

学 位 論 文 題 名

太平洋域大気エアロゾルの太陽放射吸収特性の評価

学位論文内容の要旨

大気エアロゾル（大気浮遊微粒子）は、太陽放射（日射）を散乱・吸収することにより、日射の地表面への到達量を変化させ、気候変動を引き起こす。これを大気エアロゾルの気候への直接効果と呼ぶ。この直接効果の大きさは、大気エアロゾルの地表から大気上端までの総存在量に比例する光学的厚さ τ （消散係数の総和）と、エアロゾルの散乱・吸収特性（単一散乱アルベド ω 、これを太陽放射吸収特性ともいう）に決定的に依存する。それゆえ、直接効果の算定においては、両者の季節別の広域分布が必須であるが、現在のところ、海洋上における測定値がほとんど得られていない。そこで、本研究においては、観測船「みらい」を用いて、太平洋海域の単一散乱アルベド ω および光学的厚さ τ の実測を行った。特に、 ω は散乱係数と吸収係数から算出されるが、これらは散乱光度計および吸収光度計などを用いて実測によってのみ決定されるものであり、太平洋海域における ω の季節別の広域分布は、本研究により初めて得られたものである。本研究では、これらの実測結果を基に、人工衛星によるリモートセンシングを用いて、太平洋域における大気エアロゾルによる気候への直接効果の算定も行った。以下、各章の概要を述べる。

第1章では、本研究の背景および目的について述べた。

第2章では、太平洋における1999年から2003年の間の7回（約8ヶ月間）にわたる、各海域・季節のエアロゾルの光学特性と化学組成の観測結果について述べた。散乱係数、吸収係数および光学的厚さの測定と同時に、エアロゾルをフィルター上に捕集し、水溶性成分をイオンクロマトグラフィーにより、金属成分をICP-MSにより、さらに炭素成分を燃焼法により分析、定量した。以下に、各海域・季節の結果を示す。北緯30°から40°、東経130°から160°の海域（日本南東沖）では、冬季（1月から3月）には光学的に吸収性のエアロゾル（単一散乱アルベド $\omega = 0.81$ ）、夏季（6月から8月）には透明なエアロゾル（ $\omega = 0.97$ ）が測定された。また、化学成分分析および後退流跡線解析の結果から、冬季は日本で発生した化石燃料燃焼由来の物質だけでなく、大陸上で発生した汚染物質の影響も見られた。この冬季における大陸からの汚染物質の輸送は、北緯20°付近（台湾の東方、約3000km）の海域まで達しており、その結果、この海域では $\omega = 0.88$ という、吸収性の強いエアロゾルが見られた。次に、赤道から北緯20°、東経130°から160°の海域（フィリピン東方およびニューギニア島の北方に囲まれた海域）においては、化石燃料燃焼の影響は比較的小さかった。そのため吸収性のエアロゾルの濃度が低く、 ω は0.98と強い散乱性を示した。2001年5月の日本東方沖の観測では、高濃度の黄砂粒子を測定した。この黄砂粒子は化石燃料燃焼起源物質と共に飛来してきており、 ω は0.89であった。2002年8月のインドネシア周辺海域では、森林火災によって発生したエアロゾルを観測した。最も吸収性の強いエアロゾルが測定され、 $\omega = 0.68$ であった。この森林

火災起源のエアロゾルは、北緯 10° 付近まで輸送されており、その結果、その海域のエアロゾルの ω を 0.89 まで低下させていた。2003 年 1 月の赤道上（東経 150° から西経 160° ; ナウル島付近）での観測では、清浄なエアロゾルを観測し、 $\omega = 0.98$ という散乱性の強い値が得られた。この結果から、清浄な太平洋海域の ω の値は、0.98 程度であることが分かった。

第 3 章では、任意の波長におけるエアロゾルの光学特性（単一散乱アルベド ω と散乱光の角度分布関数 $P(\Theta)$ ）の算出を行う為に、第 2 章の結果を用いてエアロゾルの粒径分布を決定した。すなわち、第 2 章で得られた各海域・季節の化学組成に基づき、エアロゾルが黒色純炭素、有機炭素、硫酸アンモニウム、硫酸ミスト、海塩粒子、土壌粒子の 6 成分からなるものとし、様々な粒径分布を用いて、Mie 散乱理論により、波長 565nm における ω を算出した。そして第 2 章で測定により得られた 565nm における ω と最も良く一致する粒径分布を得た。この粒径分布を用いて、太平洋域における各海域・季節の各波長のエアロゾルの光学特性を算出した。

