

【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)

研究代表機関：東京都立大学

研究代表者：竹川 暢之 (東京都立大学)

主：【重点課題⑯】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

行政ニーズ：(5－9)PM2.5及びOx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

研究体制：① 東京都立大学：竹川 暢之, 三澤 健太郎

② 国立研究開発法人国立環境研究所：伏見 暁洋, 藤谷 雄二

③ 国立研究開発法人産業技術総合研究所：桜井 博, 村島 淑子

④ 北海道大学：上田 佳代

⑤ 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：齊藤 勝美

Zurich University of Applied Sciences：Julien Anet, Lukas Durdina

研究開発背景：航空機排出粒子に関する国際動向

2019年申請当初

- 世界的な航空機需要は飛躍的に増加。国際民間航空機関 (ICAO) による粒子排出規制が2020年以降の製造エンジンから適用。
- 航空機は国際的な枠組みが非常に重要。日本でも国際動向に遅れをとることなく、粒子排出特性評価と健康リスク評価を両輪とした系統的な取組が必要。

ICAO Env. Report, 2022

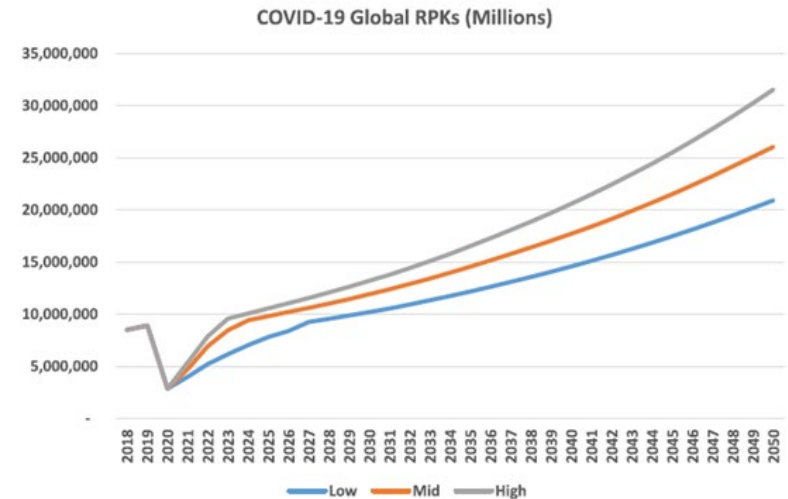
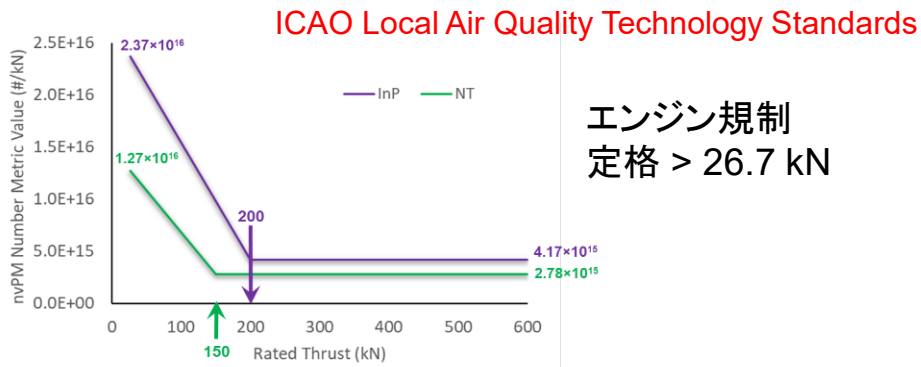


FIGURE 1-1: COVID-19 Global Passenger Forecast Scenarios

2023年現在

- COVID-19により航空需要はかつてないほどに落ち込んだ。その後の急回復により、COVID-19前の成長曲線に近づくと試算されている。
- CO₂削減と大気汚染低減は重要な課題に位置付けられている (ICAO, 2022)。
- 国内外において、再生可能または廃棄物を原料とするジェット燃料 (**持続可能な航空燃料: SAF**) への関心が大きく高まっている。

⇒ COVID-19という歴史的な出来事を経て、改めて**航空機の環境影響が注目**されている。

研究開発目的

- 粒子拡散・健康リスク評価では離着陸サイクル別の粒子排出特性が重要であるが、未解明の部分が多い。エンジン試験と実大気の乖離も大きい。

エンジン試験: サンプルング・分析法の課題

実大気観測: 空港へのアクセス制限

- 航空機UFPの疫学調査、毒性評価には不確実性が多い。一方で、国際的な情勢を考えると、**不確実性の幅を適切に考慮**した上で、先行して健康リスク評価を行うことが必要。

