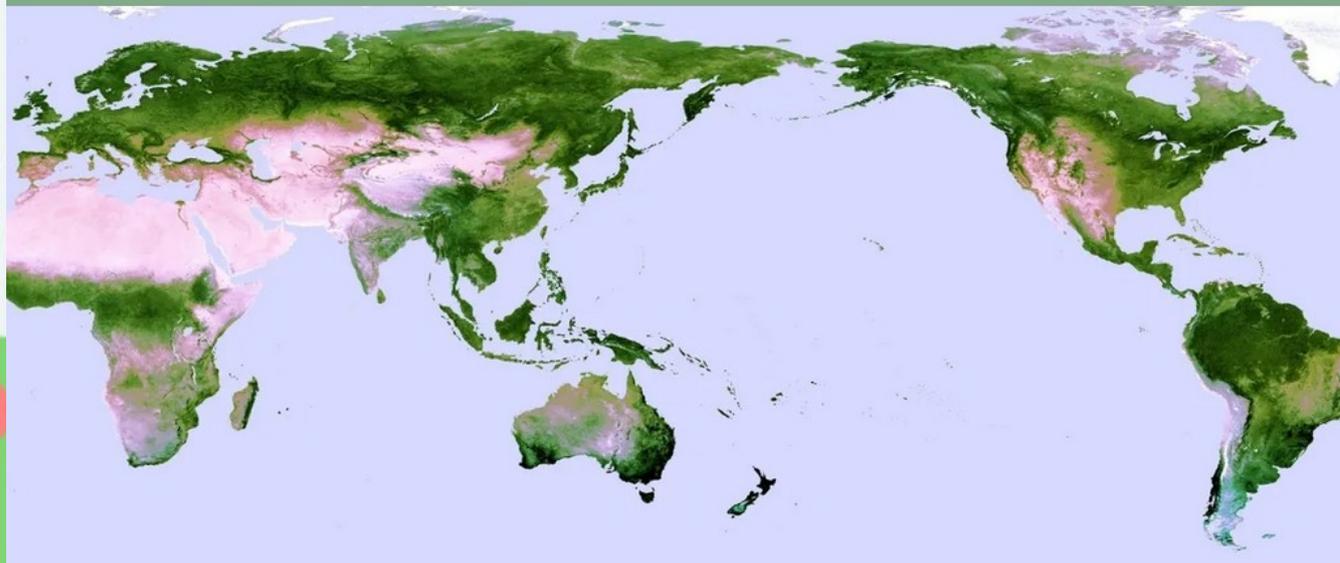
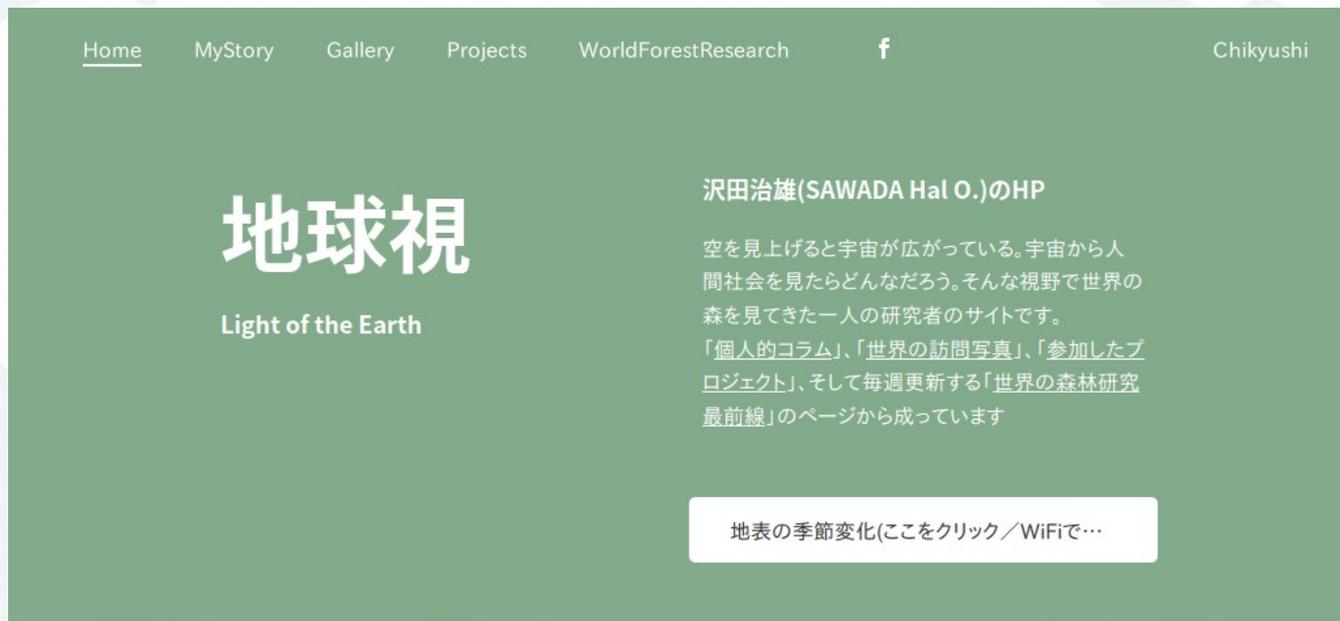


# リモセンで観る世界の森林状況



沢田治雄

東京大学  
名誉教授

# Word Cloudで一瞥する 世界の森林研究最前線

・最近の世界の森林研究や地球環境研究などを集め、紹介文や論文からワードクラウド（Word Cloud）画像を作って可視化しています。内容を一瞥できます。

・本文は各ワードクラウド画像の下に記した引用元でご参照下さい。

（応用リモートセンシングなど個人的な関心記事も一部含めています。

・また、Word Cloudは、GoogleのColaboratoryを使い、Pythonのwordcloudで自作していますが、詳細は最後のブロックに掲載しています）



# 世界の森林問題とは？

## 現象

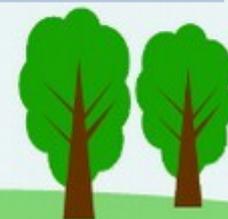
- 森林減少
  - 伐採
  - 災害
- 森林劣化
  - 伐採・採取
  - 病虫害

## 影響

- 機能消失
- 機能劣化
- 生物多様性
  
- 生産価値
- 地域環境
- 地球環境

## 対策

- 森林管理
- 人材育成
- コミュニティ形成
  
- 社会的理解
- REDD+



# 持続的開発目標(SDGs)を支える森林

## SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS



# 全世界の森林情報



# FRA2020：世界の森林資源調査

## FAOのリモセンの目的

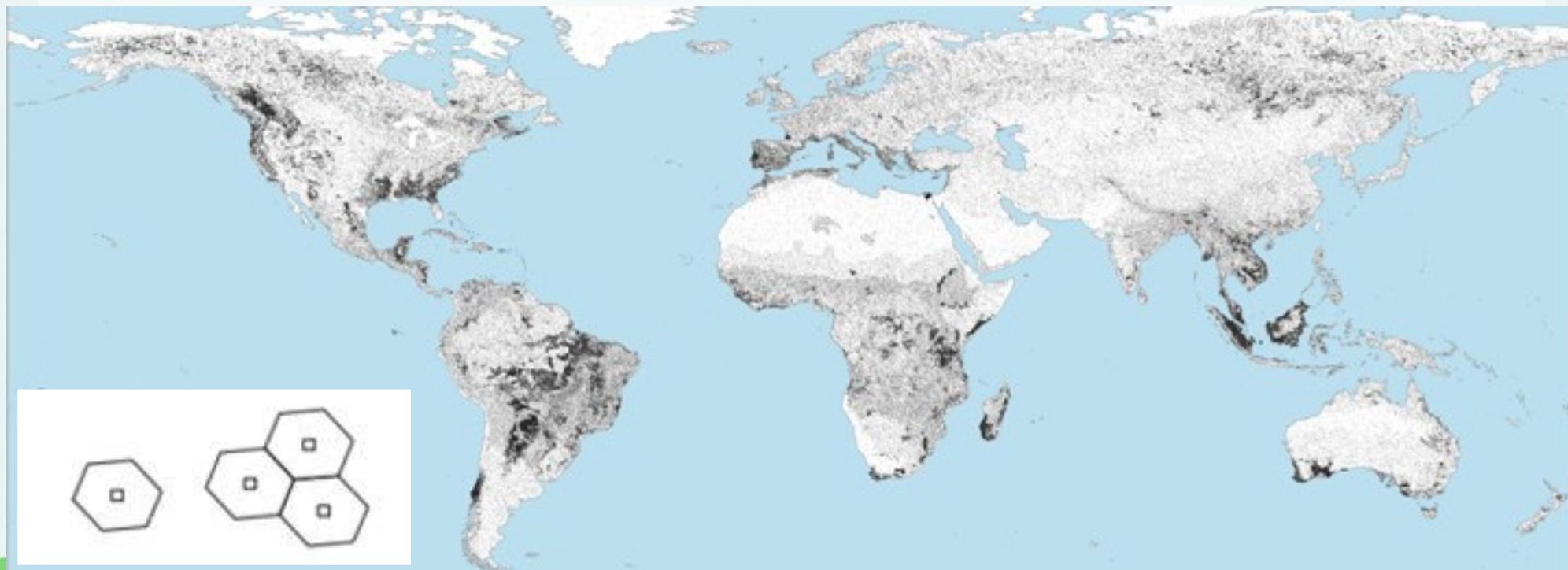
- 2018年の土地利用と土地被覆面積
- 2000～2010年および2010～2018年の期間の土地利用面積と土地被覆の変化
- 森林破壊要因特定
- リモートセンシングにおける国の能力育成
- FRA RSSエキスパートのグローバルネットワーク構築



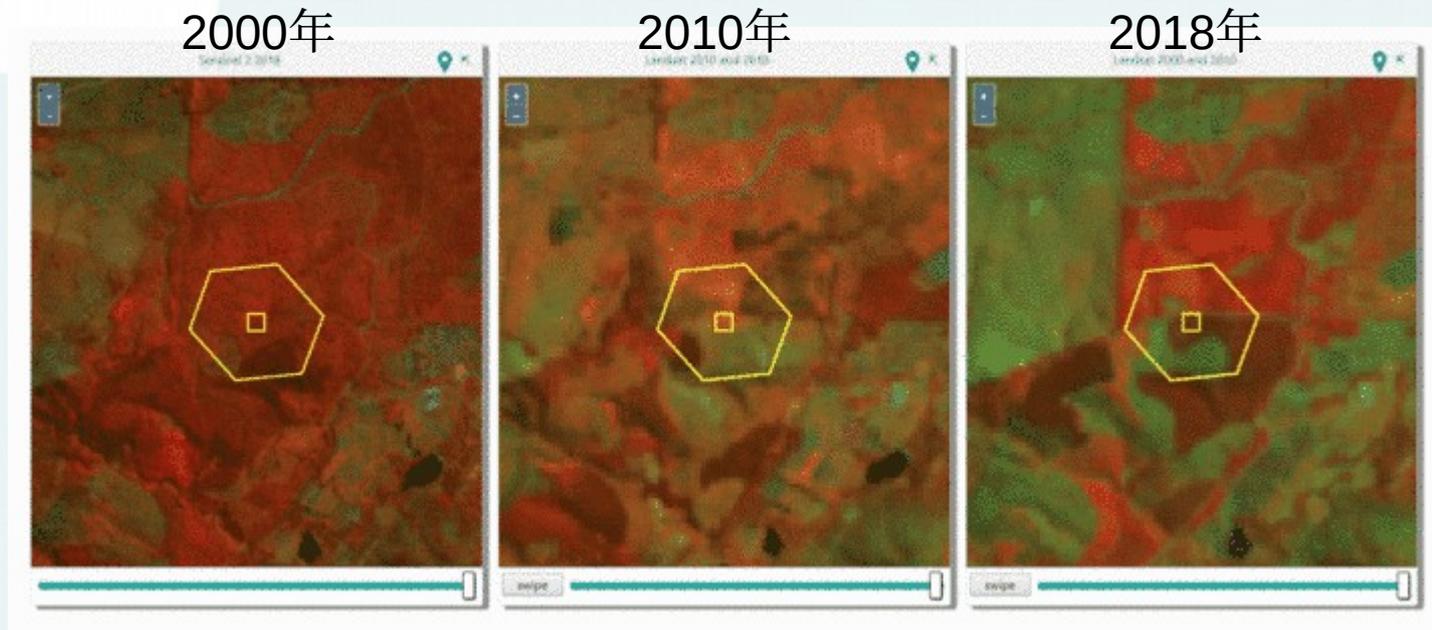
# FRA2020 サンプルリング

FRA 2020 RSSは森林地域の変化に関する信頼できる統計を導き出すことを目的としたサンプルリング設計に基づいている。サンプルは等面積の六角形グリッドから描画され、80階層の層化ランダムサンプルリングにより、森林面積の変化の推定値の不確実性を減らしている。

この地図は、世界中の六角形（40ヘクタール）と重心（1ヘクタール）から選択された合計約43万箇所のリモートセンシングサンプルを示す。



# FRA2020の衛星画像解析



各国は、FAOがNASAとGoogleと共同開発したCollect Earth オンラインプラットフォームを含むリモートセンシングの実践的研修に国の専門家を参加させる。