第 4 章では、人工衛星 Terra に搭載されている MODIS センサーの輝度データと、第 3 章で得られた光学特性から、光学的厚さ τ の推定を行った。輝度解析においては大気層毎（大気境界層、自由対流圏、成層圏）に光学特性を与えることができる大気三層モデルを作成し、使用した。まず、時間と場所が同期している場合を対象として、輝度解析で得られた τ と海上観測で得られた τ の比較を行い、広域分布の算出に用いる波長領域の選定の為の検証実験（検討）を行った。赤道から北緯 40°、東経 130° から 160° の外洋（これを A 領域と示す）では、MODIS バンド 11（波長 530nm）の解析結果が、海上からの実測値と最も良く一致した。2001 年 5 月の黄砂が飛来している場合には、自由対流圏に黄砂の光学特性を与え、ライダー測定により得られた消散係数の高度分布を用いて、自由対流圏の τ をあらかじめ求め、輝度計算を行ったところ、バンド 16（870nm）の計算値が実測値と最も良く一致した。2002 年 8 月のインドネシア周辺（B 領域）における検討結果では、 τ を算出する過程において、海面反射率が小さいバンド 14（680nm）を用いる必要があることが分かった。次に、先の結果を基に一ヶ月の光学的厚さ τ の広域分布を求めた。2002 年 2 月および 7 月の A 領域の解析では、北緯 30° 以北において、それぞれ 0.24 および 0.17 という τ の高い領域が見られた。また、2001 年 5 月の解析では、北緯 25° 以北の海域全域にわたって、平均で $\tau=0.35$ と厚いエアロゾル分布域が得られた。また、2002 年 8 月にはカリマンタン島、スマトラ島で森林火災が起きていたが、そのときの B 領域の解析では、南シナ海、マラッカ海峡などの、森林火災の発生源に近い海域で、 τ の値が 0.24 と高い領域が見られた。

第 5 章では、太陽放射領域（波長 0.3 μm から 4.0 μm ）における放射強制力 ΔF_{TOA} の広域分布を算出し、エアロゾルの気候への直接効果を評価した。なお、 ΔF_{TOA} は第 3 章で得られた光学特性および第 4 章で得られた光学的厚さの広域分布を与えて得られた、大気上端における正味の下向き放射フラックスと、清浄海域のそれらの値を用いて得られたものとの差で定義した。2002 年 2 月の化石燃料燃焼の影響がみられた北緯 30° 以北の海域における ΔF_{TOA} の平均値は -9.4 Wm^{-2} であった。この値は、北米東岸沖の大西洋や冬季のインド洋において実測されたものとほぼ同程度の大きさである。また、2001 年 5 月および 2002 年 8 月については、観測されたエアロゾルが存在することにより、地表が受け取る放射量が低下し（月毎の平均値が -92 Wm^{-2} から -95 Wm^{-2} ）、かつ大気の受け取る放射量が増大していた (90 Wm^{-2})。これは大気層が、より安定となることを示している。その結果、対流が起こりにくくなり、雲がより生成されにくい状況を作り出していると考えられる。

第 6 章では、本研究の総括を述べた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 太 田 幸 雄

副 査 教 授 清 水 達 雄

副 査 教 授 田 中 信 壽

副 査 助 教 授 村 尾 直 人

学 位 論 文 題 名

太平洋域大気エアロゾルの太陽放射吸収特性の評価

大気エアロゾル（大気浮遊微粒子）は、太陽放射（日射）を散乱・吸収することにより日射の地表面への到達量を変化させ、気候変動を引き起こす。これを大気エアロゾルの気候への直接効果と呼ぶ。この直接効果の大きさは、大気エアロゾルの地表から大気上端までの総存在量に比例する光学的厚さ τ （消散係数の総和）と、エアロゾルの散乱・吸収特性（単一散乱アルベド ω 、これを太陽放射吸収特性ともいう）に決定的に依存する。それゆえ、直接効果の算定においては、両者の季節別の広域分布が必須であるが、現在のところ、海洋上における測定値がほとんど得られていない。そこで本研究においては、観測船「みらい」を用いて太平洋海域の単一散乱アルベド ω および光学的厚さ τ の実測を行った。特に、 ω は散乱係数と吸収係数から算出されるが、これらは散乱光度計および吸収光度計などを用いて実測によってのみ決定されるものであり、太平洋海域における ω の季節別の広域分布は、本研究により初めて得られたものである。本研究では、これらの実測結果を基に、人工衛星によるリモートセンシングを用いて、太平洋域における大気エアロゾルによる気候への直接効果の算定も行った。

