

平成13年度

宇宙開発事業団成果報告書

様々な雲システムにおける潜熱放出プロファイルと  
降水構造に関する研究

2002年3月

通信総合研究所  
Communications Research Laboratory

## 抄 録

1 / 2

資料コード		取扱区分	開示制限・特殊・一般
協議先	1 .	2 .	
開示制限期間	年 月	入手区分	委託・請負 協定 共同研究

: NASDA 記入

契約年度	平成 1 3 年度	発行年月	平成 1 4 年 3 月
作成元(和)	佐藤晋介 (通信総合研究所)		
納入相手先	宇宙開発事業団		
調達仕様書番号			
契約件名	様々な雲システムにおける潜熱放出プロファイルと 降水構造に関する研究		
標題			
副標題			
和文抄録	<p>雲システムにおける潜熱加熱プロファイルは、雲スケールの対流循環だけでなく、大気大循環にも大きな影響を及ぼす。これまでに提案されてきた潜熱加熱アルゴリズム(LHA)は、TRMM マイクロ波放射計(TMI)のデータを用いるもので、雲解像モデルの結果に依存するという欠点があった。本研究で開発した TRMM 降雨レーダ(PR)データを用いる潜熱加熱アルゴリズム(PR-LHA)は、降水粒子の落下速度と降水量の鉛直傾度に加え、4次関数で推定した鉛直流プロファイルを用いることによって、降水の鉛直プロファイルを反映した潜熱プロファイルを求めることができる。このアルゴリズムを用いることによって、スコールライン、台風、浅い対流、前線や山岳域における降雨における潜熱加熱プロファイルの特徴が明らかにされた。PR-LHA は、対流性/層状性の違いだけでなく降雨の高さや融解層高度の情報を含むので、様々な雲システムの加熱プロファイルの違いを示すのに適している。</p>		
媒体区分	CD-ROM	MT	光 AV その他 (媒体を記入)
納入部数			: 部
発行国		言語区分	JP・EN・
本文ページ数		要約ページ数	
キーワード (和文)	潜熱加熱 潜熱プロファイル 降水プロファイル 鉛直流 雲解像モデル 雲システム		

(英文)

2 / 2

作成元	Shinsuke Satoh (Communications Research Laboratory)
契約件名	Study on latent heating profiles and precipitation structure in various cloud systems
標題	
副標題	
抄録	<p>Latent heating profiles in cloud systems have an important role in not only cloud-scale circulation but also global circulation. A few latent heating algorithms (LHAs), which were proposed before, were based on a cloud resolving model, and were mainly applied to TMI data. A LHA using the TRMM PR data, which is developed in this study, can retrieve a LH profile that reflects the precipitation profile. The PR-LHA uses an estimated vertical wind profile by a fourth power function, in addition to the fall velocity and the vertical gradient of precipitation. The application of the PR LHA to squall line, typhoon, shallow convection, frontal and mountainous rainfalls, reveals some characteristics of the mean latent heating profiles. The PR LHA has an advantage of including rainfall information on not only convective/stratiform classification but also storm height and melting level. This advantage seems to be very useful to show the difference between the various heating profiles.</p>
キーワード	<p>Latent heating</p> <p>Latent heating profiles</p> <p>Precipitation profile</p> <p>Vertical wind</p> <p>Cloud resolving model</p> <p>Cloud system</p>

# 様々な雲システムにおける潜熱放出プロファイルと降水構造に関する研究

Study on latent heating profiles and precipitation structure in various cloud systems

PI: 佐藤晋介 (通信総合研究所)

CI: 川島正行 (北海道大学低温科学研究所)

: 牛山朋来 (地球観測フロンティア)

## 1. はじめに

降水を伴う雲システムにおける潜熱放出量の3次元分布は、メソスケールあるいは雲スケールの対流循環だけでなく、地球規模の大気大循環に大きな影響を及ぼす。そのため、TRMM プロジェクトでは、熱帯域の潜熱加熱プロファイルを定量的に求めることを最終目標の一つとしている。これまでは、主としてマイクロ波放射計のデータから潜熱加熱を推定するアルゴリズムが提案されている。しかしながら、マイクロ波放射計は陸上での観測が難しく、水平分解能も良くないという欠点がある。さらに、このアルゴリズムは数値モデルの結果をデータベースとして使用しているので、様々な環境や場所におけるすべての雲システムの潜熱プロファイルを正確に推定しているとは言えない。そこで本研究では、Satoh et al. (2001) で提唱した TRMM 降雨レーダのデータを用いる潜熱放出プロファイルのリトリーブアルゴリズムを発展させ、様々な雲システムにおける潜熱放出プロファイルを求めることを目的とする。また、雲解像モデルの結果などを用いて、そのアルゴリズムの検証を行う。

第1表: TRMM 潜熱加熱アルゴリズムの長所と短所

	長所	短所	TMI vs PR
GPROF (2A12)	物理的なアプローチ ベイズ法によるランダム エラー 10 km ~ 5 ° 格子	数値モデルの結果に 依存 データベースのエラー	TMIのみ 観測幅が大きく、サン プリング誤差は少な いが、ストームの高さ や内部構造などの情 報を得るのが困難 陸上では、85GHzデー タの依存度が大きい
HH	物理的なアプローチ 10 km ~ 5 ° 格子	リトリーブした雲・降水 粒子のプロファイルの 精度に依存	
CSH	診断的な収支解析の 結果に基づく 5 × 5 ° 月平均	層状性降雨の割合や look-up tableのプロファ イルに対して敏感	TMI, PRいずれに も適用可能
PRH	数値モデルに依存しない 降雨の高さや構造の 情報を含む 5 km ~ 20 km格子	鉛直流プロファイルの 推定誤差の影響 (検証が不十分)	PRのみ サンプリング頻度の 問題が大きい

