

【5-1709】 高感度分析技術に基づく 空港周辺における超微小粒子状物質の動態解明

研究代表者

竹川 暢之

首都大学東京 大学院理学研究科

研究実施期間: 2017～2019年度

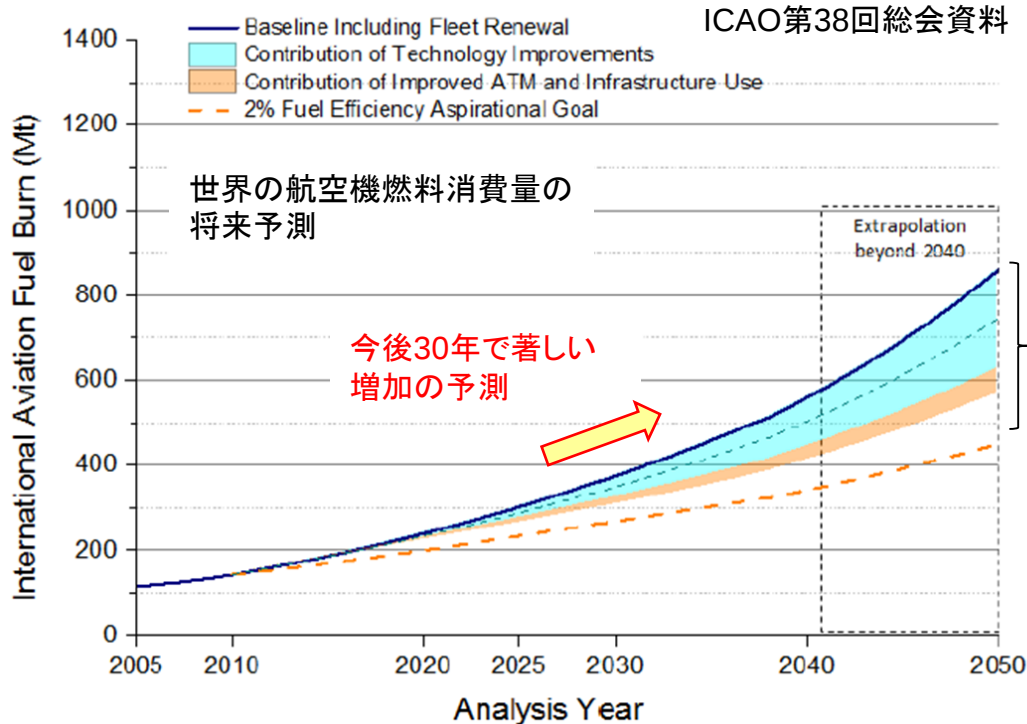
研究経費 (累計): 86,456千円

中間評価: A+

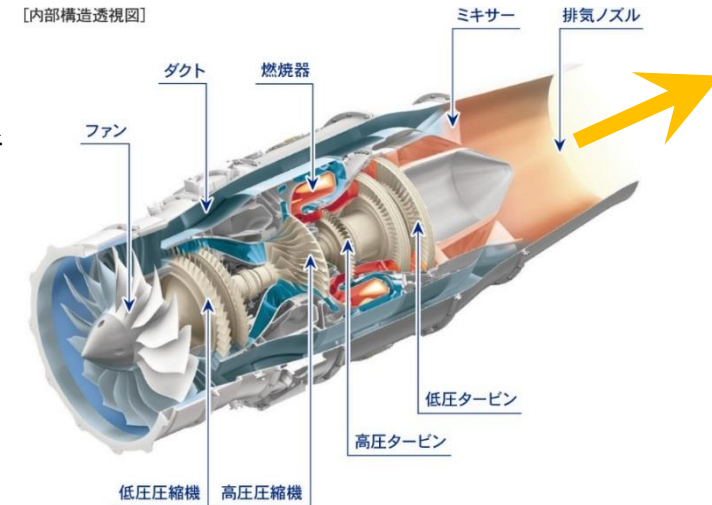
謝辞: 成田国際空港株式会社 (NAA)
成田国際空港振興協会 (NPF)
宇宙航空研究開発機構 (JAXA)
関西エアポート神戸株式会社
千葉県
成田市
富里市
神戸市

最終成果報告会 (2020年8月6日)

航空機を取り巻く世界情勢



[内部構造透視図]



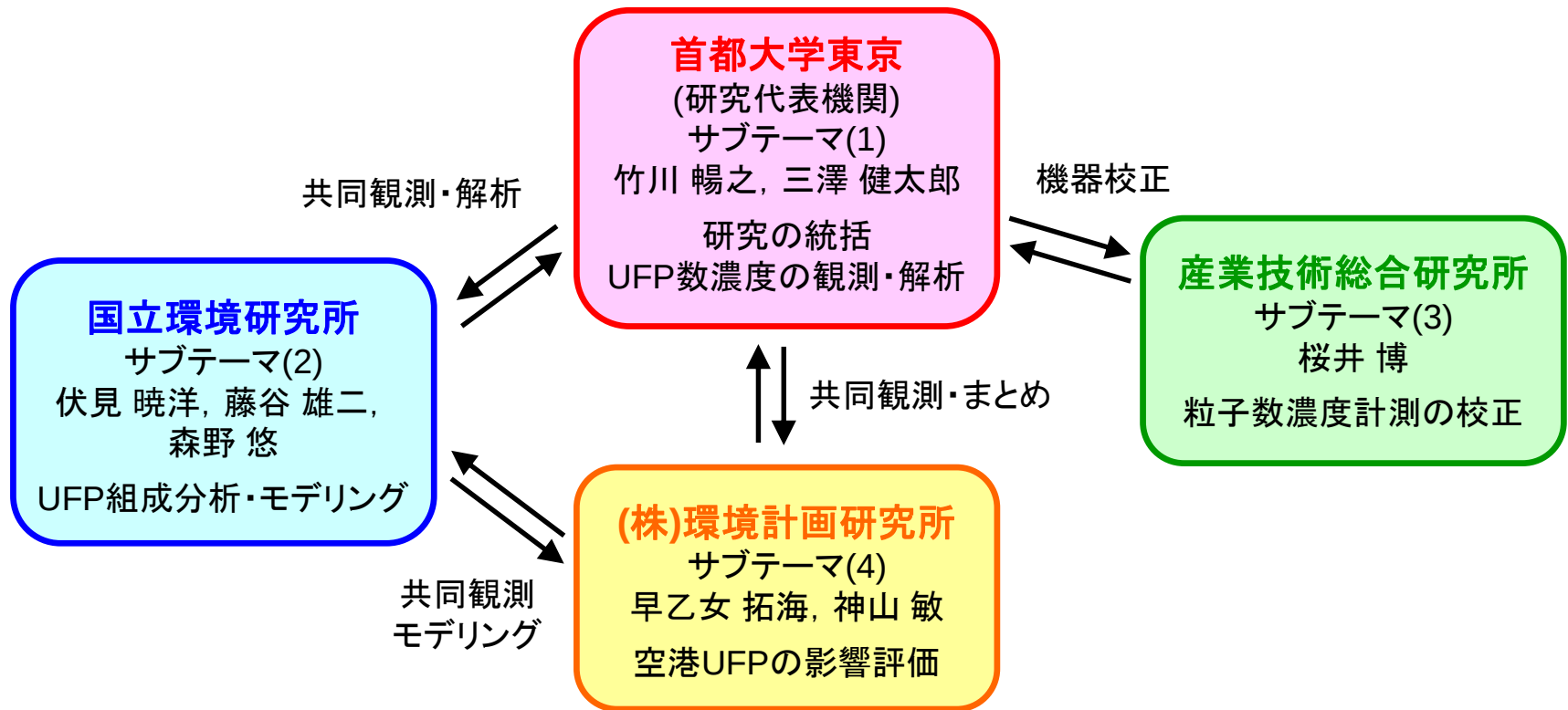
ターボファンエンジンの構造

出典: 本田技研工業株式会社HP

(<https://www.honda.co.jp/>, アクセス2020/01/14)

- 航空機需要はこれまで著しい増加を見せており、今後も増加が続く見込み。航空機の環境影響 (大気汚染および気候変動) に関する世界的な関心が高まっている。
- 国際民間航空機関 (ICAO) により**2016年に排出規制**が設置され、2020年以降の製造エンジンより適用。
- 航空機排気粒子は主に**超微小粒子状物質** (UFP: 100 nm以下) の粒径域にある。UFPによる健康影響を考える上では、質量濃度より粒径・数濃度が重要である。
- 航空機ジェットエンジンからの**UFP排出特性**や、空港周辺への**拡散状況**は不確実性が大きい。

研究体制



サブテーマ(1)「超微小粒子状物質の数濃度分布とその変動要因の解明」 首都大学東京

サブテーマ(2)「超微小粒子状物質の化学分析とモデリング手法開発」 国立環境研究所

サブテーマ(3)「国際標準に準拠した粒子濃度計測の精度評価」 産業技術総合研究所

サブテーマ(4)「空港起源の超微小粒子状物質の影響評価」 (株) 環境計画研究所

※ 研究協力者: (2) 齊藤 勝美 (イサラ研究所)、(3) 村島 淑子 (産総研)

