

上海における大気汚染と健康被害：  
疫学的研究から見えてくる課題

メタデータ	言語: ja 出版者: 静岡大学人文学部 公開日: 2013-01-18 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 傅, 喆 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="https://doi.org/10.14945/00007042">https://doi.org/10.14945/00007042</a>

## 論 説

## 上海における大気汚染と健康被害

## —疫学的研究から見えてくる課題—

傅 喆

## 1. はじめに

中国は、改革開放以降の30年間で、めざましい経済成長を遂げてきた。しかし、先進国がそうであったように、中国もまた経済成長と共に深刻な環境問題を経験している。本稿で取り上げる大気汚染もその1つである。

しかし、中国における大気汚染問題は改革開放以前にも存在した。中国はエネルギー源として石炭への依存が強かったため、石炭の燃焼に伴う大気汚染問題は1950年代から知られていた<sup>1</sup>。すなわち、固定発生源による大気汚染問題は、改革開放以前から存在していた。また、地方では、家庭での調理、暖房のために石炭ないし練炭を使うことが多く、屋内での汚染も深刻であった。

改革開放以降、中国では都市化も進んでいった。例えば、上海市では1990年頃より上海市戸籍を持たない人々の流入が加速した。2009年末現在で、常住人口1921.32万人の内、上海市戸籍をもたない外来人口は541.93万人で、28.2%も占めている<sup>2</sup>。経済成長と都市化の進展は、上海を含めた中国の大都市で自動車交通の増大をもたらした<sup>3</sup>。都市における自動車交通の増大は新たな大気汚染問題を引き起こし、中国都市部の大気汚染は固定発生源と移動発生源による複合型大気汚染へと変質していった。

中国政府の環境問題への対応は、改革開放と同時期に始まった。1979年、基本法である『環境保護法』を制定している。大気汚染対策としては、1982年に大気汚染物質に関する最初の環境基準(GB3095-82)を制定した。1996年10月1日には、最初の環境基準を破棄し、新たな基準(GB3095-1996)を制定した。この新基準は、2000年1月6日にさらに修正<sup>4</sup>され、現在に至っている(現在の

<sup>1</sup> Chen et al. (2004) は、2000年以前の中国の主要都市における大気汚染と疫学的研究について整理している。その中で、1950年代の瀋陽における総浮遊粒子状物質(TSP)は、 $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ 程度で推移していたが、時にはそれを数倍超えるときもあったことを紹介している。

<sup>2</sup> 『上海統計年鑑2010』<http://www.stats-sh.gov.cn/2003shtj/tjnj/nj10.htm?d1=2010tjnj/C0201.htm> (アクセス日: 2010年9月10日) 参照。

<sup>3</sup> 上海のモータリゼーションについては、傅(2010)を参照。

<sup>4</sup> 特に、二酸化窒素( $\text{NO}_2$ )の2級基準について、年平均基準を $0.04\text{mg}/\text{m}^3$ から $0.08\text{mg}/\text{m}^3$ に、日平均基準を $0.08\text{mg}/\text{m}^3$ から $0.12\text{mg}/\text{m}^3$ に、1時間平均基準を $0.12\text{mg}/\text{m}^3$ から $0.24\text{mg}/\text{m}^3$ に緩和した。

環境基準は、表1を参照)。

改革開放以降、中国は環境基準を制定するなど大気汚染対策に取り組んできた。問題は、その成果についての評価である。本稿は、複合型大気汚染に代表される上海の大気汚染を取り上げ、2000年代に入り蓄積された疫学的研究を展望することにより、上海の大気汚染問題の課題について検討しようとするものである。

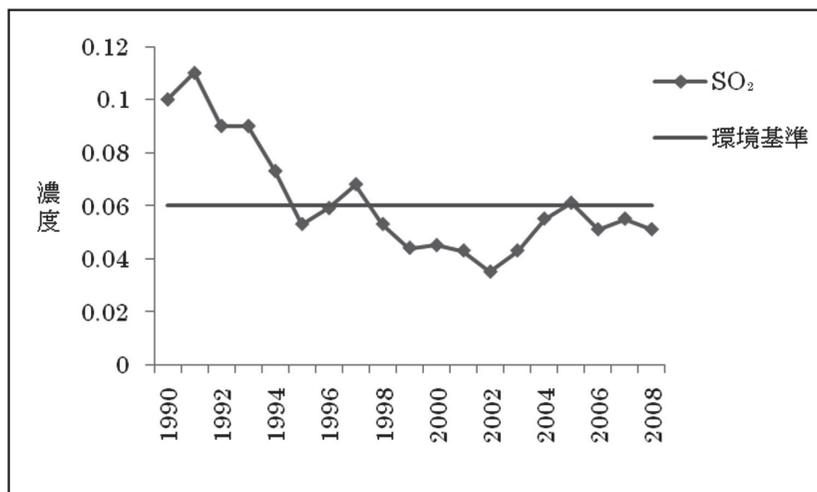
以下では、まず、1990年代以降の上海の大気汚染の推移について概観し(2節)、次に、大気汚染と健康被害についての疫学的研究の成果を整理する(3節)。そして前節で得られた結果を基に、上海の大気汚染問題が抱える課題について検討し(4節)、最後に、今後の研究の方向性についてまとめる。

