

# 地球温暖化問題への衛星観測の貢献

横田 達也

国立環境研究所

地球環境研究センター

- n 人工衛星「いぶき」(GOSAT) ?
- n どうして、なぜ？ **衛星観測**なの？
- n 今日のテーマ：「環境問題を科学的に考えよう」
- n - 地球環境・生活環境保全に対する**統計数理**の役割 -
- n 何がわかっているの？
- n 何が足りないの？ = 何を知りたいの？
- n 何がわかりそうなの？
- n 私たちとどう関係があるの？

・「いぶき」は温室効果ガスの観測を主目的として現在稼働している世界で唯一の人工衛星です。

・「いぶき」は約1年8ヶ月前の2009年1月23日に、種子島宇宙センターより無事に打ち上げられ、今も順調に観測を続けています。

・観測データは、2009年6月から連続的に蓄積されています。

n “**広辞苑**”によると【**息吹・気吹**】

n 息を吹くこと。呼吸。

n 活動の気配。生氣。

n 「春の - 」。 「新時代の - を感じる」。

n **地球は“呼吸”をするの？**

呼吸

n 酸素          二酸化炭素  
光合成（炭酸同化作用）

n 陸域生態系，土壤，海洋が二酸化炭素を取り  
こんだり放出したりする様、それが大気中で  
拡がる様

è あたかも地球が呼吸しているよう

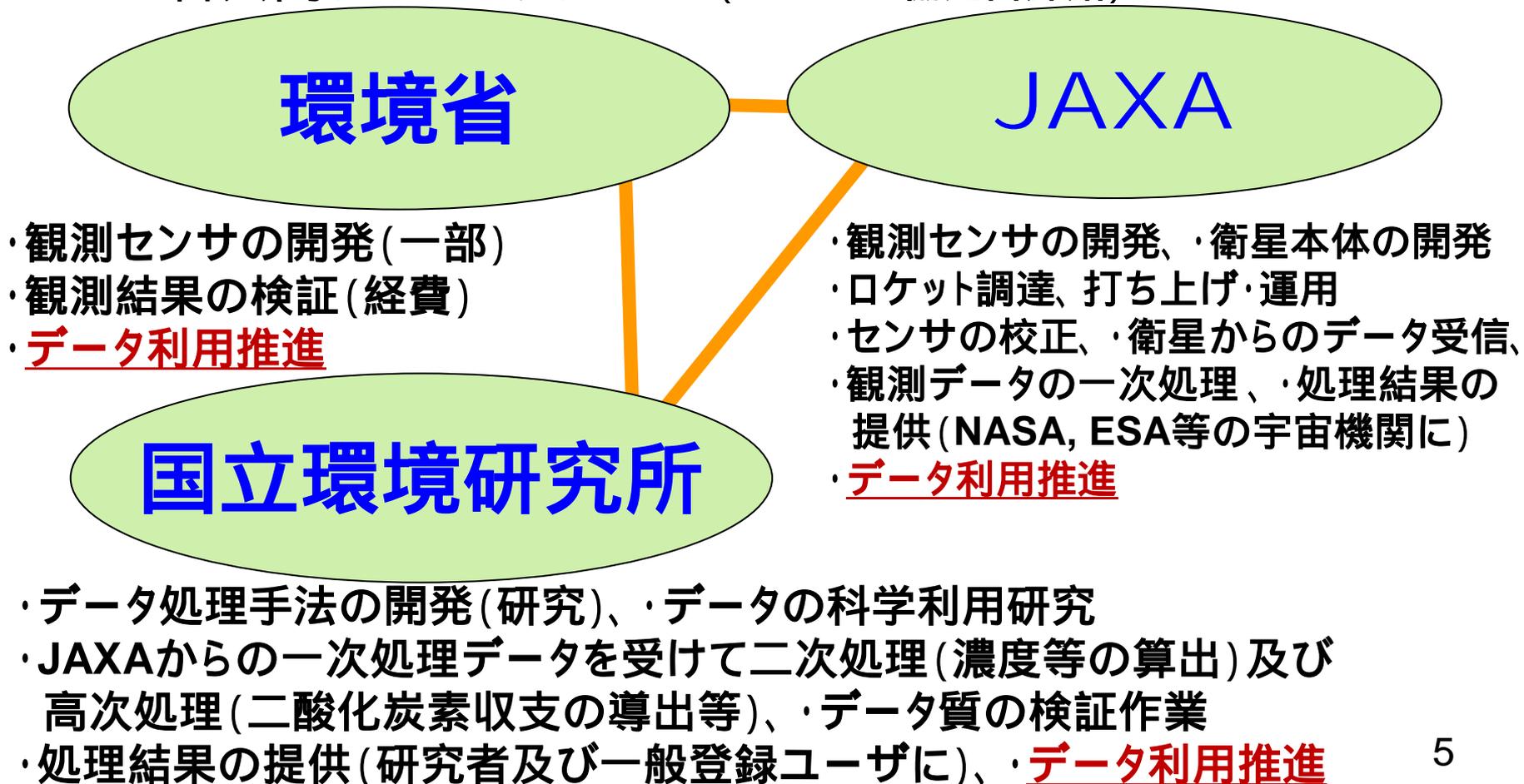
- n 「いぶき」はGOSATの愛称
- n 愛称「いぶき」はどのようにして命名？
- n 応募総数 12,683件 うち有効応募総数 11,719件
- n インターネット:5,552件, はがき:729件, 応募用紙:6,402件
- n 平成20年7月10日~9月10日に愛称を募集 10月15日に決定
- n 愛称点数 3,789点 このうち「いぶき」への応募提案者数は**630名**
- n 【選定理由】
  - n ・「いぶき」は、有効応募総数の中で高い割合を占め、多くの支持を得た愛称である。
  - n ・「地球の息づかい(息吹(いぶき))である二酸化炭素を観測する衛星」という意味合いをこめた提案理由が多くあり、GOSATのミッション内容を正確に表現している。
  - n ・また、「いぶき」には、活気と明るい未来を感じさせる響きがあるため。

# 「いぶき」(GOSAT)プロジェクトの特徴

## - 三者の共同推進 -



環境省、国立環境研究所、宇宙航空開発研究機構(JAXA)の3者共同プロジェクト è (2005.8.1 協定書締結)





- n どうして衛星が必要なの？
- n 何が難しいの？

# 「いぶき」の観測対象とする 温室効果ガス

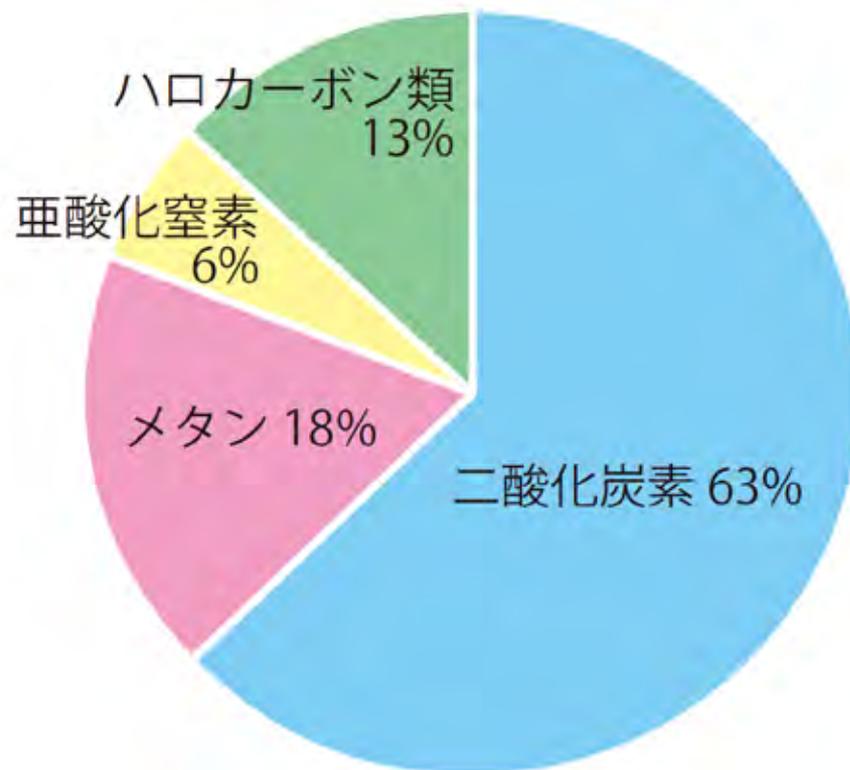


┆ 温室効果に寄与する割合の高い二つのガスをターゲットに。

┆ (衛星で観測可能なもの)

┆ 1) 二酸化炭素

2) メタン

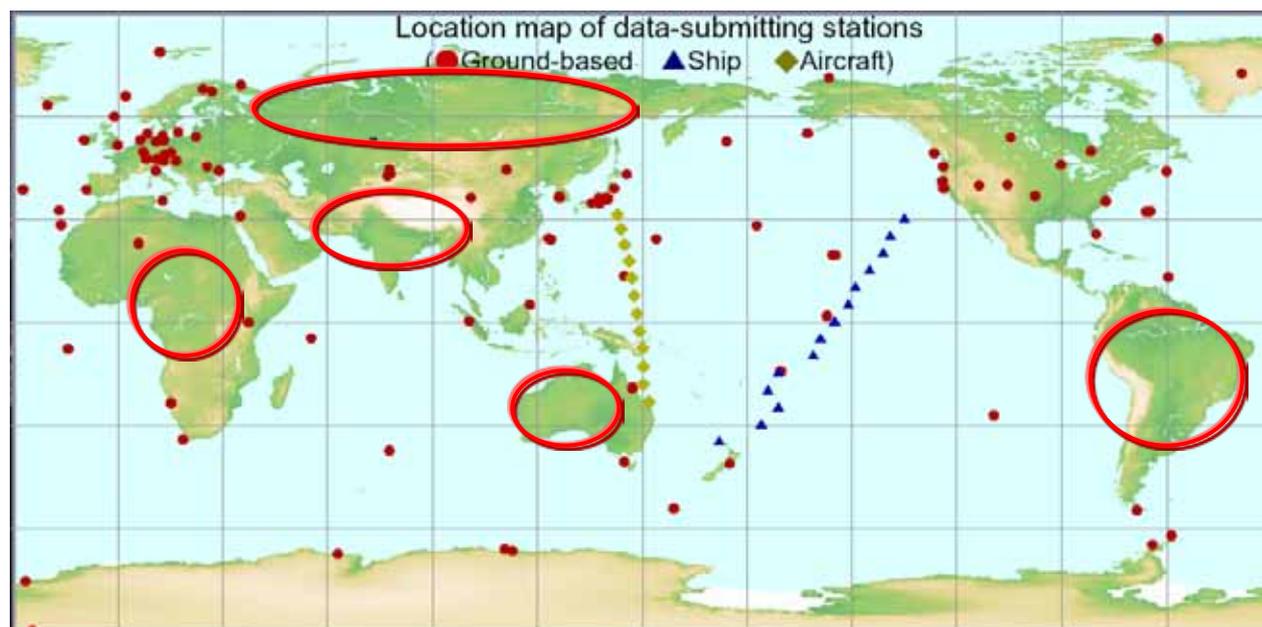


主要な温室効果ガスの気温上昇に対する寄与率  
(1750年から2005年までの放射強制力最良推定値の比、IPCC 第4次報告書より作成)

# 地球全体の温室効果ガス分布 「いぶき」観測の意義(1)



- u 全球の温室効果ガス地上観測
  - è 測定局の配置に偏りがある。(陸上の先進国中心)
- u 衛星により観測の空白域を埋める
  - ∅ 陸域と海域の晴天領域を繰り返し測定
  - ∅ 一つのセンサーで測定 è 相対差を把握しやすい



ステーション数:  
314局,  
二酸化炭素測定:  
202局  
メタン測定:  
186局  
(2010年11月1日現在,  
WDCGGより)

○: 観測の空白域

# 地球全体の温室効果ガス分布 「いぶき」観測の意義(1)



u 全球の温室効果ガス地上観測

衛星 ⇨ 分布の「見える化」

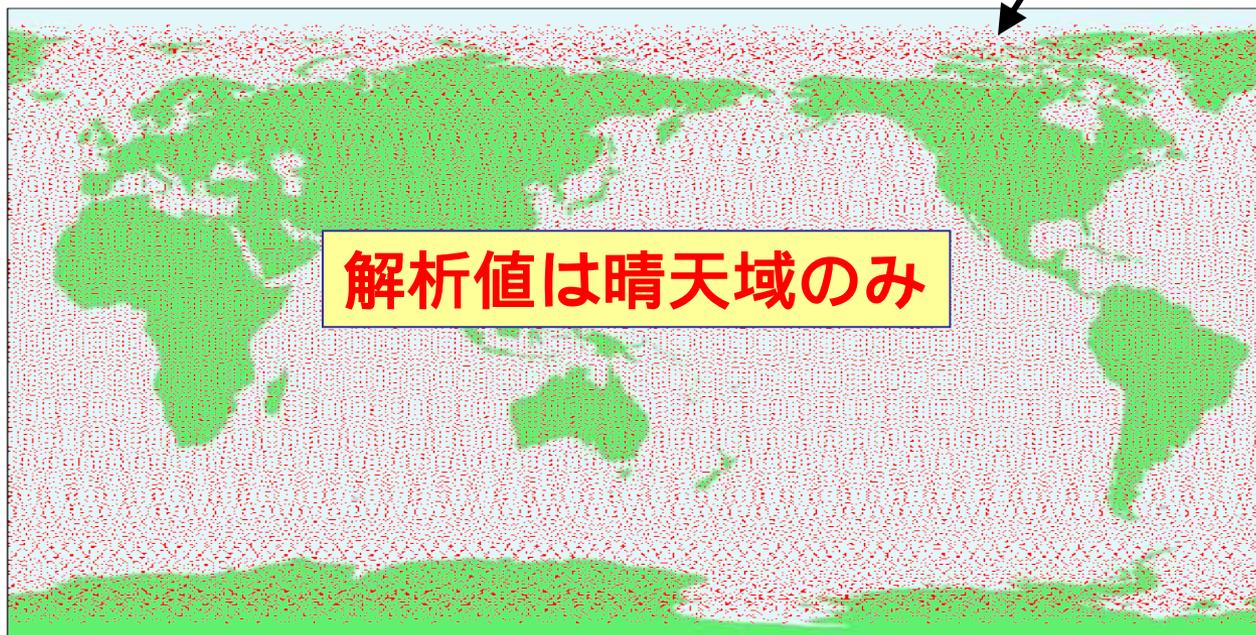
⇨ 測定局の配置に偏りがある。(陸上の先進国中心)

u 衛星により観測の空白域を埋める

「いぶき」の観測点:  
3日で56,000点

○ 陸域と海域の晴天領域を繰り返し測定

○ 一つのセンサーで測定 ⇨ 相対差を把握しやすい



解析値は晴天域のみ

ステーション数:

314局,

二酸化炭素測定:

202局

メタン測定:

186局

(2010年11月1日現在,  
WDCGGより)

○ : 観測の空白域

# 衛星観測による大気中の 温室効果ガス観測の難しさ



n 大気中温室効果ガスは微量 (窒素: 8割, 酸素: 2割)

n 二酸化炭素: 約 390 ppm (1%が約 4 ppm), メタン: 1.6 ~ 1.9ppm

n 地球上での変動量(時間的, 空間的)が小さい

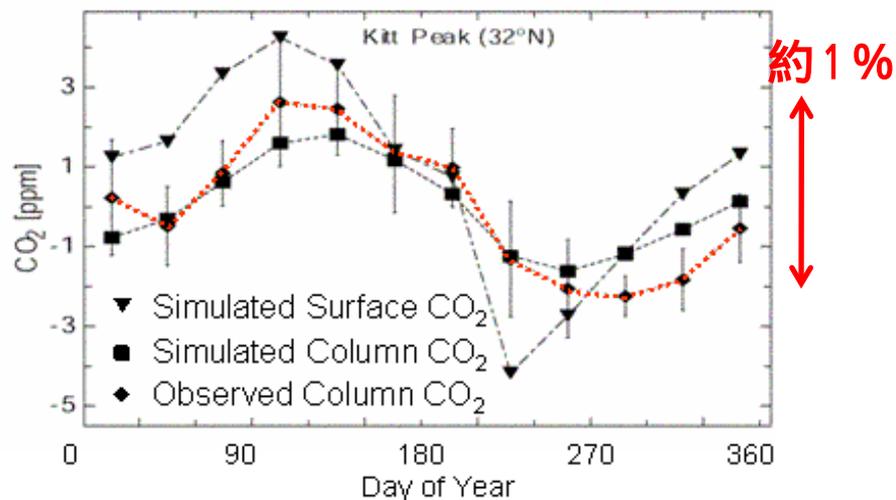
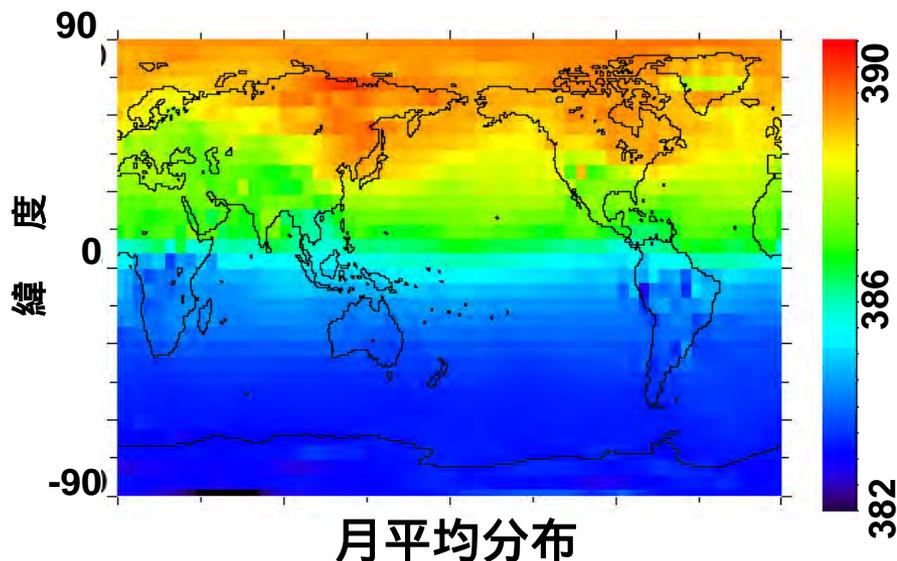
n 地域差:

n 南北差で数ppm

n 大陸と海洋上の差も数ppm

季節変動: カラム量

北半球 32° で4 ~ 5 ppm (p-p)



# 二酸化炭素濃度を人工衛星から 1パーセントの精度で測定する難しさ



Greenhouse gases  
GOSAT PROJECT  
Observing SATellite

## CO<sub>2</sub>の390 ppmとは？

- ・お風呂：200 Litter
- ・目薬：15 ml
- ・目薬(5.2本)：15 × 5.2 = 78 ml

$$78 \text{ ml} \div 200 \text{ L} = 390 \text{ ppm}$$

- ・目薬(4滴)：

$$0.05 \text{ ml} \times 4 = 0.2 \text{ ml}$$

$$0.2 \text{ ml} \div 200 \text{ L} = 1 \text{ ppm}$$

※ CO<sub>2</sub>濃度を1%精度で求める  
ということは、風呂桶に入った目  
薬(薬5.2本分)の量を15滴以内  
の精度で区別すること

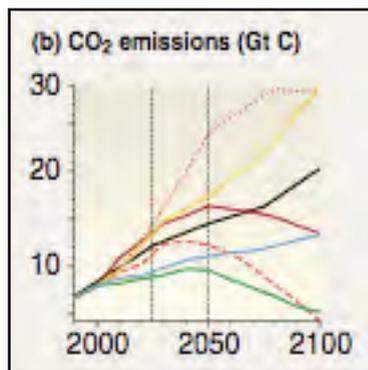




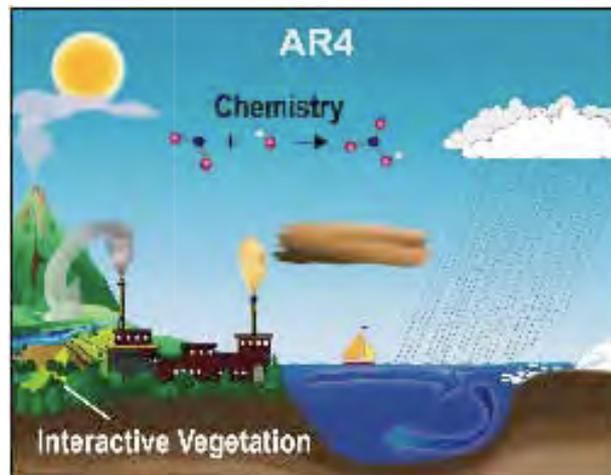
n モデルとは？

n (余談です・・・)

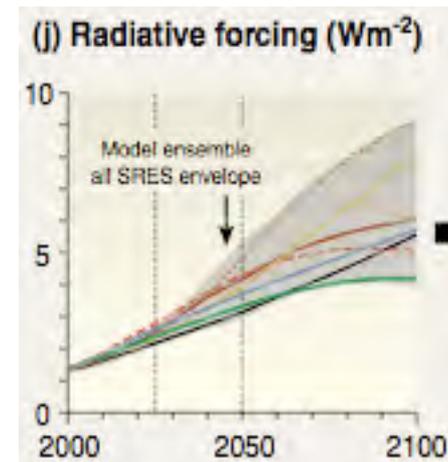
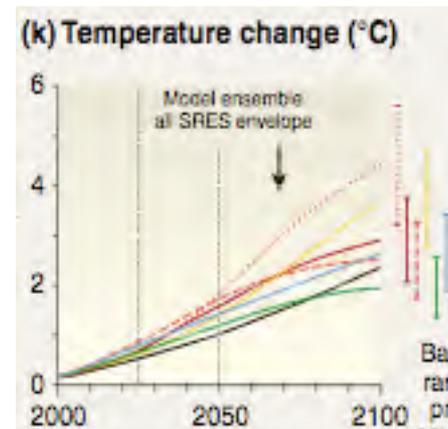
# モデルとは？ (例: 将来予測)



インプット  
(例: 排出量)



数値モデル計算  
(仮想の地球)

