

氏名・(本籍)	なか 中	じま 島	てる 映	ゆき 至
学位の種類	理	学	博	士
学位記番号	理	第	655	号
学位授与年月日	昭和56年2月25日			
学位授与の要件	学位規則第5条第2項該当			
最終学歴	昭和50年3月 東北大学大学院理学研究科 (修士課程) 地球物理学専攻修了			
学位論文題目	Solar radiative transfer in the atmosphere and ocean system (大気-海洋系における太陽光の伝播)			
論文審査委員	(主査) 教授 田中正之 教授 上山弘 教授 鳥羽良明 教授 近藤純正			

論 文 目 次

Preface

Acknowledgements

Notations

Chapter 1 Optical properties of aerosols and hydrosols.

Section 1 Scattering and absorption by the particulate matters.

1.1 Scattering theory.

1.2 Size distribution and refractive index.

Section 2 Inversion problems.

2.1 Theory.

- 2. 2 Library-inversion method.
 - 2. 2. 1 Analysis of the observed data.
- Section 3 Simultaneous inversion.
 - 3. 1 Numerical simulation.
 - 3. 2 Analysis of the observed data.
- Chapter 2 Radiative transfer in the atmosphere-ocean system.
 - Section 4 Transfer theory.
 - 4. 1 Discrete space method.
 - 4. 1. 1 Formulae.
 - 4. 1. 2 Flat sea surface.
 - 4. 2 Truncation method.
 - 4. 2. 1 Truncation of phase function.
 - 4. 2. 2 Equations.
 - 4. 2. 3 Errors introduced by the approximation---Fluxes.
 - 4. 2. 4 Calculation of intensities.
 - 4. 2. 4. 1 Small-angle approximation.
 - 4. 2. 4. 2 Gaussian-Legendre expansion of phase function.
 - 4. 3 Inversion theory of aureole.
 - Section 5 Scattering by the random sea surface.
 - 5. 1 Density functions of wave characteristics.
 - 5. 2 Shadowing factor.
 - 5. 3 Transmission and reflection functions of sea surface.
 - 5. 3. 1 Transmission and reflection matrices.
 - Section 6 Radiation fields in the atmosphere-ocean system.
 - 6. 1 Optical model of the atmosphere-ocean system.
 - 6. 2 Effects of oceanic turbidity and refractive index of hydrosols.
 - 6. 3 The effects of wind-roughened sea surface.
 - 6. 4 Approximate calculation of flux.
 - 6. 5 Exponential sum fitting.

References

論文内容要旨

本論文では、大気と海洋から成る系の中を、太陽光がどのように伝播するかを研究する。特に、可視光に対しては大気や水は極めて透明なので、その中に浮遊する微粒子による光の散乱・吸収を評価することが重要になる。ここでは、これら微粒子(大気中ではエアロゾル；海中ではハイドロゾル)に着目して、それらの光学的特性と放射伝達への影響を詳しく研究することにする。第1章では、エアロゾルとハイドロゾルの光学的な特性について調べる。粒子系を、同一の複素屈折率をもっている球が、ある粒径分布に従って混在している系とみなすことは、多くの場合良い近似であることが知られているので、光学的に等価な複素屈折率と粒径分布をエアロゾルとハイドロゾルについて求めることにする。そのために、粒子を含んだ系からの散乱光強度の散乱角依存性や系の透過率の波長依存性に注目する。系の散乱量や吸収量は各粒子の寄与を粒径分布の重みをつけて加算したものであるから、これらと粒子系の粒径分布は第一種のフレッドホルム型積分方程式によって関係づけられている。この方程式を解く問題は Inversion Problem として知られており、エアロゾルの粒径分布を求めるためによく利用されてきた。従来の方法では、粒子の複素屈折率が既知のものとして問題が解かれていたが、解の良さを詳しく調べることによって粒子の複素屈折率も粒径分布と同時に決定できることが示される。第2節では、数値実験によってエアロゾルとハイドロゾルの粒径分布および複素屈折率がよく決まることを見る。その過程で、散乱光については偏光成分をできるだけ広い散乱角範囲で測定することが必要であることもわかる。又、ハイドロゾルでは、その複素屈折率の実部が1に非常に近いために、虚部を決定することがむずかしくなる一方、実部をよい精度で決定できることが示される。一般に小粒子の多い系では複素屈折率を決めることがむずかしくなる。次に、これらの数値実験を基礎に、いくつかの実際の観測データを解析する。大気中のデータについては、青葉山(東北大学構内)において polar nephelometer を使用して Takamura (1978) によって観測と解析が行なわれた。それによると、バックグラウンド=エアロゾルの粒径分布はほぼ Junge 型であり、その上に若干の log-normal 的なピークが認められた。又、複素屈折率は平均的には $1.50 - 0.02i$ 程度であった。一方ハイドロゾルについては散乱関数の良い測定例は少なく、現在のところその光学的性質をこまかく知ることはできないが、ここに示した2例の解析ではハイドロゾルについても粒径分布は Junge 型であることが知られた。解析例では複素屈折率の実部として 1.05 が示された。すでに述べてきたように虚部については確定的な値を知ることができなかった。今後、海洋中のデータの蓄積が望まれる。

