

# 複合的な衛星観測データの解析による熱帯対流力学の研究

—2019年度日本気象学会賞受賞記念講演—

増 永 浩 彦\*

## 1. はじめに

2019年度日本気象学会賞を頂き、大変光栄に存じます。錚々たる歴代受賞者の末席を汚す荣誉に身が引き締まる思いですが、孤軍奮戦に始まった研究の拙い成果に暖かい激励を送って下さり、感謝の念に堪えません。

受賞対象に選んで頂いた一連の研究は2012年に発表しました論文に端を発します。本稿ではその内容を紹介するに先立ち、さらに15年余を遡る紆余曲折の経緯をまづお話しさせていただきます。遠い目をして人生を振り返るような歳でもないので昔話は程々にとも思いましたが、泥縄の飛び込み営業でポストクを渡り歩いた経歴を率直に語ることは、いま同じ逆境に立ち向かう若手研究者に対する先達の責任と心得ます。冴えない思い出話ですが、しばしお付き合い下さい。

## 2. 星形成理論から熱帯気象学へ

### 2.1 国立天文台にて

私はもともと天体物理学の研究者を志し、東京大学大学院理学系研究科天文学専攻の学生として国立天文台（東京都三鷹市）で修士・博士課程の大部分を過ごしました。博士論文の研究テーマは、星間分子ガスから太陽質量程度の恒星が生まれる過程を数値計算により再現を試みるもので、自己重力系の流体力学に放射伝達を組み合わせた至極面倒な数値モデル開発に悪戦苦闘していました (Masunaga *et al.* 1998 ; Masunaga and Inutsuka 2000)。分子ガスの中心に原始星（水素

核融合が始まる前段階の重力収縮エネルギーで輝く若い星）が誕生すると、周囲から超音速で落下する気体が星の表面に叩きつけられ強い衝撃波を作ります。数値計算で衝撃波を扱うことはただでさえ難題ですが、衝撃波面の熱力学構造に放射伝達が関与すると予測不能の数値不安定が次から次へと現れます。大学院生だった私の青春の大半は、シミュレーション出力ファイルを埋め尽くすNaNの原因究明に費やされました。

それでも何とか博士論文を提出する目途が立ったころ、天文学者になろうという目論見に暗雲が立ち込めます。当時の理論天文学分野は、学生時代に査読付原著論文を10編近く出版する怪物級の研究者がようやく助手職にありつける激戦地で、博士論文の成果で何とか4編をモノにしたに過ぎない私の実力では手も足も出ません。学振特別研究員を始め手当たり次第に応募したポストク公募は、連戦連敗が続きました。同期の仲間と食事に行っては就職難の話でくだを巻いたり、それはそれで楽しかったのですが、朝目覚めた瞬間から将来の不安で鬱々とする日々が次第に耐え難くなりました。博士号の審査を目前に控えたある日、私は天文学者の夢を断念する決心をします。

アカデミアをきっぱり諦めることも頭をよぎりましたが、研究に未練のあった私は地球科学への転向を思い立ちました。地球温暖化のような社会との接点が高い分野は研究資金が潤沢でポストク需要も多いはず、という安直な思い付きに過ぎず、大した志があったわけではありません。ただ星形成は天文学と惑星科学の境界領域で、転向先について相談できる先輩がいました。東大の地球惑星科学専攻を卒業した中本泰史さん（現・東工大）に事情を打ち明けると、私のような門外漢にも門戸を開いてくれそうな大気科学の専門家数名をリストに挙げて下さいました。私には一面識もない

\* 名古屋大学宇宙地球環境研究所。  
masunaga@nagoya-u.jp

—2019年8月28日受領—  
—2020年1月22日受理—

方々ばかりでしたので、深く考えずにリストの最初にあった教授にまず連絡を取ることにしました。

どのような文面をしたためののか今となっては思い出せませんが、要約すれば天文学で食い扶持がないのでポスドクで雇ってください、という不躰なお願いであったことに変わりありません。音沙汰がなくて当然と思っていましたので、その日のうちに返信を頂いた時は本当に驚きました。これが、東京大学 CCSR (当時)におられた中島映至教授 (現 JAXA) との出会いでした。

## 2.2 CCSR から NASDA へ

CCSR でポスドクとして過ごしたのは1999年度上半期に限られますが、私にとってはひときわ記憶に残る半年でした。当時の中島研は、前年 CRL (当時)に移籍した岡本 創さんや入れ違いで NASA LaRC へ飛んだ同期の河本和明君をはじめ、木村俊義さん、片桐秀一郎君、竹村俊彦君、鈴木健太郎君、関口美保さんらが学生として在籍していました。ポスドクでありながら気象学で何の実績もない私は不安でいっぱいでしたが、身元不詳の新参者の私を分け隔てなく仲間に入れてくれた中島研の皆さんの優しさが一たびならず心に染みしました。住 明正センター長率いる当時の CCSR には、専門分野を問わずいまや中堅の先鋒として各方面で活躍する多くの研究者が研究員や学生として机を並べていました。そのような環境に短期間でも居合わせることができたのは、私にとって幸運でした。

半年で CCSR を去った理由は、NASDA (現 JAXA) EORC の任期付研究員として採用されたからです。EORC は組織の性格上、ほとんどの研究者は何らかの地球観測衛星プロジェクトの開発や運用に関与します。私は中島映至教授が率いていた「みどり II」衛星搭載 GLI アルゴリズムチームでお世話になりつつ、実際には TRMM 観測データで研究 (Masunaga *et al.* 2002a-c) を進めていた縁で TRMM グループでも面倒を見て頂きました。蝙蝠のような立ち位置だったせいかどちらのプロジェクトでも業務の分担を言い渡されることがなく、これ幸いと周囲の迷惑を顧みず好き勝手に自分の研究に没頭していました。

NASDA 自体には必ずしも職員の科学研究を奨励する学術的気風はありませんでしたが、小川利紘 EORC 研究ディレクター (当時) を始め GLI グループの中島孝さん (現・東海大) や TRMM グループの沖 理子さんなど、駆け出しの研究者のわがままを暖かく見守って下さる懐の深い上司に恵まれました。その頃に

習得した衛星データ解析のイロハは、その後の私の研究ほぼ全てに欠かせない礎となっています。EORC でお世話になった皆様のご配慮には、今でも感謝しています。

やがて EORC で任期 3 年の期限が迫ってきました。その頃京都に新設された某国立研の助手公募に落ちたので次の一手に困っていましたが、その時思い出したのは CSU の Chris Kummerow 教授からメールで頂いていた「うちで働きたくなったらいつでも連絡下さい」という二行のメッセージでした。ちょうど彼のグループを去るポスドクの後任を探していたようです。Chris Kummerow と言えば米国 TRMM 業界で知らぬ人のいない人気者で、私にとっては国際会議の合間に 1、2 度立ち話を交わしたに過ぎない雲の上の存在でした。ずっと彼の真意を半信半疑に思っていました。おっかなびっくりメールを出すと、二つ返事で来いと言われました。

まだ 9.11 同時多発テロの暗い余韻が後を引いていた 2002 年 5 月、私は意を決し人生初の海外生活に旅立ちました。こうして米国コロラド州で過ごすことになった 4 年余りは、私の研究半生における決定的な転換期となります。

## 2.3 CSU にて

当時 CSU の大気科学科に名を連ねていた教授陣は、全球大循環モデリングの Dave Randall、メソ気象モデリングの Bill Cotton や Roger Pielke、熱帯気象の Wayne Schubert と Dick Johnson、衛星観測の Graeme Stephens と Chris Kummerow、大気化学の Sonia Kreidenweis など、泣く子も黙る大御所がひしめいていました。彼らのような偉人たちと日々同じ空気を吸って過ごすこと自体が夢のようでしたが、CSU 時代に得た最大の成果は、彼らの研究グループから育つ優秀な同世代の友人を作る機会を得たことです。今の自分にとって、CSU で知り合い今も国境を越えて研究交流が続いている仲間の存在は、かけがえのない財産です。海外研究滞在を経験された多くの方は、きつと同様の実感をお持ちではないかと推察します。