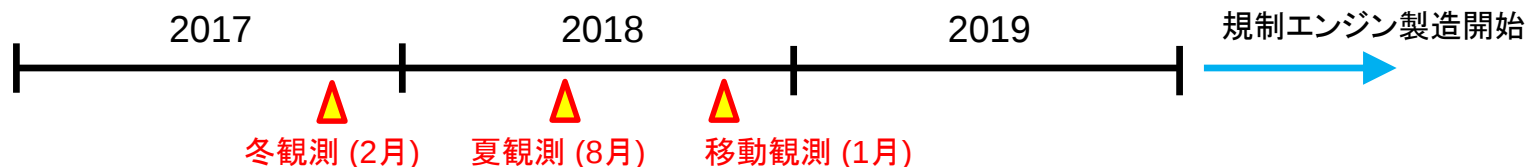
研究目的・概要

研究目的

- これまで開発してきた高感度分析技術に基づき、空港内におけるUFPの数濃度、質量濃度、化学組成 (揮発性・不揮発性) を解明することを主目的とする。
- 観測に基づき改良した移流拡散モデルを用いて航空機によるUFP濃度分布への影響を評価する。

研究方法・計画

- 成田国際空港敷地内の滑走路近傍における実大気観測 (UFP数濃度、質量濃度、化学組成) を3年間で夏と冬に1回ずつ実施する。
- 平均風が卓越する冬季において、空港の風上・風下でUFP数濃度の移動観測を実施する。
- 系統的な実測データに基づきモデルを検証することで、UFP再現の信頼性を向上させる。



当初の研究目的・計画に従い概ね予定通り実行した。

成田国際空港における観測



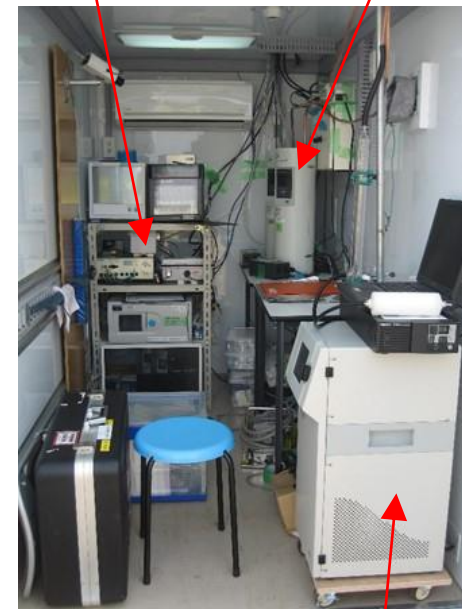
Google Earth (作成日2019年8月29日)

SMPS (数濃度粒径分布), CO₂計



UCPC (>2.5 nm) CPC (>10 nm) (数濃度)

NO_x, 気象計

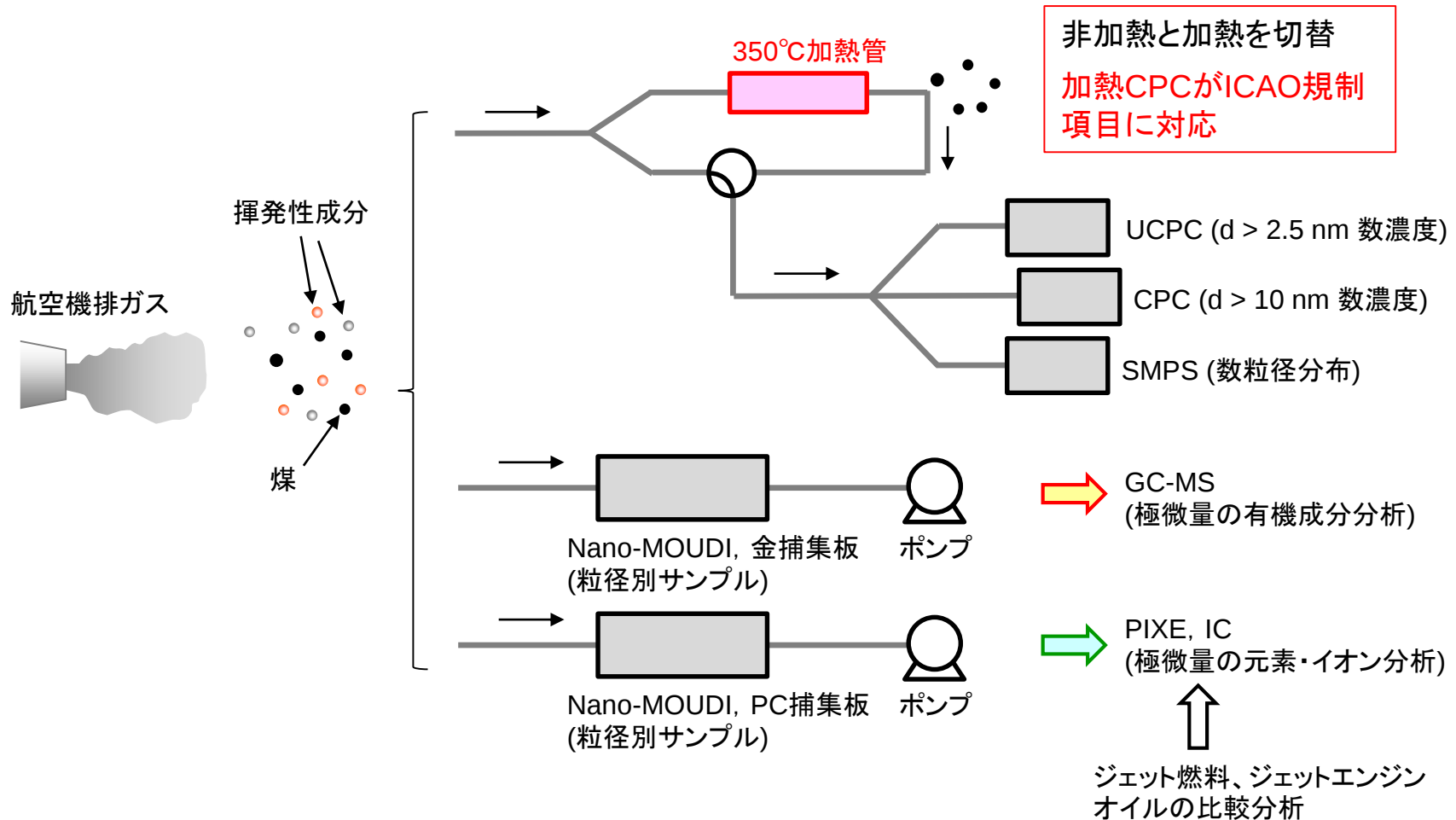


Nano-MOUDI
(化学組成分析)

EEPS
(数濃度粒径分布)

- UFP数濃度・組成を包括的に捉える装備
- 観測点: A滑走路の近傍 (約150 m)
- 冬季: 2018年2月5日～2月26日 (3週間)
- 夏季: 2018年7月27日～8月14日 (3週間)

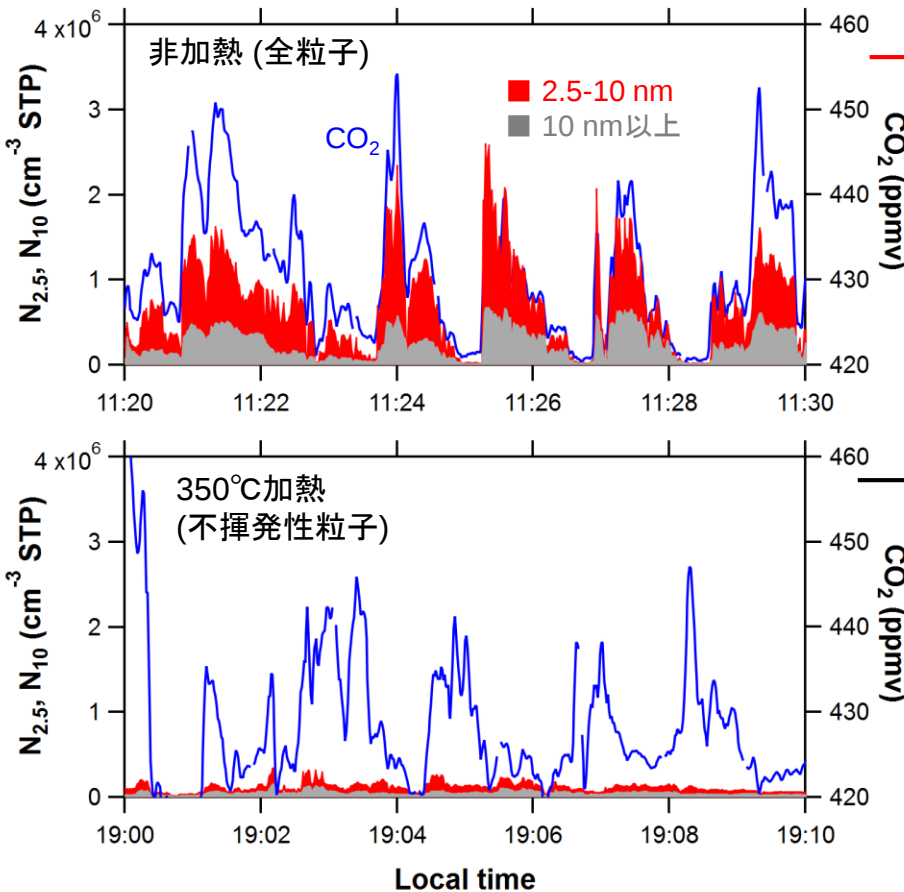
研究の独創性：高感度分析技術



- ICAO規制：350°C加熱で消失しない10 nm以上の不揮発性粒子 (主に煤) ⇔ 加熱CPC ($d > 10 \text{ nm}$) が対応。
- 高感度分析技術を駆使し、航空機UFP排出特性を解明する上で鍵となる、揮発性別の数濃度粒径分布および粒径別化学組成 (有機成分、炭素性成分、イオン、金属元素) を測定。

