

国際理学イニシアチブ特論  
「惑星環境の科学と探査」

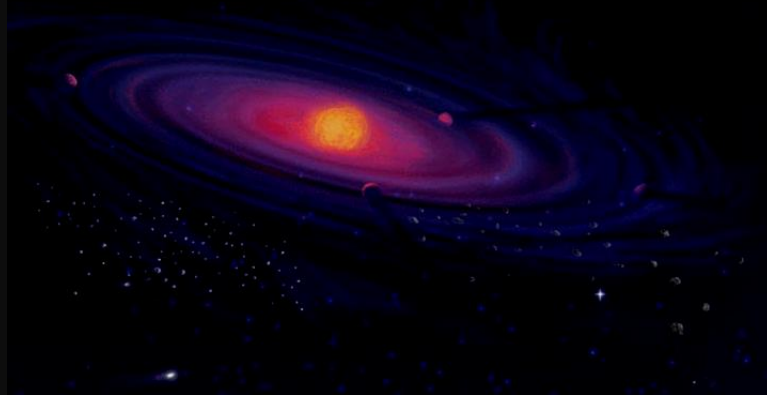
東京大学大学院 新領域創成科学研究科  
今村 剛

# 目次

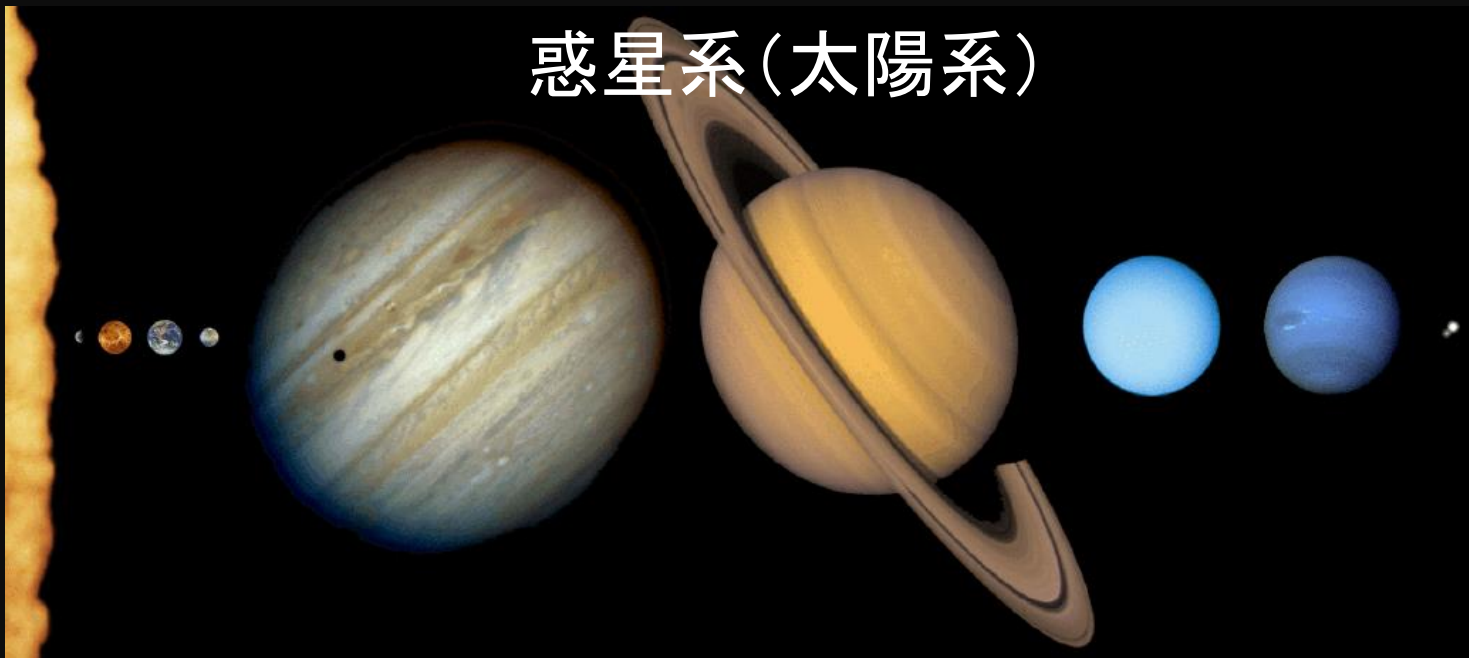
- 惑星環境科学の問題意識
- 惑星探査の進め方、国際協力
- 惑星大気の散逸
- 火星の古気候と気候変動
- 惑星大気の大循環
- 雲形成と大機大循環
- 火星大気表層探査
- 探査機あかつきで探る金星の大気大循環(セミナー)

# 惑星環境科学の問題意識

# 原始太陽系星雲



# 惑星系(太陽系)



# 隣り合う地球型惑星でも大きな違い



**金星** 460°Cの灼熱世界

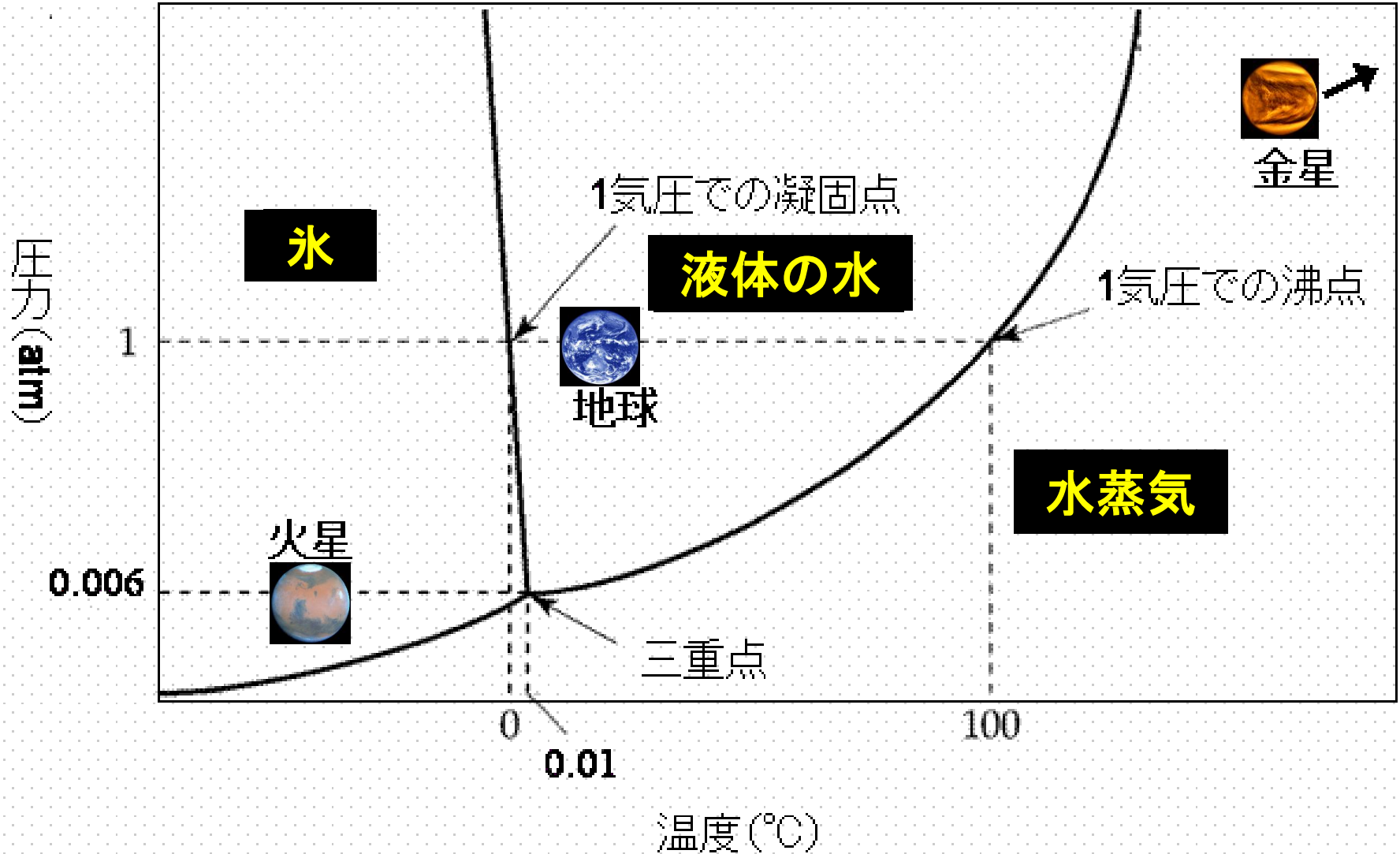


**地球** 水惑星 生命の星

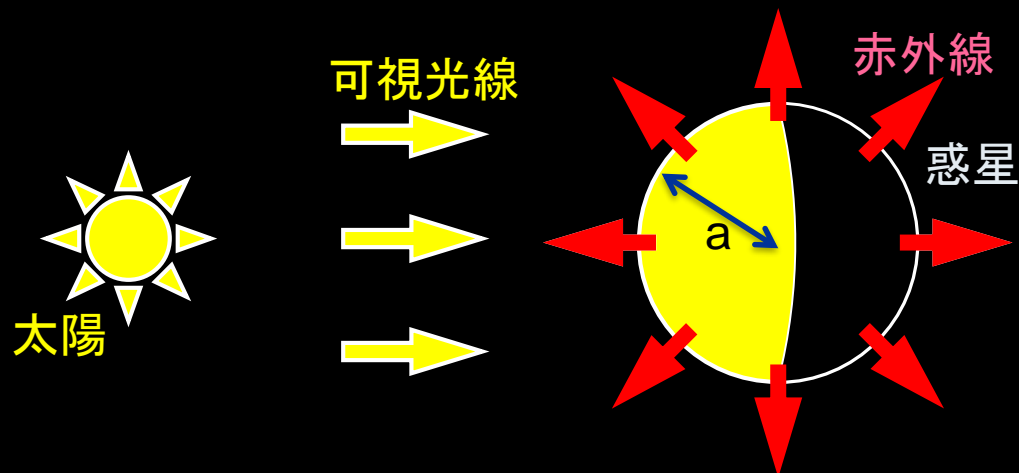


**火星** -60°Cの凍りついた世界

# 水の状態図



# 地球のエネルギー収支



入射する可視光線

$$(1 - A) S \pi a^2$$

出ていく赤外線

$$4 \pi a^2 \sigma T^4$$

A: 反射率 (地球では 0.3)

S: 太陽光強度 (地球では  $1370 \text{ W m}^{-2}$ )

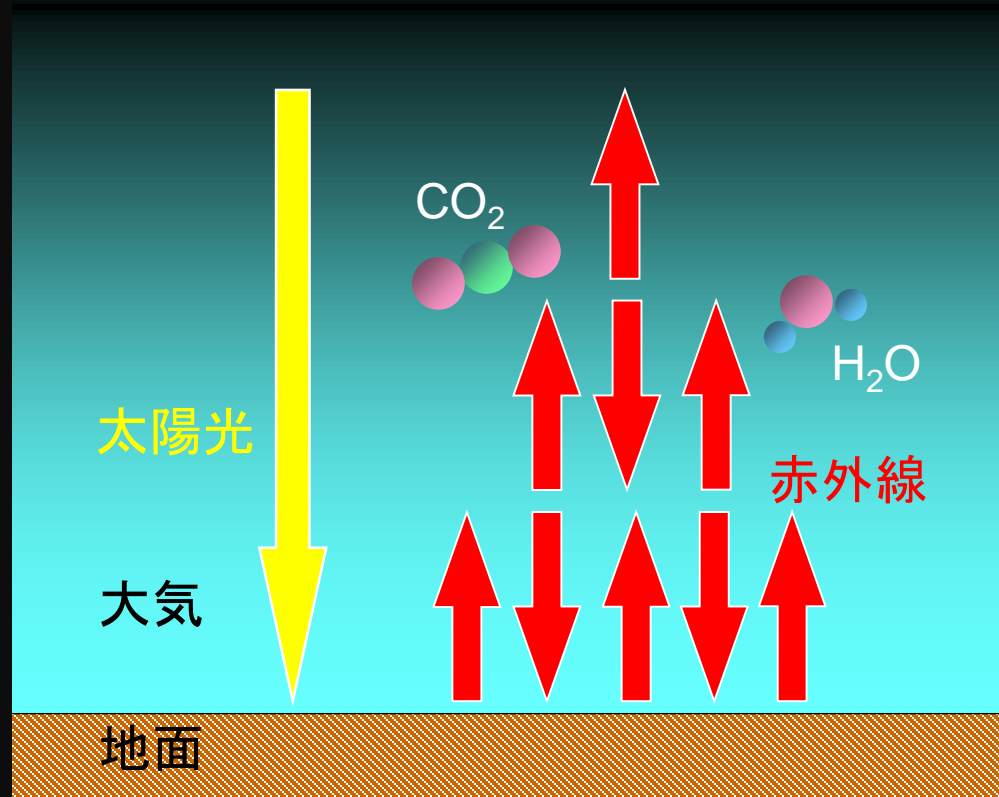
a: 惑星半径

$\sigma$ : Stefan-Boltzmann定数

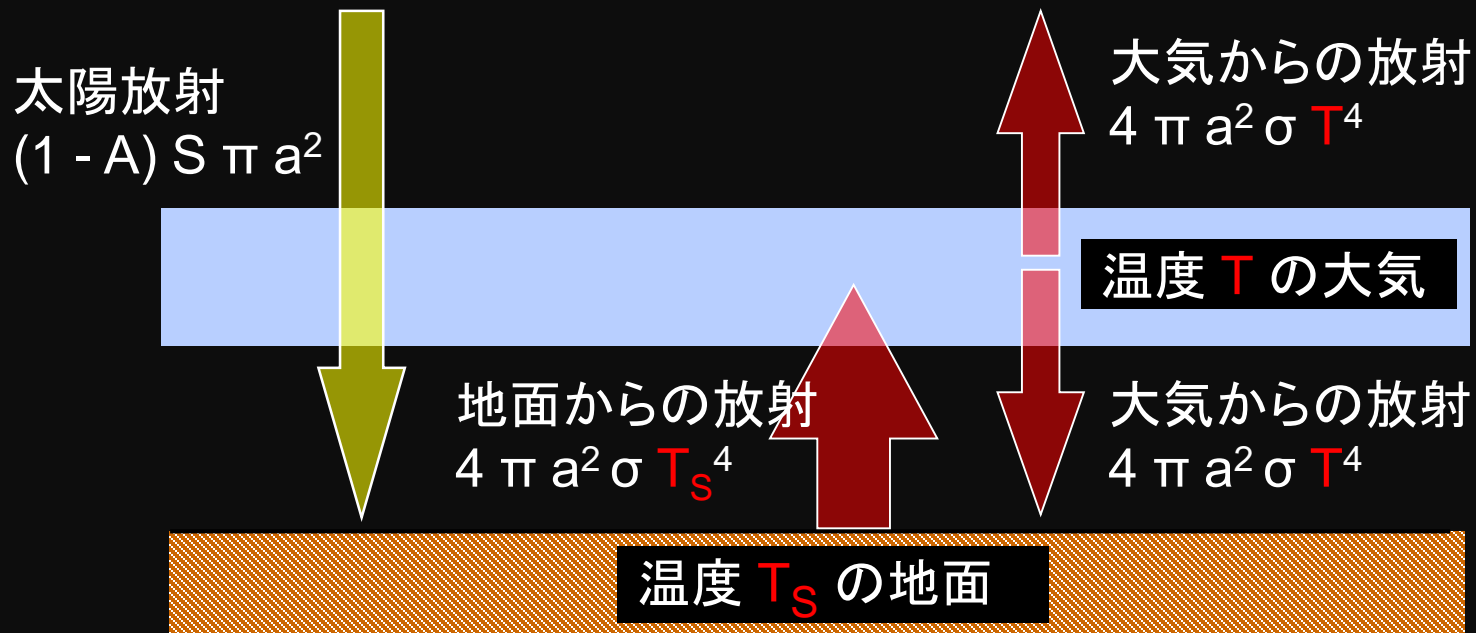
T: 表面温度

地球での値を代入すると  $T = 255 \text{ K} = \text{マイナス}18^\circ\text{C}$

- 一方、地表面気温の全球平均値は  $17^{\circ}\text{C}$   
→ 水蒸気や二酸化炭素による **温室効果**
- 温室効果ガスが赤外線を吸収する。赤外線が宇宙に逃げにくくなるために温度が上がる。







