

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

5-2004 国際民間航空機関の規制に対応した航空機排出粒子状物質の
健康リスク評価と対策提案
(JPMEERF20205004)

令和2年度～令和4年度

Assessment of Risks to Human Health from Particulate Emissions from Aircraft and Strategies for
Risk Mitigation in Relation to the International Civil Aviation Organization Standard

〈研究代表機関〉
東京都立大学

〈研究分担機関〉
国立研究開発法人国立環境研究所
国立研究開発法人産業技術総合研究所
北海道大学

〈研究協力機関〉
神戸市
関西エアポート神戸株式会社
イサラ研究所
Zurich University of Applied Sciences

令和5年5月

目次

I. 成果の概要	・・・ 1
1. はじめに（研究背景等）	
2. 研究開発目的	
3. 研究目標	
4. 研究開発内容	
5. 研究成果	
5－1. 成果の概要	
5－2. 環境政策等への貢献	
5－3. 研究目標の達成状況	
6. 研究成果の発表状況	
6－1. 査読付き論文	
6－2. 知的財産権	
6－3. その他発表件数	
7. 国際共同研究等の状況	
8. 研究者略歴	
II. 成果の詳細	
II－1 実大気観測と数値シミュレーションに基づく空港周辺の粒子拡散評価と対策提案 （東京都立大学）	・・・ 20
要旨	
1. 研究開発目的	
2. 研究目標	
3. 研究開発内容	
4. 結果及び考察	
5. 研究目標の達成状況	
6. 引用文献	
II－2 国際連携による航空機ジェットエンジン排ガス測定と粒子生成メカニズムの解明 （国立研究開発法人国立環境研究所）	・・・ 35
要旨	
1. 研究開発目的	
2. 研究目標	
3. 研究開発内容	
4. 結果及び考察	
5. 研究目標の達成状況	
6. 引用文献	

Ⅱ－３ 航空機排気粒子の物理・化学特性を考慮した粒子計測法の多角的評価 (国立研究開発法人産業技術総合研究所)	・・・ 48
--	--------

要旨

1. 研究開発目的
2. 研究目標
3. 研究開発内容
4. 結果及び考察
5. 研究目標の達成状況
6. 引用文献

Ⅱ－４ 航空機に関連する総合的な健康リスク評価法の開発 (北海道大学)	・・・ 63
--	--------

要旨

1. 研究開発目的
2. 研究目標
3. 研究開発内容
4. 結果及び考察
5. 研究目標の達成状況
6. 引用文献

Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細	・・・ 73
-----------------	--------

Ⅳ. 英文Abstract	・・・ 77
---------------	--------

I. 成果の概要

課題名 5-2004 国際民間航空機関の規制に対応した航空機排出粒子状物質の健康リスク評価と対策提案

課題代表者名 竹川 暢之 (東京都立大学 理学研究科 教授)

重点課題 主：【重点課題⑩】大気・水・土壌等の環境管理・改善のための対策技術の高度化及び評価・解明に関する研究

副：【重点課題④】環境問題の解決に資する新たな技術シーズの発掘・活用

行政要請研究テーマ（行政ニーズ） (5-9) PM2.5及び0xの総合的な削減シナリオ・技術の特定と対策コストの評価

研究実施期間 令和2年度～令和4年度

研究経費

107,499千円（合計額）

（各年度の内訳：令和2年度：39,639千円、令和3年度：35,100千円、令和4年度：32,760千円）

研究体制

（サブテーマ1）実大気観測と数値シミュレーションに基づく空港周辺の粒子拡散評価と対策提案
（東京都立大学）

（サブテーマ2）国際連携による航空機ジェットエンジン排ガス測定と粒子生成メカニズムの解明
（国立研究開発法人国立環境研究所）

（サブテーマ3）航空機排気粒子の物理・化学特性を考慮した粒子計測法の多角的評価
（国立研究開発法人産業技術総合研究所）

（サブテーマ4）航空機に関連する総合的な健康リスク評価法の開発
（北海道大学）

研究協力機関

神戸市、関西エアポート神戸株式会社、イサラ研究所、Zurich University of Applied Sciences

本研究のキーワード 航空機排気、超微小粒子状物質、国際民間航空機関、数値シミュレーション、航空機エンジン試験、健康リスク評価

1. はじめに（研究背景等）

国際民間航空機関（ICAO）の主導により、2016年に新たに排出規制が設けられ、2020年以降の製造エンジンより適用されることになった。粒子状物質について、従来はスモークナンバー（SN）により規制されていたが、新規制では粒径10 nm以上の不揮発性粒子の質量濃度・数濃度が対象となる。環境省の船舶・航空機排出大気汚染物質の影響把握に関する検討委員会の議論を踏まえ、推進費5-1709（研究代表者：竹川 暢之）では国内初の航空機由来の超微小粒子状物質（UFP：粒径100 nm以下）の動態解明に取り組んだ。航空機排ガスでは粒子数の大部分がUFP粒径域にある。成田国際空港における大気観測から、UFP成分中のジェットエンジンオイルの重要性や、煤・金属元素の粒径別存在割合が明らかになった。さらに、数値モデル（米国連邦航空局開発のAEDT）によるシミュレーションと実測を比較することで、成田国際空港の敷地内・周辺に関して現実的なNO_x、PM2.5、UFP濃度分布を再現することに成功した。以上の成果は、空港敷地内とその周辺における健康影響評価の基盤となるものである。

一方、PM2.5やオキシダントに比べると、航空機UFPは大幅に知見が不足しており、ジェットエンジン内の粒子生成メカニズムや、航空機UFP特有の健康リスクには大きな不確実性があることも明らかになった。過去10年程度の間世界的な航空機需要は飛躍的に増加してきた。2020年以降、COVID-19の影響で航空機需要は大きく落ち込んだが、今後は増加に転じると予測されている（図-0.1）。将来の需要予測やUFP健康リスク評価の不確実性はあるものの、国際的には先手の対策が加速化している。また、持続可能な航空燃料（SAF）等の新しい燃料技術の活用も促進されつつある。航空機に関わる発生源対策は、自動車や固定発生源などに比べると国際的な側面が非常に大きい。推進費5-1709で得た知見を発展させ、新たに洗い出された課題を解決することは、大きく変化しつつある国際規制動向に迅速に対応し、リスク評価に基づき適切な対策を講じるために重要である。

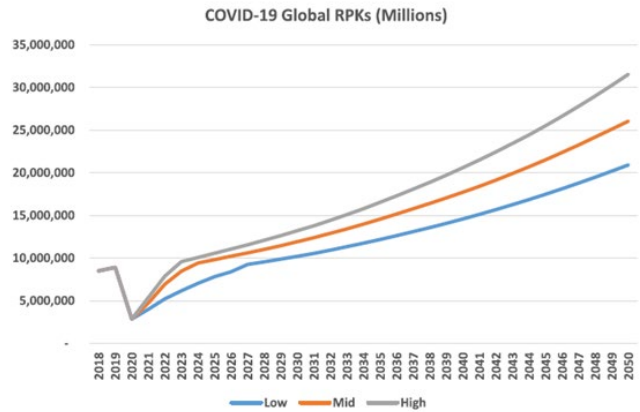


図-0.1. 航空機需要の将来予測（ICAO Environmental Report, 2022¹⁾）。

2. 研究開発目的

本研究では、国際的な規制動向と関連付けながら、エンジン試験、実環境観測、数値シミュレーション、健康リスク評価を連携させる。エンジン試験では、海外研究機関（スイス）と協力して測定を実施し、粒子生成メカニズムを解明する。そのデータをAEDTに入力してシミュレーションを実施し、空港周辺の観測データで検証する。一方、UFP毒性・疫学研究に関する様々なデータを解析し、航空機排気に関連する総合的な健康リスク評価方法を開発する。これらの知見を統合し、国内の主要空港を対象に数値シミュレーションを行い、健康リスク評価と将来の対策提案（コスト含む）を行うことを目的とする。

3. 研究目標

全体目標	エンジン試験、実環境観測、数値シミュレーション、健康リスク解析を系統的に連携させて、国内主要空港とその周辺における航空機由来の超微小粒子状物質（UFP：粒径100 nm以下）の健康リスク評価と、将来の対策提案を行うことを目標とする。具体的には、現状における健康リスクの評価、および航空機に関する
------	---

	技術革新（新規エンジン・燃料の導入、ジェットエンジンオイル回収機構の改良など）による健康リスク改善効果の評価を行う。さらに、これらに付随するコストの推定を行うことで、費用対効果を考慮した対策提案を行うことを目指す。
--	---

サブテーマ 1	実大気観測と数値シミュレーションに基づく空港周辺の粒子拡散評価と対策提案
サブテーマリーダー/所属機関	竹川 暢之／東京都立大学
目標	神戸空港を中心とした実環境UFP測定 ¹ と、航空機専用モデル（AEDT）による数値シミュレーションに基づき、従来困難であった航空機離着陸サイクル（アイドリング、離陸、着陸等）に応じたUFP排出・拡散過程を評価する。検証されたモデルを用いて、国内主要空港とその周辺におけるUFP濃度分布・健康リスク評価および対策提案をまとめる。

¹神戸空港における観測時期や規模については、新型コロナウイルス（COVID-19）の状況に応じて関係者と慎重に協議する。やむを得ず日程や規模の大幅な変更がありうる場合については、環境省およびERCAと事前に相談を行う。

サブテーマ 2	国際連携による航空機ジェットエンジン排ガス測定と粒子生成メカニズムの解明
サブテーマリーダー/所属機関	伏見 暁洋／国立研究開発法人国立環境研究所
目標	海外研究機関（スイス）と連携して航空機ジェットエンジン試験を行い ² 、化学成分分析等に基づき、粒子の排出・生成メカニズムを解明する。特に、世界的に知見がごく限られているジェットエンジンオイル起源ナノ粒子の排出箇所や生成過程を明らかにし、粒子排出抑制方策を提案することを目指す。

²ジェットエンジン試験の時期や規模については、新型コロナウイルス（COVID-19）に伴う渡航制限などに応じて関係者と協議する。やむを得ず日程や規模の大幅な変更がありうる場合については、環境省およびERCAと事前に相談を行う。

サブテーマ 3	航空機排気粒子の物理・化学特性を考慮した粒子計測法の多角的評価
サブテーマリーダー/所属機関	桜井 博／国立研究開発法人産業技術総合研究所
目標	国際規制と関連付けてサブテーマ 1 と 2 で用いる計測法の評価を行う。特に、産総研の有する高精度な粒子計測技術や試験粒子発生技術を駆使して、健康影響が懸念される不揮発性粒子（煤）測定法の信頼性を評価する ³ 。

³申請書では粒子の物理・化学特性として水溶性を考慮していたが、推進費5-1709の知見等を踏まえ、健康影響においてより重要な煤粒子の粒径・形状に重点を置く計画とした。

サブテーマ 4	航空機に関連する総合的な健康リスク評価法の開発
サブテーマリーダー/所属機関	上田 佳代／北海道大学
目標	UFPを含む大気汚染物質の毒性・疫学調査に関する文献情報を統合し、UFP個数濃度を用いた曝露－健康アウトカム関数を構築する。航空機排気粒子の物理・化学特性を考慮することで、航空機UFPに関する総合的な健康リスク評価方法を新たに開発する ⁴ 。

⁴申請書では騒音との複合影響評価も含めていたが、本研究の主題はUFPであるため、騒音の影響は考慮しつつ最終的な評価項目はUFPに特化した計画とする。

4. 研究開発内容

本研究は、エンジン試験、実環境観測、数値シミュレーション、健康リスク評価を効果的に連携させ、それらの結果に基づいて将来予測と対策提案を行うという枠組みを大きな特長としている（図-0.2）。実環境観測では多様な粒子の存在が想定されるため、装置性能の評価も重要な研究内容となる。以降の説明はこれらの項目毎にまとめる。

エンジン試験：サブテーマ2を中心としてサブテーマ1と3が協力して実施

装置評価および実環境観測：サブテーマ1を中心としてサブテーマ3が協力して実施

数値シミュレーション：サブテーマ1を中心としてサブテーマ2の知見を活用して実施

健康リスク評価：サブテーマ4を中心としてサブテーマ1の計算結果に基づいて実施

将来予測・対策提案：サブテーマ1を中心としてサブテーマ2と4の知見を活用して実施

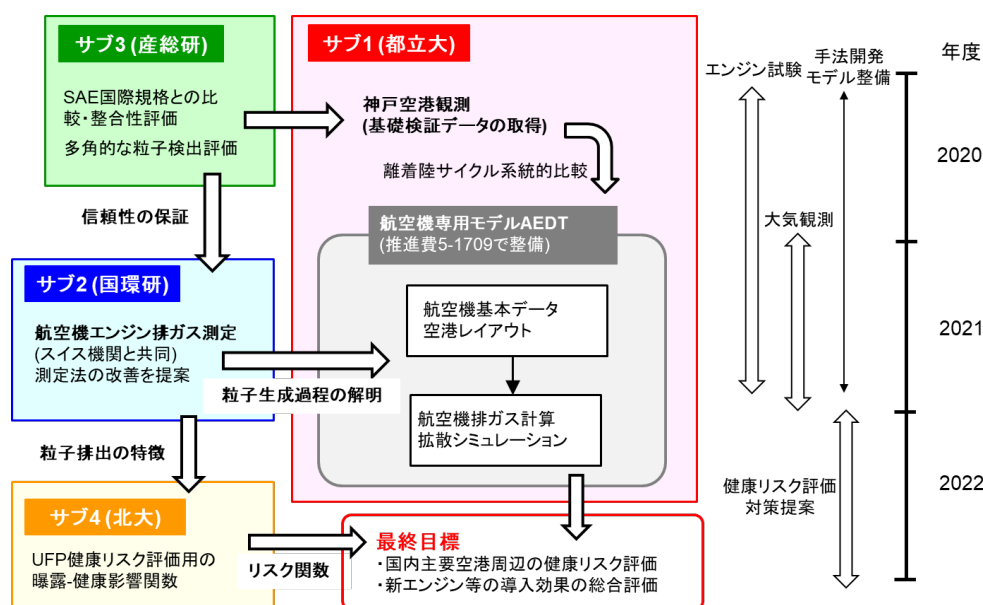


図-0.2. 本研究の枠組み。

エンジン試験

エンジン試験はスイスのZurich University of Applied Sciences のDr. Julien Anet やDr. Lukas Durdina らの協力を得て、スイスのチューリッヒ国際空港内のエンジン関連施設（SR Technics）で行った。当初計画では2020年11月に予備試験を予定していたが、COVID-19の影響で海外渡航が厳しく制限されたほか、SR Technicsにおけるエンジン試験の稼働率が大きく低下したため、研究提案時に予定していた2020年11月頃のジェットエンジン試験は約半年延期した。

本研究で想定しているジェットエンジンからのオイルナノ粒子の排出・生成箇所と、その実態を明らかにするための測定・採取場所のイメージを図-2.1に示す。本研究では、ジェットエンジン直下の燃焼排気（P1、エンジン排出規制の測定位置）に加え、エンジン排気口から約25 m後方（P3）の2箇所、粒子数濃度の粒径分布、化学組成を同時に測定することで、オイルナノ粒子の排出または生成箇所・メカニズムを特定することを目指した。

エンジン試験に先立ち、排気総粒子を1系統または2系統で採取するためのサンプラー（NIES Single/Dual Sampler）を設計・製作した。また、SR Technicsにおいてスイス側研究協力者によってサイレンサー部の試料採取プローブの交換と試運転、スモークメーターとNIES Single Samplerを用いた予備粒子試料の採取が行われた。その後、スイスSR Technicsを2回訪問し（エンジン試験#1：2021年4月10日～5月13日、エンジン試験#2：9月18日～10月5日）、以下の民間航空機エンジンの排気試験を行った。エンジン直下の燃焼排気（P1）及び25 m下流（P3、サイレンサー手前）で、航空機排出粒子の数粒径分布を測定した他、総粒子及び粒径別粒子を採取し、粒子質量と化学組成を測定した。当初計画にはなか

ったが、粒子の組成や起源について有用な情報を与えると考えられる、透過型電子顕微鏡（TEM）観察のためのサンプリングと排気粒子の形態観察も行った。

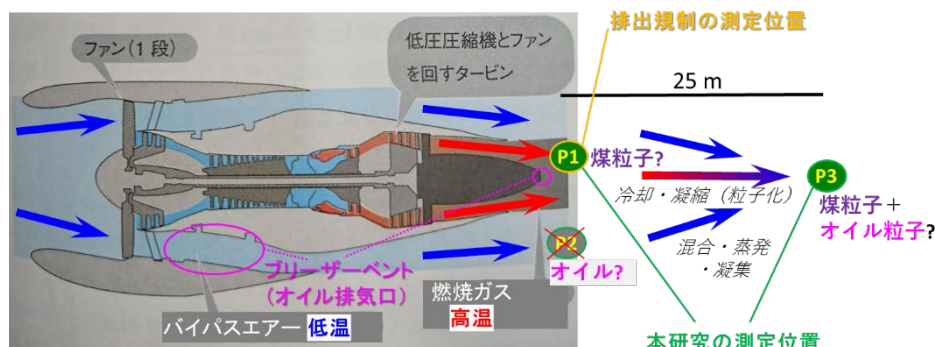


図-2.1. ジェットエンジンからのオイル粒子の排出・生成箇所の想定と試料採取場所（中村，2013²⁾の図に矢印・文字等を追記）。ブリーザーベント（エンジンによって位置は異なる）からバイパスエアーにオイルが排出されていると想定。

COVID-19の影響で大きな制約があったものの、ジェットエンジン排気の測定・試料採取を計7回行うことができた。NIES-Dual samplerによる総粒子試料の採取は、6機のエンジン（CFM56系3機、PW系3機）を対象に複数出力でのテストサイクル全体で行ったほか、PW系エンジンを対象にアイドリングのみの試料採取を1回行った。バックグラウンド空気の測定・総粒子試料採取を計3回実施した。エンジン試験#2では25 m下流で粒径別試料採取を行った。TEM観察用の試料は、25 m下流でPW系エンジンのテストサイクル全体とPW系エンジンのアイドリング時に1検体ずつ採取し、エンジン直下でPW系エンジンのアイドリングとテイクオフとCFM56系エンジンのテストサイクル全体で1検体ずつ採取した。試験対象とされたジェットエンジンは、CFMインターナショナル社のCFM56系エンジンとPratt & Whitney (P&W) 社のPW4000系エンジンで、いずれもエアバス社A320やボーイング社B763、B738などの主力機体に搭載されている。当初予定になかったスモークメーターによるフィルター試料の採取と分析も含めれば、計画と同程度以上の試料を採取することができた。

装置評価および実環境観測（Takegawa et al., 2023; P. 73 研究成果）

神戸空港における実大気観測では、推進費5-1709と同様に加熱蒸発管を用いた揮発性の粒子数測定が鍵となるため、その測定の妥当性評価が重要である。産総研で実施した加熱蒸発管・希釈器とUCPC-CPCに対する校正の概念図を図-3.1に示す。粒径分級器(DMA)を用いて単分散化した校正用粒子を発生させ、その濃度を参照エアロゾル電流計(FCAE)と比較することで粒子透過率や粒子検出効率の評価を行った。サブテーマ3では上記以外にも様々な実験を試行し、多角的な評価を行った。

また、実験室において直鎖アルカン粒子を用いた加熱蒸発管の性能評価を行い、加熱温度と粒子揮発特性の関係を詳細に調べた。航空機排ガスの不揮発性粒子測定のSAE国際規格では、揮発性粒子の除去効率評価に炭素数40の直鎖アルカン（テトラコンタン：C₄₀）が用いられている³⁾。本研究では、揮発特性の参照物質として、国際規格のC₄₀以外に炭素数30のトリアコンタン（C₃₀）を用いた。さらに、上記の室内実験に基づき推進費5-1709で実施した成田国際空港における観測データの追加解析を行い、実環境中の航空機排気粒子の揮発特性について調べた。

一方、推進費5-1709において成田国際空港で採取した試料の化学成分分析から、航空機排ガスのUFPの主成分としてジェットエンジンオイルが重要であることが示されている⁴⁾。成田国際空港の追加解析により得られた数ベースの粒子揮発特性と、サブテーマ2による化学成分の特徴を同時に説明することが可能かどうかを調べるために、実験室においてジェットエンジンオイル粒子の生成実験を行った。

神戸空港における観測は2021年の春季および秋季に実施した（図-1.2）。観測点と滑走路および誘導路との距離はそれぞれ290 mおよび110 mであった。加熱・非加熱の粒子数濃度測定には推進費5-1709と

同様にTSI社の超微小凝縮粒子カウンタ（UCPC；粒径2.5 nm以上）と凝縮粒子カウンタ（CPC；粒径10 nm以上）を使用した。また、航空機排気中の粒径10 nmの不揮発性粒子に対して凝集状態の分析を行うことを目的として、静電粒径分級と静電捕集を組み合わせたナノ粒子捕集システムを製作し、粒子捕集を行った。捕集粒子はTEMにより観察を行った。

さらに、数値シミュレーションの検証データを得るために、羽田空港、成田国際空港、福岡空港の周辺で携帯型CPC 3007を用いた粒径10 nm以上の総粒子数濃度の測定を実施した。羽田空港については2022年3月7日と10日および2023年2月18日と19日に実施した。成田国際空港については2023年3月7日と9日に実施したが、行動制限がないにも関わらず平時より便数が大幅に少なかったため、バックグラウンド濃度の取得のみを行った。福岡空港については2022年9月26、27、28日に実施した。

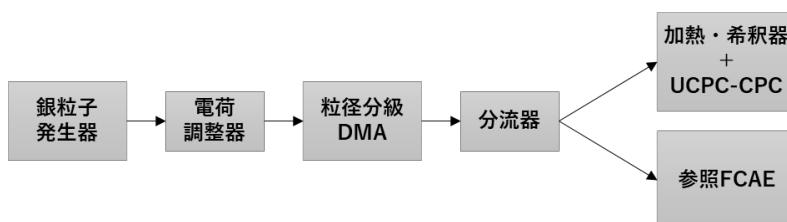


図-3.1. サブテーマ1 で用いたUCPC-CPC及び加熱・希釈器に対する校正設備の概念図。

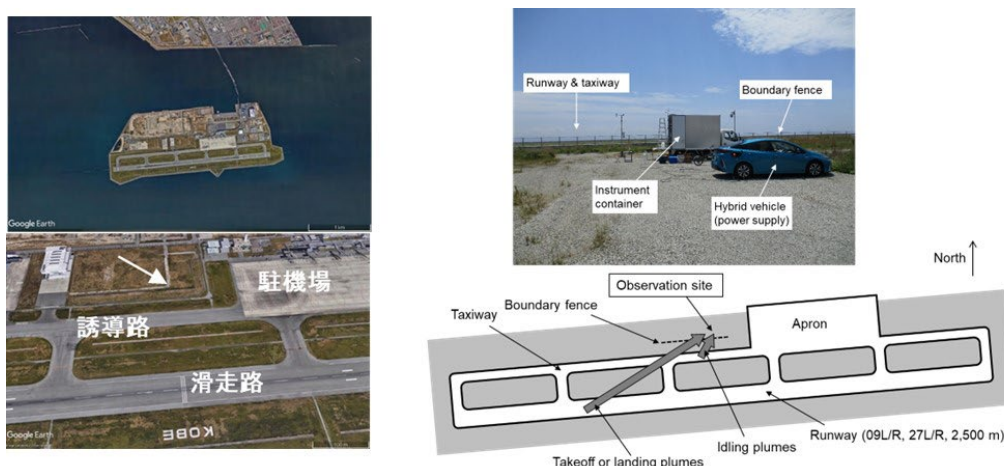


図-1.2. 神戸空港のレイアウトと観測点（地図上の白矢印）の位置関係。地図はGoogle Earthで作成。

数値シミュレーション

数値シミュレーションには、米国連邦航空局（FAA）によって開発されたシミュレーションモデルであるAEDT（Aviation Environmental Design Tool）を用いた。AEDTでは航空機の粒子排出係数を任意に設定することも可能であるが、複雑な設定にした場合に再現性評価が困難となるため既定値を利用した。

本研究では、羽田空港、成田国際空港、福岡空港を対象とした。リスク評価に用いるメッシュ人口は2015年であるため、計算は同年の3月、7月、11月で実施した。対象地域は各空港周辺の20 km×20 km四方とし、計算の空間分解能は100 m（200×200メッシュ）とした。発生源は航空機のみとし、バックグラウンドはゼロと仮定した。図-1.4にモデル内における各空港のレイアウト設定を示す。2015年3月の各空港の離発着数は、羽田空港が約1200回/日、成田国際空港が約570回/日、福岡空港が約450回/日であった。羽田の便数は福岡の3倍近くあるが、羽田の滑走路が4本あるのに対して、福岡は1本で運用しており、単純に滑走路1本あたりで考えると福岡空港の方が過密である。また、福岡空港は羽田空港や成田国際空港に比べて大都市部により近接しているという特徴がある。

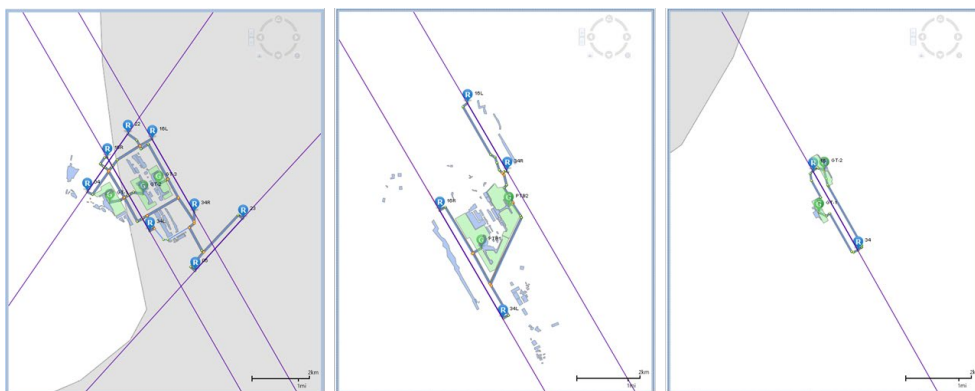


図-1.4. 数値モデルAEDTにおける羽田空港、成田国際空港、福岡空港の設定。スケールバーは2 km。

健康リスク評価（上田ら，2023；P.73 研究成果）

航空機由来UFPの健康影響評価を検討した疫学研究は限られているため、UFPの健康影響関数を構築するために、発生源に関わらずUFPを対象とした疫学知見に関する文献をまとめた。世界の主要な医学系雑誌に掲載された論文の書誌情報が掲載されている検索エンジンPubmedを用いて該当する論文を抽出した。抽出された論文について、文献情報、研究対象者、研究時期、研究デザイン、曝露評価方法、粒子径、測定方法、曝露評価時期、曝露の分布の情報を抽出した。

疫学研究において、UFPを含む大気汚染の健康影響は、単位濃度上昇当たりどれくらい健康リスクが変化するかで示されることが多いため、本検討での健康リスク関数は線形を仮定した。すなわち、UFP個数濃度（ X ）、比較の基準となる濃度（ X_0 ）、濃度と死亡との係数（健康影響係数： β ）を用いて、対象とする健康アウトカム（死亡や入院など）のリスク比（RR）は、以下のように表される。

$$RR = \exp[\beta(X - X_0)] \quad (X \geq X_0)$$

ただし、 β はUFP数濃度 $10.0 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ あたりの数値として示す。 X_0 は健康影響が出現し始める閾値とすることが多いが、閾値に関する情報が不足していること、本課題で用いるUFP濃度は航空機由来UFP濃度であるが、実際にはバックグラウンドも合わせたUFPに曝露されることから、 $X_0 = 0$ とした。本課題では、文献レビューで得られた疫学知見のメタ解析より健康影響係数 β を推定した。各健康アウトカム（死亡、循環器・呼吸器疾患）について分類し、それぞれについてメタ解析を適用し、得られた健康影響係数 β を健康リスク関数の係数とした。

航空機由来UFPの曝露評価として、サブテーマ1により推定された3、7、11月の3か月間のUFP個数濃度を用いて、対象地域（空港周囲20 km四方）に居住する人口のうち、参照濃度を超える人口割合について求めた。曝露人口推定には、国勢調査に基づく地域メッシュ統計のうち3次メッシュ（1辺約1 km）の年齢階級別人口情報を用いた。参照濃度を決定するにあたり、世界保健機関（WHO）のAir Quality Guidelines⁵⁾の内容を考慮に入れた。現在のところ、UFPの健康影響に関する知見は十分といえず、健康影響の閾値は分かっていない。空港周辺で観測された粒子濃度に基づき、 $5.0 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ を一律のバックグラウンド濃度と仮定した。本研究の数値シミュレーションでは航空機以外の寄与を考慮していないため、WHOガイドラインと実大気バックグラウンド濃度の差分 $5.0 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ を参照濃度とし、それを超える人口割合を求めた。

本課題では航空機由来UFPによる健康影響評価として、疾病負荷、すなわち航空機由来UFP関連死亡数の推定を行い、PM2.5関連死亡数と比較した。疾病負荷として、AEDTにより推定されたUFP濃度、UFP健康影響関数、3次メッシュ人口を用いて、3空港周囲20 km四方内の航空機由来UFP関連死亡数の推定を行った。UFP濃度 X におけるリスク比RRは、以下の式に示すように、UFPがその健康事象発生に寄与する割合（集団寄与割合：PAF）を求めるために用いる。

$$PAF = \frac{RR - 1}{RR}$$

PAFは、その地域の健康事象発生数（死亡や疾患発生）のうち、対象とする環境要因（ここでは航空機由来UFP）が寄与する割合を示している。対象地域の死亡数（ N_0 ）が分かれば、以下の式から、航空機UFPが寄与する死亡数（ N_{UFP} ）が得られる。

$$N_{UFP} = N_0 \times \text{PAF}$$

本課題で用いるのは、日々のUFP濃度と健康アウトカム数を用いた短期曝露影響の関数であるため、 N_0 は日別死亡数を用いた。日別死亡数は対象空港周辺の65歳以上3次メッシュ人口と人口動態調査で得られる65歳以上死亡率の積で求められる年間死亡数を推定したのち、季節変動を考慮したうえで月々の死亡者数を求め、各月をその月内の日数で按分して推定した。日別死亡数 N_0 とPAFの積で得られる日別UFP関連死亡数 N_{UFP} について、3月、7月、11月の和として示した。

将来予測・対策提案

航空需要はCOVID-19の甚大な影響を受けており、本課題申請当初と2023年現在では状況が大きく変化した。ICAO報告書および船舶・航空機排出大気汚染物質の影響把握に関する検討委員会（以下、船舶・航空機委員会）での議論を踏まえて、現時点で想定されるシナリオを設定して将来予測を行った。また、各サブテーマの知見を集約して対策提案を行った。

5. 研究成果

5-1. 成果の概要

エンジン試験

エンジン直下と25 m下流で測定された粒子個数の粒径分布の典型例を図-2.6に示す。運転モード全体で平均すると、エンジンの下流地点P3で観測された粒子個数の粒径分布は、粒径10 nm程度をピークとするほぼ一山の粒径分布であり、成田国際空港の滑走路直近で観測された粒径分布⁶⁾と似ていた。モード径におけるナノ粒子の個数濃度は、エンジン直下よりも25m下流の方が14～47倍高かった。エンジン直下では燃焼排気は希釈装置で8～11倍に希釈され、25 m下流ではバイパスエアーまたは外気によって10～27倍程度に希釈されるため、計算上は25 m下流の方が粒子濃度は低くなるはずだが、現実には逆の結果となった。この結果から、エンジン下流で揮発性粒子が核生成している可能性、またはナノ粒子が主燃焼排気とは異なる場所から排出されている可能性が考えられる。

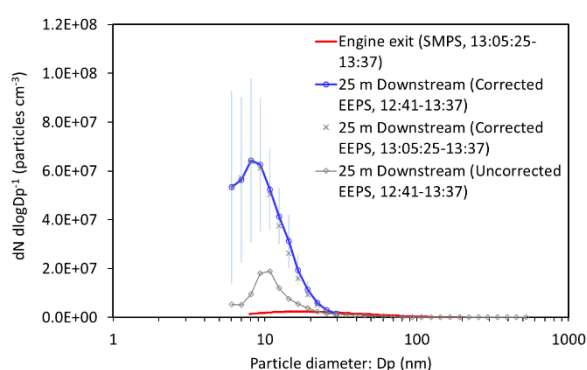


図-2.6. 粒子個数濃度の粒径分布の例（測定日：2021年4月13日、エンジン種：CFM56-7B、全エンジン出力の平均、エンジン直下P1 vs 25 m下流P3）。サブテーマ3での室内実験での検証試験結果に基づきEEPSの結果を補正し、測定・補正誤差範囲を示してある。

TEMによる観察の結果、内部構造と凝集度が異なる5種類の粒子が観察された（図-2.7）。(a)と(b)が、粒子内部にグラファイト様の層状構造が複数確認された粒子であり、(c)(d)(e)がグラファイト様の層状構造が見えない粒子（アモルファス粒子）である。グラファイト様の層状構造をもつ粒子は不完全燃焼で生じた煤粒子であること、およびアモルファス粒子はオイル等の有機物や硫酸塩等を主体とする粒

子であることが示唆されるが、正確な同定・分類は現段階では困難である。このグラファイト様の層状構造をもつ粒子が煤だとすれば、大気観測で得られた最新の知見と整合的である。粒径約10 nm以下のグラファイト様の層状構造をもつ単一粒子やアモルファス粒子は、航空機排気粒子のよいマーカーになる可能性がある。本研究で用いたTEM用の試料採取法・機材は簡易なものであるため、空港周辺での観測などにおいて、TD-GC/MSによるオイルマーカー成分の測定と並び、有効なツールとなり得る。

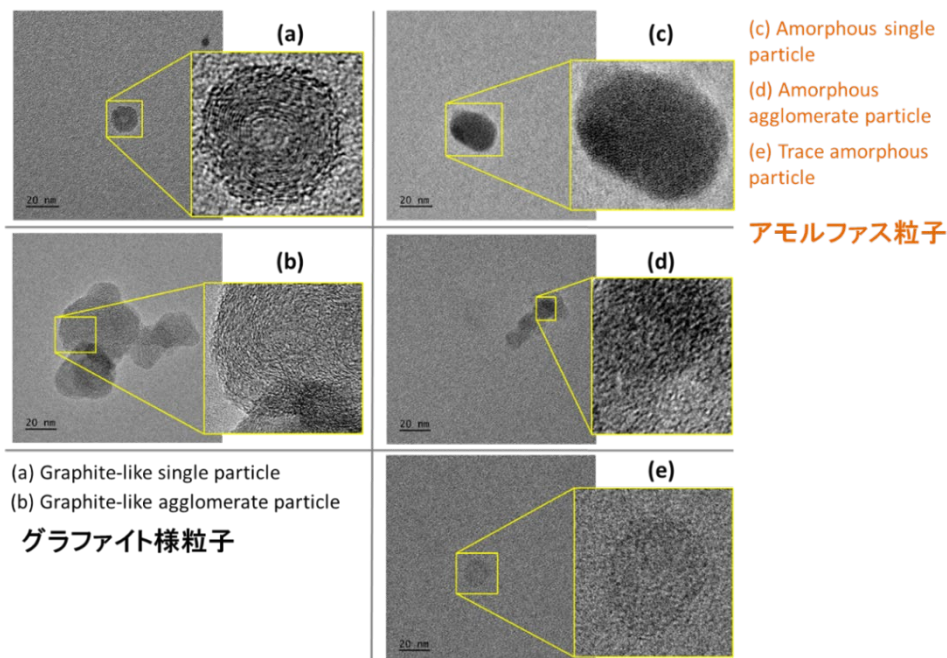


図-2.7. 内部構造と凝集度が異なる5種類のジェットエンジン排気ナノ粒子。(a) グラファイト様の層状構造をもつ単一粒子、(b) グラファイト様の層状構造をもつ凝集粒子、(c) アモルファス単一粒子、(d) アモルファス凝集粒子、(e) 薄像アモルファス粒子。

CFM56-7Bエンジンからの排気総粒子の有機成分分析の結果、エンジン直下P1の排気粒子からオイルに特徴的な成分（脂肪酸エステル、リン酸トリクレジル等、以下「オイルマーカー」）が低濃度に検出され、エンジン下流P3の排気粒子からは、これらのオイルマーカーがP1の約50倍と高濃度に検出された（図-2.11）。同様に、PW4000-100エンジンからのP1排気総粒子からも微量のオイルマーカーが検出され、P3排気総粒子からはその約13倍の強度でオイルマーカーが検出された。また、P1のスモークメーターで採取された総粒子試料の全てからオイルマーカーが検出された。PW4000系エンジンの場合も、オイルマーカー成分の検出強度はCFM56系エンジンに比べると相対的に弱かったが、エンジン直下と25 m下流における測定結果の概要・トレンドは同様であった。以上より、成田国際空港における観測⁴⁾から示唆された、オイルを高濃度に含むナノ粒子が航空機ジェットエンジンから排出されていることを実証できた。

