

2006 年度修士学位論文
SCIAMACHY センサによるメタンデータと
地上観測データの比較解析

奈良女子大学大学院
人間文化研究科 情報科学専攻
有山 悠子

2007 年 1 月 31 日

目次

第1章	序章	5
1.1	地球温暖化	5
1.2	温室効果気体、CH ₄	6
1.2.1	対流圏 CH ₄ のソースとシンク	6
1.2.2	季節変化と濃度変化	8
1.3	研究の背景と目的	8
第2章	解析に使用した衛星データ	11
2.1	SCIAMACHY センサ	11
2.2	CH ₄ と CO ₂ のカラムデータ	12
2.2.1	光路の補正と混合比への変換	13
2.2.2	雲の影響の除去	14
2.3	成層圏の影響	15
第3章	比較に使用したデータ	17
3.1	地上観測データ	17
3.1.1	World Data Centre for Greenhouse Gases (WDCGG)	17
3.1.2	中国内陸のデータ	26
3.2	航空機観測データ	30
第4章	衛星観測データの検証	33
4.1	CH ₄ の高度分布解析	33
4.1.1	解析方法	33
4.1.2	結果	35
4.2	データセットの作成	41
4.2.1	観測データの平均	41
4.2.2	観測誤差の平均	41
4.3	地上観測データとの比較	42
4.3.1	比較の方法	42
4.3.2	結果	43
4.4	ソースの影響	48
4.4.1	地上観測地点の分類	48

4.4.2 結果	50
第 5 章 CH₄ の全球分布	53
5.1 地上観測データの月平均	53
5.2 CO ₂ 濃度を考慮した月平均値	54
5.3 CH ₄ の全球分布	57
第 6 章 まとめと今後の展望	63
謝辞	65
参考文献	67

第1章 序章

1.1 地球温暖化

近年、地球温暖化は重要な環境問題の一つとして取り上げられている。地球温暖化とは、地球大気の平均気温が上昇する現象であり、その原因として「温室効果ガス」の増加が考えられている。この「温室効果ガス」は主に人間活動によって放出され、人間活動の活発化に伴いさらなる悪化が懸念されている。

温室効果ガスには、主に二酸化炭素 (CO_2)、メタン (CH_4)、一酸化二窒素 (N_2O) やフロン (CFC) などがあげられる。産業革命以降について、これらの大気中濃度の変化が、温室効果に与える影響の定量的な評価が行われた。その指標として「放射強制力」が用いられる。放射強制力とは、温室効果ガスの濃度変化や太陽放射の変化など、地球 - 大気系のエネルギーのバランスを変化させる影響力の大きさを表し、値が正の場合は地表面を暖め、負の場合は冷やす方向に働く。*IPCC* (2001) は、各ガス種の放射強制力の定量的な評価を行い (図 1.1)、人為的な温室効果ガス全体の放射強制力 2.43Wm^{-2} のうち、 1.46Wm^{-2} が CO_2 、 0.48Wm^{-2} が CH_4 であると評価している。また、 CH_4 は対流圏オゾンや成層圏の水蒸気などの新たな温室効果ガスを形成するため、間接的に 0.13Wm^{-2} の放射強制力をもつと報告している。

また、将来的な温室効果への寄与も評価されている。その指標として地球温暖化係数 (Global Warming Potential : GWP) が用いられ、各ガス種の大気中の滞留時間と、各ガス種が持つ太陽エネルギーを吸収する潜在能力の両方を考慮して決定される、地球温暖化への寄与を数値化したものである。表 1.1 に、*Jacob*(2002) で示されている GWP を示す。表より、 CH_4 は 100 年間で考えると、 CO_2 の 25 倍の温室効果を持っていることがわかる。これはわずかな増加がさらなる温暖化を引き起こし得るということであり、逆に CH_4 の削減が温暖化防止に大きく寄与すると考えられる。

表 1.1: CH_4 の GWP (*D. J. Jacob* (2002))

気体	寿命 (年)	それぞれの時間積分期間の GWP		
		20 年間	100 年間	500 年間
CO_2	~ 100 年	1	1	1
CH_4	(仮に) 10 年	62	25	8

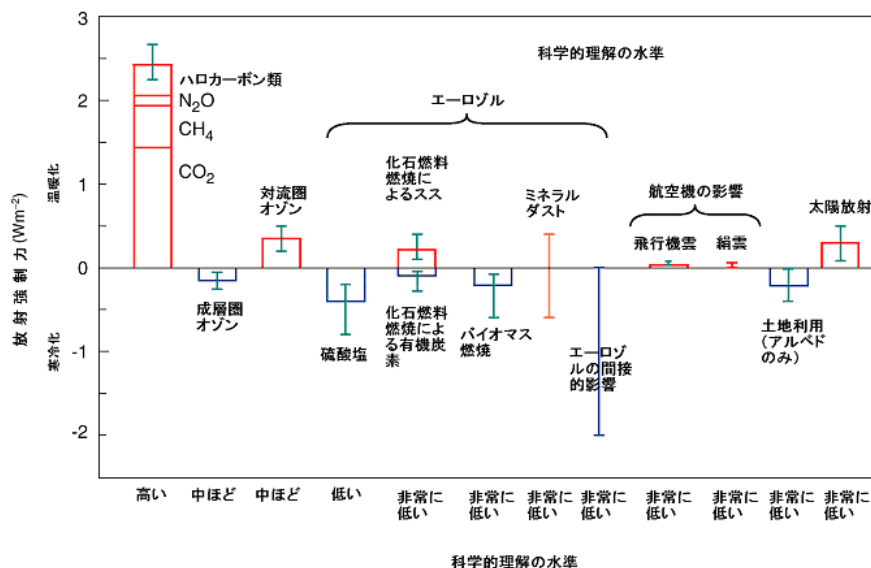


図 1.1: 1850 ~ 1990 年の期間の放射強制力とその信頼度 (IPCC (2001))

1.2 温室効果気体、CH₄

1.2.1 対流圏 CH₄ のソースとシンク

地球温暖化に大きな影響を及ぼす CH₄ は、その放出源 (ソース) や消失源 (シンク) についてこれまでさまざまな調査が行われてきた。現在推定されている CH₄ のソースは、全球の CH₄ 放出の 70% が人為起源によると推定されており、人為起源のソースの中で、最も大きな割合を占めるのは家畜と水田である。一個体あたり最も多くの CH₄ を放出する家畜は牛であり、続いて馬や羊、山羊、豚などが挙げられる。水田での CH₄ 放出は、田に水を張っている時期に嫌気的な環境ができるので放出が起こる。また、バイオマス燃焼や化石燃焼において不完全燃焼が起こる場合にも CH₄ が発生する。自然起源のソースでは、最も大きな割合を占めるのは湿原である。湿原は、雨期・乾期のような気候の変化がある地域では、主に雨期に嫌気的な環境をつくりだし CH₄ を放出する。また、高緯度に位置する湿原では、冬季には凍結がおこるため CH₄ 放出は起こらず、土壌の融解とともに CH₄ 放出量が急激に増すという現象が報告されている (Jurgen Heyer et al. (2002))。その他、永久凍土地帯の土壌や、海底にはメタンハイドレートとして大量の CH₄ が含まれていると考えられている。今後、温暖化が進行してさらに気温が上昇すると、これらの CH₄ が大気中に大量に放出されることが懸念されている。このように、CH₄ のソースは全てが地表面付近および海底に存在しており、大気中で生成されるということはない。

CH₄ のシンクは、主に対流圏での水酸化 (OH) ラジカルによる酸化であり、最終的に CO₂ が生成される。主なシンクである OH ラジカルは、紫外線の強い夏季に多量に生成されるため、夏季に CH₄ の消失量が増加する。他に、土壌沈着や成層圏への輸送により減少する。このようにシンクは大気中に存在するため、CH₄ 濃度は、地表面付近で最も高く、上空にいくにつれて

減少していくと考えられる。表 1.2 に CH₄ のソースとシンクの推定量をまとめる。

表 1.2: CH₄ のソース・シンクと推定年間発生量 (Tg) (IPCC (2001))

ソース	最も確からしい値 (Tg)	推定範囲 (Tg)
人為的ソース		
反芻動物	85	65 ~ 100
水田	60	20 ~ 100
バイオマス燃焼	40	20 ~ 80
埋め立て	40	20 ~ 70
天然ガス	40	25 ~ 50
炭鉱	30	15 ~ 45
動物排泄物	25	20 ~ 30
下水処理	25	15 ~ 80
石油生産	15	5 ~ 30
自然的ソース		
湿原	115	55 ~ 150
シロアリ	20	10 ~ 50
海洋	10	5 ~ 50
陸水	5	
ハイドレート	5	
その他	5	
総発生量	535	410 ~ 660
シンク		
対流圏での酸化	445	360 ~ 530
成層圏での酸化	40	30 ~ 50
土壌吸収	30	15 ~ 45
総消失量	515	430 ~ 600

第1章 序章

1.2.2 季節変化と濃度変化

CH_4 の放出は、物質の燃焼による放出以外はそのほとんどがメタン菌によるものである。メタン菌は、気温の高い時期に活動が活発になるため、夏季はソースの強度が増し、冬季は強度が弱まる時期である。しかし、ソースの影響を直接受けないバックグラウンドサイトでは、夏季においてソース強度よりも OH ラジカルによるシンクの強度が勝るために低濃度になる。そのため CH_4 濃度の典型的な季節変化は、夏に低く冬に高いというものである。

図 1.2.2 はアメリカ及びオーストラリアで観測された CH_4 データ (WDCGG (3.1 節参照)) のプロットである先に述べた典型的な季節変化が表れているほか、ソースの多い北半球では南半球と比べて約 100ppbv ほど高くなっていることも特徴的である。また、図 1.3 は、グリーンランドと南極のアイスコアから得られた CH_4 濃度と、南極の地上観測地点から得られた CH_4 濃度のプロットである。(WDCGG (3.1 節参照))。このように産業革命以前はおよそ 700ppbv であったが、産業革命以降、急激に濃度が上昇し、現在では約 1750ppbv とされていて、人間活動によって CH_4 放出が起こっていると考えられている。また、気温が上昇すれば、 CH_4 放出が増すと考えられているため、さらなる CH_4 濃度増加の可能性も懸念される。

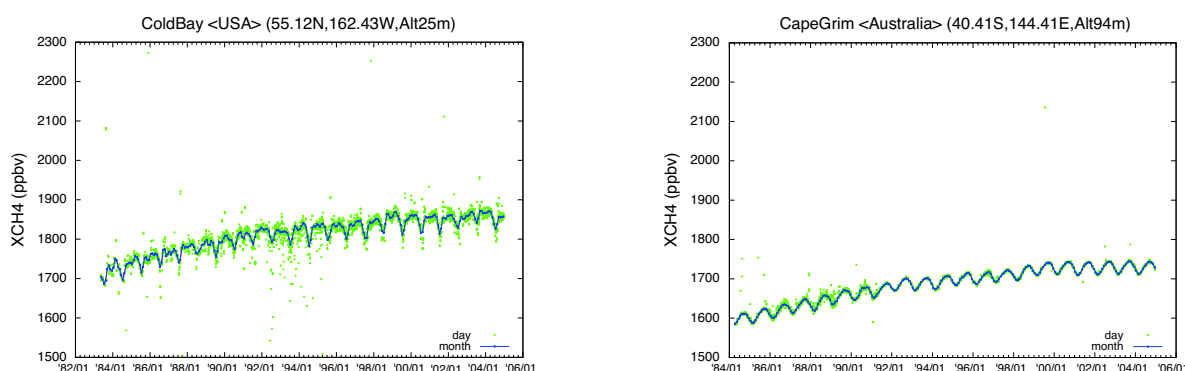


図 1.2: 左：アメリカ、右：オーストラリアで観測された CH_4 の地上観測データ。
典型的な季節変化を示す。縦軸： CH_4 (ppbv) 横軸：年

1.3 研究の背景と目的

CH_4 は、温暖化に大きく寄与する温室効果ガスであり重要な化学種である。そのため、ソースやシンク、全球的な濃度に関する解明が急がれており、これまで世界各地で地上観測が行われてきた。しかし、地上観測地点は CH_4 のソースから離れた地域で、大気中のバックグラウンド濃度を測定しており、ソースの位置やその規模、また全球での CH_4 分布の把握は困難であった。近年、衛星による CH_4 の観測が行われ始め、地上観測ではなし得なかった全球観測が可能となった。そこで、本研究では地上観測データや航空機観測データを用いて衛星観測データの比較検証し、全球規模での CH_4 濃度の特徴を理解することを目的とする。 CH_4 は、地表面付近にソースがあるため、本研究では特に全球規模での対流圏下部での CH_4 の変動に着目した。

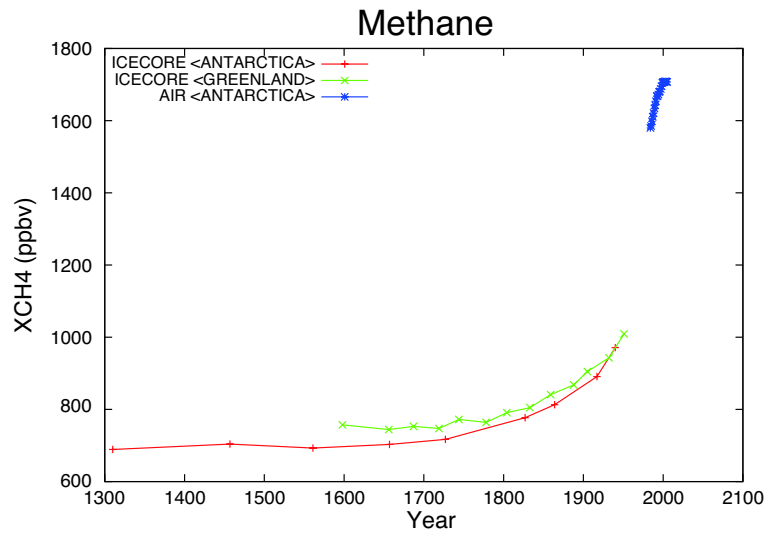


図 1.3: アイスコアや南極で観測された CH_4 データのプロット。
 CH_4 濃度の急激な増加を示す。縦軸： CH_4 (ppbv) 横軸：年

第二章では、解析に使用する衛星観測データについて述べ、第三章では、衛星観測データとの比較検証に使用する地上観測データと航空機観測データについて述べる。第四章では、衛星観測データの検証を行い、第五章では CH_4 の全球分布の特徴を述べ、第六章で結論を述べる。

第2章 解析に使用した衛星データ

本研究では、Environmental Satellite (ENVISAT) 衛星に搭載された SCanning Imaging Absorption spectroMeter for Atmospheric ChartographY(SCIAMACHY) センサによって観測された CH_4 と CO_2 データを使用する。本章では、このデータの特徴と処理方法について述べる。

2.1 SCIAMACHY センサ

SCIAMACHY は、ENVISAT 衛星に搭載されたセンサである。ENVISAT は、温室効果ガスや大気汚染物質を測定することを主な目的とした極軌道衛星である。2002 年 3 月 1 日に European Space Agency (ESA) によって打ち上げられ、現在も運用されている。ENVISAT は、高度約 800km を飛行し、赤道上空をローカル時刻の午前 10 時に通過する。ENVISAT の外観を図 2.1 に示す。



図 2.1: ENVISAT の外観図

SCIAMACHY は、 CH_4 、 CO_2 、 N_2O 、 CO 、 NO_2 、 BrO 、 OCIO 、 H_2O 、 SO_2 、 O_3 、 CH_2O 、 O_2 、 O_4 のガス種と雲やエアロゾルの観測を全球規模で行っている。SCIAMACHY は、直下視観測と周縁観測を交互に行っているセンサで、8 つの分光器チャンネルをもち、240 ~ 2380nm の紫外・可視・近赤外に及ぶ広範囲の波長域をカバーしている。直下視観測の場合、観測幅は 960km で、一日に 14 軌道、全球を 6 日でカバーする。地上でのピクセルサイズは、南北に 30km、東西に 60 ~ 120km である。

CH_4 と CO_2 は、表 2.1 で示す 3 種類の近赤外域で観測を行っており、ch6 と ch8 で観測されたデータは、それぞれハイデルベルグ大学とブレーメン大学によってリトリバルされ公開され

第2章 解析に使用した衛星データ

ている。ch6 は ch7・8 と比較して、信号対ノイズ比や空間分解能において優れているため、本研究ではハイデルベルグ大学でリトリバルされたデータを用いる [Frankenberg *et al.* (2006)]。次の表 2.1 に、各チャンネルの観測波長領域と空間分解能、スペクトル分解能を示す。

表 2.1: SCIAMACHY の近赤外域のチャンネルの性能

	ch6	ch7	ch8
観測波長領域	1000 ~ 1750nm	1940 ~ 2040nm	2265 ~ 2380nm
空間分解能	30km × 60km	30km × 120km	30km × 120km
スペクトル分解能	1.35nm	0.24nm	0.24nm

本研究で用いた CH₄ データは、ch6 の 1630 ~ 1670nm の領域で観測されたスペクトルを、IMAP (iterative maximum a posteriori) -DOAS 法によってリトリバルされた鉛直カラム (Vertical Column Density : VCD) データである。リトリバル過程において、スラントカラム量を幾何学的に VCD に変換されている。リトリバルアルゴリズムに関する詳細は、Frankenberg *et al.* (2005b) で述べられている。

2.2 CH₄ と CO₂ のカラムデータ

SCIAMACHY のデータは、一軌道分のデータである swath データとして提供されている。このデータには、CH₄ と CO₂ の VCD データ [VCD(CH₄)、VCD(CO₂)] とそれらのエラー値の他に、観測時刻、緯度・経度、太陽天頂角、地表面アルベド、地表面高度が含まれている。使用したデータの期間は、2003 年 1 月から 2004 年 12 月までの 2 年間である。

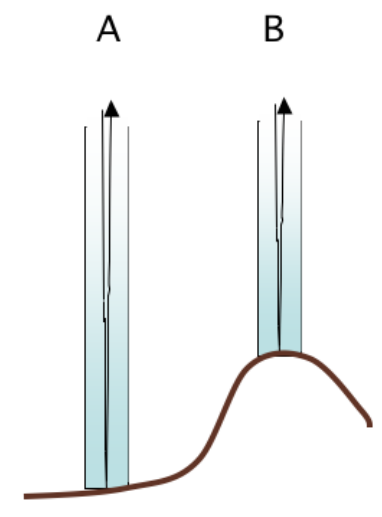


図 2.2: 地表面高度 (地表気圧) の違いによるカラム量の違い

カラム量は、図 2.2 に示すように鉛直方向の積算値であるため、A と B のカラムでは直接濃度を比較することはできない。そのため、光路の長さ（大気路程）の情報を用いて混合比（Volumn Mixing Ratio : VMR）に変換する必要がある。大気路程は、地表面気圧の他に雲やエアロゾルによる散乱によっても変化する。通常、大気路程の補正は、O₂ によって行われることが多い。なぜなら、O₂ は大気中でよく混合されているため、混合比が高度に依存せず 20.95% と一定であると知られているためである。しかし、O₂ の吸収バンド（760nm）と CH₄ の観測波長領域（1630～1670nm）は離れているため、両者の光路が同じであると仮定することができない。一方、CO₂ の観測波長領域（1562～1585nm）は CH₄ と非常に近く、両者がほぼ同じ光路を通ったと仮定することができる。また、CO₂ は CH₄ に比べて大気中に豊富に存在し、その濃度が比較的把握されているということ、高度分布の変動が比較的小さいことから、O₂ の代わりとして大気路程の補正に用いることができる。以上のことから、VCD(CO₂) を用いて VCD(CH₄) の大気路程の補正を行う [Frankenberg et al. (2005a)]。

2.2.1 光路の補正と混合比への変換

ここでは光路の補正方法について述べる。カラム平均した CH₄ や CO₂ の VMR (VMR(CH₄)、VMR(CO₂)) は、式 2.1 や式 2.2 で示すように空気の鉛直カラム量 (VCD(Air_x)) と VCD(CH₄) や VCD(CO₂) の比である。

$$VMR(CH_4) = \frac{VCD(CH_4)}{VCD(Air_x)} \quad (2.1)$$

$$VMR(CO_2) = \frac{VCD(CO_2)}{VCD(Air_y)} \quad (2.2)$$

先に述べた通り、同時に観測された CH₄ と CO₂ の光路は等しいと考えられるので、VCD(Air_x) と VCD(Air_y) は等しい値である。よって、式 2.3 が成立する。

$$\frac{VCD(CH_4)}{VCD(CO_2)} = \frac{VMR(CH_4)}{VMR(CO_2)} \quad (2.3)$$

両化学種はその光路において同様に散乱したと考えられるので、VCD(CH₄) と VCD(CO₂) を割ることによって散乱の効果を打ち消し合うことができ、光路の補正が可能となる。