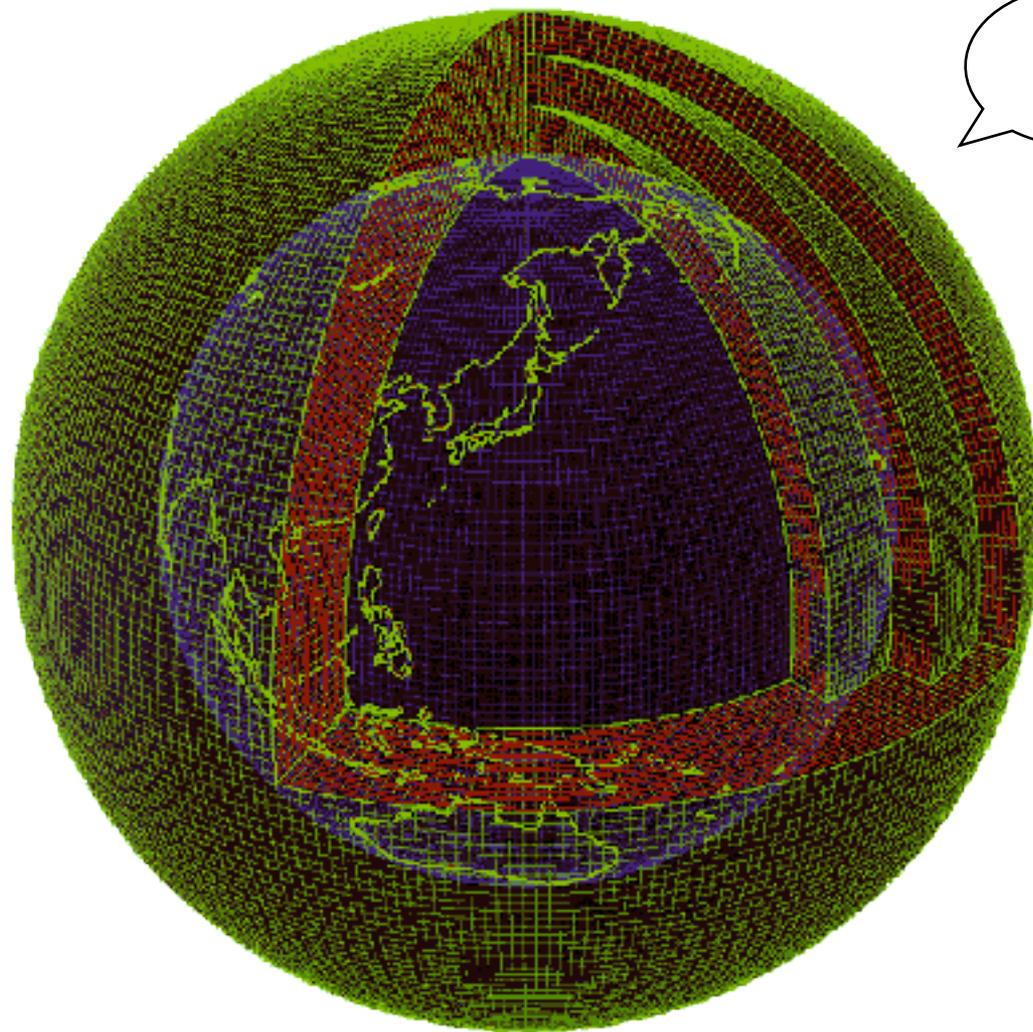


予測結果

**放射強制力や温度が計算できる！！**

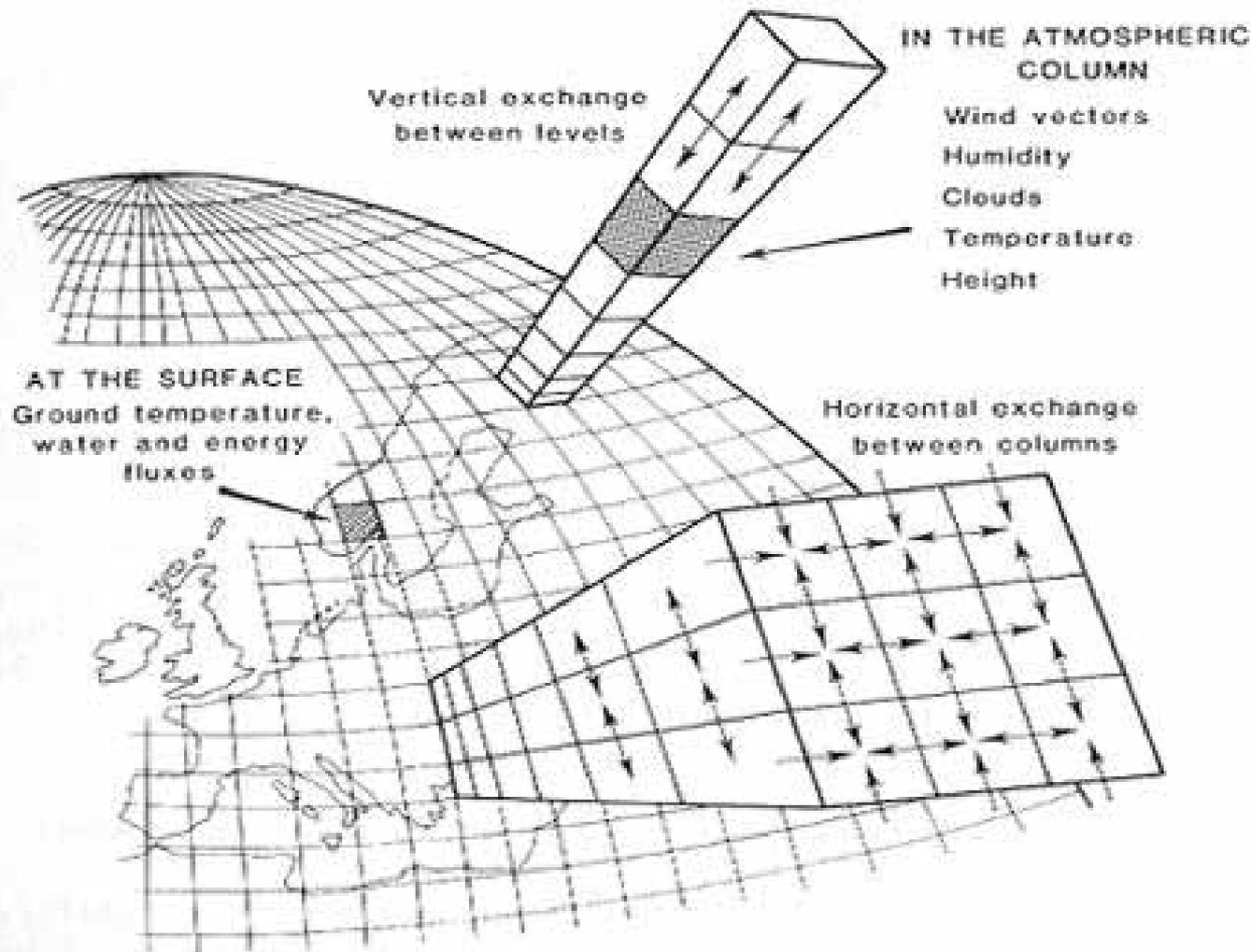
(モデルとは: 小田知宏 より)

# 大気輸送モデルの計算



このアミアミがすごく重要！ (モデルとは：小田知宏 より)

# 大気モデルの構造

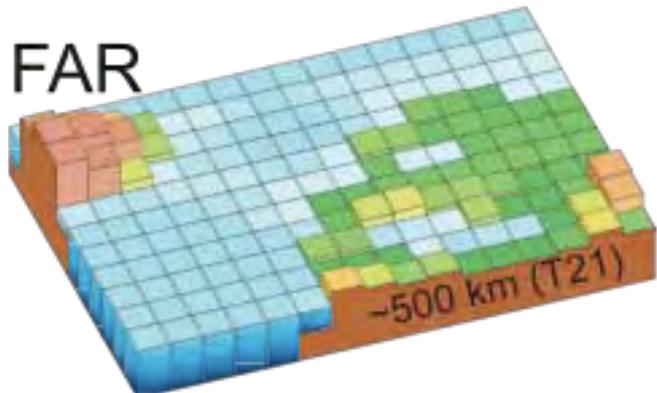


近づいてみると、こんな感じになっています。

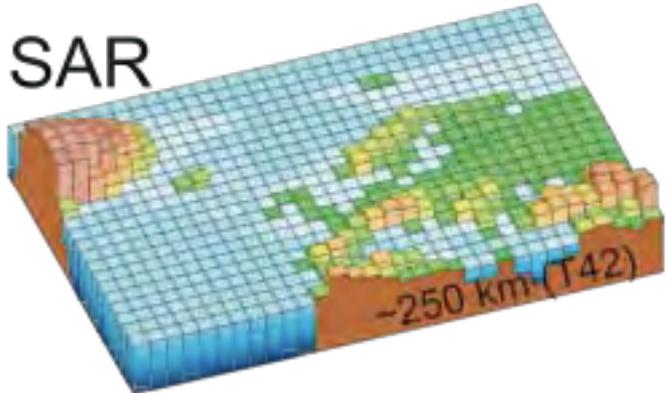
(モデルとは：小田知宏 より)

# アミアミの細かさ = 解像度

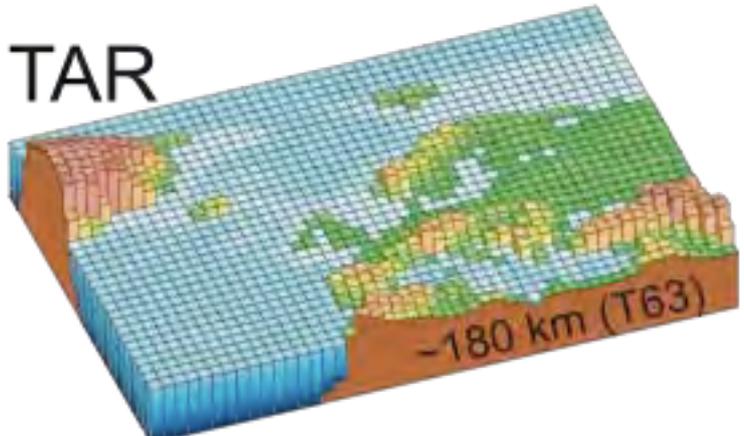
FAR



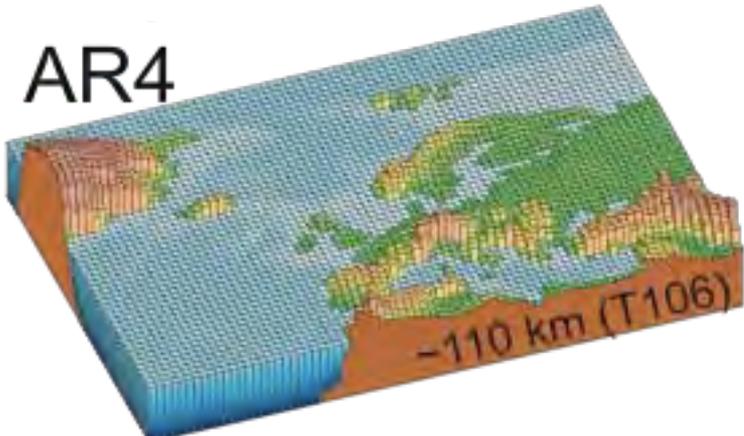
SAR



TAR



AR4



細かいと特徴がよくわかりますね。

(モデルとは：小田知宏 より)

- n モデルは事象の本質をうまく説明(再現・予測)するためのもの
- n モデルは近似によって構成されるため、必ず誤差(現実との乖離)が含まれる
- n 「誤差」の扱いが重要
  - n 最適性, 偏りの無さ
  - n ランダム誤差(バラツキ)と、バイアス誤差(カタヨリ)との見極めが重要
  - n 統計数理の方法で、ものごとの本質を正しく表現できるか...



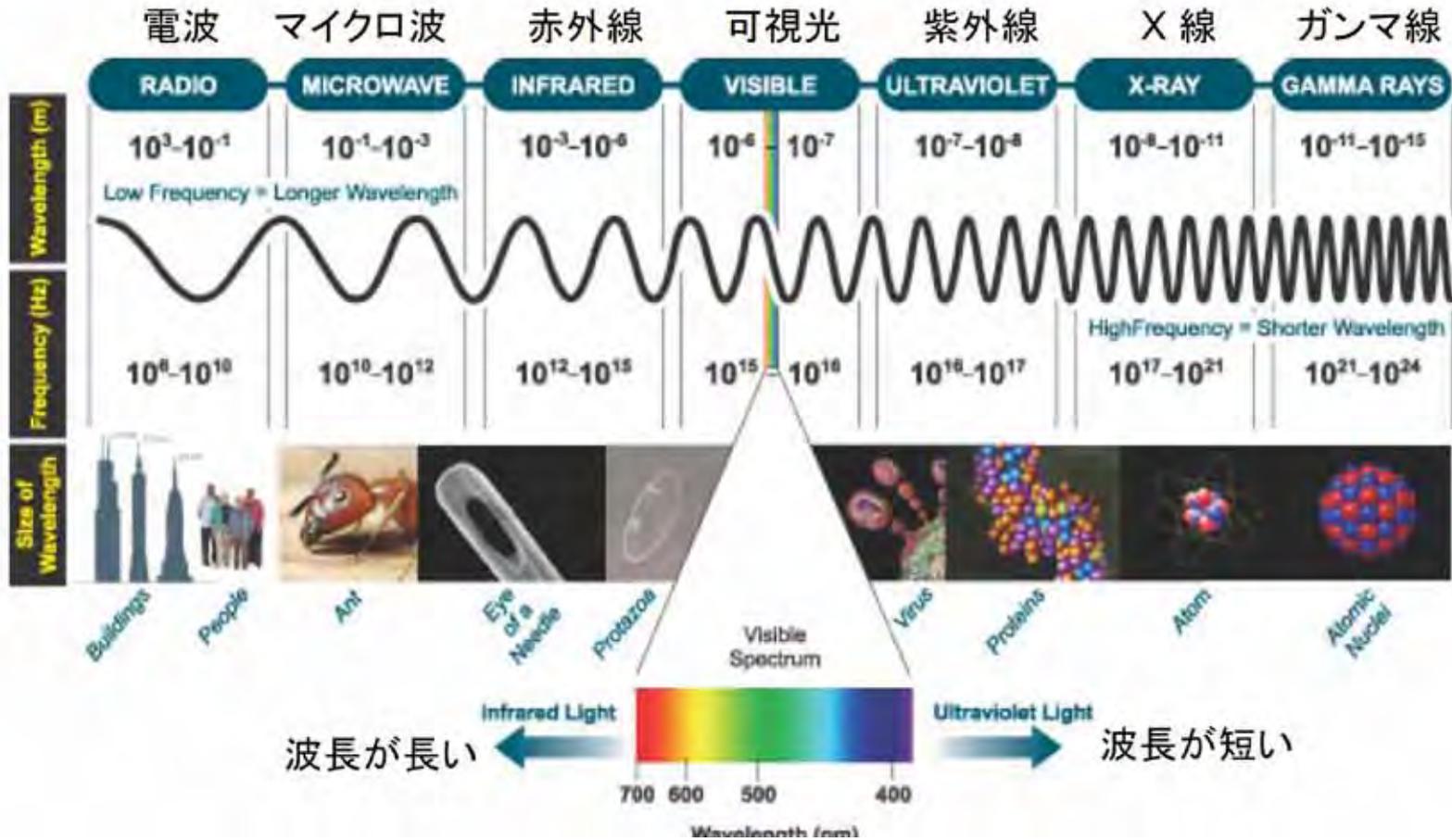
n どうして衛星から温室効果  
ガスの濃度がわかるの？

# スペクトルからどうして二酸化炭素 やメタンの濃度がわかるの？



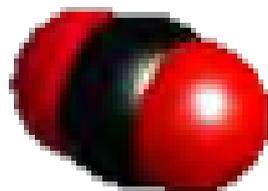
(「みずねこ色彩研究所」の  
ホームページより)

# スペクトルからどうして二酸化炭素 やメタンの濃度がわかるの？

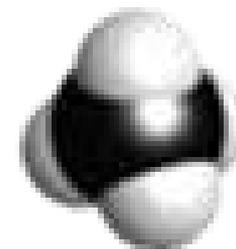


- n 直接測るわけではない
- n 離れて測る è “リモートセンシング”
- n 光の性質を利用して測る
- n 気体は固有の波長の光を吸収する性質がある

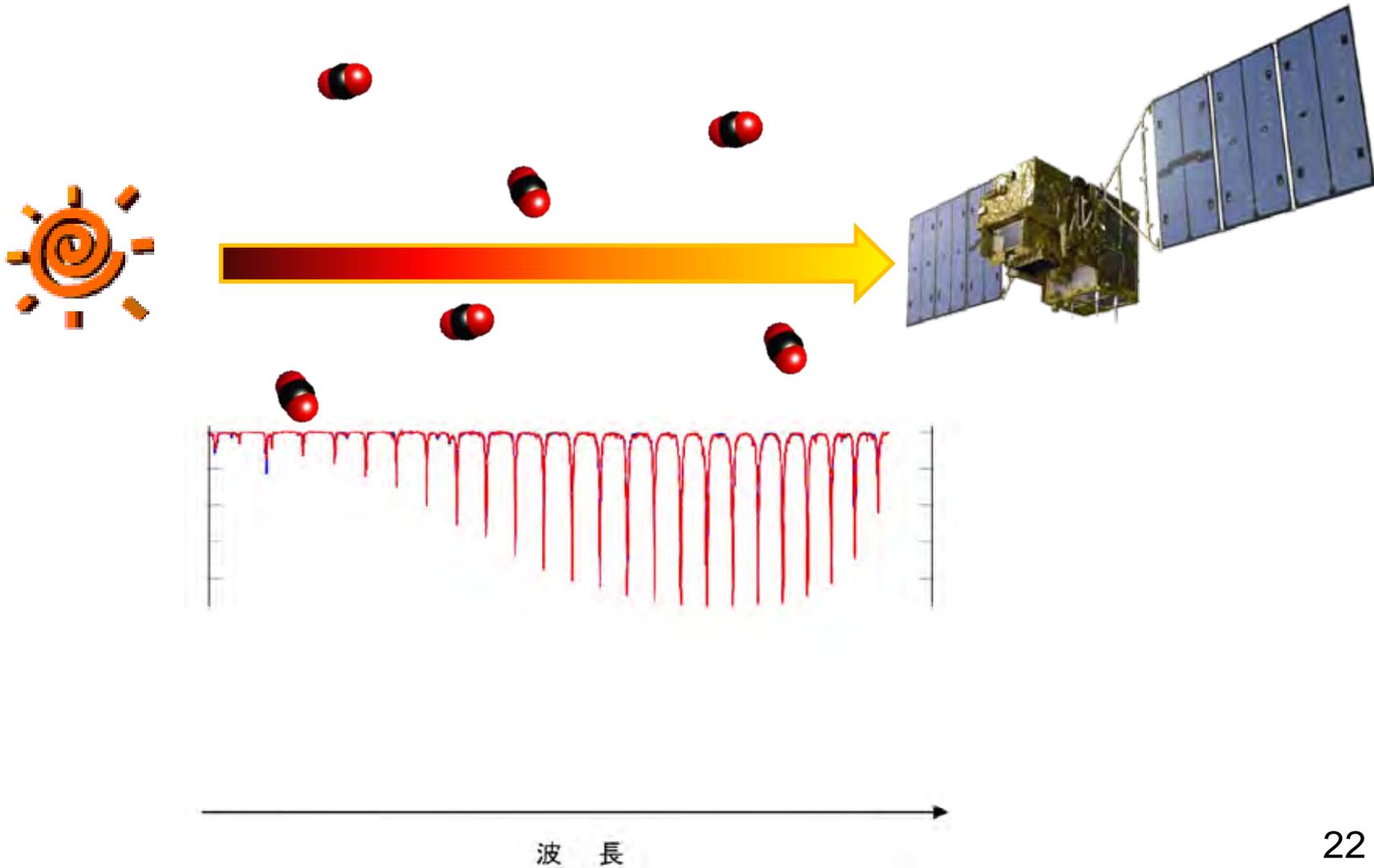
二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>)



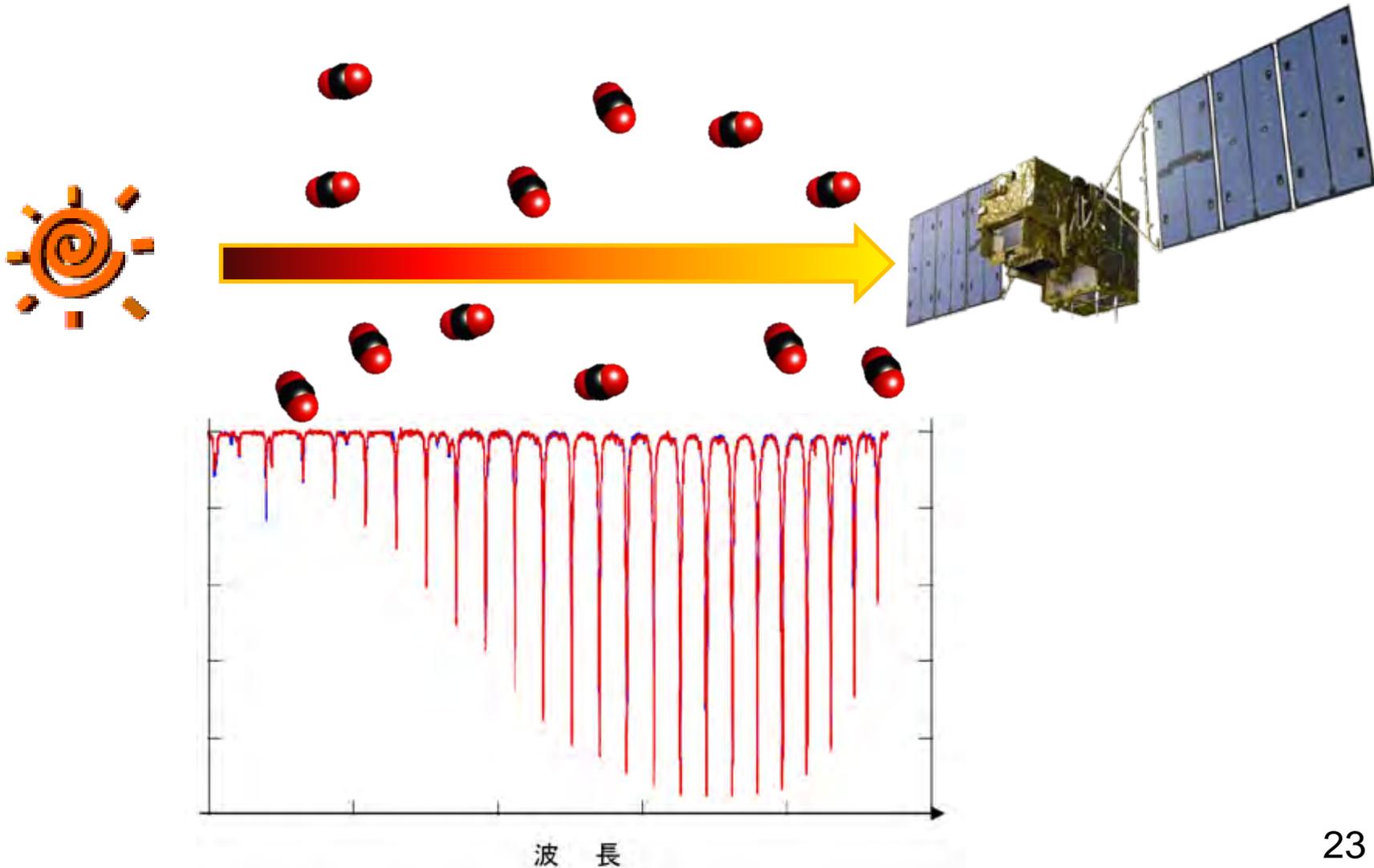
メタン(CH<sub>4</sub>)



