

# CWT 法による宮崎県の光化学オキシダントの解析

下池正彦

## Analysis of Photochemical Oxidant in Miyazaki Prefecture Using the Concentration-Weighted Trajectory (CWT) Method

Shimoike Masahiko

### 要旨

本県は大気汚染防止法に基づき県内各地で大気常時監視を行っている。監視項目の一つである光化学オキシダントについては、2024（令和6）年度も全測定局で環境基準を達成できておらず、当研究所はその原因に関する情報収集やデータ解析に取り組んでいる。その一つの手法として、本県に到達する大気塊の流れの傾向を捉える後方流跡線解析と測定局で観測された光化学オキシダント濃度を組み合わせる CWT（Concentration-Weighted Trajectory, 濃度重みづけ流跡線）法があり、この手法を用いて 2024（令和6）年度の解析を行った。その結果、光化学オキシダント濃度が上昇する冬から春にかけては、ユーラシア大陸方向からの移流が寄与している可能性が示唆された。また、夏は本県の南方海上からの大気塊の流入に変化し、濃度上昇が起こりにくい一方で、国内外からの多様な移流が存在する可能性に関する知見が得られた。なお、解析には一般的な表計算ソフトを使用し、専門的なプログラミングの知識がなくても実行可能なものとなるよう努めた。

キーワード：光化学オキシダント，CWT 法，表計算ソフト

### はじめに

光化学オキシダント（以下「Ox」という。）は排ガス中に含まれる窒素酸化物や揮発性有機化合物が空気中の酸素と光化学反応を起こすことによって発生するオゾンを中心とした酸化性物質の総称である。本県では 2019（令和元）年 5 月に注意報発令の基準である 120 ppb を超える Ox が観測され、県は対象となる地域に注意報を発令した。その後、同様の高濃度事象は確認されていないものの、特に冬から春にかけて環境基準を上回る濃度の Ox が毎年観測されており、直近の 2024（令和6）年度も県内の全測定局で環境基準を達成できない状況が続いている。

本県は県土の約 7 割を森林が占め、都市部に比べて大規模な発生源が少ないことが特徴である。しかし、大規模な発生源が存在しない山間部の測定局においても Ox 濃度の上昇が認められることから、本県外部からの移流の可能性が示唆され、

このことに関する知見の蓄積が重要であると考えられる。汚染源地域を推定する一つの手法として、本県に到達する大気塊の流れの傾向を捉える後方流跡線解析があり、当研究所の過去の所報<sup>1,2)</sup>においても利用されている。ただし、限られた期間の数本の流跡線で議論されている場合が多く、より多くの流跡線を用いて本県の状況を把握する必要があると考えられる。流跡線を増やすこと自体は専用のサイトにより比較的容易に行うことが可能であるが、流跡線同士の重なりによって傾向の把握が困難となることが欠点である。

この問題を解決する手段として、測定局で観測された Ox 濃度を用いて流跡線の重み付けを行う CWT（Concentration-Weighted Trajectory, 濃度重みづけ流跡線）法<sup>3)</sup>があり、汚染源地域の推定に利用されている。今般、表計算ソフト上で CWT 法を実行する方法について思案し、2024（令和6）年度の観測結果に適用したので、その方法と結果について報告する。

## 解析方法

### 1 解析対象

県央に位置する高鍋町健康づくりセンター測定局（以下「高鍋局」という。）を解析の代表地点として選定し、2024（令和6）年度に観測されたOx濃度の1時間値を解析に用いた。欠測値については前後1時間の平均値で補間し、連続した欠測値については前日と翌日の同時刻のデータを含めた3値の平均値を算出して補間した。

### 2 後方流跡線解析

後方流跡線解析は国立環境研究所の地球環境データベース内のMETEX<sup>4,5)</sup>を使用して行った。解析は1か月単位で行い、計算負荷を減らすため、時間間隔は3時間を基本とした。解析条件を表1に示す。

表1 後方流跡線の解析条件

|             |           |
|-------------|-----------|
| 時間帯         | 9時間       |
| 複数計算間隔      | 3時間       |
| 緯度          | 32.13°    |
| 経度          | 131.51°   |
| 高度          | 1500 m    |
| トラジェクトリーの長さ | 3日        |
| モデル         | kinematic |

### 3 CWT法による解析

表計算ソフトとしてMicrosoft®Excel®for Microsoft 365（バージョン2504）を使用し、解析はEq.1<sup>3)</sup>に従って行った。

$$C_{ij} = \frac{\sum_{l=1}^M C_l \cdot \tau_{ijl}}{\sum_{l=1}^M \tau_{ijl}} \quad (1)$$

ここで、 $i, j$  は地図上の緯度と経度を一定間隔で区切って形成される格子のインデックス、 $l$ （エル）は流跡線のインデックス、 $M$  は流跡線の総数、 $C_l$  は流跡線 $l$ の観測点濃度、 $\tau_{ijl}$  は格子 $i, j$ 内に存在する流跡線 $l$ のエンドポイント（計算した遡行時間（=1時間）毎の位置）の数である。算出される $C_{ij}$ 値は格子 $i, j$ を通過した流跡線が有する観測点濃度をエンドポイントの数に応じて加重平均した濃度である。CWT法の概念図を図1に示す。

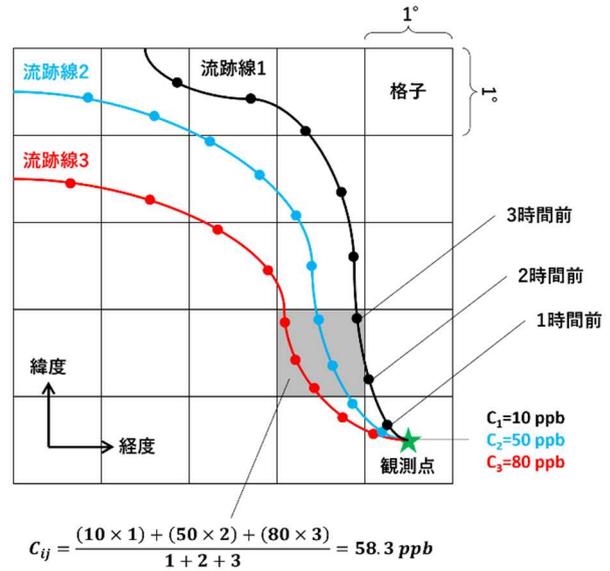


図1 CWT法の概念図

今回の解析では格子サイズを緯度 $1^\circ \times$ 経度 $1^\circ$ とし、 $C_{ij}$ 値は格子に含まれるエンドポイントの数 $n_{ij}$ に応じて表2に示す係数<sup>6)</sup>で補正を行った。

表2 補正係数

|          |      |                                     |
|----------|------|-------------------------------------|
| $W_{ij}$ | 1.00 | $n_{ij} > 3 \cdot Ave.$             |
|          | 0.70 | $Ave. < n_{ij} \leq 3 \cdot Ave.$   |
|          | 0.42 | $0.5 \cdot Ave. < n_{ij} \leq Ave.$ |
|          | 0.17 | $0 < n_{ij} \leq 0.5 \cdot Ave.$    |

ここで、 $Ave.$ は後方流跡線のエンドポイントの総数を解析領域の格子総数で除した単位格子あたりの平均エンドポイント数である。ただし、今回の解析では北緯 $0 \sim 90^\circ$ 、東経 $0 \sim 180^\circ$ の範囲を解析領域（格子総数16200）として設定し、エンドポイントを含まない格子が多数存在したため、エンドポイントを含む格子の総数で除して算出した。

### 4 表計算ソフトの操作

#### 4-1 エンドポイントデータの整理

METEXで計算した後方流跡線をCSV形式でダウンロードし、表計算ソフトのシート1にA~N列を範囲選択してコピーした。後方3日間の流跡線1本は103行のデータからなり、その内、1時間毎のエンドポイントデータは31~103行目である。2本目以降のデータも104行目以降に等間

隔で並んでいるため、データに該当する行番号の数列を作成し、緯度 F 列、経度 G 列の列番号を付して、INDIRECT 関数で抽出した。操作例を図 2 に示す。なお、各月の日数の変化に対応できるように P 列の行番号は多めに設定した。

|      | P     | Q         | R        | S         | T        | U   |
|------|-------|-----------|----------|-----------|----------|-----|
| 1    | 17522 | G         | F        | 17520     | 17520    |     |
| 2    | 行番号   | Long(deg) | Lat(deg) | Long(deg) | Lat(deg) | ROW |
| 3    | 31    | G31       | F31      | 131.51    | 32.13    | 3   |
| 4    | 32    | G32       | F32      | 131.4593  | 32.2617  | 4   |
| 途中省略 |       |           |          |           |          |     |
| 75   | 103   | G103      | F103     | 111.0992  | 26.0937  | 75  |
| 76   | 134   | G134      | F134     | 131.51    | 32.13    | 76  |
| 77   | 135   | G135      | F135     | 131.1666  | 32.335   | 77  |

- 経度の整理（緯度は R, T 列にて同じ）  
Q3 = Q\$1&\$P3  
S3 = INDIRECT(Q3)
- データ最終行の抽出  
U3 = IF(S3=0,"",ROW(S3))  
P1 = MAX(U:U)
- データ総数の確認  
S1 = COUNT(S3:INDIRECT("S"&P1))

図 2 操作例 1

#### 4-2 格子番号配列の作成

北緯 0~90°，東経 0~180° の範囲を格子サイズで区切り 1~16200 の格子番号の配列をシート 2 に作成した。格子の区切りは A° 以上 B° 未満と定義した。操作例を図 3 に示す。

|      | A    | B  | C   | FX    | FY    | FZ  |
|------|------|----|-----|-------|-------|-----|
| 1    | 格子番号 | 0  | 1   | 178   | 179   | 180 |
| 2    | 0    | 1  | 91  | 16021 | 16111 |     |
| 3    | 1    | 2  | 92  | 16022 | 16112 |     |
| 途中省略 |      |    |     |       |       |     |
| 90   | 88   | 89 | 179 | 16109 | 16199 |     |
| 91   | 89   | 90 | 180 | 16110 | 16200 |     |
| 92   | 90   |    |     |       |       |     |

