

力学的ダウンスケー リングとは何か？

気象研究所 高薮 出

2021/06/15 今さら解説シリーズ第2回



Contents

- historical review
- DDSとは何なのか？
- 親モデルとのつなぎ方
- DDSのpotentialとlimitation
- CORDEX計画とは？
- 将来へ向けて。CPMの世界



○ 世界で初めての数値予報（Charney 1949）は北米大陸を含む領域モデル

プラネタリースケール現象の予報が中緯度の天気予報にとり大事とわかり・・・

○ 全球を意識した初めてのモデルはPhillips (1956)。ベータ平面チャンネルモデル

○ 世界で最初の全球大気モデルはManabe et al (1970)による大循環実験

○ 世界で最初の数値予報はMiyakoda et al (1971)

○ 世界で最初の現業予報はECMWFで1979から

領域モデルは独自の発展を遂げた・・・

側面境界条件の問題があるが**計算機資源制約下での高解像度実験の必要性**から・・・

○ 側面境界の悪影響を避けるべく、短期予報に限定して行われた

○ Giorgi & Bates (1989)は、このシステムを長期積分して気候再現を試みた

当初の目的はVIA (Vulnerability, Impact and Adaptation)であった。

力学的・数学的妥当性の考察は不十分なままであったがある程度の成功を収めた

（この辺りには、結局長いこと苦しまされることになっている・・・）

○ これに対しては、DDS手法に関する基本的な仮定が不明瞭である、RCMを用いたDDSと短期予報について混乱している・・・といった批判がある。

○ Giorgiは2009に、この手法の世界への展開を図りCORDEXを立ち上げた。

○ CORDEXはWCRPの中に位置づけられており、最近第3期が始まった。

Historical Review

Charney et al (1949)

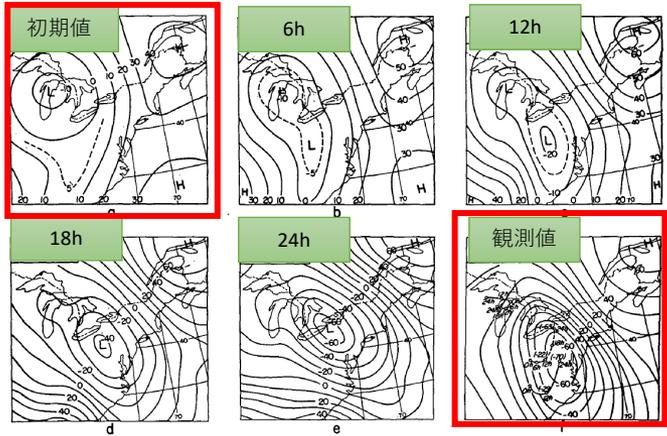


FIG. 1. (a): Observed 900-mb contours, 1500 GCT 24 November 1950; contours labeled in tens of feet as deviations from standard height of 3240 ft. (b): Three-level 900-mb prediction for 2100 GCT 24 November 1950. (c): Same as (b), but for 6 hr later. (d): Same as (b), but for 12 hr later. (e): Same as (b), but for 18 hr later. (f): Observed 900-mb chart for time of (e); small circles connected by solid lines indicate successive positions of observed low center, and those connected by dashed lines indicate predicted positions; height difference at center is printed above, and time below, each circle.

Phillips (1956)

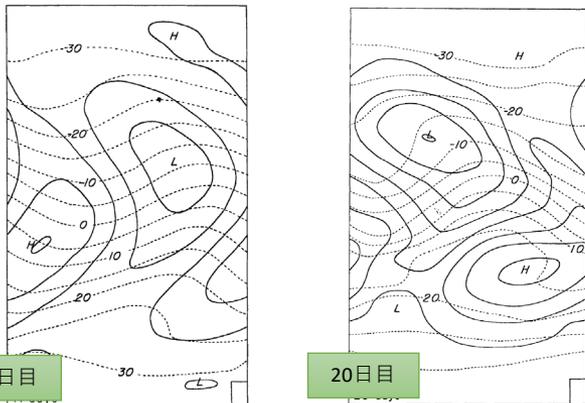
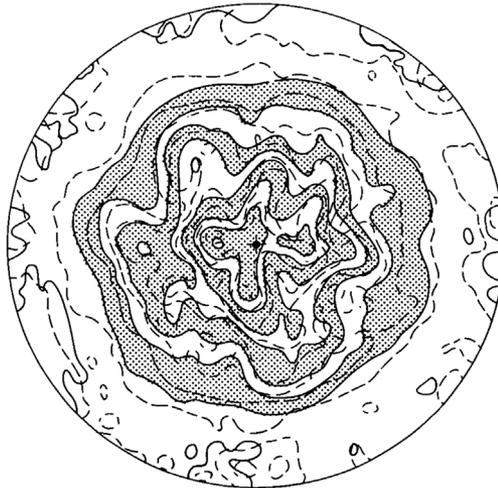


Figure 6. Distribution of 1,000-mb contour heights at 200-foot intervals (solid lines) and 900-mb temperature at 5°C intervals (dashed lines) at 11 days. The small rectangle in the lower right corner shows the finite-difference grid intervals Δx and Δy .

Figure 7. Distribution of 1,000-mb contour height at 200-foot intervals (solid lines) and 900-mb temperature at 5°C intervals (dashed lines) at 20 days. The small rectangle in the lower right corner shows the size of the finite-difference grid intervals Δx and Δy .

Manabe et al (1970)



$$\phi, \frac{P}{P^*} = .500$$

FIGURE 8.1—Solid lines show the contour lines of the geopotential and dashed lines show those of the temperature on the isobaric surface of $P/P^*^H = 0.5$. (175th day of integration.)

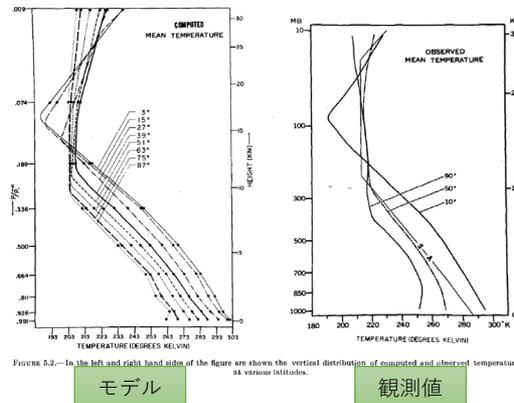


FIGURE 5.2.—In the left and right hand sides of the figure are shown the vertical distribution of computed and observed temperature at various latitudes.

Miyakoda et al (1971)

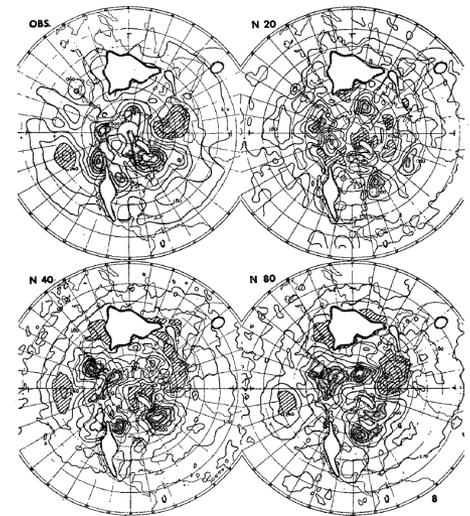


FIG. 4. The 1000-mb geopotential heights on the 8th day. The anticyclone areas with height values > 240 m are hatched, and the cyclone areas with values < 0 m are stippled. The loci of small segmented lines mark the mountain areas.

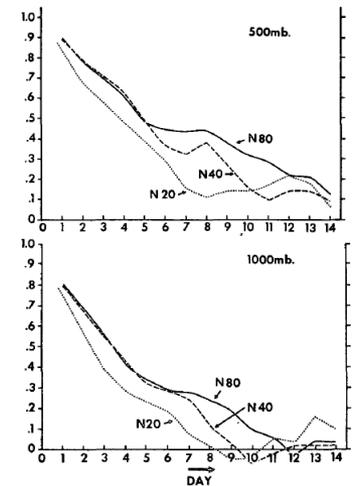
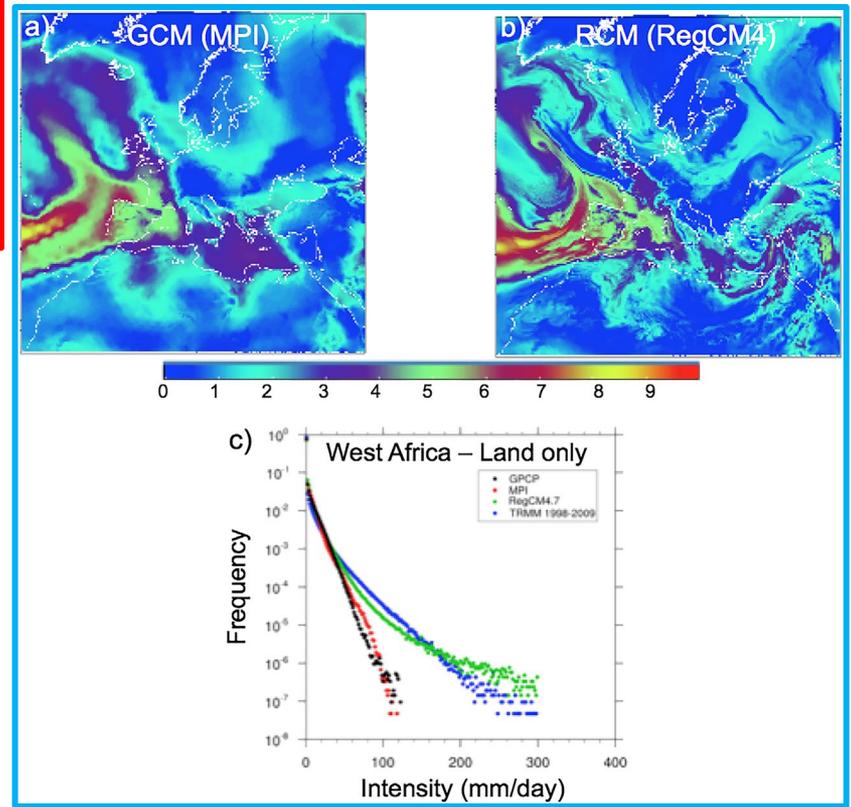
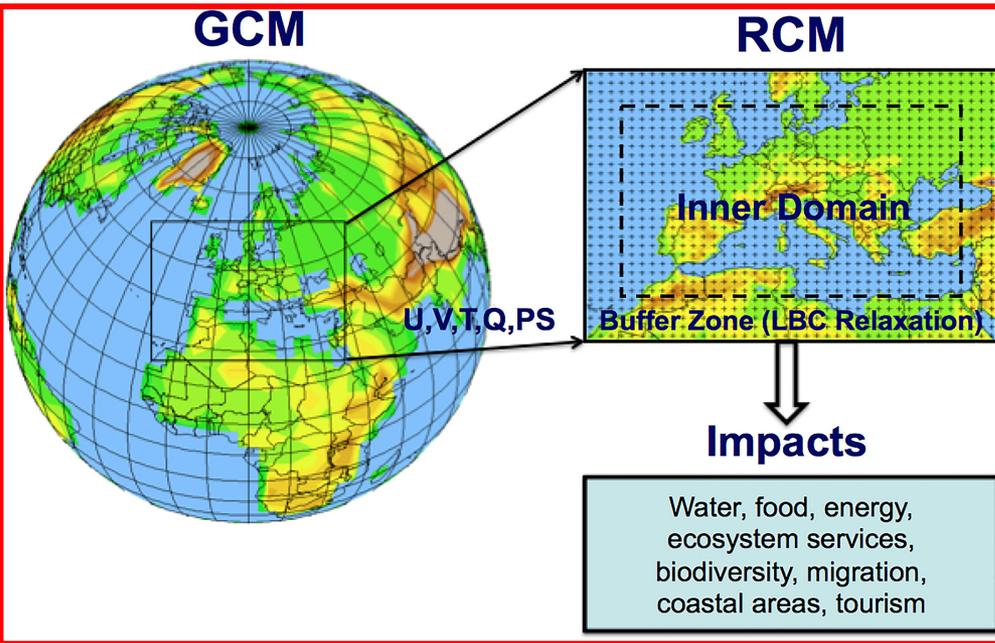
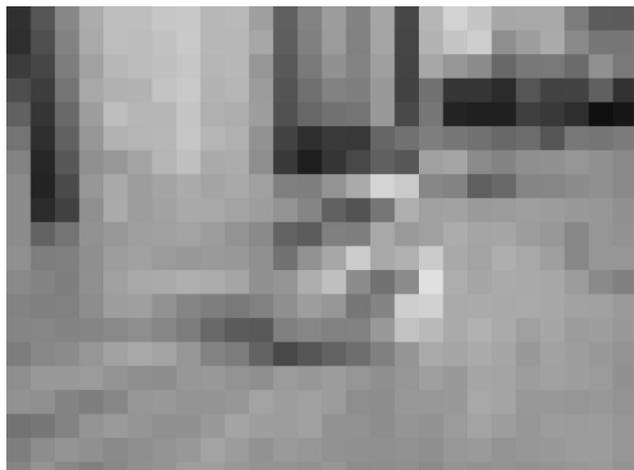


FIG. 11. The correlation coefficients between the observed and the predicted anomalies of geopotential heights for 500 and 1000 mb.

