令和 4 年 IIAE 大気環境総合センター 定期セミナー

環境研究推進費研究紹介第 3 回
『船舶と航空機の大気排出ガス』

期　日：2023 年 1 月 17 日（火）

オンライン開催

一般財団法人大気環境総合センター

〒112-0004　東京都文京区後楽 1 丁目 2-8 後楽 1 丁目ビル 6F
TEL：03-6801-6082　FAX：03-6801-6083
https://iiae.or.jp

プログラム

（敬称略）

13：30～13：35　環境研究推進費研究紹介第 3 回
『船舶と航空機の大気排出ガス』趣旨説明
若松伸司（愛媛大学名誉教授、IIAE 代表理事）

13：35～14：25　「2020 年船舶燃料油硫黄分規制強化による大気質改善効果の評価」
櫻井達也（明星大学）

14：25～14：30　休憩

14：30～15：20　「航空機が排出するナノ粒子の物理・化学的特徴と起源」
伏見暁洋（国立環境研究所）

15：20～15：30　総合討論

2020年船舶燃料油硫黄分規制強化による大気質改善効果の評価

環境研究総合推進費5-1802の成果概要

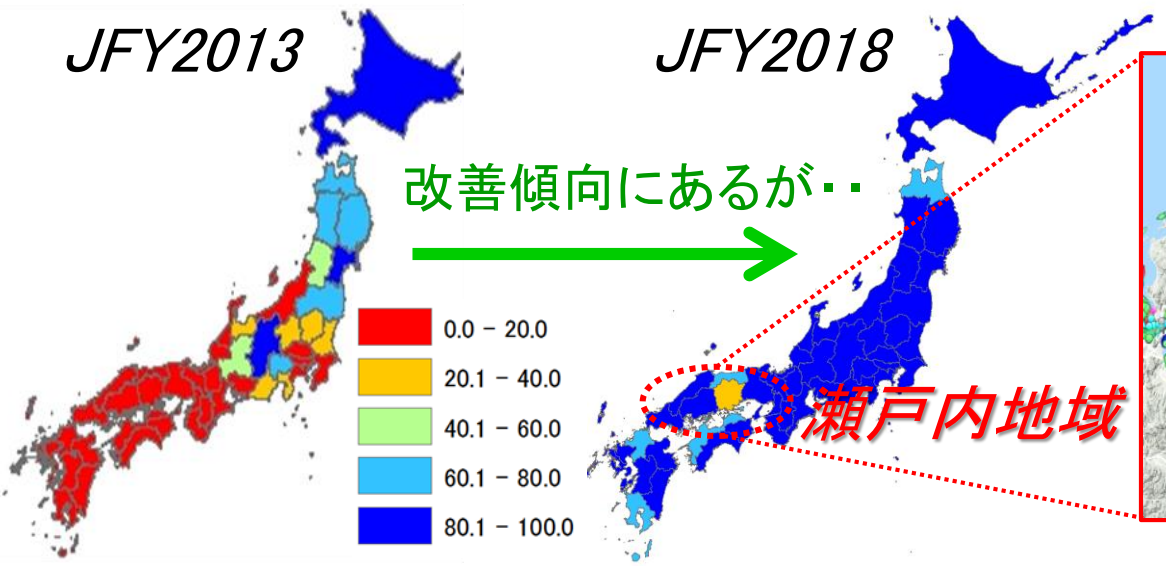
行政要請研究テーマ（行政ニーズ）

「瀬戸内海周辺における$PM_{2.5}$高濃度要因の解明」

実施期間：2018～2020年度

研究代表：櫻井　達也　（明星大学）
研究分担：速水　　洋　（早稲田大学）
板橋　秀一　（電力中央研究所）
嶋寺　　光　（大阪大学）

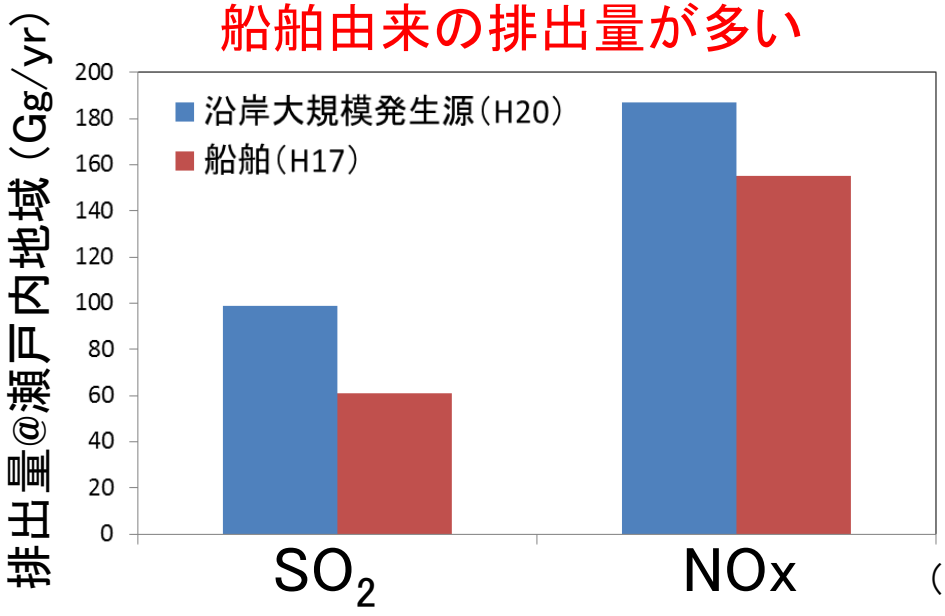
1. はじめに: 瀬戸内地域での低い$PM_{2.5}$環境基準達成率



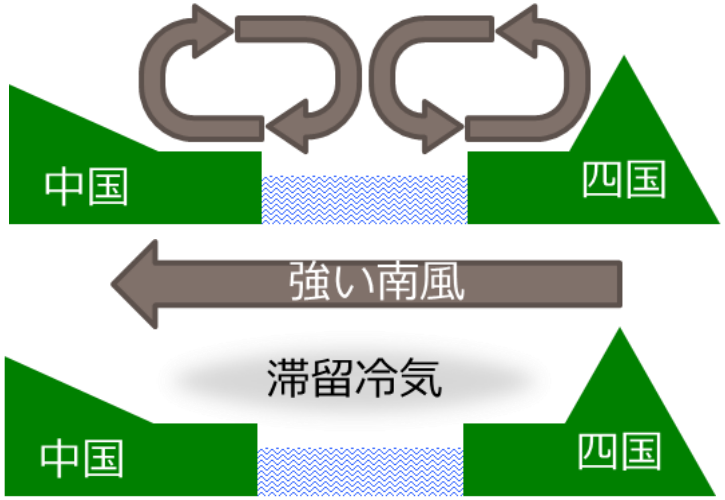
船舶通航量の過密海域

https://www.marinetraffic.com

船舶由来の排出量が多い



瀬戸内地域特有の空気塊の滞留性



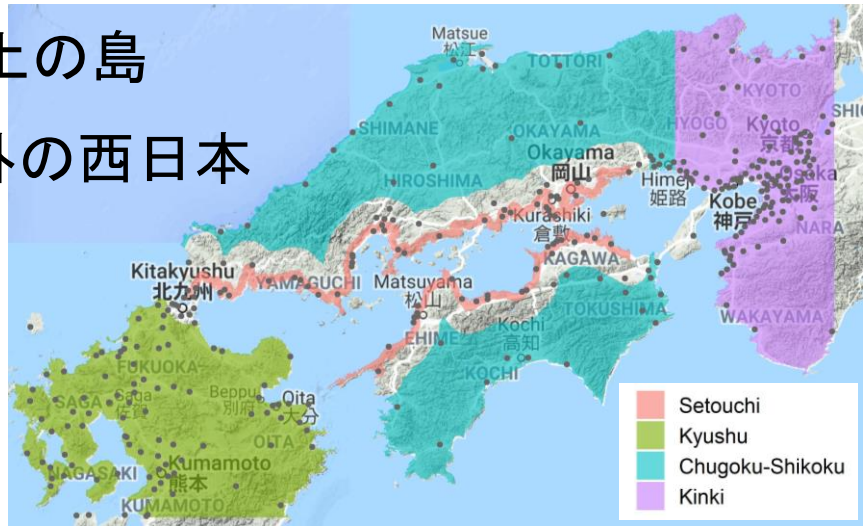
（海洋気象学会『瀬戸内海の気象と海象』に基づいて作成）

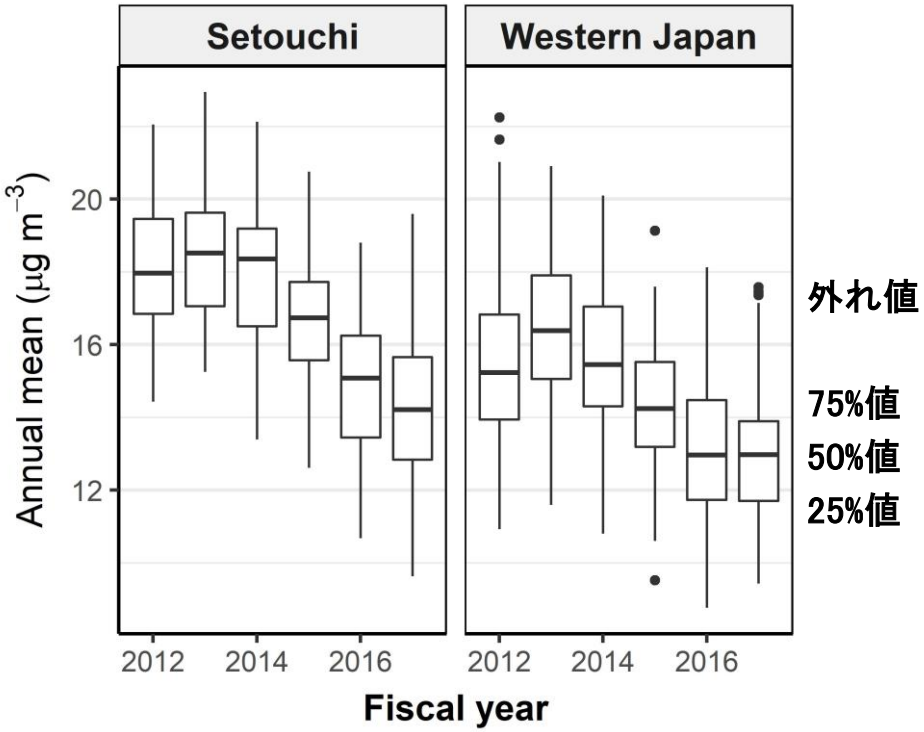
瀬戸内地域とその他地域の$PM_{2.5}$濃度比較

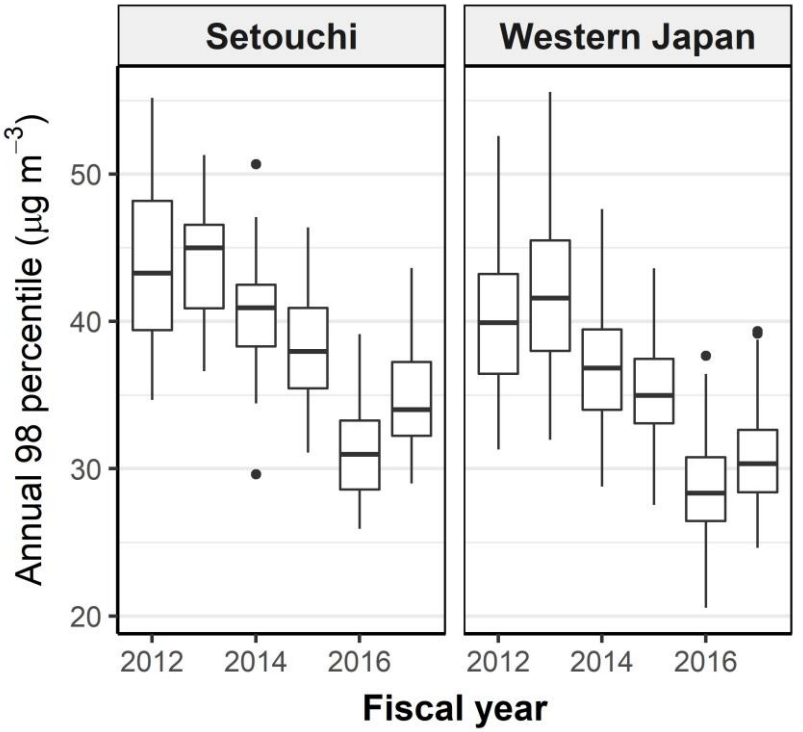
瀬戸内地域 :沿岸～5kmおよび瀬戸内海上の島

その他地域 :バッファ域（沿岸5～20km）外の西日本

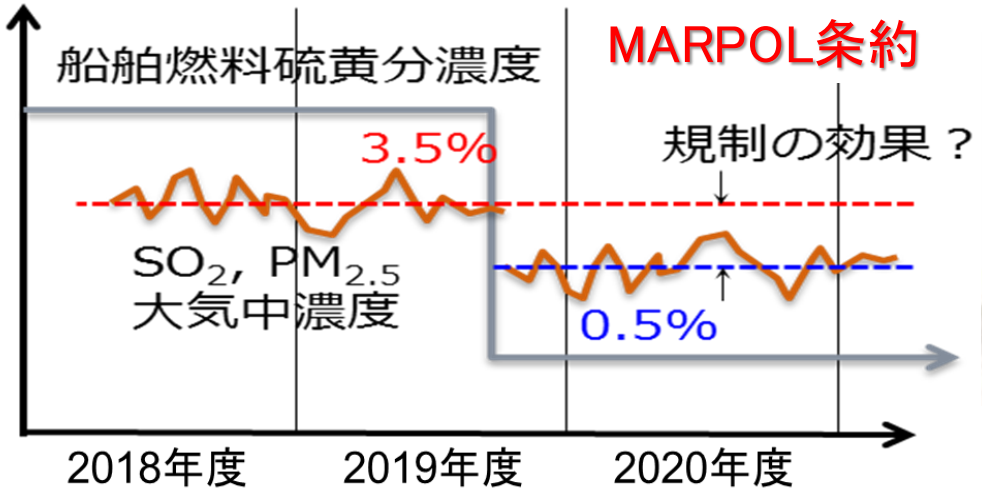
解析対象 :2012年からの継続局のみ







2. 研究開発目的：2020IMO規制強化による大気質改善効果



船舶燃料油硫黄分規制が強化される2020年1月を挟んで現地調査を実施。規制強化による瀬戸内地域での大気質改善効果を観測とモデル解析により評価する。

①：船舶排出量DBの構築と沿岸着地濃度予測（明星大学）

⇒ 排出量調査

②：船舶燃料油規制強化による$PM_{2.5}$改善効果の観測的評価（電中研）

⇒ 観測研究

③：船舶排出物質がわが国の大気質に及ぼす影響の評価（大阪大学）

⇒ モデル研究

3. 研究目標：瀬戸内での$PM_{2.5}$高濃度化要因と対策の方向性

全体目標

① 一次物質（排ガス）を対象とした短期・局所的評価から規制強化の効果を検証

② 二次生成物質を含めた大気質の長期・広域的評価から規制強化の効果を検証

③ 2020年以降の$PM_{2.5}$対策の方向性検討（政策への貢献）

サブテーマ1

- 時間・空間的に高解像度な船舶排出量データベースを構築
- 船舶排ガス拡散モデルの構築 → リアルタイム拡散予測＆排出量DB検証

サブテーマ2

- 規制強化による瀬戸内地域での大気質改善効果（長期観測）
- 規制強化による排ガス中SO_2濃度と燃料油中S分への効果（短期観測）
- 瀬戸内地域特有の$PM_{2.5}$高濃度の確認（マルチコプタ観測）

サブテーマ3

- 瀬戸内地域特有の$PM_{2.5}$高濃度の解明（再現計算）
- 規制強化による瀬戸内地域での大気質改善効果（船舶排出に対する感度計算）
- 2020年以降の$PM_{2.5}$対策の方向性（発生源寄与評価計算）

4. 研究開発内容：①短期・局所的評価

① 船舶排ガス直接観測による規制強化の効果検証（サブ2）

期間：2018，2019，2020年の8月下旬～9月上旬
（2018年は予備検討用）

場所：関門橋下関側橋脚付近（下関市壇之浦）

内容：排ガス中SO_2濃度測定　&
排ガス成分からの燃料油中S分逆推計

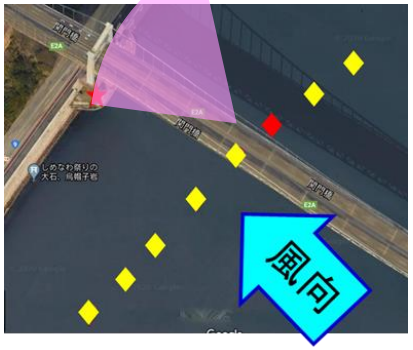
比較用データ

② 船舶排ガス拡散モデルの構築（サブ1）

内容：AISデータと紐づけた船舶排ガス
拡散モデルの開発

→ 実測との比較による排出量推計
手法の妥当性検証

→ 沿岸域でのリアルタイム高濃度予測

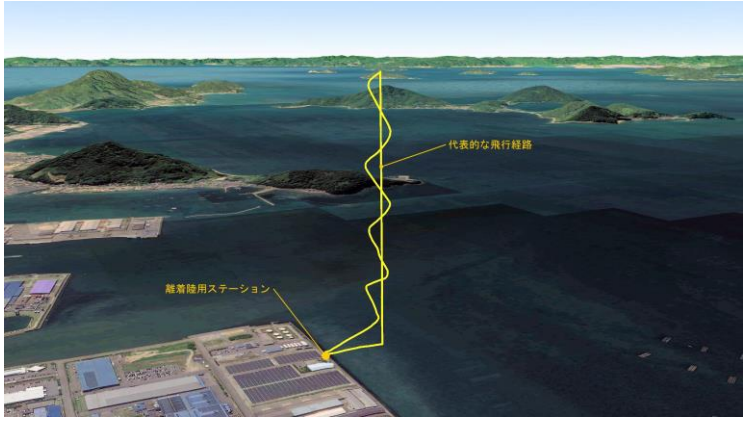


③ 海面上濃度鉛直分布観測（サブ2）

期間：2020年10月12～16日

場所：詫間（長期観測地点から東に約5km）

内容：瀬戸内地域特有の汚染状況を把握。
マルチコプタにセンサを搭載し上空500 mまで測定。

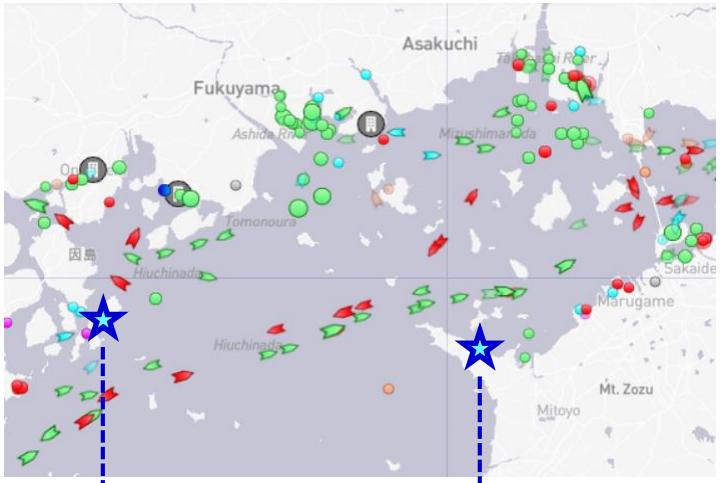


4. 研究開発内容：②長期・広域的評価 & ③$PM_{2.5}$対策の方向性

① 船舶排出量DBの構築（サブ1）

対象年：2015＆2020（燃料油中S分＝0.5%）

内容　：AISデータを利用した高解像度DBの開発（3次メッシュ・時間値ベース）



入力データ

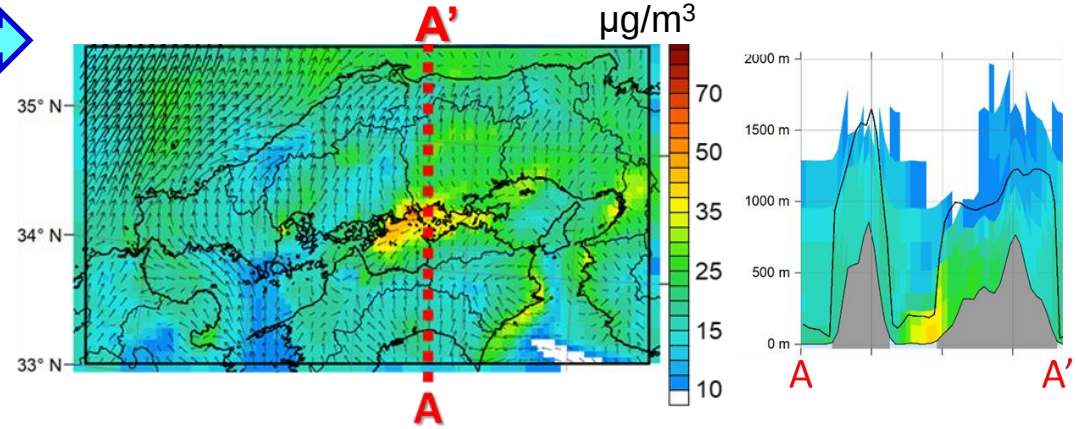
③ 大気質モデル解析（サブ3）

モデル：　WRF/CMAQ

内容　：現状再現計算（地域特性解析）

船舶感度計算（規制強化の効果）

発生源寄与計算（方向性）



モデル検証用データ＆考察補完

②-1 $PM_{2.5}$等長期観測（サブ2）

期間：2018/10～2021/1

場所：弓削（弓削高専）および詫間（香川高専）

内容：$PM_{2.5}$重量＆成分濃度の長期連続観測

大気境界層高度の測定（@詫間）

これまでの成果報告

- Sakurai et al. (2021): Development of air pollutants emission inventories for ships around Japan on a high geographical resolution, AJAE, 15(1), https://doi.org/10.5572/ajae.2020.096
- 櫻井ら (2021): 2020 年船舶燃料油硫黄分規制強化で期待される大気質改善効果,環境技術, 50(2), https://doi.org/10.5956/jriet.50.2_70
- Itahashi et al. (2021): Long-term trends of satellite-based fine-mode aerosol optical depth over the Seto Inland Sea, Japan, over two decades (2001–2020), Environmental Research Letters, 16(4), https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac03db
- Hayami et al. (2022): Detection of ship fuel sulfur contents in exhaust plumes at the Kanmon Straits, Japan, before and after the global sulfur limit 2020, AJAE, 16(3), https://doi.org/10.5572/ajae.2022.052
- 櫻井ら (2022): 2020年船舶燃料油硫黄分規制強化による大気質改善効果の評価 - 船舶排ガスを対象とした大気汚染インベントリ構築および陸域影響の観測的評価, マリンエンジニアリング, 57(5), https://doi.org/10.5988/jime.57.585
- 嶋寺ら (2022): 2020年船舶燃料油硫黄分規制強化による大気質改善効果の評価 - 船舶排ガスを対象とした大気汚染の数値シミュレーションに基づく評価,マリンエンジニアリング, 57(5), https://doi.org/10.5988/jime.57.593
- 板橋ら (2022): ドローンによる瀬戸内地域における海面上PM2.5鉛直濃度分布の測定と高濃度化要因の考察, 大気環境学会誌, 57(6), https://doi.org/10.11298/taiki.57.129

船舶起源排出インベントリーの算定方法

排出量 ＝ 活動量 × 排出係数

(g/hour)

規制値
- S：燃料中S分%（g-S/g-Fuel）
- N：g/kWh （サーマルNOx）

つまり、必要な活動量は
- S：燃料消費量（g-Fuel/h）
- N：エンジン出力（kW）

時空間的高解像度インベントリー作成には、密な航行情報が必要不可欠！

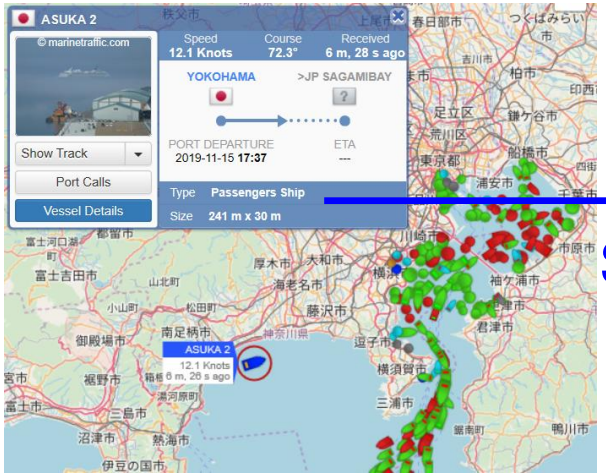
出典：https://www.marinetraffic.com/jp/

AISデータの活用

- Automatic Identification System
- 衝突防止を目的に2002年から搭載義務化
- 船舶間、対陸上局で相互に情報をやり取り。衛星で傍受可能。

5. 成果の概要（排出量）: Sakurai et al. (2021)

航行船舶排出量の算定における本研究の新規性（NOxを例として）



Ship ID

船舶明細DB

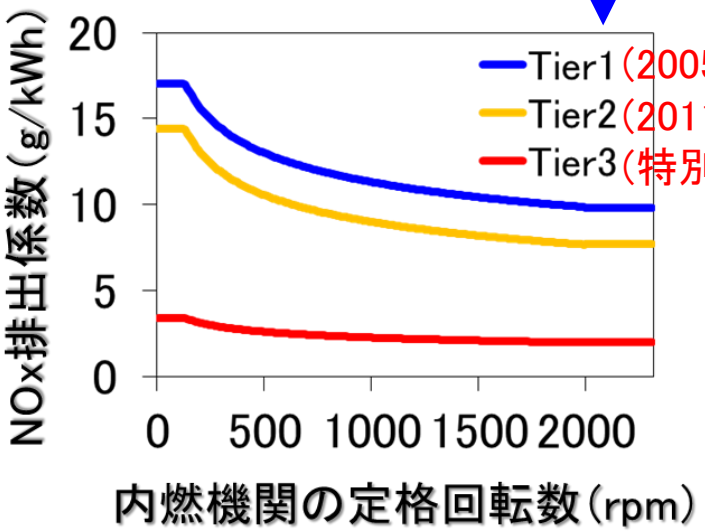
- Ship ID
- 建造年
- 機関諸元
- 航海速力

} 船固有情報を一隻ごと個別に適用

⇒ 計算量大・誤差なし

NOx排出量(g/h) ＝ 排出係数(g/kWh) × 機関定格出力(kW) × 機関負荷率(%)

