

TOWARD REMOTE SENSING OF EARTH-LIKE EXOPLANETS

Yuka Fujii (UTAP)

Hajime Kawahara (Tokyo Metropolitan Univ.)

Yasushi Suto (UTAP, RESCEU)

Atsushi Taruya (UTAP, RESCEU)

Edwin L. Turner (Princeton)

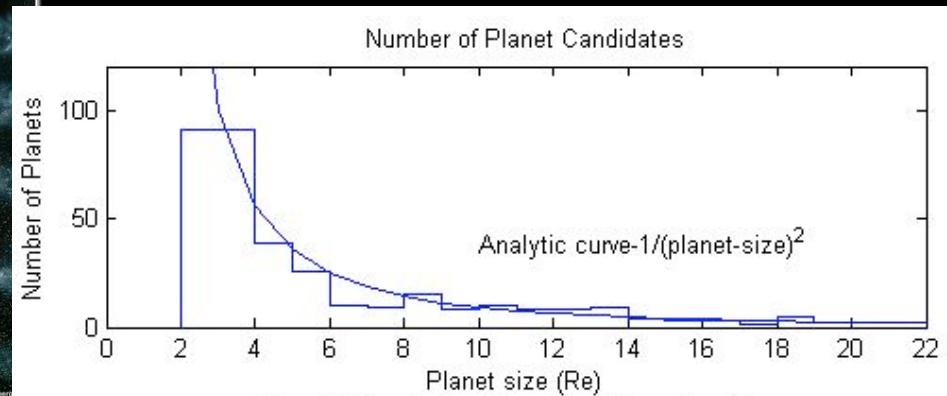
Satoru Fukuda (東大気候センター)

Teruyuki Nakajima (東大気候センター)



系外惑星探査の今とこれから

- これまで500個近い系外惑星が確認されてきた
- ↓去年打ち上がったKepler衛星の結果



Borucki et al. arXiv:1006.2799

Preliminaryな結果 でも小さい惑星が結構ありそう？

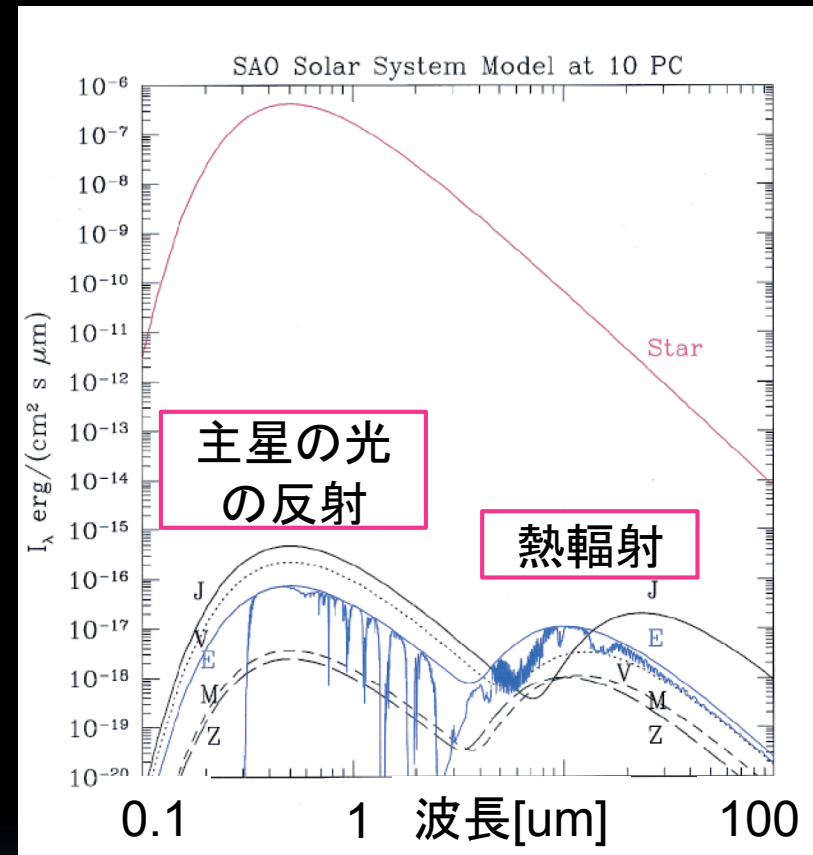
- 水の惑星はあるのか？ 生命は？

第2の地球を探す

惑星からの光

Des Marais et al. 2002

- 吸収線
 - ~中間赤外: 熱輻射
 - →温度、半径etc
 - 可視~近赤外: 反射
 - →表面の組成etc
- 惑星の光が惑星環境の詳細を知る鍵



- 直接撮像自体は巨大ガス惑星で実現されるようになってきた



Thalmann et al. 2009 ApJL, 707.123

地球型系外惑星の直接撮像へ向けて

- TPF-C (USA)

(Levine et al. 2009)

コロナグラフ

0.5-1.1 μ m?

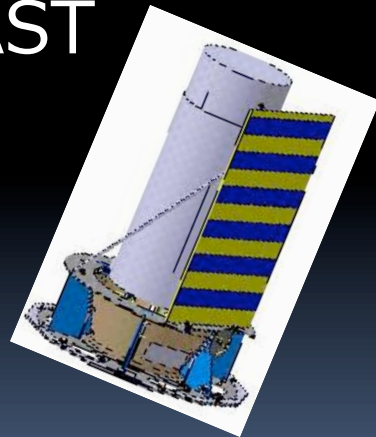
分光

IWA~65.5mas

2022年頃?

- SEE-COAST
(Europe)

D~1.5 m



- New Worlds (JWST+occulter?) (USA)

- O3 (USA)

オカルター

UVからnear-IR

多バンド測光

IWA~75-90mas

D~1.1-2 m

2020年頃??

Kasdin et al.

