

計画研究項目 A03

「赤道域における対流雲発生機構と降水システムの研究」

1. 研究組織

研究代表者：古津年章（島根大学総合理工学部・教授）

研究分担者：児玉安正（弘前大学大学院理工学研究科・准教授）

高藪 縁（東京大学気候システム研究センター・教授）

柴垣佳明（大阪電気通信大学情報通信工学部・准教授）

下舞豊志（島根大学総合理工学部・助教）

研究協力者：藤吉康志（北海道大低温科学研究所・教授）

川島正行（北海道大低温科学研究所・助教）

古本淳一（京都大学生存圏研究所・助教）

森 修一（海洋研究開発機構），その他 CPEA 研究者

2. 当初の設定目標とその達成度

当初の研究課題は、スマトラ域を中心として、(1) 積雲対流の発生・発達機構、(2) メソからシノプティックスケールに至る積雲対流活動、(3) 全球規模の大気循環に伴う積雲対流活動の特性を明らかにすることである。更に、これらの研究を基礎として、(4) 積雲対流により励起される波動・運動量解析を行うことである。このため、スマトラ・コトタバんに、気象レーダ、ラジオメータなどの気象観測システムを整備し、連続観測を実施してきた。また平成 16 年 3～5 月、および平成 17 年 11～12 月に、高頻度ラジオゾンデ観測を含む観測キャンペーンを実施した。さらに熱帯降雨観測衛星（TRMM）などの衛星データを用いて、大規模降水場の特性を調べてきた。

達成度：観測はほぼ順調に行われ、長期間安定したデータが取得された。コトタバンにおける対流活動の特性は、個々の対流雲の構造・雲微物理特性、降雨の階層構造などについて多くの知見が得られた。また TRMM 衛星などを用い、海洋大陸域の降水や雷特性、それらの季節内変動が明らかになった。従って、研究課題(1)～(3)についてはほぼ目的が達成されたと考える。課題(4)については、A04 班等との協力を通して研究がすすめられた。A03 班では、対流雲上空の重力波構造、上部対流圏・下部成層圏（UTLS）擾乱の季節内変化、重力波励起数値実験などを A04 と協力して行い、初期現在、解析結果をまとめている段階である。課題(4)については 60%程度の達成度と考える。

3. 主な研究成果

(1) スマトラ域降水活動の季節内変化

主に CPEA-I キャンペーン期間のデータ解析から、降水特性が顕著な季節内変動を伴うことがわかった。ドップラー降雨レーダ、境界層レーダ (BLR) データ、X バンドレーダデータ解析から、降雨頂高度および降雨の水平構造は Madden-Julian 振動 (MJO) のフェーズに同期した季節内変化を伴っていた。MJO の不活発期には、基本的に環境場は東風であり、それと局地循環(西風)による局地性の対流が、昼間山岳で発生する。その対流は、時間とともに西進または東進し、地域による異なる降水日周変化をもたらす。MJO の活発期には組織化した広域の降水システムが支配的になる。基本的にはスーパー雲クラスター (SCC) に伴って下層で西風になる。この場合、地形性上昇気流により層状降雨が山岳域に長時間分布する。結果として、MJO 不活発期には、降雨頂高度が高く、MJO 活発期には低くなる。外向きの長波放射 (OLR) や相当黒体輝度温度 (TBB) で表される雲頂高度は、MJO 活発期には高く、不活発期には低くなる。これは矛盾しているようであるが、対流活動の空間スケールについての詳細解析により原因が明確になると考えている。このような降雨の特性変化に対応して、MJO の不活発期の対流雲では、雨滴が大きく成長することが明らかになった。(Kawashima et al. JMSJ, 2006; Kozu et al. GRL, 2005)

(2) 雷特性と熱輸送特性の季節内変化

TRMM 搭載雷観測装置 (LIS) および OLR の解析から、MJO 不活発期に一般に雷活動が活発になることが明らかになった。(Morita and Takayabu, DAO, 2006) この現象は、CPEA-I キャンペーン期間でも認められた(Kodama et al. JMSJ, 2006). CPEA-I キャンペーン期間中のラジオゾンデデータを用いて、陸上と海上における熱収支の高度分布を調べた。その結果、潜熱放射高度は、海陸での差は少なく、MJO 活発期に増加するが、上昇気流による顕熱輸送は、特に陸上の MJO 不活発期に顕著になり、上空まで熱輸送が行われていることが明らかになった。このような雷や熱輸送の季節内変化は、3.1 で述べた結果と整合的である。(Kodama et al. JMSJ, 2006)

(3) 雨滴粒径分布 (DSD) の詳細解析・地域特性解明

コトタバン、シンガポールおよびガダンキの DSD 長期データを統計解析し、日周変化、季節変化、地域依存性を明らかにした。(Kozu et al. JMSJ, 2006) 各地の雨滴粒径分布は、対流活動の日周変化や降雨特性の季節変化に影響され、大きく変動する。コトタバンでは、最も顕著な雨滴粒径分布および降雨量の日周変化がみられた。これは海陸風や地形の影響により、一般に午後に対流活動が

最も活発となることと関連があると考えられる。

(4) 降雨の階層構造

密な空間分解能を持つ雲データを用いて、インド洋から海洋大陸にかけての SCC の変移過程やスマトラの地形効果に伴う西風バーストの振舞いを明らかにした。そのなかで、海洋大陸での SCC の移動や構造は雲クラスタ (CC) の日周期変化に強く依存すること、スマトラでの CC の特徴として、東岸付近で形成された孤立した複数のクラスタが西進し、西岸の山岳域に近づくに従い組織化し、山岳に沿った雲システムを形成する傾向があることがわかった。また山岳域の雲システム形成には背景場と局地循環との関係が重要であることが示唆された。(Shibagaki et al. MWR, 2006a; Shibagaki et al. JMSJ, 2006b)

(5) 海洋大陸の降水の特徴

海洋大陸付近の降水の特徴を全球規模と比較した。その結果、海洋大陸では、対流性・層状性降水の比率、日周変化などの海上と陸上での違いが比較的小さく、海上と陸上の降水の特性を併せ持つような特徴的な降水系を形成していることがわかった。(Takayabu, GRL, 2002)

(6) 対流活動による重力波励起特性

A04 と A03 の協力により、UTLS における擾乱、重力波、赤道波などについて、多くの知見が得られた。(A04 の成果発表参照)。A03 の重要な知見のひとつとして、スマトラ域の対流活動の MJO 依存性がある。この結果は、上下結合が必ずしも MJO の活発期に大きくなるわけではないことを示唆している。これを更に調べるため、いくつかの試みを行った。CPEA-II 期間の X バンドドップラーレーダ (XDR) データを熱源として、重力波励起の数値実験を行い、ラジオゾンデ観測と比較して妥当な結果が得られた。(Kawashima et al. CPEA Symp., 2007) 長期の EAR データや OLR データを用いて UTLS 擾乱の日周変化、季節内変化を調べた。(Kozu et al. CPEA Symp. 2007)

