



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	衛星リモートセンシングを利用した土地利用変化および森林火災による二酸化炭素放出量の推定手法の開発 [全文の要約]
Author(s)	白石, 知弘
Description	この博士論文全文の閲覧方法については、以下のサイトをご参照ください。 <a href="https://www.lib.hokudai.ac.jp/dissertations/copy-guides/">https://www.lib.hokudai.ac.jp/dissertations/copy-guides/</a>
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(農学)
Dissertation Number	乙第7152号
Issue Date	2022-03-24
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/85606">https://hdl.handle.net/2115/85606</a>
Type	doctoral thesis
File Information	Shiraishi_Tomohiro_summary.pdf



衛星リモートセンシングを利用した土地利用変化および  
森林火災による二酸化炭素放出量の推定手法の開発

2022年3月

白石知弘

# 目次

要旨 .....	1
第1章 序論 .....	1
第2章 土地利用分類手法の開発 .....	2
2.1 はじめに .....	2
2.2 方法 .....	2
2.2.1 研究領域 .....	2
2.2.2 データ .....	3
2.2.3 処理手順 .....	3
2.2.4 評価 .....	3
2.3 結果 .....	4
2.4 第2章のまとめ .....	5
第3章 森林火災による二酸化炭素放出量の推定手法開発 .....	5
3.1 はじめに .....	5
3.2 方法 .....	6
3.2.1 推定方法 .....	6
3.2.2 リモートセンシングデータ .....	6
3.2.3 評価 .....	7
3.3 結果 .....	7
3.4 第3章のまとめ .....	8
第4章 結論 .....	8
参考文献 .....	9

## 要旨

陸域と大気間の炭素収支を理解することは、2015年にパリ協定で締結された世界の平均気温上昇を抑制する目標を達成するために極めて重要である。しかし、地球規模の炭素循環を理解するために、森林生態系の炭素収支における不確実性が大きいことが問題である。本研究の目的は、人工衛星の地球観測データを使用して土地利用変化および森林火災による二酸化炭素放出量の推定手法を開発することである。森林減少や劣化を招く主要な原因である土地利用変化と森林火災による二酸化炭素放出量を推定することは、森林の炭素収支を理解するために不可欠である。本論文では、土地利用変化を検出するために土地利用図の作成手法、森林火災による二酸化炭素放出量の推定手法について述べる。

土地利用図は、インドネシア・スマトラ島の中央域を研究領域として、Lバンド合成開口レーダデータを使用して作成した。作成手法は、合成開口レーダ特有のノイズの影響を抑制するためのオブジェクト分類法、単バンドデータから最大限の情報を得るための特徴量の生成、機械学習に適した特徴量を選別する特徴量選択、機械学習アルゴリズムとしてランダムフォレストを使用して開発した。評価結果は、土地利用図の最高精度が64.1%となり、一般的な画素基準分類法の36.4%よりも向上した。

森林火災からの二酸化炭素放出量の推定手法は、従来の燃焼領域法をもとに、先行研究で不確実性要因の1つであったバイオマス密度を最新の地上バイオマスデータを使用することにより改善し、火災発生ごとに燃焼したバイオマスを評価する処理を追加した。また、入力データが二酸化炭素放出量の推定結果に与える不確実性を定量化した。2001年から2020年における20年間の森林火災からの年次二酸化炭素放出量の平均と標準偏差は $8.38 \pm 3.92 \text{ Pg CO}_2 \text{ year}^{-1}$ となり、入力データによる不確実性は大きい。比較した先行研究の4種類中3種類の平均年次二酸化炭素放出量が本研究結果の標準偏差内であり、構築した手法の妥当性を示した。

本研究の目的は、土地利用変化および森林火災からの二酸化炭素放出量の推定手法を開発することであるが、本論文では、土地利用変化を検出するための土地利用図の作成手法と森林火災からの二酸化炭素放出量の推定手法について述べる。

## 第1章 序論

森林は大気中の二酸化炭素を吸収し有機物として隔離するため、大気中の二酸化炭素濃度の緩和のために重要な役割を担っている。しかし、世界の森林面積は徐々に減少している。1990年以降、世界中で推定4.2億haの森林が伐採により失われ、再生の可能性のある森林を除くと1.8億haの森林を失った(FAO, 2020)。森林の純損失率を1990年から10年単位で見ると、1990年から2000年の年間780万ha、2000年から2010年の年間520万ha、2010年から2020年の年間470万haと減少率は徐々に小さくなっているが森林面積は着実に減少している(FAO, 2020)。また、増加する人口による食料消費を解決するために森林から農地への転換が熱帯域を中心に加速し、森林の減少や劣化が進んでいる。

陸域と大気間の炭素収支を理解することは、2015年にパリ協定で締結された世界の平均気温上昇を抑制する目標を達成し、気候変動の緩和と適応を実現するために重要である。1990年から2007年の森林破壊や劣化によって大気中に放出された二酸化炭素量は、森林による炭素蓄積量よりも大きいことが示唆されたが、2010年から2019年では、陸域における大気中の二酸化炭素吸収が土地利用変化による放出量を上回ることがGlobal Carbon Budget 2020で報告された。しかし、これらの報告は森林生態系の炭素収支における不確実性が大きいことが問題であり、地球規模の炭素循環を理解するために年々変化す

