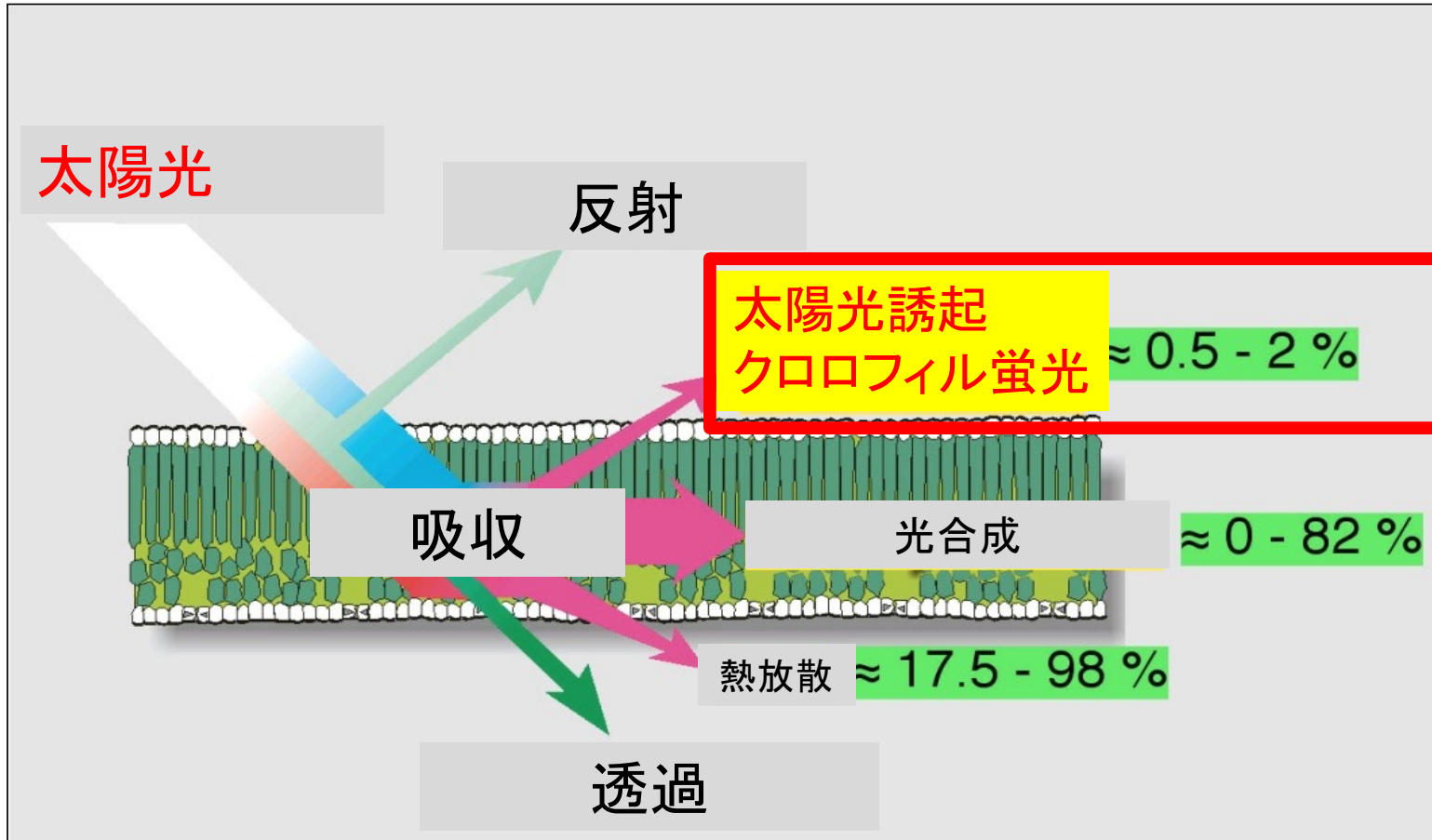


環境省推進費2-1903課題
GOSAT-2による太陽光誘起クロロフィル蛍光を利用した生態系光合成量推定の高精度化
事後評価ヒアリング

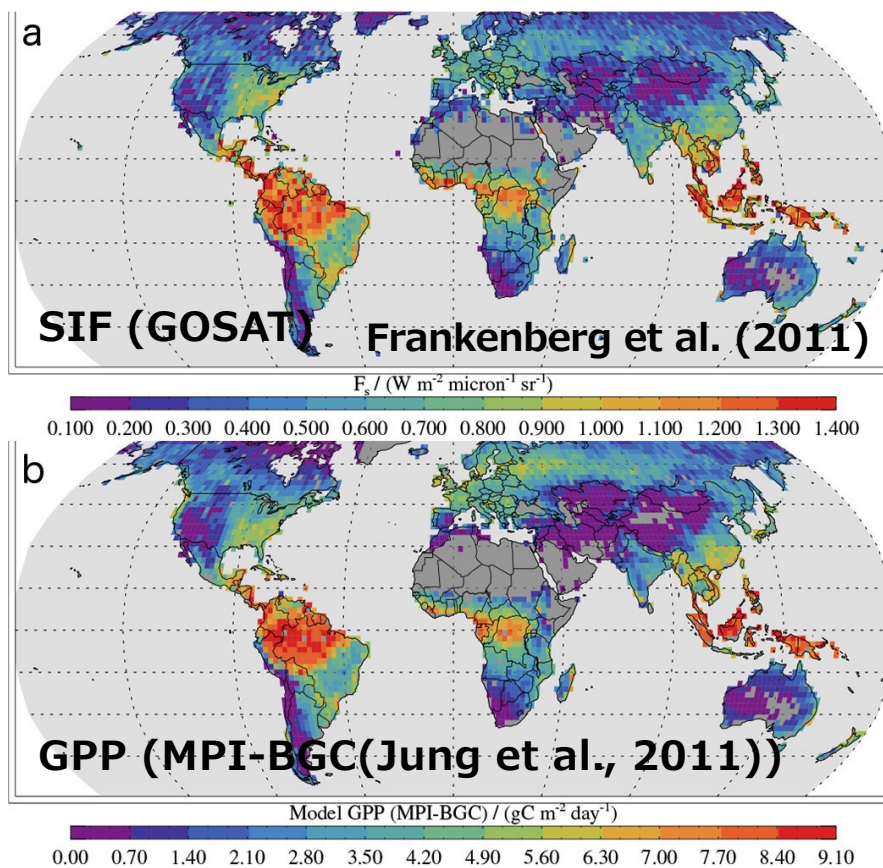
代表・サブテーマ1： 加藤 知道 (北大)
小杉 緑子 (京大)
中路 達郎 (北大)
松本 一穂 (琉球大)
サブテーマ2： 彦坂 幸毅 (東北大)
サブテーマ3： 小林 秀樹 (JAMSTEC)

2022/6/29

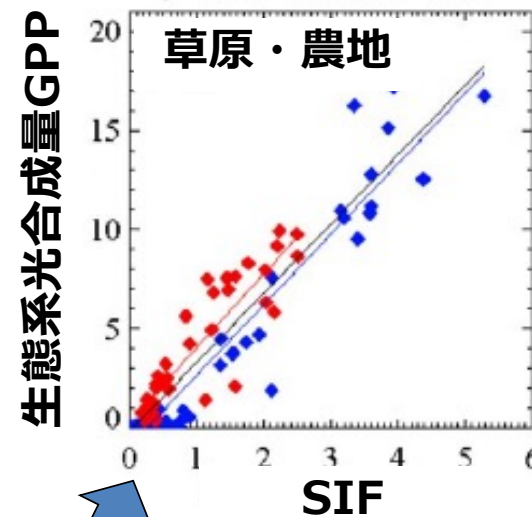
太陽光誘起クロロフィル蛍光 (SIF)



