者の数は最小限に削減されているため、このような追加の作業は担当者への負担となる。この結果、折角のシステムの利用率が低下する状況が見られた。

(3) 診断知識の構築に当たっては診断を必要とする広い領域から重要項目を注意深く選定し、選定された項目については十分に洗練された内容とする必要がある。

衛星や探査機は複雑なシステムであるため、全ての詳細部分に対して診断範囲を広げようとする膨大な情報収集が必要であり、構築費用の観点から現実的ではない。従ってミッション達成のために不可欠な監視・診断項目をバランスよく選択し、信頼性の高い結果を出せるようにするのが实际的である。

(4) 運用担当者に不安を与えないために診断結果は高い確信度を持つものに限定し、そうでない場合には異常の事実、データのみを表示すべきである。

「GEOTAIL」対応ISACS-DOCではいろいろな故障原因が考えられる場合には複数の故障原因を挙げ、それぞれに確信度を付けて表示している。この方法は人工知能システムらしくはあるが、現実的にはどの結果を採用して良いかわからず、運用担当者を混乱させる結果となった。

(5) 打ち上げ後の運用において異常監視・診断上重要な事項は衛星／探査機的设计にも反映されるべきである。

例えば「GEOTAIL」衛星では搭載された各機器の電流は元々合計電流のみをモニターしているため、特定機器の異常電流の検知は極めて困難である。一方、電流監視は機器の異常検知として最も有効な情報であるため、「のぞみ」では探査機設計時点で是非個別の電流情報を取得できるようにして欲しいとの希望を出し、実現している。この時点では「のぞみ」対応のISACS-DOCは未だ概念設計の段階であったが、他衛星への過去の経験でも新規衛星・探査機設計への反映は可能な場合もある。

### 2.3. 「のぞみ」対応ISACS-DOCの開発

2.2.で述べた基本事項を始め様々な反省点を反映させて火星探査機「のぞみ」対応の異常監視・診断システムを構築した。本システムは現在「のぞみ」の運用中、常時探査機の状態を監視しており、既に何度か異常状況を運用担当者に知らせる役割を果たしている。以下では本システムの詳細について述べる。

## 3. 「のぞみ」対応異常監視・診断システム

異常監視・診断の対象となる「のぞみ」は1998年7月4日に打ち上げられた我が国初の火星探査機で、打ち上げ時の全重量は軌道・姿勢制御用の燃料を含み540 kgである。火星探査機としては非常に小型軽量ではあるが、14もの最新の科学観測機を搭載した本格的な探査機で、搭載された観測装置は日本はもとよりアメリカ、カナダ、スウェーデン、ドイツ、フランスとの多方面の国際協力の下に準備された国際協力計画でもある。図1には「のぞみ」の飛行想像図、図2には同探査機のシステムブロックが示してある。

### 3.1. 「のぞみ」対応ISACS-DOC設計の基本構想

ISACS-DOC設計に当たっての基本的な方針は以下の通りである。これらの中で、あるものは「GEOTAIL」衛星対応のISACS-DOC開発時点から既に設定していたものであるが、「GEOTAIL」用ISACS-DOCの実際の運用経験を通して初めの考え方を修正したものや新たに導入された項目も含まれている。

1) 運用担当者が探査機全域の知識を持たない場合でも探査機の異常状態を迅速に認識し、適切な応急処置を取れるよう支援すること。

2) 本システムの運用が運用担当者に与える負荷を可能な限り軽減すること。

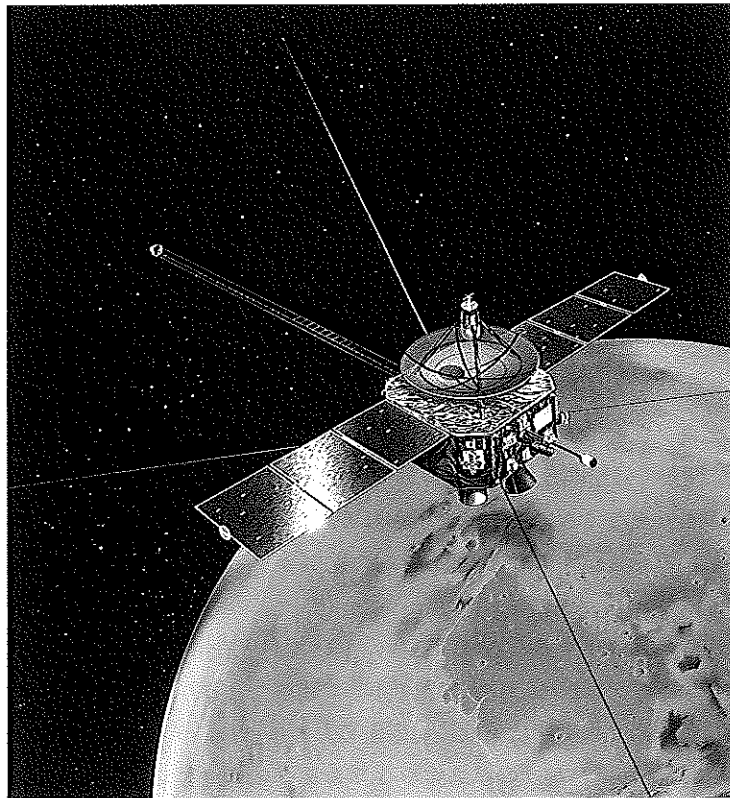


図1. 火星を周回する「のぞみ」想像図

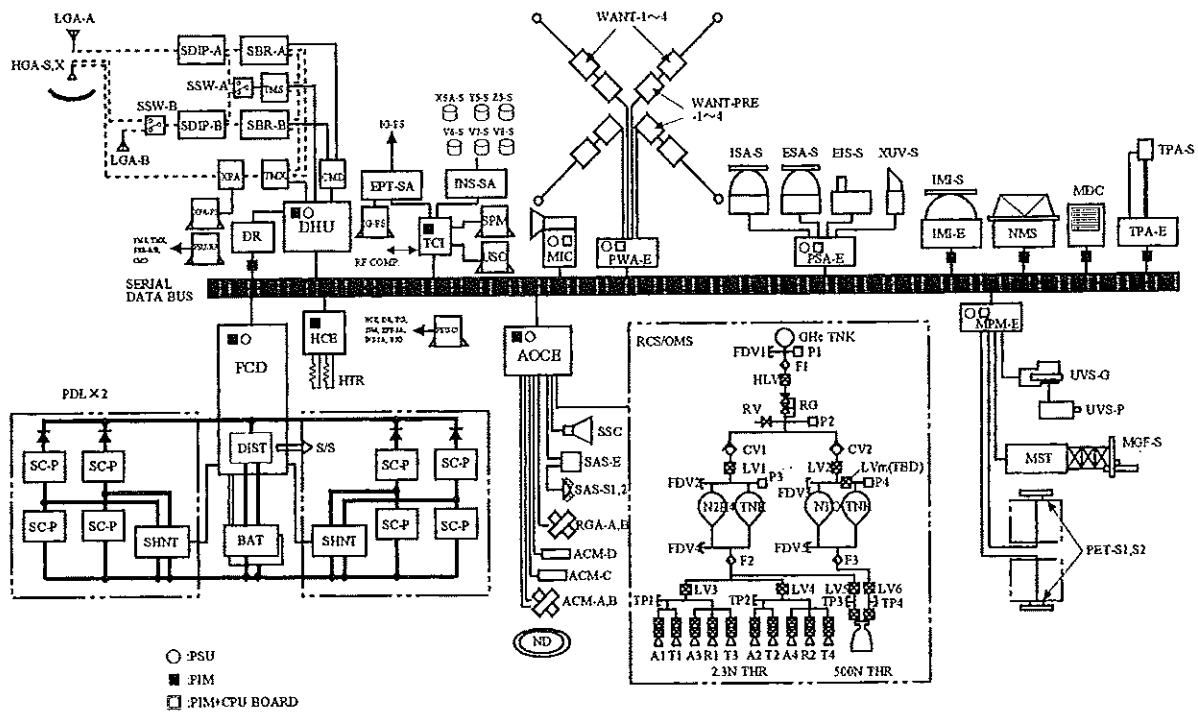


図2. 「のぞみ」のシステムブロック図

3) 探査機の運用中はリアルデータのみではなく、搭載データレコーダからの再生データに対しても可能な限り監視・診断を行えること。これにより、地上局からの非可視時間帯に発生した異常事態が再生データの受信と同時に認識でき、迅速な対応が可能となる。とりわけ「のぞみ」では打ち上げ後にSバンドテレメトリ通信機能を喪失しており、しかもXバンドで再生データを送信中はリアルデータを送れない設計となっているため、この機能は重要である。

4) 探査機と地上局間の電波伝播時間を考慮した設計とすること。火星探査機「のぞみ」は最大では往復30分以上の通信時間を必要とするため、この時間差に対する考慮が各所で必要になる。「のぞみ」対応ISACS-DOCでは常に軌道ファイルデータを参照してこの調整を実施しているが、特に地上データと探査機データをあわせて使う場合には注意が必要である。

