

一番星へ行こう!日本の金星探査機の挑戦 その57 ～あかつき運用を再延長し、金星大気長期変動の 要因解明に挑む～

佐藤 毅彦¹, 山崎 敦¹, 今村 剛², 石井 信明¹, 中村 正人¹, 阿部 琢美¹

(要旨) あかつきは2015年12月7日に金星周回軌道入りを果たして以来、定常運用(2017年度末まで)・後期運用1(2020年度末まで)・後期運用2(2023年度末まで)と延命することで、金星気象に関する良質の長期連続データを蓄積してきました。そして最後の延長と決めた後期運用3(2028年度末まで)へ突入するに当たりこれまでを振り返るとともに、その長期観測から期待される科学について紹介します。

1. あかつき定常運用の振り返り

一般にあかつきは「金星スーパーローテーション(以降はSRと略記)の謎を解明することを目標としている」というイメージが浸透していると思いますが、もちろんそれだけではありません(SR解明はとてもキャッチーで分かりやすいですが)。ミッション立ち上げ当初の科学目標を表1にまとめました。

定常運用は当初、金星周回軌道入り(2010年12月の想定)から2地球年と設定されていました。その間に周期30時間の逆行楕円軌道(遠金点付近ではSRの角速度に同期するよう設計)からデータを取得し、これら五つの科学目標を達成しようとしたわけです[1]。

しかし燃料ライン中のバルブ閉塞に起因するメインエンジン故障が発生して2010年12月の周回軌道入り(VOI-1)には失敗し、5年の「人工惑星」期間を経て2015年12月7日の再チャレンジ(VOI-R)で金星周回軌道へ入ることに成功したのです。ただしメインエンジンは使えず姿勢制御用エンジンにより時間をかけた減速を行ったため、当初予定よりはるかに大きな長楕円軌道(約11日周期)とならざるを得ませんでした(逆行軌道は堅持)[2]。これにより電波掩

表1: あかつき定常運用における科学目標。

1	スーパーローテーション(SR)のメカニズムの解明
2	子午面循環の構造の解明
3	雲生成メカニズムの解明
4	雷の有無の観測的決定
5	地表面放射率測定と活火山探索

蔽(目標1, 2)や雷観測(目標4)の頻度は1/10程度に減り、長期の積み重ねを要することとなりました。風速測定(目標1, 2)にも制約は増えましたが雲追跡手法を工夫するなどし、SRのメカニズム解明に向けた確かな手応えを得ました。2016年12月にIR1とIR2が使えなくなり、雲生成(目標3)や地表面(目標5)については一年分の限られたデータにもとづく研究を強いられることとなりました。

2. あかつき後期運用1の振り返り

定常運用の結果を受けて、次の3年の延長運用中(2020年度末まで)に達成しようとする科学目標が設定されました(表2)。

イは定常運用の科学目標2から、ロは科学目標1から、ホは科学目標4から来たものですね。IR1とIR2が使えなくなってしまったため科学目標3や5の発展は望みにくく、代わりに登場するのが「ハ 長期(年単

1.宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

2.東京大学大学院 新領域創成科学研究科
satoh@stp.isas.jaxa.jp

表2: あかつき後期運用1における科学目標.

イ	雲頂レベルにおける子午面循環の強度が,あかつき以前に予測されていた値に比べ高精度(ひとこえ,桁での向上)に求められること
ロ	SRの生成・維持メカニズムについて,その主機構および副機構とが分かり,さらにそれらの寄与度がおおまかに分かること
ハ	SRの長期(年単位)変動をとらえ,それに寄与するプロセスを明らかにすること
ニ	定在重力波について,その金星日毎の変化または安定性を定量的に示すこと.また,それがSRに対してどう関与しているのかを理解すること
ホ	金星の雷を検出すること.検出されない場合には,従来の「雷発生頻度」上限値を優位に更新すること

表3: あかつき後期運用2における科学目標.

A	大気波動の役割の解明 熱潮汐波の三次元構造と時間変化;熱潮汐波以外の波のSRに対する役割;Y字模様の起源解明
B	SRの長期変動の解明 長期変動の有無とトレンド;紫外アルベドの長期トレンド;SO ₂ 変動
C	大気構造の長期変動の解明 大気温度構造の長期トレンド;電離層プロファイルの太陽活動度依存性
D	雷発光の統計的裏付け

位)変動」という概念です.周回軌道入りから2地球年の定常運用では「その期間の状態を記述する」ことはできても,それが長期にわたり安定しているものか変動し得るものかを観測から結論することはできません.定常運用の2年間に後期運用1の3年間を加えた5年間分のデータからは,その一端をとらえられると予想したわけです.また,ニはLIRが発見した巨大な弓状構造(地表面起伏に起源をもつ重力波由来)[3]を対象とした科学目標です.

