

エアロゾルによる地球温暖化・冷却化デモンストレーション実験器

川村 康文 京都教育大学附属高校 612-0037 京都市伏見区深草関屋敷町

温室効果ガスによる地球の温暖化の議論のみならず、エアロゾル粒子による地球の温暖化・冷却化についても議論されている。エアロゾル粒子による地球の温暖化・冷却化をデモンストレーションする実験器を、環境教育の教材として開発したので報告する。

1. 目 的

温室効果ガスによる地球の温暖化の議論にあわせて、大気エアロゾル粒子による地球の温暖化・冷却化について議論されている。エアロゾル粒子の発生源は、自然起源のもの、人為的起源のものがある。前者では海洋や土壌からであり、後者では、工場や自動車など多くの発生源が存在する。人類は、これまで開発優先の論理のもと、人為的起源のエアロゾル粒子を大気中に大量に放出してきた。

エアロゾル粒子は、放出時にすでに粒子状である1次粒子と、発生源からはガス状物質として放出されたものが、大気中で物理・化学的变化によって粒子に変化した2次粒子に分けられる。人為的起源のものの場合、かつて産業の主なエネルギー源が石炭であった時代には、灰、煤などの1次粒子が大量に大気中に放出され、粒子状汚染物質として注目された。その後、エネルギー革命を経て、エネルギー源の主体が石炭から石油に変化するにつれて、1次粒子のみならず、 SO_2 などの硫黄化合物、 NO 、 NO_2 などの窒素化合物、あるいは炭化水素などに起因する2次粒子による汚染が大きな問題となってきた。

これらの硫酸塩、硝酸塩、炭化水素化合物は、人体に対しては呼吸器系への疾病を引き起こすなど健康障害をもたらすことが知られている。また、硫酸塩、硝酸塩は、酸性雨などの地球環境問題を引き起こす原因物質として、その防止対策が重要である。

さて、エアロゾルの気候への影響、つまり地球温暖化・冷却化への影響には、直接効果と間接効果がある。直接効果は、太陽光や地球からの放射熱が大気中のエアロゾル粒子に散乱または吸収されることにより、大気や地表面が加熱または冷却される効果である。間接効果は、微粒子が雲の生成や分布、性状に関与し、その結果として雲のアルベドを変化させる効果である。本研究では、エアロゾルの直接効果、つまり光学的特徴に着目し、地球の温暖化・冷却化をデモンストレーションする実験教材を開発したので、

報告する。

ここでは白色系のエアロゾル粒子として硫酸カルシウムを用い、冷却化をデモンストレーションする。また黒色系のエアロゾル粒子として黒色炭素を用い、温暖化をデモンストレーションする。

2. 実験器材

2.1 エアロゾルによる地球温暖化・冷却化デモンストレーション実験器

エアロゾルによる地球温暖化・冷却化デモンストレーション実験器は、図1に示すように、中央部に光源を設置し、その光源の周りを2つの地球モデルが周回するように製作した。その設計図を図2に示した。

