

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 21 日現在

機関番号：82109

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24740326

研究課題名(和文) 東アジアを対象とした広域大気汚染物質排出量の長期間逆推定

研究課題名(英文) Long-term inverse modeling of trans-boundary transported air pollutants over East Asia

研究代表者

弓本 桂也 (Yumimoto, Keiya)

気象庁気象研究所・環境・応用気象研究部・研究官

研究者番号：50607786

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円、(間接経費) 0円

研究成果の概要(和文)：グリーン関数法を応用した大気汚染物質排出量逆推計システムを構築した。構築したシステム、化学輸送モデル、衛星データを用いて中国から排出される一酸化炭素(CO)排出量の長期間逆推計を行った。結果を地上観測データで検証した。逆推計結果は、冬季から春季にかけての大陸から輸送される高濃度空気を再現し、中国都市部で見られた過小評価を改善した。逆推計CO排出量には冬季から春季を最大に、夏季を最小とする季節変化が見られた。中国からの年CO排出量は2007年以降に減少傾向が見られた。この減少傾向は中国の経済・社会情勢が原因だと考えられる。構築した逆推計システムは他の大気汚染物質排出量の逆推計にも応用された。

研究成果の概要(英文)：Carbon monoxide (CO) emissions in China in 2005-2010 were estimated by an inverse modeling, estimated by an inverse modeling, vertical CO profiles derived from satellite and a tagged CO simulation. Inversion results were validated with independent in situ observations. Modeling with a posteriori emission successfully reproduced CO outflow from the continent during winter and spring, and compensated for underestimates in central and eastern China in summer. A posteriori emissions showed large seasonal variations in which December and March emissions were on average 23% larger than August emissions, consistent with other studies. Estimated Chinese CO emissions were 184.4, 173.1, 184.6, 158.4, 157.4, and 157.3 Tg/year for 2005-2010. The decrease after 2007 is partly attributed to Chinese socioeconomic conditions. The inverse modeling system developed in this study is also applied to other pollutants (e.g., Cs-137 emitted by the Fukushima Nuclear Power Plant Accident).

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学、気象・海洋物理・陸水学

キーワード：逆推定 化学輸送モデル 衛星観測 大気環境 東アジア グリーン関数法 エミッションインベントリ

1. 研究開始当初の背景

(1) 発展途上国の急激な経済成長を背景にエアロゾル・大気微量気体による大気質の悪化が顕著となっている。とくに東アジアでは大陸の都市部を起源とした広域(越境)大気汚染が顕在化している。特に、2007年5月に九州北部広域にわたって発生した光化学スモッグは、広域大気汚染が既に社会問題化していることを印象づけた。

(2) このような広域大気汚染を包括的に理解するためには化学物質輸送モデル(Chemical Transport Model: CTM)を用いた研究が有効である。CTMでは化学汚染物質の排出量分布(エミッションインベントリ: EI)を読み込み、大気中の移流や拡散、化学反応を計算し、大気汚染物質の4次元分布を得る。CTMは10年スケールの長期間解析や化学天気予報などに用いられてきたが、未だ不確実性も内包している。CTM自体の未熟さに加え、重要な入力データであるEIに含まれる誤差もその影響が大きい。

(3) 通常、CTMに用いられるEIはボトムアップ推計量と呼ばれるもので、エネルギー・経済統計・人口分布などを積み上げて推算されたものである。そのため、各統計量や過程にその精度が大きく左右される上、その積算過程で誤差も同様に積み上げてしまう。また、統計量の性質上、次空間分解能を細かく取りにくく、即応性に欠け、算出までに数年かかってしまうこともある。

2. 研究の目的

(1) 以上の問題点を克服するために、グリーン関数法を応用したEI逆推定システムを開発する。

(2) 反応性の乏しい一酸化炭素(CO)に対してシステムを適用し、衛星データを拘束条件に排出源強度・分布を逆推計し、手法の実行可能性の確認を行う。

(3) 逆推定システムの最適化モジュールの効率化・並列化を行い、手法をして洗練させ、汎用性を持たせる。

(4) 長期間に渡る逆推定を行い、求めた排出量を用いたモデル計算とその検証、季節・経年変動などの解析を通じて広域大気汚染の理解の促進を行う。

(5) 逆推計で得た排出量の誤差の推定。

(6) CO以外の物質への応用研究の検討を行う。

3. 研究の方法

(1) 全球化学輸送モデル(GEOS-Chem)を用いて、逆推計に必要なソース・レセプター感度の計算を行った。計算時間の効率化のため、

タグ付きシミュレーションを利用した。ネスティングを行い、モデルの水平解像度を細かくした。モデルの解像度は0.5度×0.6667度である。基本排出量にはREAS(Regional Emission inventory in ASia) V2.1を用いた。

