

中国長江デルタにおける PM2.5 の拡散経路の推定とエアロゾル光学特徴の分析

A study on moving path estimation of PM2.5 and Aerosol Optical Depth analysis in Chang Jiang Delta area of China

史 悠
Shi, You

概要: 近年、中国の急速な経済発展に伴い、汚染物質の排出量は増加し、地域性 PM2.5 汚染問題が深刻化してきた。PM2.5 の発生原因とその形成のメカニズムの解明がその問題を解決するための鍵となる。本論文では、中国長江デルタを研究対象とし、該当地域中心となる上海市の PM2.5 平均値、PM2.5 汚染日期、CALIPSO 衛星のエアロゾルプロダクトなどの情報に基づき、HYSPLIT4 (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Ver. 4) モデルを用いて、PM2.5 の移動経路の推定とエアロゾル光学特徴の分析を行い、汚染源および汚染粒子の成分を推定した。

Summary: With the rapid development of economy of China, PM2.5 problem has become one of the serious environmental problems. It is very important to know the reasons of why PM2.5 happens and what the mechanism of PM2.5 is.

In this study, the PM2.5 related data including satellite images of Shanghai Delta is collected. The occurrence pattern and aerosol optical property of PM2.5 and the relation with other factors such as visibility, relative humidity, wind speed, AOD, and so on are analyzed. We use HYSPLIT4 (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Ver.4) model to calculate the depth of Aerosol Optical and develop a model which can predict the moving path of PM2.5.

キーワード: 大気汚染・PM2.5・HYSPLIT4 モデル・流跡・エアロゾル

Keywords: air pollution, PM2.5, HYSPLIT model, Trajectory, Aerosol

1. 背景と目的

近年、中国では経済発展、工業の発展及び国民のライフスタイルの変化により、エネルギーの消費が増加し、水汚染をはじめ、大気汚染や食品安全など様々な問題が深刻化してきている。特に、最近、北京や上海などの巨大都市周辺で発生するPM2.5問題が注目されている。この問題を解決しなければ、人々の健康に悪影響を与えるだけでなく、生産活動、経済活動、観光などあらゆる分野への打撃が避けられない。これまで中国政府は大気汚染に対して、いろいろな政策や管理方法を出してきた。例えば、大気汚染総合管理方法、車汚染コントロール条例、清潔空気行動計画などが挙げられる。しかし、効果がいまだにあまりみられていない。

本研究では上海を中心する、長江デルタ地区の気象データや衛星画像などをもとに、PM2.5 汚染の拡散経路の推定とエアロゾル光学特徴の分析を行い、汚染源および汚染粒子の成分を推定することを目的とした。

長江デルタは上海を中心に、浙江省北部の6都市と江蘇省中部、南部の8都市を含む15都市から構成され、総面積は約10万平方キロメートルであり、総人口は約一億三千五百万人である。中国GDPの22.1%、輸出入総額の28.5%を占め、中国の経済中心とも言われている。

2. PM2.5 の拡散経路の推定

2.1 HYSPLIT4 モデルとは

HYSPLIT4 は Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Ver. 4 の略で、Draxler らによって開発された長距離物質輸送モデルである。このモデルは NOAA=National Oceanic and Atmospheric Administration (米国大気海洋庁) の NCEP=National Centers for Environmental Prediction (米国環境予報センター) により作成された GDAS データを使って、大気中の粒子移流・拡散及び沈着過程を推定できる。発生した汚染物質の移流計算は汚染物質をパフあるいは粒子 (または両者の混在したもの) と仮定し、それらをラグランジュ的に追跡することで行われる。



2.2 必要なデータについて

HYSPLIT4 モデルでは、PM2.5 の移動経路を推定するため、PM2.5 汚染データと GDAS データが必要となる。

2.2.1 PM2.5 関連データ

2011 年中国環境保護部が公布した「環境空気質量標準」では、PM2.5 の一日平均濃度値 $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ を超えれば、スモッグ天気と判定する基準が定められている。また、一日平均濃度が $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ を超えなくても、10 時間連続 $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ を超えた場合もスモッグ天気に判定すると規定されている。

