

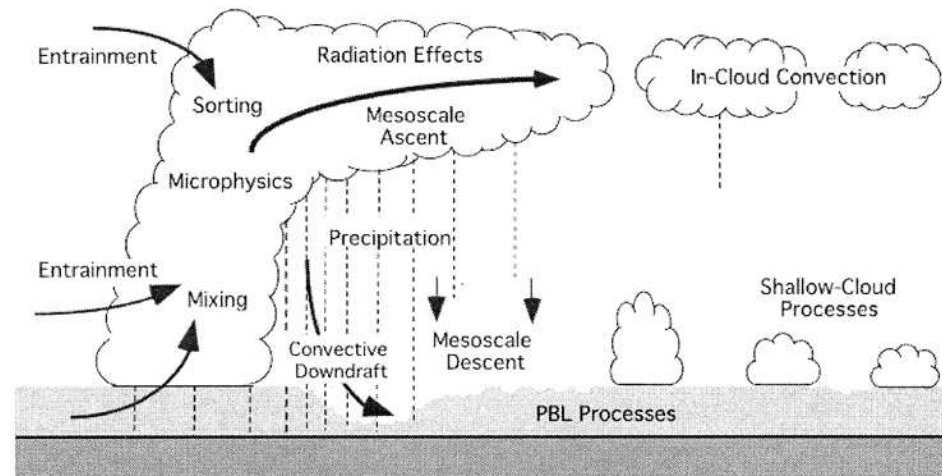


積雲対流パラメタリゼーションの概要

気象庁予報部数値予報課
松林健吾、原旅人

積雲対流という現象

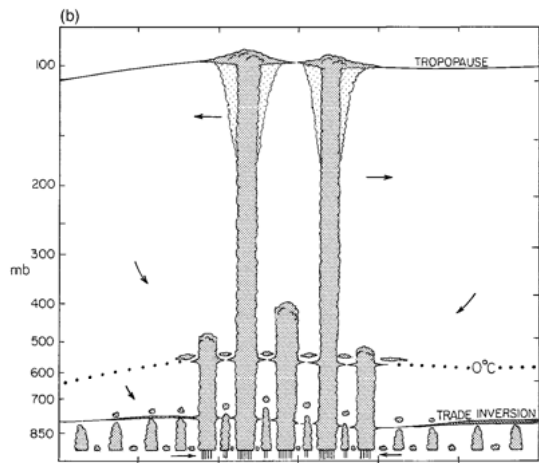
- 浮力を起源とする**運動量・熱・水蒸気**の**(鉛直) 輸送**
 - 大気で多く見られるのは、水蒸気の凝結を伴うもの (湿潤対流)
 - 浮力が鉛直方向の**運動エネルギー**に変換され、水蒸気が上空に輸送。
 - その過程において、凝結した水の一部が降水となる。
 - **幅広いスケールにまたがる、様々なプロセスが複雑に関わる。**



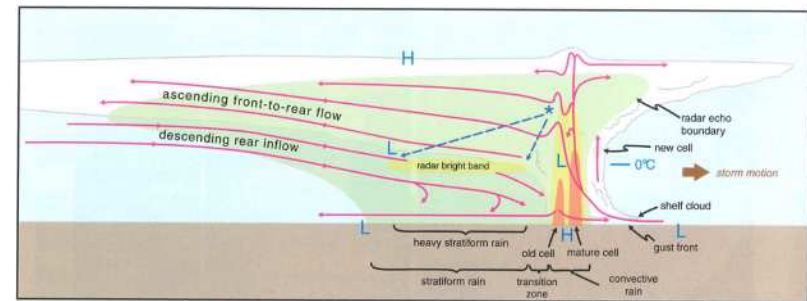
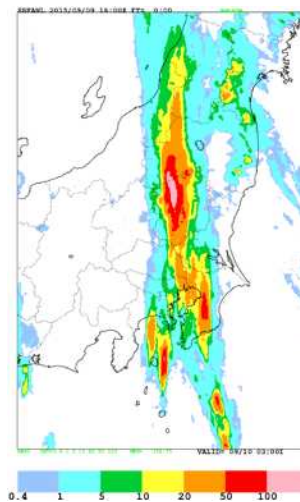
Arakawa(2004)

積雲対流という現象の重要性

- 熱帯における対流活動はハドレー循環やウォーカー循環といった基本的な循環場を担っており、全球モデルの性能に大きな影響を与えている。
- 防災を目的とするメソ・局地モデルでは、対流によって引き起こされる集中豪雨などが予測対象。
- 数値予報モデルの予測上、非常に重要。



(Johnson et. al. 1999)



(Houze et al. 1989)

平成27年9月関東・東北豪雨

数値予報モデルにおける対流

- 対流による熱・水蒸気・運動量の輸送は、グリッドスケールとサブグリッドスケールの項に分離される。

$$\frac{\partial \bar{\phi}}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(\overline{u\phi}) + \dots \quad \phi: \text{熱、水物質、運動量}$$

$$\overline{w\phi} = \overline{w}\bar{\phi} + \overline{w'\phi'}$$

- 対流パラメタリゼーションを使うような低解像度モデルでは、格子平均の鉛直速度 $\overline{w} \approx 0$
 - 上昇流と下降流はセットで現れることが多く、格子で平均すると鉛直速度はゼロ
- サブグリッドの鉛直流による鉛直輸送 $\overline{w'\phi'}$ をパラメタライズする必要

マスフラックス型対流スキーム

- 求めたいサブグリッドスケールの鉛直輸送 $\overline{w'\phi'}$ は、マスフラックスという量で記述する。

格子内に対流のある領域 σ と、その他の領域 (環境場) $(1 - \sigma)$ に分けて考える。それぞれにおける鉛直流と物理量をそれぞれ $\overline{w}^c, \overline{w}^e, \overline{\phi}^c, \overline{\phi}^e$ とすると

$$\overline{\phi} = \sigma \overline{\phi}^c + (1 - \sigma) \overline{\phi}^e$$

$$\overline{w'\phi'} = \overline{w\phi} - \overline{w}\overline{\phi}$$

$$= \sigma \overline{w\phi}^c + (1 - \sigma) \overline{w\phi}^e - [\sigma \overline{w}^c + (1 - \sigma) \overline{w}^e] \overline{\phi}$$

$$= (1 - \sigma) \overline{w'\phi'}^e + \sigma(1 - \sigma)(\overline{w}^c - \overline{w}^e)(\overline{\phi}^c - \overline{\phi}^e)$$