@AASmeeting2010



宇宙から見た地球

地球型惑星のテンプレートとしての“地球”

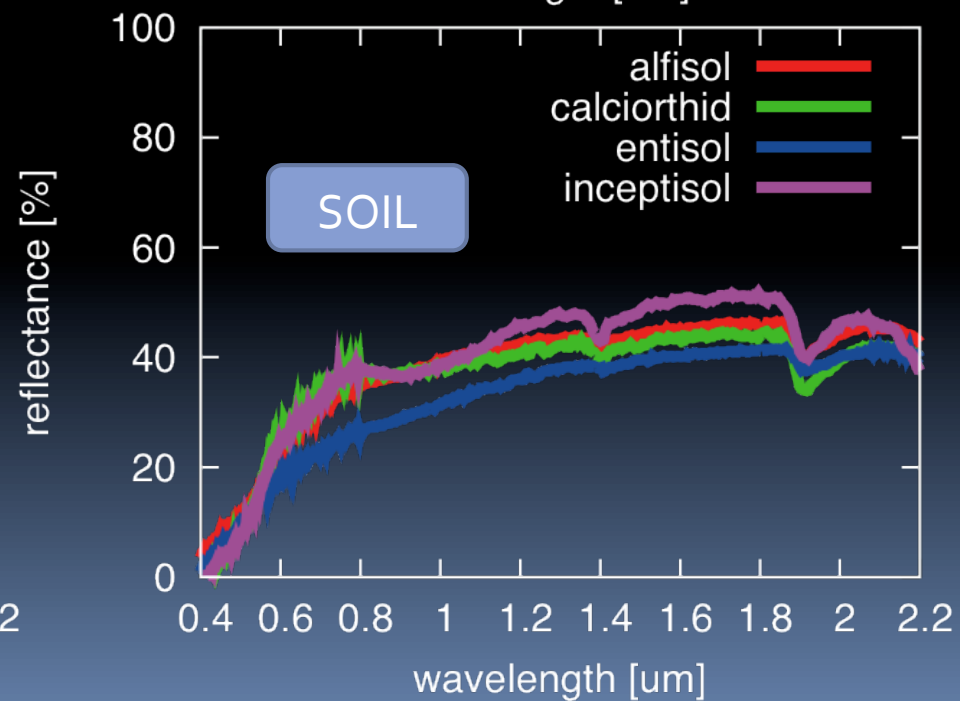
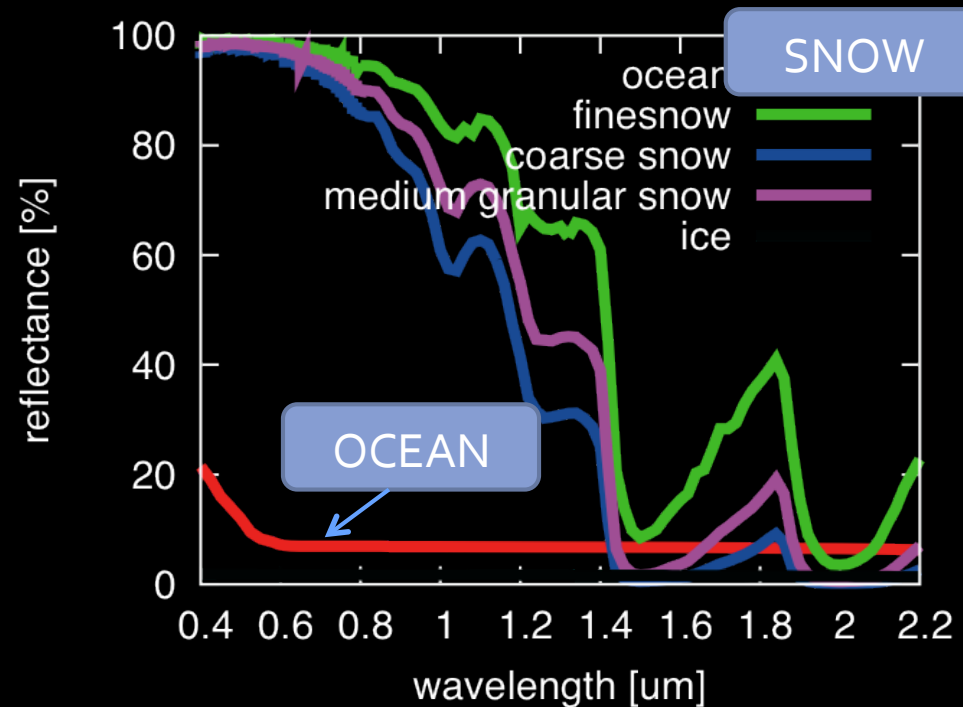
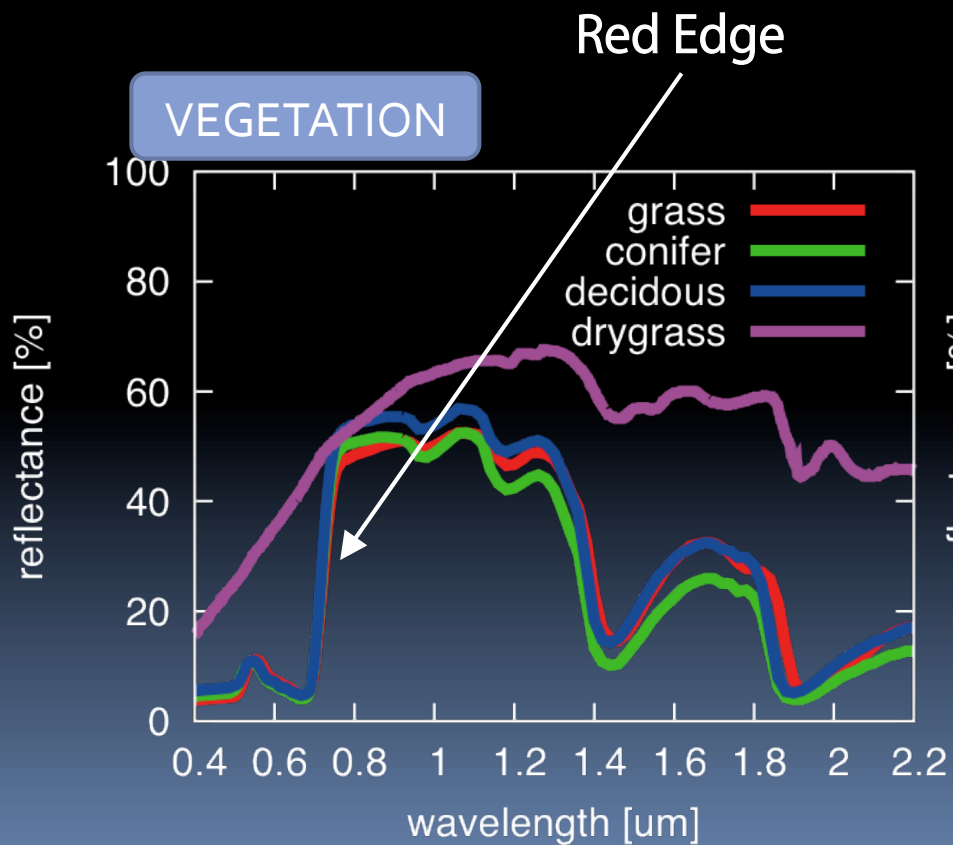


- たとえ地球と同一のものがあっても、このような空間分解した画像が得られる訳でもなく、またノイズも多いため、反射光から正しく惑星の情報を引き出せるかは自明でない

将来の直接撮像計画で系外惑星を最大限理解するための方法論が必要

いろいろな 反射スペクトル

ref.) ASTER spectral library
(<http://speclib.jpl.nasa.gov/>)