ICAO指針: 航空機の離着陸サイクル

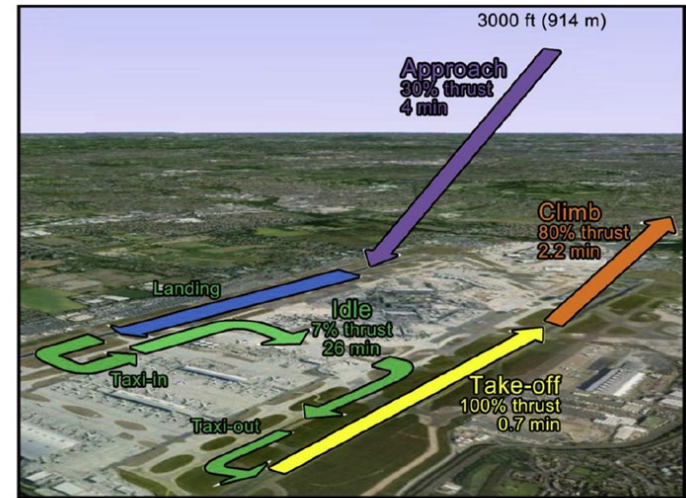


Fig. 5. Standard ICAO LTO cycle. Adapted from ICAO (2011).

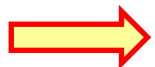
Masiol and Harrison, 2014

エンジン試験、実環境観測、数値シミュレーション、健康リスク評価の連携

エンジン試験を海外研究機関 (スイス) と協力して実施

数値モデル (AEDT) によるシミュレーション、空港周辺の観測データで検証

UFP毒性・疫学研究に関する様々なデータを解析し、健康リスク評価方法を開発



航空機由来UFPによる**健康リスク評価と対策提案**を目的とする。

研究目標

【全体】

- 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

- 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。

【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

- 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。

【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

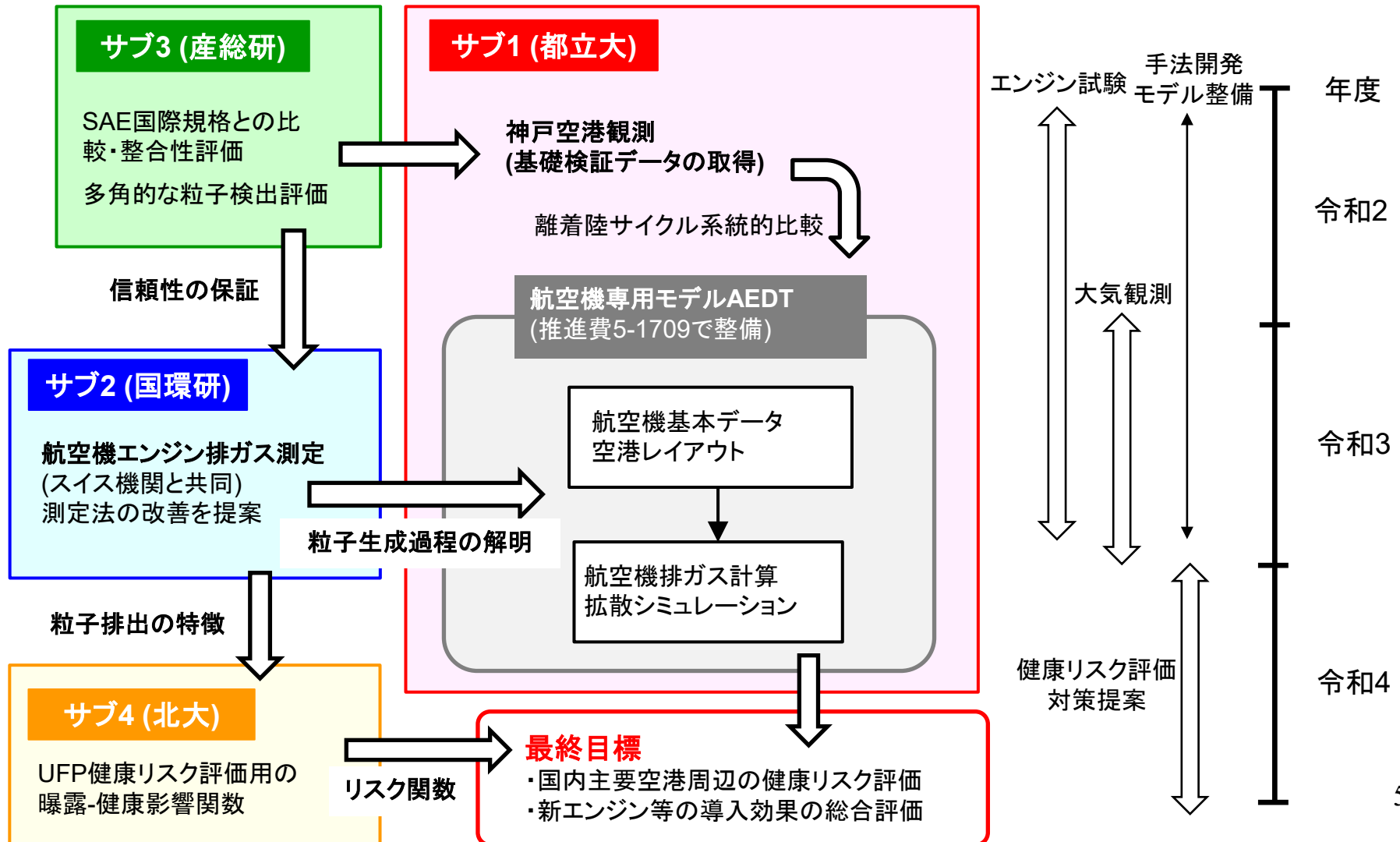
- 国際規制と関連付けてサブテーマ1と2で用いる計測法の評価を行う。特に、産総研の有する高精度な粒子計測技術や試験粒子発生技術を駆使して、健康影響が懸念される不揮発性粒子（煤）測定法の信頼性を評価する。

