

都市域および都市のバックグラウンド地点に おける大気中VOC濃度について

環境資源研究科 星 純也

【本日の発表内容】

大気汚染について

光化学オキシダントと揮発性有機化合物（VOC）

都市域の大気中VOCについて

- ・ 東京都の大気中VOCのモニタリング
- ・ VOC排出量と大気濃度の関係
- ・ 大気質シミュレーションと実測値の比較

バックグラウンド地点の大気中VOCについて

- ・ 大気中VOCのバックグラウンド（BG）濃度観測

今後の予定

【本日の発表内容】

大気汚染について

光化学オキシダントと揮発性有機化合物（VOC）

都市域の大気中VOCについて

- ・ 東京都の大気中VOCのモニタリング
- ・ VOC排出量と大気濃度の関係
- ・ 大気質シミュレーションと実測値の比較

バックグラウンド地点の大気中VOCについて

- ・ 大気中VOCのバックグラウンド（BG）濃度観測

今後の予定

大気汚染と環境基準

● 大気汚染

工場，事業所，自動車，家庭から排出された各種の汚染物質によって大気が通常の組成と異なった状態となること。これが人の健康を害し，生活を妨げ，動植物に被害を与える。（ブリタニカ国際大百科事典）

汚染された地域に居る限り影響を避けられない



11種の大気汚染物質に環境基準を設定

● 環境基準

人の健康の保護及び生活環境の保全のうえで維持されることが望ましい基準
（行政上の政策目標）

2022年度現在、東京で環境基準非達成の大気汚染物質
光化学オキシダント（ O_x ）のみ

主な大気汚染物質と一次排出と二次生成

環境基準設定項目

	排出・生成機構		原因物質種	
	一次排出	二次生成	有機物	無機物
二酸化いおう (SO ₂)	●			●
一酸化炭素 (CO)	●			●
浮遊粒子状物質 (SPM)	●	●	●	●
光化学オキシダント (O _x)		●	●	●
二酸化窒素 (NO ₂)	●	●		●
ベンゼン	●		●	
トリクロロエチレン	●		●	
テトラクロロエチレン	●		●	
ダイオキシン類	●		●	
ジクロロメタン	●		●	
微小粒子状物質 (PM _{2.5})	●	●	●	●

その他の大気汚染物質

有機ハロゲン物質（**クロロホルム**等）、炭化水素（**トルエン**等）、アルデヒド類（**ホルムアルデヒド**等）等の有機物質

重金属類（ニッケル、クロム等）等の無機物質

赤字：環境基準未達成項目

青字：揮発性有機化合物（VOC）類

【本日の発表内容】

大気汚染について

光化学オキシダントと揮発性有機化合物（VOC）

都市域の大気中VOCについて

- ・ 東京都の大気中VOCのモニタリング
- ・ VOC排出量と大気濃度の関係
- ・ 大気質シミュレーションと実測値の比較

バックグラウンド地点の大気中VOCについて

- ・ 大気中VOCのバックグラウンド（BG）濃度観測

今後の予定

光化学オキシダントとは

光化学オキシダント (O_x) の定義 :

光化学オキシダントとは、オゾン、パーオキシアセチルナイトレートその他の光化学反応により生成される酸化性物質（中性ヨウ化カリウム溶液からヨウ素を遊離するものに限り、二酸化窒素を除く。）

成分のほとんどがオゾン (O_3)

光化学オキシダントの影響

《健康影響》

- ・目や喉への刺激
- ・呼吸が苦しい
- ・めまい、頭痛

《農作物・植物被害》

- ・葉の変色
- ・収量の減少

光化学スモッグ

光化学オキシダント濃度が高くなり、遠くの建物や山に、もやがかかったような状態になる現象

東京都での光化学スモッグ注意報発令

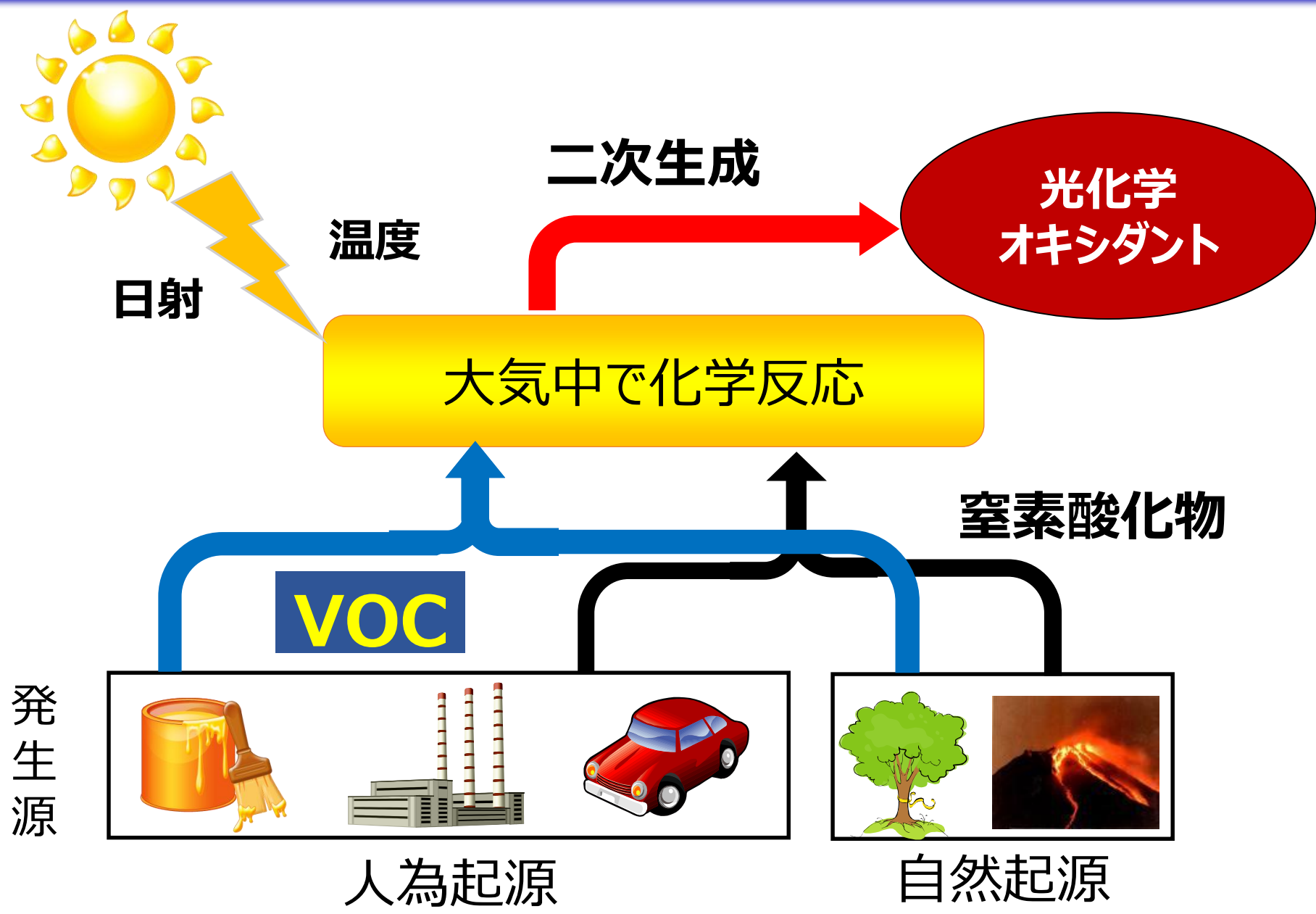
2023年:4日、2022年:7日、2021年：6日、2020年度：6日



症状が重く、酸素吸入をうける子供

写真集 記録「東京の公害」

<https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/data/photo/scenery/index.html>



- 揮発性有機化合物（VOC）
Volatile Organic Compoundsの略
- 大気中に排出され、又は飛散した時に気体である有機化合物の**総称**
- トルエン、キシレン、酢酸エチルなど、工業用途の主なもので約 2 0 0 種類
- 塗料の溶剤（シンナー）、接着剤、インキ、脱脂洗浄剤などに含まれる
- 自然由来（植物など）の排出源もある
- 光化学オキシダントの原因物質の一つとなるほか、それ自身が有害性を持つ物質もある