第1表に、これまでに提案された TRMM 潜熱加熱アルゴリズムの長所と短所を示す。Goddard Profiling Heating algorithm (GPROF) は、Kummerow (1994), Olson(1999)によって提案されたアルゴリズムで、観測された多波長のマイクロ波放射計のデータに最もふさわしい最適解を、データベースの中からベイズ法を用いて選ぶ方法である。GPROF は、TRMM 標準アルゴリズム 2A12 として採用されている。主な欠点は、データベースを限られた数の数値モデルの結果に基づいて作成しているため、

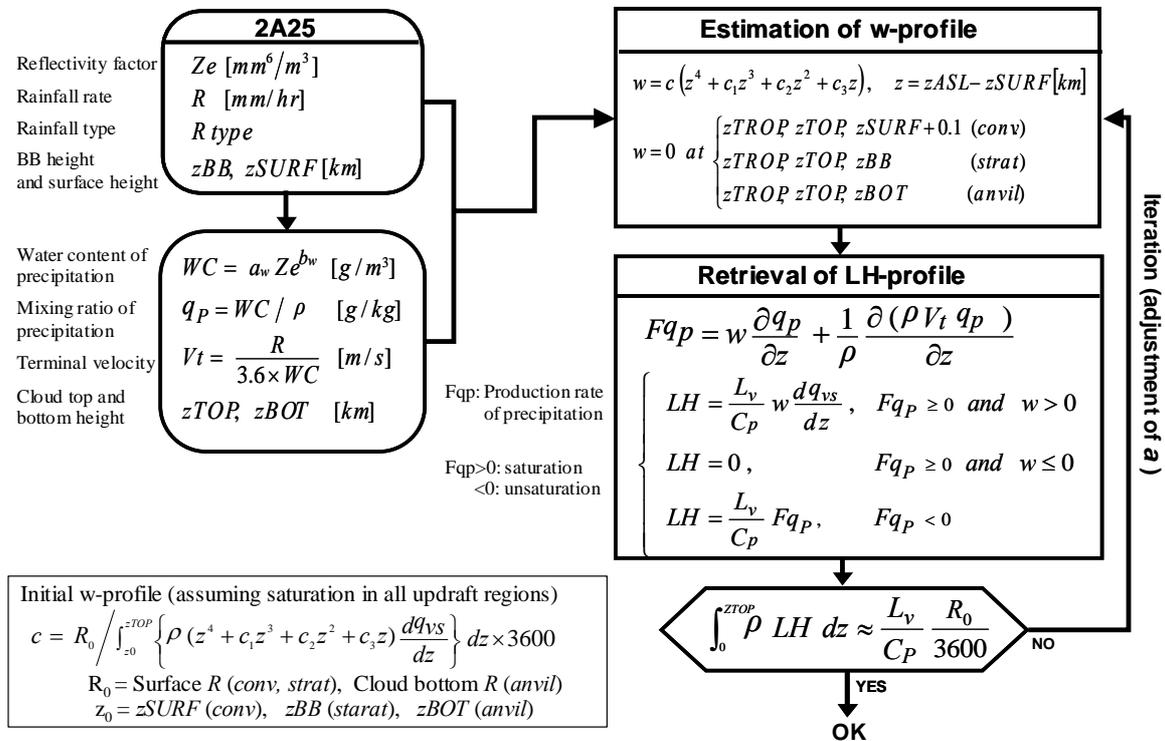
様々な種類の雲システムをすべて再現できるとは限らないことである。2番目のアルゴリズムは、Hydrometeor/Heating algorithm (HH) と呼ばれ、Tao (1990)により提案されたもので、GPROF と同様に数値モデルの結果に基づいて雲と降水のプロファイルを求めるものであるが、ベイズ法は用いない。3番目の Convective-Stratiform Heating Algorithm (CSH)は、Tao (1993)により提案されたもので、look-up table を基にして対流性降雨と層状性降雨の割合から潜熱プロファイルを求める方法である。CSH アルゴリズムはTMI だけでなく PR にも適応可能で、 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$  グリッド月平均の潜熱加熱を求めるには優れた方法である(Tao et al.,2001)。4番目の PR Heating Algorithm (PRH) は、本研究で用いるアルゴリズムで Satoh (2001) により提案されている。数値モデルの結果に依存せず、PR データを用いることから海陸を問わず降雨構造を反映することができるが、その検証はまだ不十分である。表には記していないが、最近 Shige and Takayabu (2001)によって、Spectral Retrieval of Latent Heating (SRH)というアルゴリズムも提案されている。これは、層状性/対流性、海洋上/大陸上に分けられた降雨プロファイルのスペクトル解析から求めた look-up table を用いるもので、PR データに適用される。

