

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 1日現在

機関番号：53301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22710032

研究課題名（和文） 煙道内での PM2.5 質量濃度測定のための改良型バーチャルインパクターの開発

研究課題名（英文） Development of improved virtual impactor for PM2.5 mass concentration measurement in stack

研究代表者

和田 匡司 (WADA MASASHI)

石川工業高等専門学校・環境都市工学科・助教

研究者番号：00413766

研究成果の概要（和文）：固定発生源からの PM2.5 排出濃度の測定法としてのバーチャルインパクターの実用化を目的に、改良型装置の開発を目指し研究を行った。実際のプラントでも有効な改良型バーチャルインパクターが完成した。

研究成果の概要（英文）：PM10/PM2.5 emission behavior from a real incinerator was investigated by using virtual impactors, which was newly designed for measurement of PM10/PM2.5 mass concentration in stack of stationary sources. As a result, the virtual impactor performed good PM10/PM2.5 separation and sampling.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2011年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境影響評価・環境政策

キーワード：大気環境、PM2.5、固定発生源

1. 研究開始当初の背景

環境省では大気中の PM2.5 の環境基準値が決定され、近く環境基準が規定される。現在は、固定発生源からの PM2.5 排出濃度の測定法について規格がないが、ISO/TC146 で議論がなされ、本申請のバーチャルインパクター法が規格化されようとしている。これまでの申請者らの研究で有用性を示してきたが、実用化に向けては解決すべき問題がいくつかあることも分かっている。最も重要な課題は、日本では特に排出粉じん濃度の低い場合が多く、勤務時間中に十分な捕集量が確保できないことであった。

2. 研究の目的

本研究では改良型装置の開発を目指す。さらに、本装置の信頼性について先行的に検討し、ISO 化に有効な資料提供を目指す。

3. 研究の方法

改良型バーチャルインパクターを製作することを目的に、以下の手順で研究を行う。改良型バーチャルインパクターの設計、装置を製作する。モデルエアロゾルによる基本性能測定をして試作品の性能測定をおこないつつ装置を改良していく。改良した装置を用いて実プラントでの性能試験でさらに実際に近い条件で性能測定をおこないつつ最終決定

した設計で信頼性試験（誤差測定）用の装置を製作する。信頼性の検討を行うとともに、実用性を証明する。

4. 研究成果

(1) 製作した装置

固定発生源煙道内測定用に Fig. 1 に示す改良型マルチノズル型マルチステージバーチャルインパクトを試作した。本装置は VIS impactor を、固定発生源煙道中で PM10/PM2.5 をより正確に分級捕集できるように改造したものである。上流から順に 1 段目が PM10 分級部で 10 μm 以上の粗大粒子を、2 段目が PM2.5 分級部で 2.5 ~ 10 μm の粒子 (PM10-2.5) を、その後 PM2.5 捕集部で PM2.5 をそれぞれフィルタにより捕集する。以下、捕集部については、1 段目を PM>10 捕集ステージ、2 段目を PM10-2.5 捕集ステージ、3 段目を PM2.5 捕集ステージと呼ぶことにする。分級部は同軸上に配置された加速ノズルと捕集ノズルで構成されている。加速ノズル通過流量の約 1 割を捕集ノズルで吸引する形式にすることで、含じん気流は捕集ノズル手前で方向を変えて次段へと流れ、カットオフ径以上の粒子は主流を外れて捕集ノズルを通りフィルタで捕集される。なお、バーチャルインパクトの分級特性は通常、粒子の停止距離とノズル径との比率であるストークス数によって支配される。

$$Stk = \frac{\rho_p d_p^2 U C_c}{9\eta D_0}$$

ここで、 ρ_p 、 d_p 、 U 、 C_c 、 η 、 D_0 はそれぞれ、粒子の密度、粒子径、加速ノズルのガス流速、カニングムの補正係数、気体の粘性係数、加速ノズル径である。主要設計パラメータを Table 1 に示す。部分分離効率が 50% となるストークス数の値 (本装置では 0.44)、および、 $\rho_p = 1000\text{kg/m}^3$ を代入し、各分級ステージのカットオフ径が 2.5 μm 、10 μm となるように U 、 D_0 が決定されている。