5) リアルデータと再生データを統一的に扱える時間管理を導入すること。具体的には探査機データに関しては探査機時刻を用いて、グラフなどの表示では両者が同一時間スケール上に一緒に表示されるようにする。受信レベル等の地上局データに関しては原則として地上時刻で表示する。

6) 運用担当者に無用の不安を与えないように表示される診断結果は高い確信度のものに限定し、そうでない場合には起こっている事象のみを提示すること。これは2.2.(4)項で述べたように「GEOTAIL」での経験から学んだ教訓である。

7) 診断範囲を広げ、かつ高精度化するために探査機のテレメトリ情報のみではなく、関連する地上局情報なども広く収集可能なシステムとすること。これも2.2.(1)で述べたとおり「GEOTAIL」から学んだ知見である。

8) 打ち上げ後の故障など予期せぬ事態に柔軟に対応するために、知識データベースの修正が容易な構造とすること。実際、「のぞみ」では推進系バルブの誤動作や「ガスリークの発生」、通信システムの一部故障等幾つかの新事態が発生しており、これらに対応した多くの知識変更がなされている。

9) 異常監視・診断上重要な事項は探査機の設計にも反映させること。これも2.2.(5)項で触れたように「GEOTAIL」衛星からの教訓である。

### 3.2. システム構成

図3に本監視・診断システムの構成を示す。

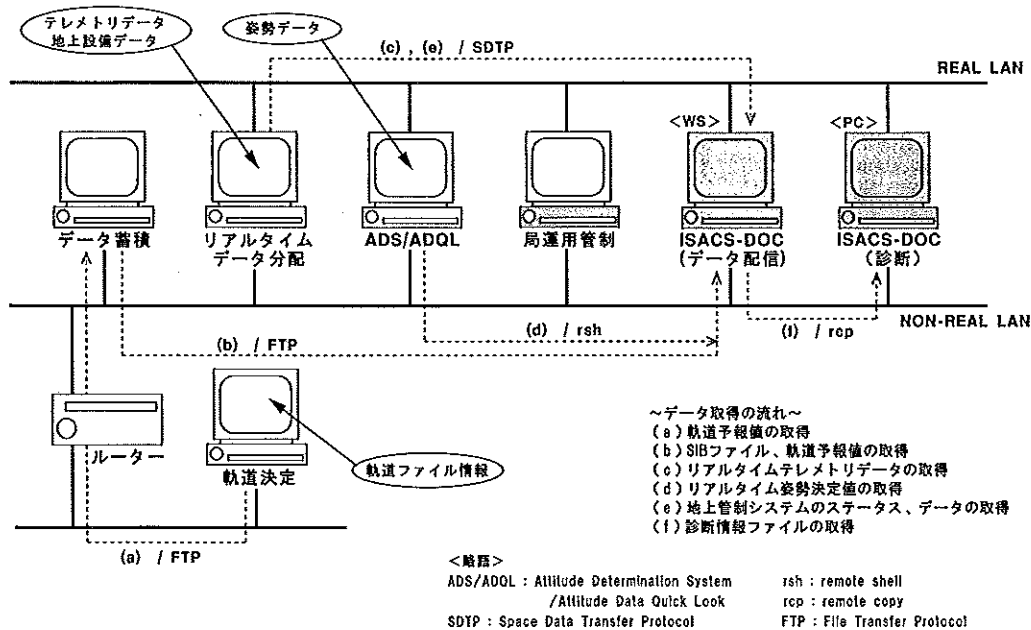


図3. 「のぞみ」対応ISACS-DOCシステム構成図



本診断システムは診断に必要な情報を収集するWS (ワークステーション) と診断作業そのものを受け持つPC (パーソナルコンピュータ) の2つの構成要素から成る。

(1) 診断データ収集機能

図3のWSでは最新テレメトリデータを始め、探査機の姿勢や軌道情報、探査機との通信を担う地上局情報等広範囲のデータを宇宙科学研究所の新地上管制システム [ 8, 10, 16 ] のネットワーク経由で自動的に収集する。またSatellite Information Base (SIB) と呼ばれる探査機からのテレメトリデータのフレーム、ワードの位置の定義や各データの閾値、さらに物理量データへの変換式等を定義したファイルを参照して、入手したデータを物理量に変換して、診断実行に必要な診断情報ファイルを作成する。上記の新地上管制システムの概略を図4に示す。

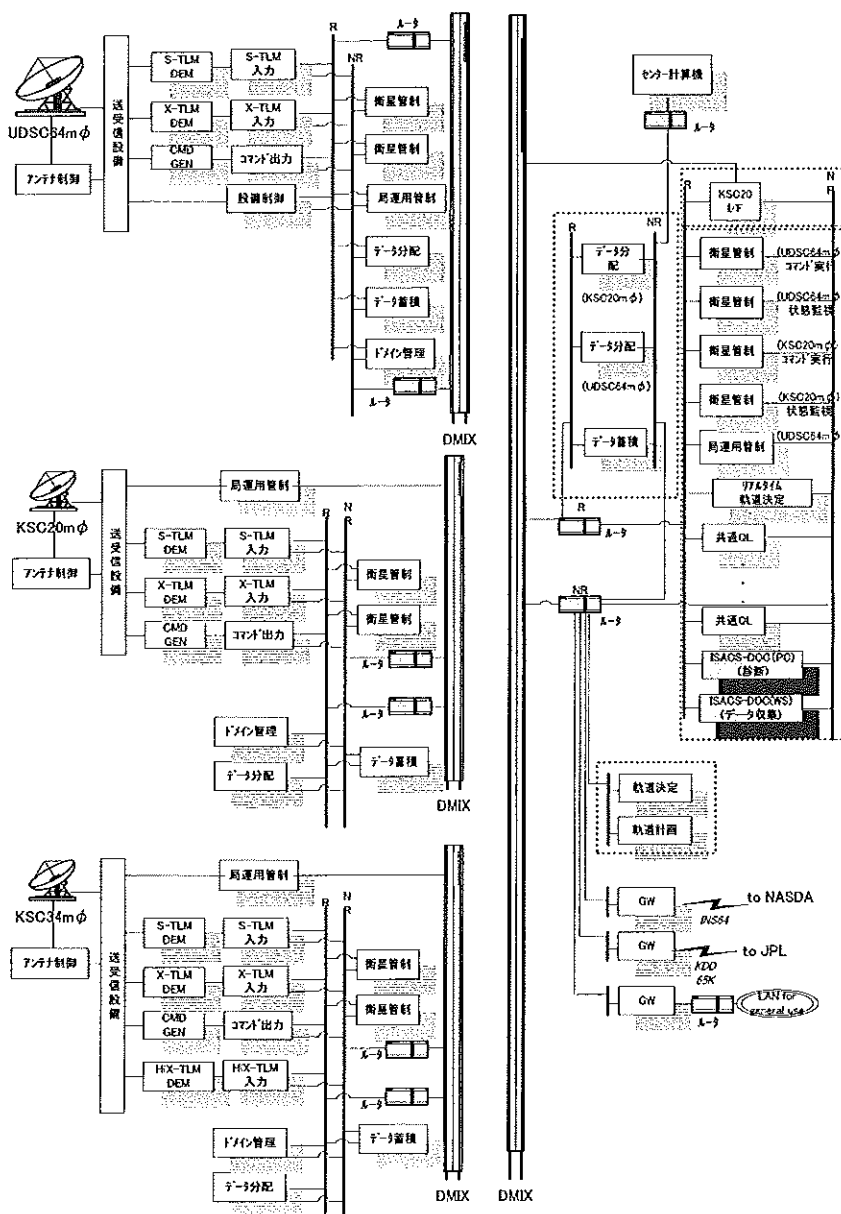


図4. 宇宙科学研究所新地上管制システム概略図

## (2) 診断機能

実際の診断そのものは図3のPCの中で実行される。この機能は構築費軽減のため、Windows NT上で動作する「まなでしくん」と呼ばれる市販のパッケージソフトウェアで実現している。この「まなでしくん」は知識データベースエディタ、推論実行、知識データベースの3つの標準的な機能を備えている。診断知識は木構造の形の知識群に整理され、それにあわせて知識を入力していくことにより、項目毎に診断の流れを設定できる。木構造の各分類ノード（節の部分）には、質問とその回答からなる成立条件が定義されている。診断の実行は本パッケージの推論機能がこの木構造をたどることにより行われる。「まなでしくん」では入力した知識の変更や新たな知識の追加はプログラムの中身に立ち入ることなく容易に可能となっている。実際のシステム構築では上記の標準機能以外に、かなりのカスタマイズも行われている。

## (3) 知識データベースの規模

ISACS-DOCの知識の内容は新たな知識の入手や探査機の状況の変化に応じて柔軟に変えられるため、その知識規模も常に変化しているが、2000年6月時点でのおよその規模は表1の通りである。すなわち、約610程度の質問が自動的に発行され、最大で460程度の異常を検知可能となっている。