## エネルギーバランス

大気上端:  $(1 - A) S \pi a^2 = 4 \pi a^2 \sigma T^4$

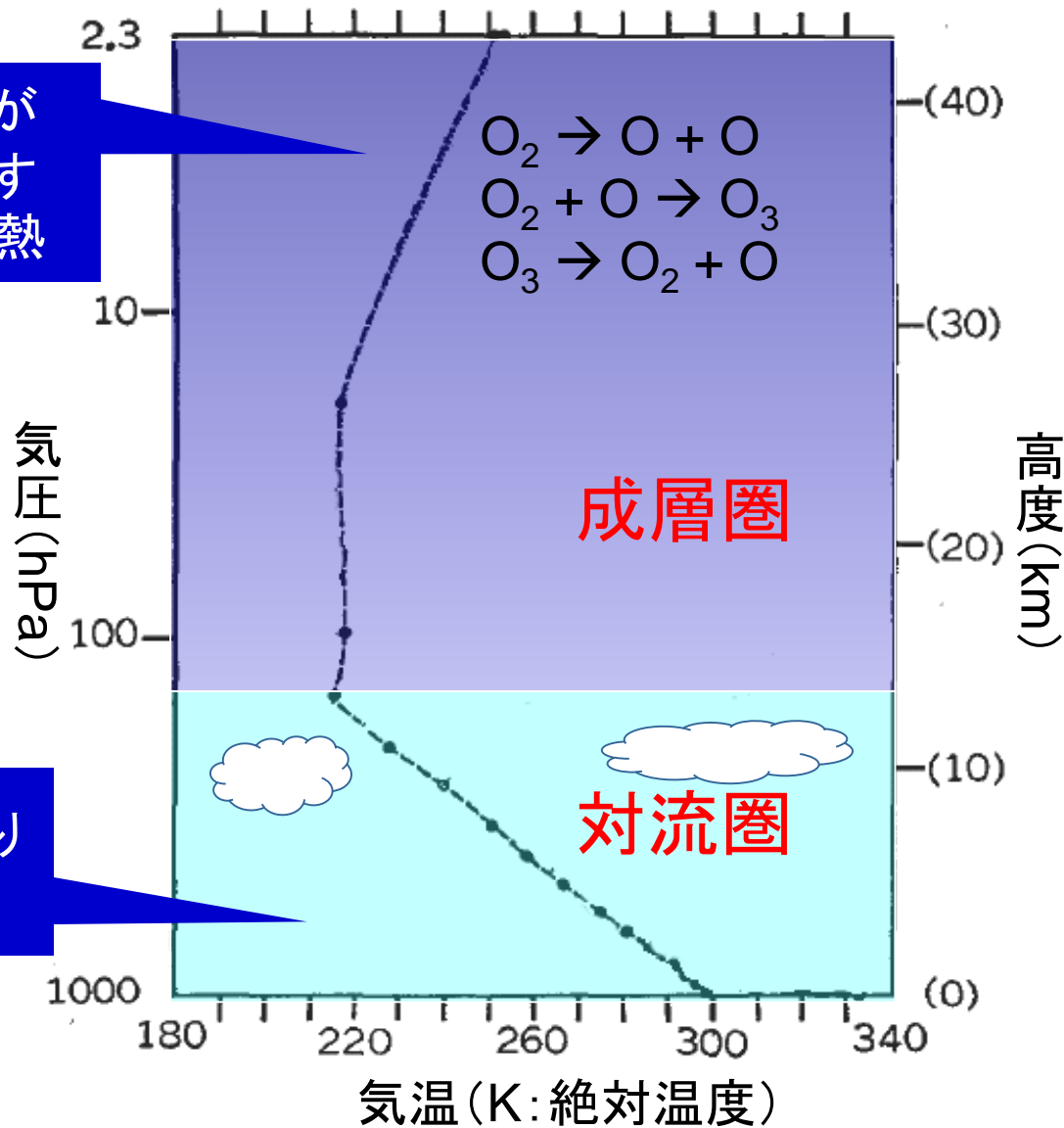
地面:  $(1 - A) S \pi a^2 + 4 \pi a^2 \sigma T^4 = 4 \pi a^2 \sigma T_s^4$

これらを解くと

$$T_s = \sqrt[4]{2} \times T = 1.19 T$$

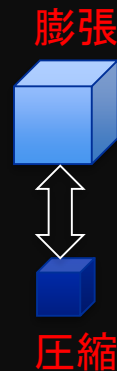
$T$  は大気が無い場合の地面温度と同じなので、大気の影響で  $T_s$  が上昇することになる。

# 地球大気の温度の高度変化

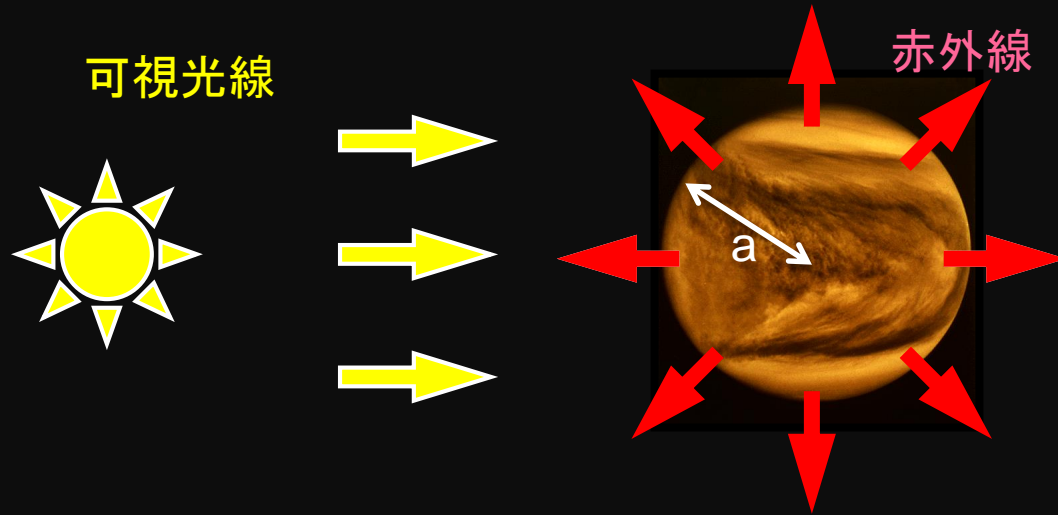


オゾン層(O<sub>3</sub>)が紫外線を吸収することにより加熱

温室効果により加熱



# 金星のエネルギー収支



$$(1 - A) S \pi a^2 = 4 \pi a^2 \sigma T^4$$

A: 反射率 (金星では 0.78)

S: 太陽光強度 (金星では  $2617 \text{ W m}^{-2}$ )

金星での値を代入すると  $T = 224 \text{ K} = \text{マイナス}49^\circ\text{C}$

地球に比べ太陽に近いが、硫酸の雲が太陽光をよく反射してエネルギー吸収を抑えるため、温室効果が無ければ極寒の世界となるはず

# 金星の温室効果は？

- 大気の成分

  - 二酸化炭素 96.5%

  - 窒素 3.5%

- 気圧 92気圧

  - 大気がとても濃い

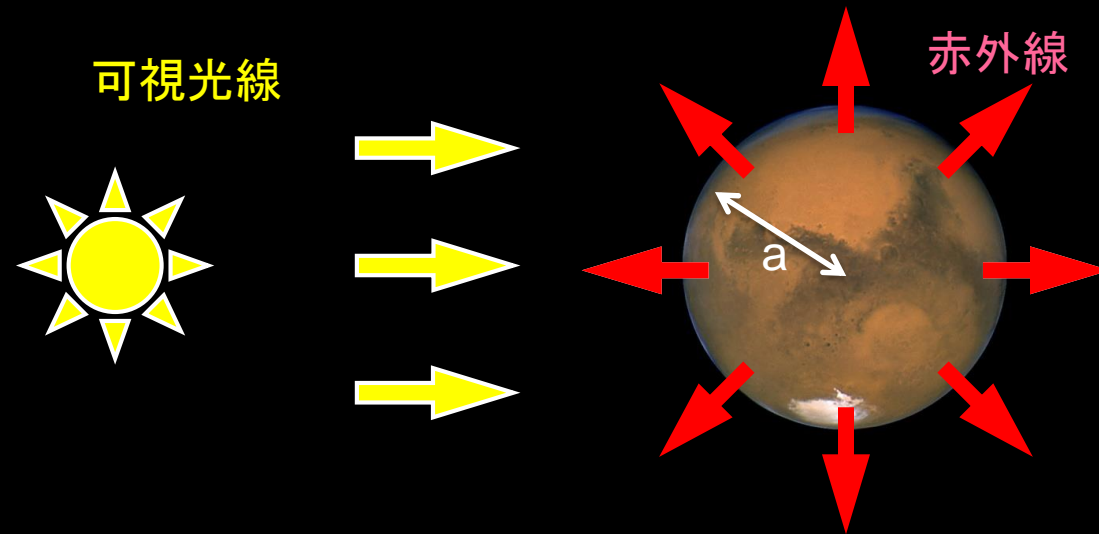
  - 地球大気のおよそ100倍

  - 二酸化炭素の量は地球の30万倍



膨大な二酸化炭素がもたらす温室効果のために、わずかな太陽光エネルギーをもとにして460°Cまで暖まる

# 火星のエネルギー収支



$$(1 - A) S \pi a^2 = 4 \pi a^2 \sigma T^4$$

A: 反射率 (火星では 0.16)

S: 太陽光強度 (火星では  $589 \text{ W m}^{-2}$ )

火星での値を代入すると  $T = 216 \text{ K} = \text{マイナス}57^\circ\text{C}$

地球に比べ反射率が小さくて太陽光吸収の効率は高いが、  
そもそも太陽から遠いために極寒の世界

# 火星の温室効果は？

## ・大気の成分

二酸化炭素 95%

窒素 2.7%

アルゴン 1.6%

二酸化炭素は温室効果ガスだが...

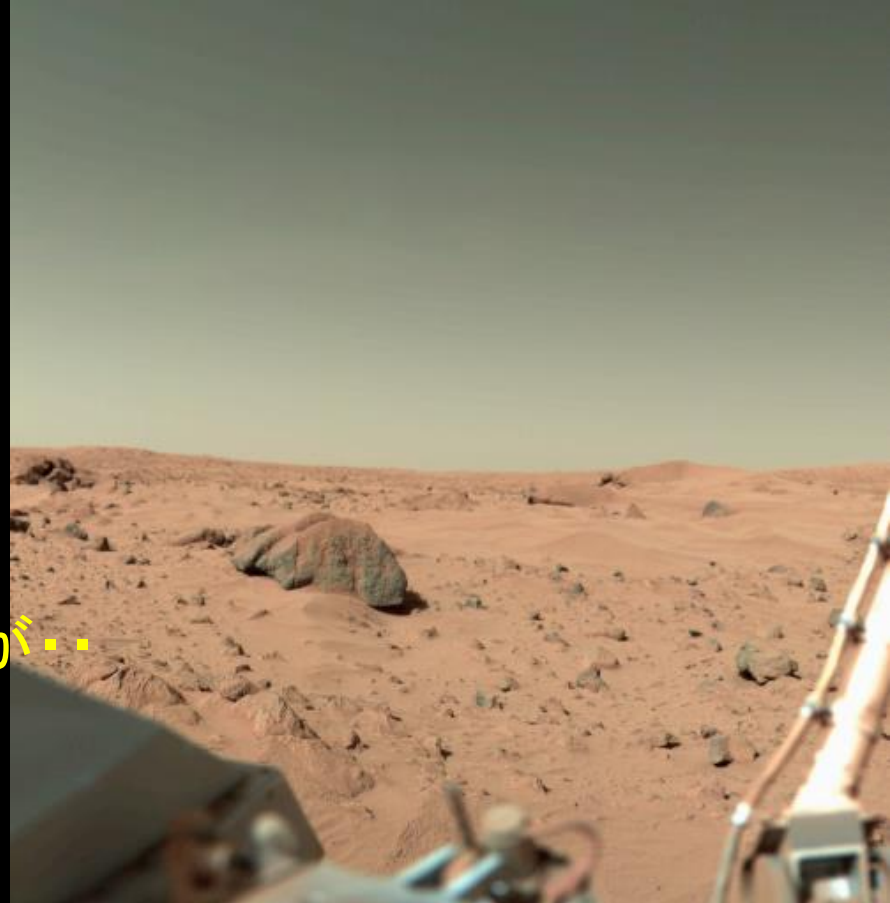
## ・気圧 0.006気圧

大気がとても薄い


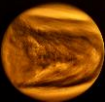
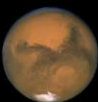
地球大気の1/100以下