図 3 操作例 2

#### 4-3 エンドポイントが含まれる格子の探索

シート 2 で作成した格子番号配列に基づき、INDEX 関数を用いてエンドポイントが含まれる格子を探索した。前述の格子の区切りによるズレを防ぐため、エンドポイントの緯度及び経度が自然数の場合は 0.001 を加算し、ROUNDUP 関数を用いて参照する行と列の番号を決定した。新規シート 3 で行った操作例を図 4 に示す。なお、

流跡線の解析範囲から緯度、経度が 0 になることはないものと仮定している。

|   | A      | B         | C        | D   | E   | F     |
|---|--------|-----------|----------|-----|-----|-------|
| 1 | 240    |           |          |     |     |       |
| 2 | 流跡線No. | Long(deg) | Lat(deg) | 列番号 | 行番号 | 格子番号  |
| 3 | 1      | 131.51    | 32.13    | 132 | 33  | 11823 |
| 4 | 1      | 131.4593  | 32.2617  | 132 | 33  | 11823 |
| 5 | 1      | 131.4063  | 32.3807  | 132 | 33  | 11823 |

- エンドポイントの端数処理（緯度は C 列にて同じ）  
B3 = IF(MOD(Sheet1!S3=0,"",  
IF(MOD(Sheet1!S3,1)=0,Sheet1!S3+0.001,Sheet1!S3))
- 切り上げ処理（緯度は E 列にて同じ）  
D3 = ROUNDUP(B3,0)
- 格子番号の抽出  
F3 = INDEX(Sheet2!\$B\$2:\$FY\$91,Sheet3!E3,Sheet3!D3)
- 流跡線の本数確認  
A1 = COUNT(F:F)/73

図 4 操作例 3

上記の操作により F3 セルの格子番号は 11823 となり、シート 2 では図 5 のとおりである。

|    | A    | EB    | EC    | ED    | EE    | EF    |
|----|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1  | 格子番号 | 130   | 131   | 132   | 133   | 134   |
| 33 | 31   | 11732 | 11822 | 11912 | 12002 | 12092 |
| 34 | 32   | 11733 | 11823 | 11913 | 12003 | 12093 |
| 35 | 33   | 11734 | 11824 | 11914 | 12004 | 12094 |
| 36 | 34   | 11735 | 11825 | 11915 | 12005 | 12095 |

図 5 シート 2 の確認

#### 4-4 Ox 濃度データの準備

3 時間間隔で抽出した 1 か月分の Ox 濃度データをシート 4 の B 列にコピーし、シート 3 の A 列に付した流跡線番号に対応する番号を A 列に設定した。操作例を図 6 に示す。

|   | A   | B    | C | D    | E   |
|---|-----|------|---|------|-----|
| 1 | No. | Ox濃度 |   |      |     |
| 2 | 1   | 34   |   | データ数 | 240 |
| 3 | 2   | 29   |   | 平均濃度 | 43  |
| 4 | 3   | 24   |   | 最高濃度 | 75  |
| 5 | 4   | 40   |   | 最低濃度 | 12  |

図 6 操作例 4

#### 4-5 Ox 濃度の流跡線への反映

XLOOKUP 関数を用いて Ox 濃度を対応する流跡線に反映させた。同関数の検索値は流跡線番号、検索範囲はシート 4 の A 列、戻り値は Ox 濃度とした。操作例を図 7 に示す。なお、流跡線の出発点 (=測定局) は固定されているため、IF 文を用いて出発点には濃度が反映されないように設定

した。また、出発点とエンドポイントを 0 と 1 で区別するための列を H 列に設けた。

|      | A      | B         | C        | D   | E   | F     | G    | H     |
|------|--------|-----------|----------|-----|-----|-------|------|-------|
| 1    | 240    |           |          |     |     |       |      |       |
| 2    | 流跡線No. | Long(deg) | Lat(deg) | 列番号 | 行番号 | 格子番号  | Ox濃度 | count |
| 3    | 1      | 131.51    | 32.13    | 132 | 33  | 11823 |      | 0     |
| 4    | 1      | 131.4593  | 32.2617  | 132 | 33  | 11823 | 34   | 1     |
| 途中省略 |        |           |          |     |     |       |      |       |
| 75   | 1      | 111.0992  | 26.0937  | 112 | 27  | 10017 | 34   | 1     |
| 76   | 2      | 131.51    | 32.13    | 132 | 33  | 11823 |      | 0     |
| 77   | 2      | 131.1666  | 32.335   | 132 | 33  | 11823 | 29   | 1     |

G3 = IF(AND(B3=\$B\$3,C3=\$C\$3),"",  
XLOOKUP(A3,Sheet4!A:A,Sheet4!B:B,""))  
H3 = COUNT(G3)

図 7 操作例 5

#### 4-6 格子番号リストの作成

シート 3 の F 列はエンドポイントが含まれる格子番号であり、UNIQUE 関数を用いて重複を除いた格子番号のリストを作成した。また、昇順となるように SORT 関数を組み合わせた。両関数ともにスピル機能に対応しているため、M3 セルに関数を入力するだけで、自動的に以降の行に結果が反映される。操作例を図 8 に示す。なお、式中のシャープ記号はスピル範囲演算子である。

|   | F     | G    | H     | I | J  | K     | L | M       |
|---|-------|------|-------|---|----|-------|---|---------|
| 1 |       |      |       |   |    | データ数  |   | 1280    |
| 2 | 格子番号  | Ox濃度 | count |   | B列 | 17520 |   | 格子番号リスト |
| 3 | 11823 |      | 0     |   | C列 | 17520 |   | 6526    |
| 4 | 11823 | 34   | 1     |   | D列 | 17520 |   | 6616    |
| 5 | 11823 | 34   | 1     |   | E列 | 17520 |   | 6617    |
| 6 | 11823 | 34   | 1     |   | F列 | 17520 |   | 6706    |

- B~F列のデータ数の確認  
K2 = COUNT(B:B) 等
- 格子番号リストの作成  
M3 = SORT(UNIQUE(F3:INDIRECT("F"&K2+2)))
- エンドポイントを含む格子の総数  
M1 = COUNT(M3#)

図 8 操作例 6

#### 4-7 分母・分子の算出

ここまでの操作で、エンドポイントが含まれる格子が求められたため、次に、それぞれの格子に含まれるエンドポイントの数を算出した。これは Eq.1 の分母の算出に相当するものである。算出には SUMIF 関数を用い、検索範囲を F 列、検索条件を M 列の格子番号、合計範囲を H 列とした。また、合計範囲を G 列の Ox 濃度に換えて Eq.1 の分子を算出した。なお、格子番号リストは解析データ毎に出力が異なるが、スピル範囲演算子を利用することによって N,O 列は M 列に対応して

自動計算される。計算の正しさは、N 列の総和がデータ総数から出発点の数を差し引いたものとなっていることや、O 列の総和が G 列の総和と等しいことで確認することができる。操作例を図 9 に示す。

|    | F     | G    | H     | I | J    | K      | L | M       | N  | O  |
|----|-------|------|-------|---|------|--------|---|---------|----|----|
| 1  |       |      |       |   |      | データ数   |   | 1280    |    |    |
| 2  | 格子番号  | Ox濃度 | count |   | B列   | 17520  |   | 格子番号リスト | 分母 | 分子 |
| 3  | 11823 |      | 0     |   | C列   | 17520  |   | 6526    | 1  | 65 |
| 4  | 11823 | 34   | 1     |   | D列   | 17520  |   | 6616    | 1  | 54 |
| 5  | 11823 | 34   | 1     |   | E列   | 17520  |   | 6617    | 1  | 65 |
| 6  | 11823 | 34   | 1     |   | F列   | 17520  |   | 6706    | 1  | 54 |
| 7  | 11823 | 34   | 1     |   |      |        |   | 6707    | 1  | 65 |
| 8  | 11733 | 34   | 1     |   | 流跡線数 | 240    |   | 6797    | 1  | 54 |
| 9  | 11733 | 34   | 1     |   | N列総和 | 17280  |   | 6798    | 1  | 65 |
| 10 | 11733 | 34   | 1     |   | 計    | 17520  |   | 6887    | 1  | 54 |
| 11 | 11733 | 34   | 1     |   |      |        |   | 6888    | 1  | 65 |
| 12 | 11733 | 34   | 1     |   | G列総和 | 746136 |   | 6895    | 1  | 28 |
| 13 | 11643 | 34   | 1     |   | O列総和 | 746136 |   | 6978    | 1  | 54 |

- 分母の算出  
N3 = SUMIF(F:F,M3#,H:H)
- 分子の算出  
O3 = SUMIF(F:F,M3#,G:G)

図 9 操作例 7

#### 4-8 $C_{ij}$ 値の算出及び係数補正

算出した分母・分子より Eq.1 の  $C_{ij}$  値を算出するとともに、表 2 の係数補正を行った。操作例を図 10 に示す。

|   | M       | N  | O  | P        | Q    | R            | S | T       | U    |
|---|---------|----|----|----------|------|--------------|---|---------|------|
| 1 | 1280    |    |    |          |      |              |   | 3Ave.   | 40.5 |
| 2 | 格子番号リスト | 分母 | 分子 | $C_{ij}$ | 補正係数 | 補正後 $C_{ij}$ |   | Ave.    | 13.5 |
| 3 | 6526    | 1  | 65 | 65       | 0.17 | 11.05        |   | 0.5Ave. | 6.75 |
| 4 | 6616    | 1  | 54 | 54       | 0.17 | 9.18         |   |         |      |
| 5 | 6617    | 1  | 65 | 65       | 0.17 | 11.05        |   |         |      |