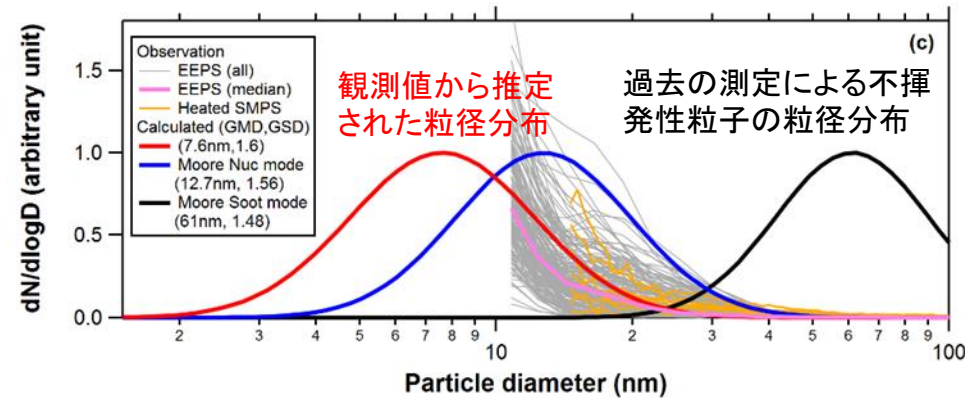
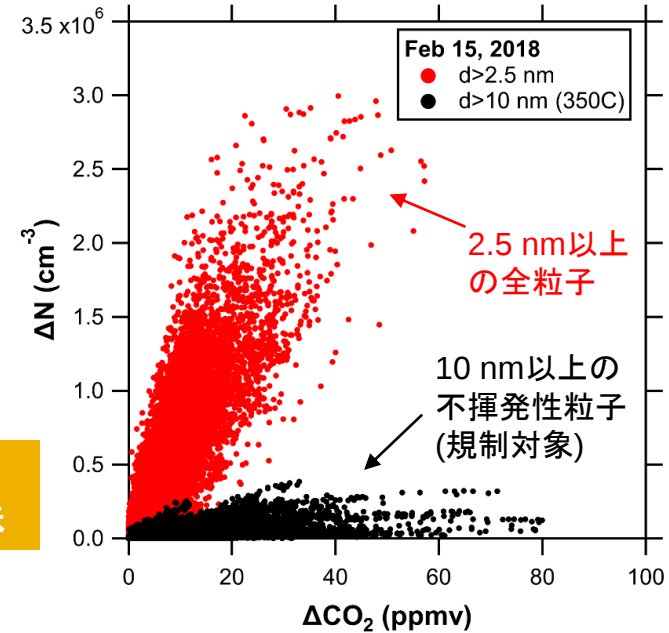
【サブ(1)(3)】UFP数濃度：粒径10 nm以下の重要性

滑走路近傍で観測された航空機plume
Takegawa et al., submittedのデータから抜粋



CO₂との増分比
(数排出係数)

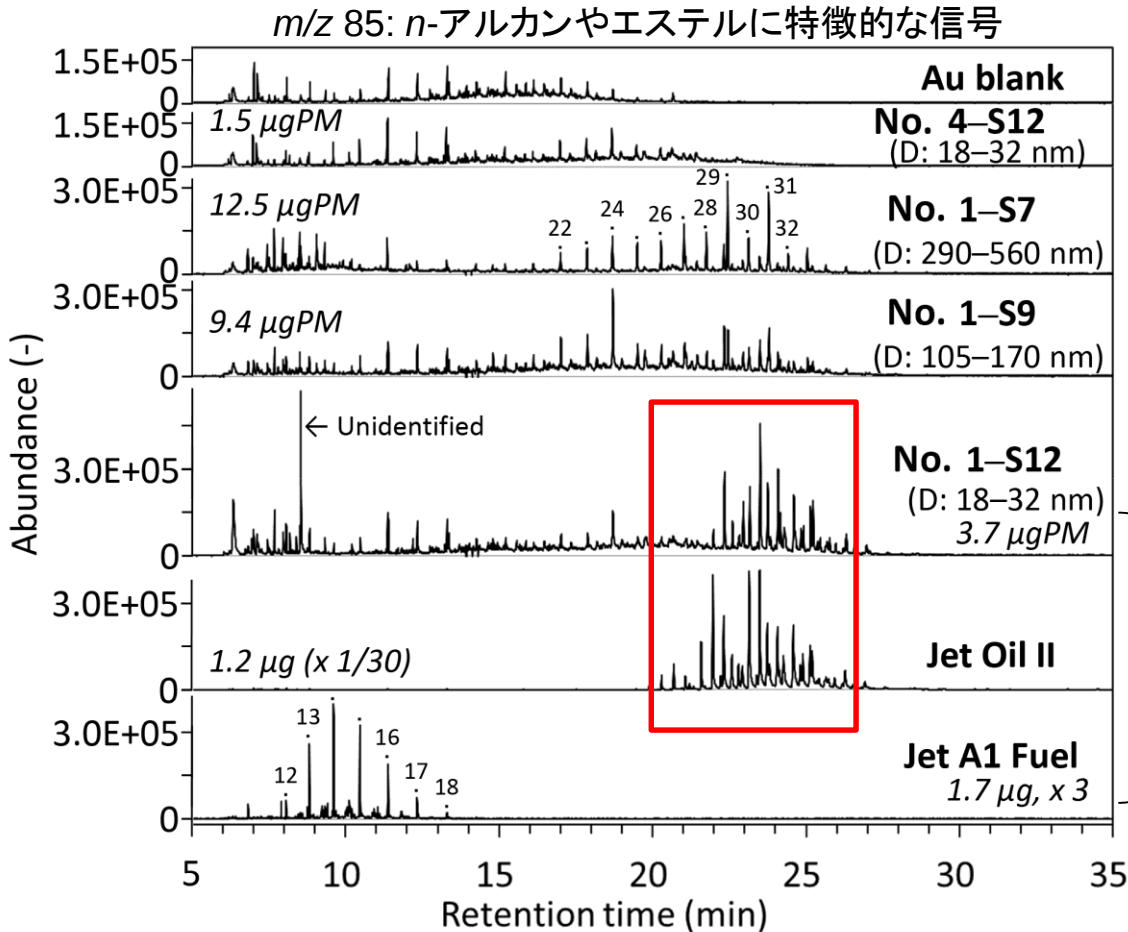
産総研における
精密校正を加味



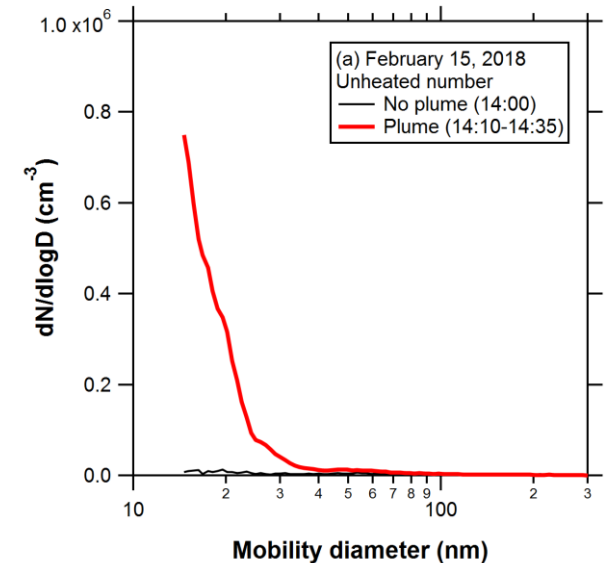
- 350°C加熱により数濃度が大幅に減少 → 揮発性粒子が支配的。
- 実環境における全粒子の数排出係数の半分以上が10 nm以下にあり、かつ規制対象となる10 nm以上の不揮発性粒子 (煤) に比べて中央値で60倍程度大きい。
- 不揮発性粒子について、10 nm以下の寄与が過去の測定例 (Lobo et al., 2015等) に比べてはるかに大きい。

【サブ(2)】化学成分分析：エンジンオイルの寄与

Fushimi et al., ACP, 2019



航空機plumeの粒径分布の例 (非加熱・全粒子)

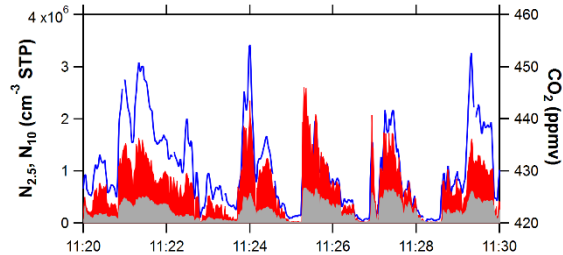


2018年2月9~13日の昼間の粒径別試料
・18-32 nmの試料がエンジンオイルと類似
・マススペクトルもよく一致
(燃料の特徴とは明確に異なる)

