

2011.3.25/ No. 209

小型ソーラー電力セイル実証機「IKAROS」の地上系に関して

佐伯 孝尚、船瀬 龍（月・惑星探査プログラムグループ（JSPEC））

1. ソーラー電力セイル実証機「IKAROS」

ソーラー電力セイル実証機「IKAROS」は2010年5月21日に、金星探査機「あかつき」とともにH-IIA ロケットにより打ち上げられました。図1に、IKAROS のミッションシーケンスの概要を示します。IKAROS の主なミッションは大型膜面の展開実証、薄膜太陽電池による発電、光圧による加速の実証です。IKAROS は太陽指向のスロースピン状態でロケットから分離された後、所定の姿勢制御を行い、先端マス開放、スピニングアップ、1次展開を経て、6月9日に2次展開を実施し、膜面の完全展開と光圧による加速を確認しました。また、薄膜太陽電池による発電についても確認できました。

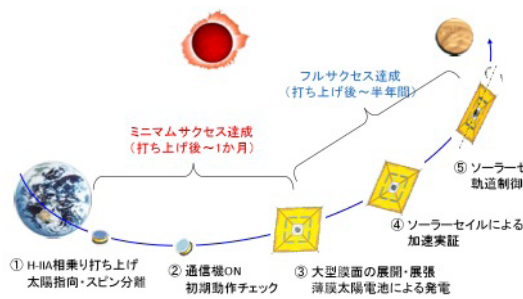


図1：IKAROS ミッションの概要

IKAROS は通常のスピニング衛星と異なり、オンボードのデータ処理のみでの姿勢決定は行っておらず、地上系でのデータ処理を含めた姿勢決定を行い、姿勢の運用を行っております。また、表面に金属（アルミニウム）が蒸着された大型のセイル膜面があるため、地球方向と膜面方向が重なる時期には通信の状態が悪くなることが予め分かっていました。そのような時期には通常の意味でのテレメトリ送信は行わず、電波の強弱によって確実に情報を伝える特別な通信モード（ビーコン運用）でIKAROS の状態を取得し、運用を行ってきました。本稿では、IKAROS 特有の地上系データ処理の例として、IKAROS の姿勢決定系と、ビーコン運用の仕組みについて紹介したいと思います。

2. IKAROS の姿勢決定系

IKAROS のオンボードの姿勢センサとしては1) 太陽センサと2) レートジャイロ（3軸）があります。このうちレートジャイロについては、展開時や姿勢制御時の本体の揺れを検知するものであり、スピニング軸が慣性空間においてどこを向いているかの決定（姿勢決定）には利用していません。そのため、オンボードの姿勢決定の為にセンサとしては太陽センサのみになります。通常のスピニング衛星は、この太陽センサに加え、スタースカナ等を搭載してオンボードで姿勢決定を行うのですが、IKAROS では一風変わった方法で姿勢決定を行っています。その方法とは、IKAROS の通信用の電波のドップラー周波数を解析して地球角を推定し、オンボードで得られた太陽角データと併せて姿勢決定をするという方法です。

IKAROS 搭載の X 帯アンテナは、XLGA1, XLGA2, XMGA

の3種類あり、全て図2に示すように、スピニング軸からオフセットした位置に搭載されています。そのため、地球から見るとスピニングによってアンテナが近づいたり遠ざかったりしているように見えて、通信の電波の周波数が変化します。アンテナと地球の相対速度変化をドップラー計測により取得し、その振幅からスピニング軸が地球方向に対してどれだけ傾いているか（地球角）を知ることができます。図3にスピニングモジュレーションのかかったドップラー信号を示します。ドップラーデータがIKAROS のスピニングの周期に同期して振動していることが分かります。この振幅から地球角を推定することができます。また、スピニングの周期についても同様に知ることが可能です。

