

本日のメニュー(あくまでも予定)

1. メソ降水システムに関するこれまでの知見
 - 1-1. 降水セルの特徴
 - 1-2. 自己維持型のメソ降水システム
2. メソ降水システムの研究手法
 - 2-1. ドップラーレーダーデータ解析
 - 2-1-1. 解析事例(降水セルの面積と高さ)
 - 2-2. 雲解像モデル
 - 2-3. 雲解像モデル(CReSS)を用いた計算事例
 - 2-3-1. 台風T0418のケース
 - 2-3-2. 台風T0423のケース
 - 2-4. メソ降水システム研究の将来
3. **GCMパラメタリゼーションの改良に向けて**
 - 3-1. **海洋上の浅い積雲の再現実験**
 - 3-2. 熱帯インド洋域における深い対流雲の予報実験

本研究の目的

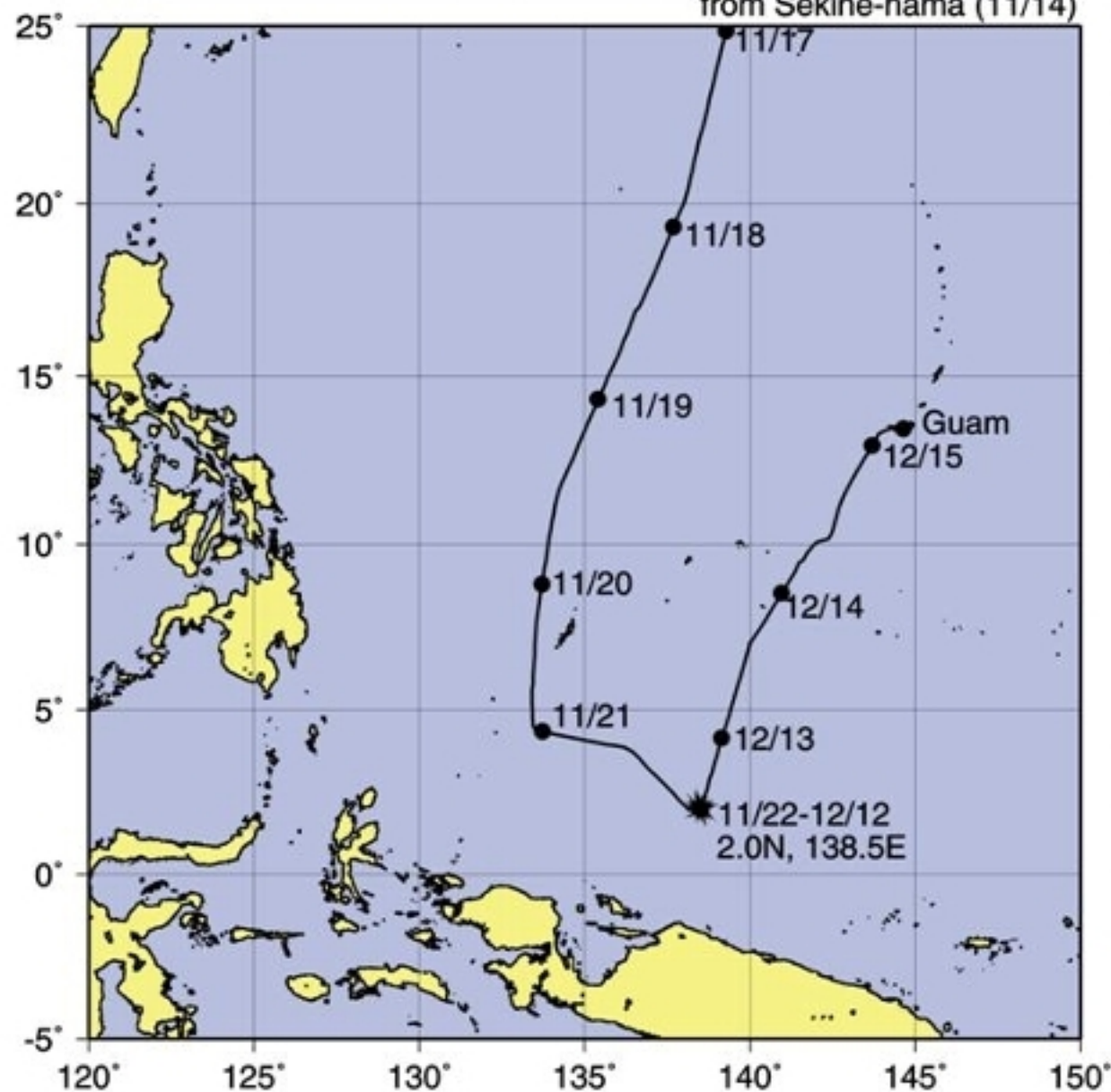
- ・ 亜熱帯海洋上（南西諸島付近）における大気境界層内の鉛直循環の構造を熱帯海洋上にも適用できるのか？
- ・ 熱・水蒸気の鉛直輸送過程はどのような鉛直循環で規定され、どのようなプロファイルになるのか？

- ・ 海洋地球研究船「みらい」のMR02-K06航海において取得されたラジオゾンデデータを用いて、大気境界層構造と同層内のプリューム、浅い積雲の構造、そして熱および水蒸気の鉛直輸送量について、数値モデルの結果を用いて考察する。

みらいMR02-K06 (Leg.1) 観測航海の概要

R/V Mirai MR02-K06 (Leg. 1) Cruise Track

from Sekine-hama (11/14)



定点連続観測

北緯2.0度、東経138.5度

11/22 (DoY = 326) ~

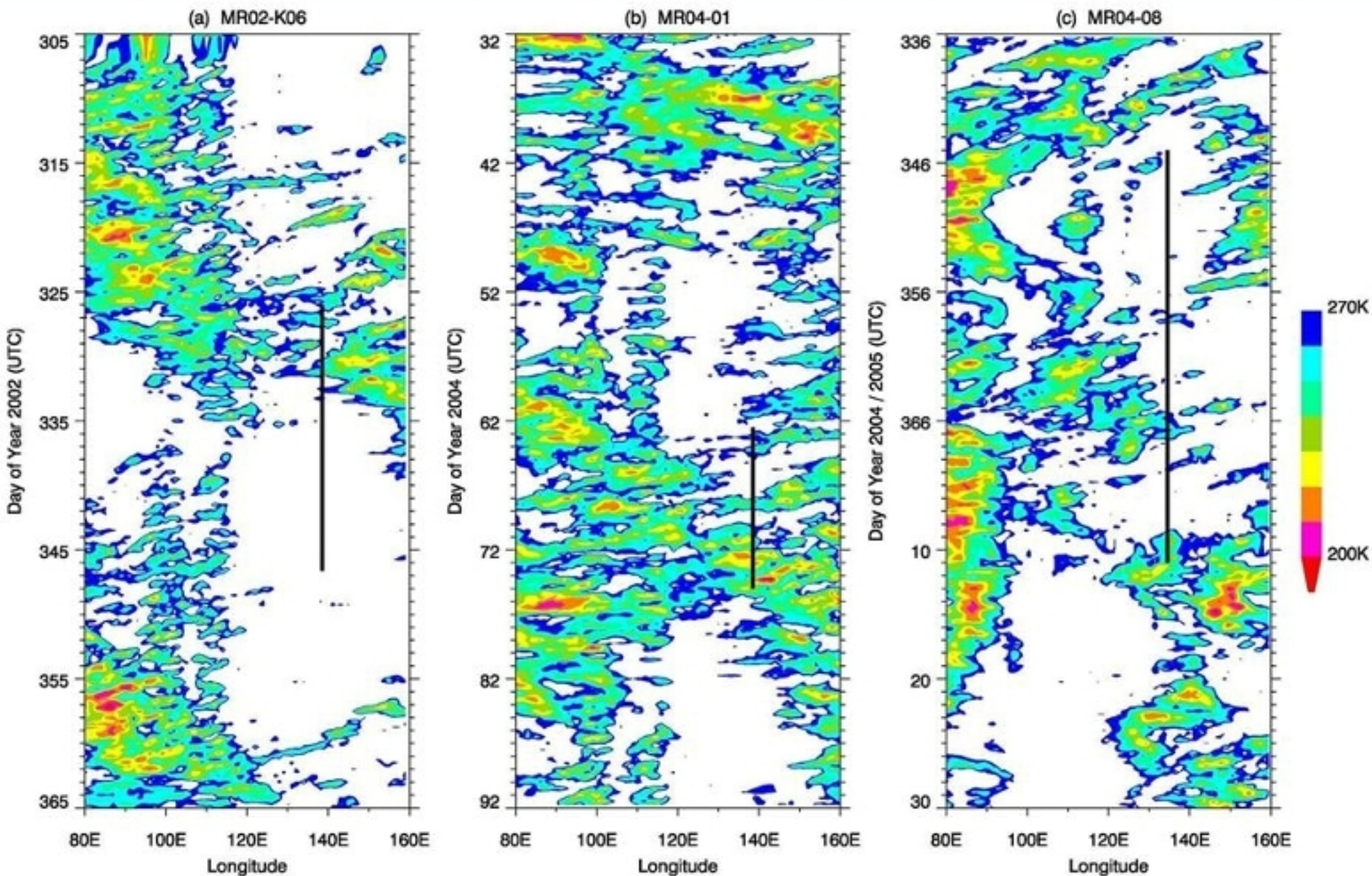
12/12 (DoY = 346)

ラジオゾンデ: 3時間毎の連続観測

気象観測装置: 1分毎 (SST)

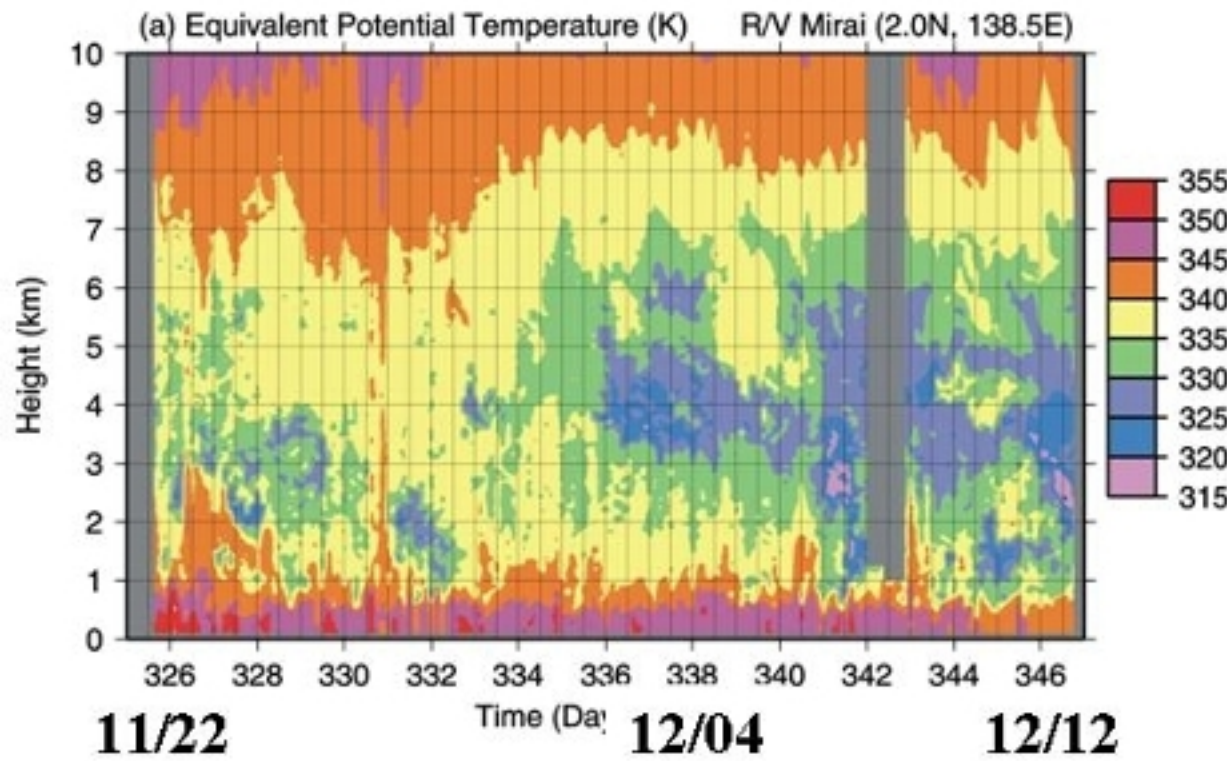
シーロメータ: 1分毎 (雲底高度・
見なし雲量)

雲頂温度 (T_{BB}) 時系列

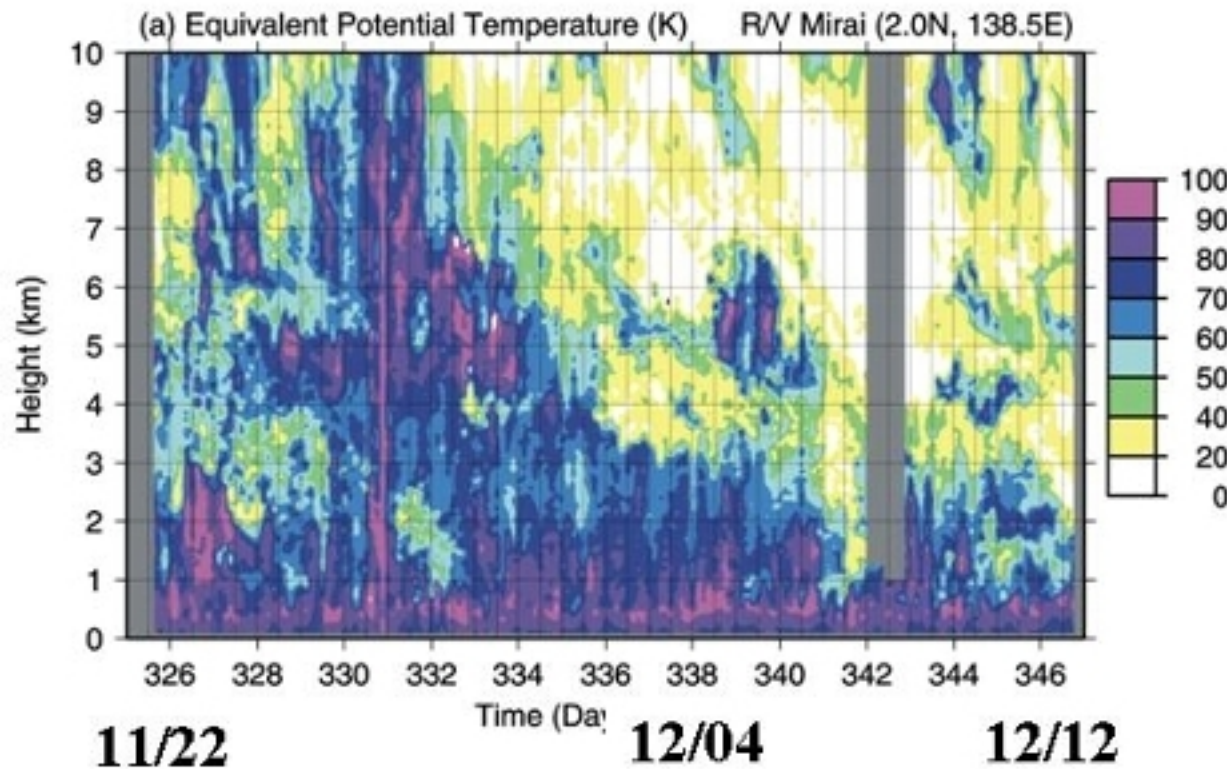


・MR02-K06は特に静穏場であった。

鉛直プロファイル時系列： 相当温位・相対湿度



- 観測期間前半は全層湿潤
- 観測期間中盤(11/30~)対流圏中層にかけて乾燥気塊が流入。
- 対流圏下層(~2km)は常時湿っている。(相対湿度が80%以上)

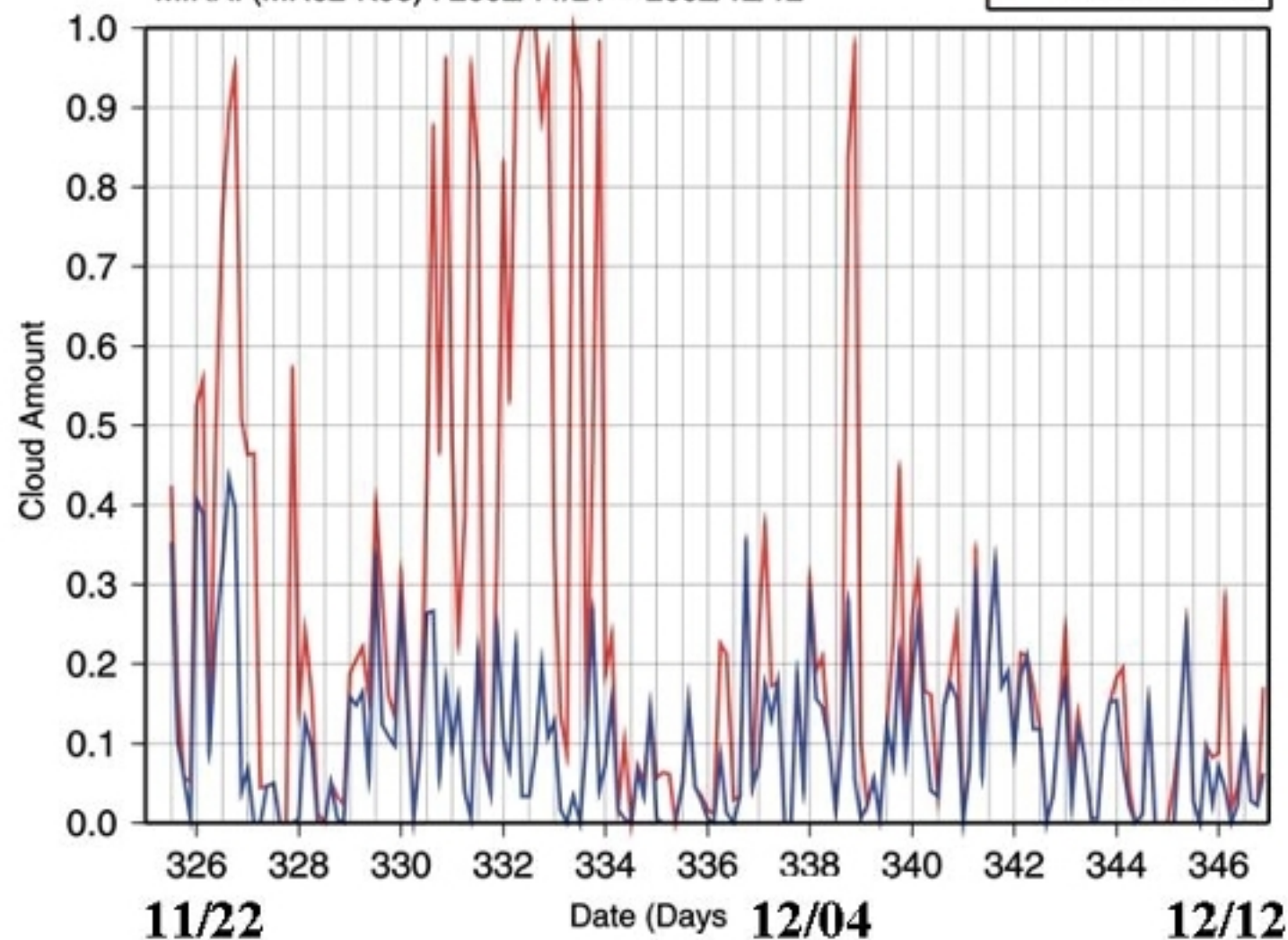


雲量時系列 (MR02-K06全期間)

Cloud Amount Observed by the Ceilometer

MIRAI (MR02-K06) : 2002/11/21 -- 2002/12/12

— Total Cloud
— Lower Cloud



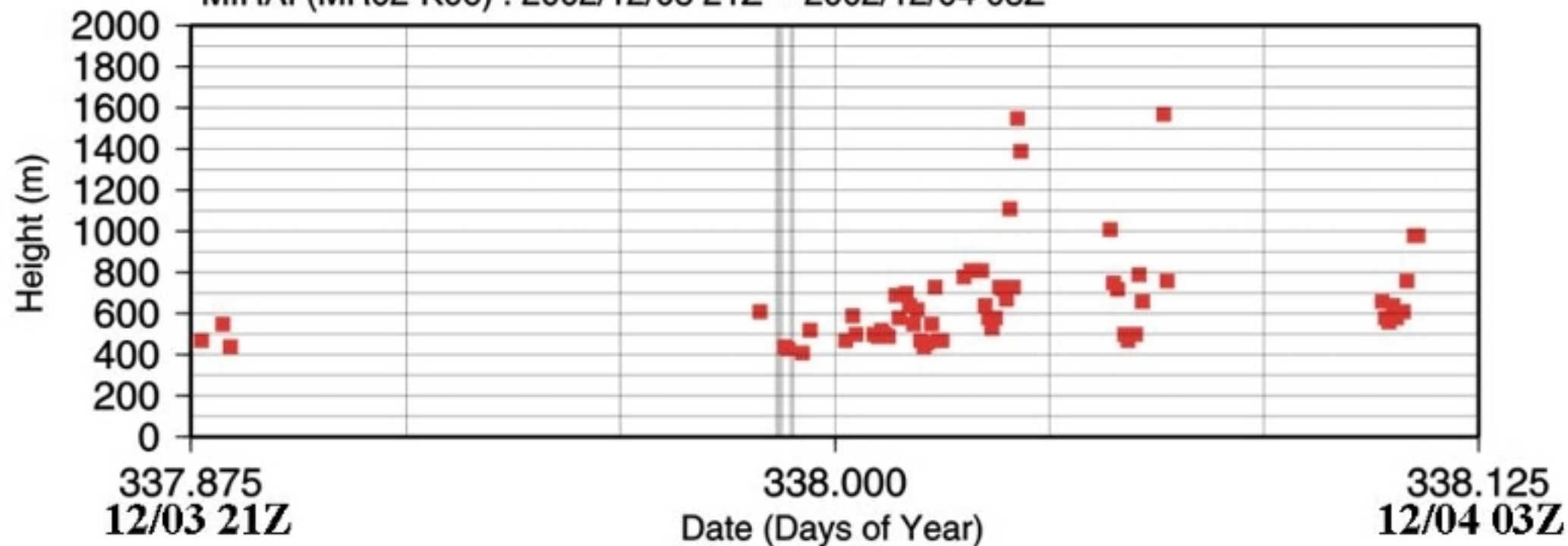
時刻	雲量
12/03 21Z	0.05%
12/04 00Z	30.81%
12/04 03Z	19.08%
12/04 06Z	20.93%

- ・観測期間の前半は雲量が多い
- ・下層雲(積雲)の雲量は期間を通じてあまり変わらない。
- ・ここでは雲量がおおよそ30%となった**12/4 00Z**付近の積雲に注目する。

雲底高度時系列 (2002年12月3日21Z~4日03Z)

