

# 衛星観測に基づく潜熱及び降水量推定手法の開発と アジアモンスーン域での地形性降雨特性の解明

—2018年度日本気象学会賞受賞記念講演—

重 尚 一\*

## 1. はじめに

このたびは、日本気象学会賞という大変荣誉ある賞を賜りましたことを深く感謝いたします。推薦ならびに選考していただきました先生方に御礼申し上げます。受賞対象となった研究は、熱帯降雨観測衛星 (TRMM: Tropical Rainfall Measuring Mission) なしにはあり得えません。打ち上げまでの困難な道のり。ミッション運用中止という危機。これらを乗り越え、当初予定の3年2ヶ月を大幅に超えた約17年に及ぶ長期観測 (岡本ほか 2016) を実現させた日米の TRMM 関係者の皆様に深く感謝します。

## 2. Spectral Latent Heating (SLH) アルゴリズム

### 2.1 TRMM に関わるきっかけ

京都大学大学院に在学中だった2000年春頃、高藪緑さんから TRMM 降雨レーダ (PR) 用の潜熱推定アルゴリズムを共同開発しませんかというお誘いの電話をいただきました。高藪さんは気象集誌 (JMSJ) に投稿した論文2編 (Shige 1999; Shige and Satomura 2000) の編集委員を担当して下さい、特に雲解像モデル (CRM) を使っていた2本目の論文がきっかけでお誘い下さいました。高藪さんは私がすでに助手になっていると勘違いされていたようでしたが、まだ学位論文完成に向けて奮闘中だった上、アルゴリズムのアルファベットも知らなかったので、指導教員の里村雄彦先生と相談してお断りしました。

当時、学位論文完成後に Wei-Kuo Tao さんのお世話で NASA ゴダード宇宙飛行センター (GSFC) に滞在させていただく予定になっていました。前年 (1999年) 夏、里村先生に学位論文完成後どこか海外に行きたいと相談すると、その前年 (1998年) に開催された COARE98 で里村先生が「膨大な3次元 CRM 計算とその結果に基づいた議論に圧倒される思いがした」(中澤ほか 1999) という Tao さんを挙げられました。Tao さんとは、COARE98 期間中に柳井迪雄先生のお誘いで参加した夕食会で隣になって挨拶していたのでメールを送り、その年 (1999年) の秋、米国での国際会議参加後に NASA/GSFC を見学させてもらいました。その際、学位論文完成後に滞在させていただく事になった訳ですが、なかなか完成できず、Tao さんに約束を忘れられてしまうのではないかとヒヤヒヤしながら「奮闘」していました。

公聴会も終えて2000年10月末、NASA の TRMM サイエンスチーム会合にあわせて渡米しました。同会合に誘って下さった沖 理子さんに、日本では PR の潜熱推定アルゴリズムの開発が必要で、そのためには CRM を使える人が必要なんだと、熱心に宇宙開発事業団 (NASDA) の招聘研究員に誘っていただきました。この時、後継ミッションの名称が全球降水観測計画 (Global Precipitation Measurement; GPM) であることも教えていただきました。ただ、当時、時間スケールの短い現象に興味があったので、TRMM 衛星通過時のスナップショット観測は使えないという思いがあり、TRMM への関心は薄いもので、沖さんのお誘いを断ろうと思っていました。

### 2.2 NASA/GSFC

滞在した Mesoscale Atmospheric Processes Branch は、まさに TRMM 研究の中心地でした。周りの会話で Japan という単語がよく聞こえてくるし、日

\* 京都大学大学院理学研究科。  
shige@kugi.kyoto-u.ac.jp

—2019年4月10日受領—  
—2019年10月6日受理—

本訪問予定（事情でキャンセルになりましたが）の NASA/GSFC センター長が日本人達を驚かせるために持って行くという日本語名刺の作成に協力するうちに、このまま日米共同の TRMM に背を向けていいものだろうかという思いが浮かんできました。しかも TRMM といえば日本が開発した PR（岡本・重 2008）だと思っていたのが、周りは米国が開発して TRMM に搭載したマイクロ波放射計（TRMM Microwave Imager；TMI）の話ばかり。当時、「マイクロ波放射計なんて赤外放射計に毛が生えた程度のもんだろう」という誤った認識を持っていたことも手伝い、反発心が芽生えてきて潜熱推定アルゴリズム開発をやろうと思うようになり、沖さんに高数さんとの共同でもよければ潜熱推定アルゴリズムの開発を NASDA でやらせてもらいますと連絡しました。

Tao さんにも決意を伝えると、3つの潜熱推定アルゴリズムを TRMM データに適用して比較した論文の原稿（Tao *et al.* 2001）を下さいました。この論文を読んで、Tao さんはすでにその10年も前に潜熱推定アルゴリズムの論文（Tao *et al.* 1990）を出版していることに驚きました。さらに、この論文で適用されている他の2つのアルゴリズム開発者 Bill Olson と Song Yang が私と同じ並びの部屋にいることに気づき、NASA/GSFC の研究者層の厚さに衝撃を受けました。新田勅先生は日本側初代 TRMM プロジェクト・サイエンティストに就任して、「米国ではすでに具体的な研究活動の取り組みが行われている。それに比べて、日本のチームはまだ予算の裏付けもなく、大きく出遅れている」（寺門 2015）と感じられたとの事ですが、私も日米のあまりの差に圧倒されました。

ただ、論文を読んでも PR に適用可能なアルゴリズムは Convective-Stratiform Heating (CSH) アルゴリズム（Tao *et al.* 1993）だけで、他は TMI 用のアルゴリズムでした。CSH アルゴリズムも

$$LH(z) = P_{\text{conv}} \cdot LH_{\text{conv}}(z) + P_{\text{strat}} \cdot LH_{\text{strat}}(z) \quad (1)$$

と、事前に CRM シミュレーションで用意した対流性潜熱プロファイル  $LH_{\text{conv}}(z)$  と層状性潜熱プロファイル  $LH_{\text{strat}}(z)$  に、PR から得られた対流性地上降水強度  $P_{\text{conv}}$  と層状性地上降水強度  $P_{\text{strat}}$  を掛けて足し合わせて推定するもので、PR による降雨3次元データは活用されていませんでした。

PR による降雨3次元データを活用したアルゴリズムの開発を考えていると TMI 用アルゴリズム開発者

Song Yang に言うと、「層状性領域上空で卓越する雪に対して PR は感度がない点は、どうするんだ？」と指摘されました。さらに、「TMI は雪にも感度がある」と。このとき「マイクロ波放射計なんて赤外放射計に毛が生えた程度」という私の認識が完全に誤りであることを悟りました。それから層状性の推定法について考えを巡らし、加熱の上層と冷却の下層の境界にあたる融解層をうまく使えば、という思いに至りました。

潜熱推定アルゴリズム開発には Tao さん達の Goddard Cumulus Ensemble (GCE) モデル（Tao and Simpson 1993）を使わせていただくことにしました。別の CRM を使ってしまうと、推定結果の違いがアルゴリズムに因るのか、CRM に因るのかの分からなくなってしまう。そして何より GCE には潜熱推定アルゴリズム開発のための機能が満載でした。帰国直前に Steve Lang さんから GCE のコードを丁寧に説明していただいた事がとても役立ちました。

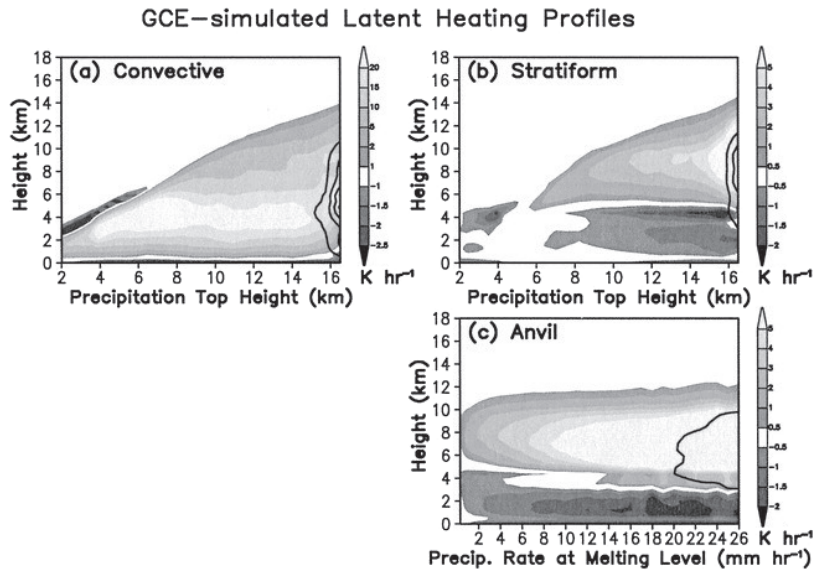
### 2.3 アルゴリズム開発

2001年春、NASDA に赴任して高数さんとの PR 用の潜熱推定アルゴリズムの開発が本格的に始まりました。降水頂（降水域の上端高度）を指標として PR の降水プロファイルを統計的に表示する Spectral plot（Takayabu 2002）を基礎にアルゴリズムを開発することになり、後に高数さんのご提案で Spectral Latent Heating (SLH) アルゴリズムという名称になりました。

