



気象庁現業モデルの 物理過程の開発課題

気象庁予報部数値予報課

原 旅人

tabito.hara@met.kishou.go.jp

本日の内容

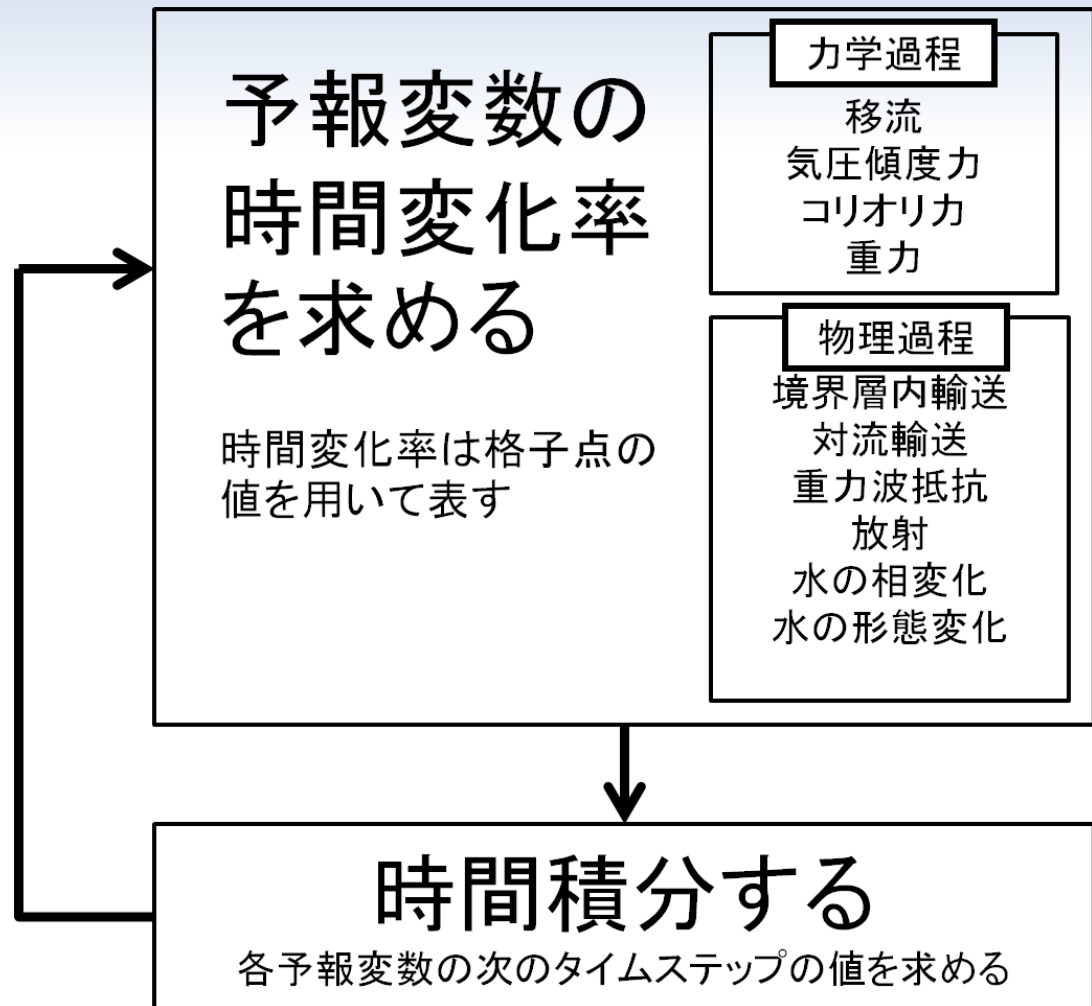
- 個別のスキームの具体的な話ではなく、物理過程開発のあり方について議論します。
 - それは、最近、気象庁の中でもいろいろ議論されているところ。
 - 台風がテーマなので、台風を意識しますが、必ずしも台風に話題は限りません。また、台風に関連する事例でも、ここで紹介することは台風予報に限らず、モデルの物理過程開発全般に関係します。

最近の気象庁の物理過程開発に関して

- キーワード
 - ボトムアップ・アプローチとトップダウン・アプローチ
 - 詳細はのちほど
- 数値予報課報告・別冊
 - 58号「物理過程の改善に向けて(I)」(2012/03)
 - 各物理過程の概要・考え方(気象庁モデルに限らず)
 - ボトムアップ・アプローチとトップダウンアプローチの概要
 - ボトムアップ・アプローチによるモデルの評価・改良
 - 59号「物理過程の改善に向けて(II)」(2013/03)
 - 現業モデルの検証手法・現業化のための判断基準
 - トップダウン・アプローチによるモデルの評価手法
 - 開発管理について

数値予報モデルの2つの柱

- 数値予報モデルを理解するには、それぞれの計算がこの柱のどこに対応しているかに常に注意。



各過程からの時間変化率の扱い

- 一般に解くべき偏微分方程式の右辺は複数の時間変化率の和

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \sum_i F_i(\phi)$$

- 一つ一つの項がそれぞれの過程に対応
- 数値予報モデルでは、一般には、時間変化率を構成する**各項は独立**とみなし、各過程からの時間変化率を足し合わせる。
 - そのためには、**他の過程による場の変化の影響を無視できるような時間積分間隔を取る必要がある。**
 - 時間積分間隔は必ずしも力学の計算安定性の要請からのみで決まるわけではない。

台風予報に重要な物理過程とスキームの違いによるインパクト

台風予報において重要な過程

積雲対流

- 台風の力学、特に運動量、熱、水蒸気の鉛直輸送の主たる部分を担う。
 - 低解像度モデルではその鉛直輸送を担う格子平均の鉛直速度はほぼゼロ。パラメタリゼーションが必要
- 対流輸送のパラメタリゼーション
 - 気象庁全球モデル:荒川シューバートスキーム
 - 低解像度向けに開発。一つの格子の中でエントレインメント率が異なる積雲のアンサンブルを考える。
 - 不確定性が大きい
- 対流パラメタリゼーションを“使う必要がない”雲解像モデル”導入の大きな動機

積雲スキームの比較例 (革新P H23成果報告書より)

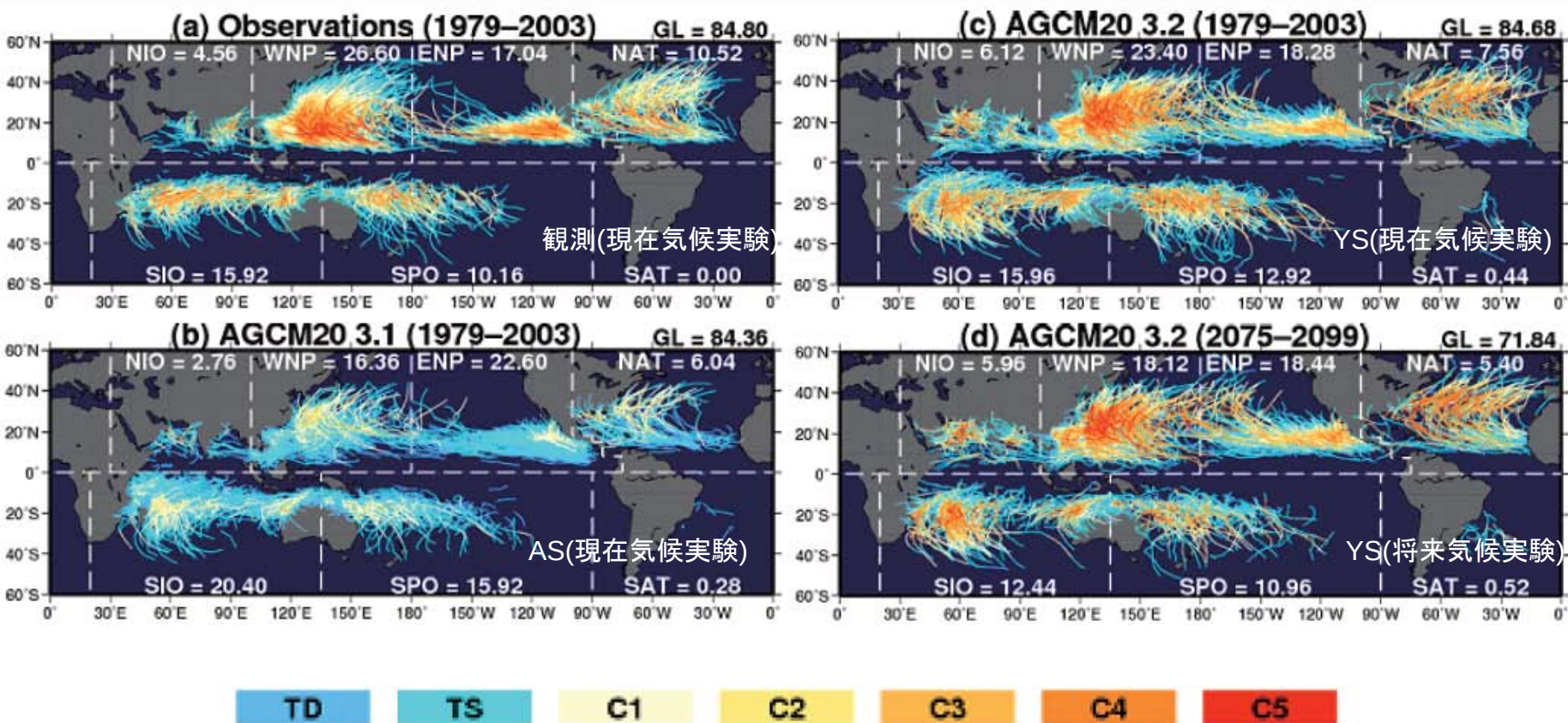


図 14 熱帯低気圧 (TC) の全球分布。(a)観測、(b) 前期 20km モデルによる現在気候実験 (1979–2003 年)、(c)後期モデルによる現在気候実験 (1979–2003 年)、(d)後期モデル 20km による将来気候実験 (2075–2099 年) を示す。色は Saffir-Simpson スケールの TC 強度を示し。図中の数字は年平均発生数を示す。

