

平成21年5月25日現在

研究種目：基盤研究（B）  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18310006  
 研究課題名（和文） 高精度全球放射収支推定のための雲のマイクロ・マクロ物理量の衛星・地上同時観測研究  
 研究課題名（英文） Observation study of micro- and macro-properties of clouds for global estimate of radiation budget  
 研究代表者  
 氏名（ローマ字）：高村 民雄（Takamura Tamio）  
 所属機関・部局・職：千葉大学・環境リモートセンシング研究センター・教授  
 研究者番号：40272356

## 研究成果の概要：

本研究は、放射収支精度向上のために、雲の内部構造を含むマイクロ・マクロなパラメータを、衛星観測・地上観測の双方から求め、比較検討した。その結果、雲の3次元的な構造が、その光学的厚さの推定精度に大きな違いを与えることを明らかにした。また、SKYNET 沖縄辺戸岬観測施設で行われた集中観測では、これまでの多様な雲・エアロソル計測器材に加え、新たに雲レーダを用いて観測を行った。これによって、レーダによる有効粒径と衛星計測の結果が水雲では比較的良く一致することを示した。しかし、氷晶雲では必ずしも十分でなかった。また、同時計測されたエアロソル散乱係数や雲水量との関係を解析すると、エアロソルの間接効果が認められた。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	5,900,000	1,770,000	7,670,000
2007年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
2008年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
年度			
年度			
総計	14,900,000	4,470,000	19,370,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学

キーワード：地球温暖化

## 1. 研究開始当初の背景

地球の“温度”は、生命生存環境の基盤であり、その根幹は太陽エネルギーにある。こうした“温度”は、大気および地表表層の環境因子が複雑に関与して決定されていることから、地球温暖化に深く関係して、多様な研究が推進されている。しかし、こ

れまでの研究では、最も根幹をなす地表面での下向き日射量の衛星データによる推定で、地域により大きな誤差があることが明らかとなっている。様々な要因によるが、なかでも雲・エアロソルの推定に関して、その微物理パラメータの推定誤差の可能性が最も高いと予想されている。特に雲

は時空間的に変動が激しく、衛星観測視野内の不均質が解析結果に影響を与えることは容易に予想される。

一方、衛星データによる推定の精度検証のための地上観測においても、このような雲の特徴は観測データのバラツキを発生させる。衛星の空間解像度を上げると、地上観測との空間的対応はより厳密になる反面、雲の時空間的な変動がより顕著な問題として出てくる。検証精度を上げるには、単に観測器材の絶対精度を向上させるだけでは改善されない雲自身の特徴が含まれており、これらの詳細な検討が必須である。

本研究では、これまで不十分な精度であった雲（相互作用としてのエアロソルを含む）の放射効果の評価に関する精度に関し、雲自身の立体構造を含む多様な観点から衛星・地上観測を行い、放射効果評価に於けるパラメータである有効雲粒径、光学的厚さについて検討する。衛星データと、既に展開している地上観測網（SKYNET）の多様な器材からの情報を総合して解析を行うことにより、推定時の誤差要因となる諸問題を解決することを目指す。

## 2. 研究の目的

この研究では、次の3つの具体的な目的を設定して実行した：

(1) 雲の立体構造が微物理特性（マイクロ特性）の推定に与える影響評価

推定精度における最大の誤差要因は、雲の微物理特性（光学的厚さ、有効粒径、非均質性等）の不十分な把握である。研究チームによって開発された95GHz FMCWレーダを用いて、雲内部構造の観測を含めた雲の観測を行い、雲の発達過程解析を考慮した誤差要因の解明を図る。

(2) 雲の非均質特性（マクロ特性）が雲

解析アルゴリズムに与える影響評価

様々な非均質状態（雲頂の幾何学的凹凸、多層構造、雲内の雲粒径・雲水の非均質分布等）の雲では、衛星データの解析アルゴリズムの妥当性が問題となる。この点を、複数衛星同時観測等を利用して検討する。

