

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：82101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K03976

研究課題名（和文）マルチスケール二酸化炭素逆解析のための長期4次元変分法システムの開発

研究課題名（英文）Development of a long-term 4D-Var inverse analysis system for estimating CO2 fluxes in multiple scales

研究代表者

丹羽 洋介 (Niwa, Yosuke)

国立研究開発法人国立環境研究所・地球システム領域・主任研究員

研究者番号：70588318

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：4次元変分法によるCO2逆解析システムをもとにして、地表面フラックスの短期(数時間)から長期(数年)のスケールまで幅広くカバーすることのできるマルチスケール最適化手法の開発を行った。様々な時間スケールのフラックスを同時に解くための手法開発を行い、システムに実装することで、30年といった長期間の解析においても光合成や呼吸といった日変化のあるグロスフラックスを解析対象とすることが可能となり、炭素循環メカニズムの理解深化に繋がる逆解析が可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球表層における炭素循環メカニズムには未だ解明すべき点が多く残されており、温暖化予測に大きな不確実性が生じている。大気濃度からCO2の地表面フラックスを推定する「逆解析」は有力な手法の一つであるが、その逆解析について本研究では、様々なスケールのフラックスを適切に最適化するための手法開発をするなどの開発研究を行い、その結果、フラックス推定の精度向上が向上した。これにより、炭素循環メカニズムの理解が促進し、温暖化予測の不確実性低減に繋がると期待される。

研究成果の概要（英文）：Based on an inverse analysis system with the 4-dimensional variational method, we developed optimization schemes to estimate surface CO2 fluxes in multiple scales - from few hours to a decade. Optimization schemes to simultaneously estimate fluxes in several temporal scales were developed and then implemented in the system. Consequently, diurnally varying gross-fluxes such as photosynthesis and respiration have become optimization parameters even for a 30-yr long time analysis period, whose inverse analysis would help us to better understand carbon cycle mechanisms.

研究分野：大気科学

キーワード：二酸化炭素 逆解析 温暖化

1. 研究開始当初の背景

地球表面における炭素循環メカニズムには未だ解明すべき点が多く残されている。そのため、陸域や海洋での炭素循環過程が組み込まれた地球システムモデルの間では、長期気候変動予測において重要な要素である気候炭素循環フィードバックの評価に顕著なばらつきが生じており、温暖化予測に大きな不確実性が生じている。炭素循環メカニズムの理解を深めるためには、現在、また過去の大気・陸域・海洋間における二酸化炭素(CO₂)フラックスの時空間変動を正確に把握する必要がある。このCO₂フラックス変動を大気CO₂濃度観測データから定量的に推定する手法として「逆解析」という手法がある。この逆解析では、大気と地表面間の輸送過程を考慮するために大気輸送モデルを用い、さらにベイズ推定などの統計学的アプローチにより、ある既存のCO₂フラックスデータ(陸域植生モデルの出力値やフラックス直接観測データをスケールアップしたもの)を修正し、大気濃度観測と整合的となるよう最適化を施す。

近年、地上ステーションや航空機、船舶、衛星など様々なプラットフォームを用いることにより、大気CO₂観測が充実してきており、時空間的に密な観測データが利用可能となってきている。これらの観測データの情報を最大限に活かすためには逆解析の高解像度化が必要不可欠であり、世界の研究機関では様々な手法を用いて高解像度化に向けた研究開発が行われている。この中で有望な手法として目されているものに4次元変分法(4D-Var)がある。この手法は、気象や海洋の予測、再解析のために使われるデータ同化手法として、長年に渡って開発・研究が行われているが、近年では、この4D-VarをCO₂などの大気微量成分の逆解析にも応用される研究が増えてきている。

CO₂逆解析分野における4D-Varの開発研究は気象・海洋のデータ同化分野と比較して歴史が浅く、まだ発展の余地を多く残している。特にCO₂逆解析に特有の長期同化ウィンドウに特化した応用技術の開発は未開拓である。気象や海洋のデータ同化では、扱う現象の非線形性から数時間から数日間という短い時間内で解析が行われるが(この解析対象期間を同化ウィンドウと呼ぶ)CO₂逆解析では、考慮する過程が大気輸送のみで線形性が良いこと、また、全球の収支を閉じるために正確に濃度増加トレンドの情報を入れる必要があることから、数年から数十年という長期の同化ウィンドウが必要とされている。

