

ウランバートルにおける大気汚染を対象とした大気質モデル再現性評価 Evaluation of air quality model performance for simulating air pollution in Ulaanbaatar, Mongolia

○福原 峻汰 (大阪大学)

嶋 寺 光 (大阪大学)

菅 澤 想 (大阪大学)

松 尾 智 仁 (大阪大学)

近 藤 明 (大阪大学)

Ryota FUKUHARA*¹ Hikari SHIMADERA*¹ So SUGASAWA*¹ Tomohito MATSUO*¹ Akira KONDO*¹*¹ Osaka University

Ulaanbaatar faces severe air pollution caused by increasing coal combustions. This study applied the Community Multiscale Air Quality modeling system (CMAQ) to air quality simulation in Ulaanbaatar. The input meteorological and emission data were respectively produced from the Weather Research Forecasting model (WRF) and emission inventories including anthropogenic emissions for the Hemispheric Transport of Air Pollution (HTAP). CMAQ substantially underestimated air pollutant concentrations in Ulaanbaatar probably because of inaccurate spatial and temporal distributions in the HTAP emission inventory. By revising the emission data, CMAQ tended to better simulate air pollution in Ulaanbaatar. This result indicates that the improvement of emission data is the most important requirement to apply the model to Ulaanbaatar for understanding the air pollution situation.

はじめに

モンゴルは国土面積 156 万 km² に対して人口約 300 万人と国全体では人口密度は非常に小さいが、首都のウランバートルには全人口の半数近くが集中している。ウランバートルでは、急激な経済成長に伴って増加するエネルギー需要や、寒冷期の暖房需要を満たすために、大量の石炭が消費されている。主にこの石炭燃焼が原因となって、深刻な大気汚染が顕在化している¹⁾。大気汚染の実態把握や発生源寄与解析のためには、大気質モデルによるシミュレーションを活用する必要があるが、これまでに大気質モデルのウランバートルへの適用事例はない。そこで本研究では、ウランバートルを対象に大気質モデルを用いた大気汚染シミュレーションを行い、その再現性評価を行うことで、今後の大気汚染の状況把握へのモデル活用の可能性を示すことを目的とした。

1. 計算条件

ウランバートルにおける大気汚染シミュレーションには、気象モデルに Weather Research Forecasting model (WRF)²⁾ のバージョン 3.7、大気質モデルに Community Multiscale Air Quality modeling system (CMAQ)³⁾ のバージョン 5.1 を使用した。計算期間は、2014 年の 1 年間とし、計算領域は、Fig.1 に示す通り、東アジアを対象とした 45km 格子領域 (D1)、中国北東部からモンゴル東部を対象とした 15km 格子領域 (D2)、ウランバートル周

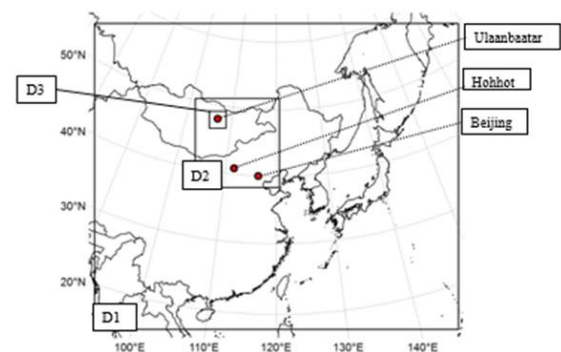


Fig.1 Modeling domains and locations of observation sites

辺を対象とする 5km 格子領域 (D3) の 3 領域とした。モデルの再現性評価には、モンゴルのウランバートル、中国の北京および呼和浩特における観測データを使用した。

排出量データについては、Hemispheric Transport of Air Pollution (HTAP) 作業部会による人為起源排出インベントリのバージョン 2.2⁴⁾ をはじめとする、複数のデータセットを組み合わせて作成した。HTAP インベントリは、人為起源の二酸化硫黄 (SO₂)、窒素酸化物 (NO_x)、一酸化炭素 (CO)、非メタン揮発性有機化合物、10μm および 2.5μm 以下の粒子状物質 (PM₁₀ および PM_{2.5})、黒色炭素粒子、有機炭素粒子の排出量について、全球を対象に解像度 0.1° × 0.1° で整備されている。本研究の計算期間における平均 SO₂、NO_x、PM₁₀ 排出強度の空間分布を Fig. 2 に示す。