積雲スキームの比較例 (革新P H23成果報告書より)

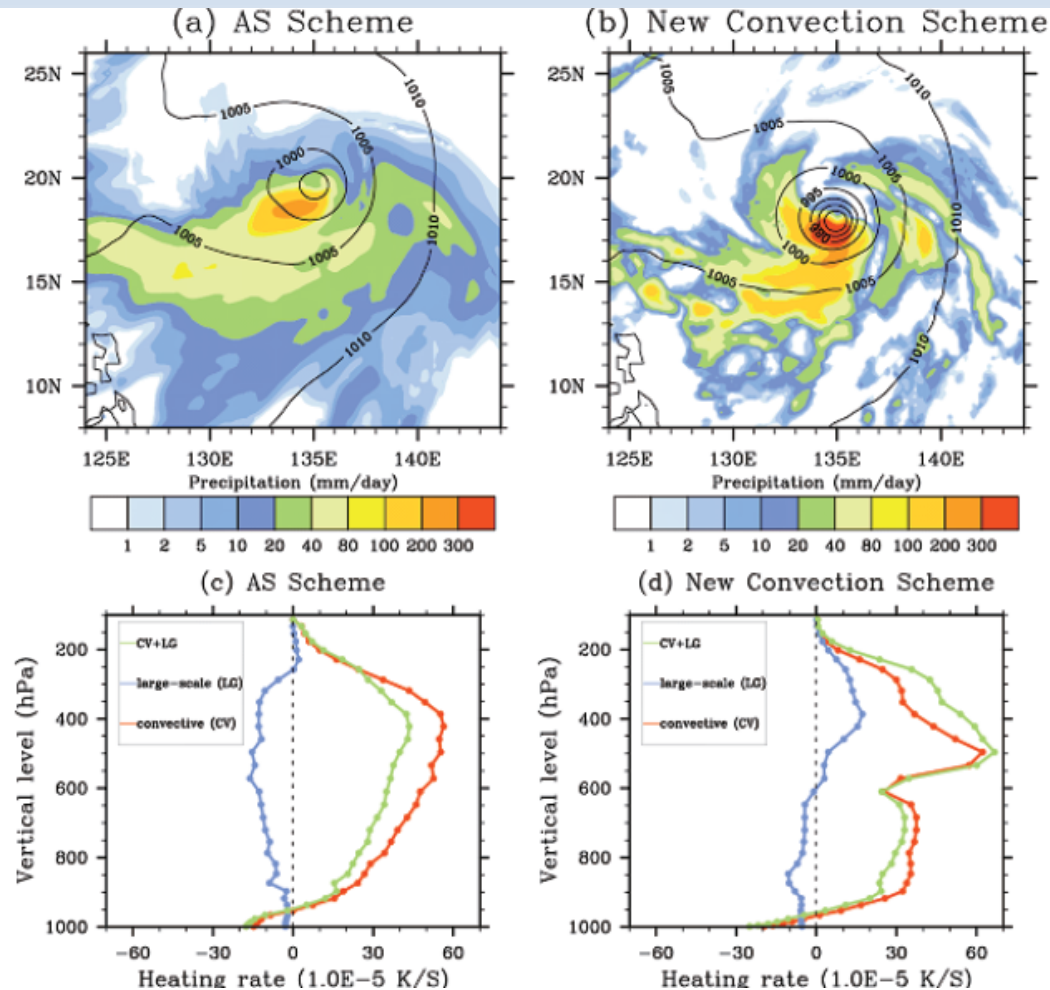


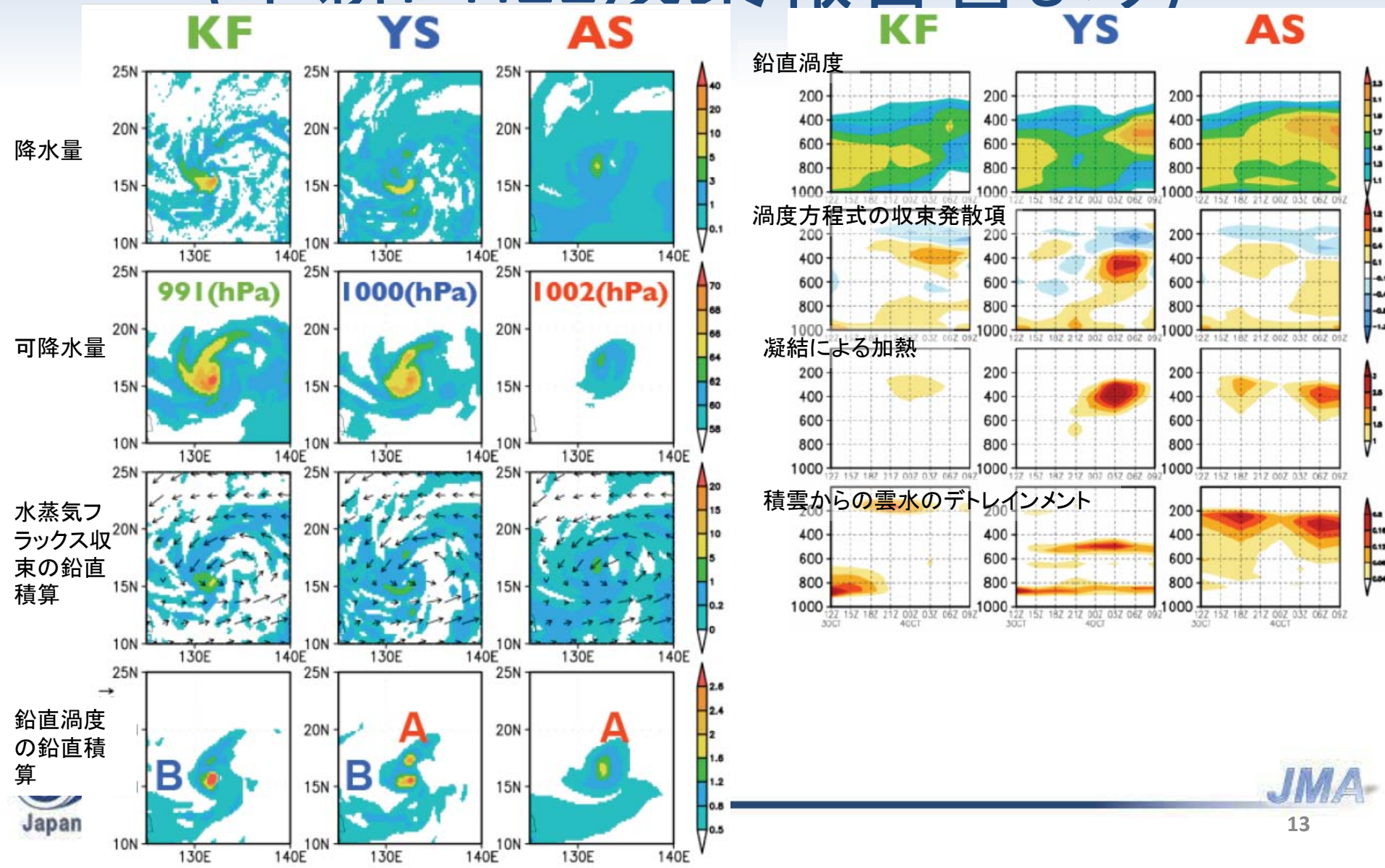
図 16 同じ初期値から予測を開始した 48 時間後の TC 構造の比較。

(a, c) Arakawa-Schubert スキーム, (b, d) 新積雲スキームによる結果。(a)-(b)のコンターは海面更正気圧 [hPa]を示し、シェードが前 1 時間平均降水量[mm/day]を示す。(c)-(d)は中心から 200km 以内の平均加熱率[K/s]の鉛直プロファイルを示し、青線が大規模凝結過程によるもの、赤線が積雲対流スキームによるもの、緑線がその和を意味す

AS スキームによる加熱率の特徴はYS スキームに比べて積雲スキームによる加熱が対流圏の高いところに位置している。一方、YS スキームは積雲スキームによる加熱は抑えられ、代わりに大規模凝結による加熱が上層で発生している。結果としてトータルの加熱率はYS スキームのほうが大きい。大規模凝結による加熱はグリッドスケールの上昇流を促進させていることを意味し、結果として対流圏下層の水蒸気供給と加熱を促進させる。このようなTC を発達させる正のフィードバックがYS スキームでより強いTC が予測できた理由であると考えられる。