マスフラックスを次のように定義 $M = \rho\sigma(1 - \sigma)(\overline{w}^c - \overline{w}^e)$

$\sigma \ll 1, \overline{w'\phi'}^e = 0$ とすると、

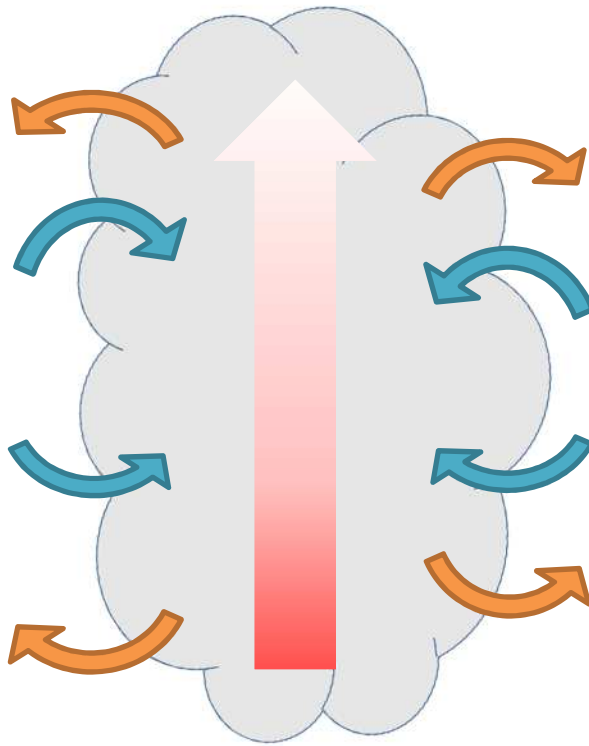
$$M \simeq \rho\sigma(\overline{w}^c - \overline{w}^e)$$
$$\rho \overline{w'\phi'} \simeq M(\overline{\phi}^c - \overline{\phi}^e)$$

マスフラックス型対流スキーム

- マスフラックス M と、対流域の割合 σ に対し、何らかの対流モデルを適用し、格子平均の運動量、熱、水蒸気量の輸送量を計算して、時間変化率を算出。
 - 気象庁で用いている積雲対流スキームはいずれもマスフラックス型
 - 主要なモデルセンター(ECMWF, Met Office, NCEPなど)で採用されている積雲対流スキームは大きくくりではマスフラックス型に属する

エントレインメント・デトレインメント

- ・ 積雲のマスフラックスには質量保存が成り立つ。
 - では、マスフラックス増減の原因には何があるか？



対流の側面では、水平乱流により対流内の空気と対流の外（環境場）の空気との混合が生じる。

環境場から対流内への流入
⇒エントレインメント
対流内から環境場への流出
⇒デトレインメント

エントレインメント・デトレインメント

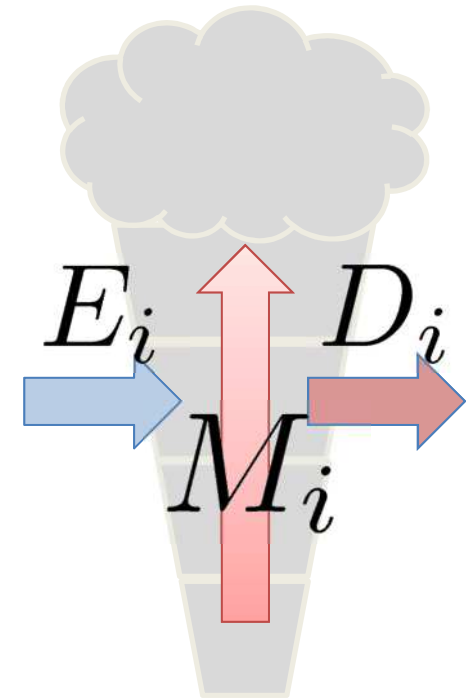
- 環境場の空気の取り込み: エントレインメント E_i
 - 環境場への対流内の空気の放出: デトレインメント D_i
- とすると、質量保存からマスフラックスを以下のようにモデル化する。

$$\frac{\partial \rho \sigma_i}{\partial t} = E_i - D_i - \frac{\partial M_i}{\partial z}$$

Steady state: 時間微分は0と仮定する

$$\frac{\partial M_i}{\partial z} = E_i - D_i$$

添え字 i は、何番目のプルームであることを示すもの。



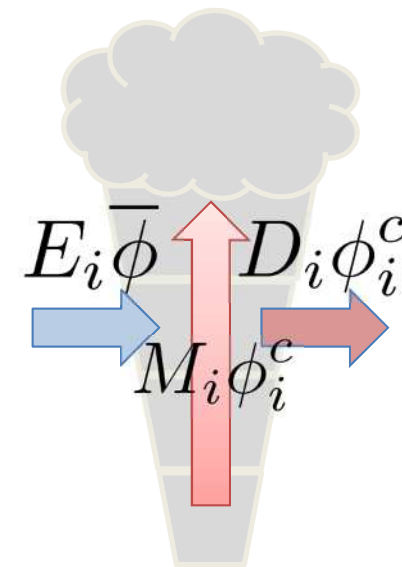
エントレインメント・デトレインメント

- 対流内の保存量の収支は、次のようにモデル化できる。
 - 増加量：エントレインメント×環境場の保存量
 - 減少量：デトレインメント×対流中の保存量

$$\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial(M_i \theta_i^c)}{\partial z} = E_i \bar{\theta} - D_i \theta_i^c + \frac{L}{C_p \pi} c_i$$

$$\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial(M_i q_{v,i}^c)}{\partial z} = E_i \bar{q}_v - D_i q_{v,i}^c - c_i$$

c_i : 凝結量



- エントレインメント、デトレインメント、相変化等の定式化が予測精度に大きく影響する。

クロージャー

- マスフラックスの鉛直プロファイルを得るためには、境界条件として雲底におけるマスフラックスの大きさを求める必要がある。

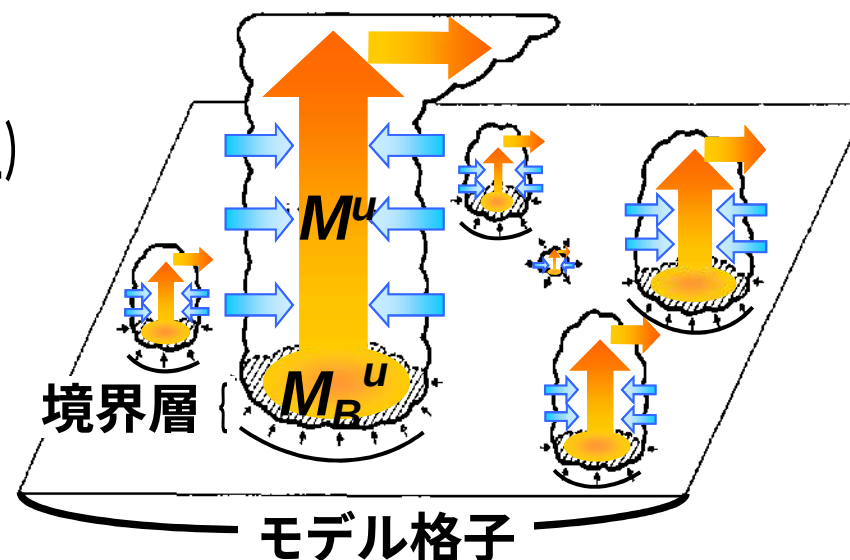
$$M_i(z) = \int_{cldbtm}^z [E_i(z) - D_i(z)] dz + \underline{M_{i,B}}$$