本研究では在中国米国大使館が公開している 1 時間ご

とのPM2.5観測データを使用する。PM2.5濃度の1日平均値は、0時から24時までの24時間のPM2.5観測データの平均値とする。

本研究では2012年3月～2013年2月と2013年3月～2014年2月の2年間のPM2.5の数値データを収集・整理し、分析を行って、PM2.5汚染日を特定した。また、一年を春夏秋冬の四季にわけて、季節内のスモッグ天気発生回数を統計した。表1に2012年、2013年各季節のPM2.5発生回数を示す。

表1 2012、2013年各季節のPM2.5発生回数

年/季節	春(3-5)	夏(6-8)	秋(9-11)	冬(12-2)
2012	19	5	25	39
2013	26	7	20	42

2.2.2 GDAS データ

前述したようにHYSPLITモデルによる汚染気団の拡散経路の推定ではGDASデータが必要である。このデータには風速、温度及び湿度等の基本状況を含む、協定世界時(UTC)00、06、12、18時に6時間間隔の全球再解析データが記録されている。気圧面データの水平格子間隔=1°*1°である。

2.2.1で確定したPM2.5汚染発生日のGDASデータを収集し、HYSPLIT4モデルにインプットすれば、PM2.5の拡散経路を推定することができる。

2.3 PM2.5 拡散軌跡線の計算式

①気団位置の計算式

$$P(t+\Delta t) = P(t) + 0.5[V(P,t) + V(P',t+\Delta t_k)]\Delta t_k \quad \text{式1}$$

$$P'(t+\Delta t_k) = P(f) + V(P,t)\Delta t_k \quad \text{式2}$$

その中、 Δt_k は可変時間である。

②鉛直混和パラメーター

$$K_h = kw_h z(1 - z/Z_i)^2 \quad \text{式3}$$

$$w_h = u_\phi \phi h^{-1} \quad z/Z_i < 0.1 \quad \text{式4}$$

$$w_h = w_m P_r^{-1} \quad 1 > z/Z_i > 0.1 \quad \text{式5}$$

$$P_r = (\phi h / \phi m) + 7.2k(z/Z)(W^* / w_m) \quad \text{式6}$$

その中、 ϕh と ϕm は $z/Z_i=0.1$ の時のプラントル数、安定する大気層の場合、 $W_m=0$ ；不安定な対流状況の場合、 $W_m>0$ 。

③水平混和パラメーター

$$K_{hor} = 2^{0.5}(cX)^2 \left[(\partial v / \partial x + \partial u / \partial y) + (\partial u / \partial x - \partial v / \partial y)^2 \right]^{0.5} \quad \text{式8}$$

その中、 X は気象データをグリッド化の大きさ、 $c=0.14$ である。

2.4 後方流跡線の計算とクラスター分析

本章では、2012年季節ごとの汚染日に対して、後方流跡線を計算し、すべての流跡線に対してクラスター分析を行い、PM2.5拡散経路の算出について述べる。

本研究では上海(31.22N, 121.48E)を原点とし、スモッグ天気が発生する日時がHYSPLITモデルのスタート時間にして、観測時間は24時間とする。また、上海は高層ビルなどが多いため、モデルのスタート高度は500m、最高高度は10000mに設定し、大気気団の後方向流跡線を分析する。

図1から図4に2012年の季節ごとのPM2.5拡散流跡線を示す

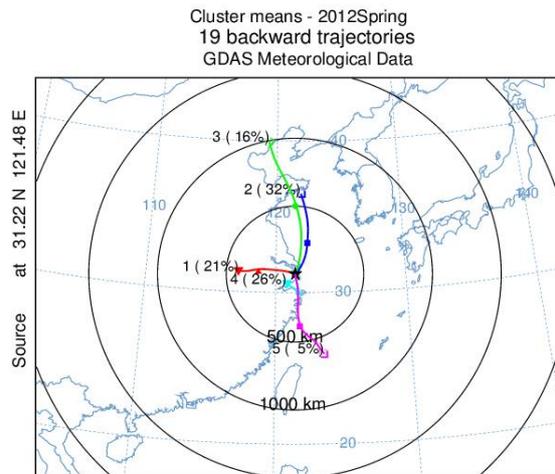


図1 2012年春汚染日気団流跡線のクラスター分析

春季には19回の汚染日があるため、その19日の汚染日に対して後方流跡線を算出し、すべての流跡線に対してクラスター分析を行った結果、図1に示すように5種類の流跡線組に集約された。上海に流入する汚染気団の割合は以下の通りである：浙江省杭州市方面からは26%、安徽省と江蘇省方面からは21%、山東省方面は32%、天津や北京方面からは16%、東南海上からは5%であった。