この長期同化ウィンドウから得られるCO₂フラックスには異なるスケールの時間変動が存在する。実際、陸域生態系の光合成・呼吸による日変化から、フェノロジー(植物季節)また、森林火災、森林伐採などの攪乱で生じる変動やCO₂濃度増加による施肥効果など、異なる時間スケールの様々な要因によってCO₂フラックスは変動している。これらのフラックスのシグナルは、混ざり合って大気濃度変動として観測される。逆解析では、この大気濃度データを“解きほぐす”ことになるが、各スケールのフラックス変動を同時に最適化できることが望ましい。しかしながら、そのような技術は未だ確立されていない。

2. 研究の目的

そこで本研究では、短期(数時間)から長期(数年)のスケールまで幅広くカバーすることのできるマルチスケール最適化手法の開発を目的とした。従来は、観測が主にバックグラウンド大気で行われてきたことから、フラックスの日変化を解像することは困難であり、解析の対象外であった。しかしながら近年、タワーなどを用いた大陸内部の観測が拡充し、日変化の情報を持つ大気濃度データが増えてきた。本研究ではこれらの観測データを積極的に用い、陸域生態系における呼吸と光合成それぞれのグロスのフラックス量を独立に推定することを目指した。本研究では、全球モデルを用いた長期の解析をしつつも、観測データが充実している地域においては日変化まで解像し、地球全体のフラックスの高精度化を図った。

3. 研究の方法

本研究では、申請者が今まで開発してきた逆解析システムNICAM-based Inverse Simulation for Monitoring CO₂(NISMN-CO₂)をもとにして研究開発を行った。NISMN-CO₂は大気モデルNonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model(NICAM: Satoh et al., 2014)の大気輸送モデル版(NICAM-TM: Niwa et al., 2011)をベースとし、準ニュートン法による降下法を用いた4D-Varで構成された逆解析システムである(Niwa et al., 2017a,b)。

まず、逆解析によるCO₂フラックス推定において、観測データの拘束力を定量的に評価するため、解析誤差共分散行列の推定手法の開発を行った。ここでは、Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shann(BFGS)法を用い、アンサンブル法やベクトル群の直交化を導入することで、高精度化を図った。次に、様々な時間スケールのフラックスを同時に解くために、フラックスの要素毎に異なる時間ステップでフラックス推定を可能とし、さらに陸域生態系においては、正味ではなく、光合成・呼吸のグロスのフラックスを推定対象とした。ここで、それぞれの日変化を再現しながらも、平均的な光合成・呼吸のグロスフラックスを推定することを可能とするため、地上気温と短波入射フラックスのデータを使って日変化を表現する高時間分解能のファクターをフラックスモデルに導入し、NISMN-CO₂に実装した。この開発したNISMN-CO₂を用いて、航空機観測によ

る実観測データを用いた逆解析を実施し、2015年に東南アジアで発生した大規模な森林火災によるCO₂放出イベントに着目した解析を実施した。

また、さまざまな時空間密度の観測データを全球で効率的に取り込むための観測重み付け手法の開発、また、陸域生態系のメカニズムにより沿った形での誤差相関をフラックス初期値に与えるために100年ほどの長期フラックスデータから各年を1つのメンバーとするアンサンブルを作成して誤差共分散行列を作成するスキームを開発した。さらに、緯度経度格子とNICAMの20面体格子間の高精度なグリッド変換スキームを導入し、従来の20面体格子上ではなく、任意の緯度経度格子上でフラックス推定を行うことを可能とする手法を開発した。

最後に、開発・改良したNISMON-CO₂を用いて、疑似観測データを用いたCO₂逆解析の実験を行い、10年以上の長期にわたる解析期間でのフラックス推定の性能評価を行った。また、その評価結果をふまえて、実観測データを用いた30年間の長期逆解析を実施し、解析結果をGlobal Carbon Project (GCP)が主導している逆解析比較に提出した。

4. 研究成果

BFGS法を用いた解析誤差共分散行列の推定手法の開発では、解析解との比較結果から、特に誤差相関(誤差共分散行列の非対角成分)について、従来の手法よりも高精度に推定することが可能であることがわかった。しかしながら、その精度を達成するためには数多くのアンサンブル数を必要とするため、今後も継続してアルゴリズムの効率化を図っていく必要があることもわかった(Niwa and Fujii, 2020)。

