

機関番号：17301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20540427

研究課題名(和文) 能動型衛星データと数値モデルによるエアロゾル間接効果の実態把握とメカニズム解明

研究課題名(英文) Study on the behaviors and mechanisms of the aerosol indirect effects with active satellite data and numerical modeling

研究代表者

河本 和明 (KAWAMOTO KAZUAKI)

長崎大学・環境科学部・准教授

研究者番号：10353450

研究成果の概要(和文): 従来の受動型衛星センサーから得られた降雨量と低層雲特性の関係や、地表面短波放射変動に及ぼす気象要素の寄与に加えて、近年の能動型衛星センサーから、中国とアマゾンでの低層雲の鉛直構造とレーダ反射率(降雨の指標となる)の関係を調べて、雲粒子・ドリズル・降雨粒子の遷移の動態・相違点を明らかにした。また数値モデルを用いて、雲の光学的厚さと有効雲粒径の統計的振る舞いの違いには、雲粒の核となるエアロゾルの粒径分布の形状が重要であることを示した。

研究成果の概要(英文): In addition to the relation between the precipitation amount and low-cloud properties and contribution of meteorological factors on the surface shortwave irradiance variation obtained from conventional passive satellite sensors, recent data from active satellite sensors revealed the behaviors, similarities and differences in the transition among cloud droplets, drizzle and precipitation particles over China and the Amazon from the analyses of cloud vertical profiles and the radar reflectivity. Moreover, the numerical modeling illustrated that the difference in statistical behaviors between the optical depth and effective particle size was caused mainly by the difference in shapes of aerosol size spectra.

交付決定額

(金額単位:円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：大気物理学

科研費の分科・細目：地球惑星科学 気象・海洋物理・陸水学

キーワード：間接効果、能動センサー、数値モデル

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化を含む広義の気候変動の問題が社会的にも注目を浴びる中、その将来予測においていくつかの不確定性の高い過程がボトルネックになっていた。その中でもエア

ロゾルの間接効果(エアロゾルは雲粒子の核になるため、その量や種類が変動すると雲の反射率や降雨効率などが変化する効果)は、2007年度のノーベル平和賞を受賞した気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の報告書で

も認められているように最も不確実性が高く、気象・気候の国際的な研究コミュニティでもその解明が強く望まれている。そのような折、2006年春に能動型衛星センサーであるライダー-CALIPSO (Cloud - Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation)とレーダ Cloudsat が打ち上げられ、大気粒子に関するリモートセンシングは新しいフェイズに入った。

2. 研究の目的

従来の受動型センサーから得られるエアロゾルと雲特性の関係性や、放射収支変動に及ぼす影響に関する研究に加えて、鉛直方向の情報を検出できる能動型センサーのデータ解析を通して、アマゾンや中国また海洋上のより詳細なエアロゾル・雲粒子・降雨間の振る舞い（粒子数や雲水総量の頻度、鉛直構造の季節・場所依存性など）の実態把握を行う。さらに粒径を解像できる最新の数値モデリング技術を用いて様々な状況をシミュレートし、観測された現象のメカニズムを解明することを目的とする。

3. 研究の方法

研究題目にも示されているように、本研究では MODIS などの受動型および CloudSat などの能動型衛星センサーから得られる各種データを統計的に解析して実態把握を行い（解析軸）、さらにエアロゾルから雲粒子、さらに降雨までの微物理特性や粒径分布関数を陽に扱い、かつ放射および力学過程も含んだビン法数値モデリングによってデータからの観測事実のメカニズム解釈を行う（モデル軸）。以上2つの手法により、本研究ではエアロゾル・雲・降水の関係性の変遷の様子を記述し、メカニズムを探求する。

4. 研究成果

以降、光学的厚さを τ , 有効粒径を r_e とする。まず受動型衛星センサーを使った結果として、以下の2つの研究を示す。

(1) 降雨による低層水雲特性の変化について

中国において τ が 20 以下で、かつ r_e が $14 \mu\text{m}$ より小さい非降水性と考えられる低層の水雲と降水量との関係性を調べたところ、降雨量が増えるに従って r_e は大きくなり、 τ と r_e から求められる鉛直積算雲粒子数密度 N_c は減少し、両者はきれいな逆相関の関係を示した（図1）。これは降雨によって、雲凝結核となるエアロゾルの除去が起こって

