

東京大学大学院新領域創成科学研究科

環境学研究系自然環境学専攻

地球環境モデリング学分野

平成 22 年度

修士論文

アフリカにおけるバイオマスバーニングの

焼失割合の推定

Estimation of burning ratio of African
biomass burning

提出 2011 年 2 月 28 日

2010 年度 3 月修了

指導教員 今須良一 准教授

47-096633 宮村真人

目次	
1	はじめに.....4
1.1	背景.....4
1.2	バイオマスバーニングによる CO ₂ 放出量の推定方法5
1.2.1	バイオマスバーニングとは.....5
1.2.2	ボトムアップアプローチによる CO ₂ 放出量の推定方法6
1.2.3	トップダウンアプローチによる CO ₂ 放出量の推定方法.....8
1.3	本研究の目的.....9
1.4	対象地域・期間.....9
2	手法12
2.1	焼失割合 η の 2 種類の推定方法12
2.2	使用データ(衛星観測データ, データベース, モデル計算結果).....14
2.2.1	衛星観測データ15
2.2.2	データベース16
2.2.3	モデル計算結果.....17
2.3	CO ₂ 輸送計算のための物質輸送モデルの設定.....18
2.3.1	物質輸送モデルの概要18
2.3.2	CO ₂ 輸送計算時の設定条件19
3	結果21
3.1	アフリカにおけるバイオマスバーニングの特徴の把握.....21
3.1.1	バイオマスバーニングの発生位置と発生率.....21
3.1.2	バイオマスバーニングの火災強度と地域の環境特性の関係.....23
3.2	焼失割合 η の推定 I26
3.2.1	バイオマスバーニングによる CO ₂ 放出量の推定26
3.2.2	推定された CO ₂ 放出量の輸送計算28
3.2.3	大気中 CO ₂ 気柱濃度の推定値と観測値の比較.....30
3.3	焼失割合 η の推定 II33
3.3.1	火災強度と植生モデルのバイオマス量を用いた焼失割合 η の推定33
3.3.2	推定された焼失割合 η と地域の環境特性の関係.....34
4	考察36
4.1	バイオマスバーニングの発生位置と発生率に関して.....36
4.2	バイオマスバーニングによる CO ₂ 放出量の推定に関して.....36
4.3	大気中 CO ₂ 気柱濃度の推定値と観測値の比較に関して.....37
4.4	火災強度と植生モデルのバイオマス量を用いた焼失割合 η の推定に関して.....38
5	まとめ39

5.1	まとめ.....	39
5.2	今後の展望.....	40
	謝辞	41
	参考文献	43
付録 A	火災強度を用いた CO ₂ 放出量推定の詳細解析	i
付録 B	大気中 CO ₂ 気柱濃度の観測値と推定値の領域での比較	iii

1 はじめに

1.1 背景

近年、気候変動と地球環境保全の視点から、二酸化炭素(CO₂)の増加による地球温暖化が問題となっている(IPCC, 2007). CO₂は地球規模で、様々な過程を経て循環しているため、その放出・吸収のプロセスを解明することが、CO₂の削減目標の設定や地球温暖化の予測をする上で非常に重要である。現在、大気中 CO₂濃度を把握するため放出源・吸収源に関する研究が数多く行われており、それらの結果が IPCC により炭素循環としてまとめられている(図 1)。

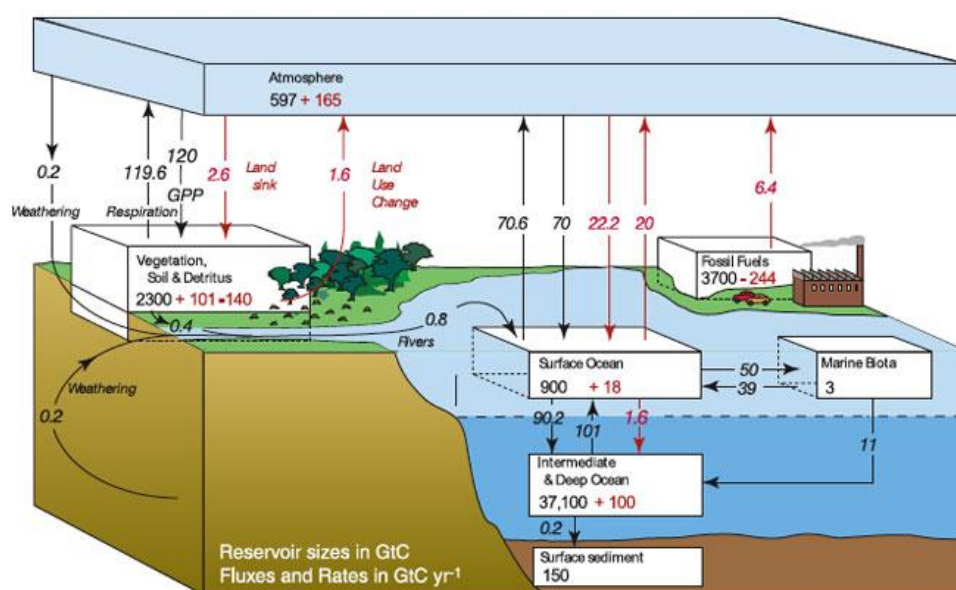


図 1: 炭素循環の模式図. IPCC AR4(2007) をもとに作成. 各数値は炭素重量に換算したもので、貯蔵量(箱の中の数値, GtC) あるいは交換量(矢印に添えられた数値, GtC/年) を表す. 黒い矢印は自然の循環で収支がゼロであり、赤い矢印は人間活動により大気中へ放出された炭素の循環を表す(気象庁 HP より引用).

炭素循環とは炭素が大気、海洋、堆積物、土壌、生物の間を交換・移動し、形成する循環のことである。図 1より現在の地球上の炭素は、陸域に 13.4%(化石燃料は 8.3%)、海域に 85.2%、大気に 1.3%存在する。これら地球表層に現存する炭素量が、様々な要因の放出・吸収によって平衡に保たれている。しかし、放出・吸収のバランスが変化することで、炭素循環が変化し、大気中の炭素(主に CO₂)が増減する。近年、化石燃料を燃やすことにより、大気中の CO₂濃度が増加している。産業革命以前、大気中 CO₂濃度は 280ppm であったが、残留した CO₂が増加することにより、2009 年では 386.8ppm と言われている(WMO, 2010)。大気中への CO₂フラックス(放出量と吸収量の差)は化石燃料起源排出量、海から大気への正味フラックス、陸から大気への正味フラックスに分類することができ、表 1 のように報告されている。

表 1 :世界の炭素収支. 正の値は大気中への CO_2 フラックス(単位は, 年あたり炭素換算で GtC), 負の値は大気からの取り込みを表す. \pm の値は変動幅であり, 各値における不確定性を示す(IPCC, 2007).

	1980 年代	1990 年代	2000~2005 年
化石燃料起源排出量	5.4 ± 0.3	6.4 ± 0.4	7.2 ± 0.3
海から大気への正味フラックス	-1.8 ± 0.8	-2.2 ± 0.4	-2.2 ± 0.5
陸から大気への正味フラックス	-0.3 ± 0.9	-1.0 ± 0.6	-0.9 ± 0.6
大気中の増加量	3.3 ± 0.1	3.2 ± 0.1	4.1 ± 0.1

これらの現状は多くの研究により得られたものであるが, 未だにそれぞれの値で $\pm 0.1 \text{GtC}$ 以上の大きな不確定性が存在する(表 1). その中でも陸から大気への正味フラックスには炭素収支の中で最も不確定性が大きい(IPCC, 2007). 例えば 2000~2005 年では -0.9GtC という値に対し, 約 67% の不確定性が存在する.

陸から大気への正味フラックスは, 植生の生長, 植林による取り込みと, 従属栄養呼吸, 収穫, 森林減少, 火災(バイオマスバーニング), バイオマスや土壌に影響を与える汚染等の攪乱要因による排出との間の正味の差である(IPCC, 2007). その中で, バイオマスバーニングによる炭素放出量は $2 \sim 4 \text{GtC/yr}$ と推定されており, 化石燃料起源の炭素放出量 7.2GtC/yr の約 50% に相当する(e.g., Bowman et al., 2009). また, 地球温暖化により, バイオマスバーニングの増加が示唆されている(Marlon et al., 2008). バイオマスバーニングは植生が取り込んだ CO_2 を大気中に放出するだけでなく, 植生による CO_2 の吸収の効果を減少させるため, 大気中の CO_2 量を増加させ, 更なる温暖化を招くことになる. よって, バイオマスバーニングに伴う CO_2 放出量の定量的評価は非常に重要である. しかし, CO_2 放出量を測定するにはこれまで航空機による CO_2 濃度の観測結果に基づく推定が主な方法であるため, 局所的なバイオマスバーニングの放出量しか把握することができていない. そのため, 全球規模の推定には数値計算や衛星観測データを用いることになるが, 各推定方法には大きな不確定性が存在する. したがって, 広域的なバイオマスバーニングによる CO_2 放出量の推定の不確定性を小さくする必要がある.

1.2 バイオマスバーニングによる CO_2 放出量の推定方法

1.2.1 バイオマスバーニングとは

バイオマスバーニングとは生きている, もしくは死んでいる植生, 土壌有機物(本研究では全てバイオマスとする) が燃えることによる火災のことである. それは焼畑農業などによる人為起源の発生, あるいは自然発火や落雷などの自然起源の発生に分けられる. 近年ではバイオマスバーニングの場所や広がりや衛星観測によって測定できるようになった. 例えば DMSP(Defense Meteorological Satellite Program) 衛星による夜間のバイオマスバーニングの位置や頻度の観測や, NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration) 衛星の AVHRR(Advanced Very

High Resolution Radiometer) センサー, Terra, Aqua 衛星の MODIS(MODerate resolution Imaging Spectrometer) センサーによるバイオマスバーニングの発生地域の観測などが行われている。バイオマスバーニングは赤道付近の熱帯地域であるアフリカや, 南アメリカ, 東南アジア, オーストラリア, また高緯度の北方地域であるカナダやロシアなどの様々な地域で発生していることがわかっている(Giglio et al., 2005)。

バイオマスバーニングはCO₂の他に様々な気体(CO, CH₄, NO など) や微粒子(固形炭素の燃焼粒子)(Elementary Carbon; EC) を大気中に放出する(Crutzen and Andreae, 1990)。バイオマスバーニングに伴うCO₂, CO や EC の放出に関する研究は数多く行われている。衛星観測による局所的な地域から放出される EC の研究(Kharol and Badarinath, 2006) や, 航空機観測による局所的なバイオマスバーニングの気体や微粒子の放出量の研究(Swap et al., 2003, Yokelson et al., 2003) などにより局所的な放出量が求められている。一方で広域的な放出量は直接導出することは難しく, 様々なデータを組み合わせた推定方法が用いられる。GEBB1 というプロジェクトによって, 数値計算による気体や微粒子の放出量推定などが行われている(Palacios-Orueta et al., 2004, Hoelzemann et al., 2004)。また, Landsat(Land satellite) 衛星の TM(Thematic Mapper) センサーを用いた観測結果と統計情報によるバイオマス量を用いて行われる CO₂ 放出量推定(Fearnside, 2000), MODIS センサーを用いた観測結果と数値計算によるバイオマス量を用いて行われる CO₂ 放出量推定(Van der Werf et al, 2006, Van der Werf et al., 2010) などがある。このような推定方法にはボトムアップアプローチとトップダウンアプローチが用いられている。

1.2.2 ボトムアップアプローチによる CO₂ 放出量の推定方法

地上における CO₂ 濃度の直接観測や, 個々の植物による CO₂ の放出・吸収プロセスの積み上げから, ある地域からの CO₂ 放出量を見積もる方法である。この方法を用いることで, 狭域から広域まで様々な規模の CO₂ 放出量を推定することができる。

全 CO₂ 放出量 M (gCO₂) のボトムアップアプローチによる推定には式(1) が一般的に用いられる(Seiler and Crutzen, 1980)。

$$M = \sum_{i=1}^n A_i B_i \eta_i \quad (1)$$

A_i はバイオマスバーニングが起きている燃焼面積比(%), B_i はバイオマス量(gC), η_i はバイオマスの焼失割合(gCO₂/gC) を表す。それぞれの変数に衛星観測データや数値計算による推定値を用いる場合, 全球を一定の間隔で区切ったグリッドごとの, 格子状のデータを用いる(図 2)。式(1) の i は各グリッド, n はグリッドの総数を表し, グリッドごとの CO₂ 放出量を積算して全 CO₂ 放出量を推定する。

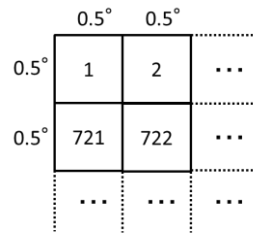


図 2: 格子状のデータ概念図. 格子一つを 1 グリッドとする. 例えば, この 1 グリッドは 1 辺が緯度 0.5° , 経度 0.5° の正方形となる. グリッドの数は 0.5° 間隔の場合全球で 720×360 個存在する.

ここで, 式(1) の A_i による燃焼面積比では燃えている箇所が二次元的にしか考慮されない. しかし, 実際のバイオマス量は三次元的に分布しているため, 焼失割合 η_i を用いて三次元的な燃焼を考慮する. ここで, η_i は以下の式(2) で表される.

$$\eta_i = CC_i \times EF_i \quad (2)$$

CC_i とはバイオマスの燃焼割合(Combustion Completeness) であり, EF_i とは燃焼効率(Emission Factors) である. 燃焼割合 CC_i はバイオマスバーニングが起こっている場所ごとで, 葉が燃えている場合や, 幹が燃えている場合などの様々な燃え方を表す変数である. また, 燃焼効率 EF_i とは CO_2 放出のみの完全燃焼と, CO や CH_4 , EC などの放出を伴う不完全燃焼があり, このうちの完全燃焼した割合を示す. 燃焼効率 EF_i に関する研究は実験的な方法に基づく結果が報告されている(Kaufman et al., 1990, Ferek et al., 1998, Andreae and Merlet, 2001). しかし, もう一つの要素である燃焼割合 CC_i は実際にどのような火災が起きているか不明瞭であり, 既存の研究では植生ごとに燃焼割合 CC_i を与えているなど, 多くの仮定をおく場合がほとんどである(図 3). したがって, バイオマスバーニングによる CO_2 放出量の不確定性は燃焼割合 CC_i の不確定性に由来する部分が大きいと考えられる.

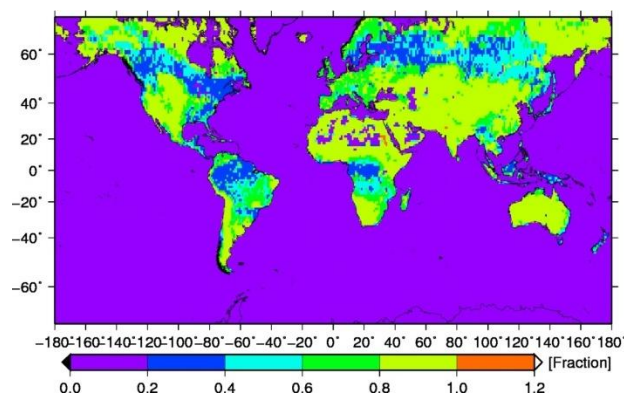


図 3: 燃焼割合 CC_i の値. GFEDv2 で使用された植生分類によって仮定された燃焼割合の値. 2006 年 12 月の値である (Van der Werf et al., 2006).

ボトムアップアプローチを用いた研究は数多く行われており, 様々な CO_2 放出量が推定されている. 特に, Van der Werf et al, 2010 により作成されたバイオマスバーニングによる炭素放出量の

データベースは GFED(Global Fire Emission Database) と呼ばれ、様々な研究に利用されている。しかし、GFED の第 2 バージョンである GFEDv2 は、場所により過大評価(Roberts and Wooster, 2008, Ellicott et al., 2009), あるいは過小評価(Reid et al., 2009, Niwa, 2010) であると言われている。また近年 GFEDv2 は GFEDv3 に更新されたが、未だ Van der Werf et al., 2010 により推定されたバイオマスバーニングによる炭素放出量の不確定性は 20%も存在すると言われている(図 4)。

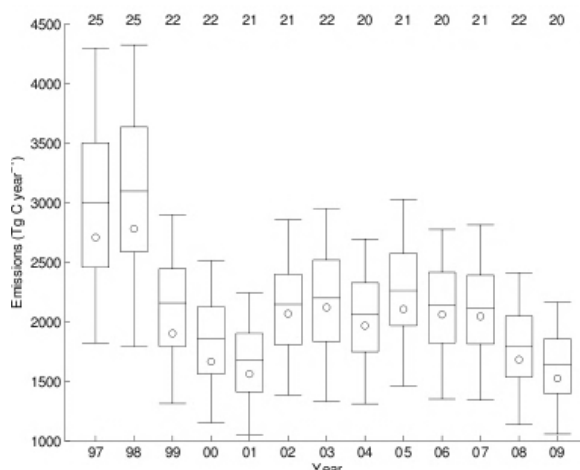


図 4: GFEDv3 の 1997 年から 2009 年までの各年における全球の炭素放出量. 横軸は年, 縦軸は全炭素放出量(TgC/yr), 上部の数字がその年における炭素放出量推定の不確定性(%)である(Van der Werf et al., 2010) .

1.2.3 トップダウンアプローチによる CO₂ 放出量の推定方法

トップダウンアプローチとは大気中の CO₂ 濃度から、物質輸送の逆計算を行うことで、ある地域からの CO₂ 放出量を直接計算する方法である。そのため、トップダウンアプローチによる CO₂ 放出量の推定には大気中の CO₂ 濃度の観測データが必要である。

大気中の CO₂ 濃度は主に定点観測、船舶・航空機観測、衛星観測の 3 種類により測定される。定点観測では地上(または海上) の観測点において、その地点付近や上空の CO₂ 濃度を観測し、船舶・航空機観測では移動航路中の CO₂ 濃度を観測する。しかし、これらの手法は観測の精度は良いが、限られた観測点のデータしかなく、トップダウンアプローチに必要な広範囲の大気中 CO₂ 濃度を観測することができない。一方で、衛星観測は他の観測方法に比べ精度は劣るものの、広範囲で定期的に観測可能である。現在 Aqua 衛星の AIRS(Atmospheric Infrared Sounder) センサー、Aura(Upper Atmosphere Research Satellite) 衛星の TES(Tropospheric Emission Spectrometer) センサーなどが大気中の CO₂ 濃度を観測している。しかし、下部対流圏に感度がなく、気柱濃度(鉛直平均濃度) を測定することができない。そのため、トップダウンアプローチによるある地域の CO₂ 放出量の推定を行った場合、非常に大きな誤差を生じさせてしまう。そのような状況下で、ボトムアップおよびトップダウンアプローチによる CO の放出量推定値の比較が行わ

れた(Ito et al., 2007). この研究では, トップダウンアプローチに Terra 衛星の MOPITT (Measurement Of the Pollution In The Troposphere) センサーの観測データを用いている. 結果は, ボトムアップアプローチにより得られた CO 放出量はトップダウンアプローチよりも過小評価であったことが示された. しかし, この研究で用いられた衛星も下部対流圏に感度がなく, トップダウンアプローチによる推定の不確定性が 30%あると言われている.

