

Evaluation of the impact of aerosol direct effect on
wintertime PM_{2.5} simulation in East Asia

○関口 亜未 (大阪大学) 嶋寺 光 (大阪大学)

正 近藤 明 (大阪大学)

Ami SEKIGUCHI, Osaka University, 2-1 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka
Hikari SHIMADERA, Osaka University, 2-1 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka
Akira KONDO, Osaka University, 2-1 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka

Numerical simulations were performed in order to evaluate the impact of the direct effect of aerosol particles on meteorology and air quality over East Asia. The online coupled Weather Research and Forecasting-Community Multiscale Air Quality (WRF-CMAQ) modeling system was applied from January to March 2014 for cases with/without feedback: two-way/one-way simulations. Ground-level shortwave radiation and PM_{2.5} concentration in the two-way simulation were respectively smaller and higher than those in the one-way simulation over the Asian Continent, particularly in China with remarkably high PM_{2.5} concentration. These differences indicate that the aerosol direct effect substantially influence the atmospheric stability, and therefore the dispersion efficiency of air pollutants.

Key words: aerosol direct effect, online coupled WRF-CMAQ model, shortwave radiation, PM_{2.5}, East Asia

1. はじめに

東アジア地域 (特に中国) では急速な経済成長に伴う大気中のエアロゾルの増加が深刻化している。エアロゾルは、粒径 0.001 ~ 数 10 μm 程度の空气中に浮遊する粒子状物質の混合体であり、太陽放射を散乱・吸収することで地球の放射収支に作用し、気温や大気境界層 (PBL: Planetary Boundary Layer) の高さ等様々な気象要素に影響を及ぼす。このエアロゾルによる放射収支への作用は「エアロゾルの直接効果」と呼ばれ、近年、東アジア地域におけるエアロゾルの直接効果による環境影響が重要視されている。しかし、従来の大気質シミュレーションにおいては多くの場合に直接効果が考慮されていなかったため、現段階ではこの効果による大気環境動態に対する影響評価が十分でない。

そこで本研究では、東アジア地域を対象に、気象および化学輸送計算を同時に行う気象・化学輸送オンラインモデル⁽¹⁾を用いてエアロゾルの直接効果を考慮したシミュレーションを行い、直接効果による気象場およびエアロゾル濃度変化について評価することを目的とした。

2. 計算方法

2.1. 気象・化学輸送オンラインモデル

本研究で使用したオンラインモデルは、気象モデル WRF-ARW (Advanced Research Weather Research Forecasting model)⁽²⁾ のバージョン 3.4 と化学輸送モデル CMAQ (Community Multiscale Air Quality system)⁽³⁾ のバージョン 5.0.2 が結合されたモデルである。このモデルを用いた化学輸送シミュレーションでは、CMAQ の計算により得られたエアロゾルのデータを WRF での放射計算にフィードバックさせることでエアロゾルの直接効果を考慮した計算が可能である。また、モデル間にフィードバックを導入するか否かは計算時に選択でき、フィードバックを行うことで CMAQ による計算結果を WRF に反映させる two-way の手法と、フィードバックを行わず WRF から CMAQ へ単一方向の計算を行う

one-way の手法がある。本研究では、two-way および one-way の両計算を実施し得られた各結果を比較することで、直接効果を考慮したことによる気象場およびエアロゾル濃度変化を評価した。

2.2. 計算領域および計算期間

Fig.1 に計算領域および計算結果の比較対象地点を示す。計算領域は、水平格子解像度 45 km、WRF および CMAQ の水平格子数はそれぞれ 140×120、130×110 の東アジア広域とし、鉛直層は地表面～上空 100 hPa までを 30 層に分割した。計算期間は 2013 年 12 月 22 日～2014 年 3 月 31 日とし、はじめの 10 日間を助走期間としたうえで、2014 年 1 月 1 日～3 月 31 日を評価対象期間とした。計算結果の比較は、中国 21 地点および日本 6 地点の計 27 地点について行った。

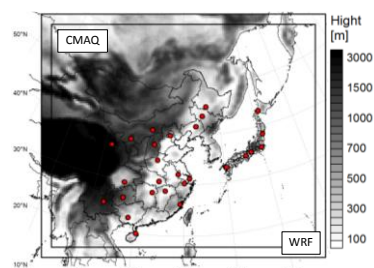


Fig.1 Modeling domain and locations of observation sites.