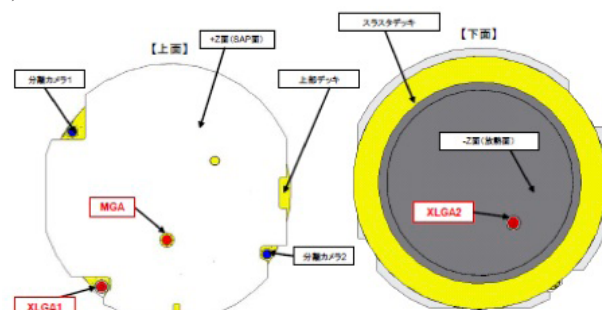


図2：IKAROS 搭載アンテナ位置

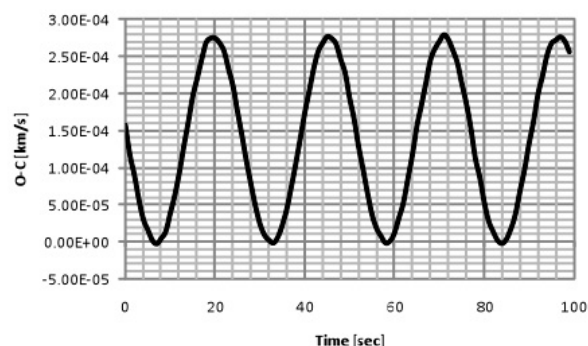


図3：スピニングモジュレーションのかかったドップラー信号

次に、IKAROS の姿勢決定の為に実際にどのような地上系を構築したかについて紹介します。前述の通り、姿勢決定の為に、1) 太陽角データと2) 地球角データを使用します。またこれ以外に3) 軌道計画値が必要となります。

太陽角データ

太陽角データは実証機の HK データから得られます。送られてくる HK データの中から太陽角データ及びスピニングレートの情報を抜き出し、それに時刻付けを行ってファイルとして出力します。

地球角データ

地球角データは、ドップラーデータを処理し、得ることができます。ドップラーデータについては相模原の軌道グループが提供するツールによって準リアルタイムに取得することが可能です。

[裏へ続く]

軌道計画値

軌道計画値については、IKAROS の軌道決定データからオフラインで生成し、サーバ内に置いておきます。

これらの3つのデータが揃って初めて姿勢決定が可能となります。ここでは原理のみ紹介します。

太陽角と地球角のデータが揃うと、天球上の太陽方向位置および地球位置からそれぞれ太陽角分、地球角分の円を描きます。その円の交点が IKAROS のスピン軸の方向となります。円の交点は通常2点ありますが、時刻を正確に管理して得られる位相情報によって、2点のうち1点を姿勢決定値として選択することが可能です。図4に実際の IKAROS 姿勢系 QL のスクリーンショットを示します。これを見れば天球上で IKAROS のスピン軸がどちらを向いているかが一目瞭然です。

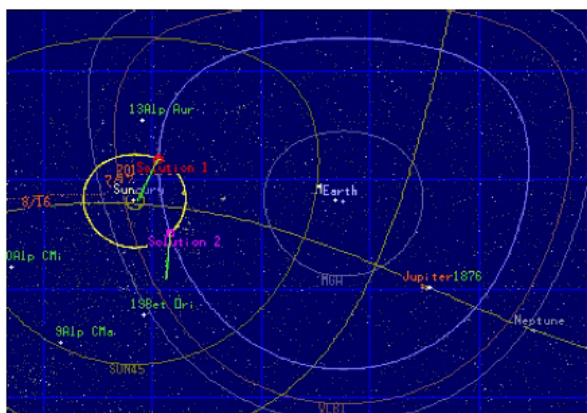


図4：IKAROS 姿勢系 QL スクリーンショット

前述の一連の姿勢決定の流れを示したものが図5になります。姿勢系のメンバで手分けして作成したツール群が連動して動作することにより IKAROS の姿勢決定を行うことができます。

3. ビーコン運用

3.1 ビーコン送信の仕組み

大面積薄膜で太陽光を反射するソーラーセイルの表面には、金属（アルミ）が蒸着されています。IKAROS の軌道の関係で地球方向と膜面方向が重なる時期には、

IKAROS から送受信される電波がセイル表面の金属層と干渉し、通信の状態が悪くなることが予め分かっていました。図6に、軌道の関係で電波が干渉する時期があることを説明を示します（図がかわいらしい「イカロス君」になっているのはご容赦下さい）。

