

6 中長期的な課題に関する調査研究

本検討会では、PM_{2.5}及び光化学オキシダントの低減に向けた基本的な対策の方向性で示した対策の推進に加え、対策を検討する上で、生成メカニズム等の現象解明に向けた大気環境の継続的な実態把握、気候変動対策とのコベネフィットアプローチの推進、対策効果の定量的評価及び予測を可能とするインベントリやシミュレーションモデルの精緻化等、中長期的課題について取り上げた。

ここでは、これまでの各資料編で示した調査のほか、中長期的な課題に関する本検討会での調査や東京都及び公益財団法人東京都環境公社東京都環境科学研究所（以下「東京都環境科学研究所」という。）での調査研究について取りまとめた。

1 大規模固定煙源調査

はじめに

本検討会では、PM_{2.5}及び光化学オキシダントの発生源寄与割合や将来濃度の推計に当たり、現時点で利用可能な排出インベントリやシミュレーションモデルを用いた解析を実施した。今後も、PM_{2.5}及び光化学オキシダントの低減に係る対策について、定量的な効果検証や将来予測を実施するためには、排出インベントリの整備・更新を通じて発生源からの排出状況を把握するとともに、シミュレーションモデルの精度向上を図り、対策を評価していくことが中長期的課題として示された。PM_{2.5}排出インベントリについて、凝縮性粒子は煙源からの排出量が多いとされているが、排出インベントリには組み込まれていない。

本検討会では、大規模固定煙源調査を実施し、既存の調査結果と共に取りまとめを行った。本章では、固定発生源のばいじん、PM_{2.5}及び凝縮性粒子に係る大規模固定煙源調査について取りまとめた。

1.1 背景と本調査の目的

大規模固定煙源からのPM_{2.5}等の排出実態を把握するためには、煙源ごとの排出ガス中の粒子状物質の発生源情報が必要となる。現状の大規模固定煙源に係る排出インベントリでは、「大気汚染物質排出量総合調査（環境省）」のばいじん濃度にPM_{2.5}/TSP比を乗じて業種・燃原料別にPM_{2.5}排出量を算出しているものが多い。しかし、算出に用いるPM_{2.5}/TSP比は、1985年の文献値から求めており、必ずしも現状を反映しきれていない可能性がある。

また、凝縮性粒子（燃焼直後は高温のため気体であるが、放出された大気中で冷却され粒子となる物質）については、煙源からの排出量が多いとされているが、排出インベントリには組み込まれていない。

これまでも一部の自治体や研究所等の関係機関で煙源調査は実施されているが、調査結果を取りまとめた事例は少ない。発生源調査により煙源の実態を把握するためには、測定調査を実施するとともに、既存の調査結果を組み合わせる解析を行うことが望ましい。

そこで本調査では、大規模固定煙源の排出ガス中のばいじん、PM_{2.5}及び凝縮性粒子の濃度を測定し、既存の調査結果と共に結果を整理することで、固定発生源のPM_{2.5}等の排出実態を把握し、PM_{2.5}対策を検討するための基礎資料とすることを目的とした。

1.2 調査方法

1.2.1 発生源調査

(1) 調査期間

2018年1月から3月

(2) 調査対象

都内における大気汚染防止法に定めるばい煙発生施設（廃棄物焼却炉）2施設

(3) 調査項目

煙道内の $PM_{2.5}$ 、 $PM_{2.5-10}$ 及び PM_{10} 以上の一次粒子と、煙突から排出された後に粒子化する凝縮性粒子を採取した。分析項目により使用するフィルタが異なるため、四フッ化エチレン樹脂（以下「PTFE」という。）フィルタと石英繊維フィルタを用いて採取を行った。PTFEフィルタは、質量濃度の測定を行うため前秤量を行った。石英繊維フィルタは、炭素成分のブランクを低減するため、 $350^{\circ}C$ で1時間の焼き出しの前処理を行った。採取後のフィルタは、秤量または分析に供するまで冷凍庫（約 $-30^{\circ}C$ ）に保管した。

煙道内の $PM_{2.5}$ 一次粒子の測定は、日本工業規格 JIS Z 7152「バーチャルインパクトによる排ガス中の $PM_{10}/PM_{2.5}$ 質量濃度測定方法」に準拠し、バーチャルインパクト（以下「VI」という。）を用いて、粒子を $10\ \mu m$ 以上、 $10\sim 2.5\ \mu m$ 、 $2.5\ \mu m$ 以下の3つの粒径に分けてフィルタに採取した。ポンプ及び湿式ガスメータを3セット使用し、粒径別の採取ラインとした。ガスの流速、成分組成等の条件から吸引速度を決定し、また等速吸引となるようにノズル径を決定して測定を行った。

ばいじんは日本工業規格 JIS Z 8808「排ガス中のダスト濃度の測定方法」に準拠し、1形採取装置にて円形フィルタに採取した。

凝縮性粒子の測定は、希釈装置（Dekati社製、FPS-4000）を使用し、 $PM_{2.5}$ サイクロンを装着したプローブを用いた。サイクロンの設計流量は約 $6\ L/min$ であり、 $2.5\ \mu m$ 以上の粗大粒子をカットして捕集する構造になっている。サイクロン先端のノズルは等速吸引となるようにノズル径を決定した。希釈空気はコンプレッサの圧縮空気を用い、除じん・除湿したものを導入した。希釈条件は20倍程度に設定して行った。希釈された排ガスをポンプにより $20\ L/min$ で吸引し、ガラス製チャンバ（ $6.7\ L$ ）に通過させて滞留時間（20秒）をとり、凝縮性粒子を生成させた。そして、チャンバ出口に接続したフィルタに粒子状物質を採取した。なお、測定中はチャンバ表面温度が $30^{\circ}C$ 以下であること、チャンバ内に結露がないことを確認した。希釈空気の確認として、 $PM_{2.5}$ サイクロンの先端にHEPAカートリッジ（粒径 $0.03\ \mu m$ の粒子を99.97%除去）を取付け、希釈空気の採取を行った。

各試料採取と同時に、窒素酸化物及び酸素濃度の測定を行った。

調査項目と測定方法の概要を表 1-1 に、採取イメージを図 1-1 に示す。

表 1-1 調査項目と測定方法

項目	測定方法
ばいじん	JIS Z 8808 フィルタ捕集－重量法
PM _{2.5}	JIS Z 7152 VI 採取：フィルタ捕集－重量法
PM _{2.5-10}	
PM ₁₀ 以上	
凝縮性粒子	空気希釈法 ¹ Dekai 社製 FPS-4000 採取：フィルタ捕集－重量法
窒素酸化物濃度 (連続)	JIS B 7982 減圧式化学発光法 連続測定
酸素濃度 (連続)	JIS B 7983 磁気力式 連続測定
使用フィルタ	石英繊維フィルタ：Pallflex 社製, 2500QAT-UP 37 mm φ (Lot.19961)、47 mm φ (Lot.19981) PTFE フィルタ：住友電工製, WP-500-50 37 mm φ (Lot.143840-01)、47 mm φ (Lot.161390-01)

(4) 分析方法

原則として、「大気中微小粒子状物質 (PM_{2.5}) 成分測定マニュアル (環境省)」に準拠して分析を実施した (表 1-2 のとおり)。

質量濃度の測定について、採取後の凝縮性ダスト測定用の PTFE フィルタは、温度 21.5°C ±1.5°C、相対湿度 35% ±5% で 24 時間以上のコンディショニングを行い、ザルトリウス株式会社製の M5P-F にて秤量した。

採取後の VI 測定用の PTFE フィルタは、日本工業規格 JIS Z 7152 「バーチャルインパクトによる排ガス中の PM10/PM2.5 質量濃度測定方法」に準じ、105～110°C で 1 時間乾燥させた後、上記の恒量条件でコンディショニングし、秤量した。秤量に際しては帯電による影響について十分に注意した。

イオン成分については、採取した PTFE フィルタを 1/2 の大きさにカットし、エタノール 50 μL、超純水 5 mL を加えて超音波抽出し、孔径 0.45 μm のディスクフィルターでろ過した後、イオンクロマトグラフィー (アニオン：Thermo Fisher Scientific 社製, INTERGRION RFIC、カチオン：Thermo Fisher Scientific 社製, INTERGRION) を用いて分析した。

¹ 清浄な空気で約 20 倍に希釈・冷却し、滞留時間を一定程度とりフィルタに採取する方法。

炭素成分については、Desert Research Institute (DRI) 製の Model 2001 OC/EC カーボンアナライザを用いて分析を行った。分析方法は、サーマルオプティカル・リフレクタンス法で行い、分析条件は IMPROVE プロトコルとした。通常、試料フィルタを 8 mm ポンチで打ち抜き装置に導入するが、PM_{2.5-10} を採取したフィルタは捕集面に同心円状に広がる 6 つのスポット（幾何学模様）がみられるため、フィルタを 1/6 の扇形にカットし、折りたたんで装置へ導入した²。なお、有機物成分が揮発することが懸念されることから、捕集後の石英繊維フィルタは 105～110℃での乾燥処理は行わずに測定を行った。