## 2. 大気汚染の推移

ここでは、1990年代からの上海市中心区部の大気汚染濃度の経年変化を見ていこう。以下の図1、図2、図3はそれぞれ、二酸化硫黄(SO<sub>2</sub>)、二酸化窒素(NO<sub>2</sub>)、浮遊粒子状物質(PM<sub>10</sub>)の濃度の経年変化を表している。図には併せて、中国における各汚染物質の環境基準2級基準も併記している。

1990年代は、各大気汚染物質の濃度は環境基準を超えて推移し、上海の大気汚染が深刻な状況にあったことが分かる。図1は、SO<sub>2</sub>濃度の経年変化を示したものだが、その主たる発生源は固定発生源であることが知られている。他方、図2は、NO<sub>2</sub>濃度の経年変化を示したもので、その主たる発生源は移動発生源であることが知られている。図1と図2から、1990年代以降の上海の大気汚染

図1 中心部におけるSO<sub>2</sub>汚染濃度の年平均値 単位：mg/m<sup>3</sup>

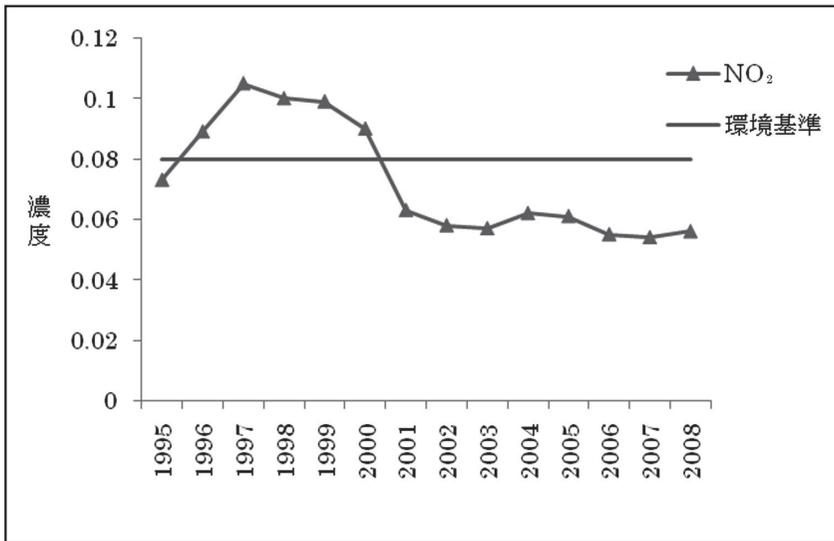


出所：上海市環境保護局『上海市環境状況公報』各年版より作成。

は、複合型大気汚染として顕在したことが分かる。

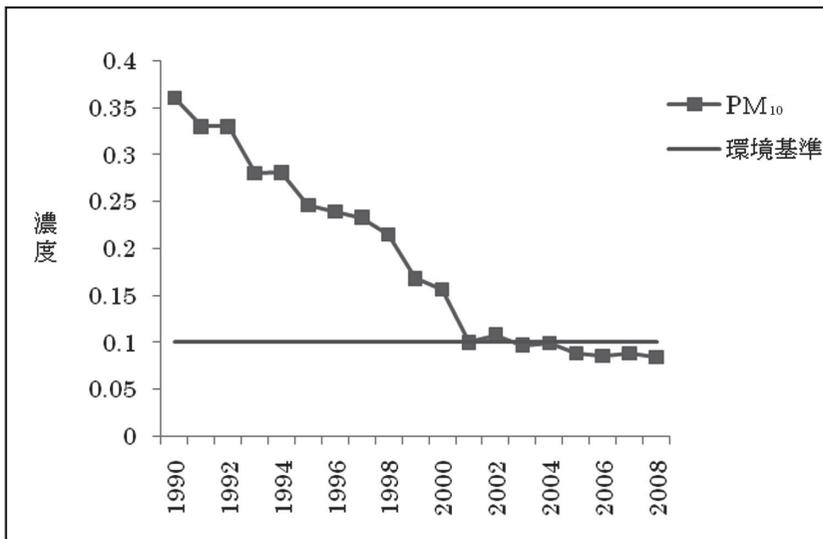
2000年代に入り、環境基準をようやく下回る水準で推移している。しかし、表1に示したWHO (World Health Organization) 基準からみると、未だ大気質が十分に改善されたとはいえない。

図2 中心部におけるNO<sub>2</sub>汚染濃度の年平均値 単位：mg/m<sup>3</sup>



出所：上海市環境保護局『上海市環境状況公報』各年版より作成。

図3 中心部におけるPM<sub>10</sub>汚染濃度の年平均値 単位: mg/m<sup>3</sup>



出所：上海市環境保護局『上海市環境状況公報』各年版より作成。

表1 WHOと中国の環境基準

単位： $\mu\text{g}/\text{m}^3$	平均時間	WHO	中国		
			1級標準	2級標準	3級標準
二酸化硫黄 (SO <sub>2</sub> )	Annual		20	60	100
	24-hour	20	50	150	250
	1-hour		150	500	700
	10-minute	500			
二酸化窒素 (NO <sub>2</sub> )	Annual	40	40	80	80
	24-hour		80	120	120
	1-hour	200	120	240	240
総浮遊粒子状物質 (TSP)	Annual		80	200	300
	24-hour		120	300	500
	20-minute				
浮遊粒子状物質 (PM <sub>10</sub> )	Annual	20	40	100	150
	24-hour	50	50	150	250
	1-hour				
微小粒子状物質 (PM <sub>2.5</sub> )	Annual	10			
	24-hour	25			
一酸化炭素 (CO)	Annual				
	24-hour	10000 (8-hour)	4000	4000	6000
	1-hour	30000	10000	10000	20000