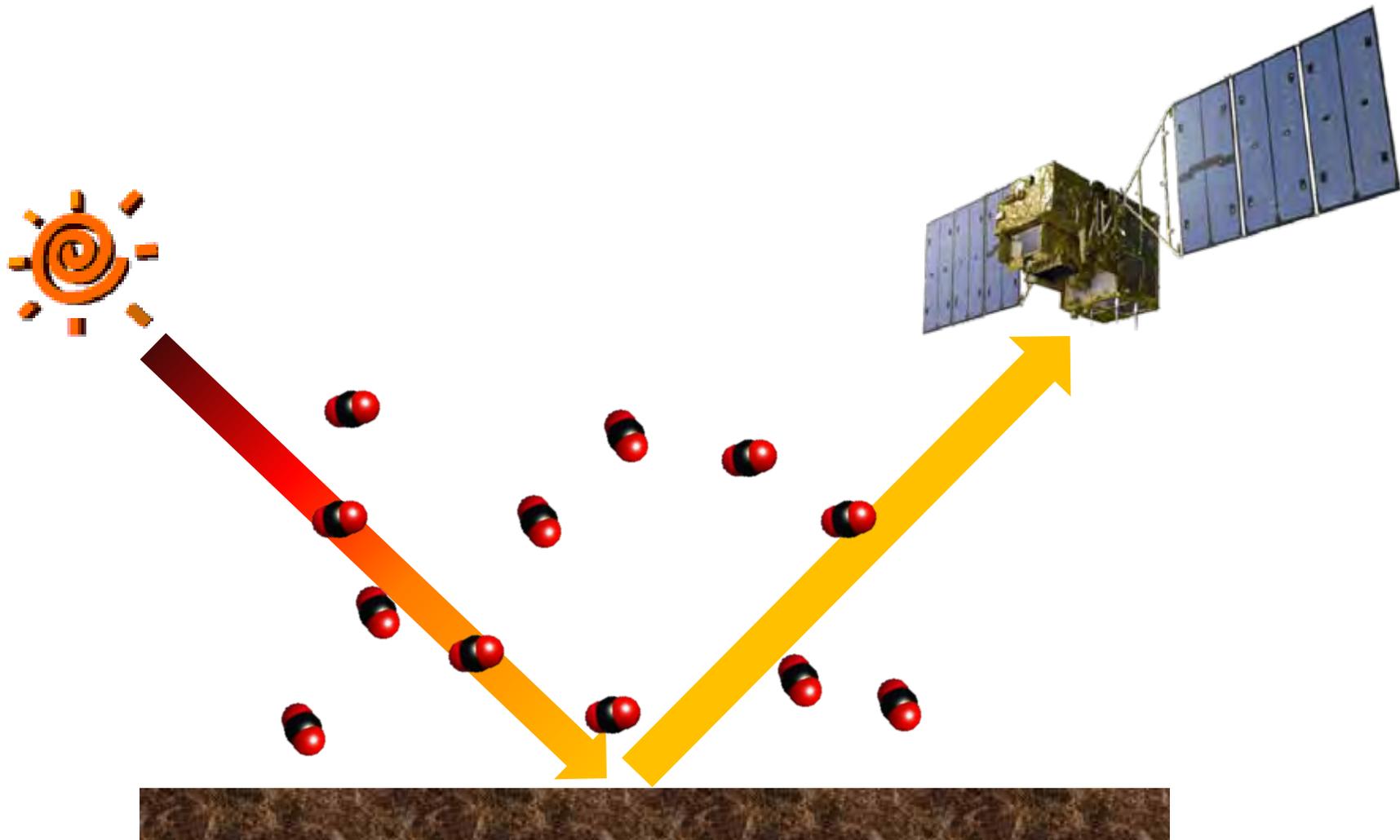
# スペクトルからどうして二酸化炭素 やメタンの濃度がわかるの？

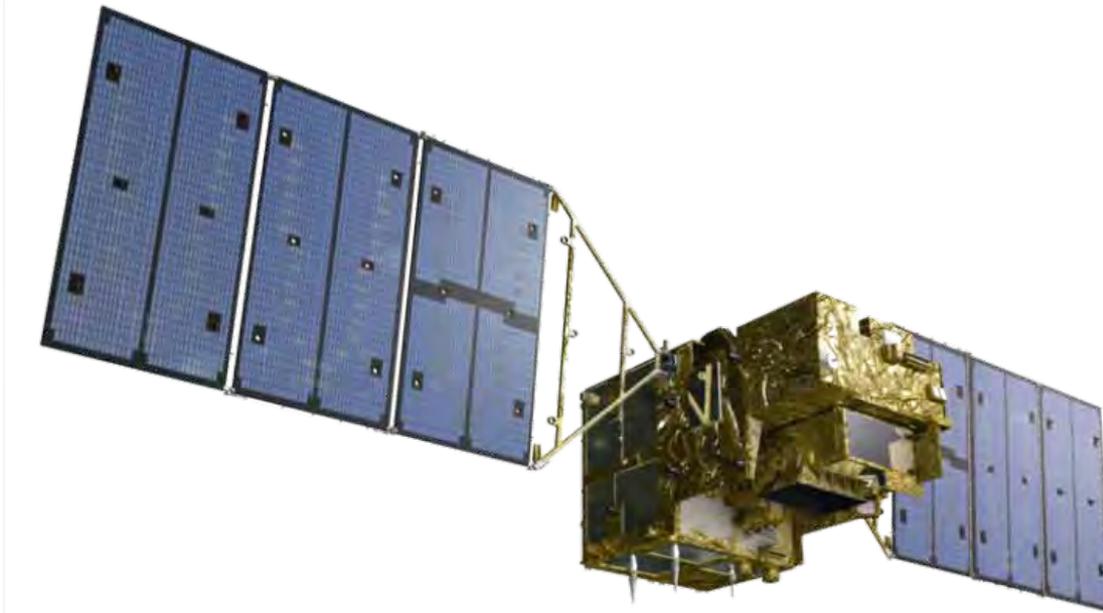


# スペクトルからどうして二酸化炭素 やメタンの濃度がわかるの？



# スペクトルからどうして二酸化炭素 やメタンの濃度がわかるの？





n 「いぶき」のセンサーと  
観測のしくみ

# 「いぶき」(GOSAT) の衛星システム

Thermal **A**nd **N**ear infrared **S**ensor for  
carbon **O**bservation 「炭素」

モニタカメラ

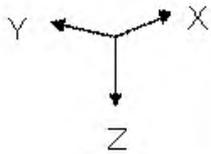
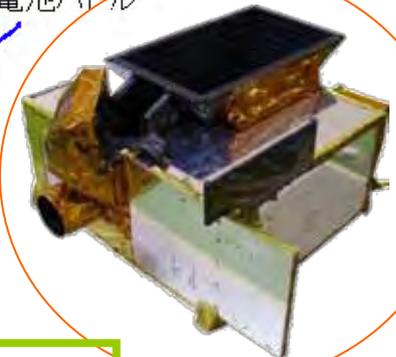
Sバンドアンテナ

技術データ取得装置

**TANSO-FTS**

温室効果ガス観測センサ

太陽電池パドル



地球方向

雲・エアロソルセンサ

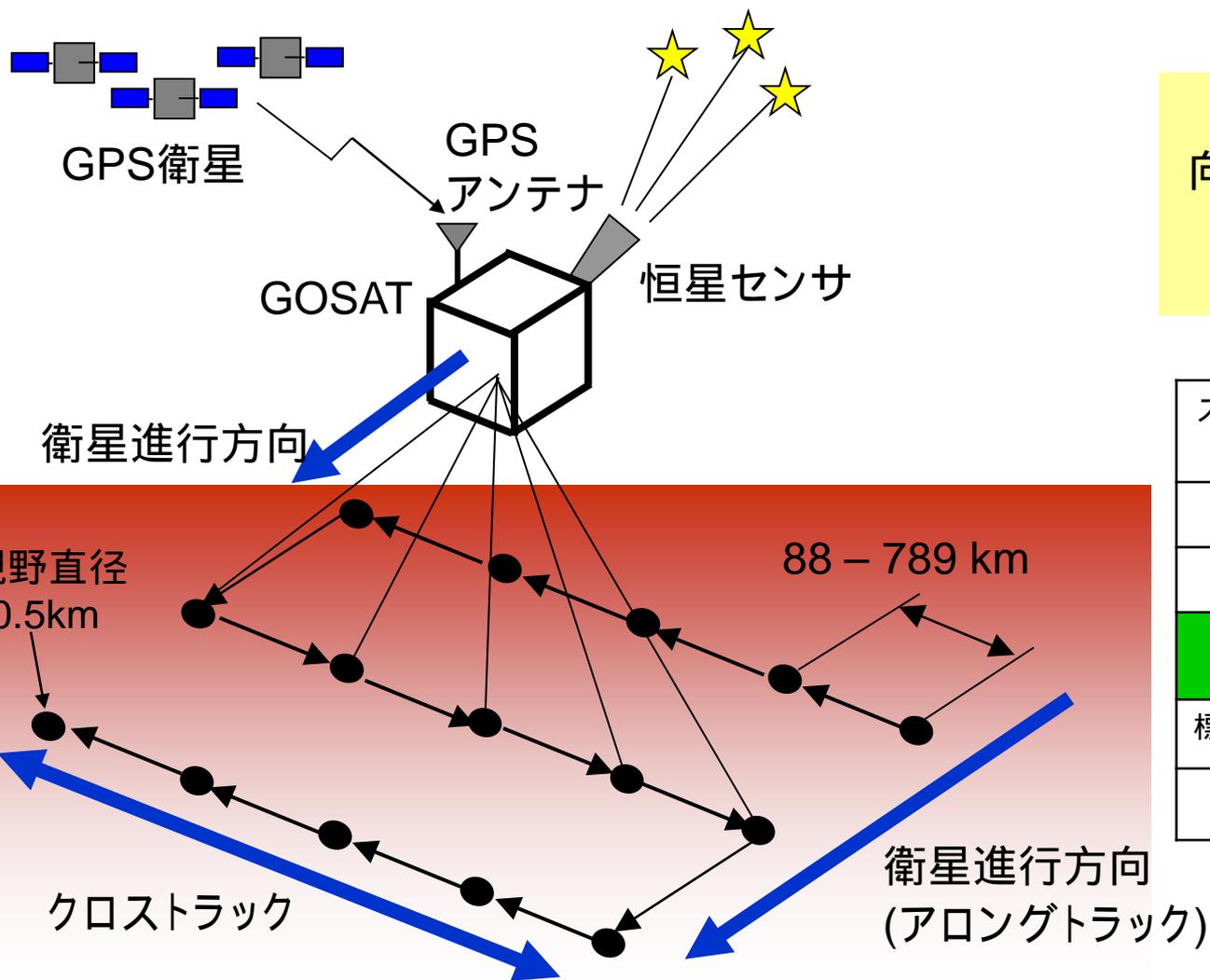
**TANSO-CAI**

サイズ  
 本体 : 高3.7m x 幅1.8m x 奥行2.0m  
 パドル翼端間 : 13.7 m  
 質量 : 1750 kg  
 発生電力 : 3.8 kw(EOL)  
 寿命 : 5 年  
 打上げ時期 : 2009年1月23日 12:54 (JS)  
 打上げロケット : H-IIAロケット 15号機



太陽同期軌道		
軌道	地方時	13:00+/-0:15
	高度	666 km
	傾斜角	98 度
	回帰	3 日 26

# 温室効果ガス観測センサの観測パターン



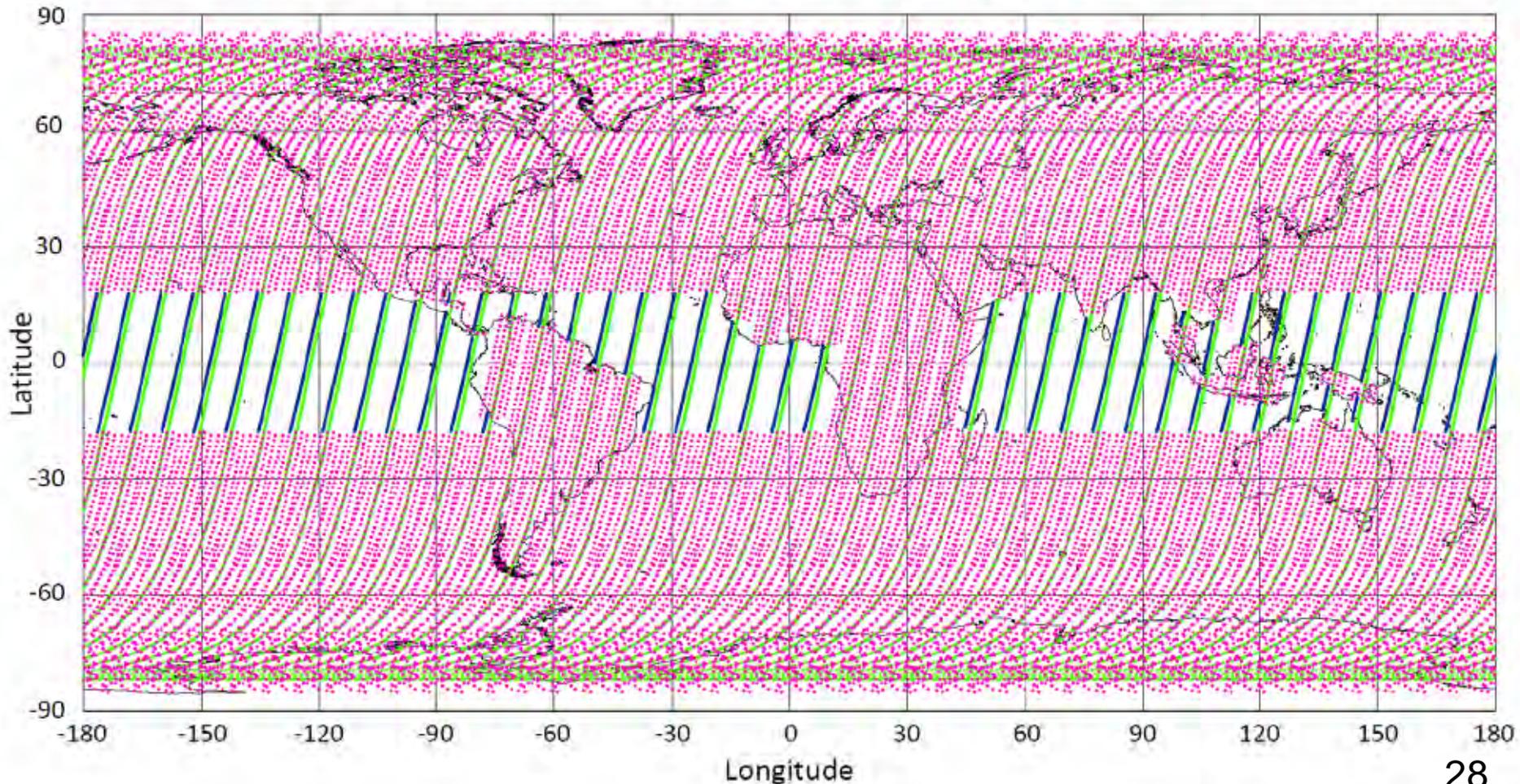
5種のクロストラック方向観測パターンを持つ。  
(1クロストラック走査あたり1, 3, 5, 7, 9点)

スキャン点数	観測間隔
1	789 km
3	263 km
5	158 km
標準モード	113 km
9	88 km

# 5点観測モード + 海上サングリント (春分・秋分点)

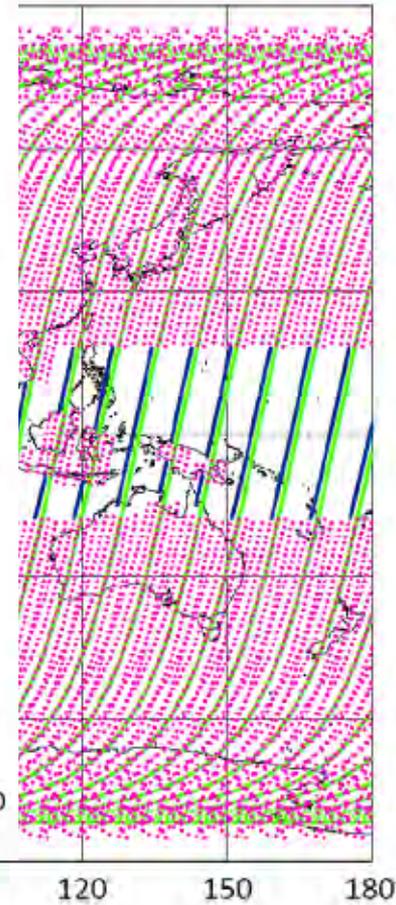
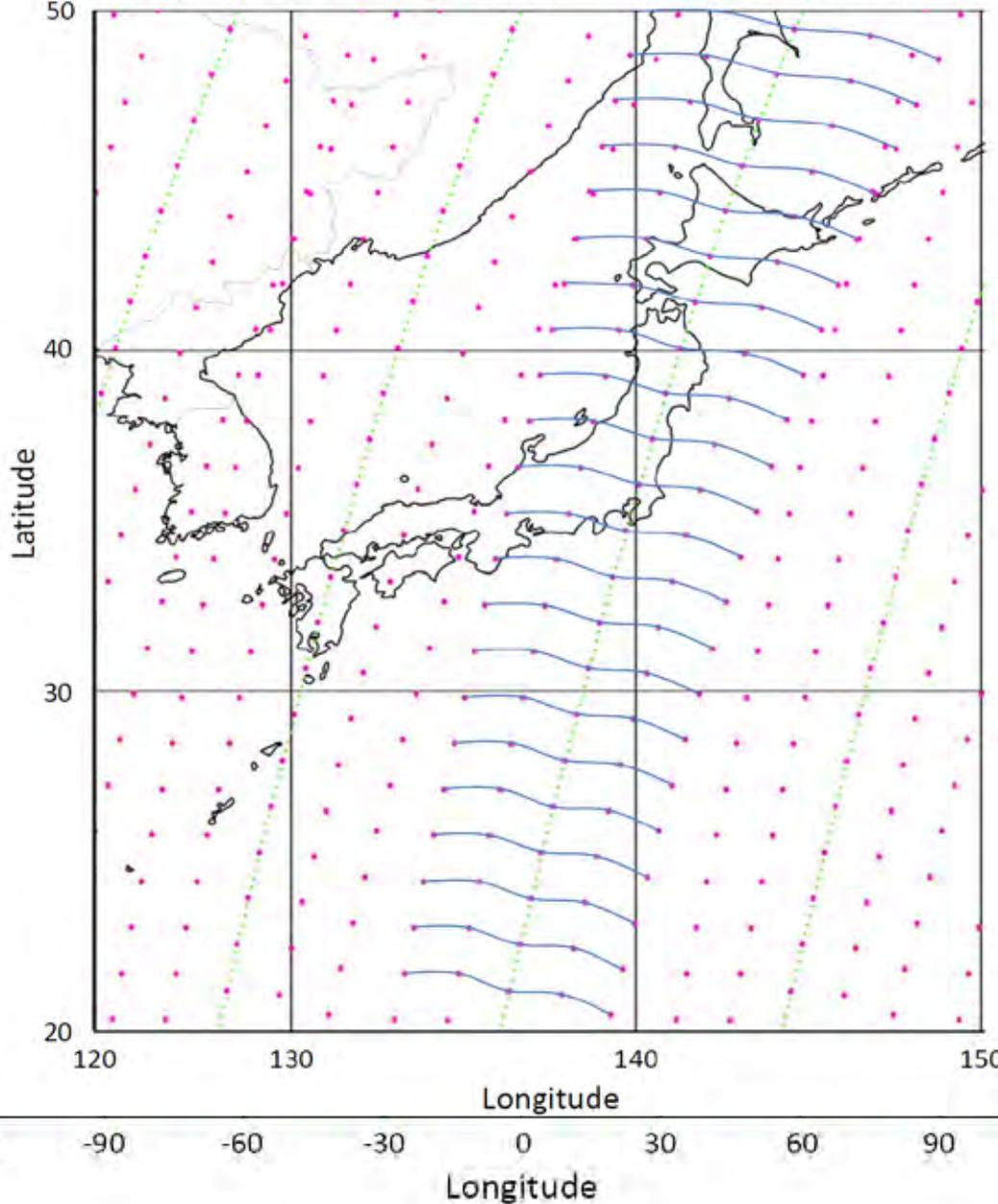
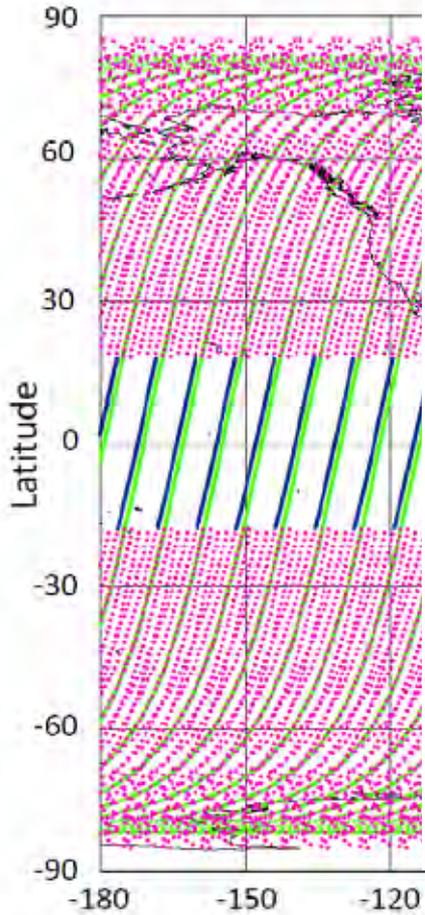


