

平成 30 年 6 月 1 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A) (海外学術調査)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H02589

研究課題名(和文) 越境ヘイズの影響を受けるマレーシアPM2.5の性状・発生源・健康リスクの総合評価

研究課題名(英文) Integrated evaluation of PM2.5 affected by transboundary haze in Malaysia from the viewpoints of characteristics, emission source and health impact

研究代表者

東野 達 (Tohno, Susumu)

京都大学・エネルギー科学研究科・教授

研究者番号：80135607

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 30,500,000円

研究成果の概要(和文)：年間捕集したマレーシアPM2.5の80種以上の無機・有機成分分析と、インドネシア泥炭火災発生地点での集中観測から、発生源と影響受容域におけるPM2.5の性状特性を明らかにした。分析データに基づいて泥炭火災発生源固有の新規な指標を提案し、火災によるヘイズ期に一部有機成分の大気輸送過程での2次生成を示唆する結果を得た。さらに、マレーシアの年平均PM2.5濃度に対する泥炭火災寄与率が30%にも達することが初めて示された。また、ヘイズ期に捕集されたPM2.5に含まれる一部有機成分と細胞影響との間に相関が認められ、呼吸器疾患の悪化に関与する可能性が示唆された。

研究成果の概要(英文)：We analyzed over 80 inorganic and organic components of PM2.5 during a 1-year sampling campaign in Malaysia. Intensive field studies were also conducted at peatland fire sites in Indonesia during the fire episode. These studies demonstrated the different chemical characteristics of PM2.5 at the source and receptor sites. Based on the analytical data, we proposed a new key indicator of Indonesian peatland fire (IPF), and secondary formation of some PAH derivatives was suggested for the haze samples associated with the peatland fire during their atmospheric transport. Furthermore, we firstly revealed that IPF contributed to nearly 30% of the annual average PM2.5 concentration in Malaysia by Positive Matrix Factorization model. In addition, we found significant correlations between biological effects and concentrations of some PAH derivatives of the haze samples. These results suggest that those components have the potential to worsen respiratory diseases.

研究分野：大気環境工学

キーワード：泥炭火災 エアロゾル PM2.5 細胞影響 発生源寄与率 越境汚染 東南アジア

### 1. 研究開始当初の背景

東南アジアにおける PM<sub>2.5</sub> の発生源は自動車、鉄鋼、発電所などの産業以外に、バイオマス燃焼が主要な排出源となっている。特に、乾季ではインドネシア泥炭地の乾燥や開発のための違法な森林焼き払い等により発生したヘイズが近隣諸国に越境し大気汚染が深刻化している。特にマレーシアの PM<sub>2.5</sub> は、インドネシアから越境する泥炭火災エアロゾル、自国やタイからの野焼き等によるバイオマス燃焼エアロゾルの流入及び国内の人為汚染源が混合した状態となっており、その発生源寄与率を明らかにすることが発生源対策上極めて重要である。しかしながら、2014 年においてマレーシアでは PM<sub>2.5</sub> の環境基準は設定されておらず、その質量濃度や化学組成データは極めて不十分でしかない。また、発生源固有のソースプロファイルに関するデータは皆無といえる。一方で、PM<sub>2.5</sub> の健康影響評価においては、健康影響決定要因(物質)やバイオマーカーの特定が不可欠であるが、マレーシアでの研究例はほとんどない。バイオマス燃焼からは多環芳香族炭化水素(Polycyclic Aromatic Hydrocarbon, PAH)類などの有害な成分が生成することは広く知られており、泥炭火災エアロゾルの長距離輸送中に非意図的な有害物質や 2 次成分の生成も予想される。しかし、泥炭火災エアロゾルの人工衛星による観測は行われているものの、発生源近傍での性状や生成メカニズムの解明はごく一部に過ぎず、越境輸送中の化学反応による非意図的な有害物質生成や二次粒子生成などによる、風下(レセプタ)地域で生じる影響についての詳細な検討例はない。