式 2.2 で与えられる VMR(CH₄) や VMR(CO₂) は、成層圏も含めたカラム平均混合比であるのが最も望ましい。Frankenberg et al. (2005a) では、モデルで求められカラム平均された VMR 値を与えているが、本研究では、VMR(CO₂) と VMR(CH₄) の高度分布が一様であると仮定して、地表面付近を観測している地上観測データを与えている。

また、式 2.4 によって混合比に変換することができ、地表面高度・気圧の異なるデータと直接比較することが可能となる。

$$\frac{VCD(CH_4)}{VCD(CO_2)} \times VMR(CO_2) = VMR(CH_4) \quad (2.4)$$

2.2.2 雲の影響の除去

雲の影響を受けて地表面付近を観測できていないデータでは、対流圏下部の CH_4 の変動が解析できないため除去する必要がある。 CO_2 データを用いると、 CO_2 は高度によらず一定であると仮定できるので、 $\text{VCD}(\text{CO}_2)$ が閾値よりも小さければ、地表面付近まで観測できていないと判断できる。図 2.3 は、この考えに基づいて衛星観測データを判断した結果である [Frankenberg *et al.* (2005a)]。閾値は、高度 1.1km より上空に存在する $\text{VCD}(\text{CO}_2)$ の理論値としている。閾値より大きい値は、目的としている高度 1.1km 以下を測定できていると考えられるので、このデータを解析に使用した。

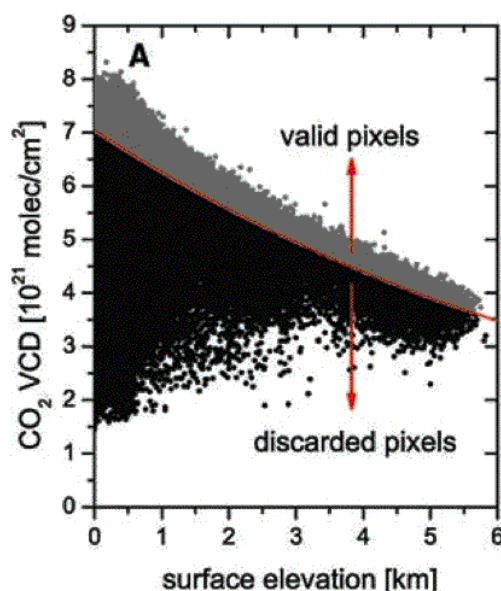


図 2.3: 2003 年 8 ~ 9 月に衛星で観測データされた $\text{VCD}(\text{CO}_2)$ と地表面高度の散布図
縦軸：地表面高度 (km) 横軸： $\text{VCD}(\text{CO}_2)$ ($\times 10^{21} \text{ molec./cm}^2$)

図 2.3 で示している閾値は、式 2.5 の右辺で示されており、本研究で使用したデータは、式 2.5 の条件を満たす $\text{VCD}(\text{CO}_2)$ と、それと同時に観測された $\text{VCD}(\text{CH}_4)$ のデータである。

$$\text{VCD}(\text{CO}_2) > 7 \times 10^{21} \times \exp\left(\frac{h}{8500}\right) \quad (2.5)$$

ここで、 h は各ピクセルデータに与えられた地表面高度データである。式 2.5 は、スケールハイトを 8.5km と仮定し、地表面高度が 0m の地点を衛星で観測した場合、高度 1.1km 以下を測定できていれば、 $\text{VCD}(\text{CO}_2)$ は約 $7 \times 10^{21} \text{ molec./cm}^2$ 以上となる。

2.3 成層圏の影響

SCIAMACHY で観測された鉛直カラム量は、本研究で目的としている対流圏メタンだけでなく成層圏メタンも含んでいる。この成層圏 CH_4 の影響は、アベレージングカーネル (Averaging Kernel : AK) を確認することによって考察できる。AK とは、ある高度について他の高度からどの程度の情報が得られるかを示す指標である。衛星で観測されたカラム量は、AK で示される最も感度の高い高度の濃度情報を示している。次の図 2.4 は CH_4 と CO_2 の AK を示している。図から分かるように、地表面付近に最も感度があり、高度が上がるにつれて感度が下がることがわかる。従って、地上付近に比べて成層圏では 60% 程度の感度しかないため、成層圏付近ではなく地表面付近を観測できていると考えられる。

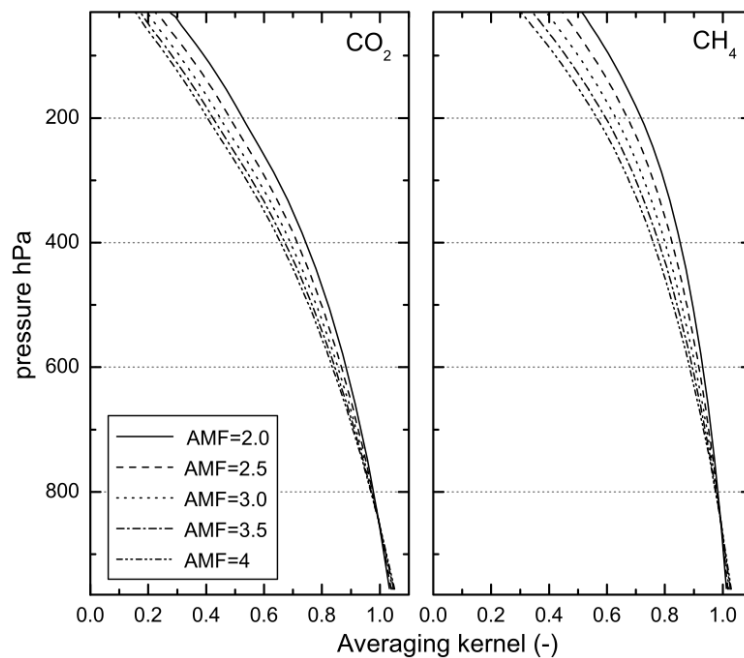


図 2.4: IMAP-DOAS 法によるリトリバルで用いられている AK。

右 : CH_4 、左 : CO_2 、縦軸 : 気圧 (hPa)、横軸 : AK (Frankenberg et al. (2005a))

第3章 比較に使用したデータ

本研究では、衛星観測データの検証のために地上観測データとの比較を行っている。また、CH₄の高度分布を得るために航空機観測データを使用している。本章では、この地上観測データと航空機観測データについて特徴などを述べる。

3.1 地上観測データ

3.1.1 World Data Centre for Greenhouse Gases (WDCGG)

WDCGG は、世界気象機関 (WMO) の全球大気監視 (GAW) 計画の下に設立され、世界各地で測定された温室効果ガス (CO₂、CH₄、CFCs、N₂O、O₃ など) と、それに関連するガス (CO、NO_x、SO₂、VOC など) のデータを収集、管理、提供している。WDCGG の web ページで提供されている CH₄ データは、Event data、Hourly data、Daily data、Weekly data、Monthly data、Icecore data がある。これまで CH₄ を観測してきた地点はおよそ 100 地点あり、表 3.1 に全観測地点の名称を、表 3.2 に各観測地点の緯度経度、提供しているデータの種類、観測期間、また本研究で衛星観測データとの比較に用いた観測地点をまとめた。

図 3.1 は、WDCGG が提供している全期間・全地点での月平均データを緯度 15 °毎に平均して作成した 3 次元プロットである。図 3.1 から分かるように、世界各地で継続的に地上観測が行われた結果、この 20 年間に約 150ppbv もの濃度が上昇したことや、人間活動の活発な北半球において濃度が高いこと、大気中濃度が夏に低く冬に高いという明瞭な季節変化が認識され、報告されている。

全データのうち、SCIAMACHY の観測期間に観測していて、比較に用いることができた日データのある観測地点は 54 地点である。図 3.2 は、その 54 地点の位置を示している。

第3章 比較に使用したデータ

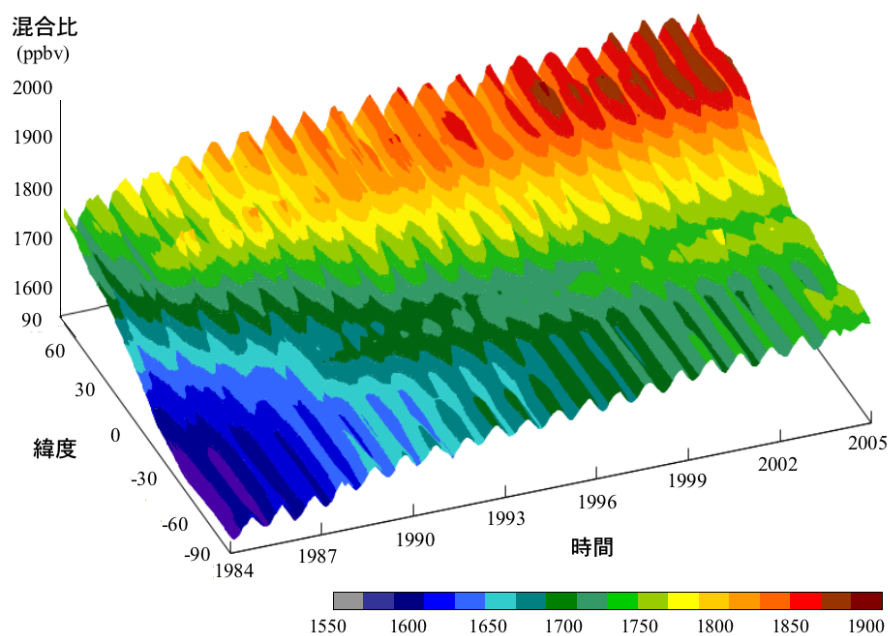
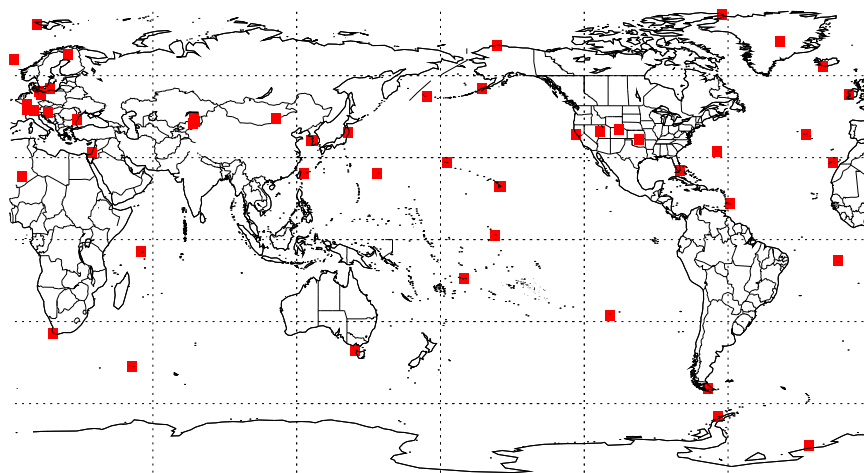


図 3.1: WDCGG の全観測データの緯度・時間・CH₄ 混合比の 3 次元プロット。
カラーバーは CH₄ 混合比 (ppbv) を示す。



Surface Station (WDCGG)

図 3.2: WDCGG の観測地点

表 3.1: WDCGG の観測地点の名称と略称

ステーション名	国名	略名
AmsterdamIsland	France	AMS
AscensionIsland	UnitedKingdom	ASC
Assekrem	Algeria	ASK
CapePoint	SouthAfrica	CPO
Crozet	France	CRZ
Gobabeb	Namibia	NMB
Izana	Spain	IZA
MaheIsland	Seychelles	SEY
Tenerife	Spain	IZO
Anmyeon-do	Rep.ofKorea	AMY
CapeOchi-ishi	Japan	COI
Gosan	Rep.ofKorea	KSN
Hateruma	Japan	HAT
Issyk-Kul	Kyrgyzstan	ISK
Kaashidhoo	Maldives	KCO
Minamitorishima	Japan	MNM
Mt.Waliguan	China	WLG
PlateauAssy	Kazakhstan	KZM
Ryori	Japan	RYO
SaryTaukum	Kazakhstan	KZD
Tae-ahnPeninsula	Rep.ofKorea	TAP
Tsukuba	Japan	TKB
UlaanUul	Mongolia	UUM
Yonagunijima	Japan	YON
BirdIsland	UnitedKingdom	SGI
EasterIsland	Chile	EIC
TierradelFuego	Argentina	TDF
Alert	Canada	ALT
Alert	Canada	ALT
Alert	Canada	ALT
Alert	Canada	ALT
Barrow	U.S.A.	BRW
Barrow	U.S.A.	BRW
CandleLake	Canada	CDL

第3章 比較に使用したデータ

CapeMeares	U.S.A.	CME
CapeMeares	U.S.A.	CMO
ColdBay	U.S.A.	CBA
EstevanPoint	Canada	EPC
EstevanPoint	Canada	EPC
Frasedale	Canada	FSD
Grifton	U.S.A.	ITN
KeyBiscayne	U.S.A.	KEY
KittPeak	U.S.A.	KPA
LaJolla	U.S.A.	SIO
Moody	U.S.A.	WKT
MouldBay	Canada	MBC
NiwotRidge	U.S.A.	NWR
OlympicPeninsula	U.S.A.	OPW
ParkFalls	U.S.A.	LEF
PointArena	U.S.A.	PTA
RaggedPoint	Barbados	RGP
RaggedPoint	Barbados	RGP
RaggedPoint	Barbados	RPB
SableIsland	Canada	SBL
SableIsland	Canada	SBL
ShemyaIsland	U.S.A.	SHM
SouthernGreatPlains	U.S.A.	SGP
St.Croix	U.S.A.	AVI
St.David'sHead	UnitedKingdom	BME
TrinidadHead	U.S.A.	TRH
TrinidadHead	U.S.A.	TRH
TudorHill	UnitedKingdom	BMW
Wendover	U.S.A.	UTA
BaringHead	NewZealand	BAR
BukitKotoTabang	Indonesia	BKT
CapeFerguson	Australia	CFA
CapeGrim	Australia	CGO
CapeGrim	Australia	CGR
CapeGrim	Australia	CGR
CapeGrim	Australia	CGR

CapeKumukahi	U.S.A.	KUM
CapeMatatula	U.S.A.	MAT
CapeMatatula	U.S.A.	MAT
ChristmasIsland	Kiribati	CHR
Guam	U.S.A.	GMI
KaitoreteSpit	NewZealand	NZL
MacquarieIsland	Australia	MQA
MaunaLoa	U.S.A.	MLO
MaunaLoa	U.S.A.	MLO
MaunaLoa	U.S.A.	MLO
SandIsland	U.S.A.	MID
Tutuila	U.S.A.	SMO
BalticSea	Poland	BAL
BlackSea	Romania	BSC
Deuselbach	Germany	DEU
DwejraPoint	Malta	GOZ
Hegyhatsal	Hungary	HUN
Heimaey	Iceland	ICE
Kollumerwaard	Netherlands	KMW
Kosetice	CzechRepublic	KOS
Lampedusa	Italy	LMP
MaceHead	Ireland	MCH
MaceHead	Ireland	MCH
MaceHead	Ireland	MHD
Neuglobsow	Germany	NGL
Ny-Alesund	Norway	ZEP
OceanStation'M'	Norway	STM
Pallas-Sammaltunturi	Finland	PAL
PlateauRosa	Italy	PLR
Schauinsland	Germany	SSL
SedeBoker	Israel	WIS
Shetland	UnitedKingdom	SIS
SiteJ(Greenland)	Denmark	GRL
Summit	Denmark	SUM
TerceiraIsland	Portugal	AZR
Teriberka	RussianFederation	TER

第3章 比較に使用したデータ

Zingst	Germany	ZGT
Zugspitze	Germany	ZGP
Schneefernerhaus	Germany	SFH
ArrivalHeights	Antarctica/NewZealand	ARH
HalleyBay	UnitedKingdom/Antarctica	HBA
Mawson	Australia/Antarctica	MAA
McMurdoStation	U.S.A./Antarctica	MCM
Mizuho	Japan/Antarctica	MZH
PalmerStation	U.S.A./Antarctica	PSA
SouthPole	U.S.A./Antarctica	SPO
SouthPole	U.S.A./Antarctica	SPO
SyowaStation	Japan/Antarctica	SYO

表 3.2: WDCGG の観測地点の情報 / E:Event H:Hourly
D:Daily W:Weekly M:Monthly I:Icecore
比較:比較に用いた日データ
(●印:4.4節で周辺にソースがあると判断した地点)

略名	緯度	経度	高度 (m)	E	H	D	W	M	I	データ提供期間	比較
AMS	37 °57'S	77 °31'E	150							1983.01-1990.12	
ASC	7 °55'S	14 °25'W	54							1983.05-2005.12	
ASK	23 °10'N	5 °25'E	2728							1995.09-2005.12	
CPO	34 °21'S	18 °29'E	230							1983.01-2005.12	
CRZ	46 °27'S	51 °51'E	120							1991.03-2005.12	
NMB	23 °34'S	15 °01'E	461							1997.01-2001.02	
IZA	28 °18'N	16 °30'W	2367							1984.01-2004.12	
SEY	4 °40'S	55 °10'E	7							1983.05-2005.12	
IZO	28 °18'N	16 °28'W	2360							1991.11-2005.12	
AMY	36 °32'N	126 °19'E	47							2000.01-2005.12	●
COI	43 °09'N	145 °30'E	45							1995.07-2002.12	
KSN	33 °17'N	126 °10'E	72							1995.01-1997.12	
HAT	24 °03'N	123 °48'E	10							1996.01-2002.12	
ISK	42 °37'N	76 °59'E	1640							2004.08-2005.11	●
KCO	4 °58'N	73 °28'E	1							1998.03-1999.07	

3.1. 地上観測データ

MNM	24 °17'N	153 °59'E	8		1994.01-2006.06	
WLG	36 °17'N	100 °54'E	3810		1990.08-2005.12	
KZM	43 °15'N	77 °52'E	2519		1997.10-2005.12	●
RYO	39 °02'N	141 °49'E	260		1991.01-2006.06	
KZD	44 °27'N	75 °34'E	412		1997.10-2005.12	
TAP	36 °43'N	126 °07'E	20		1990.11-2005.12	●
TKB	36 °03'N	140 °08'E	26		1985.06-2002.06	
UUM	44 °27'N	111 °05'E	914		1992.01-2005.12	
YON	24 °28'N	123 °01'E	30		1998.01-2006.06	
SGI	54 °00'S	38 °03'W	30		1989.02-1992.08	
EIC	27 °08'S	109 °27'W	50		1994.01-2005.12	
TDF	54 °52'S	68 °28'W	20		1994.09-2005.12	
ALT	82 °27'N	62 °31'W	210		1999.10-2005.12	
ALT	82 °27'N	62 °31'W	210		1985.06-2005.12	
ALT	82 °27'N	62 °31'W	210		1991.04-2005.12	
ALT	82 °27'N	62 °31'W	210		1988.01-2005.12	
BRW	71 °19'N	156 °36'W	8		1986.01-2005.12	
BRW	71 °19'N	156 °35'W	11		1983.04-2005.12	
CDL	53 °52'N	104 °39'W	489		2002.01-2005.12	
CME	45 °29'N	123 °58'W	30		1983.09-1989.06	
CMO	45 °28'N	123 °58'W	30		1983.05-1998.03	
CBA	55 °12'N	162 °43'W	25		1983.05-2005.12	
EPC	49 °23'N	126 °33'W	39		1999.12-2005.08	
EPC	49 °23'N	126 °33'W	39		1993.06-2002.01	
FSD	49 °53'N	81 °34'W	210		1990.01-2005.12	
ITN	35 °21'N	77 °22'W	505		1992.07-1999.06	
KEY	25 °40'N	80 °12'W	3		1983.10-2005.12	
KPA	32 °'N	112 °'W	2083		1983.04-1989.10	
SIO	32 °50'N	117 °16'W	14		1984.02-1986.09	
WKT	31 °19'N	97 °19'W	708		2001.02-2004.12	
MBC	76 °15'N	119 °20'W	58		1983.04-1997.05	
NWR	40 °02'N	105 °34'W	3526		1983.05-2005.12	
OPW	48 °15'N	124 °25'W	488		1984.11-1990.05	
LEF	45 °55'N	90 °16'W	868		1994.11-2002.12	
PTA	38 °57'N	123 °43'W	17		1999.01-2005.12	
RGP	13 °10'N	59 °26'W	45		1996.06-2005.09	

