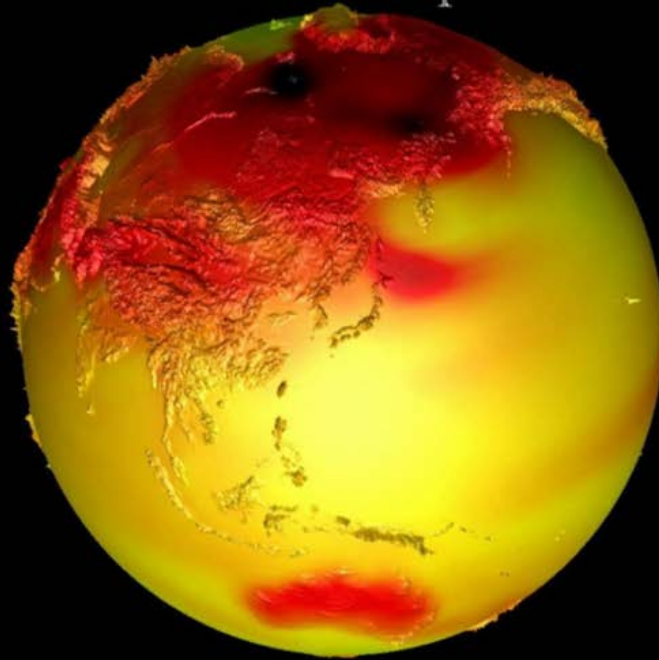


地球温暖化とその予測



2021年4月
気象研究所 応用気象研究部

地球温暖化

地球温暖化とは・・・

人間活動によって二酸化炭素などの温室効果ガスが排出されることにより、地球の平均気温が上昇すること。

- 近年の温暖化については疑う余地がない
- 人間活動が20世紀半ば以降に観測された温暖化の主な要因であった可能性が極めて高い

IPCC(気候変動に関する政府間パネル)
第5次報告書 [2013年9月発表]

温室効果ガスが全くないと、地球の表面温度は()度[今は約14度]

地球温暖化

地球温暖化とは・・・

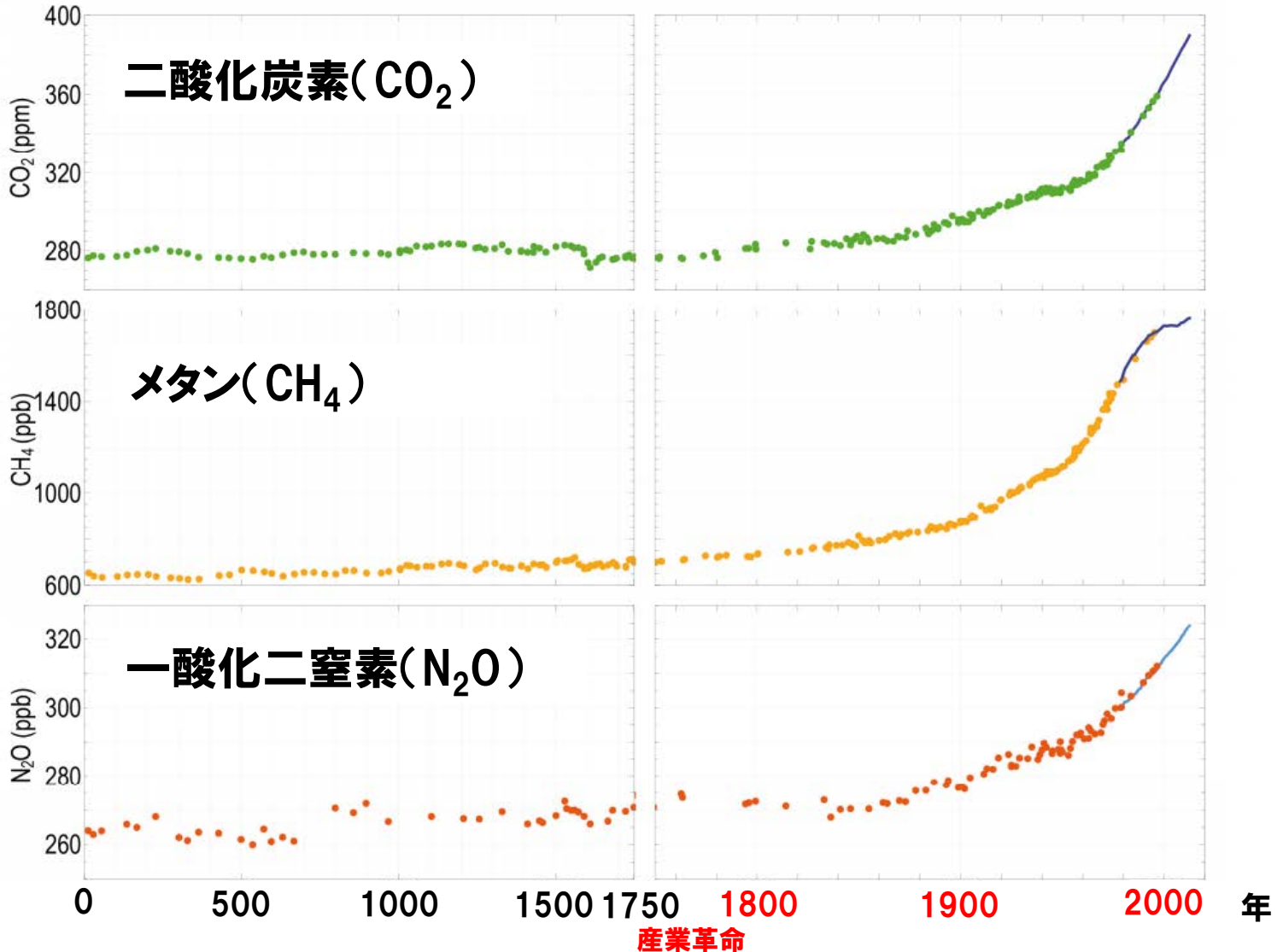
人間活動によって二酸化炭素などの温室効果ガスが排出されることにより、地球の平均気温が上昇すること。

- 近年の温暖化については疑う余地がない
- 人間活動が20世紀半ば以降に観測された温暖化の主な要因であった可能性が極めて高い

IPCC(気候変動に関する政府間パネル)
第5次報告書 [2013年9月発表]

