



気象庁現業全球モデル(GSM)の 積雲対流スキーム

氏家将志*¹、下河邊明¹、齊藤 慧¹、米原仁¹、佐藤均¹、
長澤亮二¹、中川雅之^{2,1}

1:気象庁予報部数値予報課

2: 気象研究所台風研究部

本日の内容

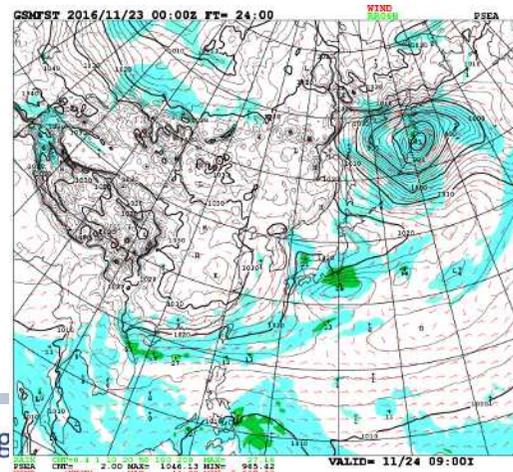
- GSMにおける積雲対流スキームの役割
- GSMの積雲対流スキームの概要
 - 採用している積雲モデル(概念モデル)を中心に紹介
 - GSMの積雲対流スキームも概念モデルやその数学的記述があって、それを基に解いている(不確実なパラメータチューニングばかりやっているわけではない)、という点が伝われば、と思います。
- 最近の積雲対流スキームの改良
 - 上記の積雲モデルの見直しをした例

GSMにおける積雲対流スキームの 役割

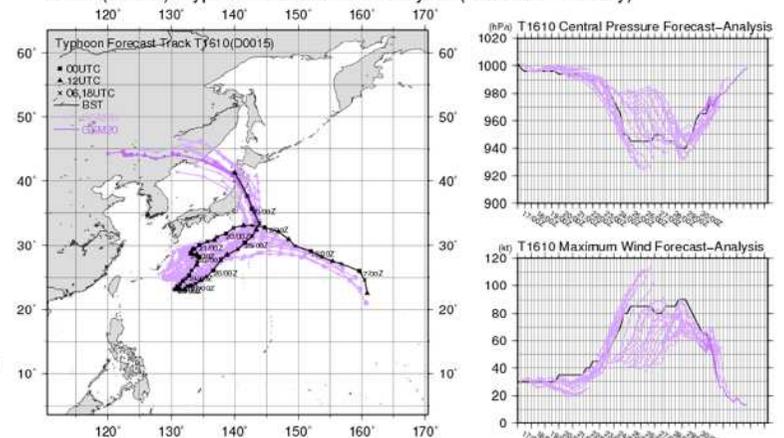


その前に: 現業数値予報モデルとしての のGSM

- 気象庁全球モデル(Global Spectral Model,GSM)は複数の時空間スケールの現象を予測対象とし、いろいろな用途に使われている
 - 天気予報、週間天気予報、1か月予報、季節予報の基礎資料
 - 数値予報システムとしては「全球数値予報システム」、「全球アンサンブル予報システム」、「季節アンサンブルシステム」が運用され、それぞれのシステムの予報モデル(大気モデル)にGSMが使われている。
 - 台風進路、強度予報の基礎資料
 - 解析システムの第一推定値
 - メソモデルの側面・上部境界条件
 - etc (波浪、化学、移流拡散モデル等への入力データ)

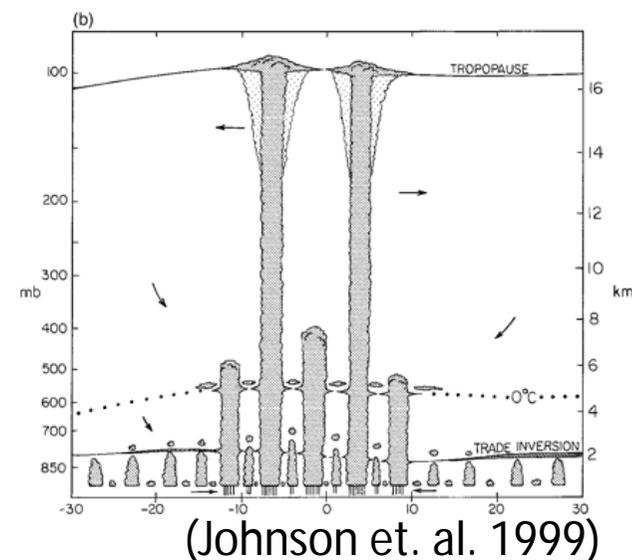


T1610(D0015) Typhoon Forecast and Analysis (Track and Intensity)