- 対流の強さを決める雲底マスフラックスは環境場から見積もれるものとする。
 - MSM: CAPEの大きさに基づいて M_B の大きさを計算
 - GSM: 雲仕事関数を用いて $M_{i,B}$ の時間変化率を計算
- トリガーに相当する仕組みを考えることもある。

スペクトル型とバルク型の積雲スキーム

- 格子内に積雲に伴うプルームは1つとは限らない。
- 大きなモデル格子の中には様々な高さを持つ積雲が存在する。それらをどう表現するかで、大雑把に以下の2通りがある。

1. アンサンブル型 (スペクトル型)
一つ一つのプルームを直接計算
GSMの積雲対流スキーム
2. バルク型
1つの実効的なプルームで
代表させて解く
MSMの積雲対流スキーム



[Arakawa and Schubert (1974)に加筆]

積雲対流パラメタリゼーションの必要性

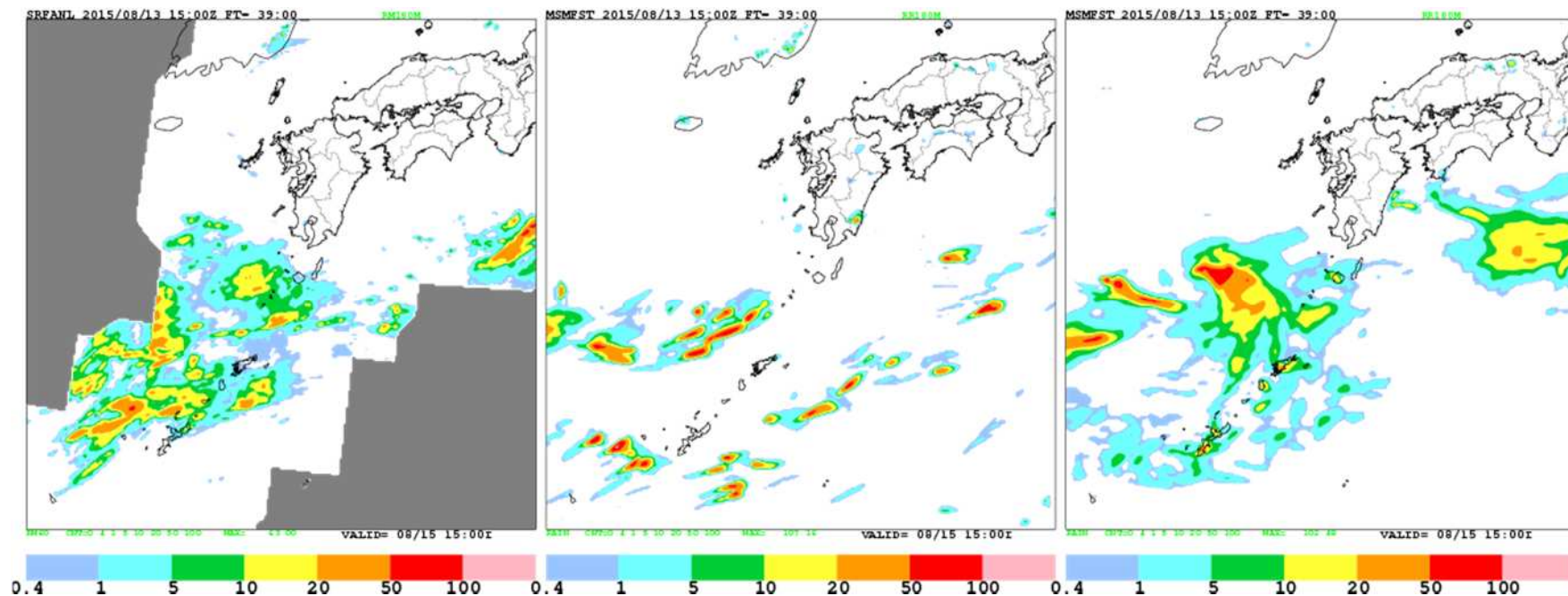
- 特に低解像度モデルでは、格子平均の鉛直速度はほぼゼロ
 - 連続性から、上昇流と下降流はセットで現れることが多く、格子で平均すると鉛直速度はゼロ
- 熱・水蒸気・運動量のサブグリッドの鉛直輸送をパラメタライズする必要がある。
- パラメタリゼーションがないと、
 - CAPEを増やす環境場の変化(日射による加熱等)は表現され、CAPEは蓄積される。
 - 同時に、日中は混合層が発達してCINを小さくする。
 - 過剰に蓄積されたCAPEが短時間に運動エネルギーに変換され、局所的に強い上昇流が計算される。

積雲対流パラメタリゼーションの必要性 (MSM)

解析雨量による実況

対流スキームなし

対流スキームあり



積雲対流パラメタリゼーションを用いることで、MSMがターゲットとする降水現象を適切に予測できるようになる。

対流による輸送が足りなく、循環場が正しく予測できないのが、積雲対流パラメタリゼーションを用いることで適切に予測できるようになる。

積雲対流パラメタリゼーションの必要性

- 低解像度モデルでは、格子平均の鉛直速度 $\overline{w} \approx 0$ であるため、対流スキームなしでは鉛直輸送が計算されない。
 - GSMでは循環場が適切に予測できない。
 - MSMでも $\overline{w}$ による輸送は十分に計算できない。
- 高解像度になると $\overline{w}$ が計算されるようになり、対流スキームなしで対流現象が計算可能といわれているが...
- 2kmのLFMでは対流に伴う現象が全て解像されているのか。

高解像度モデルにおける対流

Spectral decomposition of convective updraft mass-flux in a 250m resolution Radiative-Convective Equilibrium simulation using the Met Office LEM:

Resolvable

Grid-scale grey-zone

Sub-grid grey-zone

Sub-grid statistical equilibrium

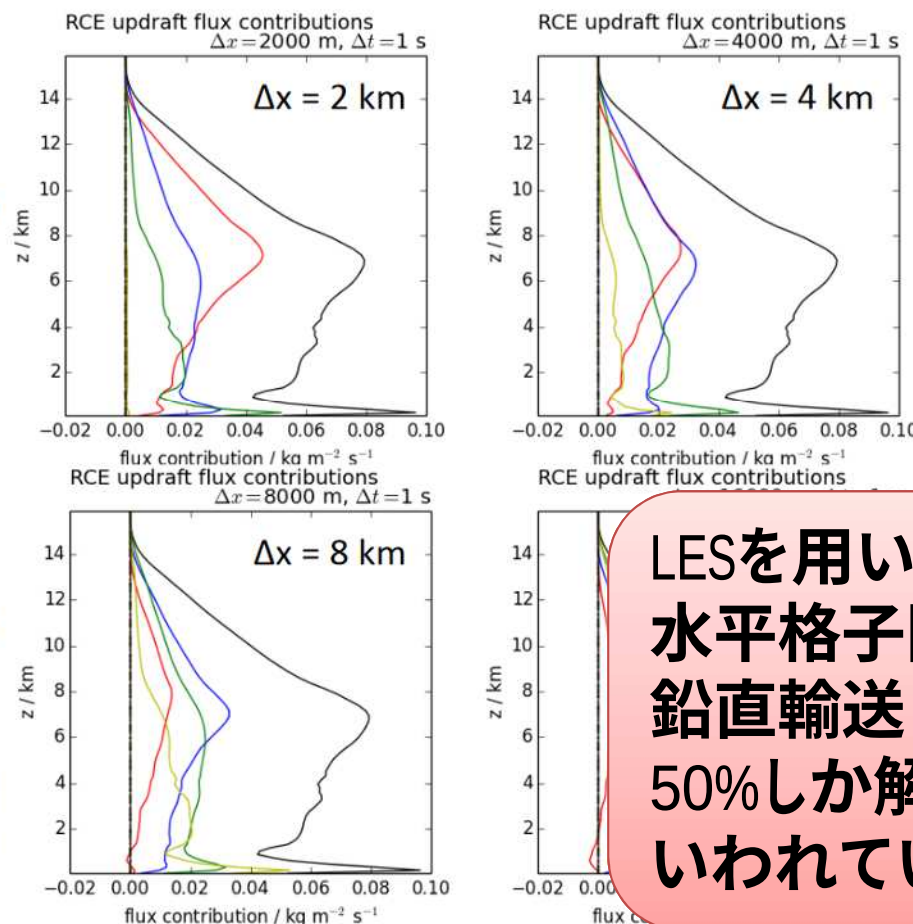
Total updraft mass-flux

- Grey-zone scales significant at all resolutions.

- Even at 2 km, only ~50% of the updraft mass-flux is resolvable.

- Even at 16 km, only ~50% of the mass-flux is in sub-grid statistical equilibrium.

- Updrafts are better-resolved in the upper troposphere than in the lower troposphere.



LESを用いた研究により、
水平格子間隔が2kmでも、
鉛直輸送（マスフラック）は
50%しか解像できないと
いわれている。

Michael Whittall (2015, Parameterization of Moist Processes for Next-Generation Weather Prediction)

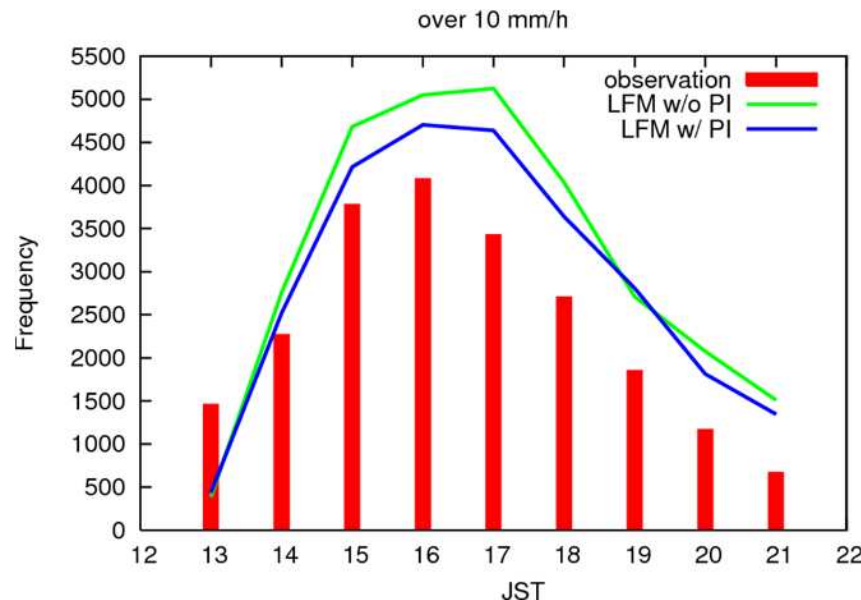
2km解像度LFMにおける対流

対流の立ち上がり (イニシエーション) は、格子内の細かいスケールの現象が引き起こす場合がある。

対流パラメタリゼーションを用いないと、

1. 格子平均で飽和し、浮力が正になるまで対流が生じないため、対流の立ち上がりが遅れる。
2. 対流が遅れると、過度に蓄積されたCAPEが一気に運動エネルギーに変換され、強すぎる上昇流・過大な雨を引き起こす。