- $C_{ij}$  値の算出  
P3 = O3#/N3#
- Ave. 値の算出  
U2 = SUM(N3#)/M1 (※U1, U3は ×3, ×0.5)
- 補正係数の反映  
Q3 = IF(S(N3#>\$U\$1,1,N3#>\$U\$2,0.7,  
N3#>\$U\$3,0.42,N3#>0,0.17)
- 係数補正後の  $C_{ij}$  値  
R3 = P3#\*Q3#

図 10 操作例 8

#### 4-9 数値データの並べ替え (1)

ここからは図を描画するため、全ての格子に対して算出したデータの反映を行った。具体的には W 列に 1~16200 の数列を作成し、XLOOKUP 関数を用いてそれぞれの格子番号に対応する算出結果を反映させた。操作例を図 11 に示す。

#### 4-10 数値データの並べ替え (2)

1 列に並んだ算出結果を緯度、経度に対応する位置に並べ替えるため、シート 5 を作成した。まず、シート 3 の X~AA 列の希望するデータを反

映させるため、プルダウンを作成し、対応するデータがD列に反映されるように設定した。操作例を図12に示す。

|   | M       | N  | V    | W  | X               | Y    | Z                  | AA |
|---|---------|----|------|----|-----------------|------|--------------------|----|
| 1 | 1280    |    |      |    | N列              | P列   | Q列                 | R列 |
| 2 | 格子番号リスト | 分母 | 格子番号 | 分母 | C <sub>ij</sub> | 補正係数 | 補正後C <sub>ij</sub> |    |
| 3 | 6526    | 1  | 1    | 0  | 0               | 0    | 0                  | 0  |
| 4 | 6616    | 1  | 2    | 0  | 0               | 0    | 0                  | 0  |
| 5 | 6617    | 1  | 3    | 0  | 0               | 0    | 0                  | 0  |

- 分母の算出結果の反映  
X3 = XLOOKUP(W3,M\$3#,N\$3:INDIRECT("\$N\$"&\$M\$1+2),0)  
(※以下、同様にNの部分をもP,Q,Rに置き換えれば良い。)

図11 操作例9

|   | A                  | B    | C | D | E |
|---|--------------------|------|---|---|---|
| 1 | ↓ 選択               | Max  | 1 | 0 |   |
| 2 | 補正後C <sub>ij</sub> | 58.8 | 2 | 0 |   |
| 3 | AA                 | Ave  | 3 | 0 |   |
| 4 |                    | 16.0 | 4 | 0 |   |
| 5 | 分母                 | Min  | 5 | 0 |   |
| 6 | C <sub>ij</sub>    | 2.0  | 6 | 0 |   |
| 7 | 補正係数               |      | 7 | 0 |   |
| 8 | 補正後C <sub>ij</sub> |      | 8 | 0 |   |

- プルダウン  
A2: データの入力規則→リスト→元の値 [= \$A\$5:\$A\$8]
- 該当列の設定  
A3 = SWITCH(A2,A5,"X",A6,"Y",A7,"Z",A8,"AA")
- データの反映  
C1 = Sheet3!W3  
D1 = INDIRECT("sheet3!"&\$A\$3&C1+2)

図12 操作例10

次に、F94セル以降の空白を利用して、図13に示す数値を作成した。これは、北緯が降順(90°→0°)であるため、並べ替えが煩雑になることを防ぐための方策である。ここで、例えばG95セルは格子番号90で北緯89°以上90°未満、東経0°以上1°未満を意味する。

|      | F    | G  | H   | GC    | GD    | GE  |
|------|------|----|-----|-------|-------|-----|
| 94   | 格子番号 | 0  | 1   | 178   | 179   | 180 |
| 95   | 90   | 90 | 180 | 16110 | 16200 |     |
| 96   | 89   | 89 | 179 | 16109 | 16199 |     |
| 途中省略 |      |    |     |       |       |     |
| 183  | 2    | 2  | 92  | 16022 | 16112 |     |
| 184  | 1    | 1  | 91  | 16021 | 16111 |     |
| 185  | 0    |    |     |       |       |     |

図13 操作例11

そして、並べ替え用の数値とINDIRECT関数を組み合わせることによりD列のデータの並べ替

えが可能となる。操作例を図14に示す。

|      | F    | G | H | GC  | GD  | GE  |
|------|------|---|---|-----|-----|-----|
| 1    | 格子番号 | 0 | 1 | 178 | 179 | 180 |
| 2    | 90   | 0 | 0 | 0   | 0   |     |
| 3    | 89   | 0 | 0 | 0   | 0   |     |
| 途中省略 |      |   |   |     |     |     |
| 90   | 2    | 0 | 0 | 0   | 0   |     |
| 91   | 1    | 0 | 0 | 0   | 0   |     |
| 92   | 0    |   |   |     |     |     |

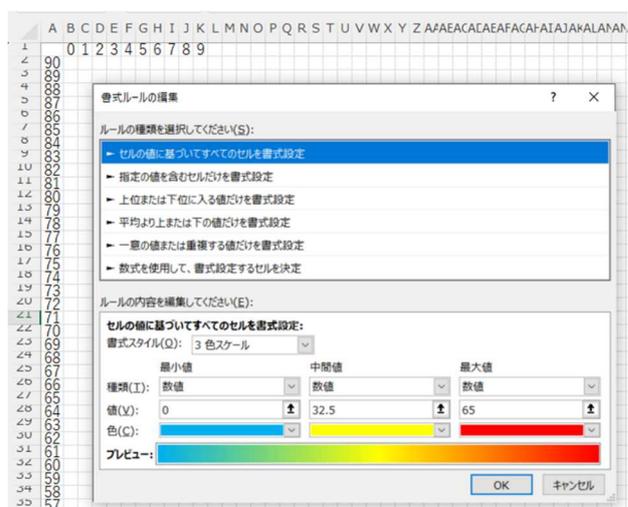
- D列データの並べ替え  
G2 = INDIRECT("D"&G95) ... GD91 = INDIRECT("D"&GD184)

図14 操作例12

#### 4-1-1 濃度分布図の作製

濃度分布図を作製するため、シート6を作成した。シート5の並べ替えデータをこのシートに反映し、セルの書式設定をユーザー定義の「;;;」とした。これによって、セルに数値が表示されなくなり、見かけ上、空白のセル群となる。そして、データ範囲に対して、条件付き書式を設定し、算出結果の大小に応じた色分けを行った。操作例を図15に示す。なお、シート5で選択した算出結果によって、条件付き書式の最大値等が異なってくるため、シート7以降で同様の操作を行い、算出結果に適した色分けを行う必要がある。

最後にデータ範囲全体をコピーし、図として貼り付けることによって濃度分布図となる。解析範囲と緯度・経度をあわせた地図と海岸線の輪郭画像を別途準備し、3枚を重ね合わせて濃度分布図の完成形とした。概念図を図16に示す。



- シート5データの反映  
B2 = IF(Sheet5!G2=0,"",Sheet5!G2) ...  
FY91 = IF(Sheet5!GD91=0,"",Sheet5!GD91)

図15 操作例13

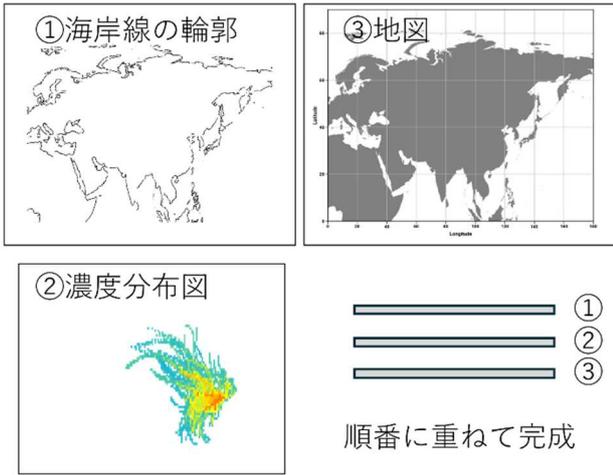


図 16 完成形のご概念図

## 結果と考察

### 1 Ox 濃度の解析結果

解析対象とした高鍋局で観測された 2024 (令和 6) 年度の Ox 濃度 (夜間を含む) の月間推移を図 17 に、10 ppb 間隔で階級分けを行った 1 時間値の出現頻度を図 18 に示す。平均濃度 (図 17 中の×印) は年間値が 33.0 ppb、最高値は 5 月の 43.6 ppb、最低値は 7 月の 16.3 ppb であった。平均濃度の推移は 6 月から低下を始め 7 月に最低となり、それ以降は徐々に増加する傾向が認められた。また、8 月と 9 月は平均値と中央値の差が特に大きく、30 ppb 未満の測定値が 6 割程度を占める一方で、時折、高濃度事象が発生したことを意味する。8 月については、CWT 法を用いて過去 5 年分の解析も行ったので後述する。なお、1 時間値の最高濃度は 2025 (令和 7) 年 3 月 23 日の 19~21 時に観測された 88 ppb であった。

