

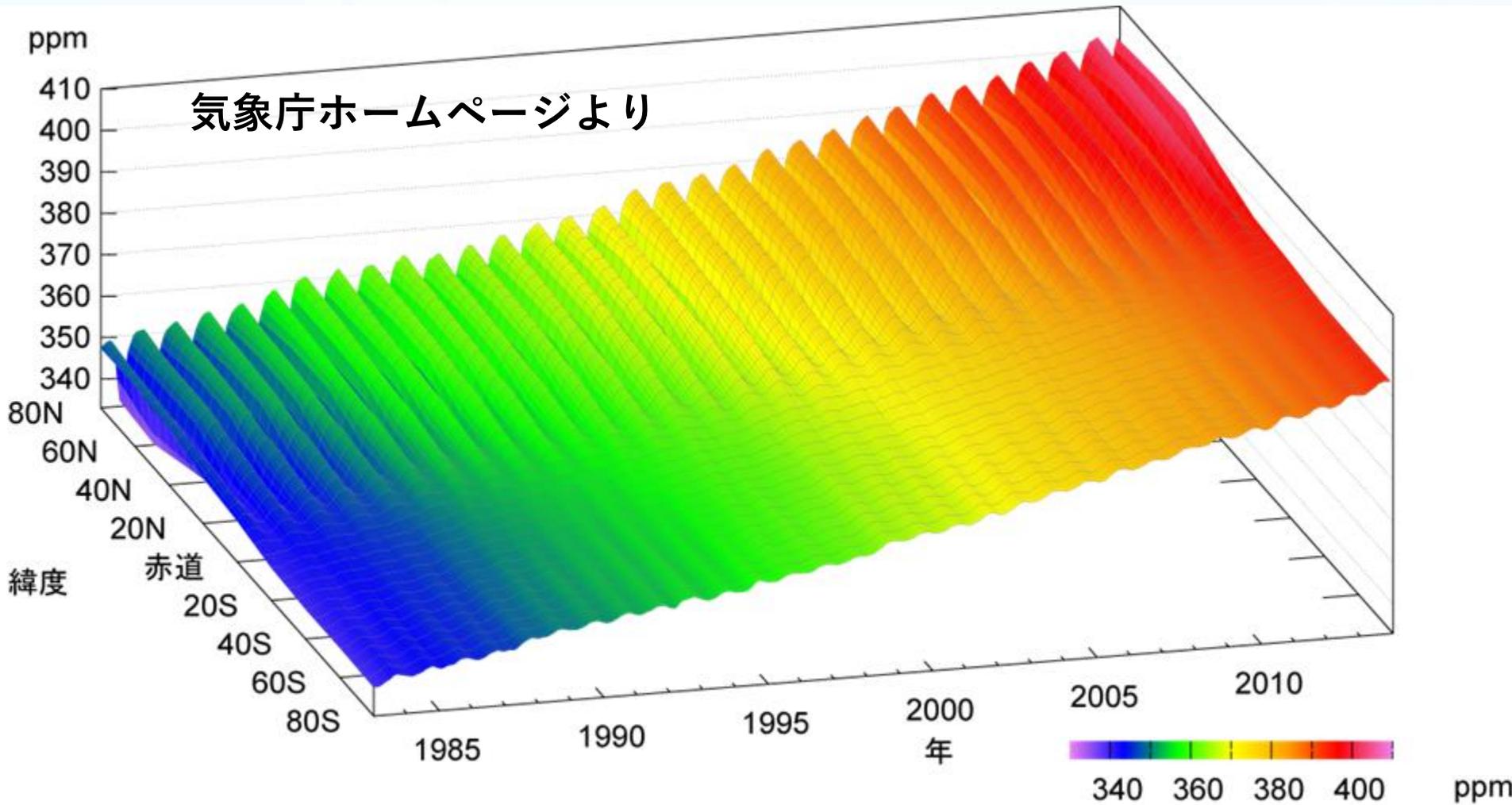
生態学分野における データ同化の利用

加藤知道（かとうともみち）

北海道大学農学研究院
連携研究部門
陸域生態系モデリング研究室

第2回 理研データ同化ワークショップ。
理化学研究所 計算科学研究機構。2017/09/26

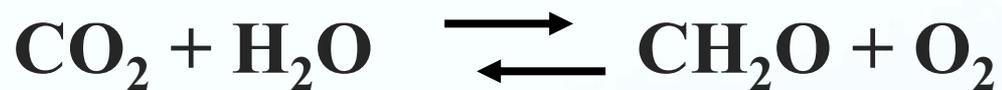
CO₂濃度の年々変化（植物・土壌の影響）



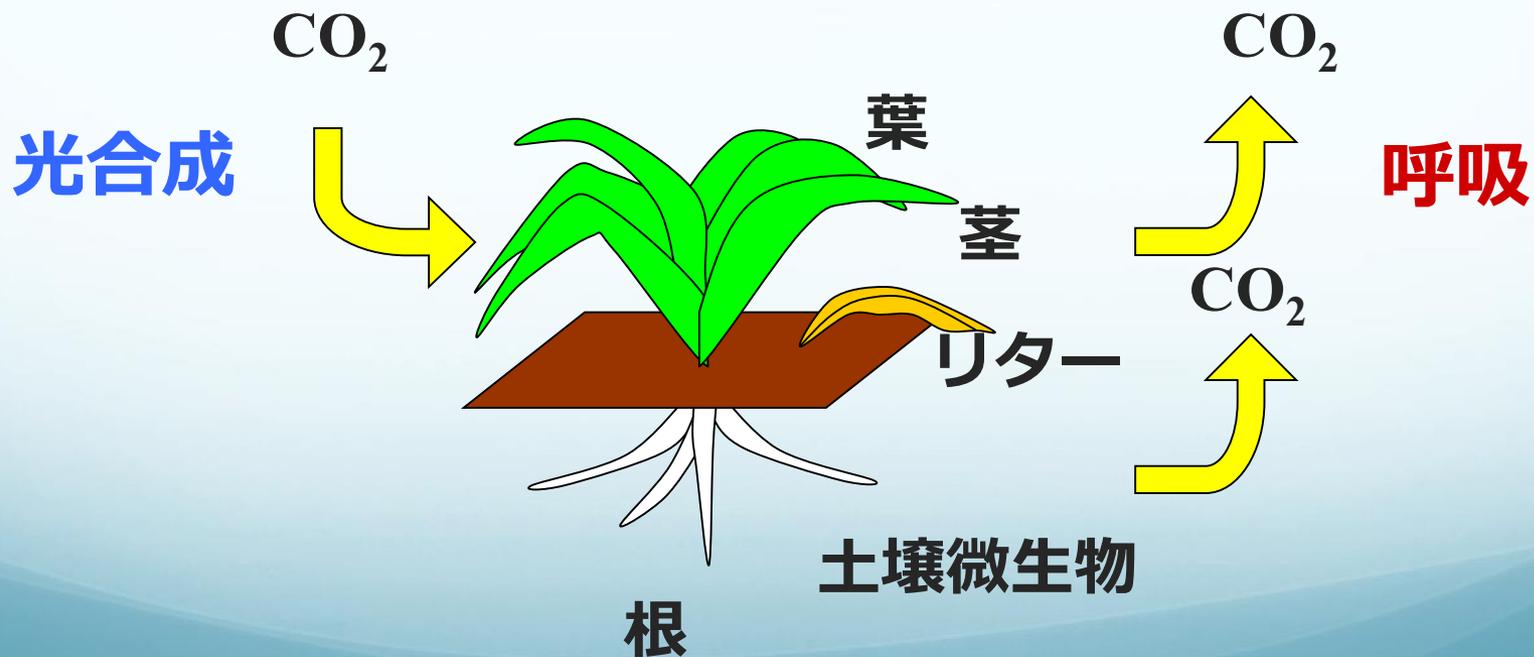
季節変化の振幅の大きさが北半球で大きく、南半球で小さい
->北半球は植物が多く、南半球は植物が少ないから
季節変化の位相が異なる -> 夏冬が反対だから

