

近年の中国におけるオゾン汚染の季節別・地域別特徴

Seasonal and Regional Characteristics of Ozone Pollution in China in Recent Years

朱美華・箕浦宏明・岡山紳一郎・渡辺宏江

Meihua Zhu*, Hiroaki Minoura, Shinichiro Okayama, Hiroe Watanabe

【要約】2013年以降、中国政府の強力なトップダウン式の大気汚染対策により、中国の大気環境は大幅に改善されている。汚染物質6つの指標（PM_{2.5}、PM₁₀、オゾン、SO₂、NO₂、CO）のうち、オゾン以外の4つの指標の濃度は下がってきているが、オゾン濃度は上昇し続け、大気汚染対策の急務となっている。本研究では、FFT（Fast Fourier Transform）分析およびクラスター解析等を通じて、オゾン汚染の季節特徴と地域特徴を明らかにした。中国のオゾン濃度は夏に高く冬に低い特徴があり、オゾン汚染は夏季に顕著であることが明らかになった。分析結果から見ると、BTH地域（北京市・天津市・河北省）はその地域の産業構造に大きく影響され、大きく4つのタイプに分類できた。一方、珠江デルタ地域（広東省を中心とする経済圏）は海洋の季節風の影響を受け、大きく3つのタイプ別に分析することができた。両地域を比較して見ると、BTH地域が珠江デルタ地域よりオゾン汚染が深刻であり、BTH地域では6月のオゾン濃度が最も高く、その後9月に向けて減少している。その反面、珠江デルタ地域は夏季のオゾン濃度のピークが見られない。

キーワード：中国 オゾン汚染 季節特性 地域特性

1. はじめに

近年、中国の大気環境は明らかな改善を見せている。2013年、北京市をはじめとする大都市で、高濃度のPM_{2.5}が大きな社会問題となり、世界中の注目を受けた。それをきっかけに、2013年6月に「大気汚染防止10条措置」、9月に「大気汚染防止行動計画2013-2017」、2018年6月に「青空保護勝利戦3年行動計画」（2018-2020）を公表するなど、一連の政策を実施してきた。トップダウン式による厳しい規制により、中国の大気環境は目に見える改善を果たし、主な大気汚染物質であるPM_{2.5}、PM₁₀、オゾン、SO₂、NO₂、COの6つの指標のうち、オゾン以外の5つの指標の濃度は明らかに低下した。2013年と2019年の74の主要都市の年平均濃度値を比較して見ると、PM_{2.5}は72 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ から44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ に、PM₁₀は118 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ から74 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ に、SO₂は40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ から12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ に、NO₂は44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ から33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ に減少している。その反面、オゾン濃度は139 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ から167 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ に上昇し、中国における大気汚染対策の新たな課題となっている。

一方、オゾン汚染の課題は中国特有の問題ではない。欧州諸国やアメリカもかつて経験した課題であり、日本もいまだに自国の基準がクリアできていない状況である。主成分がオゾンである光化学オキシダントの環境基準値1時間値0.06 ppmはほとんどの地域で未達成であり（若松ら、2014¹）、日本で観測された2005～2007年のオゾン濃度について、8時間値を対象としているWHO（World Health Organization）

および、USEPA（United States Environmental Protection Agency）基準による評価を行っても多くの地点で両基準を満足しておらず、日本の大気汚染は欧米より深刻だと指摘されている（大泉ら、2013²）。

オゾンは代表的な二次生成大気汚染物質（大気中で化学的な変化を受けて生成される物質）であるため、大気汚染対策の実施を通じて、発生源から排出される一次大気汚染物質を単純に削減するだけでは、直接的なオゾン濃度の低減につながり難く、大気汚染対策の最大の難点とも指摘されている。

近年、中国のオゾン濃度の上昇が問題視され、PM_{2.5}以上にオゾン対策に力を入れるようになり、オゾン生成メカニズムを解明するための研究が盛んに行われている。オゾン濃度の高い夏季におけるオゾン汚染の代表的なパターンやオゾン濃度の季節特徴の解明（Dong et al., 2020⁴）、気候条件がオゾン濃度の変動に与える影響の解明（Gong et al., 2019⁵; Liu et al., 2020a⁶）、汚染物質の排出がオゾン濃度の上昇に与える影響（Liu et al., 2019⁷; Liu et al., 2020b⁸）、汚染物質の排出や天候影響等多要因の総合分析（Wang et al., 2017⁹; Lu et al., 2019¹⁰; Gao et al., 2020¹¹）等が実施され、中国のオゾン汚染のメカニズムや影響要因の解明に貢献した。

一方、より効果的なオゾン対策のためには、その地域に焦点を当てたより詳細な、かつ丁寧な分析が、地域特性の提案には必要であり、そのためにまず地域ごとのオゾン汚染の分析が求められる。従って、

