

1.3.5. 潜熱加熱(重 尚一)

(1) TRMMでの成果

大気中の熱や水の循環に重要な役割を果たすメソ対流系には、短時間に激しい雨をもたらす対流性領域と長時間弱い雨の続く層状性領域が存在し (図1.3.5-1)、両者で潜熱加熱プロファイルの構造が大きく異なる (Houze, 1982; Johnson, 1984)。対流性加熱は中層にピークをもった正の加熱プロファイルであり (図1.3.5-2a)、層状性領域は上層の加熱と下層の冷却からなるプロファイルである (図1.3.5-2b)。メソ降水システム全体の潜熱加熱プロファイルは対流性・層状性降雨の比によって変化するが、一般的に対流圏上層で最大値を持つtop-heavyなプロファイルとなる (図1.3.5-2c)。Hartman *et al.* (1984) は、従来仮定されていた中層に最大値を持った対流性加熱プロファイルに比べ、top-heavyなプロファイルの方が観測により合ったウォーカー循環を生み出すことを単純化したグローバルモデルを用いて示した。このように熱帯大気の大規模循環にとって潜熱加熱が非常に重要な役割を果たしているため、潜熱加熱の4次元的構造の推定がTRMMの主要目的の1つであった (Simpson *et al.*, 1996)。Schumacher *et al.* (2004) は、TRMM PRによって観測された対流性・層状性降雨比から簡単に潜熱加熱プロファイルを算出し、潜熱加熱の鉛直構造の水平変化が熱帯大規模循環のシミュレーションに非常に重要であることを示した。最近、Shige *et al.* (2006) は、Spectral Latent Heating (SLH) アルゴリズム (Shige *et al.*, 2004) を改良してTRMM PRデータから熱帯海洋上の潜熱加熱プロファイルを推定し、潜熱加熱プロファイルが対流性・層状性降雨比だけでなく、対流性加熱プロファイルの変化に伴って大きく変化していることを示した (図1.3.5-3)。

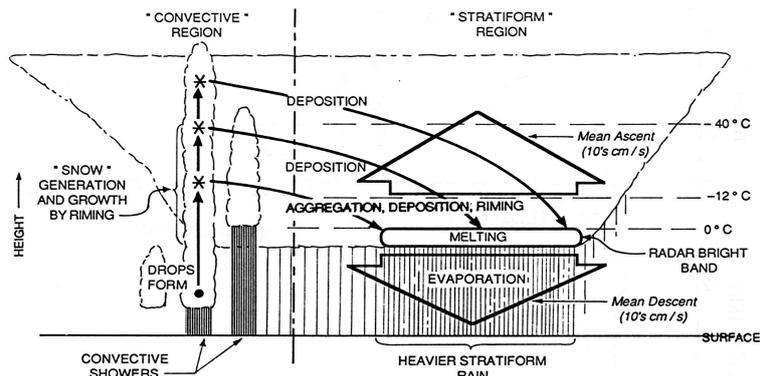


図1.3.5-1 メソ対流系における降水機構の模式図 (Houze, 1989)

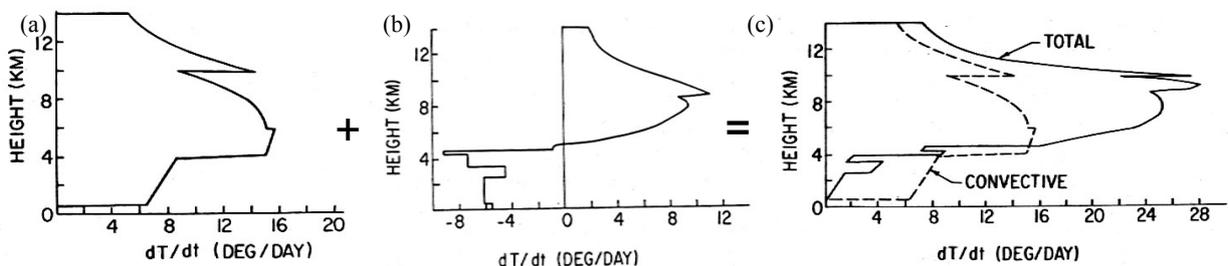


図1.3.5-2 メソ対流系の (a) 対流性加熱プロファイル、(b) 層状性加熱プロファイル、(c) 全体の加熱プロファイル (ただし比較のために(a)の対流性プロファイルが点線で示されている)。(Houze, 1982)