以上より、マレーシアにおいて、バイオマス燃焼、特に泥炭火災エアロゾルの物理化学的諸特性、生成・変質機構、その他 PM<sub>2.5</sub> 発生源のソースプロファイル及び発生源寄与率を実測データに基づいて解明し、in vitro でエアロゾルの健康影響決定要因(物質、成分)やバイオマーカーの特定を行い、スクリーニングされた成分について生活パターンの違いを考慮した PM<sub>2.5</sub> 暴露評価とヒトの健康リスク評価から健康影響を明らかにすることは、大気化学、医学的意義はもとより、影響のモデル予測や発生源制御・環境政策の策定などに不可欠で社会的貢献度も非常に高い。

### 2. 研究の目的

本研究では、マレーシアにおける PM<sub>2.5</sub> の性状・変質・発生源同定と健康影響の二つの視点から、目標を設定している。前者は、国内発生源とインドネシア泥炭火災エアロゾル(ヘイズ)などの越境汚染源の寄与が混在したマレーシア PM<sub>2.5</sub> について、発生源プロファイル及びヘイズに固有な指標成分を明らかにし、ヘイズと国内発生源の寄与率を推定する。さらに、観測および室内実験から、越境輸送中の PAH などの有害成分の変質過程を解明する。後者は、現地捕集した発生

源及び長距離輸送後のマレーシアにおけるヘイズ、非ヘイズ時の PM<sub>2.5</sub> を対象に、呼吸器系・免疫系を中心に in vitro 影響評価から、健康影響決定要因(化学物質群)を明らかにする。これらの影響評価値と、発生源プロファイルに基づいた曝露評価値とから、そこに居住するヒトの生活パターン(室内、屋外滞在時間、行動など)を調査することで、その形態に応じた呼吸器への曝露量を評価し健康リスクを定量化する。

### 3. 研究の方法

#### (1) PM<sub>2.5</sub> の捕集

マレーシアの首都クアラルンプールにあるマレーシア国民大学のクアラルンプールキャンパス構内(北緯 3°10' 6", 東経 101°42' 4")の建物屋上(地上高 13.7 m)において、2015 年 6 月~2016 年 5 月までの 1 年間 PM<sub>2.5</sub> の試料採取を行った。PM<sub>2.5</sub> 試料捕集には、PM<sub>2.5</sub> インパクト付属のサンプリングカートリッジ(Thermo, ChemComb model 3500 speciation sampling cartridge)に VOC デニューダを装着したローボリュームサンブラ(LVS)とハイボリュームサンブラ(HVS, Tisch, Model TE-3070V-2.5-BL)の 2 台を使用した。捕集フィルタにはそれぞれ 47 mmφ の PTFE (Polytetrafluoroethylene) フィルタ(WP-500-50, Sumitomo Electric Fine Polymer)と 20.3×25.4 cm の石英繊維フィルタ(2500 QAT-UP, Pall)を用いた。石英繊維フィルタは、捕集前に 900 °C で 4 時間の加熱処理を行った。LVS の大気吸引流量は 10 L/min に設定し、24 時間捕集を行った。HVS の大気吸引流量は 1.13 m<sup>3</sup>/min で同様に 24 時間、LVS と同時捕集を行った。分析には、LVS と HVS の同時捕集が正常に行われた 139 試料を用いた。なお、フィルタをポンプが稼動していない状態の捕集装置に 24 時間放置した試料をブランク補正用試料として用いた。

泥炭火災近傍(約 5m の距離)の PM<sub>2.5</sub> 試料は、2015 年 7、8 月にインドネシア・スマトラ島のリアウ州 Siak, Kampar, Payung Sekaki の 3 地点において上述の 2 台の LVS を用い、47 mmφ の PTFE 及び石英繊維フィルタに PM<sub>2.5</sub> を捕集した。捕集時間は 3~4 時間で総試料数は 13 である。また、非火災時のバックグラウンド試料とヘイズ及び非ヘイズ時の一般大気試料も別途、採取した。

#### (2) 化学分析

PM<sub>2.5</sub> 質量濃度は、エアロゾル捕集前後の PTFE フィルタの質量を、マイクロ天秤を用いて測定した後、質量差を大気吸引量で除して求めた。イオン成分は、PM<sub>2.5</sub> が捕集された石英繊維フィルタから超純水で抽出し、イオンクロマトグラフィーで C<sub>2</sub>O<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Cl<sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Na<sup>+</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>について定量した。