関連の変化



DDSとは何なのか？



全球モデル出力
からわかる情報

アセスメントに必要な
情報

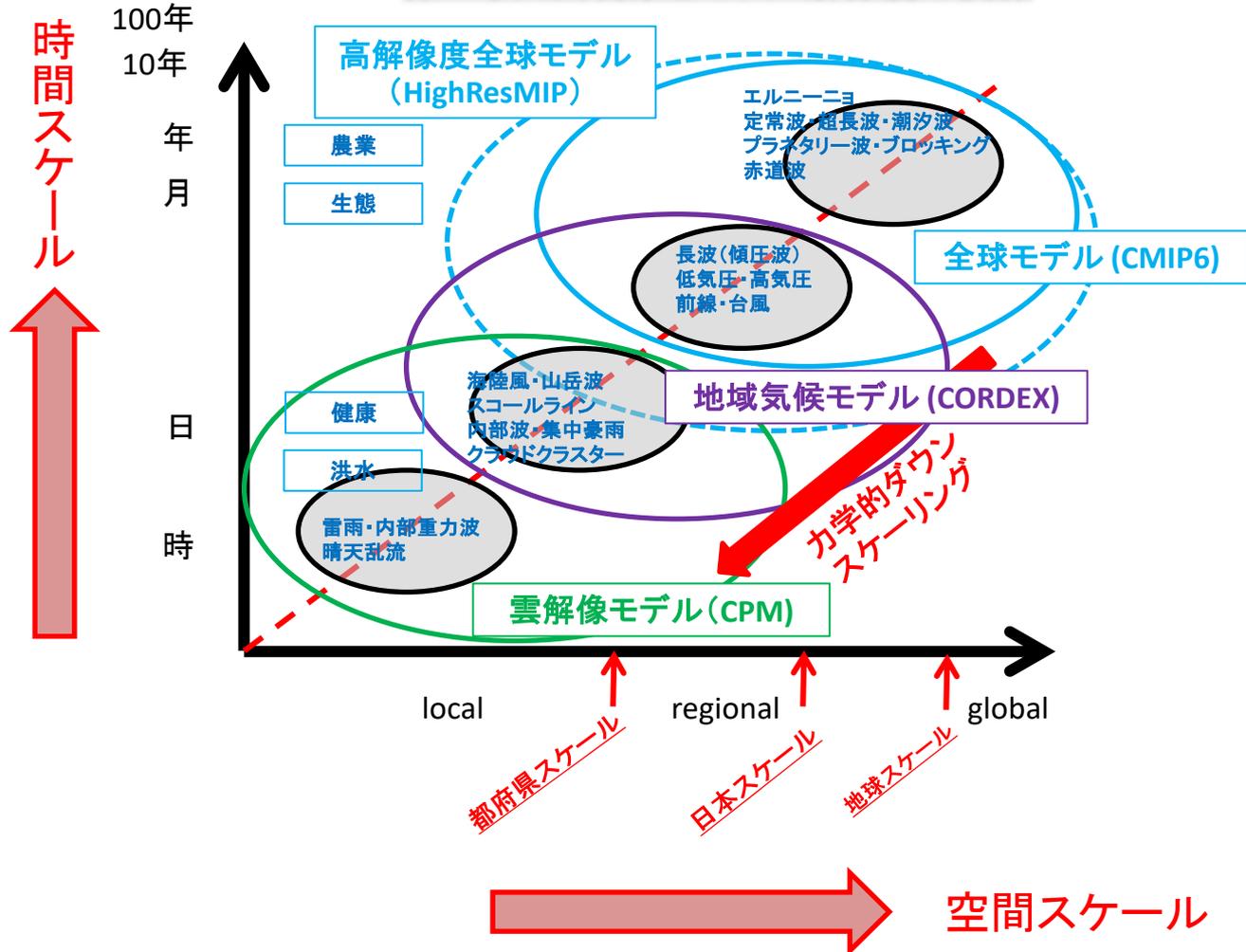
気候予測研究と影響評価研究の橋
渡しを行うのがダウンスケーリング

両者の間には大きな
ギャップがある



DDSとは何なのか？

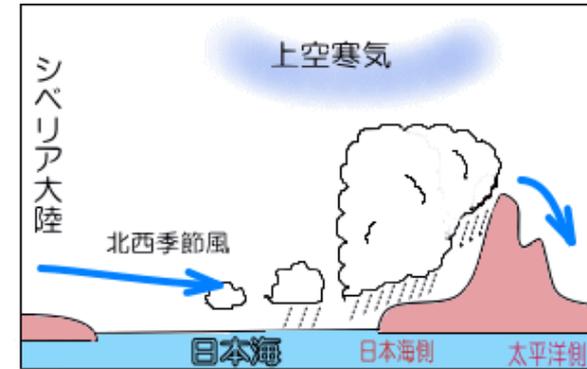
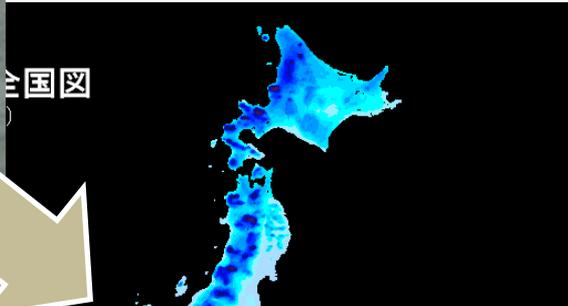
様々な大気現象とモデル解像度の関係



県単位の気候の表現。日本海側と太平洋側の違い

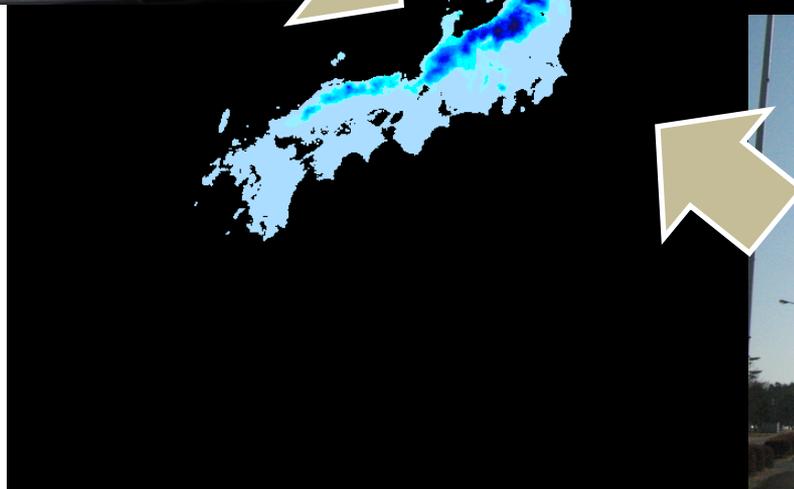


2月の最深積雪



(lizuka, 2008)

(@防災科技研)

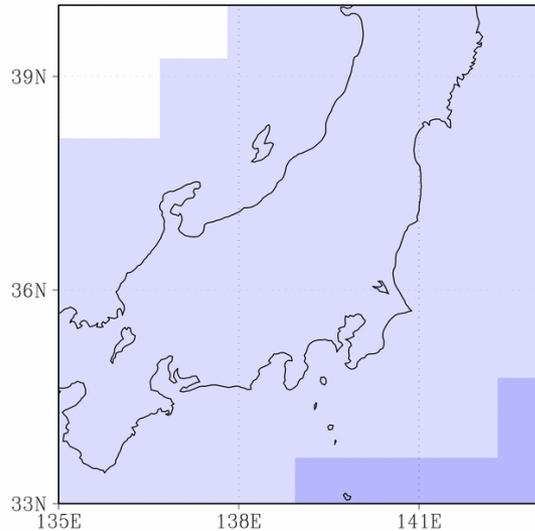


降水量分布を再現できるモデルの解像度は？

年間降水量の気候値

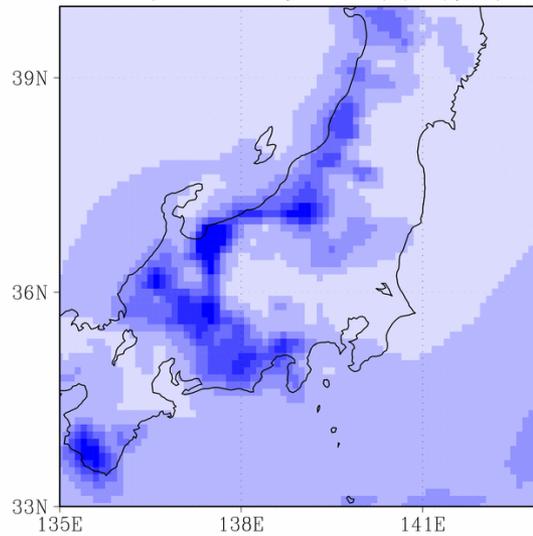
全球再解析データ JRA-25 (125km)

rain (1981 - 2000 years ave.) (mm/year)



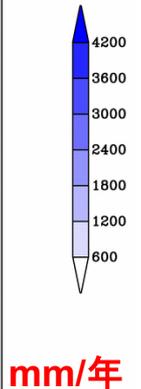
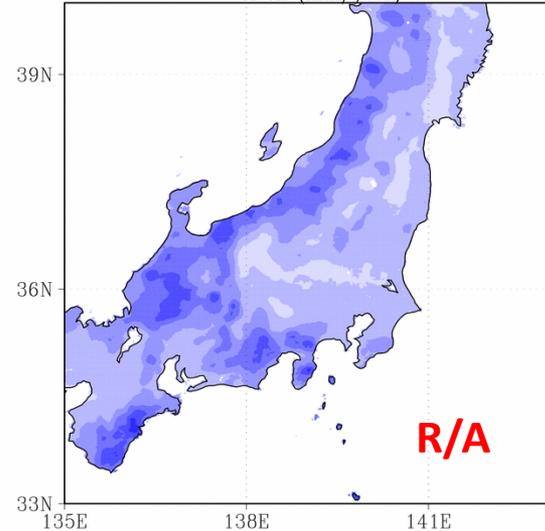
RCM (20km)

rain (1981 - 2000 years ave.) (mm/year)



観測値 (5km)

Mesh (mm/year)

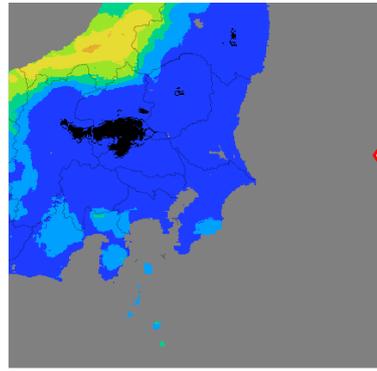
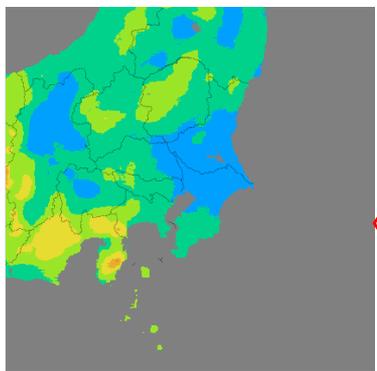


R/A

mm/年

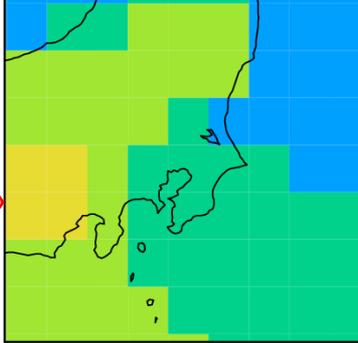
日本海側と太平洋側の降水コントラストの表現には、20km格子が必要であることがわかる。

メッシュ気候値

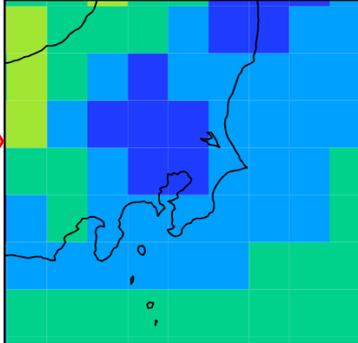


60km

RAIN JJA 60km in 1980-1999 (mm/day)

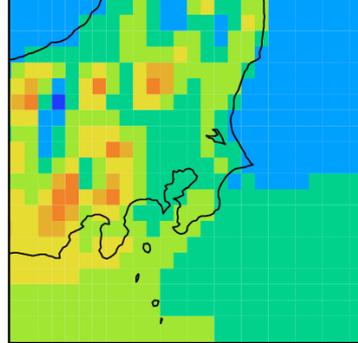


RAIN DJF 60km in 1980-1999 (mm/day)

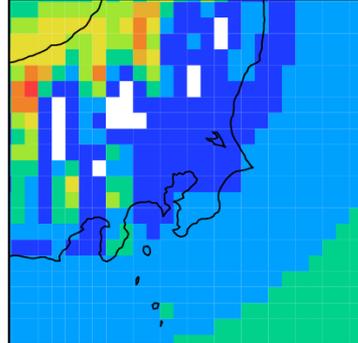


20km

RAIN JJA 20km in 1980-1999 (mm/day)

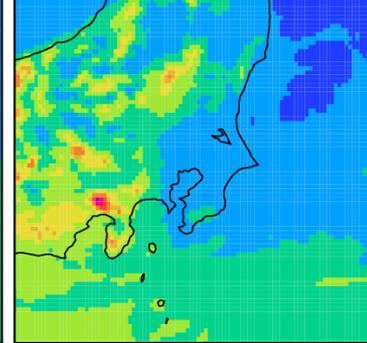


RAIN DJF 20km in 1980-1999 (mm/day)

