

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 2 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540520

研究課題名(和文) 新しい静的安定性の基準に基づく積雲対流パラメタリゼーションを使ったモデルの開発

研究課題名(英文) Development of a cumulus parameterization scheme based on a new static stability criterion

研究代表者

中村 晃三 (Nakamura, Kozo)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球環境変動領域・チームリーダー

研究者番号：20143547

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円、(間接経費) 1,170,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、未飽和環境での飽和気塊の安定性について湿潤断熱仮温度減率を用いた理論の有効性を、観測、および、数値実験の結果を用いて調べ、さらに、それを使った対流パラメタリゼーションスキームの開発を行うことであった。

観測結果の解析では、おおむね良好な結果を得た。適当な外部条件を与え平均的にバランスした状況下での対流を数値モデルで生成して、その条件を調べることに限っては、外部条件として、海面からの熱供給、水平移流、大規模沈降流を与えバランスした状態を作ろうとした。しかし、外部条件が一定でも、対流の組織化が起こる場合と起こらない場合とで、平衡状態が1つに決まらないことが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this work is to investigate the validity of the stability theory of a saturated air parcel in an unsaturated environment in terms of the moist adiabatic lapse rate of virtual temperature using observational data and numerical experiments data, and to develop a new parameterization scheme of cumulus convection. Observational results show a good agreement with the theory.

For the numerical experiment, we consider a cumulus boundary layer maintained by the balance between the surface heat fluxes, horizontal advection, and large-scale subsidence. Even if the external forcing is fixed, there occur two balanced states. One is the state with organized convection and the other is the state with randomly distributed non-organized convection. The characteristics of the boundary layer such as vertical gradient of temperature is different between the two states. In order to investigate the stability of convection, we must consider the difference between the two states.

研究分野：数物系科学

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：静的安定性 条件付き不安定成層 パーセル法 積雲境界層 雲解像モデル 積雲対流パラメタリゼーション LES

1. 研究開始当初の背景

これまで大気の静的安定性は、上昇気塊中での水蒸気の凝結の有無による乾燥断熱減率と湿潤断熱減率を用いて、絶対不安定、条件付き不安定、絶対安定の3つにわけて考えられてきた。

しかし、未飽和環境での飽和気塊の安定性は、これらの断熱減率ではなく、湿潤断熱仮温度減率を使って判定すべきことが明らかになった (Nakamura, 2011)。

温度成層の基準には、乾燥断熱温度減率 (γ_d)、湿潤断熱仮温度減率 ($\gamma_{mv/(1+q)}$)、湿潤断熱温度減率 (γ_m) の3つがある。それぞれ、未飽和環境での未飽和気塊の場合、未飽和環境での飽和気塊の場合、飽和環境での飽和気塊の場合、の安定性の基準である。ここで、添え字の v は仮温度を意味し、 γ_{mv} は、湿潤断熱過程での仮温度の減率を表している。また、 $q = 0.608$ は比湿である。

これらの理論について、観測での確認などが期待されていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、(1) 観測および対流を解像するモデルを用いた数値実験の結果を用いてこの理論の有効性を吟味すること、(2) この理論に基づいて大規模な数値モデルにおける対流の効果を表す新たなパラメタリゼーションスキームを開発すること、そして、(3) その有効性を判定すること、である。

3. 研究の方法

これまでの基準では、図1にあるように、2つの基準で成層を分類していた。

しかし、未飽和環境での飽和気塊の場合の安定性を考えると、表1のような分類が使われるべきであり、未飽和環境では、表1の下2つの基準で分類されるべきであることがわかる。

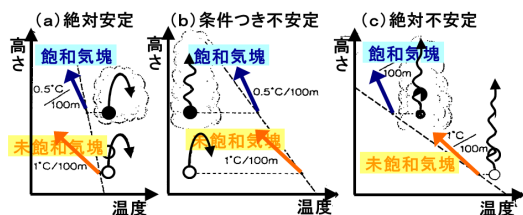


図1 これまでの静的安定性の分類。乾燥断熱減率と湿潤断熱減率の間の条件付き不安定な成層が、未飽和環境に関して、未飽和気塊は安定だが飽和気塊は安定であるかのようなイメージが与えられていた。