バイオマーカーなどの有機化合物は、石英繊維フィルタを前処理後、GC-MS により分析

した。元素状炭素 (EC) と有機炭素 (OC) は、熱分離・光学補正法で IMPROVE\_A Protocol を用い反射光補正によって定量した。

PAH 及びその誘導体 (酸化体: OPAH, ニトロ化体: NPAH, 塩素化体: CIPAH) は、石英繊維フィルタを前処理後、内標準法により GC-MS 分析した。その他、EDXRF 法による元素分析と積分球法により黒色炭素 (BC) 及びブラウンカーボン (BrC) を定量した。なお、化学分析の詳細については引用文献<sup>1, 2)</sup>、発表論文<sup>3)</sup> に記載されている。

### (3) 発生源推定手法

得られた PM<sub>2.5</sub> 化学成分濃度データセットを用い、PM<sub>2.5</sub> 濃度に対する発生源寄与率を多変量解析モデルの一つである Positive Matrix Factorization (PMF) モデル<sup>3)</sup>により推定した。本研究で用いた PMF モデルによる推定手順は発表論文<sup>3)</sup>に記載されている。さらに、PMF 解析から抽出された発生源の地理的起源について Potential Source Contribution Function (PSCF) 解析<sup>4)</sup>により推定した。

### (4) マレーシア PM<sub>2.5</sub> の細胞影響試験方法

石英繊維フィルタ上に捕集された 139 の PM<sub>2.5</sub> 試料を単一もしくは複数組み合わせる時系列通りになるよう選択し、PAH 及びその誘導体をはじめとする脂溶性成分 (ジクロロメタン抽出した試料のジメチルスルホキシド (DMSO) 溶液) と、イオンをはじめとする水溶性成分 (純水抽出した試料の DMSO-水溶液) を作成した。なお、最後の抽出液の PM<sub>2.5</sub> 濃度が 75 µg/mL になるようにフィルタの選定と切り取り面積を調整した。

#### 気道上皮細胞を用いた影響評価

正常ヒト気道上皮細胞株 BEAS-2B 細胞を使用し、LHC-9 培地を用いて培養した。コラーゲン I コートされたプレートに細胞を播種し、semi-confluent な状態まで培養後、終濃度 75 µg/mL に調製した水溶性および脂溶性抽出液を曝露した。曝露 24 時間後、細胞活性を Water soluble tetrazolium-1 (WST-1) を用いた比色法により、炎症性サイトカインである interleukin (IL) -6, IL-8 の産生を、Enzyme linked immuno-sorbent assay (ELISA) 法により、それぞれ解析した。

#### 抗原提示細胞を用いた影響評価

マウスより大腿骨を摘出し、骨髓細胞懸濁液を調製した。リコンビナントマウス顆粒球・マクロファージコロニー刺激因子を含む R10 培地で培養し、骨髓由来抗原提示細胞を分化誘導後、終濃度 75 µg/mL に調製した水溶性および脂溶性抽出液を曝露した。曝露 24 時間後、細胞活性を、WST-1 を用いた比色法により、抗原提示細胞のマーカーとして CD86 発現をフローサイトメトリーにより、それぞれ解析した。

### (5) マレーシア PM<sub>2.5</sub> の健康リスク評価

#### ICP-MS を用いた PM<sub>2.5</sub> 中の元素分析

(1) で述べたクアラルンプールで年間を通じて PM<sub>2.5</sub> を捕集した石英繊維フィルタと、一般家庭 6 家屋内の空気中 PM<sub>2.5</sub> を捕集したフィルタを対象とし、含有する元素分析を実施した。フィルタを極微量分析用硝酸 (Wako) に溶解させ、マイクロウェーブ (200 °C, 15 分間) にて灰化した。超純水にて希釈後、フィルタ (孔径 0.45µm) でろ過し最終試料液とした。バックグラウンドフィルタの分析結果と、無作為に抽出した元素スクリーニング結果から、Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Cu, Zn, As, Br, Cd, Sn, I, Ba, Pb の 14 元素を選定し、これらを内部標準検量線法にて定量した。

