

一番星へ行こう！ 日本の金星探査機の挑戦 その24 ～再び金星へ～

廣瀬 史子¹, あかつきプロジェクトチーム

(要旨) 金星探査機「あかつき」は今年(2015年)12月に再び金星に会合する。2010年12月の金星周回軌道投入に失敗した後からの軌道設計には多くの困難が伴った。寝ても覚めても軌道を考える日々が続いたが、ようやく金星への道筋が決定し、奇しくも金星周回軌道投入に失敗した日からちょうど5年後の同日、12月7日に金星周回軌道に投入する。軌道の再設計に際して直面した困難を紹介すると共に、金星周回軌道投入までの計画を述べる。

1. 思わぬ事故

私は、「あかつき」が打ち上がった3ヶ月後の2010年8月に筑波宇宙センターから宇宙科学研究所に異動して来た。以前から惑星探査機に関わりたと思っていたので、「あかつき」の運用パス前ブリーフィングに毎日顔を出すことにした。だが、今まで私が居なくて順調に進んでいたプロジェクト。出番などあるわけもなく、何か貢献出来ることは無いかと観察する日々が続いた。いまいち自身が満足する仕事は出来ず、2010年12月の金星周回軌道投入(VOI: Venus Orbit Insertion)の日を迎えた。その日、「あかつき」がエンジン噴射を開始し、途中で金星の裏側を通るため、電波が一時途切れる。電波再受信のタイミングが来て、1秒、2秒、3秒、と時間が過ぎる。10秒、20秒、30秒待っても電波は受信出来ず、何かおかしいとなった。(この日の詳細は、本連載「その14」を参照されたい。)その後は原因究明で、主に推進系担当は大変な苦勞を強いられた。軌道系担当としては、燃料が残っている限り、再び金星周回を目指すことになる。次のチャンスは2015年～2016年。軌道の再設計が始まった。

2011年はいくつかの大きな軌道上イベントがあった(図1及び表1)。9月に軌道制御エンジン(OME:

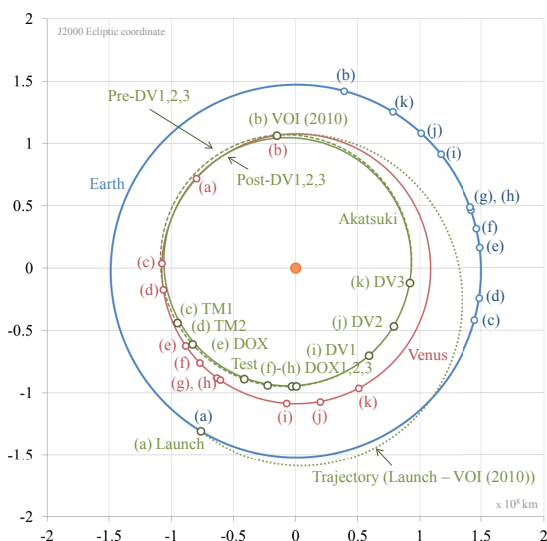


図1: あかつき・地球・金星の軌道(2010年～2015年)と主な軌道上イベント。

Orbital Maneuver Engine) の試験噴射を2回実施。OME噴射で得られた加速度は想定約1/9であり、単位質量推進あたりの加速能力(比推力)を比較すると、姿勢制御エンジン(Reaction Control System: RCS)の方が効率的であった。よって、以降の軌道制御をRCS4基を用いることとし、RCS噴射の場合は不要となる酸化剤を投棄(2011年10月)した上で、軌道制御DV1,

1. 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所
hirose.chikako@jaxa.jp

表1：2010年から2011年までの主な軌道イベント(括弧内の数字は計画値)。

	Events	Time (UTC)	Duration [sec]	Engine	Maneuver Amount [m/s]					Maneuver Direction [deg]		
					Total	Radial	In-track	Crosstrack	Error	R.A.	Dec.	Error
(a)	Launch	2010/05/20 21:58:22										
(b)	Venus Orbit Insertion (VOI)	2010/12/07 00:00:00	717.5	OME	134.8 (748.3)	(0.0)	(-748.3)	(0.0)				
(c)	OME Test Maneuver 1 (TM1)	2011/09/07 02:50:00	2.0	OME	0.7	0.0	0.0	0.7	-	277.4	68.2	-
(d)	OME Test Maneuver 2 (TM2)	2011/09/14 02:50:00	5.0	OME	0.6	0.0	0.0	0.6	-	289.7	58.0	-
(e)	Disposal of Oxidizer Test	2011/09/30 03:02:00	60.0	-	1.9	0.0	-1.9	0.0	-	239.9	-28.1	-
(f)	Disposal of Oxidizer 1 (DOX1)	2011/10/06 02:53:00	360.0	-	7.6	0.0	-7.6	0.0	-	173.9	9.0	-
(g)	Disposal of Oxidizer 2 (DOX2)	2011/10/12 03:23:00	540.0	-	16.2	0.0	-16.2	0.0	-	183.0	0.1	-
(h)	Disposal of Oxidizer 3 (DOX3)	2011/10/13 04:53:00	540.0	-								
(i)	Delta-V 1 (DV1)	2011/11/01 04:22:00	587.5	RCS	88.6 (90.0)	2.3 (0.0)	-85.6 (-86.2)	-22.7 (-25.8)	-1.6	214.4 (213.2)	-27.3 (-28.8)	1.9
(j)	Delta-V 2 (DV2)	2011/11/10 04:37:00	544.0	RCS	90.6 (90.0)	-0.7 (0.0)	-87.6 (-86.2)	-23.1 (-25.8)	0.7	232.7 (232.0)	-33.0 (-34.9)	1.9
(k)	Delta-V 3 (DV3)	2011/11/21 04:57:00	342.125	RCS	63.5 (63.8)	-2.4 (0.0)	-59.7 (-60.0)	-21.4 (-21.6)	-0.5	256.8 (256.7)	-42.8 (-42.9)	0.2