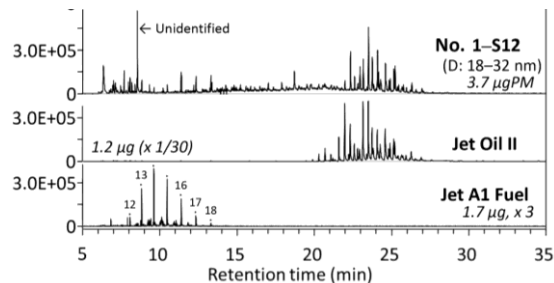
- ・ 昼間の18-32 nmの試料からジェットエンジンオイルに特徴的な信号を明確に検出 (夜間は不検出)。
- ・ 気温が大きく異なる夏の観測でも同様の結果が得られた。
- ・ 航空機エンジン排ガスに関するスイスとの国際共同研究に発展。

航空機UFPに関する科学基盤の構築

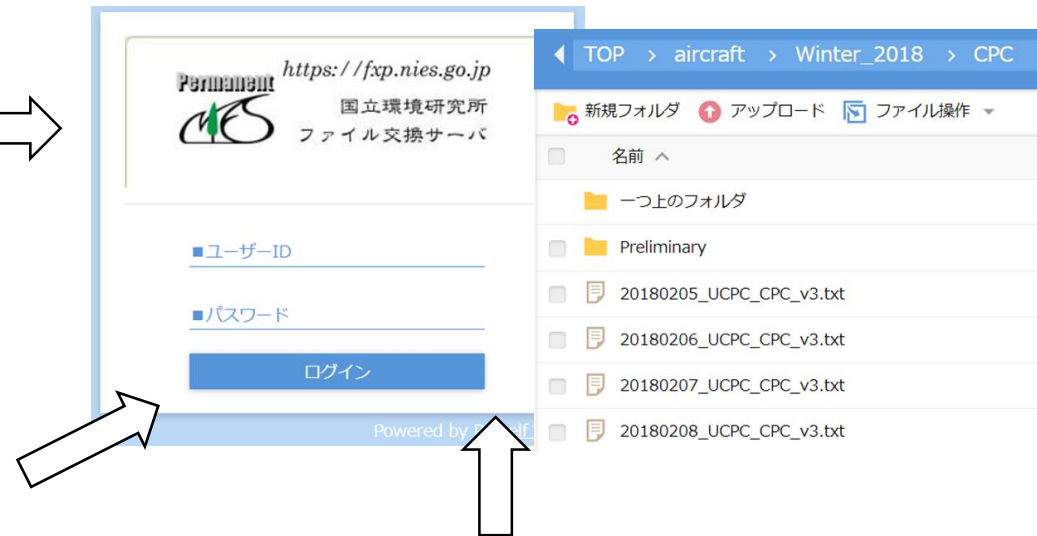
UFP数濃度・粒径分布



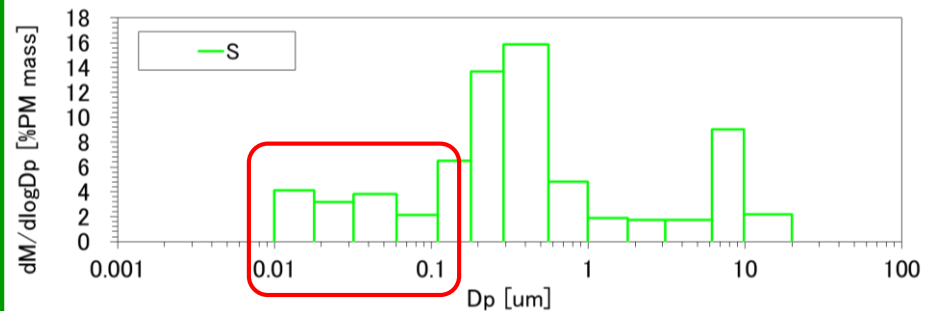
UFP有機成分



国立環境研究所データサーバ



UFP元素プロファイル

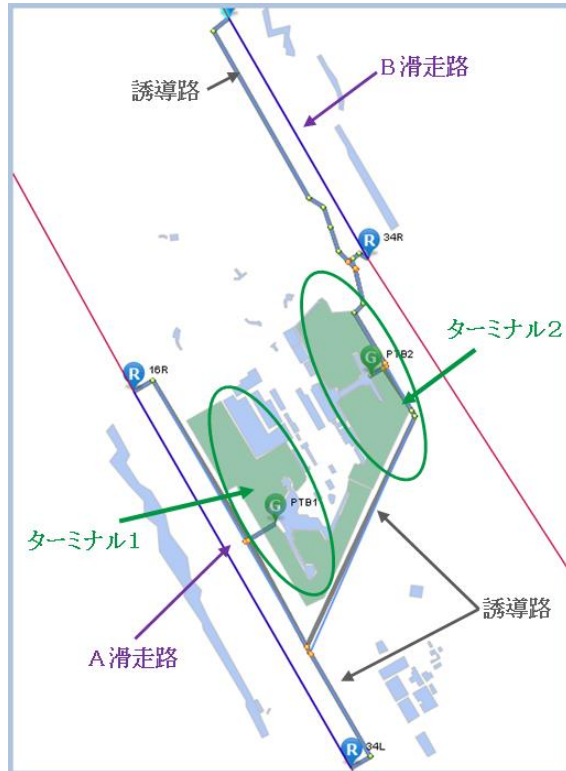


硫黄Sは微小粒径や粗大粒径だけでなく、UFP側でも濃度が増加 (K, Ni, Si, Mg, Ca, Feも同様)。

- 世界的に見ても前例のない航空機UFPに関する包括的なデータセットを構築した。
- 航空機エンジンからの粒子排出特性の解明、モデルによる拡散予測の高精度化に資する。
- 国際的な場で情報発信するための重要な科学基盤となる。

【サブ(4)】数値モデル (AEDT)

空港レイアウトの構築



航空機フライトプロファイル計算



機体データの例

Screenshot of the AEDT software interface showing aircraft data. The table lists aircraft details, including ID, Description, Type, and Model. The data is organized into columns: ANP (Airline Name Prefix), ANP (Airline Name), and Air (Airline). The table shows various aircraft models, including Boeing 777-300, Airbus A300-622R, and Airbus A300B4-203.

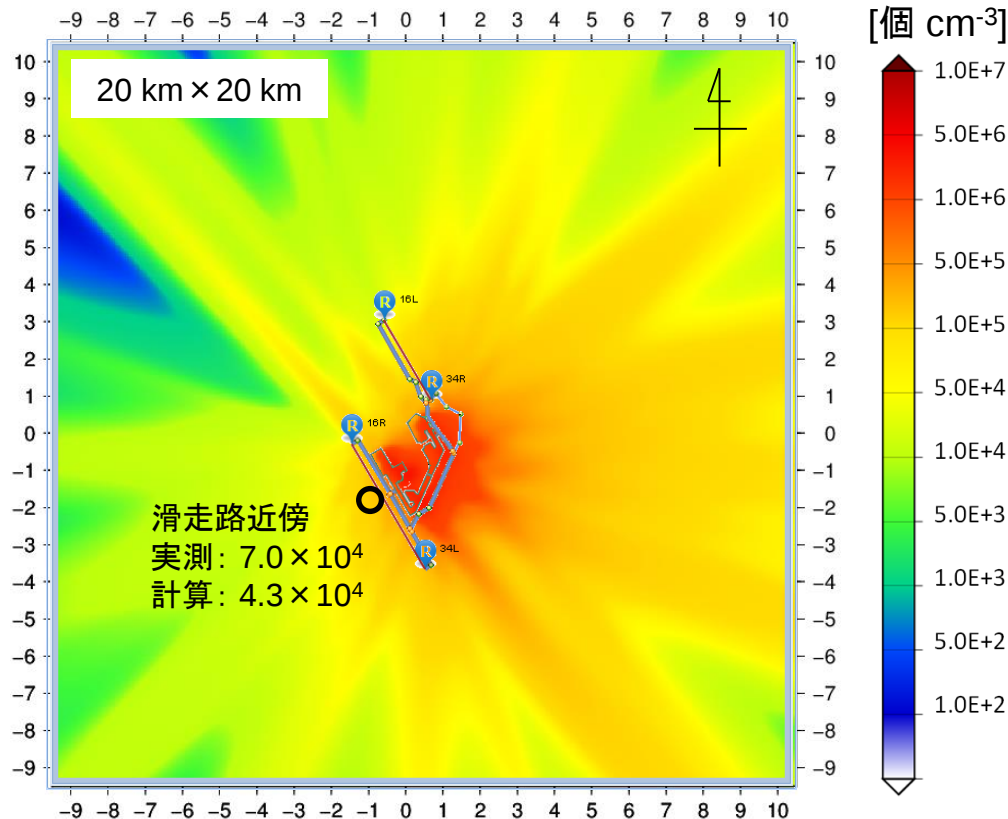
ID	Description	Type	Model
777300	BOEING 777-300/TRENT892	✈	Boeing 777
777300	BOEING 777-300/TRENT892	✈	Boeing 777
777300	BOEING 777-300/TRENT892	✈	Boeing 777
777300	BOEING 777-300/TRENT892	✈	Boeing 777
777300	BOEING 777-300/TRENT892	✈	Boeing 777
A300-622R	A300-622R#PW4168	✈	Airbus A300
A300-622R	A300-622R#PW4168	✈	Airbus A300
A300-622R	A300-622R#PW4168	✈	Airbus A300
A300-622R	A300-622R#PW4168	✈	Airbus A300
A300-622R	A300-622R#PW4168	✈	Airbus A300
A300-622R	A300-622R#PW4168	✈	Airbus A300
A300-622R	A300-622R#PW4168	✈	Airbus A300
A300-622R	A300-622R#PW4168	✈	Airbus A300
A300-622R	A300-622R#PW4168	✈	Airbus A300
A300-622R	A300-622R#PW4168	✈	Airbus A300
A300-622R	A300-622R#PW4168	✈	Airbus A300
A300-622R	A300-622R#PW4168	✈	Airbus A300
A300-622R	A300-622R#PW4168	✈	Airbus A300
A300-622R	A300-622R#PW4168	✈	Airbus A300
A300-622R	A300-622R#PW4168	✈	Airbus A300
A300B4-203	AIRBUS A300B4-200/CF6-5C	✈	Airbus A300
A300B4-203	AIRBUS A300B4-200/CF6-5C	✈	Ilyushin 76
A340-211	A340-211#CFM56-5C2	✈	Ilyushin 76