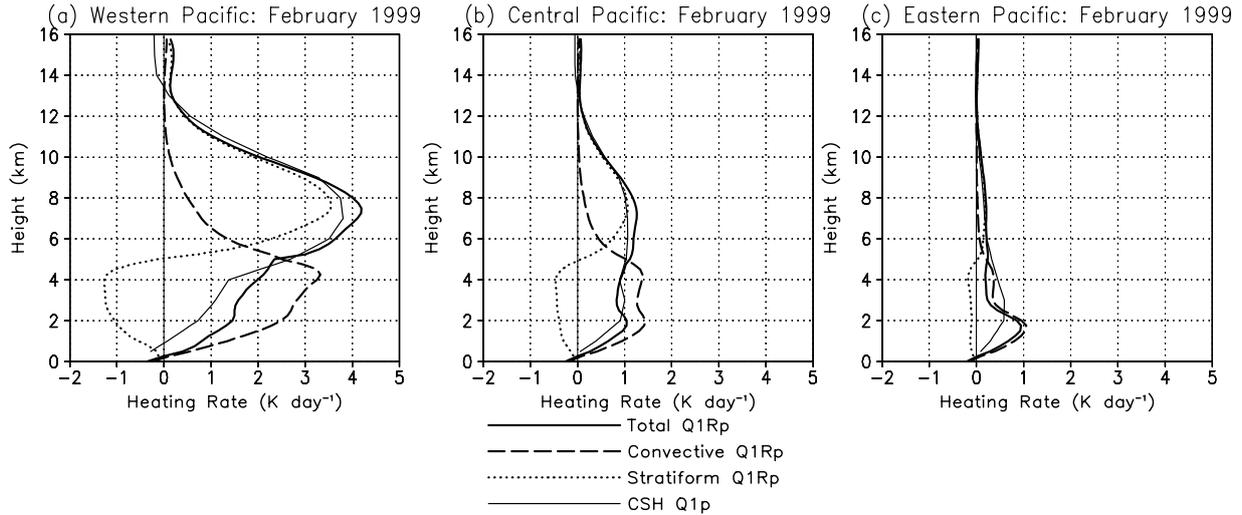


図1.3.5-3 SLH アルゴリズムによって推定された 1999 年 2 月の月平均の全体 (太実線)、対流性 (破線)、および層状性加熱プロファイル (点線)。比較のため CSH による推定値 (細実線) も示してある。場所は、(a) 西太平洋 (b) 中央太平洋 (c) 東太平洋。(Shige *et al.*, 2006)

(2) 中高緯度での潜熱加熱の役割

TRMM の観測域は熱帯・亜熱帯域に限られていたが、GPM では観測域が中・高緯度まで拡大する。熱帯では気温は水平にほぼ一様であるが、中・高緯度では南北方向の気温傾度が大きく、傾圧性が強い。したがって、中・高緯度では位置エネルギーが運動エネルギーに変換されて発達する温帯低気圧が支配的で、降水に伴う潜熱加熱の役割は熱帯に比べれば相対的に小さい。しかしながら、中高緯度においても潜熱加熱がメソスケールや総観規模のシステムを発生させたり、変形させたりしている。例えば、爆発的に発達する低気圧の強い傾圧性の環境場では、潜熱加熱が低気圧発達の基本的過程を変えるまでには至らないものの、低気圧発達の強化を行っていることが示されている (Davis *et al.*, 1993)。一方、弱い傾圧性の環境場では、潜熱加熱の低気圧の発達における役割は増し、スコールラインに伴う潜熱加熱が傾圧不安定波動の位相の傾きを促進することで、低気圧発達の基本的過程にまで影響を与えていることが示されている (Zhang and Harvey, 1995)。また、非常に弱い傾圧性の環境場では、メソ対流系による潜熱加熱がメソ渦を発生させ、このメソ渦が新しい対流や長寿命のメソ対流系を発生させることがある (Zhang and Fritsch, 1987)。

潜熱加熱の力学的影響は、摩擦を無視した等温位渦位の方程式 (小倉, 2000, p.91)

$$\frac{dP_\theta}{dt} = P_\theta \frac{\partial \dot{\theta}}{\partial \theta} \quad (1)$$