地球で温室効果を主に担っている水蒸気はほとんどない

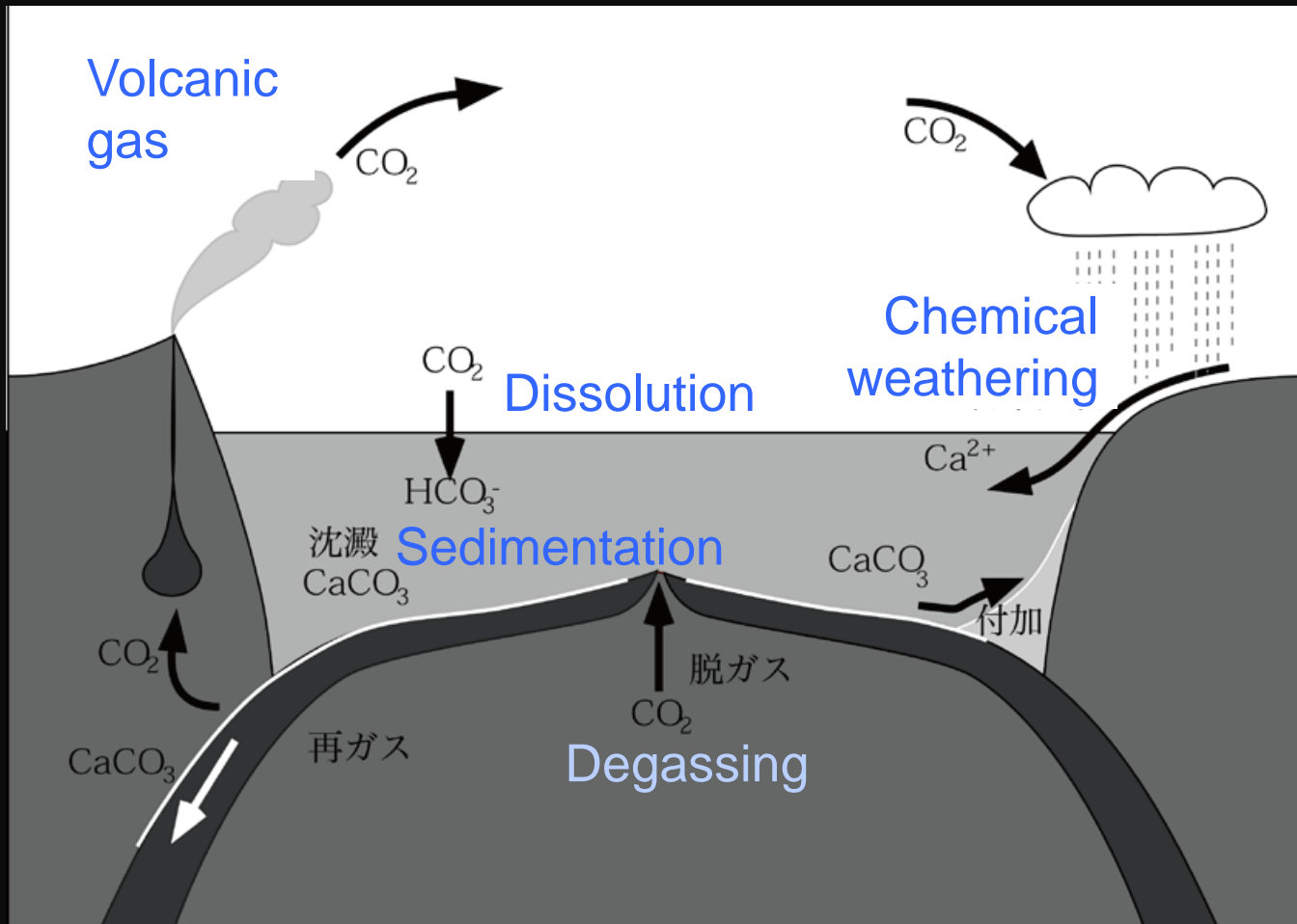
火星の温室効果は数°C暖まる程度で、結局寒いまま



# エネルギー入力と気温

	太陽光強度 S	反射率 A	吸収される エネルギー (1-A)S	温室効果 がないとき の温度	温室効果あ りの実際の 温度
地球 	1370 W/m <sup>2</sup>	0.30	959 W/m <sup>2</sup>	-18°C	15 °C
金星 	2617 W/m <sup>2</sup>	0.78	576 W/m <sup>2</sup>	-50°C	470 °C
火星 	589 W/m <sup>2</sup>	0.16	495 W/m <sup>2</sup>	-57°C	-53°C

# CO<sub>2</sub> cycle of the Earth



- CO<sub>2</sub> dissolves in water and buried in the crust.
- The CO<sub>2</sub> buffer may have stabilized the Earth's climate.



- **Venus** may have had an ocean in early stage of its evolution.
- The ocean evaporated and water vapor was lost to space through 'atmospheric escape'. This explains the enrichment of deuterium (D) in the Venus atmosphere relative to the Earth's. Once the ocean disappeared, CO<sub>2</sub> and S-containing species will have been released to the atmosphere.

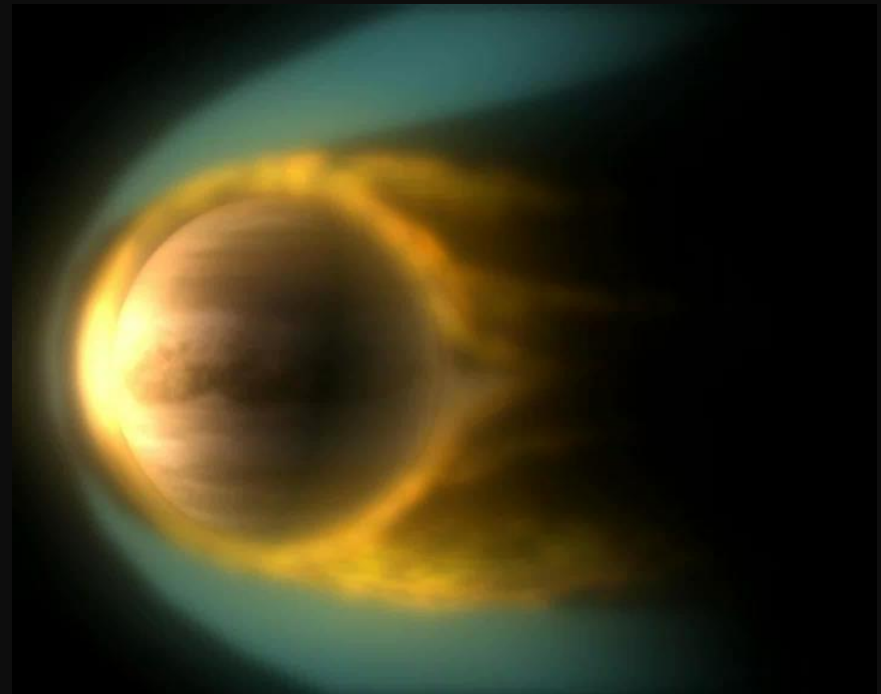
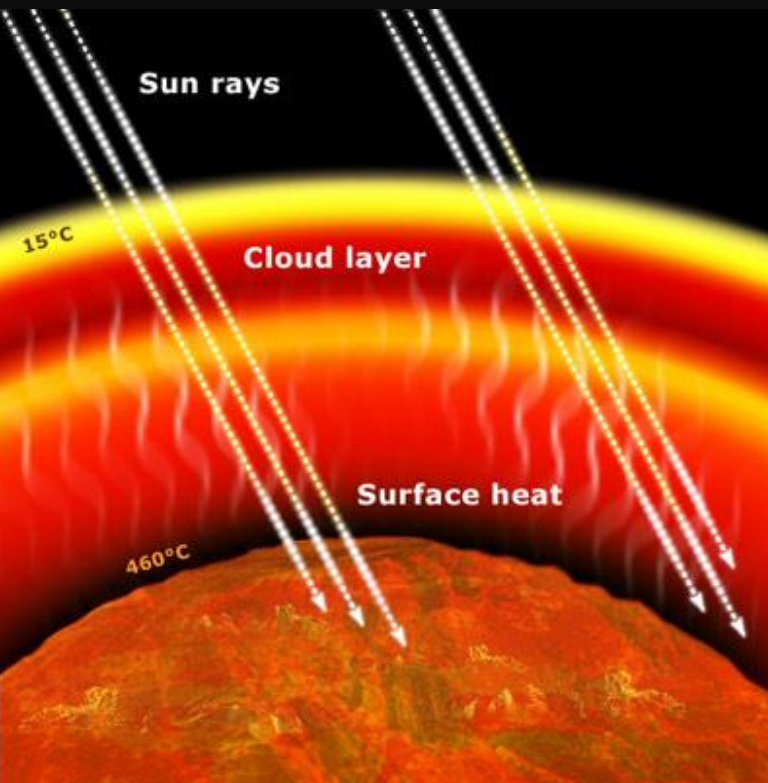
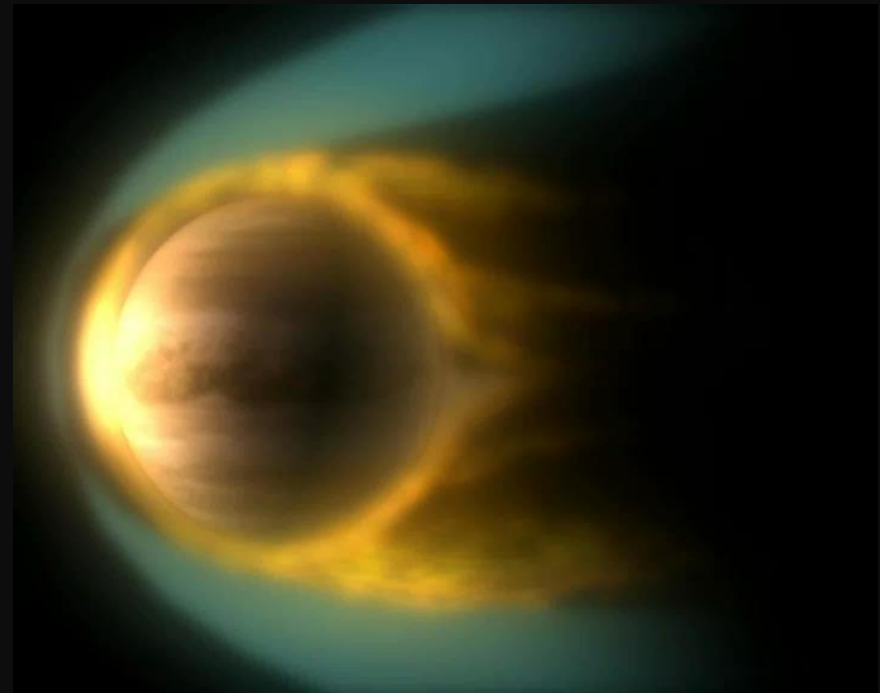
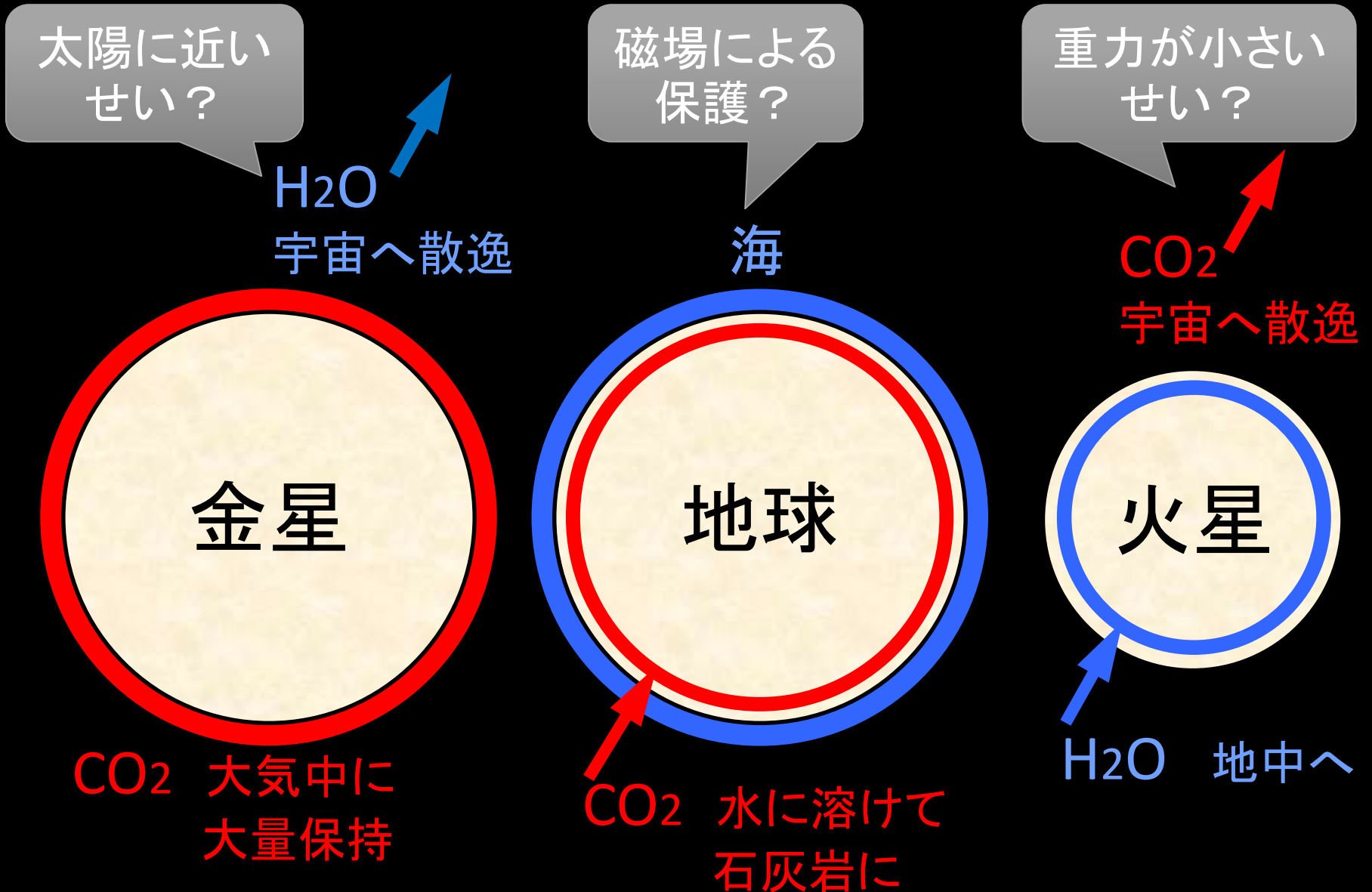


Image provided by ESA

- **Mars** may have had a thick CO<sub>2</sub> atmosphere in early stage of the revolution and have sustained a warm, humid environment via its greenhouse effect.
- The loss of CO<sub>2</sub> to space may have caused cooling of the climate.



