

ペイルブルードットを超えて

ConBio2017 “アストロバイオロジー：地球と宇宙での生命探査”
18:03-18:27、2017年12月7日@神戸ポートピアホテル

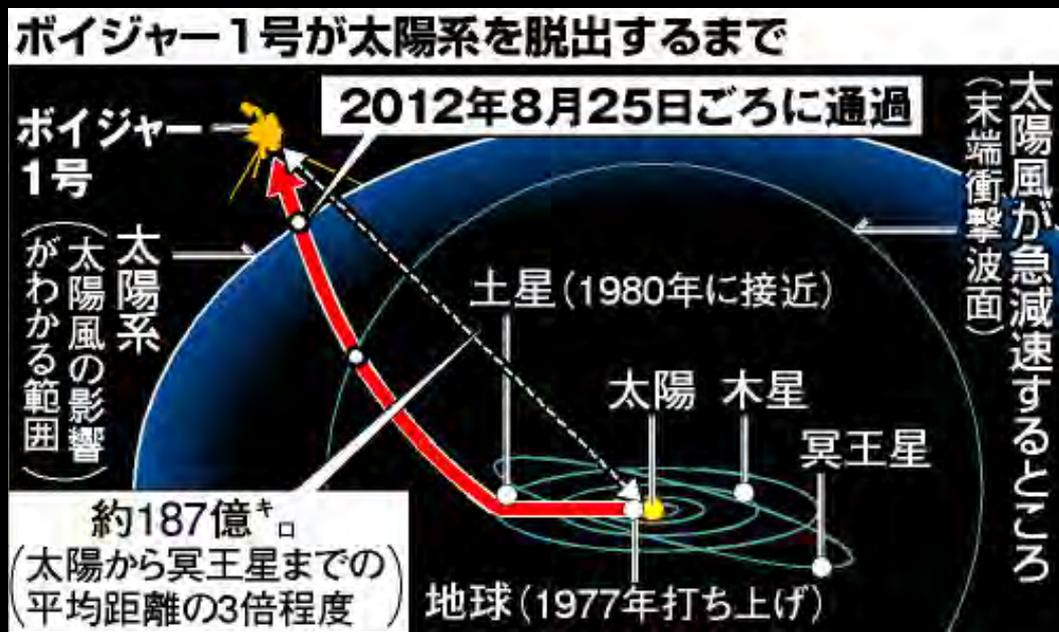
東京大学大学院理学系研究科 物理学専攻 須藤 靖



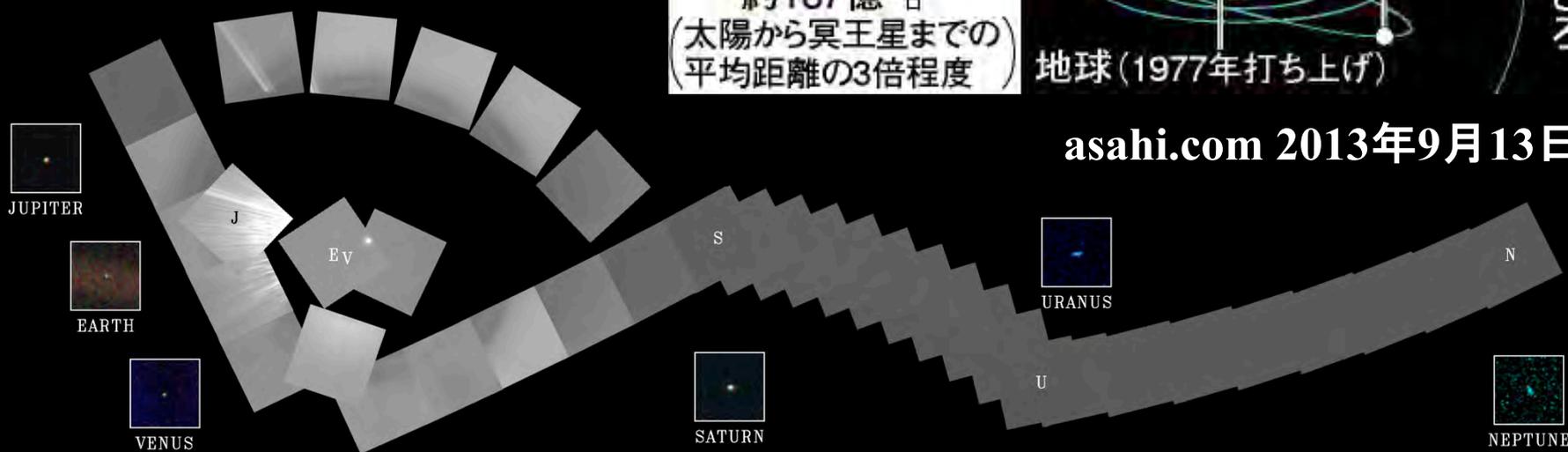
ボイジャー1号による太陽系内惑星撮像

■ 1990年2月14日
@40AU

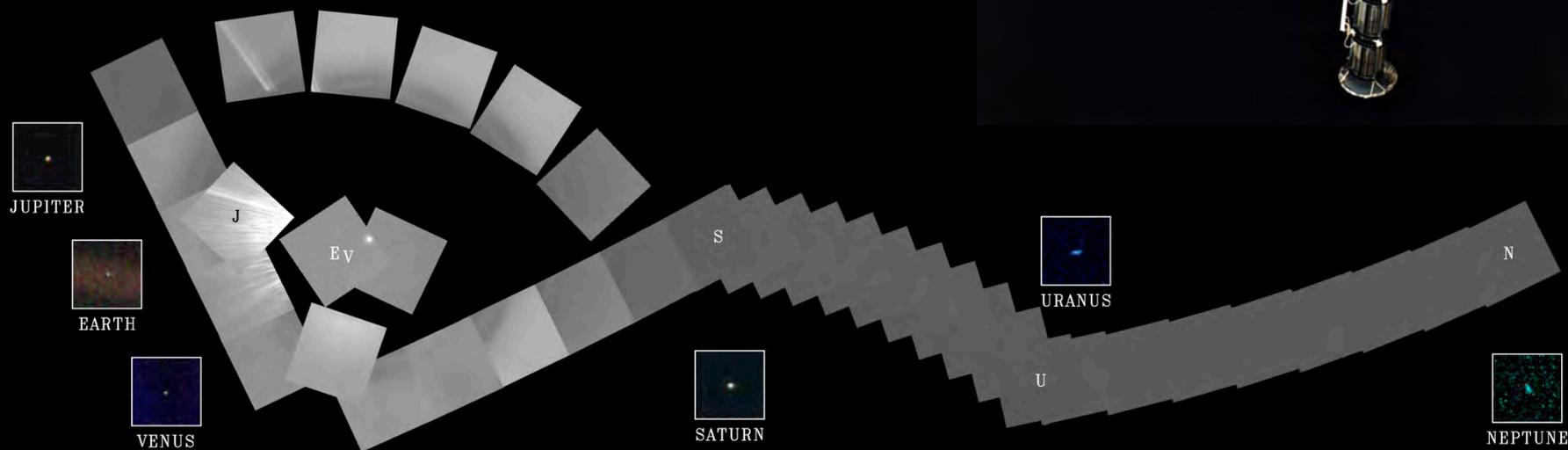
■ カールセーガンが地球の画像を
Pale Blue Dot
と命名



asahi.com 2013年9月13日



ペイル・ブルー・ドット



土星から 見た地球

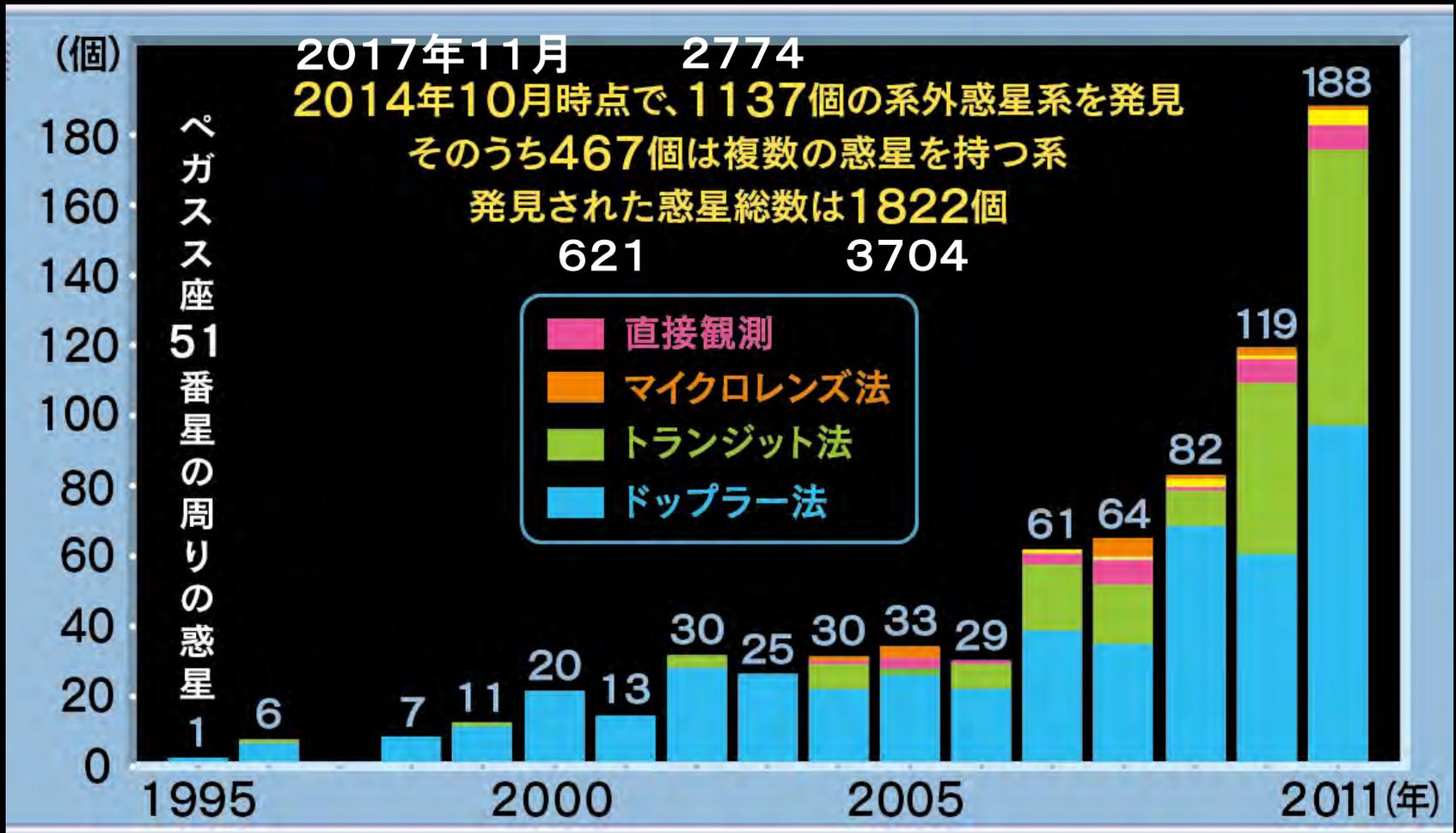


- 土星探査機カッシーニが撮影した地球と月
 - 2013年7月20日(日本時間):2万人がこちらに手を振っている

View from Saturn (Cassini)
900 million miles away

バイオシグニチャー

太陽系外惑星発見史



2016年6月時点では

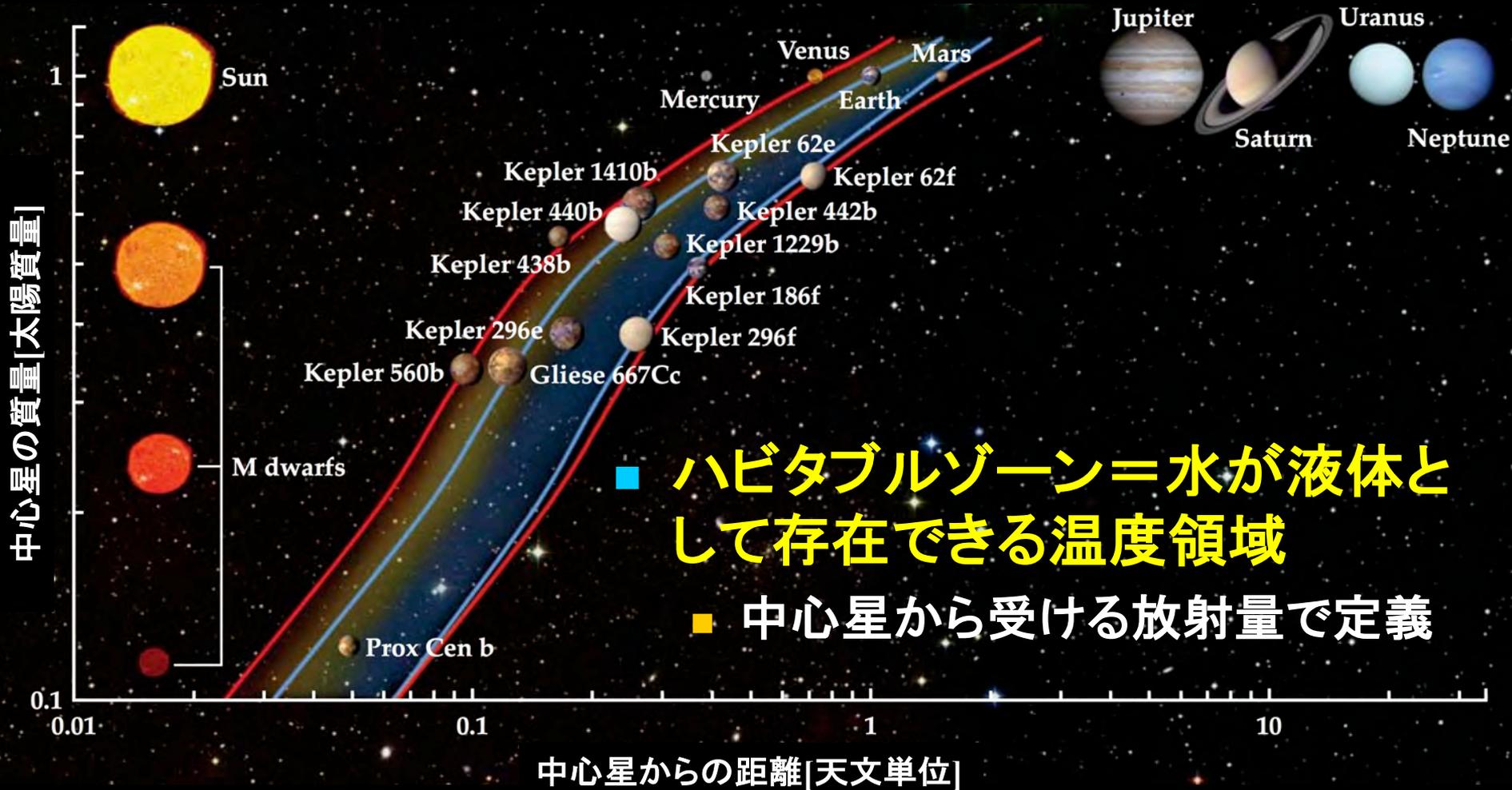
8重惑星系:太陽系のみ、7重惑星系:3、6重惑星系:2、5重惑星系:15、
 4重惑星系:49、3重惑星系:99、2重惑星系 300個以上

私が2002年頃に繰り返し示していた 系外惑星研究のロードマップ

- 巨大ガス惑星発見の時代 (1995~)
- 惑星大気の実見 (2002)
- 惑星大気の高精密分光観測による組成決定
- 惑星赤外線輻射の検出
- 惑星可視域反射光の検出
- リングの実見
- 衛星の実見
- **地球型惑星の実見**
- **ハビタブル(居住可能?)惑星の実見**