浮遊粒子の粒径分布を推定することのできるもう一つのデータとして系の波長別透過率があげられる。しかし、このデータに含まれる情報は限られた粒径域についてのみなので、ここでは散乱量である太陽周辺光強度分布を組み合わせた解析法を第3節に示す。大気層の波長別透過率と太陽周辺光強度分布が与えられた場合、広い範囲の粒径にわたって気柱平均の粒径分布が

推定されることがわかった。

しかしながら、数値実験によると、複素屈折率を推定することはむずかしい。青葉山で得られた観測データを解析してみると、エアゾルの粒径分布は、気柱平均としても Junge 分布に近いことが示された。又、Polar nephelometer による測定では推定できなかった大粒子測のもう一つのピークを見つけることができた。従ってエアゾルの粒径分布は、基本的には Junge 型であるが、その上に若干の 2 山構造を持つものが典型的であるようだ。これは $0.1 \mu\text{m}$ から、 $10 \mu\text{m}$ 程度の光学的に重要なエアゾルの 2 つの起源を知る上で興味深い事実である。

第 2 章では大気-海洋系の中の放射伝達を解くことを考える。系に特異な問題は、大気層と海洋の境界にある。海面では、媒質の屈折率の不連続のために、光が反射、屈折をする。そこで、海面も、大気や海洋と同等な散乱層とみなし、層の散乱関数と透過関数を工夫して与えることにより、従来のマトリックス法を大気-海洋系の放射伝達に適用できるように拡張した。大気-海洋系の放射伝達に従来使われていたモンテカルロ法に比べ精度が向上し、又、反復法に比べて計算時間が短縮された。海面が平面の場合には、海面の仮想的な散乱、透過関数は第 4.1, 2 節で示すように解析的な表現で与えられるが、海面が風波によって乱れた時には、その散乱・透過関数を数値計算によって求めなければならない。

第 5 節では、その方法を詳しく述べた。特に、波によって光路がさえぎられる問題は、音波の伝播などとも共通して早くから関心がもたれた。ここでは二次元の正規的な相関をもつ波高を数値的に作ってモンテカルロ法により光路のさえぎりを調べた。それによると、光が海面で 2 回以上散乱される確率は、風速が 3 m/sec 程度でも数%になることがわかる。

現在のところ、海面の散乱、透過関数は、光の海面による一次散乱のみを考慮して求めているが、今後より正確な取り扱いが必要になるとと思われる。第 2 章の後半では、述べてきたような工夫を利用して、大気海洋系中の太陽放射場、特にフラックスを計算した。大気層は第一章で見たような Junge 分布を持ち複素屈折率が $1.50-0.01i$ であるような典型的なエアロゾルが含まれているとした。海洋層にも同じく Junge 分布を持つハイドロゾルを仮定したが、その複素屈折率は、エアロゾルに比べてよくわからないので、いくつかの値を設定した。モデルによって計算された海洋層の消散係数は測定値の特徴をよく再現しているが、single scattering albedo については短波長側 ($< 0.5 \mu\text{m}$) で測定値とのくい違いが大きくなった。このことは従来使われている純水の吸収係数が短波長側ではるかに小さな値をとらなければならないことを示している。この方面の多くの測定が今後重要である。海面直上での反射率は、ハイドロゾルの量と複素屈折率によって大きな変化を示すことがわかった。複素屈折率の実部が大きく虚部が 0 に近いハイドロゾルが海中に蓄積されると、大気-海洋系の反射率が極めて増大する。このことは、海洋汚染が地球の熱収支に与える影響を知る上で興味深い結果である。又、Okami (1977) による清澄な海洋モデルによって反射率を計算したところ反射率は、極めて大きくなった。Okami のモデルは、短波長側の吸収が小さなモデルなので、すでに述べたように水の消散

係数を正しく評価することが熱収支の面からも極めて重要であることが示された。風波の影響も調べられたが、これは、大気の混濁度と同程度の影響を反射率に与えることがわかった。

しかし、他の研究者による数値計算との比較は、必ずしも一致していないので、今後、海面の散乱・透過関数の評価、数値計算法の違いを吟味する必要がある。

論文審査の結果の要旨

中島映至提出の学位論文は、大気と海洋から成る系の中での太陽放射の多重散乱過程とそれに関連する問題を研究したものである。

太陽放射、特に可視光に対しては空気や水は極めて透明であるので、その中に浮遊するエアロゾル、ハイドロゾル等の微粒子の散乱・吸収を正確に考慮することが、この問題では特に重要になる。中島はまず、微粒子系による散乱光の強度や偏光度の角度特性、波長別消散係数、太陽周辺光強度などの測定データを利用して、エアロゾルやハイドロゾルの粒径分布や複素屈折率を評価する一連の方法を開発し、これを実際のデータに適用してエアロゾルおよびハイドロゾルのそれぞれについて現実的な光学モデルを得ている。

次に、大気と海洋をつなげた単一の系と見做し、その中での太陽放射の多重散乱過程を統一的に評価するため、従来の放射伝達方程式の解法の拡張を行っている。特に問題となるのは、海面での反射・屈折の取扱いであるが、海面を大気あるいは海洋と類似の散乱層と見做し、その反射・透過関数を工夫して与えることにより、従来のマトリックス・オペレータ法を大気-海洋系に適用できるものに拡張している。海面の反射・透過関数は、海面が平面の場合には解析的に与えられるが、海面が風波によって乱れている場合には、波面の統計に基づいてそれらを合理的に求める方法を導いている。

さらに、これらの成果を総合し、現実的な大気-海洋系のモデルを対象に太陽放射伝達の数値シミュレーションを行い、系内の放射場の基本的特性を明らかにすると共に、エアロゾルやハイドロゾルの量や性質、海面状態などのちがいが放射場に与える影響を論じている。その結果、海洋中の放射場や海洋の反射率などは、ハイドロゾルの濃度と同時にその複素屈折率に大きく左右されること、風波は大気-海洋系の反射率などに大気中のエアロゾル濃度の変動と同程度の影響を与えること、などの興味ある知見が得られている。観測結果との比較から可視域における水の吸収率についての従来の評価には問題があることも指摘されている。

以上のように、中島映至提出の論文は、大気-海洋系における太陽放射の伝達について、エアロゾルやハイドロゾルの光学的性質の評価も含めて広範囲の考察を行ったものであって、その成果は大気物理学、海洋物理学等の関連分野に貢献するところ大きく、著者が自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有していることを示している。よって中島映至提出の論文は学位論文として合格と認める。