これらのことを統合して、オイルナノ粒子の排出・生成メカニズムを考察する。まず、文献における知見から、ブリーザーベントから排出されたオイルミストがそのまま検出されている可能性は低いことが示唆される。CFM56エンジンの場合には、エンジンの回転軸上からオイルが定常的に排出されているが、排出されたオイルは高温（350～550℃程度と推定）の燃焼排気に取り囲まれるため瞬間的に燃焼または蒸発すると考えられる。その後、下流に進むとバイパスエアーや外気により希釈され速やかに温度が下がるため、その過程でオイル成分を主成分として高濃度のナノ粒子が生成すると考えられる。

サブテーマ1と2が共同で実施したジェットエンジンオイル粒子の発生実験では、実際のエンジンでオイルミストが曝される温度が不明であることから、オイルミストの蒸発温度として250、300、400、600℃を試した。250℃で生成した粒子は実大気で観測された数ベースの揮発特性と化学組成の両方に矛盾しない結果を与えた。この温度は、上記の燃焼排気と外気の混合で説明できることから、ジェットエンジンオイル粒子の核生成によって実環境で観測された特徴を持つ粒子生成が可能であることが示された。

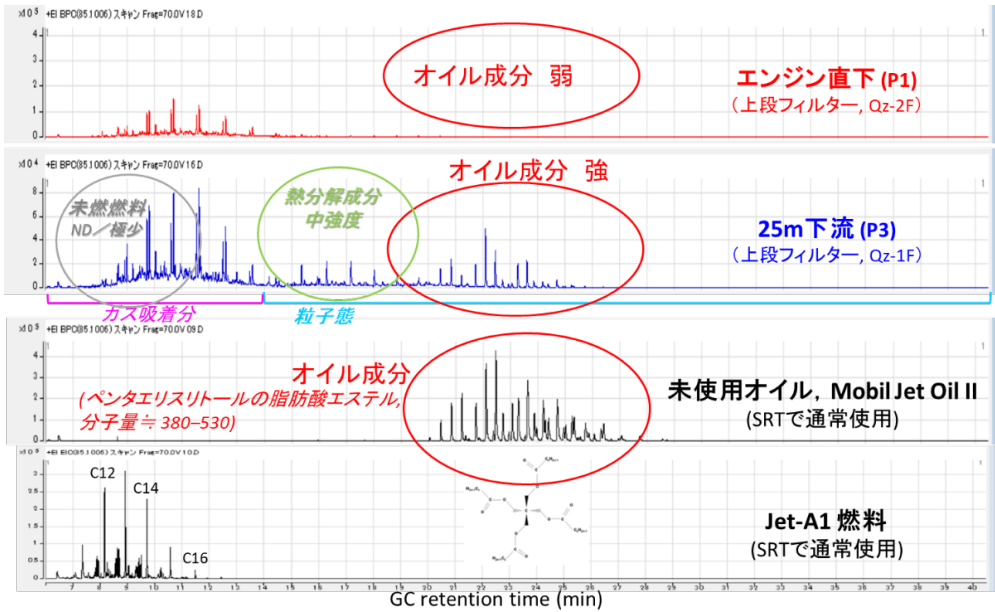


図-2. 11. 排気総粒子と未使用オイル、燃料の炭化水素 (m/z 85.1006) のTD-GC/MSマスキロマトグラム。測定日：2021年4月13日、エンジン種：CFM56-7B。

装置評価および実環境観測 (Takegawa et al., 2023; P.73 研究成果)

産総研で実施した加熱蒸発管の透過率の測定結果を図-3.7に示す。同機に対する2018年（推進費5-1709）における校正では粒径範囲が15 nm以上であったが、今回の校正では最小粒径を5 nmにまで拡張することができたため、計測の不確かさを低減することができた。

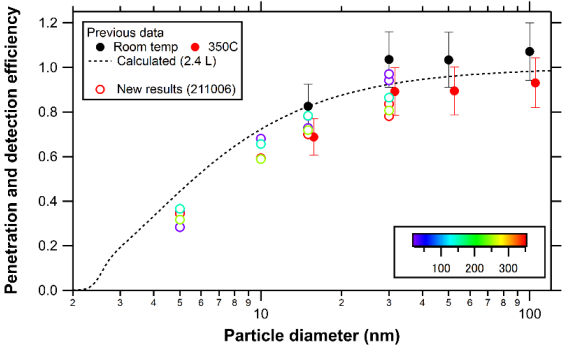


図-3. 7. サブテーマ1 で用いた加熱管・希釈器とUCPCに対する透過検出効率の試験結果。○印（中抜き）の点は今回の結果（粒径 5, 10, 15, 30 nm）、●印（塗りつぶし）は同機を2018年に校正した際の結果（粒径 15, 30, 50, 100 nm）を示す。点の色は加熱温度を表す。破線は2018年校正の結果を拡散沈着及びUCPC検出効率の関数であてはめ、粒径 2.5 nmまで外挿したもの。

成田国際空港で観測された航空機UFPの揮発特性を表-1.1に示す。数粒径分布の幾何平均径（GMD）で分類している。設定温度350℃に対する総粒子残存率が不揮発性粒子の数割合を表し、不揮発性粒子を差し引いた粒子が揮発性粒子を表す。直鎖アルカン粒子を用いた室内実験との比較から、揮発性粒子の約半数が C_{30} と同程度かそれ以下の揮発性を有し、 C_{40} より低い揮発性を持つ粒子は10%程度以下であった。先行研究⁷⁾との比較から、航空機UFPはディーゼル排気粒子より低い揮発性を有すると推定される。

表-1.1. 成田国際空港で観測された粒子の揮発特性。

粒径区分	設定温度	総粒子残存率	揮発性粒子残存率
粒径2.5 nm以上	150°C	0.58	0.53
GMD < 15 nm	250°C	0.15	0.06
	350°C	0.10	0
粒径2.5 nm以上	150°C	0.73	0.50
GMD ≥ 15 nm	250°C	0.49	0.06
	350°C	0.46	0
粒径10 nm以上	150°C	0.55	0.49
GMD < 15 nm	250°C	0.12	0.01
	350°C	0.11	0
粒径10 nm以上	150°C	0.69	0.54
GMD ≥ 15 nm	250°C	0.39	0.11
	350°C	0.31	0

神戸空港における大気観測では、COVID-19の影響により多くの便が運休となっていたが、滑走路からの風向（西南西～南西）が卓越する時間帯が一定程度あったため、航空機排ガスのplumeを捉えることに成功した。神戸空港はBoeing社のB737-800（B738）が多いが、Embraer社のERJ-170-200（E175）も含まれる。機体は観測点の前をタキシングで通過する場合があります、この際に低推力のplumeが観測された。

表-1.2は神戸空港観測から導出された数排出係数と先行研究（ロサンゼルス空港（LAX）⁸⁾およびICAOデータベース⁹⁾）の値を比較したものである。B738のエンジンはCFM56-7B、E175のエンジンはCF34-8と推定された。このうち、統計的にある程度数が得られたCFM56-7Bについて先行研究と定量的に比較した。なお、LAXは離陸時のみ、ICAOは不揮発性粒子のみの比較となる。離陸時の総粒子および不揮発性粒子については、いずれもLAXにおける先行研究と整合的であった。離陸時の不揮発性粒子はICAOデータベースより大きいが桁では一致していた。タキシングの不揮発性粒子はICAOデータベースより1桁以上大きい結果となった。ICAO基準ではタキシングの推力は7%とされているが、実環境では異なる可能性がある。これらはモデル入力値と実環境の乖離を考える上で潜在的に重要である。

表-1.2. 神戸空港で観測された粒子数排出係数。

	事例数	EI ($N_{2.5}$)	EI (N_{10})	LAX	ICAO
<i>CFM56-7B</i>					
離陸, 総粒子	10	83 (53-93)	36 (25-41)	54 (46-62)	N/A
離陸, 不揮発性粒子	7	2.7 (2.0-5.8)	1.3 (1.2-3.8)	1.9 (1.1-3.9)	1.1 (1.0-1.2)
タキシング, 総粒子	3	87, 105, 73	58, 75, 46	N/A	N/A
タキシング, 不揮発性粒子	6	29 (27-32)	6.2 (5.8-7.2)	N/A	0.15 (0.13-0.21)
<i>CF34-8</i>					
離陸, 総粒子	1	35	3.1	38 (20-42)	N/A
離陸, 不揮発性粒子	2	9.4, 2.6	6.5, 2.0	2.1 (1.8-3.3)	1.0 (0.95-1.2)
タキシング, 総粒子	5	43 (40-59)	18 (8.0-19)	N/A	N/A
タキシング, 不揮発性粒子	0	N/A	N/A	N/A	0.005 (0.004-0.006)

数値の単位は 10^{15} kg^{-1} であり、事例数が5以上の場合は中央値と括弧内に25th-75thパーセンタイルを示している。事例数が5未満は全ての推定値を示している。

羽田空港、成田国際空港、福岡空港では、日数は限られていたがモデル検証のための粒子数濃度データを得ることができた。それぞれの観測日の粒子数濃度の下位2パーセンタイルを計算し、複数日あるときはより小さい方をバックグラウンド濃度と仮定した。その値はそれぞれ $5 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ 、 $6 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ 、 $4 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ であり、空港による違いは大きくなかった。福岡空港南側の下月隈緑地において空港の影響が見られた時間帯の平均値（バックグラウンド差引後）は $3 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ であった。羽田空港北側の京浜島つばさ公園（35.57° N、139.77° E）において空港の影響が見られた時間帯の平均値（バックグラウンド差引後）は $4 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ であった。

数値シミュレーション

AEDTの最新バージョンでは不揮発性粒子数が計算可能であるが、実環境との比較や健康リスク評価では総粒子数濃度を指標とするため、推進費5-1709と同様に質量濃度から粒子数濃度に換算する方式とした。羽田空港、成田国際空港、福岡空港のそれぞれについて、質量濃度（ $\mu\text{g m}^{-3}$ ）から数濃度（ cm^{-3} ）への換算係数はそれぞれ 5.7×10^4 、 4.5×10^4 、 4.5×10^4 とした。仮定に伴う不確実性を誤差として考慮した。数濃度換算の誤差は40-60%程度と推定され、最大で1桁程度の不確実性はありうる。

前述の通り、AEDTの設定値には自由度が大きい、追試や再現性評価を考慮して粒子排出係数は既定値を使用した。燃料硫黄分は600 ppm、境界層高度は3000 ftで固定し、24時間平均値を出力した。なお、航空機がゲートで駐機している際に使う電源には地上動力装置（GPU）と補助動力装置（APU）があり、その使用割合は空港レイアウトや運航スケジュールに依存する。APUは航空燃料で作動する小型エンジンであるが、APUからの粒子排出係数のデータは限られている。離陸や着陸に比べると、APUおよびタキシングの排出量推定の不確実要素はかなり大きい。この部分の改善は今後の重要な課題の一つである。

図-0.3に各空港・各月の平均粒子数濃度分布を示す。特に高濃度になっている部分が搭乗ゲート（駐機場）付近であるが、全体として離陸・着陸に比べてゲートの寄与率が高いという結果となった。濃度分布には16方位を強く反映したパターンが見られるが、対象地域の20 km四方内の気象データの分解能が限られており、その影響を受けたものになっている。本研究で行う健康リスク評価では、1 kmメッシュで平均化して中央値を取ることで、空間的な不均一を緩和する方針とした。

前節で述べた空港周辺の観測値と比較すると、福岡空港の観測点（下月隈緑地）に相当するグリッドの平均値は3月、7月、11月の各月でそれぞれ $2.5 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ 、 $4.9 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ 、 $2.6 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ であった。羽田空港では3月、7月、11月の各月でそれぞれ $8.3 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ 、 $6.5 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ 、 $2.1 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ であった。空港周辺の観測データは粒径10 nm以上であり、モデル計算とは時期や平均期間が異なる。また、計算値には粒径下限がなく粒径10 nm以下も含むため注意が必要であるが、観測された平均値と計算値はオーダーでは整合する結果となった。

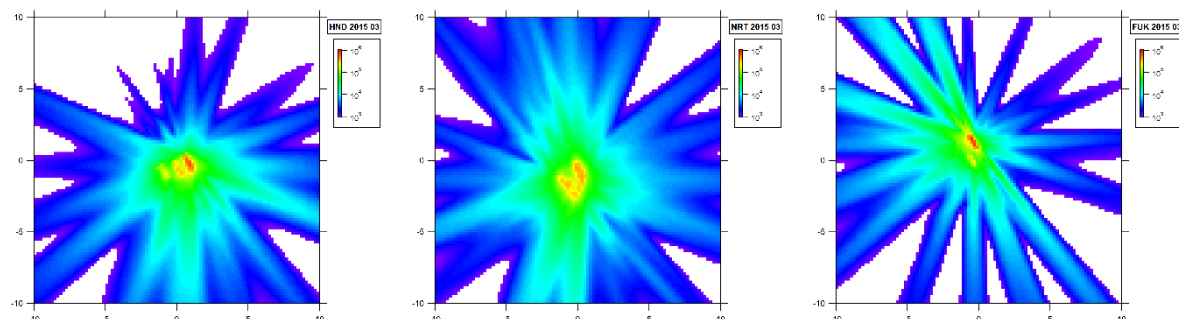


図-0.3. 羽田空港（HND）、成田国際空港（NRT）、福岡空港（FUK）を対象とした数値シミュレーション結果。2015年3月の月平均を表す。縦軸と横軸は任意に設定した空港中心位置からの相対距離（km）を表す。カラースケールは対数であり、 1000 cm^{-3} 以下は白抜きで表示している。本図は図-1.11から一部抜粋したものである。

健康リスク評価（上田ら，2023；P.73 研究成果）

Ohlwein らの2017年までのレビュー論文¹⁰⁾からの情報と、今回の2017～2020年の文献検索から得られた文献のうちOhlweinらのレビューとの重複を除いた42件と合わせて、128件の論文が抽出された。研究対象地域は北米、ヨーロッパ、中国からの研究が多くを占めていた。曝露評価について、短期曝露影響を評価する研究では、測定局での観測値を用いるものが多かった。近年、長期曝露影響を評価するコホート研究が増えてきており、その曝露評価には様々なモデルで空間的な変動を推定しているものが多い。健康アウトカムとして、心血管疾患や呼吸器疾患を対象としたものが多いが、近年では胎児への影響や中枢神経などの健康アウトカムについて検討した報告も散見される。このうち、航空機由来UFPの健康影響に関する疫学論文は4文献であった。

得られた7文献のメタ解析の結果から、UFP-全死亡関数について、粒子数 $10.0 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ あたりの係数 β は 6.4×10^{-3} （標準誤差 2.3×10^{-3} ）であった。死亡リスクの変化率として表すと、UFP濃度が $10.0 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ 増えることにより死亡リスクは0.64%増えることとなる。UFPと循環器疾患死亡および呼吸器疾患死亡とは正の関連が見られたが有意なものではなかった。呼吸器・循環器疾患による入院・受診との関連についても論文を整理した。心血管疾患（心筋梗塞、院外心停止、心血管疾患）との関連について検討した10研究のメタ解析では、粒子数 $10.0 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ あたりの係数 β は0.041（標準誤差 0.019）であった（表-4.2）。一方、呼吸器疾患による入院・受診との関連を検討したものは5研究あったが、年齢によって影響が異なり全年齢、小児・青年、高齢者（65歳以上）での関連はいずれも有意なものではなかった（表-4.2）。以上より、UFPに関連する疾病負荷の推定には全死亡の係数（ 6.4×10^{-3} ）を用いた。

表-4.2. 各アウトカムの健康影響係数（* $p < 0.05$ ）

健康アウトカム	研究数	年齢	健康影響係数 (β)	β の標準誤差
死亡				
すべての原因	16	全年齢	0.0064	0.0023 *
循環器疾患	7	全年齢	0.0334	0.0196
呼吸器疾患	6	全年齢	0.0561	0.0394
入院受診				
循環器疾患	11	全年齢	0.0407	0.0189 *
呼吸器疾患	2	全年齢	0.0291	0.8412
	4	0-18歳	0.0187	0.0100
	2	65歳以上	-0.0054	0.0123

AEDTにより推定された3、7、11月の3か月間の対象地域（各空港の周囲20 km四方、図-0.11参照）の航空機由来UFP濃度の平均値は成田空港が最も高かった（図-4.5上）。しかし、参照濃度 $5.0 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ を超える航空機由来UFPに曝露される住民の人口（同地域の全人口に対する割合）は、福岡空港が人数・割合とも最大であった（図-4.5下）。また、人口加重平均UFP濃度はそれぞれ $3.5 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ 、 $5.1 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ 、 $6.4 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ となり、人への曝露濃度は、福岡、成田、羽田空港の順に高かった（表-4.3）。空港周辺に居住する住民への曝露状況は、大気中のUFP濃度分布だけでなく、人口分布とも関わる。福岡空港周辺は比較的人口密集地に囲まれている。一方、羽田空港の西側は人口密集地であるが、東および南側は海に面している。その結果、羽田空港周囲の人口加重UFP濃度は福岡空港より小さくなったと考えられる。

2015年3、7、11月の3か月間における航空機由来UFPの関連死亡数は、羽田、成田、福岡空港で、それぞれ約9人、1人、11人であった（表-4.3）。同期間のPM2.5関連死亡数と比較すると、いずれの空港も、 X_0 が $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ の場合よりも小さかったが、成田、福岡空港のUFP関連死亡数は、 X_0 が $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ の場合のPM2.5関連死亡数と同程度であった。航空機からはUFPだけでなくPM2.5も排出されるため、航空機由来PM2.5濃度を用いて関連死亡数を算出したが、ほとんど寄与はなかった。これらの結果より、UFP曝露と死亡との因果関係があると仮定すれば、航空機UFP曝露による死亡への影響はPM2.5より小さいものの、無視できないと考えられた。

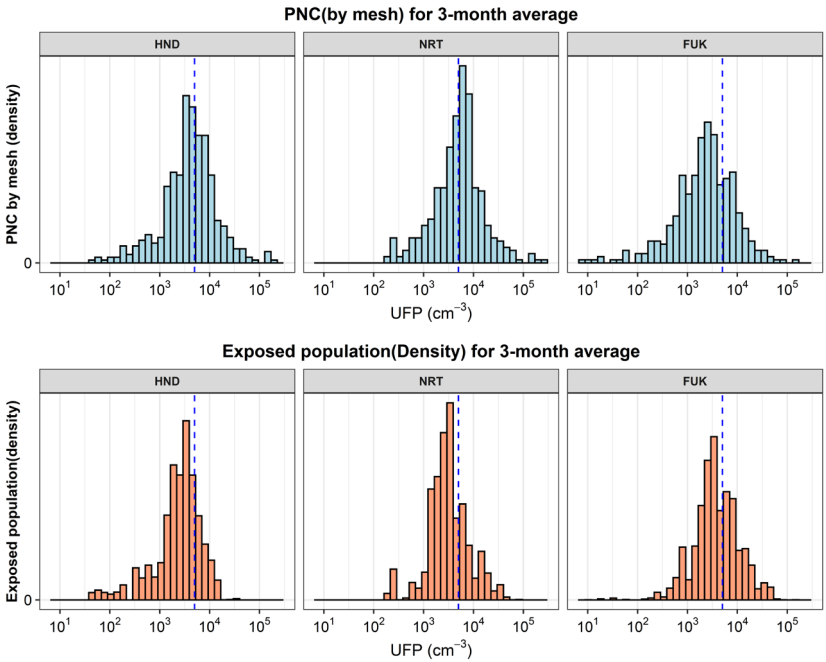


図-4.5. 羽田、成田、福岡空港における3か月（3、7、11月）の平均UFP濃度（上）とUFPへの曝露人口（下）の密度分布。破線は $5.0 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ を示す。

表-4.3. 羽田、成田、福岡空港におけるUFP健康リスク評価（2015年3、7、11月の3か月間）

	羽田空港	成田空港	福岡空港
航空機由来 UFP 濃度 (counts/cm ³)			
平均濃度 (counts/cm ³)	7.0×10^3	10.2×10^3	5.3×10^3
人口加重濃度 (counts/cm ³)	3.5×10^3	5.1×10^3	6.4×10^3
PM2.5 平均濃度 (μg/m ³)	16.1	11.5	15.0
関連死亡数 ¹			
航空機由来 UFP 関連死亡数 (X ₀ =0/cm ³)	9.2 (2.8, 15.6)	1.3 (0.4, 2.3)	10.8 (3.2, 18.3)
PM2.5 関連死亡数 (X ₀ =5 μg/m ³)	58.2 (40.5, 71.4)	3.7 (2.5, 4.5)	38.4 (26.7, 47.1)
PM2.5 関連死亡数 (X ₀ =15 μg/m ³)	21.0 (14.6, 25.7)	0.7 (0.5, 0.9)	11.7 (8.1, 14.3)
(参考)			
Background UFP による UFP 関連死亡数 (5000/cm ³ を仮定、X ₀ =0/cm ³)	13.0 (3.9, 22.3)	1.4 (0.4, 2.4)	9.6 (2.8, 16.4)
航空機由来 PM2.5 関連死亡数 (X ₀ =0 μg/m ³)	0.3 (0.2, 0.4)	0.1 (0.0, 0.1)	0.5 (0.3, 0.6)
人口と死亡数			
対象地域の人口（全年齢）	2,365,238	219,964	1,756,153
対象地域の人口（65歳以上）	485,700	51,286	355,823
65歳以上の死亡数推定（年間）	4,096	433	3,001

¹括弧内の数字は95%信頼区間を表す。

本課題では、既存の疫学知見を用いて航空機由来関連死亡数を推定したが、多くの仮定を基に推定しているため、大きな不確実性がある。たとえば、UFPと死亡との関連について検討した研究はすべて都市大気のUFPを対象としており航空機以外の様々な発生源で、おもに自動車排ガス由来であると思われる。航空機由来UFPは異なる成分組成を持ち、もし毒性に違いがあれば、その影響を過大（過小）評価することになる。また、本課題では日々のUFP濃度と日死亡との関連を検討した短期曝露影響の関数を用いた。PM2.5関連死亡数についても短期曝露影響の関数を用いたため、UFPとPM2.5の比較は妥当と思われる。しかし、短期曝露影響は動脈硬化の促進など慢性の影響を評価することはできないため、今回の疾病負荷

評価で得られたUFP関連死亡数は実際のUFPの健康影響より過小評価している可能性もある。さらに、いくつかの疫学研究では、UFPと死亡との関連についてPM2.5による交絡が調整されていない。UFPとPM2.5やNO₂など共存汚染物質の相関関係は地域の発生源により異なるため、さらなる疫学研究が望まれる。

将来予測・対策提案

【エンジンの観点】

船舶・航空機排出大気汚染物質の影響把握に関する検討委員会（以下、船舶・航空機委員会）の令和4年度報告書¹¹⁾で示されたシナリオでは、2020年以降に徐々にICA0規制対応エンジンに移行し、2030年で半分、2050年で全て置き換わる想定になっている。航空機需要については、COVID-19の甚大な影響があった2019-2022年が特例的であるため、その直近年として2018年を基準とした。船舶・航空機委員会の議論に従って、予測A（3.3%/年の成長率）と予測B（2018年以降横ばい）を想定した。また、日本の航空需要は世界の航空需要の変化に比例するものとし、人口と死亡数は2015年の数値を用いた。

サブテーマ4の成果に基づいて推定した健康リスク変化と合わせた将来予測を表-1.3に示す。エンジン規制により、未規制の場合に比べて不揮発性粒子の削減は見込めるものの、モデル計算では不揮発性粒子の数割合を1-2%と仮定しているために削減効果が弱められ、予測Bではほぼ横ばいとなった。また、予測Aでは航空需要の伸びによる増加分がエンジン規制による減少分を打ち消す結果となり、全体としては大幅に増える結果となった。総粒子の抜本的な削減には、サブテーマ2で得られた知見に基づきジェットエンジンオイル粒子排出減を併せて考えることが重要である。

スイスのエンジン技術者らとの意見交換等によって、エンジンオイルの回収・分離システムの最終段階で、オイルの蒸気やミストを含む可能性のある気体が、CFM56系エンジンではエンジンの回転軸の延長線上のブリーザーベントポートから排気され、PW4000系エンジンではエンジン下方のバイパスエアー中に排気されることが分かった。このため、ブリーザーベント手前の遠心分離機の改良等でオイルの排出量を減らすか、またはオイルの排出先を変更できれば、排出粒子数を大幅に減らせる可能性がある。上記改造に係るコストは未調査であるが、エンジン技術者との意見交換を踏まえたものであるため、実現に向けて検討する価値はあると考えられる。

表-1.3. ICA0規制に伴う粒子数濃度および健康リスク変化の予測

時期	規制未対応機種 の割合	健康リスク指標（航空機UFP関連死亡数） ¹					
		羽田空港 (2015年： 9.2)		成田国際空港 (2015年： 1.3)		福岡空港 (2015年： 10.8)	
		予測A ²	予測B ³	予測A	予測B	予測A	予測B
2030年	0.5	14.2	9.6	2.0	1.4	16.7	11.3
2050年	0	27.2	9.6	3.8	1.3	31.7	11.2

¹ 対象地域の3、7、11月の3ヶ月間における航空機由来UFPの関連死亡数。健康リスク指標の誤差はUFP数濃度に起因するものだけで少なくとも40-60%あると推定される。

² 航空機需要が成長率3.3%/年（基準2018年）。³ 航空機需要が横ばい（基準2018年）。

【燃料の観点】

COVID-19により世界経済が大きく変化したこと、2022年に航空業界の脱炭素化のためのSAFの導入促進が国際会議で採択されたことから、航空燃料を取り巻く状況は大きく変化しつつある。SAF価格は総じて従来燃料よりも数倍高いと予測されているが、2050年までにコストが下がると見込まれている¹²⁾。SAF導入による粒子削減効果は現在研究が進められているが、ジェットエンジンオイルは燃料に関わらず使用されるため、エンジンの場合と同様に燃料による総粒子の削減効果は限定的かもしれない。

一方で、HEFAとJet Aの混合燃料によって上空の粒子排出が減少する¹³⁾、あるいは従来燃料Jet AはHEFAに比べてアイドリング時の不揮発性粒子の毒性が高い¹⁴⁾という報告もあり、便益を判断する上では粒子

毒性も考慮する必要がある。毒性のメカニズムは不確実であるが、サブテーマ2で見出された粒子表面構造（グラファイト様、アモルファス）に起因する可能性もあり、今後も継続的に測定を行って粒子形態の変化を把握することが重要である。数値シミュレーションでは、搭乗ゲート付近における粒子排出が少なくとも局所的には大きい可能性が示唆されたが、ゲートでの航空燃料由来の排出はAPUまたはアイドリングによるものである。SAFは将来的に見てもコスト高が続くことが予想されるため、SAFを導入した上で、再生可能エネルギーを活用した地上電源GPUの拡充によりアイドリング時間を減らすことは、コスト低減と健康リスク低減に効果が高いと考えられる。

【モニタリング】

航空機に関わる国際情勢は不確実性が大きく、数年先であっても正確な予測は難しいと言わざるを得ない。効果的な対策を講じるには、継続的にモニタリングを行って的確に変化を把握することが必要である。航空機UFP数濃度の実態把握においては既存の常時監視データでは不十分であり、携帯型CPC等を用いた数濃度の推定が必要である。また、濃度の絶対値だけでなく排出係数を把握する上では、本研究で実施したようなCO₂濃度との同時測定が有用である。燃料消費量に対するCO₂排出量（排出係数）はよく分かっているので、UFPとCO₂の同時測定データからUFP排出係数の推定が可能である。CO₂分析計も小型かつ低消費電力であるため、携帯型CPCと併用しても場所や電力の問題は小さい。

滑走路近傍でのモニタリングは保安上の問題が大きいが、空港敷地内の搭乗ゲート付近の建屋であれば実現可能と考えられる。エンジン規制やSAF導入の効果が現れるまでには長期間かかると見込まれる。ここで提案するUFPとCO₂のモニタリングは、コストや安全性を加味しても十分に現実的なものになると期待される。さらに、粒子サンプリング・粒子形態観察等を定期的に併用することで情報は大幅に増える。今後2050年までに予想される変化を監視するための持続性のある取組として検討すべき課題であると考えられる。

5-2. 環境政策等への貢献

＜行政等が既に活用した成果＞

環境省の「船舶・航空機排出大気汚染物質の影響把握に関する検討委員会」に、研究代表者・サブテーマ1代表の竹川とサブテーマ2代表の伏見が委員として出席している。当該検討委員会で、本推進費課題の進捗状況や研究結果を報告した。

＜行政等が活用することが見込まれる成果＞

国際的な規制動向への対応：スイスの研究協力者であるDr. Julien Anet とDr. Lukas Durdinaは、SAE-E31（Society of Automotive Engineersの航空機排ガス測定に関する委員会）の正式メンバーであり、竹川、伏見、および研究協力者の齊藤は当委員会のオブザーバーである。既に当該委員会で研究成果を発信しており、今後も継続的に情報発信することで行政へのフィードバックが期待される。

航空機UFPリスク評価と効果的対策の提案：国際的には航空機UFPの健康影響に関心が集まる一方で、国内ではUFPの広域観測や疫学研究がほとんど行われていない。本研究で得られた知見はUFPの健康リスクを評価する上での重要な基盤となる。

UFPモニタリングに関する指針：航空機UFPの健康リスク評価を行う上で、空港周辺を中心として携帯型の装置を用いた面的なモニタリングを行うことが重要になると考えられる。本研究で得られた成果は、今後のUFPモニタリングや精度保証についての指針を与えるものである。

5-3. 研究目標の達成状況

全体目標	目標の達成状況
エンジン試験、実環境観測、数値シミュレーション、健康リスク解析を系統的に連携させて、国内主要空港とその周辺における航空機由来の超微小粒子状物質（UFP：粒径100 nm以下）の健康リスク評価と、将来の対策提案を行うことを目標とする。具体的には、現状における健康リスクの評価、および航空機に関する技術革新（新規エンジン・燃料の導入、ジェットエンジンオイル回収機構の改良など）による健康リスク改善効果の評価を行う。さらに、これらに付随するコストの推定を行うことで、費用対効果を考慮した対策提案を行うことを目指す。	<u>目標どおりの成果をあげた。</u> 各サブテーマの連携により、スイスにおけるエンジン試験、神戸空港等における実環境観測、羽田・成田・福岡空港を対象とした数値シミュレーション、および文献レビューに基づく健康リスク評価を実施した。また、国際民間航空機関（ICAO）のエンジン規制に伴う将来予測や持続可能な航空燃料（SAF）の動向調査に基づき、特にジェットエンジンオイル粒子に着目した対策提案を行った。COVID-19による影響もあり、国際誌論文等の成果発表についてはやや遅れているため、研究終了後も継続的に取り組む必要があると考えている。
サブテーマ1 目標	目標の達成状況
神戸空港を中心とした実環境UFP測定と、航空機専用モデル（AEDT）による数値シミュレーションに基づき、従来困難であった航空機離着陸サイクル（アイドリング、離陸、着陸等）に応じたUFP排出・拡散過程を評価する。検証されたモデルを用いて、国内主要空港とその周辺におけるUFP濃度分布・健康リスク評価および対策提案をまとめる。	<u>目標どおりの成果をあげた。</u> サブテーマ2および3と連携して神戸空港観測や数値シミュレーションを実施し、サブテーマ4と連携して健康リスク評価を実施した。また、シナリオを想定して将来予測を行った上で、ジェットエンジンオイル粒子の寄与など本研究に特徴的な成果に基づいて対策提案を行った。当初目標とした研究内容は概ね達成したと自己評価できる。
サブテーマ2 目標	目標の達成状況
海外研究機関（スイス）と連携して航空機ジェットエンジン試験を行い、化学成分分析等に基づき、粒子の排出・生成メカニズムを解明する。特に、世界的に知見がごく限られているジェットエンジンオイル起源ナノ粒子の排出箇所や生成過程を明らかにし、粒子排出抑制方策を提案することを目指す。	<u>目標どおりの成果をあげた。</u> 全体としては当初計画と同程度の水準の研究成果が達成できた。また、申請当初計画にはなかったTEM粒子観察に関しては想定以上の成果が得られた。主たる研究内容が海外との共同研究であったことが影響し、成果発表に関しては当初計画より半年程度遅れる見込みである。
サブテーマ3 目標	目標の達成状況
国際規制と関連付けてサブテーマ1と2で用いる計測法の評価を行う。特に、産総研の有する高精度な粒子計測技術や試験粒子発生技術を駆使して、健康影響が懸念される不揮発性粒子（煤）測定法の信頼性を評価する。	<u>目標どおりの成果をあげた。</u> サブテーマ1と2で用いた計測器に対し、目的に応じたテスト粒子を用いて試験・校正を行い、サブテーマ1では想定通りの測定性能が得られていることの確認、サブテーマ2では測定誤差を低減するための補正係数の導出を行った。
サブテーマ4 目標	目標の達成状況
UFPを含む大気汚染物質の毒性・疫学調査に関する文献情報を統合し、UFP個数濃度を用いた曝露－健康アウトカム関数を構築する。航空機排気粒子の物理・化学特性を考慮することで、航空機UFPに関する総合的な健康リスク評価方法を新たに開発する。	<u>目標どおりの成果をあげた。</u> UFPに起因する死亡についての健康影響関数を構築し、サブテーマ1より提供されたUFP濃度情報をもとに疾病負荷を推定した。UFPによる健康リスク評価の方法を開発するとともに、リスク評価に関わる不確実性も含めた課題を明らかにした。

参考文献

- 1) ICAO Environmental Report, 2022, <https://www.icao.int>.
- 2) 中村 寛治, カラー図解でわかるジェットエンジンの科学, ISBN-13: 978-4797363739, 2013.
- 3) Society of Automotive Engineers, 2018
(<https://saemobilus.sae.org/content/ARP6320/#scope>).
- 4) Fushimi, A., et al., Atmos. Chem. Phys., <https://doi.org/10.5194/acp-19-6389-2019>, 2019.
- 5) World Health Organization, 2021, <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>.
- 6) Takegawa, N., et al., Atmos. Chem. Phys., <https://doi.org/10.5194/acp-21-1085-2021>, 2021.
- 7) Sakurai, H., et al., Atmos. Environ., 37, 1199–1210, 2003.
- 8) Moore, R. H., et al., Sci. Data, 4, 170198, 2017.
- 9) ICAO Aircraft Engine Emissions Databank,
<https://www.easa.europa.eu/en/domains/environment/icao-aircraft-engine-emissions-databank>.
- 10) Ohlwein, S., et al. Int. J. Public Health, <https://doi.org/10.1007/s00038-019-01202-7>, 2019.
- 11) 船舶・航空機排出大気汚染物質の影響把握に関する検討委員会 令和4年度報告書, (株)環境計画研究所.
- 12) Clean Skies for Tomorrow: Sustainable Aviation Fuels as a Pathway to Net-Zero Aviation, In Collaboration with McKinsey & Company, November 2020.
- 13) Moore, R. H., et al., Nature, 543, 411–415, 2017.
- 14) Jonsdottir, H. R., et al., Commun. Biol., 2, 90, 2019.

6. 研究成果の発表状況

6-1. 査読付き論文

<件数>

1件

<主な査読付き論文>

- 1) Takegawa, N., A. Nagasaki, A. Fushimi, Y. Fujitani, Y. Murashima, and H. Sakurai, Volatility of aircraft exhaust ultrafine particles inferred from field measurements at Narita International Airport, Atmos. Environ., 292, 119391, 2023 (IF: 5.755; 2023年5月1日時点).

(参考) 投稿中または準備中の論文

- 1) (投稿中) Takegawa, N., Field observations of aircraft takeoff and taxiing plumes: A case study at Kobe Airport, Japan.
- 2) (準備中) Fushimi, A., Fujitani, Y., Durdina, L., Anet, J. G., Spirig, C., Edebeli, J., Roth, M., Sakurai, H., Murashima, Y., Saitoh, K., Takegawa, N., Significance of 10 nm single graphitic and amorphous particles emitted from in-use aircraft turbo-fan jet engines.
- 3) (準備中) Fushimi, A., Saitoh, K., Durdina, L., Anet, J. G., Spirig, C., Edebeli, J., Fujitani, Y., Takegawa, N., Formation mechanism of lubrication-oil-rich nanoparticles from in-use aircraft turbo-fan jet engines.

6-2. 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

6－3．その他発表件数

査読付き論文に準ずる成果発表	0件
その他誌上発表（査読なし）	3件
口頭発表（学会等）	15件
「国民との科学・技術対話」の実施	3件
マスコミ等への公表・報道等	0件
本研究費の研究成果による受賞	1件
その他の成果発表	6件

7．国際共同研究等の状況

サブテーマ2のジェットエンジン試験は、国際共同研究としてスイス Zurich University of Applied Sciences のDr. Julien Anet、Dr. Lukas Durdina らの協力を得て、スイスのチューリッヒ国際空港内のエンジン関連施設で行った。また、サブテーマ2代表の伏見がSAE-E31委員会で成果発表を実施し、粒子生成メカニズム等に関して意見交換を行った。

8．研究者略歴

研究代表者

竹川 暢之

東京大学理学部卒業、博士(理学)、現在、東京都立大学 理学研究科 教授

研究分担者

1) 三澤 健太郎

東京工業大学理工学研究科修了、博士(理学)、現在、東京都立大学 理学研究科 助教

2) 伏見 暁洋

横浜国立大学大学院工学研究科修了、博士(工学)

現在、国立環境研究所 環境リスク・健康領域 主幹研究員

3) 藤谷 雄二

北海道大学大学院工学研究科修了、博士(工学)

現在、国立環境研究所 環境リスク・健康領域 主幹研究員

4) 桜井 博

米国ペンシルベニア州立大学大学院理学系研究科卒業、Ph. D.

