

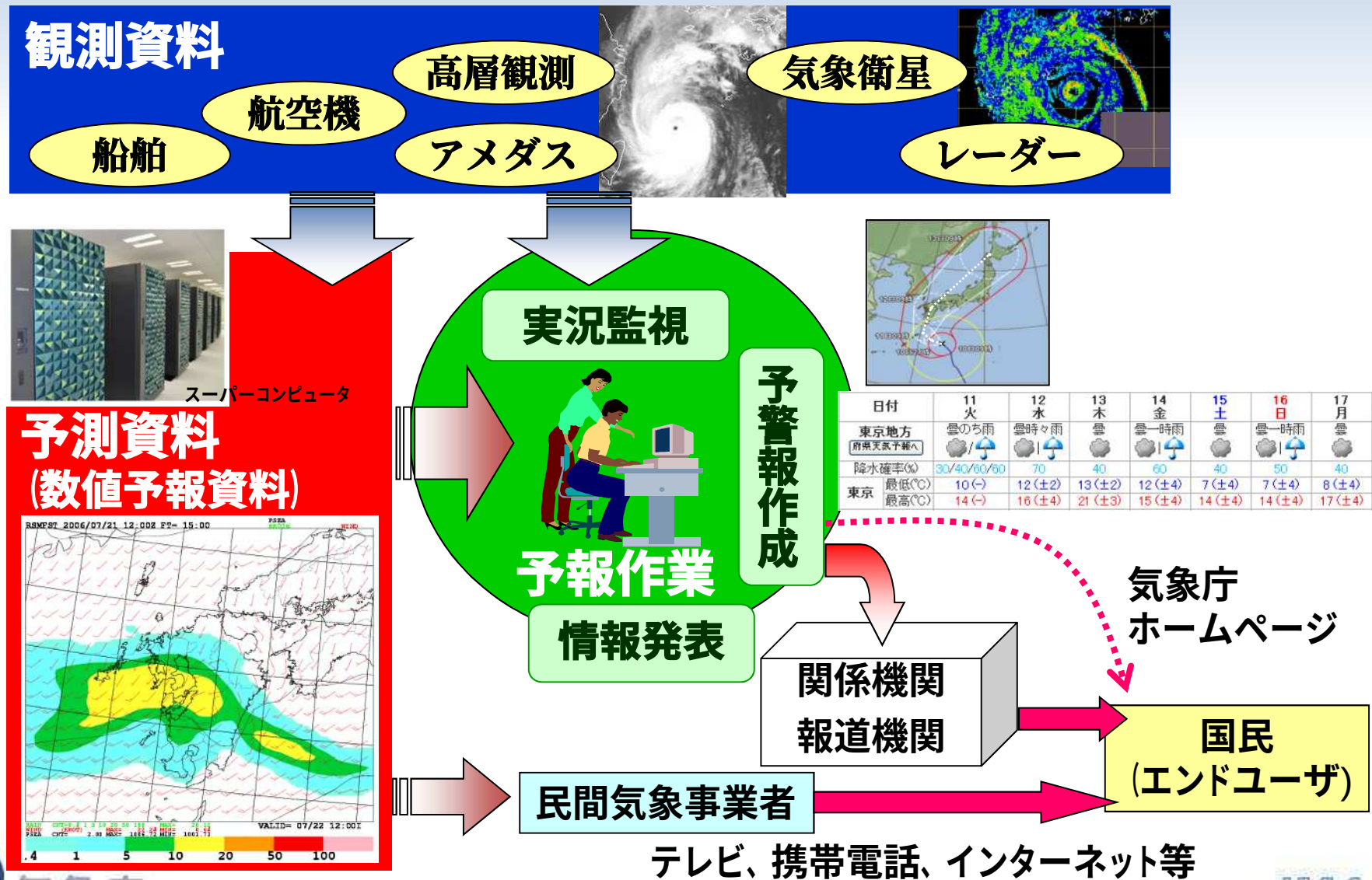


衛星データシミュレータを用いた 気象庁メソモデル・局地モデルの雲の検証

気象庁 予報部 数値予報課
原 旅人

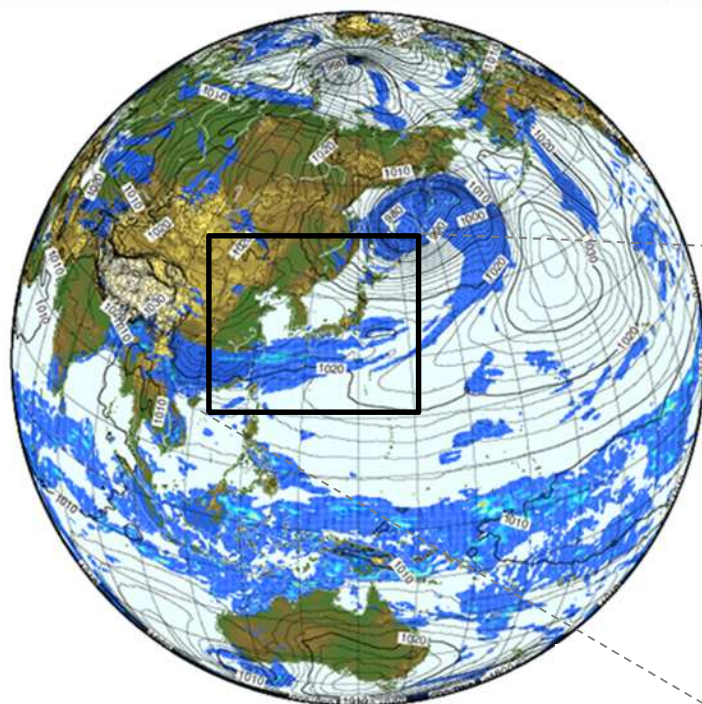
気象庁の数値予報モデル

数値予報の役割(1) 気象業務における数値天気予報の位置づけ



気象庁の短期予報向け数値予報モデル

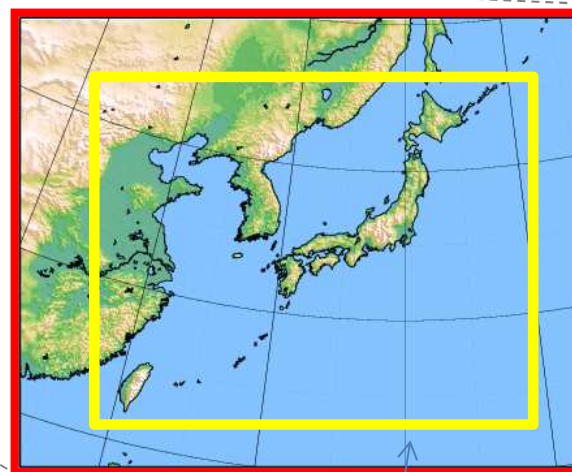
全球モデル (GSM)



水平格子間隔 ~20km

メソモデル (MSM)

水平格子間隔 5km



局地モデル (LFM)

水平格子間隔 2km

現業数値予報システムの仕様

短期予報用の大気モデルのみ、2015年3月現在

	モデル	領域 水平解像度	鉛直 層数	予報時間 (初期時刻 (UTC))	目的
決定論的予報	全球モデル (GSM)	地球全体 約20km	100層	84 hours (00,06,18) 264 hours (12)	- 各種予報・ガイダンスの基礎資料 - 各種数値予報モデルの入力値 (波浪, 黄砂, 移流拡散など) - メソモデルの側面境界条件
	メソモデル (MSM)	日本周辺 約5km	50層 (48+2)	39 hours (00,03,06,09, 12,15,18,21)	- 各種予報の支援 (防災気象情報など) - 各種数値予報モデルの入力値 (波浪, 高潮, 火山灰移流拡散など) - 局地モデルの側面境界条件
	局地モデル (LFM)	日本周辺 約2km	58層	9 hours (毎時)	各種予報の支援 (飛行場予報, 防災気象情報など)
確率論的予報	週間 アンサンブル予報 システム (WEPS)	地球全体 約40km	60層	264 hours (00,12) ※各27メンバー ～54メンバー/日	- 週間天気予報 - 東南アジア等諸外国の予報支援
	台風 アンサンブル予報 システム (TEPS)	地球全体 約40km	60層	132 hours (00,06,12,18) ※25メンバー	- 台風進路予報 ※台風発生が予想される時、 台風が存在する時等に行われる

モデル開発と衛星画像の利用

気象庁の領域モデル

- メソモデル(MSM)
 - 水平格子間隔5km、1日8回39時間予報
 - 1日先までの**防災情報**支援、航空気象支援
- 局地モデル(LFM)
 - 水平格子間隔2km、1日24回9時間予報
 - 直近の**防災情報**の支援、航空気象支援
- 防災情報で重視されるプロダクト
 - 降水量
 - 地上風速 など

気象庁本庁のメソモデル開発 今昔

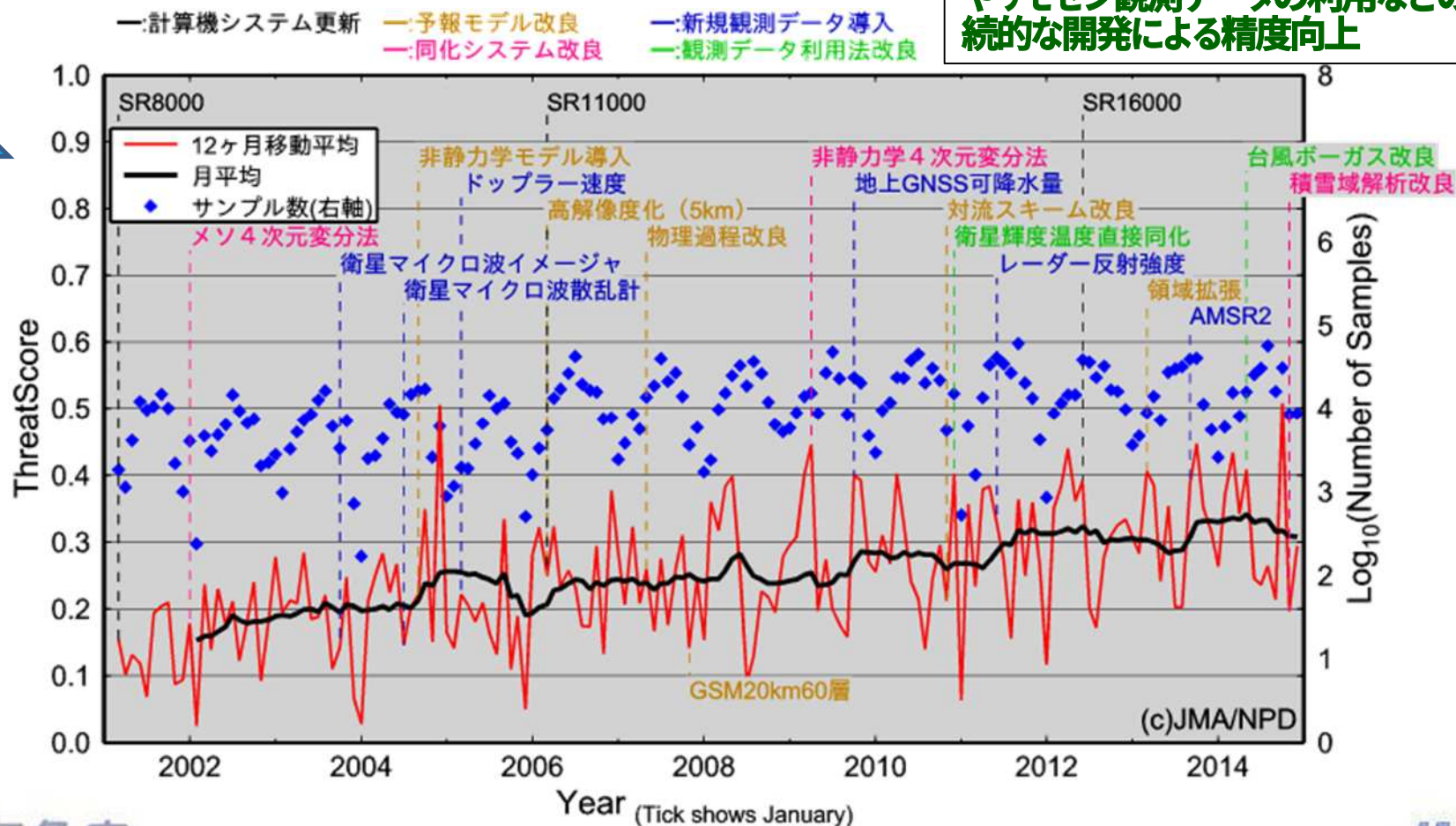
- (昔)降水のスコアが最も重視されてきた。
 - 「降水過程」のスキームの取替えをして、最も降水のスコアがよいスキームを採用することが基本だった。
 - 必ずしも、降水をもたらす物理プロセスに着目しているわけではなかった。
 - (例)雲物理の新しいスキームの評価を降水だけで行う。
- (今) 降水がプロダクトとして重要なのは変わらない。
しかし、「降水過程」だけが降水の精度を決めるわけではないことを強く意識
 - 降水は様々な過程の総合的な結果