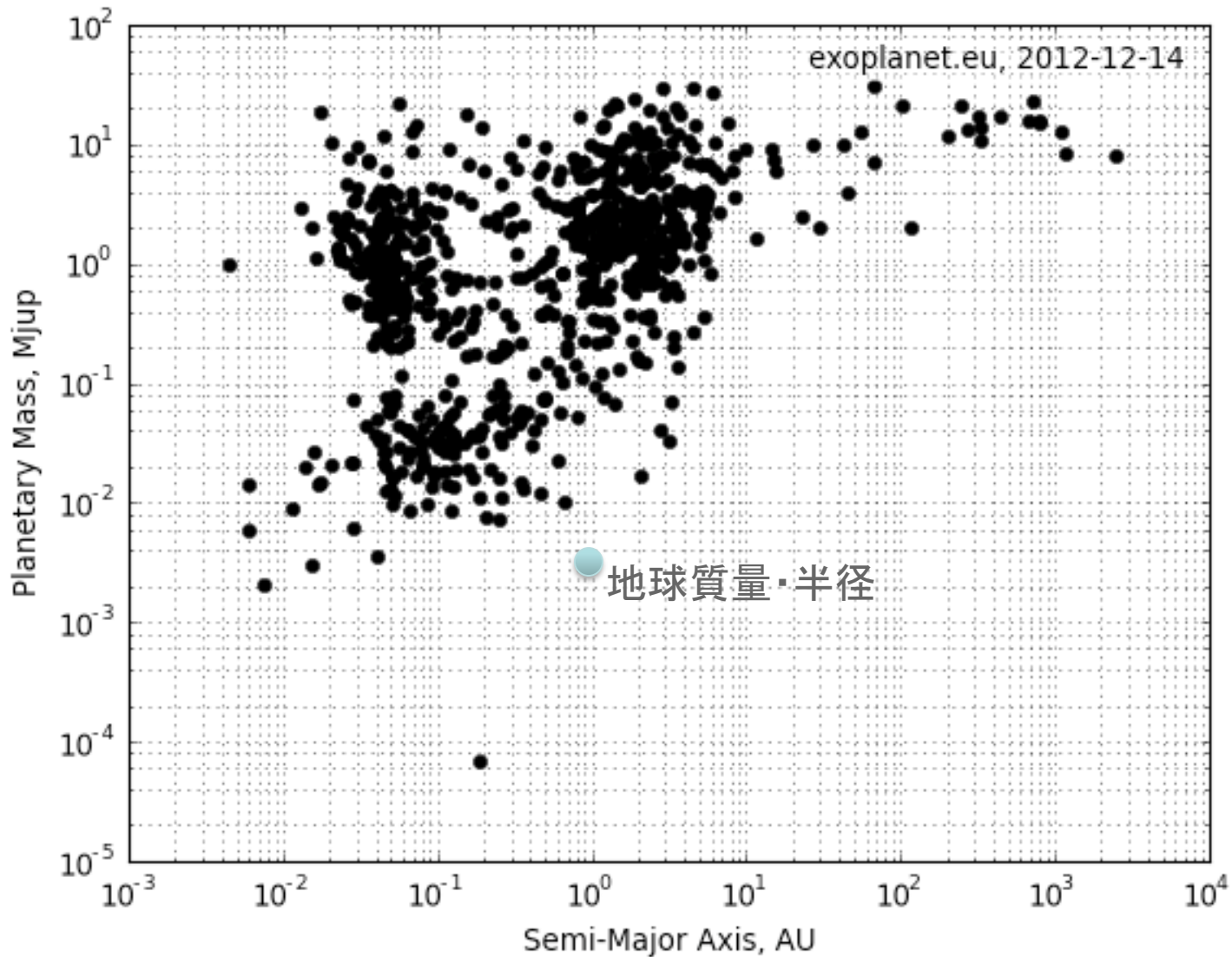
# 金星・地球・火星の分化のあり得るシナリオ



# 系外惑星 Extrasolar planets

既に1000個を超えている

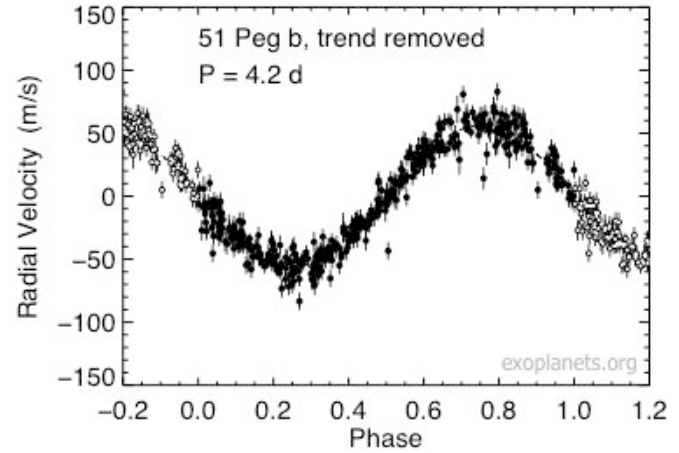
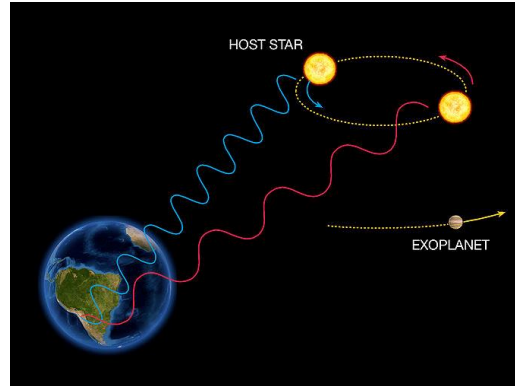
惑星の質量(木星質量に対する割合)



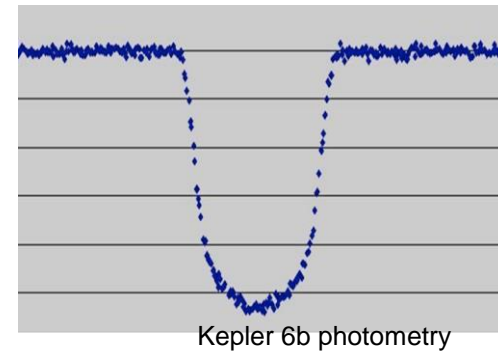
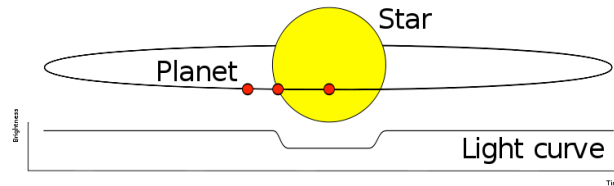
公転軌道の半径(地球太陽間距離に対する割合)

# Detection of exoplanets

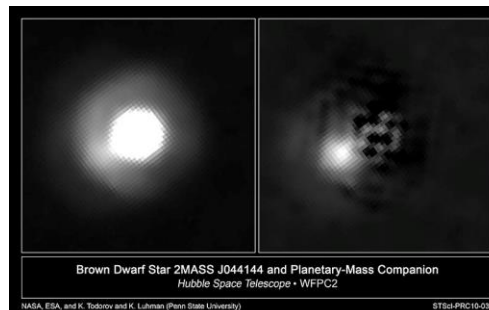
- Doppler method



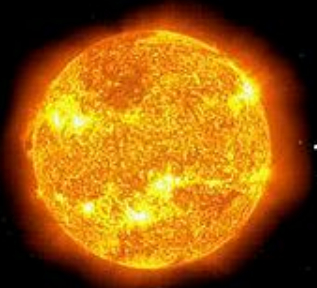
- Transit method



- Direct imaging



# 系外惑星系のHabitable zone (液体の水の存在領域)



Sun



Gliese 581



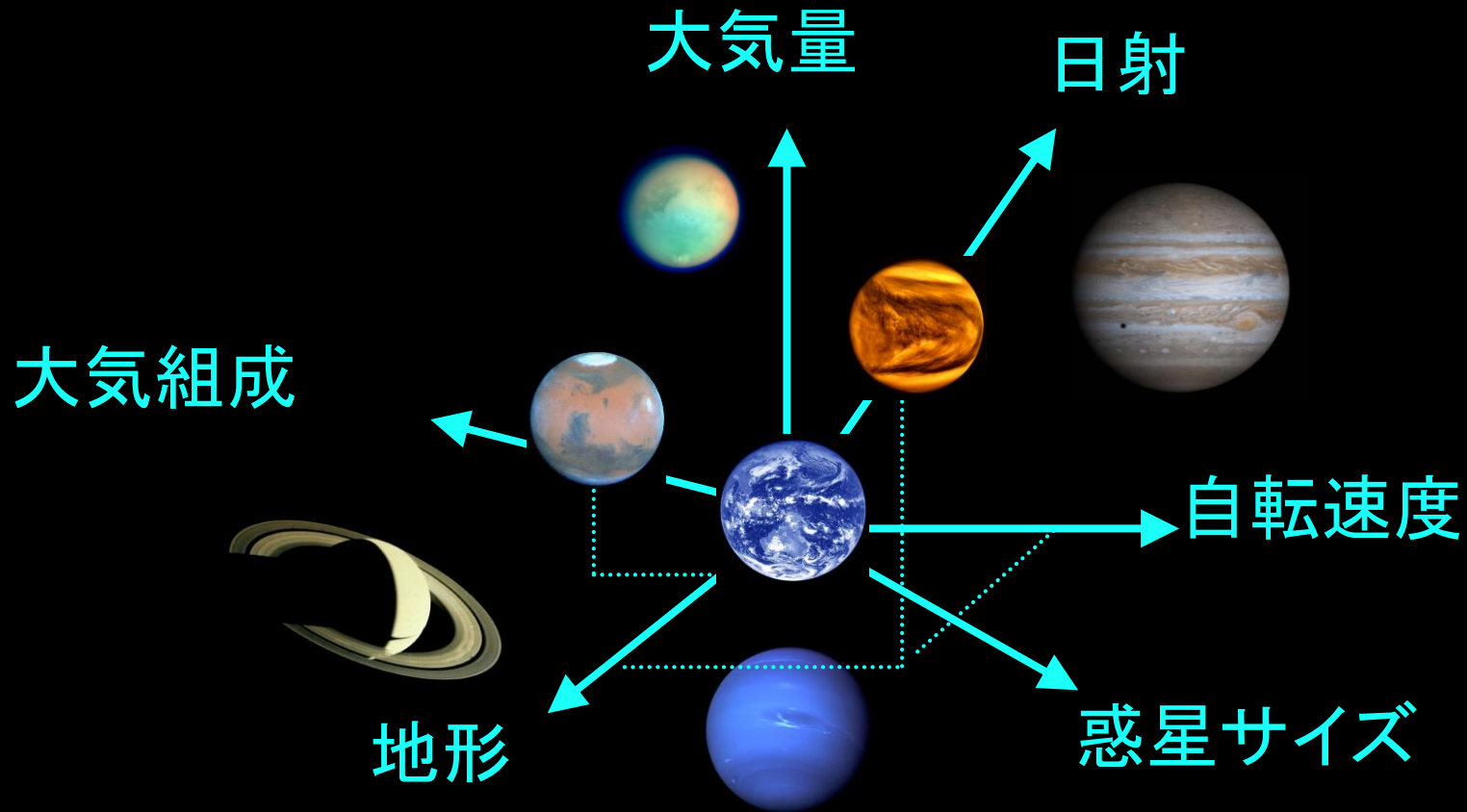
## Habitable zoneの内側境界

- 水の散逸による限界 Water loss limit  
水蒸気が分解して生じる水素が宇宙へ散逸して失われる
  - 暴走温室限界 Runaway greenhouse limit  
水が全て蒸発して地表から液体の水が無くなる
- 金星はどのようにhabitableでなくなったのか？

## Habitable zoneの外側境界

- CO<sub>2</sub>など温室効果ガスによって地表温度を0°Cより高い温度に保つ  
(地球の場合、CO<sub>2</sub>が無いと地表温度は0°C以下)
  - 地球はCO<sub>2</sub>  $3 \times 10^{-4}$  気圧で15°Cを維持している。40億年前に太陽の明るさが現在の70%であったとしたら地球のCO<sub>2</sub>量は現在の1000倍必要。
- かつて温暖湿潤だったかもしれない火星はどのようにしてhabitableでなくなったのか？

# 惑星大気環境科学の比較論へ



共通の物理過程のもとで条件に応じて多様な気候が生じる仕組みの解明



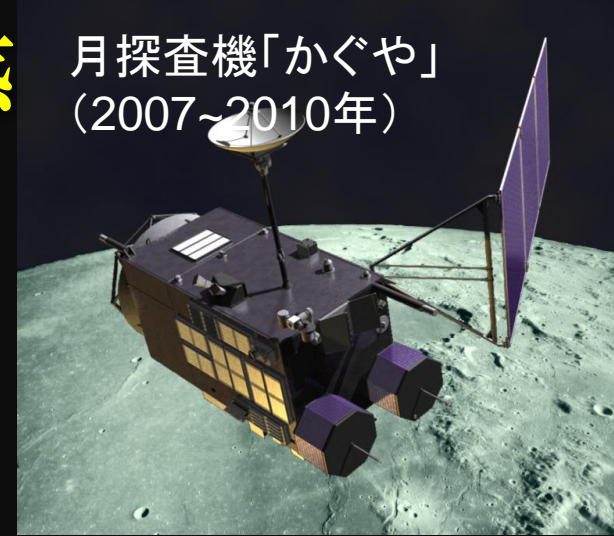
# 惑星探査の進め方

火星探査機「のぞみ」  
(1998年～2003年)