船固有情報



DBで建造年を検索

$85\% \times (\text{航行実速力}^3 / \text{航海速力}^3)$

AIS情報　船固有情報

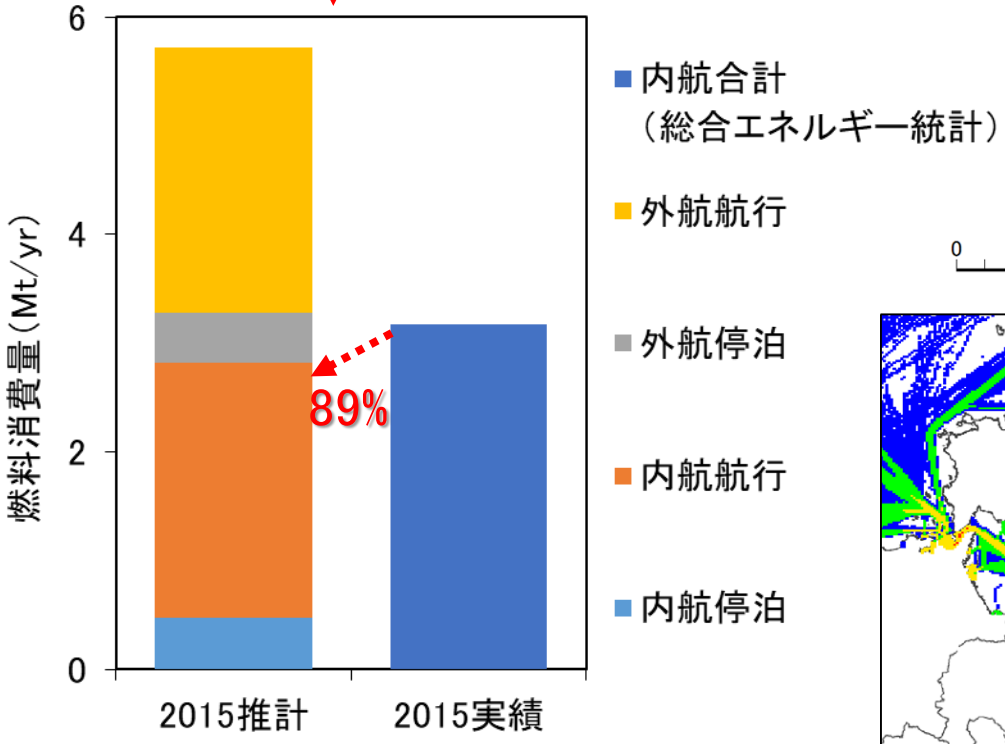
航海速力：その速度で走れば機関負荷率が85%となるように設計された速度

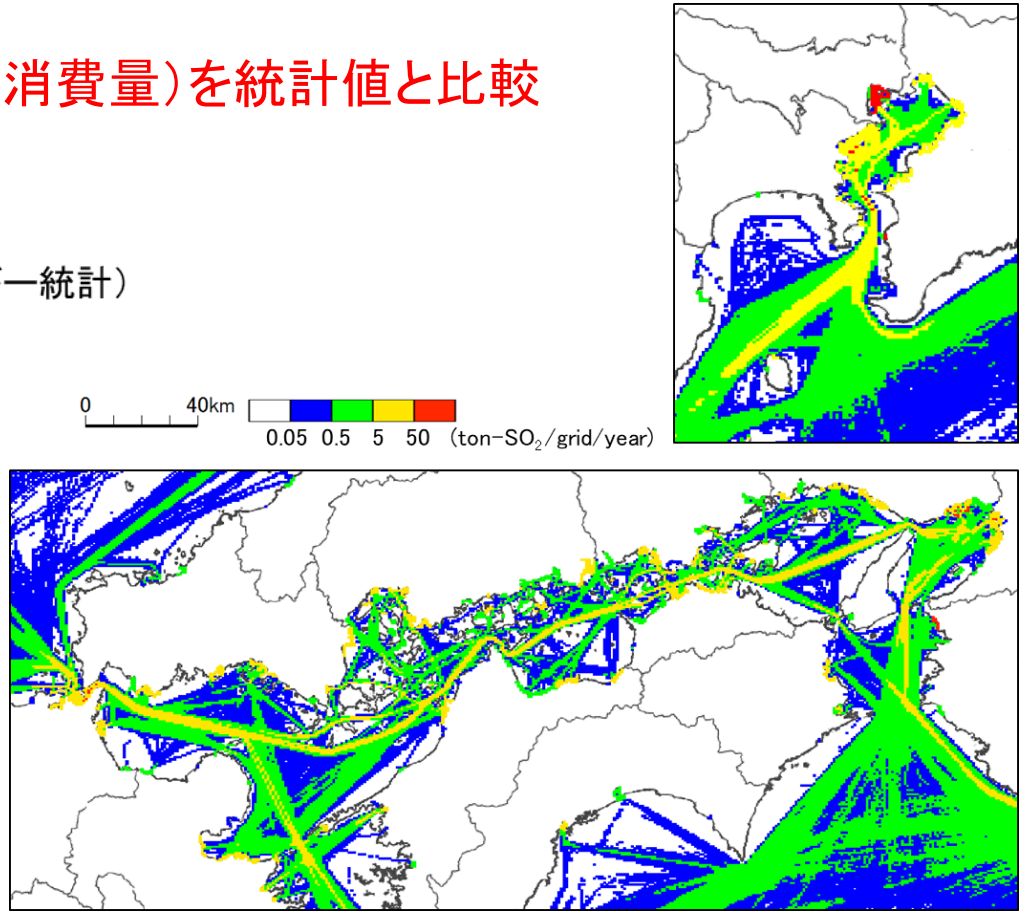
船舶排出量の算定結果例（SO_2）と誤差評価（燃料消費量）

対象物質：SO_2, NO_x, CO, CO_2, NMVOCs, $PM_{2.5}$, SO_4^{2-} in $PM_{2.5}$

推計対象：航行時・停泊時・漁船

内航船の推計値（燃料消費量）を統計値と比較

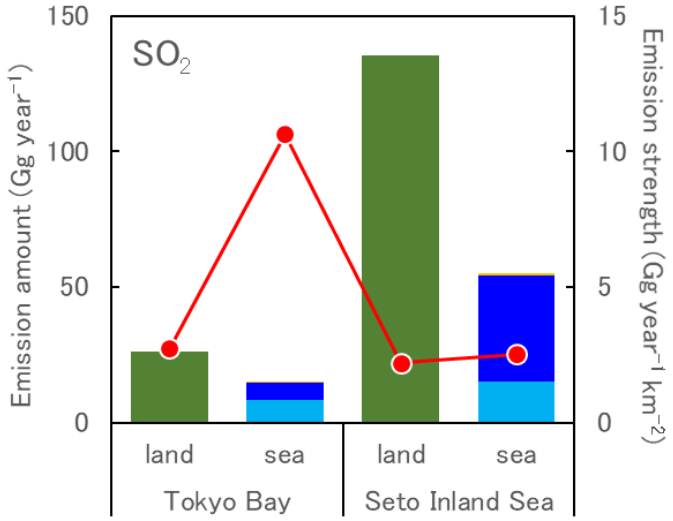


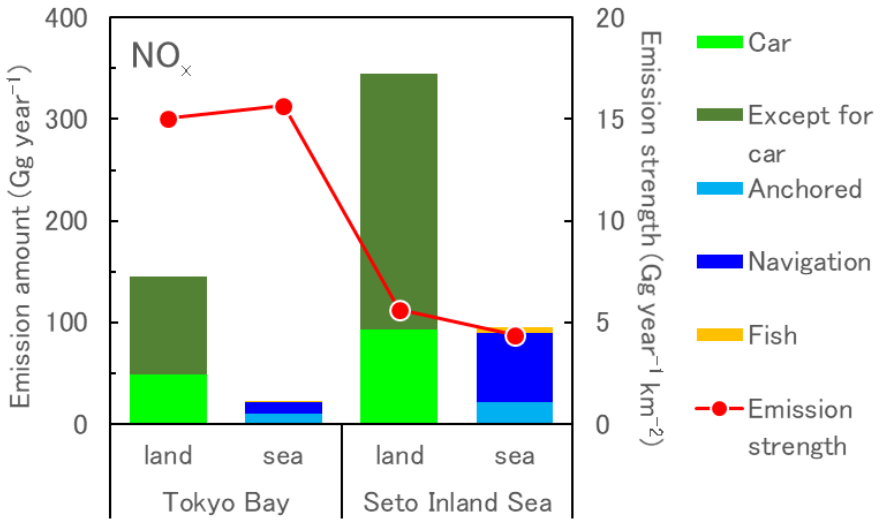


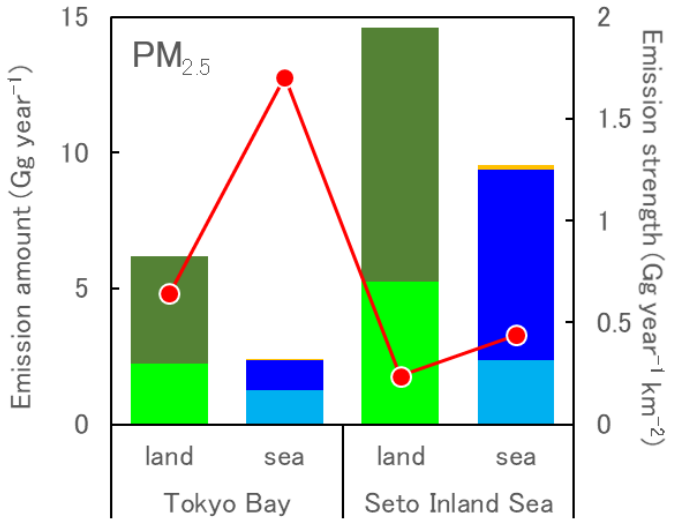
- 内航船の2015推計値/実燃料消費量≒89%
- 外航船は日本に寄港しない場合もあるため、実燃料消費量の統計データがない。

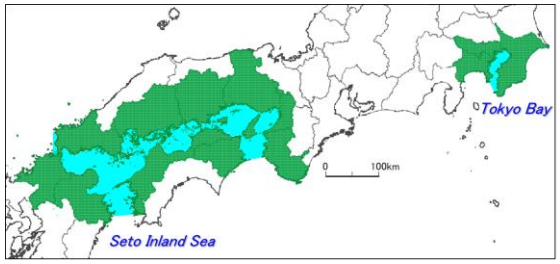
陸域排出量との比較＠瀬戸内海＆東京湾

陸域：環境省「PM2.5等大気汚染物質排出インベントリ」より作成





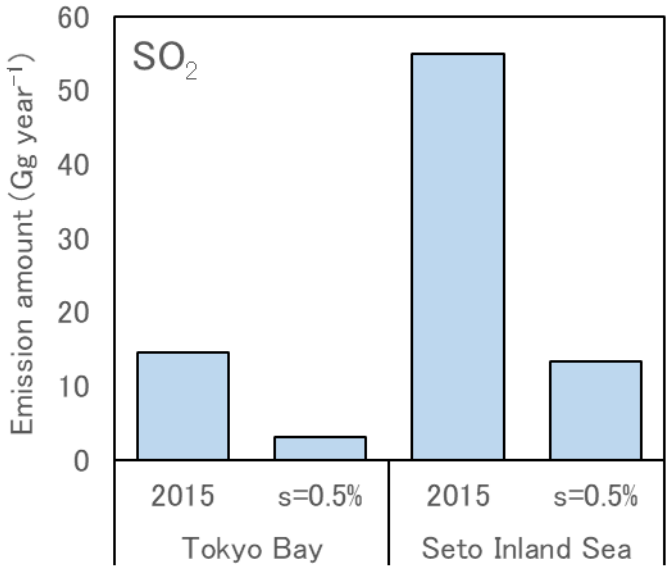


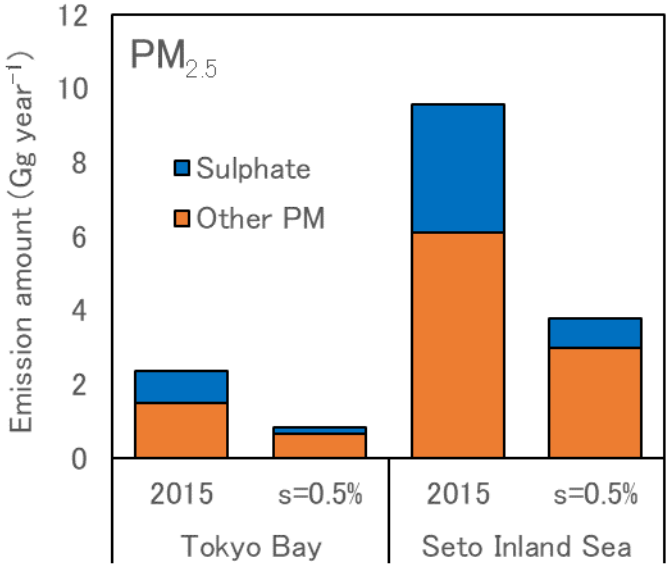


- 瀬戸内海　：21,827 km^2
  - 周辺陸域（11府県）：61,260 km^2
- 東京湾　：1,380 km^2
  - 周辺陸域（3都県）：9,612 km^2

- SO_2・$PM_{2.5}$の単位面積当たりの排出強度が海域＞陸域
- 東京湾では、SO_2・$PM_{2.5}$ともに単位面積当たりの排出強度が他と比べて非常に大きい。

2020燃料油規制強化で期待される排出削減効果



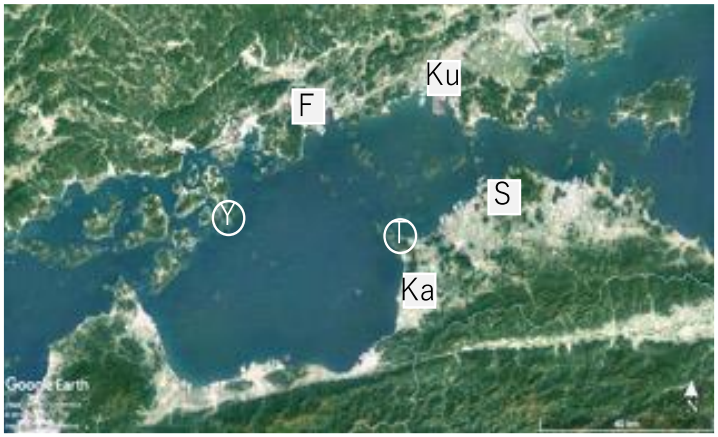


	A重油	C重油	
内航	0.40%	2.33%	→ 0.50%
外航	–	2.45%	

S=0.5% / 2015	SO_2	Sulphate	$PM_{2.5}$
Tokyo Bay	22%	21%	36%
Seto Inland Sea	24%	23%	39%

- $PM_{2.5}$排出量におけるその他成分（図中Other PM）の減少は、SO_4^{2-}に付随する水分の減少に起因したもの。
- SO_x (=SO_2+SO_4^{2-}) 排出量に占めるSO_4^{2-}の割合は、何れの場合も重量ベースで6%弱。

瀬戸内地域における長期平均濃度の改善効果①



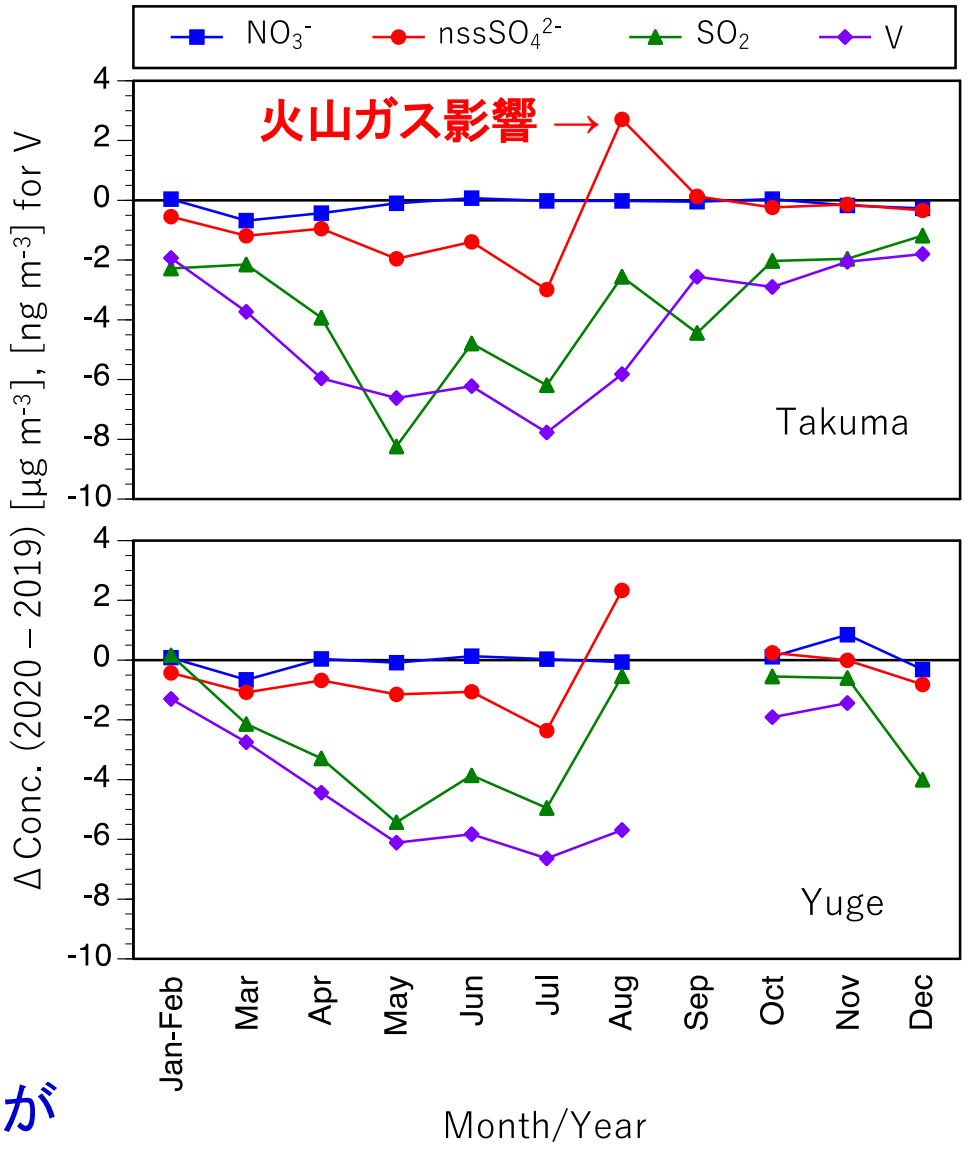
- 本研究の長期連続観測地点

  T：詫間地点，Y：弓削地点

- 利用した常監局

  F：福山市曙小学校局，Ku：倉敷市松江局，

  Ka：観音寺市役所局，S：坂出市役所局

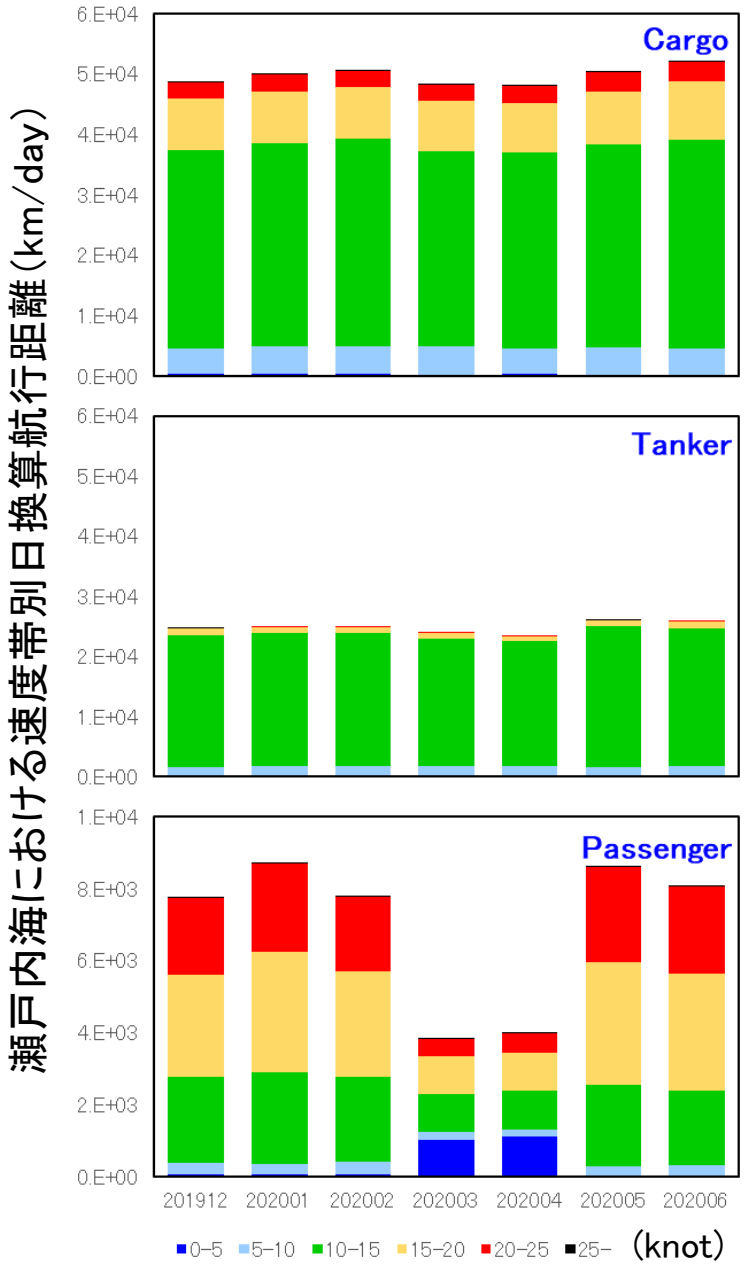


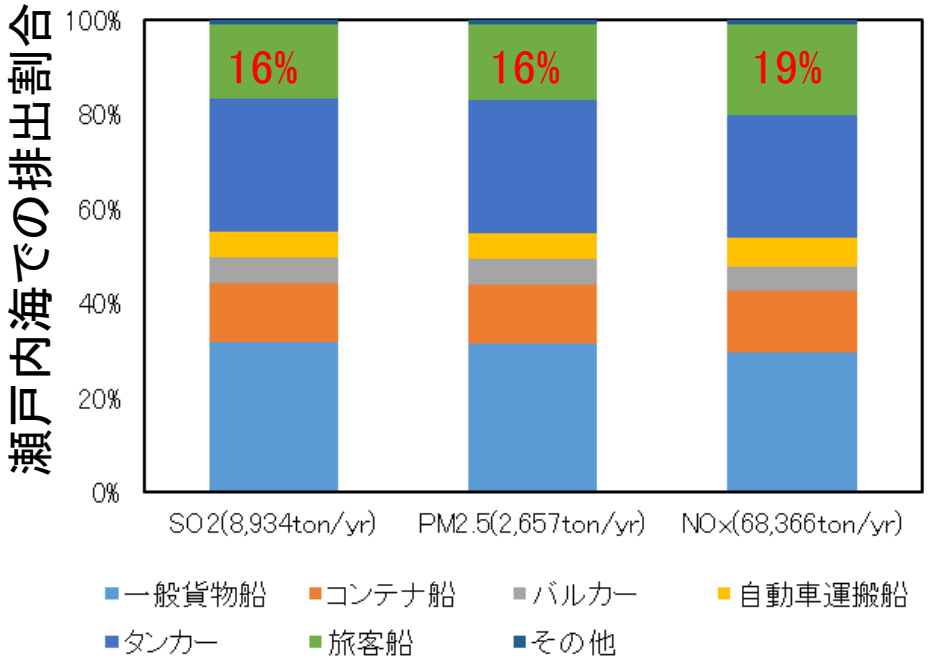
規制強化前後の月平均濃度の変化

- NO_3^-は変化なし
- SO_2と$nssSO_4^{2-}$は濃度低下

→ Vの低下から重油燃焼の寄与低減が示唆される。

COVID-19と瀬戸内海での船舶活動量（衛星AISによる航行距離）

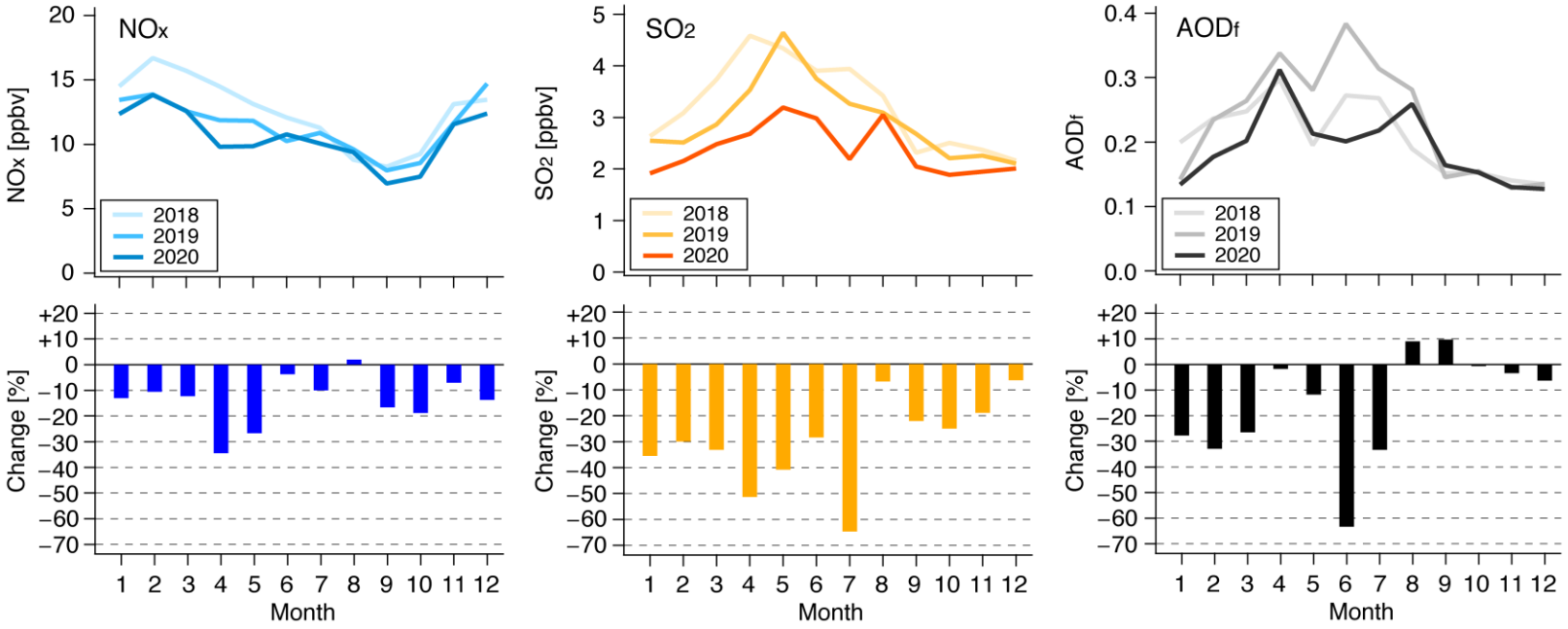




- 2020年3-4月に旅客船の活動量が低下。他の海運に大きな影響はなし。
- 瀬戸内海における旅客船由来の排出割合は16～19%
- 規制強化の効果と比べて、COVID-19による船舶排出量への影響は限定的。