#### 損失 QALY と最適な換気率の推算

調査対象とした 6 家屋中の各室の体積を  $V$ 、換気率  $\eta$  とし、室外に発生源がある対象元素の単位曝露量あたりの損失 QALY (Quality Adjusted Life Years,  $L_{in}$ ) を推算し、 $L_{in}$  が最小になる部屋の最適な換気率 (回/時間) を求め、ヘイズ時と非ヘイズ時との値を比較した。

## 4. 研究成果

### (1) 泥炭火災発生源における PM<sub>2.5</sub> の化学性状特性

2015 年 7, 8 月にインドネシア、スマトラ島の 3 地点の泥炭火災発生源近傍で捕集した PM<sub>2.5</sub> 試料の化学組成は有機物が大半であり、セルロースの主要な熱分解生成物であるレボグルコサンが支配的であった (平均: 21 mg/g-OC)。定量したリグニン熱分解生成物の中ではシリングル (S) 核を有する化合物群 (合計 (平均): 7.4 mg/g-OC) が最も支配的であり、次いでグアイアシル (G) 核を有する化合物群 (3.4 mg/g-OC) であった。また、S 核リグニン熱分解生成物はシリングアルデヒド (アルデヒド基) が支配的であったのに対し、G 核リグニン熱分解生成物ではバニリン酸 (カルボキシル基) が大半を占める等、各リグニン熱分解生成物の中でも違いが明確であった。3~5 環の総 PAH の OC に占める割合は 1.5 mg/g-OC (平均) であり、4 環 PAH が支配的 (約 46 %) であった。無機イオン成分は、OC 量に対して 1/30 程度と低割合であった。また、イオンバランスの結果から、泥炭発生源において PM<sub>2.5</sub> 中イオン成分は主として塩化アンモニウムの粒子形態で存在していることが示唆された。

本研究で行った泥炭火災発生源における野外観測は、従来にない規模 (複数地点、サンプリング回数等) のものであり、得られた結果・知見は極めて貴重である。

### (2) マレーシア PM<sub>2.5</sub> の化学性状特性

本観測期間のクアラルンプールにおける PM<sub>2.5</sub> 質量濃度は  $38 \pm 41 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (年平均値  $\pm$  標準偏差) であり、マレーシアの PM<sub>2.5</sub> 環境基準値 (2015 年) を超過した。月別の PM<sub>2.5</sub>

質量濃度(平均値)とスマトラ・ボルネオ(カリマンタン)島の火災検出件数を図1に示す(火災検出件数は人工衛星 NOAA-18 によって検出された数であり, 研究協力者の Prof. Latif より提供を受けた)。2015年8月~10月にかけてクアラルンプールのPM<sub>2.5</sub>濃度が急上昇し, 同時期にインドネシアのスマトラ島やボルネオ島で泥炭火災が頻発した。この火災発生時期に観測地点においてセルロースの代表的な熱分解生成物であるレボグルコサンの急激な濃度上昇も認められ, 泥炭火災による越境大気汚染が泥炭火災発生源指標や後方流跡線解析結果から示唆された。

人工衛星 NOAA-18 による観測期間中の火災検出件数や後方流跡線解析結果に基づいて, 2015年6月~10月をPeriod I(泥炭火災の影響を含む期間), 2015年11月~2016年5月をPeriod IIと区別し, 両期間の化学性状の違いについて解析した。ほとんどの成分濃度がPeriod I > IIとなり, 泥炭火災によるPM<sub>2.5</sub>化学性状への有意な影響が認められたが, 例外(Peak I < II)はナトリウムイオンであった(以下(3)に記述のPMF解析により, 海塩由来であることが判明)。

