

## 〈研究発表〉

マレーシア・ジョホール州における煙霧の連続観測と越境輸送の  
数値シミュレーション倉田 学 児<sup>1)</sup>, 倉本 直 哉<sup>2)</sup>, 妹尾 賢<sup>3)</sup>Pichnaree Lalitaporn<sup>1)</sup>, 松岡 讓<sup>1)</sup><sup>1)</sup> 京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻  
(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C E-mail: kurata.gakuji.5a@kyoto-u.ac.jp)<sup>2)</sup> 京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻 (現: ㈱神鋼環境ソリューション)<sup>3)</sup> 京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻 (現: ㈱ハイドロソフト技術研究所)

## 概 要

マレーシアやシンガポールでは、例年6月～10月にかけてインドネシア・スマトラ島の森林火災を起源とする深刻な煙霧に悩まされており、その健康影響や社会影響が問題となっている。本稿では、マレーシア・ジョホール州における煙霧を含めた大気汚染の長期トレンドを分析するとともに、現地における粒子状物質 (PM) の連続観測データとモデルシミュレーションによって、越境輸送の状況を明らかにした。2013年6月に観測されたインドネシア・スマトラ島の森林火災起源の煙霧について、人工衛星データを利用して火災起源の排出量データを作成して数値シミュレーションを行い、現地での観測データと比較した結果、越境輸送の状況は再現することができたものの、ピークの濃度の発生時期にズレが生じた。

キーワード: 森林火災, 煙霧, PM<sub>2.5</sub>, 越境輸送, シミュレーション

## 1. はじめに

マレー半島に位置するマレーシアおよびシンガポールでは、例年6月～10月にかけてインドネシア・スマトラ島での森林火災を起源とする煙霧に見舞われており、健康への影響が懸念されているだけでなく、空港や高速道路の機能停止などの深刻な社会影響が生じている。マレーシア・ジョホール州は、ジョホール水道を挟んでシンガポールと接しており、マレーシア政府の国家プロジェクトとして大規模な地域開発が進められている。開発地域の人口は、2012年の174万人から2025年には300万人に倍増し、地域GDPも現状の4倍になる計画である。このような地域開発において、越境輸送による大気汚染は重要な問題と認識されており、大気汚染の状況や森林火災に越境汚染のメカニズムを明らかにすることが求められている。

本研究では、マレーシア・ジョホール州のマレーシア工科大学に設置した観測データとシミュレーションモデルを利用し、現状の大気汚染メカニズムについて分析した。

## 2. 研究の方法

## 2.1 手法の概要

本研究の全体像は Fig. 1 に示した通りである。

2013年6月に発生したインドネシア・スマトラ島での森林火災を対象として、人工衛星データから森林火災の発生場所と火災規模を推計し、そこからの大気汚染物質の排出量を推計して、これと既往の排出量データを融合させて排出量マップを作成し、気象モデル (WRF) および化学輸送モデル (CMAQ) によって計算した濃度場を観測データと比較した。以下に、利用した観測機器およびデータの概要を示す。

## 2.2 人工衛星観測データ

NASA の Terra 衛星及び Aqua 衛星に搭載された MODIS センサーによって測定されたエアロゾル光学的厚さ (AOD) の値<sup>1)</sup>を利用した。観測期間は2000年

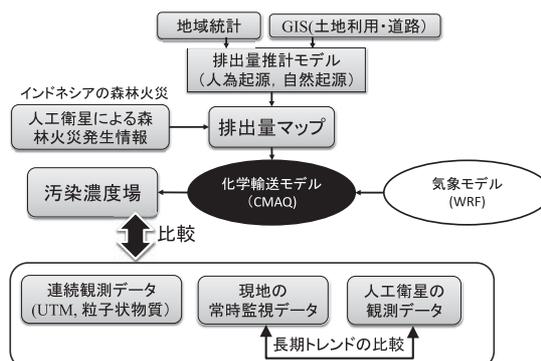


Fig. 1 Outline of this study

3月から2012年12月までであり、空間解像度は0.25度で提供されている。本研究では常時観測データと長期トレンドを比較するために、Johor BahruとPasir Gudangの2地点のデータを抽出した (Fig. 2)。

## 2.3 粒子状物質濃度の観測データ

### 2.3.1 マレーシア工科大学での連続観測

ジョホール州のマレーシア工科大学 (UTM) キャンパス内において2012年10月~2013年6月まで粒径別の粒子状物質濃度の連続観測を実施した。観測には、粒径0.25  $\mu\text{m}$  から34  $\mu\text{m}$  までを31 chで計測できるエアロゾルスペクトロメータ (GRIMM社EDM164) を使用した。粒径別の粒子個数濃度から、粒子密度を1  $\text{g}/\text{cm}^3$  と仮定して、質量濃度に換算した。