瀬戸内地域における長期平均濃度の改善効果②

瀬戸内地域におけるNOx，SO_2，微小エアロゾル光学的厚さ（AODf）の月平均値（上）と前2年平均値に対する2020年の変化率（下）



- 前出の定点での観測を常監局（4地点）と衛星データ（MODIS）で補完
  - → NOxよりもSO_2の方が減少率が大きい。
  - → 衛星AISを解析したところ、COVID-19の影響による船舶排出量の減少は小さいことを確認。

2020IMO規制強化の効果を裏付け

- AODfの減少にも2020IMO規制強化が一定の寄与

5. 成果の概要（短期観測）: Hayami et al. (2022)

関門海峡における船舶排出ガスの短期集中観測

- 測定場所： 関門橋 下関側橋脚付近（海峡幅は約600m）
- 測定期間： 2018～2020年の夏季に2週間
- 測定項目： SO_2 (Thermo 43C-TLE), NOx (Thermo 42C-TL),
  （10sec ave.） CO_2 (LICOR LI-7000)、風向風速など

欧州では特別観測による船舶排ガスの監視実施事例が蓄積されている

- 燃料中硫黄分濃度の算定、濃度遵守の監視
- プルームモデルによる計算結果と観測値との比較から
  排出量の妥当性を検証

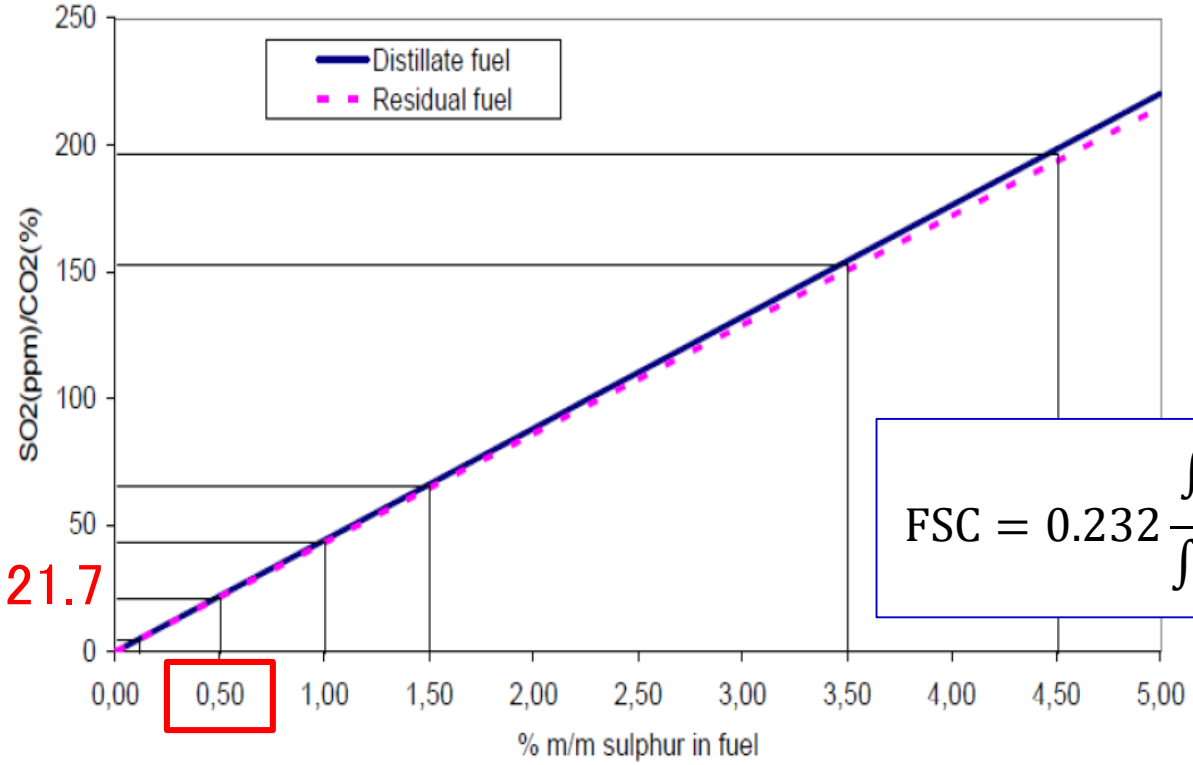
低硫黄燃料油使用に対する同等措置承認(スクラバの場合)

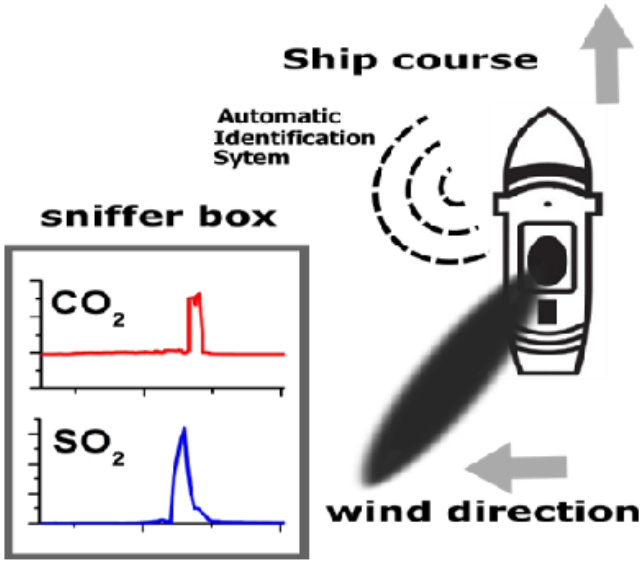
同等措置(第4規則):

旗国政府が認めた場合、排ガス浄化装置(SOxスクラバ)等のSOx削減技術による対応も可能。

(適用要件:「2015年　排ガス浄化装置ガイドライン」(決議MEPC.259(68))

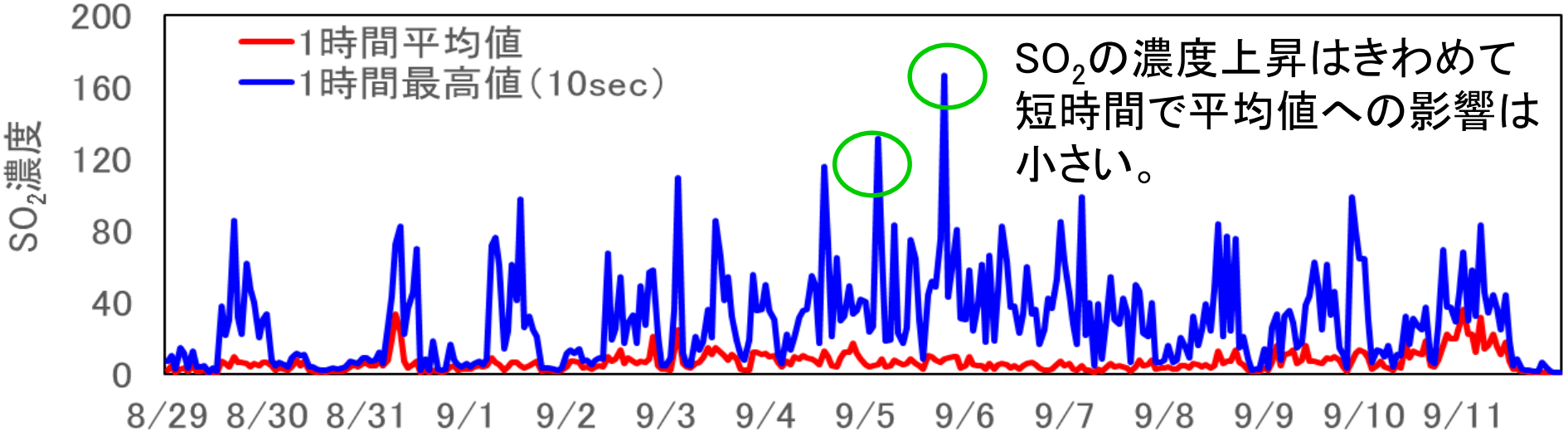
SO2/CO2比による燃料油硫黄分濃度の評価

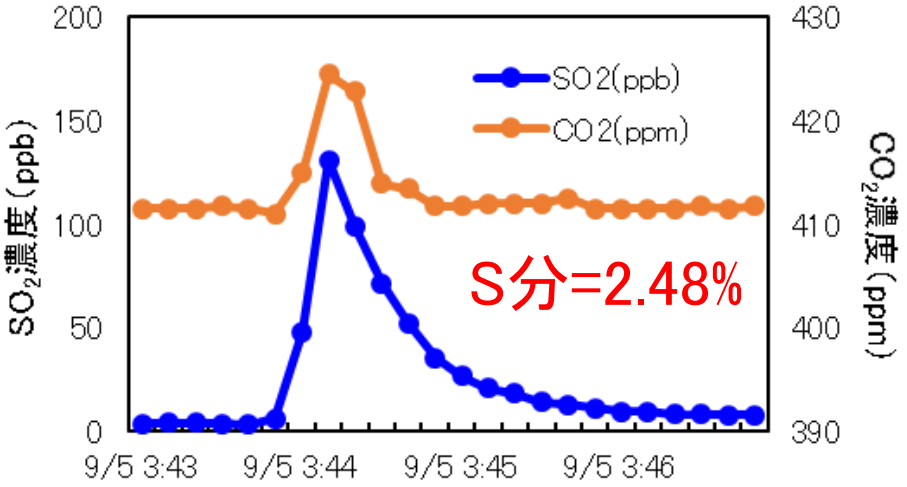


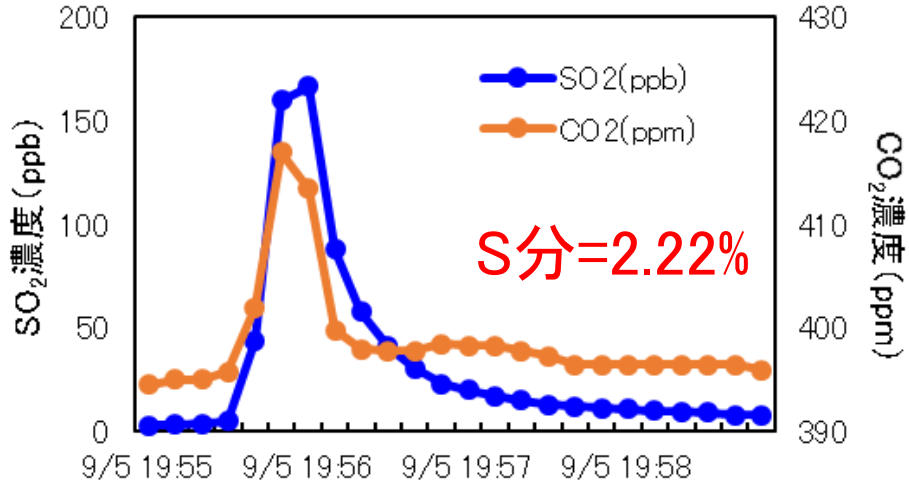


$$FSC = 0.232 \frac{\int [SO_2 - SO_{2,bkg}]_{ppb}\, dt}{\int [CO_2 - CO_{2,bkg}]_{ppm}\, dt} \quad [\%sulfur]$$

規制強化前2019年8～9月の測定値(短期・局所的評価)



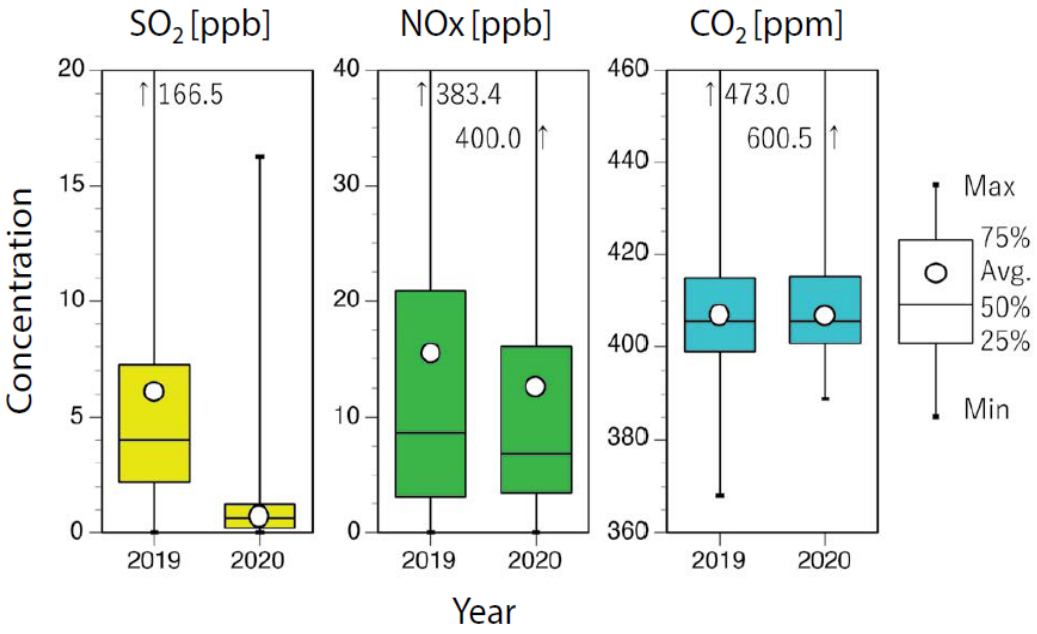




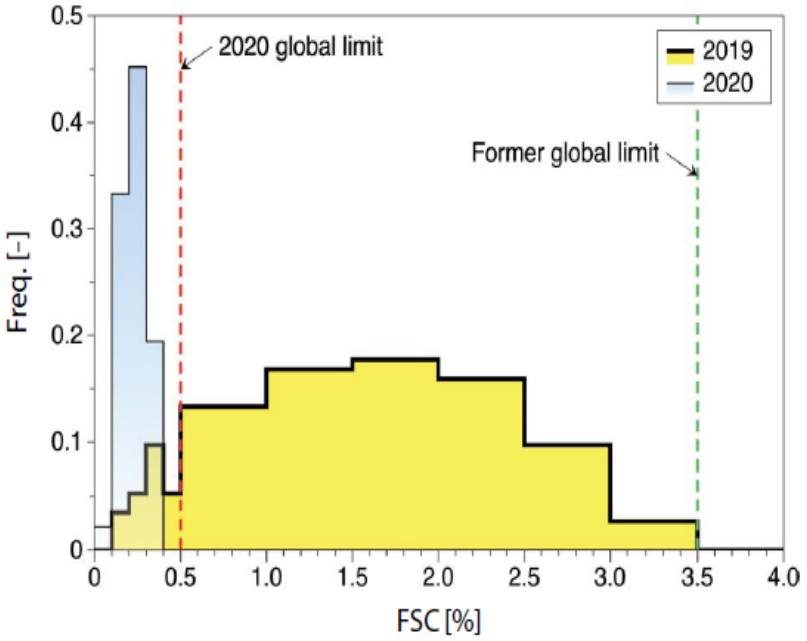
- SO_2とCO_2の濃度上昇分から燃料中s分を計算すると・・・
- 2020年1月以降は0.5%以下になっていなければならない！

船舶排ガスと沿岸大気質への改善効果（短期・局所的評価）

関門海峡で測定した汚染物質濃度の出現範囲



推定された船舶燃料油s分の出現頻度



- 観測期間中のSO_2濃度は2020年に大幅減（中央値で4.1→0.6 ppb）
- 同時計測のCO_2データを用いて燃料油中硫黄分（FSC）を推定

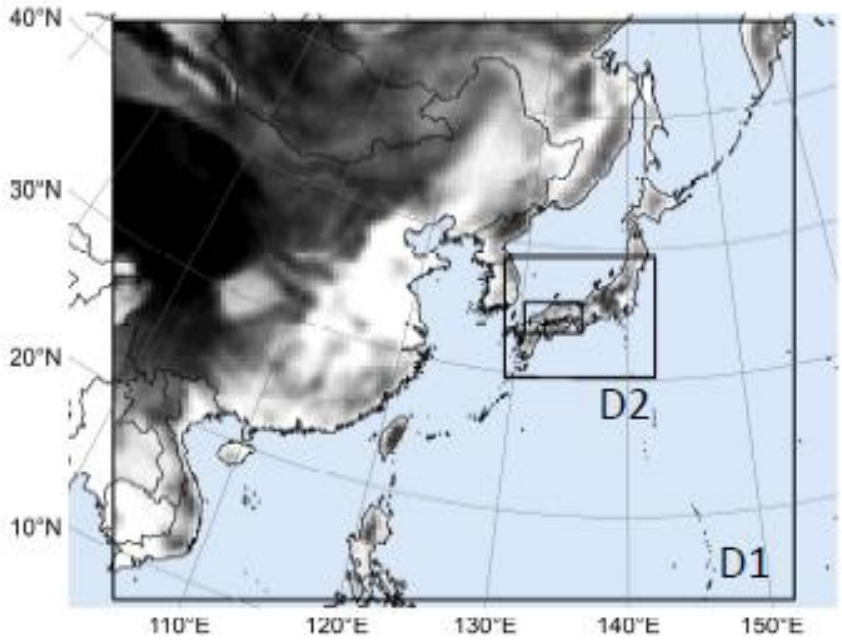
$$\mathrm{FSC} = 0.232 \frac{\int [SO_2 - SO_{2,bkg}]_{ppb}\ dt}{\int [CO_2 - CO_{2,bkg}]_{ppb}\ dt}\ [\%sulphur]$$

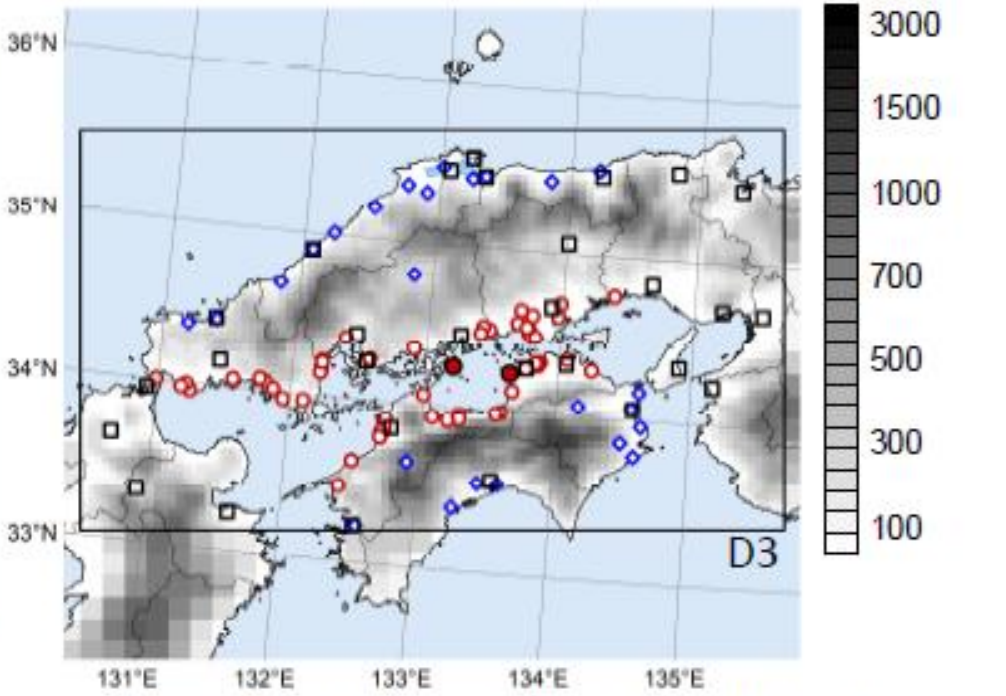
2019年：3%付近（C重油相当）と0.5%付近（A重油相当）に出現頻度のピーク

2020年：ほぼ0.5%未満　→　規制遵守を確認

瀬戸内地域における$PM_{2.5}$濃度の再現性

- 東アジア (D1): 45-km grid, 127x107 (CMAQ)
- 九州～関東 (D2): 15-km grid, 86x66 (CMAQ)
- 瀬戸内周辺 (D3) : 5-km grid, 96x54 (CMAQ)
- 鉛直30層 (地表～100 hPa, 第1層中心高さ≒26m)

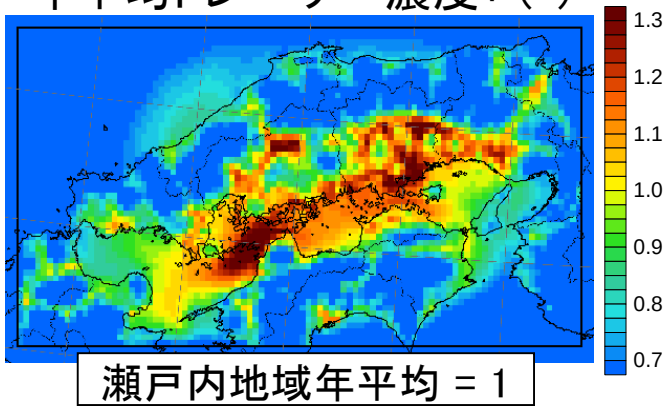




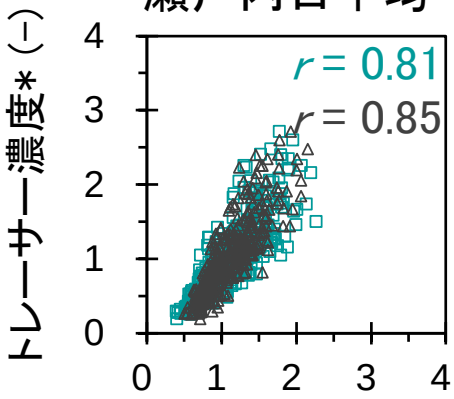
瀬戸内地域の気象特性による空気塊の滞留性評価

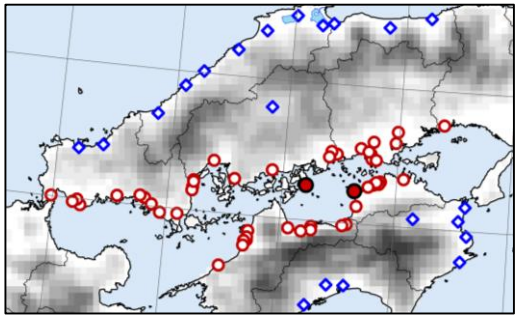
- トレーサー(反応・沈着なし)を瀬戸内周辺で水平一様に定常放出
  - 風速↓, 大気境界層↓ ＝トレーサー濃度(滞留性)↑

年平均トレーサー濃度* (–)



瀬戸内日平均

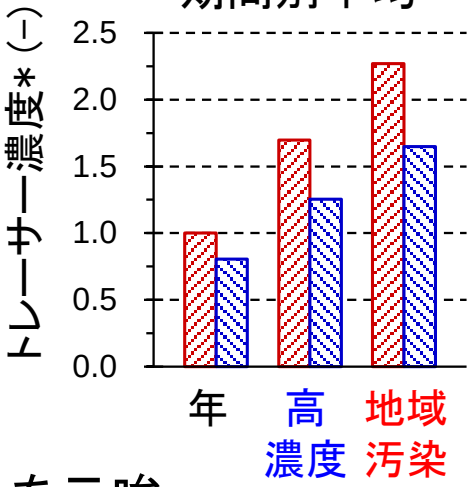




瀬戸内
その他中国四国

- 期間区分を以下の通り定義する。
  - 地域汚染日: トレーサー濃度上位5% (瀬戸内周辺で滞留)
  - 高濃度日: $PM_{2.5}$濃度上位5% (越境汚染も影響)

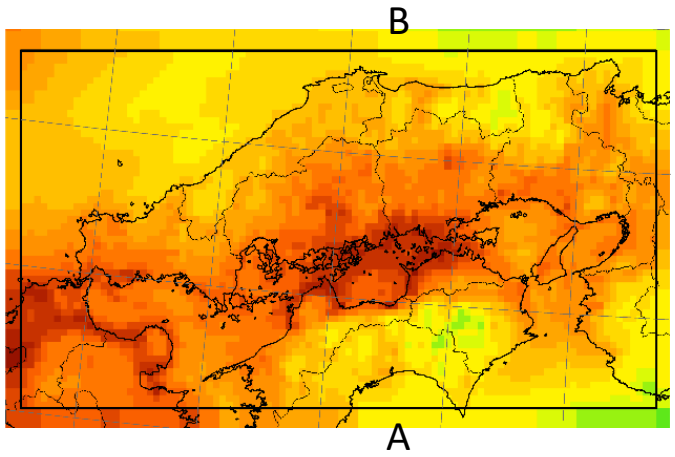
期間別平均

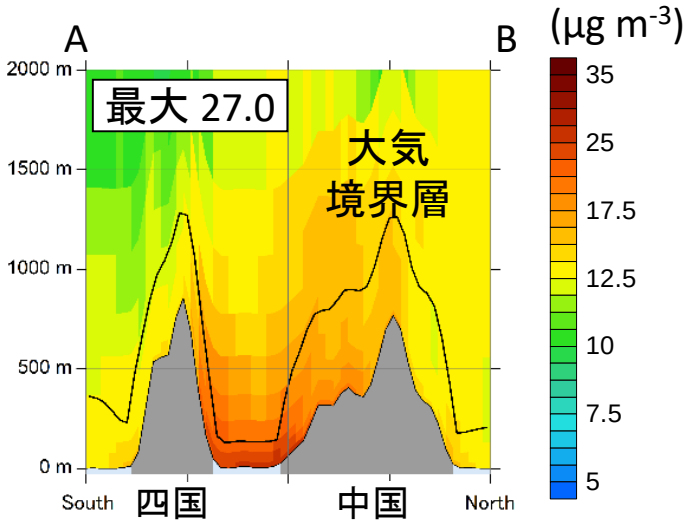


- 滞留性 ⇒ 瀬戸内地域 ＞ その他中国四国地域
  - 地域差 ⇒ 地域汚染日 > 高濃度日 > 年平均
  - 瀬戸内地域の気象特性が地域特有の高濃度に寄与することを示唆