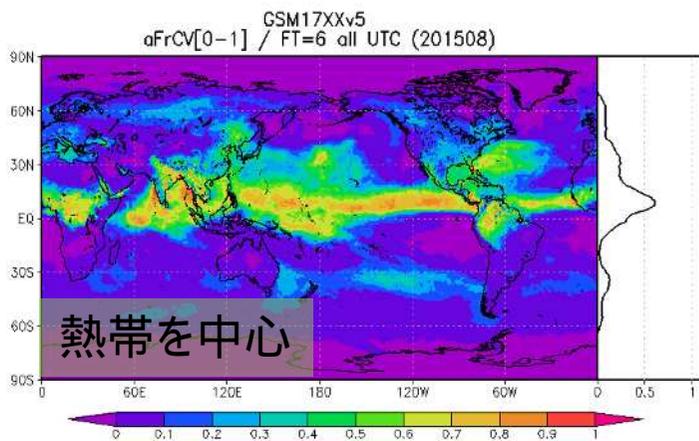


熱帯で見られる対流活動と積雲対流スキーム

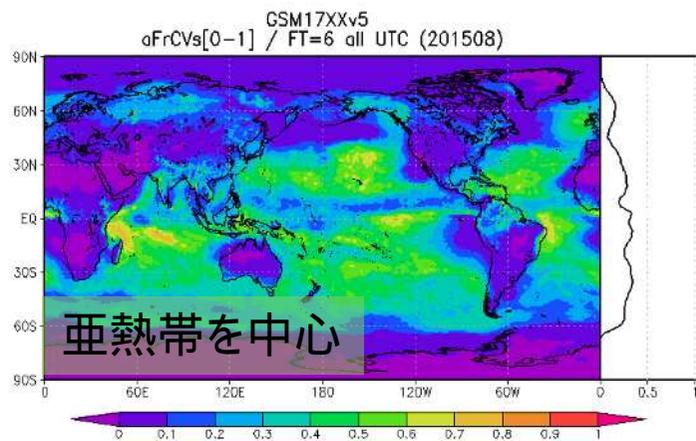
- 熱帯の対流活動はハドレー循環やウォーカー循環といった循環場を駆動する役割を担っており、積雲対流スキームによる対流活動の表現は全球モデルの性能に大きな影響を与えている。
- 熱帯の対流は、大まかに浅い対流 (shallow convection)、雄大積雲 (congestus)、深い対流 (deep convection) に分類される (右図)
- GSMでは浅い対流(雲頂が700hPaより下層)とそれ以外に分ける



深い対流の発動頻度 (2015年8月)



浅い対流の発動頻度 (2015年8月)



GSMの積雲対流スキームの概要



GSMの積雲対流スキームが解いているもの

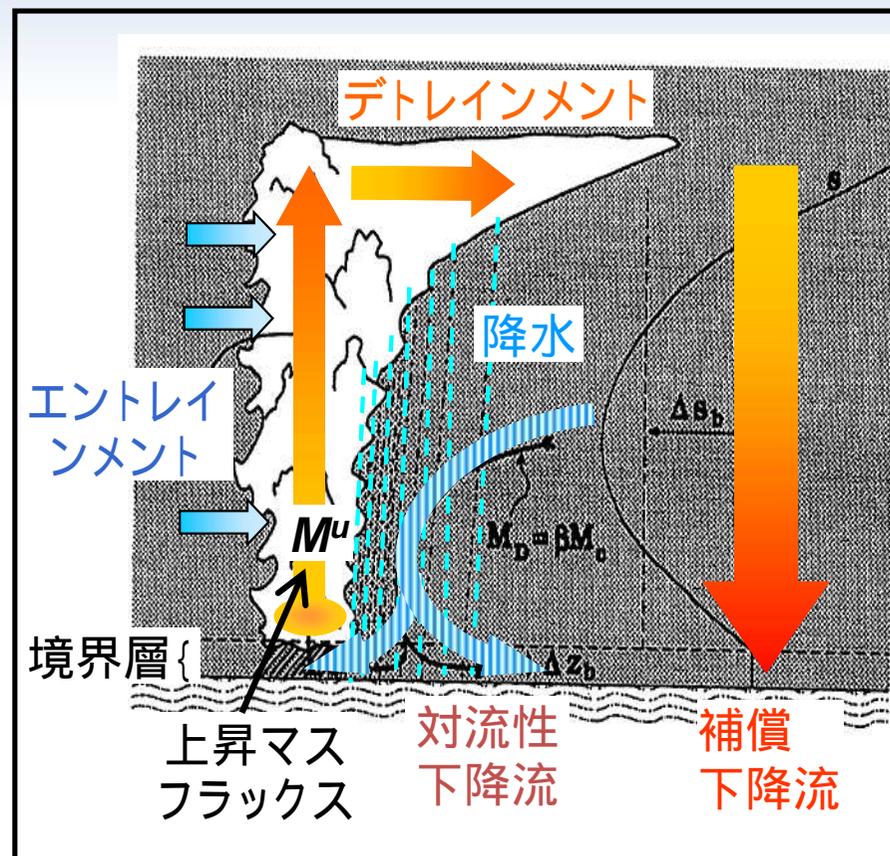
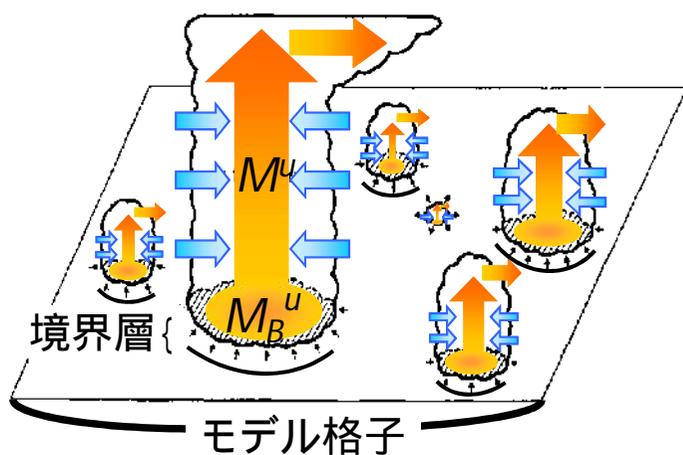
- 積雲対流スキームが最終的に計算するものは「サブグリッドスケールの運動による輸送 + 相変化」による格子平均値(熱・水・運動量)の時間変化率である

