

電力中央研究所報告

厨房排気フードにおけるトレーサガス捕集率に
基づく粒子捕集率の近似

研究報告：V16002

2017 年 3 月

 電力中央研究所

IR

CRIEPI

**Central Research Institute of
Electric Power Industry**

厨房排気フードにおけるトレーサガス捕集率に基づく粒子捕集率の近似

田中 伸幸*¹ 津崎 昌東*²

キーワード：オイルミスト

業務用厨房

排気フード

捕集率

気流擾乱

Key Words : Oil-mist

Commercial kitchen

Exhaust hood

Collection efficiency

Disturbance

Approximation of collection efficiency for particles at kitchen exhaust hood based on collection efficiency of tracer gases

Nobuyuki Tanaka and Masaharu Tsuzaki

Abstract

Collection efficiency of gases and particles at exhaust hood in case gas stream disturbance being generated was evaluated in this study. In addition, we proposed the approximation method to estimate the collection efficiency of particles at kitchen exhaust hood by using that of tracer gases. Gas stream disturbance was generated by an electric fan. Collection efficiency of tracer gas at exhaust hood was capable to adjust 70 to 90 % by means of changing the distance between the exhaust hood and the fan. Tracer particles were generated two patterns, one was $<1 \mu\text{m}$ peak top of unimodal (pattern A), the other was $<1 \mu\text{m}$ and $6\mu\text{m}$ peak tops of bimodal distributions (pattern B). Collection efficiency of tracer particles generated as pattern A at exhaust hood was quite similar to that of tracer gases which were generated simultaneously. On the contrary, collection efficiency of tracer particles generated as pattern B was degraded more than that of tracer gases in case collection efficiency of tracer gases was below 90%. Collection efficiency of tracer particles and that of gases showed fine correlation, indicating that collection efficiency of particles was corrected by that of tracer gases. Based on the results above, we proposed to approximate the collection efficiency of particles using the correlation between the collection efficiency of particles generated as pattern B and that of gases.

*¹ 環境科学研究所 環境化学領域 上席研究員

*² 環境科学研究所 環境化学領域 主任研究員

背 景

当所は電化厨房の新たな換気設計手法を確立するため、種々の条件におけるトレーサガス捕集率のデータを蓄積している¹⁾。実調理ではガス状成分のほか粒子状成分も排出されるが、試験の簡便さのため、両成分の捕集率が一致するとの仮定に基づいて評価されることが多い。実際の厨房では調理作業による気流擾乱²⁾があるなど粒子挙動の慣性の影響が顕著となり、両成分の捕集率が乖離する可能性がある。粒子状成分の捕集率をガス状成分の捕集率により近似する方法が求められている。

目 的

気流擾乱がある場合のトレーサ粒子及びトレーサガスの捕集率を評価することにより、両者の捕集率に差がある場合の近似方法を提案する。

主な成果

1. トレーサガスとトレーサ粒子の捕集率の関係

気流擾乱を起こすため、フード枠外から横風を発生させて、フード直下からトレーサガスとトレーサ粒子を同時に発生させた(図1)。その結果、フライドポテト調理のように粒径 $1\ \mu\text{m}$ 程度の微小径が卓越するトレーサ粒子(図2a:パターンA)を発生させた場合は、トレーサ粒子とトレーサガスの捕集率はほぼ一致した(図3)。これに対して、ハンバーグ調理のように粒径 $6\sim 7\ \mu\text{m}$ 付近の粗大径が卓越するトレーサ粒子(図2b:パターンB)を発生させた場合、トレーサガスの捕集率が $90\sim 100\%$ の時にトレーサ粒子の捕集率もほぼ等しい値となった(図3)。一方、トレーサガスの捕集率が 90% を下回ると、トレーサ粒子の捕集率は大幅に低下した。このとき両者には高い相関が認められた($r^2=0.85$)。

2. トレーサガス捕集率を用いた粒子捕集率の近似方法の提案

パターンB(図2b)はハンバーグ調理を模擬した粒径分布であり、調理の中でも粗大径の発生割合が高いものと考えられる³⁾。したがって、フードにおける粒子状成分の捕集率をより安全側に評価するためには、ハンバーグ調理により発生する粒径分布を模擬したパターンBにおけるトレーサ粒子とトレーサガスの捕集率の関係に基づき、トレーサ粒子の捕集率を近似することが望ましいと考えられた。得られた結果に基づき、トレーサガスの捕集率が $60\sim 90\%$ の範囲にあるとき、近似式 $y = 1.48x - 48.4$ (x, y はそれぞれトレーサガス、粒子の捕集率。 $r^2=0.85$)を用いて粒子の捕集率をトレーサガスの捕集率から補正する方法を提案した(図3)。同法により、粒子の捕集率を測定することなく、トレーサガスの捕集率から粒子の捕集率を簡便に近似することが可能となった。

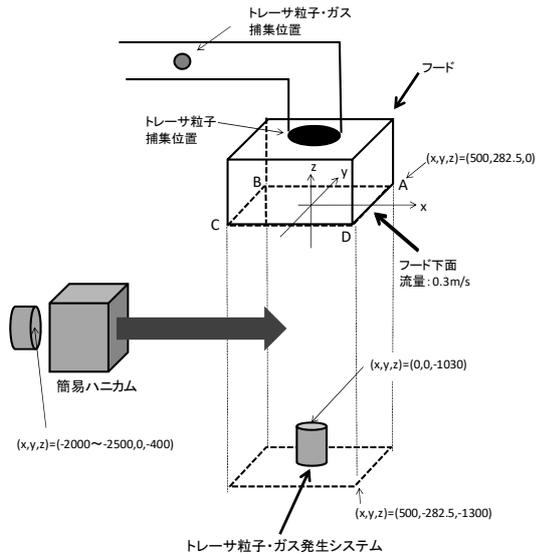


図1 横風発生のご概略

横風は羽根がなく気流むらが少ない扇風機により発生させ、ハニカムを通すことで整流した。トレーサガス及びトレーサ粒子は、当所が開発したトレーサガス・粒子発生システムにより、 $(x, y, z) = (-300, -200, -1030) \sim (300, 200, 500)$ の範囲で発生させた。横風はフード下面に移流して、トレーサガス及びトレーサ粒子の一部をフード外に搬送する。

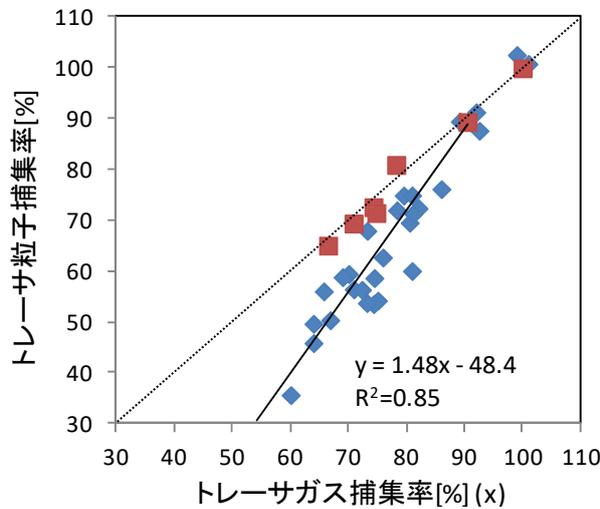


図3 トレーサガスとトレーサ粒子の捕集率の関係

■パターンA, ◆パターンB

パターンBにおいてトレーサガスの捕集率が90%を下回る領域では、トレーサガスの捕集率(x)とトレーサ粒子の捕集率(y)の間に $y = 1.48x - 48.4$ の関係が成立する ($r^2=0.85$)。

- 1) 例えば：電力中央研究所研究報告, R15016.
- 2) 時間とともに刻々と変化する気流の乱れ。
- 3) 例えば：近藤ら (2011) 日本建築学会環境系論文集, 76, 664, 547-554.