Cloud Base Height Observed by the Ceilometer

MIRAI (MR02-K06) : 2002/12/03 21Z -- 2002/12/04 03Z



- ・ 雲底高度は 450~600m が最小値。
- ・ 持ち上げ凝結高度から考えて、ほとんどが積雲であると考えられる。

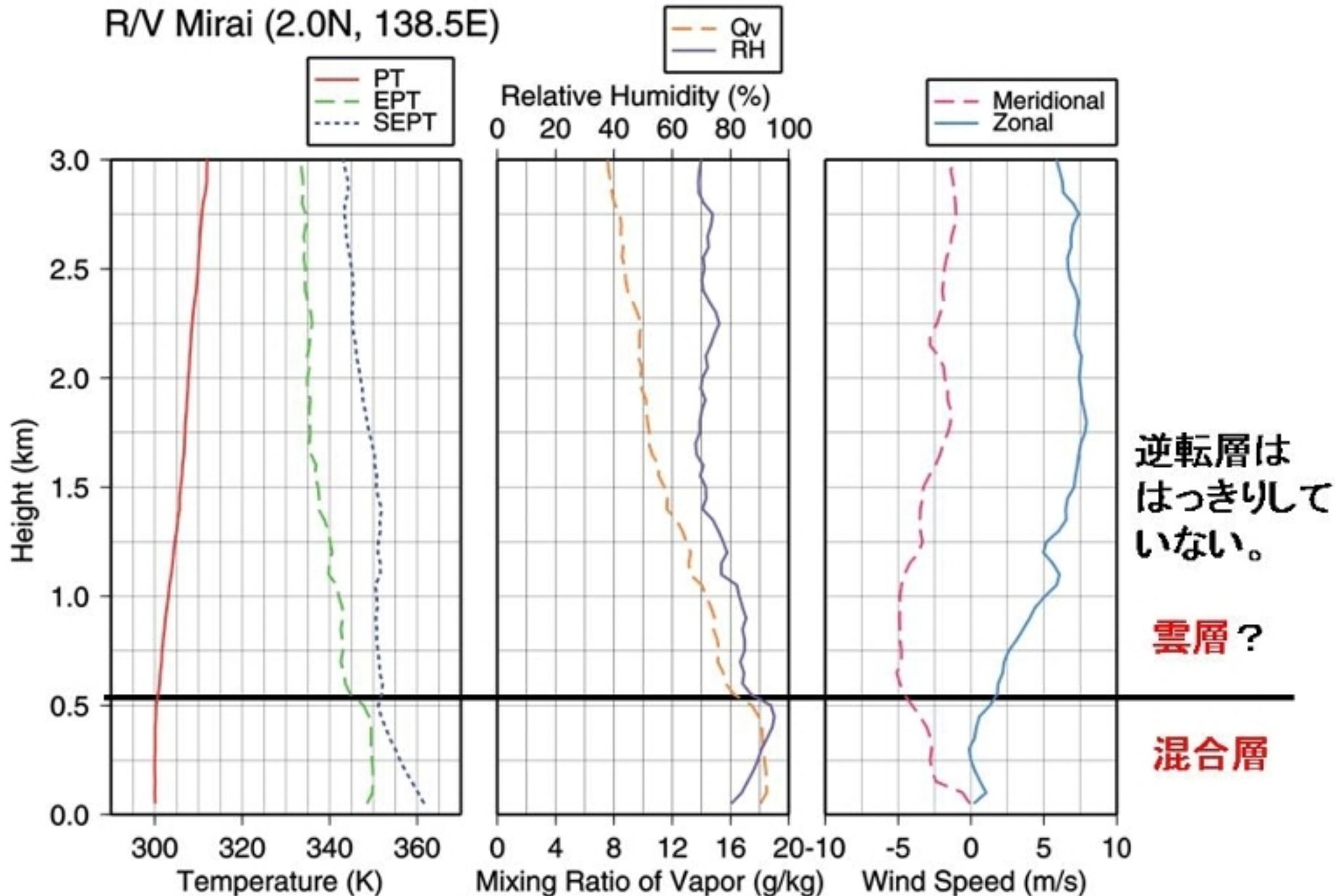
数値モデルの概要

使用した数値モデル(LES)	CReSS: Tsuboki and Sakakibara (2001)
乱流のパラメタリゼーション	1.5-TKE (Klemp and Wilhelmson 1978)
雲微物理過程のパラメタリゼーション	Cold Rain
地表面過程のパラメタリゼーション	Louis (1979)
大気・雲放射のパラメタリゼーション	なし(雲による短波放射の減少は含む)
計算領域	水平 : 100×100 格子 (10×10 km) 鉛直 : 80 層 (上限高度は7.4 km)
解像度	水平 : 100m 鉛直 : 50m (高度3000mまで) (3000m以上は格子間隔を拡張)
時間ステップ	1.0 秒 (非音波項) 0.1 秒 (音波項)
側面境界条件	周期境界条件
上面境界条件	Rayleigh Friction / Newton Cooling (3000m以上)
下層境界	海面として設定: 初期条件の SSTは29.0℃
外力	短波放射の日変化(CReSS に含まれる)
初期条件	「みらい」におけるラジオゾンデの観測結果より与える 時刻: 2002年12月3日21Z (12月4日06LST)
計算(積分)時間	6時間

初期条件:「みらい」によるラジオゾンデ観測結果(12月3日21Z)

21Z, Dec. 03, 2002

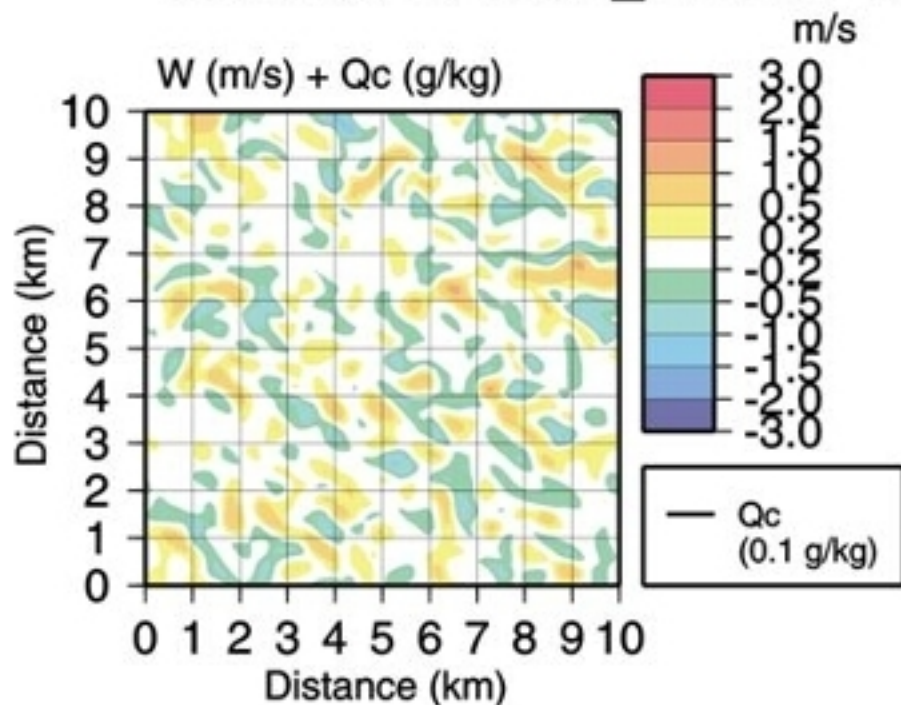
R/V Mirai (2.0N, 138.5E)



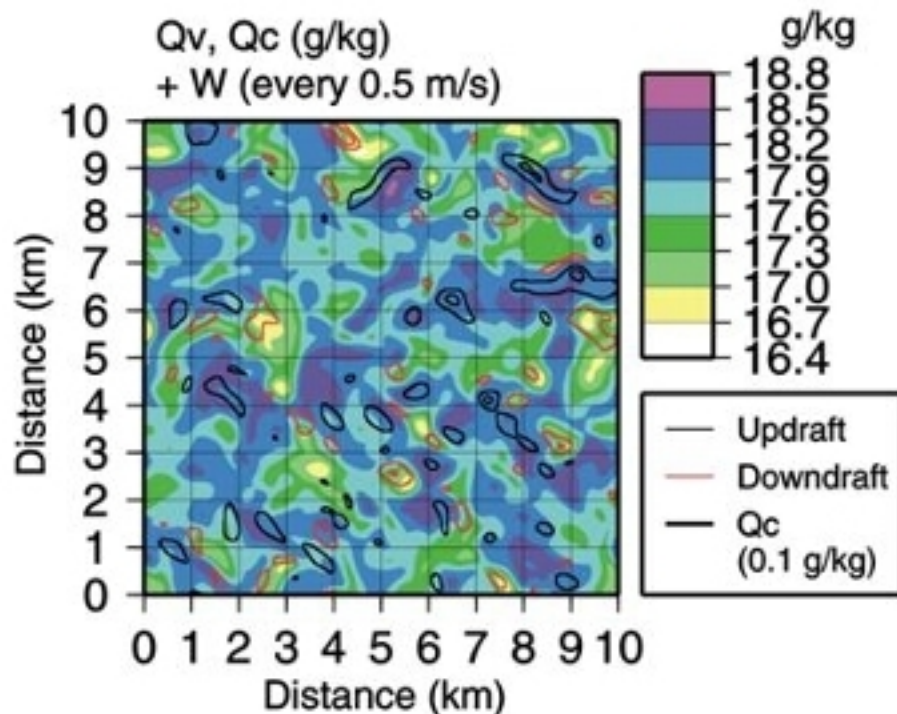
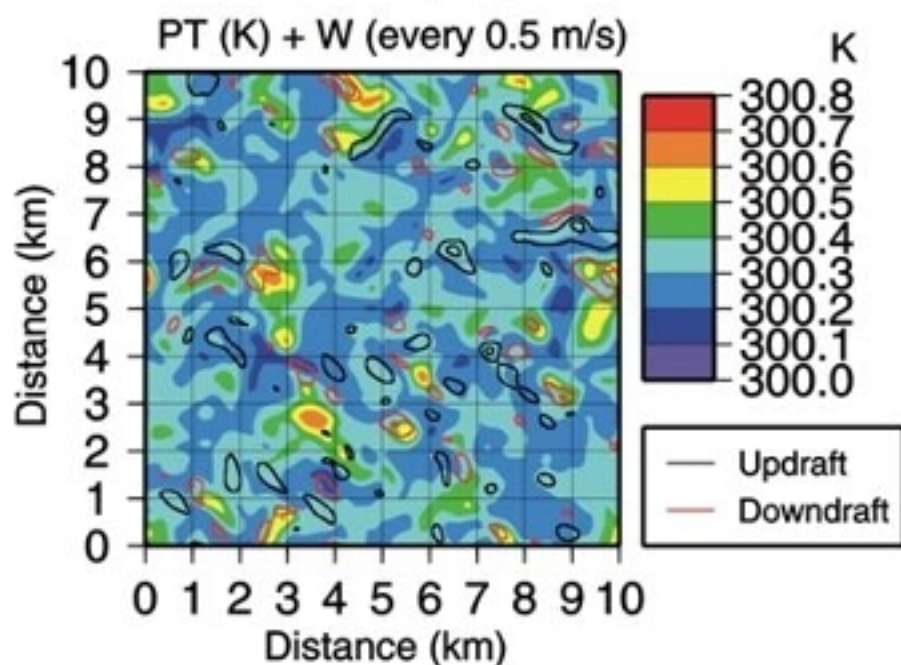
計算開始6時間後、高度425m(混合層)における水平断面図

Case: MR02-K06_02120321Z

21600 sec.
Z = 0.425 km



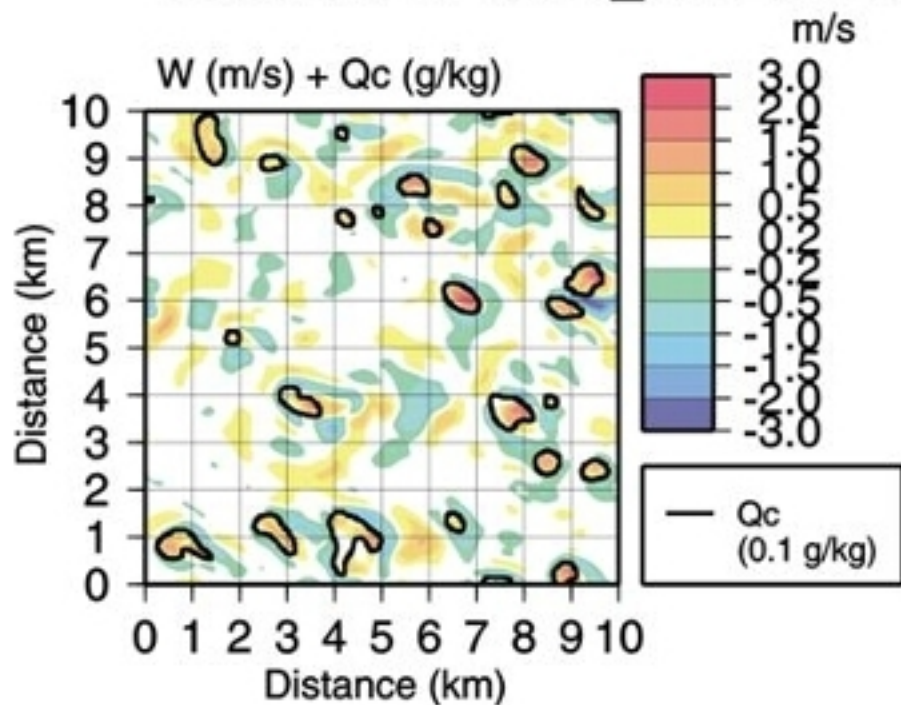
- ・上昇気流域がストリーク状に分布。
- ・上昇気流域は(わずかに)低温位・高比湿気塊が存在。
- ・下降気流域は高温位・低比湿気塊(エントレインメントの特徴)。



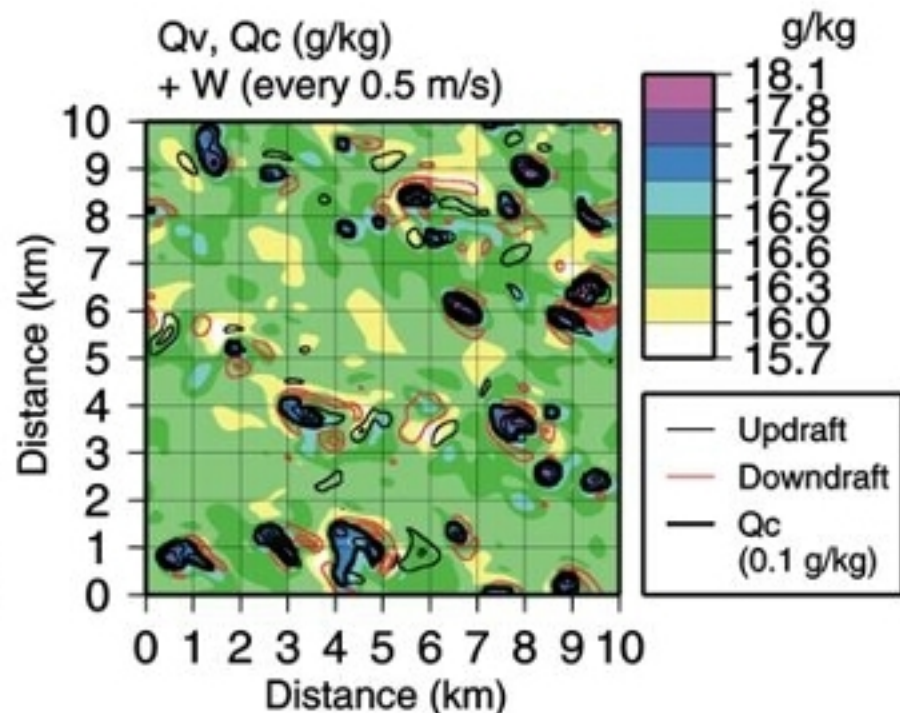
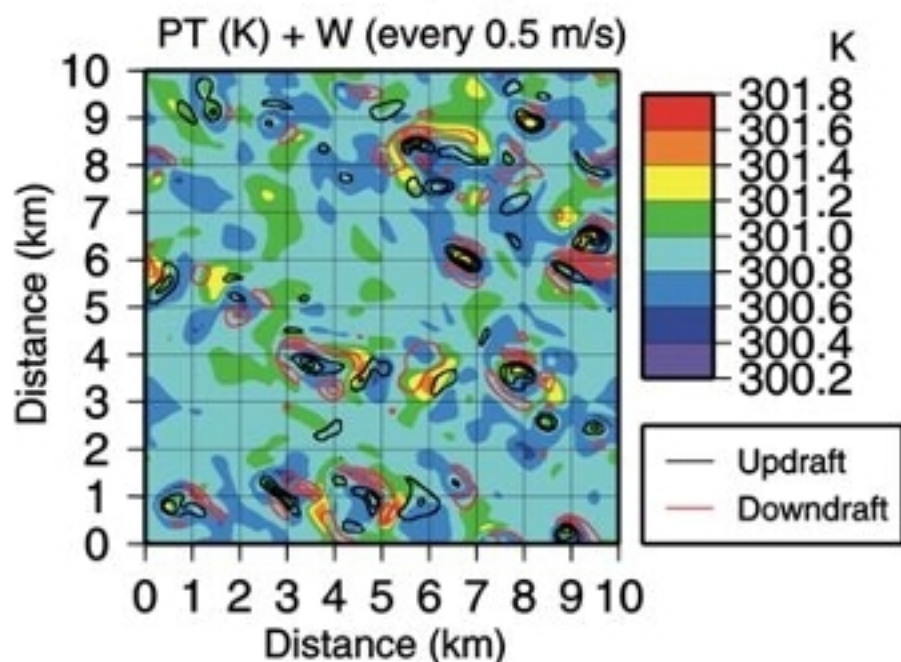
計算開始6時間後、高度725m(雲層)における水平断面図

Case: MR02-K06_02120321Z

21600 sec.
Z = 0.725 km



- ・上昇気流域がパッチ状に分布。
- ・上昇気流域に雲水(積雲)が存在。
- ・**上昇気流域は高温位・高比湿気塊が存在。**



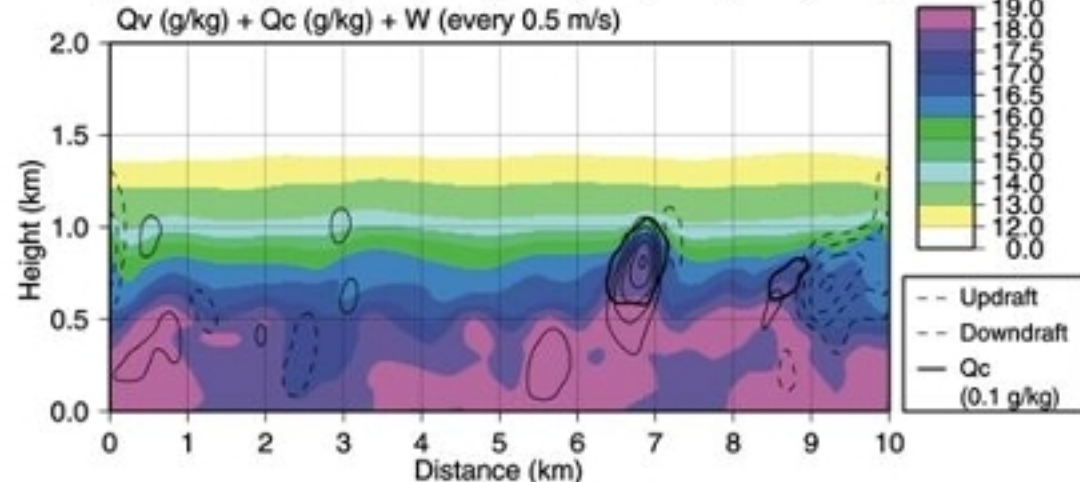
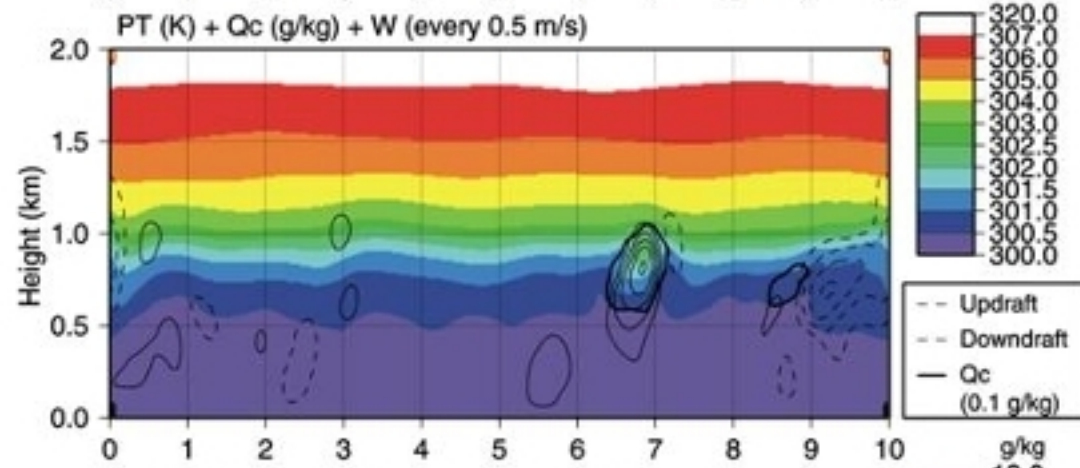
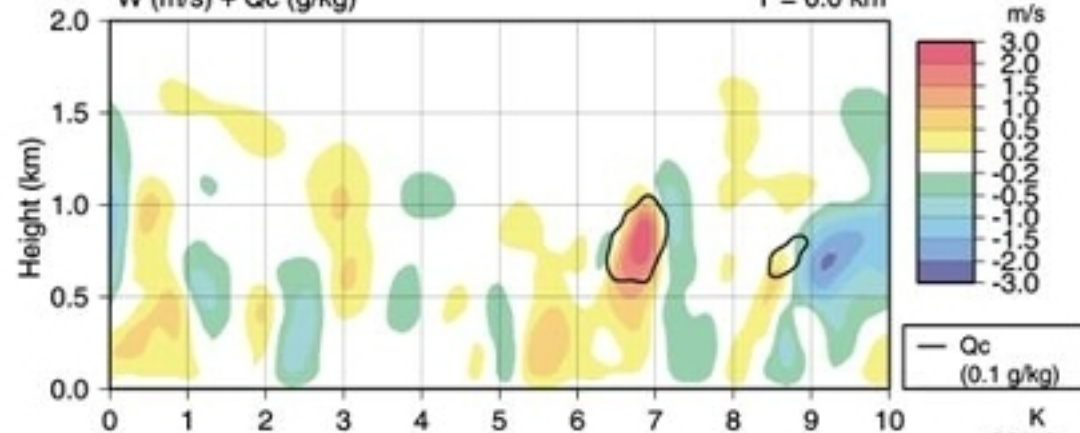
計算開始6時間後、Y=6.0kmにおける鉛直断面図

Case: MR02-K06_02120321Z

21600 sec.