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{\phi}}{\partial t} \right)_{convection} = - \frac{\partial \overline{\rho \phi' w'}}{\partial z} + S_{\phi}$$

- 降水量は時間変化率を求める途中で計算される
- そのために「積雲モデル」・「クロージャー」を定式化し、方程式系を閉じさせて、それらを数値的に適切な手法で解く
 - **積雲モデル**: 対流域(対流性の上昇流・下降流)が満たしているであろう方程式系をいくつかの仮定をもとに構築し、対流域内の物理量を決める(前講演も参照)
 - クロージャー: 対流の強さそのものを格子平均値(GSMでは、雲仕事関数から雲底マスフラックスを計算する)を使って決める(前講演も参照)
 - (参考)トリガー: 積雲対流スキームが発動するかどうかを診断する。GSMでは力学過程によるCAPEの時間変化率(DCAPE)が負だと、積雲対流スキームの発動を抑制させている。(本講演では解説略)

積雲モデル(プリュームモデル)

- アンサンブル型のマスフラックススキーム(プリュームモデル)(Arakawa and Schubert, 1974)を採用している。
- 雲底が境界層トップ付近にあるとし、簡単のため900hPa(第13層)に固定する。
- 900~100hPaまでのモデル各層を雲頂とする積雲の集合(アンサンブル)を考える。(現GSMでは最大47種類)
- 環境場へのデトレインメントは雲頂のみで起こる。
- 雲頂では浮力が0になる。



- 【Emanuel(1994)に加筆】
なお、求めるマスフラックスは47種類の各プリュームのマスフラックスの合計となる。

$$M = \sum_{i=1}^{47} M_i = \sum_{i=1}^{47} \eta_i M_{Bi}$$

積雲モデル(プリュームモデル)

前のスライドを数式で書くと、以下のようなになる。積雲の1種類ずつについて、以下の方程式系を満たすことを仮定している。

$0 = -\frac{\partial M_n^u}{\partial z} + E_n - D_n$	質量保存則
$\left(\rho \frac{\partial \sigma_n^u s_n^u}{\partial t}\right) = 0 = -\frac{\partial M_n^u s_n^u}{\partial z} + E_n \bar{s} - D_n s_n^u + L_v c_{ln} + L_s c_{in}$	乾燥静的エネルギーの予測式
$\left(\rho \frac{\partial \sigma_n^u h_n^u}{\partial t}\right) = 0 = -\frac{\partial M_n^u h_n^u}{\partial z} + E_n \bar{h} - D_n h_n^u + L_i c_{in}$	湿潤静的エネルギーの予測式
$\left(\rho \frac{\partial \sigma_n^u q_n^u}{\partial t}\right) = 0 = -\frac{\partial M_n^u q_n^u}{\partial z} + E_n \bar{q} - D_n q_n^u - c_{ln} - c_{in}$	比湿の予測式
$\left(\rho \frac{\partial \sigma_n^u q_{ln}^u}{\partial t}\right) = 0 = -\frac{\partial M_n^u q_{ln}^u}{\partial z} - D_n q_{ln}^u + c_{ln} - R_{ln}$	雲水量の予測式
$\left(\rho \frac{\partial \sigma_n^u q_{in}^u}{\partial t}\right) = 0 = -\frac{\partial M_n^u q_{in}^u}{\partial z} - D_n q_{in}^u + c_{in} - R_{in}$	雲氷量の予測式