(3) 雲、エアロソルの同時観測による相互作用の解明

凝結核としてのエアロソルの雲生成への関与を、雲レーダ、ライダー等の同時観測・複合解析から統計的に明らかにする。

## 3. 研究の方法

衛星データの雲解析において雲の3次元構造が雲微物理量推定に与える影響を評価するために、異なる衛星天頂角を持つ衛星の同時観測データを利用する。同一ターゲットに対する衛星の同時観測の頻度は少なく、ここでは高精度の放射収支を求める観点から静止衛星を基本衛星とする。この基本衛星に対して比較参照のために極軌道衛星を利用し、本研究ではMODIS/TERRA、AQUAを主として採用する。基本衛星は、時間分解能に優れているが使用チャンネル数や空間分解能の点で軌道衛星に劣るので、解析精度に問題があり、これを極軌道衛星の多チャンネルデータの解析結果と比較し検証する。

一方、衛星天頂角の違いによる雲頂構造の違いが雲パラメータ推定へ与える影響を複数衛星からの同時撮影情報で検討する。これに、FMCW雲レーダを利用した地上からの雲の鉛直断面構造の観測を加えることによって、その関連を評価する。本研究のもっとも大きな特徴の一つである。雲に関する多様な観測微物理量およびその立体構造を通して総合的に検討し、最終的に放射収支へのこれらの影響を評価し高精度化につなげる。雲・エアロソル相互作用もこの中で検討される。

#### 4. 研究成果

本研究では、最初の目的である雲の内部構造の観測について、新開発の雲レーダを用いて明らかにしてきたので報告する。この装置は、連続発信型(FMCW方式)bi-static方式のものであり、低出力ながら高い時間空間分解能と可搬性、低消費電力を実現したものである。本器材を、KUNET辺戸岬観測サイトに設置して、2008年2月～4月の間集中観測を実施した。本サイトには、同時にエアロソル用ライダー等が併設・運転されており、エアロソルと雲に関する多様な観測が行われている。

まず、集中観測期間中の辺戸岬観測所周辺での雲の発現率を見ると、月ごとの違いが明確に現れ、6km以上の高層の雲では2月から4月にかけて徐々に雲頂が高くなる傾向が見られる。一方2km以下の低層の雲では、発生頻度が逆に小さくなっている。これは、季節風による雲の発生が次第に小さくなることに対応していると思われる。雲内の強度分布も高い雲の発生頻度が増えることが分かった。一方、雲からのレーダ反射強度を計測し、雲粒子濃度を仮定すると、平均的な雲粒径が推定される。衛星データとの比較を、期間中解析に適した4ケース(4日分)解析した。雲頂輝度温度が273K前後の3ケースの雲では、衛星での推定値とレーダ推定値はよく一致することが示されたが、雲頂輝度温度が263Kである1ケースでは、大きな違いが見られた。衛星による推定パラメータから予想されるLWP値と平成されたマイクロ波放射計による計測値を比較すると、平均粒径が良く合う3ケースについて大きな違いが見られ、平均粒径の大きく異なる残りのケースで比較的一致する矛盾する結果となった。これは、レーダ及びマイクロ波放射計のそれぞれについて、検定手法を改善する必要があることを示唆

している。同時計測した地上での日射量との比較では、離散雲での対応は主要な日射を得る方向とレーダ及びマイクロ波放射計の観測視野方向が異なることから、その異方性の影響で一致度が悪いことが分かった。従って、こうした積雲系の雲に於ける比較は、同時性や空間一様性を十分確保しておく必要があることが認識される。

雲の立体構造、特に雲頂の衛星視野内に於ける非均質がもたらす影響を、雲パラメータ(主として光学的厚さ、COD)にどのような影響を与えるかについて検討した。同一ターゲットを異なる衛星により同時計測して結果を比較検討した。ここでは、東シナ海の海上雲を、Terra/MODIS(軌道衛星;空間分解能1km)及びGMS-5/SVISSR(静止衛星;可視空間分解能1km、赤外分解能空間5km)の同時撮影データで比較検討した。対象雲に対する太陽天頂角が、両衛星で常と同じであるのに対して、衛星天頂角は、同一場所の雲であれば静止衛星では同じであるのに対して、軌道衛星は軌道毎に異なる。このため、異なる両衛星の観測視野方向から得られる輝度によるCOD推定値は、雲の表面状態や立体構造に影響を受ける(完全に同一視野、均質平行平面雲であれば、いずれの衛星でも同一CODが得られる)。

その結果、幾つかの新しいことが明らかとなった;① 同一衛星天頂角に於けるCODは、水雲では違いが僅少ななのに対して、氷雲に於ける違いが顕著であった。これは、氷雲のパラメータ推定に於けるアルゴリズムの違いを反映している可能性がある。この影響を除去するために、次に水雲に限定して検討した。その結果、② 雲の上端に於ける非均質性がCOD推定に重要な影響を与えていることが分かった。これは、雲上面の凹凸による影の影響が主体であり、太陽天頂角が増大するとこの効果が顕在化し、

影によるCODの過小評価やその逆の傾向が認められた。熱赤外チャンネルによる雲頂輝度温度の計測から、前述と同様、GMS-5/SVISSRとTerra/MODISの比較では、連続した隣り合う雲の輝度温度比で0.5K/kmの時、CODで30%を超える違いが認められるものが存在した。雲底高度が大気の成層状態を反映して比較的均一なのに対して、雲頂高度は雲の発生原因や発達状態の違いによって異なっており、太陽天頂角によっては、大きな推定誤差が生まれることを示している。CODの大きさによって放射に与えるこの誤差の効果は異なり、薄い雲ほどその効果は顕著に表れることから、放射収支推定における雲の影響評価では注意する必要がある事が明らかとなった。

エアロソルの間接効果の解明の観点から、雲レーダと関連エアロソル観測を利用した解析が行われた。雲レーダによる有効雲粒の推定、マイクロ波放射計による可降水量・雲水量計測、凝結核計(CCN計)による凝結核数計測、光散乱法によるエアロソルの粒径分布計測及び散乱係数計測などを総合して解析を行った。その結果、地上に於けるエアロソルの増加が上空の雲粒径(水雲)と逆相関となっていることが認められた。およそ30%の積算モードエアロソル増加が有効雲粒径を15%程度減少させていることが認められる。さらに、50g/m<sup>2</sup>程度の雲水量別に見ても、同様の傾向はあり、雲水量の多い厚い雲ほどその傾向が強い傾向が認められる。間接効果を示すIE(= -dlog(r<sub>eff</sub>)/dlog(K<sub>sca</sub>))で見ると、この季節の雲とエアロソル(凝結核)の関係では0.04から0.18程度の値になることが示された。

雲レーダによる雲の内部構造の計測は、雲解析に強力なツールを提供しており、今回の集中観測を通じて、上記に述べたように、新しい知見を提供することが出来た。

しかし、同時に課題も幾つかある。雲は時間変動と空間変動が激しく、他の観測物理量と比較検討する場合に、十分注意する必要がある。雨レーダに比較して雲レーダは融解層がはっきりせず、マイクロ波放射計による雲水量との対応がつけにくい。薄い雲では、雲水量の推定精度の相対誤差の拡大と相俟って、日射・放射に対する影響が大きい反面、相対精度が悪くなる傾向があり、それぞれの観測・解析精度の向上も引き続き必要であることが分かった。

#### 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14件)

- ①山口潤、鷹野敏明、他7名、2009: FMCW ミリ波雲レーダ FALCON-I のレーダ反射因子の評価, 電気学会論文誌, A (IEEJ Trans.), FM, Vol. 129, No. 4, 2009. (査読有り)
- ②阿部英二、鷹野敏明、高村民雄、他5名、2009: ミリ波雲レーダ FALCON-I でのドップラ観測, 電気学会論文誌 A (IEEJ Trans.), FM, Vol. 129, No. 4. (査読有り)
- ③ Khatri, P. and T. Takamura, 2009: An algorithm to screen cloud-affected data for sky radiometer data analysis, J. Meteorol. Soc. Japan, 87 (1), 189-204. (査読有り)
- ④ Takamura, T. T. Y. Nakajima, T. Nakajima, R. T. Pinker, 他6名, 2009: Aerosol and Cloud Validation System Based on SKYNET Observations : Estimation of Shortwave Radiation Budget Using ADEOS II/GLI Data, Journal of The Remote Sensing Society of Japan Vol.29 No.1, pp.40-53. (査読有り)
- ⑤ Nakajima, T., T.Y. Nakajima, T. Takamura, 他4名, 2008: A Study of Aerosol and Cloud Information Retrievals from CAI Imager on Board GOSAT Satellite, Journal of The Remote Sensing Society of Japan, Vol. 28, No2, pp.178-189(in Japanese with English abstract). (査読有り)
- ⑥ 鷹野敏明、高村民雄、中島映至、他8名、2008: 高感度 95 GHz ミリ波雲レーダの開発とその性能—感度と空間分解能、電気学会論文誌 A, FM, 128 巻 4 号, 2008 (IEEJ Trans.FM, Vol.128, No.4, 2008, in Japanese), 257-262. (査読有り)
- ⑦ Nakajima, T., T. Takamura, 他17名,

2007: Overview of the Atmospheric Brown Cloud East Asian Regional Experiment 2005 and a study of the aerosol direct radiative forcing in east Asia, *J. Geophys. Res.*, 112, D24S91, doi:10.1029/2007JD009009. (査読有り)

- ⑧ **Takamura, T., T. Nakajima**, 他 7 名, 2007: Aerosol radiative characteristics at Gosan, Korea, during the Atmospheric Brown Cloud East Asian Regional Experiment 2005, *J. Geophys. Res.*, 112, D22S36, doi:10.1029/2007JD008506. (査読有り)
- ⑨ **Nakajima, T. Y.**, R. Oki, 2007: Satellite measurements from VIS-IR imagers and Microwave sensors in the weather and climate studies. *Tenki*, **54**, 701-704. (査読有り)
- ⑩ Dim, J. R., **T. Takamura, T. Y. Nakajima**, 他 3 名, 2007: Influence of inhomogeneous cloud fields on optical properties retrieved from satellite observations, *J. Geophys. Res.*, 112, D13202, doi:10.1029/2006JD007891. (査読有り)
- ⑪ **Pandithurai, G., R.T. Pinker, T. Takamura**, 他 2 名, 2007: Seasonal asymmetry in diurnal variation of aerosol optical characteristics over Pune, western India, *Journal of Geophysical Research*, 112, D08208, doi:10.1029/2006JD007803. (査読有り)
- ⑫ **Takano, T., T. Takamura, T. Nakajima**, 他 1 3 名, 2006: Observations of Clouds in the Pacific Ocean with the Millimeter-wave FM-CW Radar, *International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, r329. (査読なし)
- ⑬ Suzuki, K., **T. Nakajima, T. Y. Nakajima**, and A. Khain, 2006: Correlation Pattern between Effective Radius and Optical Thickness of Water Clouds Simulated by a Spectral Bin Microphysics Cloud Model. *SOLA*, **2**, 116-119. (査読有り)
- ⑭ Fukagawa, S., **T. Takamura**, 他 5 名, 2006: Characterization of seasonal and long-term variation of tropospheric aerosols in Chiba, Japan. *Atmospheric Environment*, 40(12), 2160-2169. (査読有り)

[学会発表] (計 2 4 件)

- ① 山口潤、**鷹野敏明、高村民雄、G. Pandithurai、中島映至**、他 3 名、2009: 「95GHz ミリ波 FMCW 雲レーダを用いた辺戸観測における雲領域評価」、日本大気電気学会第 80 回研究発表会 No.46, 2009 年 1 月 9 日, 東京理科大学 (東京都) .
- ② Pradeep K. and **T. Takamura**, 2008: A method to screen cloud affected data for sky radiometer data analysis, 2008 年度日本気象学会秋季大会講演予稿集, B212, P158, 2008

年 11 月 19 日～21 日, 仙台国際センター.