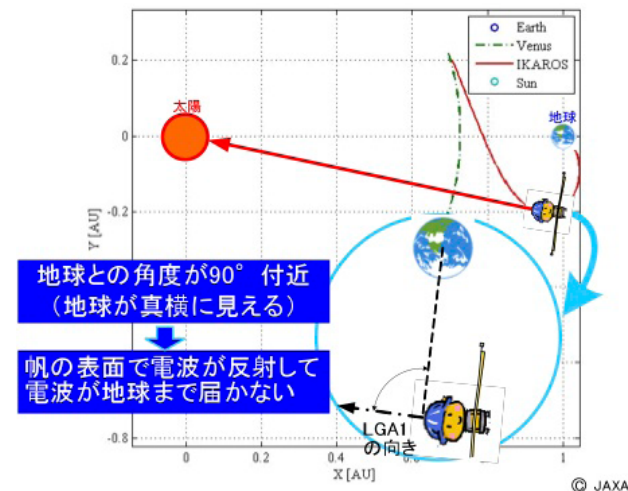


図6：セイル表面の金属層による電波の干渉（地球角が90度に近い状態では通信不安定になる）

また、IKAROS は基本的には低利得アンテナで地球と通信することとしていますが、IKAROS が金星を通過してさらに遠くへ飛行していくにつれ、確保できるテレメトリレートも下がっていきます。そこで、そのような時期には通常の意味でのテレメトリ送信は行わず（行えず）、電波の強弱によって、実効ビットレートは下がるものの確実に情報を伝える「ビーコン運用」という特別な通信モードを用意してありました。

図7に、ビーコン送信のシーケンスを示します。ビーコン送信モードでは、送信したいデータ（8ビット）の各ビットの値（0または1）に応じて、送信電波のテレメトリ変調のONとOFFを切り替えます。テレメトリ変調をONにすると、搬送波の強度が下がり、テレメトリ変調をOFFにすると搬送波の強度が上がります。このことを利用して、地上局で受信される電波の搬送波強度の

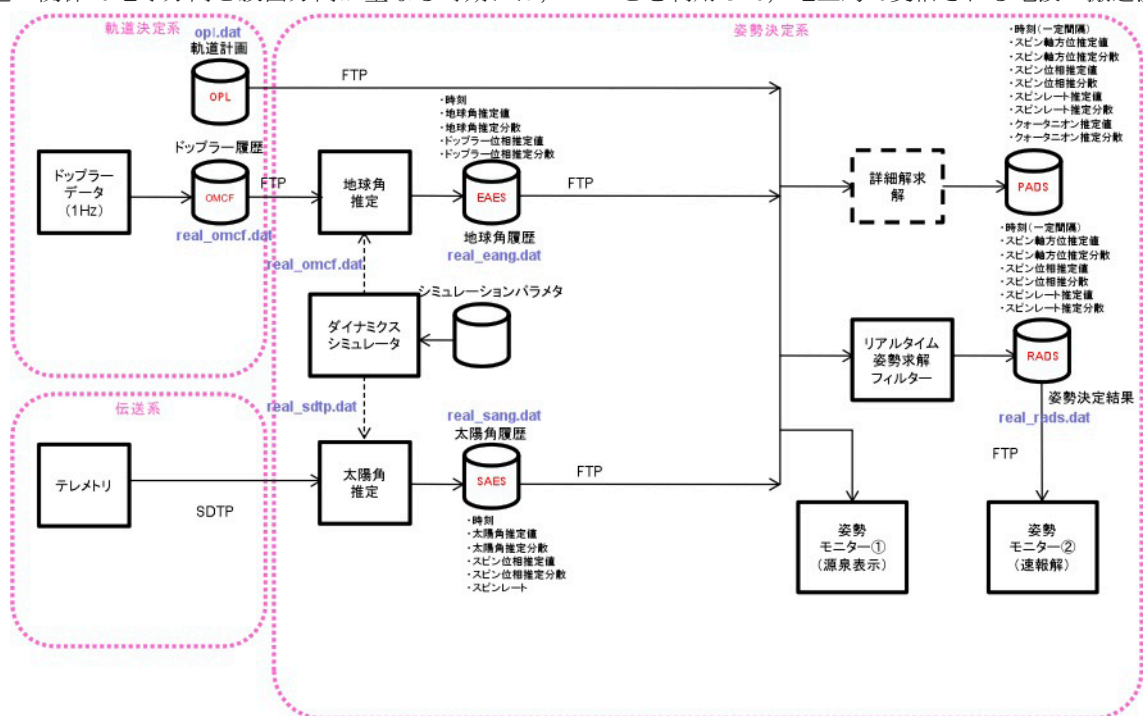
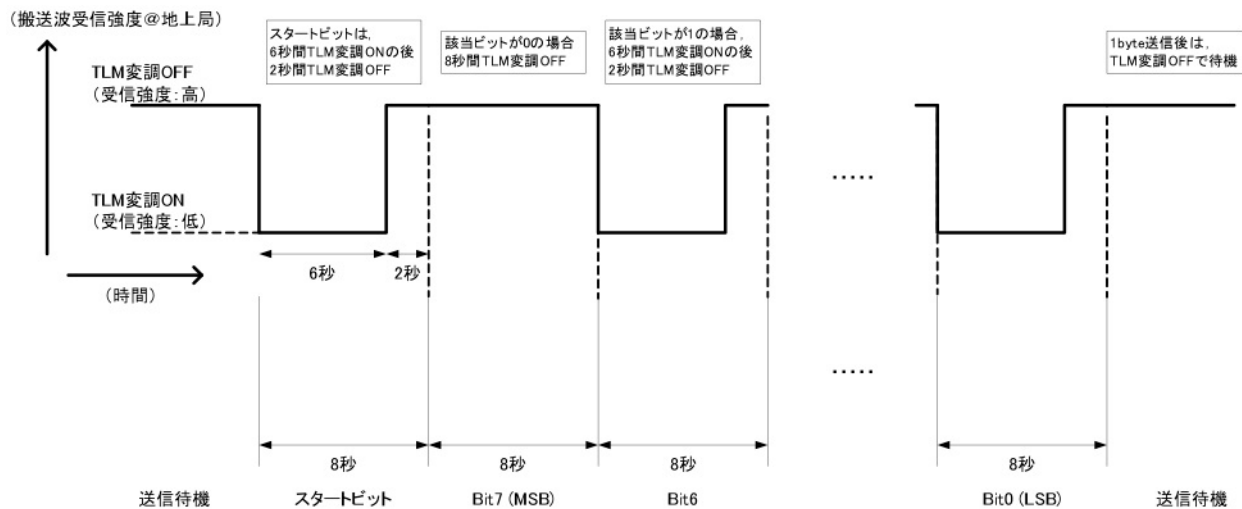