## 2. 潜熱加熱アルゴリズムの改良

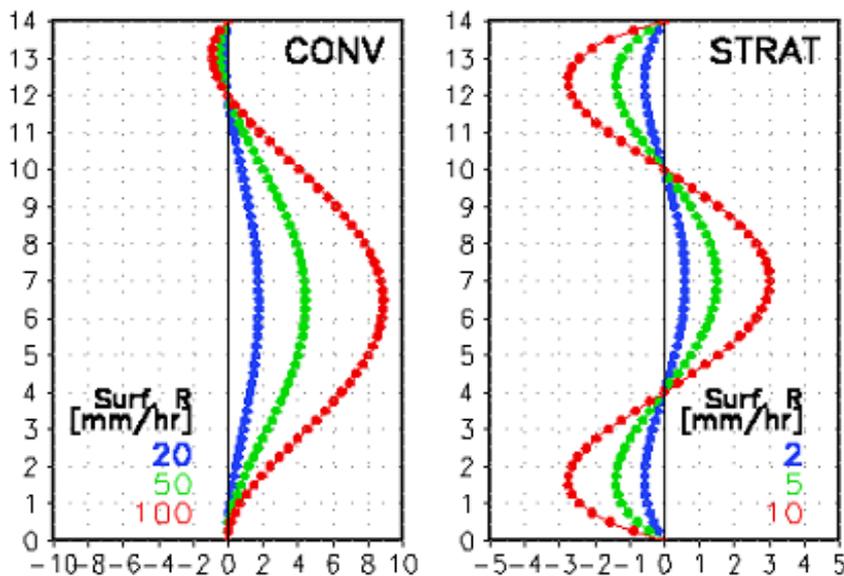
第1図は、PR Heating アルゴリズムの説明図であり、本研究で行った改良点を含む新しいフローチャートと式である。この PRH アルゴリズムは、熱力学的リトリーバル法(Roux and Sun, 1990; Kawashima et al.,1995; Satoh et al.,1996)を鉛直1次元方向に応用したものであり、必要な入力データは2A25のみである。降水の生成率( $F_{qp}$ )は、鉛直流プロファイル、降水粒子の終端落下速度と混合比の鉛直傾度によって算出する。鉛直流プロファイルは、地上高度、融解層高度、雲頂高度、圏界面高度によって決められる4次関数で推定する。そのプロファイルの形は、対流性/層状性といった降雨タイプによって区別し、対流性降雨ではすべての高度で上昇流、層状性降雨の場合は融解層の下で下降流とする。降雨レーダは潜熱加熱に直接関係する雲のプロファイルは測定できないので、 $F_{qp}$  が正の高度では飽和水蒸気量の減率と上昇流の大きさから加熱プロファイルを算出する。下降流域で  $F_{qp}$  が正の場合は、レーダで測定できる大きさの雨粒が衝突併合過程によって増加したと考えられるので、潜熱加熱量はゼロとする。 $F_{qp}$  が負の場合は、潜熱の吸収(蒸発)が生じていると考える。最後に、潜熱加熱プロファイルの鉛直積分量と地上降雨量を一致させるように、鉛直流プロファイルを表す4次関数の係数を繰り返し計算によって調整する。

本アルゴリズムのさらなる詳細については、Satoh and Noda (2001)あるいは佐藤(2001)に記されているので、以下では今回改良した点についてだけ述べる。これまでは鉛直流プロファイルを推定するのに3次関数を用いていたが、雲頂付近のプロファイルが不自然になることがあるため、従来の地表面高度、融解層高度/雲底高度、雲頂高度で  $w=0$  となる条件に加えて、平均的な圏界面高度(現在は緯度のみの関数)でも  $w=0$  となるとして4次関数を用いることとした。次章で示す雲解像モデルの結果を見ても4次関数による鉛直流プロファイルの方が現実的であることが分かる。第2図は、対流性降雨および層状性降雨における鉛直流プロファイルの初期値の例である。その他の改良点として、Iguchi et al.(2000)による R-Z 関係式の調整(-adjustment)を反映するように、WC-Ze 関係式の係数も で調整するようにしたことがある。これは2A25 ver.5 で仮定されている粒径分布から求める降水の混合比や終端落下速度が使われることを意味する。次に、降雨タイプとして、対流性・層状性以外の OTHER という分類の降雨を、さらに ANVIL と SHALLOW に区別し、ANVIL では層状性の鉛直流プロファイルを、SHALLOW には対流性の鉛直流プロファイルを与えることとした。別の改良点

は、第1図左下に示したように、鉛直流プロファイルの係数の初期値を上昇流域ですべて飽和しているという仮定と地上降雨量を用いることによって決め、最初からもっともらしいプロファイルを与えることができるようになった。これは、繰り返し計算の数を減らすことになり、計算時間の短縮に効果的である。最後の改良点は、プログラムコードの全面的な書き換えであり、2A25のグラニュールデータに即座に応用することができるようになった。