衛星GOSATに観測されたSIFと光合成量



$$y = -0.88 + 3.55x; r^2 = 0.92$$
$$y = 0.35 + 3.71x; r^2 = 0.79$$
$$y = -0.17 + 3.48x; r^2 = 0.87$$



- SIFは生態系光合成量GPPを代表する
- 関係解明にはリモセン-地上観測-モデル連携が必要

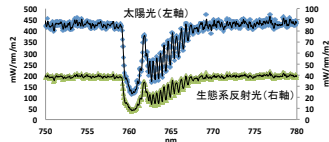
世界SIF研究における本研究の位置

	日本	外国
衛星観測	GOSAT(MOE/JAXA:2009-) GOSAT-2(MOE/JAXA:2018-) GOSAT-GW(MOE/JAXA:2023-)	OCO-2(NASA: 2015-) OCO-3(NASA: 2018-) GOME2(NASA: 1995-) TROPOMI(NASA: 2018-) FLEX (ESA: 2022-)
地上観測	中精度分光観測(PEN : 森林、水田等、2003-) 高精度分光観測(森林、湿地、水田等、2019-)	FLEXチーム/NASA JPLによる地上・航空機観測 地上分光観測 (トウモロコシ畑、広葉樹林、アマゾン)
モデル	FLiES-SIF (推進費2RF-1601: 加藤+小林)	FluoMODleaf (欧州) SCOPE(オランダ)

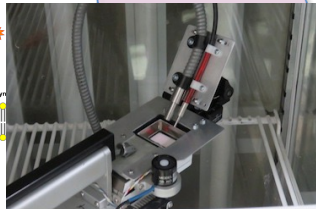
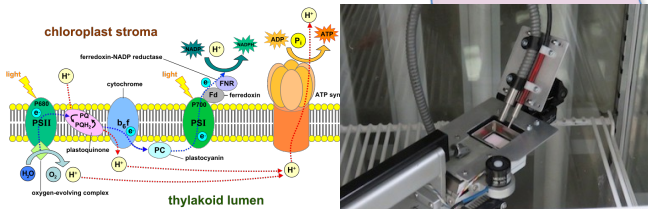
問題点 : GOSAT-2はSIFを標準プロダクトとして提供しているが、検証体制不十分で利用可能性低下

目的：GOSAT-2のSIFによる生態系光合成量推定の高精度化

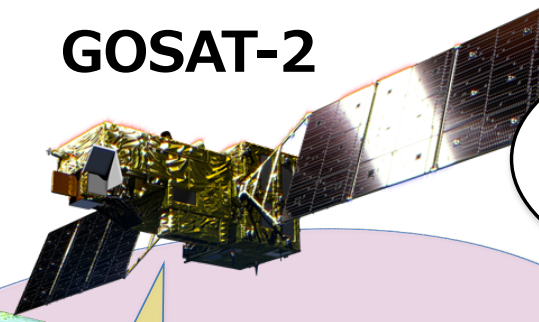
① 地上観測による検証
加藤、小杉、中路、
松本、ポスドク



② 個葉モデル改良
彦坂、ポスドク



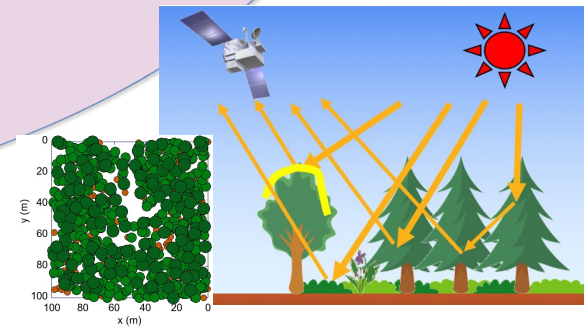
GOSAT-2



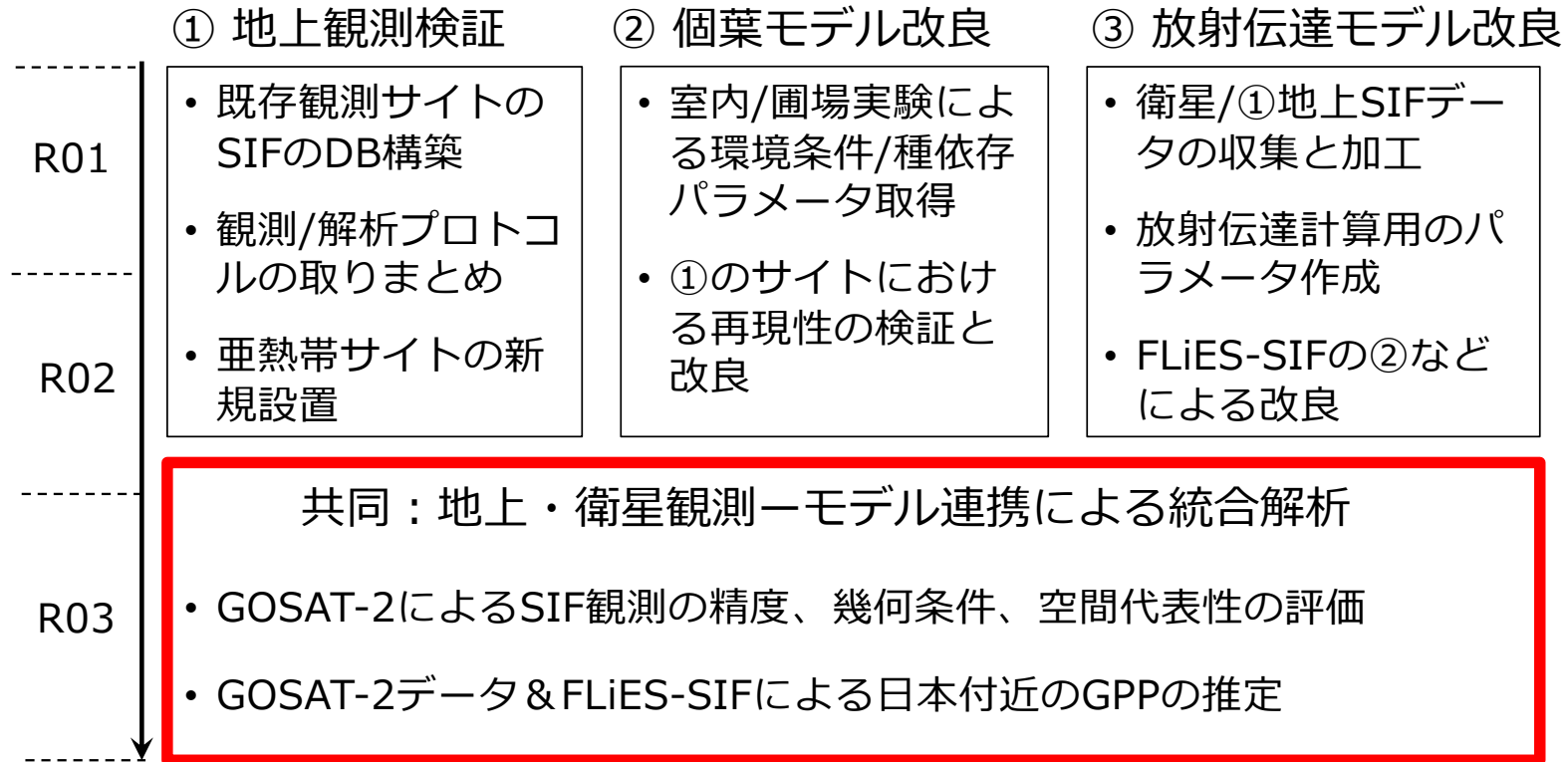
連携研究者

野田ら(GOSAT-2
チーム/NIES)