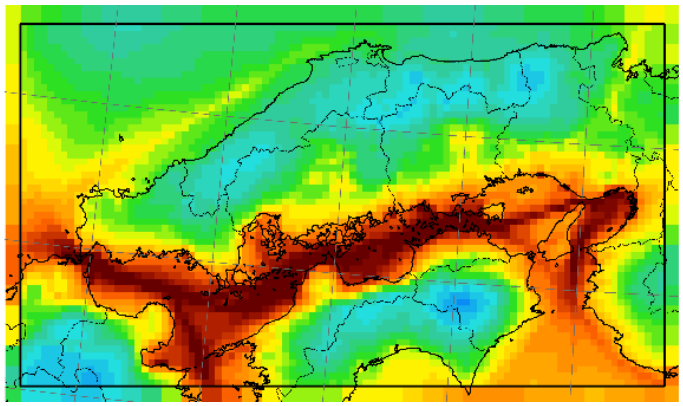
$PM_{2.5}$濃度と規制効果の空間分布(地域汚染日平均)

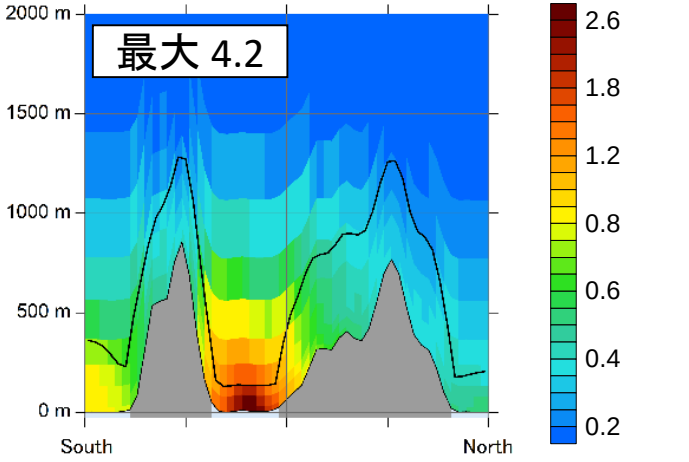
$PM_{2.5}$濃度 (2019年)





$PM_{2.5}$濃度低減効果



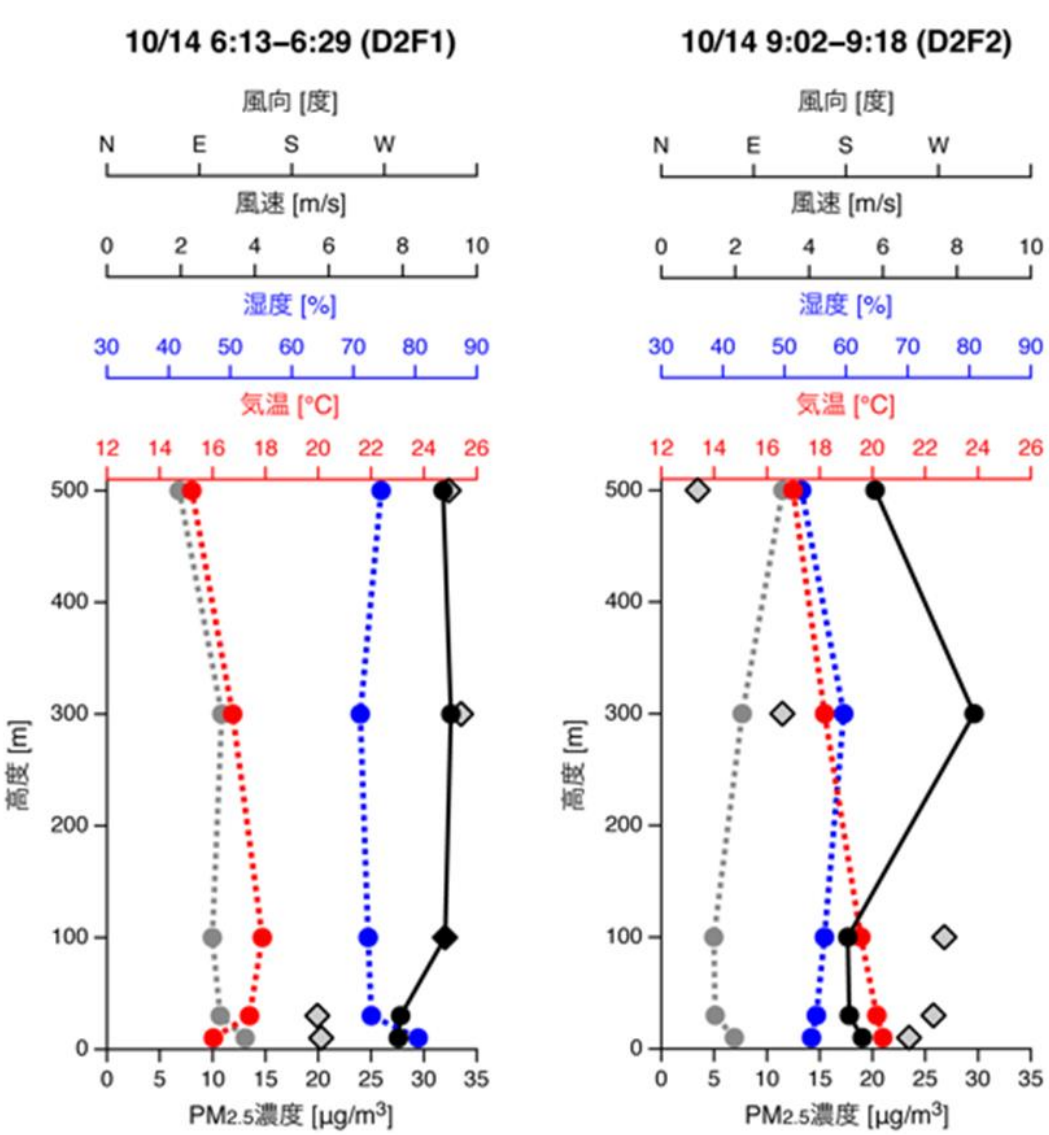


領域内のS排出量(GgS/yr)

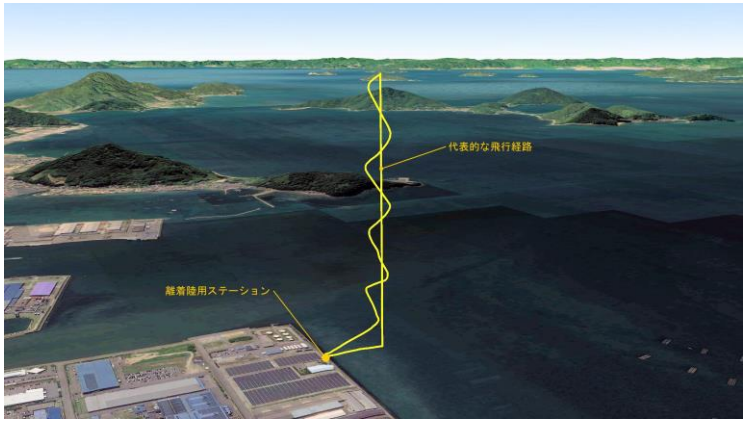
- 規制前
  - 合計: 106
  - 船舶: 34(32%)
- 規制強化後
  - 合計: 80
  - 船舶: 8(10%)

- 瀬戸内海とその沿岸の大気境界層内で高濃度$PM_{2.5}$
- 規制強化の効果は航路付近で大きいが, 沿岸・内陸でも二次生成成分が低減

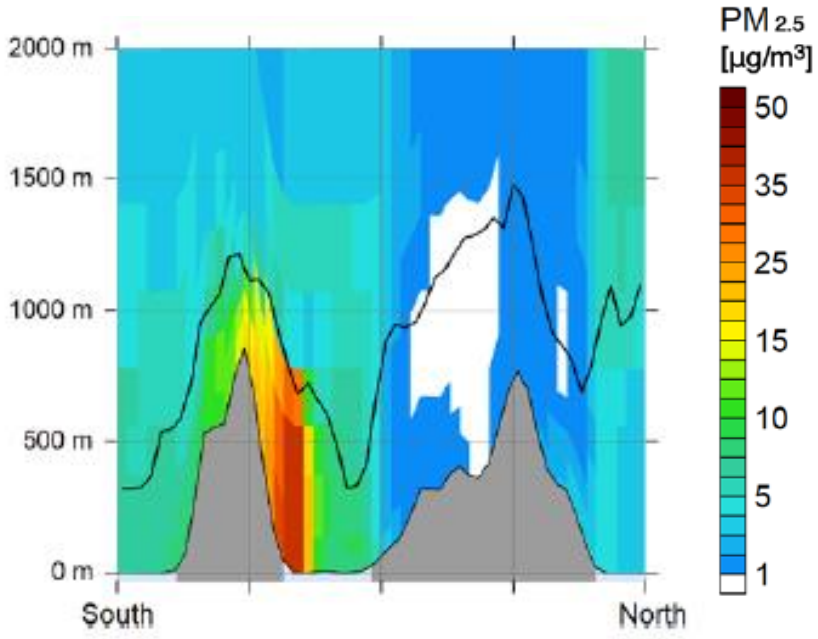
海面上$PM_{2.5}$の高濃度はドローン観測でも確認し、モデルで再現



2020/10/14朝方の$PM_{2.5}$（黒実線）と
気象要素の鉛直分布



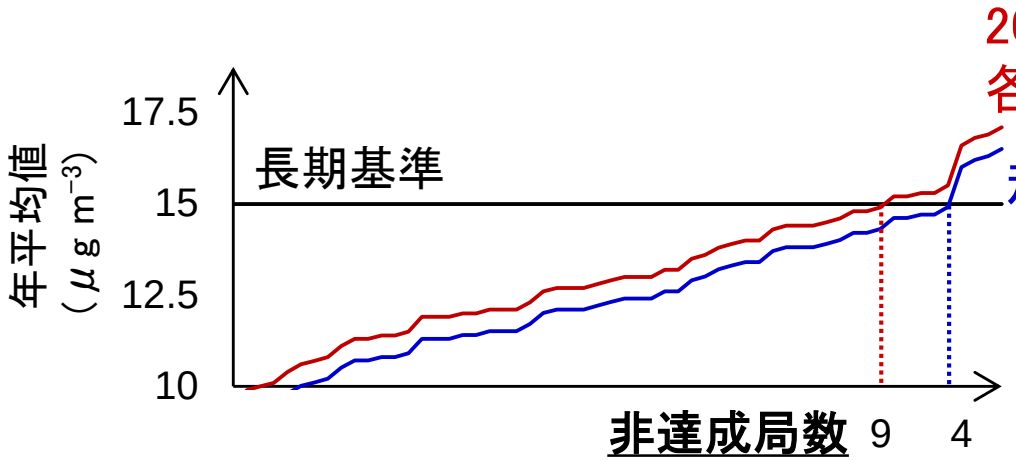
飛行経路の例

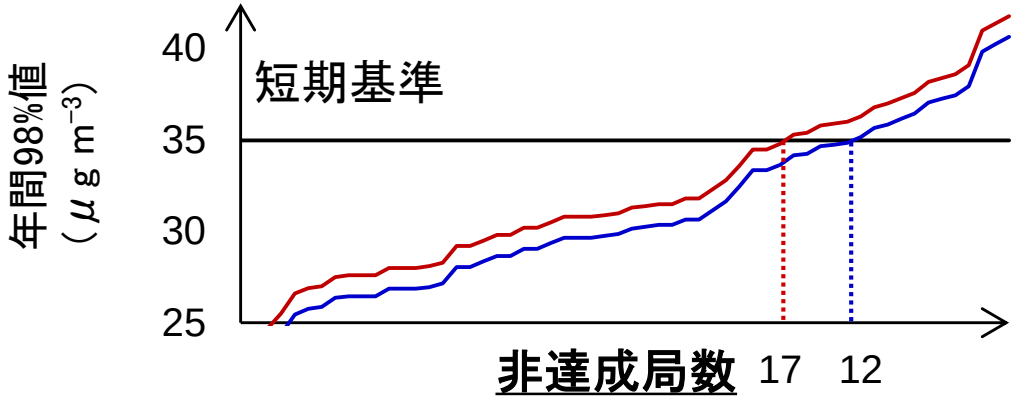


ドローン観測地点における
$PM_{2.5}$鉛直分布のモデル再現結果

$PM_{2.5}$環境基準達成状況への影響

- 2018年度の瀬戸内地域における$PM_{2.5}$測定局(58局)の環境基準達成評価値に規制強化の効果*を一律に適用





長期基準非達成: 9局 → 4局
短期基準非達成: 17局 → 12局

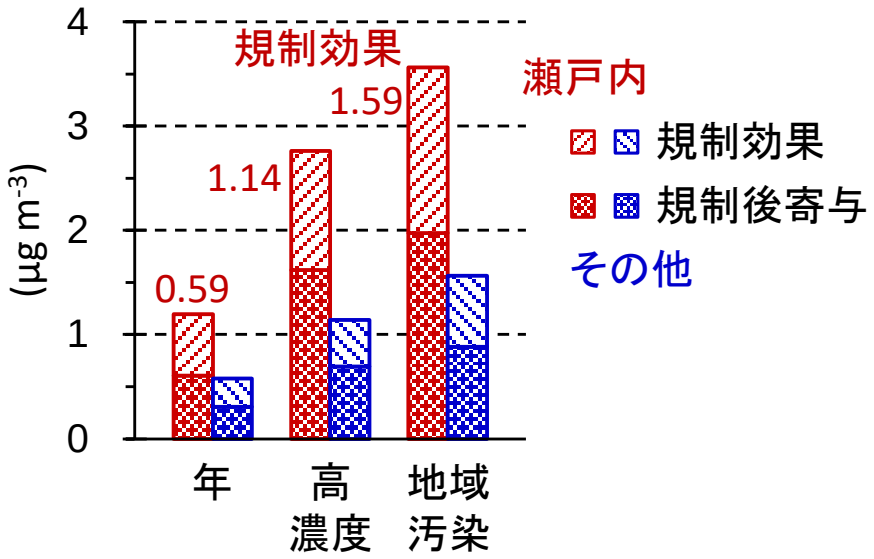
非達成: 18局 → 13局

- 規制強化によって環境基準達成状況の改善に資する効果が得られることを確認

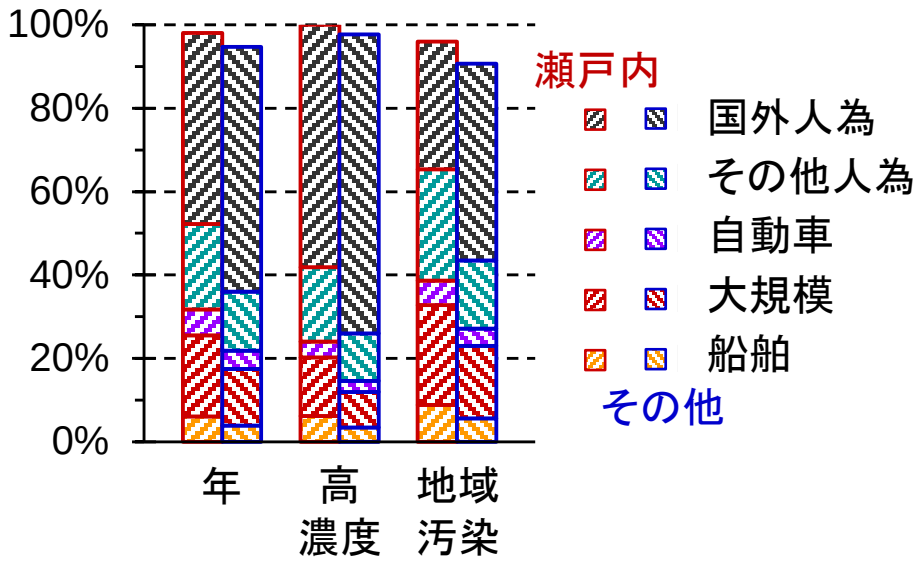
*年平均値には年平均, 年間98%値には高濃度日の規制効果を適用

$PM_{2.5}$濃度に対する規制効果と規制強化後の発生源別寄与

船舶排出の規制効果と規制強化後寄与



規制強化後の発生源別寄与率



- 瀬戸内地域, 地域汚染日で高い規制効果
  - 国内対策効果を適切に評価する上で滞留性の考慮が重要
- 規制効果で瀬戸内地域における船舶寄与が低下 ⇒ 規制強化の効果
  - 規制前: 11, 10, 15% → 規制強化後: 6, 6, 9% (年, 高濃度日, 地域汚染日)
- 瀬戸内地域・地域汚染日における規制強化後の寄与は, 大規模固定発生源 (24%) が国外人為起源 (31%) に匹敵して多い ⇒ 対策の方向性
  - 特に電気業の排出割合は最も多い(NOx:26%、SO_2:45%、$PM_{2.5}$:14%)

5. 環境政策等への貢献：瀬戸内地域の$PM_{2.5}$

1. 船舶排出量データベースの構築

- 構築した船舶排出量データベースは既に一般に公開されており，国等で実施されている$PM_{2.5}$対策に係る検討等において順次使用されている。

2. 2020IMO規制強化による瀬戸内地域での大気質改善効果の定量化

- 短期観測より，規制強化により船舶排出ガス中のSO_2濃度が大幅に減少し，沿岸大気質が改善したことがわかった。
- 長期観測より，規制強化は大気中のSO_2やヴァナジウム濃度の減少に寄与したことが示唆された。
- モデル解析より，地域特有の汚染状況下では規制強化によって船舶の寄与は15%から9%に減少し，これは2018年度における同地域の環境基準未達成局を18局（全58局中）から13局に減少させる効果に相当することを明らかにした。

3. 瀬戸内地域での更なる大気汚染対策の方向性について

- 規制強化後，地域特有の汚染状況下においては，大規模固定発生源の寄与率（約24%）は国外人為起源の寄与率（約31%）に近い値であり，国内では今後の$PM_{2.5}$対策における優先順位が高い発生源であることを示した。

ご清聴ありがとうございました。

本研究の遂行にあたり、以下の皆様に多大な支援を賜りました。
この場をお借りして、御礼申し上げます。

日本海事協会	華山 伸一　様
日本大学	中村 篤博　様
香川高等専門学校	金澤 啓三　様
弓削商船高等専門学校	伊藤 武志　様
弓削商船高等専門学校	高木 洋　様
水産大学校	酒出 昌寿　様
水産大学校	前田 和幸　様
神戸大学	山地 一代　様
大阪大学	荒木　真　様
国立環境研究所	茶谷　聡　様

航空機が排出するナノ粒子の物理･化学的特徴と起源

伏見　暁洋

国立環境研究所　環境リスク･健康領域　主幹研究員

fushimi.akihiro@nies.go.jp

①国内外における取り組みと知見

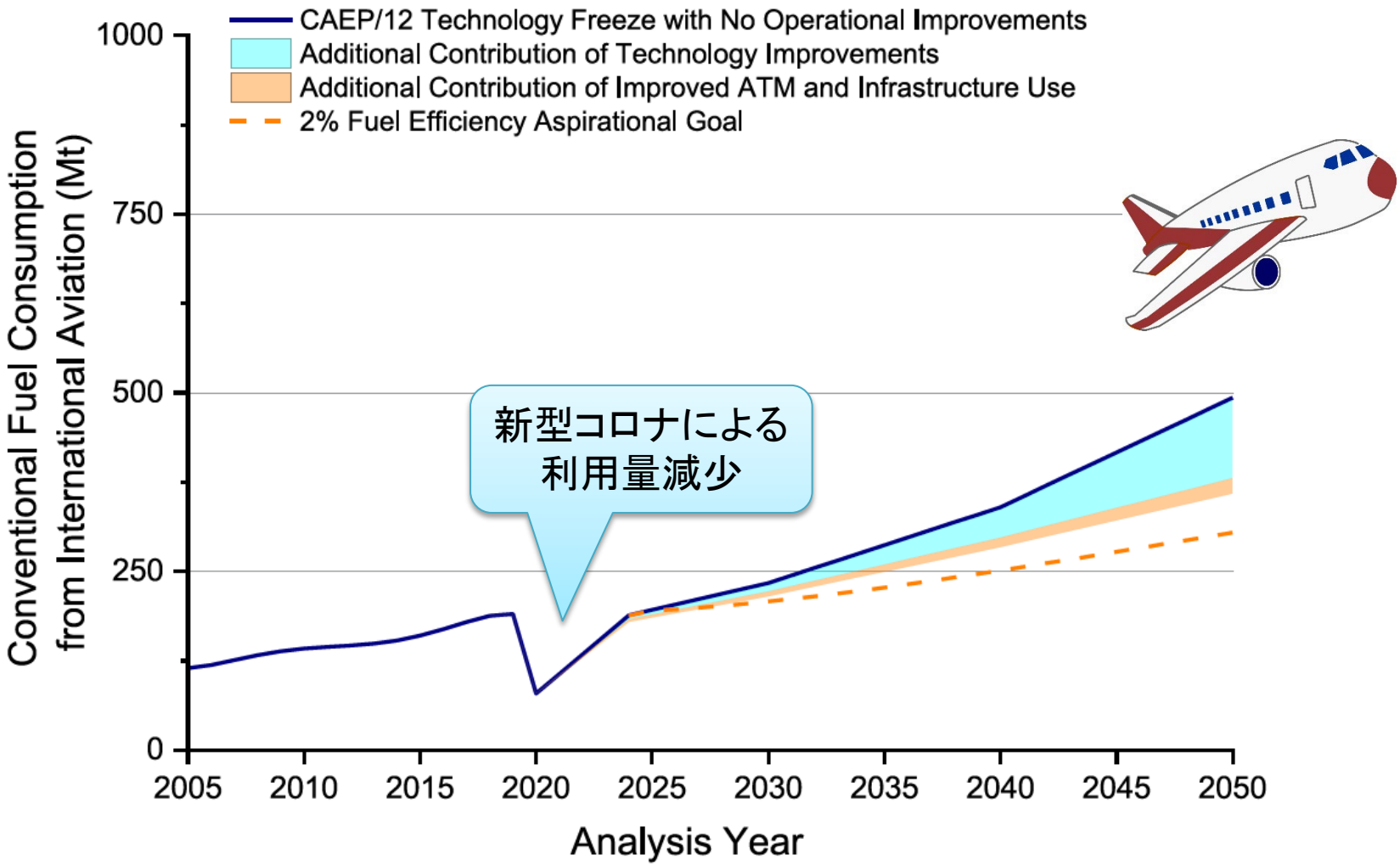
②推進費研究（5-1709, 2017-2019年度）

③推進費研究（5-2004, 2020-2022年度）

大気環境総合センター　第4期定期セミナー（環境研究推進費研究紹介第3回）

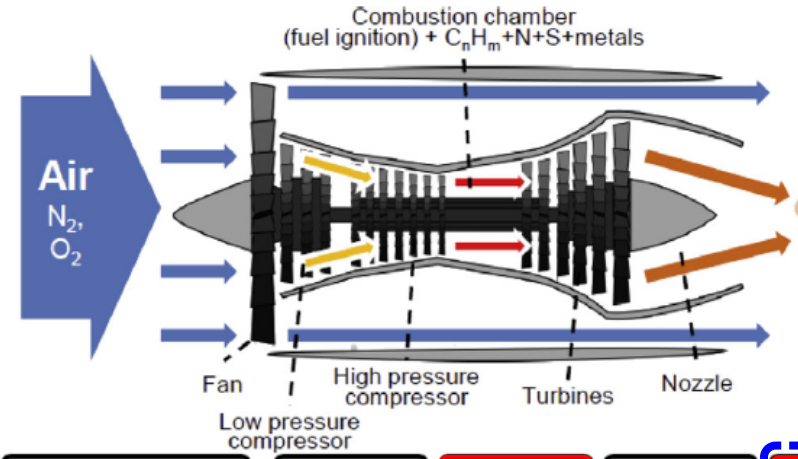
（オンライン，2023年1月17日）

国際的な航空機利用は年々増加



International Civil Aviation Organization (ICAO) (2022) Environmental Trends in Aviation to 2050.