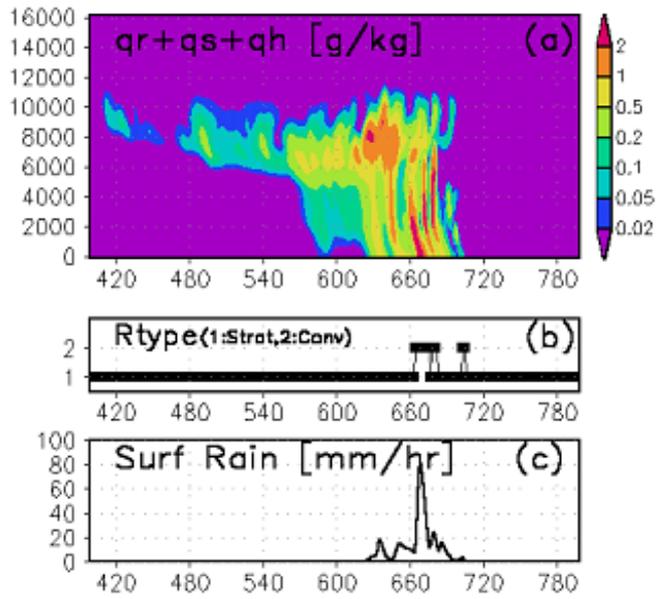
第1図：PR Heating アルゴリズムの説明図



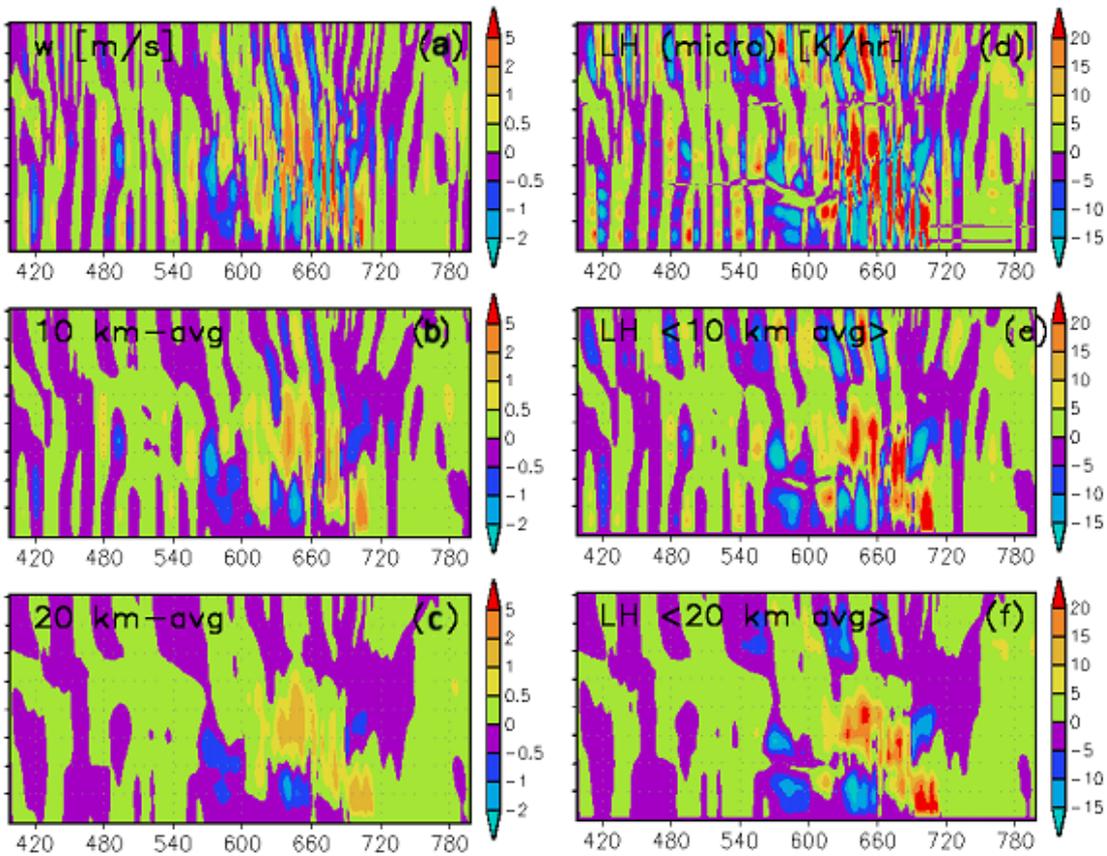
第2図：4次関数で推定した鉛直流プロファイルの例。(a)対流性降雨の場合、(b)層状性降雨の場合

### 3. 雲解像モデルによる鉛直と潜熱プロファイルの検証

第3図は、非静力学雲解像モデル (ARPS) で計算されたスコールラインの鉛直断面である。格子間隔は水平 1 km、鉛直 250 m で、初期値としての環境場は Fovell and Ogura (1988) に従った。図示した降水(雨、雪、霰)の分布は、ほぼレーダで観測される降水量に対応すると考えられる。対流性降雨の割合はわずかであるが、最大の地上降雨量は 80 mm/hr に達している。また、後方にはアンビル状の降水域が広がっている。



第3図： ARPS でシミュレートされたスコールライン。  
(a) 降水(qr+qs+qh)分布の鉛直断面、(b) 地上降雨量、  
(c) 降雨タイプの分類

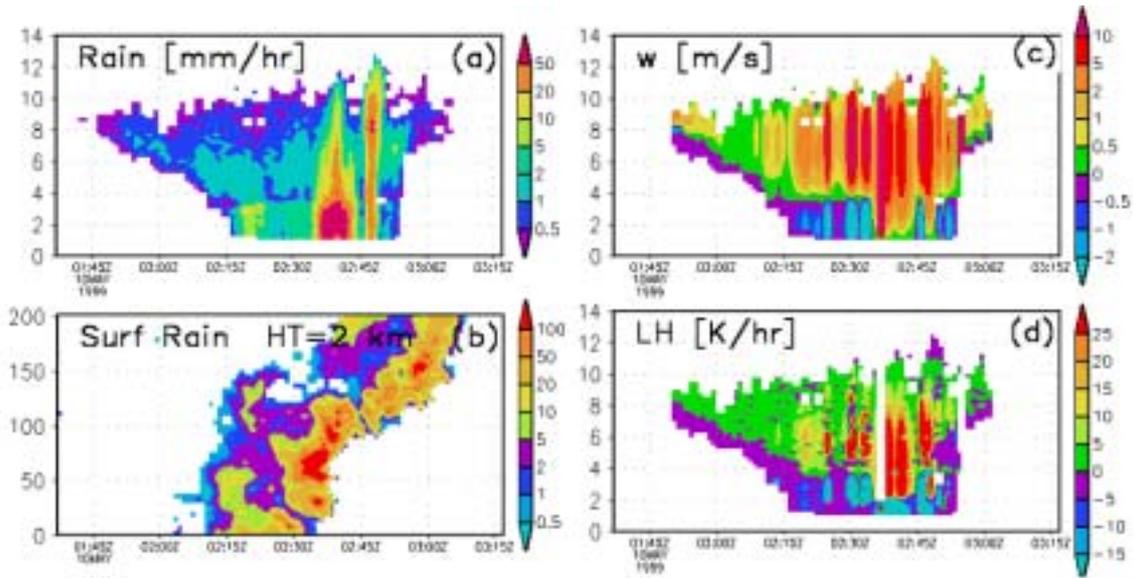


第4図： 鉛直風速の鉛直断面。(a)1 km、(b)10 km、(c)20 km 格子間隔。熱力学の第一法則から求めた潜熱プロファイル(d)1 km、(e)10 km、(f)20 km 格子間隔。