【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

- 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。

研究計画

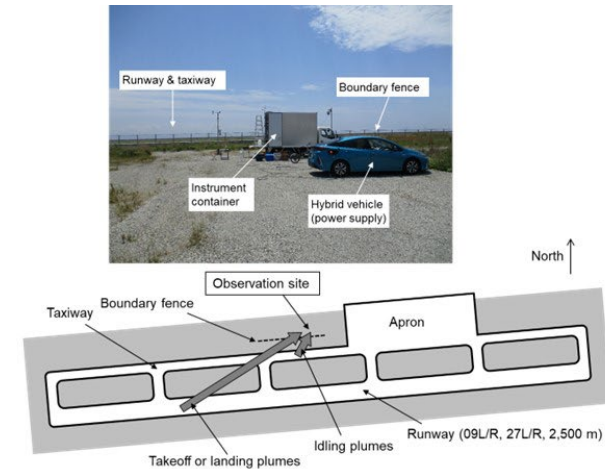
- 国内の主要空港 (特に人口密集地の空港) を対象に航空機由来UFPの健康リスク評価を行う。
- 航空機に関する技術革新 (エンジン・燃料等) による健康リスク改善効果の評価を行う。
- 各種対策のコストを推定し、費用対効果を考慮した対策提案を行う。



主な研究開発内容

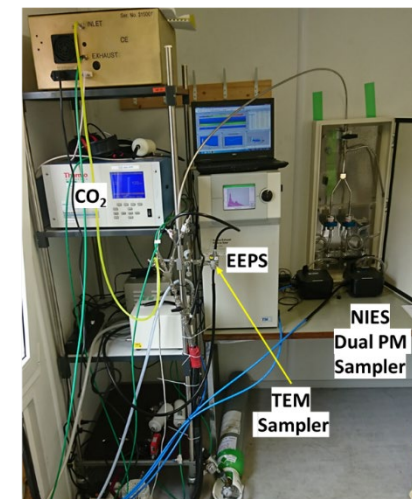
サブテーマ1: 実大気観測と数値シミュレーションに基づく空港周辺の粒子拡散評価と対策提案 (東京都立大学)

- 神戸空港は滑走路・誘導路と敷地境界が近く、かつ周囲に大きな発生源がない。
- 離陸、着陸、タキシングなど**LTOサイクル**に応じた**航空機排ガス測定**が可能。
- 推進費5-1709でも用いた加熱・非加熱切替型の凝縮粒子カウンタ (CPC) を使用。
- 数値モデルの入力値である排出係数の検証データとして重要。



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 (国立環境研究所)

- 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) でエンジン試験。
- COVID-19の影響で海外渡航が厳しく制限された中で、エンジン試験を複数回実施。
- 当初予定していた**数濃度粒径分布**と**化学分析**に加えて、**透過型電子顕微鏡 (TEM)** による粒子観察も実施。

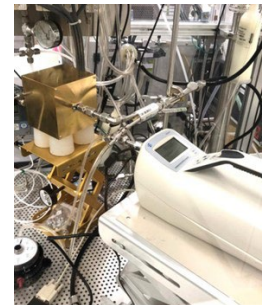
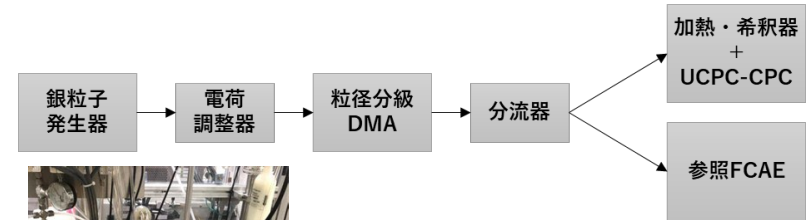