注) 中国の環境基準は、1類地域では1級基準を、2類地域では2級基準を、そして3類地域では3級基準を適用する。1類地域とは、自然保護区、風致名勝地区、及び特殊な保護が必要な地区である。2類地域は、都市計画の中で確定された居住地区、商業・交通及び住民の混合地区、文化地区、一般工業地区、及び農村地区。3類地域は、特定の工業地区である。  
出所：WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide - Global update 2005- Summary of risk assessment, World Health Organization ([http://www.who.int/phe/health\\_topics/outdoorair\\_aqg/en/](http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair_aqg/en/) (アクセス日：2010年9月10日)) と中国国家标准GB3095-1996より、筆者作成。

### 3. 大気汚染による健康被害

#### 3. 1 大気汚染物質の健康への影響

WHOは、大気汚染物質が健康へ及ぶ影響について警告している<sup>5</sup>。ここでは、主要な汚染物質である、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、PMについて見ておこう。

SO<sub>2</sub>は、呼吸器系システムと肺機能に影響を与え、目の炎症も引き起こす。SO<sub>2</sub>の暴露による気道の炎症は、咳や粘液分泌、そして喘息や慢性気管支炎の悪化の原因となる。また心臓疾患での入院やそれによる死亡が増加する、という。NO<sub>2</sub>は、NO<sub>2</sub>の長期暴露との関連で、子供の喘息患者の

<sup>5</sup> Air quality and health, WHO (<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/en/index.html> (アクセス日：2010年9月15日)) を参照。

気管支炎の兆候が増加し、肺機能の成長を阻害する、という。PMは、循環器系疾病と呼吸器系疾病と肺がんのリスクを増大させる、と警告している。

WHOが警告する大気汚染物質の健康に与える影響は深刻であり、軽視することはできない。ここではまず、大気汚染物質と関連があると言われている循環器系疾病と呼吸器系疾病による上海の死亡率の動向について見ておこう。

表2 循環器系および呼吸器系疾病を原因とする上海の死亡動向（1990年代）

循環器系疾病による死亡	全市	区部（市内）	県部（郊外）
年	死亡総数に占める割合（%）	死亡総数に占める割合（%）	死亡総数に占める割合（%）
1990	28.96	31.02	25.43
1991	29.94	32.07	26.33
1992	30.40	32.51	26.72
1993	31.18	33.32	24.49
1994	32.20	34.30	25.60
1995	33.25	35.75	25.61
1996	33.59	35.98	26.23
1997	33.82	36.39	25.91
1998	34.22	35.54	27.85
1999	33.29	34.45	27.72
呼吸器系疾病による死亡	全市	区部（市内）	県部（郊外）
年	死亡総数に占める割合（%）	死亡総数に占める割合（%）	死亡総数に占める割合（%）
1990	20.50	16.61	27.19
1991	19.18	15.49	25.44
1992	19.90	16.22	26.34
1993	19.70	16.91	28.37
1994	18.20	15.20	27.50
1995	18.30	15.04	28.28
1996	17.61	14.61	26.87
1997	16.52	13.48	25.84
1998	16.24	14.67	23.83
1999	14.96	13.53	21.83

出所：『上海統計年鑑』各年版より、筆者作成。

表2は、1990年代の循環器系および呼吸器系疾病を原因とする上海の死亡動向をまとめたものである。上海市全体としては、循環器系疾病を原因とする死亡割合の方が、呼吸器系疾病を原因とする死亡割合よりも高いことが分かる。また、循環器系疾病を原因とする死亡割合は、郊外よりも中心区部の方が高い。しかし、呼吸器系疾病を原因とする死亡割合は、対称的に郊外の方が中心区部よりも高いことが分かる。

表3 循環器系および呼吸器系疾病を原因とする上海の死亡動向（2000年代）

年	循環器系疾病による死亡		呼吸器系疾病による死亡	
	死亡率	死亡総数に占める割合（%）	死亡率	死亡総数に占める割合（%）
2000	234.21	32.69	101.57	14.18
2001	226.37	32.13	100.26	14.23
2002	230.03	31.70	104.52	14.40
2003	243.84	32.50	104.84	14.00
2004	235.64	32.90	88.60	12.40
2005	258.14	34.26	93.61	12.43
2006	243.58	33.96	81.11	11.31
2007	257.43	34.62	86.73	11.66
2008	276.14	35.78	90.00	11.66
2009	266.59	34.94	85.34	11.18