* アジア大気汚染研究センター Asia Center for Air Pollution Research

本研究では、中国の約1500箇所測定されているオゾン濃度を始めとする大気汚染物質の1時間データ(ビックデータ)を利用してFFT(Fast Fourier Transform)分析およびクラスター解析を通じて、オゾン汚染の季節を含めた濃度変動の特徴を分析するとともに、中国において重要な経済圏であるBTH地域(北京市・天津市・河北省の経済圏)と珠江デルタ地域(広東省を中心とする経済圏)の地域特徴を明らかにする。

2. 分析材料および分析方法

本研究で利用した大気汚染データは、<http://beijingair.sinaapp.com/#messy1200> サイトから入手した。これらのデータは、中国政府が公開しているサイトを巡回ソフトで回収し、収録したものであり、中国政府が確定した公式データとは異なる。この理由は本研究では時間単位の濃度変動を解析するため、汚染物質濃度の1時間値が必要であったが、中国政府が公開している確定データは日平均濃度のみであったためである。なお中国全国の測定局の1時間データが2014年以降から入手可能である。

気象データは、米国海洋大気庁(NOAA)が公開している客観解析データのうち、<http://ready.arl.noaa.gov/archives.php> サイトから入手できる0.25度の解像度のNCEP(National Centers for Environmental Prediction)データを、NOAAの後方流跡線解析プログラム(HYSPLIT ver.4)および、米国NCAR(National Center for Atmospheric research)のWRF(Weather Research & Forecasting Model)の出力データとして利用し、0.02度格子上の気象データを得た。

上記の公開データ以外に、本研究ではChina National Environmental Monitoring Center(中国環境監視総局)の公表月報のデータも利用した。

一般的に、大気汚染の状態を評価する際には、汚染物質の濃度を用いるが、中国では後述する空気質総合指数をベースとした、健康影響に関与する「主要汚染物質」という指標も導入している。China National Environmental Monitoring Centerは、2013年1月から中国の74の主要都市の空気質の月報を公表している。公表当初は74都市の空気質総合指数のみを公表していたが、2014年8月から、最大指数と主要汚染物質が指標として追加された。中国国家基準である「環境空気質標準」には6つの汚染物質指標(PM_{2.5}、PM₁₀、O₃、NO₂、SO₂、CO)がある。それぞれの汚染物質指標*I_i*の算出値のうち、最も大きい値を表している指標が主要汚染物質となる。なお、汚染物質指標*I_i*の計算方法は以下である。

$$\frac{C_i}{S_i} = I_i$$

*C_i*は汚染物質*i*の濃度値である。*i*がSO₂、NO₂、PM₁₀、PM_{2.5}の場合は月平均値、*i*がCOの場合は日平均値の月間95パーセンタイル値、*i*がO₃の場合は8時間平均値の月間90パーセンタイル値である。

*S_i*は汚染物質*i*の自然保護区や特殊な保護を必要とした区域以外の一般環境基準として定めた二級基準値である。*i*がSO₂、NO₂、PM₁₀、PM_{2.5}の場合は年平均二級基準、*i*がCOの場合は日平均二級基準、*i*がO₃の場合は8時間平均値二級基準である。

本研究では、上記汚染指標を利用した解析と共に、1時間データを利用して、FF分析およびクラスター解析、R言語のsmooth.spline関数、そして単純集計を通じて、中国の地域別のオゾン汚染の特徴の解明を試みた。

3. 解析結果

3.1 季節別のオゾン汚染状況

中国のオゾン汚染の現状とその傾向を明らかにするため、本研究ではChina National Environmental Monitoring Centerが2015年1月から2019年12月までに公表した月報のデータを用いて、6つの汚染物質指標(PM_{2.5}、PM₁₀、O₃、NO₂、SO₂、CO)のうち、オゾンが主要汚染物質となった都市数が観測対象都市全体に占める割合を算出した。結果を図1に示す。

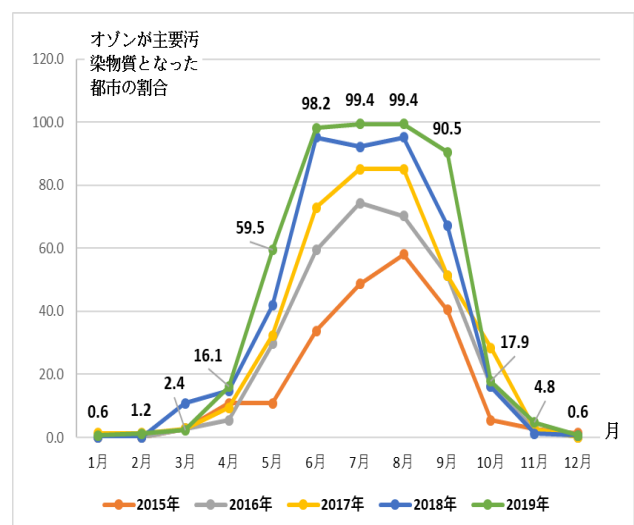


図1 オゾンが主要汚染物質となった都市が観測対象都市全体に占める割合 (%)