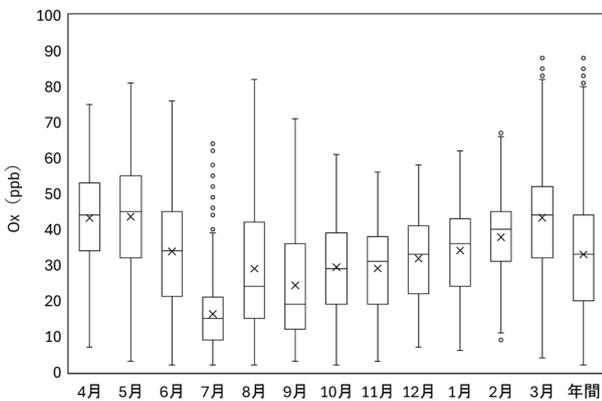


図 17 Ox 濃度の月間推移

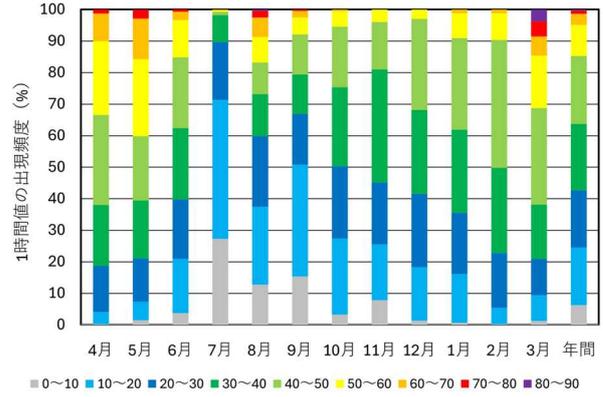


図 18 1 時間値の出現頻度

次に Ox の昼間濃度 (5 時~20 時までの平均値) と前日夜間濃度 (前日 20 時~5 時までの平均値) の差である DPOx (Daytime Production of Photochemical Oxidant<sup>7)</sup>) を算出した結果を図 19 に示す。算出の対象期間中に 5 時間以上の欠測がある場合は DPOx の算出を行わず、負値は 0 とせず、そのまま集計を行った。また、対象期間中に、環境基準を超過しなかった場合を平常日、超過した場合を超過発生日と定義し、両者を区別せずに集計したものを全日のデータとした。

平常日の DPOx は 8 月と 9 月に最大の 10.7 ppb となり、年平均値は 7.7 ppb であった。平常日は 304 日出現し、本県の光化学生成のポテンシャルは DPOx で 1 桁 ppb 程度の水準と考えられる。また、超過発生日の DPOx は 2 月を除いて概ね平常日と同様の月間推移を示し、年平均値は 16.5 ppb (全日は 9.0 ppb) であった。なお、11 月と 12 月は基準超過の発生が起こらず、7 月、10 月、2 月は発生日数が 1 日であるため、傾向を捉える上での信頼度は低いことに留意する必要がある。

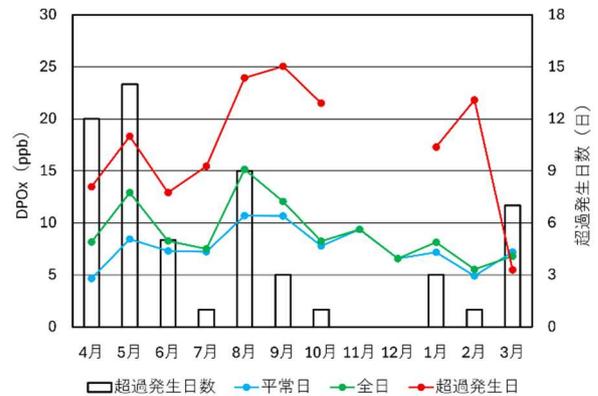


図 19 DPOx の月間推移

図 19 で特筆すべき点は 1 時間値の年間最高濃度を観測した 3 月であり、平常日や全日に比べて超過発生日の DPO<sub>x</sub> が最も低いことである。これは 3 月の超過発生日の前日夜間濃度の平均値が 60.4 ppb と著しく高く、昼間濃度との差がほとんどなかったことに起因するものである。ここで、全日のデータを用いて前日夜間濃度と昼間濃度をプロットした結果を図 20 に示す。前日夜間濃度に着目すると、夏は低めに推移する傾向にあり、10 月頃から増加に転じ、春頃に最大となる傾向が認められた。また、両者の関係を線形近似すると、相関係数 (R) は約 0.94 となり、高い正の相関が認められた。なお、日没後に O<sub>x</sub> が光化学生成することは考えられないため、夜間濃度が増加傾向にある 10 月～5 月頃にかけては本県外部からの移流が寄与している可能性が示唆された。

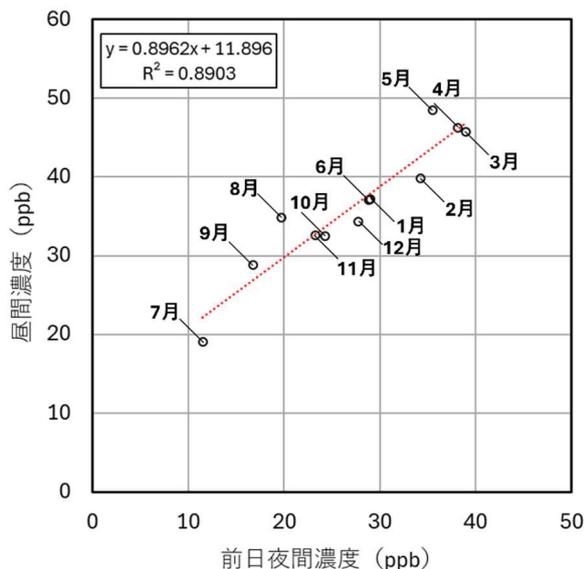


図 20 各月の前日夜間濃度と昼間濃度の関係

次に、気象庁が観測した高鍋の日照時間<sup>8)</sup>と DPO<sub>x</sub> の関係をプロットした結果を図 21 に示す。この図では超過発生日をケース 1 (前日夜間にのみ超過を観測)、ケース 2 (昼間のみ超過を観測)、ケース 3 (両方で超過を観測) に分けてプロットを行っている。平常日を除いて最も発生頻度が高いケース 2 (延べ 43 日) に着目すると、日照時間に関係なく基準超過が発生しており、日照時間がゼロの場合であっても基準超過が発生することが分かった。続くケース 3 (延べ 10 日) については、概ね日照時間が長い場合に発生し、DPO<sub>x</sub> はケース 2 の場合に比べて低く、負値となるケー

スも認められた。このことは前日夜間から O<sub>x</sub> 濃度が高い状態で推移していることを意味し、本県外部からの移流の可能性を支持するものと考えられる。なお、3 月 23 日もケース 3 に該当し、前日夜間濃度 78.1 ppb、昼間濃度 80.8 ppb、DPO<sub>x</sub> は 2.7 ppb であった。ケース 1 については延べ 3 日と発生自体は少なかったが、前日の昼間から基準超過が継続した事例は 1 件、それ以外は深夜にスポット的に基準超過が発生したものであった。

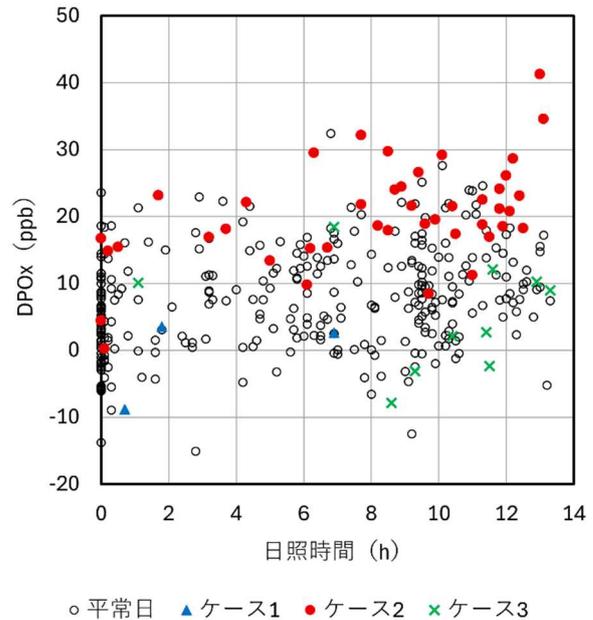


図 21 DPO<sub>x</sub> と日照時間の関係

## 2 CWT 法による解析結果

### 2-1 表計算ソフトの出力結果

一例として 4 月の後方流跡線を図 22 に、CWT 法による解析結果を図 23～25 に示す。

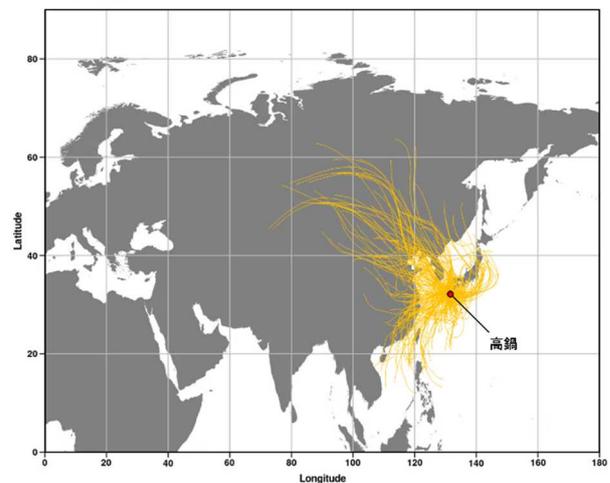


図 22 4 月の後方流跡線

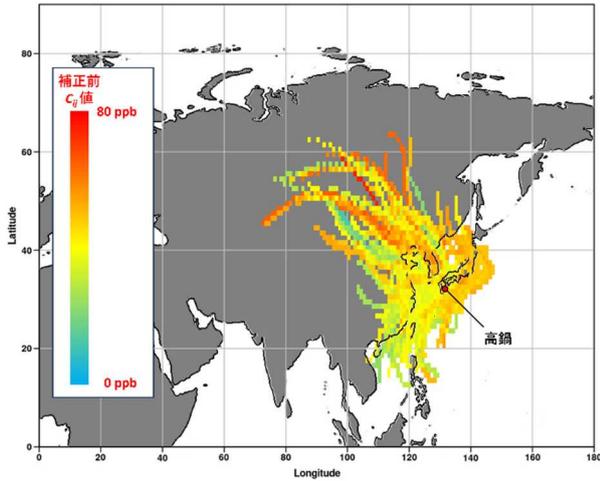


図 23  $C_{ij}$  値 (補正前)