メソモデルの改良と精度向上

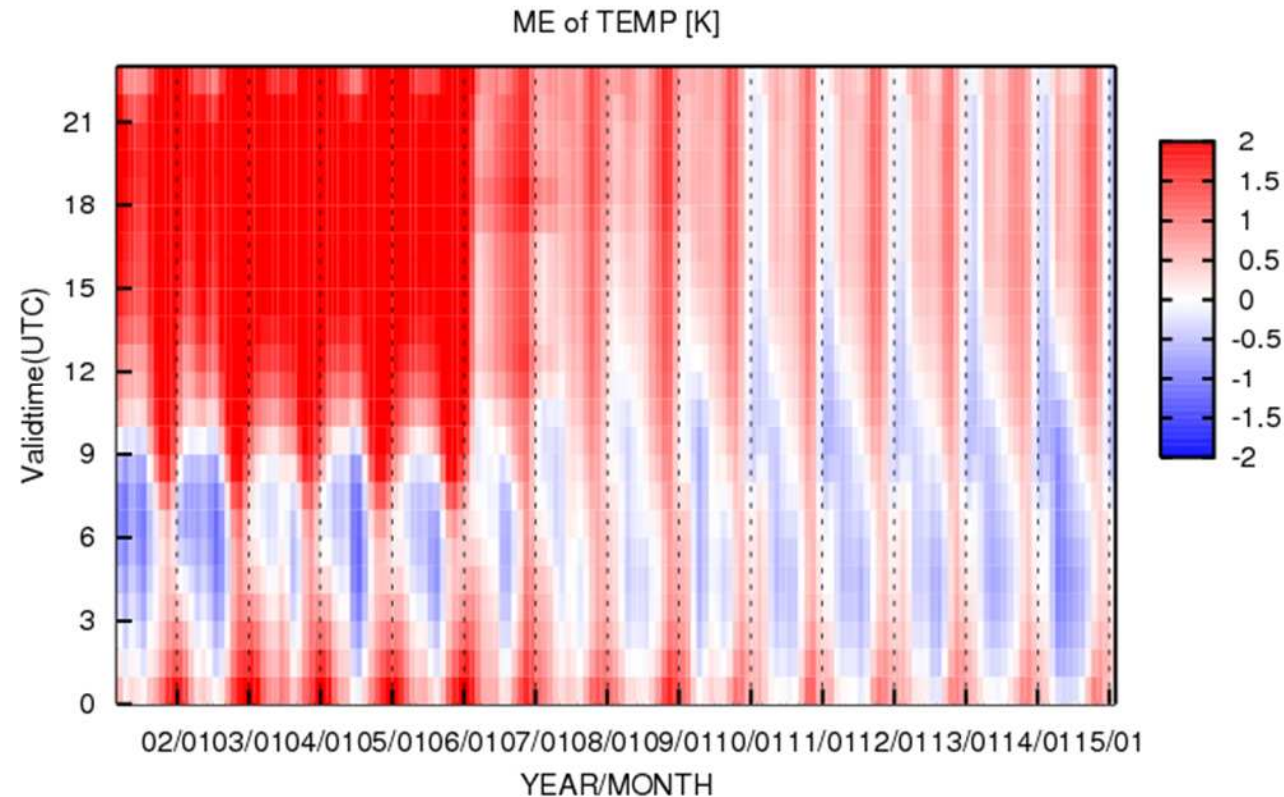
前3時間積算降水量のスレットスコア

(2002年3月～2014年12月、閾値10mm/3h、検証格子20km)

予報モデル・データ同化システム改良
やリモセン観測データの利用などの継続的な開発による精度向上



MSMの地上気温誤差の変遷



2005年以前は、地上気温の予測精度を調べることにしていなかった。
(2005年以前の検証データは事後に検証して作成)

データ量は年々肥大化

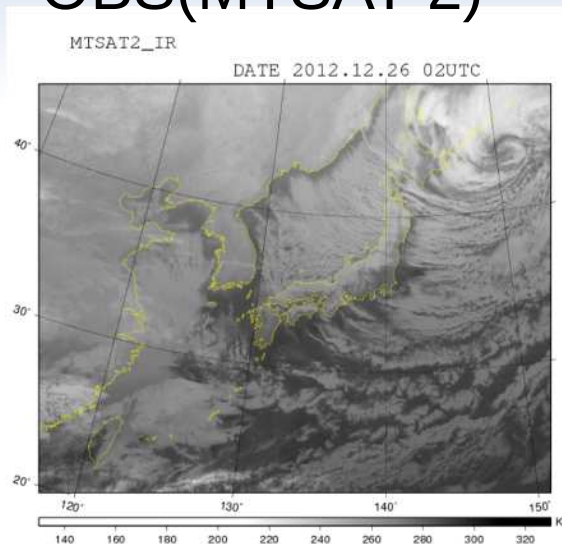
- **メソモデル(5km): 格子数817x661x48**
 - これが1日8回39時間予報x予報変数の数
 - 1回の出力ファイル量:42GB (モデル面出力のみ、1時間おき)
- **局地モデル(2km): 格子数1581x1301x58**
 - これが1日24回9時間予報x予報変数の数
 - 1回の出力ファイル量:41GB (モデル面出力のみ、1時間おき)
- **予報変数・診断変数の数も増大**
 - 風(2成分)、温度(熱エネルギー)、水蒸気量に加え、雲物理の変数、乱流の変数、陸面の変数、などなどモデルが高度化するにつれて増大
- **これらをひとつひとつ細かく見て、問題点を発見するには膨大な時間がかかる。**
 - これらの情報を集約した情報が得られると理想的。
 - さらに、それが観測と比較できるとよい。

予想衛星画像

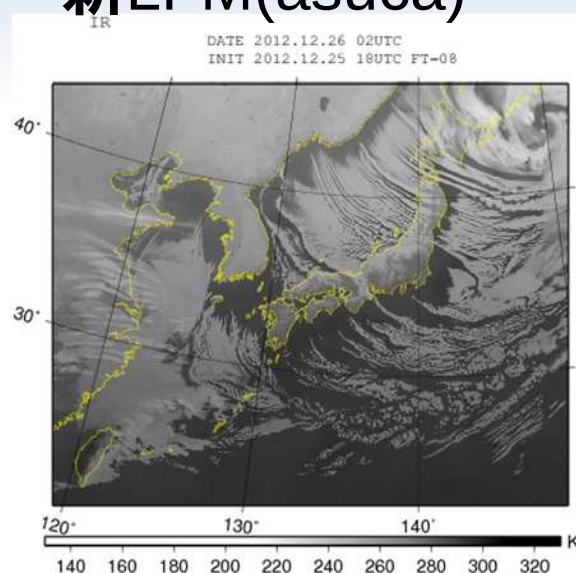
- 2004年ごろから、部内の開発で活用
- 簡易なMTSATのシミュレータによる計算
 - 以前は、モデル面出力を用いてモデルの外で計算していたが、最近はモデルの中で計算してモニタとして出力している。
- 定量的な評価には注意が必要であるが、雲の有無などの定性的な評価には大いに活用。
- モデルの大きな改良につながった例も。

予想衛星画像(赤外)で見る冬型のときの雲

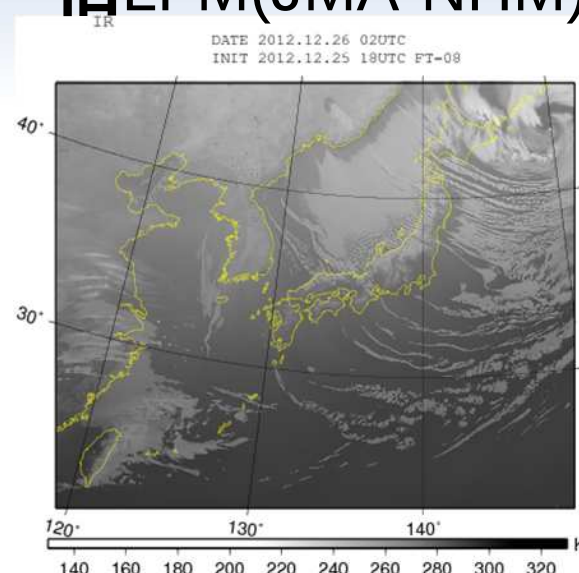
OBS(MTSAT-2)



新LFM(asuca)



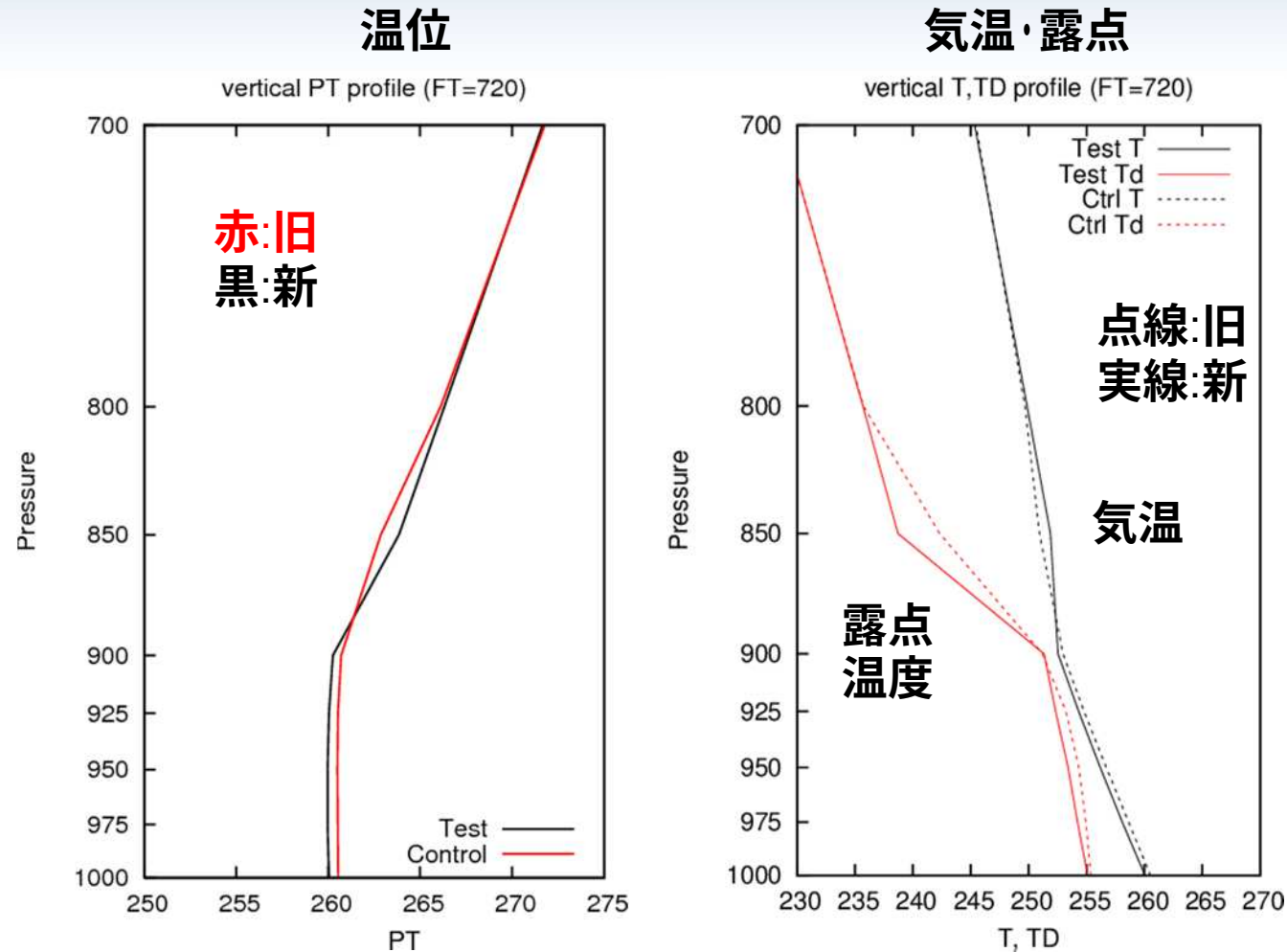
旧LFM(JMA-NHM)



2012/12/25 18UTC INI FT8

日本海、黄海、太平洋の雲の違いは、主に境界層スキームの改良(MYNN3の計算安定化)によるもの。

冬の日本海の新旧モデルのプロファイルの例

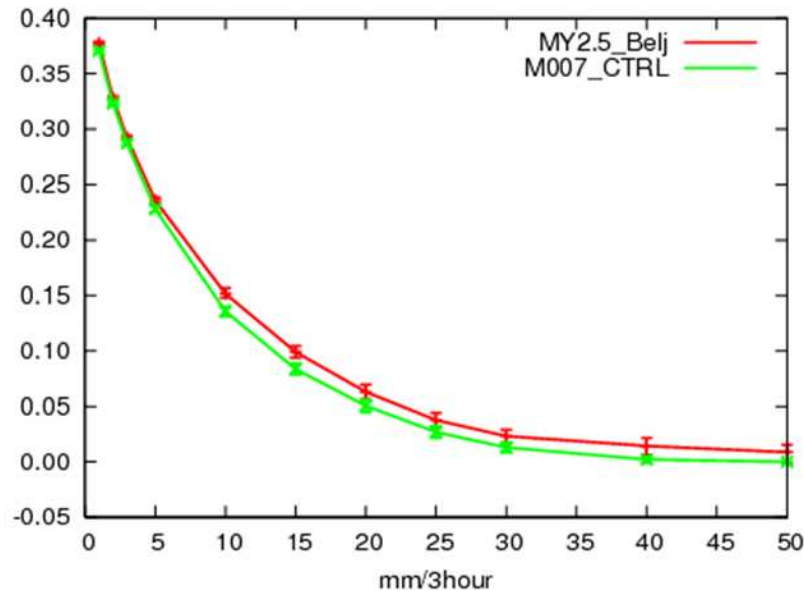


従来モデルでは、逆転層形成が弱く、不連続が小さくなっている。

同様の効果がある変更を MSM に適用してみると

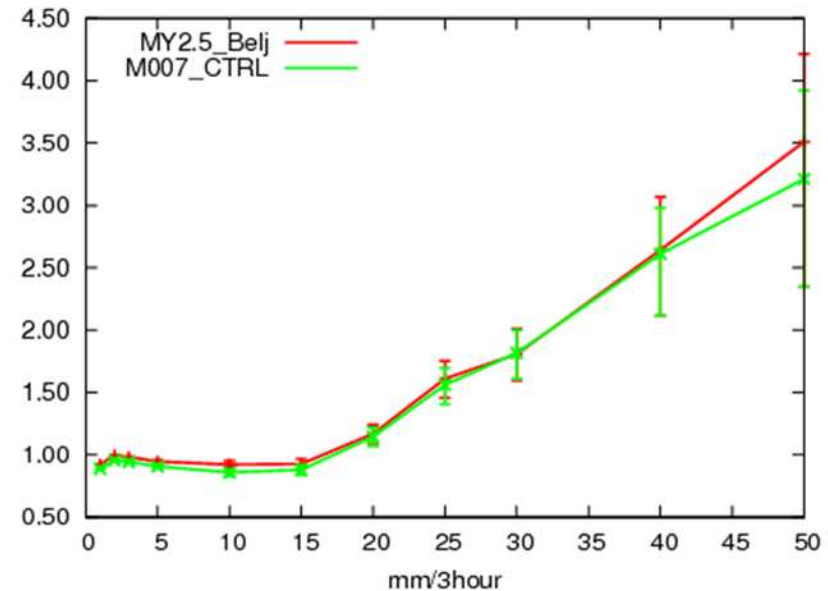
冬季の検証格子20km 3時間降水量のスコア

スレッドスコア



降水閾値(mm/3h)

バイアススコア



降水閾値(mm/3h)