③ SIF放射伝達
モデル改良
小林、ポスドク



研究スケジュール



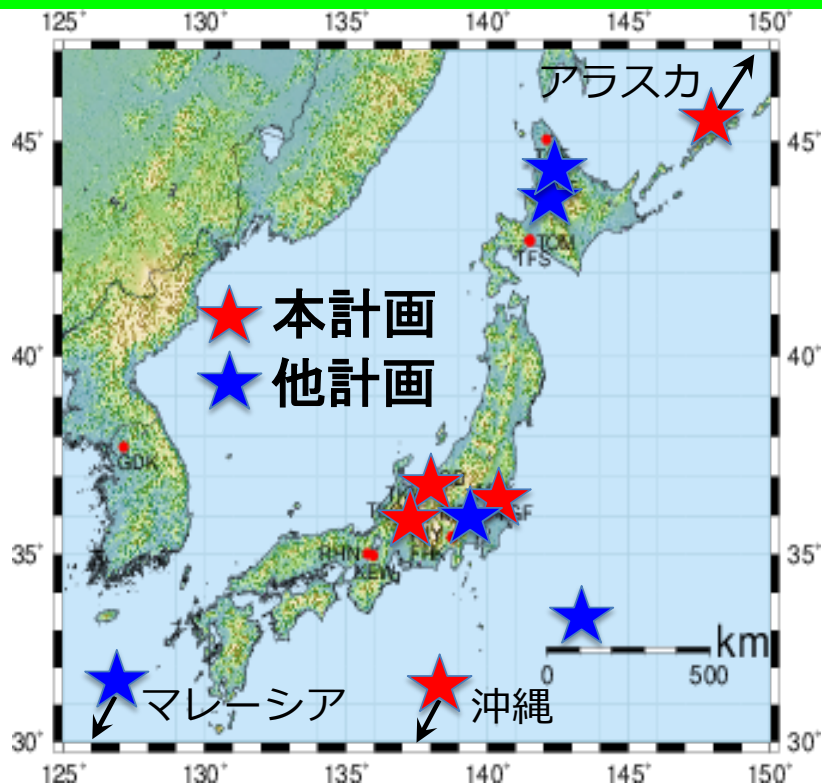
目標：地上観測・モデル利用しGOSAT2-SIFによるGPP推定の標準化(指針提示)

将来：衛星によるCO₂吸収量・光合成活性のリアルタイム推定

地球システムモデルの生態系炭素循環の推定精度改善

次期衛星計画(GOSAT-GWなど)への情報提供による貢献

サブテーマ1. 地上観測データベースによるGOSAT-2のSIF検証



気候帯	植生タイプ	場所/ID	高分解能	中分解能
寒帯	常緑針葉林	アラスカ/PFA	2018-	なし
温帯	落葉広葉林	高山/TKY	2019-	2003-
	常緑針葉林	桐生/KEW	2018-	2004-
	落葉針葉林	富士北麓/FHK	2021-	2006-
	落葉針葉林	天塩/TSE	2021-	2005-
	水田	つくば/MSE	2018-	2005-
	コムギ	羊ヶ丘/HTJ	2019-2019	なし
熱帯	湿地	美唄/BBY	2019-2021	なし
	常緑広葉林	沖縄/YNF	2019-	なし
	常緑広葉林	マレーシア/PSO	2022予定	2008-

