

大沼あゆみ研究会卒業論文  
煤の地球温暖化効果を利用した煤の排出削減案

20119263

春山 敦輝

平成17年4月1日

The only thing we have to fear is fear itself.  
by Franklin D. Roosevelt

# 目次

第1章	初めに	3
第2章	煤とは何か	4
2.1	どのようなものか	4
2.1.1	科学的な特徴	4
2.1.2	発生源と現在の散布状況	4
2.2	近年新たに明らかになった煤の環境被害	10
2.2.1	花粉症	10
2.2.2	洪水、日照り	10
2.2.3	地球温暖化	10
第3章	煤の温暖化について	11
3.1	発見への経緯	11
3.1.1	研究内容	11
3.1.2	社会的な認識	13
第4章	予防原則	15
4.1	予防原則とは	15
第5章	煤の排出抑制方法	19
5.1	技術面	19
5.1.1	ディーゼルエンジン	19
5.1.2	航空機エンジン	20
5.1.3	有機燃料	20
5.1.4	天然ガス	21
5.1.5	石炭、工場プラント	21
5.2	煤排出に予防原則を適用した場合	21
5.2.1	世界的に合意が得られた場合	21
第6章	まとめ	23

# 第1章 初めに

初めに私がなぜこのテーマを選んだのか、その理由を述べようと思う。1997年に京都議定書が採択され、アメリカが批准を拒否し、ようやく昨年になってロシアが批准する流れになり、発効される見通しとなった。しかし削減目標達成は困難を極めており、果たして達成できるのか、非常に危ぶまれている。そんななか、私はインターネット上で一つの記事<sup>1)</sup>を見つけた。このサイトは海外の環境に対する研究結果等が日本語で読めるので、よく見ているサイトである。そこで見つけたタイトルは『地球温暖化、原因の第2位は「煤」?<sup>1)</sup>』であった。非常に興味を持ち、読んでみるとタイトル通り、煤が二酸化炭素に次ぐ地球温暖化の原因物質である、という科学的な根拠が示してあった。そこからさらに調べていくと、ちょうどその年にNASAが発表した記事を見つけ、それによって上に挙げたウェブサイトが根拠としている研究以外に、NASAも研究している事が分かり、研究材料になりうるのではないかと考えた。そしてそれがきっかけで昨年度、ゼミの新聞発表でこの話題について発表した。その後はそれ以上日本語の資料が見つからなかったこともあり、興味は持ちつつも別のテーマに付いても研究を続けていたのだが、上に書いたように京都議定書の目標達成が難しい現状で、これほど温暖化効果が高い可能性がありまた排出削減を行いやすい物質が発見されたのなら、これを題材に何かを提案する事が出来るのではないかと考えた。そして、タイトル通り「煤」を卒論のテーマにした。なお、煤を選択した理由は上に書いた理由の他に、私が個人的に喘息の持病を持っている事も理由の一つである。

簡単にここで本論文の流れを述べておく。目次にある通り、本論文では主に「煤の特徴とその排出コントロール、およびそれに対する予防原則」について述べてある。私の調べた限りでは煤の温暖化効果に関して社会科学的な視点から述べた論文が存在しないため、科学的な論証を基にして論じた。また、科学的な論証そのものもあまり広く一般に知れ渡っている状況ではなく、特に日本国内においてはその傾向はさらに強い。こういった状況にあるため、まず第2、3章においてその科学的検証に関して詳しく述べた。そして、その後社会科学的にどのようにアプローチするかを提示する上で本論で用いたのは予防原則と呼ばれるものである。詳しくは第4章で述べた。そして、第5章にてこれらの検証結果やアプローチが実際に社会的にどのように捉えられうるのか、考察した。

これから本論文を読んで頂くにあたって、これらの事を念頭に置いて読んで頂けたら幸いである。なお、本論文の目的は何かの結論を導き出す事ではなく、このような事例とその可能性を知って頂きたい、という事を目的としている。

---

<sup>1)</sup>煤はすす、と読む。本論文では漢字表記ですすを表現する。

## 第2章 煤とは何か

### 2.1 どのようなものか

煤(すす)とは、一般的に何かを燃やしたときに発生する煙に含まれる、黒く細かな微粒子である。日常で目にするところとしては焚き火をした時に見る事ができる、黒い焚き火の煙で衣服や顔が黒くなってしまった経験はないだろうか。その原因が煤である。煤というとはい煙(以下煤煙)のことであると思う方もいるかもしれないが、厳密に言うと煤は煤煙の中に含まれるものではあるが、環境に与える影響を考えると、同じものとして扱うべきではない。煤煙には煤の他に硫黄酸化物や他の汚染物質も含まれており、煤煙がもたらす影響と煤がもたらす影響は必ずしも一致するものではない。環境問題ではよく煤煙が昔から注目されているが、過去に煤煙が引き起こした環境問題は、煤成分だけでなく硫黄酸化物が様々な健康被害をもたらしてきた例も多い。しかし、この論文では扱うのはいわゆる煤煙ではなく、煤そのものである。なお、英語表記では”soot”や”Black Carbon”(以下BC)、“Elemental Carbon”(以下EC)と書かれることが多い。英語圏の文献では主にBCが用いられており、また東京都などの国内の調査ではECが用いられることが多いようである。

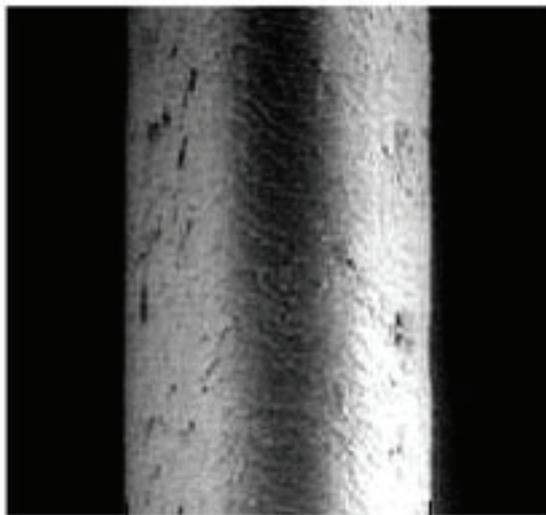
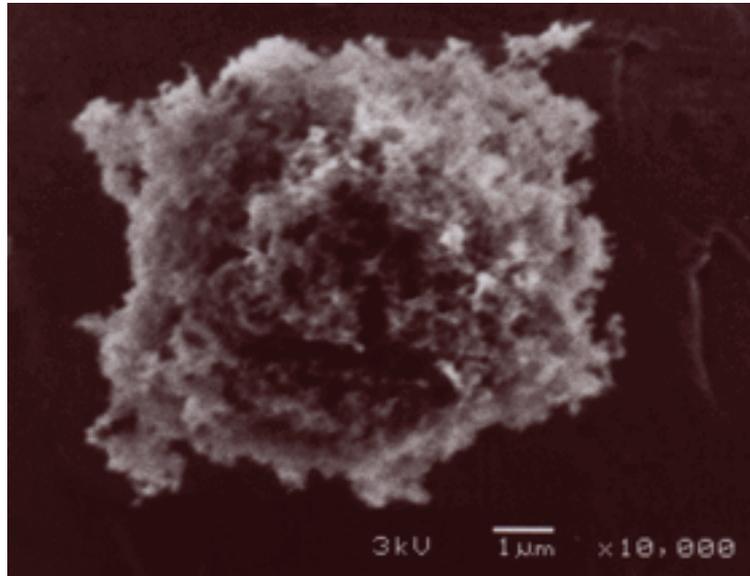
#### 2.1.1 科学的な特徴

最初に、科学的な特徴から述べる。煤は大気中に存在する粒子状浮遊物質(PM)の一種である。主に化石燃料や有機物の不完全燃焼によって発生するもので、純粋な炭素元素の状態である。参考までに煤の写真を次ページに示す。煤はCO<sub>x</sub>等と違ってある程度の大きさや質量をもった微粒子なため、長期的に大気中を浮遊することはなく、排出されてから2、3週間後には雨や雪となって地表や海上に堆積する。よって大気中には比較的短期間しか浮遊せず、その直接的な影響はやや局地的なものであると考えられている。ただし、これはその土地の地形や大気循環の状況によって影響が及ぶ範囲は異なる。

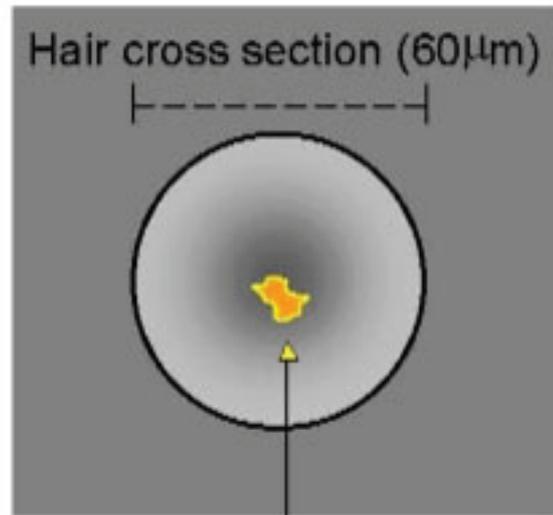
#### 2.1.2 発生源と現在の散布状況

発生源 煤の人為的な排出源の主なものとしてはディーゼルエンジンや航空機エンジンからの排出ガスと、有機燃料<sup>1</sup>を燃やした時の煙から主に排出されていると考えられている。また、工場プラントからも発生する。それでは以下で詳しく見ていく。