【本日の発表内容】

大気汚染について

光化学オキシダントと揮発性有機化合物（VOC）

都市域の大気中VOCについて

- ・ **東京都の大気中VOCのモニタリング**
- ・ VOC排出量と大気濃度の関係
- ・ 大気質シミュレーションと実測値の比較

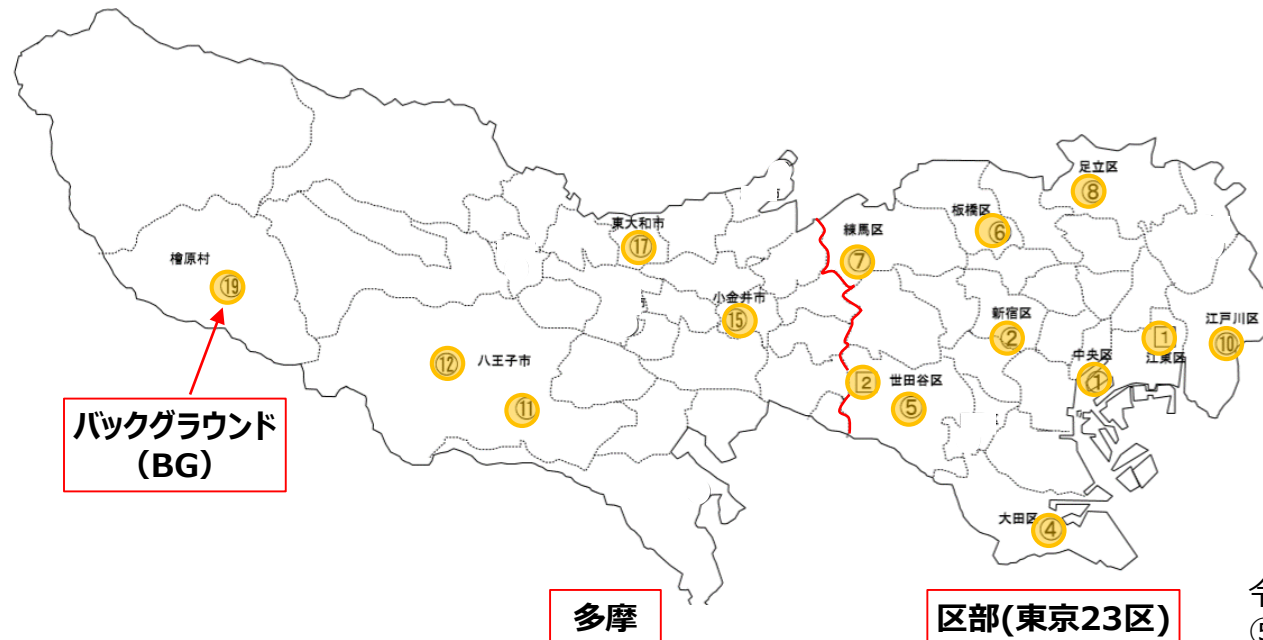
バックグラウンド地点の大気中VOCについて

- ・ 大気中VOCのバックグラウンド（BG）濃度観測

今後の予定

東京都のVOCモニタリング地点

- ・有害大気汚染物質モニタリング調査（1998年度～）
- ・VOC多成分調査（2008年度～）



令和3年（2021）年度から
⑤世田谷区世田谷→目黒区碑文谷に変更

● 15地点

一般環境大気測定局 12地点
自動車排出ガス測定局 2地点
その他（バックグラウンド） 1地点
 檜原大気測定所
毎月1回の調査 ➡ 年平均値

◆ 試料採取

月1回、24時間連続採取

◆ 分析方法

VOC多成分	: キャニスター採取-GC/MS
VOC多成分（低沸点）	: キャニスター採取-GC/FID
アルデヒド類	: DNPH含浸カートリッジ採取-LC/MS
酸化エチレン	: HBrコーティングカートリッジ採取-GC/MS

東京都のVOCモニタリング対象物質

計111物質

● 2000年度以降継続測定している19物質

アルカン・シクロアルカン

- 1 エタン
- 2 プロパン
- 3 イソブタン
- 4 n-ブタン
- 5 イソペンタン
- 6 n-ペンタン
- 7 2,2-ジメチルブタン
- 8 シクロペンタン
- 9 2,3-ジメチルブタン
- 10 2-メチルペンタン
- 11 3-メチルペンタン
- 12 n-ヘキサン
- 13 メチルシクロペンタン
- 14 2,4-ジメチルペンタン
- 15 シクロヘキサン
- 16 2-メチルヘキサン
- 17 2,3-ジメチルペンタン
- 18 3-メチルヘキサン
- 19 2,2,4-トリメチルペンタン
- 20 n-ヘプタン
- 21 メチルシクロヘキサン
- 22 2,3,4-トリメチルペンタン
- 23 2-メチルヘプタン
- 24 3-メチルヘプタン
- 25 n-オクタン
- 26 n-ノナン
- 27 n-デカン
- 28 n-ウンデカン

アルケン

- 29 エチレン
- 30 プロピレン
- 31 アセチレン
- 32 トランス-2-ブテン
- 33 1-ブテン
- 34 シス-2-ブテン
- 35 1,3-ブタジエン
- 36 1-ペンテン
- 37 イソプレン
- 38 トランス-2-ペンテン
- 39 シス-2-ペンテン
- 40 2-メチル-1-ペンテン
- 41 α-ピネン
- 42 カンフェン
- 43 β-ピネン
- 44 リモネン

芳香族炭化水素

- 45 ベンゼン
- 46 トルエン
- 47 エチルベンゼン
- 48 m-キシレン, p-キシレン
- 49 スチレン
- 50 o-キシレン
- 51 イソプロピルベンゼン
- 52 プロピルベンゼン
- 53 4-エチルトルエン
- 54 1,3,5-トリメチルベンゼン
- 55 2-エチルトルエン
- 56 1,2,4-トリメチルベンゼン
- 57 1,2,3-トリメチルベンゼン
- 58 m-ジエチルベンゼン
- 59 p-ジエチルベンゼン

ハロゲン化合物

- 60 クロロメタン
- 61 塩化ビニルモノマー
- 62 ブロモメタン
- 63 クロロエタン
- 64 1,1-ジクロロエチレン
- 65 ジクロロメタン
- 66 3-クロロ-1-プロペン
- 67 1,1-ジクロロエタン
- 68 シス-1,2-ジクロロエチレン
- 69 クロロホルム
- 70 1,2-ジクロロエタン
- 71 1,1,1-トリクロロエタン
- 72 1,2-ジクロロプロパン
- 73 トリクロロエチレン
- 74 シス-1,3-ジクロロプロパン
- 75 トランス-1,3-ジクロロプロパン
- 76 1,1,2-トリクロロエタン
- 77 1,2-ジブロモエタン
- 78 テトラクロロエチレン
- 79 クロロベンゼン
- 80 1,1,2,2-テトラクロロエタン
- 81 ベンジルクロライド
- 82 m-ジクロロベンゼン
- 83 p-ジクロロベンゼン
- 84 o-ジクロロベンゼン
- 85 1,2,4-トリクロロベンゼン
- 86 ヘキサクロロ-1,3-ブタジエン

含酸素化合物

- 97 アセトン
- 98 イソプロピルアルコール
- 99 酢酸メチル
- 100 n-プロパノール
- 101 メチル-tert-ブチルエーテル
- 102 メチルエチルケトン
- 103 酢酸エチル
- 104 イソブタノール
- 105 n-ブタノール
- 106 メチルイソブチルケトン
- 107 酢酸ブチル

フロン・四塩化炭素等

- 87 HCFC-22
- 88 CFC-12
- 89 HCFC-142
- 90 CFC-114
- 91 HCFC-123
- 92 HCFC-141
- 93 HCFC-225ca
- 94 HCFC-225cb
- 95 CFC-113
- 96 四塩化炭素