現在、産業技術総合研究所 物質計測標準研究部門 粒子計測研究グループ長

5) 村島 淑子

東京大学大学院理学系研究科修了、修士(理学)

現在、産業技術総合研究所 物質計測標準研究部門 粒子計測研究グループ 研究員

6) 上田 佳代

北海道大学医学部卒業、医学博士、現在、北海道大学医学研究院 教授

Ⅱ．成果の詳細

Ⅱ－１ 実大気観測と数値シミュレーションに基づく空港周辺の粒子拡散評価と対策提案

東京都立大学

大学院理学研究科 化学専攻

大学院理学研究科 化学専攻

竹川 暢之

三澤 健太郎

〔要旨〕

数値モデル（AEDT）を用いた航空機由来の超微小粒子状物質（UFP）計算の精緻化・検証のための実大気観測データを取得すること、国内の主要空港を対象に数値シミュレーションを行うこと、各サブテーマの知見を統合して将来の対策提案を行うことを目的として研究を実施した。神戸空港における実大気観測に先立ち、揮発性・不揮発性粒子の分類のための加熱蒸発管の性能評価をサブテーマ3と連携して行った。また、推進費5-1709で実施した成田国際空港における観測データの追加解析を行い、実環境中の航空機UFPの揮発特性について調べた。さらに、サブテーマ2の成果よりジェットエンジンオイルが揮発性粒子の主要な発生源であることを踏まえ、その生成メカニズムに関する知見を得るために、実験室においてエンジンオイル粒子の生成・評価実験を行った。これらの一連の研究により、ジェットエンジンオイル粒子の蒸発・核生成によって実環境で観測された揮発特性と化学組成の特徴を併せ持つ粒子生成が可能であることが示された。次に、AEDTを用いてUFPの拡散計算を行うための準備を行った。羽田空港、成田国際空港、福岡空港を対象として、2015年3、7、11月を基準として計算を行った。計算されたUFP濃度には大きな不確実性があるものの、各空港の周辺において取得されたUFP数濃度とオーダーでは一致する結果となった。これらの計算結果に基づいてサブテーマ4と連携しながら健康リスク評価を実施した。また、将来の排出シナリオを仮定して国際民間航空機関（ICAO）のエンジン規制の効果を評価するとともに、近年国際的に関心が高まっている持続可能な航空燃料（SAF）の動向やコストの見通しについて調査を行った。以上の成果は、COVID-19後の急変する国際航空情勢に対応するための科学的基盤になると期待される。

1．研究開発目的

研究プロジェクト全体では、国際的な規制動向と関連付けながら、エンジン試験、実環境観測、数値シミュレーション、健康リスク評価を連携させ、数値シミュレーションに基づいて航空機由来の超微小粒子状物質（UFP）の健康リスク評価と将来の対策提案（コスト含む）を行うことを目的とする。サブテーマ1では、数値モデル（AEDT）の精緻化・検証のための実大気観測データを取得すること、国内の主要空港を対象に数値シミュレーションを行うこと、各サブテーマの知見を統合して将来の対策提案を行うことを目的とする。

2．研究目標

神戸空港を中心とした実環境UFP測定^(注)と、航空機専用モデル（AEDT）による数値シミュレーションに基づき、従来困難であった航空機離着陸サイクル（アイドリング、離陸、着陸等）に応じたUFP排出・拡散過程を評価する。検証されたモデルを用いて、国内主要空港とその周辺におけるUFP濃度分布・健康リスク評価および対策提案をまとめる。

^(注)神戸空港における観測時期や規模については、新型コロナウイルス（COVID-19）の状況に応じて関係者と慎重に協議する。やむを得ず日程や規模の大幅な変更がありうる場合については、環境省およびERCAと事前に相談を行う。

3. 研究開発内容

大気観測装置の評価（粒子揮発特性の評価）、神戸空港における大気観測、羽田・成田・福岡空港における簡易観測、数値シミュレーション、将来予測・対策提案の項目別に説明する。

粒子揮発特性の評価（Takegawa et al., 2023; 研究成果 P. 73）

神戸空港における実大気観測では、推進費5-1709と同様に加熱蒸発管を用いた揮発性の粒子数測定が鍵となるため、その測定の妥当性評価が重要となる。実験室において直鎖アルカン粒子を用いた加熱蒸発管の性能評価を行い、加熱温度と粒子揮発特性の関係を調べた。航空機排ガスの不揮発性粒子測定のSAE国際規格では、揮発性粒子の除去効率評価に炭素数40の直鎖アルカン（テトラコンタン：C₄₀）が用いられている¹⁾。本研究では、揮発特性の参照物質として、国際規格のC₄₀以外に炭素数30のトリアコンタン（C₃₀）を用いた。アルカン粒子は試薬を加熱して蒸気を生成した後に急冷することで凝縮法により生成した。粒子は電気移動度分級器（DMA）で分級後に加熱管に導入し、粒子数濃度をTSI社の超微小凝縮粒子カウンタ（UCPC3776; 粒径2.5 nm以上）と凝縮粒子カウンタ（CPC3771; 粒径10 nm以上）で測定した。加熱管を通す流路と通さない流路の測定値を比較することで、粒子数残存率 F を推定した。さらに、上記の室内実験に基づき推進費5-1709で実施した成田国際空港における観測データの追加解析を行い、実環境中の航空機排気粒子の揮発特性について調べた。

一方、推進費5-1709において成田国際空港で採取した試料の化学成分分析から、航空機排ガスのUFPの主成分としてジェットエンジンオイルが重要であることが示されている²⁾。すなわち、航空機UFPの生成過程・排出係数を考える上でジェットエンジンオイルの動態が鍵となる。成田国際空港の追加解析により得られた数ベースの粒子揮発特性（後述）と、サブテーマ2による化学成分の特徴²⁾を同時に説明することが可能かどうかを調べるために、実験室においてジェットエンジンオイル粒子の生成実験を行った。ジェットエンジンオイルには、世界シェアが最も大きいMobil社のJet Oil IIを用いた³⁾。Mobil Jet Oil IIのバルク物性は引火点が270℃、自然発火点が404℃である⁴⁾。熱重量-示差熱分析を行った結果、300℃付近で急激な質量変化が観察されたが、これは上記の物性と整合的である。混合物であるオイル粒子は通常の凝縮法で生成すると粒子組成に偏りが生じる可能性がある。このため、ネブライザでオイル液滴を生成した後に、石英管で加熱して液滴を全蒸発させて凝縮法により生成した。生成した粒子をDMAで分級して揮発特性を評価するとともに、インパクタを用いて石英フィルター上に粒径別に試料捕集してサブテーマ2による化学成分分析を行った。

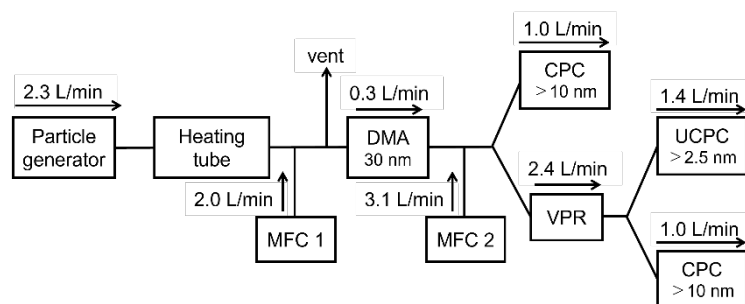


図-1.1. ジェットエンジンオイル粒子の揮発特性評価のための実験構成図。

神戸空港における大気観測

神戸空港における大気観測は、車載型の装置を用いて2021年5月24～30日および10月24日～11月3日に実施した（図-1.2）。前述の通り、加熱管の有無を切り替えて揮発性・不揮発性の粒子数濃度を測定した。神戸空港は誘導路および滑走路と敷地境界が近いため、離着陸サイクルに応じた排出特性が測定可能である。2020年度に比べて2021年4月後半から大阪・兵庫におけるCOVID-19が急速に拡大したことから、観測の実施について不確実性が大きかった。この状況を勘案し、リスク回避の観点から、観測を春季と秋季に分割して行うこととした。電力については仮設電源を用いる選択肢もあったが、COVID-19

で急な予定変更も想定されたため、ハイブリッド車から供給する仕様とした。観測点と滑走路および誘導路との距離はそれぞれ290 mおよび110 mであった。

加熱・非加熱の粒子数濃度測定には推進費5-1709と同様にTSI社の超微小凝縮粒子カウンタ（UCPC3776；粒径2.5 nm以上）と凝縮粒子カウンタ（CPC3771；粒径10 nm以上）を使用した⁵⁾。また、非加熱の粒子数濃度の測定にTSI社CPC3007（>10 nm）を使用し、非加熱の粒径分布の測定にはTSI社NanoScanを用いた。図-1.3に粒子測定装置の概念図を示す。

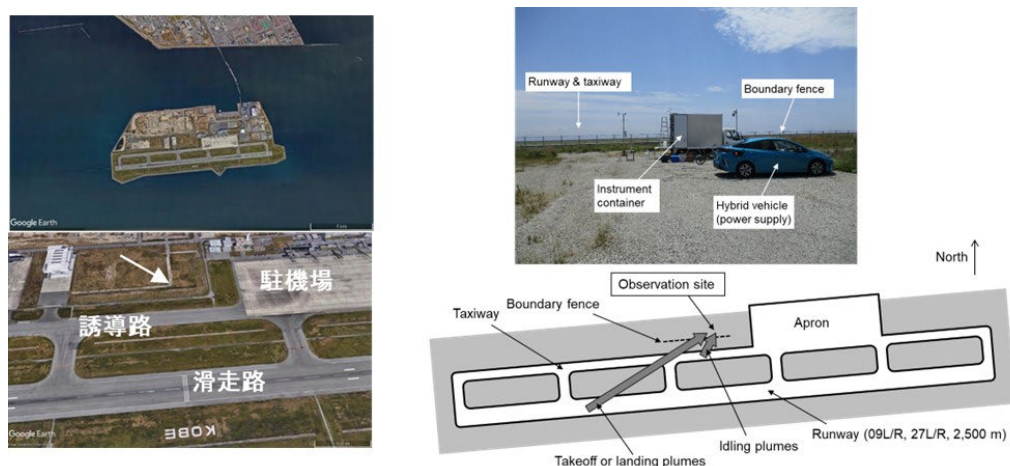


図-1.2. 神戸空港のレイアウトと観測点（地図上の白矢印）の位置関係。地図はGoogle Earthで作成。

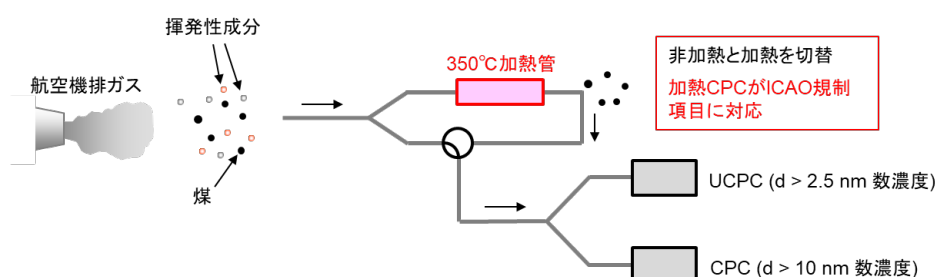


図-1.3. 神戸空港観測で用いた粒子計測装置の概念図。

羽田、成田、福岡空港における簡易観測

数値シミュレーションの検証データを得るために、羽田空港、成田国際空港、福岡空港の周辺で携帯型CPC 3007を用いた粒径10 nm以上の総粒子数濃度の測定を実施した。CPC 3007の性能についてはサブテーマ3において評価を行っている。羽田空港については2022年3月7日と10日および2023年2月18日と19日に実施したが、2022年はCOVID-19行動制限の影響で便数が大幅に減っていたため、検証に資するデータが得られなかった。成田国際空港については2023年3月7日と9日に実施したが、行動制限がないにもかかわらず平時より便数が大幅に少なかったため、バックグラウンド濃度の取得のみ行った。福岡空港については2022年9月26、27、28日に実施した。

数値シミュレーション

数値シミュレーションには、米国連邦航空局（FAA）によって開発されたシミュレーションモデルであるAEDT（Aviation Environmental Design Tool）を用いた⁶⁾。AEDTは航空機エンジンをはじめとした、飛行場内の主要な発生源から排出される大気汚染物質の排出量、及び飛行場の濃度分布を予測可能であり、EUROCONTROLの排出データを組み込んでいる。AEDTでは航空機の粒子排出係数を任意に設定すること

も可能であるが、複雑な設定にした場合に追試や再現性評価が困難となるため、既定値を利用した。

本研究では、羽田空港、成田国際空港、福岡空港を対象とした。リスク評価に用いるメッシュ人口は2015年であるため、計算は同年の3月、7月、11月で実施した。計算範囲は20 km×20 km、計算の空間分解能は100 m (200×200メッシュ) とした。発生源は航空機のみとし、バックグラウンドはゼロと仮定した。図-1.4にモデル内における各空港のレイアウト設定を示す。2015年3月の各空港の離発着数は、羽田空港が約1200回/日、成田国際空港が約570回/日、福岡空港が約450回/日であった。羽田の便数は福岡の3倍近くあるが、羽田の滑走路が4本あるのに対して、福岡は1本で運用しており、単純に滑走路1本あたりで考えると福岡空港の方が過密である。また、福岡空港は羽田空港や成田国際空港に比べて大都市部により近接しているという特徴がある。

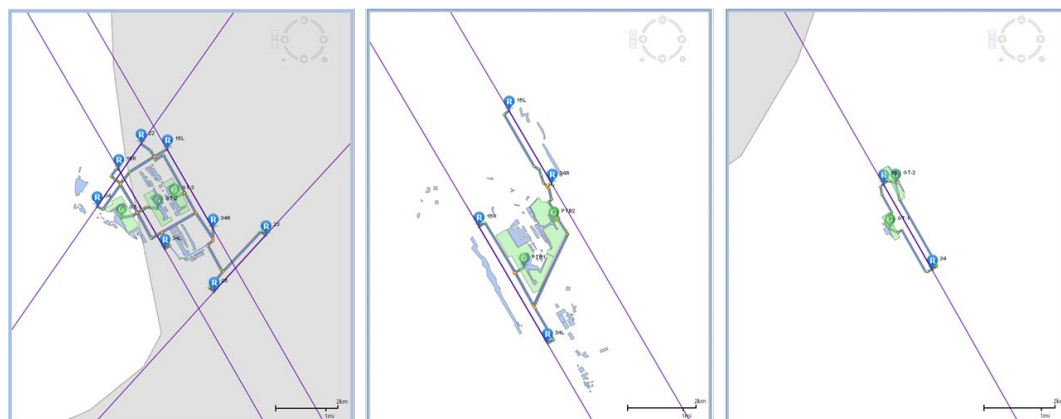


図-1.4. 数値モデルAEDTにおける羽田空港、成田国際空港、福岡空港の設定。スケールバーは2 km。

将来予測・対策提案

航空需要はCOVID-19の甚大な影響を受けており、本課題申請当初と2023年現在では状況が大きく変化した。ICAO報告書および船舶・航空機排出大気汚染物質の影響把握に関する検討委員会（以下、船舶・航空機委員会）での議論を踏まえて、現時点で想定されるシナリオを設定して将来予測を行った。また、各サブテーマの知見を集約して対策提案を行った。

4. 結果及び考察

粒子揮発特性の評価 (Takegawa et al., 2023; 研究成果 P. 73)

図-1.5に加熱管温度 (T_{tube}) に対するアルカン粒子の数残存率 F を示す。実験は粒径30および50 nmで実施したが、ここでは航空機排ガスにおいて重要な30 nmのみ示して説明する。観測データをSigmoid関数によりフィッティングし、 F 値が0.5となる温度 T_{50} を導出した。CPC検出可能粒径 (> 10 nm) で見ると、粒径30 nmの C_{30} 粒子は100℃程度で半分になり、130℃程度でほぼゼロになった。また、粒径30 nmの C_{40} 粒子は140℃程度で半分になり、250℃程度でほぼゼロになった。粒径50 nmではこれより高い温度まで残存するが、実環境の航空機排ガスではこの大きさの粒子数は非常に少ない。

成田国際空港で観測された航空機UFPの揮発特性を表-1.1に示す。設定温度350℃に対する総粒子残存率が不揮発性粒子の数割合を表し、不揮発性粒子を差し引いた粒子が揮発性粒子を表す。不揮発性粒子の数割合は総粒子の粒径分布に依存し、幾何平均径 (GMD) が小さい場合 (< 15 nm) は10%程度、大きい場合は30-50%程度であった。また、室内実験との比較から、揮発性粒子の約半数が C_{30} と同程度かそれ以下の揮発性を有し、 C_{40} より低い揮発性を持つ粒子は10%程度以下であった。先行研究⁷⁾との比較から、航空機UFPはディーゼル排気粒子より低い揮発性を有すると推定される。これらの知見は、航空機UFP拡散計算の解釈において重要である。

ジェットエンジンオイル粒子については、実際のエンジンでオイルミストが曝される温度が不明であることから、石英管の生成温度として250、300、400、600℃を試した。図-1.6にCPCで検出した残存率、

図-1.7に粒径0.2 μm 以下の試料についてのマスクロマトグラムを示す。400℃以上では揮発特性および化学成分分析の両面から、明らかな熱変性の兆候が見られた。250℃で生成した粒子は数ベースの揮発特性（表-1.1）と化学組成²⁾の両方に矛盾しない結果を与えた。このことから、ジェットエンジンオイル粒子の蒸発・核生成によって実環境で観測された特徴を持つ粒子生成が可能であることが示された。

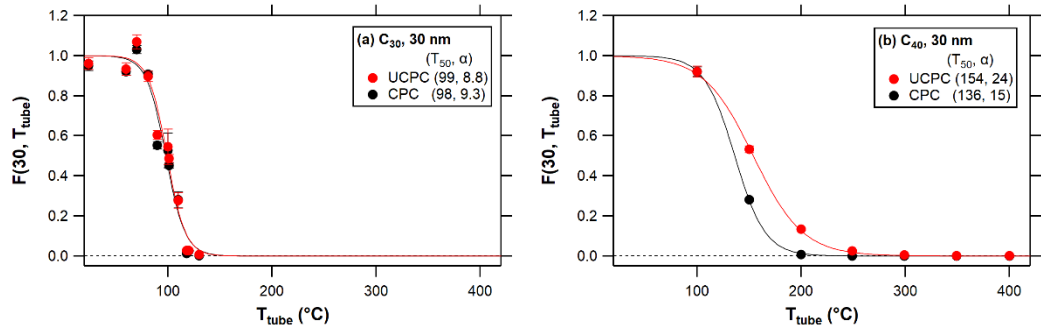


図-1.5. 加熱管温度 (T_{tube}) に対する (a) C_{30} および (b) C_{40} の粒子数残存率 F の測定結果。凡例はフィッティングに用いたSigmoid関数の係数 (T_{50} : $F = 0.5$ となる温度、 α : 曲線の傾き) を表す。赤はUCPCによる測定値、黒はCPCによる測定結果である。

表-1.1. 成田国際空港で観測された粒子の揮発特性。

粒径区分	設定温度	総粒子残存率	揮発性粒子残存率
粒径2.5 nm以上	150℃	0.58	0.53
GMD < 15 nm	250℃	0.15	0.06
	350℃	0.10	0
粒径2.5 nm以上	150℃	0.73	0.50
GMD $\geq$ 15 nm	250℃	0.49	0.06
	350℃	0.46	0
粒径10 nm以上	150℃	0.55	0.49
GMD < 15 nm	250℃	0.12	0.01
	350℃	0.11	0
粒径10 nm以上	150℃	0.69	0.54
GMD $\geq$ 15 nm	250℃	0.39	0.11
	350℃	0.31	0

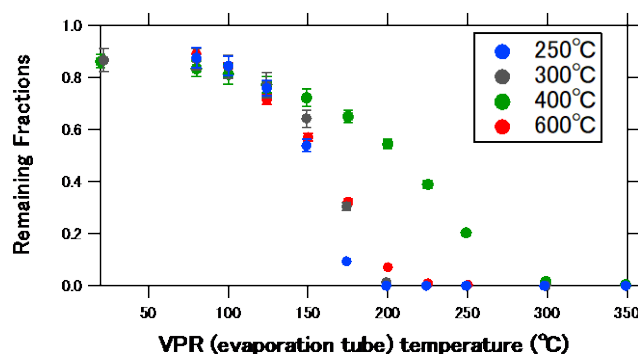


図-1.6. 粒径30 nmのジェットエンジンオイル粒子の数残存率のVPR温度依存性。加熱・再凝縮時の生成温度別に示している。VPR下流のCPCの粒子検出は粒径10 nm以上である。

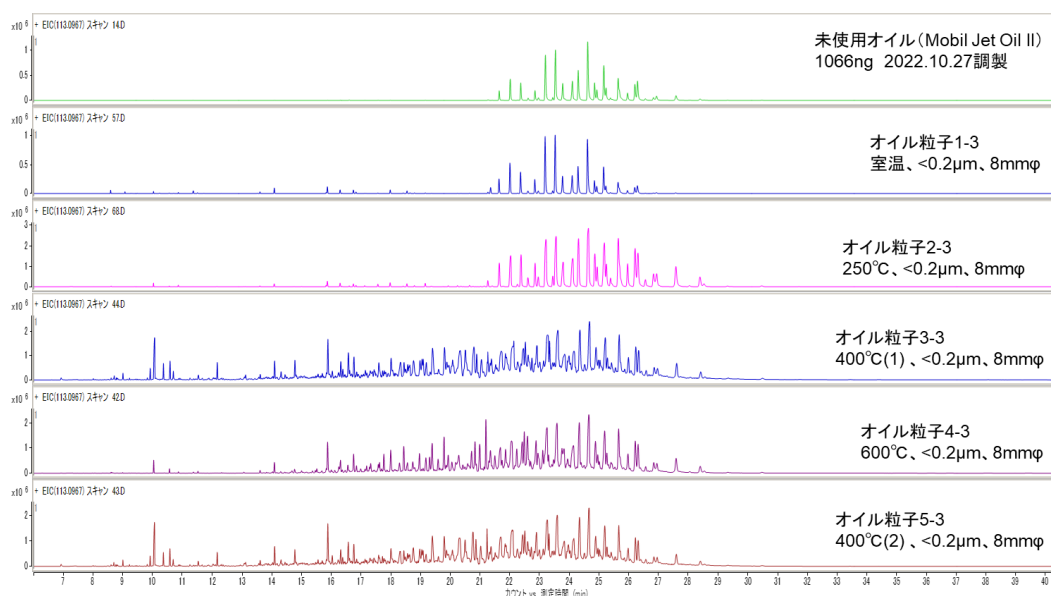


図-1.7. 生成温度別の再凝縮モード粒子 (< 0.2 μm) に対するm/z 113のマスキロマトグラム。

神戸空港における大気観測

神戸空港ではCOVID-19の影響により多くの便が運休となっていたが、滑走路からの風向（西南西～南西）が卓越する時間帯が一定程度あったため、航空機排ガスのplumeを捉えることに成功した。航空機を識別するために、各機体に固有の番号（機体記号）をカメラで記録した。神戸空港はBoeing社のB737-800（B738）が多いが、一部Embraer社のERJ-170-200（E175）も含まれる。西南西～南西風では離陸は東から西、着陸は双方向のパターンがあり、着陸した機体は観測点の前をタキシングで通過する場合がある。この際に低推力状態のplumeが観測された。

図-1.8は2021年5月24日のE175およびB738の着陸後タキシング時の総粒子の例である。燃料1 kgあたりのCO₂排出係数はよく分かっているので、バックグラウンドからの粒子数濃度とCO₂濃度の増分比を取ることによって数排出係数（燃料1 kgあたり粒子排出数）を推定することができる。E175については、粒径2.5 nm以上および10 nm以上の数排出係数はそれぞれ $EI(N_{2.5}) = 4.3 \times 10^{16} \text{ kg}^{-1}$ および $EI(N_{10}) = 8.0 \times 10^{15} \text{ kg}^{-1}$ であった。B738についてはそれぞれ $EI(N_{2.5}) = 8.7 \times 10^{16} \text{ kg}^{-1}$ および $EI(N_{10}) = 5.8 \times 10^{16} \text{ kg}^{-1}$ であった。また、粒径10 nm以下の数割合はE175で0.82であり、B738で0.33であった。これらの結果は、異なる機種（エンジン）に対する総粒子排出特性の違いを表す例である。

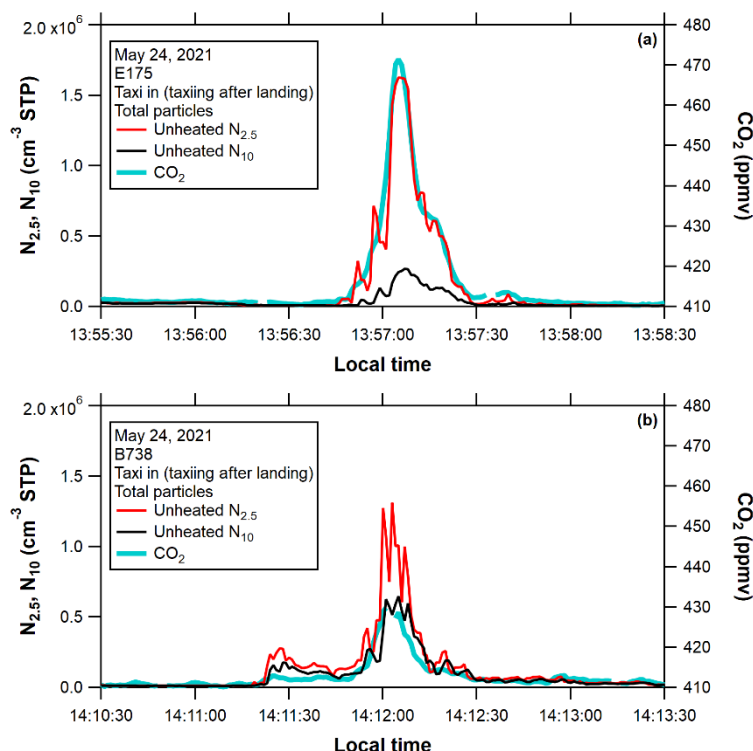


図-1.8. 神戸空港において2021年5月24日に観測された(a) E175および(b) B738のタキシング時における総粒子数濃度の時系列の例。

観測時の風向・風速から、航空機排ガスplumeが排出されてから観測点に到達するまでの時間を推定することができる。図-1.9は $N_{2.5}$ および N_{10} のバックグラウンドからの増分を輸送時間の関数としてプロットしたものである。濃度の絶対値は様々な要因で変動するため注意が必要であるが、概ね300秒程度でバックグラウンドと同程度の濃度となることが分かった。これは、風速 3 m s^{-1} を仮定すると約1 kmに相当する。

表-1.2は神戸空港観測から導出された数排出係数と先行研究（ロサンゼルス空港（LAX）⁸⁾およびICAOデータベース⁹⁾）の値を比較したものである。航空機に関するデータベースや航空会社のウェブサイト参照した結果、B738のエンジンはCFM56-7B、E175のエンジンはCF34-8と推定された。このうち、統計的にある程度数が得られたCFM56-7Bについて先行研究と定量的に比較した。なお、LAXは離陸時のみ、ICAOは不揮発性粒子のみの比較となる。

離陸時の総粒子および不揮発性粒子については、いずれもLAXにおける先行研究と整合的であった。離陸時の不揮発性粒子はICAOデータベースより大きいと一致していた。タキシングの総粒子は少なくとも過去15年では比較対象はなかった。タキシングの不揮発性粒子はICAOデータベースより1桁以上大きい結果となった。ICAO基準ではタキシングの推力は7%とされているが、実環境では異なる可能性があり、これが差異を生じた原因の一つであると考察した。実際、不揮発性粒子の数排出係数は低推力側で強い依存性があり¹⁰⁾、実環境ではタキシング時の推力は加速・減速・旋回などによって4%から9%程度に変化するという報告がある¹¹⁾。これらはエンジン試験（モデル入力）と実環境の乖離を考える上で潜在的に重要である。

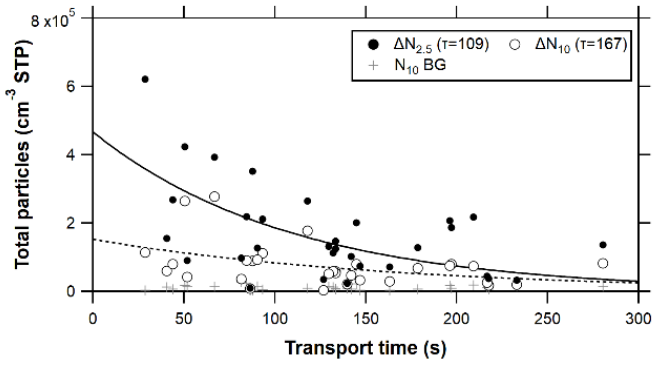


図-1.9. 滑走路または誘導路からの航空機排気plumeの輸送時間に対する粒子数濃度の変化。粒子数濃度はバックグラウンドからの増分として表している。

表-1.2. 神戸空港で観測された粒子数排出係数。

	事例数	EI ($N_{2.5}$)	EI (N_{10})	LAX	ICAO
<i>CFM56-7B</i>					
離陸, 総粒子	10	83 (53-93)	36 (25-41)	54 (46-62)	N/A
離陸, 不揮発性粒子	7	2.7 (2.0-5.8)	1.3 (1.2-3.8)	1.9 (1.1-3.9)	1.1 (1.0-1.2)
タキシング, 総粒子	3	87, 105, 73	58, 75, 46	N/A	N/A
タキシング, 不揮発性粒子	6	29 (27-32)	6.2 (5.8-7.2)	N/A	0.15 (0.13-0.21)
<i>CF34-8</i>					
離陸, 総粒子	1	35	3.1	38 (20-42)	N/A
離陸, 不揮発性粒子	2	9.4, 2.6	6.5, 2.0	2.1 (1.8-3.3)	1.0 (0.95-1.2)
タキシング, 総粒子	5	43 (40-59)	18 (8.0-19)	N/A	N/A
タキシング, 不揮発性粒子	0	N/A	N/A	N/A	0.005 (0.004-0.006)

数値の単位は 10^{15} kg^{-1} であり、事例数が5以上の場合は中央値と括弧内に25th-75thパーセンタイルを示している。事例数が5未満は全ての推定値を示している。

羽田、成田、福岡空港における簡易観測

図-1. 10に福岡空港周辺の9月27日の観測データの例を示す。空港周辺をひと通り周回した上で、風向きの条件を考慮して空港南側の下月隈緑地（33. 57° N、130. 46° E）で一定時間測定を行った。CPCとともに騒音計を併用し、航空機通過の指標とした。離着陸の多い時間帯には平均的に高濃度が見られた。特に、タキシングで観測点の近くを航空機が通過した際に、風向きが完全に適合すると著しい高濃度が観測された（15:55と16:10）。このときの粒径分布は、航空機排ガスに典型的に見られる粒径10 nm付近を中心とする分布になっていた。

羽田空港、成田国際空港、福岡空港について、それぞれの観測日の粒子数濃度の下位2パーセンタイルを計算し、複数日あるときはより小さい方をバックグラウンド濃度と仮定した。その値はそれぞれ $5 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ 、 $6 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ 、 $4 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ であり、空港による違いは大きくなかった。福岡空港南側の下月隈緑地において空港の影響が見られた時間帯の平均値（バックグラウンド差引後）は $3 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ であった。羽田空港北側の京浜島つばさ公園（35. 57° N、139. 77° E）において空港の影響が見られた時間帯の平均値（バックグラウンド差引後）は $4 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ であった。なお、上記の推定においては、変動幅を考慮して数値の有効桁は1桁としている。

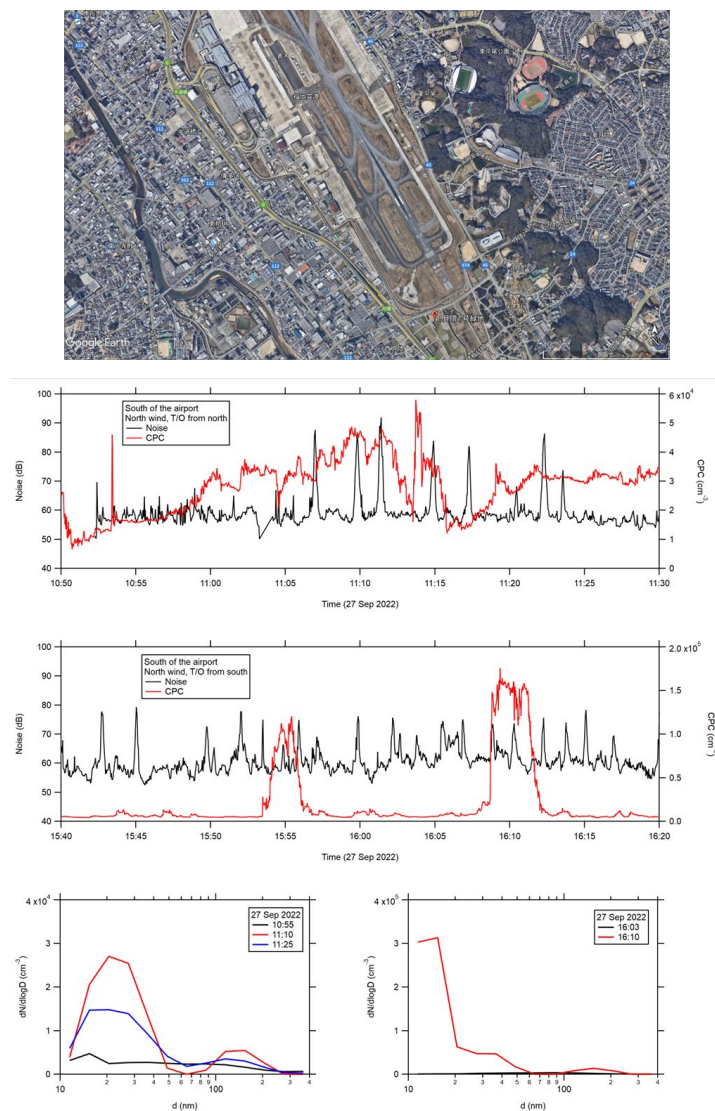


図-1. 10. 福岡空港周辺における粒子数濃度の観測。（上段）観測地点の位置（下月隈緑地、地図中の赤印）。地図はGoogle Earthにより作成。（中二段）2022年9月27日に観測された粒子数濃度の時系列。赤が粒径10 nm以上の粒子数濃度、黒が騒音計で観測された数値。騒音計でスパイク状に増加している部分は飛行機の離着陸に対応している。（下段）同日の所定の時刻における数濃度粒径分布。

数値シミュレーション

AEDTの最新バージョンでは不揮発性粒子数が計算可能であるが、実環境との比較や健康リスク評価では総粒子数濃度を指標とするため、推進費5-1709と同様に質量濃度から粒子数濃度に換算する方式とした。ただし、換算係数は推進費5-1709とは異なる方法で各空港について算出した。具体的には、AEDTのLT0別排出量合計値に基づき不揮発性粒子・揮発性粒子の質量割合を設定し、不揮発性粒子・揮発性粒子の幾何平均径（GMD）と幾何標準偏差（GSD）をそれぞれ仮定して換算係数を決定した。羽田空港、成田国際空港、福岡空港のそれぞれについて、質量濃度（ $\mu\text{g m}^{-3}$ ）から数濃度（ cm^{-3} ）への換算係数はそれぞれ 5.7×10^4 、 4.5×10^4 、 4.5×10^4 とした。仮定に伴う不確実性を誤差として考慮した。数濃度換算の誤差（GMDとGSDに依存）は40-60%程度と推定され、最大で1桁程度の不確実性はある。

前述の通り、AEDTの設定値には自由度が大きい、追試や再現性評価を考慮して粒子排出係数は既定値を使用した。燃料硫黄分は600 ppm、境界層高度は3000 ftで固定し、24時間平均値を出力した。なお、航空機が搭乗ゲートで駐機している際に使う電源には地上動力装置（GPU）と補助動力装置（APU）があり、その使用割合は空港レイアウトや運航スケジュールに依存する。APUは航空燃料で作動する小型エンジンであるが、APUからの粒子排出係数のデータは限られている。AEDT内にはゲートにおけるAPUの使用時間や、APUからメインエンジンに切り替えてタキシングする時間を詳細に設定するオプションがある。本研究ではこれらの設定のための情報が不足していたためデフォルト設定を使用した。この場合にはゲートの排出量は全てAPUとして割り当てられ、タキシングの排出は考慮されない。離陸や着陸に比べると、APUおよびタキシングの切替タイミングや排出量推定の不確実要素はかなり大きいことから、本研究ではゲート排出をAPUとタキシングの和であると見なした。この部分の改善は今後の重要な課題の一つである。

