

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20540421

研究課題名(和文)

大気環境場と積雲の相互作用に関する研究

研究課題名(英文)

Interaction between a cumulus boundary layer and atmospheric environments

研究代表者：

篠田 太郎 (SHINODA TARO)

名古屋大学・地球水循環研究センター・助教

研究者番号：50335022

研究成果の概要(和文)：

雲解像モデル CReSS を用いた数値実験によって、中国華中域平野部上における日中の大気境界層の発達過程を示した。この過程において、乾燥対流境界層から forced cumulus 境界層へ、そして active cumulus 境界層への遷移過程を示した。Active cumulus の発生は自由対流高度の急激な低下の時刻と一致していた。自由対流高度の低下は、地上付近の相当温位の増加と逆転層下端の飽和相当温位の極小値の減少によるものであることを示した。

また、組織的な感度実験の結果から、初期条件において水蒸気量が多い場合、大気の安定度が小さい(不安定な)場合、地表面が湿っている場合に active cumulus の発生時刻が早くなることを示した。Active cumulus による水蒸気の鉛直輸送により、大気境界層は厚くなり、その上層における水蒸気量が増加することも示した。

研究成果の概要(英文)：

This study investigates the development of a cumulus boundary layer over land using idealized high-resolution numerical simulations with a focus on the onset of “active cumulus” and the effects of the following external factors: the initial amount of water vapor, static stability, and surface energy partition. In the control experiment, the cumulus boundary layer transitions from a condition in which only forced cumulus exists (forced cumulus boundary layer) to a condition in which active cumulus also exists (active cumulus boundary layer). The active cumulus onset almost coincides with an abrupt drop in the level of free convection (LFC). The drop in the LFC is attributed to a decrease in the local minimum value of saturated equivalent potential temperature at the bottom of the inversion layer in addition to an increase in equivalent potential temperature near the land surface.

Systematic sensitivity experiments show that the onset time becomes earlier with greater values of initial water vapor, smaller static stability, and greater evaporative efficiency. Because the active cumulus boundary layer keeps growing, the earlier active cumulus onset leads to higher inversion height and subsequently a deeper moist layer.

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	500,000	150,000	650,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
総計	2,500,000	750,000	3,250,000

研究分野： 気象学

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： 大気現象、水循環

1. 研究開始当初の背景

熱帯や亜熱帯域の海上および陸上に発生・発達する浅い積雲は、その鉛直混合によって対流圏下層の水蒸気分布を変化させる。熱帯域や亜熱帯域における水蒸気分布の変化は対流活動の強度に影響を及ぼし、結果として全球規模の大気循環場を変化させる。このような浅い積雲の影響は浅い積雲パラメタリゼーションとして大気大循環モデル(GCM)に組み込まれている。浅い積雲パラメタリゼーションはGCM格子(数十~数百キロスケール)における安定度や相対湿度が規定された場合に、熱・水および運動量がどの程度混合されるかを示すためのアルゴリズムであり、そのパラメタリゼーションについては様々な手法が提唱されている。

浅い積雲のうち、熱帯や亜熱帯域の海洋上に発生する積雲については、過去に行われた観測プロジェクトの結果を基準としたモデル比較実験が行われ、雲量や鉛直質量フラックスなどが見積もられている。しかしながら、これらの研究は規定された大気環境場において、観測された積雲を忠実に再現すること、もしくは再現するためのモデルのチューニング(調整)手法の検討に重点が置かれている。すなわち、規定された大気環境場における積雲の特徴を示すもので、大気環境場が変わると積雲の特徴がどのように変わるか、その結果大気環境場がどのように変化するかという点(大気環境場と積雲の相互作用)については考慮されていない。

一方、1960~1970年代に行われた先行研究により、梅雨前線帯における降水システムの発達には、梅雨前線帯の南側から供給される湿潤な気塊が大きな影響を果たす事が示されていた。本研究課題の代表者は、この湿潤な気塊の形成に亜熱帯西部太平洋上と中国大陸上の大気境界層過程が重要な役割を果たしていることを指摘した。この結果を受けて、梅雨前線帯への水蒸気の供給源である東シナ海上と中国華中域の平野部上における大気境界層過程を対象とした観測と数値実験を実施してきた。数値実験は水平解像度100 mスケールの雲解像モデル CReSS を用いて行った。東シナ海上を対象とした積雲を含まない大気境界層の数値実験では、水蒸気が乾燥空気よりも軽いことによる密度差が湿潤な気塊における乾燥対流(サーマル)の発達において重要な寄与をしていることを示した。また、中国華中域平野部上の大気境界層過程については、中国安徽省寿县における地表面フラックス観測とウィンドプロファイラレーダを用いた結果に基づいて、地表面が小麦畑であった場合と、水田であった場合の地表面フラックスと積雲の発生しない対流混合層の発達過程の研究を行った。地表