積雲スキームの比較例

(革新P H22成果報告書より)



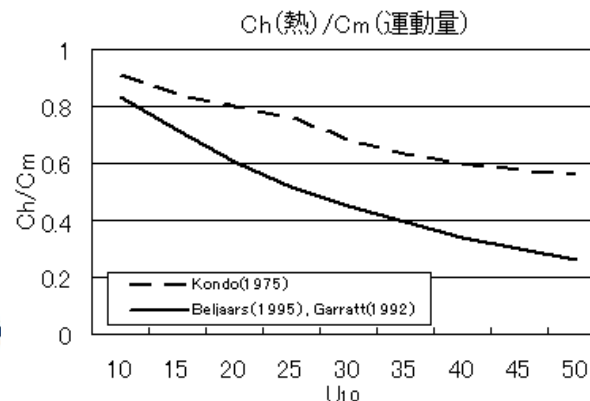
比較結果から

- 予報値だけでなく積雲対流と大規模凝結の加熱率という時間変化率に注目
 - 加熱率から台風の振る舞いについて、ある程度、理解はできる。ただ、まだある程度の推定は含む。
- 加熱率の違いは、スキームのどのような違いから現れるのか？
 - 真の物理過程開発のためには、スキームの取り換えではなく、プロセスを踏まえた問題点の把握、解決が必要 (By Martin Miller (元ECMWF))
- その加熱率の違いが、他のプロセスにどのような影響を与えているのか？
 - 大規模凝結のプロファイルの違いはなぜ起きる？
 - 一つのプロセスの時間変化率が変わると、それを補償するように他のプロセスの時間変化率が変わることも。
- どの加熱率、振る舞いが尤もらしいのか？
 - レファレンスになりうるものは？

台風予報において重要な過程

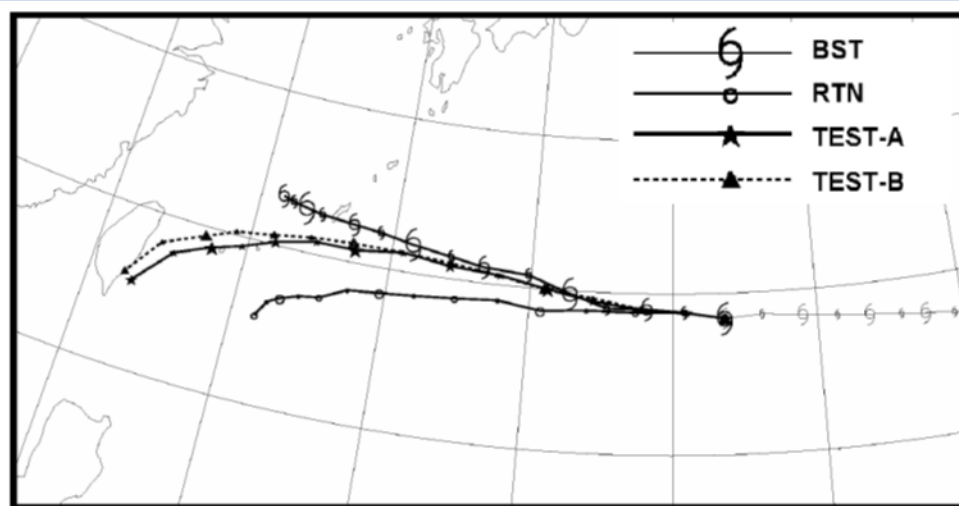
地表面フラックス

- 海面からの熱、水蒸気(凝結して潜熱を放出)は台風発達のエネルギー源
 - よく知られているようにSSTと発達傾向には相関がみられる。
- 運動量フラックス、すなわち地表面・海面の摩擦は下層の収束を促進して発達に寄与
- 地表面フラックスの交換係数は大気最下層風速の関数として与えるが、その風速依存性については、風速とともに単調変化ではなく、ある程度、風が強くなると摩擦が少なくなることも最近は観測されている



Ch/Cm:大
発達する
Ch/Cm:小
発達しない

地表面フラックスの違いによるインパクト



TEST-AとTEST-Bの差が
フラックススキームの違い
(台風モデルTYMにおける開発過程での
比較)

平成15年度数値予報研修テキストより

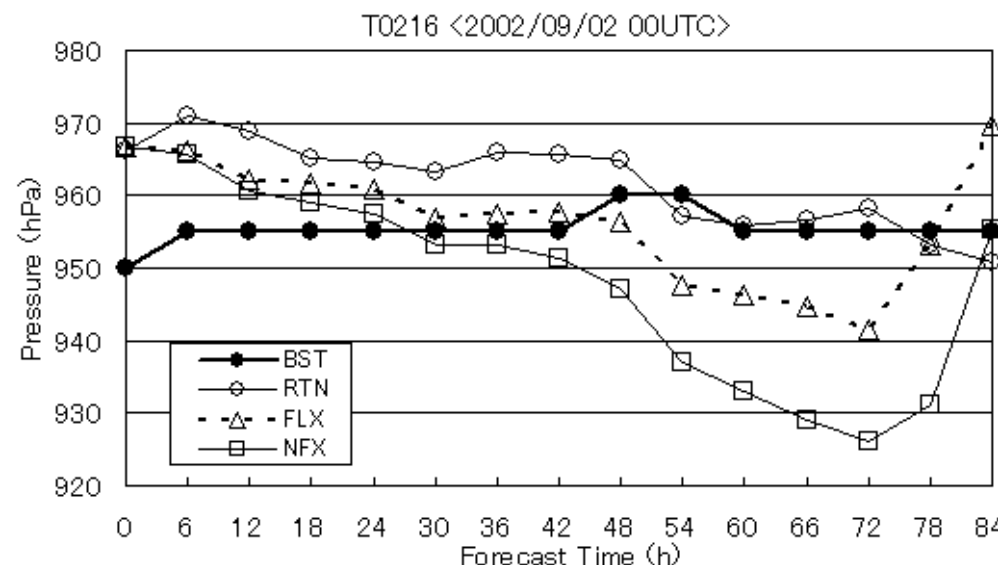
地表面フラックスの役割:

境界層輸送の下部境界条件となる。

また、運動量、熱、水蒸気だけでなく、乱流
エネルギーの生成の下部境界にもなる。
(すなわち、地表面フラックスが大きければ、
より乱流エネルギーが生成され、乱流輸送
がより活発になる)

観測がないので、**本当に正しいのか**、それ
とも**他の誤差を打ち消しているだけなのか**
は分からない。

(実は別の改良で進路予報は非常によくなったが(TEST-AとRTN)、示
度が深くなりすぎたのでフラックスの調整をした)