- **バイオシグニチャー(生物存在の証拠)の同定**
- **地球外生命の実見**



ハビタブル惑星候補



地球サイズのハビタブル惑星の存在確率

■ GK型星を公転する地球半径の1~2倍の惑星

- ケプラーのトランジット惑星検出数から、観測的選択効果を補正して推定
- 11 ± 4 % (地球上での太陽フラックスの1~4倍のもの)
- $5.7^{+2.2}_{-1.7}$ % (公転周期が200~400日のもの)

Table 1. Occurrence of small planets in the habitable zone

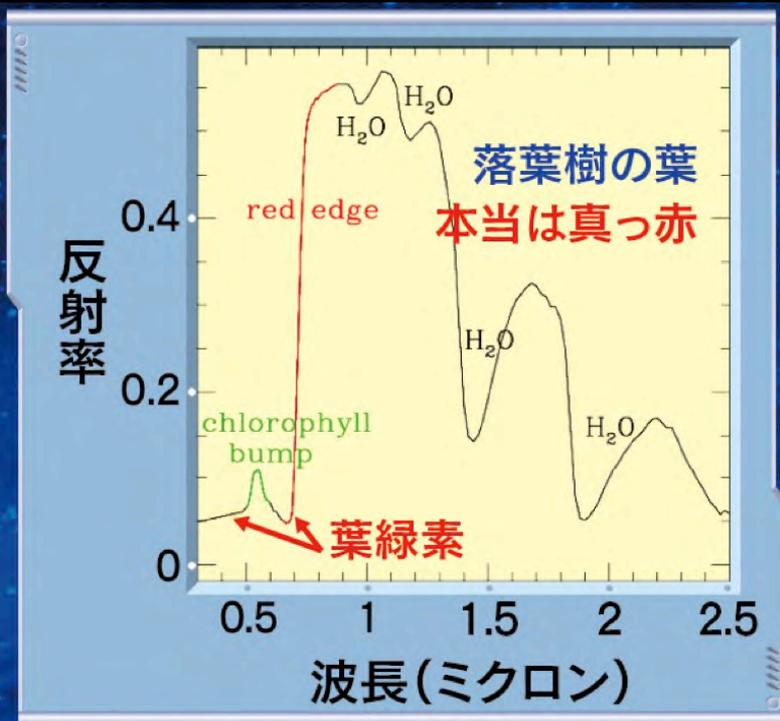
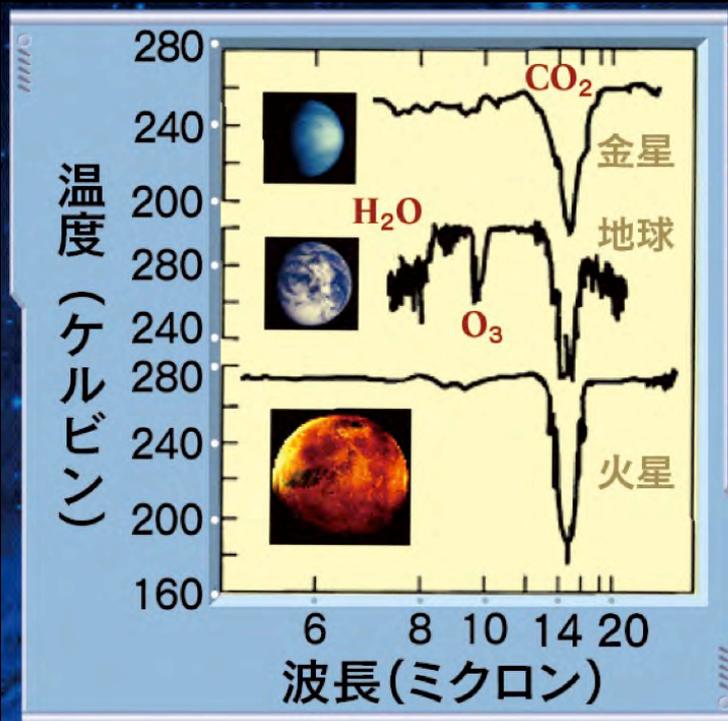
| HZ definition | a_{inner} | a_{outer} | $F_{P,\text{inner}}$ | $F_{P,\text{outer}}$ | f_{HZ} (%) |
|---------------------------------|--------------------|--------------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| Simple | 0.5 | 2 | 4 | 0.25 | 22 |
| Kasting (1993) | 0.95 | 1.37 | 1.11 | 0.53 | 5.8 |
| Kopparapu et al. (2013) | 0.99 | 1.70 | 1.02 | 0.35 | 8.6 |
| Zsom et al. (2013) | 0.38 | | 6.92 | | 26* |
| Pierrehumbert and Gaidos (2011) | | 10 | | 0.01 | ~50 [†] |