表1 環境の温度減率と環境と気塊の飽和の条件での安定性の関係

環境	気塊	γ_d	$\gamma_{mv/(1+q)}$	γ_m
飽和	飽和	不安定	不安定	不安定
飽和	未飽和	不安定	不安定	安定
未飽和	飽和	不安定	安定	安定
未飽和	未飽和	不安定	安定	安定

そこで、新しく考案された大気の静的安定性の基準を考慮しながら、まず、観測された温度成層がどのような特性を示しているかを調べる。特に、熱帯対流圏中層の大気について、その温度成層が、どのような性質を示しているかを、相対湿度との関係に注意しながらその特性を明らかにする。そのため、まず、ゾンデ観測で得られたデータ (Nakamura, 2011 で使った NOAA にアーカイブされているデータ) による成層の頻度分布の解析を行う。

解析において、相対湿度との関係に注意するのは、将来、大規模なモデルでの積雲対流パラメタリゼーションにおいて、例えば、湿潤対流調節の方法のように、相対湿度と安定度の間に何らかの関係を仮定する方法があり、そのような方法の有効性を調べるためである。

また、実際の観測からでは温度減率がどのような過程で決まっているかを調べるのは、困難であると考えられる。そこで、それがどのように決まっているかを積雲対流の運動を直接表現するような気象モデル (ここでは、密格子モデルと呼ぶ) を使って調べる。このため、成層を不安定化するようなある適当な外部条件のもとで、積雲対流による安定化によって、統計的にはほぼ平衡な状態 (この雲は生成消滅を繰り返すが、平均的にはあるほぼ一様な成層が適当な時間にわたって維持されるような状態) が実現されているような状況を再現する。適当な初期条件、境界条件のもとで、平衡状態が実現するまで時間積分を行い、その中で実現する成層構造、対流による熱・水輸送、それらによる成層構造の維持過程などの物理過程、その中で相対湿度との関係などを調べる。これらの結果をつかって、このような対流による中立化の効果を表すのに、これまでの中立成層の基準と新しい基準のどちらを使うのが適当と考えられるか考える。

最後に、積雲対流解像モデルによる成層の維持機構の解明をまとめる。それらの結果にもとづいて、積雲対流を解像しないモデルのための積雲対流パラメタリゼーションスキームを開発し、そのモデルを大規模モデルへ組み込むことで、これまでの結果と比較して改善するかどうかを調べる。

4. 研究成果

(1) 観測された成層の頻度分布

「熱対流は、温度成層が不安定になったときに、中立にする傾向がある」と考えると、観測される温度成層をみたとき、なんらかの傾向を見つけることができる可能性があると考え、ゾンデ観測で得られたデータ (Nakamura, 2011 で使った NOAA にアーカイブされているデータ) による成層の頻度分布の解析を行った。

データは、2009年の1年分。但し、氷の効果を入れないために、温度 > 0、熱帯

を考えるために南緯 10 度から北緯 10 度の間のみ、地表の影響を入れないように、地上高度 1000m 以上で、圏界面高度以下の隣り合った 2 高度間のデータを使った。温度減率から計算された無次元安定度（定義は図 2 に表した）の頻度分布（但し、下層の相対湿度は 95% 未満の場合）を図 2 に示す。

無次元安定度が 0 は湿潤過程に関して中立（湿潤断熱温度減率、もしくは、湿潤断熱仮温度減率）、無次元安定度が -1 は乾燥断熱過程に関して中立（乾燥断熱温度減率、もしくは、乾燥断熱仮温度減率）である。

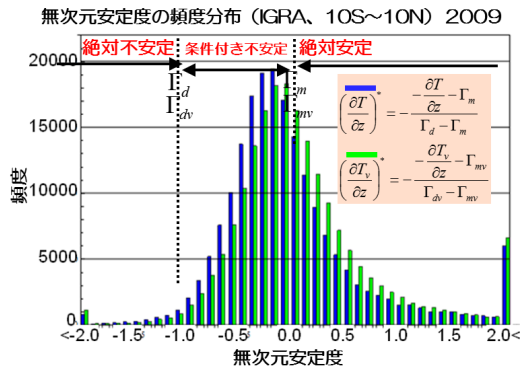


図 2 観測された無次元安定度の頻度分布。横軸が乾燥断熱（仮）温度減率と湿潤断熱（仮）温度減率を使って無次元化した温度減率と仮温度減率。縦軸がそれぞれの頻度。横軸 < -1 が絶対不安定、> 0 が絶対安定である。