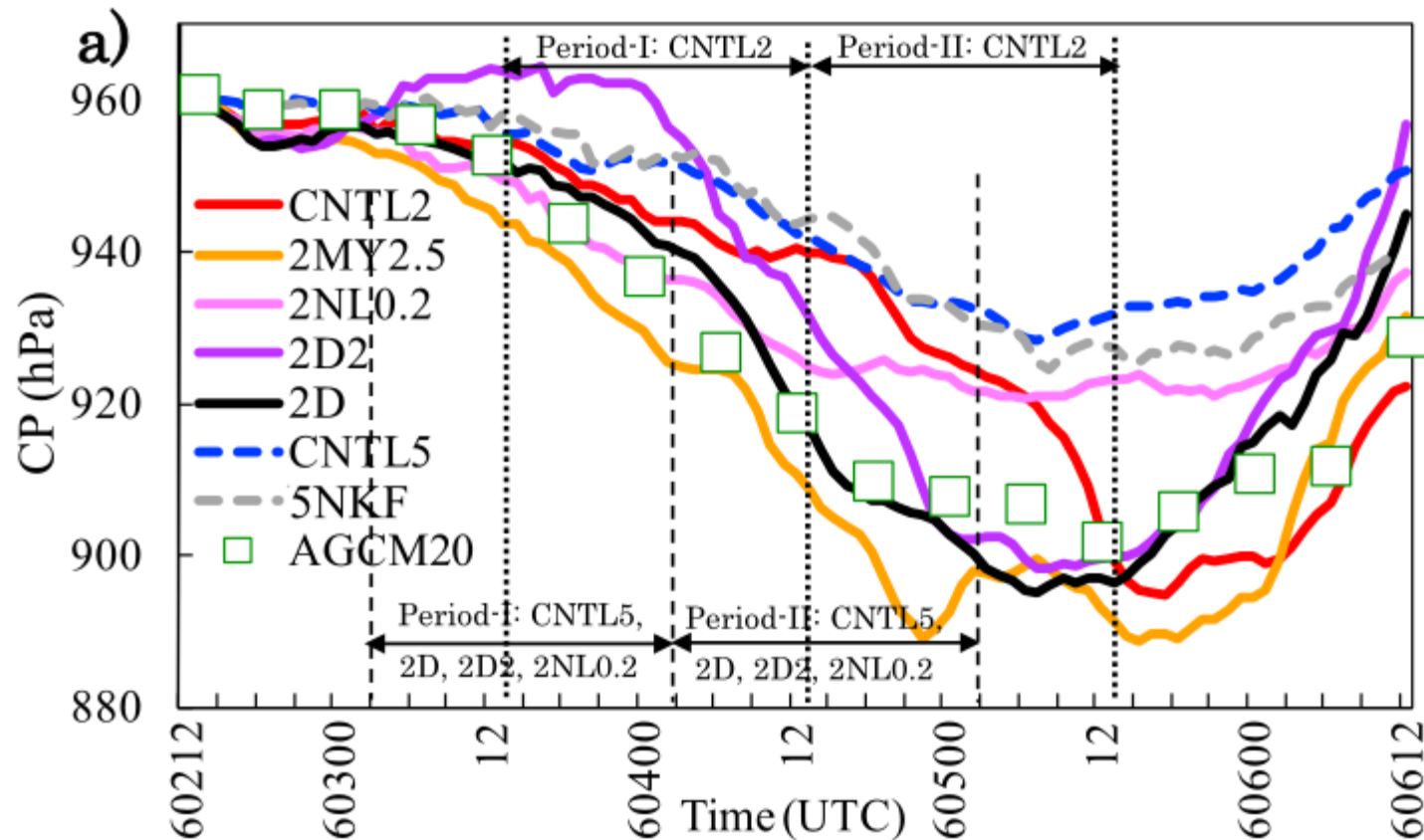
台風予報において重要な過程

境界層輸送

- 乱流によって運動量、熱、水が(主に)鉛直方向に輸送
- 最近は、積雲対流だけではなく、境界層スキームの違いによるインパクトも調査されている。
- 積雲対流による鉛直輸送とどのように区別するかは課題
 - 輸送の効果を二重カウントしている恐れも。

境界層スキームの違いによるインパクト 中心示度

複数の解像度・境界層スキームによる台風の示度の時系列



Kanada et. al (2012)より

境界層スキームの違いによるインパクト 台風の中の拡散係数の比較

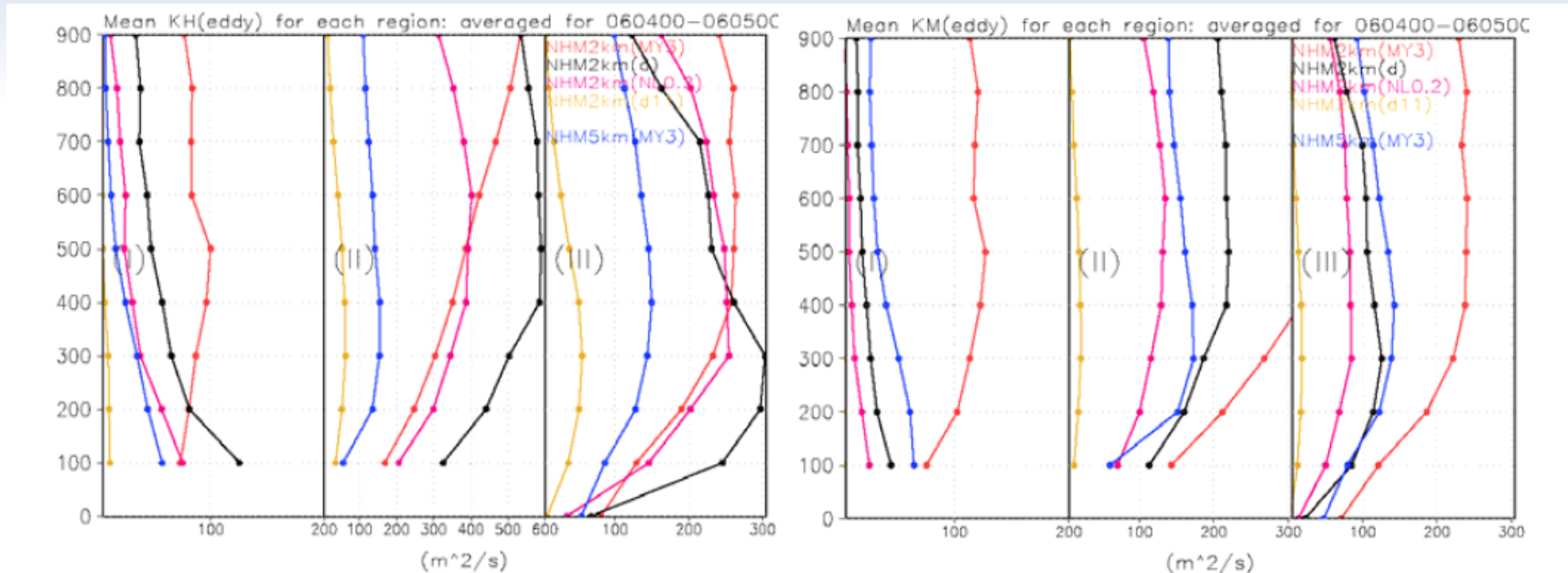


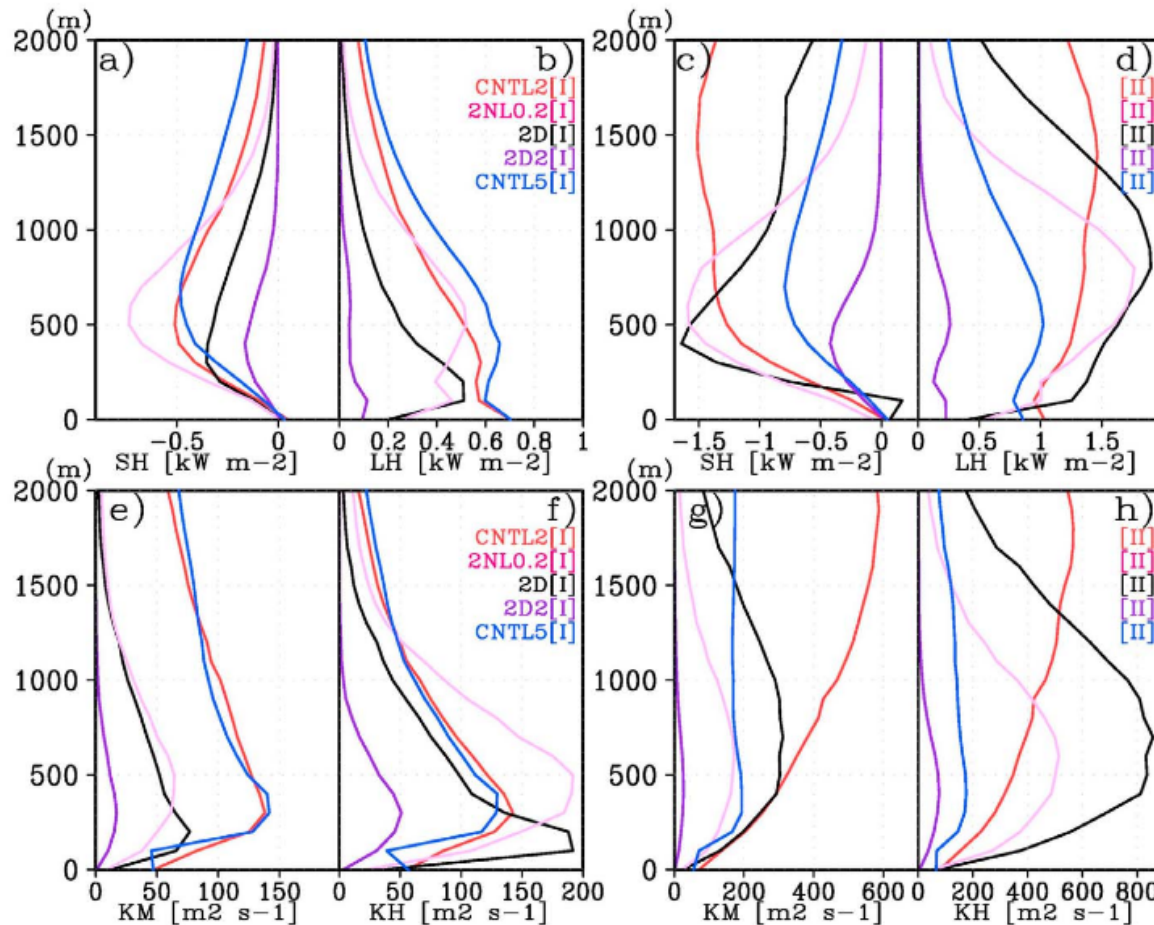
図 34 熱（左図）および運動量（右図）の拡散係数の最発達前 24 時間で平均した領域平均鉛直プロファイル。領域 (I) 目、(II) 壁雲内、(III) 壁雲外半径 100km 以内。2kmcnt1 (赤)、2kmd (黒)、2kmnl (ピンク)、2kmd11 (山吹)、5kmcnt1 (青)。
革新P H22 成果報告書より

境界層スキームの役割を”拡散”にとらえてしまうと、拡散係数に目がいてしまうことが多いが、**境界層スキームの役割は乱流による輸送のフラックスを見積もること。そのフラックスから時間変化率が求められる。**

“拡散”になるのは、フラックスを down-gradient でパラメタライズした結果であり、非勾配項をもつパラメタリゼーションでは拡散ではない。

境界層スキームの違いによるインパクト フラックスと拡散係数の比較

顕熱・
潜熱フ
ラックス



より時間変化率の算出に
関連深いフラックスの挙
動を確認し、そのフラッ
スの挙動を見るために。
そのパラメタライズに用
いている拡散係数に目を
向ける、というのが望まし
い見方

Kanada et. al (2012)より

Figure 7. Twenty-four hourly averaged mean vertical profiles in eyewall regions of (a) sensible heat flux (SH, kW m^{-2}) and (b) latent heat flux (LH, $\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$) during period I (see Figure 4a). (c and d) Same as Figures 7a and 7b but during period II. Also shown are the 24 hourly mean radial-vertical profiles in the eyewall region for (e) the momentum diffusion coefficient (K_m , $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) and (f) the heat diffusion coefficient (K_h , $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) during period I. (g and h) Same as Figures 7e and 7f but during period II.