アルデヒド類

- 108 ホルムアルデヒド
- 109 アセトアルデヒド

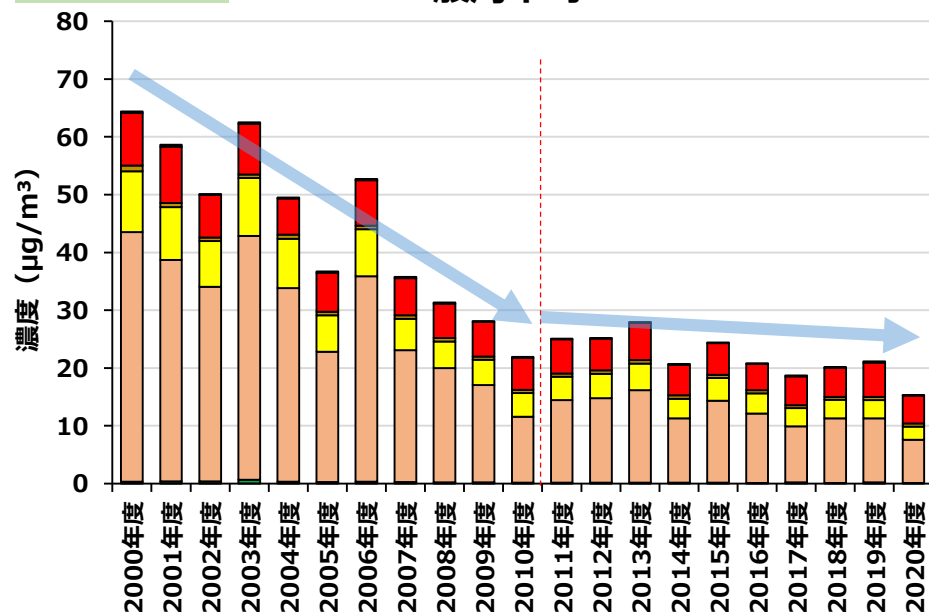
その他（酸化エチレン等）

- 110 アクリロニトリル
- 111 酸化エチレン

東京都の大気中VOC濃度のトレンド

19物質合計

一般局平均

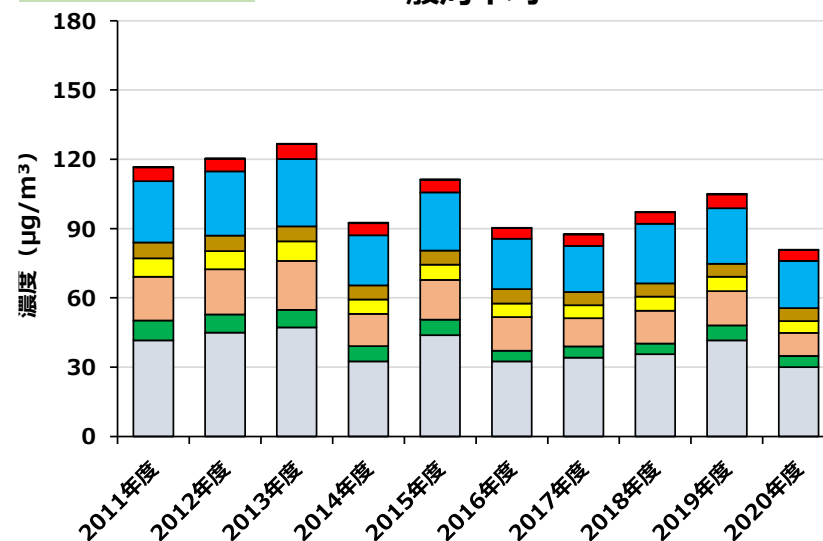


➤ 2011年度以降の濃度は微減傾向

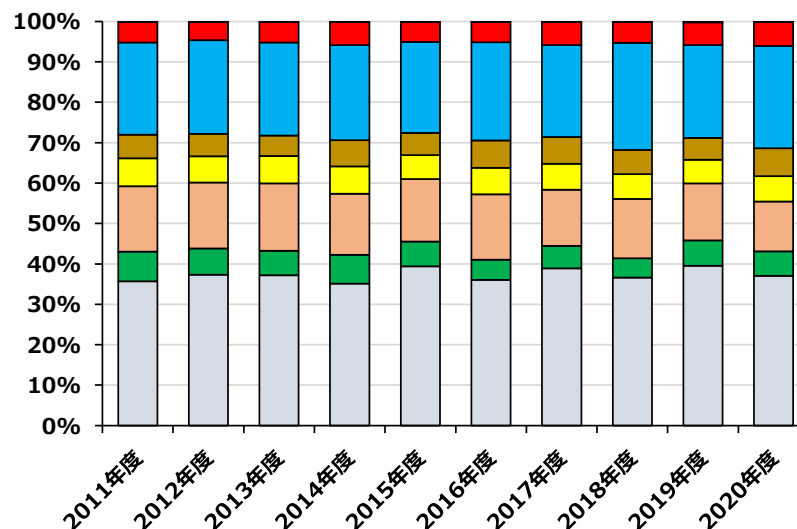
➤ VOC成分組成の変化は少ない

111物質合計

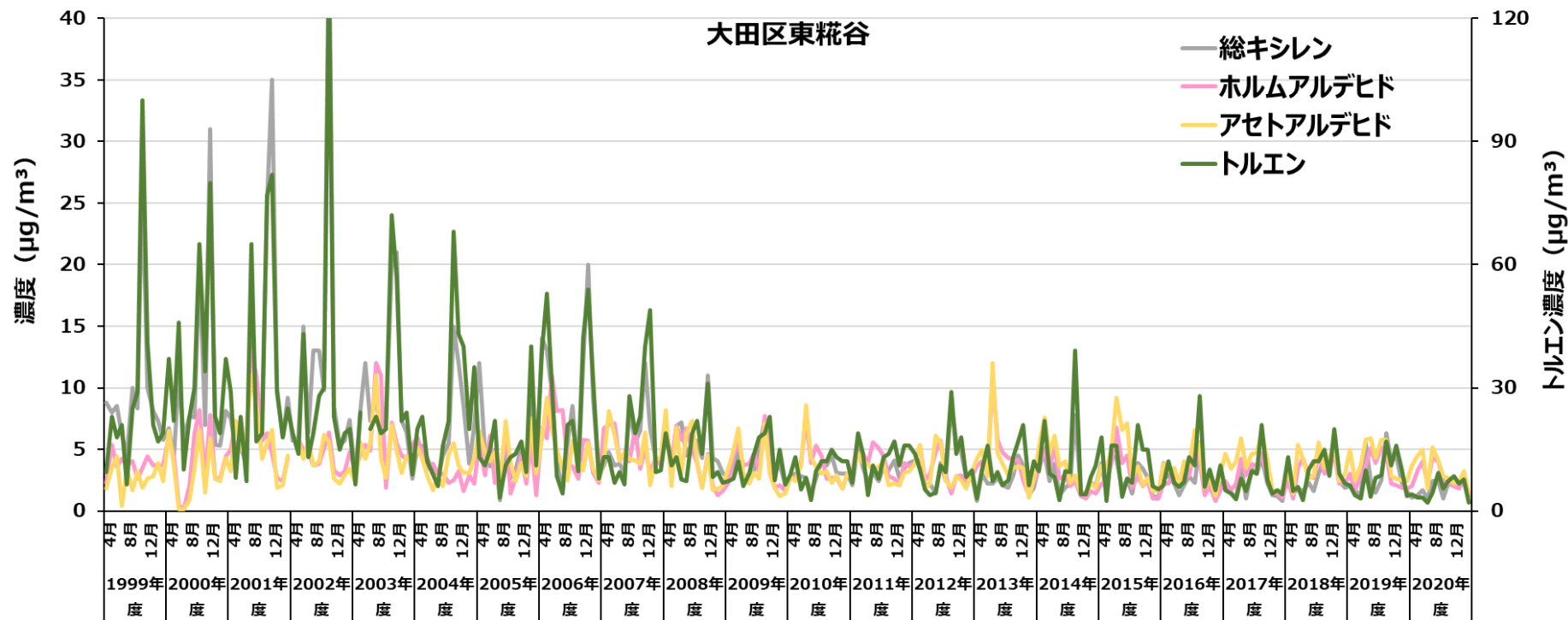
一般局平均



一般局平均



VOC個別成分の月別濃度のトレンド



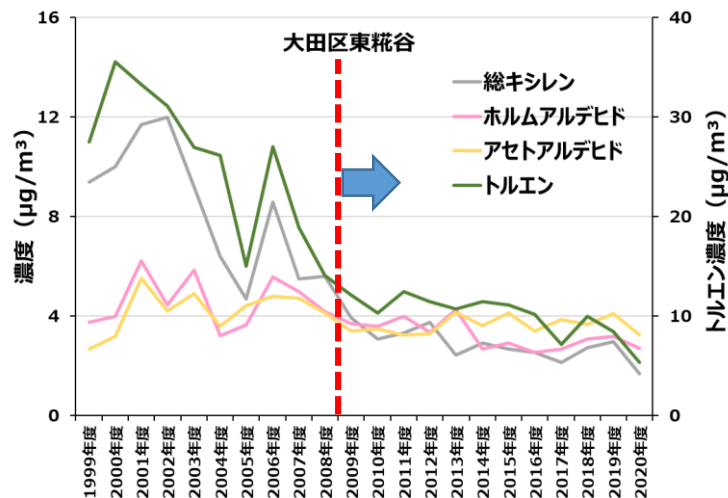
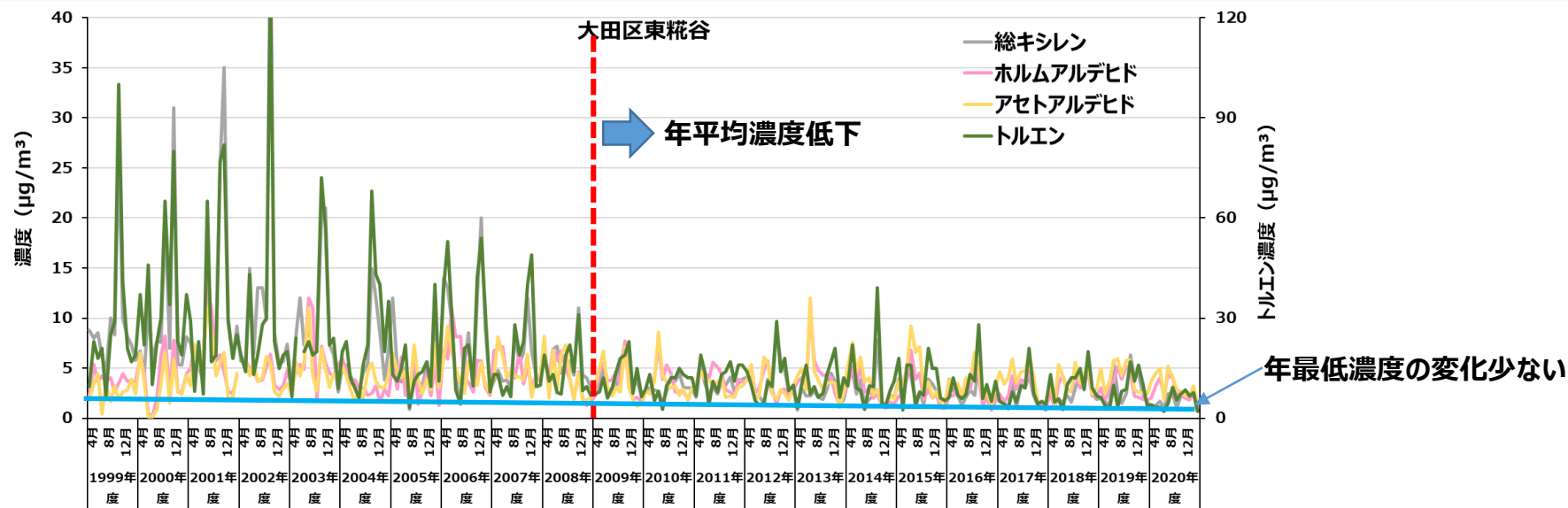
- トルエン、キシレンは2008年度くらいまでは月変動が大きく、その後は変動は少ない