3. モデルの設定

本研究で使用した気象・化学輸送オンラインモデル (WRF-CMAQ) の設定を Table.1 に示す。CMAQ の入力に必要な排出量データは NO_x、SO₂、CO、NH₃、揮発性有機化合物 (VOC: Volatile Organic Compounds)、粒子状物質 (PM: Particulate Matter) に対して INTEX-B (the Intercontinental Chemical Transport EXperiment phase-B)⁽⁴⁾ のバージョン

1.2 等各種の排出インベントリおよび排出量推計モデルの計算結果を組み合わせるにより作成した。

Table.1 WRF-CMAQ configurations.

Parameter	Setting
WRF	
Initial and boundary	NCEP FNL, MSM-GPV, RTG-SST-HR
Land use	USGS 24-category data
Explicit moisture	Morrison 2-moment scheme
Cumulus	Kain-Fritsch scheme
Surface	Pleim-Xiu Land-Surface Model
PBL and surface layer	ACM2 scheme / Pleim-Xiu scheme
Radiation	RRTMG shortwave and longwave schemes
FDDA	$3.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ (Temperature, Mixing ratio, Wind)
CMAQ	
Emission data	INTEX-B, REAS, ARCTAS EAGrid2010, JEI-DB, OPRF MEGAN v2.04, FINN v1.5, AeroCom
Initial and boundary	MOZART-4 / GEOS5
Horizontal advection	Yamartino scheme
Vertical advection	WRF-based scheme
Horizontal diffusion	Multiscale
Vertical diffusion	ACM2
Photolysis calculation	CCTM in-line calculation
Gas phase chemistry	CB05
Aerosol	AERO6

4. 計算結果

4.1 観測値との比較

本研究で使用したオンラインモデルの精度を評価するため、中国4地点（北京、上海、太原、海口）と大阪において計算値と観測値の比較を行った。評価には統計指標として、MBE (Mean Bias Error)、相関係数 (R)、MAE (Mean Absolute Error)、RMSE (Root Mean Square Error)、IA (Index of Agreement)を用いた。気象計算結果は、Emery⁵⁾らが気象モデルによる計算精度評価のために設定したベンチマークを基に比較した。ベンチマークは、気温に対して MBE $\leq \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 、MAE $\leq 2 \text{ K}$ 、IA ≥ 0.8 、混合比に対して MBE $\leq \pm 1 \text{ g/kg}$ 、MAE $\leq 2 \text{ g/kg}$ 、IA ≥ 0.6 、風速に対して MBE $\leq \pm 0.5 \text{ m/s}$ 、RMSE $\leq 2 \text{ m/s}$ 、IA ≥ 0.6 が定められている。Table.2 に、比較を行った5地点のうち、北京および大阪での計算期間における気温、混合比、風速、PM_{2.5}濃度の統計指標を示す。

気象場の計算結果は one-way、two-way の両ケースともに日変化を捉えており、観測値と概ね良好な一致が見られた。気温は、MBE、MAE は北京で、IA は北京および大阪でベンチマークを満たしている。大阪において負のバイアスが確認された原因は計算格子の標高が実際よりも高く、標高の再現性が十分でないためだと考えられる。また、計算結果はいずれの地点でも two-way の方が one-way よりも低い値を示した。混合比は、両地点ともに MBE、MAE、IA の3項目を満たしている。また、気温、混合比の相関係数は 0.9 以上と高く、計算値と観測値の変化の傾向は計算期間を通して良好に一致しているといえる。風速は、RMSE について北京および大阪でベンチマークを満たしている。一方で、相関係数は大阪で約 0.7 を示しているのに対し、北京では約 0.5 と低く、比較を行ったその他中国の3地点についても 0.3~0.6 と低い値を示した。この原因としては、中国の観測値データはノット (knot : 1 knot $\approx 0.514 \text{ m/s}$) で与えられており分解能が粗くなっていること、本研究で設定した 45 km 格子の計算では実際の土地の起伏を十分に解像できておらず地形による風速の減衰を再現できていないことが挙げられる。

