

日本の人工衛星「いぶき」で、 温室効果ガスを高精度にはかる

森野 勇

(独)国立環境研究所 地球環境研究センター
衛星観測研究室
NIES GOSAT プロジェクト

温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」(GOSAT)

(http://www.jaxa.jp/projects/sat/gosat/index_j.html)

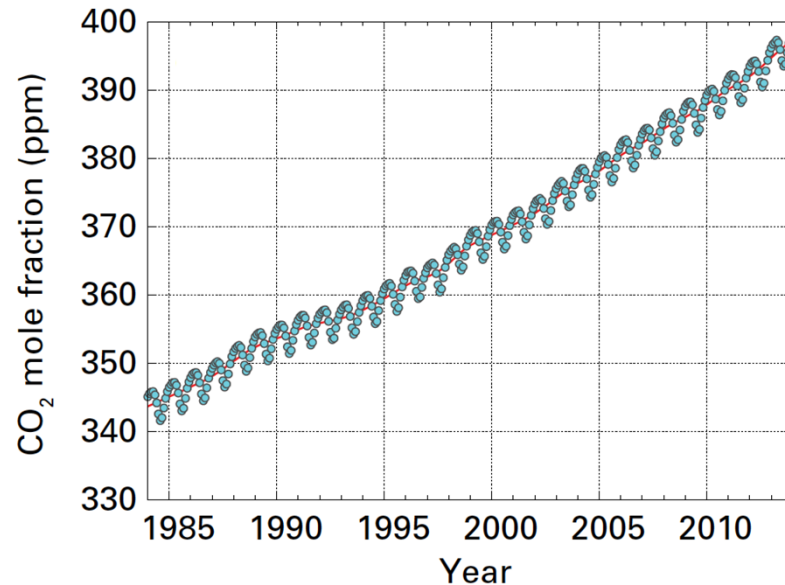
(<http://www.gosat.nies.go.jp/index.html>)

発表の内容

- 温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」の目的
- 「いぶき」に搭載された観測装置、データ解析、観測結果
- 「いぶき」データの検証
- まとめ
- 環境研究総合推進費で実施した研究内容
- 主要な温室効果ガスCO₂及びCH₄の全球分布とその変動特性を解明
- 温室効果ガス観測センサ(フーリエ変換分光計)
雲・エアロソルセンサ(画像撮像装置)
- 「いぶき」データを評価するために、地上設置フーリエ変換分光計と航空機搭載測定装置で測定したデータを使用
- 推進費2A-1102の成果を用いて「いぶき」データの高精度化を達成
→ 幅広い利用の開始

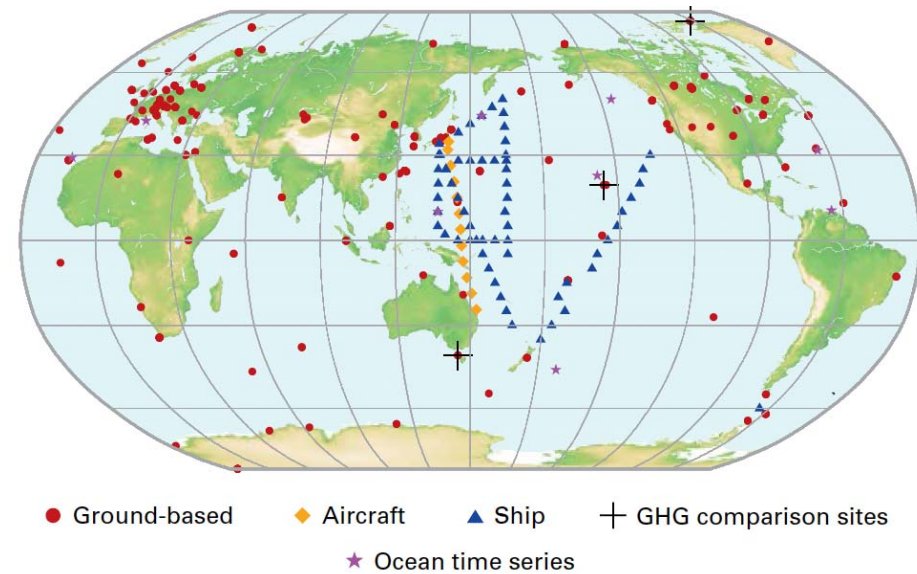
大気中二酸化炭素濃度の観測

人間活動→大気中に放出→ 二酸化炭素濃度の増加



全球平均(青:濃度、赤:トレンド)

出典: WMO Greenhouse gas bulletin, No. 10, 2014.



全球平均に用いた観測データの地点

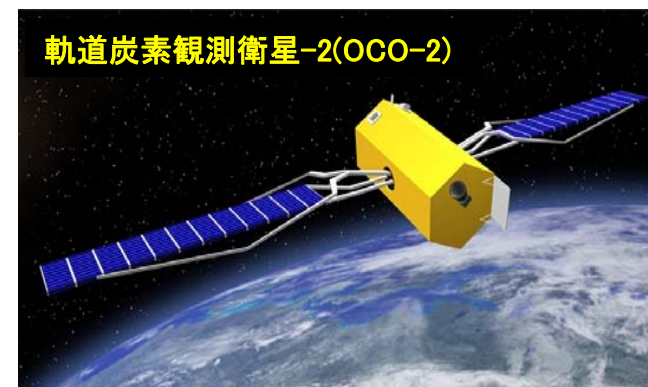
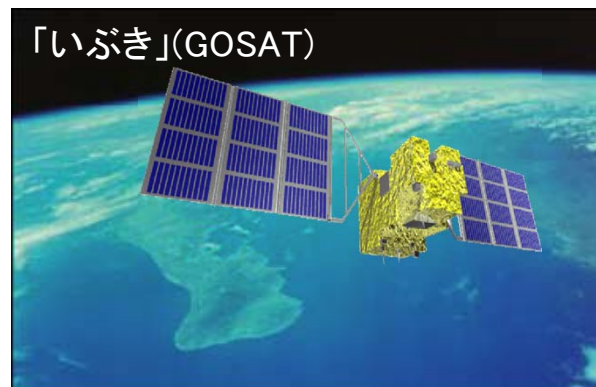
問題: 観測地点が少ない、
熱帯、シベリア、アフリカ、南アメリカが特にまばら