レッドエッジ

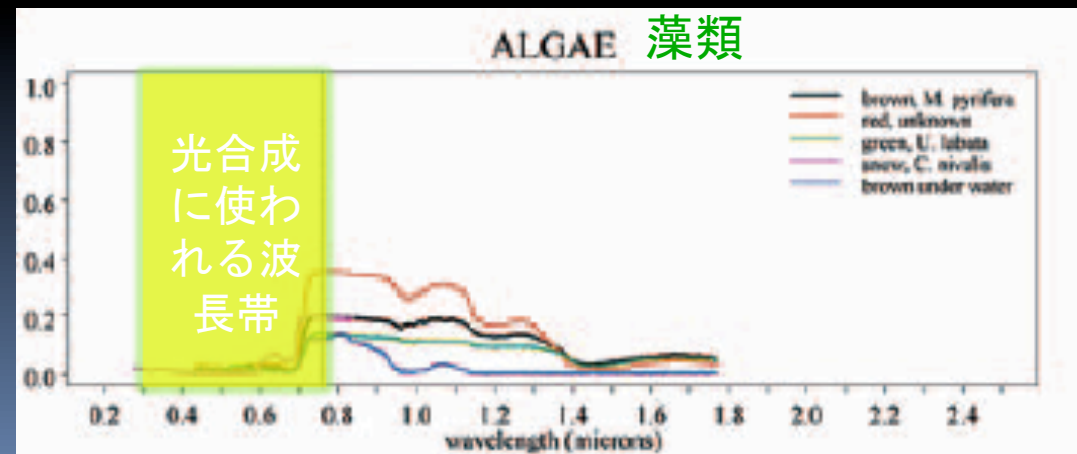
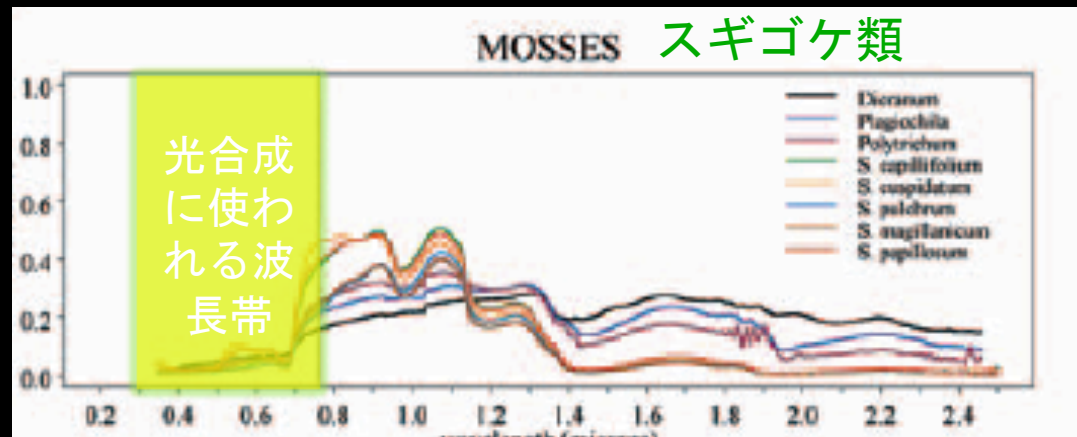
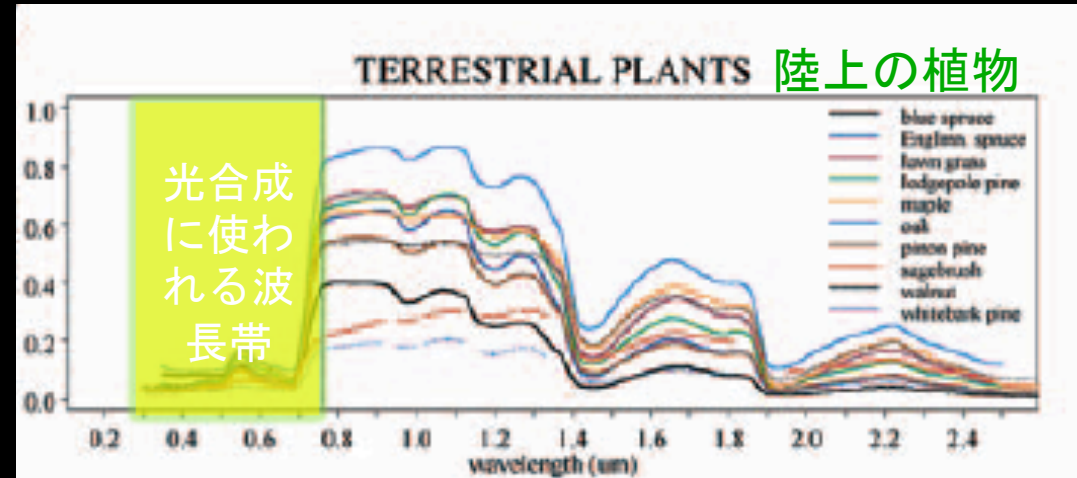
(Kiang et al. 2007)

(e.g., Seager et al. 2005)