PM_{2.5}濃度の計算結果は one-way、two-way の両ケースとも IA が 0.89 以上であり濃度の変動、ピーク位置の再現性は良好であった。計算期間において中国の two-way では正のバイアス、中国の one-way および大阪では負のバイアスとなった。観測値の平均に対する MAE の値は中国および大阪において約 3 割を占めた。この原因は主に、観測値の過大評価の影響にあり高濃度時の再現性が十分でないためだと考えられる。また、中国、大阪ともに two-way の計算結果が one-way の計算結果がより高い精度を示した。

Table.2 Statistical evaluation of meteorology and PM_{2.5} simulations (**Y: two-way/N: one-way simulation).

	Mean(Obs)	feedback	Mean(Model)	MBE	R	MAE	RMSE	IA
Temperature (°C)		**	(°C)	(°C)		(°C)	(°C)	
Beijing	2.3	Y	2.1	-0.2	0.98	1.0	1.2	0.99
		N	2.6	0.4	0.98	1.0	1.2	0.99
Osaka	7.2	Y	4.9	-2.4	0.96	2.4	2.5	0.88
		N	5.0	-2.3	0.96	2.3	2.4	0.89
Mixing ratio (g/kg)			(g/kg)	(g/kg)		(g/kg)	(g/kg)	
Beijing	2.2	Y	2.1	0.0	0.93	0.4	0.5	0.96
		N	2.1	-0.1	0.93	0.4	0.5	0.96
Osaka	4.0	Y	4.2	0.2	0.97	0.3	0.4	0.98
		N	4.2	0.2	0.97	0.3	0.4	0.98
Wind speed (m/s)			(m/s)	(m/s)		(m/s)	(m/s)	
Beijing	2.0	Y	2.9	0.9	0.54	1.1	1.4	0.53
		N	3.0	1.0	0.54	1.2	1.5	0.52
Osaka	2.3	Y	4.0	1.6	0.74	1.6	1.8	0.48
		N	4.0	1.7	0.74	1.7	1.9	0.48
PM_{2.5} (μg/m ³)			(μg/m ³)	(μg/m ³)		(μg/m ³)	(μg/m ³)	
Beijing	110.7	Y	113.3	2.6	0.86	32.4	45.5	0.93
		N	103.0	-7.8	0.85	32.7	48.0	0.90
Osaka	20.4	Y	15.4	-5.0	0.86	6.8	8.7	0.89
		N	15.4	-5.0	0.85	6.8	8.8	0.89

4.2 直接効果の評価

(1) 対象領域全体の PM_{2.5}濃度比較

Fig.2 に two-way での PM_{2.5}濃度の計算結果を、Fig.3 に中国および日本における対象期間平均の PM_{2.5}濃度を示す。

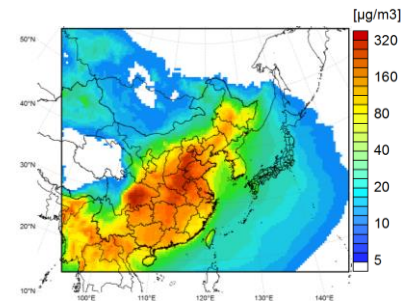


Fig.2 Spatial distribution of PM_{2.5} concentration for two-way simulation.

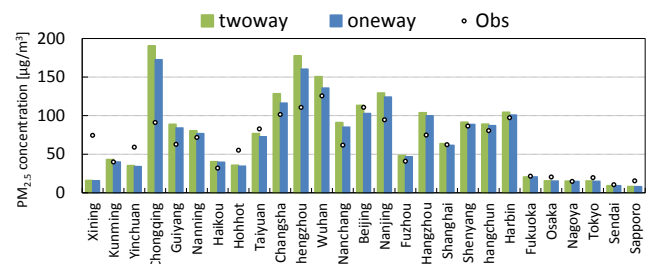


Fig.3 Comparison of PM_{2.5} concentration at all 27 sites.