面が比較的乾燥している裸地であった場合には、顕熱フラックスの値が潜熱フラックスに比べて大きく、対流混合層は午前中の早い時間から急激に発達し、その到達高度も高く(2.3 km)、サーマル内部の上昇気流も強い(3 m/s に及ぶ)ことを示した。一方、地表面が水田である場合には、顕熱フラックスに比べて潜熱フラックスの値が大きく、対流混合層は午前中の遅い時間からゆっくりと発達し、その到達高度は低く(1.4 km)、サーマル内部の上昇気流も弱い(1.5 m/s 程度)であることを示した。

しかしながら、これらの研究は大気境界層内のサーマルの構造やサーマルによる熱と水蒸気の輸送を取り扱ったものであり、湿潤対流(積雲)の構造、積雲による熱や水蒸気の輸送、積雲による大気環境場の変化にまで及ぶ研究は行えていなかった。

2. 研究の目的

本研究は、「浅い積雲パラメタリゼーション」の改良に向けて、対流圏下層の大気環境場と積雲の相互作用を明らかにする事を目的とする。具体的には、高解像雲解像モデルを用いた組織的な感度実験から、対流圏下層の大気環境場(安定度・相対湿度)を変化させた場合に、その場で発生・発達する積雲の特徴(雲量・質量フラックス・雲頂高度)と発生した積雲の影響による大気環境場の変化を考察する。この感度実験において、与える大気環境場はGCMのカラムにおける大気環境場に相当し、得られる積雲の特徴と大気環境場の変化が浅い積雲パラメタリゼーションで計算される量に相当する。

特に、湿潤な陸域上で発生する積雲が大気環境場により受ける影響に注目した解析を行う。地表面が水田である場合、対流混合層内の水蒸気量が多く、相対湿度が高いために、その上部にはしばしば積雲が発達する。積雲の発達によって、対流混合層の上端高度や積雲内部の上昇気流などの構造が大きく変化し、結果として対流圏下層の大気環境場を大きく変化させることが予想される。積雲の種類は、発達する積雲の雲頂がLFCを超えないためにその内部に正の浮力をもたない forced cumulus と、サーマル上端がLFCを超えて内部に正の浮力をもつ active cumulus に大別することができる。本研究では、両者の出現条件や遷移過程に注目した解析も行う。

3. 研究の方法

大気境界層上端に発生する積雲の再現を行うために、雲解像モデル CReSS を用いた数値実験を行った。対流境界層内のサーマルや積雲を解像するために、水平解像度 100 m

で数値実験を行った。また、積雲を表現するために、雲物理過程として暖かい雨のパラメタリゼーションを用いた。

積雲の寄与を検討する領域として、本研究では2つの領域を想定した。一つは亜熱帯海洋上を想定した夏季の東シナ海上である。しかしながら、大気環境場や海面水温などの条件を様々に変化させて数値実験を行ったものの、積雲の発生から数時間で、その上端に計算領域全域を覆うような層積雲が形成されてしまい、雲量や積雲の内部構造などの解析を行うことができなかつた。不具合の原因を検討したが、本研究期間において原因を明らかにすることはできなかった。

もう一つの設定領域は、地表面が水田という湿潤な条件を想定した夏季の中国華中域平野上である。初期条件として、積雲が発生していたと考えられる2004年6月20日の中国安徽省寿県での観測結果を参考にして、理想化されたプロファイルを与えた。

そして、その初期条件をもとにして、大気の安定度(仮温位の鉛直傾度)を変化させた実験を3ケース、大気の湿度(地上における水蒸気混合比)を変化させた実験を5ケース、地表面からの顕熱と潜熱フラックスの割合

(ボーエン比)を変化させた実験を3ケース設定し、これらを組み合わせて37通りの感度実験を実施した。それぞれの数値実験の結果から、積雲発生の有無、発生した積雲の種類(forced cumulusかactive cumulusか)、その発生時刻、雲量や到達高度などについて整理し、大気環境場と発生した積雲の特徴をまとめた。さらに、積雲の発生による水蒸気の鉛直分配についても考察を行った。