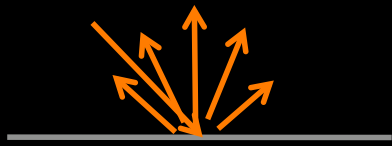
- 植物の葉はよく反射する構造

- 細胞とその周りの空隙との屈折率の違いで散乱
- 細胞小器官によるレイリー散乱、ミー散乱

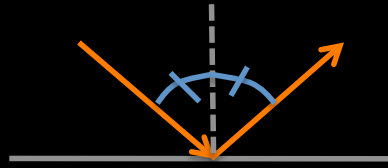
- 可視光は光合成色素によってよく吸収されるが、赤外領域では吸収しない→反射



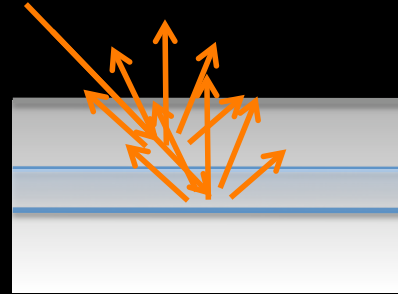
いろいろな反射特性



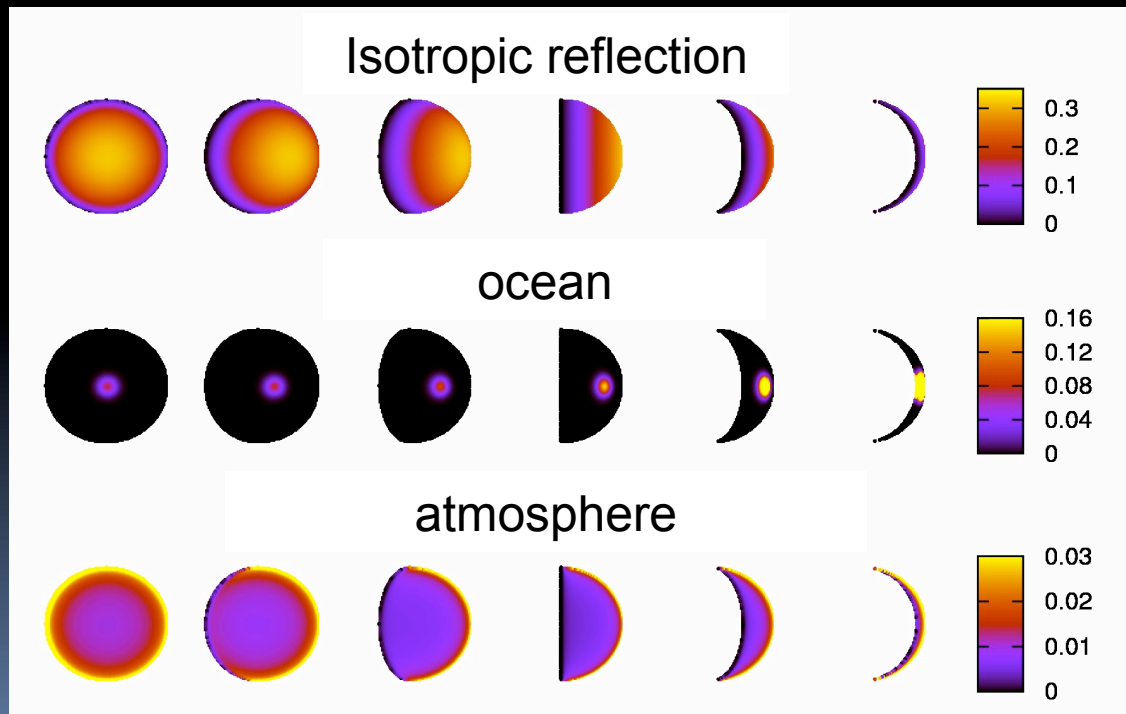
• Lambert (Isotropic)



• mirror-like



• Thick Scatterer

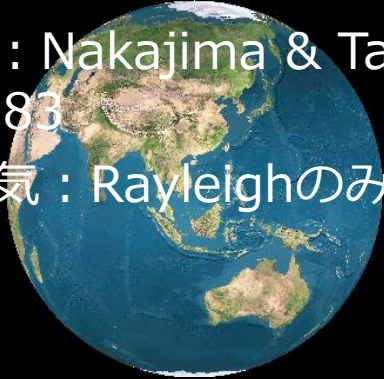


地球全体の反射光:雲がない場合

e.g., Ford et al. 2001, Fujii et al. 2010

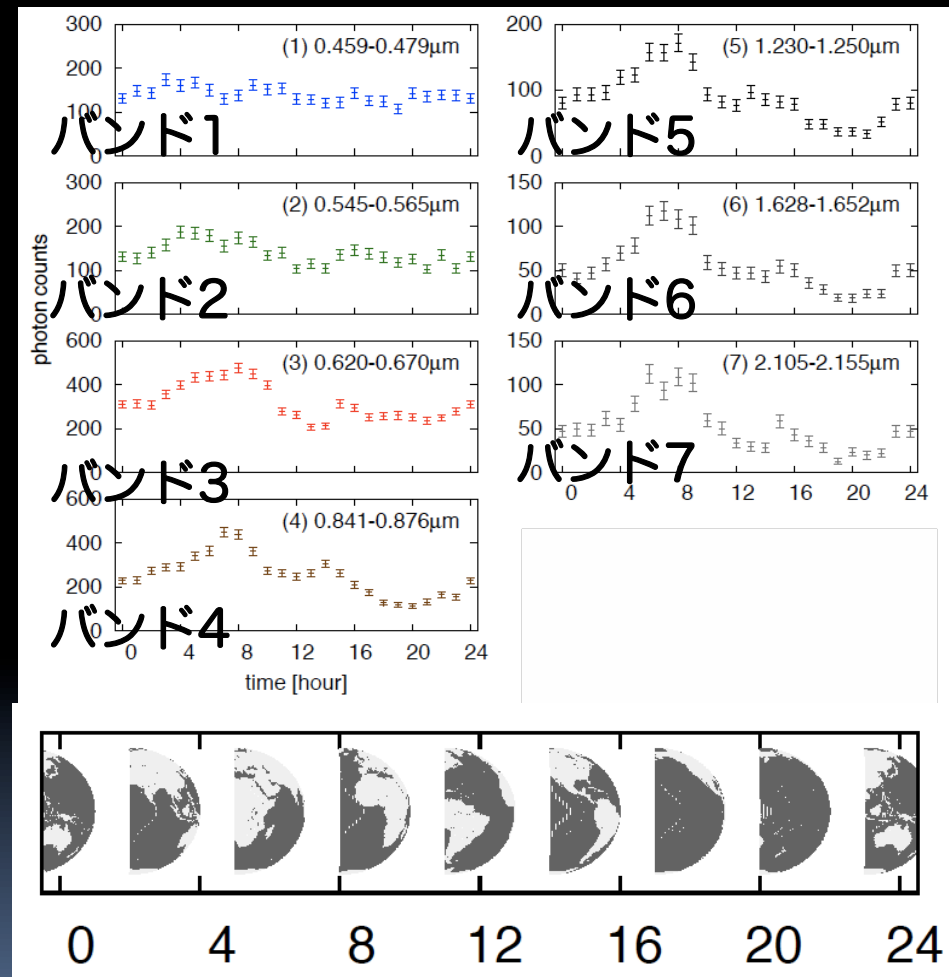
Inputした反射特性

- 陸: Rossi-Li model
- 海: Nakajima & Tanaka 1983
- 大気: Rayleighのみ

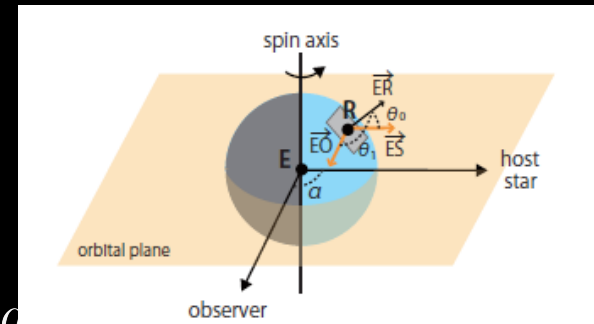


ノイズ(非常に理想的)

- エラーはフォトンノイズのみ
- 主星の光は100%遮蔽
- 2m望遠鏡
- 10pc離れた地球と太陽の系
- 14日間観測し周期で折り畳む



反射光のモデリング



$$I(\lambda, t) = R_p^2 F_*(\lambda) \iint \underline{f_{\Phi, \Theta}(\theta_0, \phi_0; \theta_1, \phi_1)} \cos \theta_0 \cos \theta_1 d\Omega$$