無機元素成分については、採取した PTFE フィルタを 1/2 の大きさにカットし、圧力容器分解法により酸分解した後、ICP-MS (アジレント・テクノロジー株式会社製, Agilent7500ce) を用いて分析を行った。無機元素の分析のうち、Si については蛍光 X 線法で測定した。分析は、エネルギー分散型蛍光 X 線分析装置 (日立ハイテクサイエンス社製, EA1200VX) を用いて測定した。測定は Rh-W の X 線管球を用い、試料雰囲気真空にして行った。

表 1-2 発生源調査の分析成分と分析方法

成分	分析方法	項目数	分析項目
質量濃度	秤量	1	
イオン成分	イオンクロマトグラフ法	8	NH ₄ ⁺ 、Na ⁺ 、K ⁺ 、Mg ²⁺ 、Ca ²⁺ 、Cl ⁻ 、NO ₃ ⁻ 、SO ₄ ²⁻
金属成分	酸分解/ICP-MS 法	31	Na、Al、K、Ca、Sc、Ti、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、As、Se、Rb、Mo、Cd、Sb、Cs、Ba、La、Ce、Sm、Hf、Ta、W、Pb、Th、Si*
炭素成分	サーマルオプティカル・リフレクタンス法	2	元素状炭素 (EC)、有機炭素 (OC) 及び炭素フラクション

※ Si については、エネルギー分散型蛍光 X 線分析法を用いた。

1.2.2 発生源調査の取りまとめ

1.2.1 の結果と併せて、既存の発生源調査結果を基に、PM_{2.5} の発生源調査結果を業種別、施設別、燃原料別等に整理した。

既存の発生源調査結果の収集に当たっては、国、地方自治体等の関係機関に対し提供を依頼した。ここで整理、集計したデータは各機関の承諾を得たものである。

² 捕集面に幾何学模様がみられるような不均一な試料では、打ち抜く場所によって測定誤差が生じてしまう。また、分析装置内のレーザ光があたる試料フィルタ領域に粒子捕集量の濃淡があるため、均一に捕集された試料を前提とした光学補正を原理的に正しく行うことができない。本調査では、幾何学模様がみられる PM_{2.5-10} を採取したフィルタについて、全炭素濃度の測定誤差を小さくするため、フィルタをポンチで打ち抜く通常の方法ではなく、1/6 の扇形にカットして分析することとした。カットしたフィルタは分析装置の構造上そのままでは分析装置に入らないため、折りたたんで装置へ導入した。

このため、PM_{2.5-10} では、光学補正により算出される有機炭素の炭化補正量を参考値としており、他の粒径と分析方法が異なるため、同様に扱えないことに留意する必要がある。

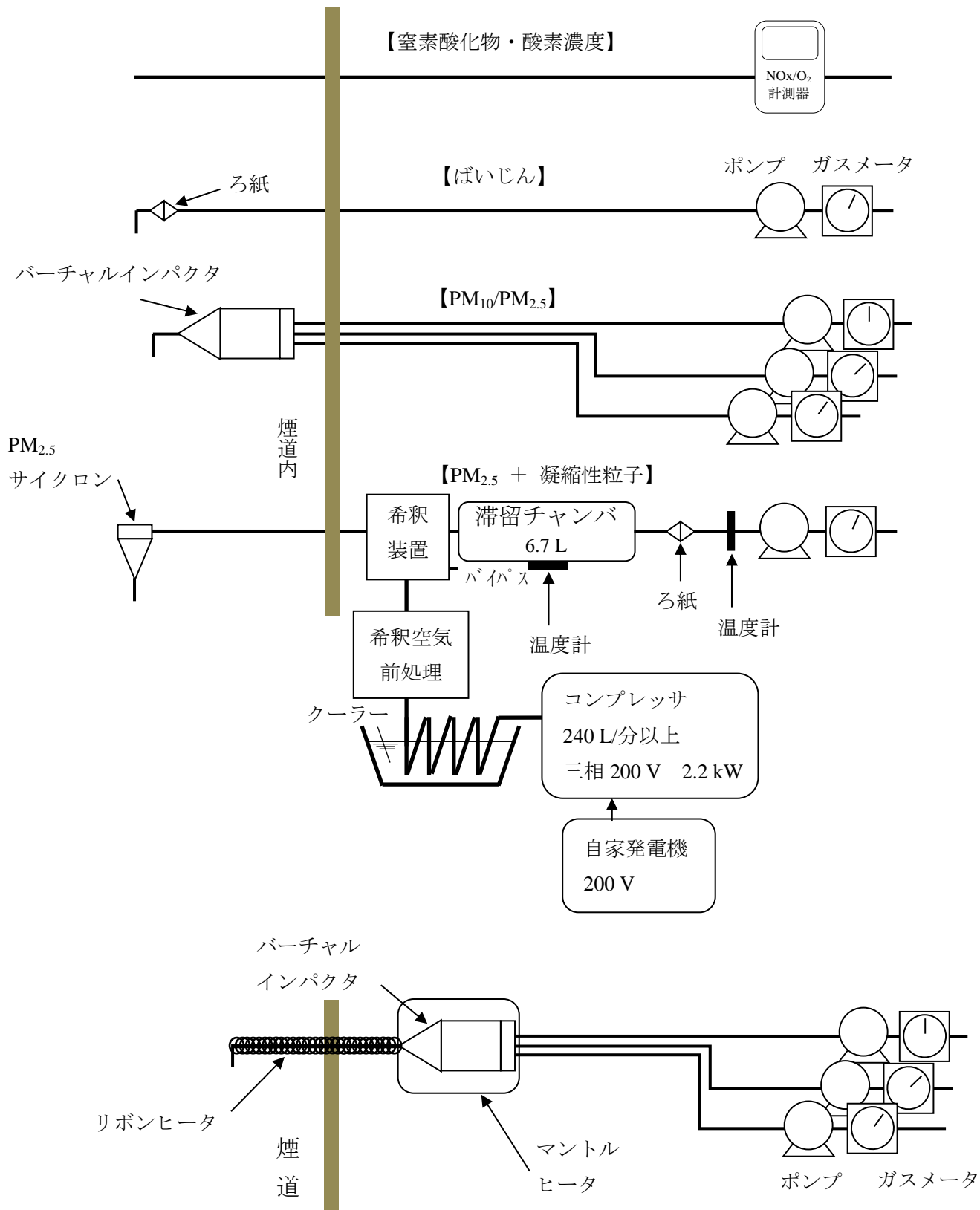


図 1-1 発生源調査 採取方法イメージ

※ 上図：1形、下図：2形（高温の場合）

1.3 結果及び考察

調査方法で示した測定結果と既存の発生源調査結果を合わせて集計した結果を示す。

1.3.1 発生源調査結果取りまとめ状況

本調査で収集した調査結果を分類するに当たり、環境省の「大気汚染物質排出量総合調査」(以下「MAP 調査」という。)の割り当てを参考に業種、施設及び燃原料別に整理した。整理した結果を表 1-3 に示す。なお、ディーゼル機関では発電機と船舶が混在するが、排出ガス濃度のレベルが異なると想定されたため、ここでは分けて集計を行った。

表 1-3 MAP 調査による業種、施設、燃原料の分類と本調査による整理結果

業種	施設	燃原料
飲食店、宿泊業、医療業、教育学術研究機関、浴場業、洗濯業、廃棄物処理業、農業、林業、漁業、鉱業、建設業、電気業、ガス業、熱供給業、ビル暖房、その他事業場、食料品製造業、繊維工業、木材・木製品製造業、パルプ・紙・紙加工品製造業、化学工業、石油製品・石炭製品製造業、ゴム製品・皮製品製造業、窯業・土石製品製造業、鉄鋼業、非鉄金属製造業、金属製品製造業、機械器具等製造業、その他の製造業、運輸・通信業、不明	ボイラ、ガス発生炉、ガス加熱炉、金属精錬、無機化学工業品製造用焙焼炉等、金属精錬用溶鉱炉・転炉・平炉、金属精錬・铸造用溶解、金属加熱炉、石油加熱炉、触媒再生塔、燃烧炉、窯業製品製造用焼成炉等、反応炉直火炉、乾燥炉、電気炉、廃棄物焼却炉、銅・鉛・亜鉛精錬用焙焼炉等、乾燥施設、塩素急速冷却施設、溶解槽、活性炭製造用反応炉、塩素反応施設等、アルミ精錬用電解炉、複合肥料等製造用反応施設等、弗酸製造用凝縮・吸収・蒸留施設、トリポリリン酸ナトリウム製造用施設等、鉛精錬用溶解炉、鉛蓄電池製造用溶解炉、鉛系顔料製造用溶解、硝酸製造用吸収・漂白・濃縮施設、コークス炉、ガスタービン、ディーゼル機関、ガス機関、ガソリン機関、不明	A 重油、B 重油、C 重油、軽油、灯油、原油、ナフサ、その他の液体燃料、一般炭、コークス、木材、木炭、その他の個体燃料、都市ガス、コークス炉ガス、高炉ガス、LNG、LPG、転炉ガス、オフガス、その他の気体燃料、鉄・鉄鉱石、硫化鉄、非鉄金属鉱石、原料炭、原料コークス、その他の原料、パルプ廃液、一般廃棄物、産業廃棄物、その他の廃棄物、電気