計算結果の空間分布より、中国中央部～東部を中心に高濃度の PM_{2.5}が確認された。また、解析を行った全 27 地点中

25 地点で two-way が one-way よりも大きな値を示し、PM_{2.5} 濃度が高い地点ほど one-way と two-way の差が大きくなるという傾向があることが明らかとなった。

この結果を基にエアロゾルの直接効果を考慮したことによる気象要素および大気中の PM_{2.5} 濃度の変化をより明確に示すため、one-way、two-way の計算結果の差に着目した比較を行った。気象要素については、エアロゾルによって直接的に影響される短波放射と、その変化に伴い二次的な影響があると考えられる PBL 高さの 2 つの要素を扱った。

(2) 直接効果による変化率

Fig.4 にエアロゾルの直接効果による地表面短波放射、PBL 高さおよび PM_{2.5} 濃度の変化率をそれぞれ空間分布で示す。変化率は one-way での結果を基準として算出した。

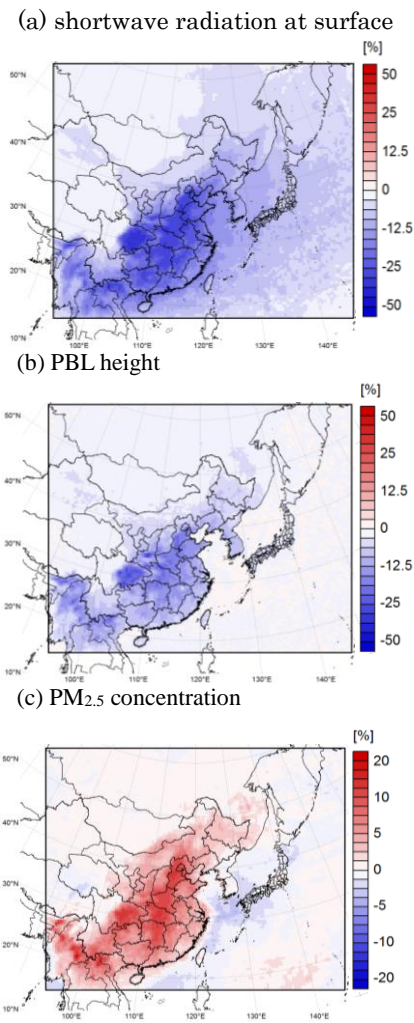


Fig.4 Spatial distributions of contribution rate of aerosol direct effect.

直接効果を考慮した結果、計算期間の平均として地表面短波放射および PBL 高さは領域全体で減少傾向を、PM_{2.5} 濃度は大陸上で増加傾向を示し、日本海・東シナ海以東では約 4% の減少傾向を示す地域もあった。最大変化率は、地表面短波放射が約 -40%、PBL 高さが約 -30%、PM_{2.5} 濃度が約 +20% であり、地表面短波放射、PBL 高さについて大きな減少を示した地域で PM_{2.5} 濃度の増加量が大きいことが確認された。**Fig.5** に計算対象領域のうち陸域における各格子での変化率の相関を散布図で示す。地表面短波放射および PBL 高さの変化率と PM_{2.5} 濃度の変化率は負の相関を示した。

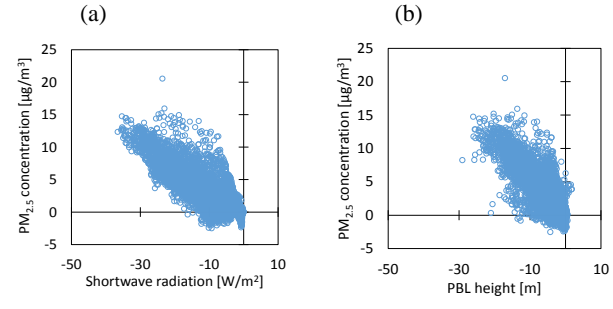


Fig.5 Scatter plots of contribution of aerosol direct effect to PM_{2.5} concentration and (a) shortwave radiation at surface, and (b) PBL height.