### 2.3.2 常時監視データ

長期トレンドを比較するために、Johor BahruおよびPasir Gudangでの常時観測データ<sup>2)</sup>を利用した。2000年から2012年の1時間値データから月平均値を求めて、衛星観測と比較した。

## 2.4 越境輸送の数値シミュレーション

### 2.4.1 排出量推計

排出量データには、SMOKE-Asia 排出量モデル<sup>3)</sup>を利用したが、対象地域内のデータ精度を高めるために、大規模点源としてジョホール州とシンガポール内の発電所のデータをGEO (Global Energy Observatory)<sup>4)</sup>から取得して利用した。また、面源 (大規模点源以外の工業・家庭部門) および線源 (道路) の空間配分の精度を高めるために Fig. 3に挙げたような詳細な人口分布データ<sup>5)</sup>と道路網データ<sup>6)</sup>を利用した。

### 2.4.2 森林火災の排出量

2013年6月に発生したインドネシア・スマトラ島での森林火災の影響を数値シミュレーションで再現するためには、森林火災からの大気汚染物質排出量のより正確な推計データが必要である。本研究では、NASA LANCE-FIRM<sup>7)</sup>の一日ごとの火災地点および火災強度のデータベースおよび火災による汚染物質の排出量を推計したGFAS<sup>8)</sup>のデータを利用して1日毎の0.1°×0.1°のメッシュデータを作成して、これを上記の人為起源・自然起源排出量データに結合した。

### 2.4.3 気象モデル

気象モデルには、NCARのWRF ver. 3.4.1を利用した。初期条件および境界条件にはNCEP FNLの1°×1°のデータを入力として利用した。計算範囲は Fig. 4に示した範囲で、格子間隔は16 kmとした。

### 2.4.4 化学輸送モデル

大気化学輸送モデルには、EPAのCMAQを利用した。計算領域はWRFと同様の範囲で、WRFで計算された気象場と森林火災を含む排出量データを入力



Fig. 2 Location of Monitoring Station

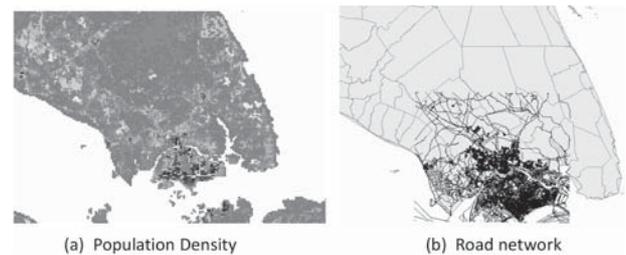


Fig. 3 Population density and Road network

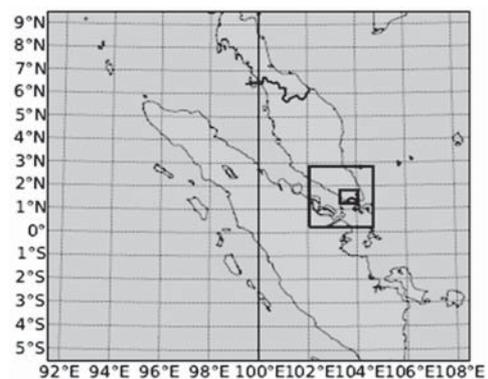


Fig. 4 Domain of Calculation

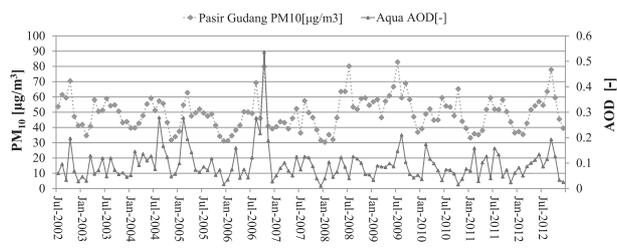
として計算を行った。ここでは、UTMでの連続観測と比較するためにPM<sub>2.5</sub>濃度を出力した。

## 3. 結果

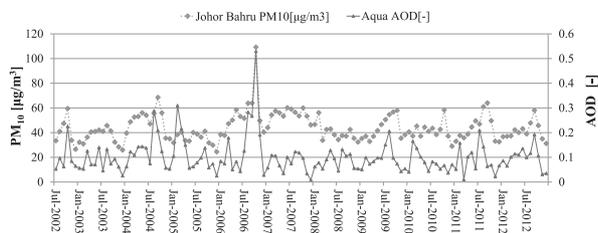
### 3.1 長期トレンドの比較

Fig. 5にJohor BahruとPasir Gudangの地上観測データのPM<sub>10</sub>濃度と人工衛星のAODを比較した結果を示す。両者の値の挙動は概ね一致していることがわかった。2006年10月の値が突出して高くなっているが、これは、この10年間で最も深刻な煙霧に見舞われた月である。

Fig. 6には、Johor BahruとPasir GudangでのSO<sub>2</sub>濃度の13年間のトレンドを示す。2000年の時点では、6月~9月の濃度の高い季節で最大0.02 ppmを示しているが、2006年にかけて低下しており、それ以降は



(a) Johor Bahru



(b) Pasir Gudang

Fig. 5 Long-term comparison between Satellite AOD and surface monitoring.