陸域生態系のはたらき

光合成



呼吸

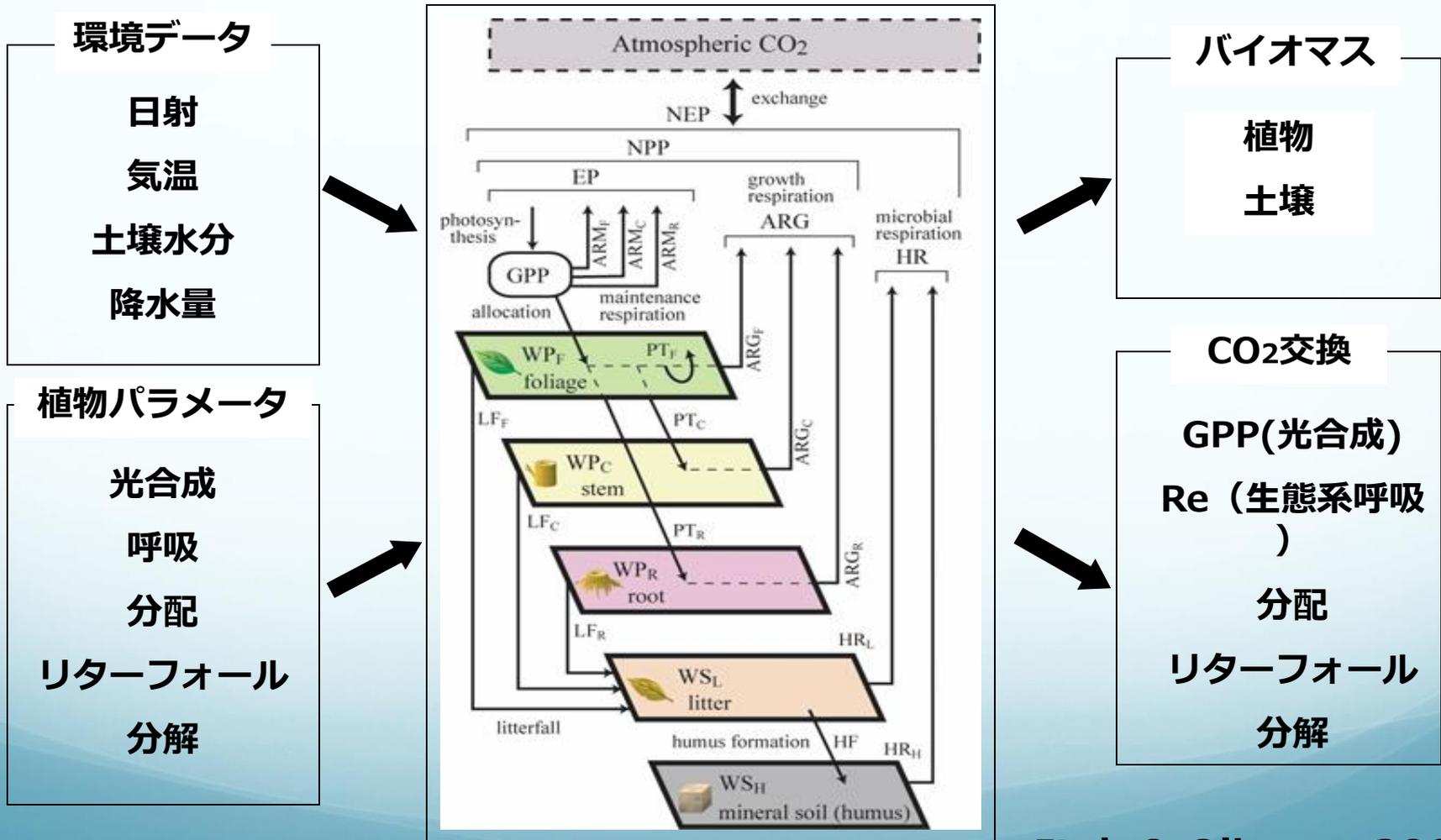


陸域生態系炭素循環モデル

入力

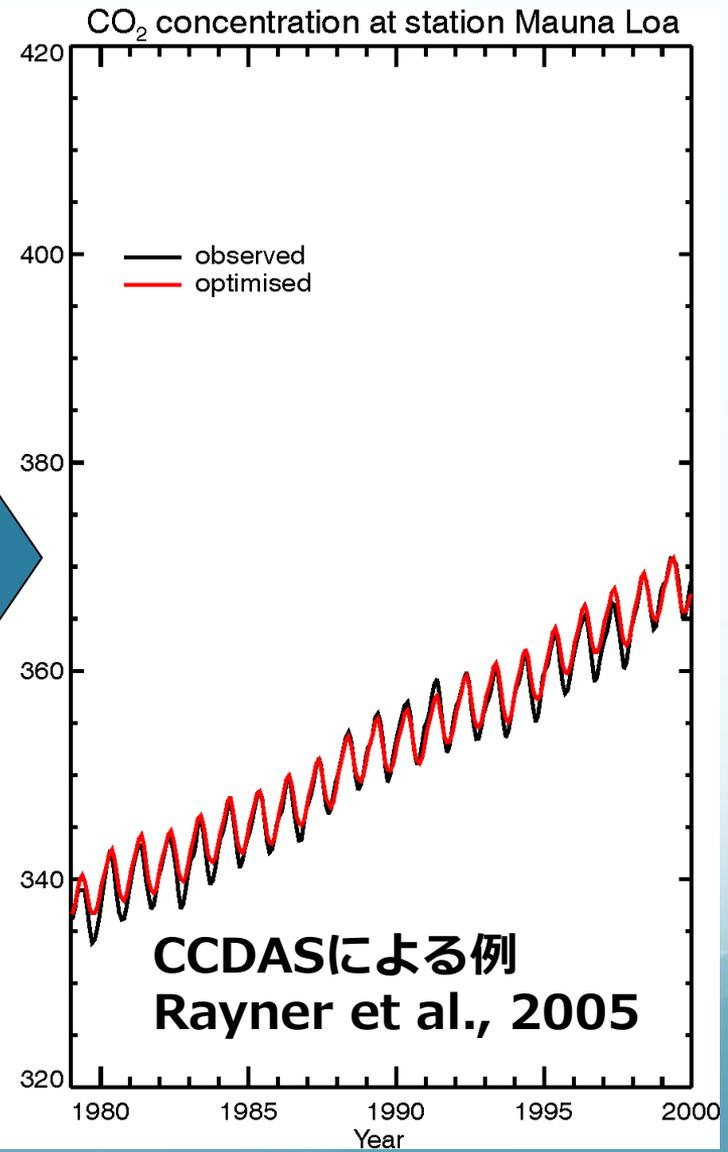
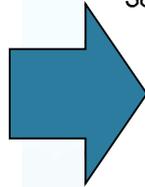
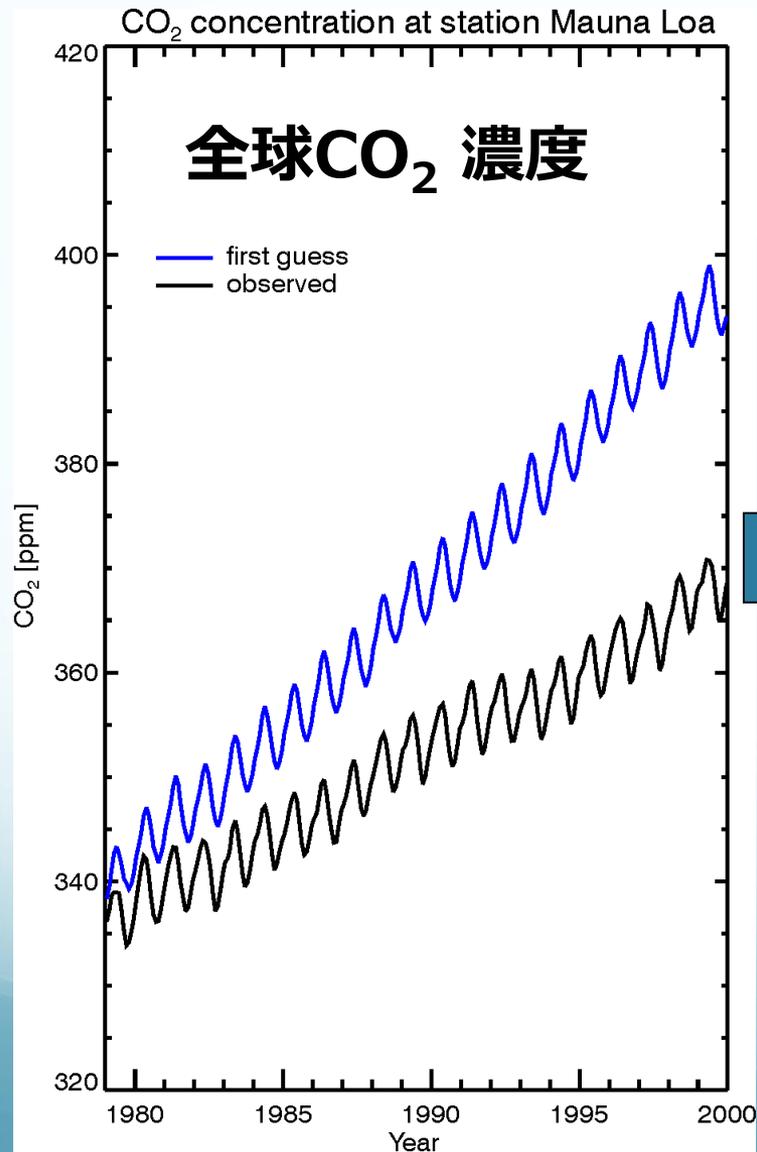
Sim-CYCLE