<sup>1</sup>英語の文献では biomass fuel となっているのだが、これはいわゆるバイオマス発電の他に、有機物(動物の糞や木材等)を家庭で燃やす場合も含まれている。バイオマス発電では旧式の発電機の一部(スウェーデン等)で煤が発生するが、それらは今撤廃の方向に向かっている。よって今回は家庭での利用に限るのだが、混乱を避ける為に有機燃料とした。



**Human Hair**  
**(60 μm diameter)**



**Particulate matter**  
**such as a soot particle**  
**(10 μm)**

図 2.1: (上) 煤の拡大図、(下) 煤と髪の毛の大きさの比較<sup>15)</sup>

**ディーゼルエンジン** 最初はディーゼルエンジンについてである。ディーゼルエンジンでは、利用する際にエンジン内において起こる不完全燃焼が原因で発生する。また、燃料が燃料やエンジンオイルなどから出る物質と一緒に排気管から出てくる際には煤を核としてその周りに炭化水素や硫酸塩が付着した状態で排出される。この状態は後に述べるのであるが、煤の温暖化についてのシミュレートの際に想定した煤の状態と同じである。

**航空機エンジン** 次は、航空機エンジンである。IPCC が煤の発生源として注目しているのは主に航空機から排出される煤である。これに関しては IPCC が 1994 年に報告書<sup>3)</sup>を出している。ただ、現段階では「温暖化へのプラス効果は認められる可能性があるが、影響は今後さらに研究をするべき」という結論が出されるにとどまっている。煤を含めた航空機の排出物の温暖化寄与度の分析はまだ決定的なものになっていないのが現状のようである。

上で挙げた IPCC の特別報告書<sup>3)</sup>によると、1992 年の時点において地上で発生する煤に比べて航空機から発生する煤の量は小さい、としている。また、2050 年の予測数値でも同様のことが言える、と書かれている。なお、IPCC における航空機分野における煤の影響としては本論文で述べるような煤の直接的な温暖化効果よりも、煤をふくめたエアロゾル全般が上空の雲の形成や変動をどのように左右しているか、に注目しているようである。

**有機燃料** これは、主に中国やインドでの排出が多い。有機燃料は不完全燃焼を起こしやすいため、多くの場合煤を発生する。さらに有機燃料の使用する場所が不完全燃焼をさらに引き起こしやすい低気温であったり、酸素が不足した低気圧にさらされていた場合、排出量はより多くなる。こういった理由から、特に有機燃料の不完全燃焼による煤の発生量が多い地域は寒冷地や高地である。このような条件によって、中国やインド、特にその内陸地にある高地からの煤の排出が多いと考えられている。

**石炭** これは、特に発展途上国に多く見られる例だ。石炭（特に質の悪い石炭）を燃やし、何も排煙処理を行わないと、大量の煤が排出されてしまう。ジョージア工科大学の研究ニュースサイトに載っている煤の温暖化の記事<sup>6)</sup>において中国における煤の典型的な排出の様子が紹介されていたので参考までに以下に示しておく。これは、Lin An という浙江省の都市である。この省は地図にある通り上海のすぐ南に位置している。また、中国全土においてのおおよその位置は後に示す煤の分布図において示す。

**天然ガス** 天然ガスの燃焼によっても煤は発生する。特に天然ガス採掘場で常に燃やされているフレアガスからは多くの煤が発生している。フレアガスとは、油田の風景でよく見られる、煙突の先から絶え間なく燃やされている炎の事である。

**工場プラント** 工場プラントといっても幅広く存在するが、上に挙げた石炭以外の有機物や化石燃料を燃やす過程が組み込まれている工場でも煤は発生する。国内にある大規模な工場プラント（石油精製プラントや火力発電所など）では高度経済成長期の公害対策によって、今ではほとんどが排出されずに除去されている。しかし、海外では未だに排出を続けているようなところは存在する。

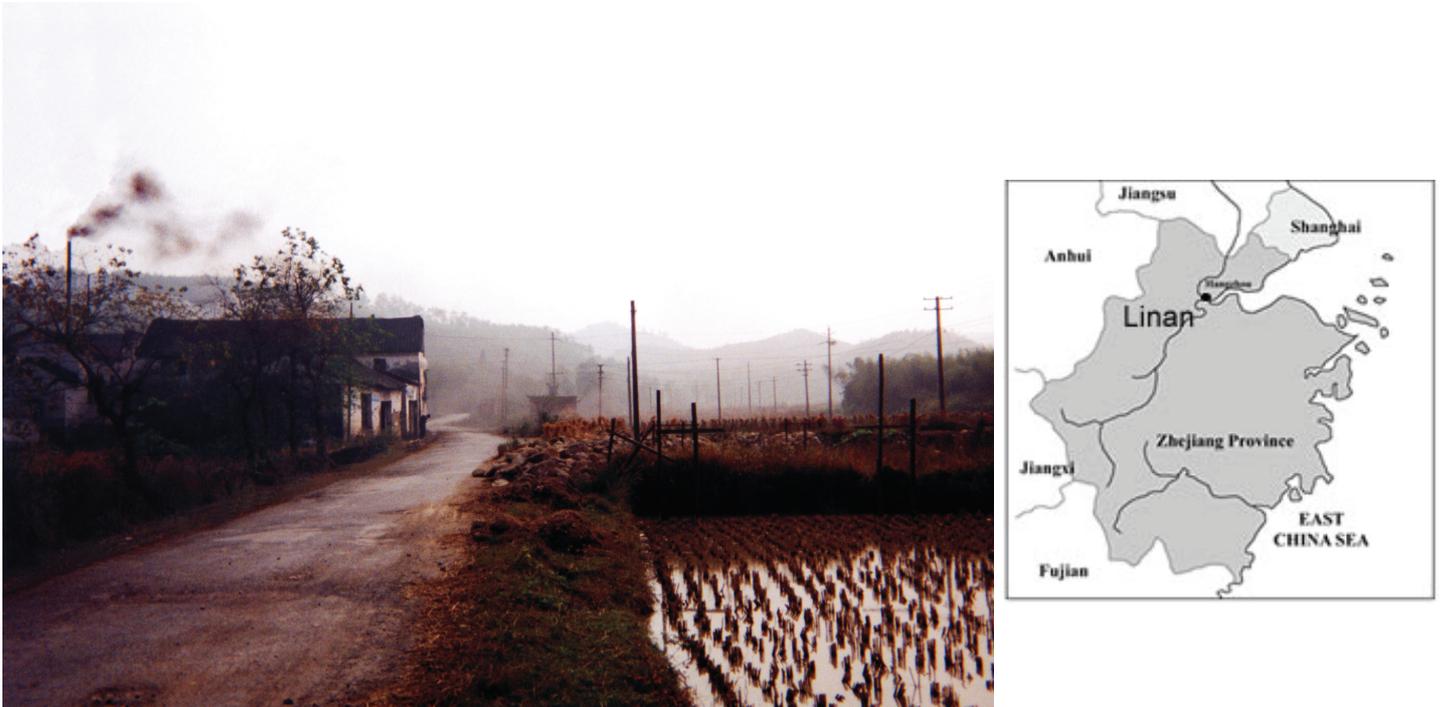


図 2.2: 左 A typical hazy day near Lin An, China.<sup>7)</sup> 右 A Map of Lin An<sup>8)</sup>

散布状況 上に様々な排出源の例を挙げたが、これらがどのくらいの割合で排出をしているのか、というはっきりした調査はなされていない。しかし、科学者の間ではディーゼルエンジンと有機燃料からの排出が大部分を占めている、というのが共通の認識らしい。そして、その散布状況も他の汚染物質ほどはっきりしたデータはないものの、カナダの IMAP が細かなデータを集めたものと、NASA の研究員がシミュレートで算出した煤の散布状況を示すマップが web 上で紹介されている。これらを以下に示す。

図の 2.4 を見ると、どの地域に煤排出の分布が多いかがよく分かる。もっとも顕著地域は中国都市部とインド中部（都市部）であろう。この地域は上に挙げたいくつかの排出源をかかえこんでいる。また、サウジアラビアの辺りが多いのは天然ガス採掘に伴うフレアガスの影響が考えられる。G8 に数えられるような先進国も排出が多くなっているが、これはディーゼル車の影響が大きいのではないと思われる。