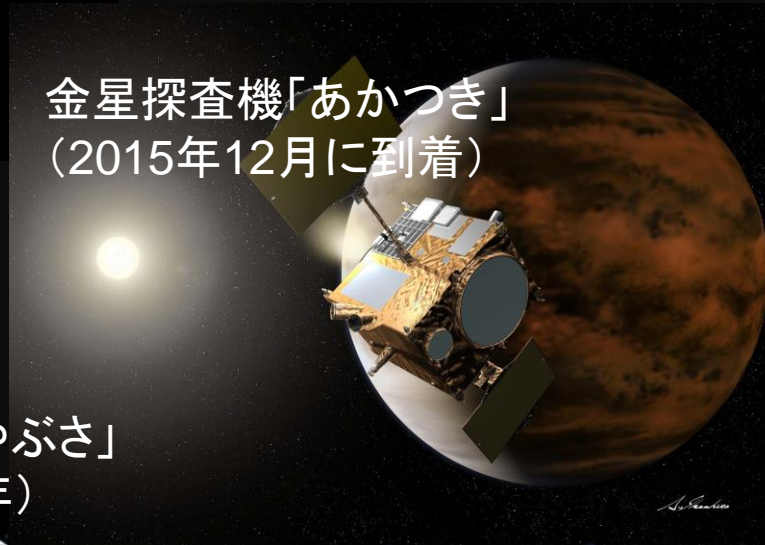


# 日本が取り組む惑 星探査

月探査機「かぐや」  
(2007～2010年)



金星探査機「あかつき」  
(2015年12月に到着)



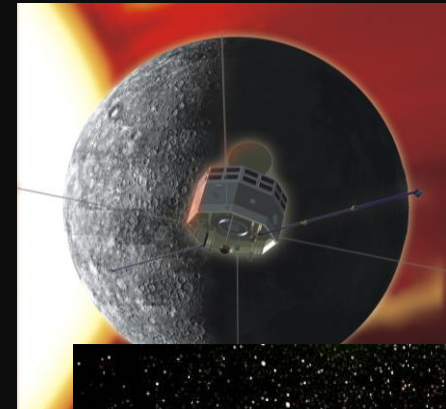
小惑星探査機「はやぶさ」  
(2003～2010年)



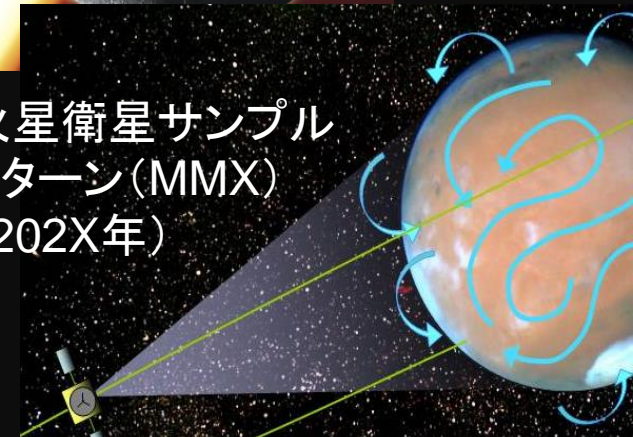
小惑星探査機「はやぶさ2」  
(2014～)



水星探査「BepiColombo」  
(開発中)



火星衛星サンプル  
リターン(MMX)  
(202X年)



打ち上げ能力を有する機関

名称	現地名称	略称	国名	設立	宇宙飛行士	人工衛星	ロケット
アメリカ航空宇宙局	National Aeronautics and Space Administration	NASA	 アメリカ合衆国	1958年10月1日	 有	 有	  有人
フランス国立宇宙研究センター	Centre National d'Études Spatiales	CNES	 フランス	1961年12月19日	 有	 有	 有
インド宇宙研究機関	Indian Space Research Organization	ISRO	 インド	1969年8月15日	 有	 有	 有
欧州宇宙機関	European Space Agency	ESA	EUROPEAN SPACE AGENCY	1975年5月11日	 有	 有	 有
イスラエル宇宙局	חלל הישראלית	IAI	ISRAELI SPACE AGENCY	1982年12月1日	 有	 有	 有
ロシア連邦宇宙局	Федеральное космическое агентство	РКА	RUSSIAN SPACE AGENCY	2004年4月1日	 有	 有	 有
ウクライナ国立宇宙機関	Національне космічне агентство України	NSAU	UKRAINE SPACE AGENCY	2010年1月20日	 有	 有	 有
中国国家航天局	国家航天局	CNSA	CHINA SPACE AGENCY	1983年3月2日	 有	 有	 有
宇宙航空研究開発機構	宇宙航空研究開発機構	JAXA	JAPANESE SPACE AGENCY	2003年7月8日	 有	 有	 有
イラン宇宙庁	سازمان فضاپی ایرانیان	ISA	 イラン	2004年	 無	 有	 有

→多くの宇宙機関が惑星探査に乗り出しつつある

なぜ惑星探査か

- 地球や宇宙の成り立ちを解き明かす
- 人類の活動圏を広げる
- 技術開発を牽引
- 国威発揚？

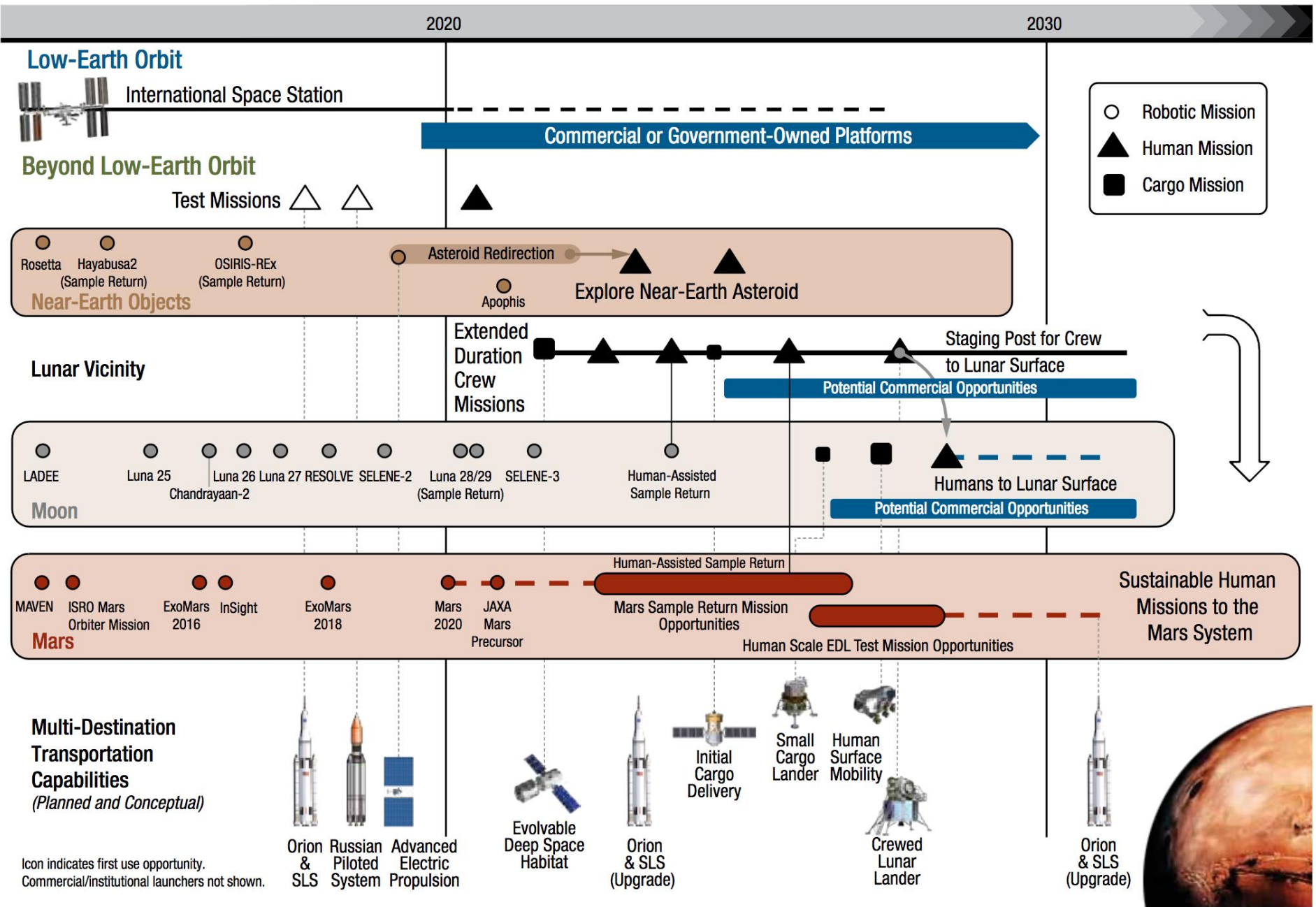
# 太陽系探査のロードマップ

- ひとつのミッションでできることは限られている。複数回のミッションの組み合わせによって段階的に理解を進める。同時に段階的に技術革新を図る。
- ロードマップは一国で描くものではなく、世界が協調して分担する時代。一方では健全な競争も必要。
- 惑星ミッションは単独で高い価値を持つだけでなく、ロードマップや世界との協力関係の中にきちんと位置付けられていなければ推進しがたい。
- ロードマップは各国の宇宙機関や国際的な話し合いの場で、常に議論され更新されている。日本においても、JAXAのほか、惑星科学会や地球電磁気・地球惑星圏学会といった惑星探査の母体となる研究者コミュニティでロードマップを検討している。

# International Space Exploration Coordination Group (ISECG)

- ISECG members: ASI (Italy), CNES (France), CNSA (China), CSA (Canada), CSIRO (Australia), DLR (Germany), ESA (European Space Agency), ISRO (India), JAXA (Japan), KARI (Republic of Korea), NASA (United States of America), NSAU (Ukraine), Roscosmos (Russia), UKSA (United Kingdom)
- The ISECG is an international coordination mechanism through which individual agencies may exchange information regarding interests, objectives, and plans in space exploration with the goal of strengthening both individual exploration programs as well as the collective effort.

# ISECG Mission Scenario





# Mars Exploration Program Analysis Group (MEPAG)

chartered by NASA HQ to assist in planning the scientific exploration of Mars



[Home](#)

[About Us](#)

[Meetings](#)

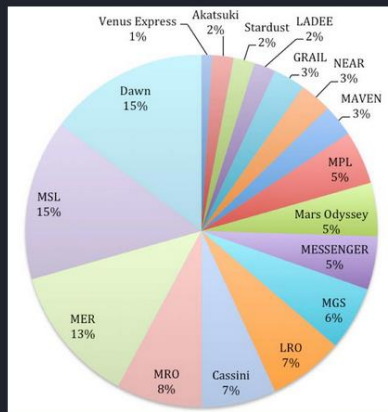
[Reports & Documents](#)

[Announcements](#)

[Other](#)

## MEPAG - HIGHLIGHT

[1](#) [2](#) [3](#)



### May 2017

A white paper about the value of Participating Scientist (PS) programs within NASA's planetary missions is posted. The paper, by LPI Director Louise Prockter & NASA AG representatives, is based on surveys of the planetary science community & mission leadership. PS programs were overwhelmingly supported as they bring increased intellectual & demographic diversity among mission science teams. > [Linked to LPI page under Announcements](#)

> [PAST HIGHLIGHTS](#)



**MEPAG  
Science Goals**



**SAG Reports**



**MEPAG  
Meetings**



**Mars Community  
Announcements**

### MEPAG UPDATES

[June 2017 Mars Science Newsletter is online.](#)

Posted: June 16, 2017

[Presentations from MEPAG meeting 33 have been posted, along with a Summary document.](#)

Posted: March 14, 2017

[The MIC-SAG Final Report is posted.](#)

Posted: March 13, 2017

[Please click here to update your entry in the MEPAG Email Directory \(i.e., if you've changed position/institution/contact info in](#)



**Student Opportunities**

### Top Discoveries of the Mars Exploration Program (as of 2012)

1. Ancient, Persistent Liquid Water
2. Complex Surface Geology
3. Modern Water



# VEXAG Venus Exploration Analysis Group

[About Us](#)

[Reports](#) ▾

[Meetings](#) ▾

[Early Career Scholars](#) ▾

[Venus Resources](#) ▾

[Venus Nuggets](#)

[VEXAG Internal Link](#)

## The Venus Exploration Analysis Group

### Unveil Venus: Why is Earth's sister planet so different?

VEXAG was established by NASA in 2005 to identify scientific priorities and opportunities for the exploration of Venus, Earth's sister planet. The group has an open membership and an 7-person Executive Committee, 3 Focus Groups, and 2 Topical Analysis Groups. Input from the scientific community is actively sought. The VEXAG provides findings to NASA Headquarters, but does not make recommendations. Stay in touch by visiting our [Twitter](#) and [Facebook](#) pages!

### VEXAG Charter

The Venus Exploration Analysis Group is NASA's community-based forum designed to provide scientific input and technology development plans for planning and prioritizing the exploration of Venus over the next several decades. VEXAG is chartered by NASA's Solar System Exploration Division and reports its findings to NASA. Open to all interested scientists, VEXAG regularly evaluates Venus exploration goals, scientific objectives, investigations, and critical measurement requirements, including especially recommendations in the NRC Decadal Survey and the Solar System Exploration Strategic Roadmap.