まずは、GCE シミュレーションデータから降水頂  $PTH$  をパラメータとする対流性と層状性の潜熱加熱プロファイル  $LH_{\text{conv}}(PTH, z)$  と  $LH_{\text{strat}}(PTH, z)$  の参照テーブルを作成し（第1図 a, b）、

$$LH(z) = P_{\text{conv}} \cdot LH_{\text{conv}}(PTH, z) + P_{\text{strat}} \cdot LH_{\text{strat}}(PTH, z) \quad (2)$$

によって推定するようにいたしました。降水頂で分けることで、CSH アルゴリズム [式 (1)] が考慮に入っていない背の高さが異なる対流性降雨の潜熱プロファイルの違いを表現できるようになりました。ただ、NASA/GSFC で Song Yang に指摘された「層状性領域上空で卓越する雪に対して PR は感度がない点」を考慮できていません。PR の鉛直情報を使うのは対流だけで、層状は CSH アルゴリズム [式 (1) の右辺第2項] のようにするしかないかと諦めかけましたが、高数さんに NASA/GSFC 滞在時に考えていた融解層の利用について相談し、降水頂が融解層を超える深い層状性降雨については融解層の降水強度  $P_m$  を指標として使ってみる事になりました。ダメ元で、融解層の



第1図 SLH アルゴリズムの参照テーブル (a) 対流性降水, (b) 層状性降水, (c) 深い層状性降水. Shige *et al.* (2004) の Fig. 5. ©American Meteorological Society. Used with permission.

降水強度  $P_m$  を指標とする参照テーブルを作成し (第1図 c), Consistency Check (CRM シミュレーションデータから PR で観測可能な降水プロファイルの情報だけをインプットとしてアルゴリズムで再構築した潜熱加熱プロファイルとシミュレーションされた潜熱プロファイルとの比較) を行ったところ, 良い一致が得られ, 「これは行ける!」と歓喜しました. 振り返って考えれば, 熱帯域ではメソ対流系に伴う層状性潜熱プロファイルの鉛直構造は大きく変化しないため (Houze 1989), 降水頂を使わなくても融解層の降水強度で十分という訳でした.

さらに, Tao さんの水物質の保存則に基づく潜熱推定法 (Tao *et al.* 1990) を思い出し, 層状性の下層冷却の振幅を融解層の降水強度と地上付近の降水強度の差 ( $P_m - P_{strat}$ ) に比例するようにしました. このお陰で, 層状性降雨については, 地上で無降雨 ( $P_{strat} = 0$ ) であっても融解層に降水があれば融解層上層の加熱量と下層の冷却量を推定することが可能となりました. Tao さんは, Tao *et al.* (1990) の推定法がうまく行かず, CSH アルゴリズム (Tao *et al.* 1993) の開発に向かいましたが, Tao *et al.* (1990) の最良の部分を抽出して SLH に統合したことになりました. Tao *et al.* (1990) のアルゴリズムは複雑過ぎる一方, Tao *et al.*

(1993) のアルゴリズムは単純過ぎると感じていた私は, SLH は絶妙なバランスをとれたと考えました.

#### 2.4 見かけの熱源・消失源の推定

SLH の最初の論文 (Shige *et al.* 2004) では, CRM シミュレーションデータだけを使った Consistency Check でしたので, 次に PR 観測データに適用した SLH アルゴリズム推定値の検証を行いました. 比較対象は, 南シナ海の特別観測データから熱収支解析によって求められた潜熱プロファイル (Johnson and Ciesielski 2002) です. SLH の推定値は, 熱収支解析で得られた対流圏上層にピークを持つ top-heavy なプロファイルにほぼ近いものの, 融解層付近に二次的なピークがでてしまい, 長い間悩み苦しみました. この頃, 岡本謙一先生のお誘いで大阪府立大学に異動していましたが, 私が浮かぬ顔をしている訳を尋ねられた岡本先生に, SLH がどうしてもうまくいかなくて悩んでいると返事すると, 「ええなあ, 高級な悩みで. 自分は予算関係の悩みばかりだ。」と言われたことを懐かしく思い出します.

熱収支解析では, 水の相変化に伴う潜熱  $LH$  (真の熱源) ではなく, 柳井先生 (Yanai 1961; Yanai *et al.* 1973) によって導入された「見かけの熱源 (apparent heat source)」 $Q_1$  が求められます.

$$Q_1 \equiv \frac{\partial \bar{s}}{\partial t} + \bar{v} \cdot \nabla \bar{s} + \bar{w} \frac{\partial \bar{s}}{\partial z} = Q_R + LH - \nabla \cdot (\overline{s'v'}) - \frac{\partial \overline{s'w'}}{\partial z} \quad (3)$$

ここで、 $s$  は乾燥静的エネルギー、 $v$  は水平風、 $w$  は鉛直流、 $Q_R$  は放射加熱、 $\bar{\cdot}$  は空間平均を、 $'$  はそこからの偏差を表します。1 段目の式の各項はすべてゾンデ観測から得られるもので熱収支解析に対応し、2 段目の式が CRM で陽に算出することができ、SLH では放射加熱項  $Q_R$  を除いた  $Q_{1R}$  ( $=Q_1 - Q_R$ ) の参照テーブルを作成して推定しています。式 (3) の 2 段目第 3, 4 項は、それぞれ CRM の格子間隔スケールの運動による水平輸送の収束と鉛直輸送の収束で、Yanai and Johnson (1993) のレビューに “Traditionally, the eddy horizontal transport terms  $-\nabla \cdot \overline{s'v'}$  and  $-\nabla \cdot \overline{q'v'}$  have been ignored.” (ここで、 $q$  は水蒸気量) とあるように、伝統的に水平輸送の収束は鉛直輸送の収束に比べて小さいと見なされて省略されてきており、日本語のどの教科書にもそのように記述されています。私もこの「伝統」にしたがって水平輸送の収束を省略して参照テーブルを作成していました [Shige *et al.* (2004) の Eq.(5)]. ある時ふと思い立って水平輸送の収束項を入れて参照テーブルを作成し直して推定してみると、融解層付近の 2 次的なピークが消えて熱収支解析と良い一致を示しました (第 2 図 a).

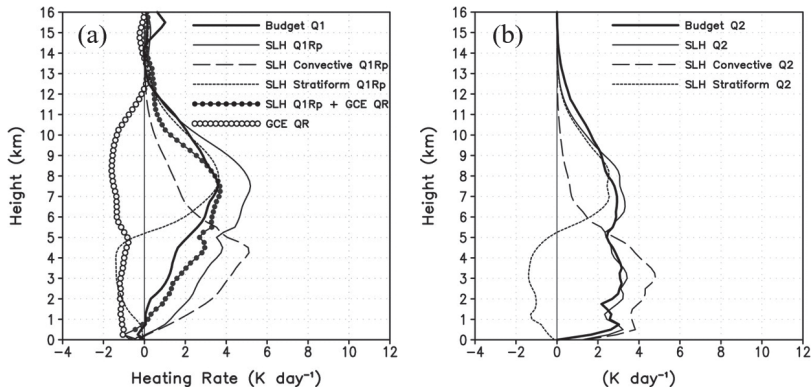
第 3 図 b, c に示すように、計算領域全体で平均した加熱プロファイルは、水平輸送の収束項が領域全体の平均で相殺されるため、水平輸送の収束項を考慮に

入れても入れなくても影響を受けません。しかしながら、対流域と層状域に分けると、融解層付近の鋭いピークが、水平輸送の収束項を考慮に入れなかった場合にあらわれ (第 3 図 b), 考慮に入れた場合に消えます (第 3 図 c)。これは、層状域における融解層の冷却の平滑化に、鉛直輸送の収束項だけでなく水平輸送の収束項が大きく効いている事が原因でした。Yanai and Johnson (1993) のレビューでは、熱収支におけるメソスケール組織化 (すなわち層状性プロファイル) の重要性は考慮されていましたが、メソスケール循環が水平輸送の収束項に影響を与えることまでは考慮されていませんでした。この時、「伝統」を無批判に受け入れてはならないことを思い知らされました。また、最初の論文 (Shige *et al.* 2004) で行った CRM シミュレーションデータを用いた Consistency Check だけでは気づかなかったため、独立した地上データによる地道な検証の重要性を痛感しました。

水平輸送の収束項のために Shige *et al.* (2004) から Shige *et al.* (2007) まで 3 年もかかってしまった穴を少しでも埋めるべく、SLH アルゴリズムを見かけの水蒸気の消失  $Q_2$  の推定にも適用しました。

$$Q_2 \equiv -L \left( \frac{\partial \bar{q}}{\partial t} + \bar{v} \cdot \nabla \bar{q} + \bar{w} \frac{\partial \bar{q}}{\partial z} \right) = NC + L \nabla \cdot \overline{q'v'} + L \frac{\partial \overline{q'w'}}{\partial z} \quad (4)$$

ここで、 $L$  は水蒸気  $q$  が水に相変化するときの凝結熱、 $NC$  は水の相変化に伴う水蒸気消失項です。以前にト



第 2 図 南シナ海の特別観測データから収支解析 (Johnson and Ciesielski 2002) によって求められた (a)  $Q_1$ , (b)  $Q_2$  プロファイルと SLH 推定値の比較. Shige *et al.* (2007) の Fig. 11 と Shige *et al.* (2008a) の Fig. 7 を改変. © American Meteorological Society. Used with permission.