(2) 拘束条件となる観測データにはTerra衛星搭載のMOPITTセンサーで観測されたCO濃度の鉛直プロファイル(Level 3, Version 5)を用いた。

(3) 逆推計の検証には、温室効果ガス世界資料センター(WDCGG)が提供する地上観測データを用いた。

(4) 逆推定手法にはグリーン関数法を用いた。

4. 研究成果

(1) 図1に春季・夏季における東アジアのCO分布を示す。上段より衛星観測、逆推計前、逆推計後のモデル結果である。春季をみると、中国から高濃度のCOが東に輸送され、朝鮮半島・日本海・日本列島を覆っていることがわかる。濃度は800hPa(高度約2km)で150ppbvを超える。逆推計前のモデル結果はこの大陸から輸送を過小評価している。また、中国の都市部(北京から山西省にかけての地域)の高濃度を再現出来ていない。この中国都市部での過小評価は夏季にも見られる。一方、逆推計で得られた排出量を用いたモデル結果では、大陸からの輸送、中国都市部での過小評価ともに改善していることがわかる。

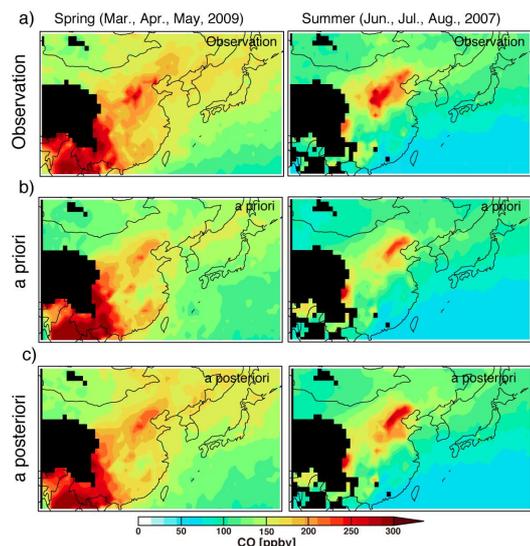


図1 春季(左)・夏季(右)における一酸化炭素分布(800hPa)。上段より衛星観測、逆推定前、逆推定後。

(2) 図2に逆推計に用いた衛星データの数

(下段灰色の棒グラフ) 東アジアで領域平均した衛星観測データ(上段黒丸) 逆推計前後のモデルによる CO(上段破線、実線) 逆推計による誤差の減少率(下段鎖線)を示す。逆推計には一ヶ月あたり約 3200-4300 のデータが使用された。2009 年の夏は衛星センサーが調整中だったためデータが得られていない。冬季で使用データが少ないのは、日本海の雲による欠測の影響が大きい。逆推計前は、観測に比べ冬季の濃度に過小な傾向があったが、逆推計によって改善されるとともに、衛星観測に見られる細かい変動が再現されるようになった。実験期間中すべての期間で衛星観測との誤差は逆推計によって減少し、誤差減少率は 6 年間平均で 22.6% となった。

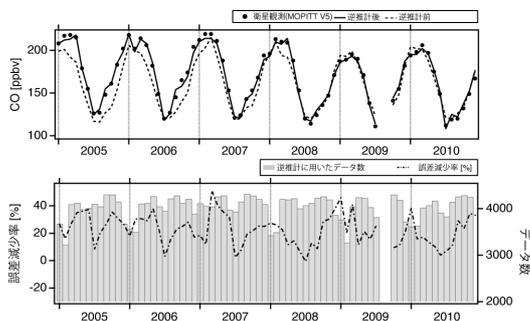


図2 (上段) 東アジア領域で平均した一酸化炭素濃度の推移(800 hPa)。黒丸: 衛星観測、実線: 逆推計後、破線: 逆推計前のモデル結果。(下段) 逆推計に用いたデータ数(棒グラフ) 逆推計によるデータ減少率(破線)。

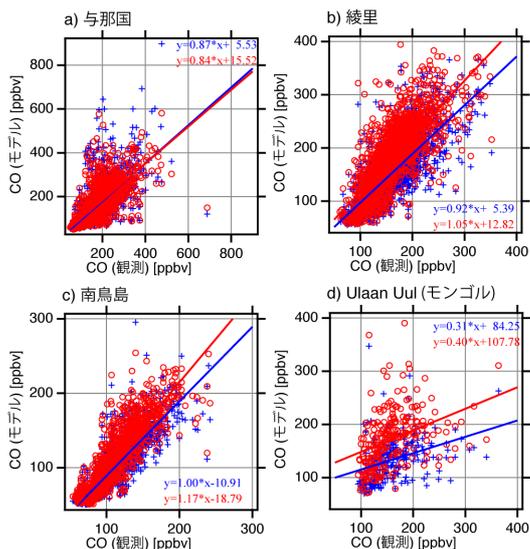


図3 独立な観測データを用いた逆推計結果の検証。赤: 逆推計後、青: 逆推計前。それぞれ与那国、綾里、南鳥島、モンゴルの Ulaan Uul。

(3) 逆推計結果を正しく評価するには、逆推計に用いられていない独立な観測データを用いた検証が必要不可欠である。本研究では

WDCGG(温室効果ガス世界資料センター)によって提供されている地上観測データを用いた。図3に結果を散布図で示す。どの地点も概ね逆推計による改善が見られた。これは主に冬季~春季にかけての過小評価の改善によるものである。平均二乗誤差・相関係数・標準平均誤差・標準平均バイアスも概ね改善しており、逆推計で得られた排出量が妥当であることが確認された(図略)。