その他, 本研究開始前にTSP(Total Suspended Particulates)を短期的に捕集した試料に対して化学分析を行い, OC中のOPとOC4成分の濃度比が泥炭火災の影響が軽微でも, 観測地点のリセプターにおいて発生源固有の指標となることをインドネシアの発生源における観測結果と併せて世界で初めて明らかにした(詳細は発表論文)。また, その有用性はクアラルンプールで1年間捕集したPM<sub>2.5</sub>試料でも確認されている。

PAH類濃度の環数比は強ヘイズ(日平均PM<sub>2.5</sub>濃度 > 100 µg/m<sup>3</sup>)非ヘイズ(日平均PM<sub>2.5</sub>濃度 < 30 µg/m<sup>3</sup>)によらず5環が約40%と最大で, 次いで6環が30%程度となり, 泥炭火災発生源とは大きく異なった。強ヘイズ時に濃度上昇が見られた9-NAnt(9-Nitroanthracene), 7,12-BaAQ(7,12-Benz[a]anthracenequinone)など6種類の誘導体濃度と, 比較的安定なPAHであるBeP(Benzo[e]pyrene)濃度との比を非ヘイズを基準に強ヘイズ, 泥炭火災近傍試料と比較したところ, 強ヘイズ時には非ヘイズ時の2~3倍程度上昇し, 泥炭火災試料では1/3~1/10であった。強ヘイズ時には, インドネシアからの大気輸送中に誘導体が二次生成したことが示唆された。

BC濃度とEC濃度は, 非ヘイズ時には2 µg/m<sup>3</sup>以下ではほぼ一致したが, 火災の影響を受けたヘイズではBC濃度は2 µg/m<sup>3</sup>程度と一定であったものの, EC濃度は2~6 µg/m<sup>3</sup>となり大きな乖離がみられた。これはフミン様物質(HULIS)などの有機物の熱分離・光学補正法への影響と考えられ, BrCとHULISの関係も含めて今後の検討課題である。

### (3) マレーシアPM<sub>2.5</sub>の発生源推定

クアラルンプールにおいて捕集した1年間

のPM<sub>2.5</sub>試料の総合的な化学成分濃度のデータセットを用い, PMF解析および発生源の位置情報を考慮したPSCF解析から発生源寄与率を推定した。2種類の2次有機エアロゾル(イソプレン由来, 硫酸塩), 化石燃料燃焼, 泥炭火災, 海塩, 塩化物+硝酸塩の6つの発生源が同定され, 年間平均PM<sub>2.5</sub>濃度に対し, 泥炭火災は約30%もの寄与(Peak Iでは約40%の寄与)を占めることを定量的に示した(図2)。さらにPSCF解析を通し, 本観測地点に影響した泥炭火災発生源の地理的起源はインドネシアのボルネオ島やスマトラ島であると推定された(図3)。

上記に加え, 本研究の一環として各種化学分析を行ったプタリンジャヤの1年間のPM<sub>2.5</sub>成分濃度データ(詳細は発表論文)に対してもPMF解析を行い, 年間平均PM<sub>2.5</sub>濃度に対する泥炭火災の寄与が30%程度となり, クアラルンプールと同様の結果を得た(詳細は発表論文)。以上のマレーシアにおける包括的なPM<sub>2.5</sub>成分濃度の長期観測データを基に, 年間平均PM<sub>2.5</sub>濃度に対するインドネシア泥炭火災の発生源寄与率を推定した事例はこれまで皆無であり, 本研究が世界初の成果である。

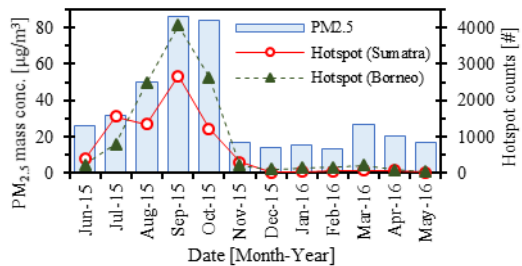


図1 本観測期間における月別のPM<sub>2.5</sub>平均濃度変動および火災検出件数

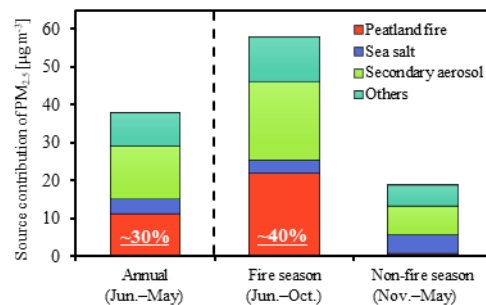


図2 クアラルンプールにおけるPM<sub>2.5</sub>質量濃度に対する各発生源寄与率 (Period I: Fire season, Period II: Non-fire season)