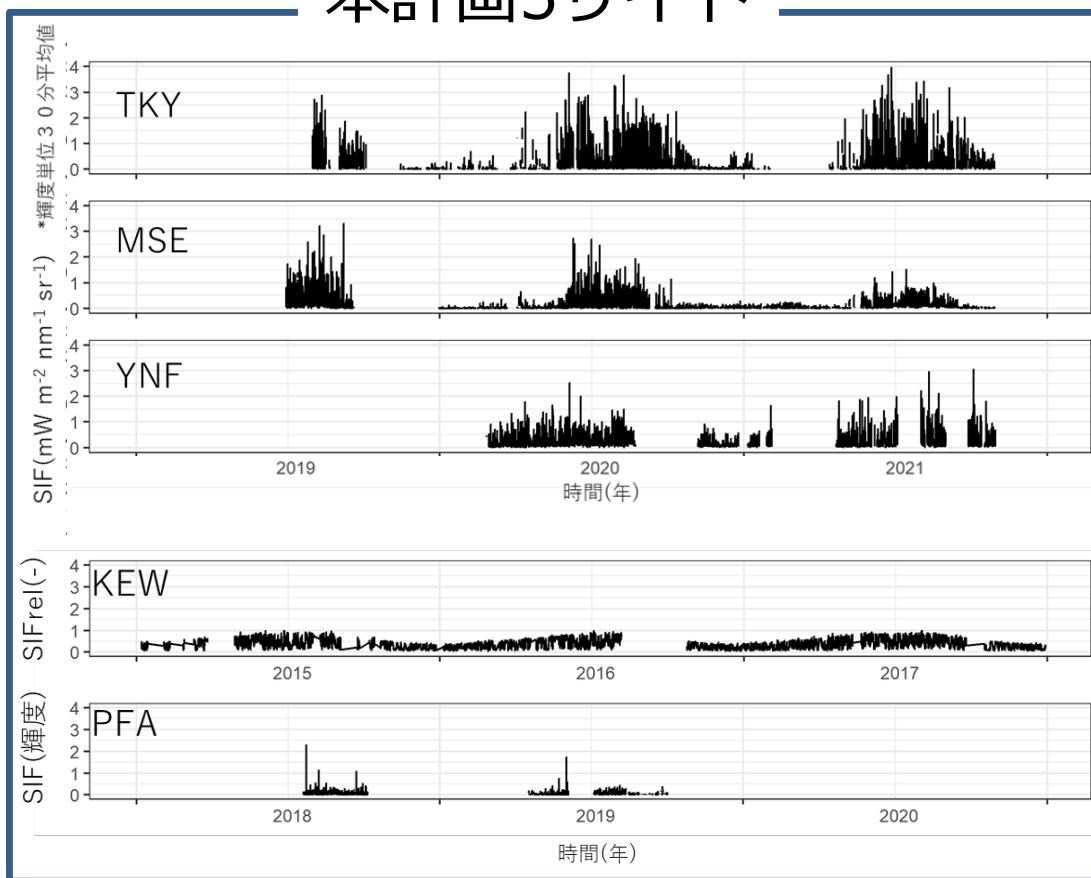
本計画： 4サイト既設 + 1サイト新設

他計画： 4サイト既設 + 1サイト予定

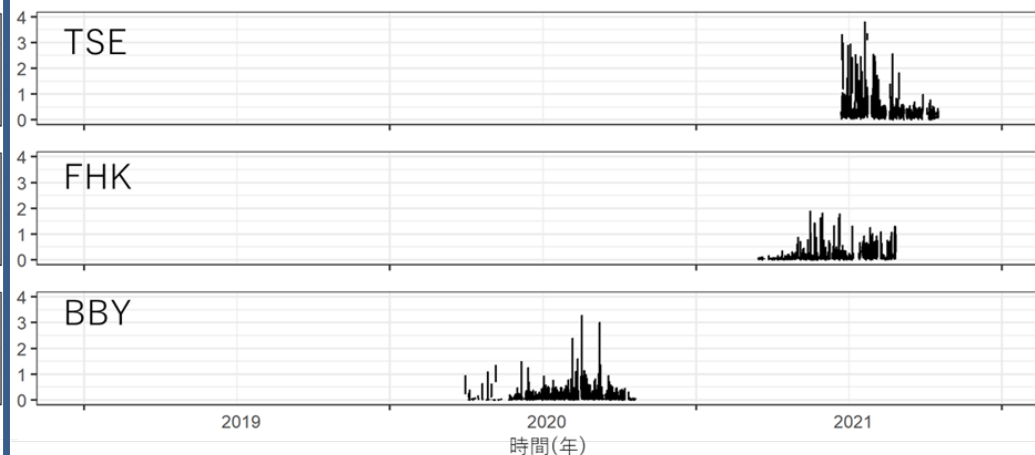
- 広く気候帯・植生タイプをカバー
- 衛星SIF/モデルの精度評価に必須データは準備できた

高分解能分光放射計による地上SIF観測データベース

本計画5サイト

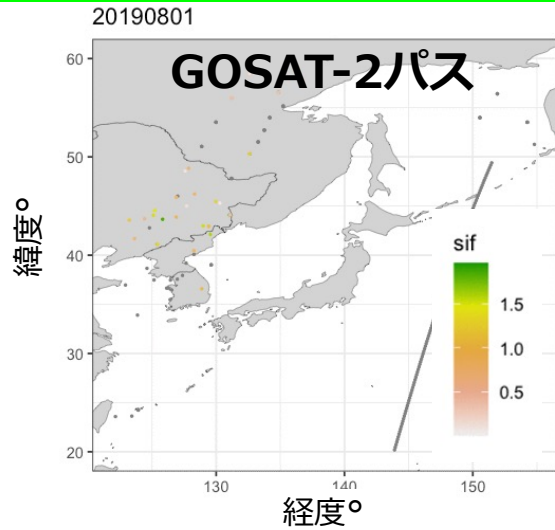


他計画サイト

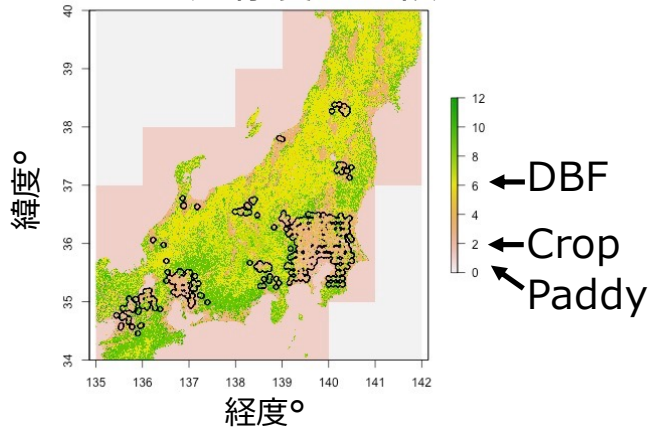


- 3年分データ蓄積 (30分値)
- 季節変動をとらえた
- 生態系の特徴が明らかに
- SIF-GPPサイト間比較可能

GOSAT-2 SIFの地上観測点における抜き出し

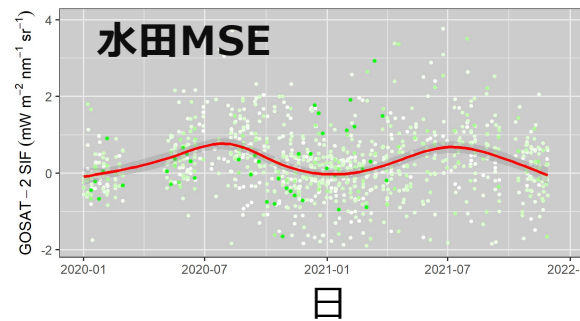
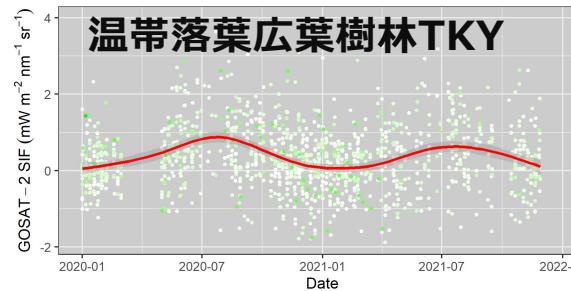
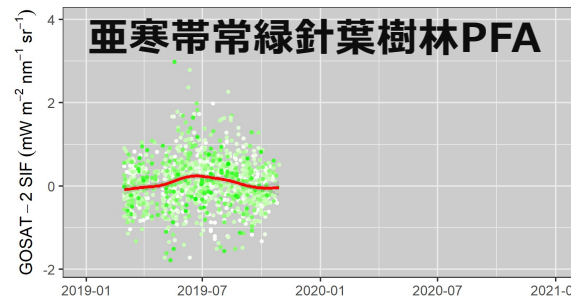


JAXA高解像度土地被覆



GOSAT-2 SIF

標的土地
被覆率

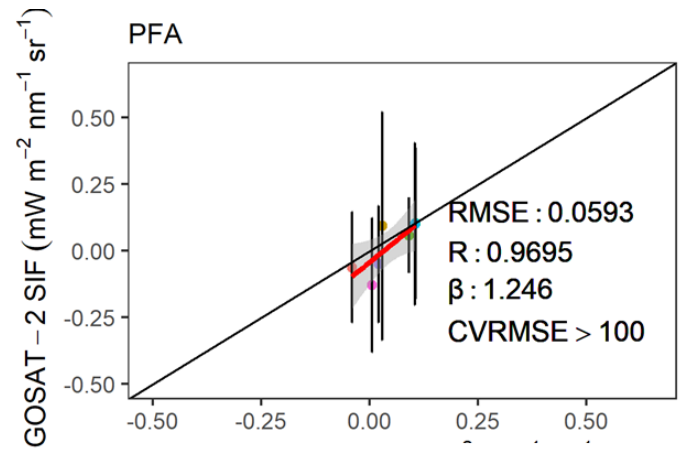


- 衛星データ点数が十分な3サイト
- 2年間の季節変化を検出し検証するためのデータサンプリング
- サイト周辺から類似の土地被覆を取得し評価

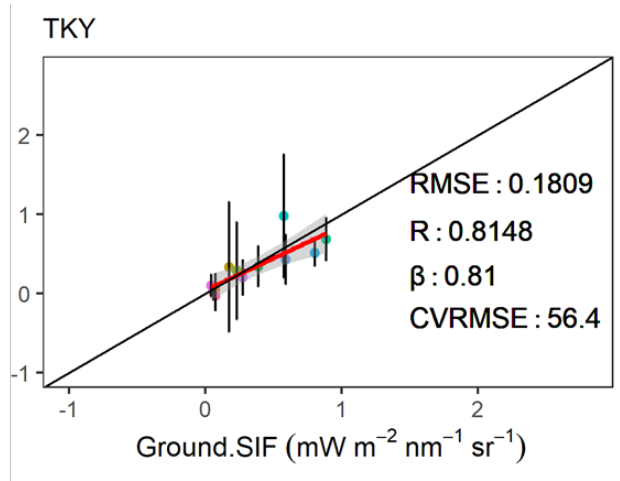
地上SIF観測によるGOSAT-2 SIFの検証(月平均値)