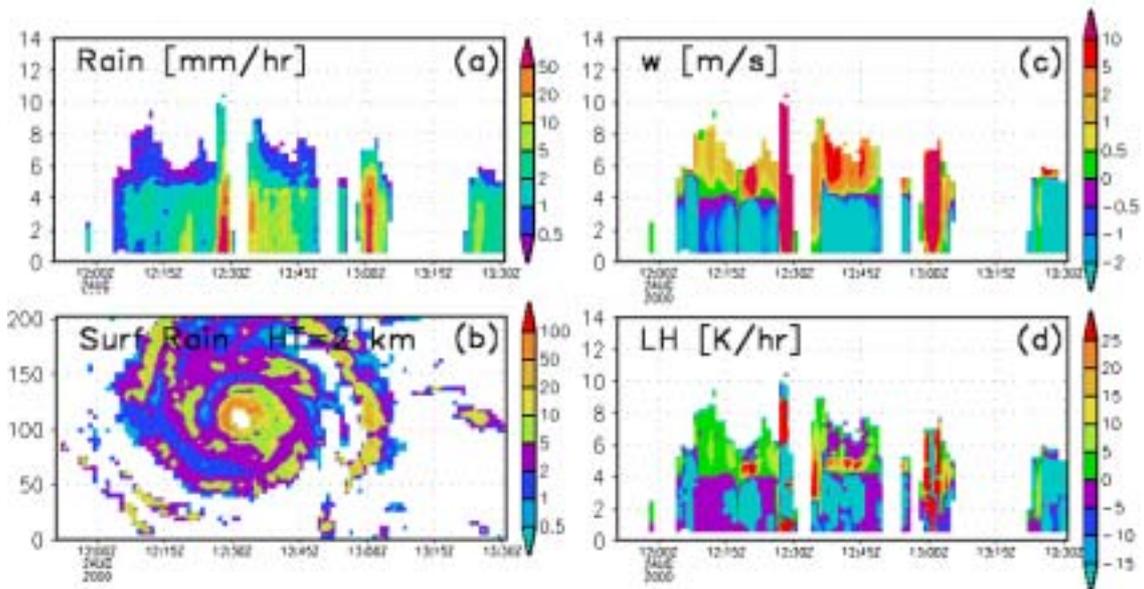
第4図は、第3図に示した鉛直断面内における鉛直風速( $w$ )の分布と、熱力学の第一法則から求めた潜熱プロファイルである。(a)と(d)がオリジナルの計算結果で、(b)と(e)はそれを水平方向に10 km 平均した結果、(c)と(f)は20 km 平均した結果である。オリジナルの計算結果に見られるように、鉛直風速、潜熱プロファイルともに水平方向に数 km 間隔で交互に正負が入れ替わる。しかしながら、10 km あるいは20 km 平均することによって、対流域では雲内ですべて上昇流となり、雲頂高度の半分程度の高度で鉛直速度と加熱量が最大となる。一方、層状域では高度3~5km より下層で下降流となり、負の潜熱加熱(蒸発による冷却)が見られる。地上に降水が達しないアンビル域では、加熱量はほぼ0に近いが、降水のある上層で加熱、その下層で冷却という傾向が見られる。