国の専門家によって収集・解釈されたデータは、FAOの品質管理を受け、サンプルの10%程度が外部専門家によって再確認される

# 熱帶林問題



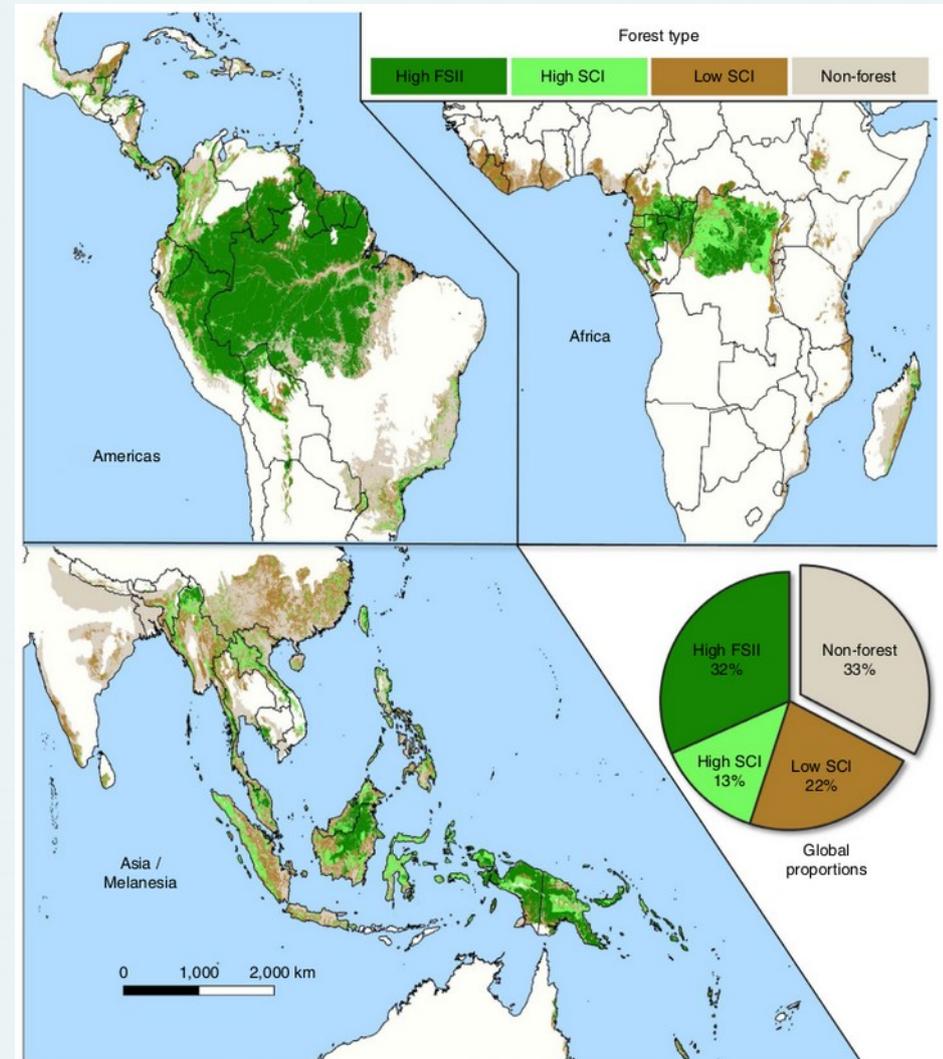


# 熱帯林の構造状態指数 (SCI)

衛星衛星データを使用して、森林の林冠だけでなく、森林の3次元の構造状態を推定

Google Earth Enginenなどの非常に強力なコンピューティングシステムを組み合わせ、ほぼ地球規模で熱帯林の品質のマッピングを可能にした。

利用可能な最高の地球観測データを統合し、熱帯林の変化状態をマッピングするデータセットを作成した。その結果、最高品質の熱帯林であるのに、正規の保護林に指定されている森林は6.5%にすぎないことを見出した。



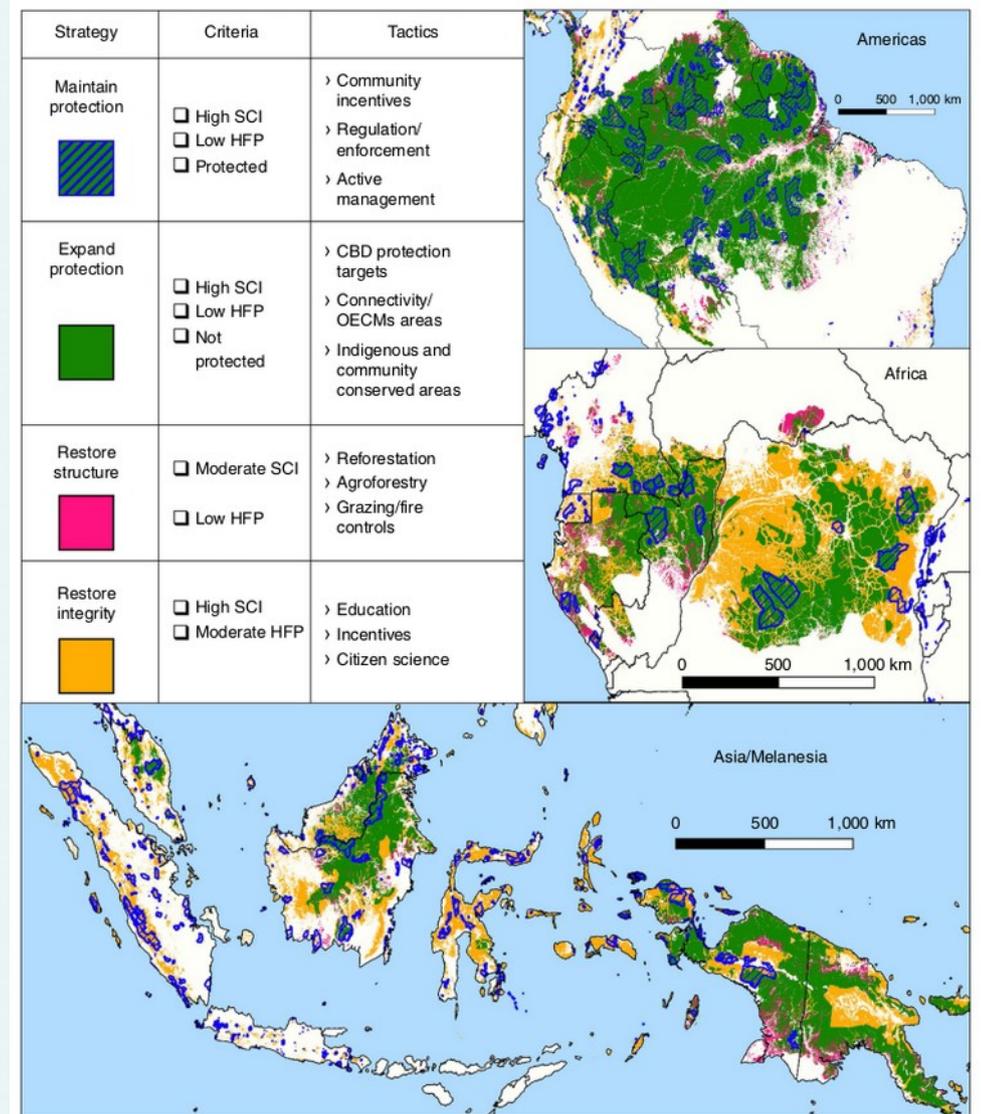
SCI: Structural Condition Index)

# 4つの戦略の提言

ビッグデータ革命が進化し続けるにつれ、リモートセンシングで計測されたデータを統合して、森林生態系全体の構造、機能、構成をマッピングすることを可能にする。

結果として生じる生態学的に整合性のとれた指標は、国際社会が地球規模の生態学的変化を監視・評価するために使用する「必須の生物多様性変数」として利用推進を図る。

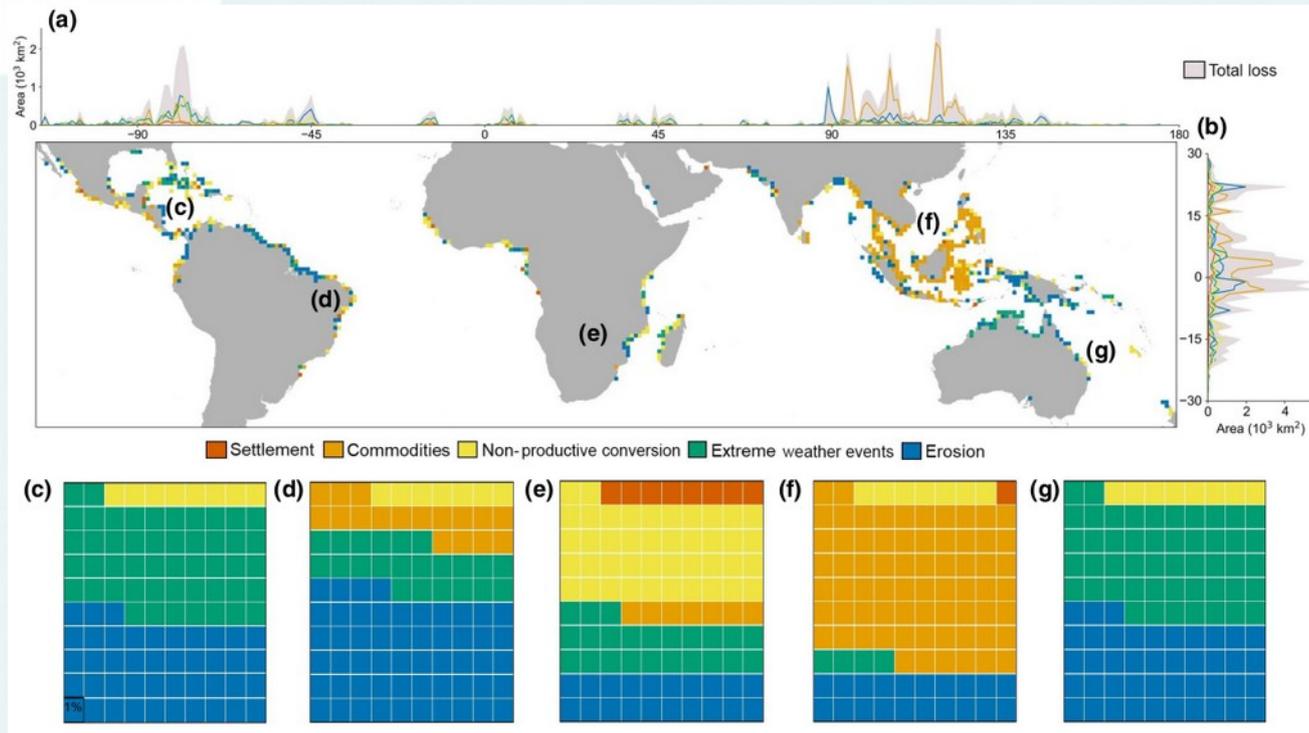
そして、特定の森林を優先的に保護・回復すべき、構造、機能、構成の状態を生態学的整合性の堅牢化により明確化して、提言する



(HFP: Human Footprint Index)



# マングローブ林の消失とその要因



- 要因カテゴリ
- 1)居住地
  - 2)農業・養殖
  - 3)非生産的転換
  - 4)異常気象
  - 5)浸食

Landsat 5、7、8の画像を使用した機械学習アルゴリズムで、2000年から2016年の間にマングローブの損失の高解像度マップを作成した。その結果マングローブ林の約1300平方マイル（全世界のマングローブ面積の約2パーセント）が失われていた。消失面積の62%は、主に農業と水産養殖による人為的原因によるもので、残りは浸食や異常気象などの自然の原因によるものであった。



# マングローブ林消失要因の傾向

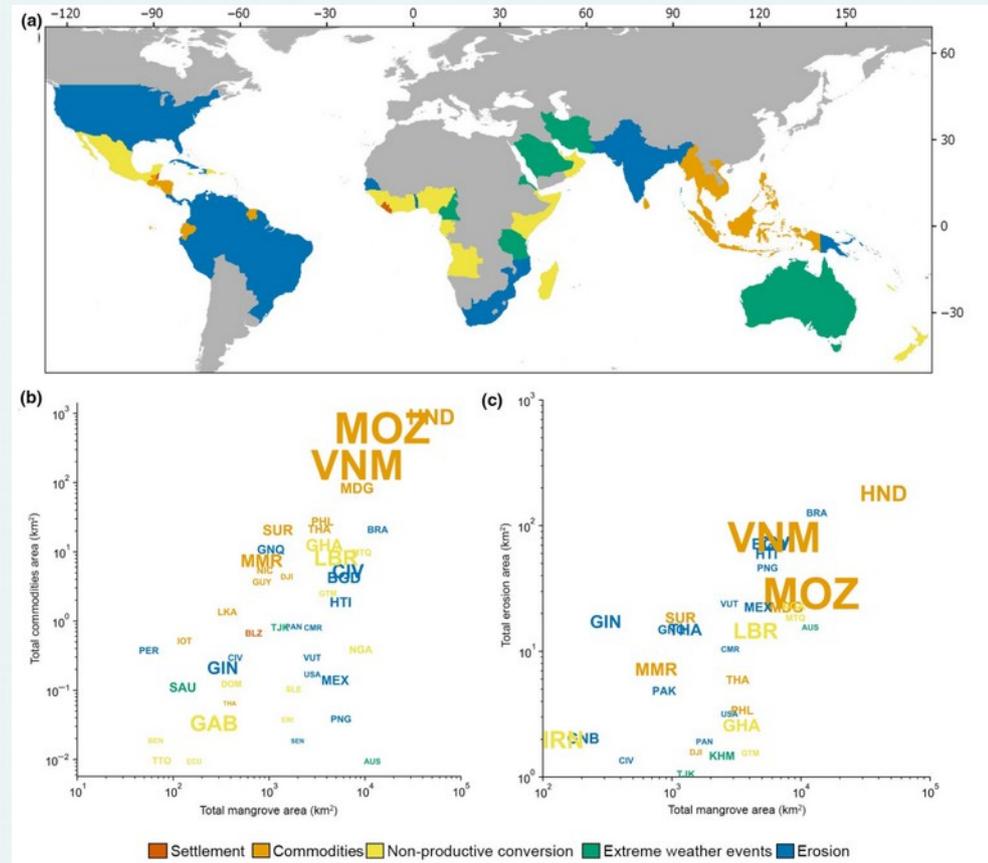
人間活動がマングローブ林消失の主要因だったが、2000年以降減少している。

現在の消失の主要因は、利用可能な生き生きとしたマングローブ林の欠如と効果的な保全イニシアチブの不足である。

マングローブ林の将来の持続可能性は、異常気象と海洋プロセスの激化など地球規模の要因を考慮しなければならない。

個々の損失改善には、過去と現在のストレスを明らかにし、より多くの情報に基づいた効果的な管理作業を支援する必要がある。

人為的損失と将来の気候による損失の考慮は不可欠である。



(Liza Goldberg et al., 2020)