	金星再会合1回目	金星再会合2回目	金星再会合3回目	金星周回軌道 高度維持の可否
(1) 金星周回軌道投入				
逆行				×
順行				×
極軌道				○
(2a) スウィングバイ θ 170° r 1.6万km		金星周回軌道投入		
		逆行		×
		順行		○
		極軌道		○
(2b)		スウィングバイ	金星周回軌道投入	
			逆行	×
			順行	○
			極軌道	○
(3a) スウィングバイ θ 0° r 15万km		金星周回軌道投入		
		逆行		×
		順行		○
		極軌道		○
(3b)		スウィングバイ	金星周回軌道投入	
			逆行	×
			順行	○
			極軌道	○

図2：金星周回軌道投入 解析ケース・サマリ。

DV2, DV3(2011年11月)を実施した。これにより金星との会合タイミングを2016年から2015年に早め、現在、「あかつき」は、2015年11月22日に金星と会合する軌道にいる。

2. 軌道、軌道、軌道

いざ軌道を検討してみると、全く一筋縄ではいかないことが判明した。2015年11月22日の会合時に金星周回軌道に投入すると、金星にすぐに落下してしまう。では、1回目の金星会合時は金星をスウィングバイし、2回目の会合で金星周回軌道に投入するかどうか。2

回目の会合で投入しても金星にすぐに落下することが分かった。1回目のスウィングバイ条件を変更し、2回目の会合時に投入しても、やはり結果は同様。2回金星をスウィングバイし、3回目で投入してもやはり結果は落下。欧州宇宙機関(ESA)の金星探査機「ヴィーナス・エクスプレス」は、大気の成分観測が主目的であるため、極軌道を選択した。一方、「あかつき」は、連続的に大気を観測するため、金星の自転・大気の回転方向と同一の逆行(北から見て時計回り)に投入したい。だが、結果はことごとく数十日で金星に落下し、高度維持は不可能であった(解析ケースのサマリは図2)。これは、ひとえに太陽重力摂動に依るものである。