注：2015年1月～2018年5月までの観測対象都市数は74であり、2018年6月～2019年12月までの観測対象都市は168である。

データ出所：『全国都市空気質報告』各年各月版

オゾン汚染に関して、2つの傾向が顕著に現れている。1つ目は、2015年から2019年までの夏季において、オゾンが主要汚染物質となっており、その割合が年々増加している点である。特に、2018年以降の6月から8月にかけては、観測対象都

市全体の9割以上で主要汚染物質がオゾンであった。2019年に入ると、その割合はさらに上昇し、約100%に達していた。2つ目は、夏季の前後となる5月、9月および10月においても、オゾンが主要汚染物質となった都市の割合が年々増加してきていることである。具体的に見てみると、5月にオゾンが主要汚染物質となった都市数は2015年には全体の10%台であったが、2019年には約60%まで上昇している。そして、9月の状況を見ると、2015年の40%台から2019年の90%台まで急上昇し、2019年の9月は観測都市のほぼすべてでオゾンが主要汚染物質となっている。オゾン汚染は従来6月～8月の3か月に集中していたが、近年は5月～9月までとオゾン汚染の期間がより長期になってきた。

3.2 地域別のオゾン汚染状況

中国は国土面積が広大であるうえ、地域によって気候状況（大陸性・海洋性など）、経済構造や経済の発展水準が多様である。したがって、本研究では中国のオゾン汚染状況を明らかにする際に、中国のBTH地域と珠江デルタ地域を対象に、それぞれの地域のオゾン汚染の特徴をまとめることにした。BTH地域は具体的に、北京市、天津市ほか、河北省の12の都市を含み、珠江デルタ地域は広州市を中心とする9つの都市が含まれる。

図2は、BTH地域と珠江デルタ地域の2015年から2019年の月平均オゾン濃度を示している。

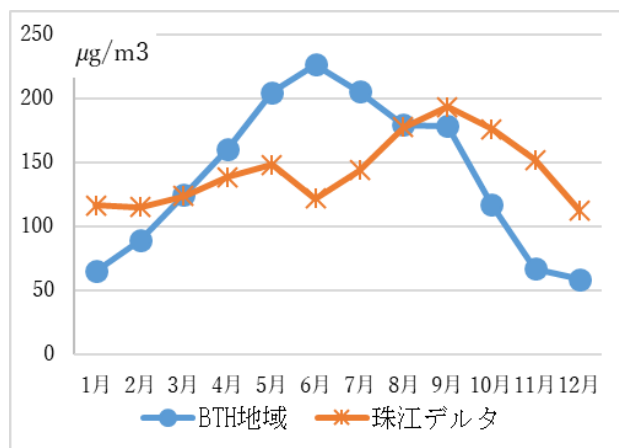


図2 BTH地域と珠江デルタ地域の月平均オゾン濃度変化

データ出所：『全国都市空気質報告』各年各月版

夏季におけるオゾン濃度の地域特徴をより詳細に見ると、6月から9月まで、BTH地域と珠江デルタ地域は異なる傾向を示している。BTH地域では6月にピークを迎えた後、その後徐々にオゾン濃度が下がる傾向であるが、珠江デルタ地域では1月から5月までに徐々に上昇した後、6月では濃度が一旦減少に転じた後に再び上昇し続け、9月にピークを迎えている。

全体的に見ると、BTH地域は4月から9月まで、

珠江デルタ地域では8月と10月が中国の国家基準を超過している。そして、BTH地域の月平均濃度は5月から7月にかけて $200\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0°C 、1気圧で、 93.33ppb) を超過し、中国のオゾン濃度基準 $160\mu\text{g}/\text{m}^3$ を超過した高い濃度を継続していることから、オゾン濃度の対策が急務であると考えられる。