注) 死亡率の単位は、1/10万人。  
出所：『上海統計年鑑』各年版より、筆者作成。

表3は、2000年代の循環器系および呼吸器系疾病を原因とする上海市全体の死亡動向をまとめたものである。循環器系疾病を原因とする死亡率が増加傾向にあるのに対して（死亡総数に占める割合も増加傾向にある）、呼吸器系疾病を原因とする死亡率は減少傾向にあることが分かる（死亡総数に占める割合も減少傾向にある）。

以下では、表2、表3の事実を踏まえて、復旦大学Kan教授を中心とした研究グループによる、上海における大気汚染の健康への影響についての一連の疫学的研究を整理しよう。

### 3. 2 大気汚染の健康へ与える影響についての時系列分析

Kan et al. (2003) は、大気汚染と1日当たりの死亡率との関係を時系列データを用いて分析を行っている。Kan教授を中心とした研究グループは、このKan et al. (2003) のデータと方法に準拠している。

Kan et al. (2003) は、データとして2000年1月1日から2001年12月31日までの1日当たりの死亡数、この間の毎日の大気汚染濃度（PM<sub>10</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>）、毎日の平均気温、相対湿度、露点を用いている。推計の目的は、タイム・トレンド、季節性、曜日を考慮に入れながら、大気汚染と死亡率の相対リスクを推計することである。

推計に当たっては、1日当たりの死亡数はポアソン分布に従うと仮定し、反応変数（独立変数）の期待値と説明変数を連結する関係式は対数連結（log link）とした、一般化加法モデル（Generalized

Additive Model) が用いられている。推計に当たっては、第1段階として、タイム・トレンド、気温、湿度、露点、曜日（ダミー変数）に対して、平滑化スプライン関数を使ってノンパラメトリック平滑項を当てはめ、これを基本モデルとした。この基本モデルの確定の後に、第2段階として、大気汚染物質を説明変数とした項を追加し推計を行っている。説明変数として大気汚染物質を1つだけのものを単一汚染物質モデル (single pollutant-model)、複数のものを複合汚染物質モデル (multiple-pollutant model) と区別し、それぞれについて推計を行っている。

モデルの推計に先立ち、Kan et al. (2003) は、説明変数の記述統計量と相関係数を計算している。特に、相関係数に注目すると、大気汚染物質間の相関係数は正の値で比較的大きい<sup>6</sup>。これに対し、気象データと大気汚染物質の間の相関係数は、負の値であり、その値も小さい。

単一汚染物質モデルでは、年齢別、死亡原因別に推計をおこなっている。推計結果は、65歳未満の人の相対リスクはいかなる汚染物質に対しても、死亡原因に対しても統計学的に有意な結果を得ていない。しかし、65歳以上の人については、大気汚染物質の濃度は死亡率の変化と正の方向で関連している。全ての原因による（事故による死亡を除く）死亡率（以下では、単に全死亡率と呼ぶ）、循環器系疾病による死亡率、呼吸器系疾病による死亡率の相対リスクは大気汚染物質の濃度の増加と有意に関係している。これらの中で、呼吸器系疾病による死亡率のリスクが全ての汚染物質と最も強く関係している。

複合汚染物質モデルの推計結果は、SO<sub>2</sub>あるいはNO<sub>2</sub>、あるいは両方を説明変数として追加した場合、全ての原因による死亡率に与えるPM<sub>10</sub>の影響は有意ではなかった。NO<sub>2</sub>については、PM<sub>10</sub>を追加してもその影響は変わらなかった。しかしSO<sub>2</sub>を追加した場合、NO<sub>2</sub>の影響は統計学的に有意とはならなかった。SO<sub>2</sub>については、残りの2つの汚染物質を説明変数として追加しても、死亡率に与える影響は変わらなかった。この結果により、Kan et al. (2003)は、上海ではガス状汚染物質、特にSO<sub>2</sub>が健康に影響を与えるものと結論付けている。Kan et al. (2003) はまた、他の先行研究との比較のため、各汚染物質濃度が10 $\mu$ g/m<sup>3</sup>増加した場合の全ての原因による死亡率の相対リスクの平均値と95%信頼区間（以下、95%CIと略する）を提示している。PM<sub>10</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>が10 $\mu$ g/m<sup>3</sup>増加した場合、全ての原因による死亡率の相対リスクの平均値と95%CIは、それぞれ1.003 (95% CI: 1.001, 1.005)、1.014 (95%CI: 1.008, 1.020)、1.015 (95%CI: 1.008, 1.022) であり、この数値は北米とヨーロッパの先行研究と比べて小さな値であることを指摘している。

Chen et al. (2008) は、Kan et al. (2003) が行った単一汚染物質モデルと複合汚染物質モデルの推計を改めて行っている。Chen et al. (2008) が用いたデータは、2001年1月から2004年12月31日と収集期間の違いはあるものの、1日当たりの死亡数、この間の毎日の大気汚染濃度（PM<sub>10</sub>、

<sup>6</sup> PM<sub>10</sub>とSO<sub>2</sub>の相関係数は、0.71。PM<sub>10</sub>とNO<sub>2</sub>は、0.73。SO<sub>2</sub>とNO<sub>2</sub>は、0.75であった。

SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>), 毎日の平均気温, 相対湿度を用いている<sup>7</sup>.