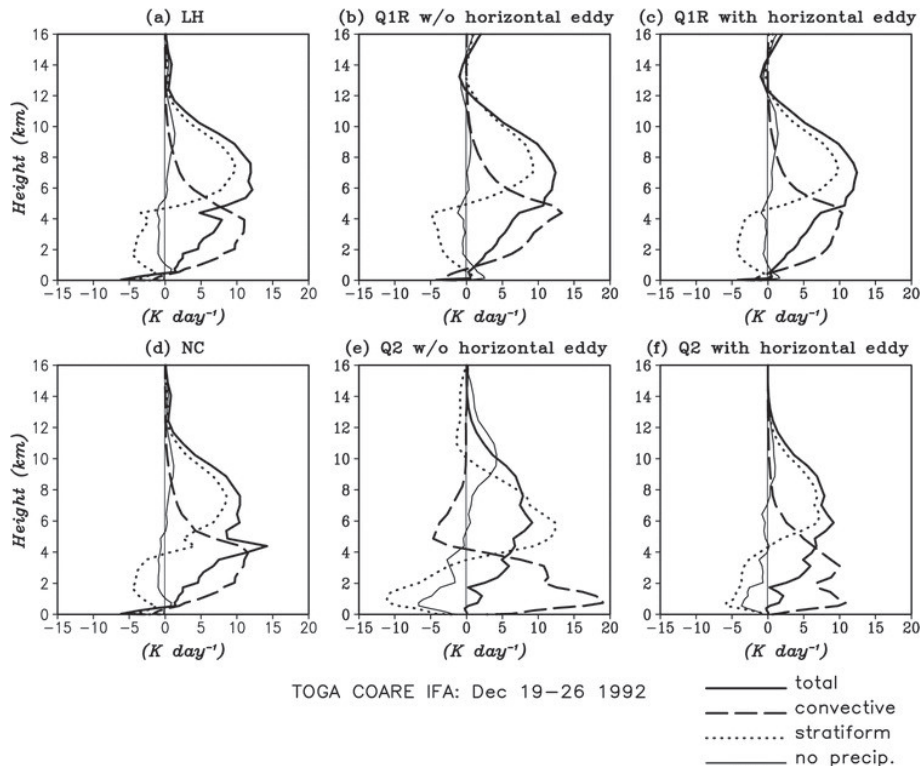
ライして目も当てられない結果だったのですが、水蒸気の水平輸送の収束項を入れていなかった事が原因だろうと気づいたからです。水蒸気場は温度場よりも水平非一様性が高いため、水平輸送の収束は  $Q_1$  よりも  $Q_2$  でさらに重要になります (第3図 d, e, f)。案の上、 $Q_1$  の推定よりも精度が落ちるとは言え、 $Q_2$  の推定もできました (Shige *et al.* 2008a; 第2図 b)。

## 2.5 TRMM 標準プロダクト

SLHの開発に携わったお陰で、Bob Houze 教授, Ed Zipser 教授, Dick Johnson 教授といった方々と懇意にさせていただくようになりました(第4図)。とくに学生の頃に決定的な影響を受けた教科書 (Houze 1993) を著した Houze 教授は、私にとって雲の上のような存在。その彼が会議で私の横に座って SLH アルゴリズムについて質問してくるという場面に出くわすと、不思議な気持ちになります。SLH アルゴリズムは、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) から研究プロダクトとして

の公開を経て、日米合同 TRMM 科学委員会で NASA と JAXA から正式な TRMM 標準プロダクトとしての公開が認可されました。この認可までに、Houze 教授, Johnson 教授, Chris Kummerow 教授などの方々にサポートのお言葉をいただきました。特に Chris Kummerow には、「おまえ達のアルゴリズムがナンバーワンだ。俺たちが有用性を示して TRMM 標準プロダクトにする。」と言って使っていただきました (Elsaesser *et al.* 2010)。

ただ TRMM 標準プロダクトとして公開するまでにさらに一苦労がありました。既存の TRMM 標準プロダクトの改訂とあわせて公開されることになったのですが、改訂された PR 降水プロファイルアルゴリズム (Iguchi *et al.* 2009; 井口 2016) の推定値を入力すると、再び融解層付近に2次のなピークがあらわれてしまいました。このため、公開を延期し、再び悪戦苦闘の日々が始まりました。その間に開催された NASA の



第3図 GCE モデルによるシミュレーション結果。(a) LH, (b)  $-\nabla \cdot \overline{s'v'}$  の項を入れていない  $Q_{1R}$  ( $=Q_1 - Q_R$ ), (c)  $-\nabla \cdot \overline{s'v'}$  の項を入れた  $Q_{1R}$ , (d) NC, (e)  $L\nabla \cdot \overline{q'v'}$  の項を入れていない  $Q_2$ , (f)  $L\nabla \cdot \overline{q'v'}$  の項を入れた  $Q_2$ . Shige *et al.* (2008a) の Fig. 2. ©American Meteorological Society. Used with permission.

会議会場のエレベータで鉢合わせた Chris Kummerow に挨拶しようとする時、「お前とは口をきかない。」というような事を言われました。私の聞き間違いかと思ったのですが、会議のラップアップで我々がデータを出し渋っていると非難され、私のヒアリング力不足ではなかったことが判明しました。英語で言い

訳するのも面倒でしたので、「溺れてワラをつかむ人は助からない。息の絶ゆるまで、手足の動く限り、陸に向かって泳ぐことに投入することだけが助かる道だ。」という言葉（坂口 1989）を心に刻んで悪戦苦闘を続け、層状性域を下層における降水プロファイルの特徴で再分類するなどしてなんとか解決し、公開にこぎ着けました。この時の改良については論文にする気力はもう残っていなかったため、アメリカ気象学会発行の柳井先生追悼のモノグラフに掲載された TRMM 潜熱のレビュー（Tao *et al.* 2016）での簡単な記述にとどまっています。

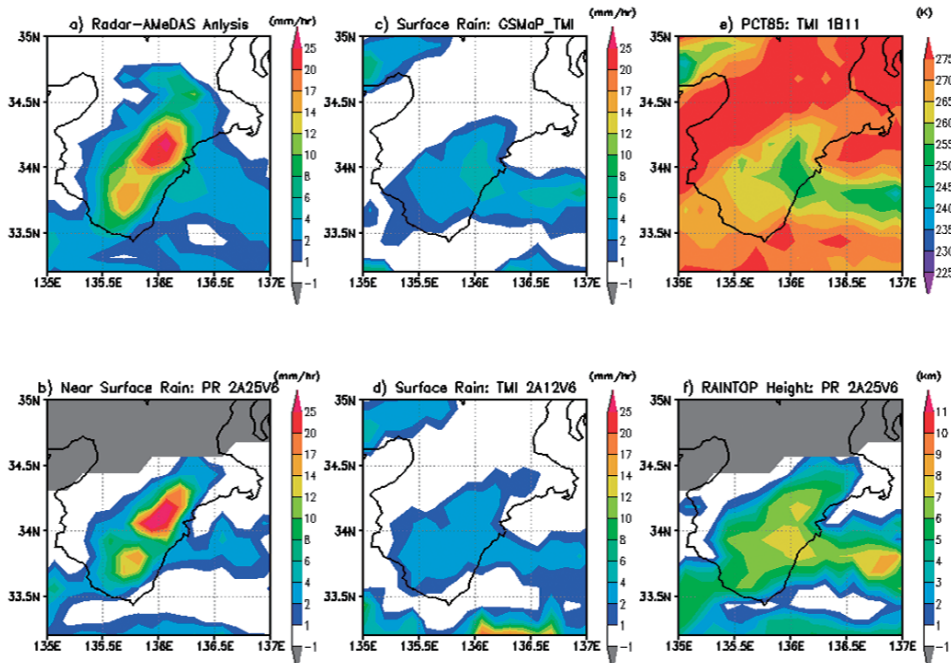


第 4 図 TRMM 潜熱ワークショップ（2007年8月27-28日）での夕食時の写真。右から左に、Bob Houze 教授、Ed Zipser 教授、Paul Ciesielski 氏、Dick Johnson 教授、高藪縁教授、Scott Braun 博士、筆者。

### 3. GSMaP マイクロ波放射計地形性降雨推定の改良

#### 3.1 GSMaP プロジェクト

JAXA に在籍していた2002年秋、科学技術振興機構（JST）戦略的創造研究推進事業チーム型研究（CREST）における研究領域「水の循環系モデリングと利用システム」の研究課題として「衛星による高精度高分解能全球降水マップの作成」（代表・岡本謙一）が選ばれ、全球衛星降水マップ GSMaP の開発が始ま



第 5 図 紀伊半島における地形性降雨の事例。(a) レーダ・アメダス、(b) PR、(c) GSMaP、(d) GPROF の降雨量推定値。(e) TMI が観測した85GHzの輝度温度。(f) PR が観測した降水頂。Kubota *et al.*(2009) の Fig. 15.