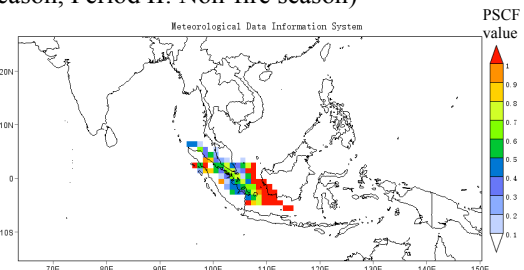


図3 同定された泥炭火災発生源に対応したPSCF解析による発源地域分布の推定結果

(PSCF 値が高いほど発生源地点である確率が大きい)

#### (4) マレーシア PM<sub>2.5</sub> の細胞影響, 成分との関係

水溶性ならびに脂溶性抽出液を各 20 サンプル準備し, 気道上皮細胞に曝露したところ, 2 つの水溶性抽出液と全ての脂溶性抽出液に細胞活性上昇作用が, 6 つの水溶性抽出液に細胞活性抑制作用が認められた。また, IL-6 や IL-8 産生を上昇させるものはなかった。

水溶性ならびに脂溶性抽出液を各 24 サンプル準備し, 骨髄由来抗原提示細胞に曝露したところ, 2 つの水溶性抽出液と 9 つの脂溶性抽出液に細胞活性抑制作用が認められた。また, CD86 の発現は, 9 つの水溶性抽出液と 5 つの脂溶性抽出液において上昇が認められた。

一方, 気道上皮細胞への影響と抽出液中のイオン成分, PAH とその誘導体濃度との相関分析の結果, 硫酸イオン及びアンモニウムイオンが細胞活性の低下に関与していることが示唆された。さらに, CD86 発現量は, 図 4 のように PAH や NPAH など 13 種類と有意な相関が認められ, 影響がみられた 5 サンプルは全てヘイズ期のもので, そのうち 4 サンプルは日平均 PM<sub>2.5</sub> 濃度が 50 ~ 200 µg/m<sup>3</sup> の強いヘイズ時のサンプルであることが分かった。これらの PM<sub>2.5</sub> に含まれる成分が, 気道上皮細胞の活性低下や抗原提示細胞の CD86 発現上昇を介して呼吸器疾患の悪化に関与する可能性が示唆された。

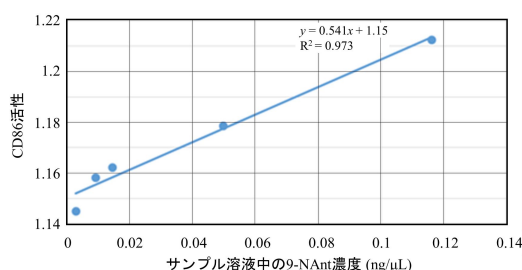


図 4 CD86 活性と 9-NANt (9-Nitroanthracene) 濃度との関係

#### (5) マレーシア PM<sub>2.5</sub> の健康リスク評価

一般大気, 室内空気中 PM<sub>2.5</sub> の元素分析  
一般大気中 PM<sub>2.5</sub> の質量濃度と, 各元素濃度との間に明確な相関は得られなかったものの, Pb, Fe が高値を示す時期が確認できた (図 5)。この他に土壤に特徴的な Al や Si に対し, As, Br, I, Pb が比較的高い値を示した。室内空気中の PM<sub>2.5</sub> に含まれる元素濃度は, わが国の基準値と比べると極めて低い値であるものの, 6 家庭全てで Cd (0.10 ~ 0.25 ng/m<sup>3</sup>), Pb (2.10 ~ 12.5 ng/m<sup>3</sup>) が検出された。