青で示されている無次元温度減率は、条件付不安定にピークがあるが、緑で示されている無次元仮温度減率ではより中立に近いところにピークがあることがわかる。未飽和大気中で観測される温度成層は、条件付不安定のことが多いが、その中でも最も頻度分布が高いのは飽和気塊に対して中立に近い場合であることがわかる。

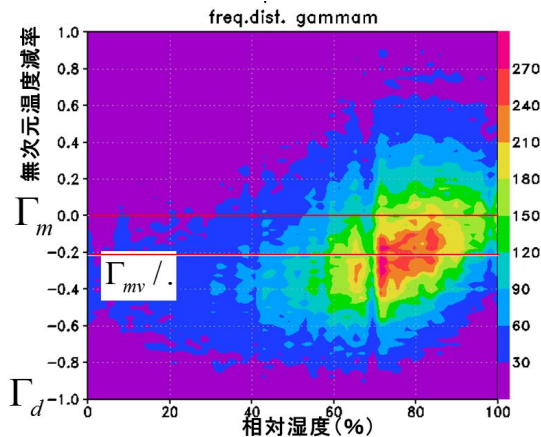


図 3 相対湿度の関数で表した無次元安定度の頻度分布。横軸は相対湿度。縦軸が乾燥断熱温度減率と湿潤断熱温度減率を使って無次元化した温度減率。縦軸の 0 と -0.2 付近の赤線が、それぞれ、湿潤中立、湿潤仮温度中立を表す。

図 2 は相対湿度 < 95% の全てのデータを使った結果だが、相対湿度への依存性を見るために、2% ごとのグループに分類してそれぞれの温度減率を使った無次元温度減率（図 2 の青の定義）の頻度分布を示したのが図 3 である。湿度 60% 程度から 90% 程度の頻度が多く、その間、頻度分布が最も高くなっている無次元温度減率は、相対湿度が高いほど 0 に近くなっている、つまり、相対湿度が高いほど湿潤中立に近い状態がおきやすいことがわかる。

興味深いのは、無次元温度減率が -0.2 程度、これは、湿潤断熱仮温度減率でみて中立になる場合で、相対湿度が 70 から 80% では、そのあたりの頻度が最も多くなっていることである。このような性質を使えば、例えば、対流調節のようなパラメタリゼーションを改良することが可能になるのではないかと期待される。

(2) 数値モデルによる積雲を含む境界層の再現とその中のバランスの解析

実際の積雲が存在する境界層を考えてみる。外的な条件としては、下部境界面（ここでは海面と考える）から熱と水蒸気が供給される一方、水平方向の移流による冷却と乾燥化によってバランスする。境界層より上では平均下降流と移流 + 放射でバランスする。下降流のためエントレインメントによる境界層トップの上昇が抑えられる。このような状況下で積雲対流が外部からの不安定化とバランスする安定化に働く。このような積雲対流の作用をパラメタライズすることが最終的な目標である。

その解析をするために、バランスした境界層を再現する必要がある。そのための設定として、これまでによく使ってきた Rain in Cumulus over Ocean（略称 RICO）と呼ばれる貿易風帯での観測実験での設定を使うことにした。

これまで使ってきた数値モデル比較実験での設定は、多くの研究者が参加できるように、格子間隔が 100m x 100m x 40m で、計算領域が格子数で水平 128 x 128、鉛直 100 と、比較的小さな設定であったため、解析に使う 24 時間積分の最後の 4 時間の間でも平均場が大きな時間変化を示した。なるべく正確なバランスした条件を作成するため、領域を 512 x 512 と大きくし、積分時間も数日行って、よくバランスした状況を作りだし、その中の積雲対流の役割を調べようとした。