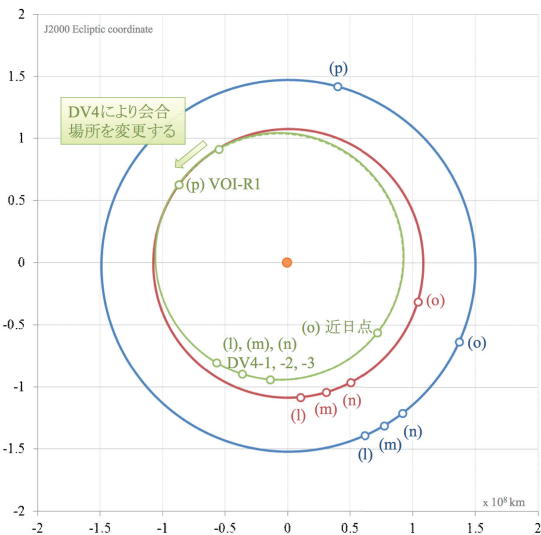


図3：DV4軌道制御及び金星周回軌道投入位置。

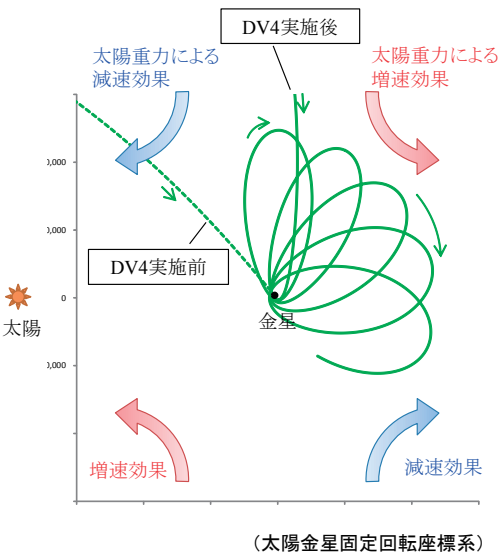


図4：DV4による金星接近方向の変更。

表2：2015年に予定する主な軌道上イベント。

	Events	Time (UTC)	Duration [sec]	Engine	Maneuver Amount [m/s]			
					Total	Radial	In-track	Crosstrack
(l)	Delta-V 4-1 (DV4-1)	2015/07/17 04:00:00	96	RCS	19.0	8.6	-12.3	11.7
(m)	Delta-V 4-2 (DV4-2)	2015/07/24 04:00:00	123	RCS	24.0	4.6	-16.7	16.6
(n)	Delta-V 4-3 (DV4-3)	2015/07/31 04:00:00	244	RCS	24.0	-4.9	-30.6	34.0
(o)	近日点	2015/08/29						
(p)	Venus Orbit Insertion (VOI-R1)	2015/12/07 00:00:00	1145	RCS	198.5	0.0	-198.5	0.0

打上げ当初「あかつき」は、遠金点高度約8万 kmの周回軌道に投入される予定であったが、今は、推進薬残量の制約から遠金点高度は約30万 kmとならざるを得ない。これにより、太陽重力の影響をより強く受けることになった。

私が「あかつき」プロジェクトの中でそれっぽい仕事を出来るようになったのは、2011年頃からである。それまではスペースデブリ(宇宙ごみ)の軌道決定や衝突解析等を専門としていたため、軌道設計などやったことも無かったが、宇宙研に異動して来て、思わぬ「あかつき」の事故に遭遇した。「あかつき」プロジェクトのサイエンス・メンバーは、観測データを得られぬなか、「あかつき」運用を黙々と続けてくれていた。サイエンス・メンバーからは、リスクとのトレードオフで必ずしも逆行軌道に拘らなくて良いと言われていたが、提案出来る投入シナリオのなかに、逆行軌道の物が一つも無かった。なんとしても逆行軌道ケースを提案シナリオの中に入れるべく、文字通り寝ても覚めて

も、睡眠時間を削って軌道を検討した。もっと頭の良さそうなやり方があるだろうと思いつつ、解析を回しては1つ1つ条件を書きとめ、次の解析で何をどちらに振るか考え、また解析を回した。「あかつき」の事故の翌年に結婚したが、夫などそっちのけで、軌道、軌道、軌道の毎日だった。

3. 2015年金星周回軌道投入計画

2013年に出産し、産休・育休に入る前に、軌道計画チームから、2通りの逆行軌道投入ケースを含む複数の軌道計画を提案することが出来た。しばらく軌道検討をお休みし、初めての育児に振り回されつつ、2014年春に仕事に復帰した。ちょうど提案軌道に基づくシステム検討が開始され、熱解析や姿勢解析を進めてもらい、皆で運用計画を組み立てた。その運用計画を更に吟味し、再度熱解析等を回す。3回ほどのサイクルを経て、現在、ほぼ運用計画が確定しつつある。

軌道投入計画を図3及び表2に示す。2015年7月に予定している軌道制御DV4(DV4-1, -2, -3の3回に分ける)を実施しない場合、2015年11月22日に金星に最接近するが、そこでVOIを行うと、近金点高度が低下し、数周回後に金星に落下してしまう。金星への接近方向を図4上方(12時の方向)からとするため、DV4を実施する。これにより、金星への衝突(落下)を回避する、という戦略である。DV4は、2015年12月の金星周回軌道投入(VOI-R1)で使用予定の姿勢制御エンジン(RCS)4基で噴射するため、スラスタ特性(噴射効率他)と姿勢安定性を把握する目的もある。現在、2015年12月7日の金星周回軌道投入を予定している。

4. 金星周回軌道投入に向けて

現在、2015年12月7日の金星周回軌道投入(VOI-R1)を目指し、プロジェクトチーム一丸となって、運用計画を精査しているところである。次の大きなイベントは、今年7月の軌道制御(DV4)である。DV4にて、スラスタ効率の特性等を得るが、期待通りの推力が出ることを願うばかりである。その後、8月に惑星間遷移軌道における最後の近日点を通過する。「あかつき」は金星軌道より内側を飛行しているため(図3)、近日点の熱環境は、金星軌道上(約 $2600 \text{ [W/m}^2\text{]}$)より約 $1000 \text{ [W/m}^2\text{]}$ 高い熱入力である。これまで8回の近日点を乗り越えており、最後の近日点も無事に乗り切ることを願っている。近日点を過ぎると、VOI-R1に向けたリハーサルや、12月7日に精確な投入点を狙うため、軌道の微修正を行い、VOI-R1に臨む。2010年のVOI失敗から5年、長いようであつという間の5年間であった。引き続き、12月に無事に金星周回出来るよう、最善の策を練りたい。

謝 辞

本軌道検討は、軌道計画チーム：宇宙科学研究所 石井信明教授、日本電気(株) 寺田博氏、鵜飼千亜妃氏との成果であり、打合せ等の議論を通じて多くの知識や示唆を頂いた皆様に感謝致します。