関連報告書：電力中央研究所研究報告, V14014.

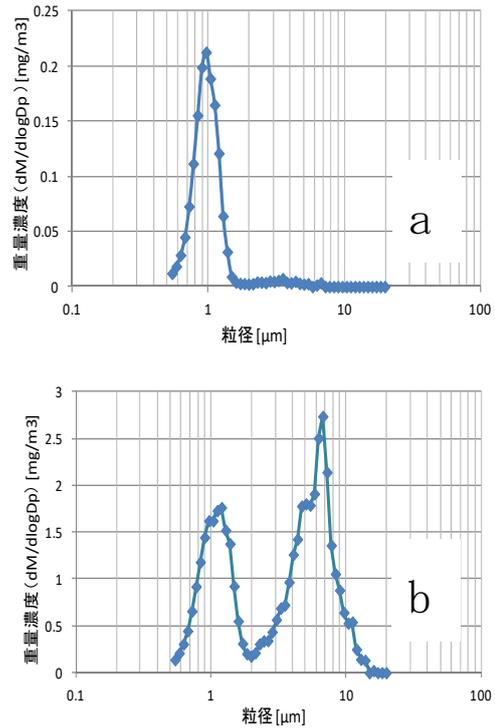


図2 トレーサ粒子の粒径分布

a: パターンA (フライドポテト調理などを模擬)

b: パターンB (ハンバーグ調理などを模擬)

パターンAでは粒径1 μm付近の微小径にピークを持つ一山の分布であるのに対して、パターンBでは微小径に加えて粒径6-7 μm付近の粗大径にもピークを持つ二山分布を呈する。

目 次

1. 緒言	1
2. 実験	2
2.1 模擬フードの概要	2
2.2 試薬	2
2.3 トレーサ粒子・トレーサガスの発生システム	3
2.4 サンプルング方法	4
2.5 前処理方法	4
2.6 分析装置	5
3. 結果と考察	5
3.1 新たなトレーサ粒子発生システムによる粒子発生条件の検討	5
3.2 実験条件の検討	6
3.3 模擬フードにおけるトレーサガスとトレーサ粒子の捕集率の関係	8
3.4 トレーサガス法に基づく粒子のフードにおける捕集率補正法の提案	11
4. 結語	12
謝辞	12
参考文献	12

1. 緒言

加熱調理に伴い排出される調理排気には、水蒸気や一酸化炭素、窒素酸化物などのガス状成分のほか、食材そのものに起因する脂肪酸、アルコール類、ステロール類などや、加熱により生成する多環芳香族炭化水素などの粒子状成分が含まれる (Rogge et al., 1991; Lewtas, 2007; Abdullahi et al., 2013; 津崎ら, 2010; 田中ら, 2012a; 田中ら, 2012b)。これら成分の一部は、悪臭を発生して主として調理者に不快感を与えるほか、ヒトへの吸入曝露により健康影響を引き起こす可能性もある。また、これら成分が厨房設備等に付着することで、衛生環境が悪化する恐れがある。それゆえ、調理排気に含まれるこれらの成分を屋内から適切に除去することは、労働衛生環境を良好な状態に保つために不可欠である。

調理排気中の粒子は、個数濃度では粒径 $1 \mu\text{m}$ 以下がほとんどを占めるが、重量濃度では、調理によって異なるものの数 μm をピークとして $10 \mu\text{m}$ を超える粒子の割合も無視しえないことが分かっている (近藤ら, 2011; 百瀬ら, 2002)。粒径 $1 \mu\text{m}$ 以下の粒子についてはほぼガスと同様に振舞い、主として換気システムによって室外に排出される。一方、 $1 \mu\text{m}$ を超える粒子は粒径が大きくなるにしたがって重力沈降などの影響を受けやすくなり、排出されにくくなる (近藤ら, 2011)。そのため、一部の粒子は室内に残留し、衛生上の問題となるほか、上に述べたように不快な臭気の原因や、有害化学物質の曝露源となりうる。加えて、調理者の動き等に起因した気流の擾乱がある環境においては、粗大径の粒子状成分の捕集率はガス状成分の捕集率と異なる可能性が示唆されている (伊藤ら, 2016)。しかし、これまでの研究では、粒子状成分の捕集率はガス状成分に概ね近似するとの仮定に基づいて評価されている。

これに対して当所では、調理排気中の粒子状成分に着目して、排気フードにおける捕集率を評価するための研究開発に取り組んでいる。これまでに、調理排気中の粒子状成分を対象に、試料採取、前処理、分析技術を開発 (田中ら, 2010; 田中ら, 2011) するとともに、調理排気中の粒子状成分の濃度レベルを明らかにした (津崎ら, 2010)。また、調理排気中の粒子の粒径分布を模擬するためのトレーサ粒子発生システムを開発した (田中ら, 2015)。同システムを用いることで、種々の加熱調理から発生する粒子の粒径分布が模擬できることを明らかにした。さらに、同システムにより発生させた粒子状成分は、開発した試料採取、前処理、分析技術を用いることで、定量的に測定できることを明らかにした (田中ら, 2015)。しかし、粒子状成分の試料採取、前処理、分析には、一般に長時間を有する上、分析精度を高めるためには高度な技術が必要である。一方で、ガス状成分の測定は粒子状成分に比較して容易であり、短時間かつ安価に結果を得ることが可能である。それゆえ、ガス状成分の排気フードにおける捕集率から粒子状成分の捕集率を推計できれば、時間やコストの大幅な削減に貢献できる。

そこで、本研究では、排気フードにおけるガス状成分の捕集率から粒子状成分の捕集率を推計する手法を開発することを目的に、排気フードにおける両者の捕集率の関係を見出すこととした。本稿では、実調理により生成される粒子の粒径分布を模擬して、トレーサガスとトレーサ粒子を同一の位置から同時に発生させ、それぞれの排気フードにおける捕集率を求めて、両者の関係を示すこととする。特に、トレーサガスとトレーサ粒子の捕集率の差が大きくなりえる低捕集率時について、両者の挙動を明らかにする。

2. 実験

本章では実験に関する事項について概説する。なお、本章に記載された内容、とりわけ試料採取、前処理、分析方法の大部分は前報（田中ら，2015）に詳述されているので、それらも併せて参照されたい。