表1. 「のぞみ」対応ISACS-DOCの知識データベース規模

		質問 (診断時チェック項目)	分類ノード			合計
			トップ	中間	結果(診断結果)	
共通部	全体管理	10	1	3		4
	通信系	146		6	63	69
	電源系	88		5	64	69
	軌道姿勢制御系	101		5	102	107
	HK	3		1	1	2
	グラフ	0		3	16	19
S I 部 (観測機名)	PSA	42		1	35	36
	PWA	64		1	61	62
	MPM	53		1	36	37
	MIC	34		1	29	30
	IMI	17		1	14	15
	MDC	16		1	14	15
	TPA	25		1	18	19
	NMS	13		1	12	13
	合計	612	1	31	465	497

## (4) 診断の流れ

「のぞみ」対応ISACS-DOCにおける診断実行の流れを図5に示す。図中、左半分のデータ収集機能は(1)で述べたWSで実施される部分で、ここでは常に診断に必要な最新の物理量に変換された1セット分のデータが準備される。このデータが準備されている場合には(2)で述べた右側のPC上で実行される診断機能により一定時間毎に上記データを収集し、診断が実行される。この繰り返し時間は自由に設定可能であるが、現状では診断実行に約2分を要するので、これに待機時間3分を加えた5分を繰り返し時間としている。診断に必要な新データが探査機運用終了等の理由で準備されなかった場合には、診断は自動的に待機状態となるが、再び診断データがそろった場合には自動的に再開される。

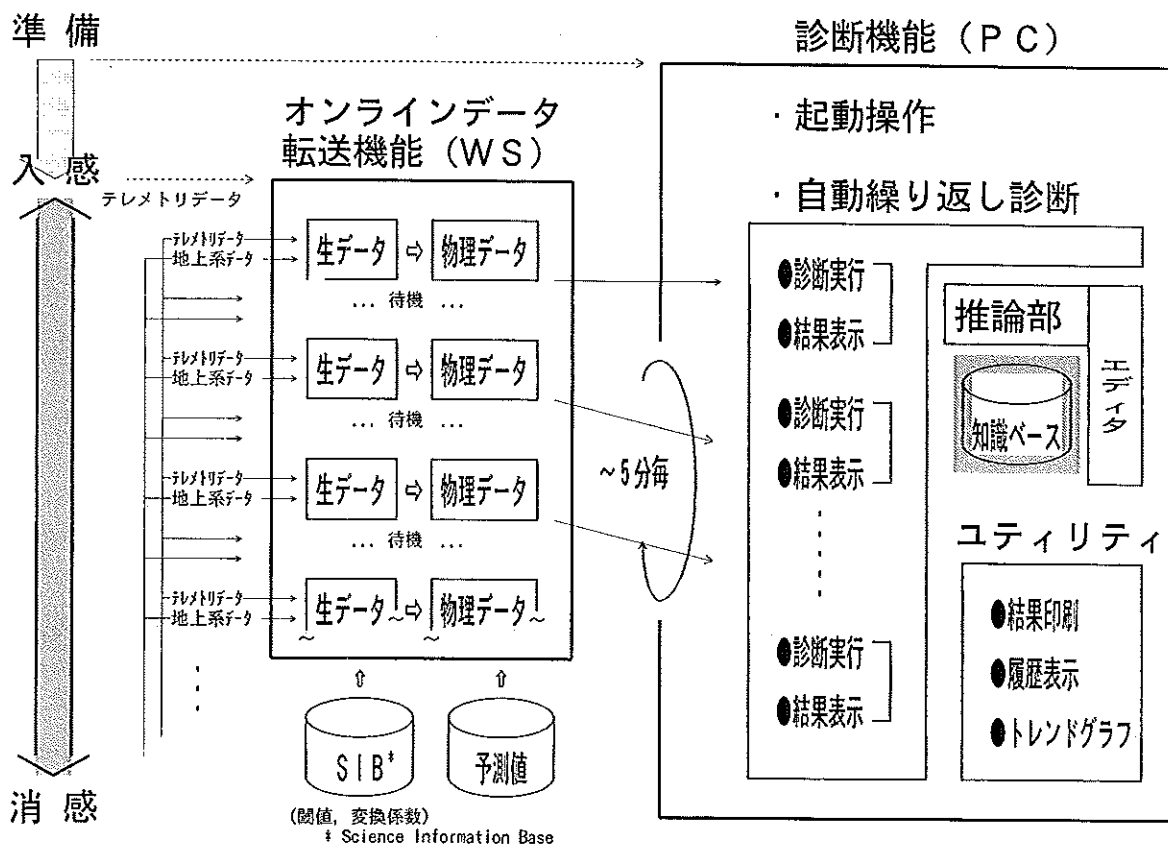


図5. 「のぞみ」対応ISACS-DOCにおける診断の流れ

#### 4. 「のぞみ」対応ISACS-DOCの運用状況と診断例

本システムは1998年7月4日に「のぞみ」が打ち上げられてから同年の12月までのおおよそ5ヶ月間は打ち上げ前に設定した知識と打ち上げ後の探査機の実状との整合，不足している知識の追加，オンラインデータ収集機能の調整等に当てられた。その後，さらに約5ヶ月間をかけて定常的な仮運用が実施され，この間にさらなる知識の詳細調整が行われた。1999年6月からは本運用が開始され，本システムの定常運用は「のぞみ」運用グループに移管された。この間，「のぞみ」には予期しなかった幾つかの重大な問題が発生したが，これらの多くを本システムは捉えている。

以下にこれまで「のぞみ」対応ISACS-DOCが捉えた幾つかの診断例を示す。これらには本運用開始前の結果も含まれている。

##### (1) TMS温度注意

本異常は「のぞみ」を打ち上げて間もなくして表示されたもので，搭載されたSバンド送信機TMSの温度がやや高めであるとの注意メッセージである。探査機温度が高めとなる地球近傍での熱設計上の僅かな誤差から起こったもので，TMSの許容温度範囲内であったが，その後注意深く温度監視が行われた。これはTMSの温度が予め設定された許容範囲を逸脱したと言う単純な例であり，従来からのクイックルック (QL) システムでも認識可能であるが，ISACS-DOCでは単に許容範囲を逸脱したことを知らせるのみではなく，図6に示すように，そのパス内での関係するデータの変化傾向や解説，必要な対処方法等も自動的に表示される。また許容値の設定変更も探査機の状況に応じて極めて容易に可能であり，さらに必要ならその変更を他の様々な条件や計算結果を利用して自動的に変えることも出来る。

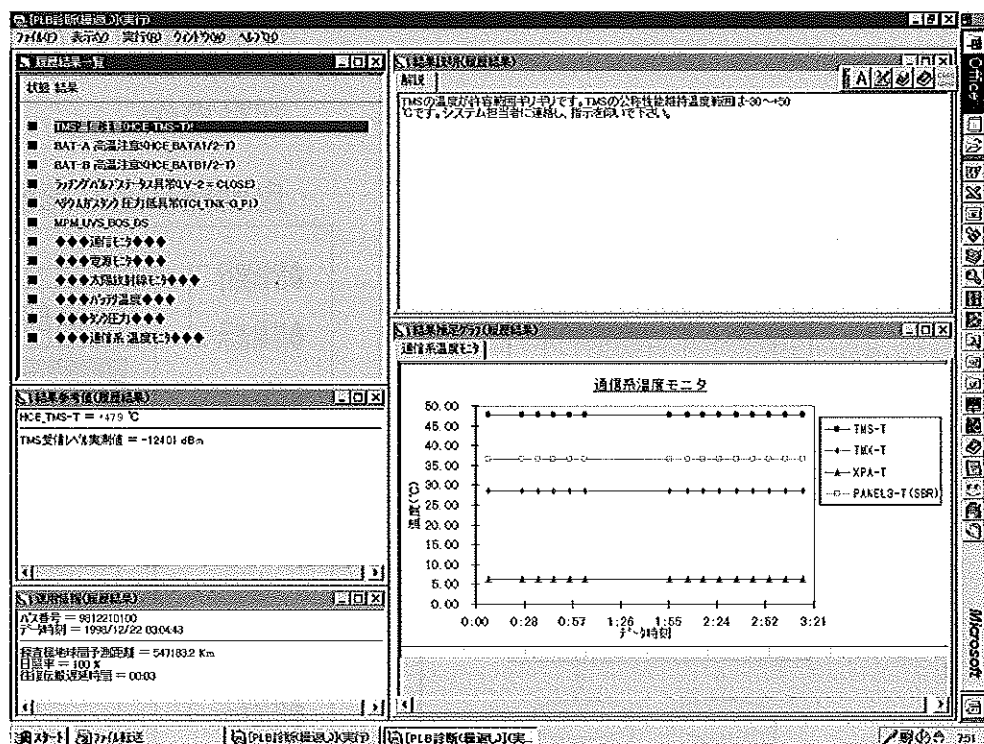


図 6. TMS温度注意診断画面

## (2) ラッチングバルブステータス異常

1998年12月、「のぞみ」がそれまでの地球一月間を周回する軌道を脱出して、火星に向けて飛び立つために実施した地球スイングバイ時での主エンジン噴射中に、酸化剤NTOを二液式エンジンに押し出すためのヘリウムガスを供給するラッチングバルブが完全に開かないというトラブルが発生した。この操作は「のぞみ」が地上局から非可視時間帯に実施する必要があったため、その瞬間を捉えて直ちに必要なコマンド送信を行う等の処置を施すことが出来なかったが、可視後にこの状況はISACS-DOCのスクリーン上にも直ちに異常項目として表示された。

