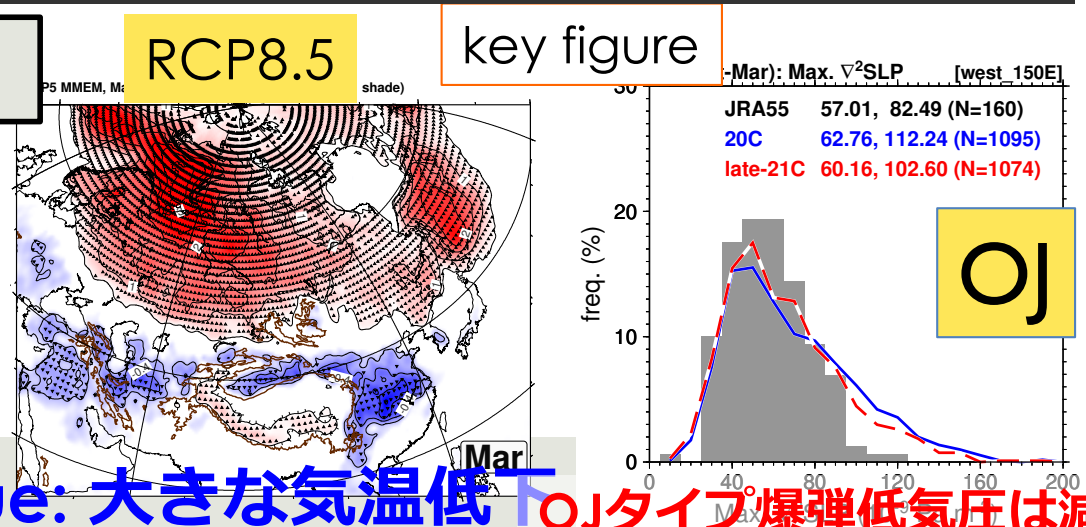


# 東アジアの冬季モンスーンの季節進行とその将来変化

早崎将光 (日本自動車研究所)



Key question:

- 温暖化すれば, 寒候期の日々の天候は穏やかになるのか?
  - 日々の地上気温変動幅
  - 低気圧活動

# 発表内容

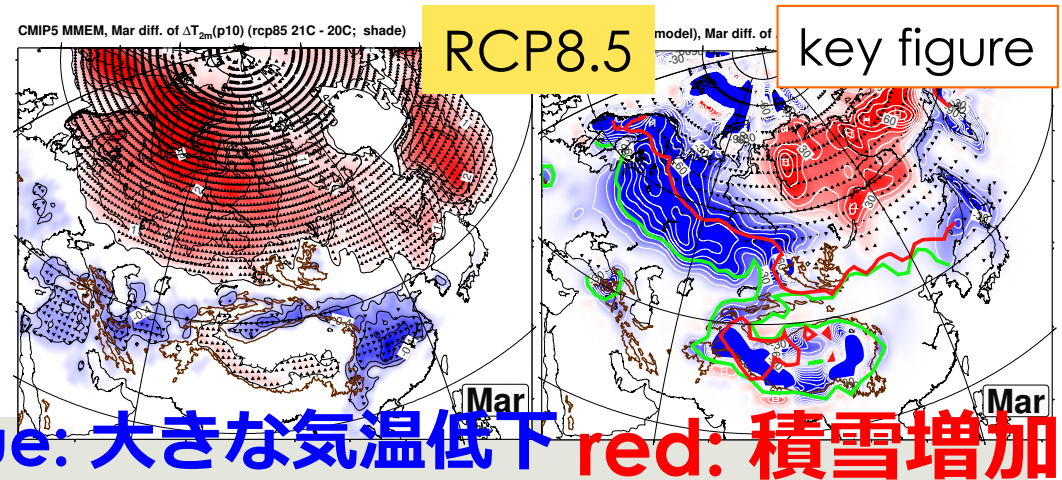
1. 日々の地上気温変動の将来変化
  - 気温急低下⇔寒気吹き出し, として評価
2. 低気圧活動の将来変化
  - 急発達する低気圧 (爆弾低気圧) に着目
  - 経路別・月別に評価

素朴なギモン：

「温暖化」は「穏やかな天候」をもたらすのか？

これに回答するため, CMIP5 将来予測データを解析

# 東アジアの冬季モンスーンの季節進行とその将来変化（1）：日々の地上気温変動



Key question:

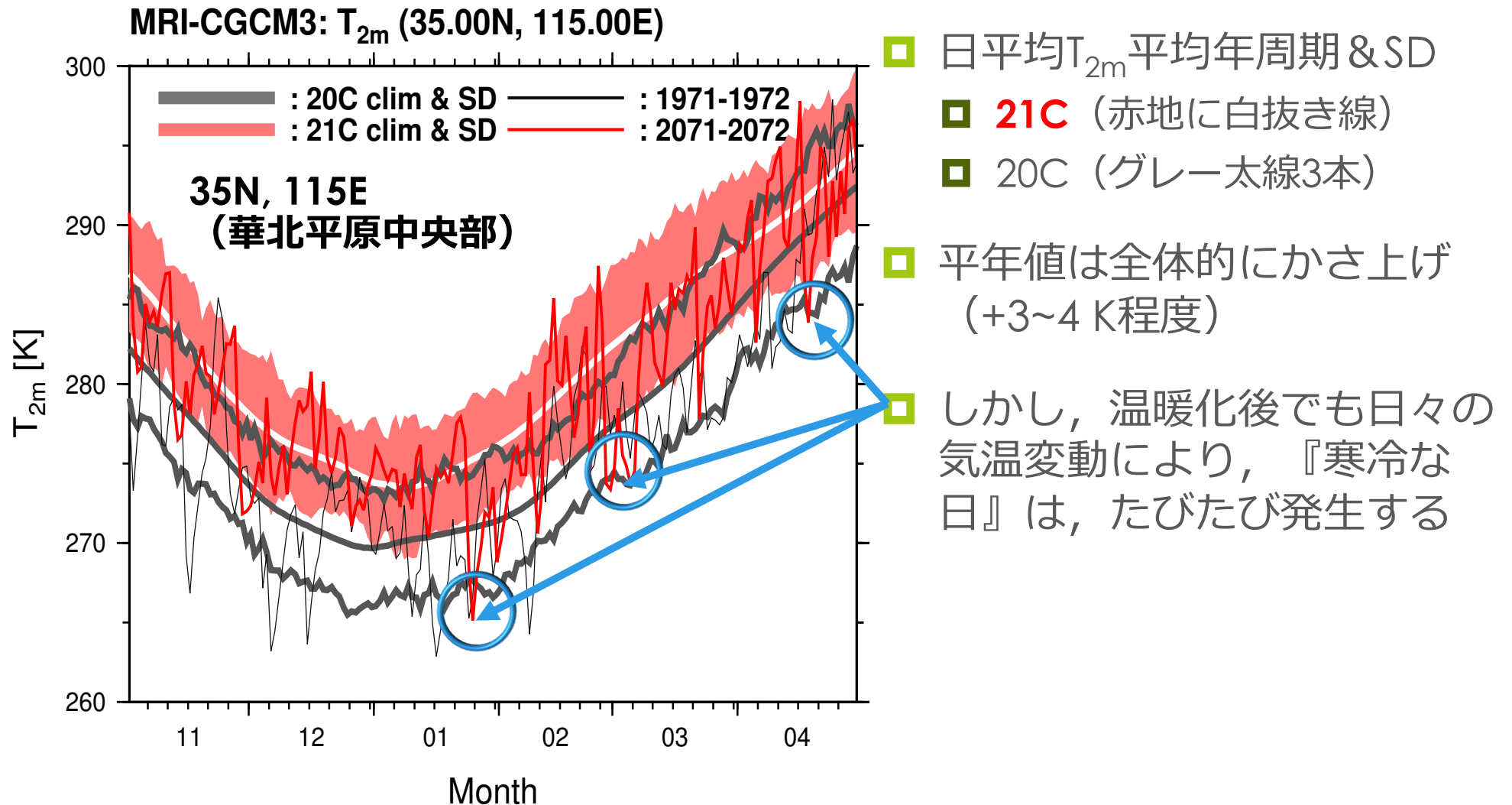
- 温暖化後，寒候期の**日々の気温変動**は穏やかになる？

➡ 現在よりも大きな変動（2，**3月**の中国東部）

➡ ユーラシア北東部での残雪の影響か

# 地上気温の平均的な季節進行

## 20C vs. **21C (RCP8.5)**, Nov-Apr



平均年周期：気象庁の日別平年値の算出方法を使用。

日別に30年平均後, ローパスフィルタ (Lanczos filter, cut-off = 30-day)