衛星GOSAT-2観測

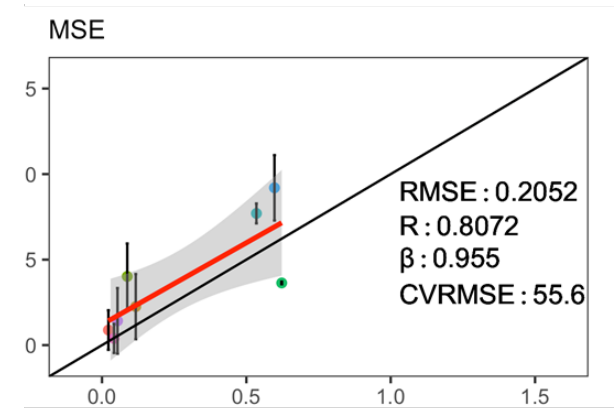
アラスカ(常緑針葉樹林)



高山(落葉広葉樹林)



真瀬(水田)



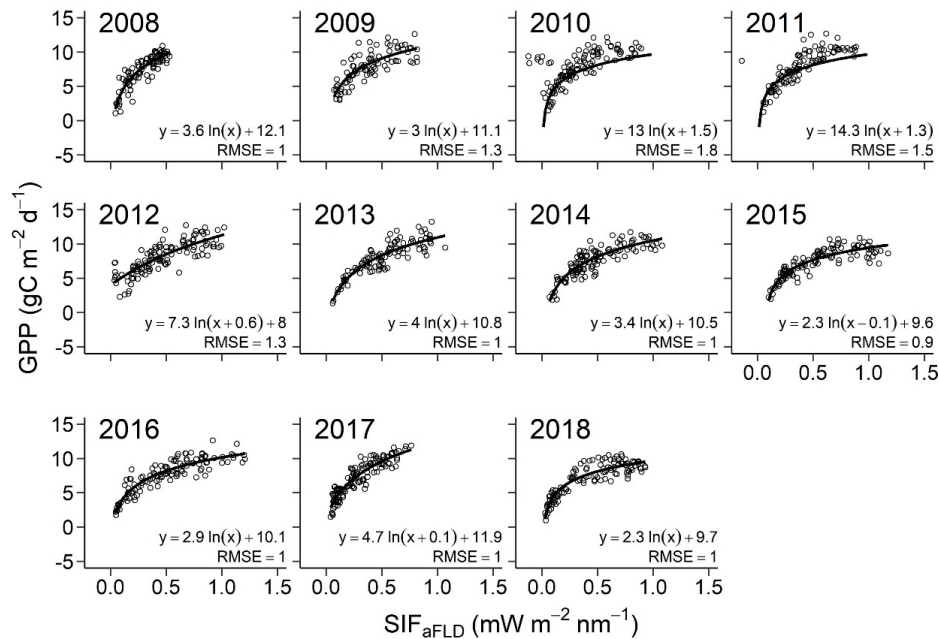
地上観測

- 地上SIFの季節変動($0-1.0 \text{ mWm}^{-2}\text{nm}^{-1}\text{sr}^{-1}$)を、GOSAT-2が検出可能
- SIF放出が小さいアラスカ亜寒帯林ではシグナル/ノイズ比が大
- ほぼ1 : 1線にのり、 $R=0.81-0.97$ → GOSAT-2観測は高い精度
- しかしながら、衛星SIF日平均値は変動が激しく、地上観測点付近データ僅少

中分解能分光放射計によるSIF推定 (TKY)

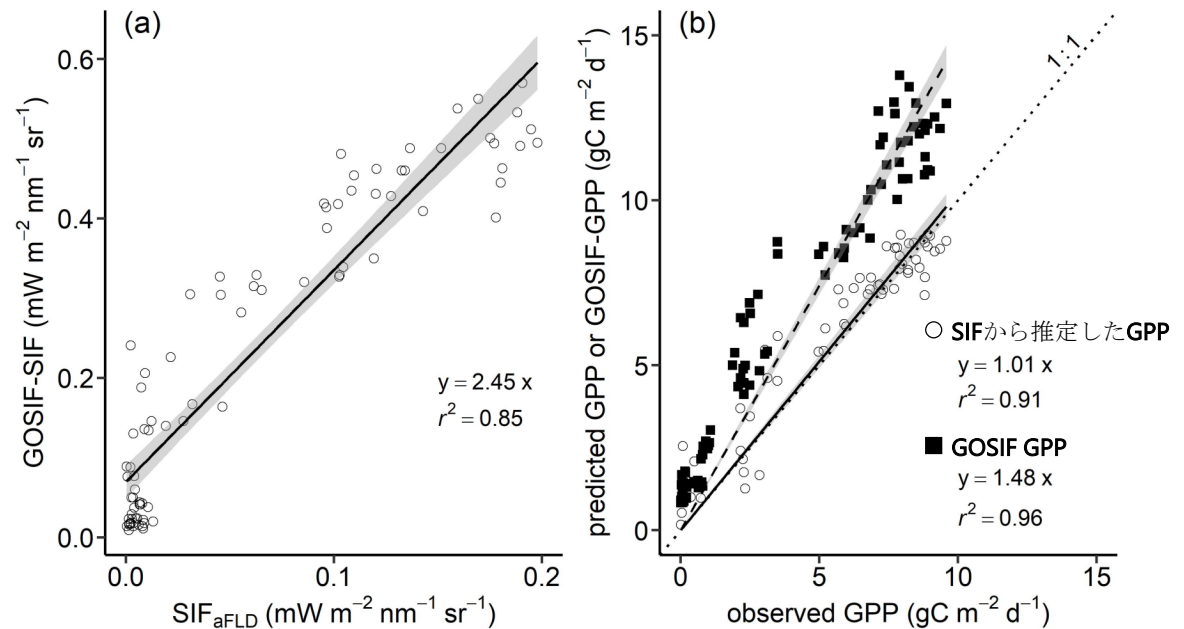
aFLD法 (Nakashima et al. 2021 *J Plant Res*)

2008~2018年のSIF – GPPの関係



(a) 地上観測SIFと衛星観測SIFの比較

(b) SIF推定GPPと衛星観測GPPの比較



・ **長期間の地上SIF観測の推定が可能** → **観測コスト低下** ・ **過去復元可能**

サブテーマ2. 光合成・蛍光・反射分光同時測定系を用いた個葉光合成推定モデルの改良

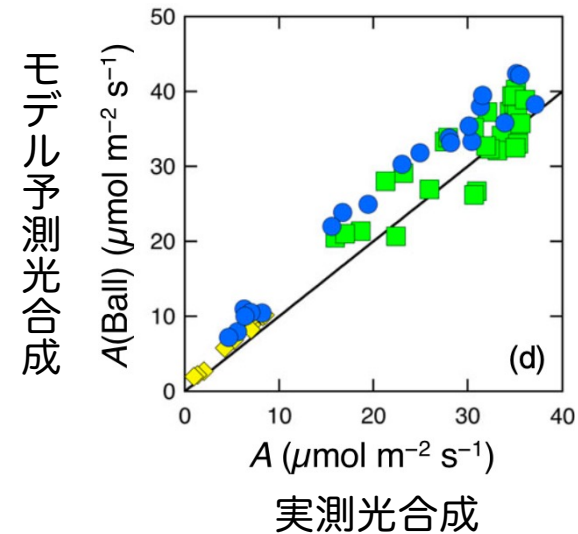
本研究以前：蛍光と光化学反射指数（PRI）から光合成速度を予測するモデルを発表

ORIGINAL ARTICLE

WILEY

Modeling leaf CO₂ assimilation and Photosystem II photochemistry from chlorophyll fluorescence and the photochemical reflectance index