- ③ **G. Pandithurai, T. Takano, T. Takamura**, 他 3 名, 2008: An observational estimate of the aerosol indirect effect using ground-based remote sensing, 2008 年度日本気象学会秋季大会講演予稿集, B210, P156, 2008 年 11 月 19 日～21 日, 仙台国際センター.
- ④ Sugimoto, N., **T. Takamura**, 他 11 名, Lidar network observations of tropospheric aerosols, *Proceedings of the 14th CEReS Int'l Symposium and SKYNET Workshop on "Remote Sensing of the Atmosphere for Better Understanding of Climate Change"*, 203, Nov. 13-14 2008, Keyaki-Hall, Chiba University.
- ⑤ Pradeep K., and **T. Takamura**, Separation of cloud-affected data for PREDE sky radiometer data analyses and then study of aerosol climatology in an urban atmosphere of Chiba, Japan, *Proceedings of the 14th CEReS Int'l Symposium and SKYNET Workshop on "Remote Sensing of the Atmosphere for Better Understanding of Climate Change"*, 152-155, Nov. 13-14 2008, Keyaki-Hall, Chiba University.
- ⑥ H. Takenaka, **T.Y. Nakajima, T. Takamura, T. Nakajima, R.T. Pinker**, 他 3 名, Estimation of radiation budget using ADOES-II/GLI, *Proceedings of the 14th CEReS Int'l Symposium and SKYNET Workshop on "Remote Sensing of the Atmosphere for Better Understanding of Climate Change"*, 73-76, Nov. 13-14 2008, Keyaki-Hall, Chiba University.
- ⑦ **G. Pandithurai, T. Takano, T. Takamura**, 他 3 名, Aerosol indirect effect studies at Cape Hedo during spring campaign-2008, *Proceedings of the 14th CEReS Int'l Symposium and SKYNET Workshop on "Remote Sensing of the Atmosphere for Better Understanding of Climate Change"*, 53-56, Nov. 13-14 2008, Keyaki-Hall, Chiba University.
- ⑧ **Takamura, T.**, and **T. Nakajima**, 2008: SKYNET and its activities for climate change monitoring on aerosol and cloud through ground observation network, ABC regional meeting, AIT, Bangkok, May 26-27, 2008.
- ⑨ **Takamura, T., T.Y. Nakajima, T. Nakajima, R. Pinker**, 他 6 名, 2008: Estimation of radiation budget using GLI, and Construction of aerosol and cloud validation system based on SKYNET observations, GLI workshop at ATAMI, Jan.22-24, 2008.
- ⑩ **Takano T., T. Takamura, T. Nakajima**, 他 8 名, Performance of a Developed Low-Power and High-Sensitivity Cloud Profiling Millimeter-wave Radar FALCON-I Asia-Pacific Microwave Conference 2007,