温室効果ガスが全くないと、地球の表面温度は－**19度**

温室効果ガスの濃度の変化



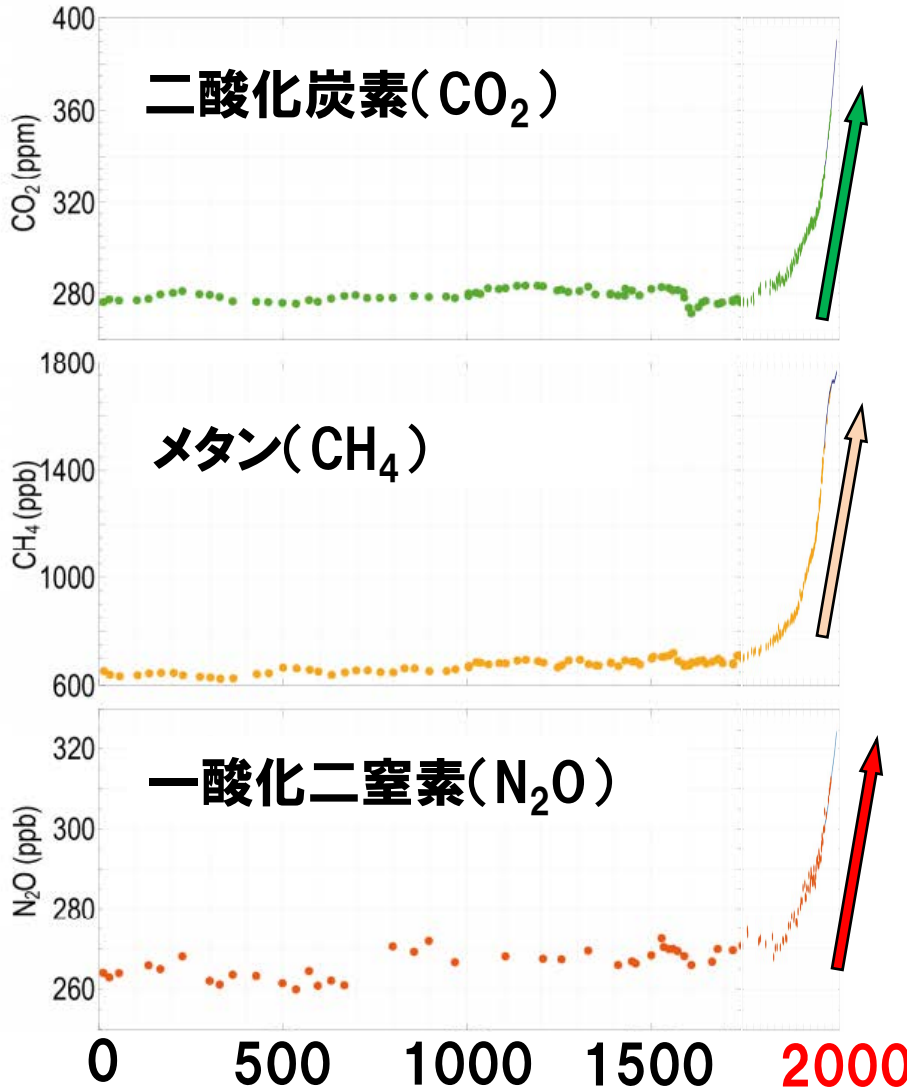
西暦 0 年から 2011 年までの主な温室効果ガスの大気中の濃度の変化

(IPCC 第 5 次評価報告書より)

※ppm= 10^{-6} ppb= 10^{-9}

※1950年代に CO_2 濃度の観測が、1970年代後半に CH_4 、 N_2O 濃度の観測が開始

温室効果ガスの濃度の変化



最近100年
で急激に増加

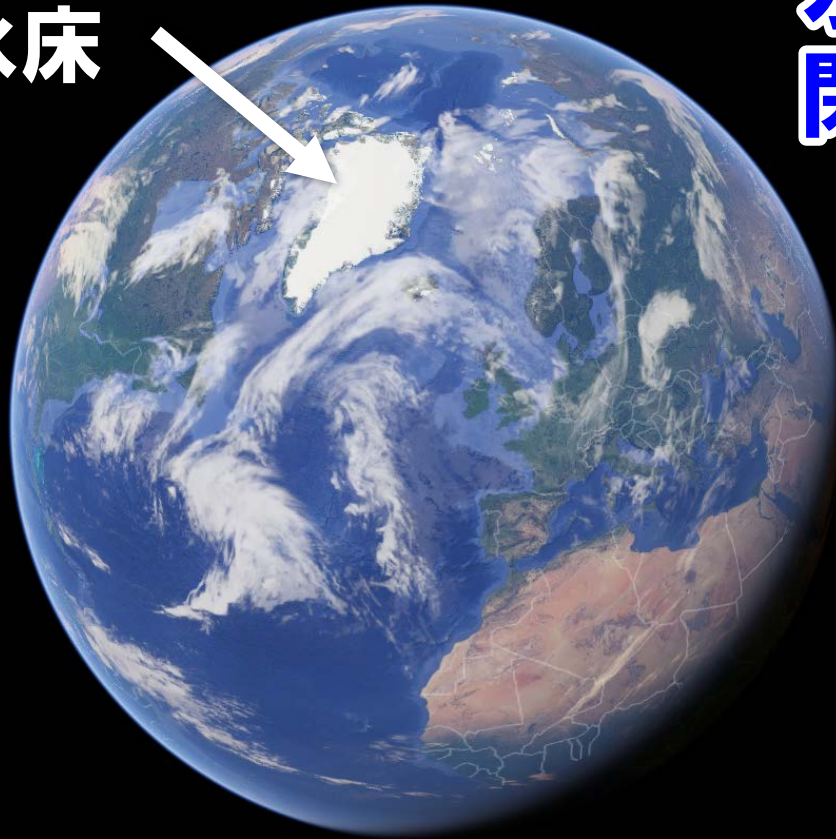
西暦 0 年から 2011 年までの主な温室効果ガスの大気中の濃度の変化

(IPCC 第 5 次評価報告書より)