「対流性上昇流(下降流)域は平衡しており、鉛直輸送と、エントレインメント・デトレインメントとソース項(凝結・凝固、雲から降水への変換etc)でバランスしている」というモデルを採用している。エントレインメント・デトレインメント・ソース項それぞれの妥当性(項の有無も含む)がモデルの予測精度に影響する。

この式を雲底から雲頂まで鉛直積分することで、対流域内の熱・水・運動量のプロファイルや降水量を計算する。雲底での値は別途決める(今日の講演では説明略)

積雲モデル(プリュームモデル)

前方 乾燥静的エネルギー

$$\left(\rho \frac{\partial \sigma_n^u s_n^u}{\partial t} \right) = 0 = \underbrace{-\frac{\partial M_n^u s_n^u}{\partial z}}_{\text{鉛直輸送}} + \underbrace{E_n \bar{s} - D_n s_n^u}_{\text{環境場から対流域への エントレインメント および対流域から環境 場へのデトレインメント}} + \underbrace{L_v c_{ln} + L_s c_{in}}_{\text{凝結・凍結}}$$

雲水量

$$\left(\rho \frac{\partial \sigma_n^u q_{ln}^u}{\partial t} \right) = 0 = \underbrace{-\frac{\partial M_n^u q_{ln}^u}{\partial z}}_{\text{鉛直輸送}} - \underbrace{D_n q_{ln}^u}_{\text{対流域から環 境場へのデト レインメント}} + \underbrace{c_{ln}}_{\text{凝結}} - \underbrace{R_{ln}}_{\text{雲水から降水への 変換}}$$

式
式

「対流性上昇流(下降流)域は平衡しており、鉛直輸送と、エントレインメント・デトレインメントとソース項(凝結・凝固、雲から降水への変換etc)でバランスしている」というモデルを採用している。エントレインメント・デトレインメント・ソース項それぞれの妥当性(項の有無も含む)がモデルの予測精度に影響する。

この式を雲底から雲頂まで鉛直積分することで、対流域内の熱・水・運動量のプロファイルや降水量を計算する。雲底での値は別途決める(今日の講演では説明略)

格子平均場へのフィードバック (熱・水の例)

対流域の面積は十分に小さいと仮定し $\overline{\rho\phi'w'} = \rho(\overline{\phi w} - \overline{\phi}\overline{w}) \sim M(\phi^u - \overline{\phi})$ とみなす。

最終的に格子平均場(環境場)の時間変化率は以下のように計算される。

乾燥静的エネルギー

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial \bar{s}}{\partial t} &= \underbrace{-\frac{\partial}{\partial z} (\rho \overline{s'w'})}_{\text{輸送}} + \underbrace{\sum_n (L_v c_{ln} + L_s c_{in})}_{\text{凝結・凝固}} - \underbrace{L_v e}_{\text{降水の蒸発}} - \underbrace{L_f m}_{\text{降水の融解}} \\ &= \underbrace{\sum_n D_n (s_n^u - \bar{s})}_{\text{デトレインメント}} + \underbrace{\sum_n M_n^u \frac{\partial \bar{s}}{\partial z}}_{\text{補償下降流}} - \underbrace{L_v e}_{\text{降水の蒸発}} - \underbrace{L_f m}_{\text{降水の融解}} \end{aligned}$$

湿潤静的エネルギー

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial \bar{h}}{\partial t} &= \underbrace{-\frac{\partial}{\partial z} (\rho \overline{h'w'})}_{\text{輸送}} + \underbrace{\sum_n L_i c_{in}}_{\text{凝固}} - \underbrace{L_f m}_{\text{降水の融解}} \\ &= \underbrace{\sum_n D_n (h_n^u - \bar{h})}_{\text{デトレインメント}} + \underbrace{\sum_n M_n^u \frac{\partial \bar{h}}{\partial z}}_{\text{補償下降流}} - \underbrace{L_f m}_{\text{降水の融解}} \end{aligned}$$

・「輸送 + 対流域での相変化(ソース、シンク)」を「対流域から環境場へのデトレインメント + 補償下降流」の形にして格子平均場の時間変化率を計算する。

・最終的には乾燥静的エネルギー・湿潤静的エネルギーの時間変化率を気温・比湿の時間変化率に変換して時間積分を行う。



最近の積雲対流スキームの改良



積雲対流スキームの改良

- ここ数年は、積雲対流スキームの構成要素のうち、前述の積雲モデル(概念モデル)の明確化・改善に力を入れてきた。
 - 概念モデルやその定式化・離散化の妥当性を明確にしないままパラメータ調整してきたことへの反省に基づく
- 同時に、積雲モデルが不十分なことを補償するために、(意図的・非意図的問わず)積雲対流スキーム内外にあるアドホックに取り入れられていた扱いを見直した。
 - どうしても必要なチューニングパラメータ等は精査した上で残す
- 最終的にモデルを更新する時は積雲対流スキームの変更だけでなく、複数の過程の変更と同時に行う。
 - モデルの誤差は複数の過程の相互作用の結果現れるため。

積雲対流スキーム(+雲関連スキーム)の最近の変更

その他のスキームの変更も含めた全体の概要は明日の専門分科会(C102、米原)も参照

- 2016年3月

- (積雲)エネルギー補正式の変更
- (積雲)雲底の静的エネルギー導出方法の変更(Jakob and Siebesma 2003)+摂動を与える
- (積雲)固体降水の融解の導入
- (積雲)対流性上昇流域の途中での雲から降水への変換
- (雲)積雲由来のPDFの揺らぎ幅調整の廃止
- (雲)雲氷落下過程の改良(τ に依存しないスキーム)
- (雲放射)短波放射に対する雲のオーバーラップの改良
- (雲放射)水雲の光学特性の見直し

- 2017年5月(25日現業化予定)

- (積雲)降水フラックス適正化
- (積雲)再蒸発・融解の改良
- (雲)再蒸発・融解の改良
- (雲)雲スキーム内での積雲過程による降水の併合廃止
- (雲放射)積雲に伴う雲・雲水量診断スキームの導入
- (雲放射)水雲粒有効半径診断手法の高度化

赤字:本講演で紹介する例

例1: 雲から降水への変換

- 以前のGSMは乾いてても湿ってても加熱率のプロファイルがトップヘビーだった。
 - 以前から指摘され、いろいろ調整がなされてきた
 - 対流圏上層の高温バイアスにもつながっていた
- 問題の本質は積雲モデルに足りない過程があったこと。
 - 対流性上昇流の途中で雲が降水に変換される過程がない(降水はすべて雲頂で生成される)ため、対流圏上層で凝固熱による浮力が増加する
 - 現在のGSMの枠組み(モデル層に雲頂があると仮定して、そこからエントレインメント率を逆算する方式)だと、繰り返し計算が生じるため計算時間はかかるが、必要な過程であると考え、2016年3月のGSM更新時に導入、2017年5月の更新で高速化

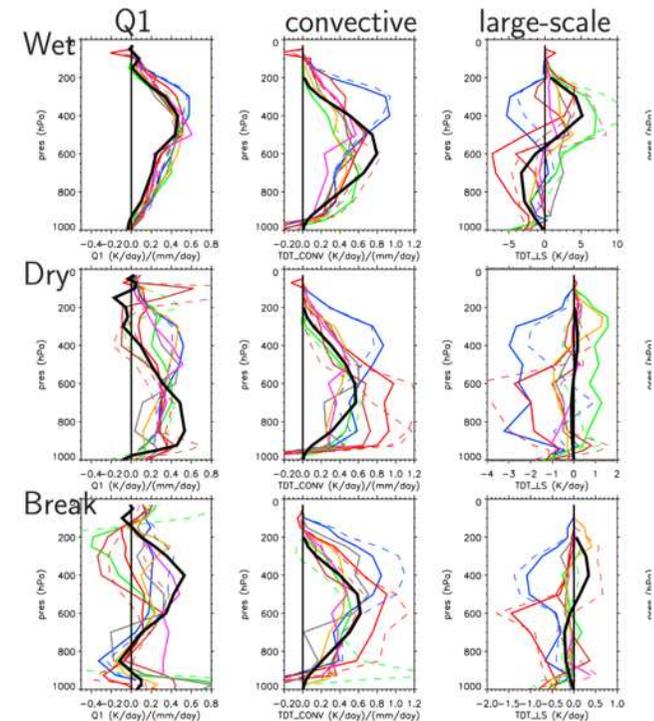


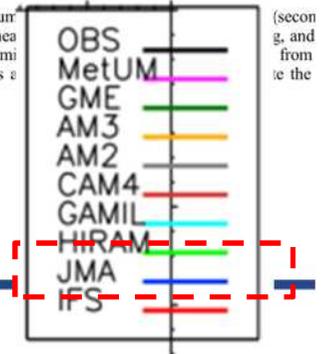
Figure 7. Mean profiles of (first column) precipitation normalized convective mass flux for the (top) wet, (middle) dry, and (bottom) break regimes. Dashed lines are for the third and fourth columns.

$$\left(\rho \frac{\partial \sigma_n^u q_{ln}^u}{\partial t} \right) = 0 = -\frac{\partial M_n^u q_{ln}^u}{\partial z} + -D_n q_{ln}^u + c_{ln} - R_{ln}$$

$$\left(\rho \frac{\partial \sigma_n^u q_{in}^u}{\partial t} \right) = 0 = -\frac{\partial M_n^u q_{in}^u}{\partial z} + -D_n q_{in}^u + c_{in} - R_{in}$$

本質はこれらの項があるかないか

Lin et al. (2012)