Silencer (P3)

主な研究開発内容

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 (産業技術総合研究所)

- 実大気観測 (サブテーマ1) とエンジン試験 (サブテーマ2) で用いる**粒子計測装置の試験・校正**および事後校正。
- 神戸空港で試料採取し、粒径10 nmの不揮発性粒子に対する凝集状態を分析。
- 排ガス計測システム内の誤差要因の検討。



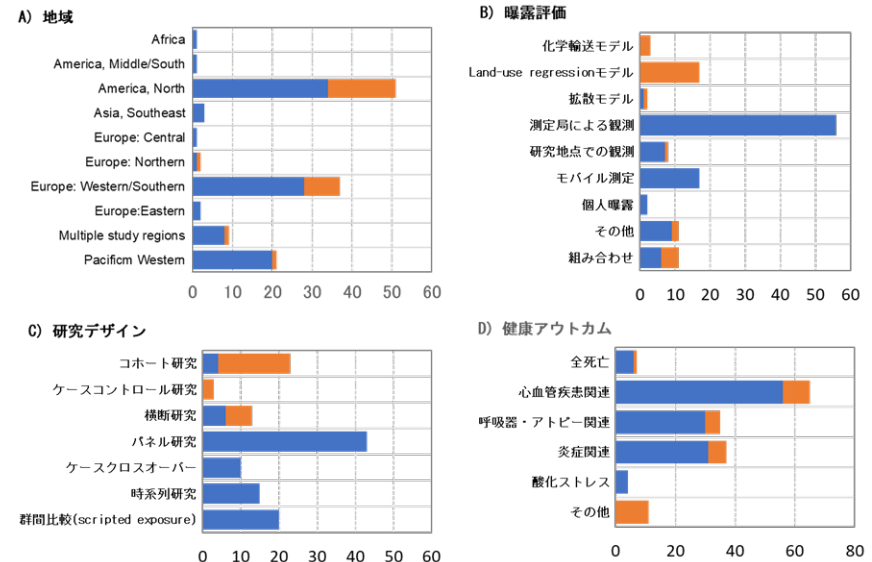
産総研の有する気中粒子数濃度
国家標準のエアロゾル電流計
(FCAE) 一次標準器

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)

- 世界の主要な医学系雑誌に掲載された論文をPubmedを用いて抽出。
- 系統的文献レビューに基づき、地域や曝露評価方法など様々な基準に基づいて分類。
- 粒子数濃度を入力値とした**健康リスク関数**の係数を導出。