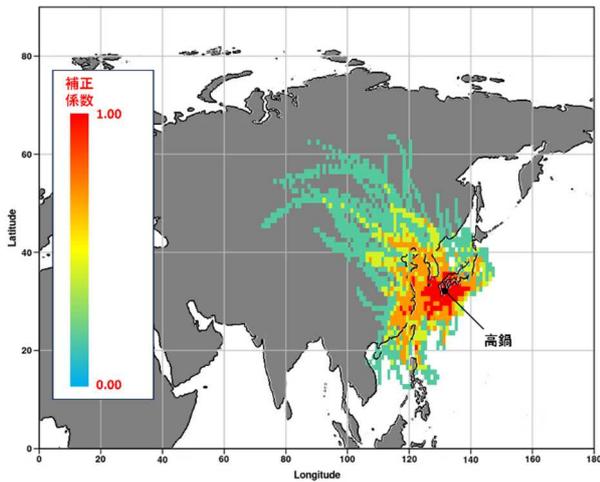


図 24 補正係数の分布

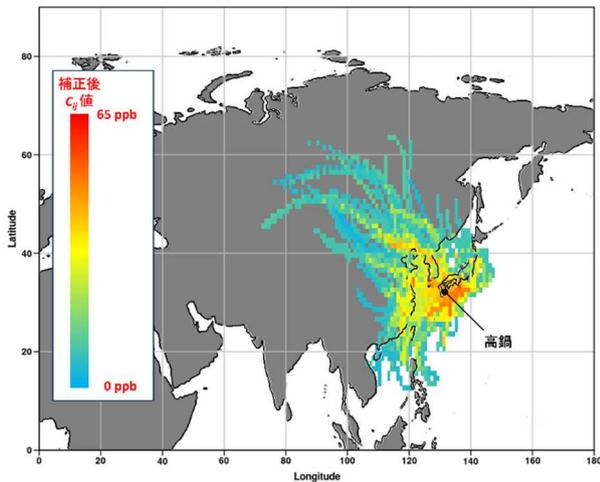


図 25  $C_{ij}$  値 (補正後)

補正前の  $C_{ij}$  値は平均が 43.8 ppb であり、0～80 ppb のスケールでは中位色が多くを占めた。図 23 では特徴を捉えにくい反面、出発点から離れるほど格子に含まれるエンドポイントの数が減

少するため、出発点における  $O_x$  濃度が直接反映されることになり、遡行最終地点が遠方に存在する高濃度事象発生時の流跡線を捉えやすい利点がある。補正係数については、重み 1.00 が出発点を中心に概ね等方的に分布しているのに対し、続く 0.70 や 0.42 の重みについては東シナ海やユーラシア大陸方向で卓越する傾向が認められた。 $C_{ij}$  値の補正によって濃度分布は捉えやすくなり、4 月については、遠方の大陸内部にも比較的濃度の高いエリアが広がっており、大陸方向からの移流の可能性を示唆する結果が得られた。

## 2-2 出発点高度の影響

今回の解析では出発点の高度を 1500 m に統一したが、500 m と 1000 m に設定した場合にどのような結果が得られるか、4 月を例として解析した結果を図 26, 27 に示す。

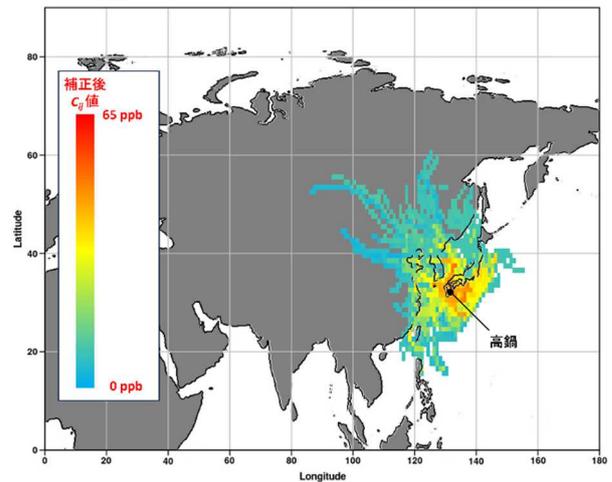


図 26 出発点高度 500 m の出力結果

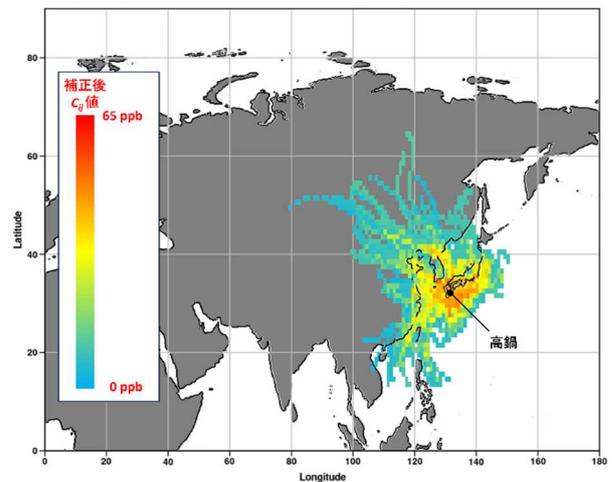


図 27 出発点高度 1000 m の出力結果

流跡線の概形はいずれも類似している一方、出発点高度が低いほど流跡線の広がりや抑えられる傾向が認められた。一つの格子に含まれるエンドポイントの平均値である Ave.値は表 3 に示すとおり高度が低いほど大きくなった。一般的に、出発点の高度を低く設定した流跡線の信頼性は損なわれると言われており<sup>9)</sup>、計算と図の描画自体は可能であるものの、結果の解釈には注意を要するものと考えられる。

表 3 Ave. 値

| 高度   | 500 m | 1000 m | 1500 m |
|------|-------|--------|--------|
| Ave. | 17.8  | 15.5   | 13.5   |

### 2-3 各月の解析結果

2024（令和 6）年度の各月の解析結果を図 28、29 に示す。4 月に引き続き、5 月も遠方の大陸内部に比較的濃度の高いエリアが認められた。6 月からは本県の南方海上からの流入が増加し、7 月と 8 月はほぼ全ての流跡線がその傾向を示した。前述のとおり、7 月は平均濃度が最も低くなっており、清澄な海上の大気塊の流入が頻出することがその要因として考えられる。8 月と 9 月も同様に低濃度で推移することが期待され、図 17 で示したとおり、実際に平均濃度よりも中央値の方が低くなっている。その一方で、西日本付近に比較的高い  $C_{ij}$  値のエリアが認められ、両月の高濃度事象は国内の他地域からの移流も考慮する必要があると考えられる。10 月以降は再び大陸方向からの流入に変化し、年間最高濃度を観測した 3 月は大陸方向からの寄与が特に大きかったことを示唆する結果となった。

次に、出発点を中心として、地図上の領域を十字に 4 分割して、エンドポイントの分布割合を求めた結果を図 30 に示す。西側の領域 1、4 が 6 割以上を占める 4~6 月、領域 4 のみで約 7 割を占める 7 月、東側の領域 2、3 が 6 割以上を占める 8~10 月、領域 1 が主となる 11~3 月と 4 つのタイプに分類された。なお、この分類では流跡線群の形状が異なっているように見える 8 月と 10 月がエンドポイントの分布としては同程度となっている。また、図 31 に示すとおり、Ave.値については 7 月と 8 月が 30 以上と高く、このことは大気塊の流入が出发点に近い、一定のエリアに偏っていることを意味するものである。