第3章 比較に使用したデータ

RGP	13 °10'N	59 °26'W	45		1985.08-1996.06	
RPB	13 °10'N	59 °25'W	45		1987.11-2005.12	
SBL	43 °56'N	60 °01'W	5		1999.11-2006.08	
SBL	43 °56'N	60 °01'W	5		2003.01-2005.12	
SHM	52 °43'N	174 °05'E	40		1985.09-2005.12	
SGP	36 °47'N	97 °30'W	314		2002.04-2005.12	●
AVI	17 °45'N	64 °45'W	3		1983.05-1990.09	
BME	32 °22'N	64 °39'W	30		1989.02-2005.12	
TRH	41 °03'N	124 °09'W	120		1995.10-2005.09	
TRH	41 °02'N	124 °09'W	107		2002.04-2002.10	
BMW	32 °16'N	64 °52'W	30		1989.05-2005.12	
UTA	39 °53'N	113 °43'W	1320		1993.05-2005.12	
BAR	41 °25'S	174 °52'E	85		1989.08-2004.12	
BKT	0 °12'N	100 °19'E	864.5		2004.01-2005.12	
CFA	19 °17'S	147 °03'E	2		1991.06-2005.12	
CGO	40 °40'S	144 °40'E	94		1984.04-2005.12	
CGR	40 °41'S	144 °41'E	94		1984.08-2005.12	
CGR	40 °41'S	144 °41'E	94		1993.08-2005.09	
CGR	40 °41'S	144 °41'E	94		1981.12-1994.12	
KUM	19 °31'N	154 °49'W	3		1983.04-2005.12	
MAT	14 °15'S	170 °34'W	42		1996.08-2005.09	
MAT	14 °15'S	170 °34'W	42		1985.07-1996.09	
CHR	1 °42'N	157 °10'W	3		1984.03-2005.12	
GMI	13 °26'N	144 °47'E	2		1983.05-2005.12	
NZL	43 °50'S	172 °38'E	3		1983.06-1985.04	
MQA	54 °29'S	158 °58'E	12		1990.04-2005.12	
MLO	19 °32'N	155 °34'W	3397		1987.01-2005.12	
MLO	19 °32'N	155 °34'W	3397		1983.05-2005.12	
MLO	19 °32'N	155 °35'W	3397		1991.05-2005.12	
MID	28 °12'N	177 °22'W	7.7		1985.05-2005.12	
SMO	14 °14'S	170 °34'W	42		1983.04-2005.12	
BAL	55 °21'N	17 °13'E	28		1992.08-2005.12	●
BSC	44 °10'N	28 °40'E	3		1994.10-2005.12	●
DEU	49 °46'N	7 °03'E	480		1994.01-2004.12	●
GOZ	36 °03'N	14 °11'E	30		1993.10-1999.02	
HUN	46 °57'N	16 °38'E	344		1993.03-2005.12	●

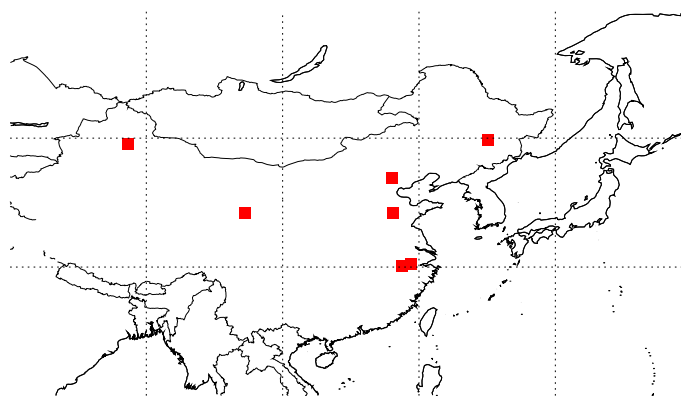
3.1. 地上観測データ

ICE	63 °20'N	20 °17'W	100		1992.10-2005.12	
KMW	53 °20'N	6 °17'E	0		1991.07-2001.12	
KOS	49 °35'N	15 °05'E	534		1995.07-2005.12	
LMP	37 °12'N	3 °36'W	720		1992.05-2005.12	
MCH	35 °31'N	12 °38'E	45		1994.03-2005.09	
MCH	53 °20'N	9 °54'W	25		1987.01-1994.06	
MHD	53 °19'N	9 °54'W	25		1991.06-2005.12	●
NGL	53 °10'N	13 °02'E	65		1994.01-2005.12	●
ZEP	78 °54'N	11 °52'E	475		1994.02-2005.12	
STM	66 °00'N	2 °00'E	5		1983.04-2005.12	
PAL	67 °58'N	24 °07'E	560		2001.12-2005.12	
PLR	45 °56'N	7 °42'E	3480		1991.05-2005.06	
SSL	47 °55'N	7 °55'E	1205		1992.01-2005.12	●
WIS	31 °07'N	34 °52'E	400		1995.11-2005.12	●
SIS	60 °05'N	1 °15'W	30		1992.11-2004.01	
GRL	66 °30'N	46 °12'W	2030		1598.**-1951.**	
SUM	72 °34'N	38 °28'W	3238		1997.06-2005.12	
AZR	38 °46'N	27 °22'W	40		1983.05-2005.10	
TER	69 °12'N	35 °06'E	40		1999.01-2005.12	
ZGT	54 °26'N	12 °44'E	1		1994.01-2003.12	
ZGP	47 °25'N	10 °59'E	2960		1995.01-2001.12	
SFH	47 °25'N	10 °59'E	2656		2002.01-2005.12	
ARH	77 °48'S	166 °40'E	184		1989.11-2004.09	
HBA	75 °34'S	26 °30'W	33		1983.01-2005.12	
MAA	67 °37'S	62 °52'E	32		1984.04-2005.12	
MCM	77 °49'S	166 °35'E	11		1985.12-1987.10	
MZH	70 °42'S	44 °18'E	2230		1310.**-1940.**	
PSA	64 °55'S	64 °00'W	10		1983.01-2005.12	
SPO	89 °59'S	24 °48'W	2810		1983.02-2005.12	
SPO	89 °59'S	24 °48'W	2810		1991.03-2005.12	
SYO	69 °00'S	39 °34'E	14		1986.01-2005.12	

第3章 比較に使用したデータ

3.1.2 中国内陸のデータ

SCIAMACHY は、反射率の低い海洋上空では適切に観測がなされておらず、海洋での観測データや海洋付近で得られた地上観測データとの比較は困難である。WDCGG の地上観測データは、内陸で観測されたものが少ないため、今回提供を受けた中国内陸の地上観測データは大変貴重なものである。観測は、2003 年 3 月から現在も行われており、SCIAMACHY の観測期間に合わせて、2003・2004 年のデータを用いた。次の図 3.3 は、観測地点を示している。



Surface Station (China)

図 3.3: 中国の観測地点

表 3.3 に、中国内陸の各観測地点の特徴をまとめる。

表 3.3: 中国内陸の観測地点の情報

地点	略名	緯度	経度	地表面高度	観測期間
Longfengshan	LFS	44.73 °N	127.60 °E	310m	2003.03-2006.03
Fukang	FUK	44.28 °N	87.93 °E	630m	2003.03-2006.03
Shangdianzi	SDZ	40.39 °N	117.07 °E	294m	2003.03-2006.03
Waliguan	WLG	36.30 °N	100.90 °E	3810m	2003.03-2006.03
Taishan	TSH	36.25 °N	117.10 °E	1534m	2003.03-2006.03
Lin'an	LAN	30.30 °N	119.07 °E	138m	2003.03-2006.03
Huangshan	HSH	30.13 °N	118.15 °E	1841m	2003.03-2006.03

次の図 3.4 は、中国内陸における CH_4 (左パネル) と CO_2 (右パネル) の観測結果を時系列プロットで示しており、各地点の特徴を述べる。

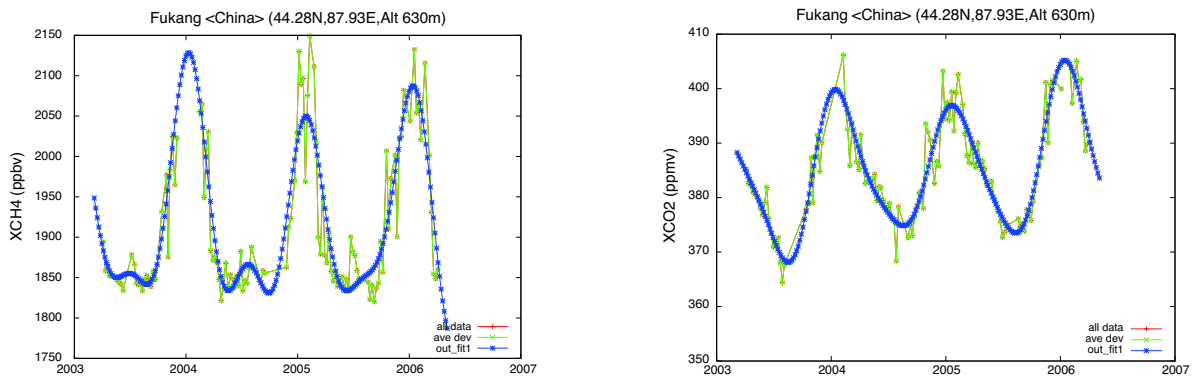
Fukang (図 3.4(a)) の周辺は、畑・荒地・灌木などで、特に強いソースはないが冬季に高濃度が見られる。この現象は CO_2 にも見られるため、冬季に強い逆転層が発達し、地表面付近の空気塊が下部対流圏に閉じ込められるため、高濃度の CH_4 が観測されていると考えられる。

Waliguan (図 3.4(b)) は、山岳地であり、周辺に全くソースがないと考えられるためバックグラウンド値を示すと考えられる。しかし、 CO_2 は典型的な季節変化を示しているが、 CH_4 は季節変化がほとんど見られない。

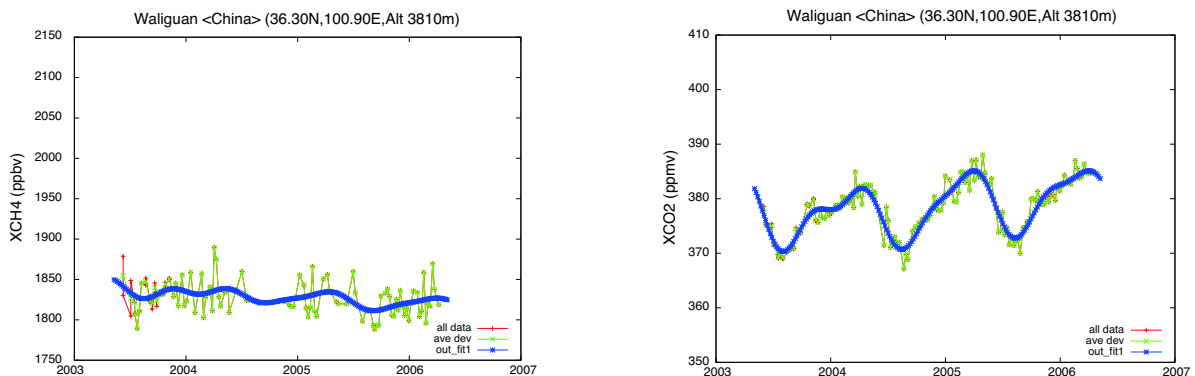
Lin-an (図 3.4(c))、Longfengshan (図 3.4(d))、Shangdianzi (図 3.4(e)) もバックグラウンドサイトと考えられる。Lin-an は、森林に囲まれているため、 CO_2 はローカルな影響を強く受けていると考えられる。 CH_4 は森林の影響を受けないが、典型的な夏季の低濃度が見られないため、中国国内のソースが輸送されたものだと考えられる。

Mt.Huangshan (図 3.4(f)) と Mt.Taishan (図 3.4(g)) は、いずれも 1000m を超える岩山の上にあり、バックグラウンドサイトに近いと考えられたが、典型的な夏季の低濃度が見られず、他の地域のソースの影響を受けていると考えられる。

(a) Fukang

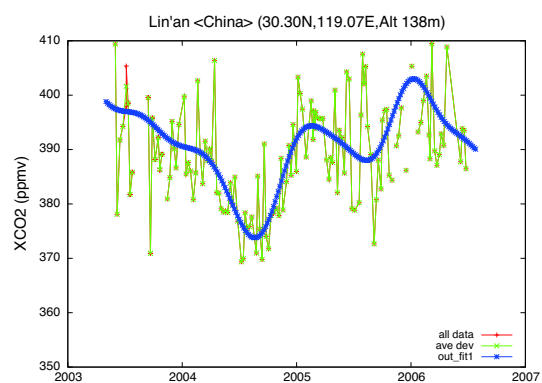
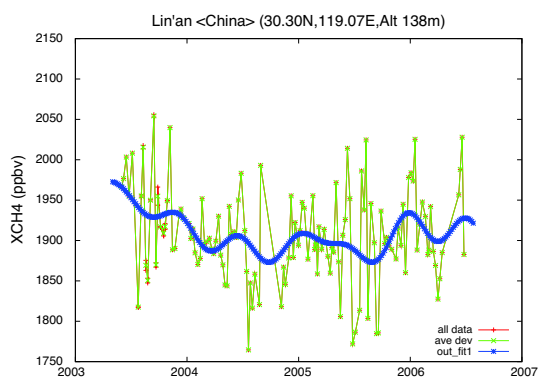


(b) Waliguan

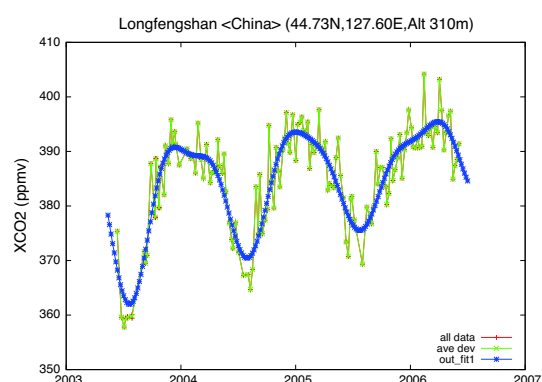
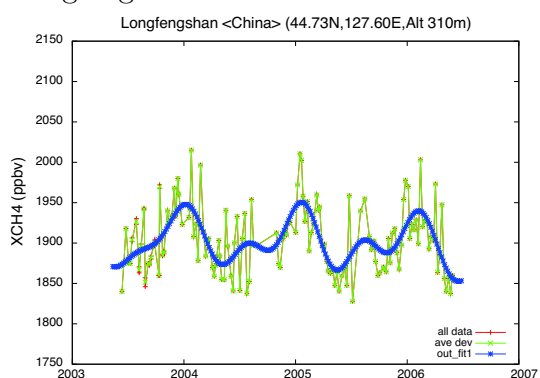


第3章 比較に使用したデータ

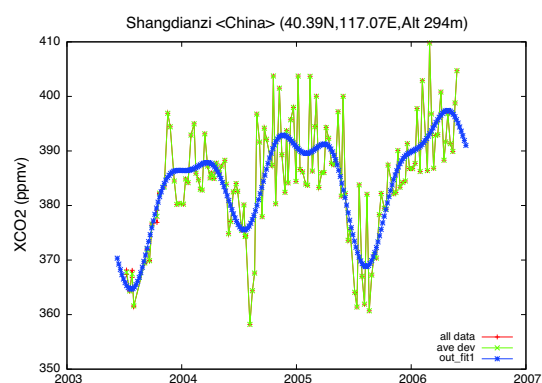
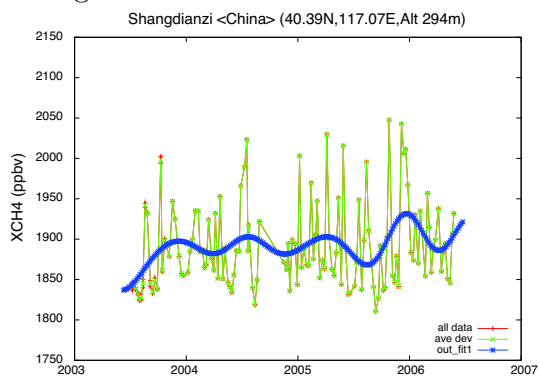
(c) Lin'an



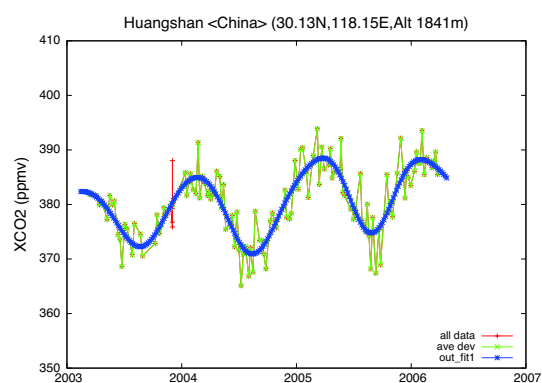
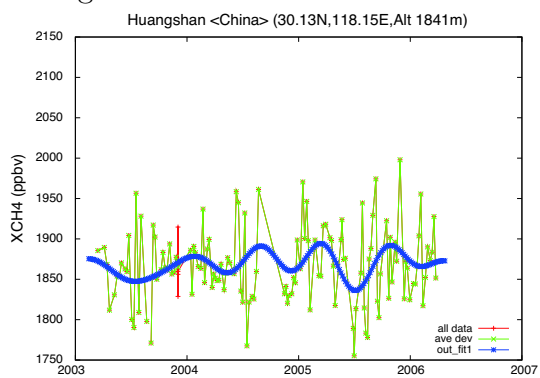
(d) Longfengshan



(e) Shangdianzi



(f) Huangshan



(g) Taishan

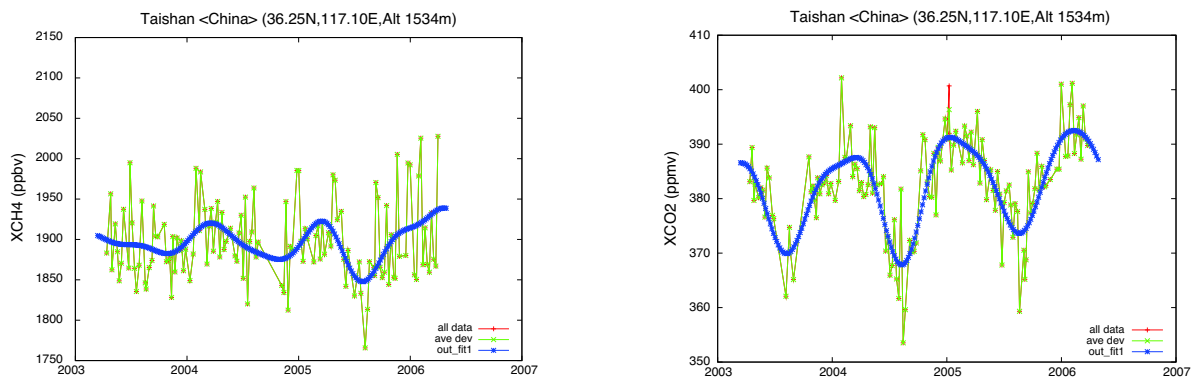


図 3.4: CH₄ (左) と CO₂ (右) の観測結果。縦軸：混合比、横軸：時間

3.2 航空機観測データ

本研究では、SCIAMACHY データの検証を行う上で CH_4 の高度分布を知る必要があるため、航空機観測データを使用している。本研究では、国立環境研究所よりシベリアの3地点と相模における航空機観測データを用いた。このデータは、航空機を利用して対流圏上部から対流圏下部にかけて、数カ所で大気を採取し濃度を分析したものである。その分析過程で生じる CH_4 と CO_2 の測定誤差は、それぞれ最大でも 5ppb と 0.1ppm である。図 3.5 は航空機観測地点を示している。

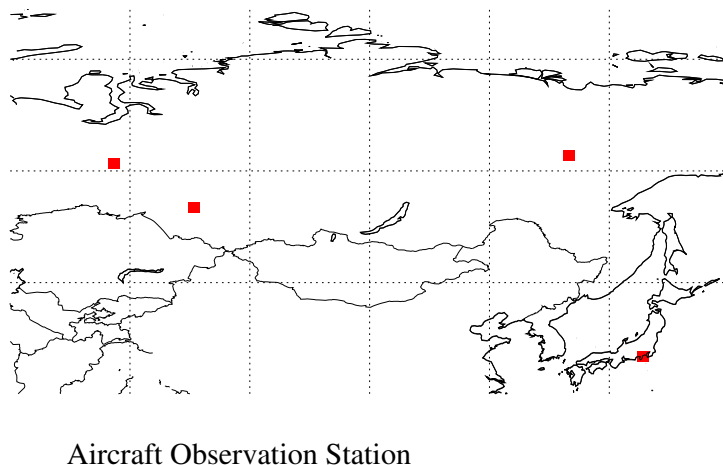


図 3.5: 航空機による観測地点

表 3.4 に、航空機観測の各観測地点の特徴をまとめる。

表 3.4: 航空機観測地点の特徴

地点	略名	緯度	経度	特徴	観測期間	高度
Surgut	SUR	61 °N	73 °E	湿地	1993.07-2005.09	0.5-7km
Novosibirsk	NOV	55 °N	83 °E	森林 (周辺に湿地)	1997.07-2005.08	0.5-7km
Yakutsk	YAK	62 °N	130 °E	森林	1997.06-2000.12	0.5-5km
					2001.10-2005.05	0.1-3km
相模	SAG	35 °N	139.2 °E	都会	1997.02-2006.02	0.5-7km