※ppm=10⁻⁶ ppb=10⁻⁹

※1950年代にCO₂濃度の観測が、1970年代後半にCH₄、N₂O濃度の観測が開始

グリーンランド
氷床



Google

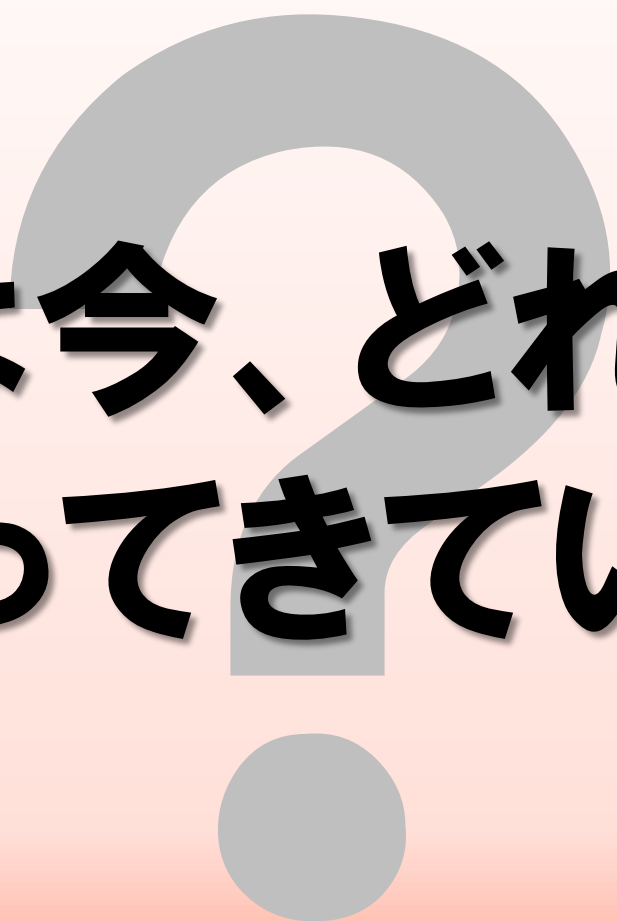
氷の中に、昔の空気が
閉じ込められている！

南極
氷床



Google

数十万年前までさかのぼることが可能

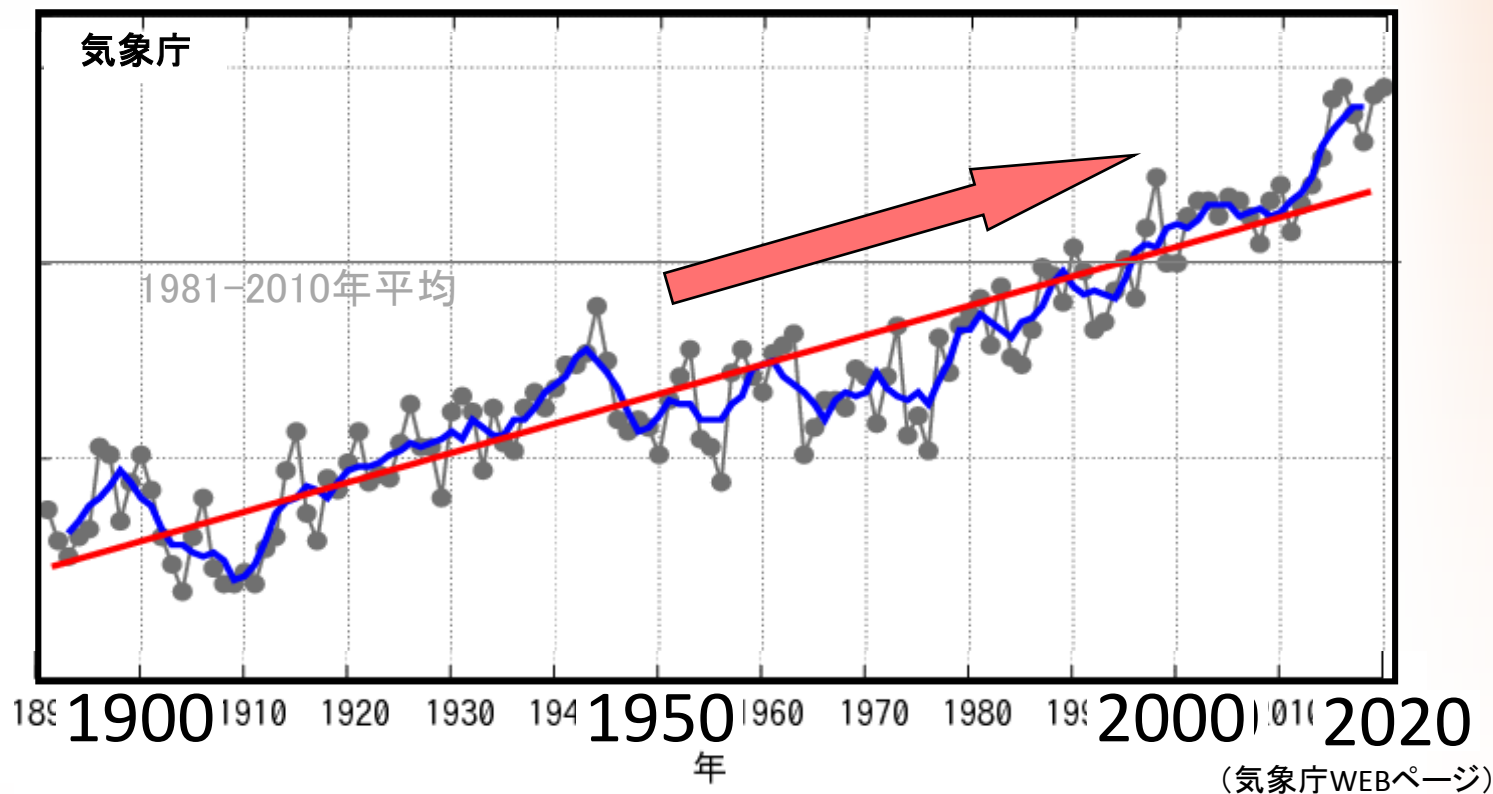


**気温は今、どれくらい
上がってきている？**

世界平均地上気温

1981-2010年平均からの差(度)

100年で？



0度～0.5度？

0.5度～1度？

1度～1.5度？

1.5度～2度？

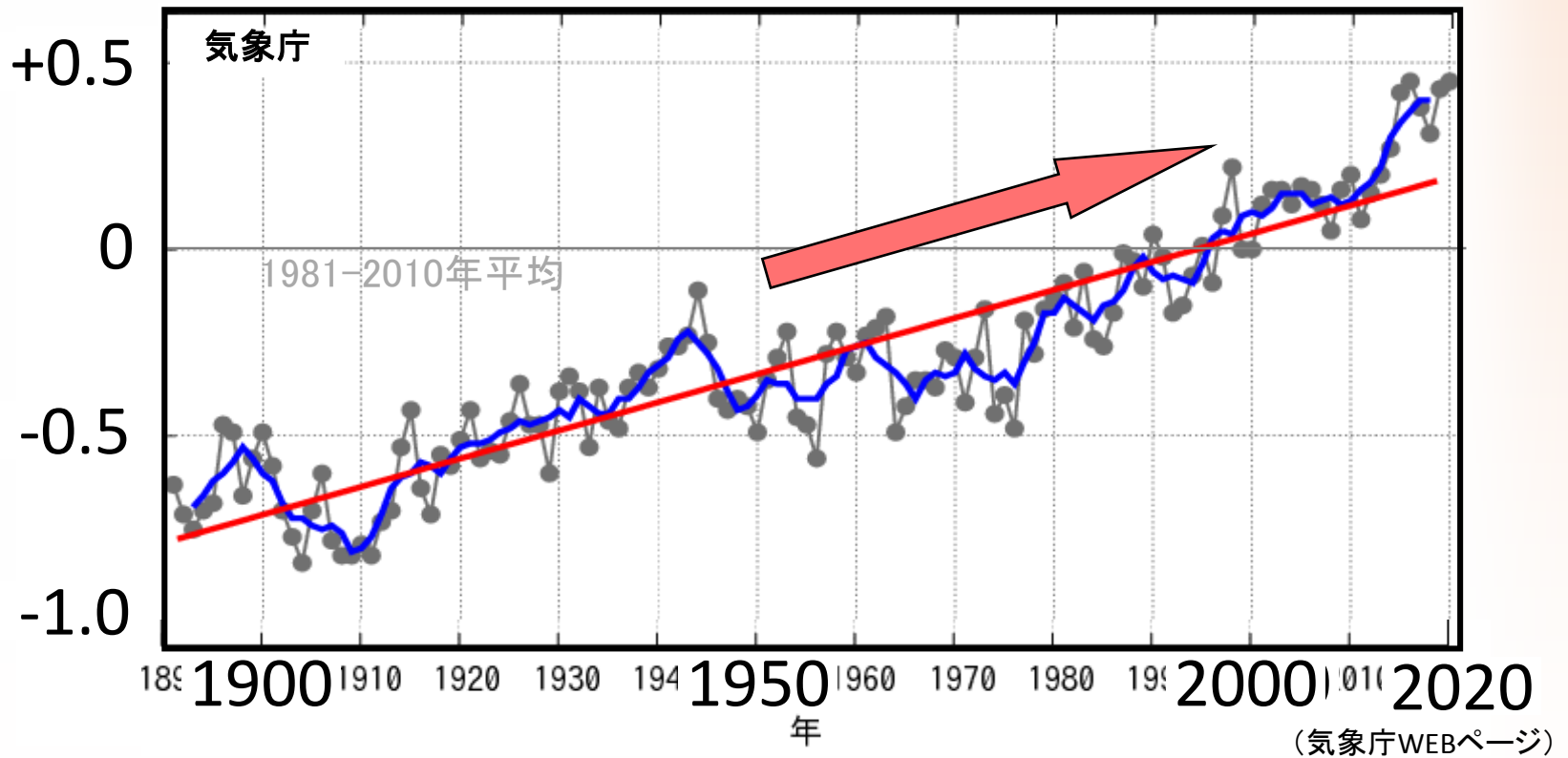
2度以上？

(気象庁)

世界平均地上気温

※産業革命前との平均値の比較では+0.85度

100年で+0.75度



2020年は観測史上1位タイ。近年6年が上位6位を占める

(気象庁)

月別の世界平均気温ランキング

(世界平均気温 月別)

1月	①2020年(+0.58℃)	②2016年(+0.52℃)	③2019年(+0.39℃)
2月	①2016年(+0.62℃)	②2020年(+0.57℃)	③2017年(+0.46℃)
3月	①2016年(+0.64℃)	②2020年(+0.59℃)	③2017年(+0.48℃)
4月	①2016年(+0.54℃)	②2020年(+0.47℃)	②2019年(+0.43℃)
5月	①2020年(+0.41℃)	②2016年(+0.38℃)	②2015年(+0.38℃)
6月	①2019年(+0.45℃)	②2020年(+0.41℃)	②2016年(+0.41℃)
7月	①2019年(+0.44℃)	②2016年(+0.43℃)	③2017年(+0.41℃)
8月	①2015年(+0.46℃)	②2016年(+0.43℃)	③2019年(+0.42℃)
9月	①2015年(+0.51℃)	②2019年(+0.45℃)	③2020年(+0.44℃)
10月	①2015年(+0.53℃)	②2019年(+0.42℃)	③2018年(+0.38℃)
11月	①2015年(+0.54℃)	②2020年(+0.45℃)	③2019年(+0.40℃)
12月	①2015年(+0.66℃)	②2019年(+0.55℃)	③2018年(+0.36℃)