Chris から与えられた研究課題は、TRMM 衛星搭載 TMI と PR を複合的に用いた降水推定アルゴリズムの開発でした (Masunaga and Kummerow 2005)。この分野で世界最先端に行く研究室でプロジェクトに従事できたことは得難い経験でしたが、どちらかという工学的なプラグマティズムが要求されるアルゴリズム開発という仕事に、自分は向いていないような気がし

ていました。もともと究極の理学畑（天体物理）で研究マインドを育んだ私は洗練された工学的センスと無縁で、駆け出しのころ泥臭い流体計算にハマっていた後遺症か、自然界の混沌とした力学現象への愛着は断ち切れませんでした。

そんなころ私が熱帯気象学に興味を持ったのは、それが湿潤対流に代表される「混沌とした力学現象」の宝庫だからです。もとより TRMM 観測データと日々格闘していたので、熱帯気象の研究素材は目の前に無尽蔵にあふれていました。心の底で燻り続けていた理学魂が、ずっと忘れていた古傷のように疼き出しました。本務の傍ら熱帯気象の基礎を付け焼刃で独学し（そもそも気象学そのものが独習でしたが）、TRMM 衛星データをもとに熱帯降水雲を雲頂高度と降雨頂高度の2次元空間で分類してみたり（Masunaga *et al.* 2005; L'Ecuyer *et al.* 2006; Masunaga and Kummerow 2006）、MJO と連動する対流結合赤道波の変調を調査したり（Masunaga *et al.* 2006; Masunaga 2007）、手探りで始めた熱帯大気力学に次第に夢中になっていきました。当時オフィスが隣で仲の良かった Tristan L'Ecuyer（現 UW-Madison）が興味を持ち力を貸してくれたことにも勇気づけられました。

あとから振り返ると、CSU 在籍のあいだ本業のアルゴリズム開発より副業の熱帯気象学研究でずっと多くの論文を書いたことになります。外部資金で雇用される立場では資金源のプロジェクトに貢献が求められることは言うまでもありませんが、同時に将来のキャリアへの準備として主体的に研究を展開する修行も必要です。与えられた義務を果たしつつ、裏では好きな研究を着実に進めるしたたかさが、若手研究者が頭角を現すために避けて通れない関門であるように思います。もちろん、理解あるボスの存在は不可欠です。Chris は黙って副業成果の出版経費を負担してくれましたし、MJO の成果で書いた二本目の論文（Masunaga 2007）の草稿を持参したときには「それはお前のアイデアだから単著で書きなさい。そういう業績が必要な段階に来ている」と告げられました。偶然時を同じくして、名古屋大学に助教授として赴任する機会を頂きました。小さいながら一研究室を運営する立場となった今、Chris がいかに偉大なメンターであったか、ひしひしと実感しています。

## 2.4 名古屋にて

2006年夏に帰国後、少し落ち着いた頃を見計らって衛星データシミュレータ（増永 2011）の整備を進めま

した。自分がアルゴリズム開発に使っていた大気放射伝達コードを一般ユーザ向けに手を加え SDSU と名付けて公開したものです（Masunaga *et al.* 2010）。シミュレータの応用研究として、佐藤正樹さん（東京大学）と三浦裕亮君（現・東京大学）から提供頂いた全球雲解像モデル NICAM の衛星データ比較検証を試みましたが（Masunaga *et al.* 2008）、SDSU を整備した真の動機は、熱帯気象学に軸足を移したためもはや自分では使うことなくなったアルゴリズム開発ツールをお蔵入りさせる代わりに、少しでも研究コミュニティの役に立てればという想いでした。CSU 以来の友人である松井俊久君（現・NASA GSFC）は初期版 SDSU に大幅な拡張を加えて G-SDSU（Matsui *et al.* 2014）を開発し、さらにその一部は JAXA EarthCARE ミッションの一環として佐藤正樹さんが端野典平君（現・高知工科大）らを起用して完成させた Joint-Simulator（Hashino *et al.* 2013）の基礎となりました。関連コミュニティで広く認知されているこれらのツールにわずかながら貢献できたことを、嬉しく思っています。

並行して大規模赤道波や MJO の研究（Masunaga 2009）をしばらく続けていましたが、少々行き詰まりを感じていました。MJO は湿潤対流がその力学構造形成に関わることが発見当初から知られていましたが（Madden and Julian 1971, 1972）、大規模気象場と対流システムの動態を衛星データ解析から紐解く作業は思いのほか厄介です。室内実験や数値モデルと違い実験設定を自由に制御ができないのが観測研究の宿命で、風系と降水分布をありのまま図に描くことは簡単でも、その相関から物理的因果関係を特定するには限界があります。しかし現象を博物学的に記述するに飽き足らず、衛星観測をもとにメカニズム理解を深める研究を指向したいとずっと思っていました。その試行として、東太平洋 ITCZ を題材に簡単な海洋混合層モデルを衛星観測値で強制し感度実験をやってみたりしました（Masunaga and L'Ecuyer 2010, 2011）。

個々の対流システムと MJO では時空間スケールに相当な隔たりがあります。衛星赤外画像からその隔たりを埋めるマトリョーシカのような階層構造の存在が知られており、その最小単位である西進雲クラスターは 1-2 日程度の短い周期を持ち（Nakazawa 1988）、さらに西進雲クラスター群の高層雲シールド下で東進する降水システムが地上レーダ観測で認められます（Yamada *et al.* 2010）。このような高周波成分（雲クラスターなどの内部構造）は MJO のデータ解析では予

めぼっさり除去されてしまうのが通例ですが、捨てられる「ノイズ」にこそ重要な手掛かりが潜んでいるように私は感じていました。大規模な対流システムの寿命が1-2日に達することを鑑みると (Chen *et al.* 1996), 湿潤対流と大気環境場が及ぼし合う影響を調査するには、この程度の時間スケールの物理をまず理解するのが筋だと考えたわけです。

しかし、衛星観測で1-2日程度の変動をどうやって追跡するかが問題でした。静止衛星であれば容易ですが、低軌道衛星(数100kmから1,000km前後の軌道高度で周回する衛星群)は上空をあっという間に通過してしまうので定点観測の手段としては不向きです。しかし、宇宙からの気象レーダ観測を実現し衛星気象学に革命をもたらした TRMM や CloudSat はいずれも低軌道衛星です(静止軌道からレーダ計測を行う技術は現時点では確立されていません)。そのため、TRMM や CloudSat 観測から対流システムの発達過程を刻一刻と追いかける研究は、一見ありそうですが実は非常に困難です。時間軸のない観測から時系列を描出することはできないからです。

あるとき、二つの衛星を組み合わせることで、存在しないはずの時間軸を魔法のように浮かび上がらせる方法を思いつきました。ここからようやく本稿の主題に入ります。

### 3. 新たな衛星データ解析手法の模索

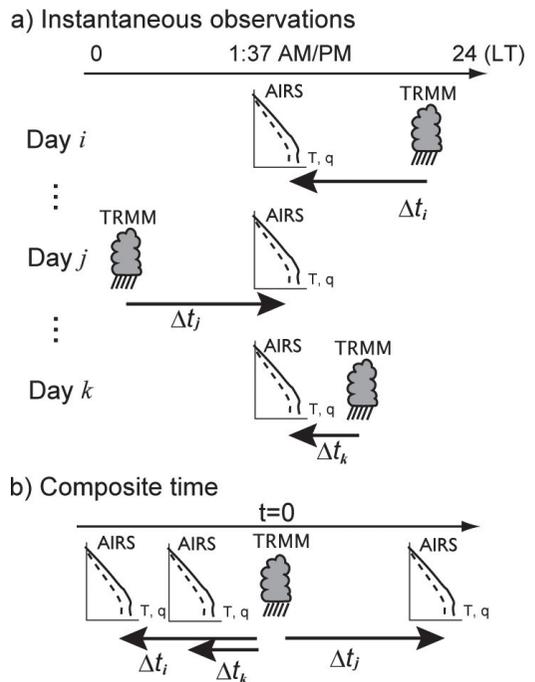
#### 3.1 コンポジット時系列の作成手法

低軌道地球観測衛星の多くは、観測地方時が一定値に固定された軌道を持つ太陽同期衛星です。例えば CloudSat 衛星を含む A-Train 衛星群は、地方時約 1:30 と 13:30 の同期軌道を周回しています。天体力学的要請により低軌道の太陽同期衛星は90度近い軌道傾斜角を持つため、太陽同期軌道は極軌道とも呼ばれます。極軌道からの地球観測は(両極直近の限られた地域を除き)全球をくまなく走査できるほか、太陽天頂角がいつもほぼ同じなので短波(可視)観測データが質的に安定し易い利点があります。