Tweets by



# 金星探査機あかつき

金星周回軌道から雲の下まで透視する3次元的なリモートセンシングによって金星の気象を調べる

知りたいこと

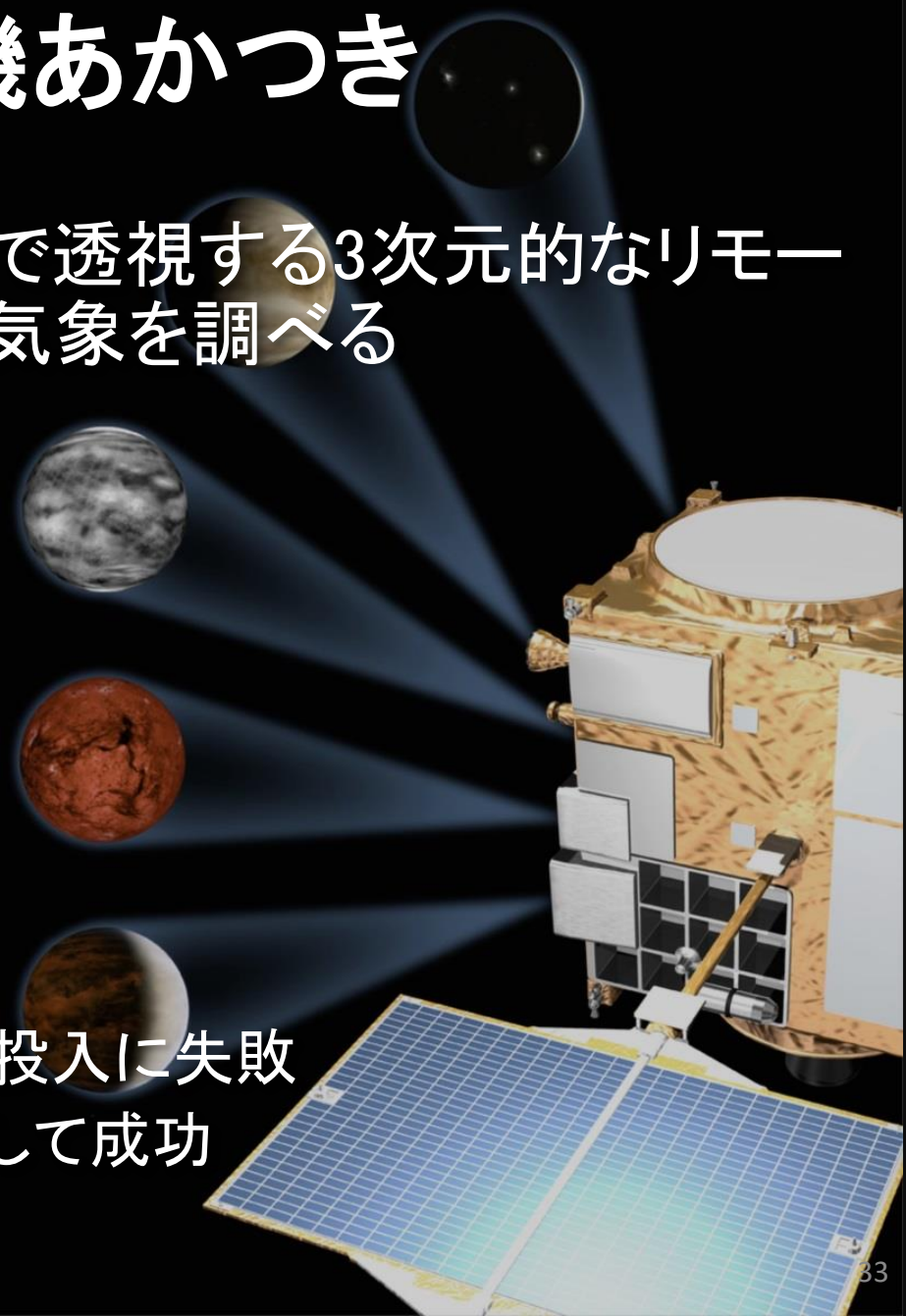
低速自転惑星の大気力学  
硫酸雲の物理化学

2010年5月 打ち上げ

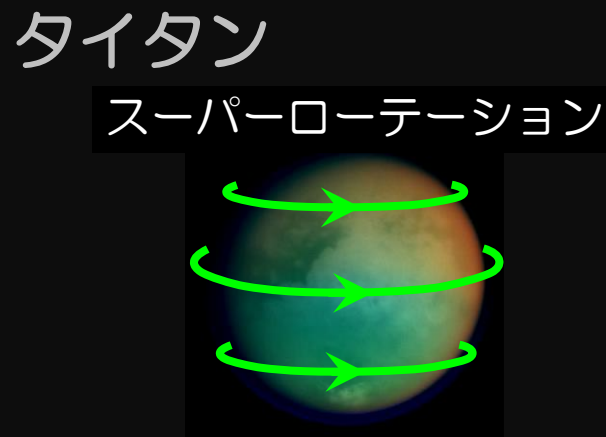
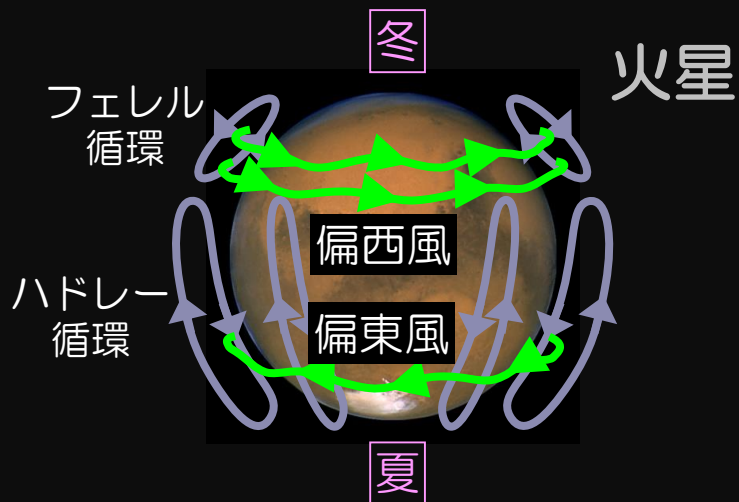
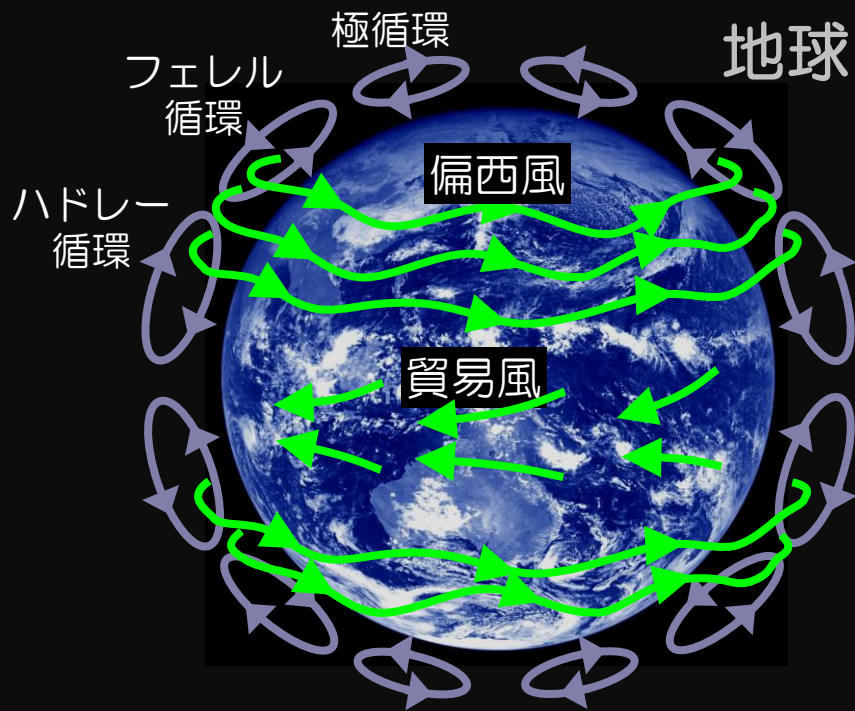
2010年12月 金星周回軌道への投入に失敗

2015年12月 軌道投入に再挑戦して成功

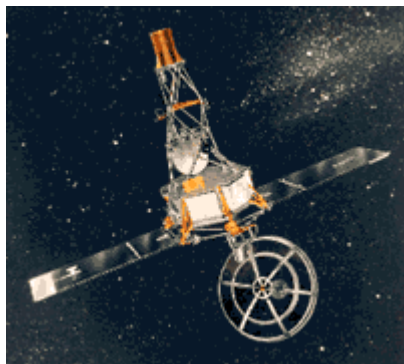
2016年4月 定常観測開始



# 地球型惑星の大気大循環



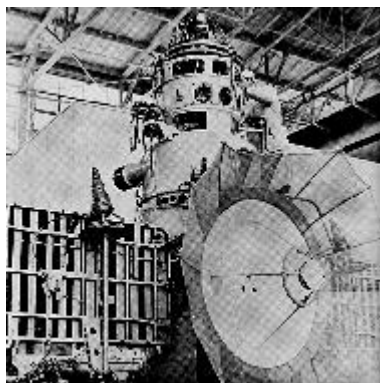
## マリナー2・5・10号



打上げ国: アメリカ

打上げ年: 1962~1973年

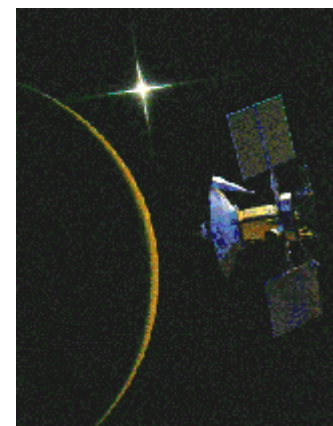
## ベネラ1~16号



打上げ国: 旧ソビエト連邦

打上げ年: 1961~1983年

## マゼラン



打上げ国: アメリカ

打上げ年: 1989年

## パイオニア・ビーナス



打上げ国: アメリカ

## ベガ1・2号



打上げ国: 旧ソ連・フランス

打上げ年: 1984年

## ビーナスエクスプレス



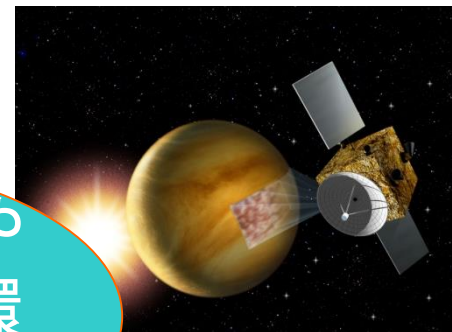
打上げ国: 欧州宇宙機関

打上げ年: 2003年

# 世界における金星探査の中での位置付け



Venus Express  
(ESA2006-2012) あかつき



大気化学や  
大気組成に  
ついて研究

気象・環境

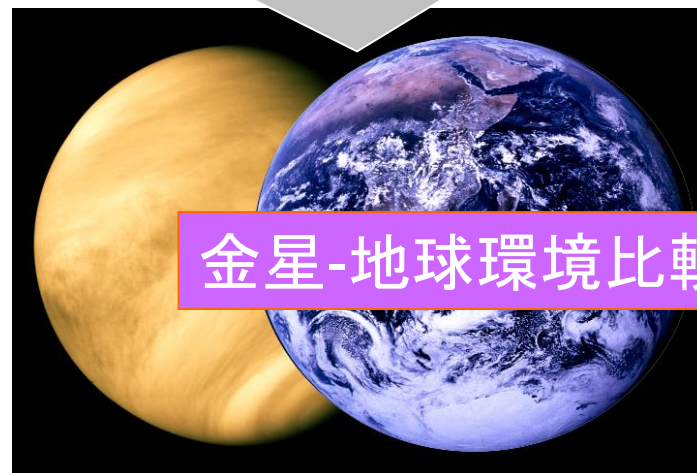
大気力学や  
大気の循環  
について研究

両者の相補的観測により金星気象・  
環境の研究が成立

固体惑星科学  
プラズマ科学

これまでの探査

PVO(1978-1991)  
Venera series



金星-地球環境比較論

# 惑星の観測

それぞれメリットとデメリットがある

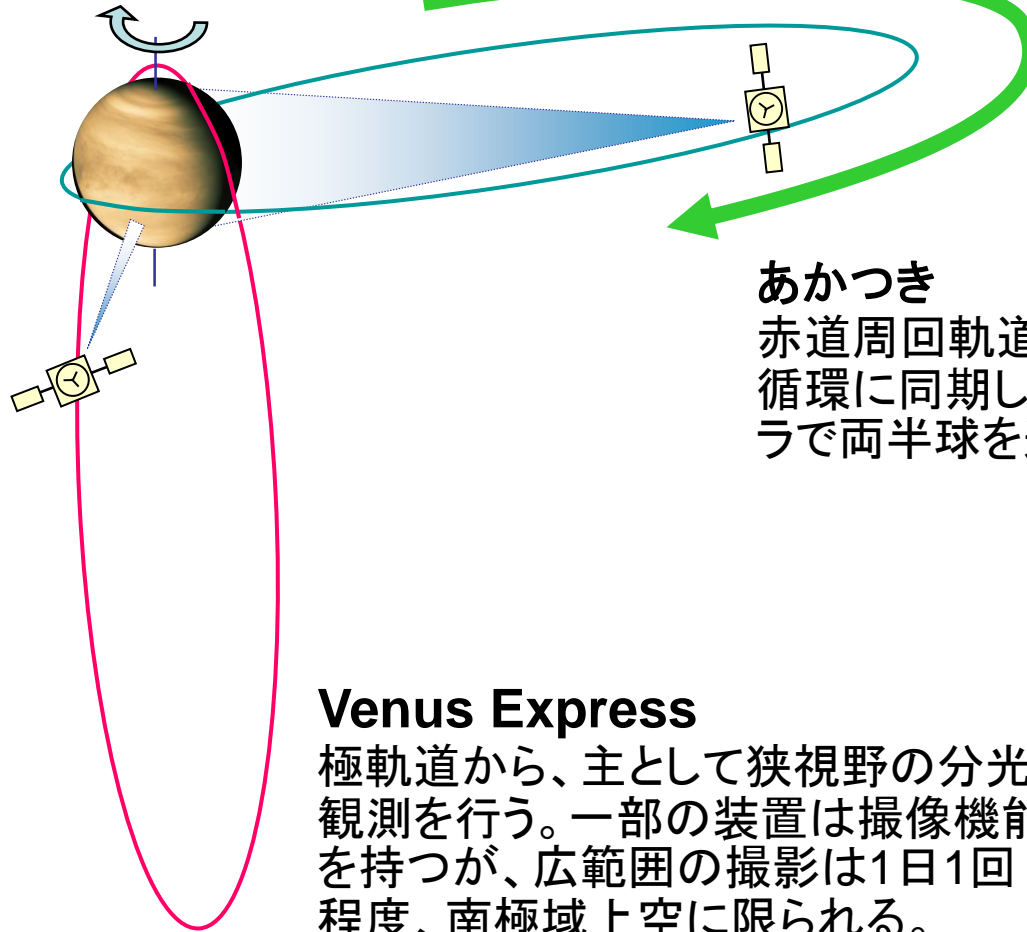
	直接探査	周回衛星	地上観測
探査領域	限定された地域	惑星の全域	惑星の全域
継続時間	多くの場合短い	長期かつ連続的	繰り返し何度でも
観測物理量	リソース次第でかなり広範	電磁波で遠隔測定できるもの 惑星周辺環境	電磁波で遠隔測定できるもの 観測装置の重量制限が緩い

# あかつき(日本)と Venus Express (ESA)の違い

	あかつき	Venus Express
観測装置	5つのカメラ 超高安定発振器(電波科学)	3つの分光装置 1つのカメラ プラズマ分析器 磁力計 超高安定発振器(電波科学)
軌道	赤道周回軌道	極軌道
主目標	大気の力学(連続撮像による 大気運動の可視化)	大気の化学(分光による大気・ 地表組成の解明)
観測期間	2010-	2006-