また、NASA が行った他のコンピュータシミュレート<sup>2</sup>によって導き出された図 2.5 を次ページに示す。この図は煤が発生すると太陽から地表に届く熱が減ってしまう事を利用して、地表に到達する熱量がどの程度減少するのか、シミュレートしたものである。これを見ると、経済発展が著しい中国の南東部からの発生が集中している事が分かる。また、地図上に薄く赤い円が示してあるが、これは前に煤の発生源の典型例として挙げた Lin An のある辺りである。中国南東部沿岸部には経済特区が多く存在し、工業生産が活発に行われている。内陸部では以前より石炭を燃料とした工場が多く稼働している。また、沿岸部、内陸部問わず最近国民の移動手段が自転車からバスやバイクに移っている。この図はこれらの社会的状況を表していると考えられるであろう。

<sup>2</sup>このシミュレートは GISS において行われ、エアロゾルのデータは中国国内にある 46 カ所の地上計測地点を利用した、としてある。また、季節は夏（6、7、8月）を想定している。

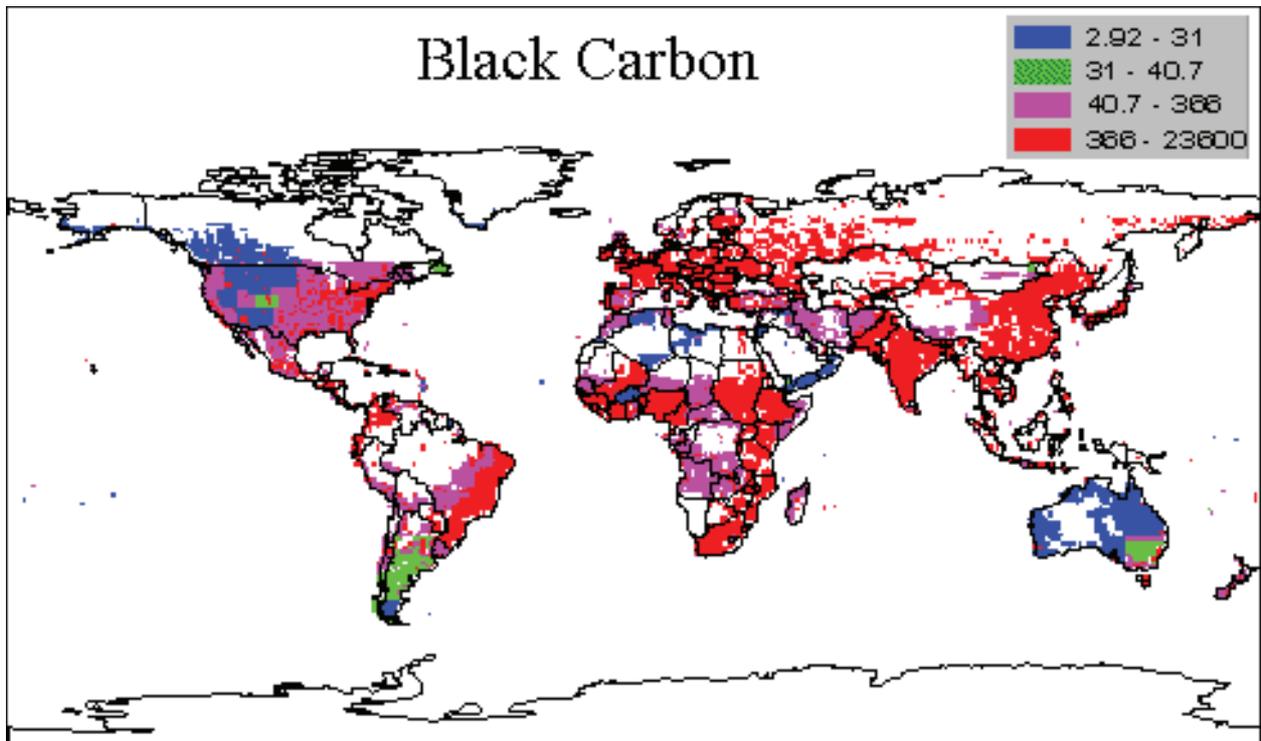


図 2.3: IMAP Black Carbon 分布 (1985) <sup>2)</sup>

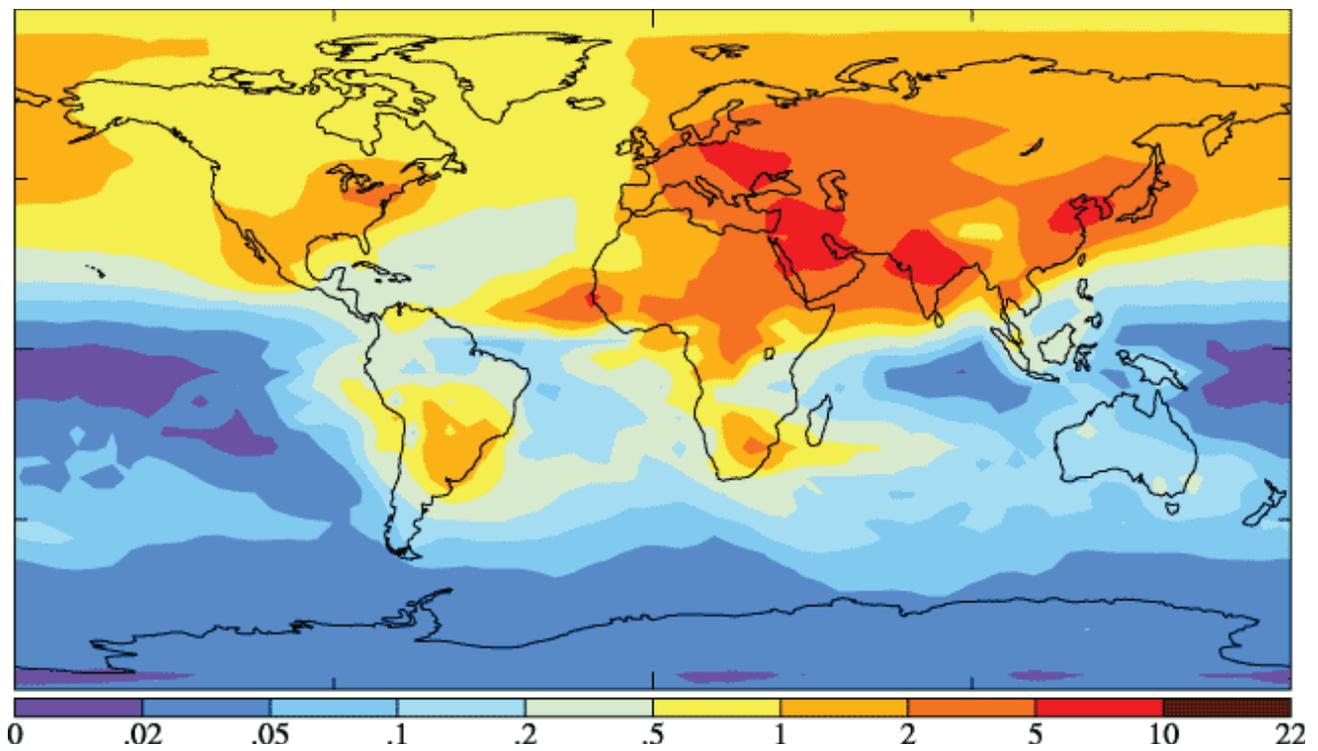
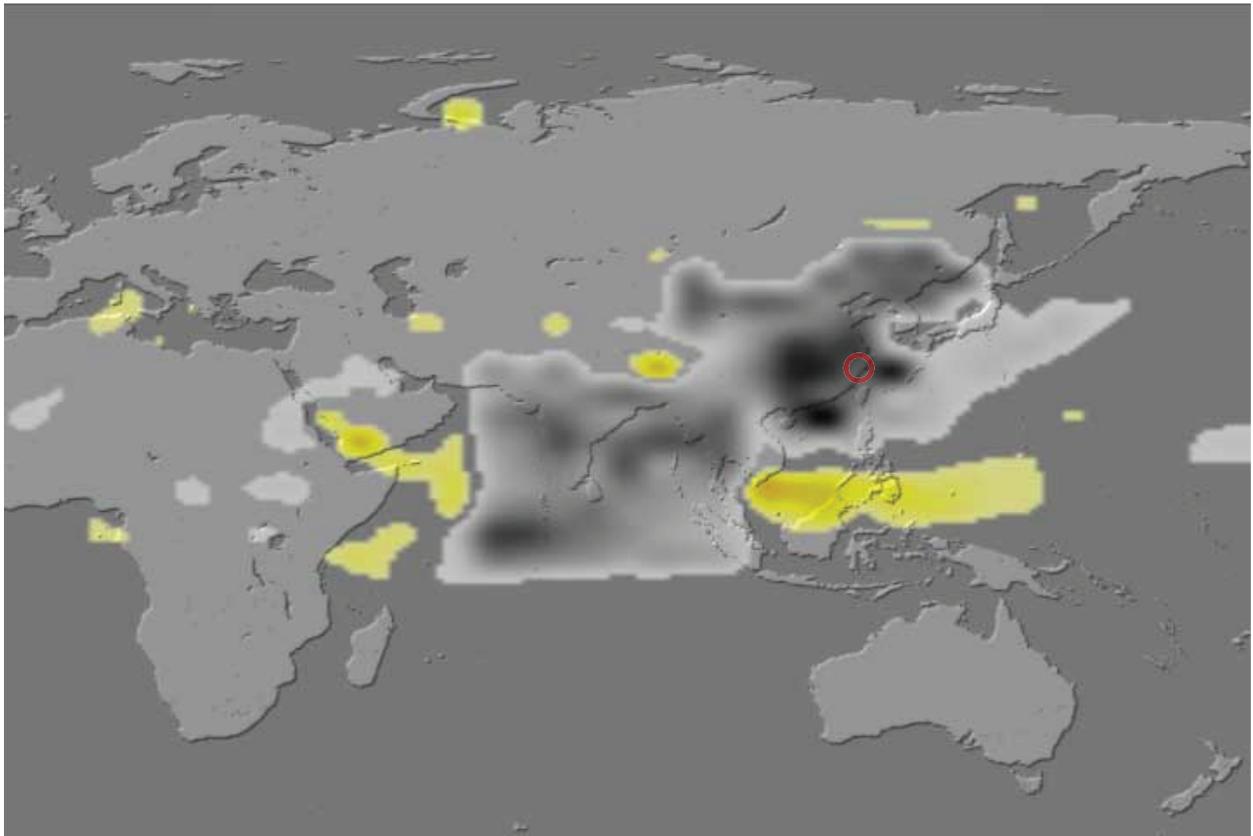