さらなる教訓

- 境界層スキームが台風予報に与えるインパクトも大きい。
- 物理過程において、**時間変化率をどのように計算しているのか**、を常に意識すべき。
 - 境界層のような輸送は**フラックスの鉛直微分**が時間変化率
 - 他の輸送(対流、放射)なども同様
 - スキームの複雑さばかりに目が行って、どのように時間変化率を計算しているかの意識がされない場合も。
 - スキームを理解するときにも、また、モデルの検証をするときにも**時間変化率の算出に関連深いものから目を向けるべき**。
 - 境界層では、フラックスの鉛直差分によって時間変化率を求め、フラックスをパラメタライズしているのであるから、まずはフラックスを見るべし。そのフラックスの挙動を見たいのであれば、そのパラメタライズに現れる拡散係数に目を向ける、ということ。

物理過程開発のあり方

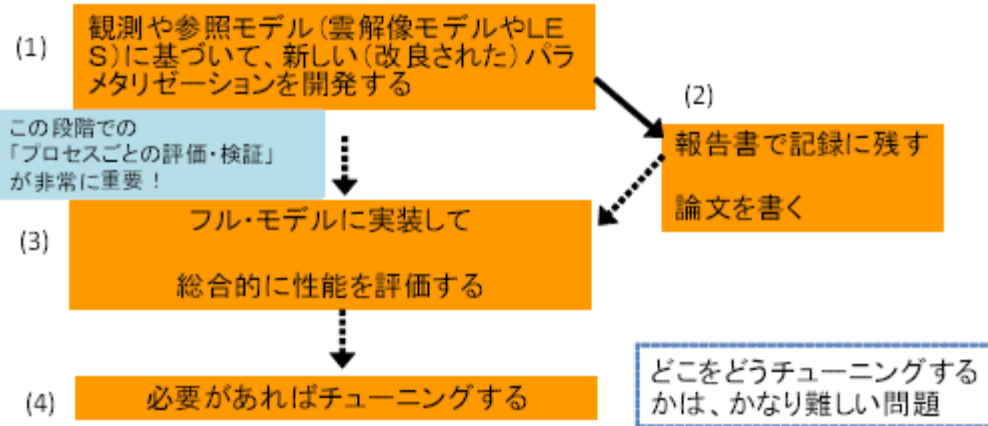
ボトムアップとトップダウン

ボトムアップ・アプローチ

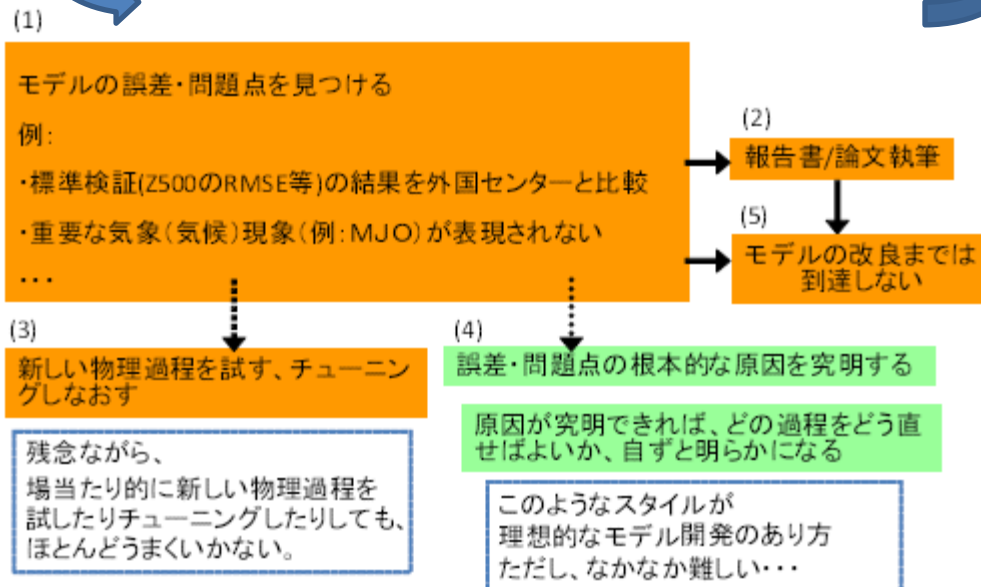
個々の部品の改良を通じて行うモデル改良への手法

部品の改良が逆効果になることも頻発
→

過程間の複雑な相互作用の存在、その結果として「打ち消し合う誤差」



両者の間のサイクルの確立が必要



トップダウン・アプローチ

モデル全体の性能の問題点をスタートとして開発を進めていく手法

ボトムアップの弱点を補う手法ではあるが方法論が確立していない。

ボトムアップ・トップダウン

- ボトムアップ・アプローチ

- 部品レベルでの評価・開発

- 理想実験(鉛直1次元モデル、2次元/3次元モデル)を用いたスキームの応答の把握とそのスキーム間の比較

- トップダウン・アプローチ

- モデルの出力の診断を通じた問題点の発見

- 時間変化率のモニター、initial tendency, conditional sampling, 衛星・レーダーシミュレータの活用、さまざまな観測データ(航空機、地上GPSを含む)の活用
 - 複雑な相互作用を解きほぐし、「打ち消し合う誤差」を見つけ出す。

プロセスレベルでのモデルの理解

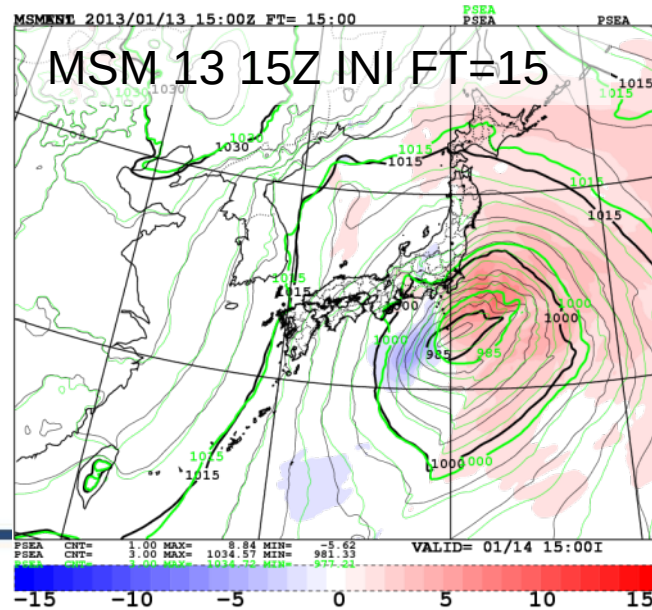
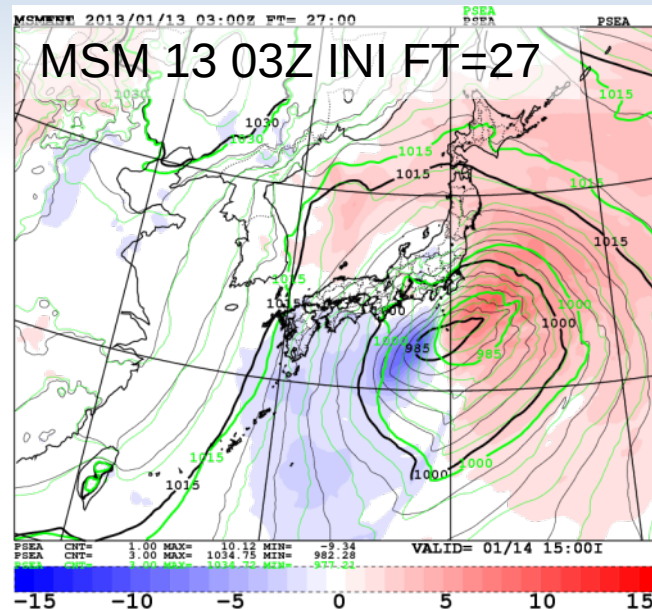
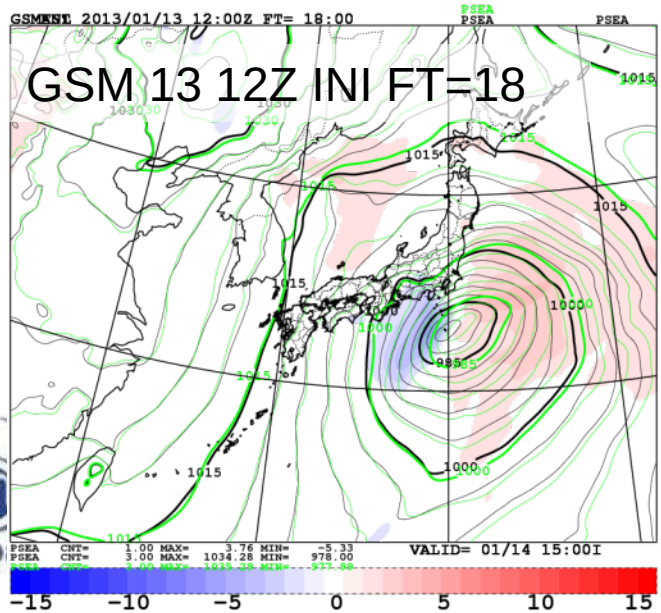
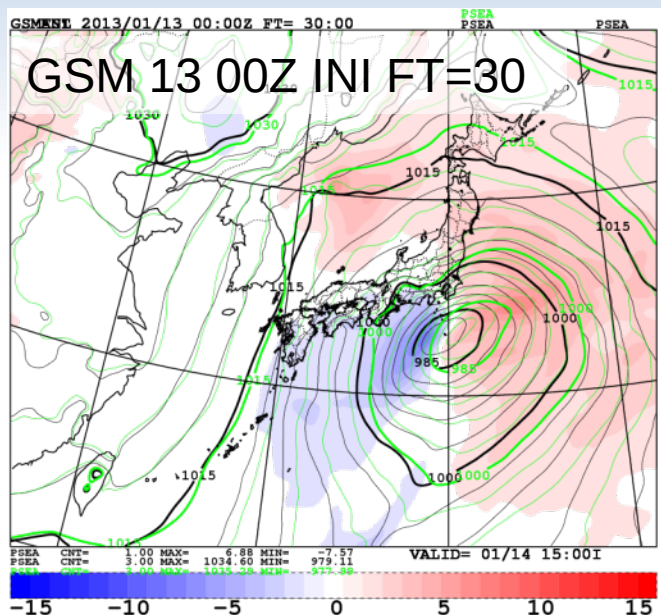
- 「プロセスに着目した検証が必要」ということはよく言われること
- しかし、それをどのように行うかは case by case で、そのためにプロセスに着目して、スキームのインパクトを調べる研究が盛んに行われているとは言えない。
- モデルが**時間変化率を評価する部品**の集まりであることを考えれば、**時間変化率をモニター**して何が起きているかを調べるのは一つの手法
 - 出力される予報値は時間変化率を足し合わせた結果であり、それがどのような時間変化率が寄与した結果かは正確にはわからない(ある程度の推定はできるが)。

