

一番星へ行こう! 日本の金星探査機の挑戦 その11 ~科学データ地上処理系~

山田 学¹, 小郷原 一智¹, 神山 徹², はしもと じょーじ³,
高木 征弘², 山崎 敦¹, 山本 幸生¹, 今村 剛¹

(要旨) 金星探査機「あかつき」(Planet-C)によって取得されたデータは、データ取得後1年を目処に公開される予定である。本稿では、地上へ伝送されたデータの処理の流れと、アーカイブ方法、そして公開されるデータの内容について紹介する。

1. はじめに

金星探査機「あかつき」は、2010年5月21日6時58分23秒に種子島宇宙センターよりH2Aロケットにより打ち上げられ、金星への旅路の真っ最中である。

この探査機は開発段階から Venus Climate Orbiter の愛称で知られてきたように気象衛星である。紫外から赤外にわたる多波長で連続的に撮像観測を行うことで、スーパーローテーションに代表される金星大気の特異な力学メカニズムを解明することを主目的としている。「あかつき」は搭載している5つのカメラによって、金星大気の様々な高度で様々な対象を測定し、金星大気の運動を3次元で可視化する[1]。

複数の観測機器によって観測された異なる高度のデータを有機的に結合して解析することが、大気運動を3次元で観測する「あかつき」のデータ解析の肝となっている。そのようなデータ解析を行うためには、観測機器の違いを意識すること無くデータを扱うことができるようなアーカイブ設計が必要とされる。また、従来より行われている地球の気象学研究において培われてきた解析技術をそのまま応用することが可能であるようなデータセットを整備することによって、金星気象データを効率よく解析できるようになることを目指した。

我々データ処理班は、過去の惑星探査データがそう

であるように、「あかつき」の得るデータが人類の資産であることを念頭に、世界初の惑星気象データセットを、いかに利用しやすい形でアーカイブし後世に残すかについて検討してきた。以下では、サイエンスデータ処理の流れ、公開データの内容やフォーマットについて紹介する。

2. 地上処理系のデータのながれ

「あかつき」は、2時間ごとに複数の波長を用いて金星の全球撮像を行う。機上で得られた観測データは、観測機器の制御と画像処理を司る DE(Digital Electronics) という計算機によって下処理が行われてから地上へと下ろされる。この下処理には、32 K bps - 2Kbps(探査機と地球の距離に依存)という細い回線幅の制約の下、データを効率的に転送するという目的がある。下処理の内容はカメラによって異なるが、例えば、機上でダーク処理を行うことによって、地上へ下ろす画像の枚数を減らす(ダーク画像は下ろさずに済ませる)といったことをする。下処理された画像データは回線幅の状態によって、可逆あるいは非可逆圧縮されてから、地上に転送される。機上処理によって地上へ下ろす画像の枚数は大きく減らすことができるが、それでも一周回(30時間)毎に各カメラ合わせて100枚程度の数になる。地上では、下りてきた全ての画像を半自動的に処理してアーカイブする(図1)。

地球に送られたデータは、臼田宇宙空間観測所の64m アンテナ局(UDSC64)で受信された後、宇宙科学

1. 宇宙航空研究開発機構

2. 東京大学大学院理学系研究科

3. 岡山大学大学院自然科学研究科

yamada.manabu@jaxa.jp

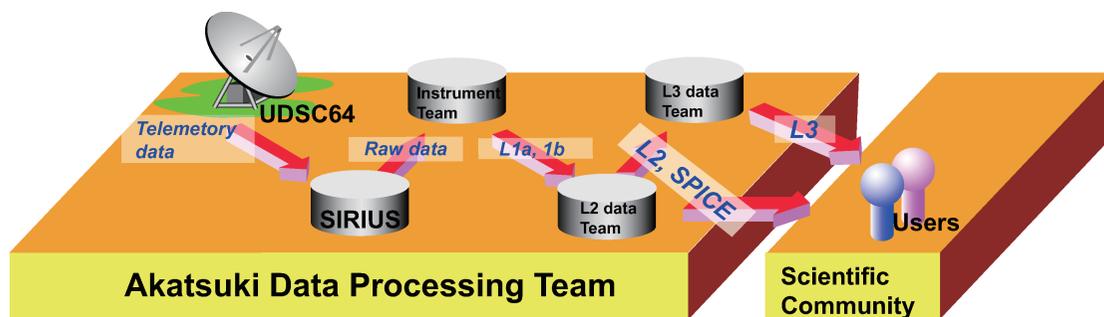


図1: 「あかつき」データフロー概略図. 研究者は, 初期処理を終え各種情報をヘッダに含んだFITS 画像 (Level 2) データ, SPICE カーネル, NetCDF 風速ベクトル格子 (Level 3) データにアクセス可能である.