#### 4. 様々な雲システムの加熱プロファイル

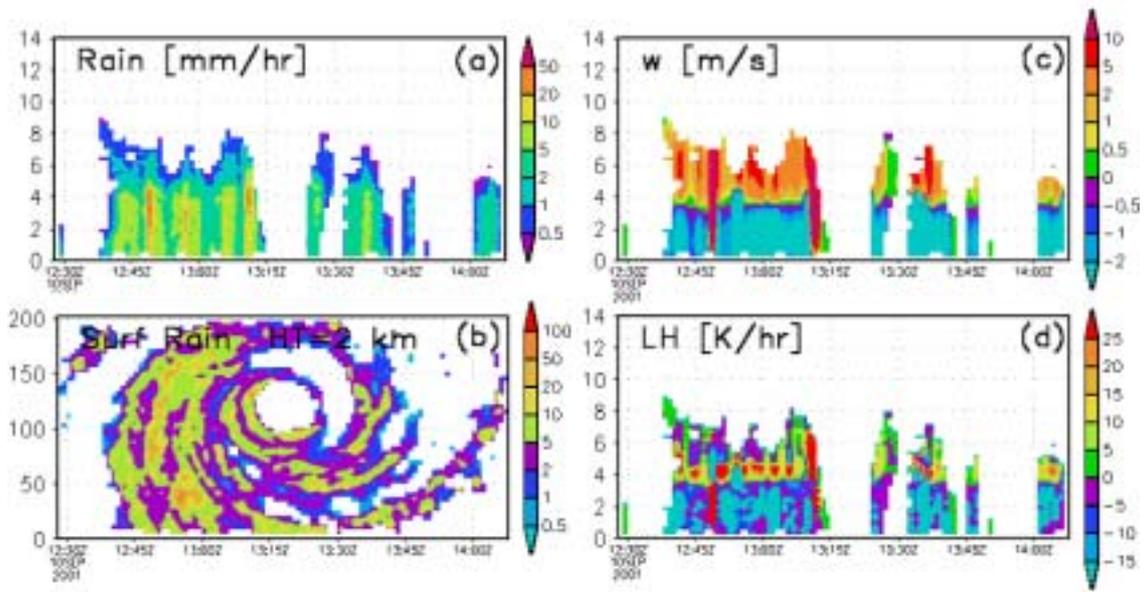
第5図から第9図は、TRMM で実際に観測された事例に対して、本研究で開発したアルゴリズム(PR-LHA)を適用した結果である。各図の(a)は降雨量の鉛直分布、(b)は高度2 km における降雨量の水平分布であり、これらは2A25に含まれる観測データである。(c)は推定した鉛直風速の鉛直分布、(d)は本アルゴリズムでリトリーブされた潜熱加熱の鉛直分布である。第5図は、1999年5月10日にオクラホマで観測された降雨システムで、典型的なスコールラインの構造を持つ。最大地上降雨量は100 mm/hr を超えるため、最大上昇流も5 m/s を超える大きな値となっている。対流セルのごく下層に見られる冷却域は、蒸発にしては大きすぎることと非常に強い降雨が存在することから、2A25のアルゴリズムで減衰補正がうまくできなかった可能性も考えられる。第6図は、2000年8月2日に太平洋上で観測された発達期の台風に伴う降雨で、小さな目の周りで見られる背の高い対流性降雨(アイ・ウォール)で降水量も加熱量も大きくなっている。その外側の層状性降雨域では、融解層より上層で加熱、下層で冷却となっている。第7図は、2001年9月10日に大西洋で観測された衰退期の台風Erinで、第6図の台風に比べて目が大きく、アイ・ウォールも顕著でない等の特徴を持つ。地上降水量も少なく、ほとんどの降雨域が層状性であり、加熱量も小さい。第8図は、2000年6月3日に日本付近で観測された梅雨前線に伴う降雨で、鉛直断面を見るとスコールラインのような構造をしているが、降雨システム全体はほぼ停滞しており、個々の対流セルは西(図の左)から東(右)に移動している。水平断面に見られる南側の強い降雨バンドは屋久島を起点として東に延びている。推定された鉛直風速と潜熱加熱分布は、スコールラインと同様に対流域で全層で正、層状域では融解層より下で負の値となっているが、層状域の上層での加熱量は小さい。第9図は、2000年8月1日にヒマラヤ山脈の麓で観測された降雨システムで、鉛直断面図の左半分の下層のデータが抜けているのは地形によるものである。山岳斜面の麓側で潜熱加熱が大きくなっているが、山側ではほとんど加熱がなく冷却となっている。最後に、以上述べた5つの事例において、それぞれ領域平均した潜熱プロファイルを第10図に示す。いずれの事例においても、対流性降雨域では中層で加熱量が最大になり、層状性降雨域では融解層より下層で冷却が見られる。これらの結果は、これまで報告されている結果と矛盾しないが、対流域の下層でいずれの事例も冷却になっているのは、再検討する必要があるかもしれない。個々の事例を見ると、対流域、層状域ともにそのプロファイルの形に特徴があり、2重ピークの加熱が見られる台風Erinの例や、上層で冷却が見られるヒマラヤの例は特に興味深い。なお、アンビル域における潜熱プロファイルは、いずれもその面積がわずかであるので誤差が大きいと思われるが、融解層の直下で大きな負の値が算出されるのは不自然であるので、アルゴリズムの改良が必要と考えられる。浅い対流域の潜熱プロファイルはもっともらしく見える。



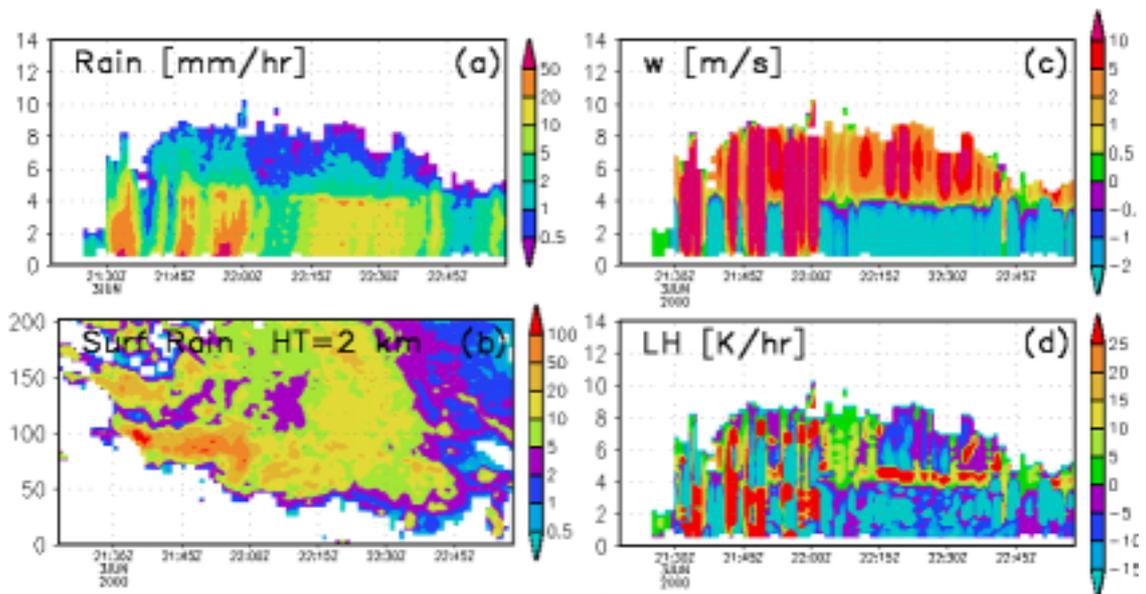
第5図：1999年5月10日にオクラホマで観測されたスクールライン。  
 (a) 降雨量の鉛直分布、(b) 高度2 km における降雨量の水平分布、  
 (c) 推定した鉛直風速の鉛直分布、(d) 潜熱加熱の鉛直分布