# 金星周回軌道の違い

大気の高速循環

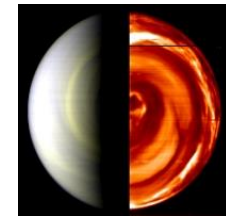


あかつき

赤道周回軌道から、大気の高速循環に同期しつつ、広視野のカメラで両半球を連続的に撮影。

## Venus Express

極軌道から、主として狭視野の分光観測を行う。一部の装置は撮像機能を持つが、広範囲の撮影は1日1回程度、南極域上空に限られる。

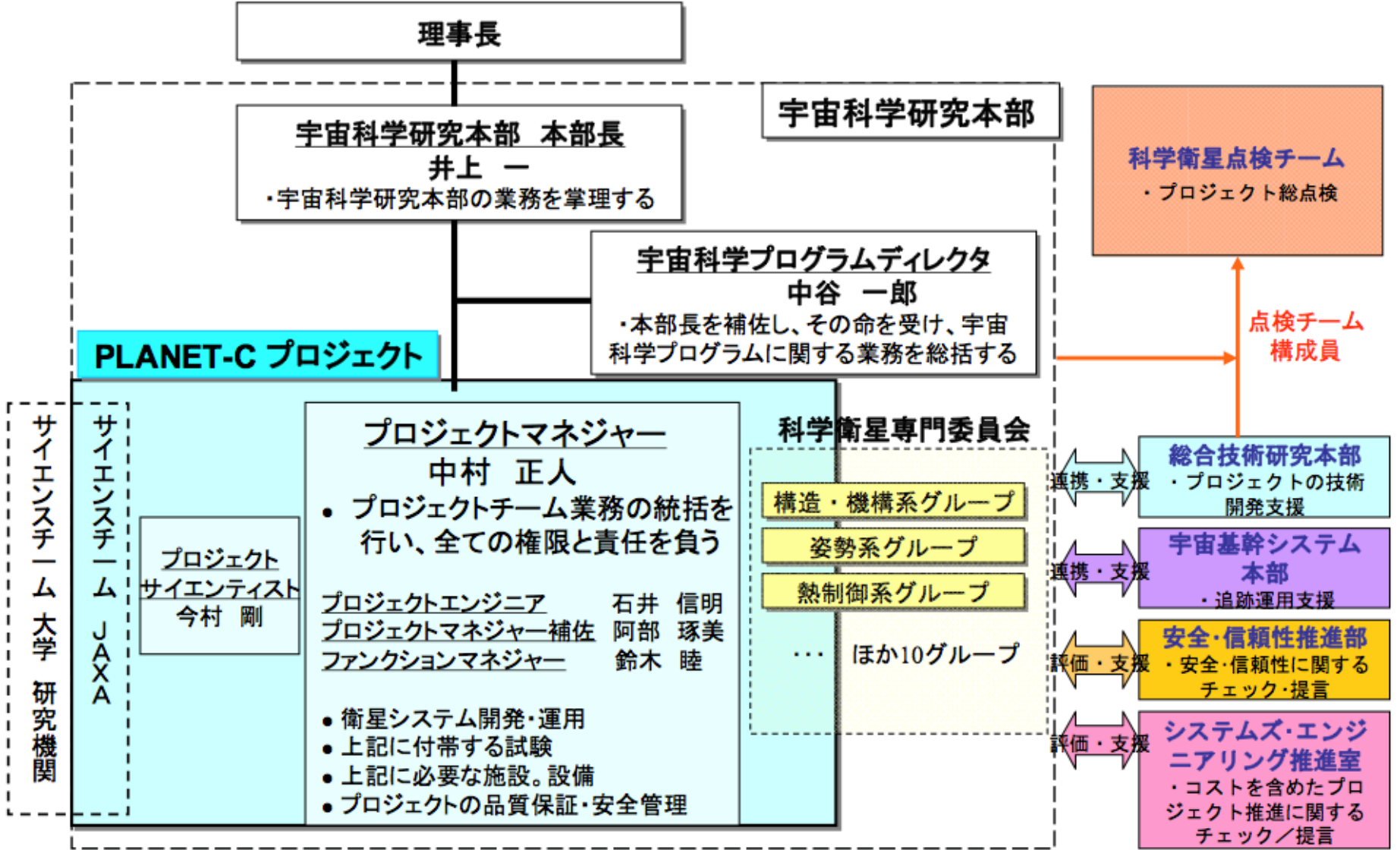


# 金星探査機「あかつき」 実現までの道のり

- 1998年 全国の色々な研究所や大学の有志とともに検討を開始、国内外の研究者を説得
- 2001年 ミッションを提案。JAXA宇宙科学研究所や宇宙開発委員会で有識者による審査を受け、開発開始。
- 2004年 衛星プロジェクトとして正式に承認、開発予算が認められる。試作モデルの設計・製作を開始
- 2006年 飛翔モデルの設計・製作を開始
- 2009年 飛翔モデル総合試験
- 2010年 打ち上げ

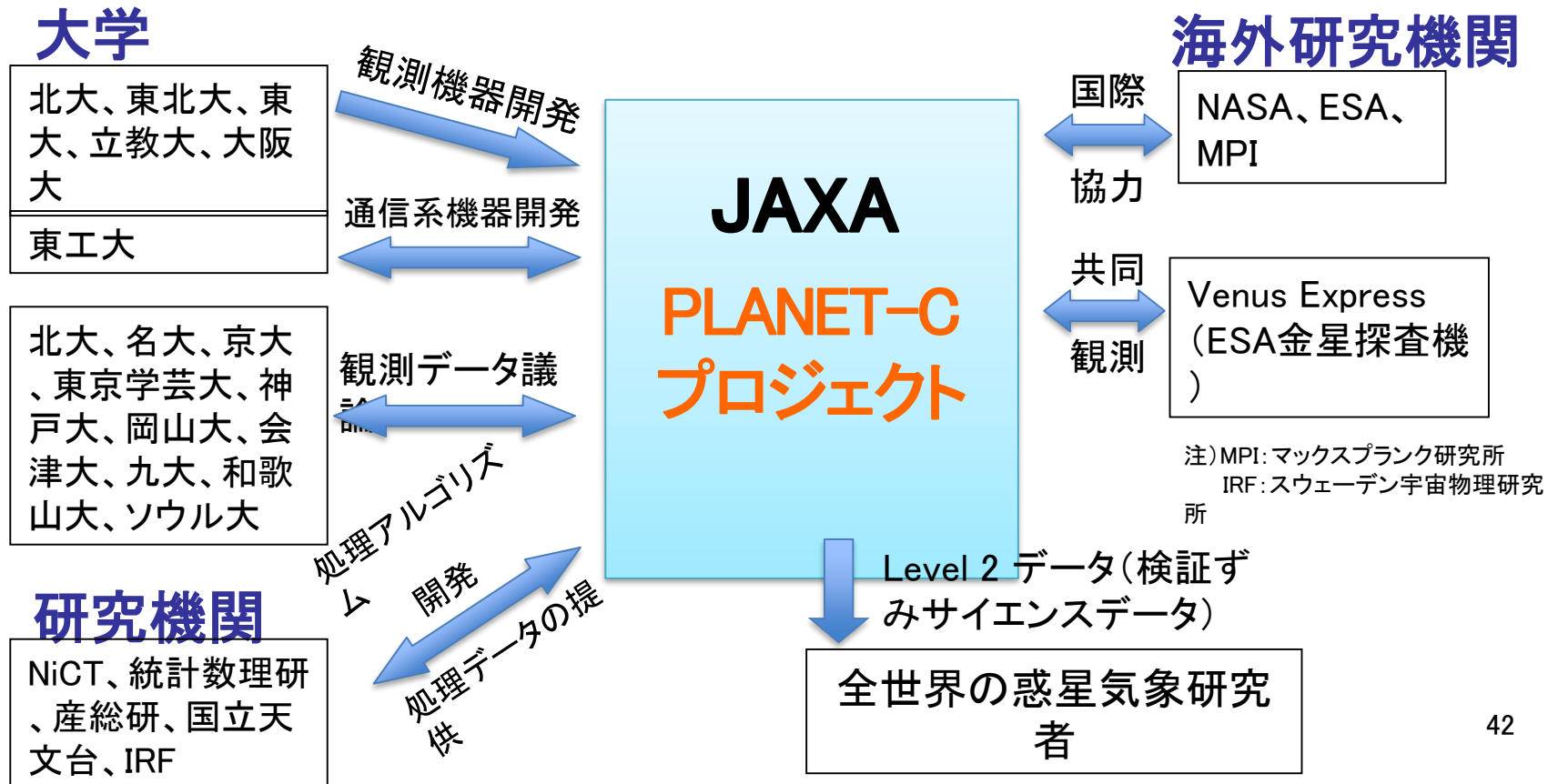


# 実施体制(2010年当時)



# 開発体制—国内・国際協力関係

本プロジェクトは、JAXAと国内の大学・研究機関との協力を中心とし、さらにESA(欧州宇宙機関)の金星探査機Venus Express と 堅固な協同推進関係を保ちつつ進められている。



# 深宇宙ネットワーク(DSN: Deep Space Network)

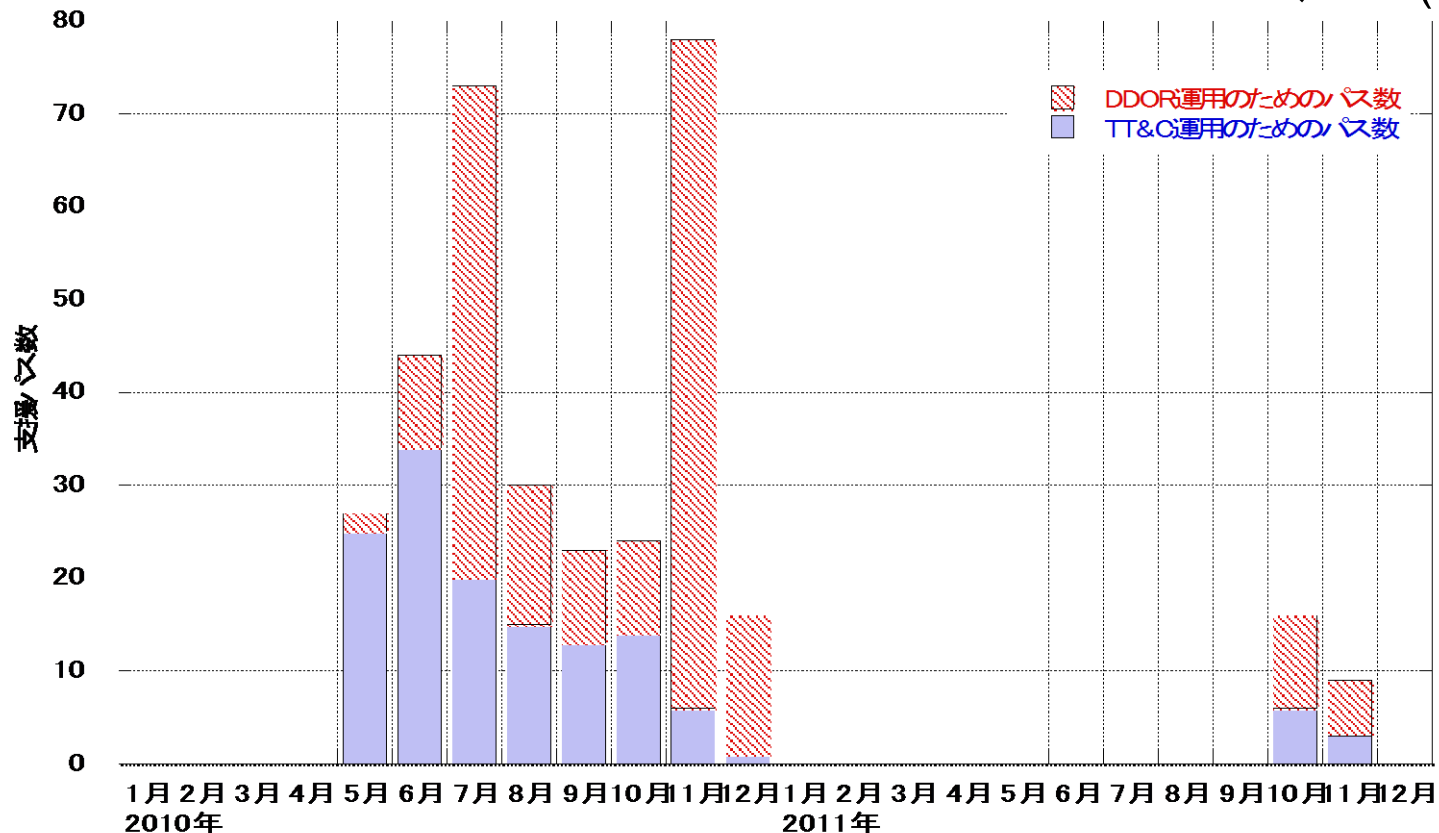
- 世界規模で深宇宙局を展開し, 24時間, 探査機の一挙手一投足を見張る深宇宙ネットワーク(DSN: Deep Space Network)でこそ極限の探査が可能
- 米国航空宇宙局(NASA: National Aeronautics and Space Administration)は早くからDSN整備に着手し, その成果は日本の探査機をも存分に支えてきた。

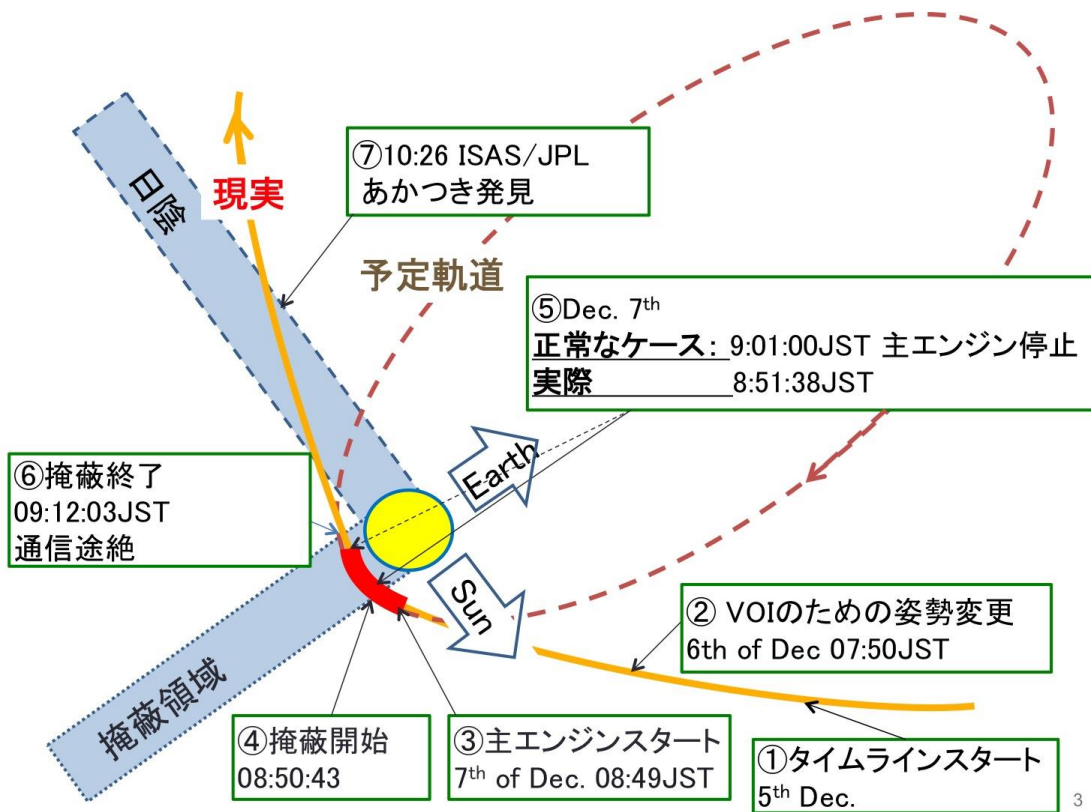


戸田 (2014)