図-1.11に各空港・各月の平均粒子数濃度分布を示す。計算の空間分解能は100 mであるが、マップ化する際に200 mで平均化した。特に高濃度になっている部分がゲートであるが、全体として離陸・着陸に比べてゲートの寄与率が高いという結果となった。これは、離陸・着陸が単発・短時間の排出の連続であるのに対して、ゲートは多数の航空機が同時に長時間滞在するためと解釈できる。濃度分布には16方位を強く反映したパターンが見られるが、計算領域の20 km四方内の気象データの分解能が限られており、その影響を受けたものになっている。この点を改善するためには、より空間解像度の高い微気象モデルが必要となる。本研究で行う健康リスク評価では、1 kmメッシュで平均化して中央値をとること、空間的な不均一を緩和する方針とした。

前節で述べた空港周辺の観測値と比較すると、福岡空港の観測点（下月隈緑地）に相当するグリッドの平均値は3月、7月、11月の各月でそれぞれ $2.5 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ 、 $4.9 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ 、 $2.6 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ であった。羽田空港では3月、7月、11月の各月でそれぞれ $8.3 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ 、 $6.5 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ 、 $2.1 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ であった。空港周辺の観測データは粒径10 nm以上であり、モデル計算とは時期や平均期間が異なる。また、計算値には粒径下限がなく粒径10 nm以下も含むため注意が必要であるが、観測された平均値と計算値はオーダーでは整合する結果となった。

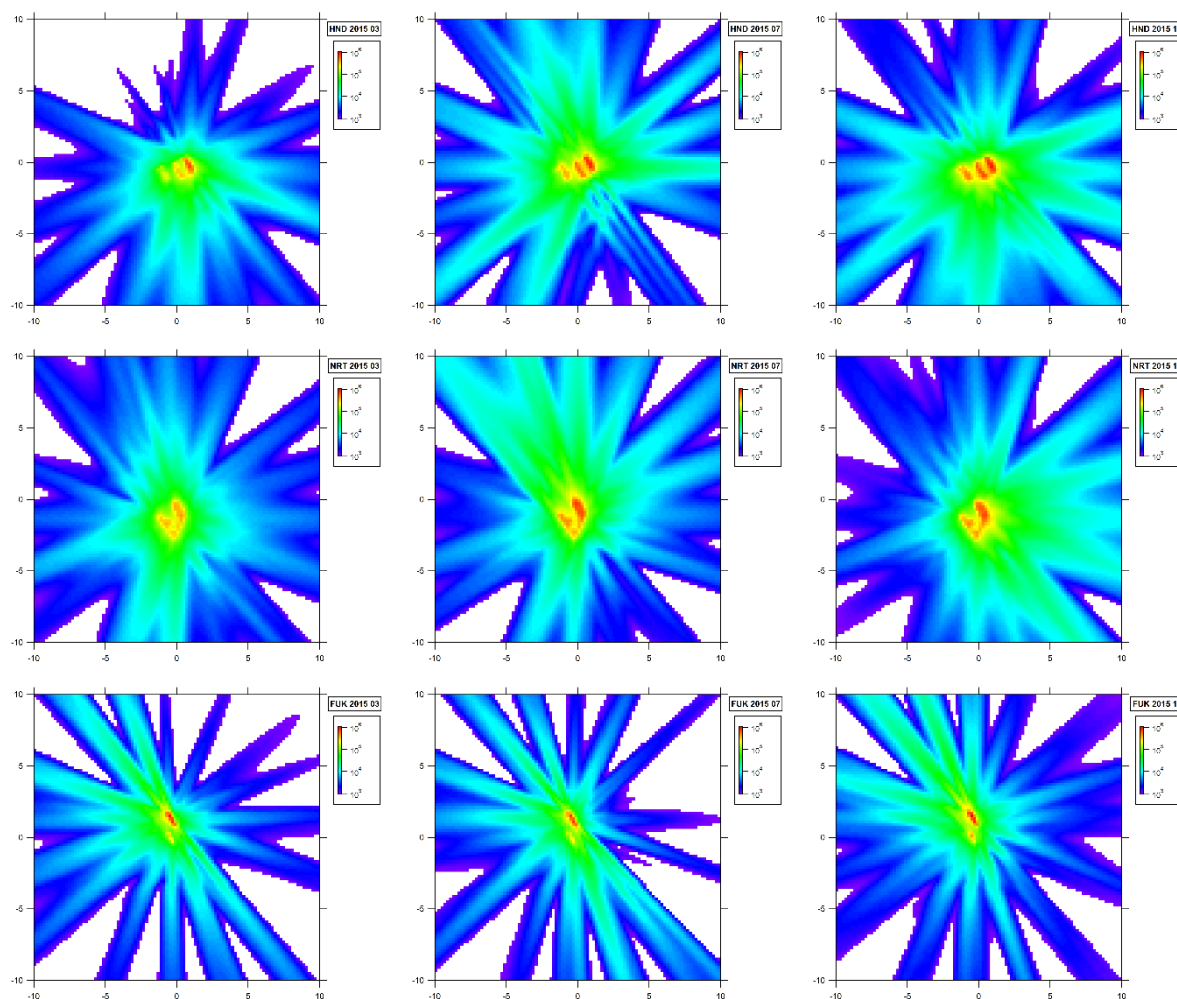


図-1.11. 羽田空港（HND）、成田国際空港（NRT）、福岡空港（FUK）を対象とした数値シミュレーション結果。2015年3、7、11月の月平均を表す。縦軸と横軸は空港中心からの相対距離（km）を表す。カラー・スケールは対数であり、 1000 cm^{-3} 以下は白抜きで表示している。

将来予測・対策提案

【エンジンの観点】

ICAOエンジン規制は定格推力26.7 kNを超えるエンジンに適用される。図-1.12にICAO資料から引用した定格推力と排出規制値の関係を示す¹²⁾。船舶・航空機委員会で検討されたシナリオでは、2020年以降に徐々に規制対応エンジンに移行し、2030年で半分、2050年で全て置き換わる想定になっている¹³⁾。航空機需要については、COVID-19の甚大な影響があった2019-2022年が特例的であるため、その直近年として2018年を基準とした。船舶・航空機委員会の議論に従って、予測A（3.3%/年の成長率）と予測B（2018年以降横ばい）を想定した¹³⁾。また、日本の航空需要は世界の航空需要の変化に比例するものとし、人口と死亡数は2015年の数値を用いた。予測AとBは現時点で考えられる上限と下限に相当する。これらは様々な仮定に基づくシナリオであり、国際情勢による不確実性は非常に大きいものの、上限と下限を想定することには一定の意義がある。

サブテーマ4の成果に基づいて推定した健康リスク変化と合わせた将来予測を表-1.3に示す。エンジン規制により、未規制の場合に比べて不揮発性粒子の削減は見込めるものの、モデル計算では不揮発性粒子の数割合を1-2%と仮定しているために削減効果が弱められ、予測Bではほぼ横ばいとなった。また、予測Aでは航空需要の伸びによる増加分がエンジン規制による減少分を打ち消す結果となり、全体としては大幅に増える結果となった。成田国際空港における観測では、離陸時の不揮発性粒子の数割合は5%程度であり、離陸時以外を含む平均では10-50%程度であった。仮に不揮発性粒子の数割合を30%と仮定し

ても、2015年に対する2030年および2015年の増減傾向に大きな変化はなかった。総粒子の抜本的な削減には、サブテーマ2で得られた知見に基づきジェットエンジンオイル粒子排出減を併せて考えることが重要である。

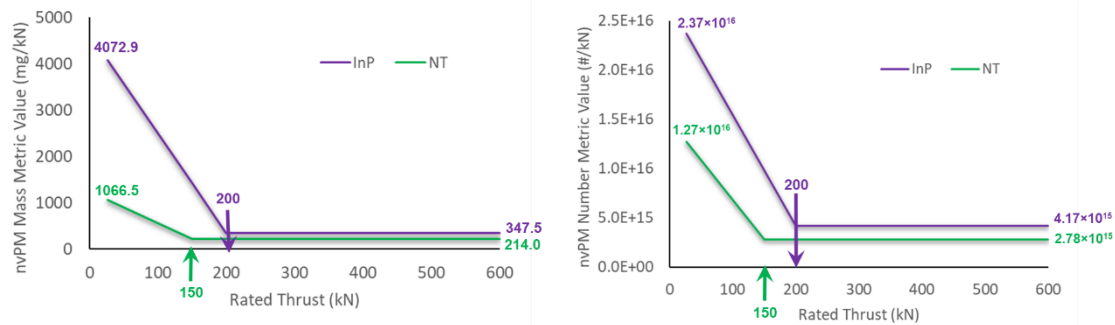


図-1-12. 定格推力に対する（左）不揮発性粒子質量および（右）不揮発性粒子数の排出量の規制値¹²⁾。

表-1.3. ICAO規制に伴う粒子数濃度および健康リスク変化の予測。

時期	規制未対応機種 の割合	健康リスク指標（航空機UFP関連死亡数） ¹⁾					
		羽田空港 (2015年： 9.2)		成田国際空港 (2015年： 1.3)		福岡空港 (2015年： 10.8)	
		予測A ²⁾	予測B ³⁾	予測A	予測B	予測A	予測B
2030年	0.5	14.2	9.6	2.0	1.4	16.7	11.3
2050年	0	27.2	9.6	3.8	1.3	31.7	11.2

¹⁾ 対象地域の3、7、11月の3ヶ月間における航空機由来UFPの関連死亡数。健康リスク指標の誤差はUFP数濃度に起因するものだけで少なくとも40-60%あると推定される。

²⁾ 航空機需要が成長率3.3%/年（基準2018年）。

³⁾ 航空機需要が横ばい（基準2018年）。2015年から2018年の航空機需要増は約5%。

【燃料の観点】

COVID-19により世界経済が大きく変化したこと、2022年に航空業界の脱炭素化のための持続可能な航空燃料（SAF）の導入促進が国際会議で採択されたことから、航空燃料を取り巻く状況は大きく変化しつつある。コスト概算にはこの点も考慮する必要がある。航空燃料に関して、当該課題申請当初は対策の一つという位置付けであったが、CO₂削減の観点からSAFの導入促進は不可避という状況にある。SAFには様々な製造法が提案されているが¹⁴⁾、その一部を表-1.4にまとめた。これらの製造法のうち、廃食用油などを原料とするHEFA（Hydroprocessed Esters and Fatty Acids）が現時点で最も確立した方法とされている。その次にアルコールから製造する方法（Alcohol-to-jet）、ガス化してFT（Fischer-Tropsch）合成する方法（Gasification/FT）がある。発電所等から回収したCO₂を原料とする方法（Power-to-liquid）はまだ研究段階であるが、CO₂削減効果は最も高い。これらのSAFは従来燃料と混合して使用することもできるが、種別により混合上限値が決められている。

SAFの多くは現在開発中であるため、販売価格は製造原料や工程によって様々である。図-1.13に製造法別の価格予測の例を示す¹⁵⁾。SAFは総じて従来燃料よりも数倍高いと予測されており、最初はPower-to-liquidで顕著であるが、2050年までに徐々にコストが下がると見込まれている。

SAF導入による粒子削減効果は現在研究が進められているが、ジェットエンジンオイルは燃料に関わらず使用されるため、燃料による総粒子の削減効果は限定的かもしれない。一方で、HEFAとJet Aの混合燃料によって上空の粒子排出が減少する¹⁶⁾、あるいは従来燃料Jet AはHEFAに比べてアイドリング時の不揮発性粒子の毒性が高いという報告もあり¹⁷⁾、便益を判断する上では粒子毒性の観点も考慮する必要

がある。数値シミュレーションでは、不確実性が大きいながらもゲートにおける排出が大きい可能性が示唆された。SAFは将来的に見てもコスト高が続くことが予想されるため、SAFを導入した上でGPUの使用拡充によりアイドリング時間を減らすことは、コスト低減と健康リスク低減に効果が高いと考えられる。

表-1. 4. 持続可能な航空燃料（SAF）の製造法の例。

原料	製造方法の概要
廃食用油、獣脂など	廃食用油、獣脂などの動植物性油脂を前処理して不純物を取り除いた後、水素化処理を行うことによって製造する（HEFA）。
サトウキビ、トウモロコシ等の非可食部分など	サトウキビから得られる糖や、トウモロコシなどのセルロース系原料から得られる糖を発酵させてアルコールを製造する。製造したアルコールに脱水処理等を施した後、水素化処理する。
林地残材など	樹木を伐採して丸太にする際、利用されなかった残材や間伐材を原材料（セルロース系バイオマス）として、ガス化や急速熱分解等の処理を加えることによってSAFを製造する。
都市ゴミなど	FT合成（COとH ₂ から触媒反応を用いて液体燃料を合成する反応）により生成されたFT合成油をSAFにする方法と、発酵をして得られたアルコールや生成物をSAFにする方法がある。
二酸化炭素	発電所や工場などから排出されるCO ₂ を逆シフト反応（CO ₂ とH ₂ からCOとH ₂ Oを生成する反応）により得られたCOをFT合成する。CO ₂ を電気分解してCOを得る方法もある。

Act for Skyを基に作成¹⁴⁾。

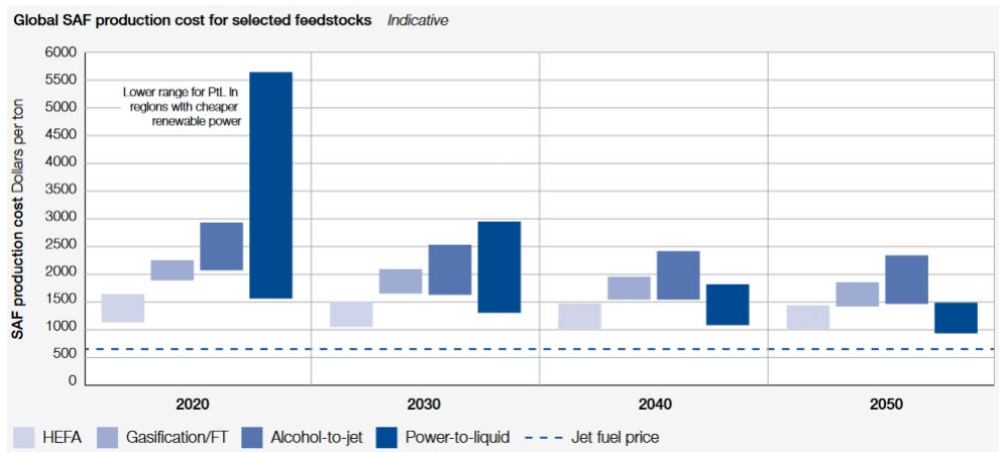


図-1. 13. 製造法別のSAF価格の将来予測の例¹⁵⁾。破線が従来燃料の価格、棒グラフは製造法別のコスト推定値の幅を表す。

【モニタリング】

航空機に関わる国際情勢は不確実性が大きく、数年先であっても正確な予測は難しいと言わざるを得ない。効果的な対策を講じるには、継続的にモニタリングを行って的確に変化を把握することが必要である。航空機UFP数濃度の実態把握においては既存の常時監視データでは不十分であり、携帯型CPC等を用いた数濃度の推定が必要である。また、濃度の絶対値だけでなく排出係数を把握する上では、本研究で実施したようなCO₂濃度との同時測定が有用である（図-1. 8、再掲）。燃料消費量に対するCO₂排出量（排出係数）はよく分かっているので、UFPとCO₂の同時測定データからUFP排出係数の推定が可能である。CO₂分析計も小型かつ低消費電力であるため、携帯型CPCと併用しても場所や電力の問題は小さい。

滑走路近傍でのモニタリングは保安上の問題が大きい、ゲート付近であれば実現可能と考えられる。エンジン規制やSAF導入の効果が現れるまでには長期間かかると見込まれる。ここで提案するUFPとCO₂のモニタリングは、コストや安全性を加味しても十分に現実的なものになると期待される。さらに、粒子の形態観察や組成分析等を定期的に併用することで情報は大幅に増える。今後2050年までに予想される

変化を監視するための持続性のある取組として検討すべき課題であると考えられる。

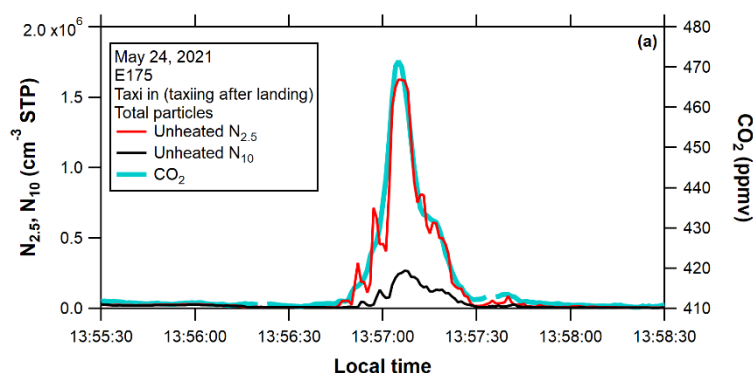


図-1.8. 神戸空港において2021年5月24日に観測されたタキシング時における総粒子数濃度とCO₂の時系列の例（再掲）。

5. 研究目標の達成状況

サブテーマ2および3と連携して神戸空港観測や数値シミュレーションを実施し、サブテーマ4と連携して健康リスク評価を実施した。また、幾つかのシナリオを想定して将来予測を行った上で、ジェットエンジンオイル粒子の寄与など本研究に特徴的な成果に基づいて対策提案を行った。当初目標とした研究内容は概ね予定通り達成したと自己評価できる。ただし、数値シミュレーションによるUFP数濃度再現性の不確実性は依然として大きく、またCOVID-19やSAFの動向など世界情勢の急変を受けて、将来予測についても不確実性が大きい。国際誌論文などの成果発表についてはやや遅れているため、研究期間終了後も継続的に取り組む必要があると考えている。

6. 参考文献

- 1) Society of Automotive Engineers, “Procedure for the continuous sampling and measurement of non-volatile particulate matter emissions from aircraft turbine engines: - Aerospace recommended practice 6320” (SAE International, 2018; <https://saemobilus.sae.org/content/AR6320/#scope>).
- 2) Fushimi, A., Saitoh, K., Fujitani, Y., Takegawa, N., Identification of jet lubrication oil as a major component of aircraft exhaust nanoparticles, *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 6389–6399, 2019.
- 3) Winder, C. and J.-C. Balouet, The toxicity of commercial jet oils, *Environ. Res.*, 89, 146–164, 2002.
- 4) Mobil Jet Oil II (<https://www.mobil.jp/ja-jp/aviationoils>).
- 5) Takegawa, N., Murashima, Y., Fushimi, A., Misawa, K., Fujitani, Y., Saitoh, K., Sakurai, H., Characteristics of sub-10 nm particle emissions from in-use commercial aircraft observed at Narita International Airport, *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 1085–1104, 2021.
- 6) Aviation Environmental Design Tool (<https://aedt.faa.gov/>).
- 7) Sakurai, H., Tobias, H. J., Park, K., Zarling, D., Docherty, S., Kittelson, D. B., McMurtry, P. H., Ziemann, P. J., On-line measurements of diesel nanoparticle composition and volatility, *Atmos. Environ.*, 37, 1199–1210, 2003.
- 8) Moore, R. H., Shook, M. A., Ziemba, L. D., DiGangi, J. P., Winstead, E. L., Rauch, B., Jurkat, T., Thornhill, K. L., Crosbie, E. C., Robinson, C., Shingler, T. J., Anderson, B. E., Take-off engine particle emission indices for in-service aircraft at Los Angeles International Airport, *Sci. Data*, 4, 170198, 2017.

- 9) ICAO Aircraft Engine Emissions Databank,
<https://www.easa.europa.eu/en/domains/environment/icao-aircraft-engine-emissions-databank>
 (accessed 16 September 2022).
- 10) Timko, M. T., Onasch, T. B., Northway, M. J., Jayne, J. T., Canagaratna, M. R., Herndon, S. C., Wood, E. C., Miake-Lye, R. C., Knighton, W. B., Gas turbine engine emissions: Part II: Chemical properties of particulate matter, *J. Eng. Gas Turbines Power*, 132, 061505, 2010.
- 11) Nikoleris, T., G. Gupta, and M. Kistler, Detailed estimation of fuel consumption and emissions during aircraft taxi operations at Dallas/Fort Worth International Airport, *Transp. Res. D.*, 16, 302–308, 2011.
- 12) ICAO Local Air Quality Technology Standards (https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/LAQ_TechnologyStandards.aspx).
- 13) 船舶・航空機排出大気汚染物質の影響把握に関する検討委員会 令和4年度報告書, 株式会社環境計画研究所.
- 14) Act for Sky (<https://actforsky.jp/>).
- 15) Clean Skies for Tomorrow: Sustainable Aviation Fuels as a Pathway to Net-Zero Aviation, In Collaboration with McKinsey & Company, November 2020.
- 16) Moore, R. H., Thornhill, K. L., Weinzierl, B., Sauer, D., D'Ascoli, E., Kim, J., Lichtenstern, M., Scheibe, M., Beaton, B., Beyersdorf, A. J., Barrick, J., Bulzan, D., Corr, C. A., Crosbie, E., Jurkat, T., Martin, R., Riddick, D., Shook, M., Slover, G., Voigt, C., White, R., Winstead, E., Yasky, R., Ziemba, L. D., Brown, A., Schlager, H., and Anderson, B. E.: Biofuel blending reduces particle emissions from aircraft engines at cruise conditions, *Nature*, 543, 411–415, 2017.
- 17) Jonsdottir, H. R., Delaval, M., Leni, Z., Keller, A., Brem, B. T., Siegerist, F., Schönenberger, D., Durdina, L., Elser, M., Burtscher, H., Liati, A., Geiser, M., Non-volatile particle emissions from aircraft turbine engines at ground-idle induce oxidative stress in bronchial cells. *Commun. Biol.* 2, 90, 2019.

Ⅱ－２ 国際連携による航空機ジェットエンジン排ガス測定と粒子生成メカニズムの解明

国立研究開発法人国立環境研究所

環境リスク・健康領域 計測化学研究室

伏見 暁洋

環境リスク・健康領域 統合化健康リスク研究室

藤谷 雄二

(研究協力者)

イサラ研究所

齊藤 勝美

Zurich University of Applied Sciences, Switzerland Julien Anet

Lukas Durdina

[要旨]

国際的な航空機排出規制に中心的に関わってきたスイスのグループと共同で、スイスのジェットエンジンのメンテナンス・試験施設 (SR Technics) において、民間航空機エンジンの排気試験を計 7 回行った。エンジン直下の燃焼排気部及び 25 m 下流において、粒径別の粒子個数濃度、粒子形態、化学組成を同時測定した。その結果、25 m 下流での粒子個数濃度は 10 nm 付近をピークとする一山分布であり、エンジン直下より数十倍高濃度であった。エンジン直下では、大半がグラファイト様の層状構造をもつ粒子だが、25 m 下流では粒径 10～30 nm のアモルファス粒子の個数比率が増加した。特に、アイドリング時の試料ではアモルファス粒子の比率が高く、63% であった。また、下流では粒径加熱脱着 GC/MS 法によって、排気総粒子 (エンジン直下、25 m 下流)、ナノ粒子 (25 m 下流) のいずれからもエンジンオイル (潤滑油) 由来の有機成分を検出した。航空機そのものの排気試験において、粒径約 30 nm 以下のナノ粒子にオイル成分が含まれることが、高感度分析法によって初めて実証された。排気ナノ粒子中の炭化水素の約 80% 以上が未燃オイルであると推定された。過去の知見、成分ごとの凝縮性などから総合的に考えると、ブリーザーベントから大気中に排出されたガス状またはミスト状のオイルが主燃焼排気と混合して瞬間的に蒸発し、25 m 下流の装置に到達するまでの間に室温まで冷却されて再凝縮し、オイルを主成分とするナノ粒子を生成したと推定される。多くの場合航空機が排出する粒子個数の 90% 程度以上が揮発性粒子であり、揮発性粒子の生成にオイルが強く関与していると推定される。そのため、ブリーザーベント手前に設置された遠心分離機の改良等でオイルの排出を減らす、あるいはオイルの排出先を変更する等を実現できれば、航空機からの排出粒子個数を大幅に減らせる可能性があると考えられる。このように、本研究では、航空機が排出するオイルを主体とするナノ粒子の排出箇所、生成メカニズムについて、非常に新規性の高い知見を得ることができ、全体として、当初計画で期待した水準の研究成果を達成できた。なお、本研究によって粒径 10 nm 程度以下の非凝集体 (単一粒子) のグラファイト様の層状構造をもつ粒子が航空機エンジン排気中に多く存在することが、透過型電子顕微鏡 (TEM) 観察の結果から明らかになった。TEM 観察のための試料採取は、比較的簡易な機材で、かつ少ない試料量で可能であるため、過去に我々が明らかにしたジェットエンジンオイルに極めて特徴的な有機成分に加え、空港周辺での観察等において、空港起源の粒子のよいマーカーとなると期待される。

1. 研究開発目的

健康影響・気候影響の観点から、航空機が排出するナノ粒子への関心が高まっており、2020 年からは世界中の民間航空機からの粒子排出規制が強化された。我々は空港大気観測により、航空機排出ナノ粒子にジェットエンジンオイル (潤滑油) が強く関与していることを初めて明らかにしたが¹⁾、航空機エンジンからのオイルナノ粒子の排出実態は明らかになっていない。

サブテーマ 2 では、海外研究機関 (スイス) と連携してエンジン試験に参画し、民間航空機ジェットエンジンから排出されるオイルナノ粒子の存在を検証することを第一の目的とした。さらに、化学成分分析等に基づきオイルナノ粒子の排出箇所や生成メカニズムを解明することを第二の目的とした。また、結果に基づき、粒子排出抑制方策を提案することを目指した。

2. 研究目標

海外研究機関(スイス)と連携して航空機ジェットエンジン試験を行い^(注)、化学成分分析等に基づき、粒子の排出・生成メカニズムを解明する。特に、世界的に知見がごく限られているジェットエンジンオイル起源ナノ粒子の排出箇所や生成過程を明らかにし、粒子排出抑制方策を提案することを目指す。

^(注)ジェットエンジン試験の時期や規模については、新型コロナウイルス(COVID-19)に伴う渡航制限などに応じて関係者と協議する。やむを得ず日程や規模の大幅な変更がありうる場合については、環境省およびERCAと事前に相談を行う。

3. 研究開発内容

ジェットエンジン試験 (スイスSR Technics)

本研究で想定しているジェットエンジンからのオイルナノ粒子の排出・生成箇所と、その実態を明らかにするための測定・採取場所のイメージを図-2.1に示す。本研究では、ジェットエンジン直下の燃焼排気(P1、エンジン排出規制の測定位置)に加え、エンジン排気口から約25 m後方(P3)の2箇所、粒子数濃度の粒径分布、化学組成を同時に測定することで、オイルナノ粒子の排出または生成箇所・メカニズムを特定することを目指した。

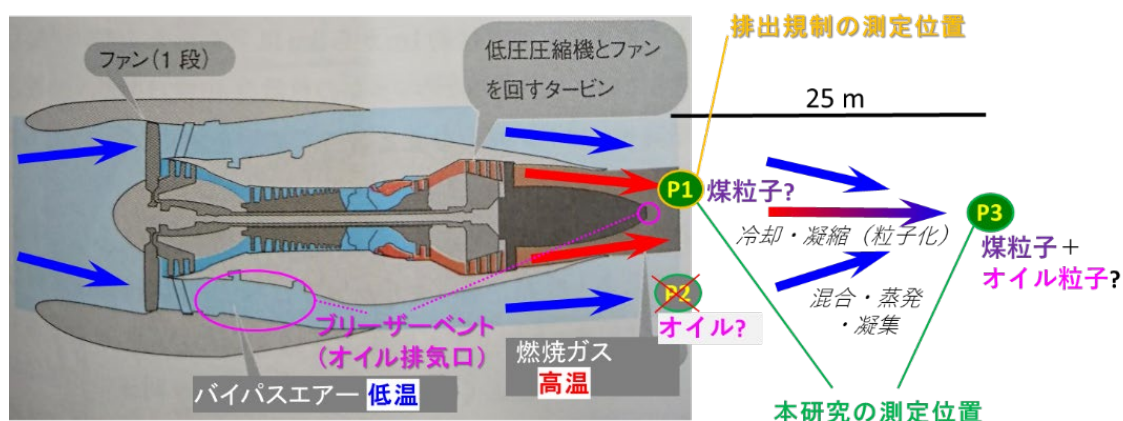


図-2.1. ジェットエンジンからのオイル粒子の排出・生成箇所の想定と試料採取場所(中村, 2013²⁾の図に矢印・文字等を追記)。ブリーザーベント(エンジンによって位置は異なる)からバイパスエアにオイルが排出されていると想定。

エンジン試験に先立ち、排気総粒子を2種類(石英繊維フィルター:Qz/Qz、テフロンフィルター:T/TX)の47 mmフィルターに同時採取するための1系統または2系統のサンプラー(NIES Single/Dual Sampler)を設計・製作した。また、スイスのチューリッヒ国際空港内のジェットエンジンのメンテナンス・試験施設(SR Technics)において、スイス側研究協力者によって、サイレンサー部の試料採取プローブの交換と試運転、スモークメーター(エンジン直下P1の無希釈ラインに設置)を用いたフィルター粒子試料(47 mm、紙フィルターまたはQzフィルター)とNIES Single Samplerを用いた予備粒子試料(47 mm、Qzフィルター)の採取が行われた。なお、COVID-19の影響で海外渡航が厳しく制限されたほか、SR Technicsにおけるエンジン試験の稼働率が大きく低下したため、研究提案時に予定していた2020年11月頃のジェットエンジン試験は約半年延期した。

その後、スイスSR Technicsを2回訪問し(エンジン試験#1:2021年4月10日～5月13日、エンジン試験#2:9月18日～10月5日)、以下の民間航空機エンジンの排気試験を行った。エンジン直下の燃焼排気(P1)及び25 m下流(P3、サイレンサー手前)で、航空機排出粒子の個数粒径分布を測定した他、総粒子(47 mm、Qzフィルター)及び粒径別粒子(NanoMoudi II、金ホイール)を採取し、粒子質量と化学組成を測定した(図-2.2)。当初計画にはなかったが、粒子の組成や起源について有用な情報を与えると考えられる、透過型電子顕微鏡(TEM)観察のためのサンプリングと排気粒子の形態観察も行った。なお、当初計

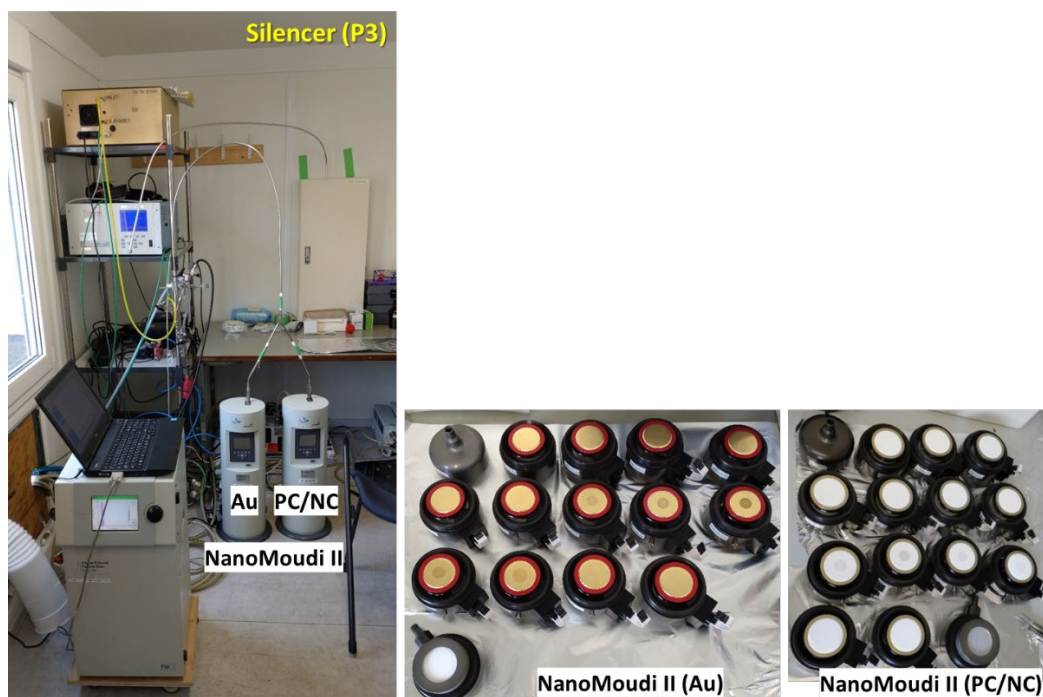


図-2.4. エンジンの25 m下流における測定機材と粒径別試料の例（2021年9月）。

エンジン試験#1（2021年4月10日～5月13日）及びエンジン試験#2（2021年9月18日～10月5日）に、スイスSR Technicsにおいて採取した航空機エンジン排出粒子試料の一覧を表-2.1に示す。COVID-19の影響で大きな制約があったものの、ジェットエンジン排気の測定・試料採取を計7回行うことができた。エンジン試験#1では測定を5回行い、総粒子の採取、粒子個数の粒径分布の測定、TEM観察用試料の採取等を実施した。エンジン試験#2では測定を2回行い、粒径別粒子の採取、粒子個数の粒径分布の測定、TEM観察用試料の採取等を実施した。NIES Dual samplerによる総粒子試料の採取は、6機のエンジン（CFM56系3機、PW系3機）を対象に複数出力でのテストサイクル（33-66分間程度）全体で行ったほか、PW系エンジンを対象にアイドリングのみ（15分間）の試料採取を1回行った。バックグラウンド空気の測定・総粒子試料採取を計3回実施した。エンジン試験#2では25 m下流でNanoMoudi II（Au）とNanoMoudi II（ポリカーボネート（PC）製フィルター）2台での粒径別試料採取を行った。TEM観察用の試料は、25 m下流でPW系エンジンのテストサイクル全体（51分間）とPW系エンジンのアイドリング時（5分間）に1検体ずつ採取し、エンジン直下でPW系エンジンのアイドリングとテイクオフ（33分間）とCFM56系エンジンのテストサイクル全体（64分間）で1検体ずつ採取した。試験対象とされたジェットエンジンは、CFMインターナショナル社のCFM56系エンジンとPratt & Whitney（P&W）社のPW4000系エンジンで、いずれもエアバス社A320やボーイング社B763、B738などの主力機体に搭載されている。当初、高出力とアイドリング別に試料採取と分析を行う計画であったが、試料量と測定感度、現場での作業性等の観点から、試料採取は原則、アイドリングや最高出力など種々の出力状態を含む運転モード全体を通じて行い、同型のエンジンの試験が複数回あった場合に、アイドリング時のみの試料採取を行った。当初予定になかったスモークメーターによるフィルター試料の採取と分析も含めれば、計画と同程度以上の試料を採取することができた。

表-2.1. スイスSR Technicsにおいて採取した航空機エンジン排出粒子試料の一覧。

Date	Engine	Engine thrust	Measurement and sampling	
			Engine exit (P1)	25 m Downstream (Silencer, P3)
April 13, 2021	CFM56-7B27	Whole cycle	SMPS, Smoke meter-Qz, NIES dual samplers (Qz/Qz, T/TX) , CO ₂ , etc.	EEPS , Smoke meter-Qz, NIES dual samplers (Qz/Qz, T/TX) , CO ₂ , etc.
April 23, 2021	CFM56-5B4	Whole cycle	SMPS, Smoke meter-Qz, NIES dual samplers (Qz/Qz, T/TX) , CO ₂ , etc.	EEPS , Smoke meter-Qz, NIES dual samplers (Qz/Qz, T/TX) , CO ₂ , etc.
April 28, 2021	PW4158-3A (PW4000-94)	Whole cycle except Takeoff	SMPS, Smoke meter-Qz, NIES dual samplers (Qz/Qz, T/TX) , CO ₂ , etc.	EEPS , Smoke meter-Qz, NIES dual samplers (Qz/Qz, T/TX) , CO ₂ , etc.
April 29, 2021	PW4170 (PW4000-100)	Whole cycle	SMPS, Smoke meter-Qz, NIES dual samplers (Qz/Qz, T/TX) , CO ₂ , etc.	EEPS , TEM sampling (whole cycle), Smoke meter-Qz, NIES dual samplers (Qz/Qz, T/TX) , CO ₂ , etc.
May 6, 2021	PW4158-3A (PW4000-94)	Idle	SMPS, Smoke meter-Qz, NIES dual samplers (Qz/Qz, T/TX) , CO ₂ , etc.	EEPS , TEM sampling (Idle), Smoke meter-Qz, NIES dual samplers (Qz/Qz, T/TX) , CO ₂ , etc.
Sept 22, 2021	PW4168-1D (PW4000-100)	Idle+Takeoff	SMPS, TEM sampling (Idle+Takeoff), Smoke meter-Qz, NIES dual samplers (Qz/Qz, T/TX) , CO ₂ , etc.	EEPS , NanoMoudill (Au, PC/NC) , CO ₂ , etc.
Sept 27, 2021	CFM56-7B27	Whole cycle	SMPS, TEM sampling (whole cycle), Smoke meter-Qz, NIES dual samplers (Qz/Qz, T/TX) , CO ₂ , etc.	EEPS , NanoMoudill (Au, PC/NC) , CO ₂ , etc.