W (m/s) + Qc (g/kg)

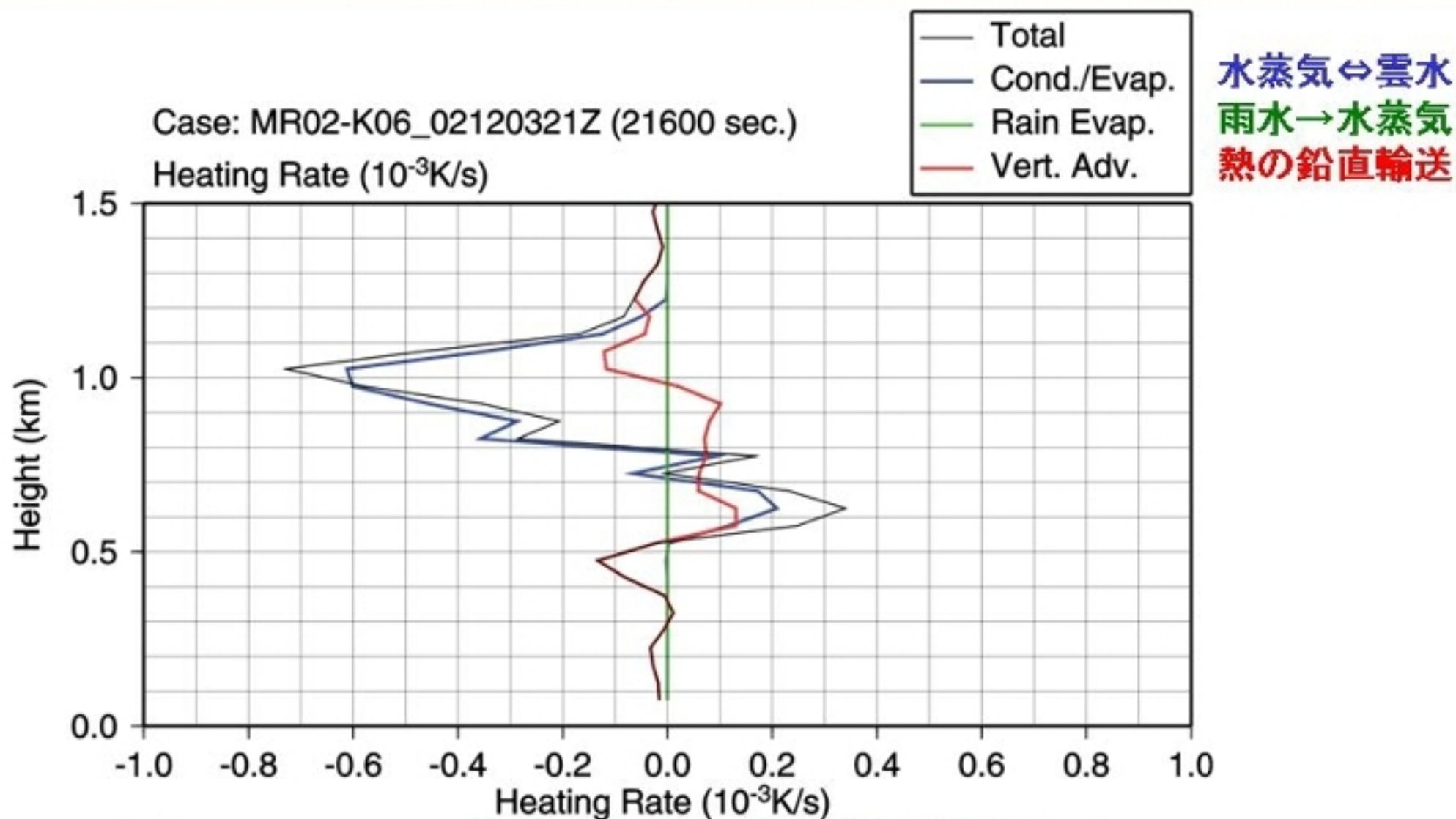
Y = 6.0 km



- ・混合層(~600m)内には **plume**に相当する**上昇気流域**が存在している。
- ・水平スケールは500m。
- ・上昇気流の最大速度は 1 m/s。

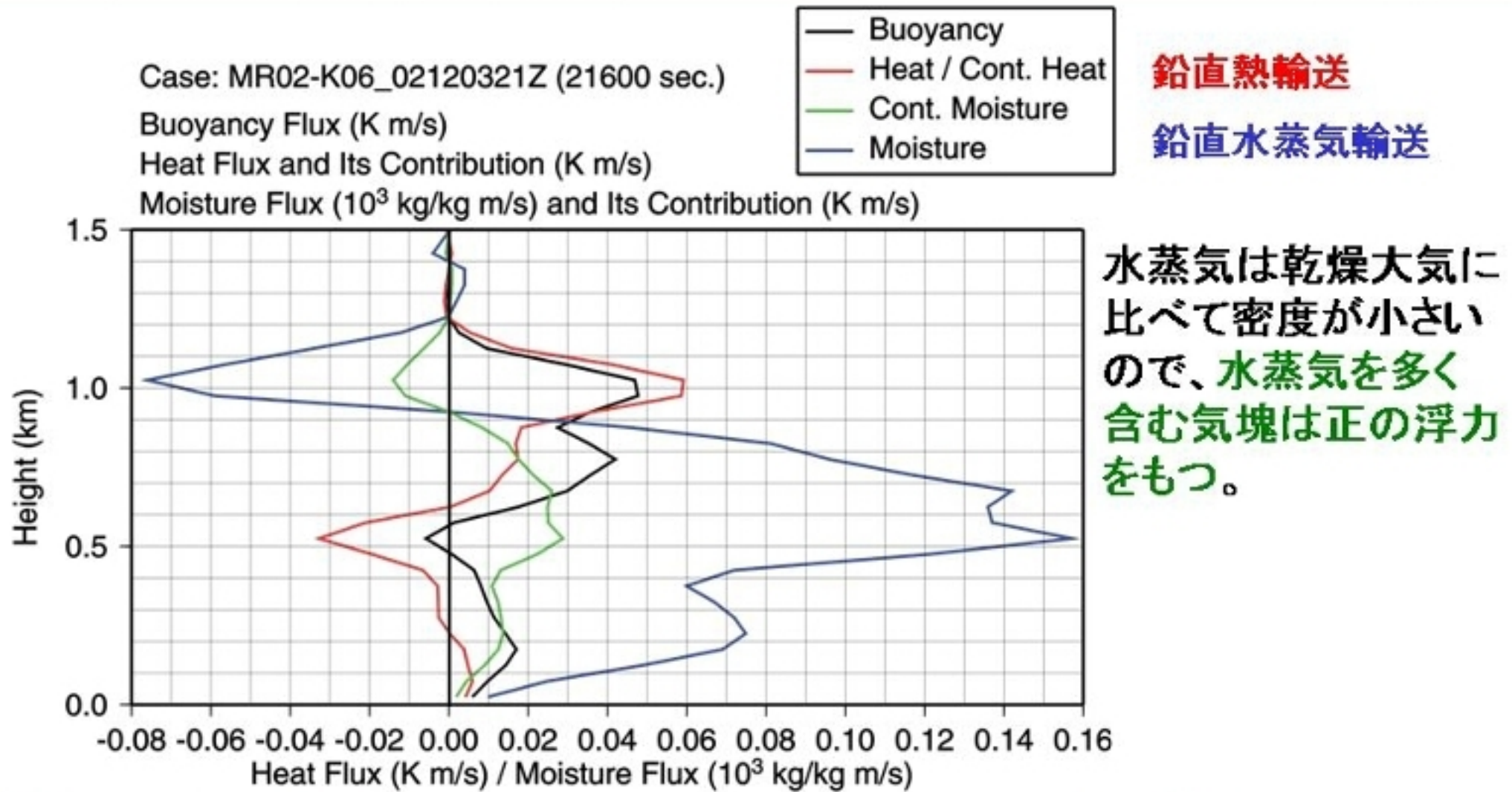
- ・**積雲**に相当する雲域が存在 (600~1200m)。
- ・積雲内部の上昇気流の速度は 2.5m/s 以上。
- ・**上昇気流域**は**高温位・高比湿気塊**によって占められている。

計算開始6時間後、加熱プロファイルの領域平均



- ・高度600～800m(雲層下部)で凝結加熱が存在。
- ・高度800～1200m(雲層上部)では蒸発冷却が存在。
- ・高度600～1000m(雲層下部～中部)では鉛直熱移流項も正值。
→ 移流による下層から上層への熱輸送を示唆している。

計算開始6時間後、鉛直フラックスのプロファイルの領域平均

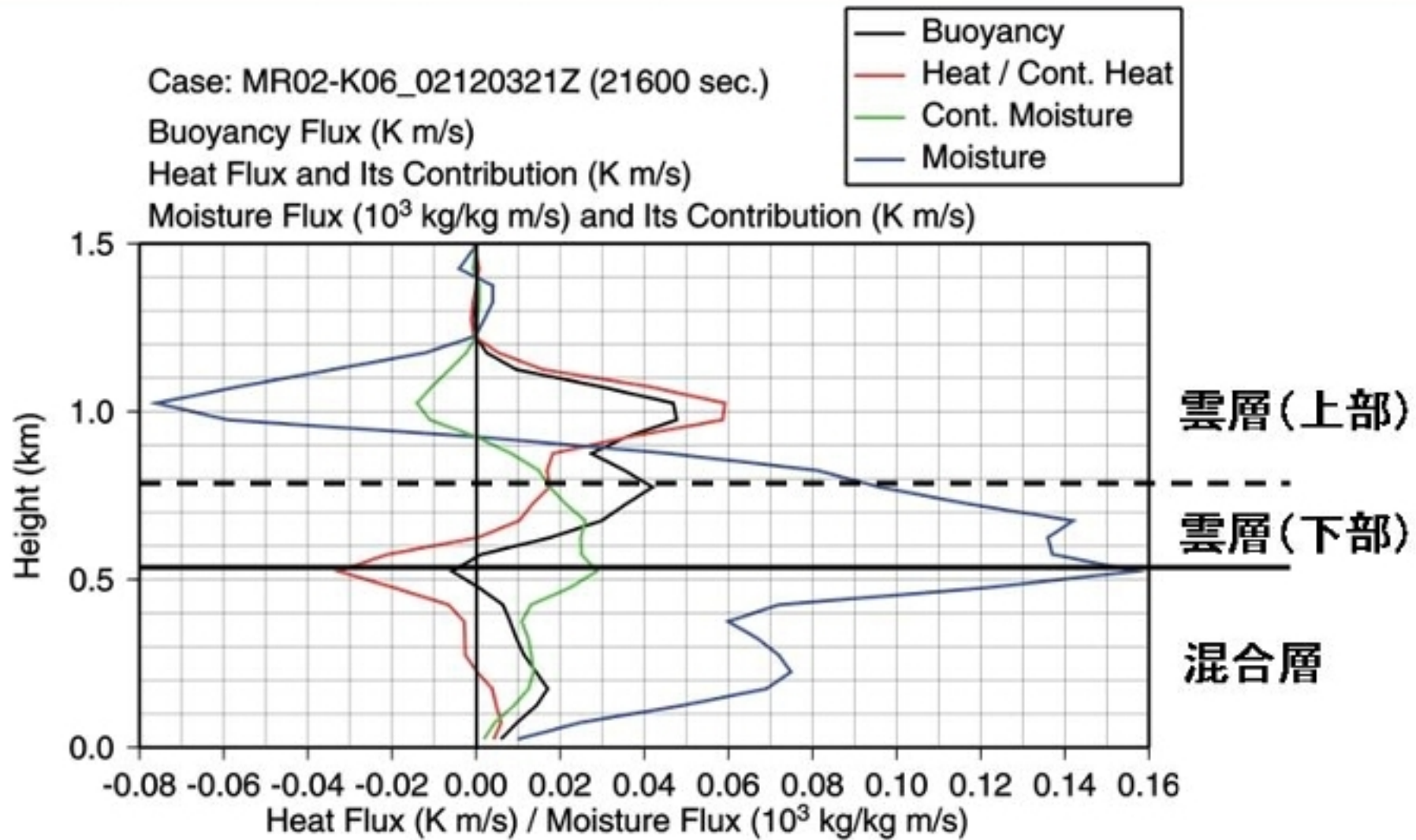


熱フラックス: $\overline{w'\theta'}$ → 浮力フラックスへの寄与: $\overline{w'\theta'}$

水蒸気フラックス: $\overline{w'q_v'}$ → 浮力フラックスへの寄与: $0.61 \overline{\theta} \overline{w'q_v'}$

浮力フラックス: $\overline{w'\theta_v'} = \overline{w'\theta'} + 0.61 \overline{\theta} \overline{w'q_v'}$

計算開始6時間後、鉛直フラックスのプロファイルの領域平均

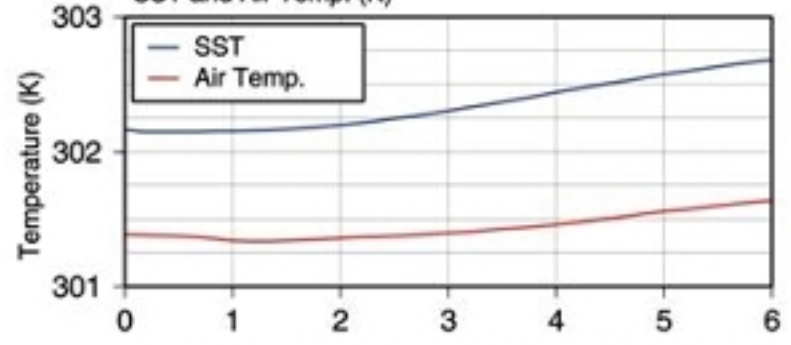


- ・混合層内では浮力フラックスは下層で大きく、上層に向けて減少。
- ・混合層内と雲層下部は水蒸気による浮力フラックスへの寄与が大。
- ・雲層上部は熱による浮力フラックスの寄与が大。
→凝結加熱による上昇気流の速度の増加が浮力フラックスに寄与。

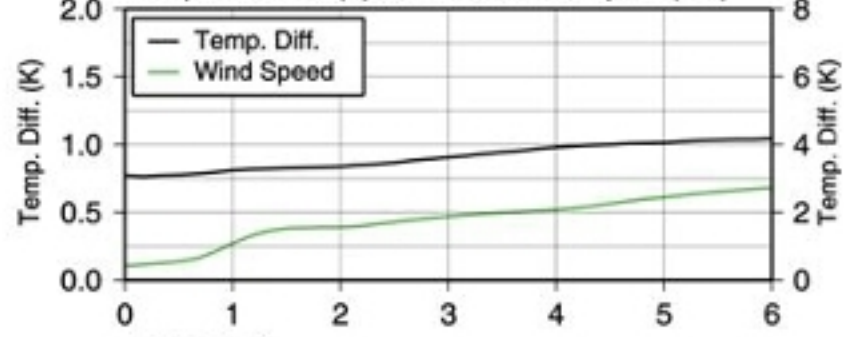
海面からのフラックスに関連する時系列

Case: MR02-K06_02120321Z

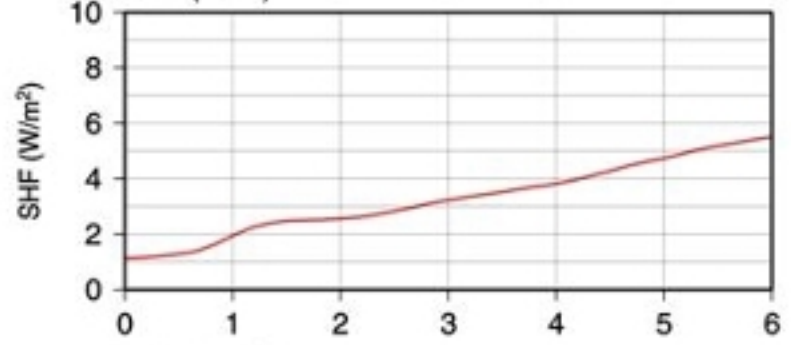
SST and Air Temp. (K)



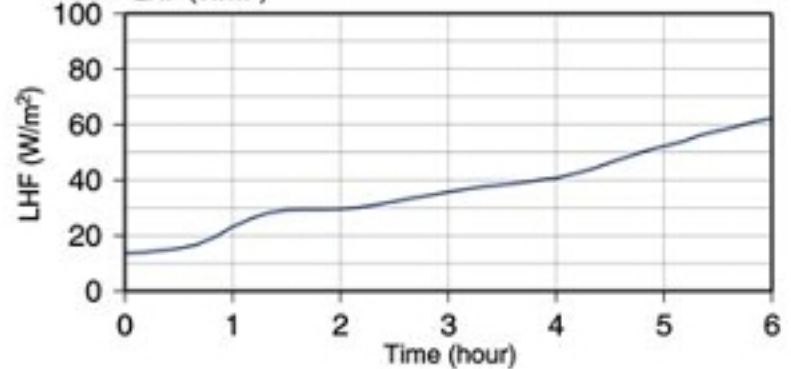
Temp. Difference (K) and Surface Wind Speed (m/s)



SHF (W/m²)



LHF (W/m²)



- ・ SSTと気温の差は1℃以内
→ 両者の温度差が小さい。
→ **顕熱フラックスが小さい。**
6W/m²以下
- ・ **潜熱フラックスの値が大きい。**
60W/m²以下

→ 大気境界層内の鉛直熱・水蒸気フラックスに影響を及ぼす。

- ・ **小さな熱フラックス**
- ・ **大きな水蒸気フラックス**
- ・ 浮力フラックスへの水蒸気の寄与が大

まとめ

- ・「みらい」MR02-K06において取得されたラジオゾンデデータをもとにして、熱帯海洋上の大気境界層内の鉛直循環と熱・水蒸気の鉛直輸送について、雲解像モデルCReSSを用いた数値実験を行った。
- ・混合層内には plume が、雲層には積雲の存在を確認する事ができた。
 - 積雲の存在はシーロメータによる雲量、雲底高度の時系列観測の結果とある程度整合する。
 - 亜熱帯における鉛直循環の構造とおおむね一致する。
ただし、雲層上部の逆転層は存在していなかった。
- ・混合層内の浮力フラックスに対しては、熱フラックスではなく水蒸気フラックスの寄与が大きかった。
 - 海面からの顕熱フラックスの値が小さく、潜熱フラックスの値が大きいことに起因すると考えられる。
- ・雲層下部の浮力フラックスに対しても、水蒸気フラックスの寄与が大きかった。
- ・雲層上部の浮力フラックスに対しては、熱フラックスの寄与が大きかった。
 - 水蒸気の凝結加熱と上昇気流の速度の増加による。

本日のメニュー(あくまでも予定)

1. メソ降水システムに関するこれまでの知見
 - 1-1. 降水セルの特徴
 - 1-2. 自己維持型のメソ降水システム
2. メソ降水システムの研究手法
 - 2-1. ドップラーレーダーデータ解析
 - 2-1-1. 解析事例(降水セルの面積と高さ)
 - 2-2. 雲解像モデル
 - 2-3. 雲解像モデル(CReSS)を用いた計算事例
 - 2-3-1. 台風T0418のケース
 - 2-3-2. 台風T0423のケース
 - 2-4. メソ降水システム研究の将来
3. **GCMパラメタリゼーションの改良に向けて**
 - 3-1. 海洋上の浅い積雲の再現実験
 - 3-2. **熱帯インド洋域における深い対流雲の予報実験**