5-point and Sunlint mode : Vernal Equinox

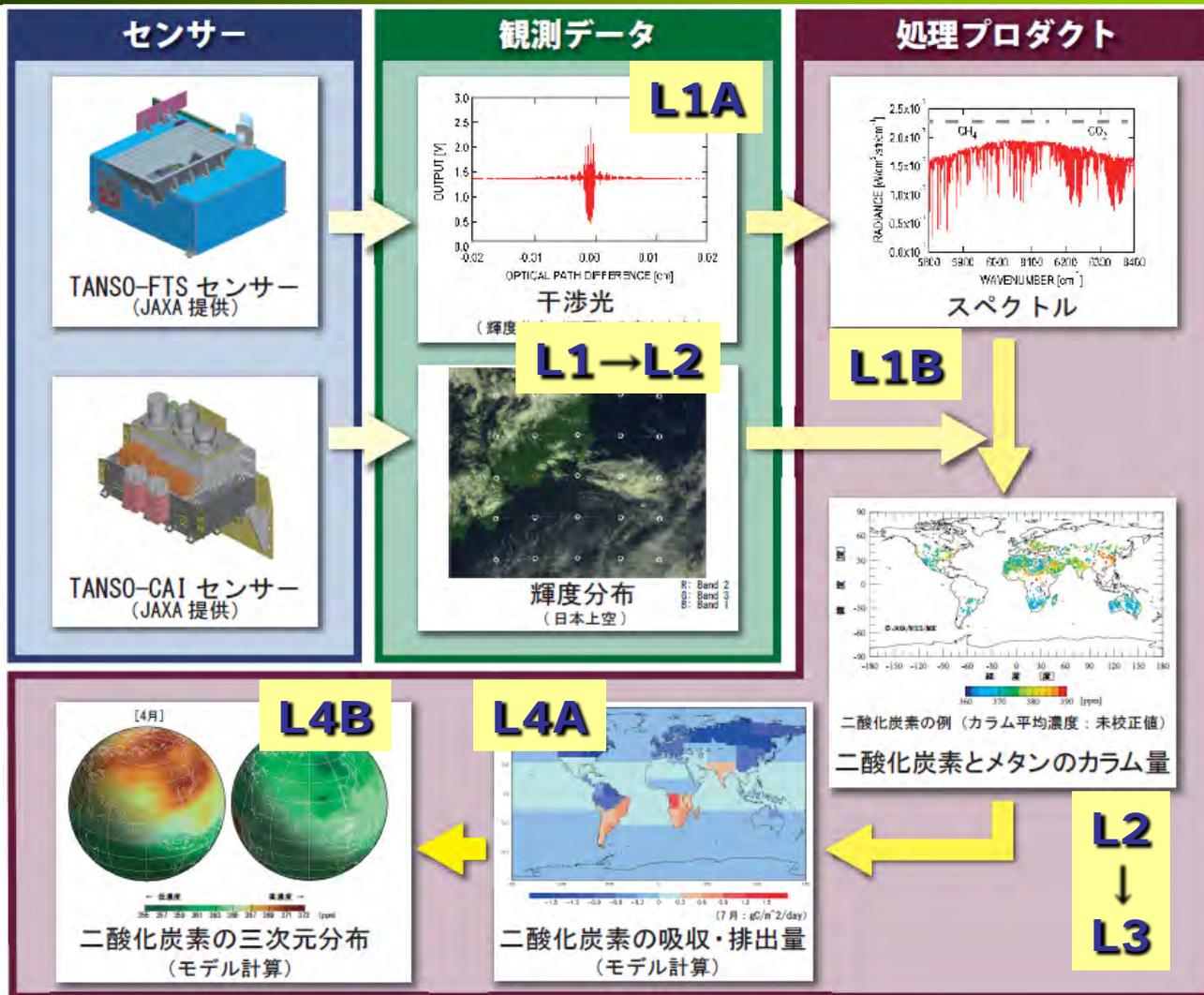


# 5点観測

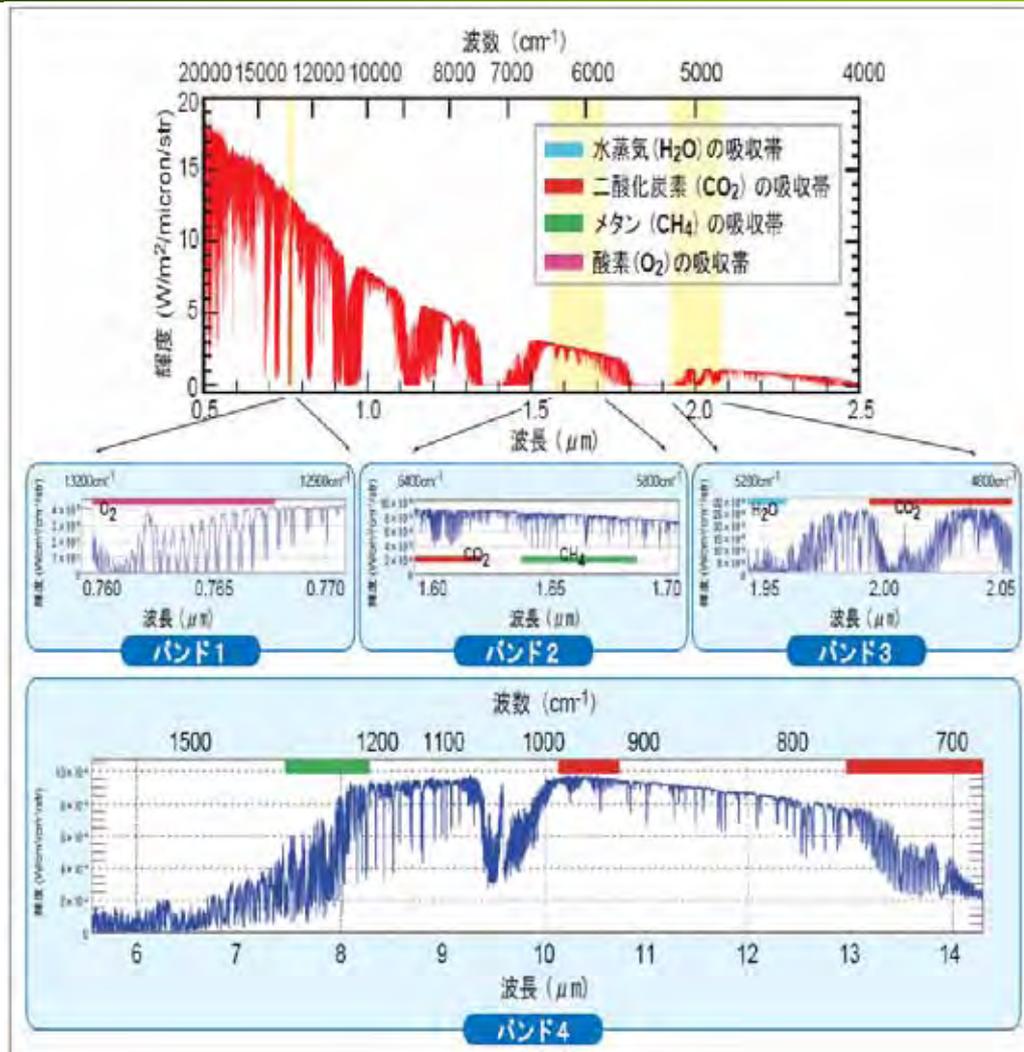
5-point and Sunlint mode : Vernal Equinox



# データ処理とプロダクト



# TANSO-FTSの観測スペクトル





- n **スペクトルをどうやって解析して温室効果ガスの濃度を求めているの？**

- 1) 良いスペクトルを選ぶ **フィルタリング**
- 2) 濃度を推定する **導出処理**
- 3) データ質から良い結果のみ選ぶ **スクリーニング**

# 導出処理：最適推定法 (Optimal Estimation)

観測情報



$$\text{コスト関数: } J(\mathbf{x}) = [\mathbf{y} - \mathbf{F}(\mathbf{x})]^T \mathbf{S}_e^{-1} [\mathbf{y} - \mathbf{F}(\mathbf{x})] + (\mathbf{x} - \mathbf{x}_a)^T \mathbf{S}_a^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_a)$$

$$\mathbf{x}_{i+1} = \mathbf{x}_i + \left( \mathbf{K}_i^T \mathbf{S}_e^{-1} \mathbf{K}_i + \mathbf{S}_a^{-1} + /_i \mathbf{D}^2 \right)^{-1} \left\{ \mathbf{K}_i^T \mathbf{S}_e^{-1} [\mathbf{y} - \mathbf{F}(\mathbf{x}_i)] + \mathbf{S}_a^{-1} (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_a) \right\}$$

$\mathbf{x}_i$                     状態ベクトル

$\mathbf{x}_a$                     状態ベクトルの先験値

$\mathbf{y}$                     観測スペクトル(ベクトル)

$\mathbf{S}_a$                     先験値の分散共分散行列

$\mathbf{S}_e$                     観測データの誤差分散共分散行列

$\mathbf{F}(\mathbf{x}_i)$               フォワードモデル(濃度→スペクトル)

$\mathbf{K} = \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}}$                     ヤコビアン

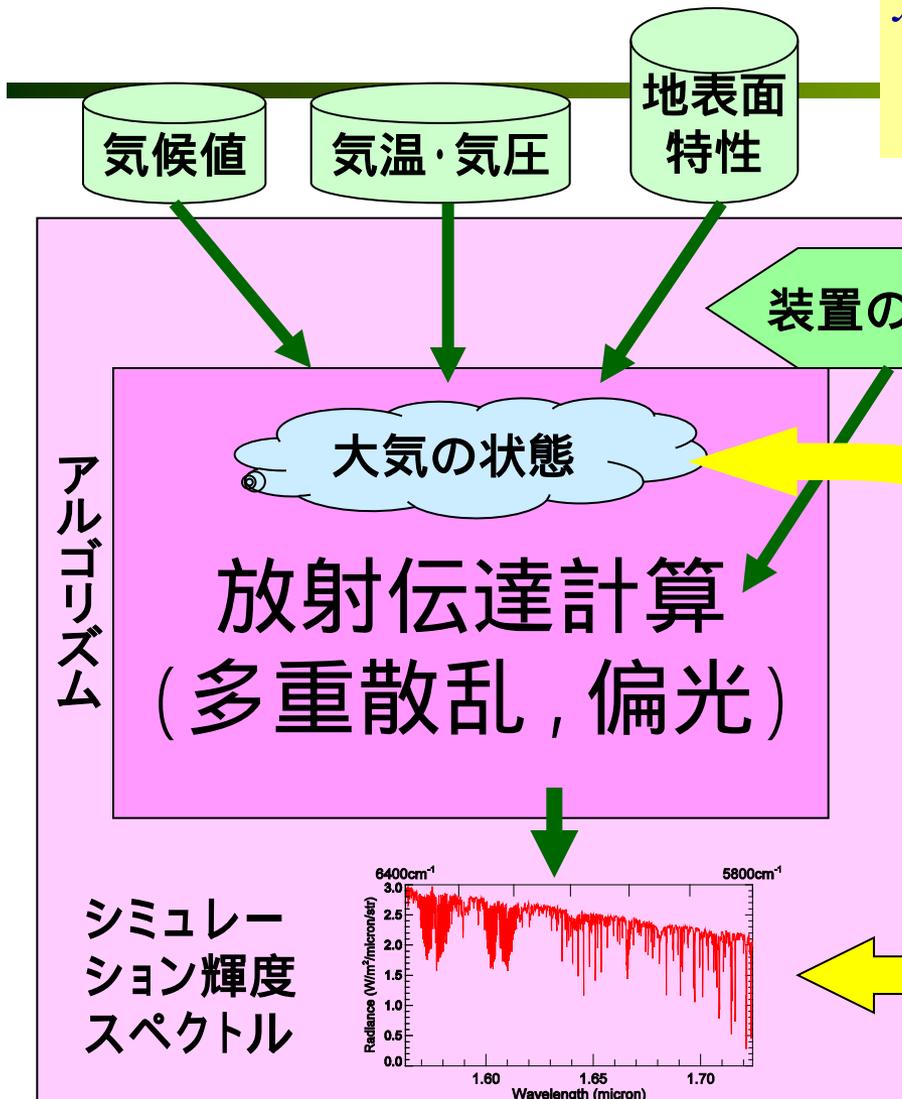
先験値による拘束

# 導出処理の概念

(導出)

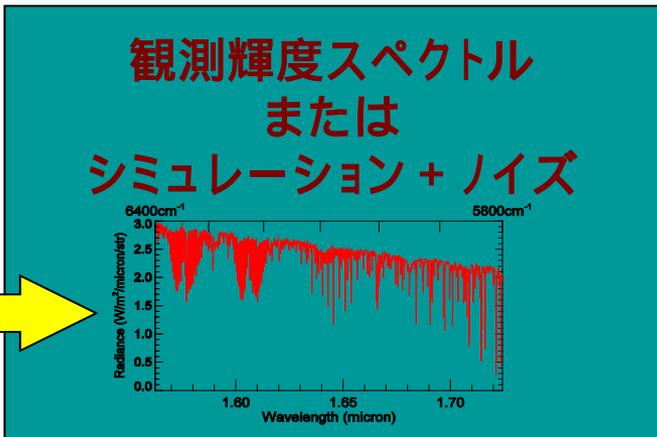


$$\hat{x} = x(\text{先験情報}) + Dx(\text{観測に基づく修正量})$$



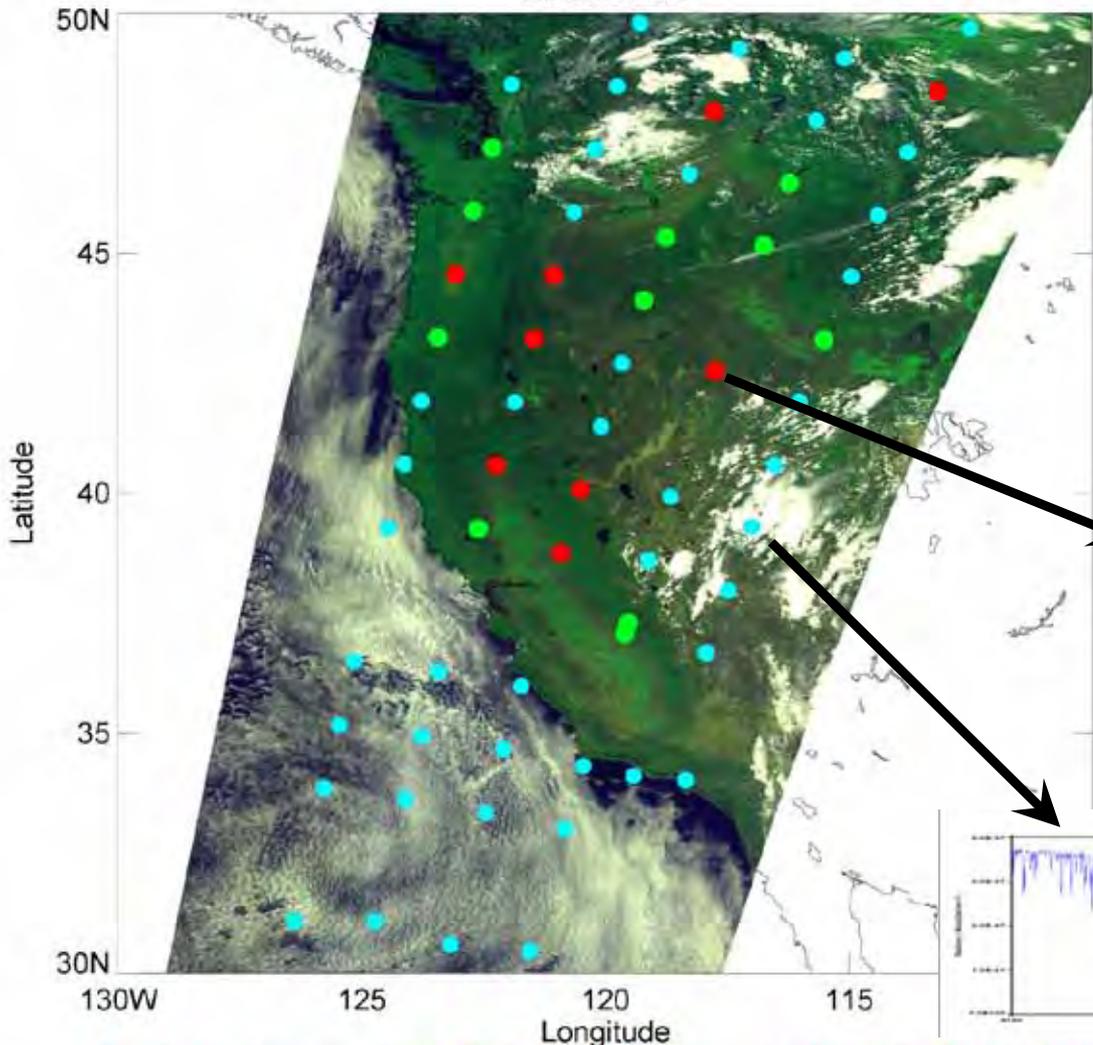
スペクトル残差の重み付き二乗和が最小になるように未知パラメータ(カラム濃度)を調整 (繰り返し演算)

比較

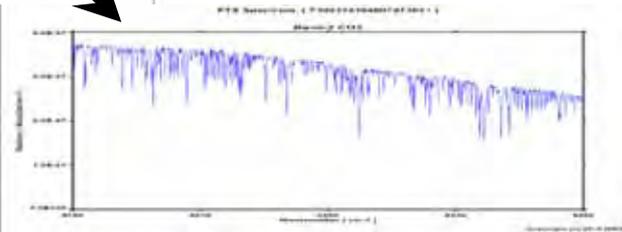
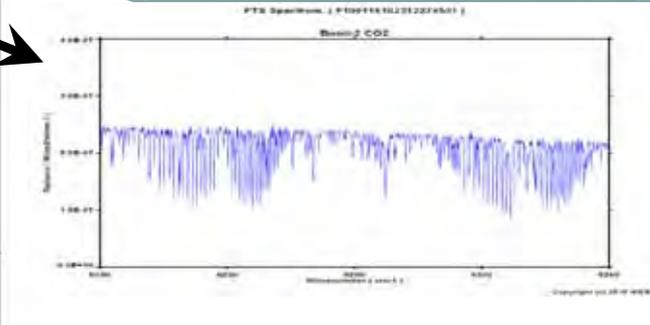


# 「いぶき」の観測とガス濃度の導出

20090724



観測点  
晴れていると判定された点  
品質がよいと判定された点



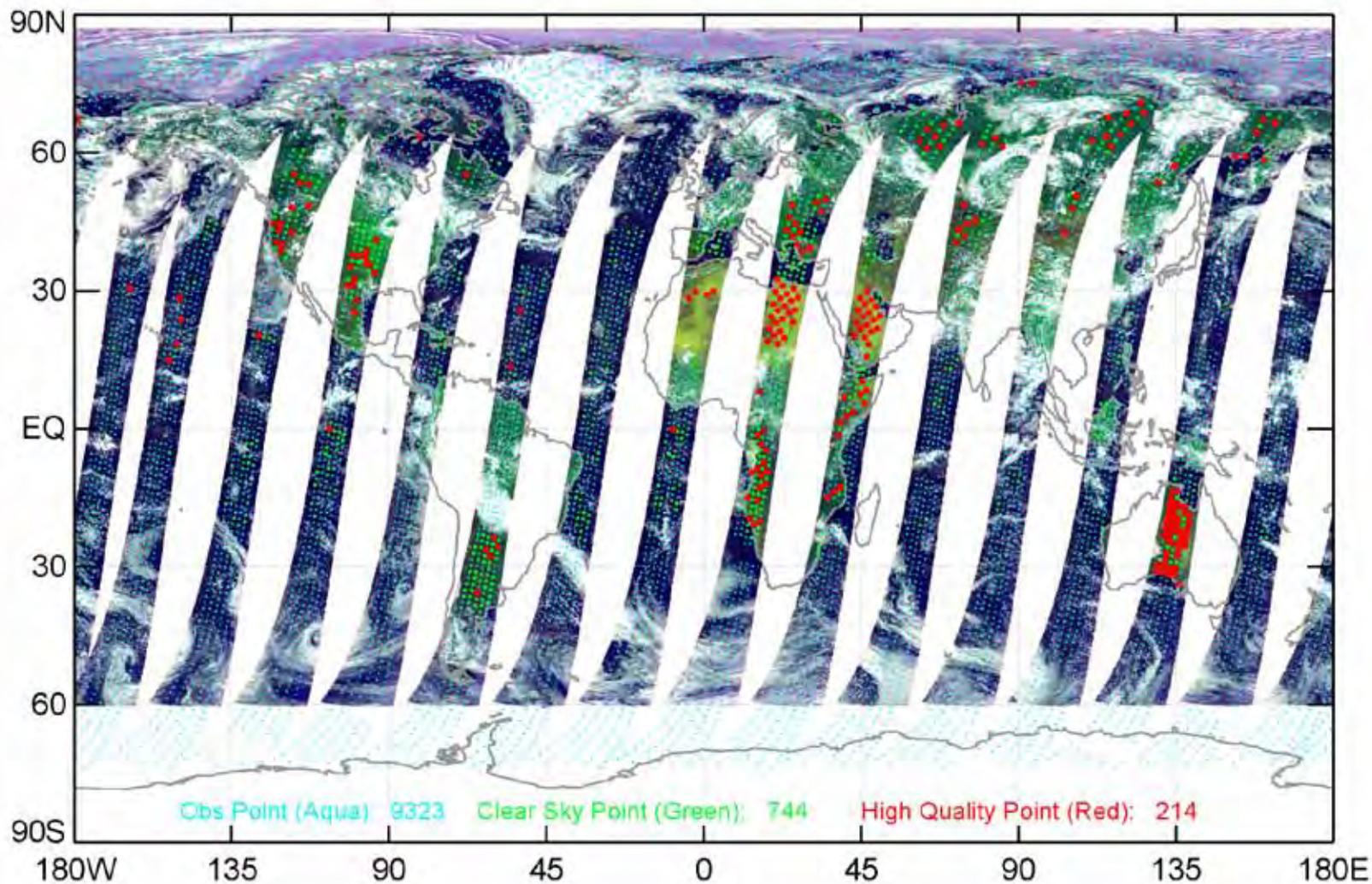
Obs.Point (Aqua)    Clear Sky Point (Green)    High Quality Point (Red)