る森林域と森林の炭素収支を推定するシステム構築が急務である。

本研究の目的は、土地利用変化および森林火災による二酸化炭素放出量の推定手法を開発することである。森林減少や劣化を招く主要な原因である土地利用変化と森林火災による二酸化炭素放出量を推定することは、森林の炭素収支を理解するために不可欠である。森林域は広域であり自然現象や人間活動により面積や構造が変化するため、本研究では、広域が観測でき周期的に均質な観測情報が入手できる人工衛星の地球観測データを利用する。また、大量のデータを長期間にわたって繰り返し処理する必要があるため、人手を介さずに自動処理が可能なアルゴリズムを開発する。本論文は、土地利用変化を検出するための土地利用図の作成手法と森林火災からの二酸化炭素放出量の推定手法について述べる。第 2 章では土地利用変化を抽出するための土地利用図の作成手法について、第 3 章では森林火災による二酸化炭素放出量の推定手法について、第 4 章では結論として本研究をまとめる。本研究の最終的な目的は、土地利用図から土地利用変化を検出し、森林火災による二酸化炭素放出量の推定手法を組み合わせることにより、土地利用変化および森林火災による二酸化炭素放出量の推定手法を開発することであるが、これらの手法や結果は学術論文への投稿を予定しているため本論文では言及しない。

## 第2章 土地利用分類手法の開発

### 2.1 はじめに

衛星による地球観測データを使った土地被覆/利用図は、世界の森林被覆のインベントリ作成 (Shimada et al., 2014)、森林域の将来予測 (Thapa et al., 2013)、土地利用変化による炭素放出量の推定 (Harris et al., 2012) など様々な用途で利用されている。土地被覆/利用図の作成は古くから取り組まれてきたが、広域を周期的に作成する必要があるため人手による作成が難しく、計算機による機械学習を利用した自動処理が適用されている。多くの研究で利用されている光学データは、多バンドによる観測データにより得られる情報量が多い反面、森林資源が豊富な熱帯域において被雲や火災による煙霧により地表面情報の取得が困難になる問題がある。一方、合成開口レーダは、雲や煙霧を透過するため天候や昼夜の観測タイミングを選ばない。特に、Lバンド合成開口レーダは波長が長く、樹木の葉や小枝を透過し幹や地表面近くで反射する特性から森林評価に適している (Shimada et al., 2014; Motohka et al., 2014)。しかし、単バンドデータであるため光学データと比較して得られる情報量が少なく、合成開口レーダデータ特有のスペックルノイズのため、高精度な土地被覆/利用図の作成は課題である。

本研究は L バンド合成開口レーダデータを使用して土地利用図の自動作成手法を開発することを目的とする。本論文では、合成開口レーダデータを使用する際に問題となるスペックルノイズの影響を低減すること、単バンドデータから得られる情報を最大限活用することに焦点を当てて分類手法を開発する。

### 2.2 方法

#### 2.2.1 研究領域

研究領域はインドネシア・スマトラ島中央域に位置するリアウ州、ジャンビ州、西スマトラ州である。この領域はインドネシアで最大級の森林炭素蓄積量を有するが、特にリアウ州はオイルパーム農園の開発による森林減少が問題になっている (Uryu et al., 2010)。主な土地被覆は、泥炭湿地林、マングローブ林、標高 300 m 以上の丘陵・山岳地帯に広く分布する無機質土壌の常緑林、オイルパーム、ゴム、アカシア、ココナッツなどの農地、裸地、草地、都市域などで構成される (Uryu et al., 2010)。

## 2.2.2 データ

土地利用図の作成に使用するデータは、時系列の L バンド合成開口レーダ (PALSAR) データと Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) データである。PALSAR データは、Fine Beam Dual (FBD) モードの水平送信・水平受信 (HH) と水平送信・垂直受信 (HV) の 2 偏波、空間分解能は 25 m、オフナディア角は  $34.3^\circ$  である。これらのデータはモザイク処理 (Shimada & Ohtaki, 2010)、オルソ補正と勾配補正 (Shimada, 2010) されたプロダクトを使用した。観測データは 2007 年、2008 年、2009 年の 3 年分を使用した。

土地利用図を機械学習により自動作成するためのグラントゥルースデータは、世界自然保護基金 (WWF) インドネシアが 2008 年から 2009 年に観測された光学衛星データをもとに手動で作成したデータを使用した。この分類図は 10 種類の土地利用種別を有し、研究域に対し被雲域以外の全ての画素を 10 クラスのいずれかに分類した土地利用図である (エラー! 参照元が見つかりません。(a))。

## 2.2.3 処理手順

土地利用図の主な作成手順を以下に示す。

1. セグメンテーション処理
2. 特徴量の算出と選択
3. 機械学習による土地利用分類
4. 土地利用図の作成

セグメンテーション処理は画像内の均質な領域 (隣り合う複数画素) をオブジェクトとしてグループ化し、オブジェクト単位で土地利用分類するための処理である。セグメンテーション処理によるオブジェクト基準の土地利用分類によりスペックルノイズの影響を低減する。本研究ではセグメンテーション処理に領域拡張法 (Baatz & Schäpe, 2000) を使用した。