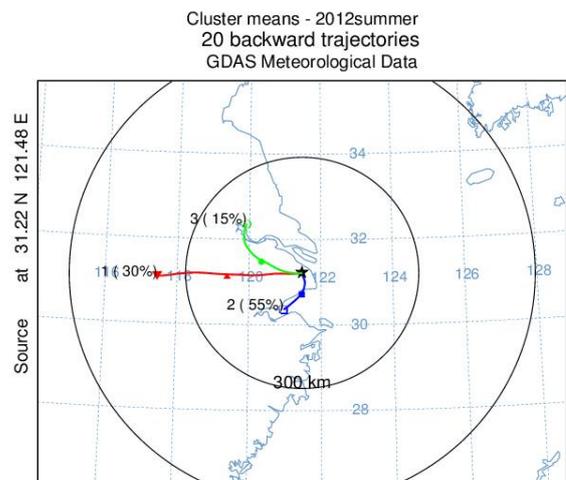


図2 2012年夏汚染日気団流跡線のクラスター分析

夏季についても同様の手順で計算を行うが、汚染基準

に達した日が少ないため、まず、6時間ずつ汚染気団後方向流跡線を作った。

次に、24時間のクラスター分析を行った。その結果、3種類の流跡線組に集約された(図2)。浙江省杭州市方面からの汚染気団が全体の55%をしめしており、残りの汚染気団が江蘇省と安徽省からそれぞれ15%と30%の割合という結果が得られた。

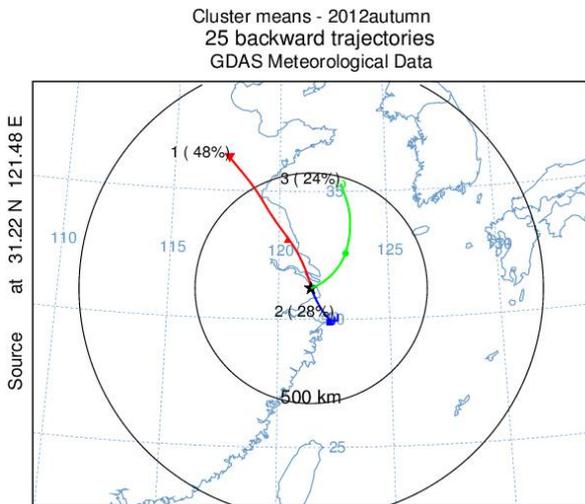


図3 2012年秋汚染日気団流跡線のクラスター分析
秋季について25本の流跡線に対してクラスター分析を行った結果、3種類の流跡線組に集約された(図3)。山東省方面大陸からの汚染気団が全体の48%をしめしており、北方から東シナ海を經由して上海に来たのが15%、浙江省方面からは28%を示している。

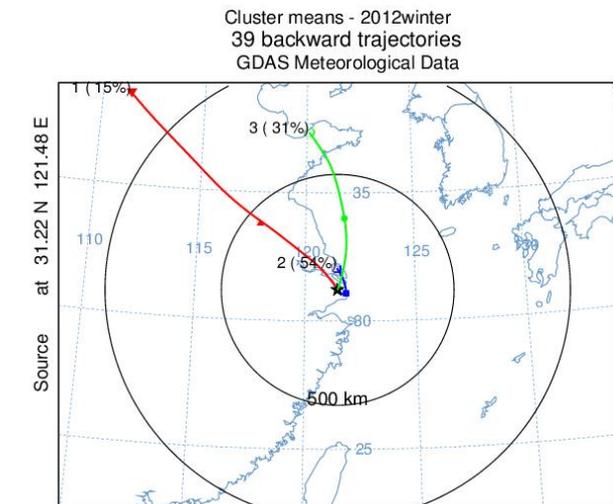


図4 2012年冬汚染日気団流跡線のクラスター分析
冬季について、汚染気団流跡線39本に対してクラスター分析を行った結果、図4に示すように3種類の流跡線組に集約された。江蘇省南通市と上海区域内からの汚染気団が全体の54%をしめしおり、山東省方面からは31%、北西方面からは15%であった。