りました。PR との物理的整合性を有するマイクロ波放射計降水推定アルゴリズムの開発を目指したこのプロジェクトで、はじめて電磁波の情報から物理量を推定する本来の意味でのリモートセンシングに関わるようになりました。その結果、放射や雲微物理と言った、それまで敬して遠ざけてきた分野が一挙に前景化して戸惑いました。さらに、このプロジェクトが始まって間もなくして異動した大阪府立大学大学院工学研究科航空宇宙工学分野で、不慣れなりリモートセンシングの研究で大学院生を指導したり (Shige *et al.* 2006, 2008b, 2009; 佐々木ほか 2007; Kida *et al.* 2009), 全く未知の航空宇宙工学に関して学部生向けの演習を担当したりと、新しい経験ばかりで大変でした。ただ、プロジェクトメンバーの方々に教えていただきながら、これら新しく出会った分野を勉強していくと次第に面白くなってきました。関連論文を読んでいくと、NASA/GSFC で特にお世話になった Bob Adler さんや George Huffman さんのお名前に出くわしました (Adler *et al.* 2003; Huffman *et al.* 2001)。一般的に (特に海外の) 研究者とは、まず論文の著者として出会い、その後、その本人と知り合うという流れだと思いますが、この場合は逆で、私は直に知っている人達が何をやっているのかを後で知ったという流れで、この分野に入っていくのに役立ちました。

プロジェクトは、久保田拓志さんがメンバーに加わってくれて軌道に乗りました (Kubota *et al.* 2007)。根幹となるマイクロ波放射計降水推定アルゴリズムは、日本で唯一開発されていた青梨和正さんのアルゴリズムを基礎に開発され (Aonashi *et al.* 2009)、牛尾知雄さんの努力によって赤外放射計を組み合わせた衛星降水プロダクトの高時空間分解能化が実現されました (Ushio *et al.* 2009)。

### 3.2 地形性降雨推定の改良

JST/CREST 終了後、GSMaP は「世界の雨分布速報」として JAXA から準リアルタイムでデータ配信されるようになり (可知ほか 2011)、様々な分野で利用されるようになりました。特にアジア域での水文学的応用が盛んになりました。しかしながら、紀伊半島のようなアジア沿岸山岳域でマイクロ波放射計アルゴリズムが地形性降雨を過小推定していることが大きな課題となりました (Kubota *et al.* 2009; 第 5 図)。

マイクロ波放射計は、水粒子 (雲粒・雨滴) からの放射が卓越する低周波数帯 (10GHz や 19GHz) と氷粒子の散乱による高周波数帯 (37GHz や 85GHz) の輝度

温度を観測しています (高橋ほか 2005a, b, c, d)。海上では、低周波数帯の輝度温度を利用できるため、赤外放射計に対して圧倒的に高い精度で降雨量を推定できます。しかしながら、陸面の射出率が高いため、陸上では雨雲の存在に関わらず低周波数帯の輝度温度が高く、降雨量推定に利用できません。このため、氷粒子の散乱による高周波数帯の輝度温度低下の情報のみを利用して降雨量を推定するため、海上に比べて精度が低くなります。

GSMaP マイクロ波放射計アルゴリズムでは、TRMM PR データから求められた平均的な降水プロファイルを放射伝達モデルにインプットし、低周波数から高周波数にわたる輝度温度と降雨量の関係 (参照テーブル) を作成して降雨推定を行っています (Kubota *et al.* 2007; Aonashi *et al.* 2009)。通常、陸上の豪雨は、「冷たい雨」の過程が支配的な背の高い対流によってもたらされるため、豪雨は大量の氷粒子によって散乱された低い輝度温度と対応する参照テーブルが用いられていました (第 6 図 a の黒線)。すなわち、「Heavy rainfall=Deep convection」という仮定に基づいて推定していた訳ですが、レーダ・アメダスや TRMM PR で捉えられていた紀伊半島における地形性降雨 (第 5 図 a, b) は、活発な水粒子の衝突・併合過程 (「暖かい雨」の過程) が支配的な背の低い降水雲からもたらされてきました (第 5 図 f)。このため、高周波数帯での輝度温度低下量は小さく (第 5 図 e)、GSMaP も NASA の Goddard PROFiling (GPROF) アルゴリズム (Kummerow *et al.* 2001) も、マイクロ波放射計 (TMI) から降雨量を過小評価していました (第 5 図 c, d)。なお、紀伊半島の地形性降雨における「暖かい雨」の過程の重要性は、過去の地上降雨レーダの観測によっても指摘されています (Takeda *et al.* 1976; Takeda and Takase 1980; Sakakibara 1981)。

この結果を見て、かつて Chris Kummerow に「GSMaP に対する criticism がある。客観解析データを利用している点が GSNMaP の特徴だが、生かし切れていない。」と言われたことを思い出しました。その際に彼が言及していた論文について問い合わせると、B. J. Sohn 教授に連絡してくれて Kwon *et al.* (2008) の論文を知ることができました。彼らの手法は、客観解析データの地上風速と地形データから算出した地形上昇流に応じて、マイクロ波放射計アルゴリズムの降雨量推定値に係数を掛け合わせて補正するというものでした。

この論文を読んで、地形性上昇流の情報を降雨量推定値の補正という工学的手法ではなく、沿岸山岳域における降水過程に結びつけた物理的手法で利用したいと考えました。すなわち、「暖かい雨」の過程は海からの湿潤大気が沿岸山岳で強制上昇されることによって活発化するため、地形性上昇流が閾値を超えたフットプリントを地形性降雨域と判定し、背の低い降水雲の鉛直構造に基づく参照テーブルに切り替えて降雨量を推定するというものです(第6図b)。地形性降雨域を判定する条件に客観解析データからの水蒸気フラックス収束量も用いる事によって、紀伊半島での降水量推定を改善できました。ただ、この頃、まだSLHのTRMM標準プロダクトの公開などで忙しくて(2.5節)、なかなか論文執筆に取りかかれなかったところ、この研究を高く評価してくれていたAdlerさんに「お前が論文を書かないのなら、俺たちがやっとうぞ。」と脅され、必死になって論文にまとめました(Shige *et al.* 2013)。この手法によって、2009年8月に台湾に上陸して多数の死者を出した台風Morakot(平成21年台風第8号)の地形性豪雨を捉える事にも成功し(Taniguchi *et al.* 2013; 第7図)、インド西岸(西ガーツ山脈)をはじめとするアジア沿岸山岳域における降水量推定を大幅に改善できました(Shige *et al.* 2015)。ただ、GSMaP公開版に導入するため、全領域に拡張したところ、メキシコ山岳域のように過大推定して精度が低下する地域が生ずることが明らかになりました(Yamamoto and Shige 2015)。すなわち、参照テーブルを切り替える地形性降雨域判定の条件として

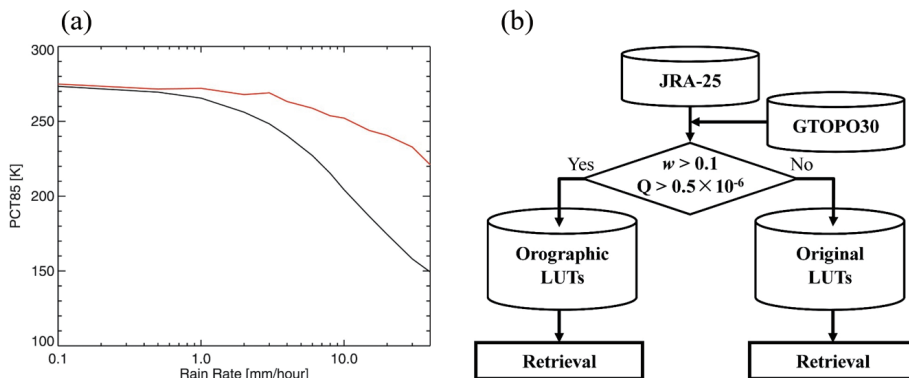
地形性上昇流とともに用いている水蒸気フラックス収束では、地形性上昇流で発生した降水雲が「暖かい雨」の過程が支配的な背の低い降水頂を持つ場合(アジア沿岸山岳域)と、「冷たい雨」の過程が支配的な背の高い降水頂を持つ場合(メキシコ山岳域)に分ける指標としては不十分で、これらに分ける環境場の熱力学的指標を見つける事が課題となりました。