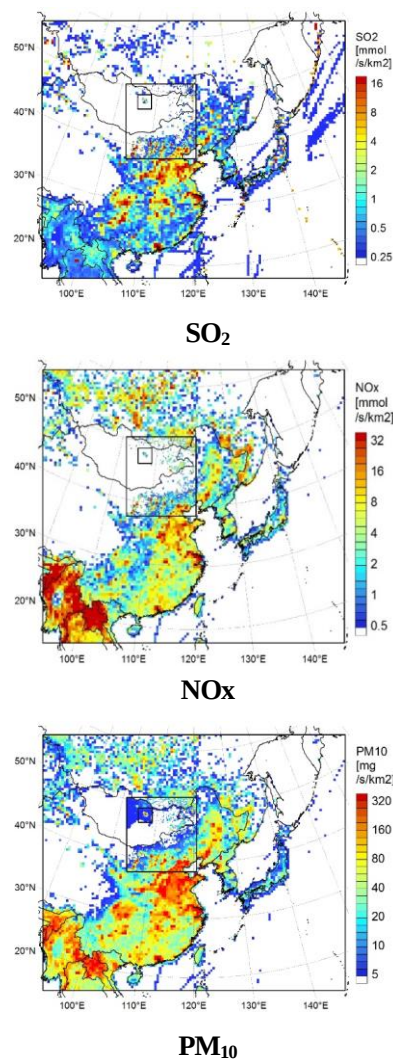


Fig.2 Spatial distributions of mean SO₂, NO_x and PM₁₀ emissions

2. 計算結果と考察

2.1 再現性評価

(1) 気象の再現性

気象モデル WRF の再現性評価のため、ウランバートルにおける気温と風速を対象に計算値と観測値の比較を行った。モデルの再現性評価には、統計指標として、相関係数 R、Mean Bias Error (MBE)、Mean Absolute Error (MAE)、Root Mean Square Error (RMSE)、Index of Agreement (IA) を用いた。IA は 0~1 の値をとり、1 に近いほどよく一致していることを示す指標である。気象の再現性評価には、Emery ら⁵⁾ が気象モデルの計算精度評価のために設定したベンチマークを用いた。ベンチマークは、気温に対して MBE ≤ ±0.5°C、MAE ≤ 2°C、IA ≥ 0.8、風速に対して MBE ≤ ±0.5 m/s、RMSE ≤ 2 m/s、IA ≥ 0.6 が定められている。

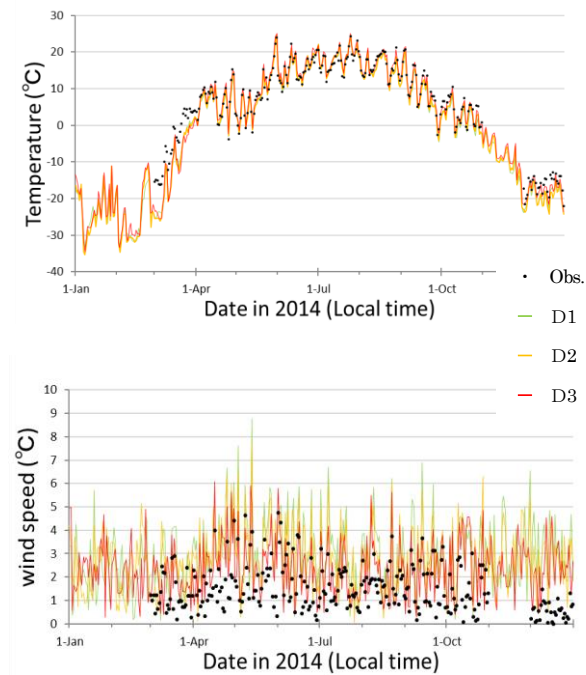


Fig.3 Time series comparisons of observed and simulated temperature and wind speed in Ulaanbaatar

