



# 金星探査機「あかつき」(PLANET-C) 試験観測の中間報告

平成28(2016)年3月31日

宇宙科学研究所

あかつきプロジェクトチーム

# 中間報告の主旨

「あかつき」の金星周回軌道投入への成功後、これまでの試験観測が現時点で順調に進んでいることを踏まえ、

1. 「あかつき」の現状と定常観測へ向けた準備状況
2. 「あかつき」に搭載された各観測機器の準備状況
3. 観測データからアプローチするサイエンス

について報告する

# 1. 「あかつき」の現状と 定常観測へ向けた準備状況

# 「あかつき」の現状

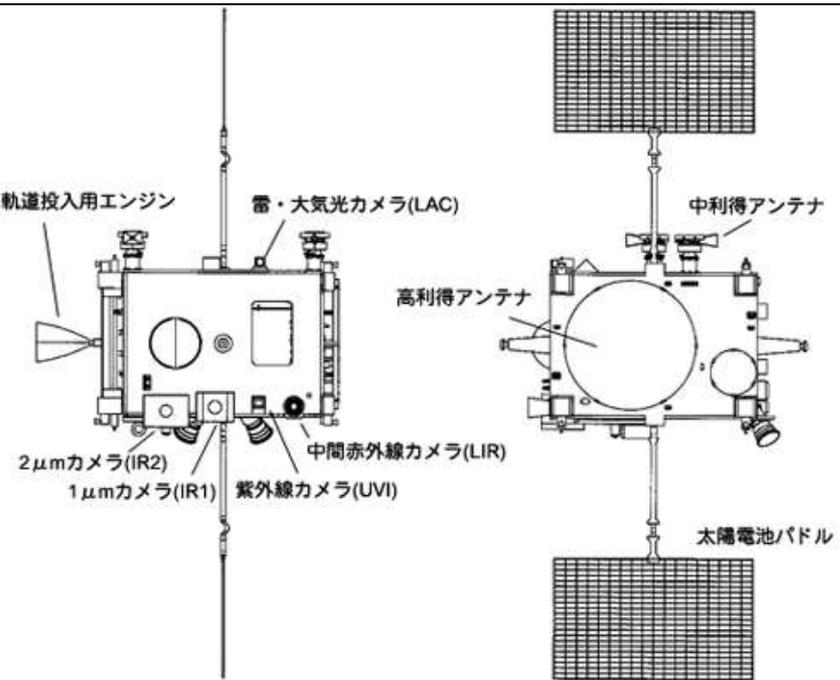
- 2015年12月7日の金星周回軌道投入 (VOI) 後、12月20日の軌道修正を経て、「あかつき」はほぼ予定どおりの軌道に入った
- 観測機器の立ち上げは現時点では順調
- ミニマムサクセスに相当する観測は既に実施
- 打上げ前に予定していたフルサクセスまでの研究計画を達成することを目指している
- 現在の軌道では遠金点高度が高く、画像解像度が低い場合が多いが、長期間にわたるデータ取得によりこのデメリットをカバー

# 金星探査機「あかつき」概要



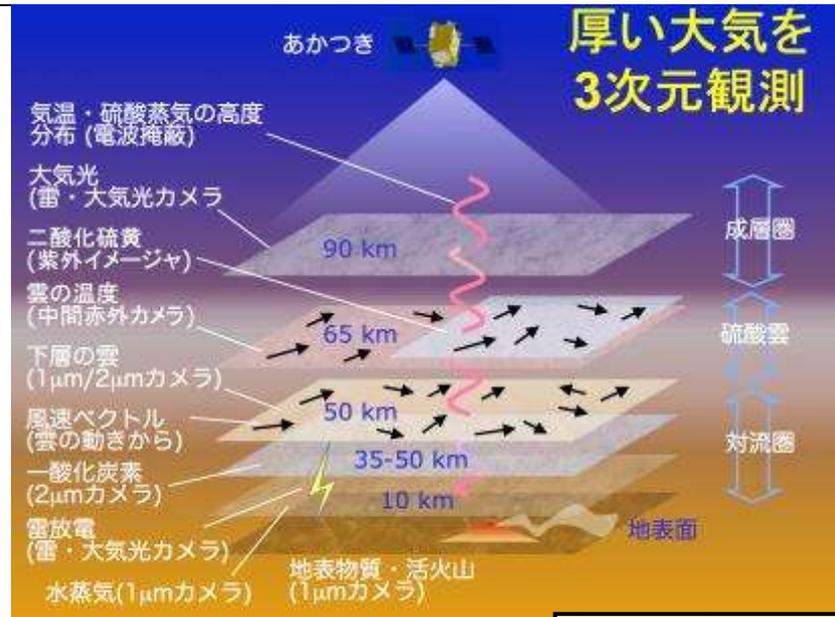
## 目的

金星の雲層の下に隠された気象現象を、最新の赤外線観測技術により金星周回軌道から観測することにより、地球気象学の常識を超えた高速の大気循環「超回転（スーパー・ローテーション）」を始めとする金星大気学のメカニズムを解明し、地球気候変動理解の鍵となる惑星気象学の確立に資する。



衛星外観

(注：左図左側部の「軌道投入用エンジン」が破損した)



赤外線や紫外線の多波長カメラと雷センサによる金星気象の3次元データ

金星大気力学の解明

- 惑星気象学の確立
- 地球環境変動の理解

## 主要諸元 (打上時の想定)

- 重量 約480 kg
- 打上げ 平成22年5月21日
- 軌道 金星周回楕円軌道、高度 約300 km~8万 km
- 金星到達まで 約 半年
- ミッション期間 金星到達後 約 2年以上

## スケジュール

- |           |        |
|-----------|--------|
| 平成14-15年度 | 基礎開発研究 |
| 平成16-18年度 | 衛星試作   |
| 平成19-21年度 | 衛星製作   |
| 平成21年度    | 動作確認試験 |
| 平成22年度    | 打上げ    |

# サクセスクライテリア達成予測

2015年2月6日記者説明会資料より抜粋

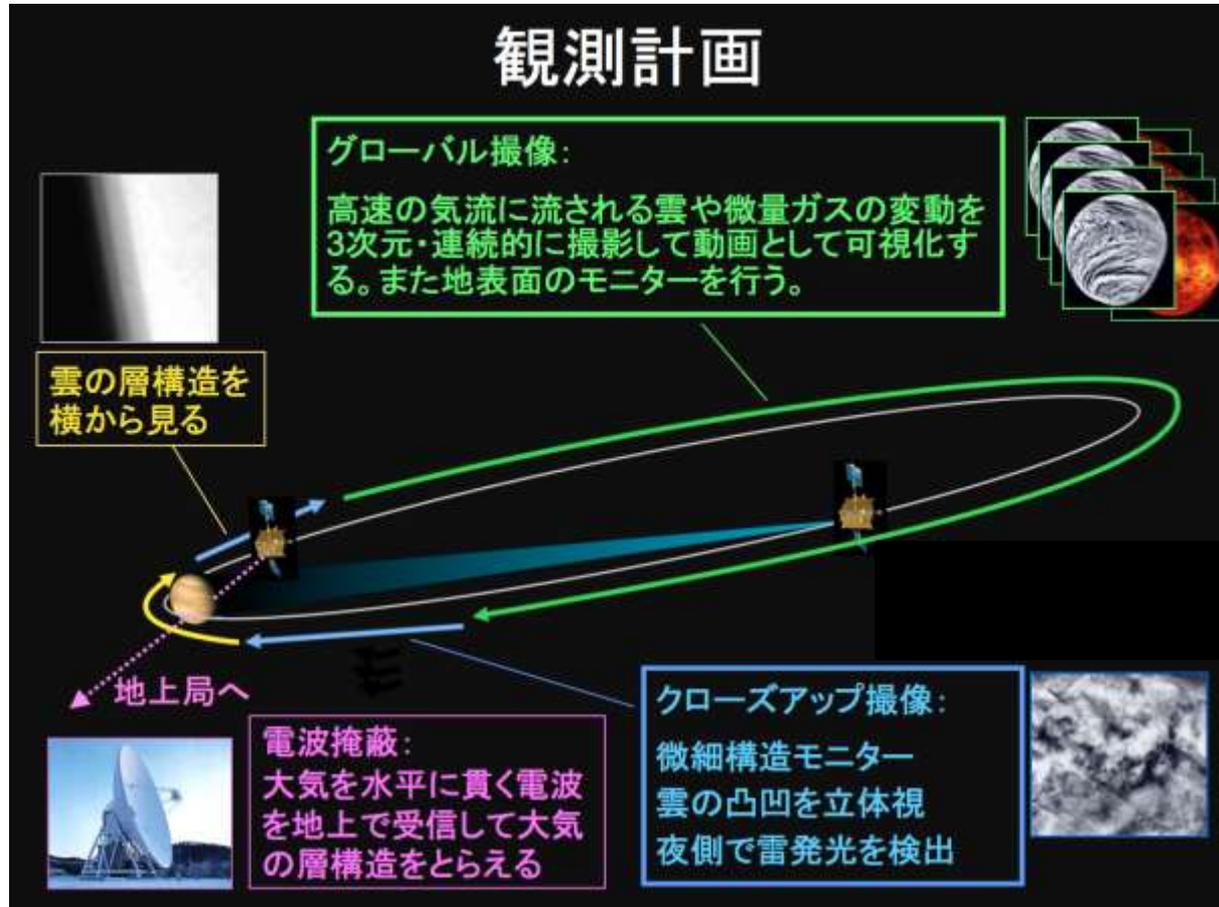
2年以内に達成する見込み

すでに観測を実行  
(3 / 5 - 1 2 LIR, UVI)

		全機器正常	一部機器劣化*	
ミニマムサクセス	雲が東西方向に1周する1週間にわたって、金星周回軌道上からいずれかのカメラによって画像を連続的(数時間毎)に取得し、全球的な雲の構造を捉える	○	○	
フルサクセス	雲領域の大気構造が変動する時間スケールである2年間にわたって右の全ての観測を行う	○ ただし空間分解能1/5	△	
	金星で雷放電が起こっているか否かを把握するために雷・大気光カメラ(LAC)を用いた観測を行う	○ ただし観測頻度1/10	×	
	電波科学により金星大気の温度構造を観測する	○ ただし観測頻度1/10	×	
エクストラサクセス	右のいずれかを達成する	太陽活動度の変化に伴う大気構造の変化を捉えるために、4地球年を超えて金星周回観測を行う	○	△
		1μmカメラ(IR1)により金星の地表面物性あるいは火山活動に関するデータを得る	○	×
		2μmカメラ(IR2)により地球軌道より内側での黄道光の分布を観測する	×	×

\* 現在、機器の状態チェックを実施中

# 観測計画



# 定常観測移行に向けた準備状況(1)

- 2015年12月20日に軌道調整
  - 遠金点36万km、近金点1,000-10,000km、周期10.5日の軌道に入った
- 準備状況
  - 高利得アンテナ(HGA)の機能確認
  - 日陰時に電力や「あかつき」の温度に問題が生じないことの確認
  - 様々な方向からの太陽光が入射しても「あかつき」の温度に問題が生じないことの確認などを実施してきた

# 定常観測移行に向けた準備状況(2)

- 順次、観測機器立上げ → 概ね順調
  - 金星周回軌道投入直後に中間赤外カメラ(LIR)、紫外イメージャ(UVI)、 $1\mu\text{m}$ カメラ(IR1)
  - 2015年12月11日に  $2\mu\text{m}$ カメラ(IR2)、2016年2月1日に超高安定発振器(USO)
- 雷・大気光カメラ(LAC)
  - 観測チャンスは10日に一度しかない日陰時
  - かける電圧を段階的に上げていくという方式で慎重に試験を進めている
  - 今後2ヶ月程度で定常観測に移行する予定
- 各観測機器の状況については後のページで個別に説明する