# 自然災害

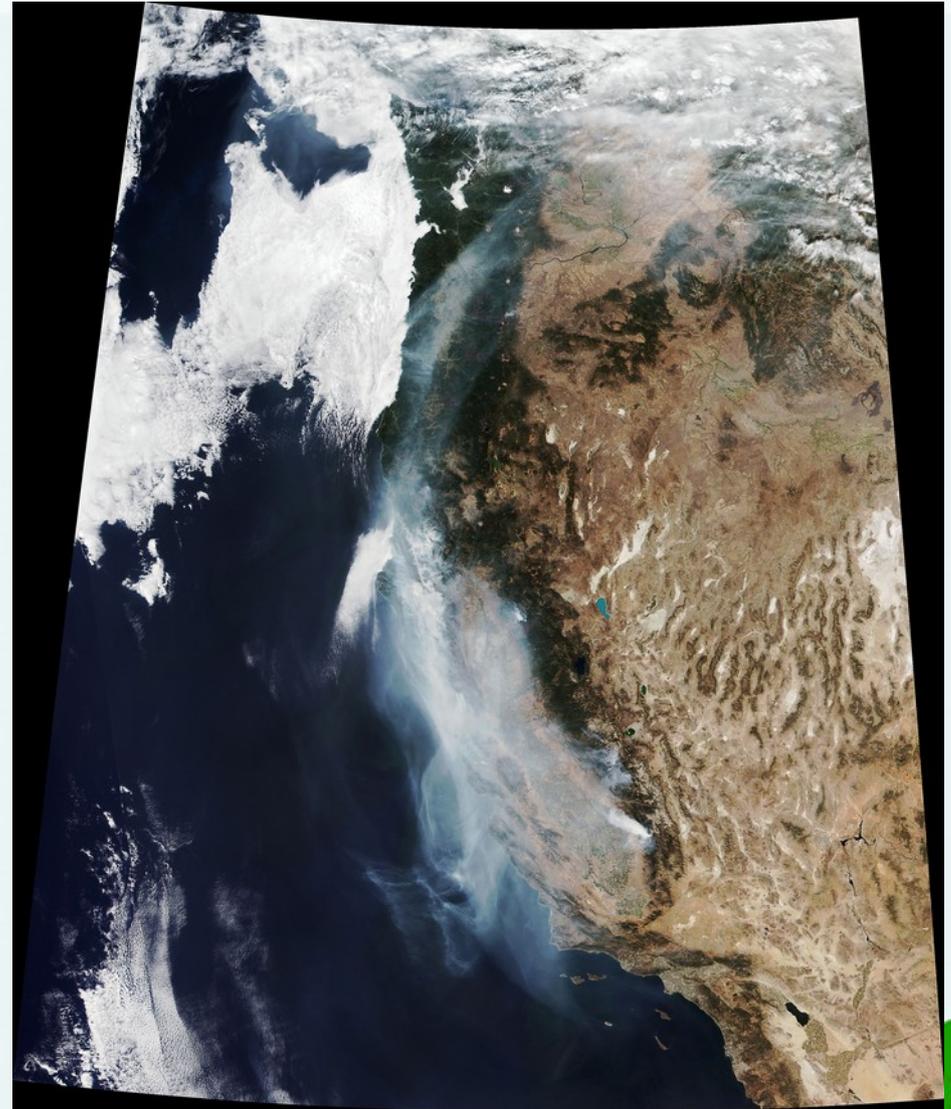


# 森林火災とリモセン

2020.10.1  
NOAA-20-VIIRS  
(Visible Infrared Imaging  
Radiometer Suite)

Cal Fireの報告:

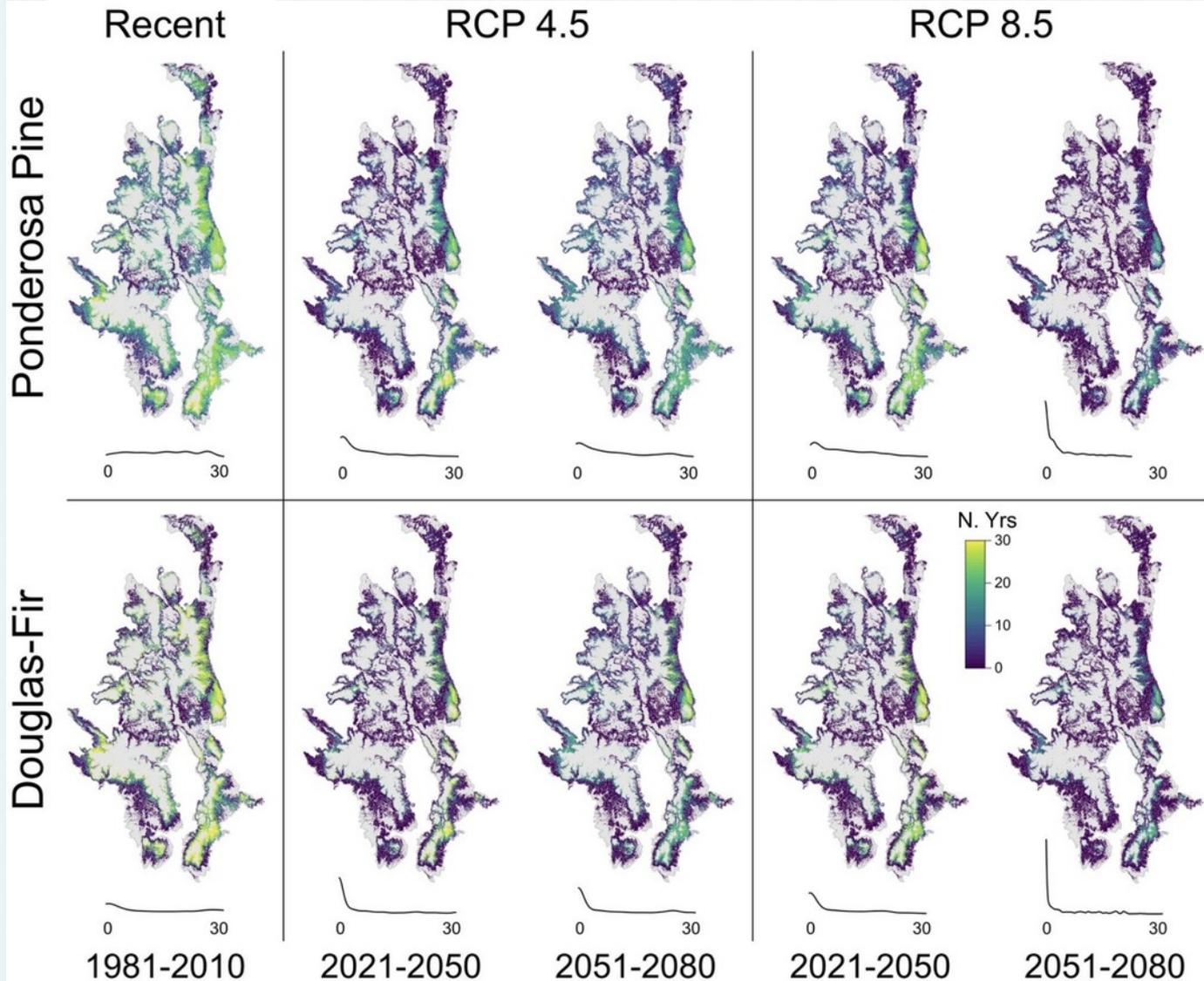
- カリフォルニアで2020年にすでに150万ha以上が被災
- 8000以上の建造物に延焼
- 少なくとも31人が死亡
- 10月2日現在、5万人以上が避難指示を受けている





# 火災後の稚樹数の変動予測

## ロッキー南部の自然生態系



IPCC 第5次評価報告書における  
RCPシナリオとは

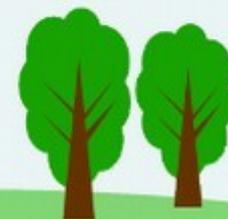
RCP...Representative Concentration Pathways (代表濃度経路シナリオ)

略称	シナリオ (予測) のタイプ
RCP 2.6	低位安定化シナリオ (世紀末の放射強制力 2.6W/m <sup>2</sup> ) 将来の気温上昇を 2°C以下に抑えるという目標のもとに 開発された排出量の最も低いシナリオ
RCP 4.5	中位安定化シナリオ (世紀末の放射強制力 4.5W/m <sup>2</sup> )
RCP 6.0	高位安定化シナリオ (世紀末の放射強制力 6.0W/m <sup>2</sup> )
RCP 8.5	高位参照シナリオ (世紀末の放射強制力 8.5W/m <sup>2</sup> ) 2100年における温室効果ガス排出量の 最大排出量に相当するシナリオ

出典: IPCC第5次評価報告書および(独)国立環境研究所 地球環境研究センターニュースVol. 16をもとにJCOCA作成

(Kyle C. Rodman,  
et al., 2020)

空間分解能：60m



# 熱帯林における落雷の影響

熱帯地域で年に1億回以上発生する落雷は、森林に大きな影響を与えている。

落雷が毎年約8億2300万本の熱帯樹木を損傷すると推定された。

およそ4分の1の木(多くは大木)が枯死している。



(Evan M. Gora, et al., 200723092749)



# ヨーロッパの森林問題



# 衛星画像が示すヨーロッパ森林状態の変化

林冠の”非うっ閉部”の高解像度マップを作成した。

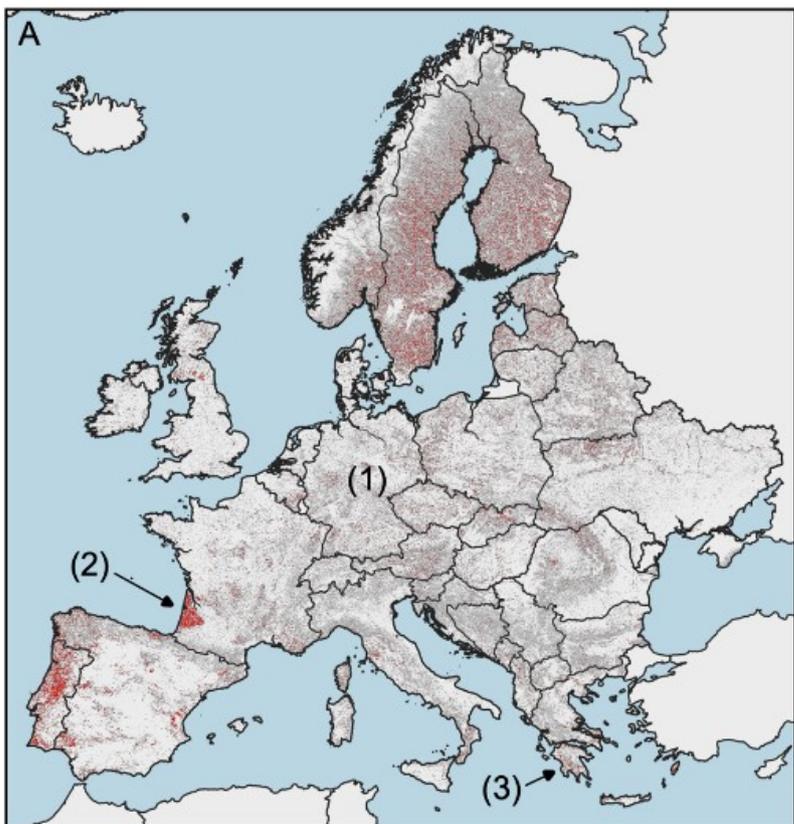
3万枚以上の衛星画像を分析し、3600万箇所以上で、大きな木が若木に生育場所を譲ったことを捕らえた。

これは、30年間で、ヨーロッパで17%の林冠が失われたことに相当する



(Technical University of Munich, 200915105951)

# 1986-2016年ヨーロッパの森林開発



A) Disturbance occurrence

- Disturbed forest
- Undisturbed forest

B) Disturbance year

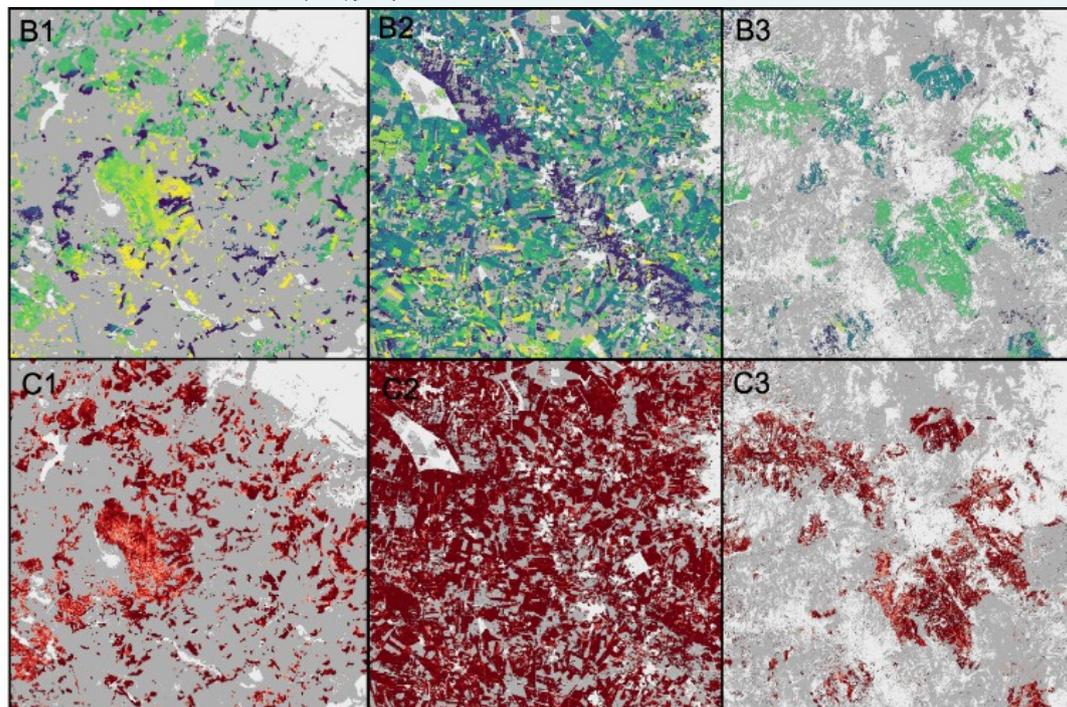
- 1986
- 1994
- 2002
- 2010
- 2018

C) Disturbance severity

- 0.00
- 0.25
- 0.50
- 0.75
- 1.00

パネルB：被災年／パネルC：深刻度

- 1) ハルツ国立公園（ドイツ）内および周辺でのカブトムシの発生。
- 2) ガスコーニュ（フランス）のプランテーションフォレスト。
- 3) ペロポネソス半島（ギリシャ）での火災