## (3) BAT高温注意

「のぞみ」に搭載されている2つのバッテリーは5～15℃の比較的狭い温度範囲に制御されるように設計された。ISACS-DOCは15～30℃の温度に対しては高温注意、30℃以上の場合には高温異常警報を発行するように設定された。しかし、これまでの運用実績では探査機が太陽に近い距離にあるときには高温注意温度に達してしまうことは避けられないことがわかった。そこで運用担当者に余計な不安を与えないように、太陽—探査機間距離が1.7億km以下になっている場合には上記の高温注意温度範囲を自動的に25～30℃に変更されるようにした。この例は診断における単純な条件付加であるが、ISACS-DOCではより複雑な条件付けや、変更が容易であり、実際に各所でそのような設定がなされている。

## (4) ヘリウムガスリーク

1999年5月始め、「のぞみ」推進系のヘリウムガスが突然リークするという不具合が起こった。当日の運用が始まって間もなく、ISACS-DOCは推進系のヘリウムガス一次圧が低く、その圧力がなおも低下中であることを表示した。図8にその時のスクリーンを示す。直ちに関係者に緊急連絡され、必要なコマンドが送出されて、ガスリークが止められた。このトラブルによって搭載ヘリウムガスの一部を失ったが、火星探査計画には影響は殆どなかった。本ISACS-DOCはこのトラブルが発生した時点では仮運用中であつたこともあって、その時点では認識されなかったが前日の運用中に既にこの異常の兆候を捉えていた。図9はその時の診断画面で、ヘリウムガスの

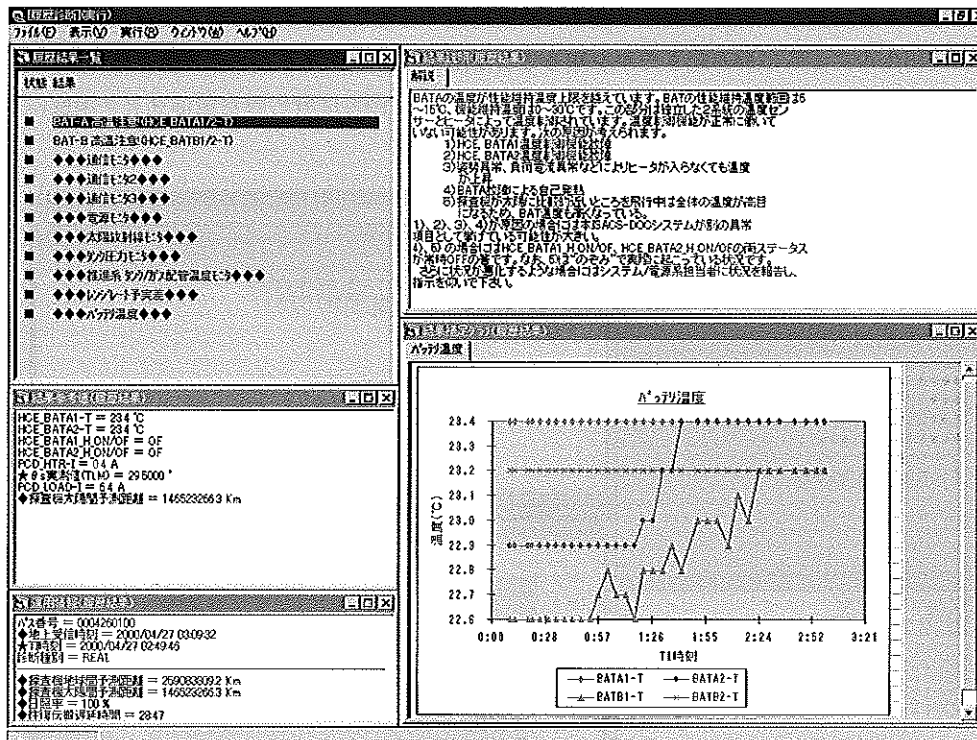


図 7. BAT高温注意診断画面

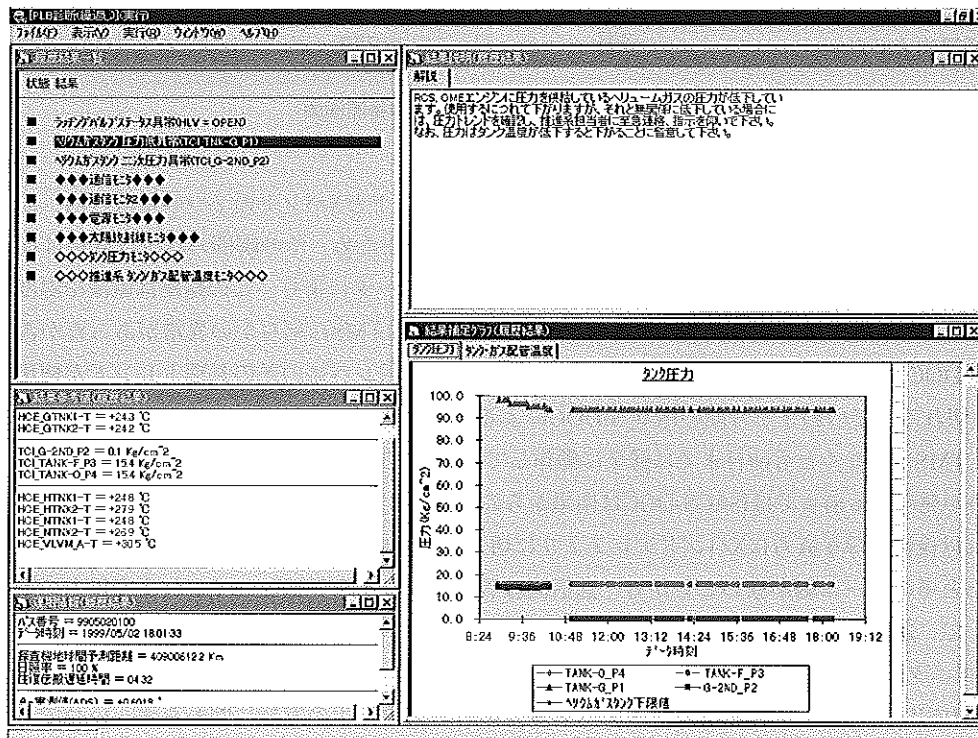


図 8. ヘリウムガス一次圧低下時の診断画面

二次圧が一時的に低下したことを警告している。一方、実際のリークの開始は地上局から非可視時間帯に発生したため、その現場をリアルタイムで捉えることは出来なかった。このことは探査機のデータレコーダを再生中

においても、そのデータに対して可能な範囲で直ちに診断可能であることが重要であると言うことを示している。この機能があれば再生中に直ちに何が起きたかを知ることが出来るからである。この教訓は既に反映済みである。また、このトラブルを契機に推進系の圧力監視機能の強化を図り、例えば警告設定値はタンク温度によって自動的に補正調整され、僅かなリークも見逃すことなく検知可能とした。