これらの達成状況は,「よくできました」に該当するのがイ,ハ,ニ,「大変よくできました」に該当するのがロとホのようにまとめられるでしょう.SRの維持メカニズムとして,赤道から低緯度にかけては熱潮汐波が重要な役割を果たしていることを見出しました[4],また金星大気中の自然発光現象と考えられる波形検出に成功しています.長期変動に関しては,あかつきデータのみからではありませんが,Venus Express他のデータも組合わせて紫外アルベドの長期変動検出を報じています[5].

3. あかつき後期運用2の振り返り

本原稿は後期運用2の終わりにさしかかっている時期に書かれています.後期運用2では表3に示す科学目標を設定しました.

今期の前,後期運用1で「熱潮汐波がSRを維持している」ことが分かったものの,他の大気波動の役割に関しては結論が出せませんでした.それを掲げたのが目標Aです.Bについてはだいぶデータが蓄積されてきて,少なくともSRがどのように変動しているかという観測事実の整理から取り組んでできました.Cは電波掩蔽を主とした目標であり,軌道周期が長くなって蓄積がゆっくりとしか進んでこなかった電波掩蔽データもようやくこのような研究を行えるようになったことを示しています.

この中でBについて,ロシアのグループが興味深い報告をしています[6].彼らはVenus Express,あかつき,さらにはより古い探査機データも組合わせて,SR速度の変動に12.5年周期が見られると主張しています(図1a).グラフは確かにそう見えるのですが,ここでは仮定した周期にもとづき同じデータを繰り返しプロットしていますし,それらしく正弦曲線を引いています.人間の目がこれらに引っ張られて「周期変動している」ように見えてしまうという危険はあると思います.彼らは2021年5月までのあかつきデータを使っていましたが,それ以降の2023年までを含めた測定結果(堀之内武氏提供)を重ねると正弦曲線からの逸脱が大きくなっているように見えます(図1b).この先まであかつきデータを増やし,そして周期解析を行うことでより確かなことが結論できる

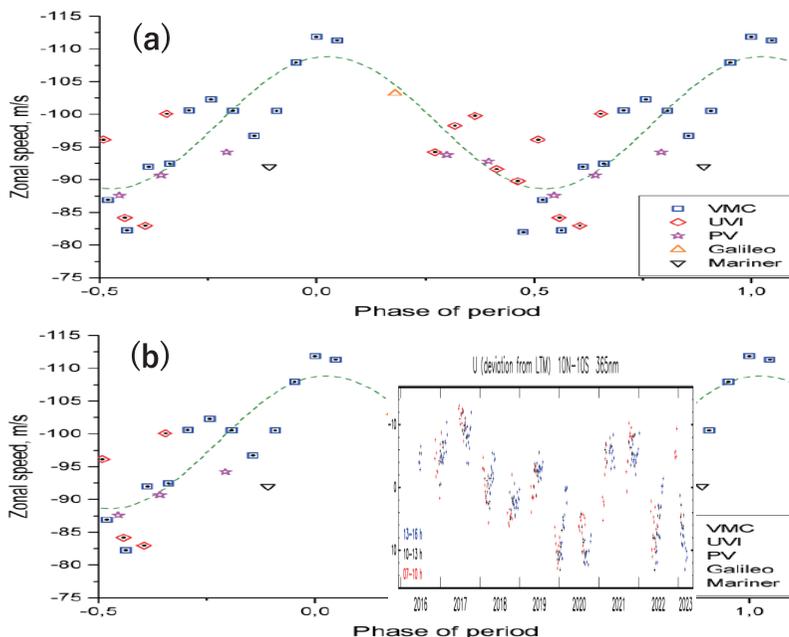


図1: (a)Khatuntsev et al. (2022)によるSR風速の長期変動プロット。横軸は12.5年周期を仮定した位相になっており、変動がサイクリックに繰り返されることを仮定してデータを複数回プロットしている。さらに正弦曲線が描かれることで、周期変動があるかのように強調されている。

(b) (a)と同じものの該当部分にあかつきUVIから測定した風速データ(2023年までをカバー:堀之内武氏提供)を上から重ねた。2019年頃までは正弦曲線に沿うようにも見えるが、2020年以降は逸脱が大きくなっている。

ようになるはずです。

4. そして後期運用3へ

そしていよいよ「次の」延長運用における科学目標です(表4)。

科学目標Eは後期運用2の目標Aの延長上にあり、FはBとCを融合したもので、Gで初めて太陽コロナ観測(電波掩蔽手法)を特出しています。これは、後期運用3を貫く大テーマが「大気現象の変動の駆動源追究」となっているからです。

残燃料に不安がある(とても不安です)とはいいつつ、後期運用3を全うすることができれば金星周回軌道における観測期間は13地球年を超えることになります。これは太陽活動周期を上回り、前後ののりしろを確保して「大気現象の変動には太陽活動(外的要因)に呼応した成分があるか否か」を論じることができると期待されます。手法としては、時間変動する大気現象の周期解析を行って、その駆動源が内的要因か外的要因かを判じてゆくことになります。海陸