AEDT (Aviation Environmental Design Tool)

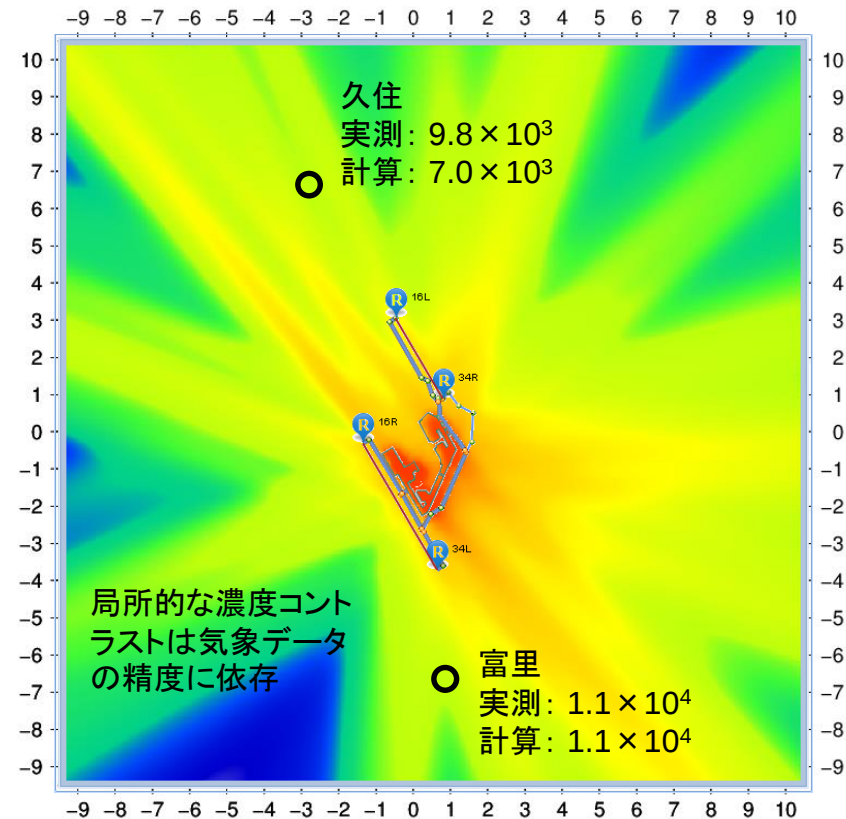
- 米国連邦航空局 (FAA) によって開発されたシミュレーションモデル。
- 航空機エンジンをはじめとした、飛行場内の主要な発生源から排出される大気汚染物質の排出量、及び飛行場の濃度分布を予測可能。
- 冬季観測の条件に合わせて、 NO_x 、 SO_x 、PM等を計算。サブ(1) (実環境の排出比) とサブ(2) (粒子拡散解析) の結果に基づき、PMにスケーリングすることで粒子数濃度 (≒UFP数濃度) を推定。

【サブ(4)】粒子数濃度シミュレーション (粒径10 nm以上)

2018年冬季観測期間平均 (2/5～23)



2019年冬季移動観測期間平均 (1/18～27)



- 粒子数濃度は滑走路およびターミナルエリアで高くなっていた (NO_x も同様の傾向)。
- 滑走路近傍および久住・富里周辺の粒子数濃度は概ね実測に近い桁であった。計算では航空機以外の排出をゼロとしているが、実際には数濃度で $10^3 \sim 10^4 \text{ cm}^{-3}$ のバックグラウンドがある。
- 空港周辺の濃度分布は気象データの精度に強く依存していた。絶対値の代表性については、継続的な検証が必要である。
- 粒子数濃度は環境基準がないので基準値との比較はできない。なお、周辺の常時監視局の NO_x や SO_2 については、環境基準を概ね達成していた。

全体の成果まとめ

航空機UFP排出特性

- 成田国際空港の滑走路近傍で観測を実施し、国内で初めて航空機由来のUFPの動態解明に資するデータを取得した。これらのデータを国立環境研究所のアーカイブに集約した。
- 実環境における全粒子の数排出係数の半分以上が10 nm以下にあり、かつ規制対象となる10 nm以上の不揮発性粒子に比べて中央値で60倍程度大きいことが明らかになった (Takegawa et al., submitted)。
- 航空機UFPの揮発性成分として未燃のジェットエンジンオイルの重要性が初めて明らかになった (Fushimi et al., 2019)。
- 航空機UFPの発生源解析において必須となる、燃料や潤滑油中の元素プロファイルを明らかにした (Saitoh et al., in press)。

航空機排気粒子の広域影響

- 観測データで検証された数値モデル (AEDT) を用いて、成田国際空港周辺の航空機排気粒子の拡散シミュレーションを実施し、空港内外の粒子数濃度の特徴を明らかにした。

国際連携体制の構築

- 推進費の成果を契機に、スイスの研究グループとの間でエンジン排ガス測定に関する共同研究体制を構築した。
- 研究代表者の竹川、サブテーマ(2)代表の伏見、研究協力者の齊藤が、SAE-E31 (航空機排ガス測定に関する委員会) への参画を実現した。

環境行政への貢献

行政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きた。
- 当該検討委員会では、成田国際空港における大気観測や空港周辺のシミュレーションなど、本推進費の研究成果が定期的に報告され、相互に情報・意見交換が行われた。また、本推進費で得られた研究論文 (Fushimi et al., 2019) が、当該委員会の文献レビューでも取り上げられた。

行政が活用することが見込まれる成果

国際的な活動への貢献

- 国際的な委員会等において、我が国からの科学的知見に基づいた情報発信や各種提案に活用されることが見込まれる。実際に、2020年1月に英国で開催されたSAE-E31会合ではジェットエンジンオイルに関する話題が頻繁に取り上げられており、当該推進費の成果が一定の影響を与えたことが伺える。

国内行政への活用

- 本推進費では、航空機排気粒子の諸特性・濃度分布を明らかにするとともに、NO_xなど常時監視項目について環境基準との比較を行った。これらの知見は、UFP健康影響の文献調査と合わせて、航空機排ガスの健康影響評価を行う上での基礎データとなることが期待される。
- 本推進費で提案された簡易調査方法 (神戸空港等における粒子数濃度のモニタリング) は、ICAO規制効果の持続的なアセスメントに活用されることが期待される。

全体の主な成果

査読付き学術誌論文

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. サブ(2)(1)
2. Saitoh K., Fushimi A., Sera K., Takegawa N., Elemental analysis of jet engine lubrication oil and jet fuel using in-air PIXE, International Journal of PIXE, in press. サブ(2)(1)
3. Saitoh K., Fushimi A., Sera K., Takegawa N., Quantification of major and trace elements contained in aircraft JET A-1fuel by PIXE analysis, International Journal of PIXE, in press. サブ(2)(1)
4. 【投稿中】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. サブ(1)～(3)