出力

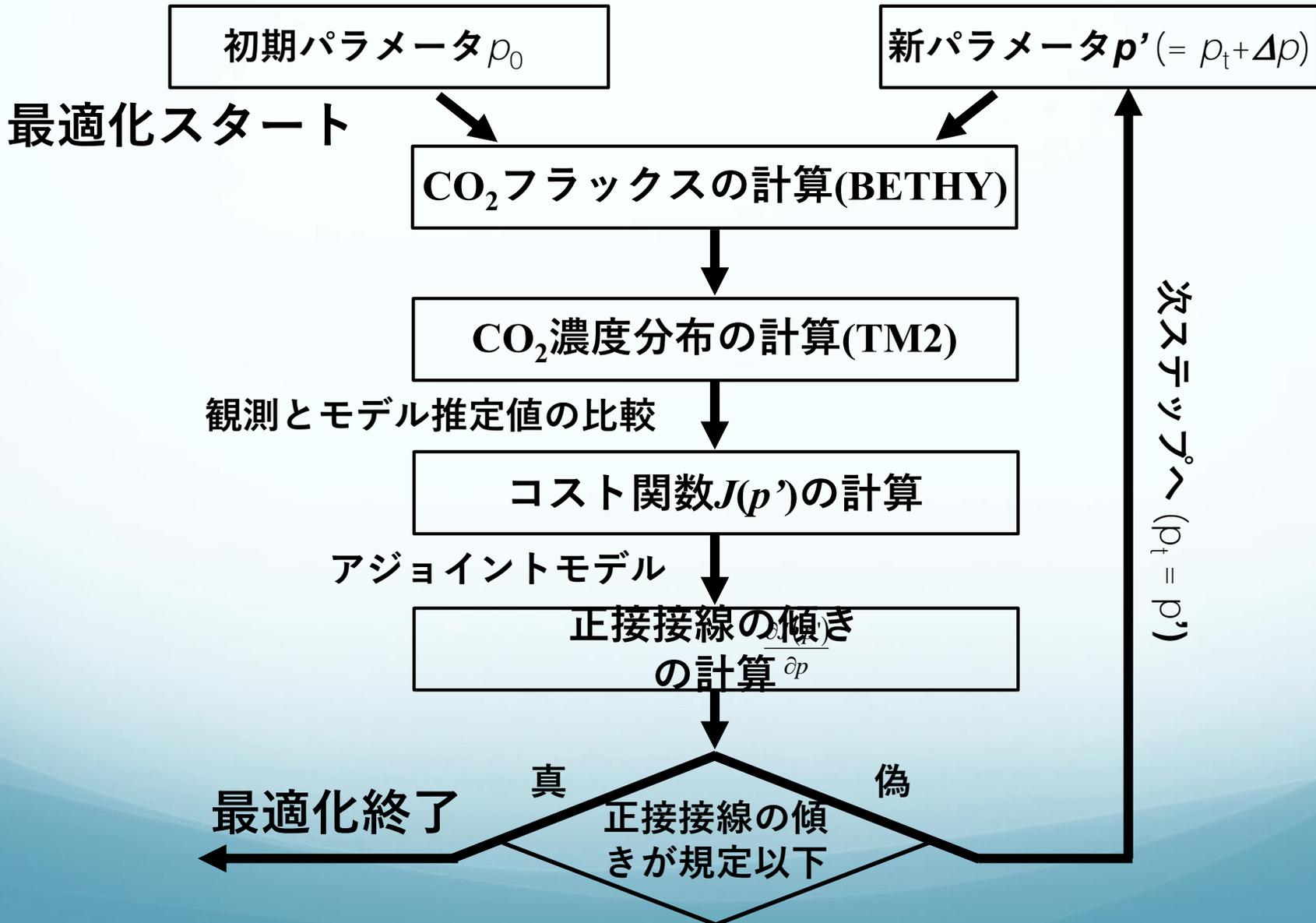


データ同化の例

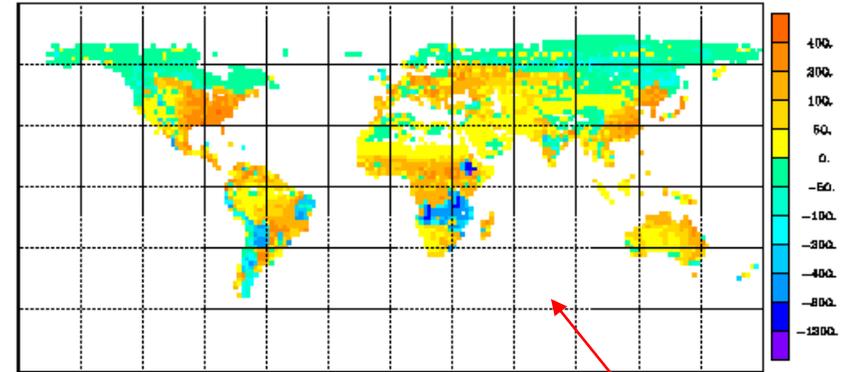
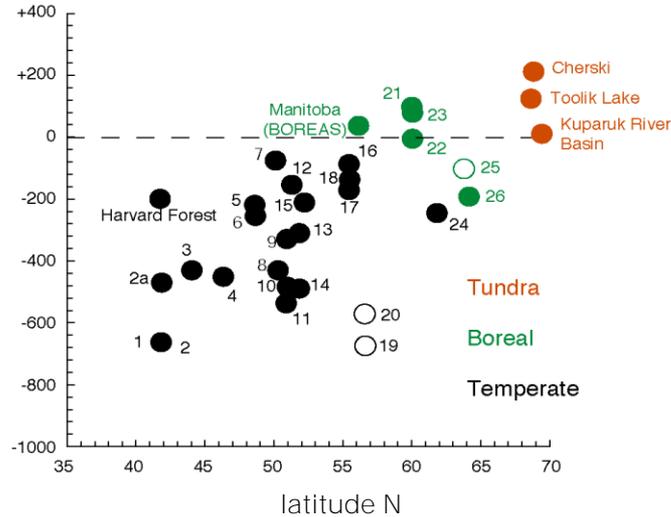
(大気輸送+生態系モデル+アジョイント)



CCDASによるパラメータ最適化

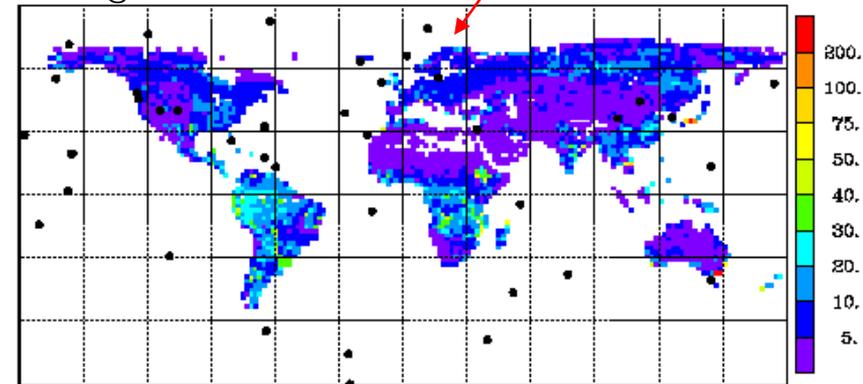
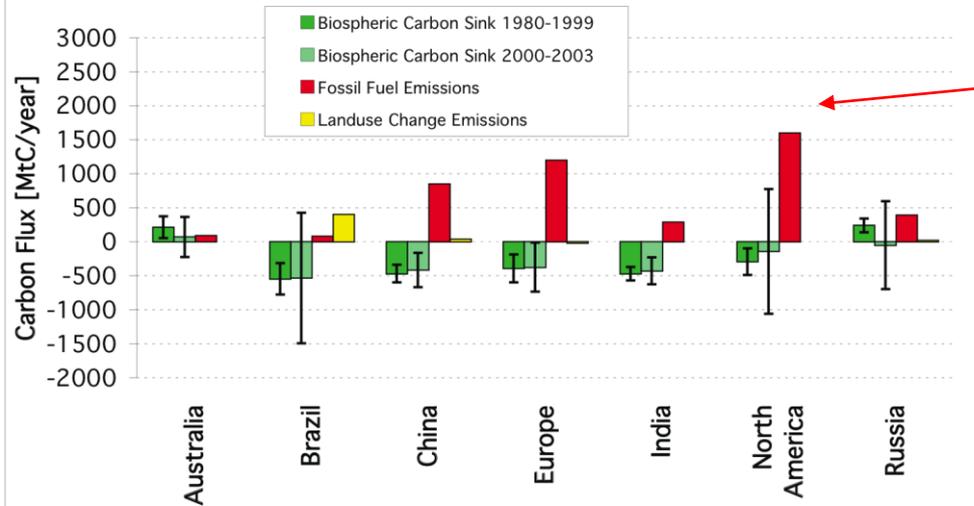


炭素循環データ同化システム (Carbon Cycle Data Assimilation System)