2.1 模擬フードの概要

実験に使用した模擬フードの概要を図1に示す。フードはステンレス製であり、開口部（フード下面）は1000 mm×565 mmである。

フードに接続した排気ダクトは内径 250 mm の円筒形である。フード上部にある排気ダクト入口には、トレーサ粒子を捕集するためのフィルタ等が装着可能である。また、ダクトには排気成分を分取するためのサンプリング口（φ4 mm）が設けられている。

ダクト下流部には熱線風速計が組み込まれており、ここで風速をモニタリングしている。排気ファンは出力を調整して任意の排気量を設定できる。本研究では、一部の実験を除いてフード下面における面風速が平均 0.3 m s^{-1} （排気ダクト内では 6.1 m s^{-1} に相当）となるように設定した。フード下面におけるこの風速は、業務用厨房の設計時に一般的に用いられる値（国土交通省，2015）である。

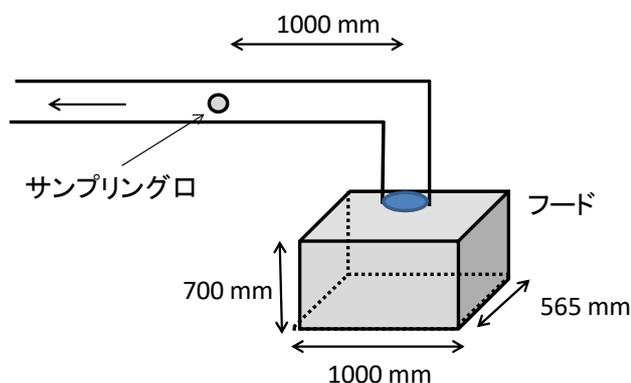


図1 模擬フードの概要

2.2 試薬

本研究ではトレーサ粒子の成分としてテトラエチレングリコール（TEG：鹿1級，関東化学）を選択した。また、前処理、分析工程における内部標準物質として、トリブチリン（TB：鹿特級，関東化学）、トリカプロイン（TC：>97%，東京化成）、テトラエチレングリコールモノブチルエーテル（BS40：>97%，KHネオケム）を用いた。それぞれの示性式を図2に示す。なお内部標準物質としては、測定対象成分の炭素ないし水素を安定同位体で置換したものを用いるのが通例であるが、TEGの安定同位体置換試薬は市販されていないため、本研究ではTEGと化学的性質が類似する上記3物質を内部標準物質として利用した。なお、前処理及び分析工程において、これら3物質がTEGとほぼ同様に振る舞うことは確認済みである。また、試料の抽出等に用いるアセトンは、ダイオキシン類分析用ないし試薬特級（和光純薬）を用いた。

一方、トレーサガスとして用いる1,1,1,2-テトラフルオロエタン（R134a）ガスは、純度99.9%以上の純品（高千穂化学）を用いた。

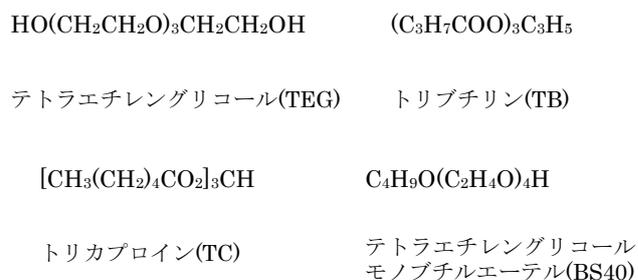


図2 測定対象成分及び内部標準物質の示性式

2.3 トレーサ粒子・トレーサガスの発生システム

トレーサ粒子及びトレーサガスは、当所が開発したトレーサ粒子・トレーサガス発生システムを用いて発生させた。同システムの全景を図3に、概要を図4に示す。同システムはガス供給部、トレーサ粒子発生部、加熱部によって構成される。同システムは一部の配管を除きSUS製であり、耐食性、密閉性が保たれている。トレーサ粒子は、加熱した TEG に窒素ガスを通気、バブリングすることにより発生させる。トレーサ粒子発生部の上部には、窒素（以下、アシストガスと表記する）及びR134aを通気した。アシストガスは、発生させたトレーサ粒子の系外への排出を促進し、排出量を増大させるためのものであり（田中ら，2015）、TEG のバブリングには関与しない。また、R134a をアシストガスとともに通気することにより、トレーサ粒子はR134aと同一の排出口から同一の線速度で排出させることができる。

実験時には室内環境、とりわけ気流を静穏にするため、実験室の空調を止め、実験室の扉は実験が終了するまで全て閉め切った。

窒素ガス及びR134aはボンベから供給し、マスフローコントローラによって流量を調節した。

通気管は内径 4 mm の直管とした。窒素ガスについては、ボンベ中にごく微量存在する可能性がある水分を除去するため、トレーサ粒子発生部の上流に無水硫酸ナトリウム約 2 g を充填したガラス管を連結した。TEG の加熱は粒子発生部のほぼ全体を覆う形に成形したマントルヒータによって行った。

トレーサ粒子・トレーサガスは、フード枠内で発生させた。発生位置の詳細は 3.2 節に記述する。加えて、トレーサ粒子・トレーサガスのフードにおける捕集率を意図的に下げるため、一部の実験においてフード外から横風を与えて