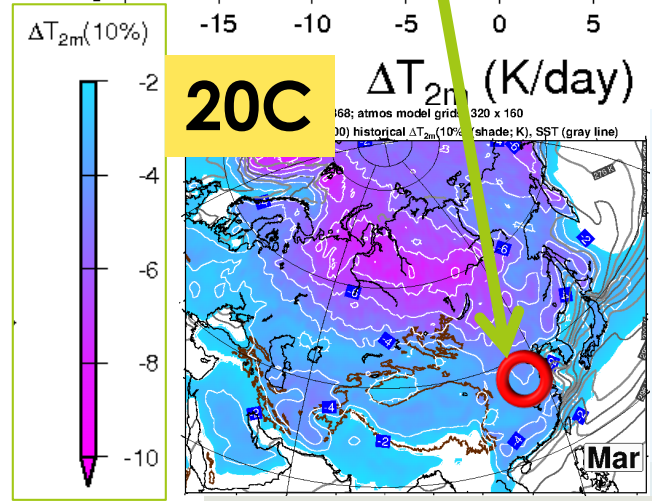
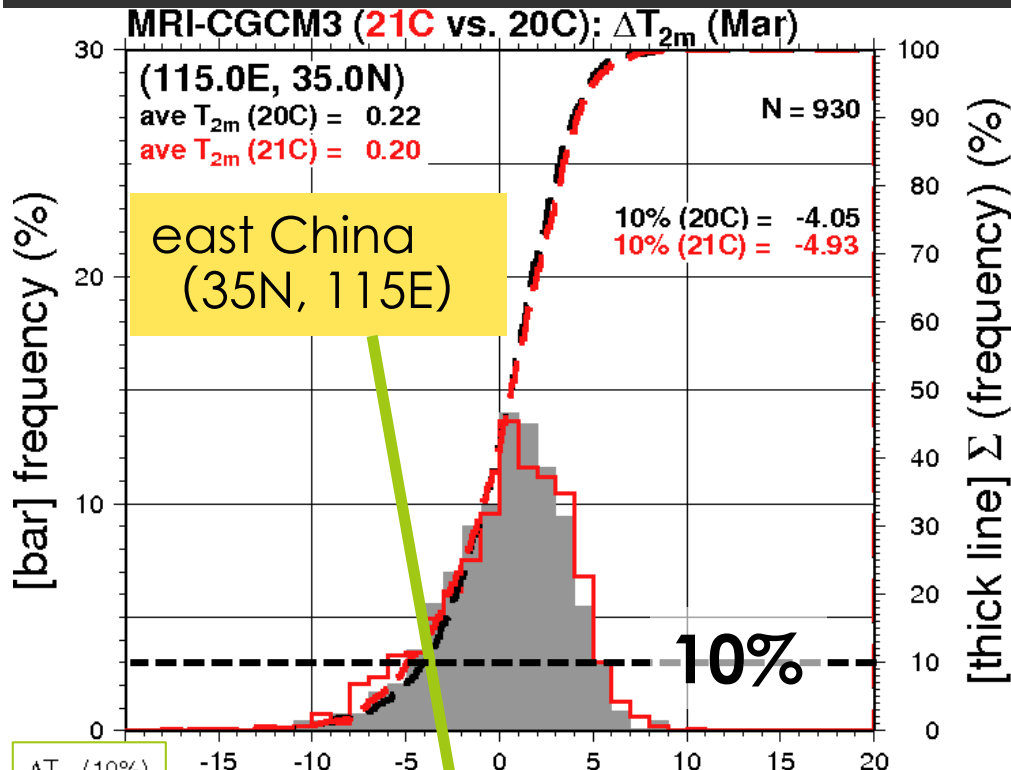


# List of CMIP5 models (regrid 1.25 deg.): Select “high-resolution” seven models

ID	model name (reference)	Institution (country)	Horizontal grids (atmos.)	vertical levels (atmos.)	Horizontal grids (ocean)
C	BCC-CSM 1.1 (M) (xxxx)	BCC/CMA (China)	320 x 160 (Txx)	Lxx, top=xx-hPa	360 x 232
E	CCSM4 ( <a href="#">Gent et al. 2011, JC</a> )	NCAR (USA)	288 x 200 (lon-lat grid)	L26, top=2.2-hPa	320 x 384
F	CESM1-BGC (xxxx)	NSF, DOE, NCAR (USA)	288 x 200 (lon-lat grid)	L26, top=2.2-hPa	320 x 384
H	CMCC-CM (xxxx)	CMCC (Italy)	480 x 240 (T159)	L31, top=10-hPa	182 x 149
I	CNRM-CM5 ( <a href="#">Voldoire et al. 2013, CD</a> )	CNRM (France)	256 x 128 (TL127)	L31, top=10-hPa	362 x 292
S	MIROC5 ( <a href="#">Watanabe et al. 2010, JC</a> )	AORI/NIES/JAMS TEC (Japan)	256 x 128 (T85)	L56, top=0.003- hPa	256 x 224 L50
V	MRI-CGCM3 ( <a href="#">Yukimoto et al. 2011, MRI Tech. Rep.</a> )	MRI (Japan)	320 x 160 (TL159)	L48, top=0.01-hPa	364 x 368 L51

# Daily cooling intensity (DCI):

10<sup>th</sup> percentile of daily mean T change;  $\Delta T_{2m}$  (10%)