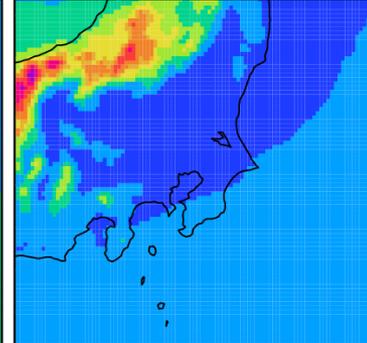


5km

RAIN JJA 05km in 1980-1999 (mm/day)



RAIN DJF 05km in 1980-1999 (mm/day)

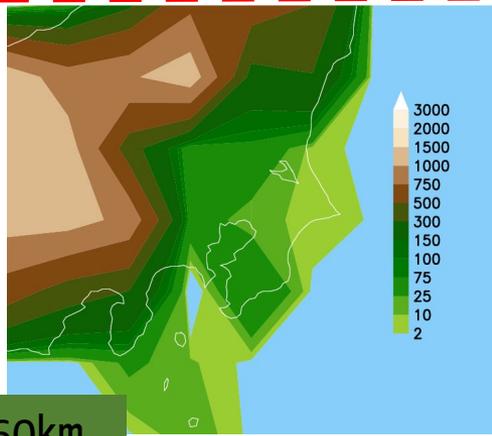


夏季

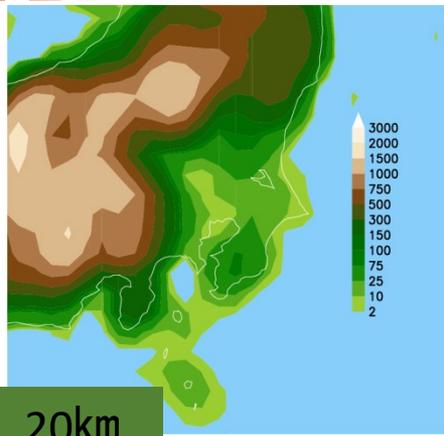
冬季

地形

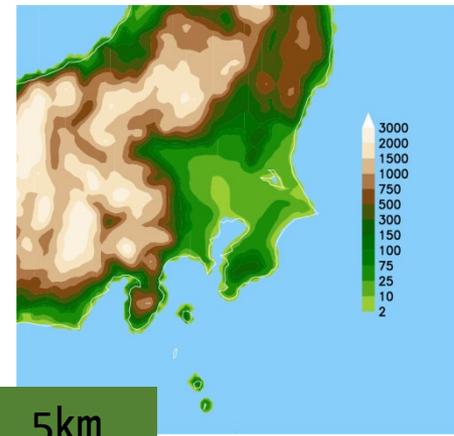
60km



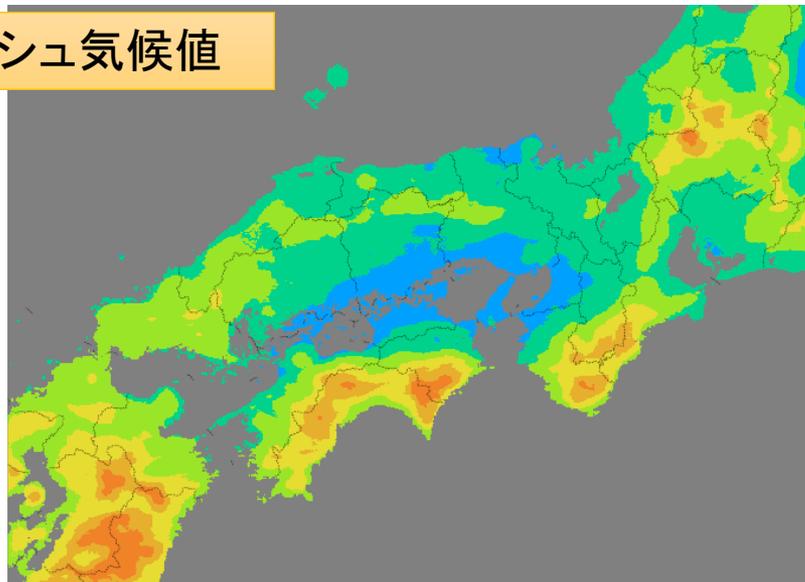
20km



5km

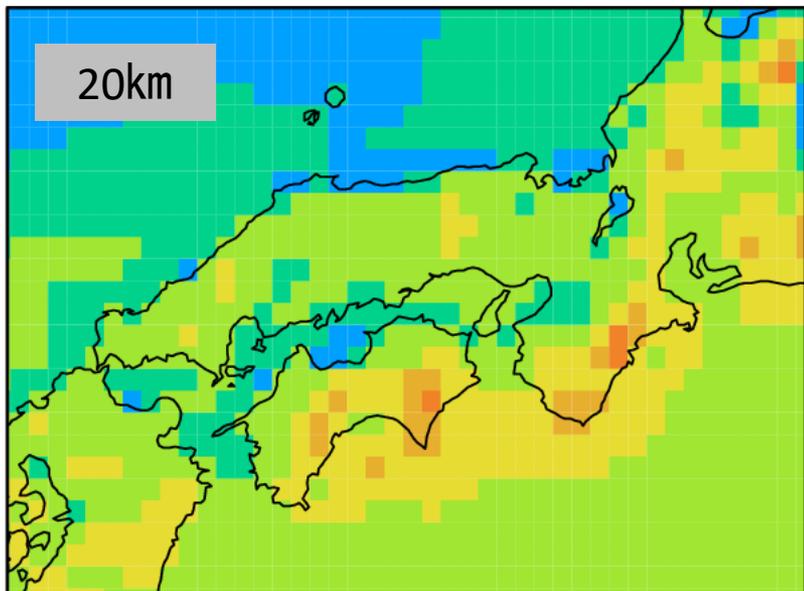


メッシュ気候値

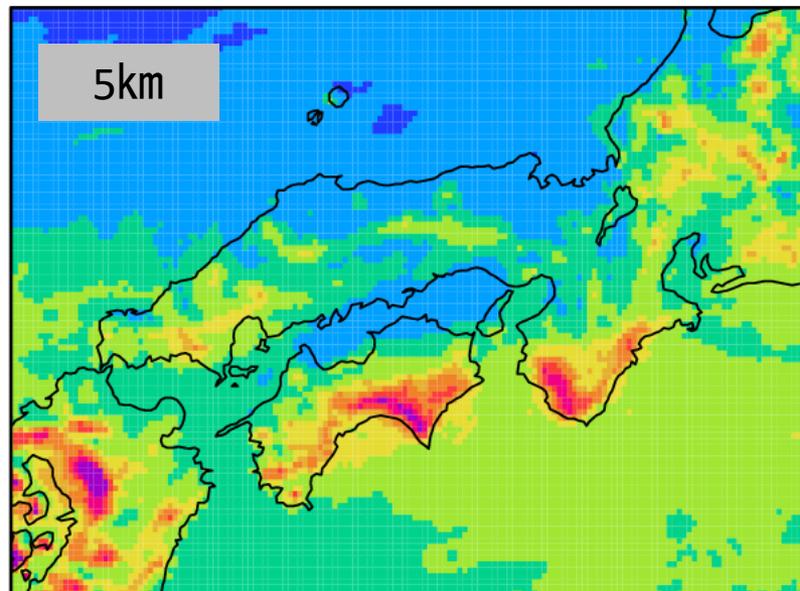


夏季

RAIN JJA 20km in 1980-1999 (mm/day)

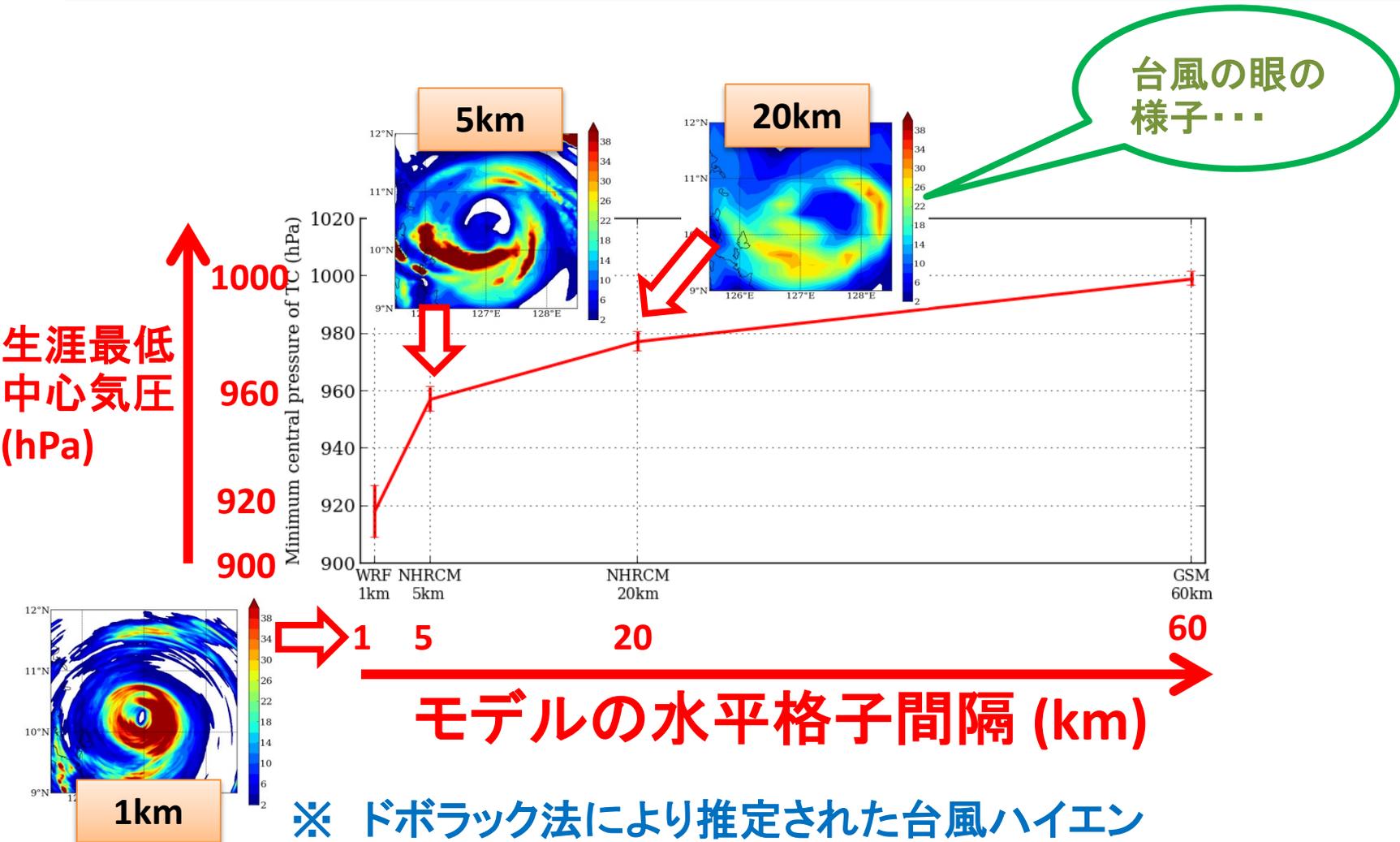


RAIN JJA 05km in 1980-1999 (mm/day)