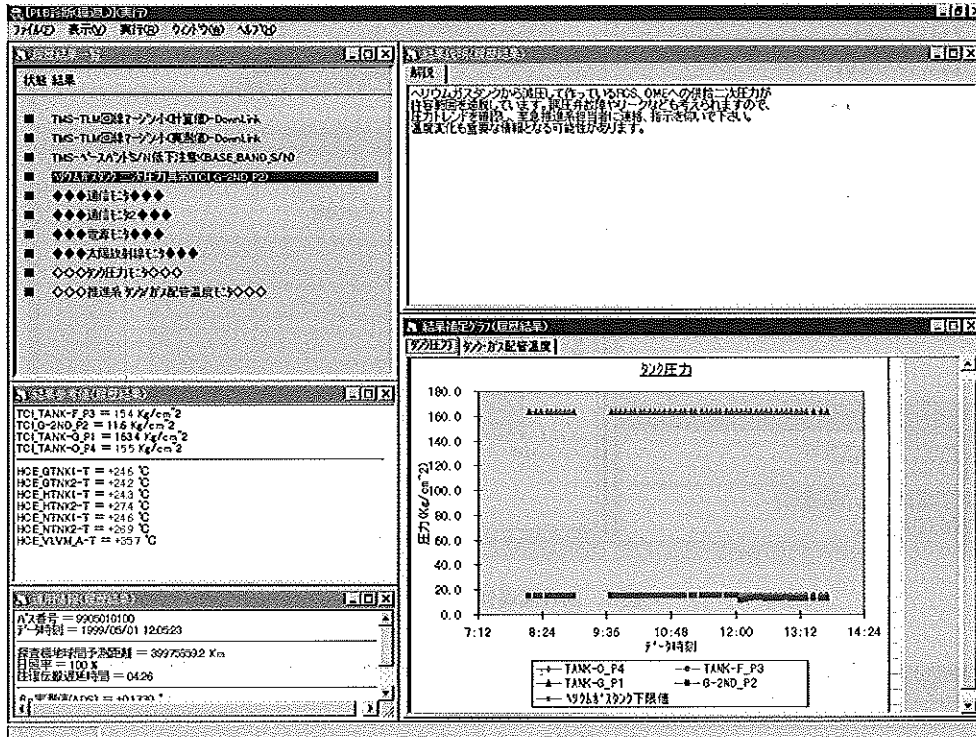


図9. ヘリウムガスリーク前日の診断画面

#### (5) TMS信号断

1999年7月5日、「のぞみ」からの情報を地球に伝達するSバンドとXバンドの2つの電波の内、前者の方が突然途絶えてしまった。途絶時間は地上局から非可視時間帯であったため、その瞬間の状況は直接は捉えられていない。しかしXバンドを使つての搭載データレコーダからの再生データにより、この途絶は電流や温度変化等の特別な前兆もなく突然発生したことが判明している。また前日までにTMSに何らかの異常があったか否かの判定の一つにISACS-DOCで常時行われている予測受信レベルと実際の着信レベルの差の長期トレンドが使用された。図10はTMSが切れるまでの約2ヶ月間のISACS-DOCによる簡易計算値と実測値をグラフにしたものである。このグラフからもTMSは少なくとも前日までは健全に動作していたことが窺える。

この不具合が発生する前まではISACS-DOCは衛星からの情報源として、原則Sバンドテレメトリ情報を使用していたが、これ以後情報源を直ちにXバンドテレメトリに切り替えている。またXバンド電波が唯一の探査機情報源となったこととそのビーム幅が狭いことから、通信回線管理は「のぞみ」にとってこれまで以上に重要となったことを考慮して、通信回線評価機能の強化を図った。

#### (6) 常時モニタ画面

「のぞみ」対応ISACS-DOCでは常時モニタすべき重要項目は異常発生の有無に関わらず、いつでも参照できるようにしている。この項目も探査機の状況に合わせて変更しているが、2000年6月時点では通信モニタ、通信モニタ2、通信モニタ3、電源モニタ、バッテリー温度モニタ、太陽放射線モニタ、タンク圧力モニタ、推進系タンク/ガス配管温度モニタ、レンジレート予実差モニタ、 $\theta$ eモニタの10項目を設定している。そのうちの幾つかを以下に例示する。

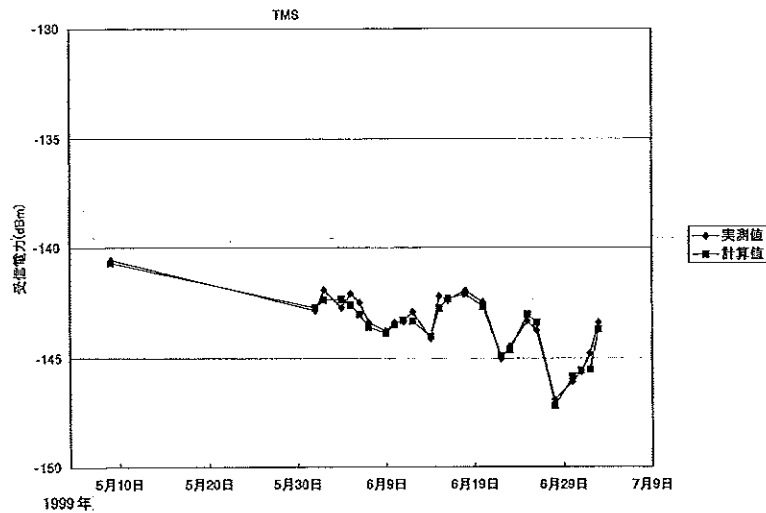


図10. ISACS-DOCの通信回線簡易評価機能によるTMS受信レベルの計算値と実測値の変化履歴

1) 通信モニタ

超遠距離通信を必要とする火星探査機「のぞみ」にとって極めて重要な探査機と地上局を結ぶ通信回線の状況を表示している。図11にその1例を示す。同図ではISACS-DOCで行っているアップリンク、ダウンリンクの回線計算から予測される受信レベルとそれぞれの実測値を常時表示し、回線全体の健全性を常時監視可能にしている。なお、この回線計算においてはその算出に必要な使用アンテナ、送信電力、探査機—地球間距離、探査機姿勢等の情報はオンラインで取得し、複雑なアンテナパターンなどは打ち上げ前の試験データを基に近似式の形で取り入れている。また計算値と予測値がある程度以上離れた場合にはこの常時表示項目とは別に回線異常の診断結果も表示される。

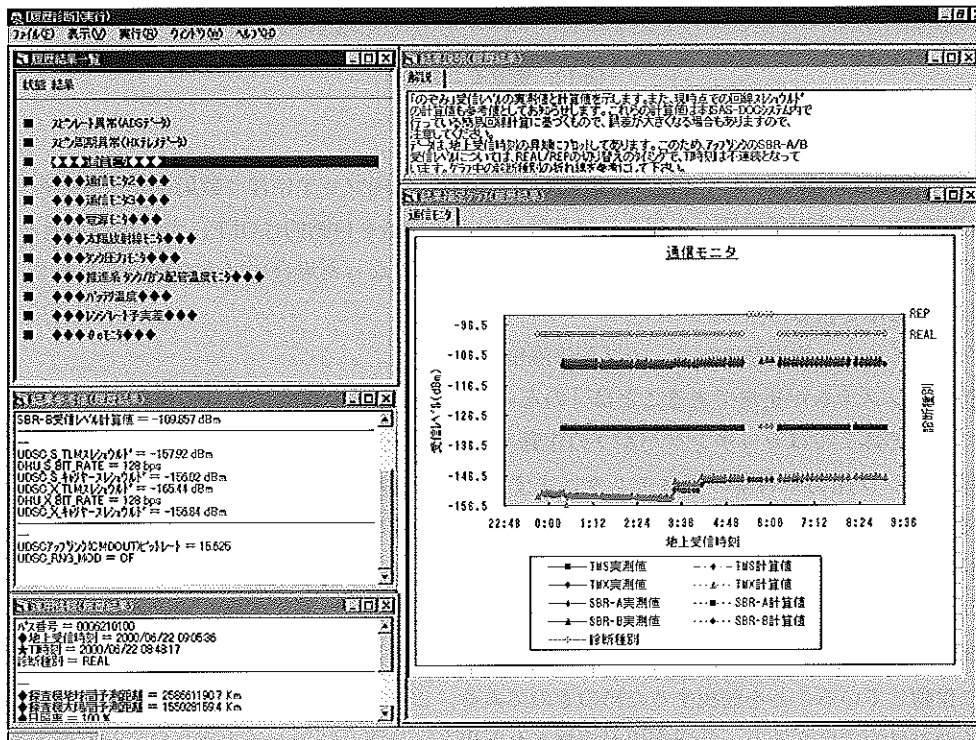


図11. 通信モニタ画面

## 2) 電源モニタ/バッテリー温度モニタ

他の衛星/探査機と同様、電源システムが正常に作動していることは「のぞみ」にとって、最重要項目の1つである。電源モニタでは太陽電池発生電流、バス電圧、バッテリー電圧/電流、負荷電流等のトレンドを常にモニタ可能にしている。また、「のぞみ」の太陽-探査機間距離は大幅に変化する事を考慮してバッテリー温度モニタも常時表示項目に加えている。電源モニタの1例を図12に示す。