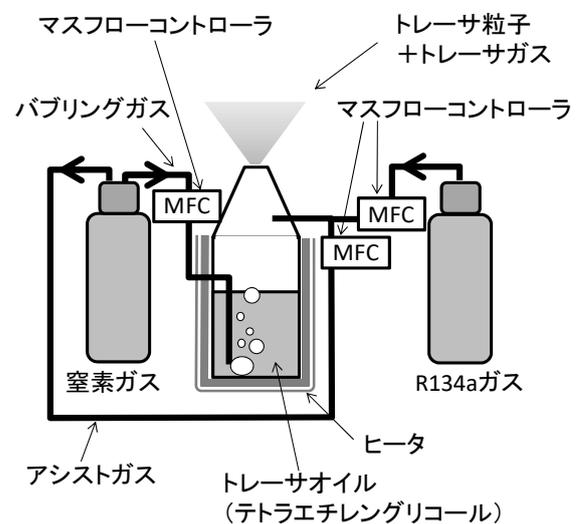


図4 トレーサ粒子・トレーサガス発生システムの概略

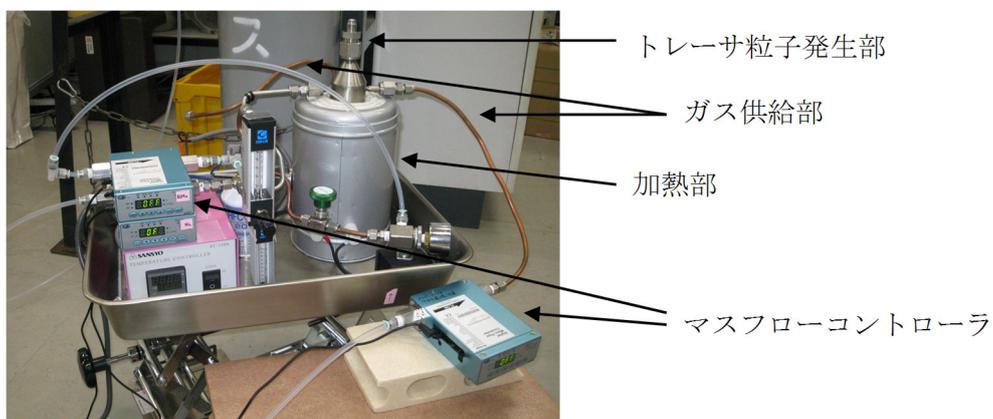


図3 トレーサ粒子・トレーサガス発生システムの全景

擾乱を発生させた。横風を発生させる装置としては、羽根がなく気流むらが少ない扇風機（AM06 テーブルファン、Dyson）を用い、さらに下流側には簡易的なハニカム（以下、ハニカムと表記；開口部 1 つあたり：60 mm × 60 mm の正方形、開口部数：6 × 6 = 36 個、ハニカム全体：425 mm × 425 mm × 195 mm）を設置して、気流が整流となるようにした。これらの設置位置の詳細は 3.2 節に記述する。扇風機の強さは、10 段階あるうちの最低出力（1）とした。このときの扇風機下流（中心点から 50 mm 風下）における風速は 0.4 m s^{-1} 、ハニカム下流（中心点から 50 mm 風下）における風速は 0.35 m s^{-1} であった。また、上述の通り、フード下面における面風速は 0.3 m s^{-1} とした。トレーサ粒子・ガスの発生時間は、10 - 30 min とした。また、トレーサ粒子発生前後の粒子発生部の重量は精密電子天秤（GX-1000、エアランドディ：測定最小目盛り 1 mg）を用いて測定した。測定前後の重量差をトレーサ粒子発生量とみなした。

2.4 サンプルング方法

トレーサ粒子の採取は、前報（田中ら、2015）にしたがい、①ダクト入口、②ダクト排気（一部を分取）、③落下物の 3 つを対象とした。

①ダクト入口における採取は、これまでの検討結果（田中ら、2015）に基づき、2 枚の活性炭フィルタ（クラシート#1000、クラレケミカル）に、ステンレス鋼（SUS316L）繊維を材質としたメタルフィルタ（ナスロン®シート NF-15LM1、日本精線）1 枚を組み合わせたものを捕集材とした。

②ダクト排気はダクト排気採取口から採取した。排気中の TEG の採取には、 $\phi 8 \text{ mm}$ のガラス管に破砕状の活性炭素（粒径 $0.9 \sim 1.1 \text{ mm}$ ；

和光純薬）を約 2 g 充填した活性炭吸着管（2 本）を用いた。活性炭吸着管はサンプリングに先立ち、 300°C に加熱した恒温槽内で、純窒素を 100 mL min^{-1} で 3 hr 通気することによりエージングした。採取時の吸引量は、等速吸引となるように設定した。

③落下物は、予めアセトンで表面を洗浄した $400 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ の SUS 板を、吹出し口から約 10 mm 下に敷くことにより採取した。

トレーサガス測定用の試料はダクト排気採取口からアルミバッグ（5L、ジーエルサイエンス）に捕集した。吸引流速は 0.5 L min^{-1} とした。

なお、一部の試料について、トレーサ粒子の粒径分布を測定した。測定には空気動力的粒径測定器（APS；APS3321, TSI）を用いた。APS は $0.523 \mu\text{m}$ （523 nm） - $20 \mu\text{m}$ の範囲で粒径分布を測定できる。

2.5 前処理方法

トレーサ粒子（TEG）測定用試料は、化学分析に先立ち試料の前処理を実施した。

①ダクト入口に設置したフィルタは、前処理工程の内部標準物質として既定量の BS40 を加えて乾燥させたのち、アセトン約 100 mL を充填したステンレスバットに全体を浸して抽出した。抽出は 6 回実施した。各抽出液はろ過ののち、ガスクロマトグラフ質量分析計による測定が可能な濃度範囲とするために、濃縮ないし希釈を行ったうえで、測定工程の内部標準物質として既定量の TB を加えてアセトンで定容した。

②ダクト排気の一部を分取した活性炭吸着管試料は、前処理工程の内部標準物質として既定量の BS40 を加えて乾燥させたのち、アセトン 150 mL を通液して TEG を抽出した。抽出後の試料は、ロータリーエバポレータおよび窒素気流を用いて濃縮した。これに内部標準物質とし

て既定量の TB を加えたのち、アセトンで定容した。また、ダクト排気試料の採取に使用したステンレス管は、内部を 50 mL のアセトンで洗浄し、洗浄液をカートリッジないし活性炭吸着材試料と同様に定容した。これらの溶液を想定される濃度に応じて希釈して分析用試料に供した。

③落下物を採取した SUS 板は、前処理工程の内部標準物質として既定量の BS40 を加えて乾燥させたのち、アセトン（ダイオキシン類分析用）を含浸させたセルロースろ紙（NO.3 型、アドバンテック）を、SUS 板の縦横方向にそれぞれ 2 往復させることにより、表面の付着物を拭き取った。

2.6 分析装置

試料中の TEG、及び内部標準物質の分析にはガスクロマトグラフ質量分析計（GC/MS：QP-2010，島津製作所）を用いた。表 1 に GC/MS の分析条件を示す。

また、試料中のトレーサガス（R134a）の分析には、光音響マルチガスモニタ（1412、INNOVA）を用いた。同装置の繰り返し測定における測定誤差は±5%の範囲である。

3. 結果と考察

3.1 新たなトレーサ粒子発生システムによる粒子発生条件の検討

既報（田中ら，2011；田中ら，2015）にて使用したトレーサ粒子発生システムは、トレーサガスを同時に発生させる仕組みを持たない。それゆえ今回、トレーサ粒子を同時に発生させるための新たなシステムを製作した（図 3，4）。同システムにおいてトレーサ粒子を発生させる際のパラメータは、(a)加熱温度、(b)窒素バブリング流量、(c)アシストガス（窒素ガス）流量、(d)TEG 充填量の 4 つである。これらの値を変えることで、発生するトレーサ粒子の量や粒径分布が変化する。表 2 に、本研究で検討した各パラメータの設定値の範囲を示す。

本研究では、コロッケの揚げ調理などのように微小径が卓越した粒径分布、及びハンバーグの焼き調理やイカリングの揚げ調理などのように粗大径が卓越した粒径分布、の 2 つを模擬するパラメータを見出すこととした。

種々のパラメータを変化させて、トレーサ粒子の粒径分布を測定した。その結果の一部を図 5 に、また発生条件を表 3 に示す。図 5a（発

表 1 GC/MS の測定条件

項目	条件
測定モード	SIM・TICモード
カラム	DB-WAX (Agilent Technology)
カラム長さ・内径・膜厚	30m × 0.25mm × 0.25μm
キャリアガス・流量	He 1.69 mL min ⁻¹
注入口温度	250°C
イオン源温度	200°C
カラム槽温度	初期温度50°C(1min保持)→(30°C min ⁻¹ 昇温)→200°C→(2.5°C min ⁻¹ 昇温)→250°C(4min保持)

表2 トレーサ粒子発生システムのパラメータと設定範囲

パラメータ	設定範囲	単位
加熱温度	100~200	°C
窒素バブリング流量	0.3~5.0	L min ⁻¹
アシストガス流量	0~5.0	L min ⁻¹
TEG充填量	50~100	mL