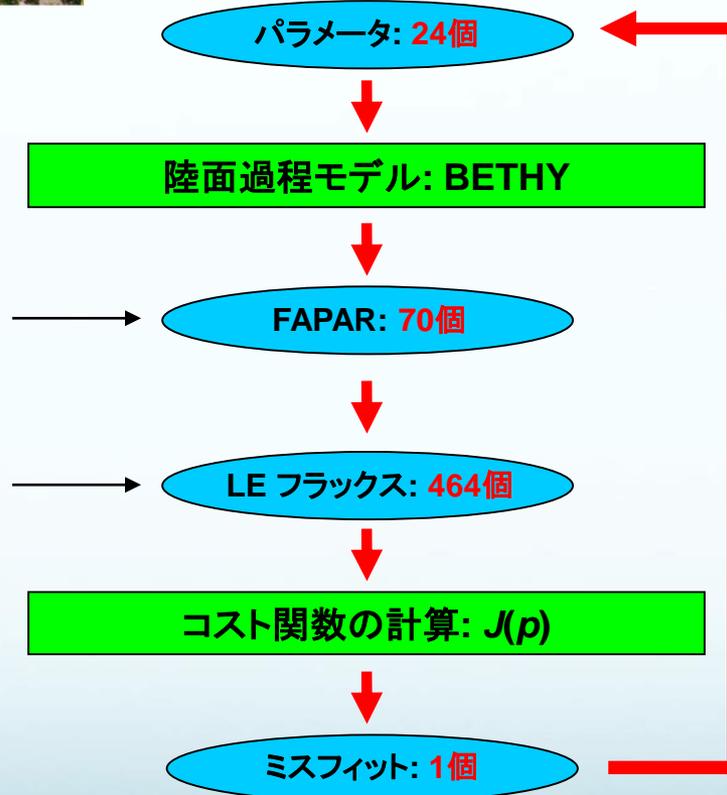
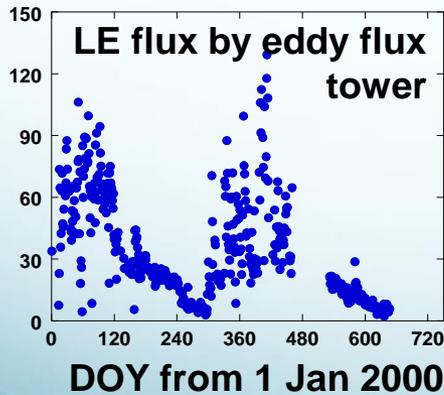
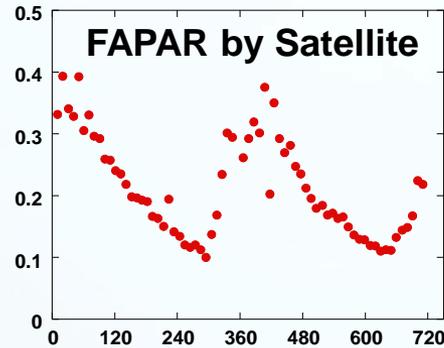
Examples for diagnostics:

- Long term mean fluxes to atmosphere ($\text{gC}/\text{m}^2/\text{year}$) and uncertainties
- Regional means





MaunサイトにおけるLE flux とFAPARのCCDASへの適用



フォワードモデル:

パラメータ → ミスフィット

アジョイントモデル:

∂ ミスフィット / ∂ パラメータ

➡ パラメータ最適化

アジョイントはTAF
(FastOpt, Hamburg)によ
って生成

FAPARとLEフラックスのコスト関数

パラメータの項

FAPARの項

LEフラックスの項

$$J(\vec{p}) = \frac{1}{2} [\vec{p} - \vec{p}_0]^T \mathbf{C}_{p_0}^{-1} [\vec{p} - \vec{p}_0] + \frac{1}{2} [\vec{a}(\vec{p}) - \vec{a}_0]^T \mathbf{C}_{a_0}^{-1} [\vec{a}(\vec{p}) - \vec{a}_0] + \frac{1}{2} [\vec{e}(\vec{p}) - \vec{e}_0]^T \mathbf{C}_{e_0}^{-1} [\vec{e}(\vec{p}) - \vec{e}_0]$$