ところが、そのような実験を行うと、2 ~ 3 日経った段階で、それまで「最初に急増し、その後、増加の割合が減少し、適当な値に収束しそうな時間変化を示していた」平均運動エネルギーがそれまでの 2 倍近くに増え、その値の付近で収束するような変化を示した（図 4）。対流パターンを見ると、平均運動エネルギーが急増する前は、全体の領域でラ

ンダムに対流が起きているような状態だったのが、平均運動エネルギーの急増後は、対流の組織化が起こり、スコールラインのような構造が現れていた(図5)。水平平均温位の鉛直分布や降水量にも大きな差が現れていた。外部条件が一定の場合でも、平均的にバランスした状態が複数あることがわかり、平衡した平均場での湿潤対流の役割を調べるためには、このような組織化が起こる場合と起こらない場合の条件を明らかにし、その2つの状態を区別して議論する必要があることが明らかになった。

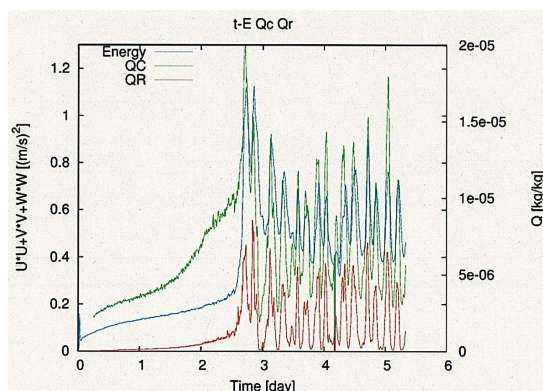


図4 大きな計算領域で行った積雲境界層の再現実験での運動エネルギー、雲水混合比、雨水混合比の領域平均値の時間変化。計算開始後、2日半ぐらいで、大きく変化した。

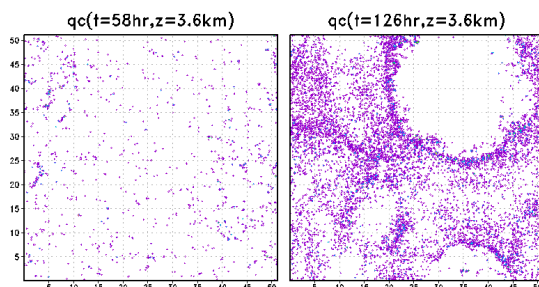


図5 2つの時刻の対流パターンの違い。高度3.6kmの雲水混合比で示した。左は組織化が起こっていない場合、右は起こっている場合。

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)

Kozo Nakamura, Masayuki Hara, Akira Noda, Hirofumi Tomita, Yasutaka Wakazuki, Simulation and Verification of Tropical Deep Convective Clouds using Eddy-Permitting Regional Atmospheric Model II, Annual Report of the Earth Simulator Center, April 2012-March 2013, 査読無, Vol. 11, 2013, pp 61-66.

Kozo Nakamura, Masayuki Hara, Akira Noda, Hirofumi Tomita, Yasutaka Wakazuki, Simulation and Verification of Tropical Deep Convective Clouds using Eddy-Permitting Regional Atmospheric Model, Annual Report of the Earth Simulator Center, April 2011-March 2013, 査読無, Vol. 11, 2012, pp 65-68.

Kozo Nakamura, Reconsideration of conditional instability. -Static stability of a saturated air parcel in an unsaturated environment-, Journal of the Meteorological Society of Japan, 査読有, Vol. 89, 2011, pp 495-516, DOI:10.2151/jmsj.2011-506.

[学会発表](計 2件)

中村晃三, 仮温度減率を使った大気の静的安定度の分類についての再考, 日本気象学会春季大会, 2012年5月26日, つくば国際会議場。

中村晃三, 熱帯で観測された湿潤静的安定度と相対湿度の関係, 日本気象学会秋季大会, 2011年11月16日, 名古屋大学。

6. 研究組織

(1)研究代表者

中村 晃三 (Nakamura, Kozo)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球環境変動領域・チームリーダー

研究者番号: 20143547