二酸化炭素の吸収排出源の推定に大きな不確かさ

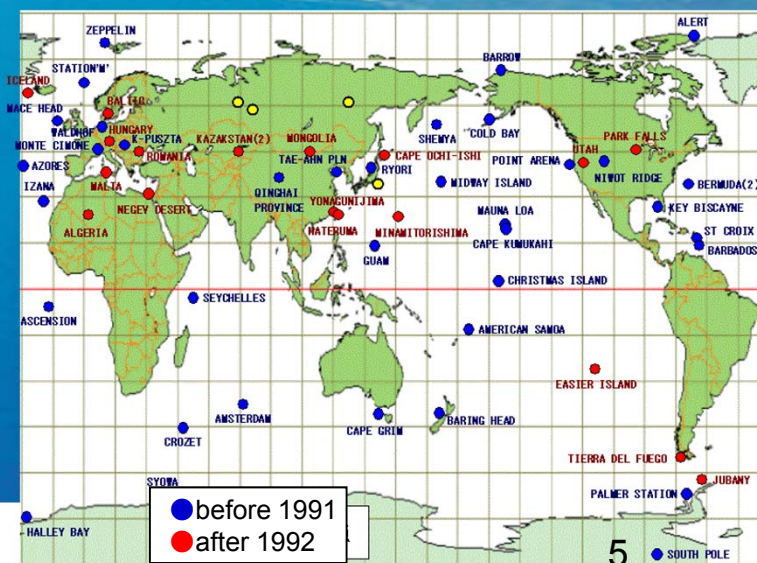
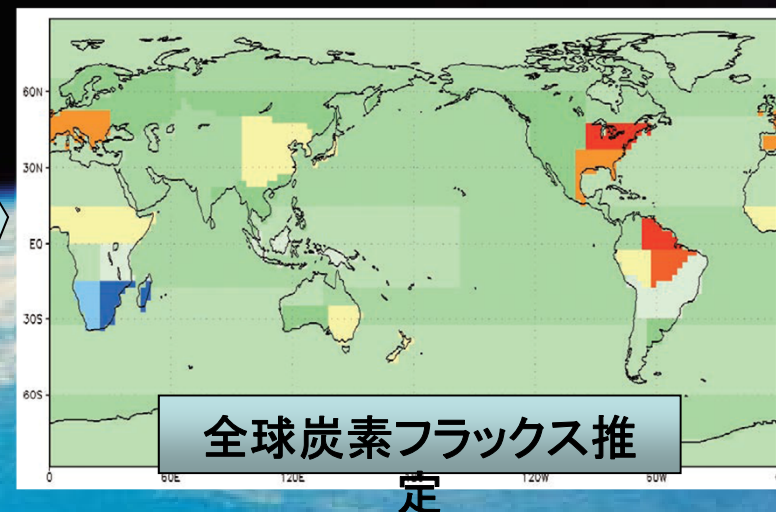
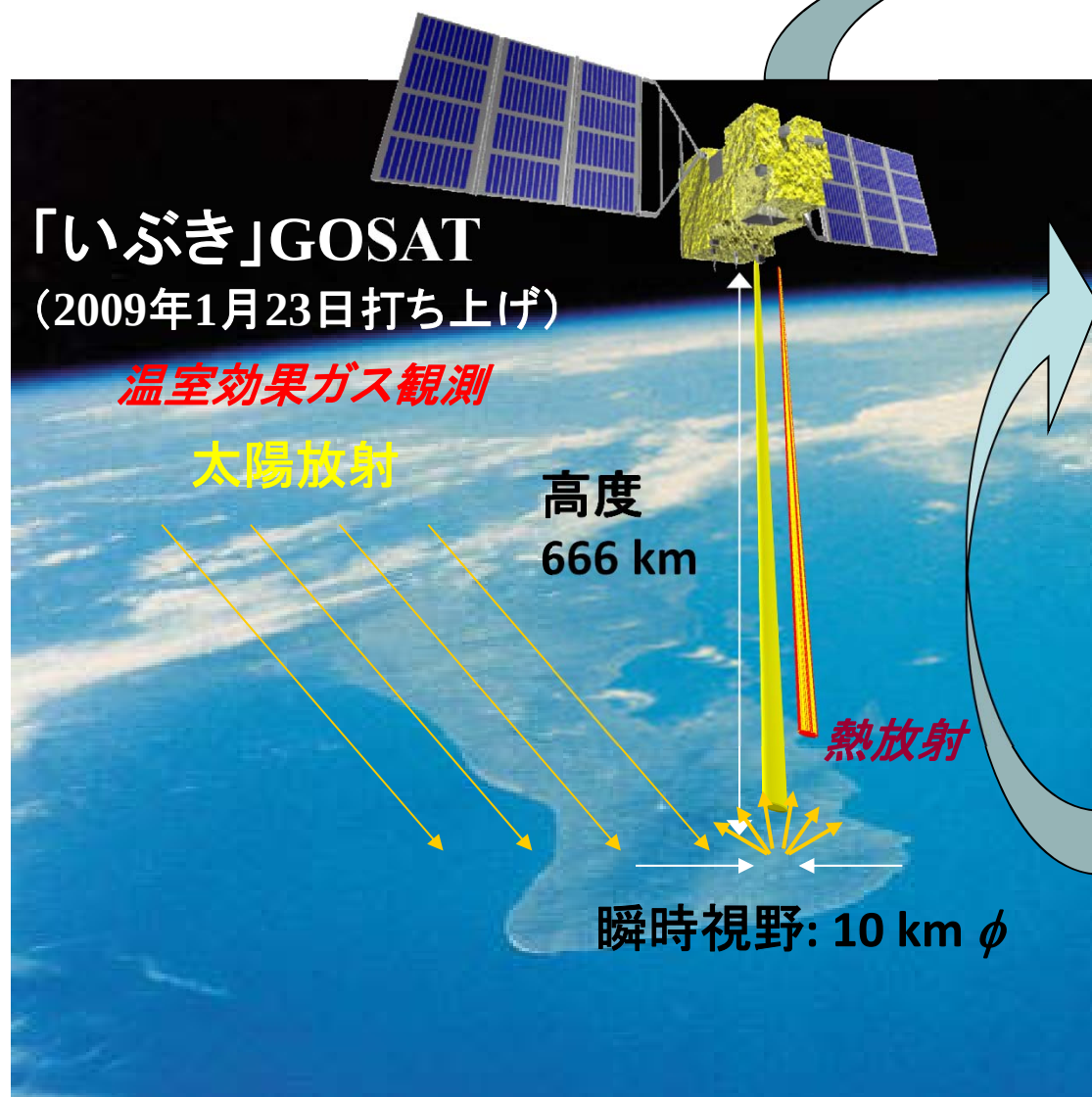
解決: 衛星による温室効果ガスの全球観測

解決: 衛星による二酸化炭素の全球観測



	スキアマキ(SCIAMACHY)	「いぶき」(GOSAT)	軌道炭素観測衛星OCO-2
打ち上げ日又は運用期間	2002年3月-2012年4月	2009年1月23日	2014年7月2日成功!
観測装置	回折格子分光計	フーリエ変換分光計	回折格子分光計
観測する大気微量成分	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, CO, NO ₂ , SO ₂ , O ₃ , ...	CO ₂ , CH ₄	CO ₂
観測手法	下方視, 周縁, 掩蔽	下方視(水面反射)	下方視(水面反射)
観測バンド	8 バンド (紫外 - 短波長赤外)	短波長赤外 3 バンド 熱赤外 1 バンド	短波長赤外 3 バンド
スペクトル波数分解能	5.6 cm ⁻¹	0.2 cm ⁻¹	0.3 cm ⁻¹
瞬時視野	60 × 30 km ²	33 km ² (直径 10.5 km)	3 km ² 4 (2.25 × 1.29 km ²)

GOSATの炭素フラックス推定への貢献



5

「いぶき」
GOSAT

「いぶき」に搭載された観測装置

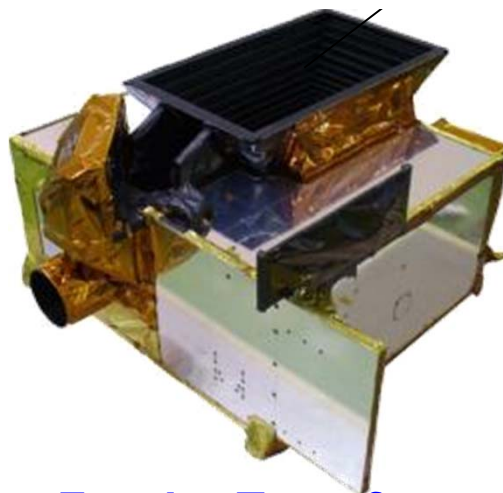
2009年1月23日打ち上げ

軌道: 高度 666 km、3日回帰

約5年以上の観測データの蓄積



Thermal And Near infrared Sensor for
carbon Observation (TANSO)



Fourier Transform
Spectrometer (FTS)



Cloud and Aerosol
Imager (CAI)

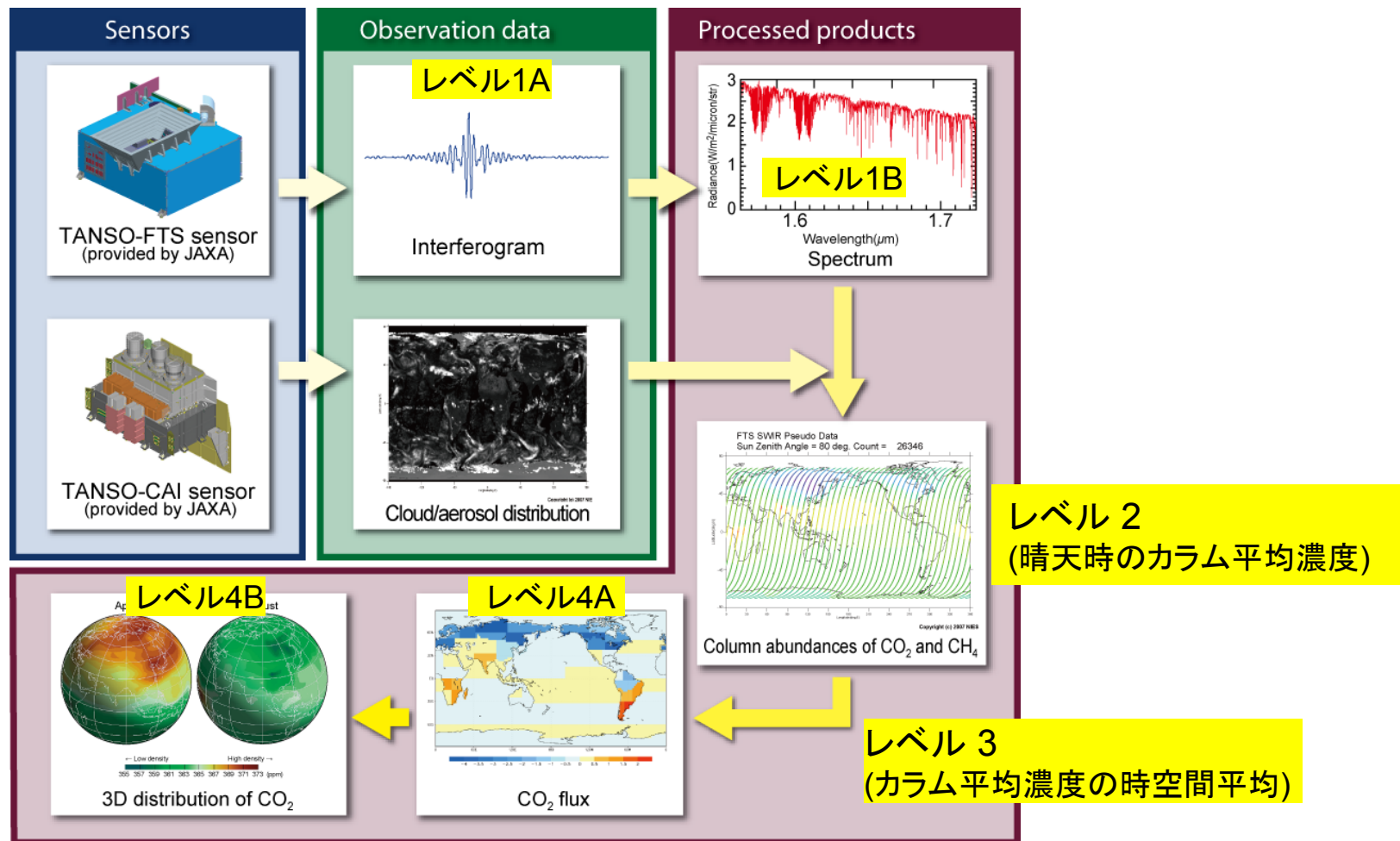
TANSO-FTS (Fourier Transform Spectrometer)