図5：IKAROS の姿勢決定系の処理フロー



変化から、IKAROS の送信しているデータ（8 ビット）の値を復元することができます。

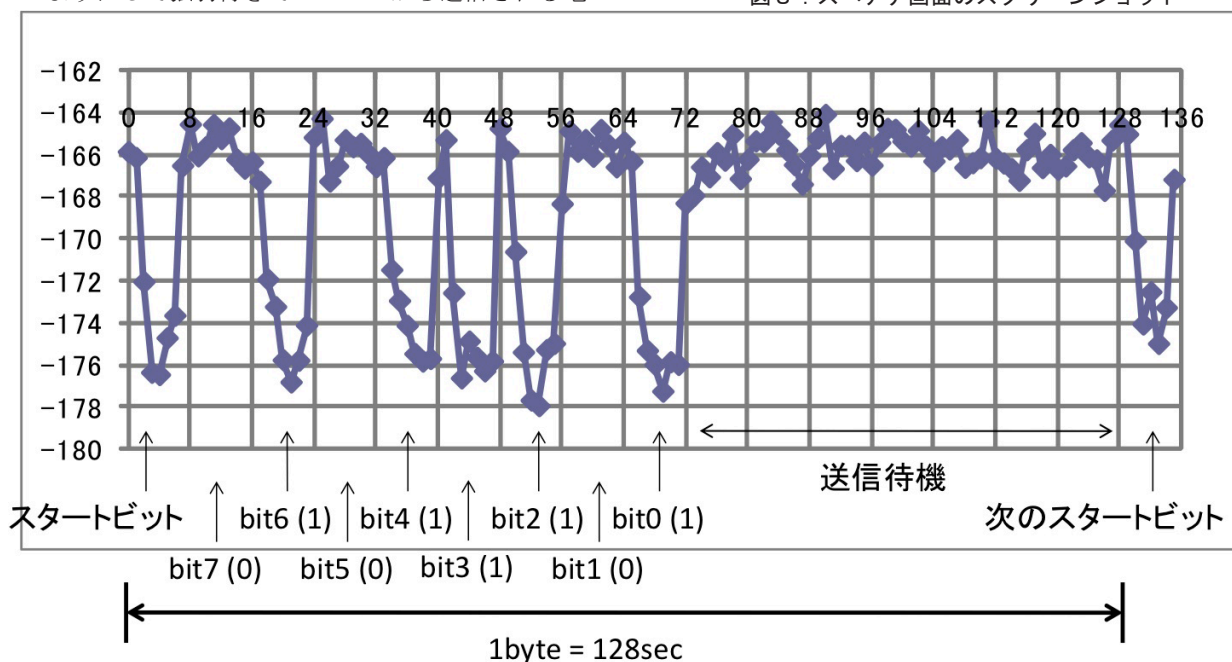
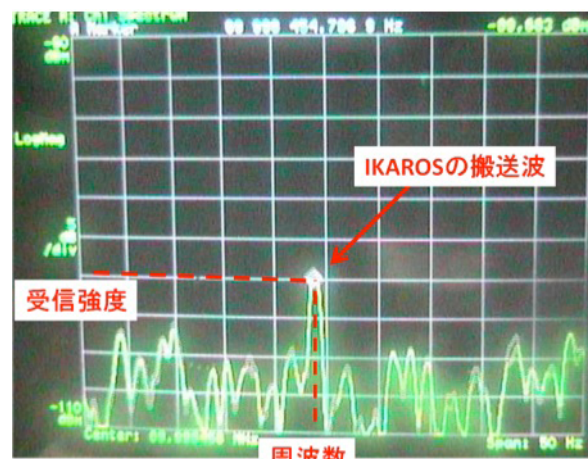
ビーコン送信モードでは、128 秒周期で 1 バイトのデータを送信しています。8 秒ごとに、スタートビット、ビット 7（最上位ビット）、…、ビット 0（最下位ビット）の順にテレメトリ変調の ON/OFF を制御します。次の 128 秒のタイミングが来るまでの残りの時間は、変調 OFF の状態を維持します。このような送信シーケンスは、IKAROS 側では次のような機能を使って実現しています。