土地利用分類のために機械学習で使用する特徴量は、標高情報や合成開口レーダデータなどの衛星データ、Gray Level Co-occurrence Matrix (GLCM) や Gray Level Difference Vector (GLDV) のテクスチャ情報、各種統計値など、合計 55 種類を使用した。さらに、機械学習による高精度の分類に貢献できる可能性の高い特徴量をラッパー法 (Kohavi & John, 1997) により選択し、機械学習の入力データに使用した。

機械学習アルゴリズムは先行研究において土地利用分類に使用され評価の高いナイーブベイズ、AdaBoost、多層パーセプトロン (ニューラルネットワーク)、ランダムフォレスト、サポートベクターマシンの 5 種類を使用する。

## 2.2.4 評価

機械学習アルゴリズムのトレーニングに使用する訓練データは、土地利用種別に対し 100 から 1000 まで 100 ごとにランダムサンプリングによりデータを取得した。土地利用図は機械学習アルゴリズムと訓練データ数ごとに 5 回作成し、土地利用図の精度は作成された 5 回分の平均値とした。ただし、サポートベクターマシンアルゴリズムは処理時間が非常に長いいため訓練データ数が 600 以上は 1 回分の分類結果を精度とした。

本研究で開発したオブジェクト基準の分類手法を評価するために、画素基準の分類結果と比較する。画素基準の土地利用分類は、オブジェクトを生成するセグメンテーション処理は行わず、また、GLCM, GLDV,

相関係数の特徴量は使用しない。分類は 5 回処理し、画素ごとに分類頻度が最も高い土地利用種別に決定する。同頻度の場合はグラントゥルースの全領域において画素数の多い土地利用種別とした。訓練データ数は土地利用種別ごとに 1000 とする。評価は、オブジェクト基準と画素基準で最終的に作成された土地利用図とグラントゥルースの全画素を比較し評価する。

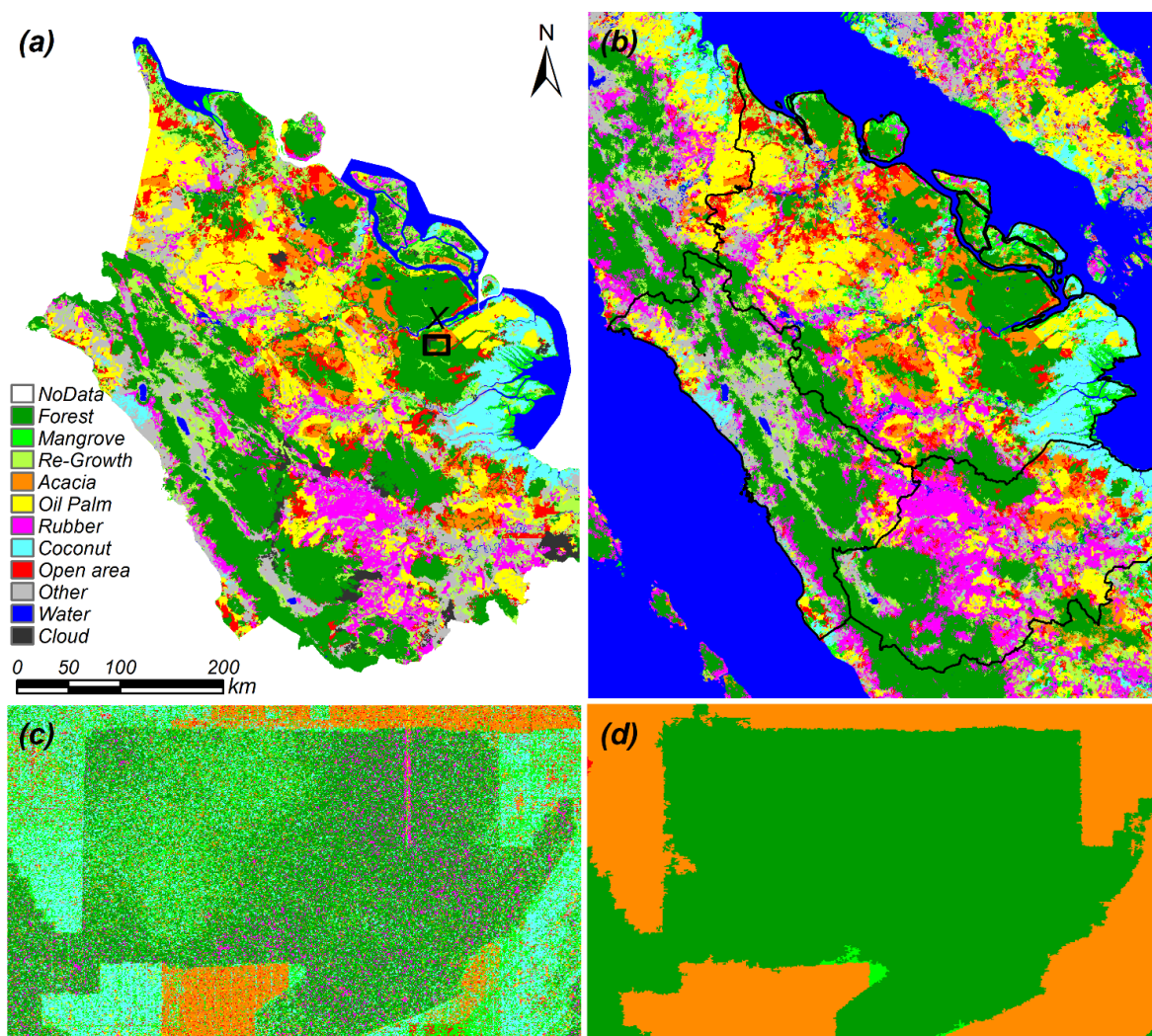


図 2.1 土地利用図の作成に使用するグラントゥルースデータと結果。(a)は WWF インドネシアが作成したグラントゥルース、(b)はランダムフォレストアルゴリズムを用いて作成した分類精度が最も高かった土地利用図、(c)は画素基準分類の結果、(d)はオブジェクト基準分類の結果を示す。(c)と(d)の領域は(a)中の X で示す領域を拡大した図である。