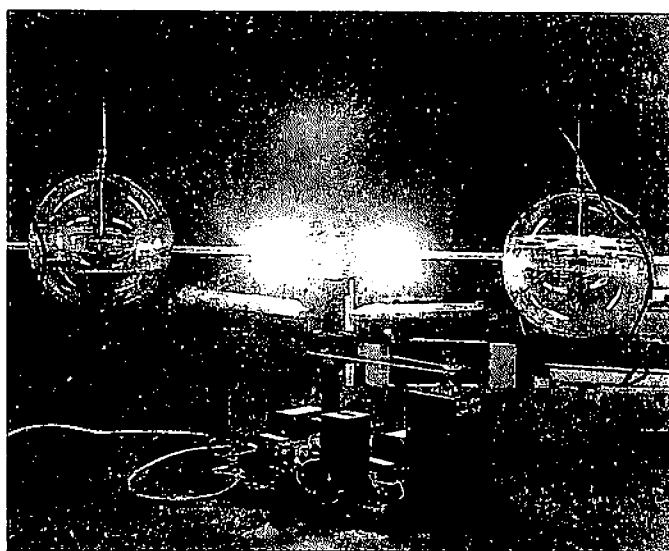


図1 エアロゾルによる地球温暖化・冷却化デモンストレーション実験器

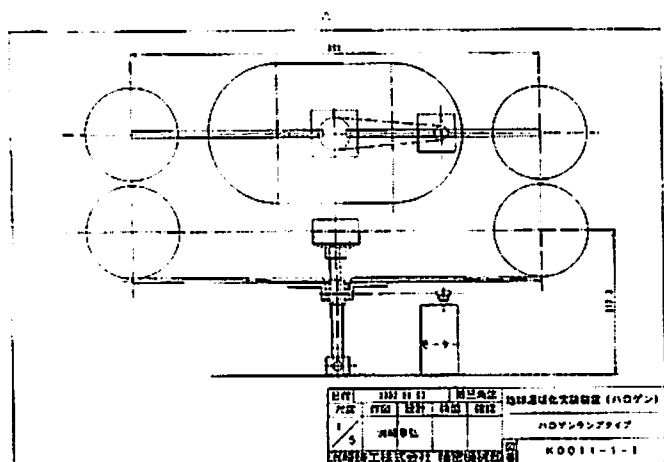


図2 エアロゾルによる地球温暖化・冷却化デモンストレーション実験器の設計図

1. 地球モデルの製作には、ポリスチレン製の透明半球を4個用いる。透明半球を2個ずつ組み合わせて球形にしたものを地球モデルとし、一方は普通の空気のままとし、もう一方はエアロゾル粒子を浮遊させた。
2. 光源としては、ハロゲンランプ50Wを4個用いる。これら4個のハロゲンランプは、それぞれ90°間隔で取り付けられた。なお、用いたハロゲンランプは、EIKO SOLUXハロゲン・ディスプレイ・ランプMR16である。この電球は、電圧は12Vで使用し、定格消費電力50W、4700Kelvinのタイプのものである。実験器にはこれらのハロゲンランプが4個取り付けられているので、実験器を運転中はランプの出力は合計200Wである。
3. 回転システムは、モータを電圧コントローラーとプーリで2段階に減速し、回転周期を2秒から3秒とする。地球モデルは図1のように回転棒に取り付ける。
4. 温度計測は、図1のようにデジタル温度計を地球モデルに設置し、30秒ごとに地球モデル内の温度を計測する。
2と3の方法を組み合わせることにより、同じ製品規格の4個のハロゲンランプのうち、どれかが他のものよりもやや高温であったり、逆にやや低温であっても、それら4個のハロゲンランプのまわりを、2つの地球モデルが公転するので、各地球モデルが1周期の間に受けるエネルギーは等しくすることができるようになった。

2.2 デジタル粉塵計

濃度測定には、日本カノマックス社製光散乱式高感度デジタル粉塵計MODEL3421を用いた。この粉塵計には、10 μ mのインパクターがついているため、10 μ m以下の粉塵を計測できるようになっている。

2.3 粒径分布および結晶の撮影

粒径分布および結晶の撮影には、KEYENCE製のデジタルHDマイクロスコープVH-7000を用いた。

2.4 多目的分光放射計

地球モデルへの放射強度の測定には、マキ製作所製多目的分光放射計MSR7000を用いた。ハロゲンランプのスペクトルの強度分布と、普通の空気の地球モデルを透過してきた光のスペクトル分布と、エアロゾル粒子が浮遊した地球モデルを透過してきた光の放射強度を比較することにより、エアロゾルによる地球温暖化・冷却化を確かめる。