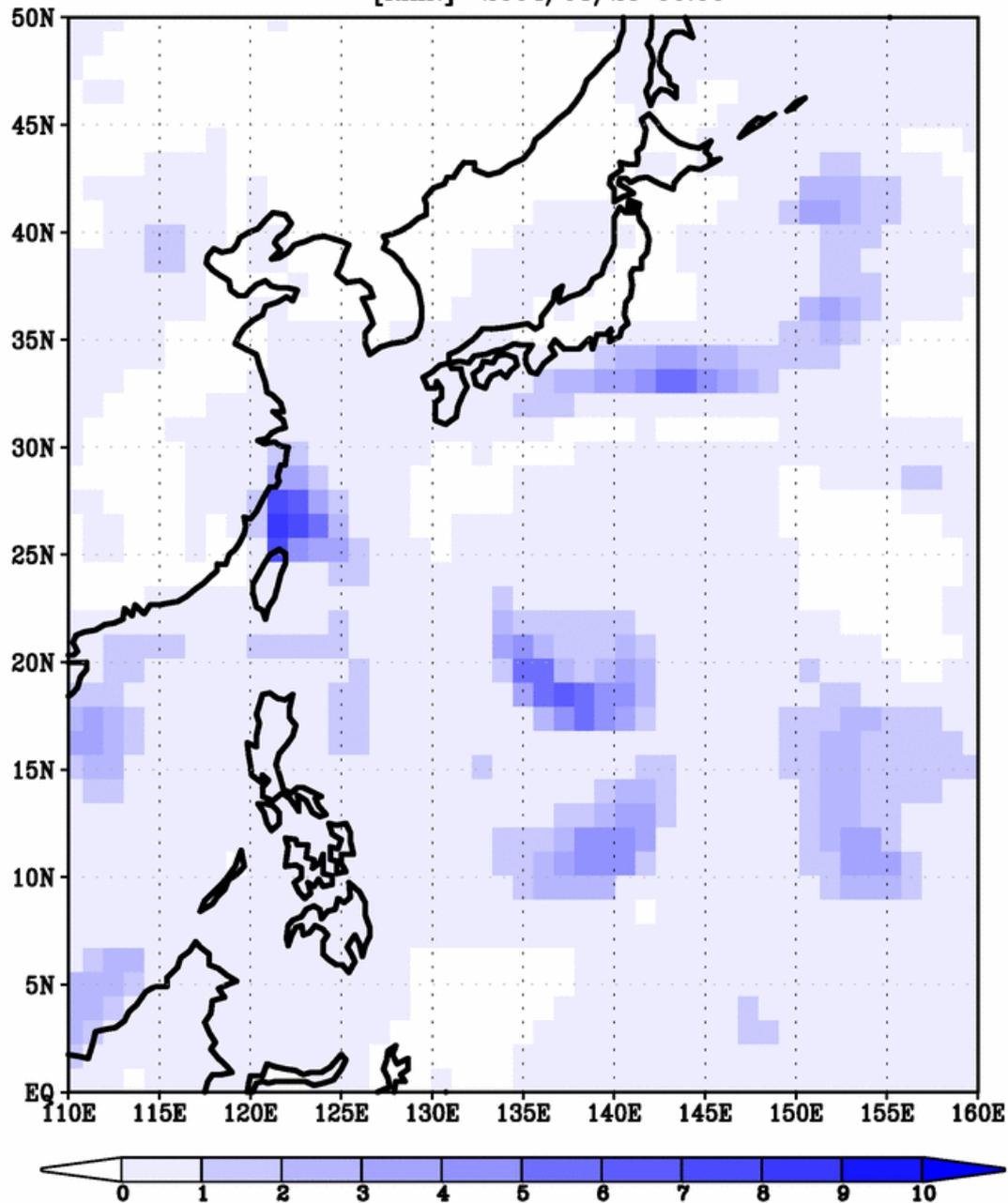
力学的ダウンスケーリングで、いったい何が見えてくるのか？

台風の中心気圧のモデル解像度による変化 — 台風ハイエンの例 —



※ ドボラック法により推定された台風ハイエンの生涯最低中心気圧は895hPa

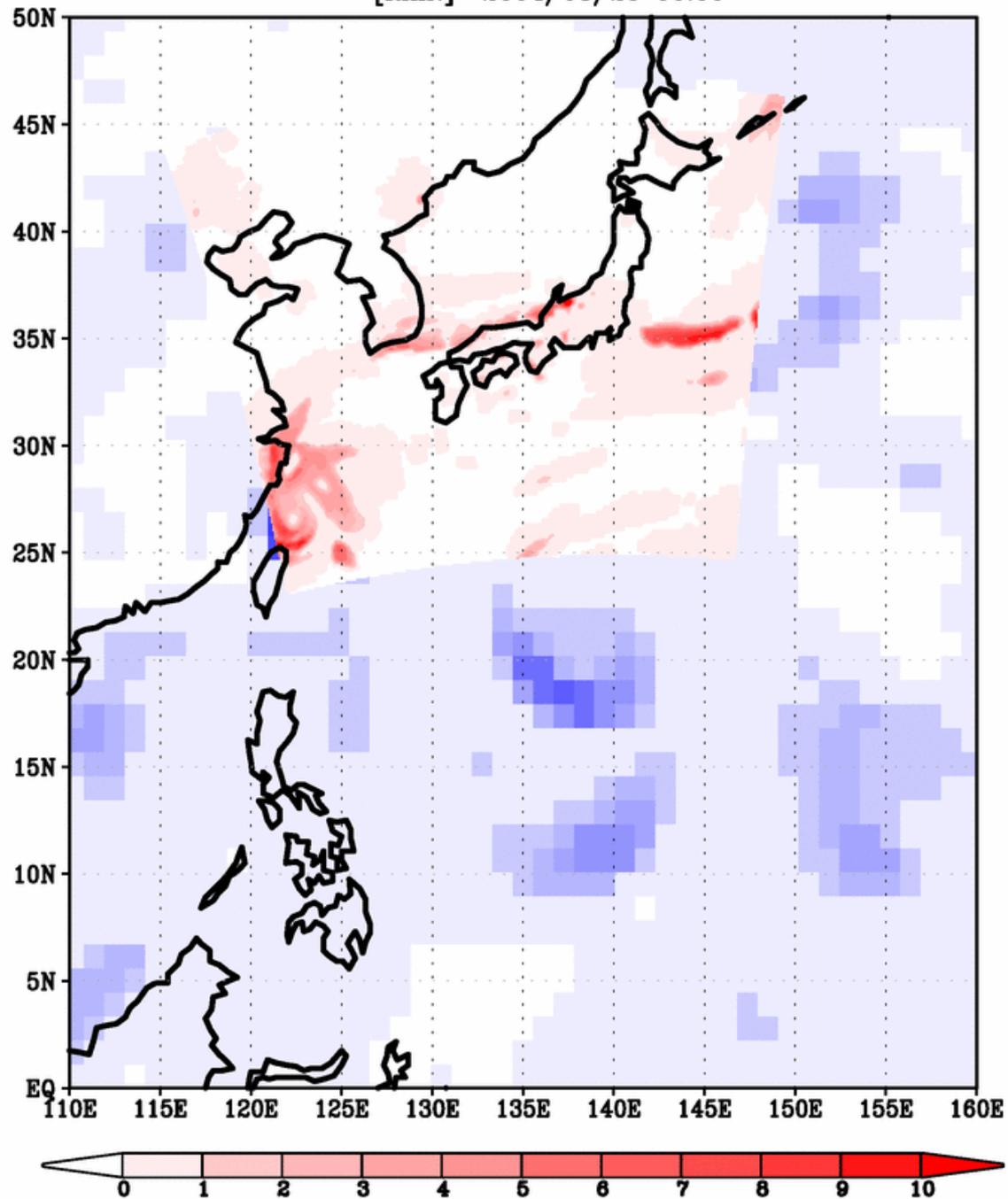
[RAIN] 2004/08/25 00:00

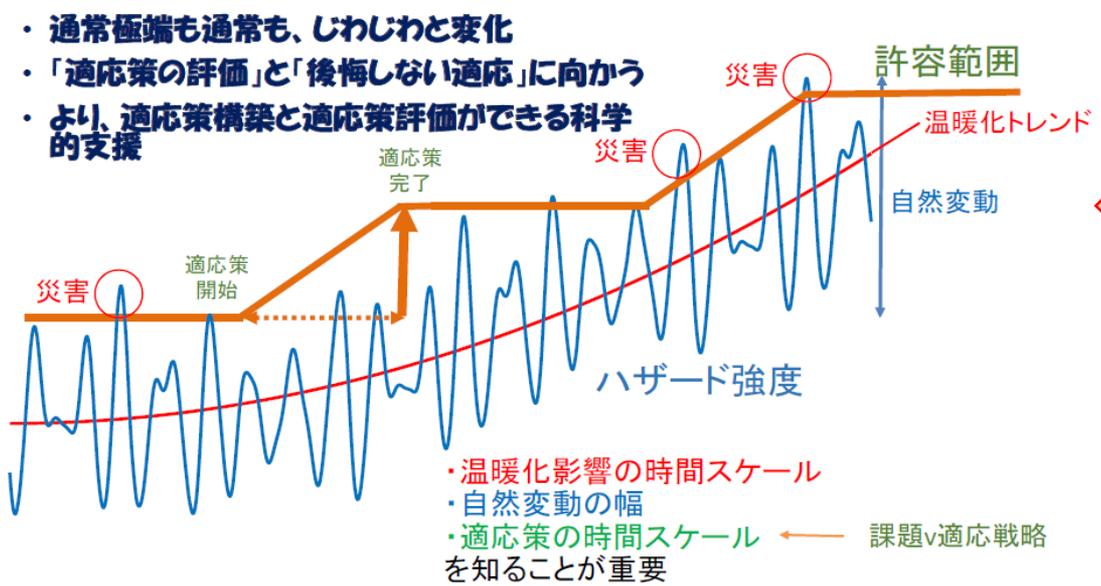
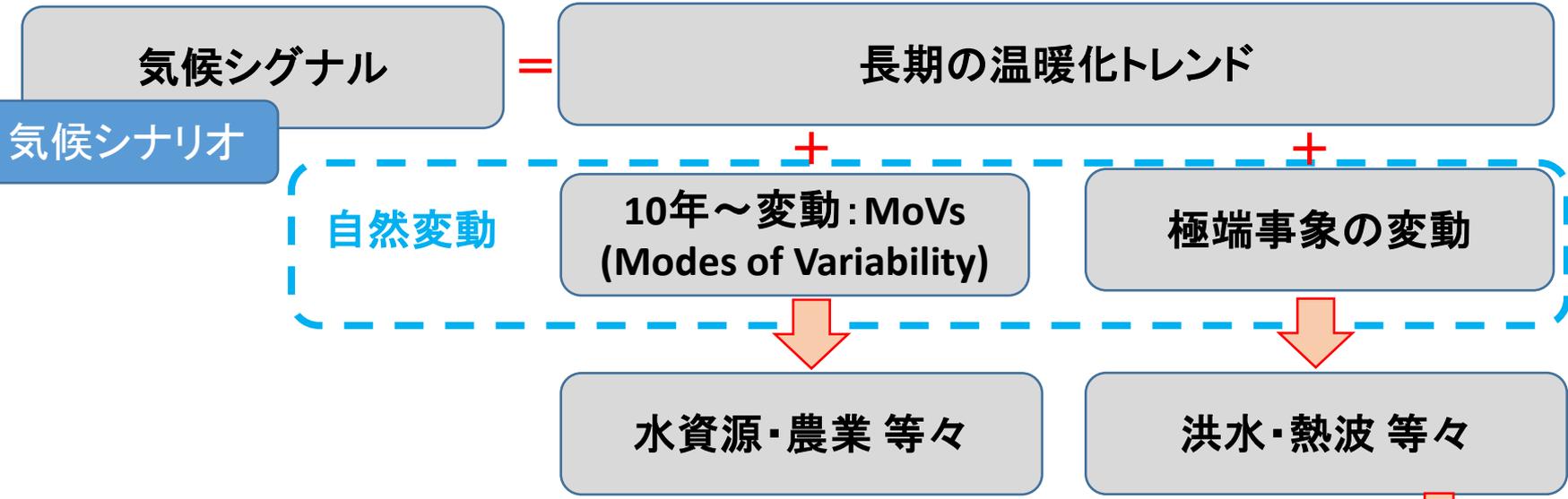


- * 全球モデル
(再解析データ)
- * 時間雨量
- * 台風が日本に
接近！

[RAIN] 2004/08/25 00:00

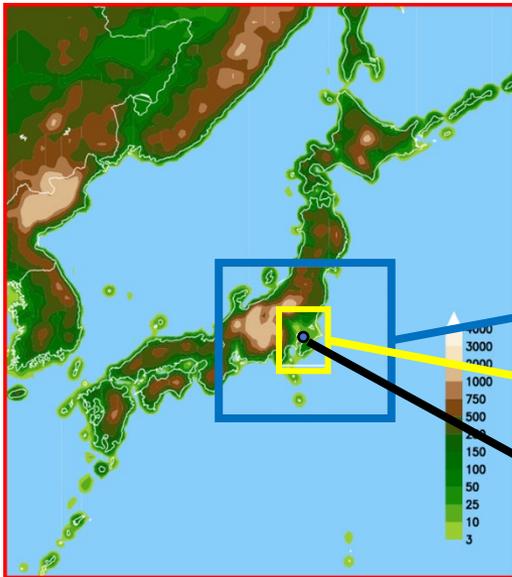
* 赤い所はダウン
スケーリング
* 時間雨量
* 台風が日本に
接近！





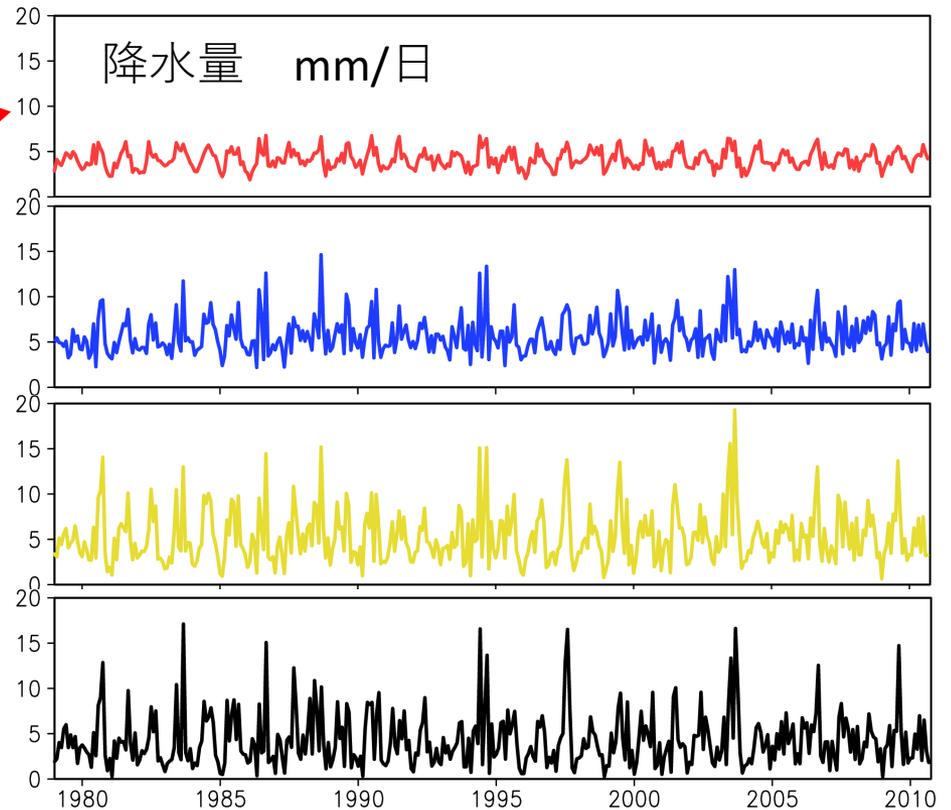
防災を考える際の、温暖化トレンドに乗った自然変動のとらえ方(中北・森 2018文科省統合プロD)。