Table.1 Statistical evaluation of WRF performance in Ulaanbaatar

種類	統計指標	D1	D2	D3
Temperature	観測平均 (°C)	6.3	6.3	6.3
	計算平均 (°C)	4.6	4.8	5.7
	R	0.99	0.99	0.99
	MBE (°C)	-1.7	-1.5	-0.6
	MAE (°C)	2.0	2.0	1.6
	RMSE (°C)	2.9	2.9	2.7
	IA	0.99	0.99	0.99
wind speed	観測平均 (m/s)	1.5	1.5	1.5
	計算平均 (m/s)	3.0	2.9	2.3
	R	0.66	0.61	0.52
	MBE (m/s)	1.6	1.4	0.9
	MAE (m/s)	1.6	1.5	1.1
	RMSE (m/s)	1.9	1.8	1.4
	IA	0.59	0.60	0.65

Fig.3 に、ウランバートルにおける気温および風速の計算値と観測値の日平均値の時系列変化を示す。気温については、計算期間を通して WRF の再現性が良好であることがわかる。風速については、WRF はやや過大評価をしているものの、日々変動を概ね良好に再現していることがわかる。

Table.2 に、D1~D3 の各領域のウランバートルにおける統計指標による計算値と観測値の比較を示す。D1 から D3 へと格子解像度が高くなるにつれて、気温と風速の再現性が向上していることがわかる。D3 において、気温については、計算値が観測値に比べて冬季に低い傾向があったことで MBE のベンチマークを満たさなかったが、MAE、IA のベンチマークを満たした。風速については、

A-47

全体として計算値が観測値に比べて大きい傾向があったことで MBE のベンチマークを満たさなかったものの、RMSE, IA のベンチマークを満たした。

以上の結果より、気象モデル WRF はウランバートルにおける気象場を概ね良好に再現したと考えられたため、WRF の計算結果を大気質モデル CMAQ に入力した。

(2) 大気汚染の再現性

大気質モデル CAMQ の再現性評価のため、ウランバートル、呼和浩特、北京における SO_2 、二酸化窒素 (NO_2)、 CO 、オゾン (O_3)、 PM_{10} および $\text{PM}_{2.5}$ を対象に計算値と観測値の比較を行った。ウランバートルについては D3 の計算値、呼和浩特および北京については D2 の計算値を観測値と比較した。Table.3 に、ウランバートル、呼和浩特、北京における統計指標による計算値と観測値の比較を示す。また、Fig.4 に、北京における時系列変化を Fig.6 の「Original」にウランバートルにおける時系列変化を示す。 $\text{PM}_{2.5}$ については、観測値が得られなかったため、計算値のみを示した。

Table. 3 Statistical evaluation of CMAQ performance in Ulaanbaatar,

Hohhot and Beijing				
汚染物質	統計指標	ウランバートル	呼和浩特	北京
SO_2 (ppb)	観測平均	7.4	16.2	7.2
	計算平均	6.2	45.5	31.5
	R	0.61	0.78	0.72
	MBE	-1.2	29.3	24.3
	MAE	3.8	29.3	24.3
	RMSE	5.4	38.6	29.0
	IA	0.71	0.49	0.44
NO_2 (ppb)	観測平均	23.6	21.7	26.6
	計算平均	6.2	25.9	42.4
	R	0.52	0.72	0.49
	MBE	-17.4	4.2	15.8
	MAE	17.4	6.2	16.4
	RMSE	18.8	8.1	19.7
	IA	0.42	0.80	0.54
CO (ppb)	観測平均	932	1519	1016
	計算平均	160	640	1178
	R	-0.07	0.66	0.78
	MBE	-772	-879	162
	MAE	806	900	338
	RMSE	3164	1149	465
	IA	0.11	0.56	0.86
O_3 (ppb)	観測平均	13.9	36.3	52.1
	計算平均	40.6	49.2	48.8
	R	0.50	0.72	0.84
	MBE	26.7	12.9	-3.3
	MAE	26.8	17.2	14.4
	RMSE	28.3	22.9	20.8
	IA	0.30	0.77	0.91
PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	観測平均	192.7	116.0	116.4
	計算平均	21.1	58.0	109.5
	R	0.34	0.43	0.72
	MBE	-171.6	-57.9	-6.8
	MAE	171.6	62.1	39.9
	RMSE	206.8	79.4	53.3
	IA	0.40	0.54	0.84
$\text{PM}_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	観測平均		43.9	84.5
	計算平均	13.7	47.5	92.9
	R		0.68	0.83
	MBE		3.6	8.4
	MAE		15.9	29.2
	RMSE		24.3	39.8
	IA		0.82	0.90