## 2.3 結果

本研究で開発したオブジェクト基準の土地利用分類結果と画素基準の分類結果を比較する。全てのオブジェクト基準分類により作成された土地利用図の中で最も高かった精度はランダムフォレストアルゴリズムから得られた 64.1%であり、画素基準の 36.4%より高精度であった(エラー! 参照元が見つかりません。(b))。画素基準の分類手法によって作成された土地利用図は図全体を通して土地被覆に均質なまとまりが見られず、斑点状に複数の土地利用種別が混ざり合うような土地利用図が生成された(エラー!

参照元が見つかりません。(c))。一方、オブジェクト基準の分類手法によって作成された土地利用図は土地被覆ごとに均質なまとまりが見られ(エラー! 参照元が見つかりません。(d)), これが画素基準分類と比較して高精度な土地利用図が作成できた一因と考えられる。光学データと比較して合成開口レーダデータは、スペックルノイズなどの影響もあり、一様な土地被覆の領域で均質なデータが得られず、土地利用分類を困難にする。本研究で開発したオブジェクト基準の分類手法は、領域を分類対象とすることによりノイズの影響を低減し、単一画素よりも多くの特徴量を生成することにより高精度な土地利用図が作成できたと考えられる。

## 2.4 第2章のまとめ

Lバンド合成開口レーダデータと標高データを使用して、近年自然林からオイルパーム農園を代表とする農地への土地利用変化が活発なスマトラ島中央域(リアウ州, ジャンビ州, 西スマトラ州)の土地利用図の作成手法を開発した。

本研究で開発したオブジェクト基準の分類手法を評価するために画素基準の分類結果と比較した。精度は、オブジェクト基準分類が64.1%, 画素基準分類が36.4%であった。この結果は、スペックルノイズの影響低減のためのセグメンテーション処理, 単バンドデータから得られる情報を最大限に活用するための特徴量算出, 分類精度向上のための特徴量選択などの処理が高精度な土地利用図の作成に貢献したと考えられる。

Lバンド合成開口レーダデータは単バンドであり、光学データと比較すると情報量が少なくスペックルノイズの影響もあり、Lバンド合成開口レーダデータを使って高精度な土地被覆/利用図を作成することは大きな課題であった。本研究では被雲や煙霧の影響により光学データでの観測が困難な東南アジア域で合成開口レーダを使用した高精度な土地利用図作成のための手法を開発した。

## 第3章 森林火災による二酸化炭素放出量の推定手法開発

### 3.1 はじめに

森林火災によるバイオマス燃焼は植生のある全ての陸域生態系で発生し、大気中に大量の二酸化炭素を放出することによって地球規模の炭素循環に強く影響する(例えば van der Werf et al., 2017)。不定期に発生するバイオマス燃焼による二酸化炭素放出量の正確な推定は、地球環境を理解するための気候モデル, 大気輸送モデル, 陸域生態系モデルなどの不確実性低減のために重要な要素である。しかし、全球で発生する火災からの二酸化炭素放出量を直接測定することは困難であるため衛星データを使用した放出量の推定は現実的な手法であるが、推定に必要な燃焼域, 土地被覆図, バイオマス密度, 燃焼効率, 排出係数は、それぞれ不確実性があるため二酸化炭素放出量の推定を困難にする。また、近年の人工衛星による地球観測の発展により先行研究で使用されたデータは様々であり、使用する入力データが放出量の推定結果に与える影響は分かっていない。

本研究は、森林火災による二酸化炭素放出量の推定手法を開発することを目的とする。先行研究の一部では、二酸化炭素放出源となる燃焼域のバイオマスに土地被覆種別ごとに定義した固定値を用い、解析期間中の火災の有無のみを用いて放出量を推定している。そこで本研究は、最新のリモートセンシングデータを使用することにより火災域に対応したバイオマスを使用し、火災ごとに燃焼するバイオマスを評価することにより不確実性の低減を図る。また、森林火災による二酸化炭素放出量の推定のために使用され