※ ゴシック体は収集した調査結果に該当する項目。

※ 収集に当たっては、関係機関から提供可能なデータについてご提供いただいた。また、環境省研究総合推進費「5-1506」「燃烧発生源における希釈法による凝縮性一次粒子揮発性特性の評価法の確立(平成 27 年度から平成 29 年度)研究代表者：藤谷雄二(国立環境研究所)」の研究成果についても活用している。

1.3.2 集計結果

発生源調査におけるばいじん、PM_{2.5}及び凝縮性粒子の集計結果を図 1-2 から図 1-4 に示す。なお、この集計結果については、以下の事項に留意する必要がある。

- ・ ばいじんについては、調査事例が比較的多く確認されたが、過去の調査結果も集計対象に加えたため、比較的古い結果も多く含まれる。
- ・ PM_{2.5}については、カスケードインパクト（以下「CI」という。）及びバーチャルインパクト（以下「VI」という。）による異なる測定方法があるが、発生源情報が少ないことから、ここでは両結果を合わせて集計を実施しており、必ずしも同じ手法によるPM_{2.5}濃度ではない³。
- ・ 凝縮性粒子については、過去に多く実施されている空気希釈法による測定結果を主に集計している。

集計の結果、ばいじんは、業種別では廃棄物処理業、施設別ではボイラ及び廃棄物焼却炉、燃原料別ではA重油、一般廃棄物及び産業廃棄物のデータが多い結果となった。業種別による廃棄物処理業の分類だけではばらつきが大きく、燃原料である一般廃棄物と産業廃棄物による濃度差が確認された。調査事例は比較的多く確認されるが、過去の古い結果も含まれており、ばらつきも多く確認された。

PM_{2.5}及び凝縮性粒子でも、ばいじんと同様の傾向が確認され、各業種や施設を比較的網羅しているが、調査事例が数事例であったり、業種、施設、燃原料によって調査未実施の事例も多く確認された。