反射特性

単純化

- 4種類の表面を仮定 (k=1,2,3,4)
- ocean/soil/vegetation/snow
- 等方散乱を仮定

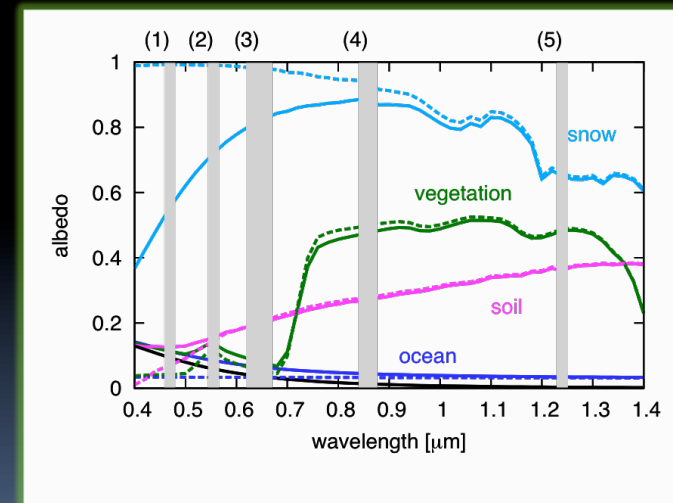
$$\underline{I_j(t_i)} = C R_p^2 F_{*j} \sum_k \underline{D_{jk}} A_k(t_i)$$

バンドjの反射光の強度 (観測値)

入射光 (given)

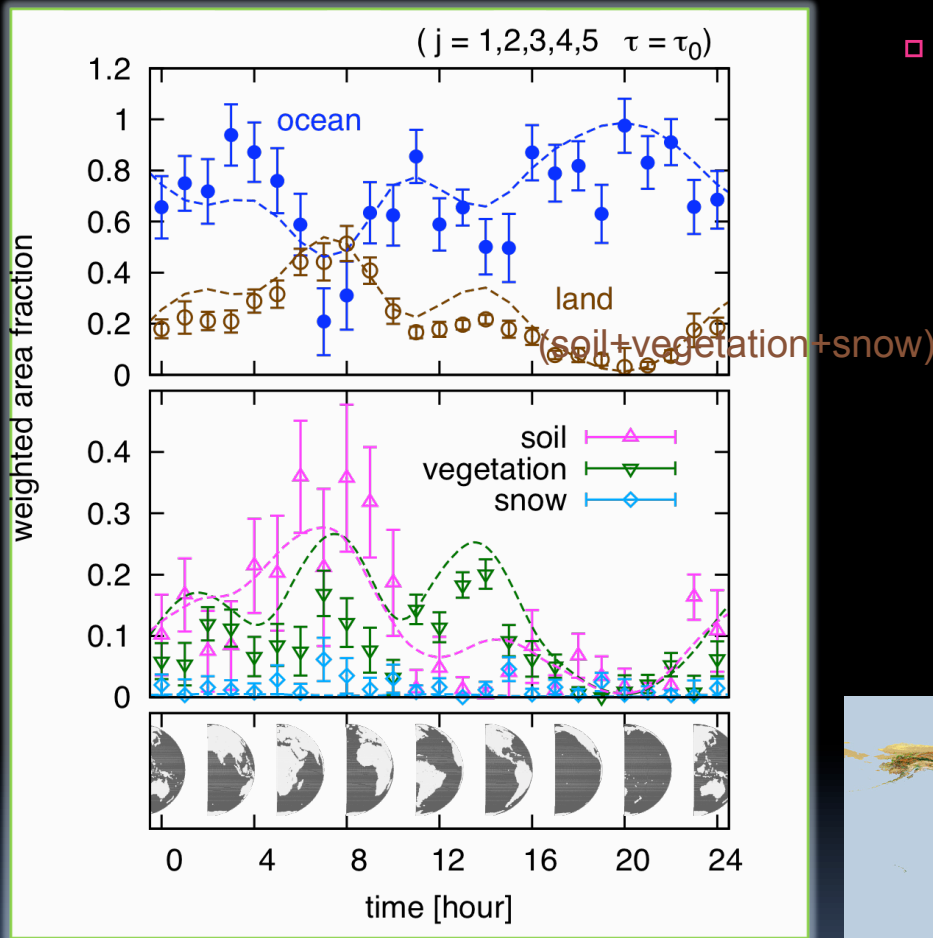
$$A_k \equiv \frac{\int_s \cos \theta_0 \cos \theta_1 ds}{\int_s \cos \theta_0 \cos \theta_1 ds}$$

k番目の種類の表面の割合 = 求めたい値 (weighted fractional area)