Kouki Hikosaka¹ | Hibiki M. Noda²



しかし、まだ不十分な点がある

- ①他のモデルに対する優位性を示していない
- ②光化学反射指数は、色素組成や入射光角度の影響を受ける可能性があり、補正が必要かもしれない
- ③他の生育環境・他の種でもモデルが使えるのか検証する必要がある

そこで、本サブテーマでは

- ①モデルが有用であると期待される、光障害を起こした葉でのモデル適用を試みる
- ②色素組成・入射光角度の違いを補正する方法を開発する
- ③異なる生育条件（光・栄養・季節）・異なる種にモデルを適用し検証する

サブテーマ2. 光合成・蛍光・反射分光同時測定系を用いた個葉光合成推定モデルの改良

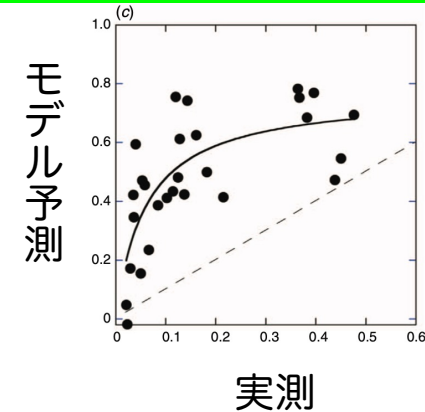
①モデルの優位性

既存のモデルと異なり、葉に強いストレスがかかった場合でも光合成の低下を予測できることを確認

Functional Plant Biology
<https://doi.org/10.1071/FP20365>

Photosynthesis, chlorophyll fluorescence and photochemical reflectance index in photoinhibited leaves

Kouki Hikosaka 



②補正法の確立

光化学反射指数 (PRI) は色素組成や光源角度の影響を受けるが、色素組成の影響は、色素組成を反映する反射指数の導入で、角度の影響は係数の導入で補正

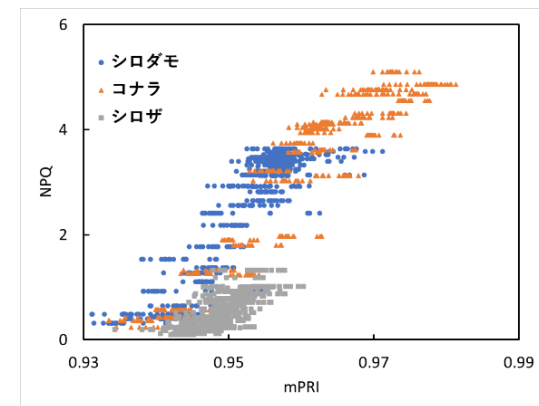
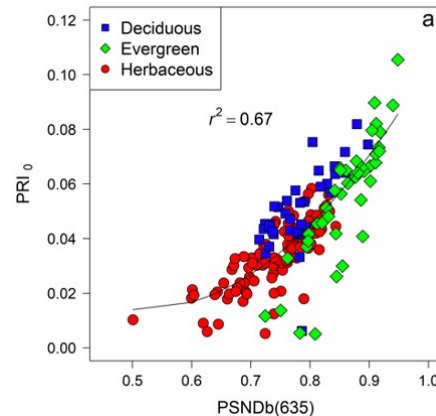
Photosynthesis Research (2021) 148:33–46
<https://doi.org/10.1007/s11120-021-00833-3>

ORIGINAL ARTICLE



Estimating leaf photosynthesis of C₃ plants grown under different environments from pigment index, photochemical reflectance index, and chlorophyll fluorescence

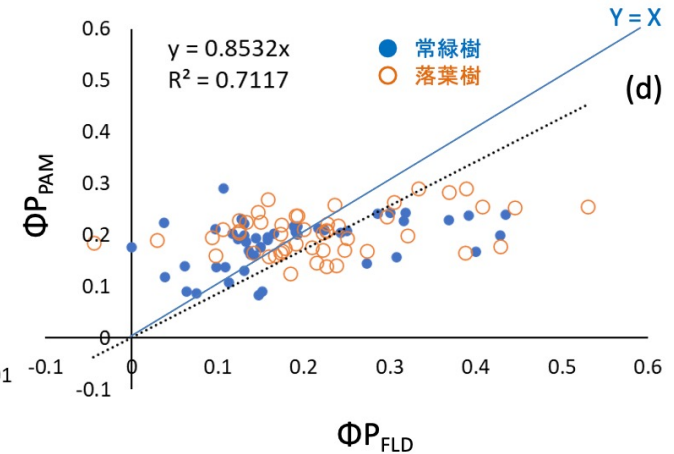
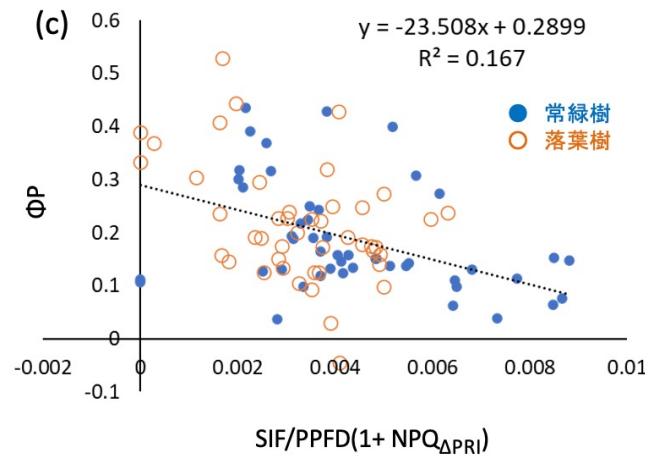
Katsuto Tsujimoto¹  · Kouki Hikosaka¹ 



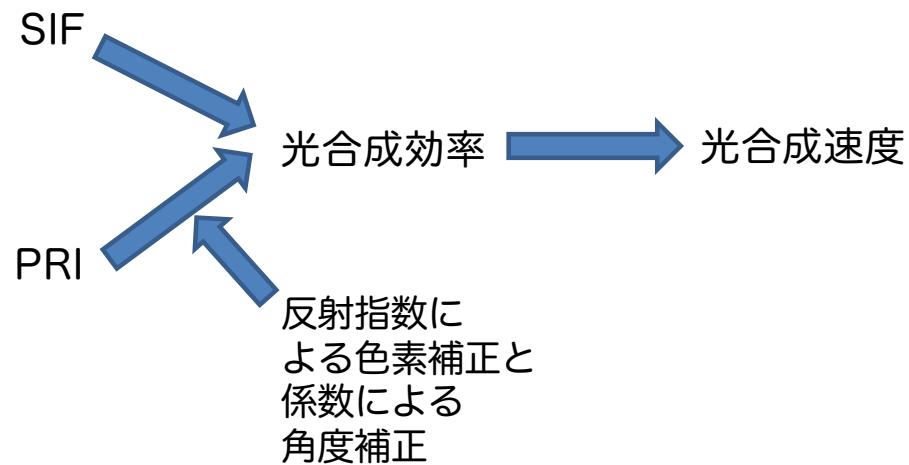
サブテーマ2. 光合成・蛍光・反射分光同時測定系を用いた個葉光合成推定モデルの改良