4. 他の班との連携状況

- (1) A01: EAR, X-band レーダの運用, EAR や雨滴粒径分布解析などで協力した。
- (2) A02: 衛星回線伝搬特性解析のためのデータを提供してきた。
- (3) A04: 対流圏-成層圏結合の解析で密接に協力体制をとってきた。
- (4) A05: 対流圏の水蒸気, 雲解析の面で, データ交換や情報交換を行ってきた。
- (5) A06: プラズマバブルや電離圏シンチレーションと対流活動の関係解析面で協力した。

A03「赤道域における対流雲発生機構と降水システムの研究」成果の概要

赤道大気上下結合 第4回評価委員会
平成19年7月21日

古津年章・下舞豊志(島根大学), 児玉安正(弘前大学),
高藪縁(東京大学CCSR), 柴垣佳明(大阪電通大),
藤吉康志・川島正行(北大), 他

1. 研究目的と概要
2. コタバン降水特性概要
3. 海洋大陸降水・雷特性
4. 降水特性の季節内変動
5. 対流システムの階層構造
6. EAR鉛直変動統計解析
7. まとめ

主な研究目的

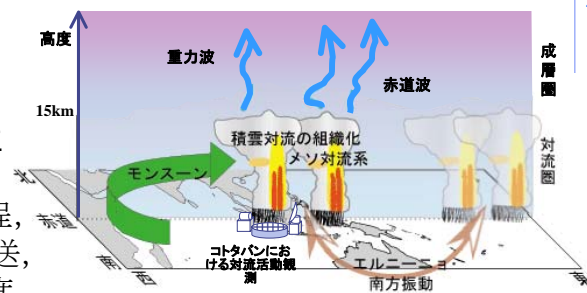
課題0 システム構築運用

課題1 積雲対流の発生機構と特徴: 個々の積雲対流の構造・形成過程, 熱エネルギーの鉛直輸送, 雨滴粒径分布・降水強度などの特徴解明.

課題2 積雲対流活動の階層構造: 個々の対流セルからメソ対流系, スーパー雲クラスターまでの組織化や階層構造解明.

課題3 全球規模の大気循環と積雲対流活動: MJO・エルニーニョなど地球規模大気循環と積雲対流活動との関係の解明.

課題4 対流活動と上下結合: 積雲対流の振舞いを基に, 波動励起特性の解明.



課題1 積雲対流の発生機構と特徴

3

課題2 積雲対流の階層構造

(1) 降雨量および雨滴粒径分布の日周変化, 季節変化, 季節内変化, OLRとの対応

[Kozu et al. GRL, 2005](#); [Kozu et al. JMSJ CPEA sp. issue, 2006](#).

(2) 降雨構造の季節内変化

[Kawashima et al. JMSJ CPEA sp. issue, 2006](#). [Kozu et al. CPEA symp. 2007](#).

(3) 雷特性・熱輸送特性の季節内変化

[Morita and Takayabu DAO, 2006](#); [Kodama et al. JMSJ CPEA sp. issue, 2006](#).

(4) 対流活動の生成・発達・移動, 降雨の階層構造

[Shibagaki et al. MWR, 2006](#); [Shibagaki et al. JMSJ CPEA sp. issue, 2006](#).

課題3 全球規模の大気循環と積雲対流活動

4

課題4 対流活動と上下結合

(1) 降雨特性のMJO応答: 課題1と重複

(2) 海洋大陸の降水の特徴: 全赤道域との比較解析

[Takayabu, GRL, 2002](#); [Takayabu, CPEA WS, 2002](#).

(3) 対流活動と重力波, 赤道波の関係: A04との協力

(4) 対流活動による重力波励起

[Kawashima et al. CPEA symp., 2007](#).

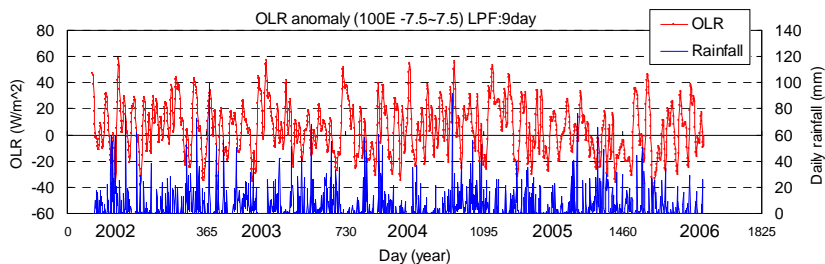
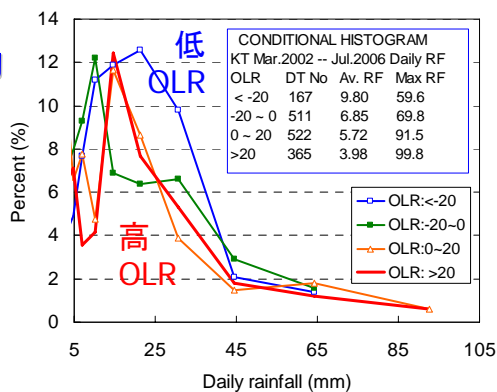
(5) UTLS鉛直流擾乱の日周変化, 季節内変化