一方、地球観測衛星の中には、敢えて極軌道を避けて運用されるものもあります。例えば TRMM 衛星は、中低緯度に観測領域を限定した太陽非同期軌道を周回していました。もともと熱帯降雨観測をその名に冠したミッションなので、熱帯とその周辺を対象を絞った軌道設計は理に当たっているのですが、もう一つの利点は観測地方時が刻一刻と変化するため統計的に日周変

化を抽出できることです。これは、観測地方時が固定された太陽同期衛星では実現できない、非同期衛星ならではの特色です。

A-Train 編隊を構成する一つ Aqua 衛星には高波長分解能赤外サウンダ AIRS が搭載され、気温・湿度プロファイルを鉛直解像度約 1 km で推定する能力を持ちます。一方 TRMM 衛星は降水検出能力に優れた世界初の衛星搭載降水レーダ PR を擁し、AIRS と組み合わせることで降水と大気熱力学場の関係が明らかになります。太陽同期軌道を回る AIRS と非同期衛星の TRMM は同一地点を同時に観測することは稀で、上空通過のタイミングが近いときもあれば離れているときもあります。例えば、AIRS が気温・湿度観測を行った数時間後に同地点で TRMM 衛星が降水雲を検出する日があれば、逆に TRMM 衛星が AIRS 観測に先立って降水雲の出現を見出す日もあるはず(第1図 a)。長期間にわたり AIRS と TRMM 観測データを収集すれば、降水出現前から出現後にわたり事実上連



第1図 コンポジット時系列作成手法の概念図。  
a) Aqua 衛星搭載 AIRS および TRMM 衛星の瞬時観測例。時間軸は観測地点の地方時を示す。b) コンポジット時系列への投影。Masunaga (2012) より引用。©American Meteorological Society.

続的に分布する観測時間差 (第 1 図中の  $\Delta t$ ) のサンプルを揃えることができます。

そのような AIRS・TRMM ペアを時刻  $t = 0$  が TRMM 観測時刻に一致するよう揃えて並べ替え、コンポジット時系列を作成します (第 1 図 b)。定義上  $t = 0$  が降水雲の出現時刻に一致しますので、AIRS 観測データはコンポジット時間軸に沿って降水発生前後の時間変化を表現すると考えられます。この衛星コンポジット手法を初めて試みた Masunaga (2012) では、2002 年秋から 2009 年末まで 7 年余の全球熱帯海洋域データを収集し、時間軸上の 1 時間 bin ごとに 1000 から 6000 個の AIRS サンプルから気温と湿度のアンサンプル平均を求め、コンポジット時系列を作成しています。サンプル数に幅があるのは、雲域内でデータ欠損となる赤外サウンダの宿命として  $t = 0$  付近の観測が難しいためですが、それでも有意な統計を得るのに十分なサンプル数が確保されていることが確認されています。

### 3.2 対流発達に伴う大気熱力学場の変動

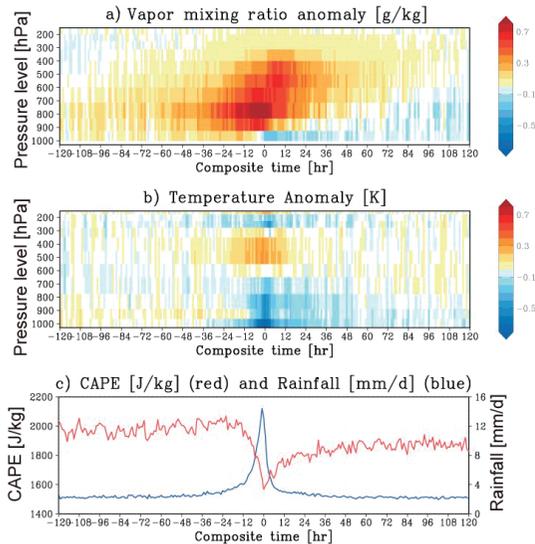
前節で概観した手法をもとに描出したコンポジット時系列の一例として、深い対流 (TRMM VIRS の赤外輝度温度  $< 245\text{K}$  かつ TRMM PR エコー頂高度 4 km

以上として定義) が検出された前後 5 日間の水蒸気混合比偏差 (第 2 図 a) と気温偏差 (第 2 図 b) の時間変化を示します。ここで偏差は背景場 (時系列の両端 12 時間分を切り取りその平均値として定義) に対して算出しています。Aqua 衛星搭載 AMSR-E から得られた降水量の時系列 (第 2 図 c の青線) は  $t = -12\text{h}$  付近から 0 h に向けて鋭い降水ピークを示しており、本コンポジット解析が降水システムの発達から消滅までを鮮やかに切り取っていることを間接的に裏付けています。

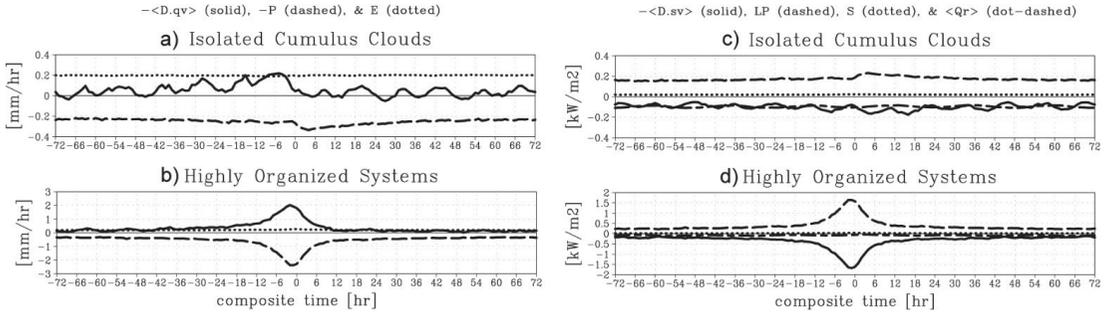
第 2 図 a は、深い対流のピーク ( $t = 0$ ) に向けて徐々に対流圏下層の湿潤化が進行し、対流発生前後から湿潤偏差が上層へと深化していく様子を捉えています。また対流発生直後から最下層の乾燥偏差が捉えられており、乾いた中層気塊が冷氣プールとして大気境界層に引きずり降ろされた結果と想像されます。このような微かな偏差まできれいに現れるとは想像しておらず、初めてコンポジット図の初期結果を目にしたときは驚きました。気温偏差 (第 2 図 b) は対流発生に伴い対流圏下層の低温偏差、上層の高温偏差、圏界面付近の低温偏差の三極構造が見られます。この気温偏差は MCS に伴う大気力学構造の熱力学的応答に酷似しており (Mapes and Houze 1995)、第 2 図が組織化された対流システムに伴う大気場の変動を捉えていることを示唆しています。

気温と湿度の鉛直分布から、CAPE の時間変動を算出することができます (第 2 図 c の赤線)。降水量の増大とともに CAPE は急激に減少しますが、降水が消失したあと再び緩やかに上昇します。すなわち熱帯大気は、準平衡仮説 (Arakawa and Schubert 1974; Emanuel *et al.* 1994) が想定するように外部強制が生成する CAPE を絶え間なく消費するように湿潤対流が誘起されるというより、降水活発期に一旦過度な安定状態に振り切れてから CAPE が徐々に回復する減衰振動のような振る舞いを示す描像が浮かび上がりました。

Masunaga (2012) を投稿した際、査読者の一人に大気力学理論の大家 Dave Raymond (NMT) がいました。Dave はコンポジット手法の有用性をいち早く認め激励してくれた上に、熱帯気象の理論的側面に疎かった私に教育的な助言を惜しみませんでした。彼ほどの大御所が、一面識もない無名の著者を相手に自ら素性を明かし親身になってアドバイスを与えてくれたことに、いたく感激しました。Dave もまた (遠く及びませんが) 私の理想とするメンターの姿を体現する一人です。



第 2 図 コンポジット時系列の一例。a) 水蒸気混合比偏差の鉛直分布。b) 気温偏差の鉛直分布。c) CAPE (赤線、左目盛) および降水量 (青線、右目盛)。a) と b) では統計的有意性 95% 未満の箇所は白抜きにしてある。Masunaga (2012) をもとに一部改変。©American Meteorological Society.