(4) 表1に中国起源一酸化炭素排出量の比較を示す。本研究では一酸化炭素排出量を2005年からそれぞれ、184.4、173.1、184.6、158.4、157.4、157.3 Tgと評価した。排出量は2007年をピークに2008年から減少を始めている。この原因として、2008年に開催された北京五輪、2008年の秋にはじまった世界的な景気後退および環境技術の復旧による燃焼効率の改善が考えられる。また、例えば中国で開発されている MEIC インベントリや、Tohjima et al. (2014)による逆推計でも2007年以降の排出量の減少傾向が見て取れる。本研究の結果は Tanimoto et al. (2008)、Zhang et al. (2009)および Tohjima et al. (2014)による見積もりと良い一致を見せた。一方、世界的に広く用いられているボトムアップ推定量である EDGAR, REAS, MEIC の各排出量の間には大きなばらつきがあり、排出量見積りに依然として大きな不確実性が含まれていることがわかった。

表1 中国起源一酸化炭素排出量の年推移の比較。

	(2001)	2005	2006	2007	2008	2009	2010
本研究結果		187.4	173.1	184.6	158.4	157.4	157.3
(逆推計前)		191.1	195.5	204.7	209.6	206.9	201.9
ボトムアップ手法による推定量							
Zhang et al. (2009)			167				
REAS 2.1		186.6	190.2	196.1	202.0		
MEIC		174.8	178.2	172.2	174.8	171.8	169.8
EDGAR V4.2		90.4	95.0	99.6	106.5		
Streets et al. (2006)		141.7					
Streets et al. (2003)		100					
Olivier et al. (1999)		87					
トップダウン手法による推定量							
Yumimoto and Uno (2012)		164.5	171.5	180.8	160.3	152.2	156.1
Tohjima et al. (2014)		182	176	189	181	150	159
Tanimoto et al. (2008)		170					
Yumimoto and Uno (2006)		147					
Heald et al. (2004)		173					
Kopacz et al. (2009)		141.5					

(5) 以上、一酸化炭素の逆推計結果についてまとめる。本研究ではグリーン関数法を応用した大気汚染物質排出量逆推計システムを開発した。構築したシステムと、全球化学輸送モデル及び衛星観測データを用いて、中国からの一酸化炭素排出量の長期間逆推計を行った。逆推計によってモデルの再現性が向上し、東アジアの冬季から春季にかけて見られる大陸からの高濃度一酸化炭素の東への越境輸送を捉えることができるようになった。逆推計によって、冬季に最大、夏季に最小となるダイナミックな中国の一酸化炭素排出量の季節変化が再現された。逆推計によって得られた排出量は 2007 年をピークに、

減少傾向となった。これは、中国の社会・経済状況を反映したものであると考える。この減少傾向は他研究による排出量推計にも見られた。

(6) 開発した逆推計システムは一酸化炭素以外の大気汚染物質にも応用されている。具体的には、東日本大震災による福島第一原子力発電所事故によって放出された放射性物質(Cs-137)の放出量の逆推計を領域化学輸送モデルと飛行機観測による沈着量データを用いて行った。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 8 件)

Yumimoto, K. and Takemura T.: The SPRINTARS/4D-Var Data Assimilation System: Development and Inversion Experiments Based on the Observing System Simulation Experiment Framework, *Geosci. Model Dev.*, 6, 2005-2022,

doi:10.5194/gmd-6-2005-2013.

Yumimoto, K.: Impacts of geostationary satellite measurements on CO forecasting: An observing system simulation experiment with GEOS-Chem/LETKF data assimilation system, *Atmos. Environ.*, 74, 123-133, doi:10.1016/j.atmosenv.2013.03.032, 2013.