により評価できる。ここで、

$$P_\theta \equiv -g \frac{\xi_\theta + f}{\partial p / \partial \theta}, \quad \xi_\theta = \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right)_\theta - \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)_\theta$$

で、 $g$  は重力加速度、 $f$  はコリオリ・パラメータ、 $p$  は気圧、 $\theta$  は温位、 $\dot{\theta}$  は非断熱加熱、 $u$ 、 $v$  は風の水平成分である。等温位面が水平であるとする (中緯度では一般的に正しくないが)、式 (1) の右辺は加熱の鉛直微分に相当し、潜熱加熱が高度 ( $\theta$ ) と共に増加 (減少) すると渦位が増加 (減少) することが分かる。したがって、渦位場の時間発展を正確に把握するには、潜熱加熱プロファイルの精度の高い推定が必要となる。

(3) 中高緯度での潜熱加熱プロファイルの特徴

Houze (1989) は、様々な地域から得られた加熱プロファイルと比較し、対流性加熱プロファイルは地域による違い、とりわけ熱帯海洋上と中緯度大陸上（北米）で違いが大きいことを示している。熱帯海洋上では Johnson (1984) が示すように対流性加熱の最大値の高度は対流圏下層から中層に存在するのに対して、Gallus and Johnson (1991) で得られた中緯度スコールラインの対流性加熱プロファイルは対流圏上層に最大値を持つ（図1.3.5-4）。この違いは、中緯度大陸上では熱帯海洋上に比べて背の高い対流が多く、さらに同じ高さの対流であっても中緯度大陸（とりわけ北米大陸上）では氷相過程が強く働いているために対流圏上層の加熱が大きいためである。

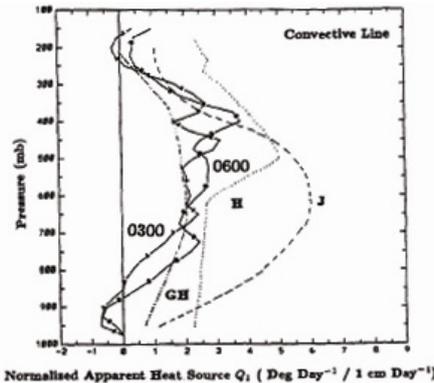


図1.3.5-4 PRE-STORM スコールラインの 1985 年 6 月 11 日 0300 および 0600UTC における  $Q_1$  プロファイル。Houze (1982) [H], Gamache and Houze (1985) [GH], Johnson (1984) [J]の熱帯における対流性加熱プロファイルも示す。(Gallus and Johnson, 1991)

Houze (1989) は、層状性加熱プロファイルは地域による違いは小さいとしている。熱帯も中緯度もメソ対流系の層状性降水は、図1.3.5-1に見られるように隣接する深い対流から移流されてきた凝結物と、層状性領域内のメソスケール上昇流自身によって生成された凝結物からなっている。しかしながら、温帯低気圧のメソスケール降雨帯に伴う層状性降雨はこれとは異なる降水機構を示す場合がある。図1.3.5-5に示す幅の広い寒冷前線降雨帯に伴う層状性降雨のケースでは、深い対流から凝結物が移流されてくるのではなく、気温が  $-15^{\circ}\text{C}$  より低い高度で生じた生成セルによって氷粒子が形成され（“SEEDER” ZONE）、氷粒子がその下層の上昇流域を落下しながら雲水を消費して成長することによって形成されている（“FEEDER” ZONE）。このケースでは融解層およびその下層では上昇流が弱かったため降水の成長はほとんど無視できるが、他の温暖前線降雨帯における層状性降水のケースでは、生成セルによって形成された降雪粒子が下層まで広がる上昇流域を落下しながら成長している（図1.3.5-6）。このような層状性領域における降水機構の違いは、潜熱加熱の鉛直プロファイルにも大きく影響すると考えられる。

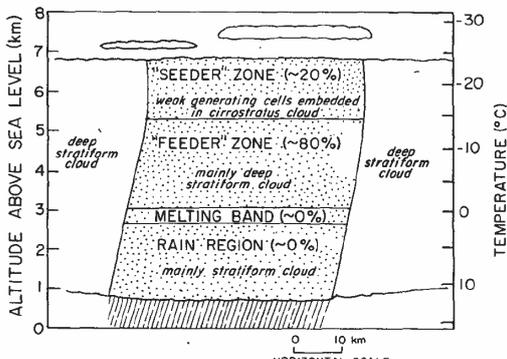


図1.3.5-5 幅の広い寒冷前線降雨帯の模式図 (Hobbs et al., 1980)