ヨーロッパ全体での被害発生

# 小さな面積にも注目

## 林冠開口部の国別特徴

スウェーデン：最大（平均約2ヘクタール）

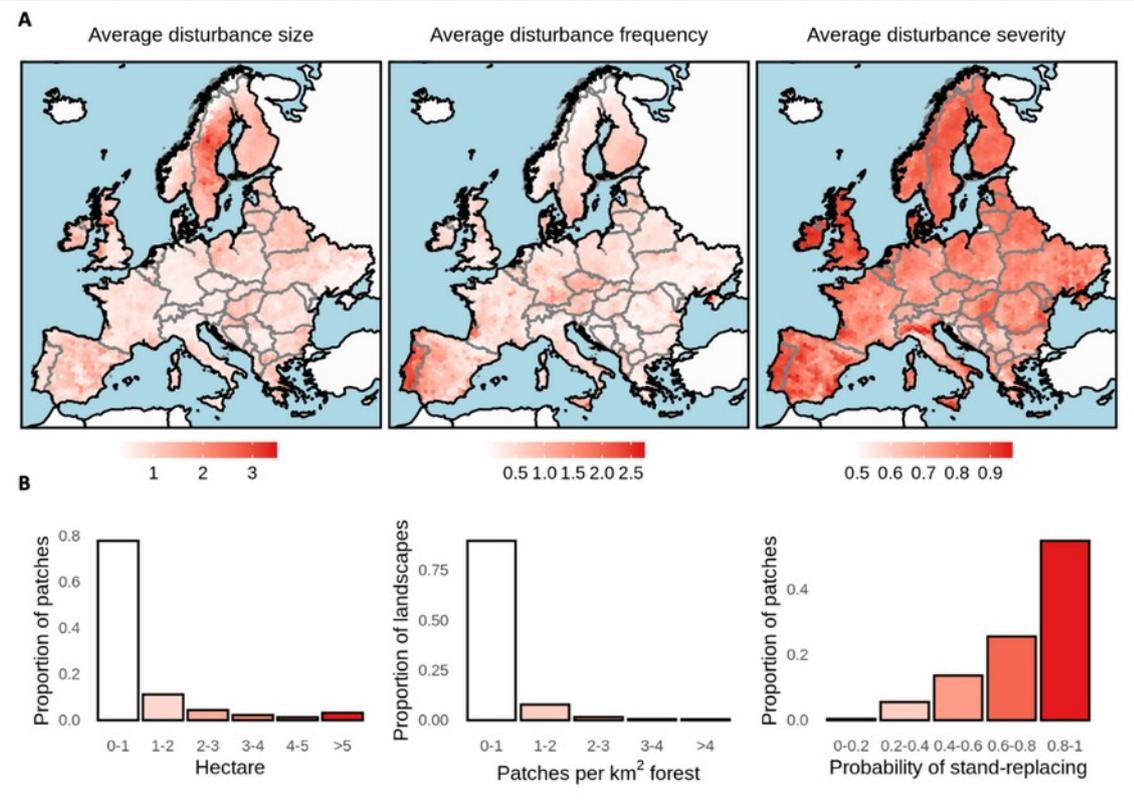
ポルトガル：最大数

スイス：最小（平均0.6ヘクタール）

ドイツ：平均0.7ヘクタール

イタリア：平均0.75ヘクタール

スペイン：最大の開口部、2012年に1回の火災で17,000ヘクタールが焼失



**LANDSATの空間分解能では粗い。**

--> **国別対策ではさらに高分解能が必要**

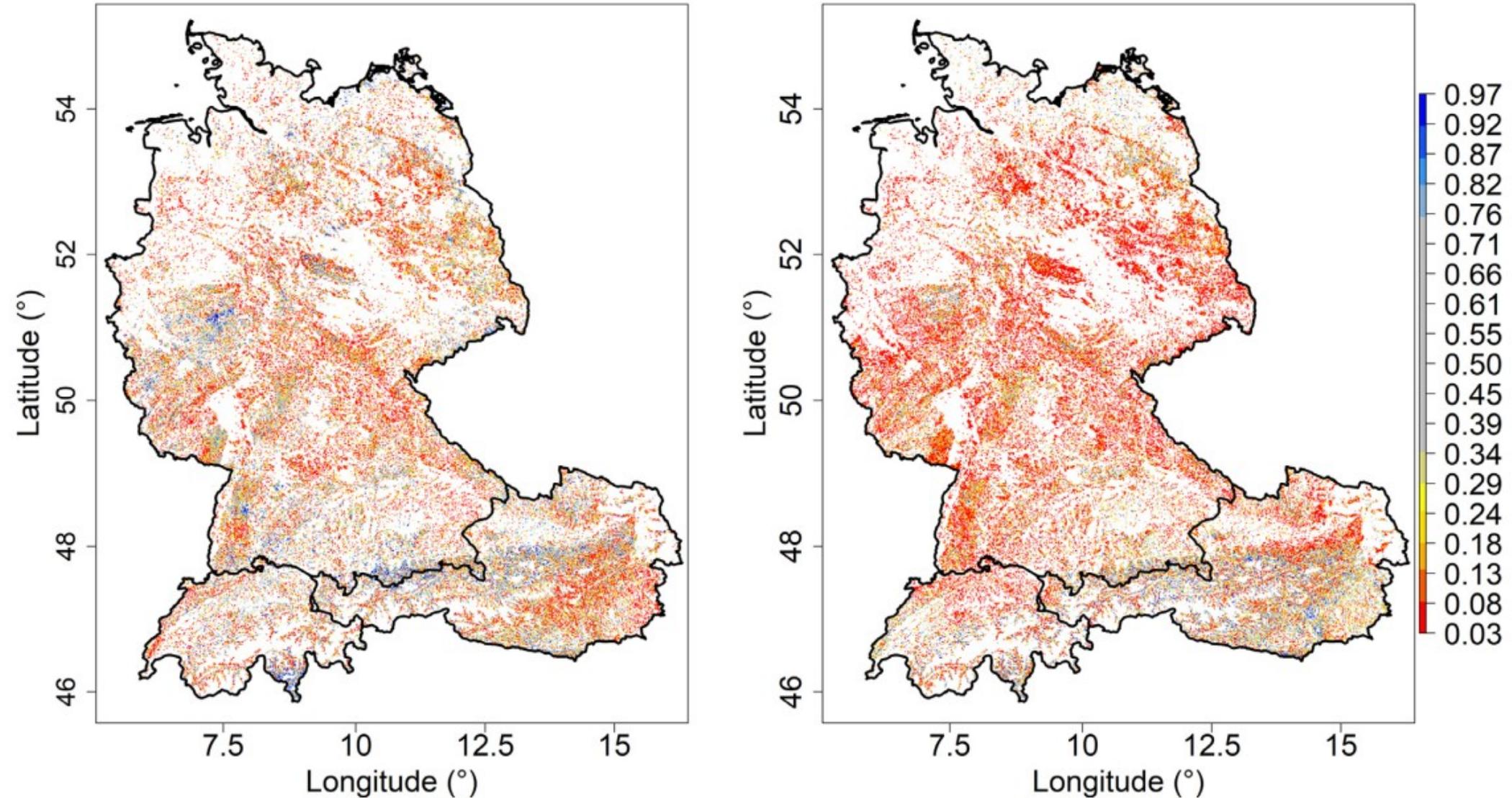




# NDVIの比較 (2003年と2018年)

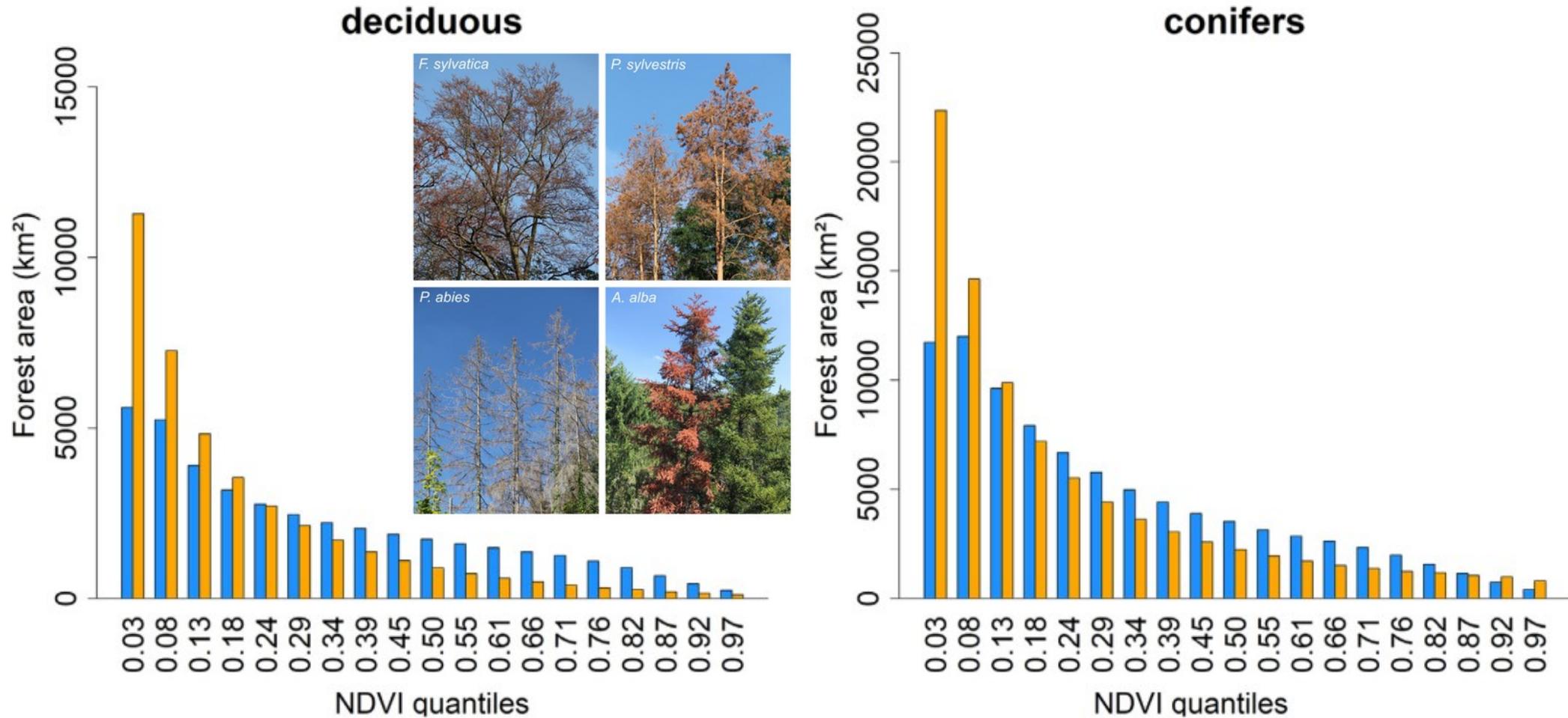
2003

2018



# 落葉樹林と針葉樹林のNDVI

## 2003年と2018年の比較



(B. Schuldt et al., 2020)



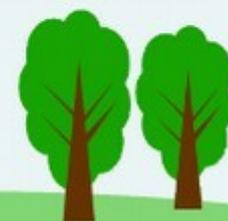
# ヨーロッパの森林被害

- 1980年代の森林衰退
  - By 大気汚染: 酸性雨、硫酸黄酸化物、重金属



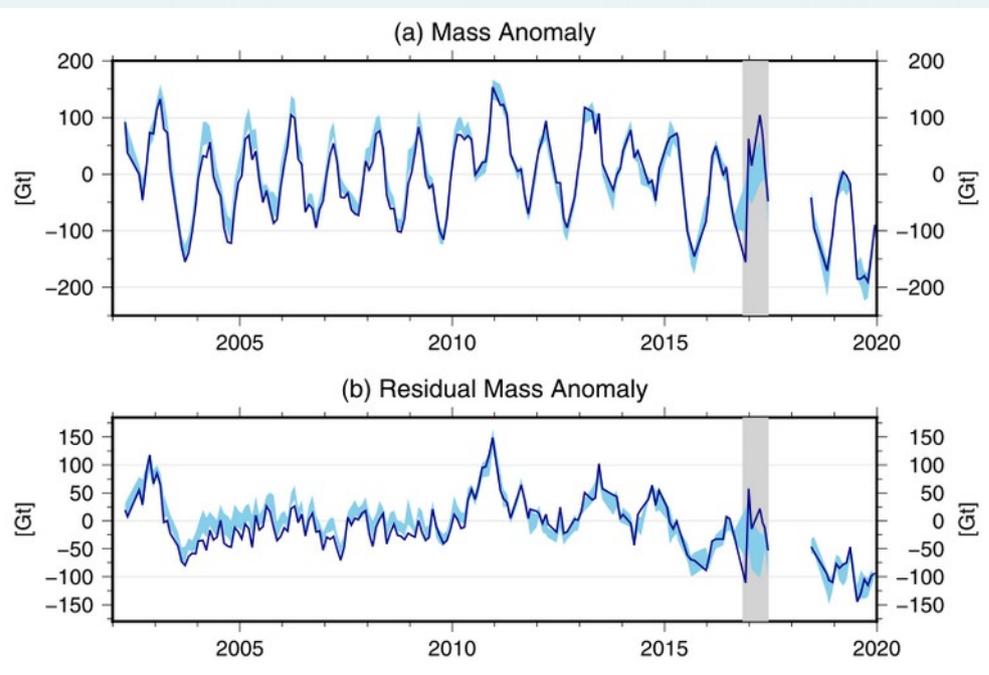
- 近年の森林衰退
  - By 気候変動

生理学的ストレス変数  
高い空間的・時間的解像度



# 2018年と2019年の中央ヨーロッパの干ばつを GRACE-Follow-Onで定量化

GRACE-FO衛星による測定では、中央ヨーロッパの貯水量は季節変動あるが最大で94%減少した



(GFZ Helmholtz Center, 200710100924)