Chen et al. (2008) の推計方法は, 基本的にKan et al. (2003) と同じである. 変更は, 反応変数が相対リスクではなく1日当たりの死亡数に変更され, 第1段階の基本モデルの確定のために自然スプライン関数を用いていることである.

Chen et al. (2008) の単一汚染物質モデルの推計結果によれば, PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>の汚染濃度と全死亡率, 循環器系疾病による死亡率との間に有意な関係がある. PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>の汚染濃度が10 $\mu$ g/m<sup>3</sup>増加すれば, それぞれ全死亡率を平均的に0.26% (95%CI 0.14-0.37), 0.95% (95%CI 0.62-1.28), 0.97% (95%CI 0.66-1.27) だけ増加させる.

複合汚染物質モデルでは, PM<sub>10</sub>の影響は, 他の汚染物質を説明変数として追加すると, 全死亡率と循環器系疾病による死亡率については平均的増加率の値は減少し有意ではない. 呼吸器系疾病による死亡率には, PM<sub>10</sub>は(単一汚染物質モデルでも複合汚染物質モデルでも)何の影響も与えない<sup>8</sup>.

SO<sub>2</sub>の全死亡率, 循環器系疾病による死亡率, 呼吸器系疾病による死亡率に与える影響は, PM<sub>10</sub>を説明変数として追加した後でも有意なままである. しかし, NO<sub>2</sub>を追加した場合と, NO<sub>2</sub>とPM<sub>10</sub>を追加した後では, 3つの死亡率に与えるSO<sub>2</sub>の影響は統計学的に有意ではない. この結果は, Kan et al. (2003) と異なる.

NO<sub>2</sub>の全死亡率, 循環器系疾病による死亡率に与える影響は, 他の汚染物質を追加した後でも変化はない. NO<sub>2</sub>の呼吸器系疾患による死亡率に与える影響は, PM<sub>10</sub>を追加した後でも影響されないが, SO<sub>2</sub>, あるいはSO<sub>2</sub>とPM<sub>10</sub>を追加した後では, 非有意になっている. この点は, Kan et al. (2003) と整合的である.

Cao et al. (2009) は, 屋外の大気汚染物質 (PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>) と病院外来と緊急治療室への来院数 (あるいは来室数) の関連性について時系列分析を行った. Cao et al. (2009) が用いたデータは, 上海市都市部9区に住む居住者の2001年1月1日から2005年12月31日 (1095日) までの病院外来と緊急治療室への来院数. 各汚染物質は, 6つの固定測定局の観測結果を平均した24時間平均濃度. そして毎日の平均気温と湿度である.

Cao et al. (2009) の推計方法は, 基本的にKan et al. (2003), Cao et al. (2009) と同じである. 来院数はポアソン分布に従うと仮定した上で, 過剰分散の一般化線形ポアソンモデルを用いている. また第1段階の基本モデルの確定のために自然スプライン関数を用いている.

第2段階のモデルとして, 大気汚染物質を説明変数 (共変量) として追加する場合に, タイムラ

<sup>7</sup> Kan et al. (2003) は明示しなかったが, Chen et al. (2008) が収集した1日当たりの死亡数のデータは上海市都市部9区の居住者に関するものであり, 各汚染物質の日中濃度は, 6つの固定測定局(虹口区, 静安区, 盧湾区, 普陀区, 徐匯区, 楊浦区)の観測結果を平均したものである.

<sup>8</sup> PM<sub>10</sub>は, 単一汚染物質モデルでも複合汚染物質モデルでも呼吸器系疾病による死亡率には何の影響も与えないとの記述とChen et al. (2008) Ttable3で示された数値は整合的ではない. Table3の誤植が考えられる.

グを考慮に入れた2つのタイプのモデル、シングル・デイ・ラグ (single day lag) モデルとマルチ・デイ・ラグ (multi day lag) モデルを設定している。シングル・デイ・ラグモデルでは、現時点の大気汚染濃度から、1日前の大気汚染濃度、2日前の大気汚染濃度、…、6日前の大気汚染濃度の7つのラグに対応した大気汚染濃度を説明変数としている。マルチ・デイ・ラグモデルでは、現時点と1日前の2日間の大気汚染濃度の移動平均値と現時点と6日前の7日間の大気汚染濃度の移動平均値を説明変数としている。さらに、暖期（4月から9月）と寒期（10月から3月）に分けた分析も行った。

Cao et al. (2009) の推計結果は以下のとおりである。

汚染物質濃度が来院数に与える影響についての推定値は、汚染物質濃度のラグ構造ごとに異なっている。例えば、PM<sub>10</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>の3日前の汚染濃度がそれぞれ10 $\mu$ g/m<sup>3</sup>増加すると、外来への来院数は0.11% (95%CI: -0.03%, 0.26%), 0.34% (95%CI: 0.06%, 0.61%), 0.55% (95%CI: 0.14%, 0.97%) だけそれぞれ増加する。そして緊急治療室への来室数は0.01% (95%CI: -0.09%, 0.10%), 0.17% (95%CI: 0.00%, 0.35%), 0.08% (95%CI: -0.18%, 0.33%) それぞれ増加する。統計学的有意な関係 ( $p < 0.05$ ) は、いくつかで見られるが全部ではない。例えば、外来への来院数は、3日前のNO<sub>2</sub>とSO<sub>2</sub>が有意であり、緊急治療室への来室数は、当日のSO<sub>2</sub>とNO<sub>2</sub>、2日前と3日前のSO<sub>2</sub>、2日間の移動平均と7日間の移動平均のSO<sub>2</sub>とNO<sub>2</sub>が有意であった。PM<sub>10</sub>は、何ら統計的有意性を示していない。