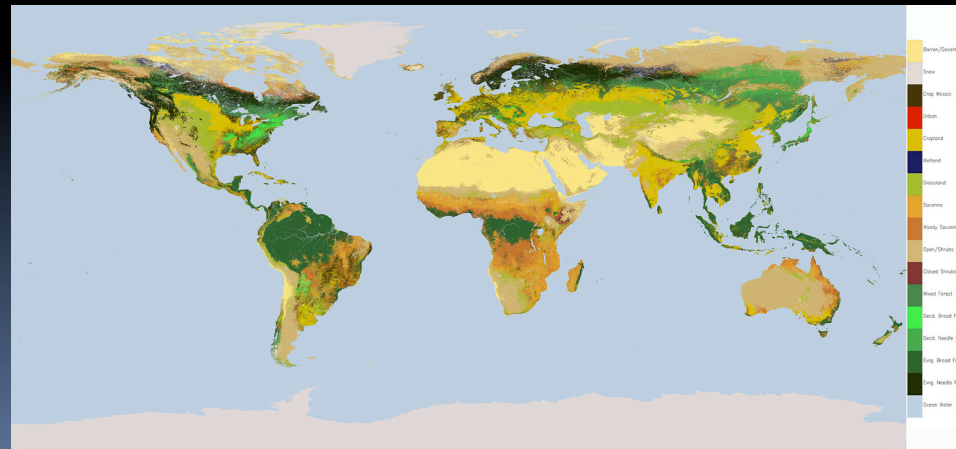


仮定した反射スペクトル

雲がない場合の解析

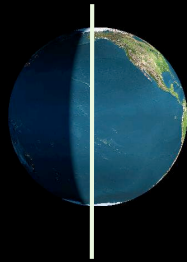


- 表面の分布がある程度再現可能
 - ・・・海単独では局所的な反射をするが、海+大気の系を合わせて考えることで面積の妥当な推定ができる

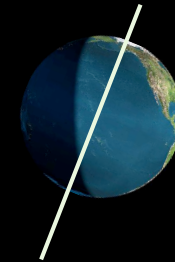
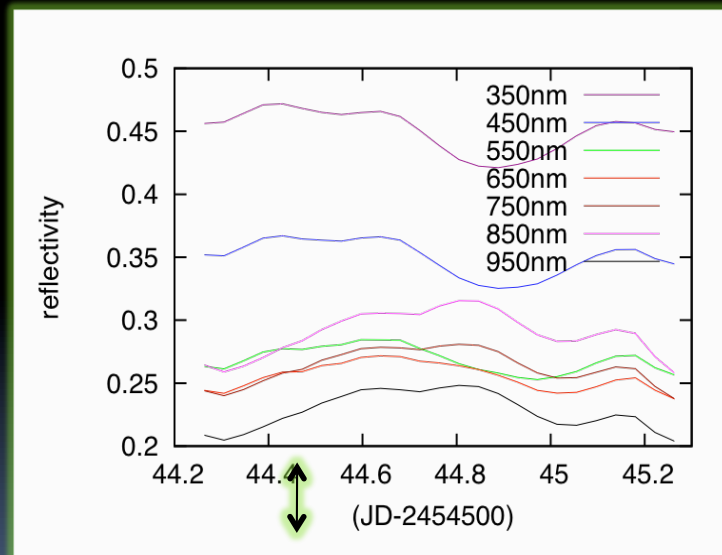


地球全体の反射光:雲がある場合(実際)

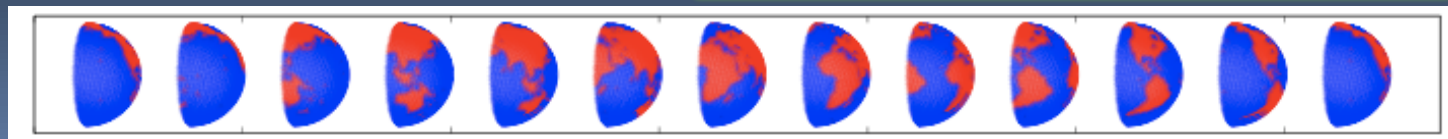
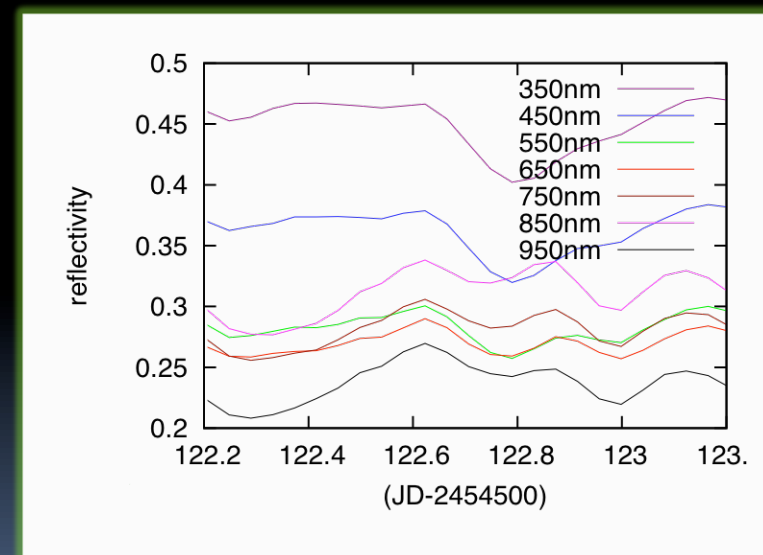
- EPOXI missionで観測された地球の反射光の日周変動