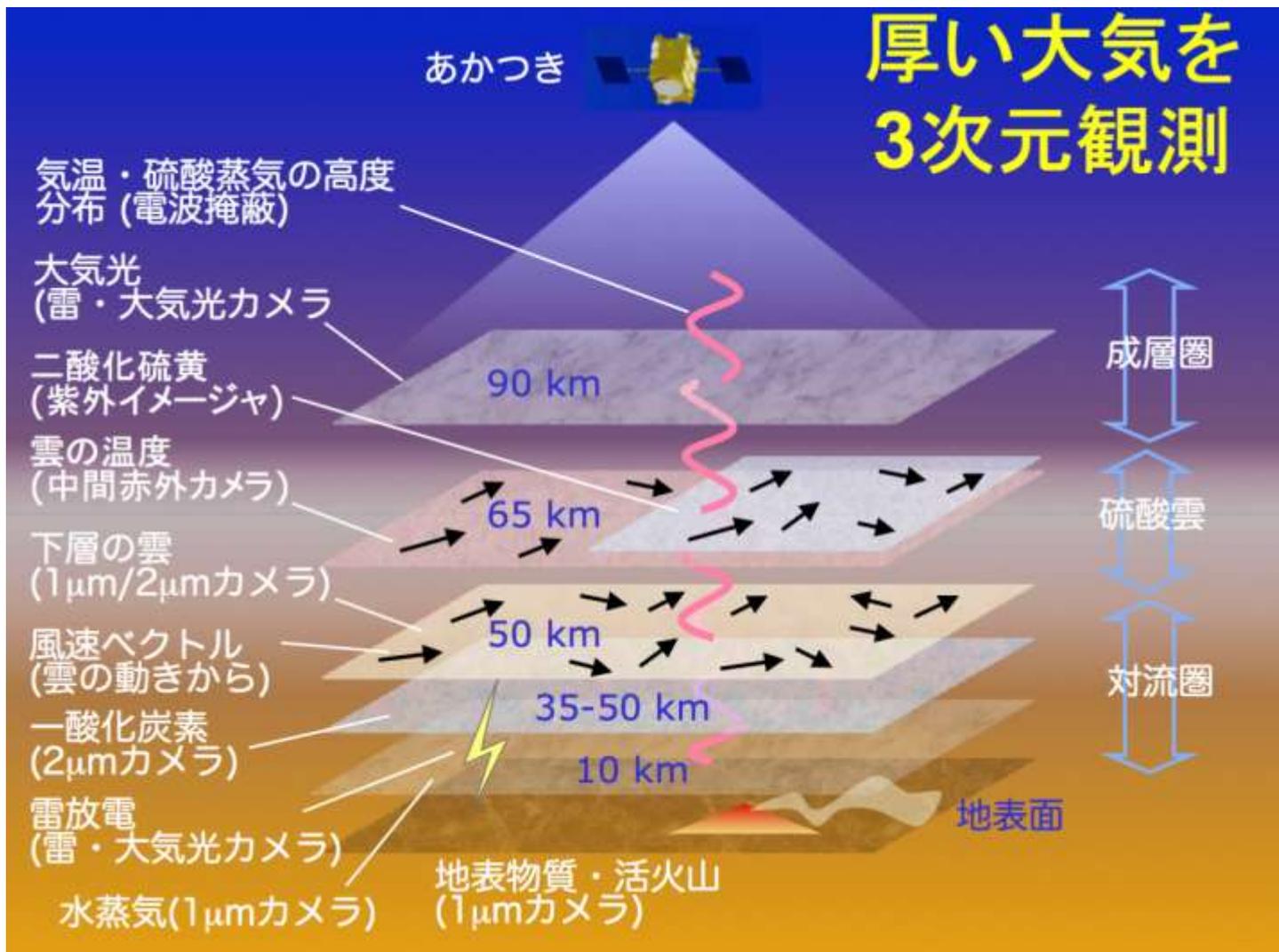
## 定常観測移行に向けた準備状況(3)

- 試験観測フェーズにおいて、2/20に一時通信不通が発生したが、正常に復帰した。本事象の原因究明及び対策を行った。
- 新しい観測画像の確認を行い、機器設定の最適化を行っている
- 定常観測への移行は4月中旬になる見込み

# 試験観測の結果(まとめ)

- 1 $\mu$ mカメラ(IR1): 機能確認結果は正常。金星周回軌道投入(VOI)直後に公開した画像は昼側の雲画像だが、その後、夜側の地表面の撮像にも成功した。
- 2 $\mu$ mカメラ(IR2): VOI直後に昼側の雲画像の取得に成功した。光学系と検出素子を冷却する冷凍機運転を最適化しつつあり、夜側撮像の成功率を着実に高めている。
- 中間赤外カメラ(LIR): 機能確認結果は正常。既に定常観測に近い連続的な撮像を実施し、過去に報告例のない興味深い現象が見つかっている。
- 紫外イメージャ(UVI): 機能確認結果は正常。VOI後、現在に至るまで「あかつき」がほとんど夜側上空にいたため、昼側専用のこのカメラはほとんど使用されなかった。昼側が写り始める4月から連続的な観測を始める。
- 雷・大気光カメラ(LAC): 検出器に加える電圧を段階的に上げていく試験を慎重に進めており、まだ観測を実施していない。
- 電波掩蔽観測(RS): 超高安定発信器(USO)の周波数安定度が劣化していないことを確認した。3月4日にUSOを用いて1回目の電波掩蔽観測を実施した。

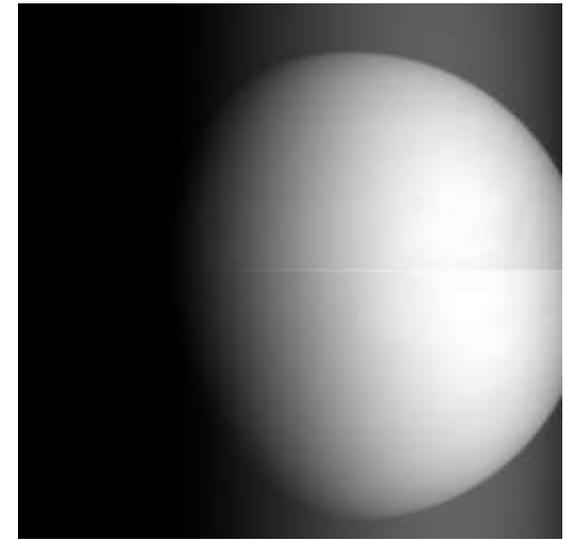
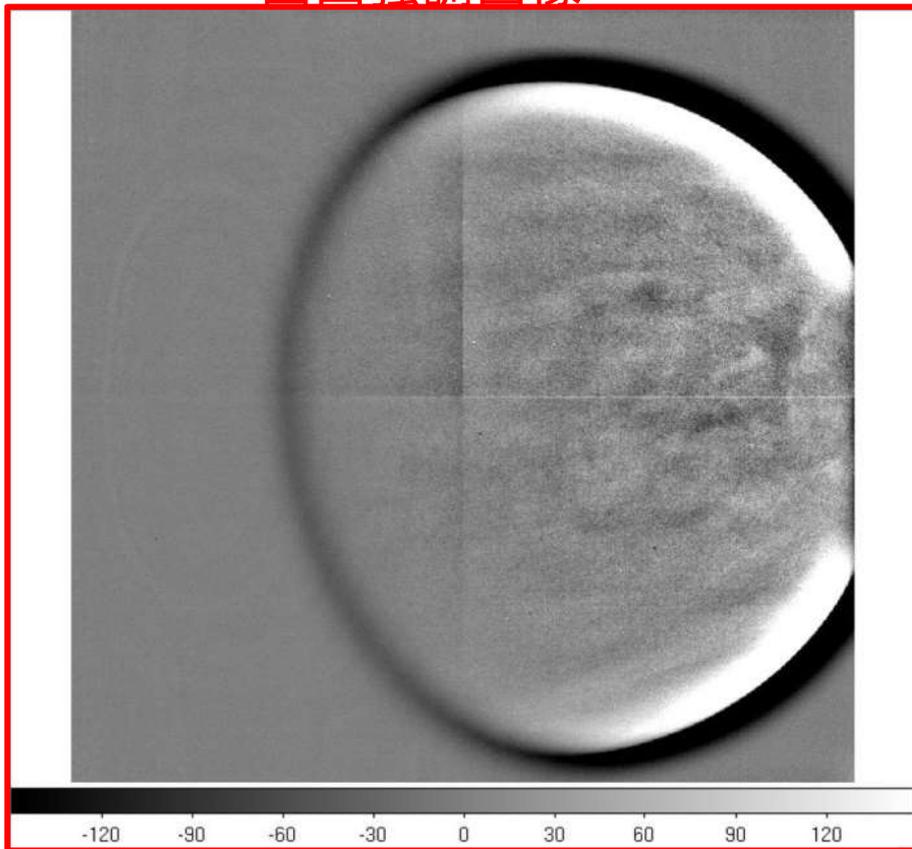
# 各観測機器の観測範囲



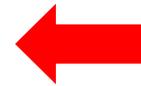
## 2.「あかつき」に搭載された各観測機器 の準備状況

# IR1 (1 $\mu$ mカメラ)の試験観測結果 (1)

## 凸凹強調画像



0.9  $\mu$ m 昼面生画像  
2015年12月7日13:50頃  
金星との距離 68,000 km



## 雲追跡により風速の分布を導出

- ・高度60kmでの風分布ができる
- ・他波長を使って他高度の風分布もできる
- ・スーパーローテーション生成の現場が見えてくると期待している

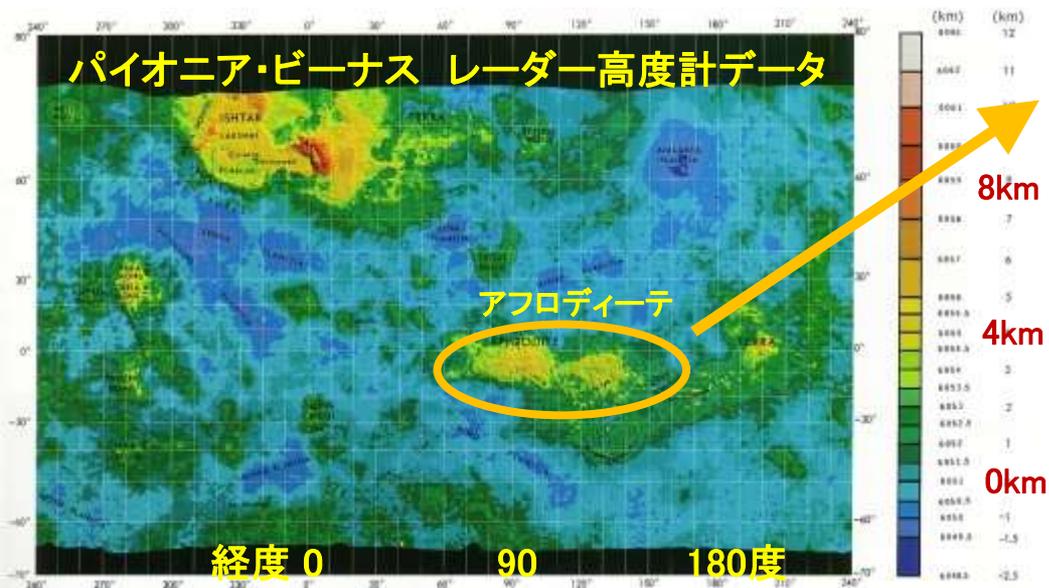
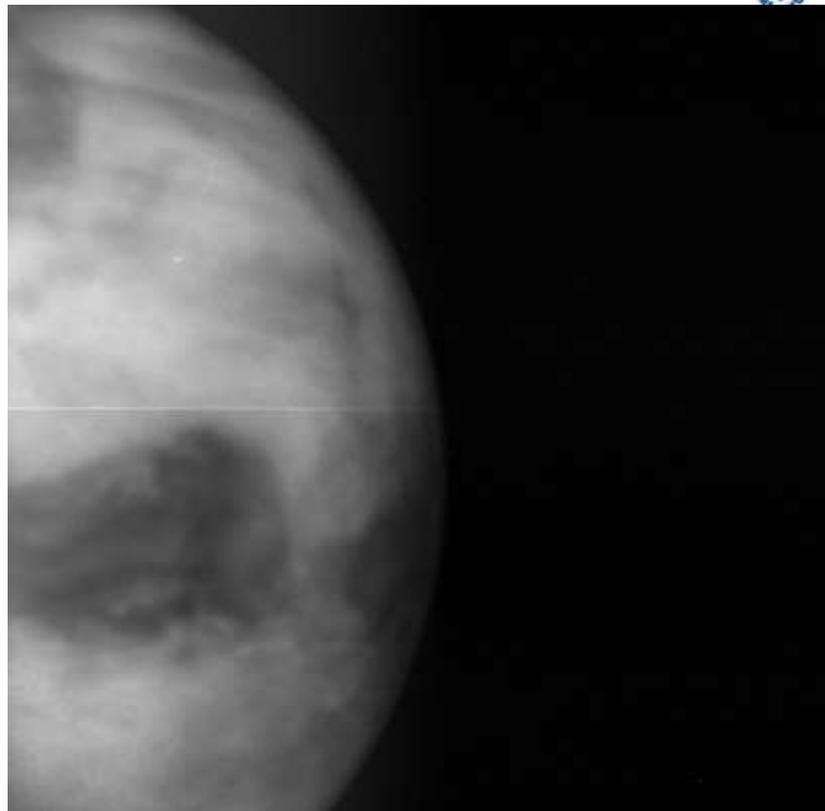
# IR1 (1 $\mu$ mカメラ) の試験観測結果 (2)

1.01 $\mu$ m夜面生画像(右画像)