以上の結果から、気象・化学輸送オンラインモデルを用いた計算を行うことで、高濃度のエアロゾルによる散乱によって地表面に到達する短波放射が大きく減少する、という直接効果の影響が確認された。また、PBL 高さの減少は、地表面が吸収する短波放射の減少に伴い気温が低下することで地表面付近の大気が安定したことによるものと考えられる。

(3) 中国 5 地点の変化量比較

気象要素および PM_{2.5} 濃度変化率の空間分布の結果を基に、より大きな変化率を示した中国の 5 地点（重慶 (Chongqing)、鄭州 (Zhengzhou)、武漢 (Wuhan)、北京 (Beijing)、南京 (Nanjing)）に着目し、直接効果を考慮したことによる地表面短波放射、PBL 高さ、PM_{2.5} 濃度の日変化の相関関係を検証した。**Fig.6** に上記 5 地点について、直接効果による変化量の比較を示す。

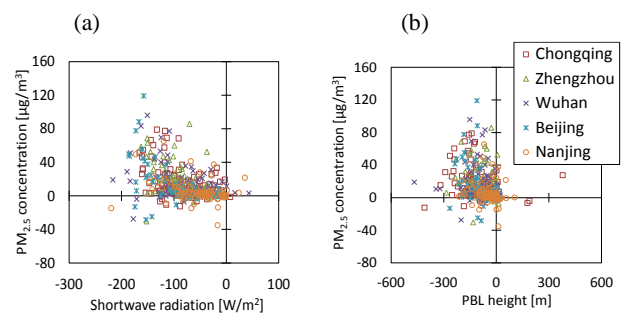


Fig.6 Scatter plots of contribution of aerosol direct effect to PM_{2.5} concentration and (a) shortwave radiation at surface, and (b) PBL height at 5 sites.

直接効果による地表面短波放射および PBL 高さの変化量と PM_{2.5} 濃度の変化量は全体的に負の相関を示した。したがって、日平均値でも計算された気象要素の減少に伴って PM_{2.5} 濃度が増加するという対応関係が明らかとなった。一方で、プロットが幅広く散布している地点も多いことから、エアロゾル濃度の変動が、必ずしも同日・同地点における気象場の変動によって起こるわけではないということも確認された。

(4) 直接効果による PM_{2.5} の越境汚染の変化

日本における本州広域で PM_{2.5} の高濃度汚染が観測され、中国からの越境汚染が懸念された 2014 年 2 月 25~26 日に着目し、エアロゾルの直接効果を考慮したことによる輸送変化について評価を行った。**Fig.7** に北京および日本の 3 地点（福岡、大阪、仙台）における PM_{2.5} 濃度の時系列変化を、**Fig.8** に 2 月 26 日 0 時の、two-way での PM_{2.5} 濃度の計算結果および直接効果による PM_{2.5} 濃度の変化をそれぞれ空間分

布で示す。

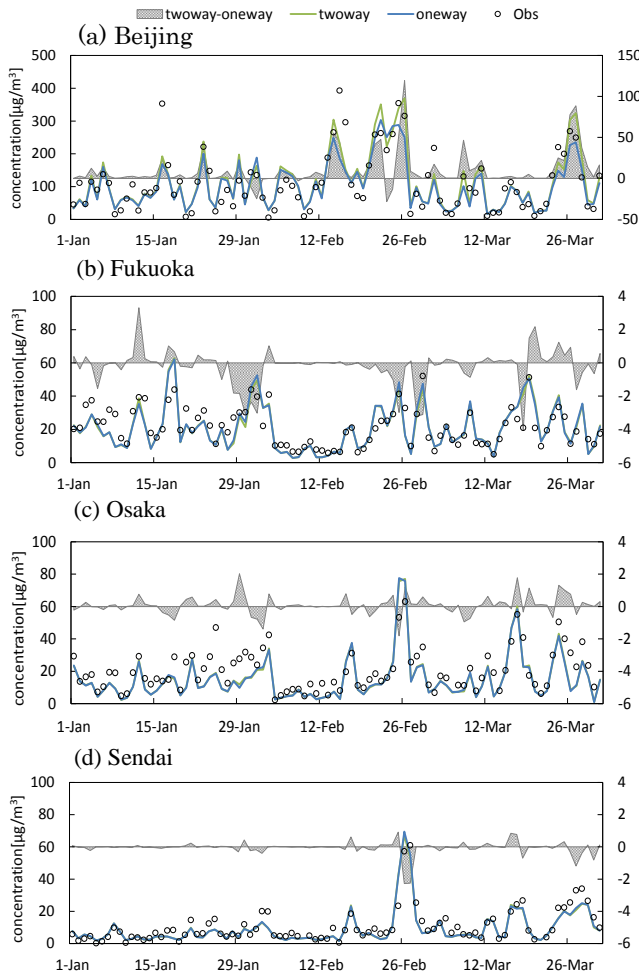


Fig.7 Time series of PM_{2.5} concentration.