学会発表

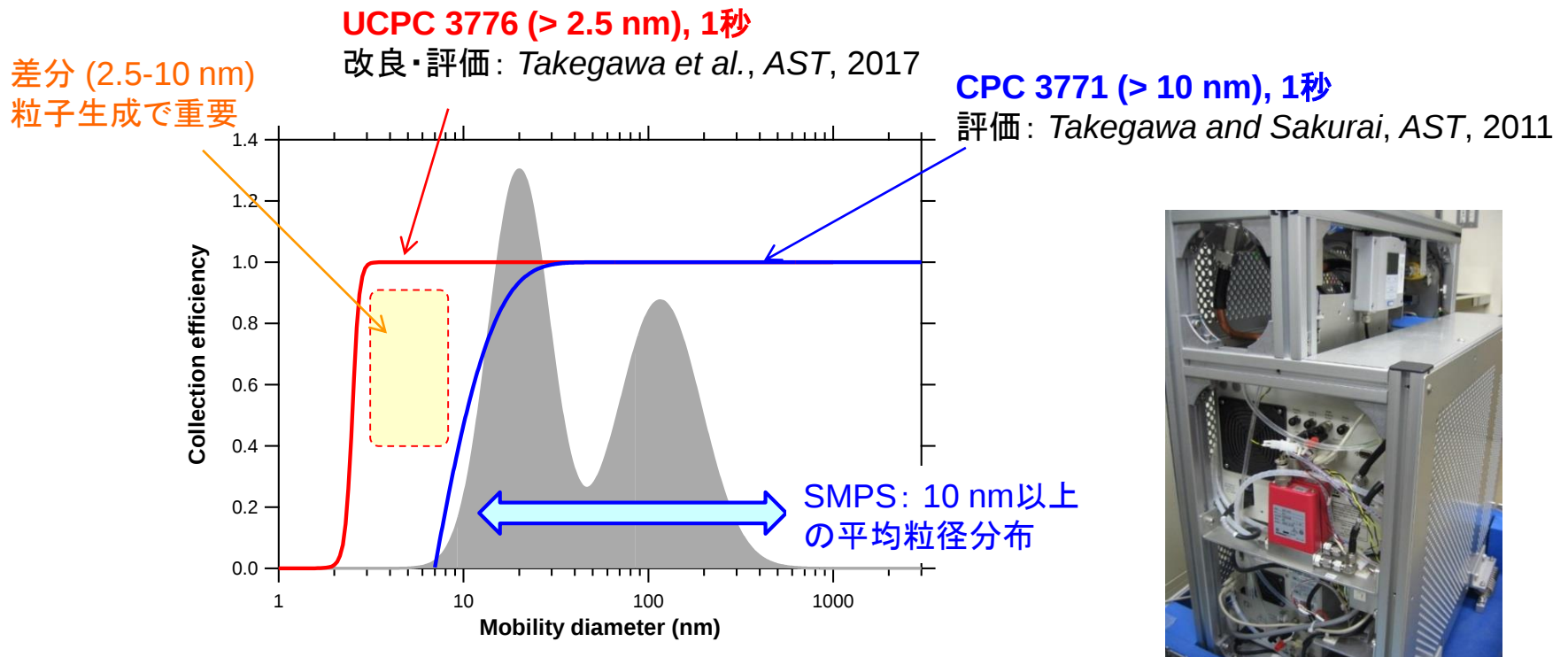
1. Fushimi A., Saitoh K., Fujitani Y., Takegawa N., 23rd ETH-Conference on Combustion Generated Nanoparticles, ETH Zurich, Switzerland, June 2019. サブ(2)(1)
2. Saitoh K., Fushimi A., Fujitani Y., Takegawa N. 23rd ETH-Conference on Combustion Generated Nanoparticles, ETH Zurich, Switzerland, June 2019. サブ(2)(1)
3. 竹川 暢之, 三澤 健太郎, 早乙女 拓海, 村島 淑子, 伏見 暁洋, 桜井 博, 大気環境学会 自動車環境分科会 シンポジウム, 2019年1月. サブ(1)～(4)
4. 竹川 暢之, 三澤 健太郎, 伏見 暁洋, 村島 淑子, 桜井 博, 第36回エアロゾル科学・技術研究討論会, 2019年9月. ①
5. 三澤 健太郎, 竹川 暢之, 藤谷 雄二, 伏見 暁洋, 村島 淑子, 桜井 博, 第36回エアロゾル科学・技術研究討論会, 2019年9月. サブ(1)～(3)
6. Takegawa, N., Misawa, K., Fushimi, A., Murashima, Y., and Sakurai, H., AAAR 37th Annual Conference, October 2019. サブ(1)～(3)

口頭発表 13件、ポスター 発表 9件

受賞

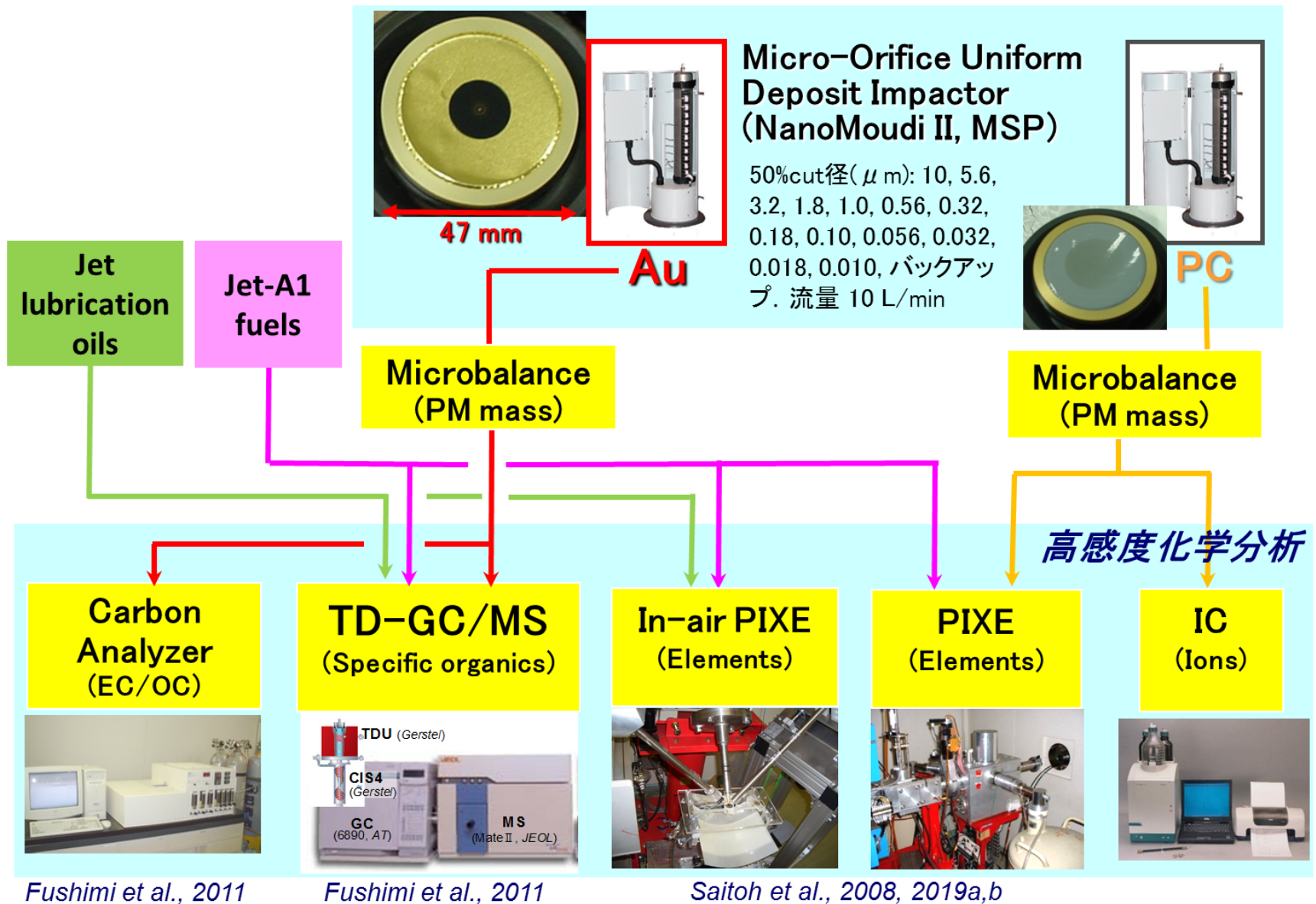
1. 齊藤 勝美 ETH-Conference「Trojan Horse Award (2019)」 サブ(2)
2. 伏見 暁洋 日本エアロゾル学会「エアロゾル計測賞 (2019)」 サブ(2)

【補足資料】サブ(1): UFP数濃度 (UCPC-CPC)



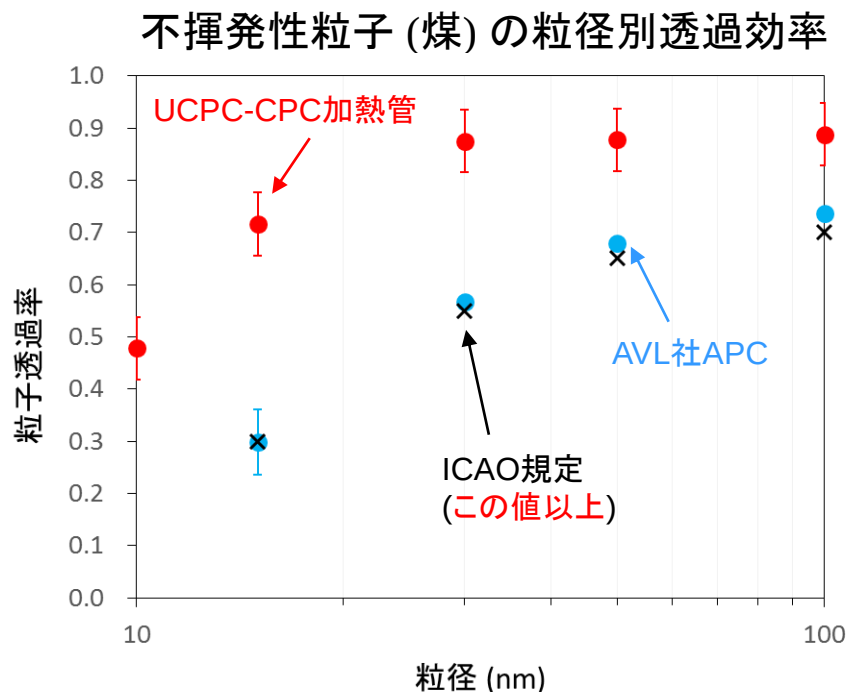
- 凝縮粒子カウンタ (UCPC-CPC) と走査型移動度分級器 (SMPS) の複合分析。
UCPC-CPC: 粒径2.5 nm以上と10 nm以上の数濃度を1秒で高速測定。
SMPS: 10 nm以上の平均粒径分布を測定。
- 粒子生成で鍵となる**粒径10 nm以下の粒子数濃度**を高精度で測定。
- インレットに**加熱管**を設置して切替観測 ⇒ **不揮発性粒子と揮発性粒子**を区別。