地域内に発生源が存在し、気象条件や排出状況に応じ、ピーク状の高濃度としてモニタリングデータに反映

図3-1 調査地点配置図



VOC個別成分の月別濃度のトレンド



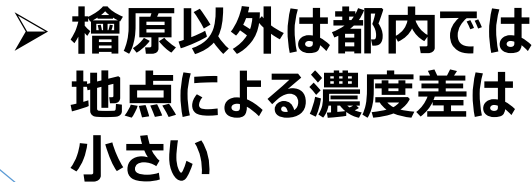
➤ 月変動が小さくなると共に年平均濃度も低下

発生源の減少が高濃度ピークの減少に繋がり、年平均濃度が低下

➤ 最低濃度は経年的に変化はない

地域内の広域的・経常的な排出や、地域外からの流入による地域のベース濃度を反映

檜原以外の都内全地点で同様の傾向



【本日の発表内容】

大気汚染について

光化学オキシダントと揮発性有機化合物（VOC）

都市域の大気中VOCについて

- ・ 東京都の大気中VOCのモニタリング
- ・ **VOC排出量と大気濃度の関係**
- ・ 大気質シミュレーションと実測値の比較

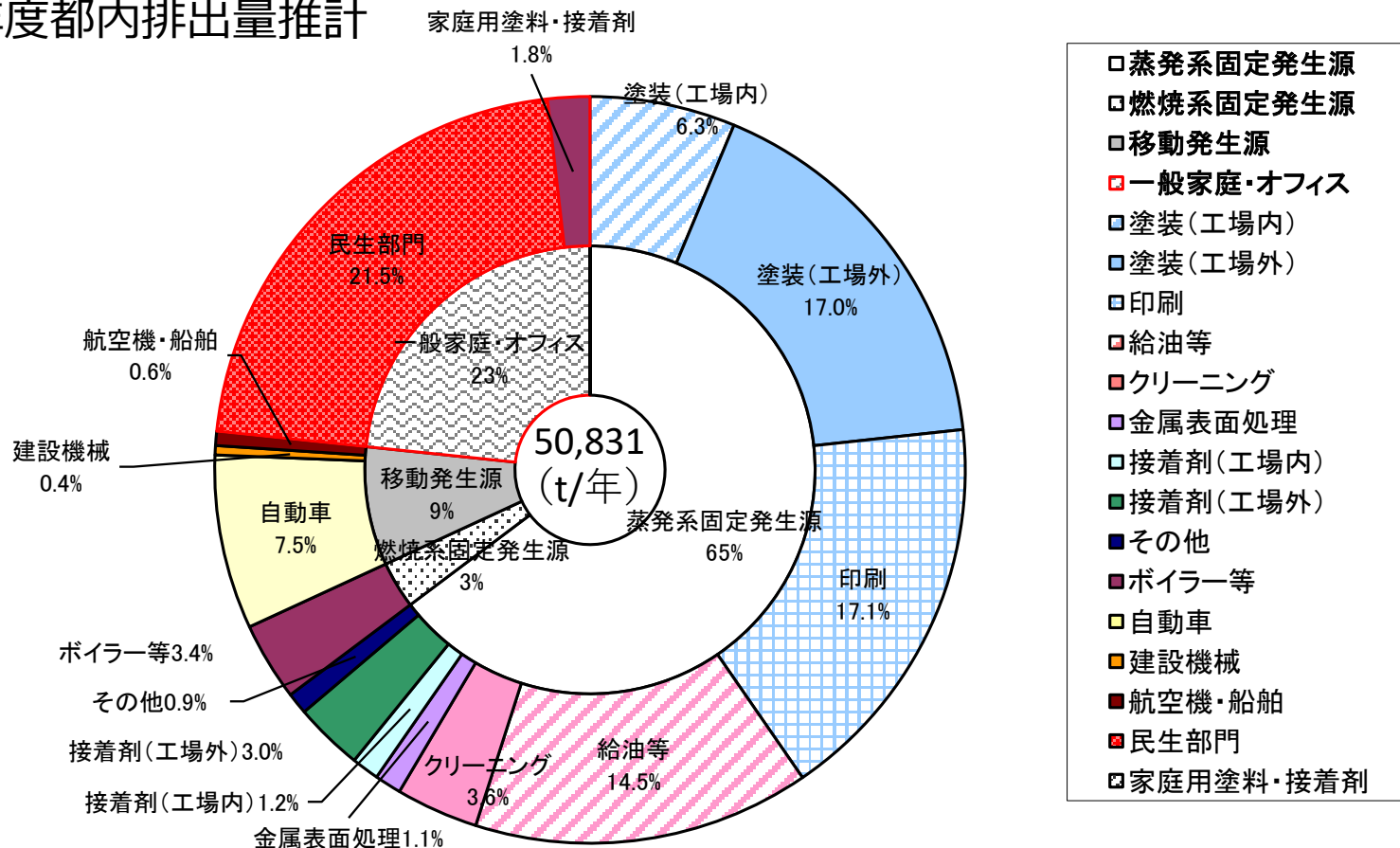
バックグラウンド地点の大気中VOCについて

- ・ 大気中VOCのバックグラウンド（BG）濃度観測

今後の予定

VOC排出量推計（都内の人為起源VOC）

2020年度都内排出量推計

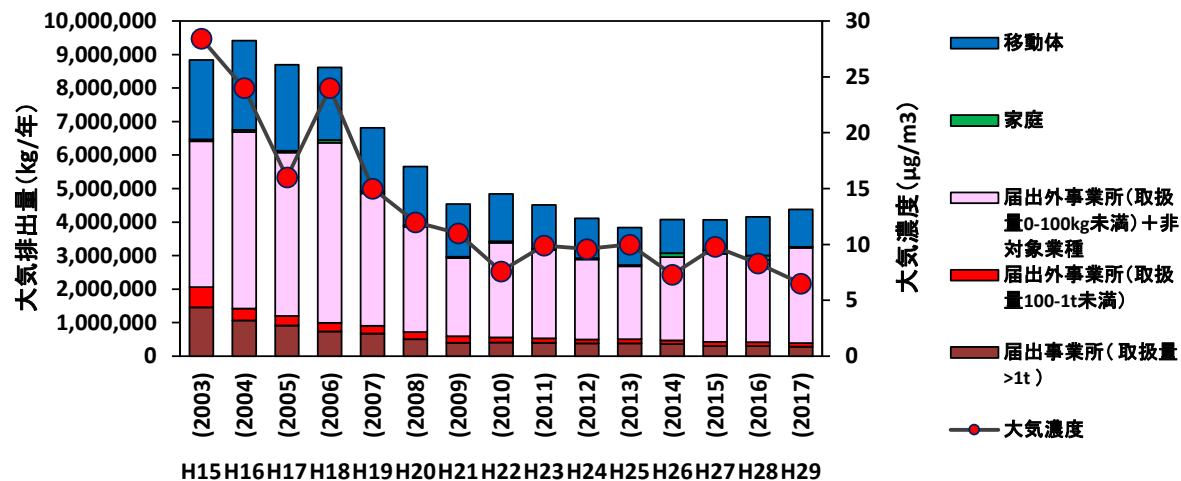


東京都環境局推計

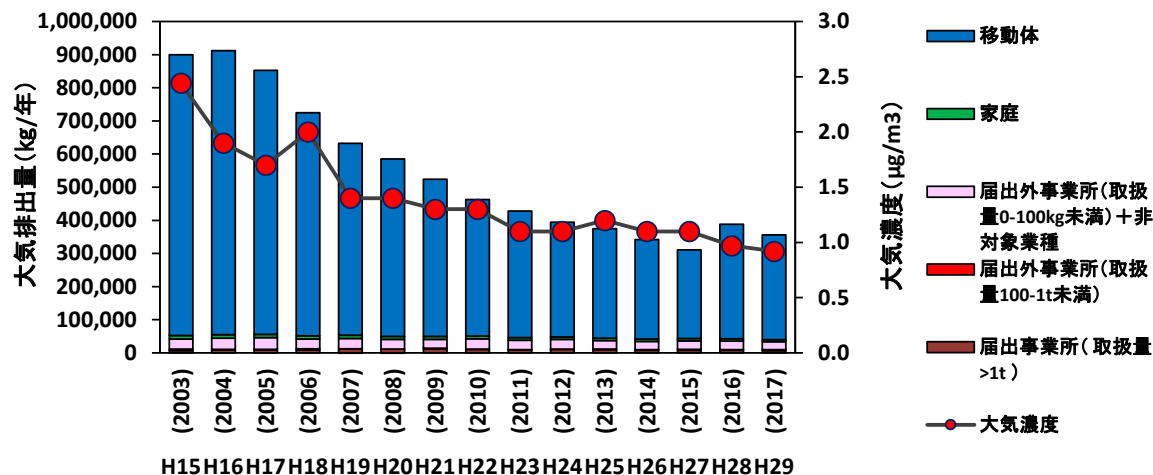
- 都内の人為起源VOCは蒸発系固定発生源（VOCを原材料や製造過程で使っている工場等）からの排出が2/3を占める

VOC排出量と大気濃度の推移

トルエン



ベンゼン



星ら (2021), 環境化学会誌
Vol.31より改変

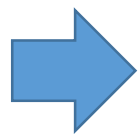
➤ 個別物質のVOC排出量と大気濃度の経年変化は多くの物質で整合的

排出量の削減が大気濃度の低減につながっていた

大気濃度の将来予測

【地域のVOC濃度】

地域での排出 + VOCの二次生成 + 地域外からの移流



地域の排出量を減らせば大気中のVOC濃度が低下するとは限らない

- 将来、排出量を減らせば大気中VOC濃度が低減するか？
- VOC排出量あるいは大気中VOC濃度が減れば光化学オキシダント濃度は低減するか？
- どの地域のVOC排出量を減らせばどの地域で光化学オキシダントが低減されるか？