図 2.4: NASA Soot 分布シミュレート <sup>17)</sup>



☒ 2.5: SUNBLOCK REDUCES CROP YIELDS ( 2002 ) <sup>5)</sup>

## 2.2 近年新たに明らかになった煤の環境被害

今まで煤の環境被害というと健康被害が中心で、一般に知られているものとしては、喉や鼻に対する悪影響や肺がん、ぜんそく発作が代表的な健康被害だ。これらに加えて、近年の研究で新たに明らかになった環境問題がいくつかある。

### 2.2.1 花粉症

これは、平成 15 年にディーゼル車排出ガスと花粉症の関連に関する調査委員会（東京都）の報告書<sup>2)</sup>によってその可能性が確認された煤の健康被害である。煤が体内に入り込んだ際にどのように作用し、その結果スギ花粉症の症状に対してどのような作用をもたらすのか、を研究したものだ。その結果、煤を主成分とするディーゼル車排出微粒子が花粉症の症状を発言増悪させる物質の産生や増強に関与し、花粉症の症状を引き起こしたり悪化させたりする可能性があることが示唆された、と報告されている。また、これと同時にラットを用いた動物実験も行われ、免疫機能の未発達な胎仔期や哺乳期にディーゼル車排出ガスの影響を受けた場合、杉花粉症を引き起こしやすい体質になる可能性があること、が報告された。これに基づいて東京都ではディーゼル車規制が花粉症の症状を和らげる効果があるとして、アピールしている。

### 2.2.2 洪水、日照り

これは、NASA の研究<sup>5)</sup>によって分かったものである。この研究は中国において近年頻発した中国国内の洪水、日照りの原因を調べる目的で行われた。それによると、中国国内における煤の排出によって現地の大気循環が狂い、その結果として近年中国国内で発生した大洪水の原因の一つがこの煤排出による大気循環の変化である、と結論付けている。地上で大量に発生した煤を多く含んだ雲は、太陽光をより多く吸収し、消失しやすい。この状態において雲がなくなると、日照りが続く。この間太陽光が地表を暖め、そこから上昇気流が発生し、その結果大量の雨雲を作り、激しい雨を降らせる。これが研究された結果導かれた簡単な仕組みである。実際にここ数十年間に中国では洪水や日照りが増えている。

### 2.2.3 地球温暖化

最後に紹介するのが地球温暖化である。第 1 章でも述べたとおり、この煤の新たな被害が本論文のメインテーマである。簡単に仕組みを紹介すると、煤が大気中に散布された場合、煤が黒いという性質が作用して、地球温暖化を引き起こすということだ。そしてその可能性が各研究によって示唆されている。次章よりその仕組みを詳しく述べる。

## 第3章 煤の温暖化について

### 3.1 発見への経緯

#### 3.1.1 研究内容

この問題を最初に指摘したのは第1章でも述べたとおり Mark Jacobson 博士である。博士の論文は Nature 誌の 2001 年 2 月 8 日号に掲載された。まず、この論文の紹介と発見された事実の説明を述べる。

Mark Jacobson 博士の論文<sup>10)</sup>の論文は日本語に訳されたものが出版されていないため、まずこの論文の流れと要点を説明する。この論文は科学分析を行った結果を論文にしたものなので、非常に専門的な論文であり、詳細に科学的な根拠について述べてある。しかし、その詳細な実験結果には本卒論においてはあまり重要ではなく、その研究の結果からどういったことが考えられるのか、が重要であると判断したため、この Mark 博士の論文に関してこの実証分析の結果とその背景について述べている Nature の記事<sup>9)</sup>を参考にし、この論文について日本語で要約しながら紹介する。

元々、IPCC<sup>11)</sup>の報告書によると、煤を含むエアロゾル<sup>1)</sup>、特にサルフェート<sup>2)</sup>は温暖化効果がマイナスで、地球を冷やす効果がある、と考えられていた。この考えはエアロゾルが白い、という仮定の上で成り立っていたものなのだが、実際とは違ったものであった。実際に存在するエアロゾルはほとんどが煤を含んでいて、白色ではなく灰色をしているのである。そして、Jacobsen 博士の研究によると、その状況を仮定してシミュレートした結果、煤の温暖化効果の絶対値はエアロゾルのうちでももっとも地球冷却効果の寄与率が高いサルフェートの冷却効果の絶対値と同じである、という結果になった。煤によって、エアロゾルの冷却効果は打ち消されてしまっている、ということだ。

では、なぜ最近までこういった研究がなかったのだろうか。その原因としては、煤の分析技術やサンプリング技術が乏しかったことと、煤単体の排出量のモニタリングが今まであまり行われてこなかったことが挙げられる。分析技術がなぜ障害になっていたかという点、煤を採取した場合には、それと同時に有機物質も多数採取され、その状態で煤の放射強制力<sup>3)</sup>を測定しようとしても、煤と有機物質をうまく分けることが難しかったために測定することは困難であったからだ。また、Direct Optical Measurements という方法もあるのだが、この方法では測定をする際にエアロゾルはフィルターに集められた状態で測定される。フィルターに触れてしまうと物質の光学的な特徴が変わってしまうので、この方法でも正確には測定できない。もう一つ、Photoacoustic Spectrometer という方法があり、これを用いれば空中にある物質の光の吸収率を直に計測することができるのだが、これはまだほとんど利用されていない状態だ。ようするに、測定技術がはっきりしていなくて、またなかなか方法を確立できないことが、煤はどこから来てどこへ行き、どのくらい排出され大気にはどの程度拡散し、その放射強制力はどのくらいなのか、を正確に知ることの障害となっている。

<sup>1)</sup>大気中に浮遊する汚染物質などの粒子のこと

<sup>2)</sup>硫酸塩

<sup>3)</sup>起こり得る気候変化のメカニズムの重要性を表す簡単な尺度。正の放射強制力は地表面を暖め、負の放射強制力は地表面を冷やす傾向がある<sup>12)</sup>。

こうした動きの中で、一つ煤の排出測定の場合がある。1999年に、INDOEXプロジェクト<sup>13)</sup>は煤の排出量の算出を行った。その結果は、南アジアから排出されている煤の量は今まで考えられていた量よりも大体25%近く多い、ということであった。

こうした状態で、Jacobsen博士は不完全ながらも最も信憑性が高いと思われる煤の排出源の仮説を立て、その仮説をグローバルモデル<sup>4)</sup>に適用し、結果を導き出した。ただし結果を導く前にもう一つ仮定をおく必要があった。それは煤が大気中でどのように、どの程度他のエアロゾルと混じりあうか、ということだ。これは、中心に核として煤があり、その周りに他のエアロゾルが付着している、という仮説を立てた。なお、この状態は後に第5章で述べるディーゼル車から排出される煤の状態と同じようなものである。

そして、このシミュレーションの結果、煤の放射強制力は $0.55Wm^{-2}$ であるという結果が導き出された。IPCCによると、 $CH_4$ の放射強制力は $0.47Wm^{-2}$ であり、 $CO_2$ の放射強制力は $1.56Wm^{-2}$ である。この計算が正しいのならば、煤は $CO_2$ に次いで2番目に放射強制力の強い物質であることが言える。IPCCの計算による各主要物質の放射強制力は以下のとおりである。また、この表を