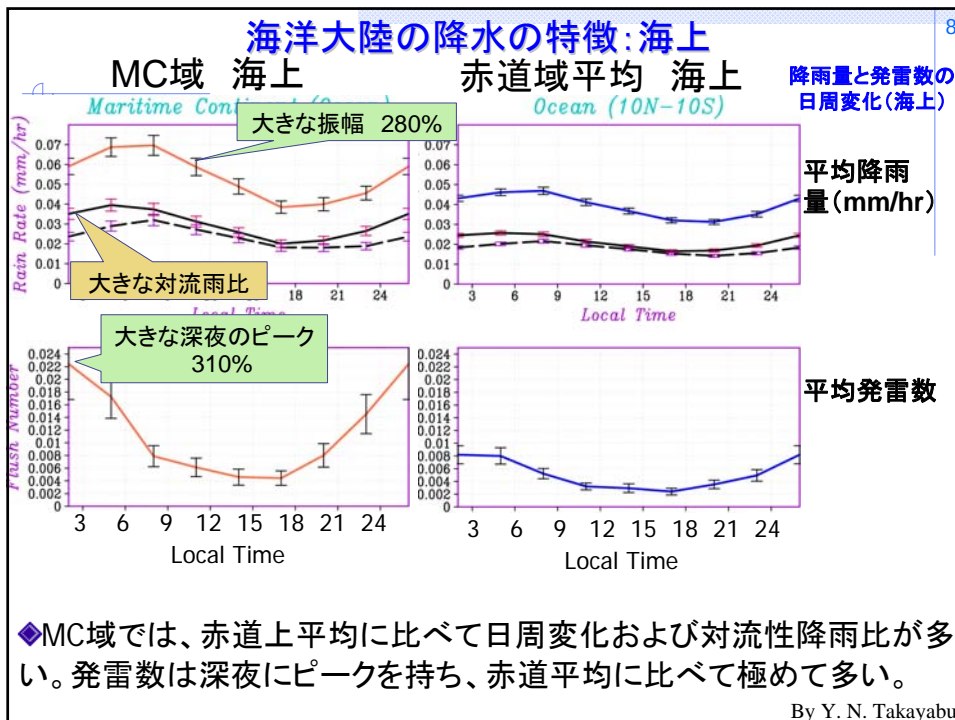
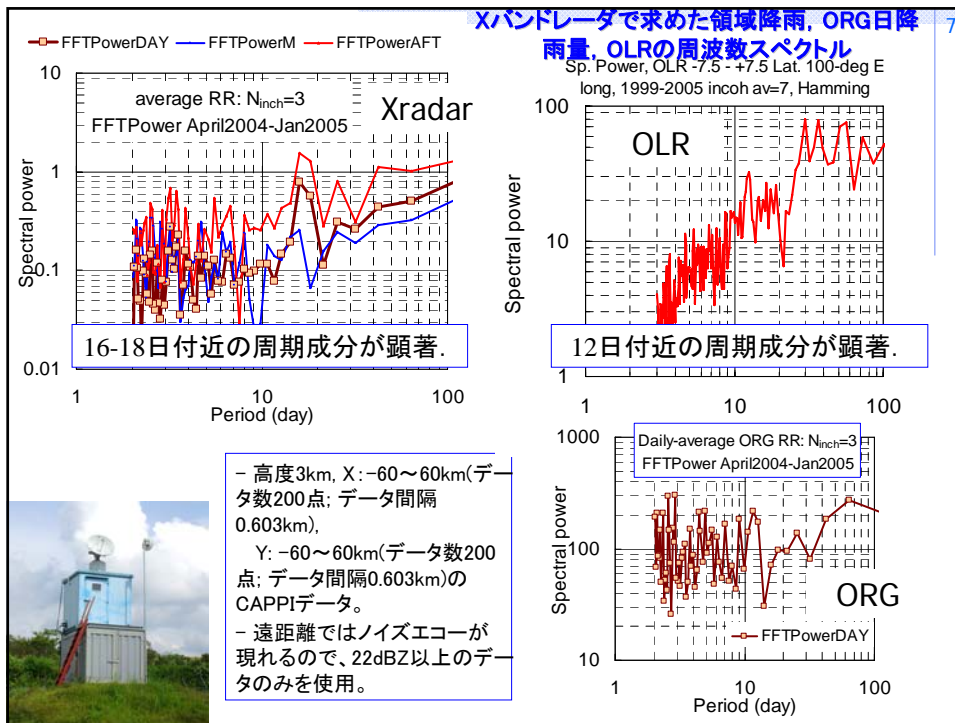
[Kozu et al. CPEA symp., 2007](#).

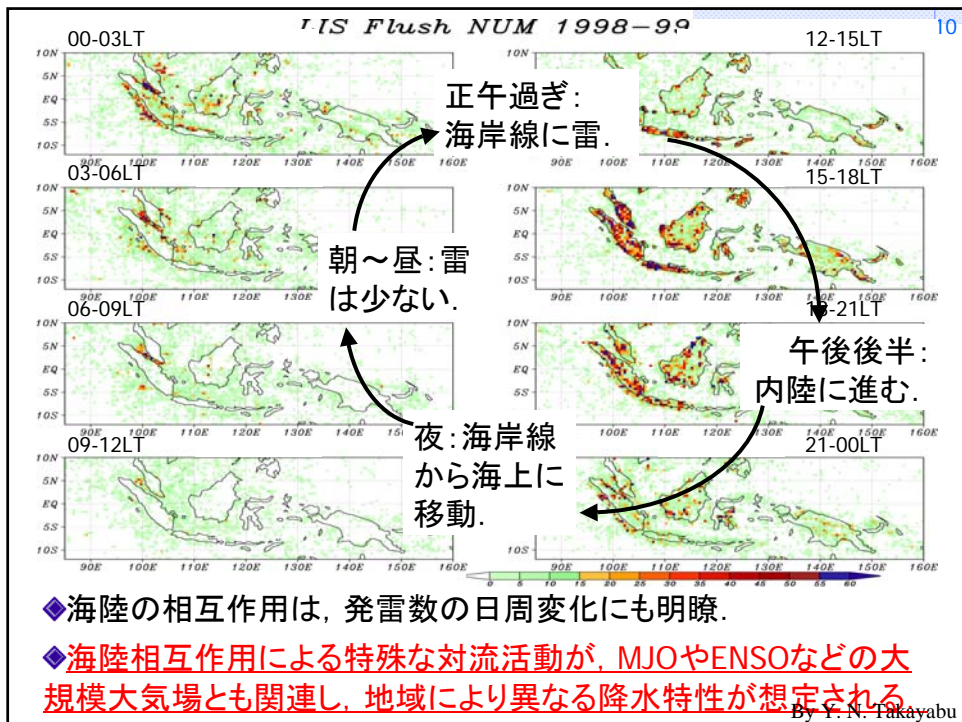
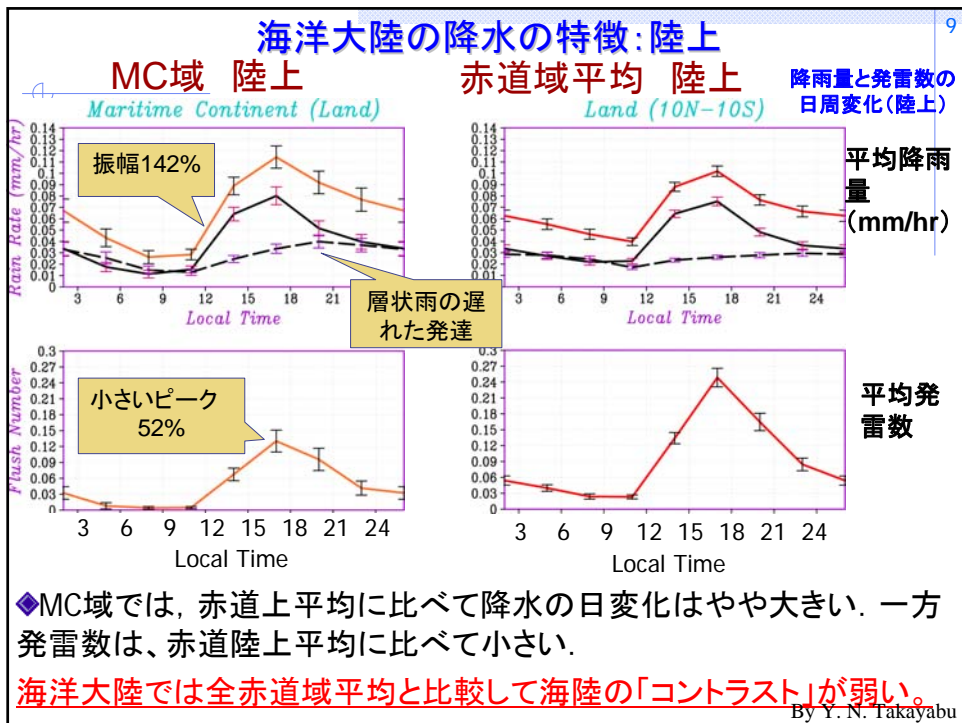
コトバン・海洋大陸の降雨特性概要