天文学と生物学での「生命」のズレ

- **生物学者による生命の定義はかなり原理的**
 - 代謝、自己増殖、外界との隔離(個別の生命)
 - ダーウィンの進化を行う自己維持的化学系
- **天文学者が期待する生命の定義は実用的**
 - 遠方からの観測によって区別できるような実用的なものでない(大規模生命システム)
 - ただし太陽系内探査は別(衛星地下の生物)
- **(できれば十分条件に近い)生命を宿す環境の必要条件を探りたい**
 - (非生物環境では実現しにくい)熱平衡からの極端なずれ(Lederberg 1965, Lovelock 1965)

バイオシグニチャー: 生物が存在する兆候

- 何を見れば生命があると考えられるのか？
 - 生物由来の大気成分(酸素、オゾン、メタン)
 - 植物のレッドエッジ
 - 知的生命体からの電磁波
- 天文学観測(リモートセンシング)が唯一の手段



Vesto Melvin Slipher (1875-1969)



レッドエッジをバイオシグニチャーとして使う先駆的試み

- “spiral nebulae”（今で言う銀河）の赤方偏移を発見
- ハッブルによる宇宙膨張の発見に本質的寄与

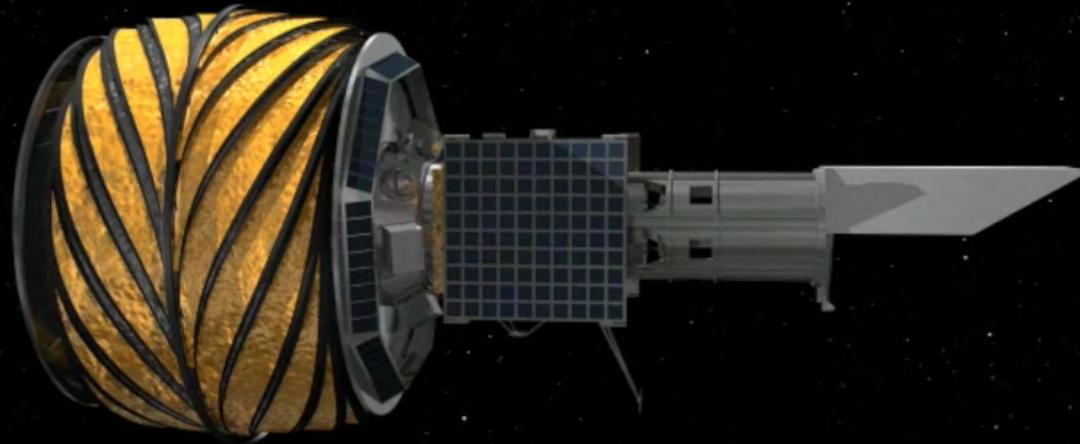
“Observations of Mars in 1924 made at the Lowell Observatory: II spectrum observations of Mars”

PASP 36(1924)261



reflection spectrum. The Martian spectra of the dark regions so far do not give any certain evidence of the typical reflection spectrum of chlorophyl. The amount and types of vegetation required to make the effect noticeable is being investigated by suitable terrestrial exposures.

Starshade project: 地球型惑星を直接見る



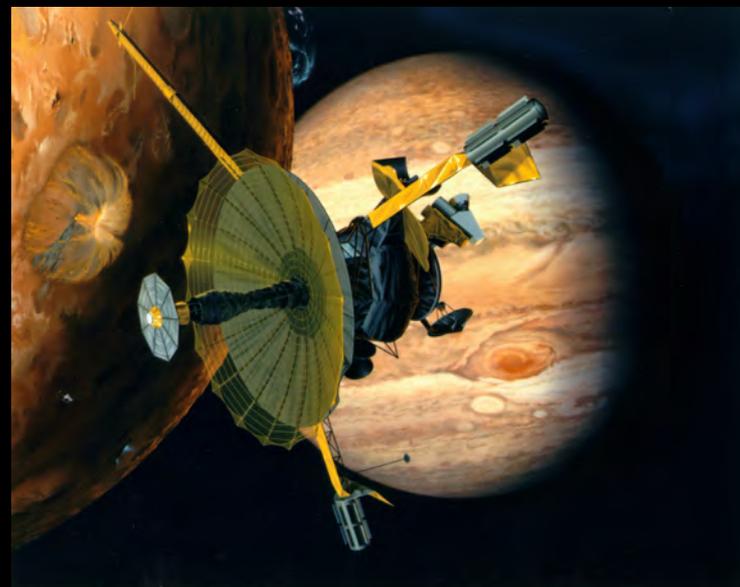
- 宇宙望遠鏡の5万km先に中心星を隠すオカルター衛星をおき、惑星を直接撮像(プリンストン大学 J.Kasdinらのグループ)

リモートセンシング

我が地球の観測

ガリレオ探査機による**地球上の**生命探査

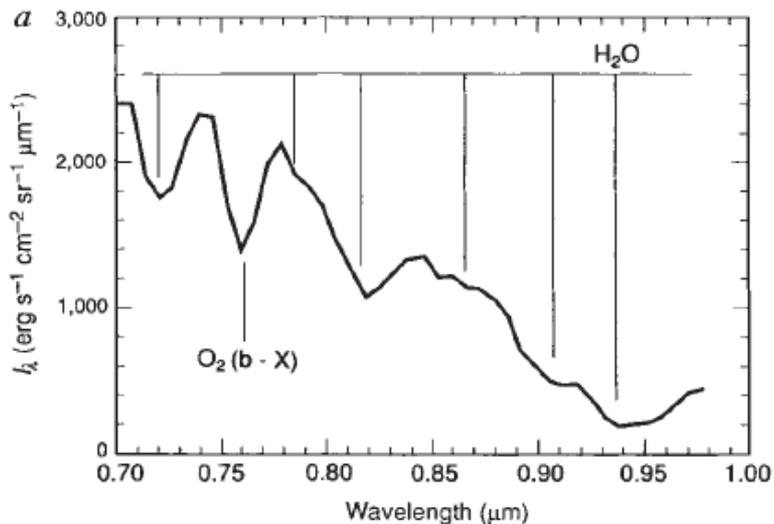
- 1986年5月打ち上げ
- 1990年12月8日一回目の地球スイングバイ時に地球上の“生命探査”
- **地球には生命がいるらしい!**
 - 大量の気体酸素
 - 植物のレッドエッジ
 - 熱平衡から極端にずれた大気中のメタンの存在量
 - 狭帯域で振幅が変化する“不自然な”パルス状電波



Sagan, Thompson,
Carlson, Gurnett & Hord:
Nature 365(1993)715

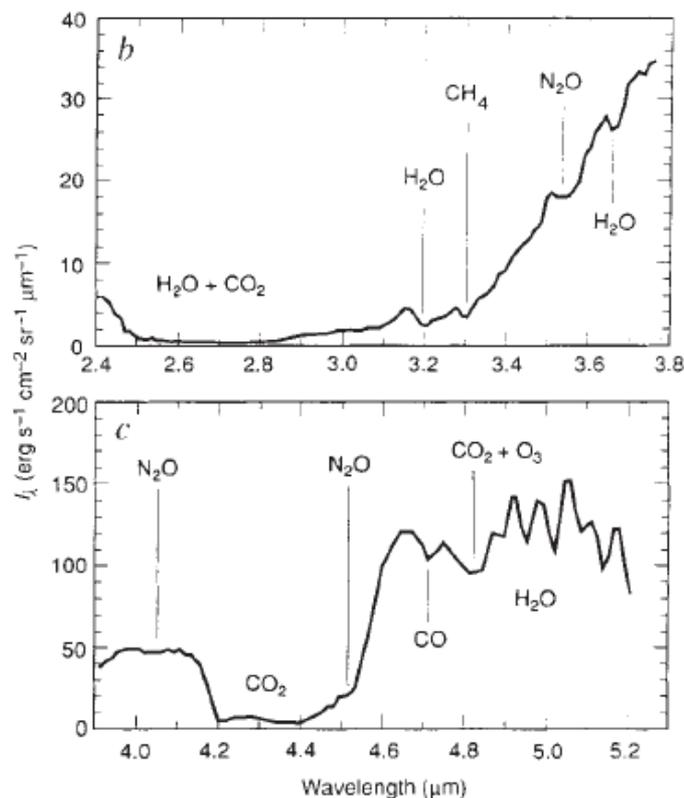
Sagan et al. (1993): 大気分光

ガリレオ探査機の観測した地球の可視光-近赤外スペクトル



酸素分子の吸収@Aバンド(0.76μm)