降水のスコアが(結果として)大きく改善。

新しいLFM向けモデルの中での予想衛星画像での観測をきっかけに、MSMでの大きな改良によりつなげたひとつの例

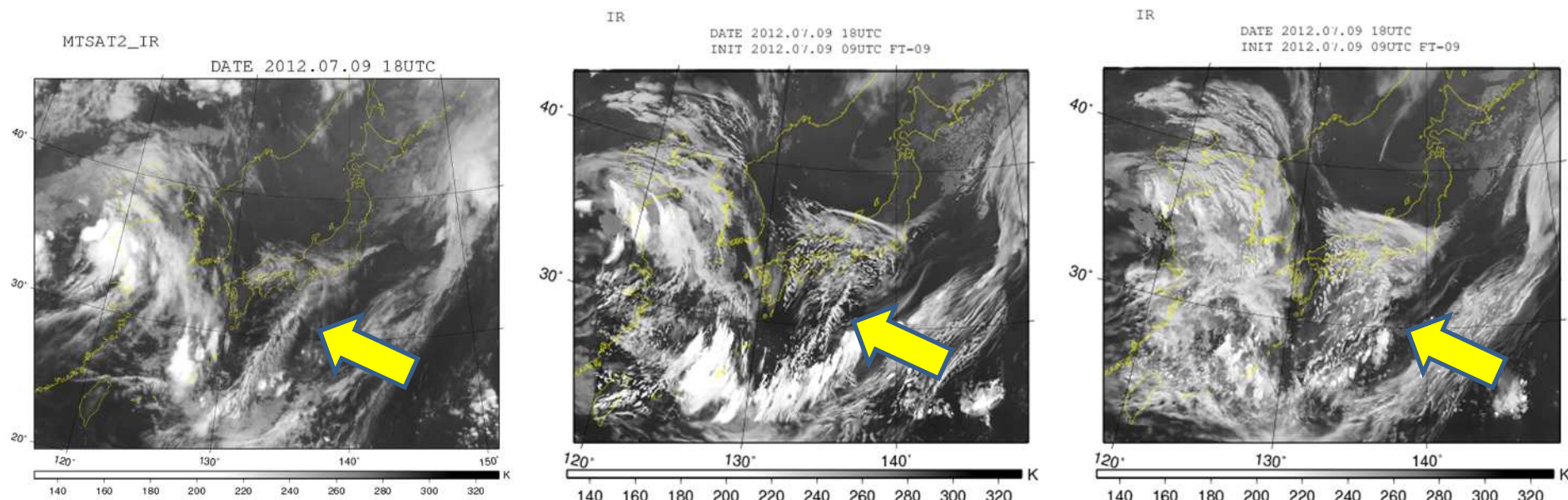
その他の事例(新旧LFM比較)

2012/7/9 09UTCイニシャル FT9

衛星画像

新LFM(asuca)

旧LFM(JMA-NHM)



流れに直行する波や、細かい構造が新LFMの方が予想できている。
旧LFMは実況に比べて雲が多すぎる。

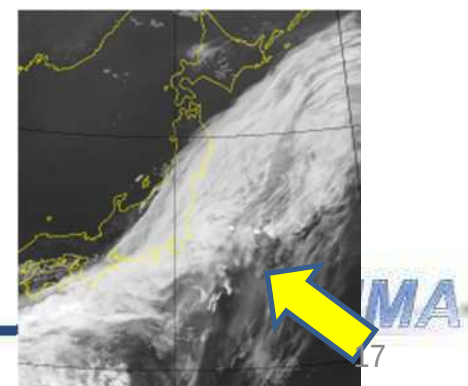
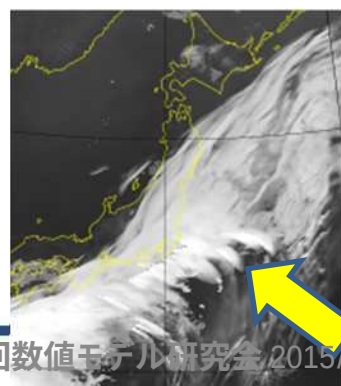
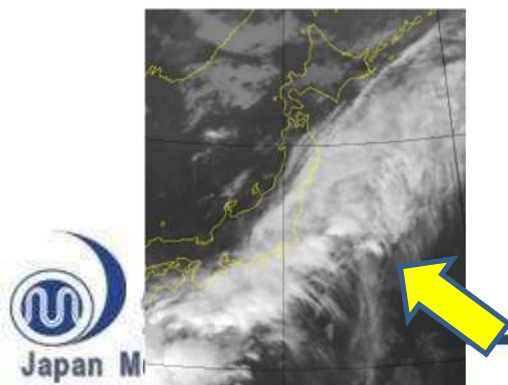
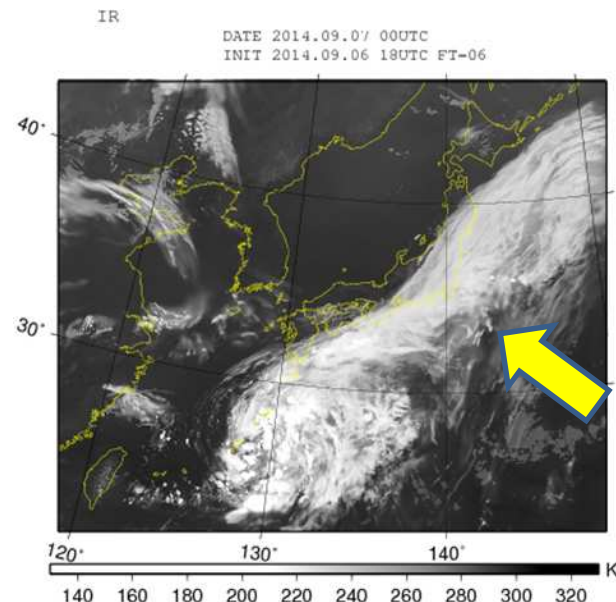
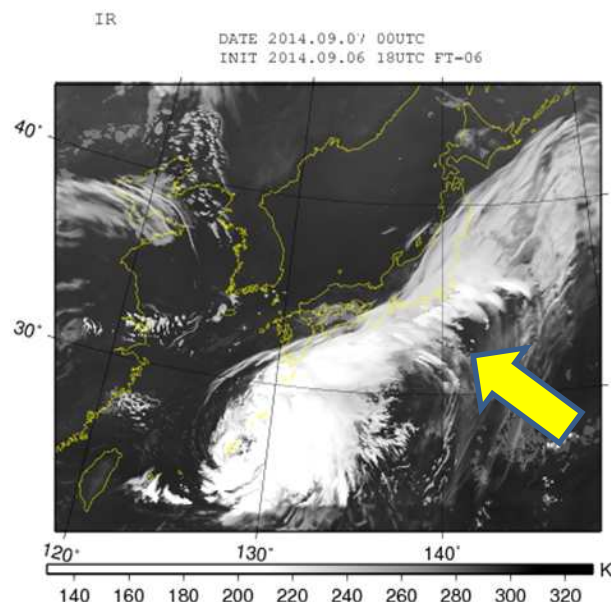
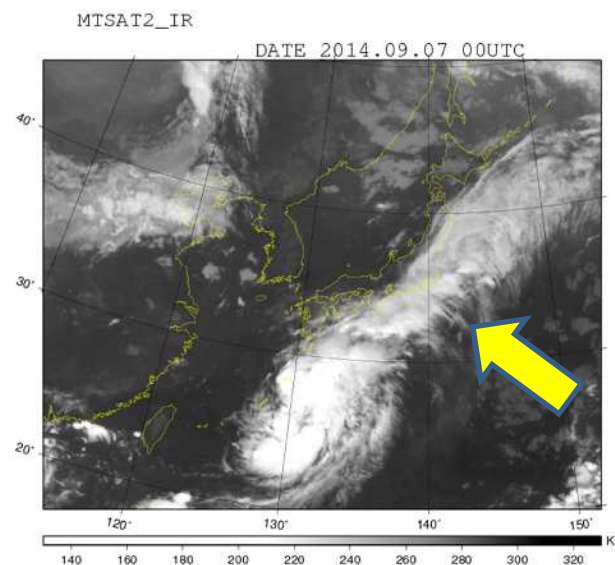
その他の事例(新旧LFM比較)

2014/9/6 18UTCイニシャル FT6

衛星画像

新LFM(asuca)

旧LFM(JMA-NHM)



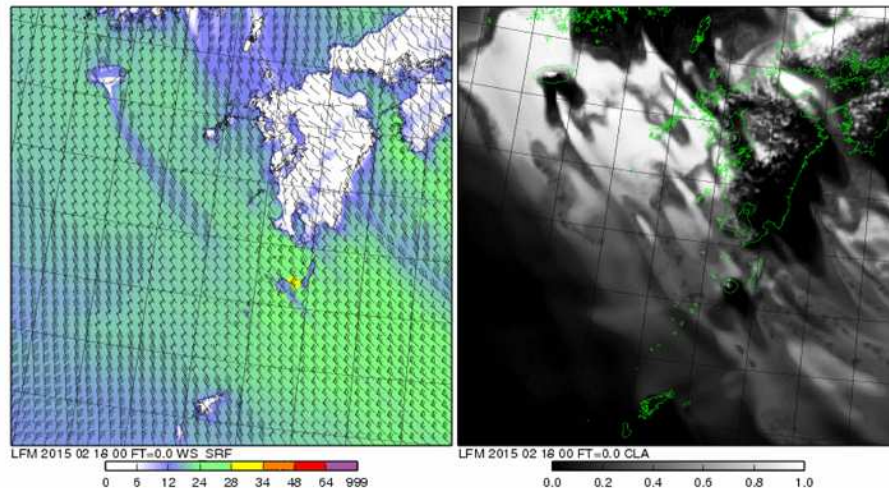
全雲量によるモデル結果の検証

新LFM(asuca)

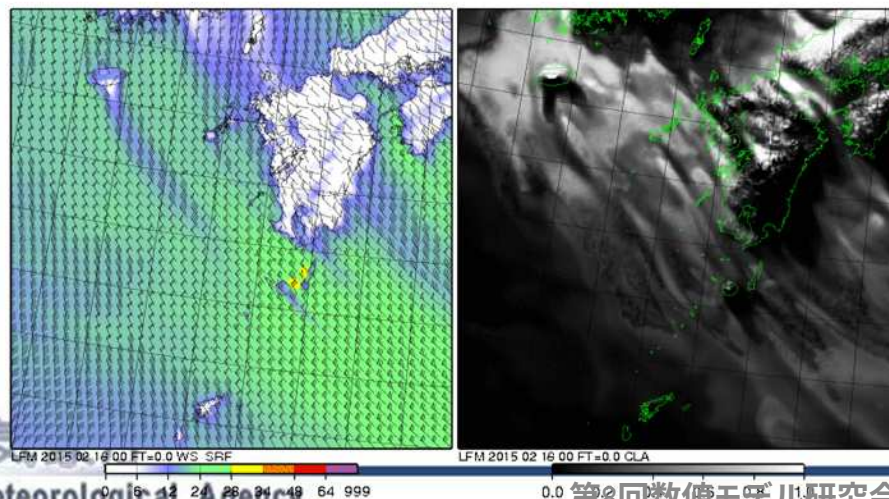
201502180000イニシャル

風速

全雲量



旧LFM(JMA-NHM)



全雲量も大きな情報をまとめる手段のひとつ。
ただ、必ずしも対応する観測があるとはいえないが。。



Japan Meteorological Agency

第8回数値モデル研究会 2015/3/27

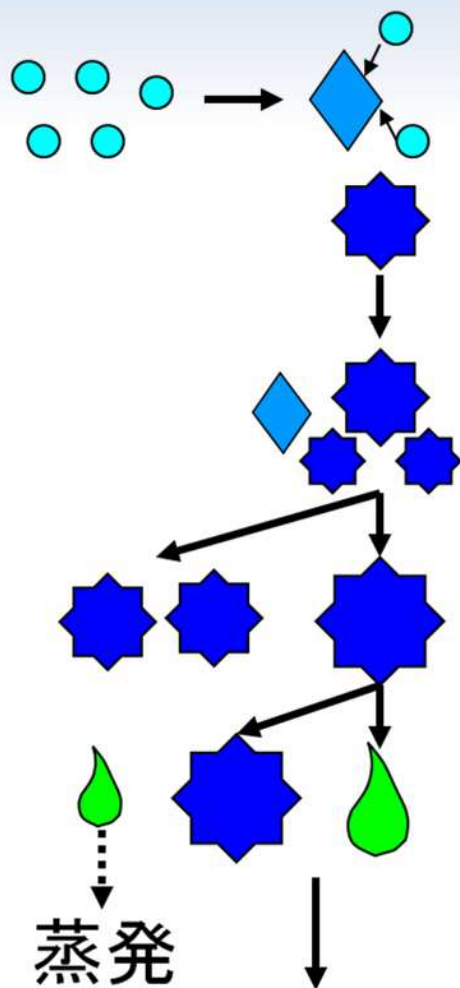
JMA

モデルの雲の表現

雲の影響:モデルの大きな難関

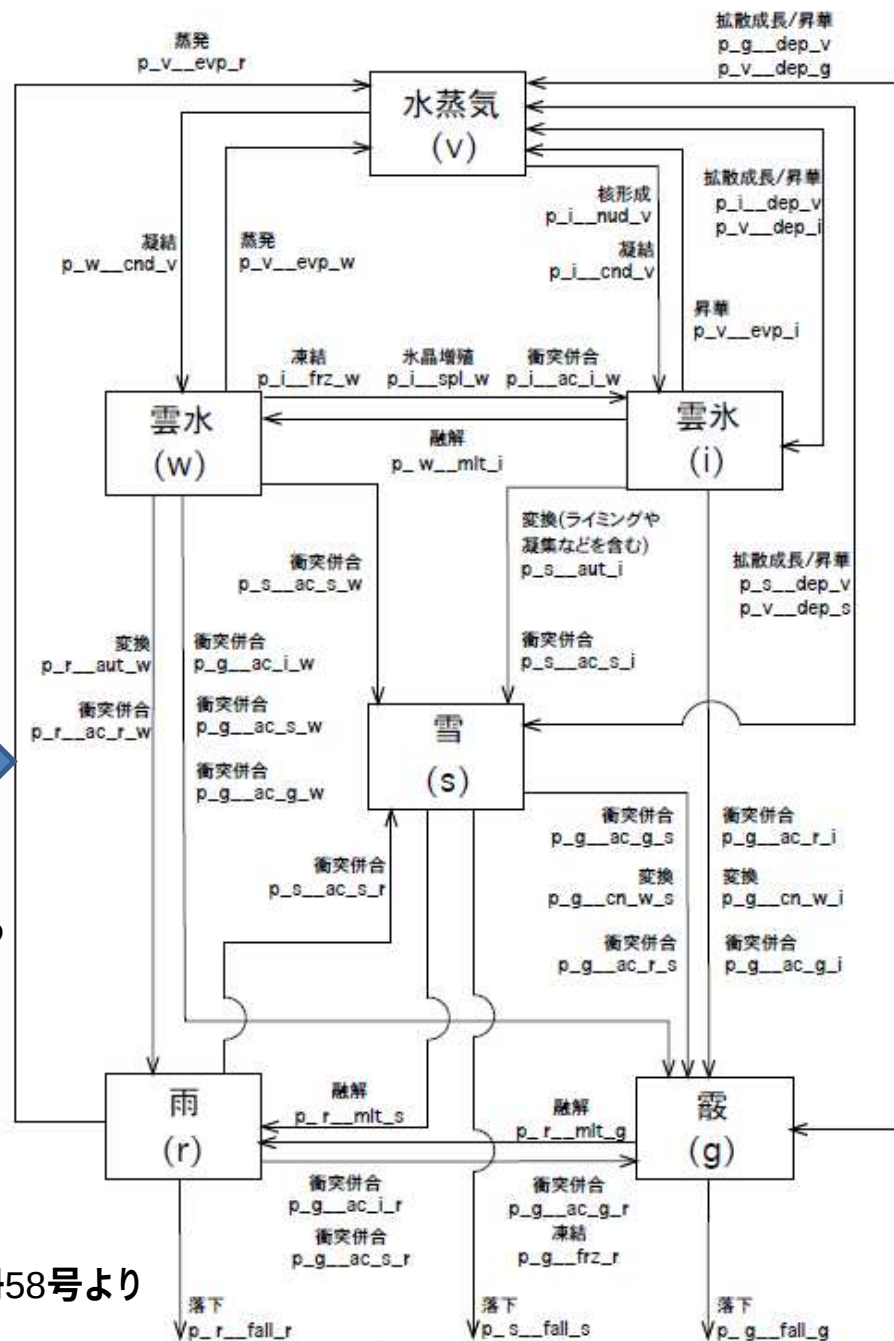
- 地上降水をもたらすもの
 - 凝結してすぐに降水になるわけではない。
- 放射への影響
 - 短波の吸収、長波の吸収・射出
 - 雲頂での乱流輸送の駆動 などなど。
- 「雲」といってもいろいろ。
 - マクロ的には
 - 形 (水平の広がり、厚さなど)
 - 存在する高さ
 - 光の透過性 など
 - よりミクロ的には
 - 構成される水粒・氷粒の大きさ(の分布)、密度、形など
 - モデルの観点では
 - 格子内の不均一性 (特に低解像度モデルでは顕著)
 - 鉛直方向の重なり(オーバーラップ)