コトバン日降雨量のOLR依存性: 季節内変動

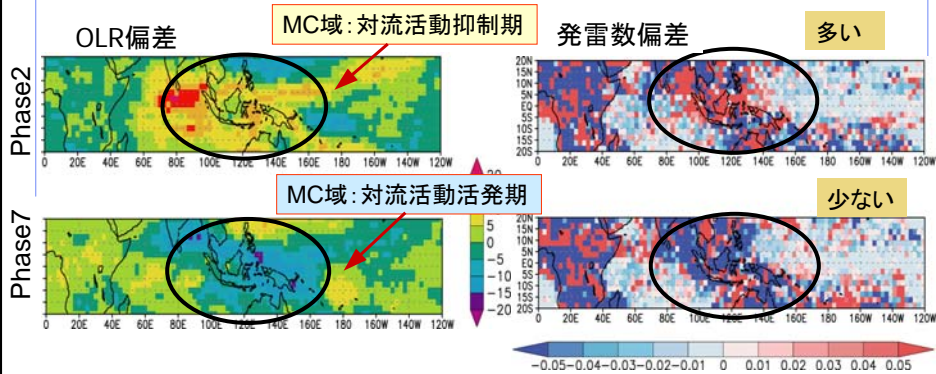
- ・期間 2002.3月～2006.7月
- ・低OLRの期間は平均降雨強度が大きい。
- ・高OLR時期には強い降雨の頻度が相対的に上がる。







熱帯季節内変動(MJO)に伴う OLR偏差と発雷数の偏差の関係



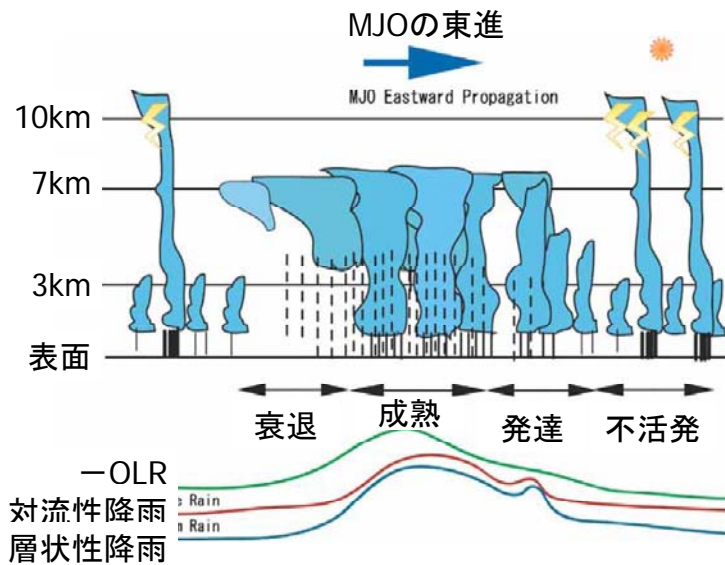
- ◆ 熱帯域で顕著な季節内振動(MJO)の、雲(OLR)で見られる対流活動抑制期に、雷活動がより活発で、対流活動活発期には雷活動がかえって少ない。

データ: NOAA日平均OLRデータ, TRMM PR2A25 & LISデータ

解析期間: 1998年1月-2001年7月 解析領域: 0° E-120° W, 20° S-20° N

手法: OLRのEEOF解析(0.5,10日)を基準としてMJOの位相を決め、コンポジット解析。

対流活動のMJO応答: 概念図



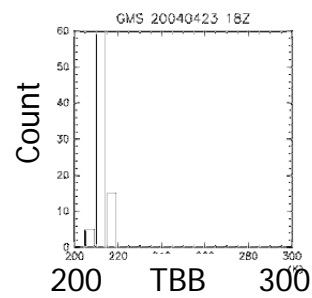
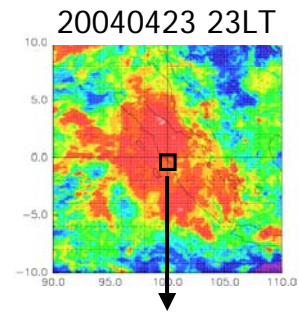
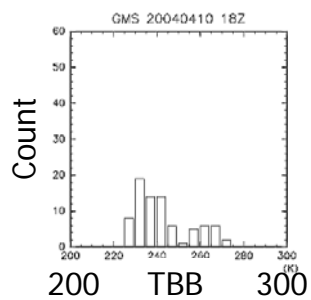
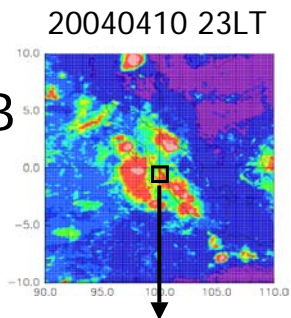
Morita & Takayabu, 2006

高分解能 でみたTBB

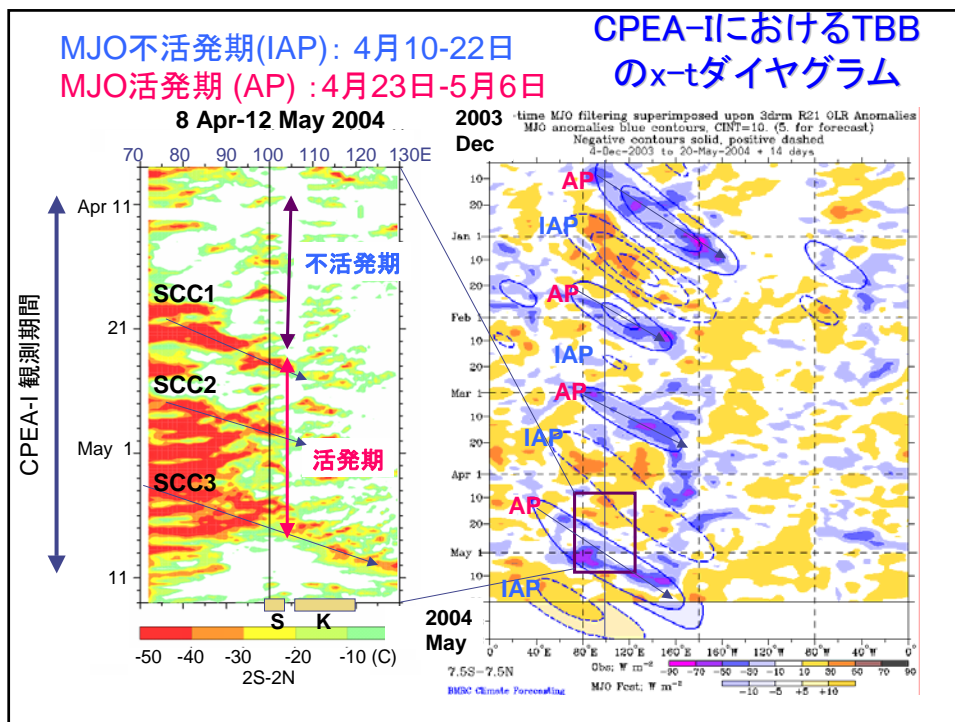
コタババン付近の
0.5度グリッド内
の、0.05度データ
のヒストグラムを
求めた。

不活発期:TBBの
ばらつき大。

活発期:TBBは低
い値で一様。



降雨特性の季節内変動



CPEA-Iキャンペーンなどから得られた季節内変動

項目	MJO 不活発期	MJO 活発期
雲頂	低い	高い
降雨頂 [1,2]	高い	低い
2次元構造 [2,3]	局地性対流	組織化・層状性
雨滴粒径分布 [1]	大雨滴	小雨滴
雷活動 [4]	活発	不活発
熱輸送 [4]	Q1 > Q2 (上方輸送)	Q2 ≈ Q1
重力波励起	?	?