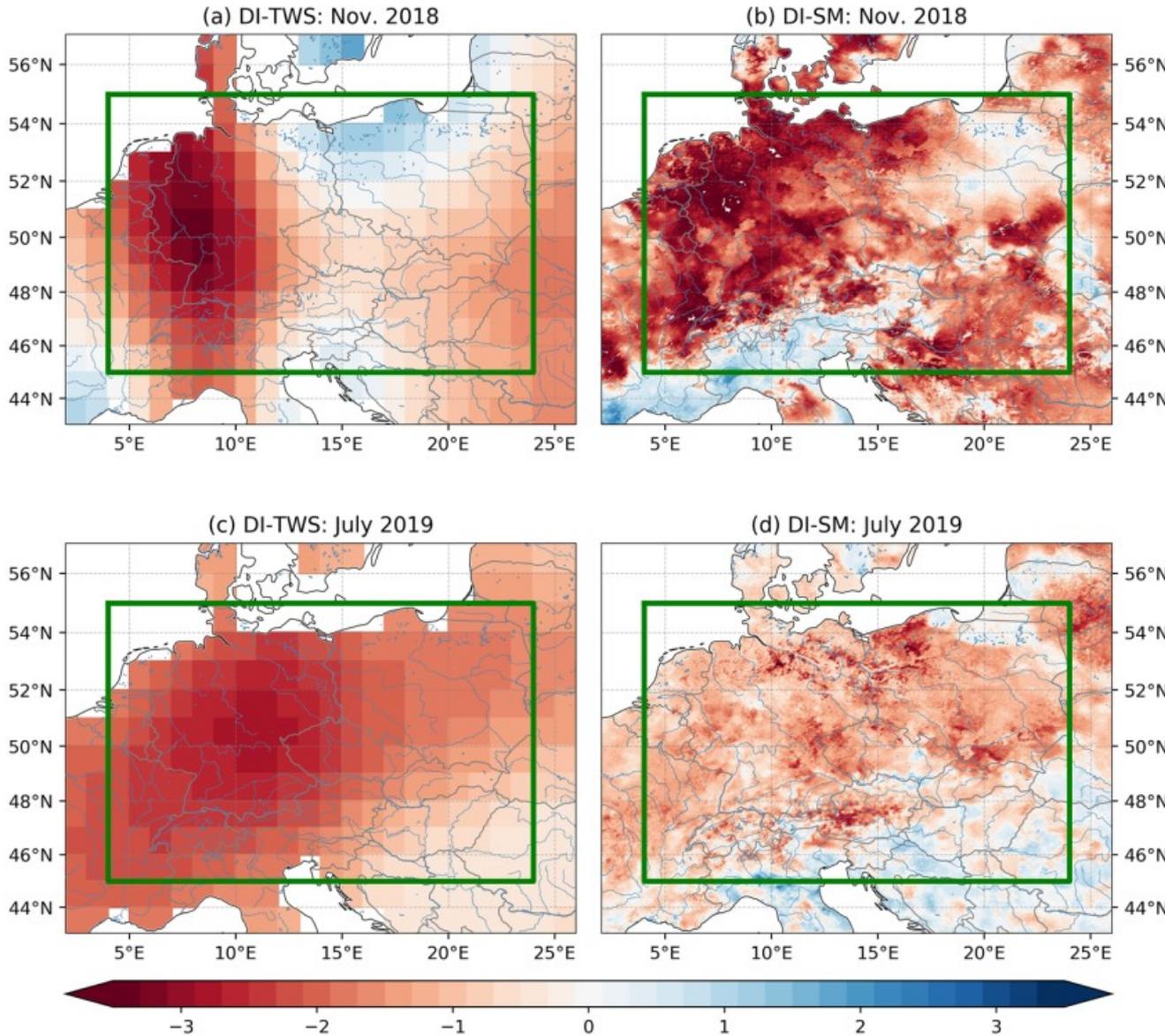
# 乾燥指数 DI

$$DI - SM_{i,j}^{EDO} = \frac{SM_{i,j} - \mu_i}{\sigma_i}$$

**SM : Soil Moisture**  
**EDO: European Drought Observatory**

**Spatial patterns**  
**(a) DI - TWS**  
**(b) DI - SM**  
**for November 2018**  
**and for July 2019 (c and d).**

**TWS: Total Water Storage**





# 生態観測のためのEnMAP

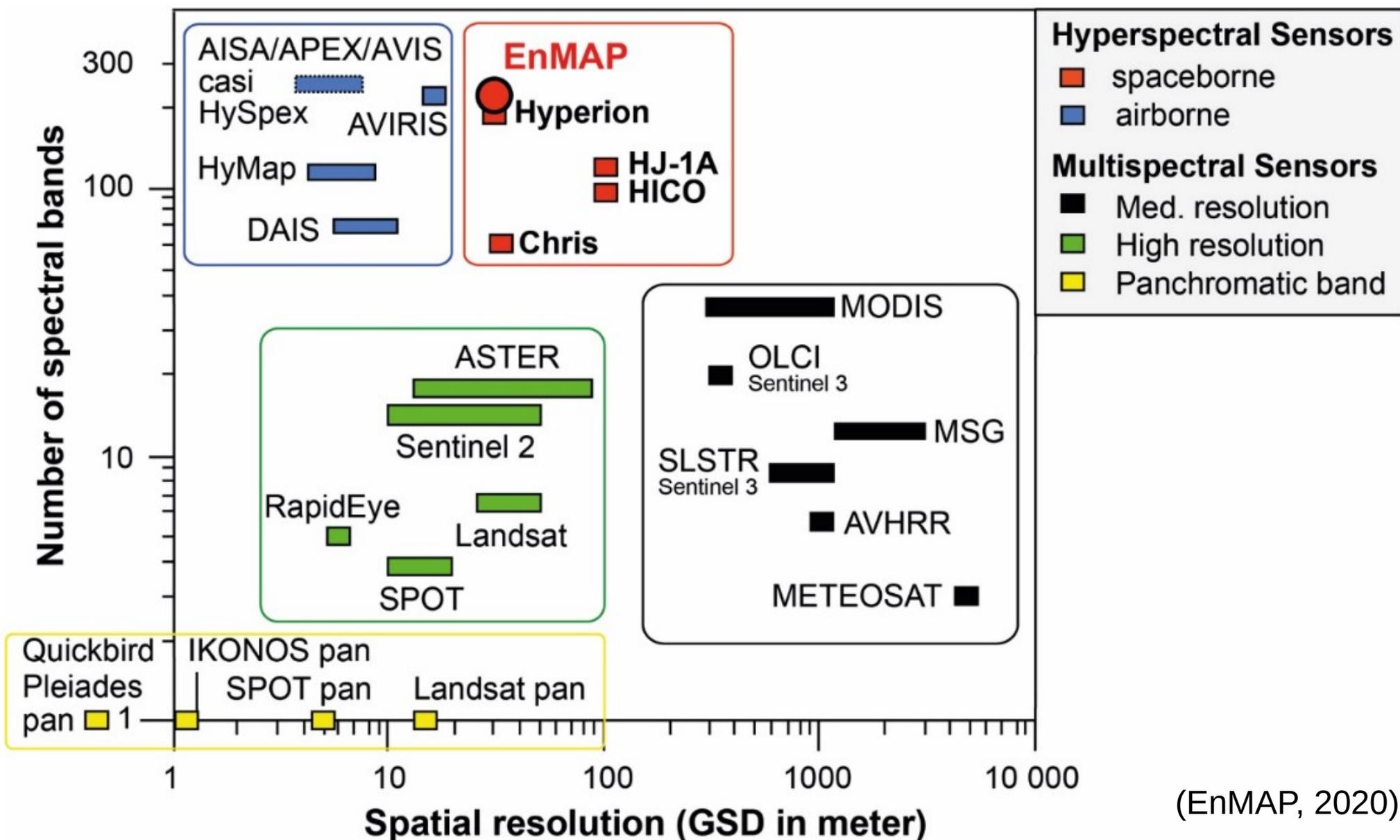


- Dedicated imaging pushbroom hyperspectral sensor mainly based on modified existing or pre-developed technology
- **Broad spectral range from 420 nm to 1000 nm (VNIR) and from 900 nm to 2450 nm (SWIR) with high radiometric resolution and stability in both spectral ranges**
- Swath width 30 km at high spatial resolution of 30 m x 30 m and off-nadir (30°) pointing feature for fast target revisit (4 days)
- Sufficient on-board memory to acquire 1,000 km swath length per orbit and a total of 5,000 km per day.

(EnMAP, 2020)



# EnMAPのスペクトル・空間分解能特性

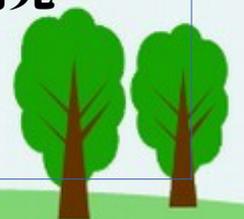


(EnMAP, 2020)

# EnMAP活用研究のテーマ

- ハイパースペクトルの多時期データセットを使用した森林型分布のマッピング、高度な分類アルゴリズム、地理データベースとのリンク
- 森林バイオマス、地上部炭素量、および成長量の推定
- 生化学的および構造的森林パラメーターのプロセスモデルへの導入
- 生態系の計測、健康度などの森林パラメーターの抽出、リスク評価
- 生態生理学的プロセスに関する化学物質の指標を介した生物季節学的変動把握
- 森林の生物指標として機能する光学指標の開発
- 多時期・多センサーデータを利用する森林の質の監視手法の開発
- ハイパースペクトル情報の抽出による高度な林業エキスパートシステムの開発

(EnMAP, 2020)



# 森林の健全度



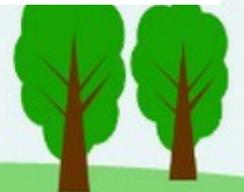
# 世界の植生の健康度マッピング

2018年6月、NASAは国際宇宙ステーション(ISS)に搭載した機器でECOSTRESSミッションを開始

- 1) 陸域生物圏は水の利用可能性の変化にどのように反応しているか？
- 2) 日中の植生水ストレスの変化は地球規模の炭素循環にどのように影響するか？
- 3) 農業用水の消費量の高度な監視と干ばつ推定の改善により、農業の脆弱性を減らすことができるか？

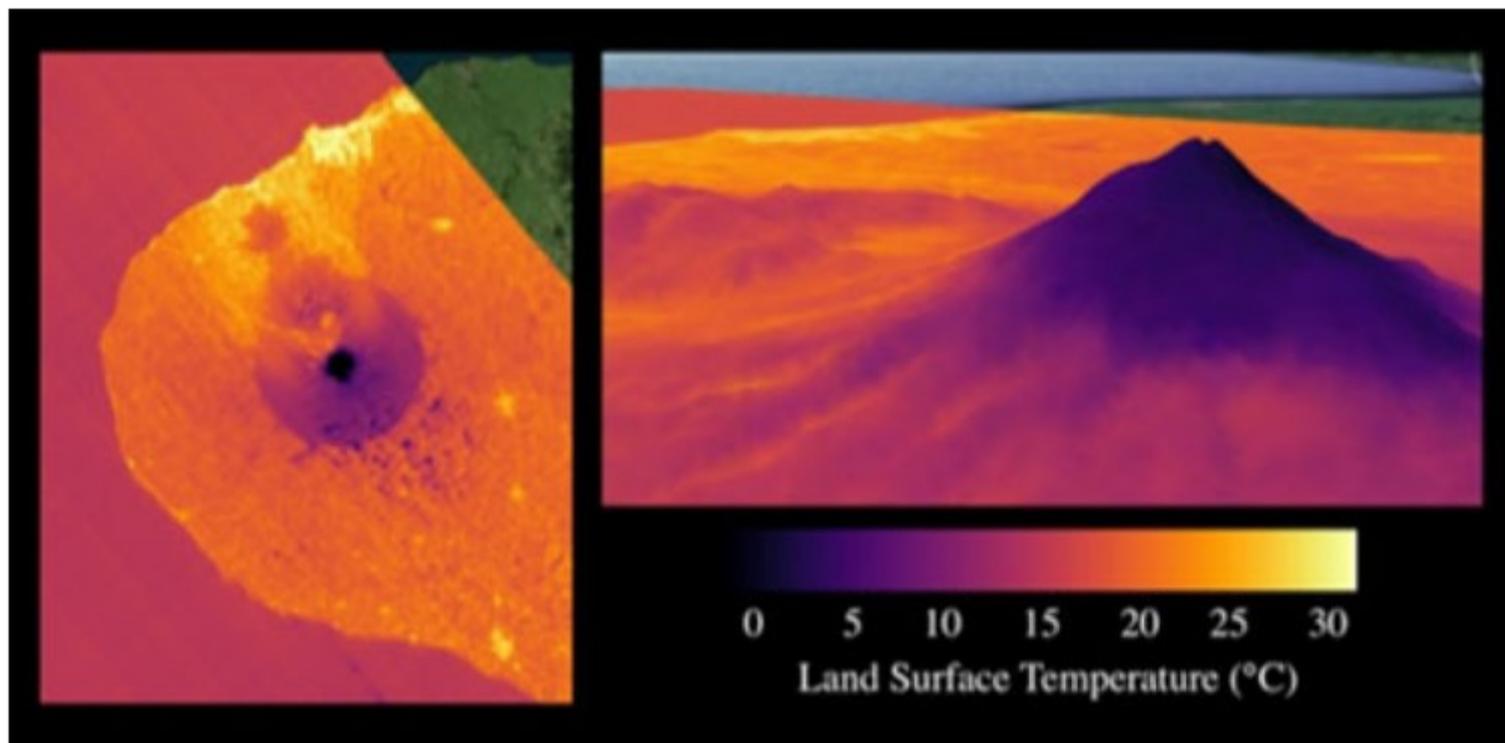


(JPL, 20071800000)



# ECOSTRESSサンプル画像

生成データの空間分解能は70メートルで、地表面の温度と放射率、蒸発散量、水の使用効率、蒸発ストレスが含まれる。ECOSTRESSは、特定エリアのデータを1日に複数回または数日おきに収集する。ISSは傾斜した楕円軌道をとるため、特定地の観測時太陽照度はパスごとに異なるが90日周期である。ECOSTRESSは52°Nと52°Sの間でさまざまな時刻にサンプルデータを収集している。