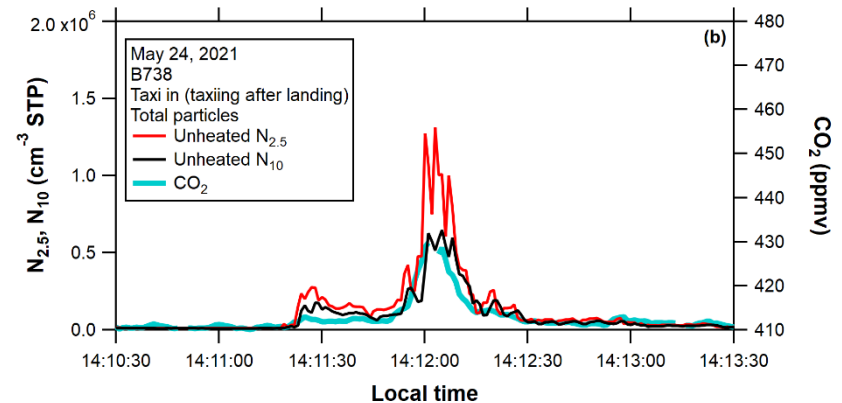
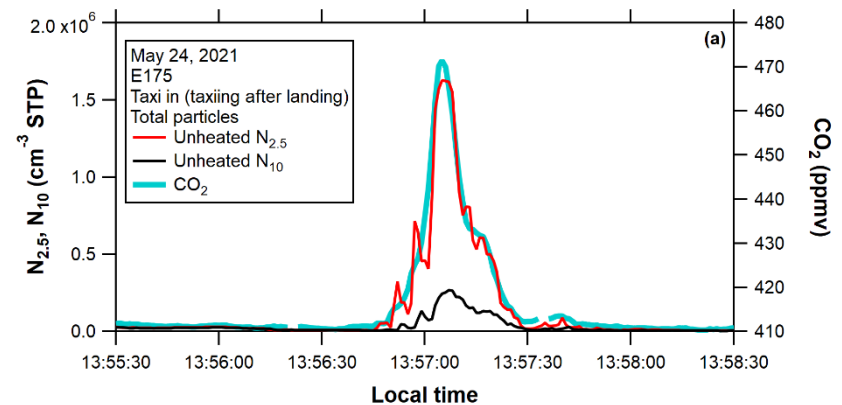
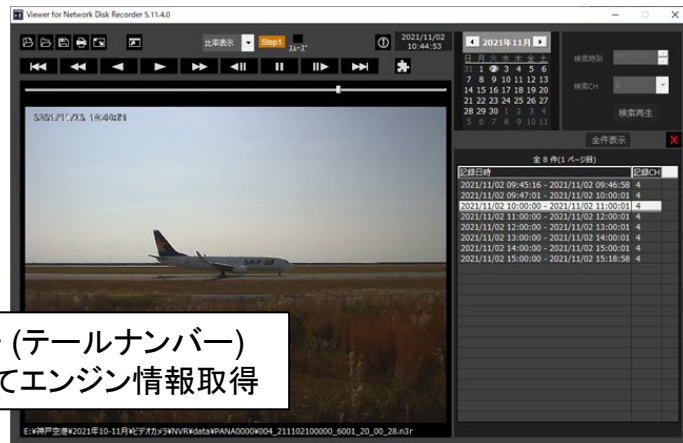
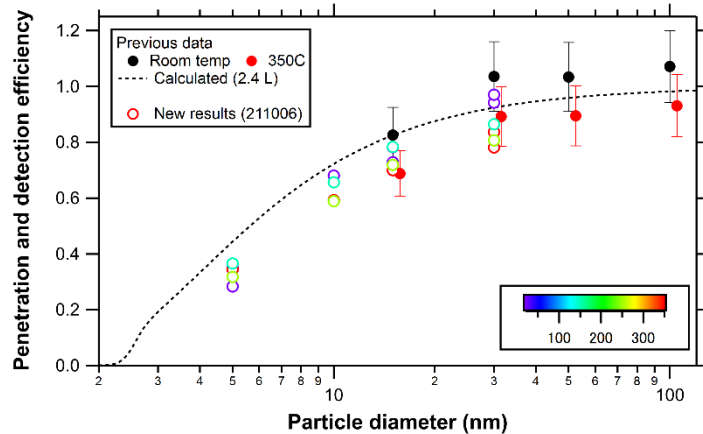
$$\text{リスク比 } RR = \exp[\beta(X - X_0)]$$

(β : 健康影響係数)



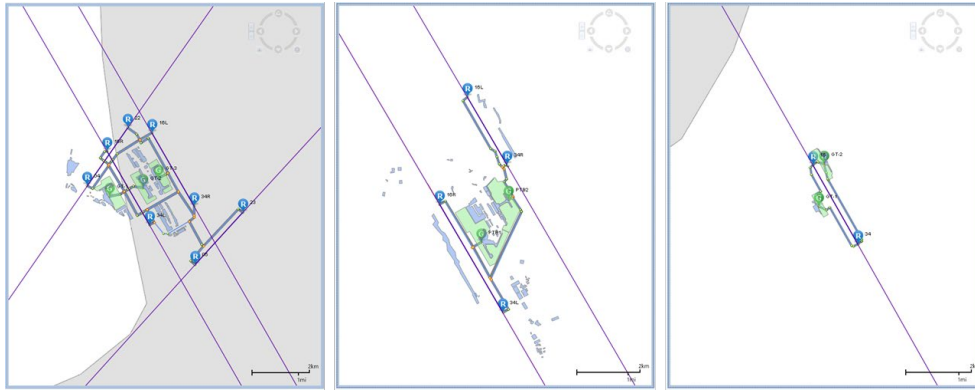
研究成果:【サブテーマ1・3】実大気観測

サブテーマ3による加熱管評価 ⇒ 揮発性別分類



- CFM56-7Bエンジン (Boeing 737-800) について先行研究と比較 (成田: Takegawa et al., 2021; ロサンゼルス: Moore et al., 2017; ICAO Databank)。
- 離陸時の総粒子・不揮発性粒子の排出係数は先行研究と整合的。
- タキシングの不揮発性粒子の排出係数はICAOデータより1桁以上大きい。ICAO基準ではタキシング時の推力は7%とされているが、実環境では異なる可能性を示唆している。