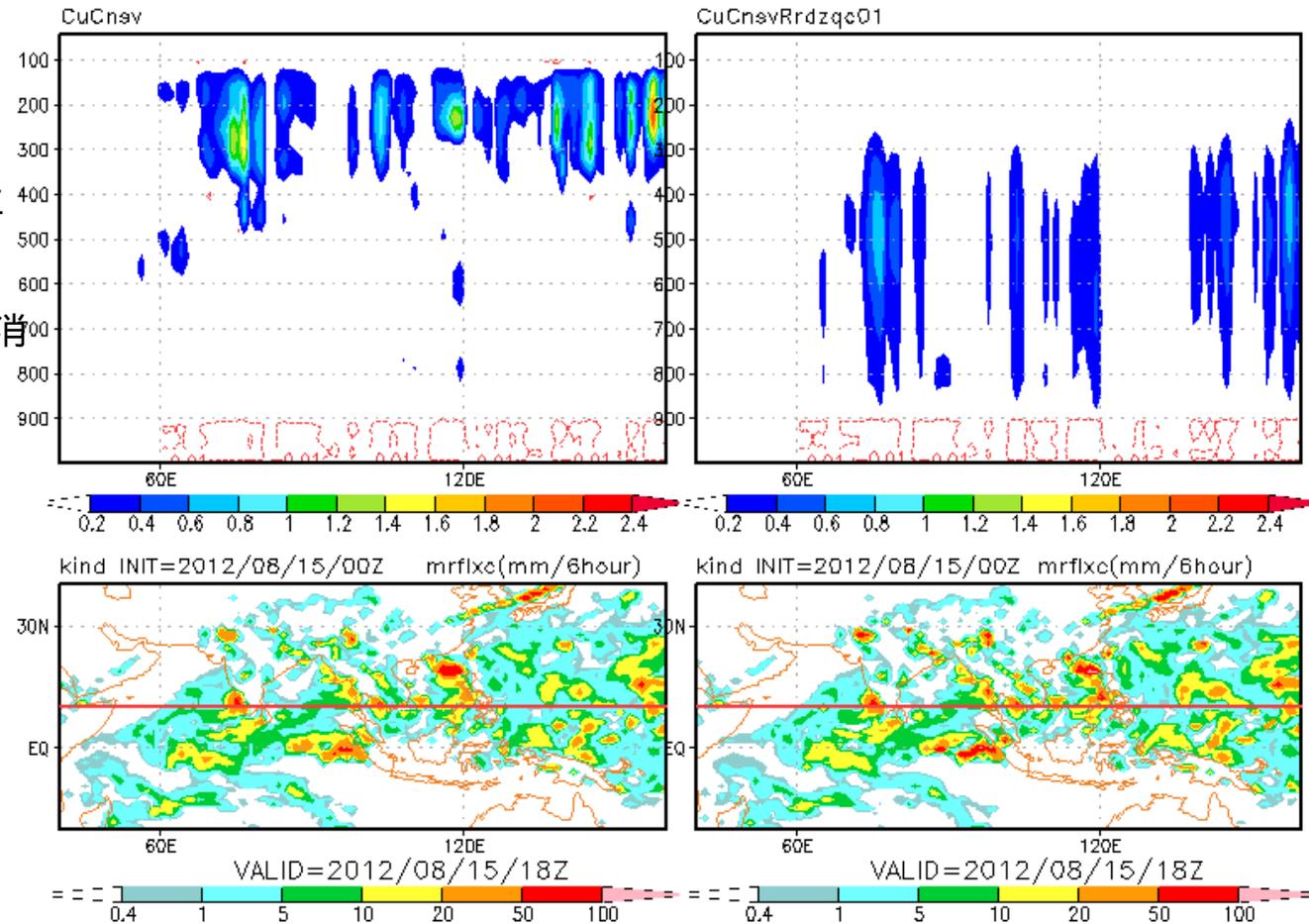


降水フラックスの生成

対流途中での降水変換なし. FT=24 lat=10 対流途中での降水変換あり

カラー: 降水フラックスの生成量(mm/6hr)

等値線: 降水フラックスの消散 (e.g. 降水の蒸発)量 (mm/6hr)



積雲対流スキーム起源の降水量(mm/6hr)

- *地上降水だけ見ると、両者の違いは小さい。しかし、「降水がどこで生成されたか」はまったく異なる。
- *左の図の場合、雲氷および雪が大量に対流圏上層で生成されるため、対流は凝固熱でより大きな浮力をもち雲頂付近のマスフラックスが大きくなる。結果として、加熱率がトップヘビーになる。
- *降水の3次元分布を見ることが重要であることを示すひとつの例でもある。