外来への来院モデルについては3日前の汚染物質濃度を取り上げ、緊急治療室への来院モデルについては現時点の汚染物質濃度を取り上げ、暖期と寒期に分けた分析結果は、暖期よりも寒期において強い関係がある。PM<sub>10</sub>は暖期よりも寒期のほうが外来への来院の影響が大きいですが、季節間の差については有意ではない。同様に、SO<sub>2</sub>とNO<sub>2</sub>は寒期において外来への来院に影響を与えている。しかし、暖期にはその影響は見られない。季節間の差については、SO<sub>2</sub>とNO<sub>2</sub>については有意である。緊急治療室への来室については、寒期のNO<sub>2</sub>のみが有意である。季節間の差については、全ての汚染物質において有意ではない結果となっている。

Kan教授を中心とした研究グループは、先駆的な分析も行っている。Huang et al. (2009) は、可視性と大気汚染との関連性を評価し、1日当たりの死亡率の変動が上海の可視水準の変動と関連性があるかどうかを分析している。Huang et al. (2009) が用いたデータは、2004年3月4日から2005年12月31日（668日）の上海市都市部9区に住む居住者の1日当たりの死亡数、1日当たりの可視性のデータ<sup>9</sup>。汚染物質PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10-2.5</sub><sup>10</sup>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub>の濃度は、普陀区にある観測所（1局）からのものである。PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10-2.5</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>については24時間平均濃度を、O<sub>3</sub>に

<sup>9</sup> 宝山区の固定観測ステーションで測定されたものである。そこでは、地上から約3メートルのところにデジタルフォト可視性システムが設定され、リアルタイムで大気の可視性を測定している。

<sup>10</sup> PM<sub>10-2.5</sub>は、PM<sub>10</sub>の測定値からPM<sub>2.5</sub>の測定値を引いて推定している。

については8時間平均濃度(午前10時から午後6時)を用いている。また、1日の平均気温と湿度のデータは徐匯区にある気象観測所(1局)からのものである。

Huang et al. (2009)の推計方法は、これまでのKan教授を中心とした研究グループの方法と同様である。第1段階の基本モデルの確定のため、罰則付きスプライン関数を適用している。第2段階で、可視性と汚染物質濃度を追加した一般化加法モデルを推計している。Huang et al. (2009)の主たる関心は、可視性のデータが大気汚染濃度を代替しうるかにある。モデルを推計する前に、可視性と各汚染物質濃度との相関係数を計算している。可視性と最も高い相関を示したものは、PM<sub>2.5</sub>であった(相関係数は-0.68)。そして、湿度と共に可視性は、PM<sub>2.5</sub>とPM<sub>10</sub>の予測において適切であるとした。これにより、大気汚染濃度の観測体制を整備することができない発展途上国において、比較的容易に観測できる可視性のデータがその国の大気汚染が健康に及ぼす影響を評価することできるとしている。

Huang et al. (2009)の推計結果によれば、可視性の下落は、全ての原因と循環器系疾病による死亡率を増加させ、それは有意であった。可視性が8km低下するごとに、全死亡率、循環器系疾病による死亡率、呼吸器系疾病による死亡率をそれぞれ2.17% (95%CI: 0.46%, 3.85%)、3.36% (95%CI: 0.96%, 5.70%)、そして3.02% (95%CI: -1.32%, 7.17%)増加させると推計した。

Kan教授を中心とした研究グループは、まだ一致した見解をもたない事例についても分析を行っている。Jiang et al. (2007)は、上海における大気汚染物質の暴露と早産の関係を分析している。Jiang et al. (2007)が用いた早産のデータは、37週未満の懐妊期間による生児出生を2004年の各日で集計したものである。大気汚染データは、PM<sub>10</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>について、6つの固定測定局の観測結果を平均したものである。PM<sub>10</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>については、24時間平均濃度を、O<sub>3</sub>については8時間平均濃度(午前10時から午後6時)を用いている。また、1日の平均気温と湿度のデータは徐匯区にある気象観測所(1局)からのものである。

Jiang et al. (2007)が採用するモデルは、基本的にHuang et al. (2009)と同じであるが、説明変数としての汚染物質濃度の構造が異なる。説明変数としての汚染物質濃度は、早産前4週の汚染濃度の平均値、早産前6週の汚染濃度の平均値、早産前8週の汚染濃度の平均値を設定している。推計結果は、早産前8週の汚染物質の暴露のみが有意であった。PM<sub>10</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub>の8週の平均値が10 $\mu$ g/m<sup>3</sup>増加すると、それぞれ早産を4.42% (95%CI 1.60%, 7.25%)、11.89% (95%CI 6.69%, 17.09%)、5.43% (95%CI 1.78%, 9.08%)、4.63% (95%CI 0.35%, 8.91%)だけ増加させると推計している。