研究成果：【サブテーマ1】数値シミュレーション



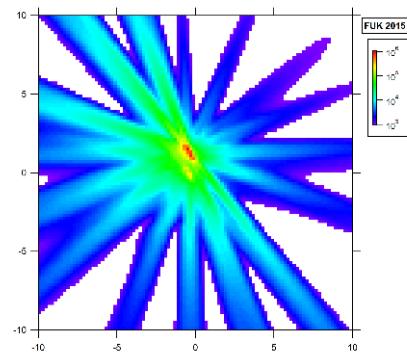
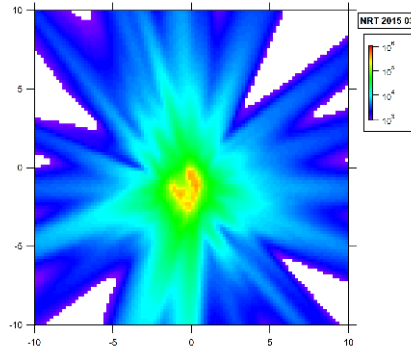
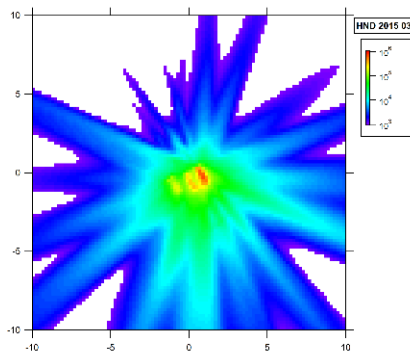
2015年3月の各空港の離発着数

羽田空港 約1200回/日

成田国際空港 約570回/日

福岡空港 約450回/日

福岡空港は滑走路1本あたりの使用頻度が高く、大都市部に近接。



質量濃度 ($\mu\text{g m}^{-3}$) から数濃度 (cm^{-3}) への換算係数

羽田 5.7×10^4

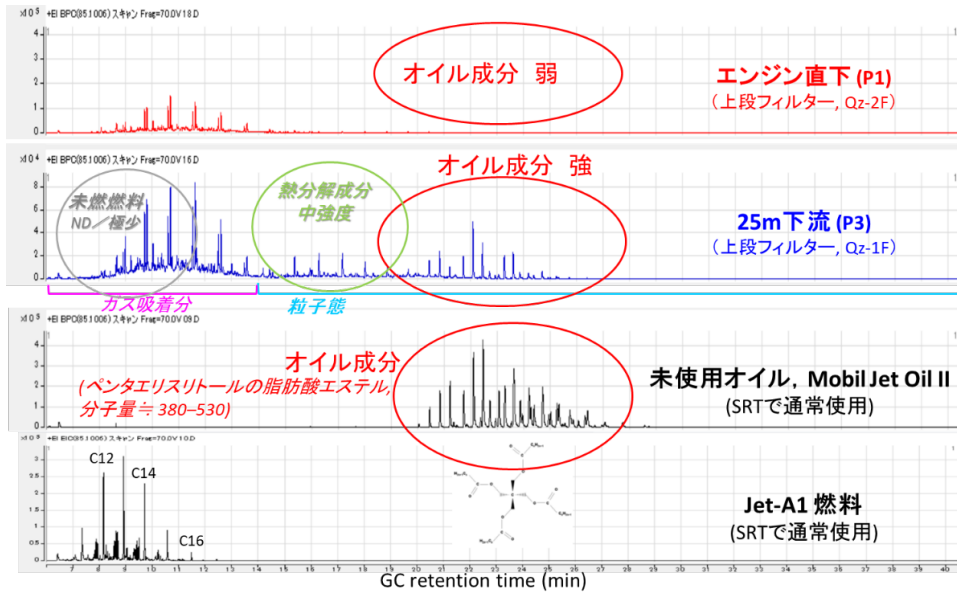
成田 4.5×10^4

福岡 4.5×10^4

- 2015年の3月、7月、11月で計算。対象地域は空港周辺20 km × 20 km四方、計算の空間分解能は100 m。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。
- AEDTの設定値には自由度が大きいが、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。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 (気象データの分解能、拡散モデルの精度)。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。