4. 研究成果

戦略的創造研究推進事業(CREST)の研究領域「水の循環系とモデリングシステム」における研究課題「湿潤・乾燥大気境界層の降水システムに与える影響の解明と降水予測精度の向上」(研究代表者:中村健治名古屋大学教授)の一環として、2004年と2005年の夏季に中国華中域平野部の安徽省寿県における観測結果に基づいて、理想実験の大気陸面環境場の設定を行った。寿県に設置されたウィンドプロファイラとフラックス観測装置による観測結果から、2004年6月20日に積雲が発生したことが示唆されていた。この日の観測の結果に基づいて、大気の安定度、水蒸気量、そして陸面の状態(水田)を制御実験の初期条件として数値実験を実施した。

最初に積雲の発達を含む大気境界層の発達の様子を示す。図1は計算領域内の雲量、持ち上げ凝結高度(LCL)、自由対流高度(LFC)、浮力のなくなる高度(LNB)、領域平均の仮温位と逆転層高度の時間変化を示したものである。最初の積雲は09時20分頃に発生し(図

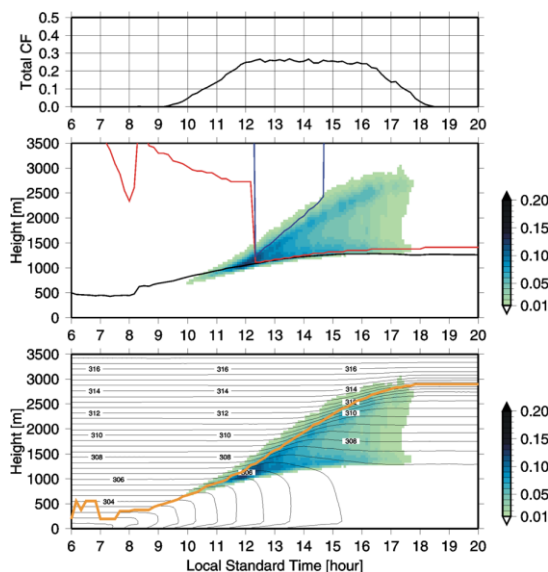


図1. 上図: 領域内の雲量の時間変化。中図: 層毎の雲量の時間変化(色)とLCL(黒線)、LFC(赤線)、LNB(青線)の時間変化。下図: 色は中図と同じ。領域平均の仮温位(コンタ)と領域仮温位傾度の最大値で規定される逆転層高度(オレンジ線)の時間変化を示す。

1上図)、時間とともに積雲の厚さが増加している様子が見て取れる(図1中図)。また、雲層の上端は仮温位の鉛直プロファイルから計算される逆転層高度にほぼ一致していることも見て取れる。LFCは12時過ぎに急激にその高度を下げ、LCLとほぼ同高度となっていることから、この時刻以前に見られる積雲は全てforced cumulus、この時刻以降に発達した積雲にはactive cumulusが含まれると考えられる。13時に発生していた積雲の内部には正の浮力が存在していた(図略)ことから、active cumulusが発生していたことも確認している。この図より、積雲の存在しない乾燥大気境界層の発達(09時以前)、forced cumulusのみにより形成される積雲境界層(09時~12時)、active cumulusが発達した積雲境界層(12時以降)という時間変化が得られた。

図1では、Active cumulusの発生に際してLFCが急激に低下していることを示した。このLFCが急激に低下した理由について考察する。このLFCの低下は、大気境界層上端に形成される逆転層における飽和相当温位が小さくなり、地上付近の相当温位に比べて小さくなったことが原因である。地上付近の相当温位は、地表面からの顕熱・潜熱フラックスにより時間とともに徐々に増加するが、こ

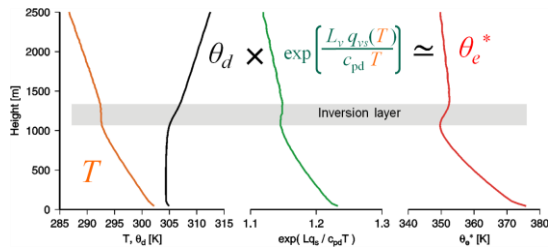


図 2. 大気境界層の飽和相当温位の鉛直プロファイルに関する概念図。飽和相当温位は乾燥温位 (θ_d) と指数項の積で表現される。指数項は気温と気温に依存する飽和混合比により表現されることから、大気境界層上端の逆転層付近に極小値をもつことになる。