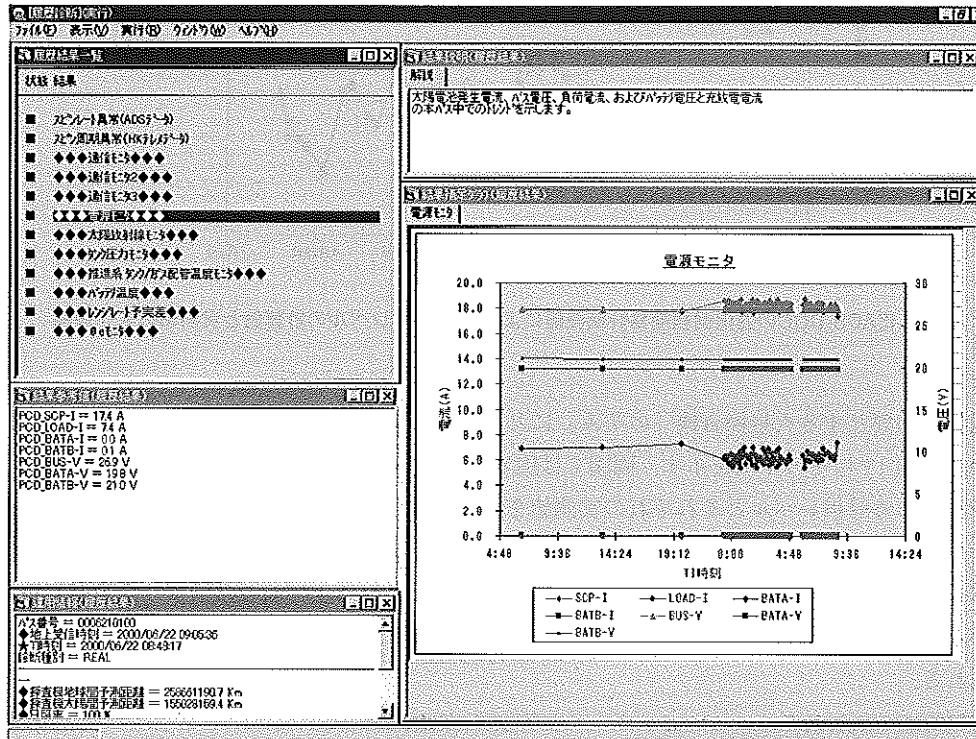


図12. 電源モニタ画面

## 3) 太陽放射線モニタ

「のぞみ」には太陽放射線モニタ (SPM) が搭載されており、太陽フレアに伴う放射線が常時監視可能となっている。また設定値以上の放射線が襲った場合には危険性のある機器を自動的にOFFにする事が可能となっている。図13はこのモニタ画面の1例である。勿論、実際に機器がOFFになった場合にはその状況も本モニタ画面とは別に診断結果として表示される。

## 4) タンク圧力モニタ/推進系タンク・ガス配管温度モニタ

軌道・姿勢制御システムが正常であることは「のぞみ」ミッションの達成にとって重要であることは言うまでもない。特に「のぞみ」ではラッチングバルブの作動不良や、ヘリウムガスのリーク等重大な不具合を経験しており、推進系のタンク圧力や各部の温度モニタはますますその重要性を増している。これらのことからISACS-DOCに於けるこれらについての監視機能は強化されている。図14にタンク圧力モニタ画面の1例を示す。

## 5) レンジレート予実差モニタ

「のぞみ」の軌道はレンジ計測システムとレンジレート計測システムによって得たデータを基に算出される。本モニタはほぼ常時計測を実施しているレンジレート計測値と予報値との差を常時監視して、レンジレート計測システムが正常に作動していることを監視するためのものである。これはあくまでレンジレート装置の計測機能をマクロに監視するのが目的ではあるが、軌道変更が実施された場合には概ね制御が予定通りに行われたか否かの監視にも役立つ。図15に2000年6月22日に実施された軌道修正時のレンジレート予実差モニタ画面の1例を示す。



