

## 気象学者は大気汚染問題に如何に対処すべきか

1. 会期 第1日(5月24日)(月)午後1時30分~5時
2. 会場 第2会場
3. 司会 坂上 治郎(お茶の水大)・伊藤 昭三(高層気象台)
4. 話題提供者
  - 1) 菊地 幸雄(気研): 大気大循環と汚染物質の研究の立場から
  - 2) 川村 清(気研): 全地球的規模の大気汚染とその監視計画
  - 3) 磯野 謙治(名大理): 大気汚染物質の移動および変化の過程を研究する立場から
  - 4) 横山 長之(資源研): 大気汚染物質の拡散を研究する立場から
  - 5) 神山 恵三(気研): 生気象学の立場から
5. 討 論

### 大気大循環と汚染物質\*

菊 池 幸 雄\*\*

#### はじめに

この表題の問題については、すでに気研ノート、第108号「環境汚染特集号」第2章で詳細に述べたので、ここでは簡単に概要を書くにとどめる。

地球全体に及ぶ大気汚染は、人体への悪影響と共に、全世界的に気候を改変する可能性があるということで重要視されてきた。即ち、汚染物質の増加は、大気の熱収支を変え、それは大規模な大気運動に影響を及ぼし、気候の変化をもたらすというわけである。かくして、大循環と汚染物質の関係を考えると、大規模な大気運動によって汚染物質がどのように拡散するか、またその拡散した汚染物質が大規模な大気運動や気候にどのような影響を興えるか、という二つの重要な問題が提起される。

これらの問題についての議論に入る前に、まず、汚染物質も含めて、大気中に存在する各種物質の分布とその変動を概観しよう。

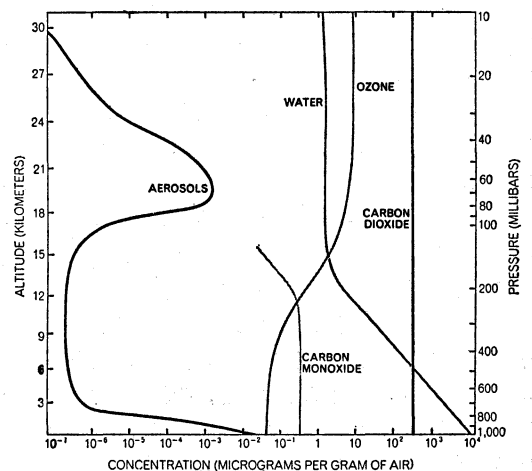
#### 1. トレイス物質の分布と変動

大気中に存在する物質の多くは、大気運動のtracerとしての役割も果しているので、トレイス(trace)物質とも呼ばれている。

トレイス物質の中には、オゾン(光化学反応により成層圏でつくられる)、放射性物質(地上核爆発により成層圏へ打上げられたもの、高々度の核爆発によるもの)、人工衛星が原因となっているもの、火山灰(火山噴火

により成層圏へ吹き上げられたもの)等のように成層圏に source があるものと、水蒸気、CO<sub>2</sub> 等々地表附近に source を持つものがある。これらの物質の濃度の平均的垂直分布が第1図に示されている。CO<sub>2</sub> を除いては、source から遠ざかるにつれて、濃度が小さくなっている(aerosol については、成層圏と地表附近の両方に source がある)。

熱帯で行なわれた核爆発により成層圏へ打ち上げられた放射性物質のうち、タングステン-185の7ヵ月後の成層圏内の緯度・高度分布を見ると、濃度の最大は赤道下部成層圏20km 附近にあって、それから濃度の大きい値を結ぶ軸が極へ向って、幾分下降しながら伸びている。



第1図 トレイス物質濃度の垂直分布(Newell 1971)

\* The Relationship between the Atmospheric Circulations and Pollutants.