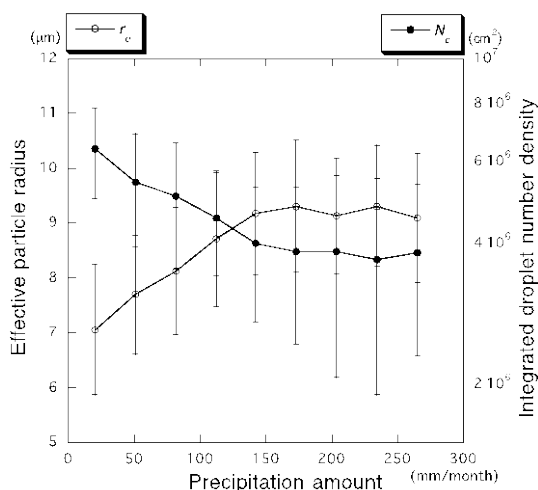


図1 中国における降水量と r_e , N_c の関係 (Kawamoto 2008)

ることを意味している。この傾向は Twomey 効果と同様であり、低層に存在する非降水性水雲への一方的な影響と結論された。また図2に降水量と N_c の関係について中国とアマゾンを比較した。両者とも同様な負の傾向を示すが、同じ降水量でも N_c の絶対値が異なっている。これはエアロゾルのバックグラウンド値や排出量の違いの他、さらに上昇気流など力学系の違いを反映したものと考えられる。

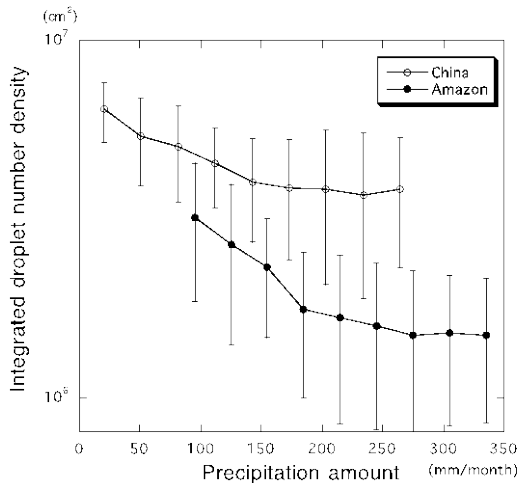


図2 中国とアマゾンにおける降水量と N_c の比較 (Kawamoto 2008)

(2) Potential Radiative Forcing (PRF)による地表面短波放射量の変動に対する各気象要素の変化の寄与について

地表面における下向き短波放射フラックス（以降は地表面短波放射と呼ぶ）の変動に対する雲（光学的厚さと雲量）、エアロゾル（光学的厚さ）、水蒸気（積算量）のそれぞれの寄与を定量化するために、PRF の概念を導入して定式化した。PRF は常に負であり、太陽放射量が多いほど、また気象要素の値が小さいほど絶対値が大きい。詳細な放射伝達計算コードを用いて、中国を対象に1月(図3上)と7月(図3下)の雲の光学的厚さによるPRFを計算した。使用したデータはISCCPプロダクト（雲の光学的厚さと雲量）、MODISプロダクト（エアロゾルの光学的厚さ）、ECMWF客観解析データ（可降水量）である(2002年から2005年までの平均)。この図から地表面短波放射の変動は、雲特性・エアロゾル特性（量や吸収の度合い）・水蒸気量の季節および地理的変動の組み合わせが複雑に絡んで決定されることがわかるが、PRFを用いると比較的簡便に気象要素の寄与を求めることができることが明らかとなった。

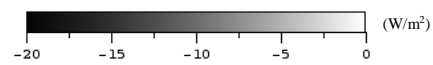


図3 東アジアでの雲の光学的厚さのPRF (Kawamoto and Hayasaka 2008)

(3) アマゾンと中国の雲内部構造の違い

この節では、雲内部の構造を見ることができる能動型センサーの利点を示す。CloudSat衛星のCPR(Cloud Profiling Radar)データを用いてCFODD (Contoured Frequency by Optical Depth Diagram) 解析のアプローチ(業績欄のSuzuki et al. 2010を参照)を行った結果を図4に示す。CFODDは横軸にレーダ反射率(Z_e)、縦軸に断熱雲モデルから得られた雲の光学的厚さ(τ)を取り、各ビンにおける頻度を示

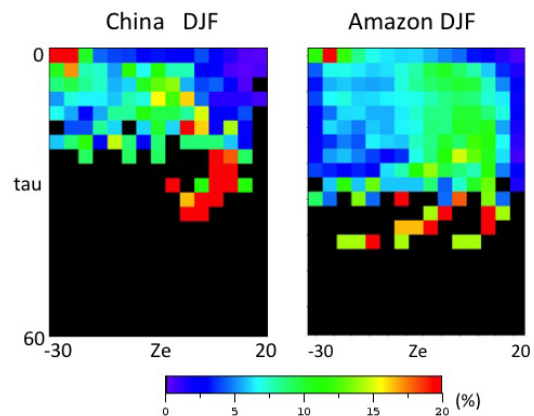


図4 DJFの中国とアマゾンでのCFODD (Kawamoto and Suzuki, submitting)

したもので、一層の雲の鉛直構造や放射特性を調べるには非常に適した解析法である。この図は N_c が少ない場合の例を示しているが、中国の方がより薄い雲で降雨が起きていること、アマゾンの方が高い降雨効を示すことがわかる。紙幅の関係で割愛したが、異なる N_c 範囲毎にCFODDを描くと、雲粒子の併合とともに N_c が減少し、降雨が生じ始めることが例証される。

(4)水雲特性の振る舞いに関する数値モデリング研究

τ と r_e の相関の統計的動態の違いをもたらす原因を探るために、ビン法を導入した数値モデリングのアプローチを採用した。 τ - r_e 相関の形状には2種類が確認されており、1つは τ の値が小さい時に正の相関、大きくなるにつれて負の相関になるもの（ハイヒール型と呼ばれる。図4上）で、もう1つは概して正の相関を示すもの（図4下）である。異なる条件下で計算された数値モデル出力を解析することによって、 τ - r_e 統計の違いはエアロゾルの粒径スペクトルの違いによってもたらされていることが明らかになり、雲粒子の活性化過程についての情報を持っていることが示された。

CloudSat 衛星は打ち上げから5年が経とうとしており、同時期に打ち上げられたCALIPSO 衛星とともに、能動型衛星リモートセンシングに新たなフェイズを持ち込み、新規的な多くの結果をもたらしたが、今からは数年のアーカイブデータを基にクライマトロロジーとしての解析が多く報告されるようになると思われる。

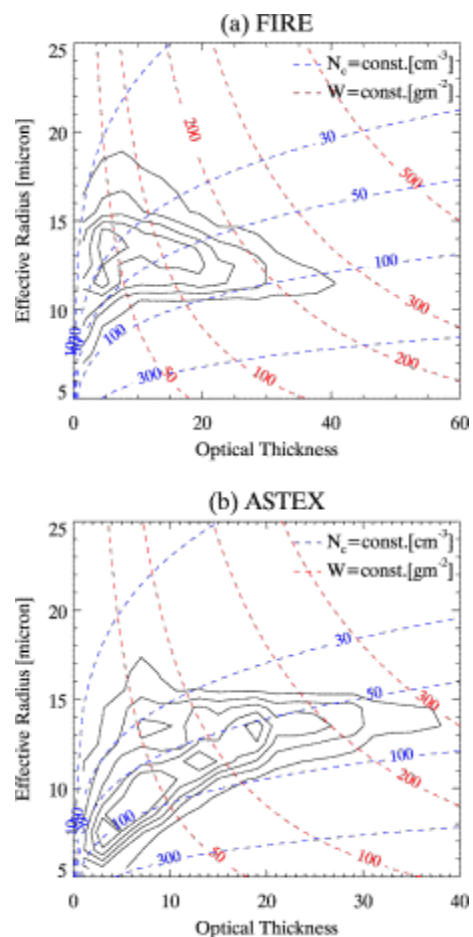


図4 τ - r_e 相関の違いの様子 (Suzuki et al. 2010)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計12件)

研究代表者(河本)と研究協力者(鈴木)の業績を以下に示す。

① Kawamoto, K. and T. Hayasaka, Cloud and aerosol contributions to variation in shortwave surface irradiance over East Asia in July during 2001 and 2007. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer* 112, 329–337, (2011). (査読有り)

<http://naosite.lb.nagasaki-u.ac.jp/dspace/handle/1>

0069/24122

② Kawamoto, K. and T. Hayasaka, Geographical features of changes in surface shortwave irradiance in East Asia estimated using the potential radiative forcing index. *Atmospheric Research* 96, pp. 337-343. DOI information: 10.1016/j.atmosres.2009.09.016, (2010). (査読有り)