の理由だけでは LFC の低下の原因の考察としては不十分である。そこで、逆転層近傍における飽和相当温位の変化を考察する必要がある。

飽和相当温位は温位と指数項の積で表現される。図 2 に飽和相当温位に関連する温位と指数項の鉛直プロファイルの概念図を示す。ここで、温位は大気境界層内ではほぼ一定の値となる。一方、指数項の鉛直プロファイルは水蒸気の飽和混合比に因るが、飽和混合比の気温依存性から気温の鉛直プロファイルに似た形状となる。そして、両者の積で表現される飽和相当温位は、大気境界層内部では上層に向けて減少する一方、逆転層内では上層に向けて増加するために、逆転層下端において極小が生じると考えられる。時間とともに対流境界層が厚くなることで飽和相当温位の極小値も低下し、この値が地上付近の相当温位の値よりも小さくなる時に LFC の急激な低下が生じて active cumulus が発生すると考えられる。大気環境場におけるこの過程が forced cumulus から active cumulus への遷移過程であると考えられる。

次いで、積雲の発生・発達に対する大気環境場、地表面状態の寄与を検討するために実施した組織的な感度実験の結果を示す。図 3 は水蒸気量を変化させた各実験における、逆転層高度の時間変化を示す。初期条件における地上水蒸気量が減少するにつれて、forced cumulus と active cumulus の発生時刻が遅くなっていることを見取れる。また、初期条件における地上水蒸気量が特に少ない 13 g/kg、14 g/kg の場合、active cumulus は発生しなかった。水蒸気量が少ない場合には、地上付近の相当温位の値が小さいことと、forced cumulus の発生が遅れるために逆転層

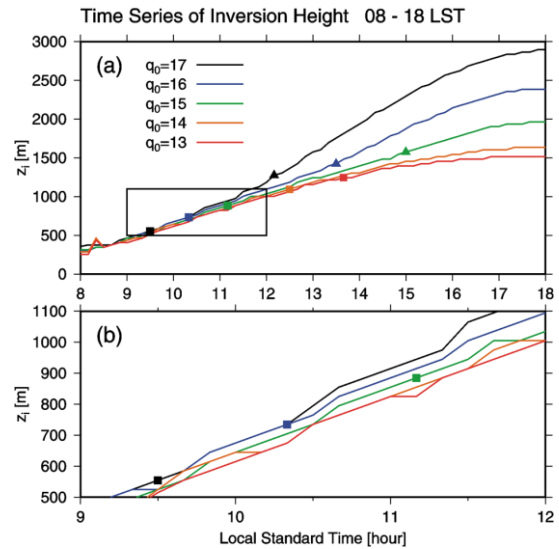


図 3. 水蒸気量を変化させた感度実験における逆転層高度の時間変化を色実線で示す。図中の■は各水蒸気量の感度実験における forced cumulus の、▲は active cumulus の発生時刻を示す。下図は上図中の矩形領域の拡大図である。

下端における飽和相当温位の極小値の減少の割合が小さくなるのが原因となり、LFC の低下が発生しなかった。そして、active cumulus が早い時間から発達したケースほど、すなわち水蒸気量が多いケースほど日没時の逆転層高度は高くなっていることも見て取れる。このことから、active cumulus の発生の有無と発生時刻が逆転層高度の発達に大きな寄与をしていると考えられる。

次いで、大気の静的安定度を変化させた場合の積雲の発生時刻と逆転層高度の時間変化 (図略) を比較すると、安定度を減少させる (より不安定化させる) につれて、active cumulus の発生時刻が早くなることが示された。これは、安定度が小さくなったために、対流混合層が急激に発達することで、逆転層下端に形成される飽和相当温位の極小値が急激に減少したことに起因すると考えられる。

一方、蒸発効率を変化させた場合の積雲の発生時刻と逆転層高度の時間変化 (図略) を比較すると、蒸発効率を増加させる (地表面フラックスのボーエン比は小さくなる: より湿った地表面を想定することになる) につれて、active cumulus の発生時刻が早くなることが示された。これは、より湿った地表面からより多量の水蒸気が供給されることで相当温位の増加の割合が大きくなることに

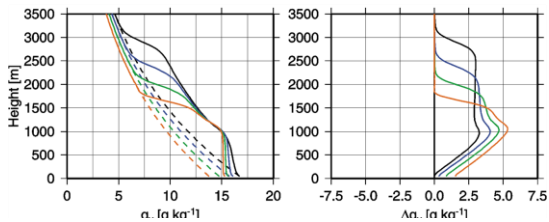


図 4. 左図: 初期条件における水蒸気量を変化させた感度実験における初期条件 (06 時:破線) と日没時 (19 時: 実線) の水蒸気混合比の鉛直プロファイル。右図: 日没時と初期条件の水蒸気混合比の差分の鉛直プロファイル。線の色は図 3 と同じ感度実験の結果を示す。