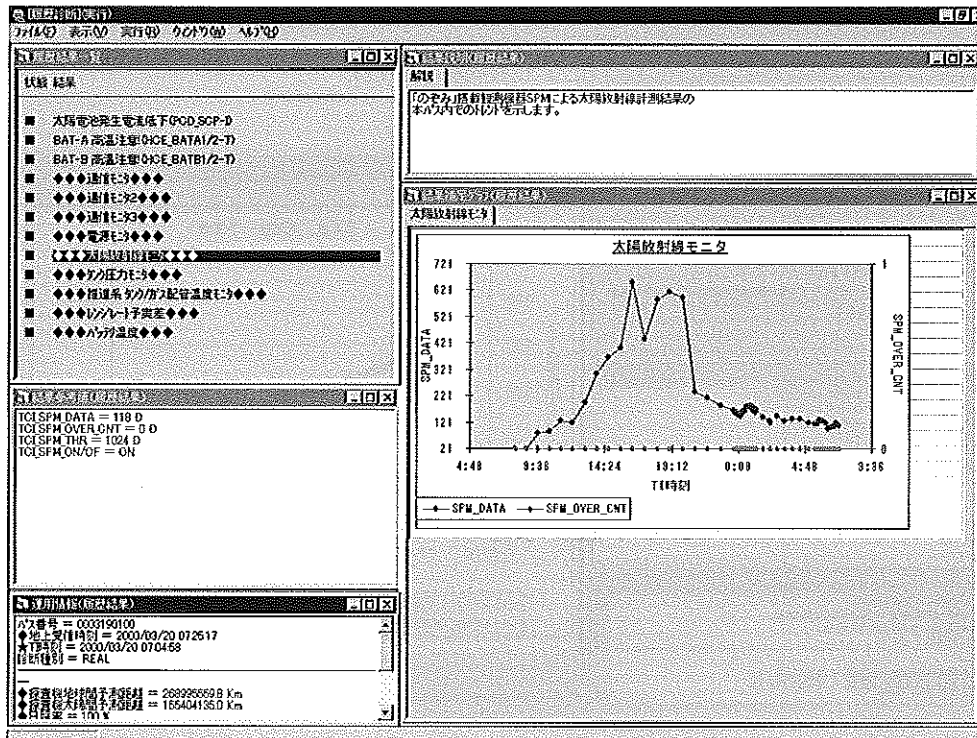


図13. 太陽放射線モニタ画面

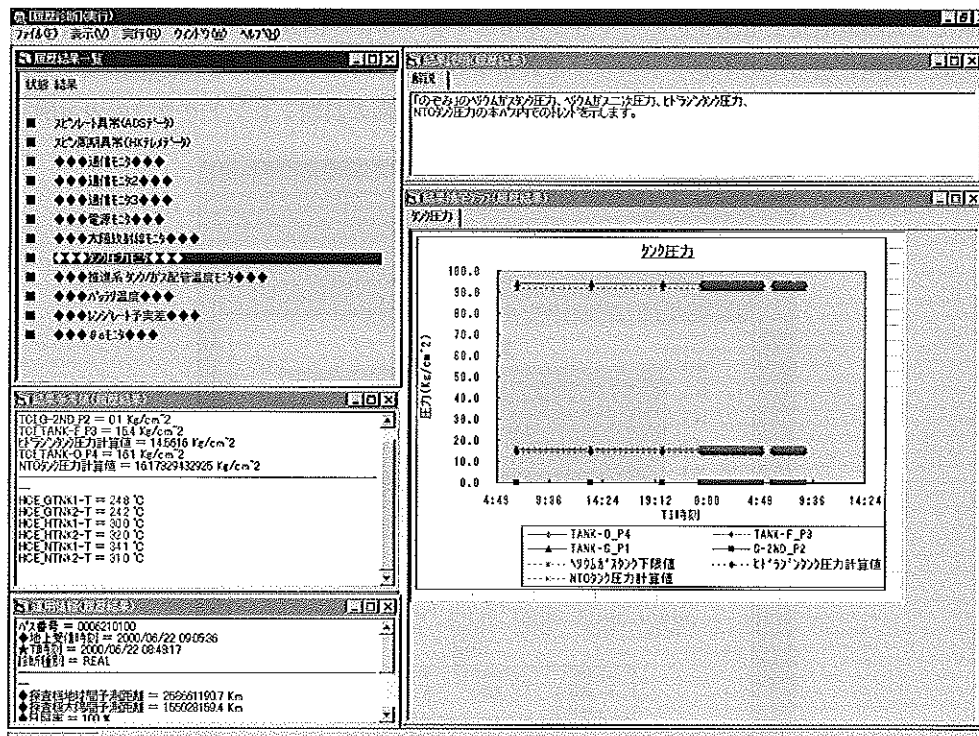


図14. タンク圧力モニタ画面

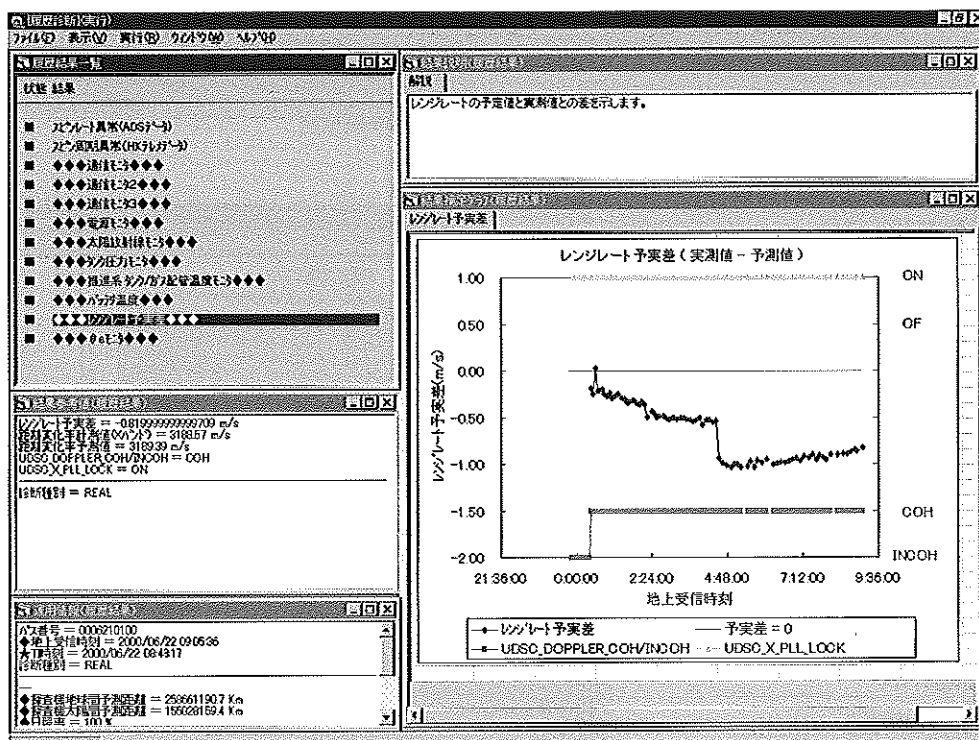


図15. レンジレート予実差モニタ画面

(7) 長期トレンドグラフ

「のぞみ」は太陽との距離が大略、太陽—地球間距離から太陽—火星間距離までの間をゆっくりと変化する。これに伴って温度や太陽電池発生電流等がゆっくりと変化をする。ISACS-DOCはこのようなゆっくりした変化の傾向を捉えるため、長期に亘ってのトレンドグラフを表示する機能を持っている。この機能により機器の長期間における特性変動なども捉えることが出来る。図16は電源モニタ画面の長期トレンドグラフの表示例である。

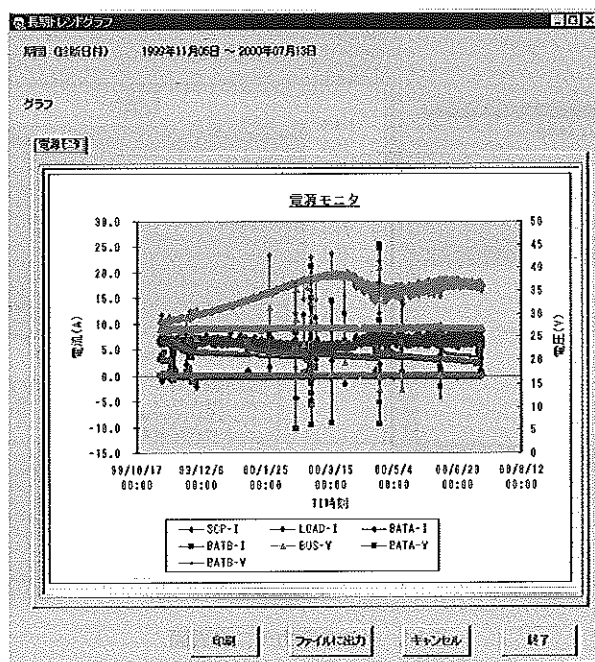


図16. 電源モニタ画面長期トレンド

## 5. 今後への課題

「のぞみ」対応ISACS-DOCではこれまでの運用経験を生かして様々な改善を行ってきた。現時点で概ね熟成段階に達していると思われるが、それでも幾つかの改善すべき項目が残されている。ここでは目前の具体的な改善項目と長期的に見た今後の検討課題について触れる。

### (1) 現「のぞみ」対応ISACS-DOCでの要改善項目

#### 1) システム安定化

現在のシステムは基本的には完全無人化を意図しており、システム再立ち上げを不要にすることを狙っていた。しかし実際には何らかの原因で数日間連続運用すると動作が重くなる現象がある。これは基本ソフト側の問題である可能性が大であるが、定期的に「まなでしくん」を再立ち上げすれば正常復帰する。これについては対応手段を模索中である。

#### 2) 履歴診断、長期トレンド機能とリアル診断機能の分離

これまで述べたように、「のぞみ」対応ISACS-DOCには過去の診断を再現する機能や長期トレンドを表示する機能がある。現在はこれらの機能は1つのPCで行っているため、「のぞみ」の運用中にこれらを実施するとリアルタイムの診断間隔が延びるなどの影響を及ぼす。今後リアル診断と履歴診断/長期トレンド表示機能は別々のPCで実現できればと考えている。

#### 3) 関係者への自動通知機能

NASA Goddard Space Flight CenterのJulia Breed等は運用システムで何らかの異常が見つかったときには自動的に関係者に通知するシステムを実用化している[20]。通知の方法も電話、Web、ページングシステム、電子メール等複数の手段が確立されている。宇宙科学研究所に於ける衛星・探査機運用システムにも今後はこのような考え方を導入する必要があるように思える。

#### 4) 探査機シミュレーション機能

ISACS-DOCのリミット値の設定に探査機のシミュレータを導入し予測されるステータス又は値を自動設定する考え方は「GEOTAIL」対応ISACS-DOC構築の時点から既に議論され、実際にも一部構築が試みられた。この中ではISACS-PLNとも連動させ、実際の運用計画と同じ動作を模擬することも考えられていた。これが実現できれば実際の運用前に状況を模擬できるので非常に有効である。しかし開発コストやその信頼性等を含めた様々の理由から実際の衛星・探査機を模擬できる段階には至っていない。少なくとも熱、電力、通信の3つは模擬しようと言う考えであったが、現状では簡易的な通信回線の予測計算がISACS-DOC自身の中に、また大雑把な電力収支評価がISACS-PLNの中に組み込まれ実用化されているのみである。今後開発コストの低減も含めた実現可能なシミュレータの検討が必要と思われる。

### (2) 長期的検討課題

#### 1) 近地球周り衛星対応システムの開発

これまでのところ近地球周り衛星対応のISACS-DOCは開発実績がない。これまでの経験を生かすと同時に、近地球周り特有の条件を加味した衛星異常監視・診断システムの開発の必要性がでてくるものと思われる。

#### 2) 自律化衛星/探査機対応システムの開発

今後「MUSES-C」のように自律機能が進んだ衛星/探査機対応の異常監視・診断システムの開発が必要になってくるものと思われる。「MUSES-C」の例では巡航時の大部分の時間で地上局との通信回線は非常に細く、診断に必要なデータを地上局にて迅速に取得するには困難が予想されるが、この場合でも基本的な探査機状況を知るための重要情報は濃縮されて送られてくることになり、探査機上での出来事を可能な限り迅速に知る上で有効な地上診断システムの構築はある程度まで可能と考える。但し、探査機の自律機能などにより情報がどのように集

約されているかを正しく理解し、これと整合のとれた知識データベースの構築が重要と思われる。また「のぞみ」対応ISACS-DOCでも実現している、テレメトリデータと独立に入手可能なレンジレートデータを使う軌道情報の常時監視機能などはMUSES-Cに搭載したイオンエンジンによる加速状況を定常的に監視する上でも有益と思われる。NASAのビーコンモニタ運用実験 [21] もこのような考え方の実践例と考えられる。このようなシステムでは通信回線の制限や搭載自律システムとの融和等から、これまで以上に探査機設計と一体となった設計が求められるものと思われる。

## 6. おわりに

宇宙科学研究所が現在運用中の衛星／探査機のうち、磁気圏観測衛星「GEOTAIL」ならびに火星探査機「のぞみ」の定常運用に使用されている異常監視・診断システム (ISACS-DOC) の開発経緯、開発思想、システムの具体的内容および現在までの運用状況について述べた。本システムはこれまでに様々な異常状況を迅速に知らせる役割を果たしてきており、今後ミッション終了までその役目を果たし続けるものと思われる。特に我が国最初の惑星探査機「のぞみ」はこれまでに多くの苦難を乗り越えてきており、またその運用期間も打ち上げ当初の予定より大幅に延びている。このような厳しい状況下で所期のミッションを無事達成するためにも、本システムの役割はますます重要となっている。今後も、本システムの継続的な改善を続ける予定である。図17に管制室で「のぞみ」の健康状態を常時監視するISACS-DOCの写真を示す。