プロセスに着目したモデルの検証例

2013/1/14 関東の降雪事例

- 南岸低気圧の通過に伴い、まとまった降水が関東にもたらされる。
- 雨は朝方から降り始め、東京では昼ごろに気温が急低下し、雪に変わって積雪。
- 積雪:東京で7cm, 横浜で12cm
- メソモデル(MSM)ではタイミングに若干の遅れはあったものの気温の低下が予報できていたが、全球モデルでは気温の低下が小さかった。
--- その差を生んだものは？総観場？

予報と実況(GSM/MSM) 1/14 15JST



黒:予報
緑:解析
色:予報-解析

MSMもGSMも
低気圧の進行
位相は実況より
遅れており、新
しい初期値の予
報では修正され
る傾向にある。

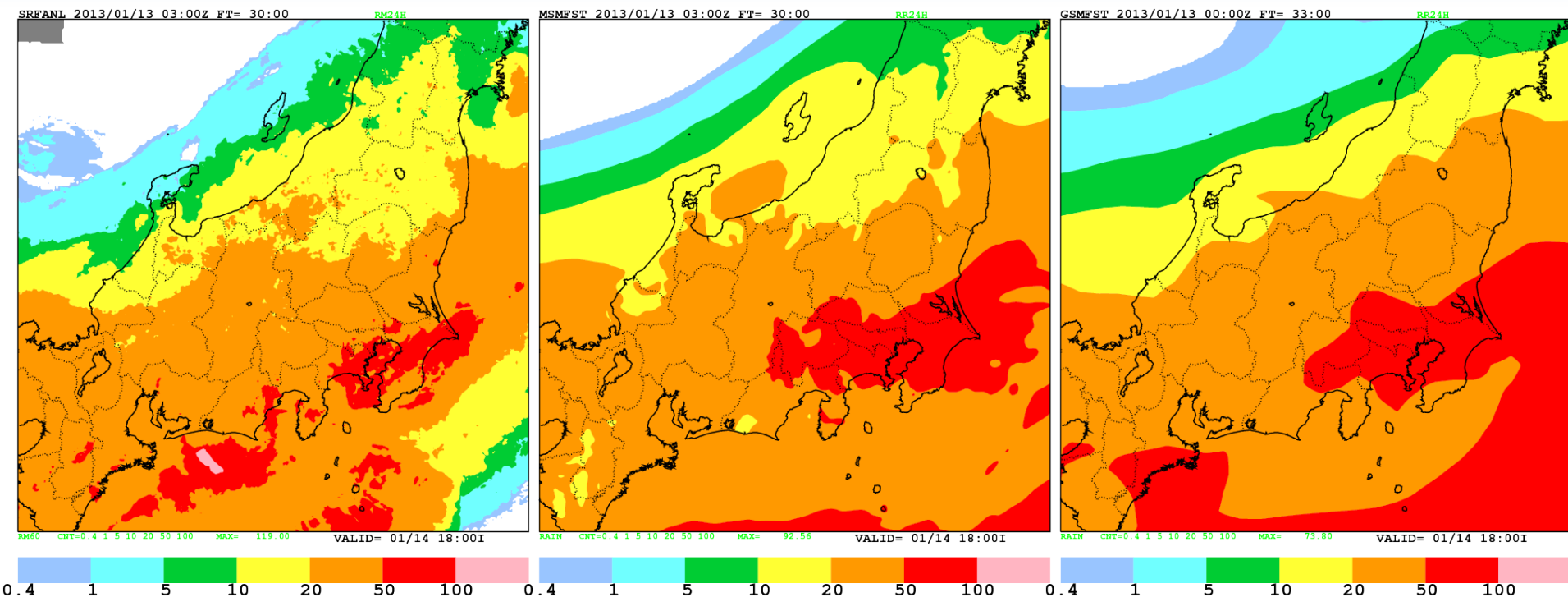
位相の遅れは
GSMとMSMと
もだいたい同じ。
気温低下の違
いは総観場だけ
からは説明でき
ない。

降水量(1/14 18JST までの24時間)

解析雨量

MSM 13 03Z FT=6-30

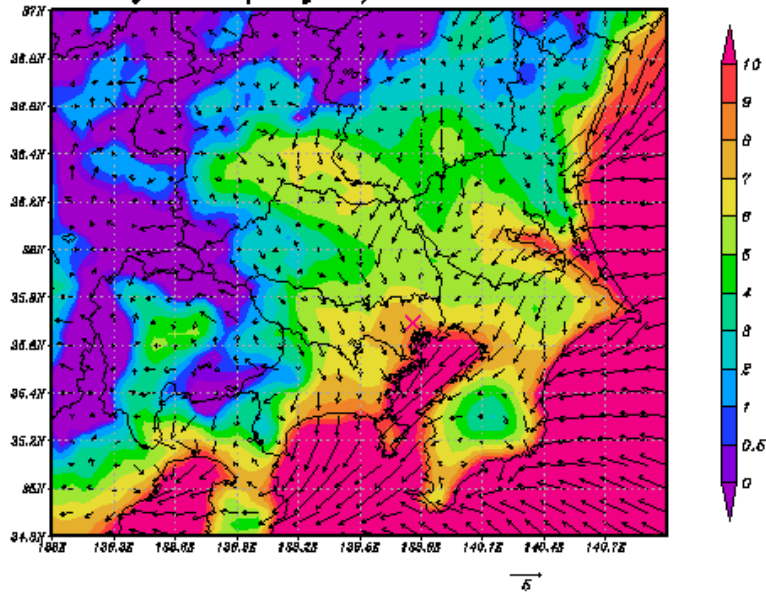
GSM 13 00Z FT=9-33



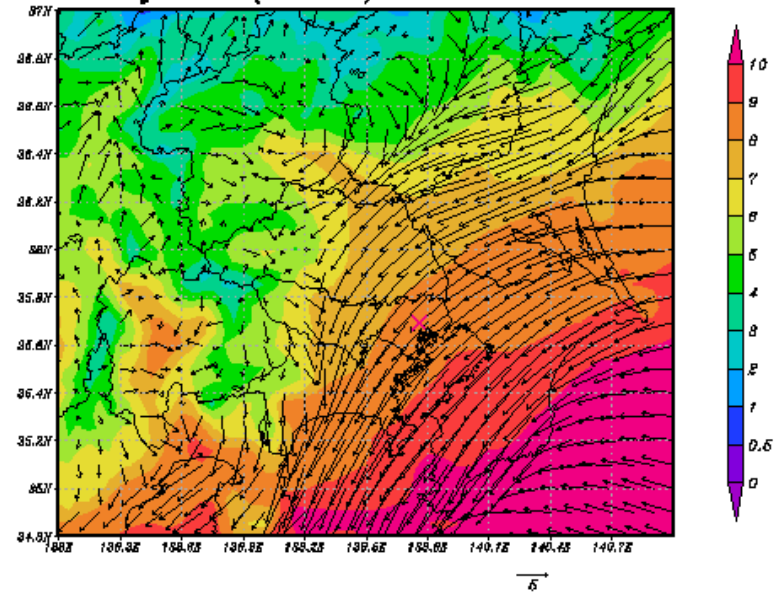
- 関東では24時間で60mm超の降水を観測
- 関東でモデルがやや過剰であるが、降水量はだいたいよい