次の図 3.6 は、それぞれ航空機観測による CH_4 、 CO_2 の時系列プロットである。

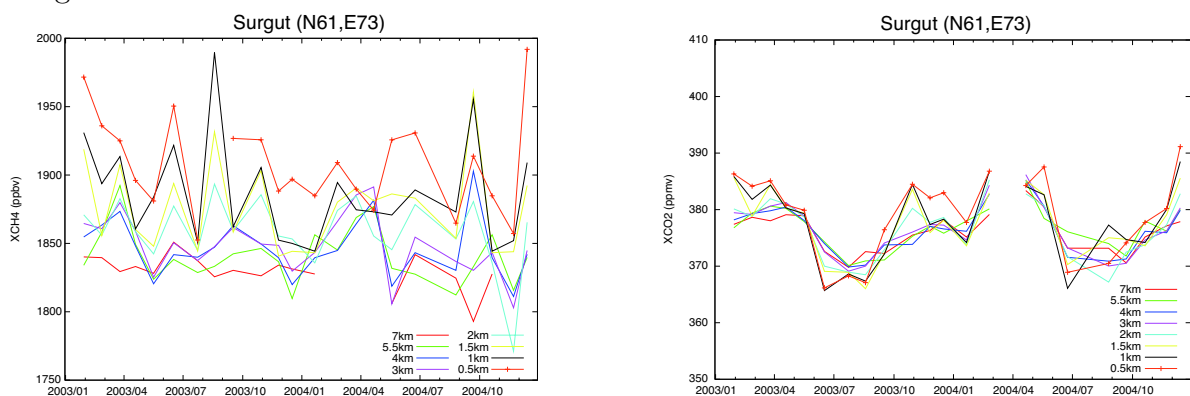
CH_4 は、シンクである OH ラジカルが夏季に多量に生成されることから、夏季に低濃度となる季節変化をもつ。しかし、Surgut は CH_4 のソースである湿地帯であるため、夏季に放出される CH_4 の影響を受けて、明瞭な季節変化を示さないと考えられる（図 3.6(a) 左）。また、高度 0.5km や高度 1km における観測データから、地表面に近い CH_4 濃度は非常に激しく変動していることが分かる。一方で、 CO_2 は植物の光合成が活発な夏季に低濃度となるが、その季節変化が明瞭に表れており、高度分布も比較的一様であることが分かる（図 3.6(a) 右）。

Novosibirsk では、Surgut ほど激しい変動は見られないが、周辺に存在する湿地の影響を受けて CH_4 濃度が夏季に低くならない（図 3.6(b) 左）。また CO_2 の季節変化について、夏季に低濃度となる典型的な季節変化を示す。さらに、森林に覆われている地域であるため、低高度では光合成が活発で CO_2 濃度が低くなっており、高度が上がるにつれて濃度が高くなっていることが分かる（図 3.6(b) 右）。

Yakutsk は、森林に覆われていて CH_4 のソースが存在しない地域なので、 CH_4 も CO_2 も典型的な季節変化を示している（図 3.6(c)）。

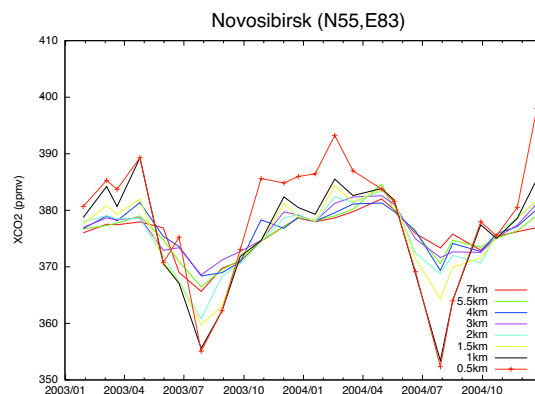
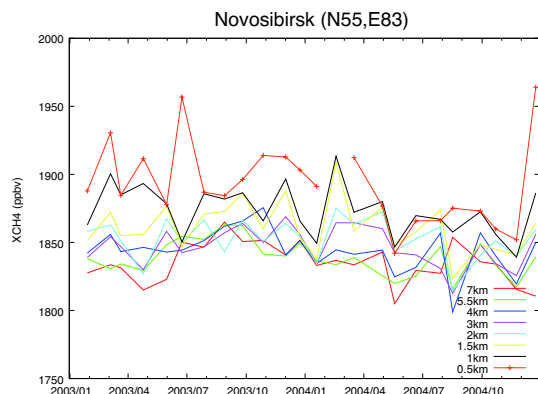
相模は、両化学種とも夏季に濃度が下がる傾向にある。しかし、都会に近いことから人間活動の影響を受けた空気塊をサンプリングした場合は、 CH_4 濃度も CO_2 濃度も高濃度を示すなど各観測データセット毎に変動が見られる（図 3.6(d)）。

(a) Surgut

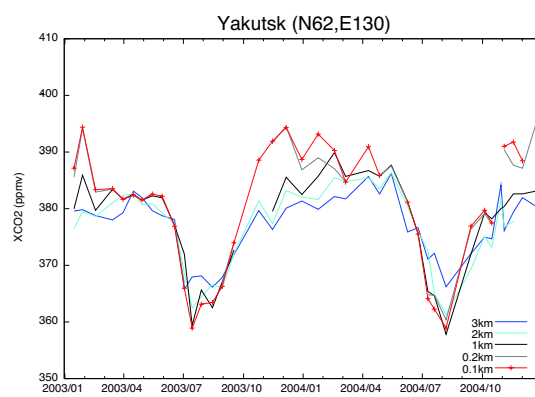
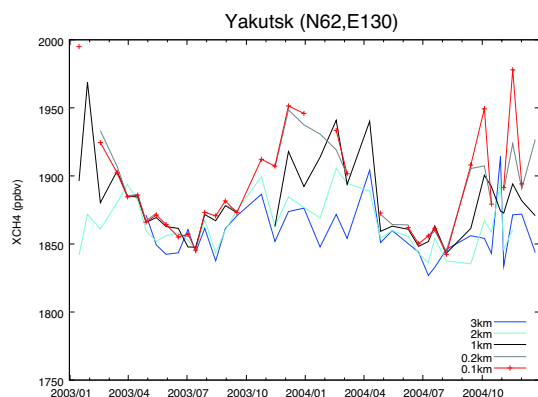


第3章 比較に使用したデータ

(b) Novosibirsk



(c) Yakutsk



(d) 相模

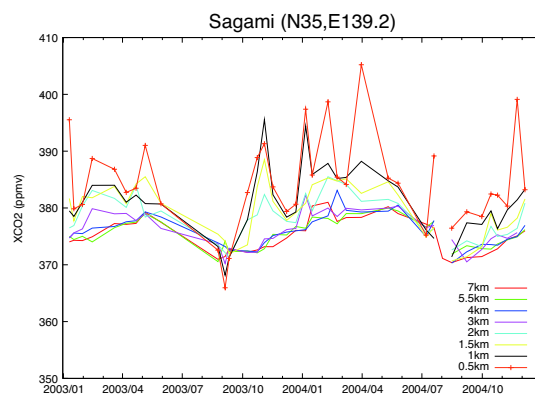
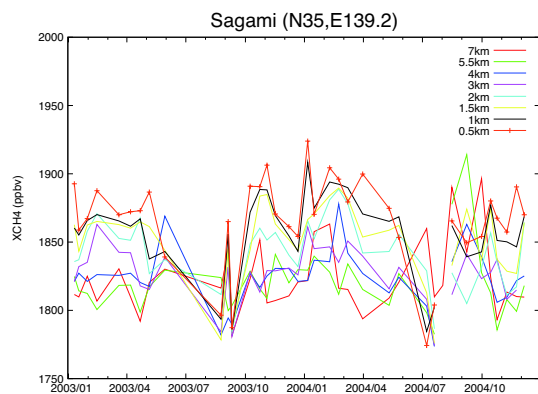


図 3.6: CH_4 (左) と CO_2 (右) の各高度における航空機観測結果。縦軸：混合比、横軸：時間

第4章 衛星観測データの検証

地表面付近にソースがあり大気中にシンクがある CH_4 の分布は、高度分布が一樣でなく、カラム量データである衛星観測データから計算した平均混合比と、地表面付近での混合比との比較を行うと、衛星観測データの方が低い値となることが予想される。そこで本章では、航空機観測による CH_4 と CO_2 データを用いて両化学種の高度分布を調べた後に、衛星観測データと地上観測データとの比較を行い、衛星観測データの信頼性について述べる。

4.1 CH_4 の高度分布解析

4.1.1 解析方法

ここでは CH_4 の高度分布を調べるための解析方法を述べる。衛星観測データである $\left(\frac{VCD(\text{CH}_4)}{VCD(\text{CO}_2)}\right)$ は、 CH_4 や CO_2 の高度分布が一樣であると仮定すれば、カラム全体の平均的な混合比の比と等しい。ここではまず、航空機観測データの最上層から最下層の平均混合比と最下層の混合比を比較してその差の定量的な評価を行う。

以下に、その比較の方法を述べる。計算に用いた値は表 4.1.1 に示す。

1. 理科年表（2003 年）の温度と気圧のデータを用いて、航空機観測を行っている各高度における空気の数密度 (n_a) を式 4.1 によって求める。

$$n_a = \frac{6.022 \times 10^{23} \times P(\text{hPa}) \times 100}{8.31 \times T(K)} \quad (4.1)$$

ここで $P(\text{hPa})$ は各高度の気圧、 $T(K)$ は気温である。

2. 1. で求めた数密度と、航空機で観測された $\text{VMR}(\text{CH}_4)$ や $\text{VMR}(\text{CO}_2)$ の値を用いて、各高度での CH_4 や CO_2 の数密度を求める。また、SCIAMACHY のリトリバル段階で用いられているアプリオリと AK を考慮し、式 4.2 を用いて衛星データと同じ条件に合わせた数密度の計算を行う。

$$\text{VMR}_{i,AK} = (\text{VMR}_i - \text{apriori}_i) \times \text{AK}_i + \text{apriori}_i \quad (4.2)$$

ここで、 $\text{VMR}_{i,AK}$ を AK を考慮した高度 i での VMR とし、 VMR_i を高度 i で測定した航空機観測値、 apriori_i を高度 i における各化学種のアプリオリ、 AK_i を高度 i における各化学種の AK とする。

第4章 衛星観測データの検証

3. 2. で求めた両化学種の数密度の値を積分したものを、最上層から最下層まで積分してカラム量 $VCD(CH_4)$ 、 $VCD(CO_2)$ とし、両化学種の比 $\left(\frac{VCD(CH_4)}{VCD(CO_2)}\right)$ をとる。積分したカラム量の場合、以下が成り立つ。

$$\left(\frac{VCD(CH_4)}{VCD(Air)}\right) = VMR(CH_4) \quad (4.3)$$

$$\left(\frac{VCD(CO_2)}{VCD(Air)}\right) = VMR(CO_2) \quad (4.4)$$

$$\left(\frac{VCD(CH_4)}{VCD(CO_2)}\right) = \left(\frac{VMR(CH_4)}{VMR(CO_2)}\right) \quad (4.5)$$

よって両化学種の積分値の比 $\left(\frac{VCD(CH_4)}{VCD(CO_2)}\right)$ は、カラム平均された混合比の比 $\left(\frac{VMR(CH_4)}{VMR(CO_2)}\right)$ と等しい。

4. 最下層の $\left(\frac{VMR(CH_4)}{VMR(CO_2)}\right)$ を求める。
5. 3. で求めた $\left(\frac{VMR(CH_4)}{VMR(CO_2)}\right)$ のカラム平均値と、4. で求めた最下層の $\left(\frac{VMR(CH_4)}{VMR(CO_2)}\right)$ を比較するため、bias 量 (式 4.6) を定義する。

$$bias = \left(\frac{\left(\frac{VMR(CH_4)}{VMR(CO_2)}\right) \text{ のカラム平均値}}{\text{最下層の } \frac{VMR(CH_4)}{VMR(CO_2)}} - 1 \right) \times 100(\%) \quad (4.6)$$

表 4.1: 各高度における気圧・気温データ (理科年表 (2003)) と
CH₄・CO₂ の AK (Frankenberg et al. (2005a))

高度 (km)	気圧 (hPa)	気温 (K)	CH ₄ の AK	CO ₂ の AK
7.0	410.6	245.3	0.8458	0.7432
5.5	505.1	255.0	0.8860	0.8119
5.0	540.2	258.3	0.8991	0.8341
4.0	616.4	264.8	0.9247	0.8778
3.0	701.1	271.3	0.9497	0.9205
2.5	746.9	274.5	0.9620	0.9415
2.0	795.0	277.8	0.9741	0.9621
1.5	845.6	281.0	0.9860	0.9826
1.0	898.7	284.3	0.9979	1.0028
0.5	954.7	287.5	1.0096	1.0228
0.2	989.5	289.5	1.0165	1.0347
0.1	1001.4	290.1	1.0189	1.0386

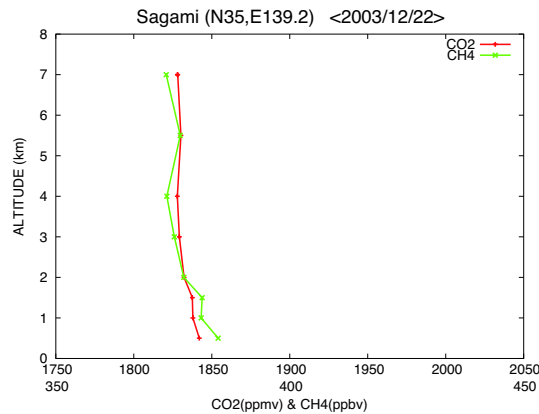
4.1.2 結果

CH₄ も CO₂ も高度分布が比較的一様である場合を図 4.1(a) に示す。 $\left(\frac{VMR(CH_4)}{VMR(CO_2)}\right)$ のカラム平均値と最下層の $\left(\frac{VMR(CH_4)}{VMR(CO_2)}\right)$ の差は-0.32%で、AK を考慮すると 0.23%であった。このように高度分布が一様であると、 $\left(\frac{VMR(CH_4)}{VMR(CO_2)}\right)$ のカラム平均値と最下層の $\left(\frac{VMR(CH_4)}{VMR(CO_2)}\right)$ がほぼ等しくなるため両者の差が小さい。

次に、地表面付近の VMR(CH₄) が高濃度な場合を図 4.1(b)(c) に示す。 $\left(\frac{VMR(CH_4)}{VMR(CO_2)}\right)$ のカラム平均値の方が、最下層の $\left(\frac{VMR(CH_4)}{VMR(CO_2)}\right)$ よりも小さくなり、図 4.1(b) では、その差が-5.99%、AK を考慮すると-5.94%であり、図 4.1(c) では、-3.68%、AK を考慮すると-3.50%となった。

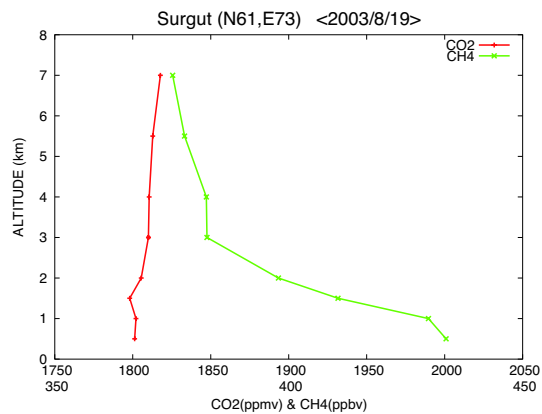
最後に CO₂ の高度分布が一様でない場合を次の図 4.1(d)(e) に示す。 $\left(\frac{VMR(CH_4)}{VMR(CO_2)}\right)$ のカラム平均値と最下層の $\left(\frac{VMR(CH_4)}{VMR(CO_2)}\right)$ の差は、図 4.1(d) では、-4.68%、AK を考慮すると-4.07%となった。地表面付近の VMR(CO₂) が非常に低濃度で、高度が上がるにつれて高濃度になったため、結果的に $\left(\frac{VMR(CH_4)}{VMR(CO_2)}\right)$ のカラム平均値の方が、最下層の $\left(\frac{VMR(CH_4)}{VMR(CO_2)}\right)$ よりも小さくなった事例である。図 4.1(e) では、差が 2.29%、AK を考慮すると 3.13%となり、差が正の値を示した事例である。これまで述べてきたように、高度が上がるにつれて VMR(CH₄) が減少していくと差は負の値を示すが、CH₄ が減少したことによる影響よりも、地表面付近の VMR(CO₂) が非常に高い値であることが影響して差が正の値となった。このように地表面付近の影響を受けて CO₂ の高度分布が一様ではない場合があるため、CO₂ が $\left(\frac{VMR(CH_4)}{VMR(CO_2)}\right)$ のカラム平均値と最下層の $\left(\frac{VMR(CH_4)}{VMR(CO_2)}\right)$ に影響を及ぼす。

(a) 相模：2003/12/22

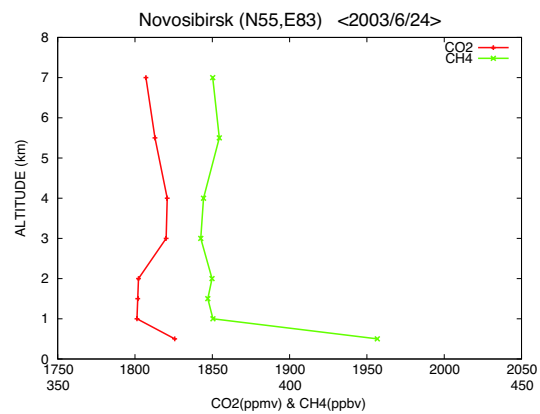


第4章 衛星観測データの検証

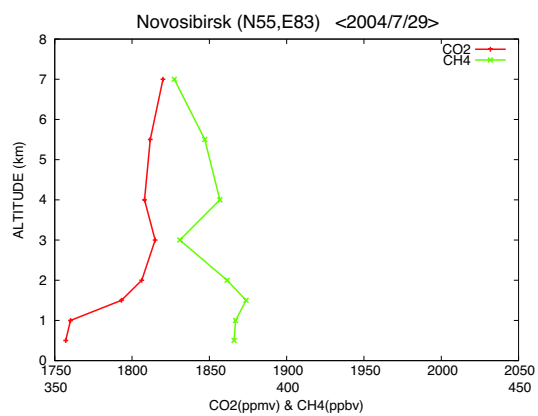
(b) Surgut : 2003/8/19



(c) Novosibirsk : 2003/6/24



(d) Novosibirsk : 2004/7/29



(e) 相模 : 2004/3/31

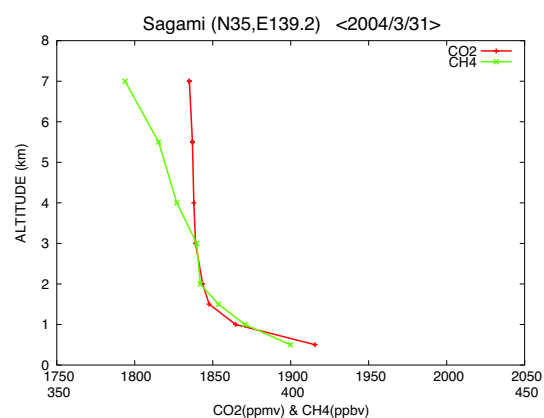


図 4.1: CH₄ (緑) と CO₂ (赤) の鉛直分布。縦軸：高度 (km) 横軸：混合比 (ppbv)

各地点での結果のまとめ

各地点毎に $\left(\frac{VMR(CH_4)}{VMR(CO_2)}\right)$ のカラム平均値と最下層の $\left(\frac{VMR(CH_4)}{VMR(CO_2)}\right)$ の差とその標準偏差を月毎に平均し、図 4.2 に示す。ここで、AK を考慮した場合と考慮しなかった場合の両方について示し、また表 4.2 に各地点でのデータ数を示す。