月別の世界平均気温ランキング

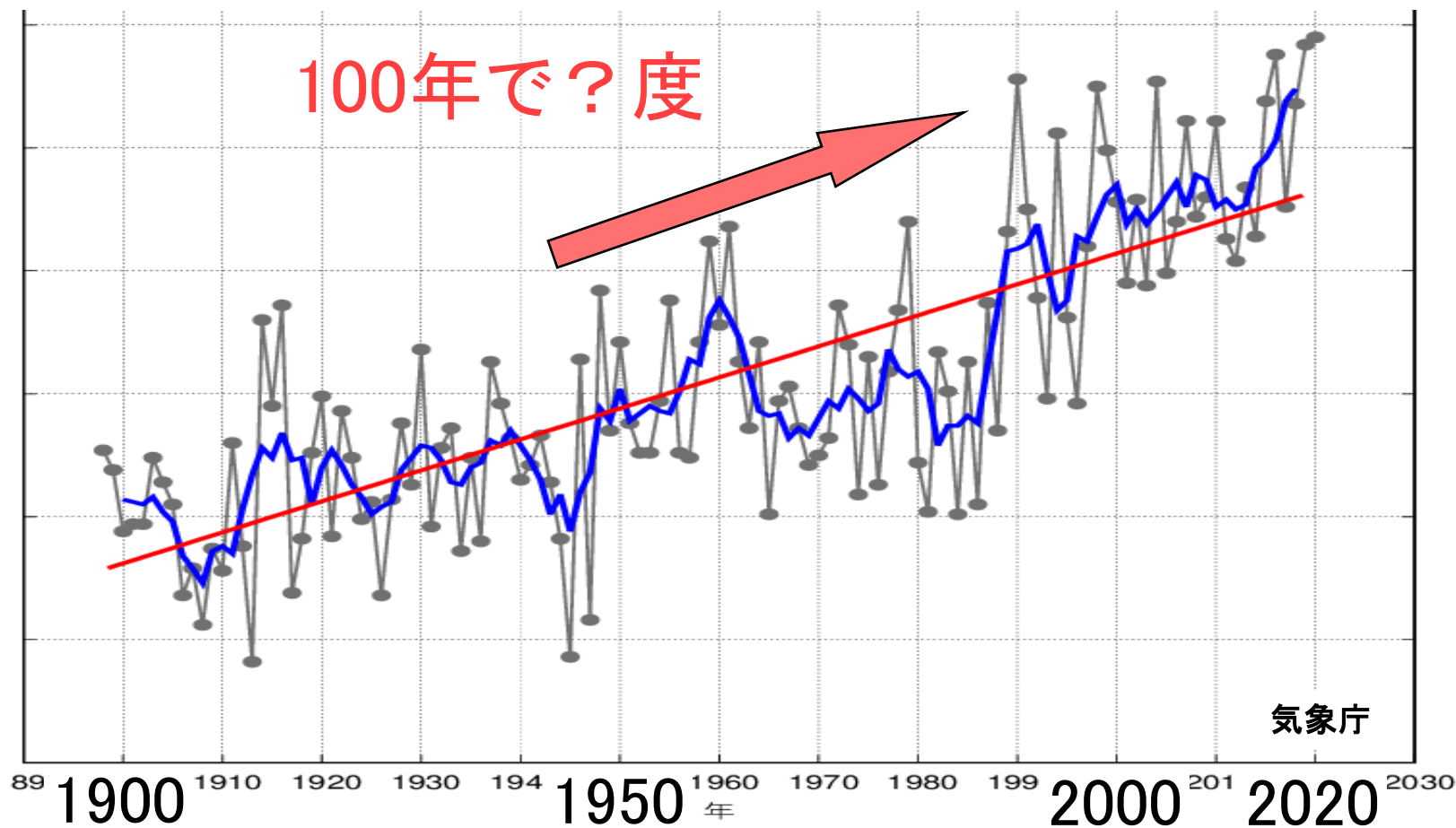
(世界平均気温 月別)

※2015年以降を色付け

1月	① <u>2020年 (+0.58°C)</u>	②2016年 (+0.52°C)	③2019年 (+0.39°C)
2月	①2016年 (+0.62°C)	② <u>2020年 (+0.57°C)</u>	③2017年 (+0.46°C)
3月	①2016年 (+0.64°C)	② <u>2020年 (+0.59°C)</u>	③2017年 (+0.48°C)
4月	①2016年 (+0.54°C)	② <u>2020年 (+0.47°C)</u>	②2019年 (+0.43°C)
5月	① <u>2020年 (+0.41°C)</u>	②2016年 (+0.38°C)	②2015年 (+0.38°C)
6月	①2019年 (+0.45°C)	② <u>2020年 (+0.41°C)</u>	②2016年 (+0.41°C)
7月	①2019年 (+0.44°C)	②2016年 (+0.43°C)	③2017年 (+0.41°C) ④2020年 (+0.39°C)
8月	①2015年 (+0.46°C)	②2016年 (+0.43°C)	③2019年 (+0.42°C) ④2020年 (+0.41°C)
9月	①2015年 (+0.51°C)	②2019年 (+0.45°C)	③ <u>2020年 (+0.44°C)</u>
10月	①2015年 (+0.53°C)	②2019年 (+0.42°C)	③2018年 (+0.38°C) ④2020年 (+0.34°C)
11月	①2015年 (+0.54°C)	③ <u>2020年 (+0.45°C)</u>	②2019年 (+0.40°C)
12月	①2015年 (+0.66°C)	②2019年 (+0.55°C)	③2018年 (+0.36°C)

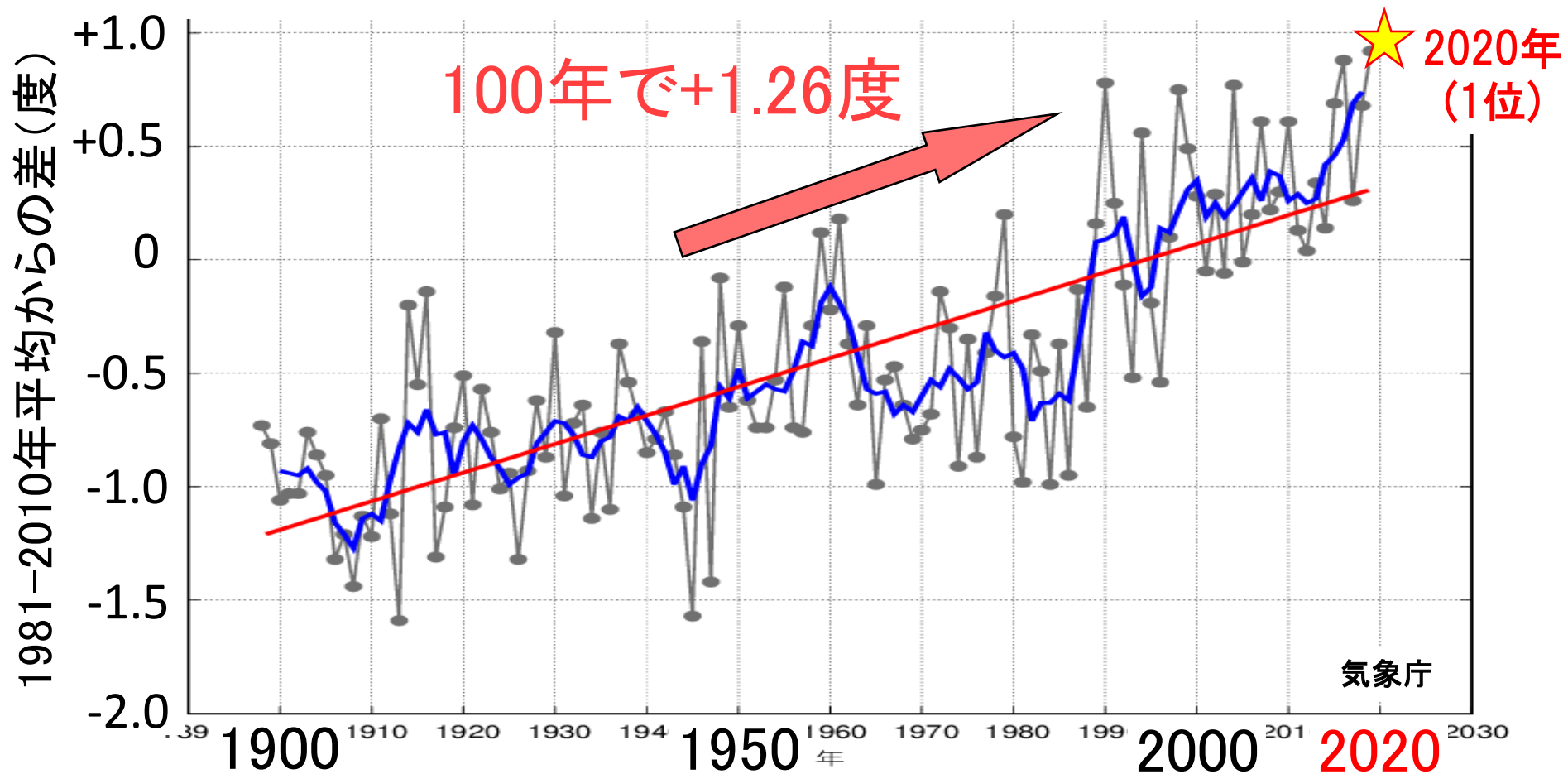
日本の地上気温の変化

1981-2010年平均からの差(度)