3.3 BTH地域におけるオゾン濃度のクラスター分析

BTH地域の汚染解析は、図3に示す北緯36度～42度、東経113度～119度の地域に対して実施した。

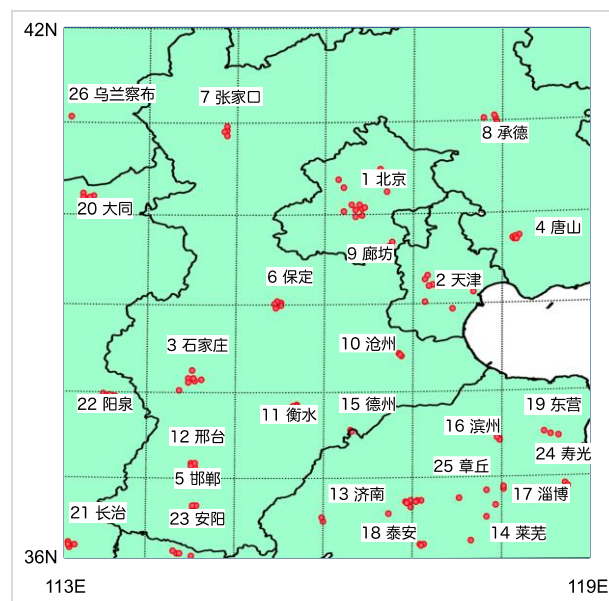


図3 BTH地域の都市と測定局位置

対象地域には、図中赤丸で示す26都市119の測定局が存在し、2018年1年間の大気汚染1時間データを利用した。2018年に焦点を当てた理由は、中国のオゾン濃度が公表された2013年から2019年までの推移の中で、年間平均オゾン濃度が2018年にピークに達し、2019年からやや改善された傾向が見られたためである。

オゾン濃度は、 NO_2 やVOCsと言った生成のための前駆体の影響を受けるほか、 NO との消滅反応によっても変化する。BTH地域では種々の産業が存在し、場所と時刻によって上記物質が地域特有の濃度変動を示し、その結果、それらの濃度に応じてオゾン濃度は異なる濃度変動を生じる。地域的な違いや都市間の属性を検討するため、119の測定局で計測されたオゾン濃度の変化について、26都市ごとに平均濃度を求め、都市の環境濃度にクラスター解析と呼ばれる手法を適用することにより、都市の属性をグループ分けした。理論的には年間8760の1時間値が得られるが、データ欠損のうち短期間のデータ欠損は、スプライン近似補間したほか、長期間データ欠損のあった2018年12月後半以降を除外し、12月21日までの8515時間のデータを利用した。また、後にオゾン濃度変動をパワースペクトルから解析することを考え、1時間周期のパワースペクトルが計