#### 4. アジアモンスーン域での地形性降雨特性の解明

##### 4.1 降水頂の決定要因

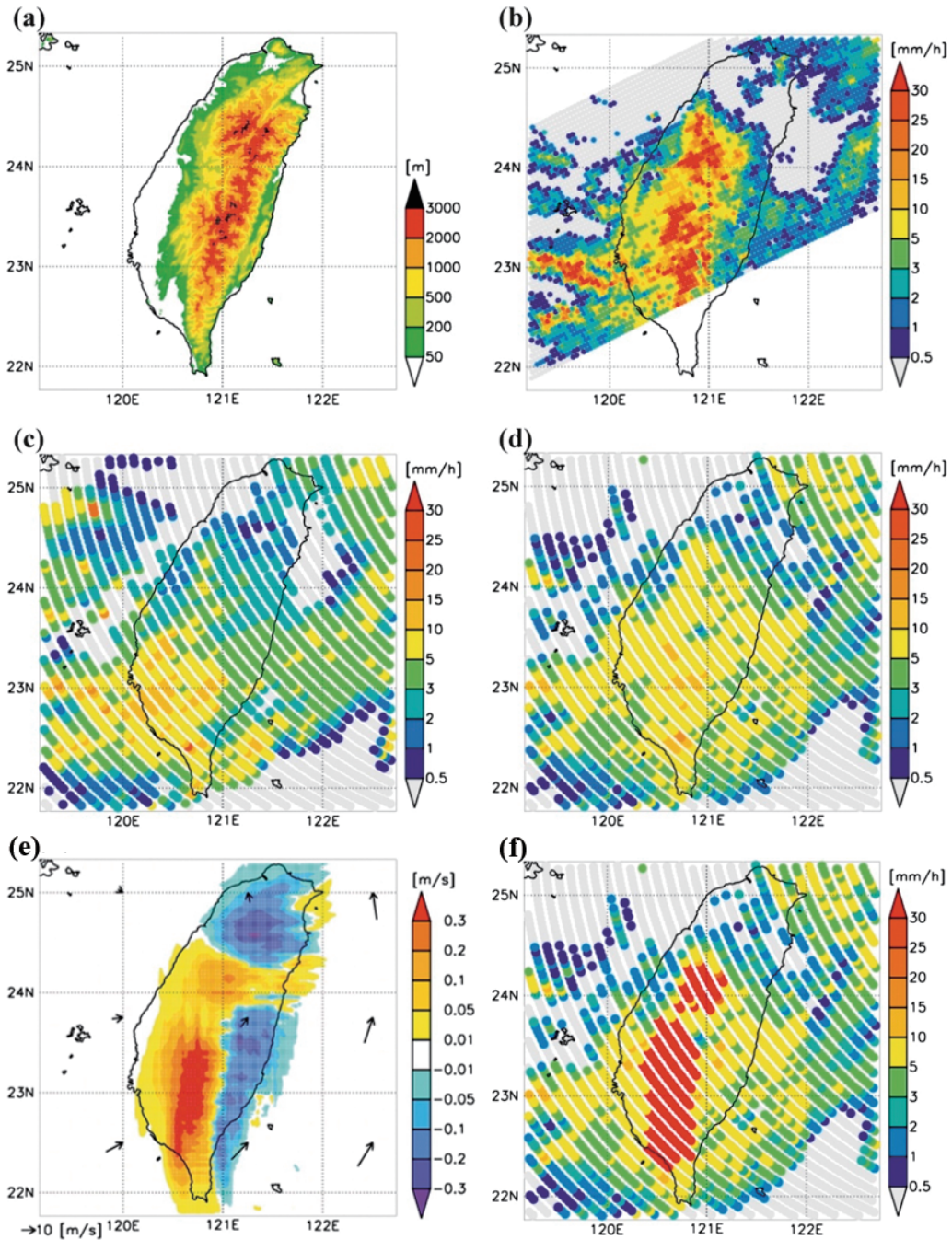
2012年の春か夏、研究室飲み会の2次会の席で、里村先生が「どこか海外に行ってくれば？」とおっしゃってくださいました。ありがたい話でしたが、私は腰が重いタイプで、あまり熱心に動きませんでした。そうこうしているうちに、2012年の年末に里村先生が倒れられ、この話はなくなったと思いました。しかし年が明けて、里村先生に最後のチャンスだと思って行ってきてくれとおっしゃっていただき、前々から来てもいいよと言ってくれていたChris Kummerowに連絡し、コロラド州立大学で共同研究することになりました。

2013年8月、蒸し暑い京都からたどり着いたフォートコリンズは天国のようでした。我々の地形性降雨推定手法をGPROFアルゴリズム(Kummerow *et al.* 2001)に導入させられるかと思っていましたが、Chrisはサイエンスをしようと言って、地形性上昇流で発生した降水雲の降水頂を決定する熱力学的パラメータの探求を提案してくれました。願ったりかなったりの課



第6図 (a) 従来用いていた陸域降水プロファイルから求めた参照テーブル(黒線)と背の低い地形性降水プロファイルから求めた参照テーブル(赤線)。(b) 地形性/非地形性降雨分類に基づく降雨推定のフローチャート。Shige *et al.*(2013)のFig.3とFig.6を改変。©American Meteorological Society. Used with permission.





第7図 2009年8月に台湾に上陸した台風Morakot (平成21年台風第8号). (a) SRTM30標高 (m), (b) TRMM PR 降雨推定値 ( $\text{mm h}^{-1}$ ), (c) GPROF 降雨推定値 ( $\text{mm h}^{-1}$ ), (d) 地形性/非地形性降雨分類導入前の GSMaP 降雨推定値 ( $\text{mm h}^{-1}$ ), (e) 標高データと再解析データから算出した地形性上昇流 ( $\text{m s}^{-1}$ ), (f) 地形性/非地形性降雨分類導入後の GSMaP 降雨推定値 ( $\text{mm h}^{-1}$ ). (c), (d), (f) はいずれも PR とともに TRMM に搭載された TMI が観測した輝度温度から推定している. Taniguchi *et al.* (2013) の Fig. 1, Fig. 4, Fig. 6 を改変. ©American Meteorological Society. Used with permission.

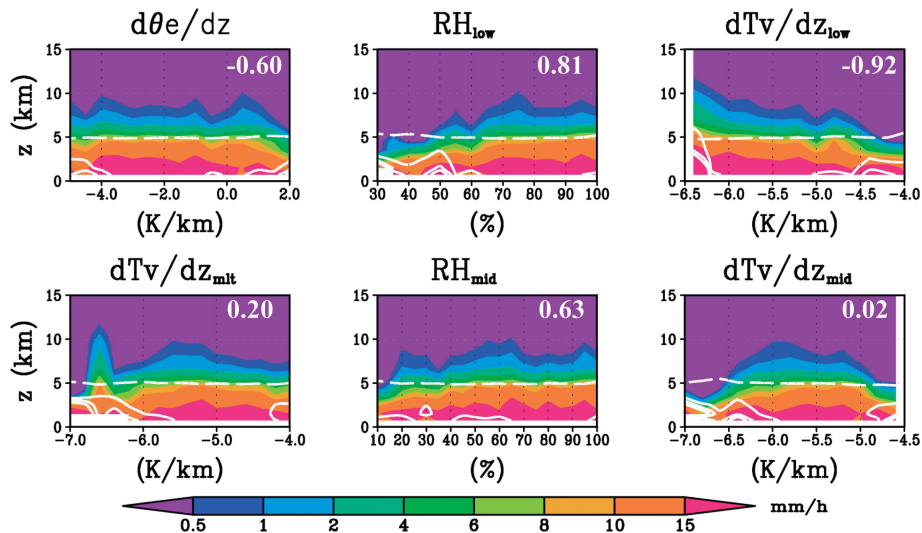
題でしたが、学生にやらせてもうまく行きませんでしたし、私自身が数年間「現場」から離れてプログラミングをほとんどしていなかったので少し不安でした。

まず、アジア夏季モンスーンの最大降雨域であるインド西岸（西ガーツ山脈）を対象に、PR が地形性上昇流域で観測した地表付近降雨強度 $10\text{--}40\text{mm h}^{-1}$ を持つ降水雲の背の高さと環境場の様々な熱力学的パラメータとの関係を調べてみたところ、下層・中層の湿度や安定度のいずれも相関が高く、どのパラメータが最も重要か決め手に欠きました。Xie *et al.* (2006) を参考に他のアジアモンスーン沿岸山岳域に対象を広げると、湿度の相関は低いものの、安定度は低層・中層ともに高い結果が得られました。僅かに相関係数が高い中層の安定度の線で、とりあえず原稿を書き始めました。