LFMでは、対流のイニシエーションのパラメタリゼーション (PI) を導入。

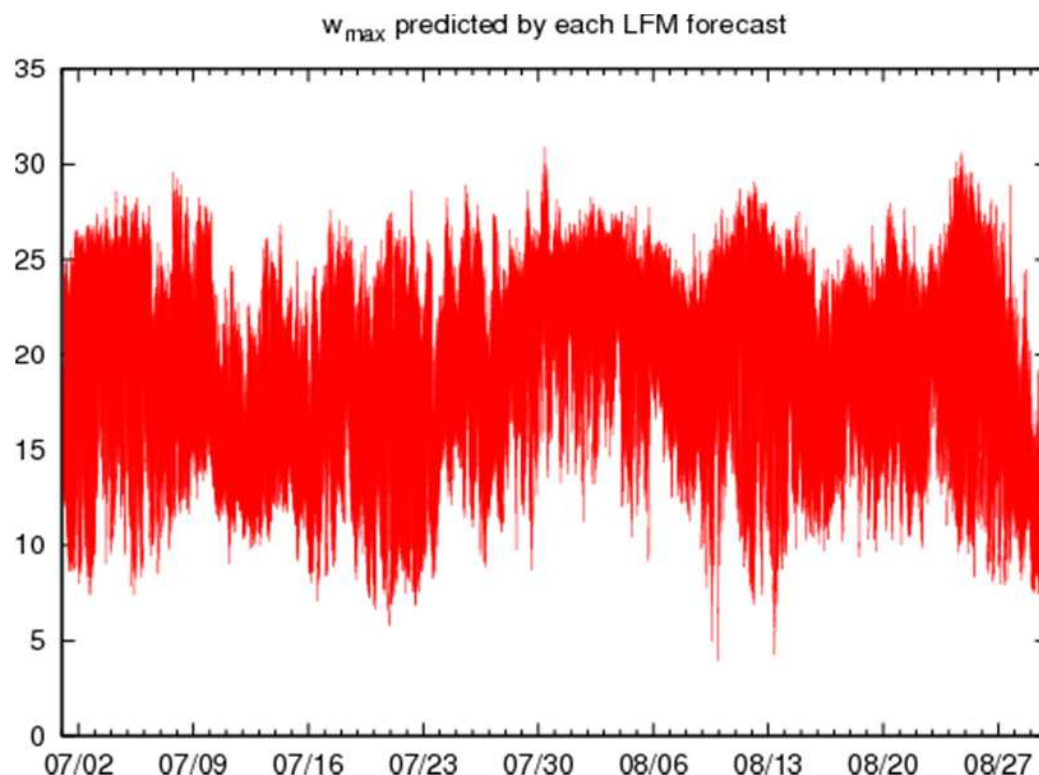


PIなしは、実況に比べて降水のピークの時間帯が遅れる

PI導入により、降水のピークの時間帯が観測と整合

2km解像度LFMにおける対流

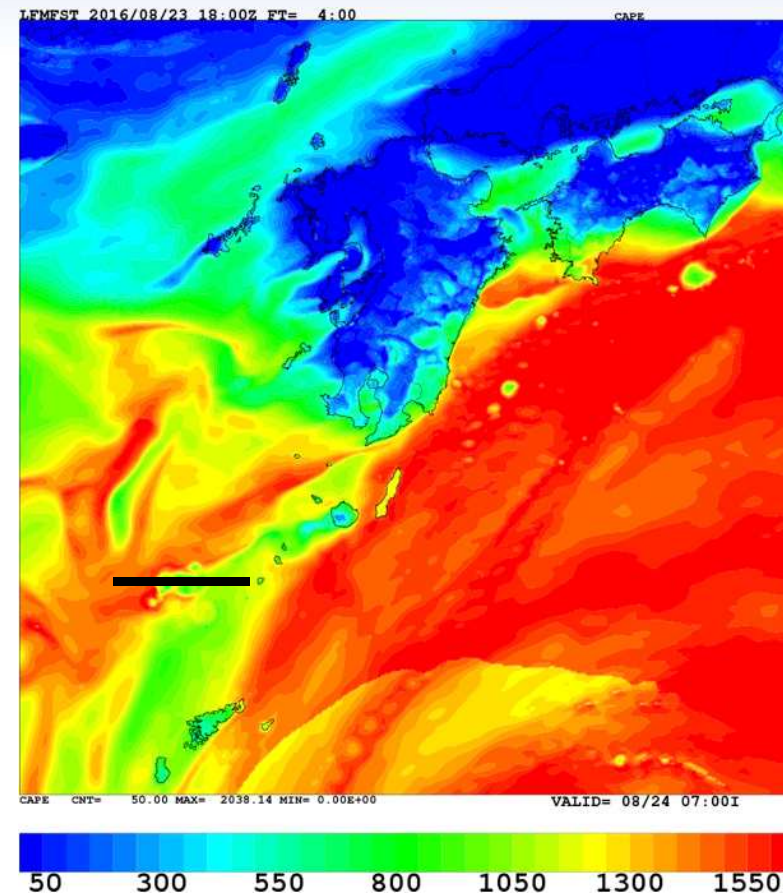
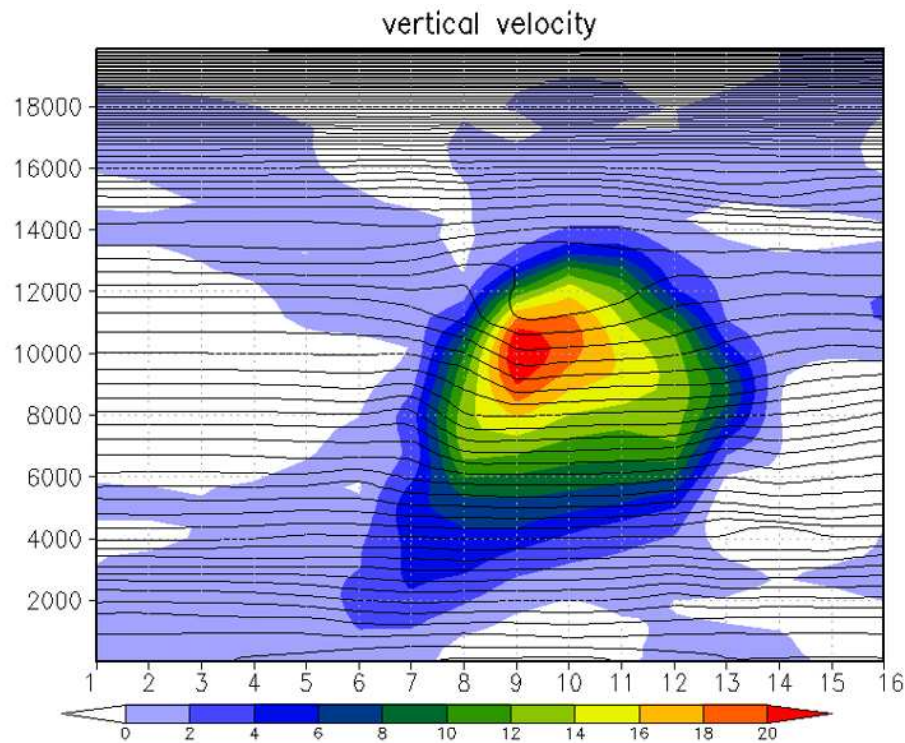
- 2016年7, 8月のLFMにおける上昇流最大値



1日24回実行しているLFMの
各ステップの上昇流最大値を、
2016年7月～8月の
全イニシャル表示したもの。

LFMでは、2kmの格子平均値で20m/sを超える上昇流が**毎日**
計算されている。

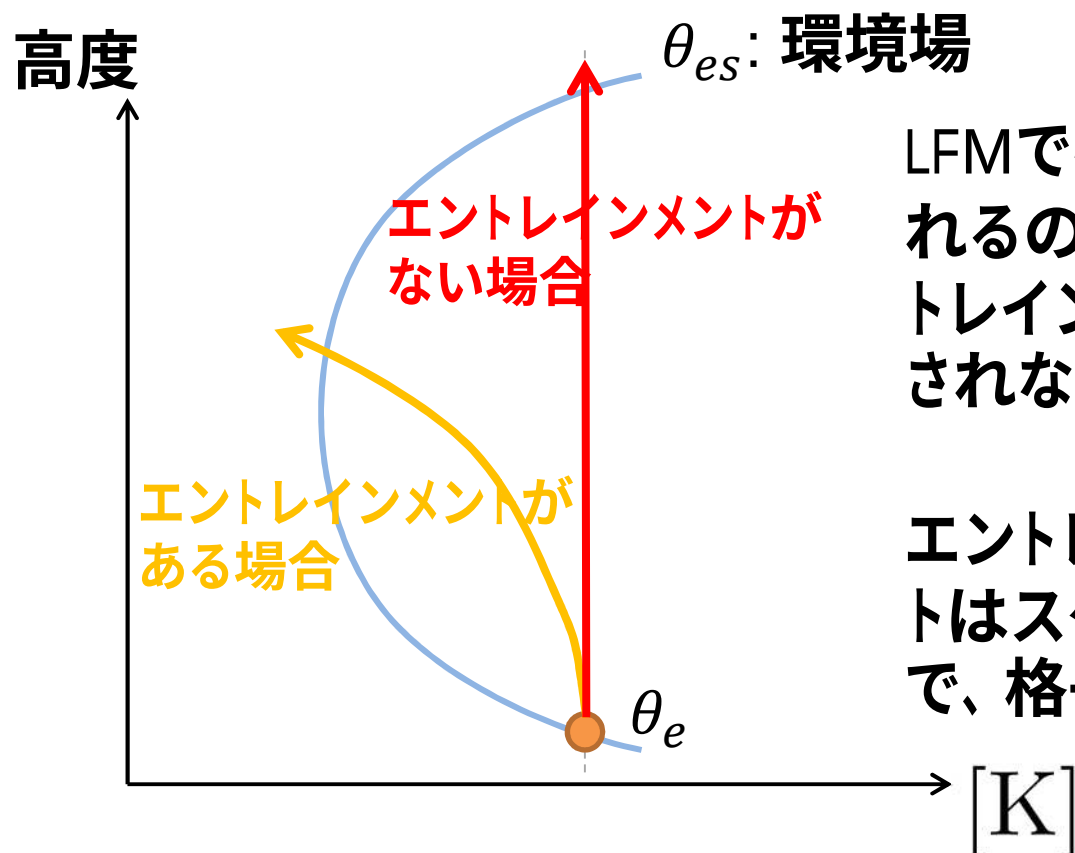
2km解像度LFMにおける対流



対流域のCAPEは1500[J/kg]程度あるため、 $\bar{w} \approx 2\sqrt{\text{CAPE}}$ とすれば、 $\bar{w} \approx 80[\text{m/s}]$

エントレインメント・デトレインメントは 解像されているのか

- 現実の大気で、20m/s～30m/sとなるような対流は少ないと考えられる。



LFMで強すぎる上昇流が予想されるのは、エントレインメント・デトレインメントが格子平均で計算されないことによる可能性がある。

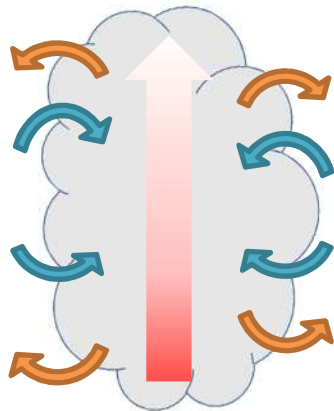
エントレインメント・デトレインメントはスケールが非常に小さいので、格子平均では計算できない。

2km解像度LFMにおける対流

- 対流のイニシエーション

- 格子平均値で浮力を持つまで対流が生じず、対流発生が遅れる。(過剰に蓄積されたCAPEが過大な上昇流に。)

- エントレインメント・デトレインメントの欠如？



対流側面における対流外の空気との水平混合が計算されないため、過大な上昇流に。

**2kmLFMでも解像できない。
既存の対流スキームを使わないのなら、
このようなプロセスを取り入れるべき**

まとめ

- 積雲対流という現象では様々なスケールの現象が重要な役割を果たしているため、水平解像度10kmオーダーの全球モデルはもちろん、解像度2kmのLFMであっても対流のプロセスの全部または一部をパラメタライズする必要がある。
- 現在の主要な積雲対流スキームは大きなくくりでは「マスフラックス型」に属する。
 - エントレインメント、デトレインメントを考慮したプリュームモデルによって、(規格化) マスフラックスや対流内の物理量の鉛直プロファイル、これらと、クロージャーによって決まったマスフラックスの雲底での値から、格子平均の物理量の時間変化率を最終的に計算する。
 - 格子内の複数種類の積雲をどのように扱うかで、アンサンブル型、バルク型に大きく2種類に分けられる。
 - MSM, ECMWF, Met Officeはバルク型
 - GSMはアンサンブル型
 - YS積雲スキームはアンサンブル・バルクの両方の考え方を導入



気象庁現業メソモデルの積雲対流スキーム

気象庁予報部数値予報課

松林健吾、原旅人、荒波恒平、河野耕平

MSMの対流スキーム

- Kain and Fritsch (1990) **以下、KFスキーム**
 - バルク型プルームモデル
 - 2017年2月にMSM改良を行った際に、KFスキームも大きく変更。
- **スキームの挙動を徹底的に調査し、問題点を見つけ、改良を行う。**
 - 一次元モデルの活用。
 - 一次元モデルでも、様々な問題が明らかに。
 - スキーム内の各プロセスを詳しく調べることで、特性を理解し、フルモデルの問題発見・解決にもつながる。

2017年2月のKFスキーム変更点

- 雲底マスフラックスと雲底以下のエントレインメントを整合
- トリガーにおけるプルームの持ち上げ開始高度を変更
- 浅い対流の雲底マスフラックスの変更
- KFスキームの時間変化率を毎ステップ見積もる
- 凝結物のうち、雨・雪になる閾値を凝結物の合計量に対して設定する
- 背の高い対流によって生成される雨・雪の落下の扱いの変更
- 積雲のライフタイムを、水平風が格子を横切る時間ではなく固定値とする
- ダウンドラフトの扱いの変更
- トリガーの変更
- ひまわり8号プロダクトを用いたエ
- 0度以下のupdraft中に、ある程度水が存在する場合にあられを考慮する
- 格子スケールで鉛直輸送が起きている場合はKFスキームを弱める
- デトレインメントにより放出する氷は、雪とする

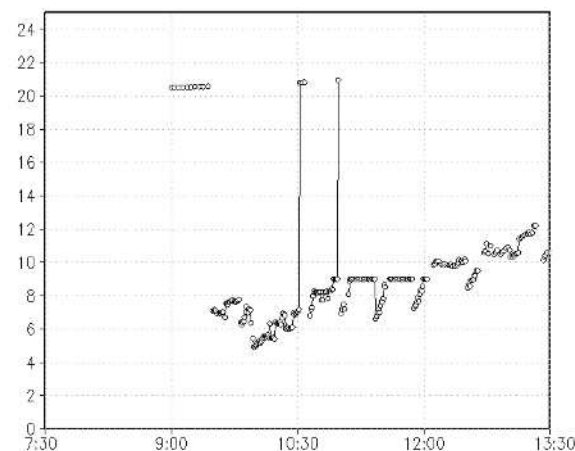
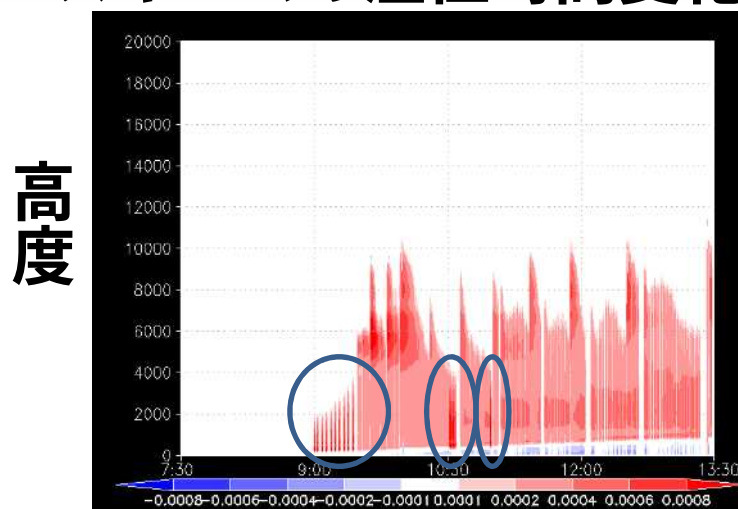
行った改良のうち、約半分は
一次元モデルにおける問題発見を
契機としたもの