³ PM_{2.5}濃度では、CIの測定機器内の捕集板で捕集した粒子が反発や再飛散等の影響を受けることで、VIよりも排出ガス濃度が高い値を示すことがある。

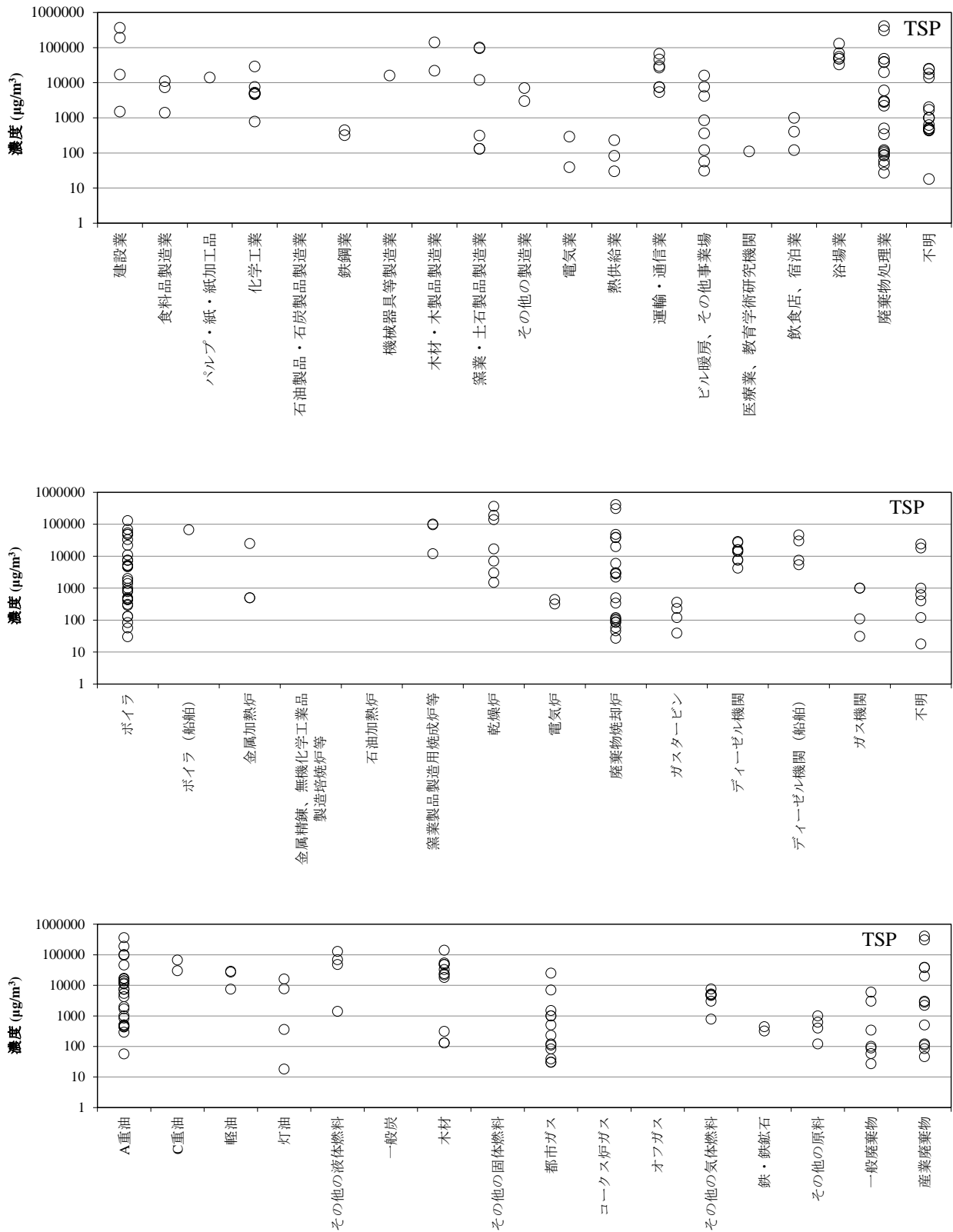


図 1-2 既存調査を含めた発生源調査結果によるばいじんの集計結果

上図：業種別、中図：施設別、下図：燃原料別

※ 濃度は対数目盛で示した。

※ ばいじんは、TSP (Total Suspended Particles) と示した。

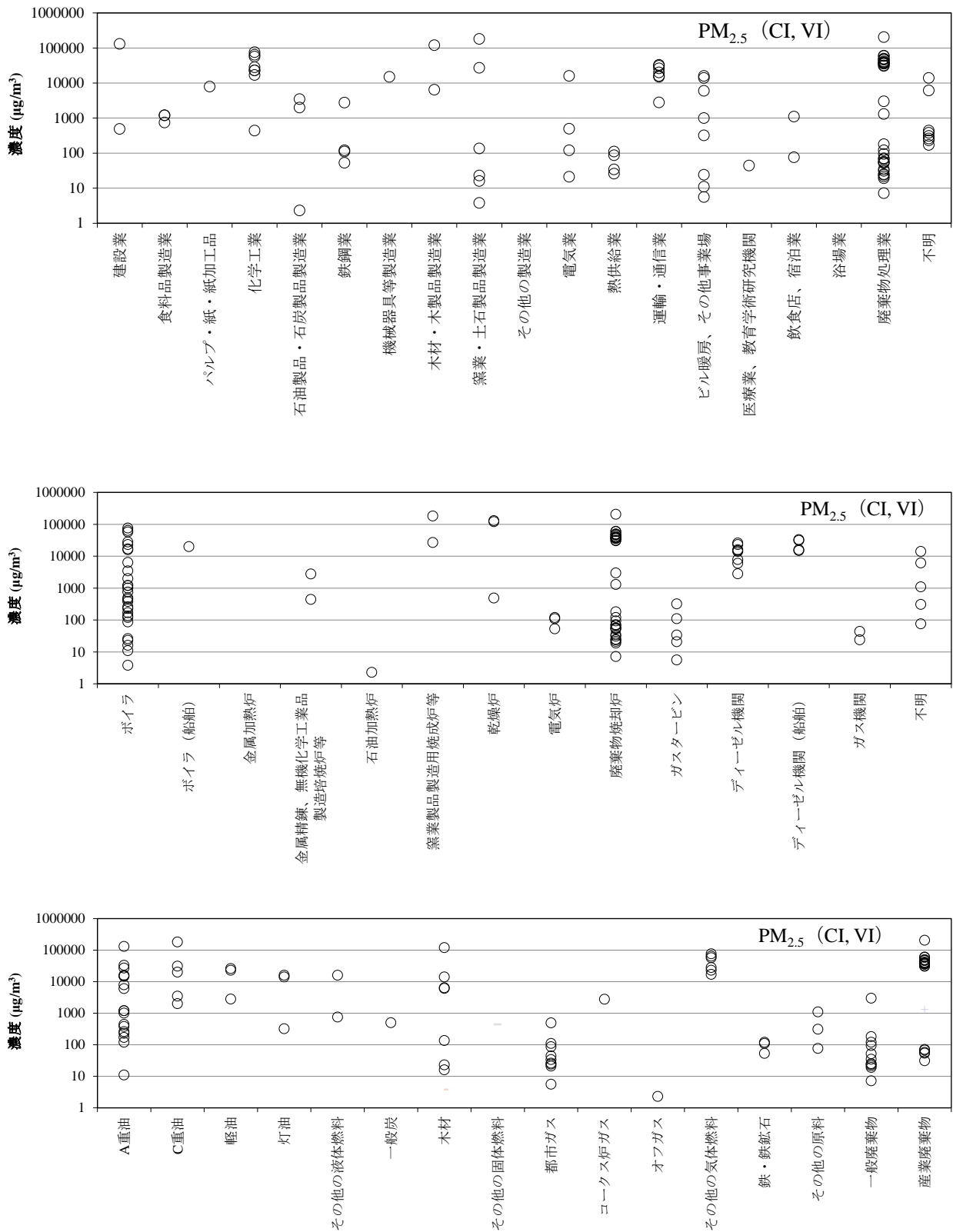


図 1-3 既存調査を含めた発生源調査結果による PM_{2.5} の集計結果

上図：業種別、中図：施設別、下図：燃原料別

※ 濃度は対数目盛で示した。

※ 発生源情報が少ないことからCI及びVIの異なる測定方法の両結果を合わせて集計を実施しており、必ずしも同手法による PM_{2.5} 濃度ではないことに注意が必要である。

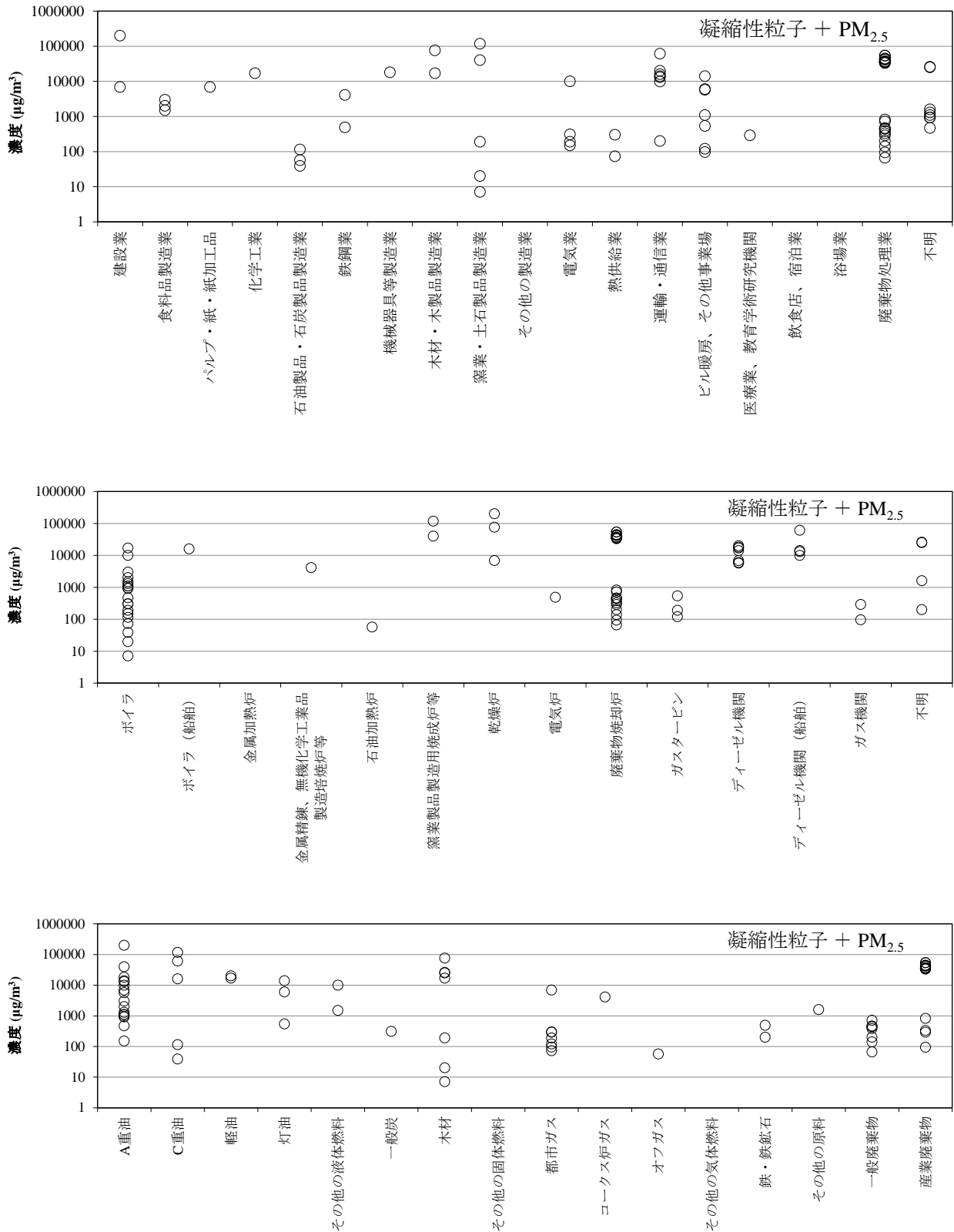


図 1-4 既存調査を含めた発生源調査結果による凝縮性粒子の集計結果

上図：業種別、中図：施設別、下図：燃原料別

※ 濃度は対数目盛で示した。

1.3.3 既存のプロファイルとの比較 (PM_{2.5}/TSP 比)

(1) 業種・燃原料別

シミュレーション解析調査でも用いられている環境省インベントリでは、MAP 調査によるばいじん濃度（以下「TSP」という⁴。）から PM_{2.5} 排出量を算出する際、排出係数である業種・燃原料別の PM_{2.5}/TSP 比は文献値により設定している。しかし、前述のとおり算出に用いる文献値は 1985 年の報告書⁵を用いたものが多く、必ずしも現状の実態を反映しきれていない可能性がある。そこで、本調査結果を基に PM_{2.5}/TSP 比を算出し、現行のインベントリで用いられている PM_{2.5}/TSP 比の値との比較を行った。

算出に当たっては、現行のインベントリで用いられている業種・燃原料別に結果を分類した。1.3.2 と同様に PM_{2.5} については、CI と VI の結果を同じ PM_{2.5} として統合し、同一施設において両測定方法が確認される場合には、VI の結果を用いた。また、TSP の結果がない施設については、VI で捕集された総粉じん量を TSP と仮定し、同一施設において両測定方法が確認された場合は、TSP の結果を優先した。本来、PM_{2.5} よりも TSP の方が濃度が高いはずであることから、算出した値において、PM_{2.5} 濃度が TSP 濃度を大きく上回った結果については本算出からは除外した（ここでは、PM_{2.5}/TSP が 2 以上とした）。

上記を踏まえて算出した本調査結果による PM_{2.5}/TSP 比と現行の PM_{2.5}/TSP 比の結果を図 1-5 に示す。本調査集計値の平均と現行値は、一部乖離している業種もあるものの、おおむね一致している傾向が確認された。ただし、1 事例の業種も多く、また事例が多い業種では、平均値は現行値に近いものの、最大最小幅は大きい結果となった。