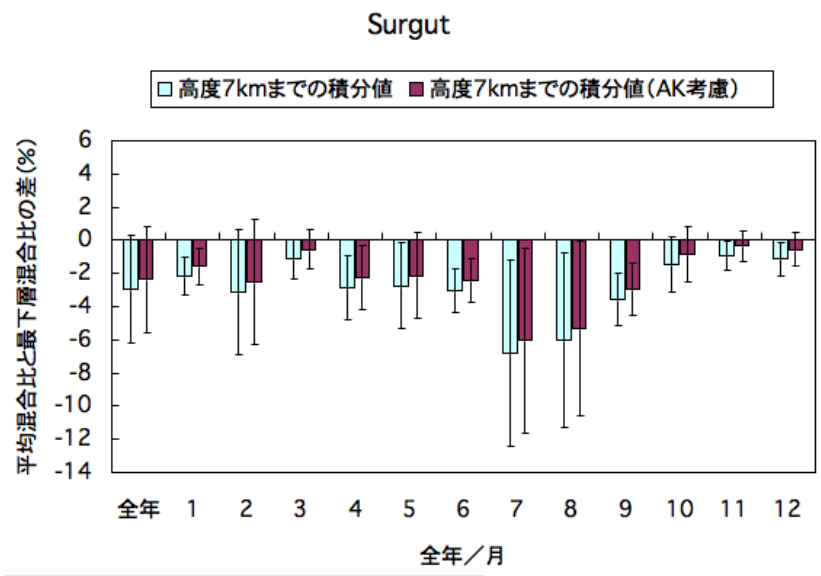
Surgut (図 4.2(a)) と Novosibirsk (図 4.2(b)) での結果は、夏季に $\left(\frac{VMR(CH_4)}{VMR(CO_2)}\right)$ のカラム平均値よりも最下層の $\left(\frac{VMR(CH_4)}{VMR(CO_2)}\right)$ の方が大きく、標準偏差は大きい値を示した。これは、夏季に湿地からの CH₄ の放出がさかんになるため、その影響を受けたものと考えられる。また Novosibirsk では、夏季に森林の光合成が活発になるため、地表面付近の CO₂ 濃度が低くなることも影響している。冬季は湿地からの CH₄ 放出量が減少、あるいは放出自体がなくなるため、差が小さくなったと考えられる。

できるだけ高高度まで情報を得てカラム平均値を計算するため、Yakutsk での観測結果は高度 5km まで観測している場合のみを用いた (図 4.2(c))。Surgut や Novosibirsk に比べると、Yakutsk は高度分布が比較的一様であるため、 $\left(\frac{VMR(CH_4)}{VMR(CO_2)}\right)$ のカラム平均値と最下層の $\left(\frac{VMR(CH_4)}{VMR(CO_2)}\right)$ の差が小さくなった。また、夏季は差が負の値となるが、これは森林での光合成活動が活発になるため、地表面付近の CO₂ 濃度が下がるためである。

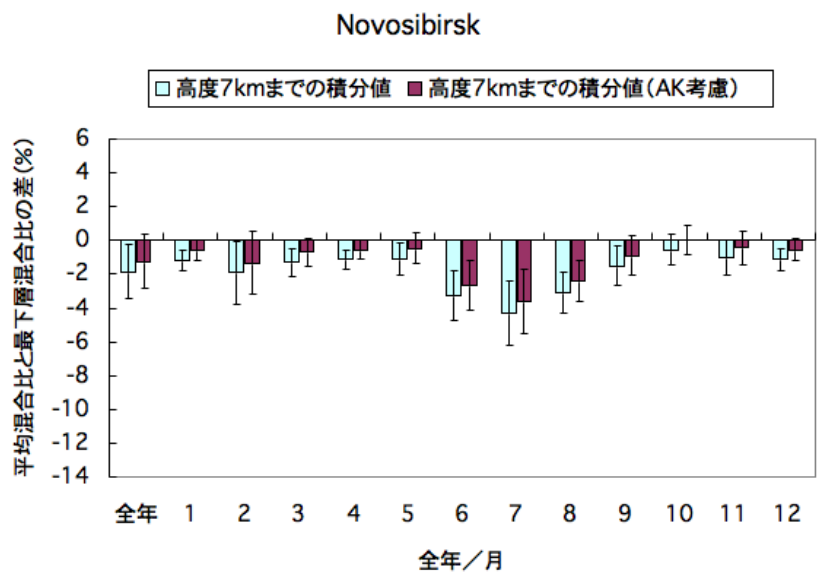
相模では、人間活動にともなう CH₄ 放出や CO₂ 放出が季節を問わず起こるため、Surgut や Novosibirsk のように差に季節変化が生じない (図 4.2(d))。また CH₄ の高度分布は非常に変動が激しいため、 $\left(\frac{VMR(CH_4)}{VMR(CO_2)}\right)$ のカラム平均値と最下層の $\left(\frac{VMR(CH_4)}{VMR(CO_2)}\right)$ の差は小さいが、標準偏差は比較的大きい値を示す。年間を通じて差が正の値を示しているが、これは CO₂ が人間活動によって放出され、低高度での CO₂ 濃度が高くなるために起こる。

最後に、AK を考慮した場合について述べる。AK を考慮すると、AK を考慮しない場合に比べて $\left(\frac{VMR(CH_4)}{VMR(CO_2)}\right)$ のカラム平均値は大きくなる。これは図 2.4 に示した通り、CH₄ と CO₂ の AK を比べると、CO₂ の方が高度が上がるにつれて感度が下がるため、CO₂ の高度分布は地表面付近に重みがかかる。そのため、 $\left(\frac{VMR(CH_4)}{VMR(CO_2)}\right)$ のカラム平均値の分母が小さくなるので、カラム平均値は大きくなる。

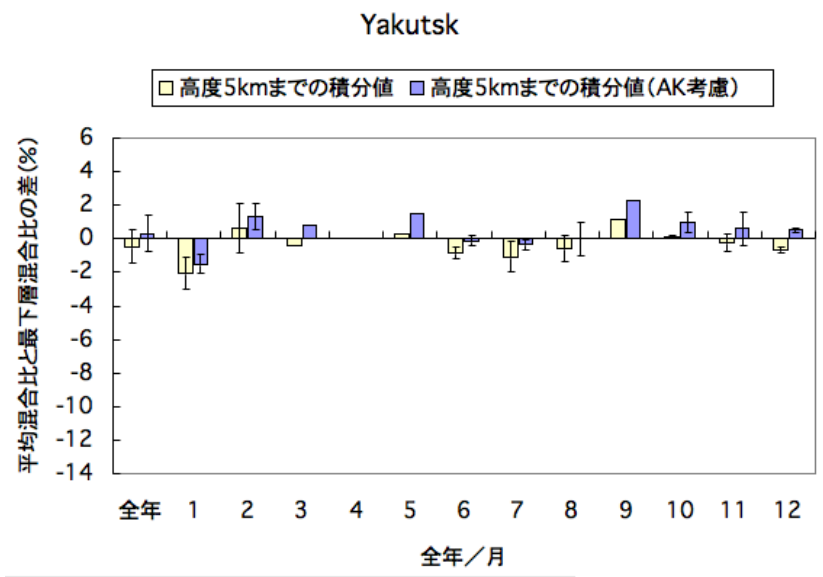
(a) Surgut



(b) Novosibirsk



(c) Yakutsk



(d) 相模

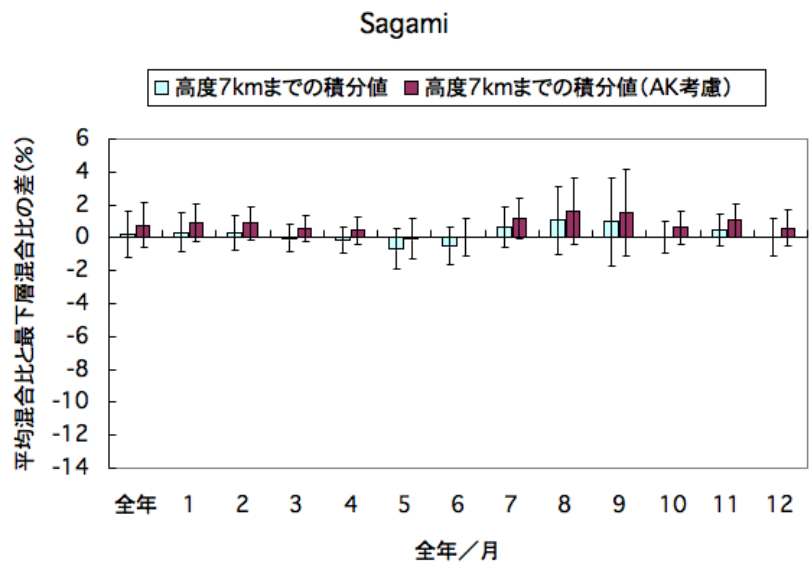


図 4.2: $\left(\frac{VMR(CH_4)}{VMR(CO_2)}\right)$ のカラム平均値と最下層の $\left(\frac{VMR(CH_4)}{VMR(CO_2)}\right)$ の差の月平均値。
縦軸：差 (%) 横軸：月

(a) Surgut、(b) Novosibirsk、(c) Yakutsk、(d) 相模

表 4.2: 図 4.2 のデータ数

地点	全年	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
Surgut	124	11	8	10	10	12	10	8	14	12	10	9	10
Novosibirsk	92	6	8	9	6	7	7	9	8	9	6	7	10
Yakutsk	23	3	2	1	0	1	2	2	3	1	3	3	2
相模	173	18	17	16	12	17	11	10	12	15	17	16	12

表 4.3 に、AK を考慮した場合、 $\left(\frac{VMR(CH_4)}{VMR(CO_2)}\right)$ のカラム平均値と最下層の $\left(\frac{VMR(CH_4)}{VMR(CO_2)}\right)$ の差を各地点毎に平均した結果を示す。Yakutsk では高度 5km まで観測されているので、他の地点もそれに最も近い高度 5.5km までの値も示す。

表 4.3: 各観測地点での $\left(\frac{VMR(CH_4)}{VMR(CO_2)}\right)$ のカラム平均値と最下層の $\left(\frac{VMR(CH_4)}{VMR(CO_2)}\right)$ の差 (AK を考慮)

地点	特徴	差 (%) () 内は標準偏差	
		観測高度 0.5 ~ 7km	0.5 ~ 5 又は 5.5km
Surgut	湿地	-2.35(3.20)	-2.18(3.09)
Novosibirsk	周辺に湿地	-1.23(1.56)	-1.12(1.49)
Yakutsk	森林		0.33(1.10)
相模	都会	0.77(1.39)	0.51(1.35)

表 4.3 の結果から、ソースがある Surgut では差が大きな負の値を示した。Novosibirsk は、その地点にソースはないが、湿地の空気塊が輸送されてくるため、その影響を受けて差が負の値を示したと考えられる。森林に覆われている Yakutsk は、 CH_4 のソースがないため差が小さく正の値を示した。

この結果から、衛星観測データと地上観測データの比較において、周辺にソースがあると思われる地点とそうではない地点に分類して比較を行うべきである。従って、4.4 節で衛星観測データと地上観測データの比較を行う際、ソースの有無についても考慮する。

4.2 データセットの作成

4.2.1 観測データの平均

ハイデルベルグ大学から提供を受けたデータは swath データであるので、 $1^\circ \times 1^\circ$ のグリッドデータを作成する。その際、式 4.7 によって観測誤差を考慮した加重平均により VCD を日平均し、グリッドデータを求めた。

$$mean(x) = \frac{\sum_{j=1}^N \frac{x_j}{err_j^2}}{\sum_{j=1}^N \frac{1}{err_j^2}} \quad (4.7)$$

ここで、 $mean(x)$: 観測データの平均値、 x : VCD(CH₄) または VCD(CO₂)、 N : データ数、 err_j : x_j に対応する観測誤差である。

4.2.2 観測誤差の平均

2.2 節で述べたように、衛星観測データは $\left(\frac{VCD(CH_4)}{VCD(CO_2)}\right)$ として用いるので、この比に対する観測誤差 $err_{\frac{CH_4}{CO_2}}$ は相対誤差とし、式 4.8 によって求めた。

$$err_{\frac{CH_4}{CO_2}} = \frac{err\left(\frac{V_{CH_4}}{V_{CO_2}}\right)}{\frac{V_{CH_4}}{V_{CO_2}}} = \frac{err(V_{CH_4})}{V_{CH_4}} + \frac{err(V_{CO_2})}{V_{CO_2}} \quad (4.8)$$

ここで $err(V_{CH_4})$: VCD(CH₄) に対する観測誤差、 $err(V_{CO_2})$: VCD(CO₂) に対する観測誤差、 $err_{\left(\frac{V_{CH_4}}{V_{CO_2}}\right)}$: $\left(\frac{VCD(CH_4)}{VCD(CO_2)}\right)$ に対する観測誤差である。

この相対誤差の日平均値 $mean(err)$ は式 4.9 によって求めた。

$$mean(err) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N err_j^2}{N}} \quad (4.9)$$

ここで、 err_j : $\left(\frac{VCD(CH_4)}{VCD(CO_2)}\right)$ の相対誤差、 N : データ数である。

図 4.3 は、マウナロアを含む日平均化・グリッド化した北緯 24 ~ 25 °、東経 153 ~ 154 ° のデータのプロットである。エラーバーで観測誤差を表している。

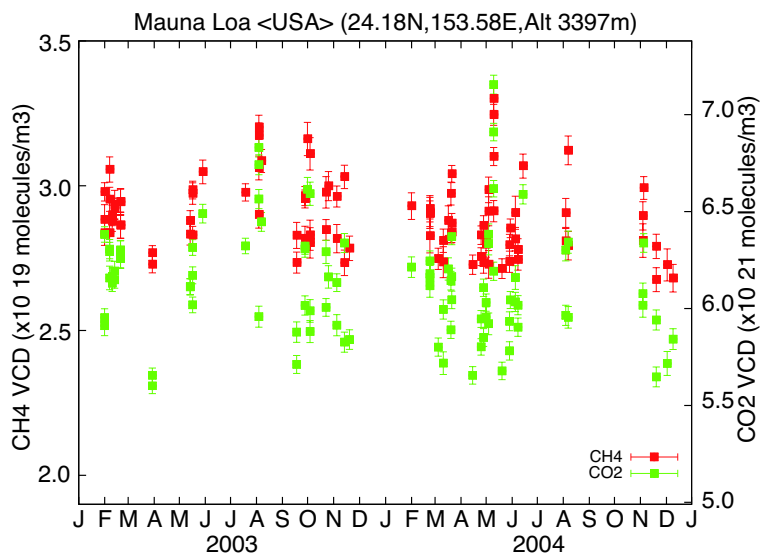


図 4.3: マウナロアにおける CH_4 (緑) と CO_2 (赤) の衛星観測の日平均データプロット。

左縦軸: $\text{VCD}(\text{CH}_4)$ ($\times 10^{19} \text{ molec./cm}^2$)

右縦軸: $\text{VCD}(\text{CO}_2)$ ($\times 10^{21} \text{ molec./cm}^2$) 横軸: 時間 (月) バー: 衛星の観測誤差

4.3 地上観測データとの比較

4.3.1 比較の方法

ここでは地上観測データとの比較の方法を述べる。衛星観測の $\left(\frac{\text{VCD}(\text{CH}_4)}{\text{VCD}(\text{CO}_2)}\right)$ の日平均値を検証するために、地上観測の日データを用いて比較を行った。地上観測データは、同時に $\text{VMR}(\text{CH}_4)$ と $\text{VMR}(\text{CO}_2)$ を観測しているもののみを使用し、衛星観測データと同様に $\left(\frac{\text{VMR}(\text{CH}_4)}{\text{VMR}(\text{CO}_2)}\right)$ を比較に用いた。例えば図 4.4 は、マウナロアにおける衛星観測データと地上観測データの $\left(\frac{\text{CH}_4}{\text{CO}_2}\right)$ をプロットしたものである。

地上観測データとの比較は、式 4.10 に定義する差によって求めた。

$$\text{bias} = \left(\frac{\frac{V_{\text{CH}_4}}{V_{\text{CO}_2}}}{\frac{\text{VMR}(\text{CH}_4)}{\text{VMR}(\text{CO}_2)}} - 1 \right) \times 100(\%) \quad (4.10)$$

例えば図 4.5 は、マウナロアにおける衛星観測データと地上観測データの $\left(\frac{\text{CH}_4}{\text{CO}_2}\right)$ の差を表している。0 を下回れば衛星観測が過小評価しており、0 を上回れば過大評価していることになる。

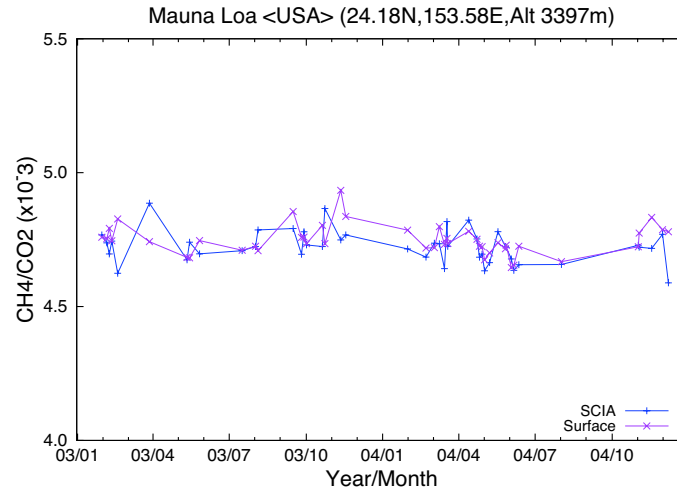


図 4.4: マウナロアにおける衛星観測データ（青）と地上観測データ（紫）の $\left(\frac{CH_4}{CO_2}\right)$ プロット。
縦軸： $\left(\frac{CH_4}{CO_2}\right)$ 比、横軸：時間（月）

4.3.2 結果

地上観測地点を含むグリッドデータと地上観測データの比較を行った。4.2 節で示した方法で日平均化・グリッド化し、衛星観測データと地上観測データの $\left(\frac{CH_4}{CO_2}\right)$ を求めた。次に示す図 4.6(a) ~ (g) の左のパネルが衛星観測と地上観測が同時に行われていた日のみをプロットしたもので、右のパネルが全データをプロットしたものである。

地上観測データとの比較について定性的に述べる。なお、Fukang (図 4.6(a)) での地上観測データは、 $\left(\frac{CH_4}{CO_2}\right)$ が冬季に高い値を示すという特徴をもつが、衛星観測では冬季の観測データが良好ではなく、その他の地点に地点について述べる。Huangshan (図 4.6(b))、Lin'an (図 4.6(c))、Waliguan (図 4.6(d)) では、地上観測結果において $\left(\frac{CH_4}{CO_2}\right)$ に明瞭な季節変化が表れておらず、衛星観測でも同様に季節変化が表れていないことから、定性的に似ているといえる。また、Longfengshan (図 4.6(e))、Shangdianzi (図 4.6(f))、Taishan (図 4.6(g)) においては、夏季に値が高くなることが地上観測結果から分かっており、その特徴は衛星でもよくとらえていることが分かる。どの地点においても、衛星観測結果の $\left(\frac{CH_4}{CO_2}\right)$ の方が若干小さくなっており、特に地上観測結果が高い値を示している時期にはその差がひらいている傾向がある。