一次元モデルで見つかった問題

一次元モデル (TRMM-LBA) の結果

KFスキームの温位時間変化率

雲底マスフラックス



($\times 1\text{m/s} \times \text{格子面積}$ が雲底マスフラックス)

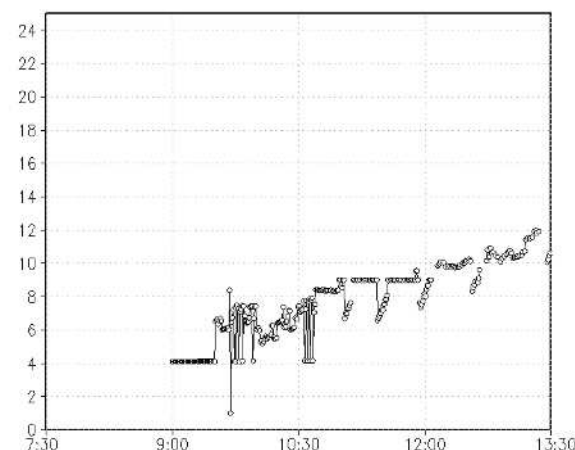
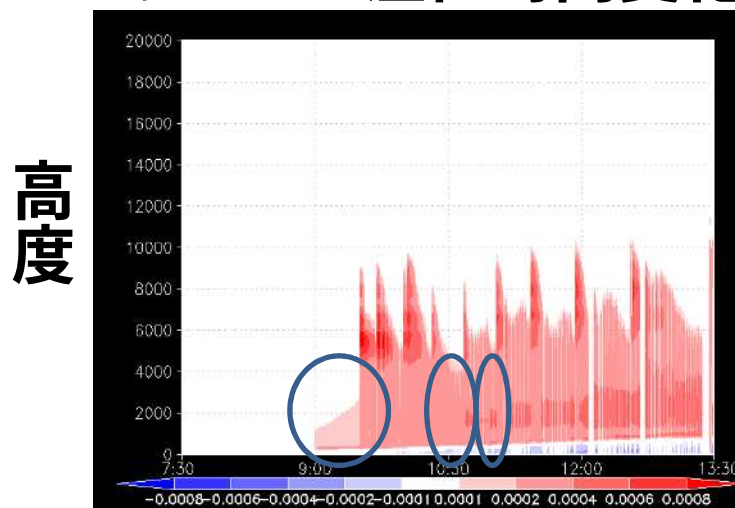
- 背の高い対流と低い対流で時間変化率の大きさが全く異なる。
 - KFスキームでは、対流の背の高さによってクロージャー (雲底マスフラックスの大きさ) を変えているが、これが不適切だった。
- 背の低い対流の時間変化率が大きすぎるにより、KFスキームの発動→非発動が断続的に生じている。
- 下層の乾燥バイアスの原因にもなっていた。

一次元モデルで見つかった問題

一次元モデル (TRMM-LBA) の結果

KFスキームの温位時間変化率

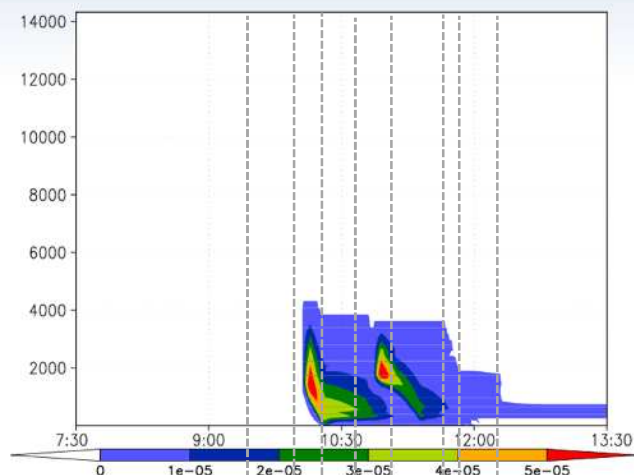
雲底マスフラックス



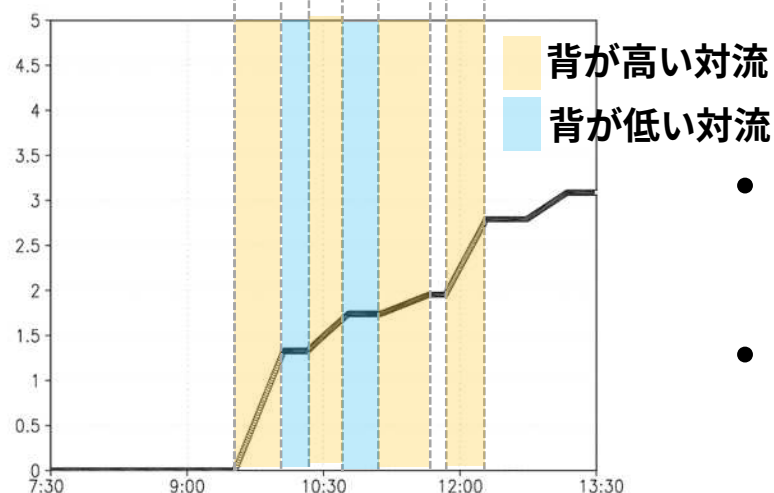
- 背の低い対流のマスフラックスの大きさが、背の高い対流と同程度になるようにクロージャーを変更。
- 背の低い対流における時間変化率の振動も解消。
- 下層の乾燥バイアスも軽減。

一次元モデルで見つかった問題

雨の混合比



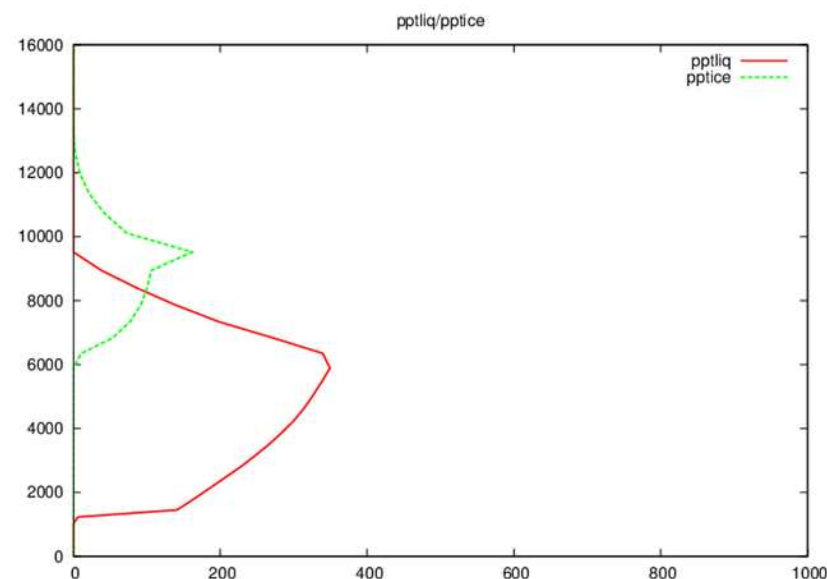
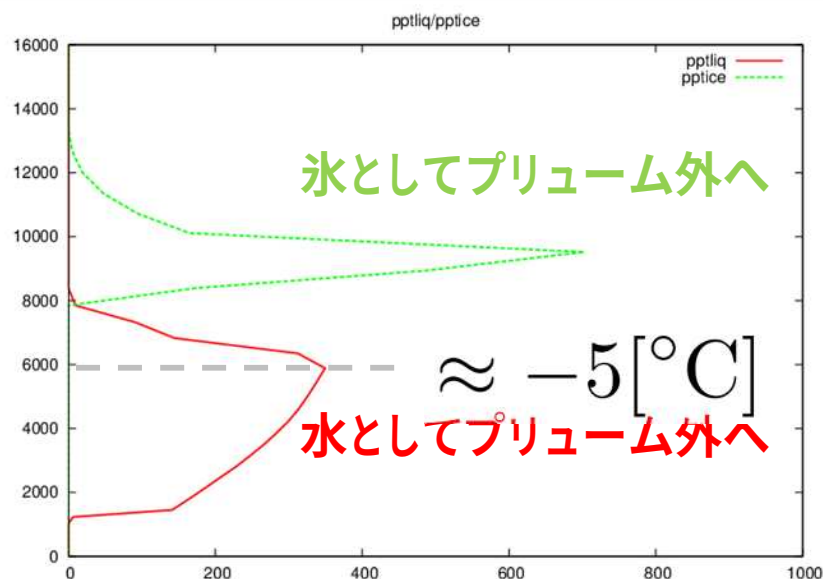
地面に落下した雨の積算量