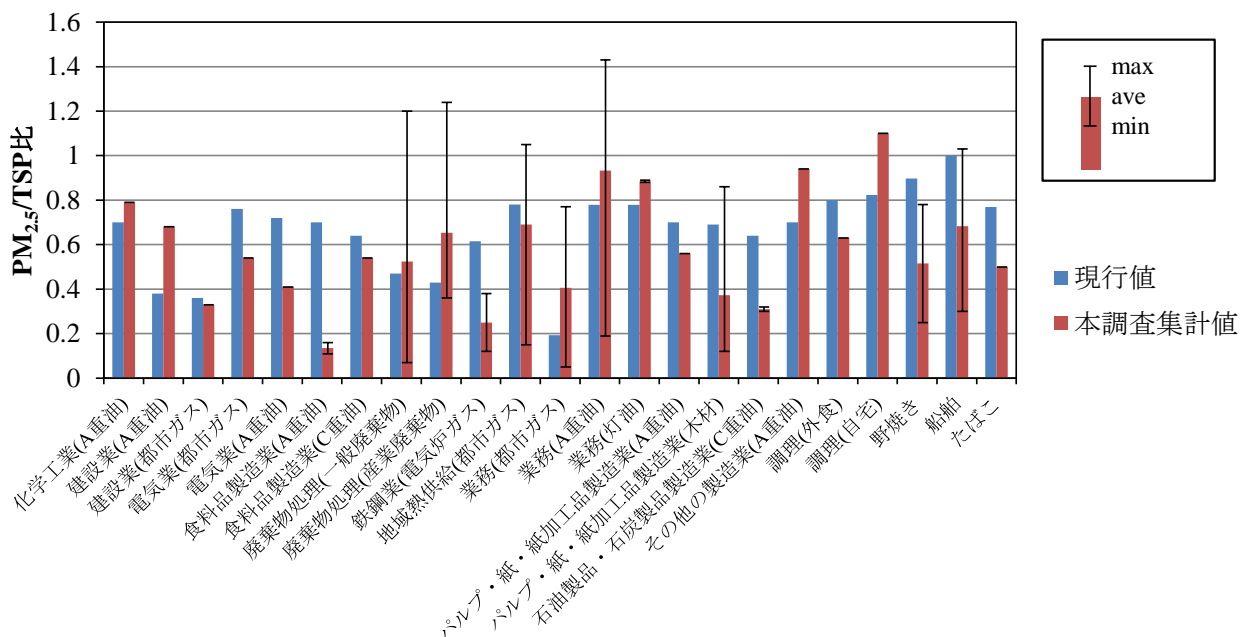


図 1-5 本調査結果から集計した PM_{2.5}/TSP 比と現行のインベントリで用いる PM_{2.5}/TSP 比

- ※ 本調査集計値のエラーバーは最大値と最小値を示す。
- ※ 同一施設について TSP、PM_{2.5}(CI)、PM_{2.5}(VI)、総粉じん(VI)がある場合には、優先順位を付けて集計した (PM_{2.5}(VI)/TSP > PM_{2.5}(VI)/TOTAL > PM_{2.5}(CI)/TSP)。TOTAL は VI で捕集された総粉じん量を示す。

⁴ TSP : Total Suspended Particles

⁵ 産業公害防止協会: 粒子状物質の挙動に関する調査研究 拡散シミュレーション (昭和 60 年 3 月), (1985)

(2) 施設・燃原料別

環境省インベントリで用いられている PM_{2.5}/TSP 比に係る文献値は、施設・燃原料別にロジン・ラムラー分布により粒径割合を整理している。そこで、本調査結果で整理した PM_{2.5}/TSP 比について、施設別燃原料別に整理し、文献値との比較を行った。

PM_{2.5}/TSP 比の算出に当たっては、1.3.3 (1) で示した方法と同様の手法を用いた。本調査結果から集計した施設別・燃原料別の PM_{2.5}/TSP 比を図 1-6 に示す。

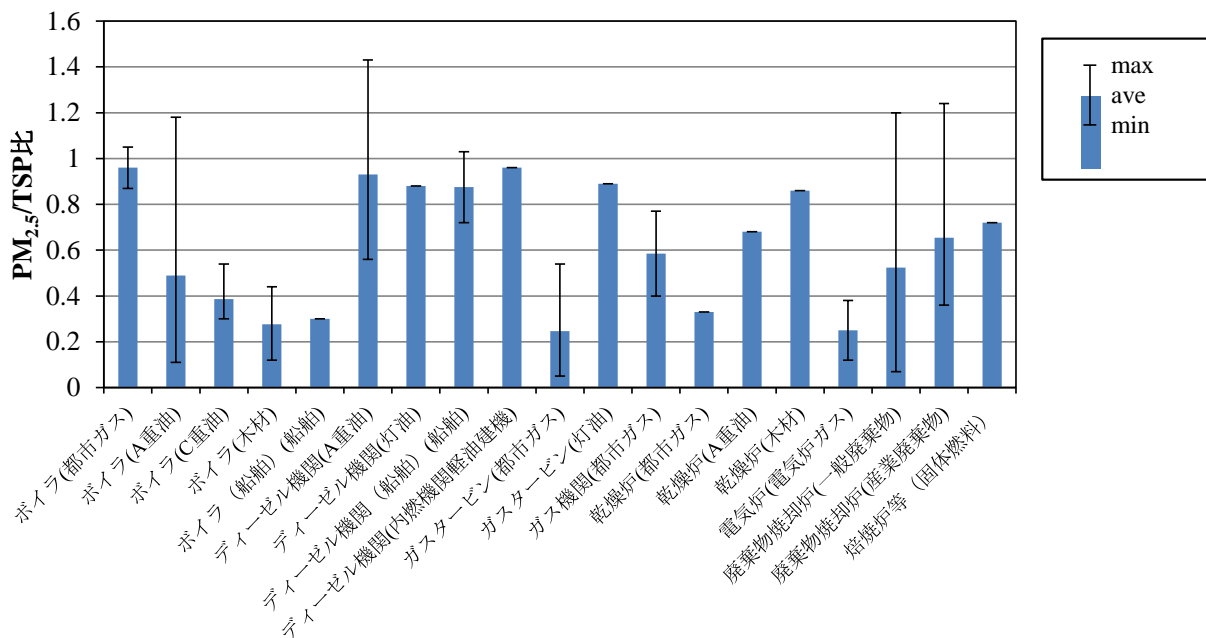


図 1-6 本調査結果から集計した集計した PM_{2.5}/TSP 比

※ 本調査集計値のエラーバーは最大値と最小値を示す。

※ 同一施設について TSP、PM_{2.5}(CI)、PM_{2.5}(VI)、総粉じん(VI)がある場合には、優先順位を付けて集計した (PM_{2.5}(VI)/TSP > PM_{2.5}(VI)/TOTAL > PM_{2.5}(CI)/TSP)。TOTAL は VI で捕集された総粉じん量を示す。

文献値では、その当時収集された発生源調査結果について、施設、集塵装置の有無、必要に応じて燃原料ごとにロジン・ラムラー分布を作成し、粒径分布を求めている。文献の分布指数、粒度特性係数を基に、ダストの粒径分布を表すロジン・ラムラー分布について、次式から 2.5 μm 以下の粒子割合を算出することで文献値の PM_{2.5}/TSP 比を求めた。

$$R = 100 \times \exp(-\beta dp^n)$$

dp : 粒子径、 β : 粒度特性係数、 n : 分布指数

本調査結果による施設・燃原料別の $PM_{2.5}/TSP$ 比と文献値により求めた $PM_{2.5}/TSP$ 比の比較を行った（図 1-7）。業種別・燃原料別の比較結果と同様に、一部乖離している施設もあるものの、おおむね一致している傾向が確認された。ただし、事例の少ない施設も多く、事例が多い施設では、平均値は文献値に比較的近いものの、最大最小幅は大きい結果となった。

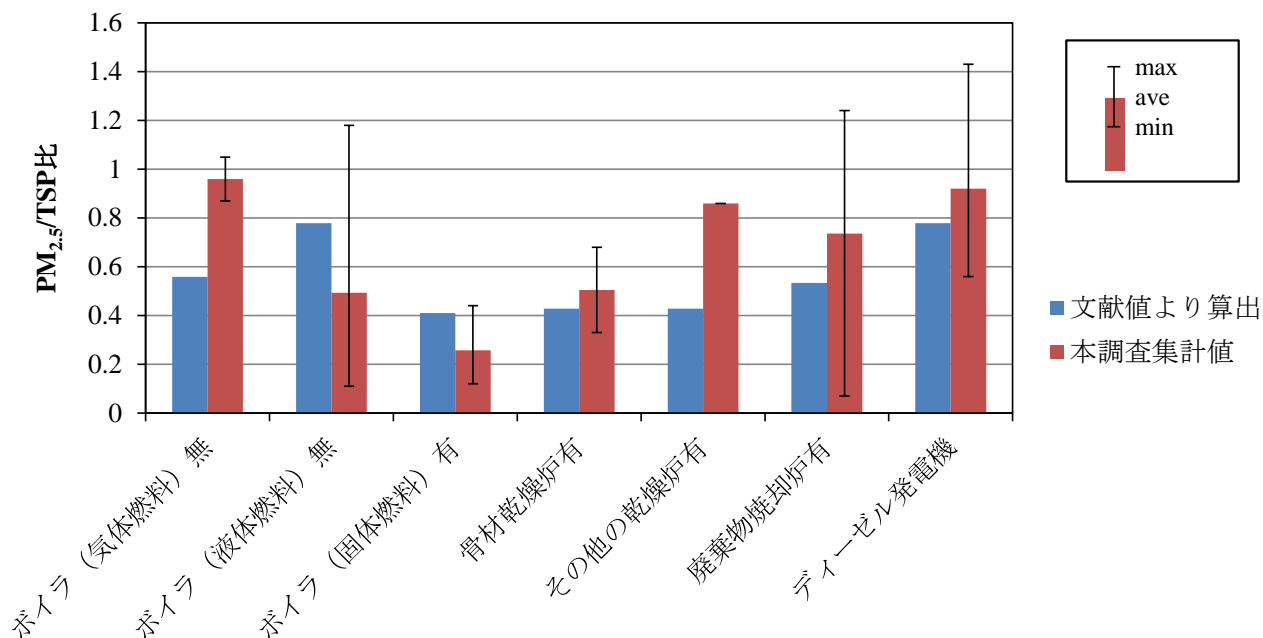


図 1-7 本調査結果から算出した施設・燃原料別の $PM_{2.5}/TSP$ 比と文献値から求めた $PM_{2.5}/TSP$ 比

- ※ 文献値と比較可能な施設を対象とした。「粒子状物質の挙動に関する調査研究 拡散シミュレーション（産業公害防止協会、昭和 60 年 3 月）」の分布指数、粒度特性係数を基に、ダストの粒径分布を表すロジック・ラムラー分布から $PM_{2.5}/TSP$ 比を算出した。
- ※ 本調査集計値のエラーバーは最大値と最小値を示す。
- ※ 施設（燃原料）の後に記載した「有無」は、集塵装置の有無を示す。
- ※ 同一施設について TSP、 $PM_{2.5}(CI)$ 、 $PM_{2.5}(VI)$ 、総粉じん(VI)がある場合には、優先順位を付けて集計した ($PM_{2.5}(VI)/TSP > PM_{2.5}(VI)/TOTAL > PM_{2.5}(CI)/TSP$)。TOTAL は VI で捕集された総粉じん量を示す。