ここで、 $J(p)$ はパラメータセット p のコスト関数。 P_0 は事前パラメータセット。

C_{p_0} は事前パラメータセット p の不確実性の共分散。

$a(p)$ と $e(p)$ は、FAPARとLEフラックス。

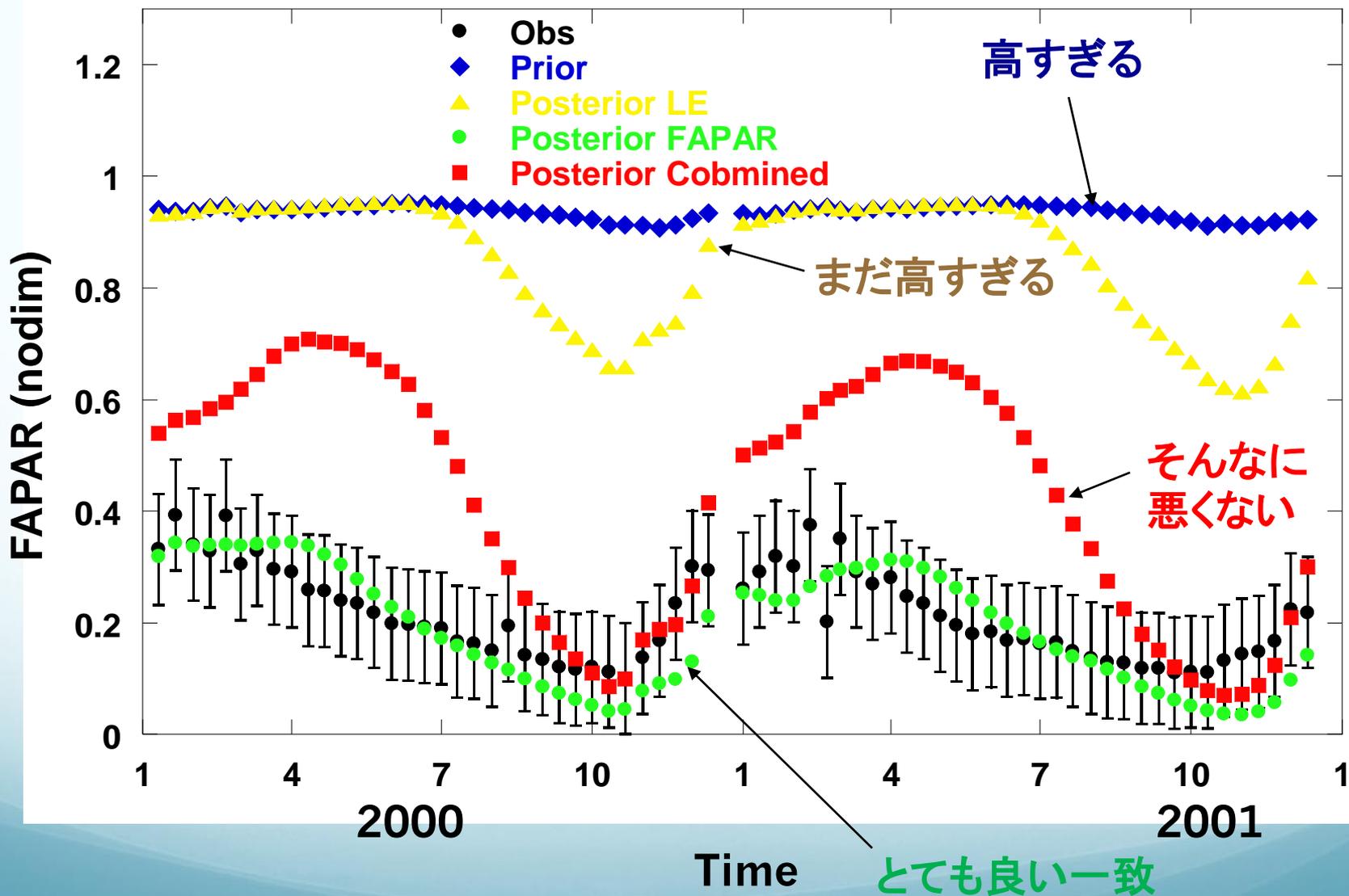
a_0 と e_0 は、FAPARとLE fluxの観測。

C_{a_0} と C_{e_0} は、 a_0 と e_0 の不確実性の共分散。 T^{-1} は行列の転置と逆行列。

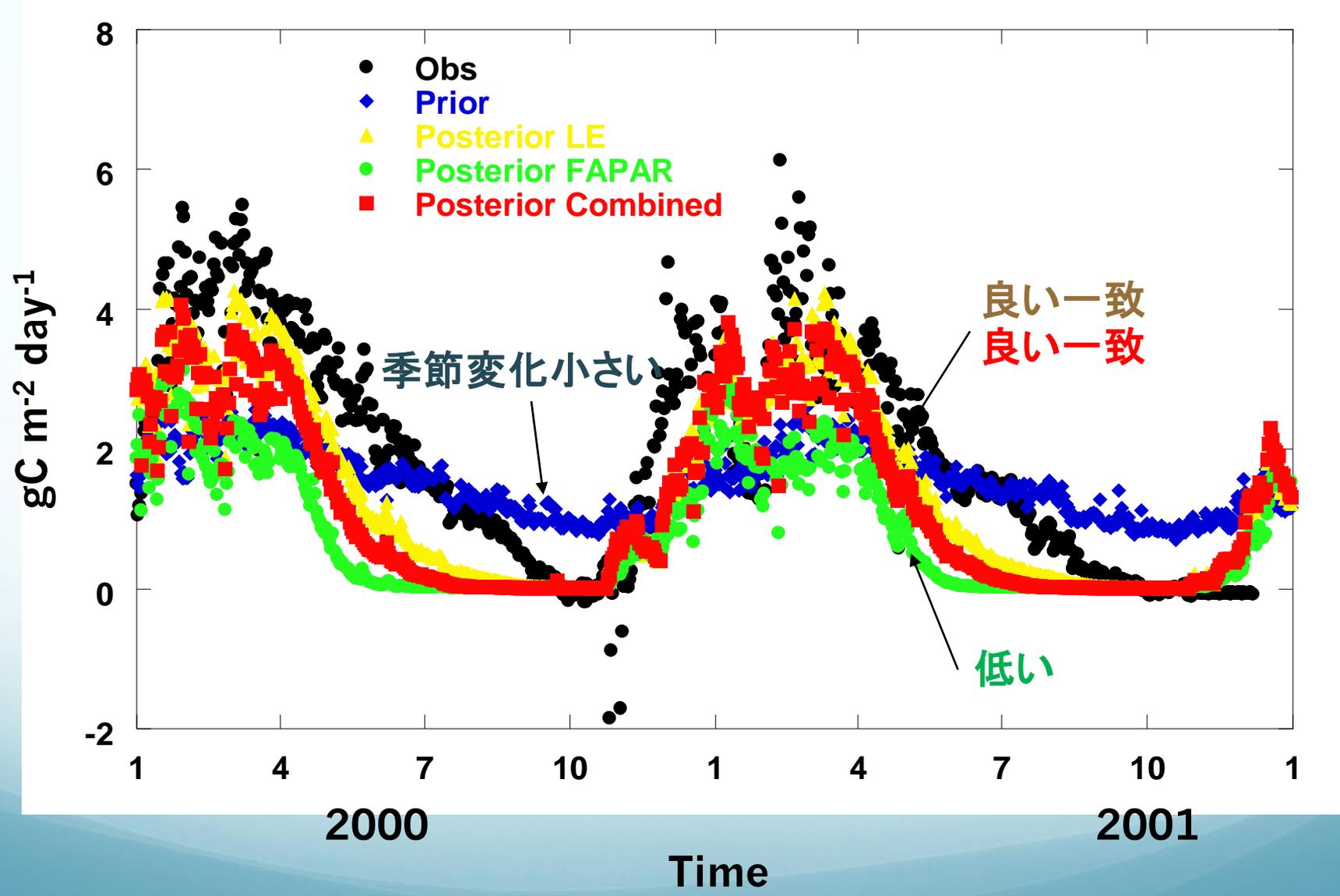
実験設定

- 2 PFT: Tropical broadleaf deciduous tressとC4 grass
地表被覆割合(0.7 と 0.3)
- 期間と同化データ:
2年間 (2000-2001)の
FAPAR(MERIS/毎8-11日)とLE(日平均EC)データ
- パラメータ: 18の炭素関係 (従来のもの)のパラメータ と
6の熱・水関係(今回新たに導入)のパラメータ
- 3つのパラメータ最適化:
 1. LEフラックスのみによるパラメータ最適化
 2. FAPARのみによるパラメータ最適化
 3. LEとFAPARの両方を用いた(Combined)パラメータ最適化

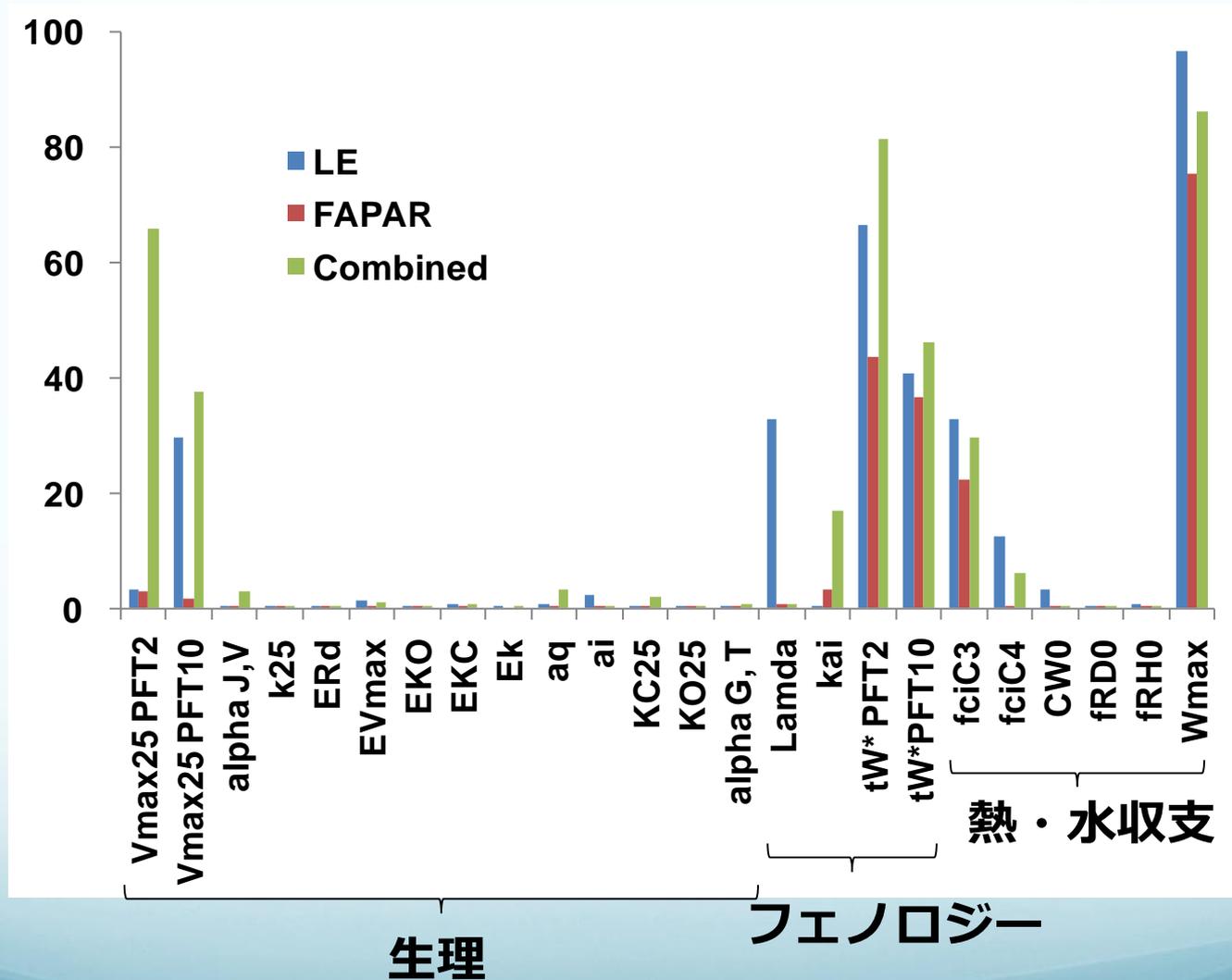
FAPAR (葉で吸収される日射=光合成効率)



Gross Primary Production (=光合成)



パラメータにおける不確実性の減少



生態系の物質循環にとって、重要なパラメータを検出

生態系モデルのデータ同化の特徴

- **パラメータ数が非常に多い**

数十のパラメータがあるため、生態系タイプ・目的に応じて数を絞る必要

-> 生理パラメータは文献値多い。しかし、フェノロジー・バイオマス分配率・根圏深度などは、実測が少ないので最適化することが多い。

- **非線形性**

条件文が多いため、モデル挙動が極端に変動し、ローカルな極小が多い

-> 累積温度などで、フェノロジー（展葉、落葉開始）を調節する場合など、イベントの開始時に大きくフラックスが変わる。

- **同化する観測データの質・量に幅が大きい**

衛星データ：NDVI(葉の緑度)、LAI(葉面積)、土壌水分、クロロフィル蛍光

地上データ：CO₂濃度、渦相関CO₂/LEフラックス、バイオマス調査

-> 観測期間・頻度・分布がまちまち。観測には誤差も大きく、利用には注意が必要。例えば、熱帯雨林の衛星データは、数少ない晴れの日で構成されているので、植物の活性が高い状況を表現している。

生態系モデルにおけるデータ同化例

- **マルコフ連鎖モンテカルロ法、進化戦略(SRES)+学習モデル**
渦相関CO₂/LEフラックス (Knorr et al., 2005; Lasslop et al. 2008など)
水稻生長モデル(Iizumi et al., 2009)、分配 (Kondo et al, 2015)
-> 実例多い。実装が簡単だが計算資源が必要。
1サイトでの適用がほとんど。
- **逐次フィルタリング (KFなど)**
渦相関CO₂/LEフラックス (Williams et al., 2005; Mo et al., 2008など)
、
MODIS BRF (Quaife et al., 2008)、粒子フィルター (荒木田さんなど)
-> 比較的例がすくない。診断的な利用。
- **アジョイント (4次元変分法)**
全球CO₂データ (Rayner et al., 2005; Scholze et al., 2007)
MERIS FAPAR (Knorr et al., 2010)
-> ほとんど実例がない。実装は難しいが、計算負荷は比較的少ない。

