

(要旨) PLANET-Cに搭載される紫外イメージャ UVI(Ultraviolet Imager)はプロトモデル(試作機)の性能 評価を無事終え,2008年8月現在フライトモデル(実機)の組み立て段階に入っている.2010年夏の打ち上げ に向け着々と準備の進むUVIについて,観測対象と性能諸元,および現在の開発状況を報告する.

1. はじめに

金星は可視光で見ると特徴的な模様がないが、紫外 線で見ると"横倒しのY字"をはじめとする惑星規模 の模様があり、それらが約4地球日の周期で東から西 へと循環していることを発見したのは1960年代の地上 からの紫外観測であった[1]. ほぼ同時期に地上から のレーダーを用いた地表面の観測から自転は地球と反 対方向で、周期は243日という非常に遅いものである ことが判明した. 雲の模様の動きが背景風に乗ったも のであると仮定し、自転速度と比較すると、地面の約 60倍という速さで大気が回転していることになる.地 球での平均的な東西風速は自転速度のせいぜい1割程 度であり、これに比べると自転の60倍の風速はかなり 非常識である、そのため、模様の動きは風に流された ものではなく波動の伝播であるという考え方もあった. しかし、1970年代以降の旧ソ連のベネラシリーズによ るプローブ観測や、アメリカのマリナー10、パイオ ニアビーナスによる観測から、波の伝播ではなく本当 に大気が高速循環していること(図1). "Y字模様"だけ でなく、細かな構造が存在することが確認された(図2).

大気のこの高速循環は "超回転"と呼ばれており, 金星大気の最大の謎の一つとされている. 超回転につ いての研究は紫外観測から始まったといっても良く, 金星探査において紫外光による撮像は繰り返し行われ てきた(表1).

- 1. 東北大学理学研究科惑星プラズマ・大気研究センター
- 2. 宇宙航空研究開発機構
- 3. 北海道大学大学院理学研究院



図1: 金星大気の西向き風の高度プロファイル. 'V' で示され ている曲線はベネラシリーズによる観測,他の曲線はパイ オニアビーナスの観測による(文献[2]の図を改変).

金星の雲は高度約47kmから70kmに存在していて濃 硫酸の液滴からなり,光学的厚さは20~40と非常に厚 い.紫外で見える模様の暗い部分は,雲頂付近の光学 的に薄い部分に何らかの化学物質がより多く存在し, それらが太陽紫外線の散乱を弱めるために生じるもの



図2: 紫外域で観測した金星に見られる典型的な模様(文献[3]の 図を改変).

表1: 金星探査に使われた紫外撮像装置の比較.

衛星名	PVO*	Galileo	Venus
			Express
センサ名	OCPP	SSI	VMC
受光素子	シリコン	CCD	CCD
	フォトダイ	(画素数	(画素数
	オード	800×800)	1024×1024)
中心波長	365nm	404nm	365nm
視野角	0.5mrad	8.1mrad	0.3rad
全球撮像時	30km	16km	27km
空間分解能			
データ深度	8bit	8bit	14bit

*PVO: Pioneer Venus Orbiter

と推測される.このような紫外吸収物質の不均一な分 布[4]や雲そのものの不均一な分布,高緯度の明るい部 分については微細な粒子の影響などにより,濃淡が作 られていると説明されている.大規模な"Y字模様" がどのようにして作られているのかについては,赤道 ケルビン波やロスビー波による説明が試みられている が決着を見ていない[5].

大気大循環を明らかにするというPlanet-C[6, 7]の目 標を達成するには、惑星スケールからメソ(数+km) スケールまでの様々な大気現象(波動,循環,対流)を 網羅的にとらえる必要がある.我々は、高空間分解 能と高シグナルノイズ比(SN比)を得ることに注力し、 UVI(Ultraviolet Imager)の開発を行ってきた.本稿 では、UVIの観測対象と性能諸元、および現在の開発 状況を報告する.

2.UVIの観測対象

金星昼面の太陽散乱光のスペクトルには200nmから 500nmの間で広く吸収構造があり、雲の中に含まれる 物質によるものと考えられている[8]. 過去に行われて きた紫外域イメージ観測は,経験から比較的大きなコ ントラストがあることが知られている365nm付近を中 心に行われてきた.この波長域の吸収を担う物質は未 同定であり、その挙動を調べることは物質を同定する 手がかりとなること、また320nm-400nmの太陽放射 の50%近くを吸収しており[4]、エネルギー収支にとっ て重要であることから、我々はこの波長を第一のター ゲットとする.加えて、雲の成分である硫酸のもとに なる二酸化硫黄(SO₂)が主に吸収を担う波長320nm以



図3: UVI-Sプロトモデル概観

下でも観測を行う. 観測の中心波長は283nmであるが, ここを選んだ理由は, この波長付近でのSO₂の吸収の 強さと太陽光スペクトル強度の兼ね合いで最も高コン トラストが期待できるためである.