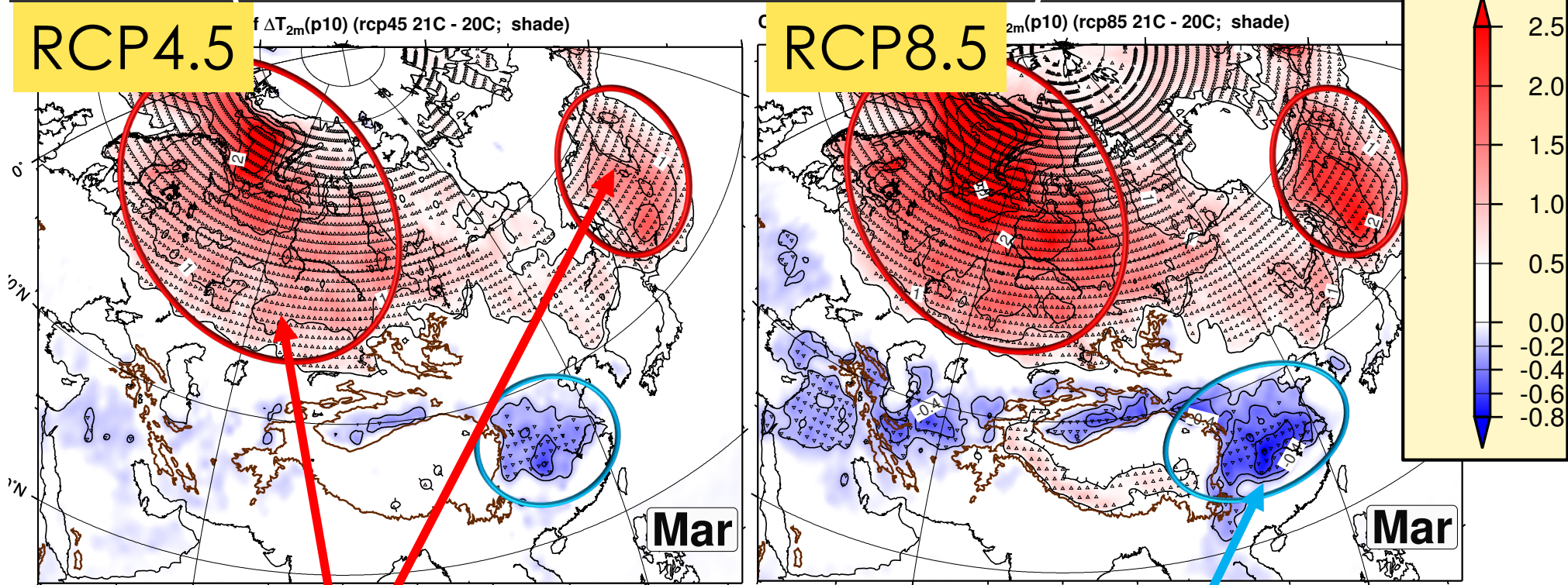


- Make monthly statistics of DCI (Oct – May) in the late 20C & 21C
  - 20C (historical; 1971-2000)
  - 21C (RCP4.5 & 8.5; 2071-2100)
- DCI: **10<sup>th</sup> percentile** of  $\Delta T_{2m}$ 
  - Use daily mean 2-meter Temp. ( $T_{2m}$ ), **day-to-day  $T_{2m}$  changes sort upward (30-yr; N = approx. 900).**

$$\Delta T_{2m} = T_{2m}(t=0) - T_{2m}(t = -1)$$

Fig. (upper)  $\Delta T_{2m}$  histogram. (left) Horizontal distribution of DCI. dashed: accumulated freq. (right axis) histogram (gray & red): rank freq. (left axis) gray: 20C (1971-2000) **red: 21C (2071-2100)**

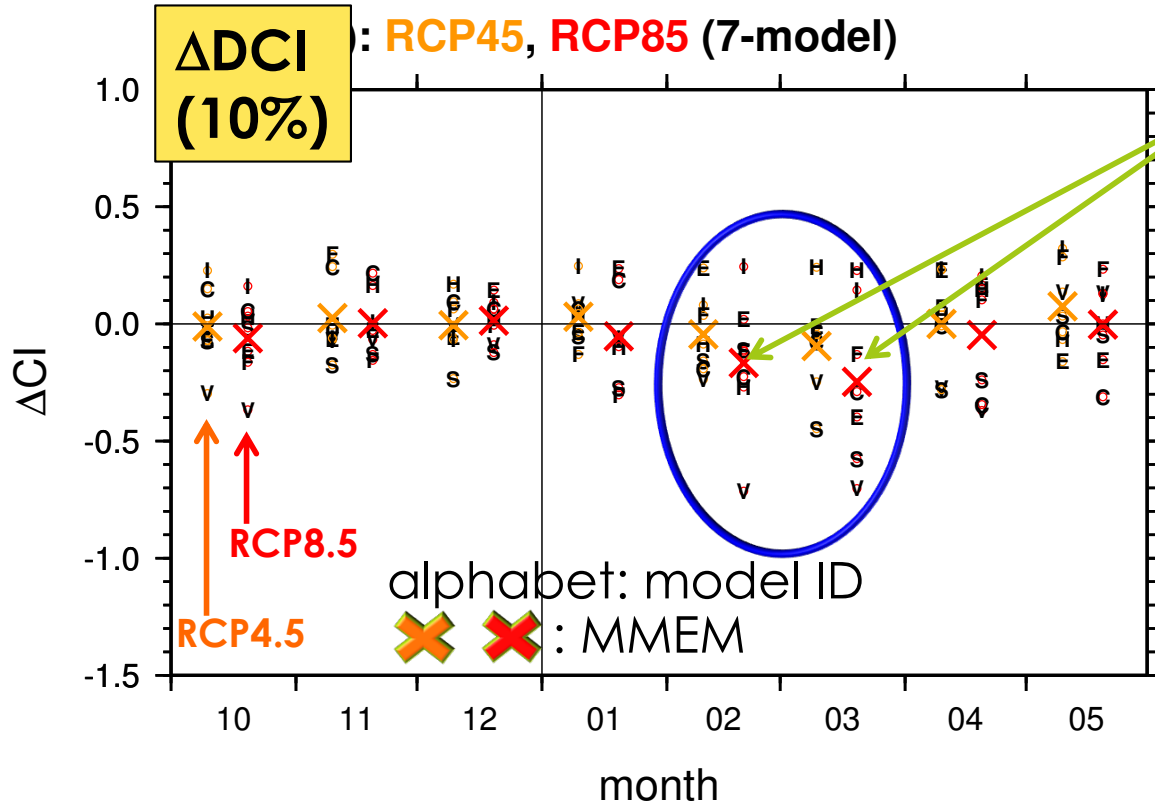
# $\Delta DCI$ (21C - 20C): RCP4.5 & RCP8.5 Mar (CMIP5, 7-model MMEM)



※格子点の丸印：MMEMと同符号の偏差となるモデルが6個以上の場合

- 高緯度でのDCI弱<sup>化</sup>, 中緯度（特に中国東部）でのDCI強<sup>化</sup>は、いずれのモデルでも同符号
- RCP8.5シナリオの方が顕著なDCI強<sup>化</sup>

# [ $\Delta DCI$ ] (E. China), RCP4.5 & RCP8.5: Oct-May (**7-model MMEM**)



□ **DCI amplification** ( $\Delta DCI < 0$ ) is dominant in **Feb, Mar**

□  $\Delta DCI_{RCP8.5} < \Delta DCI_{RCP4.5}$  (温暖化が進行するほど極端な気温低下が生じやすい)

[ ] = Area-mean in E. China (**25-40N, 100-120E**)