まとめ

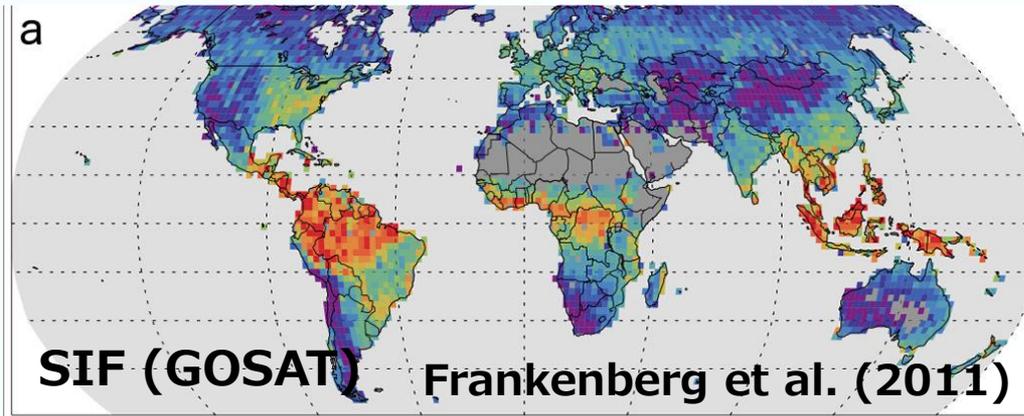
1. 陸域関連モデルへのデータ同化は非常に重要
2. しかし、最終的なゴールを考慮して進める必要あり

モデル精度向上 or 生態学・水文学的な解釈

-> 最適化パラメータの数を増やし、モデルを簡略化すると精度上がるが、学問的な意味は低い

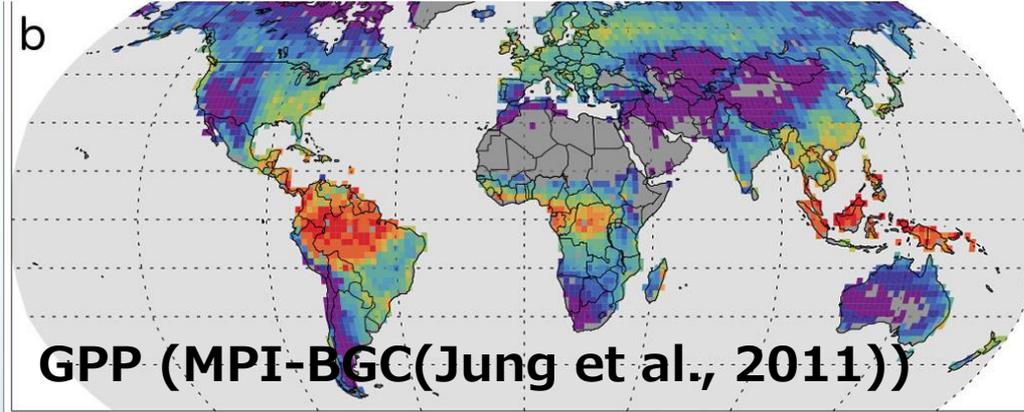
3. **期待される研究：複数観測データの同化、再解析データの作成、パラメータ変化自体に着目**
4. **一番大切なのは、若手研究者の育成や、生態系データ同化の重要性を偉い人に認知させること**

太陽光誘起クロロフィル蛍光(SIF)と光合成量



$F_s / (\text{W m}^{-2} \text{ micron}^{-1} \text{ sr}^{-1})$

0.100 0.200 0.300 0.400 0.500 0.600 0.700 0.800 0.900 1.000 1.100 1.200 1.300 1.400



Model GPP (MPI-BGC) / ($\text{gC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)

0.00 0.70 1.40 2.10 2.80 3.50 4.20 4.90 5.60 6.30 7.00 7.70 8.40 9.10

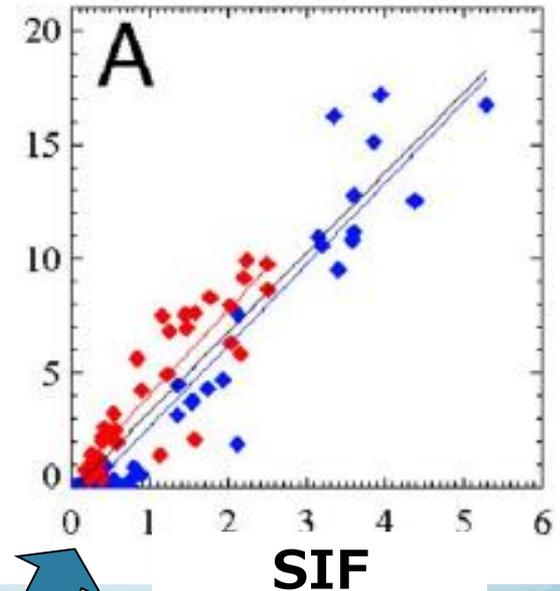


$$y = -0.88 + 3.55x; r^2 = 0.92$$

$$y = 0.35 + 3.71x; r^2 = 0.79$$

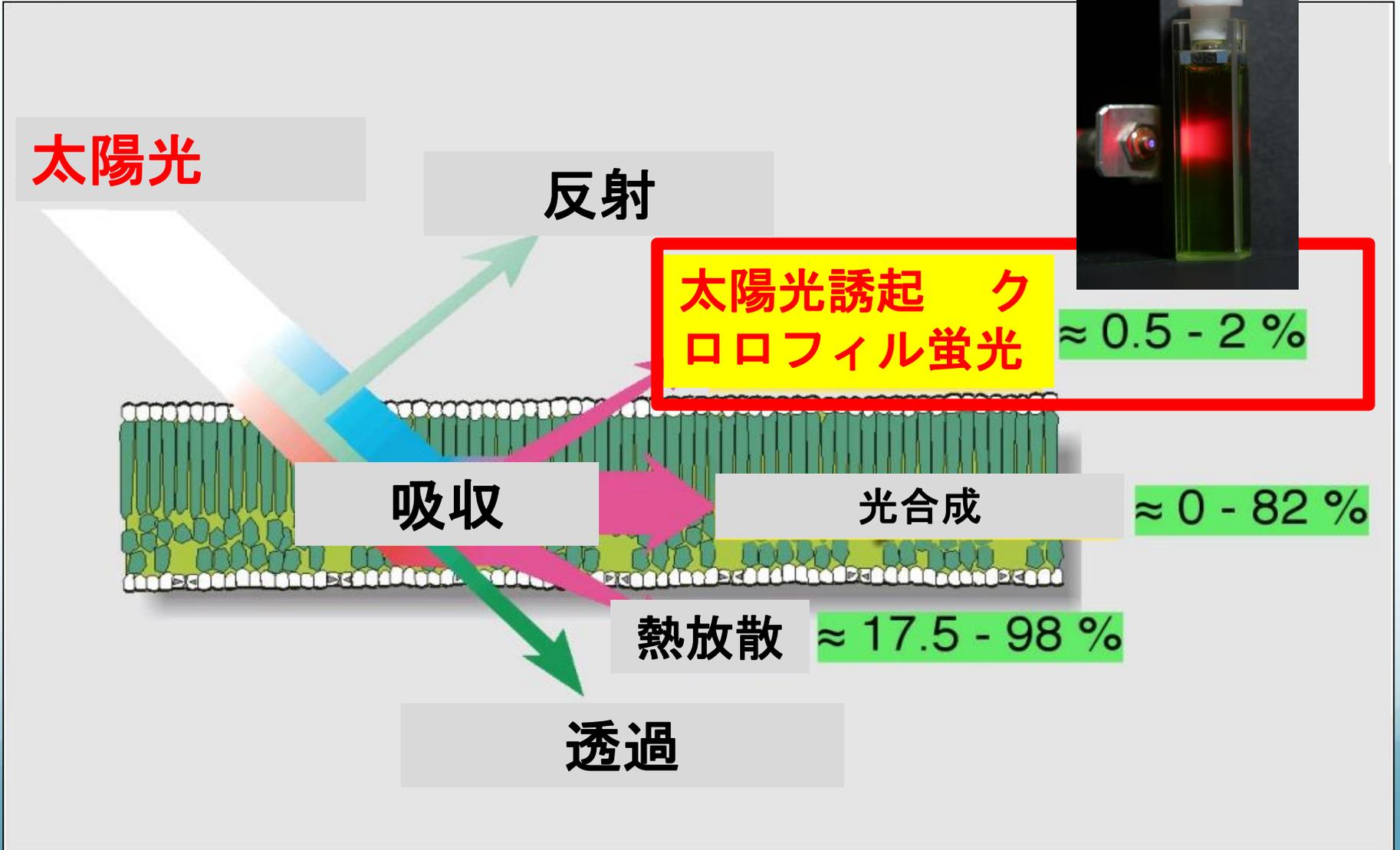
$$y = -0.17 + 3.48x; r^2 = 0.87$$

生態系光合成量GPP



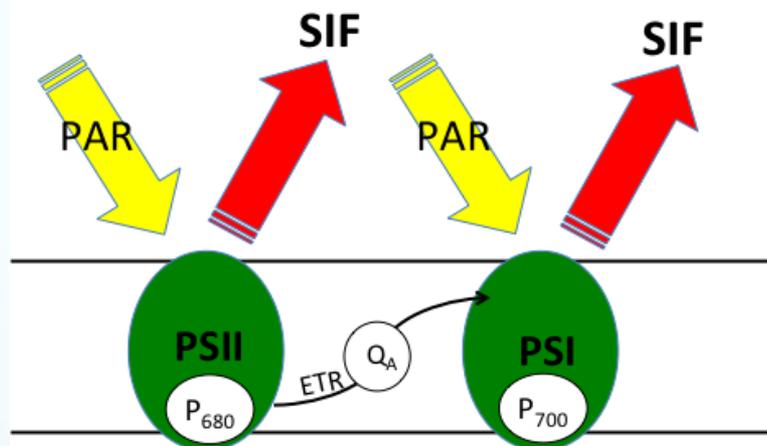
**SIFは生態系光合成量GPPを代表する
その関係を解釈するには詳細なモデルが必要**