航空機観測データを使った逆解析では東南アジアの島嶼地域を解像するために空間解像度を従来よりも高い112 kmとし、また、光合成と呼吸のグロスフラックスとともに、森林火災からの放出量をそれぞれ独立に推定した。ここで時間変動の大きい火災特有の事象を考慮して、フラックスの推定対象は月平均ではなく日平均値とした。一方で、海洋については、本事象に大きな影響がないとして、月平均で推定した。この逆解析の結果、東南アジア地域で発生した大規模火災からのCO₂放出量が9-10月の2ヶ月間で273 Tg Cであると推定され、東南アジアにおける森林火災が重要なCO₂発生源であること(日本の年間の放出量に匹敵する量であること)がわかった。さらに本解析により、新たに開発したNISMON-CO₂が事象に応じて時空間的にフレキシブルに解析を行うことができるシステムであることが実証された(Niwa et al., 2021)。

観測重み付けやアンサンブルをもとにした誤差共分散行列、グリッド変換をNISMON-CO₂に導入したのちに行った長期の逆解析では、疑似観測データを用いた実験から、季節変動のみならず、経年的な変動までも逆解析で推定することが可能であることがわかった(図1)。一方で、10年間の解析期間に対して十分な推定精度を得るためには、4D-Var計算における反復計算が300回ほど必要であることもわかった。また、それぞれの開発要素に対して行った感度実験では、フラックス推定の精度を最も高めたものが観測重み付けであることがわかった(Niwa et al., 2022)。実観測データを用いて30年間の解析を実施し、データを提出したGCPの解析では、NISMON-CO₂の解析結果が全球的には欧米の他の研究機関と同程度のパフォーマンスを持っていることが確認された(Friedlingstein et al., 2022)。

以上のように本研究では、NISMON-CO₂の開発・改良を重ね、30年にも及ぶ長期の解析期間をとっても、先行研究に引けを取らない解析プロダクトを作成することが可能となった。ここで、光合成や呼吸による日変化も適切に扱うフラックスモデルを新たに用いることで、長期の期間であっても光合成や呼吸それぞれを解析対象とすることが可能となり、フラックスの日変化が大きい大陸内部の観測データの利用も可能となった。これらの大陸内部の観測データを積極的に用いることで、特に陸上のフラックス推定が向上したと考えられる。今後は、さらなる地球表層における炭素循環メカニズム解明を目指して、陸域フラックスのメカニズムを考慮したフラックス推定の評価を行っていく予定である。