などの複雑さをもたない金星では内的要因の支配的な地球と異なる駆動源の可能性も考えられ、気象学的に新しいサンプルとなることも期待されます。

また、8地球年と13金星年はほぼ同じ長さであることから、VOI-R後の1年(2016年)と同じような金星～太陽～地球の位置関係が2024年には繰り返されます。すると、電波掩蔽による太陽コロナ観測も2016年の外合と同じジオメトリの観測ができるのですが、太陽活動度はまったく異なります。こうした理由からGも特出しし成果を期待しているわけです。

5. むすびに

あの2010年12月の悲劇を乗り越えて、2015年12月以来これまでに定常運用・後期運用1・後期運用2を成し遂げ、あかつきは後期運用3へ突入してゆこうとしています。周回軌道周期が当初予定の30時間から約11日に長くなったためデータの蓄積により長い時間がかかるようになりました。そうした状況を踏まえてこれまでのフェーズに呼び名を与えたとしたら、

表4: あかつき後期運用3における科学目標.

E	風速場データを蓄積し, 数値モデリングにデータ同化手法を積極的に導入して, 大気波動と対流が金星大気の基本構造形成に果たす役割を明らかにする.
F	次のモニターを継続し, 変動の駆動源(内的 or 外的要因)を明らかにする. SRを含む雲頂風速場(UVI, LIR); 雲頂温度場(LIR); UVアルベド(UVI); 雲頂SO ₂ (UVI); 大気鉛直構造(RS)
G	太陽風生成メカニズムを特定し, 太陽活動への依存性を明らかにする(RS太陽コロナ観測).
H	雷発光頻度値を更新し発光メカニズムを特定する(LAC).

定常運用・後期運用1は「発見と軌道制約からのリカバリー」フェーズと呼ぶことができるでしょう. 後期運用1の後半あたりからは長期変動がありそうだなという感触が確かなものへと変わり, そこから後期運用2全体を通じた期間を「長期変動トレンドの検出」フェーズと呼ぶことができそうです. さらに後期運用2の後半から試行が始まった周期解析を後期運用3全期間に適用すれば「太陽活動周期に呼応する成分の有無を観測的に結論できる」ことから, これは「長期変動要因の識別」フェーズと呼びたいと思います.

大指揮者であった朝比奈隆氏は「一日でも長生きをし, 一回でも多く舞台上で演奏しなさい」と師匠に言われたのを93歳で亡くなるまで実践し, 音楽界に大きな足跡を遺しました. あかつきも先輩格のVenus Express(金星周回軌道に8年半)を追い越し, 大先輩のPioneer Venus Orbiter(金星周回軌道に14年4ヶ月)に肉薄しようとしています. 実は最初のVOI-1に失敗した直後の金星撮像[7]や翌2011年に遠方から金星の測光観測を行った実績[8]を含めると, 「スペースで最長期間にわたり金星観測を行ったミッション」となります. 長ければよいというものではない, それも本当でしょうけれど, 「あかつきがあればだけの長きに渡りデータを蓄積してくれたからこそ,

それ以外では決して得ることのできない知見が獲得できた」とそう評価されるよう, これからもがんばってゆきたいとメンバーは気を引き締めています.

参考文献

- [1] 金星探査計画提案書
https://web.archive.org/web/20160307220810/https://www.isas.jaxa.jp/home/rigaku/project/PLANET_C/PLANET-C_Proposal.pdf
(2024年2月16日にアクセス)
- [2] Nakamura, M. et al., 2016, Earth Planets and Space, <https://doi.org/10.1186/s40623-016-0457-6>.
- [3] Fukuhara, T. et al., 2017, Nature Geoscience 10, 85.
- [4] Horinouchi, T. et al., 2020, Science 368, 405.
- [5] Lee, Y. J. et al., 2019, Astron. J. 158, 126.
- [6] Khatuntsev, I. et al., 2022, Atmosphere 13, <https://doi.org/10.3390/atmos13122023>.
- [7] Taguchi, M. et al., 2012, Icarus 219, 502.
- [8] Satoh, T. et al., 2015, Icarus 248, 213.

著者紹介

佐藤 毅彦

宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所教授, 総合研究大学院大学先端学術院教授, 北海道大学大学院理学院客員教授, 東京理科大学大学院理学研究科博士課程修了, 博士(理学), ハワイ大学天文学研究所客員研究員, NASAゴダード宇宙飛行センター

研究員, 東京理科大学計算科学フロンティア研究センター講師, 熊本大学教育学部准教授を経て, 2006年12月より現職. 専門は惑星大気科学. 日本天文学会, 日本惑星科学会, 地球電磁気惑星圏学会, アメリカ天文学会, アジア大洋州地球科学会などに所属. アジア大洋州地球科学会次期会長を務める.