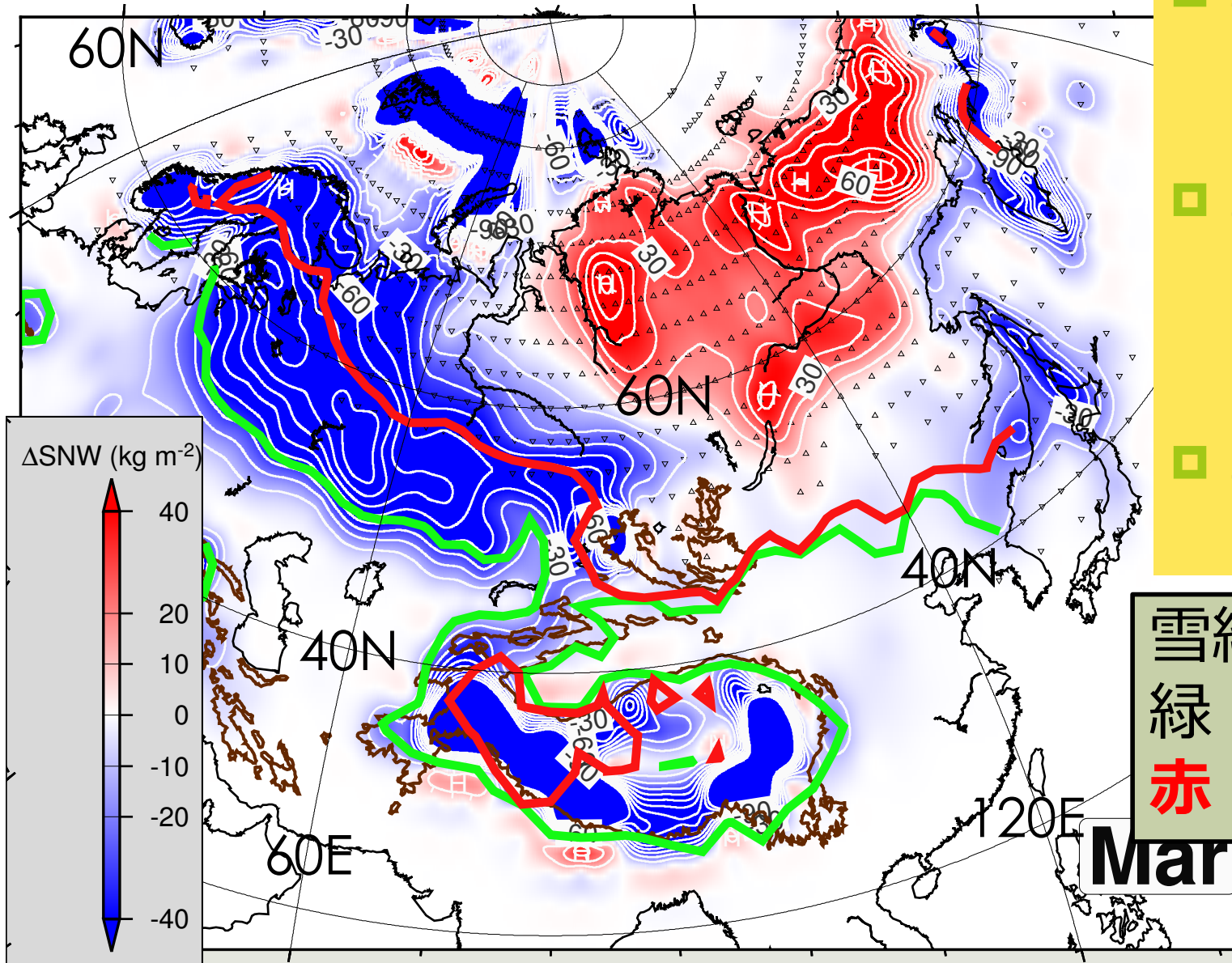
large  $\Delta CI$  (highest two)  
 H: CMCC-CM  
 I: CNRM-CM5

small  $\Delta CI$  (lowest two)  
 S: MIROC5  
 V: MRI-CGCM3



# Future changes of snow water amount in Eurasia: Mar, 21C-20C, RCP8.5 (13-model MMEM)

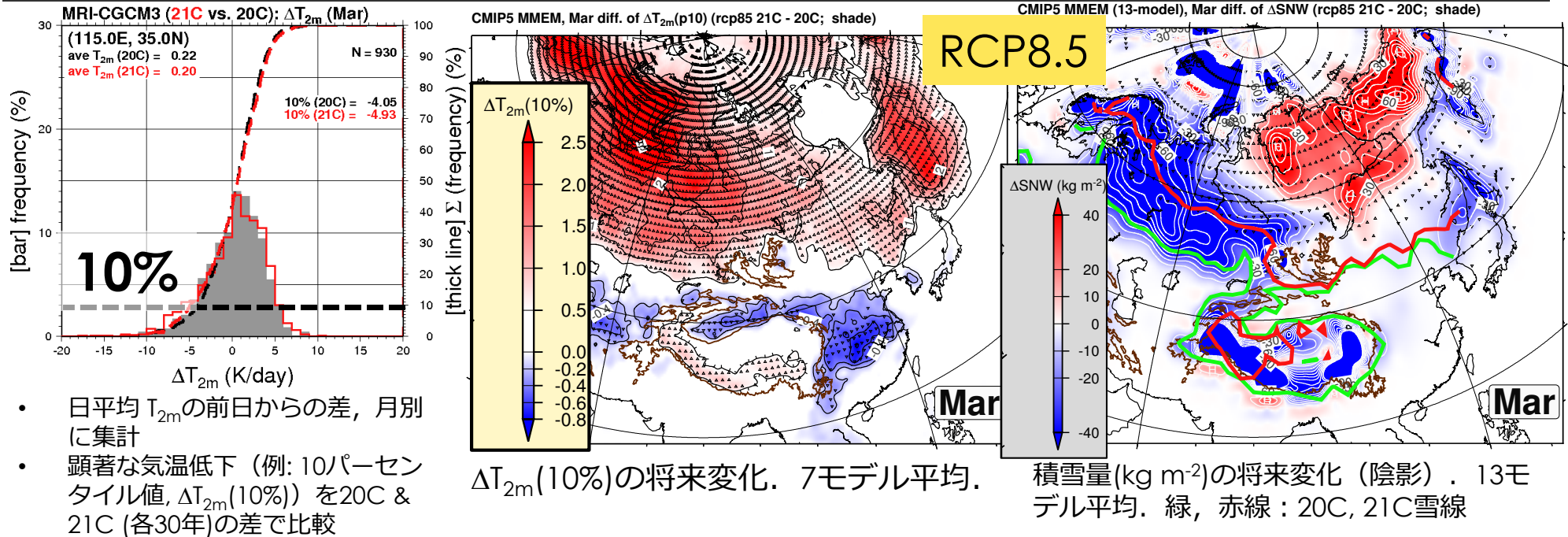
CMIP5 MMEM (13-model), Mar diff. of  $\Delta$ SNW (rcp85 21C - 20C; shade)



- ユーラシア北東部で多雪 (20C比で最大+50%)
- ユーラシア西部 : 21C末の雪線, 20C末に比べて約1000 km 後退
- ユーラシア東部 : 雪線, ほぼ同じ

雪線 (20 kg m<sup>-2</sup>)  
緑 : 20C  
赤 : 21C

# まとめ：冬季モンスーン期における日々の気温変動幅の将来変化



- 日平均  $T_{2m}$  の前日からの差, 月別に集計
- 顕著な気温低下 (例: 10パーセントایل値,  $\Delta T_{2m}(10\%)$ ) を20C & 21C (各30年)の差で比較

$\Delta T_{2m}(10\%)$ の将来変化. 7モデル平均.

積雪量(kg m<sup>-2</sup>)の将来変化 (陰影). 13モデル平均. 緑, 赤線: 20C, 21C雪線

- 高緯度域：海氷 & 陸上積雪の減少域の周辺部で**DCIが弱化**.
  - 温暖化すると, 日々の気温変動も穏やかに
- 中緯度域 (特に中国東部)：2, 3月で**気温低下幅**が現在気候よりも**拡大**.
  - 温暖化しても「急に寒くなった」と感じる日は, 同程度以上の頻度で発生

温暖化時, 北東シベリアでは冬季積雪が増加. 積雪被覆域からの寒冷気塊の流出 (寒気吹き出し) 時, 中緯度で顕著な気温低下

# まとめ（1）：日々の地上気温変動

- DCI は**晩冬～初春**の東アジアで特に強まる
  - 高解像度モデルの多く（7モデル中6ヶ）が同様の傾向。上記に低解像度モデルを含めてもほぼ同様（全16モデル中13ヶ）。
  - DCI 強化が顕著な期間では、ユーラシア**東部**の積雪**面積**は現在気候と同程度（積雪量は増加）。つまり、ユーラシア東部では下層寒気形成に適した地表面状態は温暖化時でも維持。

## Future plan:

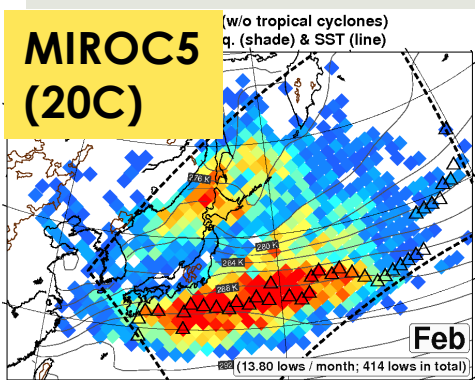
- 陸上積雪とDCIとの関連
  - **中東～中央アジア**でのDCI強化をどう説明するのか？ 現時点の仮説が誤っているのか、それとも東アジアとは別プロセスが作用しているのか？