太陽光誘起クロロフィル蛍光とは

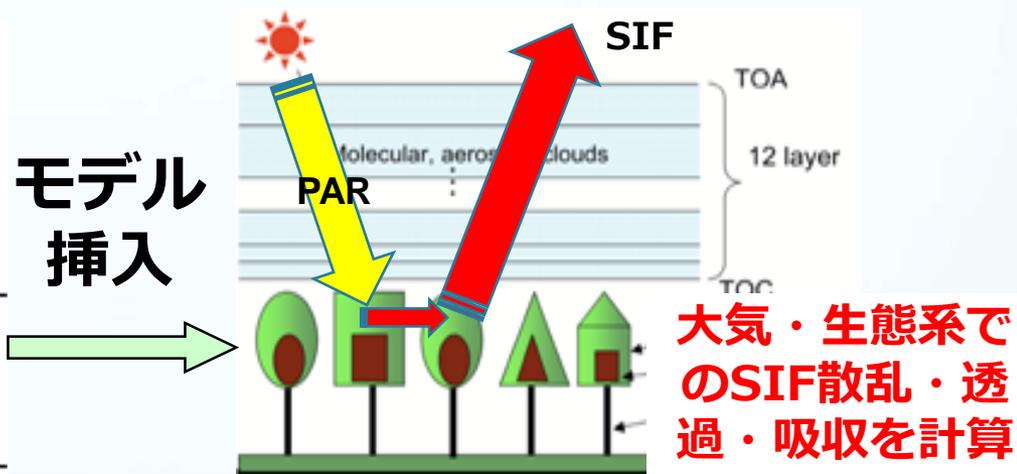


SIF光合成モデルの構築（環境省推進費）

個葉光合成プロセスモデル （加藤・北大）



森林 3次元放射伝達モデル （小林・JAMSTEC）



葉でのSIF生成/放出と光合成速度を計算

入力

出力

環境データ：PAR・温湿度・
太陽高度・大気光学的厚さ等

パラメータ：光合成回路・葉
反射透過率・葉位置情報等

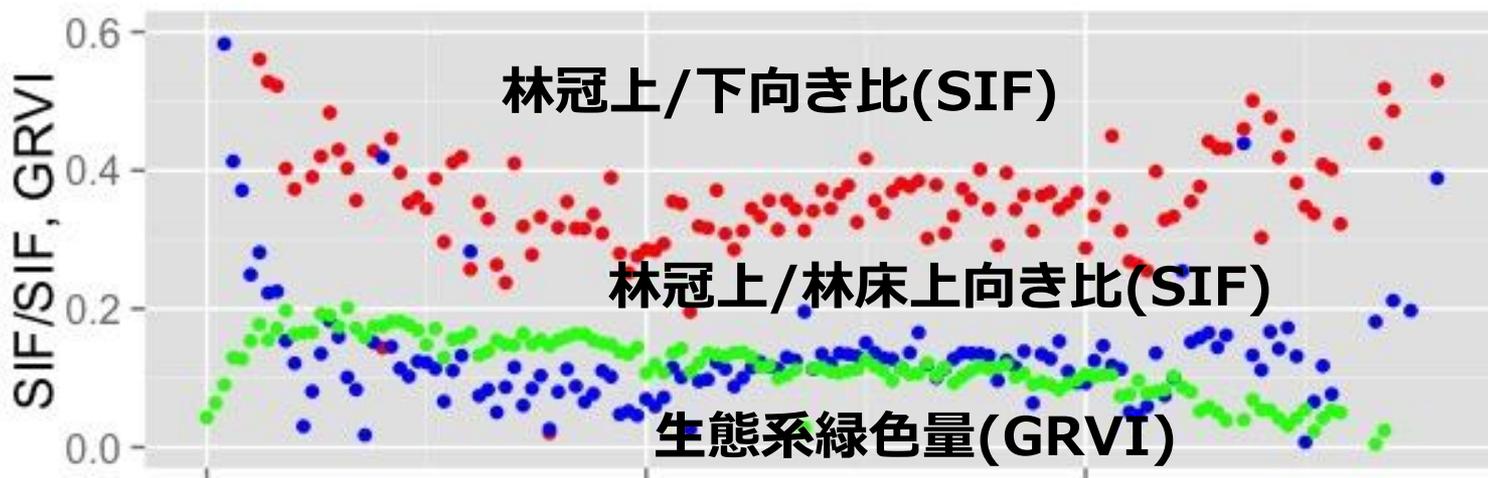
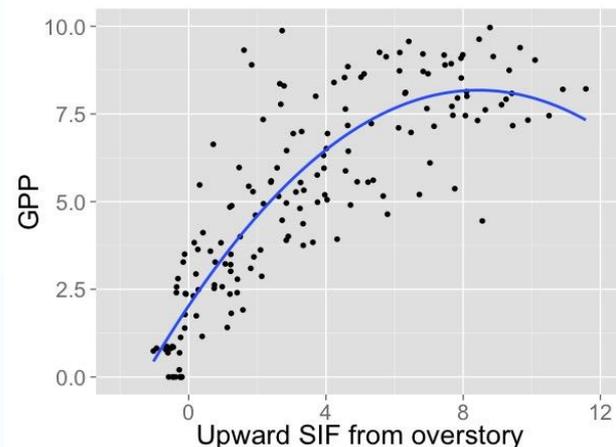
SIF・光合成量・
光合成ストレス

衛星・地上観測データ
（落葉広葉樹林）で検証

検証サイト (岐阜大高山TKYサイト)



SIF-GPP関係



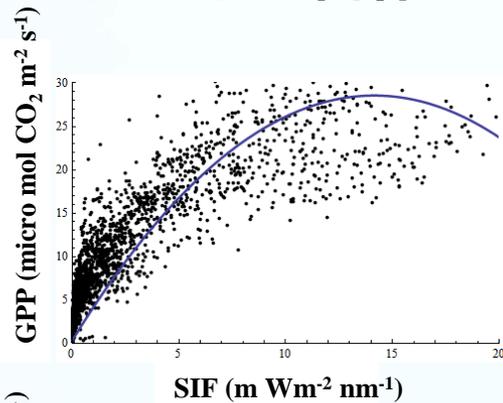
**特徴：長期生理生態観測データが蓄積
検証用SIF(上/下)&GPPが2006以降ある**

サブテーマ 1 : 個葉光合成プロセスモデル

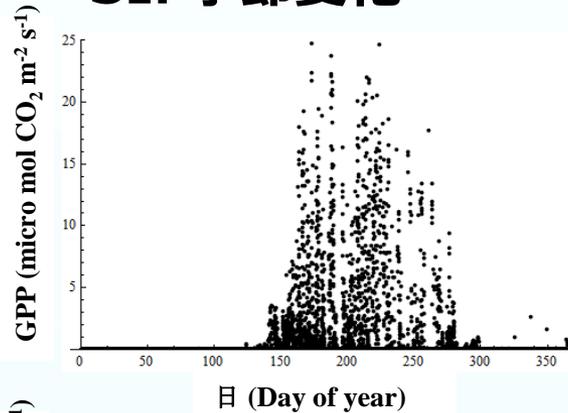
・ 検証サイト(TKY)におけるシミュレーション (2007)

モデル
(個葉)

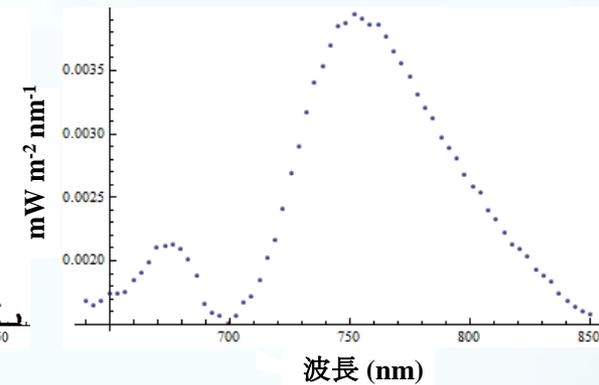
SIF-GPP関係



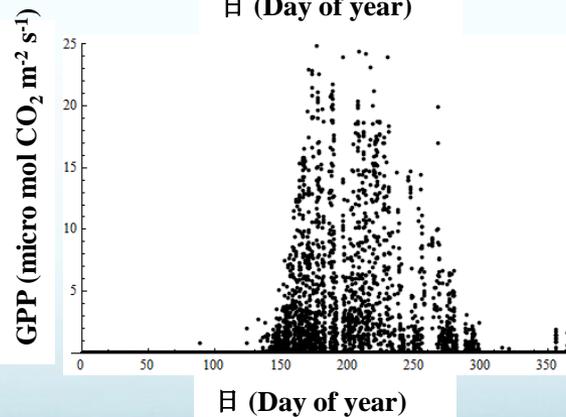
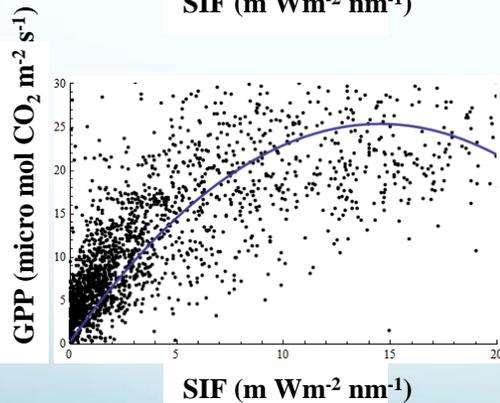
SIF季節変化