(注) P1、P3の列において色付けした項目が、国立環境研究所が現地に持ち込んで稼働させた装置。他の装置はスイスの研究協力者が用意・稼働させた装置であり、この表に記載していない装置も多く稼働していた。

エンジン直下では、ジェットエンジンの燃焼排気の一部が、エンジンの排気断面から水平距離1 m以内、回転軸から0.2-0.5 m 上側に設置したサンプリングプローブから採取された(図-2.2)。採取された排ガス試料は、160℃に加熱されたステンレス管(内径8 mm、長さ5 m)を通り、希釈器(Dekati, DI-1000)で8~11倍に希釈された後、60℃に加熱されたcPTFE管(内径8 mm、長さ24.2 m)を通り、装置群に導入された。粒径分布の測定はスイスグループによりSMPS(Model 3938, D = 7.91-209.1 nm, TSI Inc.)を用いて30秒サイクルで行われた。TEM試料は、事前に有効性が確認された簡易的な方法を用い、400メッシュのコロジオン膜をコーティングした銅グリッド(Nisshin EM)に捕集した。PC製メンブレンフィルター(外径25 mm, ポアサイズ0.1 μm, K010A025A, アドバンテック)の中央部に4つの銅グリッドを固定した。メンブレンフィルターをステンレス製フィルターホルダー(LS25, アドバンテック)に装着し、ポンプ(NLY-2, 東京ダイレック株式会社)を用いてサンプル空気を1.2 L min⁻¹で吸引した。排気粒子は主に拡散力によって銅グリッド上に捕集されたと考えられる。

エンジンの25 m下流での排ガス試料は、サイレンサー(P3)の前に設置された十字型の鋼製円筒に取り付けた4箇所のサンプリングプローブから採取された。サンプルガスは、cPTFE管(内径4 mm、長さ0.75m、内径8mm、長さ14.9m、100℃)を用いて屋外コンテナに導入した。屋外コンテナでは、排気サンプルガスをリアルタイム機器、TEMサンプラー、組成分析用サンプラーに分岐した。粒子数濃度の粒径分布はEEPS(Model 3090、粒径: 6.04-523.3 nm、TSI、流速10 L min⁻¹)を用いて1秒ごとに測定した。

TEM観察、化学分析条件

国立環境研究所基盤計測機器のTEM（JEM-2100plus、日本電子）を用いて、加速電圧200 kVで動作させながら粒子の形状を観察した。粒子画像は、20万倍でランダムに撮影し、1枚の画像に1個の粒子が得られるようにした。各サンプルから50～100枚の画像をFujitaniらの手法³⁾に従って撮影・評価した。画像は手で投影像に変換し、粒子の投影面積を求めた後、投影面積相当径を算出した⁴⁾。

化学分析の項目は、元素状炭素（EC）、有機炭素（OC）、全炭素（TC）、有機成分、元素、水溶性イオンである。炭素分析には熱分離・光学補正炭素分析計を、有機成分分析には、極微量の試料に適用可能な、加熱脱着ガスクロマトグラフィー/質量分析（TD-GC/MS）を用いた（図-2.5）。元素組成分析には東北大学の低X-rayと高X-ray用のSi（Li）検出器を備えた μ -PIXEシステムを、イオン成分分析には陰イオンと陽イオンを同時に測定可能なイオンクロマトグラフィーを用いた。粒子の起源解析に欠かせないジェット燃料とオイルについても、現地で使用されているものを分取し、有機成分分析と元素分析を行った。粒子個数の粒径分布と化学組成、ジェットエンジンの構造に関する新たな知見に基づき、排出されるオイルナノ粒子の存在、排出箇所、煤粒子との混合箇所について考察した。

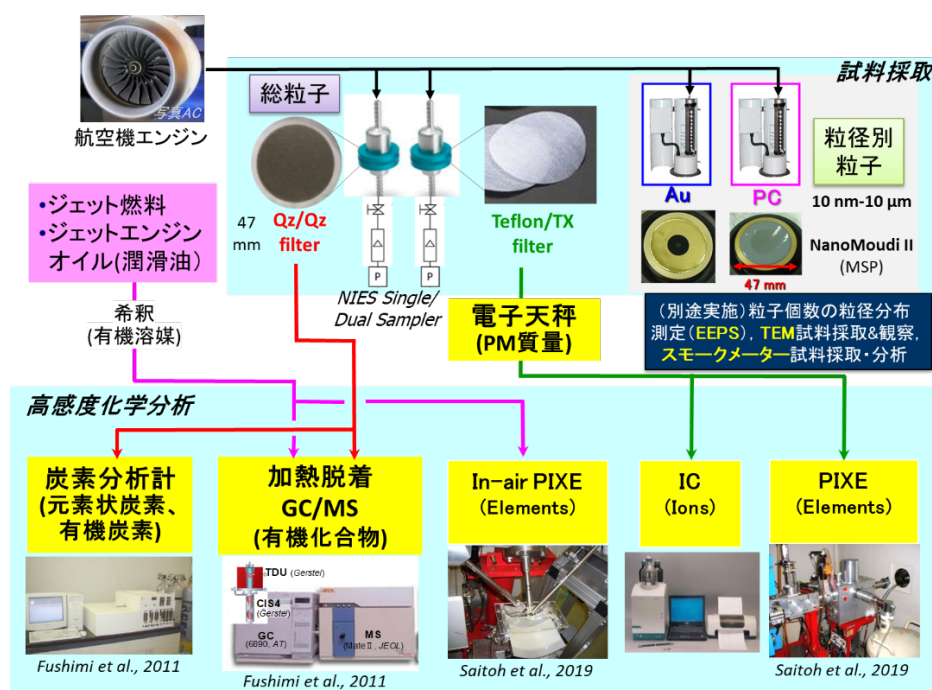


図-2.5. 粒子試料採取から化学分析までのフロー。

4. 結果及び考察

粒子個数濃度の粒径分布

エンジン直下と25 m下流で測定された粒子数濃度粒径分布の典型例を図-2.6に示す。運転モード全体で平均すると、エンジンの下流地点P3で観測された粒子個数の粒径分布は、粒径10 nm程度をピークとするほぼ一山の粒径分布であり、成田国際空港の滑走路直近で観測された粒径分布¹⁾と似ていた。モード径におけるナノ粒子の個数濃度は、エンジン直下よりも25m下流の方が14～47倍高かった。エンジン直下では燃焼排気は希釈装置で8～11倍に希釈され、25 m下流ではバイパスエアーまたは外気によって10～27倍程度に希釈されるため、計算上は25 m下流の方が粒子濃度は低くなるはずだが、現実には逆の結果となった。この結果から、以下の二つの仮説が考えられる。

(仮説1) エンジン下流で核生成（有機物や硫酸塩）。

(仮説2) ナノ粒子が主燃焼排気とは異なる場所（ブリーザーベント等）から排出。

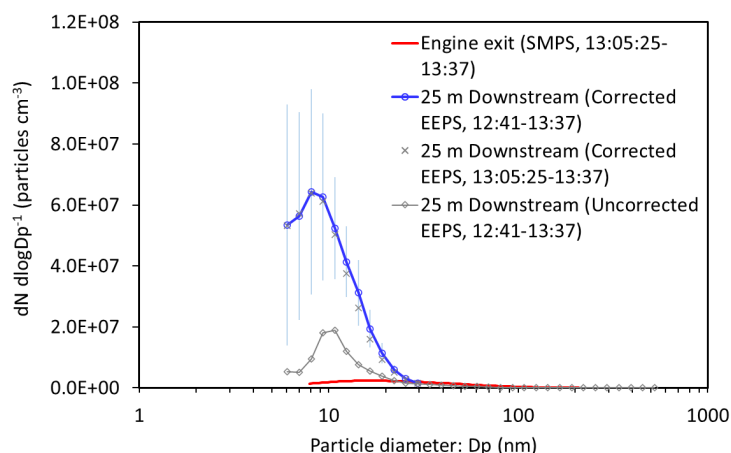


図-2.6. 粒子数濃度粒径分布の例（測定日：2021年4月13日、エンジン種：CFM56-7B、全エンジン出力の平均、エンジン直下P1 vs 25 m下流P3）。サブテーマ3での室内実験での検証試験結果に基づきEEPSの結果を補正し、測定・補正誤差範囲を示してある。

粒子形態（TEM観察）

TEMによる観察の結果、内部構造と凝集度が異なる5種類の粒子が観察された（図-2.7）。(a)と(b)が粒子内部にグラファイト様の層状構造が複数確認された粒子であり、(c)(d)(e)がグラファイト様の層状構造が見えない粒子（アモルファス粒子）である。グラファイト様の層状構造をもつ粒子は不完全燃焼で生じた煤粒子であること、およびアモルファス粒子はオイル等の有機物や硫酸塩等を主体とする粒子であることが示唆されるが、正確な同定・分類は現段階では困難である。この5種類の粒子数比は図-2.8のようになり、エンジン直下ではグラファイト様の層状構造をもつ粒子が支配的（84-91%）だった一方、25 m下流ではアモルファス粒子の比率が増加し、特にアイドリング時の試料では63%がアモルファス粒子という非常に特徴的な結果であった。TEM観察に基づく投影面積等価径は図-2.9のようになり、グラファイト様の層状構造をもつ粒子のモード径は11-29 nmである一方、アモルファス粒子のモード径はやや小さかった（8.1-19 nm）。また、成田空港での大気観測から不揮発性粒子（煤粒子を想定）のモード径が9.0～9.5 nm程度であると推定されているが⁵⁾、本研究によって粒径10 nm程度以下の非凝集体（単一粒子）のグラファイト様の層状構造をもつ粒子が航空機エンジン排気中に多く存在することが、TEM観察の結果から実証された。このグラファイト様の層状構造をもつ粒子が煤だとすれば、大気観測で得られた最新の知見と整合的である。粒径約10 nm以下のグラファイト様の層状構造をもつ単一粒子やアモルファス粒子は、航空機排気粒子のよいマーカーになる可能性がある。本研究で用いたTEM用の試料採取法・機材は簡易なものであるため、空港周辺での観測などにおいて、TD-GC/MSによるオイルマーカー成分の測定と並び、有効なツールとなり得る。

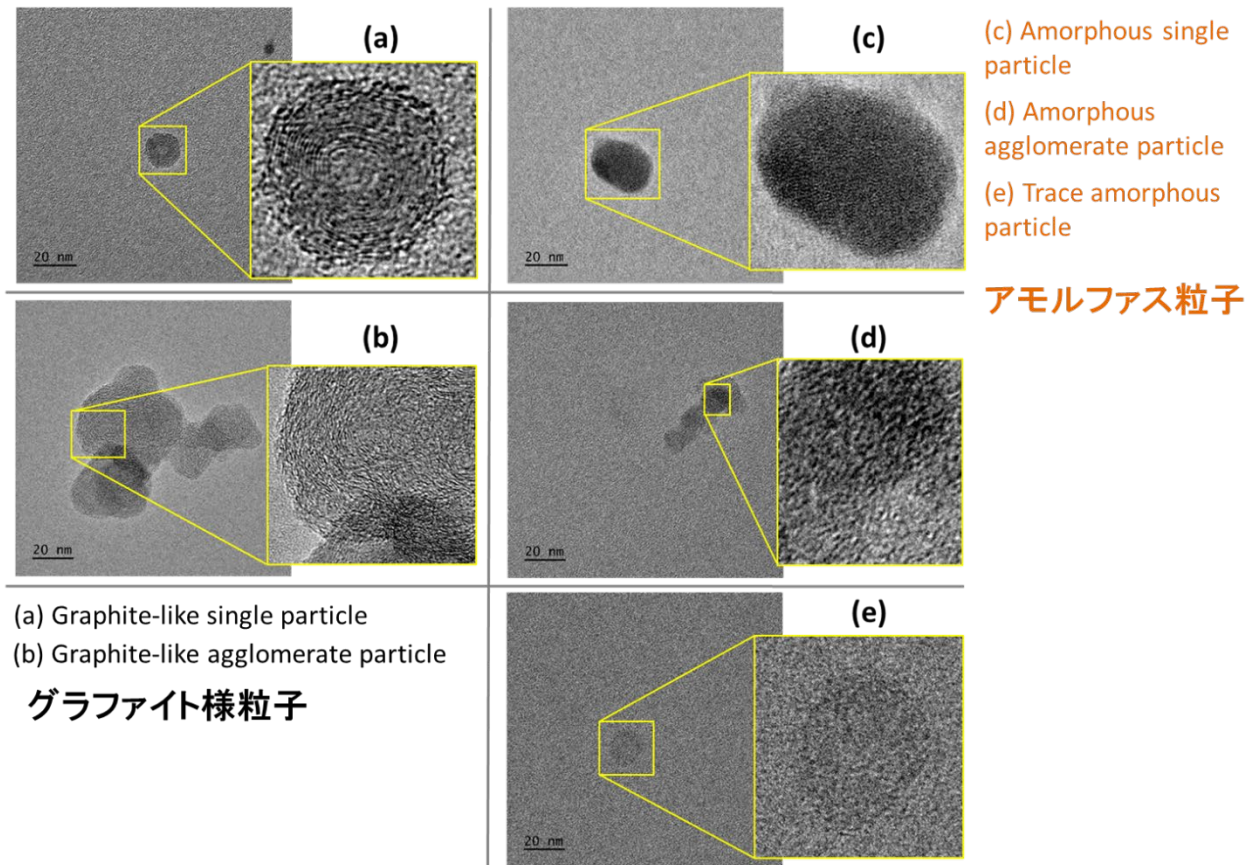


図-2.7. 内部構造と凝集度が異なる5種類のジェットエンジン排気ナノ粒子。(a) グラファイト様の層状構造をもつ単一粒子、(b) グラファイト様の層状構造をもつ凝集粒子、(c) アモルファス単一粒子、(d) アモルファス凝集粒子、(e) 薄像アモルファス粒子。

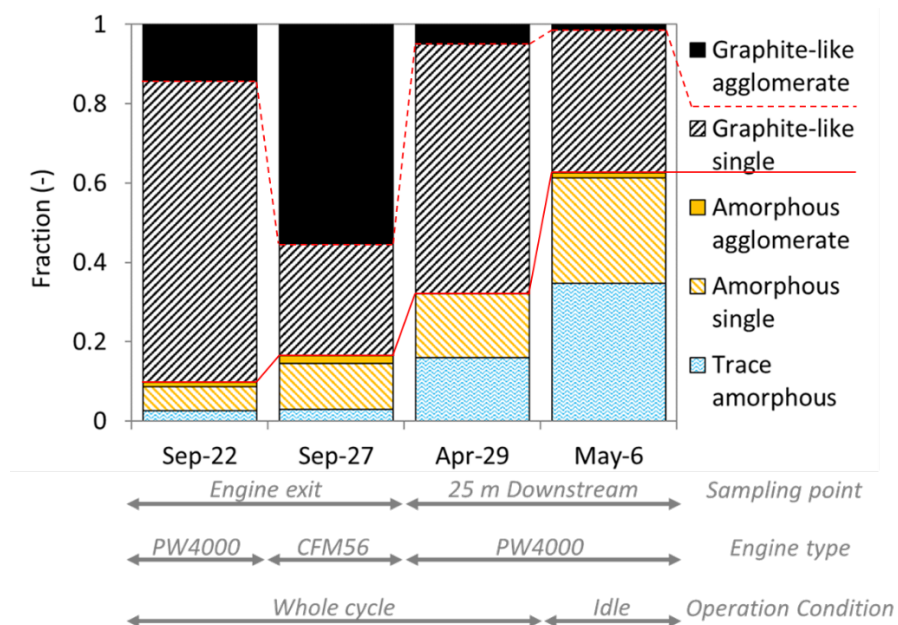


図-2.8. 5種類の粒子の個数比。

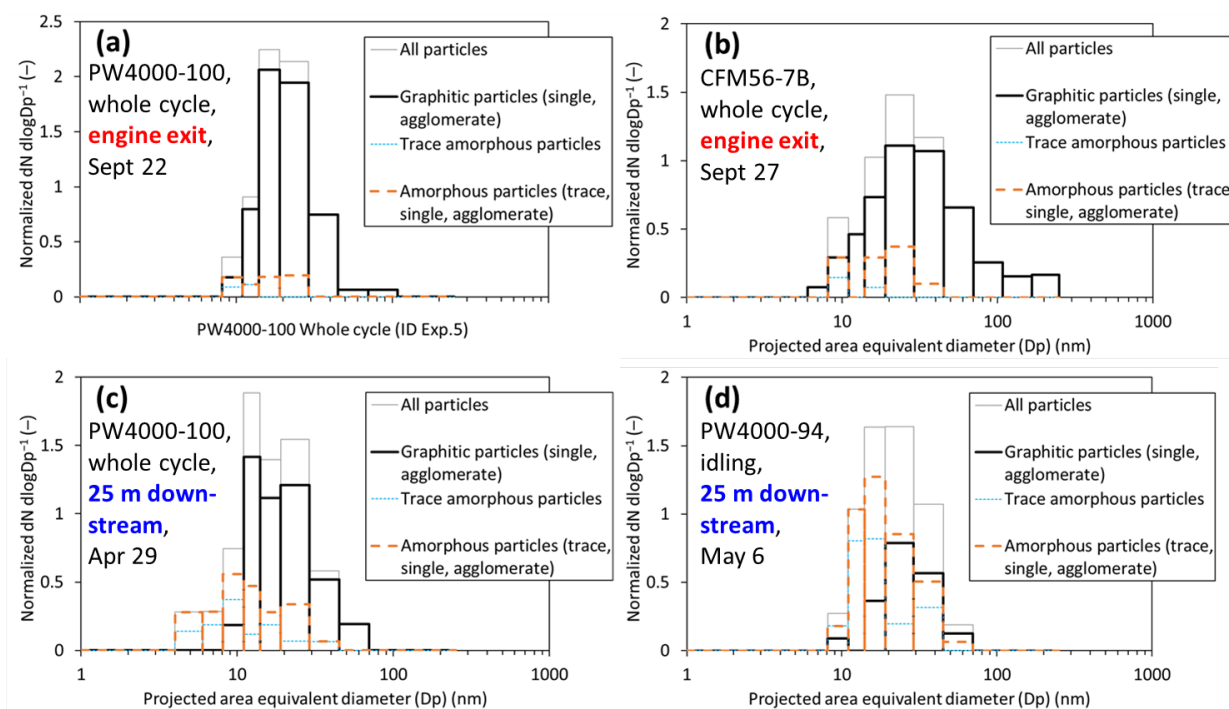


図-2. 9. 投影面積等価径の分布。

粒子の化学組成

排気総粒子の主成分組成の分析結果の例を図-2. 10に示す。いずれの試料も炭素成分が粒子質量の大部分を占めた。元素状炭素／全炭素比は運転モード平均では0.12～0.59であったが、アイドリング時には有機炭素が支配的（元素状炭素／全炭素比は0.04～0.08）であった。また、エンジン直下P1よりも下流P3で有機炭素／全炭素比が少し高い傾向が認められた。一部の試料でEC3（最も高い温度で燃焼・検出される元素状炭素）が元素状炭素総量の半分程度を占める特徴的な結果であった。

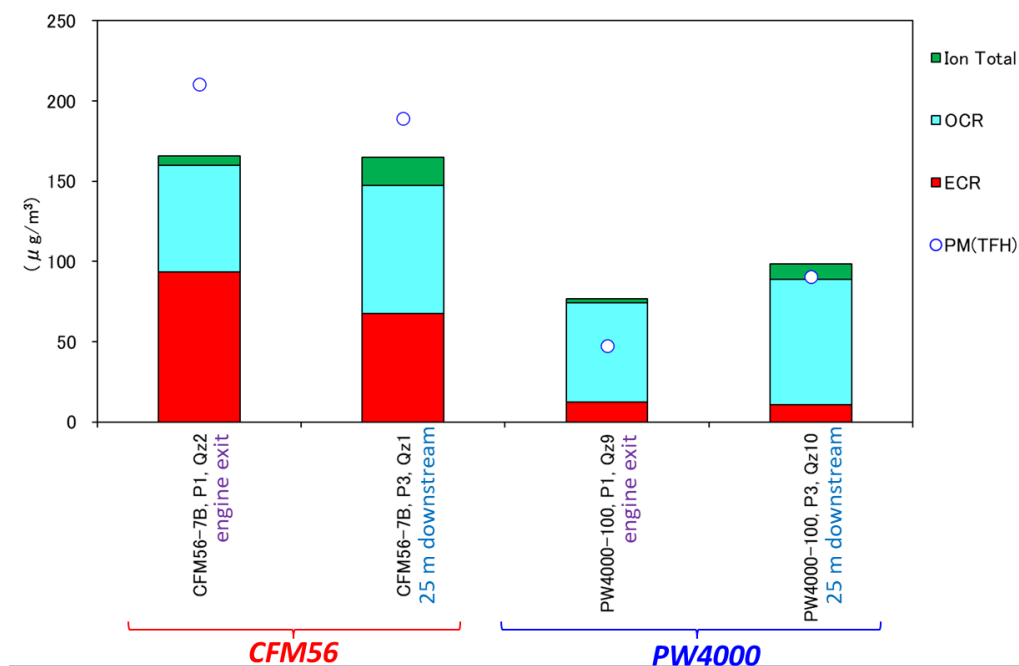


図-2. 10. 排気総粒子の主成分の濃度。NIES dual sampler、Qz/Qz、Teflon/TX。OC（有機炭素）濃度は、後段の石英繊維フィルターの分析値をガス吸着分とみなし減算した。

CFM56-7Bエンジンからの排気総粒子の有機成分分析の結果、エンジン直下P1の排気粒子からオイルに特徴的な成分（脂肪酸エステル、リン酸トリクレジル等、以下「オイルマーカ」）が低濃度に検出され、エンジン下流P3の排気粒子からは、これらのオイルマーカがP1の約50倍と高濃度に検出された（図-2.11、2.12）。同様に、PW4000-100エンジンからのP1排気総粒子からも微量のオイルマーカが検出され、P3排気総粒子からはその約13倍の強度でオイルマーカが検出された。また、P1のスモークメーターで採取された総粒子試料の全てからオイルマーカが検出された。

さらに、CFM56-7Bエンジン排気粒子の粒径別有機成分分析の結果、粒径18～32 nm、32～60 nm、60～110 nmからもオイルマーカがはっきり検出された（図-2.13）。オイルマーカの気中濃度は、ナノ粒子で高く、粗大粒子で低かった。図-2.13のクロマトグラムから推定すると、排気ナノ粒子中の炭化水素の約80%以上が未燃オイルで構成されると推定される。

このように、スモークメーターによるエンジン直下P1の総粒子、NIES Dual Samplerによるエンジン直下P1と下流P3の総粒子、エンジン下流P3のナノ粒子を含む粒径別粒子の全てからオイルマーカ（有機成分）が検出された。これらのことから、空港大気観測から示唆された、オイルを高濃度に含むナノ粒子が航空機ジェットエンジンから排出されていることを実証できた。PW4000系エンジンの場合も、オイルマーカ成分の検出強度はCFM56エンジンに比べると相対的に弱かったが、エンジン直下と25 m下流における測定結果の概要・トレンドは同様であった。

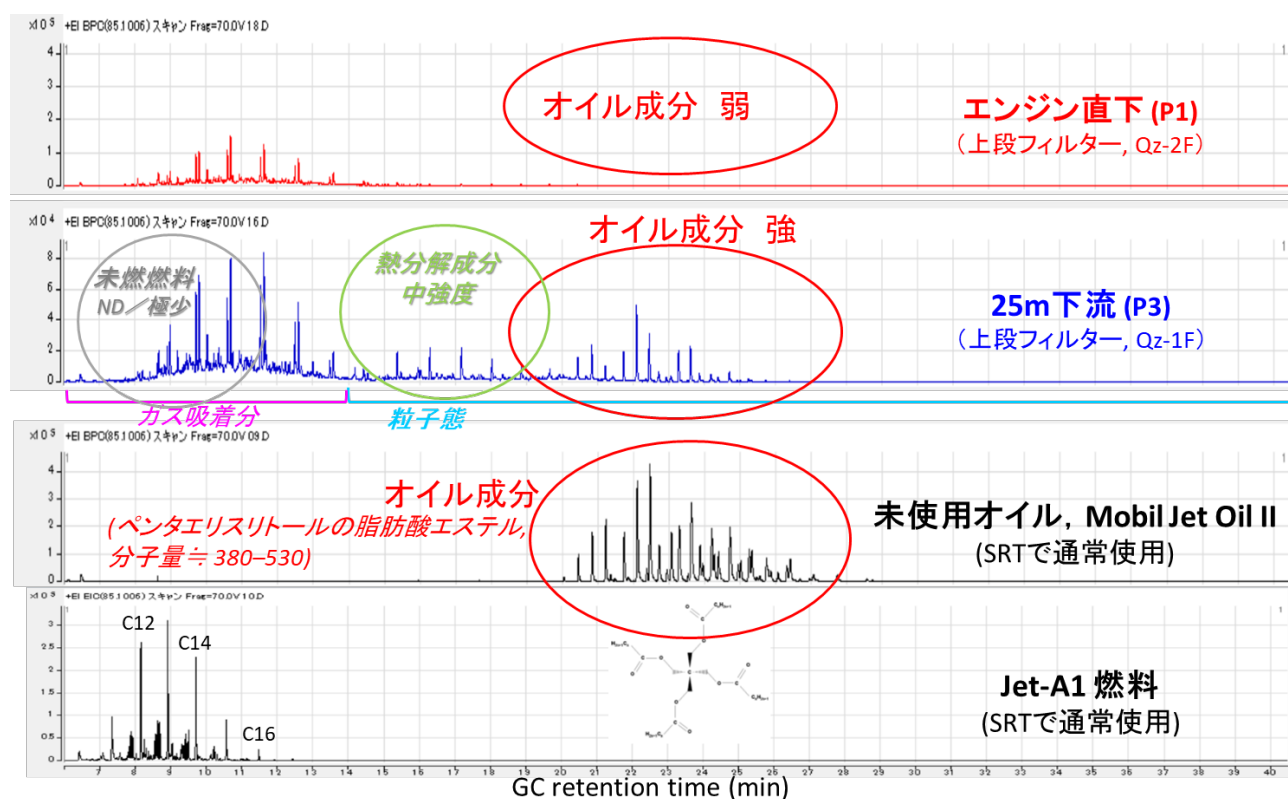


図-2.11. 排気総粒子と未使用オイル、燃料の炭化水素（ m/z 85.1006）のTD-GC/MSマスキロマトグラム。測定日：2021年4月13日、エンジン種：CFM56-7B。

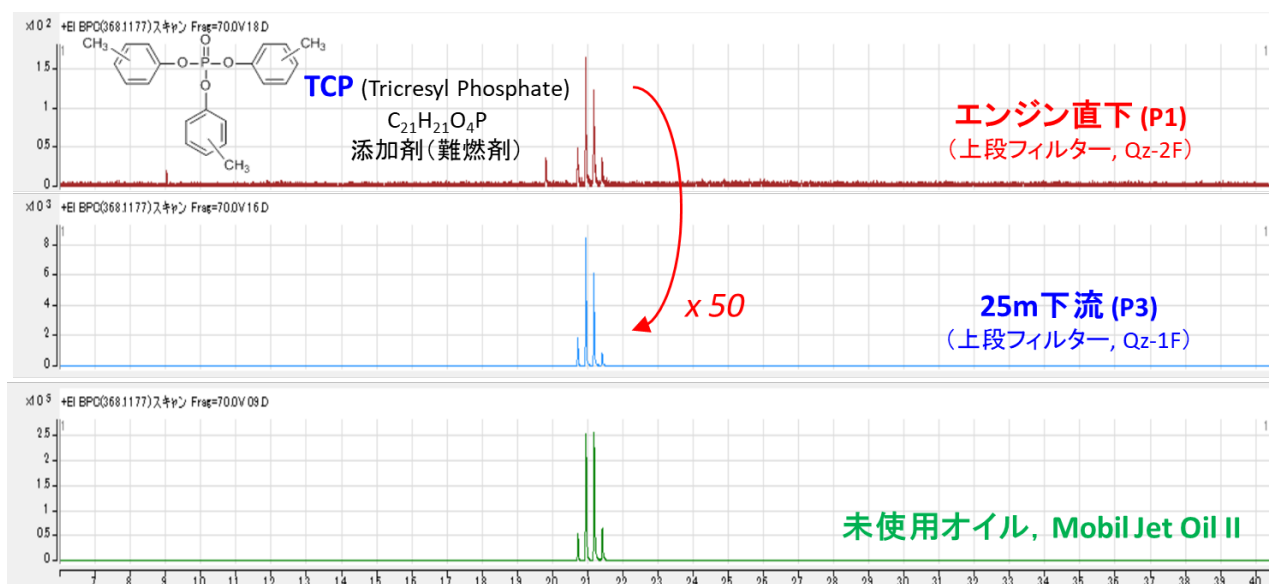


図-2.12. 排気総粒子と未使用オイルのリン酸トリクレジル (TCP; m/z 368.1176) のTD-GC/MSマスキロマトグラム。測定日：2021年4月13日、エンジン種：CFM56-7B。

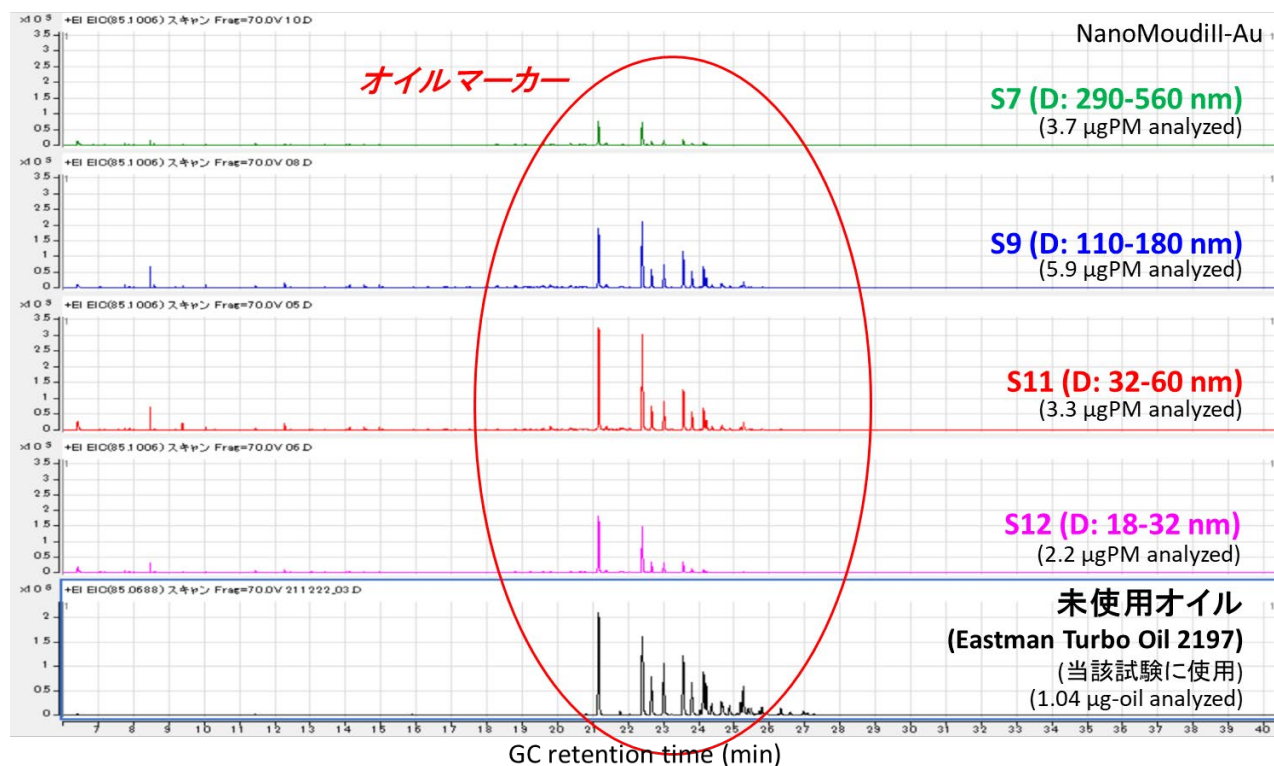


図-2.13. エンジンの25 m下流における粒径別排気粒子と未使用オイルの炭化水素 (m/z 85.1006) のTD-GC/MSマスキロマトグラム。測定日：2021年9月27日、エンジン種：CFM56-7B。

オイルナノ粒子の排出・生成メカニズムと排出低減対策の考察

以上の研究成果をまとめると次のようになる。

- ・ エンジンの25m下流に進むと、粒径30nm以下のナノ粒子の個数濃度が10倍以上高くなる。
- ・ エンジン下流では、個数比で見ると、ナノ粒子はグラファイト様の層状構造をもつ粒子よりもアモルファス状の粒子が多い。
- ・ オイル成分の濃度が下流で増える。
- ・ 25 m下流のナノ粒子の炭化水素の大半がオイル由来。

このほか、既存の知見として次のものがある。

- ・ P&W社エンジンのブリーザーベント内で、オイル粒子を検出した例があるが、体積モード径は250-350 nmと大きくナノ粒径ではなく、排出個数は全粒子に比べ6桁小さい⁶⁾。
- ・ サブミクロンサイズの自動車用オイルミスト (10 cm^{-3} オーダー) を500℃で加熱・蒸発し、40℃で冷却して再凝縮させると、 10^7 cm^{-3} オーダーのオイルナノ粒子 (粒径約20 nm) が生成する⁷⁾。
- ・ 硫酸塩が無くても、航空機用オイル中の有機成分が単独で核生成することが理論的に示された⁸⁾。

これらのことを統合して、オイルナノ粒子の排出・生成メカニズムを考察する。まず、文献における知見から、ブリーザーベントから排出されたオイルミストがそのまま検出されている可能性は低いことが示唆される。一方、元のオイルミストの個数濃度が低くても、それが一旦蒸発して再凝縮すると 10^6 倍の個数濃度の極めて小さいナノ粒子が生成することから、ジェットエンジンの下流でこのプロセスが生じていると推察される。すなわち、CFM56エンジンの場合には、エンジンの回転軸上からオイルが定常的に排出されているが、排出されたオイルは高温 (350～550℃程度と推定) の燃焼排気に取り囲まれるため瞬間的に燃焼または蒸発すると考えられる。その後、下流に進むとバイパスエアーや外気により希釈され速やかに温度が下がるため、その過程でオイル成分を主成分として高濃度のナノ粒子が生成すると考えられる。

なお、スイス施設のエンジン技術者らとの意見交換等によって、エンジンオイルの回収・分離システムの最終段階で、オイルの蒸気やミストを含む可能性のある気体が、CFM56系エンジンではエンジンの回転軸の延長線上のブリーザーベントポートから排気され、PW4000系エンジンではエンジン下方のバイパスエアー中に排気されることが分かった。PW4000系エンジンの場合にはオイルの濃度が相対的にCFM56エンジンよりも低い、エンジン直下と25 m下流の相対的な関係はCFM56と同様である。よって、PW4000系エンジンにおいても、エンジン下方のブリーザーベントから排出されたオイル (ガス状または液状) が、エンジン出口の後方で燃焼排気と混合し、瞬間的に蒸発し、その後希釈・冷却される過程でオイルを主成分とする高濃度のナノ粒子を生成したことが示唆される。

ブリーザーベント手前の遠心分離機の改良等でオイルの排出量を減らすか、またはオイルの排出先を変更できれば (例えば再度エンジン燃焼室内に導入する)、排出粒子個数を大幅に減らせる可能性があると考えられる。

今後の課題

本研究の主な今後の課題として、以下の事項が挙げられる。

- ・ 元素組成の解析、排気ナノ粒子組成の定量的情報の提示、エンジン運転条件との関係解析。→健康影響との関連の考察のための知見。
- ・ 粒子中オイルの定量、オイルの寄与率 (粒子質量・個数ベース) の推定。
- ・ 航空機エンジン試験における25m下流の測定結果に基づくエンジン推力 (LT0サイクル) 別の総粒子の排出係数の算出。サブテーマ1の神戸空港周辺での観測に基づく値との整合性確認。
- ・ オイルの排出を減らすために、航空機エンジン側で実現可能な改良は何か、改良によってオイルの排出を減らすことができるかの検証。

5. 研究目標の達成状況

全体としては当初計画と同程度の水準の研究成果が達成できた。また、申請当初計画にはなかった粒子形態測定に関しては想定以上の成果が得られた。成果発表に関しては当初計画より半年程度遅れる見込みである。主たる研究内容が海外との共同研究であり、COVID-19による甚大な影響下ではやむを得ないと考えられるが、研究期間終了後も継続的に論文発表を行うことで成果を発信したい。

6. 引用文献

- 1) Fushimi, A., Saitoh, K., Fujitani, Y., Takegawa, N., 2019. Identification of jet lubrication oil as a major component of aircraft exhaust nanoparticles. *Atmos. Chem. Phys.* 19, 6389-6399.
- 2) 中村 寛治, カラー図解でわかるジェットエンジンの科学, ISBN-13: 978-4797363739, 2013.
- 3) Fujitani, Y., Saitoh, K., Kondo, Y., Fushimi, A., Takami, A., Tanabe, K., and Kobayashi, S.: Characterization of structure of single particles from various automobile engines under steady-state conditions, *Aerosol Sci Tech*, 50, 1055-1067, 10.1080/02786826.2016.1218438, 2016.
- 4) Fujitani, Y., Sakamoto, T., and Misawa, K.: Quantitative Determination of Composition of Particle Type by Morphology of Nanoparticles in Diesel Exhaust and Roadside Atmosphere, *Journal of Civil & Environmental Engineering*, 01, 10.4172/2165-784x.S1-002, 2013.
- 5) Takegawa, N., Murashima, Y., Fushimi, A., Misawa, K., Fujitani, Y., Saitoh, K., and Sakurai, H.: Characteristics of sub-10 nm particle emissions from in-use commercial aircraft observed at Narita International Airport, *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 1085-1104, 10.5194/acp-21-1085-2021, 2021.
- 6) Yu, Z., Liscinsky, D. S., Winstead, E. L., True, B. S., Timko, M. T., Bhargava, A., Herndon, S. C., Miake-Lye, R. C., and Anderson, B. E.: Characterization of lubrication oil emissions from aircraft engines, *Environ Sci Technol*, 44, 9530-9534, 10.1021/es102145z, 2010.
- 7) Fujitani, Y., Ideno, Y., Fushimi, A., Tanabe, K., Kobayashi, S., and Kobayashi, T.: Generation of Nanoparticles of Lubricating Motor Oil for Inhalation Studies, *Aerosol Sci Tech*, 41, 14-23, 10.1080/02786820601026559, 2007.
- 8) Ungeheuer, F., Caudillo, L., Ditas, F., Simon, M., van Pinxteren, D., Kılıç, D., Rose, D., Jacobi, S., Kürten, A., Curtius, J., and Vogel, A. L.: Nucleation of jet engine oil vapours is a large source of aviation-related ultrafine particles, *Communications Earth & Environment*, 3, 10.1038/s43247-022-00653-w, 2022.