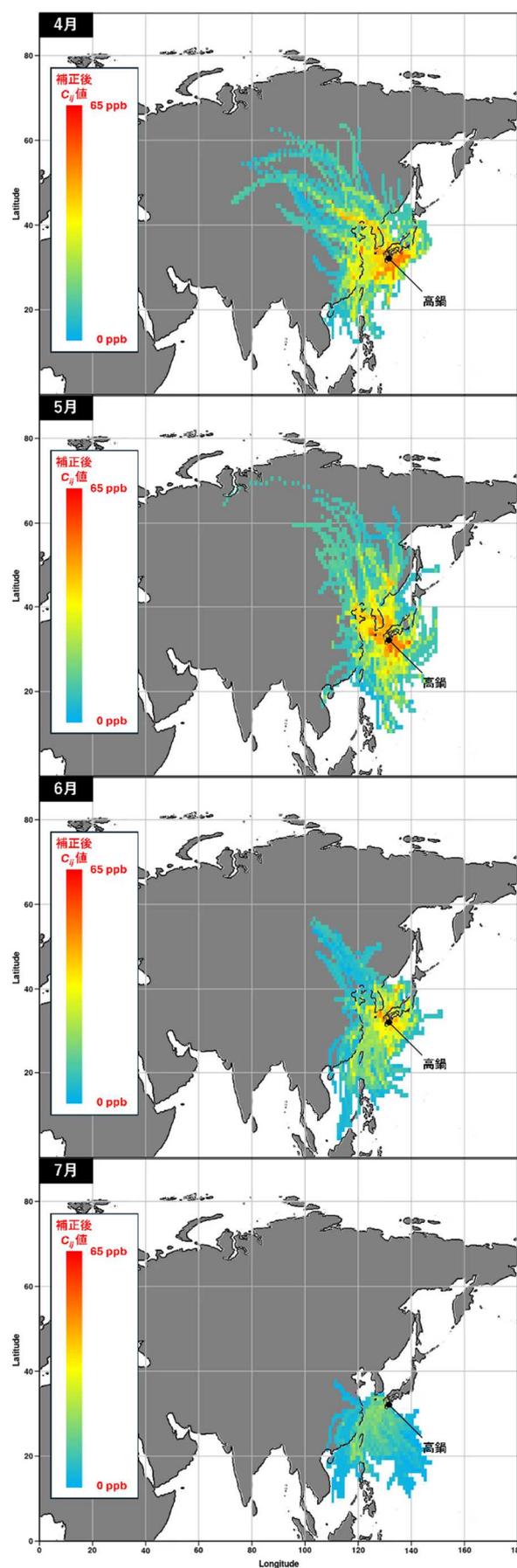


図 28 4~7 月の解析結果

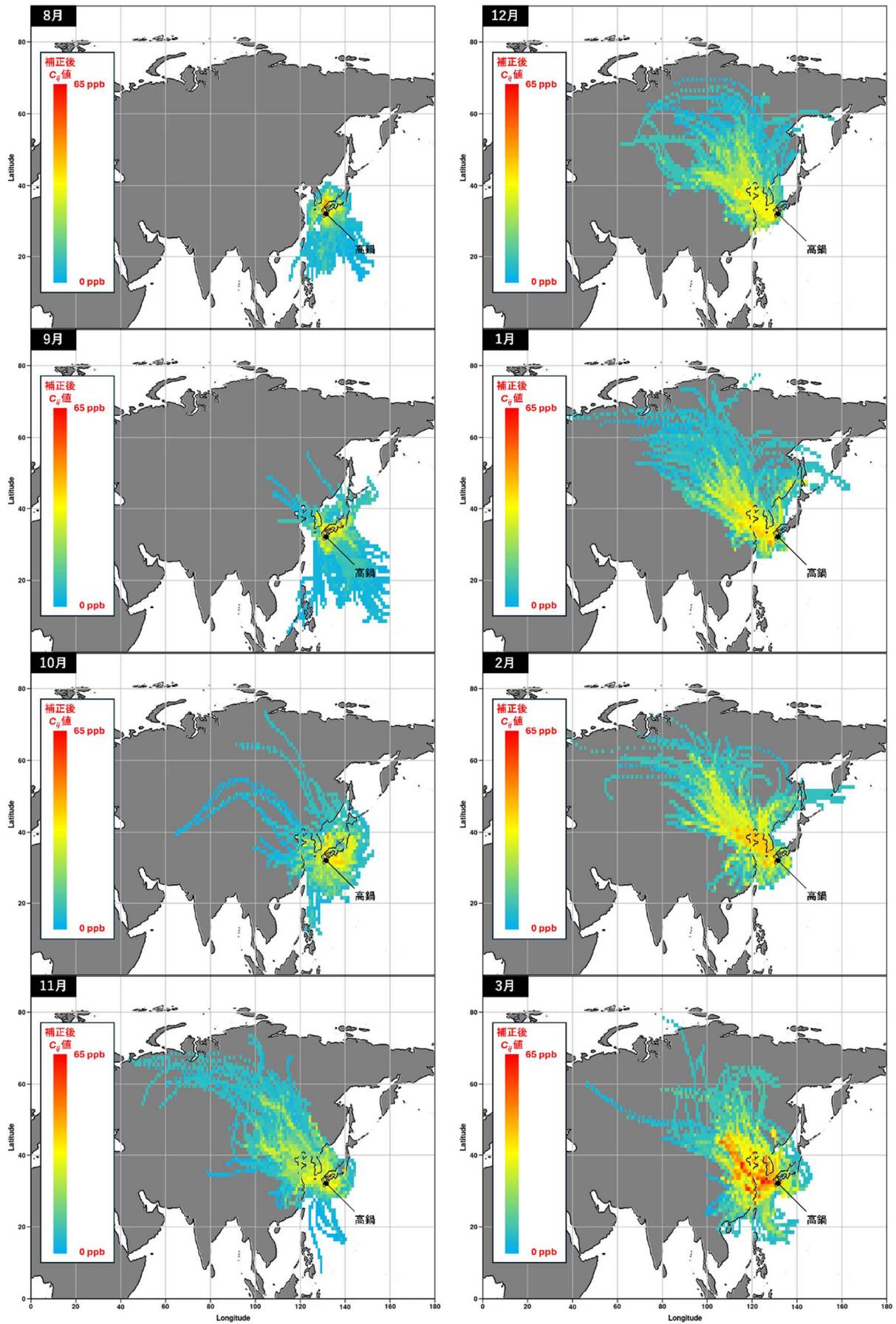


図 29 8～3月の解析結果

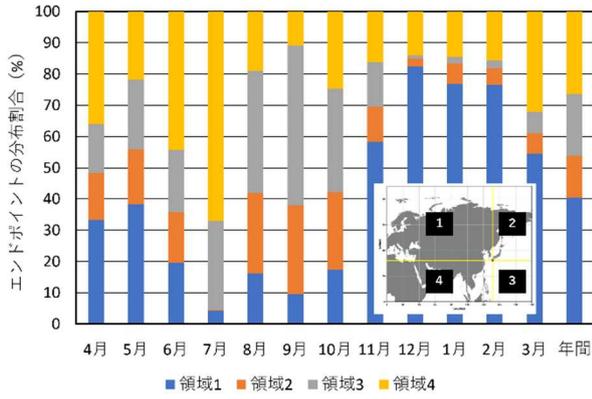


図 30 各月のエンドポイントの分布割合

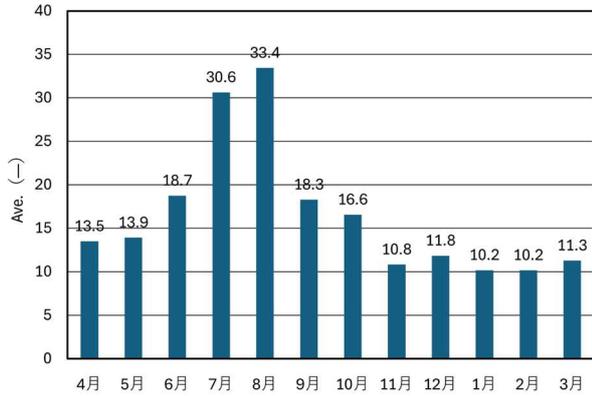


図 31 各月の Ave. 値

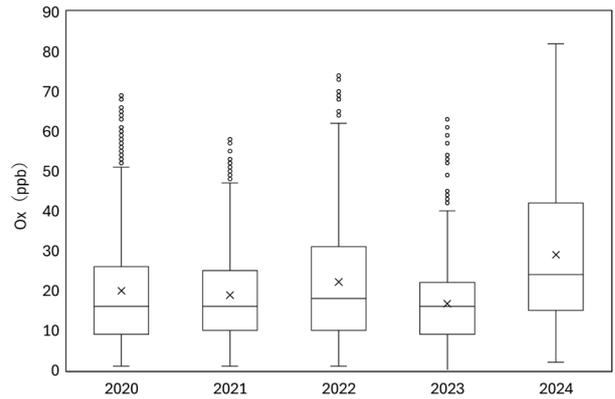


図 32 過去 5 年間の 8 月の Ox 濃度

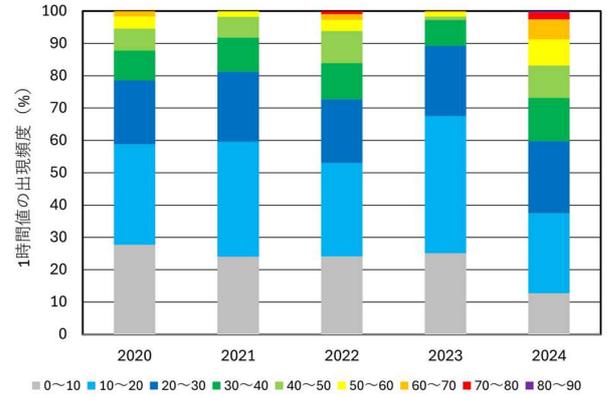


図 33 1 時間値の出現頻度

2-4 8月に着目した解析結果

前述のとおり、本県への大気塊の流入は夏に南方海上寄りに変化するため、清澄な海上の大気塊の流入によって Ox 濃度の上昇が抑制されると考えられ、過去 5 年間の濃度状況は表 4 及び図 32, 33 に示すとおりである。いずれの年も環境基準を超える Ox 濃度が観測されているものの、2023 (令和 5) 年度までは箱ひげ図上で外れ値として扱われており、1 か月の中でも稀な事象であったと考えられる。一方、2024 (令和 6) 年度は過去 5 年間の中で平均濃度、環境基準超過の時間数ともに高く、61 ppb 以上の濃度が観測されても、外れ値とはならなかった。

表 4 61 ppb 以上を観測した時間数

| 年度    | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 |
|-------|------|------|------|------|------|
| 時間(h) | 12   | 1    | 17   | 3    | 53   |

過去 5 年間の CWT 法による解析結果を図 34 に示す。いずれの年度も本県の南方海上からの大気塊の流入が卓越する傾向が認められ、Ox 濃度

が低下する要因になっているものと考えられる。基準超過延べ 53 時間の 2024 (令和 6) 年度については、前述のとおり西日本とその周辺に比較的濃度の高いエリアが存在し、国内からの移流の可能性が示唆される結果となった。次いで、延べ 17 時間の 2022 (令和 4) 年度は他の年度と異なり大陸方向からの大気塊の流入も認められ、大陸を起源とする西方からの寄与が大きいことを示唆する結果となった。また、2020 (令和 2) 年度は図 35 に示すとおり九州北部にスポット的に濃度の高いエリアが認められた。これらのことから、本県の 8 月の高濃度事象は年度によって要因が異なる可能性が考えられる。なお、各年度の Ave. 値は表 5 に示すとおりであり、8 月に関しては流跡線の広がりが大きく、Ave. 値が小さいほど高濃度事象が起りにくい傾向にあることが確認された。

表 5 8 月の Ave. 値

| 年度   | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 |
|------|------|------|------|------|------|
| Ave. | 34.1 | 21.7 | 31.7 | 17.8 | 33.4 |