- 一定周期ごとに特定のコマンドを実行する機能（システムタイマ）を使って、128 秒に 1 回、1 バイトのビーコン送信シーケンス全体を実行するマクロコマンド（一連のコマンドをまとめて実行する機能）を呼び出す
- 呼び出されたマクロコマンドでは、8 秒ごとに送信対象ビットの値を判定し、値が 1 であればテレメトリ変調を ON する。値が 0 の場合はテレメトリ変調を OFF する。（ビットの値に応じて動作を変える仕組みは、データ処理計算機の「汎用自動化自律化機能」を用いている）

3.2 ビーコン受信・地上データ処理の仕組み

このようにして強弱付きで IKAROS から送信される電

波の情報は、臼田局で処理され、相模原にある IKAROS 運用室へ伝送されます。伝送経路としては 2 つの方法を用意しています。1 つは、臼田局の受信設備が常時モニタしている時々刻々の搬送波受信強度の履歴を、IKAROS 運用室内の解析端末から取得する方法です。もう 1 つは、IKAROS 専用を用意したスペクトラムアナライザ（通称スペアナ）を臼田局の受信設備に接続し、搬送波の受信強度と周波数を取得し（図 8）、IKAROS 運用室内の解析端末へ送信する方法です。図 8 に、スペアナの画面のス



〔裏へ続く〕

クリーンショットを示します。受信強度と周波数情報を転送するのと平行して、WEBカメラ経由でも IKAROS 運用室で画面をモニタできるようにしています。

運用室内の解析端末では、取得した電波強度履歴から、128 秒周期の送信データの開始（スタートビット）を識別し、8 秒ごとにデータ中のビットの値を判定し、1 バイトのデータを得ることができます。取得した電波強度履歴には、IKAROS の健康状態を把握するために必要な HK データが、時系列で並んでいます。ビーコン送信のタイミングは、時刻指定コマンド（タイムラインコマンド）によって「** 時 ** 分から ** 時 ** 分まで、** というデータを送信せよ」という形で管理されて実行されるので、取得した電波強度履歴のどの部分が何のデータを送信した結果なのか判断することができます。図 9 に、取得した電波強度履歴と、そこから復元されたデータの例を示します。図から分かるように、電波強度履歴には相当のノイズ成分が含まれています。したがって、データの復元は、自動的に行えるようなツールを準備し

つつ、最終的には人間の目で判断するようにしています。なかなか自動解析ツールだけでは常に正確な解読をすることは難しく、人間の脳の柔軟な情報処理能力には機械がかなわないのが実情です。