航空機エンジンから排出される物質と環境影響



Masiol and Harrison, 2014

Ideal complete combustion:
$CO_2+H_2O+N_2$

Actual combustion (simplified):
$CO_2+N_2+H_2O+O_2+CO+SO_x+NO_x+HC+soot$

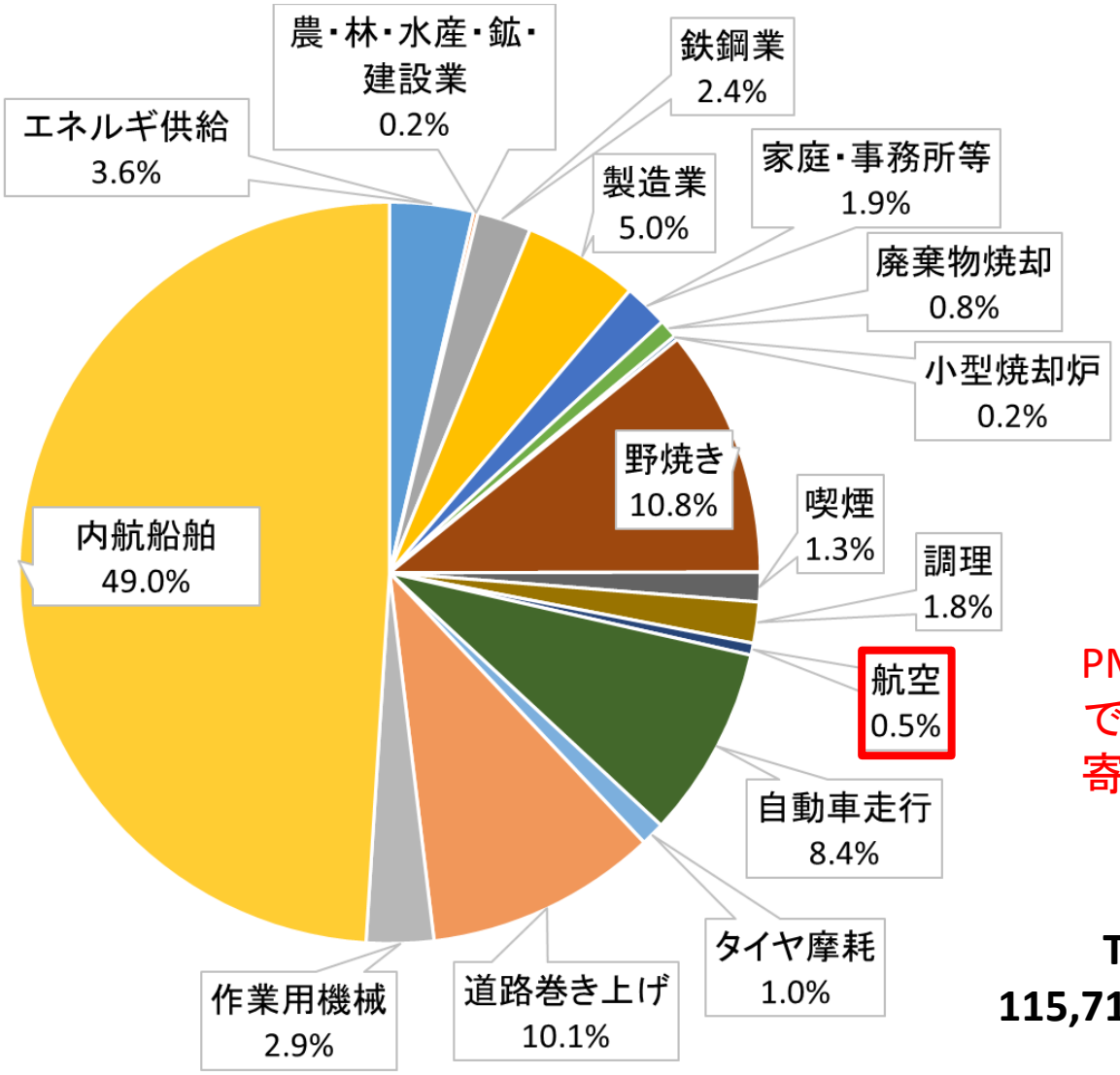
国際民間航空機の排ガス規制物質

volatile PM

Direct emissions	CO_2	CO	H_2O	NO_x	HCs	V-PM	SO_2	Soot
Main atmospheric processes and products			Microphysical processes, condensation	Chemical reactions, Oxidation	Gas/particle partitioning, dilution	Microphysical processes		
			Greenhouse radiative forcing (+)	$+\Delta O_3, -\Delta CH_4$			S(IV)→S(VI)	Primary PM
Effects on the environment at global– and local–scales	Greenhouse radiative forcing (+)	Reaction with -OH to CO_2	Contrails, cloudiness radiative forcing (+)	HNO_3	Gaseous, POA, SOA, SIA		H_2SO_4	Condensation
			Enhanced precipitation	Indirect radiative forcing (+)	Aerosol system, contrails, cloudiness radiative forcing (+/–)			
				Pollution, photo-chemical smog, acid rain, NH_4NO_3	Pollution			
Effects on humans	Climate change, weather	Reduced blood O_2 carrying capacity		NO_2 cardiovascular, and respiratory mortality	Direct: some compounds can have toxic, mutagenic, carcinogenic effects; Indirect: oxygenated compounds		SO_2 increased mortality and morbidity	SO_2 increased mortality and morbidity
Main sinks	Ocean Biosphere	Reaction with -OH to CO_2	Hydrological cycle	Deposition, nitrogen cycle	Deposition, oxidation		Deposition, sulphur cycle	Deposition

- Smoke number
- 不揮発性粒子の質量（2020年～），個数（2023年～）

国内の$PM_{2.5}$（一次排出）排出量（2015年度）

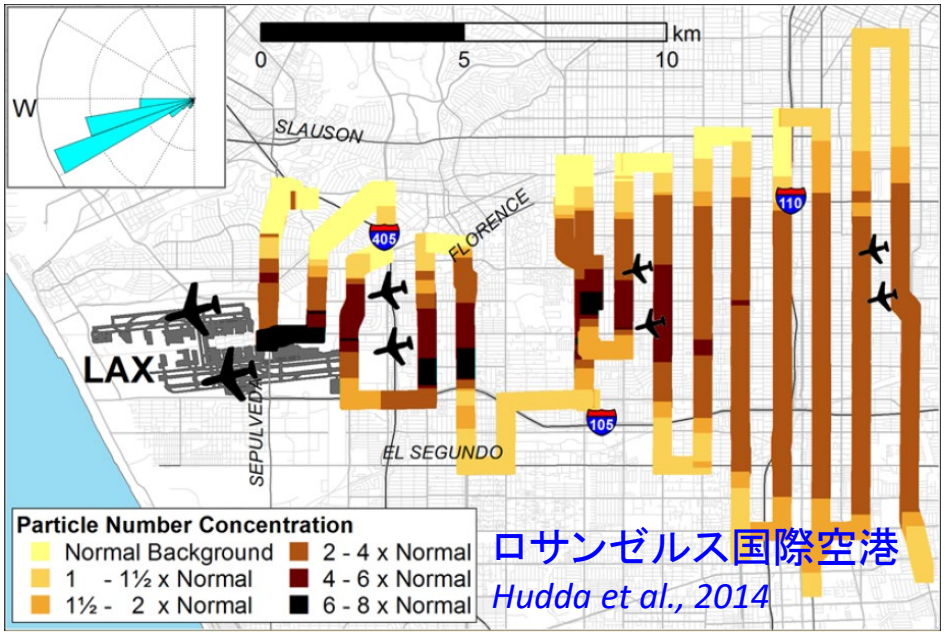


PMの質量ベースでは航空機の寄与は小さい

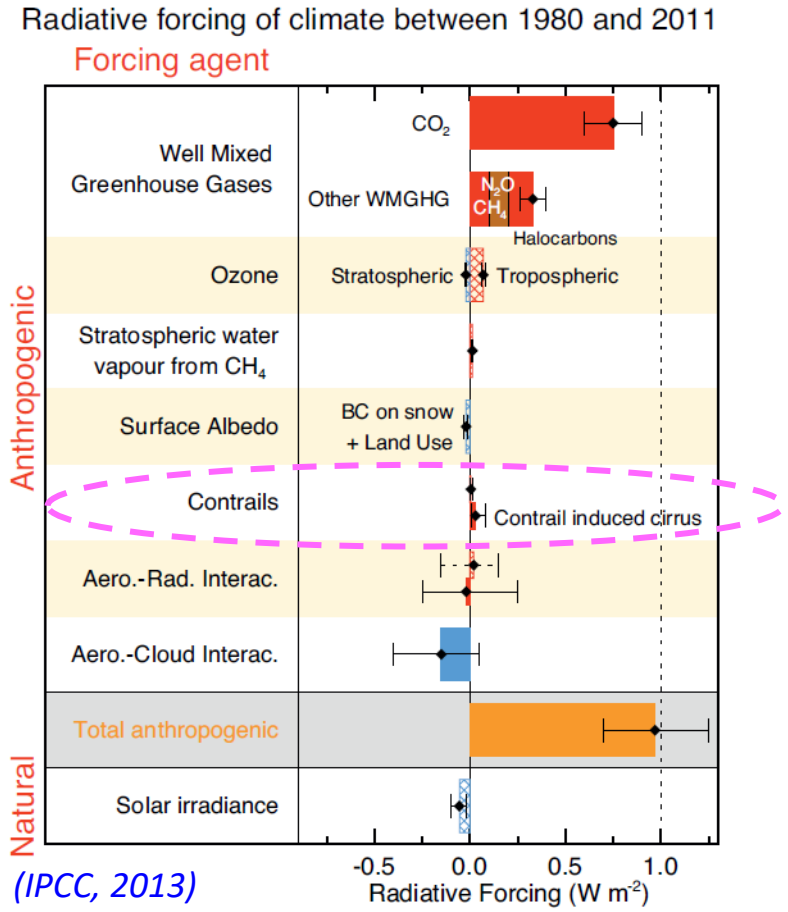
Total
115,711 (Ton/y)

環境省「PM2.5排出インベントリ及び発生源プロファイル策定検討会」事務局,
平成30年度PM2.5インベントリ及び発生源プロファイル策定委託業務報告書，2019年3月

航空機排出ナノ粒子（粒径<50nm）
（超微小粒子：UFP，粒径<100nm）



ロサンゼルス国際空港
Hudda et al., 2014



(IPCC, 2013)

- 民間航空機の排出規制が変更：**不揮発粒子の質量（2020年～），個数（2023年～）** *(ICAO, 2017)*
- 航空機は**地上から上部対流圏まで大気中にナノ粒子を直接排出** *(Masiol and Harrison, 2014; Hudda et al., 2014)*
- 航空機排出粒子は大気の放射強制力に関与し得るが不確実性大 *(Masiol and Harrison, 2014; Righi et al., 2016; Kärcher, 2018)*

→ 欧米では盛んに研究。日本での研究例は少ない

ナノ粒子の健康影響と曝露

1. ナノ粒子の毒性・健康影響

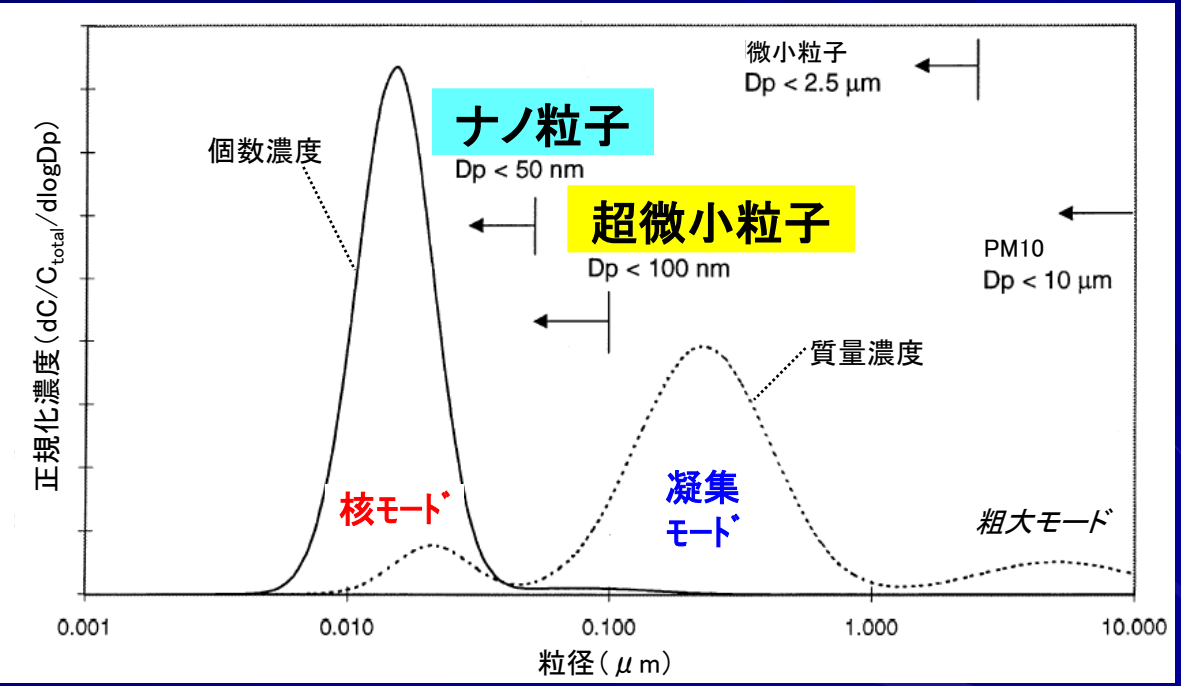
- 動物実験の結果から，超微小粒子（UFP, 粒径100nm以下，$PM_{0.1}$）は大きな粒子よりも毒性が高い可能性 *(Oberdörster et al., 2000; Biswas and Wu, 2005)*

3. WHO (global air quality guidelines, 2021)が大気中UFP濃度のGood practice statements（実施規範）を提示

- UFPは指針値を設けるには知見が少ない
- UFPの実施規範
  - 粒径下限は10 nm以下
  - 大気常時監視に追加
  - 個数濃度が低い=1,000ケ/cm^3(日平均)，高い=10,000～20,000ケ/cm^3(日平均)
  - 疫学研究と管理に最新の科学技術を活用
- $PM_{2.5}$指針値（年平均濃度）= 5 μg/m^3（それまでは10）

2. ナノ粒子の曝露

- ナノ粒子は質量は非常に小さいが，自動車排気中，沿道大気中，**空港内・周辺**では個数濃度が高く，高濃度曝露の可能性



ディーゼル排気粒子の個数濃度と質量濃度の粒径分布
（概念図, *Kittelson, 1998*を改変）

空港由来UFPによる人健康影響も欧米で盛んに研究

Lammers et al. (2020) Environment International 141, 105779.

- オランダ・アムステルダムのスキポール空港の周辺で，健康な人（ボランティア）21人を対象に，5時間の運動を繰り返し実施
- 平均粒子個数濃度は53,500ケ/cm^3
- UFP個数濃度曝露の上昇（125,000ケ/cm^3）はFVC（努力肺活量）の減少（-73.8 mL）と補正QT間隔（心拍数で補正した心室再分極時間）の延長（9.9 ms）と関連

- 他の研究例： Habre, et al. 2018; Moller et al. 2014; Wing et al. 2020

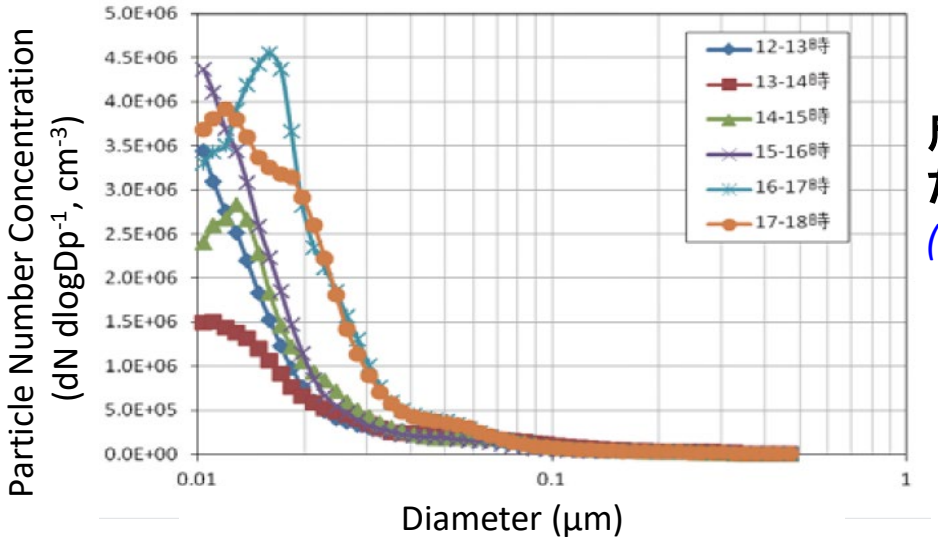
- 空港に限定しないUFP濃度の疫学研究も多く実施（e.g., Stafoggia et al., 2017; Tobias et al., 2018）

「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」（環境省 水・大気環境局自動車環境対策課）

検討委員　2010年度～現在

2018年度委員 （五十音順、敬称略）

石田　武志　水産研究・教育機構　水産大学校　教授
井上　和也　産業技術総合研究所　安全科学研究部門　主任研究員
城田　英之　海上・港湾・航空技術研究所　海上技術安全研究所　グループ長
竹川　暢之　首都大学東京　大学院理学研究科　教授
橋本　弘樹　空港振興・環境整備支援機構 航空環境研究センター　主任研究員
速水　洋　　電力中央研究所　環境科学研究所　副研究参事
伏見　暁洋　　国立環境研究所　環境計測研究センター　主任研究員
藤原　仁志　宇宙航空研究開発機構　航空技術部門　主任研究員
前田　和幸　水産研究・教育機構　水産大学校　特命教授



成田国際空港の滑走路近傍で観測された大気中粒子の個数濃度の粒径分布
(早乙女, 伏見ら, 航空環境研究, 37-43, 2013)

②推進費研究（5-1709，2017-2019年度）

航空機排出ナノ粒子の物理・化学特性と起源

伏見　暁洋 [1)]

齊藤 勝美 [1,2)]，藤谷 雄二 [1)]，竹川 暢之 [3)]

1)国立環境研究所
2)イサラ研究所
3)首都大学東京

環境研究総合推進費

【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
竹川ら，2017-2019年度

目標(1) 空港内UFP濃度・化学組成
目標(2) 実環境UFP/CO_2排出比
目標(3) 観測・モデルによる影響評価
目標(4) 規制後の追跡調査法の提案

超微小粒子状物質の化学分析とモデリング手法開発

首都大学東京
(研究代表機関)
サブテーマ①
竹川 暢之，三澤 健太郎
研究の統括
UFP数濃度の観測・解析

目標(1)(3)
共同観測・解析

目標(1)
機器校正

国立環境研究所
サブテーマ②
伏見 暁洋，藤谷 雄二，森野 悠
UFP組成分析・モデリング

(研究協力者) 齊藤 勝美
国環研 客員研究員
イサラ研究所

目標(1)～(4)
共同観測・まとめ

産業技術総合研究所
サブテーマ③
桜井 博
粒子数濃度計測の校正
村島 淑子

(株)環境計画研究所
サブテーマ④
早乙女 拓海，神山 敏
空港UFPの影響評価

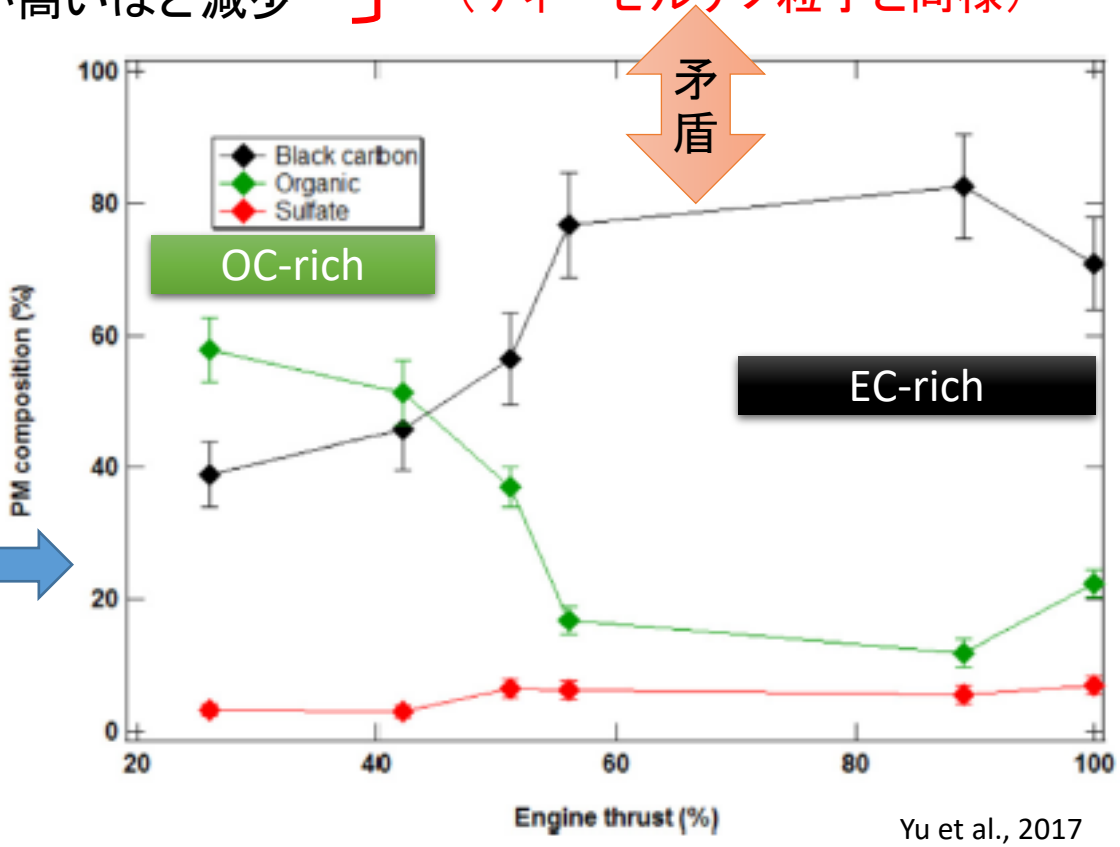
目標(1)(3)
共同観測
モデリング

航空機排出ナノ粒子の物理化学特性

1. 300℃に加熱すると、粒子数は約70～95%減少 *(Wey et al., 2006)*
2. 20nm以下の粒子数は、気温が高いほど減少 *(Wey et al., 2006)*

ナノ粒子は揮発性粒子
（ディーゼルナノ粒子と同様）

3. ジェット燃料はS分が100–1600ppmと高い *(Kinsey et al., 2009)*
4. 総粒子の主成分はOC, EC, S（*Kinsey et al., 2009; Masiol et al., 2014*）。高出力時はEC主体，低出力時はOC主体（Presto et al., 2011）
5. ナノ粒子の化学組成の情報は非常に少ない



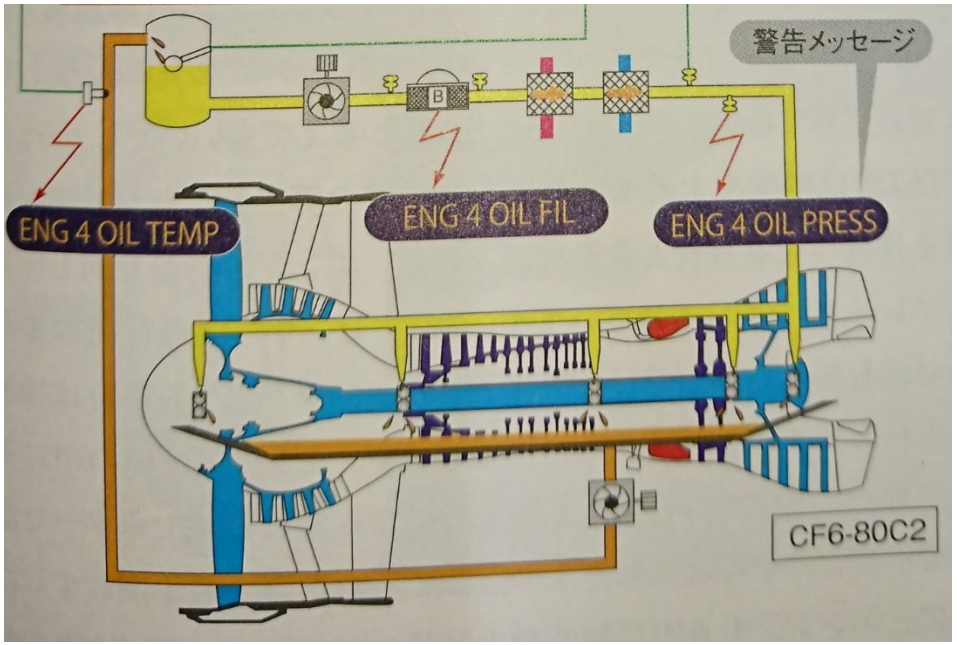
Yu et al., 2017

分級無し粒子の組成の例
（1台の飛行機エンジン）

実際のエンジン出力範囲：7～100%（*Wey et al., 2006*）

航空機UFPの起源

- 燃料は確実にPMに関与
- ジェットエンジンにも**オイル（潤滑油）**が使用
  - 排気粒子中から，オイル成分（ホパン，ステラン）を検出 *（Kinsey et al., 2011）*
  - オイルはPMから常に検出され *（Timko et al., 2010）*，PM重量への寄与は5–100% *（Yu et al., 2012）*
  - オイルPMの体積径は250–350nm *（Yu et al., 2010）*。



ジェットエンジンの潤滑

中村寛治，カラー図解でわかるジェットエンジンの科学，2013

- **燃料とオイルの両方がPM組成に関与？比率は？**
- **ナノ粒子ではどうか？**

目　的

1. 航空機排気（使用過程機，リアルワールド条件）
   ナノ粒子の化学組成
   - 主成分：EC，OC，S？
   - 有機物と元素の組成

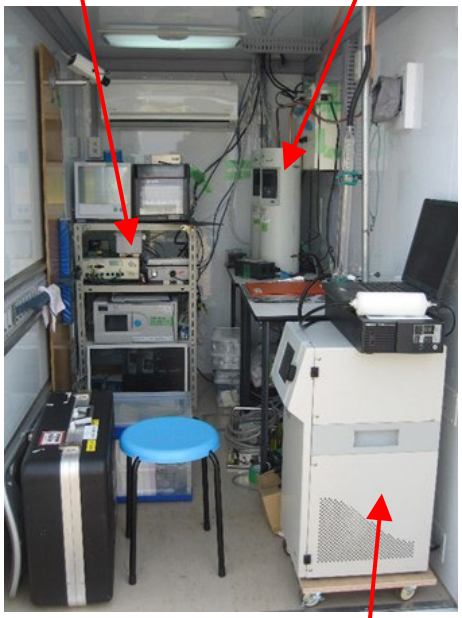
2. **起源**（燃料とオイルの寄与率）

冬 成田国際空港の滑走路直近での大気観測

SMPS (D =15–660 nm, every 5 min), CO_2

NO_x
Meteorology

Nano-MOUDI II



UCPC (>2.5 nm), **CPC** (>10 nm)

EEPS
Engine exhaust particle sizer
Model 3090, TSI
D = 6–560 nm
every 1 s

- 滑走路Aの離発着数は約400/日
- **離発着は6:00～23:00のみ許可**

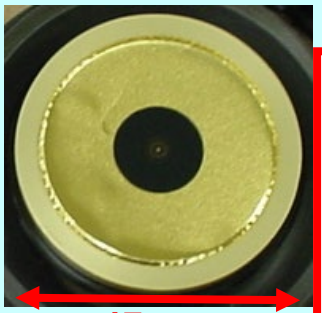
2018年2月5～26日

サンプリング～分析

粒径別試料

Daytime samples
- 7:00–22:00, 2-4 days, 3 times
- **Aircraft-affected**

Nighttime samples
- 0:00–6:00, 5 days, 1 time
- **Background**



Au

Micro-Orifice Uniform Deposit Impactor (NanoMoudi II, MSP)

50%cut径(μm): 10, 5.6, 3.2, 1.8, 1.0, 0.56, 0.32, 0.18, 0.10, 0.056, 0.032, 0.018, 0.010, バックアップ. 流量 10 L/min

PC

- Jet-A1 fuels
- Jet lubrication oils

Dilution (solvent)

Microbalance (PM mass)

Microbalance (PM mass)