【補足資料】サブ(2): UFP粒径別化学組成



【補足資料】サブ(3): 産総研における装置性能評価

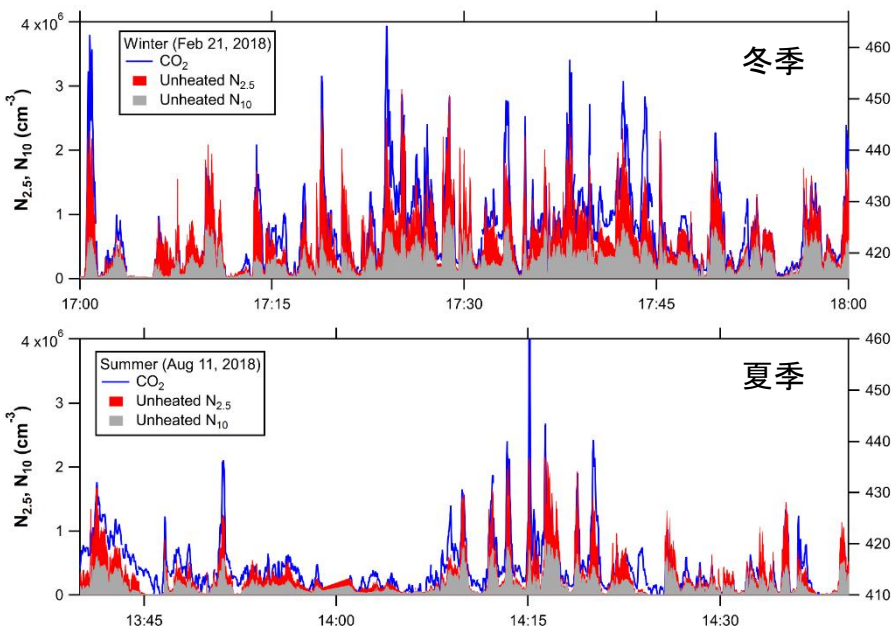
- ICAO規定に対応した航空機排ガス測定に関する国際規格 SAE ARP 6320では、温度350°C、 $\tau > 0.25$ sの加熱処理で蒸散せずに残った、粒径10nm以上の不揮発性粒子の数を測定 (sulfurや有機物などの粒子は測らない) $\Rightarrow$ AVL社APC
- JAXAとの共同研究により、AVL社APCの加熱管と、UCPC-CPCに取り付ける加熱管の比較を実施。
- 粒径分布測定装置 (SMPS、EEPS) の評価も実施。



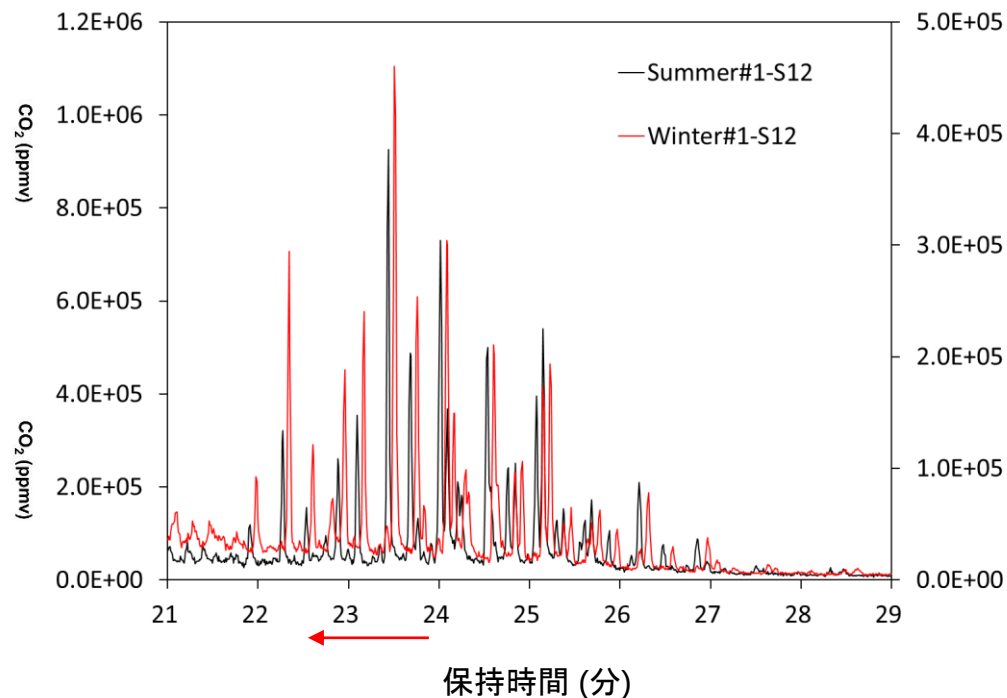
- 揮発性粒子 (テトラコンタン $C_{40}H_{82}$) の除去効率 99.9%以上。
- 首都大UCPC-CPCの不揮発性粒子 (煤) の透過効率はICAO規定値以上。

【補足資料】サブ(1)(2): 冬季と夏季の比較

航空機plume中の粒子数濃度およびCO₂濃度の比較。



昼間のUFP試料 (S12: 18-32nm) のマスクロマトグラム (*m/z* 85) の比較。
※ 見やすさのためシフトさせている。

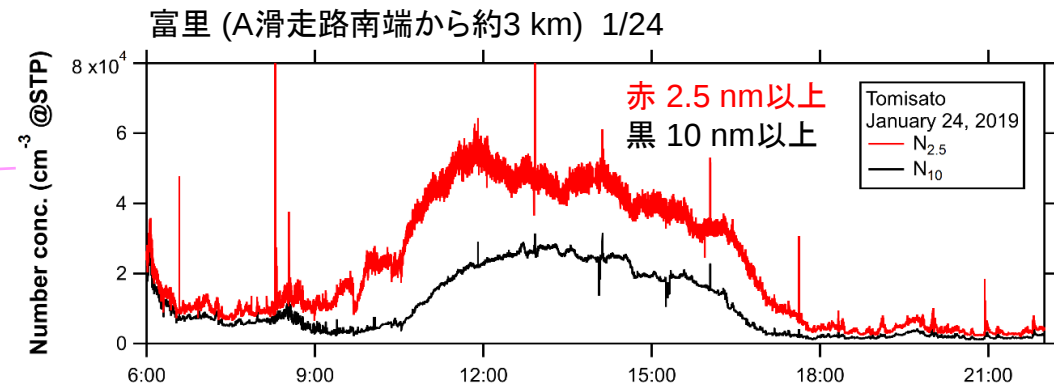
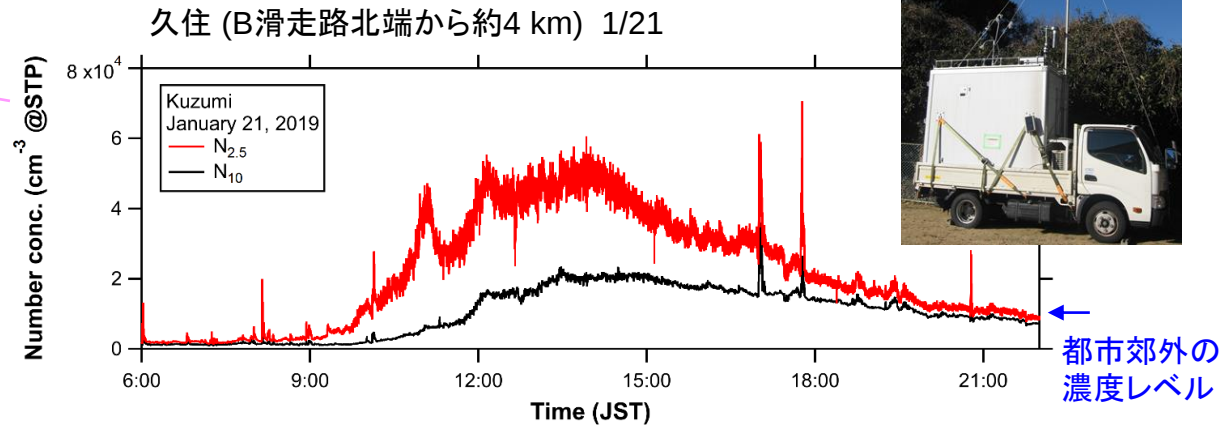


- UFP数濃度について、冬季と夏季では濃度レベルとCO₂に対する増分比が類似していた。
 - 化学組成について、冬季と夏季では有機成分のマスクロマトグラムは非常に良く似ていた。ただし、保持時間24分以前のピークは若干夏の方が小さめであり、揮発の程度の違いを反映していると推測される。
- ⇒ 冬季と夏季では気温は大きく異なるものの、**揮発性粒子の性状に大きな違いはない**と考えられる。