4. おわりに

本稿では、IKAROS 特有の地上データ処理系の例として、まず、機上のセンサーデータ（太陽角）と地上で観測されるドップラー周波数（地球角）を組み合わせてスピン軸方向を決定する姿勢決定システムについて紹介しました。次に、地球距離が遠くなった状態や、セイル膜面と電波の干渉によって通信環境が悪くなった状態のために用意している「ビーコン運用」システムについて紹介しました。

これらのシステムは、火星探査機「のぞみ」や小惑星探査機「はやぶさ」で（トラブル発生時に図らずも）実現された機能を、IKAROS に向けて改良・改善したものです。今後も深宇宙探査機特有の機能として改良を重ねながら使われていくものと思われます。

平成 22 年度宇宙科学情報解析シンポジウム報告

海老沢 研（宇宙科学情報解析研究系）

表記のシンポジウムを、2 月 16 日に宇宙科学研究所にて開催しました。「大規模データベースとデータ処理」、「クラウド・大規模計算」、「地球・月惑星科学」、「天文学」、「教育・コミュニティ活動」という広い分野を網羅する 17 の講演発表がありました。また、宇宙、情報、計算技術等をバックグラウンドとする多くの出席者の間で、活発な意見交換がなされました（熱い議論は懇親会場まで続きました）。発表資料は、<http://www.isas.jaxa.jp/docs/PLAINnews/plainSympo22/PDFsiryo.html> にありますので、ご覧ください。

PLAIN ニュース休刊のお知らせ

海老沢 研（PLAIN ニュース編集長）

高性能の PC やインターネットがやっと世の中に普及し始めた 1993 年、主に ISAS 内のネットワーク管理、大型計算機（スパコン）、衛星データベース運用を担当するために PLAIN センター（宇宙科学情報解析センター）が設立され、ISAS 内外に関連情報を発信するためのメディアとして「PLAIN センターニュース」が創刊されました。やがてネットワークが情報インフラとして定着し、大型計算機が廃止されてスパコン業務が JEDI（情報計算工学センター）に統合される一方で、JAXA の科学衛星は大型化し、それらの生み出す大量データの処理、公開、利用促進が、PLAIN センターの主な業務となってきました。そのような背景で PLAIN センターは発展的に解消し、2008 年度から C-SODA（科学衛星運用・データ利用センター）が発足しました。その前後から、新たな「PLAIN ニュース」には、JAXA の枠を超えた広い範囲の執筆者による科学衛星データ利用に関する記事が多くなってきました。やがて、初期の PLAIN センターニュースが果たしてきた ISAS 内への情報発信という役割が薄れていくのと並行して、科学衛星データ利用に関して

は、宇宙科学と情報通信技術の両方に跨がるより大きなコミュニティの中で、さらに掘り下げた情報交換や議論を行う気運が高まってきたように思われます。

PLAIN センターニュース創刊以来、1993 年の「あすか」から 2010 年のあかつき / イカロス、さらに将来の小型科学衛星 1 号機 (EXCEED) に至るまで、「データ利用」という観点から、PLAIN ニュースはほぼすべての科学衛星プロジェクトを網羅してきました。新たな衛星の打ち上げまでに少々時間ができたこの機会に、PLAIN ニュースの発行母体である C-SODA 科学データ利用促進グループ、宇宙科学情報解析研究系のスタッフで話し合った結果、PLAIN ニュースはしばらく休刊し、今後我々の活動が目指すべき方向をじっくりと検討することにしました。科学衛星データ利用については、広い範囲の執筆者による、より充実した出版物を定期的に発行することを考えています。その一方、ISAS の情報システムのユーザーには、C-SODA ホームページを通じて、よりきめ細かな情報発信を行っていききたいと思います。長い間、PLAIN ニュースのご愛読をありがとうございました。

編集発行：宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 科学衛星運用・データ利用センター 科学データ利用促進グループ
〒252-5210 相模原市中央区由野台 3-1-1 Tel. 050-3362-2460 住所変更等 e-mail: plainnews@plain.isas.jaxa.jp
本ニュースはインターネットでもご覧になれます。 <http://www.isas.jaxa.jp/docs/PLAINnews>

●編集後記：未曾有の大震災が発生しました。宇宙研でも毎日のように計画停電があり、対応が大変です。在日外国人が続々と国外退避するなか、今こそが世界に日本の底力を見せるときでしょう (K.E.)