雲の中のミクロな振る舞いの表現(雲物理)



モデル化

質量(混合比)や
数濃度の時間
変化率を追跡



雲物理過程における質量時間変化

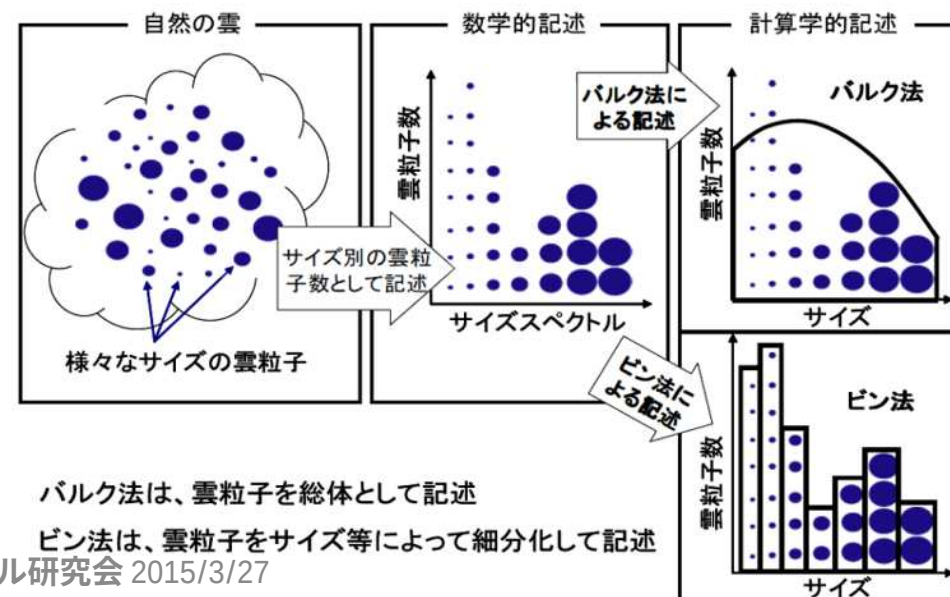
- 粒子1つ1つの記述では、各過程の質量の時間変化率は粒径に依存する。
- しかし、粒子1つ1つを記述するには膨大な計算が必要

→ 粒径ごとの粒子数を記述する粒径分布関数を作り、統計的に記述する

粒子ごとの質量
時間変化
(粒径Dの関数)

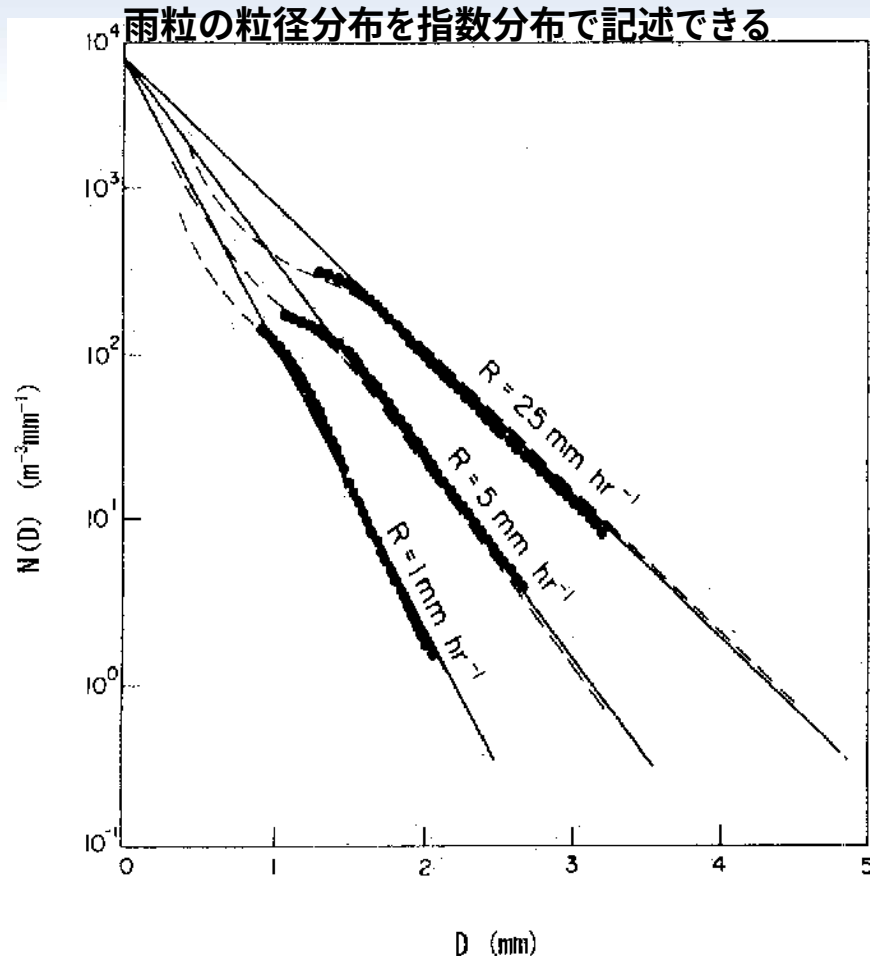
$$\frac{dM_i}{dt} = \int_0^\infty \frac{dm_i}{dt} n(D) dD$$

$n(D)$: 粒径分布関数



バルク法雲物理

Marshall and Palmer (1948)



Marshall and Palmer, 1948, The distribution of raindrops with size. J. Meteor. 5, 165-166.

- 粒径に関する分布関数の形を仮定
- 分布関数に表れるパラメータを質量や数濃度で表す。
- 例)
 - 指数分布
$$n_i(D_i) = N_{i0} \exp(-\lambda_i D_i)$$

$$N_i = \frac{N_{0i}}{\lambda_i}$$

$$q_i = c_i \frac{N_{i0}}{\lambda_i^{d_i+1}} \Gamma(d_i + 1)$$

Ni: 数濃度
qi: 混合比

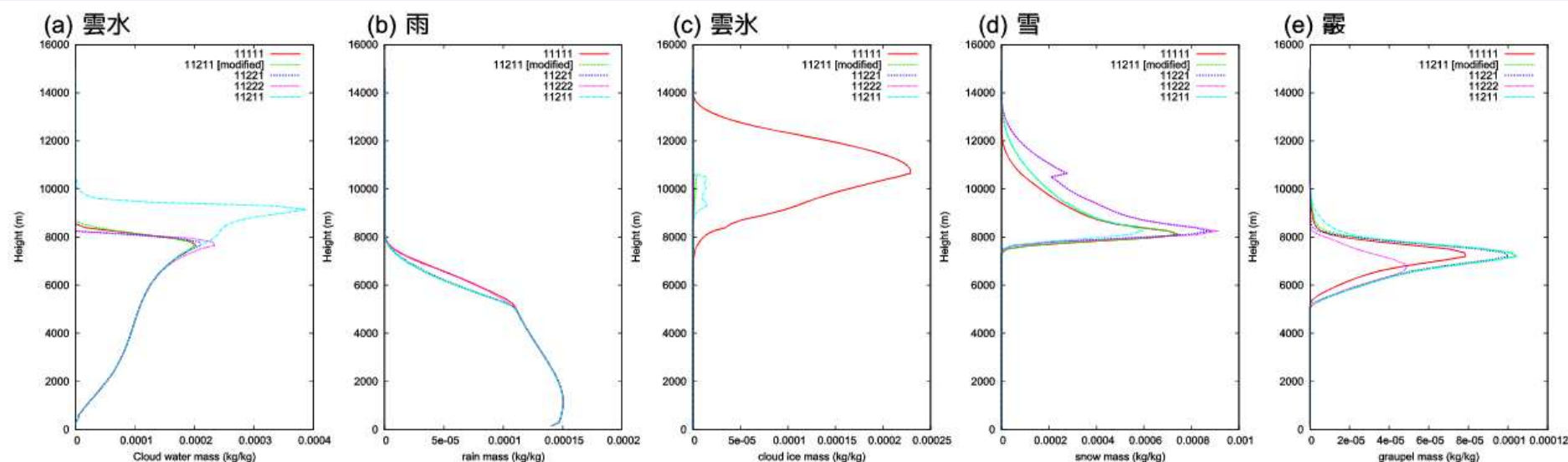
この2つの関係式から未知パラメータ N_{0i} , λ_i が求まる。

すなわち、質量と数濃度が決まれば、粒径分布が決まって、粒径分布が与えられれば、質量や数濃度の時間変化率がわかる。

雲物理のバリエーション

- 雲物理には様々なバリエーションがある。
 - カテゴリーの区別とその性質(密度、形状、落下速度など)
 - 各生成項の与え方(定式化、パラメータ)
 - 粒径分布関数の与え方、その自由度(1-moment, 2-moment)
- どれが良いかを検証する直接観測データはほとんどない。

鉛直1次元モデルによる比較例



KiD (Kinematic driver for cloud microphysics: 雲物理の鉛直1次元比較ツール)による気象庁メソモデルに実装されている雲物理スキームの比較(対流のケース)

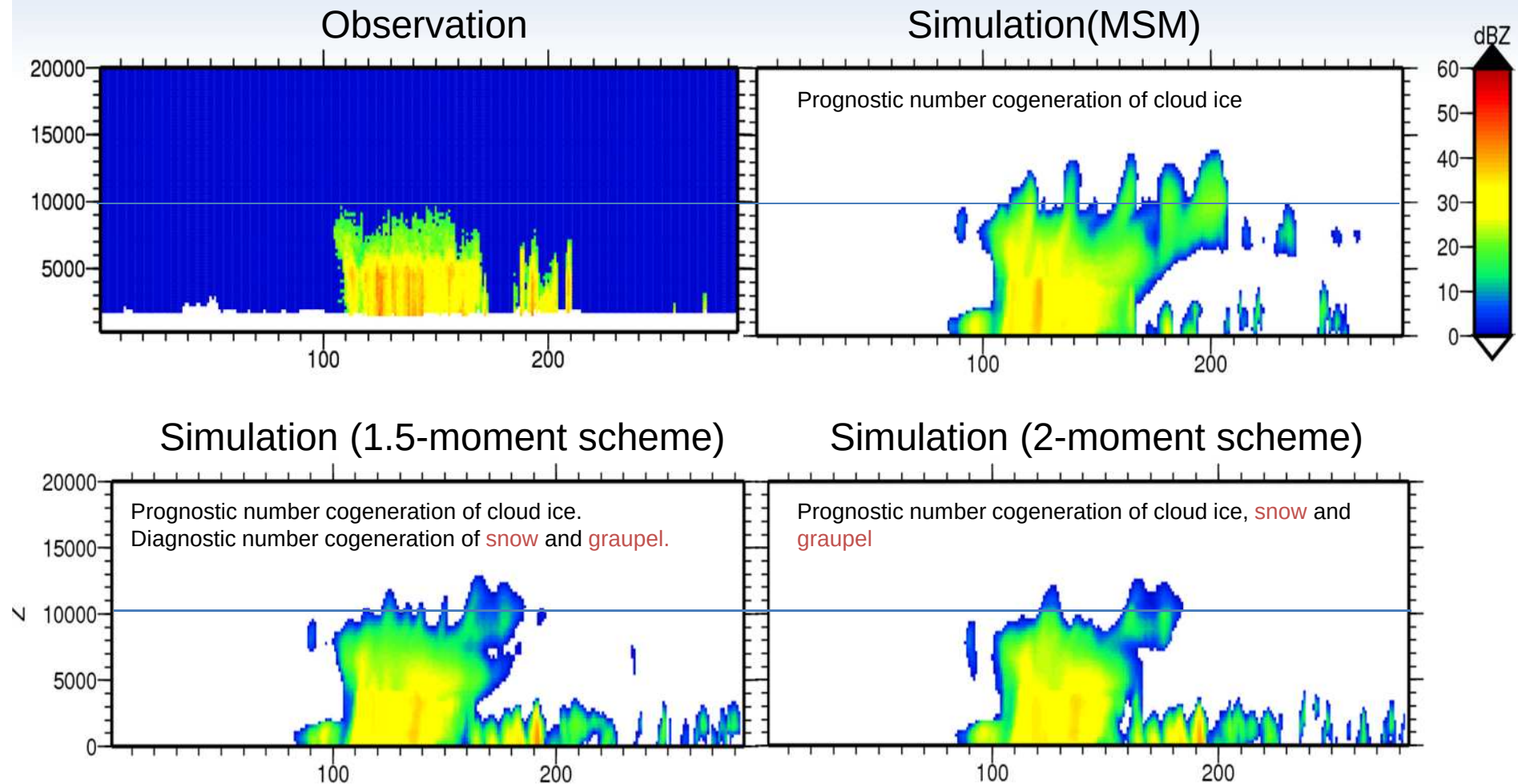
線の色は、気象庁メソモデルに実装されている雲物理スキームを示す。

スキームによるバリエーションが大きい。

雲物理を精度よくする必要性

- 重要なプロダクトである降水予報の精度向上につながりうる。
- 放射における雲の特性への反映も可能に
 - 現状は、雲物理とは別に放射の雲を考えていることが多い。
- レーダーデータのデータ同化のためには、大きなバイアスは排除しなくてはならない。
 - モデルの予報値(第一推定値)と大きくかけ離れたデータは有効に同化できない。
- 従来の赤外・可視だけでは雲物理の詳細についての議論はできない。