③異なる季節・異なる種の光合成効率を予測する

10種3時期のデータをプールし、SIFとPRIを使って光合成効率 (Φ_P) を推定することに成功



まとめ



サブテーマ3.放射モデル解析に基づく地上・衛星 SIF 観測の標準化

3次元放射伝達モデルFLiES-SIF を用いた SIF観測値の標準化

GPP推定フロー

① 観測角度の標準化

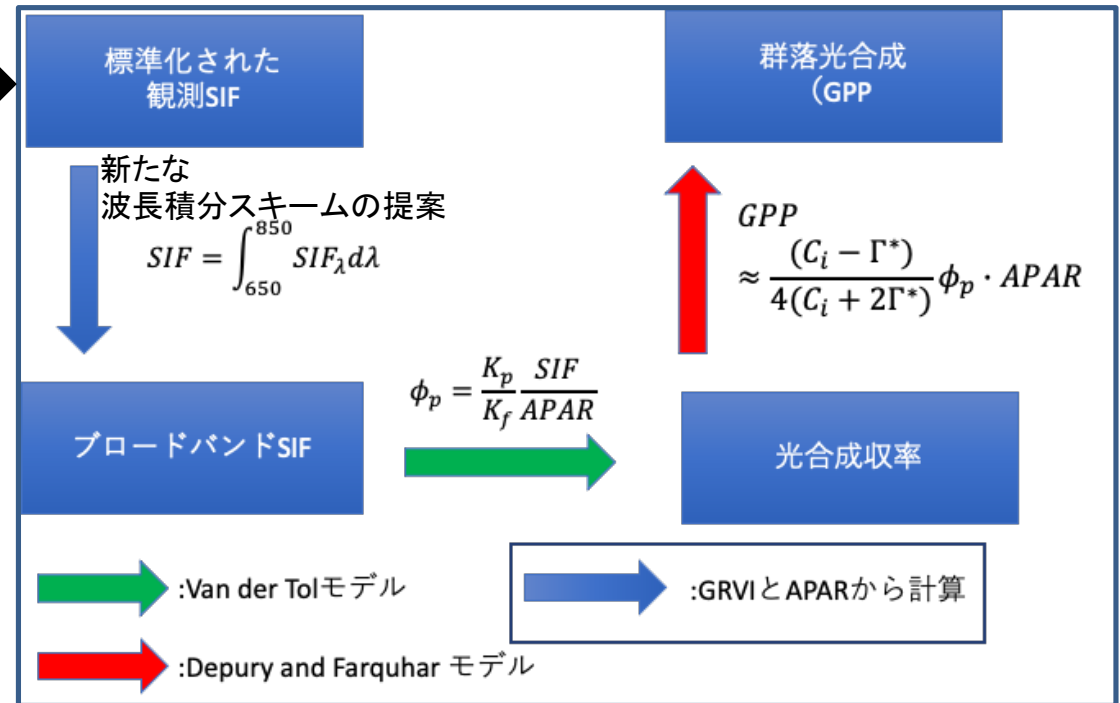
- 様々な角度で観測されているSIFを直下視の観測に標準化

② 地上SIF観測値における視野角の標準化

- 地上SIF観測値の視野に混在する観測タワーなどの影響の除去
- 地上観測で見られる半球SIF観測の狭視野角・直下視への補正

③ 観測SIFから群落内SIF総量の推定(f_{esc})

- FLiES-SIFによる高精度な f_{esc} の算出
- 先行研究(Zeng et al., 2019)で計算が難しい、春先、秋での信頼性の高い計算が可能に