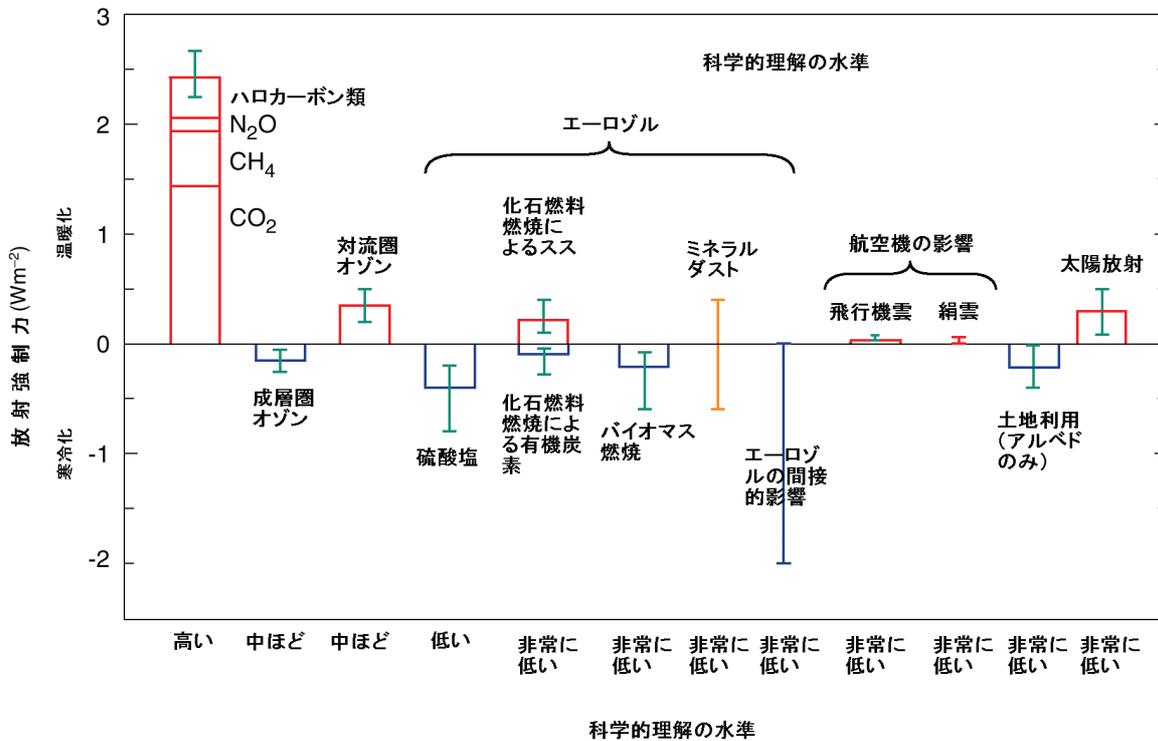


図 3.1: 各物質の放射強制力。IPCC 第三次評価報告書より引用<sup>14)</sup>

見ると、今回 Jacobsen 博士が算出した数値よりも IPCC が計算した煤の放射強制力のほうが小さいことがわかる。IPCC については後ほどまた触れる。

Jacobsen 博士はこういった計算を示した後に、煤の削減の必要性を強く主張している。第二章でも述べたとおり、煤は短期間で削減効果が現れるため、削減を行えばその効果はすぐに現れ、非常に効率的である。そして、今後京都議定書にこの内容を取り込む事を検討するように促してい

<sup>4)</sup>気候シミュレータ。GATOR-GCMというもので、気体やエアロゾル、放射、気象、輸送プロセスが扱える。また、エアロゾルのプロセスとしては18種類のエアロゾル間での排出量や液化、融解、凝固、化学的平衡などが考慮されている。

る。

その後、別の研究者グループが NASA において研究を進め、2003 年の 5 月に、煤と地球温暖化の関連性を認める研究結果を発表<sup>15) 16)</sup>した。この研究は AERONET を利用したシミュレーションで、IPCC の評価と矛盾しない煤の排出源データを含んだコンピュータシミュレーションを行った。その結果、煤の太陽光吸収量は今まで考えられていたよりも 2 から 4 倍大きいことが確認された。そしてその後 2003 年の 12 月に NASA によってもう一つの研究結果<sup>17) 18) 19)</sup>が発表された。それによると、本来地表にある雪や氷河は太陽光を反射し、地球外へ熱を放出する働きを持っているのだが、煤が雪に混じって雪や氷河の上に降り積もった場合、本来の働きを妨げるだけでなく、逆に太陽光を吸収し、熱を蓄積するようになってしまう。そしてさらに、この作用によって例えば永久凍土が融解した場合、永久凍土内に存在する地中炭素分や、 $CO_2$  の約 58 倍の温暖化効果を持つといわれているメタンを大気に放出してしまう。こういった煤の作用が世界の温暖化に与えた影響を考えると、 $CO_2$  の二倍の影響力があるだろう、としている。結論として 1880-2000 年の間に起こった地球温暖化のうち 25% が煤の雪や氷河に与える温暖化の影響によるものだった、と述べている。ただし著者の Hansen 博士は、今後ますます  $CO_2$  の影響力は増すと思われるので  $CO_2$  の影響も忘れてはならない、と注意を促している。

これらの論文は、確かにどれもコンピュータシミュレーション上のもので、場合によっては多くの仮説の上になりたっているものではあるが、IPCC が気候変化を予想する際にも同様のコンピュータシミュレーションを利用しており、またこれら煤に関する研究は科学的な根拠に基づいたシミュレートであるので、不確実性はあるとしても、一定以上の確実性はあるものであると考えられる。

### 3.1.2 社会的な認識

これらの発表に対して社会はどの程度の反応を示したのであろうか。IPCC がこれに対して直接的な反応を示した資料を見つける事は出来なかったが、前に述べたように IPCC は以前より煤に関しては航空機エンジンより排出されるものに関する研究報告書<sup>?)</sup>を出して、そこでは上空での煤を含むエアロゾルの作用は未だに不確実性が大きいので今後も研究が必要である、という結論になっている。

また、現アメリカ大統領のジョージ.W. ブッシュ大統領が記者会見で述べている。この記者会見でブッシュ大統領は、京都議定書に批准しないこととその理由について述べている。以下はその部分の抜粋<sup>4)</sup>である。

… ”The Kyoto Protocol was fatally flawed in fundamental ways.” ”But the process used to bring nations together to discuss our joint response to climate change is an important one.”

… ”The world’s second-largest emitter of greenhouse gases is China.” ”Yet, China was entirely exempted from the requirements of the Kyoto Protocol.”

… ”India and Germany are among the top emitters.” ”Yet, India was also exempt from Kyoto.”

… ”We want to work cooperatively with these countries in their efforts to reduce greenhouse emissions and maintain economic growth.”

… ”Kyoto also failed to address two major pollutants that have an impact on warming:” ”black soot and tropospheric ozone.” ”Both are proven

**health hazards.” ”Reducing both would not only address climate change, but also dramatically improve people’s health.”**

”Kyoto is, in many ways, unrealistic.””Many countries cannot meet their Kyoto targets.”…

と指摘している。公式な記者会見の場でこのような発表がなされたということは不確実性のある研究課題としては非常に意味のある発表であると考えられる。この後に煤の研究を行ったのは今のところ NASA だけであり、NASA はアメリカ政府機関である事から、アメリカはこの問題に対して比較的積極的に取り組もうとしているのではないか、と思う。なお、この会見は 2001 年 6 月に行われたので、Jacobson 博士の論文発表の直後に行われた事になる。この発言については第 5 章にてもう少し触れる。

なお、各メディアの取り扱いであるが、日本においてはこの問題について触れたメディアはあまりなかった。海外では BBC や CNN などが報道し、インターネットニュースサイト大手の WiredNews でも取り扱われた。

それでは、このような不確実性が存在し、社会的に認知されていない環境問題についてどのように対処すべきなのであろうか。次章以降ではそれについて論じていこうと思う。

## 第4章 予防原則

### 4.1 予防原則とは

予防原則とは何か。一般的な一つの定義というものは存在しないのだが、考え方としては様々なところで議論され、色々な形で世に出てきている。予防原則の定義の例として、予防原則を学ぶ上で参考とした本<sup>20)</sup>に「リスクの原因や源（ハザード）と、人の健康、安全、環境への望ましくない結果の間の因果関係が科学的に解明されていない場合に、重大で、かつ、不可逆的な影響が予想されるリスク管理の戦略の一つ」という文章が示してある。予防原則の最も基本的な考え方をよく表した定義であると思う。これを解釈すると、環境や人体に付加逆的な大きな損害を与える可能性がある行動を行っていたり、行おうとしていた場合、たとえその損害の因果関係が科学的に完全に証明されていなくても、そういった環境負荷のかかる行動は予防しなければならない、ということだ。様々な機関がこの原則を適用しようと議論を続けているのだが、その対象が幅広く、また細かくプロセスが決まっいて今回の煤排出抑制に関して適用が可能だと思われる EC の予防原則を参考に今回の論文では予防原則を展開していく。EC の資料<sup>21)</sup>によると、まず予防原則をその事象に用いるか否かの前提としては