ところが, 2009 年 1 月に打ち上げられた温室効果ガス観測技術衛星 GOSAT (Greenhouse gases Observation SATellite) により, 大気中の CO₂ 気柱濃度を観測することが可能となった. 現段階では, GOSAT 衛星の大気中 CO₂ 気柱濃度は十分に検証されてはおらず, トップダウンアプローチによるバイオマスバーニングからの CO₂ 放出量を直接計算することはできない. しかし, ボトムアップアプローチによって推定された CO₂ 放出量に基づき, 物質輸送モデルを用いて大気中 CO₂ 気柱濃度を計算し, 衛星観測データと比較することは可能となった. つまり, バイオマスバーニングによる CO₂ 放出量推定において, これまでになかった独立な情報を取り入れることが可能となったと言える.

1.3 本研究の目的

バイオマスバーニングによる CO₂ 放出量推定において, これまでは最も不確定性の大きいとされる焼失割合 η の推定には, 多くの仮定をおく場合がほとんどであった. しかし, 本研究では, これまでになかった独立な情報を取り入れることで焼失割合 η そのものの推定を試みる方法を 2 種類提案する.

1 つ目は, 大気中 CO₂ 気柱濃度の観測値と推定値を比較することで, 焼失割合 η を求める方法である. 2 つ目は, 赤外線情報から得られた火災強度(Fire Radiative Power; FRP) と, 植生モデルのバイオマス量の両値のみを用いて焼失割合 η を求めるこれまでになかった新たな方法である.

1.4 対象地域・期間

本研究ではアフリカ(北緯 40°から南緯 40°, 西経 20°から東経 60°の範囲, 図 5) を対象とする. アフリカを対象とする理由は 2 点ある. 1 点目は Van der Werf et al, 2010 により, アフリカからのバイオマスバーニングに伴う大気中への炭素放出量は世界の約 52%と言われており, この地域における CO₂ 放出量を把握することは重要と考えられるからである(図 6).

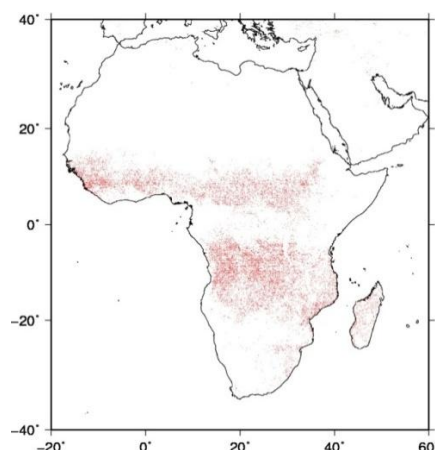


図 5:本研究の対象地域であるアフリカ. 北緯 40°から南緯 40°, 西経 20°から東経 60°の範囲. 赤い点は 2009 年一年間のバイオマスバーニングの発生位置である. サヘル地域と南部地域にバイオマスバーニングの発生点が集中している.

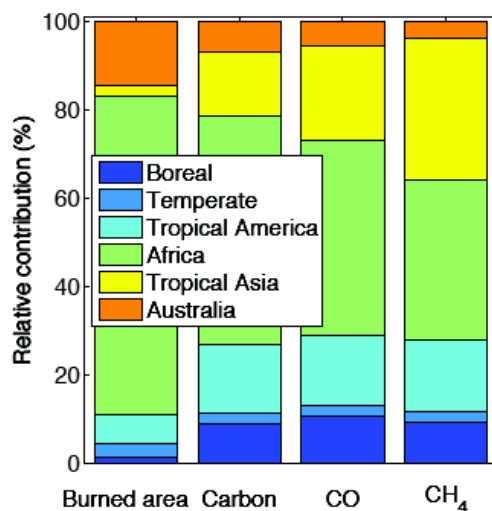


図 6:地域別の燃焼面積と C, CO, CH₄ の放出量の割合. 縦軸が割合(%), 図中の色はラベルの上から, 寒帯地域, 温帯地域, 熱帯アメリカ, アフリカ, 熱帯アジア, オーストラリアを示す(Van der Werf et al., 2010).

2 点目は GOSAT 衛星によりアフリカ上空の CO₂ 気柱濃度の観測が行われ, ボトムアップアプローチの結果に対する比較検証が可能となったからである. これまでは全球で地上の温室効果ガス観測点は 256 点と非常に少なく, 偏在しており, 特にアフリカには観測点はほとんど存在しなかった. それに対し, GOSAT 衛星の観測点は 3 日で 56000 点となり, ほぼ全球を網羅することができる(図 7).

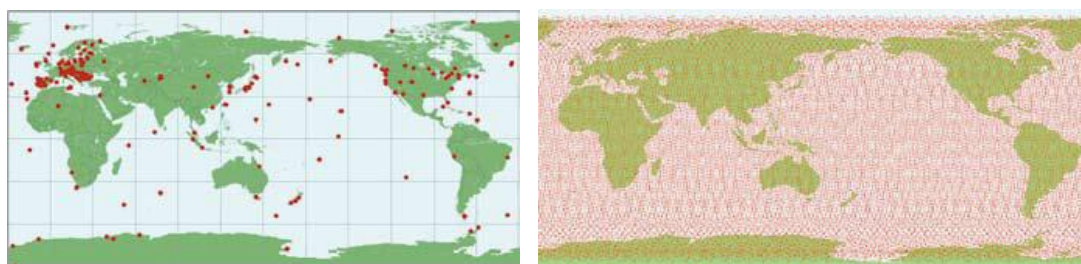


図 7: 温室効果ガス観測点. 左図, 地上観測点(World Data Centre for Greenhouse Gases; WDCGG の HP より引用), 右図, GOSAT 衛星の観測点(国立環境研究所 (National Institute for Environmental Studies; NIES) の HP より引用). 赤い点が観測点である.

これまでアフリカのバイオマスバーニングを対象とする研究は数多く行われてきた. 特に SAFARI プロジェクトによって集中的に研究がなされ(e.g., Swap et al., 2003, Yokelson et al., 2003), 炭素放出量やエルニーニョとの相関についての議論が行われてきたが, 本研究で注目している焼失割合 η に焦点を置く研究はほとんどない.

対象期間は GOSAT 衛星のデータが取得され始めた 2009 年 1 月から 12 月までの一年間とする.

2 手法

2.1 焼失割合 η の 2 種類の推定方法

まず、アフリカにおけるバイオマスバーニングの特徴を把握する。具体的には様々な衛星観測データ、データベースを用いて、バイオマスバーニングの起きている地域の特定や、その地域の環境特性を明らかにする。

以上を踏まえ、2 種類の方法を用いて焼失割合 η の推定を行う。

1 つ目は、大気中 CO_2 気柱濃度の観測値と推定値を比較することで、焼失割合 η を求める方法である(図 8)。まず 3 つのボトムアップアプローチを用いて CO_2 放出量を推定する。式(1) を基に推定する方法が 2 種類、式(1) のようなバイオマス量や焼失割合 η を用いず、火災強度 FRP から直接推定する方法が 1 種類の 3 つの CO_2 放出量である。それに加え、比較としてデータベースの CO_2 放出量の計 4 つを使用する。

- ①. 衛星観測に基づく方法: 東京大学生産技術研究所の竹内先生によって、衛星観測(MODIS) から求めた正規化植生指数(Normalized Difference Vegetation Index; NDVI) と国立環境研究所の伊藤先生によって開発された植生モデル (Vegetation Integrative Simulator for Trace; VISIT) の地上部バイオマス量の関係を用いて、衛星観測データ基準のバイオマス量を推定する係数が求められた。その係数を用いて推定されたバイオマス量に MODIS から得られた火災点情報と NDVI の減少率から計算された燃焼面積比と、暫定的に仮定したバイオマスの焼失割合 η を掛け合わせ、 CO_2 放出量を求める。以後 NDVI 法とする。これは、図 8 中で“1”として示してある。
 - ②. 植生モデルに基づく方法: 植生モデル VISIT により推定された地上部バイオマス量に同様の燃焼面積比と、仮定したバイオマスの焼失割合 η を掛け合わせ、 CO_2 放出量を求める。以後 VISIT 法とする。これは、図 8 中で“2”として示してある。
 - ③. 火災強度に基づく方法: MODIS により観測された赤外線情報から直接火災強度 FRP を推定し、実験により求められた係数(Wooster et al., 2005) を掛け合わせ、燃焼時間を 1 時間と仮定し、 CO_2 放出量を求める。以後 FRP 法とする。これは、図 8 中で“3”として示してある。
 - ④. GFEDv3 の CO_2 放出推定量(以後 GFED 法とする。これは、図 8 中で“4”として示してある。) も比較対象として加え、合計 4 つの方法により得られた CO_2 放出量について比較を行う。次に、これら 4 つの CO_2 放出量を、物質輸送モデル(Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model – Transport Model; NICAM-TM) (Niwa, 2010) に導入し、大気中 CO_2 気柱濃度を計算して、GOSAT 衛星により観測された値と比較する。最後に比較した結果をフィードバックすることで、① NDVI 法、② VISIT 法で CO_2 放出量を計算する時に仮定した焼失割合 η を検証し、推定する。
- 2 つ目は、赤外線情報から得られた火災強度 FRP と植生モデルのバイオマス量を用いて焼失割合 η を求める方法である(式(3))。

$$\eta = \frac{M}{AB} \quad (3)$$

これは式(1) を変形したものである。

③FRP 法から求められた CO_2 放出量と、植生モデル VISIT の地上部バイオマス量と燃焼面積比を掛け合わせた値の比率から焼失割合 η を推定する。この方法では、焼失割合 η の時間変化や、場所ごとの違いを検出できる可能性がある。

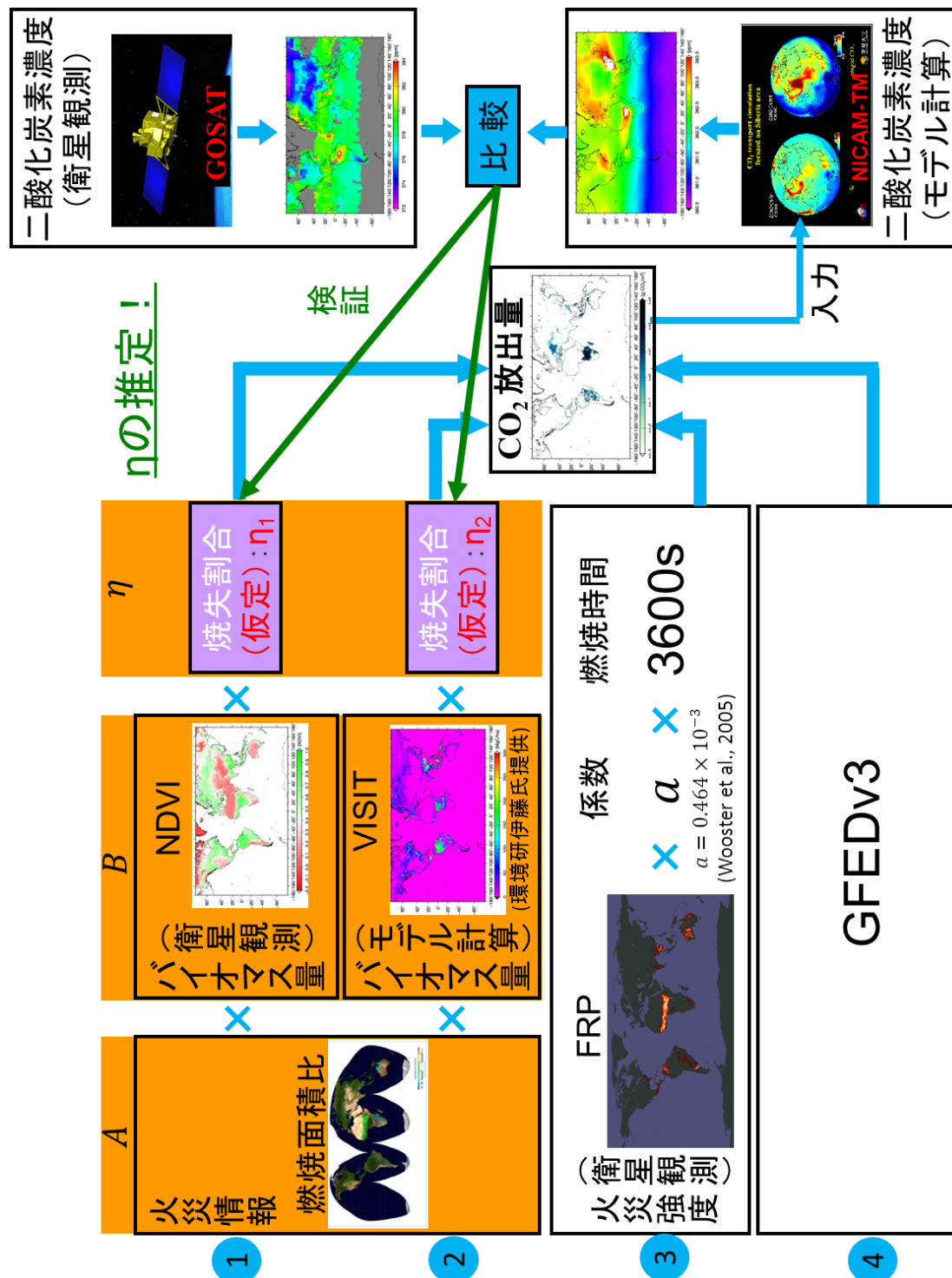


図 8: 本研究の概念図。

2.2 使用データ(衛星観測データ, データベース, モデル計算結果)

本研究で使用する衛星観測データ, データベース, モデル計算結果の三種類の一覧を表 2 に示す.

表 2: 本研究の使用データ一覧.

衛星	センサー	物理量	単位	水平分解能	鉛直分解能	時間分解能	期間
GOSAT	TANSO-FTS	CO ₂ 気柱濃度	ppm	2.5°×2.5°	Column	Monthly	2009-現在
Terra/ Aqua	MODIS	植生指数(NDVI)	-	1km×1km	-	8days	2000-現在
	MODIS	火災強度(FRP)	MW	1km×1km	-	Monthly	2000-現在
	MODIS	火災日時	Julian day	500m×500m	-	Monthly	2000-現在
Aqua	AMSR-E	土壌水分量	g/cm ³	0.25°×0.25°	-	Monthly	2002-現在
データベース		物理量	単位	水平分解能	鉛直分解能	時間分解能	期間
IGBP		土地被覆分類	-	1km×1km	-	Yearly	2002-2008
GFEDv3		CO ₂ 放出量	gC/m ²	0.5°×0.5°	-	Monthly	1997-2009
GPCP		降水量	mm/day	2.5°×2.5°	-	Monthly	1979-2009
モデル		物理量	単位	水平分解能	鉛直分解能	時間分解能	期間
VISIT		バイオマス量	MgC/ha	0.5°×0.5°	-	Monthly	1979-2009

2.2.1 衛星観測データ

◆ GOSAT

- TANSO-FTS(Thermal And Near infrared Sensor for carbon Observation – Fourier Transform Spectrometer) センサー

国立環境研究所 NIES が提供している GOSAT 衛星の TANSO-FTS センサー SWIR(Short-Wavelength Infra-Red) バンドによって観測された大気中 CO₂ 気柱濃度の Level3 データ Version1.10 と 1.20 を使用した。Level3 とは格子状にまとめられたデータである。

GOSAT の TANSO-FTS-SWIR は太陽光の地表面または海表面での散乱光を観測している。CO₂ は赤外域に吸収帯を持ち、吸収のない波長における光の量から、CO₂ の強い吸収帯での光源の強さを推定する。これにより、測定光の強さから大気中の CO₂ 気柱濃度を測定する(横田ほか, 2008)。単位は ppm である。水平分解能は 2.5°×2.5°であり、時間分解能は月平均、データの期間は 2009 年から現在までである。

◆ Terra・Aqua

- MODIS センサー

本研究では、NASA(the National Aeronautics and Space Administration) の LP DAAC(The Land Processis Distributed Active Archive Center) が提供している Terra・Aqua 衛星の MODIS センサーにより観測された植生指数 NDVI, 火災強度 FRP, 火災日時のデータを用いる。ただし、実際に使用するデータは東京大学生産技術研究所のアーカイブから竹内渉先生を通じて提供して頂いた。

MODIS センサーは Terra, Aqua 両衛星に搭載され、同一地点を昼と夜一日に 1～2 回観測する。36 バンドで様々な地上情報を観測している。

植生指数 NDVI は単位面積あたりの植物の量(あるいは活性度)である。植物の葉に含まれるクロロフィルは、可視域の赤の波長帯(0.64～0.67μm) を強く吸収し、葉の細胞構造は近赤外の波長帯を強く反射する(加藤, 2007)。この特性を利用し、赤波長(RED) と近赤外波長(NIR) の値を用いて NDVI を算出する(式(4))。

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (4)$$

水平分解能は 1km×1km であり、時間分解能は 8 日間平均、データの期間は 2000 年から現在までである。

火災強度 FRP は 4μm 帯の輝度温度と 4μm 帯と 11μm 帯の輝度温度の差の両方が火災の起こっていない場所での輝度温度から大幅に異なる場合火災として捉え、火災の強度を観測している(Giglio et al., 2003)。単位は MW である。水平分解能は 1km×1km であり、時間分解能は月平均、データの期間は 2000 年から現在までである。

火災日時は時系列に火災の発生エリアの分布を推定している。MODIS センサーにより観測された火災点情報と植生指数 NDVI の変化から植生の減少量も考慮し、燃焼面積を計算して

いる(Roy et al., 2005). 単位は Julian day である. 水平分解能は 500m×500m であり, 時間分解能は月単位, データの期間は 2000 年から現在までである.

◆ Aqua

➤ AMSR-E(Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS)

JAXA(Japan Aerospace Exploration Agency) の EOC(Earth Observation Center) が提供している Aqua 衛星の AMSR-E センサーにより観測された土壌水分量の Level3 データ version 600 を使用した.

Aqua の AMSR-E は地球表面から放射される微弱なマイクロ波を観測している. マイクロ波が大気の影響を受けずに, 昼夜関係なく定期的かつ広範囲に観測でき, 液体水分が土壌と比べてマイクロ波領域で非常に高い誘電率を有する(小池俊雄ほか, 2004) という特徴から土壌水分量を測定している. 単位は g/cm^3 である. 水平分解能は $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ であり, 時間分解能は月平均, データの期間は 2002 年から現在までである.

土壌水分量はアフリカにおける季節変化を調べるとともに, NDVI, FRP, 降水量, 推定した焼失割合 η との相関を調べた.