3. 実験方法

3.1 エアロゾルによる地球温暖化・冷却化デモンストレーション実験器での温暖化・冷却化の計測

1. ポリスチレン製の透明半球2個をあわせて1個の地球モデルとする。この地球モデルを2個準備する。
2. 地球モデルのうちの下部の側の透明半球の底に3 ϕ の穴をあけ、その穴に3 ϕ のボルトを挿入し、透明半球とボルトをボンドで固定する。ボルトは、図1に示すように、回転システムの回転棒にナットを用いてとめる。
3. 地球モデルのうちの上部の側の透明半球の天頂に3 ϕ の穴を1個、3 ϕ の穴付近に4 ϕ の穴を1個、合計2個の穴をあける。天頂の穴には、デジタル温度計のセンサーを挿入する。また、この際、デジタル温度計のセンサーを刺した穴の隙間から、地球モデル内部の気体が漏れないようにシールする。3 ϕ の穴の付近にあげた4 ϕ の穴から、50mlの注射器を利用して、エアロゾル粒子を地球モデル内部に噴射する。

注射器の針を取り外し、10mlだけエアロゾル粒子を吸引する。地球モデル内部にエアロゾル粒子を噴射する場合には、注射器の噴出口にガーゼを4重にしてあて、ピストンを勢いよく押し込むことでエアロゾル粒子を噴出する。1回で注射器内のすべてのエアロゾル粒子が放出できなかった場合は、すべて放出し終わるまで繰り返して放出する。その後10分間放置し、エアロゾル粒子の浮遊状態が定常状態になるのを待つ。この方法により、地球モデル内部にエアロゾル粒子を浮遊させることができる。

4. もう一方の地球モデルは普通の空気のままの状態とする。地球モデルの底部には3 ϕ のボルトを取り付け、回転棒にナットで取り付ける。天頂の部分には、デジタル温度計を取り付ける。
5. 回転システムは、交流100Vをそのまま利用するとあまりに回転周期が早すぎるので、電圧コントローラーを用いて減速し、周期を2秒から3秒にあわせる。
6. 地球温暖化デモンストレーション実験器の中央の熱源には、50Wのハロゲンランプを4個用いる。これらの

ハロゲンランプの点灯を確認しておく。

7. 回転システムを起動させると同時に、中央部のランプを点灯させる。30秒ごとに、デジタル温度計で、両方の地球モデル内の温度を計測する。両者とも、温度上昇がほぼ止まれば、計測を終了する。およその目安として、6分程度が考えられる。

3.2 デジタル粉塵計

濃度測定は、エアロゾル粒子を浮遊させた地球モデル内部の気体を粉塵計に導入して測定を行った。

3.3 粒径分布および結晶の撮影

KEYENCE製のデジタルHDマイクロスコープVH-7000を用いて、粒径分布を調べた。またこれを用いて、結晶の撮影を行った。

3.4 多目的分光放射計での放射強度の計測

1. 多目的分光放射計で、ハロゲンランプ1個の放射強度を測定する。ディテクターとハロゲンランプの距離は50cmとした。
2. 普通の空気の地球モデルを、多目的分光放射計とハロゲンランプの間の中央に置き、普通の空気の地球モデルを透過してきた光の放射強度を測定した。ディテクターとハロゲンランプの距離は50cmのまま一定とした。
3. 白色系エアロゾル粒子として硫酸カルシウムを、地球モデル内部に浮遊させ、この地球モデルを、多目的分光放射計とハロゲンランプの間の中央に置き、この地球モデルを透過してきた光の放射強度を測定した。ディテクターとハロゲンランプの距離は50cmのまま一定とした。
4. 黒色系エアロゾル粒子として黒色炭素を、地球モデル内部に浮遊させ、この地球モデルを、多目的分光放射計とハロゲンランプの間の中央に置き、この地球モデルを透過してきた光の放射強度を測定した。ディテクターとハロゲンランプの距離は50cmのまま一定とした。
5. 1～4で計測した放射強度を1つのグラフにすることにより、エアロゾルによる地球温暖化・冷却化デモンストレーション実験器において、白色系エアロゾル粒子では光の散乱が、黒色系エアロゾル粒子では光の吸収が生じることを確認する。

4. 実験結果

4.1 硫酸カルシウムを用いた場合

本実験器の2つの地球モデルのうち、一方には普通の空気を封入し、もう一方には白色系エアロゾルとして硫酸カルシウムを封入した。

4.1.1 冷却化実験

温度計測において得られた実験データを表1に示す。室温は26.7℃であった。エアロゾルの濃度は、 $46.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($\leq 10 \mu\text{m}$)であった。