都市化の影響を除くため、大都市を除外

日本の地上気温の変化

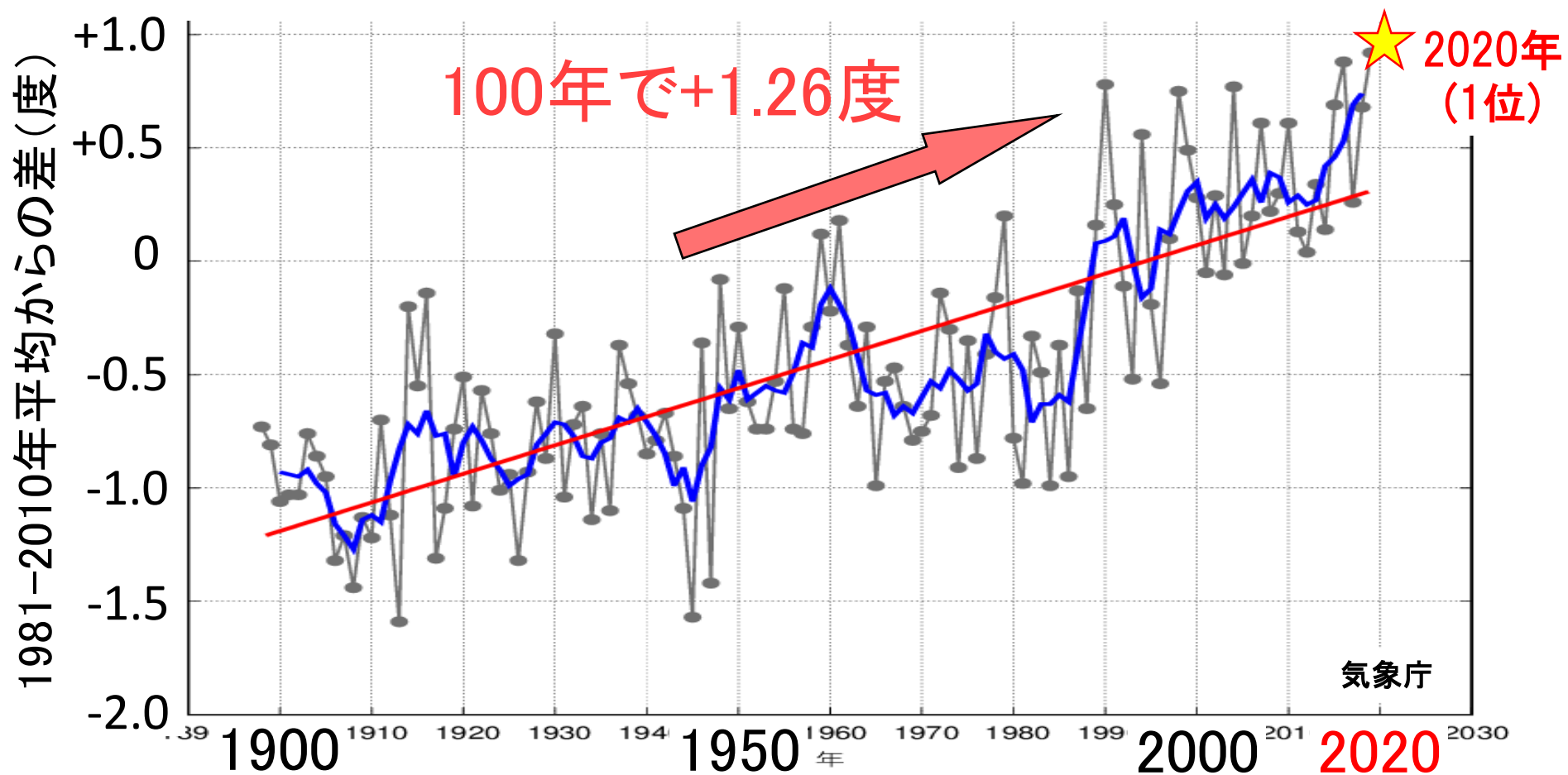


1位：2020年 2位：2019年

3位：2016年 4位：1990年 5位：2004年

(気象庁WEBページ)

日本の地上気温の変化



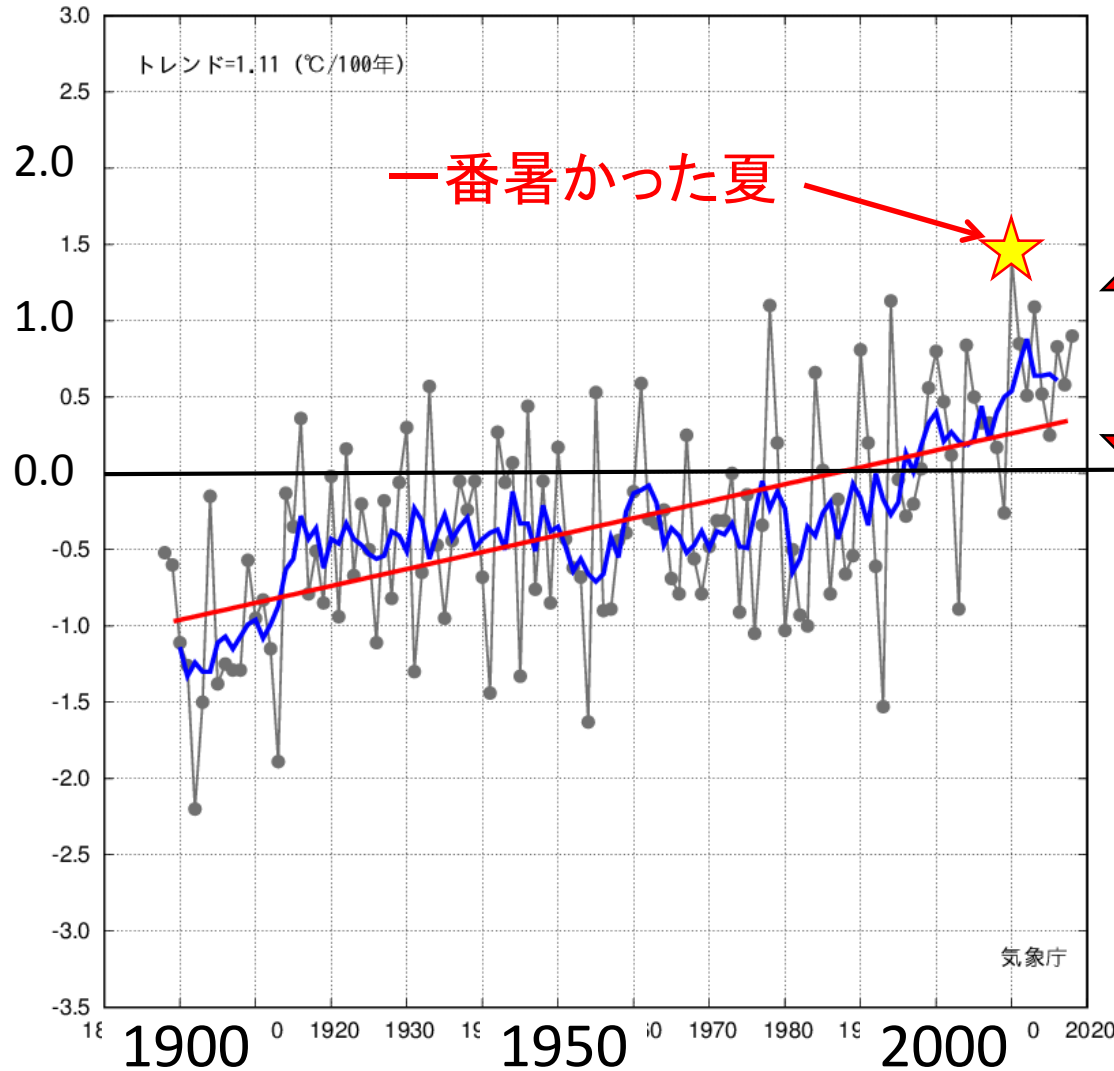
国内歴代最高気温は41.1度

(2020年8月17日 静岡県浜松市 2018年7月23日 埼玉県熊谷市)