2016年1月21日 44,000km

「あかつき」直下点 緯度+3° 経度=+67°

- ・主に地形がみえている
- ・地表面の鉱物組成が分かると期待される
- ・連続観測による金星の内部情報にも期待している



上画像中の左下の暗斑は  
アフロディーテ大陸

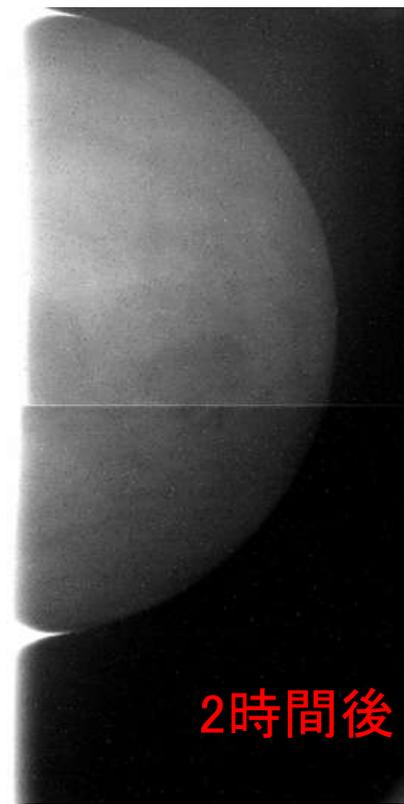
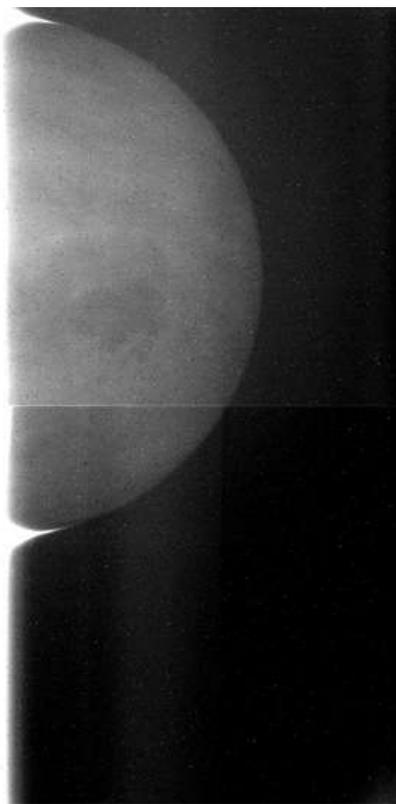
周辺の土地よりも高度が  
4km高いたため30K冷たく、  
熱放射が弱いので暗く見える

# IR1 (1 $\mu$ mカメラ)の試験観測結果 (3)

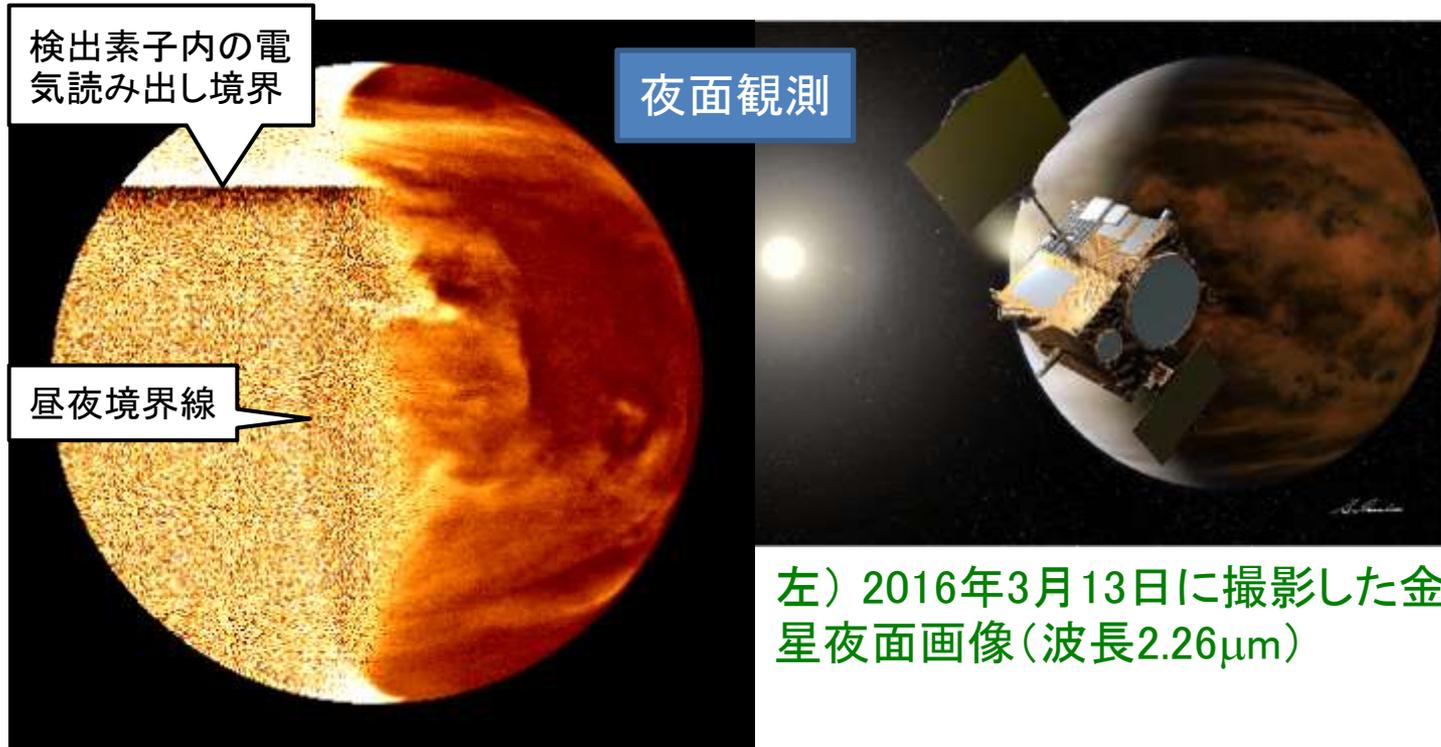
11:36UT 91,000km  
「あかつき」直下点  
緯度+1° 経度=102°

13:36UT 76,000km  
「あかつき」直下点  
緯度+1° 経度=96°

0.90 $\mu$ m夜面生画像  
2016年1月31日  
赤道暗部は  
アフロディーテ大陸



# IR2 (2 $\mu\text{m}$ カメラ) の試験観測結果 (1)



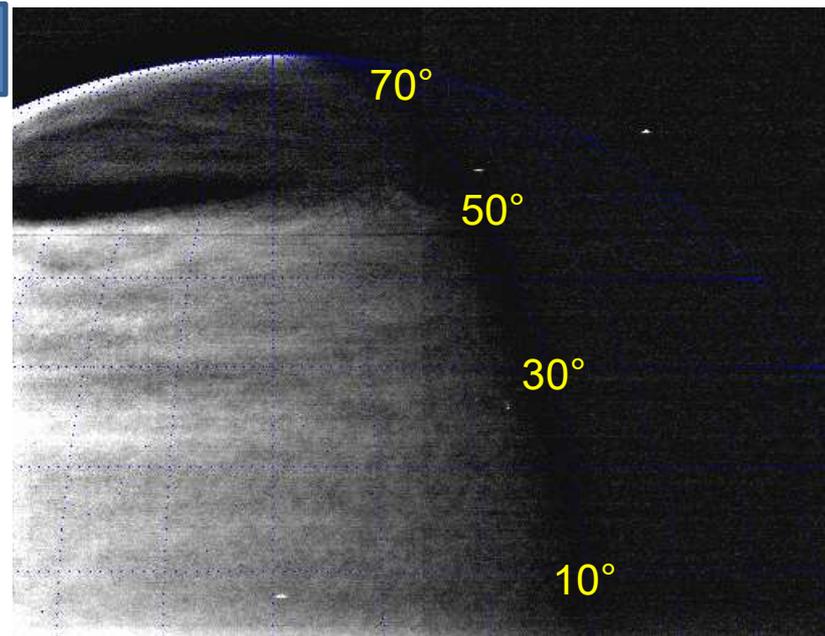
# IR2 (2 $\mu$ mカメラ) の試験観測結果 (2)



## 昼面観測

雲頂の高低が縞状構造を作る

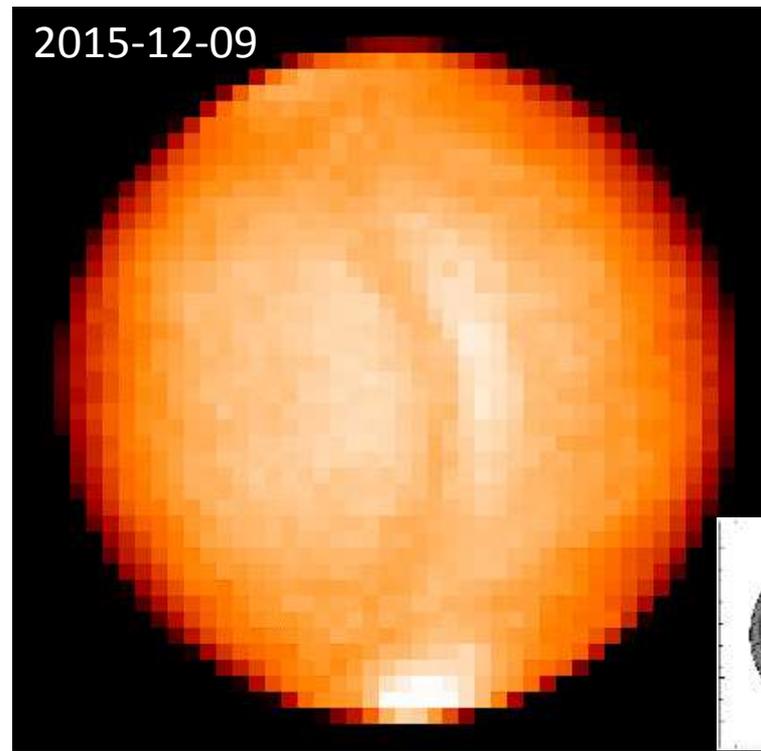
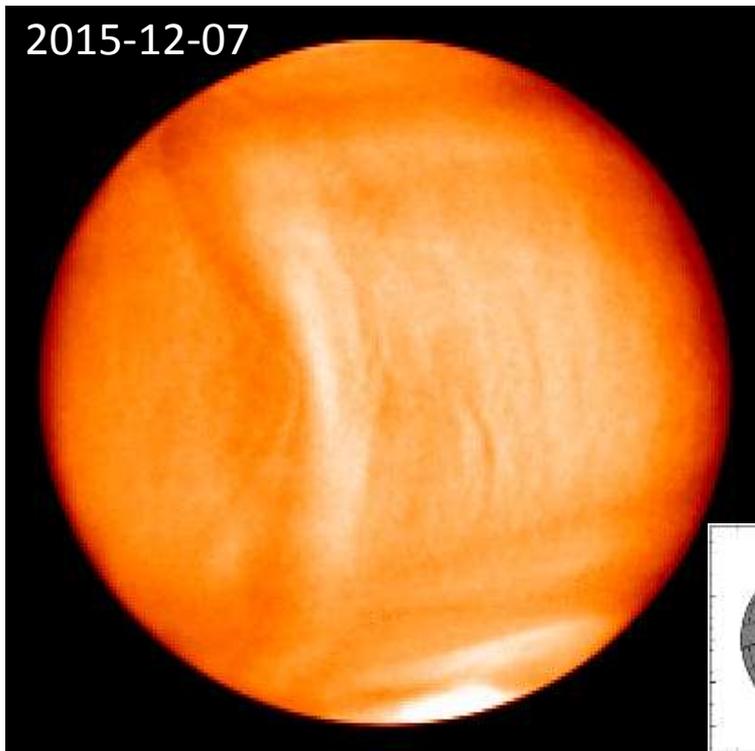
50° より高緯度で雲頂が低くなっている。