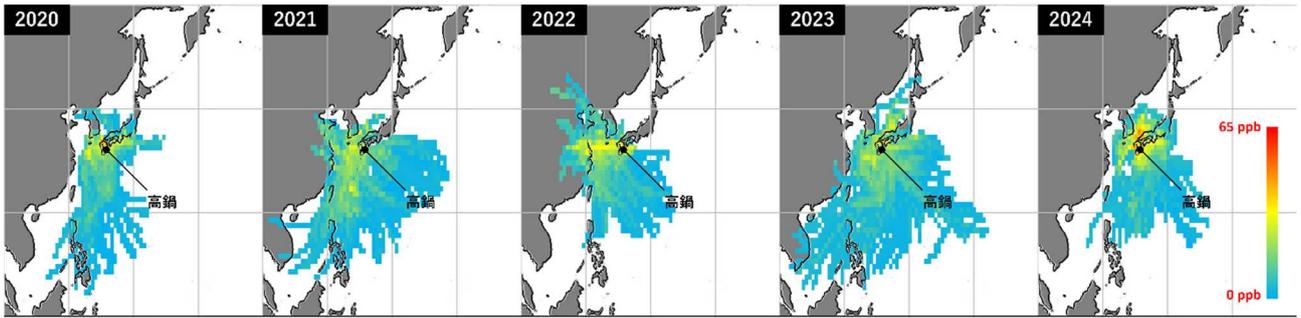


図 34 CWT 法による過去 5 年間の 8 月の解析結果

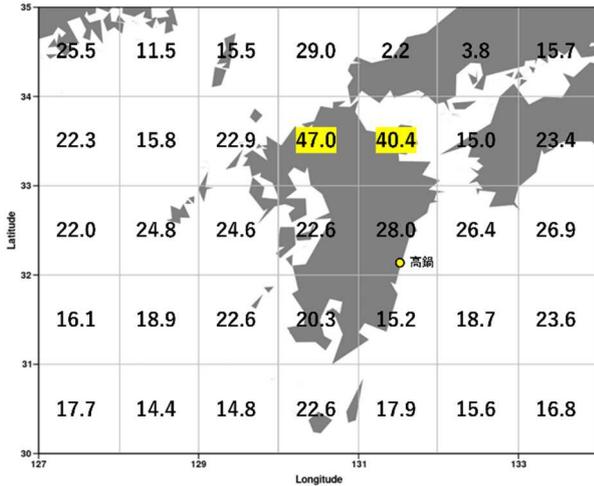


図 35 2020 年 8 月の補正後の  $C_{ij}$  値の分布

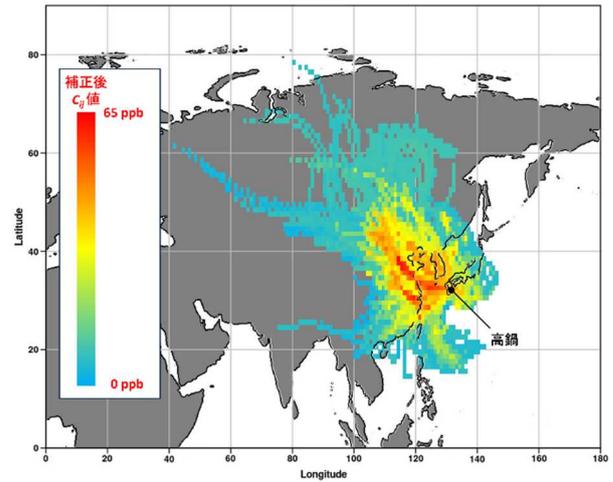


図 36 3 月の解析結果 (1 時間間隔)

### 2-5 3 月に着目した解析結果

令和 6 年度の最高濃度を観測した 3 月について、1 時間間隔で計算した後方流跡線を用いて解析を行った結果を図 36 に示す。図 29 と同様に、大陸方向に高い  $C_{ij}$  値のエリアが広がっている様子を確認することができた。最高濃度を観測した 23 日を含む前後 1 週間の後方流跡線を図 37 に、この期間の  $O_x$  濃度の推移を図 38 に示す。赤線で示した 23 日は 1 日分計 24 本の流跡線がばらつくことなく収束して同じエリアを通過していることが分かった。また、最高濃度を観測した 19~21 時以降に濃度は低下に転じたものの高止まりとなった。国立天文台の発表<sup>10)</sup>による 23 日の本県の日入り時刻は 18 時 28 分であり、地域内における  $O_x$  の光化学生成に高濃度の要因を求めることは困難であると考えられる。

次に、3 時間間隔で計算した後方流跡線の遡行最終地点の対地高度を 1 km 間隔で階級分けした結果を図 39 に示す。6~10 月にかけては、最終地点の高度が 3 km 未満の割合が多いが、それら以外の月では高高度からの大気塊の流入が発生し

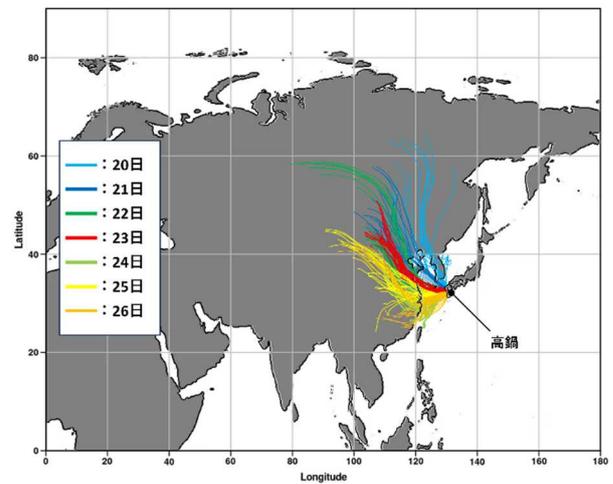


図 37 3 月 20 日~26 日の後方流跡線

やすい傾向が認められた。高層の大気の降下は成層圏オゾンを上付近にもたらすと言われており<sup>11)</sup>、高濃度事象に一定程度寄与している可能性が考えられる。但し、3 月 20 日~26 日にかけては図 40 に示すとおり、特筆すべき高高度からの流入は確認されず、成層圏オゾンの寄与について言及することは困難であった。

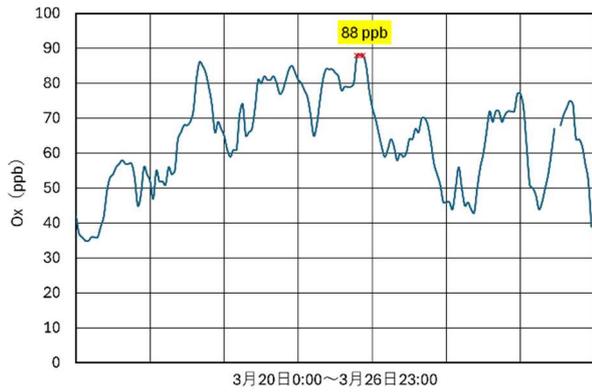


図 38 3月20日～26日のO<sub>x</sub>濃度の推移

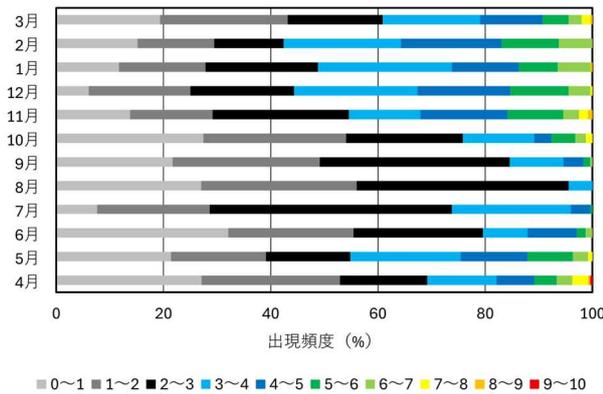


図 39 各月の遡行最終地点の対地高度

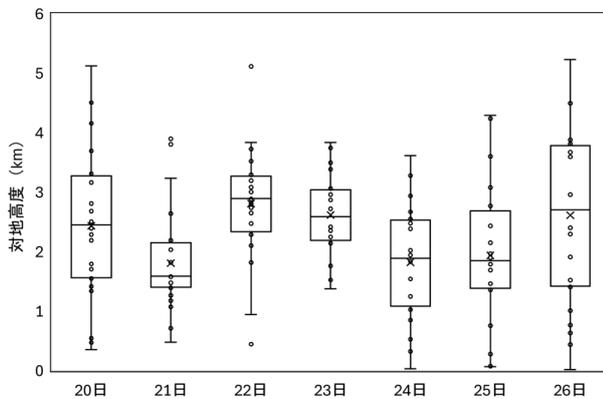
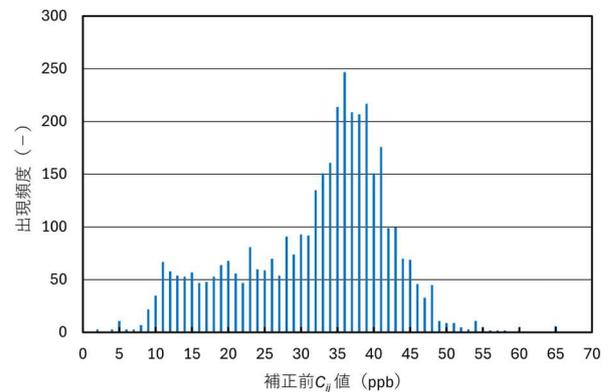


図 40 3月20日～26日の  
遡行最終地点の対地高度

## 2-6 2024 (令和6) 年度の解析結果

前節においてデータ数を増やしても CWT 法による解析が可能であったことから、3 時間間隔の各月のデータを 1 年分まとめ併せて解析した結果を図 41 に示す。流跡線の総数は 2920 本、エンドポイントの総数は 210240 点であったが、支障なく解析を行うことができた。補正前後の  $C_{ij}$  値の出現頻度 (例えば 5 は 5 以上 6 未満を表す) は図 42 に示す分布となり、補正係数  $W_{ij}$  によって分布

の形状は大きく変化した。また、エンドポイントは 3829 個の格子に分配され、一つの格子に含まれるエンドポイント数の分布は図 43 に示すものとなった。図中の破線は左から 0.5Ave., Ave., 3Ave.を表している。重み 1.00 で補正される格子は全体の約 7%, 最小の 0.17 で補正される格子はその 10 倍程度存在した。また、図 30 で示したとおりエンドポイントの約 7 割が領域 1 と 4 に分布し、本県は西方に位置するユーラシア大陸方向からの影響を受けやすいエリアに位置していることが明確となった。