2008/3/18

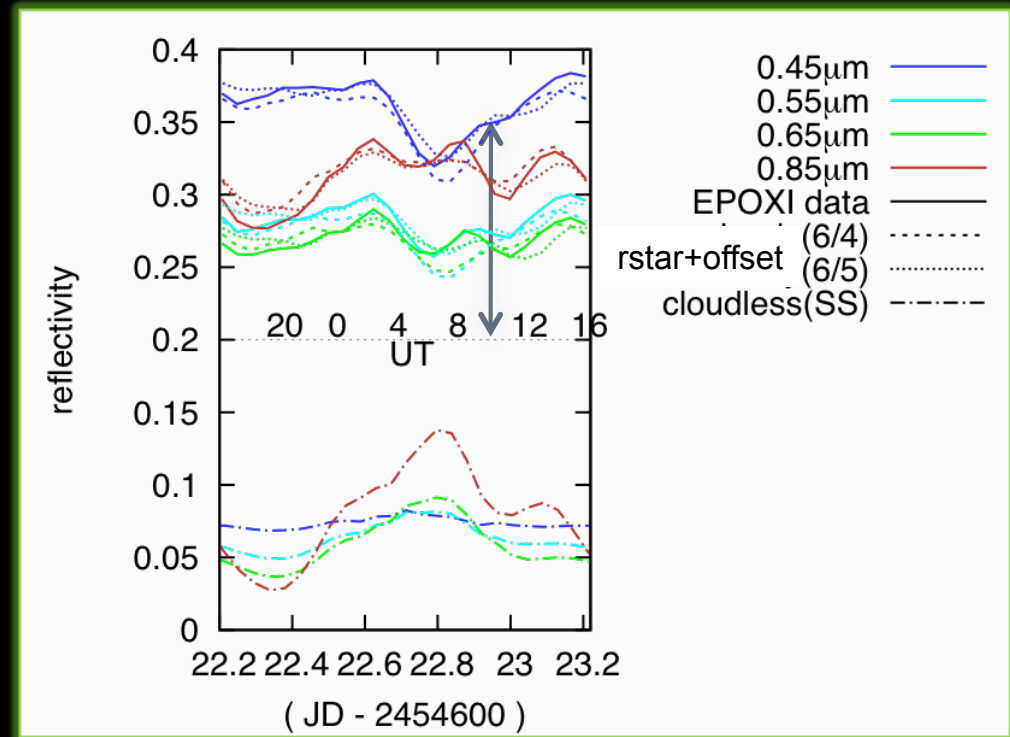


2008/6/4



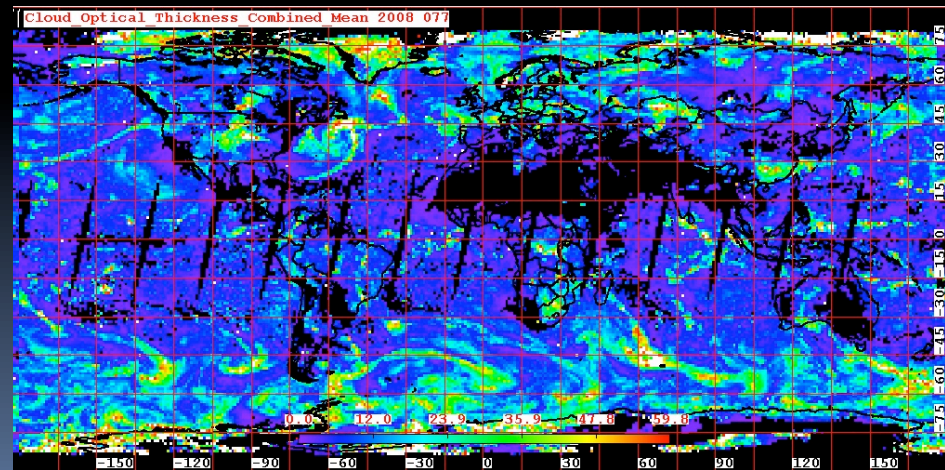
雲の影響

- シミュレーション
 - 輻射輸送のコードrstar6bを用いて各地点の反射を計算
 - 地球観測衛星のデータを利用
- 変動パターンは観測と大体一致



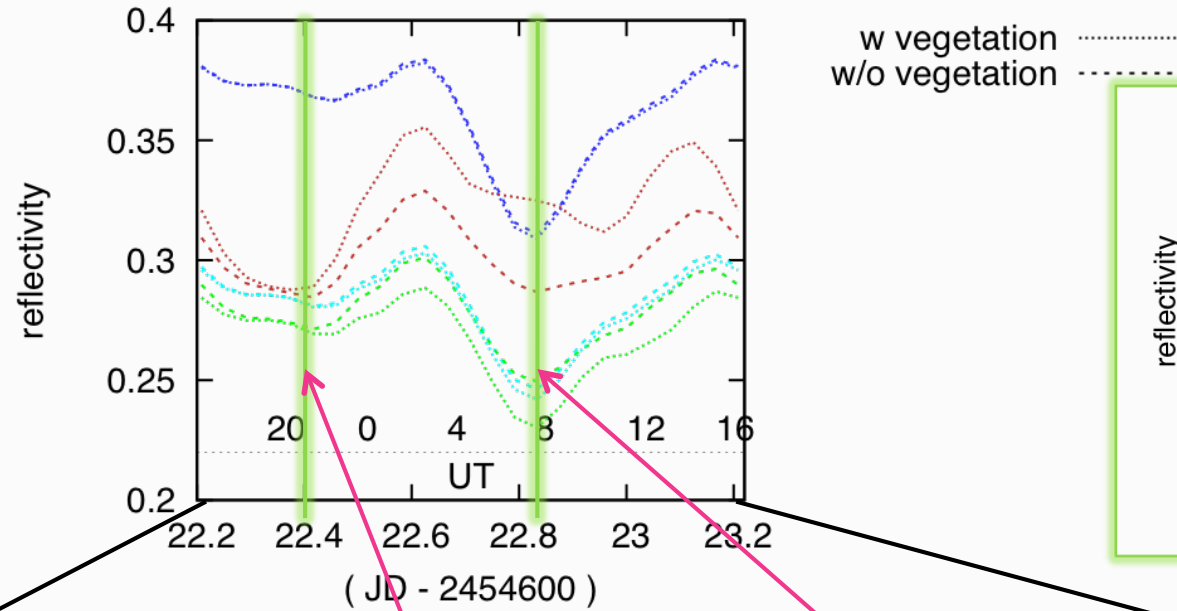
雲は

- 全体の反射率を上げる
- 自転に正確には同期しない時間変化
 - (ただし短期的にはあまり変動は激しくない)
- 表面情報を隠す

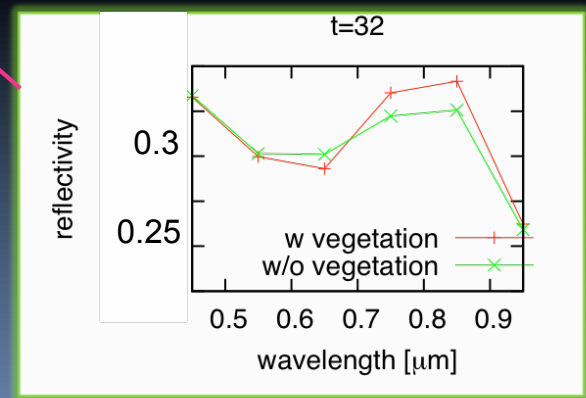
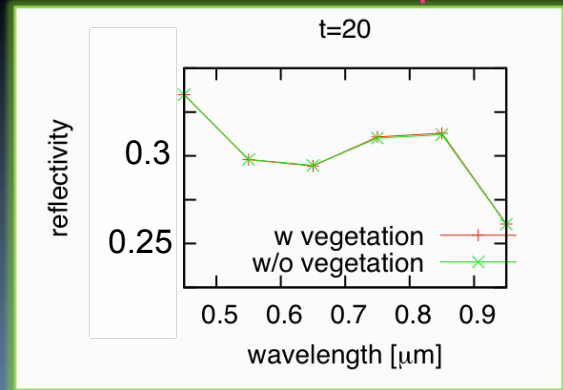
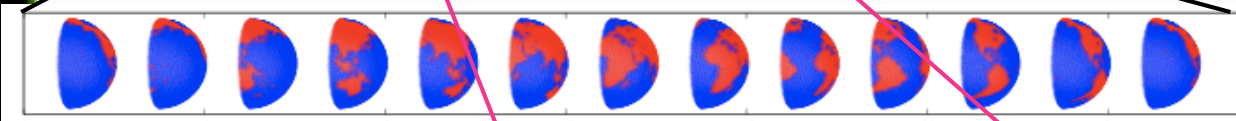
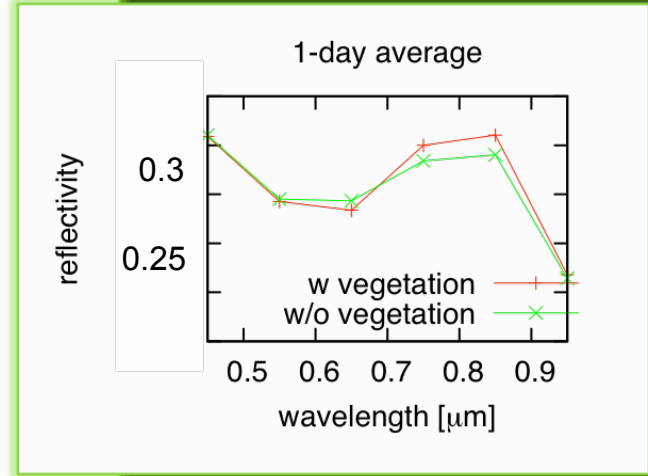


雲のOptical depth (MODIS projectより)