算できるよう、8515時間のデータを 2^{15} である32768データ(約15.6分間隔)にスプライン近似補間して、クラスター解析を実施した。

26都市のスプラインで補間した時間変動オゾンデータを、ウォード法でクラスター解析を行っ

た結果、図4に示す5つのグループに分けることができ、グループは地域ごとに偏在していることが明らかとなった。

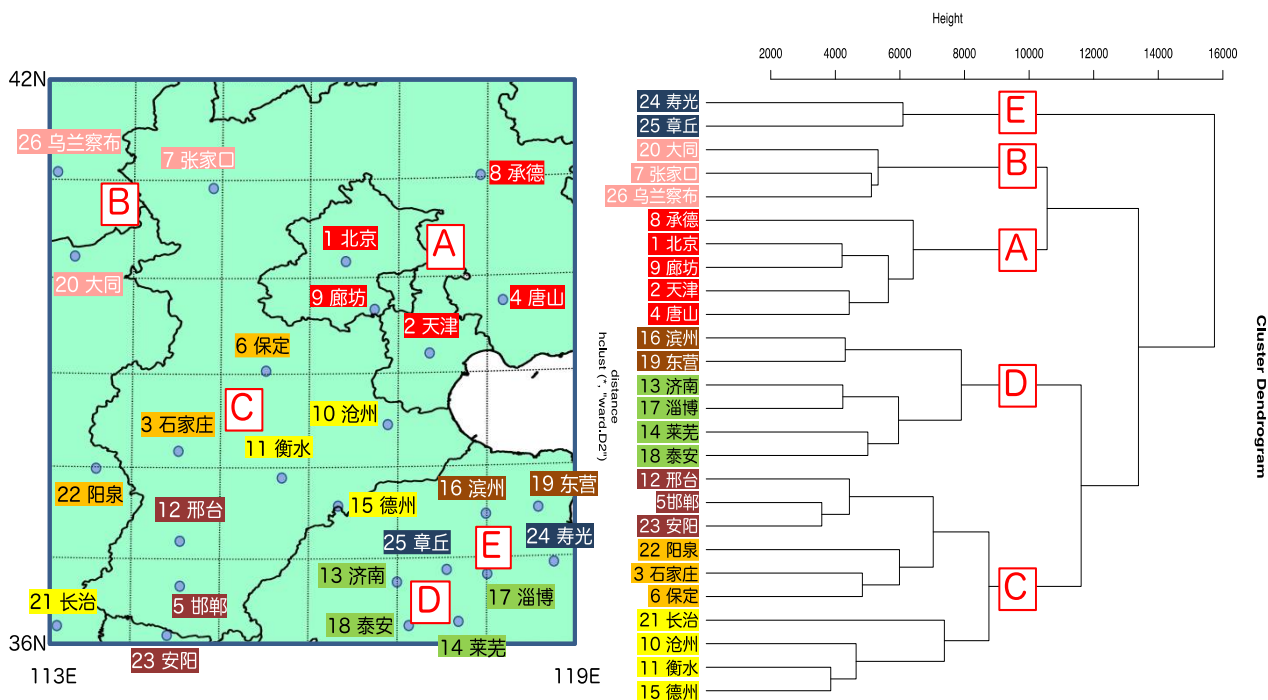


図4： BTH地域の都市別オゾン濃度変動のクラスター解析結果

北京や天津を含むAグループは、BTH地域の北東に位置する。また、Aグループに最も近いBグループは北京の西側に位置するグループで、流跡線解析の結果、夏季以外でこの地域を通過して北京に流跡線が到達していたことが明らかとなり、汚染気塊間にも密接な関係があると推察された。CグループとDグループは、北京の南～南西に位置する地域である。クラスター解析したグループがどのような濃度変化の特徴を有するかを明らかにするため、グループごとに平均化した濃度データを用いて、FFT分析よりパワースペクトルを求めた。結果を図5に示す。オゾン濃度の変動は、NOとの消滅反応が秒単位の短時間で進行する一方で、日中の光化学反応によるオゾン生成が数時間単位で進む。さらに、日射強度や揮発性炭化水素(VOC)の排出量等が季節単位でオゾン生成に影響を及ぼす。オゾンのパワースペクトルは、都市の産業構造を表す指標となり得る。パワースペクトルで最も大きい値を示す周期は、図5に示すように24時間であり、オゾン濃度が24時間周期で変動する割合が大きいことを示す。次に大きいのは、24時間の倍音である12時間である。パワースペクトルは、図6に示すように長周期のパワーになるほど振動エネルギーが高くバイアスがかかっている点に注意が必要である。Cグループの24時間パワーは他のグループと比較して大きい。Cグル

ープの都市には多くの工場が稼働しており、毎日規則的なNO排出がある。オゾン濃度を規則的に変動させる要因として、NO排出が工場の生産工程に応じて8、12、24時間等の周期で規則的に排出されている背景があると考えられる。

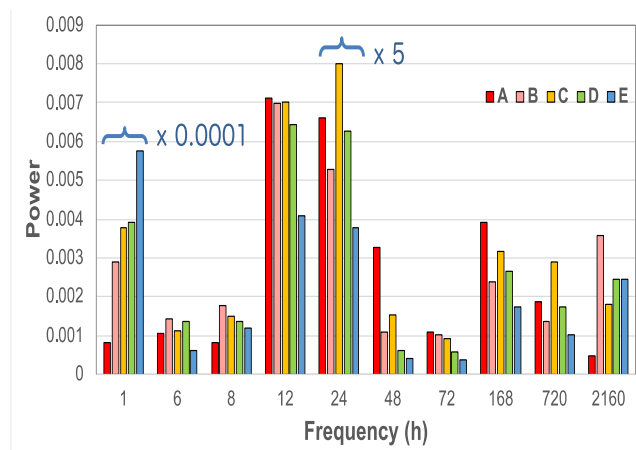


図5：都市別オゾン濃度変動のパワースペクトル比較結果

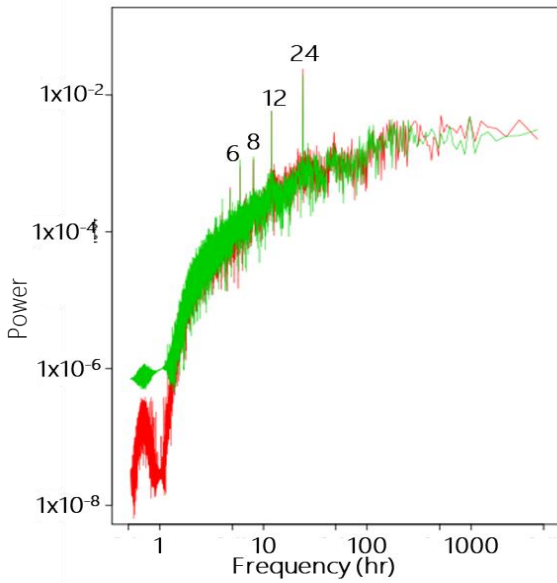
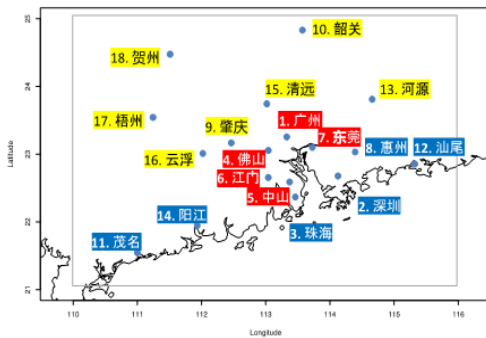