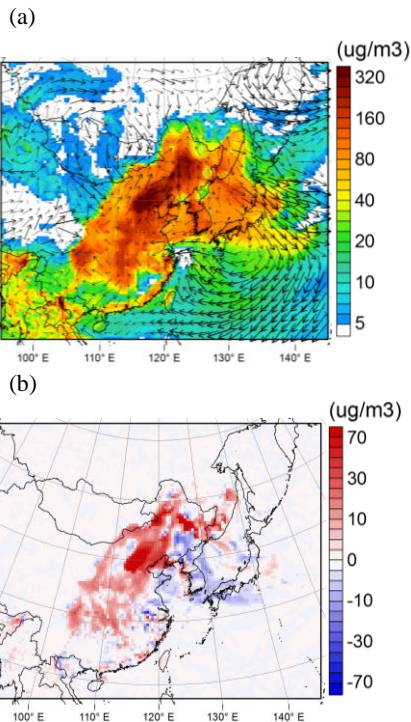


Fig.8 Spatial distributions of (a) PM_{2.5} concentration and (b) difference of PM_{2.5} concentration at 0:00 on 26-February 2014.

北京および日本の各地点では、2月25~26日にかけてPM_{2.5}濃度が著しく増加しており、日本での濃度の増加は大陸から日本海へ東進する移動性高気圧が原因で生じた北西~西風によるPM_{2.5}の輸送であると考えられる。このときの直接効果によるPM_{2.5}濃度の変化量に着目すると、北京で約120 µg/m³の増加、一方、日本については福岡で約3 µg/m³、大阪および仙台では約2 µg/m³の減少を示し、同日のone-wayの計算結果と比較すると北京では約50%、福岡では約6%、大阪では約2%、仙台では約3%にあたること明らかとなった。また、空間分布よりPM_{2.5}濃度の減少傾向を示す地域は大陸からのPM_{2.5}の輸送が顕著である風下にあたる地域と概ね一致している。これらの結果は、直接効果により短波放射収支、PBL高さが減少し、これら気象要素の変化によって大気安定度が増したことで大気中のPM_{2.5}が拡散しにくい大気環境がもたらされ、中国における高濃度のPM_{2.5}が大陸上で滞留しているために生じていると考えられる。したがって、これらの現象に伴い風により輸送されるPM_{2.5}濃度が減少し、風下地域では負の変化を示したと推測される。

5. 結論

本研究では、2014年冬季の東アジア地域を対象に、気象・化学輸送オンラインモデルを用いてエアロゾルの直接効果を考慮したシミュレーションを行い、直接効果による気象場およびエアロゾル濃度への影響を評価した。

結果として、中国での高濃度のエアロゾルにより、計算期間平均の値として、地表面における短波放射量が約40%、PBL高さが約30%の減少を、一方で、PM_{2.5}濃度は約20%の増加を示すことが明らかとなった。また、エアロゾルの直接効果は大気安定度にも変化を与え、それに伴い大陸から日本へのPM_{2.5}の越境汚染濃度にも影響があることが確認された。

今後の課題としては、より高解像度の計算や冬季以外の期間を対象とした計算、排出量データ等異なるモデルの設定での計算を行うことで、モデルの結果がどのように変化するかを検証することが挙げられ、エアロゾルの直接効果による大気環境への影響についてさらに評価することが重要であると考えられる。

参考文献

- (1) Wong D.C., Pleim J., Mathur R., Binkowski F., Otte T., Gilliam R., Pouliot G., Xiu A., Young J.O. and Kang D.: WRF-CMAQ two-way coupled system with aerosol feedback: software development and preliminary results, *Geoscientific Model Development*, 5, pp.299-312, 2012.
- (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) Zhang Q., Streets D.G., Carmichael G.R., He K., Huo H., Kannari A., Klimont Z., Park I., Reddy S., Fu J.S., Chen D., Duan L., Lei Y., Wang L. and Yao Z.: Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9, pp.4081-4139, 2009.
- (5) Emery C., Tai E, 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.