第4章 衛星観測データの検証

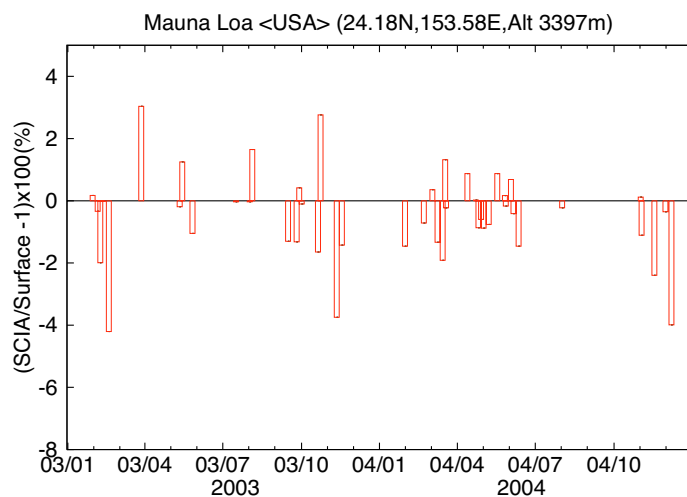
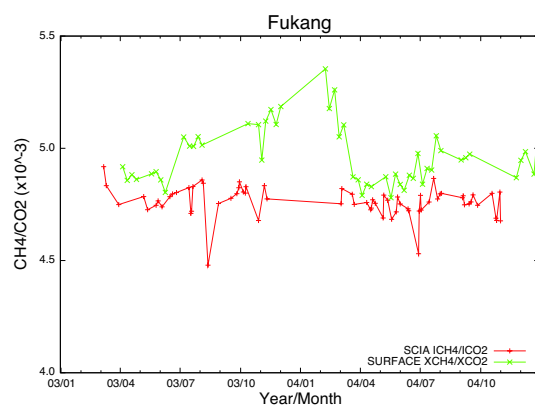
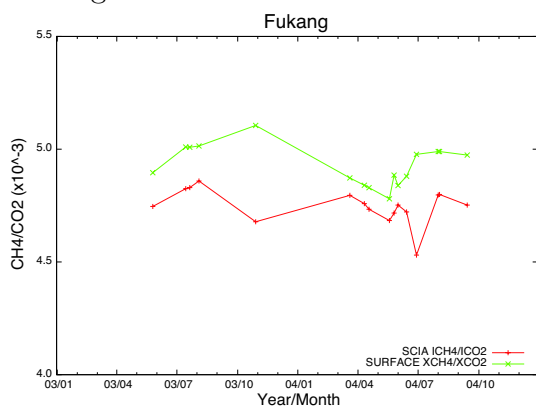
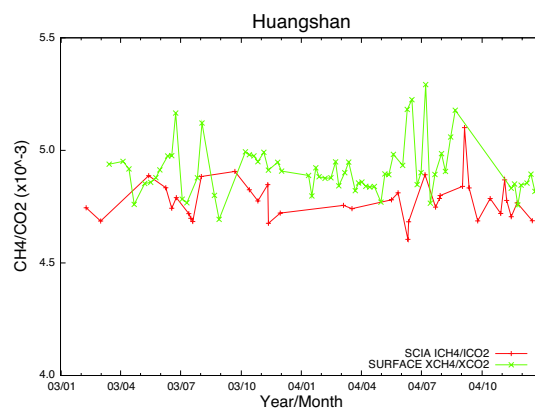
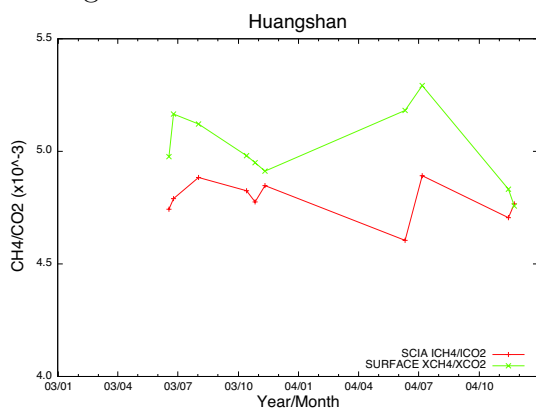


図 4.5: マウナロアにおける衛星観測データと地上観測データの $\left(\frac{CH_4}{CO_2}\right)$ の差
縦軸：差（％） 横軸：時間（月）

(a) Fukang

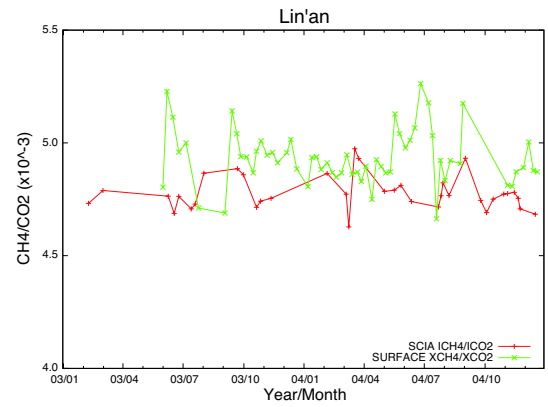
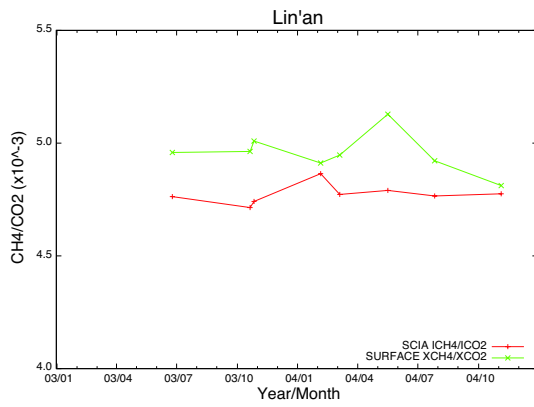


(b) Huangshan

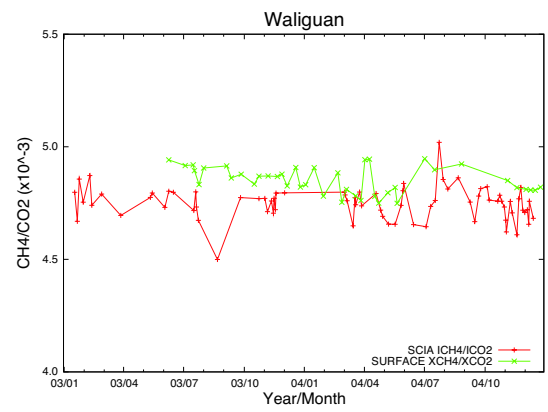
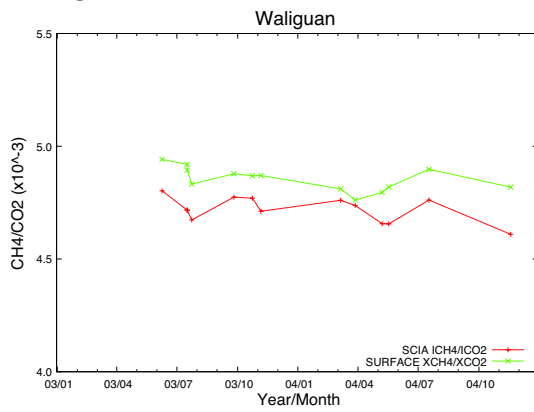


4.3. 地上観測データとの比較

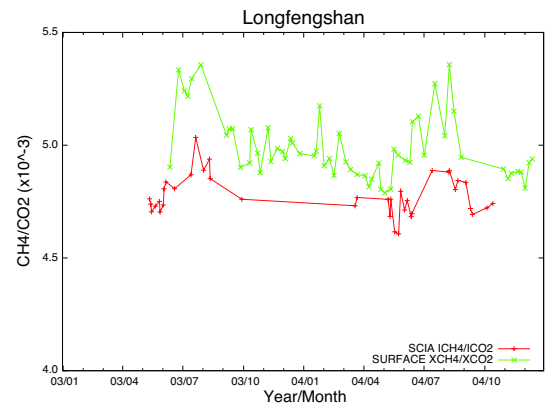
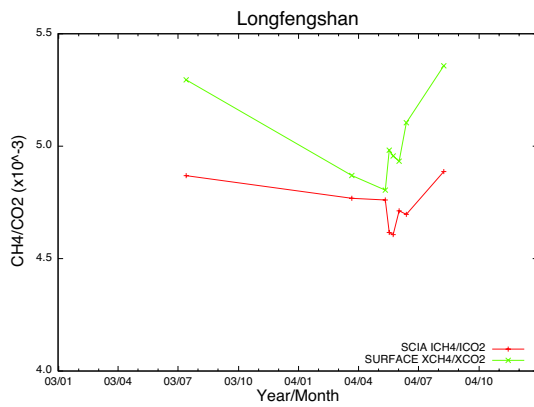
(c) Lin'an



(d) Waliguan

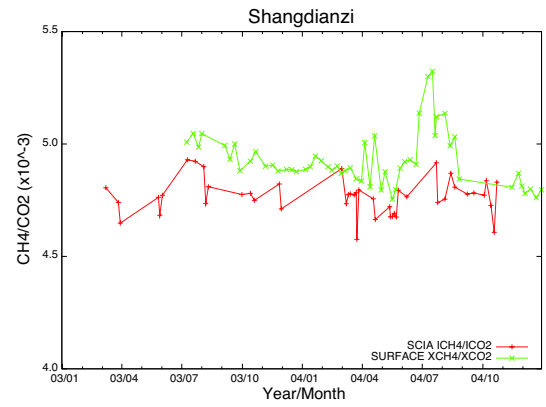
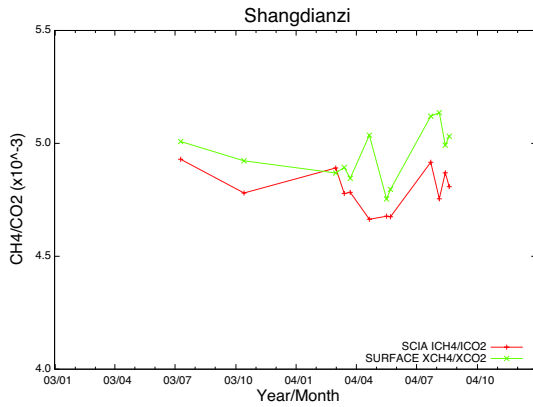


(e) Longfengshan



第4章 衛星観測データの検証

(f) Shangdianzi



(g) Taishan

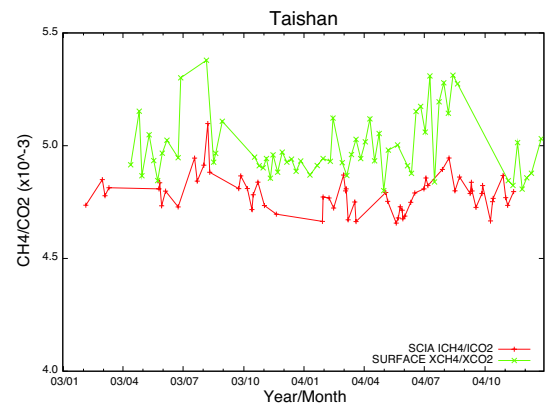
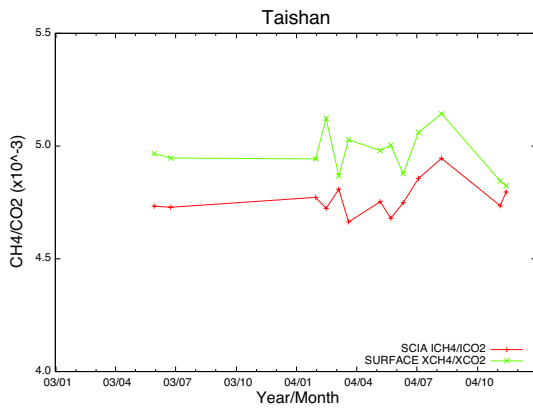


図 4.6: 衛星観測の $\left(\frac{CH_4}{CO_2}\right)$ (赤) と地上観測の $\left(\frac{CH_4}{CO_2}\right)$ (緑) のプロット。

左のパネルは衛星観測と地上観測が同時に行われている日のみをプロット。

右のパネルは全データをプロット。縦軸： $\left(\frac{CH_4}{CO_2}\right)$ 、横軸：時間(月) (a) Fukang、(b) Huangshan、(c) Lin'an、(d) Waliguan、(e) Longfengshan、(f) Shangdianzi、(g) Taishan

結果のまとめ

全地点の比較結果を地上観測地点の緯度によって分類し、差を緯度 15 °毎に平均して図 4.7 に示す。エラーバーは標準偏差を示している。また、図 4.8 では、エラーバーによって衛星の観測誤差を示している。各緯度帯におけるデータ数は表 4.4 に示す。

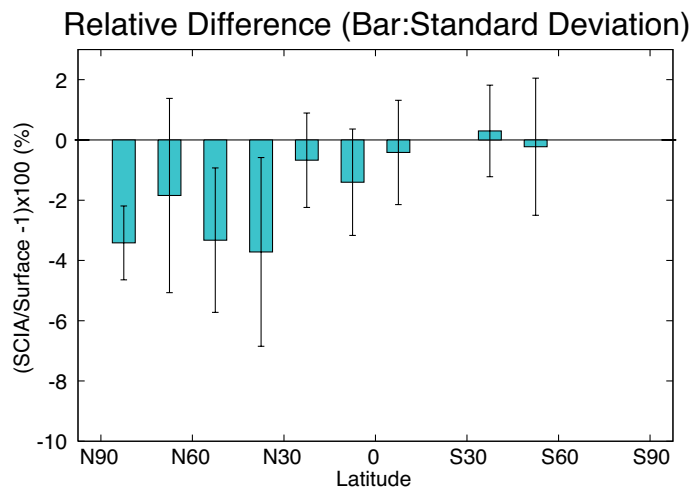


図 4.7: 衛星観測データと地上観測データの差の緯度帯平均とその標準偏差。

縦軸：差（％）、横軸：緯度、バー：標準偏差

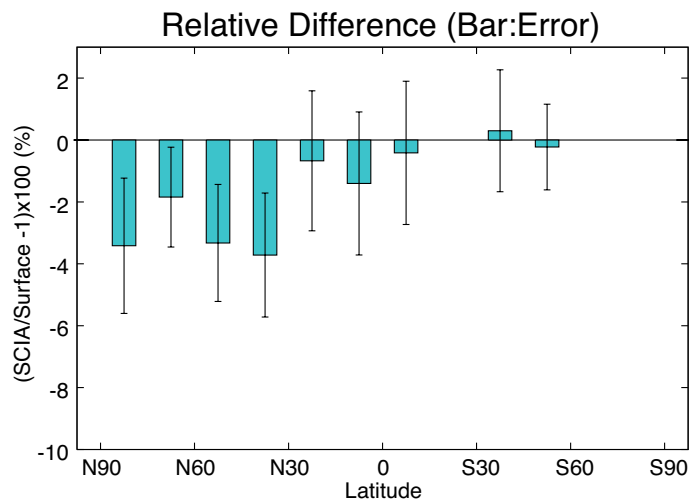


図 4.8: 衛星観測データと地上観測データの差の緯度帯平均と衛星の観測誤差。

縦軸：差（％）、横軸：緯度、バー：衛星の観測誤差

図 4.7 から分かるように、ほとんどの緯度帯においても衛星観測が過小評価しており、北半球高緯度と中緯度で特に顕著である。また標準偏差について、南半球においてはデータ数が少

表 4.4: データ数

緯度	N90-75	N75-60	N60-45	N45-30	N30-15	N15-0
データ数	3	13	68	174	56	4
緯度	S15-0	S30-15	S45-30	S60-45	S75-60	S90-75
データ数	5	0	14	2	0	0

なく信頼性が低い、データ数の多い北半球中緯度では標準偏差が大きく、データのばらつきが大きいことが分かる。さらに、図 4.8 から分かるように、北半球低緯度と南半球においては、地上観測からの差が衛星の観測誤差内におさまっている。

4.4 ソースの影響

4.4.1 地上観測地点の分類

4.1 節で述べたように、ソースの有無によって CH_4 の高度分布が一樣ではなく、衛星観測データと地上観測データの差に大きな違いが生じる可能性があるため、ソースの有無により地上観測地点を分類した。

各地上観測地点の $\text{VMR}(\text{CH}_4)$ が明瞭な季節変化を示す場合は、周辺にソースがなく、高度分布が比較的一様だと思われる地点であるとする。また、明瞭な季節変化を示さない場合は、周辺にソースがある、または輸送の影響で高濃度の CH_4 を含む空気塊が運ばれる地点であると判断し、高度分布が一樣でないと思われる地点であると見なす。その例を下に示す。

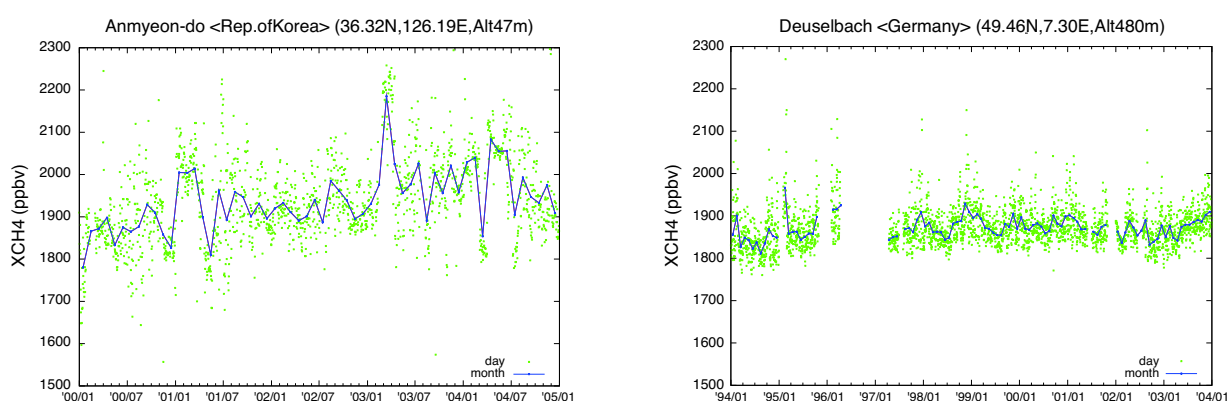


図 4.9: 高度分布が一樣ではないと思われる地点での CH_4 混合比の時間変化。

左：韓国、右：ドイツ、縦軸：混合比 (ppbv)、横軸：時間 (月)

韓国における $\text{VMR}(\text{CH}_4)$ について (図 4.9 左)、明瞭な季節変化がない、 CH_4 濃度の変動が激しく、ばらつきも大きいことが分かる。ドイツにおける $\text{VMR}(\text{CH}_4)$ について (図 4.9 右)、

4.4. ソースの影響

若干の季節変化はあるが、明瞭ではないうえ、濃度のばらつきが大きい。このような特徴の観測地点を、ソースまたは高濃度の CH_4 の輸送の影響を受けている地域であると判断した。

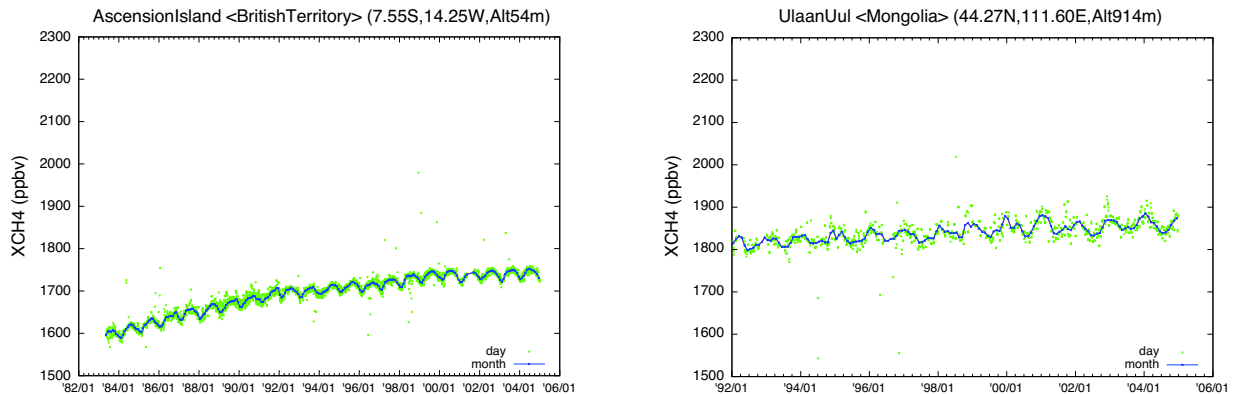


図 4.10: ソースの影響がないと思われる地点。

左：アセンション島、右：モンゴル、縦軸：混合比 (ppbv)、横軸：時間 (月)

アセンション島における $\text{VMR}(\text{CH}_4)$ について (図 4.10 左)、明瞭な季節変化があり、 CH_4 濃度のばらつきがほとんどないことが分かる。モンゴルについて (図 4.10 右) は、典型的な季節変化とは言えないが、ばらつきが小さいためソースではない地域であると判断した。

分類した結果、季節変化が明瞭でなかった地上観測地点は北半球中緯度に多く存在した。

第4章 衛星観測データの検証

4.4.2 結果

図 4.11 に、分類した後の地上観測データと衛星観測データの差を示し、データ数を表 4.5 にまとめた。

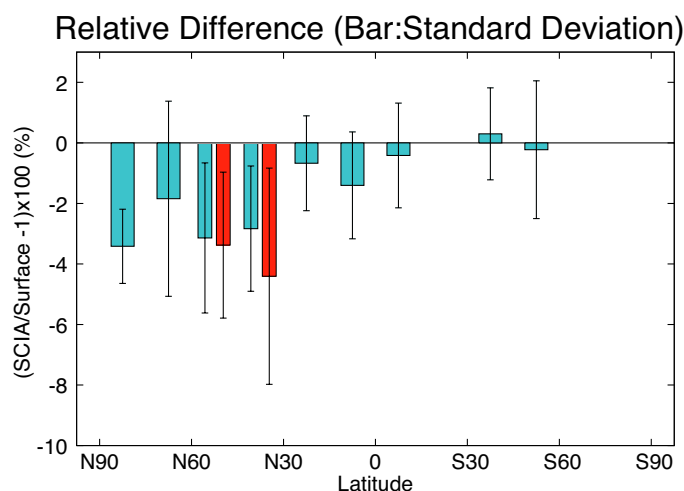


図 4.11: ソースの影響を受けていない地点（青）と受けている地点（赤）での地上観測データと衛星観測データの差の緯度帯平均と標準偏差。
縦軸：差（％）、横軸：緯度、バー：標準偏差