将来予測の必要性

大気質シミュレーションによる濃度計算が有用

【本日の発表内容】

大気汚染について

光化学オキシダントと揮発性有機化合物（VOC）

都市域の大気中VOCについて

- ・ 東京都の大気中VOCのモニタリング
- ・ VOC排出量と大気濃度の関係
- ・ **大気質シミュレーションと実測値の比較**

バックグラウンド地点の大気中VOCについて

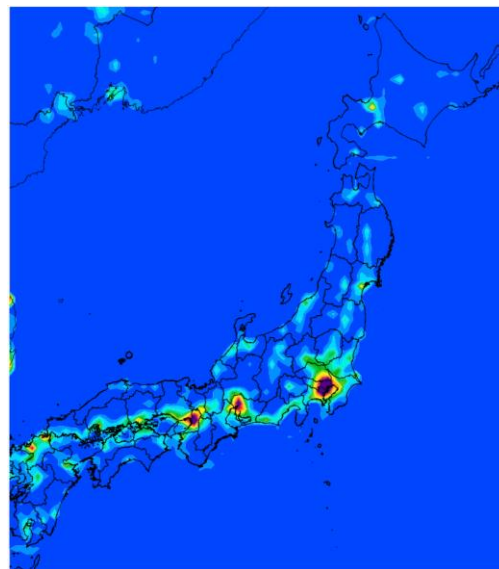
- ・ 大気中VOCのバックグラウンド（BG）濃度観測

今後の予定

3次元大気質シミュレーション

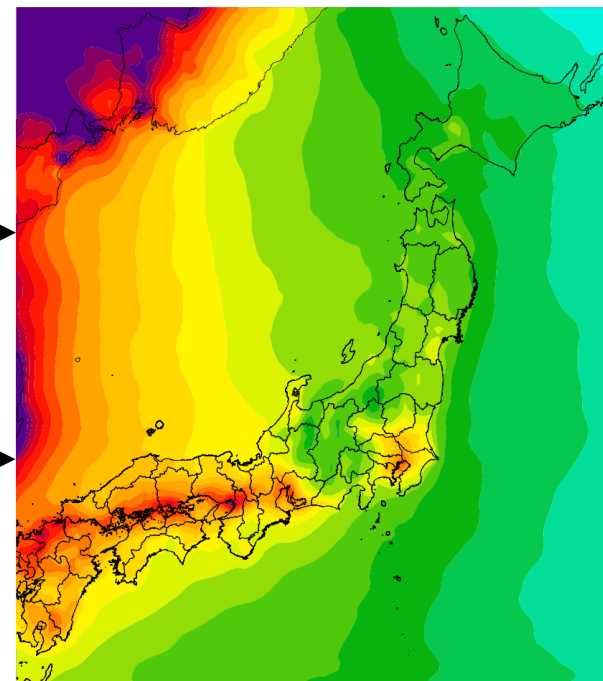
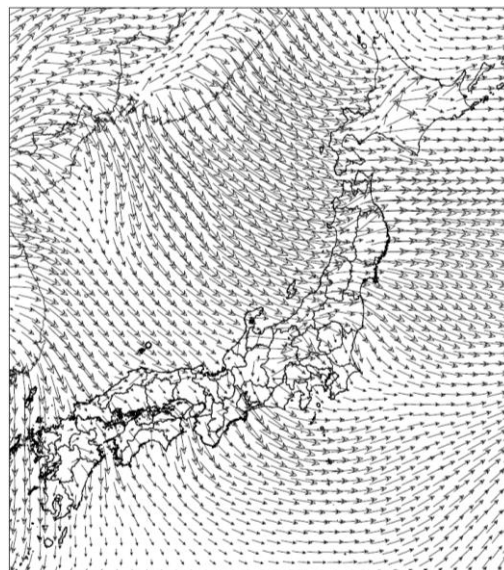
排出インベントリ

発生源から
排出される
原因物質の
時々刻々の
排出量を入力



領域気象モデル

風、気温、
湿度、日射量
などの
気象要素の
時々刻々の
変化を計算



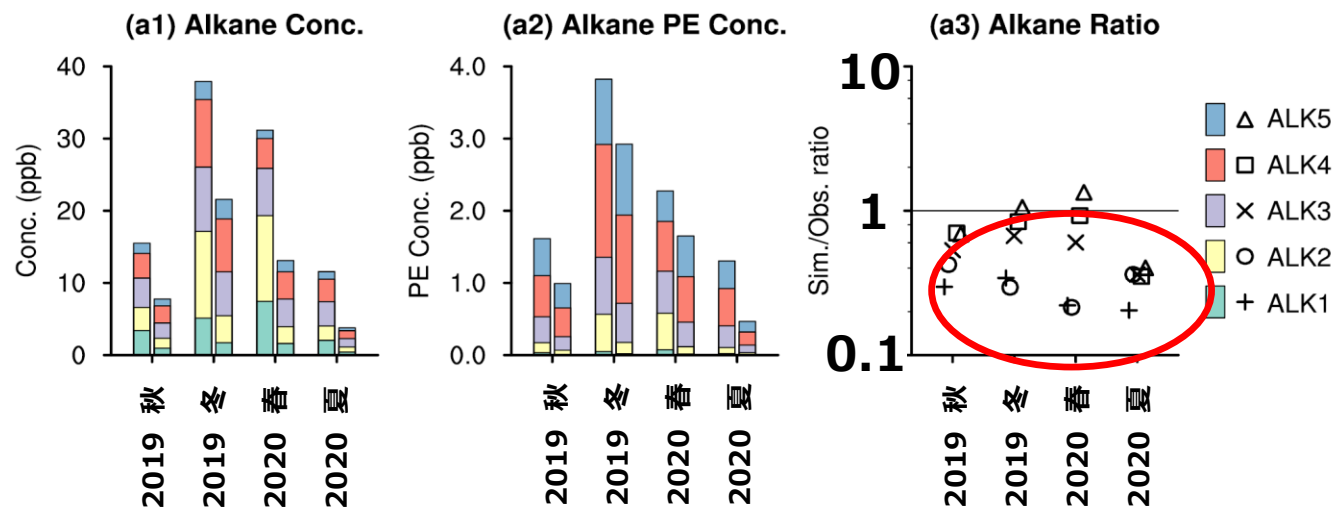
領域 (Regional) 化学輸送モデル

光化学反応を含む
大気中の
さまざまな過程による
汚染物質の時々刻々の
濃度変化を計算

先行研究におけるVOC濃度再現性の検証

- 2019年秋、冬、2020年春、夏の各季節2日間、東京都区内の5地点において、VOC個別成分（139成分）濃度を観測
- 同期間を対象に大気質シミュレーションを実行し、VOC成分濃度の再現性を検証