起因すると考えられる。

積雲の効果を考えない場合には、地表面が乾燥している場合により高い高度まで大気境界層が発達することが示されている。しかしながら、地表面が湿潤な環境場では、active cumulus がより早い時間に発生することで、乾燥した陸面上において発達する大気境界層に匹敵する厚さの積雲境界層が形成される可能性があることが示された。

図 4 に水蒸気量を変化させた感度実験における初期条件と日没後の水蒸気混合比の鉛直プロファイルを示す。いずれの実験結果でも、地表面からの潜熱フラックスによって、06LST に比べて 19LST では大気境界層内全体で水蒸気量が増加している様子が見取れる。また、水蒸気混合比の鉛直プロファイルが直立している乾燥対流混合層と、緩やかな鉛直傾度をもつ積雲層、水蒸気混合比が急激に減少している逆転層を識別することができる。両時刻の水蒸気混合比の差分 (図 4 右図) から、初期時刻における水蒸気量が多い (小さい) 場合には、上層 (下層) での水蒸気混合比の増加量が多いことを見取れる。初期時刻における水蒸気量が多い (小さい) 場合には、active cumulus が早い (遅い) 時刻から発達することから、active cumulus が乾燥対流混合層から積雲層に水蒸気を輸送することで、水蒸気の鉛直分布を大きく変えることを示唆している。

このように初期の大気プロファイル (安定度や水蒸気量)、地表面の状態 (蒸発効率) が発生させる積雲の種類やその到達高度を制御するとともに、発生した積雲によって水蒸気の鉛直プロファイルも変化することを示した。湿潤な陸域では積雲が発生することで、大気境界層の構造が改変されるために、

水蒸気の鉛直プロファイルの変化が生じ易くなることを示した。

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 3 件)

- ① Shinoda, T., A. Higuchi, K. Tsuboki, T. Hiyama, H. Tanaka, S. Endo, H. Minda, H. Uyeda, K. Nakamura: Structure of convective circulation in the atmospheric boundary layer over the northwestern Pacific Ocean under a subtropical high. J. Meteor. Soc. Japan, 87, 979-996, 2009, 査読有.
- ② 篠田太郎・山田広幸・遠藤智史・田中広樹・上田博: 中国華中域における大気境界層・降水システム研究の進展 ~ GAME/HUBEX 特別集中観測からの 10 年 ~. 天気, 56, 739-745, 2009, 査読有.
- ③ Endo, S., T. Shinoda, H. Tanaka, T. Hiyama, K. Tsuboki, H. Uyeda, K. Nakamura: Characteristics of vertical circulation in the convective boundary layer over the Huaihe River Basin in China in the early summer of 2004. J. Appl. Meteor. Climatol., 47, 2911-2928, 2008, 査読有.

[学会発表] (計 5 件)

- ① 遠藤智史・篠田太郎・坪木和久・上田博: 陸域における積雲境界層の発達過程の数値実験. 第 11 回非静力学モデルに関するワークショップ, 弘前, 2009 年 9 月 24 日-9 月 25 日.
- ② Endo, S., T. Shinoda, K. Tsuboki and H. Uyeda: Development of cumulus boundary layer over land. First SELIS International Workshop: Eco-Climate Dynamics in Eurasia / Monsoon Asia, Nagoya, January 26-27, 2009.
- ③ 篠田太郎・山田広幸・遠藤智史・上田博: 中国華中域における大気境界層・降水システム研究の進展 ~ GAME/HUBEX IOP からの 10 年 ~. 日本気象学会 2008 年度秋季大会, 仙台, A154, 2008 年 11 月 19 日-11 月 21 日.
- ④ 遠藤智史・篠田太郎・坪木和久・上田博: 湿潤な陸域における対流境界層と積雲の数値実験. 日本気象学会 2008 年度秋季大会, 仙台, P355, 2008 年 11 月 19 日-11 月 21 日.
- ⑤ Endo, S., T. Shinoda, H. Tanaka, T. Hiyama, K. Tsuboki, H. Uyeda and K. Nakamura: Characteristics of the convective boundary layer in the humid terrestrial area. Les Houches Summer

School Session - Atmospheric Boundary
Layers: Concepts, Observations, and
Numerical Simulations -, Les Houches,
France, June 17-27, 2008.

[図書] (計 0 件)

[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:

取得年月日:

国内外の別:

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

篠田 太郎 (SHINODA TARO)

名古屋大学・地球水循環研究センター・助
教

研究者番号: 50335022

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし