

一番星へ行こう! 日本の金星探査機の挑戦 その13 ~古くて新しい電波掩蔽~

今村 剛¹, 安藤 紘基², 戸田 知朗¹, 岩田 隆浩¹
あかつき電波科学チーム

(要旨) 金星探査機「あかつき」は光学観測による大気運動の可視化に加え、電波掩蔽により大気鉛直構造を観測し、気温分布など気象学の研究に欠かせない情報を提供する。この観測のために必要となる、周波数が安定した電波を送信するために、「あかつき」には超高安定発振器を搭載している。これまでの経緯と現状について簡単に紹介する。

1. いまさら電波掩蔽?

およそ10年前に金星気象衛星の検討が始まったとき、電波掩蔽を行うことはわりとすぐに決まった。ミッションの華は多波長の連続撮像による流体運動の可視化に違いない[1]。しかし気象学の研究において気温情報が無いわけにはいくまい。大気の成層度を知らずして雲画像を解釈できようか。流体波動の伝搬を探るのにも気温擾乱の検出が決め手になるだろう。気温の遠隔測定の方法としては大気の熱放射を分光することも考えられるが、金星の下層大気の温度変動は数℃以下と予想され、これを調べるために必要となる0.1℃程度の精度を達成することは容易でない。そこで我々は、観測点は限定されるが計測精度の高い電波掩蔽を選んだ。

普段は探査機と地上局の間の通信に用いる電波を、電波掩蔽では観測に利用する。地上局から見て探査機が金星の背後に隠れる時と背後から出てくる時、探査機から送信される電波は金星大気をかすめるように通過して地上局に届く(図1)。このとき電波が金星大気の影響で屈折する結果として、受信周波数が変化する。この周波数変化を分析すると屈折率の高度分布がわか

り、そこから気温の高度分布がわかる。「あかつき」の場合、気温を0.1℃の精度、高度分解能1kmで得ることを目指している。高度100km以上での屈折率からは電離層の電子密度を求めることもできる。受信電波強度の変化からは、硫酸雲の下に多く存在する電波吸収体である硫酸蒸気の分布がわかる。

電波掩蔽という手法自体は惑星探査の黎明期から使われてきた枯れた技術である。教科書に載っている太陽系惑星の温度構造のグラフはたいてい、電波掩蔽の観測結果である。金星でも1970年代から幾度となく実施されている[2]。しかし電波掩蔽は、たとえば地球気象研究において気象ゾンデを放球するようなものであり、いつでもどのように実施するかによって成果は全く異なるものとなる。初の金星気象衛星で5台の気象カメラと連携する電波掩蔽は、他機器との連携

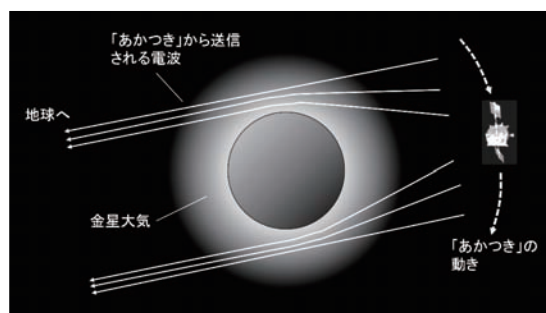


図1: 「あかつき」による金星大気の電波掩蔽観測のイメージ

1. 宇宙航空研究開発機構
2. 東京大学大学院
imamura.takeshi@jaxa.jp

がほとんどなかった過去のミッションとは目的を異にする。

金星の赤道域を周回する「あかつき」の場合、よくある極軌道の惑星探査とは違って、電波掩蔽の観測点は赤道域に集中する。太陽光エネルギーの入力が最大となり活発な大気運動の存在が予想される赤道域のデータが充実することも、気象学の観点からはこれまでに無いメリットであるように思われる。

2. 装置の準備

手法が確立しているとはいえ、目指す精度は簡単に達成できるものではない。金星大気の変動をもたらす微小な周波数変化を検出するために、基準周波数に対する周波数変動の割合が10のマイナス12乗以下という高い安定度の信号を送信する必要がある。そこで「あかつき」には超高安定発振器(Ultra-stable oscillator, 略してUSO)を搭載し、送信機の基準信号源を通常の発振器からこちらに切り替えて観測を行う。USOの中心部には周囲から断熱された水晶振動子があり、この温度を高い精度で安定化することによって周波数を安定化する。これまでの金星探査において上記のレベルのUSOは現在運用中の欧州のVenus Expressに搭載されたものだけである。Venus ExpressのUSOを開発したのはTimetechというドイツの会社であり、我々もこのUSOを採用することにした。雑居ビルのワンフロアで設計から製作までやっている小規模なメーカーであるが、小回りが利き、我々が押しつける難題にも熱心に対応してくれる。

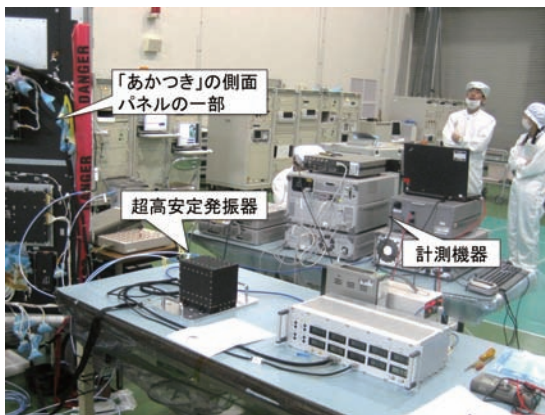


図2：2009年7月にJAXA宇宙科学研究所の衛星組み立て室で実施した超高安定発振器(USO)の評価試験の様子

USOは基本的に開発済みの機器という認識だったが、実際には衛星とのインターフェースや環境条件や出力周波数の違いから、色々な技術的課題が生じた。たとえば打ち上げロケットの低周波の振動が水晶振動子にとっては厳しいことがわかり、この対策と評価試験に時間を要した。この10年の間、ドイツに幾度も通って技術的な打合せをすることになり、フライトモデルの日本への到着は2009年7月、衛星に組み付けられるぎりぎりのタイミングとなった(図2)。

「あかつき」本体の制御にも一工夫必要である。電波の屈折角は数十度にも達する。そのため、観測時には高利得アンテナをまっすぐ地球方向に向けるのではなく、屈折角の分だけ向きを変える必要がある。この角度を計算して「あかつき」にプログラムする機能は地上の運用設備に組み込まれる。地球から見て「あかつき」が金星の向こうに隠れているときも、電波は屈折して地球で受信され続けるのである。

「あかつき」から送信された電波は長野県の山中にある臼田宇宙空間観測所の直径64mのアンテナで受信される(図3)。GHz帯の信号は数百KHzの信号に変換され、専用装置で波形ごと記録される。記録は水素レーザーで生成された精密な時刻信号に同期して行わ

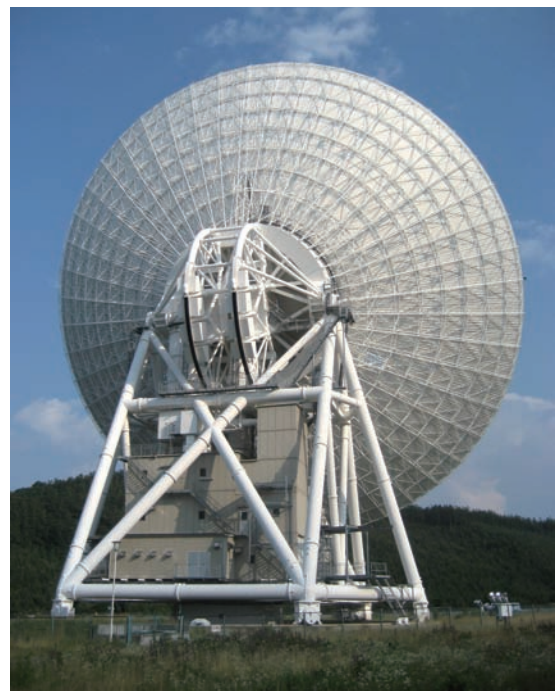


図3：臼田宇宙空間観測所の直径64mのパラボラアンテナ

れ, 記録データからわずかな周波数変動を取り出すことを可能にする. 観測装置そのものは地上にあるので, 惑星探査というよりも天体観測の趣がある.

3. 軌道上試験

2010年5月21日に「あかつき」が打ち上げられたあと, 5月28日にUSOをオンにして, まずは正常に立ち上がることに安堵する. 続いて6月2日にUSOを基準信号とする電波を臼田宇宙空間観測所で受信して記録した. 祈る思いで算出した周波数安定度は, 打ち上げ前に相模原キャンパスの衛星組み立て室で計測したものよりも良かった. 宇宙空間にしばらく放置されて周辺の温度がよく安定していることが効いているのかもしれない. これなら本格的な気象研究に耐えるデータが得られそうだ. すぐにUSOを製作したTimetech社に結果を送り, これまでの努力に対して改めて謝意を伝える.

また2010年4月から6月にかけて3回にわたって, Venus Expressが金星で掩蔽されるタイミングに合わせて臼田宇宙空間観測所でVenus Expressからの信号を記録した. これは我々の記録装置とデータ解析ソフトウェアの動作を検証するためにVenus Expressチームの協力により実現したものである. 得られた周波数時系列とシミュレーション結果を比べると, 金星大気の影響が無いはずの部分でも周波数変化の傾向に微妙な違いがある. シミュレーションを見直し, それまで考慮していなかったいくつかの一般相対論的効果をドップラーシフトの計算に導入すると, ぴたりと合う. 宇宙はそうのようにできているのだと実感する. こうして解析した結果から見事に金星大気鉛直構造が現れ, しばし結果に見とれた. 一足先に金星探査の気分を味わう.

こうして「あかつき」の隠れた主役, 電波掩蔽の準備は整った. 本稿執筆時, ミッション最大の山場である金星周回軌道投入は1ヶ月後に迫っている.

参考文献

- [1] 今村 剛, et al., 2007, 遊星人 Vol.16, No.3, 226.
- [2] Tellmann, et al., 2009, J. Geophys. Res. 114, E00B36, doi:10.1029/2008JE003204.