SIFスペクトル



観測
(生態系)

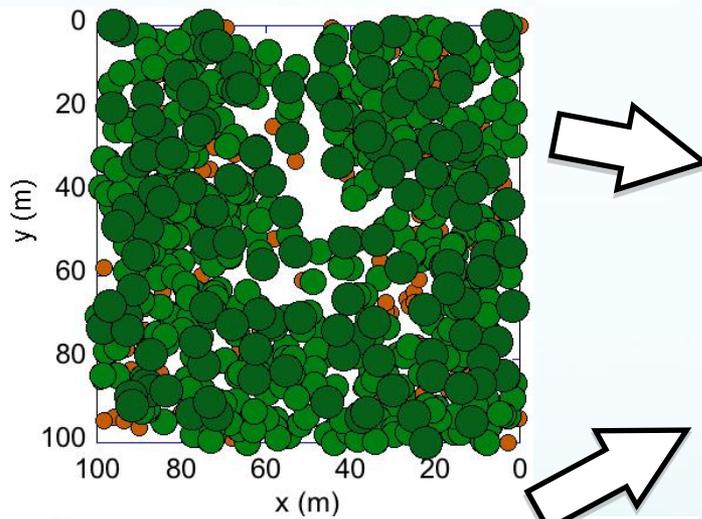


モデルは観測と同様な傾向を示しており、
基礎部分が完成しつつある。

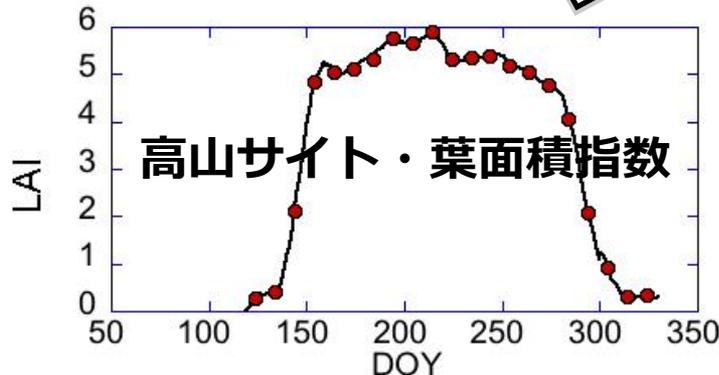
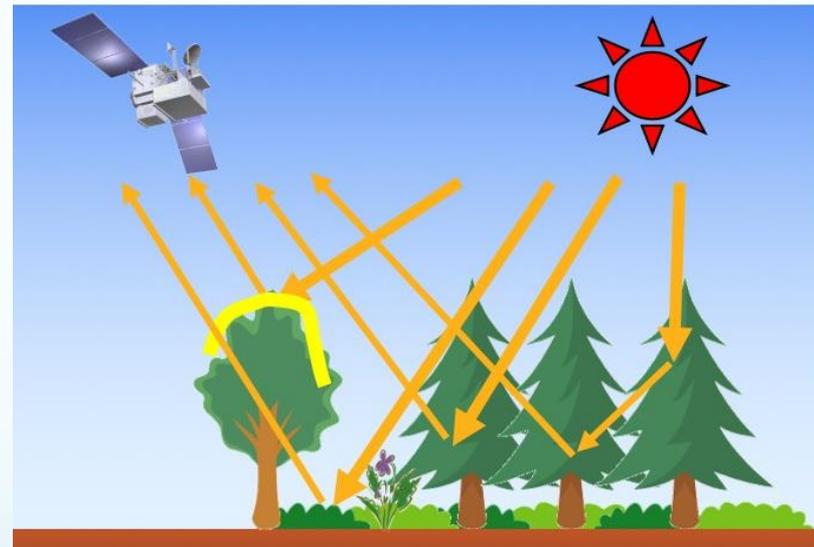
サブテーマ2：森林3次元放射伝達モデル

- ・ 現実の林分構造に合わせることが可能
- ・ 樹冠スケールで観測されるSIFに対する要素別寄与率（陽葉、陰葉、多重散乱成分）の定量化が可能

高山サイト・林分データ

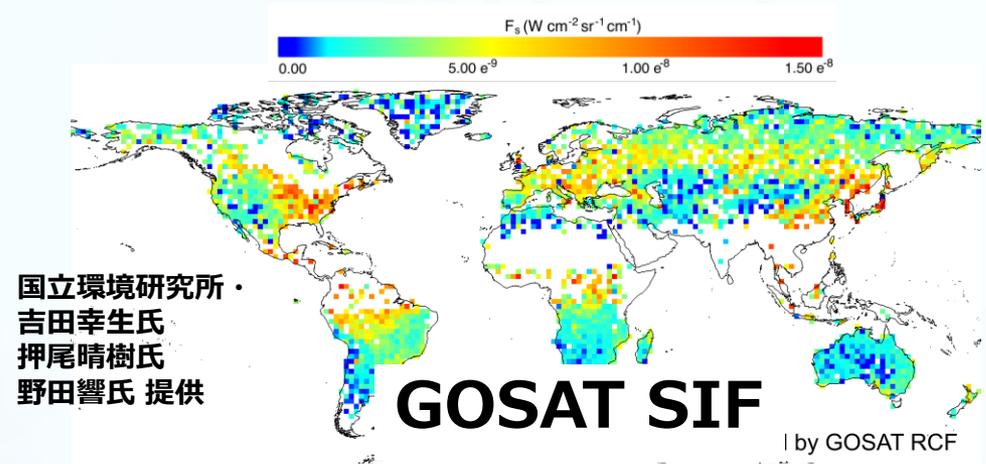


放射伝達シミュレーション

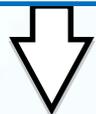


- ・ 高山サイトの森林条件に可能な限り近い条件でシミュレーションを実施
- ・ SIFやGPP(光合成)観測値によるモデルの検証と改善

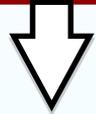
将来の発展性：モデルと衛星による炭素収支評価



開発中のSIF・光合成モデルを
衛星SIFデータに適用

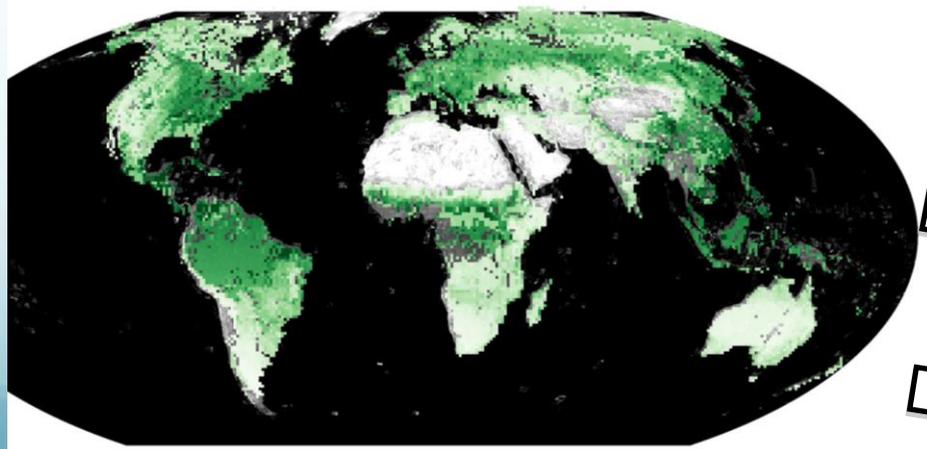
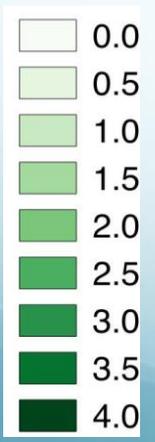


光合成パラメータ(V_{cmax} 等)の逆推定
生態系モデルのデータ同化での活用



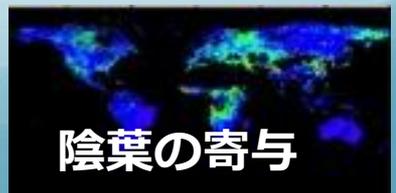
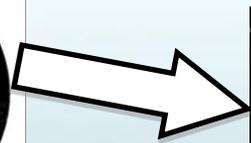
炭素収支推定精度の向上や
大規模干魃の広域評価などに貢献

衛星インバース解析



SIFシミュレーション

要素別寄与の算出・
パラメータ推定



蛍光まとめ

1. 衛星によるクロロフィル蛍光観測はしばらく続く
(GOSAT, OCO-2, GOSAT-2, FLEX
etc.)
2. しかし、地上検証データ (SIF vs. GPP) が不足
3. モデルは1次元SCOPE(van der Tol et al., 2009)のみ
4. **モデル・衛星検証のためのデータベースをスペクトルデータから作る。**
5. **最終的に、モデルへのSIFのデータ同化を目指す**