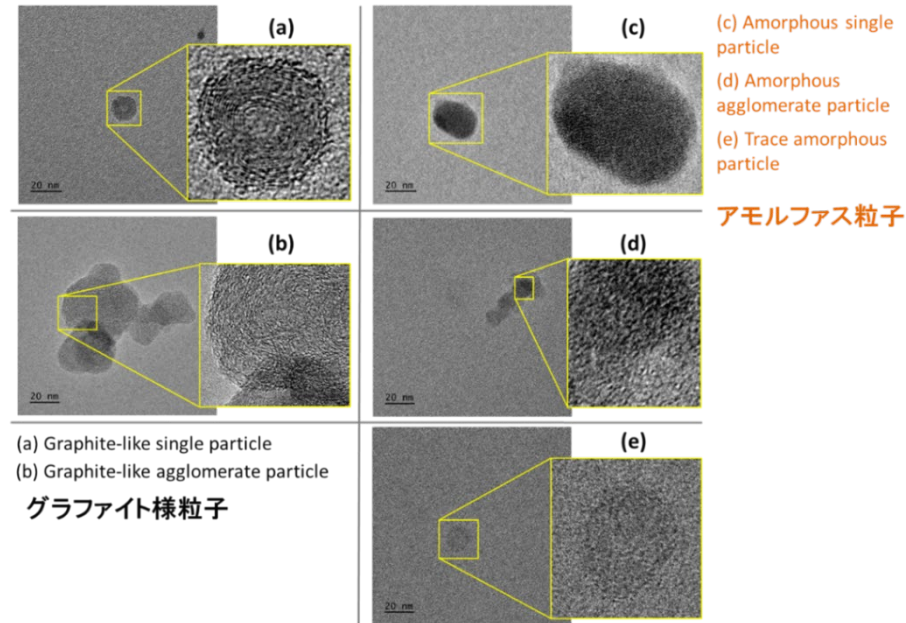
研究成果:【サブテーマ2】エンジン試験

加熱脱着GC/MSの分析結果



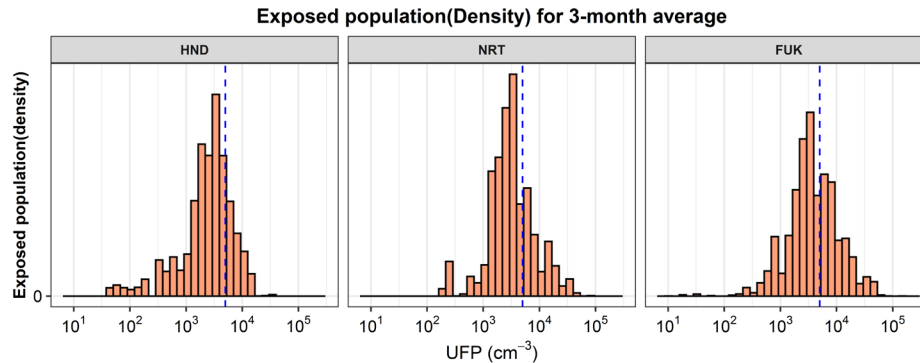
- CFM56-7Bエンジンについて、エンジン下流で粒径18~32 nm、32~60 nm、60~110 nmから**オイルマーカ**を明確に検出。PW4000-100エンジンについても同様。
- オイルを主体とするナノ粒子排出**を実証。
- 従来にないデータであり、推進費5-1709における観測結果を支持 (Fushimi et al., 2019)。
- オイルミストの蒸発・核生成によるナノ粒子生成を示唆。

TEMによる粒子形態観察



- 粒径10 nm程度以下の**アモルファス粒子**や**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。
- 従来にないデータであり、推進費5-1709の観測結果を支持 (Takegawa et al., 2021)。
- 空港周辺観測において、航空機排気粒子に特徴的なマーカーになる可能性がある。

研究成果：【サブテーマ4】健康リスク評価



対象地域 (空港周囲20 km四方) における人口加重UFP曝露濃度

関連死亡数	羽田空港	成田国際空港	福岡空港
航空機由来UFP ($X_0 = 0 \text{ cm}^{-3}$)	9.2 (2.8, 15.6)	1.3 (0.4, 2.3)	10.8 (3.2, 18.3)
PM2.5 ($X_0 = 5 \mu\text{g m}^{-3}$)	58.2 (40.5, 71.4)	3.7 (2.5, 4.5)	38.4 (26.7, 47.1)
PM2.5 ($X_0 = 15 \mu\text{g m}^{-3}$)	21.0 (14.6, 25.7)	0.7 (0.5, 0.9)	11.7 (8.1, 14.3)

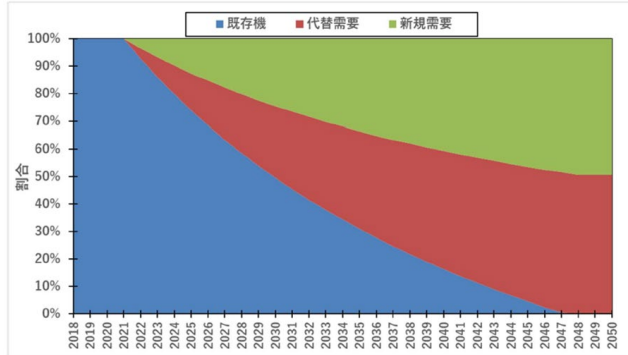
対象地域における2015年3, 7, 11月の3か月間の航空機UFP関連死亡数 (括弧内の数字は95%信頼区間)