第3図 水収支・熱収支変数のコンポジット時系列. a) 孤立積雲コンポジットの鉛直積算水蒸気収束(実線), 降水量(破線, 正負を逆転してある), 蒸発フラックス(点線). b) 高度組織化コンポジットについてa)と同様. c) 孤立積雲コンポジットの鉛直積算DSE収束(実線), 降水量(破線), 顕熱フラックス(点線), 鉛直積算放射加熱(一点鎖線). d) 高度組織化コンポジットについてc)と同様. Masunaga (2013) より一部改変. ©American Meteorological Society.

### 3.3 湿潤対流発達に伴う水収支・熱収支解析

衛星コンポジット手法が思いの外うまくいく感触を得たので, その発展としてさまざまな応用問題を試してみました. その一つとして, 水収支・熱収支解析をコンポジット時系列に適用し水蒸気収束とDSE収束を推定することを試みました(Masunaga 2013). アイディアは単純です. 水収支方程式

$$\langle \nabla \cdot \overline{qu} \rangle = -\partial_t \langle \overline{q} \rangle + \overline{E} - \overline{P} \quad (1)$$

および熱収支方程式

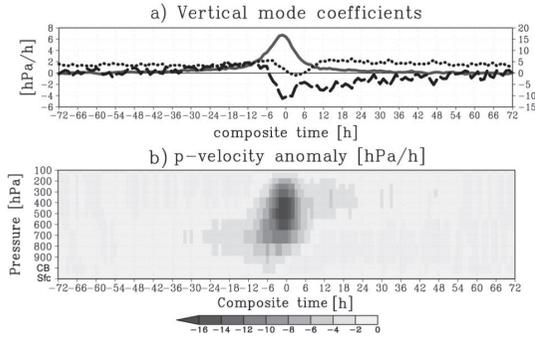
$$\langle \nabla \cdot \overline{su} \rangle = -\partial_t \langle \overline{s} \rangle + \overline{S} + \overline{LP} + \langle \overline{Q_R} \rangle \quad (2)$$

をこのように発散項のみ左辺に据えて書き直すと, 右辺はいずれの項も既存の衛星データプロダクトから導かれる変数ばかりになります(ここで $q$ ,  $s$ ,  $u$ はそれぞれ水蒸気混合比, DSE, 水平風を,  $E$ ,  $L$ ,  $P$ ,  $S$ ,  $Q_R$ はそれぞれ蒸発フラックス, 単位質量当たり水蒸気凝結潜熱, 地表面降水量, 顕熱フラックス, 放射加熱率を,  $\langle \dots \rangle$ は大気全層に渡る鉛直積分を, 上線は半径100km領域平均を表します). 熱帯気象場について現場観測実験データをもとに詳細な収支解析を行う研究はYanai *et al.* (1973)を始め長い歴史がありますが, 衛星観測は水平風鉛直構造を観測する手段を持たないため, 式(1)と(2)の左辺を直接算出することはできません. そこで, 収支式を逆に用いて水蒸気収束とDSE収束を診断的に導出しようというのがここでの新しい着想です.

その結果を第3図に示します. 100kmスケール領域

内でTRMM PRが検出する降水雲が占める面積( $t=0$ )が25%に満たない場合(「孤立積雲」コンポジット, 第3図上段)と50%を超える場合(「高度組織化」コンポジット, 下段)でコンポジット図を作り分け, 降水タイプによる大気熱力学場の変動特性の違いに着目します. 水収支の観点では孤立積雲コンポジットの場合水蒸気収束は弱く蒸発の寄与が概ね勝り, 降水量は $0.2-0.4 \text{ mm h}^{-1}$ 程度を推移するに留まります(第3図a). 一方, 高度組織化コンポジットでは,  $t=0$ 付近で水蒸気収束が蒸発量を大幅に凌駕して $2 \text{ mm h}^{-1}$ に達し, 収束場がもたらす水蒸気増加を消費するように降水量ピークが見られます(第3図b, 上述aとの縦軸範囲の違いに留意). 熱収支においては, 孤立積雲コンポジットでは放射冷却とDSE発散が同程度の寄与で降水(潜熱加熱)と釣り合う一方(第3図c), 高度組織化システムの発達時はDSE発散がほぼ単独で凝結加熱を相殺します(第3図d). これらの結果自体は特段に新しい発見ではありませんが, 降水システムの発達過程と密接に関わる大気熱力学を衛星データ解析のみから描くアプローチは, 知る限り前例のないものです.

第3図下段が示すように, 高度に組織化した降水システムは顕著な水蒸気収束とDSE発散を伴います. 水蒸気は下層に集中する一方DSEは高度と共に単調増加しますので, 第3図の結果は対流圏内の下層収束と上層発散すなわち第一傾圧モード的な深い上昇流の存在を示唆します. このことに思いを馳せていたとき, 水蒸気収束場とDSE発散場を組み合わせると大規模場平均上昇流の鉛直分布を定量化できるので, とふと思ひ当たりました. 本研究の収支解析は鉛



第4図 a) 第一傾圧モード (実線, 右軸目盛), 第二傾圧モード (破線, 左軸目盛), 浅い積雲モード (点線, 左軸目盛) の振幅のコンポジット時系列. b) 全鉛直モードの和として求めた大規模場平均上昇流 ( $\bar{w}$ ) 鉛直分布の時間変化. 縦軸ラベルの CB と Sfc はそれぞれ雲底と地表面を表す. 高度組織化コンポジットの例 (第3図下段と同条件) を示している. Masunaga and L'Ecuyer (2014) より一部改変. ©American Meteorological Society.

直積算された1次元量を扱うので詳細な鉛直構造の推定は半ば諦めていたのですが、 $\bar{w}$ の鉛直分布をモード展開してしまえば自由度を大幅に減らすことができます。そこで、熱帯対流力学で重要な鉛直モードである第一傾圧モード、第二傾圧モード、浅い積雲モードを基底関数とし $\bar{w}$ を3つの自由度で表現することを着想しました。すると、(1)と(2)の2式に加えてマイクロ波散乱計から得られる海上風速場 $u_{10}$ から算出する雲底高度での鉛直流

$$\bar{w}_{CB} = \overline{(\nabla \cdot \mathbf{u}_{10})} \Delta p_{CB} \quad (3)$$

の3つの観測値をもとに $\bar{w}$ を導出することができます (ここで $\Delta p_{CB}$ は雲底と地表面の気圧差)。具体的な手法の詳細はMasunaga and L'Ecuyer (2014)をご参照下さい。

各鉛直モードの時間進化は第4図aのようになります。第一傾圧 (深い対流) モードは水蒸気収束や降水量の時間進化 (第3図) を忠実になぞり、 $t = 0$ 付近に山型の最大値を持ちます。対照的に、第二傾圧モードは $t = -6$  hまでかすかな正の値を持ちますがその後急激に負に転じ最小値を取った後ゆるやかに減衰します。 $t < 0$ での正値は雄大積雲 (Congestus) モードと呼ばれる対流圏下層の弱い上昇流を示唆し、後半の

