

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 13 日現在

機関番号：11301

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2010～2014

課題番号：22106004

研究課題名（和文）雲・放射エネルギーを介したモンスーンアジアの大気海洋相互作用

研究課題名（英文）Air-Sea Interaction in Monsoon Asia through Cloud and Radiation Processes

研究代表者

早坂 忠裕（Hayasaka, Tadahiro）

東北大学・理学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：40202262

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 81,610,000円

研究成果の概要（和文）：衛星観測データ、船舶観測データの解析、および雲解像モデルを用いて日本周辺海域から北太平洋を対象に、海面熱フラックスと雲微物理特性、雲のマクロ特性の関係を重点的に解析した。その結果、海面熱フラックスが大きいと凝結過程による雲粒の成長が卓越し、海面熱フラックスが小さい、あるいは負の場合には衝突併合過程で大きな雲粒が形成されることが示された。また、衛星搭載ライダー・雲レーダーの観測データ解析から、上層雲が下層雲の発達を抑制することが定量的に示された。

研究成果の概要（英文）：A relationship between micro and macro physical properties of cloud and heat flux at the sea surface was studied by using satellite observation data, ship-borne observation data, surface observation data, and numerical simulation with a cloud-resolving model. The results show that condensation process is dominant in the growth of cloud droplet over the area where heat flux at the sea surface is large, while collision process is important for the droplet growth in the other area. It was shown from the space-borne lidar and cloud-radar that overlapping clouds suppress the underlying low level cloud development.

研究分野：大気物理学

キーワード：雲 放射 大気海洋相互作用 衛星観測 数値シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

気候変動メカニズムを解明する上で最大の不確定要因の一つとして、現実の雲物理特性とその放射特性が十分解明されていないことがある。海洋上の雲の形成、維持、消滅過程は海面からの潜熱、顕熱フラックス、総観規模の力学場と複雑に絡み合っている。特に雲を含む大気の大気非断熱加熱冷却過程は平行平板状の単純な雲については評価されてきたが、不均質な現実の雲については、複雑な時空間変動を伴う雲水(氷)量や雲粒の粒径分布の把握が不十分なこと、また、そのような雲の放射特性を正確に計算する技術が十分ではなかったことが研究進展のネックになり、十分な精度で評価できていない。

また、近年は衛星観測技術が大きく進展し、可視赤外のイメージャーはもちろんのこと、ライダー、雲レーダー等の能動型センサーを搭載した衛星のデータも利用できるようになり、雲を3次元で把握することが可能になってきた。雲のシミュレーションを行なう雲解像モデルの進展も目覚ましく、衛星観測と直接比較可能な空間解像度で計算が可能になっている。さらに、気候変動の研究においては、大気の研究と海洋の研究の連携協力が進展してきており、大気海洋の研究は新たな展開期を迎えている。このような背景の下、本研究は実施された。

2. 研究の目的

雲の物理特性を観測および数値シミュレーションにより解明する研究者が協力し、対流圏のエネルギーフローにおける雲・放射過程の役割を解明しようというのが本課題の狙いである。他の計画班との協力により、中緯度大気海洋相互作用のエネルギーフローの全容解明に資する。特に、日本周辺海域から北太平洋を対象に、海面熱フラックスと雲微物理特性、雲のマクロ特性の関係を重点的に解明する。

3. 研究の方法

雲・放射の船舶・地上観測のデータを用いて、日本周辺の雲物理特性と地表面(海面)放射収支の季節変動を解明する。次に、衛星観測データから、日本周辺海域の雲および夏季北太平洋全域の下層雲の雲物理特性(雲水量、雲氷量、雲粒有効半径、水蒸気量、雲の光学的・幾何学的厚さ、雲頂高度の水平分布)と海面の熱フラックスの関係を解明する。さらに雲解像モデルCRESSを用いて、雲の微物理過程(水滴と氷晶の区別や粒径分布等)のシミュレーションを行ない、その結果を衛星観測や船舶・地上観測と比較する。その際にモデルにおける放射過程や解像度の高度化も含めて改良を図る。衛星データ、特にライダー、雲レーダーの能動型センサーを搭載するCloudSat、CALIPSOデータから得られる雲の鉛直構造と詳細な比較を行なう。雲層内外の短波・長波放射過程を考慮し、放射エネ