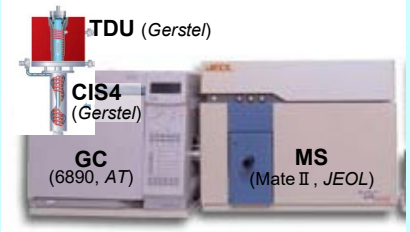
化学分析

高感度分析

Carbon Analyzer (EC/OC)

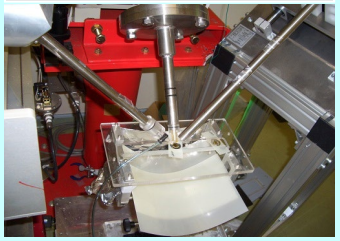
Fushimi et al., 2011

TD-GC/MS (Specific organics)



Fushimi et al., 2011

In-air PIXE (Elements)

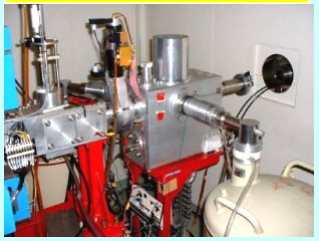


Saitoh et al., 2008, 2019a,b

IC (Ions)

Saitoh et al., 2008, 2019a,b

PIXE (Elements)



ジェットエンジンオイル

（協力：サブ4）

Mobil

JET Oil Ⅱ

国内旅客機の大半で使用。世界シェア49% *(Winder et al., 2002)*

Mobil

JET Oil 254

Jet Oil IIの高性能版，新型エンジンに使用

https://ishino-oil.com

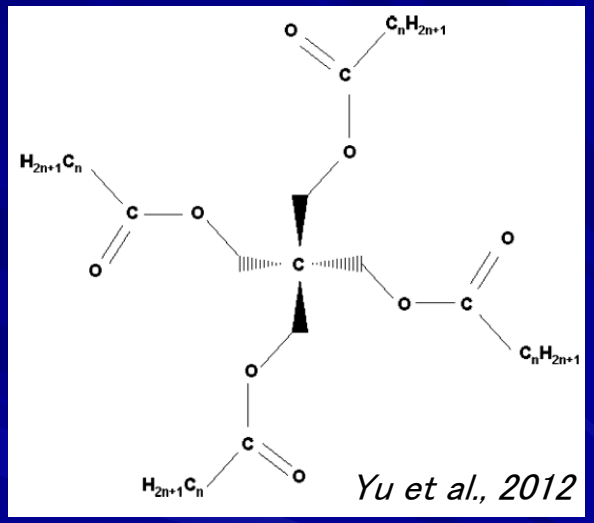
Eastman

Turbo Oil 2380

一部で使用

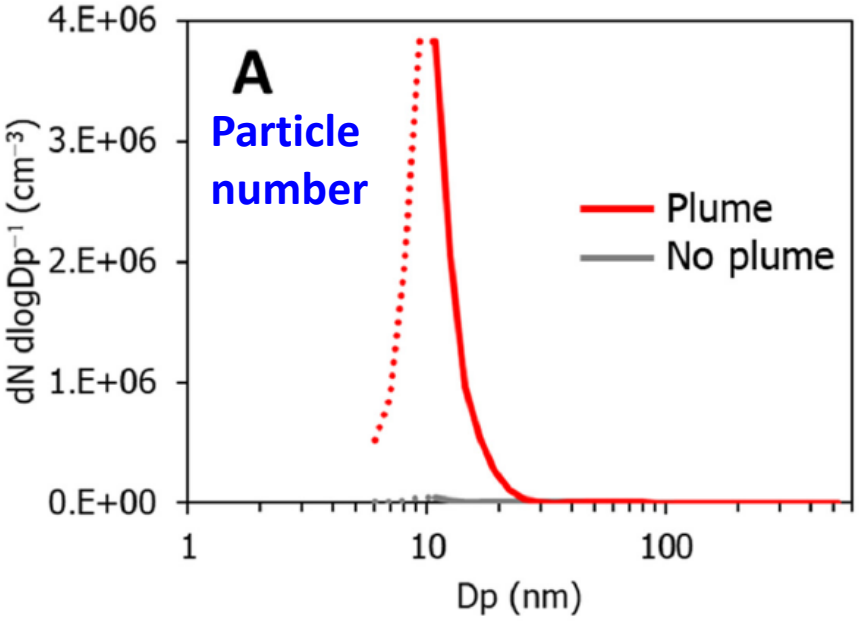
合成エステル油

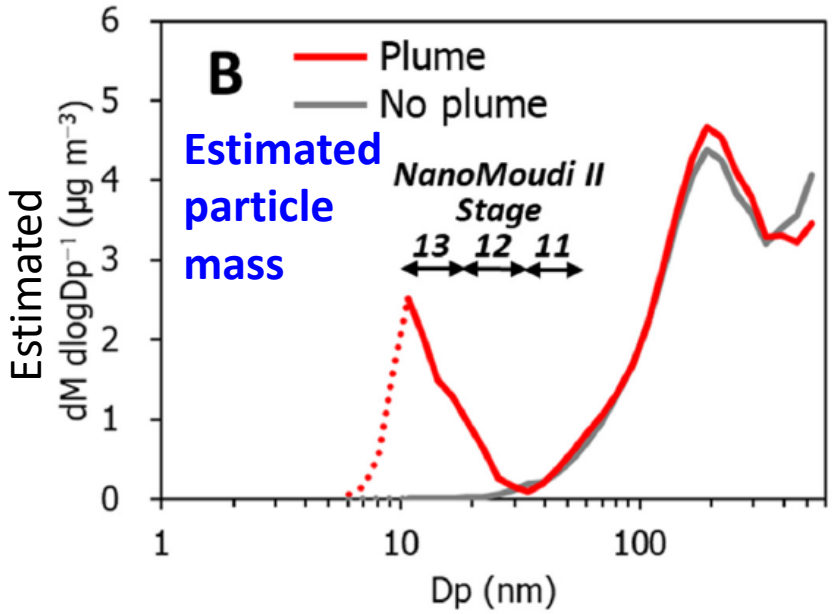
（主成分はペンタエリスリトールのC_5–C_{10}脂肪酸エステル）



自動車用エンジンオイル（鉱物油）には含まれない

粒子個数濃度の粒径分布
（航空機排気プルーム有り vs 無し）





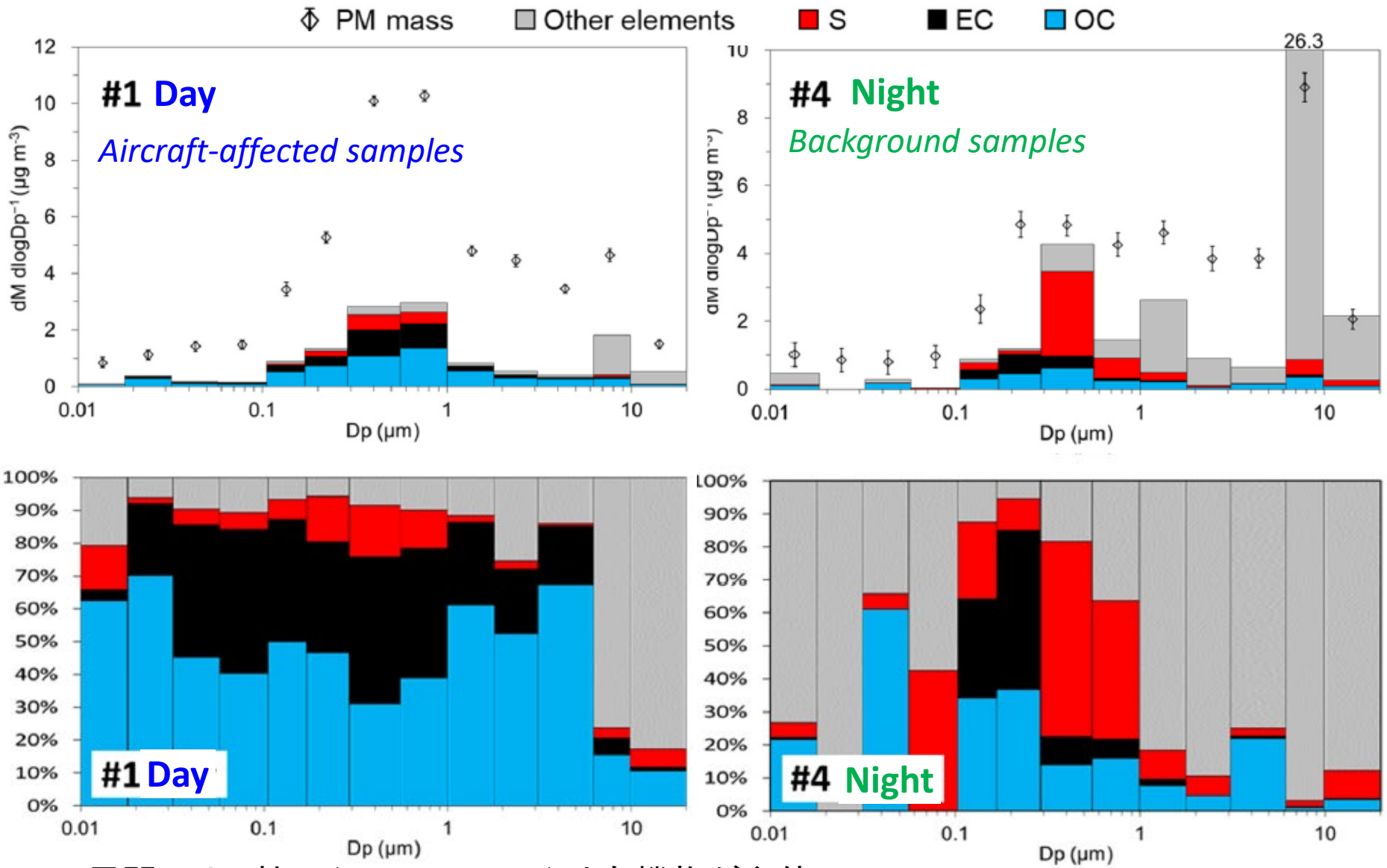
Plume: 11:43:42–11:44:01, February 15, 2018
No plume: 11:43:11–11:43:30, February 15, 2018
EEPS

- プルームが到達すると，核モード粒子（ナノ粒子）濃度が大きく増加
- モード経は10 nm以下

- 航空機排気は粒径30 nm以下の粒子の**質量**にも大きく関与

Fushimi et al., ACP 19, 6389-6399, 2019

主要成分の粒径別質量濃度



- 昼間のナノ粒子（D = 10–32 nm）は有機物が主体 *Fushimi et al., ACP 19, 6389-6399, 2019*

有機成分分析：加熱脱着−GC/MS法

加熱脱着導入装置
- 加熱脱着装置（TDU，ゲステル）
- 冷却導入システム（CIS4，ゲステル）

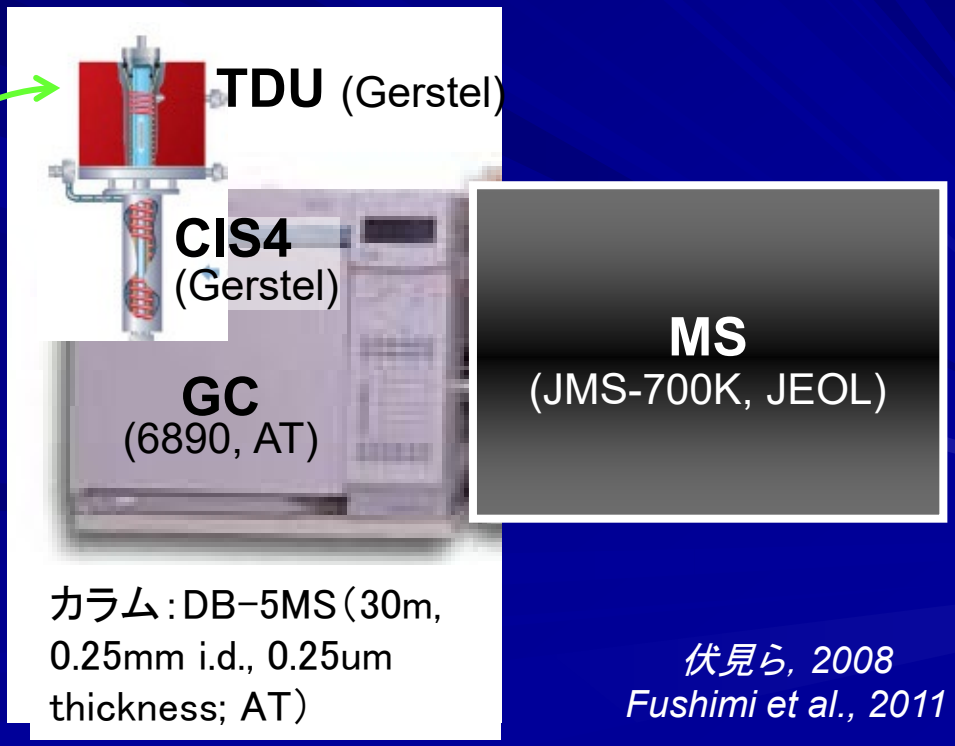
質量分析計（MS）
- 二重収束型質量分析計（JMS−700K，JEOL）

MS測定モード
- 質量分解能1,000
- Scan法（m/z 35〜400）

加熱脱着ライナー

粒径別粒子試料
1/8〜3/8 cut
（1〜20 μg）

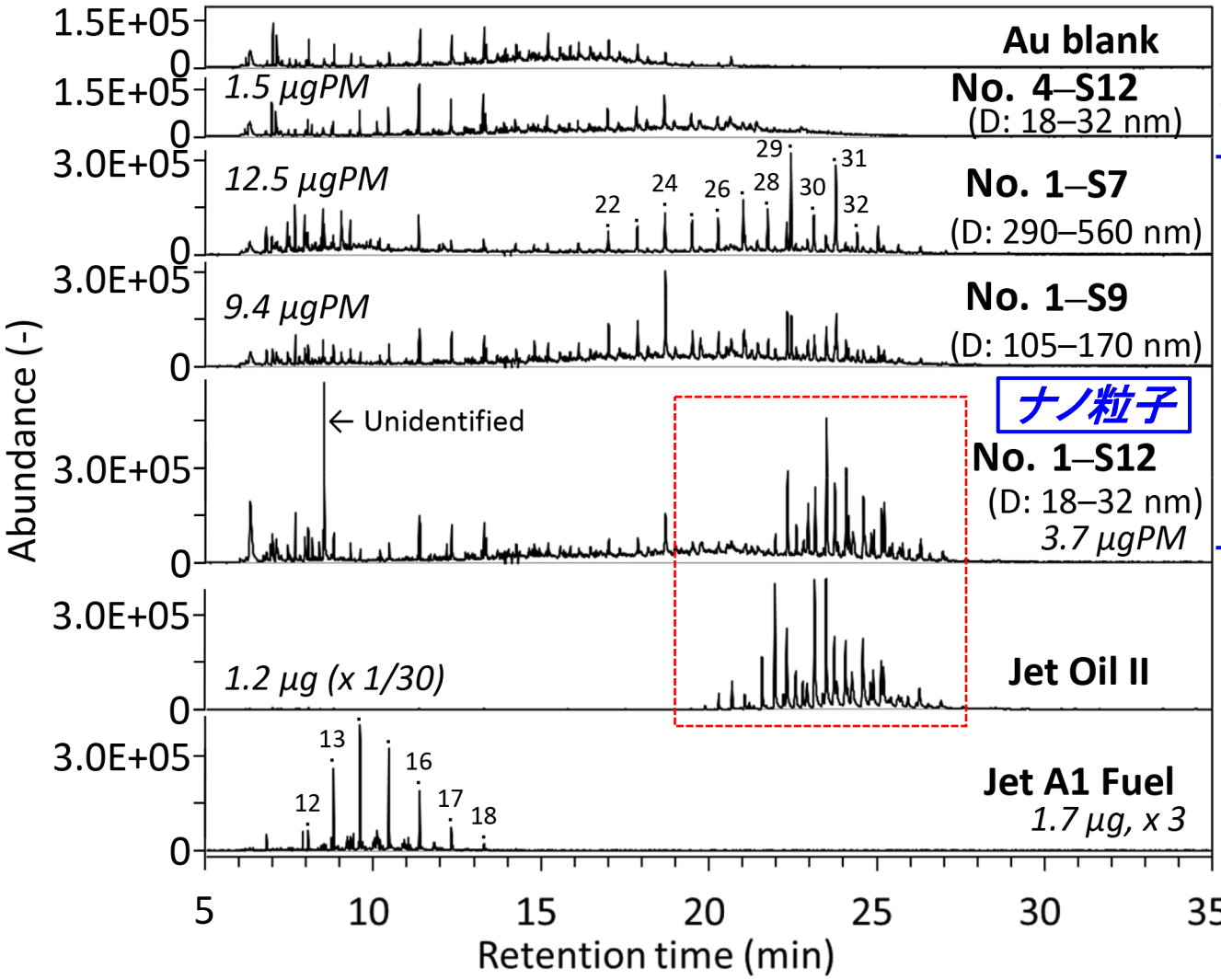
内標準物質（13C−PAHs mixとC24D50とC30D62 n−アルカン）を粒子表面に添加



カラム：DB−5MS（30m，0.25mm i.d.，0.25um thickness; AT）

伏見ら，2008
Fushimi et al., 2011

昼間(No.1試料)と夜間(No.4試料)の粒径別試料，ジェットオイル，ジェット燃料のマスクロマトグラム（*m/z* 85）



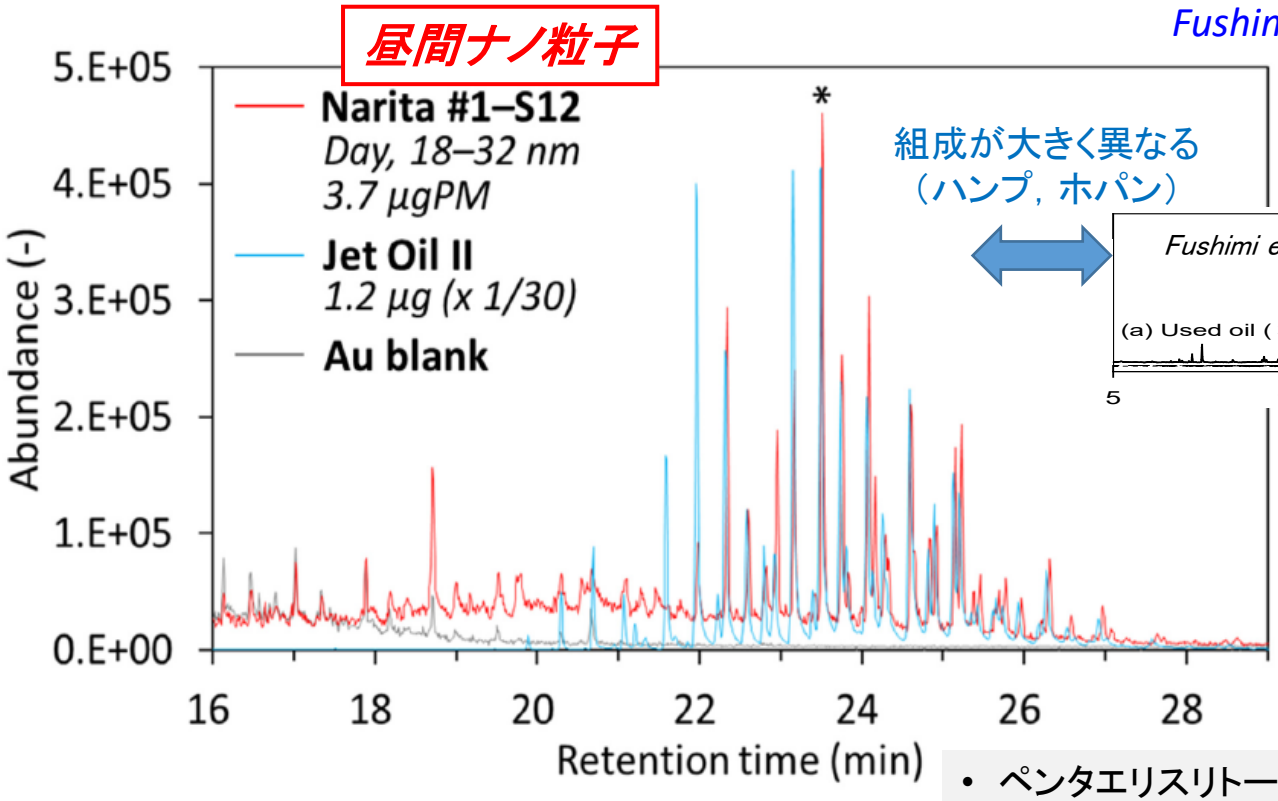
- *m/z* 85は炭化水素の指標
- 図中の粒子質量は加熱脱着GCMSで分析した粒子質量

- 昼間のナノ粒子のクロマトはジェットエンジンオイル（潤滑油）のクロマトと酷似
- 夜間のナノ粒子からはオイル成分は検出されず

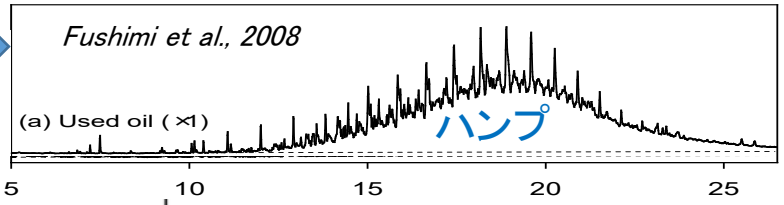
Fushimi et al., ACP 19, 6389-6399, 2019

マスクロマトグラム（*m/z* 85）比較：昼間の空港大気ナノ粒子，ジェットエンジンオイル，金ホイルブランク

Fushimi et al., ACP 19, 6389-6399, 2019



組成が大きく異なる
（ハンプ，ホパン）



自動車用エンジンオイル（鉱物油）のTDGCMSクロマトグラム（*m/z* 57）

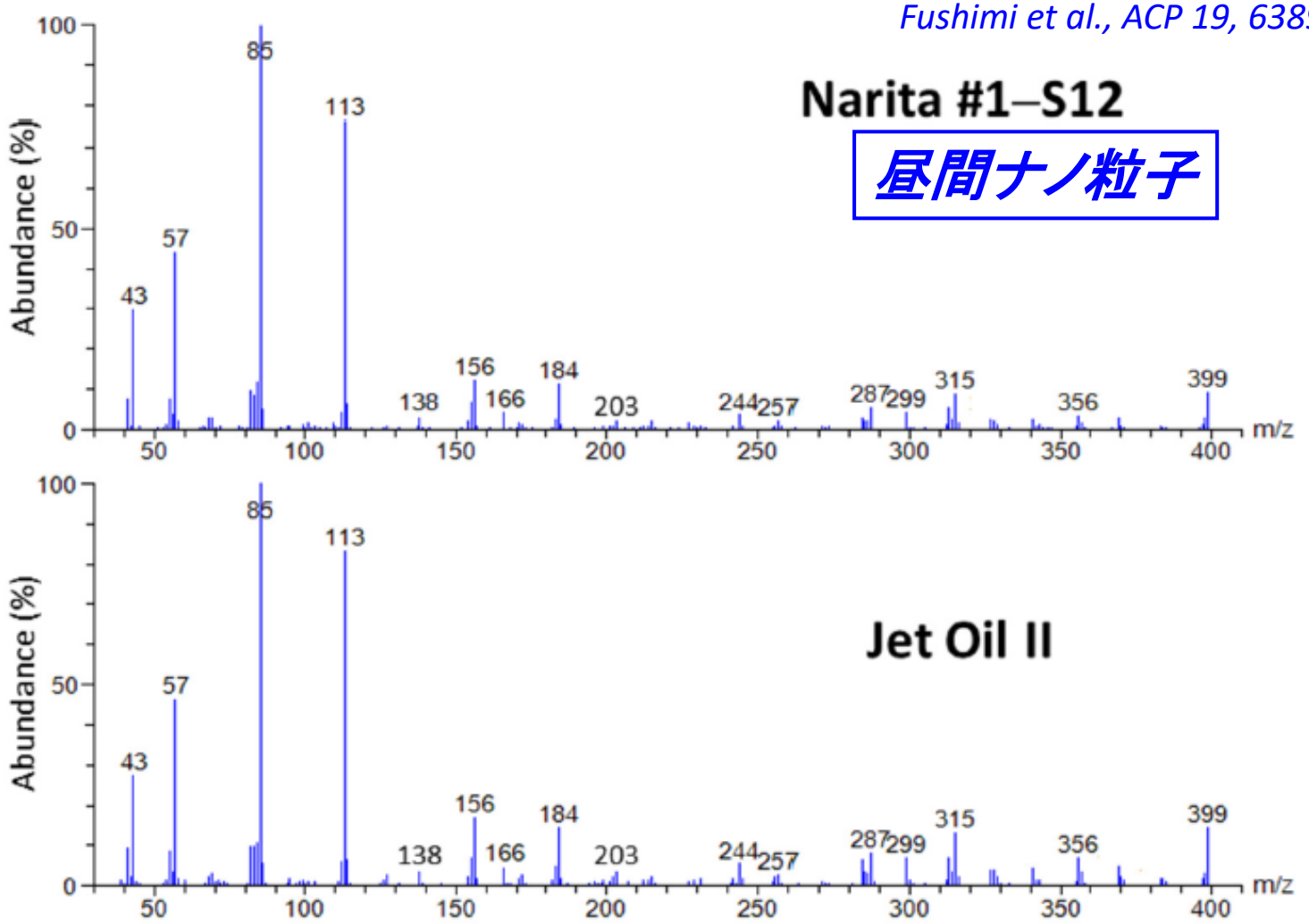
- ペンタエリスリトールのC5-C10脂肪酸エステルと思われる約25のピーク
- N-phenyl-1-naphthylamine
- Alkylated diphenyl amines
- Tricresyl phosphate (TCP)