- ある現象、製品、又は、手続きから生じる潜在的な悪影響の確認
- データが不十分であったり、決定的でなかったり、又は、不正確であるが故に、十分な確実性を持って確定する事が出来ないようなリスクの科学的評価

となっている。一つ目に関して、潜在的な悪影響というのは煤による + の温暖化効果である。二つ目に関しては、データの不十分さや不正確さはシミュレーションの元データが基本的に仮定やシミュレーションに基づいていること、であり、この2つの条件はどちらも今回の事例にあてはめられる。また、この検証をする際に、恣意的決定（例えば政治的な貿易問題など）を行うのを正当化することは許されていないが、今回は科学的実験から懸念される環境悪化を食い止めるというのが目的であるので、恣意的であるとは言えない。次の条件として、予防原則の実施に際して

予防原則に基づくアプローチの実施は、まずは、出来る限り完全な科学的評価から始めるべきであり、可能な場合、各段階において、科学的不確実性の度合いを確認すべきである。

という事が書いてある。これは、個人的には予防原則としてはなくてはならない条件だと思う。今回のアプローチは上で見て来た通り科学的な評価から始まったものである。そして、定期的に今回のシミュレートの不確実性の度合いを確認する為に話し合いを持つべきであり、またその為にも更なる研究が望まれる。予防原則を適用し、こういった方針を盛り込む事でこの研究に対してより多くの関心が集まり、より精度の高い研究結果が集まるきっかけになるであろう。

この時点で、政策決定者はこの予防原則を実行するか、しないかの判断をすることになる。この段階について EC の委員会では

今現在の科学的データからこの事象が環境や住民の一定レベルの水準を下回るような悪影響を及ぼす可能性が示唆された場合、不確実性の残る部分を仮説として含んだ上で政策決定者は説明をする必要がある。また、不確実性の残る部分に対する科学的実証を待つかどうか、は最大限透明性の確保された方法で決定されるべきである。そして、もしこの提案を行っている科学者が少数であったとしても、その科学者集団の信頼性と評判が承認されるという条件で、かかる科学者集団の見解に適切な考慮が払われるべきである。

となっている。この点に付いてはどうであろうか。説明する責任に関しては、環境問題が話し合われる場合には必要なものであるので、問題が無い。最大限透明性の確保された方法での政策決定であるが、今回は地球規模での環境問題であるので、国際会議の場でオープンに話し合われるのが最も望ましい。そう言った場ですぐにこのような意見を通すのは難しいのかもしれないが、国際的な公の場でこの事を提起することだけでも予防原則のアプローチとしては一歩前進することが考えられるので、そのような場での意思決定が最も望ましい。また、最低限でも多国間での協議の場で最終的な意思決定がなされるべきであると考え。3つめの少数の科学者集団の場合であるが、今回の件はこれにあてはまると考えている。少数、というのはもちろんである上、これらの科学的実証を行ったのがアメリカの著名な大学や政府組織に属する研究者であり、またそれらの論文が掲載されているのが定評のある雑誌であることから、今回の煤の研究者は適切な考慮が払われるべき研究者である、と本論では仮定する。

上に挙げた条件をクリアした上で、適用する予防原則をどのようなものにすべきかについて考えてみたい。適用の一般原則として、均衡性、無差別、一貫性、行動すること、又は行動しないことの便益と費用の検討、新しい科学的知見の検討の5つが挙げられている。それぞれについて以下で考察する。

**均衡性** これは、望まれる保護の基準と対策の基準が均衡すべきであり、最初からゼロリスクを目指すものであってはならず、また長期的な視点から見てその事象の悪影響を考慮し、対策を決定しなくてはならない、としている。今回の煤の悪影響を考えると、環境に不可を与え期間が煤の性質上5~10年単位であると考えられる。よって、この単位期間ごとに話し合いをし、適宜適用する予防原則を検討し、この均衡性を保つ必要がある。

**無差別** これは、客観的な根拠が無い限り、同様な状況は、異なるように取り扱われてはならない、というものだ。例えば今回の例では、アメリカと中国で同じ程度の煤の排出抑制を達成できた場合に、何か恣意的な理由でどちらかの国がより優遇されるようなことはあってはならない、ということだ。ただ、経済的な格差や環境の現状等を客観的に考慮した上で、各国の間での効果に対する評価が異なる可能性は考えられる。

**一貫性** これは、以前に同様な状況で既に対策が取られている事象がある場合、これと矛盾する方法で対策を行ってはいけない、ということだ。本論分で扱っているような煤の温暖化効果に対するアプローチは、無論確立されたものはないのでそれを見習うということは不可能だが、似たような事例を考えることは出来る。今回の問題に比較的近い問題が、 $CO_2$ の温暖化問題である。元々は $CO_2$ も19世紀末にある科学者が唱えた説を皮切りに、時を経ながら様々な話し合いが持たれ、現在のような状況になっている。そして、今現在 $CO_2$ の温暖化問題に対してリーダー的な役割を担っているIPCCの方針は、以下のようなものだ。

その任務は、二酸化炭素等の温室効果気体の増加に伴う地球温暖化の科学的・技

術的 (および、社会・経済的) 評価を行い、得られた知見を、政策決定者始め、広く一般に利用してもらうことである。<sup>22)</sup>

これは、現在の煤の温暖化効果に対するアプローチとしても非常に有効なアプローチ方法であり、このアプローチの一端を予防原則が担えることも確かである。よってこの条件もクリアできる。

**費用効果分析** これは、予防原則を適用する予定の行動を行うこと、又は行動しないことの便益と費用の検討を行うことである。

まず、行動した場合の費用と便益を考えてみる。ディーゼル車や工場プラント f に対して対策を施した場合、かかる費用はフィルター類の設置、もしくは内燃機関の改良、買い替えとなる。これらの対策を施すことによって生産力は基本的に低下せず、場合によっては逆に生産性も向上する可能性も考えられる。結果、予防原則を採用し、それに従って行動した場合には設備投資分のみの費用がかかることとなる。次に行動した場合の便益を考えてみる。煤は元々温暖化以外に大気汚染を引き起こす非常に有名な物質であり、かつ飛散距離が短いために比較的排出者本人の生活圏において直接的に被害を与えている。それに加えて、温暖化効果によって、それよりももっと広範囲に渡って負の外部性を与え続けている。予防原則にのっとりた行動により、得られる便益として、こうした損失を減少させることができることがあるだろう。また、煤対策で設備の買い替えなどを行えば生産効率が上がる可能性もあり、それによってさらなる便益<sup>1</sup>を得られる可能性がある。これらが予防原則に基づいて行動した場合に想定される便益である。

次に、予防原則に基づいて行動しなかった場合の費用と便益について考える。行動しなかった場合にかかる費用は、環境悪化から被るさまざまな不利益と、設備投資をしなかったことに対する機会費用が含まれると思われた、行動しなかった場合の便益は、煤排出削減設備に対する設備費用を消費しなくてもすんだ、ということだけだ。

ここから読み取れることは、行動した場合と行動しなかった場合の費用と便益は内容がそれぞれ対称的なものとなっていることが分かる。ということは、煤削減費用と環境改善等による便益のどちらが大きいかで行動すべきかどうかが決まる。削減は絶対的なものであり、金額がはっきりと分かる。それに対して環境改善等による便益がどの程度になるかは、その各個人や社会に依存しており、絶対的な評価があるわけではない。それではこの状況下で予防原則を発動させるためにこの条件をクリアするにはどのようにするべきだろうか？第一に、費用を下げるように努力する、ということがある。これには技術改革の他に、補助金や税優遇も考えられる。また第 5 章で提案する国際的な短期的 CDM の利用も費用を削減する効果が期待できる。第二に考えられるのは環境改善等による便益評価の向上を促すための施策である。これは研究者や市民の認知度を上げることが大切であると考えられるが、この認知を広める方法として、予防原則そのものが非常に役立つツールなりうる、という現状がある。よって、計画的にある程度効果を予測しつつ、行動することに対してプラスの費用便益効果を見出すためには、1 つ目に挙げた何らかの方法によっての費用削減が有効であると考えられる。そしてその施策がまとめられ、実行される見込みが立った時点で、予防原則に対する費用便益分析の条件もクリアすることができる。

**新しい科学的知見の検討** 不確実性のある科学的根拠に基づき予防原則を適用するのであるが、予防原則が適用されたあとも引き続き完全なデータを得る為に研究を続けることが必要とさ

<sup>1</sup>通常の生産活動ならば、この便益は、支払った設備投資に見合った便益を得られるはずである。

れている。また、予防原則はこれら研究結果を適宜フォローアップし、必要な場合には研究結果によって原則の内容を変更されなければならない、とされている。これは非常に重要な事である。今回の事象においてはさらなる研究は可能であるため、この条件はクリアできると考える。