- WE-P2-H5, 2007年12月12日、バンコク(タイ).
- ⑪ 松本寛生、**高村民雄**、他2名、2007: Sky radiometerによるエアロソルの光学的特性の解析、2007年度日本気象学会秋季大会講演予稿集、Vol. 92, P154, p406、2007年10月14日～10月16日、北海道大学、札幌。
- ⑫ 竹中栄晶、**高村民雄**、**中島映至**、他8名、2007: GMS/VISSR データ再解析～放射収支の推定～、2007年度日本気象学会秋季大会講演予稿集、Vol. 92, A310, p95、2007年10月14日～10月16日、北海道大学、札幌。
- ⑬ **T. Takamura, T. Nanakjima**, 他7名、2007: Radiative effect of aerosols during the ABC EAREX2005, AOGS 4<sup>th</sup> annual meeting, AS12/Climate Effects of the Atmospheric Particle System: Aerosols and Clouds, Jul.31-Aug.4, Bangkok, Thailand.
- ⑭ **Takano.T, T.Takamura, T.Nakajima** 他8名、2007: Performance of FALCON-I developed low-power and hi-sensitivity cloud profiling FM-CW RADAR at 95GHz, 6<sup>th</sup> Millimeter and Sub-millimeter Wave Symposium 2007, IV-2, 2007年6月27日、ハリコフ(ウクライナ)
- ⑮ **T. Takano, T. Takamura, T. Nakajima**, 他12名、2006: Observations of Cloud Properties Using the Millimeter-Wave FM-CW Radar of Chiba Univ., Asia-Pacific Microwave Conference 2006, Yokohama(JAPAN), Dec.13, WEOF-52.
- ⑯ J. Yamaguchi, **T. Takano, T. Nakajima, T. Takamura**, 他4名、2006: The development of FMCW 95 GHz MMCR, Asia-Pacific Microwave Conference (APMC) 2006, Yokohama (JAPAN), Dec.13, 2006.
- ⑰ 中西裕治、**鷹野敏明**、**高村民雄**、**中島映至**、他8名、2006: FM-CW 雲レーダ感度向上に於けるコヒーレンシーの検討、第32回リモートセンシングシンポジウム講演論文集、P73-76、2006年11月9-10日、情報通信研究機構研究本館4階会議室、小金井。
- ⑱ Abe, H., **T. Takano, T. Takamura, T. Nakajima**, 他4名、2006: Development of the Monostatic FM-CW Radar at 95GHz, ISAP (International Symposium on Antenna and Propagation), 11/1-4, Singapore 2006
- ⑲ **T. Takano, T. Takamura**, 他12名、2006: Observation of clouds on MIRAI in the Pacific Ocean with the millimeter-wave FM-CW radar at 95 GHz, 11-14 September 2006, *Proceedings of SPIE* Vol. #6362, Remote Sensing, An SPIE Europe Event 11 - 14, September 2006, Stockholm International Fairs, Stockholm, Sweden
- ⑳ **Takano, T., T. Takamura**, 他8名、2006: Performance of the Developed Low-Power and High-Sensitivity Cloud Profiling FM-CW Radar at 95GHz, Progress in Electromagnetics

- Research Symposium (PIERS), 4A3-R6417, Tokyo (JAPAN), 4A3, August 5, 2006
- ㉑ NAKANISHI, Y. **T. Takano, T. Takamura, T. Nakajima**, 他4名、2006: Observations of Cloud Properties Using the Millimeter-Wave FM-CW Radar of Chiba Univ., 2nd Asia-Pacific Radiation Symposium (APRS 2006), Kanazawa (JAPAN), August 1.
- ㉒ Nakanishi, Y., **T. Takano, T. Takamura, T. Nakajima**, 他4名、2006: Coherent time in cloud analysis using 95GHz FM-CW cloud profiling radar. Proceedings of "The 2<sup>nd</sup> International Conference on Land cover/Land use study using Remote Sensing/GIS and the GOF-C-GOLD regional capacity building meeting in Mongolia", 41 - 44, 08-09<sup>th</sup> June 2006 Ulaanbaatar Mongolia.
- ㉓ **鷹野敏明**、**高村民雄**、**中島映至**、他14名、2006: 「みらい」搭載ミリ波雲レーダによる北極海および太平洋での雲観測、日本気象学会 2006年度春季大会講演予稿集、A453(P86)、2006年5月21日～24日、つくば国際会議場。
- ㉔ **高村民雄**、**中島映至**、他4名、2006: SKYNETによるエアロソル・雲・放射観測網の構築。日本気象学会 2006年度春季大会講演予稿集、A458(P91)、2006年5月21日～24日、つくば国際会議場。

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

高村民雄 (Takamura Tamio)  
千葉大学・環境リモートセンシング研究センター・教授  
研究者番号: 40272356

### (2) 研究分担者

鷹野敏明 (Takano Toshiaki)  
千葉大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 40183058  
中島孝 (Nakajima Takashi)  
東海大学・情報デザイン工学部・准教授  
研究者番号: 70408029  
中島映至 (Teruyuki Nakajima)  
東京大学・気候システム研究センター・教授  
研究者番号: 60124608

### (3) 連携研究者

Rachel Pinker University of Maryland,  
Dept. Atmospheric Physics, Professor  
Govindan Pandithurai Indian Institute  
of Tropical Meteorology Senior  
Researcher.