

論文内容の要旨

論文題目 人為起源気候変動要因が東アジア域の放射場と雲場に及ぼす影響に関する研究

(A study of anthropogenic impacts on the radiation budget and the cloud field in East Asia)

氏名 向井 真木子

本研究は、近年の急速な経済成長によって燃料消費量が増加している東アジア（特に中国）において、燃料消費により増加した大気中の汚染物質（エアロゾル）が放射場や雲場へ与える影響の感度調査を目的としている。研究は次の手順で進める。i) 観測された長期データをもとに、中国域におけるエアロゾル量や日射量の地域特性・経年変化・季節変化を解析し、中国域での日射量変化の場所や季節による違いを明らかにする。ii) 数値モデルを用いた感度実験を行い、日射量の変化に影響を及ぼす各要因の感度を調べる。同時に数値モデルから導出されるエアロゾル増加と雲量の関係や、人為起源汚染物質が放射収支を変化させることによって引き起こされる気象場の変化についても言及する。iii) 観測、並びに数値モデル解析結果を比較照合することで、東中国域でのエアロゾル増加と日射量や雲量の変化傾向の関係を明らかにする。

日射量データとして中国気象局提供の全天日射量や直達日射量など地上観測日射量データを使用する。気象業務支援センターが提供している日照時間、気温、水蒸気量、雲量など地上観測データ、ISCCP (International Satellite Clouds Climatology Projects) の雲量データや、Terra 衛星に搭載されている MODIS センサーデータのエアロゾル光学的厚さ、アメリカ国立気候データセンター(NCDC)が収集しているデータ集(NOAA Daily Global Summary of Day)の日平均視程なども解析に活用した。

使用した数値モデルは全球三次元エアロゾル輸送・放射モデル SPRINTARS で、東京大

学気候システム研究センター、国立環境研究所、地球フロンティア研究システムが開発を行っている大気大循環モデル(AGCM) [K-1 Model Developers, 2004]を基盤としており、扱うエアロゾルは硫酸エアロゾル、炭素性（無機炭素、黒色炭素）エアロゾル、土壌エアロゾル、海塩エアロゾルの4種類である。モデルではこのようなエアロゾルの発生、移流、拡散、湿生沈着、乾性沈着、重力落下の過程を計算している。また、エアロゾル直接効果（エアロゾルによる太陽・赤外放射の散乱・吸収）およびエアロゾル間接効果（エアロゾルによる雲粒生成機能）も計算に含まれている。本研究でのモデル分解能は、水平方向T42（約 $2.8^{\circ} \times 2.8^{\circ}$ ）、鉛直方向20層である。

長期日射量データの解析から、中国域におけるエアロゾル量の増加傾向や日射量の減少傾向を確認した。Table 1は中国の一級日射観測局における日射量の経年変化である。年平均の直達日射量、全天日射量ともに1961年から2000年の間、ほぼ全ての観測局で減少傾向を示していることがわかる。日射量の減少が最も顕著なのは長江中流域にある武漢(Wuhan)である。1961年から2000年の40年間の前半(1961-1980)と後半(1981-2000)それぞれ20年間の平均の差をみると年平均の直達日射量で約 35W/m^2 、全天日射量で約 25W/m^2 の減少がみられる。また、日射量の減少が中国西部に比べ東部域の都市で顕著であることがわかる。さらに、日射量変化の大きさは季節によって異なり、中国北部ではエアロゾル増加の顕著な夏に日射量減少も大きいなど、エアロゾルの季節変化が日射量変化の季節変化に寄与していることが示唆された。

Table 1 Long-term trends with respect to annual mean values of the observed direct and global radiation. The item 'linear trend' represents the linear trend per year [$\text{W/m}^2/\text{yr}$], and the bold digits indicate the cases of significant level with $P < 0.01$, and 'change' denotes the difference [W/m^2] between the averaged value during 1981 to 2000 and that during 1961 to 1980.