2015年12月11日(左)、2016年3月14日(上)に撮影した金星昼面画像(波長2.02 $\mu$ m)。

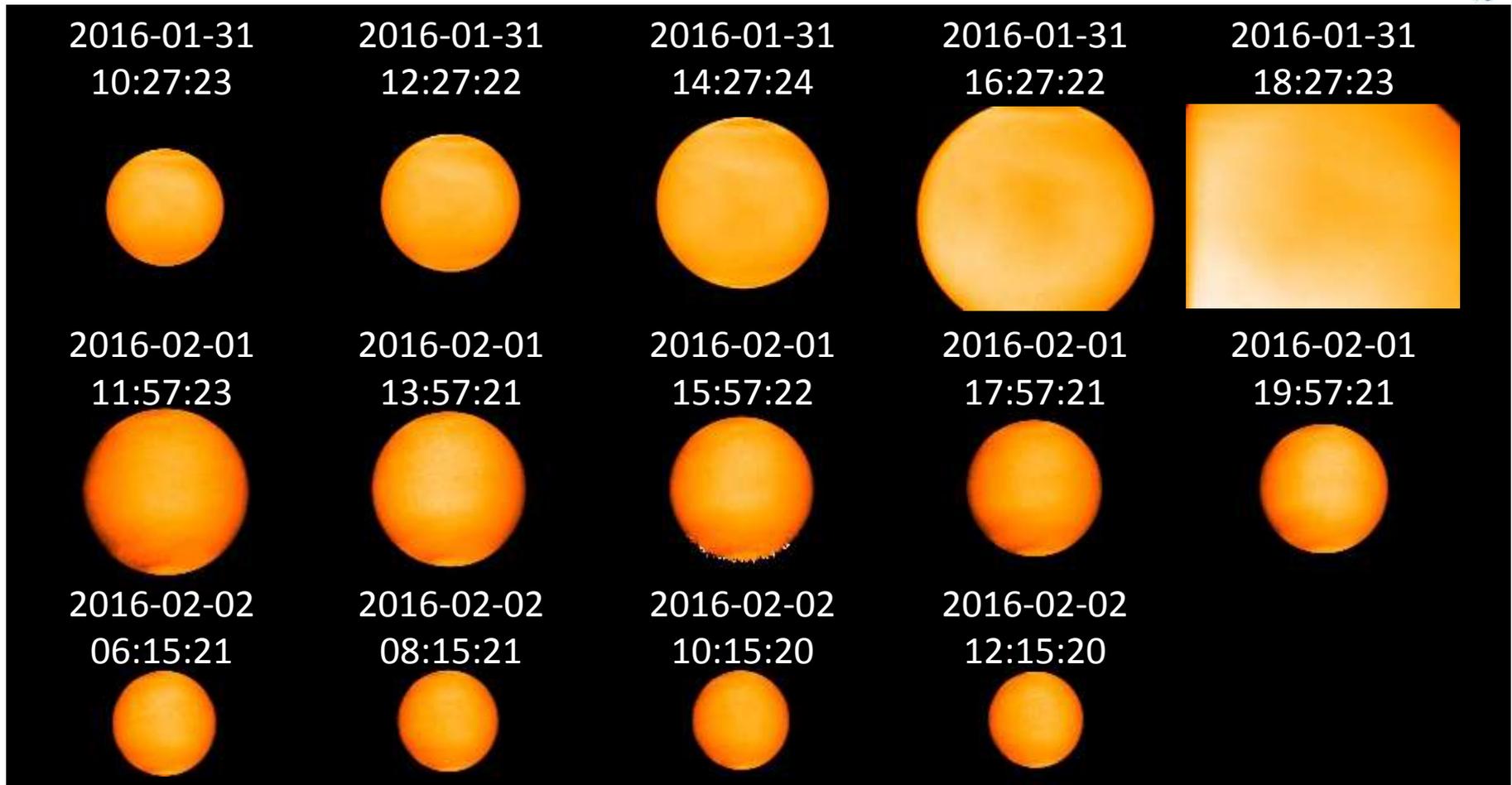
CO<sub>2</sub>の吸収により、雲頂が高いと明るく、低ければ暗く見える。

# LIR(中間赤外カメラ)の試験観測結果(1)



- ・機能確認結果は正常。既に定常観測に近い連続的な撮像を実施中
- ・得られた雲頂温度は過去の観測で知られている平均的温度と整合
- ・2015年12月7日の金星周回軌道投入直後にLIRが撮像した画像には南北両半球にまたがる弓状の構造が夕方側に見つかった。それはその後4日間にわたって存在していた。このような現象はこれまでに知られていなかった。
- ・得られた画像で見える範囲では南極上空が最も高温である
- ・低緯度に南北方向に伸びる細いフィラメント状の低温領域が存在する

# LIR(中間赤外カメラ)の試験観測結果(2)



2016年1月31日から2月2日にかけて、「あかつき」が近金点を通る前後にLIRによって撮像された連続画像(※)。各日、2時間毎に4~5枚の画像を取得した。この時期、12月7日から11日に見られた特徴的な温度構造は見られない。

※なお、配布資料では2月1日と2日の画像は1月31日の画像の2倍に拡大して表示。

画像処理は国立研究開発法人産業技術総合研究所の協力による。

# UVI(紫外イメージャ)の試験観測結果(1)

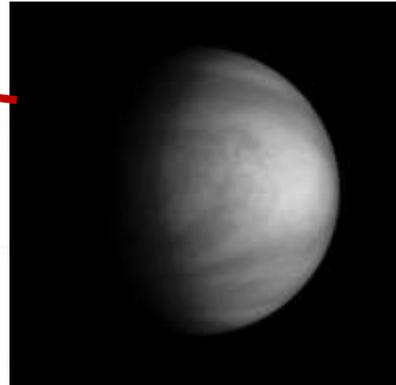
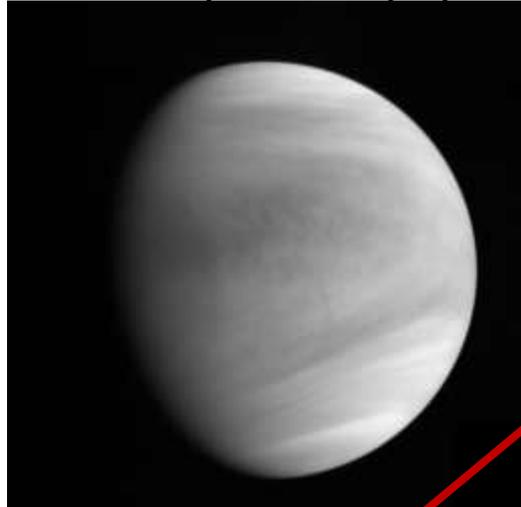
AKATSUKI/UVI 2015/12/7

AKATSUKI/UVI

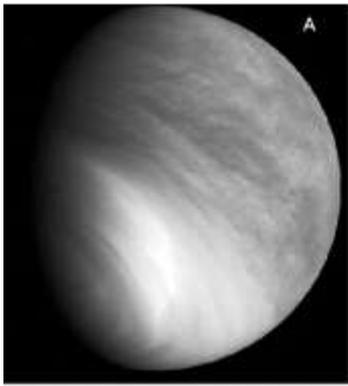
283nm

365nm

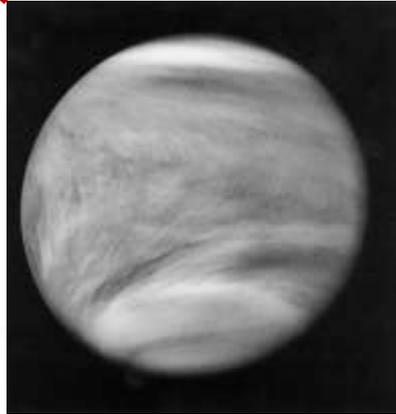
(観測波長域)



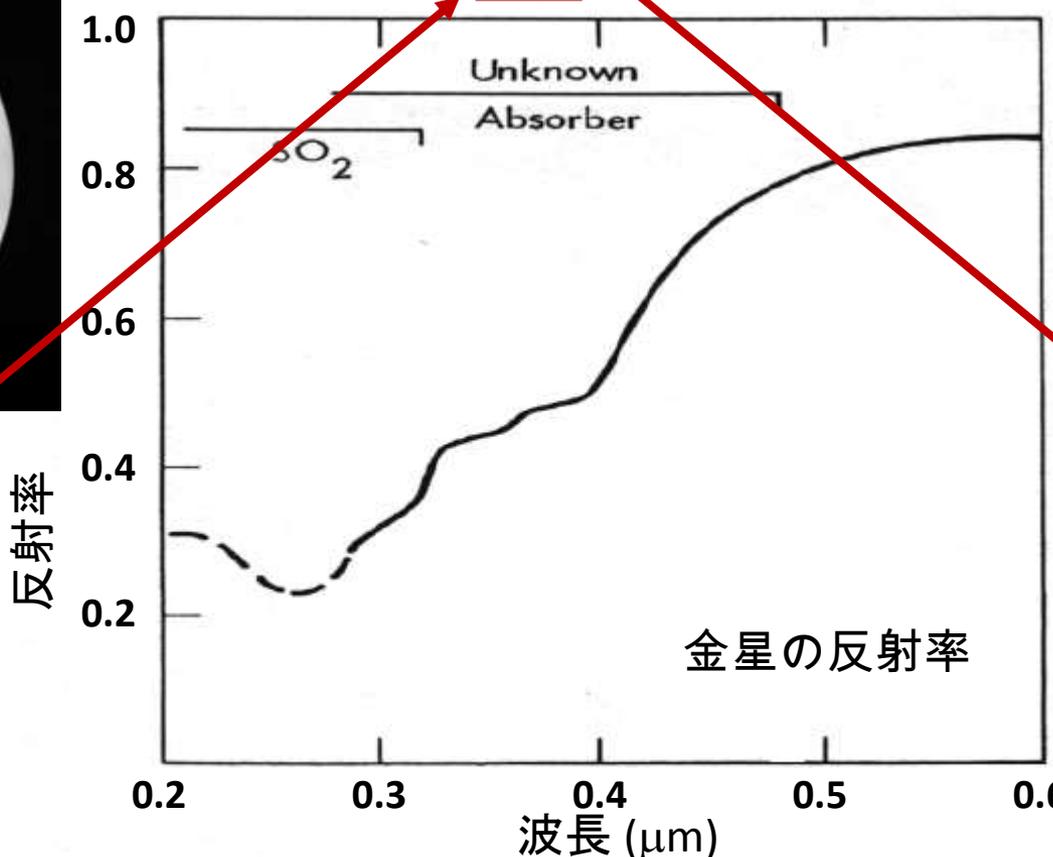
Galileo



Venus Express / VMC



Pioneer Venus Orbiter



金星の反射率

- ・ 雲頂で反射する太陽紫外線を観測する。吸収物質の量の大小により明るさが変わり、模様が雲と一緒に移動。雲の速度を算出。
- ・ 「あかつき」のUVIは、他の探査機が観測した波長と、世界初となる雲の主成分である硫酸のガス(SO<sub>2</sub>)の吸収波長の2波長で観測。雲の成因も探る。

# UVI(紫外イメージャ)の試験観測結果(2)

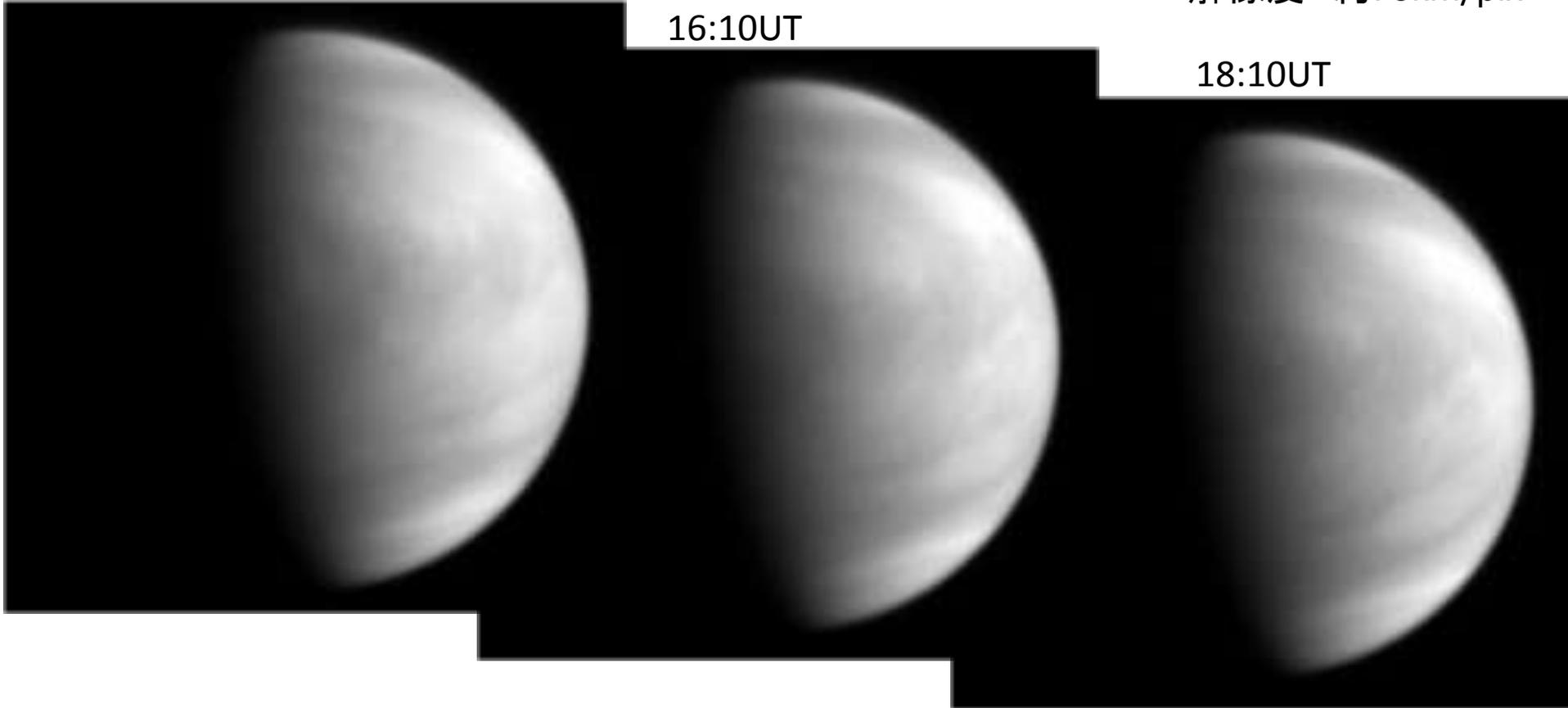
2015/12/09

14:10UT

解像度 約70km/pix

16:10UT

18:10UT



金星周回軌道投入の2日後、2015/12/9 に2時間毎(14:10UT、16:10UT、18:10UT)にUVIで撮影された3枚の連続画像。雲の移動を捉えた。

## 金星に雷はあるか？

- ネイチャーやサイエンスに掲載された論文を含み、30年以上論争が続いている
- 専用観測器による決定的な観測が不足
- もし検出できれば鉛直大気運動を把握する大きな手がかりに