【補足資料】サブ(1): 成田周辺移動観測 (2019年1月)



Google Earth (作成日2020年4月30日)



- 空港北側・南側のいずれにおいても、**離着陸時間帯の全体にわたって**ナノ粒子の顕著な増加が見られた。
- 空港周辺への影響範囲は単純に風向だけでは決まらない可能性を示唆している。

【補足資料】サブ(1): 神戸空港における簡易調査 (2019年8月)

神戸空港



Google Earth (作成日2019年8月29日)

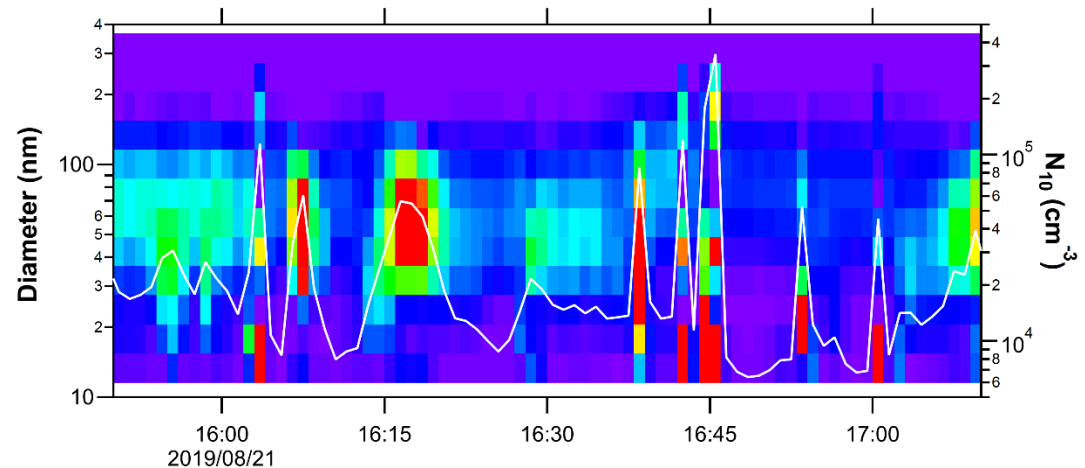
アイドリング



離陸



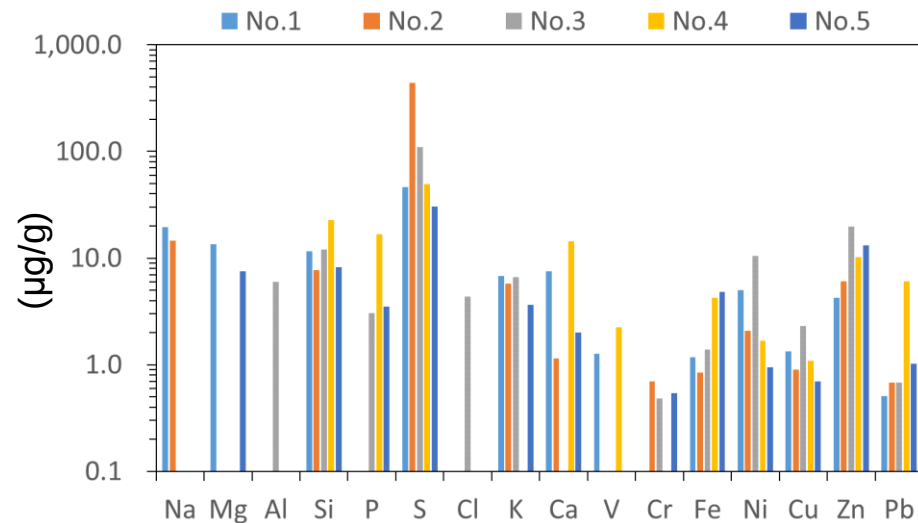
粒径分布 (カラー) と粒子数濃度 (白線)
個々の離着陸イベントを分離可能



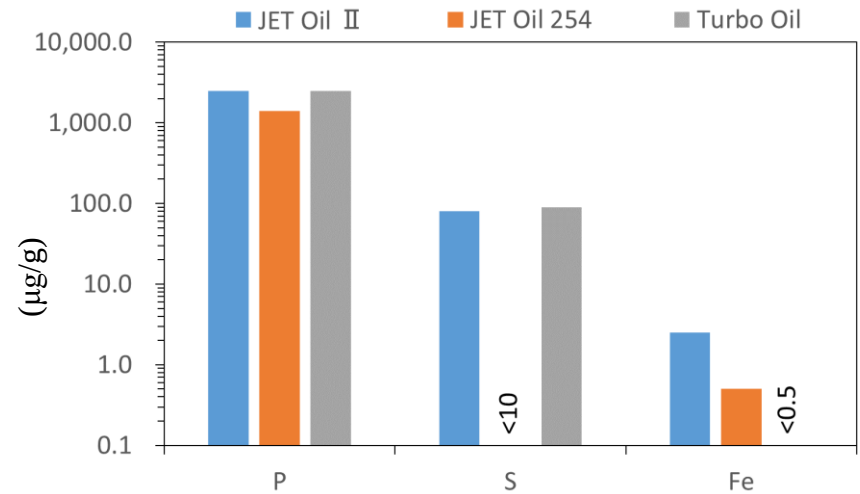
- 滑走路から約280 m、誘導路から約100 mの地点で観測を行った (2019年8月19日～22日)。携帯型のCPC (10 nm以上) とSMPS (NanoScan: 10-420 nm) を使用した。
- バックグラウンド粒子数濃度が $5 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ 程度と低いため、航空機の有無でのコントラストが見やすい。また、離着陸サイクルに応じて明確な紐付けが可能であるため、航空機排ガスの拡散過程を調べるには好適地であることが分かった。

【補足資料】サブ(2): 燃料・オイルの分析

PIXEによる燃料中の元素分析
(Saitoh et al., in press)



オイル中の元素分析結果
In-air-PIXE法
(Saitoh et al., in press)

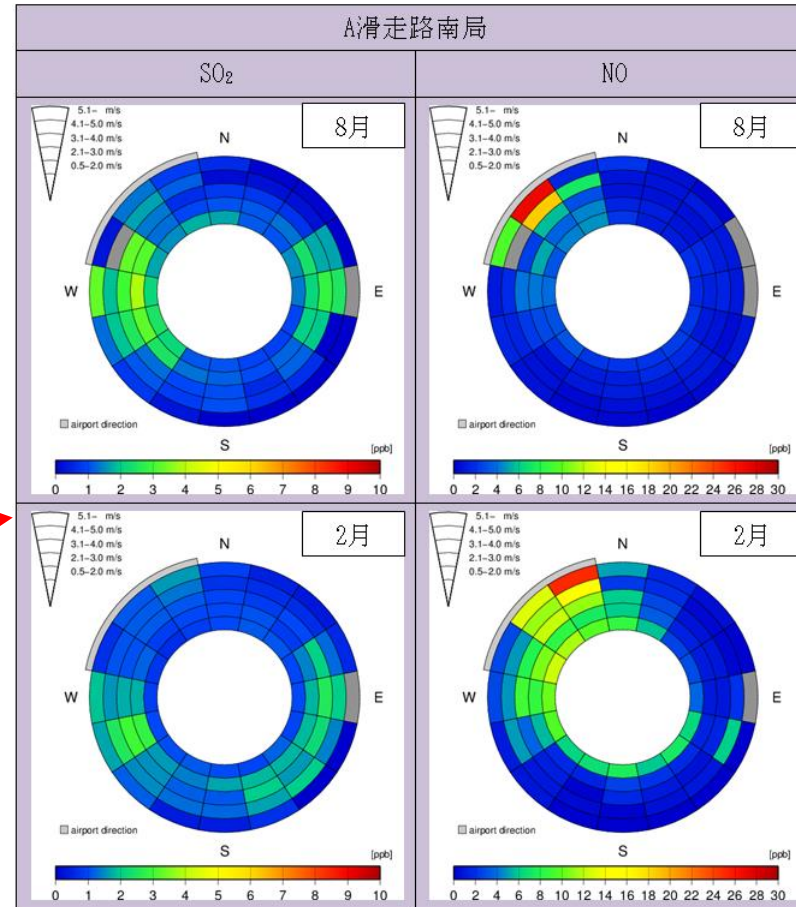


- 大気データの比較対象として、燃料およびエンジンオイルの元素分析を実施。
- 燃料中で、硫黄Sは粒子生成において極めて重要 (世界で広く使われているジェット燃料 Jet A-1はS基準が3,000 ppm)。
- 今回入手した燃料のSは<10~530 ppm (平均160 ppm) であった。

【補足資料】サブ(4): 大気汚染常時監視局データの解析



A滑走路南局における風向別の SO_2 および NO_x



- 滑走路に近い常時監視局では、風向に応じて濃度が大きく変化した (特に NO_x)。
- 2012～2016年度を対象として、空港内および空港周辺の測定局における環境基準の達成状況を確認した。
- 光化学オキシダント (O_x) 以外の物質 (NO_x 、 SO_2 等) は概ね達成であった。 O_x については広域発生源の影響が大きいと推測される。