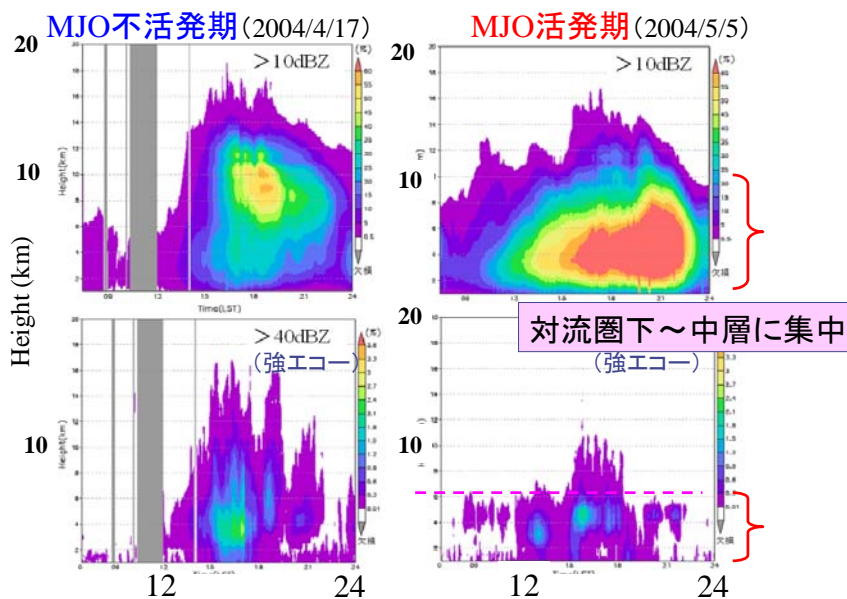
[1] Kozu et al. 2005, GRL, [2] Kawashima et al. 2006, JMSJ CPEA SI, [3] Kozu et al. 2006, JMSJ Autumn conf., [4] Kodama et al. 2006, JMSJ CPEA SI.

SI: Special Issue

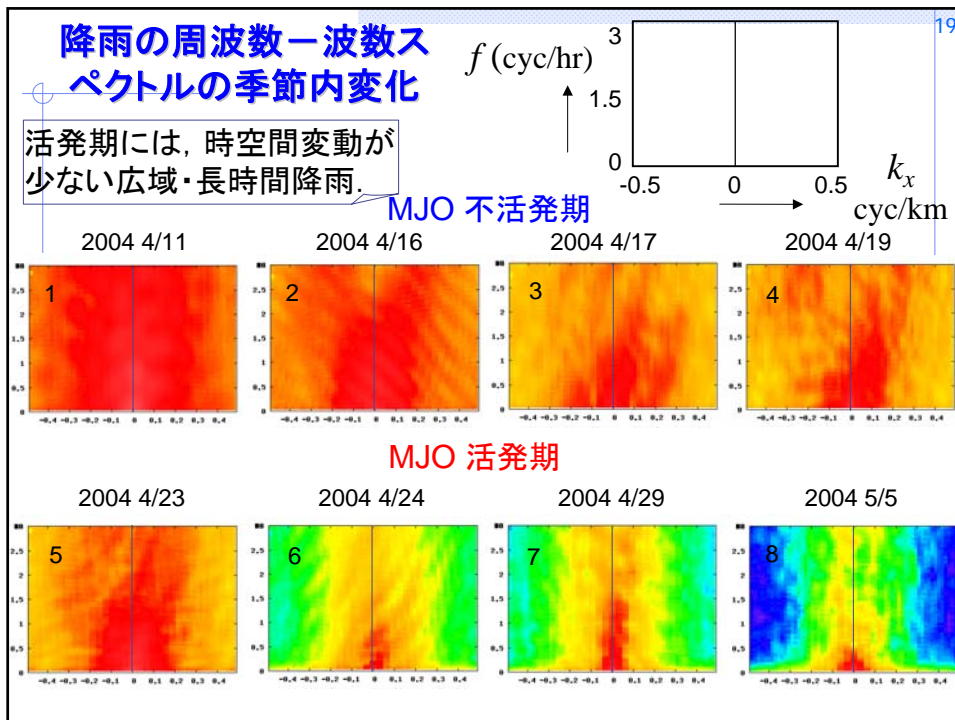
MJOに伴う降雨特性変化研究:新規性

1. 従来MJOによる対流活動研究は, TBBやOLRを用いて行われてきた.
2. TOGA/COAREの解析で, 海上ではMJO活発期に降雨頂が高くなる. 一方, 活発期には層状性比が増えることがわかった. (Demott and Rutledge, 1998; Lin et al 2004)
3. Seto他(2004):降水特性のISV変調. 2002.6月データ解析
 → インド洋からのSCCが地形の影響で変化するスマトラ域での降水特性のMJO応答を様々な側面, 長期に調べる必要がある.
 → 主にCPEA-I解析から, 興味ある降雨特性変化が得られた.
大気上下結合解析への重要な示唆. この知見を海洋大陸域の陸上へ一般化することが課題.