## LACの結果に世界が期待



## 過去の研究 --- 存否の見解はほぼ半々

### 光学観測

ベネラ9号 / 10号	P
パイオニアビーナス	N
ベガ 気球	N
ガリレオ探査機	N
アリゾナ大 地上観測	P

### 電磁波観測

ベネラ11号/12号 着陸機	P
パイオニアビーナス	P & N
ガリレオ探査機	P
カッシーニ探査機	N
ビーナスエスクプレス	P

P:肯定的結果, N:否定的結果

# LAC(雷・大気光カメラ) (2)



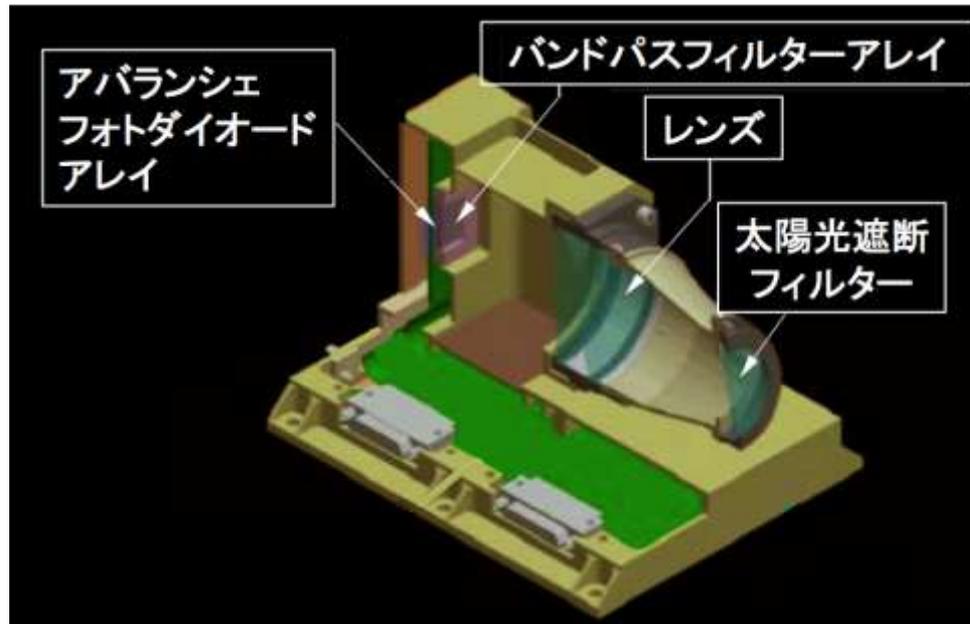
惑星雷観測に最適化された世界初のユニークな計測器

## 現状と見通し

- ・ 2016年1月20日に高圧電源をオンし、動作を確認
- ・ 今後、観測に必要な電圧まで順次上げていく
- ・ 運用が日陰時に限られる(10日に1回、1時間程度)ため、本格的な観測開始は6月を目指している

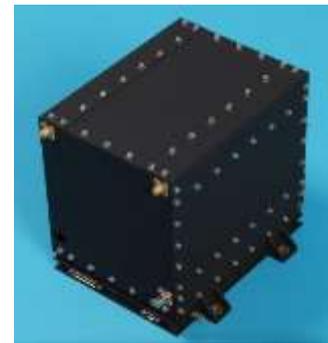
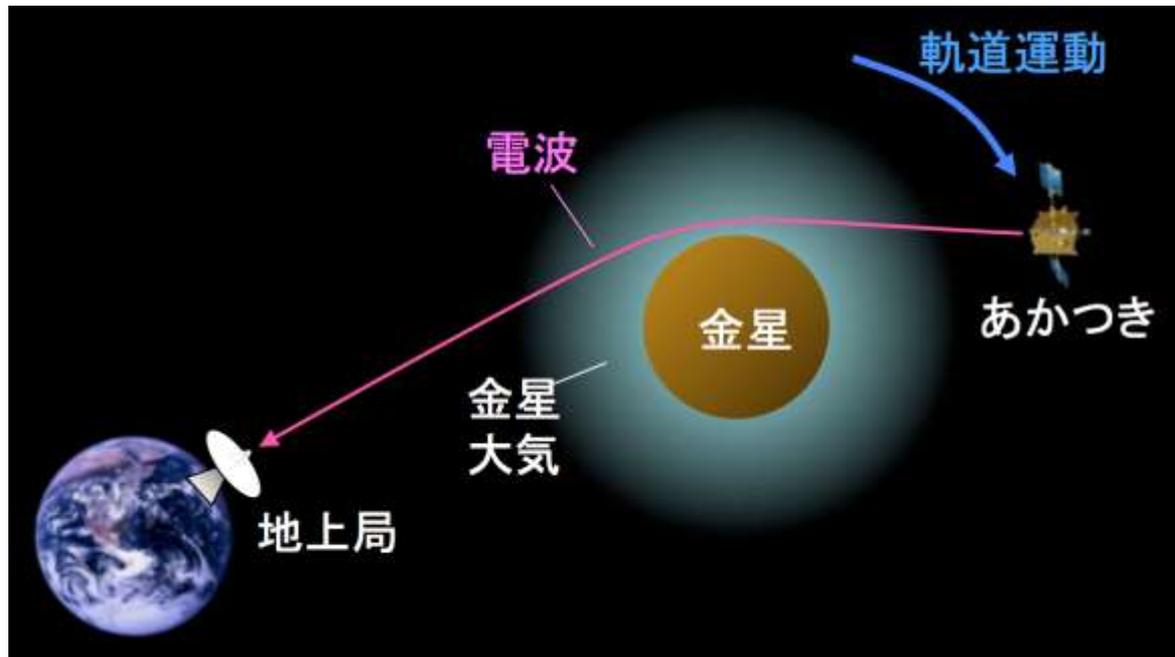


1秒間に約3万回の発光強度計測で時間変化を捉え、雷とノイズを分離する



# 電波掩蔽観測(RS)の試験観測結果(1)

- 「あかつき」が地球から見て金星の背後に隠れるときと金星の背後から出てくるとき、金星大気をかすめて地上局に届く通信電波の周波数と強度が変化するのを分析して、大気の高さ方向の構造を求める。このことによりカメラ群による大気の水平構造の観測を補完する。
- 電波源として超高安定発振器(Ultra-Stable Oscillator: USO)を搭載
- 2016年3月4日に1回目、3月25日に2回目の観測を実施した



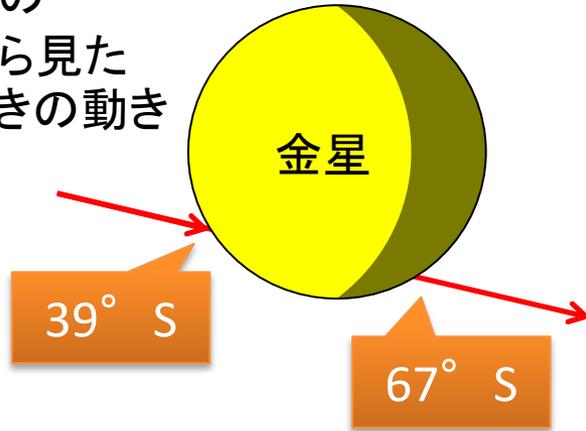
超高安定発振器



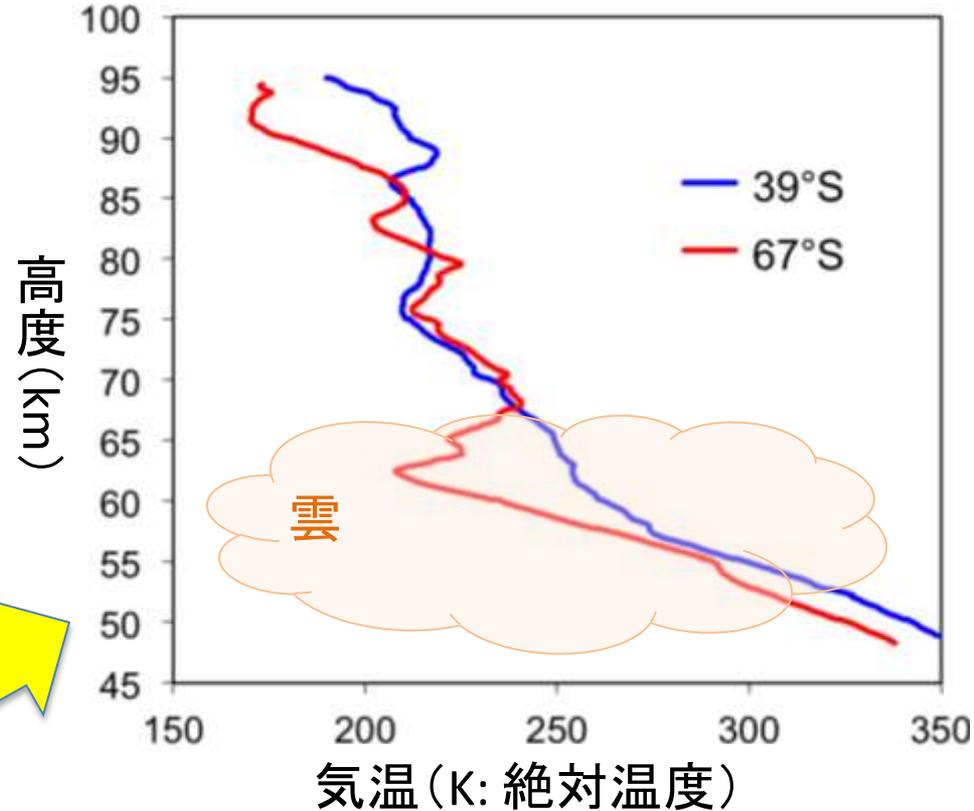
臼田宇宙空間  
観測所

# 電波掩蔽観測(RS)の試験観測結果(2)

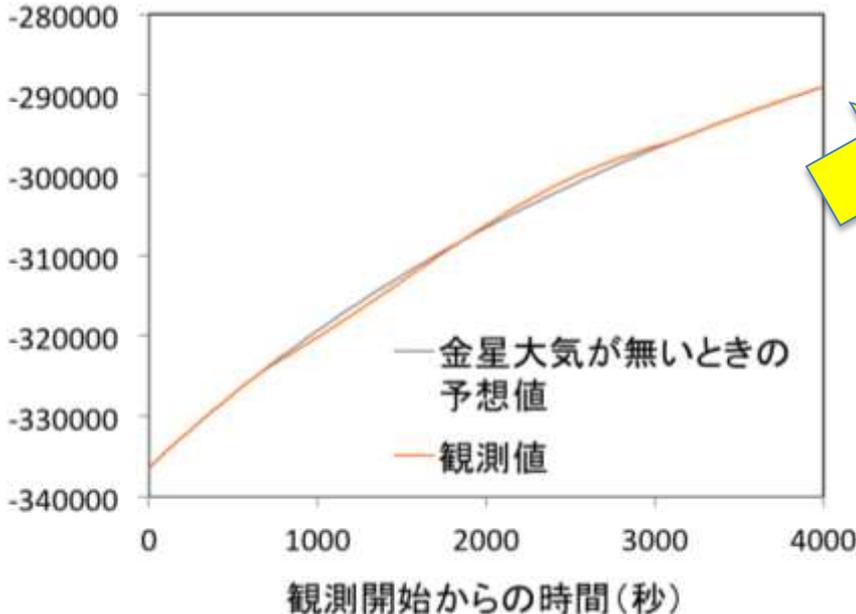
3月4日の  
地球から見た  
あかつきの動き



## 気温の高度変化



## 周波数の時間変化



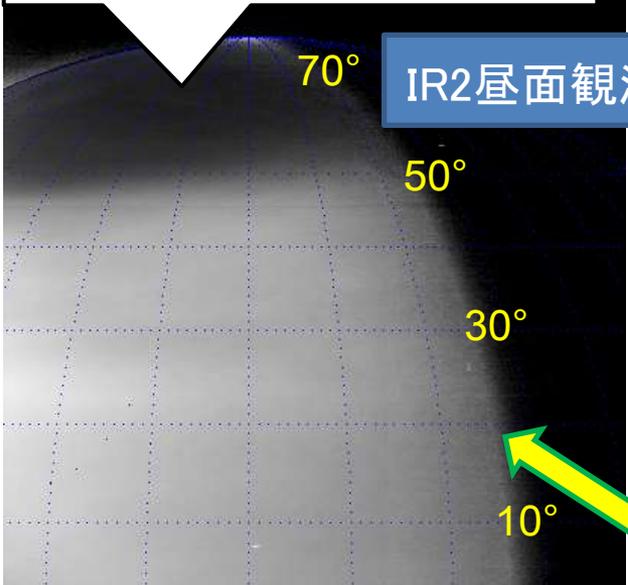
複雑な層構造が存在する  
これらがどのような大気運動と関係しているのか、今後、カメラによる観測と組み合わせせて究明する