表1 硫酸カルシウムを封入した地球モデルと普通の空気を封入した地球モデルの温度の時間的变化

時間(秒)	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
空気のみ	27.1	27.5	27.8	28.1	28.3	28.4	28.5	28.6	28.7	28.8	28.8	28.9	28.9
硫酸カルシウム	27.1	27.3	27.5	27.7	27.8	27.9	28.0	28.1	28.2	28.3	28.3	28.4	28.4

得られたデータをグラフ化すると、図3に示すグラフが得られる。

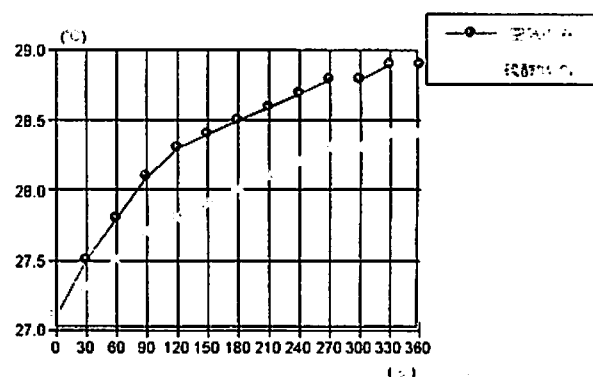


図3 硫酸カルシウムを封入した地球モデルと普通の空気を封入した地球モデルの温度の時間的变化

図3より、白色系の硫酸カルシウムを封入した地球モデル内で、冷却化していることがわかる。このことにより、白色系エアロゾルにより地球の冷却化が生じることをデモンストレーションの形で示すことができた。

4.1.2 硫酸カルシウムの粒径の分布および結晶の写真

本実験に用いた硫酸カルシウムの粒径の分布は、以下図4に示す通りである。なお、この実験で用いた硫酸カルシウムの結晶形状を図5に示す。粒径分布および結晶の撮影には、KEYENCE製のデジタルHDマイクロスコープVH-7000を用いた。

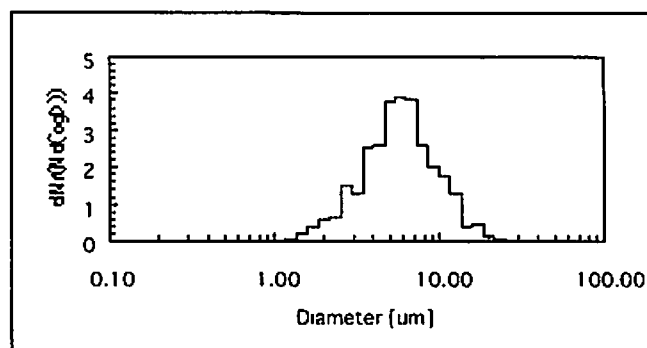


図4 硫酸カルシウムの粒径分布

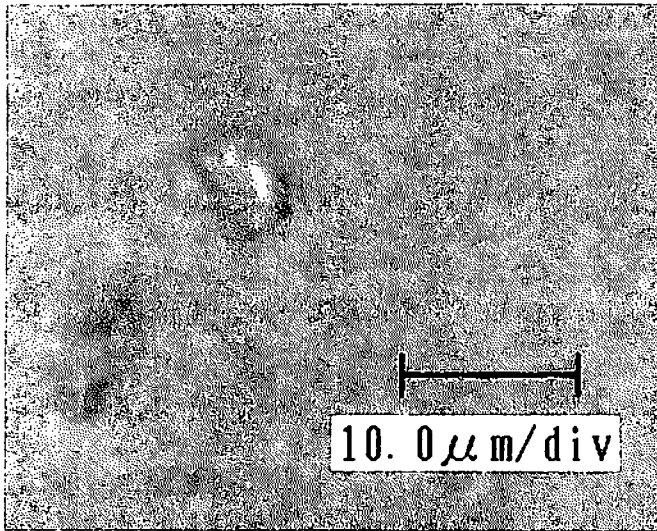


図5 硫酸カルシウムの結晶形状 (2000倍)