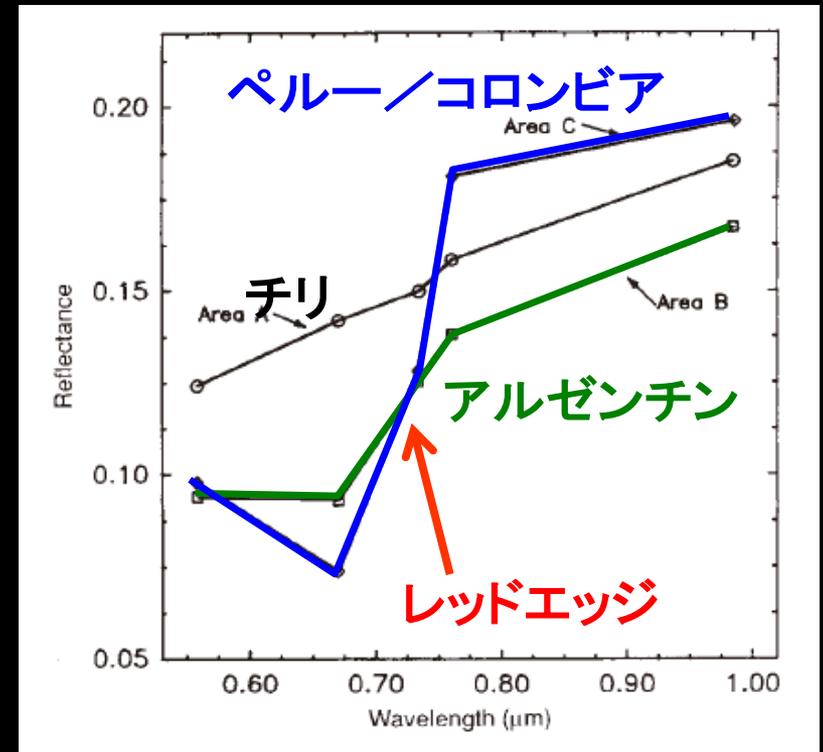
FIG. 1 a, Galileo long-wavelength-visible and near-infrared spectra of the Earth over a relatively cloud-free region of the Pacific Ocean, north of Borneo. The incidence and emission angles are 77° and 57° respectively. The $(b^1\Sigma_g^+ \rightarrow X^3\Sigma_g^-)$ O₂ at $0.76 \mu\text{m}$ is evident, along with a number of H₂O features. Using several cloud-free regions of varying airmass, we estimate an O₂ vertical column density of $1.5 \text{ km-amagat} \pm 25\%$. b and c, Infrared spectra of the Earth in the $2.4\text{--}5.2 \mu\text{m}$ region. The strong ν_3 CO₂ band is seen at the $4.3 \mu\text{m}$, and water vapour bands are found, but not indicated, in the $3.0 \mu\text{m}$ region. The ν_3 band of nitrous oxide, N₂O, is apparent at the edge of the CO₂ band near $4.5 \mu\text{m}$, and N₂O combination bands are also seen near $4.0 \mu\text{m}$. The



methane (0010) vibrational transition is evident at $3.31 \mu\text{m}$. A crude estimate¹⁰ of the CH₄ and N₂O column abundances is, for both species, of the order of 1 cm-amagat ($\equiv 1 \text{ cm path at STP}$).

Sagan et al. (1993): 撮像

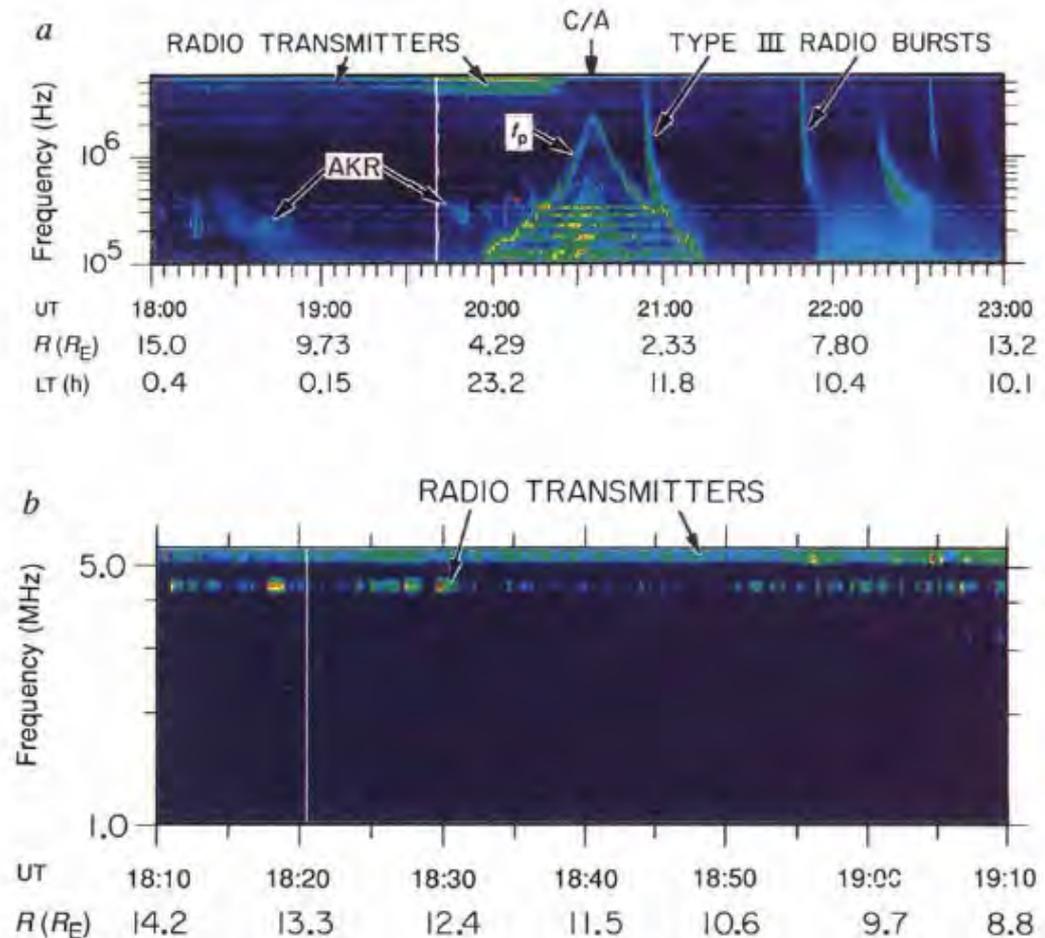
ガリレオ探査機の観測した地球のレッドエッジ



Sagan et al. (1993): 電波観測

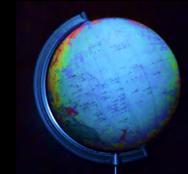
ガリレオ探査機の観測した地球の電波信号の時系列

FIG. 4 A frequency–time spectrogram of the radio signals detected by the Galileo plasma wave instrument. The intensities are coded in the sequence blue–green–yellow–red, with blue lowest and red highest. Several natural sources of radio emission are shown in *a*, including auroral kilometric radiation (AKR). Modulated emission at $f > 4$ MHz is shown with an expanded time scale in *b*. Modulated patterns of this type are characteristic of the transmission of information, and would be highly unusual for a naturally occurring radio source. (UT, universal time; R is distance of Galileo from Earth in units of Earth's radius, R_E ; LT, local time.)