をオイル及び昼間のナノ粒子から検出

- ジェットエンジンオイルが航空機排出ナノ粒子に強く関与していることを示す初めての証拠
- GC/MS測定による有機成分の約半分が未燃オイル起源

マススペクトル比較：昼間（No.1試料）の空港大気ナノ粒子 vs ジェットエンジンオイル（@RT 23.51分）

Fushimi et al., ACP 19, 6389-6399, 2019



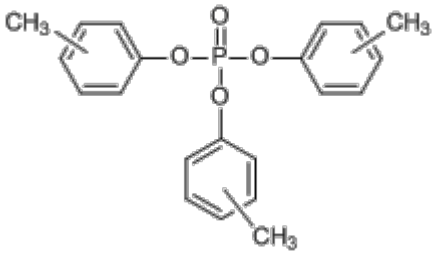
- マススペクトルがジェットオイルのものと酷似（@保持時間21～27分）

結　論　成田国際空港での観測より

- 航空機排出粒子のモード径は10 nm以下
- 大半が揮発性粒子(*Takegawa et al., ACP 21, 1085-1104, 2019; Takegawa et al., Atmos Environ 292, 119391, 2023*)
- 航空機排出ナノ粒子は有機物が主体
- 航空機排出ナノ粒子(粒径30 nm以下)中の有機物の約半分が未燃ジェットエンジンオイル起源と推定
- 航空機排出ナノ粒子とオイル・燃料中の金属元素のプロファイルを解明 (*Saitoh et al., 2018, I J PIXE 28, 85-92; Saitoh et al., 2019, I J PIXE 29, 61-65*)

意　義

- ジェットエンジンオイルの大気への放出を減らすことができれば，ナノ粒子の排出を減らすことができるかも
- 揮発性粒子は規制対象外だが，健康影響・気候影響の観点から重要性は高い
- ジェットエンジンオイルにはTCP(有害物質)が添加されているため(焼付防止，摩耗低減のため)，オイル排出の低減は健康リスク低減にも貢献し得る
- 空港内・周辺や上部対流圏での大気中動態(寿命など)の理解



TCP

(Tricresyl Phosphate
リン酸トリクレジル)

$C_{21}H_{21}O_4P$

MW = 368.37

謝　辞

環境省　環境研究総合推進費*(5-1709, JPMEERF20175009)*
「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」

成田国際空港株式会社
成田国際空港振興協会

早乙女拓海氏	(株)環境計画研究所
桜井博博士・村島淑子氏	産業技術総合研究所
世良耕一郎 教授	岩手医科大学
森野悠博士・橋本俊次博士・家田曜世氏 田邊潔博士・高澤嘉一博士	国立環境研究所
千葉真紀氏・井原昌代氏・菅谷裕氏	国立環境研究所
三澤健太郎博士	首都大学東京
中村真人氏	グリーンブルー(株)
今野秀徳氏	(株)堀場テクノサービス
寺林郁夫氏	青森県量子科学センター

③推進費研究（5-2004，2020-2022年度）

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

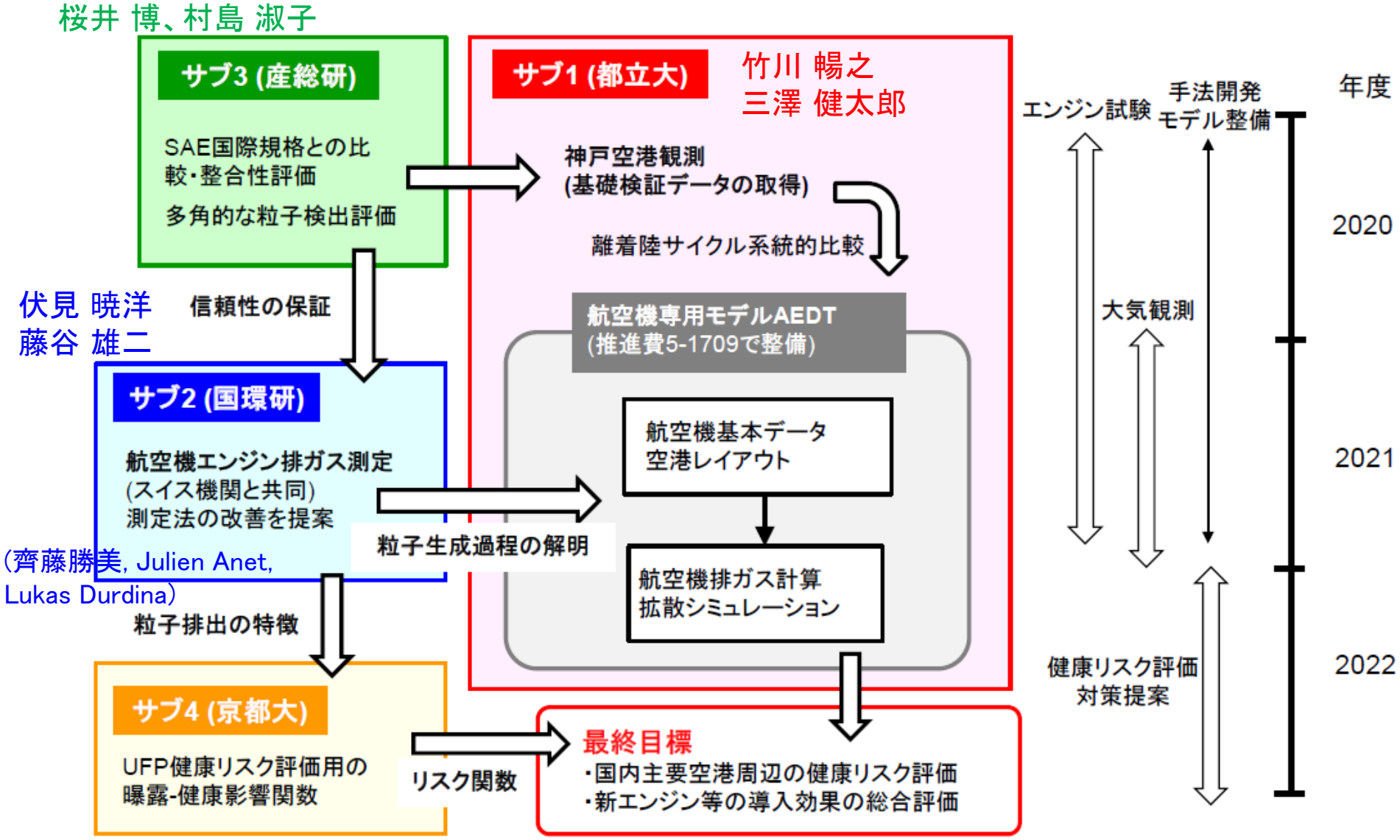
伏 見 暁 洋[1)]

齊藤勝美[1,2)*]，藤谷雄二[1)]，Lukas Durdina[3)*]，Julien G. Anet[3)*]，Jacinta Edebeli[3)*]，Curdin Spirig[3)*]，Manuel Roth[3)*]，竹川暢之[4)]

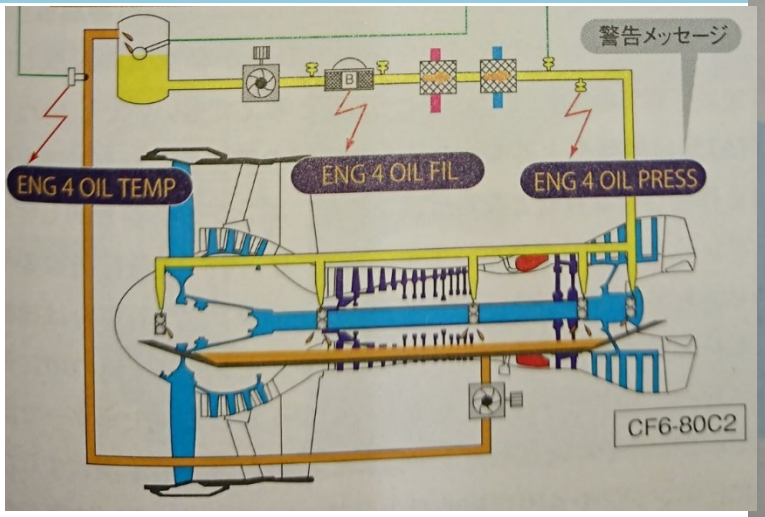
1)国立環境研究所
2)イサラ研究所
3)Zurich University of Applied Sciences, Switzerland
4)東京都立大学
**研究協力者*

TOKYO METROPOLITAN UNIVERSITY

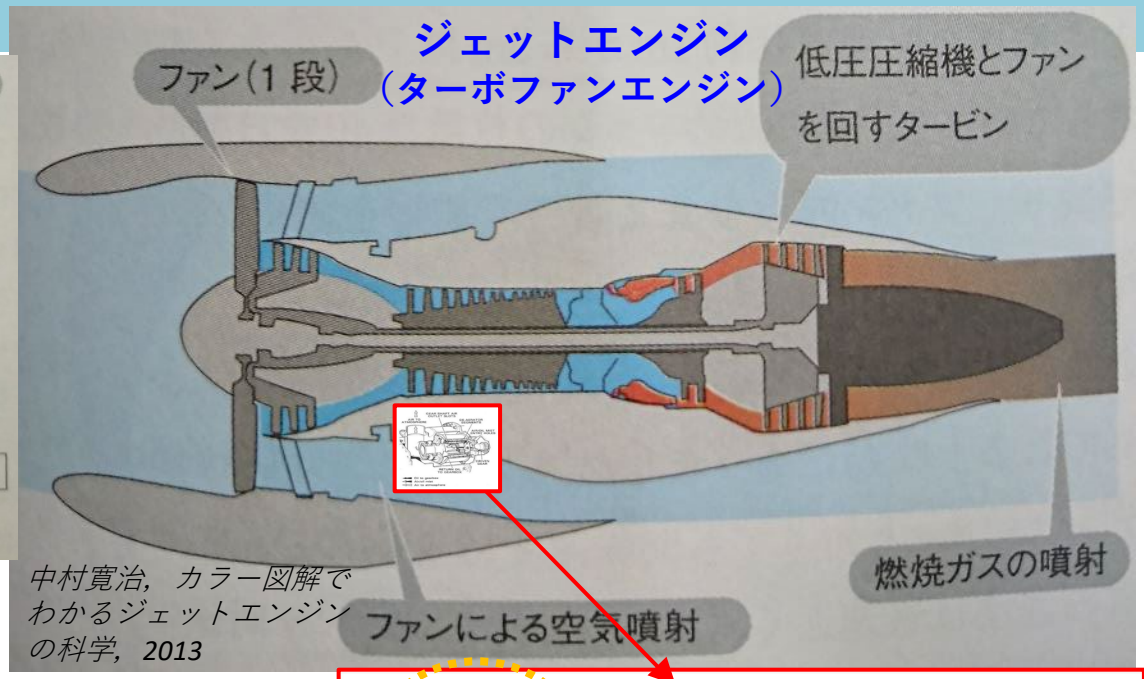
【環境省推進費，5-2004】国際民間航空機関の規制に対応した航空機排出粒子状物質の健康リスク評価と対策提案（竹川ら，2020-2022）



ジェットエンジンオイルの排出箇所（*推定*）

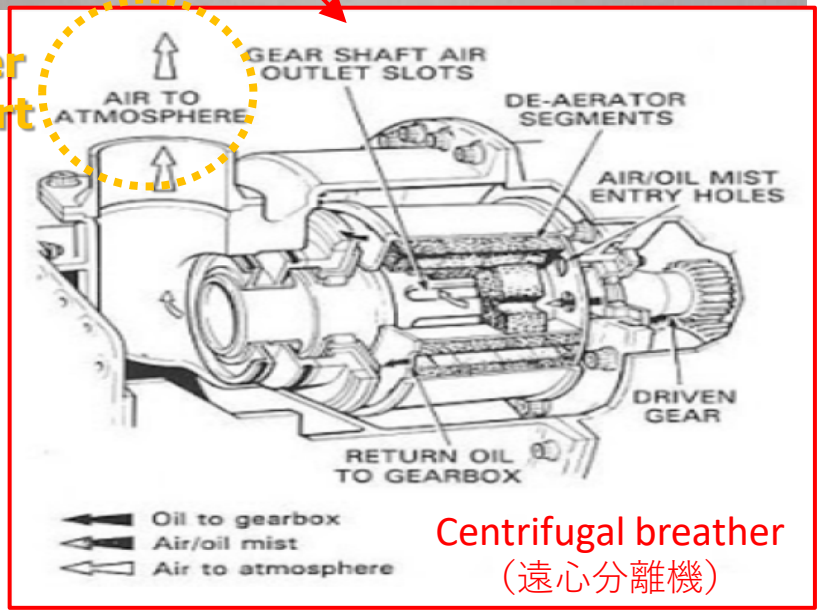


Lubrication of jet engine
(Nakamura K., 2013)



中村寛治，カラー図解でわかるジェットエンジンの科学，2013

Breather Vent Port



Centrifugal breather
（遠心分離機）

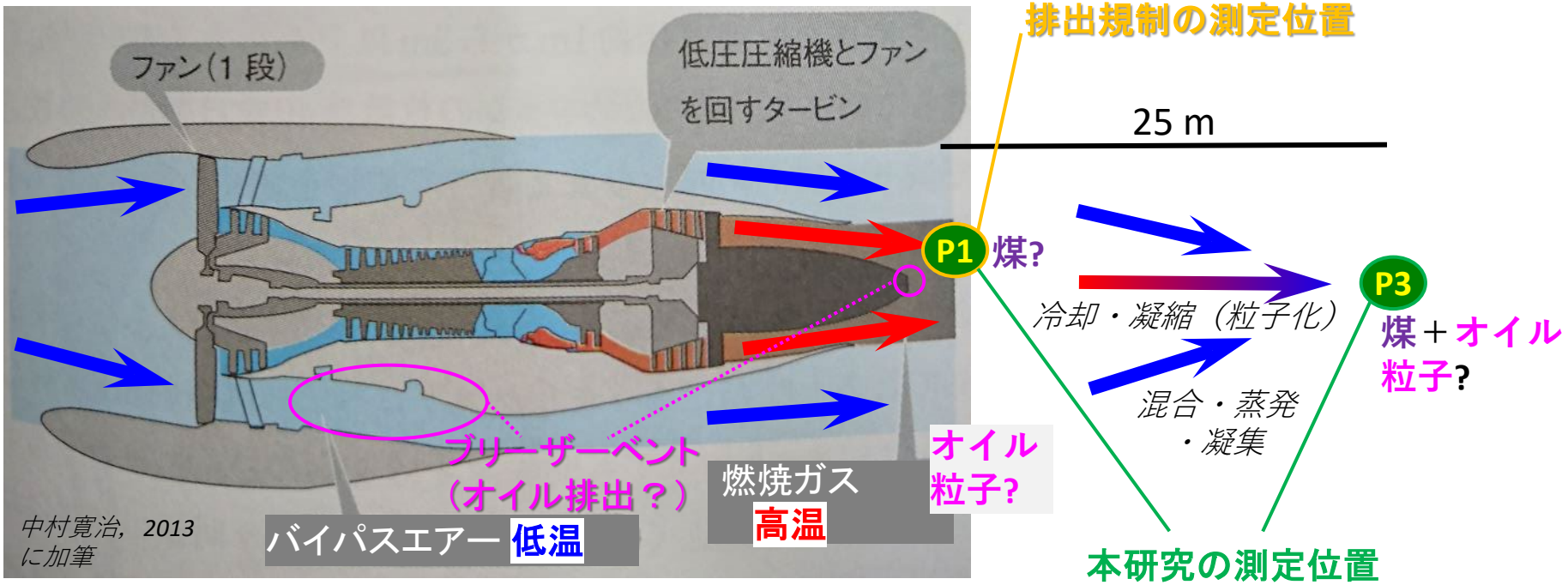
Rolls-Royce pic, the Jet engine, 1996

Yu et al., 2010

- 航空エンジンのBreather vent portでオイルPMを検出
- オイルPMの平均体積径は250–350 nm

オイル（粒径1 μm以下の粒子またはガス）
が低温バイパスフロー中に排出され
ナノ粒子を形成？

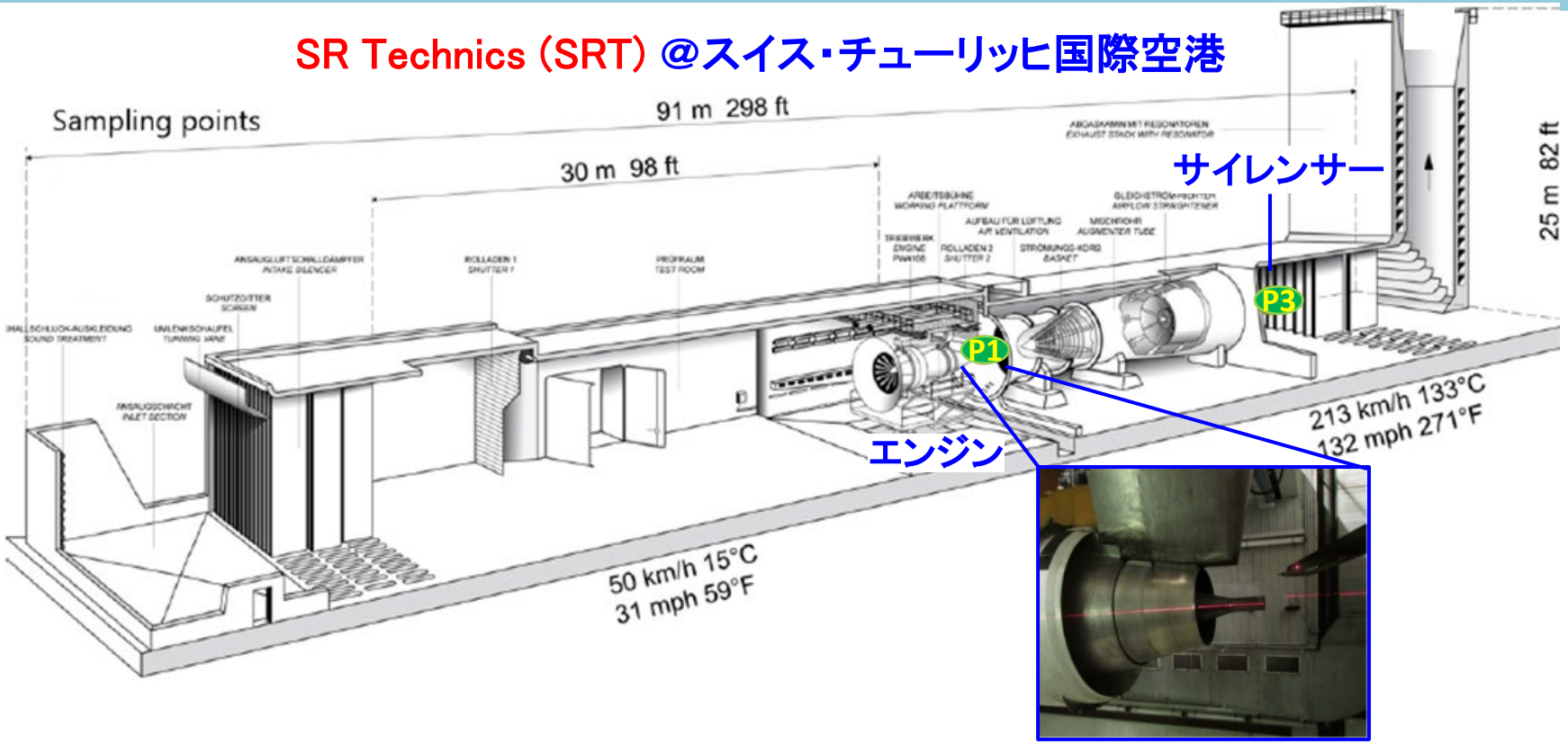
研究の目的と実施概要



- **実エンジンで、オイルナノ粒子の存在を検証**
- **オイルナノ粒子の排出・生成メカニズムを解明**
- 粒子排出を減らすための対策を提言
- エンジン直下（**P1**），25 m下流（**P3**）で、粒子個数と化学組成（元素状炭素、有機炭素、**有機成分**）を測定

航空機エンジン試験施設

SR Technics (SRT) @スイス・チューリッヒ国際空港



- 日本など世界各国の民間航空機の使用過程エンジンの整備や試験を請負
- 世界中の類似施設のうち、**排出ガス・粒子の計測が可能なのはSRTのみ**
- スイスの研究グループは国際的な航空機排気規制に中心的に関与。欧米諸国との連携のもと、先駆的な研究成果多数
- 研究協力者：**Dr. Anet, Dr. Durdina** (Zurich University of Applied Sciences, スイス)ら

実験・計測項目

SR Technics (SRT) @スイス・チューリッヒ国際空港

予：予備試験（2020年～2021年3月）
①エンジン試験#1（2021年4-5月）
②エンジン試験#2（2021年9月）

Sampling line temperature
- 160 °C
- 60 °C
- Ambient

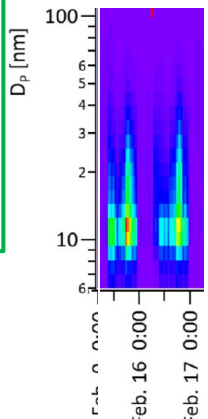
- NIES Single Sampler予
- **NIES Dual Sampler (Qz/Qz, T/TX)①②**
- **TEM sampler②**
- **SMPS, CO_2**

1 μm-cut Cyclone

Diluter 1:10

- APC, MSS, CO_2

Single-point sampling probe



Container (outdoor)

Turbofan jet engine

P1

遠隔
移動可

Exhaust gas

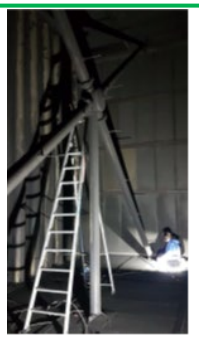
- CO_2, NOx, SO_2, THC
- **Smoke meter 予①②**

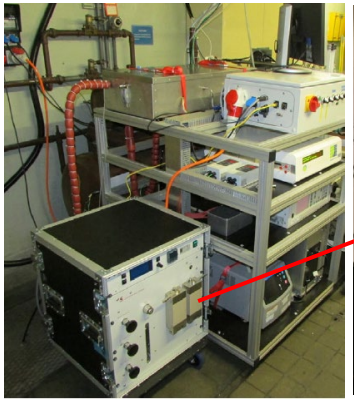
25 m

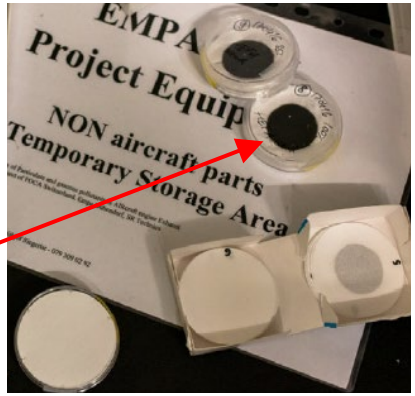
P3

Before Silencer

- **NIES Dual Sampler (Qz/Qz, T/TX)①**
- **NanoMoudiII (Au, PC/NC)②**
- **EEPS①②**
- **TEM sampler①**
- **CO_2**







Smoke meter
Undiluted exhaust @160 °C, Chell, CSM2000, 70 °C, Filter paper (OD: 55 mm, deposit area: 29 mm), 14LPM

Instruments
- NIES (Japan)
- ZHAW (Swiss)

APC: AVL Particle Counter
MSS: Micro Soot Sensor
CS: Catalytic Stripper

粒子試料採取～化学分析

Jet engine

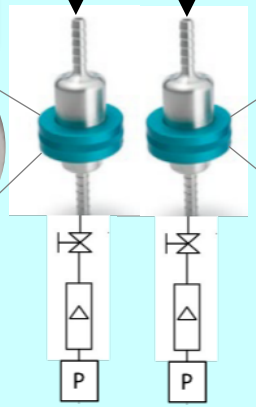
- Jet fuel
- Jet engine (lubrication) oil

Dilution

Sampling

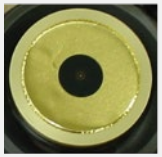
Bulk PM

47 mm **Qz/Qz filter**



NIES Single/ Dual Sampler

Teflon/TX filter



Size-resolved PM

NanoMoudi II (MSP)

Microbalance (PM mass)

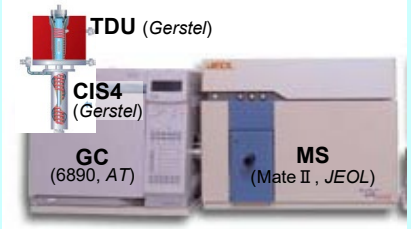
Particle number size distribution (**EEPS**), **TEM** observation, Smoke meter sampling/analysis

Chemical analysis (sensitive)

Carbon analyzer (EC, OC)

Fushimi et al., 2011

TD-GC/MS (organic compounds)



Fushimi et al., 2011

In-air PIXE (Elements)

Saitoh et al., 2019

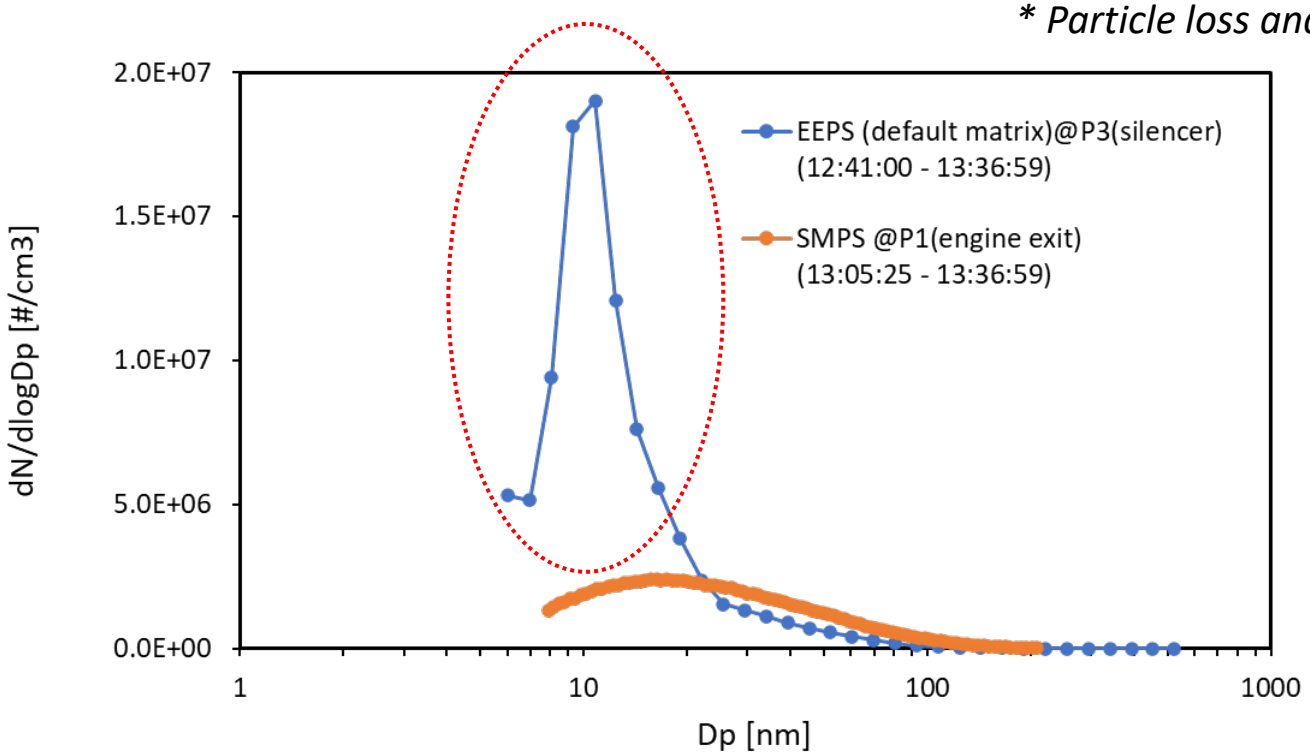
IC (Ions)