降水量の変動、スケール効果



20km解像度の地形

Grid数
赤: ~16,000
青: ~1,500
黄: ~200
黒: 1

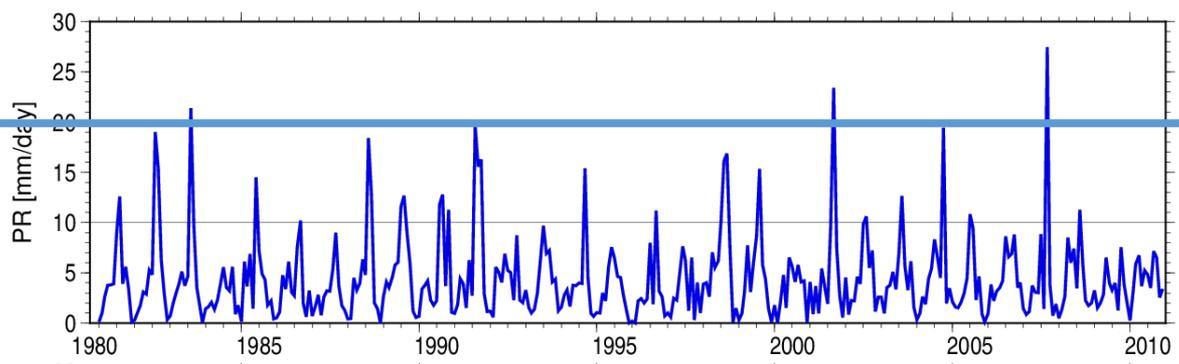


(伊東 文科省統合プロC)

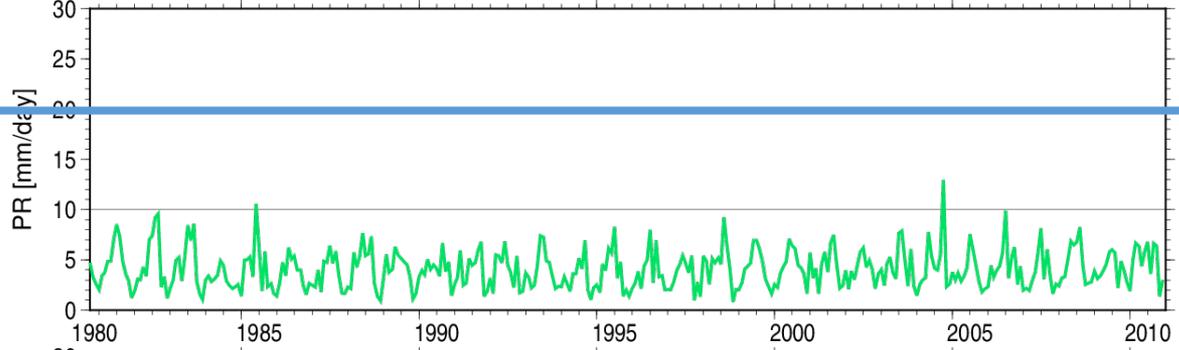
※ 領域を狭めれば狭めるほど、自然変動（極端事象）のシグナルが見えてくる

東京都小河内の降水

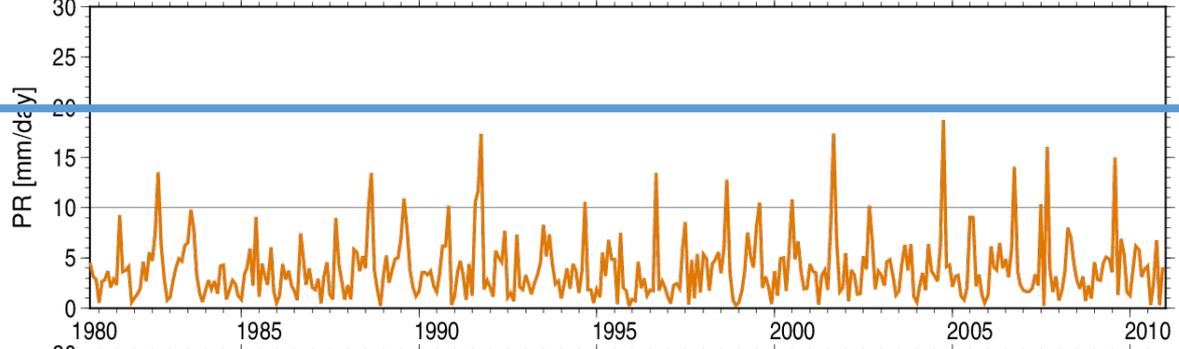
大雨のシグナルは、高い解像度のモデルのほうが得手



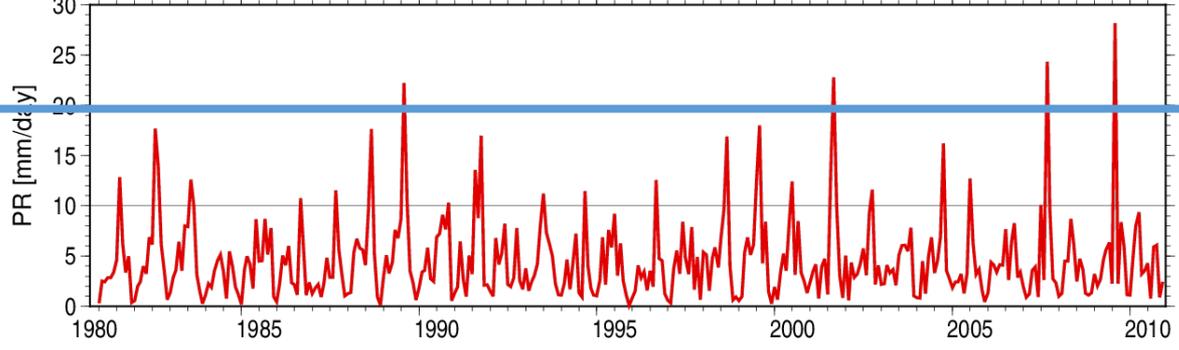
アメダス



125km



20km



5km

5kmモデルが一番良く追従している

GCM とのつなぎ方

○ モデル上でゆがめられた分散関係の問題

- ▲ モデル格子が分散関係に影響を与えるため、見かけの位相速度が狂ってくる
親モデルと、**DDS**モデルの格子間隔が異なるため、出口で位相がずれる
中緯度だと、領域の東の端に誤差がたまる

○ ナッジングの問題

- ▲ 領域の境界で波の反射が生じると**DDS**内部にエネルギーがたまってしまう
ナッジングでは、位相速度を内外で計算して反射が起きないように対処
スポンジ層を作って衝撃を吸収させている (Davies, 1983)
- ▲ **Kida et al (1991)**は計算された大規模循環場を親モデルのそれと間欠的に置き換える手法を開発 (スペクトルナッジング)
- ▲ **Waldron et al (1996)**, **von Storch et al (2000)**, **Kanamaru and Kanamitsu (2007)**により
連続データ同化のアイデアによる方法が考案される (スペクトルナッジング)

○ 誤差伝搬の問題

- ▲ **Suzuki Parker et al (2018)**がANOVA法で**DDS**の結果に対する**GCM/RCM**の寄与調査
- ▲ **Ole Christensen & Kjellstrom (2020)**が同じ手法で欧州の結果を解析
両者とも、地形の影響の大きなところで**RCM**の寄与が大きいと結論付けている
後者は冬季も行っており、雪に関する**RCM**の寄与の大きさを指摘している

ゆがめられる分散関係の説明

移流型の方程式で考察しよう⁷⁾。

$$\partial_t \phi + c \partial_x \phi = 0 \quad (1)$$

この式の解を波型と仮定して

$$\phi \approx \exp(ikx) \quad (2)$$

と置くと、(1)式は

$$\partial_t \phi + ikc\phi = 0 \quad (3)$$

さて、(1)式の x 方向のみ差分化すると中央差分で、

$$\partial_t \phi_j + c(\phi_{j+1} - \phi_{j-1}) / 2\Delta x = 0 \quad (4)$$

となる。Δx は x 方向の格子間隔であり j は格子の

番号である。ここで解の形を解析解と同様に

$$\phi_j \approx \exp(ikj\Delta x) \quad (5)$$

と置くと、(4)式は

$$\partial_t \phi_j + c\phi_j(\exp(ik\Delta x) - \exp(-ik\Delta x)) / 2\Delta x = 0 \quad (6)$$

これに

$$\exp(ik\Delta x) - \exp(-ik\Delta x) = 2i \sin k\Delta x \quad (7)$$

を代入すると、

$$\partial_t \phi_j + c\phi_j k \cdot i \sin k\Delta x / (k\Delta x) = 0 \quad (8)$$

(8)を(3)と比較すると、

$$c^* = c \cdot \sin k\Delta x / k\Delta x \quad (9)$$

$$L_s = 2\pi / k_s = 2\Delta x$$

では

$$c^* = c \cdot (\sin \pi) / \pi = 0$$

となってしまう。

○ ここでは、切断波数の近くで、位相速度が非常に遅くなってしまふ。この辺りを成敗していったのが数値予報の歴史である。

○ ここで問題になるのは、親モデル(GCM)と子モデル(RCM)の格子間隔が違うことである。中緯度で考えると、西の端から侵入してきた低気圧は、東の端まで来ると位相がずれてしまうのである。

○ そのため、東の端にゴミがたまることに悩まされていた時期もある。

スペクトルナッジングの荒っぽい説明

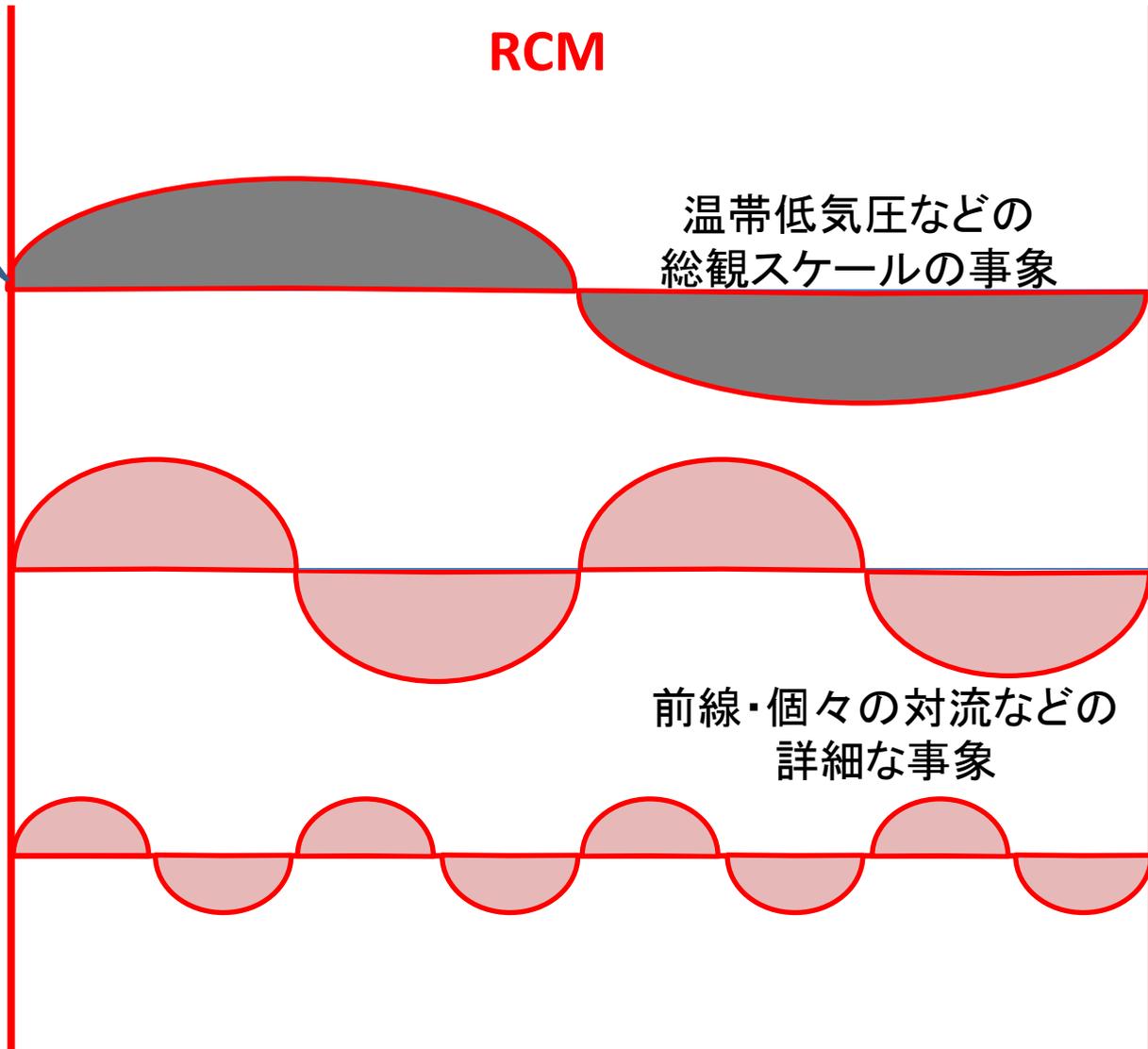
GCMと
取り替える

RCM

温帯低気圧などの
総観スケールの事象

前線・個々の対流などの
詳細な事象

RCMの
計算結果
を残す

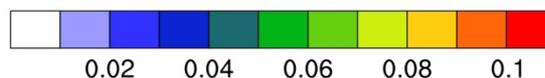
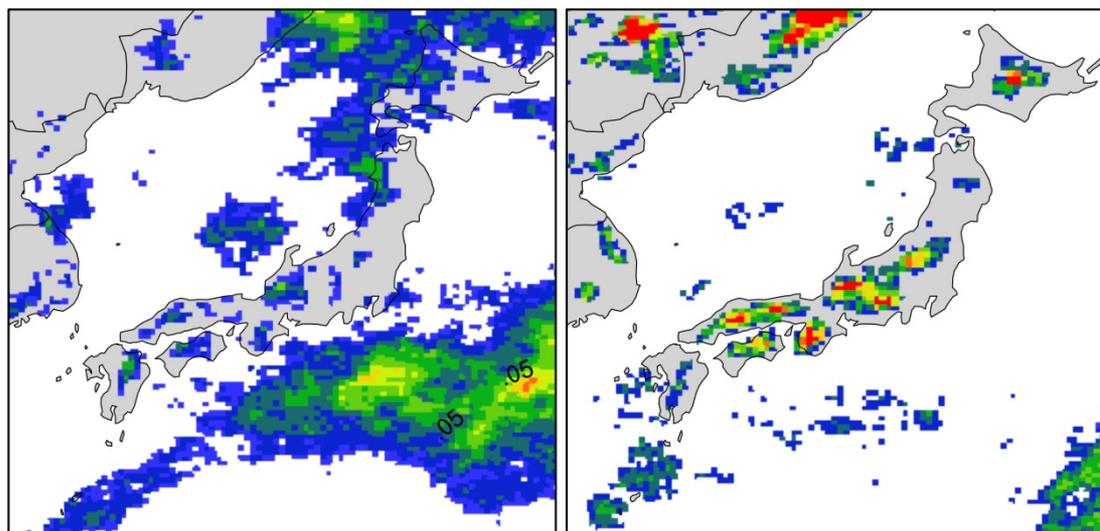