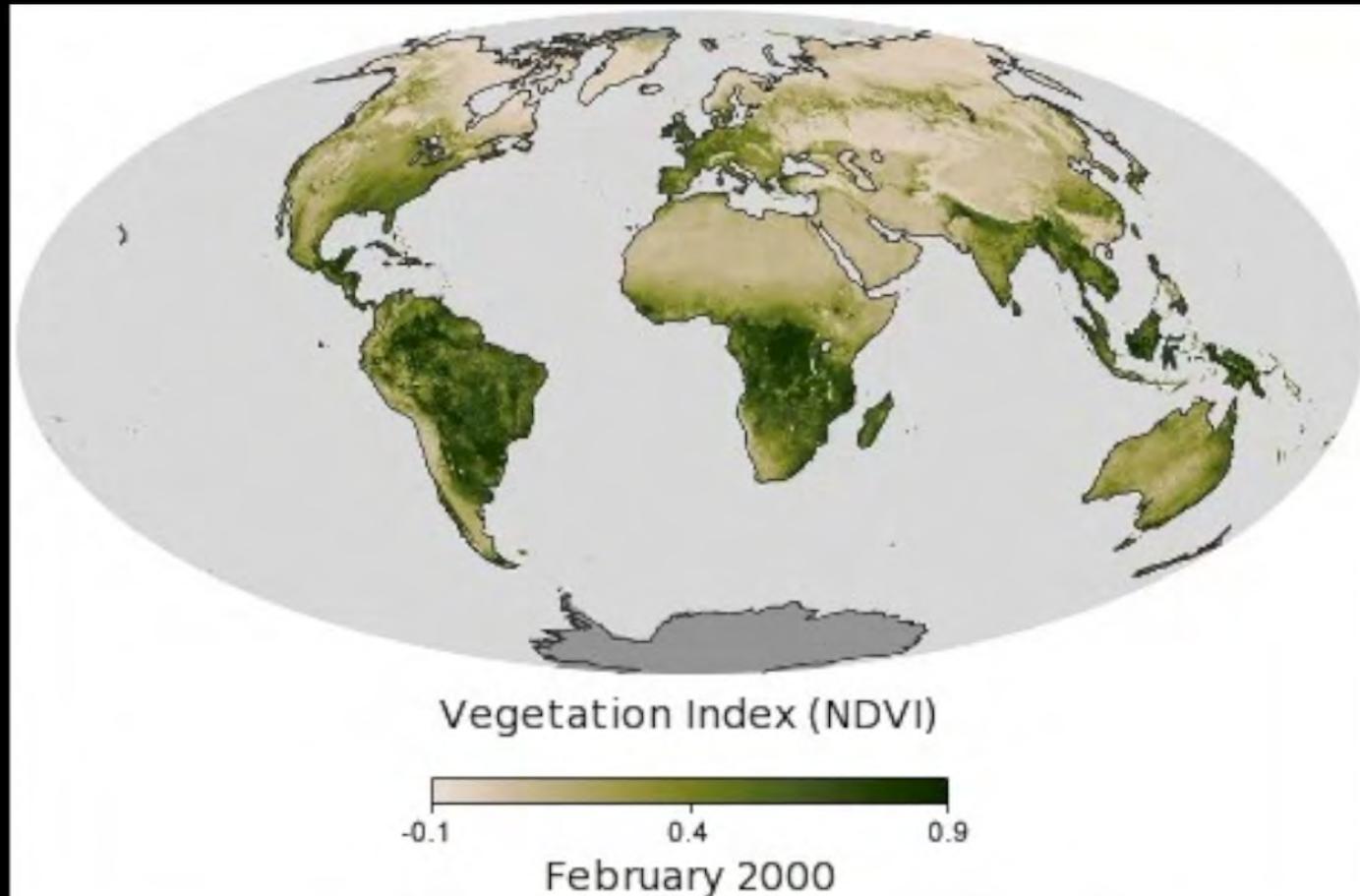


ペイルブルードットを超えて

- 系外惑星は「点＝ドット」としか見えない
- 表面を直接分解できない
- 自転周期による微妙な色の変化は観測可能



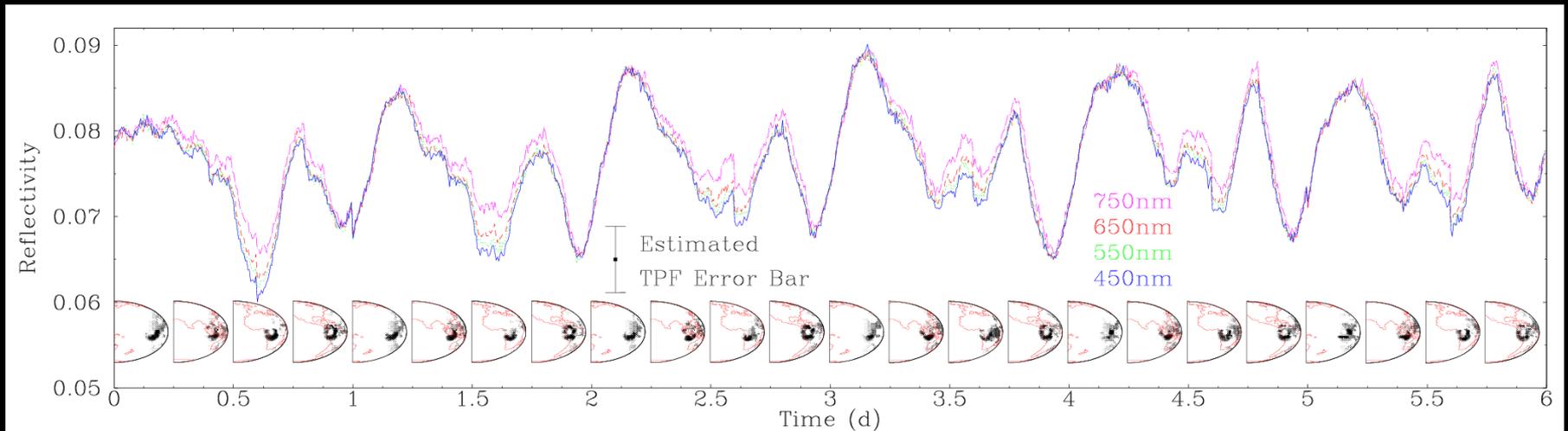
地球観測衛星Terraによる 植生分布地図の年次変化



<http://earthobservatory.nasa.gov/GlobalMaps/>

地球が30光年先にあるとして何がどこまでわかるか？

系外惑星リモートセンシング



Ford, Seager & Turner : Nature 412 (2001) 885

- **10%レベルの日変化は検出可能**
 - 大陸、海洋、森林などの反射特性の違いを用いる
- **雲の存在が鍵**
 - 太陽系外地球型惑星の天気予報の精度が本質的！

Colors of a Second Earth: estimating the fractional areas of ocean, land and vegetation of Earth-like exoplanets

ApJ. 715(2010)866, arXiv:0911.5621

Colors of a Second Earth. II: Effects of Clouds on Photometric Characterization of Earth-like Exoplanets

ApJ. 738(2011)184, arXiv:1102.3625

- **Yuka Fujii**, H.Kawahara, A.Taruya, Y.Suto (Dept. of Phys., Univ. of Tokyo), S.Fukuda, T.Nakajima (Univ. of Tokyo, Center of climate system research), Edwin Turner (Princeton Univ.)

<http://www.space.com/scienceastronomy/color-changing-planets-alien-life-100513.html>