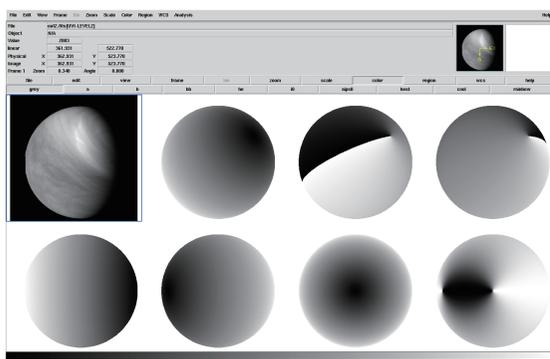


図2: Venus Express/VMC のデータを用いて作成した「あかつき」Level 2 データのサンプル. 上段一番左が撮像データ. ヘッダ内に, 観測器の撮像時の状態や軌道情報, 画像中心のジオメトリ情報といった情報が含まれる. 残りの画像は, SPICE カーネルを用いて作成した, 緯度, 経度, 散乱位相角などの情報が含まれたマルチフレーム FITS 画像.

研究所の科学衛星観測データベースである "SIRIUS" に格納される. この時点での各カメラの画像データは圧縮・断片化されていて, まだ1枚の画像として見る事ができない.

Level 1a データは "SIRIUS" からデータを得て, 圧縮されたデータを解凍し, 断片化したデータをつなぎ合わせて1枚の画像としたものである. データフォーマットは, FITS (Flexible Image Transport System) 形式を採用した. この時点での画像値はカウント値であり, ヘッダ情報には画像付帯情報をもとにした衛星時刻や観測器の温度情報などが記載されている. また, 機上で下処理に使用した画像の付帯情報も同様に記載される. つづいて, 1a データの画像値を, 地上での試験結果などを用い校正し物理値に変換することで,

Level 1b データが生成される.

Level 2 では, Level 1b データにジオメトリ情報などが追加される. 具体的には, 観測時刻における「あかつき」の姿勢情報や, 探査機・金星・太陽の位置関係, 視野中心の緯度経度といったジオメトリ情報の代表値などが補助情報として Level 1b の FITS ファイルに付加される. また, Level 1b の各画像について, 各ピクセルの緯度, 経度, 地方時, 散乱位相角などを値として持つマルチフレームの FITS ファイルも Level 2 データとして生成される (図2).

Level 2 データは, PDS (Planetary Data System) に準拠した形で保存され, 宇宙研の科学衛星データ公開システム DARTS の Web サーバを介して公開される. PDS は NASA が開発したデータアーカイブの形式で, 惑星探査ミッションのデータアーカイブにおいてはデファクトスタンダードとなっているものである.

Level 2 データの生成において使用した「あかつき」の軌道・姿勢情報および観測機器のスペック・衛星へのとりつけ位置といった情報(補助情報)も, DARTS にて公開する. データの形式は NASA/JPL の SPICE システムで使われている各種のカーネルと呼ばれるデータ形式を用いる. SPICE はジオメトリ情報を計算するための各種ライブラリが公開されており, それらを利用して一般ユーザも各自でジオメトリ情報を計算することができる.

Level 3 データは, 緯度経度格子を用いてデータを記述する. Level 2 データの観測物理量を内挿し, 規則正しい緯度経度格子上のデータに変換したものが Level 3a で, Level 3a データを処理して得られるより高次のデータは Level 3b となる. 「あかつき」のデー

タ解析チームは、Level 3bとして水平風を導出して公開する予定である。Level 3データは気象学的な解析での利用を想定しているため、気象業界で標準的なデータ形式であるNetCDF(Network Common Data Form)形式で公開する。

3. 電波掩蔽データ

地上局(白田宇宙空間観測所)から見て「あかつき」が金星の背後に隠れようとする時と背後から出てくる時、「あかつき」から送信されて地上局に届く電波が金星大気をかすめる。このとき金星大気の影響で受信電波の周波数や強度が変化するが、これを地上局で記録して解析することにより、大気鉛直構造の情報を得る。このように電波掩蔽のデータは探査機上でのデータ収集を経ずに地上局での計測から得られるので、その処理は5カメラとは別扱いとなる。

電波掩蔽からは以下の4種をLevel 2データとして公開する予定である。

1. 気温・気圧の高度分布
2. 電離層の電子密度の高度分布
3. 電波の吸収量の高度分布
4. 電波強度の時系列

このうち気温・気圧・電子密度は受信周波数の時系列から求められる。吸収量は電波強度の時系列から求められ、硫酸雲の下に漂う硫酸蒸気の情報を含む。電波強度の時系列を公開するのは、ここから大気中の乱流の強度を推定することが可能で、これをユーザに委ねるためである。

電波経路に沿って積分された情報から、大気球対称を仮定して鉛直構造が求められるが、実際には電波経路が金星に最も近づく地点が観測データに最大の寄与をしていると考えられる。そこで公開データのヘッダ部には、この地点の緯度経度や太陽天頂角、地方時などの幾何情報を収め、上述の5カメラのデータとともに気象学データとして供する。