Stations	Latitude [° N]	Longitude [° E]	Direct radiation		Global radiation	
			linear trend [$\text{W/m}^2/\text{yr}$]	change [W/m^2]	linear trend [$\text{W/m}^2/\text{yr}$]	change [W/m^2]
Harbin	45.75	126.77	-0.225	-6.064	0.050	-0.545
Urumqi	43.47	87.37	-0.785	-17.061	-0.582	-12.097
Kashgar	39.28	75.59	-0.373	-8.976	-0.462	-11.332
Golmud	36.42	94.90	-0.061	-4.375	-0.170	-5.981
Lanzhou	36.03	103.53	-0.736	-17.125	-0.570	-17.129
Shenyang	41.44	123.27	-0.885	-19.417	-0.549	-13.182
Beijing	39.56	116.17	-0.962	-21.119	-0.993	-22.408
Lhasa	29.40	91.08	-0.862	-24.228	-1.109	-25.497
Chengdu	30.40	104.01	-1.355	-28.058	-0.858	-19.757
Kunming	25.01	102.41	-0.580	-8.521	0.059	5.164
Zhengzhou	34.43	113.39	-1.029	-20.941	-0.140	-4.574
Wuhan	30.37	114.08	-1.610	-35.516	-1.090	-25.906
Guangzhou	23.08	113.19	-1.393	-26.878	-0.798	-15.623

次に、エアロゾルの直接効果・間接効果・これらの効果によって放射収支が変化する事に伴う循環場の変化を調べるために、海洋混合層を結合させたエアロゾルモデルによる感度実験を行った。人為起源の気候影響を調べるために、燃料燃焼起源エアロゾル増加だけではなく温室効果気体濃度の増加による効果についても調べた。Figure 1 は、現在（2000年）と産業革命以前（1850年）のエアロゾル排出量データを用いた数値実験から求めた中国の地域ごとのエアロゾル光学的厚さである。現在のエアロゾル光学的厚さが大きい値を取る地域は、東中国域の南部(S)、東部(E)、北部(N)域となった。これに対して、産業革命以前の実験では、現在のデータを用いた場合には 0.65 という大きなエアロゾル光学的厚さ値を示した東部域でも、0.12 という低い値となった。この数値は、現在データから得られる実験値の 5 分の 1 弱にすぎない。これら 2 ケースの実験結果は、燃料燃焼起源の硫酸エアロゾル、炭素性エアロゾルが産業革命以降の増加している事を明確に示唆している。この増加傾向は、特に東中国域で顕著である。