Ⅱ－３ 航空機排気粒子の物理・化学特性を考慮した粒子計測法の多角的評価

国立研究開発法人産業技術総合研究所

計量標準総合センター	物質計測標準研究部門	粒子計測研究グループ	桜井 博
計量標準総合センター	物質計測標準研究部門	粒子計測研究グループ	村島 淑子

【要旨】

サブテーマ3においては3つの課題を設定して研究開発を行った。第一の課題では、サブテーマ1と2で用いた計測器に対し、煤などの不揮発性粒子（粒径 5 nm～100 nm）を人工的に発生させ、国家標準にトレーサブルな校正のなされた計測器を参照標準に用いて試験・校正を行った。サブテーマ1については粒子数濃度計測器（UCPC-CPC）、加熱・希釈器、携帯型CPC、携帯型SMPSの試験・校正を行い、UCPC-CPCと加熱・希釈器に対しては透過検出効率、携帯型CPCに対しては検出効率の粒径・濃度依存性と日内安定性、携帯型SMPSに対しては粒径及び粒子数濃度の計測精度とその粒径・濃度依存性を調べた。サブテーマ2についてはエンジン排ガス用粒径分布測定器（EEPS）に対して試験・校正を行い、粒径分布の計測誤差を低減するための粒径ごとの補正係数を導出した。第二の課題では、航空機から排出される不揮発性粒子の形状が計測精度に与える影響を考察するため、サブテーマ1の空港での実大気観測に合わせ、粒径10 nmの不揮発性粒子を捕集し、顕微鏡による形状観察を行った。観察できた粒子の数がわずかであったために断定には至らなかったが、観察された粒子はフラクタル状ではなく球形に近いコンパクトな形状を有しており、本プロジェクトで用いた計測手法（電気移動度分級、凝縮粒子計数）へ及ぼす粒子形状の影響は大きくない可能性が示唆された。第三の課題では、国際民間航空機関（ICAO）排出規制用の排ガス粒子計測設備内で起こる粒子の損失や粒径変化に起因する計測誤差を評価し、実環境中と試験設備中での計測の差異を考察するため、排ガス計測設備を模擬した実験設備を産総研内に構築し、航空機排ガス中の不揮発性粒子を模擬した粒子を発生させて、粒子数濃度の低下と粒径の変化を調べる実験を行った。その結果、排ガス計測設備に対してICAO規制中で想定されているのとおおむね同程度の粒子損失が生じることが確認された。

1. 研究開発目的

サブテーマ3の目的は、サブテーマ1・2において用いられる計測器に対する試験・校正を通じて、得られた計測結果への信頼性を確保することである。サブテーマ1・2で行う超微小粒子状物質の計測は未だに精度管理技術が十分に成熟・普及しておらず、そのため、研究結果として報告される計測値の信頼性の確保は個々の研究者に委ねられており、それが文献間の結果の不一致の一因となっている可能性がある。超微小粒子状物質の計測器に対する試験・校正を正しく行うには、特殊な設備と多くの知識・経験を必要とし、個々の研究者が自身で実施するのは容易ではない。そのため、当該研究課題で用いられる計測器に対する信頼性確保を一つのサブテーマとし、超微小粒子状物質の計測器に対する試験・校正の知見を有し、粒径・粒子数濃度の国家標準を開発・供給してきた実績のある産総研が担当して、方法の考案、試験・校正の実施、結果の解釈を行う。

2. 研究目標

国際規制と関連付けてサブテーマ1と2で用いる計測法の評価を行う。特に、産総研の有する高精度な粒子計測技術や試験粒子発生技術を駆使して、健康影響が懸念される不揮発性粒子（煤）測定法の信頼性を評価する^(注)。

^(注) 申請書では粒子の物理・化学特性として水溶性を考慮していたが、推進費5-1709の知見等を踏まえ、健康影響においてより重要な煤粒子の粒径・形状に重点を置く計画とした。

3. 研究開発内容

本サブテーマでは、サブテーマ1及び2で得られた実験データの信頼性を確立するとの研究目標に応じ、以下の3つの課題に取り組んだ。

- 実大気観測とエンジン試験で用いる粒子計測装置の試験・校正、事後校正
- 粒径10 nmの不揮発性粒子に対する凝集状態の分析
- 排ガス計測システム内の誤差要因の検討

実大気観測とエンジン試験で用いる粒子計測装置の試験・校正、事後校正

サブテーマ1の実大気観測において用いられた計測器として、UCPC-CPC、加熱・希釈器、携帯型CPC、携帯型SMPSに対し試験・校正を行った。加熱・希釈器とUCPC-CPCに対する校正では、図-3.1に示すように、実大気観測時と同様にこれらを組み合わせた状態で、粒径分級器（DMA）を用いて単分散化した校正用粒子を発生させ、その濃度を参照エアロゾル電流計（FCAE）と比較測定することで、加熱・希釈器の透過率とUCPC-CPCの検出効率の積である透過検出効率を、参照FCAEを基準として求めた。過去に同計測器に対して行った試験では最も小さい粒径は15 nmであったが、さらに小さな粒径の校正用粒子を発生可能な不揮発性粒子発生器を導入し、校正範囲の下限粒径を5 nmへと拡張した。参照FCAEには、産総研が有する気中粒子数濃度の国家標準を用いた校正がなされたものを使用した。加熱管温度は室温・150℃・250℃・350℃の4段階に設定した。

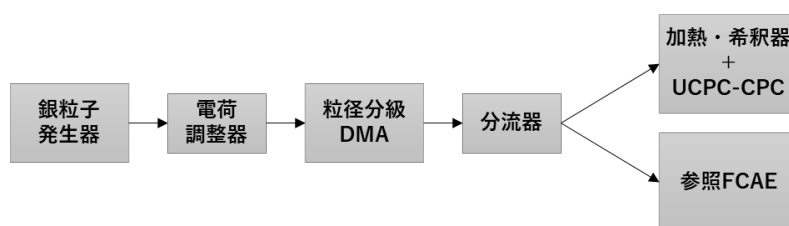


図-3.1. サブテーマ1で用いたUCPC-CPC及び加熱・希釈器に対する校正設備の概念図。

サブテーマ1の実大気観測において用いた携帯型CPCに対しても、図-3.1と同様の設備を用いて参照FCAEと被試験装置の比較を行い、検出効率の粒径依存性、濃度依存性、日内安定性を調べた。校正用粒子発生には銀粒子の代わりにエレクトロスプレー式粒子発生器を用い、発生する粒子を粒径によってショ糖・ポリアルファオレフィン（PAO）・ポリスチレンの中から選定し、粒径分級DMAを用いて単分散化した。参照FCAEには、産総研の有する気中粒子数濃度国家標準のFCAE一次標準器を使用した。

サブテーマ1の実大気観測において用いた携帯型SMPSに対しては、図-3.2に示す設備を用い、参照SMPS及び参照CPCを基準とした試験を行って、粒径及び粒子数濃度の計測精度を調べた。試験用粒子発生にはエレクトロスプレー式粒子発生器を用い、粒径に応じて発生する粒子をショ糖・ポリスチレンから選定した。ポリスチレン粒子の場合は粒径分級DMAを用いて単分散化し、ショ糖粒子の場合は、発生する粒子濃度に応じ、粒径分級DMAを用いて単分散化して、あるいは粒径分級DMAを用いずに多分散のまま、試験に用いた。参照SMPS及び参照CPCには、産総研の有する気中粒子数濃度国家標準及び粒径国家標準にトレーサブルな校正を行ったものを使用した。

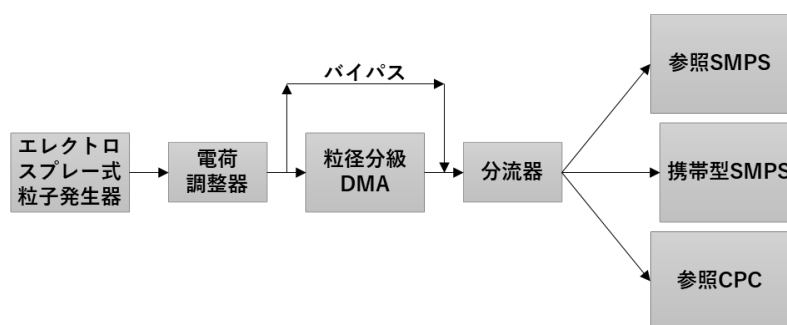


図-3.2. サブテーマ1で用いた携帯型SMPSに対する試験設備の概念図。

サブテーマ2のエンジン試験において用いられた計測器として、エンジン排ガス用粒径分布測定器（EEPS）に対し試験・校正を行った。試験・校正では、図-3.3に示す設備を用いた。試験・校正用粒子には、粒径によって銀・PAO・煤から選定した。粒径分級DMAによる単分散化は、試験・校正の目的によって行う場合と行わない場合とを使い分けた。参照装置には、試験・校正によって参照SMPSまたは参照CPCを用いた。参照SMPS及び参照CPCには、産総研の有する気中粒子数濃度国家標準及び粒径国家標準にトレーサブルな校正を行ったものを使用した。また、EEPSを他機関から1台借用して比較した。

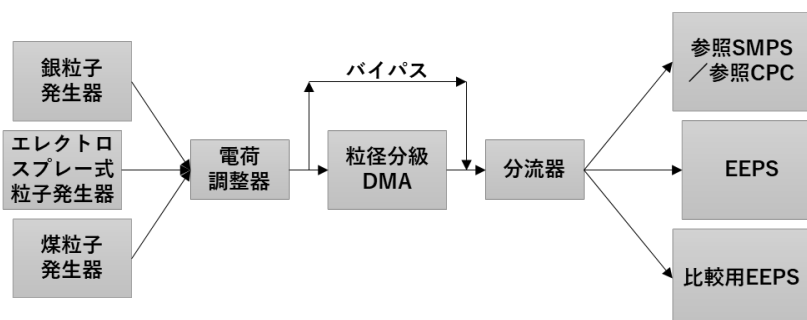


図-3.3. サブテーマ2で用いたEEPSに対する試験・校正設備の概念図。

粒径10 nmの不揮発性粒子に対する凝集状態の分析

航空機排気中の粒径10 nmの不揮発性粒子に対して凝集状態の分析を行うことを目的として、静電粒径分級と静電捕集を組み合わせたナノ粒子捕集システムを製作し、サブテーマ1が2021年10月～11月に行った神戸空港での観測に参加して不揮発性・粒径10 nmの航空機排気粒子の捕集を行った。その後、サブテーマ2の協力を得てTEMによる捕集粒子の観察を行った。

排ガス計測システム内の誤差要因の検討

国際民間航空機関（ICAO）排出規制用の排ガス粒子計測設備¹⁾は、図-3.4に概略を示すように、ジェットエンジンから高温・高濃度・高流速で排出される排ガス粒子の計測を安全な場所で行えるよう長い輸送管を有し、また、排ガスの温度と濃度を計測器が許容できる程度まで下げる希釈機構と、揮発性粒子を除去して不揮発性粒子のみを取り出す加熱機構（VPR）を備えている。そのようなサンプリング・前処理システム内では輸送管内壁への沈着による粒子の損失が生じることが知られている²⁾。そうした計測誤差の要因と程度の検討は、過去に航空機排ガスを用いて実験的に行われた例があるが³⁾、粒子の濃度や粒径の影響をより詳細に検討するため、Section 4（粗大粒子除去器、サイクロン）以外について、排ガス計測システムを模擬した設備を産総研内に構築して実験を行った。希釈器（Section 2）、25 m輸送管（Section 3）、VPR（Section 5）については、実際の計測システムに用いられるのと同じ、またはそれを模擬したものを用意し、航空機排出粒子と同程度の粒径のナノ粒子を産総研の実験室で発生させ、希釈器等に導入し、その前後での粒子数濃度または粒径分布をCPCまたはSMPSを用いて計測し、粒子透過率を算出した（図-3.5）。サンプリング・前処理システムの最上流部（Section 1）に位置するサンプリ

ングプローブ管については、希釈器前の高濃度粒子が通過し、その内部で粒子同士の凝集による粒径の増大と粒子数濃度の低下が生じる可能性があることから、その検討のため、高濃度の試験用多分散粒子を導入し、サンプリングプローブ管前後での粒径分布の変化を調べた（図-3.6）。



図-3.4. ICAO排出規制用の航空機排ガス粒子計測設備の概念図。

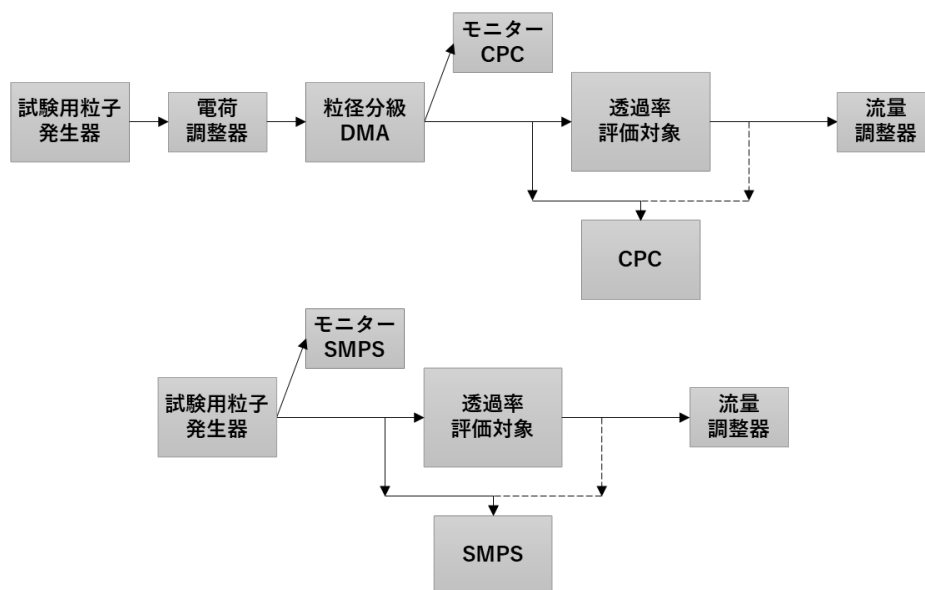


図-3.5. 希釈器・25 m輸送管・VPRに対する粒径ごとの粒子透過率を求めるための実験設備の概念図。上図は単分散の試験用粒子を発生させ、評価対象の上流（実線）及び下流（破線）の粒子数濃度をCPCによって測定した場合、下図は多分散の試験用粒子を発生させ、評価対象の上流及び下流の粒径分布をSMPSによって測定した場合。上図ではモニターCPC、下図ではモニターSMPSを取り付け、粒子発生器の変動や流路の切り替えに伴う濃度及び粒径分布の変化を定量化し、透過率算出での補正に利用した。

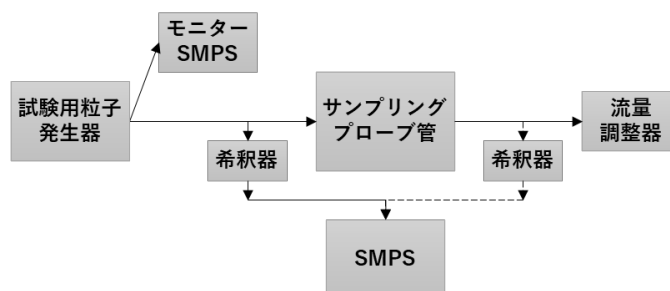


図-3.6. サンプリングプローブ管での粒径分布変化を調べるための実験設備の概略。多分散の試験用粒子を発生させ、サンプリングプローブ管の上流（実線）及び下流（破線）の粒径分布をSMPSによって測定した。SMPSへの配管中で凝集が生じないように、分岐直後に約40倍に薄めるための希釈器を製作し、使用した。モニターSMPSを取り付け、粒子発生器の変動や流路の切り替えに伴う濃度及び粒径分布の変化を定量化し、透過率算出での補正に利用した。

4. 結果及び考察

実大気観測とエンジン試験で用いる粒子計測装置の試験・校正、事後校正

サブテーマ1で用いた加熱・希釈器及びUCPC-CPCに対する校正のうち、検出器にUCPCを用いた場合の透過検出効率の結果を図-3.7に示す。同機に対する2018年の校正では粒径範囲が15 nm以上であったが、今回の校正では最小粒径を5 nmにまで拡張することができ、これまではあてはめ関数の外挿による推定値であった粒径15 nm以下での粒子透過検出率を実測に基づく値へと置き換えることができ、計測の不確かさを低減することができた。

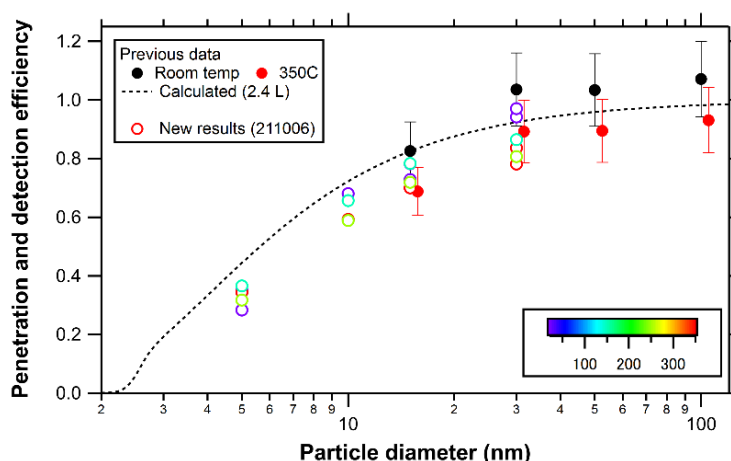


図-3.7. サブテーマ1で用いた加熱・希釈器とUCPCに対する透過検出効率の試験結果。○印（中抜き）の点は今回の結果（粒径 5, 10, 15, 30 nm）、●印（塗りつぶし）は同機を2018年に校正した際の結果（粒径 15, 30, 50, 100 nm）を示す。点の色は加熱温度を表す。破線は2018年校正の結果を拡散沈着及びUCPC検出効率の関数であてはめ、粒径 2.5 nmまで外挿したもの。

サブテーマ1で用いた携帯型CPCに対する検出効率校正の結果を図-3.8～9に示す。図-3.8は検出効率が50 %程度のカットオフ領域（粒径 8.5, 10, 12, 15 nmの点）及び検出効率が粒径によらずほぼ一定なプラトー領域（粒径 100 nmの点）での検出効率を複数日にわたって測定した結果を示す。この図から、このCPCは仕様の「粒径10 nmで検出効率が50%」を満たすこと、一般的なCPCと同様にプラトー領域の検出効率が0.9～1.0の範囲内であること、日間変動が小さく安定していることが読み取れる。日間変動は、粒径10 nmでは0.05以内（3日間）、15 nmでは0.01以内（2日間）、100 nmでは0.02以内（4日間）であった。図-3.9は粒径 55 nmでの検出効率の濃度依存性を示す。校正を行った濃度範囲 $5 \times 10^3 \text{ cm}^{-3} \sim 2.5 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ のうち、低濃度側の $5 \times 10^3 \text{ cm}^{-3} \sim 5 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ では検出効率が0.88で一定であった。さらに高濃度になると同時通過計数損失と思われる検出効率の低下が見られ、 $1 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ では0.84であった。一般的に同時通過計数損失による検出効率の低下は約5%まで許容されるので、上記の結果から、このCPCは仕様「最大可測濃度 $1 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ 」を満たすことが確認できた。

携帯型CPCでは作動液のアルコールは着脱式カートリッジに染み込ませてあり、その持続時間は仕様では約6時間となっている。粒径10 nmのショ糖粒子に対する検出効率を、アルコール補充時から連続して計測したところ、7時間経過してもほぼ一定の検出効率を維持することが確認できた。

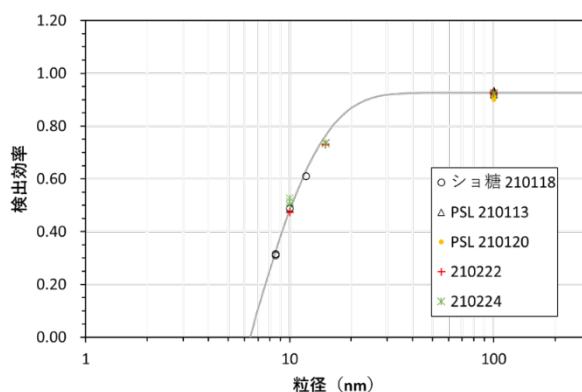


図-3.8. サブテーマ 1 で用いた携帯型CPCに対するカットオフ近傍での粒径ごとの検出効率校正結果。用いた粒子種は、粒径100 nmではポリスチレン、他の粒径ではショ糖。記号は測定日を表す(例えば210118は2021年1月18日)。

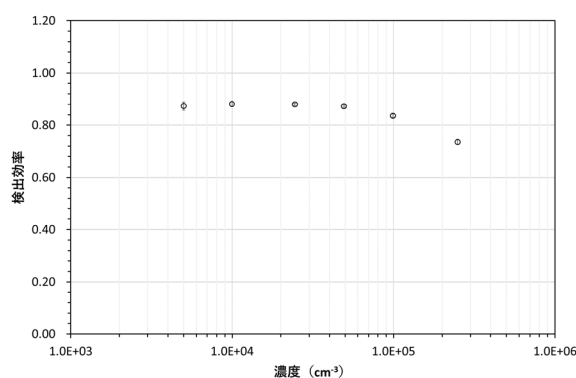


図-3.9. サブテーマ 1 で用いた携帯型CPCに対する濃度ごとの検出効率校正結果。校正用粒子は、粒径55 nmのPAO粒子。

サブテーマ 1 で用いた携帯型SMPSに対する粒径計測精度試験の結果を図-3.10～12に示す。図-3.10は幾何平均径19 nmの粒子を用いた場合の試験結果で、上の図が携帯型SMPSによる粒径分布、下の図が参照SMPSによる粒径分布である。参照SMPSにも見られる粒径20 nm付近のピークに加え、粒径56.2 nm～100.0 nmの区間と粒径316.2 nm以上の区間に粒子が検出されているが、これらはノイズである。幾何平均径と幾何標準偏差を参照SMPSと比べた結果を表-3.1に示す。幾何平均径と幾何標準偏差は参照SMPSと3%以内でよく一致していた。図-3.11は幾何平均径14 nmの粒子を用いた場合の試験結果で、この場合も粒子のピークに加え、粒径31.6 nm～56.2 nmの区間と100.0 nm～237.1 nmの区間にノイズが見られた。表-3.1では、幾何平均径は参照SMPSに比べ-6%、幾何標準偏差は-1%で、いずれも大きな差異は見られなかった。これらのように粒径分布が測定範囲内に包含されるような場合には、幾何平均径と幾何標準偏差を精度よく測定できることが確認できた。図-3.12は幾何平均径10 nmの粒子を用いた場合の試験結果で、この場合も粒子のピークに加え、粒径23.7 nm～42.2 nmの区間と100.0 nm～237.1 nmの区間にノイズが見られた。表-3.1では、幾何平均径は参照SMPSに比べ+20%であったが、携帯型SMPSの測定粒径範囲の下限が10 nmであることから、粒径分布のうち10 nm以上の約半分しか計測できていないことに起因すると考えられる。幾何標準偏差は参照SMPSとよく一致したが、粒径分布の約半分が計測できていないことを考えると、本来であればより小さな幾何標準偏差が算出されるはずである。このように、粒径分布が測定粒径下限より小粒径側に広がっている場合は、幾何平均径と幾何標準偏差の計測結果に大きな誤差が生じうることに注意が必要である。図-3.10に見られたように携帯型SMPSの粒径分布が粒径最小の区間(10.0 nm～13.3 nm)でゼロになっている場合は粒径分布が10 nmより小粒径側へ広がっている可能性はないが、図-3.11や図-3.12のように粒径10.0 nm～13.3 nmの区間で粒径分布値($dN/d\log D_p$)が最大になる場合に

は、粒径分布が10 nmより小粒径側へ広がっているかどうかを正確に見極めることは不可能であり、粒径10 nm付近の粒径分布情報を得られる他の計測器の併用が必要である。また、粒子の存在しない粒径域に現れるノイズは、個数基準の粒径分布では大きな誤差にはならないかもしれないが、体積基準や質量基準の粒径分布へと変換する場合はノイズが強調され、大きな誤差となりうる。

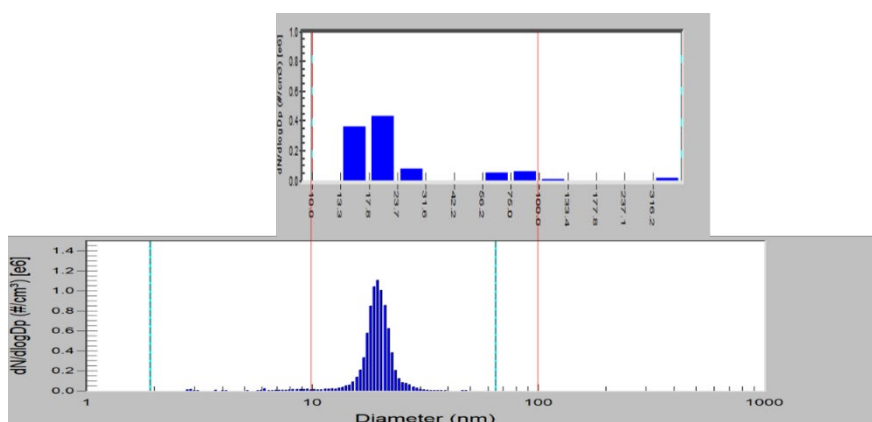


図-3. 10. サブテーマ 1 で用いた携帯型SMPSに対する幾何平均径19 nmのショ糖粒子を用いた試験結果。参照SMPS（下図）との粒径分布の比較。赤色の縦線は粒径 10 nmと100 nmの位置を表す。

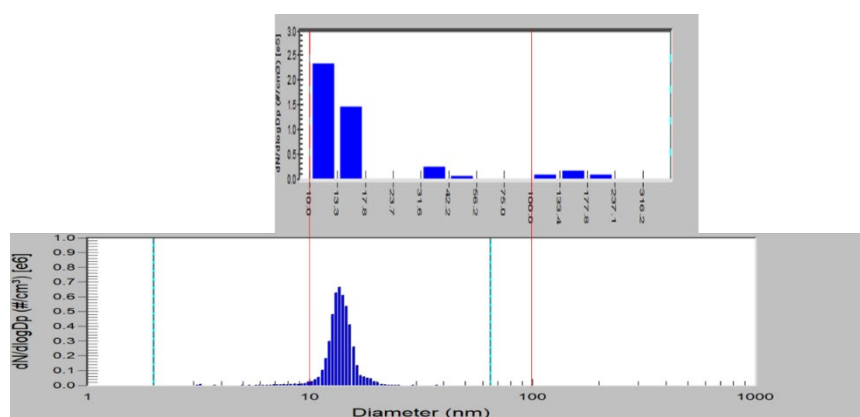


図-3. 11. サブテーマ 1 で用いた携帯型SMPSに対する幾何平均径14 nmのショ糖粒子を用いた試験結果。参照SMPSとの粒径分布の比較。赤色の縦線は粒径 10 nmと100 nmの位置を表す。

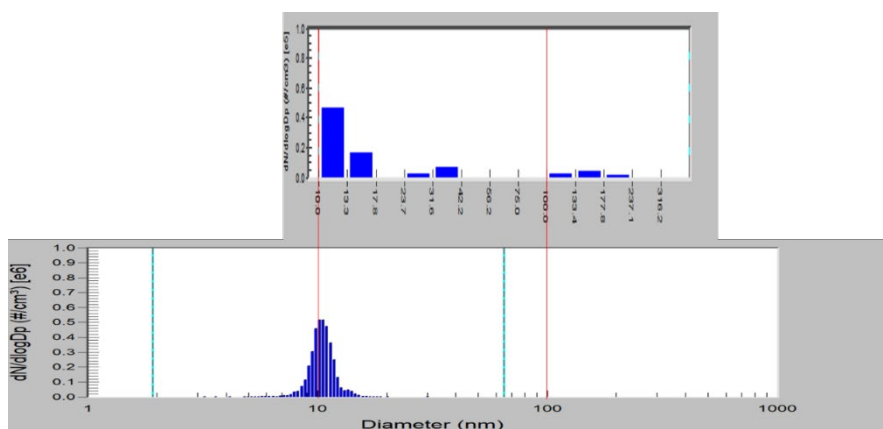


図-3. 12. サブテーマ 1 で用いた携帯型SMPSに対する幾何平均径10 nmのショ糖粒子を用いた試験結果。参照SMPSとの粒径分布の比較。赤色の縦線は粒径 10 nmと100 nmの位置を表す。

表-3.1. サブテーマ 1 で用いた携帯型SMPSの粒径計測精度試験の結果

およその 粒径 (nm)	図	参照SMPS		携帯型SMPS	
		幾何平均径 (nm)	幾何標準偏差	幾何平均径 (nm)	幾何標準偏差
19	3.10	19.0	1.23	18.7	1.20
14	3.11	13.7	1.16	12.9	1.15
10	3.12	10.4	1.14	12.5	1.14

サブテーマ 1 で用いた携帯型SMPSに対する濃度計測精度の濃度依存性試験の結果を図-3.13に示す。この試験は粒径19 nmのショ糖粒子を用いたもので、試験を行った全濃度範囲にわたって濃度を約半分に過小評価することが分かった。試験を行った約 $1 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$ まで線形性は良好であった。

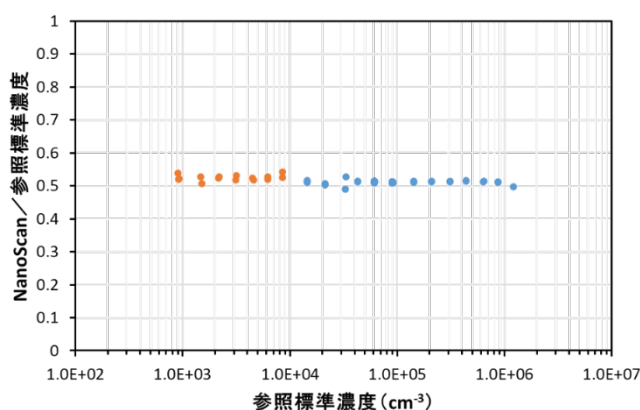


図-3.13. サブテーマ 1 で用いた携帯型SMPSに対する幾何平均径19 nmのショ糖粒子を用いた試験結果。参照CPCに対する濃度比の濃度依存性。オレンジは参照CPCとの直接比較、青は参照CPCに希釈器を取り付けて比較。

サブテーマ 1 で用いた携帯型SMPSに対する濃度計測精度の粒径依存性試験の結果を図-3.14に示す。粒径範囲10 nm～100 nmにおいては、粒径25 nmくらいを境に、小粒径側では濃度を過小評価し、大粒径側では過大評価することが分かった。この結果から、携帯型SMPSは濃度計測での誤差が大きく、主に粒径の計測に用いるのが適切と考えられる。

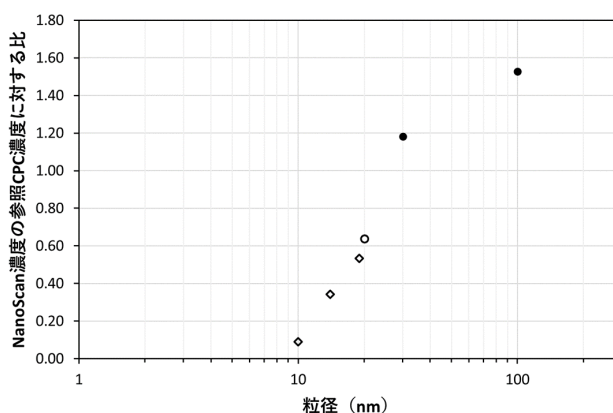


図-3.14. サブテーマ1で用いた携帯型SMPSに対するポリスチレン粒子およびショ糖粒子を用いた試験結果。参照CPCに対する濃度比の粒径依存性。用いた試験粒子は、●は単分散ポリスチレン粒子、○は単分散ショ糖粒子、◇は多分散ショ糖粒子。

サブテーマ2で用いたエンジン排ガス用粒径分布測定器（EEPS）に対しては、エンジン試験の際に他の計測器との比較で判明した①粒径10 nm付近のノイズと②濃度の過小評価について、原因の特定と解消を目指し、比較用EEPSの測定結果を参考にしながら、試験・校正を行った。その結果、サブテーマ2でエンジン試験に用いたEEPSには装置内部に特異なノイズ源があり、実際には存在しない粒子があたかも存在するかのようにノイズが発生する場合があります、それが上記①の原因であることが明らかになった。そこで、EEPS内部での粒径分布算出におけるデータ逆演算にノイズ除去を含めることを検討したが、十分な効果は得られなかった。EEPSによる粒径分布の計測では、装置内部のデータ逆演算が複雑なため、粒径分布値（ $dN/d\log D_p$ ）に対する粒径ごとの補正係数を適用して誤差を解消する手法は適用できない。しかし、対象とする粒径分布を限定すれば、ある程度の不確かさ以内で補正が可能と考えられた。そこで、エンジン試験時の粒径分布を再現するような試験用粒子を産総研の実験室で再現し、その粒子をEEPSと参照SMPSとで比較測定した。その結果を図-3.15に示す。図の青線がEEPSの粒径分布を示し、この分布形状及び $dN/d\log D_p$ 値がエンジン試験時と同様になるよう、幾何平均径約8 nmの銀粒子と幾何平均径約60 nmの煤粒子とを混合して試験用粒子とした。同じ粒子を参照SMPSで測定した結果を赤線で示す。図から分かるように、EEPSは濃度を大幅に過小評価していた。図-3.16は、図-3.15の結果に対し、粒径6.0 nmから29 nmの範囲で粒径ごとに $dN/d\log D_p$ 値のEEPS／参照SMPS比を算出したものである。粒径の増大とともに比が大きくなる傾向に加え、粒径約11 nmの前後に局所的に比の大きな区間があり、これが粒径10 nm付近に生じるノイズを除去する補正である。サブテーマ2のエンジン試験で取得したEEPS粒径分布はエンジンの動作状態によって多様であり、それらの多くにはこの補正は適用できないが、最も重要と思われるデータのの一つに対し、このように補正と不確かさ評価を行うことに成功した。

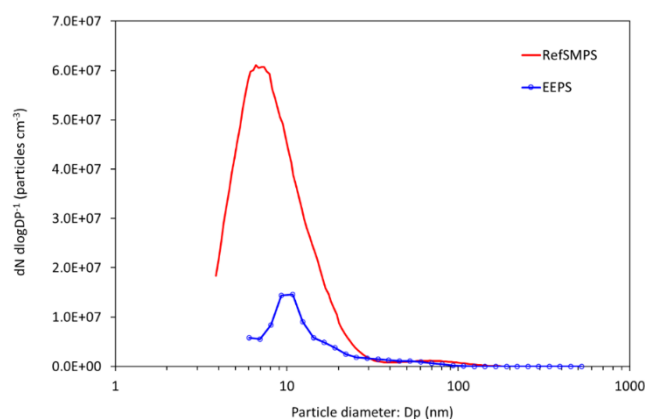


図-3.15. サブテーマ2でエンジン試験に用いたEEPSに対する試験結果。エンジン試験で観測された粒径分布を模した試験用粒子を発生させての参照SMPSとの粒径分布の比較。