3. エーロゾルの光学特徴分析

前章ではPM_{2.5}の拡散経路について述べた。本章では、

上海市大気汚染の可能成分を推定するため、エーロゾル光学特徴の分析について説明する。

3.1 エーロゾルとは

エーロゾルは、空気中の微小な液体や固体粒子が浮遊している分散系、あるいはこれらの微小な粒子そのものを意味する^[2]。エーロゾルは大気中ではごくありふれた存在であるが、実は大気汚染、酸性雨、地球温暖化などの大気環境問題に直接・間接的に深く関わっている。大気エーロゾルは、太陽放射を直接散乱・吸収こと(直接効果)により、地球の気候に影響を与える。エーロゾルの直接効果による気候変化の評価においては、大気エーロゾルの光学的厚さ(エーロゾルの消散係数について、大気上端から地表面までの総合をとったものであり、大気中に存在するエーロゾルの総量に比例するもの)の季節ごとの広域分布、およびエーロゾルの放射特性(単一散乱アルベド(=散乱係数/消散係数)と散乱光の角度分布関数、あるいはエーロゾルの粒径分布)の季節ごとの広域分布が必要である。また、地域や季節によって大気中で観測されるエーロゾルの種類・量が異なるため、時空間変動を把握することは容易ではない、そのため、エーロゾルの広域分布の測定が、人工衛星観測によりおこなわれるのが一般的である。

3.2 衛星観測データについて

本研究ではCALIPSO衛星データを利用し、エーロゾルの光学特徴を分析する。CALIPSO衛星に搭載されているCALIOPライダー受信した信号が処理された後、Level0、Level1A、Level1B、Level2、Level3及びLevel4計五つレベルのデータが提供される。その中、Level1には後方散乱データ、気象データ、位置及び高度データが含まれている。Level2には後方散乱係数、単一散乱アルベド等の鉛直データが含まれている。本研究ではLevel1とLevel2のデータを利用する。

3.3 上海地区エーロゾル光学特徴分析

本研究では、長江デルタ地域長年間エーロゾル変化を把握するため、2012年3月~2014年2月まで2年間、上海を越境する時CALIPSOデータを選択し、後方散乱係数、偏光解消度、色比率等三つのパラメーターの分析を行った。

3.3.1 後方散乱係数

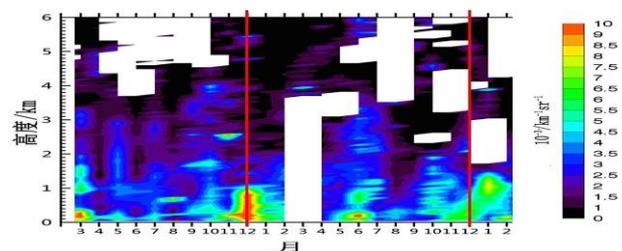


図6 後方散乱係数の月平均図

後方散乱係数は CALIPSO Level2 エアロゾルプロダクトの中で一つの重要なパラメーターである。後方散乱係数は大きいほど、大気中の粒子状物質の散乱能力が強くなる。図6は2012年3月から2014年2月まで532nm後方散乱係数時間序列図である。図6より、毎年12月から3月までの期間の後方散乱係数が最も高い数値が示されている。鉛直分布から、後方散乱係数数値は高度を上げるほど小さくなる、高い数値は低層範囲(0-2km)内集中している。エアロゾルは大体4kmまでのことがわかる。

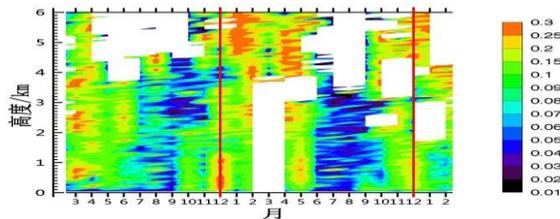


図7 偏光解消度変化

3.3.2 偏光解消度

偏光解消度は散乱体の非球形性を示すパラメーターであり、黄砂や氷晶雲等の非球形粒子の検出に利用されている。しかしながら、各種エアロゾルの偏光解消度を単一成分で測定した例は少ない。例えば、球形(液滴)の粒子は0、巻雲の氷雲粒子(~35%)、黄砂など(10~%)。本研究では偏光解消度数値から各高度層エアロゾルの形を推測する。一般的には偏光解消度が大きくほど、粒子状物質の構成は不規則である。図7は2年間上海地域の偏光解消度数値時間序列図である。青色が集まる区間は偏光解消度低い夏季であり、夏季主要なエアロゾル粒子は海塩粒子と考えられる。他の季節の偏光解消度は比較的高い、それは不規則的な粒子状物質が多いことを表明できる。