降水量挙動に対するGCM/RCMの寄与の評価

陸面の降水量は、地域気候モデルでばらつく

全球モデルの寄与

地域気候モデルの寄与



3つのCMIP5参加のGCMから4つの20km RCM (WRF, MM5, NIED-RAMS, NHRCM) を用いてダウンスケーリングした6月から8月の3か月の日降水量の挙動の差異がGCM(左)、RCM(右)いずれの差によるものかをANOVA法により評価したもの。(鈴木パーカー等 SOLA 2018)

鈴木パーカー等 (SOLA 2018)



DDS のpotentialとlimitation

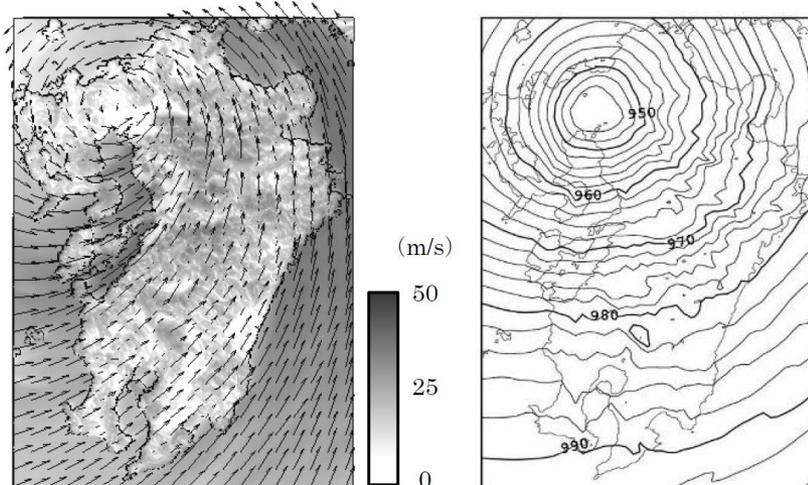
○ RANSと風の再現

- ▲ RCMは風の息を表すことができるか？
- ▲ 大気境界層スキームに用いられているRANSとの関係は？

○ 降水の再現

- ▲ 短時間降水量の再現には、高解像度モデルが有効
- ▲ さらに降水極値をもたらすような降水の再現にはCPMが有効

RANSによる風の再現の 限界



a. 地上10mにおける水平風速と風速ベクトル
b. 海面校正気圧分布等値線は2hPa毎に描く

図4 NHMによる計算結果, 9月7日8時30分

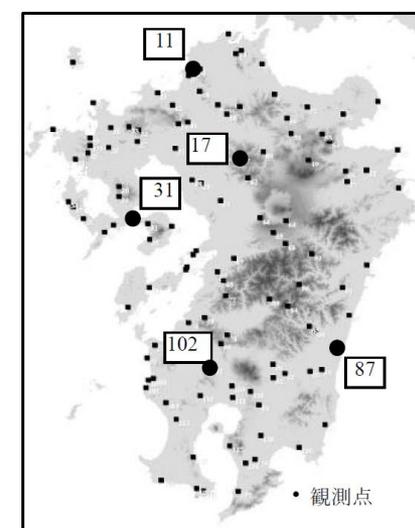


図5 NeWMeK 観測網

10分間風速との比較

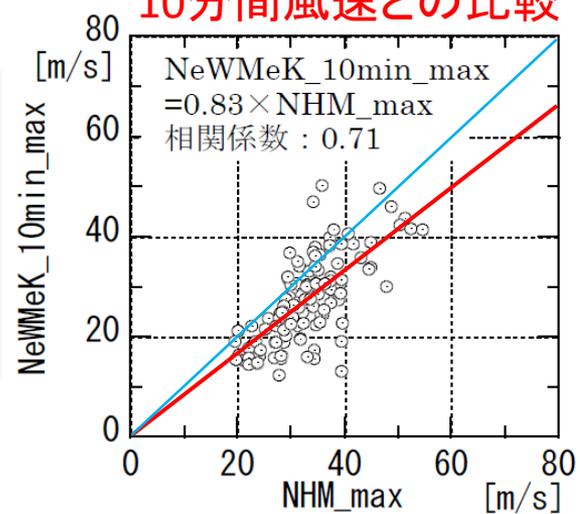


図9 NHM 風速最大値とNeWMeK 観測値の10分間平均風速最大値の関係

瞬間風速との比較

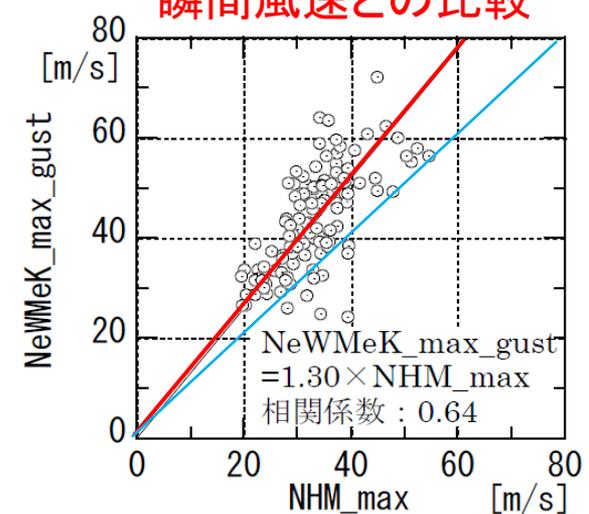
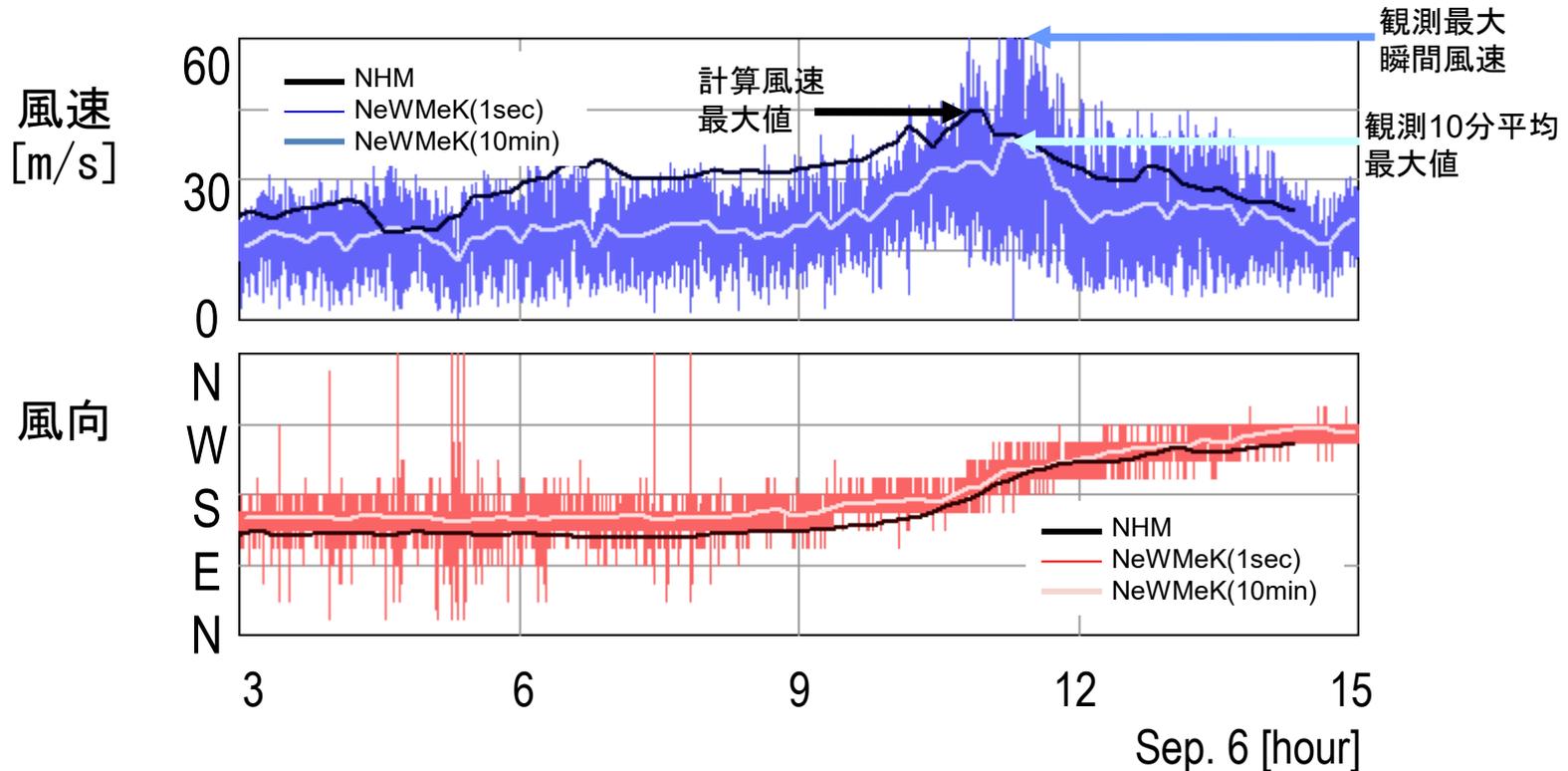


図10 NHM 風速最大値とNeWMeK 観測値の最大瞬間風速の比関係

モデルの最大風速の、
観測された
○ 10分間最大風速
○ 瞬間最大風速
との比較

観測値と計算値の比較による検証

1km格子 領域気候モデルが表現していること。
領域気候モデルはABLをパラメタイズしている。



- ・ 計算結果は風向をほぼ再現する。
- ・ 計算結果は実測に換算して、約10から15分程度の平均風速の変化を再現する。

クロージャー問題

ナビエ・ストークス方程式

$$\partial_t u_i + u_j \partial_{x_j} u_i = -\frac{1}{\rho} \partial_{x_i} p + \nu \partial_{x_j} \partial_{x_j} u_i$$