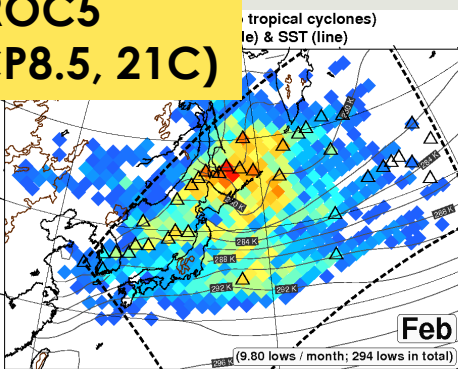
# 東アジアの冬季モンスーンの季節進行とその将来変化（2）：低気圧活動

Q. 低気圧活動の将来変化は？

A. 個数が減少，経路は高緯度側シフト



**MIROC5 (RCP8.5, 21C)**

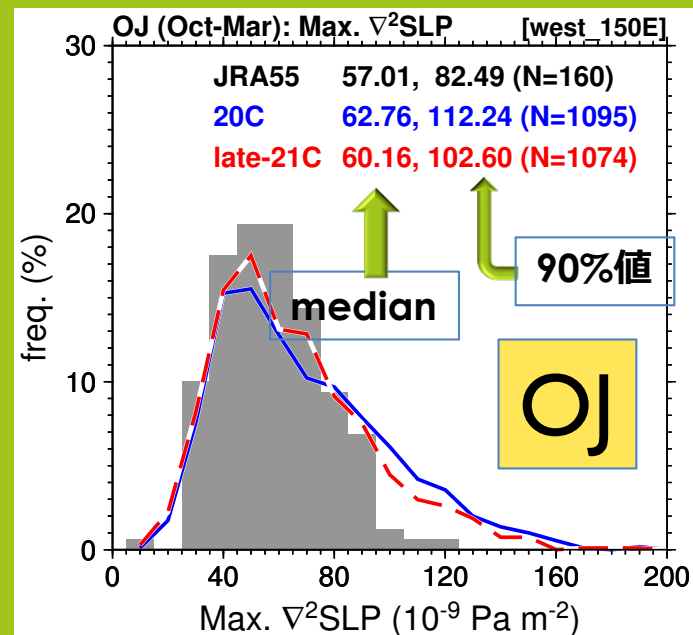


南岸低気圧が減少，  
低気圧経路は高緯度側シフト

key result

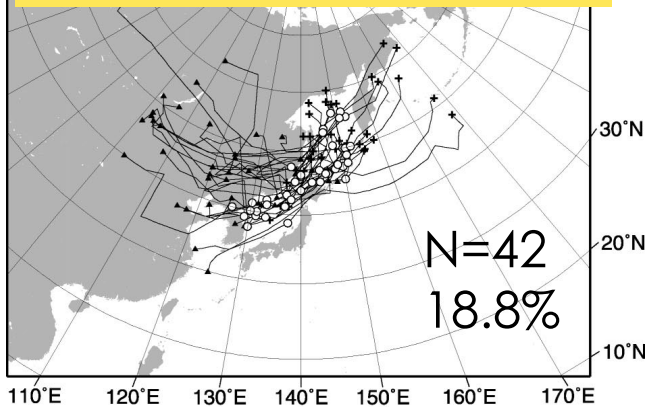
Q. 爆弾低気圧ではどうか？

A. OJタイプは減らない。  
強くもないが弱くもない

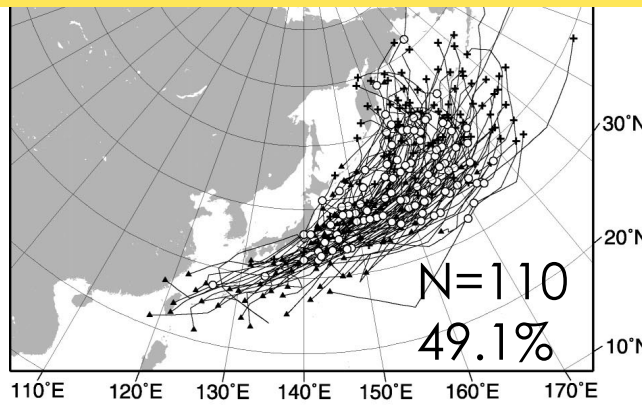


# 研究動機：日本付近の爆弾低気圧活動は、将来どのように変わるのか？

## Okhotsk-Japan Sea (OJ)



## Pacific Ocean-Ocean (PO-O)



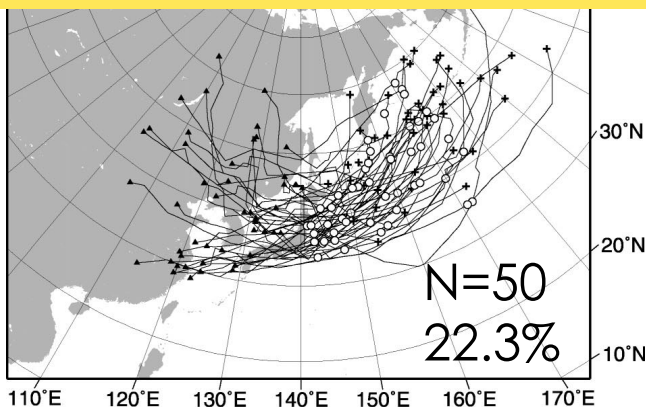
□ 爆弾低気圧を3つの経路タイプに区分.

□ OJ (18.8%)

□ PO-L (22.3%)

□ PO-O (49.1%)

## Pacific Ocean-Land (PO-L)



▲ : FORMATION  
○ : MAXIMUM DEEPENING  
+ : MINIMUM CENTER SLP  
— : CYCLONE TRACK

FIG. 2. Cyclone tracks of (a) OJ, (b) PO-L, and (c) PO-O cyclones. Triangles show positions of formation, circles show positions of maximum deepening rate, and crosses show positions of minimum center sea level pressure.

total = 224  
(others = 22)

□ CMIP5モデル群の現在気候において、爆弾低気圧活動は観測事実と整合的か？

□ 温暖化により爆弾低気圧活動は変化するのか？

## Yoshida and Asuma (2004, MWR)

Anal. period = 1995 – 1999 (5 cold seasons; Oct – Mar),

Use JMA GANAL

1.875 deg. (before Feb1996), 1.25 deg. (after Feb1996)

# 研究目的, 使用データ

- 日本付近を通過する爆弾低気圧の再現性を評価, その将来変化傾向を明らかにする
  - 経路タイプ別の活動度 (季節性, 頻度, 強度)
  - YA2004 による3分類を低気圧経路データに適用

使用データ: 長期再解析&CMIP5

- 再解析: JRA55, ERA Interim, CFSR
- CMIP5: **高解像度 6モデル** (水平格子1.25°間隔程度)
  - BCC-CSM 1.1 (M), CCSM4, CMCC-CM, CNRM-CM5, MIROC5, MRI-CGCM3
  - RCP4.5 & **RCP8.5** シナリオ
  - 期間(25-yr):
    - **20C** (1981-2005)
    - mid-21C (2036-2060)
    - **late-21C** (2076-2100)