XDRエコーの占有面積(%)の時間-高度断面



By M. Kawashima



スマトラ域対流活動の階層構造

降雨の階層構造の解明

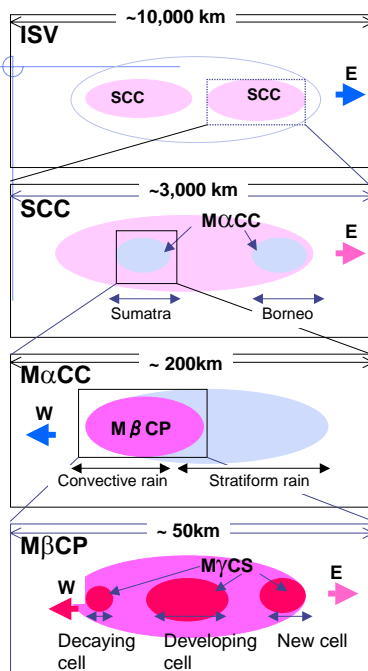
1. SCC(東進) – メソ α (西進) – メソ β 雲system (西進)
 – メソ β 降水system (東・西進)
 – – メソ γ 対流

数千km ~ 数百km ~ 数十km ~ 数km

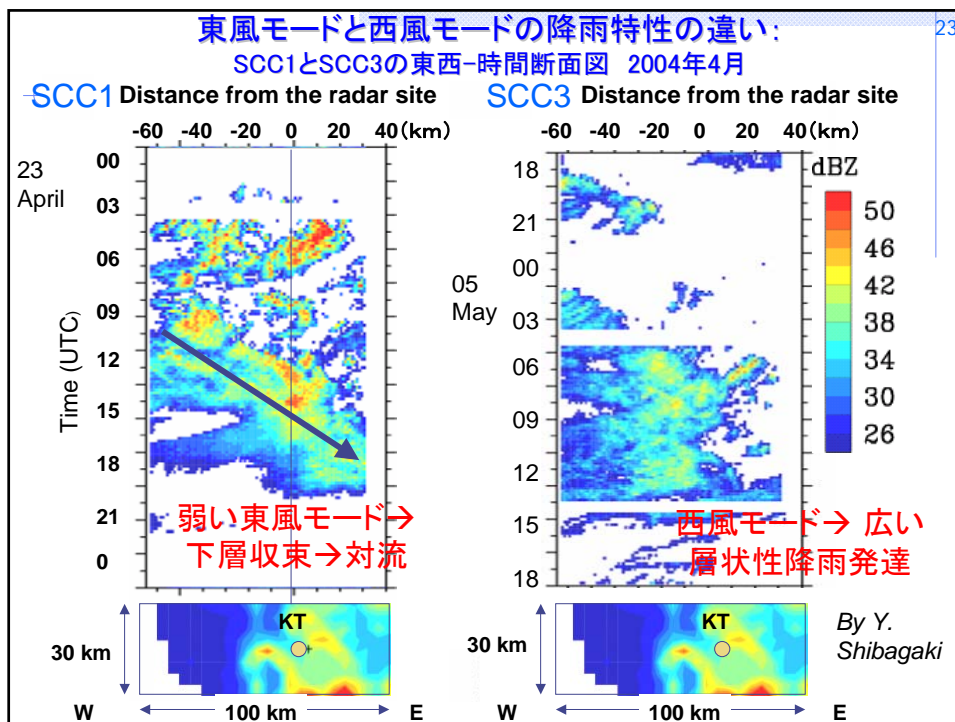
2. SCCの構造は、インド洋から海洋大陸に到達すると、地形の影響で複雑に変化し、階層構造は複雑化。
3. スマトラ域の階層構造とその生成・移動・消滅は、地形、局地風、環境風の関係によって決まる。
4. 環境場が東風フェーズ、西風フェーズで降水の特性が変化する。前者は強い局地性対流を伴い、後者は広く・弱い層状性降雨が支配的。

降雨の階層構造：概念

内部構造の特徴



- ISV 最下層では東側SCCでE-wind phase
西側SCCでW-wind phase
- SCC M α CCのevolutionはスマトラ・ボルネオ島の地形に影響
- M α CC (西進, 内部にメソ β CCを含む)
KT付近 前: 東進対流性降雨 (M β CP) (局地風)
後: 西進層状性降雨 (M β SP) (環境風場)
- M β CP 複数のM γ CSから構成
前面でM γ CSの形成、
後面でM γ CSの消滅
- M γ CS 局地循環と背景風の下層収束
によって形成・発達?



23

階層構造研究の成果と新規性

24

・過去のISV階層構造研究

雲データの経度-時間変化によるISV→SCC→CCの移動特性と持続時間の研究が主。雲システムの空間変化の詳細研究は、ほとんどない。ISVが複雑に変移する海洋大陸では、SCC、CCの研究はこれまでにない。

・CPEAにおける研究結果まとめ

- ・高空間分解能の雲データを用いて、インド洋から海洋大陸にかけてのSCCの変移過程やスマトラの地形効果を明確化。
- ・海洋大陸でのSCCの移動や構造はCCsの日周期変化に依存。
- ・スマトラでのCCの特徴: 東岸付近の孤立クラスタが西進し、次第に組織化。山岳に沿った雲システムを形成。
 - 山岳域では背景場と局地循環との関係が重要。
 - 大スケールの環境場が小スケールの対流の発達を支配。
 - 小スケール対流の発達が中スケール対流の移動・構造に寄与。

A03/A04主体で開催したワークショップ・検討会

1. 2003.5.23 つくば(気象学会) A03研究計画 自由討論会
2. 2003.10.15 仙台 A03/A04 CPEA-Iキャンペーン戦略WS
3. 2004.10.6 アクロス福岡, 13名, 第1回キャンペーン(下層中心)の結果など研究状況, その他報告
4. 2005.1.20+3.5 RISH, 対流圏-成層圏+上下結合WS
5. 2006.3.22 生存圏シンポジウム「赤道域対流圏・成層圏結合に関する研究集会」22件発表
6. 2006.6.28 RISH, テーマ限定ワークショップ 9件発表. 長期間統計処理とその利用, MJO応答 の2テーマに限定して発表, 議論.
7. 2007.2.2-3 島根大学 6名参加. CPEA研究自由討論会

コトタバン対流活動による重力波励起

コタババン対流活動による短周期重力波励起特性

短周期重力波: 比較的伝搬仰角が高く, コタババン付近の対流の影響を受けると考えられる. (M. J. Alexander et al. 2000)

1. S. Alexander他(2006, 2007)による短周期擾乱は, CPEA-Iを中心とした事例解析, TRMMデータを併用した季節変化解析.

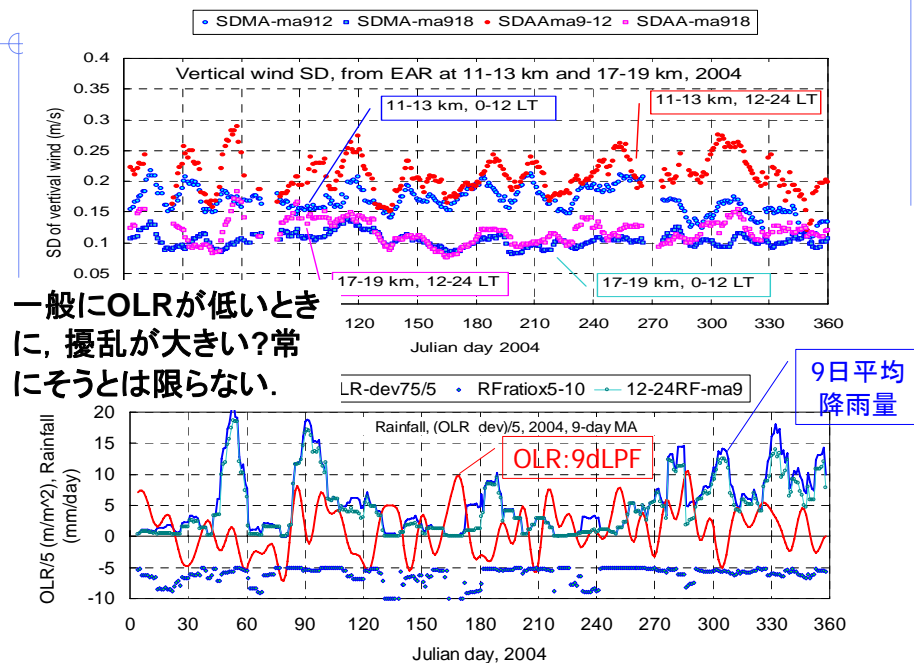
→ 日周変化, 季節内変化, 日降雨との相関に着目, 統計解析.