RCMで計算しているのは、この平均量。風の息は出てこない。

$$u_i = \bar{u}_i + u_i'$$
$$p = \bar{p} + p'$$

統計的平均値と乱流変動成分に分ける

代入して高次の項を落とすと平均流に対する次式が得られる

$$\partial_t \bar{u}_i + \bar{u}_j \partial_{x_j} \bar{u}_i = -\frac{1}{\rho} \partial_{x_i} \bar{p} + \frac{1}{\rho} \partial_{x_j} (\nu \partial_{x_j} \bar{u}_i$$

$$- \rho \overline{u_j' u_i'})$$

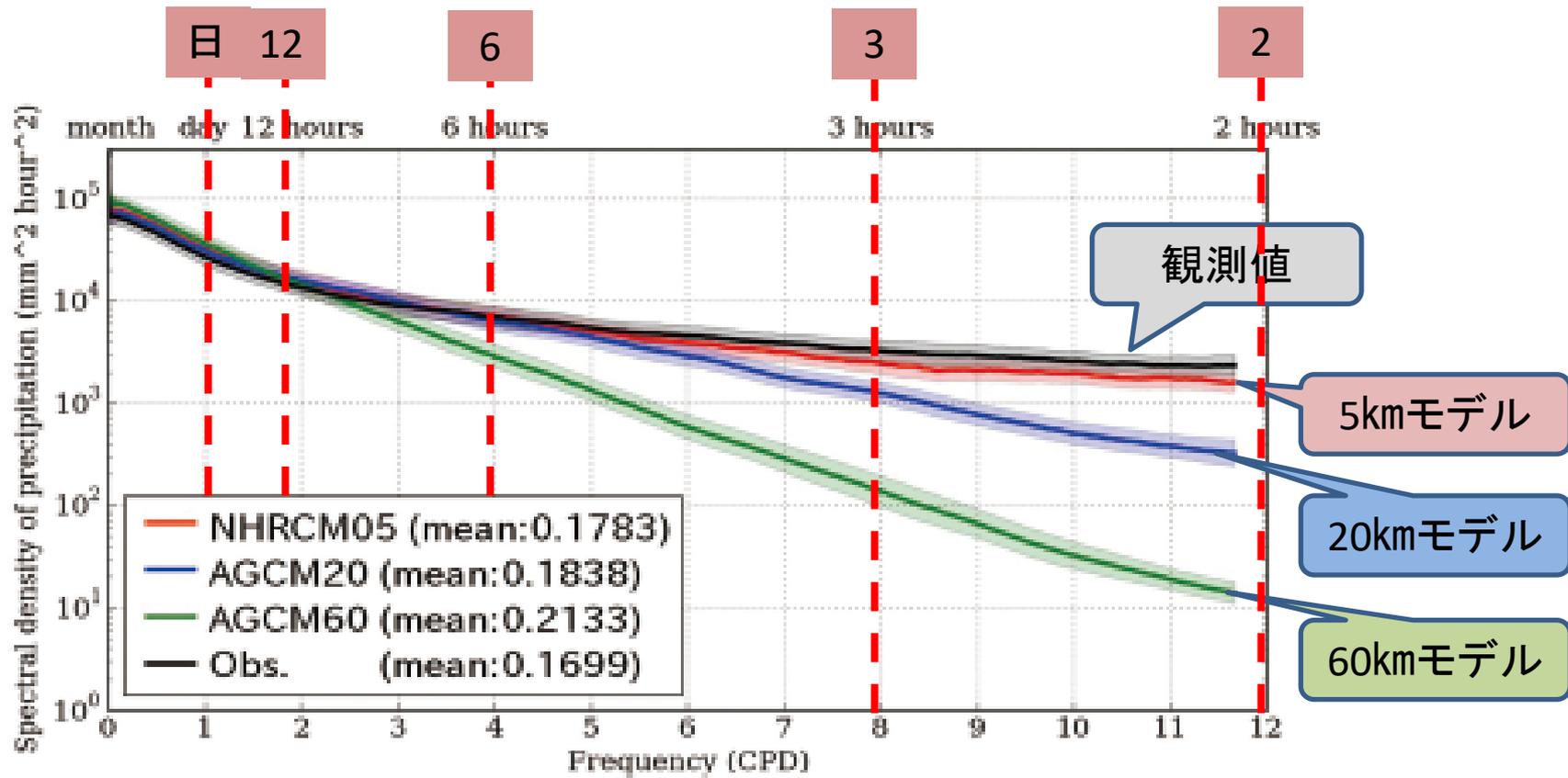
こうしないと、 $u'u'$ の方程式を計算せねばならなくなる。その中には、 $u'u'u'$ の三次の項が...

$$-\overline{u_j' u_i'} = \nu \partial_{x_j} \bar{u}_i$$

一次のクロージャー

二次の項が出るレイノルズ応力

モデルによる降水の再現性の限界

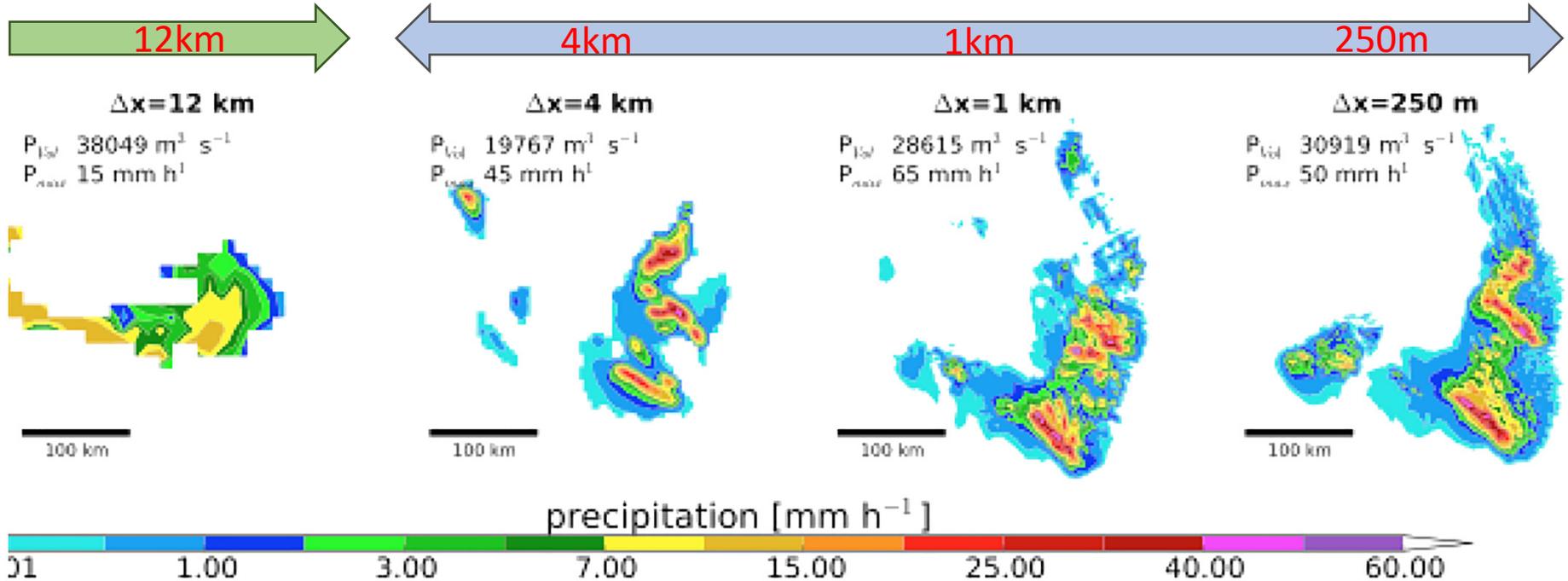


東京大手町での年間の降水量のシグナルの出方を描いたもの。日降水なら60kmモデルでもシグナルを十分にとらえられるが、時間降水量となると5kmモデルが必要になることがわかる。

CPMによる降水の詳細化

KF-scheme

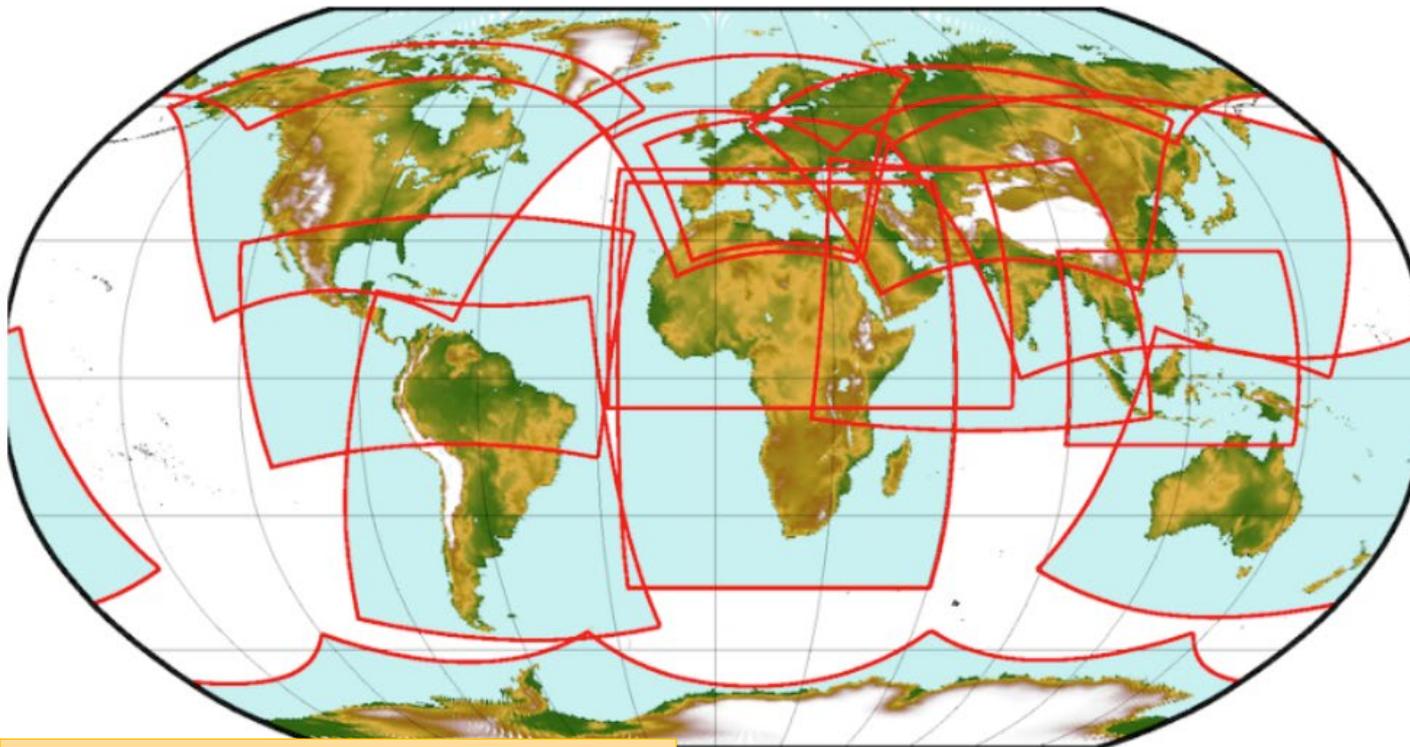
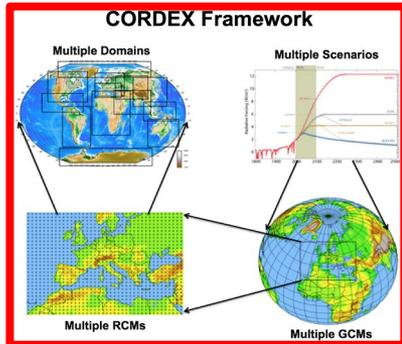
CPM (Convection Permitting Model)



Accumulated hourly precipitation between hours five and six from idealized mesoscale convective system simulations using 12-km, 4-km, 1-km, and 250-m horizontal grid spacing (Δx) with the model WRF. The Kain-Fritsch convection parameterization is used in the 12-km simulation, while deep convection is explicitly modeled in the other simulations. The experiment is based on a single sounding of an actual MCS inflow, and convection is initially triggered with forced low level upward motion. The simulation is run on a 750×750 -km domain with open boundaries for 7 hr. The total precipitation volume (P_{Vol}) and peak precipitation (P_{max}) are shown in each panel. Courtesy of A. Prein. WRF = Weather Research and Forecasting.



- WCRPの中に位置づけられている。現在のco-chairはアルゼンチンのSilvia Solmanと独のDaniela Jacob
- 高解像度のhistorical からfuture projectionまでを、様々な地域でensembleで行っている。
- 2009年に仏ツールズで旗揚げ。その際は50km解像度
- 現在、解像度は地域によって10~50km
- VIAのみならず、サイエンスも視野に入れている。
- CPMの提案も始まっている
- 人間活動を入れる提案(都市モデル等)も始まっている



- Region 1: South America
- Region 2: Central America
- Region 3: North America
- Region 4: Africa
- Region 5: Europe (EURO)
- Region 6: South Asia
- Region 7: East Asia
- Region 8: Central Asia
- Region 9: Australasia
- Region 10: Antarctica
- Region 11: Arctic
- Region 12: Mediterranean (MED)
- Region 13: Middle East North Africa (MENA)
- Region 14: South-East Asia (SEA)



- CPM climate modelに対する期待 (Kendon et al, 2017)

- 欧州への適応例 (Nikolina et al, 2021)
 - ▲ アルプス周辺の雨の再現性 (2.2 – 3km格子モデル)
 - ▲ 夏季の極端降水へのadded valueが顕著

- 南アメリカへの適応例 (Lavin-Gullon et al, 2021)
 - ▲ アンデス山脈の影響下の対流性降水の再現性 (3km格子モデル)
 - ▲ 総観場の中での深い対流。下層の水蒸気フラックスが大事。 CPMでadded value

- 東中国への適応例 (Yun et al, 2020)
 - ▲ 暖候期の降水の再現性 (3km格子モデル)
 - ▲ 降水の日変化から、雨域の季節進行 (Meiyu) までにadded valueあり



2021年9月8-10,14とCPM2021-Virtual-WS開催します。
ご関心ありましたら、ぜひ登録をお願いします。

○ CPM climate modelに対する期待 (Kendon et al, 2017)