2.2.2 データベース

◆ IGBP

NASA の LP DAAC が提供している Terra・Aqua 衛星の MODIS センサーによって観測された地表面反射率や NDVI に代わる植生指標として用いられる EVI(Enhanced Vegetation Index), 木の形状を表す情報として用いられる双方向反射率分布関数(Bidirectional Reflectance Distribution Function; BRDF), 地表面温度等のデータを用いて, IGBP (International Geosphere-Biosphere Program) による土地被覆分類を基に推定された全球の土地被覆分類データを使用した.

IGBP は Terra, Aqua 両衛星の観測データを合わせたデータを基に, 年間で割合の多い土地被覆に分類している. その分類とは米国地質調査所(United States Geological Survey; USGS) の EROS(Earth Resources Observation and Science) データセンターとネブラスカ-リンカーン大学(University of Nebraska-Lincoln; UNL) および欧州の共同研究所(Joint Research Centre; JRC) の主導により 17 タイプに分けられたものである. 11 タイプが自然植生の分類(湿地, 草地, サバンナ, サバンナ(woody), 疎な灌木地, 密な灌木地, 混合林, 落葉広葉樹林, 落葉針葉樹林, 常緑広葉樹林, 常緑針葉樹林) であり, 3 タイプが人工物(耕作地・自然植生, 都市, 耕作地), 3 タイプが植生のない分類(裸地, 雪氷, 海)である(Friedl et al., 2002). 水平分解能は $1\text{km} \times 1\text{km}$ であり, 時間分解能は年平均, データの期間は 2002 年から 2008 年までである.

◆ GFEDv3・GFEDv2

GFEDv3 の CO_2 放出量と, GFEDv2 の燃焼割合 CC を使用した.

GFEDv2・GFEDv3 は MODIS センサー等の衛星に搭載されたセンサーにより観測された火災

情報と植生モデル(Carnegie-Ames-Stanford Approach; CASA) のバイオマス量を使用して作成されたデータベースである。バイオマスの焼失割合 η は燃焼割合 CC と燃焼効率 EF に分類されており、燃焼割合 CC は実験により求められたデータを植生分類により推定している。燃焼効率 EF は Andreae and merlet, 2001 により求められた植生分類ごとの燃焼効率の値を使用している。GFEDv3 はバイオマスバーニングの発生場所の種類による分類を行い、炭素放出量を GFEDv2 より精度よく推定した。分類はサバンナ、森林、森林伐採、北方林、農地、泥炭となっている(Van der werf et al, 2010)。これらにより、バイオマスバーニングに伴う物質ごとの放出量を推定した。単位は g/m^2 である。水平分解能は $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ であり、時間分解能は月平均、データの期間は 1997 年から 2009 年までである。

◆ GPCP (Global Precipitation Climate Program)

NASA の GSFC(Goddard Space Flight Center) Lab. Atmospheres が提供している GPCP の降水量データを使用した。

GPCP は、多種類の衛星観測、例えば DMSP 衛星の SSM/I(Special Sensor Microwave Imager) センサーの全可降水量や、GPCC(Global Precipitation Climatology Centre) の雨量計データなどを組み合わせ推定された(Adler et al., 2003) 降水量のデータベースである。単位は mm/day である。水平分解能は $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ であり、時間分解能は月平均、データの期間は 1979 年から 2009 年 9 月までである。

2.2.3 モデル計算結果

◆ VISIT

植生モデル VISIT の計算結果は国立環境研究所伊藤昭彦先生から提供して頂いた。

VISIT は同じく伊藤先生が開発した陸域炭素循環モデル Sim-cycle(Simulation Model of Carbon Cycle in Land Ecosystems) をベースにした全球陸域生態系モデルである。地表の枝・葉・幹などの地上部バイオマス量、地中の根の地下部バイオマス量、地表の土壌有機物量と 3 タイプ(図 9) に分けて計算可能である(Ito and Oikawa, 2000)。単位は MgC/ha である。水平分解能は $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ であり、時間分解能は月平均、データの期間は 1979 年から 2009 年までである。

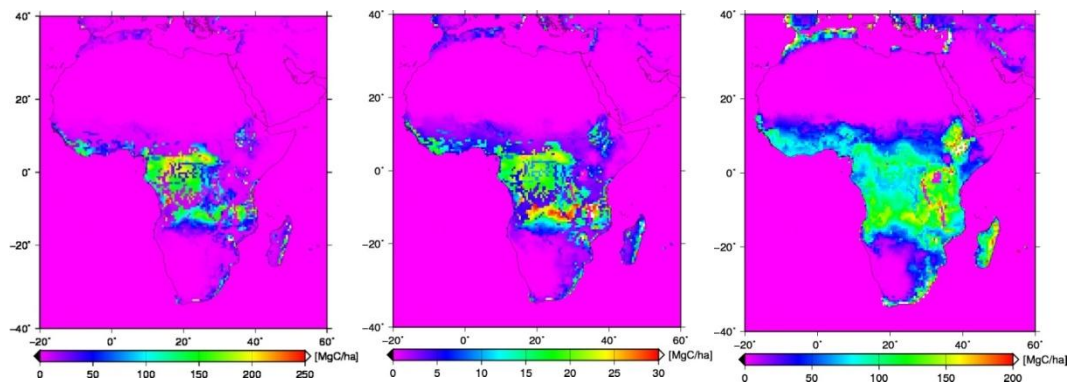


図 9: 植生モデル VISIT により推定されたバイオマス量. 左図, 地上部バイオマス量, 中央図, 地下部バイオマス量, 右図, 土壌有機物量. 単位は MgC/ha. 2009 年の平均値.

2.3 CO₂ 輸送計算のための物質輸送モデルの設定

2.3.1 物質輸送モデルの概要

本研究で使用する大気中物質輸送モデルは, 次世代大気大循環モデルとして開発されている非静力正 20 面体大気モデル(NICAM)(Tomita and Satoh, 2004, Sato et al., 2008) をベースに開発された. そのため, これを NICAM-TM(NICAM-Transport Model) と呼んでいる.

今までの多くの大気大循環モデル(General Circulation Model; GCM) が用いてきた緯度経度格子では極付近に格子が集中し, 数 10km 程度の水平解像度が限界であった. しかし NICAM では正二十面体格子を用いており, 球面状にその格子を投影していくことで全球においてほぼ一様な格子ができる(図 10). その格子を細かく分割することで, 解像度を上げていくことができ, 局所的に格子が集中することがなく, 超高分解能の計算を全球で行うことができる.

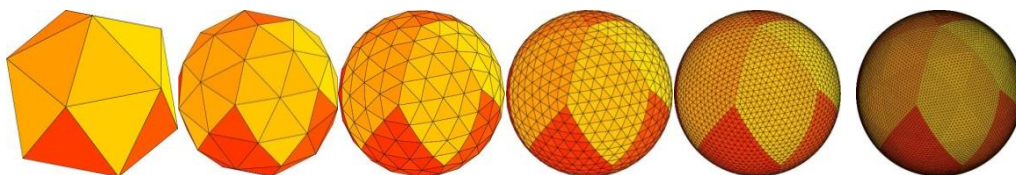


図 10: NICAM の準一様格子(icosahedral grid) (Tomita and Satoh, 2004, Sato et al., 2008). 左から glevel-0, glevel-1, glevel-2, glevel-3, glevel-4, glevel-5. (NICAM の HP より引用).

NICAM の解像度のレベルは, 元の正二十面体からの分割回数で決められており, 5 回分割した格子の水平解像度のレベルでは glevel-5(格子間隔約 240km) となる. 現在の NICAM の水平解像度の最高は glevel-11 であり, 格子間隔は約 3.5km に相当する. 物質輸送モデルでは glevel-5 が用いられている.

物質輸送にとって鉛直輸送は重要な要素となるため, 鉛直解像度は NICAM で用いられてい

る層数の中で一番多い 54 層となっている(Niwa,2010).

大気における不活性大気組成成分の輸送過程は式(5) で表される.

$$\frac{\partial(\rho q)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho q \mathbf{v}) + C + D = f(s) \quad (5)$$

ρ は空気の密度, q はトレーサの混合率, \mathbf{v} は風ベクトルを表す. 式(4) の左辺第二項はモデルのグリッドで分けられた三次元のフラックス(放出量と吸収量の差) 気体の移流を表す. C は積雲対流による鉛直輸送, D は乱流による鉛直拡散を表す. 地表面のフラックスのフォーシングは $f(s)$ で表される(Niwa,2010). トレーサとは, 空気あるいは水などの流体の運動を追跡するのに用いられる物質あるいはその流体の特性であり, フォーシングとは 1 つまたは複数の物理過程への正のフィードバックをもたらす要因の効果である(山岸, 2005).

また物質輸送モデルは現実大気をより忠実に再現する必要があるため, ナッジングという手法が用いられている. ナッジングとは式(6)で表されるように, ニュートン緩和法により, 力学変数が再解析データとの差を小さくするような補正計算を行う.

$$\Delta X = \frac{\alpha(\xi)\tau}{\Delta t} (X_r - X) \quad (6)$$

X はナッジングにかかる力学変数, X_r は再解析データ, τ はナッジング時定数, Δt はモデルの時間ステップ間隔, $\alpha(\xi)$ はモデルの高度 ξ によって決定される変更要素を表す. 再解析データは気象庁 (Japanese Meteorological Agency; JMA) が提供している JRA-25/JCDAS (Japanese 25-year ReAnalysis / JMA Climate Data Assimilation System) (Onogi et al., 2007) が用いられている.

NICAM-TM は始め, CO_2 濃度 0 からの計算を行う. そして計算の中で地表面 CO_2 フラックスを与え続ける(スピナップ). 与えられた CO_2 は気象場によって移動される. 移動されることで, CO_2 濃度分布, および何北, 鉛直勾配が概ね平衡状態となる. スピナップ期間を含め, 4 年分の積分を行うことで物質の輸送計算が可能となる.

2.3.2 CO_2 輸送計算時の設定条件

本研究では 2.1 節で示した 3 種類の方法と GFEDv3 を合わせた, 計 4 種類の CO_2 放出量を基に, NICAM-TM を用いて大気中 CO_2 気柱濃度を計算する. 実際の CO_2 の大気中気柱濃度を求めるには, 上記バイオマスバーニング起源の CO_2 放出の他に, 1) 植生による放出・吸収, 2) 海洋による放出・吸収, 3) 化石燃料起源の放出, 合わせて 4 つの放出源・吸収源を考慮する必要がある.

植生からの CO_2 放出・吸収量は植生モデル CASA を用いている(Randerson et al., 1997)(図 11, 左上). また, 海洋からの CO_2 放出・吸収量は Takahashi et al, 2009 のデータを使用する(図 11, 右上). また化石燃料起源の CO_2 放出量は CDIAC (Carbon Dioxide Information Analysis Center)(Marland et al., 2007) と, EDGAR v3.2 (Emission Database for Global Atmospheric Research version 3.2)(Olivier and Berndowski, 2001) のデータを使用する(図 11, 左下). 最後

にバイオマスバーニングによる CO_2 放出量(図 11, 右下) をインプットデータとする. バイオマスバーニングによる CO_2 放出量は本研究で推定した①NDVI 法, ②VISIT 法, ③FRP 法, さらに比較対象として④GFED 法を用いる.

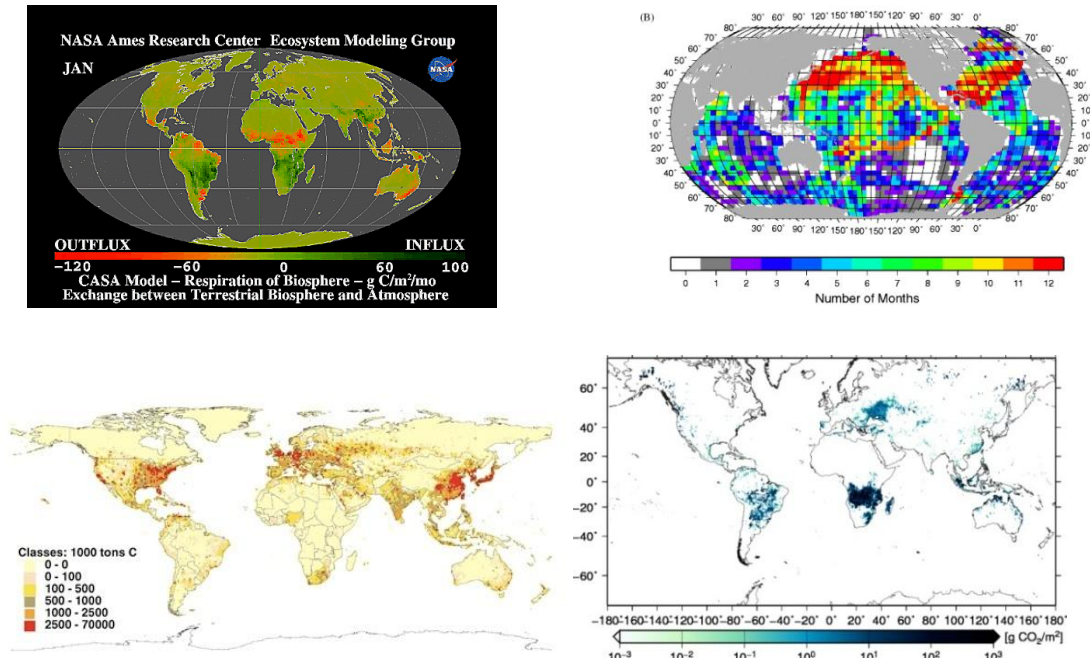


図 11: 物質輸送モデル NICAM-TM の CO_2 放出・吸収量のインプットデータの概念図. 左上図, 植生による CO_2 放出・吸収量, 右上図, 海洋による CO_2 放出・吸収量, 左下図, 化石燃料起源の CO_2 放出量, 右下図, バイオマスバーニングによる CO_2 放出量.

3 結果

3.1 アフリカにおけるバイオマスバーニングの特徴の把握

3.1.1 バイオマスバーニングの発生位置と発生率

アフリカで発生しているバイオマスバーニングの特徴を掴むため、表 2 に挙げたデータを用いて解析を行った。まず、火災強度 FRP からバイオマスバーニングの発生場所を特定し、2009 年の一年間で発生した位置をプロットし、最新である 2008 年の土地被覆分類を重ね合わせた (図 12)。バイオマスバーニングはサヘル地域と南部地域のサバンナ、サバンナ(woody) で多く発生していた。

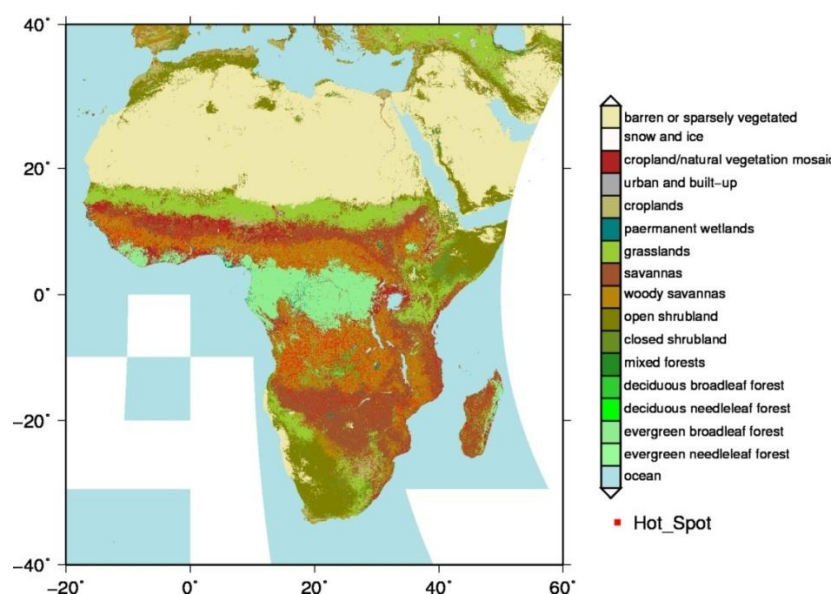


図 12: 土地被覆分類とバイオマスバーニングの発生位置。上の色から順に裸地、雪氷、耕作地・自然植生、都市、耕作地、湿地、草地、サバンナ、サバンナ(woody)、疎な灌木地、密な灌木地、混合林、落葉広葉樹林、落葉針葉樹林、常緑広葉樹林、常緑針葉樹林、海となっている。白い部分はデータがないところである。土地被覆分類は 2008 年のデータを使用している。赤い点が 2009 年のバイオマスバーニングの全発生場所である。

土地被覆分類(裸地を除く)に基づいて、土地被覆分類中におけるバイオマスバーニングの発生率を調べた結果を図 13 に示す。2009 年の一年間で発生したバイオマスバーニングを土地被覆分類ごとにカウントし、その占有面積で割ることで、その土地被覆分類におけるバイオマスバーニングの発生率を求めた。土地被覆分類の面積占有率を表 3 に示す。裸地を除くとサバンナ、サバンナ(woody) の占有面積率が約 19%, 23%と高いことがわかる。

土地被覆分類におけるバイオマスバーニングの発生率の平均値は約 0.33%であった。その中でサバンナ、サバンナ(woody) における発生率は約 1.26%, 0.63%と高かった。また落葉広葉樹林も約 1.20%とサバンナ(woody) に次いで発生率が高かった。サバンナ、サバンナ(woody) はア

フリカにおける占有面積率も高かったが、落葉広葉樹林は専有面積率が低いので、落葉広葉樹林におけるバイオマスバーニングの発生総数は多くないと考えられる。一方で灌木地は約 0.03%, 0.01%と極端に発生率が低かった。以上のように土地被覆分類によって、バイオマスバーニングが発生しやすい、発生しにくいという特徴が存在し、サバンナ、サバンナ(woody) で最もバイオマスバーニングが発生していたことが示された。また、バイオマスバーニングは土地被覆分類だけではなく、様々な気象、環境の要素による影響を受ける値であると考えられる。そこで、降水量や土壌水分量、植生指数 NDVI との相関と、季節変化を調べるためにデータによる解析を行った。

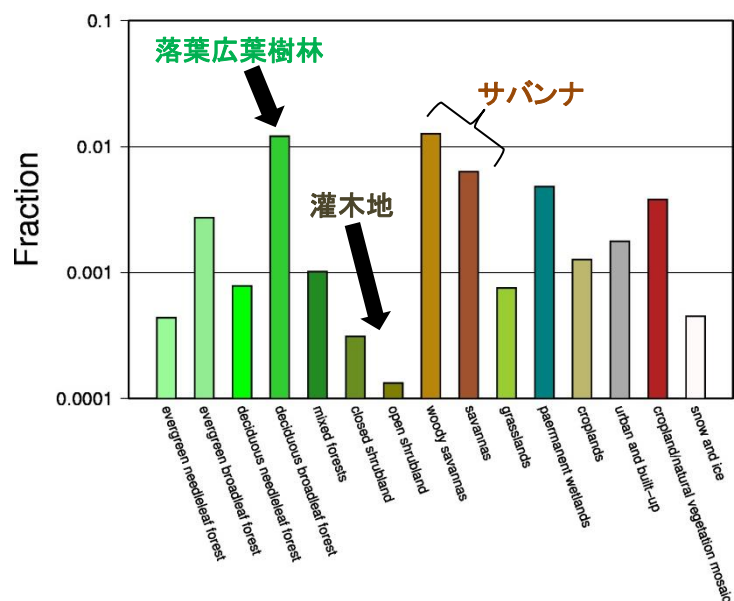


図 13: 土地被覆分類ごとのバイオマスバーニングの発生率. 2009 年の全バイオマスバーニングの発生率. 横軸は土地被覆分類. 左から順に常緑針葉樹林, 常緑広葉樹林, 落葉針葉樹林, 落葉広葉樹林, 混合林, 密な灌木地, 疎な灌木地, サバンナ(woody), サバンナ, 草地, 湿地, 耕作地, 都市, 耕作地・自然植生, 雪氷となっている. 縦軸はその土地被覆分類の総面積中のバイオマスバーニングの発生率である. 対数で示している.

