

湿潤絶対不安定層 (MAUL)

竹 見 哲 也*

大気の対流現象には、境界層内の乾燥対流や水の相変化を伴う湿潤対流があり、湿潤対流の場合には多様性に富む雲システムを形成する。これら対流運動が生じるかどうかは、大気成層の静力学的安定性に依存する。成層の安定性は、通常、鉛直方向の気温減率 (Γ と表す) が乾燥断熱減率 (Γ_d) や湿潤断熱減率 (Γ_m) と比べてどのような大小関係にあるかによって分類される。具体的には、絶対不安定 ($\Gamma > \Gamma_d$)、乾燥中立 ($\Gamma = \Gamma_d$)、条件付不安定 ($\Gamma_d > \Gamma > \Gamma_m$)、湿潤中立 ($\Gamma = \Gamma_m$)、絶対安定 ($\Gamma < \Gamma_m$) の5つに分類され、このことは一般的な気象学の教科書に説明されている。このうち条件付不安定とは、空気塊が飽和している場合に不安定成層であることを意味する。言い換えれば、未飽和ならば安定である。多くの場合において大気の相対湿度は未飽和であることから、安定度は、絶対安定でない限り、条件付不安定に分類されることがほとんどである。つまり条件付不安定は、ありふれた状態であると言える。

一方、メソ降水系の内部や前線帯のレインバンド内部では、相対湿度が100%に達する状況がしばしば現れる。このような飽和大気において、仮に気温減率が湿潤断熱減率よりも大きくなる状況があるとしたら、どのような安定性として理解すべきであろうか。これは、湿潤状況下での絶対不安定 (湿潤絶対不安定) と呼ぶべきものであり、地表面加熱で形成される接地境界層での絶対不安定 (乾燥絶対不安定) の湿潤版として捉えることができ、第6の安定度条件として Bryan and Fritsch (2000) により提唱された概念である。飽和状態にある大気成層の気温減率 Γ を Γ_s と記して、湿潤絶対不安定は、

$$\Gamma_s > \Gamma_m$$

と表現される。湿潤絶対不安定な状態にある鉛直層は、湿潤絶対不安定層 (Moist Absolutely Unstable Layer : MAUL) と呼ばれる。

Bryan and Fritsch (2000) は、米国大陸上での2年8か月分の高層気象観測データから MAUL の統計的性状を調べた。ここで、MAUL の判定条件は、相当温位の鉛直勾配が負、かつ湿数が 1°C 以下とされた。解析の結果、観測全体の24.1%に MAUL が抽出され、また100hPa 以上の厚みを持つ MAUL は全体の2.4%であることが示された。さらに、MAUL が現れるのは、スコールラインなどメソ対流系の先端部の対流圏下層であり、面的 (スラブ状) に形成される上昇流域内にあることを示した。Bryan and Fritsch (2000) に提示された MAUL を伴うスラブ状の上昇流と類似した概念図は、Kingsmill and Houze (1999) において、スコールライン先端部での対流不安定な下層の持ち上げとして描かれていた。Kingsmill and Houze (1999) は、MAUL という用語を使わなかったものの、湿潤絶対不安定な層の存在を示唆していた。また、スラブ状に広がる上昇流域の存在は、米国大陸上のスコールラインの事例において特に冷氣プールが広域に発達する場合に確認されている (James *et al.* 2005)。言い換えると、広域に発達する冷氣プールによって対流不安定な下層が層全体として持ち上げられることにより、スラブ状の上昇流が発達する。こうしたスラブ状上昇流域において MAUL が形成されるのである。

MAUL は絶対不安定であることから、不安定を解消するための鉛直運動がすぐさま生じると予想され、MAUL は一時的にしか存在できないと推測される。そのため、MAUL が持続するとすれば、何らかの維持メカニズムが作用しているものと考えられる。Bryan

Tetsuya TAKEMI, 京都大学防災研究所.

© 2023 日本気象学会

and Fritsch (2000) が指摘した通り, MAUL の維持には, メソスケールの広域で励起される強制が上昇流を主に駆動している状況が必要である. すなわち, 広域でスラブ状に上昇流が形成される一方, 浮力に起因する持ち上げ効果は顕著ではない, というのである. 浮力による上昇流は一般に対流圏中・上層でピークになることから, 対流圏下層に限って見れば, メソスケールでの強制上昇が浮力による上昇よりも大きくなる状況は十分にありえる. このようにスラブ状に強制される上昇流域において, MAUL が維持されるのである.

これまでの研究で, MAUL は, 中緯度大陸上のメソ対流系の発達時に, その存在と特徴が分かってきた. 中緯度大陸上は基本的には乾燥した気候であることから, 乾燥条件下で MAUL のような飽和状態が維持されるには, 広域での強い冷氣プールとスラブ状の上昇流の存在が必須であると考えられる. 一方, 日本を含む東アジアの梅雨期や台風期には, 対流圏が中・下層で飽和に近い状況は頻繁に生じる. 例えば, 暖候期における停滞性降水系発生時の環境条件は, 非降水時に比べて, 対流圏中層での湿度の高さが顕著である (Unuma and Takemi 2016). この状況下で気温減率を大きくする何らかのメカニズムが作用すれば, MAUL が形成・維持されることになるであろう.