目標	温室効果ガスの測定
観測バンド	短波長赤外0.76 μ m, 1.6 μ m, 2.0 μ m の3バンド(偏光P/Sを分離して観測) (O ₂ -A, CO ₂ , CH ₄ , H ₂ O band)
	熱赤外5.5 ~14.3 μ mの1バンド (CO ₂ , CH ₄ , O ₃ band and other)
スペクトル波 数分解能	0.2 cm ⁻¹
刈り幅	750 km 3 モードの場合/ 観測間隔 約263 km
瞬時視野	10.5km

Cloud and Aerosol Imager (CAI)

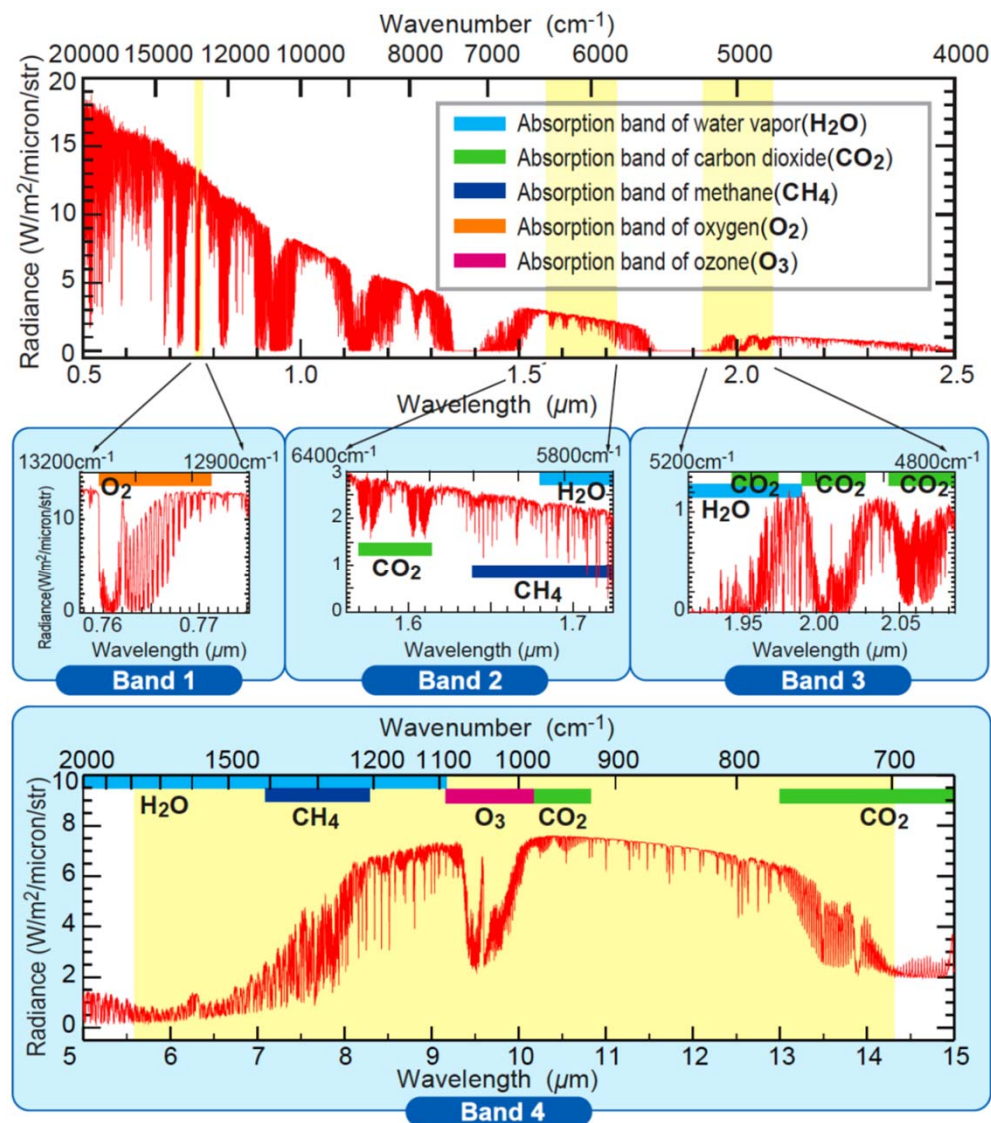
目標	FTS瞬時視野内の巻雲やエアロゾル 補正
観測バンド	0.38, 0.67, 0.87, 1.60 μ m の4バンド
刈り幅	750-1000 km
フットプリント	0.5-1.5km