ているデータは先行研究によって異なる。そこで、先行研究が主に使用している入力データが放出量の推定結果に与える影響を定量化する。

## 3.2 方法

### 3.2.1 推定方法

火災からの二酸化炭素放出量(EMISSION, g CO<sub>2</sub>)は、燃焼面積(BA, m<sup>2</sup>)に対して、バイオマス密度(BD, kg m<sup>-2</sup>)と燃焼効率(BE, 0 から 1)と排出係数(EF, g CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup>)の積から推定される(式 3.1)。ただし、バイオマス密度と排出係数は乾重量を基準とする。従来の推定手法(例えば, Mieville et al., 2010)では、バイオマス密度は燃焼域の土地被覆種別に応じて代表値を用い、解析期間中の燃焼の有無のみを使用し放出量を推定している。本研究では、推定に必要なバイオマス密度に全球地上バイオマス図を用いることにより燃焼域に対応したバイオマス密度を適用する。また、燃焼域は解析期間中の火災回数情報から、火災ごとに燃焼するバイオマス密度を算出することにより詳細な二酸化炭素放出量を推定する(式 3.2)。

$$\text{EMISSION}_{(m,p)} = \text{BA}_{(m,p)} \cdot \text{BD}_{(m,p)} \cdot \text{BE}_{(c)} \cdot \text{EF}_{(c)} \quad (3.1)$$

$$\text{BD}_{(m,p)} = \sum_{j=i+1}^I \left\{ \text{Agb}_{(p)} \cdot (1 - \text{BE}_{(c)})^{j-1} \right\} \quad (3.2)$$

ここで、mは推定する対象月、pは全球図中のグリッド位置、cはグリッド位置の土地被覆種別、iは前月までの累積火災発生数、Iは対象月までの累積火災発生数を示す。Agb<sub>(p)</sub>は、地上バイオマス図から得られるpが示すグリッドの地上バイオマス値を示す。式 3.2 に示す Agb と (1-BE) の積は 1 度の火災で燃え残った地上バイオマスを表現しており、同一の領域で複数回の火災が発生した場合、火災ごとに燃焼対象のバイオマス密度を評価し、対象期間中に燃焼した総バイオマス密度を、式 3.1 のバイオマス密度(BD)として使用する。

### 3.2.2 リモートセンシングデータ

森林火災からの二酸化炭素放出量を推定するために、火災図、土地被覆図、地上バイオマス図の3種類のリモートセンシングデータを使用する。

火災図は月次および年次の燃焼域と火災回数を得るために MODIS の Thermal Anomalies and Fire (MOD14A1) version 6 プロダクト(Giglio et al., 2016)を使用した。MOD14A1は、全ての火災域に対して、低(0%から30%)、中(30%から80%)、高(80%から100%)いずれかの信頼性フラグを割り当てている。本研究では、これらの信頼性フラグによって2種類の火災図、つまり、信頼性が中程度の火災図(NCM: Nominal Confidence Map, 30%から100%の信頼性)、全ての信頼性から得られる火災図(LCM: Low Confidence Map, 0%から100%の信頼性)を作成して使用した。

本研究で使用する全球土地被覆図は、MODIS Land Cover Type (MCD12Q1) version 6 (Sulla-Menashe et al., 2019)と、Global Land Cover 2000 project (GLC2000: Bartholomé et al., 2005)の2種類である。また、全球地上バイオマス図はワーゲニンゲン大学から公開されている GEOCARBON (Avitabile et al., 2016)と欧州宇宙機関(ESA)によって公開されている Globbiomass (ESA, 2017)の2種類を使用する。

### 3.2.3 評価

本研究では、火災による二酸化炭素放出量を推定するために、火災図に NCM と LCM，土地被覆図に MCD12Q1 と GLC2000，地上バイオマス図に GEOCARBON と Globbiomass を使用する。本論文ではこれらのデータの組合せにより 8 種類(2<sup>3</sup>)の二酸化炭素放出量インベントリを作成した。8 種類のインベントリの識別を簡単にするためインベントリ名は、入力データを表す 1 文字のアルファベット，土地被覆図(M: MCD12Q1, G: GLC2000)，地上バイオマス図(W: GEOCARBON, E: Globbiomass)，火災図(N: NCM, L: LCM)を順番につなげた 3 文字で表す。例えば、土地被覆図が MCD12Q1 (M)，地上バイオマス図が GEOCARBON (W)，火災図が NCM (N) の入力データセットで作成したインベントリ名は MWN となる。本研究結果を評価するための先行研究として Global Fire Emissions Database version 4.1s (GFED4.1s: van der Werf et al., 2017), Global Fire Assimilation System version 1.2 (GFASv1.2: Di Giuseppe et al., 2018), Fire Inventory from the National Center for Atmospheric Research version 1.5 (FINNv1.5: Wiedinmyer et al., 2011), Global Inventory for Chemistry-Climate studies (GICC: Mieville et al., 2010) の 4 種類を使用する。ただし、GICC はオリジナルデータではなく、アルゴリズムに従って作成したものである。

表 3.1 2001 年から 2020 年における 8 種類のインベントリと先行研究の平均年次二酸化炭素放出量。括弧内の数値は 2003 年から 2019 年の平均年次二酸化炭素放出量を示す。

インベントリ	平均年次 二酸化炭素放出量 (Pg CO <sub>2</sub> year <sup>-1</sup> )
MWN	6.32 (6.34)
MWL	6.66 (6.68)
MEN	13.9 (13.8)
MEL	14.5 (14.5)
GWN	3.46 (3.46)
GWL	3.66 (3.66)
GEN	9.04 (9.00)
GEL	9.48 (9.43)
本研究の平均	8.38 (8.36)
GFED4.1s	(6.93)
GFASv1.2	(6.44)
FINNv1.5	(6.10)
GICC	(9.65)
先行研究の平均	(7.28)