ルギーの収束発散や潜熱の変化に伴う非断熱加熱の評価を行なう。

4. 研究成果

(1) 雲観測衛星(ISCCP、MODIS、CloudSat、CALIPSO)のデータセットから、日本近海・北西太平洋域を対象に雲の光学的厚さ、雲水量、雲氷量、雲粒有効半径、水蒸気量のデータ解析を行なった。衛星搭載能動型センサーである Cloudsat と CALIPSO から2種類の氷雲、過冷却の水雲、通常の水雲に分けて雲粒子のタイプ識別を行なう手法を確立し、データセットに適用した。また、雲の光学的・幾何学的厚さ、雲頂高度の水平分布、放射収支を定量的に評価するための複合センサーを用いた解析手法の改良を行なった。次に、雲解像領域大気モデルを用いて雲の微物理過程(水滴と氷晶の区別や粒径分布等)のシミュレーションを行うために放射過程を改良した。冬季の日本周辺の寒気の吹き出しに伴う雲の計算結果を衛星データと比較し、これらの雲についてはモデルによる計算結果の精度の妥当性を確認した。さらに、大気上端と地表面の放射収支について過去の船舶観測データや衛星観測のデータを用いて冬季の黒潮域及び黒潮続流域を対象に定量的な評価を行なった。その結果、冬季の黒潮域においては海面での短波・長波の放射収支はほぼバランスしており、顕熱と潜熱による海面から大気への熱の輸送が支配的であることが示された。

(2) 冬の日本周辺海域については、公募研究(A03-公募6)と協力して解析を実施し、次のような結果を得た。

① 黒潮～黒潮続流域(142E-150E, 35N-40N)の冬の海面乱流熱フラックスにはSSTが重要だが、海面で短波放射と長波放射がバランスしており、放射はSSTにはあまり影響していない。

CALIPSO/CloudSatの解析から、下層雲は30N付近以南では水、30N付近以北でも過冷

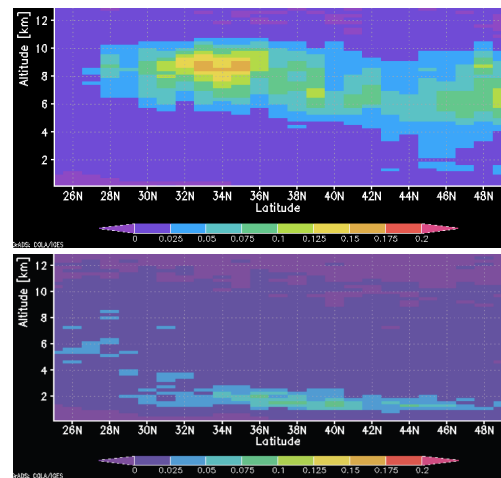


図1. 冬季日本周辺海域における氷雲(上)と氷雲(過冷却氷雲)の緯度-高度分布

却水の雲粒子が主であり、氷粒子はあまり見られない(図1)。

(3)夏の北太平洋中高緯度の下層雲の微物理特性と海面水温(SST)、海上気温(SAT)の関係について衛星データ解析と客観解析データから得られた結果は次のとおり。

北太平洋全域の平均で雲粒有効半径は $14.53\mu\text{m}$ となり、陸域や他の海域と比べて大きい。北太平洋を4分割して雲微物理特性の特徴を調べた結果、アリューシャン列島南の海域で有効半径の平均値が $15.65\mu\text{m}$ となり、他の海域よりも大きな値となった。この海域では $\text{SST}<\text{SAT}$ という関係が顕著である。

雲の光学的厚さ(COT)と雲粒有効半径(CDR)の関係から $\text{SST}>\text{SAT}$ の条件下では凝結による雲粒の成長が卓越し、衝突併合過程はあまり見られない。一方、 $\text{SST}<\text{SAT}$ の場合は、衝突併合過程による雲粒の成長が推測さ

れる(図2)。

この図には雲粒の等数密度線(左下から右上へ続く線)と等雲水量線(左上から右下へ続く線)があるが、観測データが等数密度線に添ってプロットされる場合には、雲粒の数は変化せずに雲粒が成長して光学的厚さが大きくなることを意味している。一方、等雲水量線に添う場合には、雲水量が一定なので、凝結による雲水量の増加は無く衝突併合によって雲粒の粒径が変化していると解釈できる。前者(図2の上図)はカリフォルニア沖の層積雲によく見られる例であり、後者(図2の下図)は北太平洋中高緯度中央部から西部に出現する下層雲でよく見られる。

