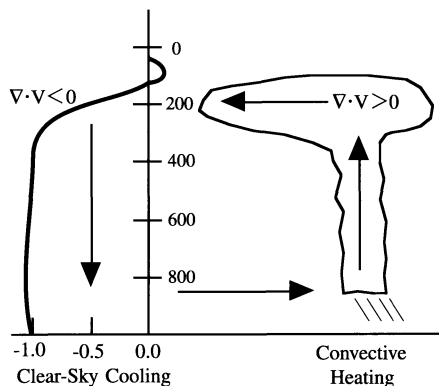


“Fixed Anvil Temperature (FAT)” 仮説

気候-雲フィードバック，すなわち，放射-雲-大規模循環場の相互作用，の問題は，気候システムの鋭敏性に関する研究の中で最も不確かな点のひとつである (Hartmann, 1994). そのことは，例えば，温室効果気体の増加に伴う地球温暖化予測の，気候モデルによるばらつきが雲フィードバックに大きく依存する (Cess *et al.*, 1989) ことに顕著に見られる. 本稿では，雲フィードバックの一側面として，気候変動下でかなとこ雲 (anvil) の温度が変化しないことを主張する，“fixed anvil temperature (FAT)” 仮説を紹介する. FAT 仮説は，现阶段では確立した考えではないが，雲フィードバックを理解する有力な手がかりの一つと考えられる.

Hartmann *et al.* (2001) は，熱帯の平均的気候状態を想定した放射伝達モデル計算から，晴天領域における放射冷却率分布が200 hPa 以上で高さとともに急激に減少する結果を得た(第1図). 彼らは，その理由として，そのような高度では温度が非常に低く，クラジウス-クラペイロンの関係式より飽和水蒸気圧が低く抑えられ，水蒸気による長波放射がきわめて非効率であることを挙げている.

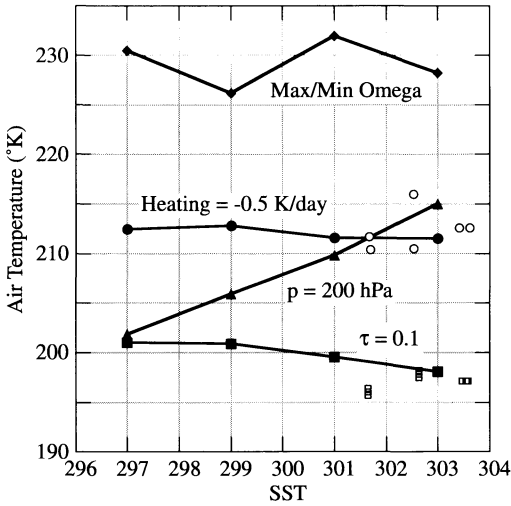
Hartmann and Larson (2002, 以下 HL) は，この放射冷却率分布から，平均状態に関する描像が次のように得られることを主張した. 晴天領域における200 hPa 以下の放射冷却は，下降流に伴う断熱加熱と釣り合う. 質量保存を満足させるために，晴天領域での下降流は，対流領域での上昇流を必要とする. 上昇流に伴う断熱冷却は，対流加熱 (潜熱の放出) と釣り合っている. 200 hPa 付近では対流領域から晴天領域へ向けて空気が流れ出し，かなとこ雲を伴う. 要約すれば，かなとこ雲の存在する高度は，晴天領域において長波冷却が減少する高度であり，その高度の温度は，クラジウス-クラペイロン原理で決定される. したがって，HL は，地表の温度が上昇したとき，対流圏界面高度とともに，かなとこ雲の存在する高度は上昇する (かも



第1図 晴天領域における放射冷却率(実線)と循環(矢印)を示す模式図. 縦軸は気圧. HL より引用.

しれない) が，その高度の温度はほぼ一定であると考えた.