本装置はモデル粒子による分離試験をしながら、改良を加えていったものである。

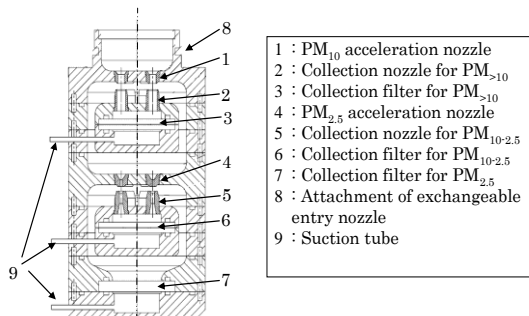


Fig.1 Diagram of VIS-impactor for PM10/PM2.5 sampling in stack of stationary sources

(2) 実プラントでの検証試験 石油燃焼ボイラ排ガスをを用いた測定

日本国内でも主な固定発生源のひとつである発電用ボイラで測定を行った。本施設は重油+LNG の混焼ボイラである。燃焼排ガスは熱交換器で冷却、煙突から排出される。測定は温調機後方で行った。測定点煙道は 1700mm×4510mm の四角形で、排ガスは水平方向に流れている。測定には内径 100mm のサンプリング口を使用した。排ガスの諸条件はガス速度 7.6m/s、温度 152℃、水分量 18g/m³、CO2 濃度 11.6%、O2 濃度 2.4%、ダスト濃度 5.4mg/m³。

測定口から分級装置を鉛直に挿入し、屈曲ノズルを用いて吸引した。排ガス条件からノズル径は 6mm とした。分級ステージの流量調整は湿式ガスメータを用いて行った。測定の際は、煙道内で 5 分程度予熱を行ってから測定を行った。なお、同一サンプリング口で交互に装置を入れ替えて 4 回の測定を行い、3 対の不確かさ評価を行った。

それぞれの PM10/PM2.5 質量濃度測定結果を Fig. 2-3 に示す。PM2.5 積算率は、全捕集粒子中の該当粒子の割合を質量基準で表したものである。本測定の対象排ガスでは PM10 の平均値は 3mg/m³ 程度で PM2.5 の平均値が 1mg/m³ 程度であった。また、PM2.5 はおよそ 30% 程度含まれていることが分かった。

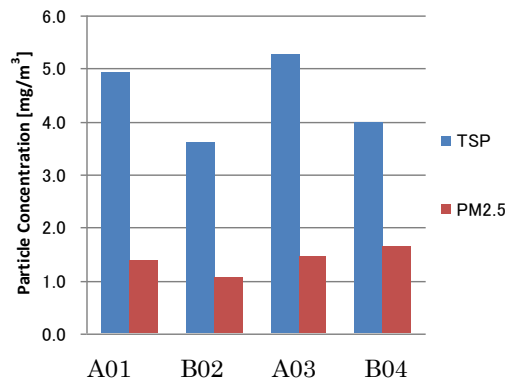


Fig.2 Result of PM2.5 at C point

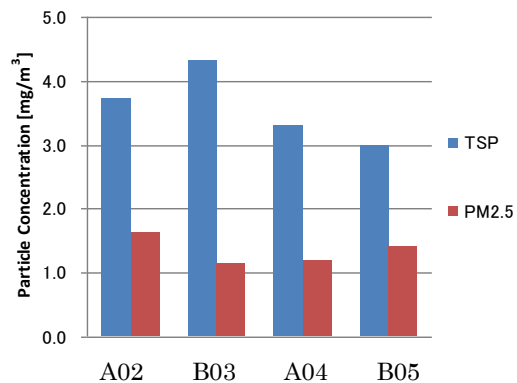


Fig.3 Result of PM2.5 at C' point

また、それぞれの地点での4回の測定結果を元に連続する3対の測定結果同士から得られる測定誤差を求め、標準不確かさを求めた。Table1 に濃度測定値の平均値と不確かさの検討をした結果を示す。なお、標準不確かさは ISO 20988 に基づき以下の対測定による s_D (standard deviation) を求める式を用いて計算した。

$$s_D = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (c_{1,i} - c_{2,i})^2}{2n}}$$

ここで、 $c_{1,i}$ は1台目の装置による i 回目の濃度測定値、 $c_{2,i}$ は2台目の装置による i 回目の濃度測定値、 n は対測定の回数である。本測定の場合 A、B の i 回目の測定値がそれぞれ $c_{1,i}$ 、 $c_{2,i}$ である。

この結果から、数 mg/m^3 程度の濃度を有する排ガスならば、PM2.5 は標準不確かさ $0.2\text{mg}/\text{m}^3$ 程度の測定が可能であることが分かった。