負値は対流圏上層の上昇流と下層の下降流で構成されるいわゆる層状 (Stratiform) モードに相当します。浅い積雲モードは深い対流モードのピークに少し遅れて極小値を取り、冷氣プールをもたらす対流スケール下降流が大気境界層直上の上昇流を抑制する結果と解釈すると辻褄が合います。雄大積雲モードに続いて深い対流モードが発達したのち層状モードに切り替わる進化は、対流結合赤道波の力学で知られている特徴とよく似ています (Takayabu *et al.* 1996; Khouider and Majda 2006; Haertel *et al.* 2008など)。3つの鉛直モードを足し合わせ鉛直流の構造進化を再現した図が第4図bです。 $\bar{w}$ の基本構造は第一傾圧モードが支配的ですが、 $t = 0$ 前後で下層から上層へ向けて上昇流がかすかに傾く構造が第二モードの寄与と認められます。Masunaga and L'Ecuyer (2014) では、さらにMSE取支解析を軸にGMS (Neelin and Held 1987; Raymond *et al.* 2009) の変動に着目した考察を展開しました。

鉛直流速は大気大循環を特徴づける重要な大気力学パラメータですが、再解析データの $\bar{w}$ は同化モデル依存性が強く信頼性に課題があることが知られています (Huaman and Takahashi 2016など)。上に述べた結果は、数値モデルが介在しない $\bar{w}$ の衛星観測推定値という点でユニークと言えます。もちろん抽象化されたコンポジット時系列の結果ですし、本アルゴリズム固有の仮定や簡略化に起因する推定誤差も検討する必要があります。Masunaga (2015) は、CINDY2011/DYNAMO/AMIE 観測実験で実施された地上サウンディング観測網データを解析し、本研究で開発された衛星コンポジット手法が地上観測が捉えた対流発達に伴う大気場変動の統計的特徴をおおむね再現することを確認しました。

### 3.4 積雲質量フラックスの推定

湿潤対流に伴う非断熱加熱が熱帯大気循環の駆動機構に不可欠であることはよく知られており (初期の研究ではRiehl and Malkus 1958など)、積雲の熱力学効果を大規模大気力学場の文脈で考慮する枠組みは古くから存在します (Yanai *et al.* 1973; Arakawa and Schubert 1974など)。一方、その際に鍵となるパラメータ (たとえば積雲質量フラックス) を観測的に検証することは現在でも容易ではありません。ウィンドプロファイラから積雲質量フラックスを推定する試みは始まっていますが (Kumar *et al.* 2015)、雲内鉛直流速を推定する観測装置を持たない現在の衛星観測で積

雲質量フラックスの推定は原理的に困難です。しかし上述のとおり大規模場平均上昇流の推定が何とか実現したので (Masunaga and L'Ecuyer 2014), 衛星データから積雲質量フラックスを導出するという「不可能」への挑戦を試みたのが Masunaga and Luo (2016) です。

共著者の Johnny Luo (CUNY) は CSU で共に研究員をやっていた頃からの同僚で、衛星観測をベースに雲対流力学に挑む独創的な研究で知られています。研究上の趣味がかなり重なるので、国際会議等で出会うと話がよく合いました。彼の仕事のなかで特に私の興味を引いたのは、雲頂温度から雲内浮力を算出する論文 (Luo *et al.* 2010) と、A-Train を構成する 2 衛星間のわずかな観測時間差を利用し雲頂上昇速度を求める研究です (Luo *et al.* 2014)。いずれも赤外輝度温度を用いているので雲頂の情報に限られますが、雲鉛直流を衛星観測から読み解く工夫が優れており、積雲質量フラックス推定に応用できないかと思いました。

Johnny から彼の解析データを送ってもらい、雲頂データから雲内上昇流の全体像 (鉛直分布) を導く方法を模索しました。積雲を表現する単一コラムモデル (SCM) を作りエントレインメント率を様々に振って走らせると、深さまぎまの各種積雲サンプルが揃うショーケースが出来上がります。与えられた雲頂観測量に対しこの SCM データベースを検索し、観測入力値と整合する積雲サンプルを探し出し、このサンプルが持つ雲内上昇流の鉛直分布を出力値とするアルゴリズムを構想しました (入力値として雲頂浮力と雲頂上昇速度をそれぞれ試した結果、観測数が豊富で統計ノイズの小さい前者を出版論文では採用しました)。

観測値に対する最適解をベイズ推定の要領で決定するアルゴリズムをざっと作って初期結果が出ると、Johnny に送って意見を求めました。彼の反応は期待以上で、とくにベイズ推定を導入する発想には「椅子から転げ落ちそうになったほど」驚いたと告白されました。実は昔 Chris Kummerow のプロジェクトでベイズ型の逆問題解法に慣れ親しんでいたのですが、何ら新しいアイデアではなかったのですが、あまり得意ではなかったアルゴリズム開発の経験が今になって役立つことに不思議な巡り合わせを感じました。

第 5 図 a は雲内鉛直速度の鉛直分布を描いたものです (第 3 図で示した高度組織化コンポジットと同条件です)。鉛直速度が 300–200hPa の高度で最大をとる基本的な鉛直構造は、時間とともにほとんど変わりません。サンプルを意図的に深い対流雲に絞っている事情

もありますが、個々の対流雲内部の力学的特徴は降水活発期か非活発期かを問わず基本的には似通っていることを示唆します。この雲内鉛直流速に積雲面積被覆率の重みをかけて領域平均すると、積雲質量フラックスが得られます。積雲質量フラックス (第 5 図 b) は  $t = 0$  前後で顕著な振幅の増減が見られ、この変動は雲内鉛直流速そのものの変化ではなくもっぱら積雲量の時間変化に支配されます。同様の知見は地上観測研究からも得られています (Kumar *et al.* 2015)。

さて大規模場平均上昇流と積雲質量フラックスの差を取ると、何が見えてくるのでしょうか? 古典的な Arakawa and Schubert (1974) 的描像によれば、環境場の補償下降流が現れると期待されます。ところが本解析によれば、降水活発期に対流圏中上層で強い上昇流、下層で弱い下降流という二極構造が見られます (第 5 図 c)。これは MCS などの組織化された降水雲に特徴的な層状性降水雲の力学構造と似ています (70 年代にはまだ MCS の概念はよく知られていませんでしたので、Arakawa and Schubert (1974) の有名なポンチ絵に層状性降水雲が想定されていないことは無理もありません)。気候モデルの積雲パラメタリゼーションに MCS 的な組織化構造を反映させることに数々の技術的課題を伴うことは広く認識されていますが、その難しさを改めて観測データから再確認した一例と言えます。

### 3.5 理論的考察と観測データ解析の接点を求めて

第 2 節で「メカニズム理解を深める研究を指向したい」と書きました。上に述べた一連のコンポジット解析を通じその足掛かりとなる観測的知見は少しずつ蓄積されてきたと感じていましたが、依然としてメカニズム理解の深化に踏み出せていないもどかしさを払拭できず、観測データを解釈する理論ツールを自分で開発する必要性を感じていました。

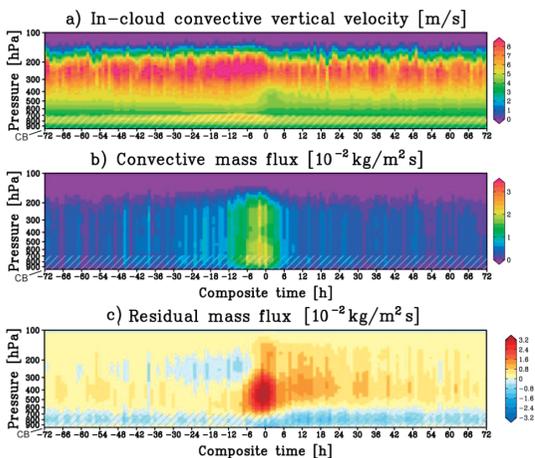
その試作品が Masunaga and Sumi (2017) で、地上サウンディング観測網データを答え合わせに参照しつつ、熱帯大気の大気熱力学的特性を表現する簡便な概念モデルを構築したものです。この概念モデルは、湿潤対流発達に伴う大気の大気力学的進化を第一・第二傾圧モードの和で表現するにあたり、モードごとに降水効率 (降水量と水蒸気収束の比) をパラメタライズするところに特色があります。地上観測から、第一 (深い対流) モードは降水効率が高く第二 (雄大積雲) モードは逆に降水効率が低いことが示唆されましたので、この特性をパラメタリゼーションに反映させると、実際に概