表3 パターンA・Bの発生条件

パラメータ	単位	パターンA	パターンB
加熱温度	°C	170	180
窒素バブリング流量	Lmin ⁻¹	2.0	2.0
アシストガス流量	Lmin ⁻¹	0.2	2.0
TEG充填量	mL	100	100

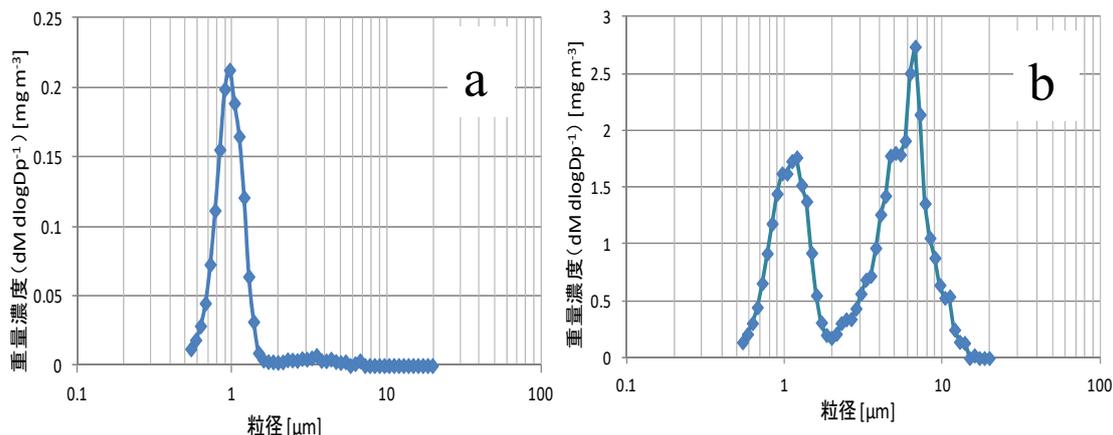


図5 トレーサ粒子発生システムより発生された粒子の粒径分布（一例）

a: パターンAの発生条件 b: パターンBの発生条件

生パターンA)は、0.777 μmをピークトップとし、大部分の粒子は粒径1 μm未満の微小径に集中した。また、粒径3 μm以上の粒子はほとんど発生しなかった。すなわちパターンAは微小径が卓越した粒径分布を示しており、クロツケの揚げ調理などから発生する粒子の粒径分布を模擬している。

これに対して図5b(発生パターンB)は1.197 μmをピークトップとする微小径と、6.732 μmをピークトップとする粗大径を有する二山の分布を呈している。パターンBは微小径よりも粗大径が卓越しており、これはハンバーグの焼き調理などから発生する粒子の粒径分布に類するものである。このように、トレーサオイルの加熱温度や窒素バブリング流量、アシストガス流量などのパラメータを変えることにより、実調理を模擬した粒径分布を持つ粒子

を発生しうることが明らかになった。以降の実験では、図5aに示した微小径の単分散のパターンAと、図5bに示した微小径と粗大径の二山分布を持つ発生パターンBのそれぞれについて評価した。

3.2 実験条件の検討

3.2.1 トレーサガス・粒子の発生位置の検討

模擬フードにおけるトレーサガス、トレーサ粒子の捕集率を評価するのに先立ち、発生位置による捕集率の違いを、トレーサガスを用いて評価した。発生位置の表記の概略を図6に示す。発生位置は、フード下面中心点を(x, y, z) = (0, 0, 0)として、各発生位置はxyz座標系を用いてmm単位で表すこととした。ここで発生

位置とは、トレーサ粒子・トレーサガス発生システムの排出口部を指す(図4参照)。図6より明らかなように、 $|x| < 500$ 、かつ $|y| < 282.5$ のとき、トレーサガスの発生位置はフード下面の枠内にある。また $z < 0$ のとき、トレーサガスの発生位置はフード下面より下の位置となる。なお、模擬フードおよび発生システムの物理的な制約により、 z の取りうる値は $-1030 \leq z \leq 500$ の範囲に限定される。

発生実験を行った各発生位置におけるトレーサガスの模擬フードにおける捕集率を表4に示

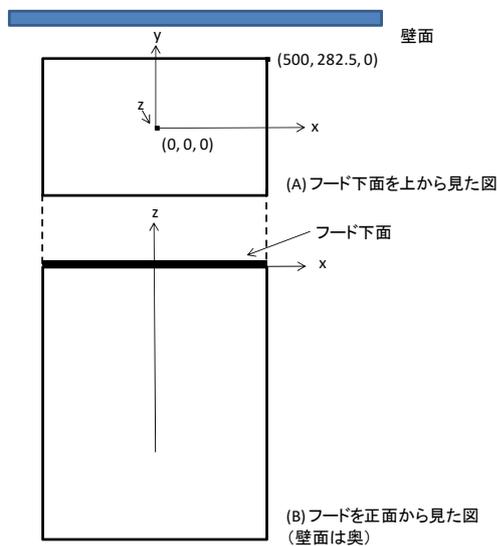


図6 トレーサガス・粒子発生位置の設定

す。表より、発生位置A ($(x, y, z) = (0, 0, 70)$)におけるトレーサガスの捕集率はほぼ100%であり、繰り返し測定した際にも再現性が高かった。発生位置Aはフード下面より上にあり、その全量がフードに捕集されるはずである。よって、発生位置Aにおいて発生させた際のトレーサガスの測定値を、100%捕集条件における測定値とした。また、100%捕集条件以外の実験では、発生点B ($(x, y, z) = (0, 0, -1030)$)においてトレーサガス・トレーサ粒子を発生させることとした。

3.2.2 捕集率の低減方法の検討

実際の厨房では、調理作業による気流擾乱がある(岩松ら, 2014; 近藤ら, 2014)など粒子挙動の慣性の影響が顕著となり、トレーサガス・トレーサ粒子の捕集率が乖離する可能性がある。本研究では、横風の発生位置を変えることで、粒子挙動の慣性の影響を変化させた場合の、両者の関係を明らかにすることを目的としている。

横風発生の概略を図7に示す。横風の発生位置は、図6に示したものと同一の座標系で表記する。すなわちフード下面中心点が $(x, y, z) = (0, 0, 0)$ であり、各数値はmm単位である。

表4 各発生位置におけるトレーサガスの捕集率の違い

	発生位置座標 [mm]			フード下面風速 [m s ⁻¹]	トレーサガス捕集率 [%]	±σ	試料数
	x	y	z				
発生点A	0	0	70	0.3	99.2	2.4	10
	0	0	500	0.3	101.4	1.8	10
	0	0	-300	0.3	99.3	1.6	10
	0	0	-600	0.3	100.3	1.7	10
発生点B	0	0	-1030	0.3	99.7	2.1	10
	300	-200	-1030	0.3	98.1	3.7	10
	300	200	-1030	0.3	96.7	4.7	10
	-300	200	-1030	0.3	97.8	5.1	10
	-300	-200	-1030	0.3	96.6	4.2	10