Table 1 Uncertainty of measurement

	Measurement number	Average of PM ₁₀ content [mg/Nm ³]	Standard deviation of PM ₁₀ content [mg/Nm ³]	Average of PM _{2.5} content [mg/Nm ³]	Standard deviation of PM _{2.5} content [mg/Nm ³]
C	4	3.6	0.8	1.4	0.2
C'	4	3.0	0.3	1.3	0.2

医療系廃棄物焼却排ガスを用いた測定

東アジア地区における経済発展は著しく急速である。発生源近傍の大気汚染はもとより、周辺国への広域越境汚染、さらには北半球全体にも及ぶ広がりをもって、地域規模から地球規模の大気汚染問題の顕著化につながっている。特に、PM2.5 は日本国内でも環境基準が設置され、関心が高まっている項目である。大気環境中のPM2.5 はさまざまな成分から構成されており、対策を進めるためには各種発生源の排出実態を把握する必要がある。そこで、東アジアにおける固定発生源からのPM10/PM2.5 排出量を推定するため、マレーシアにある医療廃棄物焼却プラントの煙道での排出量を二段バーチャルインパクトにより測定した。本プラントでは、点滴容器、脱脂綿などの医療系廃棄物の焼却処理をしている。燃焼排ガスは熱交換器で冷却、消石灰を添加後、バグフィルタで除塵、煙突から排出される。測定はバグフィルタ後方の煙突中間地点で行った。測定口から分級装置

を水平に挿入し、屈曲ノズルを用いて吸引した。The entry nozzle the diameter is 6.0mm was used. 各分級ステージの流量調整は乾式ガスメータを用いて行った。測定の際は、煙道内で5分程度与熱を行ってから測定を行った。煙道の内径は800mm、排ガスの流れ方向は垂直方向上向きで、測定には内径100mmのサンプリング口を使用した。同時に2台のサンプリング装置を挿入し、同時並列測定を行った。測定は3回行った。各測定時の排ガスの諸条件をTable2に示す。

Table 2 Flue gas condition

Velocity [m/s]	Temperature [°C]	Water content [g/m ³]	CO ₂ [%]	O ₂ [%]
4.6	157	30	1.4	19
9.8	161	30	1.8	18.5
9.8	161	30	1.8	18.5

それぞれのPM10/PM2.5 質量濃度測定結果をTable2に示す。分配率は、全捕集粒子中の該当粒子の割合を質量基準で表したものである。測定番号1では、粒子濃度が高く平均 $19\text{mg}/\text{m}^3$ のTSP濃度であった。測定番号2,3では平均 $6\text{mg}/\text{m}^3$ 程度であった。しかし、分配率を見ると、いずれの測定においてもPM2.5 は70%以上と高い値を示している。このことから、本プラントからの排ガスには径の小さい粒子がかなり多く含まれていることが分かる。

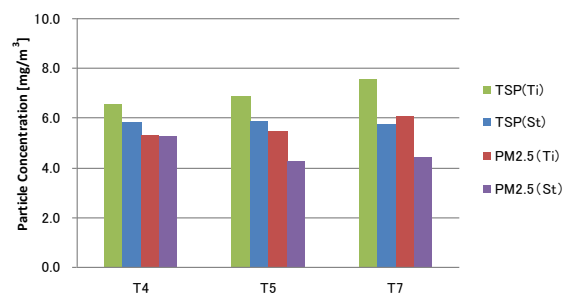


Fig. 4 Result of PM2.5 measurement

ガスメータ読みによる実際の吸引流量と、PM10/2.5 分級のための理論吸引量との誤差を示した。誤差は82%~100%の間であった。この誤差によって変わるカットオフ径の推算値をTable3に示した。82% (-18%の誤差) があるとカットオフ径が10%以上ずれることになる。それ以外は数%以下であるのでこの程

Table2 Sampling result of PM10/PM2.5 mass concentration

Sampling No		1		2		3	
Rig No		A	B	A	B	A	B
Volume of sampled gas	(m3)	1.1	1.0	0.6	0.6	0.6	0.6
Sampling time (min)		120	120	60	60	60	60
Mass of collected particle (mg)	1st stage	0.34	2.83	0.36	0.39	0.54	0.46
	2nd stage	3.67	3.55	0.45	0	0.35	0.59
	3rd stage	11.32	17.6	3.34	3.26	3.43	2.72
Total mass (mg)		15.33	23.98	4.15	3.61	4.32	3.77
PM10 concentration (mg/m3)		13.7	20.8	6.0	5.2	6.0	5.2
PM2.5 concentration (mg/m3)		10.3	17.3	5.3	5.3	5.5	4.2
TSP concentration (mg/m3)		14.0	23.5	6.6	5.8	6.9	5.9
Collection ratio of PM>10 (%)		2.2	11.8	8.7	10.8	12.5	12.2
Collection ratio of PM10-2.5 (%)		23.9	14.8	10.8	0.0	8.1	15.6
Collection ratio of PM2.5 (%)		73.8	73.4	80.5	90.3	79.4	72.1