毎時大気解析による風・気温

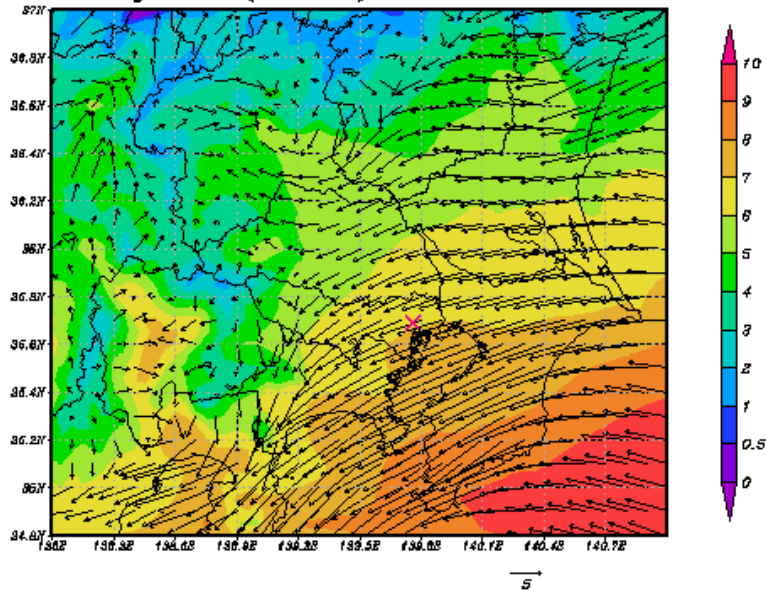
Maiji-Taiki(Surface) 2013.01.14 00JST



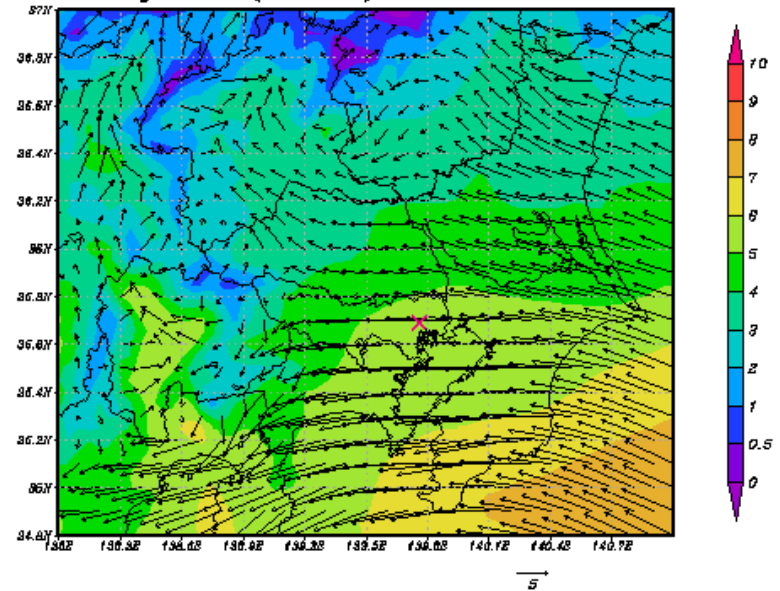
Maiji-Taiki(975hPa) 2013.01.14 00JST



Maiji-Taiki(950hPa) 2013.01.14 00JST



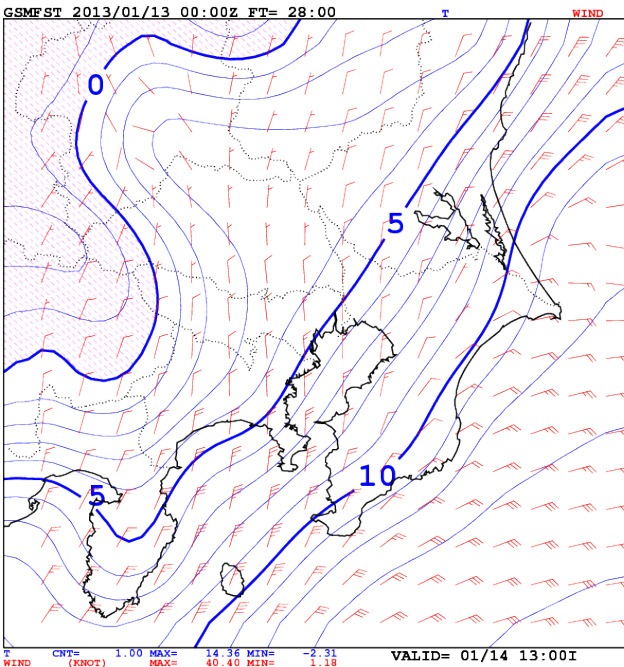
Maiji-Taiki(925hPa) 2013.01.14 00JST



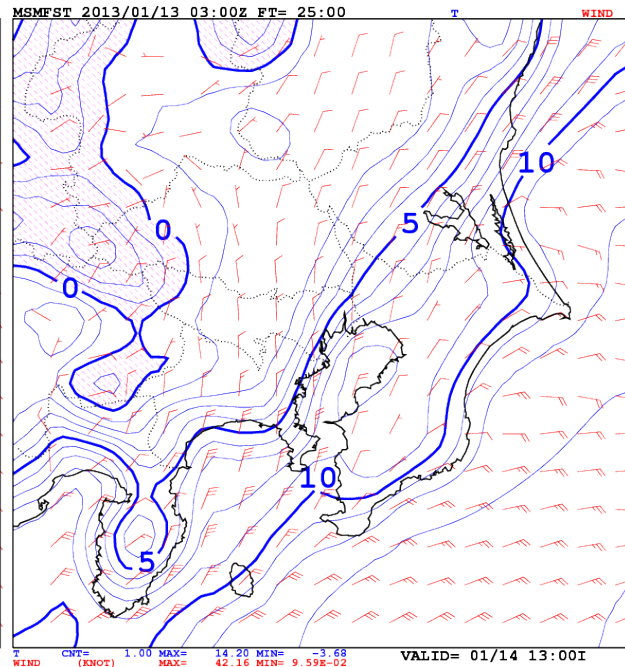
地上気温と風

GSMとMSM、毎時大気解析の比較 (13JST)

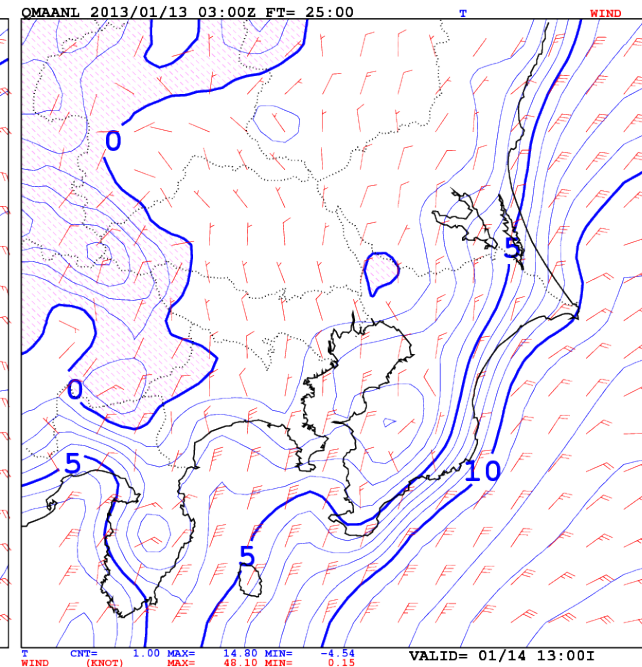
GSM 13 00Z INI FT=28



MSM 13 03Z INI FT=25



毎時大気解析



北関東から東京湾の西にかけての気温の低下にモデル間で大きな差。

時間変化率のGSMとMSMの比較

地点鉛直時間断面(東京)

上:GSM(13 00Z INI), 下:MSM(13 03Z)