4. 雲追跡による水平風分布の導出

あかつきによる観測のもっとも大きな目標の1つは、撮像された金星の雲を追跡することによって、3次元的な風速分布を導出することである。時刻 t に画像上

にみられる雲が、時刻 $t + \Delta t$ にどれだけ移動したかを求めれば、その移動距離を Δt で割ることで風速が求められる。この手法は、雷・大気光カメラ(LAC)を除くすべてのカメラ・すべてのフィルタに適用可能である。しかし、画像上の金星ディスクは、時間とともに位置と大きさが変化してしまうため、特定の雲を追跡し、その移動距離を求めることは容易ではない。また、大気波動の検出といった気象学的な解析も困難である。

そこで、Level 3 データ処理の第一段階では、Level 2データとして提供される観測物理量(雲画像)を金星地形に固定された緯度経度座標に変換する。

緯度経度座標への変換には、画像上の金星の位置を正確に決定することが重要である。一般に、画像上の金星ディスクは円ではなく楕円になるので、金星のリムに対して楕円フィッティングを施し、楕円の中心位置や長半径、短半径といったパラメータをサブピクセル精度で求めることを検討している[2]。これらのパラメータと、軌道情報やジオメトリ情報を用いることにより、精度よく座標変換した観測物理量データ(Level 3aデータ)を提供する予定である。

次に、Level 3aデータの時系列に対して、雲追跡による風速分布の導出を行う。雲追跡の手法には、過去の研究でも実績のある相互相関法を採用する[3]。さらに、誤ベクトルの除去といった手法を取り入れることによって、風速ベクトル導出の高精度化を図る[4, 5]。雲追跡によって求められた速度ベクトルは、原理的には雲のみかけの移動速度にすぎないが、これまでの研究結果から、およそ周囲の風速と一致しているとみなして差し支えない。導出された風速データは、適当な長さの時系列データとして格納される(Level 3bデータ)。Level 3データ処理では、以上の処理をすべてのカメラ・すべてのフィルタに対して実行する。各フィルタは異なる観測高度に対応すると考えられるので、結果的に3次元的な水平風速分布が得られることになる(表1)。中間赤外カメラ(LIR)や2カメラ(IR2)の画像を用いれば、夜面での雲追跡も可能である。Level 3 データを用いることにより、全球的な大気スーパーローテーションの分布や、大気波動の時空間構造とそれに伴う運動量輸送といった、金星気象学の謎に迫る解析が可能になるものと期待される。特に、LIRでは昼夜ともに同じ高度の雲画像が得られるため、

これまでまったくわかっていなかった平均子午面循環の有無や強度を明らかにできるかもしれない。

前述のように、Level 3データは規則正しい緯度経度格子上で定義され、気象学分野で一般的な NetCDF形式で公開される。あかつきプロジェクトの成功には、機器横断的に観測データを活用した気象学的解析が必要不可欠である。これまで惑星探査データになじみのなかった気象研究者の積極的な参加を期待したい。また、風速の導出に用いるプログラムも公開される予定であり、緯度経度座標に変換された金星画像を用いて、ユーザ自身の工夫による雲追跡を行うことも可能である。

表1: 雲追跡を行う画像を撮像する波長、昼夜の別、対応する高度の一覧。高度はおよその値であり、雲モデルに依存する。

カメラ	フィルター	昼面	夜面	高度[km]
IR1	0.90 μm	○	—	~ 65
IR2	2.02 μm	○	—	~ 65
	2.26 μm	—	○	~ 50
UVI	283 nm	○	—	~ 70
	365 nm	○	—	~ 70
LIR	10 μm	○	○	~ 65

5. まとめ

「あかつき」プロジェクトは、取得される科学データを研究者が利用しやすい形で公開することを目指している。その意味は、現在地球の気象研究で使用しているツールをそのまま適用可能であるということである。そのため、データフォーマットは業界においてスタンダードに使われている形式を採用した。またクイックルック的な解析を思い立った時に直ぐ出来るように、最低限必要になるであろう補助情報は可能な限り画像データ自身に組み込んである。このことによって、機器や探査機の詳細を知らずとも解析を始められるデータセットとなっているはずである。一方で、一歩踏み込んだ研究を行いたい研究者向けにはSPICEカーネルなども公開される。とことんやりたい人は、他人が計算したジオメトリ情報などを利用することなく、自分でジオメトリ情報を計算して解析を行うことができるようになっていく。

惑星気象衛星データのスタンダードを「あかつき」が決めることになるであろうという思いから、「あかつき」のデータアーカイブは特に気象学分野の研究を

行うに当たっての利便性が高くなるように設計されている。格子データでのLevel 3データ公開は、惑星探査データとしては、おそらく初めての試みである。これまで惑星探査データに触れたことのない人々が、「あかつき」データの公開によって惑星気象研究に参入してくれれば幸いである。

参考文献

- [1] 今村剛他, 2007, 遊・星・人 16, 226.
- [2] 山田純平他, 2006, 情報処理学会研究報告, 2006-CVIM-154-36, 339.
- [3] Rossow et al., 1990, J. Geophys. Res. 47, 2053.
- [4] Evans, A. N., 2000, IEEE T. Geosci. Remote. 38, 1064.
- [5] Wu, Q. X., 1995, IEEE T. Pattern Anal. 17, 843.