Mirai Indian Ocean cruise for the Study of the MJO-convection Onset

<http://www.jamstec.go.jp/iorgc/mismo/index.html>

- ・ MJOに伴う積雲対流活動が活発化する海域において、海洋と大気の特徴を調べることを主目的とする。

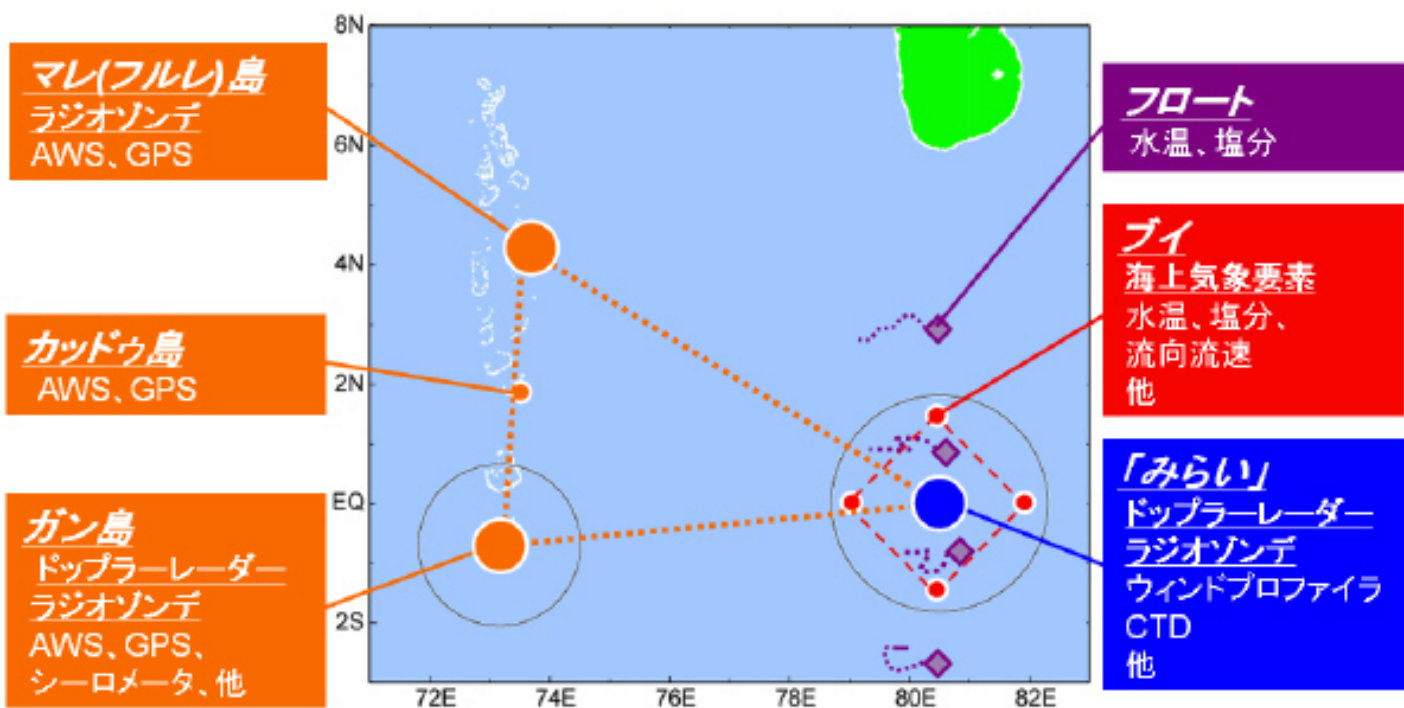
時期：2006年10月下旬～12月上旬

場所：インド洋熱帯域（MJOがオンセットする領域）

観測体制：みらい定点観測（80.5E, 0.0N）

モルジブ観測（ガン島、フルレ島、カッドウ島）

MISMO コア観測網



MISMO コア観測網

マレ(フルレ)島

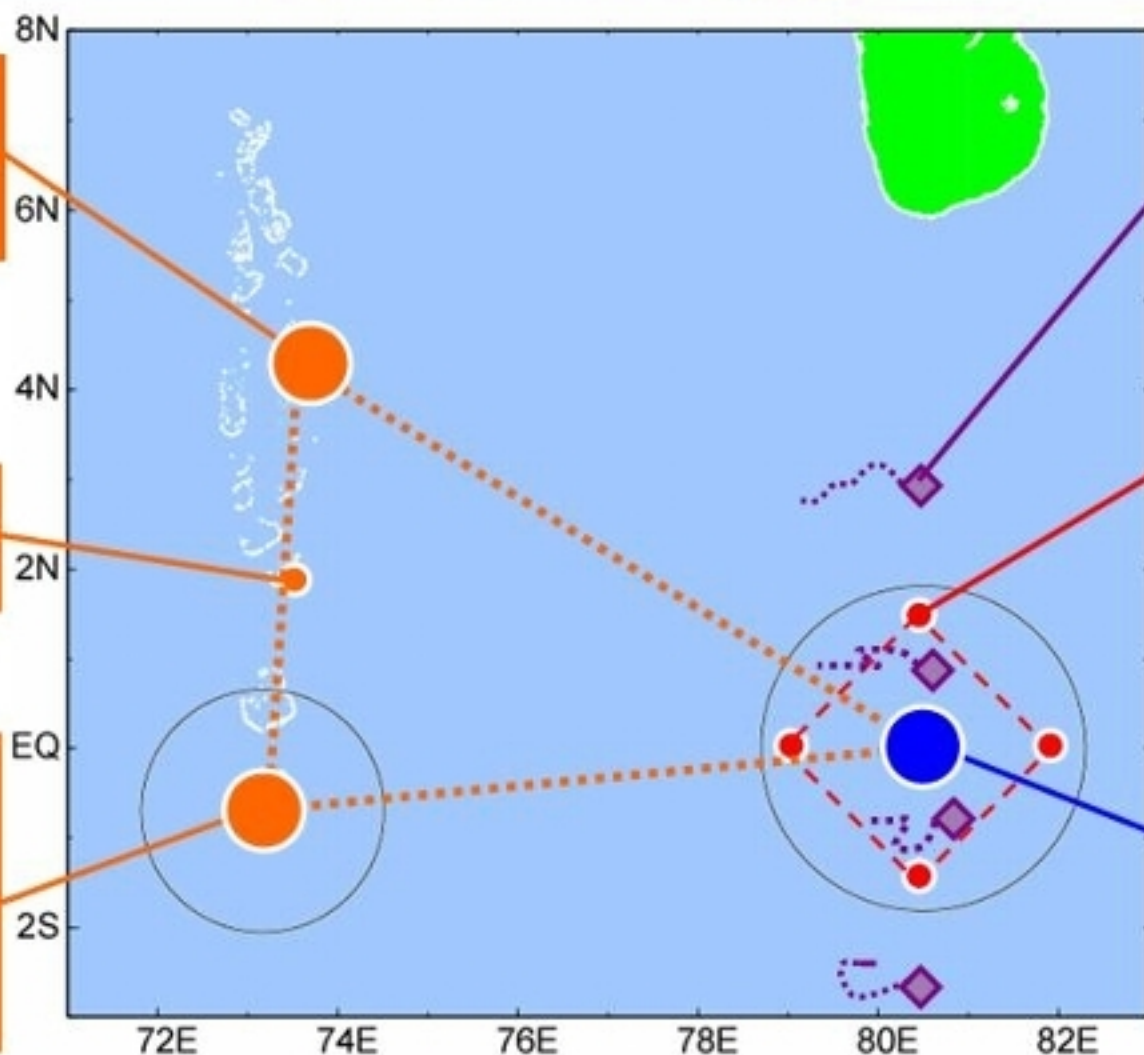
ラジオゾンデ
AWS、GPS

カッドウ島

AWS、GPS

ガン島

ドップラーレーダー
ラジオゾンデ
AWS、GPS、
シーロメータ、他



フロート

水温、塩分

パイ

海上気象要素
水温、塩分、
流向流速
他

「みらい」

ドップラーレーダー
ラジオゾンデ
ウィンドプロファイラ
CTD
他

ゾンデ: 大気の大規模場・環境場の時空間変動
GPS: 水蒸気量の細かい変動
シーロメータ: 非降水雲の細かい分布
レーダー: 降水雲の分布と構造
パイ: 大気海洋間のフラックス交換

MISMO域を対象とした毎日のシミュレーション実験の背景

- ・ 雲解像モデルの結果を用いてGCMにおける**大規模凝結過程**や**積雲過程**の検証を行っていきたい。
 - ・ GCMの検証を行うためには**雲解像モデルの精度の評価**が必要。
 - ・ GCMの検証を行うためには日本域の実験結果だけでは不十分。特に**熱帯域での実験**実績が必要。
- 日本域では衛星データだけでなく、AMeDASやレーダーデータなどの入手が可能。熱帯域では衛星データのみ。

MISMOでは

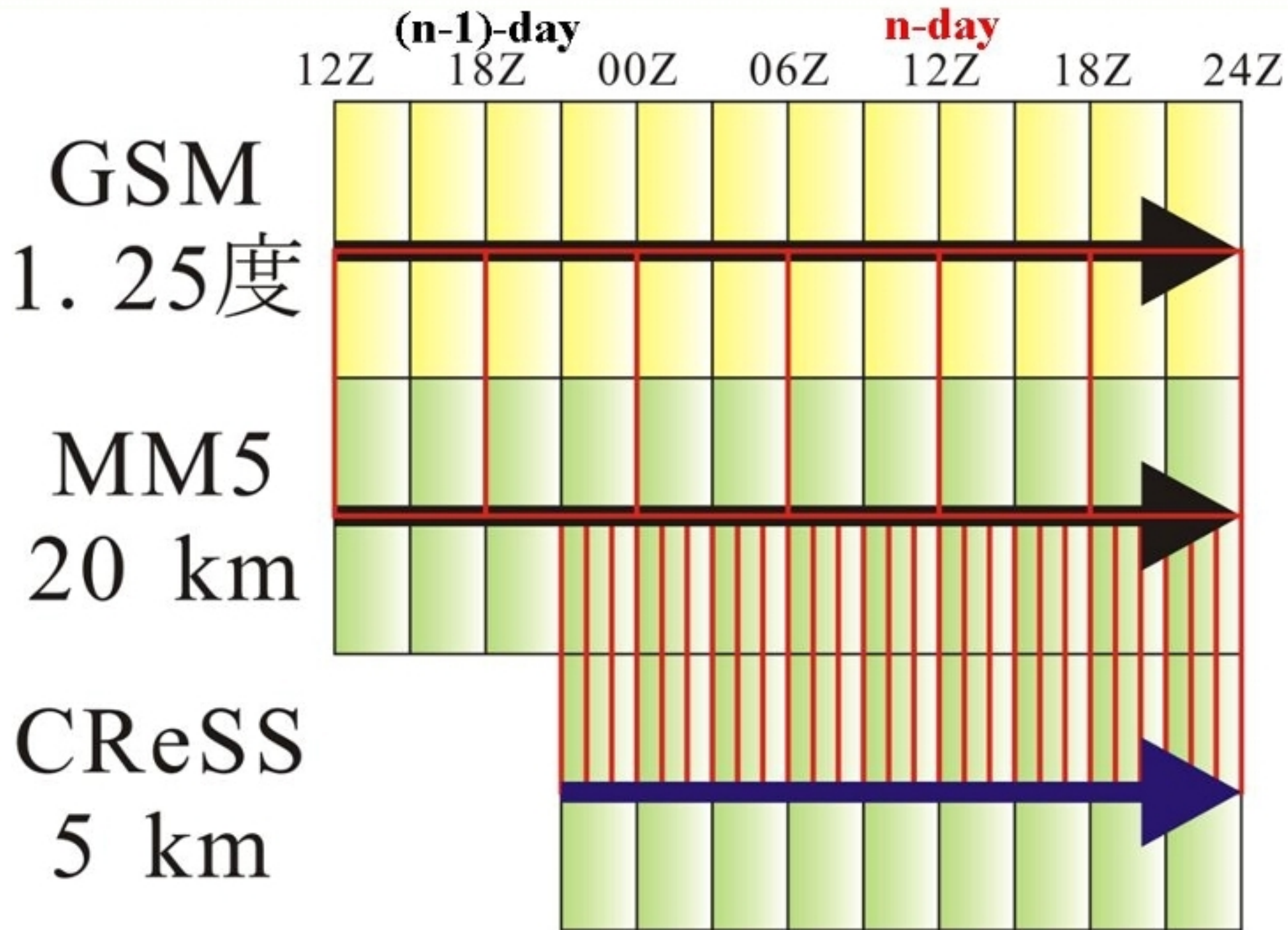
- ・ 衛星データに加えて、強化観測(みらい、モルジブ)が実施される。
- ・ モデルの精度評価に多様な観測結果を使用する事が可能。

本研究の目的

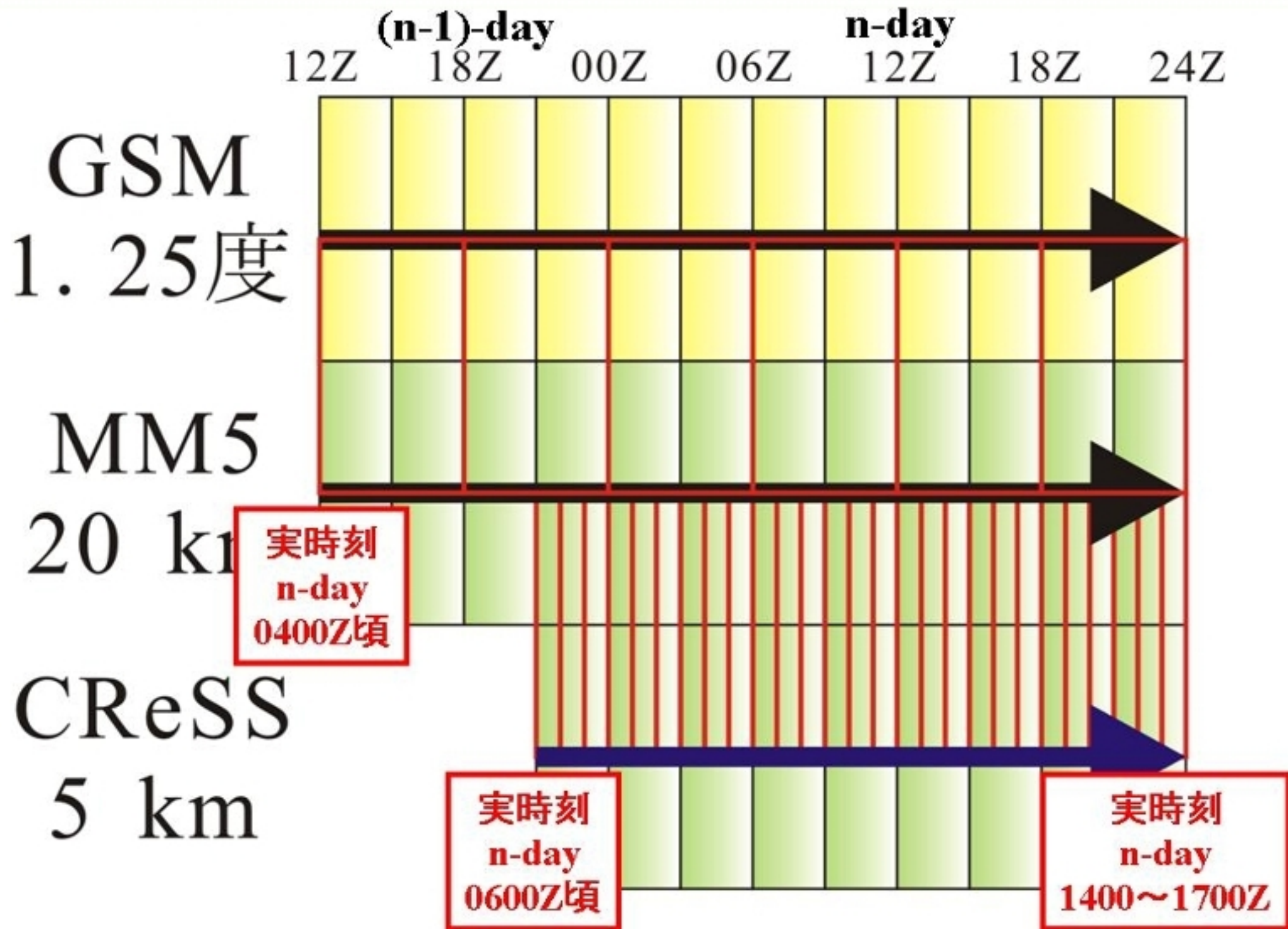
MISMOに合わせて熱帯インド洋域を対象として
毎日のシミュレーション実験を実施し、実験結果から
どの様な現象を再現できた(できなかった)かを確認する。

- ・ 熱帯域において対流活動が再現できるか？
- ・ シミュレーションの精度の確認をどの様に行うか？
- ・ 今後、シミュレーションを実施する際に考慮すべき点は
どの様なものであるか？

数値実験の概要(ネストの構造)



数値実験の概要(ネストの構造)

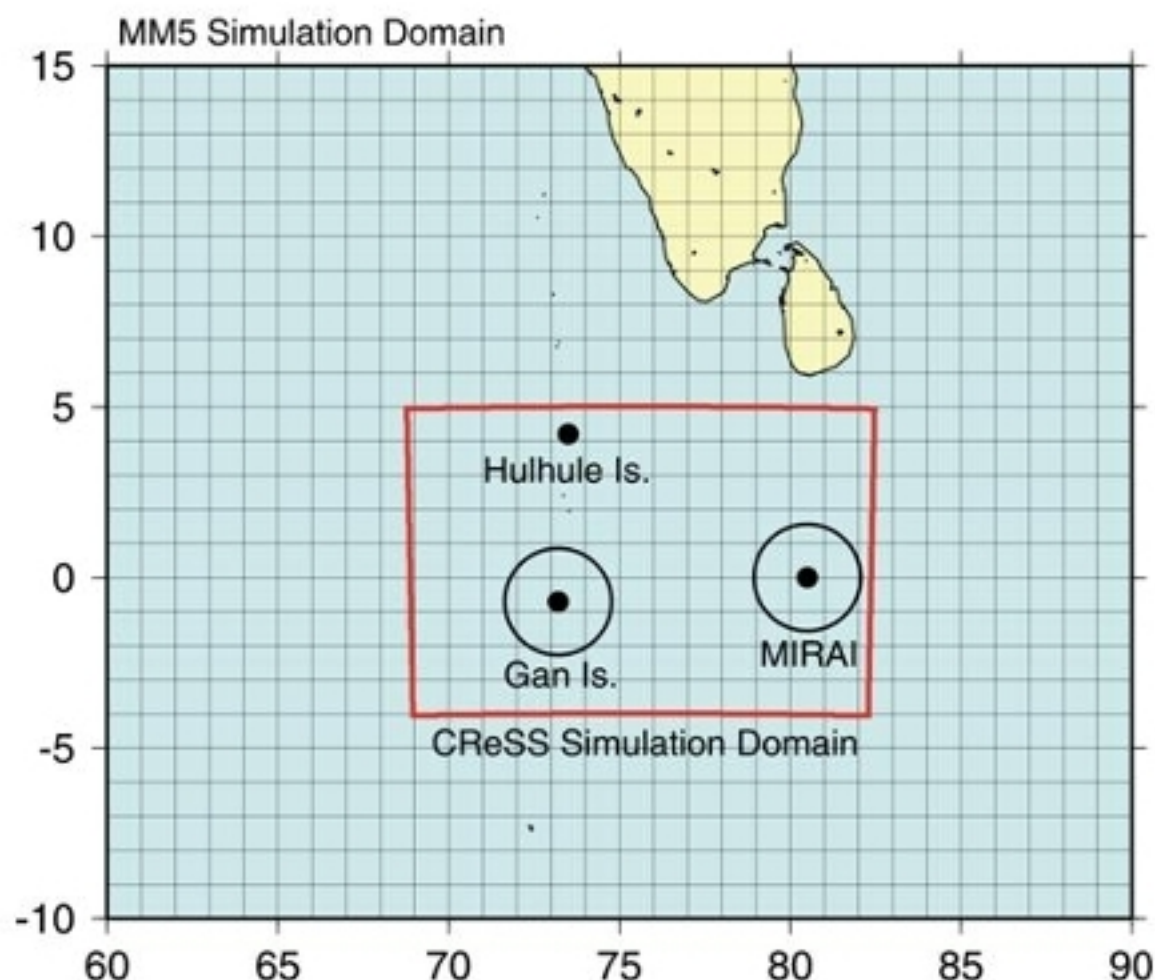


数値実験の概要(数値モデルの概要)

使用した数値モデル	MM5 (The PSU/NCAR mesoscale model)
大気境界層のパラメタリゼーション	Blackadar-Scheme
雲微物理過程のパラメタリゼーション	Mixed Phase (5相の水物質)
積雲のパラメタリゼーション	Modified Kain-Fritsch (KF2)
浅い積雲のパラメタリゼーション	含む
大気・雲放射のパラメタリゼーション	雲放射過程を含む
計算領域	水平 : 200×150 鉛直 : 35層 (上限高度は10hPa)
解像度	水平 : 20km 鉛直 : 最下層は 40m , σ 座標系で stretching
時間ステップ	30 秒
初期値・境界値	気象庁全球スペクトルモデル(GSM)の予報値
初期時刻・積分時間	前日 12Z より 36時間
下層境界	海面水温として外部データ(気象庁 MGDSST)を使用

使用した数値モデル	CReSS ver2.2
乱流のパラメタリゼーション	1.5次-TKE
大気境界層のパラメタリゼーション	バルクモデル(Louis 1979)
雲微物理過程のパラメタリゼーション	冷たい雨 (6相の水物質、数濃度計算は行わない)
大気・雲放射のパラメタリゼーション	含まない(雲による短波放射の減少は含む)
計算領域	水平 : 300×200 鉛直 : 40層 (上限高度は19.6 km)
解像度	水平 : 5000m 鉛直 : 最下層は 50m , stretching
時間ステップ	6.0 秒 (非音波項)・ 1.0 秒 (音波項)
初期値・境界値	MM5 の予報値
初期時刻・積分時間	前日 21Z より 27時間
下層境界	初期値のみ外部データ(気象庁 MGDSST)を使用

数値実験の概要(計算領域)



シミュレーションの実施 2006年10月20日～12月3日 (計45日)

- ・正常終了 21日
- ・途中終了 7日
- ・実施されず 17日

幾つかのケースについては、
シミュレーション結果をみらいと
モルジブに送付。

その後再計算を実施 (2007年3月6日現在)

- ・正常終了 **31日**
- ・途中終了 **8日**
- ・実施されず 6日

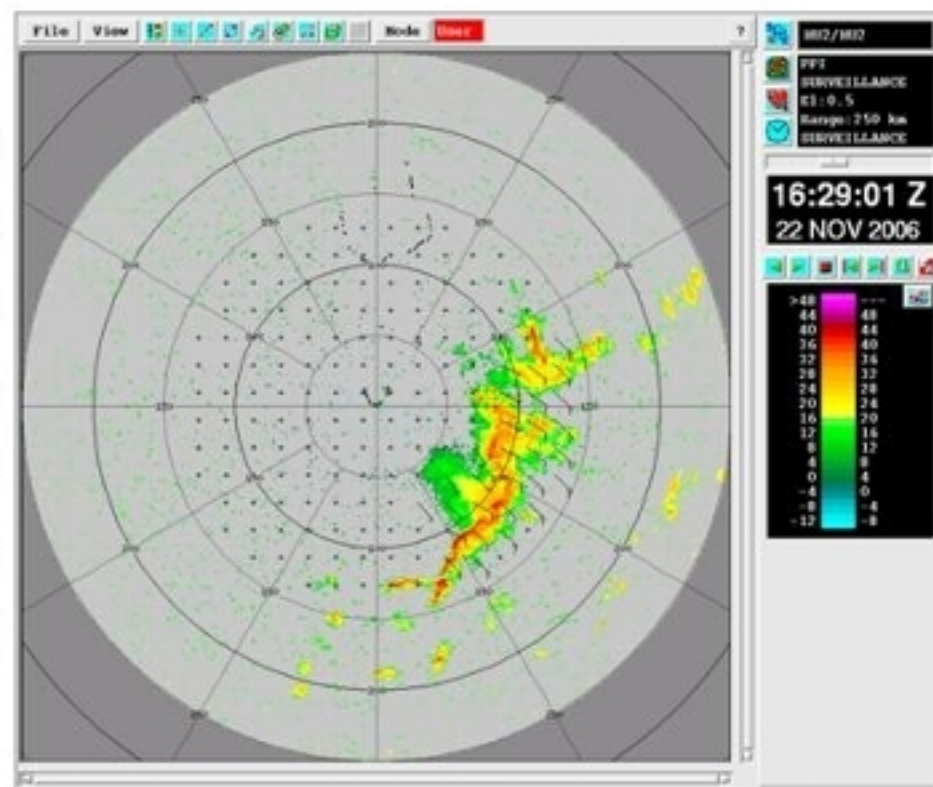
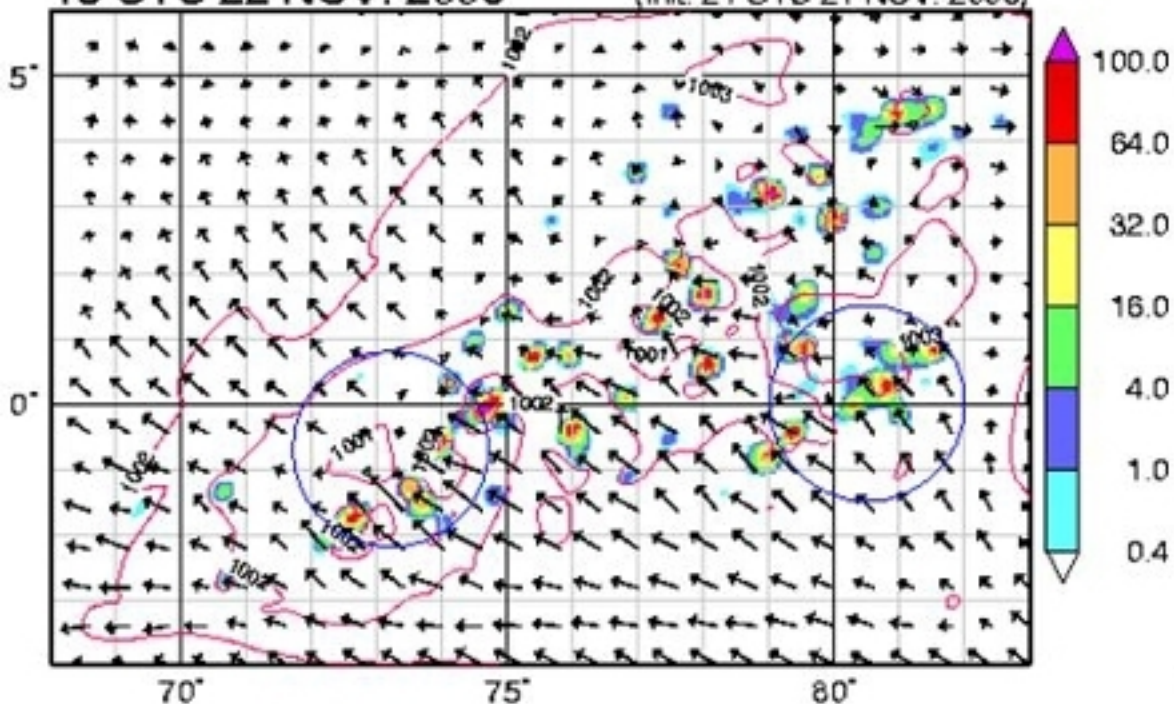
計算結果の例(その1)