降水変換がなかったことの影響

- 地上の降水を見ただけではその影響は分からない、しかし…
 - 加熱率がトップヘビーになる、対流圏界面付近で気温が高温ドリフトする
 - 大量の雪と雲氷が対流圏上層で生成される
 - 雲氷は主に長波放射を通じて気温に影響
 - 影響が強すぎるため、雲頂の雲氷を人工的に鉛直再配分する処理があった(2016年3月に降水変換導入に併せて廃止)
 - 雪は落下し、融ける
 - 大量の融解冷却が計算安定性に悪影響を及ぼすため融解過程が停止されていた(2016年3月に降水変換導入に併せて復活、2017年5月に改良)
 - 代わりにエネルギー補正と呼ばれる人工処理が融解を補償していた。ただし、融解では起きないはずの乾燥ももたらしていた。
- などの弊害(概念モデルの欠点を人工的な調整でカバーする事態)が起きており、降水変換の導入と同時にそれらの調整も廃止または修正する必要があった。

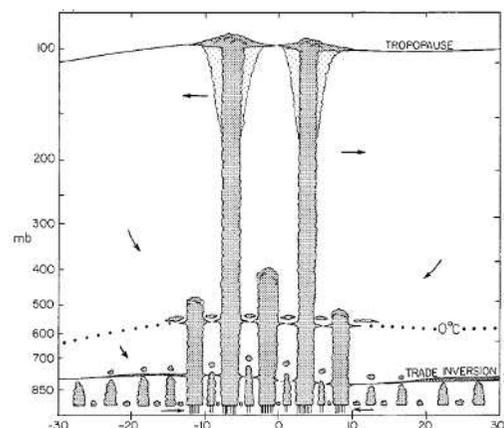
例2.1:融解過程再導入の例

2012年8月15日00UTC初期値 FT=24
前6時間に各層に雲頂を持つ積雲が発生した割合

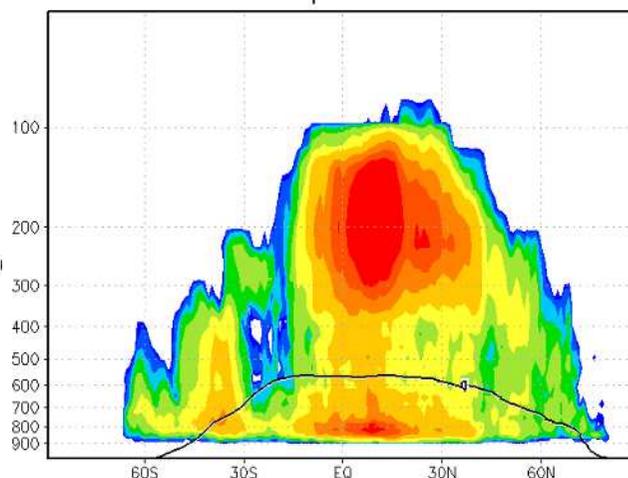
融解なし

融解あり

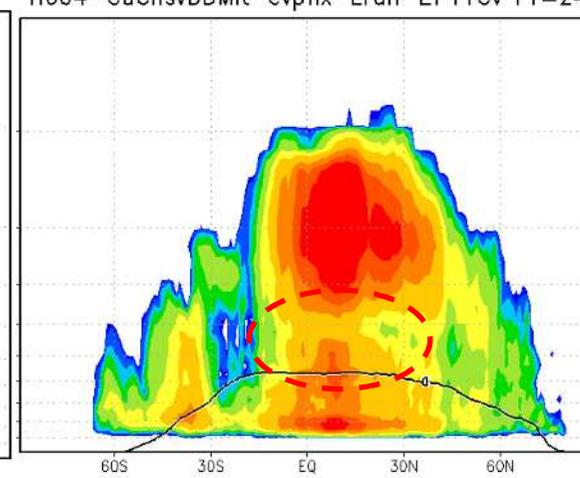
3つのモードの積雲の概念図
(Johnson et al. 1999)



H004-CuCnsvDD-evpfix-Lrun-Ef FrCv FT=24



H004-CuCnsvDDMit-evpfix-Lrun-Ef FrCv FT=24



・前述の降水変換を導入することで、エネルギー補正の修正 + 融解過程の再導入が可能になった。ただし、2016年3月の変更では安定性を考慮し、融解層は300hPa固定とかなり幅を持たせた。

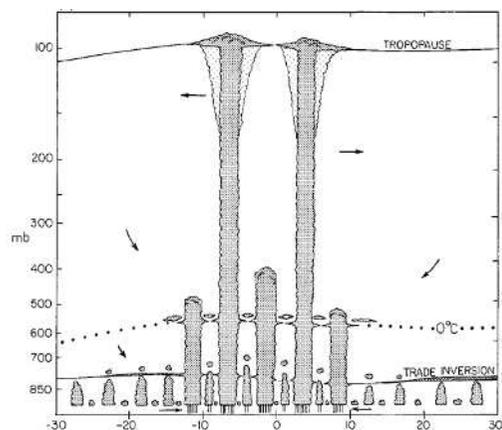
・0 線付近に雲頂を持つ積雲の頻度が増え、全体的に積雲スキームの発動頻度が増える。かつてのGSMには、0 付近に雲頂上を持つ、congestusに相当する箇所がほとんど存在していなかった。