東西風速の1/10未満と予想される南北風速を導出す るにはできるだけ長い間同じ雲を追跡することが必要 となる. Planet-Cは遠金点付近で超回転に同期する軌 道を選ぶという工夫がされており, UVIは同期してい る約20時間に全球を2時間以下の時間間隔で撮像する ことで,連続した雲の動きを捕らえる.また,近金点 付近での撮像やリム撮像ではこれまでに類を見ない高 解像度で雲の水平・鉛直構造の観測を試みる.

283nmで見る金星が従来365nmで見てきた金星とど のように異なるのか誰にもわからないがこれら2波長 の画像を用いて次のような研究が可能となるだろう.

・SO₂および未同定吸収物質の水平分布

・雲追跡による雲頂高度付近の大気運動の解析

・リム観測によるヘイズの鉛直分布

これらは独立ではなく,光化学や雲物理と密接に関係 するSO₂や未同定吸収物質の挙動と風速場との関係は, 雲物理の理解の鍵を握る.また,同時に観測を行う他 のカメラとの連携によりこれまで不可能であった3次 元的な大気の動きを知ることが期待できる.

3. 性能諸元

UVIは光学センサーからなるUVI-S, 主に電源供給 およびCCD制御を行うUVI-AEで構成され,取得画 像データの処理はUVIを含めた4つのカメラで共通の カメラ系統合制御装置(DE)に送られる.表2にUVI の諸元を、図3にUVI-Sのプロトモデルの概観を示す. UVI-Sにおいてフードから入った光は、フィルターホ イールに取り付けられた任意のフィルタを通過し、軸 外し反射屈折型の光学系によって1024×1024ピクセル の背面照射型CCDに結象する. CCDは電気的な冷却 装置を持たず、ラジエターにより自然放射冷却で-5 ℃以下を保つよう設計されている. なお、UVIの開発 担当メーカーはNEC東芝スペースシステム(㈱である.

UVIの観測解像度を表3に示す.光学系の視野角12 度はPlanet-Cに搭載される他のカメラと同じであり, 10金星半径(Rv)よりも遠くからの撮像では金星ディ スク全体を撮像でき解像度は13km程度となる.また 近金点付近では,解像度が最高60mのクローズアップ 撮像となる.

フィルタホイールには、365nm,283nmのフィルタ の他、フラット画像を得るための拡散板と、太陽直射 などを防ぐための蓋に相当するアルミ板のポジション がある。フレーム転送型CCDを採用しているため高 感度であるが、露出時間にあわせて瞬間的に動くシャ ッタはなく,短時間露出ではフレーム転送中の露出(ス ミア)がSN比を低下させる。UVIはこの問題を解決す るため、通常の露出時間の撮像とセットで画像転送時 間のみの露出による撮像(ゼロ秒露出)を行い、スミア による上乗せ分の信号をオンボードで除去すること が可能である。これにより、SN比100を超えるデータ

表2: UVI諸元

センサ名	UVI
観測方式	昼面雲よる太陽散乱光観測
センサ形式	反射屈折光学系を用いた撮像カメラ
総合F值	16
中心波長	283nm, 365nm(共に半値全幅15nm)
視野角	12度×12度
露出時間	0.004sec - 11 sec
空間解像度	60m(@近金点)-17km(@13金星半径)
データ深度	12bit
観測器重量	4.1 kg
光学素子	SiCCD(背面照射フレーム転送型)
画素数	1024×1024 ピクセル

表3: UVI観測解像度概要

	全球撮像	近金点付近	リム
金星中心から	10–13Rv	300km-2Rv	\sim 2000km
の距離			
空間解像度	13–17km	60m–2.6km	\sim 500m
SN比	> 100	> 10	> 10

を取得できると見積られる. ゼロ秒露出を用いた撮像 は被写体が高速で移動しない全球撮像時に利用可能で あり, クローズアップ撮像時はワンショットとなるが, この場合でもSN比10を達成する設計である.

4. おわりに

UVIはPlanet-Cに搭載されるカメラの中で,新規開 発要素の少ない機器であるといわれていた.しかしな がら,金星までの航行と金星周回軌道という未体験の 環境において,最良の性能を得るため,これまでの経 験や知識を結集させ,あるいは実験を行うことで必要 な基礎データを取得し,浮上してくる問題を一つ一つ 解決する必要があった.