これらのことを踏まえた上で、どのようにして予防原則を適用すべきなのだろうか。詳しくは次章で述べる。

## 第5章 煤の排出抑制方法

### 5.1 技術面

煤の排出抑制をする際に、技術的にどのような方法で排出抑制を行う事が出来るのかを紹介する。これらの技術的な背景について考えてみたい。それぞれの項目は第2章で紹介した発生源の一覧と対応している。

#### 5.1.1 ディーゼルエンジン

ディーゼルエンジンの煤削減方法については、1. エンジン内部での燃焼効率を上げる方法と、2. 排ガスから煤を取り除く方法の2通りがある。まず前者について説明する。燃焼効率を上げる為には主にエンジンそのものの構造を変えるか、燃料を改良するか、の2通りの方法がある。

エンジン内の燃焼の改良 この方法は既に実用化されている。大手で採用されているのはデンソーが開発したコモンレールシステム(電子制御による高圧燃料噴射)<sup>23)</sup>である。このシステムは、燃料を高圧でエンジン内に噴射する事により完全燃焼を促し、煤の発生を抑えている。完全燃焼を促す事によりNO<sub>x</sub>の濃度が上がってしまう副作用があるのだが、それに関しては電子制御によって細かく噴射をする事により回避している。また、燃料の改良としては添加剤の利用<sup>24)</sup>が考えられている。これはまだ研究段階ではあるのだが、研究によると10%弱のPM削減効果が見込める、とされている。

排ガス対策 これに関しても既に技術的には実用化された段階だ。車の排気管の途中にDPF(Diesel Particulate Filter)を取り付ける事で行える。DPFとは排ガス中のPMを取り除く為のフィルターである。また、COやHC、NO<sub>x</sub>を減少させる場合もある。DPFには方式が3つあり、それぞれの名称と内容、PM削減率等を表5.1にまとめておく。これを見ると、DPFはかなりのPM除去率を達成している。また今回表には載せていないが、連続再生式のみCOとHCを80%以上減少させる効果を持っていて、NO<sub>x</sub>に関しては3方式共にほとんど減少しない、となっている。なお、酸化触媒というものはDPFの連続再生式に付いている酸化触媒のみを利用したフィルターで、PMの減少率は低いもののCO、HCに関してはDPFの連続再生式と同様の効果を発揮する。

DPF利用の有名な例としては東京都が現在行っているディーゼル車規制が挙げられる。この規制において、東京都は自家用乗用車以外のディーゼル車にこの装置の装着を義務付けるとともに、様々な罰則や補助金などを設けている<sup>27)</sup>。この東京都の政策の目的はPM排出を抑制し、きれいな空を取り戻すとともに都民の健康被害を食い止めるのが目的である。この条例により、現在では首都圏の1都3県(東京都、神奈川県、千葉県、埼玉県)において基準値をみたまないディーゼル車の走行は禁止されている。なお、東京都によると、一定以上の汚染物の削減効果を確認した、としている。簡単な図を以下に示す。ただし、東京都はこの規制のために都内の各汚染物質のモニタリングを行っているのだが、そこではSPMはチェックされているものの、それに含まれる煤は直接には測定していない。

PM 除去装置の種類		構造	原理	PM 減少率
DPF	強制再生式	フィルター	フィルターに捕集した粒子状物質を外部からのエネルギー（電気ヒーターなど）により燃焼させてフィルターを再生する装置。	98%程度まで可能
	連続再生式	酸化触媒 + フィルター	フィルターに酸化触媒を担持したり、フィルター前段に酸化触媒を設置するなどして、その酸化力により、CO、HC および PM（酸化されやすいもの）を減少する他、フィルターで捕集した PM を酸化または燃焼させてフィルターを再生する装置。	60~90%程度
	非再生式	フィルター	フィルターに粒子状物質を捕集し、車両が稼働していないときにフィルターなどをメンテナンスする装置。	98%程度まで可能
酸化触媒		酸化触媒	触媒のもつ酸化力により、CO、HC および PM（酸化されやすいもの）を減少する装置。	30~50%程度

表 5.1: 各 PM 除去装置の説明と PM 除去率 <sup>25)</sup>

### 5.1.2 航空機エンジン

航空機の排出抑制技術であるが、これといって確立されたものはない現状だ。現在考えられる方法としてはエンジンの改良（燃焼効率の改善など）である <sup>3)</sup>。これにより燃費がよくなり、エアロゾルだけではなく CO<sub>2</sub> の削減にも繋がるものである。ただ、何か装置をとりつけばエアロゾルの発生は抑えられる、というような技術は今実用段階にはあまりないようだ。

### 5.1.3 有機燃料

有機燃料に対する対策は、ディーゼルエンジンのようにフィルターを装着するか、燃料を改質する方法しかないのだが、この問題が主に発生している中国やインドなどの山間地域にある民家においてこれらの対策を施すことは困難である。各家庭に集塵機をとりつけることは大変コストがかかるうえ、電気、ガスなどのインフラも整っていないような地域でそういった装置を設置するのは不可能である。また、燃料の改質であるが、代替エネルギーとしてはガスの使用が考えられる。しかしこれも、煤抑制のためだけに各家庭にガスを供給することは非常に困難だと思われる。むしろ、国内の貧困格差を是正し、ガスを利用したりフィルターをとりつけられるような経済状態になるよう、発展を促す方が費用対効果は高いように思われる。

#### 5.1.4 天然ガス

天然ガスのフレアから排出される煤に関しては、近年いくつかの企業がサワーガス<sup>1</sup>を燃やさないで処理する方法を開発し、その使用は進んでいる。例えば、アラブ首長国連邦にあるアブダビ油田では環境法が規定され、サワーガスの燃焼は禁止された。これに伴い、以前は燃やしていたガスは地中の油層に圧入し、地上へは排出しないことにした。これによって、現地の環境が改善されたとともに、油層にガスを注入する事によって原油回収の促進もはかれるようになった。他の油田でもサワーガスの燃焼以外の処理を進めているところが多い。油層に圧入する以外の方法としては、サワーガスの再処理という方法がある。これはサワーガスに脱硫処理を施し、利用可能な天然ガスとして精製することである。天然ガスが無駄にならずに、また大気汚染も防げるという意味で効果的なのだが、大量の硫黄が廃棄物として発生してしまうという欠点もある。

#### 5.1.5 石炭、工場プラント

これらに対する対策はディーゼル車に対するものとほぼ同じもので、燃料を燃焼させた後の排ガスから煤を取り除く集塵装置を取り付けることによって煤の排出を抑制できる。前にも述べた通り、中国の内陸部などでは石炭を利用している工場からの煤煙被害がひどいことから、これらの装置の設置が始まっているところもある。ただ、発展途上国で普及しているこれらの装置は非効率で安価なものが多く、確実に煤を取りきれしていないのが現状だ。また、中国では低品質の石炭を使っている工場も多くみられたが、近年では良質の石炭に移行する動きが出てきている。石炭を良質のものにすることも、対策の一つとなる。

### 5.2 煤排出に予防原則を適用した場合

予防原則を考える上で、この論文においては様々な排出源の中で排出削減対策が容易で、かつ効果がはっきりしているディーゼルエンジンと工場プラント（石炭を含む）の排出抑制について、特に考えてみたい。なお、Jacobson 氏を始めとする煤の研究者はディーゼル車対策が最も効果的である、と述べている。煤排出の問題は、先進国においてはその排出抑制技術は国内に存在するものの煤汚染に対する認識が甘く、また対策費用を出そうとしないことが問題であり、発展途上国においては効率的な排出抑制技術、対策費用をかけようという認識の両方が不足している現状である。

#### 5.2.1 世界的に合意が得られた場合

第4章で述べた予防原則が煤の温暖化効果にも適用された場合、結果として温室効果物質として公に条件付きで認められたことになる。その条件とは、新たな研究成果が出てきた場合に、それに伴って原則が変化する、ということだ。この条件化で、煤の温室効果物質としての特徴をどのように地球温暖化問題にあてはめられるであろうか。まず注目すべき点は、煤は対策を行えばCO<sub>2</sub>等に比べて非常に短期間で効果が現れる、ということと、すでに抑制技術は完成していて、先進国では特別に高いコストを支払わなくても購入が可能だ、ということだ。まず一つ目の特徴と、予防原則を踏まえて、煤を期間限定で温暖化物質として認め、期限付きの削減目標 CDM や共同実施等の対象にして効率よく排出量の抑制を行い、一定期間後はその基準値かそれ以下の数値を義務付け

<sup>1</sup>フレアの元となるガス。硫黄分が多く、そのままでは天然ガスとして使用できないので焼却処分されて来た

る、という方法が考えられる。ようするに、 $CO_2$ だけを削減していくのでは厳しい現状を踏まえて、煤をその移行期間に使ってみよう、ということである。CDM等の京都メカニズムを利用することによって、先進国、発展途上国双方にとって効率よく排出削減を行えることは、すでに $CO_2$ の事例で証明されている。さらに煤の場合には大気汚染問題も同時に解決することが可能である。そして、先ほど述べた一定期間であるが、10~20年間くらいが適当ではないか、と思う。それは後に述べる発展途上国の経済成長やバックストップ技術への移行期間を考えてのものだ。そして、この削減目標は、非付属書1国にも設定する。これは、とくに現在 $CO_2$ 排出が多い中国やインドにも適用を行う、ということだ。