帰国直前の頃、最初の原稿を Chris に見せると、対象としているアジアモンスーンの概観について記述すべきだとの指摘を受けました。里村先生をはじめ周りの多くの方々が研究対象としてきたアジアモンスーンに対して、天邪鬼な性格から距離をとってきた私にとって痛い所をつかれた指摘でした。重い腰をあげて文献を読み始めてみて、アジアモンスーンの面白さに気づかされました。お恥ずかしい話、対象としていたヴェトナムのアナン山脈沿岸部が、夏季モンスーンか

ら冬季モンスーン北東風に変わる10-12月に雨が多いことを初めて知りました。そこでアナン山脈を季節に分けて解析してみると、10-12月に中層の安定度は降水頂と相関がほとんどなく、下層の安定度が降水頂と最も逆相関が高いことが分かりました (Shige and Kummerow 2016; 第8図)。

振り返って考えれば、下層の安定度が高いほど降水頂が低いという上記の結果は、驚くべきものではありません。安定な下層大気の下で発生する背の低い地形性降雨は、地形性降雨の最も代表的なタイプである「stable upslope mechanism」[Roe (2005) の Fig. 6a, Lin (2007) の Fig. 11. 12a, Houze (2012) の Figs. 3a] に対応し、不安定な下層大気の下で発生する背の高い地形性降雨は「unstable upslope mechanism」[Roe (2005) の Fig. 6f, Lin (2007) の Fig. 11. 12b, Houze (2012) の Figs. 3b] に対応します。ただ、対流性の強い雨は unstable で「冷たい雨」の過程が支配的な後者がもたらすものであり、stable で「暖かい雨」の過程が支配的な前者は層状性の弱い雨に過ぎないと考えられていました。これらの概念が作り上げられる基となった欧米では概ねその通りだと思います。しかし、湿潤なアジア域では、stable で「暖かい雨」の過程が支配的な前者でも強い雨が降るため、「Heavy rainfall = Deep convection」という仮定が通用せず、マイクロ波



第8図 ヴェトナム・アナン山脈地形性上昇流域で10-12月に TRMM PR が観測した地表付近降雨強度 $10\text{--}40\text{mm h}^{-1}$ を持つ降水プロファイルを6つの熱力学的指標の関数として表示した結果。Shige and Kummerow (2016) の Fig. 9. ©American Meteorological Society. Used with permission.

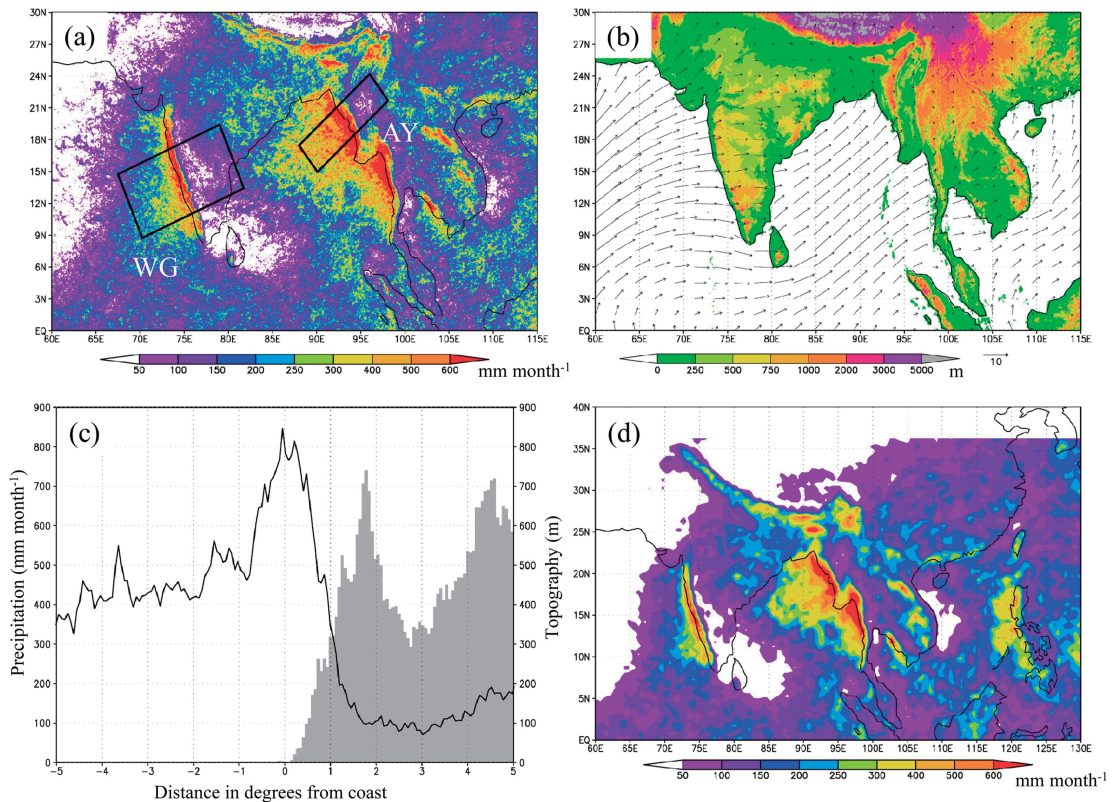
放射計アルゴリズムが過小評価していたことになりま  
す。

#### 4.2 インド西岸域とミャンマー沿岸域の降雨分布

Shige and Kummerow (2016) の研究について日本  
国内の学会や研究会で発表すると、アジアモンスーン  
沿岸山岳域における日周期変動について質問を頂きま  
した。直感的に日周期変動は小さいだろうと考えてい  
ましたが、解析してみなければ回答できません。とい  
っても、帰国後、忙しくて自分で手を動かせる状態  
にはありませんでした。ちょうどその頃、修士2年生  
の中野輝雄君が数値モデルを使った研究で行き詰ま  
っていたので、研究テーマを大きく変えて解析してもら  
うことにしました。まずアジア夏季モンスーン期の降  
雨量分布を作成してもらったのですが、西ガーツ山脈  
付近の降雨量ピークが風上海上ではなく、山岳斜面上

に位置していて驚きました(第9図a)。ミャンマー沿  
岸域も、降雨量ピークは沖合の海上ではなく、沿岸に  
位置していました(第9図b)。Xie *et al.*(2006) は  
TRMM PR データを用いて、これらの地域における降  
雨量のピークは風上の海上にあると述べていました。  
TRMM 標準プロダクトの改訂前後の違いかと思っ  
て、Xie *et al.*(2006) で使われていたと考えられる改訂前  
の古いプロダクトを掘り起こして作成してもらいま  
したが、やはり風上斜面上に位置しており(第9図d)、海  
上の降雨量ピークは誤りだと判断しました。

西ガーツ山脈風上海上の降雨量ピークは、多くの数  
値的研究によって調べられてきました(Smith and Lin  
1983; Grossman and Durran 1984; Ogura and Yoshi-  
zaki 1988)。上記の誤りは、これら過去の研究の影響  
だと思えました。例えば、Romatschke and Houze



第9図 夏季モンスーン期(6-8月)の気候値。(a) TRMM PR 2A25 V7データからの0.05度解像降雨量( $\text{mm month}^{-1}$ )、(b) ERA-Interimからの850hPa水平風( $\text{m s}^{-1}$ )と標高(m)、(c) (a)でAYと記した黒線ボックス域で平均した海岸に直交した降雨量分布(黒線; $\text{mm month}^{-1}$ )と地形(灰色バー;m)、(d) TRMM PR 2A25 V6データからの0.5度解像降雨量( $\text{mm month}^{-1}$ )。(a)-(c)は1998-2013の16年平均で、(d)は1998-2004の7年平均。Shige *et al.*(2017)のFig.1。©American Meteorological Society. Used with permission.