「いぶき」の データ処理フローとプロダクト

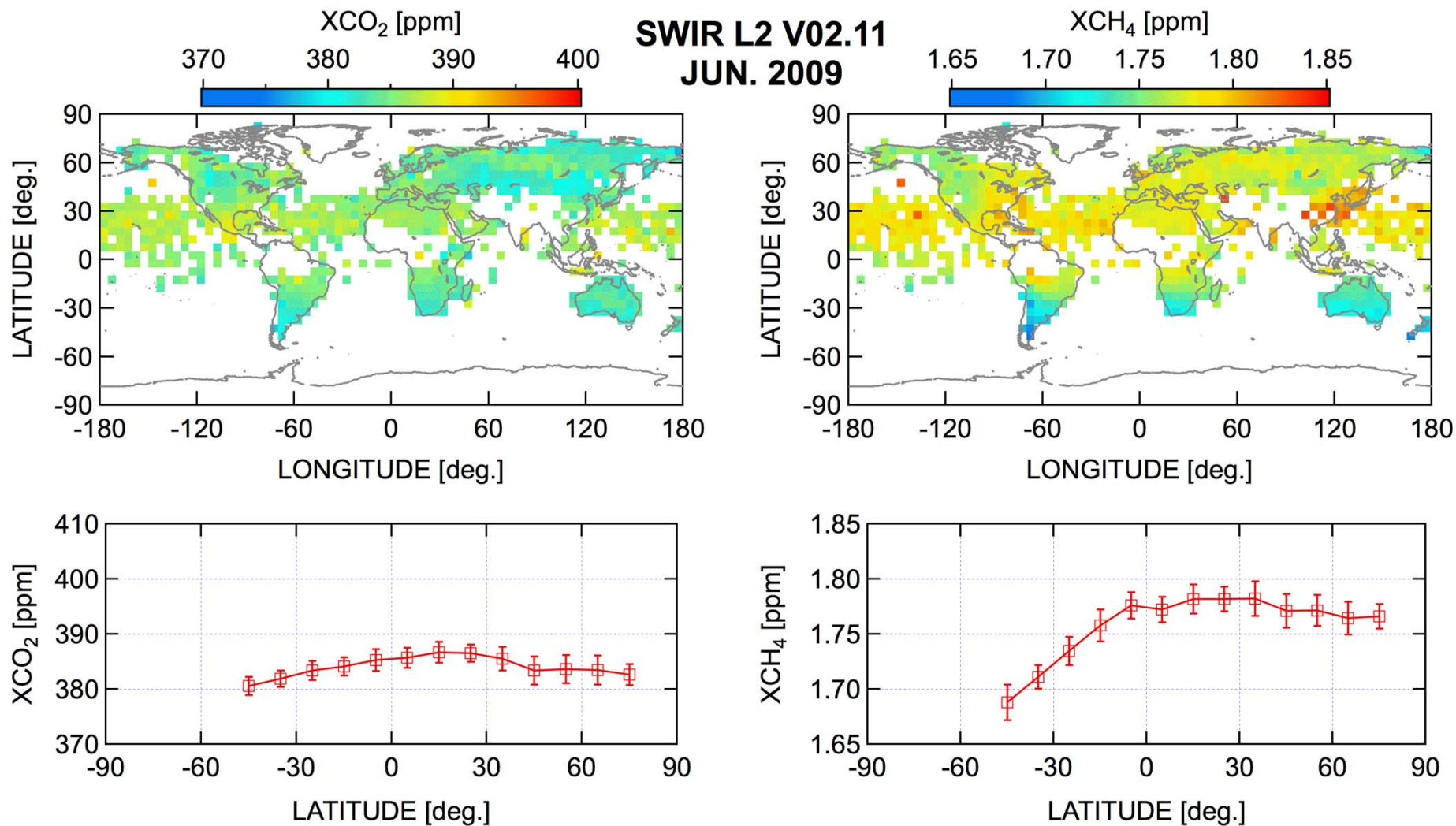


観測スペクトル、XCO₂、XCH₄、フラックス等は一般公開済。

レベル3とレベル4を作成するための源泉となるので、レベル2の検証は重要。



GOSATによる温室効果ガス濃度の全球マップと帯状平均

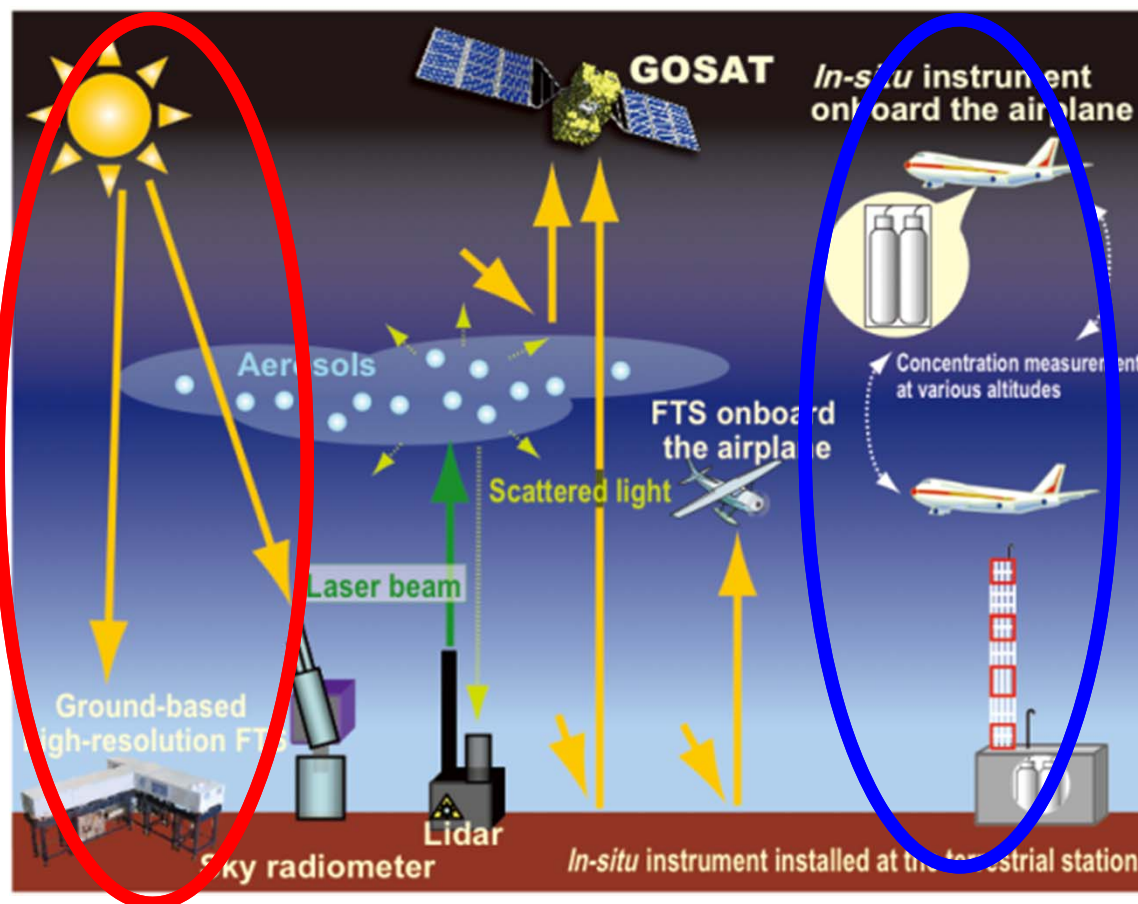


上図:5度メッシュ月平均、下図:緯度10度毎の帯状月平均
左図:二酸化炭素、右図:メタン

「いぶき」プロダクトの検証

TCCONデータ

航空機観測データ



(1) 「いぶき」データ

SWIR L2 一般公開用
データ、Ver. 02.xx

2009年4月 - 2013年2月

(2) 地上設置高分解能FTS観
測ネットワーク(TCCON)
データ

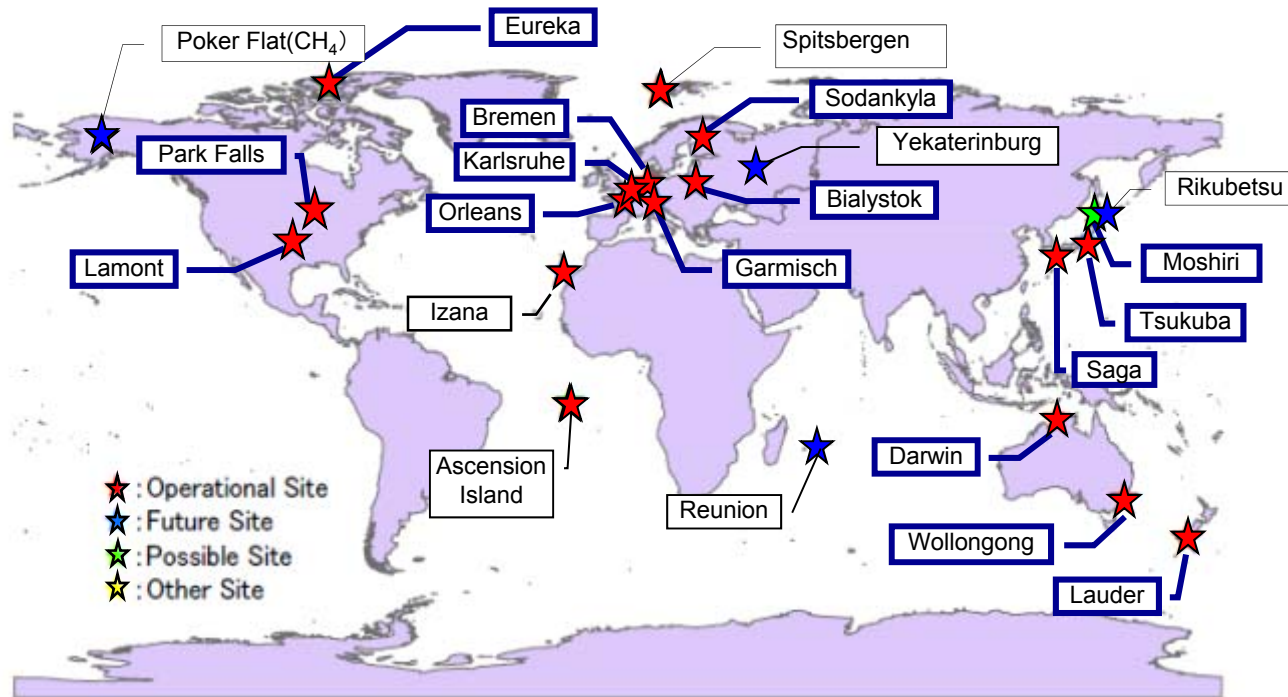
2009年4月 - 2013年2月

(3) 航空機観測データ

2009年4月 - 2010年12月

GOSATプロダクトの検証にはTCCONデータと航空機観測データを使用

TCCONを含む地上設置フーリエ変換分光計観測網



□ : 検証に用いた地点

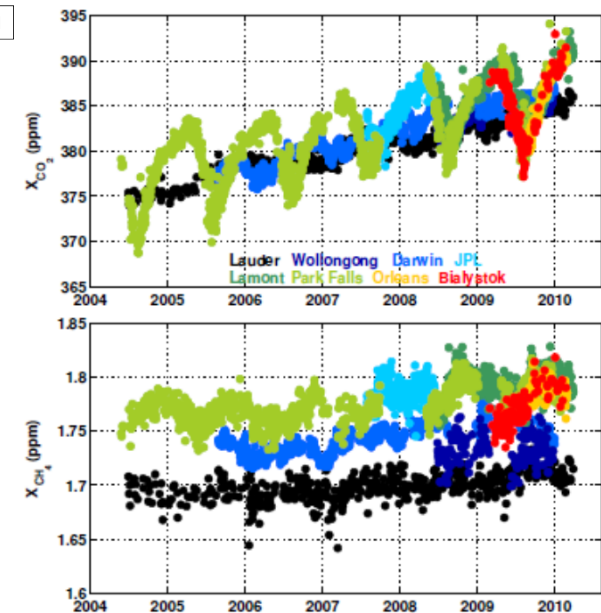
- 14 TCCON 地点を検証に使用