念モデルで降水や水蒸気量の変動を現実的に再現できました。なお（どうでもいい話ですが）私が主著で書いた中で衛星観測がまったく関与しない論文は Masunaga and Sumi (2017) が16年ぶり（天文学時代の業績を除くと2編目）になります。

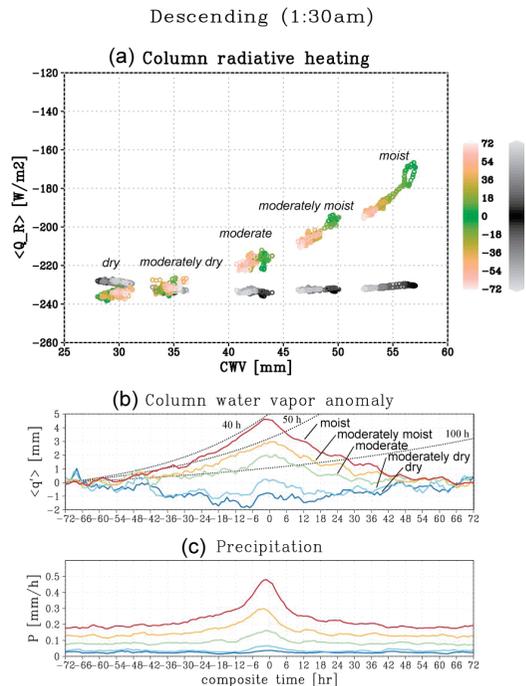
これに限らず私の仕事はかなり趣味に走った地味な成果ばかりですが、こつこつとあちこちの国際会議で喋っていると時々関心を示してくれる物好きがいます。Sandrine Bony (LMD/UPMC) もその一人でした。今をときめく気候モデリング界の大スターを「物好き」呼ばわりすると叱られますが、Sandrine は良い意味で物理的な原理主義指向が強く（彼女は量子力学で修士号を取得しています）、複雑な現象の背後に潜むメカニズムの美しさを物理の言葉で説明しようとすると、目を輝かせて聞いてくれます。一度立ち話がてらいつか LMD に寄ってみたいと話すと好感触を得ましたが、本気か社交辞令か定かでない何となく躊躇していました。すると当時 Sandrine のもとでポストドクをやっていた和泉健司君（現・University of Bristol）から、Sandrine が増永さん来るのを待っていますよ、という意外な情報もたらされました。それを真に受けることにし、2015年の春にセミナーがてら一週間弱パリを訪問しました。そして UPMC キャンパスが接するパリ 5 区の閑静で美しい街並みにすっかり魅了されて

しまい、（それだけが理由ではありませんが）折しも新しく導入された科研費種目「国際共同研究加速基金(国際共同研究強化)」を利用し2017年に半年間の LMD 滞在が実現しました。

パリ滞在中に Sandrine と進めた研究は、雲の放射効果が湿潤対流の発達に及ぼす力学的影響を調べることでした (Masunaga and Bony 2018)。熱帯海洋上でも比較的乾燥した大気と湿潤な大気では対流雲に付随して広がる巻雲雲量は大きく異なり、従って雲放射効果も大気環境に応じて明確に変わります。この実態を観察するため、CloudSat/CALIPSO 放射加熱率プロダクトをこれまで同様 TRMM PR に対してコンポジットした時系列を作成しました。第6図はその結果を示



第5図 a) 雲内鉛直速度, b) 積雲質量フラックス, c) 大規模場平均上昇流 (第4図b) から積雲質量フラックスを差し引いた残渣, の各コンポジット時系列. 高度組織化コンポジットの例 (第3図下段と同条件) を示している. 縦軸ラベルのCBは雲底を表す. Masunaga and Luo (2016) より一部改変.



第6図 a) コンポジット時系列を鉛直積算水蒸気量(横軸)-鉛直積算放射加熱率(縦軸)平面上に投影した軌跡. 「dry」から「moist」まで水蒸気環境場に応じた5種類のコンポジットを示す. カラーは全天放射加熱, 白黒は晴天放射加熱を示す. 階調はコンポジット時刻 (右凡例, 単位は [h]) を表す. b) a) と同じ5つのコンポジットに対する鉛直積算水蒸気偏差の時間変化. 点線は典型的な時間スケールで指数関数的成長を示す理論曲線. c) 降水量のコンポジット時系列. Masunaga and Bony (2018) より一部改変. ©American Meteorological Society.

し、乾燥大気下のコンポジット (dry と示された曲線) に比べ湿潤大気の下での時間変化 (moist) は顕著な加熱偏差が見られます。なおここでは降交軌道 (地方時 1:30 am) を解析し長波の寄与のみ含む結果を示しています。晴天放射加熱率 (第6図 a で白黒の軌跡) は全天放射加熱率に比べ水蒸気量に対する依存性はずっと弱いので、雲の放射影響とくに巻雲の温室効果が湿潤な環境であればあるほど増大することがわかります。最も乾燥した大気では雲放射効果がわずかに負になりますが、これは巻雲の温室効果に代わって下層雲の放射冷却が見えている結果と解釈できます。

第6図 b は、同じコンポジットから得られる鉛直積算水蒸気量の時間変化を示します。湿潤大気ほど対流活発ピーク ( $t=0$ ) に向けた湿潤化が急激であり、降水量の増大も顕著です (第6図 c)。この湿潤化の物理的要因を探るため、Masunaga and Sumi (2017) で開発した概念モデルをさらに簡略化し、巻雲の温室効果が第二傾圧モード (雄大積雲モード) を増幅させ水蒸気収束を誘起する時間スケールを与える解析解を導出しました。第二傾圧モードは第一モードほど顕著な降水を伴いませんが、負のGMSを持ち自己増幅的に成長する力学的潜在性を持っています。この解によると、巻雲の放射効果により引き起こされる水蒸気偏差の成長率は湿潤な環境ほど高くなり、もっとも湿潤な大気では約2日の時間スケールで湿潤化が進行することが期待されます。第6図 b は、衛星観測コンポジットが理論的予測を定量的に裏付けていることを示しています。放射対流相互作用が対流システムのライフサイクルに変調を与える程に速やかな効果を持つとは、これまで明確に認識されていませんでした。Masunaga and Bony (2018) の結果は、そのようなプロセスが第二傾圧モードの力学を介し実現し得ることを裏付けました。

#### 4. 火星の天文学者

神経学者 Oliver Sacks の著書『An Anthropologist on Mars (火星の人類学者)』の中に、Sacks が Temple Grandin という動物学者 (奇しくも CSU の教授) に会いに行く話が出てきます。Grandin は自閉症を抱えながらアカデミアで成功を収めた女性で、一見特異な人物像に隠された彼女の秘めたる情熱と葛藤を看破した名著であります。彼女は何気ないコミュニケーションのコツ一つを会得するのにも、あたかも異質な文明に暮らす部族を研究するかのよう、他者を観察

し分析することにより学習していきます。「火星の人類学者」とは Grandin 本人がそんな自分をなぞらえて Sacks に語った言葉です。

私は気象学では遅いスタートラインを切りましたので、アウトサイダーとしてこの世界に入った初心を敢えて忘れないようにしています。自閉症の Grandin は動物が抱えるストレスを敏感に感じるとる稀有な才能を持ち、これは彼女が「火星の人類学者」だからこそ勝ち得た強みでもあります。私は不遜ながら Grandin にあやかり、自分を火星の天文学者だと開き直すことにしています。もし地球の地球学者が思いつきにくい何かの一つでも目に入るとすれば、それが私にとって唯一の取り柄になるからです。