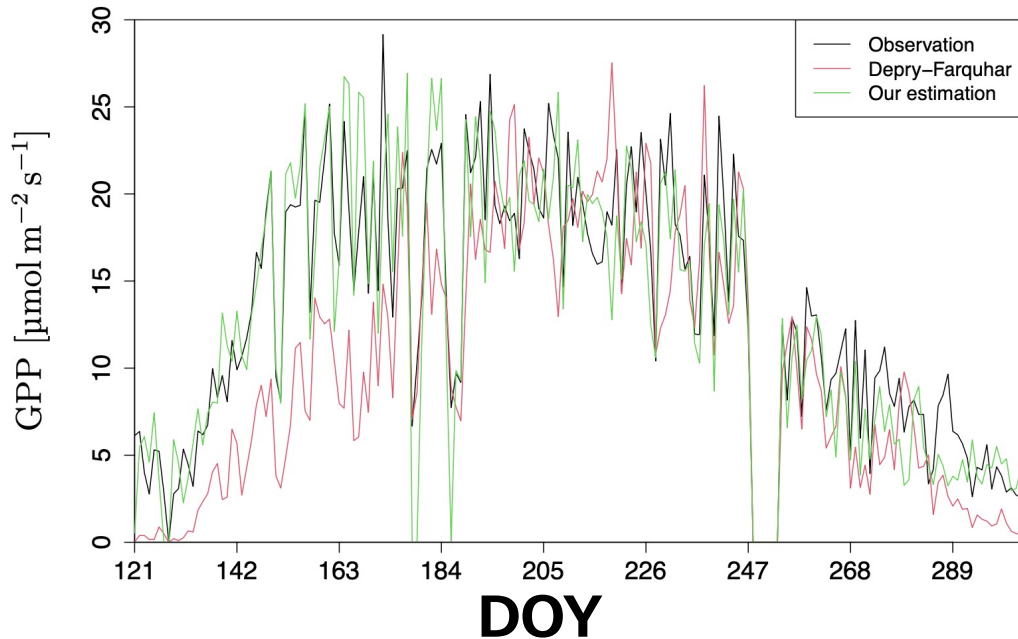
青：新たなSIFの波長積分スキームの提案

緑：Tol (2014)モデルによる光合成収率計算

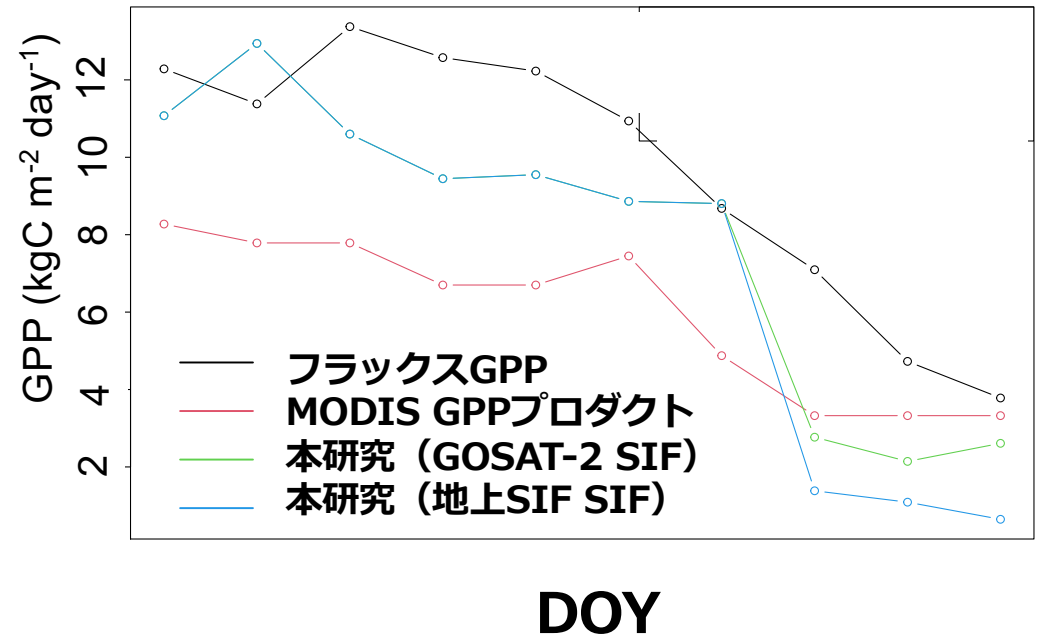
赤：De Pury and FarquharモデルによるGPP推定

地上観測サイトにおけるアルゴリズム検証

落葉広葉樹林TKY
2019年



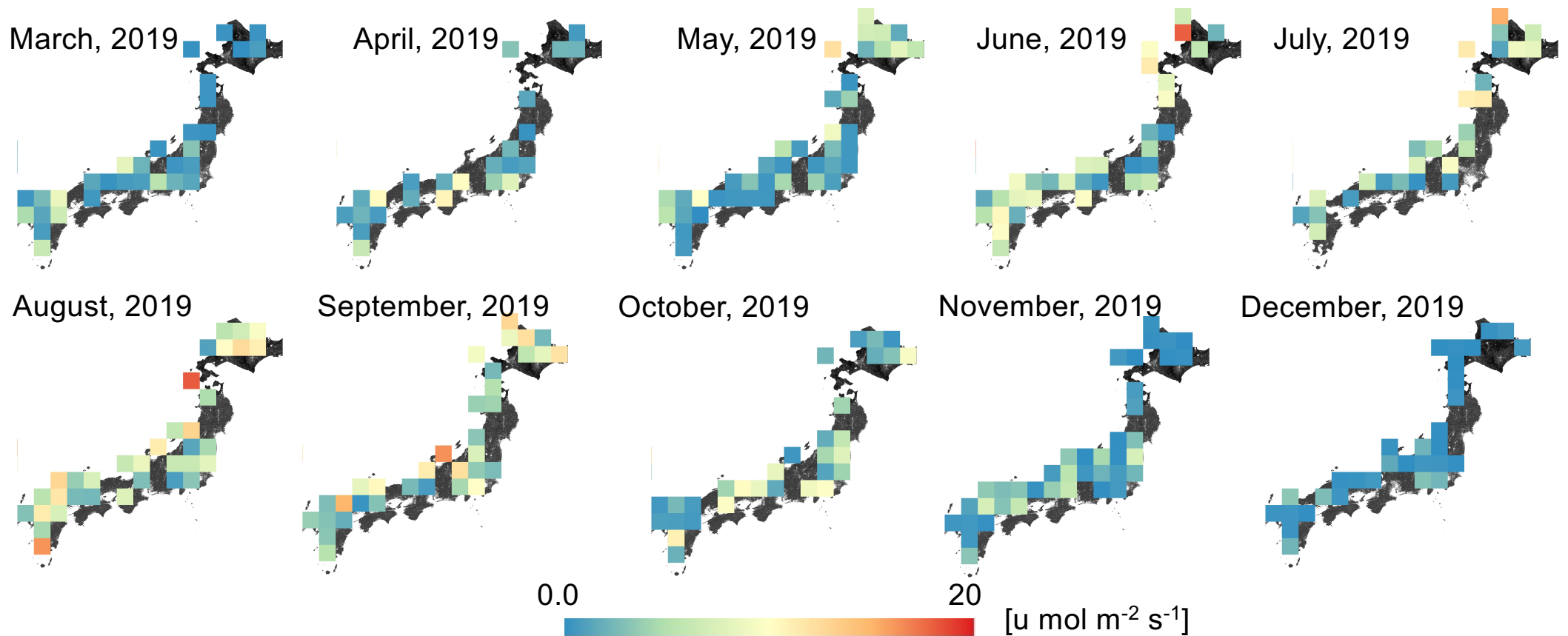
水田MSE
2019年



フラックスGPPとの比較より

- 既存GPP推定手法 (Depuy and Farquharモデル) よりも小さい誤差
- MODISの標準プロダクトであるMOD17のGPPよりも小さい誤差

GOSAT-2による日本周辺のGPP推定結果



- 春～夏、夏～秋にかけての季節変化は再現されている。
- 観測点数が少なく 1° メッシュでまとめても欠測が発生

TROPOMIによる日本周辺のGPP推定結果

March, 2019

April, 2019

May, 2019

June, 2019

July, 2019

August, 2019

September, 2019

October, 2019

November, 2019

December, 2019

0.0

20

[$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$]

- GOSAT-GW模擬データとして解析。季節変化や高い空間再現性
- 0.05° メッシュ（約5km）でも欠測なく計算可能

成果の概要（まとめ）

1. 衛星GOSAT-2 SIF検証体制の確立

- ・ 長期的・多地点で検証するための地上観測ネットワークとデータベースを構築
- ・ これにより国内外の同様衛星の検証も可能になり、世界の生態系光合成量（＝生態系CO₂吸収量）の高精度な推定に貢献可能

2. 衛星GOSAT-2 SIFによる光合成量推定の標準化

- ・ FLiES-SIFは、地上2ヶ所での観測SIFおよび生態系光合成量を良く再現
- ・ 日本周辺において、GOSAT-2よりも空間解像度が高い後継機GOSAT-GWによるSIFによって、より詳細に生態系光合成量の推定が可能

環境政策等への貢献

衛星SIF観測を利用して、広域な生態系光合成量を推定可能なアルゴリズムを提案した。本手法は、2023年頃打ち上げが検討されているGOSAT-GWのSIFデータにも応用可能であり、高精度なGPPプロダクト作成への貢献が期待される。

成果の発表状況

論文発表（査読あり7件）

- Nakashima, Kato, Morozumi et al., 2021, *J Plant Res* (IF=2.63; 中分解能スペクトルからの新SIF計算法)
- Hikosaka, 2021, *Functional Plant Biology* (IF=3.10; 個葉モデル)
- Hikosaka, Tsujimoto, 2021, *J Plant Res* (IF=2.63; 個葉モデル)
- Kohzuma, Tamaki, Hikosaka, 2021, *J Plant Res* (IF=2.63; 個葉モデル)
- Hikosaka, Sonoike, Hikosaka, 2021, *J Plant Res* (IF=2.63; 個葉モデル)
- Tsujimoto, Hikosaka, 2021, *Photosyn Res* (IF=3.57; 個葉モデル)
- Sakai, Kobayashi, Kato, 2020, *Geoscientific Model Development* (IF=6.15; FLiES-SIFモデル記述)

投稿中（3件）

- Morozumi, Kato, Kobayashi et al., *Agr. For. Met.* (再投稿中: IF=5.7; FLiES-SIFによるコムギSIFの再現)
- Buareal, Kato, Morozumi et al., *Agr. For. Met.* (再投稿中: IF=5.7; 水田SIF観測)
- Morozumi, Kato, et al., *Remote Sen. Env.* (投稿中: IF=10.2; 落葉広葉林SIFの多層観測)

知的財産権（1件）

Kobayashi & Sakai, 2019. FLiES-SIF version 1.0

Zenodo. <http://doi.org/10.5281/zenodo.3584099>

*開発コードのパブリックライセンス取得しZenodo公開

その他

査読付き論文に準ずる成果発表	7件
その他誌上発表（査読なし）	0件
口頭発表（学会等）	36件
「国民との科学・技術対話」の実施	5件
マスコミ等への公表・報道等	0件
本研究に関連する受賞	2件