TCCON: Total Carbon Column Observing Network

(出典: <https://tccon-wiki.caltech.edu/>)

TCCON は測定条件など厳しい条件を課して運営されている
TCCON地点のデータを収集している。

TCCONのXCO₂やCH₄の変動



出典: Wunch et al. Phil. Trans. R. Soc. A 369, 2087–2112, 2011.

TCCONデータの不確かさ (2σ):

XCO₂ :~ 0.8 ppm

XCH₄ :~ 7 ppb

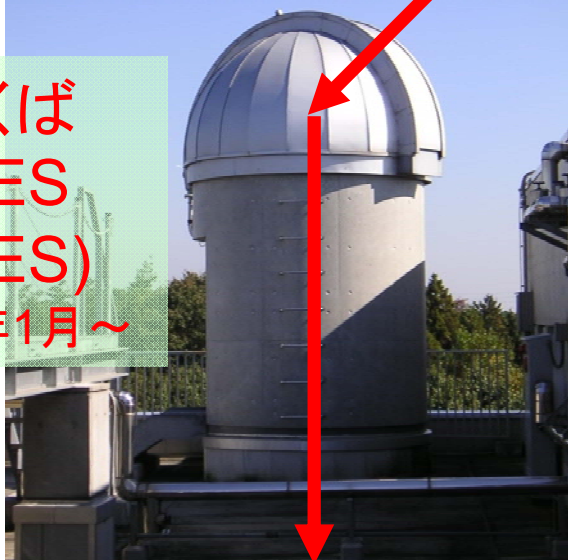
(出典: Wunch et al., Atmos. Meas. Tech., 3, 1351–1362, 2010)

ドーム(内部に太陽追尾装置が設置)

合推進費 研究成果発表会、2014年10月16日

日本のTCCONサイト

つくば
NIES
(NIES)
2009年1月～

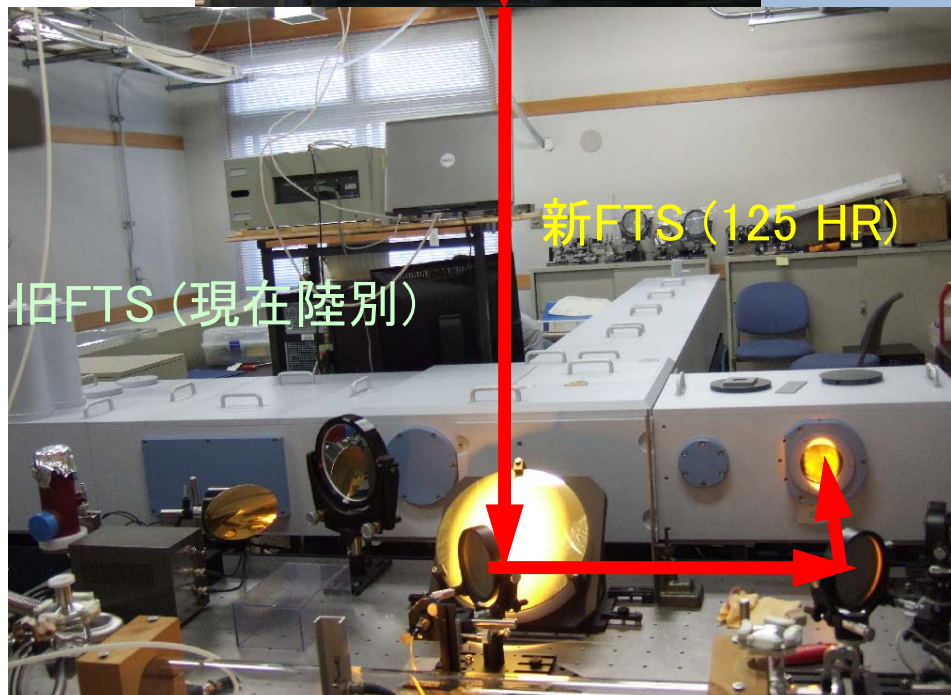


佐賀大学
(JAXA)

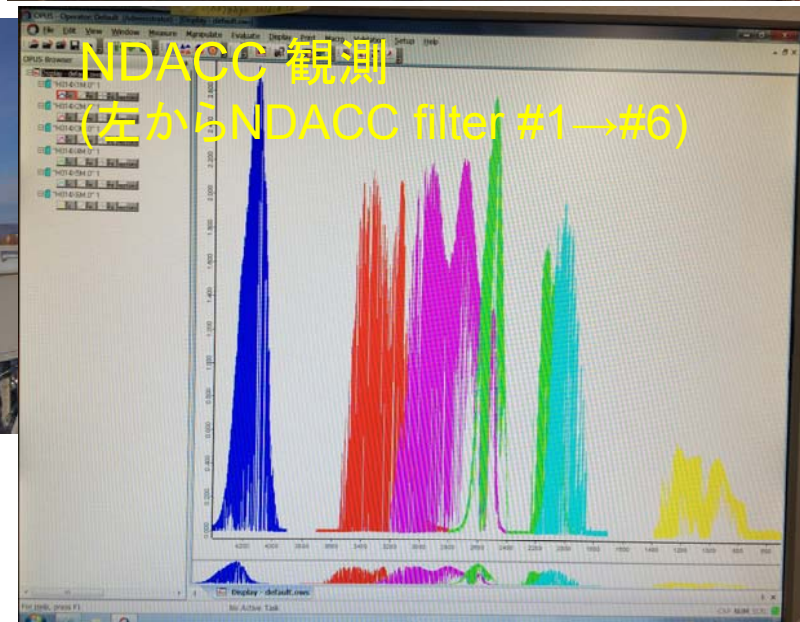
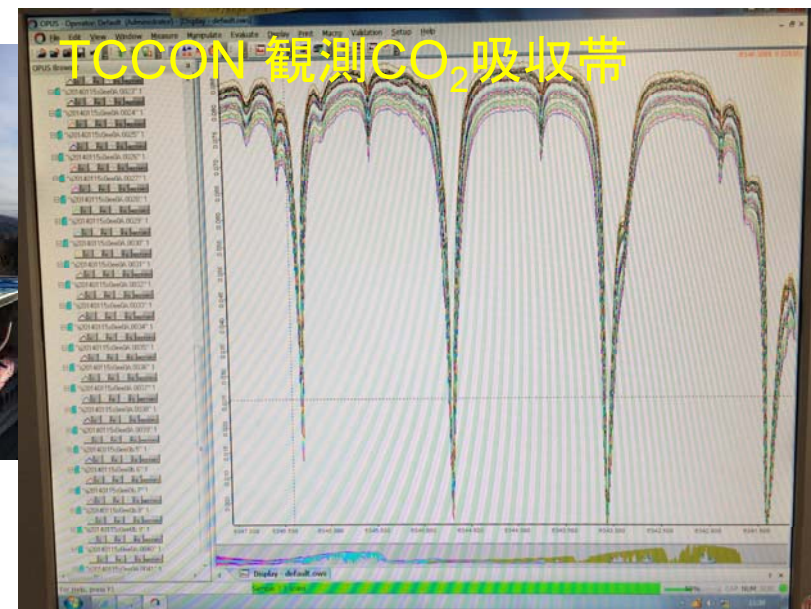
2011年6月～