3.3.3 色比率

色比率では1064nm後方散乱係数と532nm総後方散乱係数の比率であり、色比率が高いほど粒子が大きい。図8は2年間の色比率時間序列図であり、色比率は全体的に0.2~1.4に分布している。低層の色比率は大体1.0より大きい、中層の色比率は主に1.0以下であり、高層では混和状態に見える。

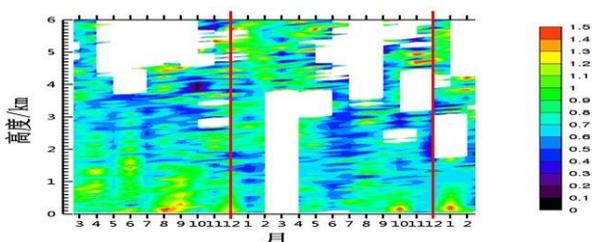


図8 色比率時間序列図

CALIPSO データに基づいて上海地区長年間エアロゾル光学特徴の分布や変化を分析した。結論は以下であり

- ①春季と冬季エアロゾル粒子散乱能力が高い
- ②夏季エアロゾル粒子の形は規則であり、秋季エアロゾル粒子の混合程度が高い、これはエアロゾルの二次生成を考えられる。
- ③エアロゾル粒子の散乱能力と形の規則度は高度を上げると低くなる。粒子径は高度を上げると大きくなる。

4. 汚染源および汚染粒子の成分の推定

第2、第3章では、それぞれPM2.5汚染物質の拡散経路とエアロゾル光学特徴の分析について説明した。本章では、汚染源および汚染粒子の推定について述べる。

- ① PM2.5汚染は冬季の寒冷前線の通過時、すなわち北方内陸から季節風が吹く晩秋から初春に起こりやすく、これに対して海洋から季節風が吹く初夏から初秋にかけて相対的に減少する。季節風は汚染物質の拡散に対して大きい影響を与える。特に春季と冬季は中国北方や北西地域は長江デルタ地域の主要な汚染源であると推測される。一方、春季と冬季はエアロゾル粒子散乱能力を示す数値が高いため、北方地域の石炭大量燃焼産出した化学成分や黄砂などが主要汚染源、夏季で季節風は海洋から吹いて来て、主要エアロゾル粒子が海塩粒子と考えられる。
- ② 2012年の結果では汚染源として海洋性気団の比例が少なかったため、大陸からの気団が上海市周辺地域の主要汚染源であると推測される。
- ③ 本研究で得られた結果では、一年中、長江デルタ区域内からの汚染が多いため、該当地域のPM2.5汚染は上海を含む長江デルタ地区における建設工事や交通、火力発電等の人間活動によるものが主因であることがわかった。

5. まとめ

本研究では、HYSPLIT4モデルを用いて、上海を中心する長江デルタ地区のPM2.5の移動経路の推定とエアロゾル光学特徴の分析を行ったうえ、汚染源および汚染粒子の成分について推測した。本研究では、リモートセンシング画像や統計データを用いて分析や推測を行った。今後、より正確な汚染源および汚染粒子の成分を特定するには、汚染物質の化学分析、汚染日の天気情報(大気圧、温度など)と経路上の各都市のPM2.5データなど細かい情報の利用が必要である。

6. 参考文献

- [1] PM2.5と大気汚染がわかる本 饒村 曜
- [2] エアロゾルの大気環境影響 笠原三紀夫・東野 達
- [3] 上海不同汚染等級下气溶膠光学特性垂直分布特征 沈仙霞, 刘朝順, 施潤和, 陳園園, 高煒
- [4] 環境省大気汚染物質広域監視システム(そらまめ君)
- [5] NOAA Air Resources Laboratory (ARL) が提供する HYSPLIT model および READY website