三陸沖のヤマセ雲の海陸特性は風の収束の強弱や水蒸気の状態に依存している。この海域では南風が卓越すると湿潤な大気が冷たい海に移流することによって形成される海霧になるが、SSTとSATの関係から、ヤマセ雲は移流霧という単純な捉え方は適切ではないと思われる。すなわち、いわゆる $\text{SST}>\text{SAT}$ の場合が多々見られるが、気温と海面水温両方が低いと雲の成長は十分でなく、雲粒は小さくなり、幾何学的厚さも薄いままになると推測される。また、雲解像モデルCReSSによるヤマセ雲の数値計算結果から、放射による加熱・冷却が重要であることが示唆された。

夏季北太平洋では、中央部から西部にかけて大規模な上昇流があるために、上層雲が出現する頻度が高く、その結果、多層構造の雲が出現する。一方、下層雲の形成・維持・消滅過程においては雲頂の長波放射冷却が極めて重要である。そこで、CALIPSOとCloudSatのデータを用いて上層雲が下層雲に及ぼす影響を調べた。得られた結果は次のとおりである。夜間においては、上層雲の出現により下層雲の雲頂の放射冷却が抑制され、雲の発達を抑えられる。その結果、下層雲の幾何学的厚さが小さくなる。一方、昼間においては、上層雲は短波放射を遮るので、下層雲上部の短波放射吸収量を抑制する。その結果、下層雲の消滅過程が抑えられ、雲の幾何学的厚さは上層雲が無い場合と比べて厚くなる。昼と夜の差を取ると、夜間の長波放射冷却の抑制効果の方が大きく影響し、雲の幾何学的厚さの日変化が上層雲の出現によって抑制されることが示された。

(4)黒潮等、日本付近の暖流から大量の熱が大気に放出される要因には、特に冬季の中国大陸からの寒気の吹き出しが重要な役割を果たす。そこで、温位を用いて寒気質量の流出を解析した。その結果、北極で形成された寒気は、東アジアと北米大陸東部の2つの大きな流れとなって太平洋、大西洋にそれぞれ流出する。それにより、黒潮海域とメキシコ湾流海域が海から大気への大きな熱の放出減となることが定量的に示された。また、こ

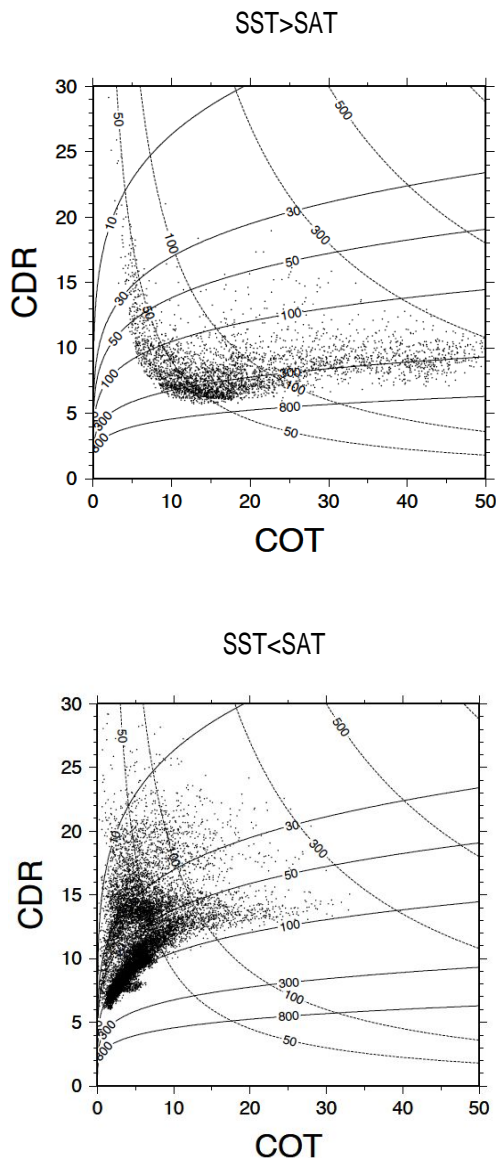


図2. 雲の光学的厚さ(COT)と雲粒有効半径(CDR)の関係。左下-右上の線は等雲粒数濃度線、左上-右下の線は等雲水量線を表わす。

これらの寒気の流出経路は地形の影響を受けていることも示された。

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47件)