地球は青かった？

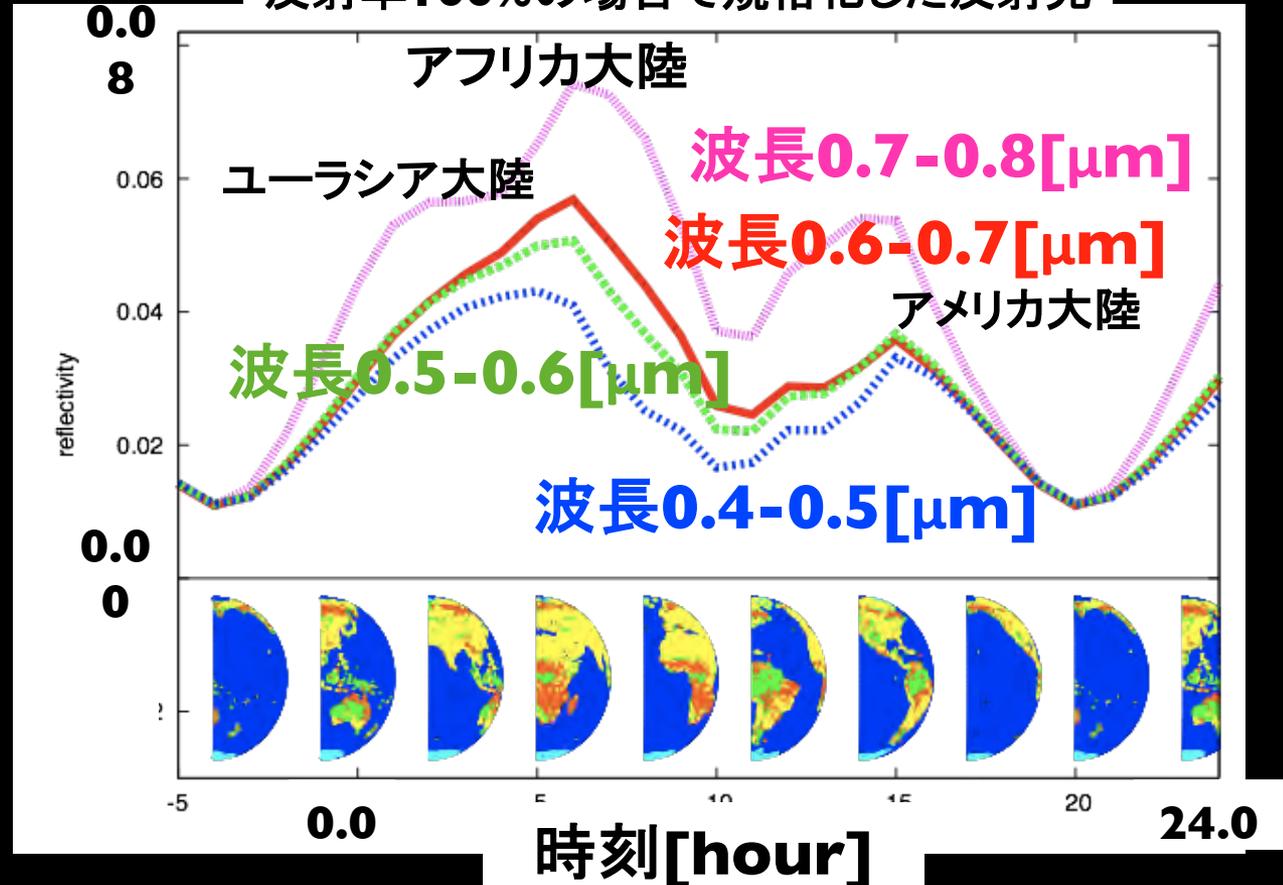
*Beyond A pale
blue dot*



自転に伴う反
射光の色の
時間変動のシ
ミュレーション

- 春分(3月)
- 自転軸に垂直な方向から観測
- 地球観測衛星のデータを用いて計算

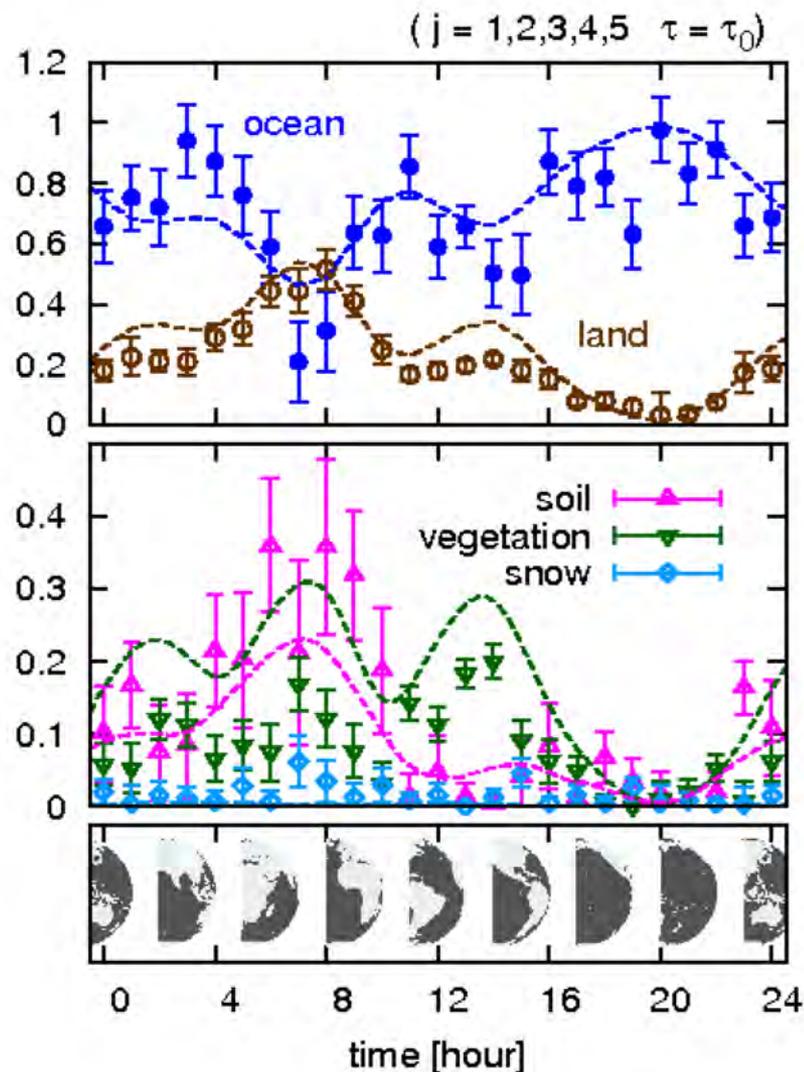
反射率100%の場合で規格化した反射光



Fujii et al. (2010)

もう一つの地球の色を解読する

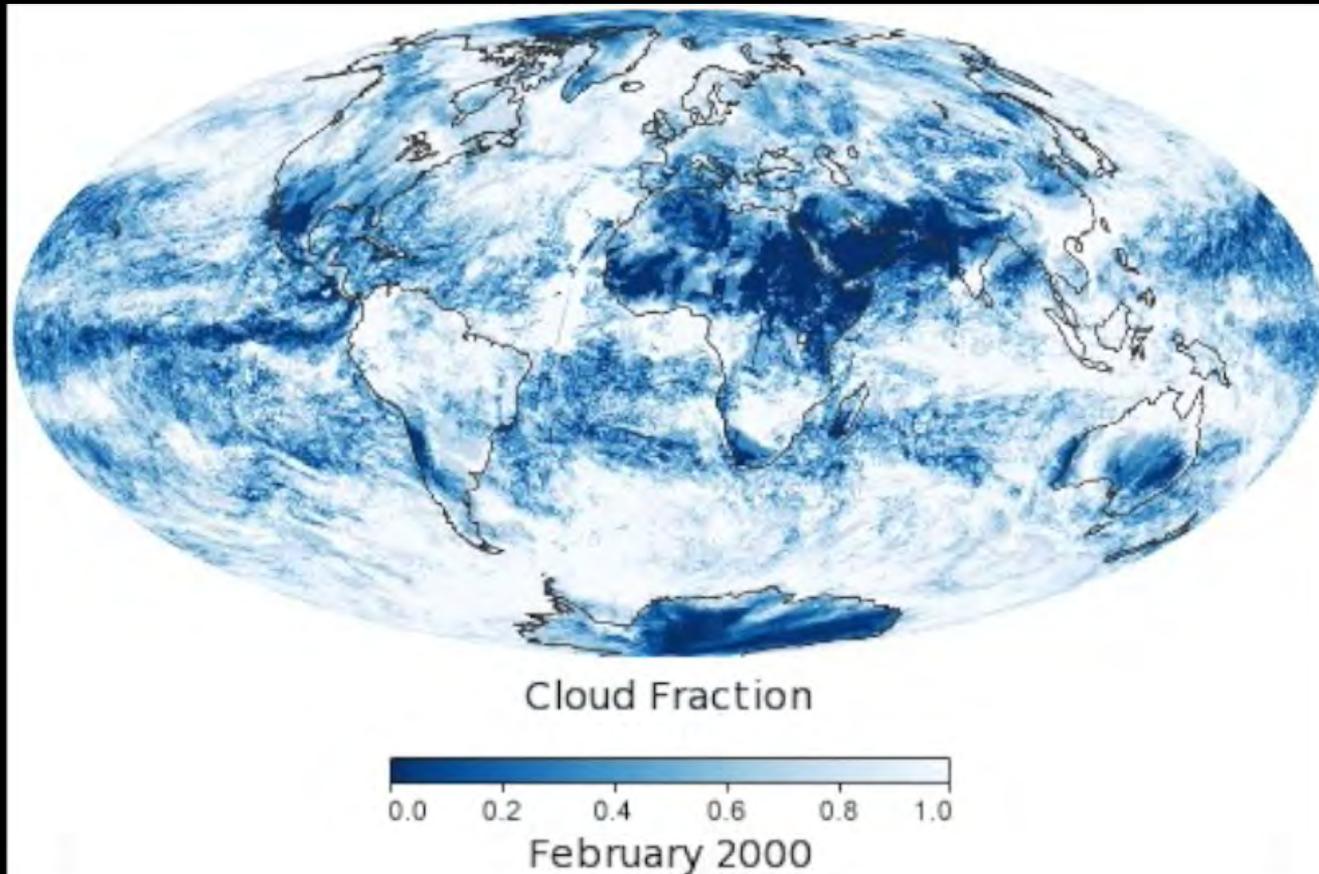
(重みつき)表面積比



- 雲は無視
- 中心星の光が完全にブロックできた場合
- 10pc先の地球を口径4mの宇宙望遠鏡で1週間観測
- 海、土、植物、雪の4つの成分の面積比を推定
- 雲がなければ、海や植物の存在が検出可能！
 - 雲を考慮した計算では、海や雲は検出できるが、植物は難しいという結論

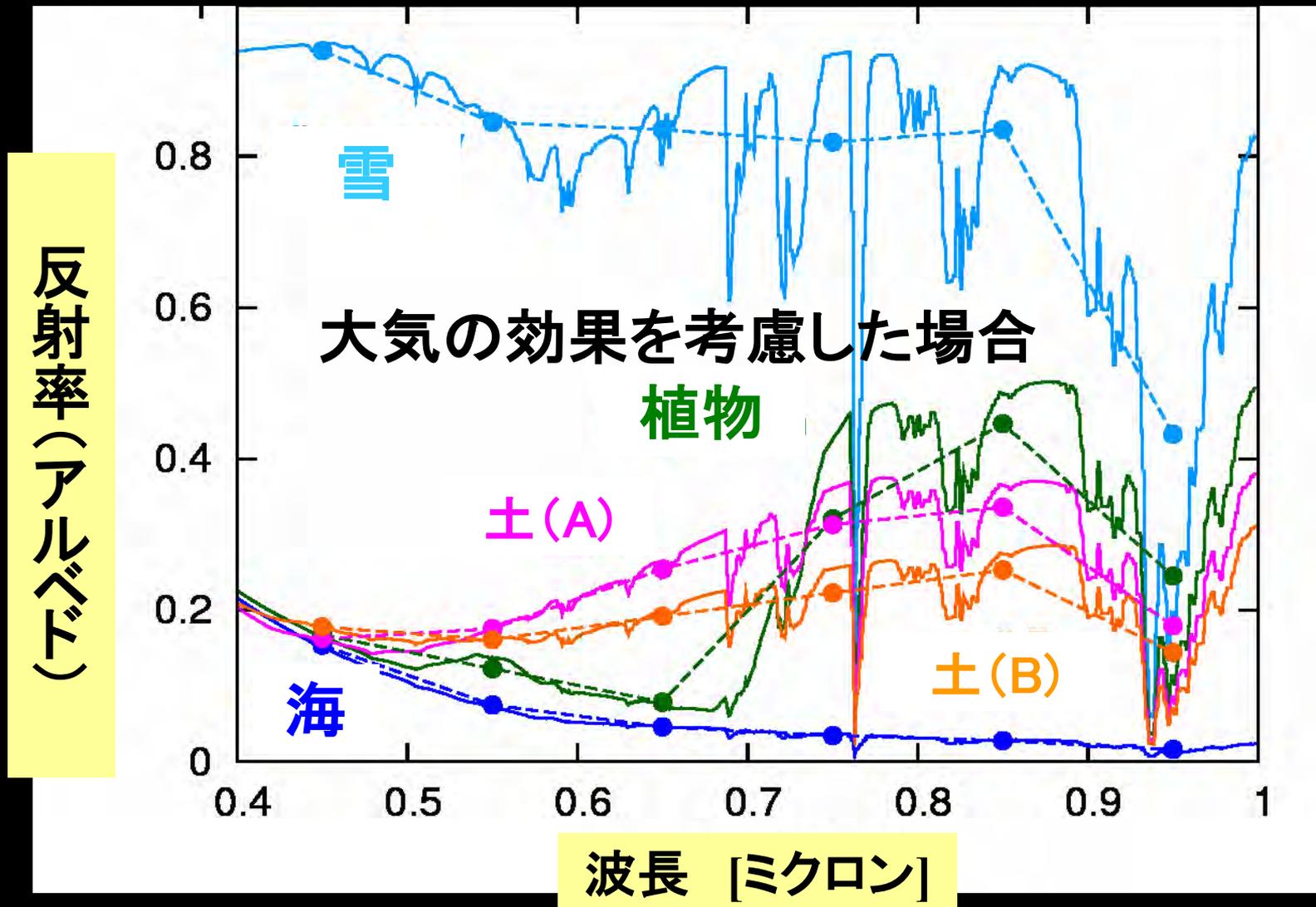
藤井友香ほか(2010)