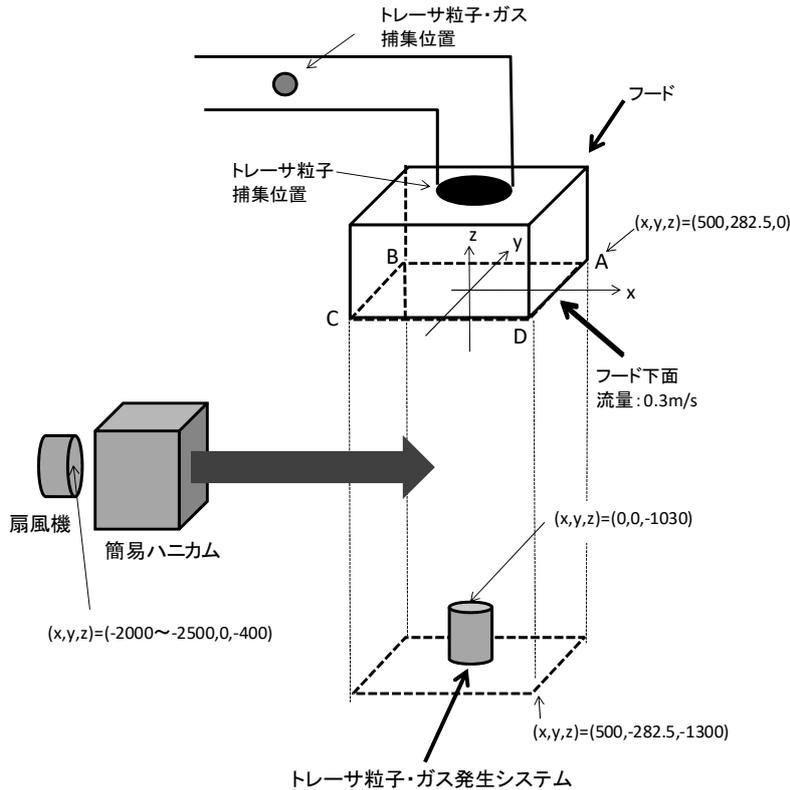


図7 横風発生の概略

横風発生に用いた扇風機の位置は $-2500 \leq x \leq -1500$ の範囲で調整した。横風は、鉛直方向に上昇するトレーサガスと直角に交わるようにするため、扇風機の y 座標は 0 とした。また、横風発生位置の z は -400 とした。扇風機とハニカムの距離は 150 mm とした。なお、横風発生位置の座標は扇風機を中心位置を指す。トレーサガスの発生位置は $(x, y, z) = (0, 0, -1030)$ とした。このときトレーサガスは、鉛直方向におよそ 600 mm 上昇したのちに横風の影響を受けることになる。

横風の発生位置を変化させた時のトレーサガスの模擬フードにおける捕集率を表5に示す。表より明らかなように、横風発生位置がフードに近いほどトレーサ粒子のフードにおける捕集率が低減し、 $z = -1500$ ではトレーサガスの捕集率は 37.1% であった。これに対して $z \geq -2000$ ではトレーサガスの捕集率は概ね 70% を超え、

$z = -2500$ では 90% 程度の捕集率となった。以上の結果から、既往研究（例えば：岩松ら，2016）の測定結果に見られるトレーサガスの捕集率（ $70\% \sim 90\%$ ）を意識して、本研究では、 z を -2000 から -2500 の間で調節して横風を発生させることにした。

3.3 模擬フードにおけるトレーサガスとトレーサ粒子の捕集率の関係

図8に同一位置から同時に発生させたトレーサガス及びトレーサ粒子の模擬フードにおける捕集率の関係を示す。微小径の粒子のみが発生するパターンAの場合、フードにおけるトレーサ粒子の捕集率は、トレーサガスの捕集率とほぼ同一であった。この傾向は捕集率が 70% 程度のケースでも変わらなかった。パターンAでは、発生するトレーサ粒子のほとんどが

表 5 横風発生位置によるトレーサガス捕集率の違い

(* : 試料数=2のものについては、各値を示した)

発生位置座標 [mm]			フード下面 風速[m s ⁻¹]	トレーサガス 捕集率[%]	±σ	試料数
x	y	z				
-1500	0	-400	0.3	37.1 *(26.2, 48.0)	-	2
-1750	0	-400	0.3	54.2 *(45.2, 63.2)	-	2
-2000	0	-400	0.3	69.5	6.6	5
-2250	0	-400	0.3	78.6	5.7	5
-2500	0	-400	0.3	92.1	5.1	5

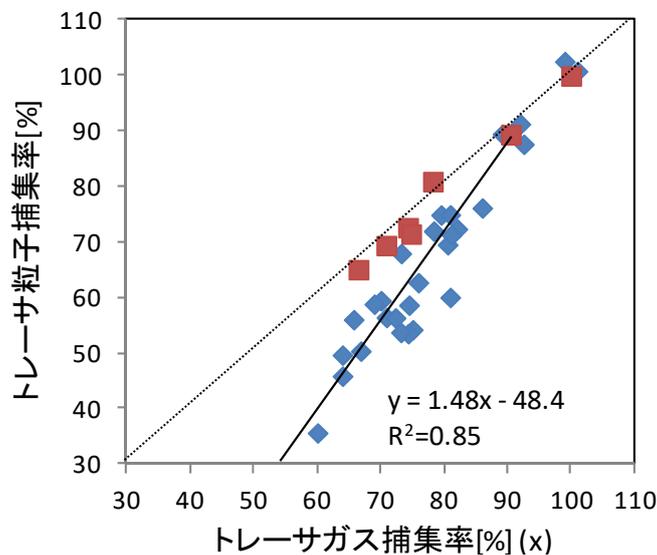


図 8 排気フードにおけるトレーサガス捕集率とトレーサ粒子捕集率の関係

■ : パターン A (n=7)、◆ : パターン B (n=28)

サブミクロン径であり、重力沈降の影響を受けずに気流に同伴されたと考えられる。このためトレーサ粒子の捕集率はトレーサガスの捕集率とほぼ等しくなったものと考えられる。実際、トレーサ粒子発生実験時の発生源近傍、およびフード下面近傍における粒径分布を示した図 9 より、両者の粒径分布にはほとんど差異が認められない。これは、発生したトレーサ粒子が気流とほぼ同じ挙動を示したためと考えられる。以上の結果から、排出される粒子の粒径が微小径であるフライドポテトのような調理の場合には、フードにおけるトレーサガスの捕集率を、

調理由来の粒子状物質の捕集率に近似することが可能であると言える。

一方、微小径のほか粗大径の粒子も発生するパターン B では、トレーサガスのフードにおける捕集率が 90%を上回った場合には、トレーサガスとトレーサ粒子の捕集率はほぼ等しくなった。すなわち、トレーサガスのフードにおける捕集率が高い時には、粗大径が含まれる粒子であっても、重力沈降などの影響を受けずに、ほぼ全量がフードまで到達したものと考えられる。これに対してトレーサガスのフードにおける捕集率が 90%より低い場合には、トレー

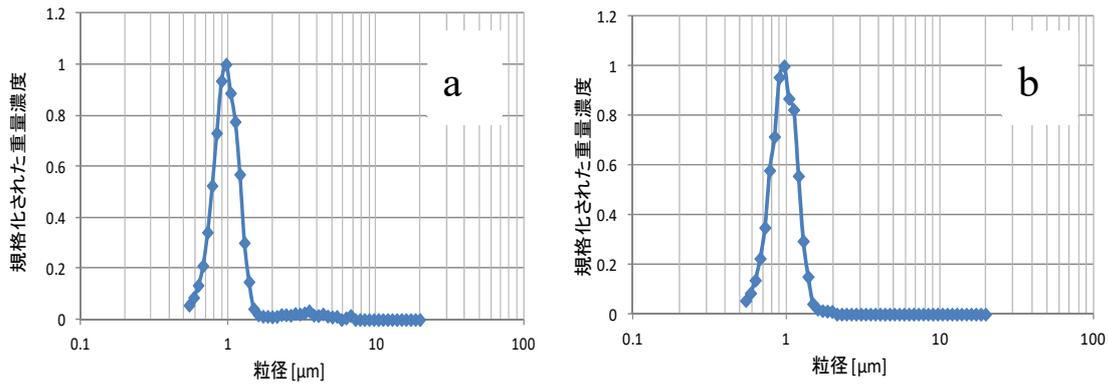


図9 パターンAの発生条件で発生させた粒子の粒径分布

a: 発生口近傍、b: フード下面付近

重量濃度は最大値を1として規格化した。

発生直後、フード入口における捕集位置はそれぞれ

$(x, y, z) = (0, 0, -1000), (0, 0, 0)$ である。

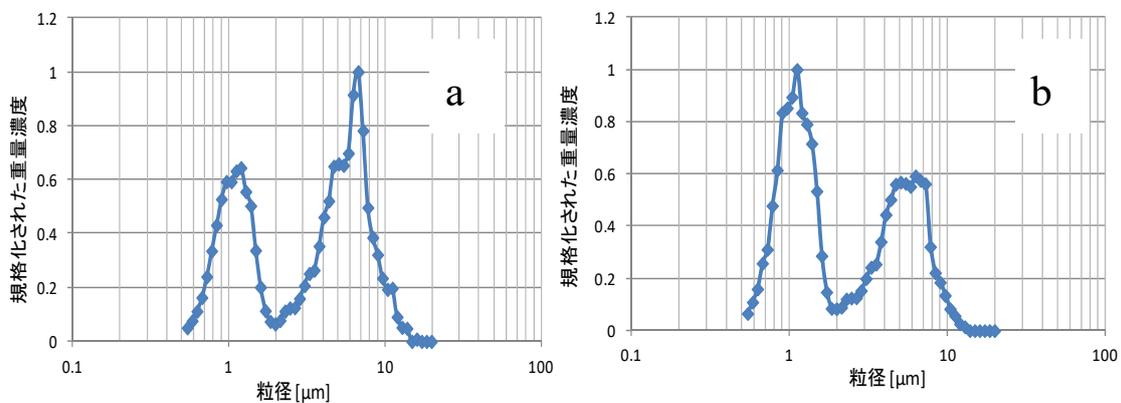


図10 パターンBの発生条件で発生させた粒子の粒径分布

a: 発生口近傍、b: フード下面付近

重量濃度は最大値を1として規格化した。

発生直後、フード入口における捕集位置はそれぞれ

$(x, y, z) = (0, 0, -1000), (0, 0, 0)$ である。

サ粒子のフードにおける捕集率はトレーサガスのそれを下回る傾向を示した (図 8)。とりわけトレーサガスの捕集率が 70%を下回ったケースでは、フードにおけるトレーサ粒子の捕集率はトレーサガスのそれを大幅に下回り、かつばらつきが大きくなった。この結果は、横風を発生させることにより、鉛直方向の気流から外れた気塊が、再び鉛直方向に輸送される際に、粗大径の粒子の一部が遠心力により除外され、フード外に移動したことを示すと考えられる。横風発生位置を $(x, y, z) = (-2000, 0, -400)$ としてトレーサ粒子発生実験を行った時の発生源近傍、

およびフード下面近傍における粒径分布を図 10 に示す。同図より、トレーサ粒子発生源近傍では粗大径の粒子が多く存在する一方、フード下面では粗大径の粒子の割合が相対的に減少していることがわかる。この結果は、粗大径のトレーサ粒子が微小径のそれと同一の行動を取らずにフード外に除去されたことを示している。

ここでパターンBについて、トレーサガスの捕集率が約 100%であるデータ (2 点) を除いた場合のトレーサガスおよびトレーサ粒子のフードにおける捕集率をそれぞれ x, y として、両者の間に線形の関係が成立すると仮定した場

合、以下の式により近似される。

$$y = 1.48x - 48.4 \quad (\text{式 1})$$
$$(60 \leq x < 90)$$

このときの相関係数 r の 2 乗 (r^2) は 0.85 である。一方、 x, y の関係が多項式により近似できるとした場合には、次数 2 の時に、以下の関係が成り立つ。

$$y = 0.0172x^2 + 1.2033x - 55.269 \quad (\text{式 2})$$
$$(60 \leq x < 90)$$

この時の r^2 は 0.85 であった。なお線形と多項式以外の近似では r^2 は 0.8 を下回った。このことから、パターン B のように粗大径を多く発生させる調理の場合、粒子のフードにおける捕集率は、トレーサガスの捕集率から推計できると考えられる。一方で、図 8 に示した通り、粒径 1 μm 程度を下回る微小径のみが発生する調理の場合には、トレーサガスの捕集率がトレーサ粒子の捕集率とほぼ等しいものと考えられた。

なお、式 1 及び式 2 は、あくまでも取得したデータの範囲内（フードにおけるトレーサガスの捕集率 x : およそ 60~90%）で成立する関係であり、取得したデータの範囲外に外挿することが可能か否かは確認していない。

3.4 トレーサガス法に基づく粒子のフードにおける捕集率補正法の提案

以上の結果から、トレーサガス法に基づく粒子のフードにおける捕集率の補正方法を提案する。前節にて明らかにした通り、微小径のみが発生するパターン A（図 5a）では、トレーサガスのフードにおける捕集率が 60% を上回る場合に、粒子の捕集率はトレーサガスの捕集率で

近似できる。一方で、微小径だけでなく粗大径も発生するパターン B（図 5b）においては、トレーサガスのフードにおける捕集率が 90% を下回ると、粒子の捕集率 (y) はトレーサガスの捕集率 (x) よりも低くなり、その関係は式 1 あるいは式 2 のように表される。したがって理論的には、発生する粒子のほとんどを微小径が占めるポテトフライのような調理の場合には、トレーサガスの捕集率を粒子の捕集率と同値とみなす一方、微小径のほか粗大径の粒子も発生するハンバーグのような調理の場合には、粒子の捕集率を式 1 ないし式 2 を用いてトレーサガスの捕集率から推計することが可能である。