表 3: アフリカにおける土地被覆分類の面積占有率. 単位は%. その他には雪氷, 耕作地・自然植生, 都市, 耕作地, 湿地, 密な灌木地, 混合林, 落葉広葉樹林, 落葉針葉樹林, 常緑針葉樹林が含まれる. 2008 年の土地被覆分類を使用.

土地被覆分類	面積占有率(裸地以外)
サバンナ(woody)	23
サバンナ	19
草原	16
疎な灌木地	16
常緑広葉樹林	11
その他	15

3.1.2 バイオマスバーニングの火災強度と地域の環境特性の関係

火災強度 FRP, 降水量, 土壌水分量の月平均値と植生指数 NDVI の 8 日間平均値から, アフリカ全土の平均値をそれぞれ算出し, 時系列変化を調べた(図 14). 降水量は 2009 年 9 月までのデータを使用した. アフリカ全土の平均値では, 緩やかな季節変化や要素間の相関があるようにも見えるが, はっきりとした特徴は見えにくかった.

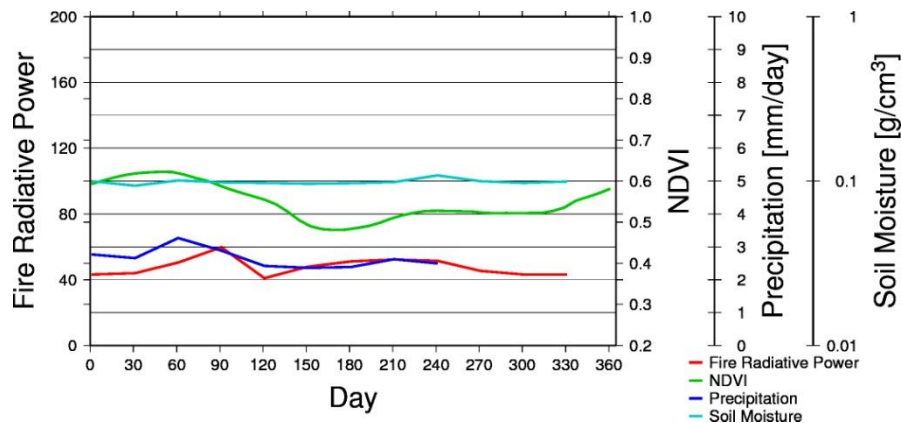


図 14: 火災強度 FRP, 降水量, 土壌水分量の月平均値と植生指数 NDVI の 8 日間平均値のアフリカ全土の平均値の時系列変化. 赤が FRP, 単位は MW, 緑が NDVI, 青が降水量, 単位は mm/day, 水色が土壌水分量, 単位は g/cm³. 横軸が時間, 単位は日. 2009 年一年間のデータ.

そこで, 図 12 より, 土地被覆分類が緯度によって異なるため, FRP, 降水量, 土壌水分量, NDVI の緯度ごとの帯状平均値を求め, 時系列変化を調べた(図 15) ところ, 全ての要素において季節変化が見られた.

NDVI と降水量, 土壌水分量には正相関が見られ, それらの値と FRP ではおおそ逆相関が見られた. ただし, この図からだけではバイオマスバーニングによって NDVI が低いのか, NDVI が低い時に FRP が強いのか判断できない. また, 降水量や土壌水分量が低い時に, FRP は低くなった. ただし, 緯度によってバイオマスバーニングには強弱があり, 一様に逆相関があるとは言えない. それは図 13 で見られた土地被覆分類によるバイオマスバーニングの発生率の特徴が関係していると考えられる. そこで, 図 15 では赤道の南北で異なる特徴が見られたため赤道で南北に 2 分割し, FRP, 降水量, 土壌水分量, NDVI の土地被覆分類ごとの平均値を求め, 時系列変化を調べた. ここで特徴的な結果が見られた密な灌木地とサバンナの結果を図 16 に示す.

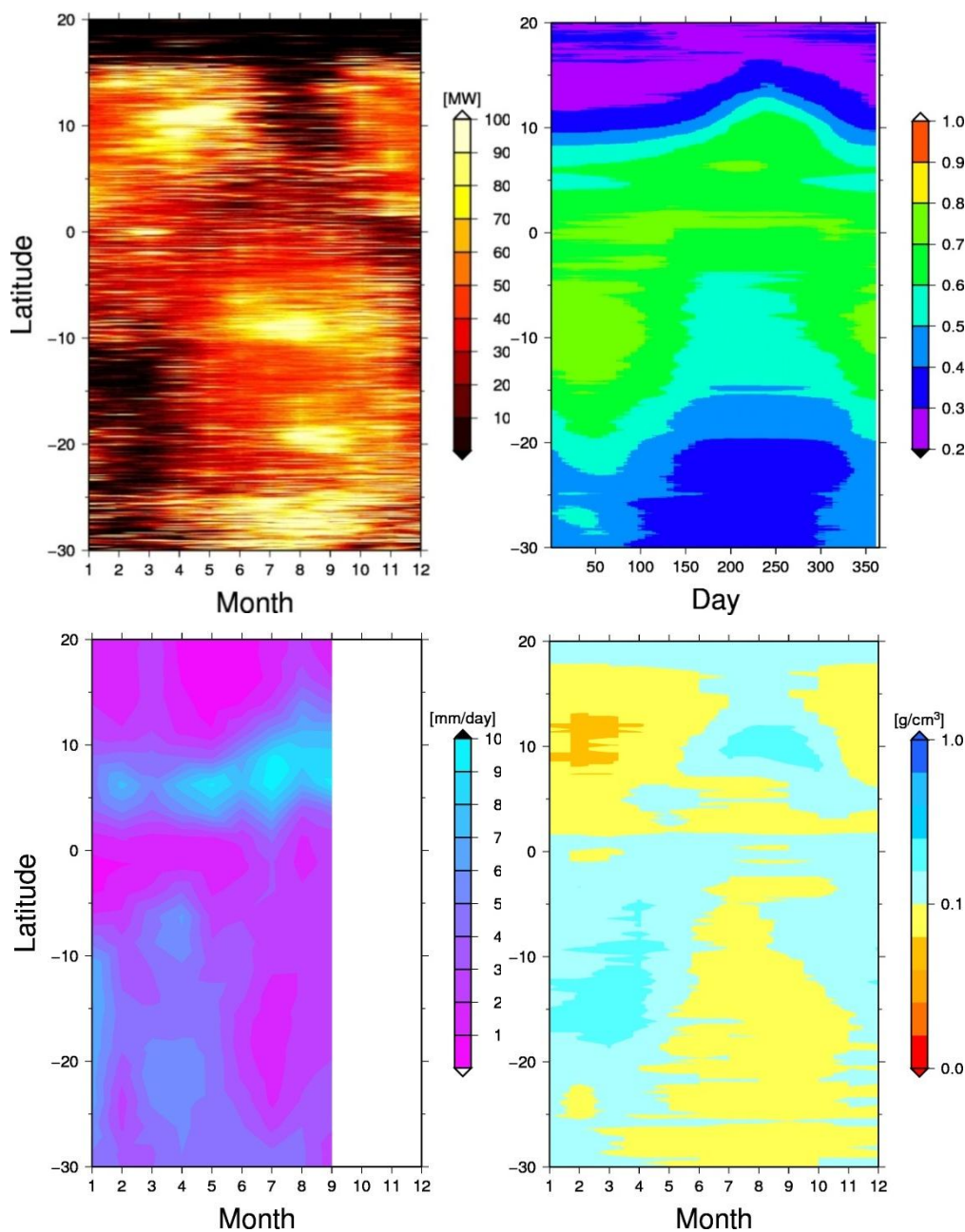


図 15:FRP, 降水量, 土壌水分量の月平均値とNDVIの8日間平均値の緯度ごとの带状平均値の時系列変化. 左上図, FRP. 単位は MW. 横軸が時間で単位は月, 縦軸は緯度で単位は度. 右上図, NDVI. 横軸が時間で単位は日. 左下図, 降水量. 単位は mm/day. 右下図, 土壌水分量. 単位は g/cm³. すべて 2009 年一年間のデータを使用.

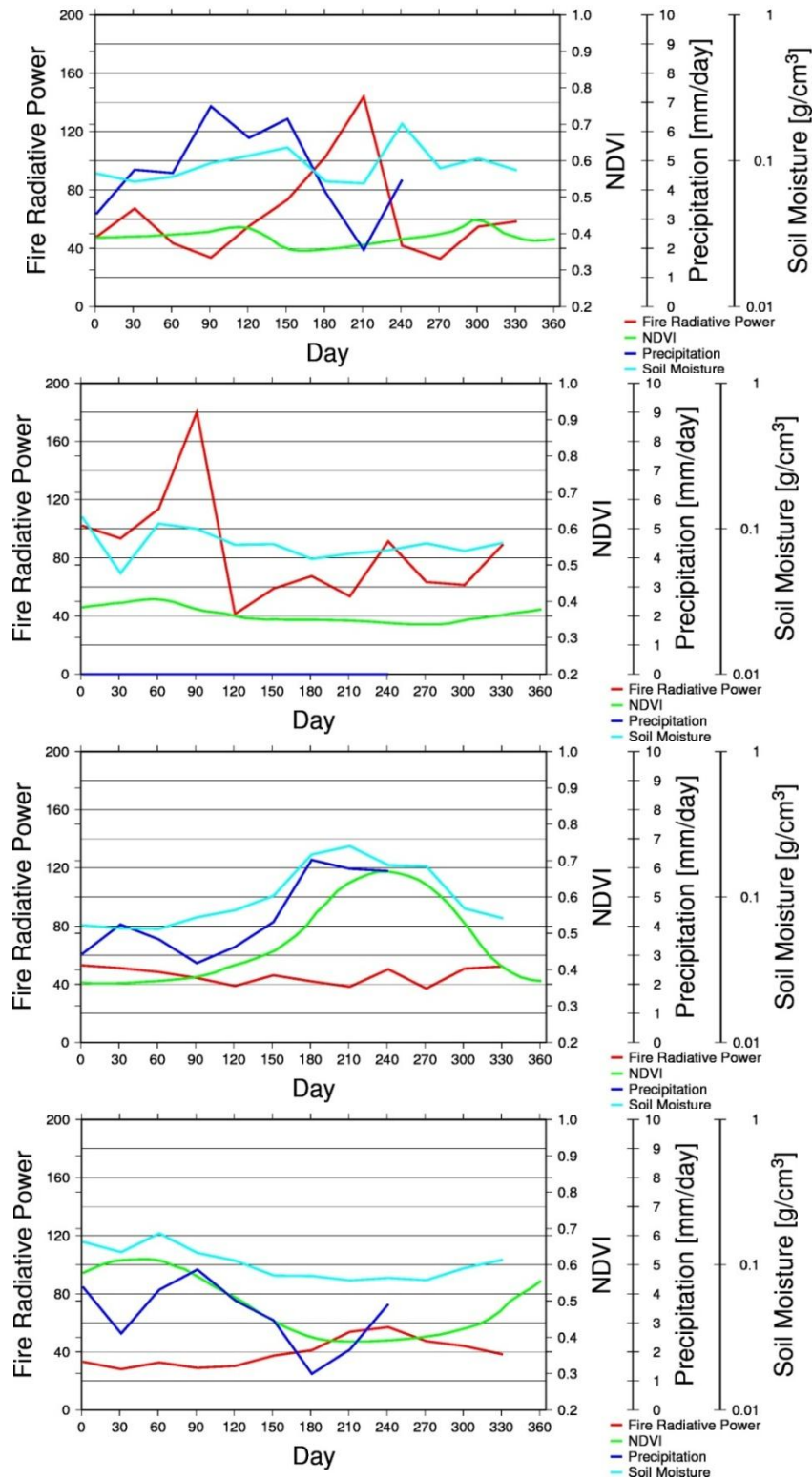


図 16:FRP, 降水量, 土壌水分量の月平均値と NDVI の 8 日間平均値のそれぞれの南北で分類した土地被覆分類ごとの平均値の時系列変化. 一番上の図から北半球の密な灌木地, 南半球の密な灌木地, 北半球のサバンナ, 南半球のサバンナ. 赤が FRP, 単位は MW, 緑が NDVI, 青が降水量, 単位は mm/day, 水色が土壌水分量, 単位は g/cm³. 横軸が時間, 単位は日. 2009 年一年間のデータ.

火災の強度を表す FRP は、アフリカ全土では平均約 47.7MW であったが、南半球の密な灌木地では最大 180.0MW と高かった。密な灌木地ではバイオマスバーニングの発生率は低い、一度燃えると大量に燃えるという特徴が示唆される。また北半球では降水量との逆相関も見られた。

サバンナでは南北半球ともに NDVI、降水量、土壌水分量は季節変化があり、相関が見られた。しかし、FRP は南北半球ともに季節変化があまり見られず比較的一定であり、平均約 39.4MW、46.1MW であった。したがって、サバンナではバイオマスバーニングは頻繁に発生するが、一度に燃える量は少ないという特徴があることが分かった。

これらのデータ解析により、土地被覆分類ごとのバイオマスバーニングの特徴を把握した。バイオマスバーニングによって燃えやすい、燃えにくい土地被覆分類が存在することが分かった。また、気象、環境の要素による影響を受ける地域もあれば、影響を受けない地域も存在した。

3.2 焼失割合 η の推定 I

3.2.1 バイオマスバーニングによる CO₂ 放出量の推定

本研究では 2.1 節で示した 3 つの方法を用いてバイオマスバーニングによる CO₂ 放出量の計算を行った。

- ①. **NDVI 法**: 東京大学生産技術研究所の竹内渉先生により植生指数 NDVI と植生モデル VISIT の地上部バイオマス量の関係から求められた係数 9.8 を NDVI に掛け合わせ、バイオマス量を推定した。そのバイオマス量に、MODIS センサーにより観測された火災日時から求めた燃焼面積比(図 17) を掛け合わせた。加えて、GFEDv2 の燃焼割合 CC と燃焼効率 EF (0.8 と仮定) の積をバイオマスの焼失割合 η とし、掛け合わせ CO₂ 放出量を計算した(図 18, 左図)。アフリカ全土で放出された CO₂ は 3.06GtCO₂/yr であった。また、焼失割合 η を 0.3, 0.5, 0.7 と仮定し計算を行ったところ、それぞれ 1.58, 2.63, 3.68Gt CO₂/yr であった。
- ②. **VISIT 法**: 植生モデル VISIT により推定された地上部バイオマス量に同様の燃焼面積比と、バイオマスの焼失割合 η を掛け合わせ、CO₂ 放出量を計算した(図 18, 中央図)。アフリカ全土で放出された CO₂ は 18.10GtCO₂/yr であった。同様に焼失割合 η を変え、計算を行ったところ、10.25, 17.08, 23.91Gt CO₂/yr であった。
- ③. **FRP 法**: サバンナの植生を実験的に燃やし、観測された火災強度 FRP と CO₂ 放出量の関係から求められた係数 0.464×10^{-3} (Wooster et al., 2005) を FRP に掛け合わせ、燃焼時間を 1 時間と仮定し、CO₂ 放出量を計算した(図 18, 右図)。アフリカ全土で放出された CO₂ は 6.19GtCO₂/yr であった。

これら推定された 3 種類の CO₂ 放出量の年積算値は大きく異なっていた。そこで、それぞれの CO₂ 放出量を詳しく比較した。

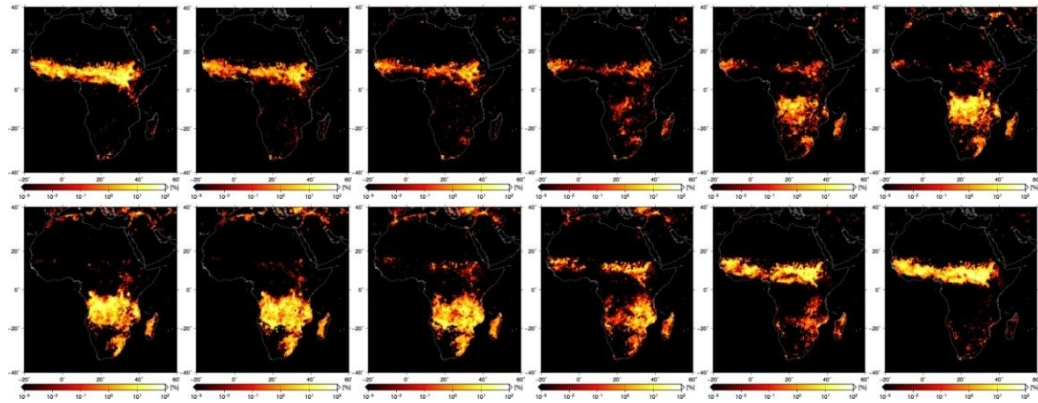


図 17: MODIS センサーにより観測された火災日時から計算した燃焼面積比. 単位は%. 左上から順に 2009 年 1 月から 12 月までのデータ.

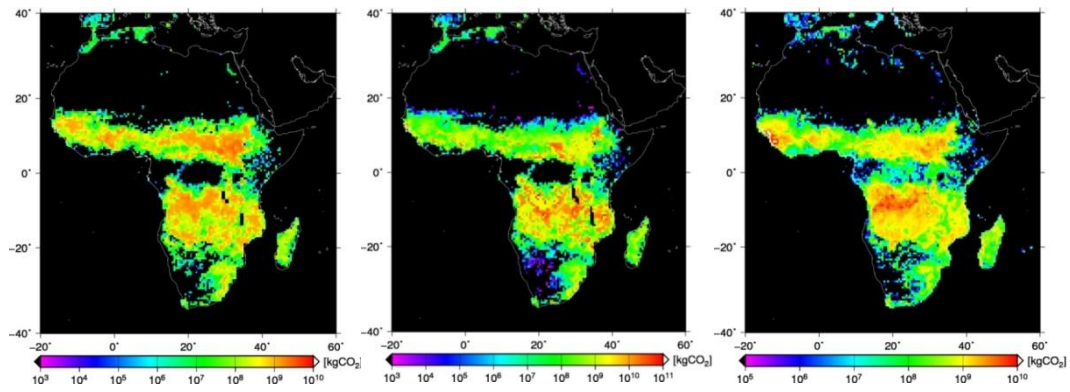


図 18: 左図, ①NDVI 法で推定された CO_2 放出量, 中央図, ②VISIT 法, 右図, ③FRP 法. 単位は kg CO_2 . 2009 年一年間の積算値となっている. 焼失割合 η は GFEDv2 の燃焼割合 CC の値に 0.8 と仮定した燃焼効率 EF を掛け合わせた値を用いた.