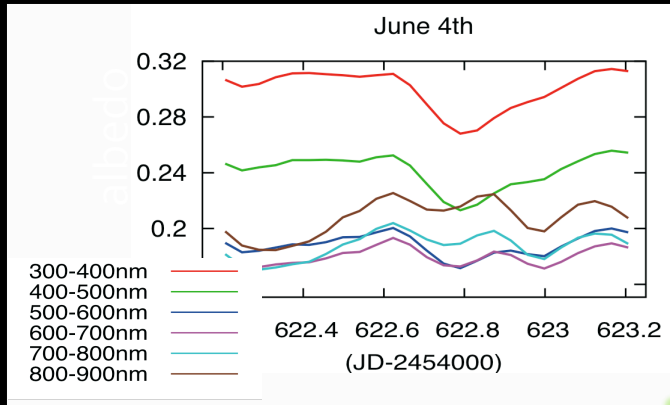
レッドエッジ



1日平均

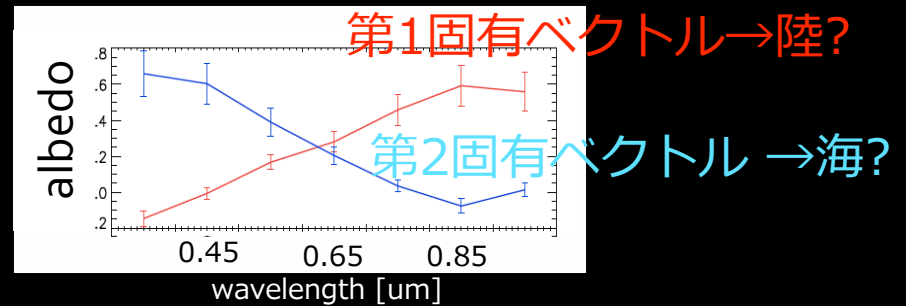


実際の地球の反射光の解析1 Cowan et al. 2009

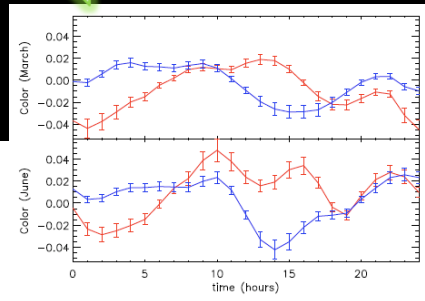
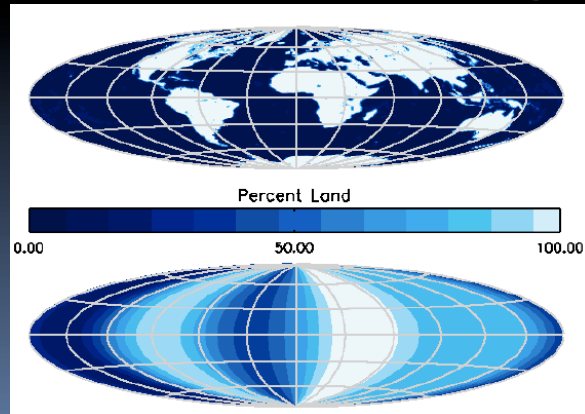


変動成分を

主成分分析



“陸”成分を使ったmapping
 (“海”ではうまくいかない)

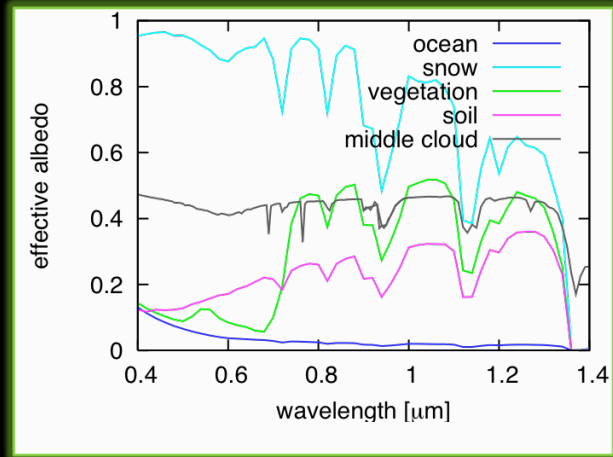


ただし、

- ・ 主成分分析では直交するスペクトルしか抽出できず、表面の種類とは必ずしもダイレクトに結びつかない
- ・ 別の成分が縮退しがち

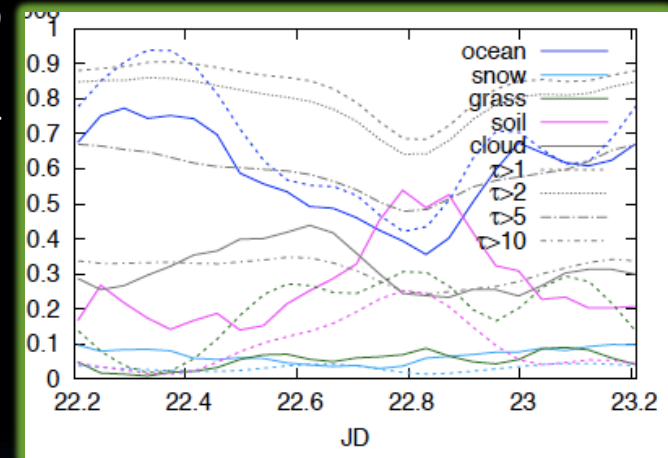
実際の地球の反射光の解析2 (ongoing i.e. preliminary)

↓各成分の反射スペクトル



先ほどと同様のモデルで、制限付き線形逆問題を解く
$$I_j(t_i) = CR_p^2 F_{*j} \sum_k D_{jk} A_k(t_i)$$

EPOXIの
観測データ
の解析



- 「雲」成分を入れることで、海/陸共に変動パターンは再現可能
- アルベドは大気の詳細(気圧、組成等)で少しずつ変わる それらを少し変えると解析結果が大きく変わる (雲を入れたことにより不安定化)
- バンドの取り方の工夫や吸収線の情報などと併用して正確に推定することが今後の課題

※現在進行形の話である関係で、プレゼンに使ったファイルを一部改変しました(一部省略・一部書き換え)

今後の課題と方向性

- 雲の寄与の分離
- 表面による反射の季節変化(雪の量など)
- 惑星科学との連携 — 赤道傾斜角の大きさや季節によって雲や海の分布が変わる
- 雲がある場合の、
惑星の自転による変動と公転による変動を組み合わせることによる2次元Map
反射光の変動パターンからの赤道傾斜角の推定

Summary

- 第2の地球の発見が現実的なものとなりつつある
- 系外惑星の反射光のスペクトルや時間変化は、系外惑星の詳細な環境を観測的に同定するための鍵
- 5~10pc程度の彼方に地球と同様の表面を持つ惑星があった場合、多いバンド測光観測から表面組成とその分布が再現できる可能性
- 雲と表面を見分ける方法論を開拓していくことが必要