このような考えのもと, Takemi and Unuma (2020) は, 日降水量の観測史上 1 位 (箱根での 922.5mm) を記録するなど東日本各地で大雨をもたらした 2019 年台風 19 号に着目し, 大雨が生じた時の環境場を調べたところ, 700~300hPa の対流圏中・上層で飽和に近い状況を確認した. 気象庁メソ客観解析値から, 相当温位の鉛直勾配が負, かつ相対湿度が 99% 以上という条件で MAUL を判定したところ, 台風周辺のレインバンドなど降水システムの形成域において 1 km 以上の厚みを持つ MAUL が存在していることが分かった. MAUL の厚みは数 km に及ぶこともあり, こういった厚みを持った湿潤絶対不安定層が持続することにより, 強い雨が発生したと考えられる.

その後, 日本国内での事例を対象に解析が進められている. Tsuji *et al.* (2021) は, 九州で発生した降水事例における水蒸気輸送について解析し, 降水のピーク時に対流圏中・下層において MAUL が存在することを示し, 特に強い降水時ほど MAUL が高頻度で出現することを明らかにした. Naka and Takemi (2023) は, 平成 29 年 7 月九州北部豪雨・令和 2 年 7 月豪雨な

ど近年の九州北部地域で発生した豪雨を解析対象として, 豪雨の発生環境条件を調べた. 彼らは, 豪雨に先行して MAUL が存在すること, 厚みを持った MAUL が広域に存在するほど降水量が多いこと, MAUL の形成には 700hPa までの対流圏下層での水蒸気輸送が寄与していることを示した. このように, 台風や梅雨前線に伴う大雨発生時に MAUL が存在する事例が報告されている.

先述の通り, MAUL の維持には何らかのメカニズムが必要である. 中緯度大陸上に比べて, 東アジアでの梅雨期など湿潤な環境場においては, 気温減率が湿潤断熱減率に近いため, そもそも浮力が相対的に小さい環境条件にある (Lucas *et al.* 1994). 浮力が小さい場合には, 上昇する間に周囲大気のエントレインメントなどの影響によって, 浮力がさらに弱まってしまう (Takemi 2007). このように浮力が小さい状況において, 前線帯での収束に伴う広域の上昇流や地形性の強制上昇流が発生することにより, MAUL が形成・維持されることが考えられる. Tsuji *et al.* (2020) は, 平成 30 年 7 月豪雨の発生には, 上空のトラフに伴う準地衡風の強制上昇 (Holton (2004) の ω 方程式による診断に基づく) による大気の湿潤化が重要な役割を果たしており, これにより豪雨発生に好都合な状況が作られていることを示した. このように, 広域での上昇流を強制する物理過程が何であるかをまずは事例解析から示すことが大事であろう. MAUL は絶対不安定であることから, その不安定の維持と解消の過程および降水強化との因果関係について, 今後の研究により解明されることが期待される.

参考文献

- Bryan, G. H. and J. M. Fritsch, 2000: Moist absolute instability: The sixth static stability state. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **81**, 1207-1230.
- Holton, J. R., 2004: *An Introduction to Dynamic Meteorology* (4th ed.). Academic Press, 535 pp.
- James, R. P., J. M. Fritsch and P. M. Markowski, 2005: Environmental distinctions between cellular and slabular convective lines. *Mon. Wea. Rev.*, **133**, 2669-2691.
- Kingsmill, D. E. and R. A. Houze Jr., 1999: Thermodynamic characteristics of air flowing into and out of precipitating convection over the west Pacific warm pool. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **125**, 1209-1229.
- Lucas, C., E. J. Zipser and M. A. LeMone, 1994: Vertical velocity in oceanic convection off tropical Australia. *J.*

- Atmos. Sci., **51**, 3183–3193.
 - Naka, N. and T. Takemi, 2023: Characteristics of the environmental conditions for the occurrence of recent extreme rainfall events in northern Kyushu, Japan. SOLA, **19A**, 9–16.
 - Takemi, T., 2007: Environmental stability control of the intensity of squall lines under low-level shear conditions. J. Geophys. Res. Atmos., **112**, D24110, doi:10.1029/2007JD008793.
 - Takemi, T. and T. Unuma, 2020: Environmental factors for the development of heavy rainfall in the eastern part of Japan during Typhoon Hagibis (2019). SOLA, **16**, 30–36.
 - Tsuji, H., C. Yokoyama and Y. N. Takayabu, 2020: Contrasting features of the July 2018 heavy rainfall event and the 2017 northern Kyushu rainfall event in Japan. J. Meteor. Soc. Japan, **98**, 859–876.
 - Tsuji, H., Y. N. Takayabu, R. Shibuya, H. Kamahori and C. Yokoyama, 2021: The role of free-tropospheric moisture convergence for summertime heavy rainfall in western Japan. Geophys. Res. Lett., **48**, e2021GL095030, doi:10.1029/2021GL095030.
 - Unuma, T. and T. Takemi, 2016: Characteristics and environmental conditions of quasi-stationary convective clusters during the warm season in Japan. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., **142**, 1232–1249.
-