1.3.4 一次排出によるPM_{2.5}と凝縮性粒子

(1) 業種・燃原料別

凝縮性粒子（Condensable Particulate Matter：CPM）は、燃焼直後は高温のため気体だが、放出された大気中で冷却され粒子となる物質である。排出量が多いとされているが、現状のインベントリでは考慮されていない。

そこで、CPMの課題を整理するため、本調査結果で集計したPM_{2.5}とCPMの比較を行った。集計したPM_{2.5}とPM_{2.5}+CPMの調査結果の業種別・燃原料別の比率を図1-8に示す。ここでも1.3.2と同様にPM_{2.5}については、CIとVIの結果を合わせて集計した。

集計結果では、重油や廃棄物焼却等、比率が倍以上の燃原料が確認された。また、一般的に排出濃度が少ないとされる都市ガス燃料でも、PM_{2.5}と比べ、比較的多くのCPMが確認される結果となった。

ただし、この結果も同様に事例が少ないものも多く、ばらつきも大きく確認されることから、今後もデータの拡充が求められる。

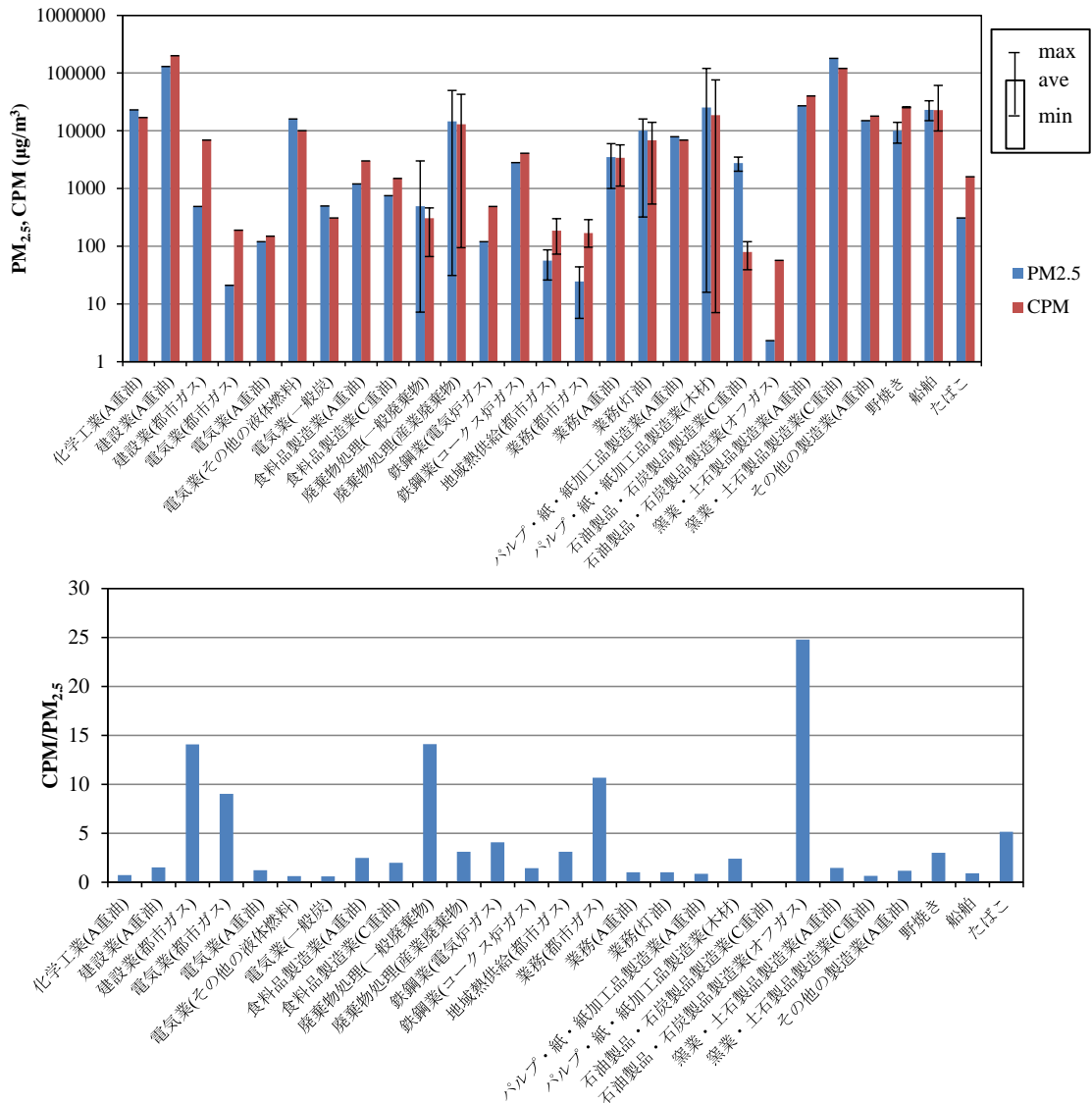


図 1-8 本調査で集計した CPM と PM_{2.5} (上図：CPM, PM_{2.5} 濃度、下図：CPM/PM_{2.5} 比)

- ※ 凝縮性粒子を CPM (Condensable Particulate Matter) とした。本図の CPM は「CPM + PM_{2.5}」を示す。
- ※ PM_{2.5}については、CI と VI の結果を合わせて集計している。
- ※ 上図の濃度は対数目盛で示した。

1.3.5 凝縮性粒子を考慮した排出量の試算・検討

凝縮性粒子（CPM）については、煙源からの排出量が多いとされているが、排出インベントリには組み込まれていない。本調査では、PM_{2.5}及び凝縮性粒子等に係る既存の発生源調査結果を整理し、排出濃度について比較を行った。CPMを考慮した排出量の推計については、既往研究による検討事例があり、従来の推計の5～7倍程度の有機粒子排出が報告されている（Morino et al. (2018)⁶、速水ら (2012)⁷）。そこで、過去の推計事例等を参考にすることで、本調査結果を基に都内におけるCPMを考慮した排出量推計の試算を行った。

（1） 既往研究の推計手法

CPMを考慮した排出量推計について、既往研究の推計方法を整理した。

Morino et al. (2018) は、2008年度から2013年度までの発生源調査結果を基に、PM_{2.5}と凝縮性粒子（Filterable-plus-Condensable Particulate Matter：FCPM）を考慮した有機粒子（Organic Aerosol：OA）の排出量の推計結果を報告している。煙道中のPM_{2.5}質量濃度（C_{PM2.5}(FPM)）と凝縮性粒子中のOA質量濃度（C_{OA}(FCPM)）の比率を燃焼起源別（heavy oil combustion, coal combustion, gas combustion, wood burning, waste burning, waste burning-sewage sludge）に整理し、排出量を推計した。

$$E_{OA}(FCPM) = E_{PM2.5}(FPM) \times \frac{E_{OA}(FCPM)}{E_{PM2.5}(FPM)} = E_{PM2.5}(FPM) \times \frac{C_{OA}(FCPM)}{C_{PM2.5}(FPM)}$$

※ 煙道中のPM_{2.5}のOAは非常に低濃度の試料が存在するため、凝縮性粒子中のOA濃度と煙道中のPM_{2.5}質量濃度の比率をPM_{2.5}の排出量に乗じて算出。

※ OC × 1.2をOAとして算出。

推計の結果、凝縮性粒子を考慮した場合、従来の推計よりもPM_{2.5}のOAは約7倍に増加し、産業群や発電所の固定発生源の排出寄与割合が拡大した。

また、速水ら (2012) は、凝縮性粒子を考慮した有機炭素（Organic Carbon：OC）の排出量推計結果を報告している。燃焼起源（ガス燃焼、液体燃料、木材、固体燃料、電気炉、廃棄物、船舶、建機、野焼き、たばこ）に応じた発生源調査結果を基に、PM_{2.5}に対する凝縮性粒子のOC比率を算出し、大規模固定煙源からのPM_{2.5}排出量から凝縮性粒子を考慮した排出量を推計した。推計の結果、凝縮性粒子を考慮したPM_{2.5}排出量では、OC排出量は従来の推計よりも5～6倍に増加し、シミュレーションモデルによる計算を実施したところ、OAの過小評価は大幅に解消された。