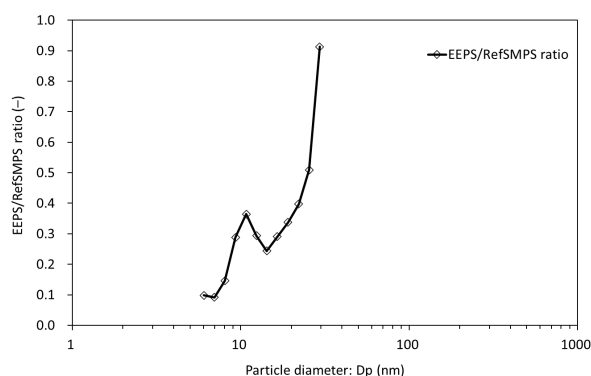


図-3.16. サブテーマ2のエンジン試験に用いたEEPSに対する粒径ごとの粒径分布補正係数。図-3.15の比較測定結果から算出。比較測定時と同様の粒径分布の場合にのみ適用可能であることに注意。

粒径10 nmの不揮発性粒子に対する凝集状態の分析

図3-17に製作したナノ粒子捕集システムの概略を示す。システムの設計では、短時間により多くの粒子を捕集するための工夫を行った。これは、航空機1機からの排気をサンプリングできるのが、ある風向条件下で航空機と捕集の相対位置が特定の条件を満たしたごく短時間に限られるためである。具体的には、通常は1 L/min程度の捕集流量を10 L/minに設定し、それに合わせてCatalytic stripper（触媒式剥離器、350 °C加熱）には流量10 L/minのものを導入し、粒径分級器（Nano DMA）と粒子荷電器を大流量化した。Nano DMAはシース流量：エアロゾル流量を通常の15 L/min：1.5 L/minから40 L/min：10 L/minへと変更し、それでも分級特性に大きな問題がないことを実験的に確認した。粒子荷電器は捕集粒子数を増やすために単極式を選択し、さらに空港観測で使えるよう、放射性同位体や軟エックス線源を用いない放電式のものを作製した。また、観測での電力供給制限に合わせて捕集システムの省電力化を行った。静電捕集器の入口に携帯型CPCを取り付け、10 nmで分級された不揮発性粒子の濃度をモニターできるようにした。空港観測の前に実験室で性能試験を行い、粒径10 nm粒子に対し期待された荷電・分級・捕集性能が得られていることを確認した。静電捕集器には、(株)島津製作所のプロトタイプを使用した。この捕集器は、捕集器入口での粒子数濃度が既知の場合、粒径と捕集器の動作設定（流量、印加電圧、捕集時間）から粒子捕集密度を精度よく推定できる特徴がある。過去の実験から、捕集密度が1 個/ μm^2 以上であれば粒径10 nm粒子の観察をできると予想された。

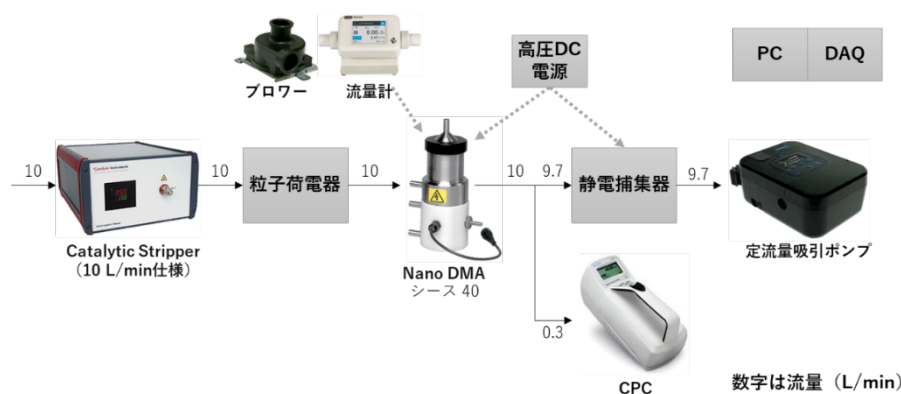


図-3.17. 粒径10 nm不揮発性粒子の捕集システム。写真は各社HPから転載（定流量吸引ポンプ：柴田科学(株)、ブロワー：日本電産コパル(株)、Nano DMA・CPC・流量計：米国TSI社、Catalytic Stripper：独国Catalytic Instruments社）。

サブテーマ1の神戸空港観測（2021年10月～11月）に合わせて実施した捕集は10/23～30の期間に行い、天候と風向が良好であった10/24と10/30の2日間に1つずつ試料を取得した。図-3.18と図-3.19には、10/24と10/30に観測された静電捕集器入口濃度（10 nm分級不揮発性粒子濃度）を高濃度イベントの注釈とともに示す。高濃度イベントはタキシング中の航空機によるものがほとんどであった。コロナ禍の影響により発着便数が少なかったため、いずれの試料においても捕集密度の推定値は目標の1 個/ μm^2 を下回る0.2 個/ μm^2 程度であった。

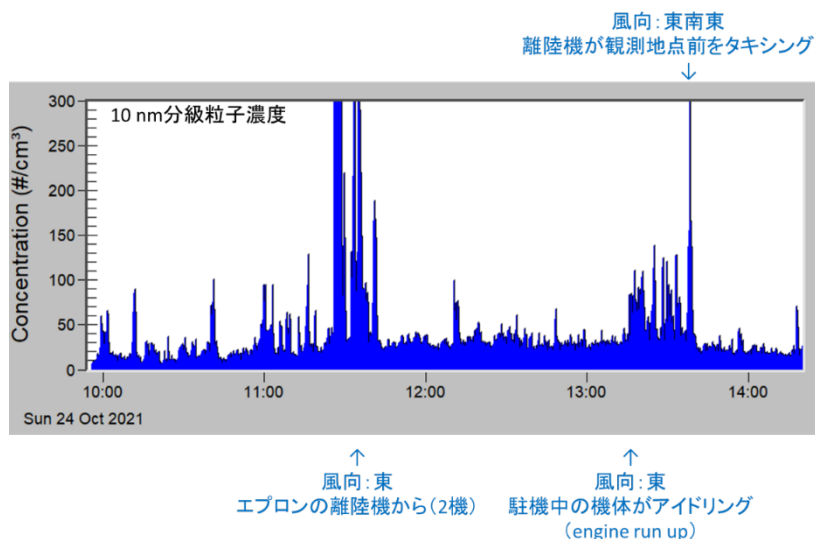


図-3. 18. 2021年10月24日の粒径10 nm分級不揮発性粒子に対する濃度測定結果。

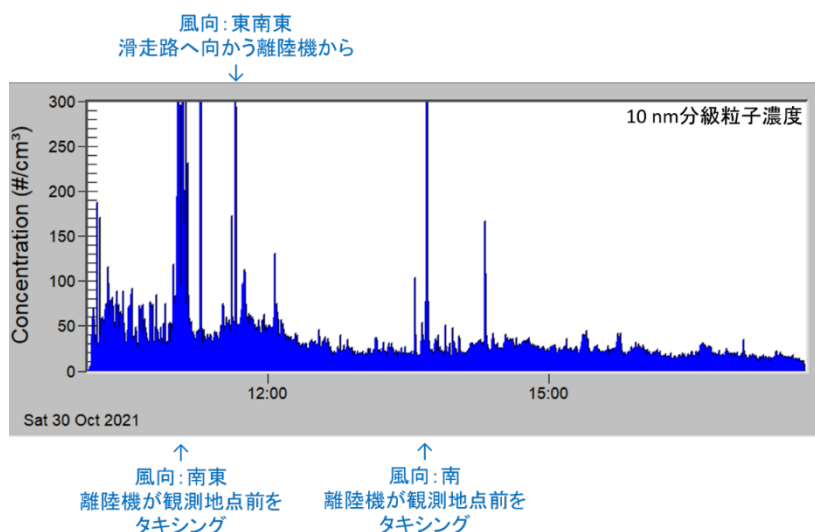


図-3. 19. 2021年10月30日の粒径10 nm分級不揮発性粒子に対する濃度測定結果。

捕集した試料をサブテーマ2の協力を得てTEMにより観察した結果を図-3. 20に示す。図のa～cは神戸空港で捕集したもの、図のdは実験室で発生させた銀粒子を捕集したものである。捕集に使用したTEMグリッドの膜が弱く、加速電圧を上げられなかったため、解像度が不十分で、不鮮明な画像しか得られなかった。また、TEM観察中に膜の破れが多発したため、写真として記録できた粒子は、神戸空港の試料ではa～cの3個だけであった。これらの粒子は完全な球状ではないが、コンパクトな形状を有し、フラクタル状で隙間の多い凝集体ではない。そのため、サブテーマ1・2で用いた計測手法（電気移動度分級、凝縮粒子計数）へ及ぼす粒子形状の影響は大きくないことが示唆された。ただし、観察できたのは3個のみだったため、サンプルの絶対数が少なすぎるとともに、捕集密度に基づいて行うはずであった航空機由来粒子であることの検証ができていないため、これらは航空機由来粒子ではない可能性があることに留意が必要である。

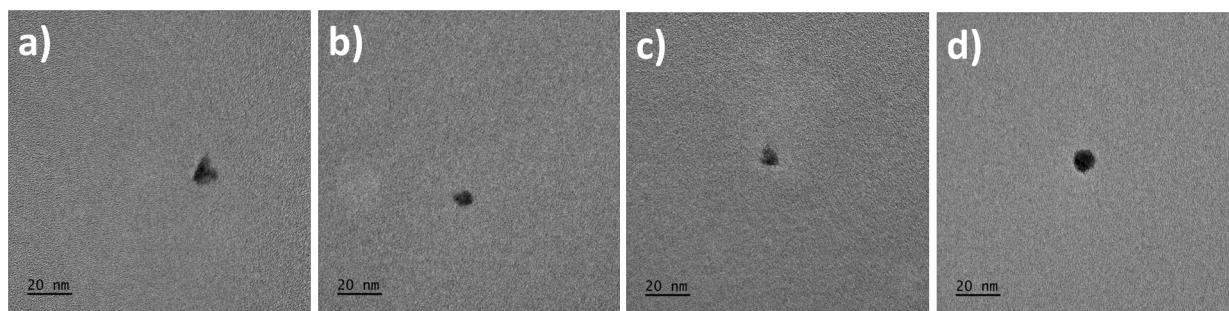


図-3.20. TEM観察において見られた粒子。a) 2021年10月24日捕集試料、b-c) 2021年10月30日捕集試料、d) 実験室で発生させた銀粒子を捕集した試料。

排ガス計測システム内の誤差要因の検討

25 m輸送管 (Section 3) の透過率評価は、図-3.5で示した設備を用い、外径1/2インチ (内径10.7 mm) の銅管を用い、流量を約25 L/minに設定して行った。試験用粒子には幾何平均径約10 nmの銀粒子と幾何平均径約35 nmのNaCl粒子を用いた。図-3.21に示す結果は幾何平均径約10 nmのAg粒子を多分散のまま25 m輸送管に導入し、粒径分布 $dN/d\log D_p$ の出口／入口比から粒径ごとの透過率を算出したものである。また、図-3.22に示す結果は幾何平均径約35 nmのNaCl粒子を粒径分級により単分散化し、粒子濃度の出口／入口比から粒径ごとの透過率を算出したものである。いずれの方法でも、ICA0規制で想定されている透過率 (UTRCモデル) とおおむね一致する結果が得られた。なお、多分散粒子を用いた試験は、単分散粒子を用いた試験に比べて再現性の低い傾向が見られた。

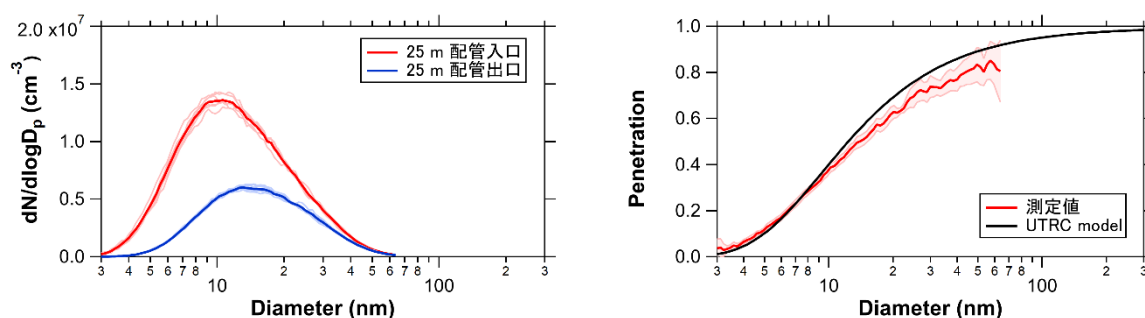


図-3.21. 25 m輸送管 (Section 3) に対する多分散粒子を用いた透過率評価結果。左図：25 m管の入口 (赤線) 及び出口 (青線) における試験粒子の粒径分布、右図：粒径ごとに上図の粒径分布 $dN/d\log D_p$ の出口／入口比を算出した結果。黒線は文献3) 中のUTRCモデルによって算出された透過率。

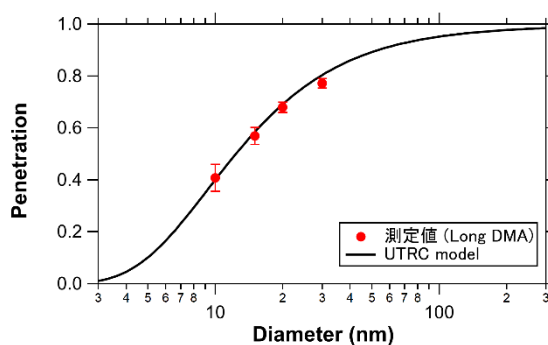


図-3.22. 25 m輸送管 (Section 3) に対する単分散NaCl粒子を用いた透過率評価結果。黒線は文献3) 中のUTRCモデルによって算出された透過率。

10倍希釈器 (Section 2) の希釈・透過率評価は、図-3.5で示した設備を用い、ICA0規制で使用されて

いるDekati社DI-1000型を用いて行った。試験用粒子には多分散と単分散の両方を試したが、結果は単分散粒子を用いた場合のみを図-3.23に示す。粒径30 nm以上では透過率は粒径によらず一定と見なせるが、粒径30 nm以下では小粒径ほど透過率が低下する傾向が見られ、10 nmでは約0.8であった。

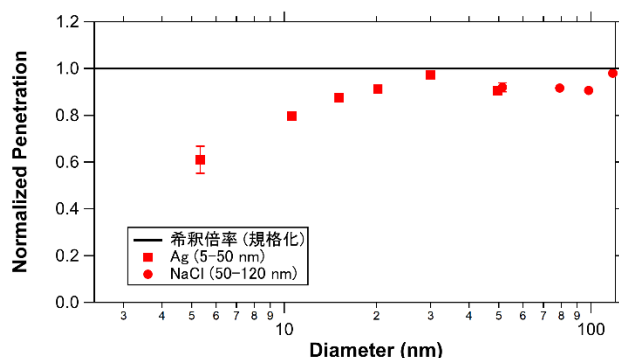


図-3.23. 10倍希釈器に対する実験結果。単分散試験粒子を用いて得られた濃度の出口／入口比から、流量比に基づく希釈率を除して算出した透過率。黒実線は透過率100 %を表す。

揮発粒子除去器（VPR、Section 5）の透過率評価は、図-3.5で示した設備を用い、希釈機構を除いたCatalytic stripperのみを対象とし、Catalytic Instruments社CS10型（流量10 L/min用）に対して行った。試験用粒子には単分散の銀粒子（5 nm～15 nm）とNaCl粒子（15 nm～100 nm）を用いた。結果を図-3.24に示す。得られた結果はメーカーの提供する透過率データとよく一致した。

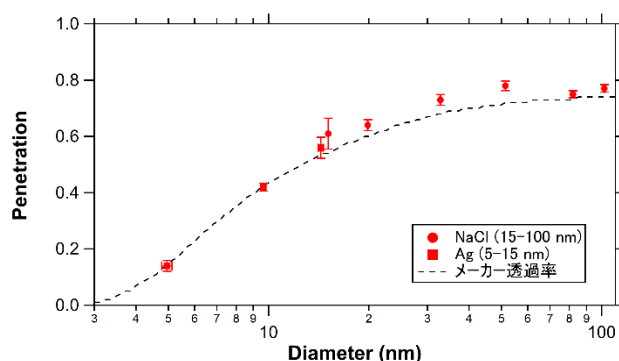


図-3.24. Catalytic stripperに対する透過率の実験結果（赤点）。破線はメーカーが提供している透過率を表す。

サンプリングプローブ管（Section 1）に対しては、図-3.6で示した設備を用いて実験を行った。単分散化した粒子では航空機排ガス粒子のような高濃度が得られないため、多分散粒子を用いて試験を行った。サンプリングプローブ管としては外径3/8インチ（内径7.5 mm）のステンレス直管を使用し、管内の平均滞留時間を調節するため、流量を10.7 L/min（0.5 s）、5.3 L/min（1 s）、1.8 L/min（3 s）の3段階に設定した。試験結果を図-3.25に示す。2 m管を流れる間に粒径分布がより大きな粒径へ、より低い濃度へと変化した。幾何平均径（粒径範囲3 nm～30 nmにおいて算出）で見ると、a)では6.7 nmから7.1 nmに、b)では6.7 nmから7.3 nmに、c)では7.0 nmから8.3 nmへと変化した。総粒子数濃度（粒径範囲3 nm～30 nmにおいて算出）の上流比では、a)では70 %、b)では55 %、c)では44 %に低下した。こうした平均径の増大と濃度の低下は、輸送管壁への拡散沈着（粒径が小さいほど透過率が低い）だけでは説明できず、粒子同士の凝集が同時に進行した結果である。なお、これらの結果は試験粒子の総粒子数濃度が約 $2 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$ の場合に対するものであり、粒子濃度がより高い場合には、凝集がさらに進み、より大きな平均径の増加と濃度の低下が生じると予想される。

このような凝集の進行は、実環境中より、サンプリングプローブ管による排ガスからの粒子のサンプリングにおいてより顕著に生じる可能性がある。実環境中ではエンジンから排出された排ガスが周囲の空気と混合して希釈され、粒子濃度が急速に低下すると考えられるが、サンプリングプローブ管によるサンプリングではSection 2の希釈器へ到達するまでの一定の時間（1 sのオーダー）を高濃度のまま粒子が保持されるため、凝集が起こりやすい。実環境中とエンジン試験設備とで観察される粒径分布の差異の一因として、さらなる検証が必要と考えられる。

本研究では、各Sectionの要素部品を個別に評価することで、エンジン試験では困難である誤差要因の切り分けを行うことを目指した。今後は、要素部品を直列に接続した模擬計測システム一式（Section 1+2+3+5）に対して測定を行い、総合的な誤差評価を行うことも必要と考えられる。

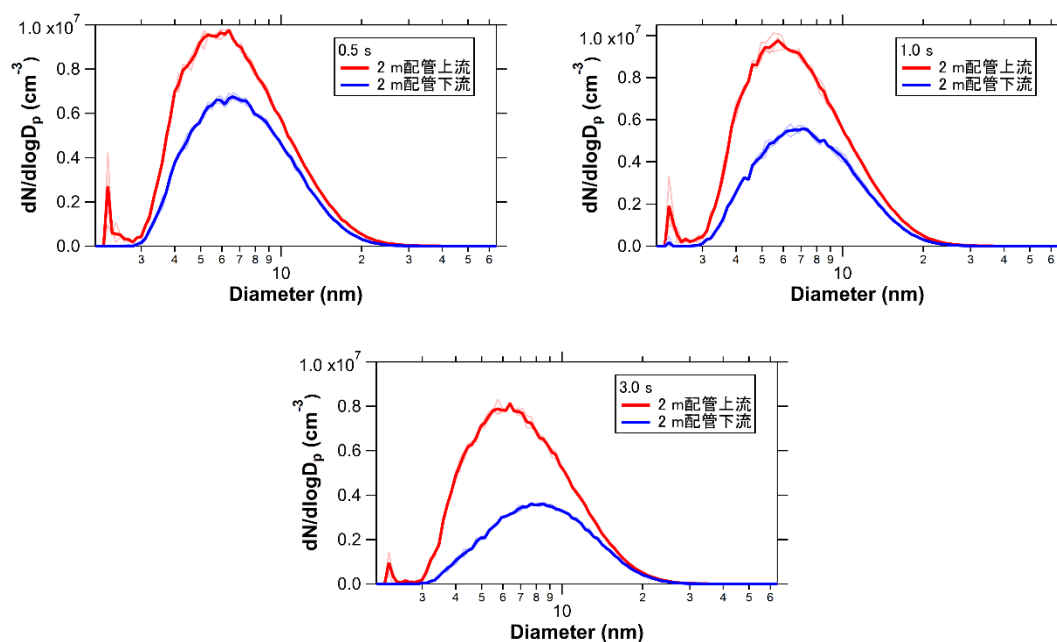


図-3.25. サンプリングプローブ管（Section 1）を模した2 m直管を通過した際の試験粒子の粒径分布の変化。赤実線は入口（上流）での粒径分布、青実線は出口（下流）での粒径分布。SMPSに取り付けた希釈器（約40倍）の $dN/d\log D_p$ 値への補正は未反映。滞留時間は0.5 s、1.0 s、3.0 s。

5. 研究目標の達成状況

目標どおりの成果をあげた。サブテーマ1と2で用いた計測器に対し、煤などの不揮発性粒子（粒径5 nm～100 nm）を人工的に発生させ、国家標準にトレーサブルな校正のなされた計測器を参照標準に用いて試験・校正を行い、サブテーマ1では想定通りの測定性能が得られていることの確認、サブテーマ2では測定誤差を低減するための補正係数の導出を行い、屋外及びエンジン試験施設での実測データの信頼性確保を実現した。

6. 参考文献

- 1) SAE International, Aerospace Recommended Practice (ARP) 6320 Procedure for the Continuous Sampling and Measurement of Non-Volatile Particulate Matter Emissions from Aircraft Turbine Engines, 2018.
- 2) SAE International, Aerospace Recommended Practice (ARP) 6481 Procedure for the Calculation of Non-Volatile Particulate Matter Sampling and Measurement System Losses and System Loss Correction Factors, 2019.
- 3) Kittelson, D.B., Swanson, J., Aldridge, M., Giannelli, R.A., Kinsey, J.S., Stevens, J.A.,

Liscinsky, D.S., Hagen, D., Leggett, C., Stephens, K., Hoffman, B., Howard, R., Frazee, R.W., Silvis, W., McArthur, T., Lobo, P., Achterberg, S., Trueblood, M., Thomson, K., Wolff, L., Cerully, K., Onasch, T., Miake-Lye, R., Freedman, A., Bachalo, W. and Payne, G. (2022). Experimental verification of principal losses in a regulatory particulate matter emissions sampling system for aircraft turbine engines. *Aerosol Science and Technology* 56: 63-74.

Ⅱ－４ 航空機に関連する総合的な健康リスク評価法の開発

北海道大学

大学院医学研究院 社会医学分野 衛生学教室

上田 佳代

〔要旨〕

本課題では、航空由来UFP曝露による健康影響を評価するために、疫学研究の文献レビューに基づきUFP健康影響関数を構築するとともに、サブテーマ1より提供された航空機由来UFP濃度に健康影響関数を適用して、UFP関連死亡数を推定した。さらに、空港周辺で航空機由来UFPへの曝露の状況を検討するために、3次メッシュ人口情報を用い、 $5.0 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ を超えるUFP濃度へ曝露される人口を推定した。

UFP関連死亡数を推定するための健康影響関数は、文献レビューにUFP短期曝露と死亡との関連を検討した7文献を抽出し、メタ解析を用いて統合した。7研究はいずれもヨーロッパで行われた研究であった。得られた健康影響係数 $\beta = 6.4 \times 10^{-3}$ (標準誤差 2.3×10^{-3}) から、UFP濃度に対応する相対リスク、集団寄与割合を求め、それに3次メッシュ人口と死亡率から算出した死亡数を乗じることにより、UFP関連死亡数を推定した。対象空港は羽田、成田、福岡の3空港で、2015年の3, 7, 11月の3か月間を対象期間とした。航空機由来UFPの関連死亡数は、それぞれの空港で約9人、1人、11人であった。これは、WHOの大気質ガイドライン推奨値 ($5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) を超えるPM2.5関連死亡数より小さい値であったが、成田・福岡空港においては、日本の環境基準値 ($15 \mu\text{g}/\text{m}^3$) を超える場合のPM2.5関連死亡数と同程度で無視できないと考えられた。

空港周囲で $5.0 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ を超える航空機由来UFPへの曝露人口 (全人口に対する割合) は、羽田、成田、福岡空港それぞれ、50.3万人 (21.2%)、6.4万人 (29.0%)、66.8万人 (38.0%) であり、人口密集地に囲まれる福岡空港が多かった。また、人口加重平均UFP濃度は、それぞれの空港で $3.5 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ 、 $5.1 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ 、 $6.4 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ であった。疫学知見を用いた疾病負荷評価はUFPの健康リスク評価に寄与するが、本課題ではアジアおよび我が国におけるUFPに関する疫学研究の必要性も併せて示した。

1. 研究開発目的

超微小粒子 (UFP) の健康影響に対する健康影響への関心が高まっており、世界保健機関 (WHO) によるAir Quality Guidelines¹⁾の2021年改訂でも言及されている。一方、これまでのUFPに関する知見は、主に欧米からであり、日本での検討は皆無である。さらに欧米の知見も都市大気の粒子個数を用いた研究がほとんどであり、航空機由来のUFPの健康影響を評価した疫学知見は非常に限られる。

サブテーマ4では、航空機由来UFPによる健康影響を評価するために、まずUFPを含む大気汚染物質の毒性・疫学調査に関する文献情報を統合し、UFP個数濃度を用いた曝露－健康アウトカム関数を構築することを目指した。さらに、航空機排気粒子の物理・化学特性を考慮することで、航空機UFPに関する総合的な健康リスク評価方法を新たに開発することを目的とした。

2. 研究目標

UFPを含む大気汚染物質の毒性・疫学調査に関する文献情報を統合し、UFP個数濃度を用いた曝露－健康アウトカム関数を構築する。航空機排気粒子の物理・化学特性を考慮することで、航空機UFPに関する総合的な健康リスク評価方法を新たに開発する^(注)。

^(注)申請書では騒音との複合影響評価も含めていたが、本研究の主題はUFPであるため、騒音の影響は考慮しつつ最終的な評価項目はUFPに特化した計画とする。

3. 研究開発内容

【サブテーマ4】航空機に関連する総合的な健康リスク評価法の開発

系統的文献レビューによるUFP健康影響関数の構築 (上田ら, 2023; P. 73 研究成果)

航空機由来UFPの健康影響評価を検討した疫学研究は限られているため、UFPの健康影響関数を構築するために、発生源に関わらずUFPを対象とした疫学知見に関する文献をまとめた。UFPの健康影響、特に死亡や呼吸器・循環器疾患発生に対する影響を評価する文献を抽出するために、世界の主要な医学系雑

誌に掲載された論文の書誌情報が掲載されている検索エンジンPubmedを用いて該当する論文を抽出した。検索用語は、曝露に関する用語は発生源を限定せず (Ultrafine, ultrafine partic*, nano partic*, PM0.1, PM0.25, particle number) とし、健康アウトカムに関する用語 (mortality, morbidity, hospitalization, cardiovascular, respiratory, clinic visits, lung function) を組み合わせた。なお、既存の系統的レビュー²⁾が2017年11月5日以前の論文について検索しているため、本検討での文献検索は2017年1月1日～2020年12月31日までとした。検索された文献については、まず論文タイトル、抄録によるスクリーニングを行ったのちに本文を入手し、該当する論文を絞り込み重複を除いたうえで、2017年までのレビュー文献の情報と結合したうえで、分析対象とした。抽出された論文について、文献情報、研究対象者 (年齢、性別など)、研究時期、研究デザイン、曝露評価方法、粒子径、測定方法 (重量濃度、個数濃度)、曝露評価時期、曝露の分布 (平均、中央値、最小、最大、標準偏差など) の情報を抽出した。

疫学研究において、UFPを含む大気汚染の健康影響は、単位濃度上昇当たりどれくらい健康リスクが変化するか (あるいは比較の基準となる濃度と比較した場合のリスク比) で示されることが多いため、本検討での健康リスク関数は線形を仮定した。すなわち、UFP個数濃度 (X)、比較の基準となる濃度 (X_0)、濃度と死亡との係数 (健康影響係数: β) を用いて、対象とする健康アウトカム (死亡や入院など) のリスク比 (RR) は、以下のように表される。

$$RR = \exp[\beta(X - X_0)] \quad (X \geq X_0)$$

ただし、 β はUFP数濃度 $10.0 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ あたりの数値として示す。 X_0 は健康影響が出現し始める閾値とすることが多いが、閾値に関する情報が不足していること、本課題で用いるUFP濃度は航空機由来UFP濃度であるが、実際にはバックグラウンドも合わせたUFPにばく露されることから、 $X_0 = 0$ とした。

本課題では、文献レビューで得られた疫学知見のメタ解析より健康影響係数 β を推定した。各健康アウトカム (死亡、循環器・呼吸器疾患) について分類し、それぞれについてメタ解析を適用し、得られた健康影響係数 β を健康リスク関数の係数とした。メタ解析に含める研究は、粒径100 nm以下の粒子を含むものとし、異なる粒径分布の結果が報告されている場合は、最も個数濃度の多い範囲を選択した。

空港周辺の航空機由来UFP曝露人口推計と人口加重UFP濃度

航空機由来UFPの曝露評価として、サブテーマ1により推定された3、7、11月の3か月間のUFP個数濃度を用いて、対象地域 (空港周囲20 km四方) に居住する人口のうち、参照濃度を超える人口割合について求めた。曝露人口推定には、国勢調査に基づく地域メッシュ統計のうち3次メッシュ (1辺約1 km) の年齢階級別人口情報を用いた。

本研究で参照濃度を決定するにあたり、世界保健機関 (WHO) のAir Quality Guidelines (大気質ガイドライン)¹⁾の内容と、本課題で観測された空港周辺のバックグラウンド濃度を考慮に入れた。現在のところ、UFPの健康影響に関する知見は十分といえず、健康影響が出現する閾値はわかっていない。2021年に改訂されたWHOの大気質ガイドラインでもUFPの推奨値は定められていない。一方、同ガイドラインでは、24時間平均のUFP個数濃度が典型的な都市域のバックグラウンド濃度 ($10.0 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$) を超える場合を「高い個数濃度」としている。また、これまでの疫学研究で示されたUFP濃度は国・地域により異なるが (図-4.1)、日本の郊外 (つくば市) の濃度は $6.0 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ であること、本課題で観測された空港周辺のバックグラウンド濃度の、下位2パーセンタイルの最小値は、福岡、羽田、成田それぞれの空港で、 $4.2 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ 、 $5.2 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ 、 $6.4 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ であることより、 $5.0 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ を一律のバックグラウンド濃度と仮定した。本研究の数値シミュレーションでは航空機以外の寄与を考慮していないため、WHOガイドラインと実大気バックグラウンドの差分 $5.0 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ ($10.0 \times 10^3 - 5.0 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$) を参照濃度とし、それを超える人口割合を求めた。

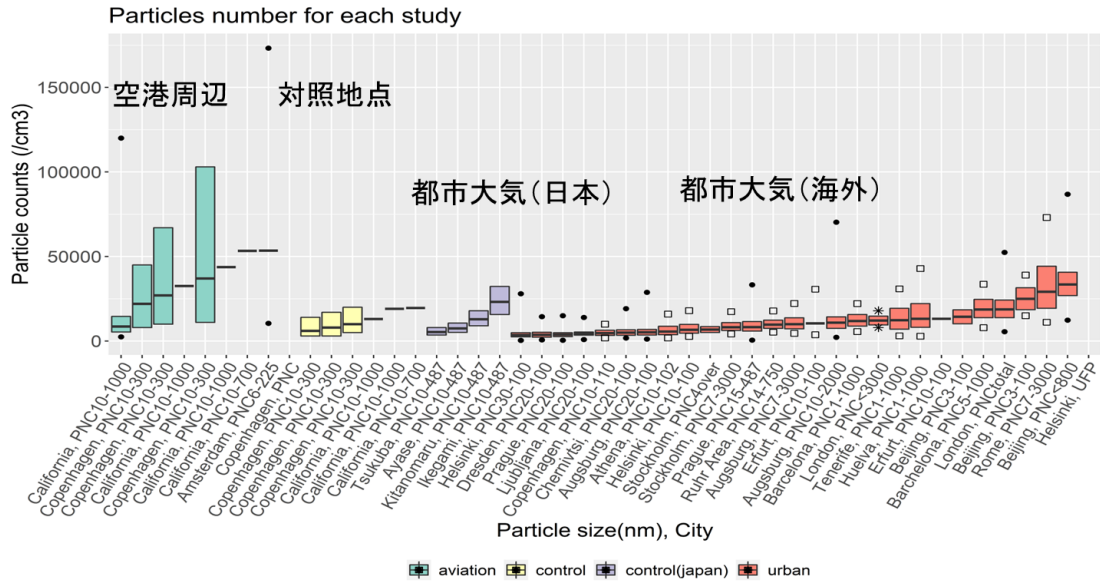


図-4.1. 過去の疫学研究で観測されたUFP濃度分布。

また、人への曝露濃度推定という観点から、人口加重平均UFP濃度について以下の式を用いて計算した。人口加重平均濃度は、大気汚染への曝露レベルを示す指標としてWHOの報告書や国連のSDG indicatorとして用いられている。

$$Cpop_k = \frac{\sum_i C_{i,k} P_{i,k}}{\sum_i P_{i,k}}$$

$Cpop_k$ は、空港 k における人口加重平均UFP濃度、 $C_{i,k}$ はメッシュ i の濃度（3、7、11月の3か月平均）、 $P_{i,k}$ はメッシュ i の人口である。

航空機由来UFP関連死亡数：PM2.5関連死亡数との比較

本課題では航空機由来UFPによる健康影響評価として、疾病負荷、すなわち航空機由来UFP関連死亡数の推定を行い、PM2.5関連死亡数と比較した。疾病負荷は特定の環境要因の健康への影響を定量化するために用いられる³⁾。

疾病負荷として、AEDTにより推定されたUFP濃度、UFP健康影響関数、3次メッシュ人口を用いて、3空港周囲20km四方内の航空機由来UFP関連死亡数の推定を行った。UFP濃度 X におけるリスク比RRは、以下の式に示すように、UFPがその健康事象発生に寄与する割合（集団寄与割合：PAF）を求めるために用いる。

$$PAF = \frac{RR - 1}{RR}$$

PAFは、その地域の健康事象発生数（死亡や疾患発生）のうち、対象とする環境要因（ここでは航空機由来UFP）が寄与する割合を示している。対象地域の死亡数（ N_0 ）が分かれば、以下の式から、航空機UFPが寄与する死亡数（ N_{UFP} ）が得られる。

$$N_{UFP} = N_0 \times PAF$$

本課題で用いるのは、日々のUFP濃度と健康アウトカム数を用いた短期曝露影響の関数であるため、 N_0 は日別死亡数を用いた。日別死亡数は対象空港周辺の65歳以上3次メッシュ人口と人口動態調査で得られる65歳以上死亡率の積で求められる年間死亡数を推定したのち、季節変動を考慮したうえで月々の死亡者数を求め、各月をその月内の日数で按分して推定した。日別死亡数 N_0 とPAFの積で得られる日別UFP関連死亡数 N_{UFP} について、3月、7月、11月の和として示した。

航空機由来UFPによる疾病負荷を他の大気汚染物質と比較するために、同じ方法を用い、航空機由来

PM2.5および空港周辺のPM2.5関連死亡数を算出し、航空機由来UFP関連死亡数との比較を行った。PM2.5濃度はそれぞれの空港周辺にある測定局（羽田、成田、福岡それぞれについて、大田区東糀谷局、成田加良部局、吉塚局）を選び、その測定局で観測された濃度を用いた。また、対象地域内のPM2.5は一様に分布すると仮定した。推定に用いたPM2.5の影響推定値の係数は、国内の既存の研究⁴⁾で得られた値（ 1.29×10^{-3} ）を用いた。また、PM2.5関連死亡数算出の X_0 として、日本の環境基準（ $15 \mu\text{g m}^{-3}$ ）、WHOの大気質ガイドラインの推奨値（ $5 \mu\text{g m}^{-3}$ ）を用いた。