例2.2:融解過程の改良

2017年5月の変更によって、対流性降水の融解の定式化を変更(緩和型の方程式)し、よりシャープな融解層を表現するようになった。

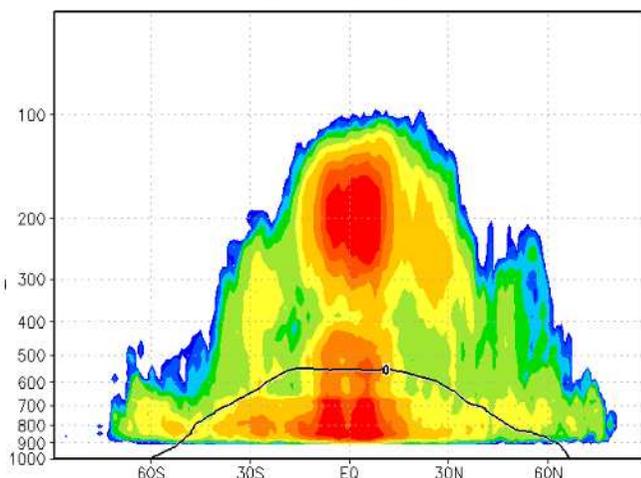
2017年5月11日12UTC初期値 FT=24

3つのモードの積雲の概念図
(Johnson et al. 1999)



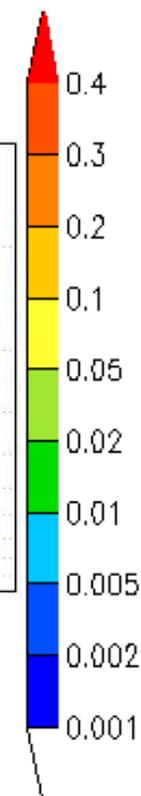
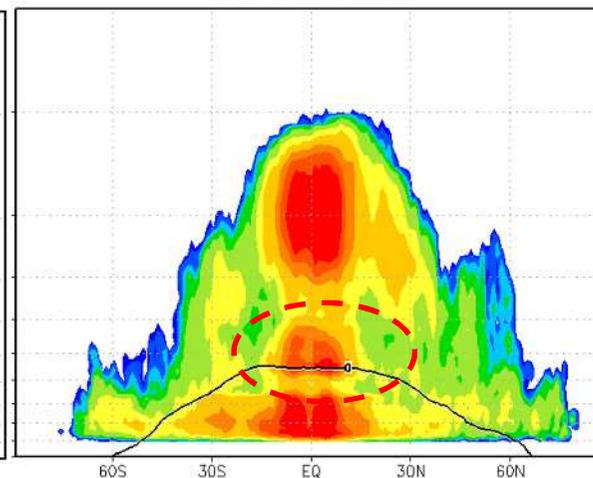
融解改良前

Rtn FrCv FT=24



融解改良後

JRtn FrCv FT=24



・熱帯で、積雲の3層構造がよりはっきりするようになった

まとめ

- 気象庁の現業全球モデル(GSM)の積雲対流スキームは大きな分類では「アンサンブル型のマスフラックススキーム」の一種
 - 格子内で複数種類の積雲(プリューム)モデルとそれらが満たす式を定式化し、数値的に解く。それらを使って格子平均の物理量の時間変化率を計算する。
- ここ数年は、積雲対流スキームの構成要素のうち、積雲モデルの見直しが行われ、特性が大きく変わった。
 - パラメタリゼーションといえど、方程式系の定式化・離散化をしっかりと行う点は力学過程と同じ。解く方程式系とその妥当性は明確にする必要がある。
 - 積雲モデルの整理・見直しによって、積雲モデルに足りない過程を補償するために取り入れられていたスキーム内外のアドホックな扱いも廃止された。

今後の課題

たくさんあるが、その一部として・・・

- 環境場への積雲の応答の理解、そのモデル化
 - 現在のGSMの積雲スキームは環境場に関係なく深い積雲が立ちやすい傾向がある。
 - エントレインメント、デトレインメントの扱いの改善が必要であると考えている。
 - エントレインメント率の対流性上昇流の速度を通じて環境場依存させるか(Chikira and Sugiyama 2010, アンサンブル型での適用例)、エントレインメント率を直接環境場に依存させるか(Bechtold et al. 2008, バルク型での適用例) etc・・・やりかたはさまざま。いずれのやり方にせよ理論的な背景や、アンサンブル型のマスフラックススキームの枠組みの中で定式化可能な手法かを明確にさせなければならない
- 積雲モデルを検証する観測(3次元)、理論
 - 雲・降水の3次元分布の改善は衛星輝度温度の全天候同化を進める上でも重要な課題となっている。