(2011)は正しく山岳斜面上の降雨量ピークを図示しているにもかかわらず, “The coastal regions of western India and western Myanmar are the regions of greatest monsoon precipitation, with much of the rain falling over the ocean upwind of the coastlines (Hoyos and Webster 2007; Xie *et al.* 2006).” と記述しています。

過去の数値的研究が依拠していた観測結果は, 可視・赤外データから推定された降雨量分布でした (Kilonsky and Ramage 1976; Krishnamurti *et al.* 1983). GPCP (Adler *et al.* 2003; Huffman *et al.* 2001) や TRMM 3B42 (Huffman *et al.* 2007) といった現在よく使われている降雨量データにおいても, インド西岸域やミャンマー沿岸域で降雨量ピークが海上にシフトしています。風上斜面上の降雨は, 背の低い地形性降水雲によってもたらされるため, 可視・赤外データでは降雨量が過小推定されてしまいます。さらにモンスーン期, 中・上層の雲が強い東風によって西に流されるため, 中・上層風の風下, 下層風の風上にあたる海上で降雨量を過大推定してしまい, 西ガーツ山脈風上海上に降雨量ピークを持つ降雨量分布となってしまう。日周期変動が強ければ, 西ガーツ山脈で発生した降雨システムの伝播によって風上海上に降雨量ピークをもたらすことも考えられますが, 事前の予想通り, 日周期変動は弱いものでした (Shige *et al.* 2017 の Fig. 3)。

里村先生は, Xie *et al.* (2006) が示していた風上海上での降雨量ピークに興味を持っておられ, 私に TRMM PR データは正しいのかと質問されていました。当時, TRMM PR には陸上での過小推定の問題があるとお返事したのですが, 図示までしておけばよかったと思います。里村先生から数値モデルによる再現をテーマに与えてられていた当時の大学院生に会った際, 降雨量ピークは海上ではなく, 山脈斜面上だったと伝えると, 彼女も修士論文提出間際に, 自身で TRMM PR データを使って図示してみると, 降雨量ピークが海上ではなく, 山脈斜面上にあったが, 自分の間違いだと思って修士論文に載せなかったと語ってくれました。「伝統」を打ち破ることが難しい事をあらためて感じさせられました。

## 5. さいごに

「…TRMM はこれからは若い人たちの出番である。この衛星とそれから取れるデータを充分に使って研究

に成果を上げて欲しい。そしてその人たちも何時か, 次の世代へ残す新しい計画を立ち上げ, 育てるのにも力を注いで欲しいと願っている。」(畚野 1998)

TRMM 実現にご尽力された畚野信義先生が TRMM 打ち上げ後に書かれた文章ですが, GPM 主衛星 (Hou *et al.* 2014) が打ち上がった現在, 「TRMM」を「GPM」に置き換えれば, そのまま通用する文章になります。当時, 「若い人たち」の 1 人として TRMM を使って研究させていただいた身として, 現在は若い人たちが GPM を使って成果を上げるお手伝いをしているところです (Kobayashi *et al.* 2018; Akiyama *et al.* 2019)。私自身は「新しい計画を立ち上げる」事には向かない人間だと考えていますが, 他の皆様の足を引っ張らない程度に GPM 後の計画にも貢献したいと思います。

すでにお名前を挙げさせていただいた方々だけでなく, 多くの皆様方にお世話になりました。最後に, 亡くなった里村雄彦先生への感謝を記しておきたいと思います。何よりも自由を大切にされた里村先生に, 学生の頃から, 本当に自由にさせていただきました。その里村先生が, 唯一, 病床で東南アジア域の研究を継いで欲しいとおっしゃいました。里村先生をご期待なさっていた形とは大きく異なるかと思いますが, 私なりにその御遺志をつげればと思います。

## 参 考 文 献

- Adler, R. F. *et al.*, 2003: The version-2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979–present). *J. Hydrometeorol.*, **4**, 1147–1167.
- Akiyama, S., S. Shige, M. K. Yamamoto and T. Iguchi, 2019: Heavy ice precipitation band in an oceanic extra-tropical cyclone observed by GPM/DPR: 1. A case study. *Geophys. Res. Lett.*, **46**, 7007–7014.
- Aonashi, K., J. Awaka, M. Hirose, T. Kozu, T. Kubota, G. Liu, S. Shige, S. Kida, S. Seto, N. Takahashi and Y. N. Takayabu, 2009: GSMaP passive microwave precipitation retrieval algorithm: Algorithm description and validation. *J. Meteor. Soc. Japan*, **87A**, 119–136.
- Elsaesser G. S., C. D. Kummerow, T. S. L’Ecuyer, Y. N. Takayabu and S. Shige, 2010: Observed self-similarity of precipitation regimes over the tropical oceans. *J. Climate*, **23**, 2686–2698.
- 畚野信義, 1998: TRMM の成功に寄せて. *日本リモートセンシング学会誌*, **18**, 409–412.
- Grossman, R. L. and D. R. Durran, 1984: Interaction of low-level flow with the Western Ghat Mountains and offshore convection in the summer monsoon. *Mon. Wea.*

- Rev., 112, 652-672.
- Hou, A. Y., R. K. Kakar, S. Neeck, A. A. Azarbarzin, C. D. Kummerow, M. Kojima, R. Oki, K. Nakamura and T. Iguchi, 2014: The Global Precipitation Measurement mission. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **95**, 701-722.
- 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., 1993: *Cloud Dynamics*. Academic Press, San Diego, 573 pp.
- Houze, R. A., Jr., 2012: Orographic effects on precipitating clouds. *Rev. Geophys.*, **50**, RG1001, doi:10.1029/2011RG000365.
- Hoyos, C. D. and P. J. Webster, 2007: The role of intraseasonal variability in the nature of Asian monsoon precipitation. *J. Climate*, **20**, 4402-4424.
- Huffman, G. J., R. F. Adler, M. M. Morrissey, D. T. Bolvin, S. Curtis, R. Joyce, B. McGavock and J. Susskind, 2001: Global precipitation at one-degree daily resolution from multisatellite observations. *J. Hydrometeor.*, **2**, 36-50.
- Huffman, G. J., R. F. Adler, D. T. Bolvin, G. Gu, E. J. Nelkin, K. P. Bowman, Y. Hong, E. F. Stocker and D. B. Wolff, 2007: The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *J. Hydrometeor.*, **8**, 38-55.
- 井口俊夫, 2016: 衛星搭載降雨レーダによる降雨観測手法の開拓～主に TRMM 搭載降雨レーダのアルゴリズム開発について～2015年度堀内賞受賞記念講演一. *天気*, **63**, 381-392.
- Iguchi, T., T. Kozu, J. Kwiatkowski, R. Meneghini, J. Awaka and K. Okamoto, 2009: Uncertainties in the rain profiling algorithm for the TRMM precipitation radar. *J. Meteor. Soc. Japan*, **87A**, 1-30.
- Johnson, R. H. and P. E. Ciesielski, 2002: Characteristics of the 1998 summer monsoon onset over the northern South China Sea. *J. Meteor. Soc. Japan*, **80**, 561-578.
- 可知美佐子, 久保田拓志, 牛尾知雄, 重 尚一, 木田智史, 青梨和正, 岡本謙一, 沖 理子, 2011: 複数の衛星搭載マイクロ波/赤外放射計の複合による「世界の雨分布速報」システムの構築とその利用. *電気学会論文誌 A (基礎・材料・共通部門誌)*, **131**, 729-737.
- Kida, S., S. Shige, T. Kubota, K. Aonashi and K. Okamoto, 2009: Improvement of rain/no-rain classification methods for microwave radiometer observations over ocean using a 37-GHz emission signature. *J. Meteor. Soc. Japan*, **87A**, 165-181.
- Kilonsky, B. J. and C. S. Ramage, 1976: A technique for estimating tropical open-ocean rainfall from satellite observations. *J. Appl. Meteor.*, **15**, 972-975.
- Kobayashi, K., S. Shige and M. K. Yamamoto, 2018: Vertical gradient of stratiform radar reflectivity below the bright band from the tropics to the extratropical latitudes seen by GPM. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **144** (Suppl. 1), 165-175.
- Krishnamurti, T. N., S. Cocke, R. Pasch and S. Low-Nam, 1983: *Precipitation Estimates from Rain Gauge and Satellite Observations: Summer MONEX*. Dept. Meteor., Florida State Univ., 373 pp.
- Kubota, T., S. Shige, H. Hashizume, K. Aonashi, N. Takahashi, S. Seto, M. Hirose, Y. N. Takayabu, T. Ushio, K. Nakagawa, K. Iwanami, M. Kachi and K. Okamoto, 2007: Global precipitation map using satellite-borne microwave radiometers by the GSMaP project: Production and validation. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **45**, 2259-2275.
- Kubota, T., T. Ushio, S. Shige, S. Kida, M. Kachi and K. Okamoto, 2009: Verification of high-resolution satellite-based rainfall estimates around Japan using a gauge-calibrated ground-radar dataset. *J. Meteor. Soc. Japan*, **87A**, 203-222.
- Kummerow, C., Y. Hong, W. S. Olson, S. Yang, R. F. Adler, J. McCollum, R. Ferraro, G. Petty, D.-B. Shin and T. T. Wilheit, 2001: The evolution of the Goddard profiling algorithm (GPROF) for rainfall estimation from passive microwave sensors. *J. Appl. Meteor.*, **40**, 1801-1820.
- Kwon, E.-H., B.-J. Sohn, D.-E. Chang, M.-H. Ahn and S. Yang, 2008: Use of numerical forecasts for improving TMI rain retrievals over the mountainous area in Korea. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **47**, 1995-2007.
- Lin, Y.-L., 2007: *Mesoscale Dynamics*. Cambridge Univ. Press, 630 pp.
- 中澤哲夫, 里村雄彦, 重 尚一, 谷田貝亜紀代, 沖 理子, 1999: COARE98出席報告. *天気*, **46**, 517-524.
- Ogura, Y. and M. Yoshizaki, 1988: Numerical study of orographic-convective precipitation over the eastern Arabian Sea and the Ghat Mountains during the summer monsoon. *J. Atmos. Sci.*, **45**, 2097-2122.
- 岡本謙一, 重 尚一, 2008: 熱帯降雨観測衛星搭載降雨レーダの研究開発とその観測成果. *電子情報通信学会論文誌*, **J91-B**, 723-733.
- 岡本謙一, 沖 理子, 井口俊夫, 2016: 熱帯降雨観測衛星 (TRMM)の終焉. *日本リモートセンシング学会誌*, **36**, 156-158.
- Roe, G. H., 2005: Orographic precipitation. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, **33**, 645-671.
- Romatschke, U. and R. A. Houze, Jr., 2011: Characteristics of precipitating convective systems in the South Asian