⁶ Y. Morino, S. Chatani, K. Tanabe, Y. Fujitani, T. Morikawa, K. Takahashi, K. Sato, S. Sugata: Contributions of Condensable Particulate Matter to Atmospheric Organic Aerosol over Japan, Environ. Sci. Technol., 52, 8456-8466 (2018)

⁷ 環境省研究総合推進費「C-1001」「我が国都市部のPM_{2.5}に対する大気質モデルの妥当性と予測誤差の評価（平成22年度から平成24年度）研究代表者：速水洋（電力中央研究所）」

(2) 本調査における推計方法

既往研究結果を基に、都内における PM_{2.5} 排出量について、凝縮性粒子を考慮した排出量の試算を行った。収集した発生源調査は主に大規模固定煙源での測定結果であり、既往研究においても大規模煙源の排出量の寄与の増大が報告されていることから、推計対象は、大規模固定煙源とした。現状の都内 PM_{2.5} 排出量は、大規模固定煙源について「一般事業所」、「下水処理場」、「一般工場」、「清掃工場」、「発電所」の業態別に排出量を推計しており、PM_{2.5} 中の成分は、施設別、燃原料別に配分している⁸。既往研究を踏まえ、大規模固定煙源について、燃焼起源区分別に凝縮性粒子と煙道中の PM_{2.5} に係る比率を算出した。

表 1-4 凝縮性粒子を考慮した排出量推計における燃原料区分

推計手法	推計項目	燃焼起源区分	参考文献
A 方式	OA 排出量	① heavy oil combustion (重油) ② coal combustion (石炭) ③ gas combustion (都市ガス) ④ wood burning (木材) ⑤ waste burning (一般廃棄物・産業廃棄物) ⑥ waste burning-sewage sludge (下水汚泥)	Morino et al. (2018) ⁹
B 方式	OC 排出量	① ガス燃料 (都市ガス) ② 液体燃料 (重油) ③ 木材 ④ 固体燃料 ⑤ 電気炉 (電力) ⑥ 廃棄物 (一般廃棄物・産業廃棄物)	速水ら (2012) ¹⁰

本調査による発生源調査結果を基に、煙道中の PM_{2.5} と凝縮性粒子について有機粒子に係る比率を整理し、燃焼起源ごとに、OA 排出量、OC 排出量に、それぞれの比率を乗じることで、凝縮性粒子を考慮した排出量を試算した。

⁸ 東京都微小粒子状物質検討会 資料集 (東京都微小粒子状物質検討会、平成 23 年 7 月)「微小粒子状物質 (PM_{2.5}) 等排出インベントリ報告書 (東京都環境局環境改善部・財団法人東京都環境整備公社東京都環境科学研究所)」

⁹ Y. Morino, S. Chatani, K. Tanabe, Y. Fujitani, T. Morikawa, K. Takahashi, K. Sato, S. Sugata: Contributions of Condensable Particulate Matter to Atmospheric Organic Aerosol over Japan, Environ. Sci. Technol., 52, 8456-8466 (2018)

¹⁰ 環境省研究総合推進費「C-1001」 「我が国都市部の PM_{2.5} に対する大気質モデルの妥当性と予測誤差の評価 (平成 22 年度から平成 24 年度) 研究代表者: 速水洋 (電力中央研究所)」

(3) 凝縮性粒子と煙道中の PM_{2.5} 濃度の比率

① A 方式による推計

既往研究の結果と比較すると、「gas combustion」や「heavy oil combustion」についてデータ数が多く確認され、いずれの燃焼起源においても凝縮性粒子の OA と煙道中の PM_{2.5} 質量濃度の比率 ($E_{OA}(FCPM)/E_{PM2.5}(FPM)$) は、本調査集計値が既往研究の結果よりも低い結果となった。「waste burning-sewage sludge」では、本調査集計値が低い結果であった。一方、「waste burning」では、本調査集計値が高い結果であった。その他についてはおおむね同程度であった。データ数の違いや集計した発生源データの違い等が主な要因と考えられる。

表 1-5 A 方式による凝縮性粒子と煙道中 PM_{2.5} の OA 比率

本調査集計値	number	temperature (exhaust)	temperature (after dilution)	$E_{OA}(FPM)$ / $E_{PM2.5}(FPM)$	$E_{OA}(FCPM)$ / $E_{PM2.5}(FPM)$	SD
01 heavy oil combustion	20	196.3	18.5	0.23	1.34	1.51
02 coal combustion	1	147.0	25.5	0.01	1.08	
03 gas combustion	6	132.8	26.3	0.41	12.75	7.72
04 wood burning	5	153.8	16.7	0.75	0.40	0.38
05 waste burning	6	183.3	17.1	0.12	7.34	13.74
06 waste burning-sewage sludge	5	174.8	17.5	0.04	2.41	3.00

※ 表中に示す用語は以下のとおり。

number : 測定数、temperature(exhaust) : 排出ガス温度、temperature(after dilution) : 希釈後の排出ガス温度、 $E_{OA}(FPM)/E_{PM2.5}(FPM)$: PM_{2.5} 排出量に対する PM_{2.5}OA 排出量の比率、 $E_{OA}(FCPM)/E_{PM2.5}(FPM)$: PM_{2.5} 排出量に対する PM_{2.5} + 凝縮性粒子中の OA 排出量の比率。

※ 凝縮性粒子の OA と煙道中の PM_{2.5} の比率について、凝縮性粒子の濃度が煙道中の PM_{2.5} 濃度よりも大幅に高い値については異常値として、本集計から除外した (100 以上)。

※ 下水汚泥以外の産業廃棄物は “waste burning” に含めた。

表 1-6 Morino et al. (2018)による結果

Morino et al. (2018)※	number	temperature (exhaust)	temperature (after dilution)	$E_{OA}(FPM)$ / $E_{PM2.5}(FPM)$	$E_{OA}(FCPM)$ / $E_{PM2.5}(FPM)$	SD
01 heavy oil combustion	8	208.2	21.2	0.08	2.13	1.58
02 coal combustion	1	147	22.7	0.01	0.96	
03 gas combustion	3	142.1	29.7	0.37	18.27	2.58
04 wood burning	2	84.5	21	0.12	0.77	0.5
05 waste burning	5	179	19.6	0.1	1.25	1.11
06 waste burning-sewage sludge	5	192.6	18.3		6.01	1.35

※ 出典 : Y. Morino, S. Chatani, K. Tanabe, Y. Fujitani, T. Morikawa, K. Takahashi, K. Sato, S. Sugata: Contributions of Condensable Particulate Matter to Atmospheric Organic Aerosol over Japan, Environ. Sci. Technol., 52, 8456-8466 (2018)

② B 方式による推計

B 方式による集計結果では、既往研究の結果と比較すると、「ガス燃料」、「液体燃料」、「木材」、「廃棄物」について、データ数が多く確認された。「ガス燃料」及び「液体燃料」では、本調査集計値が既往研究の結果よりも低かったが、「廃棄物」、「木材」では、おおむね同程度の値となった。

表 1-7 B 方式による凝縮性粒子と煙道中 PM_{2.5} の OC 比率

本調査集計値	number	OCの倍率
01 ガス燃料	6	37.4
02 液体燃料	18	9.4
03 木材	5	0.8
04 固体燃料		
05 電気炉	1	29.9
06 廃棄物	11	42.5

※ 凝縮性粒子の OC と煙道中の PM_{2.5} の比率について、凝縮性粒子の濃度が煙道中の PM_{2.5} 濃度よりも大幅に高い値については異常値として、本集計から除外した (100 以上)。固体燃料については、異常値として除外されたため、空白となっている。

表 1-8 既往研究による OC 比率

速水ら (2012) ※	number	OCの倍率
01 ガス燃料	4	48
02 液体燃料	2	30
03 木材	1	1
04 固体燃料		1
05 電気炉	1	30
06 廃棄物	4	48

※ 出典：環境省研究総合推進費「C-1001」 「我が国都市部の PM_{2.5} に対する大気質モデルの妥当性と予測誤差の評価 (平成 22 年度から平成 24 年度) 研究代表者：速水洋 (電力中央研究所)」

(4) 凝縮性粒子を考慮した排出量推計結果

大規模固定煙源における凝縮性粒子の排出量推計結果を図 1-9 及び図 1-10 に示す。推計に当たっては、凝縮性粒子を考慮した PM_{2.5} 排出量 (A 方式は OA 排出量、B 方式は OC 排出量) について、業態別に整理した (発電所、清掃工場、一般工場、下水処理場、一般事業所)。推計の結果、凝縮性粒子を考慮した排出量は、A 方式では従来推計の約 9 倍の PM_{2.5}OA 排出量 (従来推計: 18 t、A 方式: 162 t)、B 方式では従来推計の約 28 倍の PM_{2.5}OC 排出量が推計された (従来推計: 15 t、B 方式: 431 t)。煙道の PM_{2.5} 中の OC は非常に低濃度の試料が存在するため、凝縮性粒子中の OC 濃度と煙道中の PM_{2.5} 中の OC 濃度の比率による比較では、凝縮性粒子の排出量を過大評価している可能性がある。