# 低気圧経路解析：SLP 極小値の検出・追跡

Serreze et al. (1993, Meteorol. Atmos. Phys.) の修正版

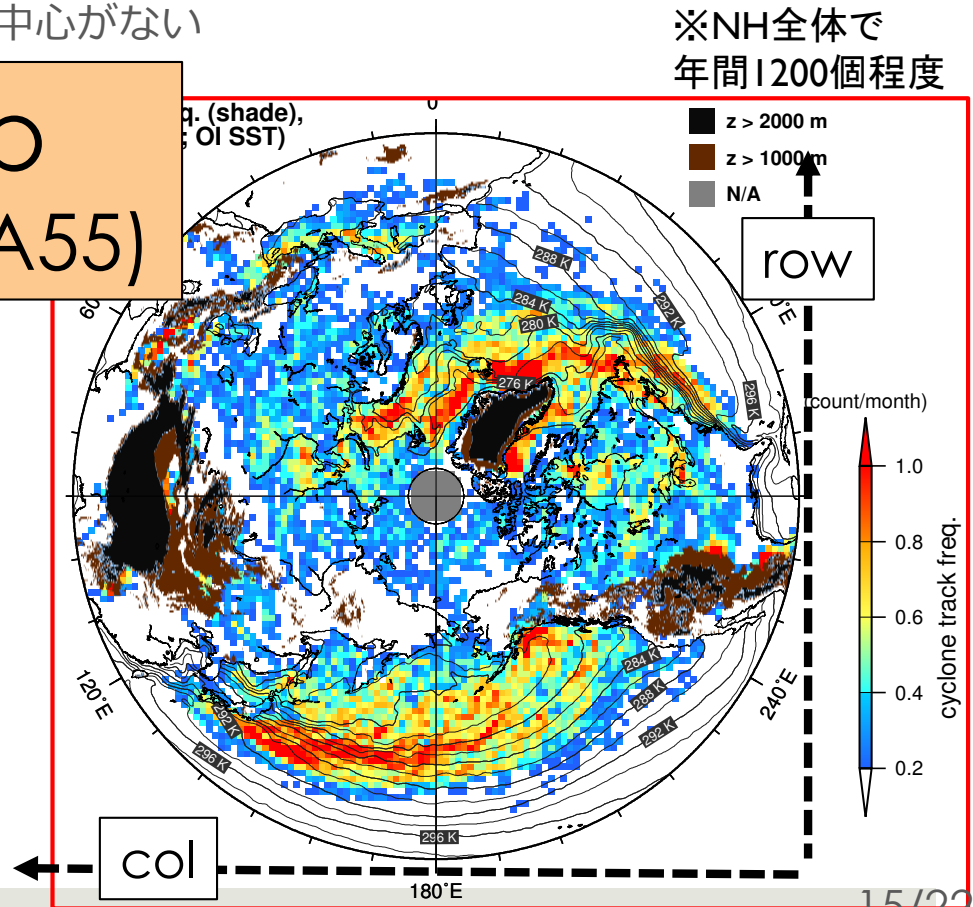
- 等緯度経度間隔SLPを **EASEグリッド**（等面積格子，中緯度で約140 km 間隔，NH: 145 x 145 グリッド）に変換
- **SLP 極小値**（周囲より **0.5 hPa以上低い**）を「低気圧の中心」として追跡。1日未済で消滅するものは対象外。
  - 発生： $\Delta t$  時間前， $d$  [km] 以内に低気圧中心がない
  - 消滅： $\Delta t$  時間後， $d$  [km] 以内に低気圧中心がない

時間間隔:  $\Delta t = 6$  [hour]

探索範囲:  $d = 600$  [km]

- ▶ 選択した低気圧経路を，気象庁天気図から判読した低気圧経路と比較，ほぼ現実的な低気圧経路であることを確認。
- ▶ 右図：2月の低気圧経路頻度（1981-2005年の平均，JRA55）

Feb  
(JRA55)



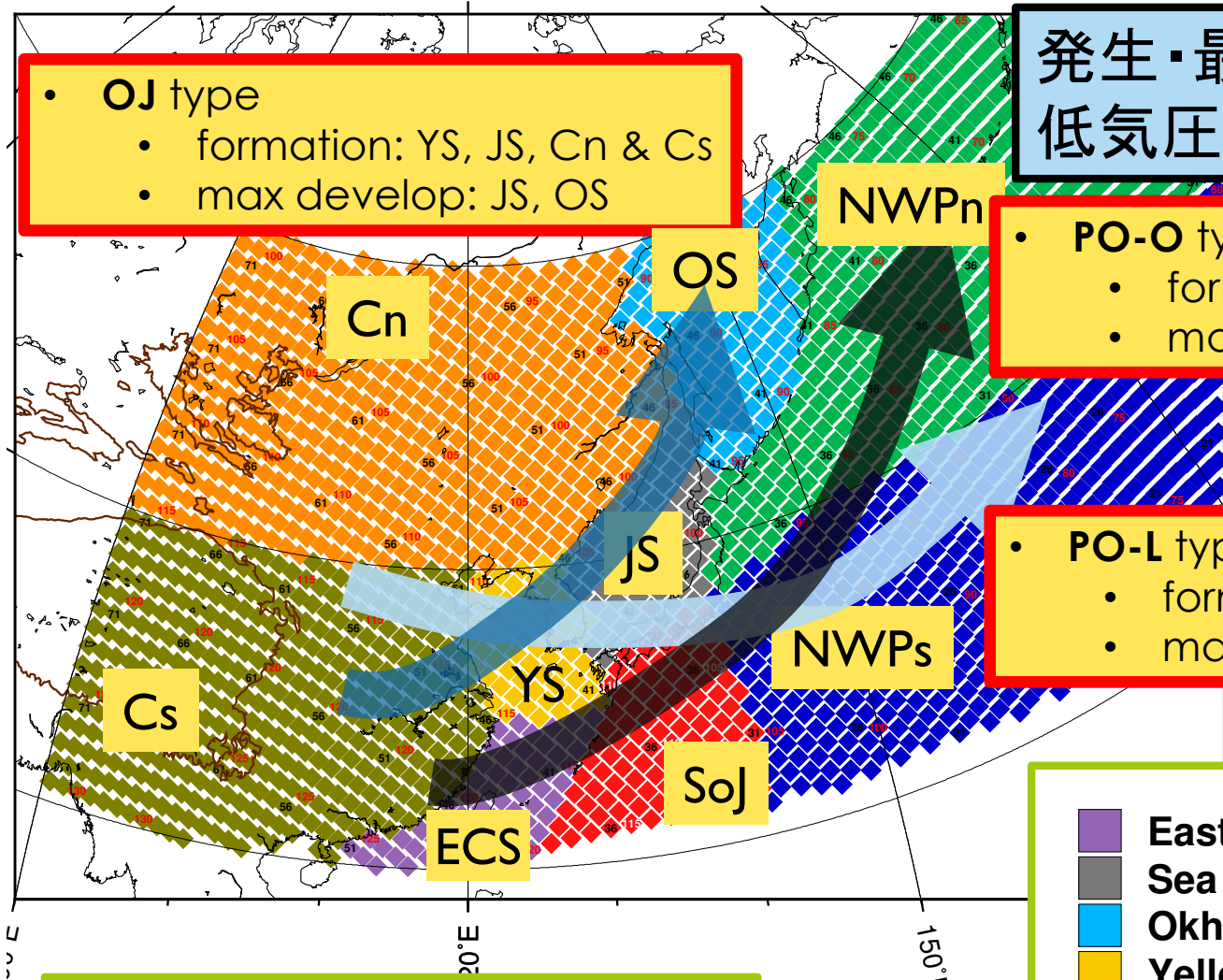
爆弾低気圧の経路 = Yoshida and Asuma (2004, MWR) を踏襲  
 日本付近 (30-50N, 130-150E) を通過する低気圧のみ使用