# 3.観測データからアプローチする サイエンス

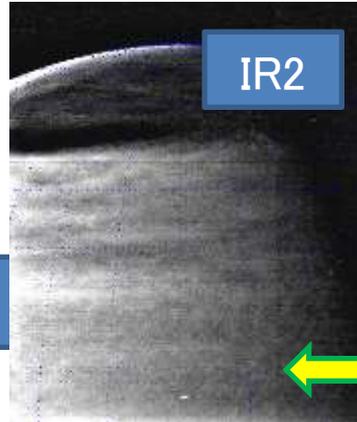
# 事例1:雲層最上部の構造に関する研究 (IR1+IR2+LIR+UVI)



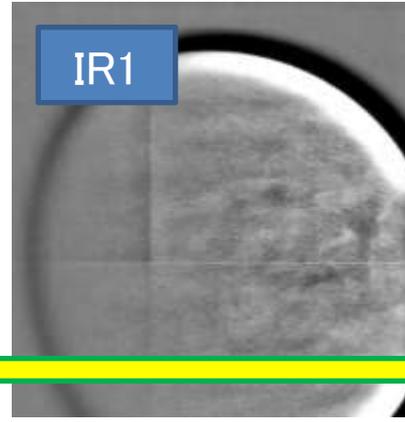
IR2昼面観測は、温度の影響を受けずに雲頂の凹凸を調べることができる。50°より高緯度の明るさは低緯度地方の約1/3であり、雲頂が4km程度低くなっていると推定される。



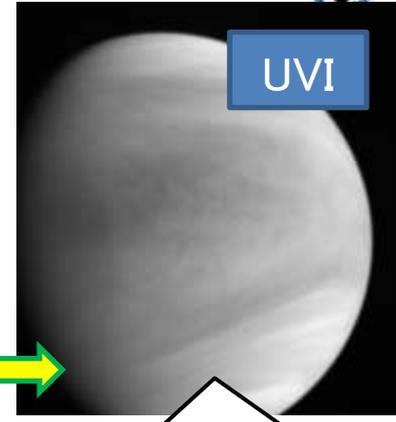
IR2昼面観測



IR2



IR1

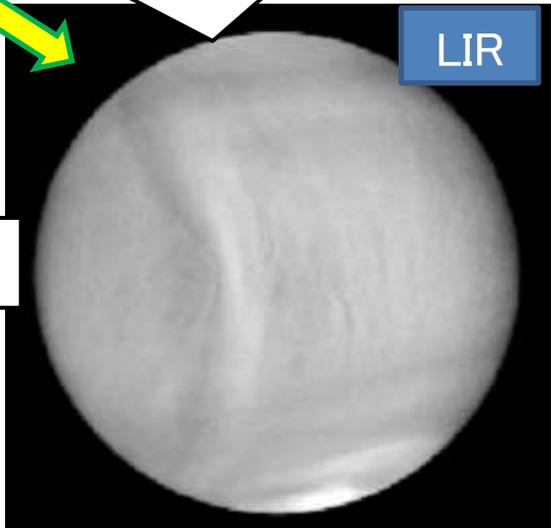


UVI

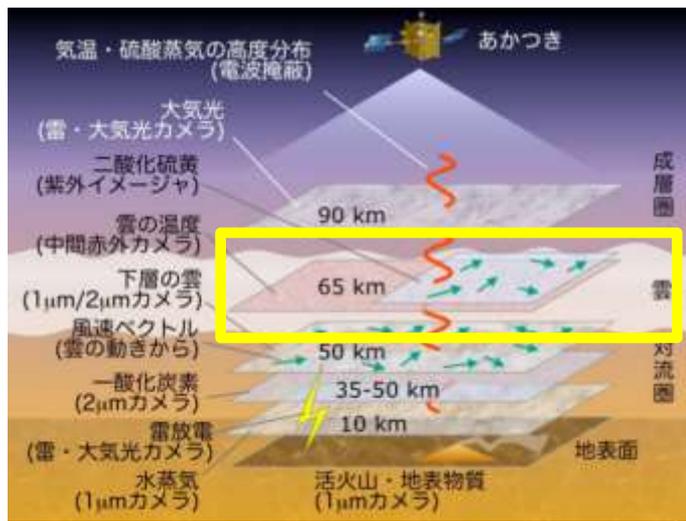
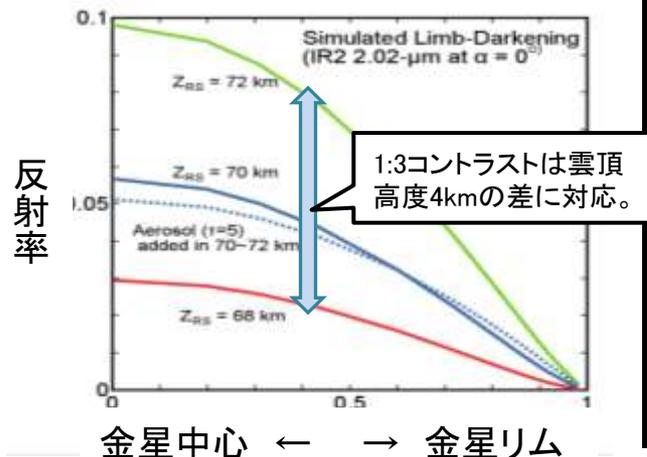


LIR観測は、雲頂の温度分布を調べることができる。50°より高緯度で雲頂が低くなっている(IR2)にも関わらず、温度がさほど変わらず、大気温度構造の違いを示唆する。大循環モデルにより「高緯度での下降気流」メカニズムを解明する。

雲頂の微細な凹凸(IR2)、雲頂温度(LIR)、紫外吸収物質やSO<sub>2</sub>の分布(UVI)、IR1による微細なコントラスト模様、これらがどう相関(相違)しているのかを調べる。それを通じて、上層大気熱バランスと力学への影響を解明する。



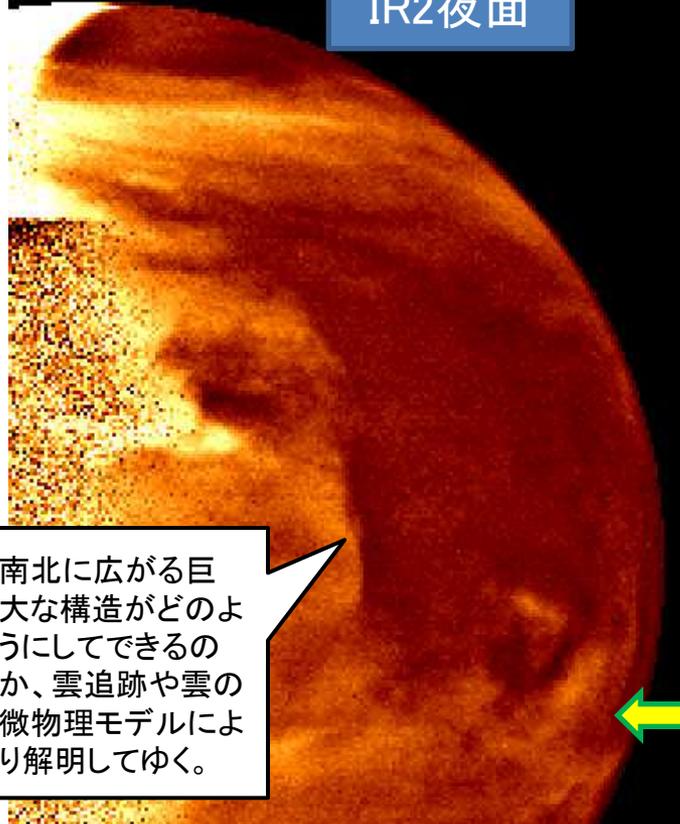
LIR



# 事例2:雲層の生成維持機構に関する研究(IR1+IR2+RS)



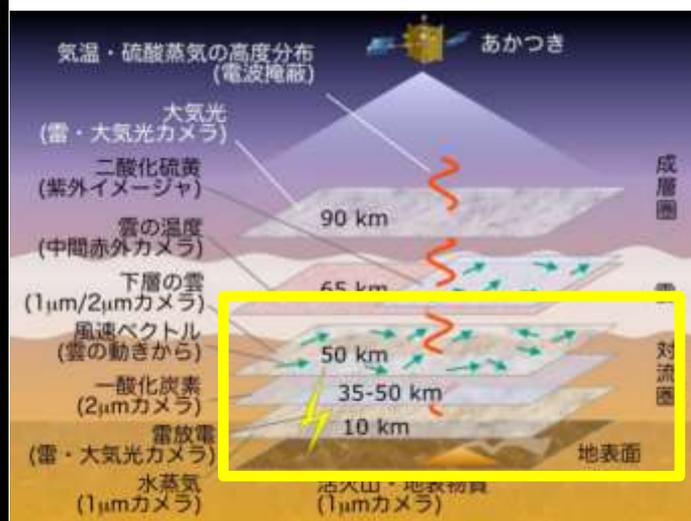
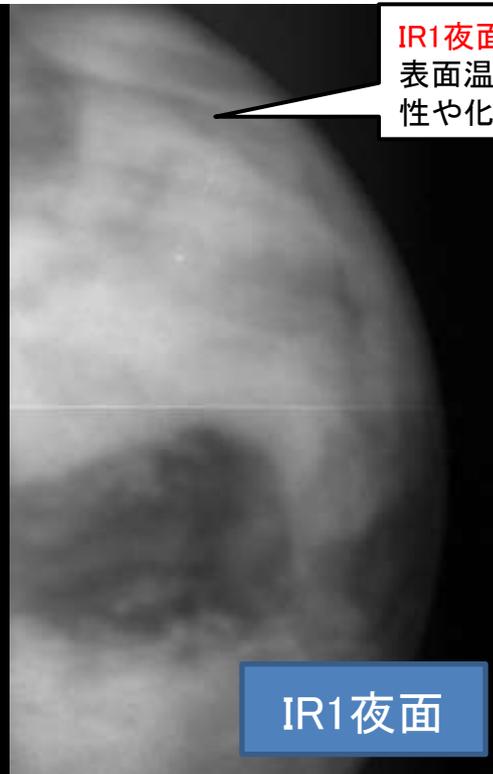
IR2夜面



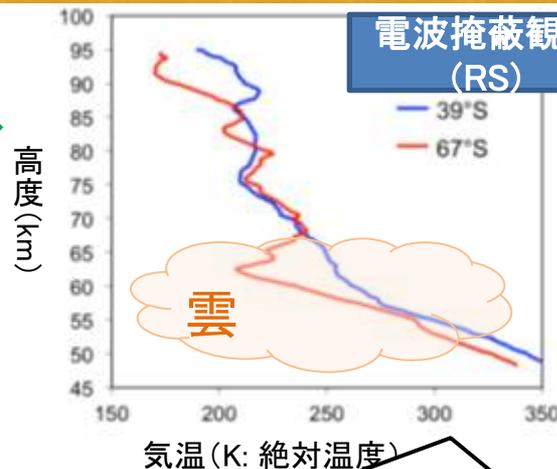
南北に広がる巨大な構造がどのようにしてできるのか、雲追跡や雲の微物理モデルにより解明してゆく。

IR1夜面に見られる雲をIR2画像を参照して取り除く。地表面温度と放射率の精密マップを得て、地表物質の物性や化学反応を明らかにしてゆく。

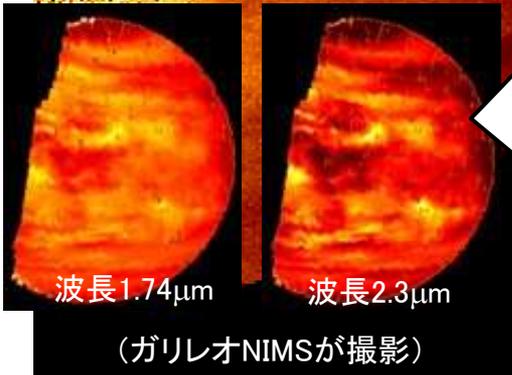
IR1夜面



電波掩蔽観測 (RS)