2006年11月22日16Z (ガン島周辺で観測された降水システム)

PRECIPITATION INTENSITY (mm hr^{-1})

13 UTC 22 NOV. 2006

(init. 21 UTC 21 NOV. 2006)

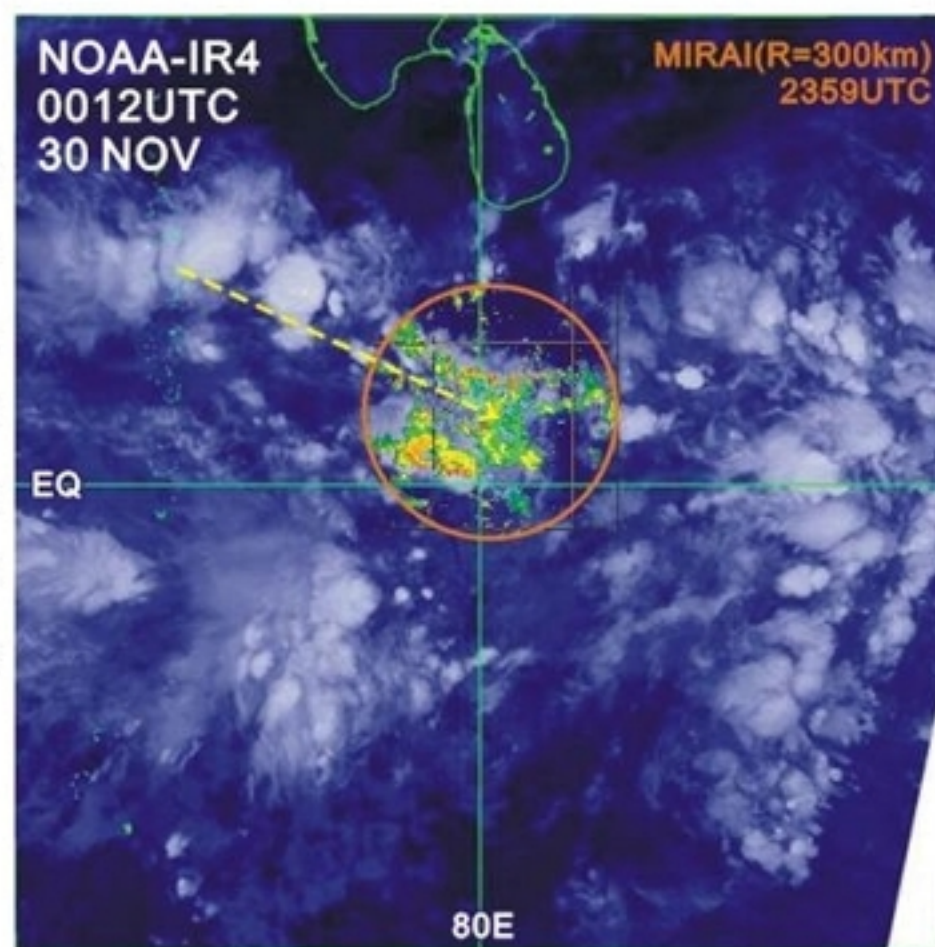
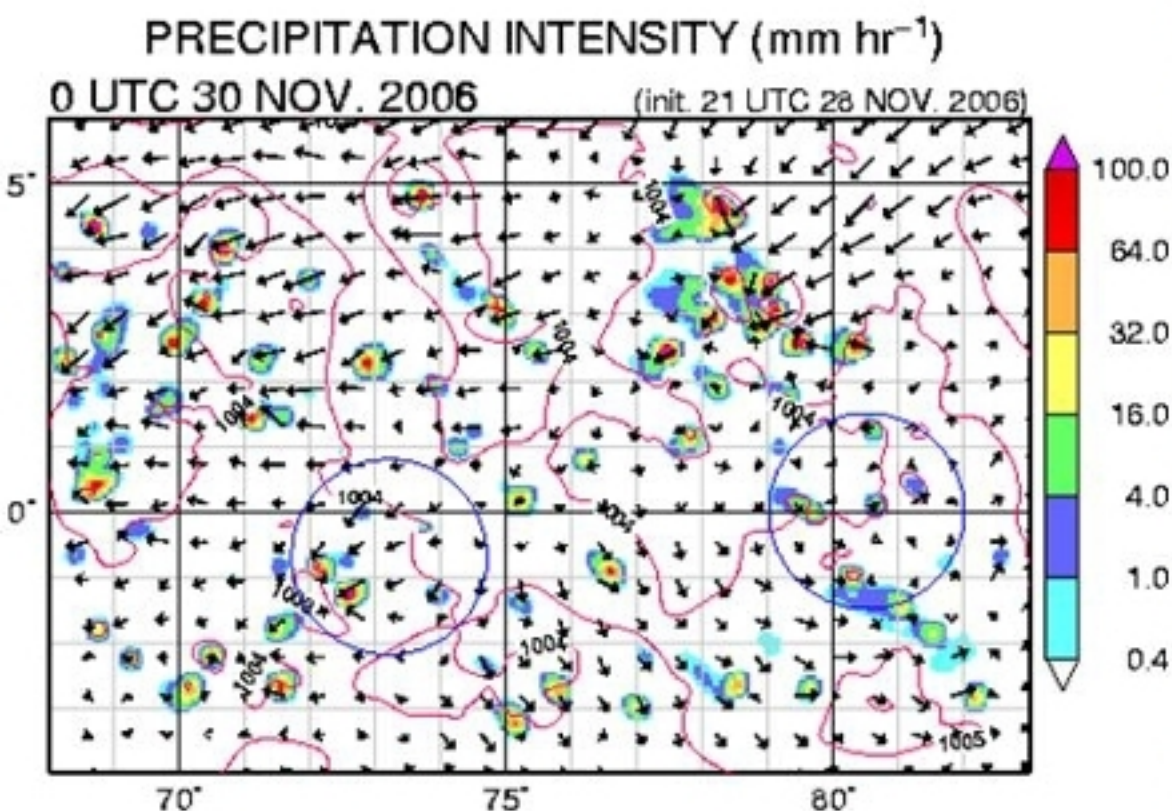


数値実験では (72.5E, 2S) 付近から北東に伸びる線状降水域が見られる。これは南東風の前面の収束帯に対応する降水システムである。(時間は3時間ほどずれている)

ガン島のドップラーレーダーで観測された降水システムの走向は南南西-北北東。降水システムの後面で南東風が観測されている。

計算結果の例(その2)

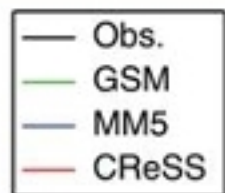
2006年11月30日00Z (みらいは 80E, 1N 付近に位置)



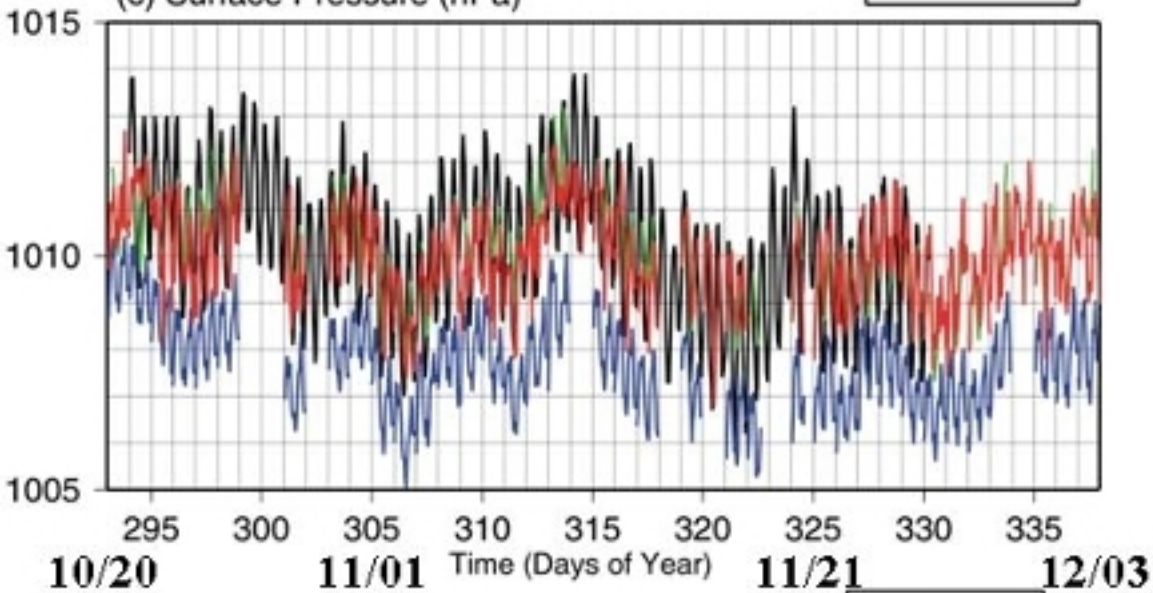
数値実験では (80E, 2.5N) 付近から北西に伸びる線状降水域が見られる。これは北東風の前面の収束帯に対応する降水システムである。

モデル結果から得られた地上における気圧の時系列

MISMO / MIRAI (80.5E, 0.0N)
2006/10/20 - 2006/12/03

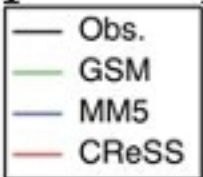


(c) Surface Pressure (hPa)

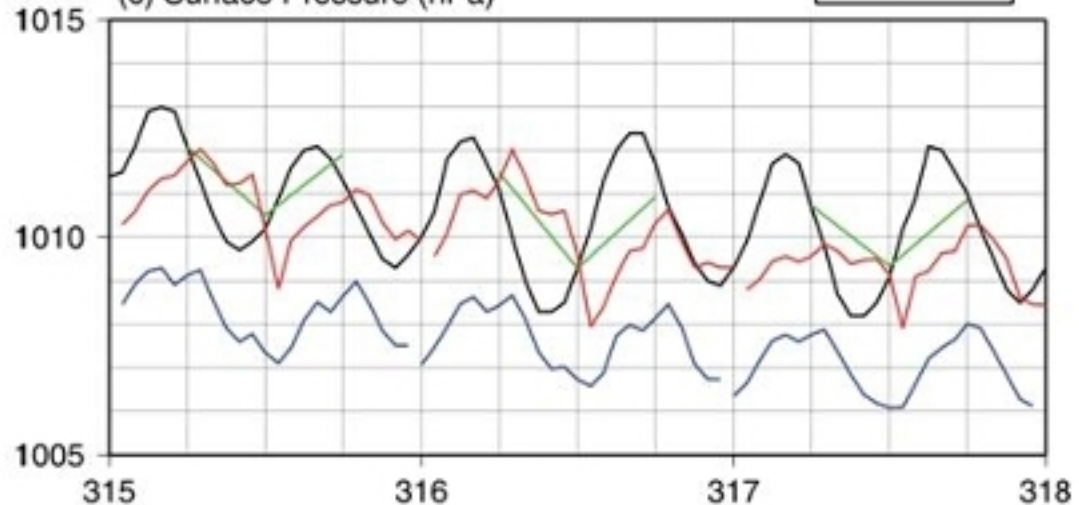


みらいの定点(80.5E, 0.0N)観測は
10/27 (DOY=300) 21Z から
11/21 (DOY=325) 18Z まで

MISMO / MIRAI (80.5E, 0.0N)
2006/11/11 - 2006/11/13



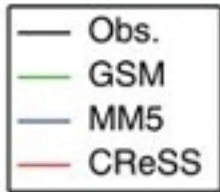
(c) Surface Pressure (hPa)



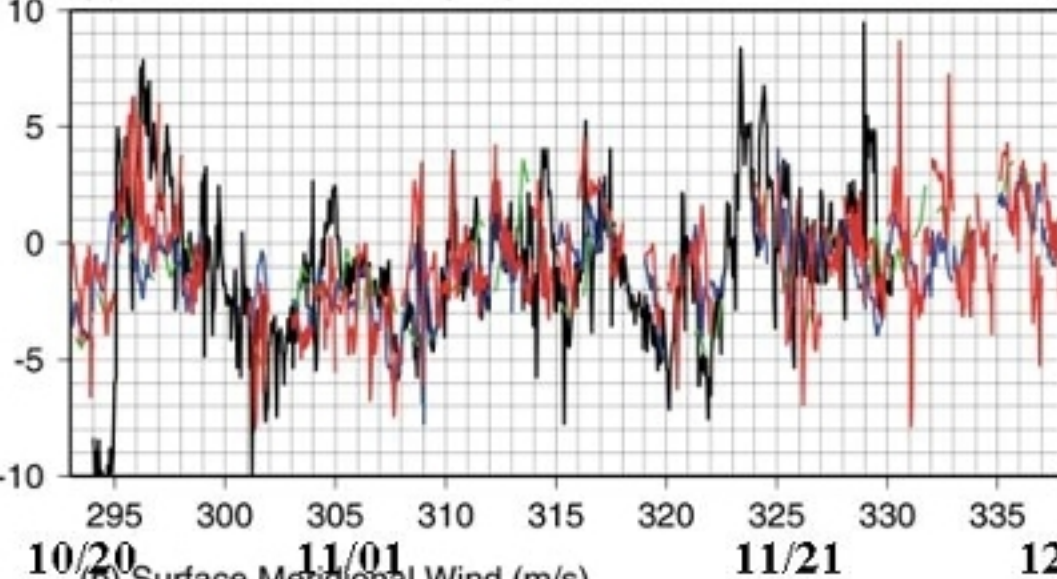
数値実験の結果(MM5, CReSS)
ともに、気圧変動(慣性振動)が
見られる。
その振幅は小さく、時刻も遅れる。
(GSMの値に依存している)

モデル結果から得られた地上における水平風の時系列

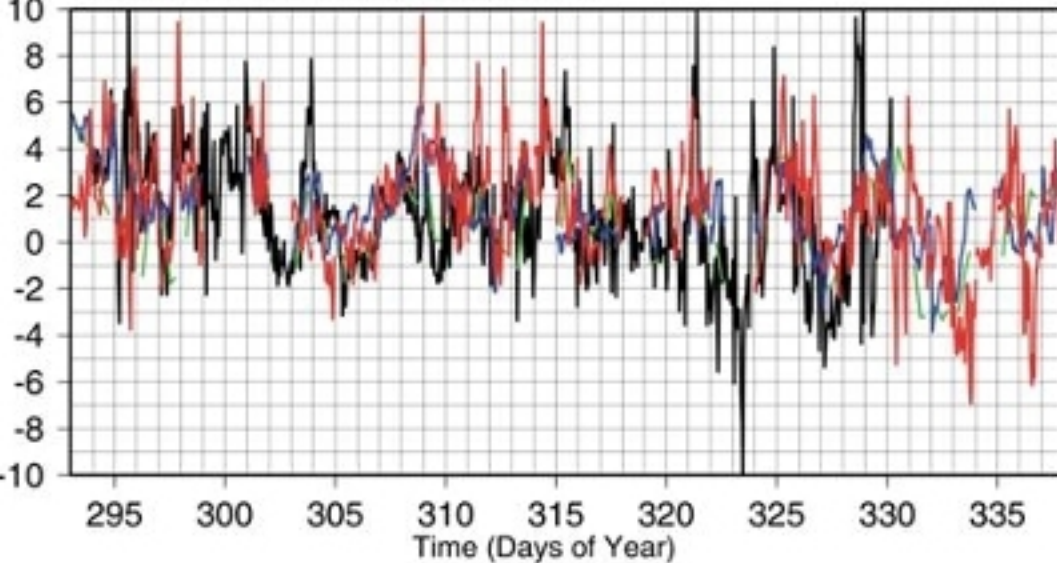
MISMO / MIRAI (80.5E, 0.0N)
2006/10/20 - 2006/12/03



(a) Surface Zonal Wind (m/s)

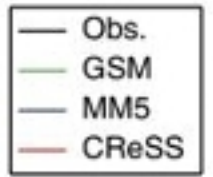


(b) Surface Meridional Wind (m/s)

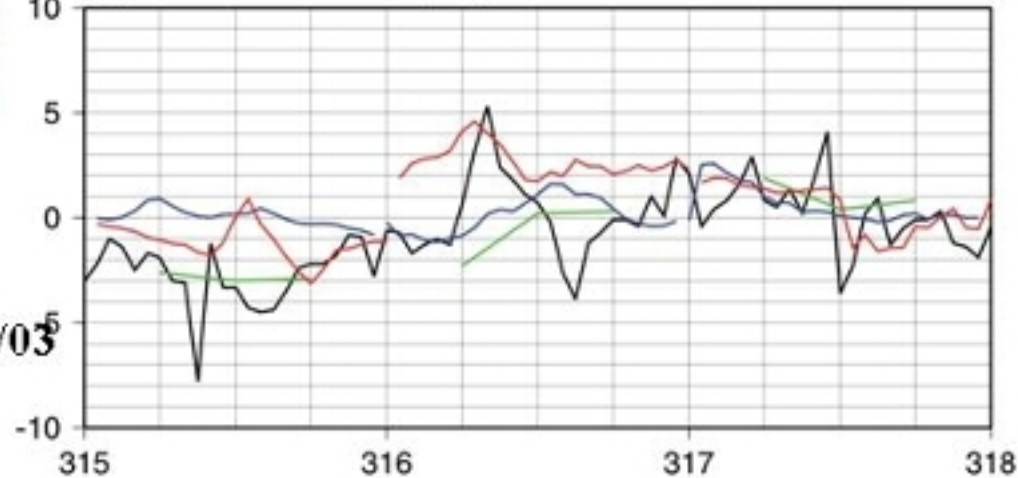


みらいの定点(80.5E, 0.0N)観測は
10/27 (DOY=300) 21Z から
11/21 (DOY=325) 18Z まで

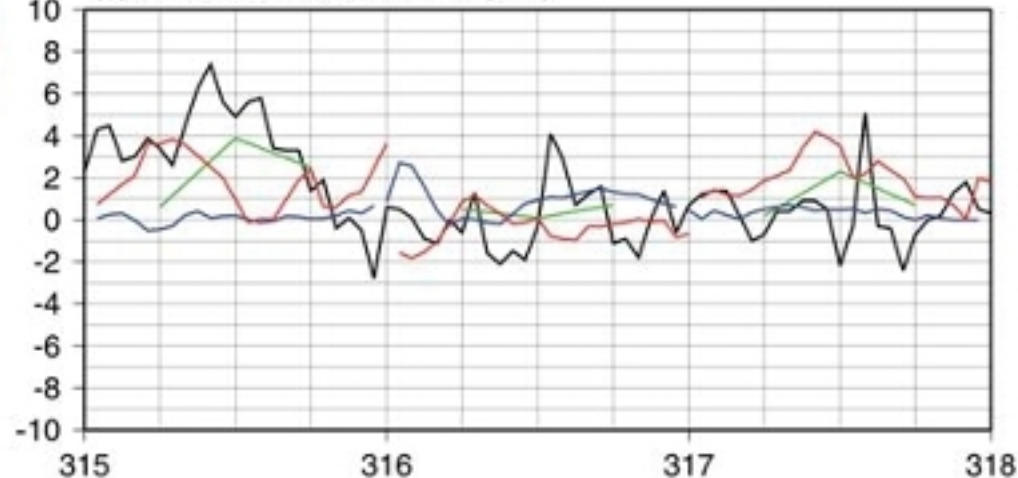
MISMO / MIRAI (80.5E, 0.0N)
2006/11/11 - 2006/11/13



(a) Surface Zonal Wind (m/s)

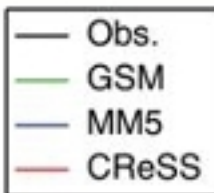


(b) Surface Meridional Wind (m/s)

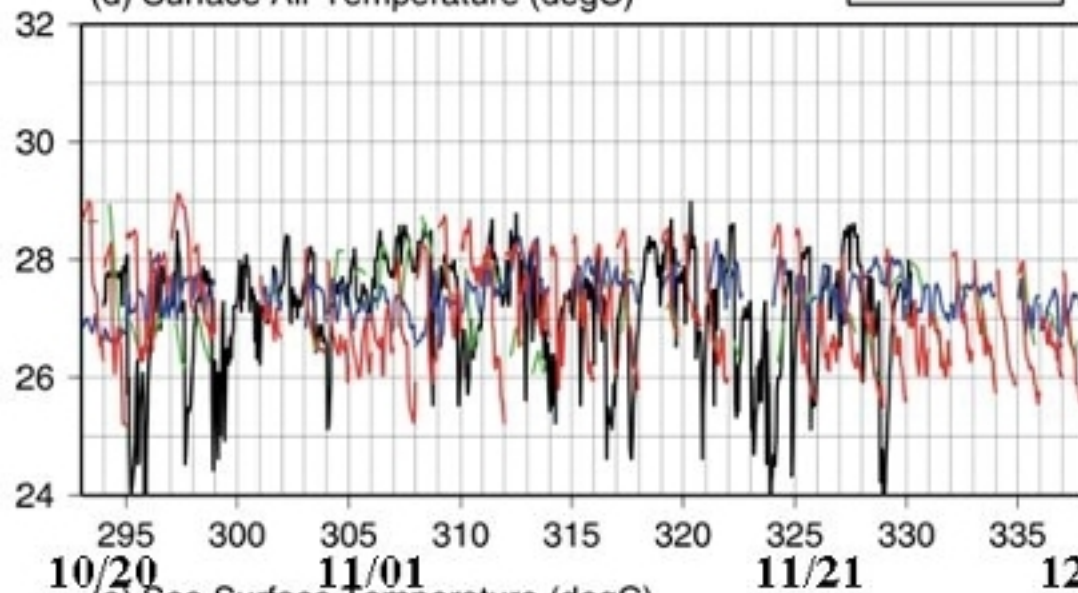


モデル結果から得られた地上における気温と海面水温の時系列

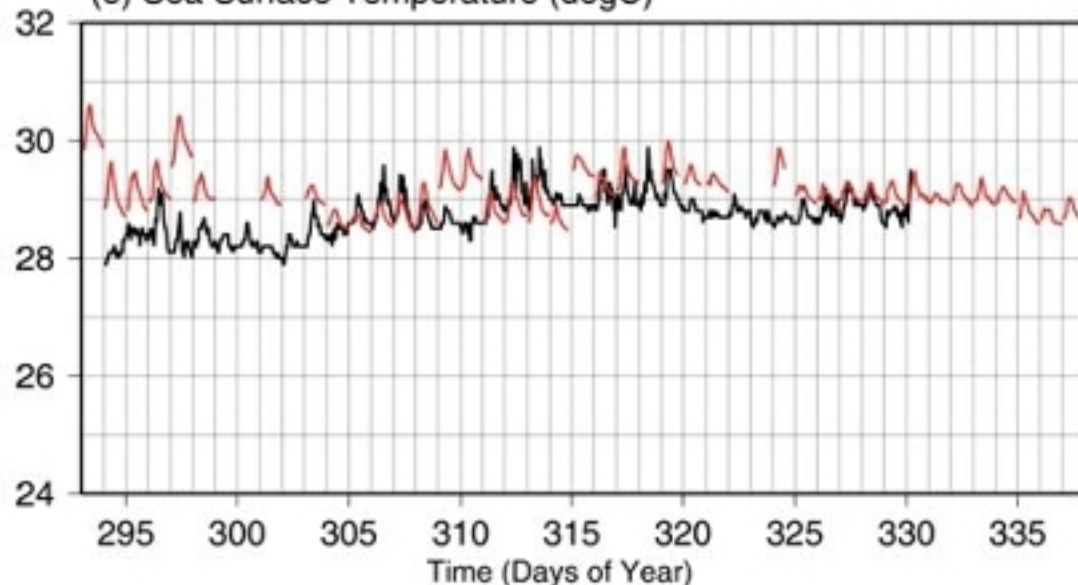
MISMO / MIRAI (80.5E, 0.0N)
2006/10/20 - 2006/12/03