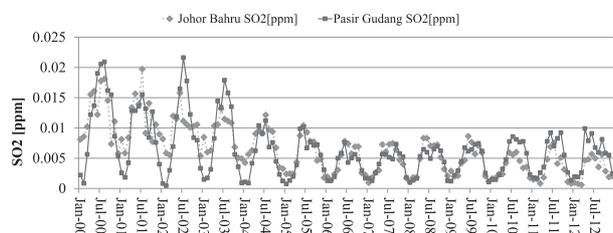


Fig. 6 Long-term trend of SO<sub>2</sub> concentration at two monitoring station.

ほぼ横ばいである。しかし Pasir Gudang では、その後有意に増加している傾向がある。高濃度を示す6月～9月は南風が卓越している事が分かっており、これらはシンガポールまたはマレー半島を迂回する航路からの排出源が影響しているものと考えられる。

### 3.2 煙霧の越境輸送のシミュレーションと連続観測データの比較

#### 3.2.1 連続観測データ

2013年6月において UTM で観測された粒径別の PM 濃度を Fig. 7 に示す。PM 濃度は、6月20日の日中に最大で 500 µg/m<sup>3</sup> を記録しており、その大部分は粒径が 2.5 µm 以下の PM<sub>2.5</sub> 粒子であった。燃烧起源の粒子は、粒径 1 µm 以下の微小粒子が大部分を占めることから、6月20日前後の高濃度の粒子状物質は、森林火災の特徴を捉えているものと考えられる。

#### 3.2.2 シミュレーション結果

Fig. 8 に、地上観測で高濃度となった6月20日の地表面での PM<sub>2.5</sub> 濃度の計算結果を示した。スマトラ島中部の2箇所で大規模な森林火災が発生しており、そこから東ないしは北東方向に輸送されてマレー半島へ運ばれていることが分かる。また、森林火災起源の他にも、クアラルンプールやシンガポールなどの大都

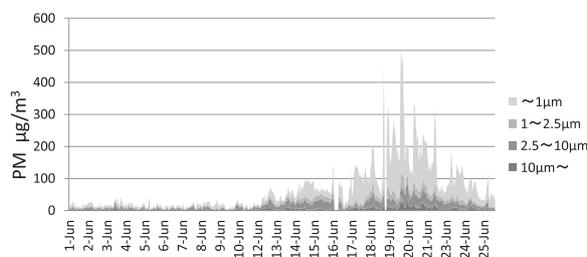


Fig. 7 Observed concentration of Particulate Matter at UTM campus during haze event on June 2013.

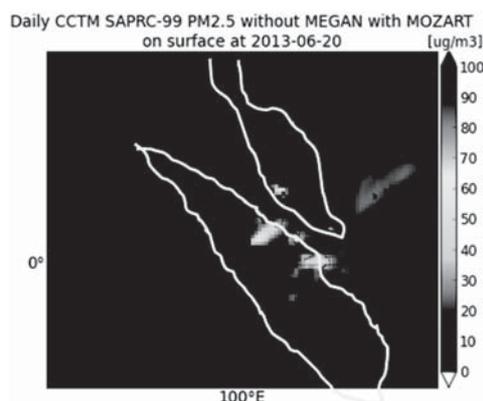


Fig. 8 Simulated surface PM<sub>2.5</sub> concentration at 20<sup>th</sup> June 2013.

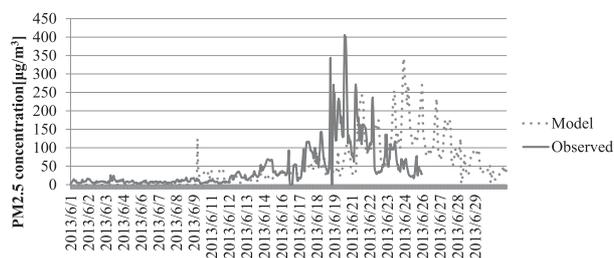


Fig. 9 Comparison between simulated and observed PM<sub>2.5</sub> concentration during haze event on June 2013

市周辺で自動車交通や産業活動に伴って発生した汚染物質が見られる。

次に、UTM キャンパスの観測地点における PM<sub>2.5</sub> の計算結果を抽出して、連続観測の PM<sub>2.5</sub> 濃度と比較を行った。その結果を Fig. 9 に示す。