図6：パワースペクトル比較結果
(A-group:赤、C-group:緑)

一方、DグループとEグループは、自然豊かな地域に位置し、2160時間(3ヶ月)周期のパワーが高く、オゾン濃度が季節ごとに濃度変動している影響が強い地域と考えられる。さらに、このような清浄地域にもかかわらず、1時間のパワーが高い理由として、測定地点を通過する自動車NOなど、単発的なNOでオゾン濃度が左右されることが考えられる。

3.4 珠江デルタ地域のオゾン濃度のクラスター分析

珠江デルタ地域では、北緯22度～24度、東経112



度～115度の範囲の18都市83測定局データを使用した(なお、香港は含まれていない)。珠江デルタ地域は、BTH地域が初夏にオゾン濃度がピークを示すのに対し、秋季にピークが見られる。一例として、2018年10月の8時間オゾン濃度(90パーセンタイル値)の空間分布を図7に示す。

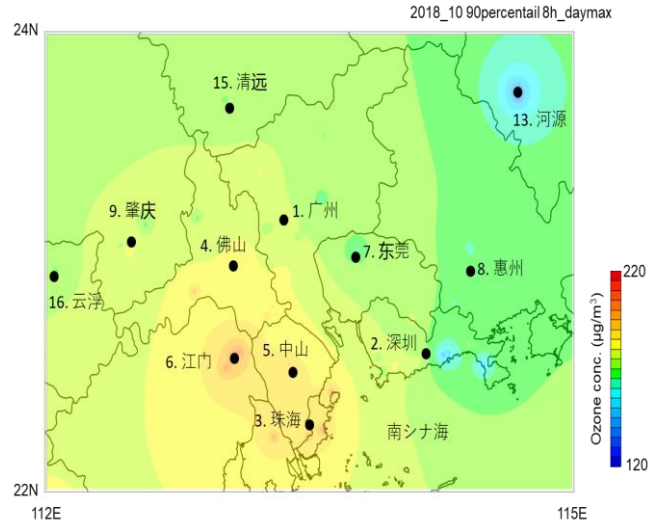


図7：珠江デルタ地域のオゾン濃度分布

図7に示すように、高濃度地区は、江門や中山など、珠江西側が高くなる傾向にある。珠江デルタ地域においても、BTH地域と同様の手順で、18都市ごとに平均した1時間濃度からスプライン近似で32,768データを作成し、クラスター解析を行った。その結果、図8に示すように3つのグループに分けることができた。Aのグループは、広州を代表とする珠江周辺の大都市である。Aグループに近いBグループは、Aグループより内陸に位置し、Cグループは太平洋沿岸に位置するグループで、地理条件の違いがオゾン濃度変動の特徴の違いとして現れた。

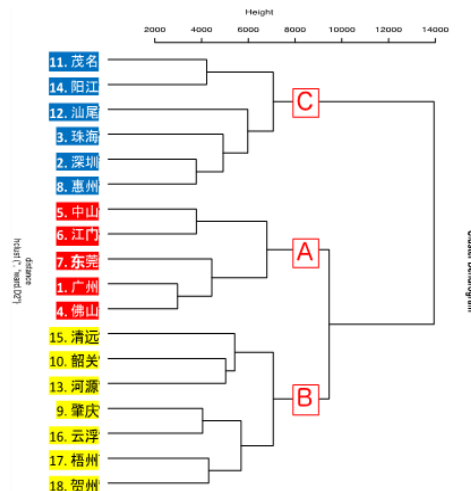


図8：珠江デルタ地域の都市別オゾン濃度変動のクラスター解析結果

3.5 BTH 地域と珠江デルタ地域の比較分析

最高オゾン濃度の出現が、BTH 地域では初夏、珠江デルタ地域では秋季であることを述べたが、両地域でのオゾン濃度の季節変化の違いを見るため、グループ分けしたそれぞれの地域で季節変化を比較した。都市の産業構造の違いによるオゾン濃度変化は、最大メソスケール程度の時空間変動(数時間、数百 km)で見ることができるが、BTH 地域と珠江デルタ地域の差は、シノプティックスケール(月～季節、1000km 以上)の差で顕著に現れる。両地域の季節変化は大きく異なり、結果を図 9 に示す。ここでは、R 言語の smooth.spline 関数を用いて、約 1 ヶ月の平滑フィルターより得られた結果を示す。光化学反応が沈静化する 10 月から 2 月にかけて、BTH 地域と