図17. 管制室で稼働中の「のぞみ」対応ISACS-DOC

## 7. 謝辞

エキスパートシステムが有用なものになるか否かは集められた知識が如何に適切な内容であるか否かに掛かっている。有用な知識は、該当する機器を知り尽くした人によってのみ提供しうるもので、多くのノウハウを含む極めて貴重なものである。本論文で述べたISACS-DOCが実際に役立つ段階まで成長出来たのは、多くの関係者にこのような貴重な情報を惜しみなく提供して頂いたことが最大の要因である。情報提供を頂いた「GEOTAIL」および「のぞみ」に関係された各観測機器担当の方々、共通機器、地上システムを担当された宇宙科学研究所の関係各位、そして日頃から多大なるご支援を頂いている日本電気、富士通、三菱重工等を始めとする数多くの関係各社の方々に心より感謝する。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] L. G. Hull and P. M. Hughes : "CLEAR : Communication Link Expert Assistance Resource", Proceedings of 1987 Goddard Conference on Space Applications of Artificial Intelligence (AI) and Robotics, 1987 .
- [ 2 ] S. A. Mouneimne : "Mission Telemetry System Monitor: A Real-Time Knowledge-Based System", 1988 Goddard Conference on Space Applications of Artificial Intelligence, pp. 207 - 212 , May 1988 .
- [ 3 ] R. G. Martin, D. J. Atkinson, M. L. James, D. L. Lawson, and H. J. Porta : "A Report on SHARP and the Voyager Neptune Encounter", JPL Publication 90 - 21 , August, 1990 .
- [ 4 ] P. M. Hughes and E. C. Luczak : "The Generic Spacecraft Analyst Assistant (GenSAA) : A Tool for Automating Spacecraft Monitoring with Expert Systems", 1991 Goddard Conference on Space Applications of Artificial Intelligence, pp. 129 - 139 , May, 1991 .
- [ 5 ] P. M. Hughes, G. W. Shirah, and E. C. Luczak : "Advancing Satellite Operations with Intelligent Graphical monitoring Systems", AIAA Computing in Aerospace Conference, 9 th, San Diego, CA, pp. 69 - 76 , Oct. 1993 .
- [ 6 ] I. Nakatani, M. Hashimoto, N. Nishigori, and M. Mizutani : "Diagnostic Expert System for Scientific Satellite", 44 th Congress of the International Astronautical Federation, Graz, Austria, Oct. 1993 .
- [ 7 ] K. Uesugi, I. Nakatani, T. Mukai, M. Hashimoto, T. Obara, and N. Nishigori : "ISACS of ISAS-an Intelligent Satellite Control Software-, International Symposium on Spacecraft Ground Control and Flight Dynamics-SCD 1 ", Sao Jose dos Compos, Brazil, Feb. 1994 .
- [ 8 ] 山田隆弘 : 「分散型衛星運用システムの一構成法 (その1) システムの基本構成要素」, 電子情報通信学会技術報告, SANE 94 - 48 , 1994 年 9 月
- [ 9 ] I. Nakatani, M. Hashimoto, T. Mukai, T. Obara, and N. Nishigori : "A Scheduling and Diagnostic System for Scientific Satellite GEOTAIL Using Expert System", i-SAIRAS, Pasadena USA, Oct. 1994 .
- [ 10 ] Takahiro Yamada : "Architecture of Distributed Multimission Operations System", Third International Symposium on Space Mission Operations and Ground Data Systems, pp. 1317 - 1324 , November 1994 .
- [ 11 ] M. Lewis, F. Girourd, F. Kronberg, P. Ringrose, A. Abedini, D. Biroscak, T. Morgan, and R. F. Malina : "Lessons Learned from the Introduction of Autonomous Monitoring to the EUVE Science Operations Center", 1995 Goddard Conference on Space Applications of Artificial Intelligence and Emerging Information Technologies, pp. 229 - 235 , May 1995 .
- [ 12 ] 橋本正之, 西郡直実, 水谷光恵 : 「GEOTAIL衛星異常診断システム」, 宇宙科学衛星シンポジウム, 1995 年 6 月
- [ 13 ] M. Hashimoto, N. Nishigori and M. Mizutani : "A Monitoring and Diagnostic Expert System for Scientific Satellite GEOTAIL", 20 th International Symposium on Space Technology and Science, Gifu Japan, May 1996 .
- [ 14 ] 橋本正之, 西郡直実, 水谷光恵 : 「科学衛星GEOTAIL異常監視診断システムの運用成果」, 第 40 回宇宙科学技術連合講演会講演集, pp. 223 - 224 , 1996 年 10 月
- [ 15 ] M. Hashimoto, N. Nishigori, and M. Mizutani : "Operating Status of Monitoring and Diagnostic Expert System for Geomagnetic Observation Satellite GEOTAIL", 2 nd International Symposium on Reducing the Cost of Spacecraft Ground Systems and Operations, Oxford, UK, July 1997 .
- [ 16 ] Takahiro Yamada : "Cost Effective Development of Communication Systems for Space Operations", 2 nd International Symposium on Reducing the Cost of Spacecraft Ground Systems and Operations, pp. 12.1 - 12.7 , July 1997 .
- [ 17 ] M. Hashimoto, N. Nishigori, and M. Mizutani : "Monitoring and Diagnostic Expert System for Scientific Spacecraft : Evolution for PLANET-B Probe", 21 st International Symposium on Space Technology and Science, Omiya, Japan, May 1998 .
- [ 18 ] 橋本正之, 長木明成, 西郡直実, 水谷光恵 : 「火星探査機PLANET-B (のぞみ) に向けての状態監視/診断システムの構築」, 第 42 回宇宙科学技術連合講演会, 1998 年 10 月
- [ 19 ] M. Hashimoto, N. Nishigori, and M. Mizutani : "Monitoring and Diagnostic Expert System for Mars Probe NOZOMI", the 3 rd International Symposium on Reducing the Cost of Spacecraft Ground Systems and Operations, Mar. 1999 .
- [ 20 ] J. Breed, P. Baker, Kai-Dee. Chu, C. Starr, J. Fox, and M. Baitinger : "The Spacecraft Emergency Response Systems (SERS) For Autonomous Mission Operations", the 3 rd International Symposium on Reducing the Cost of Spacecraft Ground Systems and Operations, Mar. 1999 .
- [ 21 ] R. Sherwood, J. Wyatt, H. Hotz, A. Schlusmeyer, and M. Sue : "Lessons Learned During Implementation and Early Operations of the DS 1 Beacon Monitor Experiment", the 3 rd International Symposium on Reducing the Cost of Spacecraft

- Ground Systems and Operations, Mar. 1999.
- [22] M. Hashimoto, N. Nishigori, and M. Mizutani : "Anomaly Detective Ground Support System for Mars Probe NOZOMI", 5 th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, Noordwijk, The Netherlands, pp. 483 - 489, June 1999.
  - [23] A. Donati, E. Romani, and M. Aynsley : "INTELMOD: Artificial Intelligence in Support of Mission Operations Tasks", 5 th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, Noordwijk, The Netherlands, pp. 477 - 482, June 1999.
  - [24] 橋本正之, 長木明成, 西郡直実, 水谷光恵 : 「火星探査機PLANET-B (のぞみ) に向けての状態監視/診断システムの構築 (2)」, 第43回宇宙科学技術連合講演会, 99-2D12, 1999年10月
  - [25] M. Hashimoto, A. Choki, N. Nishigori, and M. Mizutani : "Running Status of Monitoring and Diagnostic Expert System for Mars Observer NOZOMI", 22 nd International Symposium on Space Technology and Science, Morioka, Japan, June 2000.

## 既 刊 行 物

- 第 92 号 (1997 年 3 月) X線天文衛星「あすか」による活動銀河核におけるソフトX線  
エクセス
- 第 93 号 (1997 年 3 月) 「さきがけ」で観測された磁場データの一次処理法：惑星間空  
間磁場と磁気バイアス・磁気オフセットの分離
- 第 94 号 (1997 年 3 月) ロケット搭載用窒素振動温度計測器の開発に関する基礎研究
- 第 95 号 (1997 年 8 月) 熱圏下部の窒素分子振動温度、回転温度および数密度—観測ロ  
ケット S-310-24 号機による観測—
- 第 96 号 (1997 年 8 月) 自由ピストン 2 段膜衝撃波管の試作
- 第 97 号 (1997 年 9 月) Space Flyer Unit (SFU) で計測されたガス環境
- 第 98 号 (1997 年 11 月) 惑星間空間衝撃波による電子フェルミ加速
- 第 99 号 (1998 年 2 月) レールガン・二次アークの挙動
- 第 100 号 (1998 年 3 月) 弾性振動に起因するViperロケットの軌道分散
- 第 101 号 (1998 年 6 月) 科学衛星「はるか」のアンテナ展開実験
- 第 102 号 (1999 年 2 月) 天文観測用科学衛星の姿勢決定系におけるカルマンフィルタ
- 第 103 号 (1999 年 3 月) カプセル型物体の動的不安定性についての実験的研究
- 第 104 号 (1999 年 3 月) ロケット搭載用テレビジョンシステム
- 第 105 号 (1999 年 10 月) S-310-27 号機による中層大気水蒸気密度の測定
- 第 106 号 (1999 年 12 月) S-310-27 号機によるDCプローブ測定—ES層中の電子温度  
について—
- 第 107 号 (2000 年 2 月) SEPACプロジェクトのエンジニアリングとマネジメント
- 第 108 号 (2000 年 2 月) 飛行時間法を用いた中性ガス質量分析器の開発
- 第 109 号 (2000 年 3 月) 金星ホールの生成機構に関する一考察
- 第 110 号 (2000 年 8 月) 臼田宇宙空間観測所水素メーザ標準周波数時刻システム
- 第 111 号 (2000 年 10 月) 臼田宇宙空間観測所用Xバンドン冷却低雑音増幅器

---

## 宇宙科学研究報告

第 112 号

2000 年 10 月

発行者 宇宙科学研究所  
〒229-8510 神奈川県相模原市山野台 3-1-1  
電話 (042) 759-8009

印刷社 株式会社 ワークワン  
〒229-1124 神奈川県相模原市田名 10213-6  
電話 (042) 778-6765

---

*IAS*