\*\* Y. Kikuchi 気象研究所予報研究部

濃度の等値線は、この軸にほぼ平行に走っている。オゾンや火山灰も、これとよく似た緯度・高度分布をしている。一方、水蒸気は赤道で最大、極へ向うにつれて減少する分布を示している。CO<sub>2</sub>についても、年平均の分布は水蒸気と同じである（季節別分布は年平均分布とは異なる）。

またこれらの分布に関しては、季節による変動が見られる。例えば、オゾン量は、北半球では、春に最大、秋に最小となり、南半球では、反対に北半球で最大となる春に最小となり、秋に最大となる。他の物質分布も、夫々特有の季節変動をしており、中にはオゾンの変動とよく似ているものもある。トレイス物質の分布は、その source や sink の分布と大規模な大気運動にもとづく物質拡散に依存している。したがって、その分布の季節変動は source や sink 及び大規模な大気運動が季節によって異なるために起るものと思われる。

このような季節変動の外に、自然的、人工的原因による物質の経年変化も見られる。人工的原因によるものは汚染物質の年々の増加となって現われているわけである。

## 2. 大規模運動による物質の拡散

大気中に放出された物質は東西方向には比較的早く拡散すると考えられている。ここでは、その南北・上下方向の拡散について考えよう。

大規模な大気運動は、子午面循環と擾乱に分けることができるが、物質の拡散も子午面循環の輸送によるものと、擾乱の輸送によるものに分けることができる。それでは、子午面循環による輸送と擾乱による輸送は、物質拡散に対してどのような役割を果しているのか、また、それら二つの輸送機構は相互にどのような関係を持っているのかという疑問が生ずる。

現在の所、この疑問に対する解答を得るための手段は数値実験である。放射性物質に似た tracer が成層圏に投入されたとき、その拡散がどうなるかを調べるための数値実験が Hunt & Manabe によってなされた。この結果によると、tracer が成層圏に投入されてから拡散して行く初期の段階では、擾乱による輸送が卓越するが、tracer の拡散が進むにつれて、擾乱による輸送と子午面循環による輸送は、互に相手の輸送により生ずる tracer の過不足を補うように働き、それらはやがて、ほぼバランスし、わずかの量が対流圏へ流出するという状態になる。これは、成層圏で tracer の滞留時間が長い一因となっているように思われる。

成層圏から対流圏への tracer の流出は、主に圏界面ギャップで起っており、それに対して、子午面循環も擾乱も同程度の寄与をしている。

対流圏では、混合がはげしく、sink も存在し、その上成層圏からこの領域への tracer の流出量が小さいので、対流圏へ入ると tracer の濃度は不連続的に減少する。

地表近くで発生した汚染物質が対流圏内を拡散して行き、やがて成層圏に入り、そこで長く留まるということがあれば、これは汚染物質の気候に及ぼす影響を考えるとき重要となる。この意味で、地表附近に source を持つ物質の対流圏での拡散、成層圏へ入る過程、成層圏での拡散等は興味ある問題である。水蒸気についての数値実験の結果によれば、Dobson-Brewer のモデルとは異なり、対流圏から成層圏への水蒸気輸送の大部分は、すべての緯度で擾乱により、また熱帯で Hadley 循環により逐行されている。また、成層圏内での水蒸気の輸送機構も彼等のモデルとは異なり、成層圏へ運び込まれた水蒸気は、結局は擾乱の水平輸送によって低緯度へ集められ、熱帯圏界面附近で凝結して成層圏より取除かれている。

## 3. 汚染物質の気候に及ぼす影響

人間が気候を変え得る方法として次のようなものが考えられる<sup>2)</sup>。

- 1) 化石燃料の燃焼による CO<sub>2</sub> の増加
- 2) 人工的な aerosol や dust の増加
- 3) 超音速旅客機 (SST) による成層圏水蒸気量の増加
- 4) 油による海洋汚染の増大
- 5) 地表アルベドの人工的改变
- 6) 燃焼や核爆発による人工的大気加熱

以上のうち、1)～4) は汚染物質の人工的增加による気候の変化に外ならないが、1)～3) は大気中の汚染物質に関係している。

CO<sub>2</sub>, aerosol や dust, 水蒸気はいずれも放射伝達に関係する物質で、このような物質が大気の運動によって拡散して行くとき、その物質分布の変動は放射伝達の機構を変え、それに伴う大気や地表面の熱収支の変化は、気温分布や大気運動へ影響する。即ち汚染物質と大規模な大気運動の間には feed back メカニズムがあるわけである。したがって、汚染物質が一方的に増大すると、気温分布や大気運動への feed back 効果の累積は気候の変化をもたらすであろうと想像される。