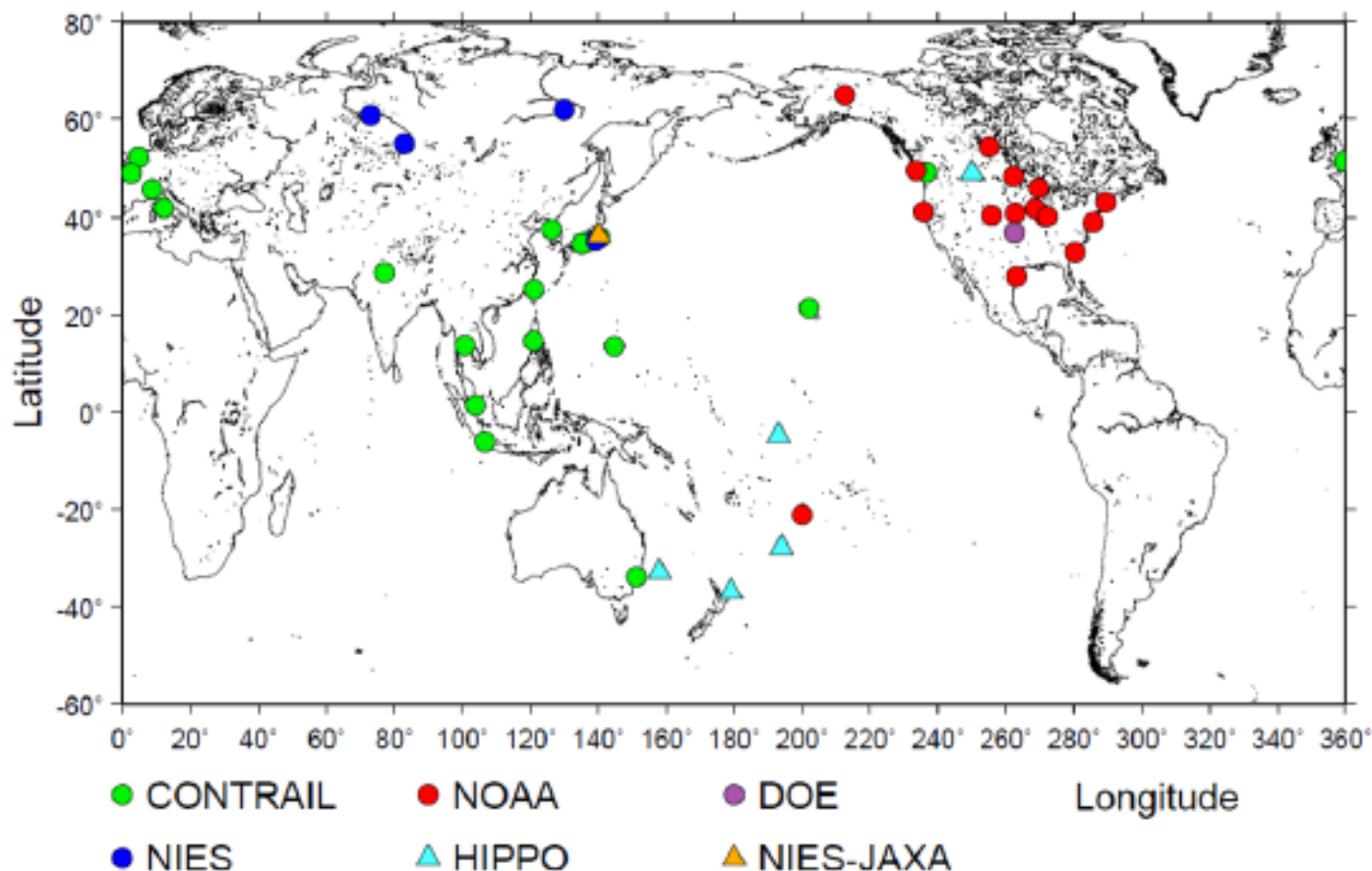
太陽追尾装置 + スライディンググループ



陸別(NIES)
2013年11月～



CONTRAIL、NOAA、DOE、NIES等による航空機観測



世界で20-50の観測地点

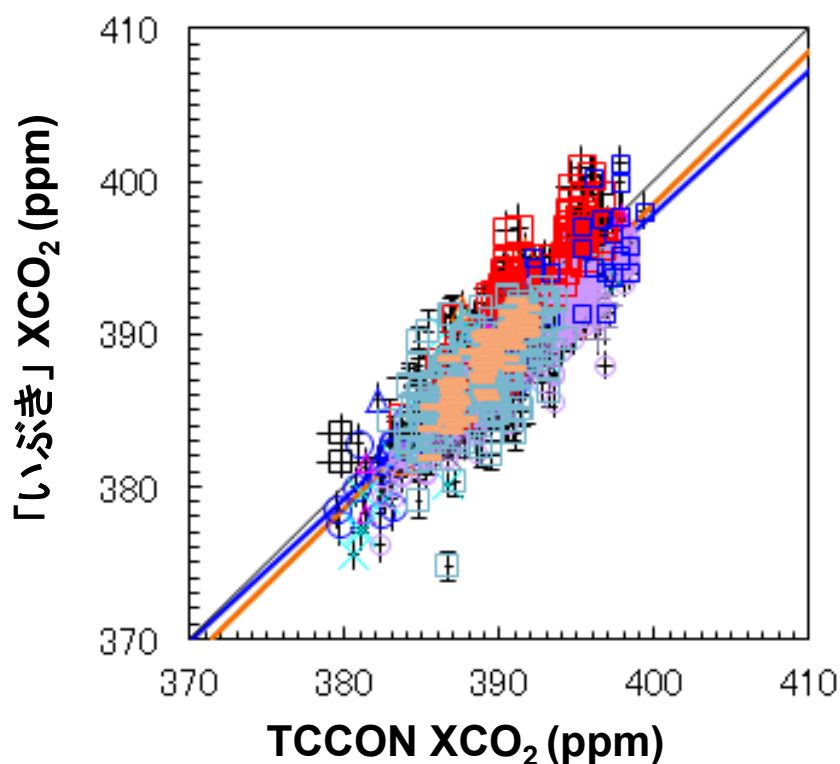
CONTRAIL, HIPPO, NIES-JAXA: in situ

NOAA, DOE, NIES, NIES-JAXA: flask sampling

XCO₂に計算するときの不確かさ: ~ 1 ppm
XCH₄に計算するときの不確かさ: ~ 20 ppb

TCCONデータを用いた「いぶき」の検証結果

「いぶき」SWIR L2 : Ver. 02.xx (2009年7月 – 2012年11月)
TCCON地点を中心に +/- 2 度内の陸域一般公開観測データ
TCCON : 「いぶき」観測 +/- 30 以内の平均値

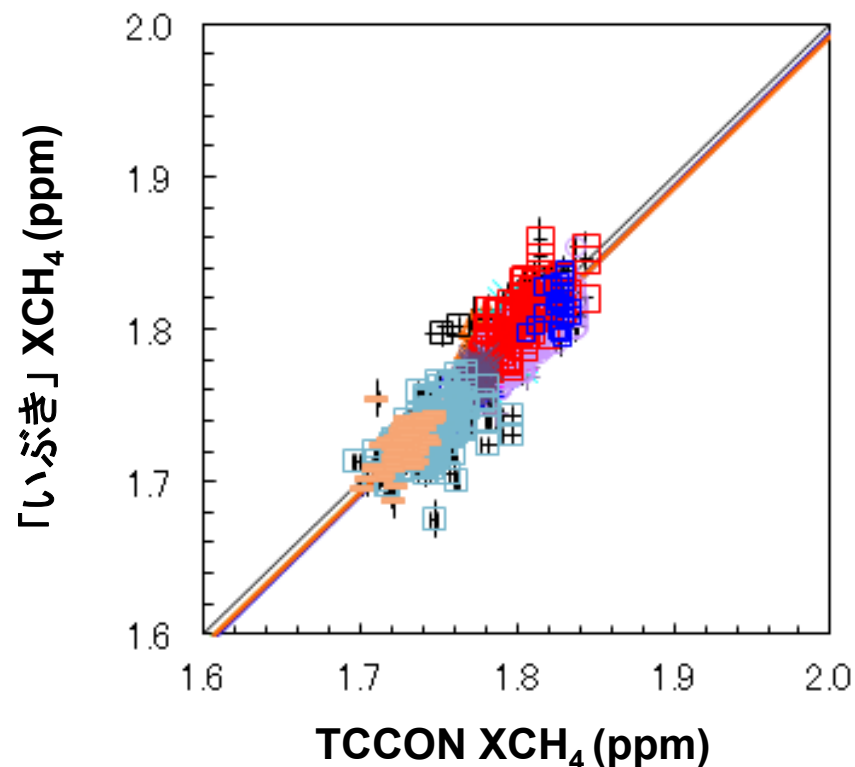


データ数: 1033

R=0.85

バイアス : -1.48 ppm (-0.38 %)