Yumimoto, K., Uno, I., Shimizu, A., and Sugimoto, N., Hara, Y., and Takemura, T.: Size-resolved adjoint inversion of Asian dust, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L24807, doi:10.1029/2012GL053890, 2012

弓本桂也, 鶴野伊津志: グリーン関数を用いた一酸化炭素排出量の逆推定, *大気環境学会誌*, 47, 162-172, 2012, https://www.jstage.jst.go.jp/article/taiki/47/4/47_162/_article/-char/ja/

鶴野伊津志, 弓本桂也, 大原利眞, 黒川純一: タグ付き CO 輸送モデルを用いたアジア行きのソース・リセプター解析, *大気環境学会誌*, 48, 123-132, 2013, https://www.jstage.jst.go.jp/article/taiki/48/3/48_123/_article/-char/ja/

鶴野伊津志, 弓本桂也, 大原利眞, 黒川純一: タグ付き輸送モデルによるアジア行きの CO 濃度と発生源寄与の長期解析, *大気環境学会誌*, 48, 133-139, 2013, https://www.jstage.jst.go.jp/article/taiki/48/3/48_133/_article/-char/ja/

鶴野伊津志, 弓本桂也, 原由香里, 板橋秀一, 金谷有剛, 杉本伸夫, 大原利眞: 何故 2013 年冬季の中国で PM2.5 が高濃度になったか?, *大気環境学会誌*, 48, 274-280, 2013,

https://www.jstage.jst.go.jp/article/taiki/48/5/48_274/_article/-char/ja/

鶴野伊津志, 板橋秀一, 弓本桂也, 入江仁志, 黒川純一, 大原利眞, 黒川純一: 東アジア域の NOx 発生量の経年変化と窒素化合物の挙動のモデル解析, *大気環境学会誌*, 48, 223-233, 2013, https://www.jstage.jst.go.jp/article/taiki/48/5/48_223/_article/-char/ja/

[学会発表](計 13 件)

Yumimoto, K.: Long-term inverse model in of Asian dust with satellite observation and aerosol 4D-Var data assimilation system, *The International Conference on Atmospheric Dust (DUST2014)* Bari, Italy, June 1-5, 2014.

Yumimoto, K.: Inverse estimation of CO and black carbon emission, *International workshop on Asian Greenhouse Gases Budget*, Yokohama, Japan, April 8-10, 2014

弓本桂也: 粒径分布を考慮した発生量逆推定, *風送ダストに関する現状と今後の展開に関する研究集会*, 九州大学応用力学研究所, 2014 年 1 月 9-10 日

Yumimoto, K.: Experiences from several data assimilation methods: ground-based lidar 4D-Var and MODIS AOD LETKF, *International Cooperative for Aerosol Prediction (ICAP) 5th working group meeting*, Tsukuba, Japan, November 5-8, 2013.

弓本桂也, 鶴野伊津志: 中国起源一酸化炭素排出量の長期間逆推定, *第 54 回大気環境学会年会*, 朱鷺メッセ:新潟コンベンションセンター, 2013 年 9 月 18-20 日.

鶴野伊津志, 弓本桂也, 原由香里, 杉本伸夫, 大原利眞: 化学輸送モデルを用いた東アジア域の PM 濃度の経年変化の解析, *第 54 回大気環境学会年会*, 朱鷺メッセ:新潟コンベンションセンター, 2013 年 9 月 18-20 日.

Yumimoto, K. and Takemura T.: Inverse Modeling of Asian Dust Emission with MODIS AOT and the SPRINTARS Adjoint Model, *Goldschmidt 2013*, Florence, Italy, August 25-30, 2013.

Yumimoto, K. and Uno I.: Inverse modeling of long-term CO emission in China with Green's function method and forward sensitivity,

International Workshop on Inventory, Modeling and Climate Impacts of Greenhouse Gas emissions (GHG's) and Aerosols in Asian Region, Tsukuba, Japan, June 26-28, 2013.

弓本桂也, 竹村俊彦: データ同化を用いたエアロゾルの不確実性低減への取り組み, *日本気象学会 2013 年度春季大会*, 国立オリンピックセンター, 2013 年 5 月 15-18 日.

Yumimoto, K: Inverse Estimate of Long-Term CO Emission in China between 2005-2010 with Green's Function Method, *The 6th International GEOS-Chem Meeting (IGC6)*, Harvard University, Cambridge, USA, May 8-9, 2013.

弓本桂也, 竹村俊彦: SPRINTARS/4DVAR 同化システムを用いた黄砂の排出量推定, *日本気象学会 2012 年度秋季大会*, 北海道大学, 2012 年 10 月 3-5 日.

Yumimoto, K. and Uno I.: Inverse Estimate of Long-Term CO Emission in China between 2005-2010 with Green's Function Method, *IGAC International Science Conference*, Beijing, China, September 17-21, 2012.

弓本桂也, Jabob, D.: 東アジア域における化学天気予報に対する静止衛星データのインパクト調査, *日本気象学会 2012 年度春季大会*, エポカルつくば, 2012 年 5 月 26-29 日.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

弓本 桂也 (YUMIMOTO KEIYA)

気象庁気象研究所・環境・応用気象研究部・研究官

研究者番号: 5 0 6 0 7 7 8 6