気温分布と大気運動は互に影響し合っているから、それらを切りはなして考えるのは不合理であるが簡単なた

め、運動を無視したとき、気温分布が汚染物質の増加によってどう変るかを見てみよう。

CO<sub>2</sub> の増加は温室効果によって、地表温度を上昇させる。まだ地中に埋まっている化石燃料を、すべて燃焼させたとき生ずる CO<sub>2</sub> の半分が、大気に留まる（残りは海洋に吸収される）とすると、1.1°C~1.7°C の地表温度の上昇が予想される。

将来、SST が成層圏を飛行するようになると、500機の SST によって放出される水蒸気量は毎秒 2000,000g で、これは Hadley cell により熱帯で対流圏から成層圏へ運ばれる水蒸気量 7000,000g sec<sup>-1</sup> に近い大きさである。成層圏水蒸気量の増加は地表温度を増加させるが、一方成層圏内の雲量の増加にも結びつくであろう。対流圏の上層雲の雲量が1%増加すると地表温度は0.04°C上昇するが、成層圏の雲量増加が地表温度にどう影響するか興味ある所である。

aerosol や dust の増加は、大気の透過率を悪くする。また霧や層雲の発生頻度を高める可能性もある。いずれの効果も日射の減衰を大きくする。太陽常数1%の減少は1.2°Cの地表温度の下降を、下層雲1%の増加は0.8°Cの地表温度下降をもたらす。

成層圏の aerosol の増加には、人工的なものばかりでなく、火山噴火も大きな寄与をしている。1963年3月、Bali 島の Agung 山 (20°S, 119°E) が噴火したが、この噴火によってできた成層圏の火山灰層の附近で著しい気温上昇が見られた。これは aerosol が日射を吸収したためと考えられている。

ある物質量的変化に伴う気候変化を考えると、その物質量的変化が他の物質量的変化を誘発する場合があるということや self-amplification の作用を考慮することが必要である。これらは気候変動のメカニズムの複雑さを物語っている。

現在の地球は、平均的に見るとほぼ 70°N 以北が氷で覆われているが、これは不安定な状態で、わずかの太陽放射の増加で極を取りまく氷は溶けてしまし、また太陽放射の減衰が1.6%を越えると、地球はすべて氷で覆

われてしまうといわれている。

CO<sub>2</sub> や成層圏水蒸気の増加と aerosol や dust の増加は、気温変化に対して相反する効果を示す。1958年から1970年までの間に CO<sub>2</sub> は毎年 0.7ppm ずつ増加しており、成層圏水蒸気量は1964年から1970年までに2ppmから3ppmに増加（原因不明）している。これらは地表温度を上昇させる効果を持っているが、実際の温度変化を見ると、1940年から1970年までの30年間、平均温度は下降を示している。勿論これだけから aerosol や dust の効果が卓越しているということとはできない。

汚染物質の増加によって、将来、地球は冷されるのだろうか、暖められるのだろうか。我々はこの予測を正確に行なう必要にせまられている。このためには、大気循環モデルによる数値実験が最もよい方法であろう。この場合、大気循環モデルは各種物質量的変動を支配する方程式と、その運動への feed back メカニズムを含んでいなければならないのは当然であるが、同時に海洋循環モデルと結合されていなければならない（油による海洋汚染は、大気と海洋の相互作用に関係する）。

最近、アメリカにおいて Presidential Council on Environmental Quality は、上述のようなモデルにもとづいた気候変動の予測に関する研究の推進と同時に汚染物質に関連して次のような監視をすべきことを勧告した<sup>2)</sup>。

1) 地上 station における大気の混濁度、CO<sub>2</sub> 量、水蒸気分布の監視。航空機による浮遊微粒子の数、密度、大きさ、組成の監視。

2) 人工衛星による全地球上の雲量、大気の熱バランス、地表のアルベドの監視。

#### 引用文献（追加）

- 1) Newell, R.E., 1971: The global circulation of atmospheric pollutants. Scientific american, 224, 32-42.
- 2) Presidential Council on Environmental Quality, 1970: Man's inadvertent modification of weather and climate. Bull. Amer. Met. Soc., 51, 1043-1047.