レーダー反射強度の 観測とモデル予測の比較



マイクロ波イメージャによる検証

- いくつかのマイクロ波イメージャを搭載している衛星/センサー
 - GCOM-W1/AMSR2, TRMM/TMI, DMSP-F16,17,18,19/SSMIS など
- 低周波では大気に対して透明、高周波では雲粒子(雪・霰など)による散乱が強くなる。
 - 高周波では、雲粒が多いほど散乱が強くなり、輝度温度が低下する。
 - 複数の周波数の輝度温度を見ることで、検証対象の雲粒子の種類を絞ることができる。
- 地表面射出率に敏感
 - 特に海面上

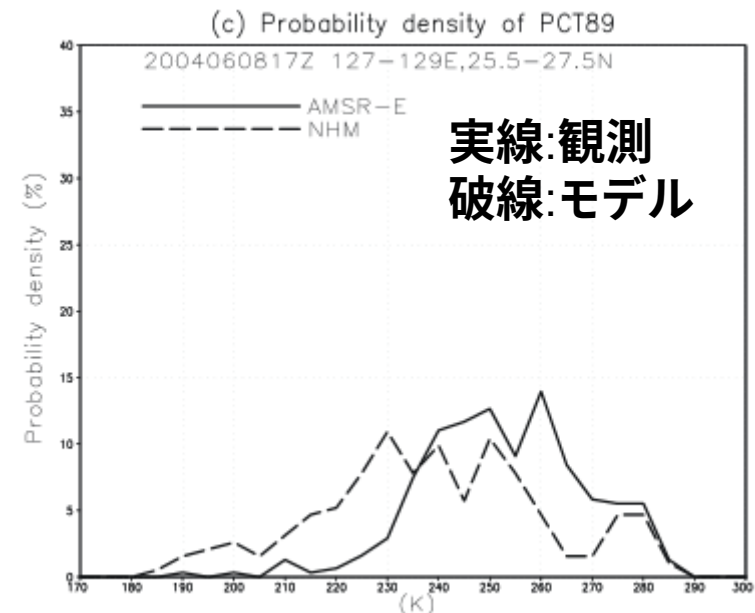
Eito and Aonashi (2009)

- JMA-NHMの予測結果から作成したマイクロ波輝度温度を、梅雨期の雲について観測と比較。

高周波でモデルのほうが観測より輝度温度が低く、雪や霰などの大きな雲粒子がモデルの中では過剰であることを示唆

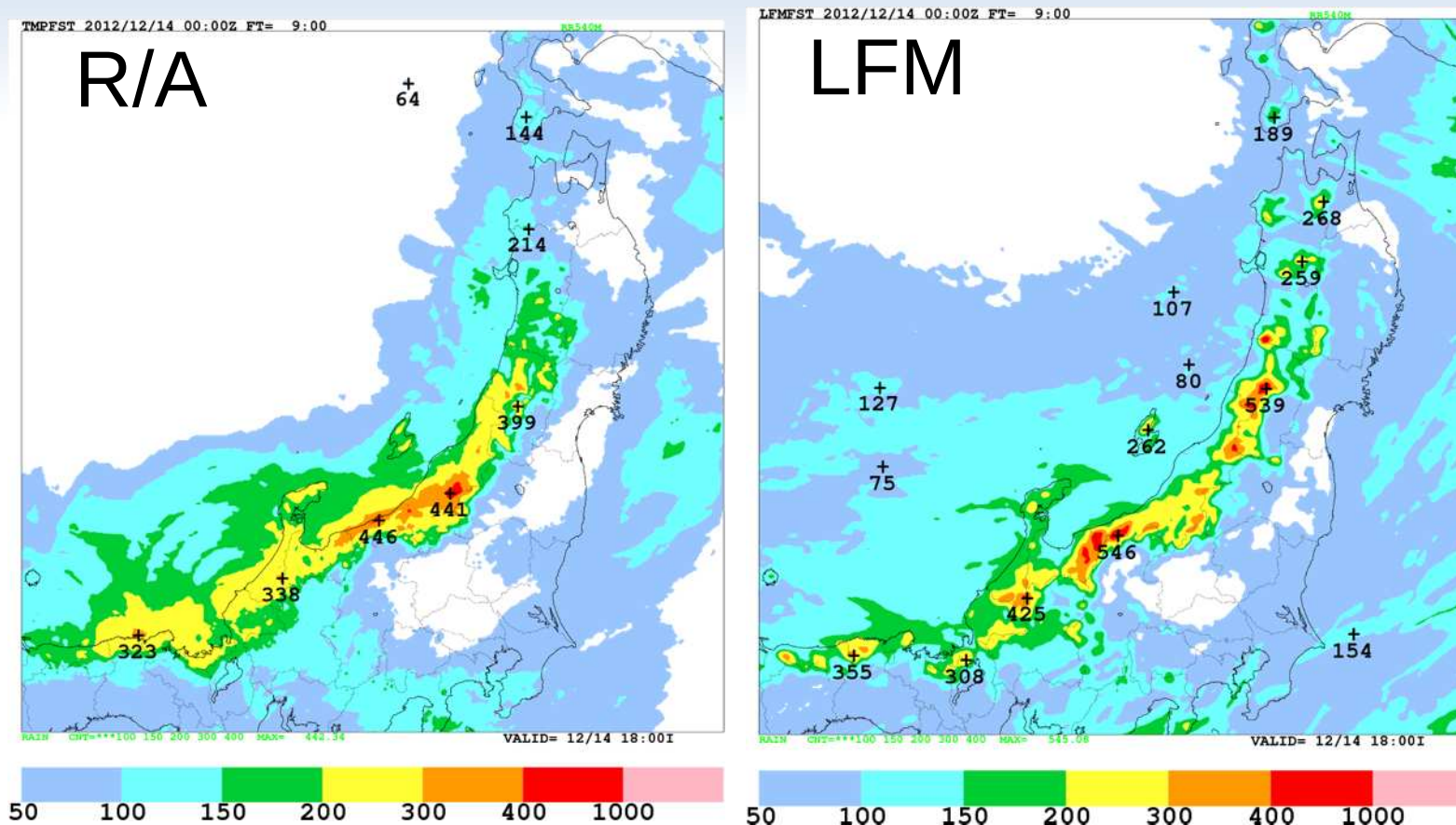
同様の検証を、冬型の日本海に対して行ったらどうなるか？

PCT89 の輝度温度の頻度分布



冬季のモデルの課題:日本海沿岸の過少な降水量

冬季のある期間の積算降水量の実況とモデル予想



沿岸でモデル予測が過少で、地形に沿ってモデル予測が過大
考える原因: 雲物理、解像度による上昇流の弱さ、海面からの水
蒸気供給の少なさ など。

Joint Simulator の利用

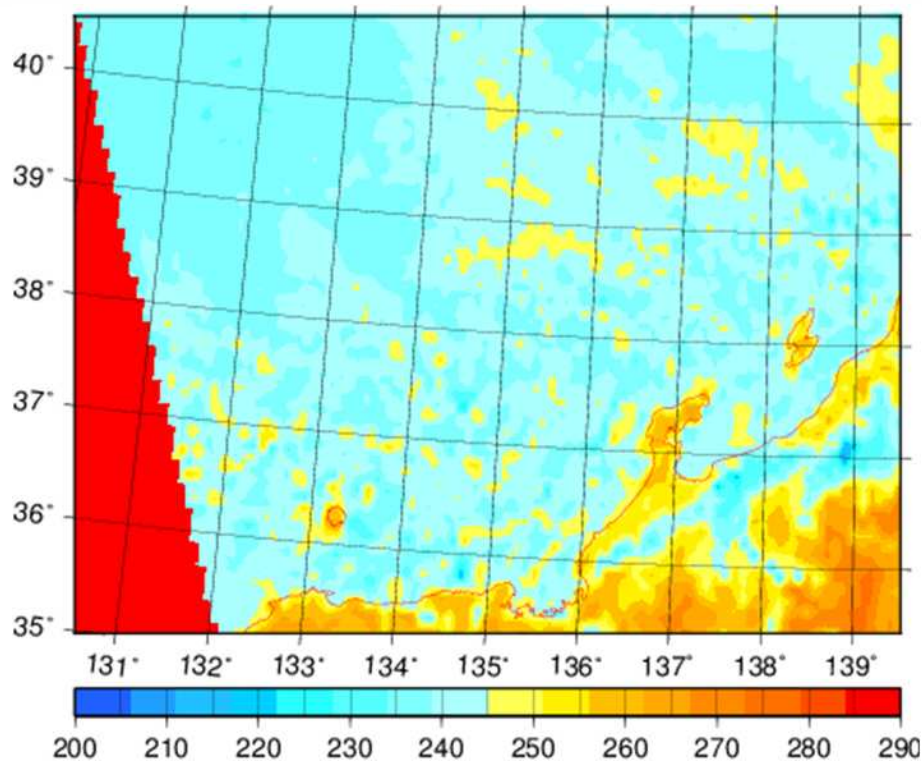
- モデルにJoint Simulator の入力となるデータセットを出力をする仕組みを実装。
 - 粒径分布関数のパラメータなどもそのデータに保存。
- バグ修正や機能拡張でJoint Simulator の開発にも寄与

Joint Simulator による冬の日本海の雲

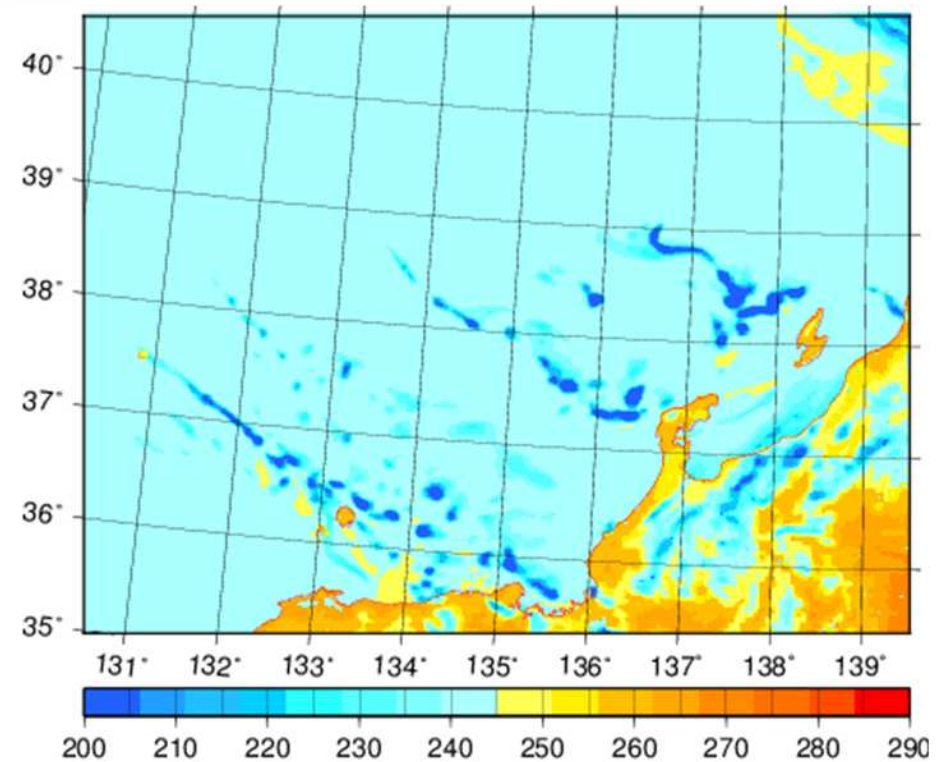
- AMSR2 の 89GHz-V と比較
 - 89GHz では、雪や霰の散乱が強いと輝度温度が低くなる。
- 現業LFMで用いている1モーメントスキーム(1-mom)と観測を比較。
- 水平格子間隔は2kmで、現業LFMと同じ設定。
- 2015年2月13日0330UTCの予測に注目
 - 初期時刻は2/12 21UTC

マイクロ波の実況とモデル予測からの シミュレーション

AMSR2 89GHz V



1-mom シミュレーション

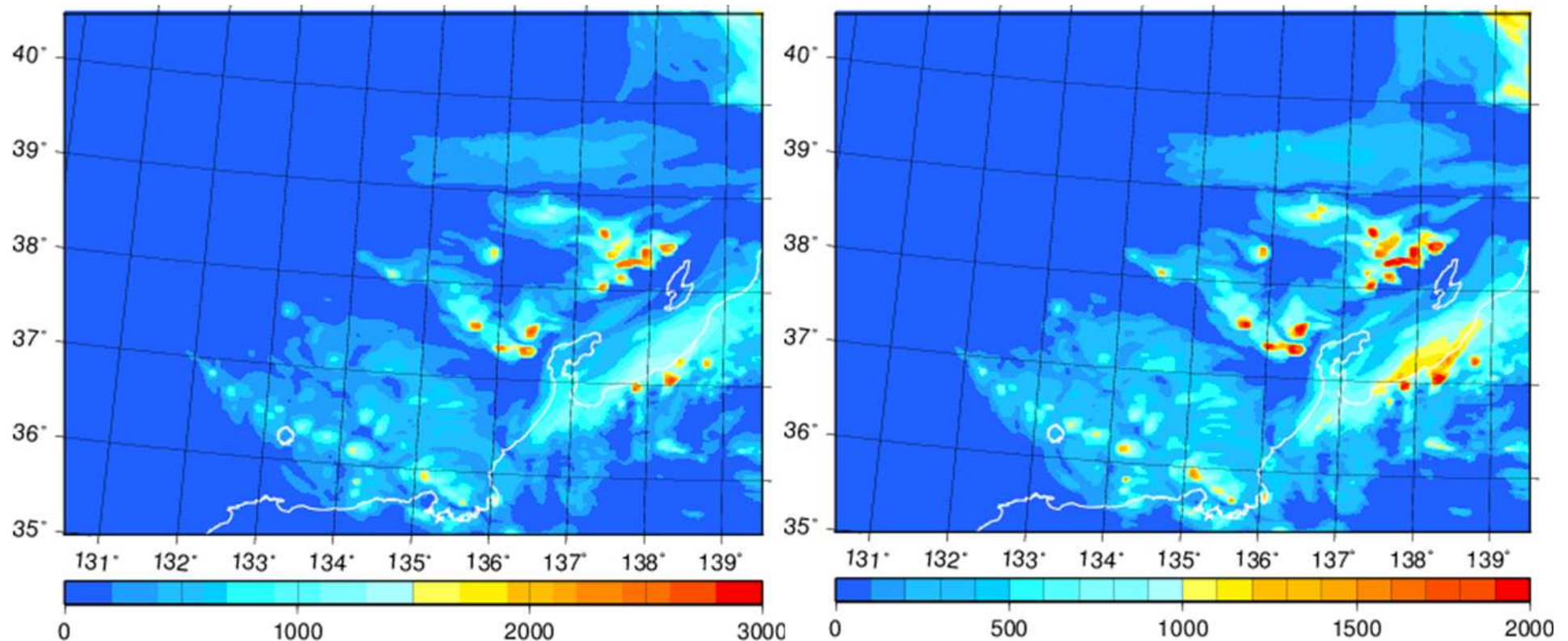


モデルでは輝度温度が低い部分が集中し、その輝度温度は実況よりかなり低い。

モデル予測の雪の数濃度と有効半径 (高度3000m付近)

雪の数濃度 ($1/m^3$)

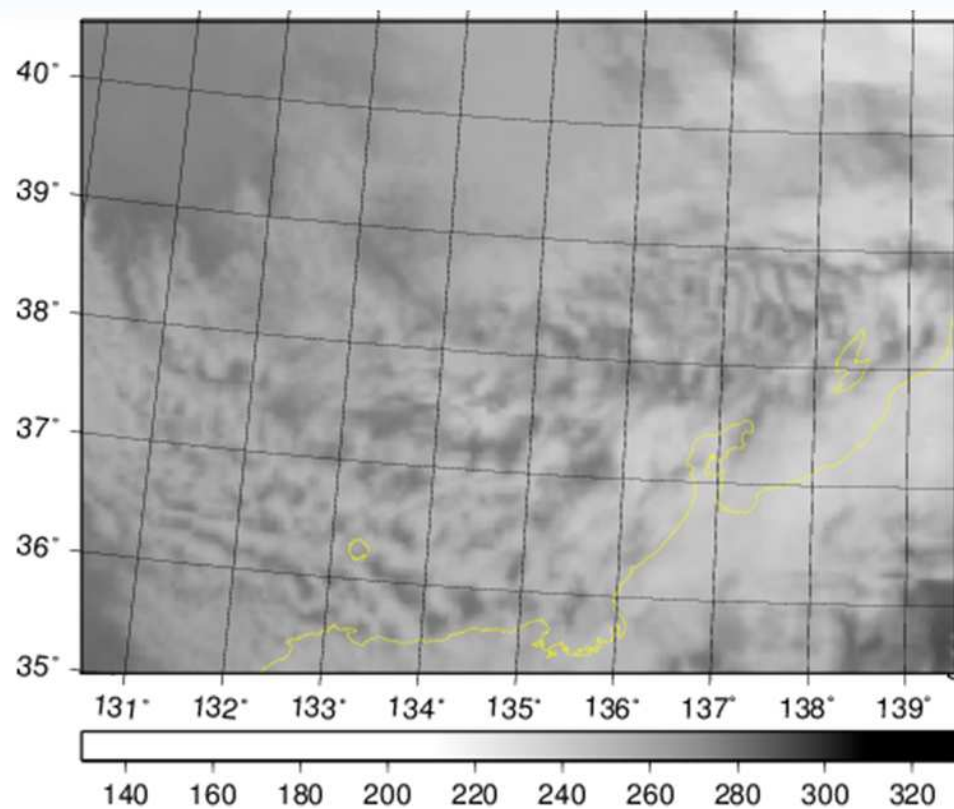
雪の有効半径 (μm)



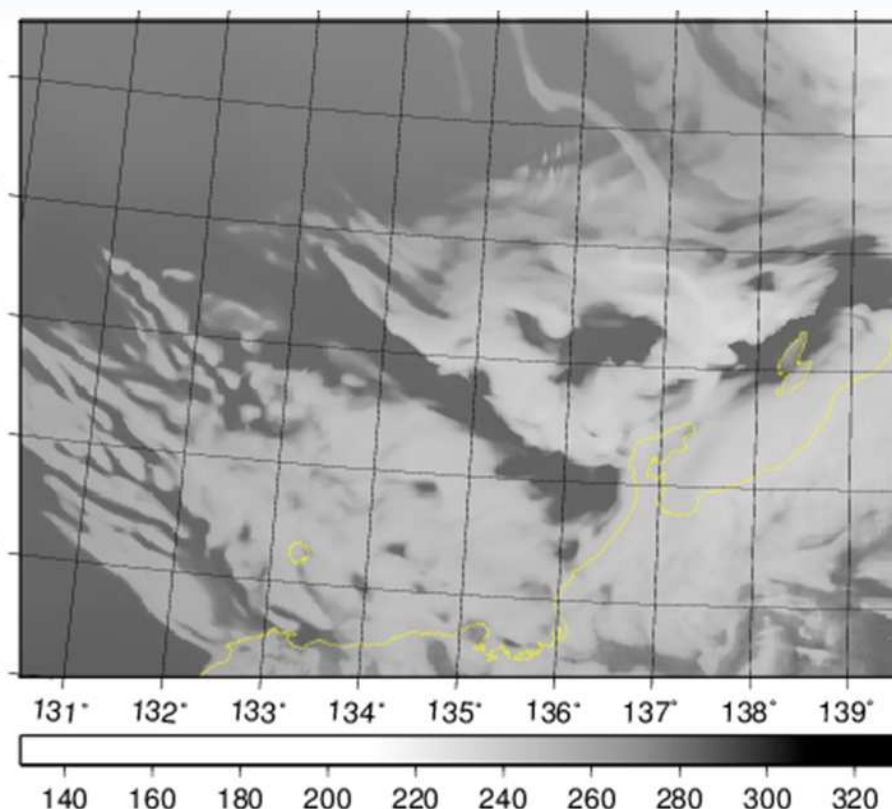
数濃度は極端に小さく、雪の有効半径は現実より大きなもの(0.5mm以上)のものが多

予想衛星画像(赤外)と実況

MTSAT-2 IR



1-mom 予想衛星画像



雲の広がり、モデル予想のほうが沖でやや少ない

1-mom についてわかったこと

- 実況には対応しない雲の集中を表現
 - 解像度が不足？ 部分雲の扱いが必要？
- 雲の集中域で特にマイクロ波輝度温度が低い。
 - ← 雪の有効半径が非常に大きい(0.5mm以上が多数)
 - 雪の典型的な半径は0.2-0.5mm程度
 - ← 雪の数濃度が非常に小さい
 - または 雪の混合比が非常に大きい
 - 特に1-momでは、混合比の変化に対して、数濃度や有効半径が非常に敏感。

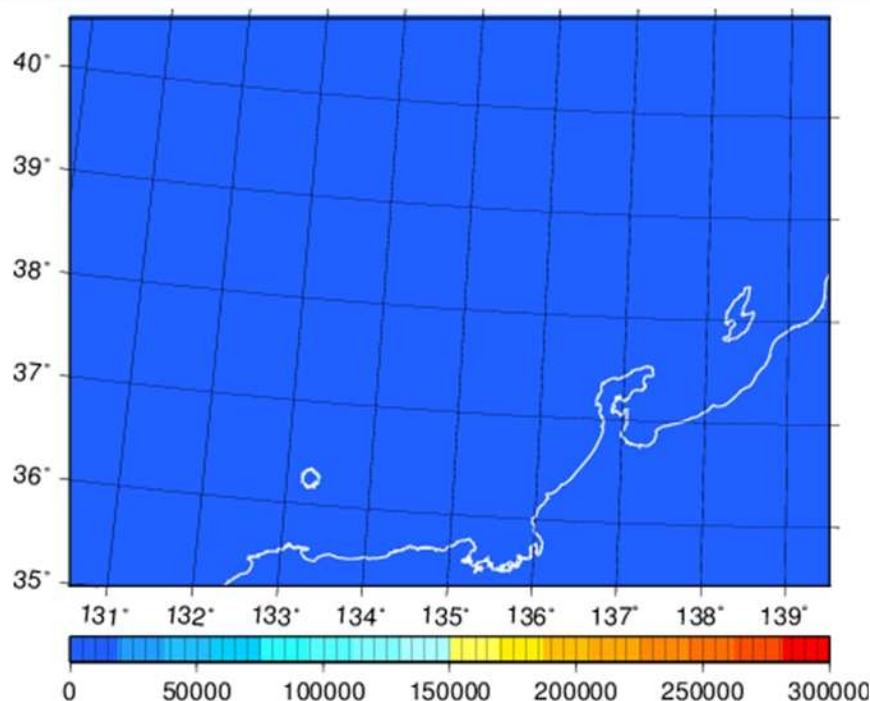
$$r_e = \frac{\langle r^3 \rangle}{\langle r^2 \rangle} = \frac{3}{4} \frac{N}{N_0} = \frac{3}{4} \left(\frac{\rho q}{\pi N_0 \rho_0} \right)^4$$

- 粒径分布の問題であれば、2-momentスキーム(雲氷と雪)を使えば解決するのか？

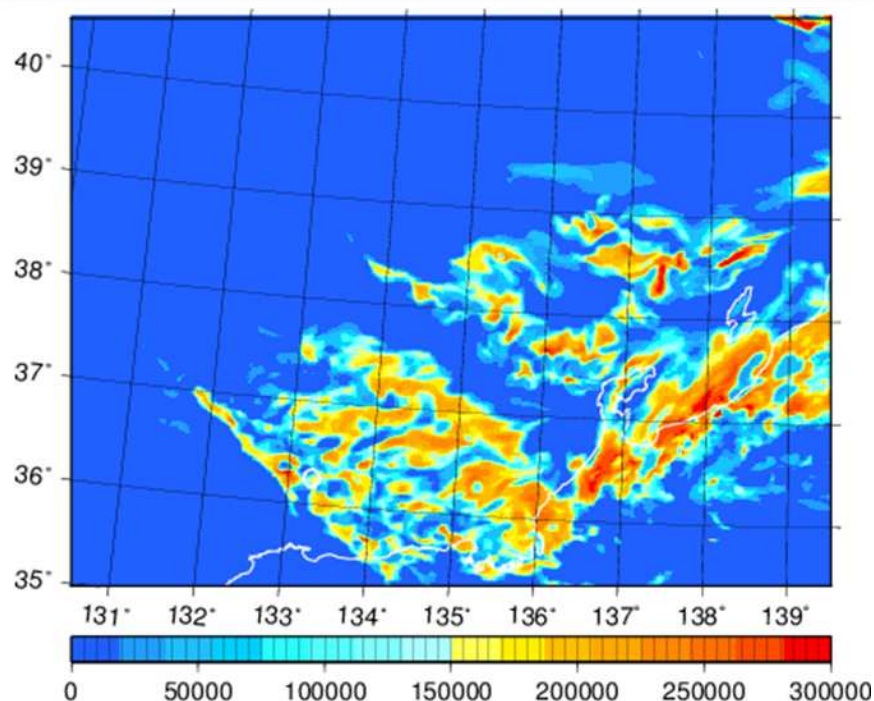
1-mom と 2-mom の比較

雪の数濃度($1/m^3$, 高度3000m付近)

1-mom



2-mom



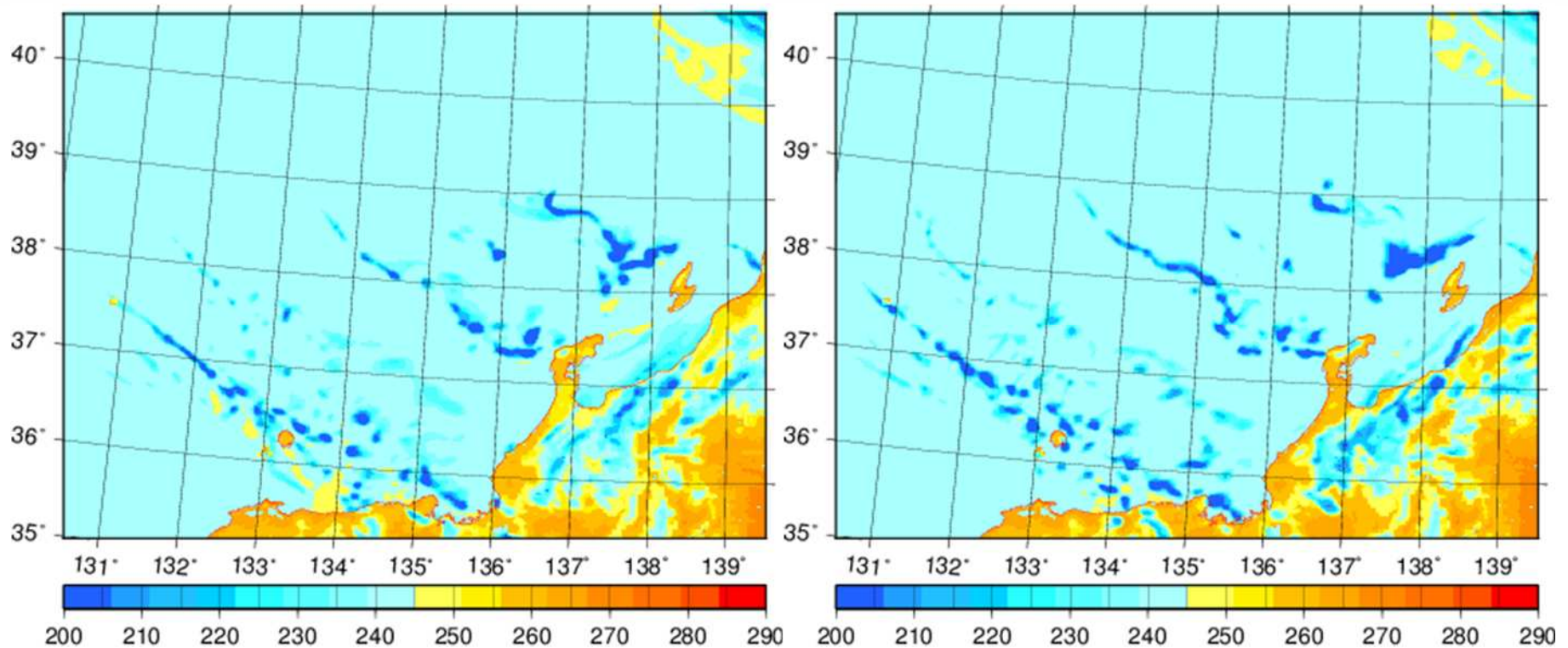
雪の数濃度は(期待通り)非常に大きく増えている。
(前のスライドと1-momの雪の数濃度のスケールを変更していることに注意)