- monsoon. *J. Hydrometeor.*, **12**, 3-26.
- 坂口安吾, 1989: 信長・イノチガケ. 講談社, 518pp.
- Sakakibara, H., 1981: Heavy rainfall from very shallow convective clouds. *J. Meteor. Soc. Japan*, **59**, 387-394.
- 佐々木 宏, 重 尚一, 岡本謙一, 2007: TRMM 降雨プロダクト検証のための輝度温度シミュレーションの高度化. *日本リモートセンシング学会誌*, **27**, 153-166.
- Shige, S., 1999: Disturbances of 1-2 hour-periods observed in the tropical lower troposphere during the TOGA-COARE IOP. *J. Meteor. Soc. Japan*, **77**, 1123-1136.
- Shige, S. and C. D. Kummerow, 2016: Precipitation-top heights of heavy orographic rainfall in the Asian monsoon region. *J. Atmos. Sci.*, **73**, 3009-3024.
- Shige, S. and T. Satomura, 2000: The gravity wave response in the troposphere around deep convection. *J. Meteor. Soc. Japan*, **78**, 789-801.
- 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., H. Sasaki, K. Okamoto and T. Iguchi, 2006: Validation of rainfall estimates from the TRMM precipitation radar and microwave imager using a radiative transfer model: I. Comparison of the version-5 and -6 products. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L13803, doi:10.1029/2006GL026350.
- Shige, S., Y. N. Takayabu, W.-K. Tao and C.-L. Shie, 2007: 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.*, **46**, 1098-1124.
- Shige, S., Y. N. Takayabu and W.-K. Tao, 2008a: Spectral retrieval of latent heating profiles from TRMM PR data. Part III: Estimating apparent moisture sink profiles over tropical oceans. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **47**, 620-640.
- Shige, S., T. Watanabe, H. Sasaki, T. Kubota, S. Kida and K. Okamoto, 2008b: Validation of western and eastern Pacific rainfall estimates from the TRMM PR using a radiative transfer model. *J. Geophys. Res.*, **113**, D15116, doi:10.1029/2007JD009002.
- Shige, S., T. Yamamoto, T. Tsukiyama, S. Kida, H. Ashiwake, T. Kubota, S. Seto, K. Aonashi and K. Okamoto, 2009: The GSMaP precipitation retrieval algorithm for microwave sounders. Part I: Over-ocean algorithm. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **47**, 3084-3097.
- Shige, S., S. Kida, H. Ashiwake, T. Kubota and K. Aonashi, 2013: Improvement of TMI rain retrievals in mountainous areas. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **52**, 242-254.
- Shige, S., M. K. Yamamoto and A. Taniguchi, 2015: Improvement of TMI rain retrieval over the Indian subcontinent. Remote Sensing of the Terrestrial Water Cycle (V. Lakshmi *et al.*, eds.), *Geophys. Monogr.*, **206**, Amer. Geophys. Union, 27-42.
- Shige, S., Y. Nakano and M. K. Yamamoto, 2017: Role of orography, diurnal cycle, and intraseasonal oscillation in summer monsoon rainfall over the Western Ghats and Myanmar coast. *J. Climate*, **30**, 9365-9381.
- Smith, R. B. and Y.-L. Lin, 1983: Orographic rain on Western Ghats. *Mountain Meteorology* (E. R. Reiter *et al.*, ed.), Science Press and Amer. Meteor. Soc., 71-94.
- 高橋暢宏, 重 尚一, 佐藤晋介, 清水収司, 瀬戸心太, 2005a: 衛星搭載マイクロ波放射計降水リトリバルアルゴリズムに関するレビュー PART I: 降水リトリバルの概要. *日本リモートセンシング学会誌*, **25**, 101-109.
- 高橋暢宏, 重 尚一, 佐藤晋介, 清水収司, 瀬戸心太, 2005b: 衛星搭載マイクロ波放射計降水リトリバルアルゴリズムに関するレビュー PART II: 決定論的降水リトリバル. *日本リモートセンシング学会誌*, **25**, 221-230.
- 高橋暢宏, 重 尚一, 佐藤晋介, 清水収司, 瀬戸心太, 2005c: 衛星搭載マイクロ波放射計降水リトリバルアルゴリズムに関するレビュー PART III: 確率論的降水リトリバルアルゴリズム. *日本リモートセンシング学会誌*, **25**, 289-296.
- 高橋暢宏, 重 尚一, 佐藤晋介, 清水収司, 瀬戸心太, 2005d: 衛星搭載マイクロ波放射計降水リトリバルアルゴリズムに関するレビュー PART IV: アルゴリズムの横断的比較. *日本リモートセンシング学会誌*, **25**, 384-398.
- Takayabu, Y. N., 2002: Spectral representation of rain profiles and diurnal variations observed with TRMM PR over the equatorial area. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 1584, doi:10.1029/2001GL014113.
- Takeda, T. and K. Takase, 1980: Radar observation of rainfall system modified by orographic effects. *J. Meteor. Soc. Japan*, **58**, 500-516.
- Takeda, T., N. Moriyama and Y. Iwasaka, 1976: A case study of heavy rain in Owase area. *J. Meteor. Soc. Japan*, **54**, 32-41.
- Taniguchi, A., S. Shige, M. K. Yamamoto, T. Mega, S. Kida, T. Kubota, M. Kachi, T. Ushio and K. Aonashi, 2013: Improvement of high-resolution satellite rainfall product for Typhoon Morakot (2009) over Taiwan. *J. Hydrometeor.*, **14**, 1859-1871.

- Tao, W.-K. and J. Simpson, 1993: The Goddard Cumulus Ensemble model. Part I: Model description. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, **4**, 35-72.
- 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 algorithms 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.
- Tao, W.-K. *et al.*, 2016: TRMM latent heating retrieval: Applications and comparisons with field campaigns and large-scale analyses. *Multiscale Convection-Coupled Systems in the Tropics: A Tribute to Dr. Michio Yanai*, Meteor. Monogr., **56**, Amer. Meteor. Soc., 2.1-2.34.
- 寺門和夫, 2015: 宇宙から見た雨: 熱帯降雨観測衛星 TRMM 物語. 毎日新聞社, 85pp.
- Ushio, T. *et al.*, 2009: A Kalman filter approach to the Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) from combined passive microwave and infrared radiometric data. *J. Meteor. Soc. Japan*, **87A**, 137-151.
- Xie, S.-P., H. M. Xu, N. H. Saji, Y. Wang and W. T. Liu, 2006: Role of narrow mountains in large-scale organization of Asian monsoon convection. *J. Climate*, **19**, 3420-3429.
- Yamamoto, M. K. and S. Shige, 2015: Implementation of an orographic/nonorographic rainfall classification scheme in the GSMaP algorithm for microwave radiometers. *Atmos. Res.*, **163**, 36-47.
- Yanai, M., 1961: Dynamical aspects of typhoon formation. *J. Meteor. Soc. Japan*, **39**, 282-309.
- Yanai, M. and R. H. Johnson, 1993: Impacts of cumulus convection on thermodynamic fields. *The Representation of Cumulus Convection in Numerical Models*, Meteor. Monogr., **46**, Amer. Meteor. Soc., 39-62.
- Yanai, M., S. Esbensen and J.-H. Chu, 1973: Determination of bulk properties of tropical cloud clusters from large-scale heat and moisture budgets. *J. Atmos. Sci.*, **30**, 611-627.

---

## Development of Latent Heating and Precipitation Estimation Methods Based on Satellite Observations and Elucidation of Orographic Rainfall Characteristics in the Asian Monsoon Region

Shoichi SHIGE\*

\* Graduate School of Science, Kyoto University Kitashirakawa-Oiwake-cho, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8502, Japan  
E-mail: shige@kugi.kyoto-u.ac.jp

(Received 10 April 2019; Accepted 6 October 2019)

---