表 4.5: 図 4.11 のデータ数

	N90-75	N75-60	N60-45	N45-30	N30-15	N15-0
ソース無し	3	13	4	72	56	4
ソース有り	0	0	64	102	0	0
	S15-0	S30-15	S45-30	S60-45	S75-60	S90-75
ソース無し	5	0	14	2	0	0
ソース有り	0	0	0	0	0	0

図 4.11 から、ソースがあると思われる地点の方が地上観測データとの差が大きくなり、またデータ数が多くても標準偏差の値も大きいことが分かる。この結果は、4.1 節での結果と整合している。

また、地上観測データと衛星観測データの差を南北半球で分け、月毎に平均して図 4.12 に示し、データ数を表 4.6 にまとめた。ただし、南半球のデータは少なかったため北半球の結果のみを示す。

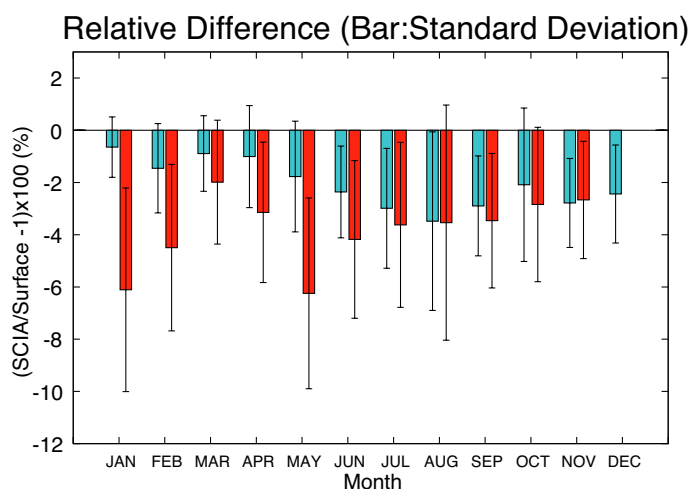


図 4.12: ソースの影響を受けていない地点（青）と受けている地点（赤）での地上観測データと衛星観測データの差の月平均と標準偏差。

縦軸：差（％） 横軸：時間（月） バー：標準偏差

表 4.6: 図 4.12 のデータ数

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
ソース無し	2	5	18	13	36	21	18	17	11	14	9	3
ソース有り	2	7	15	4	23	30	20	13	19	12	6	0

図 4.12 の結果から、ソースがあると思われる地点のほうが、ソースがないと思われる地点に比べると差が大きくなった。また、ソースがないと思われる地点でも、夏季に差が大きくなり、冬季に小さくなるという傾向が見られる。

これまで、4.3 節と 4.4 節において、衛星観測データと地上観測データとの比較を行った。その結果、衛星観測データが過小評価しているという結果になったが、地上観測データとの差が、2～4%とわずかであることや、衛星の観測誤差（±約 2%）内にほぼおさまっていることから、衛星の観測自体は極めて良好であったと結論づける。

次章に、この衛星観測データを解析し、衛星によってとらえられた世界各地の CH₄ 分布の特徴について述べる。

第5章 CH₄の全球分布

前章までの結果、衛星観測から得られたCH₄データの信頼性は高いことが分かった。そこで本章では、このCH₄データを用いてCH₄の全球分布について考察を行う。ここでは、VMR(CO₂)を気候値で与えて、VCD(CH₄)をVMR(CH₄)に換算したCH₄データを用いている。

5.1 地上観測データの月平均

式4.7で求めたVCD(CH₄)とVCD(CO₂)の日平均値の比をさらに平均して月平均値を求めた。次に示す図5.1は、2004年3月の $\left(\frac{VCD(CH_4)}{VCD(CO_2)}\right)$ の月平均値である。カラーバーは、 $\left(\frac{VCD(CH_4)}{VCD(CO_2)}\right)$ とともに目安としてのVMR(CH₄)を表している。これは、全球的にVMR(CO₂)が370ppmであると仮定した場合で、 $\left(\frac{VCD(CH_4)}{VCD(CO_2)}\right)$ と370ppmの積から得られる値を示している。

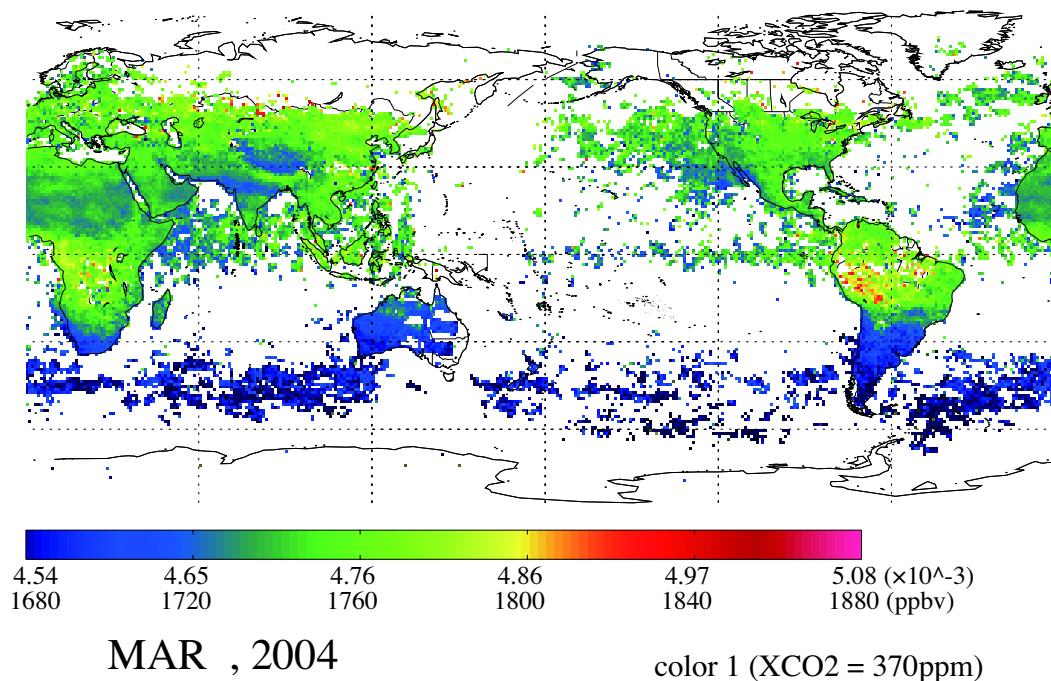


図 5.1: 2004 年 3 月の $\left(\frac{VCD(CH_4)}{VCD(CO_2)}\right)$ の月平均値
カラーバーの上段、下段はそれぞれ $\left(\frac{CH_4}{CO_2}\right)$ と、XCO₂=370ppm の場合の VMR(CH₄) を表す。

5.2 CO₂ 濃度を考慮した月平均値

図5.1では、全球的にVMR(CO₂)が370ppmであると仮定して示した。しかし実際のVMR(CO₂)は、北半球で濃度が高く季節変化も大きい。次の図5.2は、WDCGGが提供している地上観測のVMR(CO₂)の月平均値を緯度15°毎に平均したプロットである。この図から、VMR(CO₂)濃度は南北に勾配があり、特に北半球では季節変化が大きいことがわかる。また、2003年よりも2004年の方が濃度が高く、時間・緯度を考慮すると、全球的にVMR(CO₂)が370ppmであるという仮定は非現実的である。

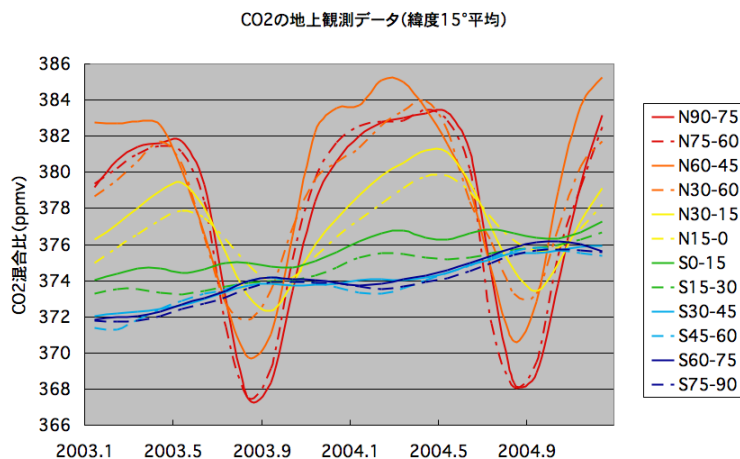


図 5.2: 緯度 15°毎に平均した地上観測による VMR(CO₂) の月平均値
(2003 年 1 月 ~ 2004 年 12 月)
縦軸：混合比 (ppmv) 横軸：時間 (月)

そこで、経度方向には同程度の季節変化をすると仮定して、地上観測のVMR(CO₂)の月平均値を緯度15°毎に平均し、月毎のVMR(CO₂)データセットを作成した。このデータセットを、時間・緯度・混合比の3次元でプロットしたものが、図5.3である。

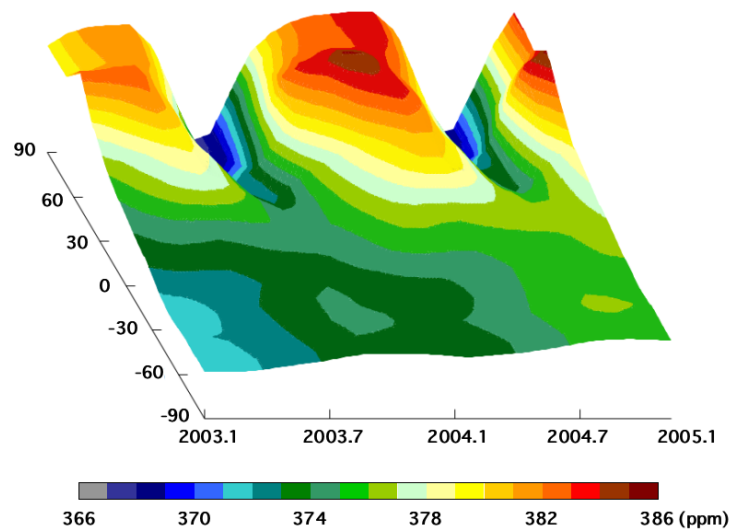


図 5.3: CO₂ の気候値として用いたデータセットの時間・緯度・CO₂ 混合比の 3 次元プロット。
カラーバーは CO₂ 混合比 (ppmv) を示す。

この濃度の勾配や季節変化を考慮した CO₂ のデータセットを、衛星で観測された $\left(\frac{VCD(CH_4)}{VCD(CO_2)}\right)$ 比に掛け合わせて月平均値を求めた。その例として 2004 年 3 月の月平均値が次の図 5.4 である。2004 年 3 月の VMR(CO₂) は、北半球の方が約 8ppm 大きいため、図 5.1 と比べると、南半球はあまり変わらないが北半球では値が最大約 50ppb ほど大きくなっている。このように、VCD(CH₄) を VMR(CH₄) に変換する際の VMR(CO₂) の与え方により、VMR(CH₄) 濃度は大きく異なってくる。データの提供を受けたハイデルベルグ大学では、化学輸送モデルを用いて求めた VMR(CO₂) を与えている [Frankenberg *et. al.* (2005a)]。

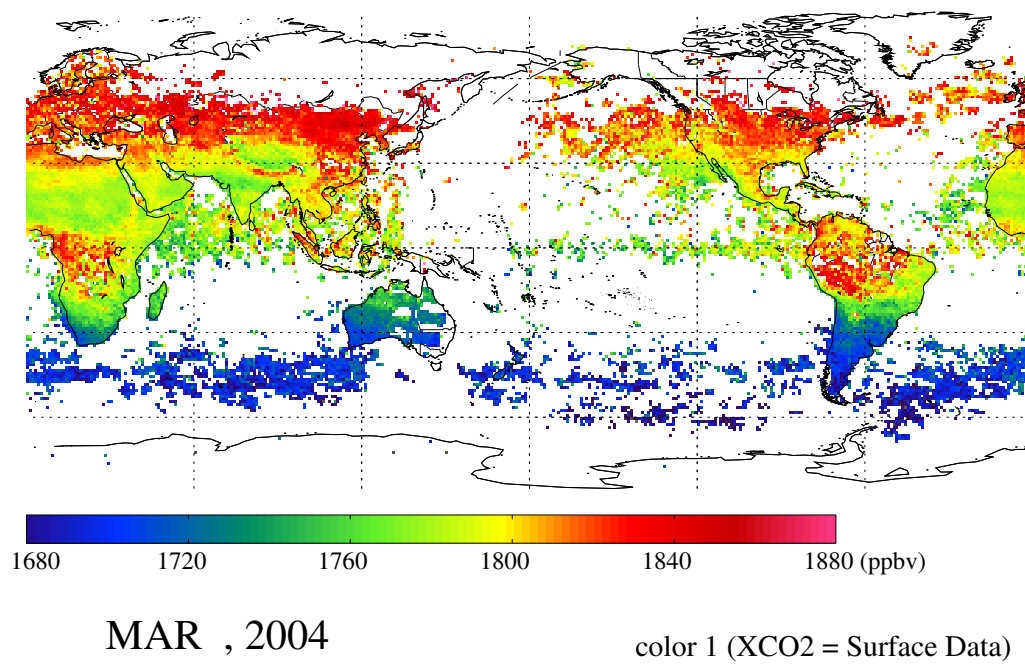


図 5.4: VMR(CO₂) を気候値で与えた場合の 2004 年 3 月の VMR(CH₄) 月平均値。

5.3 CH₄ の全球分布

CO₂ 濃度を考慮した 2003 年・2004 年の 12ヶ月の月平均値を図 5.5、図 5.6、図 5.7 に示す。これまでの地上観測結果から北半球の VMR(CH₄) 濃度の方が高いことが確認されており、図 5.5 ~ 5.7 の衛星観測結果からもその勾配を確認することができる。また、冬の北半球中緯度のデータは少ないため比較が困難だが、3 月の北半球中緯度の濃度は高く、それに対して 7・8 月の濃度は低いという典型的な季節変化が確認できる。

特徴の現れている地域は、アジア域やアフリカ・南米赤道域である。アジア域は水田が多く、また牛などの反芻動物を家畜として飼っていることから CH₄ 濃度が高いと考えられる。また、アフリカや南米の赤道域は、一年を通して予想以上に高濃度であることが分かってきた。この地域は、乳牛や肉牛などのソースがあると考えられているが、それによる放出量はあまり多くないとも考えられているため、ほかにソースがある可能性がでてきた [Frankenberg *et al.* (2006)]。Keppler *et al.* [2006] によると、植物が様々な有機物を放出することは知られていたが、CH₄ の放出も予想以上に多いということを発見し、植物からの放出量は年間約 62 ~ 236Tg、落葉からも放出が起こり、年間 1 ~ 7Tg の CH₄ 放出が起こっているということが示唆された。アフリカ・南米赤道域には熱帯雨林が存在するので、植物からの CH₄ 放出によって年間を通して高濃度であるということが考えられる。S. Houweling *et al.* [2006] では、植物からの CH₄ 放出をモデルによって再現し、SCIAMACHY の CH₄ データと比較を行っている。