4.2 黑色炭素を用いた場合

本実験器の2つの地球モデルのうち、一方にはふつうの空気を封入し、もう一方には黒色系のエアロゾルとして黒色炭素を封入した。

4.2.1 温暖化実験

温度計測で得られた実験データを表2に示す。室温は27.0℃であった。エアロゾルの濃度は、 $565 \mu\text{g}/\text{m}^3 (\leq 10 \mu\text{m})$ であった。

表2 黒色炭素を封入した地球モデルとふつうの空気を封入した地球モデルの温度の時間的变化

時間(秒)	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
黒色炭素	27.5	28.3	28.8	29.3	29.8	30.1	30.3	30.5	30.7	30.8	30.9	30.9	31.0
空気のみ	27.5	28.1	28.4	28.7	28.9	29.1	29.3	29.4	29.5	29.6	29.6	29.6	29.7

得られたデータをグラフ化すると、図6に示すグラフが得られる。

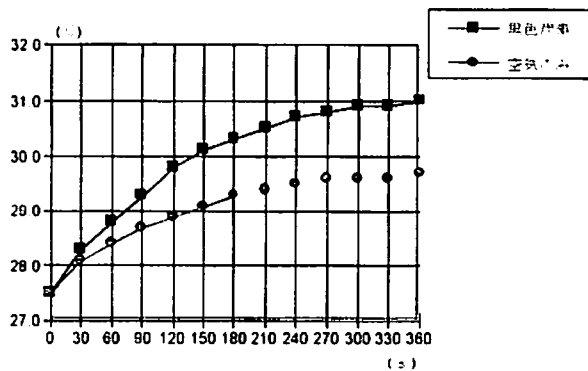


図6 黒色炭素を封入した地球モデルとふつうの空気を封入した地球モデルの温度の時間的变化

図6より、黒色炭素を封入した地球モデル内で、温暖化していることがわかる。このことにより、黒色系のエアロゾルにより地球の温暖化が生じることをデモンストレーションの形で示すことができた。

4.2.2 黒色炭素の粒径の分布および結晶の写真

本実験に用いた黒色炭素の粒径の分布は、以下図7に示す通りである。なお、この実験で用いた硫酸カルシウムの結晶形状を図8に示す。粒径分布および結晶の撮影には、KEYENCE製のデジタルHDマイクروسコープVH-7000を用いた。