厄介なことに雲の存在が 地表面の情報を隠してしまう



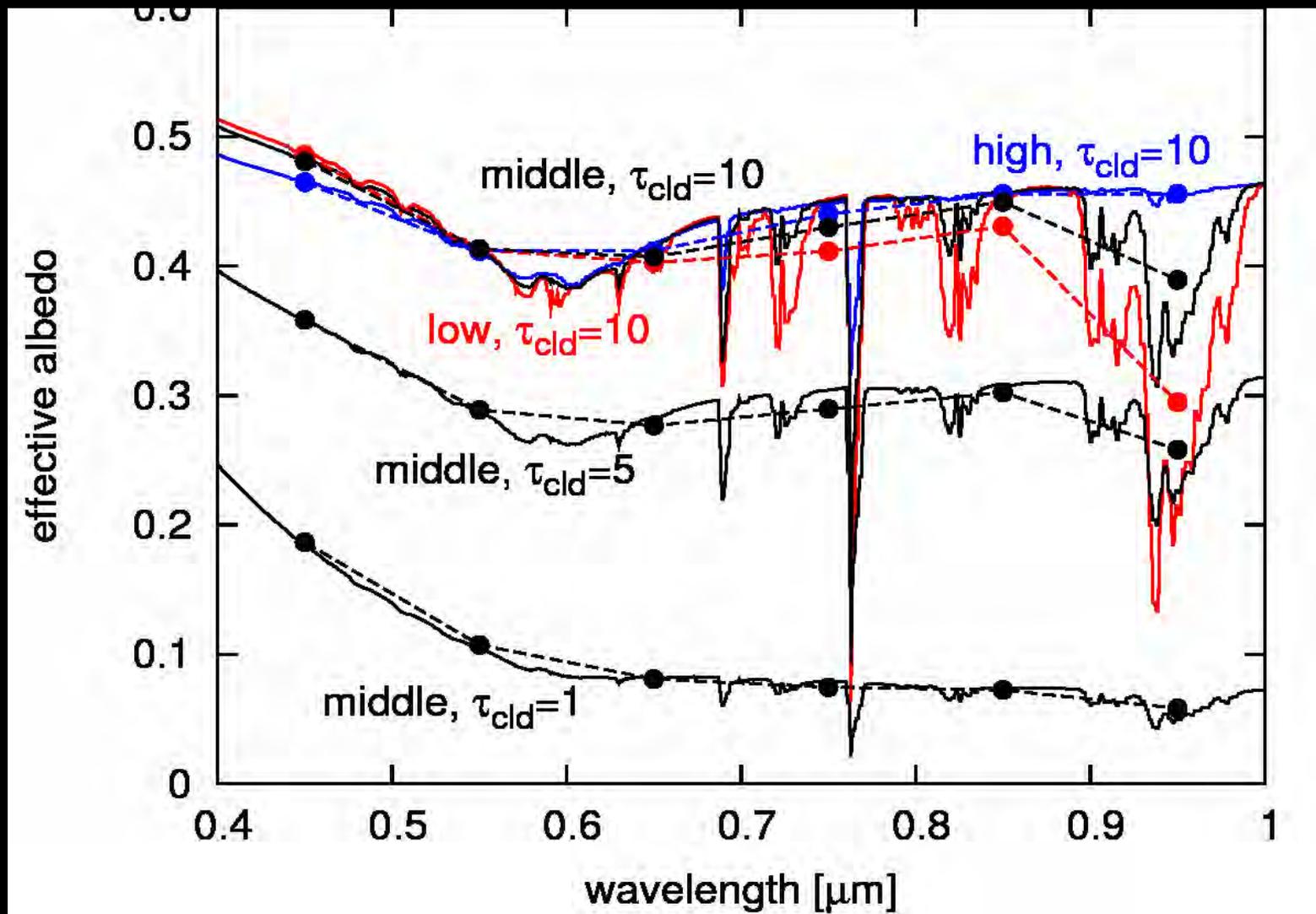
<http://earthobservatory.nasa.gov/GlobalMaps/>

等方散乱近似での反射スペクトル

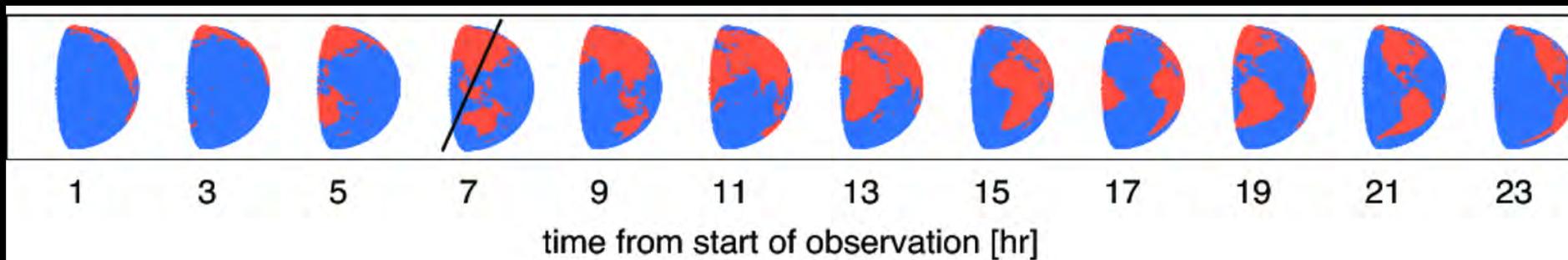
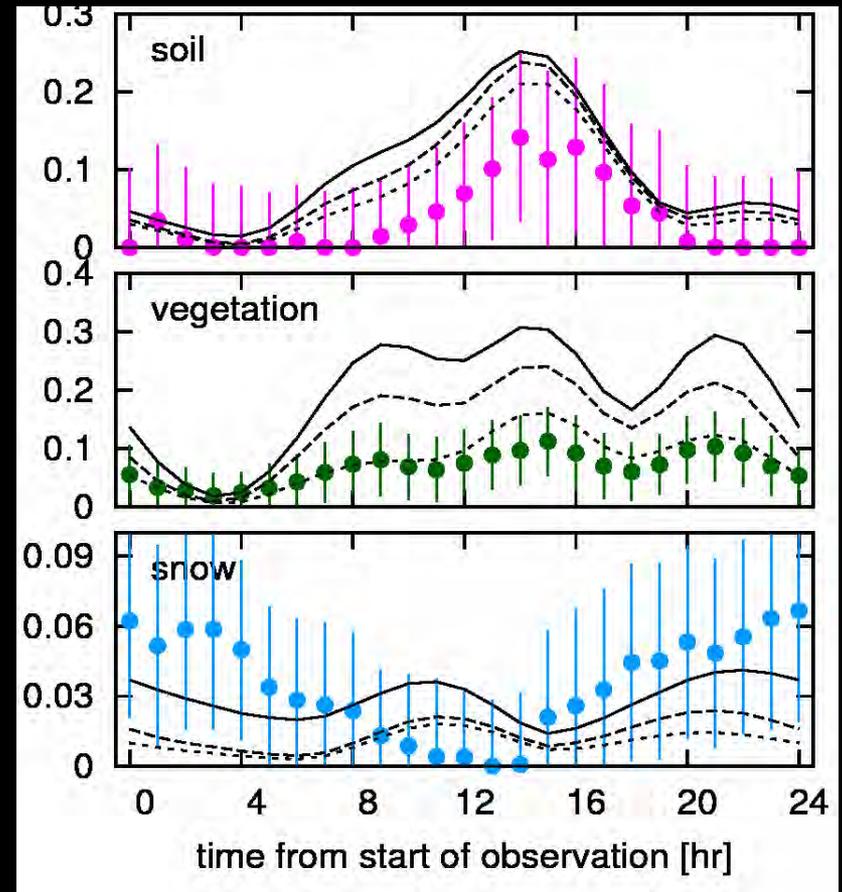
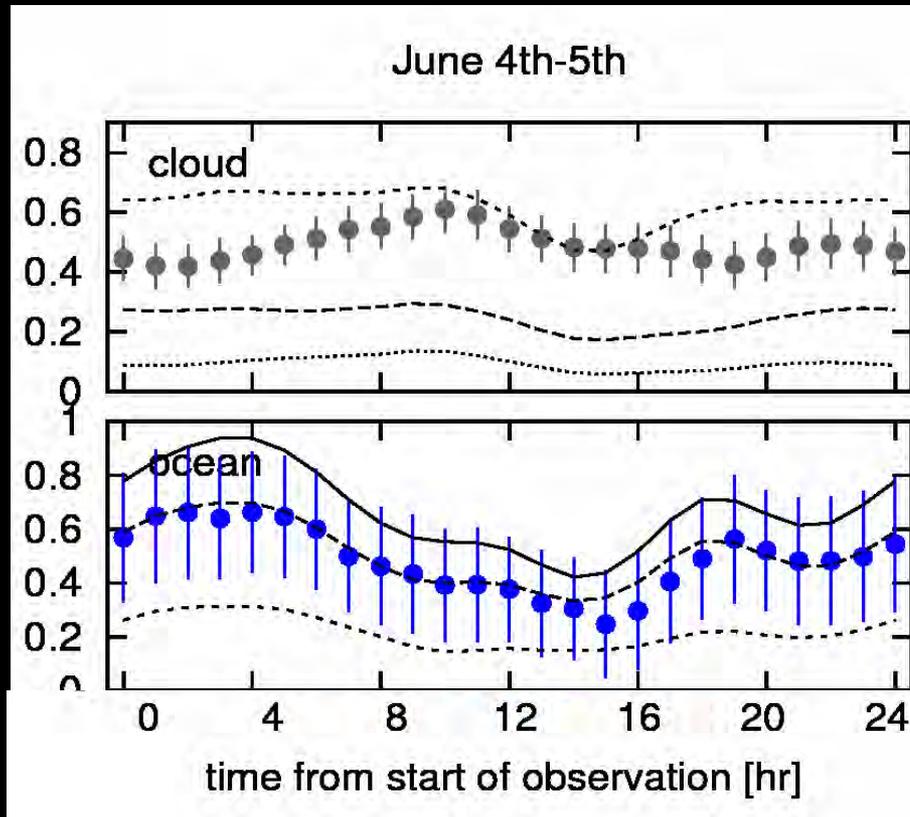