##### 損失 QALY と最適な換気率

対象元素を Cd, Pb とし, その室内濃度を  $C_{in}$  (mg/m<sup>3</sup>), 室内に 1 日 12 時間滞在, 1 日

の呼吸量を 15 m<sup>3</sup>, 体重を 50 kg と仮定して, 損失 QALY を試算し<sup>5)</sup>, その値を最小化する換気率  $\eta$  を求めた (表 1)。過去の研究例にあるように, ヘイズ時には一般大気中の PM<sub>2.5</sub> に由来する元素濃度が上昇する。このため, 換気回数を少なくしなければならず, 損失 QALY は 18% 程度増加することが認められた。

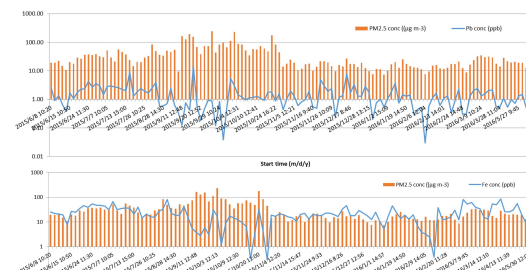


図 5 年間を通した PM<sub>2.5</sub> 質量濃度と PM<sub>2.5</sub> 中の Pb (上段), Fe (下段) 濃度との関係

表 1 損失 QALY と最適な換気率

	最適換気率(回/hour)	損失 QALY (day)
非ヘイズ時	2.9	0.404
ヘイズ時	2.2	0.478

#### (6) まとめ

インドネシア泥炭火災によるヘイズの影響を受けるマレーシアにおいて, 年間捕集した PM<sub>2.5</sub> の無機・有機成分の包括的分析を行い, その性状特性や変質過程について多くの新たな知見を得た。また, 火災発源地域であるインドネシアの複数地点で集中観測を行い, 発生源における PM<sub>2.5</sub> の性状特性を明らかにした。これらの従来皆無であったデータを用いて新規な発生源固有指標を提案し, マレーシアにおける年平均 PM<sub>2.5</sub> 濃度に対する泥炭火災寄与率が 30%にも達することを初めて明らかにした。さらに, マレーシアでヘイズ期に捕集された PM<sub>2.5</sub> に含まれる NPAH などの成分と細胞影響の間に相関が認められ, 呼吸器疾患の悪化に関与する可能性が示唆されたことは, 新たな成果である。

リスク評価は, 一部の重金属にとどまっておらず, PAH などの有機成分を含めた総合評価を今後進めていく必要がある。

#### <引用文献>

- 1) Y. Kamiya, T. Kameda, T. Ohura, S. Tohno, *Polycyclic Aromatic Compounds*, **37**, 128-140, 2017.
- 2) A. Wonaschütz, R. Hitznerberger, H. Bauer, P. Pouresmaeil, B. Klatzer, A. Caseiro, H. Puxbaum, *Environ. Sci. Technol.*, **43**, 1141-1146, 2009
- 3) P. Paatero, U. Tapper, *Environmetrics*, **5**, 111-126, 1994
- 4) P.K. Hopke, *J. Air Waste Manage. Assoc.*, **66**, 237-259, 2016.
- 5) 蒲生昌志, 岡 敏広, 中西準子, 環境科学会誌, **9**, 1-8, 1996.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計9件)

Y. Fujii, S. Tohno, N. Amil, M.T. Latif, Quantitative assessment of source contributions to PM<sub>2.5</sub> on the west coast of Peninsular Malaysia to determine the burden of Indonesian peatland fire, *Atmospheric Environment*, **171**, 111–117, 2017 (査読有)

DOI:10.1016/j.atmosenv.2017.10.009

Y. Fujii, M. Mahmud, M. Oda, S. Tohno, J. Matsumoto and A. Mizohata, A key indicator of transboundary particulate matter pollution derived from Indonesian peatland fires in Malaysia, *Aerosol Air Quality Research*, **16**, 69–78, 2016 (査読有)

DOI:10.4209/aaqr.2015.04.0215.