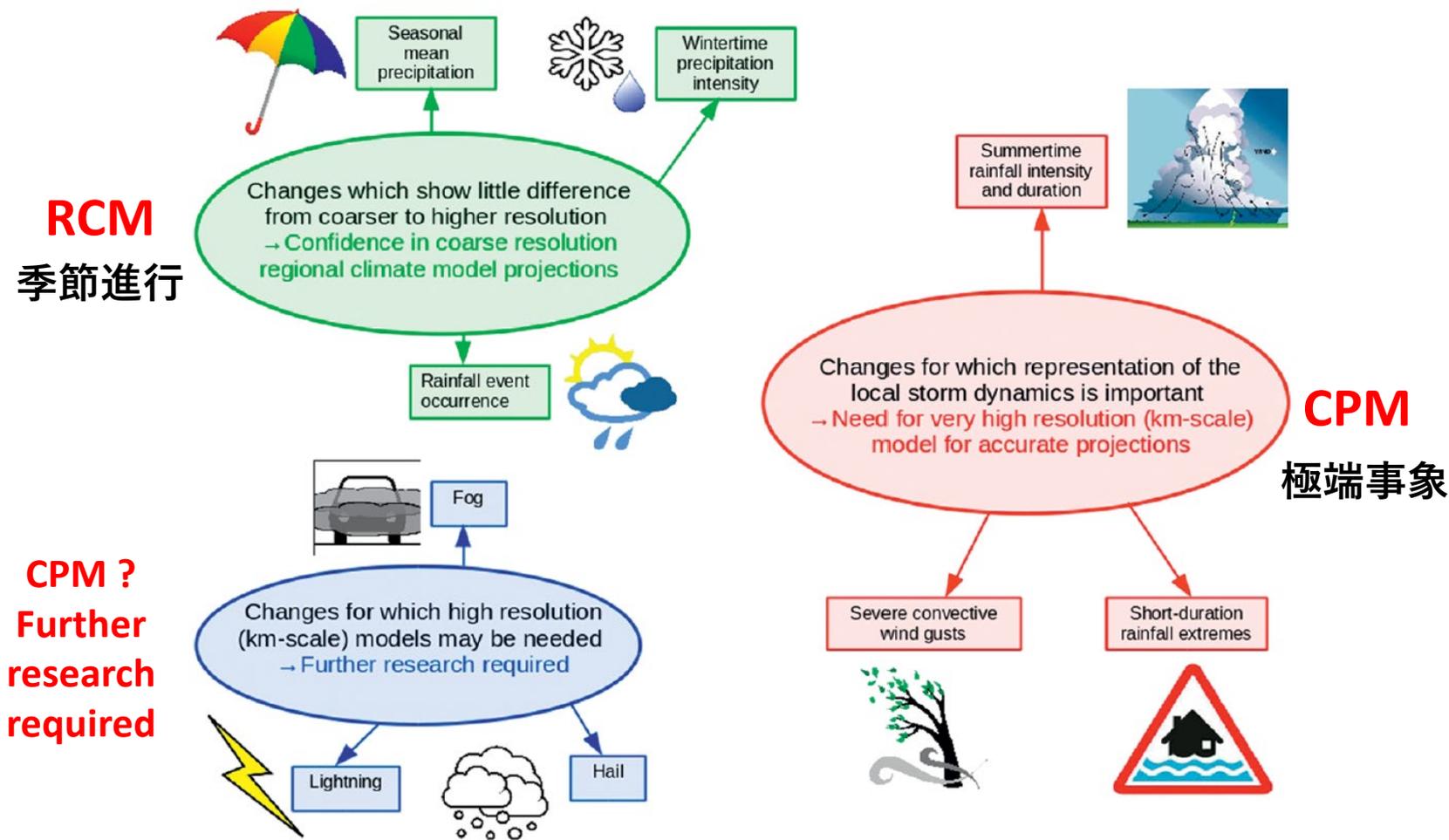
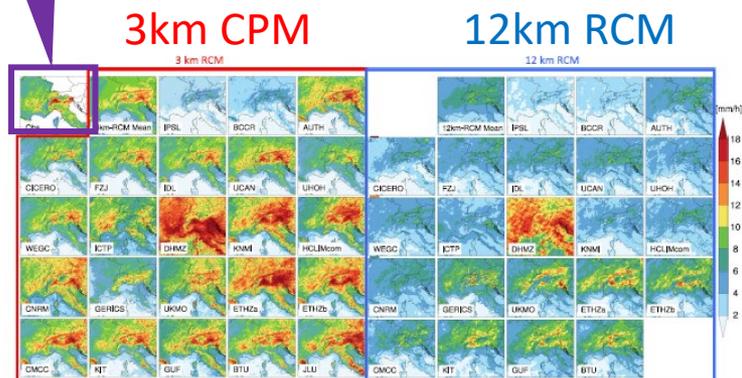


FIG. 7. Schematic summarizing where we have confidence in coarse-resolution RCM projections and where very high-resolution (kilometer scale) models are needed for accurate projections.

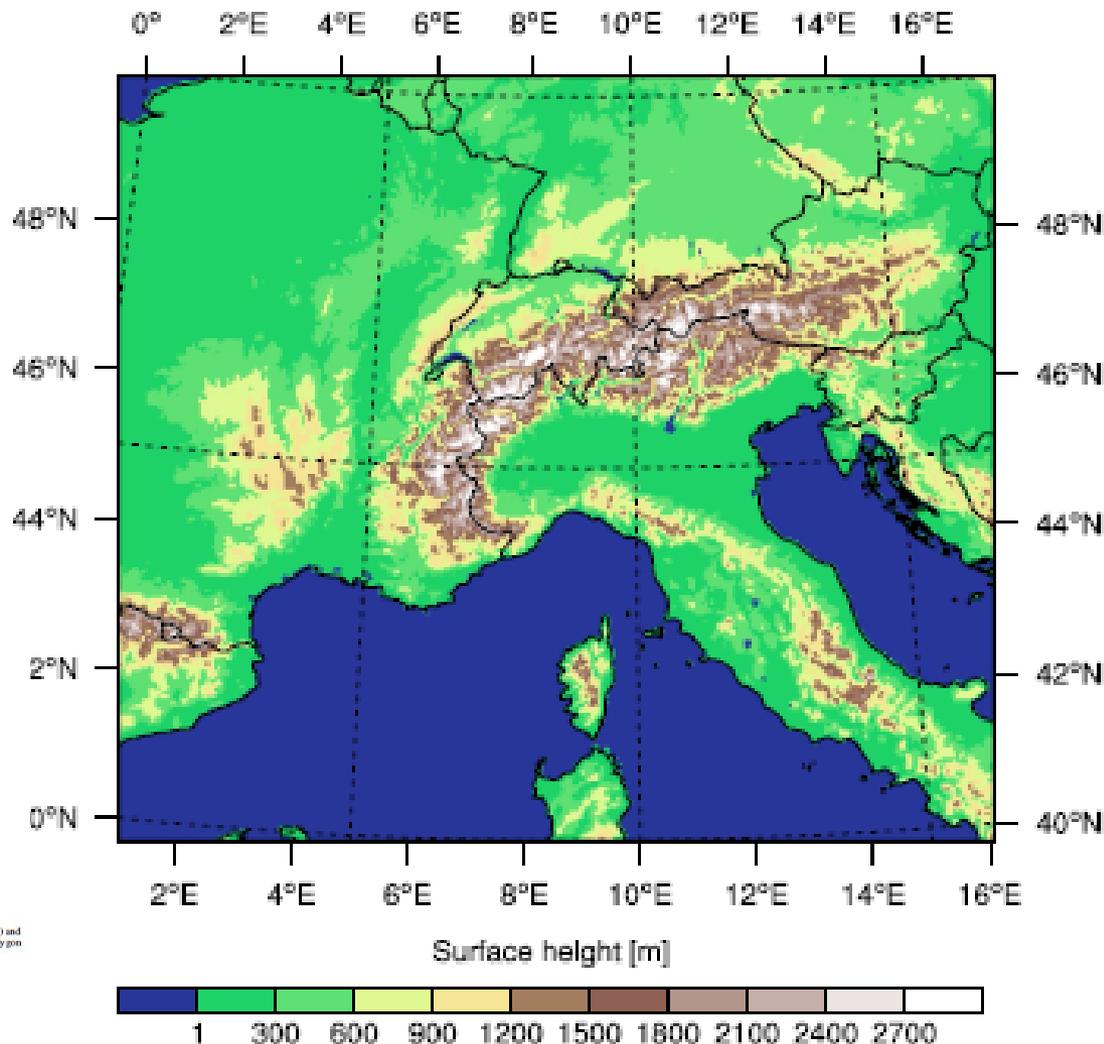
Nikolina et al, (2021)

The first multi-model ensemble of regional climate simulations at kilometer-scale resolution, part I: evaluation of precipitation

観測値



夏季：時間雨量のP99.9のモデル毎の図



- CORDEX-FPS実験の解析 (22か国から23モデルが参加)
- 12km RCMと3km CPMの10年分の計算の比較
- 特に夏季の日雨量と時間雨量の極値についてCPMで大幅な改善
- 弱い雨がたくさん降るといいうRCMのバイアスを改善
- 降雨の日周期変化をより正しく表現

(Nikolina et al, 2021)

降水の再現性の比較

○ CPMは**夏季降水量**の再現性の改善が大きい。

Abbreviation	Definition	Unit
Mean	Mean precipitation	(mm/day)
Freq	Wet day/hour ^a frequency	(fraction)
Int	Wet day/hour ^a intensity	(mm/day)/(mm/h)
pXX	XX percentile ^b of daily/hourly precipitation	(mm/day)/(mm/h)

^aA wet day (hour) is a day (hour) with precipitation ≥ 1 mm (≥ 0.1 mm)

^bPercentiles are calculated using all events (wet and dry) following Schär et al. (2016)

日雨量

時間雨量

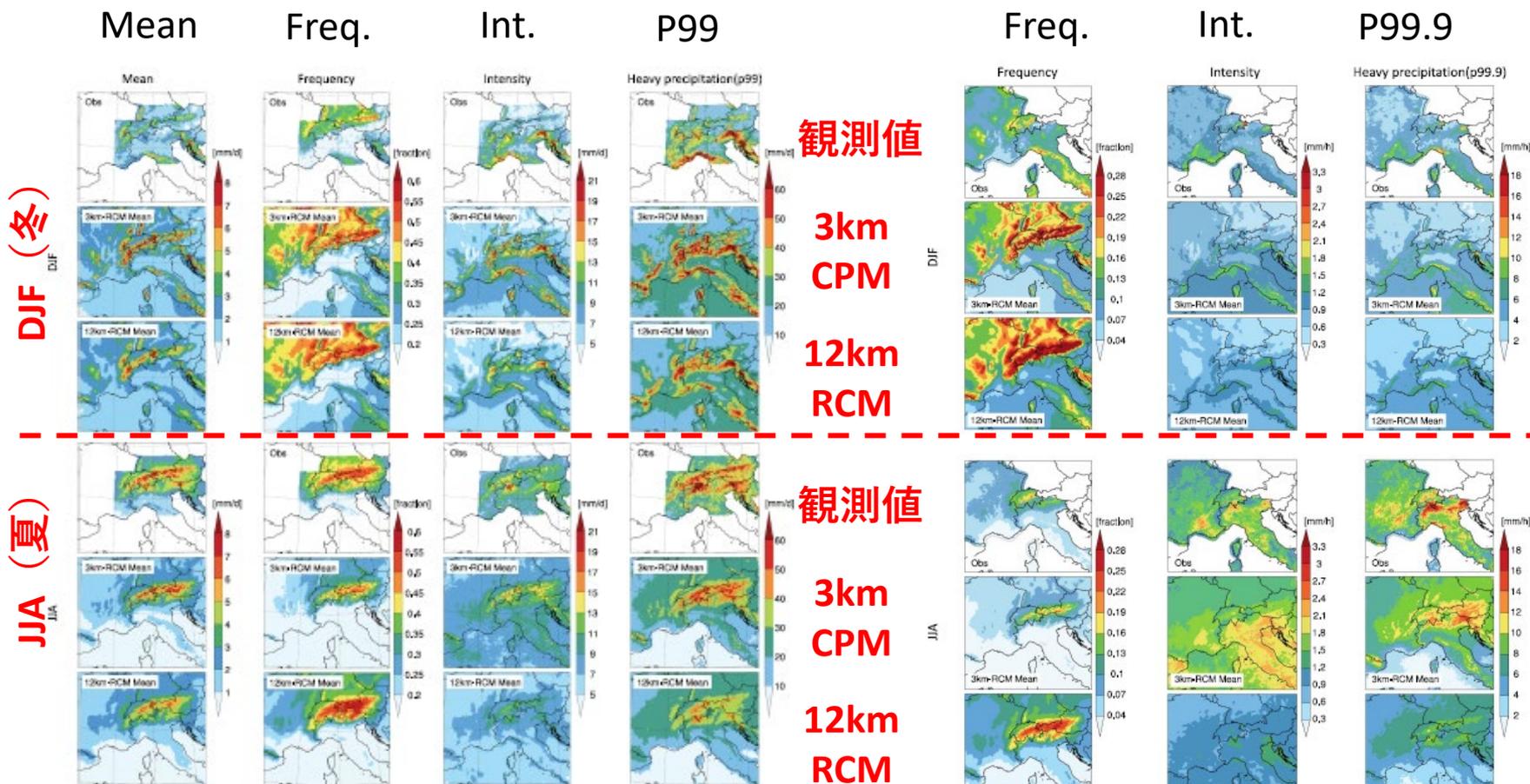


Fig. 2 Ensemble mean of analysed indices (from left to right: mean precipitation, precipitation frequency, precipitation intensity, and heavy precipitation defined as 99th percentile) calculated for daily precipitation in the winter and summer season. The results are

obtained from EURO4M-APGD observations (Obs; Isotta et al. (2014)), 3 km-RCM (as a mean across 23 simulations) and 12 km-RCM model simulations (as a mean across 22 simulations)

Fig. 4 As Fig. 2, but for hourly precipitation. The observations are composed from available gridded hourly precipitation over land (Wüest et al. 2010), France (Fumière et al. 2020) and I

(Nikolina et al, 2021)

地域気候モデル (RCM) による力学的ダウンスケーリングとは・・・

- RCMはGCMより高解像度、地域限定対応モデル
- RCMの高解像度で初めて見えてくる現象がある
- RCMが境界を持っていることには注意が必要
- RCMの用途はDDS（応用）とprocess study（気象学）の2つがある。
- RCMは側面境界・下端境界にGCM等の情報を入れる
- RCMはone-way nestingである
- Spectrum nudgingはRCM-GCM間のconsistencyを保つ
- RCMはGCMの再現性の特性を引き継ぐ
- RCMにとり、GCMが作るlarge scale forcingは重要である