# 「いぶき」の観測とガス濃度の導出

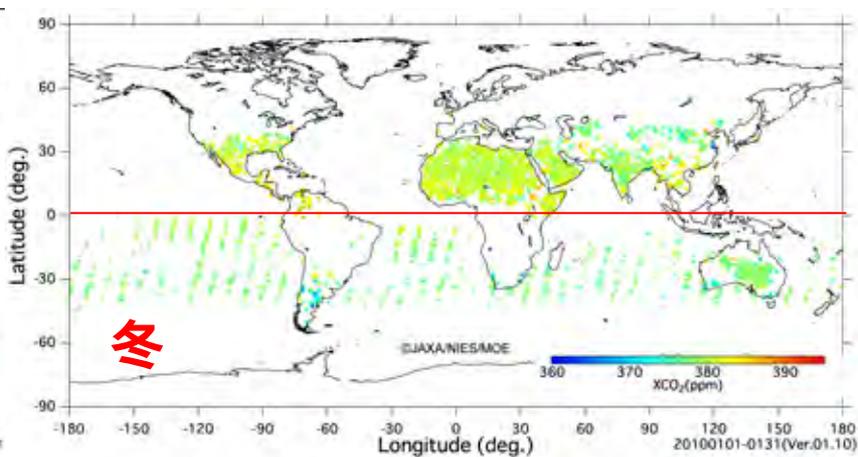
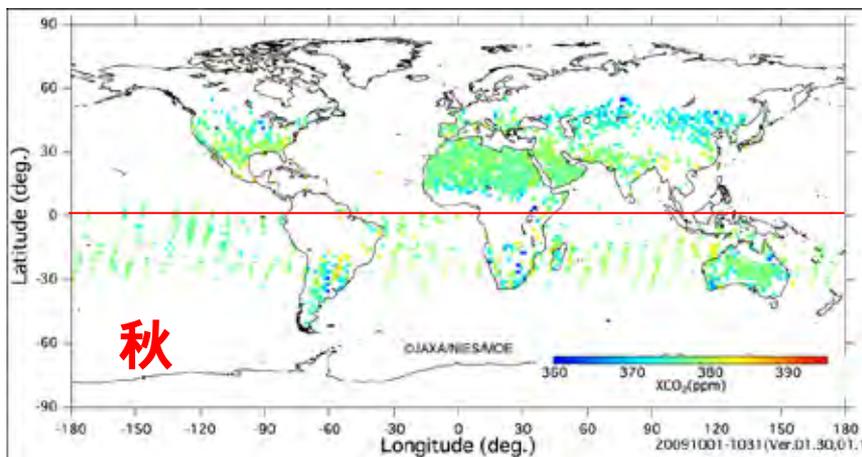
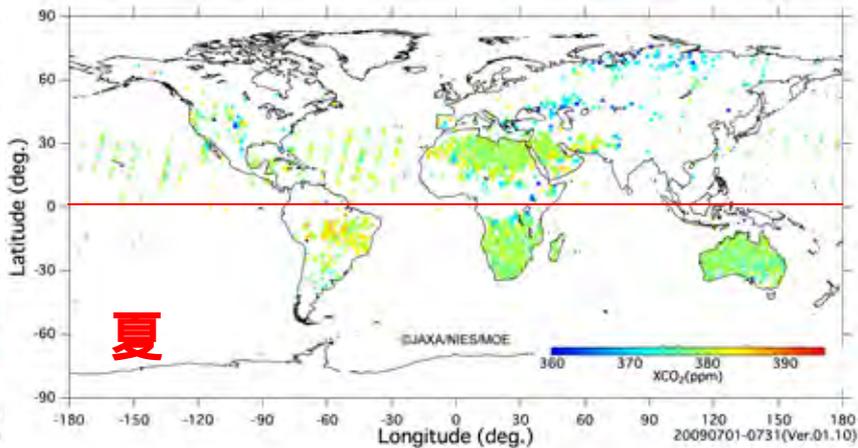
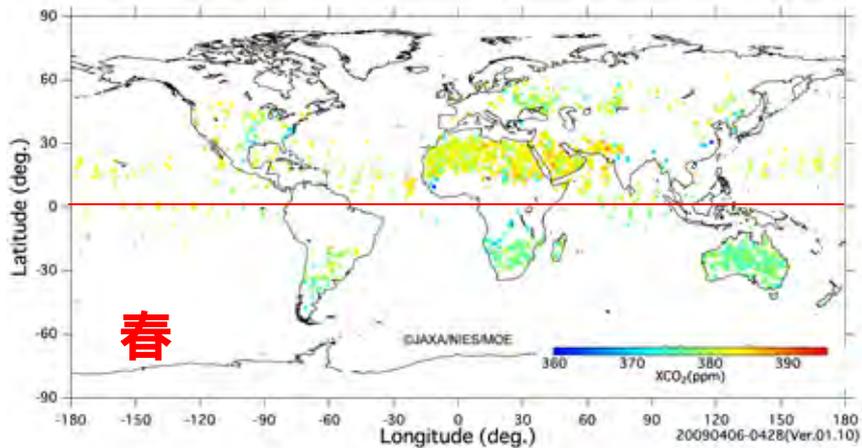
観測点

晴れ判定点

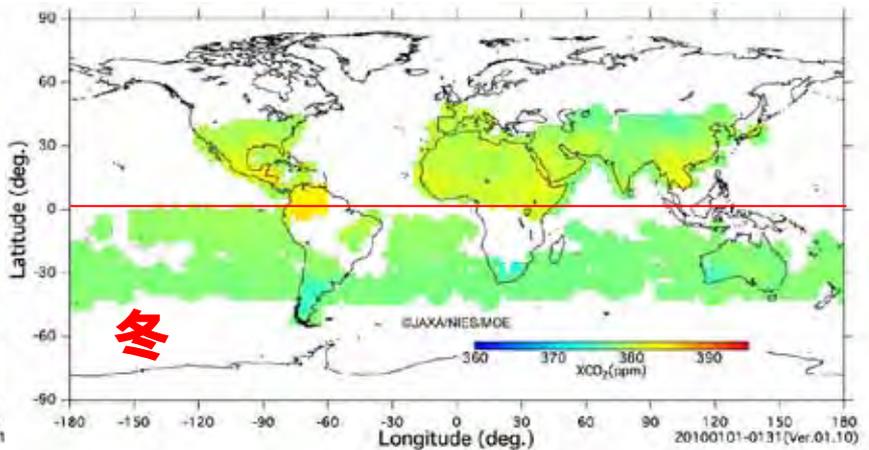
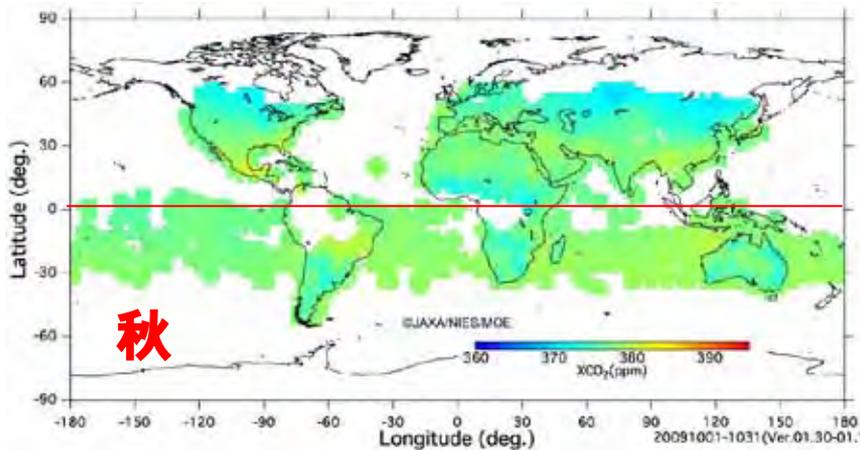
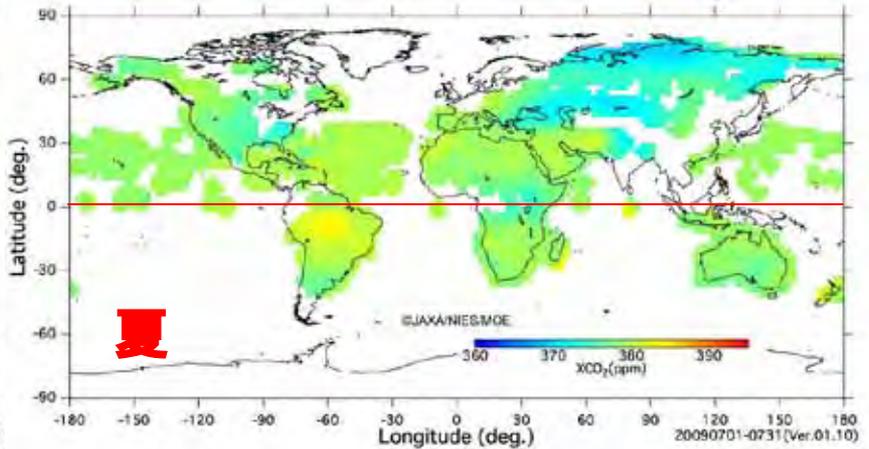
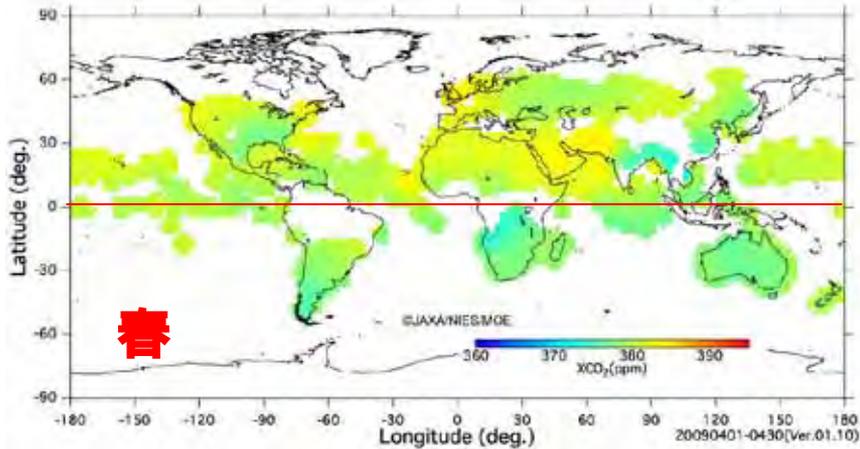
良品質判定点(導出点)



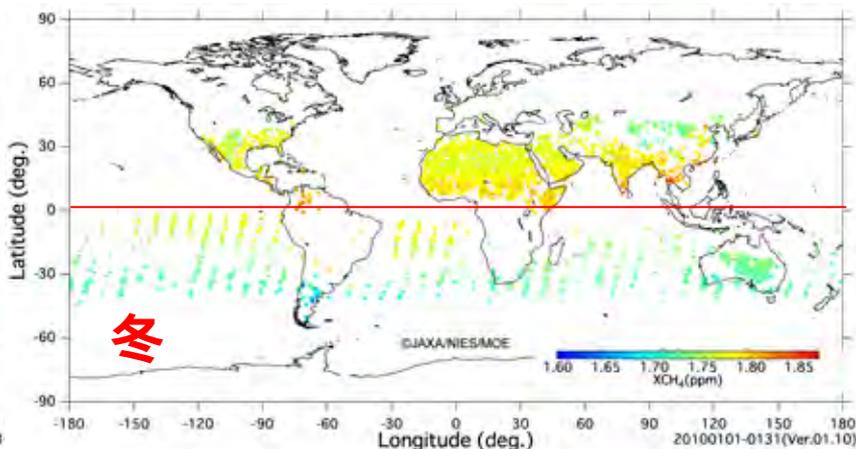
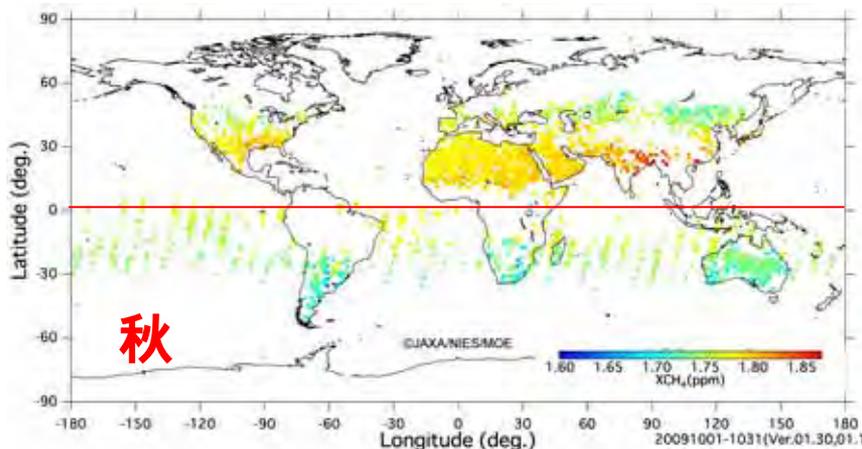
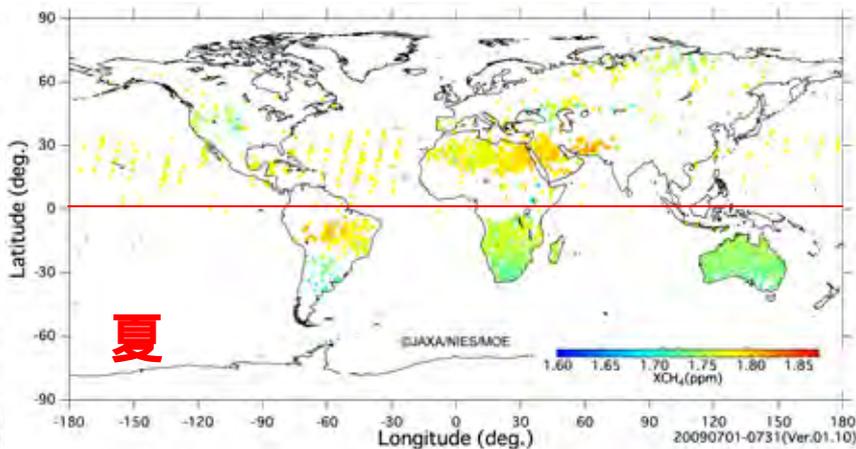
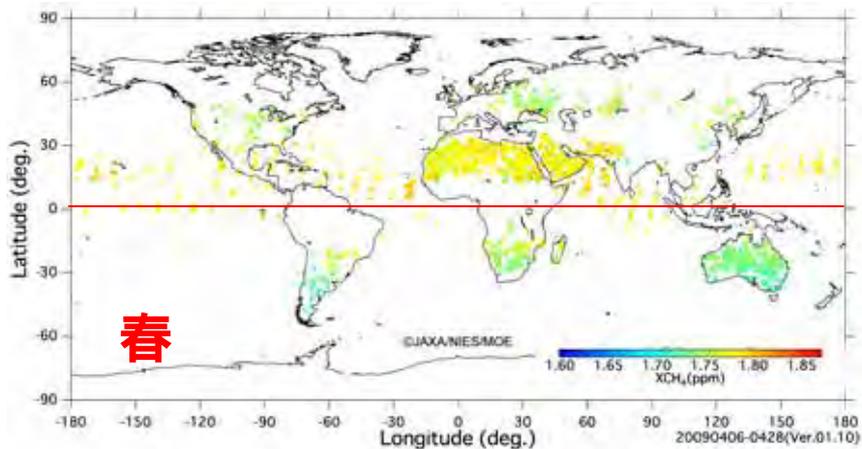
# 「いぶき」にみる 二酸化炭素分布 の四季の変化



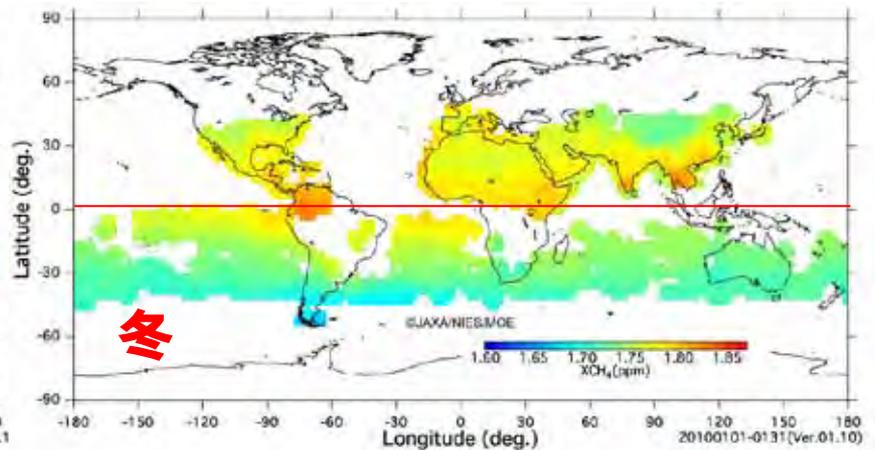
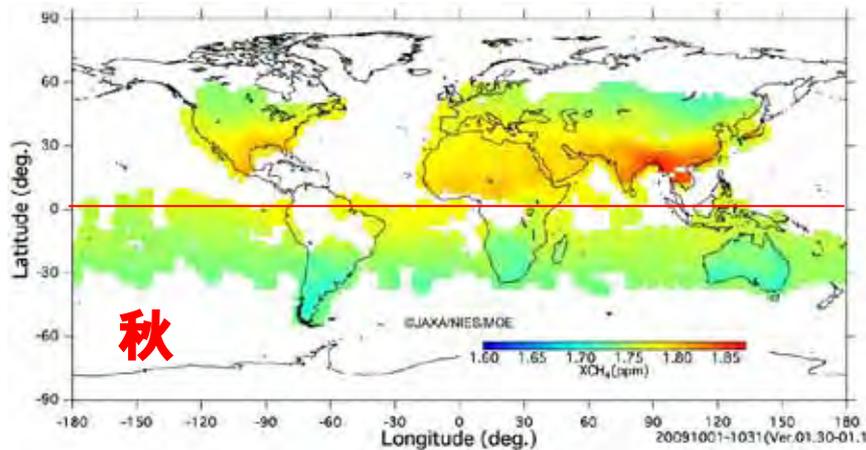
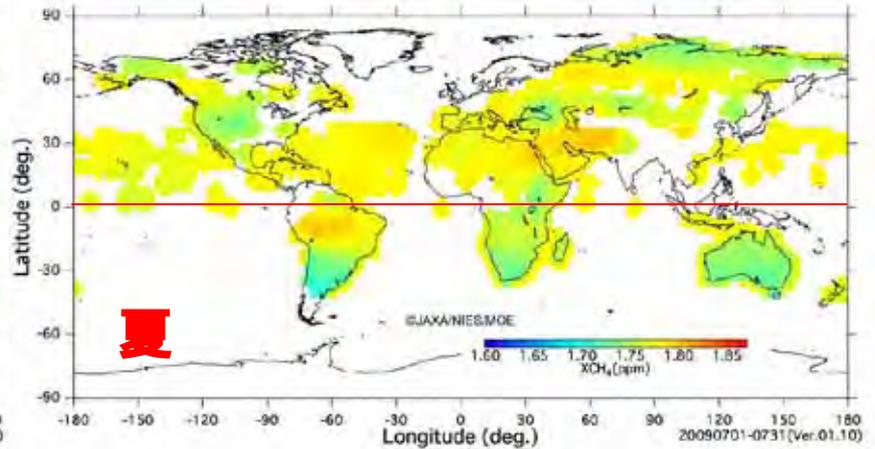
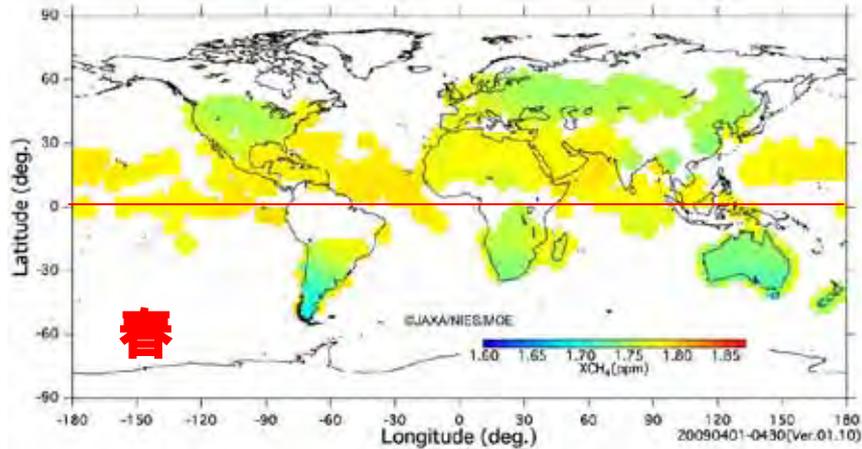
# 四季の二酸化炭素濃度の 「レベル3」マップ



# 「いぶき」にみる メタン分布 の四季の変化



# 四季のメタン濃度の 「レベル3」マップ

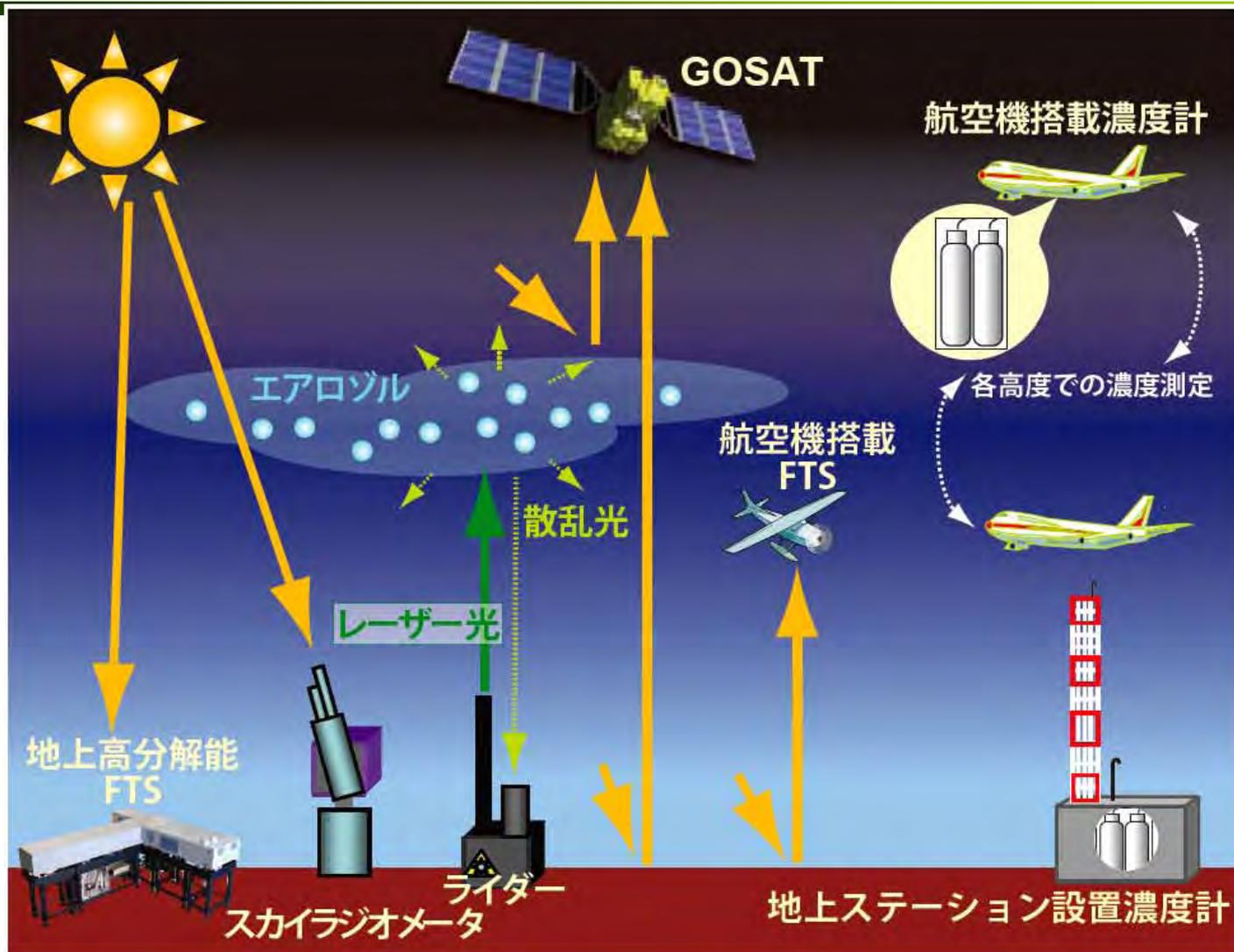


# 推定された結果は……

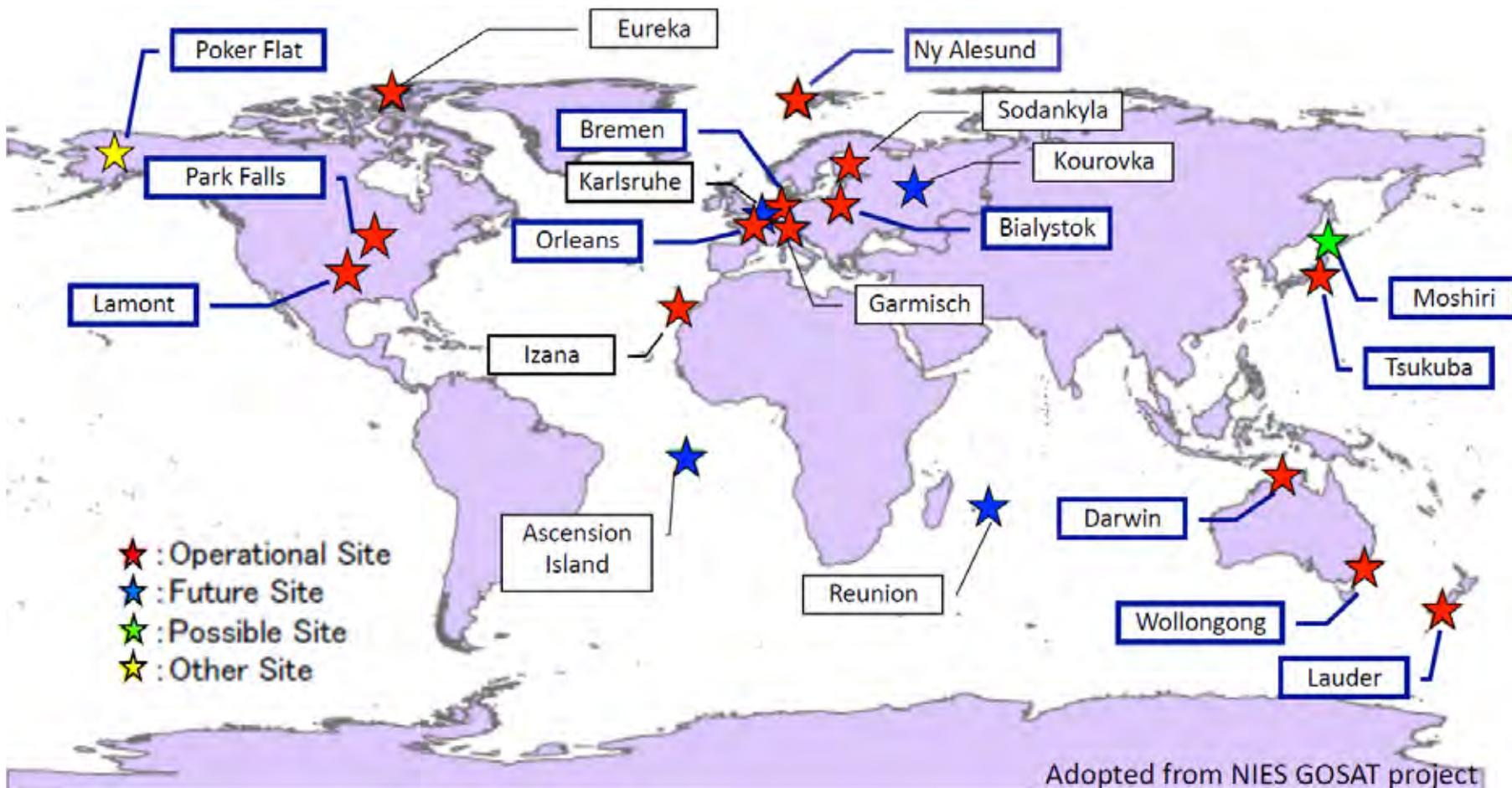


- ⌋ どれくらい正しいのかを**確認**しなければ使えない、使ってもらえない…
- ⌋ 正しいとは？
  - ⊖ 本当の値から、どの程度ずれているのか？（バイアス，確度）
  - ⊖ 同じ濃度の大気を測って、測るたびにどれくらいまちまちな値を示すのか？（バラツキ，精度）
- ⌋ これを地域別・季節別に求める作業（研究）が  
**「検証」**

# 検証観測の模式図



# 「いぶき」の検証に利用している世界の 地上設置高分解能FTSの観測地点



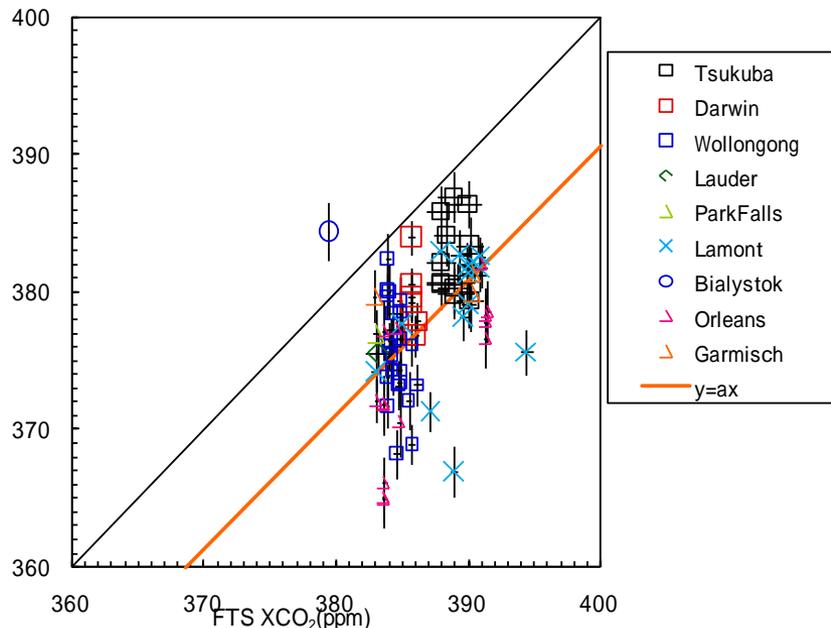
□ : 進捗中

TCCON=Total Carbon Column Observing Network  
 (<http://www.tccon.caltech.edu/index.html>)

# 地上高分解能 FTS による検証結果

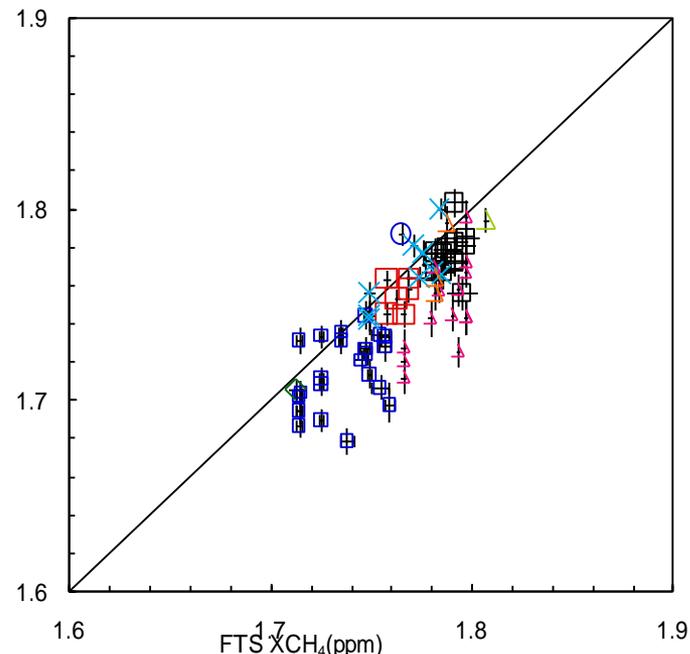


GOSAT による二酸化炭素カラム量



地上FTSによる二酸化炭素カラム量  
(検証データ)

GOSAT によるメタンカラム量



地上FTSによるメタンカラム量  
(検証データ)

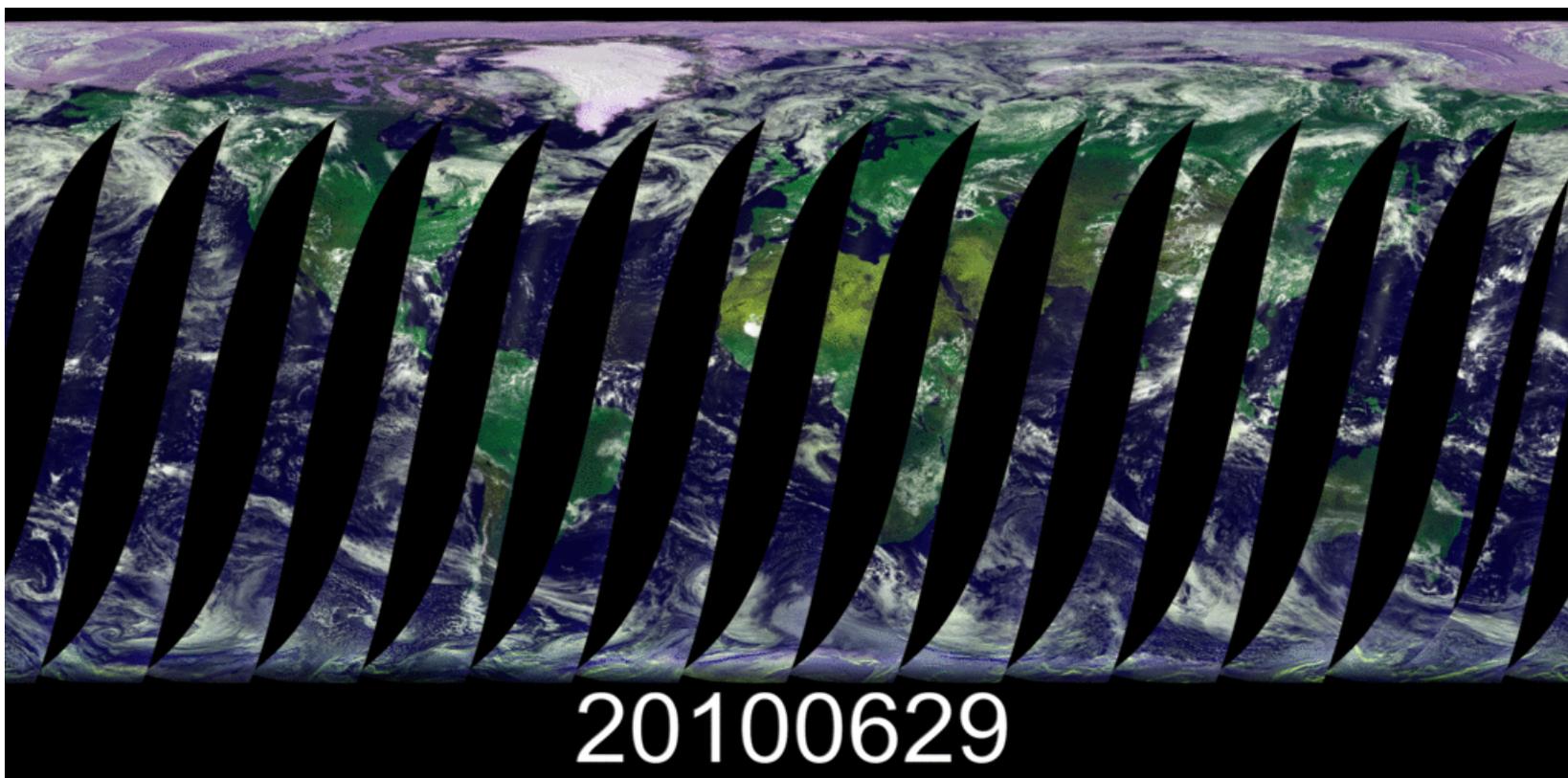
TCCON等のデータを利用, 黒線は 1:1 の直線、**橙線**は  $y=aX$  として求めた回帰直線

## 【検証結果概要】

- ・二酸化炭素は2～3%の負の濃度バイアスが見られる。メタンの濃度バイアスは小さい。
- ・GOSATデータのばらつきは、二酸化炭素・メタンともに2～3%。

# 「いぶき」のもう一つの眼

## ☒ 雲・エアロソルセンサ

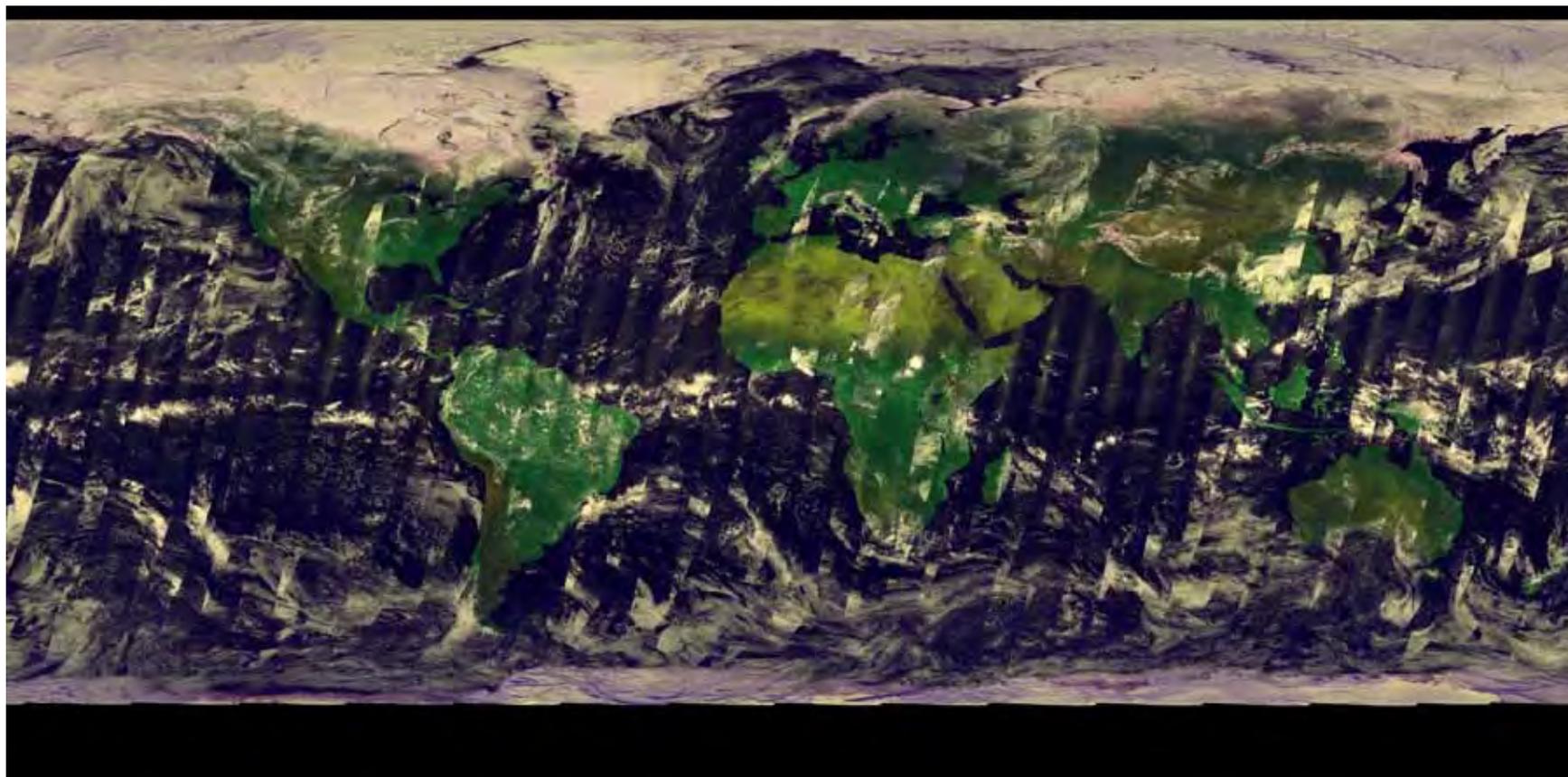


# 雲・エアロソルセンサの3日分の画像

2009年4月23日 ~ 25日



Red: Band 2 (0.67 $\mu$ m) Green: Band 3 (0.87 $\mu$ m) Blue: Band 1 (0.38 $\mu$ m)

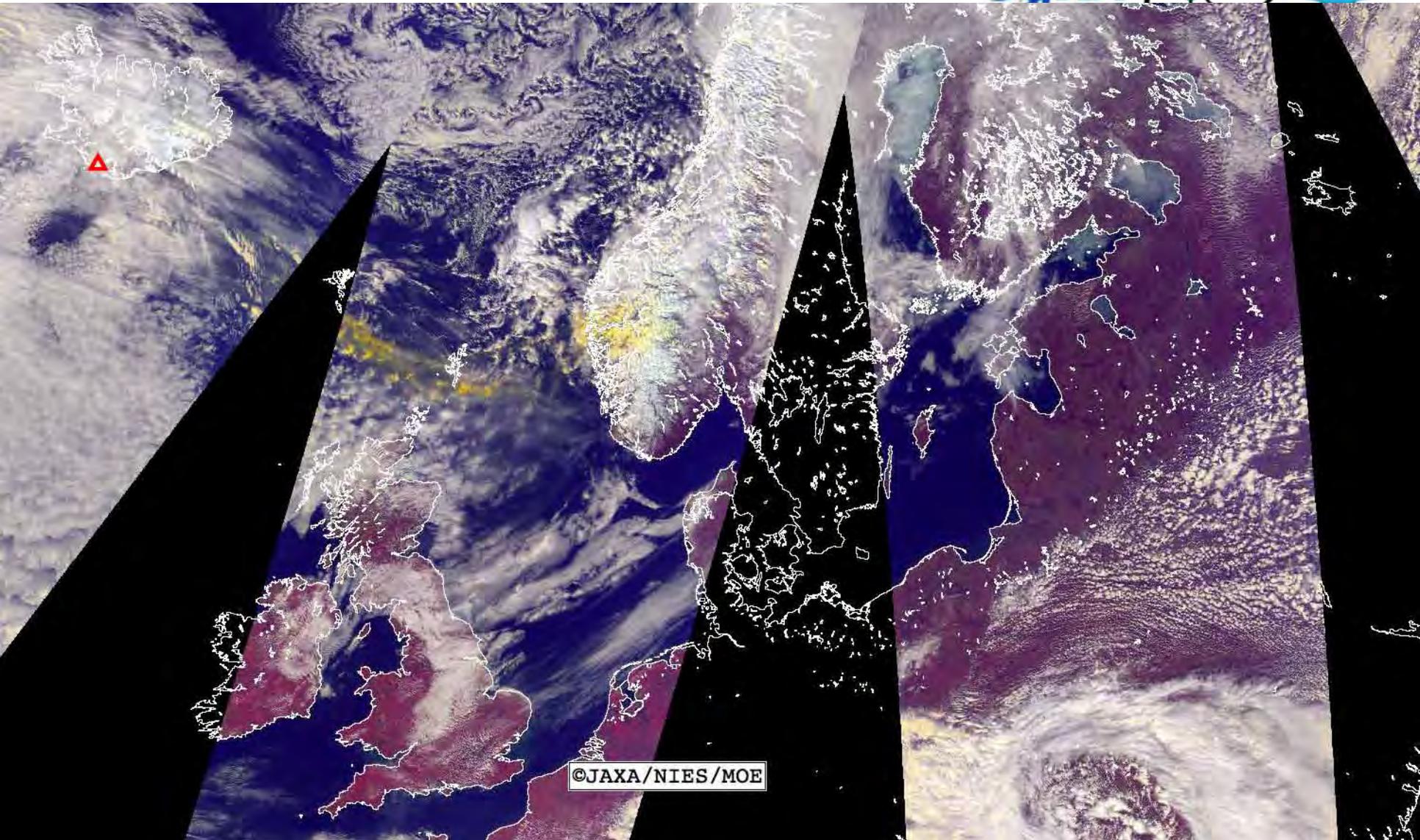


# 雲・エアロソルセンサの 月別最小反射率画像

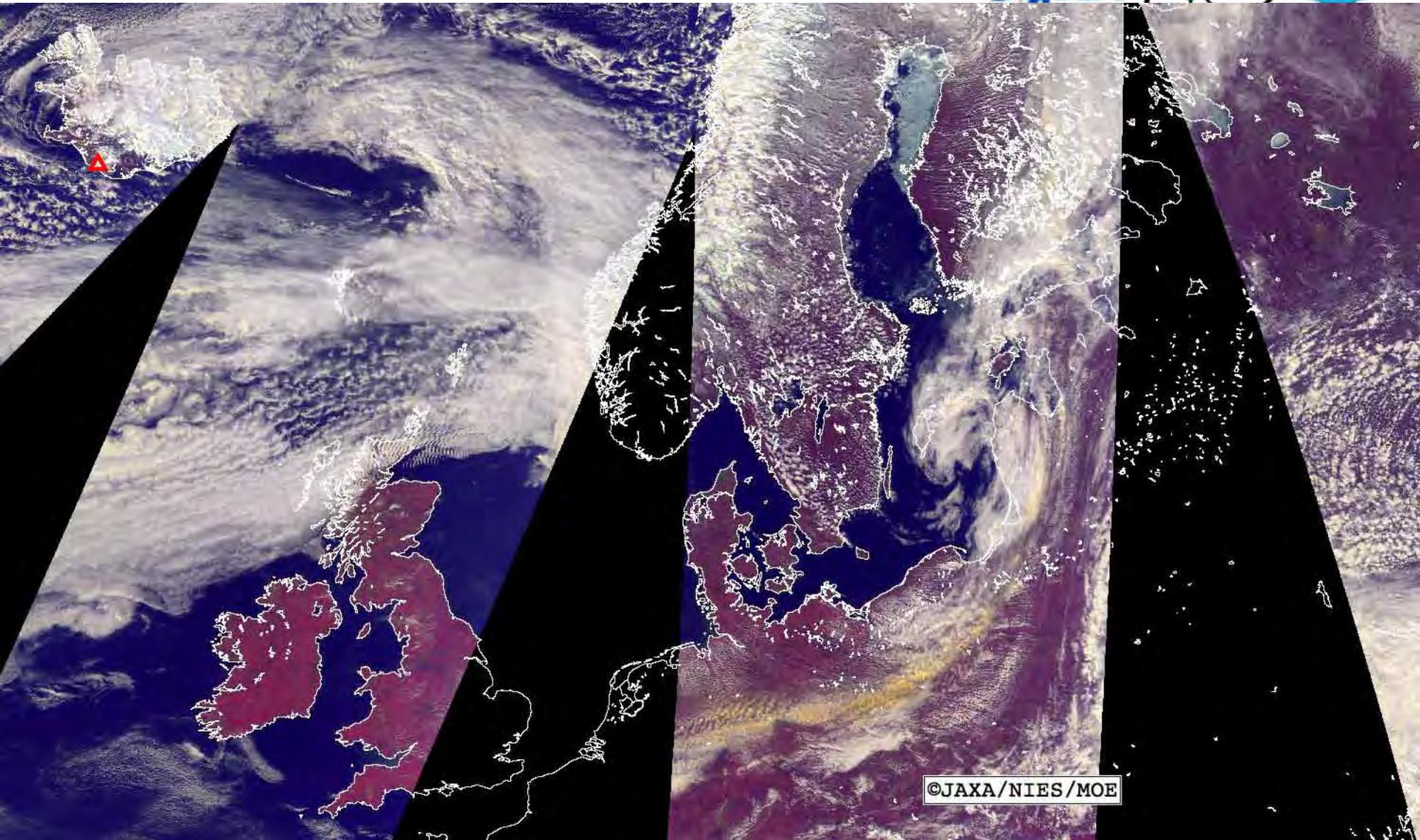


Red: Band 2 (0.67 $\mu$ m) Green: Band 3 (0.87 $\mu$ m) Blue: Band 1 (0.38 $\mu$ m)