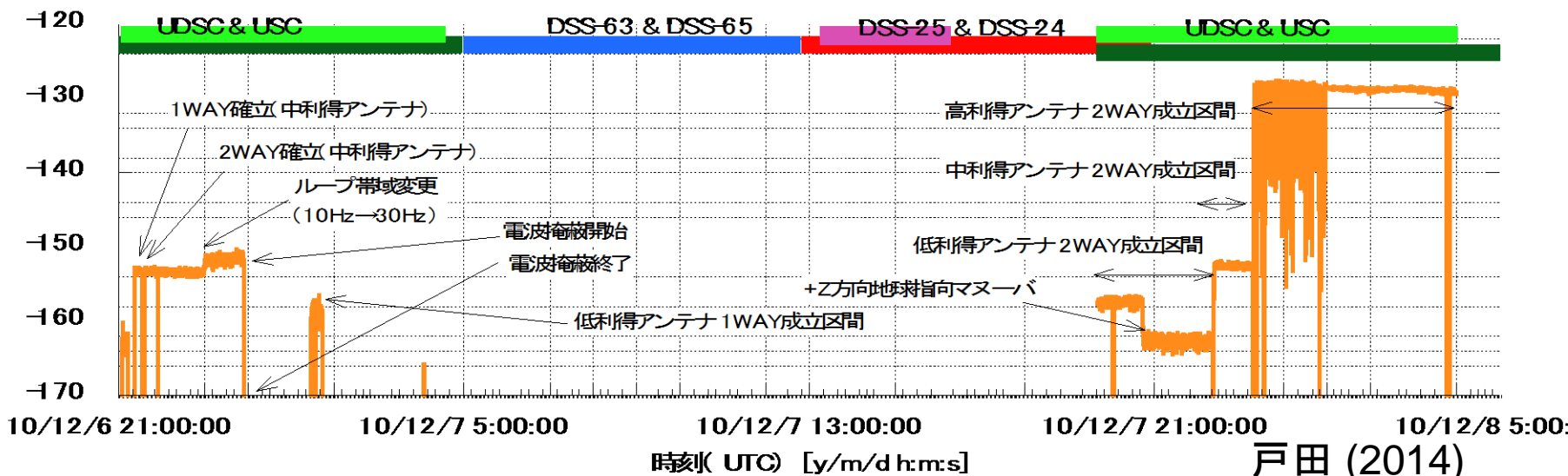
- 軌道投入に必要な精緻な軌道決定には、Differential One Way Range(DDOR)と呼ばれるコンプレックス間基線を利用した位置決定技術が欠かせない。また、軌道投入前後にUDSCから非可視となる時間が不可避で、投入準備、投入異常時の救済対応など、「あかつき」の不測の事態に備える唯一の手段だった

戸田 (2014)





UDSC84 受信レベル [dBm]



2010年12月

エンジンの破損のために速度を十分にゆるめることができず、金星の横を素通りしてしまった。

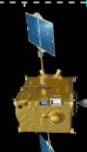
地球の軌道



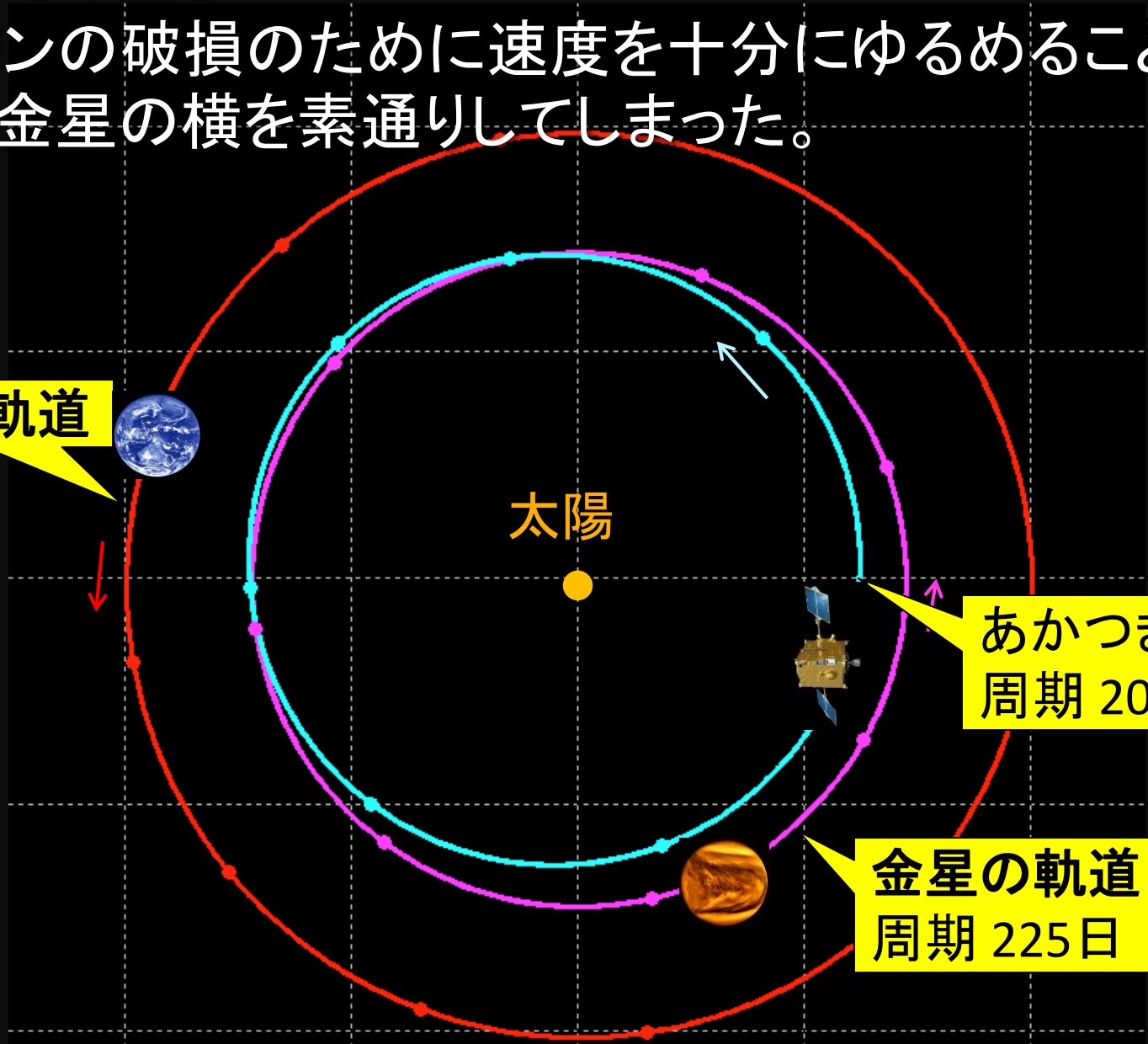
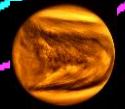
太陽



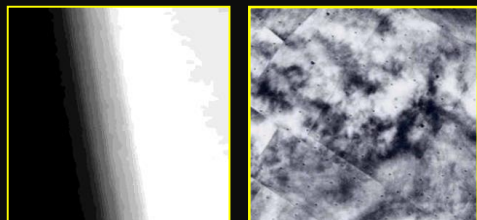
あかつきの軌道  
周期 203日



金星の軌道  
周期 225日

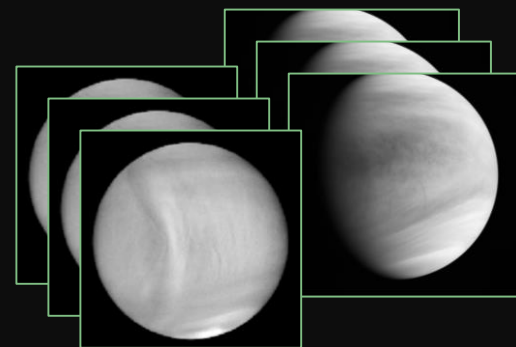


# 2015年12月 再挑戦して周回軌道に入った



クローズアップ撮影  
層構造の撮影

雲や微量ガスの変動を  
3次元・連続的に撮影して  
動画として可視化



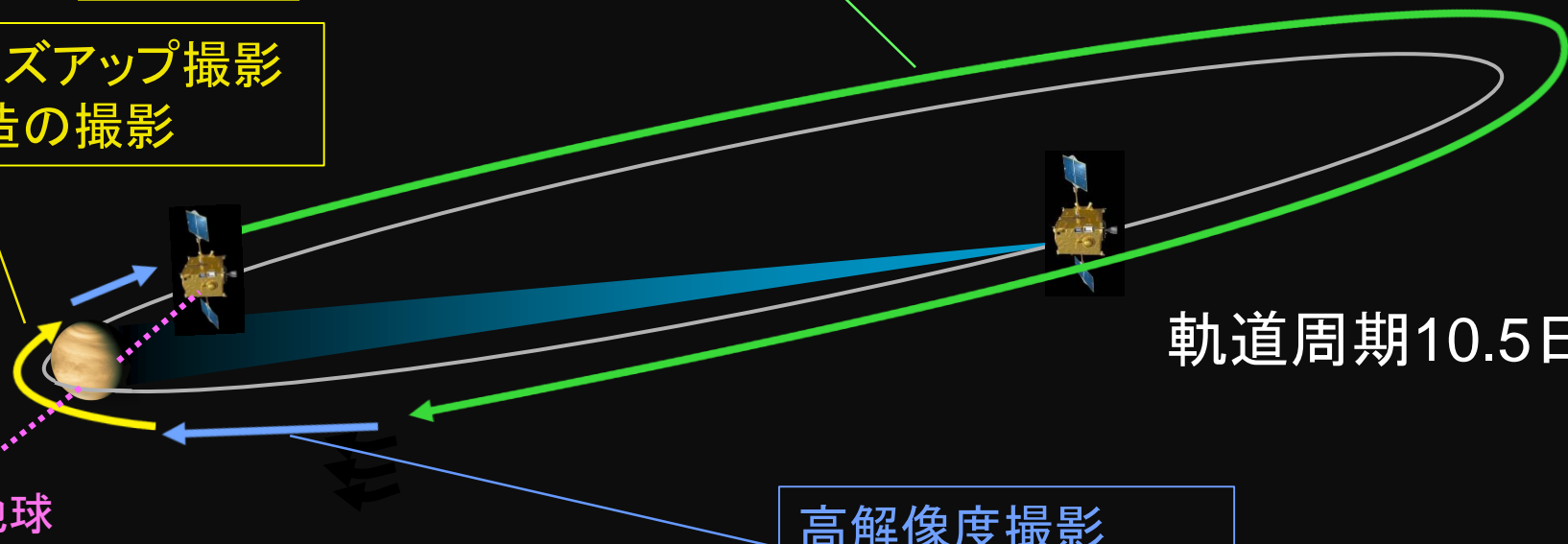
軌道周期10.5日

地球



大気を水平に貫く電波  
を地上で受信して大気  
の層構造をとらえる

高解像度撮影  
雷・大気光の観測



# NASA's Akatsuki Participating Scientist Program (PSP)

- The PSP funds two scientists in residence (PSiR) to live in Japan and five Participating Scientists (PS) to conduct joint research with the science team.
- NASA PSs:
  - Limaye, Sanjay S : University of Wisconsin – Madison
  - McGouldrick, Kevin : University of Colorado
  - Acton, Charles H : Jet Propulsion Laboratory
  - Lorenz, Ralph D : Johns Hopkins University Applied Physics Lab
  - Schubert, Gerald : University of California Los Angeles
  - Young, Eliot F. : University of California Los Angeles
  - Bullock, Mark A : Southwest Research Institute
  - Kandis L. Jessup : Southwest Research Institute



# 世界へのデータ公開

## AKATSUKI Science Data Archives

This website provides the science data obtained by the AKATSUKI (also known as Venus Climate Orbiter and PLANET-C) mission.

取得後1年を目処に全世界に向けてデータを公開するのが慣例となっている

### News

- 2017-07-11
  - 1st release of L1b and L2b products for UVI, IR1, IR2 and LIR are available. The current status of these products is "pre peer review", so please use at your own risk.
  - 1st release of VCO SPICE data set is available.

### UVI [Ultraviolet Imager]

UVI is an ultraviolet imager that is able to capture images with 365-nm wavelength and 283-nm wavelength to map SO<sub>2</sub> and unknown absorber, respectively.

[View details »](#)

### IR1 [1- $\mu$ m Camera]

IR1 measures the thermal radiation mostly from the surface and a little from the atmosphere using four filters, 0.90  $\mu$ m (dayside), 0.90  $\mu$ m (nightside), 0.97  $\mu$ m, and 1.01  $\mu$ m.

[View details »](#)

### IR2 [2- $\mu$ m Camera]

IR2 utilizes the atmospheric windows at wavelengths of 1.74, 2.26, and 2.32  $\mu$ m; the first two suffer only CO<sub>2</sub> absorption, while the last one contains a CO absorption band. At these wavelengths the outgoing infrared radiation originates from the altitudes 35 -- 50 km.

[View details »](#)

### LIR [Longwave Infrared Camera]

LIR detects thermal emission from the cloud top in a

### LAC [Lightning and Airglow Camera]

LAC searches for lightning flashes and maps airglow

### RS [Radio Science]

RS aims to determine the vertical structure of the