0°C線の下降が
小さい

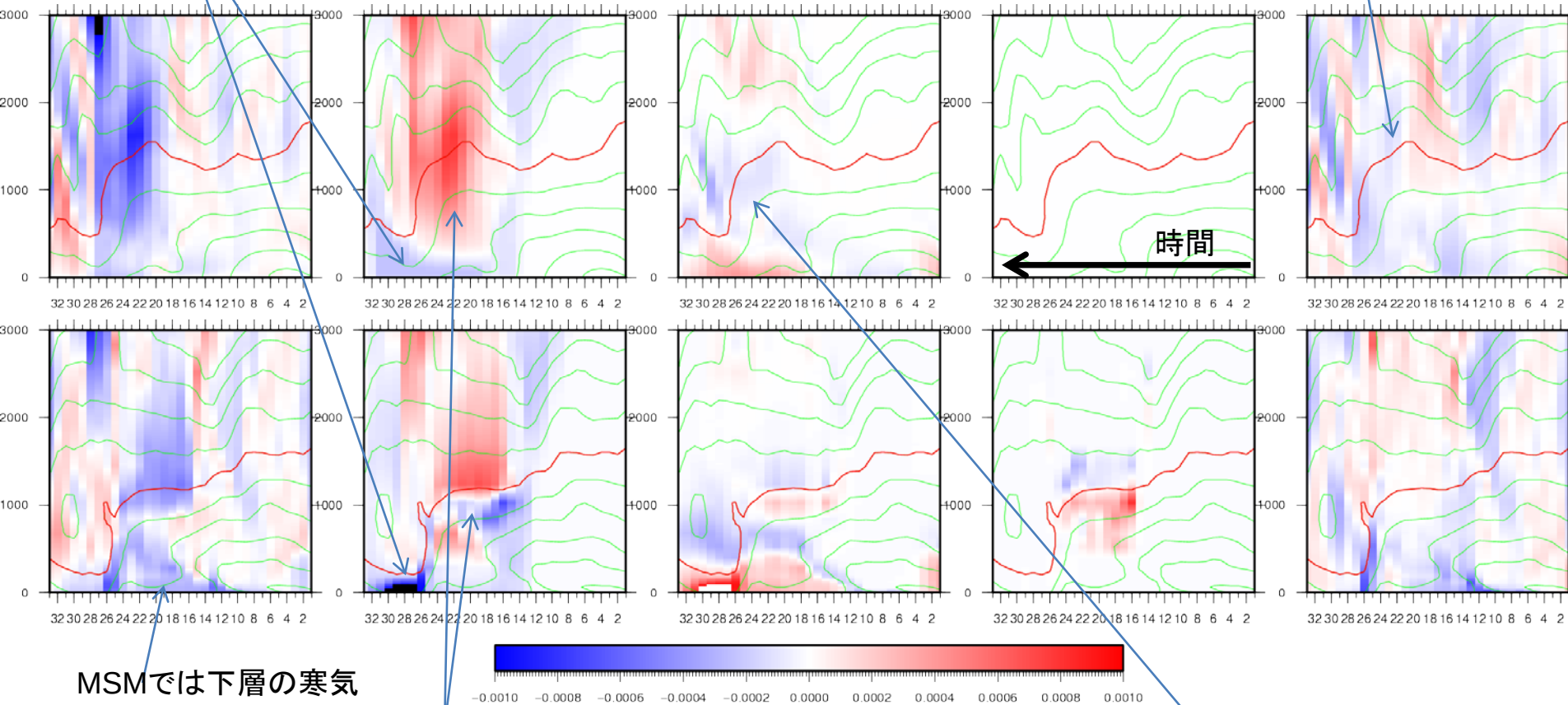
移流

雲過程

境界層

対流

合計



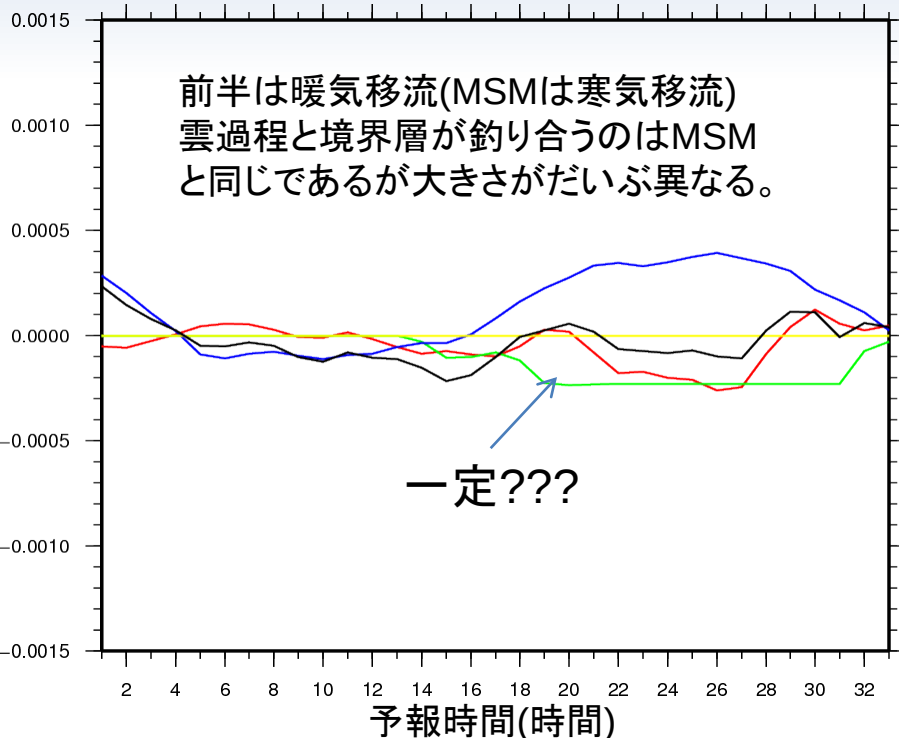
MSMでは下層の寒気
移流が顕著

MSMでは0°C線を境に上は加熱、下は冷却(融解熱がdominant)。しかし、GSMでは0°C線より下でも加熱

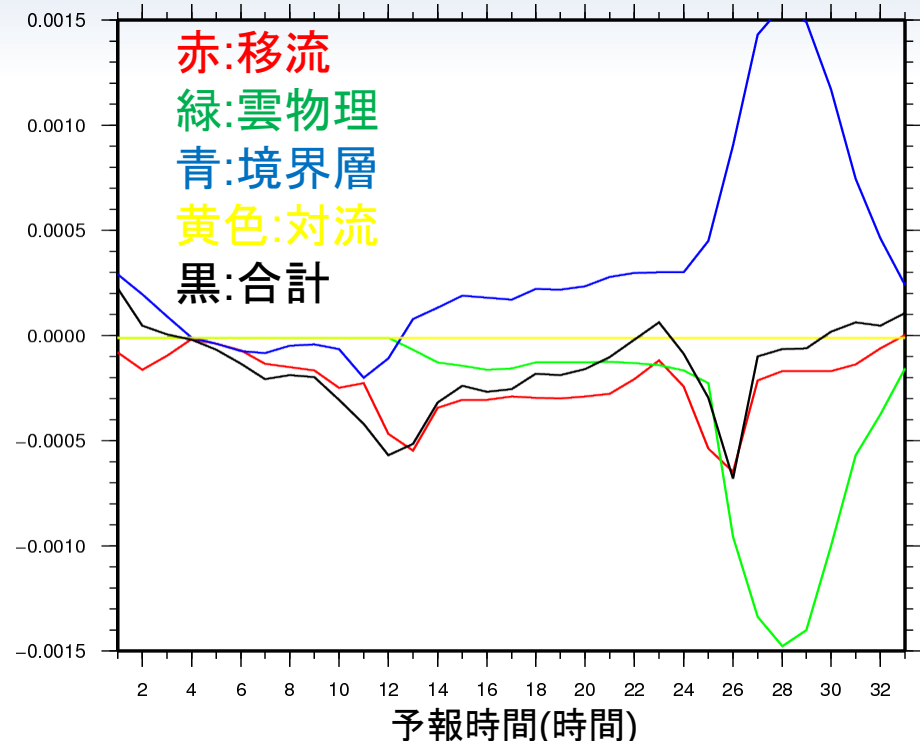
冷却層が厚過ぎ?

(東京)地表付近(海面から40m)の 時間変化率と気温(GSMとMSM)

GSM



MSM



- GSMでは大きなタイムステップで計算不安定にならずに時間積分できるように、雨の蒸発、雪の融解それぞれに上限値が設定。その上限値に達していた。
- 落下物質の蒸発・融解はタイムスプリットするモデルもあることから確かに計算安定性に影響を与うる。
- 東京での冷却が小さいだけでなく、北関東での冷却も小さいために、その移流も小さく気温の低下が小さかった。
- 時間変化率に着目してモデルを比較することで問題を発見できた一つの例。

時間変化率の活用

- この雪の事例はプロセスが比較的単純で、局所的なモニタでも、問題点を見出すことができた。
- 台風や総観場にも適用可能であるはず。
 - 力学の時間変化率のモニターも必要
 - 広域で鉛直方向、時間方向を見ながら解析する必要がある。
 - 予報値でも同様であるが、予報値が結果であるのに対して、時間変化率は原因であるので、解釈はしやすい。

まとめ

- 物理過程の開発には、**現象の理解**は不可欠。また、どのように**時間変化率**を求めているのか、その時間変化率を求めるのに必要な物理量は何かを意識することが必要。
- **スキームの取り換えではなく**、スキーム間、モデル間の比較から問題点、そして解決方法を見出していくのが物理過程のあるべき姿。
- **ボトムアップ・アプローチとトップダウン・アプローチ**を適切に組み合わせていく必要。
- 予報値だけでなく**時間変化率に着目して解析**することが**プロセスレベルでのモデルの理解**の第一歩。