K. Kawamoto, K. Suzuki, Distributional correspondence of 94-GHz radar reflectivity with the variation in water cloud properties over the northwestern Pacific and China, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, Vol.153, 2015, pp.38-48, DOI:10.1016/j.jqsrt.2014.10.012、査読有り

Hirakata, M., H. Okamoto, Y. Hagihara, T. Hayasaka, R. Oki, Comparison of global and seasonal characteristics of cloud phase and horizontal ice plates derived from CALIPSO with MODIS and ECMWF, J. Atmos. Ocean. Tech., Vol.31, 2014, pp.2114-2130, DOI:10.1175/JTECH-D-13-00245.1、査読有り

Saito, T., T. Hayasaka, Effects of Dust Aerosols on Warm Cloud Properties over East Asia and the Sahara from Satellite Data, J. Meteor. Soc. Japan, Vol.92A, 2014, pp.109-123, DOI:10.2151/jmsj.2014-A07、査読有り

Eguchi, N., T. Hayasaka, M. Sawada, The maritime-continental contrasts in the properties of low-level clouds: a case study of the summer 2003 Yamase cloud event, Adv.Meteorol. Vol.2014, 2014, Article ID 548091, <http://dx.doi.org/10.1155/2014/548091>、査読有り

Iwasaki, T., T. Shoji, Y. Kanno, M. Sawada, M. Ujiie, K. Takaya, Isentropic analysis of polar cold air mass streams in the northern hemispheric winter. J. Atmos. Sci., Vol.71, 2014, pp.2230-2243, DOI: 10.1175/JAS-D-13-058.1、査読有り

[学会発表](計58件)

K. Kawamoto, K. Suzuki, Characterizing Vertical Structure of Water Clouds using CloudSat and MODIS datasets, AMS 14th Conference on Cloud Physics/14th Conference on Atmospheric Radiation, 2014/7/9, Boston (USA)

早坂忠裕、片桐秀一郎、丸山拓海、吉岡真由美、岡本創、夏季北太平洋の下層雲に及ぼす上層雲の影響、日本気象学会2013年秋季大会、2013年11月21日、仙

台国際センター(宮城県・仙台市)
吉岡真由美、片桐秀一郎、早坂忠裕、坪木和久、榊原篤志、雲解像モデルCReSSを用いた夏季北西太平洋域の低層雲の再現実験日本気象学会2013年秋季大会、2013年11月21日、仙台国際センター(宮城県・仙台市)

早坂忠裕、丸山拓海、河本和明、海洋上の下層雲の物理特性、日本海洋学会2013年秋季大会、2013年9月19日、北海道大学(北海道・札幌市)

Maruyama, T. and T. Hayasaka: Microphysical properties of low clouds over the North Pacific Ocean, SPIE Asia-Pacific Remote Sensing Conference, 2012/10/29, 京都国際会館(京都府・京都市)

[図書](計1件)

早坂忠裕、岩淵弘信(編集) 日本気象学会、気象・気候学のための最新放射計算技術とその応用、2011、183

[産業財産権]

出願状況(計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

取得状況(計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

取得年月日:

国内外の別:

[その他]

特に無し。

6. 研究組織

(1)研究代表者

早坂 忠裕 (HAYASAKA, Tadahiro)
東北大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号: 40202262

(2)研究分担者

河本 和明 (KAWAMOTO, Kazuaki)
長崎大学・大学院水産・環境科学総合研究科・教授
研究者番号: 10353450

村山 利幸 (MURAYAMA, Toshiyuki)
東京海洋大学・大学院海洋科学技術研究
科・教授
研究者番号：5 0 2 0 0 3 0 8

江口 菜穂 (EGUCHI, Nawo)
九州大学・応用力学研究所・助教
研究者番号：5 0 3 7 8 9 0 7

岩崎 俊樹 (IWASAKI, Toshiki)
東北大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：8 0 3 0 2 0 7 4

坪木 和久 (TSUBOKI, Kazuhisa)
名古屋大学・地球水循環研究センター・教
授
研究者番号：9 0 2 2 2 1 4 0

(3)連携研究者

岩淵 弘信 (IWABUCHI, Hironobu)
東北大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号：8 0 3 5 8 7 5 4

岡本 創 (OKAMOTO, Hajime)
九州大学・応用力学研究所・教授
研究者番号：1 0 3 3 3 7 8 3