火星から地球を観察する私が一番興味をそられるテーマは、なぜ地球に雨が降るのかというシンプルな疑問です。大気を持つ太陽系の惑星に雲はありふれた存在ですが、雲が降水となり広大な海を持つに至った天体は (メタンの雨が降るタイタンを除けば) 私たちの知る限り地球だけです。

気象学の教科書には、雨が降るしくみが事細かく解説されています。雲微物理 (雲粒の凝結や併合成長など)・熱力学 (条件付不安定や CAPE など)・力学 (下層風の収束や鉛直シアなど)・地理的条件 (地形や海陸分布) といった知識を総動員すれば、雨雲を作り出す局所的な気象条件の多くを説明することができます。しかるに気候学的な文脈では、全球収支のことで降水の必要性が説明されます。大気水収支の要請として降水量は蒸発量と釣り合わなければならず、同時に大気エネルギー収支は降水 (潜熱加熱) と顕熱加熱が放射冷却を相殺することを要請します。

局所的な降水トリガーと全球水/エネルギー収支の要請は、どうして両立できるのでしょうか? ある日ある場所で発生する小さな雨雲が全球収支に「付度」するとは思えませんし、地球上あちこちに散在する雨雲が長期的に全球水収支とエネルギー収支を満たすようちゃんと辻褄を合わせているとは、考えてみると大変不思議なことではないでしょうか? 私はこのパラドックスを、「Think globally, act locally」問題と呼びたいと思います。地球にどうして雨が降るのか、すなわち現在の地球気候において降水の物理的必然性はどのように担保されているのか、これは気象学と気候学にまたがる根源的な未解決問題だと私は考えています。雨ほど身近な自然現象がこれほど深遠な謎を秘めているとは、とても魅力的なことだと思いませんか?

## 謝 辞

第2節では研究遍歴に沿ってお世話になった方々のお名前に触れました。とりわけ、キャリアの転機に支えて下さった中島映至先生とChris Kummerow教授のお二人には改めて深く謝意を表したいと思います。また大学院在籍時に指導を仰いだ観山正見教授(現・広島大学)と犬塚修一郎さん(現・名古屋大学)には、極めて質の高い教育と鍛錬の場を与えて下さったことに深く御礼を申し上げます。

名古屋大学で研究室の運営を支えて下さった皆さん、とくに秘書の田中知子さんと研究員の古澤(秋元)文江さんには、着任以来10数年に渡りずっとお世話になり感謝の念に堪えません。研究室に在籍した学生の皆さんにとって私は拙い指導教員だったかと身の縮む思いですが、それぞれ逞しく卒業後の人生を歩んでいることを知るたび嬉しく思っています。

論文等でご一緒したことはなくても、研究集会などに呼んでいただいたり逆に招きにに応じていただいたりと親しくお付き合い下さる研究仲間が大勢います。一人ひとりのお名前を挙げることは叶いませんが、良い同僚に恵まれ本当に幸運だと思っています。最後に、研究者という(一般の人の目には)謎めいた人生を歩む私を三者それぞれに支えてくれた両親(故人)と妻に感謝します。

## 略語一覧

AIRS: Atmospheric InfraRed Sounder 大気赤外サウンダ  
 AMIE: Atmospheric Radiation Measurements (ARM)  
 MJO Investigation Experiment  
 AMSR-E: Advanced Microwave Scanning Radiometer for the Earth Observing System (EOS) 改良型高性能マイクロ波放射計  
 A-Train: Afternoon Train  
 CALIPSO: Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation  
 CAPE: Convective Available Potential Energy 対流有効位置エネルギー  
 CCSR: Center for Climate System Research 気候システム研究センター  
 CINDY2011: Cooperative Indian Ocean experiment on Intraseasonal variability in the Year 2011  
 CRL: Communications Research Laboratory 通信総合研究所  
 CSU: Colorado State University コロラド州立大学  
 CUNY: The City University of New York ニューヨーク市立大学

DSE: Dry Static Energy 乾燥静的エネルギー  
 DYNAMO: Dynamics of MJO  
 EarthCARE: Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer 雲エアロゾル放射ミッション  
 EORC: Earth Observation Research Center 地球観測研究センター  
 GLI: Global Imager グローバルイメージャ  
 GMS: Gross Moist Stability  
 GSFC: Goddard Space Flight Center ゴダード宇宙飛行センター  
 G-SDSU: Goddard Satellite Data Simulator Unit ゴダード衛星データシミュレータユニット  
 ITCZ: Inter-Tropical Convergence Zone 熱帯収束帯  
 JAXA: Japan Aerospace Exploration Agency 宇宙航空研究開発機構  
 LaRC: Langley Research Center ラングレー研究所  
 LMD: Laboratoire de Météorologie Dynamique 気象力学研究所  
 MCS: Mesoscale Convective System メソ対流系  
 MJO: Madden Julian Oscillation マッデンジュリアン振動  
 MSE: Moist Static Energy 湿潤静的エネルギー  
 NASA: National Aeronautics and Space Administration アメリカ航空宇宙局  
 NASDA: National Space Development Agency of Japan 宇宙開発事業団  
 NICAM: Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model 非静力学正20面体格子大気モデル  
 NMT: New Mexico Institute of Mining and Technology ニューメキシコ工科大学  
 PR: Precipitation Radar 降水レーダ  
 SDSU: Satellite Data Simulator Unit 衛星データシミュレータユニット  
 TMI: TRMM Microwave Imager TRMM マイクロ波放射計  
 TRMM: Tropical Rainfall Measuring Mission 熱帯降雨観測衛星  
 UPMC: Université Pierre et Marie Curie ピエールマリーキュリー大学  
 UW-Madison: University of Wisconsin-Madison ウィスコンシン大学マディソン校  
 VIRS: Visible and Infrared Scanner 可視赤外観測装置

## 参 考 文 献

Arakawa, A. and W. H. Schubert, 1974: Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large-scale environment. Part I. *J. Atmos. Sci.*, **31**, 674-701.  
 Chen, S. S., R. A. Houze Jr. and B. E. Mapes, 1996: Multi-scale variability of deep convection in relation to large-scale circulation in TOGA COARE. *J. Atmos. Sci.*, **53**,