発生・最大発達した地域で  
 低気圧経路タイプを3区分

- **OJ type**
  - formation: YS, JS, Cn & Cs
  - max develop: JS, OS

- **PO-O type**
  - formation: ECS, SoJ
  - max develop: SoJ, NWPn & NWPn

- **PO-L type**
  - formation: YS, JS, Cn & Cs
  - max develop: SoJ, NWPn & NWPn



Orange	Mongolia - N. China	911
Green	E. China	921

Purple	East China Sea	101
Grey	Sea of Japan	121
Light Blue	Okhotsk Sea	111
Yellow	Yellow Sea, Korean Pen.	131
Red	south of Japan	201
Green	NW Pacific (north)	221
Blue	NW Pacific (south)	211



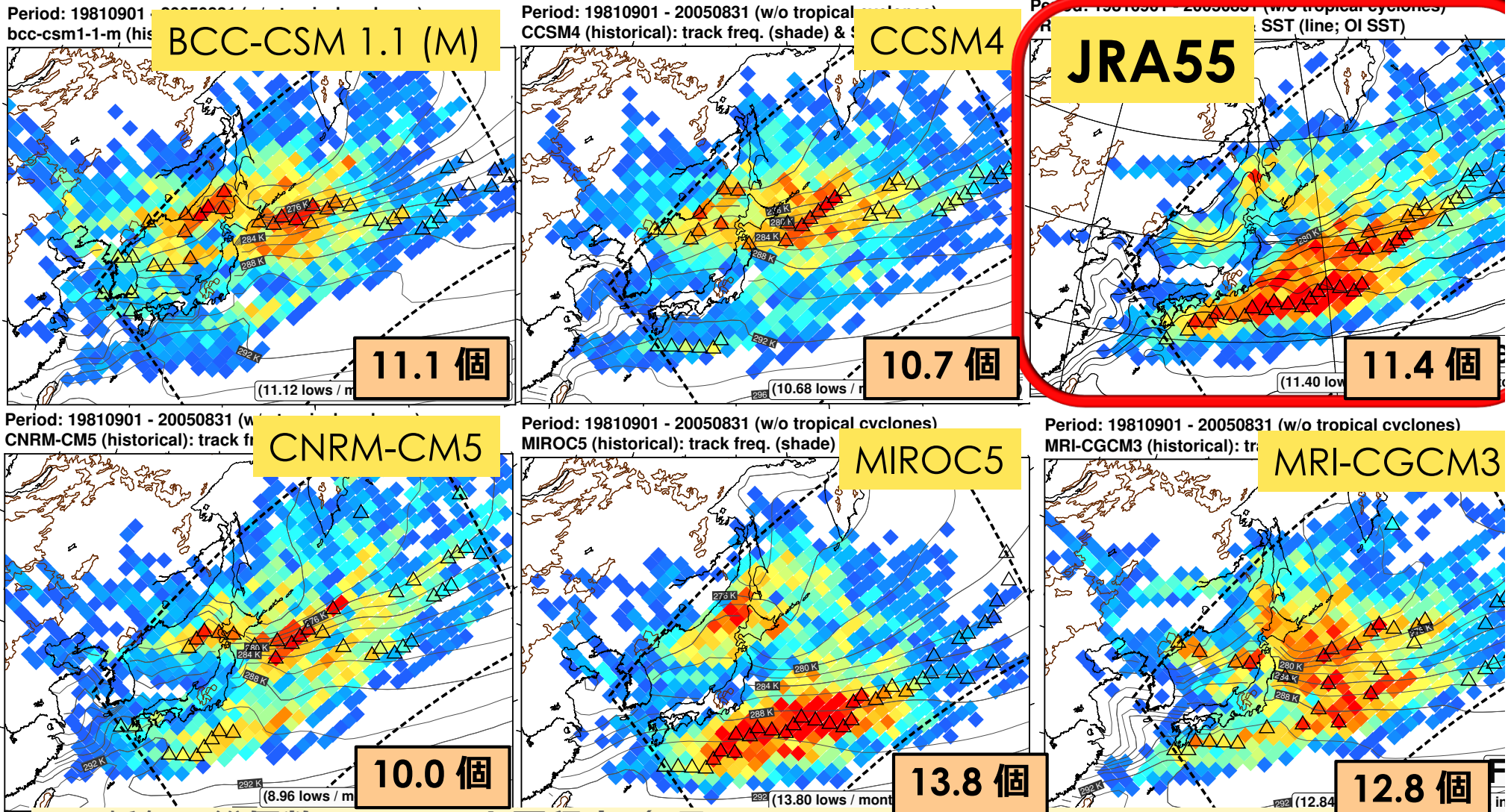
Track types of 'bomb' cyclones in **Japan** (30-50N, 130-150E):  
 Three **reanalysis dataset** (Oct-Mar **1981-2005**)

Reanal.	OJ (%)	PO-L (%)	PO-O (%)	other (%)	total freq. (count/year)
JRA55	21.4	24.7	51.7	2.1	29.8
ERA Interim	21.5	24.1	52.2	2.3	33.7
CFSR	21.2	27.2	49.2	2.5	30.9
YA2004 (1995-1999)	18.8	22.3	49.1	9.8	44.8

- 爆弾低気圧の経路タイプ, Yoshida and Asuma (2004 MWR) による3分類を適用
  - OJ & PO-L が**各2割**, PO-O が**約半分**. YA2004 とほぼ同様の比率
- YA2004 より合計頻度が少ないのは, **低気圧検出範囲が狭いため**.
  - 本研究では, **150E より東で発生する低気圧をカウントせず**. つまり, 現状では **PO-O** の爆弾低気圧個数を**過小評価**.
  - 同一期間の頻度 : 29.8個 (JRA55), 33.8個 (ERA Interim), 30.8個 (CFSR)

# Cyclone track frequency in Japan

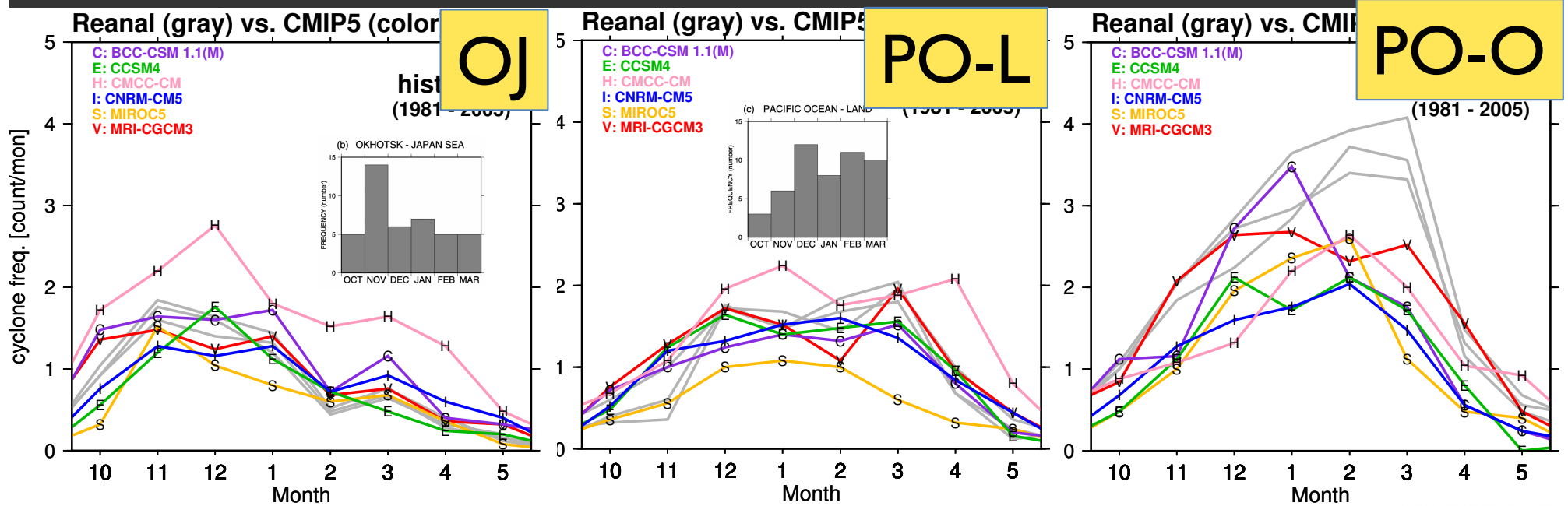
## Feb (20C) CMIP5 vs. JRA55 (全低気圧)