Fujii et al. (2010)

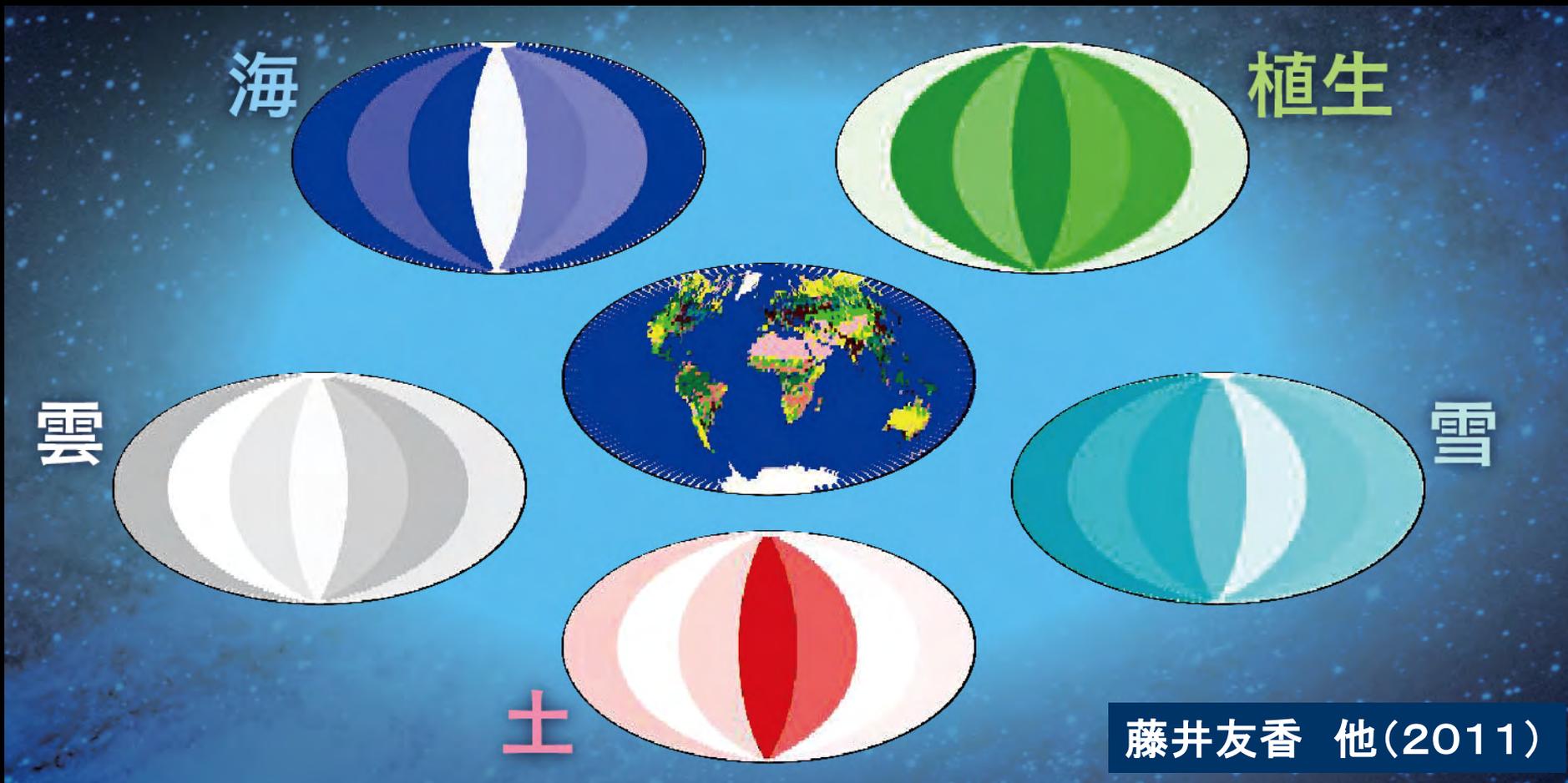
雲の反射スペクトル: モデル依存性



地球の雲の分布を考慮した場合



雲を含む地球測光観測データから推定された地表面成分の経度分布地図



藤井友香 他(2011)

展望

天文学から宇宙生物学へ

- **太陽系外惑星研究の革命的進歩**
 - 水が液体として存在し得る地球型惑星
 - プロキシマケンタウリ(4光年先)
 - 2018年に打ち上げ予定の衛星TESSがさらなる候補を
 - いずれは、ハビタブル惑星の直接撮像、分光が可能となる
- **その先には宇宙の生命探査という究極の目標が！**
 - リモートセンシングによる検出可能性から考えるバイオシグニチャーの同定(酸素、水、オゾン、メタン、植物、核爆発)
 - もちろん、最も確実なのは高度文明からの(電磁波)信号
- **リモートセンシングのシミュレーションが本質的**

系外惑星上の植物の色を予想する

古いM型星



若いM型星



G型星

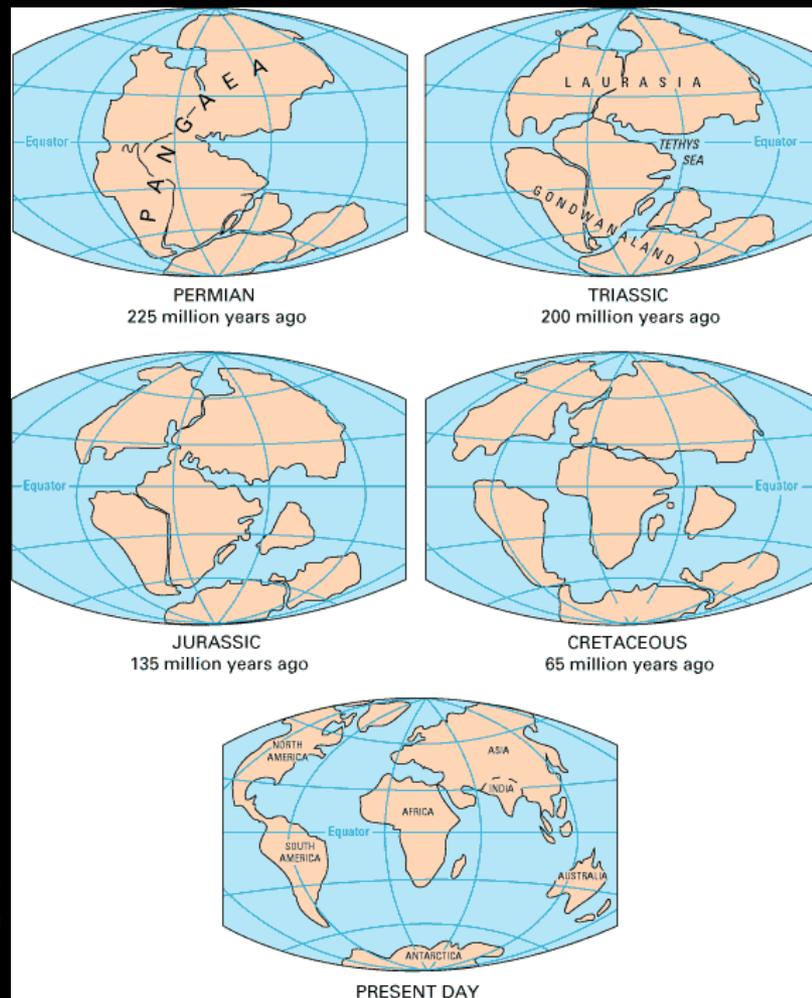


F型星



日経サイエンス2008年7月号
Nancy Y. Kiang

紅色細菌は植物の陸上進出以前の地球(38~25億年前)におけるバイオシグニチャーになるか？



Sanroma et al. arXiv:1311.1145

第二の地球のシミュレーションへ

- 地球の観測データを用いた研究はすでに多くなされてきた (Fujii et al. 2010, 2011; Kawahara & Fujii 2010, 2011; Fujii & Kawahara 2012)
 - 「地球」をより一般化したシミュレーションによる観測可能性を系統的に研究すべき
- 大気大循環モデルシミュレーション(現在進行中)
 - 大気・表層環境(海洋、大陸、植生分布)
 - 中心星(温度、距離)、惑星軌道(自転、傾斜角、離心率)
 - 雲の分布を含めた惑星の観測シミュレーション
 - 気象、地球物理、生物、物理、天文の学際的研究
 - 生物学研究者の方々の協力が不可欠な時期となっている