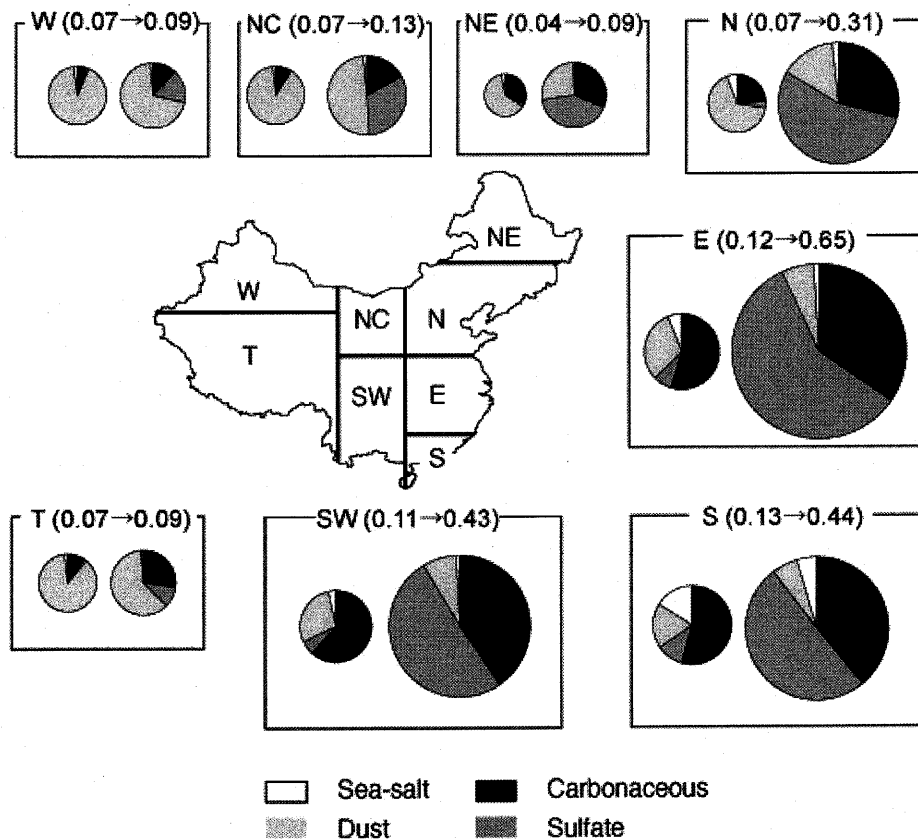


Figure 1 Simulated annual mean aerosol optical thickness at $0.55 \mu\text{m}$ at eight regions in China for the experiment using anthropogenic aerosol emission data in the pre-industrial (left circles) and the experiment using anthropogenic aerosol emission data in the present day (right circles).

数値モデルシミュレーションの解析結果と観測データ解析結果をもとに、エアロゾルと日射量、雲場の変化について考察する。

(1) エアロゾル増加と日射量変化

燃料燃焼起源エアロゾル増加の顕著な東中国域では観測データが示す日射量の大きな減少が数値モデルにおいても再現され、エアロゾルの直接効果が強く寄与していることがわかった。また、エアロゾル光学的厚さ増加の大きい季節に直接効果が大きくなるという特徴がみられた。このように、日射量の地域や季節による変化にエアロゾルが強く影響している。故に、観測データにみられるような中国における日射量減少の主要因はエアロゾル増加だと考えられる。

(2) エアロゾル増加と雲場変化

数値モデルシミュレーションではエアロゾル増加に伴って雲の光学的厚さにも増加がみられた。また雲量は間接効果などで低層雲量を中心に雲量増加がみられた。一方、中国南部の夏には、エアロゾル増加による冷却効果が原因と考えられる雲量の減少がみられた。

(3) エアロゾルの直接効果、間接効果

エアロゾルの直接効果はエアロゾル量増加に比例する傾向が数値モデル結果にみられた。これに対して、エアロゾル間接効果は地域や季節によって、その大きさが異なる。従来の第一種、第二種間接効果で予測されるよりも大きな間接効果がみられる場合もあった。これは、本実験では海洋混合層を結合させていることで、エアロゾル増加の影響が海面水温変化や循環場変化に及んだためだと考えられる。

(4) エアロゾル増加と温室効果気体増加

雲量変化を介して温室効果気体は日射量に影響する。雲量変化はエアロゾル増加時と温室効果気体増加時では異なる変化をみせ、温室効果気体増加時には大部分の中国域で雲量に減少がみられた。しかし、日射量変化に与える影響は温室効果気体増加と比べ、エアロゾル増加による影響のほうが大きい傾向がみられた。数値モデル解析から、中国東部ではエアロゾル増加を主要因とする日射量減少と温室効果気体増加を主要因とする雲量減少が同時にみられるという結果が得られた。これから、観測されている日射量、雲量の減少は、このような異なる人為起源要因によって引き起こされている可能性が示唆される。

本研究において、エアロゾル変化が放射収支の変化を通して雲量や降水量変化にまで影響を及ぼすことがわかった。エアロゾルの影響を調べる際には、エアロゾルの種類や分布、モデルにおけるエアロゾルの取り扱い方などが重要となる。それ故、高精度のエアロゾル排出量データや高い精度の数値モデルの開発が期待される。