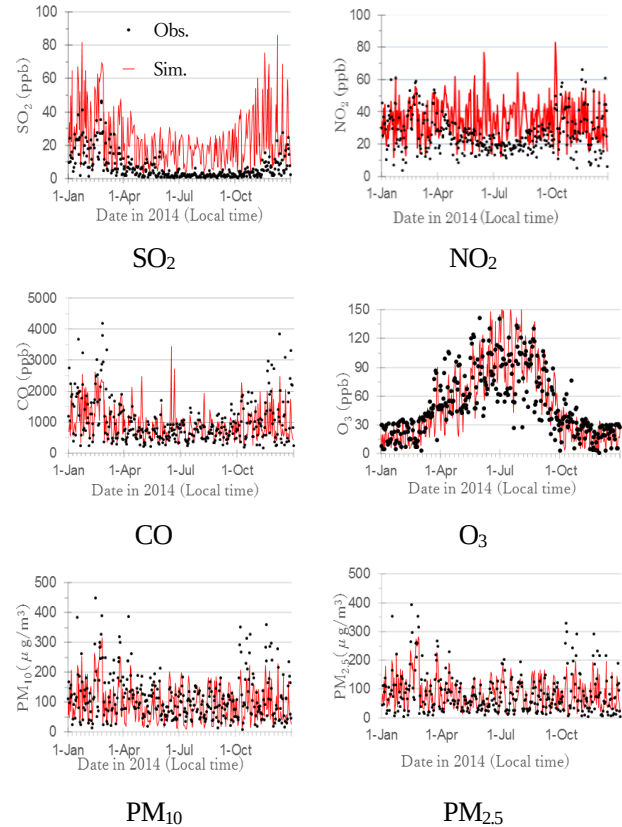


Fig. 4 Time series comparisons of observed and simulated concentrations in Beijing

ウランバートルにおいて、 SO_2 については濃度レベル、時間変動ともに概ね良好に再現された。しかし、 NO_2 、 CO 、 PM_{10} については大幅に過小評価、 O_3 については過大評価となった。ウランバートルにおける大気汚染の再現性は高いといえるものではなく、大幅な改善が必要である。

呼和浩特、北京においては、CMAQ は SO_2 については過大評価したものの、 NO_2 、 CO 、 O_3 、 PM_{10} についてはウランバートルに比べて明らかに良い再現性を示した。 $\text{PM}_{2.5}$ についても、両地点で濃度レベル、時間変動ともに良好に再現された。

ウランバートルで大気汚染の再現性が著しく悪い原因として、呼和浩特、北京で大気汚染が概ね良好に再現されたことから、CMAQ 本体の物理・化学過程に起因する誤差は考えにくい。また、ウランバートルにおける気象の再現性に大きな問題はなかった。したがって、HTAP インベントリを基にしたウランバートルにおける排出量データが第一の原因として考えられた。そこで、排出量データを変更し、大気汚染の再現性が向上するかを確認した。

2.2 排出量データの変更と再現性の変化

本研究で使用した HTAP インベントリはウランバートルにおける排出強度を過小評価していると考えられる。

そこで、以下の3点のようにしてD3における排出量データの変更を行った。

- ① エネルギー・産業・家庭・交通部門排出を計算格子の都市域割合に応じて空間配分
- ② 家庭部門排出で内モンゴル自治区を基に季節変動を考慮
- ③ 産業部門排出の大半が低煙突からのものであることを想定し地表付近の鉛直層に排出量を集中

空間分布の変化の例として、Fig.5にD3における変更前後のPM₁₀排出強度を示す。

CMAQによる大気汚染物質濃度の排出量データ変更前後での比較をFig.6に示す。排出量がウランバートル都市域に集中したことで、SO₂、NO₂、CO、PM₁₀濃度は