- 低気圧総個数は JRA55 と同程度 (2月では -12% ~ +21%)
- 低気圧主要経路は, 40~45N の日本海北部~北海道東方海上をとるものが多い



# 爆弾低気圧頻度の季節性 (20C) : OJ, PO-L は再解析と整合的, PO-O は過小



□ OJ: 全モデルが**晩秋~初冬 (Nov, Dec) の頻度極大を再現**

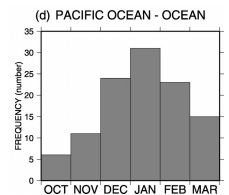
□ CMCC-CM が大幅に頻度過大

□ PO-L: Dec & Feb-Mar の2つの頻度極大

□ MIROC5 は過小, CMCC-CM は過大

□ PO-O: 全般的に多くのモデルが**過小**

□ 特に Feb~Mar では, 全モデルが再解析の平均頻度に対し, 大幅に過小評価 (Feb: -40%, Mar: -50%)



**Future change** of track types of 'bomb' cyclones in **Japan** (30-50N, 130-150E) **RCP8.5** (Oct-Mar **2076-2100**)

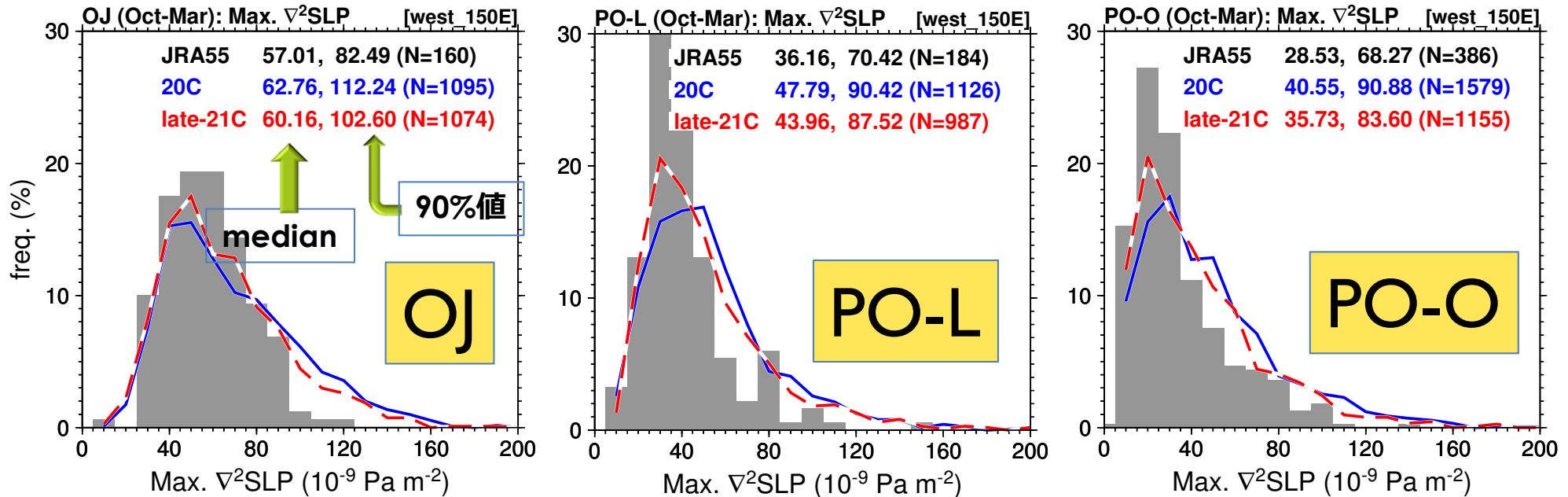
	OJ (%)	PO-L (%)	PO-O (%)	other (%)	total N (個数&増減比)
MRI-CGCM3	28.4 (+5.5)	25.4 (-2.1)	37.9 (-5.3)	8.3	708 (-49; <b>-6%</b> )
MIROC5	36.3 (+12.7)	24.3 (-2.5)	33.2 (-12.1)	6.1	460 (-65; <b>-12%</b> )
CCSM4	26.7 (+3.0)	32.0 (+0.3)	34.0 (-3.7)	7.3	494 (-122; <b>-20%</b> )
CNRM-CM5	27.1 (+1.4)	32.9 (+1.5)	33.5 (-3.5)	6.6	502 (-96; <b>-16%</b> )
CMCC-CM	35.2 (+1.6)	30.1 (+2.4)	24.6 (-4.6)	7.1	707 (-159; <b>-18%</b> )
BCC-CSM1-1(M)	28.3 (+1.8)	23.8 (+0.9)	33.7 (-5.6)	14.2	668 (-118; <b>-15%</b> )

□ 頻度, 寒候期全体では減少 (-6% から -20% ; モデル別20Cに対する比)

□ 全モデルで PO-O が減少 & OJ が増加

# 爆弾低気圧の強さ ( $\nabla^2(\text{SLP})$ ) の将来変化 (RCP8.5; 6モデル合計版)

※150Eより西での最大値



- PO-L, PO-O の頻度・強さの将来変化は類似。
  - 頻度：大幅に減少（それぞれ -12%, -27%）
  - 強さ：弱い爆弾低気圧（20C の CMIP5 モデル中央値未満）の比率が相対的に増加，強い低気圧（20C の90%値以上）は減少
- OJ は強い低気圧数を再解析よりも過大に検出
  - 頻度：20C と late 21C で同程度
  - 強さ：強い低気圧の頻度は減少，中程度の強さ（同じく50%-75%値）の爆弾低気圧は20C とほぼ同程度の頻度

$\nabla^2(\text{SLP})$ の参照値  
 14Jan2013: 106.4  
 08Feb2014: 74.4  
 15Feb2014: 47.3

## まとめ（2）： 日本付近の爆弾低気圧の将来変化

- CMIP5現在気候実験（20C）における日本周辺の爆弾低気圧の活動を調査。全頻度や経路タイプごとの存在比は長期再解析と類似。
  - ただし、PO-Oタイプの頻度を過小評価（特にFeb, Mar）。爆弾低気圧だけでなく、全低気圧でも同様の結果。
- 将来気候（late 21C）では、経路ごとに変動傾向が異なる。
  - PO-Oタイプ：解析対象の**全モデルで爆弾低気圧頻度が大幅低下**。日本付近では「弱い」爆弾低気圧頻度が相対的に増加
  - OJタイプ：頻度は20Cと同程度。中程度の爆弾低気圧数が増加。ただし、モデル間で比較すると強さに関する将来変化傾向が正反対になるものも。

今後の課題：なぜ上記のような将来変化となるのか？

- OJの将来変化がモデル間でバラつく理由は？
  - 擾乱の成長率に關与する要素（鉛直シア、潜熱）の解析

# 全体まとめ

- 冒頭のギモン：「温暖化」したら、寒候期の日々の天候は「穏やか」になるのか？
  - 地上気温変動性：中緯度では、「20C気候よりも大きな地上気温低下」が生じる可能性が予測されている
  - 「爆弾」低気圧活動（日本周辺）：いわゆる「南岸低気圧型」は頻度減少&弱化、「日本海－オホーツク型」は20C並みの頻度強さを維持
- これら2つの結果は、相互に関連し合っているのか？ 現時点では整合性のある説明を見いだせていない

以上.