珠江デルタ地域のオゾン濃度に大きな違いは見られないが、4 月以降(90 日目以降)から両者は大きく異なる変動を示した。BTH 地域ではどのグループも初夏に向かってオゾン濃度が増加する傾向を示したのに対し、珠江デルタ地域では初夏に向かって濃度低下を示したのである。珠江デルタ地域では 7 月以降(210 日目以降)濃度増加を示し、結果として秋季(270 日~300 日)に高濃度を示す傾向となった。緯度の低い地域では太平洋高気圧下の清浄な大気の影響が夏季に現れやすく、夏季の南風とともに濃度低下したと考えられる。一方、BTH 地域は日本列島に阻まれ、太平洋高気圧の影響が現れにくい内陸型のオゾン濃度変動を示したものと考えられる。

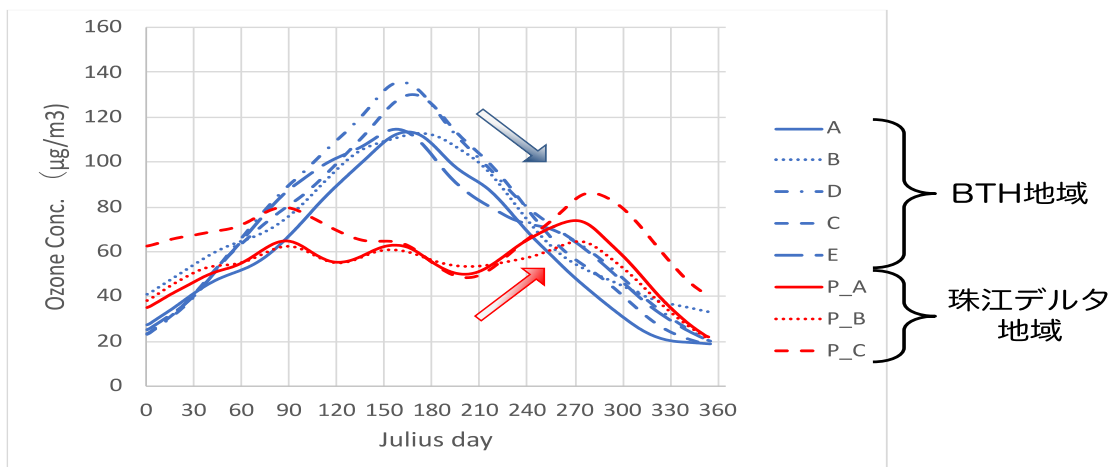


図9 地域ごとグループ別オゾン濃度の季節変化

4. まとめ

近年、中国の大気汚染状況は目に見える形で改善されている。6つの汚染物質の指標、PM_{2.5}、PM₁₀、オゾン (O₃)、SO₂、NO₂、COのうち、オゾン以外の4つの汚染物質の濃度は2013年以来継続的に減少する傾向にあるが、オゾン濃度だけが上昇し続けている。そのため、本研究ではオゾン濃度の特徴を解明することに焦点を絞った。一方、中国は国土が大変広く、地域の地形・気候・経済発展状況も大変大きな差がある。したがって、本研究ではオゾン濃度の四季変化の特徴だけではなく、中国のBTH地域と珠江デルタ地域を対象としてオゾン濃度の地域的特徴も明らかにすることを試みた。

まず、中国のオゾン濃度の季節的特徴を見ると、春先からオゾン濃度が上昇し始め、地域によっては多少の違いはあるものの、夏或いは初秋ごろにオゾン濃度がピークに達する。その後、オゾン濃度は下がる傾向にあり、冬場のオゾン濃度が一年の中で最も低くなっている。

続いて、地域的特徴を明らかにするために、China National Environmental Monitoring Centerが2015年1月から2019年12月までに公表した月報の

データほか、中国1500箇所以上でモニタリングされている大気汚染の1時間データを利用してBTH地域と珠江デルタ地域に焦点をあててより詳しい分析を実施し、以下のことが明らかになった。

- 1) オゾン濃度の季節特性を見ると、地域差はあるものの、濃度のピークは6月から9月にかけて観測され、12月と1月はどの地域においてもオゾン濃度は低い。
- 2) 夏季におけるオゾン濃度の地域特徴をより詳細に見ると、6月から9月まで、BTH地域と珠江デルタ地域は異なる濃度推移の傾向を示している。BTH地域では6月にピークを迎えた後、その後徐々にオゾン濃度が下がる傾向にあったが、珠江デルタ地域では1月から5月までに徐々に上昇した後、6月では濃度が一旦減少に転じた後に再び上昇し続け、9月にピークを迎えている。
- 3) BTH地域では、4月から9月まで中国の国家基準 ($160 \mu\text{g}/\text{m}^3$; 74.66 ppb) を超過している。また、珠江デルタ地域では8月と10月が国家基準を超過し、9月の月平均オゾン濃度が最も高くなっている。BTH地域の月平均濃度は5月から7月にかけて $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ を超過し、他の地域に比べて圧倒的に高い水準である