ばらつき(1 σ): 2.10 ppm (0.54 %)



データ数: 1044

R=0.88

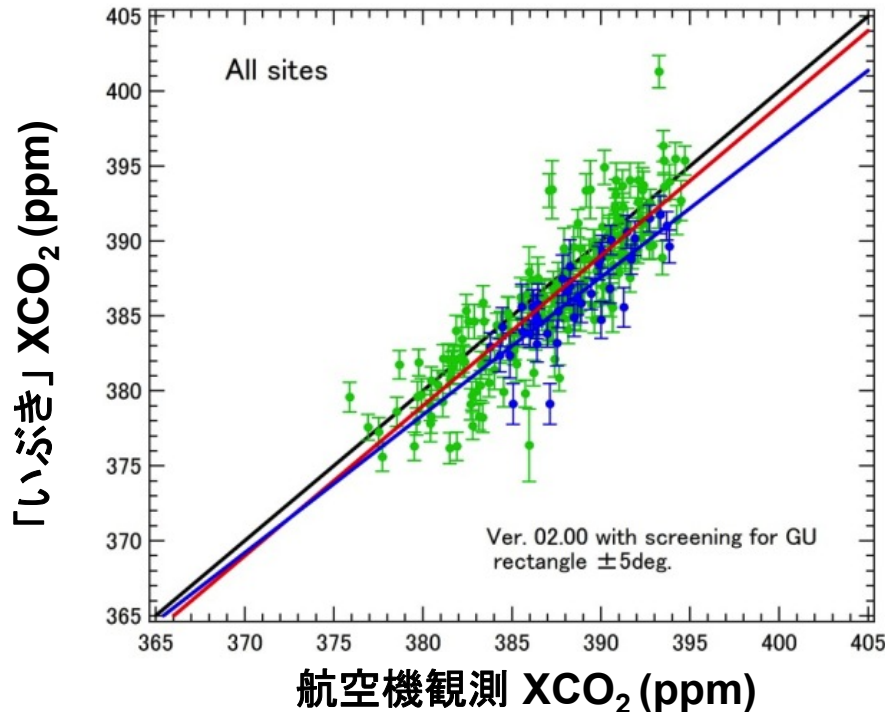
バイアス : -6.8 ppb (-0.38 %)

ばらつき(1 σ): 13.2 ppb (0.74 %)¹⁵

航空観測データを用いた「いぶき」の検証結果

期間 : 2009年4月 – 2010年12月

「いぶき」: Ver. 02.00 各地点 +/-5 度以内の観測一般公開用データ



CONTRAIL+NOAA+DOE+HIPPO+NIES+NIES-JAXA

陸域データ数: 182

R=0.86

バイアス: -0.99 ppm (-0.25 %)

ばらつき: 2.51 ppm (0.64 %)

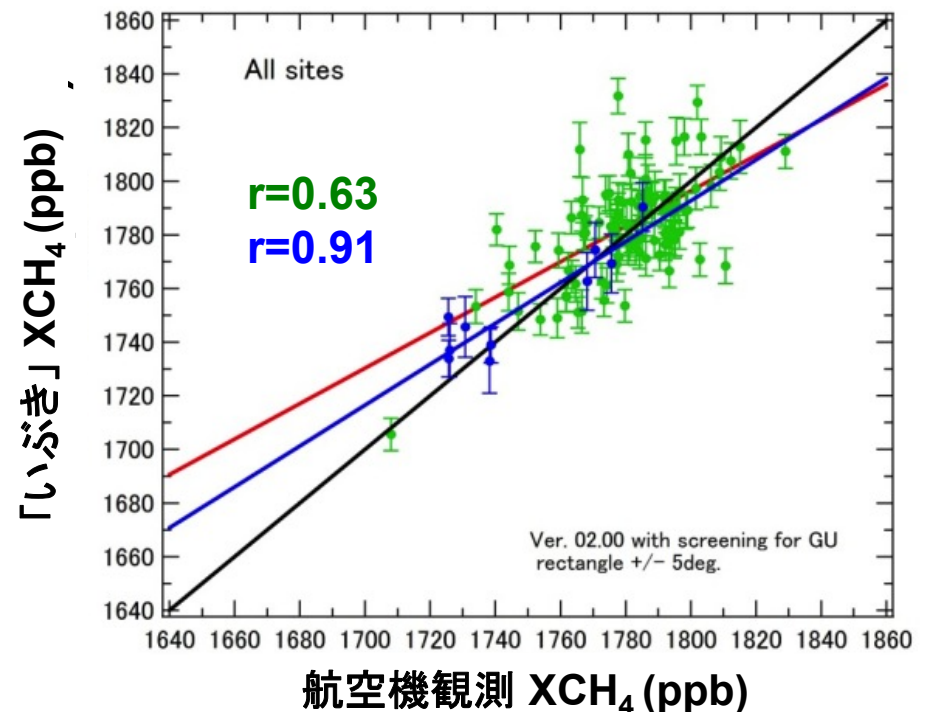
海域データ数: 40

R=0.82

バイアス: -2.27 ppm (-0.58 %)

ばらつき: 1.79 ppm (0.46 %)

出典: Inoue et al.,
Atmos. Chem. Phys.,
13, 9771-9788, 2013.



NOAA+DOE+HIPPO+NIES+NIES-JAXA

陸域データ数: 102

R=0.63

バイアス: 2.0 ppb (0.11 %)

ばらつき: 16.1 ppb (0.89 %)

海域データ数: 10

R=0.91

バイアス: 5.0 ppb (0.28 %)

ばらつき: 9.8 ppb (0.55 %)

出典: Inoue et al.,
Atmos. Meas. Tech.,
7, 2987-3005, 2014.

まとめ

- 「いぶき」は2009年1月23日打ち上げられ、5年間の運用を終了後も観測継続中。
- 「いぶき」による一般公開用短波長赤外温室効果ガスカラム平均濃度(XCO_2 及び XCH_4 , ver. 02.xx)をTCCONと航空機観測(CONTRAIL, NOAA, DOE, HIPPO, NIES, NIES-JAXA)により取得したデータを用いて検証を実施。
- 「いぶき」 XCO_2 はTCCONデータに対して、0.38 % (1.48 ppm)小さく、ばらつきは0.54 % (2.1 ppm)である。「いぶき」 XCH_4 はTCCONデータに対して 0.38 % (6.8 ppb)小さく、ばらつきは 0.74 % (13.2 ppb)である。
- 更なる「いぶき」データの高精度化を目指して、TCCON FTSに加え、ライダー、放射計を設置したつくば、佐賀、Lauder等の重点検証サイトの検証データを用いて誤差の要因を検討し、解析手法のケーススタディを実施。
- 更なるリトリバル手法の改善は時間と労力がかかるため、「いぶき」による温室効果ガスカラム平均濃度を解析するときに同時に求めた付随データ(地上気圧、大気質量、エアロゾル光学的厚さ、地表面反射率)との相関解析を行い、相関が無くなるように「いぶき」データの経験的補正を行い、データ質が改善されていることを確認。
- 「いぶき」データの現公開データは科学研究に利用可能な高精度を達成している。ただし、エアロゾルや巻雲などにより影響を受けている(バイアスやばらつきが大きいもの)場合のデータも含まれているので使用には注意が必要。
- 地上フラックス推定や他衛星やモデルデータとの比較だけでなく、炭素収支の季節変動の解釈、大規模な山火事や大都市による CO_2 や CH_4 の増加の検出等に、幅広く利用されるようになってきている。
- GOSAT-2(「いぶき」の後継機) 2017年度打ち上げで開発開始。

2A-1102

「いぶき」観測データ解析により得られた温室効果ガス濃度の高精度化に関する研究

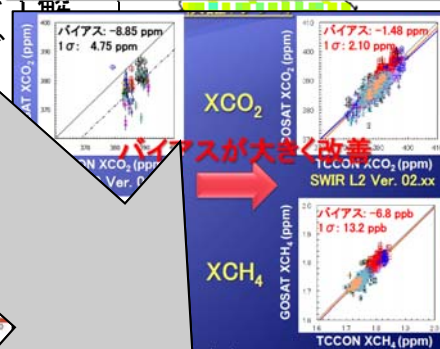
更なる「いぶき」データの高精度化

- ・ バイアスの季節変動・経年変動の解明
- ・ 航空機観測データによる検証
- ・ 経験的補正法の開発と補正データ検証
- ・ 重点検証観測サイトでのエアロゾル・雲の分布と「いぶき」データとの対応
- ・ 巻雲スクリーニング・解析方法の改善、下層エアロゾル過小評価の可能性、成層圏エアロゾル影響
- ・ 全重点検証観測サイトで取得したデータを用いたケーススタディ
- ・ 更なる参照値・アルゴリズムの改良等