<http://naosite.lb.nagasaki-u.ac.jp/dspace/handle/10069/22457>

③ Suzuki, K., T. Y. Nakajima, and G. L. Stephens, Particle growth and drop collection efficiency of warm clouds as inferred from joint CloudSat and MODIS observations. *J. Atmos. Sci.*, **67**, 3019-3032, (2010). (査読有り)

④ Suzuki, K., T. Nakajima, T. Y. Nakajima and G. L. Stephens, Effect of the droplet activation process on microphysical properties of warm clouds. *Environ. Res. Lett.*, **5**, 024012. doi:10.1088/1748-9326/5/2/024012, (2010). (査読有り)

⑤ Suzuki, K., T. Nakajima, T. Y. Nakajima and A. P. Khain, A study of microphysical mechanisms for correlation pattern between droplet radius and optical thickness of warm clouds with a spectral bin microphysics cloud model. *J. Atmos. Sci.*, **67**, 1126-1141, (2010). (査読有り)

⑥ Kawamoto, K. and T. Hayasaka, Introducing Potential Radiative Forcing (PRF) for quantifying the Earth radiation budget. AIP Conference Proceedings, 1100(1), pp.541-544, (2009). (査読有り)

<http://naosite.lb.nagasaki-u.ac.jp/dspace/handle/10069/21980>

⑦ Suzuki, K., and G. L. Stephens, Relationship between radar reflectivity and the time scale of warm rain formation in a global cloud-resolving model. *Atmos. Res.*, **92**, 411-419, (2009). (査読有り)

⑧ Suzuki, K., and G. L. Stephens, A possible use of multi-sensor satellite observations for inferring the drop collection efficiency of warm clouds. *SOLA*, **5**, 125-128, (2009) (査読有り)

⑨ Kawamoto, K., and T. Hayasaka, Relative contributions to surface shortwave irradiance over China: A new index of potential radiative forcing, *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L17809, doi:10.1029/2008GL035083, (2008). (査読有り)

<http://naosite.lb.nagasaki-u.ac.jp/dspace/handle/10069/22497>

⑩ Kawamoto, K. Effect of precipitation on water cloud properties over China *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L20811, doi:10.1029/2008GL035052, (2008). (査読有り)

<http://naosite.lb.nagasaki-u.ac.jp/dspace/handle/10069/20923>

[学会発表] (計 8 件)

① Kawamoto, K. and K. Suzuki, Vertical characteristics of liquid hydrometers in view of column cloud droplet number, A-Train symposium, 2010, Oct. 26, New Orleans, LA, USA

② Kawamoto, K. and T. Hayasaka

Temporal and spatial variations of atmospheric (clouds and aerosols) contributions to shortwave surface irradiance in East Asia.

2010年6月28日, AMS Cloud and Radiation meeting, Portland, OR, USA

③ 河本和明、早坂忠裕

東アジアにおける短波放射変動に対する雲・エアロゾル・水蒸気の寄与の地理分布 日本気象学会秋季大会 2009年11月26日 福岡

④ Kawamoto, K. and T. Hayasaka,

Applying the Index of Potential Radiative Forcing to Quantify Relative Contributions of Atmospheric Parameters to the Surface Shortwave Irradiance, International Association of Meteorology and Atmospheric Sciences, 2009. Jul. 22, Montreal, Canada

⑤ Kawamoto, K. and T. Hayasaka,

Estimating the contributions of atmospheric parameters on the surface shortwave irradiance changes in East Asia, International Symposium on Atmospheric Light Scattering and Remote Sensing, 2009. Jul. 13, Xian, China

⑥ 河本和明、早坂忠裕

地表面短波放射量変動への気象要素の相対的寄与 日本気象学会秋季大会 2008年11月21日 仙台

⑦ K. Kawamoto and T. Hayasaka,

Introducing Potential Radiative Forcing (PRF) for quantifying the Earth Radiation Budget, International Radiation Symposium, 2008. Aug. 5, Foz do Iguas, Brazil

⑧ K. Kawamoto and T. Hayasaka,

Potential Radiative Forcing to the surface shortwave irradiance over China, International Conference on Cloud and Precipitation, 2008. Jul. 8, Cancun, Mexico

[その他]

ホームページ等

http://www.env.nagasaki-u.ac.jp/kyouiku/shoukai_66.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

河本 和明 (KAWAMOTO KAZUAKI)
長崎大学・環境科学部・准教授

研究者番号: 10353450

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号:

研究協力者

鈴木健太郎 (SUZUKI KENTAROH)

米国・コロラド州立大学大気科学部・リサーチサイエンティストII