RS電波が通過する位置をIR2でほぼ同時に撮像する。温度構造・硫酸蒸気濃度を雲の濃淡や構造と比較し生成維持機構を解明する。

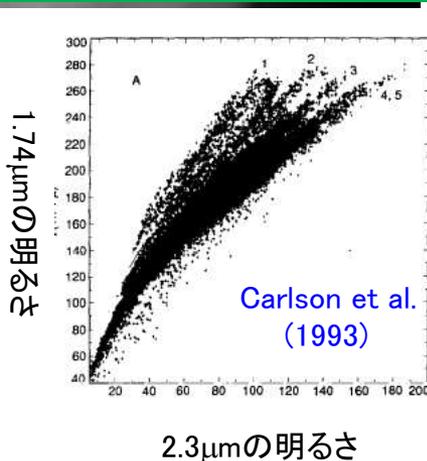


波長1.74μm

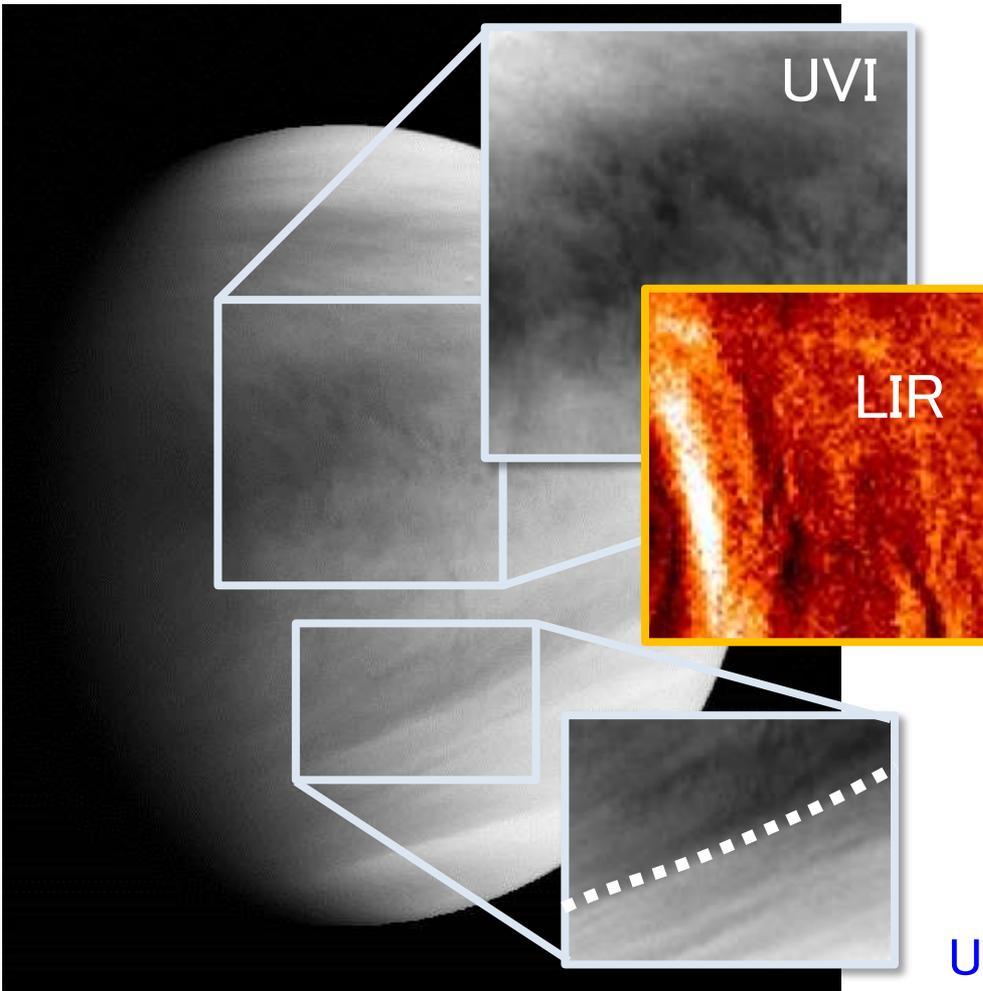
波長2.3μm

(ガリレオNIMSが撮影)

IR2の1.735, 2.26 μm観測により、雲粒子のサイズを調べる。2波長での明るさを散布図に描くと、異なるサイズのグループに分けることができる。



# 事例3:複雑な模様ができるメカニズムの解明(UVI+LIR)



特に暗い領域に存在する  
複雑な吸収パターン

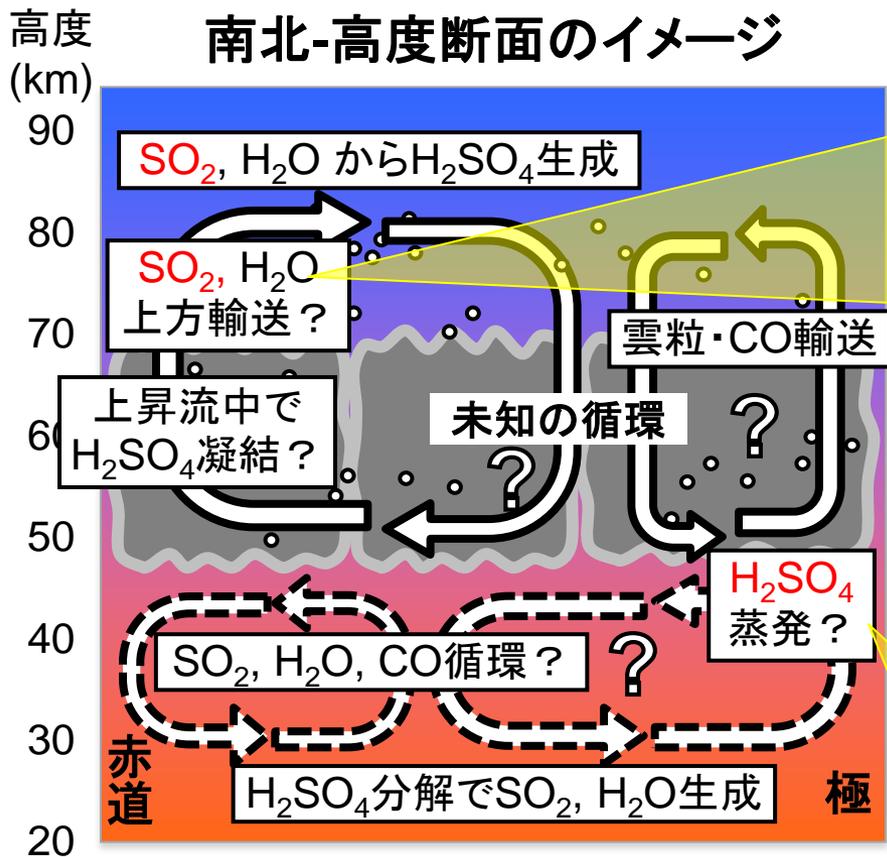
低い高度から太陽光吸収物質が持ち上げられるのか、雲頂で新たに化学反応で作られるのか、水平方向にどう流れていくのか  
どのような対流、波動、乱流が関わるのか

暗い領域と明るい領域を  
切り取る**はっきりとした境界**

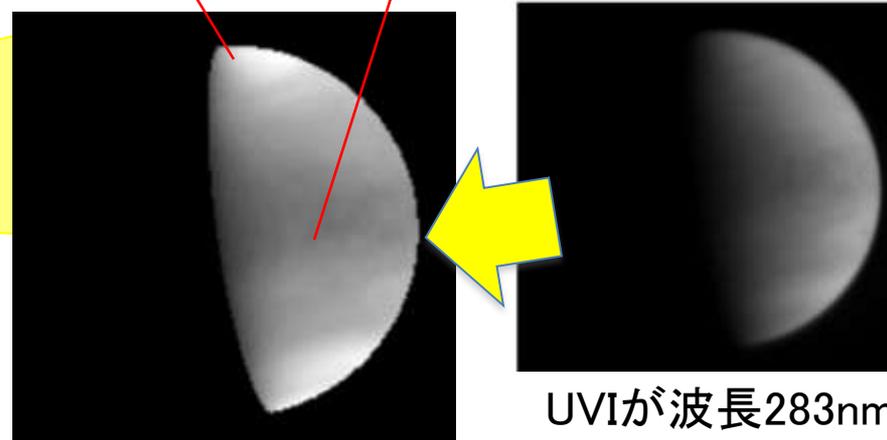
吸収物質・ヘイズの水平混合の障壁があるのか、特定の場所で新たなエアロゾル生成があるのか

UVIによる吸収物質とヘイズの分布、LIRによる雲の温度(高度)の変化、雲追跡による風速分布の関係から、雲頂での空気塊の輸送と変質プロセスを明らかにする。

# 事例4: 硫酸の雲を作る物質輸送の解明 (UVI+RS+IR2)



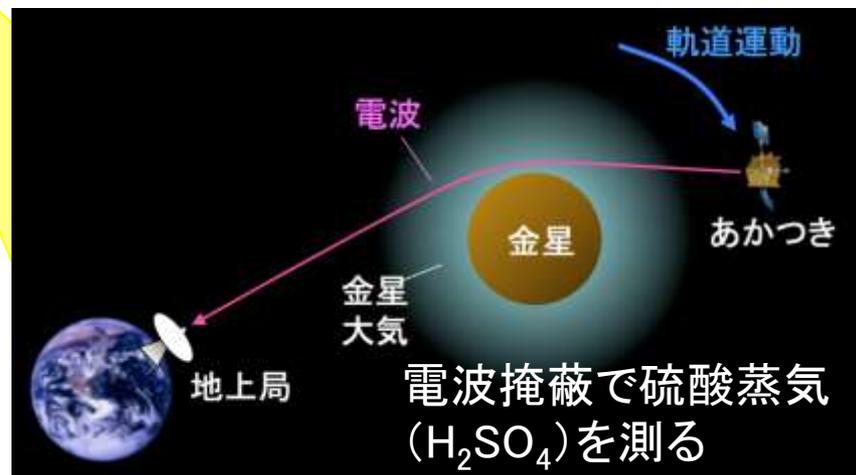
明るい =  $\text{SO}_2$  少 暗い =  $\text{SO}_2$  多



UVI画像から求めた反射率マップ。二酸化硫黄 ( $\text{SO}_2$ ) の分布がわかる。

UVIが波長283nm ( $\text{SO}_2$  吸収) で取得した画像

UVIによる二酸化硫黄 ( $\text{SO}_2$ )、電波掩蔽による硫酸蒸気 ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )、IR2による雲量のデータから、雲層を横切る上下循環によって硫酸雲がどう作られているのかを明らかにする。