1-mom と 2-mom の比較

89GHz(V) のマイクロ波輝度温度

1-mom

2-mom



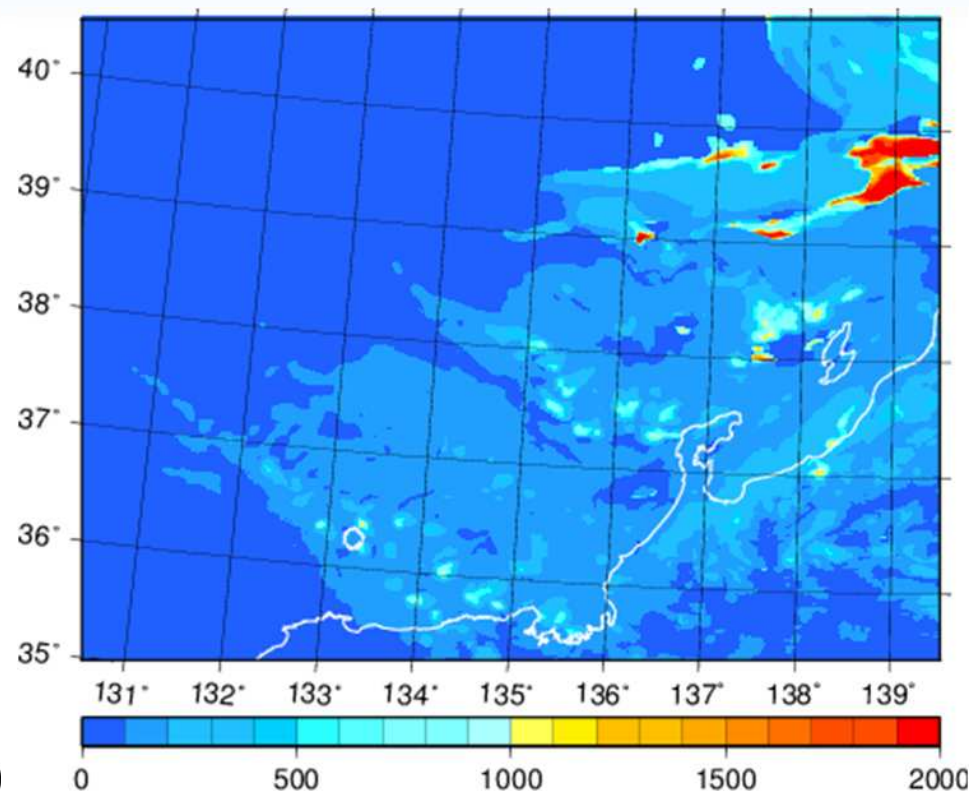
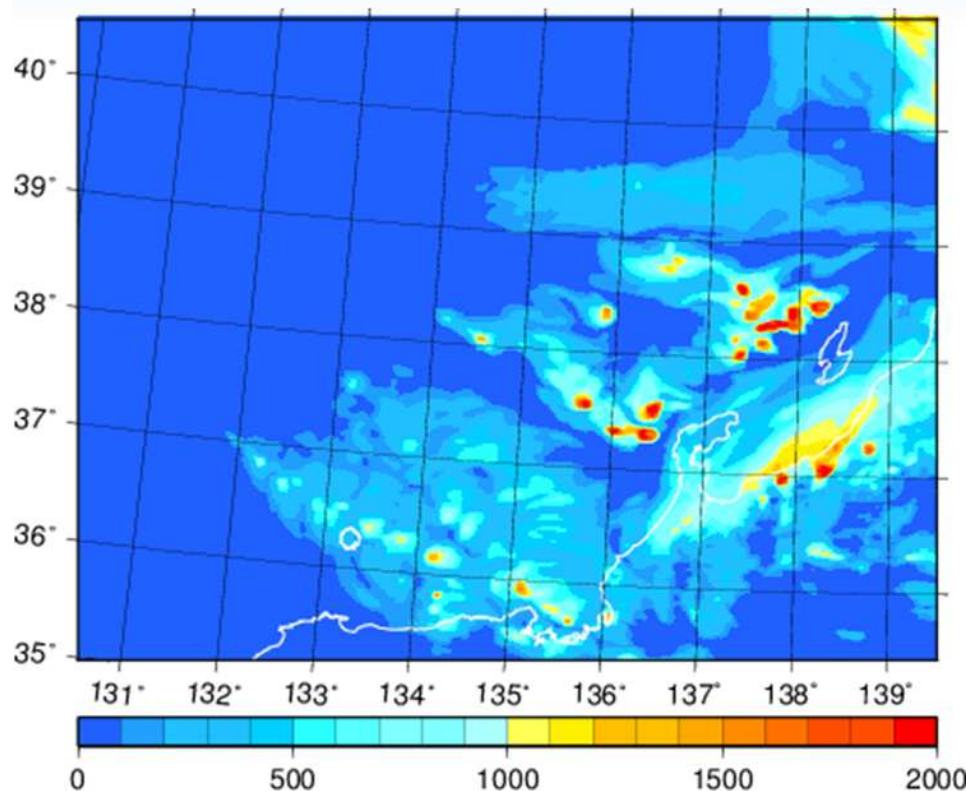
雪の数濃度の劇的な変化ほど、輝度温度は変わっていない。

1-mom と 2-mom の比較

有効半径(μm , 高度3000m付近)

1-mom

2-mom



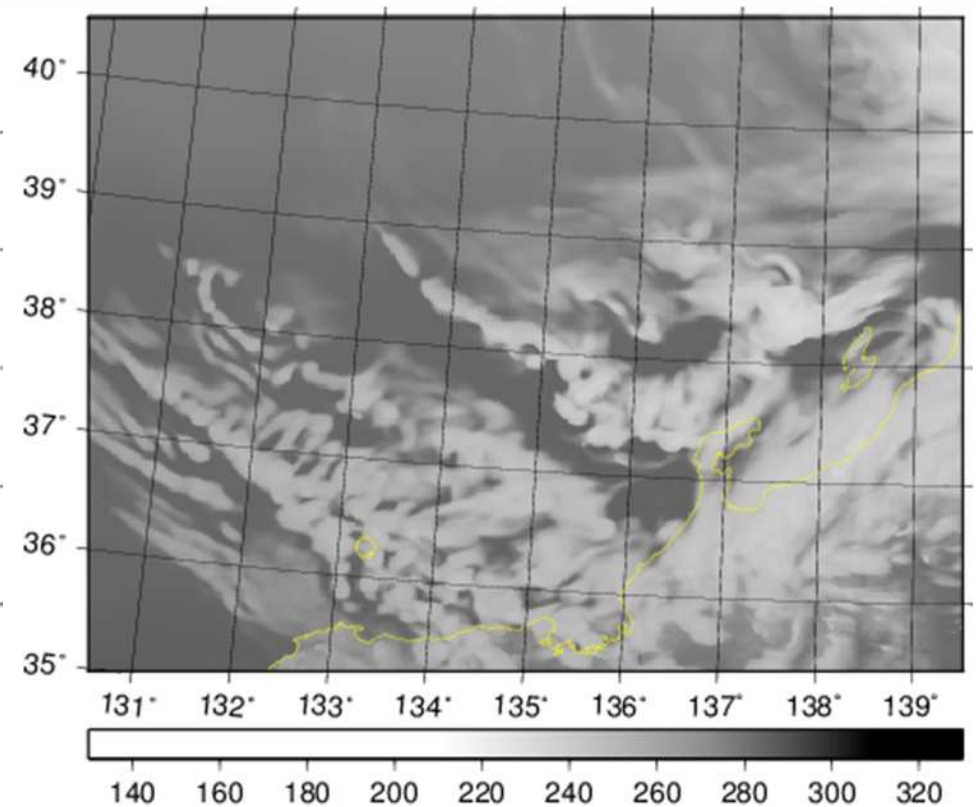
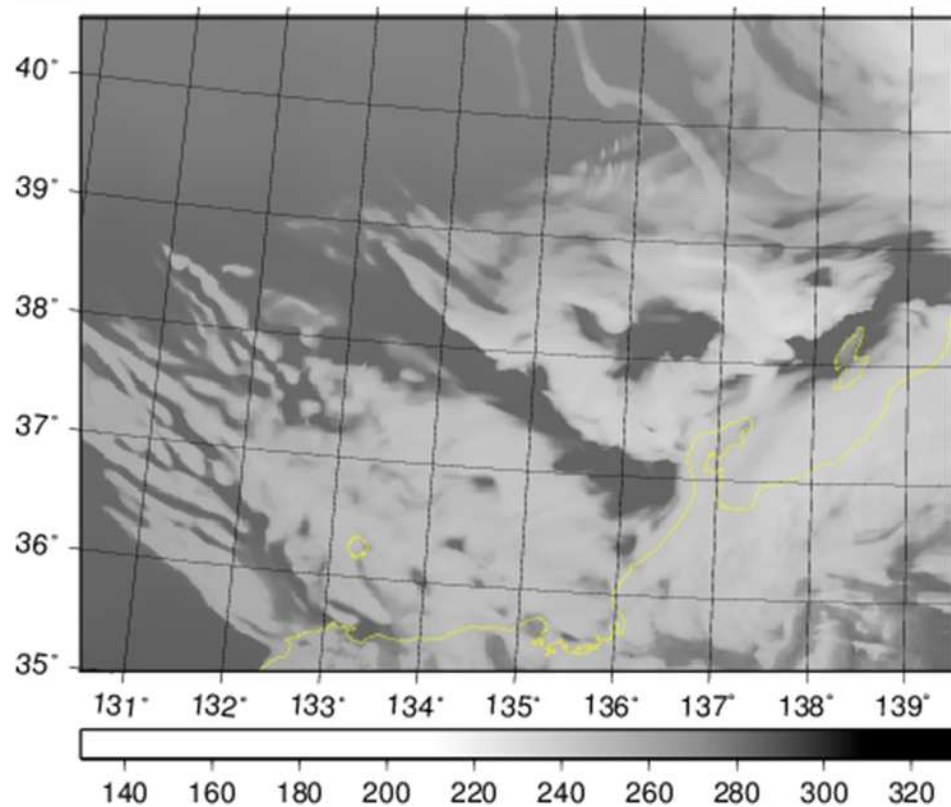
2-mom の方が有効半径が小さいが、極端に小さいわけではない。
数濃度が大きく増えたのに、有効半径がそれほど小さくならない
＝混合比も大きく増えていることを示唆

1-mom と 2-mom の比較

赤外輝度温度(予想衛星画像)