↓  $\times W_{ij}$

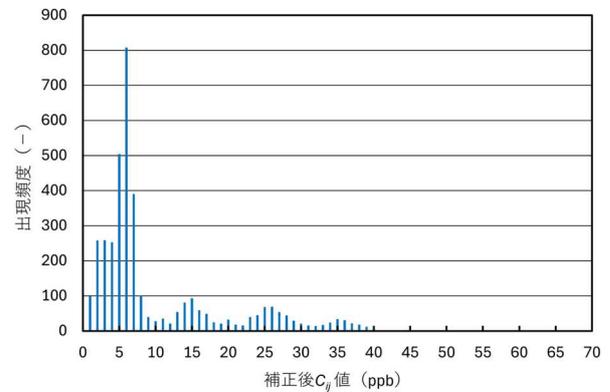


図 42 補正前後の  $C_{ij}$  値の分布

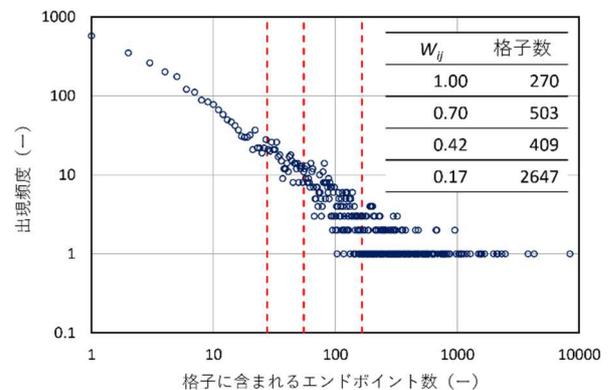


図 43 格子に含まれるエンドポイント数の分布

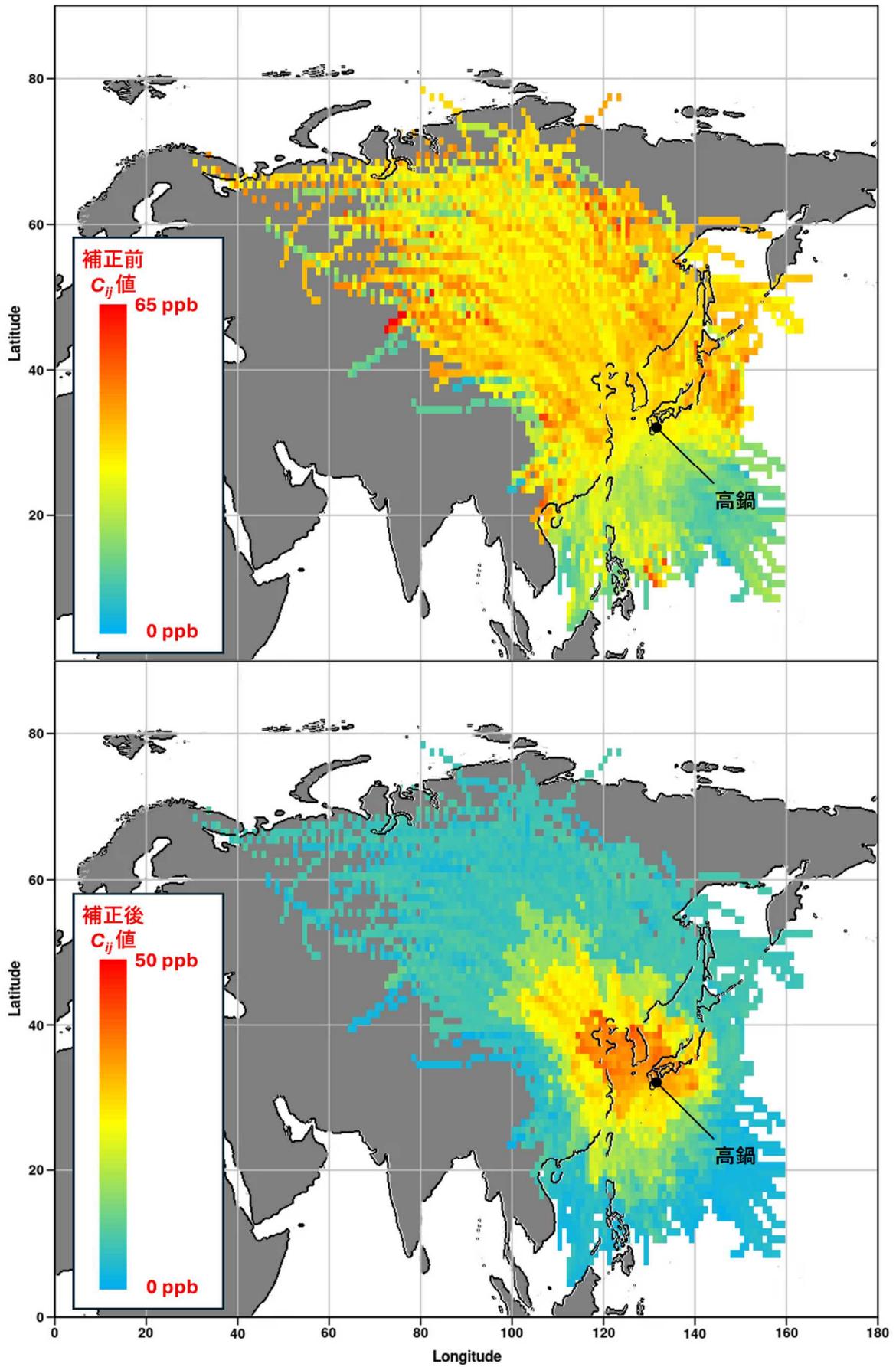


図 41 2024 (令和 6) 年度の解析結果

## まとめ

表計算ソフトを使用して CWT 法を実施する方法を思案し、2024（令和 6）年度の高鍋局で観測された Ox 濃度に適用した結果、次のことが明らかとなった。

- 本県の Ox 濃度は冬から春にかけて高く、日差しの強い夏に低下する傾向が認められた。また、冬から春にかけては、前日夜間濃度も高く、本県外部からの移流が寄与している可能性が示唆された。
- 環境基準を上回る Ox 濃度は日照時間に関わらず観測され、地域内の光化学生成以外に要因がある可能性が支持された。
- DPOx を指標とした解析の結果、本県の光化学生成のポテンシャルは 1 桁 ppb 程度の水準であると推定された。
- CWT 法による各月の解析の結果、ユーラシア大陸方向からの大気塊の流入が卓越する時期と本県の Ox 濃度が上昇する時期が概ね一致する傾向が認められた。
- 夏は本県の南方海上からの大気塊の流入が卓越し、清澄な海上の大気塊の流入によって Ox 濃度が低下することが示唆された。
- Ox 濃度が低下する 8 月に発生する高濃度事象については、国内と国外に汚染源が存在する可能性が示唆され、年度によって要因が異なった。
- 1 時間値の最高濃度を観測した 3 月 23 日については、日没後の観測であることや夜間帯も濃度が高い状況が続いたことから、本県外部からの移流である可能性が強く示唆された。また、CWT 法による解析の結果もそれを支持するものとなった。
- 表計算ソフトを用いて 20 万点程度のエンドポイントの処理が可能であることが実証された。また、スピル機能を活用することによってデータ変動に柔軟に対応可能であることが明らかとなった。

以上のとおり、CWT 法を用いることによって Ox の濃度データの解析だけでは把握できない本県の大気環境に関する有益な知見を得ることができた。今後も毎月の解析を継続し、目には見えない本県の大気環境の本質を明らかにしていきたいと考えている。

## 謝辞

後方流跡線解析の場を提供いただいた国立研究開発法人国立環境研究所に感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1)岩田龍祐, 十川隆博. 県内初の光化学オキシダント注意報について. 宮崎県衛生環境研究所年報 2020 ; 31 : 79-81.
- 2)日岡一也, 山田和史, 田中智博. 光化学オキシダントにおける長期的な変動の解析. 宮崎県衛生環境研究所年報 2024 ; 34 : 74-77.
- 3)Hsu Y-K, Holsen TM, Hopke PK. Comparison of hybrid receptor models to locate PCB sources in Chicago. Atmospheric Environment 2003 ; 37 : 545-562.
- 4)国立環境研究所. 地球環境データベース流跡線解析 (METEX). <https://db.cger.nies.go.jp/ged/metex/ja/index.html> (2025 年 7 月 30 日アクセス可能).
- 5)米国 NCEP. NCEP Climate Forecast System Version 2 (CFSv2) 6-hourly Products. <https://rda.ucar.edu/datasets/d094000/> (2025 年 7 月 30 日アクセス可能).
- 6)Polissar AV, Hopke PK, Harris JM. Source regions for atmospheric aerosol measured at Barrow, Alaska. Environmental Science & Technology 2001 ; 35 : 4214-4226.
- 7)若松伸司. 大気環境むかし・いまー第 2 講 大気環境常時監視データの活用に向けてー. 大気環境学会誌 2023 ; 58 (6) : 154-181.
- 8)気象庁. 過去の気象データ・ダウンロード. <https://www.data.jma.go.jp/risk/obsdl/> (2025 年 7 月 30 日アクセス可能)
- 9)村尾直人. 大気モデルー第 6 講 流跡線解析ー. 大気環境学会誌 2011 ; 46 (5) : A61-A67.
- 10)国立天文台. 各地のこよみ. <https://eco.mtk.nao.ac.jp/koyomi/dni/> (2025 年 7 月 30 日アクセス可能)
- 11)Ogawa T, Miyata A. Seasonal Variation of the Tropospheric Ozone : A Summer Minimum in Japan. Journal of the Meteorological Society of Japan 1985 ; 63 : 937-946.