これはどのような意味があるのだろうか。今現在中国やインドは発展途上であり、今後20年間で大きく成長する可能性がある。特にその発展において、第2次産業を経済発展の柱のひとつにする(煤を発生させやすい)であろう中国について非常に簡単な予測データから考えてみる。UFJ総合研究所の予測<sup>28)</sup>によると、中国の2015年の名目GDPは4.3兆ドル。一人当たりGDPは3088ドルとなる、とされている。ちなみに2001年の日本の名目GDPは約4.1兆ドル<sup>29)</sup>である。この予想通りに推移すれば2015年時点で中国の名目GDPは日本の名目GDPの約9割になる、としている。これはここ10年でどれだけ中国の成長が予想されているかのいい例であると思う。

今現在の京都議定書の議論の中で、アメリカなど先進国の一部の国からは、発展途上国も $CO_2$ 負担を背負うべきだ、という意見がある。しかし、これは発展途上国から見れば受け入れがたい意見であるため、和解には至っていない。そこで、煤の京都メカニズムへの組み込みを認めることで、大量の煤を排出している発展途上国に対して援助をする分と、自国で煤排出抑制をした分だけ、自国で $CO_2$ 排出を伴う生産活動を増やせることになる。これによって、特にアメリカが京都議定書の批准に若干なり前向きになる可能性はある。また、研究成果や先に述べたブッシュ大統領のコメントから考えて、アメリカにおいては煤の研究が最も進んでいると思われる。そのため、この予防原則が適用されればより煤の研究が活発に進み、正確なデータを得られる確立は高くなることが予想される。そして最終的にこの施策によって、地球温暖化効果や異常気象がある程度緩和される可能性がある上に、確実に発展途上国、または先進国の大気汚染を改善することができる。また、この一定期間の間に、水素などの新エネルギーの開発が進むことは確実視されているので、その為の移行期間としても、非常に有効な手段なのではないか、と考えた。

こういった理由から、煤の地球温暖化効果に対して予防原則を認め、それに沿った対策をすることで地球温暖化問題と大気汚染問題の両方をより効率的に解決することができるのではないかと、いう結論を得た。

## 第6章 まとめ

この卒業論文を作成している間にも、地球温暖化問題に関して社会的に様々な変化が起こった。この論文を書き始めたころと違い、現在は京都議定書が発効され、実際に京都メカニズムを利用した国内排出量削減が現実的に考えられたり、各団体からの  $CO_2$  排出量の測定を徹底するなどのニュースが新聞などで以前に増して報じられるようになってきている。しかし、抜本的な解決策はまだ見出せておらず、環境税の導入も現実には導入されるまでにはまだ時間がかかりそうである。そうした流れの中で従来は考えられていなかった「煤」の温暖化効果について卒業論文で研究した目的は第一章で述べたとおりであるが、なによりも現在ある仕組みの上で今よりも効率的に地球温暖化防止を加速させるような方法はないだろうか、と考えた末に思いついたテーマである。そして、科学者が研究をした結果ある程度の可能性が認められたことから、この物質について、自然科学者、社会科学者問わず、特に国内でより多くの人に知っていただきたいという思いもあってこのテーマを選択した。なお、国内のいくつかの研究所では、Jacobson 博士の研究結果に基づいた授業や研究が行われているようである。

実際に、すぐに煤削減を採り入れた地球温暖化防止策が世に広まるとは思えないが、やや手詰まり感のある現状を打開するきっかけのひとつとして万が一「煤」が候補に上がった場合は、個人的に非常に嬉しく感じるでしょう。

最後まで読んでいただきまして、ありがとうございました。

## 参考文献

- 1) 地球温暖化、原因の第2位は「煤」?  
*Hotwired Japan* <http://hotwired.goo.ne.jp/news/technology/story/20010226306.html>
- 2) Black Carbon from fossil fuel alone *IMAP*  
[http://www.utoronto.ca/imap/collections/air\\_quality/particulate\\_matter.htm](http://www.utoronto.ca/imap/collections/air_quality/particulate_matter.htm) (1985)
- 3) IPCC 特別報告書 航空機と地球大気 IPCC/地球産業文化研究所  
<http://www.gispri.or.jp/kankyo/ipcc/pdf/SRAGA-japaneseRev.PDF>
- 4) President Bush Discusses Global Climate Change  
*The White House* <http://www.whitehouse.gov/news/releases/2001/06/20010611-2.html>  
(2001)
- 5) Black Carbon Contributes to Droughts and Floods in China **NASA, GISS**  
<http://www.giss.nasa.gov/research/news/20020926/>,  
<http://www.gsfc.nasa.gov/topstory/20020822blackcarbon.html> (2002)
- 6) Report assessing impact of soot on global warming could alter control strategies  
**Georgia Institute of Technology** <http://gtresearchnews.gatech.edu/newsrelease/SOOT.htm>
- 7) A typical hazy day near Lin An, China.  
**Georgia Institute of Technology** <http://gtresearchnews.gatech.edu/images/linan2.jpg>
- 8) A Map of Lin An **The Hong Kong Polytechnic University, Tao Wang**  
<http://www.cse.polyu.edu.hk/cetwang/Yangtze%20map.jpg>
- 9) Meinrat O. Andreae The dark side of aerosols *Nature* **409**, 671-672 (2001)
- 10) Mark Z. Jacobson Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols *Nature* **409**, 695-697 (2001)
- 11) IPCC
- 12) JCCA 温暖化用語集 <http://www.jcca.org/find/yougo/>
- 13) INDOEX - The Indian Ocean Experiment **University of California** <http://www-indoex.ucsd.edu/index.html>
- 14) IPCC 第三次評価報告書 気象庁  
[http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/ipcc\\_tar/spm/fig3.htm](http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/ipcc_tar/spm/fig3.htm)
- 15) NASA Finds Soot has Impact on Global Climate  
**NASA, GISS** <http://www.giss.nasa.gov/reserch/news/2003513/> (2003)

- 16) Sato, Miki., J. Hansen, D. Koch, A. Lacis, R. Ruedy, O. Dubvik, B. Holben, M. Chin, and T. Navakov Global atmospheric black carbon inferred from AERONET. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **100**, 6319-6324, doi:10.1073/pnas.0731897100. (2003)
- 17) Black Soot and Snow: A Warmer Combination  
*NASA, GISS* <http://www.giss.nasa.gov/research/news/20031222/> (2003)
- 18) James E. Hansen As Pure as Snow  
*NASA, GISS* [http://www.giss.nasa.gov/research/briefs/hansen\\_10](http://www.giss.nasa.gov/research/briefs/hansen_10) (2003)
- 19) Hansen, J., and L. Nazarenko Soot climate forcing via snow and ice albedos *Proc. Natl. Acad. Sci.* **101**, 423-438, doi:10.1073/pnas.2237157100, in press. (2004)
- 20) 「リスク、環境および経済」 池田三郎・酒井泰弘・多田和真 著 勁草書房 (2004)
- 21) 環境政策における予防的方策・予防原則のあり方に関する研究会報告書 資料3  
環境省 <http://www.env.go.jp/policy/report/h16-03/index.html>
- 22) IPCC とは IPCC WG1 国内支援事務局 <http://www.jamstec.go.jp/ipccwg1/ipcc01.html>
- 23) デンソーコモンレールシステム 株式会社デンソー <http://www.denso.co.jp>
- 24) 環境調和型燃料油添加剤・省燃費ディーゼルエンジン油の研究開発 財団法人石油産業活性化センター <http://www.pecj.or.jp/japanese/report/2004report/04I15A.pdf>
- 25) ディーゼル微粒子除去装置とフィルター材料 (web review)  
CMC 出版 [http://www.cmcbooks.co.jp/review/review01\\_10.html](http://www.cmcbooks.co.jp/review/review01_10.html)
- 26) ディーゼル排気微粒子フィルター (DPF) システムの汎用性向上に関する調査 P.35  
公害健康被害補償予防協会 (現環境再生保全機構)  
[http://www.erca.go.jp/taiki/research/pdf\\_05/b321img.pdf](http://www.erca.go.jp/taiki/research/pdf_05/b321img.pdf)
- 27) 東京の空をきれいにするために  
東京都 <http://www2.kankyo.metro.tokyo.jp/jidousya/diesel/tokyo-sora/index.htm>
- 28) 2015年の中国 (長期経済予測) UFJ 総合研究所  
<http://www.ufji.co.jp/publication/report/2002/0285.html>
- 29) 世界の国内総生産 総務省統計局 <http://www.stat.go.jp/data/sekai/pdf/0301p01.pdf>