Kan教授を中心とした研究グループによる一連の研究<sup>11</sup>は、上海の大気汚染問題に対して重大な

<sup>11</sup> Kan教授を中心とした研究グループの研究は、本稿で検討したもの以外に、例えばO<sub>3</sub>の健康に与える影響についての研究もある。ここでは、基本的にPM<sub>10</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>に焦点を当てた分析を中心に整理を行った。

問題提起を行っている。2000年代に入り、上海の大気汚染は中国の環境基準を下回る水準で推移してきたが、未だ上海市民の健康に悪影響を与えている可能性があることを示した。以下では、ここで整理した疫学的研究の問題点あるいは限界を改めて整理し、上海の大気汚染問題の課題について検討を行う。

#### 4. 検討

Kan et al. (2003) は、北米やヨーロッパの先行研究と比べて、推計値が小さいことを自ら認めている。特に、PM<sub>10</sub>の推計値が小さい。この問題は、Kan et al. (2003) に固有の問題ではなく、Chen et al. (2008) においてもPM<sub>10</sub>の推計値が小さいことを認めている。これは、先行研究との推計方法の違いに起因すると考えられるが、Kan et al. (2003) は別の可能性についても指摘している。それは、上海の大気汚染水準、大気汚染物質に対する居住者の感応性、人口の年齢分布、そして特に大気汚染の構成物質の違いが暴露—反応関係に強く影響を与えている可能性を挙げている。例えば、ヨーロッパやアメリカの自動車保有の構成は中国とは大きく異なり、中国では石炭が広く使用されていることにより、中国（上海）の大気中における汚染物質の混合は他の地域とは異なり、中国における暴露—反応関係が異なる、というものである。健康の視点から考えると、汚染物質の影響が小さく推計されたことは好ましい。しかし、推計方法に問題がある場合、Kan教授を中心とした研究グループの研究成果は、重大な変更を求められることになる。Kan et al. (2003) とChen et al. (2008) は、反応変数（相対リスクと1日当たりの死亡数）とデータの大きさに違いがあるとはいえ、ほぼ同じタイプのモデルとデータを使い推計を行っている。しかし、前節で見たように、推計結果については違いもみられる。この違いが何に起因するかの検討は必要であろう。推計方法に問題がないとするならば、Kan et al. (2003) が指摘したように、推計結果の違いは上海の2000年代前半に暴露—反応関係が急速に変化した可能性を指摘することができる。この暴露—反応関係を解明することができれば、上海に固有の大気汚染問題の原因構造を明らかにすることもできる。いずれにせよ、少なくともKan et al. (2003) とChen et al. (2008) の推計結果の違いについて、推計方法の妥当性の検討が必要である。

Kan教授を中心とした研究グループの研究の多くは、大気汚染物質の濃度については同じタイプのデータを利用している。すなわち、上海市中心区部の6箇所の観測所データの平均値を用いている。これは、彼らが認めているように、いくつかの問題がある。まず、観測所自体が必ずしも汚染源（移動発生源の場合、交差点など）近くに設置されているわけではない。そのため、観測データは汚染源の背景における汚染濃度を示していると考え、上海市中心部に居住する住民が平均的に暴露する汚染濃度として彼らは推計を行っている。すなわち、彼らの推計からは上海市民の個人的暴露の状況は明らかとはならないのである。この問題は、上海の大気汚染監視体制が未だ十分でない

ことによる。監視体制が十分でないことは、上海の大気汚染の現状について誤った認識に導く。2節で、上海の大気汚染は2000年代に入り、環境基準を下回る水準で推移しているを見たが、例えば、呉・余・馬（2007）は、2004年の上海市中心区部のNO<sub>x</sub>年平均濃度は0.09mg/m<sup>3</sup>であり、旧国家環境基準2級基準を超えていることを明らかにした。また、上海市環境科学研究院（2008）も、2004年の上海市18の主要交通幹線道路での観測結果は、汚染濃度が非常に高かったことを報告している。NO<sub>x</sub>の1時間の最高濃度は0.95mg/m<sup>3</sup>に達し、旧国家環境基準3級基準（0.30mg/m<sup>3</sup>）の3倍以上であり、NO<sub>2</sub>の1時間の最高濃度は0.25mg/m<sup>3</sup>に達し、国家3級基準標準値（0.24mg/m<sup>3</sup>）を超えた。PM<sub>10</sub>の1時間の最高濃度は1.199mg/m<sup>3</sup>に達している。住民は長時間、高濃度の大気汚染に暴露していたのである。

大気汚染濃度のデータが上方に修正されるならば、Kan教授を中心とした研究グループの推計結果は大幅に修正を迫られることになる。より正確な疫学的研究を行う上でも、大気汚染の現状を十分に把握できる観測体制の整備が必要である。

この問題を考慮の外においても、Kan教授を中心とした研究グループの研究は、中国あるいは上海の環境政策に与える影響は大きい。環境基準を下回る大気汚染の水準であっても、健康被害をもたらすことを明らかにしている。健康被害の防止のためには、WHOの基準に近づく新たな環境基準を制定し、そのための対策を構築する段階にきていることを強く示唆している。