【アルカン類の例】



左：観測値 右：計算値

茶谷ら（2022）, 大気環境学会誌 Vol.57より改変

観測値と計算値が合っていない

- アルカン、アルケン、アルキンは計算値が過少
- 芳香族は計算値が過大

観測値との乖離の原因

- 日本国内の排出量推計の誤差
- 越境輸送を通じた半球規模での濃度の過小評価

➡ 計算領域の境界濃度に誤差がある



d01



d02



d04



茶谷ら (2022) , 大気環境学会誌 Vol.57より改変

◆ 境界濃度を実測してモデルの計算値と比較・補正

バックグラウンド地点での濃度観測

【本日の発表内容】

大気汚染について

光化学オキシダントと揮発性有機化合物（VOC）

都市域の大気中VOCについて

- ・ 東京都の大気中VOCのモニタリング
- ・ VOC排出量と大気濃度の関係
- ・ 大気質シミュレーションと実測値の比較

バックグラウンド地点の大気中VOCについて

- ・ 大気中VOCのバックグラウンド（BG）濃度観測

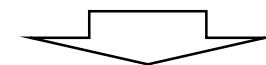
今後の予定

バックグラウンド（BG）濃度について



【① + ②】
日本全国のBG

【① + ② + ③】
関東のBG

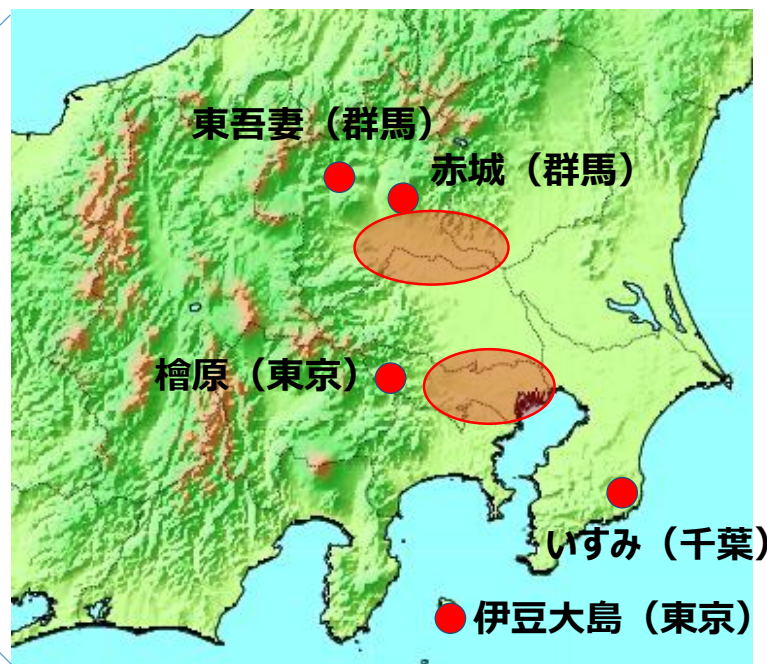


④のうちの① + ②
および、③の影響を
評価

バックグラウンド濃度

対象地域（関東）
に影響を与える、大
気中に恒常的に存在
あるいは対象地域外
で排出された濃度

バックグラウンド濃度の観測地点



都市部モニタリング
エリア

鳥取：大陸の影響も受ける日本のBG地点

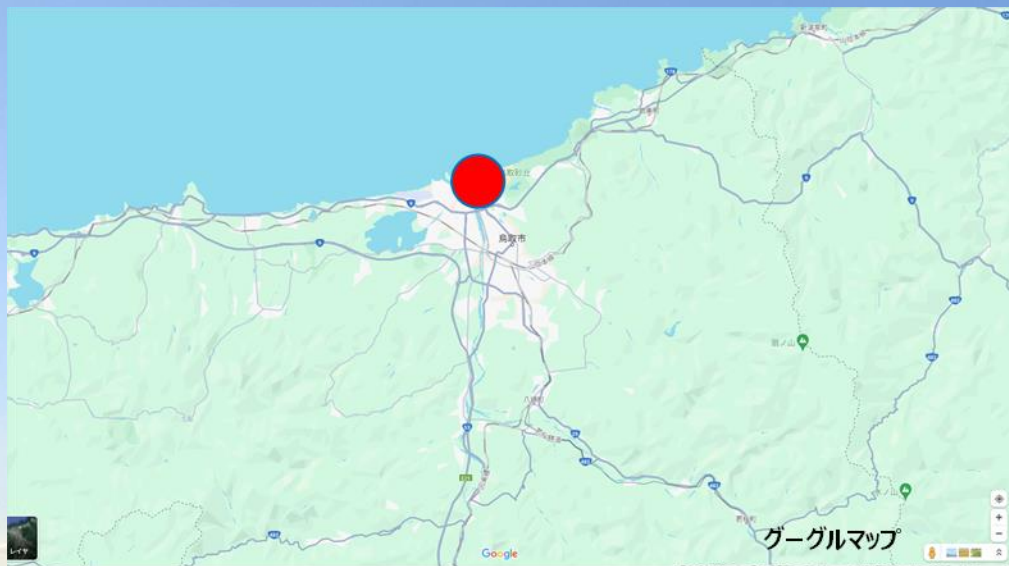
八丈島：これまでのデータの少なく、大陸からの影響が小さいと考えられる太平洋側のBG地点

小笠原：周囲1000kmに都市が存在しない半球的BG地点

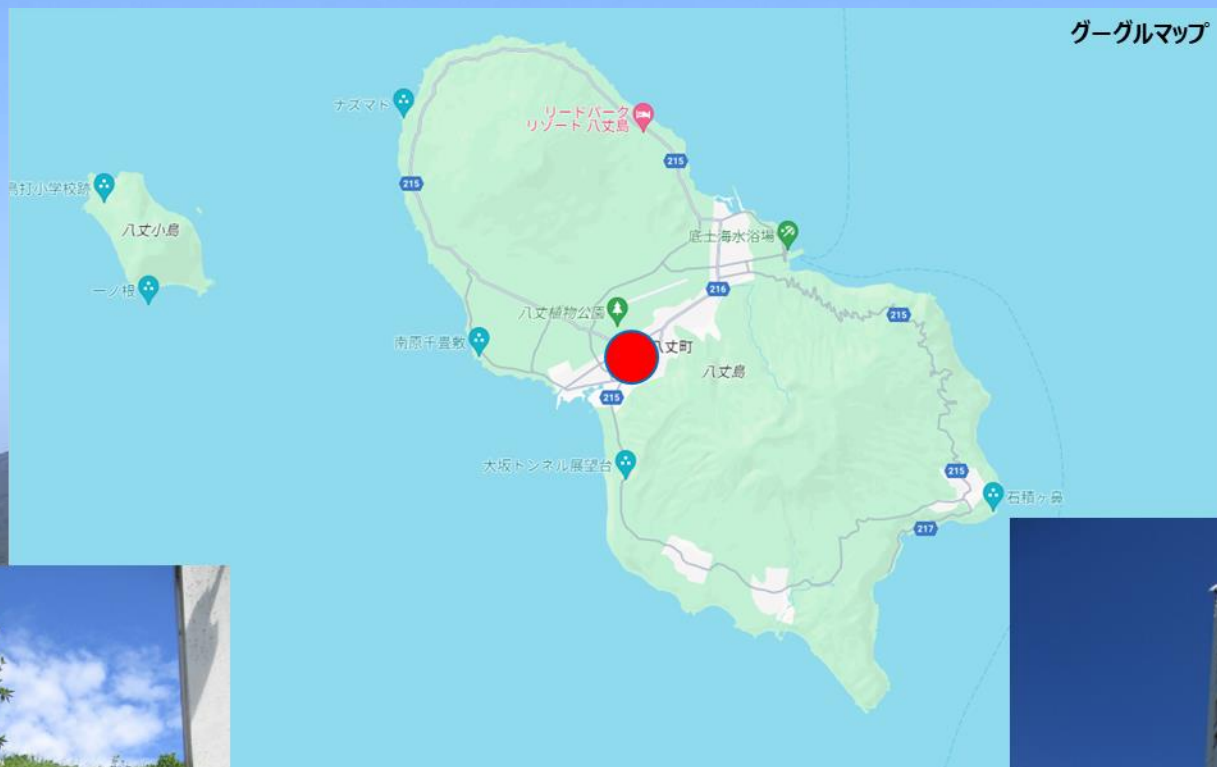
東吾妻、赤城、檜原、伊豆大島、いすみ：

本研究におけるBGの影響の評価地域である東京（大都市部）、群馬（地方都市部）を取り囲むように、関東平野外縁部に調査地点を設定

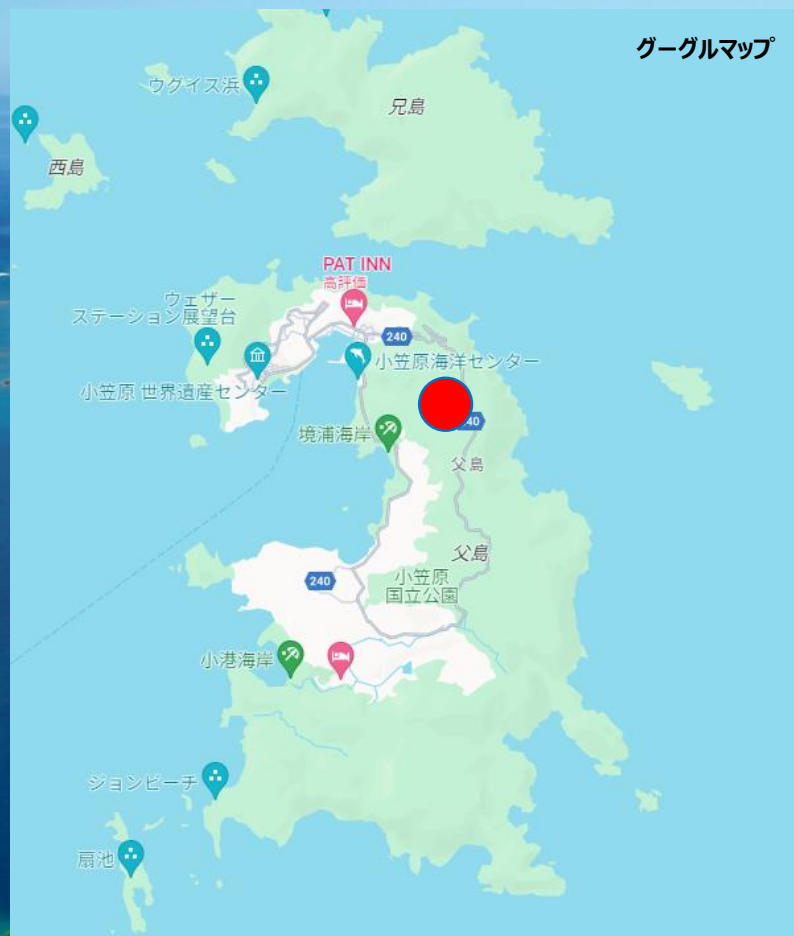
観測地点 鳥取県鳥取市 鳥取大学乾燥地研究センター



観測地点 東京都八丈町 八丈島特別地域気象観測所



観測地点 東京都小笠原村 小笠原酸性雨離島局



観測地点 関東BG地点

東吾妻



赤城（冬）



伊豆大島



いすみ



VOC等の測定物質一覧と分類

【アルカン・シクロアルカン】

- 1 エタン
- 2 プロパン
- 3 イソブタン
- 4 n-ブタン
- 5 イソペンタン
- 6 n-ペンタン
- 7 2,2-ジメチルブタン
- 8 シクロペンタン
- 9 2,3-ジメチルブタン
- 10 2-メチルペンタン
- 11 3-メチルペンタン
- 12 n-ヘキサン
- 13 メチルシクロペンタン
- 14 2,4-ジメチルペンタン
- 15 シクロヘキサン
- 16 2-メチルヘキサン
- 17 2,3-ジメチルペンタン
- 18 3-メチルヘキサン
- 19 2,2,4-トリメチルペンタン
- 20 n-ヘプタン
- 21 メチルシクロヘキサン
- 22 2,3,4-トリメチルペンタン
- 23 2-メチルヘプタン
- 24 3-メチルヘプタン
- 25 n-オクタン
- 26 n-ノナン
- 27 n-デカン
- 28 n-ウンデカン

【アルケン】

- 29 エチレン
- 30 プロピレン
- 31 アセチレン
- 32 トランス-2-ブテン
- 33 1-ブテン
- 34 シス-2-ブテン
- 35 1-ペンテン
- 36 トランス-2-ペンテン
- 37 シス-2-ペンテン
- 38 2-メチル-1-ペンテン
- 39 イソブテン
- 40 3-メチル-1-ブテン
- 41 2-メチル-1-ブテン
- 42 2-メチル-2-ブテン
- 43 1,3-ペンタジエン
- 44 1,3-ペンタジエン(2)
- 45 1-ヘキセン
- 46 シス-3-ヘキセン
- 47 2-ヘキセン
- 48 シス-3-メチル-2-ペンテン
- 49 2-ヘキセン(2)
- 50 トランス-3-メチル-2-ペンテン
- 51 1-ヘプテン
- 52 1,3-ブタジエン