(d) Surface Air Temperature (degC)



(e) Sea Surface Temperature (degC)

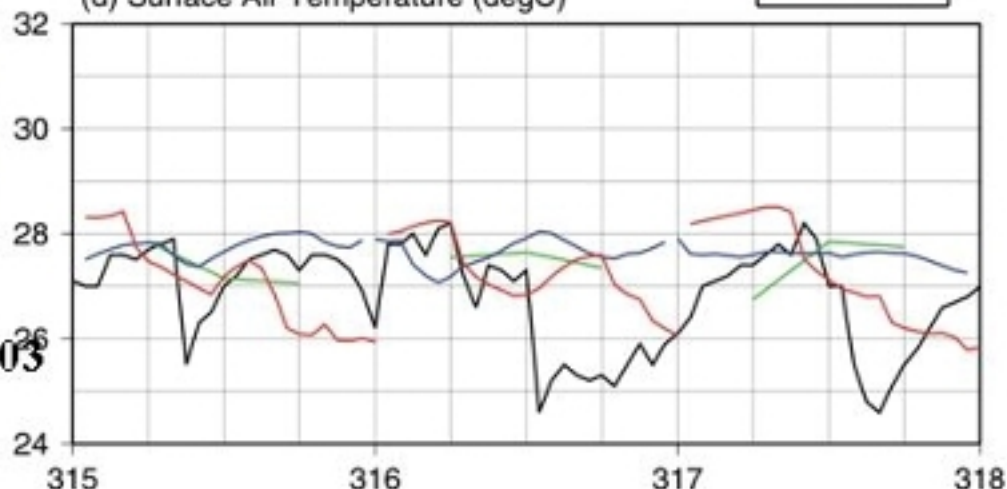


みらいの定点(80.5E, 0.0N)観測は
10/27 (DOY=300) 21Z から
11/21 (DOY=325) 18Z まで

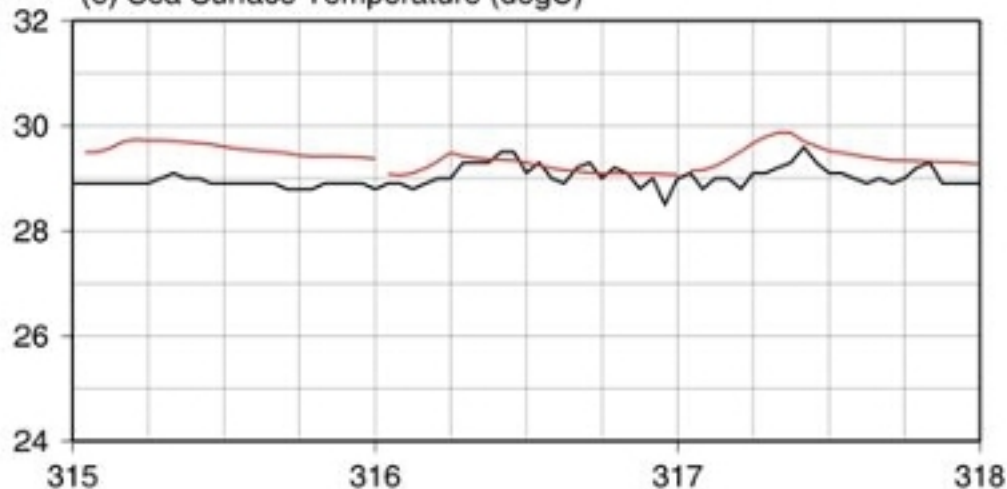
MISMO / MIRAI (80.5E, 0.0N)
2006/11/11 - 2006/11/13



(d) Surface Air Temperature (degC)

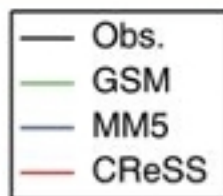


(e) Sea Surface Temperature (degC)

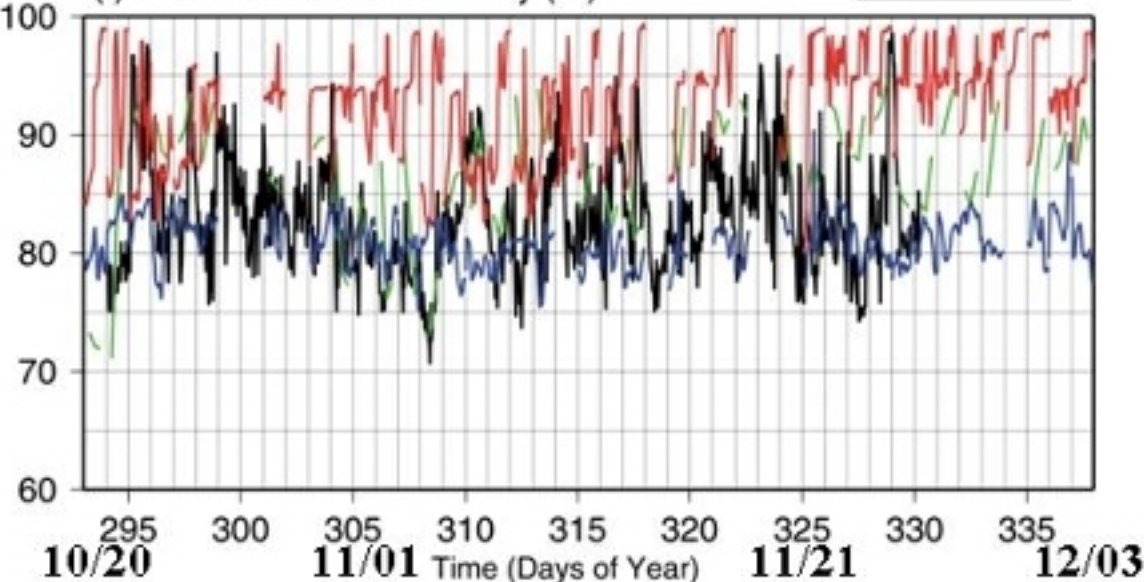


モデル結果から得られた地上における相対湿度の時系列

MISMO / MIRAI (80.5E, 0.0N)
2006/10/20 - 2006/12/03

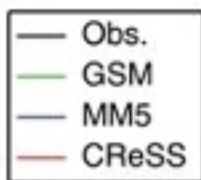


(f) Surface Relative Humidity (%)

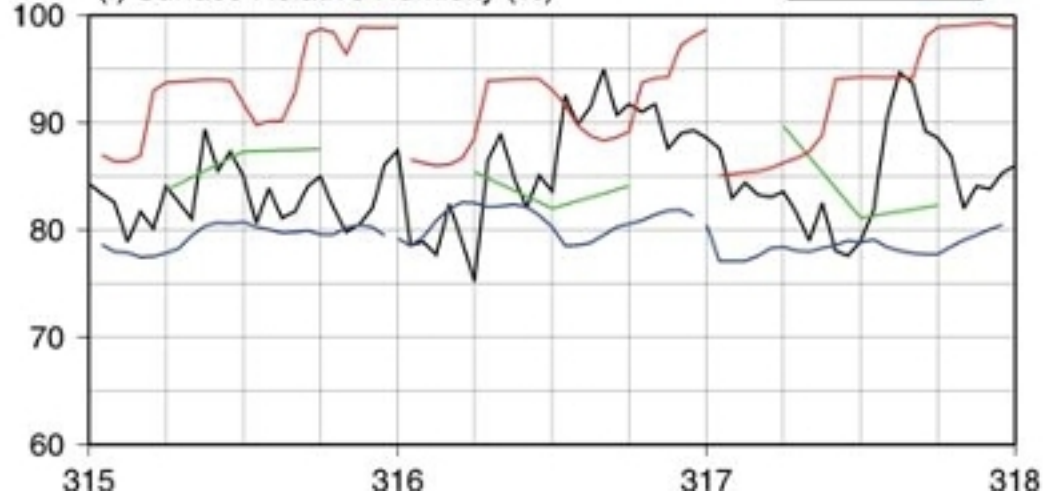


みらいの定点(80.5E, 0.0N)観測は
10/27 (DOY=300) 21Z から
11/21 (DOY=325) 18Z まで

MISMO / MIRAI (80.5E, 0.0N)
2006/11/11 - 2006/11/13



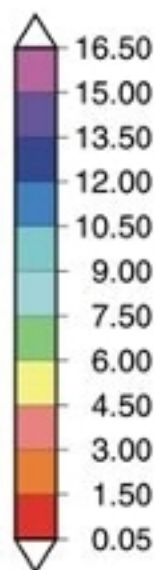
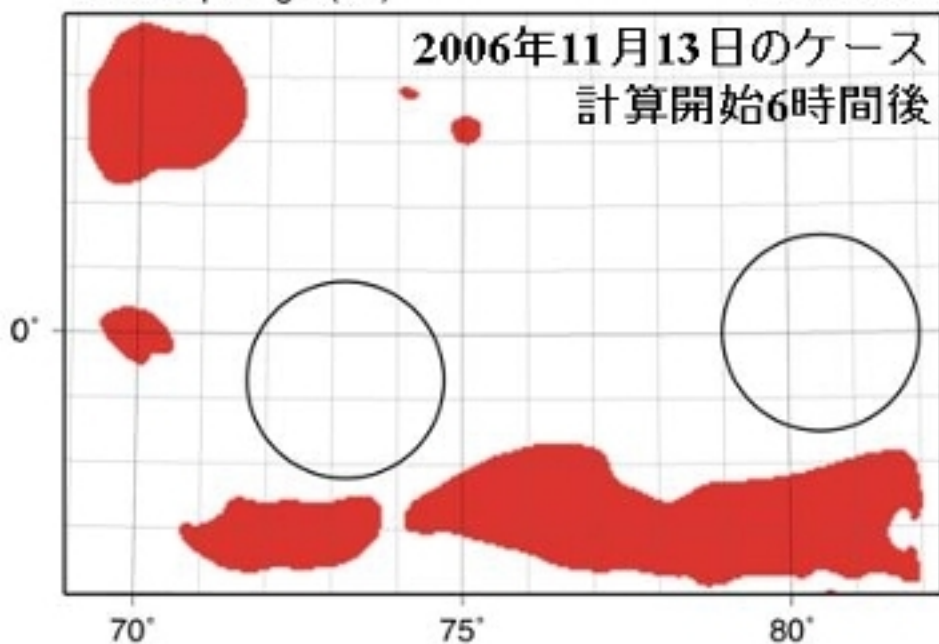
(f) Surface Relative Humidity (%)



MM5では相対湿度は観測結果と比べて小さな値となる傾向がある。
CReSSでは明らかに観測結果と比べて大きな値となる。
また、計算時間とともに相対湿度が増加する傾向が見られる。

モデル結果に見られた境界層雲

Cloud Top Height (km) 20061113 03Z



下層の相対湿度が大きくなる原因？

or

下層の相対湿度が大きい結果？

→ 下層雲の形成

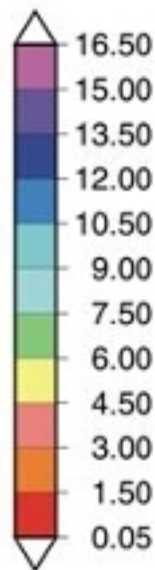
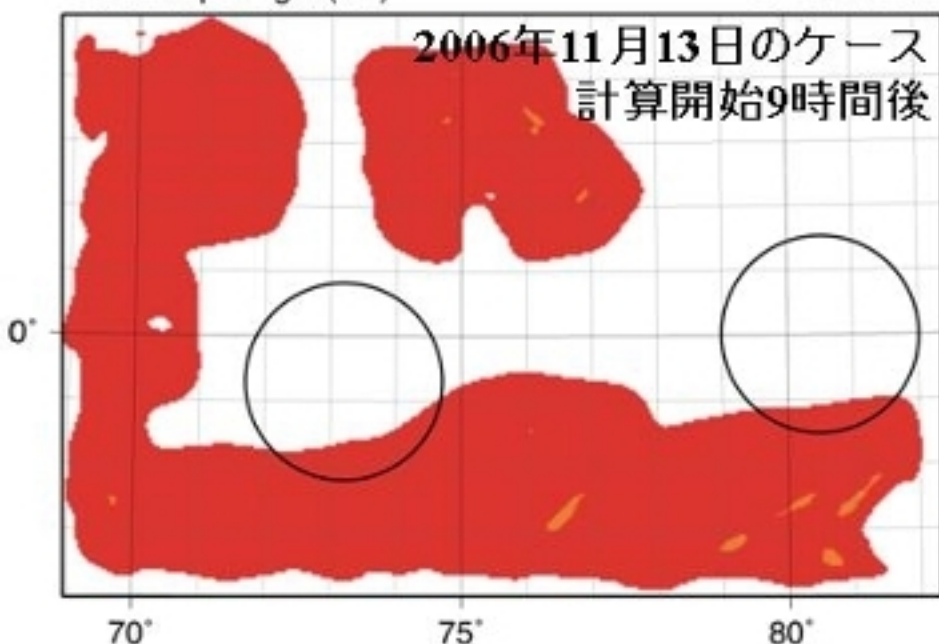
大気境界層上端付近で薄い雲が発生、
広く分布してしまっている。

本来であれば**積雲**が発生し、水蒸気が大気境界層から自由大気(対流圏下層)に輸送されるはずである。

しかしながら、本モデルでは積雲を再現する事ができず、水蒸気が大気境界層内に閉じ込められたまま溜まっていると考えられる。

→ **モデルの水平解像度を細かくする。**
浅い積雲のパラメタリゼーション
を導入する必要がある。

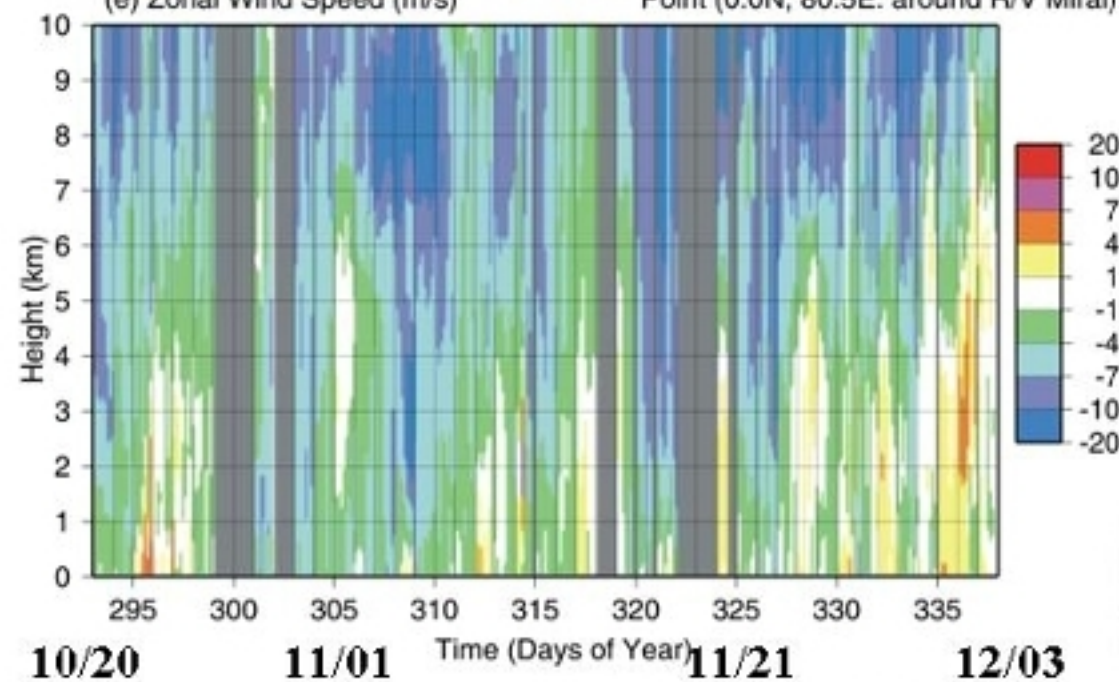
Cloud Top Height (km) 20061113 06Z



モデル結果から得られた水平風の鉛直プロファイル

Oct. 21, 2006 -- Dec. 03, 2006
Point (0.0N, 80.5E: around R/V Mirai)

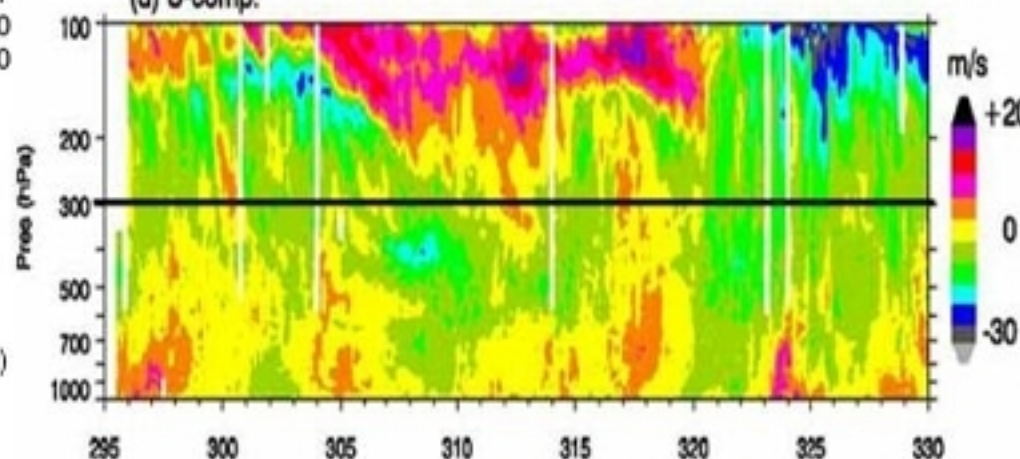
(e) Zonal Wind Speed (m/s)



ラジオゾンデ観測の時系列に相当

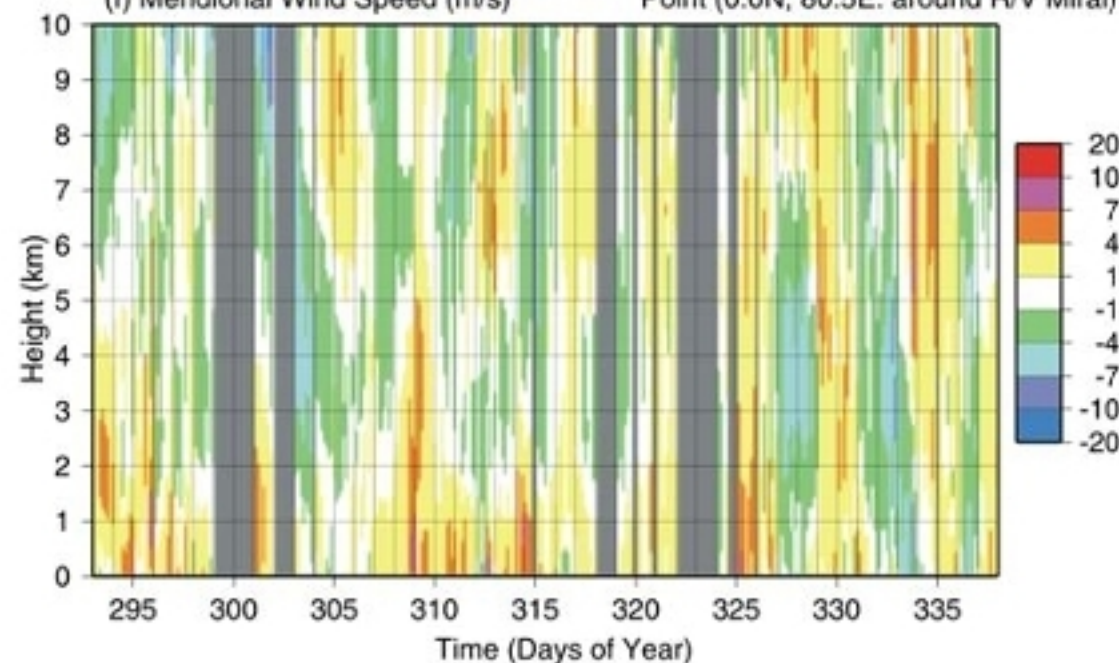
- ・対流圏下層はおおむね南東風。
- ・11/26 (DOY = 330) 以降、対流圏の下層から中層にかけて西風域が現れる。→ MJO と解析。

(d) U-comp.