- 1380-1409.
- Emanuel, K. A., J. D. Neelin and C. S. Bretherton, 1994: On large-scale circulations in convecting atmospheres. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **120**, 1111-1143.
- Haertel, P. T., G. N. Kiladis, A. Denno and T. M. Rickenbach, 2008: Vertical-mode decompositions of 2-day waves and the Madden-Julian oscillation. *J. Atmos. Sci.*, **65**, doi:10.1175/2007JAS2314.1.
- Hashino, T., M. Satoh, Y. Hagihara, T. Kubota, T. Matsui, T. Nasuno and H. Okamoto, 2013: Evaluating cloud microphysics from NICAM against CloudSat and CALIPSO. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **118**, doi:10.1002/jgrd.50564.
- Huaman, L. and K. Takahashi, 2016: The vertical structure of the eastern Pacific ITCZs and associated circulation using the TRMM Precipitation Radar and in situ data. *Geophys. Res. Lett.*, **43**, doi:10.1002/2016GL068835.
- Khouider, B. and A. J. Majda, 2006: A simple multicloud parameterization for convectively coupled tropical waves. Part I: Linear analysis. *J. Atmos. Sci.*, **63**, doi:10.1175/JAS3677.1.
- Kumar, V. V., C. Jakob, A. Protat, C. R. Williams and P. T. May, 2015: Mass-flux characteristics of tropical cumulus clouds from wind profiler observations at Darwin, Australia. *J. Atmos. Sci.*, **72**, doi:10.1175/JAS-D-14-0259.1.
- L'Ecuyer, T. S., H. Masunaga and C. D. Kummerow, 2006: Variability in the characteristics of precipitation systems in the tropical Pacific. Part II: Implications for atmospheric heating. *J. Climate*, **19**, 1388-1406.
- Luo, Z. J., G. Y. Liu and G. L. Stephens, 2010: Use of A-Train data to estimate convective buoyancy and entrainment rate. *Geophys. Res. Lett.*, **37**, doi:10.1029/2010GL042904.
- Luo, Z. J., J. Jeyaratnam, S. Iwasaki, H. Takahashi and R. Anderson, 2014: Convective vertical velocity and cloud internal vertical structure: An A-Train perspective. *Geophys. Res. Lett.*, **41**, doi:10.1002/2013GL058922.
- Madden, R. A. and P. R. Julian, 1971: Detection of a 40-50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. *J. Atmos. Sci.*, **28**, 702-708.
- Madden, R. A. and P. R. Julian, 1972: Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 40-50 day period. *J. Atmos. Sci.*, **29**, 1109-1123.
- Mapes, B. E. and R. A. Houze Jr., 1995: Diabatic divergence profiles in western Pacific mesoscale convective systems. *J. Atmos. Sci.*, **52**, 1807-1828.
- Masunaga, H., 2007: Seasonality and regionality of the Madden-Julian Oscillation, Kelvin wave, and equatorial Rossby wave. *J. Atmos. Sci.*, **64**, 4400-4416.
- Masunaga, H., 2009: A 9-season TRMM observation of the austral summer MJO and low-frequency equatorial waves. *J. Meteor. Soc. Japan*, **87A**, 295-315.
- 増永浩彦, 2011: 衛星データ・シミュレータ. *天気*, **58**, 559-561.
- Masunaga, H., 2012: A satellite study of the atmospheric forcing and response to moist convection over tropical and subtropical oceans. *J. Atmos. Sci.*, **69**, 150-167.
- Masunaga, H., 2013: A satellite study of tropical moist convection and environmental variability: A moisture and thermal budget analysis. *J. Atmos. Sci.*, **70**, 2443-2466.
- Masunaga, H., 2015: Assessment of a satellite-based atmospheric budget analysis method using CINDY2011/DYNAMO/AMIE and TOGA COARE sounding array data. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93A**, doi:10.2151/jmsj.2015-032.
- Masunaga, H. and S. Bony, 2018: Radiative invigoration of tropical convection by preceding cirrus clouds. *J. Atmos. Sci.*, **75**, doi:10.1175/JAS-D-17-0355.1.
- Masunaga, H. and S. Inutsuka, 2000: A radiation hydrodynamic model for protostellar collapse. II. The second collapse and the birth of a protostar. *Astrophys. J.*, **531**, 350-365.
- Masunaga, H. and C. D. Kummerow, 2005: Combined radar and radiometer analysis of precipitation profiles for a parametric retrieval algorithm. *J. Atmos. Oceanic Tech.*, **22**, 909-929.
- Masunaga, H. and C. D. Kummerow, 2006: Observations of tropical precipitating clouds ranging from shallow to deep convective systems. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, doi:10.1029/2006GL026547.
- Masunaga, H. and T. S. L'Ecuyer, 2010: The southeast Pacific warm band and double ITCZ. *J. Climate*, **23**, 1189-1208.
- Masunaga, H. and T. S. L'Ecuyer, 2011: Equatorial asymmetry of the east Pacific ITCZ: Observational constraints on the underlying processes. *J. Climate*, **24**, 1784-1800.
- Masunaga, H. and T. S. L'Ecuyer, 2014: A mechanism of tropical convection inferred from observed variability in the moist static energy budget. *J. Atmos. Sci.*, **71**, 3747-3766.
- Masunaga, H. and Z. J. Luo, 2016: Convective and large-scale mass flux profiles over tropical oceans determined from synergistic analysis of a suite of satellite observations. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **121**, doi:10.1002/2016JD024753.

- Masunaga, H. and Y. Sumi, 2017: A toy model of tropical convection with a moisture storage closure. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, **9**, doi:10.1002/2016MS000855.
- Masunaga, H., S. M. Miyama and S. Inutsuka, 1998: A radiation hydrodynamic model for protostellar collapse. I. The first collapse. *Astrophys. J.*, **495**, 346-369.
- Masunaga, H., T. Iguchi, R. Oki and M. Kachi, 2002a: Comparison of rainfall products derived from TRMM Microwave Imager and Precipitation Radar. *J. Appl. Meteor.*, **41**, 849-862.
- Masunaga, H., T. Y. Nakajima, T. Nakajima, M. Kachi, R. Oki and S. Kuroda, 2002b: Physical properties of maritime low clouds as retrieved by combined use of Tropical Rainfall Measurement Mission Microwave Imager and Visible/Infrared Scanner: Algorithm. *J. Geophys. Res.*, **107**, doi:10.1029/2001JD000743.
- Masunaga, H., T. Y. Nakajima, T. Nakajima, M. Kachi and K. Suzuki, 2002c: Physical properties of maritime low clouds as retrieved by combined use of Tropical Rainfall Measurement Mission (TRMM) Microwave Imager and Visible/Infrared Scanner 2. Climatology of warm clouds and rain. *J. Geophys. Res.*, **107**, doi:10.1029/2001JD001269.
- Masunaga, H., T. S. L'Ecuyer and C. D. Kummerow, 2005: Variability in the characteristics of precipitation systems in the tropical Pacific. Part I: Spatial Structure. *J. Climate*, **18**, 823-840.
- Masunaga, H., T. S. L'Ecuyer and C. D. Kummerow, 2006: The Madden-Julian Oscillation recorded in early observations from the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). *J. Atmos. Sci.*, **63**, 2777-2794.
- Masunaga, H., M. Satoh and H. Miura, 2008: A joint satellite and global cloud-resolving model analysis of a Madden-Julian Oscillation event: Model diagnosis. *J. Geophys. Res.*, **113**, doi:10.1029/2008JD009986.
- Masunaga, H., T. Matsui, W.-K. Tao, A. Y. Hou, C. D. Kummerow, T. Nakajima, P. Bauer, W. S. Olson, M. Sekiguchi and T. Y. Nakajima, 2010: Satellite Data Simulator Unit (SDSU): A multi-sensor, multi-spectral satellite simulator package. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **91**, 1625-1632.
- Matsui, T., J. Santanello, J. J. Shi, W.-K. Tao, D. Wu, C. Peters-Lidard, E. Kemp, M. Chin, D. Starr, M. Sekiguchi and F. Aires, 2014: Introducing multisensor satellite radiance-based evaluation for regional Earth System modeling. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **119**, doi:10.1002/2013JD021424.
- Nakazawa, T., 1988: Tropical super clusters within intraseasonal variations over the western Pacific. *J. Meteor. Soc. Japan*, **66**, 823-839.
- Neelin, J. D. and I. M. Held, 1987: Modeling tropical convergence based on the moist static energy budget. *Mon. Wea. Rev.*, **115**, 3-12.
- Raymond, D. J., S. L. Sessions, A. H. Sobel and Ž. Fuchs, 2009: The mechanics of gross moist stability. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, **1**, doi:10.3894/JAMES.2009.1.9.
- Riehl, H. and J. S. Malkus, 1958: On the heat balance in the equatorial trough zone. *Geophysica*, **6**, 503-538.
- Takayabu, Y. N., K.-M. Lau and C.-H. Sui, 1996: Observation of a quasi-2-day wave during TOGA COARE. *Mon. Wea. Rev.*, **124**, 1892-1913.
- Yamada, H., K. Yoneyama, M. Katsumata and R. Shirooka, 2010: Observations of a super cloud cluster accompanied by synoptic-scale eastward-propagating precipitating systems over the Indian Ocean. *J. Atmos. Sci.*, **67**, 1456-1473.
- 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.

---

## Study of Tropical Convective Dynamics by Combined Analysis of Satellite Observations

Hirohiko MASUNAGA\*

\* *Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, 464-8601 Nagoya, Japan*  
*Email: masunaga@nagoya-u.jp*

(Received 28 August 2019; Accepted 22 January 2020)

---