PIXE (Elements)

Saitoh et al., 2019

粒子個数濃度粒径分布の比較
エンジン直下（P1） vs 25 m下流（P3, サイレンサー）

** Averaged for whole engine test cycle*
** Particle loss and dilution were not corrected*



13-April-2021
CFM56-7B

CFM56 engines are installed in Airbus A320 Boeing B738

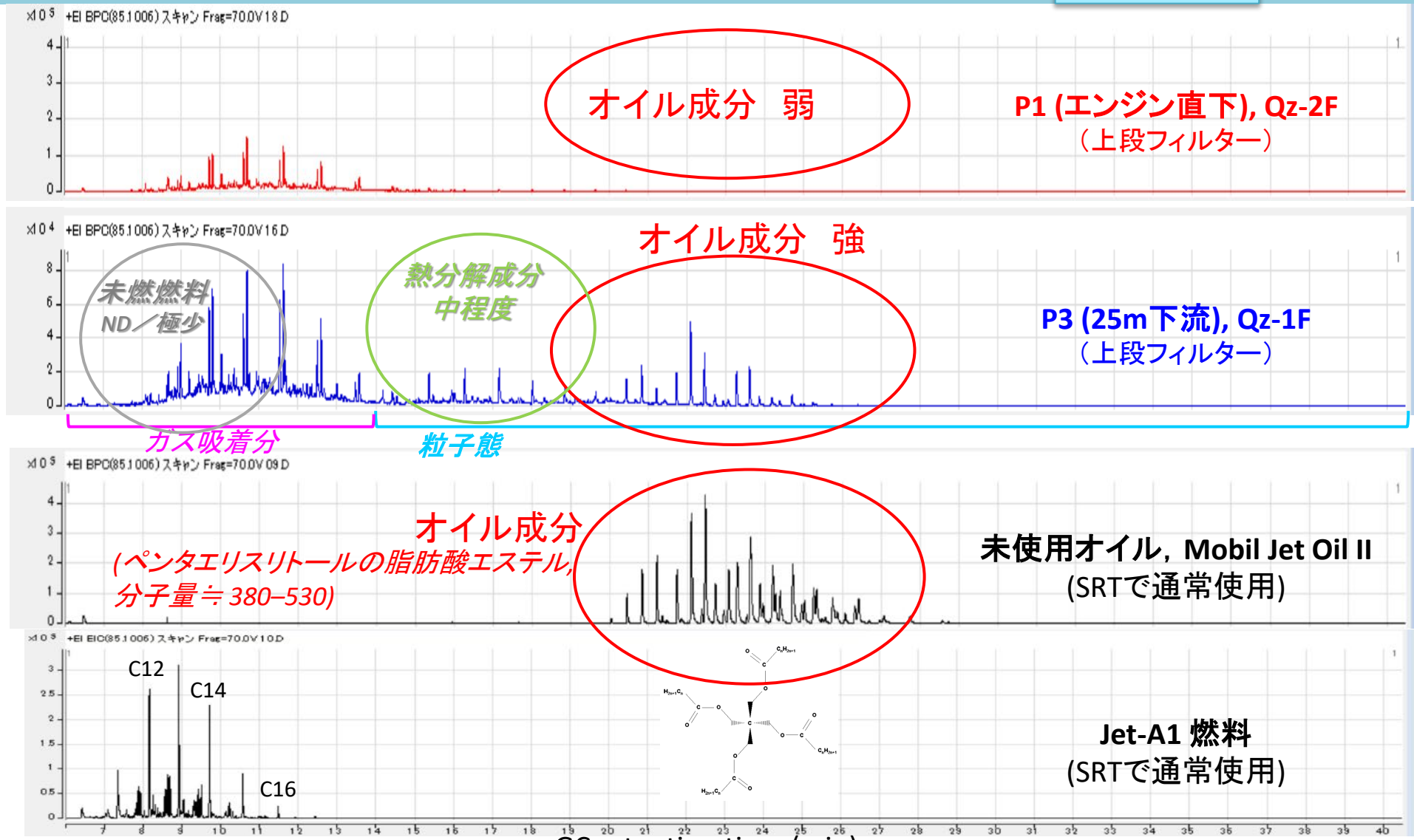
核モード粒子の個数濃度:
エンジン直下 (P1) << 25 m 下流 (P3)

→ 2つの仮説が示唆
1. エンジン下流での核生成 (例:硫酸塩，有機物)
2. 核モード粒子が主燃焼排気とは別の場所から排出され (例: ブリーザーベントからオイルミストとして排出)，主燃焼排気と混合

総粒子

有機組成：炭化水素 (*m/z* 85.1006)の TD-GC/MSマスクロマトグラム

CFM56-7B (2021/4/13)

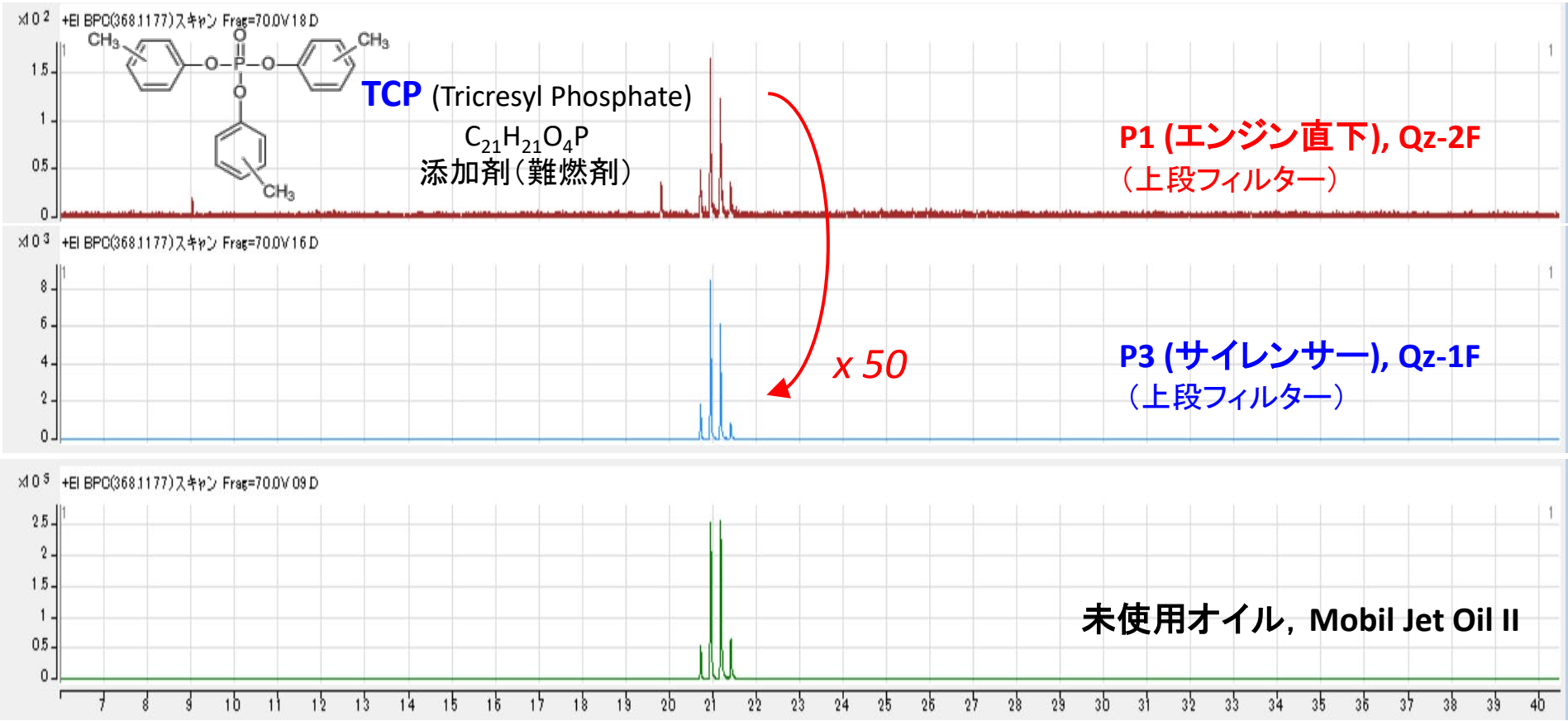


- オイルマーカーが25m下流で排気総粒子から検出　→　オイルが排気粒子に存在することが実証
- 25m下流でのオイルの寄与：　約70%（TD-GC/MSで検出される有機成分のうち）

総粒子

有機組成：TCP = tricresyl phosphate（リン酸トリクレジル）(*m/z* 368.1176)のTD-GC/MSマスクロマトグラム

CFM56-7B（2021/4/13）



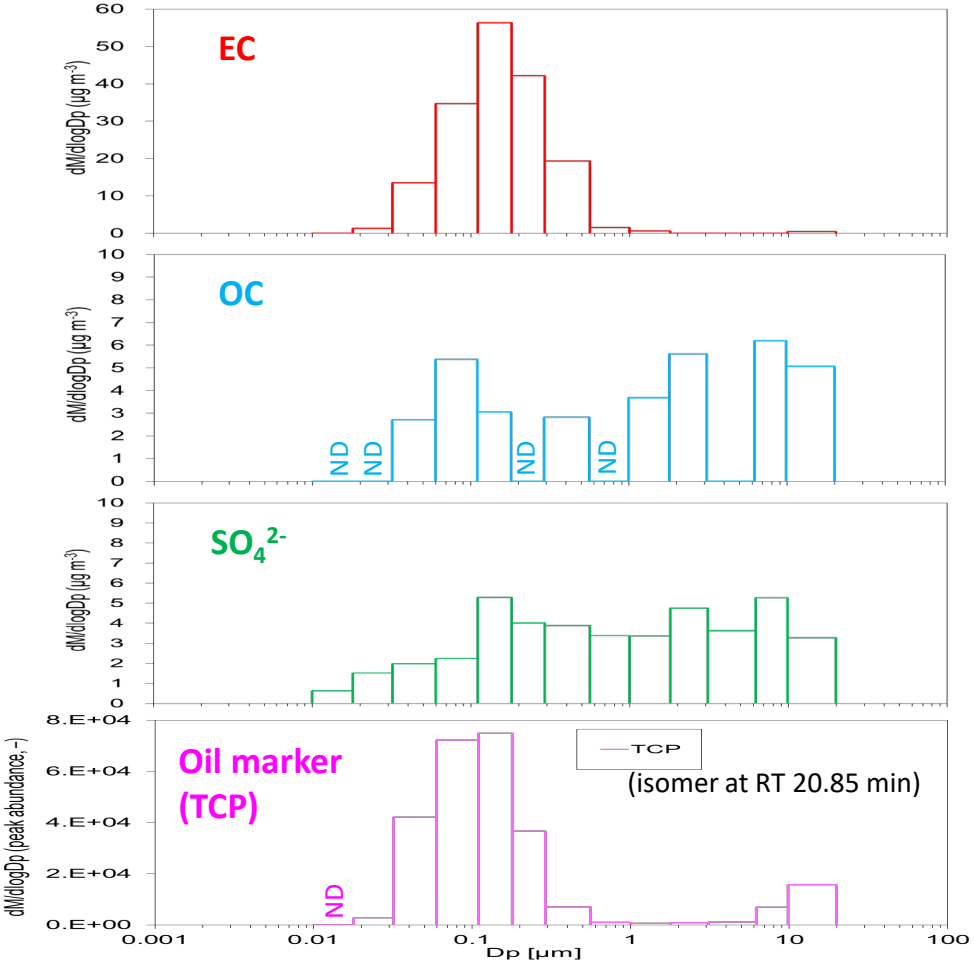
- オイルマーカー濃度はエンジン直下（P1）<<P3（サイレンサー部）

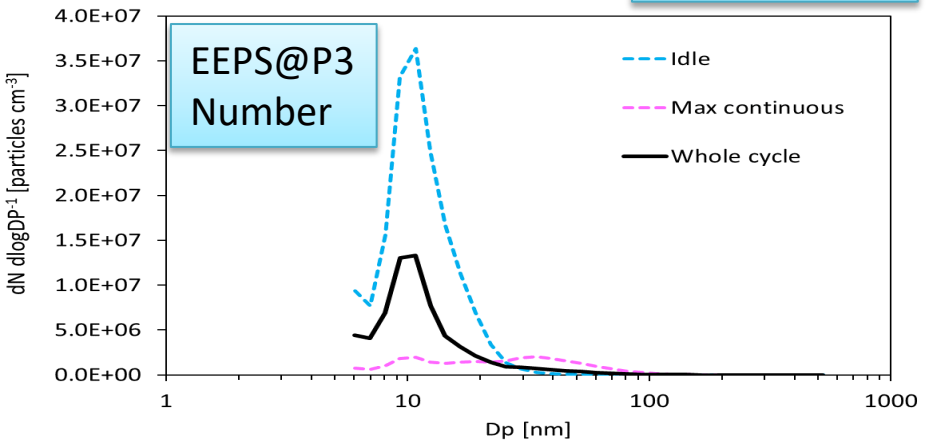
→ 仮説（オイル成分から核生成，またはエンジン下流で燃焼排気にオイル粒子が混合）を支持

(25 m 下流, P3)

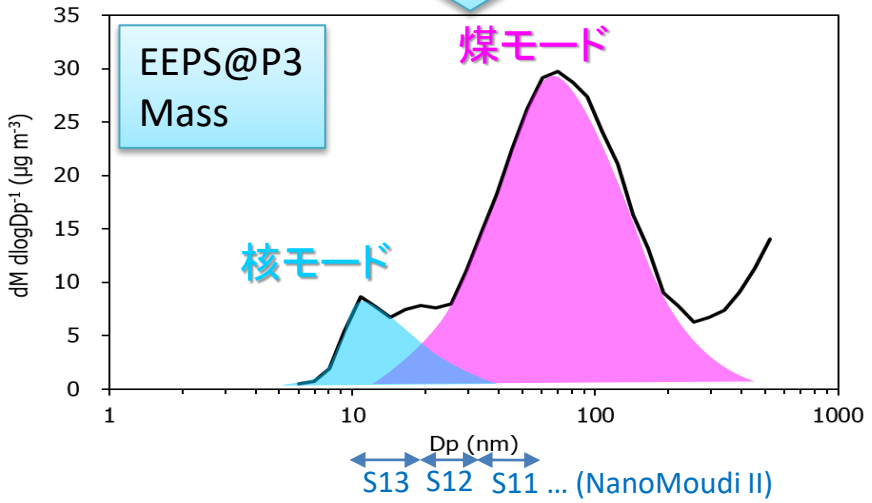
EC, OC, 硫酸イオン, オイルマーカー（TCP）の粒径別濃度

CFM56-7B





Estimate (spherical, ρ = 1 g/cm³)



- Nuclei-mode PM may greatly contribute to the mass at <30 nm

- OC（有機炭素）とオイルマーカー（TCP）のモード径はEC（元素状炭素）より小さい

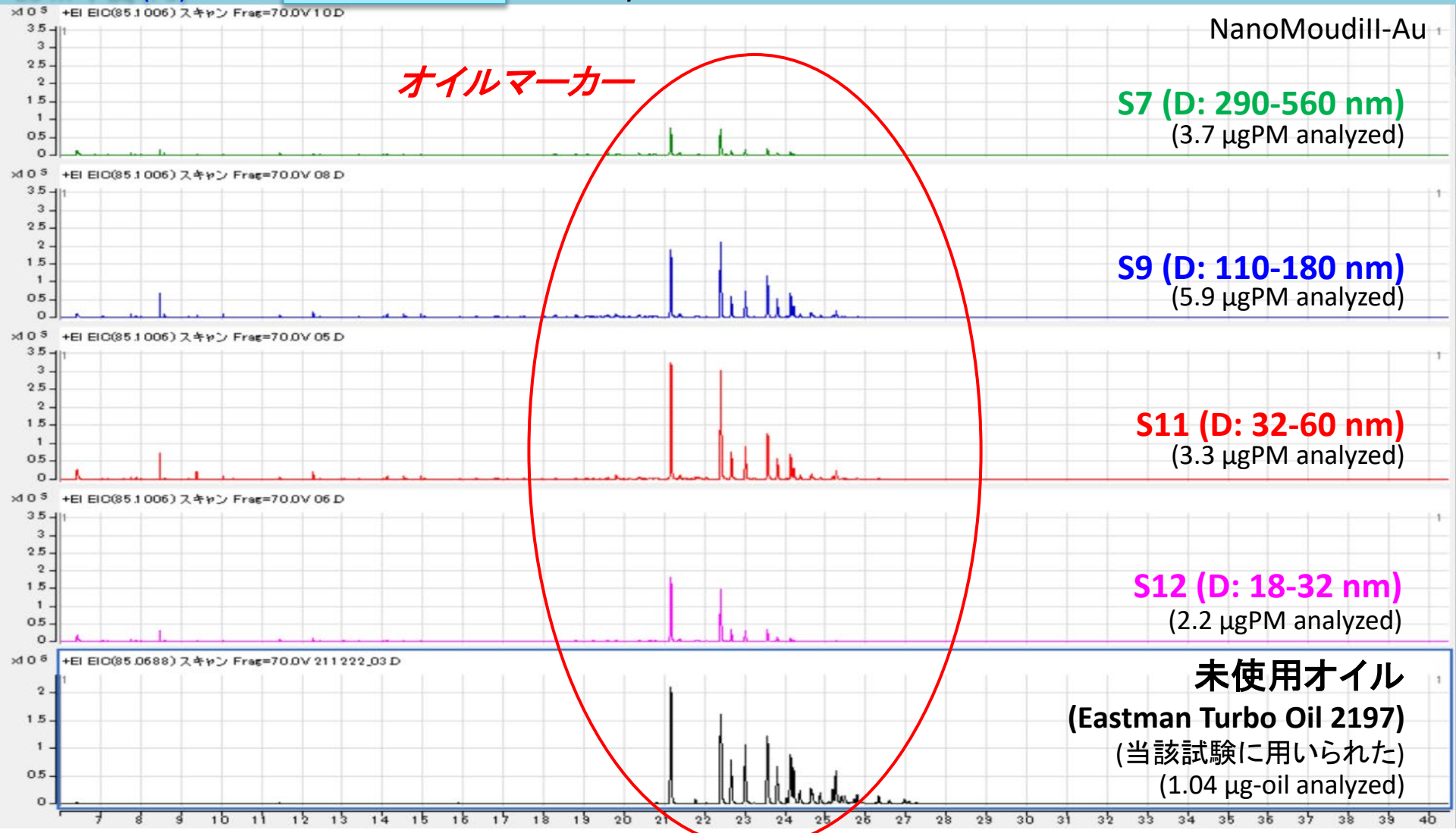
→ 核モード粒子へのオイルの寄与の大きさを示唆

粒径別粒子

25 m 下流 (P3)

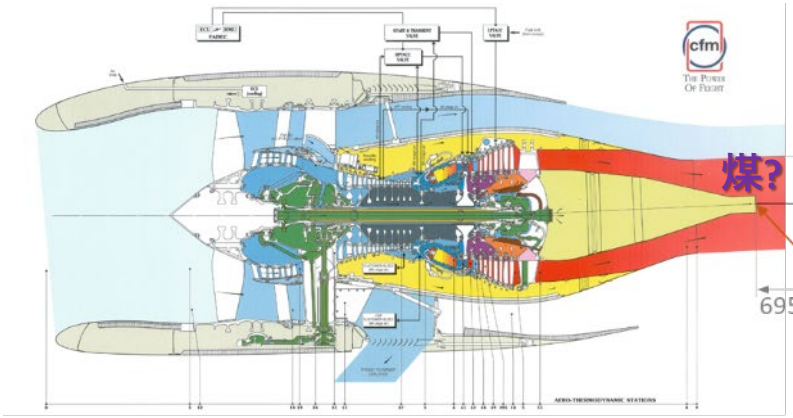
CFM56-7B

有機成分組成：炭化水素成分 (*m/z* 85.1006)の TD-GC/MSマスクロマトグラム



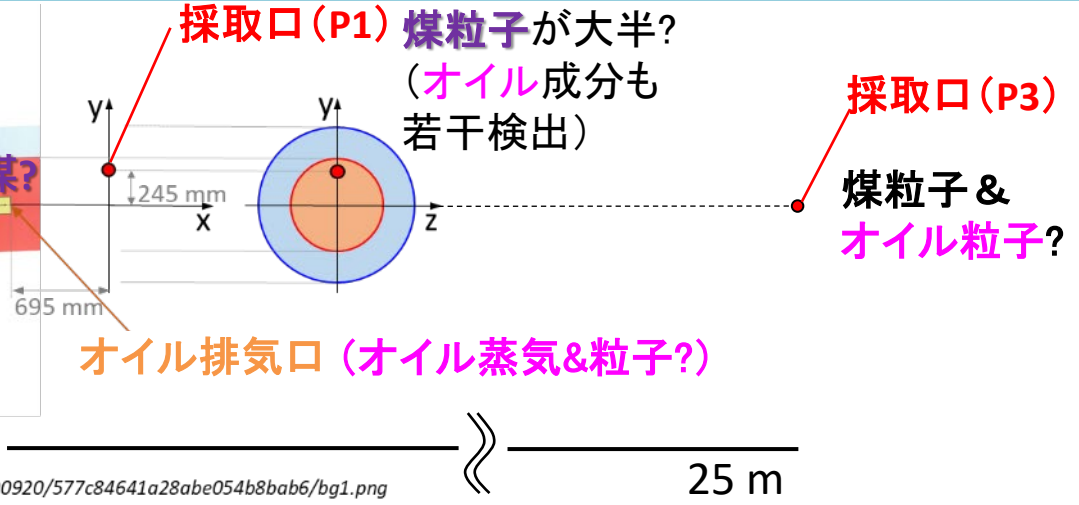
- **排気ナノ粒子 (D: 18–32 and 32–60 nm)中の炭化水素の約80%以上が未燃オイルで構成**

【考察】オイルナノ粒子の排出箇所、生成メカニズム



CFM56-7B SAC Engine Airflow

https://reader020.staticloud.net/reader020/html5/20190920/577c84641a28abe054b8bab6/bg1.png



- P&W社エンジンのブリーザーベント内で，オイル粒子（体積モード径250-350 nm）が検出されている（Yu et al., 2010）
- サブミクロンサイズのオイルミスト(10ケ/cm^3) が加熱（500°C）により蒸発し，冷却（40°C）され再凝縮すると，10^{7}ケ/cm^{3}オーダーの高濃度のオイルナノ粒子(D: 20 nm)が生成する(*Fujitani et al., Aerosol Sci Technol 41, 14-23, 2007*).

⇒ **ブリーザーベントから定常的に大気中に排出されているオイル（ガス状または液状）が主燃焼排気（350～500℃程度）と混合することで瞬間的に蒸発し，その後，25m下流の測定機器に到達するまでの間に室温程度まで冷却され，再凝縮し，ナノ粒子（核モード粒子）を生成した可能性が高い**

まとめ

- スイスで2021年春と秋に**航空機エンジン試験を計7回実施**
- エンジンの25m下流（P3）での粒子個数濃度（全運転モード平均）は**10 nm付近をピークとする一山分布**
- スモークメーター粒子（エンジン直下），**総粒子（エンジン直下，25m下流），ナノ粒子（25m下流）のいずれからもオイルマーカー成分を検出** → **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ることを実証**
- ジェットエンジン排気粒子の**粒径別有機組成を高感度分析法により初めて示した**
- **ブリーザーベントから排出されたオイルミストがエンジン燃焼排気によって一旦蒸発した後，エンジン下流での希釈・冷却過程において再凝縮し，オイルを主体とするナノ粒子を形成した可能性が高い**

謝　辞

資　金

- 環境省　環境研究総合推進費 (5-2004, JPMEERF20205004)
- 国立環境研究所　所内公募型提案研究B
- Scientific Exchanges grant of Swiss National Science Foundation (IZSEZ0_198063)
- Swiss Federal Office of Civil Aviation (FOCA) projects (AGEAIR SFLV 2017-030 and AGEAIR 2 SFLV 2018-048)

研究協力者・施設

- Mr. Frithjof Siegerist *(Ziggy)*, SR Technics, Switzerland
- Mr. Theo Rindlisbacher, Federal Office of Civil Aviation, Switzerland
- Mr. Takeshi Oyama, NIES, Japan
- Mr. Yutaka Sugaya, NIES
- Ms. Masayo Ihara, NIES
- Mr. Takahisa Saito, Green Blue Corp
- Ms. Yasuko Yoshikawa, NIES
- The TEM of the Fundamental Instruments for Measurement and Analysis, NIES was used.

国際連携，行政貢献

【推進費5-1709】

- 本推進費の成果を契機に、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への参画を実現
- 本推進費で既に得られた成果、あるいは今後の追加解析で期待される成果は、これらの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、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 (Fushimi et al., 2019) が一定の影響を与えたことが伺える。
- 本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 (5-2004の研究協力者)。この試験設備では、航空機排ガス規制に関わる重要なデータの取得がなされており、SAE-E31委員会とも深く関係

【推進費5-2004】

- SAE委員会で情報収集および研究成果を発信することで、国際的な規制動向に適切に対応することが可能になると期待
- 伏見が2022年6月のSAE会合でスイスグループとの共同研究の成果（ジェットエンジンからのオイルナノ粒子の生成メカニズム）を発表し，強い関心が寄せられた（発表24分，質疑応答43分）。

- *SAE-E31：Society of Automotive Engineersの航空機排ガス測定に関する国際専門委員会。ICAOと密に連携し，測定法等について助言・提案*
- *ICAO：International Civil Aviation Organization，国際民間航空機関。民間航空機の排ガス規制を統括*

令和 4 年 IIAE 大気環境総合センター　定期セミナー

環境研究推進費研究紹介第 3 回『船舶と航空機の大気排出ガス』

主催：一般財団法人大気環境総合センター

本誌の無断転載を禁じます