Y. Fujii, S. Tohno, N. Amil, M. T. Latif, M. Oda, J. Matsumoto, and A. Mizohata, Annual variations of carbonaceous PM<sub>2.5</sub> in Malaysia: Influence by Indonesian peatland fires, *Atmospheric Chemistry and Physics*, **15**, 13319–13329, 2015 (査読有)

DOI:10.5194/acp-15-13319-2015.

Y. Fujii, H. Kawamoto, S. Tohno, M. Oda, W. Iriana, and P. Lestari, Characteristics of carbonaceous aerosols emitted from peatland fire in Riau, Sumatra, Indonesia (2) – Identification of organic compounds –, *Atmospheric Environment*, **110**, 1–7, 2015 (査読有)

DOI:10.1016/j.atmosenv.2015.03.042.

〔学会発表〕(計18件)

H. Kurita, Y. Fujii, S. Tohno, N. Saito, Y. Kamiya, T. Kameda, R. Hitzengerger, T. Haller, K. Ikeda, N. Sakai, N.A. Sulong, M.T. Latif, T. Ohura, Comprehensive assessment of carbonaceous PM<sub>2.5</sub> in Malaysia during haze events influenced by Indonesia peatland fire and non-haze period, 10th International Aerosol Conference, St. Louis, U.S.A., 2018 (accepted)

Y. Fujii, K. Ikeda, S. Tohno, M. Mahmud, Characterization of humic-like substances in particulate matter in Malaysia influenced by Indonesian peatland fires, 36<sup>th</sup> AAAR Annual Conference, Raleigh, North Carolina, U.S.A., 2017

齋藤 想, 藤井佑介, 神谷 優太, 本田晶子, 亀田貴之, 東野 達, 高野裕久, M.T. Latif, H.S. Huboyo, 大浦 健, インドネシア泥炭火災の影響を受けるマレーシア PM<sub>2.5</sub> の細胞影響と多環芳香族炭化水素及び誘導体の性状特性, 第 34 回エアロゾル科学・技術研究討論会, 芝浦工業大学, 2017

Y. Matsui, N.T. Thuong, M. Yoneda, S. Tohno, Indoor air quality analysis of particle

matters and volatile organic compounds in Malaysia, 10th Asian Aerosol Conference, Jeju, Korea, 2017

齋藤 想, 藤井佑介, 神谷優太, 亀田貴之, 東野 達, Mastura Mahmud, 大浦 健, マレーシアで捕集された粒子状 PAH 及びその誘導体と n-アルカンの特性, 第 33 回エアロゾル科学・技術研究討論会, 大阪府立大学, 2016

Y. Fujii, M. Oda, N. Amil, S. Tohno, M.T. Latif, Annual variations of solvent-extractable organic compounds in PM<sub>2.5</sub> in Malaysia – Influence of Indonesian peatland fires –, 2015 European Aerosol Conference, Milan, Italy, 2015

Y. Fujii, N. Amil, M. Oda, S. Tohno, M.T. Latif, J. Matsumoto and A. Mizohata, Characteristics of carbonaceous PM<sub>2.5</sub>: Annual observation in Malaysia, 9th Asian Aerosol Conference, Kanazawa, Japan, 2015

〔その他〕

ホームページ等

<http://aerosol.energy.kyoto-u.ac.jp/tohno/profile3001.html>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

東野 達 (TOHNO, Susumu)

京都大学・大学院エネルギー科学研究科・教授

研究者番号：80135607

(2) 研究分担者

亀田 貴之 (KAMEDA, Takayuki)

京都大学・大学院エネルギー科学研究科・准教授

研究者番号：50398426

高野 裕久 (TAKANO, Hirohisa)

京都大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：60281698

松井 康人 (MATSUI, Yasuto)

京都大学・環境安全保健機構・准教授

研究者番号：50533501

藤井 佑介 (FUJII, Yusuke)

埼玉県環境科学国際センター・大気環境担当・技師

研究者番号：90780099

(3) 研究協力者

奥田 知明 (OKUDA, Tomoaki)

Haryono Setiyo Huboyo

Mohd Talib Latif

Mastura Mahmud

Regina Hitzengerger