UVIチームの検討課題として.1)フィルタホイール 用モーター耐久性。2)CCDの高エネルギー粒子耐性。 3) 光学系内のガラス緩衝材として使用するシリコン材 からのアウトガスによる分子コンタミネーション対策. が挙げられる。1)に関しては中間赤外カメラと共に真 空中における機構モデルの耐久実証試験をおこなった [9]. 2)の放射線によるCCD感度劣化に関して、フラ イト品で使用する同型のCCDへ高エネルギープロト ンを照射し、感度劣化を測定した、雲のような広がり を持った対象が撮像可能となる放射線耐性(6KRad以 下)を見積り、必要となる遮蔽物の厚み(アルミ6mm 相当以上)を決定した。3)については、衛星上で予想 されるUVIの温度環境下・真空条件下で、シリコン材 (40度)からのアウトガスがどの程度低温箇所(-50度) に付着するかを10⁻⁶g/cm²以下の精度で計測可能な水 晶振動子センサー(TQCM)を用いて実測した.また、 -50度に冷却したガラス材をチャンバー内に一緒に入 れておき,アウトガスが付着した状態の透過率を分光 器で測定した. これから見積もられるコンタミネーシ ョンの許容量(<1.8×10⁻⁵g/cm²)を十分達成する長時 間のベーキング(80℃で1週間以上)をFM品のシリコ ン材に対して実施した.

以上のような試行錯誤を経て、UVIは万全の体制で フライトモデルの組み上げを行っている最中である. 今後、フライトモデルの性能評価試験という最後の山 場を越えれば、2010年からは金星への旅路が始まる. 2006年4月から観測を行っているVenus Expressに搭 載されたVMC(Venus Monitoring Camera)の紫外画 像は、これまで考えられていた以上に細かな雲構造が 存在することを示しており[10]、より高解像度・高感 度のUVIが、どのような雲の姿・動きを我々に見せて くれるのか、さらなる予想外の構造が存在するのでは ないのか、と非常に楽しみである.

謝 辞

本論文の執筆にあたっては多くのUVIチームメンバ ーから協力を得ました.

本稿で述べた、モーター耐久試験実施にあたり多摩 川精機㈱の唐澤豊氏からステッピングモータに関する 技術協力をいただきました. CCD放射線耐性試験の 実施に関しては、放射線医学総合研究所の重粒子線が ん治療装置(HIMAC)を使用させて頂き、同研究所の 内堀幸夫氏、北村尚氏と宇宙航空研究開発機構の高島 健准教授に御協力いただきました.また、アウトガス 試験においては、国立天文台先端技術センターの真空 チャンバーおよびTQCMといった機材を利用させて 頂き、同センターの田村友範氏と原弘久助教には実験 方法に関して多くのアドバイスと御協力をいただきま した.この他、UVIの開発に際して、さまざまな研究 機関の施設や関係諸氏に御協力いただきました.全て を記載するのは困難でありますが、ここに感謝の意を 記します.

UVIの設計,製作および上記実験に関係した試料の 提供など全般に関して,高い技術力で我々の要求に親 身に答えてくださったNEC東芝スペースシステム㈱ の佐藤康志氏,野口一秀氏,ならびに,NEC航空宇 宙システム㈱の小菅勇司氏を中心とするUVI開発チー ムの皆様,そして光学系に関して最高の設計をしてく ださった㈱ニコンの江崎龍彦氏,向井香織氏,沼田利 幸氏,その他多数メーカーの関係諸氏によってUVI開 発は支えられてきました.この場を借りて厚く御礼申 し上げます.

参考文献

- [1] Boyer and Guerin, 1969, Icarus, 11, 338.
- [2] Schubert, G. et al., 1980, J. Geophys. Res., 85, 8007.
- [3] Rossow, W. B. et al., 1980, J. Geophys. Res., 85,

8107.

- [4] Pollack, J. B. et al., 1980, J. Geophys. Res., 85, 8141.
- [5] 今村剛他, 2003, 遊・星・人, 12, 254.
- [6] Nakamura, M. et al., 2007, Planet. Space Sci., 55, 1831.
- [7] 今村剛他, 2007, 遊·星·人, 16, 226.
- [8] Moroz, V. I. et al., 1985, Adv. Space Res., 5, 197.
- [9] 福原哲哉他, 2008, 遊·星·人, 17, 130.
- [10] Markiewicz, W. J. et al., 2007, Nature, 450, 633.