第5章 CH₄ の全球分布

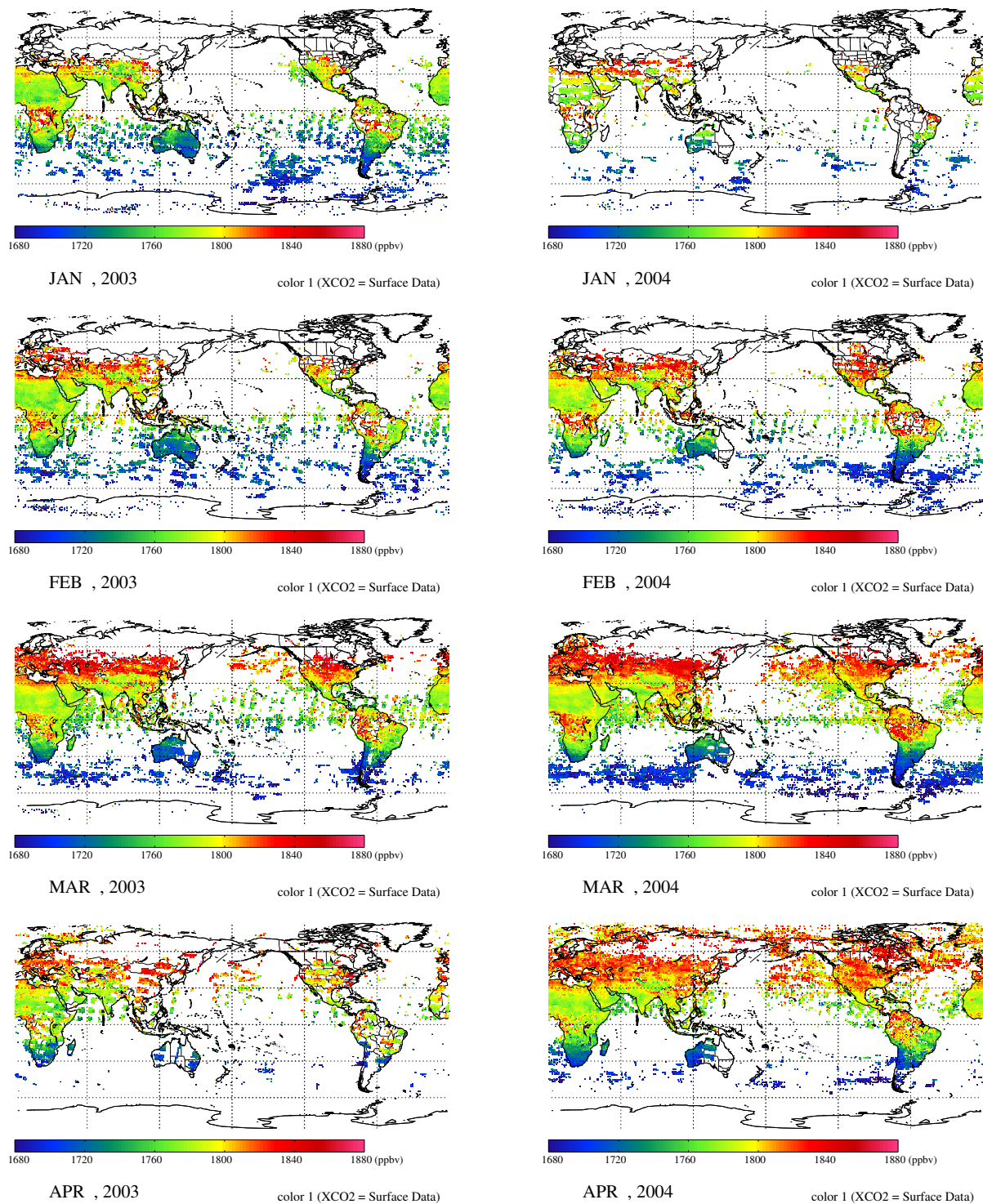


図 5.5: 2003 年 (左) と 2004 年 (右) の 1~4 月における CH₄ 混合比

5.3. CH₄ の全球分布

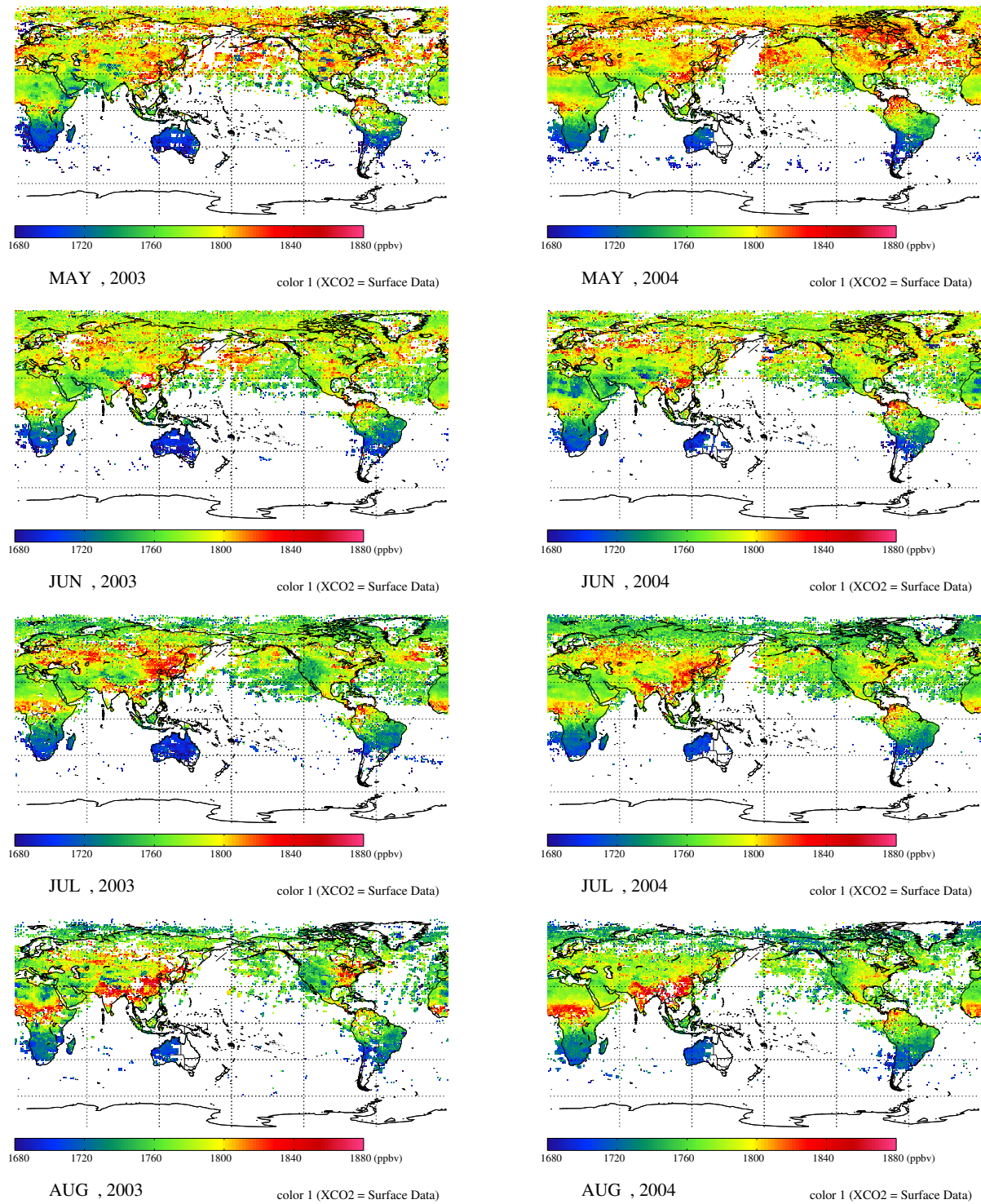


図 5.6: 2003 年 (左) と 2004 年 (右) の 5 ~ 8 月における CH₄ 混合比

第5章 CH₄ の全球分布

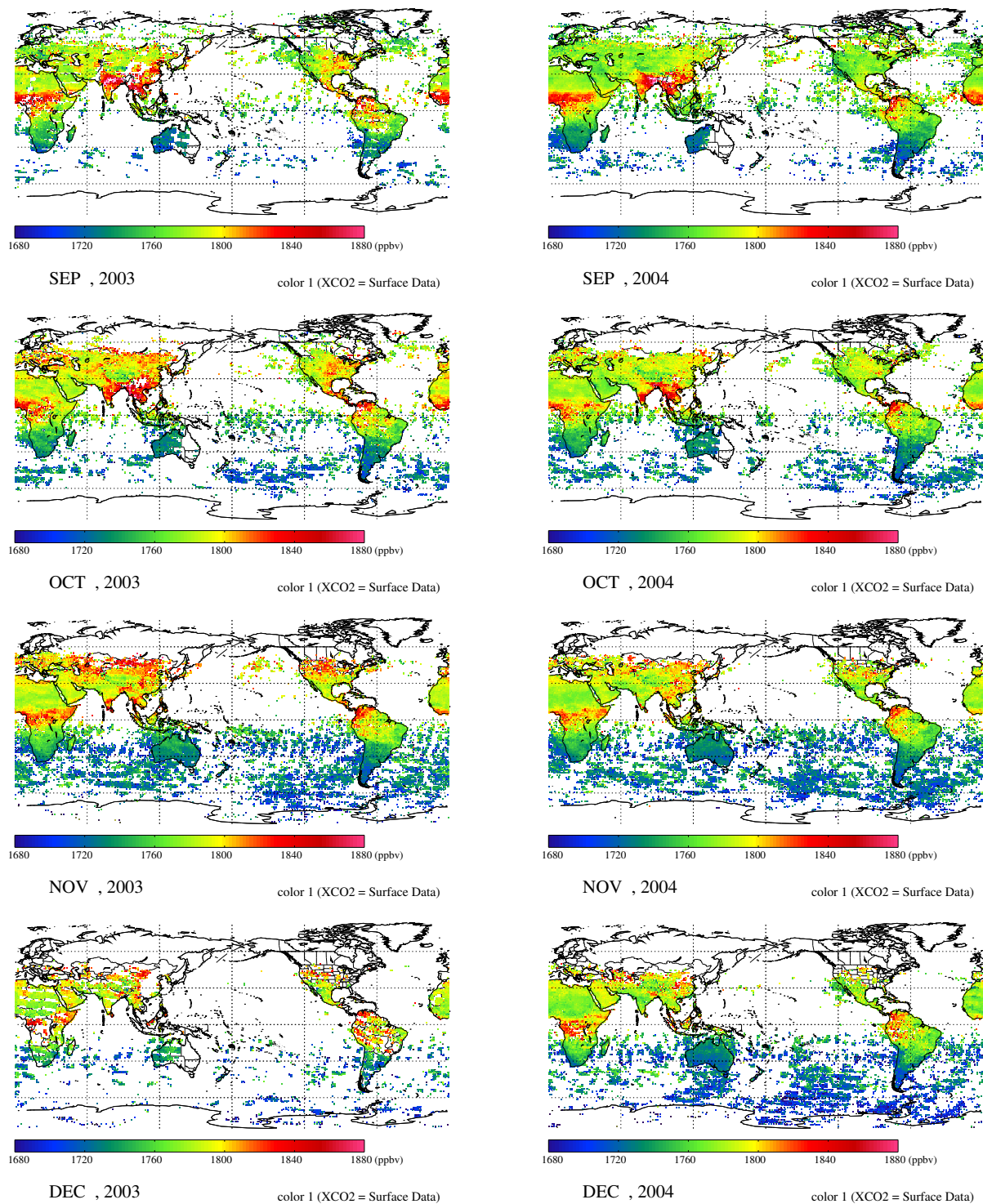


図 5.7: 2003 年 (左) と 2004 年 (右) の 9 ~ 12 月における CH₄ 混合比

図 5.8 は、2003 年 1～12 月のアジア域のみの月平均値と 2000 年の CH₄ のエミッションインベントリーのプロットである。このエミッションインベントリーは、国立環境研究所より提供を受けたもので、社会統計値を用いて CH₄ の放出量を推定したものである。最下段の左のパネルは、全ての人為起源由来の CH₄ 放出量である。中央のパネルは家畜からの放出量、右のパネルは水田からの放出量を示している。エミッションインベントリーのデータは、他に石炭の採掘や化石燃料の燃焼などおよそ 10 種類のカテゴリーに分類されているが、アジア域では家畜と水田からの放出量によって大半が占められている。

家畜からの CH₄ 放出は、バングラデシュやヒマラヤ山脈沿いに特に多く、またインド全域や中国の広範囲にわたって多いということが分かる。水田からの CH₄ 放出は、バングラデシュ、タイ、カンボジア、中国などで多いと予想される。実際に衛星観測では、6～11 月にバングラデシュで高濃度が観測されているほか、5・8～10 月は東南アジアで高い値を示している。東南アジアの水田では、二期作や三期作が行われており、隣接する水田でさえ生長の時期が一律ではなく、CH₄ の田植えの時期を特定することは困難である。また、日本の水田は、一時期に水を張る乾田だが、東南アジアには年間を通して水を張っている湿田が存在する。これらの地域も統計ないために位置を把握することは困難であるが、東南アジアの 5・8～10 月に水田に水が張られていたという可能性は大いにある。

第5章 CH₄ の全球分布

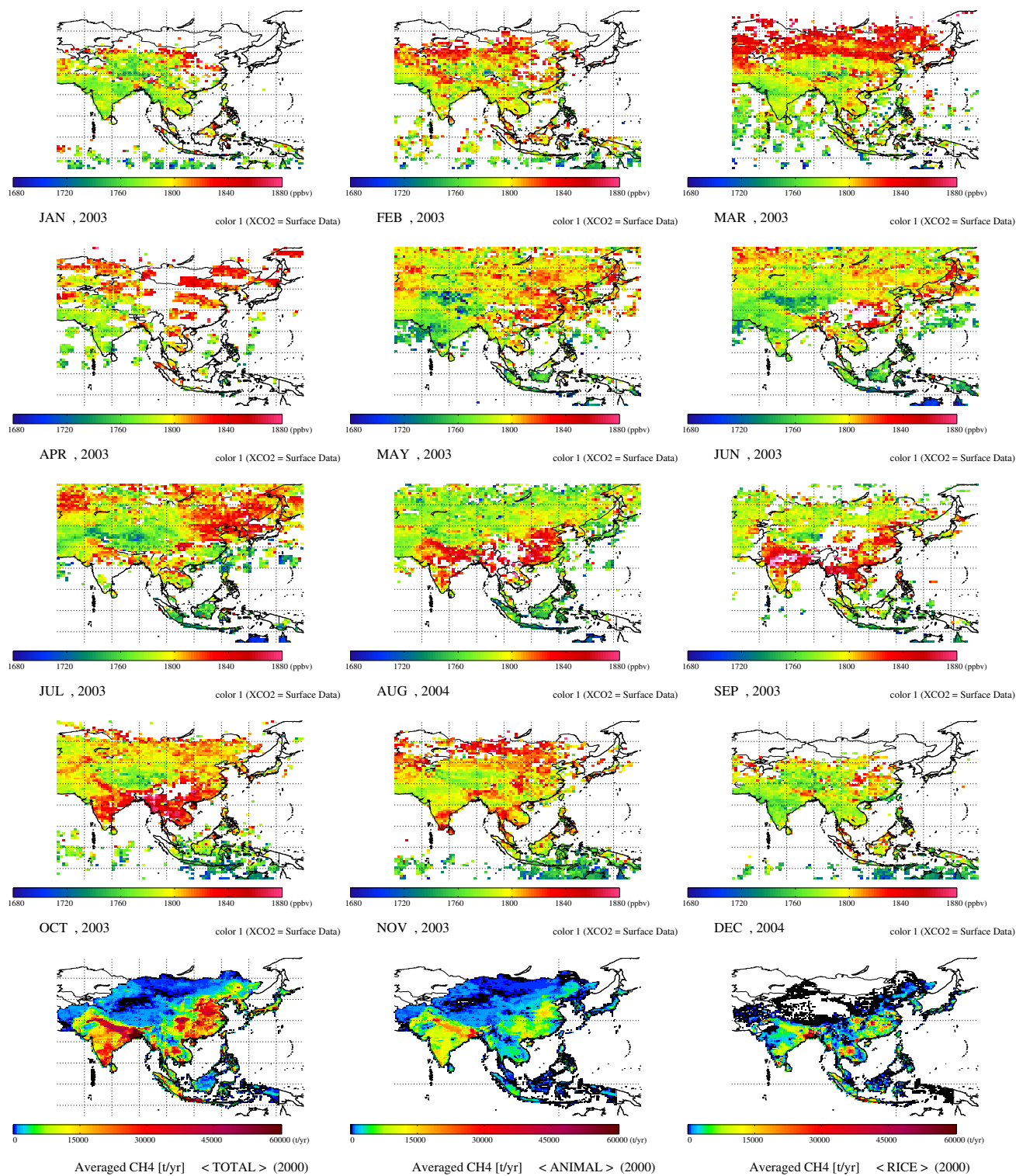


図 5.8: 上 4 段：2003 年 1～12 月のアジア域における CH₄ 混合比。下段：エミッションインベントリー（2000 年）

第6章 まとめと今後の展望

本研究では、SCIAMACHY センサによって観測された CH_4 データの検証とその特徴をつかむことを目的とした。

第一章では CH_4 の特徴を紹介し、研究の背景と目的を述べた。第二章では解析に使用した衛星観測データの諸情報とデータの特徴を説明し、第三章では比較に使用した地上観測データや航空機観測データの特徴を説明した。

第四章では、衛星観測データの検証を行うために、地上観測データとの比較を行った。両者の比較を行うためには、 CH_4 の高度分布を把握する必要があるため、これらの比較を行う前に、航空機観測データを用いて CH_4 と CO_2 の高度分布を調べた（4.1 節）。高度分布を調べるために、航空機で観測している最上層から最下層までのカラム平均混合比と、最下層の混合比の差を計算した。結果、特に CH_4 のソースがある地点・時期には低高度の $\text{VMR}(\text{CH}_4)$ が高くなり、逆に、 CO_2 のシンクがある地点・時期には低高度の $\text{VMR}(\text{CO}_2)$ 濃度が低くなるため、カラム平均混合比と最下層の混合比を比較すると、高度分布は無視できないほど両者の差に影響していることが分かった。具体的には、 CH_4 のソースの強度や CO_2 のシンクの強度が大きい夏に最も高度分布の傾きが大きくなるため、カラム平均混合比と最下層の混合比の差が大きくなった（ $-6 \sim -4\%$ ）。ソースのない地点や、冬季などのソースの影響を受けない時期でも、 CH_4 は大気中にシンクがあり、高度があがるにつれて濃度が減少しているため、わずかに差が生じた（ $-1.5 \sim 1\%$ ）。これらの結果から、気柱全体を観測している衛星観測データと、最も濃度の高い地表面付近を測定している地上観測データを比較すると、衛星観測が過小評価することが推測される。

4.3 節において、地上観測データの $\left(\frac{\text{VMR}(\text{CH}_4)}{\text{VMR}(\text{CO}_2)}\right)$ 比と衛星観測データの $\left(\frac{\text{VCD}(\text{CH}_4)}{\text{VCD}(\text{CO}_2)}\right)$ 比を比較した結果、全体的には衛星観測データの値の方が小さく、北半球中・高緯度では特に差が大きくなった（ $-4 \sim -2\%$ ）。北半球低緯度と南半球においては、両者の差は衛星の観測誤差内におさまっていた（差： $-1.5 \sim 0.5\%$ 、観測誤差：約 $\pm 2\%$ ）。北半球中・高緯度は、大陸が多く、人間活動が活発であるため、ソースが多い地域であるといえ、北半球低緯度や南半球は海が多くソースが少ない地域であるといえる。よって、4.1 節で得た結果と整合しているといえる。

4.4 節において、地上観測地点をソースがあると思われる地点とそうではない地点に分類して、衛星観測データと比較を行った結果、ソースがあると思われる地点の方が差が大きくなった。また、北半球のソースがないと思われる地点では、差が夏季に大きく冬季に小さくなるという結果になった。これは、冬季よりも夏季の方が CH_4 の高度分布が一様でなかった可能性がある。その原因として考えられることは、 CH_4 や CO_2 のソースとシンクの季節変化があげられる。冬季は、ソースもシンクも強度が弱いので、高度分布が比較的一様に近いと考えられる。夏

第6章 まとめと今後の展望

季は、ソースのある地点では CH_4 放出が増す時期であり、シンクの強度も強くなる季節であるため、地上観測結果からソースがないと判断した地点でも、輸送の影響によりその上空の CH_4 の高度分布が一様ではない可能性がある。

以上の結果をまとめると、地表面付近にソースがあるか、または高濃度の空気塊が輸送されて、地上観測データが高濃度を示していたとしても、衛星観測データではそれをとらえきれていない傾向があると分かった。これは、 CH_4 の高度分布が原因であると考えられる。また、衛星の空間分解能が $30\text{km} \times 60\text{km}$ であり、さらにその swath データを $1^\circ \times 1^\circ$ のグリッドデータにしているため、高濃度の空気塊を観測しているとしても、データの平均化により値が低くなった可能性もある。

しかしながら、衛星観測データと地上観測データの間に生じる差は、高度分布を考えると説明がつくため妥当なものであり、差が衛星の観測誤差内にほぼおさまっていることから、衛星の観測自体は極めて良好であったと結論づけられる。

第五章では CH_4 の全球分布の特徴について述べた。全球的に見ると、南北の濃度勾配がはっきりと表れており、これまで行われてきた地上観測結果と整合している。地域的に見ると、中国や東南アジア域は、 CH_4 濃度が高いことが明らかとなった。これは、家畜を飼育している地域や水田地帯が多く存在するためであると考えられる。また、 CH_4 の全球分布はこれまで知られておらず、世界で初めて明らかになった地域が多く存在する。たとえば、アフリカや南米である。両大陸の赤道域は、これまでのエミッションインベントリーでは大きなソースがないと推測されてきたが、予想以上に高濃度であることを明らかにした。

今後、SCIAMACHY によって観測された CH_4 データと、エミッションインベントリーの値を用いたモデルの CH_4 データとの比較により、ソースに関する解析を行うことが可能であるとともに、これまで知られていなかったソースの発見が期待される。また、長期にわたる衛星観測が行われれば、濃度変化に関する研究も期待される。

他に、 CO_2 で補正を行うこの CH_4 データを扱う上で、より正確な CO_2 の高度分布を把握することが望ましいため、航空機観測や気球観測による CH_4 の高度分布の観測が必要とされる。

謝辞

本論文を仕上げるにあたり、お世話になりました先生方、研究室の皆様はこの場をお借りして御礼申し上げます。

林田佐智子教授には、本研究の機会および素晴らしい研究環境を与えて下さり、貴重な時間を割いて惜しみないご指導を賜りました。また、多くの他機関で研究打ち合わせをさせて頂くなど、素晴らしい研究環境を与えて下さいました。ここに深く感謝いたします。久慈誠先生、野口克行先生には、様々な御助言をして頂き深く感謝いたします。

日頃から研究に行き詰まる度に相談にのって下さり、度重なる御助言をして頂いた池田奈生先輩、研究に必要な計算機環境を整えて下さった荒木晶さん、秘書の山田眞裕美さんに深く感謝いたします。

本研究で使用した SCIAMACHY データは、the Netherlands Institute for Space Research (SRON) の Christian Frankenberg 氏が、ハイデルベルグ大学にてリトリートし、作成され、提供を受けたものです。国立環境研究所の町田敏暢博士には、航空機観測データを提供して頂きました。また、惜しみない御助言を頂き、数々の有意義な御意見を賜りました。大変感謝しております。東北大学の中澤高清教授、青木周司教授、宮城教育大学の菅原敏助教授、地球環境研究所の佐伯田鶴助手には、中国内陸の地上観測データを提供して頂き、研究に必要な様々な情報・アドバイスを頂きました。有り難うございました。

改めて、皆様に心より御礼申し上げます。

参考文献

- B. Dils, M. De Maziere, J. F. Muller, T. Blumenstock, M. Buchwitz, R. de Beek, P. Demoulin, P. Duchatelet, H. Fast, C. Frankenberg, A. Gloudemans, D. Griffith, N. Jones, T. Kerzenmacher, I. Kramer, E. Mahieu, J. Mellqvist, R. L. Mittermeier, J. Notholt, C. P. Rinsland, H. Schrijver, D. Smale, A. Strandberg, A. G. Straume, W. Stremme, K. Strong, R. Sussmann, J. Taylor, M. van den Broek, V. Velazco, T. Wagner, T. Warneke, A. Wiacek, and S. Wood, Comparisons between SCIAMACHY and ground-based FTIR data for total columns of CO, CH₄, CO₂ and N₂O, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 5, 2677 -2717.
- D. J. Jacob (2002), 大気化学入門 (東京大学出版会)
- Frankenberg, C., J. F. Meirink, M. van Weele, U. Platt, and T. Wagner (2005a), Assessing methane emissions from global space-borne observations, *Science*, 308(5724), 1010-1014, doi:10.1126/science.1106644.
- Frankenberg, C., U. Platt, and T. Wagner (2005b), Iterative maximum a posteriori (IMAP)-DOAS for retrieval of strongly absorbing trace gases: Model studies for CH₄ and CO₂ retrieval from near infrared spectra of SCIAMACHY on board ENVISAT, *Atmos. Chem. Phys.*, 5, 9-22.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2001), Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge Univ. Press, New York.
- Jurgen Heyer, Ursula Berger, Ivan Leontevich Kuzin and Oleg Nikolaevich Yakovlev (2002), Methane emissions from different ecosystem structures of the subarctic tundra in Western Siberia during midsummer and during the thawing period, *Tellus B*54 (3), 231-249. doi:10.1034/j
- Keppler, F., J. T. G. Hamilton, M. Brass, and T. Rockmann (2006), Methane emissions from terrestrial plants under aerobic conditions, *Nature*, 439, 187-191, doi:10.1038/nature04420.
- S. Houweling, T. Rockmann, I. Aben, F. Keppler, M. Krol, J. F. Meirink, E. J. Dlugokencky, and C. Frankenberg (2006), Atmospheric constraints on global emissions of methane from plants, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L15821, doi:10.1029/2006GL026162, 2006

参考文献

秋元肇, 河村公隆, 中澤高清, 鷺田伸明 編 (2002), 対流圏大気の化学と地球環境 (学会出版センター)

国立天文台 編 (2003), 理科年表 (丸善株式会社)