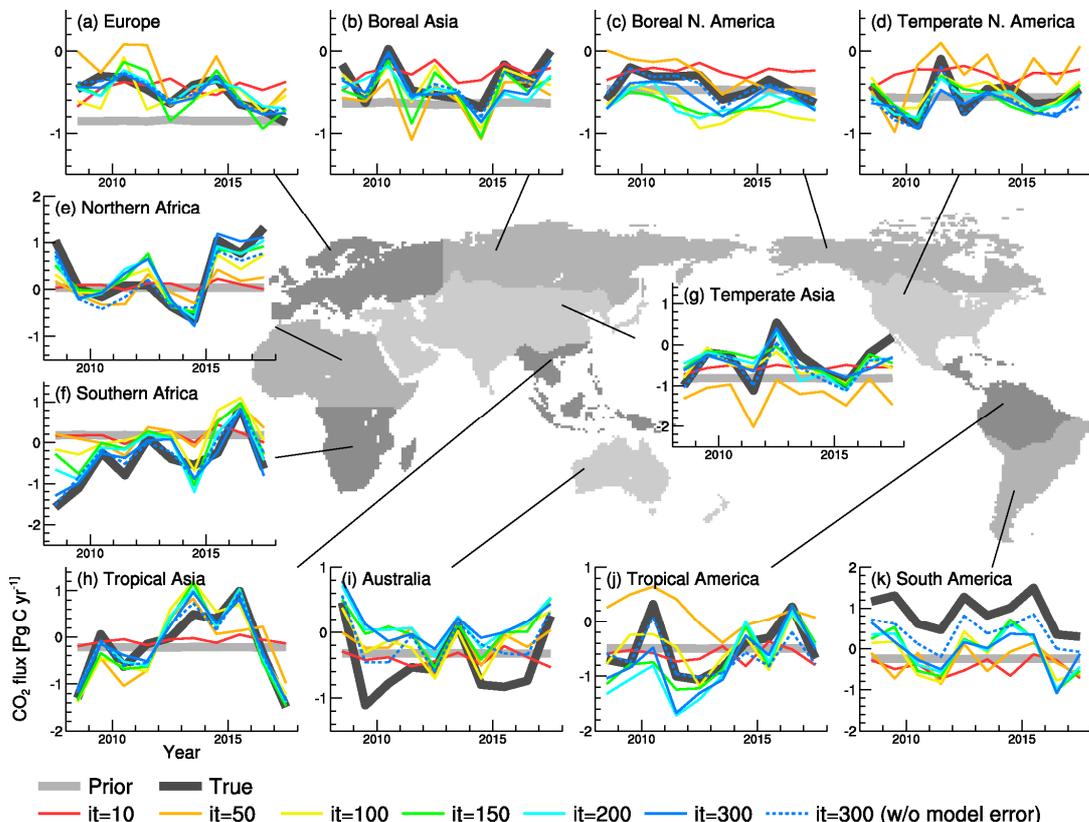


図 1: 疑似観測データを用いた CO₂ 逆解析実験における陸域 1 1 領域の化石燃料起源以外の CO₂ フラックスの年々変動。薄い灰色と濃い灰色の実線はそれぞれ初期値と真値を表す。他の色の実線は CTL 実験による逆解析の解析値で 10 回から 300 回までの反復計算で得られたものを示す。青の破線は、モデル誤差を考慮しない逆解析 (NO_ERR 実験) の解析値で 300 回の反復計算で得られたものを示す。Niwa et al. (2022) の Fig.8 より。

< 引用文献 >

- Friedlingstein, P., et al. (2022) Global Carbon Budget 2022, *Earth Syst. Sci. Data*, 14, 4811-4900, doi:10.5194/essd-14-4811-2022.
- Niwa, Y., H. Tomita, M. Satoh, R. Imasu (2011) A three-dimensional icosahedral grid advection scheme preserving monotonicity and consistency with continuity for atmospheric tracer transport, *J. Meteor. Soc. Japan*, 89, 3, 255-268, doi: 10.2151/jmsj.2011-306.
- Niwa, Y., H. Tomita, M. Satoh, R. Imasu, Y. Sawa, K. Tsuboi, H. Matsueda, T. Machida, M. Sasakawa, B. Belan, N. Saigusa (2017a) A 4D-Var inversion system based on the icosahedral grid model (NICAM-TM 4D-Var v1.0) - Part 1: Offline forward and adjoint transport models. *Geosci. Model Dev.*, 10, 1157-1174, doi:10.5194/gmd-10-1157-2017.
- Niwa, Y., Y. Fujii, Y. Sawa, Y. Iida, A. Ito, M. Satoh, R. Imasu, K. Tsuboi, H. Matsueda, N. Saigusa (2017b) A 4D-Var inversion system based on the icosahedral grid model (NICAM-TM 4D-Var v1.0) - Part 2: Optimization scheme and identical twin experiment of atmospheric CO₂ inversion. *Geosci. Model Dev.*, 10, 2201-2219, doi:10.5194/gmd-10-2201-2017.
- Niwa Y., and Y. Fujii (2020) A conjugate BFGS method for accurate estimation of a posterior error covariance matrix in a linear inverse problem, *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, 146, 3118- 3143, doi:10.1002/qj.3838.
- Niwa, Y., Y. Sawa, H. Nara, T. Machida, H. Matsueda, T. Umezawa, A. Ito, S.-I. Nakaoka, H. Tanimoto, Y. Tohjima (2021) Estimation of fire-induced carbon emissions from Equatorial Asia in 2015 using in situ aircraft and ship observations, *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 9455-9473, doi:10.5194/acp-21-9455-2021.
- Niwa, Y., Ishijima, K., Ito, A., and Iida, Y. (2022) Toward a long-term atmospheric CO₂ inversion for elucidating natural carbon fluxes: technical notes of NISMON-CO₂ v2021.1., *Prog Earth Planet Sci* 9, 42, <https://doi.org/10.1186/s40645-022->

00502-6.

Satoh, M., et al. (2014) The Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model: Description and Development, *Progress in Earth and Planetary Science*, 1, 18.
doi:10.1186/s40645-014-0018-1.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Niwa Yosuke, Sawa Yosuke, Nara Hideki, Machida Toshinobu, Matsueda Hidekazu, Umezawa Taku, Ito Akihiko, Nakaoka Shin-Ichiro, Tanimoto Hiroshi, Tohjima Yasunori	4. 巻 21
2. 論文標題 Estimation of fire-induced carbon emissions from Equatorial Asia in 2015 using in situ aircraft and ship observations	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Atmospheric Chemistry and Physics	6. 最初と最後の頁 9455 ~ 9473
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5194/acp-21-9455-2021	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Niwa Yosuke, Fujii Yosuke	4. 巻 146
2. 論文標題 A conjugate BFGS method for accurate estimation of a posterior error covariance matrix in a linear inverse problem	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society	6. 最初と最後の頁 3118 ~ 3143
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/qj.3838	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Niwa Yosuke, Ishijima Kentaro, Ito Akihiko, Iida Yosuke	4. 巻 9
2. 論文標題 Toward a long-term atmospheric CO2 inversion for elucidating natural carbon fluxes: technical notes of NISMON-CO2 v2021.1	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Progress in Earth and Planetary Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40645-022-00502-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 4件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 丹羽洋介
2. 発表標題 温室効果ガスの逆解析研究
3. 学会等名 第13回データ同化ワークショップ(招待講演) (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名	Yosuke Niwa, Yasunori Tohjima, Masao Ishii, Akihiko Ito, Kyohei Yamada, Yukio Terao, Toshinobu Machida, Taku Umezawa, Shin-Ichiro Nakaoka, Hiroshi Tanimoto, Yosuke Iida, Hiroyuki Tsujino, Naohiro Kosugi, Takashi Maki, Kentaro Ishijima, Kazuhiro Tsuboi, Ryo Fujita
2. 発表標題	Multiple observation platforms and inverse/transport simulations for monitoring GHGs around Asia
3. 学会等名	WMO International Greenhouse Gas Monitoring Symposium (国際学会)
4. 発表年	2023年

1. 発表者名	Yosuke Niwa
2. 発表標題	Multi-species inversion for better constraining Asian GHG emissions
3. 学会等名	JpGU2022 (招待講演)
4. 発表年	2022年

1. 発表者名	Yosuke Niwa, Yousuke Sawa, Hideki Nara, Toshinobu Machida, Hidekazu Matsueda, Taku Umezawa, Akihiko Ito, Shin-Ichiro Nakaoka, Hiroshi Tanimoto, and Yasunori Tohjima
2. 発表標題	Inverse analysis of fire-induced carbon emission from Equatorial Asia in 2015 with CONTRAIL and NIES-VOS data
3. 学会等名	Europe Geoscience Union General Assembly 2021 (国際学会)
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	Yosuke Niwa, Yousuke Sawa, Hideki Nara, Toshinobu Machida, Hidekazu Matsueda, Taku Umezawa, Akihiko Ito, Shin-Ichiro Nakaoka, Hiroshi Tanimoto, and Yasunori Tohjima
2. 発表標題	Inverse analysis with aircraft and ship observations for estimating CO2 fluxes in Equatorial Asia
3. 学会等名	The 10th Asia-Pacific GAW Workshop on Greenhouse Gases (招待講演)
4. 発表年	2021年

1. 発表者名 Yosuke Niwa
2. 発表標題 NISMOM and CONTRAIL for estimating GHG fluxes in Asia
3. 学会等名 National (training) Workshop on Greenhouse Gases (GHG-3) Observation and Inverse Modeling on Indian Regional Perspective (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Niwa Yosuke
2. 発表標題 Toward a long-term global inversion of atmospheric CO ₂ for elucidating seasonal and interannual variations of natural carbon fluxes
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 丹羽洋介、伊藤昭彦、飯田洋介
2. 発表標題 陸・海CO ₂ フラックスの長期変動推定に向けた逆解析実験
3. 学会等名 第 25回大気化学討論会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 丹羽洋介
2. 発表標題 全球CH ₄ 逆解析によるフラックス推定値の独立性評価
3. 学会等名 日本気象学会2019年度秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Niwa Yosuke, Sawa Yousuke, Nara Hideki, Machida Toshinobu, Matsueda Hidekazu, Umezawa Taku, Ito Akihiko, Nakaoka Shin- Ichiro, and Tanimoto Hiroshi
2. 発表標題 Fire-induced CO2 emission from Equatorial Asia in 2015 estimated by CONTRAIL
3. 学会等名 12th AOGEO Symposium 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Niwa Yosuke, Sawa Yousuke, Nara Hideki, Machida Toshinobu, Matsueda Hidekazu, Umezawa Taku, Ito Akihiko, Nakaoka Shin- Ichiro, and Tanimoto Hiroshi
2. 発表標題 Fire-induced CO2 emission in Equatorial Asia during the 2015 drought estimated by aircraft and ship observations
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------