同地域のPM2.5関連死亡数との比較 (カットオフ濃度 X_0 別)

- 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。
- 空港周辺に居住する住民への曝露状況は、**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、羽田空港の東および南側は海に面している。
- 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。
- UFP曝露と死亡との因果関係があるという仮定のもとで、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、無視できないという結果になった。
- 課題：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 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、さらなる疫学研究が望まれる。

研究成果：将来予測と対策提案

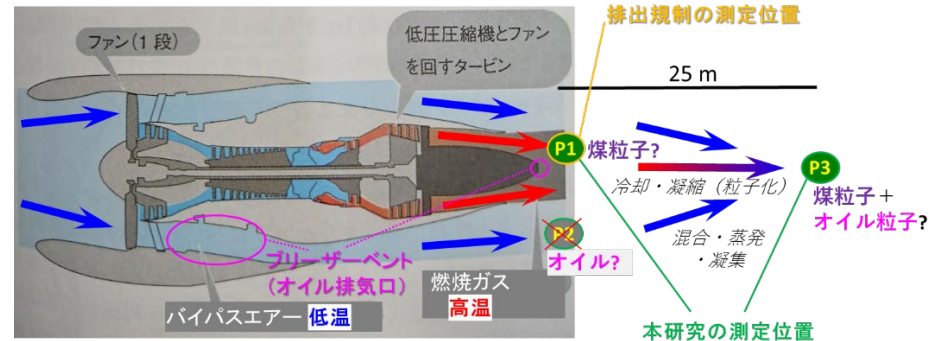
船舶・航空機委員会 令和4年度報告書



出典：(一財)日本航空機開発協会「民間航空機に関する市場予測 2022～2041」、令和4年3月。を基に算出。
注：「既存機」を規制未対応、「代替需要」(買い換え)と「新規需要」を規制対応と仮定する。

図 53 航空機の既存機・代替需要・新規需要別の割合

中村, 2013の図に矢印・文字等を追記



【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でのシナリオを使用

- COVID-19直近年2018年を基準とし、予測A(3.3%/年の成長率)と予測B(2018年以降横ばい)を想定。人口と死亡数は2015年の数値を使用。
- 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、不揮発性粒子の数割合が小さいために削減効果が弱められ、予測Bでは健康リスク(全死亡数)ほぼ横ばいと予測。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して全体としては増える予測(2050年で3倍程度)。
- 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**。

【燃料の観点】

- 2022年に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、状況は大きく変化しつつある。
- SAFによって上空の粒子排出が減少する(Moore et al., Nature, 2017)、従来燃料はSAF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(Jonsdottir et al., 2019)、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。
- 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を導入した上で地上動力装置(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。

環境政策への貢献

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。

研究目標の達成状況

【全体】

目標どおりの成果をあげた。

- 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、および健康リスク評価を実施した。
- 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。

【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

目標どおりの成果をあげた。

- 神戸空港観測、数値シミュレーション、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。

【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

目標どおりの成果をあげた。

- COVID-19の影響を強く受けたものの、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。申請当初計画にはなかったTEM粒子観察に関して、想定以上の成果が得られた。

【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

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、目的に応じたテスト粒子を用いて試験・校正を行った。

【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

目標どおりの成果をあげた。

- UFPIに起因する健康影響関数を構築し、UFP濃度情報をもとに疾病負荷を推定した。

研究成果の発表状況

<査読付き論文>

- 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.

<その他誌上発表 (抜粋)>

- 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.
- 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, 24-28, 2023.

<口頭発表 (抜粋)>

- 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. ⇒ 学生優秀発表賞
- 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.

査読付き論文 1件 (投稿中または準備中の論文 3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

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

参考文献

Fushimi, A., et al., Atmos. Chem. Phys., 19, 6389–6399, 2019.

ICAO Environmental Report 2022, <https://www.icao.int>.

ICAO Aircraft Engine Emissions Databank,
<https://www.easa.europa.eu/en/domains/environment/icao-aircraft-engine-emissions-databank>.

ICAO Local Air Quality Technology Standards, https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/LAQ_TechnologyStandards.aspx

Jonsdottir, H. R., Commun. Biol., 2, 90, 2019.

Masiol, M., and Harrison, R. M., Atmos. Environ., 95, 409–455, 2014.

Moore, R. H., et al., Sci. Data, 4, 170198, 2017.

Moore, R. H., et al., Nature, 543, 411–415, 2017.

Takegawa, N., et al., Atmos. Chem. Phys. 21, 1085–1104, 2021.

Takegawa, N., Atmos. Environ., 292, 119391, 2023.

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.

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.