- KFスキームが生成する雨・雪の混合比が不自然。
 - KFスキームでは、背の低い対流と背の高い対流で雨・雪の扱いが異なる。
 - 背の高い対流で生成した雨・雪は即地面に落下するものとする。
 - このため、対流の背の高さによって水物質の時間変化率が不連続に切り替わることが判明。
- 背の高い対流と低い対流で雨・雪の扱いが同じとなるように変更
- 背の高い対流の雨・雪による降水の予測精度が向上

一次元モデルで見つかった問題

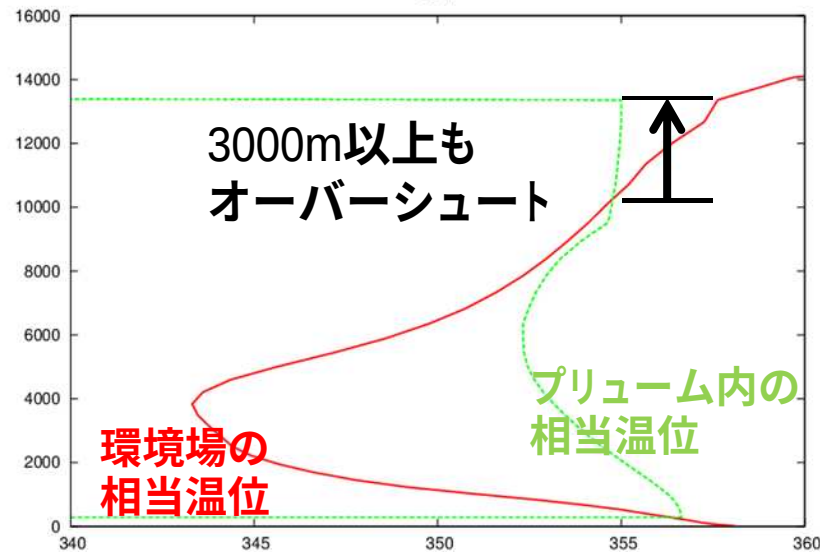
サブグリッドのプリュームから抜け出る雨・雪



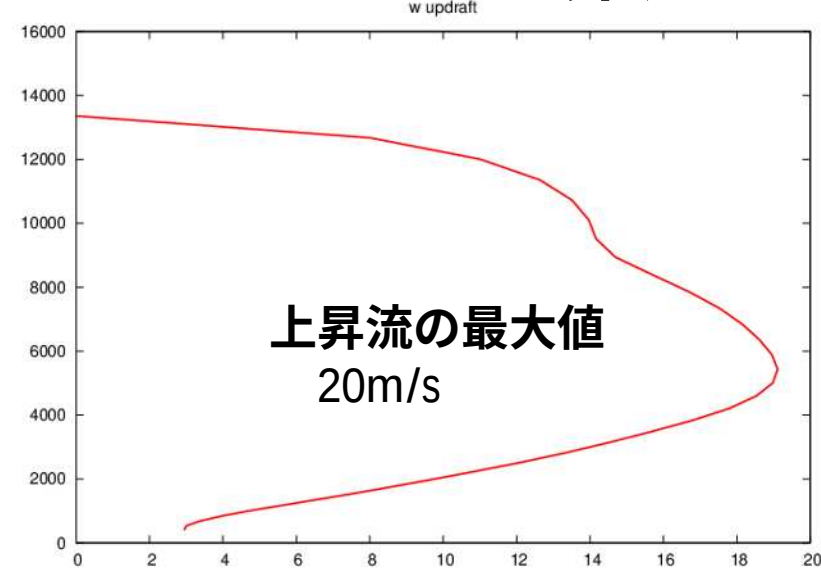
- プリューム内の水物質が、水から氷に変わり始める -5°C から -25°C 付近にかけて、雨・雪が生成されないということが分かった。
 - プリューム内の水・氷に対して個別に閾値を設定し、その設定値を超えた量を雨・雪としていたのが原因。
- 水と氷の合計量に対して閾値を設定するように変更。

一次元モデルで見つかった問題

環境場 (格子平均値) (赤線) と
プリューム内 (緑線) の相当温位



プリュームの上昇流



- KFスキームのプリュームの上昇流は非常に大きく、**20m/sを超えることも**。
- 上昇流が強すぎてオーバーシュートが止まらず、雲頂がLNBよりかなり高くなる。**(18kmを超えることも)**
- これは、**エントレインメントが過小**であることを示唆しているため、エントレインメント率を変更。対流の背が高すぎる問題が改善。

一次元モデルを用いたスキーム調査

- 一次元モデルで徹底的にスキームを調査
 - 一次元モデルだけでも、様々な問題が明らかに。
 - 一次元モデルで修正した場合の影響を確認後、フルモデルで期待した効果が見られるか確認。
- 一次元モデルでスキームの特性を理解することで、フルモデルにおける問題発見・解決にもつながる。

まとめ

- 2017年2月にKFスキームを更新
 - ただ精緻な別スキームに取り替えるのではなく、既存のKFスキームを一次元モデルを活用して徹底的に調査。
 - 一次元モデルを用いて徹底的に調査することで、問題が見つかる。
 - スキーム特性の理解は、フルモデルにおける問題の発見・解決につながる。

今後の課題

- 対流についての理解
 - エントレインメント・デトレインメントの定式化は、予測精度に大きな影響がある一方で、分かっていないことが多い。
 - 対流のイニシエーションについても同様。
- 衛星データなどの活用
 - スキームの検証・改良へ