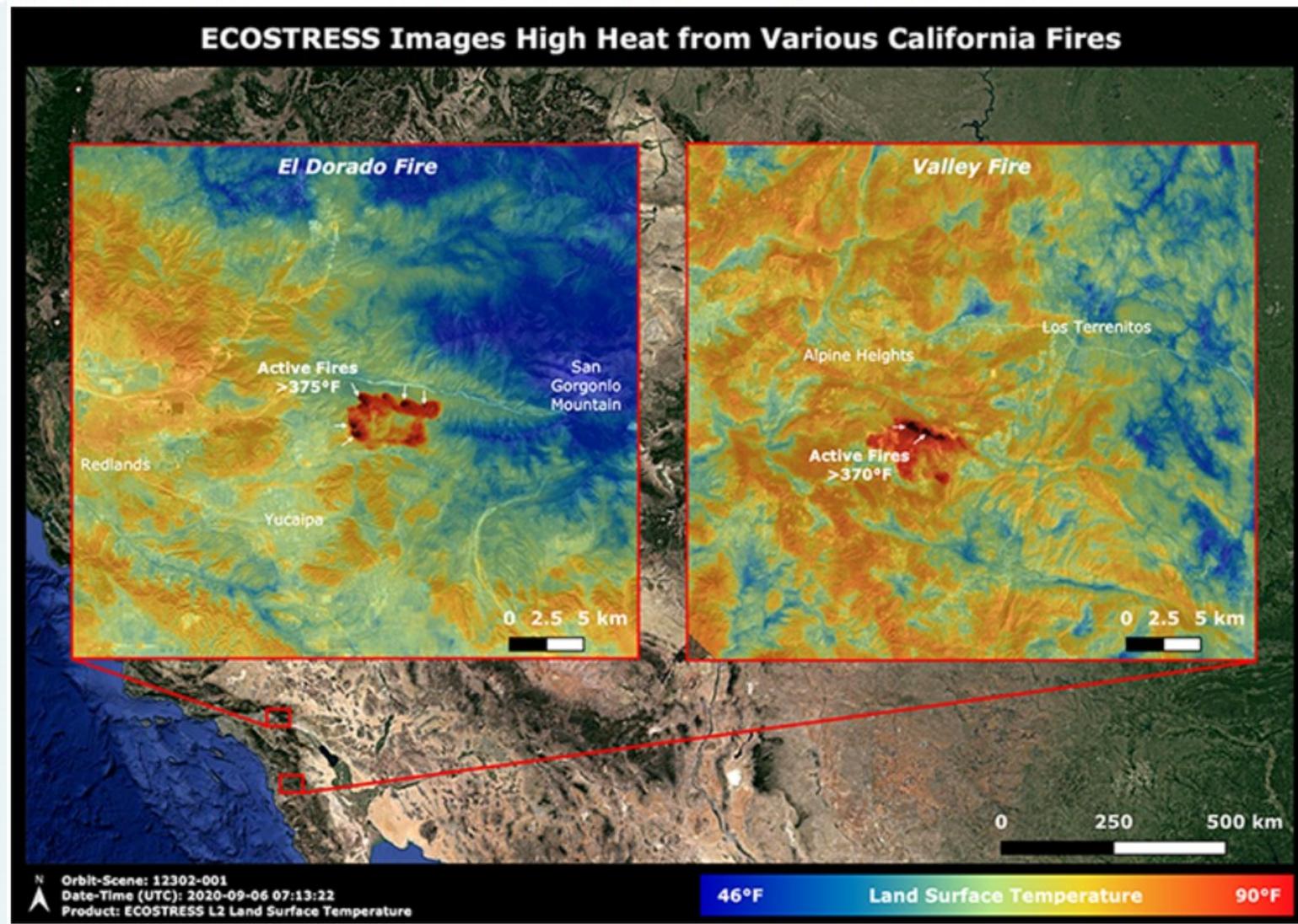
ニュージーランド  
Taranaki山の表層  
熱画像



# 火災発生地周辺の表層温度

## カリフォルニア

NASA's ECOSTRESS Takes Surface Temperature Around California Fires



# ECOSTRESSの展望

ISSに乗って2年目になるECOSTRESSは、熱データの取得を続けている。このデータセットは、気候変化ホットスポットでの水利用効率のしきい値や、日中の蒸発散量に独特のパターンを示すさまざまな植生タイプを明らかにするなど、ミッションの主要な貢献を担っている。

高解像度のデータが増えるにつれて、大量のデータセットを管理することは、ECOSTRESSと将来の地球観測ミッションにとって重要な課題となっている。ミッションチームとデータアーカイブセンター間の緊密なコラボレーションにより、ユーザーがデータに簡単にアクセスして分析できるようにサポートする新しいツールとサービスが共同開発される。



# 生物多様性

## 生物多様性研究の主要タスク

- 現在の状況を記録
- 生態系内のプロセスを解明
- 起こり得る変化や障害を特定

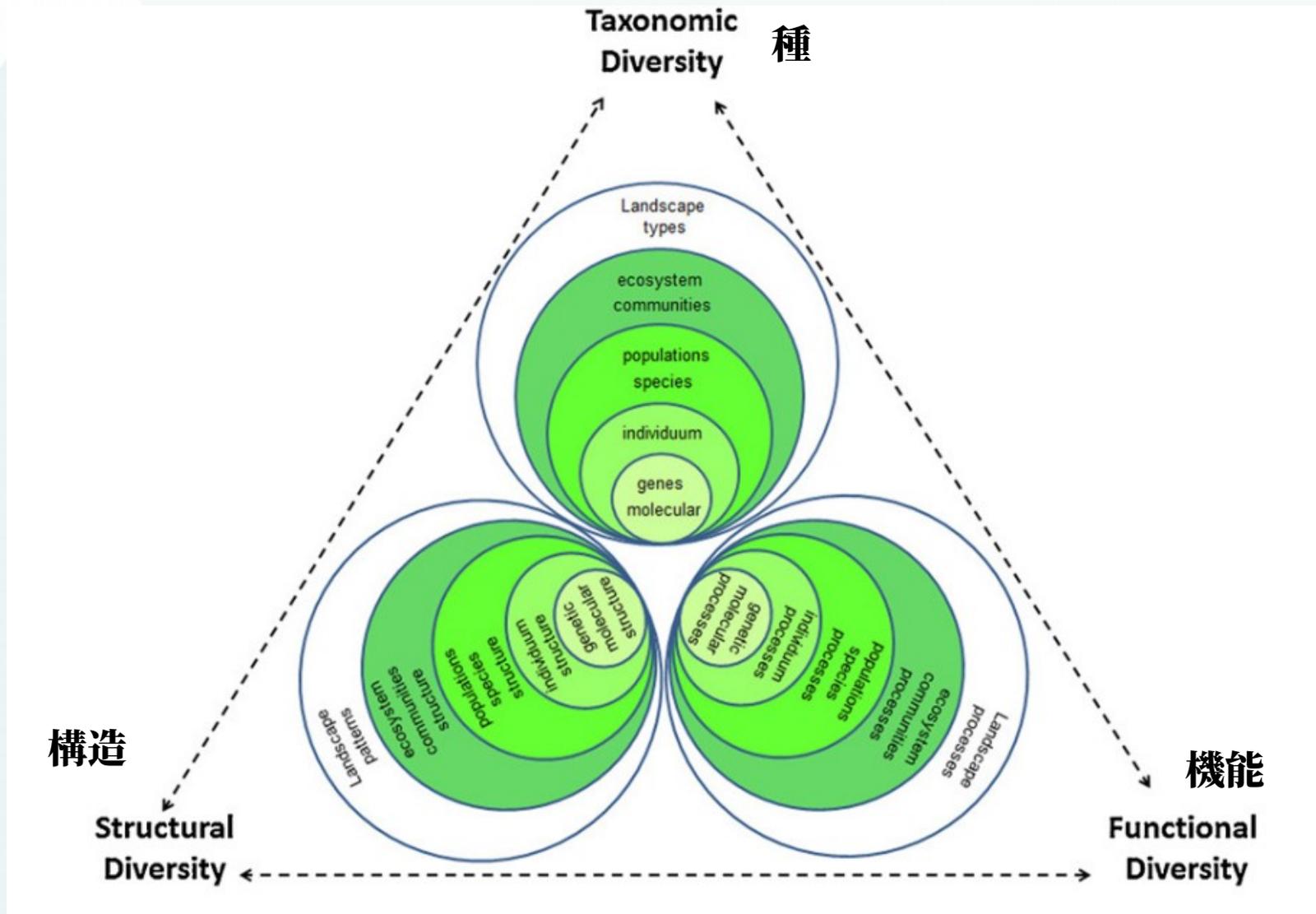
広い領域の長い期間にわたる  
信頼性の高いデータが必要



(Lauschら、161212084459)



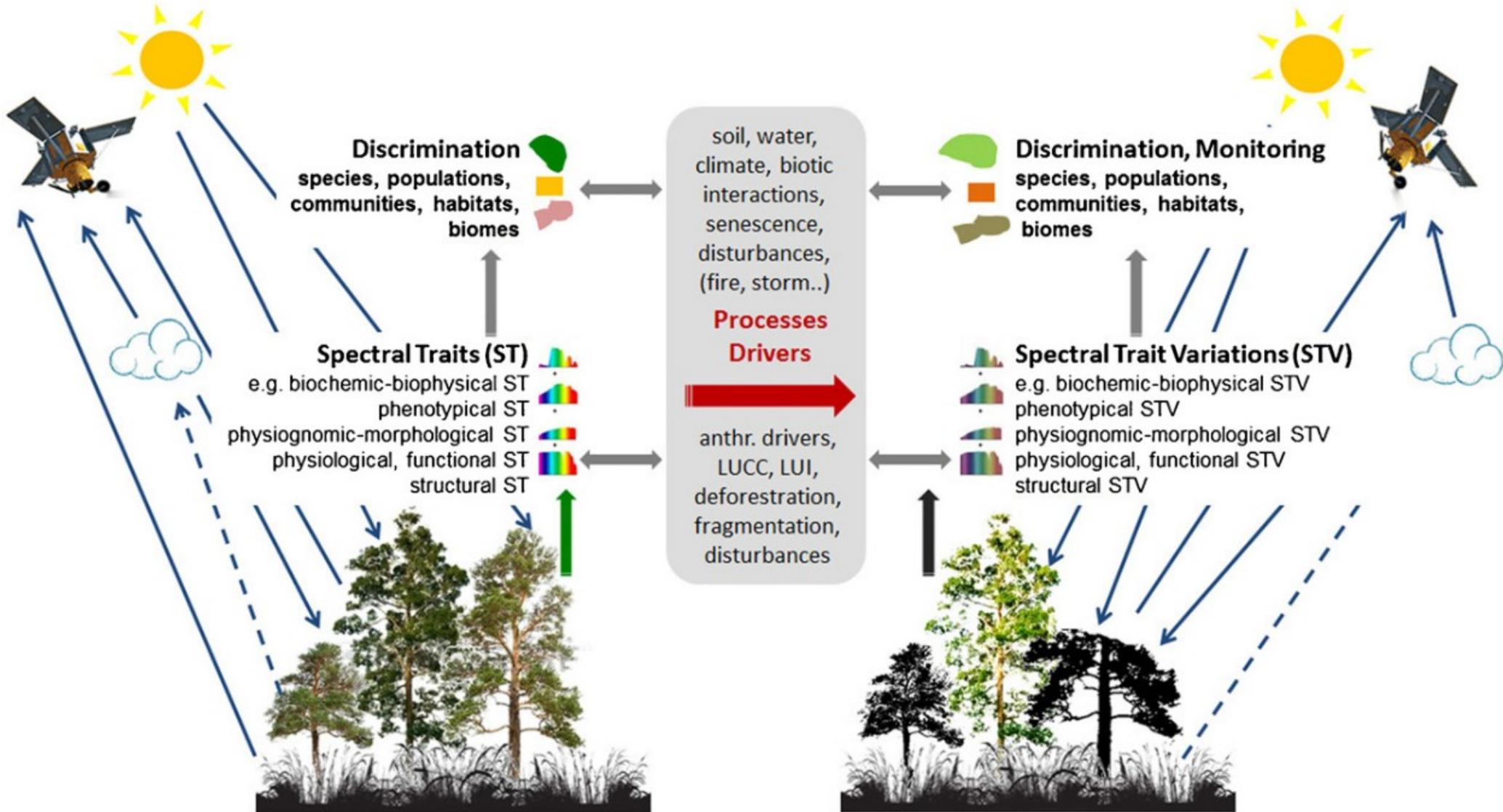
# 生態系の3つの多様性指標



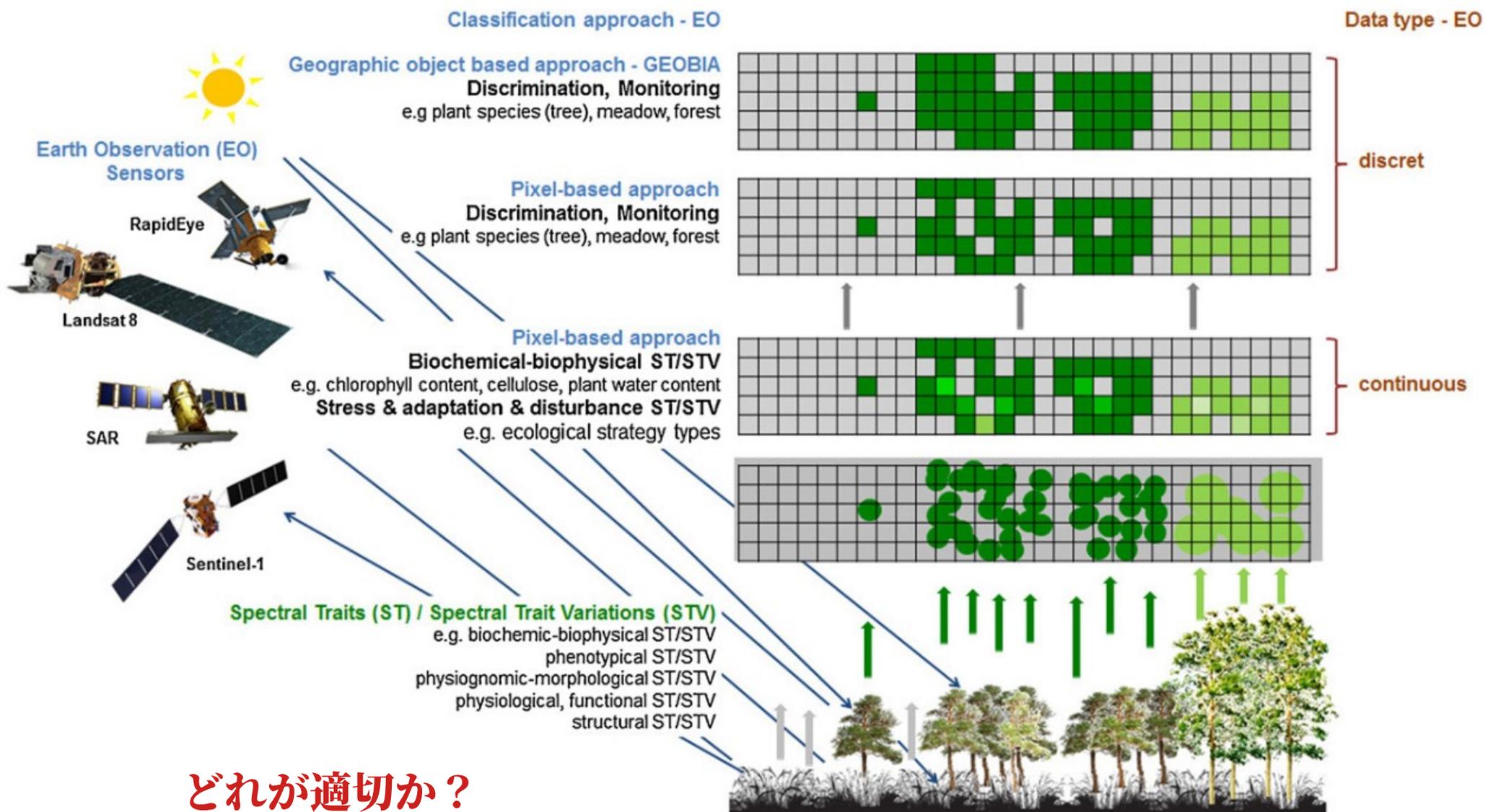
(Lauschら、2016)



# スペクトル情報の活用



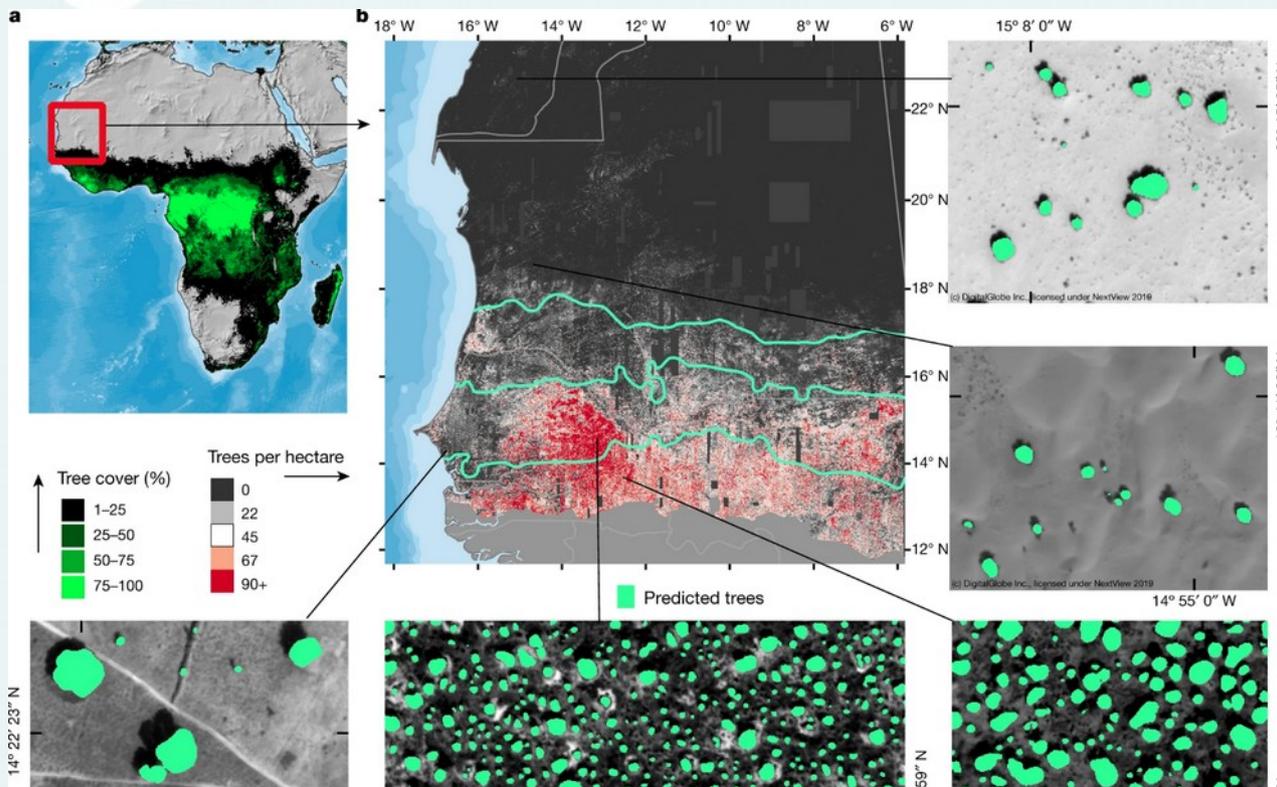
# カテゴリ分類(オブジェクト/ピクセル)vs指標化



# 深層学習で森林域外の樹木図作成

サハラ、サヘルに18億本の樹木発見（樹冠面積 3 m<sup>2</sup>以上）

[QuickBird-2、GeoEye-1、WorldView-2、WorldView-3衛星で]



砂漠 データ 人間 タ本  
衛星 森林 炭素 樹立  
大気 億 森林 密度 樹冠  
貯蔵 方法 成長 樹木 孤立  
非常 樹木 学習  
領域 マッピング 測定

DL: Deep Learning

(M. Brandt, NASA/  
Goddard Space Flight  
Center, 201016132015)



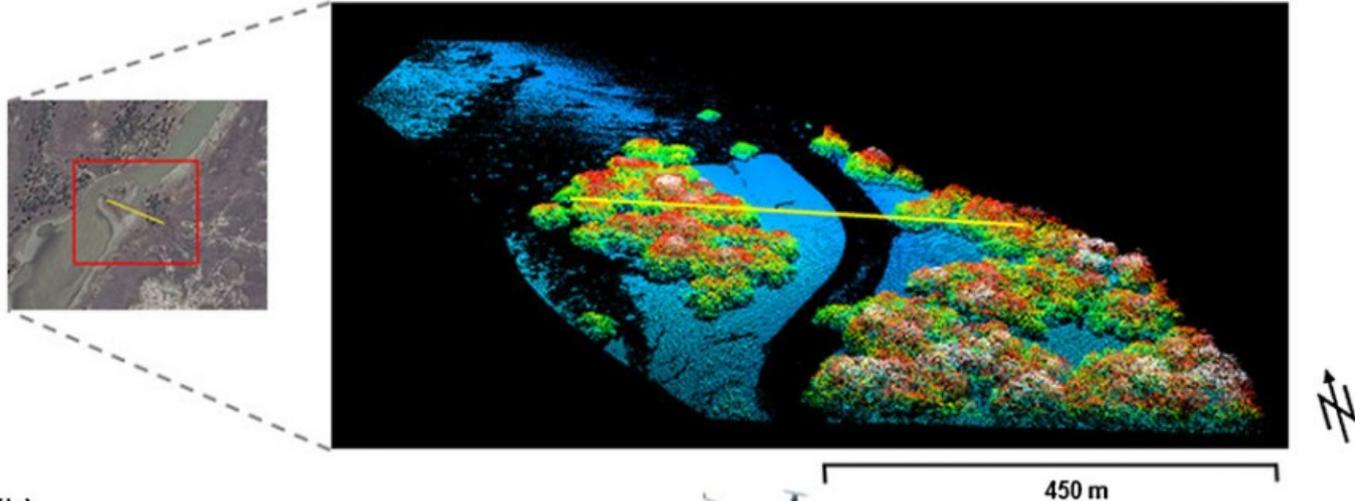
# 森林の3次元構造情報



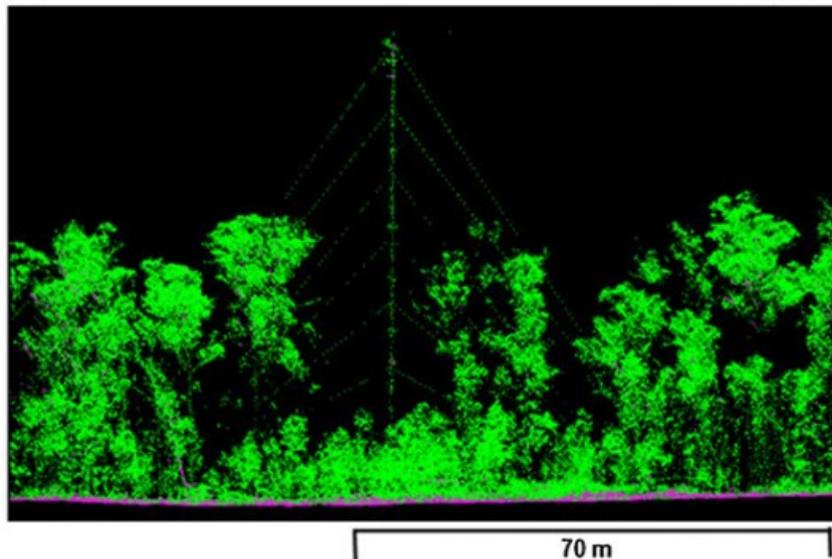
# 植生の垂直構造の定量化

航空機搭載レーザースキャンデータの画像化

(a) マングローブ林

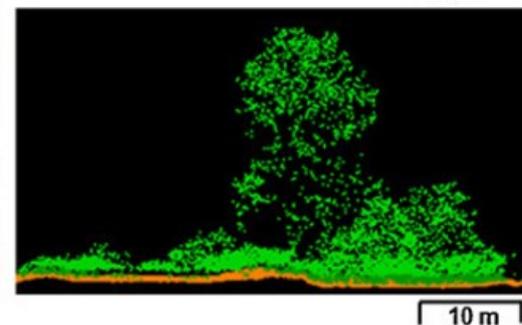


(b)



フラックスタワーサイト

(c)

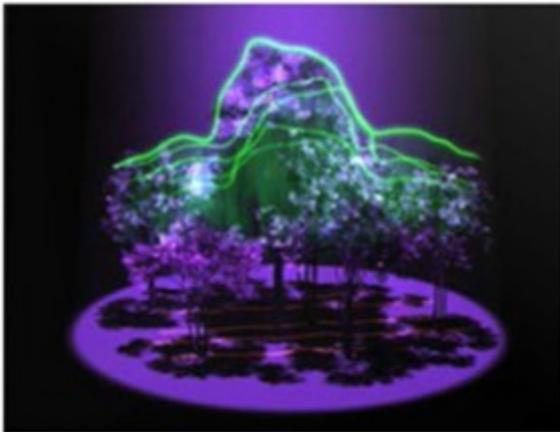


(A. Lausch et al, 2016)

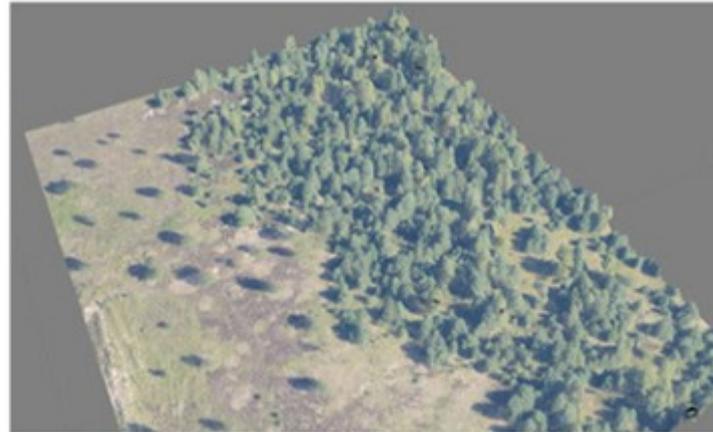


# 様々なスケールでの植生の垂直構造

(a)



(b)



(c)



**GEDI-3D-LiDAR**

**ジャイロコプター**

**UAV**

(A. Lausch et al, 2016)







# JEDI と MOLI

## 2. 植生ライダーMOLIの概要(ベンチマーク)

	MOLI	ICESat	ICESat-2	GEDI
				
ミッション	植生	氷床	氷床	植生
プラットフォーム	ISS	衛星	衛星	ISS
質量、電力	/400W	970kg/730W	1580kg/1320W	450kg/1000W
軌道高度	400 km	586 km	481 km	400 km
状態		運用終了2003.1-2010.8	運用中 2018.9 -	運用中 2018.12 -
コスト	30億円(未定)	2.83億usd / 340億円 (120jpy/usd@2003)	10.63億usd/1170億円 (112jpy/usd@2018)	9000万usd/99億円 (112jpy/usd@2018)
搭載センサ	ライダー・イメージャ	ライダー	ライダー	ライダー
ペイロード電力	250W/200kg	350W/298kg	300W/298kg	516W/230kg
特徴・知見	傾斜地上の樹高精度改善 イメージャ同時観測による位置同定精度の改善 高精度の樹高観測	氷床の標高マップ作成 世界初の衛星搭載ライダー 森林観測におけるフットプリント径、傾斜地、位置同定の問題を明示	ICESatの後継器 レーザの高出力高効率化 光子計数観測による氷床DEMの実証	森林観測用に特化したライダー 事前に定められたコストのみで実施

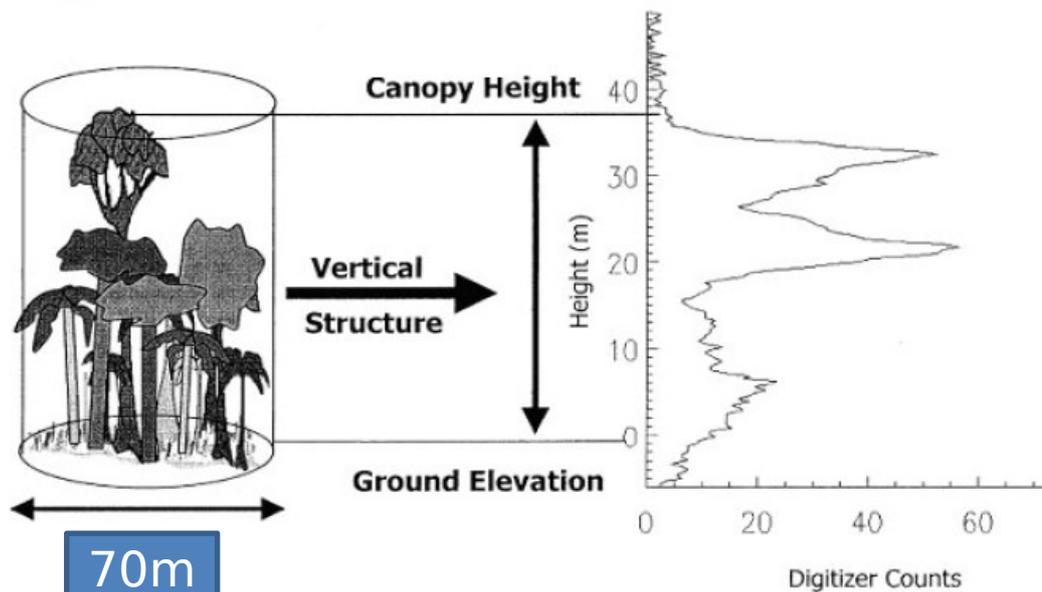
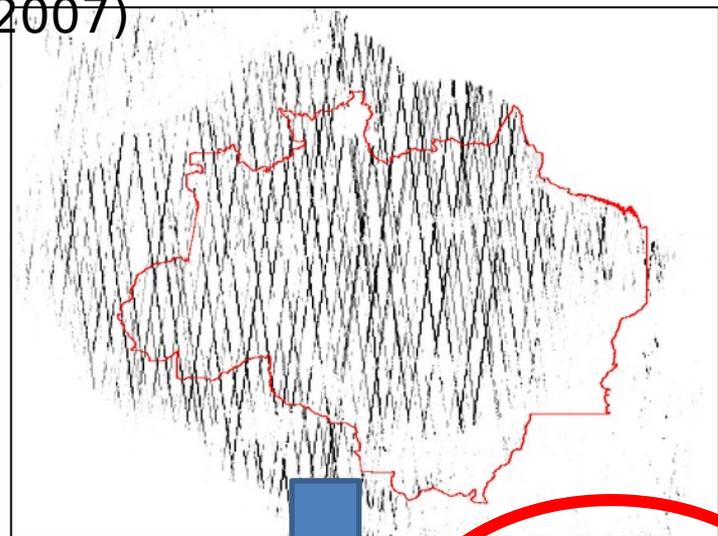


**CADAF**

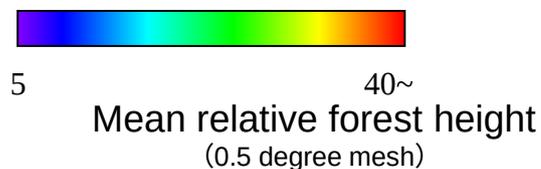
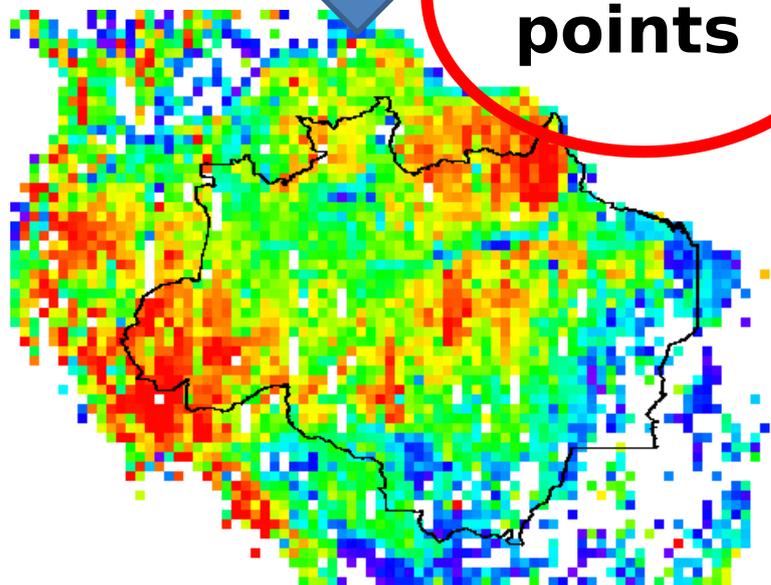
**アマゾン熱帯林炭素動態計測プロジェクト**

# ICESat/GLASによる森林構造計測

GLAS data on GLA01 (L2A-L3I, 2003-2007)

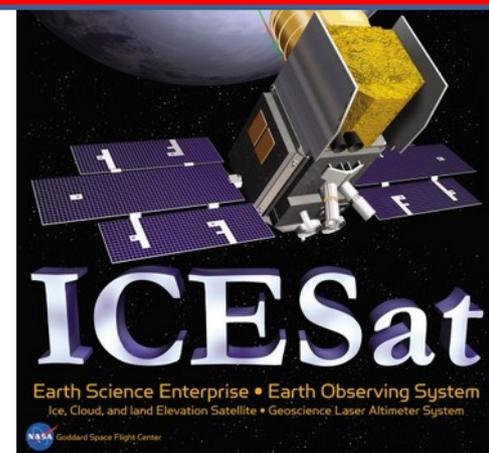


2,766,061 points

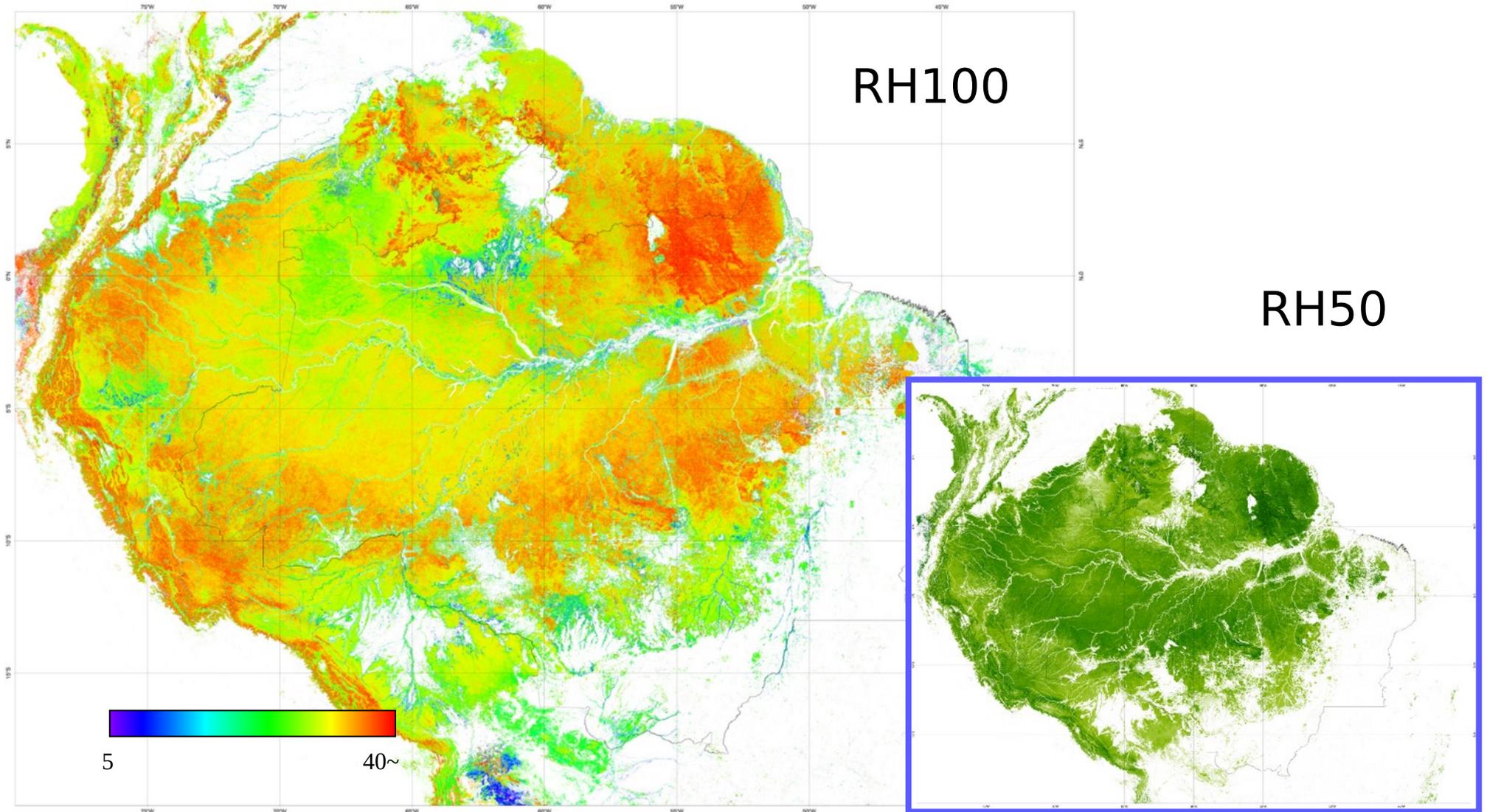


*Data archive was set up in 2013!*

To Understand and Protect Our Home Planet



# GLASを利用したアマゾン林冠高マップ (RH100 and RH50)



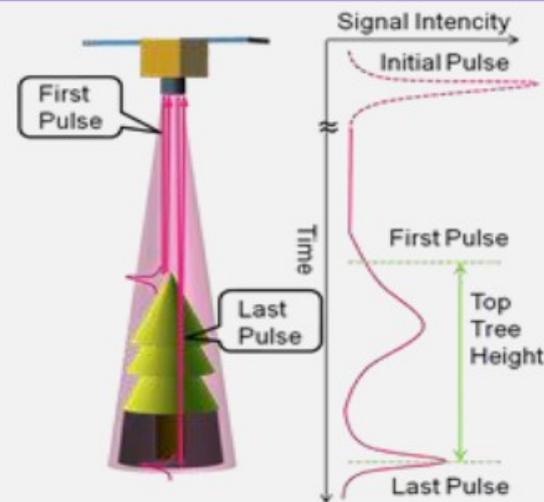
## 広域森林観測の方法

- 衛星観測 (Imager and SAR)
  - イメージャ衛星は広域観測が可能だが、基本的には面積のみ
  - レゾリューションSARは、バイオマスを推定できるが、約100t/haを超える密度では信号が飽和
  - 主要な森林である熱帯雨林では、100t/haを超えることがほとんどである

- 衛星ライダーによる観測
  - ライダーはレーザパルスを地上に向けて照射し、送信信号と受信信号との時間差から距離を測定。樹頂と地盤面の差分から森林高さ(林冠高)を推定
  - 密度の高い森林でも観測可能(～500t/ha)
  - 林冠高(Canopy heights)はバイオマスとよい相関

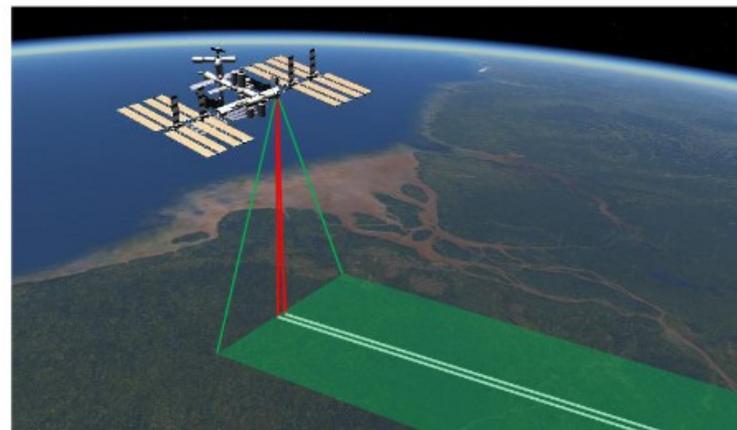


ライダー衛星は、広域に林冠高、バイオマスを推定可能  
イメージャ、SARと組み合わせて広域化(マップ化)することで全球を推定



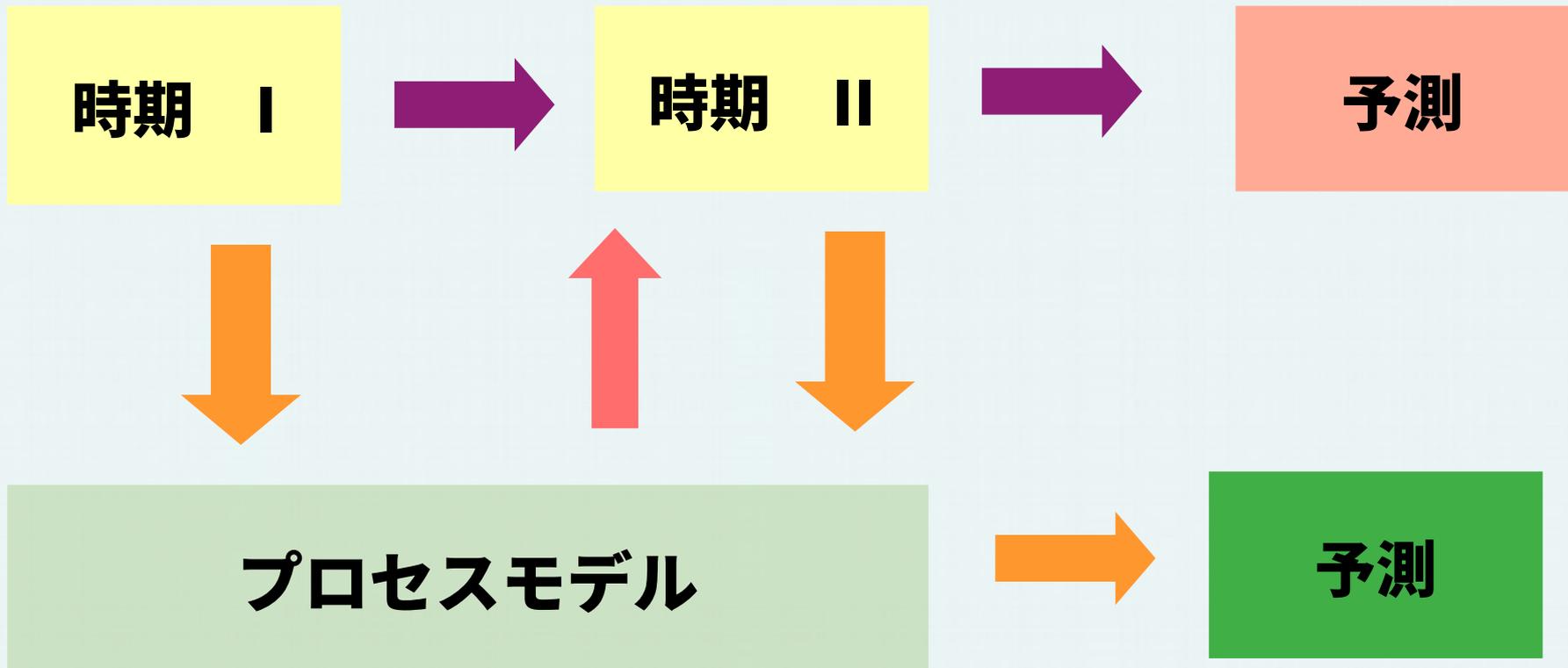
## 2. 植生ライダーMOLIの概要

- **MOLI** (**M**ulti-footprint **O**bservation **L**idar and **I**mager)
  - 国際宇宙ステーションきぼう曝露部に取付
  - 太陽非同期、軌道傾斜角 51.6度、高度 400km
- **搭載センサ**
  - 林冠高測定用ライダー
  - 樹木位置判別・樹冠状態確認用イメージャ
- **観測対象**
  - ISS軌道直下の森林(主要対象は熱帯林)
- **ミッション目的**
  - 林冠高および森林バイオマスを高精度に推定する手法を開発する。PALSAR-2、SGLI等と協力し、広域森林バイオマス推定手法を研究開発する。
  - 宇宙用ライダー技術を獲得し、3次元レーザスキャナ等の宇宙将来ライダーの実現を目指す。
- **打ち上げ**
  - 2023年(未定)





# リモセン情報をプロセスモデルへ



# 終わりに

バーチャル 表示 サンゴ礁  
郷 白 然 豊  
リアリティ ケア 条件  
BBC  
現実 テレビ シリーズ  
可能 人 々 境 験  
方法 参加 無  
インタラクティブ 否定 配信  
仮想 退 屈  
体験 つながり 気分 ビデオ



# 終わりに



テレビで自然を観ると幸福感を後押しする