本研究では、太平洋における 1999 年から 2003 年の間の 7 回（延べ 8 ヶ月間）にわたる、各海域・季節のエアロゾルの光学特性と化学組成の観測を行った。散乱係数、吸収係数および光学的厚さの測定と同時に、エアロゾルをフィルター上に捕集し、水溶性成分をイオンクロマトグラフィーにより、金属成分を ICP-MS 法により、さらに炭素成分を燃焼法により分析、定量した。以下、各海域・季節の結果を示す。北緯 30° から 40°、東経 130° から 160° の海域（日本南東沖）では、冬季（1 月から 3 月）には光学的に吸収性のエアロゾル（単一散乱アルベド $\omega = 0.81$ ）、夏季（6 月から 8 月）には透明なエアロゾル（ $\omega = 0.97$ ）が測定された。また化学成分分析および後退流跡線解析の結果から、冬季は日本で発生した化石燃料燃焼由来の物質だけでなく、大陸上で発生した汚染物質の影響も見られた。この冬季における大陸からの汚染物質の輸送は、北緯 20° 付近（台湾の東方、約 3000km）の海域まで達しており、その結果、この海域では $\omega = 0.88$ という、吸収性の強いエアロゾルが測定された。次に、赤道から北緯 20°、東経 130° から 160° の海域（フィリピン東方およびニューギニア島の北方に囲まれた海域）においては化石燃料燃焼の影響は小さく、そのため吸収性エアロゾルの濃度が低く、 ω は 0.98 と強い散乱性を示した。2001 年 5 月の日本東方沖の観測では高濃度の黄砂粒子を観測した。この黄砂粒子は化石燃料燃焼起源

物質と共に飛来してきており、 ω は0.89であった。2002年8月のインドネシア周辺海域では、森林火災によって発生したエアロゾルを観測した。最も吸収性の強いエアロゾルが測定され、 $\omega = 0.66$ であった。この森林火災起源のエアロゾルは、北緯 10° 付近まで輸送されており、その結果、その海域のエアロゾルの ω を0.89まで低下させていた。2003年1月の赤道上（東経 150° から西経 160° ；ナウル島付近）での観測では、清浄な海域におけるエアロゾルを観測し、 $\omega = 0.98$ という散乱性の強い値が得られた。この結果から、清浄な太平洋海域の ω の値は、0.98程度であることが明らかになった。

エアロゾルの気候影響を評価するためには、単一散乱アルベド ω だけではなく、エアロゾルの散乱光角度分布関数 $P(\Theta)$ も必要である。そのために本研究では、上述の観測結果を用いて、まずエアロゾルの粒径分布を決定した。すなわち、各海域・季節の化学組成測定値に基づき、エアロゾルが黒色純炭素、有機炭素、硫酸アンモニウム、硫酸ミスト、海塩粒子、土壌粒子の6成分からなるものとし、様々な粒径分布を与えて、ミー散乱理論により、波長 565nm における ω を算出した。この計算値と上述の観測で得られた ω とを比較し、最も良く一致する場合の粒径分布を求めた。この粒径分布を用いて、太平洋域における各海域・季節の各波長毎の ω と $P(\Theta)$ を算出した。次に、これらの値を用いて、人工衛星 Terra に搭載されている MODIS センサーの輝度データから、大気三層モデル（大気境界層、自由対流圏、成層圏）により、光学的厚さ τ を算出し、一ヶ月の τ の広域分布を求めた。2002年2月および7月の解析では、北緯 30° 以北において、それぞれ光学的厚さ τ が0.24および0.17という高い領域が見られた。また、2001年5月の解析では、北緯 25° 以北の海域全域にわたって、平均で $\tau=0.35$ と厚いエアロゾル分布域が得られた。また、2002年8月にはカリマンタン島やスマトラ島で森林火災が起きていたが、そのときの解析では、森林火災の発生源に近い南シナ海、マラッカ海峡などの海域で、 τ の値が0.24という高い海域が見られた。

以上の結果を基に、太陽放射領域（波長 $0.3\mu\text{m}$ から $4.0\mu\text{m}$ ）における放射強制力 ΔF_{TOA} の広域分布を算出し、エアロゾルの気候への直接効果を評価した。なお、本研究においては、 ΔF_{TOA} は、本観測で得られた人為起源エアロゾルが存在する場合について算出された大気上端における正味の下向き放射フラックスと、清浄海域のエアロゾルについて算出された大気上端下向き放射フラックスとの差で定義した。化石燃料燃焼の影響がみられた2002年2月の北緯 30° 以北の海域における放射強制力の平均値は -9Wm^{-2} 程度であった。この値は、北米東岸沖の大西洋や、冬季のインド洋において実測されたものとほぼ同程度の大きさである。なお、人為起源物質とともに飛来する黄砂粒子や森林火災エアロゾルによる放射強制力は、 -2 から -6Wm^{-2} 程度であり、それほど大きくはない。ただしこれらの高濃度汚染エアロゾルの存在は、大気をより安定化させ、対流の発生を抑え、雲の生成を抑制し、降水量を減少させる可能性があり、今後、大気循環気候モデルによる詳細な検討が必要であると思われる。

これを要するに、著者は、人為起源大気エアロゾルの気候への影響の評価において、これまで不明であった太平洋域の大気エアロゾルの太陽放射吸収特性を、5年間7回延べ8カ月にわたる船上観測により、初めて明らかにしており、大気環境保全工学の進歩に寄与するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。