ことから、オゾン濃度の対策が急務であると考えられる。

- 4) BTH地域の26都市の119局で観測されたオゾン濃度変動をクラスター解析し、地域によって異なる特徴を持つ5つのグループに分け、濃度変動をFFT解析することで、特徴を把握することができた。北京南西部に位置する工場の多いグループでは、工場作業等の人為的活動によるエミッション(主にNO)が作業工程に対応した8,12,24時間等の周期的に排出されていることに対応したオゾン濃度変動の周期が卓越したパワースペクトルを示したが、自然が多い清浄地域のグループは、季節変動に依存した3ヶ月周期のパワースペクトルが卓越するなど、地域によって異なる特徴が明らかになった。
- 5) 珠江デルタ地域では、特に珠江西側で秋季に高濃度オゾンが観測される。18都市83局で観測されたオゾンの1時間データを用い、クラスター解析を行った結果、広州を代表とする珠江周辺の大都市のグループと内陸のグループ、および沿岸部のグループの3つに大別できた。BTH地域では初夏にオゾン濃度が最高値を示すのに対し、珠江デルタ地域では秋季に最高値となる点について両者を比較した結果、光化学反応が沈静化する10月から2月にかけて、両地域の季節変動に大きな違いが見られないものの、4月以降珠江デルタ地域で濃度低下が見られ、7月以降再び濃度増加する傾向が見られた。これは、夏季の南風により太平洋上の清浄大気が輸送されるためだと考えられる。夏季に濃度低下する傾向は、日本国内でも特に太平洋側で頻繁に見られ、東京でも同様の傾向で、低緯度ほど顕著であることが分かった。一方、緯度が高く内陸側にある北京では、日本列島に阻まれ太平洋上の清浄大気が侵入する割合が低く、オゾン前駆体の濃度低下が少ないため、日射強度の最も高い初夏に最高オゾン濃度を示すという、汚染物質輸送に関与したメカニズムの違いが明らかになった。

Summary

Since 2013, China's air quality has improved significantly due to the Chinese government's strong top-down air pollution control measures. Among the six indicators of air pollutants (PM_{2.5}, PM₁₀, Ozone, SO₂, NO₂, CO) in China, four indicators except ozone have been decreasing. The ozone concentration is continuously increasing, which has become an urgent issue for air pollution control in recent years. This study aims to clarify the seasonal and regional

characteristics of ozone pollution through FFT (Fast Fourier Transform) analysis and cluster analysis. The results show that ozone concentration is high in summer and low in winter, and ozone pollution is more prominent in the summer season. The characteristic of the BTH region is that the ozone concentration of the BTH region is greatly influenced by industrial accumulation and could be classified into five major types. The Pearl River Delta region, on the other hand, is more affected by the oceanic monsoon and could be classified into three major types.

Comparing the two regions shows that the BTH region has more serious ozone pollution than the Pearl River Delta region. In the BTH region, the ozone concentration is highest in June and then decreases toward September. On the other hand, the peak ozone concentration in the Pearl River Delta appears in September.

参考文献

- 1) 若松伸司ら (2014) : 二次生成大気汚染物質 (オゾン, PM_{2.5}) に関する近年の研究の状況. 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第49巻第6号, pp.54-59
- 2) 大泉毅ら (2013) : 我が国の光化学オゾン汚染の8時間平均値による評価. 大気環境学会誌, 第48巻第4号, pp.181-187
- 3) 中国『全国都市空気質報告』2015年1月~2019年12月
- 4) Dong et al. (2020): The impact of synoptic patterns on summertime ozone pollution in the North China Plain. *Science of the Total Environment*, 735 (139559), pp.1-13
- 5) Gong and Liao (2019): A typical weather pattern for ozone pollution events in North China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19, pp.13725-13740
- 6) Liu and Wang (2020a): Worsening urban ozone pollution in China from 2013 to 2017 part 1: The complex and varying roles of meteorology.

Atmospheric Chemistry and Physics, 20,
pp.6305-6321

7) Liu et al. (2020): Characterization and sources of volatile organic compounds (VOCs) and their related changes during ozone pollution days in 2016 in Beijing, China. *Environmental Pollution*, 257 (113599), pp.1-11

8) Liu and Wang (2020b): Worsening urban ozone pollution in China from 2013 to 2017 part 2: The effects of emission changes and implications for multi-pollutant control. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20, pp.6323-6337

9) Wang et al. (2017): Ozone pollution in China: A review of concentrations, meteorological influences, chemical precursors, and effects. *Science of the Total Environment*, 575, pp.1582-1596

10) Lu et al. (2019): Exploring 2016–2017 surface ozone pollution over China: source contributions and meteorological influences. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19, pp.8339-8361

11) Gao et al. (2020): Ozone pollution over China and India: seasonality and sources. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20, pp.4399-4414