推定された 3 種類の CO_2 放出量に④GFEDv3 の CO_2 放出量(GFED 法)を加え, 4 つの CO_2 放出量のアフリカ全土における積算値を求め, 月別の比較を行った結果を図 19 に示す. その結果, 季節変化に類似性は見られるものの, 絶対値に大きな差があった. また焼失割合 η の値を 0.3, 0.5, 0.7 と変えると, この値に比例した変化が見られた. しかし, 手法の差と比較すると差が小さく, 焼失割合 η だけではなく手法そのものにも大きな不確定性が存在することを示す結果となった. したがって, このような 4 つの手法間の差が, 大気中 CO_2 気柱濃度にどの程度影響を与えるかを調べるために, 推定した CO_2 放出量を導入した物質輸送モデル NICAM-TM の計算結果と GOSAT 衛星による観測結果を比較する. 次節で示す CO_2 の大気中気柱濃度の計算においては, 焼失割合 η として GFEDv2 で設定されている燃焼割合 CC と燃焼効率 EF (0.8 と仮定) の積を焼失割合 η と仮定し, 大気中 CO_2 気柱濃度の計算を行うこととする. 結果は, 次小節に示す.

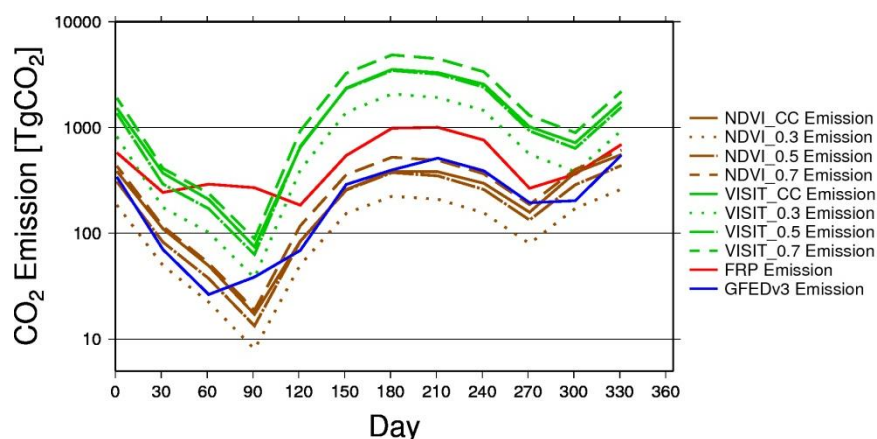


図 19: 推定された 3 種類の CO_2 放出量に加え GFEDv3 の CO_2 放出量のアフリカ全土における積算値の月平均値の比較。横軸が時間で単位は日。縦軸が全 CO_2 放出量で単位が TgCO_2 である。対数表示となっている。茶色が①NDVI 法で推定された CO_2 放出量。緑が②VISIT 法。赤が③FRP 法。青が④GFED 法。実線は焼失割合を GFEDv2 の焼失割合 CC の値に 0.8 と仮定した燃焼効率 EF を掛け合わせた値、ダッシュ線は 0.7、ダッシュ点線は 0.5、点線は 0.3 に変えて計算したもの。2009 年一年間の結果を示す。

3.2.2 推定された CO_2 放出量の輸送計算

4 種類の方法により得られた CO_2 放出量を物質輸送モデル NICAM-TM に導入し、大気中 CO_2 気柱濃度の計算を行った。アフリカ以外の地域からのバイオマスバーニングによる CO_2 放出量は GFEDv3 の CO_2 放出量を使用した。また、バイオマスバーニング起源の CO_2 の他に、1) 植生による放出・吸収、2) 海洋による放出・吸収、3) 化石燃料起源の放出、合わせて 4 つの放出源、吸収源を加え、濃度計算を行った。

NICAM-TM は濃度 0 から計算しているため、バックグラウンド濃度を考慮し、380ppm を加え計算した。バックグラウンド濃度には 4 年分の積分を行うため、気象庁の気候変動監視レポートと TCCON (Total Carbon Column Observing Network) の観測値の 2005 年の CO_2 濃度を考慮した。TCCON は地上観測点で観測された大気中 CO_2 気柱濃度のデータを収集している研究者組織である。図 20 に計算された大気中 CO_2 気柱濃度を示す。

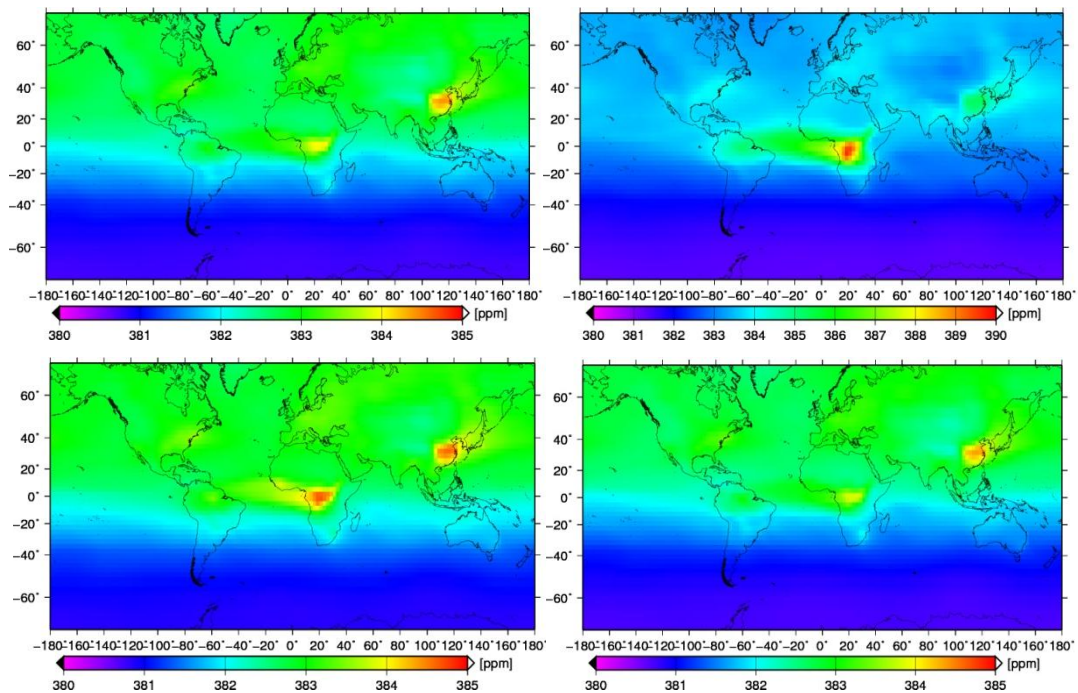


図 20:物質輸送モデル NICAM-TM を用いて推定した大気中の CO_2 気柱濃度. 左上図, ①NDVI 法を用いた計算結果, 右上図, ②VISIT 法, 左下図, ③FRP 法, 右下図, ④GFED 法. バックグラウンド濃度に 380ppm を加えた. 単位は ppm. 2009 年一年間の平均値.

①NDVI 法を用いた大気中 CO_2 気柱濃度の年平均値は全球平均で 382.0ppm, ②VISIT 法は 382.9ppm, ③FRP 法は 382.2ppm, ④GFED 法は 382.0ppm であった. ①NDVI 法と④GFED 法は同等の濃度となった. また, ②VISIT 法が最も濃度が高くなった. しかし, CO_2 気柱濃度で比較すると放出量と比べ, その差はあまり大きく見えないため, 全 CO_2 放出・吸収量のうちバイオマスバーニングによる CO_2 放出量の寄与率を調べる解析を行った. ここでは, バイオマスバーニングのみに起因した大気中 CO_2 気柱濃度の時間的な変動幅と, 全 CO_2 放出・吸収量に起因する変動幅の割合を示す. つまり, バイオマスバーニングのみに起因した大気中 CO_2 気柱濃度の月ごとの各グリッドの値における標準偏差と, 全 CO_2 放出・吸収量の標準偏差の割合として求めた結果を図 21 に示す.

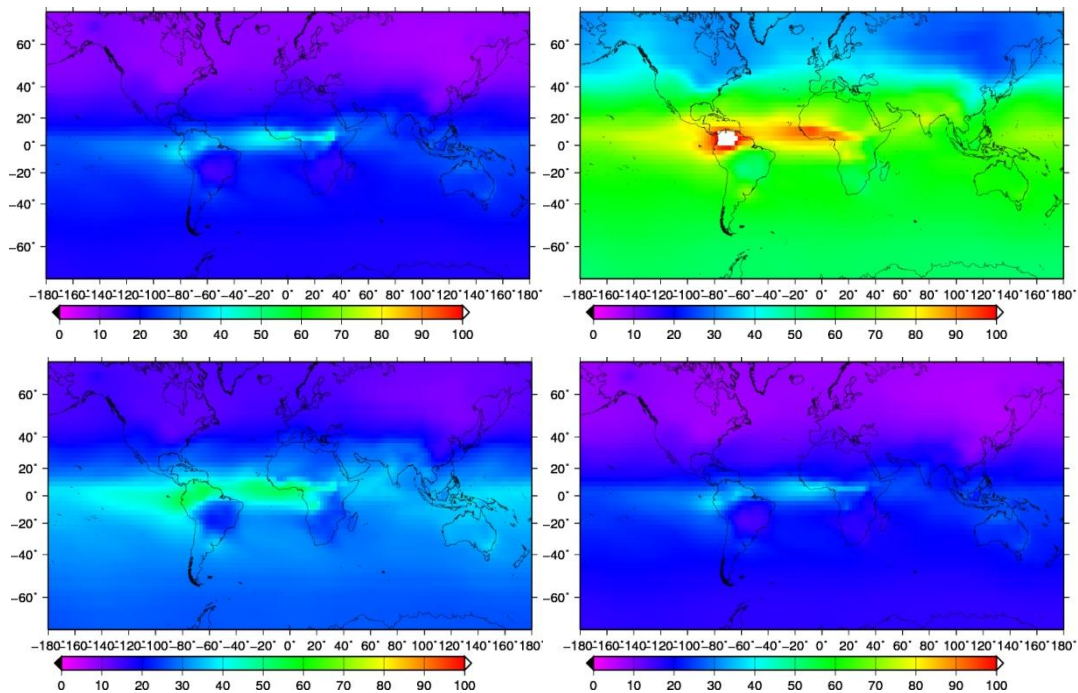


図 21:物質輸送モデル NICAM-TM により推定されたバイオマスバーニングのみに起因した大気中 CO_2 気柱濃度の時間的な変動幅と、全 CO_2 放出・吸収量に起因する変動幅の割合. 左上図, ①NDVI 法を用いた計算結果, 右上図, ②VISIT 法, 左下図, ③FRP 法, 右下図, ④GFED 法. 単位は%. 2009 年一年間の月ごとの各グリッドの値における標準偏差をそれぞれ求め, 割合で示した.

これを見ると, 標準偏差の割合は全球平均で①NDVI 法の場合 17.6%, ②VISIT 法は 53.2%, ③FRP 法は 25.9%, ④GFED 法は 16.6%であった. ②VISIT 法ではバイオマスバーニングのみに起因する変動幅が全体の約半分を占めるという結果が得られた.

以上を踏まえ, 計算された大気中 CO_2 気柱濃度と衛星による観測値との比較を行った.

3.2.3 大気中 CO_2 気柱濃度の推定値と観測値の比較

温室効果ガス観測技術衛星 GOSAT により観測された大気中 CO_2 気柱濃度を図 22 に示す.

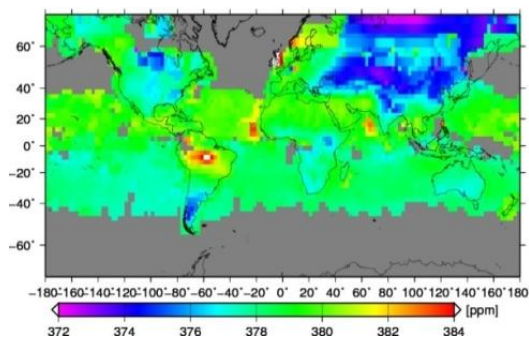


図 22:GOSAT 衛星により観測された大気中 CO_2 気柱濃度. 単位は ppm. 2009 年 4 月, 6 月から 12 月の平均値.

GOSAT により観測された全球平均 CO_2 気柱濃度は 378.19ppm であった。しかし、国立環境研究所 NIES によると、GOSAT の CO_2 気柱平均濃度は検証データに比べて約 7~10ppm 低いと言われている。そこで、全球の CO_2 気柱濃度に 7ppm を加えた。その値を TCCON の観測結果と検証したところ、GOSAT の観測結果が TCCON の観測結果と非常に近い値となった。したがって GOSAT の観測結果に 7ppm を加えて、推定値と比較を行う。

大気中 CO_2 気柱濃度の GOSAT による観測値と物質輸送モデル NICAM-TM により計算された推定値を比較するため GOSAT のデータの存在するところのみ両者の年平均値を求め、差を取った。結果を図 23 に示す。

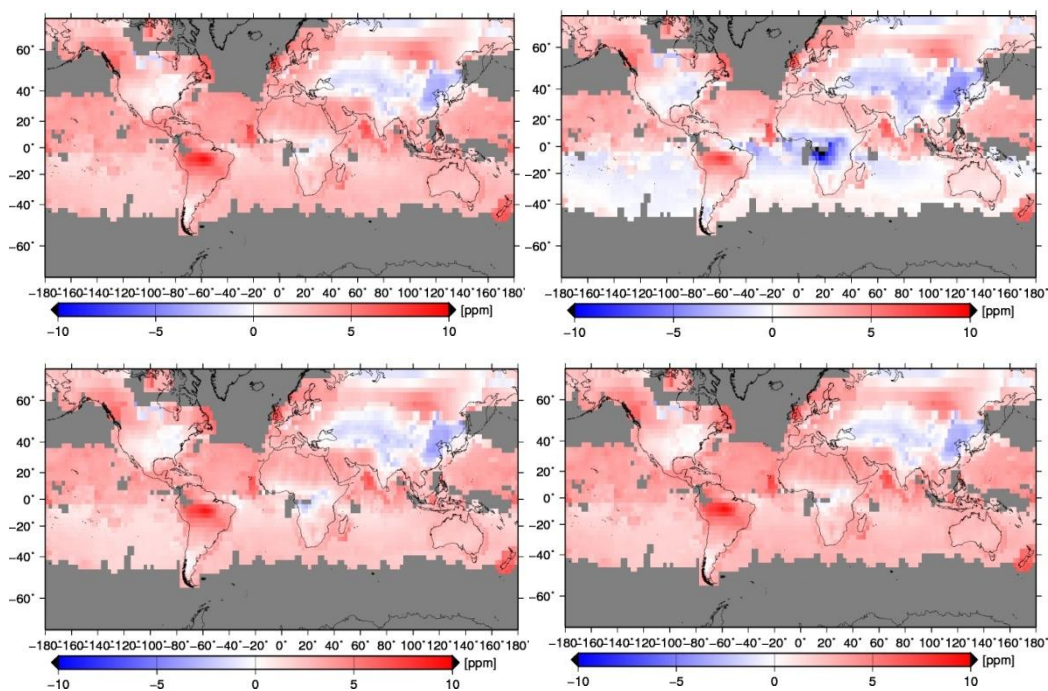


図 23: 大気中 CO_2 気柱濃度の GOSAT 衛星による観測値と物質輸送モデル NICAM-TM による推定値の差。左上図, ①NDVI 法を用いた計算結果, 右上図, ②VISIT 法, 左下図, ③FRP 法, 右下図, ④GFED 法。単位は ppm。2009 年一年間のうち GOSAT のデータがある時の年平均値の差。観測値から推定値を引いている。

全体的に NICAM-TM による推定値が過小評価傾向であると言えるが、地域により過大評価であるところも見られた。①NDVI 法との差は全球平均で 2.47ppm, ②VISIT 法との差は 1.02ppm, ③FRP 法との差は 2.21ppm, ④GFED 法との差は 2.52ppm であった。したがって、②VISIT 法が GOSAT の観測値と最も近いという結果が得られた。この値で見ると、②VISIT 法で推定された CO_2 放出量に基づいて計算された大気中 CO_2 気柱濃度は、④GFED 法を用いた場合よりも、観測値との差が小さいという結果となった。

しかし、全球平均では②VISIT 法が最も近い値となったが、アフリカにおいて、GOSAT による観測結果の過大過小の差が地域的に見られる。そこで、GOSAT による観測値と NICAM-TM により計算された推定値の各グリッド点における相関関係を調べるため、散布図に表した(図 24)。また、

緯度 20° , -20° を境界に緯度 20° 以下の熱帯地域と、それ以外の中・高緯度地域、そして対象地域のアフリカに分類して、比較を行った。

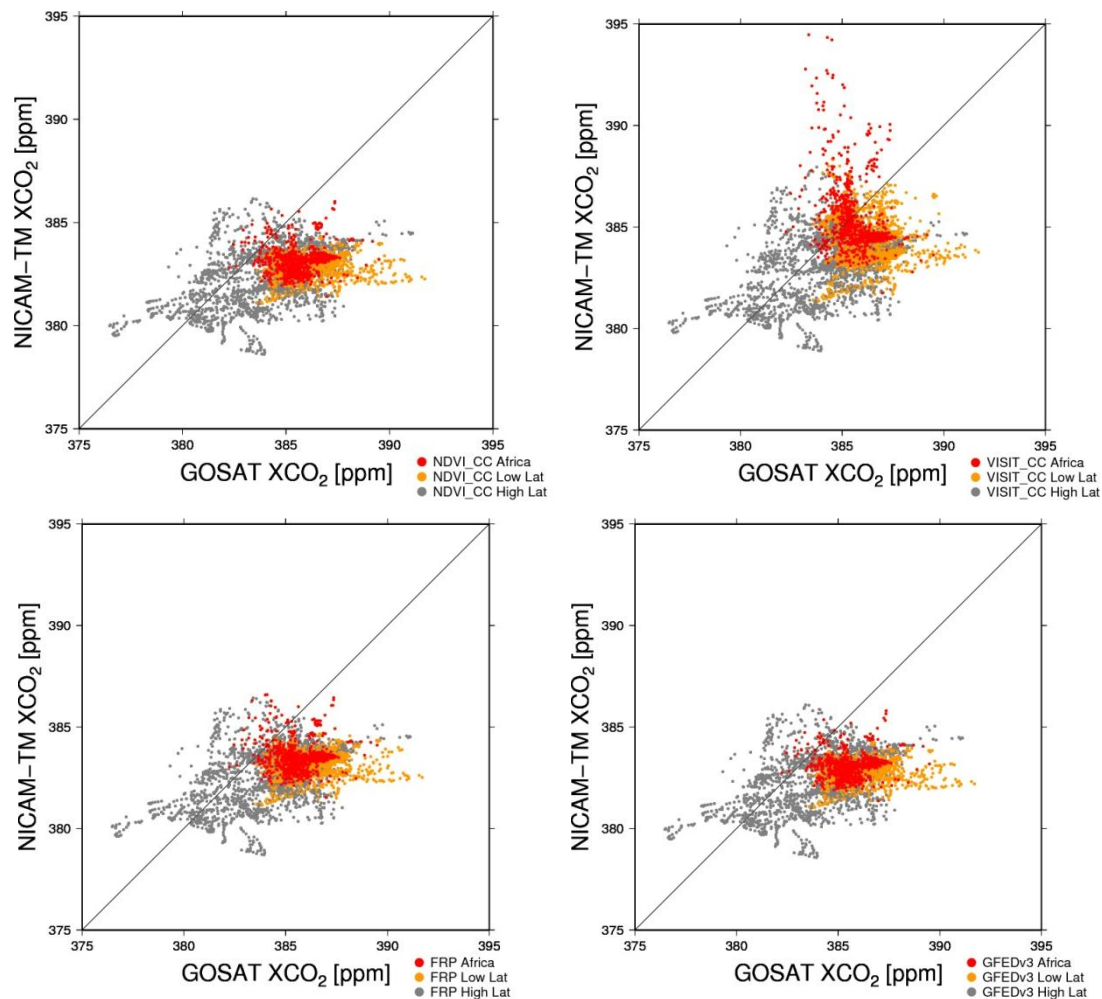


図 24: 大気中 CO_2 気柱濃度の GOSAT 衛星による観測値と物質輸送モデル

NICAM-TM による推定値の比較散布図. 左上図, ①NDVI 法を用いた計算結果との比較, 右上図, ②VISIT 法との比較, 左下図, ③FRP 法との比較, 右下図, ④GFED 法との比較. グレーの点は緯度 20° 以上の中・高緯度地域, オレンジの点は緯度 20° 以下の熱帯地域, 赤の点はアフリカにおける大気中 CO_2 気柱濃度である. 横軸が観測値, 縦軸が推定値. 単位は ppm. 2009 年一年間のうち GOSAT のデータがある時の年平均値を使用.

全球で見ると, 比較的中央に点が集まっているものの全体的に NICAM-TM による推定値が過小評価傾向にある. 特に地域別に見ると, アフリカや熱帯地域で顕著であった. また, ②VISIT 法との比較では, 他と比べて熱帯地域の推定値の過小評価が小さいが, やや大きめのばらつきが見られた. これはアフリカの大気中 CO_2 気柱濃度の推定値が過大評価のためである. 相関を定量的に調べるために全球と分類した地域それぞれにおける相関係数を求めた結果を表 4 に示す. 全球において相関係数が最も 1 に近い値となったのは③FRP 法との比較結果であった. 分類した

地域別に見ると、中・高緯度地域においてはどの比較結果も類似した結果となった。また、熱帯地域、アフリカにおいてはどの比較結果も相関が悪かった。複数の比較結果をまとめると、相関係数は悪いのだが、絶対量と空間分布の再現性から②VISIT 法が最も良い結果であると判断でき、この結果は④GFED 法よりも GOSAT の観測結果に近かった。したがって、各グリッドにおける GOSAT による観測値と NICAM-TM による推定値は整合性が悪く、モデルによる空間的な濃度分布の再現性にまだ改善の余地があると言える。ただし、GOSAT の観測結果にも不確実性が多く含まれることから、より高次元での検証が今後必要となる。

表 4: 大気中 CO_2 気柱濃度の GOSAT 衛星による観測値と物質輸送モデル

NICAM-TM による推定値の相関係数。緯度 20° 、 -20° を境界に緯度 20° 以下の熱帯地域とそれ以外の中・高緯度地域に分類。また、アフリカ地域のみ結果も示す。

相関係数	全球	熱帯地域	中・高緯度地域	アフリカ
NDVI による方法	0.38	0.04	0.46	0.11
VISIT による方法	0.29	-0.31	0.43	-0.33
FRP による方法	0.68	-0.06	0.44	0.01
GFEDv3	0.55	0.05	0.48	0.19

3.3 焼失割合 η の推定 II

3.3.1 火災強度と植生モデルのバイオマス量を用いた焼失割合 η の推定

2.1 節の手法の説明の最後に示した通り、③FRP 法を用いた CO_2 放出量の推定では、バイオマス量の推定を介さないため、これによる CO_2 放出量と、植生モデル VISIT の地上部バイオマス量と燃焼面積比を掛け合わせた値の比率から焼失割合 η の推定が可能である。この方法で推定した焼失割合 η を図 25 に示す。その結果、焼失割合 η は同じ土地被覆分類の中でも場所によって 0.2 から 1.2 を超える値を示した。1.0 を超える値を示す場合には、現存するバイオマス量以上の CO_2 放出量があることを意味し、③FRP 法を用いた CO_2 放出量が過大評価の可能性はあるが、逆に VISIT の地上部バイオマス量が過小評価の可能性も考えられる。また、焼失割合 η は土地被覆分類だけではなく、様々な気象、環境の要素による影響を受ける値であると考えられる。そこで、降水量や土壌水分量、植生指数 NDVI との相関と、季節変化を調べた。

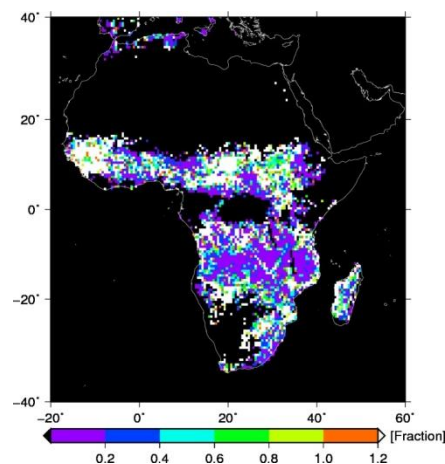


図 25: 火災強度 FRP と植生モデル VISIT のバイオマス量を用いて推定された焼失割合 η . ③FRP 方法を用いた CO_2 放出量と VISIT の地上部バイオマス量と燃焼面積比を掛け合わせた値の比率. 2009 年一年間の平均値である.

3.3.2 推定された焼失割合 η と地域の環境特性の関係

3.3.1 節で示した焼失割合 η , 火災強度 FRP, 降水量, 土壌水分量に加え, GFEDv2 の燃焼割合 CC と燃焼効率 EF (0.8 と仮定) の積の月平均値と植生指数 NDVI の 8 日間平均値から土地被覆分類ごとの平均値をそれぞれ算出し, 時系列変化を調べた. しかし, どの土地被覆分類においても 1 を超える焼失割合 η の値が多く, 焼失割合 η が 1 を超えずに示されたのは南半球における落葉広葉樹林のみであった. したがって, 南半球におけるサバンナと広葉落葉樹林を示す(図 26). サバンナでは焼失割合 η が 1 を超えてしまい, どの季節においても③FRP 法の CO_2 放出量が過大評価であった. しかし, GFEDv2 の焼失割合 η で見られなかった季節変化が, 本研究で推定した焼失割合 η に見られ, 降水量が多い時に, 焼失割合 η が小さくなる傾向が見られた. また, 落葉広葉樹林でも同様に GFEDv2 で用いられた焼失割合 η よりも季節変化が見られ, NDVI, 土壌水分量が低くなった後に焼失割合 η が大きくなる変化が見られた. したがって, 焼失割合 η の時間変化や, 場所ごとの違い, さらに環境特性など他の要因による違いを検出できる可能性が示された.

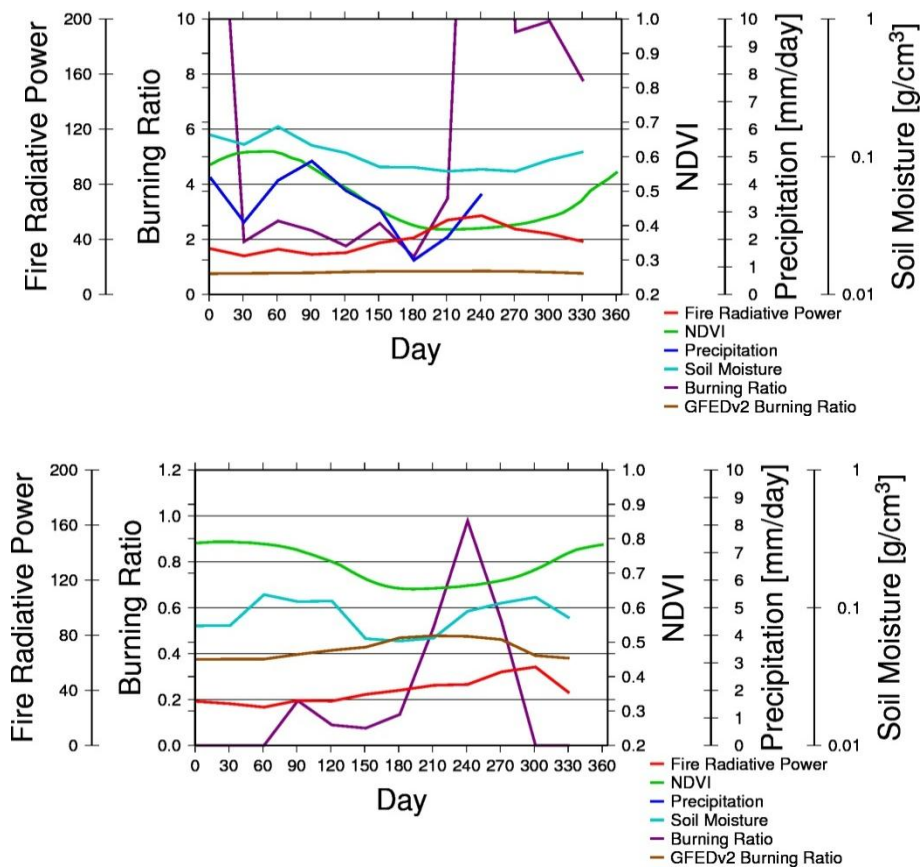


図 26: 本研究で推定した焼失割合 η , 火災強度 FRP, 降水量, 土壌水分量, GFEDv2 の燃焼割合 CC と燃焼効率 EF (0.8と仮定) の積の月平均値と植生指数 NDVI の 8 日間平均値の南半球サバンナと落葉広葉樹林における平均値の時系列変化. 紫が本研究で推定した焼失割合 η , 赤が FRP, 単位は MW, 緑が NDVI, 青が降水量, 単位は mm/day, 水色が土壌水分量, 単位は g/cm³, 茶色が GFEDv2 の燃焼割合 CC と燃焼効率 EF (0.8と仮定) の積. 横軸が時間, 単位は日. 2009 年一年間のデータ. 上図, サバンナ. 焼失割合 η の値は 0 から 10. 下図, 落葉広葉樹林. 焼失割合 η の値は 0 から 1.2 となっている.

4 考察

4.1 バイオマスバーニングの発生位置と発生率に関して

アフリカではサバンナ、サバンナ(woody) で最もバイオマスバーニングが発生していた。したがって、アフリカからのバイオマスバーニングによる CO_2 放出量の寄与を見積もるにはサバンナ、サバンナ(woody) からの放出量を正確に見積もることは重要と考えられる。

サバンナでは、火災強度 FRP による季節変化があまり見られなかった。したがって、③FRP 法による CO_2 放出量の推定において季節変化が他の推定方法と比較して小さかったのは、これが原因である可能性がある。また、サバンナにおいて FRP に顕著な変化が見られなかったため、気象、環境の要素による影響を焼失割合 η が受けていない可能性がある。

北方林のような背の高い木が燃える場合には焼失割合 η の影響は非常に大きいと考えられるが、一般に、サバンナのような背の低い草では焼失割合 η が比較的大きな一定値を取るため、その影響はあまりないと考えられる。したがって本研究はアフリカを対象としたため、サバンナの寄与がほとんどであることより、焼失割合 η の影響が現れなかった可能性がある。背の高い木が燃える北方の地域では本研究がより有効的に利用されることが考えられる。

4.2 バイオマスバーニングによる CO_2 放出量の推定に関して

①NDVI 法による CO_2 放出量の推定において、④GFED 法と近い結果が得られたのはサバンナのような背の低い草が多く燃えていたからであったと考えられる。背の低い草ならば NDVI が直接バイオマス量と対応すると考えられる。また MODIS センサーによって観測された火災日時は火災強度 FRP で見られた常緑広葉樹林のバイオマスバーニングはほとんどないと推定している。したがって、NDVI によるバイオマス量と火災日時から計算された燃焼面積比を掛け合わせることで GFEDv3 と近い値をとったと考えられる。

本研究では GFEDv2 の燃焼割合 CC と燃焼効率 EF (0.8 と仮定) の積を焼失割合 η と仮定して行った推定結果と、焼失割合 η を 0.5 と仮定して行った推定結果は非常に類似していた。したがって、GFEDv2 の燃焼割合 CC と燃焼効率 EF (0.8 と仮定) の積が燃えた場合に、焼失割合 η が 0.5 となるような植生分類の場所で多くバイオマスバーニングが発生していると考えられる。

手法の違いによる CO_2 放出量の絶対値に差異があったことから、バイオマスバーニングによる CO_2 放出量推定では焼失割合 η よりも手法の違い、主にバイオマス量の推定値によって推定量が大きく影響されることが示された。バイオマス量は現在ではモデルによる推定方法によってバイオマス量を求めるか、統計情報を扱うしか方法はないため、その不確実性が大きいと考えられる。統計的に表されたデータセット IIASA (Kindermann et al., 2008) は存在するが、2008 年の一年しかデータが存在しない。また、衛星観測による方法(Baccini et al., 2008) も存在するが、方法はまだ確立されていなく、一般的にデータが普及していない。しかし、2014 年打ち上げ予定の GCOM-C(Global Change Observation Mission - Climate) 衛星の SGLI(Second Generation Global Imager) センサーには多方向観測センサーが搭載予定であり、それによりバイオマスのボ

リウムを観測することができると期待されている。この観測値を利用することにより、バイオマス量の不確定性を減らすことができると考えられる。

CO₂ 放出量に比例して焼失割合 η の影響も大きくなった。したがって、NDVI を用いた方法では焼失割合 η はほとんど影響がなかったが、植生モデル VISIT を用いた方法のように CO₂ 放出量が多い時は非常に重要なパラメータとなると考えられる。

VISIT のもとになっているモデルである Sim-cycle を用いたボトムアップアプローチによる CO 放出量の推定では GFEDv2 と比較すると、本研究の結果とは逆に Sim-cycle の推定値の方が過小評価であった(Ito et al, 2007)。ただし、その原因は CO₂ と CO の違いに起因することも考えられる。今後の課題である。

4.3 大気中 CO₂ 気柱濃度の推定値と観測値の比較に関して

アフリカからの寄与は図 21 に示したように全球に大きく影響することが示された。

バイオマスバーニングはイベント的であるので、バイオマスバーニングによる CO₂ 放出量の変動幅が大きいと考えられる。特に 2009 年はエルニーニョであったため、変動幅が大きかったと考えられる。平年では変動幅はより少ない可能性が考えられる。

バイオマスバーニングのみに起因した大気中 CO₂ 気柱濃度の時間的な変動幅と、全 CO₂ 放出・吸収量に起因する変動幅の割合を見たところ、バイオマスバーニングのみに起因した大気中 CO₂ 気柱濃度の変動幅が大きいことが示された。したがって季節変化による大気中 CO₂ 気柱濃度の変動はバイオマスバーニングに寄与されることが多く、変動幅を理解することは重要であると考えられる。また、②VISIT 法による変動幅の割合のうち 100%を超える箇所がアマゾン付近で見られた。これは全 CO₂ 放出・吸収量の変動幅を見たときに、バイオマスバーニングによる放出と植生による吸収などがバランスし、分母となる全体の変動幅が小さくなったため、100%を超えてしまったと考えられる。したがってアフリカからバイオマスバーニングによって放出された CO₂ がアマゾンで植生によって吸収されたことが考えられる。

GOSAT 衛星の年平均大気中 CO₂ 気柱濃度を見ると、アジア域やロシアで非常に低濃度である。人為起源の放出量が多いと考えられる地域であることから考えて、GOSAT 側に推定の不確定性があるのではないかと考えられる。また GOSAT はバイアスが全体にかかっているとしても値の変動が大きい。モデル計算の結果では、このような大きなばらつきは見られなかったため、GOSAT データのバイアスは全球一様なものではなく、局所的なものである可能性がある。また、アマゾンでは放出が多いと考えられる値が示された。しかし、アマゾンは熱帯林であり、多くの CO₂ の取り込みがあると考えられる。本研究では、モデル計算による輸送では貿易風によりアフリカからの CO₂ 放出量が西に流れているため、それが停滞しているのか、吸収しきれていないのか、そもその観測に不確定性が含まれるのかわからないが、高濃度が観測されている。またそれは GOSAT の観測値と物質輸送モデル NICAM-TM の推定値との差をとっても、最も高濃度と推定された②VISIT 法でさえ、アマゾンの高濃度は表せなかった。アフリカと同様に、バイオマスバーニ

ングによる CO₂ 放出量が多いと考えられる。

GOSAT との差を求めることにより②VISIT 法による大気中 CO₂ 気柱濃度が GOSAT の観測結果に最も近かったことから、④GFED 法よりも CO₂ 放出量を精度よく表していることが示唆される。

大気中 CO₂ 気柱濃度の GOSAT による観測値と NICAM-TM による推定値の散布図の相関係数は③FRP 法による結果が最も近かった。全球の大気中 CO₂ 気柱濃度では GOSAT の観測値に近い値を、②VISIT 法が表せていたが、各グリッド点における比較では③FRP 法が最も再現性が高いのだと言える。これはモデルによる輸送が正確に表せていないことを意味し、モデルによる輸送をうまく再現できれば、より精度のよい CO₂ 放出量を推定できるものと考えられる。また、③FRP 法では CO₂ 放出量が過小評価であったため、推定量が多くなれば、より精度のよい CO₂ 放出量を推定できると考えられる。しかし、今回の計算はすべてアフリカにおいての推定のみに基づくものであり、全球的に本研究の手法を適応すれば、より全球で良い結果が得られるであろう。

4.4 火災強度と植生モデルのバイオマス量を用いた焼失割合 η の推定に関して

火災強度 FRP を用いた方法において、CO₂ 放出量が過大評価の可能性があることを述べたが、この値を計算する時に用いた係数 a の値が大きすぎた可能性がある。もしくは燃焼時間を 1 時間と仮定し、常に一定の値として計算していたことに過大評価の原因がある可能性もある。現在、火災エネルギー(Fire Radiative Energy; FRE) といった値を用いて研究されている(Boschetti and Roy, 2009, Ellicott et al., 2009)。この FRE とは、FRP に燃焼時間を考慮して求めた値である。特にサバンナでは仮定した燃焼時間が長すぎる可能性もあるので、今後このような値を取り入れて計算されるようになれば更なる CO₂ 放出量推定の精度が向上すると考えられる。

FRP と植生モデル VISIT によるバイオマス推定量から焼失割合 η を求める方法により、土地被覆分類による焼失割合 η に加え、同じ土地被覆分類の中でも場所ごとの違いがあることが確認できた。それぞれの場所で土地被覆分類や気温、湿度、日照時間など気象条件の違いによる焼失割合 η の違いを抽出できる可能性があることが示された。例えば、落葉広葉樹林では植生指数 NDVI や土壌水分量が低くなった後に焼失割合 η が大きくなる変化が見られるなど、燃焼割合 CC の季節変化が抽出できる可能性も示された。したがって焼失割合 η の推定にはさらに細かい値が必要であり、今後データの精度、分解能が上がることで焼失割合 η もしくは燃焼割合 CC を特定できるようになると考えられる。

GFEDv2 の燃焼割合 CC と燃焼効率 EF (0.8 と仮定) の積である焼失割合 η が比較的一定であったのは、燃焼効率 EF に季節変化を考慮できていないことが原因の一つと考えられる。

FRP と VISIT によるバイオマス量を用いて求めた焼失割合 η が、火災強度に比例しなかったのは、季節変化がバイオマス量か、燃焼面積比に考慮されているためであると考えられる。しかし、VISIT によるバイオマス量には大きな季節変化は見られていないので、燃焼面積比による季節変化が大きいと考えられる。今後、この点を確認していく必要がある。

5 まとめ

5.1 まとめ

バイオマスバーニングによる CO_2 放出量推定において、これまでは最も不確定性の大きいとされる焼失割合 η の推定には、多くの仮定をおく場合がほとんどであった。しかし、本研究では、これまでにない独立な情報を取り入れることで焼失割合 η そのものの推定を試みる方法を2種類提案した。1つ目は、大気中 CO_2 気柱濃度の観測値と推定値を比較することで焼失割合 η を求める方法である。2つ目は、赤外線情報から得られた火災強度 FRP と植生モデルのバイオマス量を用いて焼失割合 η を求めるこれまでにない新たな方法である。対象地域をアフリカとし、対象期間を2009年の一年間とした。

まずバイオマスバーニングの特徴を掴むため、アフリカの土地被覆分類と火災強度 FRP のデータの解析から、現状どのような場所でバイオマスバーニングが発生し、どのくらいの強度があるのかを調べた。その結果、バイオマスバーニングはサヘル地域と南部のサバンナで頻繁に発生していた。また、土地被覆の分類ごとにバイオマスバーニングの特徴も見られた。密な灌木地では発生率は低い、一度燃えると大量に燃えるという特徴、サバンナでは頻繁に発生するが、一度に燃える量は少ないという特徴があることが示された。

これらを踏まえ、1つ目の焼失割合 η の推定を試みた。3種類の方法でバイオマスバーニングによる CO_2 放出量の計算を行った。3種類の方法のうち1つ目は、NDVI と植生モデル VISIT の地上部バイオマス量の関係を用いてバイオマス量を推定し、MODIS センサーの火災情報から燃焼面積比を求め掛け合わせた。加えて、GFEDv2 の燃焼割合 CC と燃焼効率 EF (0.8 と仮定) の積をバイオマスの焼失割合 η とし、掛け合わせ CO_2 放出量を計算した(①NDVI 法)。また焼失割合 η を 0.3, 0.5, 0.7 と仮定した計算も行った。2つ目は、VISIT を用いて推定された地上部バイオマス量に同様の燃焼面積比と、バイオマスの焼失割合 η を掛け合わせ、 CO_2 放出量を計算した(②VISIT 法)。3つ目は、FRP に実験によって求められた係数を掛け合わせ、燃焼時間を1時間と仮定し、 CO_2 放出量を計算した(③FRP 法)。これら3種類の CO_2 放出量と、既存のデータベースである GFEDv3 の CO_2 放出量(④GFED 法) と合わせて4種類の CO_2 放出量について、それぞれアフリカ全土における放出量の積算値を求め、月別放出量の比較を行ったところ、季節変化には類似性は見られるものの、絶対値に大きな差があった。焼失割合 η よりも手法そのものにも大きな不確定性が存在することを示す結果となった。

4つの手法間の差が、大気中 CO_2 気柱濃度にどの程度影響を与えるかを調べるため、これら推定された CO_2 放出量を物質輸送モデル NICAM-TM に導入し、植生、海洋、化石燃料起源のフラックスを加味し、大気中 CO_2 気柱濃度の計算を行った。まず、バイオマスバーニングのみに起因した大気中 CO_2 気柱濃度の時間的な変動幅と、全 CO_2 放出・吸収量に起因する変動幅の割合を求めたところ、それぞれ 17.6%(①NDVI 法)、53.2%(②VISIT 法)、25.9%(③FRP 法)、16.6%(④GFED 法) であった。②VISIT 法では全体の約半分を占めるという結果が得られた。次に、GOSAT 衛星によって観測された大気中 CO_2 気柱濃度とNICAM-TMによる濃度計算結果を比較

した. 全体的に多少 NICAM-TM の推定値が過小評価であったが, 全球の大気中 CO_2 気柱濃度の差を求めたところ, それぞれ 2.47ppm(①NDVI 法), 1.02ppm(②VISIT 法), 2.21ppm(③FRP 法), 2.52ppm(④GFED 法) で, 最も差の小さい②VISIT 法は④GFED 法を上回る結果となった. また, 相関係数を求めたところ, 0.38(①NDVI 法), 0.29(②VISIT 法), 0.68(③FRP 法), 0.55(④GFED 法) で, 最も相関が高い③FRP 法は④GFED 法を上回る結果となった. 複数の比較結果をまとめると, 相関係数は悪いのだが, 絶対量と空間分布の再現性から②VISIT 法が最もよい結果であると判断でき, この結果は④GFED 法よりも GOSAT の観測結果に近かった. また, モデルによる空間的な濃度分布の再現性にまだ改善の余地があることを示したが, GOSAT の観測結果にも不確実性が多く含まれることから, より高次元での検証が今後必要となる.

上記手法とは別に, 2 つ目の焼失割合 η の推定を試みた. ③FRP 法はバイオマス量の推定を介さないため, これによる CO_2 放出量と, 植生モデル VISIT のバイオマス量と燃焼面積比を掛け合わせた値の比率から焼失割合 η を推定した. その結果, 焼失割合 η は同じ土地被覆分類の中でも場所によって 0.2 から 1.2 を超える値まであり, 気象条件や季節などの違いによる焼失割合 η の違いを抽出できる可能性があることが示された. 例えば, 落葉広葉樹林では植生指数 NDVI や土壌水分量が低くなった後に焼失割合 η が大きくなる変化が見られるなど, 燃焼割合 CC の季節変化が抽出できる可能性も示された.

5.2 今後の展望

GOSAT 衛星により観測された大気中 CO_2 気柱濃度は今まだ十分に検証されてはおらず, 誤差も大きいとされている. 今後, 観測精度の向上により, 本研究で示した焼失割合 η の導出方法が有効に利用されることになるであろう. また GOSAT の観測データに基づいて, 大気中 CO_2 気柱濃度から各エリアの CO_2 放出量を直接計算するインバージョン解析ができることになれば, 単なる CO_2 気柱濃度の比較ではなく, CO_2 放出量を直接比較できるようになる. CO_2 放出量としての比較を行うことができれば焼失割合 η の推定に伴い, 3.3 章で, 土地被覆分類による焼失割合 η に加え, 場所ごとの違いがあることが確認できたように, どのような因子, 例えば土壌水分量, 季節変化, 経年変化と関連があるかを調査することが可能であると考えられる. さらに本研究では燃焼割合 CC や燃焼効率 EF は焼失割合 η としていたが, 燃焼効率 EF の値は研究されてきている (Kaufman et al., 1990, Ferek et al., 1998, Andreae and Merlet, 2001). その値を用いれば燃焼割合 CC の値も特定することができると考えられる. それらを用いることでバイオマスバーニングによる CO_2 放出量推定の不確実性を減らすことが可能であると考えられる.

バイオマスバーニングにも種類があり, 自然発火によって発生したバイオマスバーニングであるのか, 人為の影響による焼き畑なのか, 分類をすることは非常に重要であると考えられる. また, 農業や社会科学的分野のデータと融合することにより, バイオマスバーニング後の農業生産量へのインパクトはどの程度なのかといった, より実用的なデータ提供へと発展させることができるものと期待される.

謝辞

本研究では多くのデータを使用させていただきました。データを提供して頂いた皆様に感謝致します。

GOSAT の観測データは NIES により提供されたもので、<https://data.gosat.nies.go.jp/GosatUserInterfaceGateway/guig/GuigPage/open.do> よりダウンロードして使用させていただきました。

MODIS の観測データは NASA の LP DAAC により提供されたデータを、東京大学生産技術研究所のアーカイブから竹内渉講師を通じてご提供いただき、使用させていただきました。また、土地被覆分類のデータは <http://edcdaac.usgs.gov/dataproducts.asp> よりダウンロードして使用させていただきました。

AMSR-E の観測データは JAXA の EOC により提供されたもので、<https://www.eoc.jaxa.jp/iss/jsp/index.html> よりダウンロードして使用させていただきました。

GFEDv2, GFEDv3 は <http://www.falw.vu/~gwerf/GFED/index.html> よりダウンロードして使用させていただきました。

GPCP は GSFC Lab. Atmospheres により提供されたもので、<http://precip.gsfc.nasa.gov/> よりダウンロードして使用させていただきました。

VISIT の計算結果は国立環境研究所 NIES の伊藤昭彦先生よりご提供いただき、使用させていただきました。

東京大学大気海洋研究所気候システム研究系の佐藤正樹准教授、地球フロンティアの富田浩文様のモデル NICAM をベースに気象庁気象研究所の丹羽洋介様によって作成された NICAM-TM は、丹羽様により提供して頂き、使用させていただきました。

NICAM-TM のインプットデータは <http://www.purdue.edu/transcom/> よりダウンロードされたデータを丹羽様よりご提供いただき、使用させていただきました。また、JRA-25/JCDAS は気象庁及び電力中央研究所による JRA-25 長期間再解析プロジェクトにより提供されたもので、http://jra.kishou.go.jp/JRA-25/index_en.html よりダウンロードされたデータを丹羽様よりご提供いただき、使用させていただきました。

Darwin, Park Falls, Orleans における CO₂ 気柱濃度の観測データは TCCON により提供されたもので、<http://tccon.ipac.caltech.edu/> よりダウンロードして使用させていただきました。

また、本研究では多くの研究のためのツールを使用させていただきました。ツールを提供して頂いた皆様に感謝致します。

描画ソフトは、ハワイ大学で開発された GMT(The Generic Mapping Tools) を使用させていただきました。

モデルを計算するためのスーパーコンピューターは、東京大学情報基盤センターのスーパーコンピューターシステム SR11000 を使用させていただきました。

本研究は東京大学大気海洋研究所今須良一准教授のご指導の下、行いました。今須先生には研究に関する様々なご指導、ご指摘の他、プレゼンの仕方から計算機のことまで非常に多くのことを教えていただきました。また、ドイツにつれていってくださり、国際学会の様子まで見る機会まで設けていただきました。心から深く感謝申し上げます。有難うございました。

東京大学生産技術研究所の竹内渉講師には共同で研究を進めていくうえで、研究に関するご助言、データの提供、社会の時事まで教えていただきました。東京大学工学系研究科小池俊雄教授、Lu Hui 様には共同で研究を進めていくうえで、研究に関するご助言をいただきました。深く感謝申し上げます。有難うございました。

今須研究室の皆様には、研究だけではなく研究室の生活でも非常にお世話になりました。齋藤尚子元特任助教には、放射コロキや、holton の輪読セミナーなどで大変お世話になりました。新井さんには研究室の先輩として様々なことを教えていただきました。また、食事もご馳走になりました。丹羽さんには一年間研究室で大変お世話になった上に、卒業後も研究に関して、ご丁寧にご指導いただきました。稲子谷さん、染谷君には研究室の仕事を引き継いでいただき、よく仕事をしてくれました。長谷部さん、永岡さん、稲本さん、武田さん、小島さんには事務手続きなどでお世話になり、また秘書室に快く迎え入れてくれました。特に、最も身近であった林さんには二年間色々とお世話になりました。研究に関するご助言、また研究を進める上でのパソコンの設定や、サーバーの使い方、研究室の生活の些細なことなど、大変お世話になりました。皆様のご協力により、二年間有意義に研究活動を行うことができました。皆様に深く感謝申し上げます。有難うございました。

中島映至教授には放射コロキや CCSR セミナーの際に貴重なご意見やご指摘をいただきました。また飲み会でも仲良くして頂き、ビリヤードにも連れて行ってくださいました。中島研究室の皆様にも放射コロキ、放射勉強会、夏山と様々な機会でお世話になりました。皆様に深く感謝申し上げます。有難うございました。

CCSR 及び自然環境学専攻の先生方、PD の方々、先輩、後輩の方々には、コースゼミ、CCSR セミナーなどにおいて貴重なご意見・ご質問をいただきました。また CCSR、自然環境学専攻の事務の方々にも常日頃から大変お世話になりました。同室と一緒に研究していた先輩、後輩の方々にもお世話になりました。皆様に深く感謝申し上げます。有難うございました。

同期である大泉君、岡田君、金沢君、小山君、北沢君、橋本さん、村山君、村上君には大変お世話になりました。皆様のおかげで楽しく有意義な二年間を過ごすことができました。特に橋本さん、金沢君、岡田君の三人は放射グループとして、色々な面で共同に作業することが多く、お世話になりました。三人が同期で良かったと思います。また、自然環境学専攻の同期は離れた研究室でしたが、いつも仲良くして下さり、非常に楽しく有意義な二年間を過ごすことができました。みんなありがとう。

最後に、大学院進学に理解を示し、金銭面でも精神面でも支えてくださった両親に感謝申し上げます。ありがとうございました。

参考文献

- Adler R. F., Huffman G. J., Chang A., Ferraro R., Xie P.-P., Janowiak J., Rudolf B., Schneider U., Curtis S., Bolvin D., Gruber A., Susskind J., Arkin P. and Nelkin E., 2003: The version-2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979 – present). *J. Hydrometeorol.*, 4, 1147- 1167.
- Andreae, M. O. and Merlet, P.: Emission of trace gases and aerosols from biomass burning, *Global Biogeochem. Cy.*, 15, 955-966, 2001.
- Baccini, A., N. Laporte, S. J. Goetz, M. Sun, and D. Huang, A fire map of tropical Africa's above-ground biomass derived from satellite imagery, *Environ. Res. Lett.*, 3, 9pp, doi:10.1088/1748-9326/3/4/045011, 2008.
- Boschetti, L., and D. P. Roy (2009), Strategies for the fusion of satellite fire radiative power with burned area data for fire radiative energy derivation, *J. Geophys. Res.*, 114, D20302, doi:10.1029/2008JD011645.
- Bowman, M. J. S. David, Jennifer K. Balch, † Paulo Artaxo, William J. Bond, Jean M. Carlson, Mark A. Cochrane, Carla M. D' Antonio, Ruth S. DeFries John C. Doyle, Sandy P. Harrison, Fay H. Johnston, Jon E. Keeley, Meg A. Krawchuk, Christian A. Kull, J. Brad Marston, Max A. Moritz, I. Colin Prentice, Christopher I. Roos, Andrew C. Scott, Thomas W. Swetnam, Guido R. van der Werf, Stephen J. Pyne, Fire in the Earth System, *SCIENCE*, 304, 2009.
- Crutzen, J. Paul, and Meinrat O. Andreae, Biomass Burning in the Tropics: Impact on Atmospheric Chemistry and Biogeochemical Cycle, *SCIENCE*, 250, 1669-1678, 1990.
- Ellicott, E., E. Vermote, L. Giglio, and G. Roberts (2009), Estimating biomass consumed from fire using MODIS FRE, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L13401, doi:10.1029/2009GL038581.
- Fearnside, M. Philip, Global warming and tropical land-use change: greenhouse gas emissions from biomass burning, decomposition and soils in forest conversion, shifting cultivation and secondary vegetation, *Climate Change*, 46, 115-158, 2000.
- Ferek, J. Ronald, Jeffrey S. Reid, and Peter V. Hobbs, Emission factors of hydrocarbons, harocarbons, trace gases and particles from biomass burning in Brazil, *J. Geophys. Res.*, 103, D24, 32, 107-32,118, 1998.
- Friedl, M. A., D. K. McIver, J. C. F. Hodges, X. Y. Zhang, D. Muchoney, A. H. Strahler, C. E. Woodcock, S. Gopal, A. Schneider, A. Cooper, A. Baccini, F. Gao, C. Schaaf, 2002. Global land cover mapping from MODIS: algorithms and early results, *Remote Sensing of Environment*, 83, 287-302.
- Giglio, L., Descloitres, J., Justice, C. O., Kaufman, Y. 2003. An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 87, 273-282.

- Giglio, L., G. R. van der Werf, J. T. Randerson, G. J. Collatz, and P. Kasibhatla, 2005, Global estimation of burned area using MODIS active fire observations, *Atmos. Chem. Phys., Discuss.*, 5, 11091-11141.
- Hoelzemann, J. J., M. G. Schultz, G. P. Brasseur, and M. Simon (2004), Global Wildland Fire Emission Model (GWEM): Evaluating the use of global area burnt satellite data, *J. Geophys. Res.*, 109, D14S04, doi:10.1029/2003JD003666.
- IPCC, 2007: *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Ito, A., A. Ito, and H. Akimoto (2007), Seasonal and interannual variations in CO and BC emissions from open biomass burning in Southern Africa during 1998-2005, *Global Biogeochem. Cycles*, 21, GB2011, doi:10.1029/2006GB002848.
- Ito, A., and T. Oikawa, The Large Carbon Emission from Terrestrial Ecosystems in 1998, *J. Meteor. Soc. Japan*, 78, 2, 103-110, 2000.
- Kaufman, J., Yoram, Compton, J., Tucker, Inez, Fung, Remote Sensing of Biomass Burning in the Tropics, *J. Geophys. Res.*, 95, D7, 9927-9939, 1990.
- Kharol, S. K., and K. V. S. Badarinath (2006), Impact of biomass burning on aerosol properties over tropical urban region of Hyderabad, India, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L20801, doi:10.1029/2006GL026759.
- Kindermann, G. E., MaCallum, I., Fritz, S. and Obersteiner, M.** 2008. A global forest growing stock, biomass and carbon map based on FAO statistics. *Silva Fennica* 42(3), 387-396.
- Marland, G., T. A. Boden, and R. J. Andres, 2007, *Global, Regional, and National fossil fuel CO₂ Emissions In Trends: A Compendium of Data on Global Change*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn, USA.
- Marlon, J. R., P. J. Bartlein, M. K. Walsh, S. P. Harrison, K. J. Brown, M. E. Edwards, P. E. Higuera, M. J. Power, R. S. Anderson, C. Briles, A. Brunelle, C. Carcaillet, M. Daniels, F. S. Hu, M. Lavoie, C. Long, T. Minckley, P. J. H. Richard, A. C. Scott, D. S. Shafer, W. Tinner, C. E. Umbanhowar, Jr., and C. Whitlock, Wildfire responses to abrupt climate change in North America, *PNAS*, 106, 8, 2519-2524.
- Niwa, Y, Numerical study on atmospheric transport and surface source/sink of carbon dioxide, Ph. D. dissertation, University of Tokyo, 2010.
- Olivier, J. G. J. and J. J. M. Berdowski, 2001, *Global emissions sources and sinks*. A. A. Balkema Publishers / Swets & Zeitlinger Publishers, Lisse, The Netherlands, 33-78pp.
- Onogi, K., et al., 2007, The JRA-25 Reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 369-432.

- Palacios-Orueta, A., A. Parra, E. Chuvieco, and C. Carmona-Moreno (2004), Remote sensing and geographic information systems methods for global spatiotemporal modeling of biomass burning emissions: Assessment in the African continent, *J. Geophys. Res.*, *109*, D14S09, doi:10.1029/2004JD004734.
- Randerson, J. T., M. V. Thompson, T. J. Conway, I. Y. Fung, and C. B. Field, 1997, The contribution of terrestrial sources and sinks to trends in the seasonal cycle of atmospheric carbon dioxide. *Global Biogeochem. Cycles*, **11**, 535-560.
- Reid, J. S., E. J. Hyer, E. M. Prins, D. L. Westphal, J. Zhang, J. Wang, S. A. Christopher, C. A. Curtis, C. C. Schmidt, D. P. Eleuterio, K. A. Richardson, and J. P. Hoffman, Global Monitoring and Forecasting of Biomass-Burning Smoke: Description of and lessons From the Fire Locating and Modeling of Burning Emissions (FLAMBE) Program, *Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, *2*, 3, 2009.
- Roberts, J. G., and M. J. Wooster, Fire Detection and Fire Characterization Over Africa Using Meteosat SEVIRI, *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *46*, 4, 2008.
- Roy, D. P., Jin, Y., Lewis, P. E., Justice, C. O. 2005.**, Prototyping a global algorithm for systematic fire-affected area mapping using MODIS time series data. *Remote Sensing of Environment*, *97*: 137-162.
- Satoh, M., T. Matsuno, H. Tomita, H. Miura, T. Nasuno, and S. Iga, 2008, Nonhydrostatic icosahedral atmospheric model (NICAM) for global cloud resolving simulations. *J. Comput. Phys.*, **227**, 3486-3514.
- Seiler, W., and Paul J. Crutzen, Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and the atmosphere from biomass burning, *Climatic Change*, **2**, 207-247, 1980.
- Swap, R. J., H. J. Annegarn, J. T. Suttles, M. D. King, S. Platnick, J. L. Privette, and R. J. Scholes, Africa burning: A thematic analysis of the Southern African Regional Science Initiative (SAFARI2000), *J. Geophys. Res.*, *108*(D13), 8465, doi:10.1029/2003JD003747, 2003.
- Takahashi, T., et al., 2009, Climatological mean and decadal change in surface ocean pCO₂, and net sea-air CO₂ flux over the global oceans. *Deep-Sea Research, Part II*, **56**, 554-577.
- Tomita, H. and M. Satoh, 2004, A new dynamical framework of nonhydrostatic global model using the icosahedral grid. *Fluid Dyn. Res.*, **34**, 357-400.
- Van der Werf, G. R., J. T. Randerson, L. Giglio, G. J. Collatz, and P. S. Kasibhatla, 2006, Interannual variability in global biomass burning emissions from 1997 to 2004, *Atmos. Chem. Phys.*, **6**, 3423-3441.
- Van der Werf, G. R., J. T. Randerson, L. Giglio, G. J. Collatz, M. Mu, P. S. Kasibhatla, D. C. Morton, R. S. DeFries, Y. Jin, and T. T. van Leeuwen, 2010, Global fire emissions and the

- contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997-2009), *Atmos. Chem. Phys., Discuss.*, 10, 16153-16230.
- Vermote, E., E. Ellicott, O. Dubovik, T. Lapyonok, M. Chin, L. Giglio, and G. J. Toberts (2009), An approach to estimate global biomass burning emissions of organic and black carbon from MODIS fire radiative power, *J. Geophys. Res.*, 114, D18205, doi:10.1029/2008JD011188.
- WMO, 2009; Greenhouse Gas Bulletin.
- Wooster, M. J., G. R. Roberts, G. L. W. Perry, and Y. J. Kaufman (2005), Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: FRP derivation and calibration relationships between biomass consumption and fire radiative energy release, *J. Geophys. Res.*, 110, D24311, doi:10.1029/2005JD006318.
- Yokelson, R. J., I. T. Bertschi, T. J. Christian, P. V. hobbs, D. E. Ward, and W. M. hao, Trace gas measurements in nascent, aged, and cloud-processed smoke from African savanna fires by airborne Fourier transform infrared spectroscopy (AFTIR), *J. Geophys. Res.*, 108(D13), 8478, doi:10.1029/2002JD002322, 2003.
- 加藤正人, 森林リモートセンシング-基礎から応用まで-, J-FIC, 2007.
- 小池俊夫・中村佳照・開発一郎・Gombo Davaa・松浦直人・玉川勝徳・藤井秀幸 (2004) :改良型高性能マイクロ波放射計(AMSR-E)による土壌水分・植生水分観測手法の開発. 水工学論文集, 48:217-222.
- 山岸米二郎, オックスフォード気象辞典, 朝倉書店, 2005.
- 横田達也・青木忠生・江口菜穂・太田芳文・吉田幸生・セルゲイ オフシェフコフ・アンドレイ ブリル・ラファエル デビアン・森野勇 :GOSAT 搭載温室効果ガス観測センサ(TANSO-FTS)短波長赤外バンドのデータ処理手法. *Journal of The Remote Sensing Society of Japan*, 28, 2, (2008), 133-142.

付録 A 火災強度を用いた CO₂ 放出量推定の詳細解析

推定した 3 種類の CO₂ 放出量に加え, GFEDv3 による CO₂ 放出量それぞれでアフリカ全土における積算値を求め, 月単位の放出量の比較(図 19) を行ったところ, ①NDVI 法, ②VISIT 法, ④GFED 法では季節変化に類似性は見られたが, ③FRP 法では季節変化に違いが見られた. 60 日(2 月) と 90 日(3 月) に他の CO₂ 放出量には減少が見られたが③FRP 法の CO₂ 放出量には見られなかった. そこで, この差異の原因の調査を行った.

土地被覆分類ごとに③FRP 法による CO₂ 放出量を求めたところ, サバンナ, サバンナ(woody)からの CO₂ 放出量が支配的であることが分かった(図 27). また, 2, 3 月に他の CO₂ 放出量には減少が見られたが火災強度 FRP には見られずピークとなっていた点に関して, 常緑広葉樹林からの寄与があることが示された.

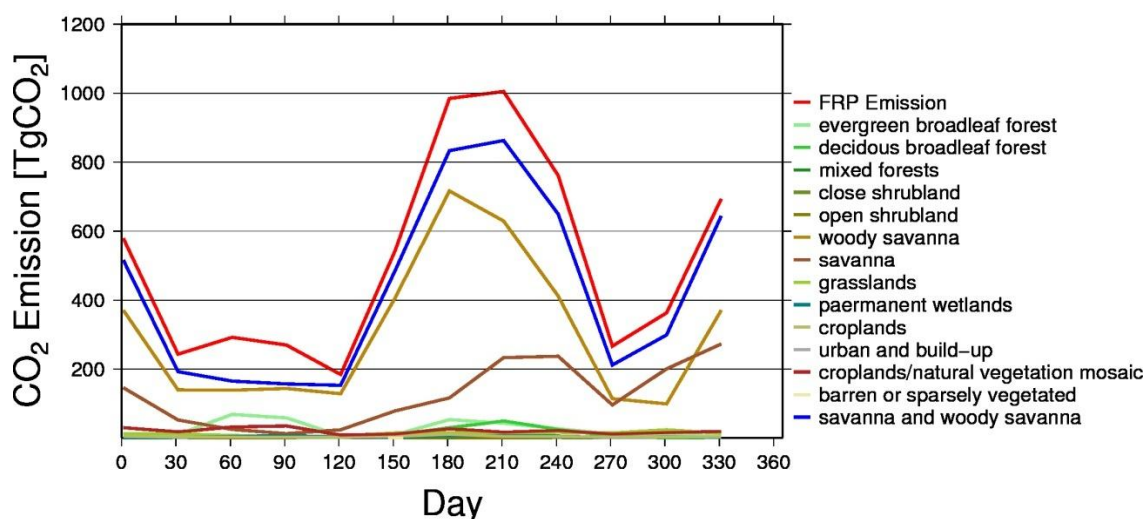


図 27: ③FRP 法による CO₂ 放出量の土地被覆分類ごとの積算値の月ごとの比較. 赤色が③FRP 法による CO₂ 放出量. 上の色から常緑広葉樹林, 落葉広葉樹林, 混合林, 疎な灌木地, 密な灌木地, サバンナ(woody), サバンナ, 草地, 湿地, 耕作地, 都市, 耕作地・自然植生, 裸地からの③FRP 法による CO₂ 放出量. 青色がサバンナ, サバンナ(woody) からの CO₂ 放出量を合計したもの. 横軸が時間, 単位は日. 縦軸が全 CO₂ 放出量, 単位は TgCO₂.

さらに 3 月のみに着目して③FRP 法による CO₂ 放出量と④GFED 法による CO₂ 放出量と比較を行うと, ギニア周辺に異常な CO₂ 放出量が見られた. しかし, ④GFED 法にはそれが現れていなかった. また, ③FRP 法による CO₂ 放出量では常緑広葉樹林において CO₂ 放出量が見られたのに対し, ④GFED 法では見られなかった. 以上のような点が, この比較における差異であったと考えられる.

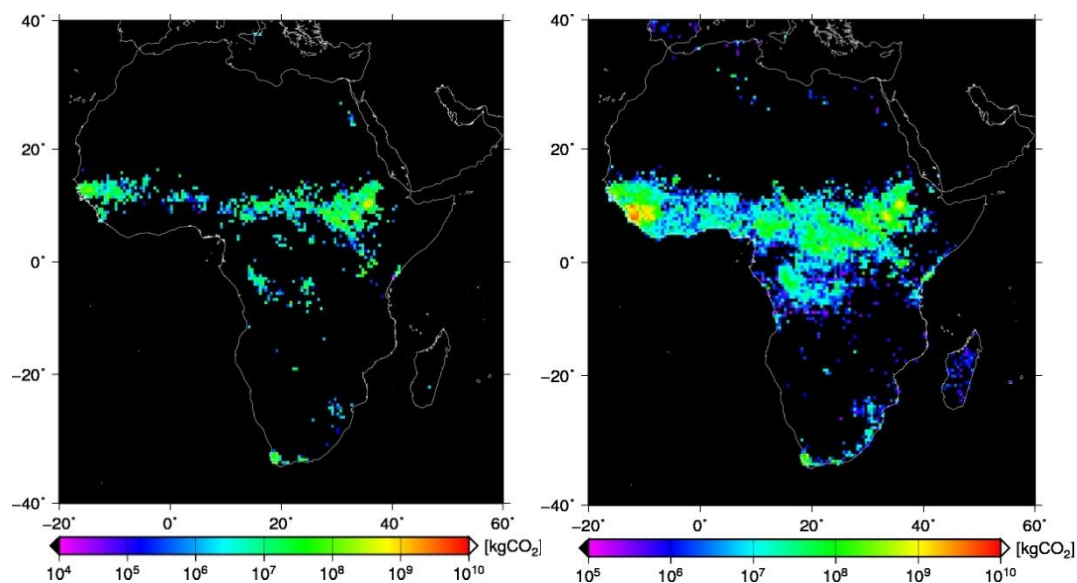


図 28:2009 年 3 月における CO_2 放出量の比較. 左図, ④GFED 法による CO_2 放出量, 右図, ③FRP 法による CO_2 放出量. 単位は kgCO_2 .

本研究で用いた燃焼面積比にも不確定性が存在する. 植生指数 NDVI の減少率を考慮することで, FRP では見ることができていたバイオマスバーニングを見落としている可能性がある. 特にコンゴ盆地付近の常緑広葉樹林では顕著である. またギニア周辺で③FRP 法による CO_2 放出量が多いと推定されているのは FRP が高かったからである. 実際はバイオマスバーニングによるものではなく別の要因で高温を観測し, バイオマスバーニングと誤認している可能性がある. そのような場合には植生の減少率を加味することで, 誤認を除去できる. ただし, 現段階では植生の減少率と FRP の観測点のどちらからバイオマスバーニングが起きていると判断するのが正しいのか識別不可能であるため, 今後衛星観測の精度向上によって, バイオマスバーニングであるか判別されることを期待する.

付録 B 大気中 CO₂ 気柱濃度の観測値と推定値の領域での比較

大気中 CO₂ 気柱濃度の観測値と推定値の比較において、散布図では相関がよく見られなかったため、領域での比較を行った(図 29). 結果 GOSAT 衛星による観測値が最も大気中 CO₂ 気柱濃度が高いという結果が得られた. また、相関のよかった③FRP 法は観測値と比較して過小評価であった. ②VISIT 法が最も観測値に近く、分布やピークも近い値となった. したがって②VISIT 法が最も再現性があるという結果が示された.

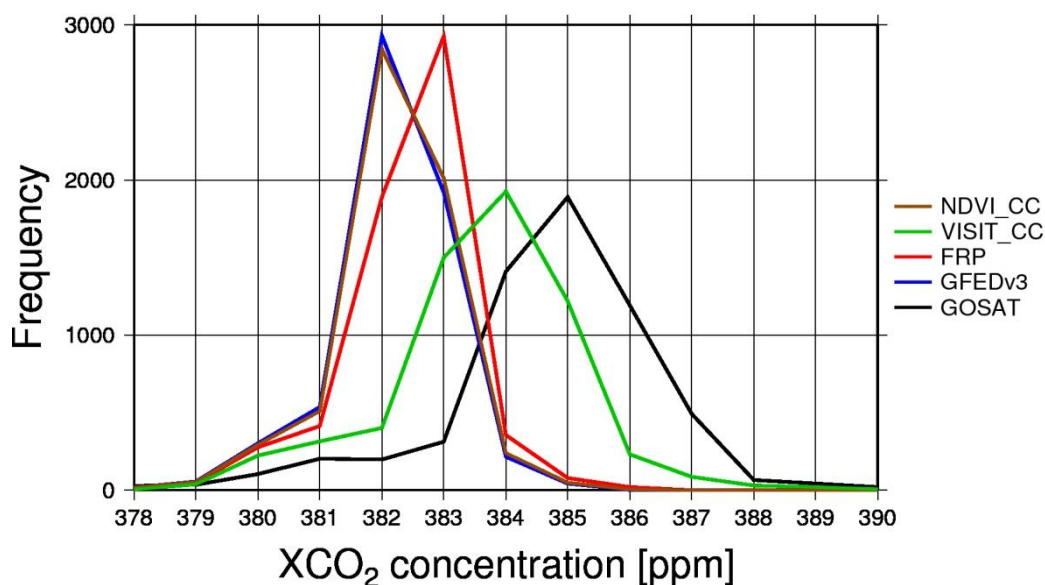


図 29: 全球における大気中 CO₂ 気柱濃度の頻度分布図. 横軸は CO₂ 気柱濃度, 単位は ppm. 縦軸は頻度. 茶色が①NDVI 法で推定された大気中 CO₂ 気柱濃度, 緑が②VISIT 法, 赤が③FRP 法, 青が④GFED 法, 黒は GOSAT 衛星による観測値. 2009 年一年間のうち GOSAT のデータがある時の年平均値を用いた.

次に本研究はアフリカのためのバイオマスバーニングによる CO₂ 放出量を推定したので, アフリカ上空のみで比較を行った結果を図 30 に示す. 観測値が最も大気中 CO₂ 気柱濃度が高いという結果は同様であり, ②VISIT 法が最も観測値に近い値となった. 多少分布やピークが異なるものの②VISIT 法が最も再現性があるという結果が示されたと言える.

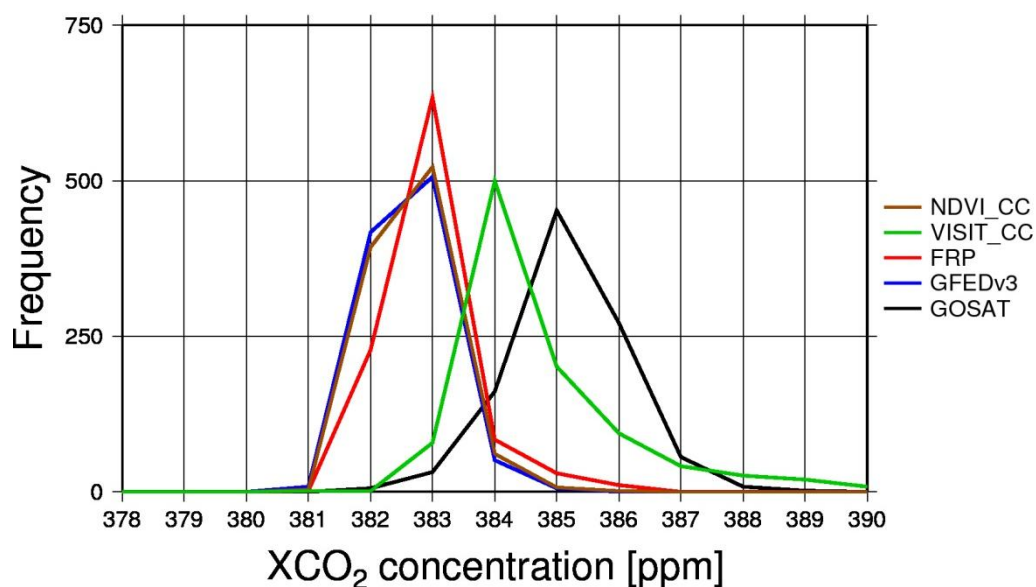


図 30: アフリカにおける大気中 CO_2 気柱濃度の頻度分布図. 横軸は CO_2 気柱濃度, 単位は ppm. 縦軸は頻度. 茶色が①NDVI 法で推定された大気中 CO_2 気柱濃度, 緑が②VISIT 法, 赤が③FRP 法, 青が④GFED 法, 黒は GOSAT 衛星による観測値. 2009 年一年間のうち GOSAT のデータがある時の年平均値を用いた.

②VISIT 法での大気中 CO_2 気柱濃度は観測値と相関が悪かったことに対し, 領域での比較において観測値に近い結果が得られたことから, 濃度の絶対値は合っているが, 空間的な分布のモデルによる再現性が悪く, その点での改善性の余地があるという結果が示された. 今後は, モデルによる輸送などを考慮し, 再現性を高める必要があることが示唆される. ただし, GOSAT の観測結果にも不確実性が多く含まれることから, より高次元での検証も今後必要となる.