【植物起源VOC】

- 86 イソプレン
- 87 α-ピネン
- 88 カンフェン
- 89 β-ピネン
- 90 リモネン

【芳香族炭化水素】

- 53 ベンゼン
- 54 トルエン
- 55 エチルベンゼン
- 56 m-キシレン,p-キシレン
- 57 スチレン
- 58 o-キシレン
- 59 イソプロピルベンゼン
- 60 プロピルベンゼン
- 61 3-エチルトルエン
- 62 4-エチルトルエン
- 63 1,3,5-トリメチルベンゼン
- 64 2-エチルトルエン
- 65 1,2,4-トリメチルベンゼン
- 66 1,2,3-トリメチルベンゼン
- 67 m-ジエチルベンゼン
- 68 p-ジエチルベンゼン
- 69 2-エチル-p-キシレン
- 70 4-エチル-m-キシレン
- 71 1,2,3,5-テトラメチルベンゼン

【フロン・四塩化炭素等】

- 119 HCFC-22
- 120 CFC-12
- 121 HCFC-142
- 122 CFC-114
- 123 HCFC-123
- 124 CFC-11
- 125 HCFC-141
- 126 HCFC-225ca
- 127 HCFC-225cb
- 128 CFC-113
- 129 四塩化炭素

【含酸素化合物】

- 72 エチル-tert-ブチルエーテル
- 73 アセトン
- 74 イソプロピルアルコール
- 75 酢酸メチル
- 76 n-プロパノール
- 77 メチル-tert-ブチルエーテル
- 78 メチルエチルケトン
- 79 酢酸エチル
- 80 イソブタノール
- 81 n-ブタノール
- 82 メチルイソブチルケトン
- 83 酢酸ブチル
- 84 メタノール
- 85 エタノール

【アルデヒド類】

- 130 ホルムアルデヒド
- 131 アセトアルデヒド
- 132 アクロレイン
- 133 プロピオンアルデヒド
- 134 クロトンアルデヒド
- 135 ブチルアルデヒド
- 136 ベンズアルデヒド
- 137 イソバレルアルデヒド
- 138 バレルアルデヒド
- 139 o-トルアルデヒド
- 140 m-トルアルデヒド, p-トルアルデヒド
- 141 ヘキサアルデヒド
- 142 2,5-ジメチルベンズアルデヒド

【ハロゲン化合物】

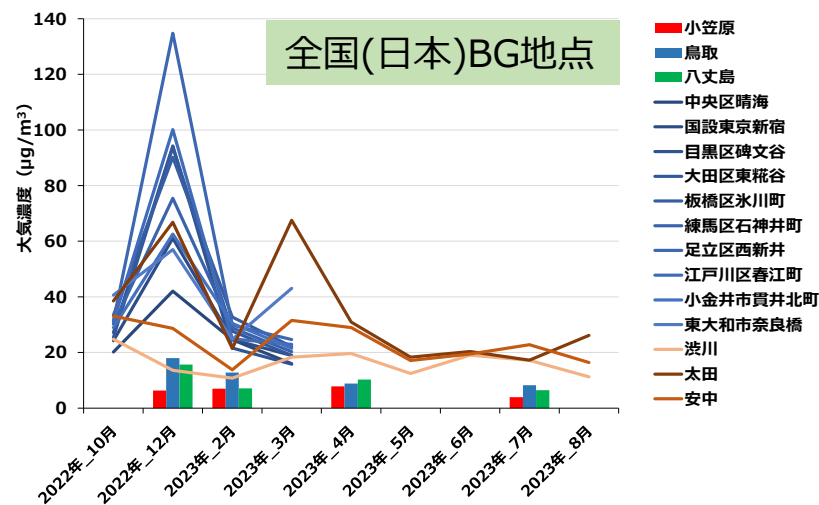
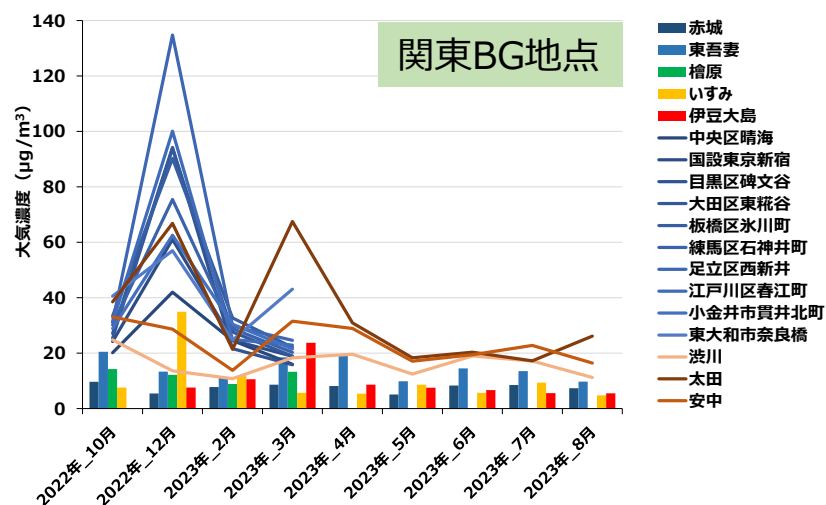
- 91 クロロメタン
- 92 塩化ビニルモノマー
- 93 ブロモメタン
- 94 クロロエタン
- 95 1,1-ジクロロエチレン
- 96 ジクロロメタン
- 97 3-クロロ-1-プロパン
- 98 1,1-ジクロロエタン
- 99 シス-1,2-ジクロロエチレン
- 100 クロロホルム
- 101 1,2-ジクロロエタン
- 102 1,1,1-トリクロロエタン
- 103 1,2-ジクロロプロパン
- 104 トリクロロエチレン
- 105 シス-1,3-ジクロロプロパン
- 106 トランス-1,3-ジクロロプロパン
- 107 1,1,2-トリクロロエタン
- 108 1,2-ジブロモエタン
- 109 テトラクロロエチレン
- 110 クロロベンゼン
- 111 1,1,2,2-テトラクロロエタン
- 112 ベンジルクロライド
- 113 m-ジクロロベンゼン
- 114 p-ジクロロベンゼン
- 115 o-ジクロロベンゼン
- 116 1,2,4-トリクロロベンゼン
- 117 ヘキサクロロ-1,3-ブタジエン
- 118 1-ブロモプロパン

【その他（酸化エチレン等）】

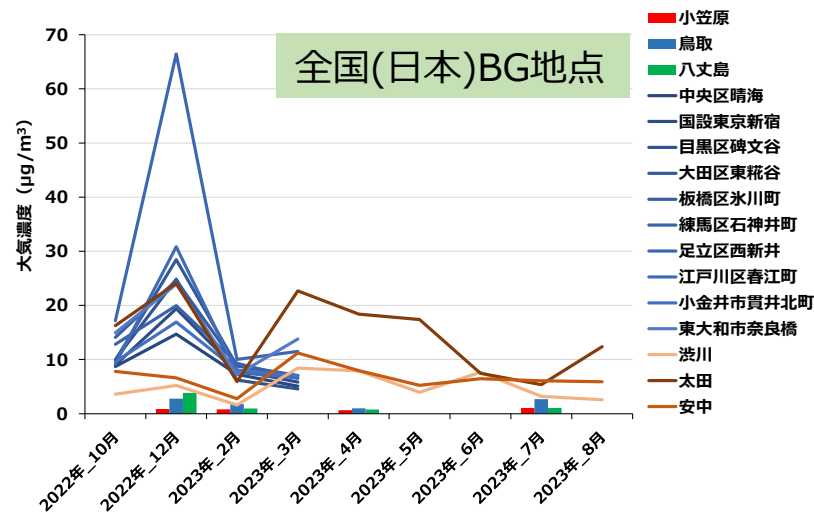
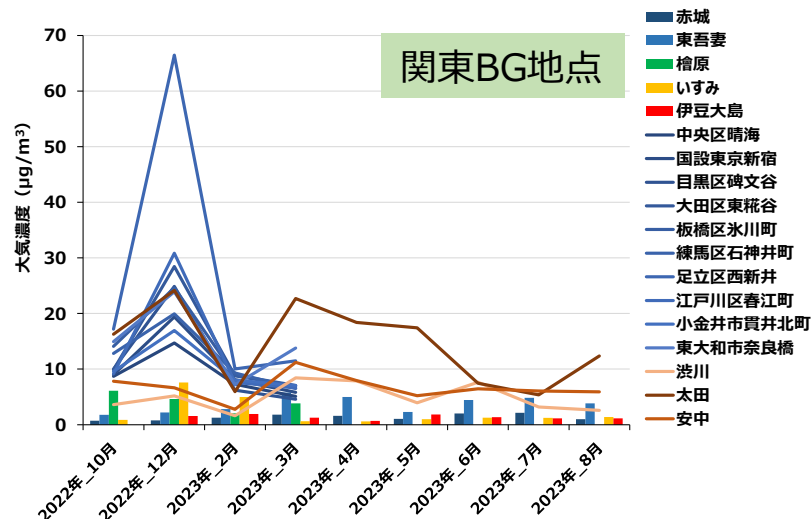
- 143 アクリロニトリル
- 144 酸化プロピレン
- 145 酸化エチレン