最後に、表2、表3で見た循環器系および呼吸器系疾病を原因とする上海の死亡動向について触れておこう。上海市全体としては、呼吸器系疾病を原因とする上海の死亡率は減少傾向にある。Kan教授を中心とした研究グループの研究では、大気汚染物質と呼吸器系疾病を原因とする死亡率の間に有意な関係を見いだせなかったものが多い。この点についてさらなる研究が求められるが、表2からわかるように、1990年代の呼吸器系疾病を原因とする死亡率は上海市中心部より郊外の方が大きな割合を占めていた。これまで上海の大気汚染問題を考えると、多くの関心は複合型汚染として都市部（中心部）の大気汚染問題に集中していた。しかし、表2に示された死亡率の動向は、郊外の大気汚染問題に関心を向けることを示唆している。

## 5. おわりに

疫学的研究から見えてくる上海の大気汚染問題は、前節で見たように、いくつかの課題を提示した。先行研究との国際比較は、推計方法に問題がなければ、推計結果の違いは暴露—反応関係の違いを反映することになる。暴露—反応関係の違いは、特定地域の大気汚染の原因構造の解明の手掛かりとなる。少なくとも本稿で見てきた上海の大気汚染において、ガス状汚染物質であるSO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>が住民の健康へ大きな影響を与えている。これは、上海の大気汚染が複合型汚染であることと一致している。どちらの汚染物質がより大きな影響を与えているかを見ることにより、上海の大気汚染

の原因構造はより明確となり、大気汚染対策の手掛かりを与えるであろう。さらに、PM<sub>10</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>以外の汚染物質に関する疫学的研究についての整理も必要となる。

Kan教授を中心とした研究グループの疫学的研究は、中国の環境基準は十分な成果を上げていないことを示唆している。新たな基準の制定と基準達成のための環境政策の研究が、今後、重要な課題となる。

最後に、前節の終わりに指摘したように、上海市郊外の大気汚染問題の解明も必要であろう。ここにあげた課題に取り組むことで、上海の大気汚染問題の解明と解決に向けた環境政策を構築することが、筆者に残された大きな課題である。

## 追記

筆者は、静岡大学在籍中、青山茂樹教授の心温まる指導の下、環境問題への関心を深めることができた。ここに、感謝の意を表するとともに、青山茂樹教授の益々のご活躍とご健勝をお祈り申し上げます。

## 参考文献

### [英語文献]

- Cao, Junshan, Weihua Li, Jianguo Tan, Weimin Song, Xiaohui Xu, Cheng Jiang, Guohai Chen, Renjie Chen, Wenjuan Ma, Bingheng Chen and Haidong Kan (2009), "Association of ambient air pollution with hospital outpatient and emergency room visits in Shanghai, China," *Science of The Total Environment*, vol.407, issue 21, pp.5531-5536.
- Chen Bingheng, Chuanjie Hong and Haidong Kan (2004), "Exposures and health outcomes from outdoor air pollutants in China," *Toxicology*, vol.198, no.1-3, pp.291-300.
- Chen, Guohai, Guixiang Song, Lili Jiang, Yunhui Zhang, Naiqing Zhao, Bingheng Chen and Haidong Kan (2008), "Short-term Effects of Ambient Gaseous Pollutants and Particulate Matter on Daily Mortality in Shanghai, China," *Journal of Occupational Health*, vol.50, no.1, pp.41-47
- Huang, Wei, Jianguo Tan, Haidong Kan, Ni Zhao, Weimin Song, Guixiang Song, Guohai Chen, Lili Jiang, Cheng Jiang, Renjie Chen and Bingheng Chen (2009), "Visibility, air quality and daily mortality in Shanghai, China," *Science of The Total Environment*, vol.407, issue 10, pp.3295-3300.
- Jiang, Li-Li Yun-Hui Zhang, Gui-Xiang Song, Guo-Hai Chen, Bing-Heng Chen, Nai-Qing Zhao, and Hai-Dong Kan (2007), "A time series analysis of outdoor air pollution and preterm birth in Shanghai, China," *Biomedical and Environmental Sciences*, vol.20, no.5, pp.426-431.

Kan, Haidong and Bingheng Chen (2003), "Air pollution and daily mortality in Shanghai: A time-series study," *Archives of environmental health*, vol.58, no.6, pp.360-367.

【日本語文献】

傅喆 (2010), 「上海における自動車保有台数の推移に関する一考察: 「ナンバープレート・オークション制」に着目して」, Discussion papers / Graduate School of Economics, Hitotsubashi University, no. 2010-10. (<http://hermes-ir.lib.hit-u.ac.jp/rs/handle/10086/18670> (アクセス日: 2010年9月10日)).

【中国語文献】

上海市環境科学研究院 (2008), 「2007年上海市環境空氣質量狀況報告」.

吳曉璐・余琦・馬蔚純 (2007), 「環境空氣質量数值模拟及其在上海道路交通規劃環境評価中的応用」  
『復旦學報 (自然科学版)』第46卷第3号, pp.348-355.