度の誤差であれば、大きなカットオフ径の差にはならないことが分かる。測定濃度結果を見ると PM の排出濃度が高く、特に PM2.5 の割合が非常に大きいことが分かる。Table3 に PM10/2.5 の平均測定濃度と対測定による測定の不確かさを検討した結果を示す。

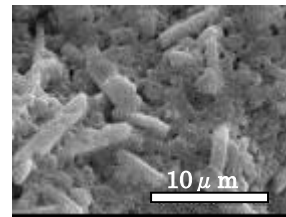
Table3 Uncertainty of measurement

Measurement number	Average of PM ₁₀ content [mg/Nm ³]	Standard deviation of PM ₁₀ content [mg/Nm ³]	Average of PM _{2.5} content [mg/Nm ³]	Standard deviation of PM _{2.5} content [mg/Nm ³]
3	5.7	0.8	5.1	0.8

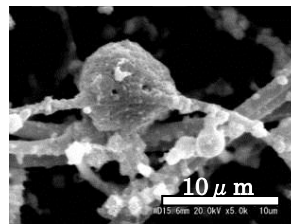
Table4 Estimation of Cut-off diameter deviation by the error of suction flow rate

Error of suction flow rate	Q_{real}/Q_{ideal}	110%	100%	90%	80%
Velocity of PM2.5 separation nozzle	U [m/s]	19.88	18.08	16.27	14.46
Cut-off diameter	dp50 [μ m]	2.38	2.50	2.63	2.79
Re No.	Re	1977	1798	1618	1438

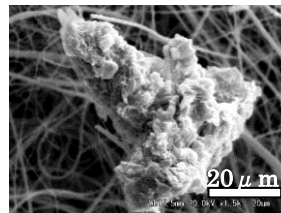
Fig. 2 にそれぞれのステージで捕集された粒子の SEM 画像を示す。SEM 観察からは、良好な分級が出来ていることが確認できる。さらに、各粒子について成分分析を行った。5 箇所の平均値を Fig. 3 に示す。どの大きさの粒子も Cl の含有率が高い。これは、プラスチック系の廃棄物が多いことによると考えられる。また、粒子径別に見ると、PM2.5 には Zn や Pb が多く含まれており、これらは塩化物として存在しているのではないかと考えられる。一方、粗大粒子には Fe や Si が多かった。



PM2.5



PM10-2.5



PM>10

Fig.2 SEM image of collected particle

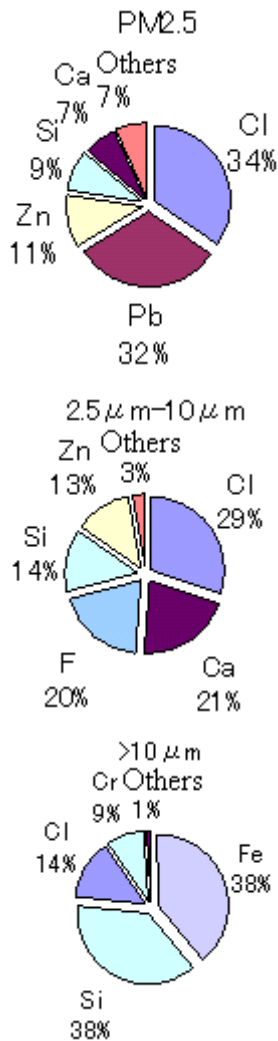


Fig.3 Component ratios of collected particle

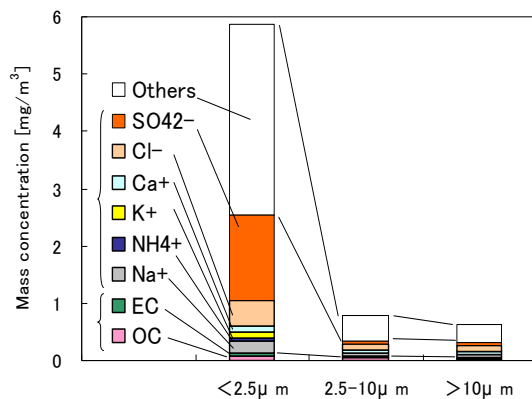


Fig.4 Chemical composition analysis

OC/EC 及びイオン濃度の分析結果の一例を図1に示した。医療廃棄物焼却プラント排ガスでは、PM10に比べてPM2.5の粒子濃度が非常に高い。他の施設でも、PM10以上に比べPM10以下の粒子濃度が高い。また、OC/ECは多くはないが、他施設の試料には多く含まれてい