・EAR 11-13km, 17-19km 鉛直流 w' の, 半日(午前, 午後)の標準偏差を用い, 日周変化, 季節内変化を調べた.

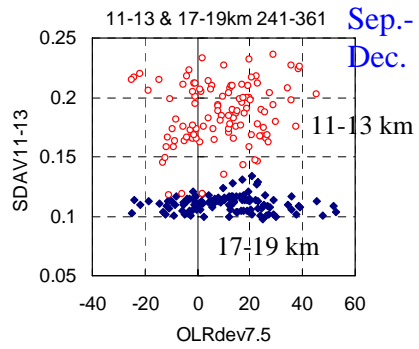
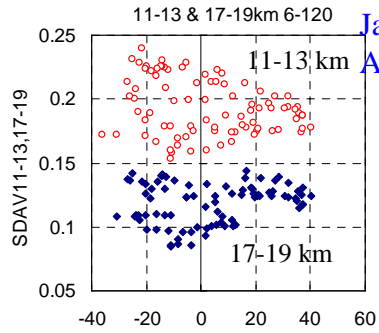
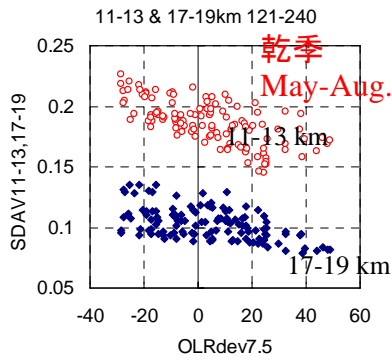
・100E, 7.5度SNの平均OLR: 9日LPFをかけて比較.

・9日移動平均地上降雨量, X-radarで求めた60km範囲の平均降雨強度を, 降雨活動の指標として使用.

鉛直流標準偏差, 降雨量, OLR偏差の季節内・季節変化, 2004



OLR偏差と鉛直流変動の関係は？

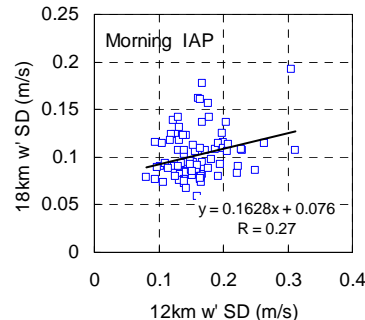
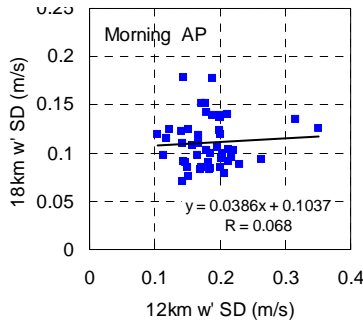
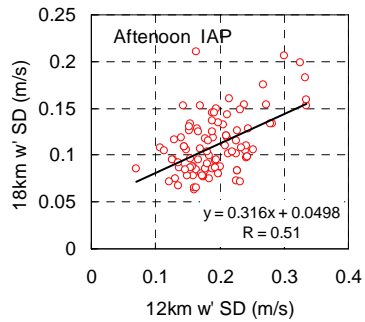
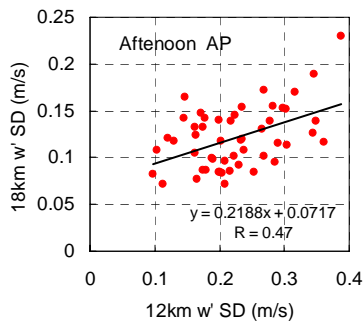


- ・雨季には、明確な相関がない。
→ 広域降雨の影響？
- ・乾季には、OLRに対して負の相関を持つ。

上部対流圏と下部成層圏擾乱の関係2004, 日周・季節内変化

1. 午後に相関が高い。
2. IAPに相関が高い。
3. 午後, 12km擾乱はAPが大. 18kmは同程度。

AP: 対流活発期
 IAP: 不活発期

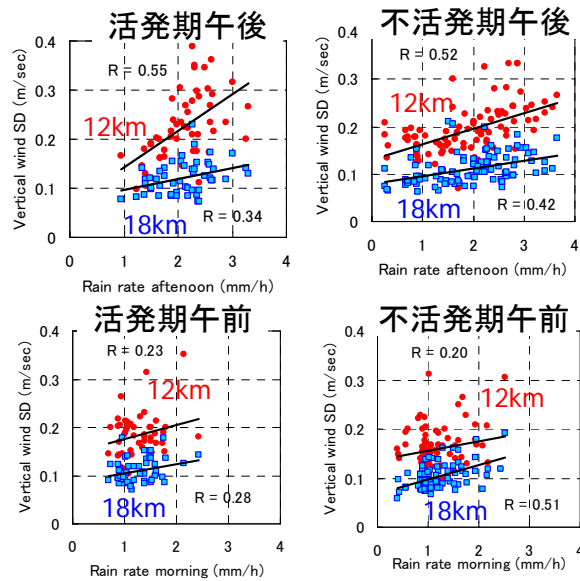


降雨量とUTLS擾乱の関係2004 季節内変化

	12km	18km
AP午後	0.22	0.12
IAP午後	0.19	0.11
AP午前	0.18	0.11
IAP午前	0.16	0.10

処理条件

- ・移動平均なし
- ・無降雨時は省く
- ・降雨強度: X-band レーダによる120km 直径領域平均



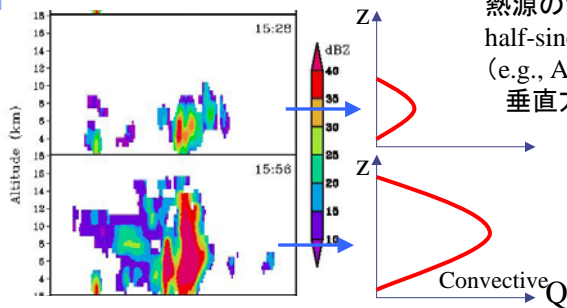
AP:OLR偏差 $-10W/m^2$ 以下. IAP:OLR偏差 $+10W/m^2$ 以上

重力波励起数値実験(熱源応答実験)

- ◆ 二次元 (東西、鉛直方向)
- ◆ 方程式系: 非静水圧, 非弾性系 (Whilhelmson and Ogura, 1972)
- ◆ 側面境界条件: 開放 (Orlanski, 1976)
- ◆ 上下境界: 摩擦なし(上部 6kmには波の吸収層を設けている)
- ◆ 領域: $L_x=400km$, $L_z=36km$
- ◆ 格子間隔: $\Delta x=1km$, $\Delta z=300m$
- ◆ 湿潤(雲微物理)過程 : off
- ◆ XDR反射強度から求めた潜熱加熱 $Q(x,y,z,t)$ でモデルを駆動(e.g., Alexander et al. 2004).