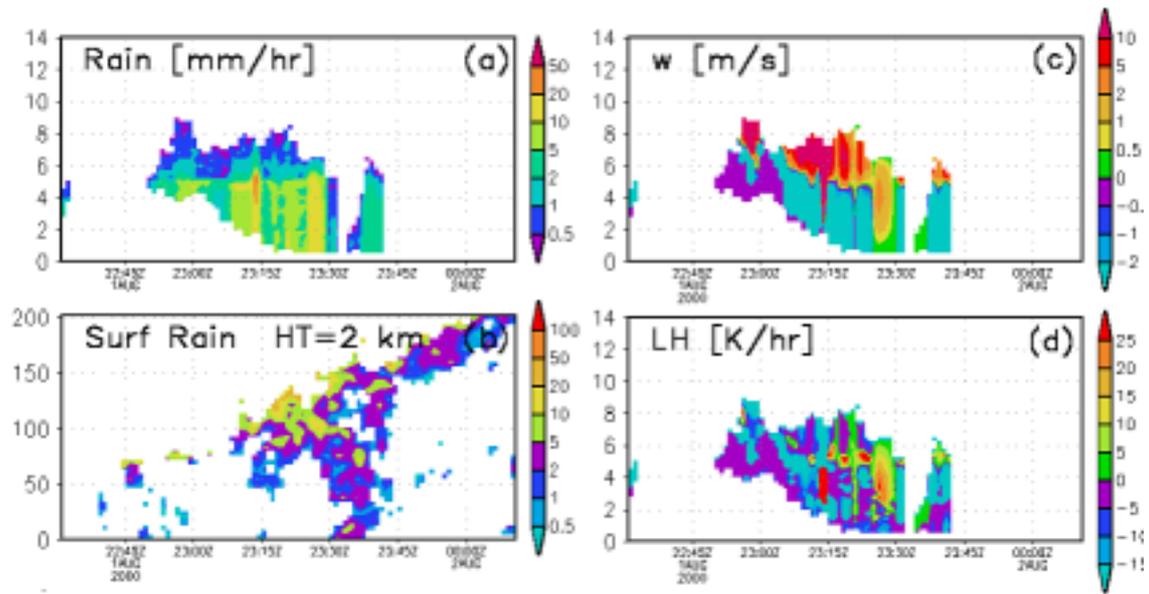
第6図：2000年8月2日に太平洋上で観測された台風8号



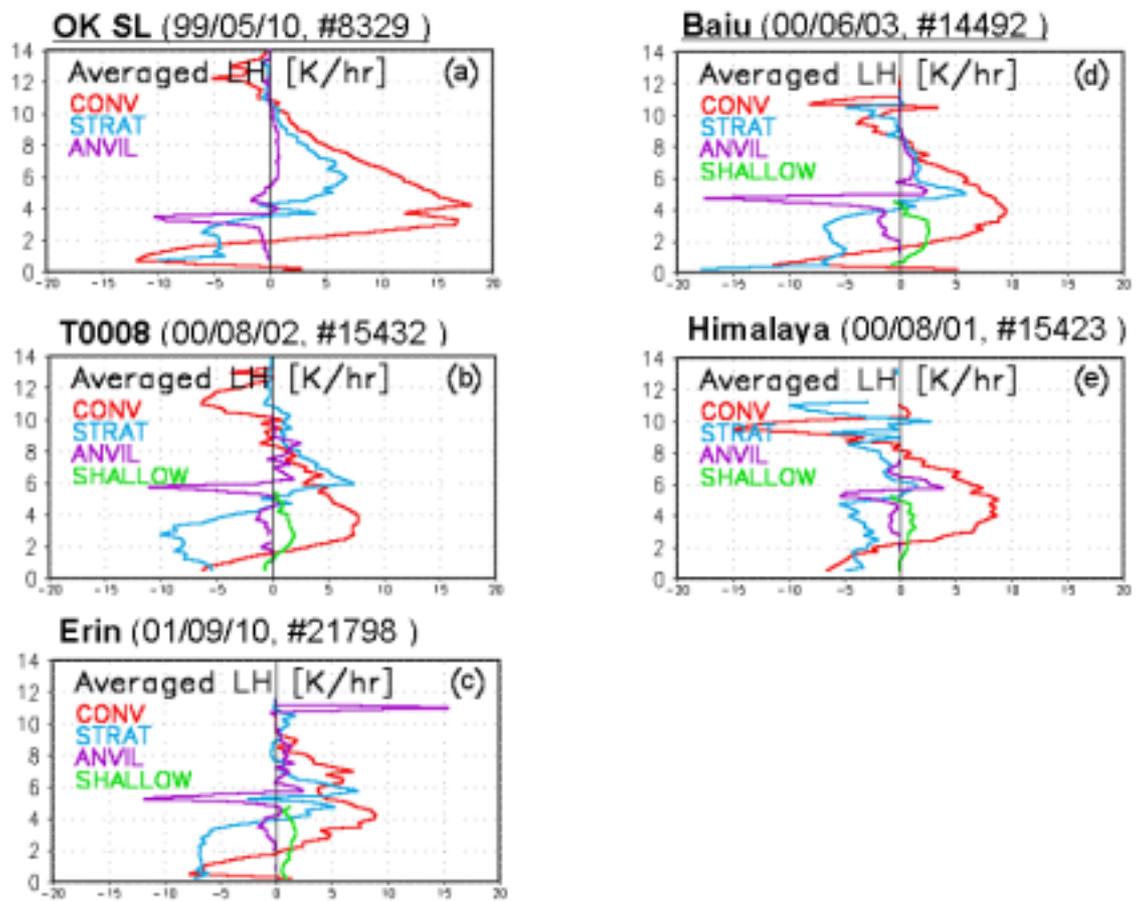
第7図：2001年9月10日に大西洋で観測された台風Erin



第8図：2000年6月3日に日本付近で観測された梅雨前線に伴う降雨



第9図：2000年8月1日にヒマラヤ山脈の麓で観測された降雨



第10図：5つの事例における領域平均した潜熱プロファイル

## 5. まとめと今後の課題

TRMM 降雨レーダデータ(2A25)を用いる潜熱放出プロファイルのリトリバルアルゴリズム(PR-LHA)を発展させ、様々な雲システムにおける潜熱放出プロファイルを求めた。アルゴリズムの改良点としては、調整を含むWC-Z関係式の導入、アンビルと浅い対流を加えた降雨タイプの分類、4次関数による鉛直風速の推定、鉛直プロファイルの推定初期値の改良による繰り返し計算時間の短縮などである。