た。さらに、3つの施設に共通してPM2.5段では、硫黄分、無機イオン濃度が高い傾向が認められた。FE-SEM/EDS分析結果からもPM10/2.5ではS、Fe、Vなどが多い傾向がある。他の発生源で捕集されたPM10/2.5でも、金属成分などが微粒子側に多い傾向が認められた。OC/ECは、PM2.5-PM10段が多いが、PM2.5段では、硫黄分、無機イオン濃度が高い傾向が認められた。GC-MS分析結果からは重油・LNG、石炭燃焼施設共に固有の芳香族化合物が検出され、医療系廃棄物からも多くのピークが検出された。特に重油・LNG燃焼施設からは、他の試料より多くの成分が検出された。

(4) まとめ

固定発生源からのPM_{2.5}排出濃度の測定法としてのバーチャルインパクタの実用化を目的に、改良型装置の開発を目指し研究を行った。改良を試み、有効性を確認した。分離性能低下については、最適な流量に対する装置の最適構造（特にノズルの配置や形状）に改良した。流量制御については、マスフローメータを含む流量制御ラインを整備し、ある程度の自動制御が可能にすることで対策した。圧力差については、急激な圧力差を生み出さないよう空吸引時間を含ませた吸引プログラムを導入することにより対策した。水分凝縮や熱に対しては、流量制御ライン内に凝縮水除去部を設けることや素材の選択及び加温装置の取り付けにより対策した。以上の改良を加え、中国の石炭火力発電排ガスを用いてその効果を確認した。測定の結果から、新たに導入・改良した装置本体・流量制御ライン・吸引プログラムにより、正確なPM2.5測定が可能になった。

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1件)

H. Kamiya, K. Hada, T. Sekizawa, M. Yamada, M. Tsukada, W. Lenggoro, M. Wada, N. Kogure, Y. Yuping, W. W. Szymanski: "Measurement and analysis of fine particulate matters (PM10/PM2.5) and condensable nanoparticles emission from stationary sources", *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 154, 71-81 (2011)

〔学会発表〕(計5件)

- 1) 神谷秀博, 塚田まゆみ, 峰島知芳, 並木則和, 和田匡司, 野田直希, 牧

野尚夫：“人為発生源におけるエアロゾルの生成と排出源同定”，「東アジアにおけるエアロゾルの植物・人間系へのインパクト」シンポジウム,3, 京都, 2012.1.24-26

- 2) 和田匡司, 神谷秀博, 塚田まゆみ, 並木則和, 関口和彦, 金庚煥, 東野達, 奥村智憲, Ramli B. Mat, Mohd Rashid Mohd Yusof, W.W. Szymanski: “バーチャルインパクトにより分離捕集した固定発生源からのPM10/PM2.5排出濃度と化学組成”, 「東アジアにおけるエアロゾルの植物・人間系へのインパクト」シンポジウム,41,京都, 2012.1.24-26
- 3) 大石亨, 並木則和, 新井美葉, 塚田まゆみ, 神谷秀博, 和田匡司, W.W. Szymanski: “PM10/PM2.5 質量濃度測定用バーチャルインパクトの分級性能評価と固定発生源実測への適用”, 「東アジアにおけるエアロゾルの植物・人間系へのインパクト」シンポジウム,40,京都, 2012.1.24-26
- 4) 並木則和, 新井美葉, 塚田まゆみ, 神谷秀博, 和田匡司, W.W. Szymanski: “PM10/PM2.5 質量濃度測定用バーチャルインパクトの分級特性評価と固定発生源実測への適用”, エアロゾル科学・技術研究討論会,7-8,大阪, 2011.8.27
- 5) H. Kamiya, K. Hada, T. Sekizawa, M. Yamada, M. Tsukada, W. Lenggoro, M. Wada, N. Kogure, Y. Yuping, W. W. Szymanski: “Measurement and analysis of PM2.5 and condensable nanoparticles emission from stationary sources” Sustainable Chemistry 2011, Belgium, 2011.7.6-8

6. 研究組織

(1) 研究代表者

和田 匡司 (WADA MASASHI)

研究者番号 : 00413766