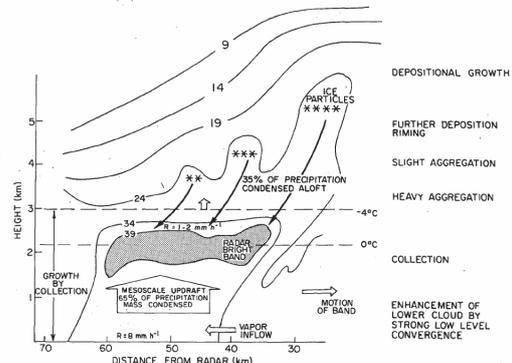


図1.3.5-6 温暖前線降雨帯の模式図 (Houze et al., 1981)

## 参考文献

- Davis, C. A., M. T. Stoelinga and Y.-H. Kuo, 1993: The integrated effect of condensation in numerical simulations of extratropical cyclogenesis. *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 2309-2330.
- Gallus, W. A., Jr., and R. H. Johnson, 1991: Heat and moisture budgets of an intense midlatitude squall line. *J. Atmos. Sci.*, **48**, 122-146.
- Gamache, J. F., and R. A. Houze, Jr., 1985: Further analysis of the composite wind and thermodynamic structure of the 12 September GATE squall line. *Mon. Wea. Rev.*, **113**, 1241-1259.
- Hartmann, D. L., H. H. Hendon and R. A. Houze, Jr., 1984: Some implications of the mesoscale circulations in tropical cloud clusters for large-scale dynamics and climate. *J. Atmos. Sci.*, **41**, 113-121.
- Hobbs, P. V., T. J. Matejka, P. H. Herzegh, J. D. Locatelli and R. A. Houze, Jr., 1980: The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones. I: A case study of a cold front. *J. Atmos. Sci.*, **37**, 568-596.
- Houze, R. A., Jr., 1982: Cloud clusters and large-scale vertical motions in the tropics. *J. Meteor. Soc. Japan*, **60**, 396-410.
- Houze, R. A., Jr., 1989: Observed structure of mesoscale convective systems and implications for large-scale heating. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **115**, 425-461.
- Houze, R. A., Jr., S. A. Rutledge, T. J. Matejka and P. V. Hobbs, 1981: The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones. III: Air motions and precipitation growth in a warm-frontal rainband. *J. Atmos. Sci.*, **38**, 639-649.
- Johnson, R. H., 1984: Partitioning tropical heat and moisture budgets into cumulus and mesoscale components: Implications for cumulus parameterization. *Mon. Wea. Rev.*, **112**, 1590-1601.
- 小倉義光, 2000: 総観気象学入門, 東京大学出版, pp. 289.
- Schumacher, C., R. A. Houze, Jr., and I. Kraucunas, 2004: The tropical dynamical response to latent heating estimates derived from the TRMM Precipitation Radar. *J. Atmos. Sci.*, **61**, 1341-1358.
- Shige, S., Y. N. Takayabu, W.-K. Tao and D. E. Johnson, 2004: Spectral retrieval of latent heating profiles from TRMM PR data. Part I: Development of a model-based algorithm. *J. Appl. Meteor.*, **43**, 1095-1113.
- Shige, S., Y. N. Takayabu, W.-K. Tao and C.-L. Shie, 2006: Spectral retrieval of latent heating profiles from TRMM PR data. Part II: Algorithm Improvement and heating estimates over tropical ocean regions. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, accepted.
- Simpson, J., C. Kummerow, W.-K. Tao and R. F. Adler, 1996: On the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). *Meteor. Atmos. Phys.*, **60**, 19-36.
- Zhang, D.-L., and J. M. Fritsch, 1987: Numerical simulation of the meso- $\beta$  scale structure and evolution of the 1977 Johnstown Flood. Part II: Inertially stable warm-core vortex and the mesoscale convective complex. *J. Atmos. Sci.*, **44**, 2593-2612.
- Zhang, D.-L., and R. Harvey, 1995: Enhancement of extratropical cyclogenesis by a mesoscale convective system. *J. Atmos. Sci.*, **52**, 1107-1127.