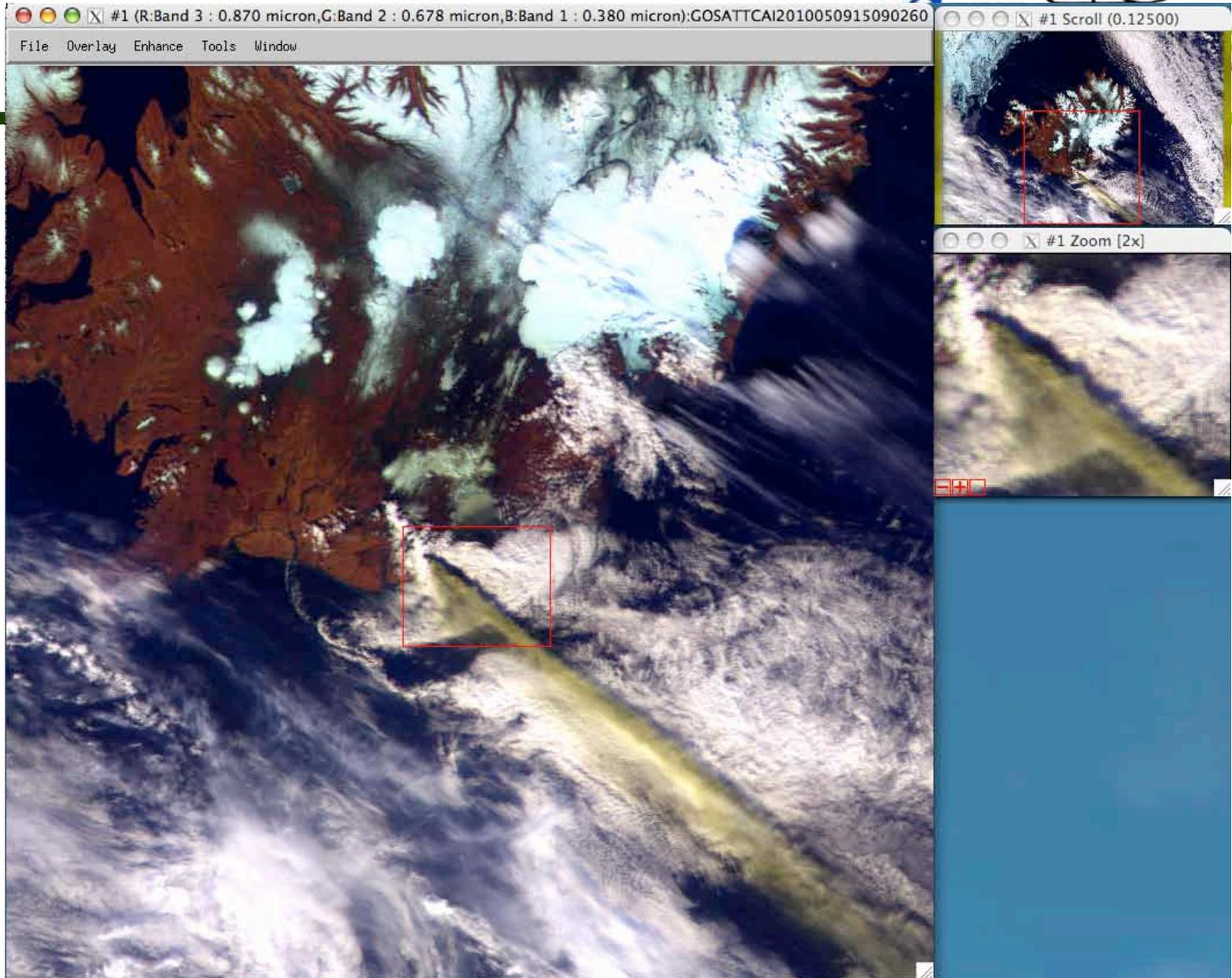




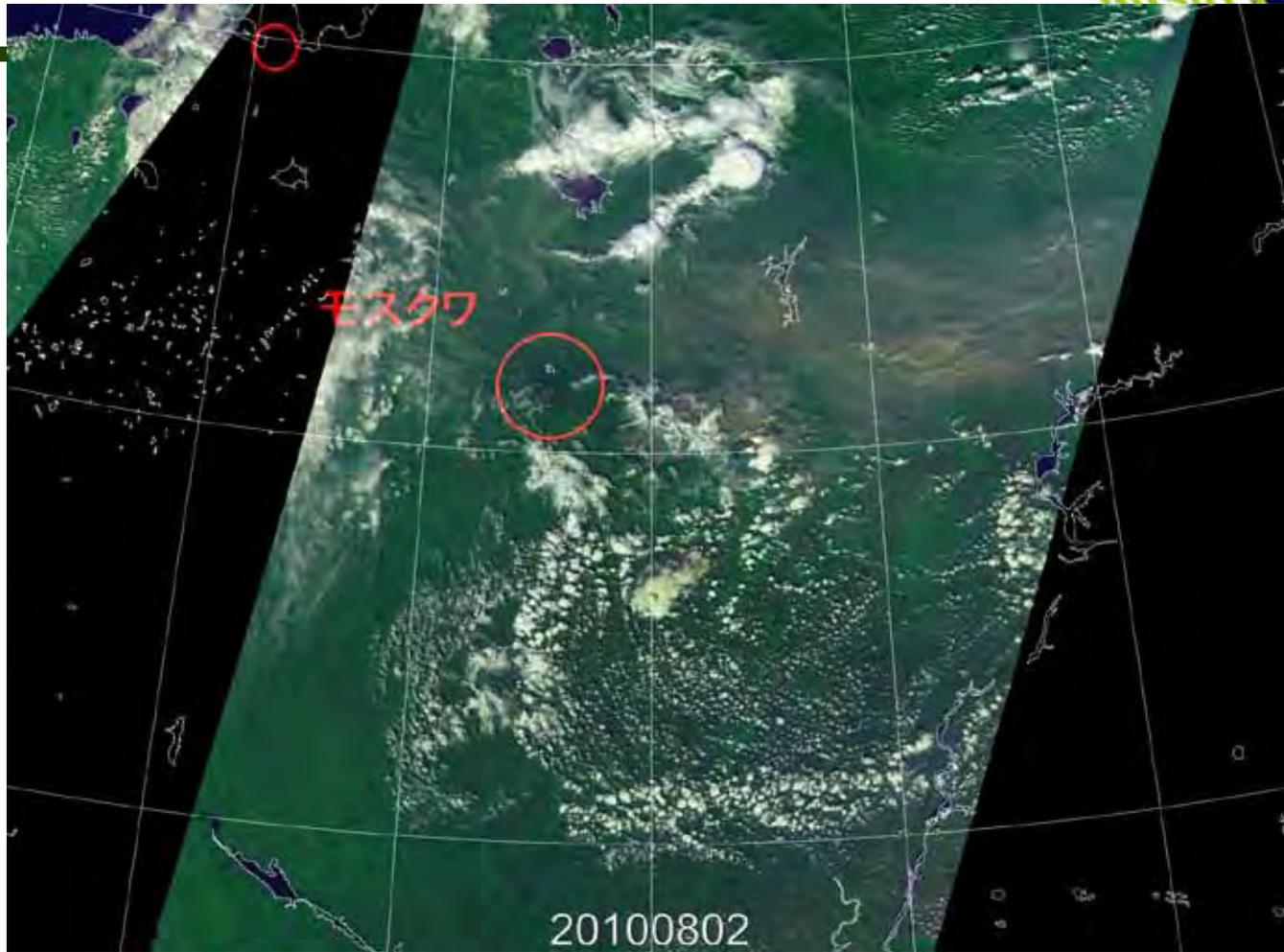
©JAXA/NIES/MOE



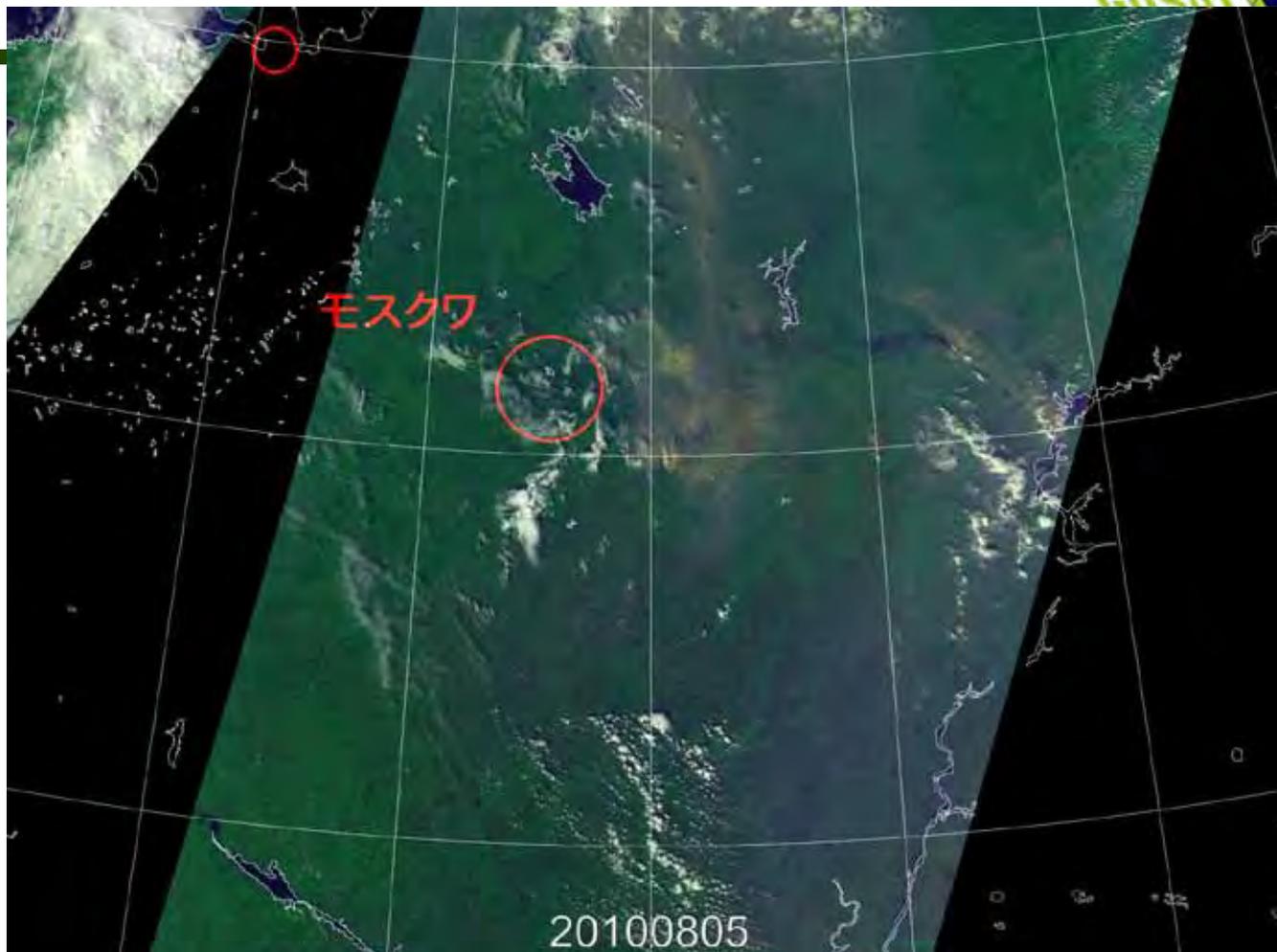
# GOSAT TANSO-CAI Image : 2010/5/9



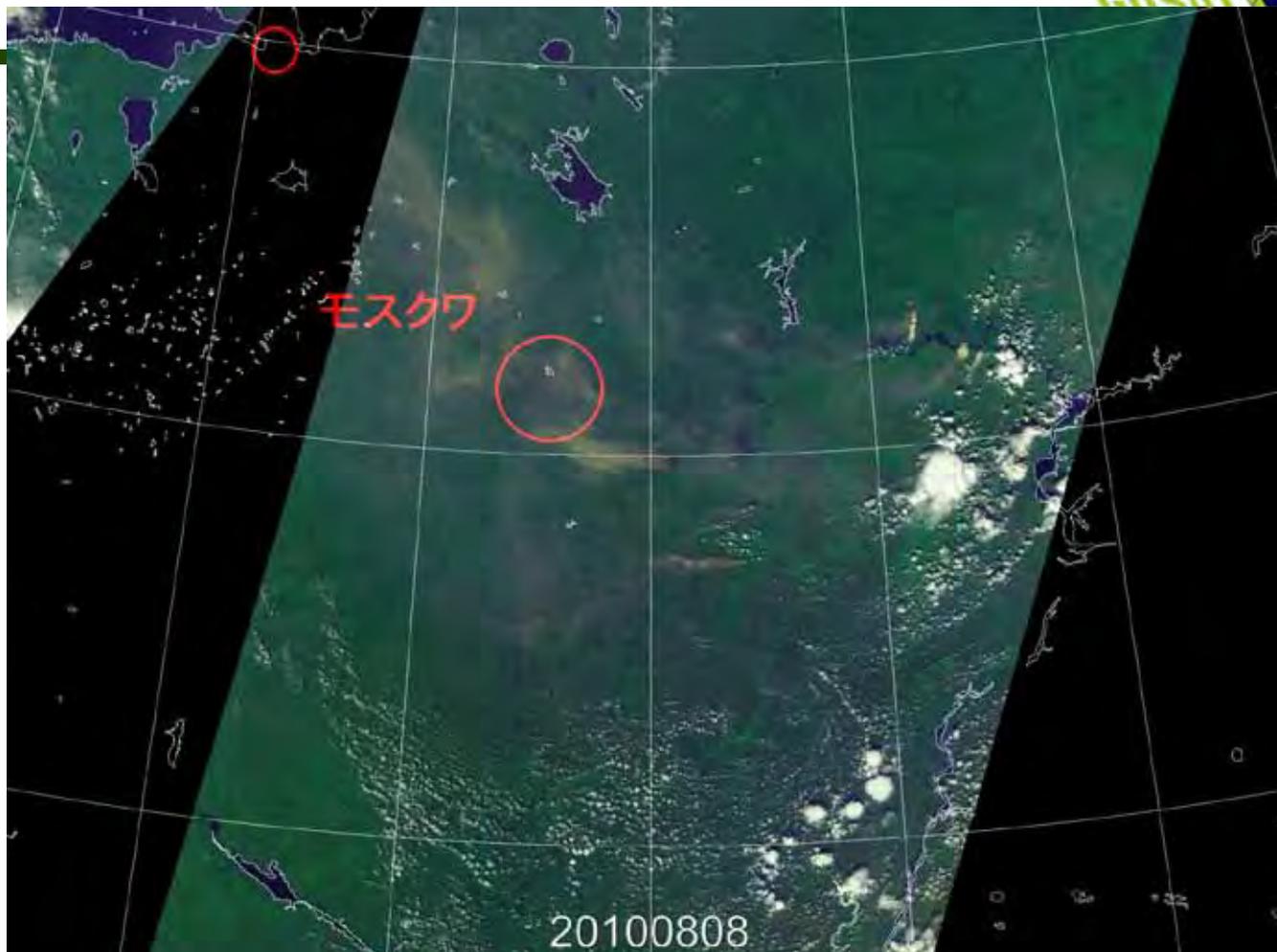
# ロシア(西シベリア)の森林火災



# ロシア(西シベリア)の森林火災



# ロシア(西シベリア)の森林火災



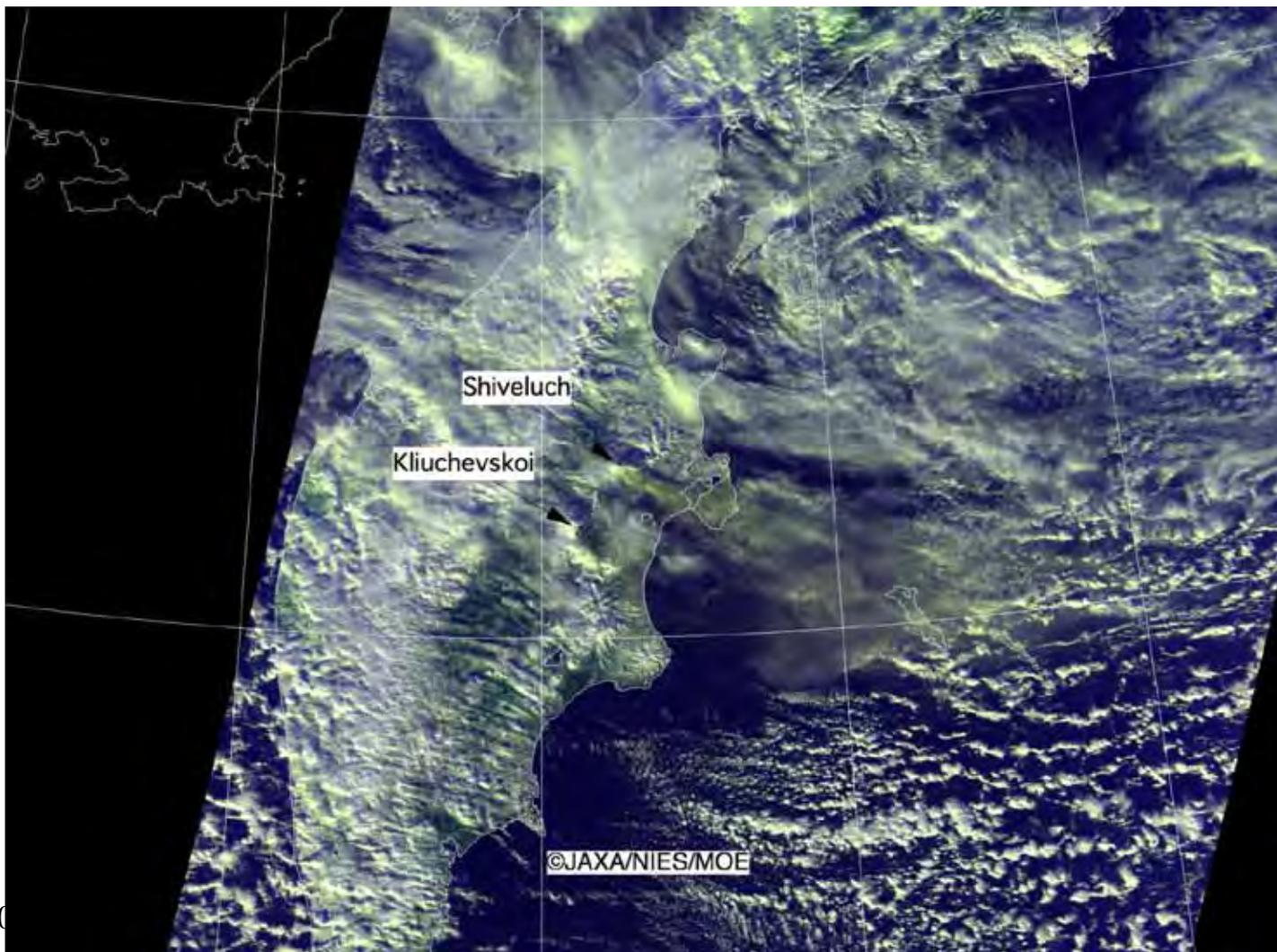
9-Nov-10

2010年8月8日

54

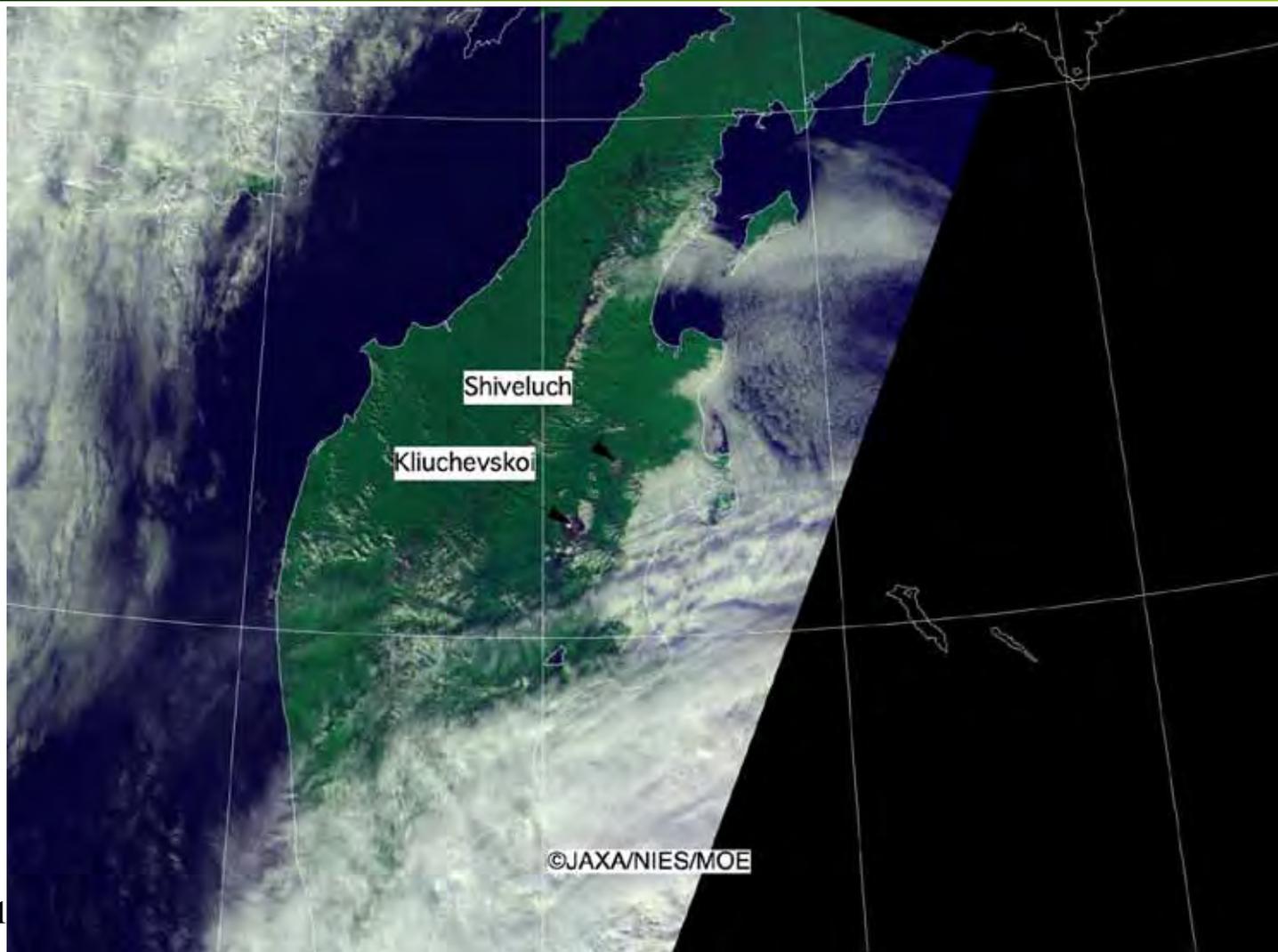
54

# カムチャッカ半島シベルチ火山噴火 2010年10月28日



9-Nov-10

# カムチャッカ半島シベルチ火山噴火 2010年9月8日(噴火前の様子)

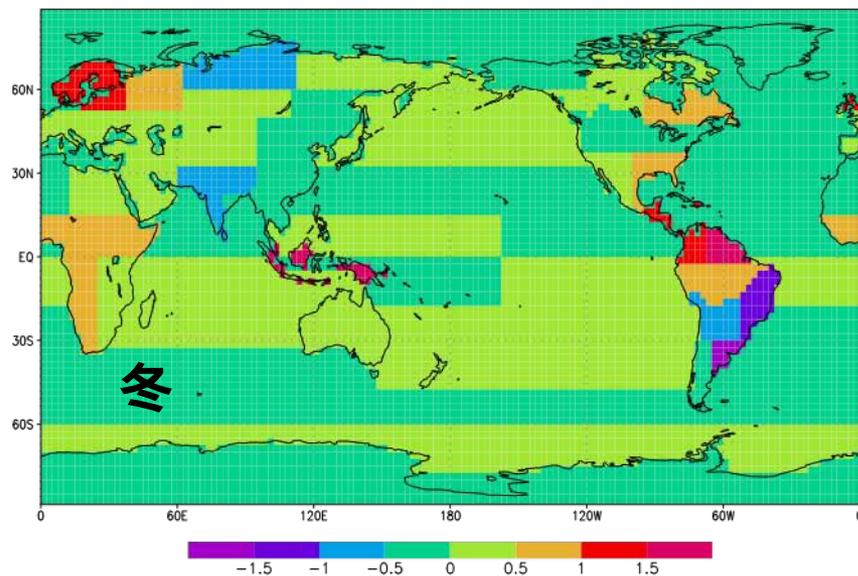
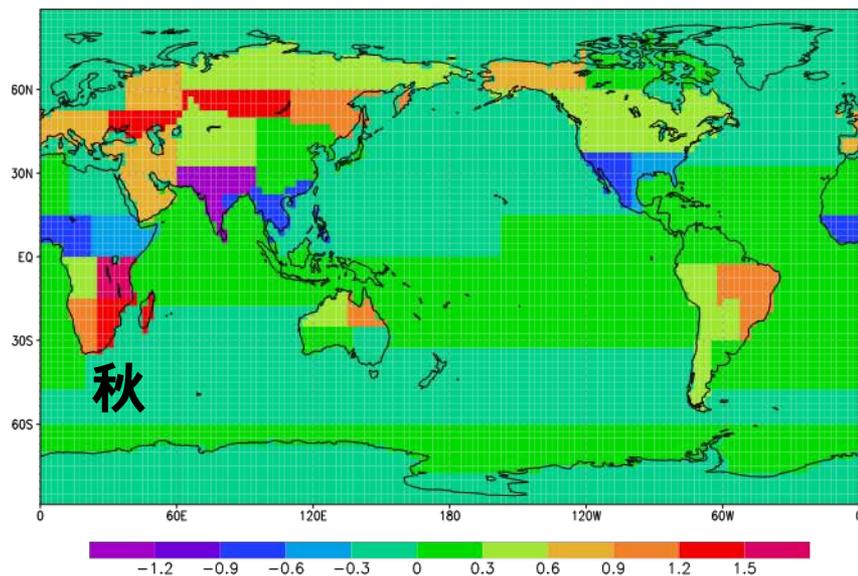
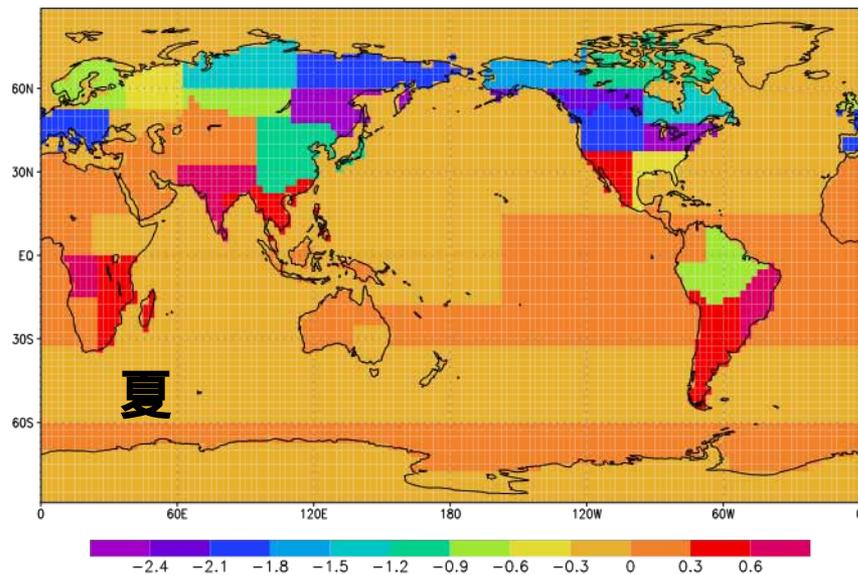
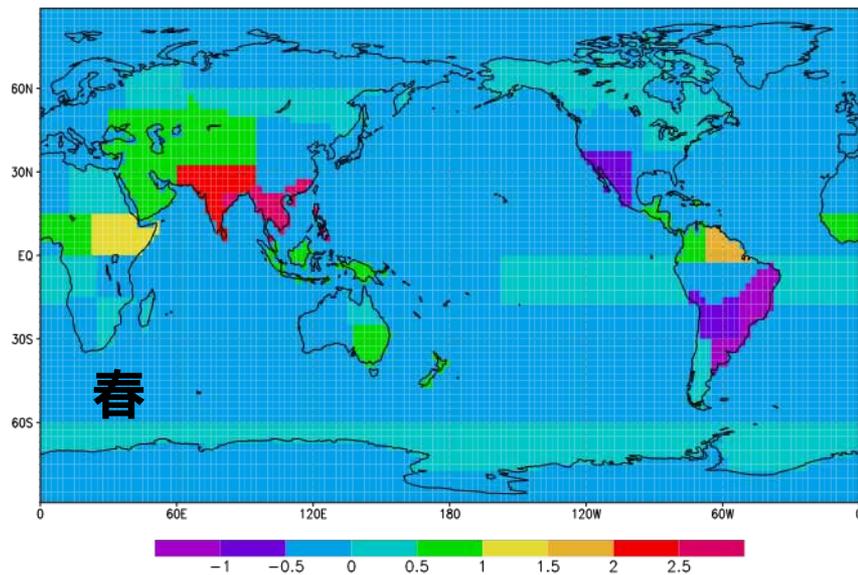


9-Nov-1

これからの「いぶき」データは？



# どこで吸収、どこで排出？ (レベル4 A)



n 炭素収支推定結果の**あいまいさ**が減る



n **陸域生態系モデル**や、モデルの応答関数  
(**感度**)をよくする



n 「いぶき」のデータから推定した月別・地域別の炭素収支(吸収 / 排出)に合うように、  
**大気輸送モデル**を調整



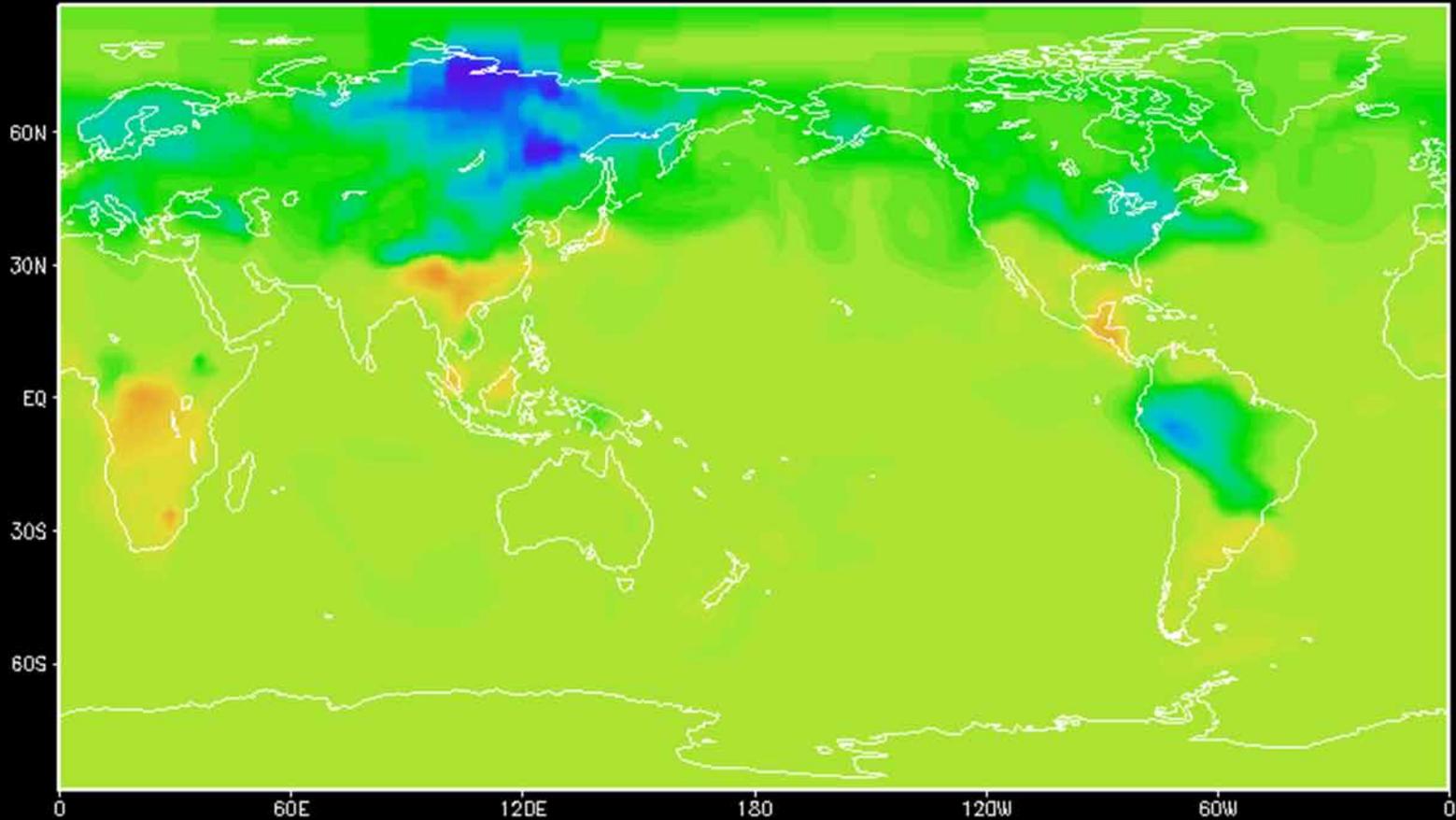
n 新たな3次元分布が得られる

# 3次元分布(レベル4B)のイメージ



PROJECT  
Satellite

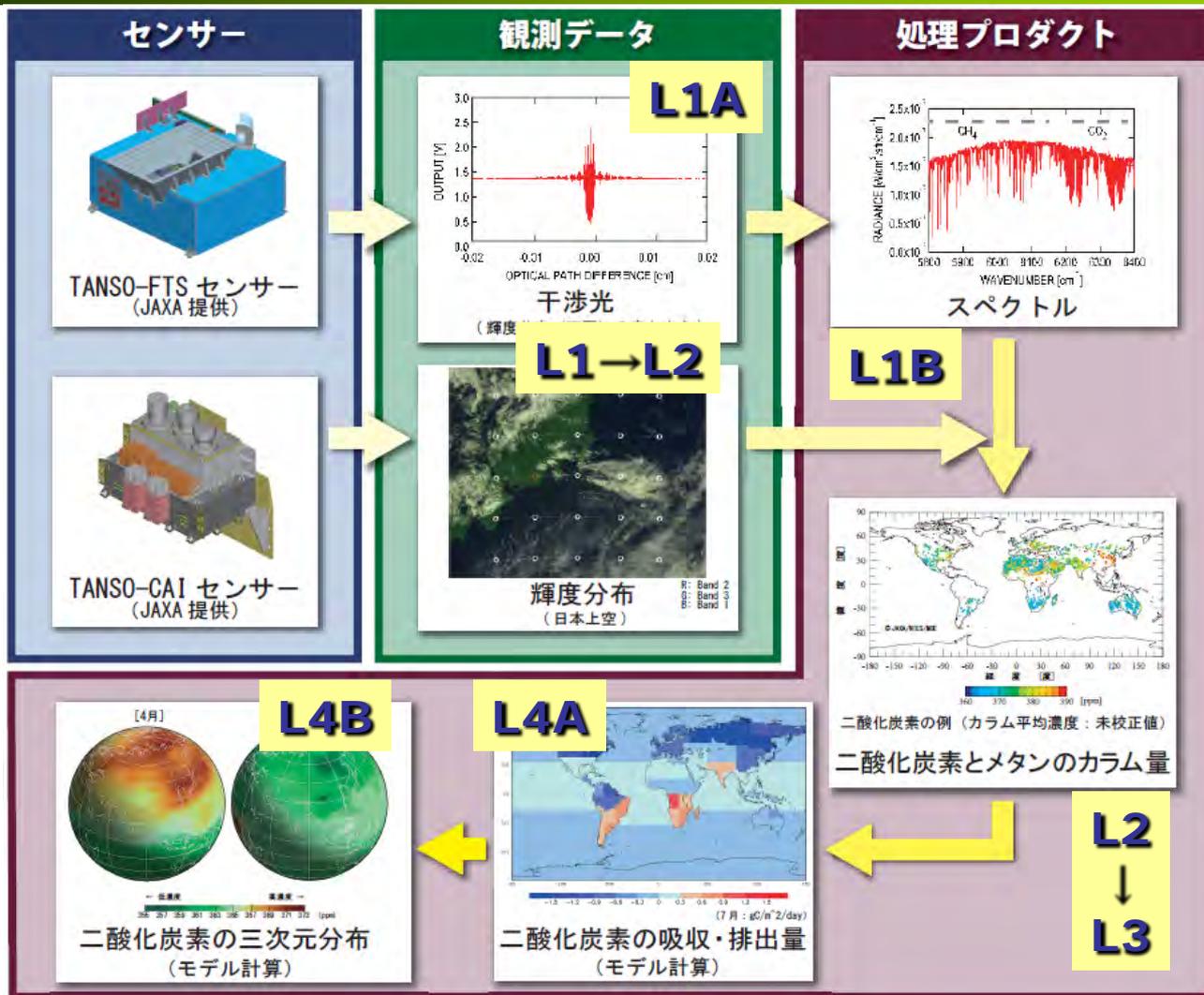
2009.07.01 00:00 (UTC)





n プロダクトは、手に入るの？

# データ処理とプロダクト



# 「いぶき」データプロダクト (標準プロダクト)



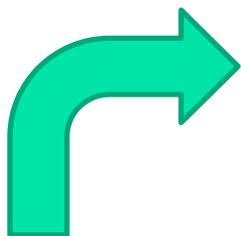
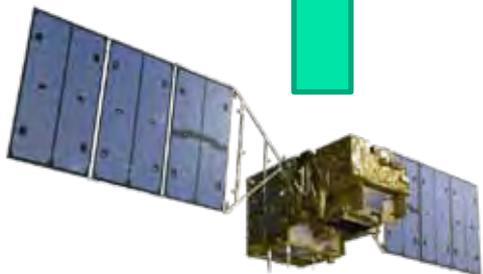
プロダクトレベル	センサー	プロダクトの内容
L1B	FTS	干渉光データをフーリエ変換して得られる輝度スペクトルデータ
	CAI	バンド間補正、幾何補正のパラメータを含む輝度データ (地図マッピングは未適用)
L1B+	CAI	バンド間補正、幾何補正、地図マッピングを行った輝度データ
L2	FTS	二酸化炭素カラム量データ等
		メタンカラム量データ等
L3	FTS	二酸化炭素カラム量を地図上にマッピングした図表データ (月平均と3ヶ月平均)
		メタンカラム量を地図上にマッピングした図表データ (月平均と3ヶ月平均)
L4A	-	全球を64程度に分割した地域別の二酸化炭素の吸収・排出量データ (月平均)
L4B	-	二酸化炭素の全球三次元分布のデータ (月平均)



n 人工衛星の観測と私たちの  
くらし・・・

# 衛星による温室効果ガス観測の役割

一般の方にとって



科学者・技術者にとって

- ・本当の今を知りたい(小さなあいまいさで)
- ・客観的な情報に基づいて、皆で判断したい
  - è 教育・啓蒙
- ・私たちの未来の暮らしを守りたい
- ・そのために適切な対策を打ちたい、打ってもらいたい → **できることへの行動へ**

- ・判断(対策)に役立つ科学的根拠がほしい
- ・データに基づいて、新たな科学的な知見を集積したい
- ・あいまいさを減らした共通認識がほしい
- ・**将来予測・制御のための観測(計測)**

---

**今後も「いぶき」にご期待ください！**

**ご静聴ありがとうございました。**