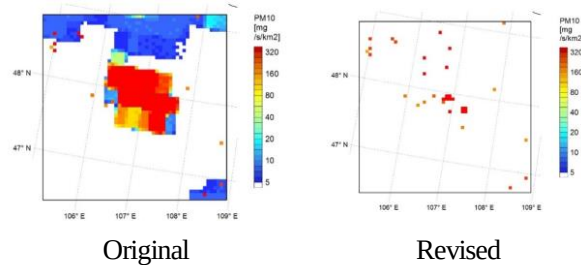


Fig. 5 Spatial distributions of mean PM₁₀ emissions before and after revision in D3

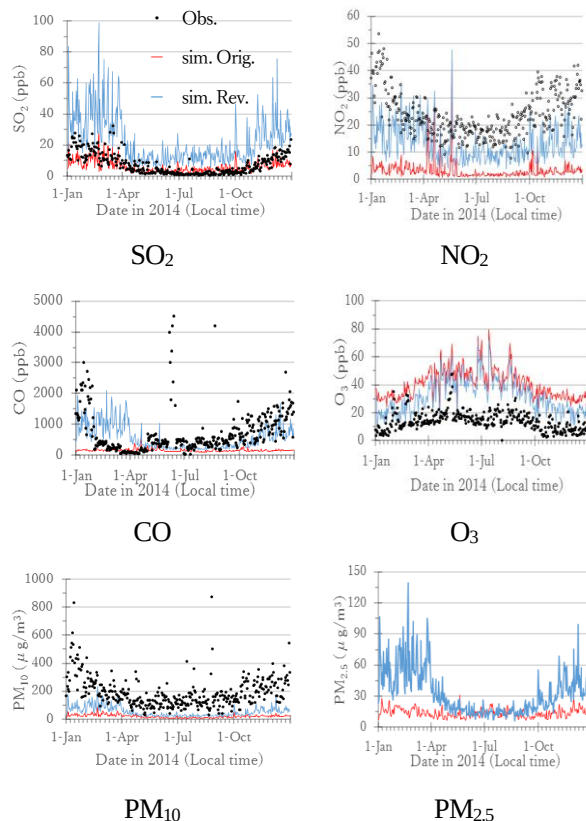


Fig. 6 Time series comparisons of concentrations simulated with original and revised emissions in Ulaanbaatar

上昇し、O₃濃度は低下した。元々再現性が良好であったSO₂については排出量変更によって過大評価となったが、その他の物質については濃度レベルが観測値に近づいた。以上の結果から、排出量の改善によって、大気質モデルによるウランバートルにおける大気汚染の再現性が向上する可能性が示された。

3. 結論

大気質モデル CMAQ を大気汚染が深刻化するウランバートルに適用したところ、その再現性は高いといえるものではなく、大幅な改善が必要であることがわかった。排出量データの改善が再現性向上に寄与することが示されたことから、今後、大気質モデルを大気汚染の実態把握に活用できるよう、ウランバートルの実態を反映した排出量推計を進めていく。

参考文献

- 1) D. Amarsaikhan, V. Battengel, B. Nergui, M. Ganzorig, G. Bolor : A Study on Air Pollution in Ulaanbaatar City, Mongolia Journal of Geoscience and Environment Protection, 2014, 2, p123-128
- 2)Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Baker, D.M., Duda, M.G., Huang, X.-Y., Wang, W. and Powers, J.G.: A description of the advanced research WRF version 3, NCAR Technical Note, NCAR/TN-475+STR., 2009.
- 3)Byun D, Ching J: Science algorithms of the EPA Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) modeling system, EPA/600/R-99/030, 1999.
- 4)Janssens-Maenhout, G., Crippa, M., Guizzardi, D., Dentener, F., Muntean, M., Pouliot, G., ... & Denier van der Gon, H. (2015). HTAP_v2. 2: a mosaic of regional and global emission grid maps for 2008 and 2010 to study hemispheric transport of air pollution. Atmospheric Chemistry and Physics, 15(19), 11411-11432.
- 5)Emery C., Tai E. and Yarwood G.: Enhanced meteorological modeling and performance evaluation for two Texas ozone episodes. Prepared for The Texas Natural Resource Conservation Commission 12118 Park 35 Circle Austin, Texas 78753. 2001.