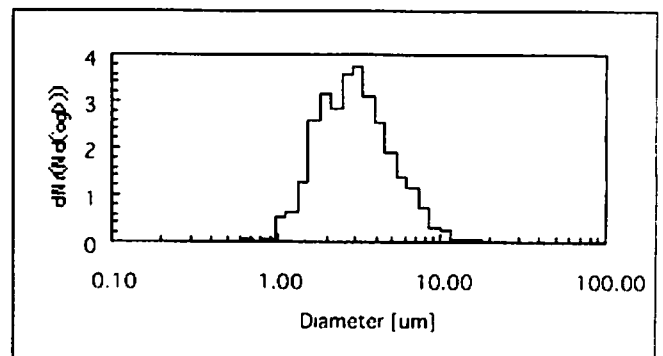


図7 黒色炭素の粒径分布

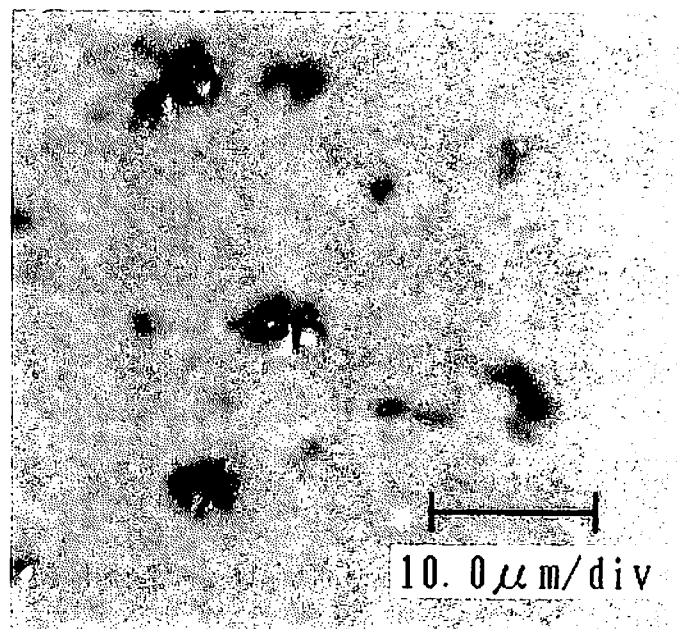


図8 黒色炭素の結晶 (2000倍)

4.3 エアロゾル粒子による光の散乱・光の吸収

本実験に用いたハロゲンランプのスペクトル強度を図9に示した。用いたハロゲンランプは、EIKO SOLUXハロゲン・ディスプレイ・ランプMR16である。この電球の特性は、12 V、50 W、4700 K (4700 Kelvin)である。このハロゲンランプのスペクトルは、360nm付近より立ち上がり、測定器の限界の2500nmまでの分布が確認できた。得

られた曲線の形態から2500nm以上の長波長も含んでいることが推測できる。

また、この実験で用いたふつうの空気の状態の地球モデルを透過したスペクトル及び、硫酸カルシウムが成分であるエアロゾル、黒色炭素が成分であるエアロゾルを浮遊さ

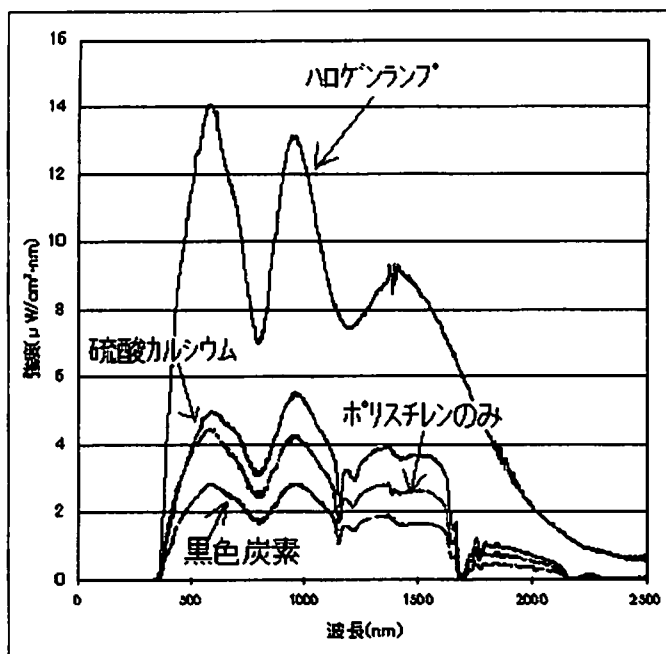


図9 各地球モデルの透過光の放射強度

せた地球モデルを透過したスペクトルもあわせて示した

硫酸カルシウムを封入した地球モデルを透過してきたスペクトルは、硫酸カルシウムの散乱を受けて、ふつうの空気の地球モデルを透過してきたスペクトルよりも強度が強くなっていることがわかり、逆に、黒色炭素を封入した地球モデルを透過してきたスペクトルは、ハロゲンランプより放射されたスペクトルのほぼ全域において吸収を受け、全体的に強度が弱くなったことがわかった。

5. 考 察

白色系エアロゾル粒子を浮遊させた地球モデルでは冷却化が、黒色系エアロゾル粒子を浮遊させた地球モデルでは温暖化していることがわかった。地球モデルの透過光のスペクトル強度の分析より、前者では光の散乱により冷却化し、後者では光の吸収により温暖化することがわかった。そしてこの実験器は、このような内容をデモンストレーション実験するのに適した教育用実験器であることが確認できた。

参考文献

柴田清孝「光の気象学」木村龍治編集「応用気象学シリーズ」朝倉書店、1999

(2002年12月24日受理)