「+1度」はたいしたことない？

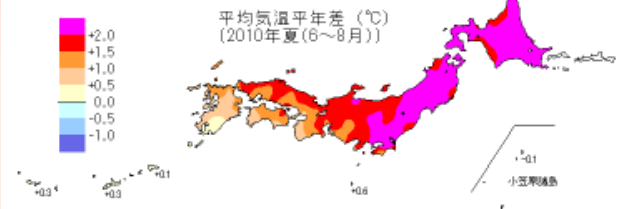
1981-2010年平均からの差(度)

日本の夏平均(6-8月)気温偏差



熱中症で死亡、2010年は1718人
猛暑響き過去最悪に

(2011/6/1 日本経済新聞)



これが+1.4度(2010年)

ここが平均的な夏

もし1.2度低かったら、
ほとんど普通の夏の
気温になっていた。

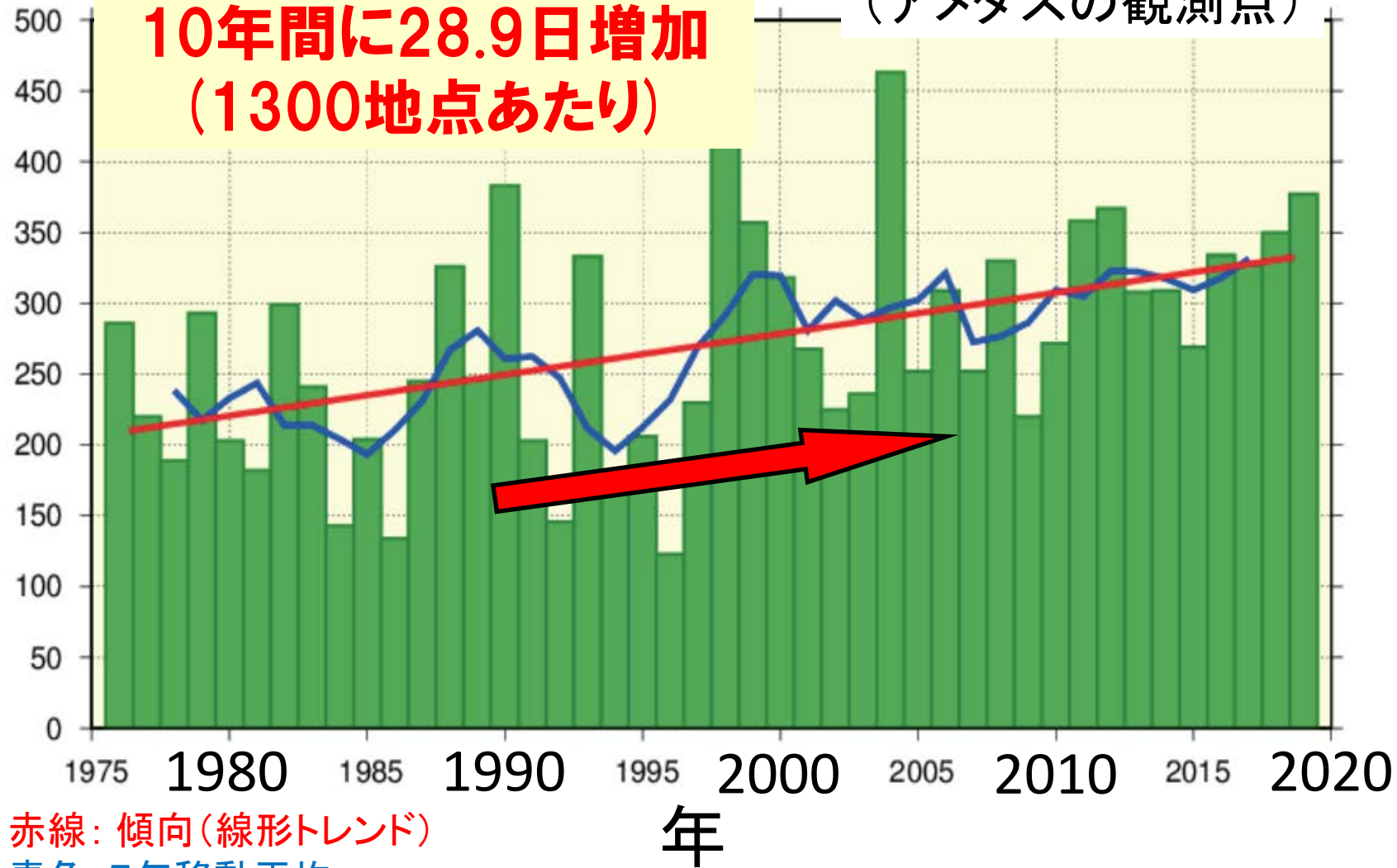
時間雨量50mm以上の非常に激しい雨

[アメダス] 1時間降水量50mm以上の年間発生回数の増加

(アメダスの観測点)

10年間に28.9日増加
(1300地点あたり)