東京都における大規模固定煙源では、ガス燃料の排出量が多く、ガス燃料は A 方式及び B 方式の比率においても非常に高い値を示した。ガス燃料等では低濃度の測定結果が多く、凝縮性粒子に係る現状の測定方法では、低濃度の排出ガス試料の場合、希釈倍率によって測定を正確に実施することが困難であるという課題がある。現在、測定時の温度やガス成分の濃度の影響を受けずに凝縮性粒子の排出実態を把握する手法として、有機物の揮発性分布を測定する研究が進められており、研究段階ではあるが、新たな測定方法も提案された¹¹。今後、発生源情報を充実させるためには新たな測定方法による排出源の実態把握を行うとともに、凝縮性粒子を考慮した排出量の適切な推計が望まれる。

¹¹ 環境省研究総合推進費「5-1506」「燃焼発生源における希釈法による凝縮性一次粒子揮発性特性の評価法の確立 (平成 27 年度から平成 29 年度) 研究代表者: 藤谷雄二 (国立環境研究所)

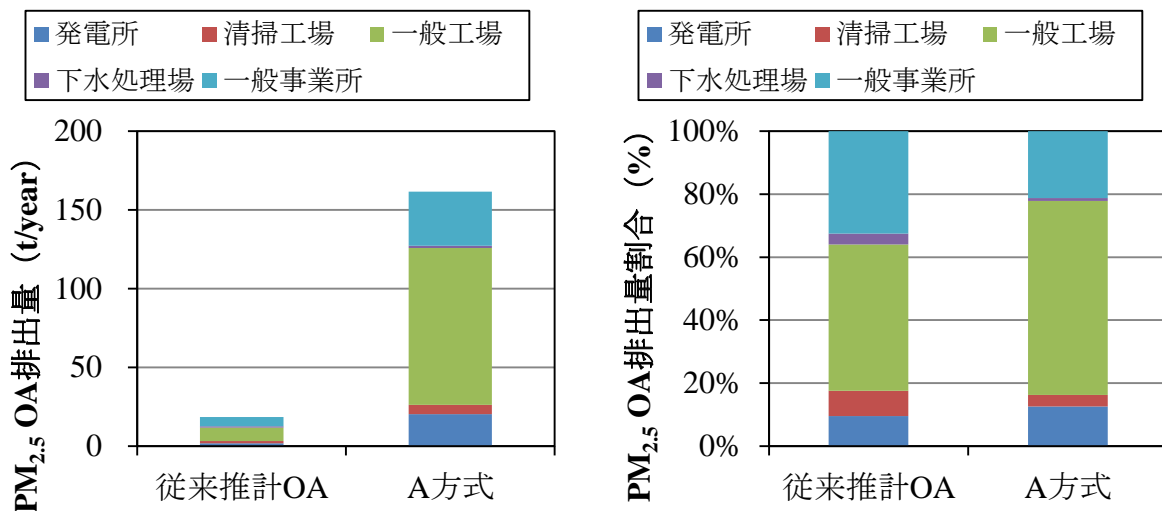


図 1-9 都内における従来推計の PM_{2.5}OA 排出量と A 方式による凝縮性粒子を考慮した PM_{2.5}OA 排出量 (左図：排出量、右図：割合)

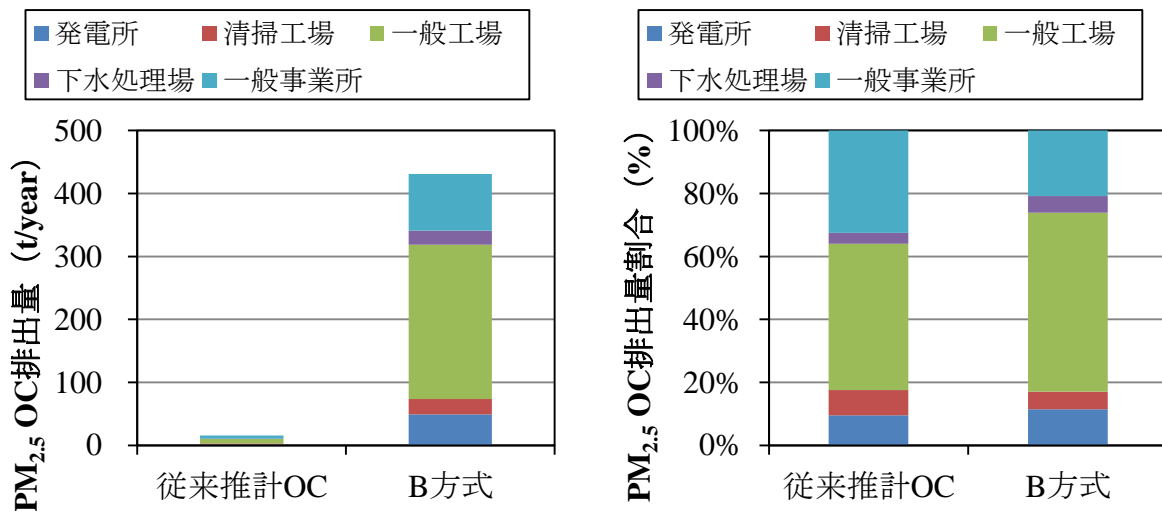


図 1-10 都内における従来推計の PM_{2.5}OC 排出量と B 方式による凝縮性粒子を考慮した PM_{2.5}OC 排出量 (左図：排出量、右図：割合)

1.3.6 測定結果の不確実性の整理

本調査による集計結果において、PM_{2.5}/TSP 比や PM_{2.5} と凝縮性粒子の比較を実施したが、発生源情報が少ないことや図 1-2 から図 1-4 に示すように、業種、施設、燃原料によってばらつきが多く確認された。本来、既存調査結果を類型化するには、施設の規模や集塵装置の種類等も含めて集計することが望ましい。しかし、本調査では、発生源情報が限られており、施設規模や後処理装置等に起因するばらつきの大さを検討することは困難であることから、なるべく同じ分類で多くの事例を確保し、濃度分類が可能な業種、施設及び燃原料で類型化することとした。

凝縮性粒子については、測定事例として確認された空気希釈法では、低濃度の排出ガス試料の場合、希釈倍率によって測定を正確に実施することが困難であるという課題がある。現在、測定時の温度やガス成分の濃度の影響を受けずに凝縮性粒子の排出実態を把握する手法として、有機物の揮発性分布を測定する研究が進められ、研究レベルではあるが、新たな測定方法も提案された¹²。今後、発生源情報を充実させるにはそういった新たな測定方法による排出源の実態把握が望まれる。

このように、現状の測定データ等の発生源情報は必ずしも十分であるとは言えず、引き続きより多くの施設における測定結果の情報収集やデータの拡充が必要であることに留意する必要がある。

1.4 まとめ

大規模固定煙源調査の結果を以下に示す。

- ・ 本調査で収集した発生源調査結果について、業種別、施設別、燃原料別で集計したところ、業種・施設別だけではばらつきが大きく、燃原料で濃度差がある分野が確認された。一方、調査事例が少なく、業種、施設、燃原料のそれぞれの分野で調査未実施の事例も多く確認された。
- ・ PM_{2.5}/TSP 比について、現行のインベントリで用いられる数値と本調査結果集計値を比較したところ、おおむね一致している傾向が確認できたが、最大最小幅が大きい業種・施設や一部乖離している業種・施設も確認された。
- ・ 凝縮性粒子と PM_{2.5} では、重油や廃棄物焼却等、比率が倍近く濃度差が確認され、排出濃度の小さい都市ガス燃料でも PM_{2.5} よりも比較的多くの凝縮性粒子が確認された。凝縮性粒子を考慮した排出量を試算した結果、東京都における大規模固定煙源の PM_{2.5}OA 排出量では、従来の推計方法と比べて 9 倍程度の増加が見込まれる結果となった。ただし、現状の凝縮性粒子の測定方法では、都市ガス等の低濃度の排出ガス試料の場合、希釈倍率によって測定を正確に実施することが困難であるという課題がある。今後、新たな測定方法を含めた発生源情報のデータの拡充・整備により、凝縮性粒子の影響を考慮した排出源の実態を把握し、固定発生源の PM_{2.5} 濃度影響を評価していくことが望ましい。
- ・ 本調査は、限られた発生源情報を基に取りまとめた結果であり、業種、施設、燃原料によってばらつきが多く確認されたことから、現状の発生源情報は必ずしも十分であ

¹² 環境省研究総合推進費「5-1506」「燃焼発生源における希釈法による凝縮性一次粒子揮発性特性の評価法の確立（平成 27 年度から平成 29 年度）研究代表者：藤谷雄二（国立環境研究所）」

るとは言えず、引き続きより多くの施設における測定結果の情報収集やデータの拡充が求められることを踏まえた上での考察であることに留意する必要がある。