次に、4次関数で推定した鉛直速度プロファイルの正当性や、対流性/層状性降雨の潜熱プロファイルの形を確認するために、雲解像モデル(ARPS)によるスコールラインのシミュレーションを行った。オリジナルの数値計算の結果によると、鉛直流は水平数 km 毎に上昇・下降流が交互に現れ、それに伴い熱力学第一法則から求めた潜熱プロファイルも、加熱・冷却が交互に現れた。しかしながら、水平方向に 10~20 km 平均することによって、これまでの研究結果や本アルゴリズムの結果に見られるような形の潜熱加熱プロファイルが得られることが分かった。すなわち、本アルゴリズムで推定される潜熱プロファイルは、PRの水平分解能である約 4 km 毎に算出されるが、その結果は少なくとも 10 km 程度の空間平均、あるいはそれに相当する時間平均をした結果であると考えるのが妥当である。

最後に、本アルゴリズムを実際に TRMM PR で観測された様々な降水システムのデータに適応した。それによって、スコールライン、台風、梅雨前線や山岳域における降雨といった様々な雲システムにおける潜熱加熱プロファイルの特徴が明らかにされた。PR-LHA は、対流性/層状性の違いだけでなく降雨の高さや融解層高度の情報を含むという長所があるので、様々な加熱プロファイルの違いを示すのに適しており、海上と陸上の加熱プロファイルの違いを区別することもできるので、今後さらなる研究成果が期待される。

今後の課題としては、まず本アルゴリズムで算出される潜熱プロファイルを検証するとともに、アルゴリズムの改良を進めていくことである。検証の手段としては、第一に雲解像モデルの結果を応用することである。数値計算の結果から潜熱加熱量を求める方法としては、熱力学の第一法則を利用する以外に、モデルの雲物理過程から直接加熱量を引き出すこともできる。また、数値モデルで算出される降水の混合比を適切な粒径分布や散乱計算を用いて、レーダで観測される反射強度に変換することも重要な課題である。また別の検証方法としては、さらに多くの種類の降水システムに対して本アルゴリズムを適用し、野外実験等による既知の結果と比べたり、他の潜熱加熱アルゴリズムとの比較検証を進めなくてはならない。また、本アルゴリズムによる全球の月平均潜熱加熱分布を計算することも重要である。

## 参考文献

- Fovell, R. G., and Y. Ogura, 1988: Numerical simulation of a midlatitude squall line in two-dimensions, *J. Atmos. Sci.*, 45, 3846-3879.
- Iguchi, T., T. Kozu, R. Meneghini, J. Awaka, and K. Okamoto, 2000: Rain-profiling algorithm for the TRMM precipitation radar. *J. Appl. Meteor.*, 39, 2038-2052.
- Kawashima M., K. Tsuboki and T. Asai, 1995: Maintenance mechanism and thermodynamic structure of a Baiu frontal rainband retrieved from dual Doppler radar observations. *J. Meteor. Soc. Japan*, 73, 717-735.
- Kummerow, C. and L. Giglio, 1994: A passive microwave technique for estimating the vertical structure of rainfall from space. Part I: Algorithm description. *J. Appl. Meteor.*, 33, 3-18.
- Olson, W., C. Kummerow, Y. Hong, and W.-K. Tao, 1999: Atmospheric latent heating distributions in the tropics derived from satellite passive microwave radiometer measurements. *J. Appl. Meteor.*, 38, 633-664.
- Roux, F., and J. Sun, 1990: Single-Doppler observations of a west African squall line on 27-28 May 1981 during COPT81: Kinematics, thermodynamics, and water budget. *Mon. Wea. Rev.*, 118, 1826-1854.
- Satoh S., D. Abe, M. Kawashima, T. Ushiyama and K. Takeuchi, 1996: Retrieved thermodynamic structures of mesoscale convective systems observed in the western tropical Pacific. *Proceedings of 12th Int. Conf. on Cloud and Precipitation, Zurich*, 550-553.
- Satoh, S., and A. Noda, 2001: Retrieval of Latent Heating Profiles from TRMM Radar Data. *Proc. 30th Conf. on Radar Meteor., Munich, Germany, Amer. Meteor. Soc.*, 340-342.
- 佐藤晋介, 2001: TRMM データを用いた雲システムにおける潜熱放出量のリトリバルに関する研究 第2回 TRMM RA 研究成果報告書、宇宙開発事業団.
- Tao, W.-K., J. Simpson, S. Lang, M. McCumber, R. Adler and R. Penc, 1990: An algorithm to estimate the heating budget from vertical hydrometer profiles. *J. Appl. Meteor.*, 29, 1232-1244.
- Tao, W.-K., S. Lang, J. Simpson and R. Adler, 1993: Retrieval algorithm for estimating the vertical profiles of latent heat release: Their applications for TRMM. *J. Meteor. Soc. Japan*, 71, 685-700.
- Tao, W.-K., S. Lang, W. S. Olson, R. Meneghini, S. Yang, J. Simpson, C. Kummerow, E. Smith, and J. Halverson, 2001: Retrieved Vertical Profiles of Latent Heat Release Using TRMM Rainfall Products for February 1998., *J. Appl. Meteor.*, 40, 957-982.