1300地点あたりの年間発生日数

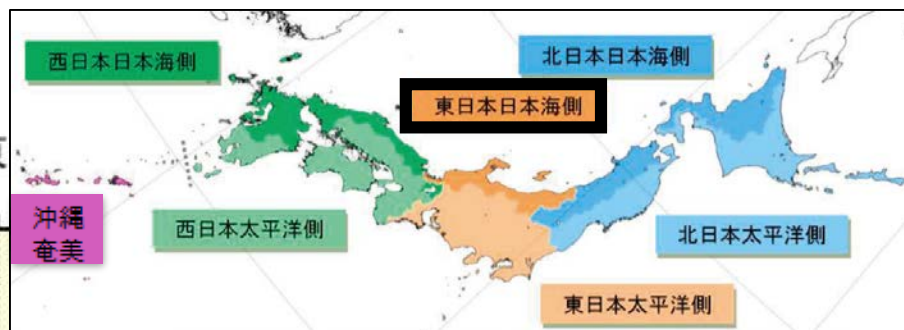


年最深積雪の変化

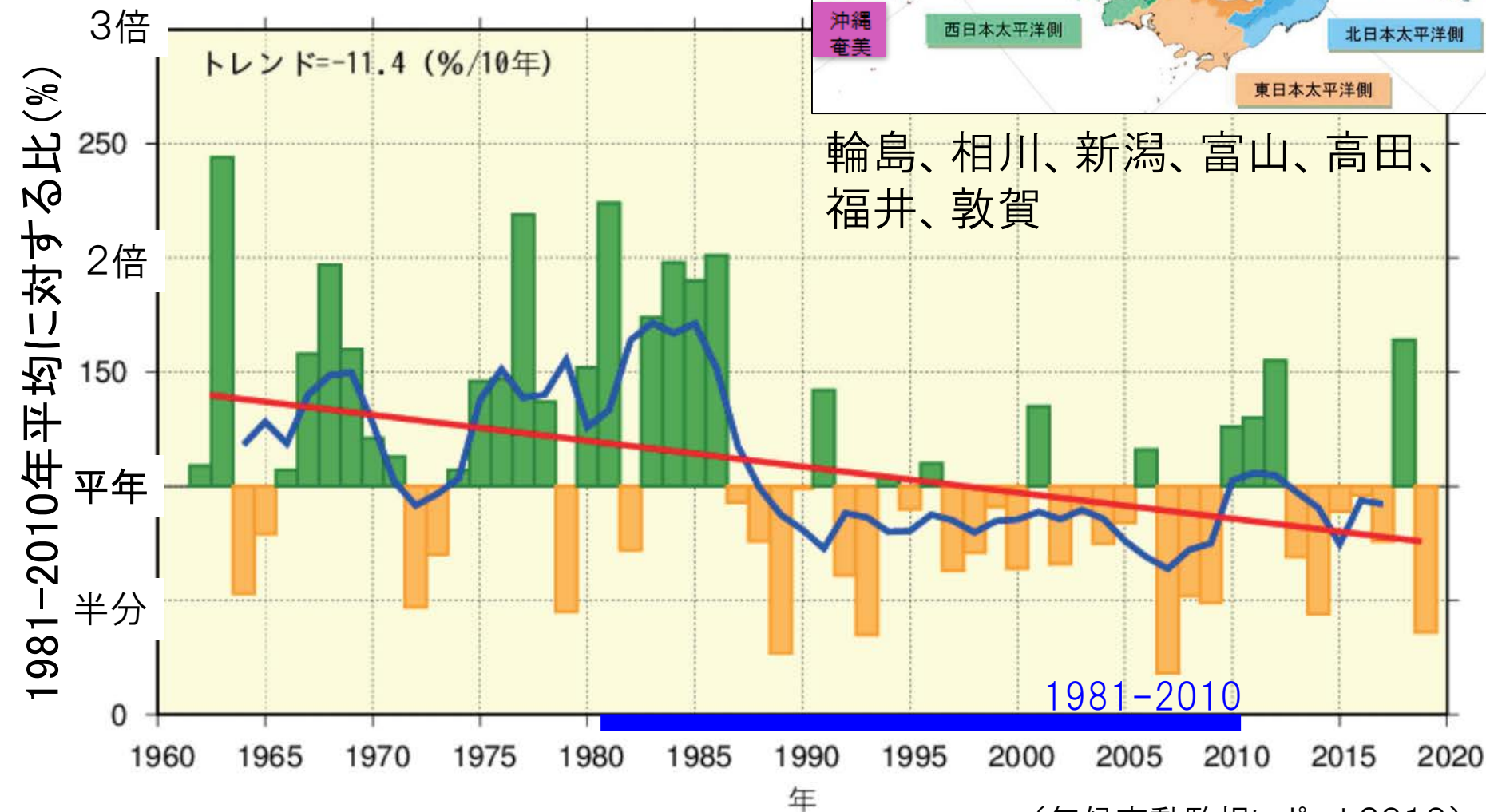


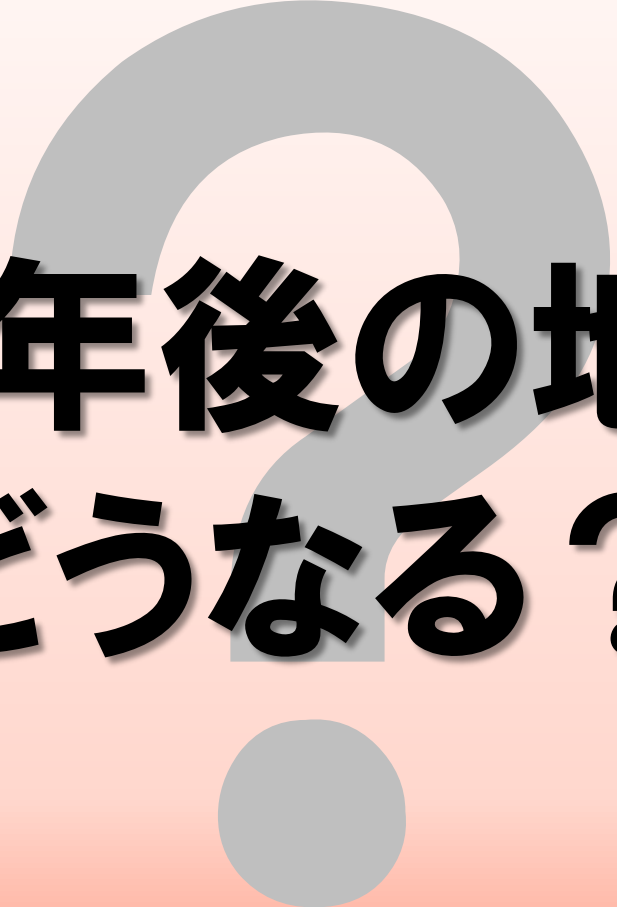
東日本の日本海側

東



輪島、相川、新潟、富山、高田、
福井、敦賀

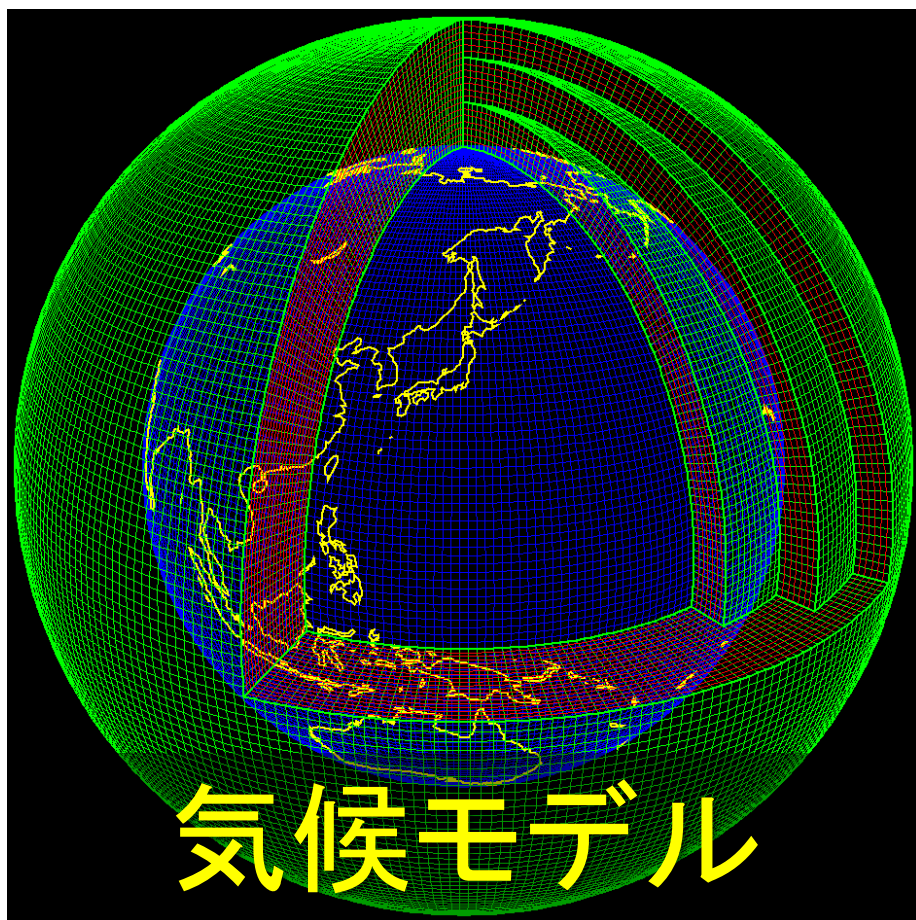




**100年後の地球は
どうなる？**

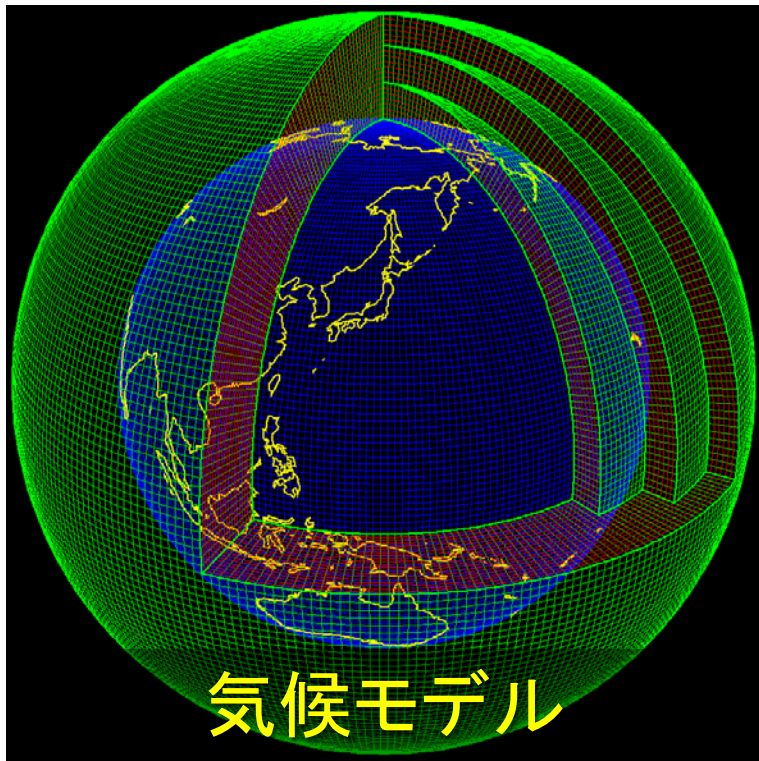
気候を再現・予測するには・・・

気候モデルを使います！



- ・ 大気と海を「格子(網目)」で分割
- ・ 物理法則をもとに計算
- ・ 日々の天気予報で使っているものから発展。

気候を再現・予測するには・・・



大気の流れを解く方程式

運動方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \omega \frac{\partial u}{\partial p} - f v + \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \omega \frac{\partial v}{\partial p} + f u + \frac{\partial \phi}{\partial y} = 0$$

静力学平衡の式

$$\frac{\partial \phi}{\partial p} = -\frac{1}{\rho} = \alpha$$