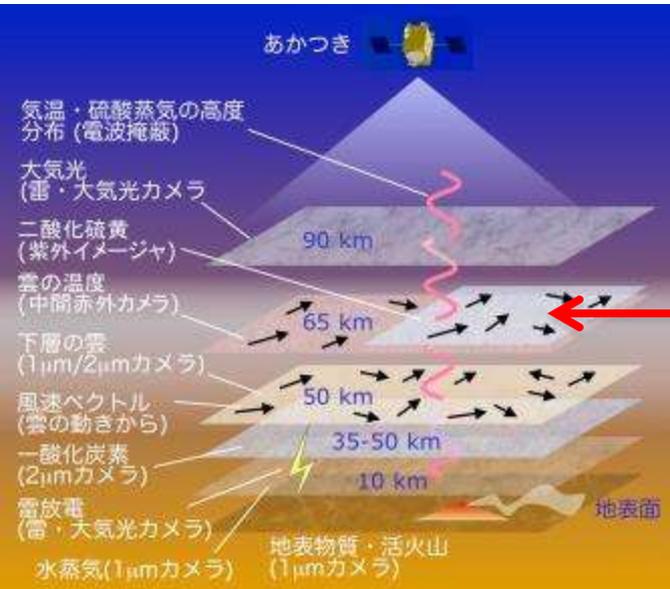
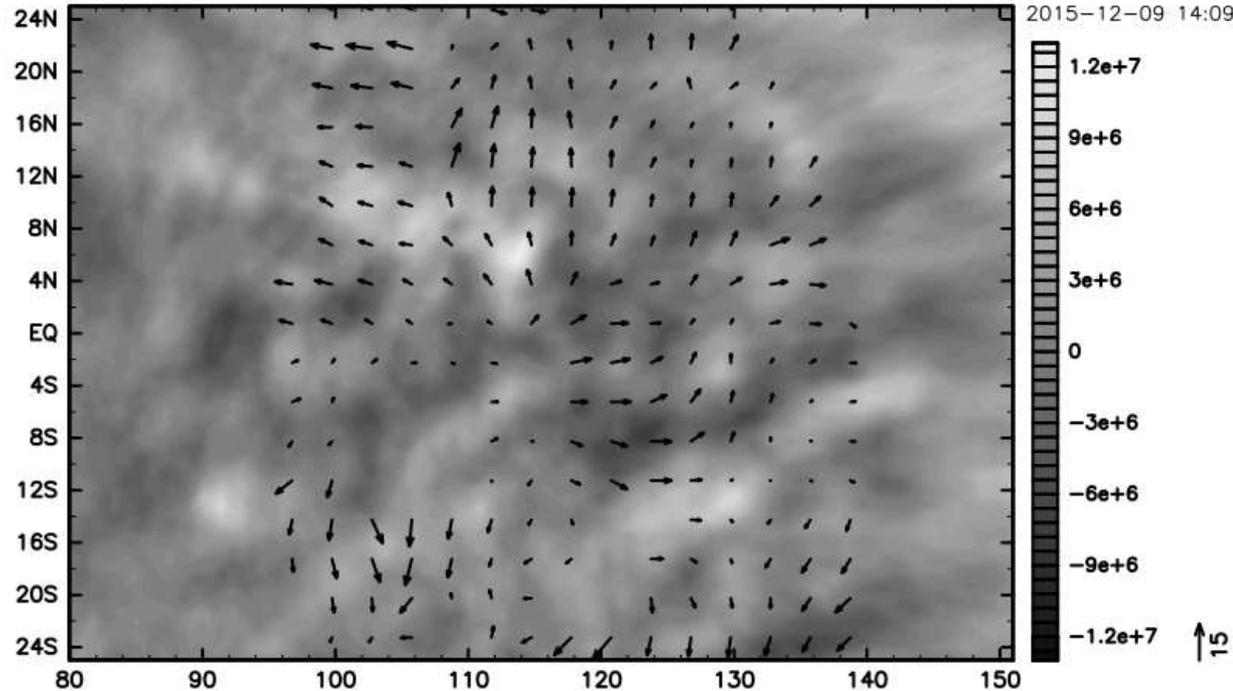
# 事例5: 雲追跡による大気運動の解明 (UVI+IR1+IR1+LIR)



UVIが2時間おきに取り得した3枚の画像(波長365 nm)を解析して風速分布を求めた

赤道域の風速分布(南緯25° ~ 北緯25°)

[ $U+110\cos\phi$ ,  $V$ ] & radiance



大気はスーパーローテーションによって流されているだけでなく、運動の空間パターンは時々刻々変化する。複数の高度でこれを分析することによって、どのような流体波動が存在して、それがスーパーローテーションにどう関わるのか、大気は上下にどう循環するのか、を究明する。

# 試験観測の結果(まとめ)

P10と同じ資料です

- 1 $\mu$ mカメラ(IR1): 機能確認結果は正常。金星周回軌道投入(VOI)直後に公開した画像は昼側の雲画像だが、その後、夜側の地表面の撮像にも成功した。
- 2 $\mu$ mカメラ(IR2): VOI直後に昼側の雲画像の取得に成功した。光学系と検出素子を冷却する冷凍機運転を最適化しつつあり、夜側撮像の成功率を着実に高めている。
- 中間赤外カメラ(LIR): 機能確認結果は正常。既に定常観測に近い連続的な撮像を実施し、過去に報告例のない興味深い現象が見つかっている。
- 紫外イメージャ(UVI): 機能確認結果は正常。VOI後、現在に至るまで「あかつき」がほとんど夜側上空にいたため、昼側専用のこのカメラはほとんど使用されなかった。昼側が写り始める4月から連続的な観測を始める。
- 雷・大気光カメラ(LAC): 検出器に加える電圧を段階的に上げていく試験を慎重に進めており、まだ観測を実施していない。
- 電波掩蔽観測(RS): 超高安定発信器(USO)の周波数安定度が劣化していないことを確認した。3月4日にUSOを用いて1回目の電波掩蔽観測を実施した。

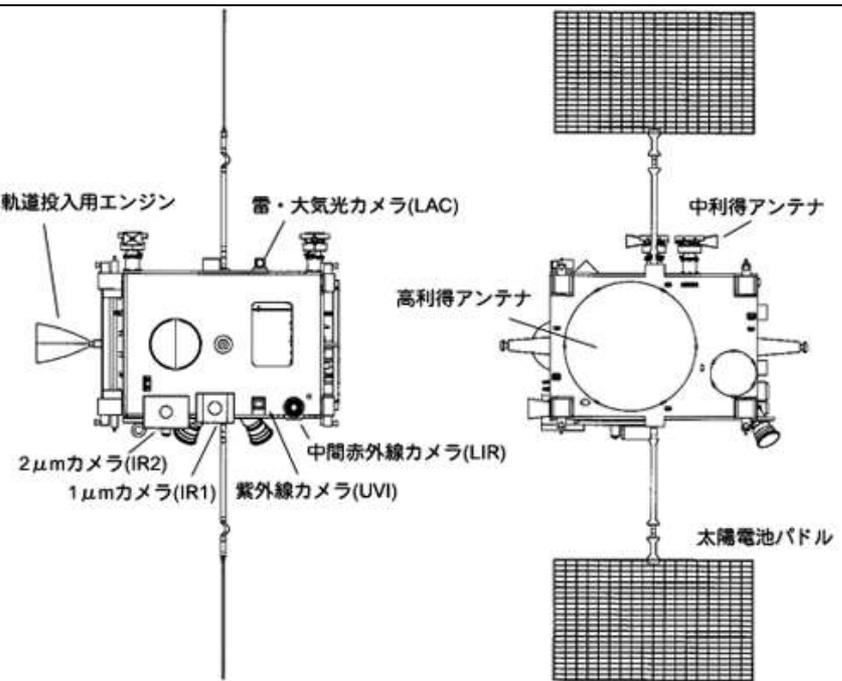
# 【参考資料】

# 金星探査機「あかつき」概要



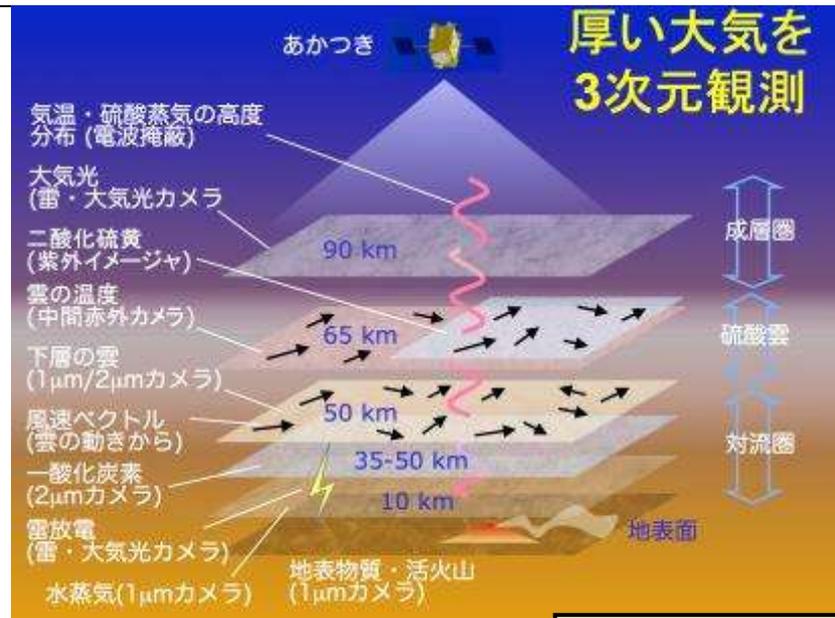
## 目的

金星の雲層の下に隠された気象現象を、最新の赤外線観測技術により金星周回軌道から観測することにより、地球気象学の常識を超えた高速の大気循環「超回転（スーパー・ローテーション）」を始めとする金星大気学のメカニズムを解明し、地球気候変動理解の鍵となる惑星気象学の確立に資する。



衛星外観

(注：左図左側部の「軌道投入用エンジン」が破損した)



赤外線や紫外線の多波長カメラと雷センサによる金星気象の3次元データ

金星大気力学の解明

- 惑星気象学の確立
- 地球環境変動の理解

## 主要諸元 (打上時の想定)

- 重量 約480 kg
- 打上げ 平成22年5月21日
- 軌道 金星周回楕円軌道、高度 約300 km～8万 km
- 金星到達まで 約 半年
- ミッション期間 金星到達後 約 2年以上

## スケジュール

- |           |        |
|-----------|--------|
| 平成14-15年度 | 基礎開発研究 |
| 平成16-18年度 | 衛星試作   |
| 平成19-21年度 | 衛星製作   |
| 平成21年度    | 動作確認試験 |
| 平成22年度    | 打上げ    |

# 参考: 1 $\mu$ mカメラ IR1



PI: 岩上直幹 (東京大学)

- ❖ 金星の雲の下や地表付近まで透視できる1 $\mu$ m付近の波長を利用し、下層大気中の雲の動き、水蒸気の分布、地表面の鉱物組成、活火山の有無などを調べる。



1 $\mu$ mカメラ IR1	
質量	約6.7kg ※
視野角	12°
検出器	Si-CSD/CCD (1024画素×1024画素)
観測波長 (観測対象)	1.01 $\mu$ m (夜: 地表面、雲)
	0.97 $\mu$ m (夜: 水蒸気)
	0.90 $\mu$ m (夜: 地表面、雲)
	0.90 $\mu$ m (昼: 雲)

※IR2と共通の回路部(約3.9kg)を含む

# 参考: 2 $\mu$ mカメラ IR2



PI: 佐藤毅彦 (ISAS/JAXA)

- ❖ 金星の雲の下まで透視できる2 $\mu$ m付近の波長を利用し、雲の濃さ、雲粒の大きさ、一酸化炭素の分布などから、下層大気の循環や雲物理の基礎データを得る。
- ❖ 金星到着までの間に黄道光観測し、惑星間空間ダストの振る舞いを明らかにする。



2 $\mu$ mカメラ IR2	
質量	約18kg ※
視野角	12°
検出器	PtSi-CSD/CCD (1024画素×1024画素)
観測波長 (観測対象)	1.735 $\mu$ m (夜: 雲、粒径分布)
	2.26 $\mu$ m (夜: 雲、粒径分布)
	2.32 $\mu$ m (夜: 一酸化炭素)
	2.02 $\mu$ m (昼: 雲頂高度)
	1.65 $\mu$ m (黄道光)

※冷凍機及びIR1と共通の回路部(約3.9kg)を含む

# 参考: 中間赤外カメラ LIR



PI: 田口真 (立教大学)

- ❖ 波長 $10\mu\text{m}$ の赤外線で雲の温度を映像化し、雲層上部の波動や対流活動、夜側の雲頂高度における風速分布を明らかにする。



中間赤外カメラ LIR	
質量	約3.3kg
視野角	$12.4 \times 16.4^\circ$
検出器	非冷却ボロメータ (248画素 $\times$ 328画素)
観測波長 (観測対象)	$10 \mu\text{m}$ (昼/夜: 雲頂温度)

# 参考：紫外線イメージャ UVI



PI: 渡部重十（北海道大学）

- ❖ 雲の形成に関わる二酸化硫黄や、紫外波長で吸収をもつ未知の化学物質の分布を紫外線でとらえるとともに、その変動から雲頂高度での風速分布を求める。



紫外線イメージャ UVI	
質量	約4.1kg
視野角	12°
検出器	Si-CCD (1024画素 × 1024画素)
観測波長 (観測対象)	283 nm (昼：雲頂の二酸化硫黄)
	365 nm (昼：未同定吸収物質)

# 参考：雷・大気光カメラ LAC



PI: 高橋幸弘（北海道大学）

- ❖ 可視光で高度100km付近の高層大気の酸素が放つ大気光という淡い光をとらえ、昼夜間循環の変動や大気波動を映像化する。
- ❖ 毎秒3万回の高速露光（32 $\mu$ secの時間分解能）により、金星での雷放電発光の有無に決着をつける。



雷・大気光カメラ LAC	
質量	約2.3kg
視野角	16°
検出器	8×8 APDマトリックスアレイ
観測波長 (観測対象)	777.4nm (夜: 雷放電発光)
	480-650nm (夜: 酸素分子大気光)
	557.7 nm (夜: 酸素原子大気光)
	545 nm (較正用)

# 参考: 超高安定発振器 USO



PI: 今村剛 (ISAS/JAXA)

- ❖ 電波掩蔽観測のために用いる。探査機から送信され金星大気を通過して地球に届く電波の周波数や強度の変化から、気温などの高度分布が分かり、大気の熱構造や鉛直伝搬波動の情報を得る。

## 超高安定発振器 USO

質量	約2kg
観測波長 (観測対象)	USO周波数38MHz 送信周波数 8.4GHz (気温、硫酸蒸気、電子密度)



USOは衛星内部に取り付けられている

[電波掩蔽観測のイメージ図]