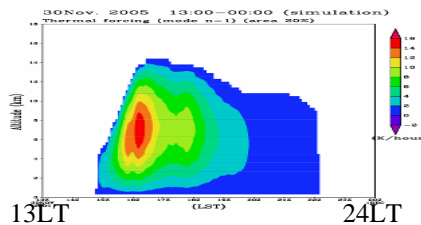
CPEA-II期間内の2005年11月30日の対流性降雨で実験.

Thermal forcing $Q(x,y,t)$



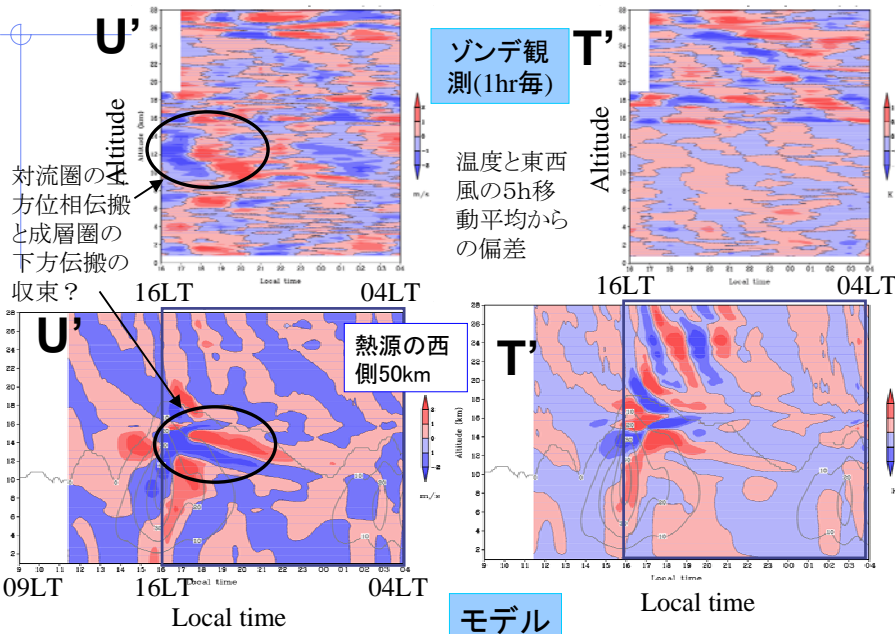
熱源頂 = Echo top height
 熱源下限 : 1km AGL
 熱源の鉛直プロファイル:
 half-sine (対流性降雨の領域)
 (e.g., Alexander et al. 2004, JGR)
 垂直方向積分Z因子に比例.

加熱量Qの時間変化



熱源モデル

実験結果と観測値の比較2005.11.30



UTLS擾乱の解析および重力波励起実験まとめ

1. 2003-2005年にわたり, EARにより観測されたUTLSの鉛直流擾乱の統計解析を行った. (特に2004年重点解析)

- 明確な**日周変化**: 午後に擾乱が増加
- 12km付近の擾乱と18km付近の擾乱の相関は, 午後に高い. 局地的な上下結合は, 午後に大きくなる.
- 明確な**季節内変化**: OLR偏差との相関に**季節変化**がみられる. 対流活発期に12km付近の擾乱は大. 18km付近の擾乱の季節内変化は少ない.
- **降雨量と鉛直流擾乱には相関**がある. 午後に高い相関.
- 海上の降雨日周変化を考慮→上下結合の位相は海陸で位相反転? それが季節内変動, 季節変動に重畳.

2. 重力波励起数値実験

- 2次元モデルで, 観測結果と整合的な結果が得られた. 今後3次元に拡張し, 様々な事例でテストする予定.

他の分野へのインパクト・データ提供など

- (1) 衛星からの降雨観測の検証のために, 赤道域の新たなデータを提供.
- (2) 熱帯域のマイクロ波・ミリ波伝搬特性解明のために新たなデータを提供.
- (3) 偏波レーダによる降雨詳細解析のために, 2DVDデータを提供, コロラド州立大学との間に共同研究を開始.
- (4) LAPANやアンダラス大学の対流圏研究者には継続してデータ提供し, 研究面での意見交換を行ってきた. その結果, コタバンに近いアンダラス大学に, 新たに研究拠点が形成された.

主なデータ提供

- LAPAN関係者 A03データ全般
- 西スマトラ・アンダラス大学 ORG, MRR, 2DVD データ
- コロラド州立大学 2DVD データ,
- ITB ORGデータ
- 京大防災研 微気圧計データ
- JAMSTEC CPEA-I MMS ラジオゾンデデータ
- 首都大東京 ORGデータ, 衛星伝搬関係
- Dr.Dhaka コタバンゾンデデータ

成果発表など

- (1) 論文誌上发表 A03主体:19編. 他の班主体(A03が協力):
13編. 合計 32編.
- (2) 国際会議発表
計57件(うち, 2007年3月CPEA国際シンポジウム17件)

A03/A04主体で開催したワークショップ・検討会

1. 2003.5.23 つくば(気象学会) A03研究計画 自由討論会
2. 2003.10.15 仙台 A03/A04 CPEA-Iキャンペーン戦略WS
3. 2004.10.6 アクロス福岡, 13名, 第1回キャンペーン(下層中心)の結果
など研究状況, その他報告
4. 2005.1.20+3.5 RISH, 対流圏-成層圏+上下結合WS
5. 2006.3.22 生存圏シンポジウム「赤道域対流圏・成層圏結合に関する研
究集会」22件発表
6. 2006.6.28 RISH, テーマ限定ワークショップ 9件発表. 長期間統計処理
とその利用, MJO応答 の2テーマに限定して発表, 議論.
7. 2007.2.2-3 島根大学 6名参加. CPEA研究自由討論会

まとめ

1. 観測機器の設置運用:ほぼ順調に実施できた. CPEA関係
者, LAPAN関係者の尽力に深謝する.
2. コタバン観測データ・ゾンデ観測データから, 個々の対流
雲の構造・雲微物理特性, 降雨の季節内変動, 階層構造など
について多くの知見が得られた.
3. コタバン観測データ, TRMMデータなどから, 海洋大陸域
の降水や雷特性, それらの季節内変動が明らかになった.
4. 対流活動による重力波励起など上下結合に関する問題に
ついては, A04班等CPEA関係者との協力によりすすめ, 対流圏
～成層圏重力波特性について多くの成果が得られた. また
UTLS擾乱の統計解析, 重力波励起数値実験などを行った. こ
れらは, 第2回CPEA特集号までにまとめる予定である.