参照値・アルゴリズムの改良とTCCONデータによる検証

目標達成

$\text{XCO}_2: -1.48 \pm 2.10 \text{ ppm}$
 $(-0.4 \pm 0.5 \%)$



重点検証観測

連携

同期観測

重点サイトで取得したデータを用いた検証と誤差要因の特定

地上設置高分解能FTS

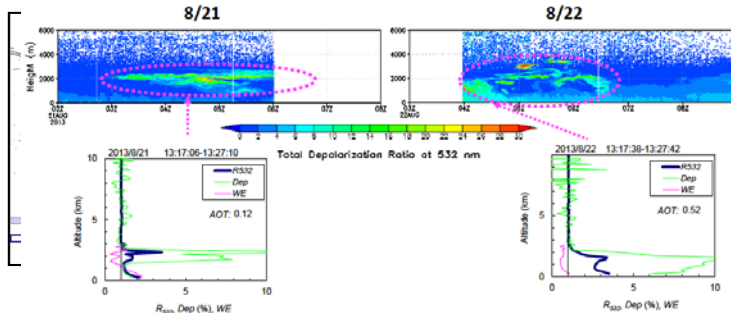
重点検証観測サイトつくばにおけるケーススタディ

ライダー 放射計

間接的成果

- ・ ライダーによる火山性成層圏エアロゾルの観測
- ・ ライダーとスカイラジオメーターによる桜島噴火火山灰の観測

桜島噴煙(2013年8月18日噴火)を佐賀で観測

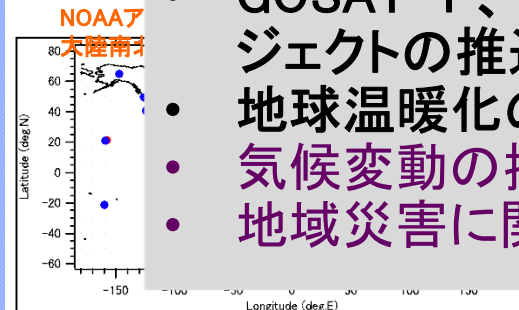


航空機搭載観測

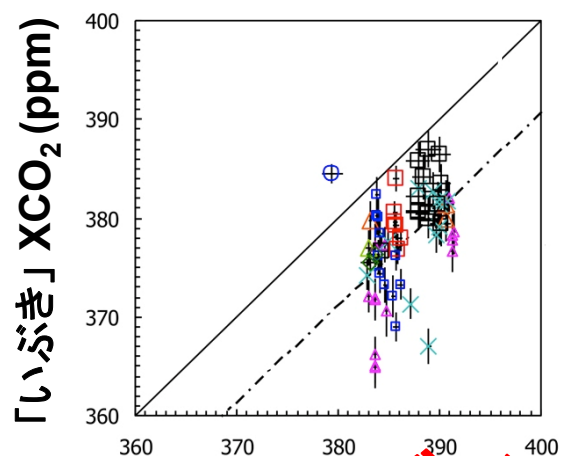
環境政策への貢献

- ・ GOSAT-1、GOSAT-2 プロジェクトの推進
- ・ 地球温暖化の解明の知見
- ・ 気候変動の把握
- ・ 地域災害に関する情報提供

比較



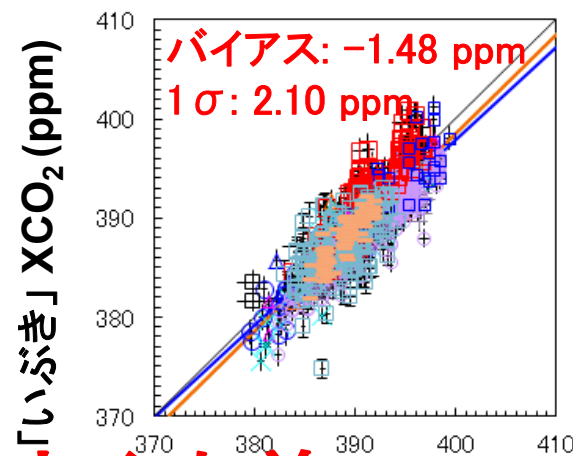
アルゴリズム・初期値改良前後のTCCONデータによる検証



TCCON XCO₂ (ppm)

短波長赤外レベル 2 Ver. 01.xx

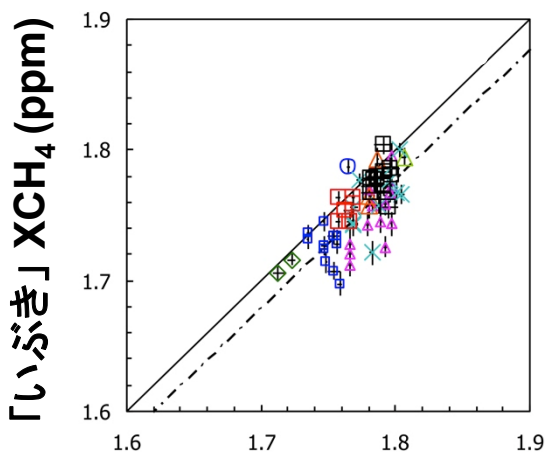
XCO₂



TCCON XCO₂ (ppm)

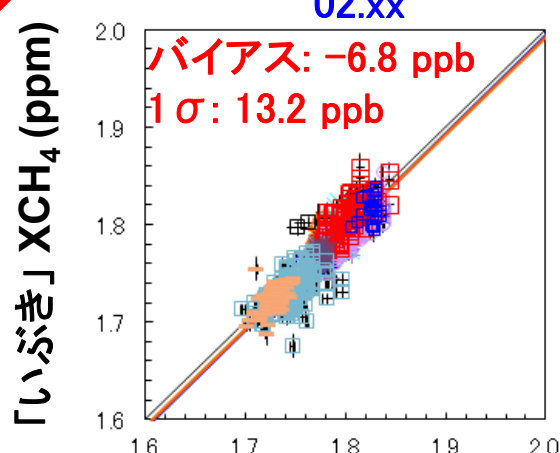
短波長赤外レベル2 Ver.

02.xx



TCCON XCH₄ (ppm)

XCH₄



TCCON XCH₄ (ppm)

19

TCCON: +/-30分平均、「いぶき」: 0.5~1.5 度box内

TCCON: +/-30分平均、GOSAT: +/- 2 度box内

参照値・アルゴリズム改良によるバイアスの変化

	XCO ₂	XCH ₄
Ver. 01.xx	-8.85 ppm	-20.4 ppb
太陽照度データ	(+3 ppm)	(-7 ppb)
エアロゾル光学特性	(+3 ppm)	(+12 ppb)
エアロゾル高度分布	(-1 ppm)	(-4 ppb)
O ₂ 分光パラメータ	(+2 ppm)	(+10 ppb)
Ver. 02.00	-1.20 ppm	-7.2 ppb
Ver. 02.xx	-1.48 ppm	-6.0 ppb

Ver. 01.xx, Ver. 02.00: TCCON データ (GGG 2009) を使用

Ver. 02.xx: TCCON データ (GGG 2012) を使用

Ver. 01.xx: 2009/06～2010/11 観測分

Ver. 02.00: 2009/06～2010/07 観測分

Ver. 02.xx: 2009/06～2012/11 観測分

出典: Y. Yoshida et al., AMT, 6, 1533–1547 (2013) “Improvement of the retrieval algorithm for GOSAT SWIR XCO₂ and XCH₄ and their validation using TCCON data”

研究体制：研究機関と参画者・関係者

2A-1102 「『いぶき』観測データ解析により得られた温室効果ガス濃度の高精度化に関する研究」

(1)長期間検証データの評価、「いぶき」データ検証とアルゴリズム改良に関する研究

(独)国立環境研究所 森野 勇、吉田 幸生、横田 達也
井上 誠、菊地 信弘、中前 久美

(2)重点サイトにおける巻雲・エアロゾル光学特性観測に関する研究

気象庁気象研究所 永井 智広、真野 裕三、酒井 哲、
内山 明博、山崎 明宏

(3)重点サイトにおける高精度温室効果ガス観測に関する研究

(独)宇宙航空研究開発機構 川上 修司、大山 博史