観測では6月20日頃にピークが見られるが、モデルの計算結果では、6月24日頃にピークが生じており、時間的なズレが存在する。6月20日の PM<sub>2.5</sub> 濃度で比較をすると、観測では最大で 400 µg/m<sup>3</sup> に達しているのに対して、モデルの計算結果では、100 µg/m<sup>3</sup> にも達しておらず、4倍以上の開きがある。この原因を探るために、バックトラジェクトリー解析を行った。

#### 3.2.3 バックトラジェクトリー解析

UTM キャンパスでの観測濃度と計算濃度のズレの原因を明らかにするために、気象モデル WRF から出

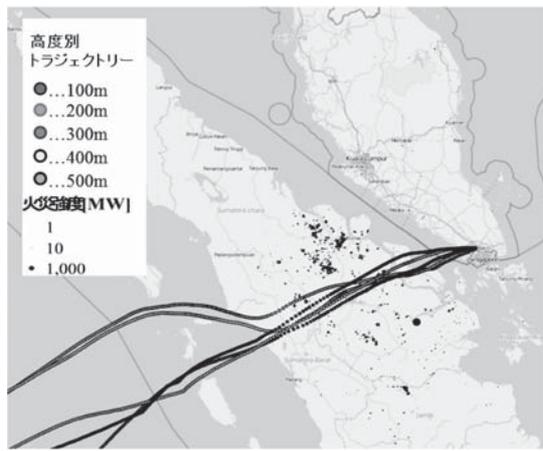


Fig. 10 Backward trajectories from UTM campus started at 12:00 20<sup>th</sup> June 2013

力された風向・風速のデータを利用して、2013年6月20日の12:00にUTMキャンパス上空の複数の高度を出発点としてバックトラジェクトリーを計算した。その結果を Fig. 10 に示す。いずれの軌跡もスマトラ島上空を東北東へ輸送されて観測点上空に達していることが分かる。図中では示せていないが、スマトラ島の火災発生域からの所要時間は12時間～24時間程度である事が判明した。そこで、6月19日に人工衛星から観測された火災の発生地域を Fig. 10 にプロットした。

トラジェクトリーの通過した地域でも火災が観測されているが、軌跡よりも北側に火災の集中した地域があり、また南側にも非常に強度の大きな火災が観測されている。これらの情報を総合すると観測とモデル計算でピークのズレが生じた原因としては、以下の可能性が推測される。

1. 気象場の再現性が不十分で風向がずれたこと。
2. 人工衛星から観測された火災強度と排出量を比例させたが、大気汚染物質は激しい燃焼時よりも、焦っている場合に多く排出される場合があり、これらを反映できていないこと。
3. 人工衛星からの火災強度の観測が1日1回の観測に基づいているために、実際の火災の変動を十分に反映できていないこと

これらの分析は、今後の課題としたい。

## 4. ま と め

本研究により得られた結果は以下の通りである。

- (1) 長期トレンド分析において地上観測データと人工衛星の観測値を比較した結果、PM<sub>10</sub> と AOD の変動は概ね一致した。この10年間では、2013年6月と同規模の煙霧は2006年10月に観測されている。SO<sub>2</sub>については減少傾向が停止し、一部で増加傾向も見られる。
- (2) 2013年6月の高濃度の煙霧を観測した結果、粒径が1 μm 以下の微小粒子が主体であることがわかった。
- (3) 数値シミュレーションによって煙霧のイベントの再現を試みた結果、越境輸送の状況は再現できたが、ピークの時期にズレが生じた。これらは気象モデルによる風向のズレや森林火災からの排出量の推計手法に原因があるのではないかと推測できた。

## 謝辞

本研究は、地球規模課題対応国際科学技術協力事業 (SATREPS) の支援によって実施されました。

## 参考文献

- 1) NASA (Web), [http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/MOD04\\_L2/](http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/MOD04_L2/)
- 2) Rafee (2013), 私信
- 3) Woo, J.-H., K. -C. Choi, et al., (2012): Development of an anthropogenic emissions processing system for Asia using SMOKE, *Atmospheric Environment*, 58, 5-13.
- 4) Rajan Gupta *et al.* (2009): GEO, Global Energy Observatory
- 5) Oak Ridge National Laboratory (2008): LandScan Global Population Database, *Oak Ridge National Laboratory*
- 6) Cloud Made (2013): Open Street Maps, <http://download.cloudmade.com/>
- 7) Justice, C. O., L. Giglio, et al. (2011), MODIS-Derived Global Fire Products. *Land Remote Sensing and Global Environmental Change*, Springer New York. 11: 661-679. doi: 10.1007/978-1-4419-6749-7\_29.
- 8) N. Andela, J. W. Kaiser, et al., (2013), Assessment of the Global Fire Assimilation System (GFASv1).