バックグラウンド調査結果

アルカン、シクロアルカン

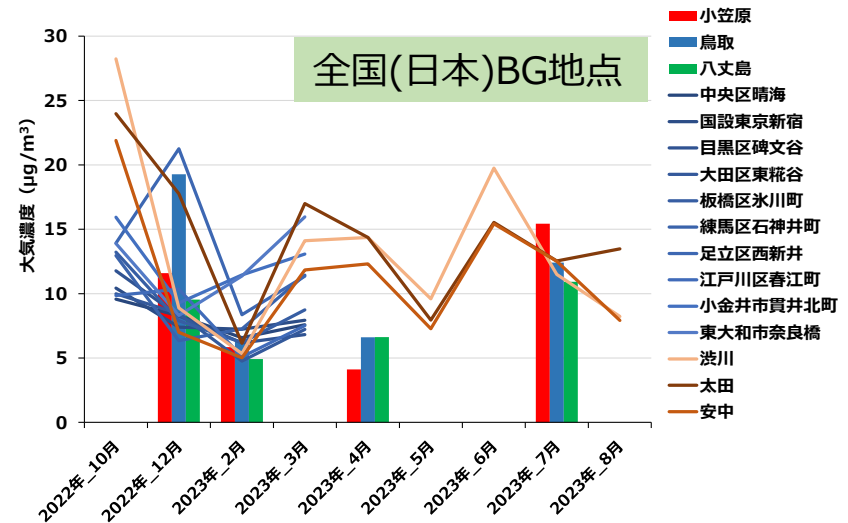
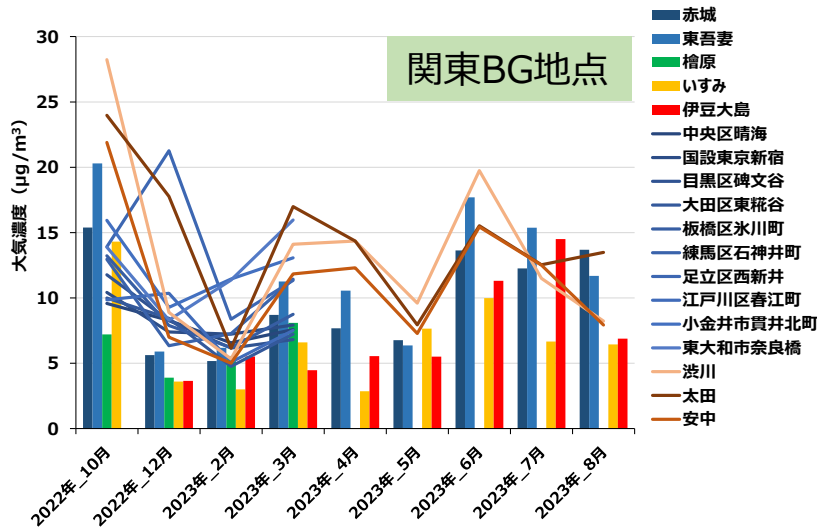


芳香族



バックグラウンド調査結果

ケトン

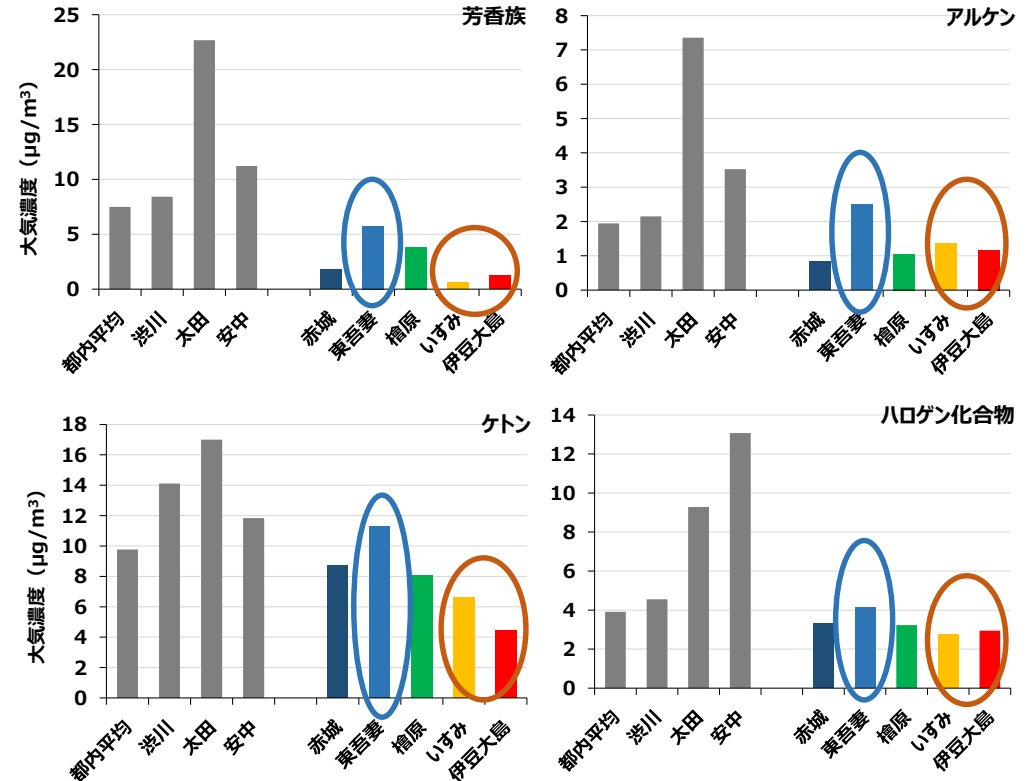
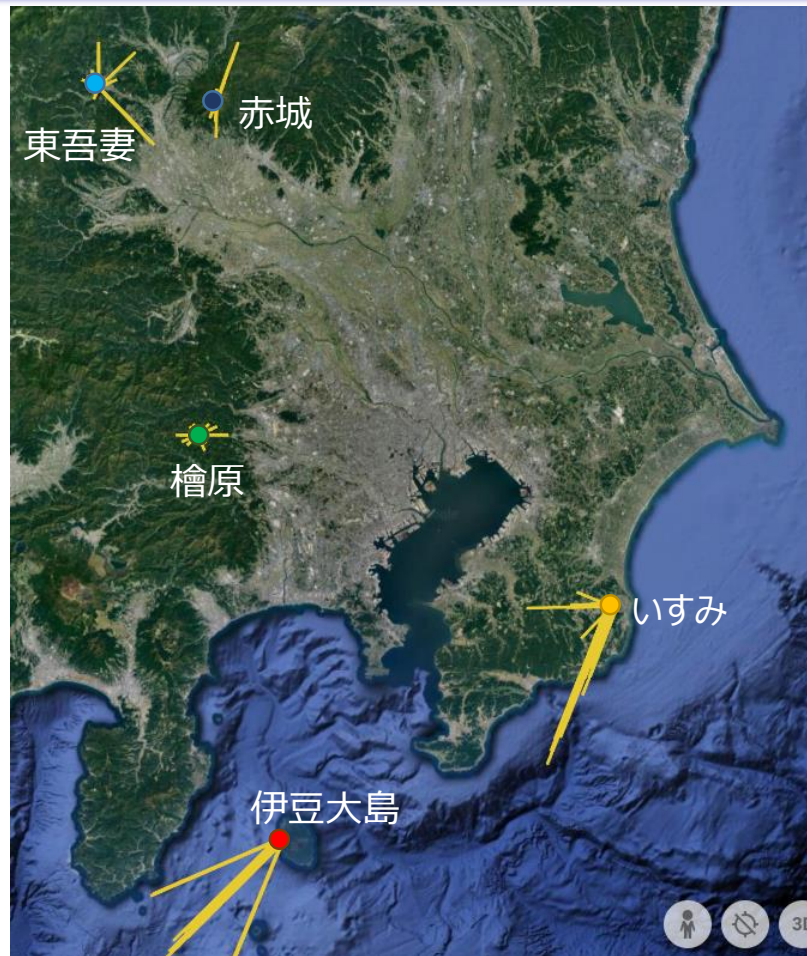


東京都都市部のデータは速報値

- アルカン、シクロアルカン、芳香族、ハロゲン化合物はBG地域では低濃度となる傾向
- ケトン、フロン類は都市部とBGで差が小さい

物質によって都市部へのBG濃度の影響が異なる

バックグラウンド濃度と風向（2023年3月調査）



東京都都市部のデータは速報値

- 同日のBG測定でも海側からの風が強かった伊豆大島、いすみは低濃度で関東平野側の風が強い東吾妻はやや高濃度

評価地域（都市部）の風上・風下によってBG濃度の位置付けが異なる

【本日の発表内容】

大気汚染について

光化学オキシダントと揮発性有機化合物（VOC）

都市域の大気中VOCについて

- ・ 東京都の大気中VOCのモニタリング
- ・ VOC排出量と大気濃度の関係
- ・ 大気質シミュレーションと実測値の比較

バックグラウンド地点の大気中VOCについて

- ・ 大気中VOCのバックグラウンド（BG）濃度観測

今後の予定

調査結果のまとめと今後の方向性

- 関東BG、全国（日本）BGとも通年の観測を実施
- 収集したデータの風向等による濃度特性を解析
- 得られた年間のBG（全国、関東）観測データ、及び有害大気汚染物質モニタリングデータを用いて、モデル計算値と観測値の整合を評価
- 今後収集する予定の多地点のBGデータを用いて、境界濃度の推計結果を検証

謝辞

本研究は環境省・(独)環境再生保全機構の環境研究総合推進費
(JPMEERF20225M03) により実施しました。

以下の研究メンバー、研究協力者の方々にご協力をいただきました。
記して感謝します。

勝島智恵子博士、齊藤伸治博士、鶴丸央博士、長田和雄教授、熊谷貴美代博士、
齊藤由倫博士、茶谷聡博士、坂本祥一氏、永妻はな子氏、田子博博士、
友松瑛里氏、小池有理子氏、岡田めぐみ氏、舟久保千景氏、黒崎泰典教授、
東京都環境局環境改善部、東京管区気象台、東京地方検察庁、大舘芳子氏