4. 結果及び考察

系統的文献レビューによるUFP健康影響関数構築（上田ら，2023；P.73 研究成果）

Ohlwein らの2017年までのレビュー論文²⁾からの情報と、今回の2017～2020年の文献検索から得られた文献のうちOhlweinらのレビューとの重複を除いた42件と合わせて、128件の論文が抽出された。研究対象地域は北米、ヨーロッパ、中国からの研究が多くを占めていた（図-4.2A）。曝露評価について、短期曝露影響を評価する研究では、測定局での観測値を用いるものが多かった（図-4.2B）。近年、長期曝露影響を評価するコホート研究が増えてきており（図-4.2C）、その曝露評価には様々なモデルで空間的な変動を推定しているものが多い。健康アウトカムとして、心血管疾患や呼吸器疾患を対象としたものが多いが（図-4.2D）、近年では胎児への影響や中枢神経などの健康アウトカムについて検討した報告も散見される（図-4.2Dのその他に分類される）。このうち、航空機由来UFPの健康影響に関する疫学論文は4文献であった⁵⁻⁸⁾。Møller ら⁸⁾は、航空機駐機場での勤務時間を基に航空機由来UFPのばく露の有無で2群に分け、心血管疾患発症との関連について検討したが、明らかなリスクの上昇は見られなかったと報告した。

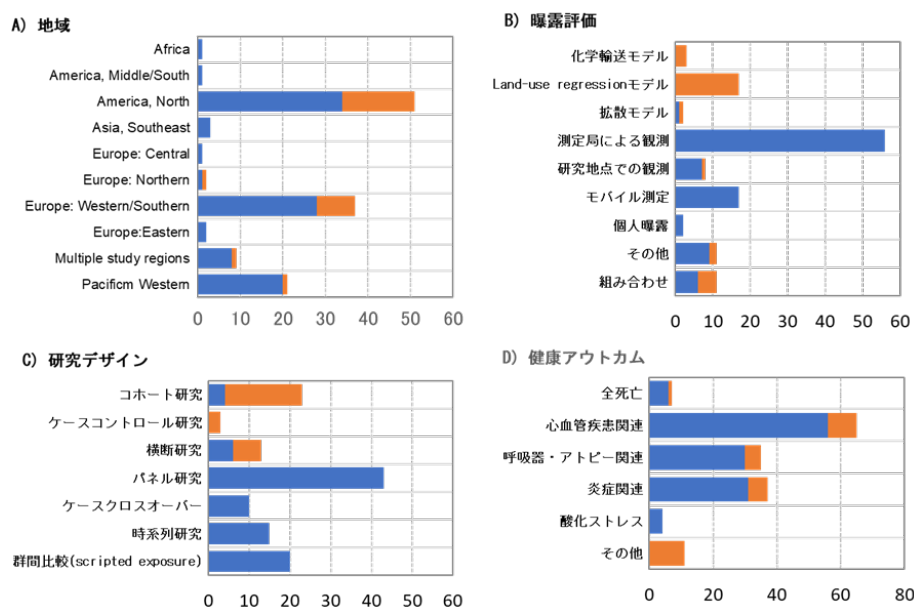


図-4.2. 文献レビューにより抽出された文献の対象地域 (A)、曝露評価 (B)、研究デザイン (C)、健康アウトカム (D) 別の分類。短期曝露 (青) と長期曝露 (オレンジ) 別に示している。

UFPの短期曝露と全死亡との関連を検討したものは7研究（重複を除く）⁹⁻¹⁵⁾で、ヨーロッパの都市部で行われたものであった（表-4.1）。研究対象期間中の平均粒子個数濃度は $4.2 \times 10^3 \sim 34.0 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ であり、研究や地域で大きな差があった。そのうち3研究⁹⁻¹¹⁾ではUFP個数濃度とPM2.5重量濃度との相関係数が示されておりその値は0.07～0.56であった（図-4.3）。

表-4. 1. UFPの短期曝露と全死亡との関連についての疫学研究

著者（公表年）	国（地域、市）	研究対象期間	測定された UFPの粒径 (nm)	UFP個数濃度 (cm ⁻³), Mean (SD)	
Breitner (2009)	Germany (Erfurt)	Sep1995-Mar2002	10-100	13, 198	(9, 019)
Atkinson (2010)	UK (London)	2000-2005	7-3000	18, 769*	(10, 456) #
Lanzinger (2016)	Czech Republic (Prague)	2011-2013	20-100	4, 197	(2, 010)
	Germany (Augsburg)			5, 880	(3, 016)
	Germany (Dresden)			4, 286	(2, 339)
	Slovenia (Ljubljana)			4, 693	(1, 897)
	Ukraine (Chernivtsi)			5, 511	(2, 615)
Samoli (2016)	UK (London)	2011-2012	7-3000	12, 123*	(5, 180) #
Stafoggia (2017)	Denmark (Copenhagen)	2001-2010	10-110	5, 105	(2, 563)
	Finland (Helsinki)	2001-2010	10-100	7, 951	(4, 912)
	Germany (Augsburg)	1999-2009	7-3000	11, 158	(5, 617)
	Germany (Ruhr Area)	2009-2013	14-750	10, 303	(3, 902)
	Greece (Athena)	2008-2010	10-102	6, 917	(4, 878)
	Italy (Rome)	2001-2010	7-3000	34, 046	(20, 164)
	Spain (Barcelona)	2005-2010	5-1000	19, 554	(8, 044)
	Sweden (Stockholm)	2001-2005, 2008-2010	7-3000	9, 128	(4, 320)
Tobias (2018)	Spain (Barcelona)	2009-2014	5-1000	12, 608	(5, 089)
	Spain (Huelva)	2008-2010	2.5-1000	16, 752	(12, 787)
	Spain (Tenerife)	2008-2012	2.5-1000	14, 151	(9, 131)
Olstrup (2019)	Sweden (Stockholm)	2000-2016	4-3000	6, 793	(3, 484) #

* Median; # Interquartile range

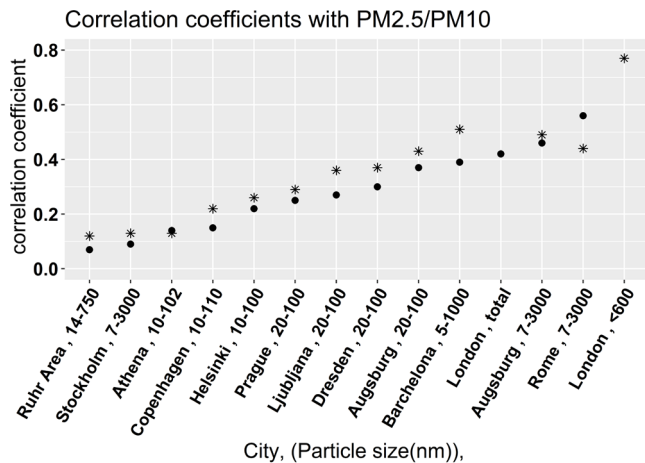


図-4. 3. 4研究におけるUFP濃度とPM2. 5およびPM10濃度との相関係数。●はUFPとPM2. 5、*はUFPとPM10との相関係数を示す。

得られた7文献のメタ解析の結果（図-4. 4）から、UFP-全死亡関数について、粒子数 $10.0 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ あたりの係数 β は 6.4×10^{-3} （標準誤差 2.3×10^{-3} ）であった。死亡リスクの変化率として表すと、UFP濃度が $10.0 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ 増えることにより死亡リスクは0.64%（95%信頼区間（以後95%CI）：0.19%, 1.10%）増えることとなる。UFPと循環器疾患死亡および呼吸器疾患死亡とは正の関連が見られたが有意なものではなかった。

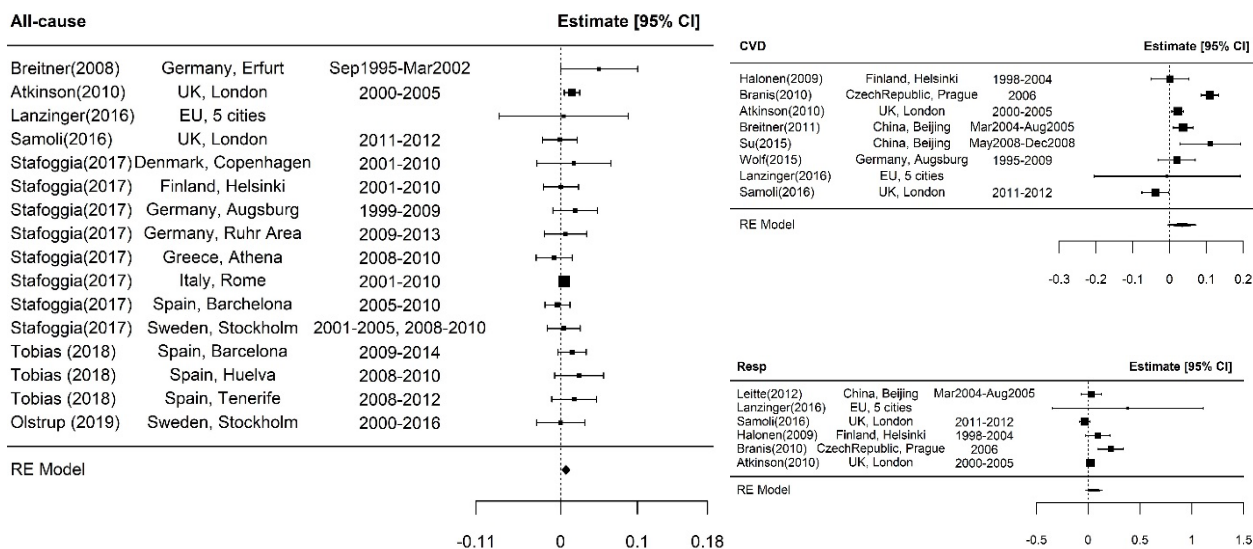


図-4.4. UFP曝露による全死亡（左）、循環器疾患死亡（右上）、呼吸器疾患死亡（右下）に対する影響の推定値のフォレスト・プロット。それぞれの影響推定値はUFPが単位濃度($10.0 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$)上昇した場合の死亡リスク比の対数として示されている。

呼吸器・循環器疾患による入院・受診との関連についても論文を整理した。心血管疾患（心筋梗塞、院外心停止、心血管疾患）との関連について検討した10研究のメタ解析では、粒子数 $10.0 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ あたりの係数 β は0.041（標準誤差 0.019）であった（表-4.2）。一方、呼吸器疾患による入院・受診との関連を検討したものは5研究あったが、年齢によって影響が異なり全年齢、小児・青年、高齢者（65歳以上）での関連はいずれも有意なものではなかった（表-4.2）。以上より、UFPに関連する疾病負荷の推定には、すべての原因による死亡（全死亡）の係数（ 6.4×10^{-3} ）を用いることとした。

表-4.2. 各アウトカムの健康影響係数（* $p < 0.05$ ）

健康アウトカム	研究数	年齢	健康影響係数 (β)	β の標準誤差
死亡				
すべての原因	16	全年齢	0.0064	0.0023 *
循環器疾患	7	全年齢	0.0334	0.0196
呼吸器疾患	6	全年齢	0.0561	0.0394
入院受診				
循環器疾患	11	全年齢	0.0407	0.0189 *
呼吸器疾患	2	全年齢	0.0291	0.8412
	4	0-18歳	0.0187	0.0100
	2	65歳以上	-0.0054	0.0123

空港周辺の航空機由来UFP曝露人口推計

AEDTにより推定された3、7、11月の3か月間の対象地域の航空機由来UFP濃度の平均値は、羽田、成田、福岡空港それぞれ $7.0 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ 、 $10.2 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ 、 $5.3 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ であり、成田空港が最も高かった（図-4.5上）。しかし、対象地域で参照濃度 $5.0 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ を超える航空機由来UFPに曝露される住民の人口（同地域の全人口に対する割合）は、羽田、成田、福岡空港それぞれ、50.3万人（21.2%）、6.4万人（29.0%）、66.8万人（38.0%）であり（図-4.5下）、福岡空港が、人数、割合とも最大であった。また、人口加重平均UFP濃度は、 $3.5 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ 、 $5.1 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ 、 $6.4 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ となり、人への曝露濃度は、福岡、成田、

羽田空港の順に高かった（表-4.3）。空港周辺に居住する住民への曝露状況は、大気中のUFP濃度分布だけでなく、人口分布とも関わる。福岡空港周辺は比較的人口密集地に囲まれている。一方、羽田空港の西側は人口密集地であるが、東および南側は海に面している。その結果、羽田空港周囲の人口加重UFP濃度は福岡空港よりも小さくなったと考えられる。

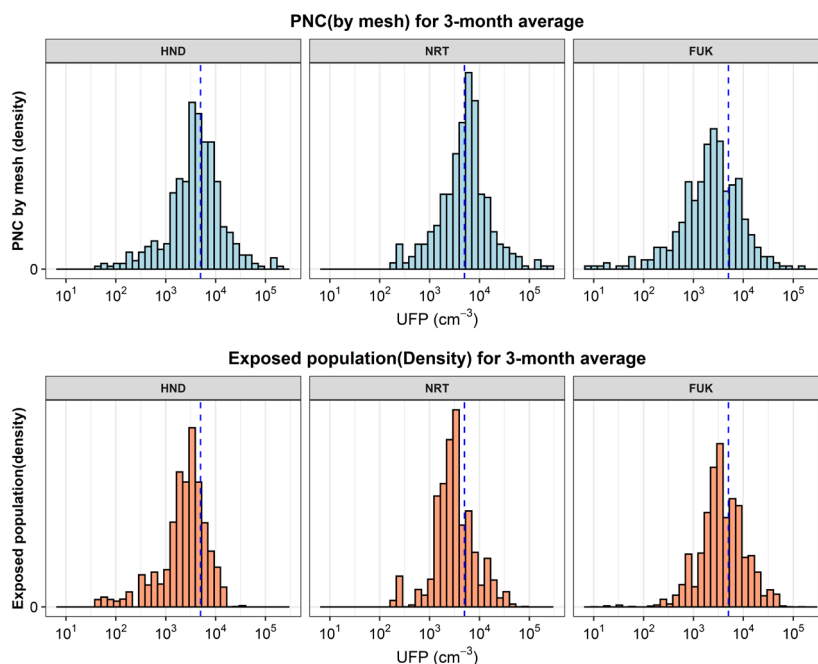


図-4.5. 羽田、成田、福岡空港における3か月（3、7、11月）の平均UFP濃度（上）とUFPへの曝露人口（下）の密度分布。破線は $5.0 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ を示す。

航空機由来UFP関連死亡数：PM2.5関連死亡数との比較

2015年3、7、11月の3か月間における航空機由来UFPの関連死亡数は、羽田、成田、福岡空港で、それぞれ約9人、1人、11人であった（表-4.3）。同期間のPM2.5関連死亡数と比較すると、いずれの空港も、 X_0 が $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ の場合よりも小さかったが、成田、福岡空港のUFP関連死亡数は、 X_0 が $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ の場合のPM2.5関連死亡数と同程度であった。航空機からはUFPだけでなくPM2.5も排出されるため、航空機由来PM2.5濃度を用いて関連死亡数を算出したが、ほとんど寄与はなかった。これらの結果より、UFP曝露と死亡との因果関係があると仮定すれば、航空機UFP曝露による死亡への影響はPM2.5より小さいものの、無視できないと考えられた。

本課題では、既存の疫学知見を用いて航空機由来関連死亡数を推定したが、多くの仮定を基に推定しているため、大きな不確実性がある。たとえば、UFPと死亡との関連について検討した研究はすべて都市大気中のUFPを対象としており航空機以外の様々な発生源で、おもに自動車排ガス由来であると思われる。航空機由来UFPは異なる成分組成を持ち、もし毒性に違いがあれば、その影響を過大（過小）評価することになる。また、本課題では日々のUFP濃度と日死亡との関連を検討した短期曝露影響の関数を用いた。PM2.5関連死亡数についても短期曝露影響の関数を用いたため、UFPとPM2.5の比較は妥当と思われる。しかし、短期曝露影響は動脈硬化の促進など慢性の影響を評価することはできないため、今回の疾病負荷評価で得られたUFP関連死亡数は実際のUFPの健康影響より過小評価している可能性もある。さらに、いくつかの疫学研究では、UFPと死亡との関連についてPM2.5による交絡が調整されていない。ヨーロッパの疫学研究では、UFPの関連はPM2.5で調整しても変わらない場合¹⁰⁾、PM2.5や NO_2 による調整で正の関連がほぼなくなる場合¹¹⁾があり、共存汚染物質による調整の影響の結果は一貫しなかった。UFPとPM2.5や NO_2 など共存汚染物質の相関関係は地域の発生源により異なるため、ヨーロッパ以外の地域での疫学研究が望まれる。

表-4.3. 羽田、成田、福岡空港におけるUFP健康リスク評価（2015年3、7、11月の3か月間）

	羽田空港	成田空港	福岡空港
航空機由来 UFP 濃度 (counts/cm ³)			
平均濃度 (counts/cm ³)	7.0×10^3	10.2×10^3	5.3×10^3
人口加重濃度 (counts/cm ³)	3.5×10^3	5.1×10^3	6.4×10^3
PM2.5 平均濃度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	16.1	11.5	15.0
関連死亡数 ¹			
航空機由来 UFP 関連死亡数 ($X_0=0/\text{cm}^3$)	9.2 (2.8, 15.6)	1.3 (0.4, 2.3)	10.8 (3.2, 18.3)
PM2.5 関連死亡数 ($X_0=5 \mu\text{g}/\text{m}^3$)	58.2 (40.5, 71.4)	3.7 (2.5, 4.5)	38.4 (26.7, 47.1)
PM2.5 関連死亡数 ($X_0=15 \mu\text{g}/\text{m}^3$)	21.0 (14.6, 25.7)	0.7 (0.5, 0.9)	11.7 (8.1, 14.3)
(参考)			
Background UFP による UFP 関連死亡数 (5000/cm ³ を仮定、 $X_0=0/\text{cm}^3$)	13.0 (3.9, 22.3)	1.4 (0.4, 2.4)	9.6 (2.8, 16.4)
航空機由来 PM2.5 関連死亡数 ($X_0=0 \mu\text{g}/\text{m}^3$)	0.3 (0.2, 0.4)	0.1 (0.0, 0.1)	0.5 (0.3, 0.6)
人口と死亡数			
対象地域の人口 (全年齢)	2,365,238	219,964	1,756,153
対象地域の人口 (65歳以上)	485,700	51,286	355,823
65歳以上の死亡数推定 (年間)	4,096	433	3,001

¹括弧内の数字は95%信頼区間を表す。

航空機由来UFPには、炭素成分とオイルミスト成分が含まれるが、本課題で検討したUFPの疫学研究ではUFPの成分組成を対象としたものはなかった。スペインの3都市で行われた研究では¹⁴⁾、Black CarbonとUFPの相関が高いことを用いて、UFPを発生源から直接排出される一次粒子成分（主に煤成分）と二次粒子成分（主に有機・無機成分）に分けて死亡との関連を検討した。一次および二次とも含めたUFPと死亡との関連は、3都市とも有意ではないものの正の関連がみられた。一次粒子成分と死亡との関連はBalceronaだけで有意な正の関連が見られたが、工業都市Huelvaでは二次粒子と死亡との有意な関連が見られ、都市により結果が異なった。一方、米国でのコホート研究では、二次有機粒子成分と心疾患死亡との有意な関連が見られたと報告し¹⁶⁾、粒子の生体影響メカニズムが炎症や酸化ストレスを介したものであることから、Cu, Asなど遷移金属成分の毒性が関与している可能性について考察している。

5. 研究目標の達成状況

概ね計画通り、死亡についての健康影響関数を構築し、サブテーマ1より提供されたUFP濃度情報と健康影響関数をもとに疾病負荷を推定した。さらに、PM2.5による疾病負荷との比較から、UFPの健康リスクが無視できない可能性を示した。本課題では、疫学知見を用いて、航空機由来UFPによる健康リスク評価の方法を開発するとともに、リスク評価に関わる不確実性も含めた課題を明らかにした。特に、アジアにおけるUFPの健康影響に関する疫学知見がないこと、UFPによる健康影響の地域差があること、成分別の健康影響についての疫学知見は非常に限られていることについて示した。また、本課題では騒音による影響は考慮していない。これらの課題に対応する疫学研究が求められる。

6. 引用文献

- 1) World Health Organization. (2021). WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>.
- 2) Ohlwein, S., Kappeler, R., Kutlar, J. M., Künzli, N., Hoffmann, B., Health effects of ultrafine particles: a systematic literature review update of epidemiological evidence,

- Int. J. Public Health, 64, 547-559, 2019.
- 3) Ostro, B., Outdoor air pollution: Assessing the environmental burden of disease at national and local levels, Geneva, World Health Organization, 2004.
 - 4) Michikawa, T., Ueda, K., Takami, A., Sugata, S., Yoshino, A., Nitta H., Yamazaki, S., Japanese Nationwide Study on the Association Between Short-term Exposure to Particulate Matter and Mortality, J. Epidemiol., 29, 471-477, 2019.
 - 5) Habre, R., Zhou, H., Eckel, SP., Enebish, T., Fruin, S., Bastain, T., Rappaport, E., Gilliland, F., Short-term effects of airport-associated ultrafine particle exposure on lung function and inflammation in adults with asthma, Environ. Int., 118, 48-59, 2018.
 - 6) Wing. S. E., Larson, T.V., Hudda, N., Boonyarattaphan, S., Fruin, S., Ritz, B., Preterm Birth among Infants Exposed to in Utero Ultrafine Particles from Aircraft Emissions, Environ. Health Perspect., 128, 47002, 2020.
 - 7) Lammers, A., Janssen, NAH., Boere, A. J. F., Berger, M., Longo, C., Vijverberg, S. J. H., Neerincx, A. H., Maitland-van der Zee, A. H., Cassee, F. R., Effects of short-term exposures to ultrafine particles near an airport in healthy subjects, Environ. Int., 141, 105779 2020.
 - 8) Møller, KL., Brauer, C., Mikkelsen, S., Bonde, JP., Loft, S., Helweg-Larsen, K., Thygesen, LC., Cardiovascular disease and long-term occupational exposure to ultrafine particles: A cohort study of airport workers. Int. J. Hyg. Environ. Health., 223, 214-219, 2020.
 - 9) Breitner, S., Stölzel, M., Cyrys, J., Pitz, M., Wölke, G., Kreyling, W., Küchenhoff, H., Heinrich, J., Wichmann, H. E., Peters, A., Short-term mortality rates during a decade of improved air quality in Erfurt, Germany, Environ. Health Perspect., 117, 448-54, 2009.
 - 10) Lanzinger, S., Schneider, A., Breitner, S., Stafoggia, M., Erzen, I., Dostal, M., Pastorkova, A., Bastian, S., Cyrys, J., Zscheppang, A., Kolodnitska, T., Peters, A; UFIREG study group, Associations between ultrafine and fine particles and mortality in five central European cities - Results from the UFIREG study, Environ. Int. 88, 44-52, 2016.
 - 11) Stafoggia, M., Schneider, A., Cyrys, J., Samoli, E., Andersen, Z. J., Bedada, G. B., Bellander, T., Cattani, G., Eleftheriadis, K., Faustini, A., Hoffmann, B., Jacquemin, B., Katsouyanni, K., Massling, A., Pekkanen, J., Perez, N., Peters, A., Quass, U., Yli-Tuomi, T., Forastiere, F; UF&HEALTH Study Group, Association Between Short-term Exposure to Ultrafine Particles and Mortality in Eight European Urban Areas. Epidemiology. 28, 172-180, 2017.
 - 12) Atkinson, R. W., Fuller, G. W., Anderson, HR., Harrison, RM., Armstrong, B., Urban ambient particle metrics and health: a time-series analysis. Epidemiology, 21, 501-511, 2010.
 - 13) Samoli, E., Atkinson, R. W., Analitis, A., Fuller, G. W., Beddows, D., Green, DC., Mudway, IS., Harrison, RM., Anderson, HR., Kelly, F. J., Differential health effects of short-term exposure to source-specific particles in London, U.K., Environ. Int., 97, 246-253, 2016.
 - 14) Tobías, A., Rivas, I., Reche, C., Alastuey, A., Rodríguez, S., Fernández-Camacho, R., Sánchez de la Campa, AM., de la Rosa, J., Sunyer, J., Querol, X., Short-term effects of ultrafine particles on daily mortality by primary vehicle exhaust versus secondary origin in three Spanish cities. Environ. Int. 111, 144-151, 2018.
 - 15) Olstrup, H., Johansson, C., Forsberg, B., Åström, C., Association between mortality and short-term exposure to particles., ozone and nitrogen dioxide in Stockholm., Sweden, Int. J. Environ. Res. Public Health., 21, 16, 1028, 2019.
 - 16) Ostro, B., Hu, J., Goldberg, D., Reynolds, P., Hertz, A., Bernstein, L., Kleeman, M.J.,

Associations of mortality with long-term exposures to fine and ultrafine particles, species and sources: results from the California Teachers Study Cohort. *Environ. Health Perspect.* 123, 549-556, 2015

Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細

(1) 誌上発表

<査読付き論文>

【サブテーマ1】

- 1) Takegawa, N., A. Nagasaki, A. Fushimi, Y. Fujitani, Y. Murashima, and H. Sakurai, Volatility of aircraft exhaust ultrafine particles inferred from field measurements at Narita International Airport, Atmos. Environ., 292, 119391, 2023 (IF: 5.755; 2023年5月1日時点).

【サブテーマ2】

サブテーマ1の1)と共著

【サブテーマ3】

サブテーマ1の1)と共著

【サブテーマ4】

特に記載すべき事項はない。

<査読付き論文に準ずる成果発表>

【サブテーマ1】

特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ2】

特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ3】

特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ4】

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>

【サブテーマ1】

特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ2】

- 1) 伏見 暁洋, 航空機排出ナノ粒子の物理・化学的特徴, 起源および健康影響, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 57, 5, 72-76, 2022.

【サブテーマ3】

特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ4】

- 1) Ueda, K., : Particulate matter/PM2.5, In Handbook of Air Quality and Climate Change. Hajime Akimoto and Hiroshi Tanimoto (eds.) https://doi.org/10.1007/978-981-15-2527-8_21-1, Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2022.
- 2) 上田 佳代, 池田 和男, Paoiin Kanawat, 梁 雨文: 超微小粒子の健康影響に関する疫学知見, エアロゾル研究, 38, 1, 24-28, 2023.

(参考) 投稿中または準備中の論文

【サブテーマ1】

- 1) (投稿中) Takegawa, N., Field observations of aircraft takeoff and taxiing plumes: A

case study at Kobe Airport, Japan.

【サブテーマ2】

- 1) (準備中) Fushimi, A., Fujitani, Y., Durdina, L., Anet, J. G., Spirig, C., Edebeli, J., Roth, M., Sakurai, H., Murashima, Y., Saitoh, K., Takegawa, N., Significance of 10 nm single graphitic and amorphous particles emitted from in-use aircraft turbo-fan jet engines.
- 2) (準備中) Fushimi, A. Saitoh, K., Durdina, L., Anet, J. G., Spirig, C., Edebeli, J., Fujitani, Y., Takegawa, N., Formation mechanism of lubrication-oil-rich nanoparticles from in-use aircraft turbo-fan jet engines.

(2) 口頭発表 (学会等)

【サブテーマ1】

- 1) 竹川 暢之, 航空機排出粒子とその健康影響に関する国際的な研究動向, 自動車技術会大気環境技術・評価部門委員会, 2021年5月11日.
- 2) Takegawa, N., and A. Nagasaki, Laboratory evaluation of the volatility of nanoparticles generated from jet engine lubrication oil, AAAR 39th Annual Conference, October 18, 2021 (録画口頭形式).
- 3) 豊田 創大, 長崎 安奈, 伏見 暁洋, 竹川 暢之, 航空機用ジェットエンジンオイル粒子の揮発特性の粒子生成温度依存性, 第27回大気化学討論会, 2022年11月17日.
- 4) (予定) 竹川 暢之, 航空機の離陸・タキシング時の粒子排出特性: 神戸空港における事例解析, 第40回エアロゾル科学・技術研究討論会, 桐生, 2023年8月30日-9月1日.
- 5) (予定) 豊田 創大, 長崎 安奈, 伏見 暁洋, 竹川 暢之, 航空機用ジェットエンジンオイル粒子の揮発特性・化学組成に関する実験室評価, 第40回エアロゾル科学・技術研究討論会, 桐生, 2023年8月30日-9月1日.

【サブテーマ2】

- 1) Fushimi A., Saitoh K., Durdina L., Anet J. G., Edebeli J., Spirig C., Fujitani Y., Takegawa N., Organic analysis of aircraft engine smoke number filter samples with thermal-optical carbon analysis and thermal desorption-gas chromatography/mass spectrometry, 24th ETH-Conference on Combustion Generated Nanoparticles, June 22-24, 2021.
- 2) Saitoh K., Fushimi A., Matsuyama S., Miwa M., Toyama S., Kikuchi Y., Durdina L., Anet J., Takegawa N., Elemental and ionic analysis of aircraft engine smoke number filter samples with micro-PIXE and IC, 24th ETH-Conference on Combustion Generated Nanoparticles, June 22-24, 2021.
- 3) Saitoh K, Fushimi A, Matsuyama S, Miwa M, Toyama S, Kikuchi Y, Durdina L, Anet J G, Edebeli J, Spirig C, Takegawa N, Elemental analysis of aircraft engine smoke number filter samples with micro-PIXE, IBA&PIXE - SIMS 2021, P78, Abstract book, 146-147, October 11-15, 2021, Online.
- 4) Saitoh K, Sakurai H., Matsuyama S, Miwa M, Nishizawa M., Toyama S, Kikuchi Y, Fushimi A, Takegawa N, Micro-PIXE analysis of aerosol particles emitted during aircraft idling, The 12th Asian Aerosol Conference (AAC) 2022, P1-099, June 12-16, 2022, Taipei, Taiwan.
- 5) 伏見暁洋, 齊藤勝美, 藤谷雄二, Durdina L., Anet J. G., Edebeli J., Spirig C., Roth M., 竹川暢之の民間航空機ジェットエンジンからのオイルナノ粒子の排出実態, 第63回大気環境学会年会, 2B1000, 大阪, 2022年9月14日-16日.
- 6) (予定) 伏見 暁洋, 齊藤 勝美, 藤谷 雄二, Durdina L., Anet J. G., Edebeli J., Spirig

C., Roth M., 竹川 暢之, 航空機ジェットエンジンから排出されるナノ粒子の化学組成と生成メカニズム, 第40回エアロゾル科学・技術研究討論会, 桐生, 2023年8月30日-9月1日.

- 7) (予定) 藤谷 雄二, 伏見 暁洋, Durdina L., Anet J. G., Spirig C., Edebeli J., Roth M., 桜井 博, 村島 淑子, 齊藤 勝美, 竹川 暢之, 航空機ジェットエンジンから排出される超微小粒子の物理的特徴, 第40回エアロゾル科学・技術研究討論会, 桐生, 2023年8月30日-9月1日.

【サブテーマ3】

特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ4】

- 1) 上田 佳代, 池田 一男, Paoin Kanawat, 梁雨文, 竹川 暢之, 伏見 暁洋, 藤谷 雄二, 桜井 博, 村島 淑子, 超微小粒子の健康影響に関する文献レビュー, 第62回大気環境学会年会, 2021年9月15-17日, オンライン.
- 2) 上田 佳代, Seposo Xerxes, 伏見 暁洋, 藤谷 雄二, 竹川 暢之, 航空機由来超微小粒子に関連する健康リスクの推定, 第63回大気環境学会年会, 大阪, 2022年9月14日-16日.
- 3) (予定) 上田佳代, 航空機から排出される超微小粒子の健康リスク評価, 大気環境学会 モビリティ環境分科会講演会, 2023年6月13日予定.

(3) 「国民との科学・技術対話」の実施

【サブテーマ1】

- 1) 竹川 暢之, 三澤 健太郎, 芝本 幸平, 「航空機排気ナノ粒子」, 東京都立大学オープンラボ, 2022年11月3日 (参加者多数).

【サブテーマ2】

- 1) 伏見暁洋, 「航空機が排出する超微小粒子状物質」, 国立環境研究所 公開シンポジウム2022 「未来につなぐ世界との絆ー持続可能な地球を目指してー」, 2022年6月23日, オンライン (参加者約400人). <https://www.nies.go.jp/event/sympo/2022/index.html#tab2>
- 2) 伏見暁洋, 航空機が排出するナノ粒子の物理・化学的特徴と起源, 一般財団法人大気環境総合センター第4期定期セミナー, 2023年1月17日, オンライン (参加者約23名).

【サブテーマ3】

特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ4】

特に記載すべき事項はない。

(4) マスコミ等への公表・報道等

【サブテーマ1】

特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ2】

特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ3】

特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ4】

特に記載すべき事項はない。

(5) 本研究費の研究成果による受賞**【サブテーマ1】**

- 1) 豊田 創大, 第27回大気化学討論会 学生優秀発表賞, 2022年11月18日.

【サブテーマ2】

特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ3】

特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ4】

特に記載すべき事項はない。

(6) その他の成果発表**【サブテーマ1】**

- 1) (ポスター発表) 竹川 暢之、長崎 安奈, 航空機ジェットエンジン潤滑油ナノ粒子の揮発特性, Japan Geoscience Union Meeting 2021, May 30 - June 6, 2021.
- 2) (ポスター発表) Takegawa, N., Nagasaki, A., Fushimi, A., Fujitani, Y., Murashima, Y., and Sakurai, H., Volatility of aircraft exhaust nanoparticles observed at Narita International Airport, European Aerosol Conference 2021, September 3, 2021.
- 3) (ポスター発表) 佐藤 勇太朗, 中川 壮真, 竹川 暢之, 村島 淑子, 桜井 博, 航空機排気測定を模擬したサンプリング配管内におけるナノ粒子損失の評価, 第39回エアロゾル科学・技術研究討論会, 2022年8月3日-5日.
- 4) 竹川 暢之, 環境研究総合推進費の研究課題 (5-1709, 5-2004) の概要紹介, 令和4年度船舶・航空機排出大気汚染物質の影響把握に関する検討委員会, 2022年11月29日.
- 5) (ポスター発表予定) 中川 壮真, 佐藤 勇太朗, 村島 淑子, 桜井 博, 竹川 暢之, 航空機エンジン排気粒子測定における不確実性評価; 揮発性粒子除去装置及び捕集プローブ, 第40回エアロゾル科学・技術研究討論会, 桐生, 2023年8月30日-9月1日.

【サブテーマ2】

- 1) Fushimi A., Fujitani Y., Saitoh K., Durdina L., Anet J. G., Edebeli J., Spirig C., Roth M., Takegawa N. (2022.6.20-24, hybrid (Zurich, Switzerland)) Emission of lubrication-oil-derived nanoparticles from in-use commercial aircraft engines, SAE-E31 (Society of Automotive Engineers, Aircraft Engine Gas and Particulate Emissions Measurement) Summer Meeting (国際連携, 行政貢献).

【サブテーマ3】

特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ4】

特に記載すべき事項はない。

IV. 英文Abstract

Assessment of Risks to Human Health from Particulate Emissions from Aircraft and Strategies for Risk Mitigation in Relation to the International Civil Aviation Organization Standard

Principal Investigator: Nobuyuki TAKEGAWA

Institution: Tokyo Metropolitan University

1-1 Minami-Osawa, Hachioji, Tokyo 192-0397, JAPAN

Tel: +81-42-677-2532 / Fax: +81-42-677-2532

E-mail: takegawa@tmu.ac.jp

Cooperated by: National Institute for Environmental Studies, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Hokkaido University

[Abstract]

Key Words: Aircraft emissions, Ultrafine particles, International Civil Aviation Organization, Numerical simulations, Aircraft engine tests, Health risk assessment

Civil aviation has grown rapidly as a result of global economic development. The International Civil Aviation Organization has authorized a new regulatory standard for the mass and number emissions of particles emitted from aircraft engines and also promoted the development of sustainable aviation fuels for reducing net carbon emissions. Although civil aviation traffic in 2020 and 2021 was greatly reduced due to the Covid-19 pandemic, the global passenger market started gradually recovering in 2022 and is predicted to return to 2019 levels in 2023-2027. Therefore, the environmental impacts of aircraft emissions will continue to be an important issue in the following decades.

The major objectives of this project were to assess the health risks of aircraft-related ultrafine particles (UFPs) around major airports in Japan and also to propose effective measures for mitigating such risks in future. We have built a new framework involving aircraft engine tests, ambient measurements, numerical simulations, and health risk assessments. Field observations of UFPs were conducted at an observation site located near the runway and taxiway of Kobe Airport. We successfully estimated the particle number emission indices for takeoff and taxiing from specific aircraft. Direct measurements of particle number size distributions and size-resolved chemical compositions behind jet engines were performed at SR-Technics in Switzerland. The results clearly demonstrated the evolution of UFPs originating from jet engine lubrication oil during the expansion of plumes, which was consistent with the findings that we obtained at Narita International Airport. We have newly developed an empirical function for predicting the health risks of UFPs by using the particle number concentration as an input parameter. Mortality rates related to aircraft emissions around Haneda, Narita International, and Fukuoka Airports were estimated by combining the empirical function with numerical simulations obtained from an Aviation Environmental Design Tool model. Based on future predictions of the health risks associated with new engine and fuel technologies, we have proposed possible measures for mitigating the risks, focusing on the reduction of UFPs originating from jet engine lubrication oil.

To summarize, we have successfully obtained new insights that improve our understanding

of aircraft UFP emissions and related health risks around major airports. The project outcomes provide a firm scientific basis for assessing the future health risks of aircraft emissions and the possible co-benefits of mitigating carbon emissions and improving human health.