HL は，メソスケールモデル (NCAR/PSU MM5) を用いた数値実験により，FAT 仮説を支持する結果を得た. モデルは，水平120 km 四方を16×16格子点，二重周期境界条件で表現し，鉛直には24層を有する. 地表は，一様な温度を持つ海で覆われている. 海面温度 (SST) を実験パラメータとして変化させ，それぞれについて平衡状態を求めた. 実験結果は，SST を上昇させたとき，上部対流圏における一定気圧レベルにおける温度は上昇する一方，上層の雲頂付近の温度は比較的一定であることを示している (第2図). ここでは詳細には触れないが，HL は，水平傾度を持つ SST 分布を与えた場合でも，仮説が概ね成り立つことを確認している. 特に，気候変動下で雲の微物理過程が同じである保障はない，すなわち，同一の雲パラメタリゼーションが妥当とは限らないが，上の考えは雲の微物理過程には依存しないことに留意すべきである. このことは，より精巧な非静力学雲解像モデルを用いた実験や，観測データに基づいた解析でも今のところ仮説を支持する (少なくとも棄却しない) 結果が得られている (Hartmann, 私信) ことと矛盾しない.



第2図 メソスケールモデルを用いた数値実験の結果。“ $p=200$ hPa”の線は、200 hPaにおける温度を、実験パラメータとして走査したSSTの関数として示す。“Max/Min Omega” (“Heating = -0.5 K/day”/“ $\tau=0.1$ ”)の線は、最大の鉛直風が存在する(加熱率が -0.5 K/dayを横切る/大気上端からの可視域での光学的厚さが 0.1 となる)レベルでの温度を示す。HLより引用。○と□は、水平傾度を持つSST分布を与えた場合の結果を示す(詳細は原論文を参照)。

FAT 仮説は、クラジウスークラペイロンの関係式というごく基本的な原理に基づくので、かなり異なった気候状態でも雲フィードバックに制約を与えることになる。かなとこ雲は熱帯の対流領域における長波放射に支配的役割を果たすことから、この仮説は、熱帯の対流性雲システムからの長波放射が一定であることを示唆する。長波放射だけを考えた場合、このことは、気候(系の温度)が変化しても系外に出て行くエネルギーが変化しないことから、熱帯の気候は外力(例えば、SSTや温室効果気体の濃度)の変化に大きな鋭感性を持つことを含意する。ただし、HLも言及しているように、他の効果、例えば短波に対する雲の効果(面積やアルベドの変化)も考慮すると、この推論が保持されるかは明らかでない。

著者としては、現段階では、FAT 仮説は上のような推論よりも、むしろ雲フィードバックをよりよく理解する制約を与える手がかりの1つとして有用であると思われる。例えば、前述したようにこの視点から観測データを見直すことや、さらに、もしFAT 仮説が現実大気で成り立つならば、季節変化やエルニーニョ・南方振動に関連して考察されている(Cess *et al.*, 1997; Cess *et al.*, 2001)ように、この特徴は、全球気候モデルを含む様々な階層の数値モデルにおける雲の振る舞いを検証する視点としての使いみちが考えられる。

謝 辞

本稿の準備段階で、京都大学理学研究科廣田 勇名 誉教授、新村典子「天気」編集委員、及び「天気」査読者に有益な助言を頂きました。

(ワシントン大学大気科学教室 田口正和 (taguchi@atmos.washington.edu)).

参 考 文 献

- Cess, R. D. *et al.*, 1989: Interpretation of cloud-climate feedback as produced by 14 atmospheric general circulation models, *Science*, **245**, 513-516.
- Cess, R. D. *et al.*, 1997: Comparison of the seasonal change in cloud radiative forcing from atmospheric general circulation models and satellite observations, *J. Geophys. Res.*, **102**, 16593-16603.
- Cess, R. D., M. Zhang, P.-H. Wang and B. A. Wielicki, 2001: Cloud structure anomalies over the tropical Pacific during the 1997/98 El Nino, *Geophys. Res. Lett.*, **28**(24), 4547-4550.
- Hartmann, D. L., 1994: *Global Physical Climatology*, Academic Press, 411 pp.
- Hartmann, D. L., J. R. Holton and Q. Fu, 2001: The heat balance of the tropical tropopause, cirrus, and stratospheric dehydration, *Geophys. Res. Lett.*, **28**(10), 1969-1972.
- Hartmann, D. L. and K. Larson, 2002: An important constraint on tropical cloud-climate feedback, *Geophys. Res. Lett.*, **29**(20), 1951, doi:10.1029/2002GL015835.