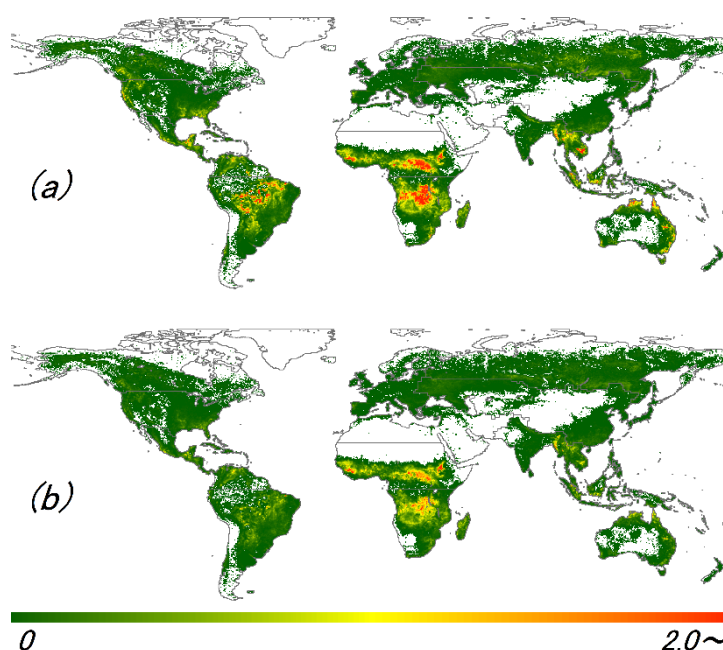


図 3.1 2001 年から 2020 年における年次二酸化炭素放出量(Tg CO<sub>2</sub> year<sup>-1</sup> grid<sup>-1</sup>)。8 種類のインベントリによる二酸化炭素放出量の平均(a)と標準偏差(b)を示す。グリッドの空間分解能は 50km×50km。

### 3.3 結果

平均年次二酸化炭素放出量の推定結果を表 3.1 に示す。最大の平均年次二酸化炭素放出量は MEL の 14.5±0.83 Pg CO<sub>2</sub> year<sup>-1</sup>，最小は GWN の 3.46±0.41 Pg CO<sub>2</sub> year<sup>-1</sup>，全インベントリの平均と標準偏差は 8.38±3.92 Pg CO<sub>2</sub> year<sup>-1</sup>であった。MEL は GWN の 4.2 倍の放出量に相当し、8 種類のインベントリの

平均値と比較して、MEL は 43%大きく、GWN は 58%小さい結果であった。平均放出量に最も近いインベントリは GEN の  $9.04 \pm 0.60 \text{ Pg CO}_2 \text{ year}^{-1}$  であった。**エラー！ 参照元が見つかりません。**は 8 種類の二酸化炭素放出量インベントリの平均と標準偏差の全球分布図である。全インベントリに共通してアフリカ大陸中央域とアマゾン域から高い二酸化炭素放出量が見られた。

本研究の推定結果と 4 種類の先行研究 (GFED4.1s, GFASv1.2, FINNv1.5, GICC) を比較する。2003 年から 2019 年の 4 種類の先行研究の平均年次放出量は  $7.28 \pm 0.60 \text{ Pg CO}_2 \text{ year}^{-1}$  であった (表 3.1)。本研究の推定結果の中で最も先行研究の平均放出量に近いインベントリは MWL で、GFASv1.2 に対し 4%大きく、GFED4.1s に対し 4%小さく、FINNv1.5 に対して 9%大きく、GICC に対して 31%小さい放出量であった。GICC を除く 3 種類の先行研究の平均年次二酸化炭素放出量は、本研究の推定結果である 8 種類のインベントリの標準偏差内の推定値となった。

### 3.4 第 3 章のまとめ

森林火災からの二酸化炭素放出量を推定するために、全球地上バイオマス図を使用して火災域ごとにバイオマス密度を適用し、火災回数情報を使用して火災ごとに燃焼するバイオマス密度を評価することによって不確実性の低減を目的とした推定手法を開発した。

森林火災による全球二酸化炭素放出量について、入力データの組合せにより 8 種類のインベントリを作成した。8 種類のインベントリの年次二酸化炭素放出量の平均と標準偏差は  $8.38 \pm 3.92 \text{ Pg CO}_2 \text{ year}^{-1}$  であり、入力データが二酸化炭素放出量の推定結果に与える影響を定量化した。また、最小と最大の二酸化炭素放出量は 4.2 倍の差があり、入力データによって大きく変動することが明らかになった。二酸化炭素放出量の推定結果を評価するために 4 種類の先行研究と比較した。比較した先行研究のうち 3 種類の先行研究 (GFED4.1s, GFASv1.2, FINNv1.5) の平均年次二酸化炭素放出量は、本研究の推定結果である 8 種類のインベントリの標準偏差内の推定値となった。

本研究は全球地上バイオマス図を使用し、火災ごとに燃焼するバイオマス密度を評価した森林火災からの二酸化炭素放出量の推定手法を開発した。また、入力データが二酸化炭素放出量の推定結果に与える影響を定量化した。しかし、依然として森林火災による二酸化炭素放出量の推定結果の不確実性は先行研究同様に定量化できていない。二酸化炭素放出量をトップダウン手法による大気濃度との比較評価など、不確実性の定量化、火災放出量の推定に用いる個々のデータソースの精度向上、より信頼性の高い火災放出量の推定手法の開発は今後の重要な課題である。

## 第 4 章 結論

本研究の目的は、衛星リモートセンシングデータを使用した土地利用変化および森林火災による二酸化炭素放出量の推定手法を開発することである。本論文では、土地利用変化を検出するための土地利用分類手法、森林火災による二酸化炭素放出量の推定手法について述べた。

第 2 章では、合成開口レーダデータを使用した土地利用図の作成手法について述べた。スペックルノイズの影響を低減するためのオブジェクト分類、単バンドデータから得られる情報を最大限に活用した特徴量の作成、機械学習による分類精度の向上のための特徴量選択を機能として加えた土地利用分類手法を開発し、インドネシア・スマトラ島中央域 (リアウ州, ジャンビ州, 西スマトラ州) の土地利用図を作成し結果を評価した。分類アルゴリズムとこれらの結果は Shiraiishi et al. (2014) で発表した。また、

土地利用図を自動作成するための分類アルゴリズムはソフトウェアとして開発され、Lバンド合成開口レーダデータの判読支援や利用用途拡大のために JAXA・地球観測研究センター (EORC)・ALOS 解析研究プロジェクトのウェブサイトで公開されている (宇宙航空研究開発機構 地球観測研究センター, 1997)。

第3章では、全世界の森林火災からの二酸化炭素放出量の推定手法について述べた。本研究は、最新のリモートセンシングデータを用いることによって先行研究の不確実性要因であったバイオマス密度の改善と、火災ごとに燃焼する地上バイオマスを評価する処理により推定手法を開発した。また、森林火災からの二酸化炭素放出量を推定する際の入力データに関する不確実性を定量化した。これらの結果は Shiraishi et al. (2021) で発表した。また、2019年から2020年にかけてオーストラリアで発生した大規模火災に関して本推定手法を適用した結果と評価を Shiraishi and Hirata (2021) で発表した。本手法を用いて作成した森林火災からの二酸化炭素放出量インベントリは、Greenhouse gases observation satellite (GOSAT) データの検証のために大気輸送モデルの入力データとして国立環境研究所にて定常利用されることが検討されており、先行研究との比較により高評価を得ている (Saito et al., under review)。

世界第3位の温室効果ガス放出国であるインドネシアでは、土地利用変化、泥炭火災の2つのセクターからの二酸化炭素放出量が国全体の放出量のうち74%を占めており (MOE, 2010)、両セクターからの二酸化炭素放出量を推定する手法の開発は重要な課題である。本論文では、土地利用図の作成手法と森林火災からの二酸化炭素放出量の推定手法について述べたが、最終的な目的は両者を統合し、土地利用変化および森林火災からの二酸化炭素放出量の推定手法を開発することである。本論文では土地利用変化および森林火災からの二酸化炭素放出量の推定手法については言及していないが、この推定手法と結果に関して論文を執筆している。これらの開発した推定手法は、REDD+のMRVシステムに代表されるような熱帯泥炭域における炭素収支の推定手法として、GFOI や IPCC などの国際的な枠組みを通じて世界各国に展開することができる。パリ協定で締結された世界の平均気温上昇を抑制する目標を達成し、気候変動の緩和と適応を実現するために、将来的に多様化と高精度化が期待されるリモートセンシングデータを有効活用し、地球の炭素循環の理解と不確実性の低減のために持続的な研究開発が必要である。

## 参考文献

- Avitabile, V., Herold, M., Heuvelink, G. B.M., Lewis, S. L., Phillips, O. L., Asner, G. P., Armston, J., Ashton, P. S., Banin, L., Bayol, N., Berry, N. J., Boeckx, P., de Jong, B. H.J., Devries, B., Girardin, C. A.J., Kearsley, E., Lindsell, J. A., Lopez-Gonzalez, G., Lucas, R., Malhi, Y., Morel, A., Mitchard, E. T.A., Nagy, L., Qie, L., Quinones, M. J., Ryan, C. M., Ferry, S. J.W., Sunderland, T., Laurin, G. V., Gatti, R. C., Valentini, R., Verbeeck, H., Wijaya, A., & Willcock, S. (2016). An integrated pan-tropical biomass map using multiple reference datasets. *Global Change Biology*, 22(4), 1406–1420. <https://doi.org/10.1111/gcb.13139>
- Baatz, M., & Schäpe, A. (2000). Multiresolution Segmentation : an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung, XII*, 12–23, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, Germany.
- Bartholomé, E., & Belward, A. S. (2005). GLC2000: A new approach to global land cover mapping from earth observation data. *International Journal of Remote Sensing*, 26(9), 1959–1977. <https://doi.org/10.1080/01431160412331291297>
- Di Giuseppe, F., Rémy, S., Pappenberger, F., & Wetterhall, F. (2018). Using the Fire Weather Index (FWI) to improve the estimation of FIRE emissions from Fire radiative power (frp) observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(8), 5359–5370. <https://doi.org/10.5194/acp-18-5359-2018>
- European Space Agency (ESA). (2017). *DUE GlobBiomass Validation Report*.
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2020). *Global Forest Resources Assessment 2020 – Key findings*. Rome. <https://doi.org/10.4060/ca8753en>

- Giglio, L., Schroeder, W., & Justice, C. O. (2016). The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products. *Remote Sensing of Environment*, 178, 31–41. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.054>
- Harris, N. L., Brown, S., Hagen, S. C., Saatchi, S. S., Petrova, S., Salas, W., Hansen, M. C., Potapov, P. V., & Lutsch, A. (2012). Baseline map of carbon emissions from deforestation in tropical regions. *Science*, 336(6088), 1573–1576. <https://doi.org/10.1126/science.1217962>
- Kohavi, R., & John, G. H. (1997). Wrappers for feature subset selection. *Artificial Intelligence*, 97(1-2), 273–324. [https://doi.org/10.1016/s0004-3702\(97\)00043-x](https://doi.org/10.1016/s0004-3702(97)00043-x)
- Mieville, A., Granier, C., Lioussé, C., Guillaume, B., Mouillot, F., Lamarque, J.-F., Grégoire, J.-M., & Pétron, G. (2010). Emissions of gases and particles from biomass burning during the 20th century using satellite data and an historical reconstruction. *Atmospheric Environment*, 44(11), 1469–1477. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.01.011>
- Ministry of Environment (MOE), Republic of Indonesia. (2010). *Indonesia Second National Communication Under The United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)*.
- Motohka, T., Shimada, M., Uryu, Y., & Setiabudi, B. (2014). Using time series PALSAR gamma nought mosaics for automatic detection of tropical deforestation: A test study in Riau, Indonesia. *Remote Sensing of Environment*, 155, 79–88. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.04.012>
- Saito, M., Shiraishi, T., Hirata, R., Niwa, Y., Saito, K., Steinbacher, M., Worthy, D., & Matsunaga, T. Sensitivity of biomass burning emissions estimates to land surface information. (under review).
- Shimada, M. (2010). Ortho-Rectification and Slope Correction of SAR Data Using DEM and Its Accuracy Evaluation. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 3(4), 657–671. <https://doi.org/10.1109/jstars.2010.2072984>
- Shimada, M., & Ohtaki, T. (2010). Generating Large-Scale High-Quality SAR Mosaic Datasets: Application to PALSAR Data for Global Monitoring. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 3(4), 637–656. <https://doi.org/10.1109/jstars.2010.2077619>
- Shimada, M., Itoh, T., Motooka, T., Watanabe, M., Shiraishi, T., Thapa, R., & Lucas, R. (2014). New global Forest/non-forest maps from ALOS PALSAR data (2007–2010). *Remote Sensing of Environment*, 155, 13–31. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.04.014>
- Shiraishi, T., & Hirata, R. (2021). Estimation of carbon dioxide emissions from the megafires of Australia in 2019–2020. *Scientific Reports*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-87721-x>
- Shiraishi, T., Hirata, R., & Hirano, T. (2021). New Inventories of Global Carbon Dioxide Emissions through Biomass Burning in 2001–2020. *Remote Sensing*, 13(10), 1914. <https://doi.org/10.3390/rs13101914>
- Shiraishi, T., Motohka, T., Thapa, R. B., Watanabe, M., & Shimada, M. (2014). Comparative Assessment of Supervised Classifiers for Land Use–Land Cover Classification in a Tropical Region Using Time-Series PALSAR Mosaic Data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(4), 1186–1199. <https://doi.org/10.1109/jstars.2014.2313572>
- Sulla-Menashe, D., Gray, J. M., Abercrombie, S. P., & Friedl, M. A. (2019). Hierarchical mapping of annual global land cover 2001 to present: The MODIS Collection 6 Land Cover product. *Remote Sensing of Environment*, 222, 183–194. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.12.013>
- Thapa, R. B., Shimada, M., Watanabe, M., Motohka, T., & Shiraishi, T. (2013). The Tropical Forest in South East Asia: Monitoring and scenario modeling using Synthetic Aperture Radar Data. *Applied Geography*, 41, 168–178. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2013.04.009>
- Uryu, Y., Putrastuti, E., Laumonier, Y., Sunarto, Setiabudi., Budiman, A., Yulianto, K., Sudibyo, A., Hadian, O., Kosasih, D.A. & Stuwe, M. (2010) Sumatra’s Forests, their Wildlife and the Climate – Windows in Time: 1985, 1990, 2000 and 2009. WWF-Indonesia Report, Jakarta.
- Wiedinmyer, C., Akagi, S. K., Yokelson, R. J., Emmons, L. K., Al-Saadi, J. A., Orlando, J. J., & Soja, A. J. (2011). The fire inventory from NCAR (Finn): A high resolution global model to estimate the emissions from open burning. *Geoscientific Model Development*, 4(3), 625–641. <https://doi.org/10.5194/gmd-4-625-2011>
- van der Werf, G. R., Randerson, J. T., Giglio, L., Van Leeuwen, T. T., Chen, Y., Rogers, B. M., Mu, M., Van Marle, M. J.E., Morton, D. C., Collatz, G. J., Yokelson, R. J., & Kasibhatla, P. S. (2017). Global fire emissions estimates during 1997–2016. *Earth System Science Data*, 9(2), 697–720. <https://doi.org/10.5194/essd-9-697-2017>
- 宇宙航空研究開発機構 地球観測研究センター. (1997). Alos-2 ツール. Retrieved January 9, 2022, from [https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/jp/alos-2/datause/a2\\_tool\\_j.htm](https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/jp/alos-2/datause/a2_tool_j.htm).