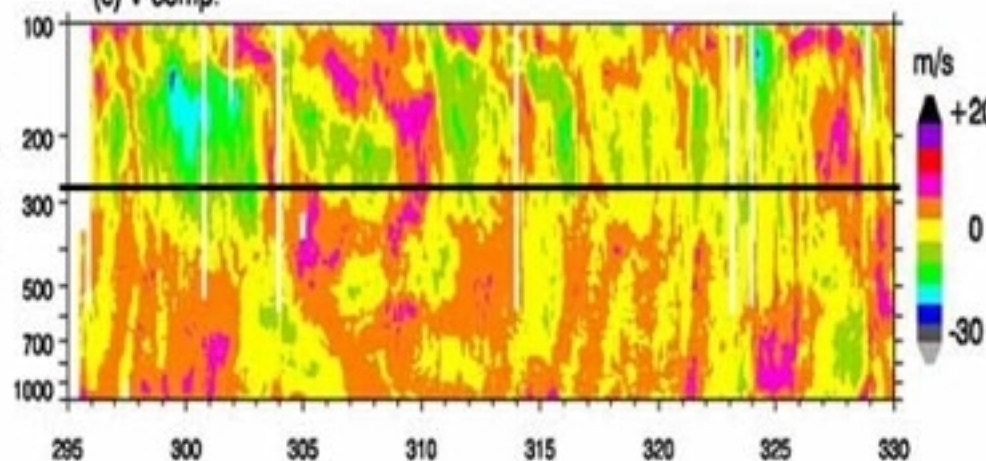


(f) Meridional Wind Speed (m/s)

Oct. 21, 2006 -- Dec. 03, 2006
Point (0.0N, 80.5E: around R/V Mirai)

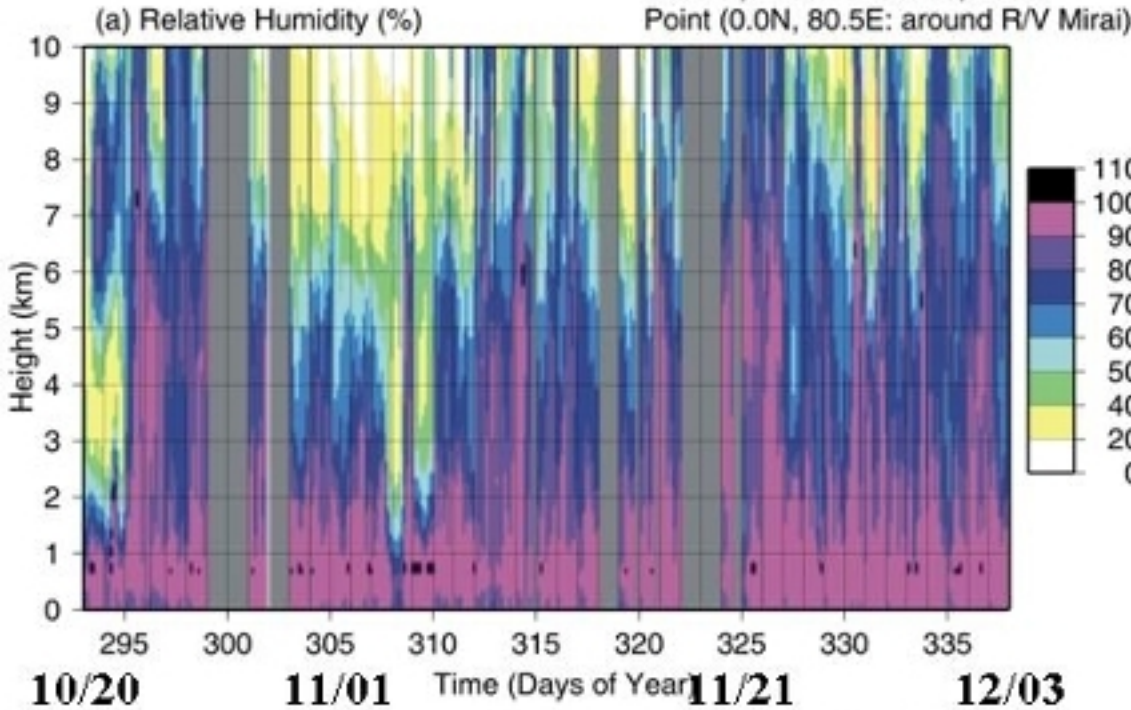


(e) V-comp.



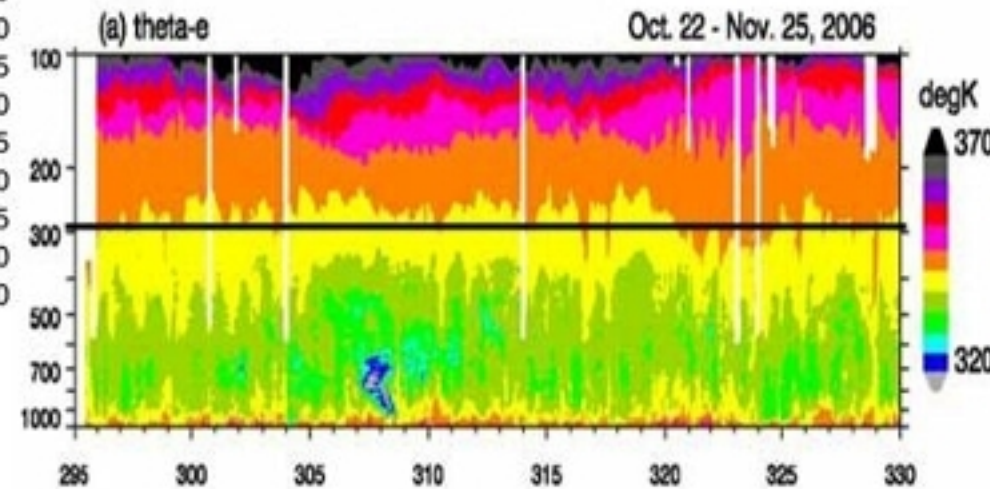
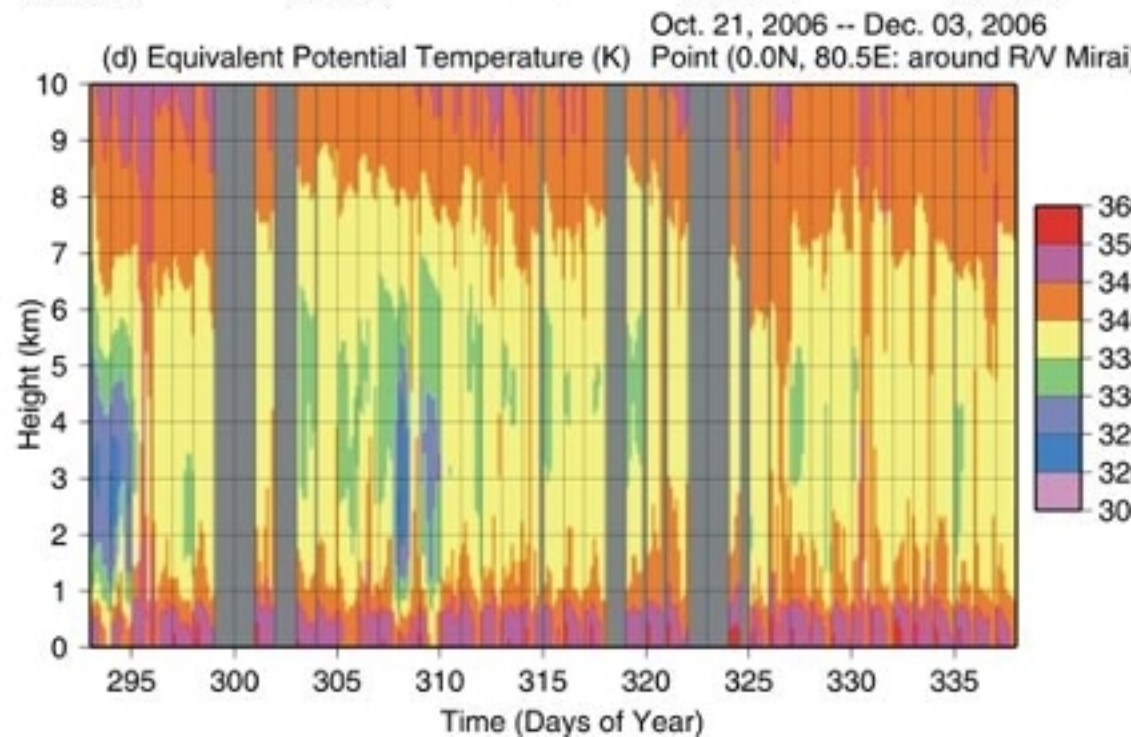
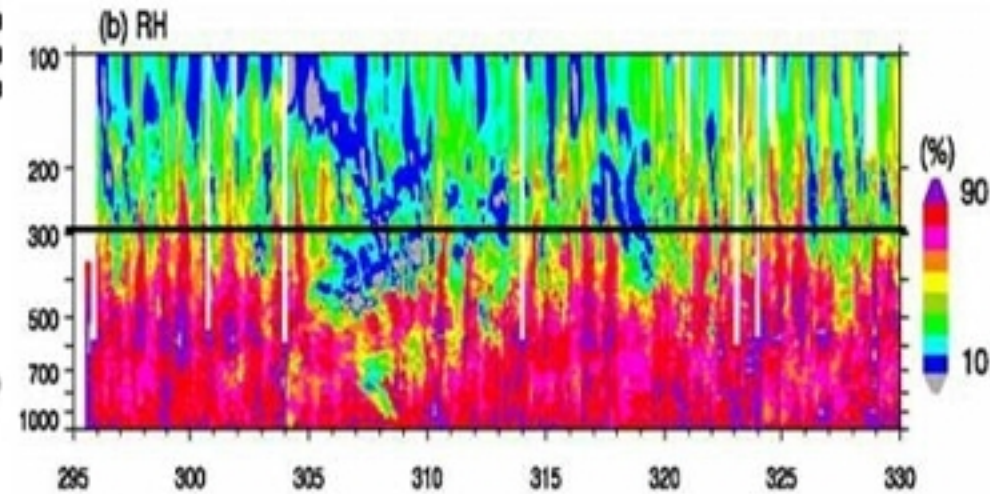
モデル結果から得られた相当温位、相対湿度の鉛直プロファイル

Oct. 21, 2006 -- Dec. 03, 2006
Point (0.0N, 80.5E: around R/V Mirai)

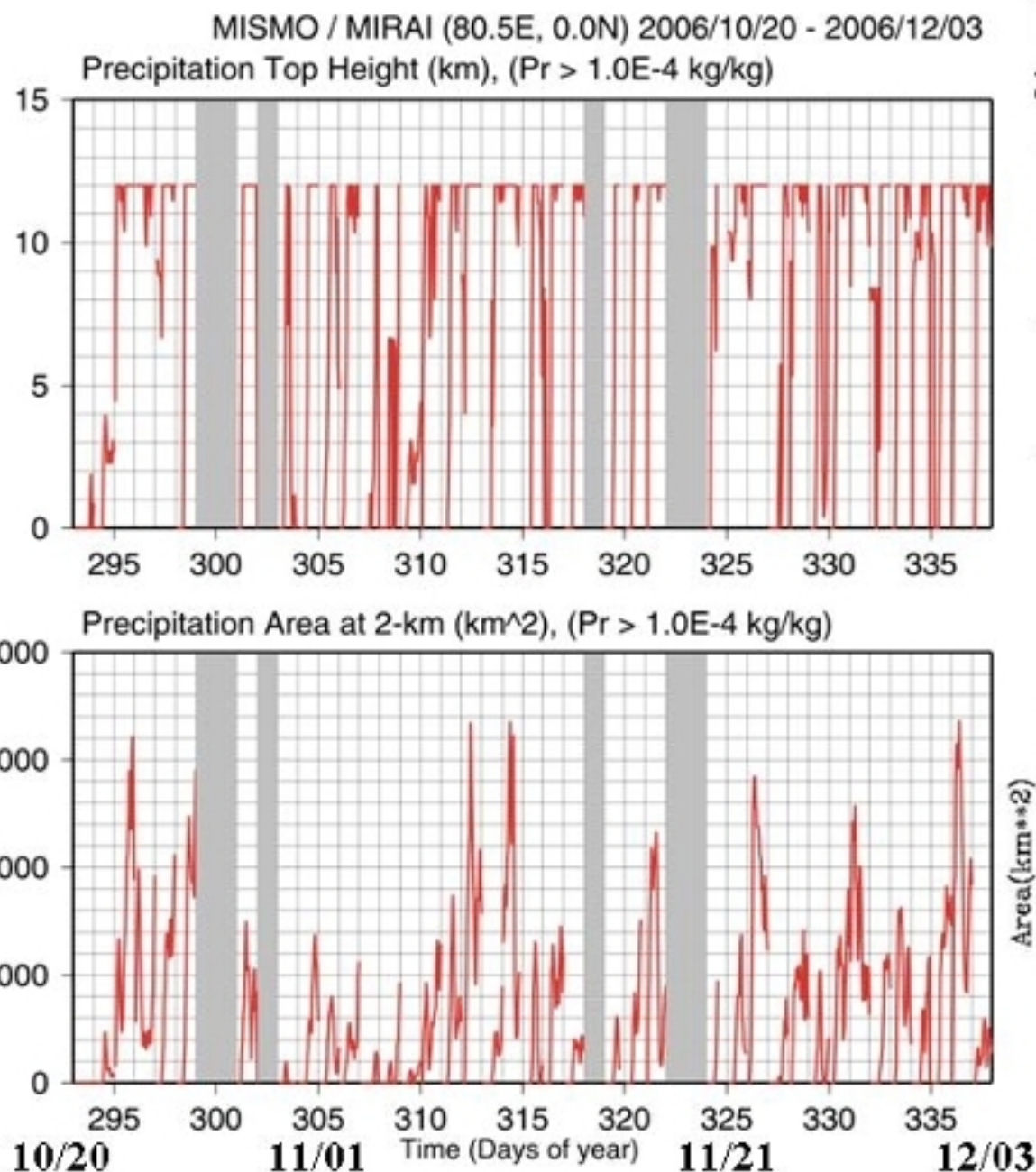


ラジオゾンデ観測の時系列に相当

- ・対流圏下層は湿潤。
- ・10/31~11/6にかけて対流圏中層が非常に乾燥している。

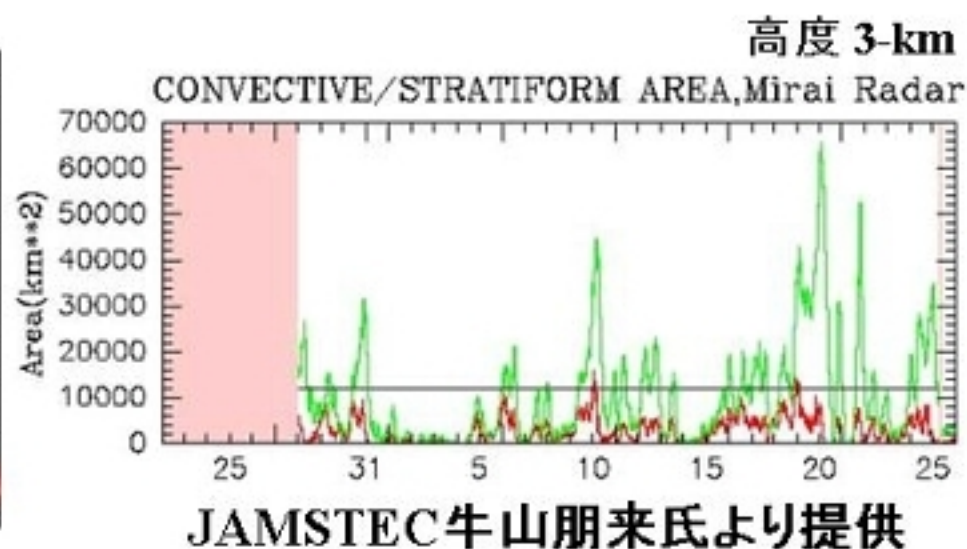


モデル結果から得られた降水域の面積と最大高度



ドップラーレーダー観測の時系列に相当

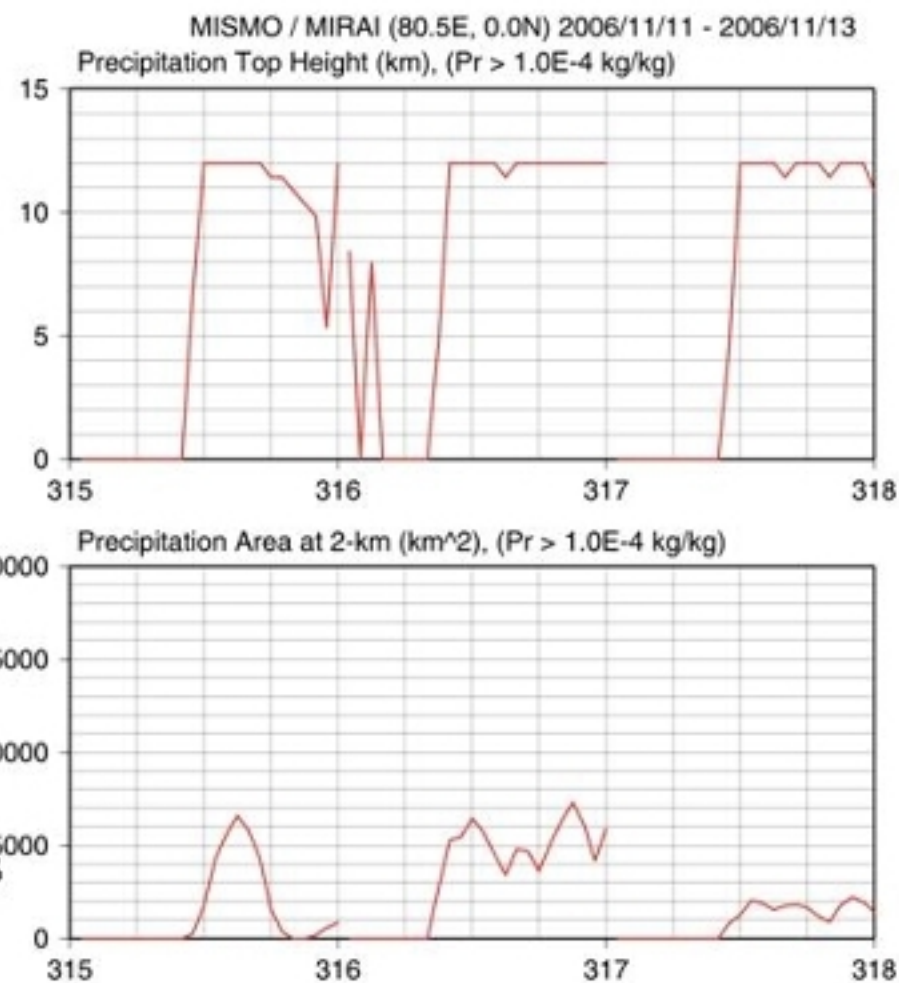
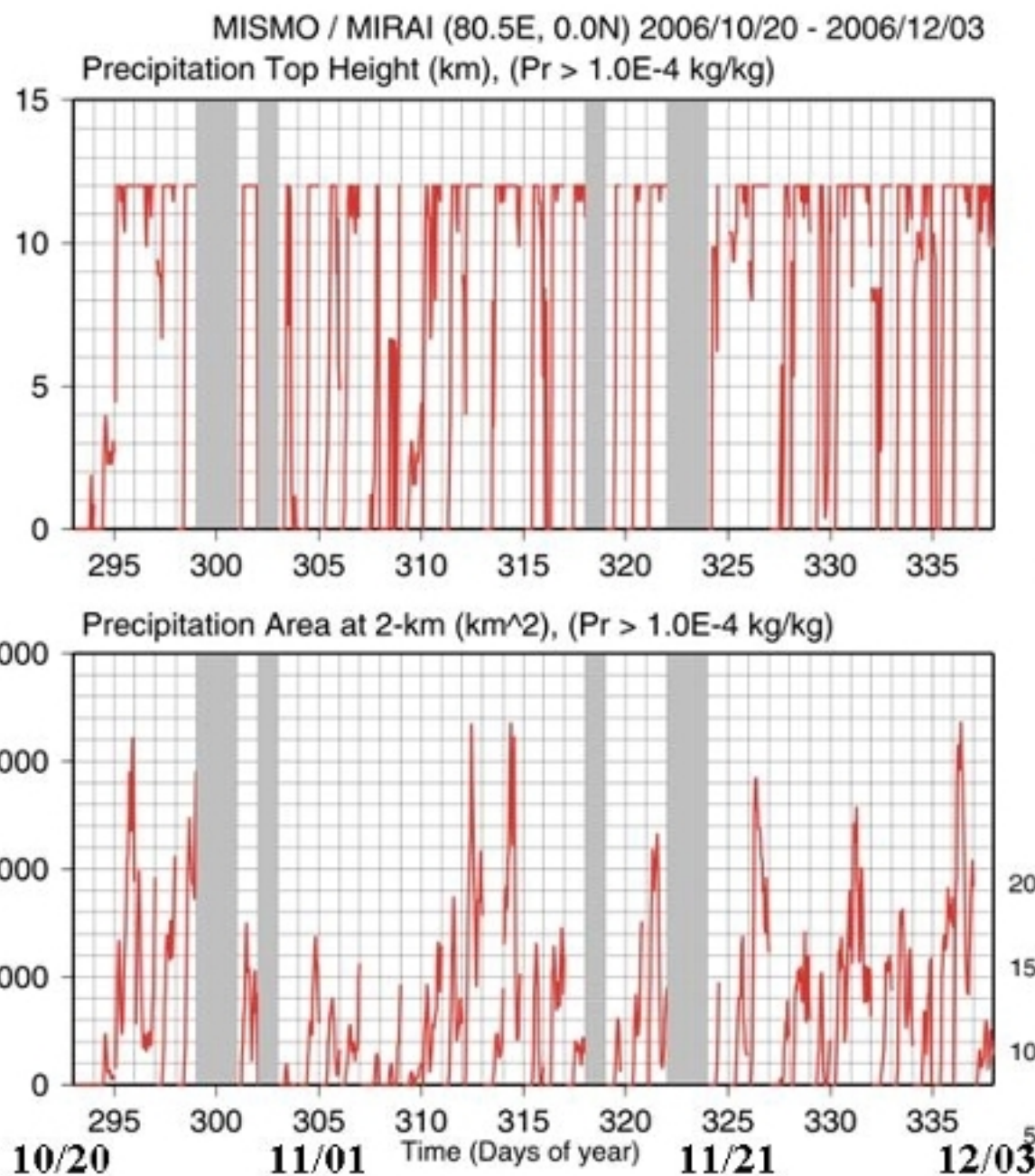
- ・個々の降水域(積乱雲)の比較は行えないが、雨域の特徴(面積・到達高度)などを用いた検証を行いたい。
- ・10/31~11/6にかけて降水域の面積が小さい(5000 km² 以下)。
- ・降水域の面積は観測結果における対流性降水域の面積と比較できる。



モデル結果から得られた降水域の面積と最大高度

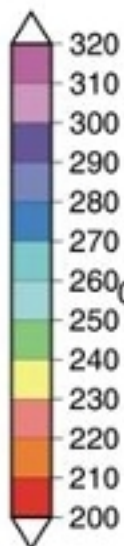
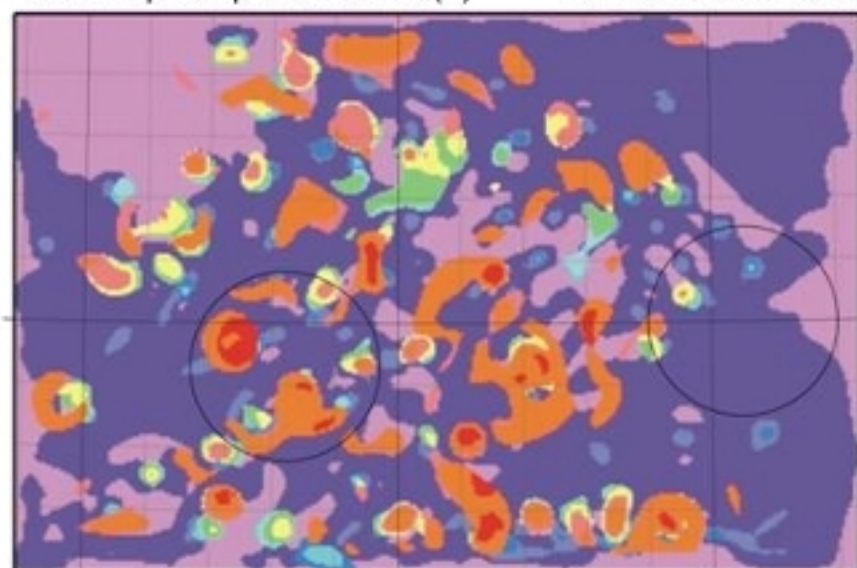
降水域の最大到達高度