しかし、加熱調理により発生する粒子の粒径分布は、同一調理であったとしても変動する可能性は否定できない。また、全ての調理について発生する粒子の粒径分布を明らかにすることは現実的ではない。したがって、種々の調理により発生する粒子のフードにおける捕集率を確実に評価するには、フードにおける捕集率がより低い粗大径の粒子が発生したとして、その捕集率を推計することが、安全性の観点からも望ましい。ハンバーグ調理は他の調理と比較して、粗大径の粒子が多く発生する（例えば：近藤ら、2011）ことから、ハンバーグ調理の模擬したパターン B における粒子とガスの捕集率の関係から、他の調理における粒子の捕集率を推計することで、より安全側に評価することが可能となる。前節で明らかにした通り、粗大径を含む粒子のフードにおける捕集率は式 1 ないし式 2 により推計可能である。よって、本研究では、より推計の容易な式 1 を用いて、トレーサガスのフードにおける捕集率 (x) から粒子の捕集率 (y) を推計する方法を提案する。

フードにおけるトレーサ粒子の捕集率を評価する試験は、トレーサガスの捕集率評価試験と比較して試料の前処理や分析に長時間を要する上、前処理操作や分析装置に起因する誤差を生

じやすい。したがって、本研究で示したような、トレーサガスの捕集率からトレーサ粒子の捕集率を推計することは、時間やコストの観点からメリットが大きいものと考えられる。

4. 結語

本研究では、排気フードにおけるガス状成分の捕集率から粒子状成分の捕集率を推計する手法を開発することを目的とした。まず、新たに開発したトレーサ粒子発生システムによる粒子発生条件の検討を行った。その結果、コロックの揚げ調理などのように微小径が卓越した粒径分布、及びハンバーグの焼き調理やイカリングの揚げ調理などのように粗大径が卓越した粒径分布、の2つを模擬するパラメータを見出すことができた。次に、適切な実験条件を見出すため、トレーサガスおよびトレーサ粒子の発生位置と、捕集率を低減させる方法について検討した。による捕集率の違いをトレーサガスを用いて評価した。その結果、トレーサガス・粒子の発生位置としては $(x, y, z) = (0, 0, -1030)$ が適当であることを見出した。またトレーサガス・粒子の捕集率を低減させる手段として横風を与える方法を検討し、 z を-2000 から-2500 の間で調整することで、トレーサガスの捕集率をおよそ 70%から 90%とできることが明らかになった。以上の検討結果を踏まえて、微小径の粒子のみが発生するパターンA、微小径に加えて粗大径の粒子も発生するパターンBについて、フードにおける捕集率を評価した。その結果、パターンAでは、フードにおけるトレーサ粒子の捕集率は、トレーサガスの捕集率とほぼ同一であった。一方、パターンBでは、トレーサガスのフードにおける捕集率が 90%より低い場合には、トレーサ粒子のフードにおける捕集率はトレーサガスのそれを下回る傾向を示した。このとき、トレーサ粒子のフードにおける捕集

率は、同時に発生させたトレーサガスの捕集率と高い相関を示すことが明らかになった。以上の結果に基づき、本研究では、種々の調理により発生する粒子のフードにおける捕集率 (y) を、トレーサガスの捕集率 (x) を用いて推計することを提案した。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、試料採取、前処理、分析、データ整理作業の一部を(株)電力テクノシステムズの福森進矢・高度技師に分担いただいたことをここに記し、深く感謝申し上げます。

参考文献

- Abdullahi Karimatu L., Juana Maria Delgado-Saborit, Roy M. Harrison (2013) Emissions and indoor concentrations of particulate matter and its specific chemical components from cooking: A review. *Atmospheric Environment*, **71**, 260-294.
- 伊藤一哉, 小峯裕己 (2016) 電化厨房におけるレンジフードの調理生成物に対する捕集率測定方法の提案 二相水分法の開発とトレーサガス法に基づく捕集率との比較, 日本建築学会学術論文集, **81**, 721, 273-281.
- 岩松俊哉, 占部亘 (2014) 業務用電化厨房の排気フード捕集性能に及ぼす調理者擾乱の影響に関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集, **204**, 1-14.
- 岩松俊哉・占部 亘 (2016) 業務用電化厨房の排気フード捕集性能に及ぼす排気フードの張り出し長さの影響に関する実験研究, 空気調和・衛生工学会論文集, **232**, 国土交通省大臣官房官庁営繕部設備・環境課監

- 修 (2015). 建築設備設計基準 平成 27 年版. 近藤靖史, 川口明伸, 吉野一, 萩田俊輔 (2011) 業務用厨房内で発生する油煙の粒度分布とエアロゾルとしての特性. 日本建築学会環境系論文集, **76**, 664, 547-554.
- 近藤靖史, 岩崎裕仁, 吉野一 (2014) 業務用厨房のフード捕集率測定における調理行為に伴う擾乱を模擬したパネル移動速度と移動頻度に関する検討, 空気調和・衛生工学会論文集 (204), 77-83.
- Lewtas, Joellen (2007) Air pollution combustion emissions: Characterization of causative agents and mechanisms associated with cancer, reproductive, and cardiovascular effects. *Mutation Research*. **636**, 95-133.
- 百瀬敏成, 佐藤隆二, 山中俊夫, 甲谷寿史 (2002) 業務用厨房における外乱気流がフードの捕集性能に及ぼす影響, 日本建築学会計画系論文集, **560**, 15-22.
- Rogge Wolfgang F., Lyn M. Hildemann, Monica A. Mazurek, Glen R. Cass (1991) Sources of fine organic aerosol. 1. Charbroilers and meat cooking, *Environmental Science and Technology*, **25**. 1112-1125.
- 田中伸幸, 津崎昌東 (2010) 調理排気に含まれるオイルミスト中化学成分の測定手法の開発, 電力中央研究所研究報告, **V09019**.
- 田中伸幸, 津崎昌東 (2011) 業務用厨房の排気フードにおけるオイルミスト捕集効率評価方法の開発, 電力中央研究所研究報告, **V10015**.
- 田中伸幸, 大竹加耶子, 津崎昌東, 宮崎あかね (2012a) 食品の加熱調理により排出されるオイルミスト中の多環芳香族炭化水素の分析 分析化学, **61**, 11, 77-86.
- 田中伸幸, 赤井依美, 津崎昌東, 宮崎あかね (2012b) 魚の焼き調理により排出されるオイルミストの粒径と多環芳香族炭化水素の分布. 分析化学, **61**, 11, 901-909.
- 田中伸幸, 津崎昌東 (2015) 業務用厨房の排気フードにおけるオイルミスト捕集率の評価方法の開発と適用, 電力中央研究所研究報告, **V14014**.
- 津崎昌東, 田中伸幸 (2010) 業務用厨房における調理排気中化学成分の計測(1)ーガス厨房における計測ー, 電力中央研究所研究報告, **V09012**.

IR

CRIEPI

Central Research Institute of
Electric Power Industry

電力中央研究所報告

〔不許複製〕

編集・発行人 一般財団法人 電力中央研究所
環境科学研究所長
千葉県我孫子市我孫子1646
電話 04 (7182) 1181 (代)
e-mail esrl-rr-ml@criepi.denken.or.jp

発行・著作・公開 一般財団法人 電力中央研究所
東京都千代田区大手町1-6-1
電話 03 (3201) 6601 (代)

ISBN978-4-7983-1571-3