1-mom

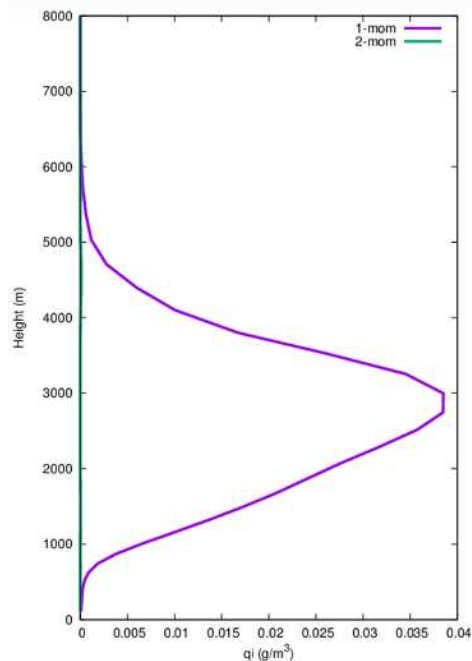
2-mom



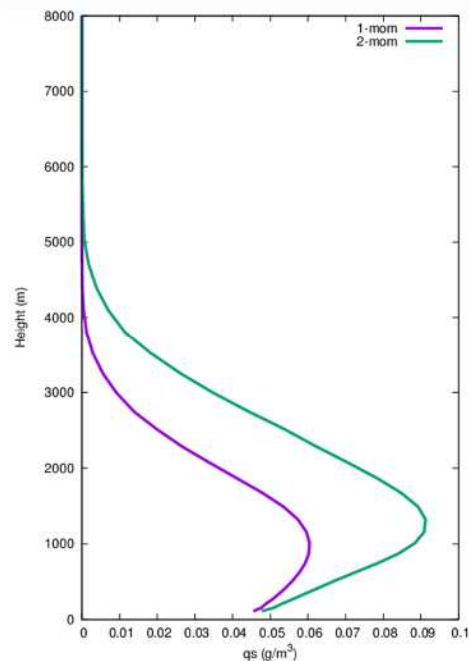
実況よりやや少ない1-momでの雲の広がり、2-momでさらに小さくなる。

領域平均の鉛直プロファイル

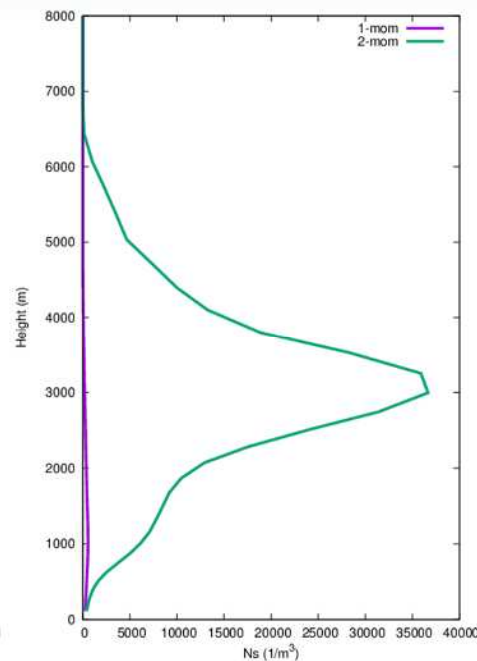
雲氷混合比



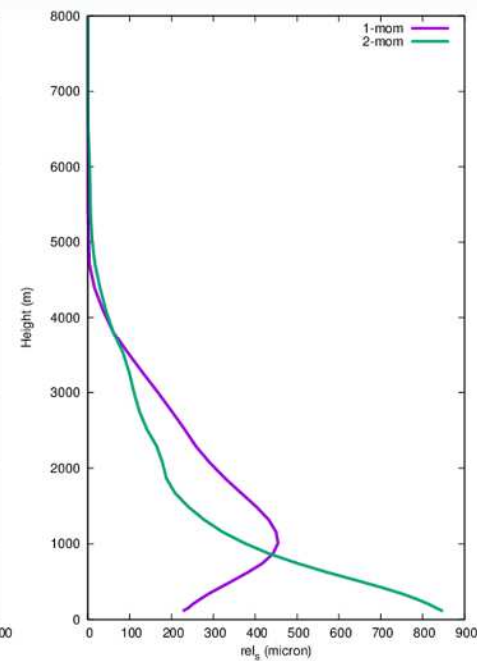
雪混合比



雪数濃度

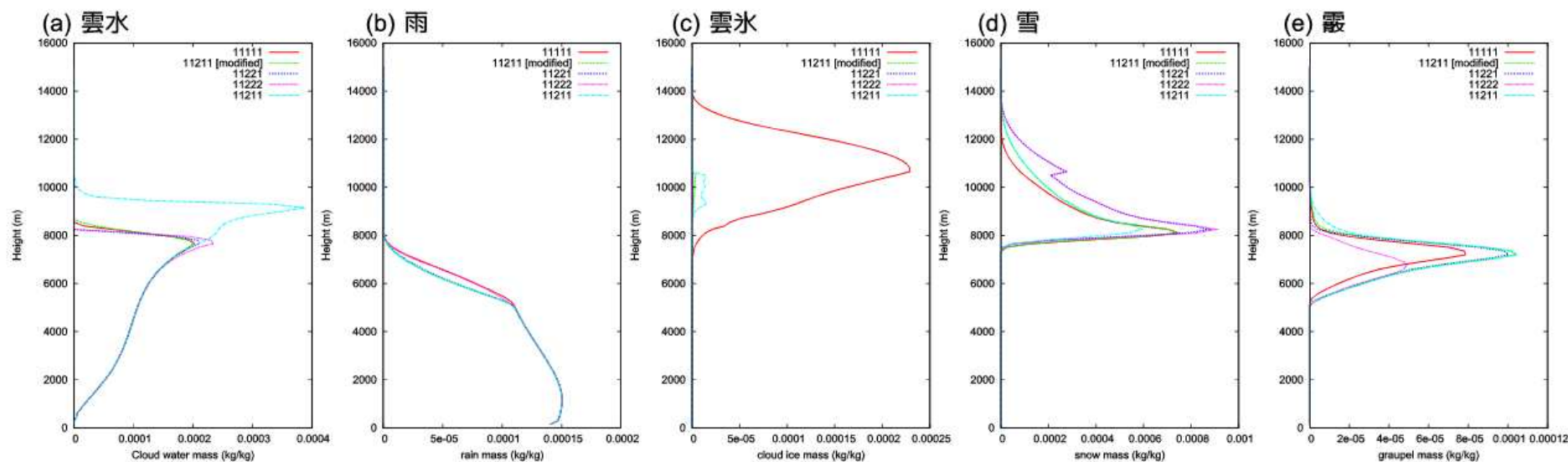


雪有効半径

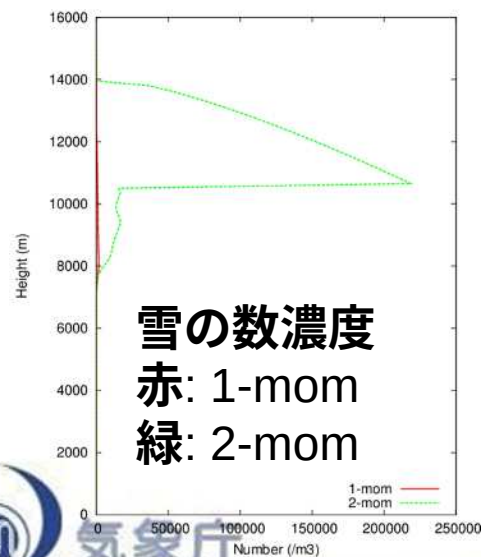


高度3000m付近で、2-mom では雲氷が大幅に減り、その分、雪が増加。
雪の数濃度は2-momで大幅に大きくなり、有効半径も縮小しているが、大幅な変化ではない。

鉛直1次元モデルの結果を思い出すと



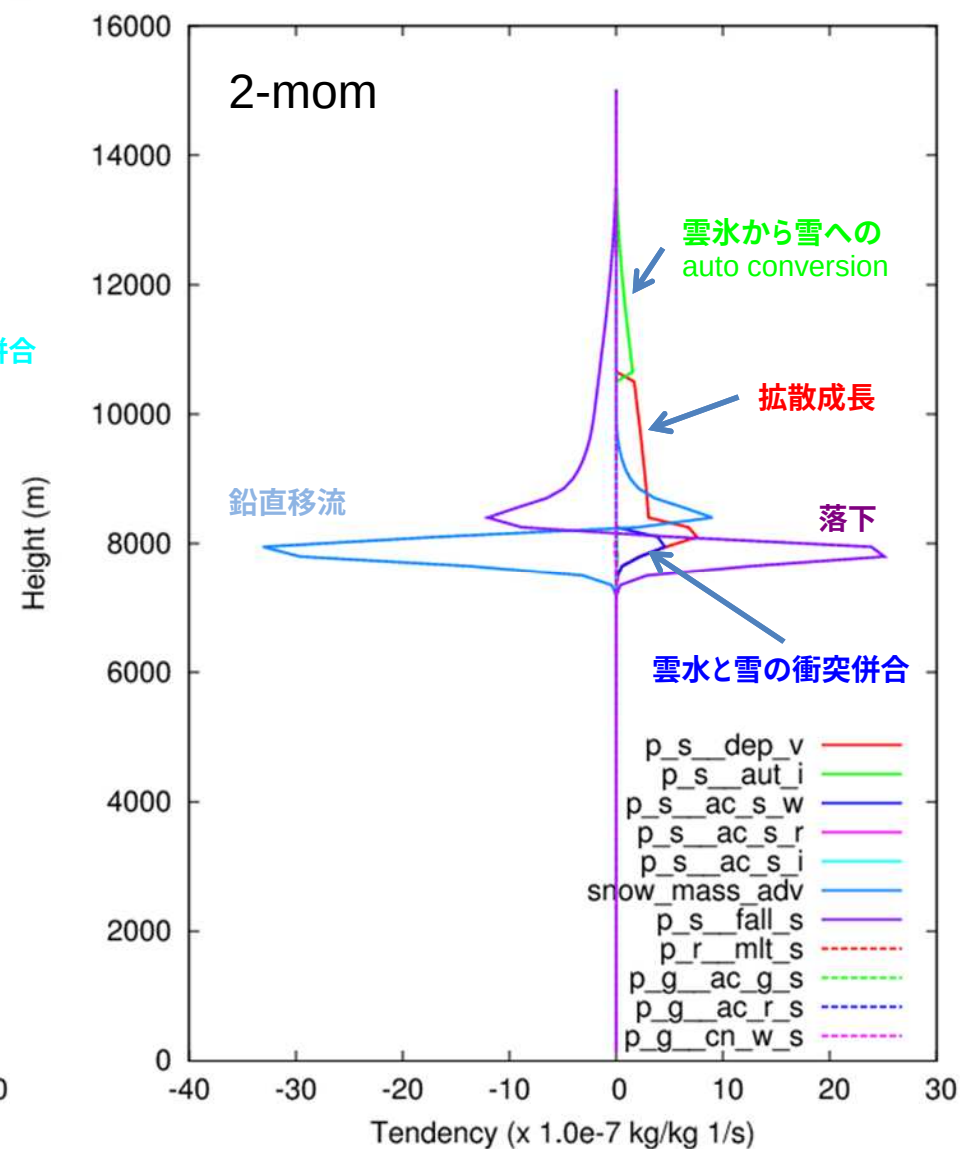
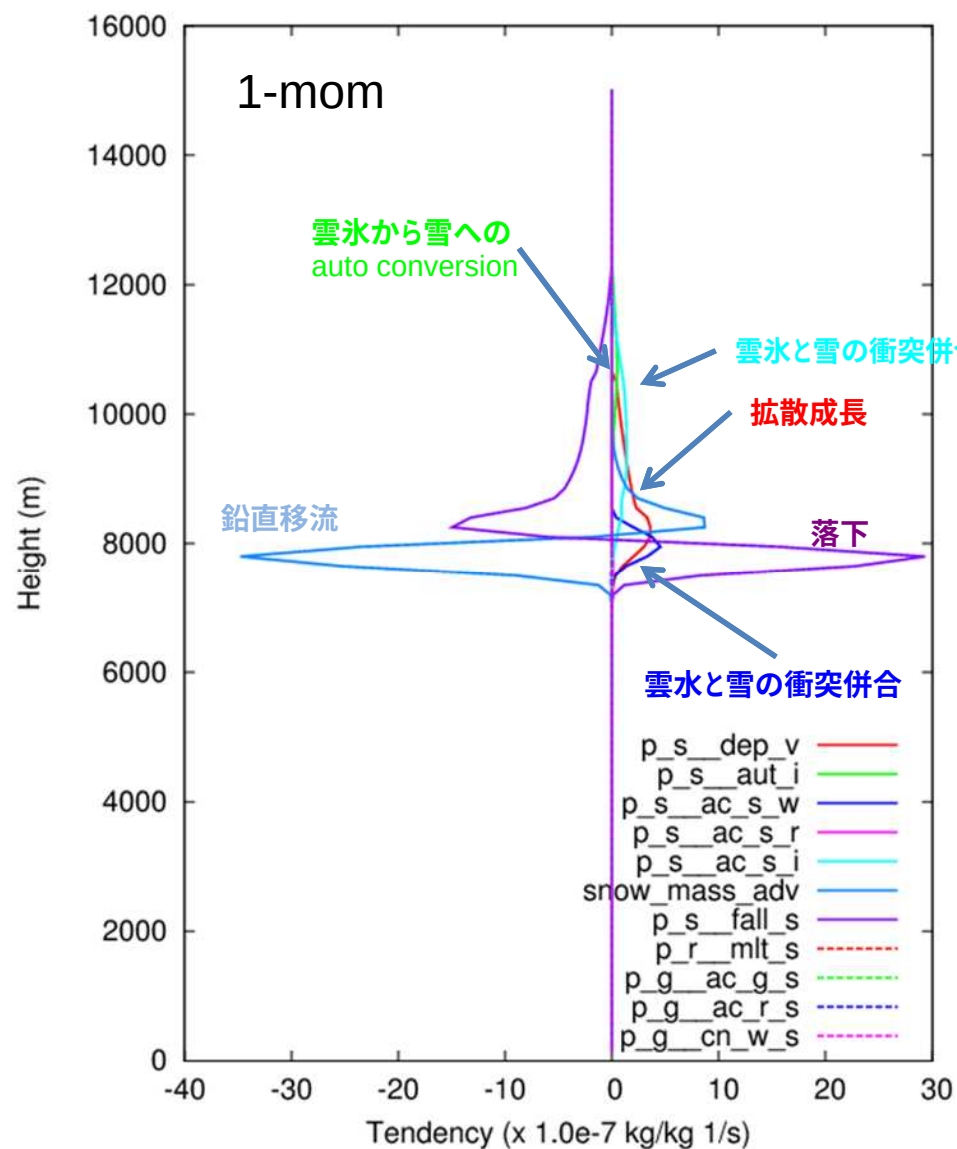
(想定事例が違うので)高度は違うが、雲氷、雪の混合比、雪の数濃度の関係は冬の事例と同じ。



雪の数濃度
赤: 1-mom
緑: 2-mom

1-mom では上層で雲氷が多いのに対し、
2-momでは対応する層で雪が多い
→赤外で輝度温度が高くなることに対応。

鉛直1次元モデルでの雪の生成・成長の時間変化率



見えてきた課題

- 雪の質量が多すぎる/雪の数濃度が小さすぎる
 - 結果として、1-momでは有効半径が大きくなり、高周波マイクロ波の輝度温度が低くなる。
 - Eito and Aonashi (2009)での梅雨の事例での結論や、気象研・村上さん、橋本さんの観測結果の解析とも合致
 - 2-mom にすれば、雪の数濃度の極端な過少は改善されるものの、混合比が多くなり有効半径は大きく変わらず。上層の雲氷の過少が顕在化。
 - 1-mom の雲氷は赤外画像からはそんなに悪くない。
 - 2-mom では雲氷から雪への変換過程に大きな課題
 - 1-mom と 2-mom で大きく定式化が異なるところ。

1-mom
p_s_aut_i

$$= \begin{cases} \alpha_i \exp[0.025(T - T_0)](q_i - q_{i0}) & (q_i \geq q_{i0}, T < T_0) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases}$$

p_s_aut_i

$$= \begin{cases} (q_i - q_{i,\max})/\Delta t & (q_i \geq q_{i,\max}, T < T_0) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases}$$

$$q_{i,\max} = \frac{M_i N_i}{\rho} \quad (N_i: \text{prognostic})$$

2-mom

(M_i : maximum mass of a cloud ice particle)

改良の方向性

- より自由度のある雪の粒径分布関数
 - 2-mom
 - 1-mom で固定しているパラメータに何らかの変化を与える(Roh and Satoh, 2014など)
 - 切片パラメータの温度依存性(現在は固定)
$$N_{0s} = 2.0 \times 10^6 \exp[-0.12(T - T_0)]$$
 - 質量-粒径関係(現在は球を仮定し、密度固定)
$$m_s(D) \propto D^2, \quad \rho_s \propto D^{-1}$$
 - 粒径分布が変化すれば、各過程の寄与も変化してくることに注意
 - 拡散成長、衝突併合など
- 雲氷から雪への変換
 - 雲氷に粒径分布を導入し、粒径分布を使って、ある大きさの粒径を超えたものを雪に変換(気象研・橋本さん)

Joint Simulator の高速化の必要性

- 現状、高速化できるところで、高速化がされていない。
 - メモリの連続性の問題など
 - スパコンよりMacbook Proのほうが場合によっては効率よく動く。
 - 計算が重そうなところに、OpenMP の指示行を入ただけでもかなり高速になる。
 - 領域分割によるMPI並列もできるようになっているが、ロードインバランスが大きく、並列化効率はあまりよくない。
- 今後、さらに大きな問題を扱うために、計算効率も念頭に置くべき。
 - 高速になり、モジュールとして利用しやすくなれば、(予想衛星画像のように)ルーチンのモニタに組み込むこともあり得るかも

まとめ

- 降水予測はプロダクトとしては重要であるが、それだけを精度向上しようとしても限界がある。
- データ量が膨大になる中で、そのデータの特性を示す物理量・手法は今後さらに重要になる。
 - 衛星シミュレータは、その有力な手法の一つ
- 雲物理過程には様々なバリエーションがあり、その検証にも衛星シミュレータは有効。
 - 特にマイクロ波は雲粒子を絞って検証できる可能性がある。
- LFMでは、雪の有効半径が大きすぎる。
 - 2-mom にすると過大な有効半径は緩和されるが、雲氷から雪への変換が速すぎて、雲氷が極端に少なくなってしまう。
- 雲氷から雪への変換過程に大きな課題