- ・09Z以前は降水域なし
(スピナップ)
- ・計算開始 12 時間後に急激に
モデル上端高度にまで発達。

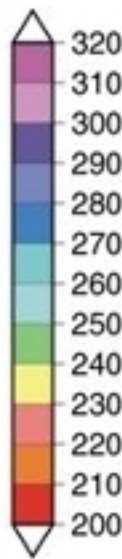
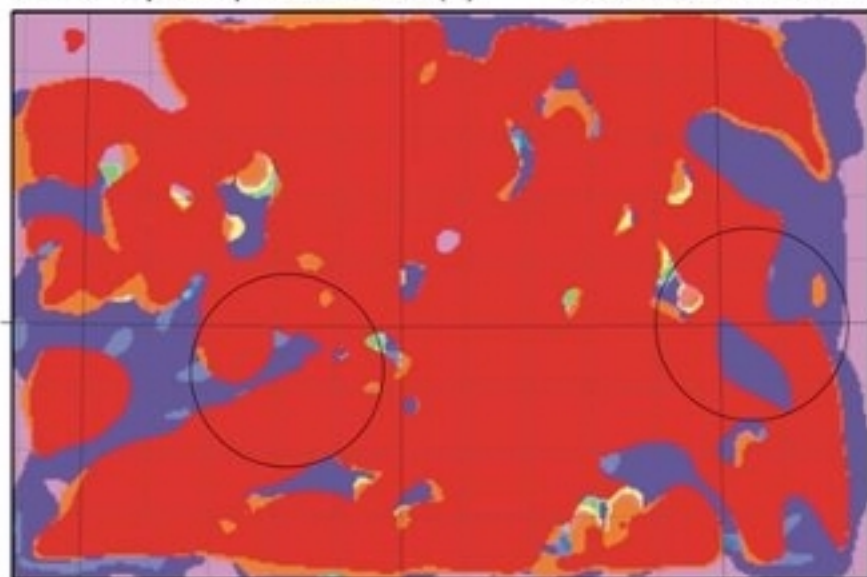


モデル結果から得られた雲頂温度(雲の閾値による差異)

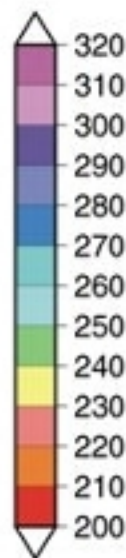
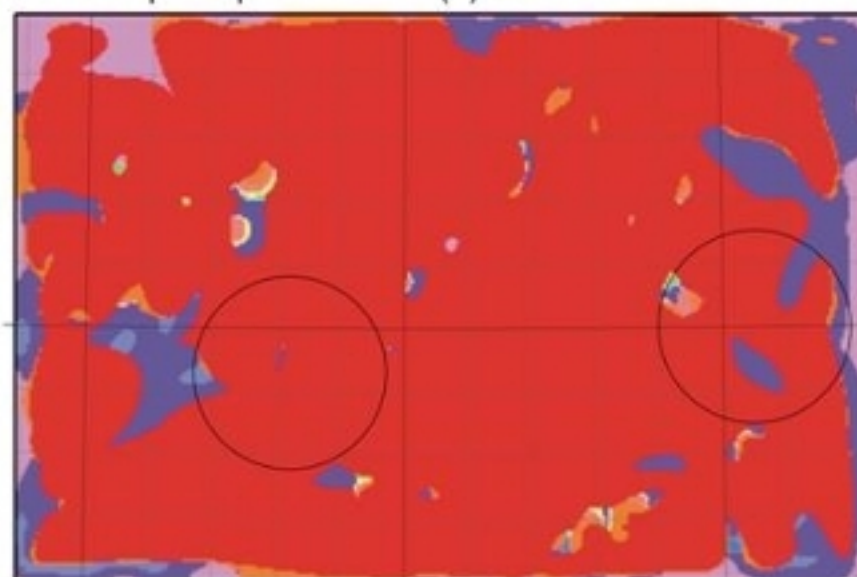
Cloud Top Temperature: TBB (K) 2006111221Z + 27 hours



Cloud Top Temperature: TBB (K) 2006111221Z + 27 hours



Cloud Top Temperature: TBB (K) 2006111221Z + 27 hours



雲 ($Q_c+Q_r+Q_i+Q_s+Q_g$) の閾値

左上: 10^{-4} (kg/kg)

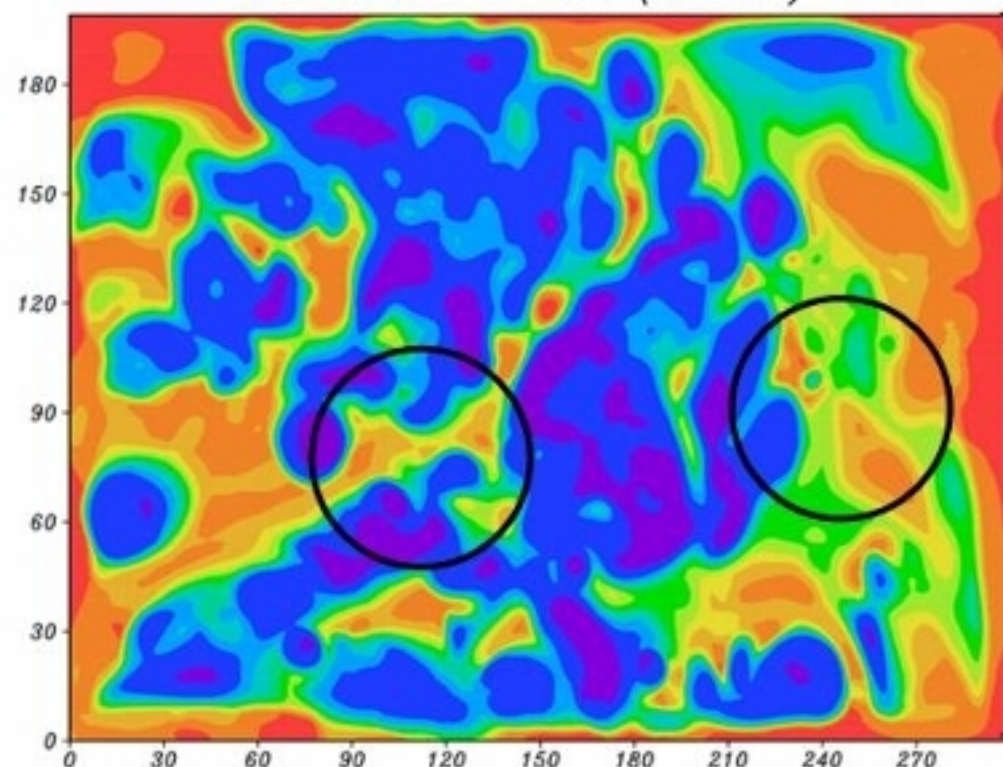
右上: 10^{-5} (kg/kg)

左下: 10^{-6} (kg/kg)

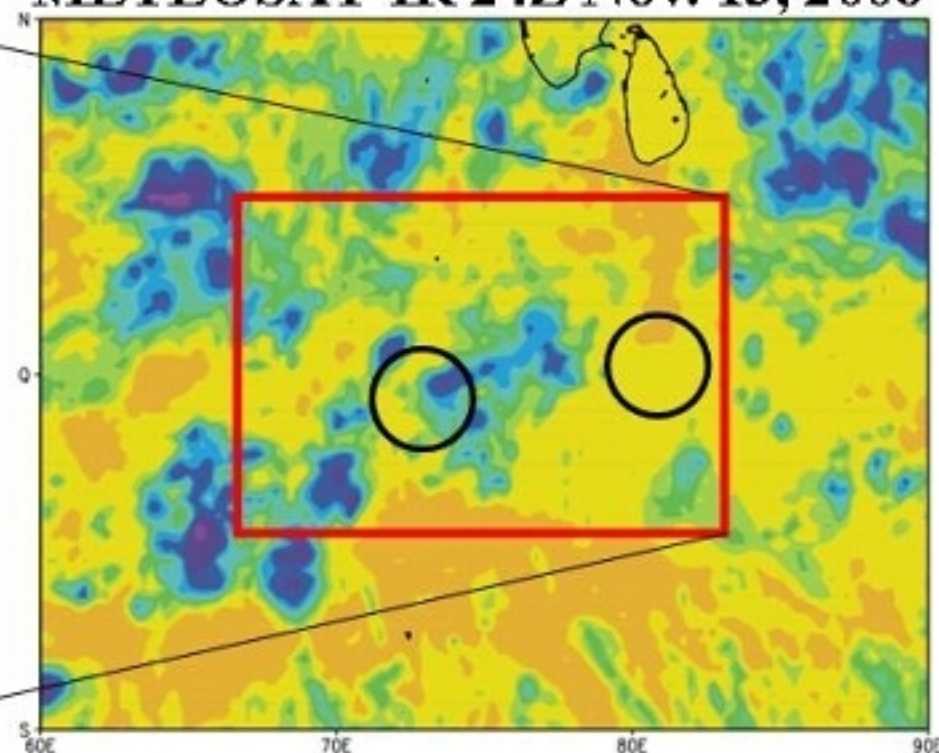
雲の閾値の決め方により
 T_{BB} (相当値) の分布が大きく異なる。

モデル結果から得られたIRイメージと観測結果 (METEOSAT) の比較

Tb at 10.8 micron (097200)



METEOSAT-IR 24Z Nov. 13, 2006



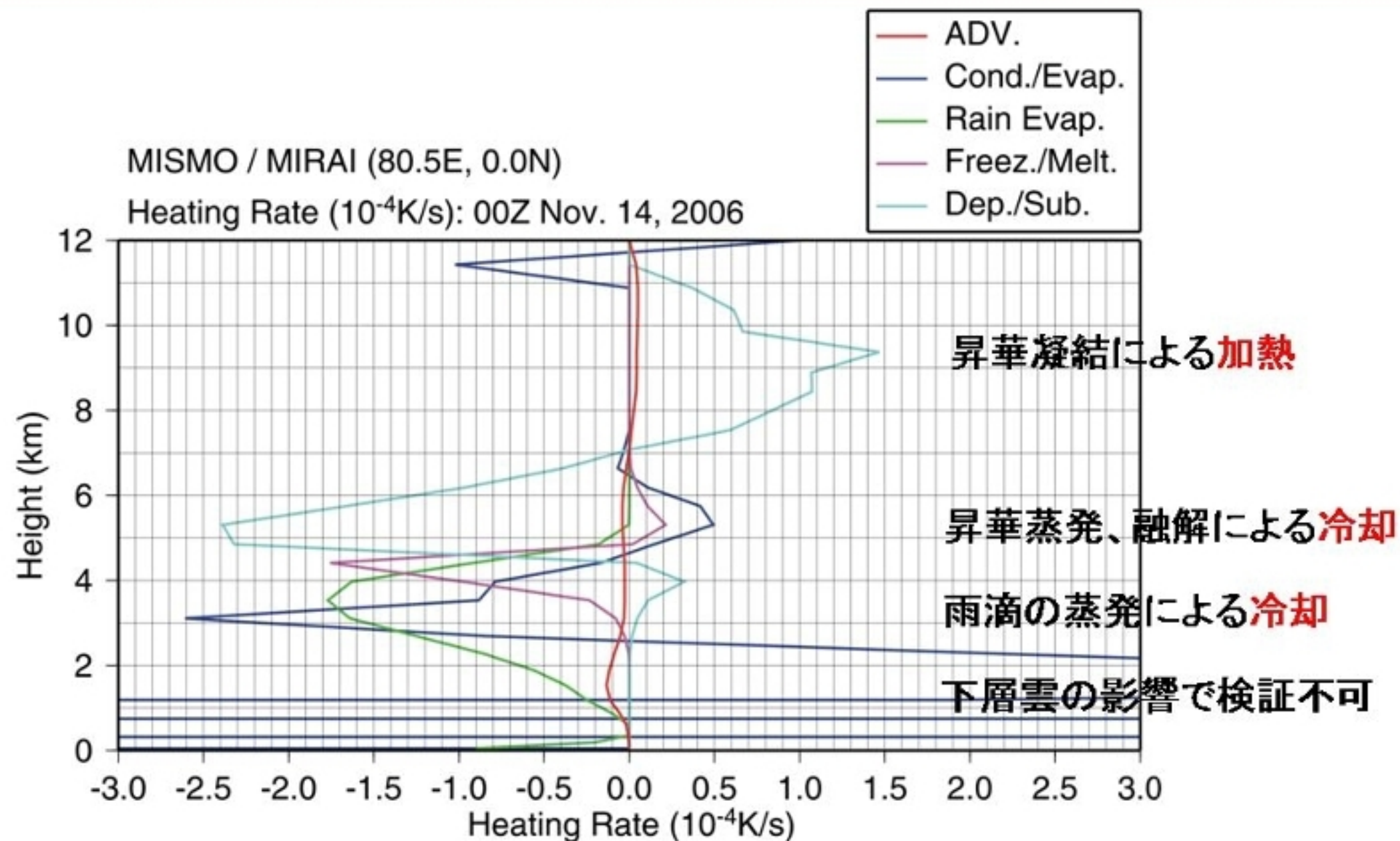
きちんと放射伝達方程式を解いて
 T_{BB} を計算。増永浩彦氏より提供。



copyright 2006 EUMETSAT

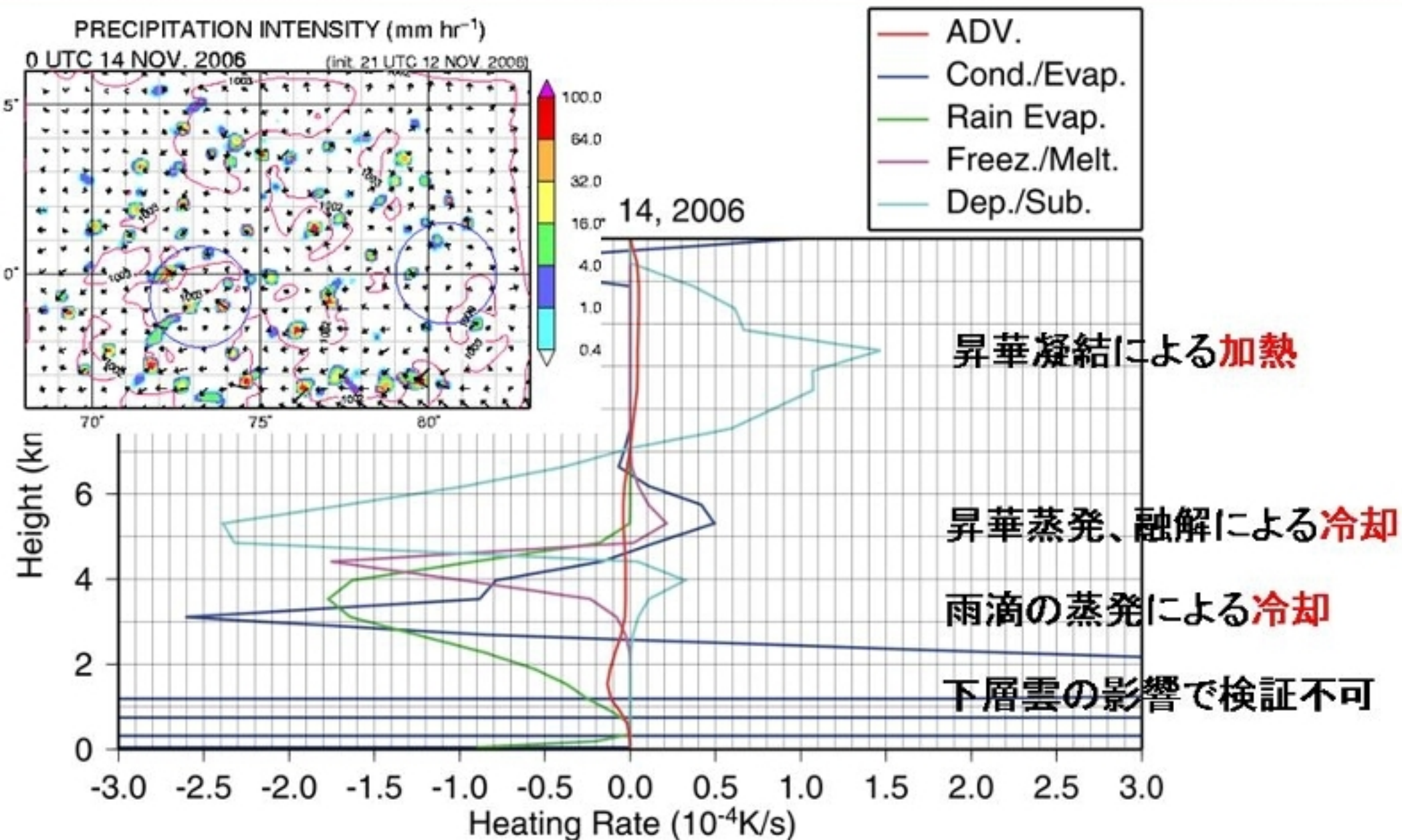
- ・みらいとガン島の高い雲域 (降水システム) は再現
- ・高い雲域が広がりすぎている印象がある。
- ・CReSSの微物理過程 (主に氷晶過程) に改良の余地がある。

レーダー観測域での大気の加熱プロファイル



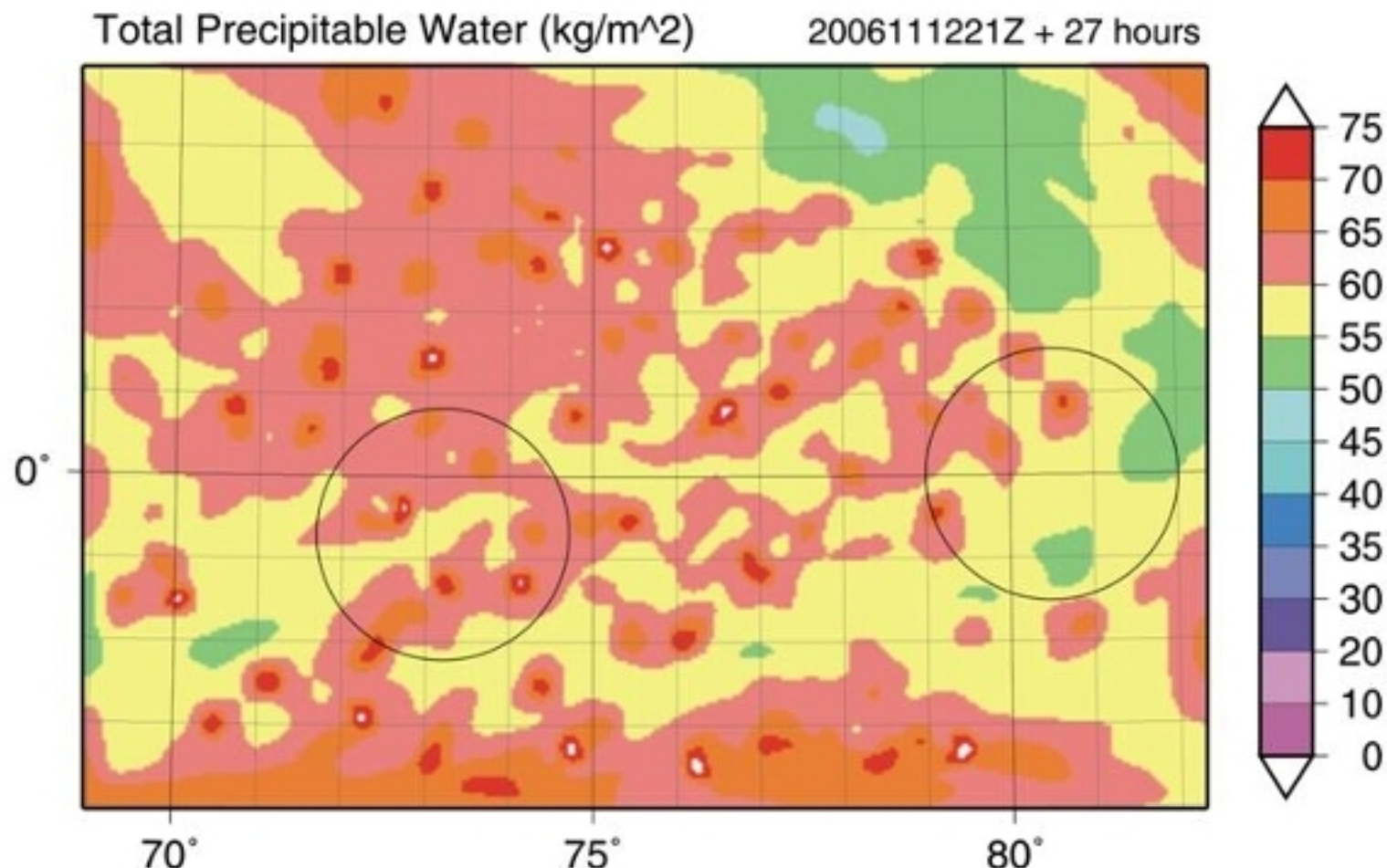
- ・ 対流システムのうち**層状域の加熱プロファイル**に似ている。

レーダー観測域での大気の加熱プロファイル



- 対流システムの中の**層状域の加熱プロファイル**に似ている。

モデル結果から得られた可降水量の水平分布



- ・ ラジオゾンデデータから観測点における可降水量の時間変化量を取得可能。
- ・ 衛星データ (TRMM-TMI:21GHz, AQUA-AMSR/E) より軌道に沿った帯状領域における空間的な分布を取得可能。

まとめ

MISMO期間中の熱帯インド洋域における対流活動を対象とした毎日のシミュレーション実験を実施した。

・得られた知見

- ・深い対流システムが発生した。
- ・いくつかのケースについては、実際の現象を再現していると考えられるものもあった。
- ・スピナップに要する時間は6~9時間程度必要である。
- ・ある領域における加熱プロファイルを示した。

・浮かび上がった問題点

- ・地上における相対湿度が観測結果に比べて非常に大きくなり、結果として境界層雲が形成されてしまった。
 - 境界層上端における積雲による水蒸気の上層への輸送を再現できていなかったためであると考えられる。
 - モデルの水平解像度をより細かくして実験を実施するか、浅い積雲のパラメタリゼーションの導入を検討すべきであろう。
- ・深い対流が発達しすぎ、結果として広く上層雲が存在してしまった。
 - 微物理過程(主に氷晶過程)に改良の余地がある。



Thank you

ご清聴ありがとうございました。



参考文献

- Klemp, J.B., Wilhelmson, R.B., 1978: The simulation of three-dimensional convective storm dynamics. *J. Atmos. Sci.*, **35**, 1070-1096.
- Klemp, J.B., Wilhelmson, R.B., 1978: Simulations of right- and left-moving storms produced through storm splitting. *J. Atmos. Sci.*, **35**, 1097-1110.
- Louis, J. F., 1979: A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere. *Bound.-Lay. Meteorol.*, **17**, 187-202.
- Tsuboki, K., and Sakakibara, A., 2001: CReSS User's Guide. 210pp, (in Japanese).