質量保存則(連続の式)

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial p} = 0$$

熱力学の第1法則
(エネルギー保存の法則)

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\theta}{C_p T} \dot{Q}$$

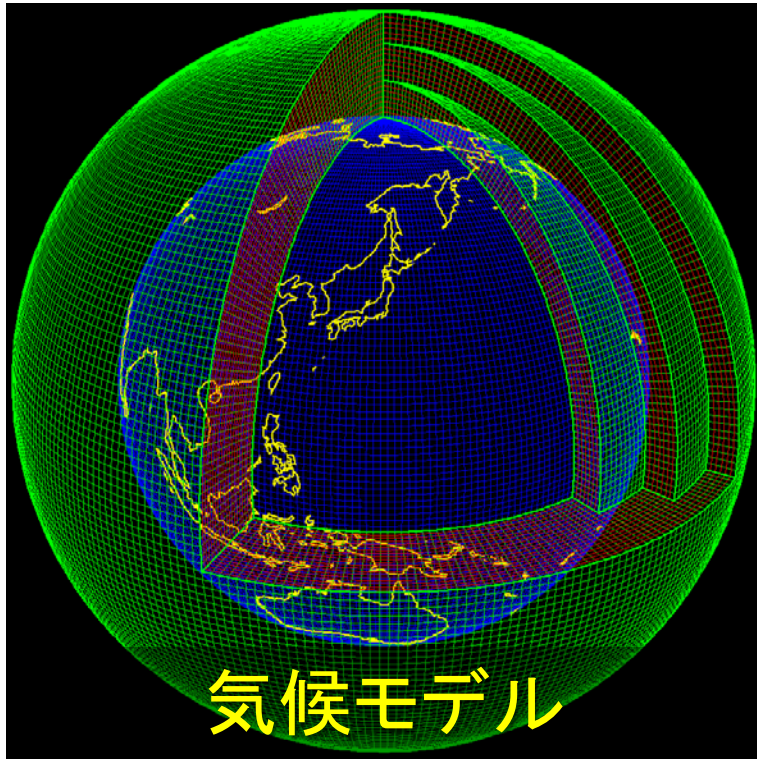
$$\alpha = \frac{\theta R_d}{p} \left(\frac{p}{p_{oo}} \right)^{R_d/C_p}$$

(状態方程式 $p = \rho R T$)

※変数 $u, v, \omega, \phi, \theta, \alpha$ の連立方程式

**大学で習う物理
と数学、(化学)の
かたまり**

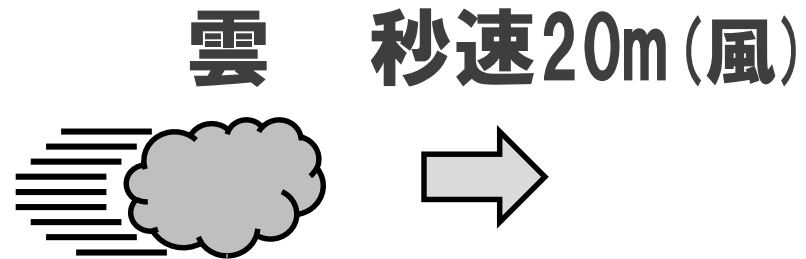
気候を再現・予測するには・・・



基本は、

道のり $[L] = \text{速さ} [v] \times \text{時間} [t]$

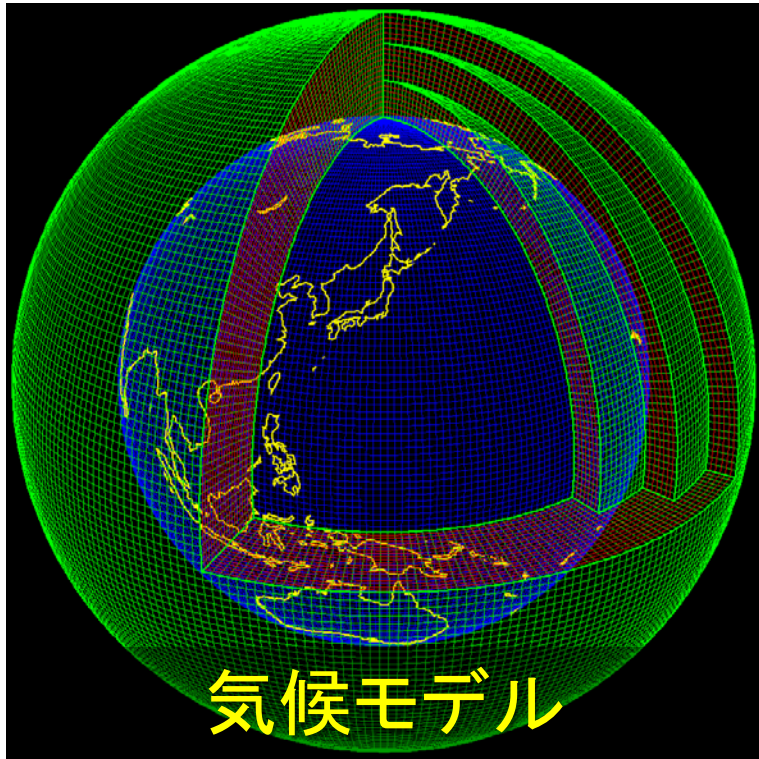
の考え方で。



1秒後は？

10秒後は？

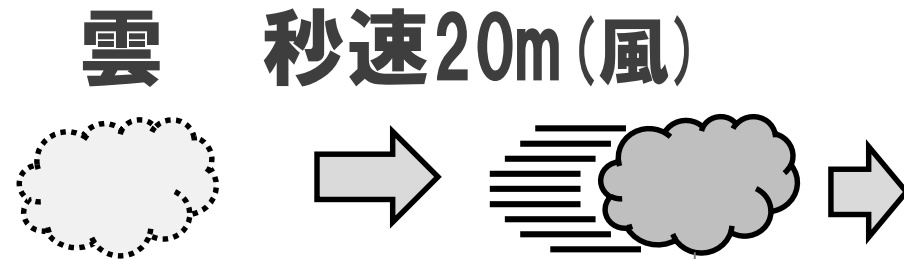
気候を再現・予測するには・・・



基本は、

道のり $[L] = \text{速さ} [v] \times \text{時間} [t]$

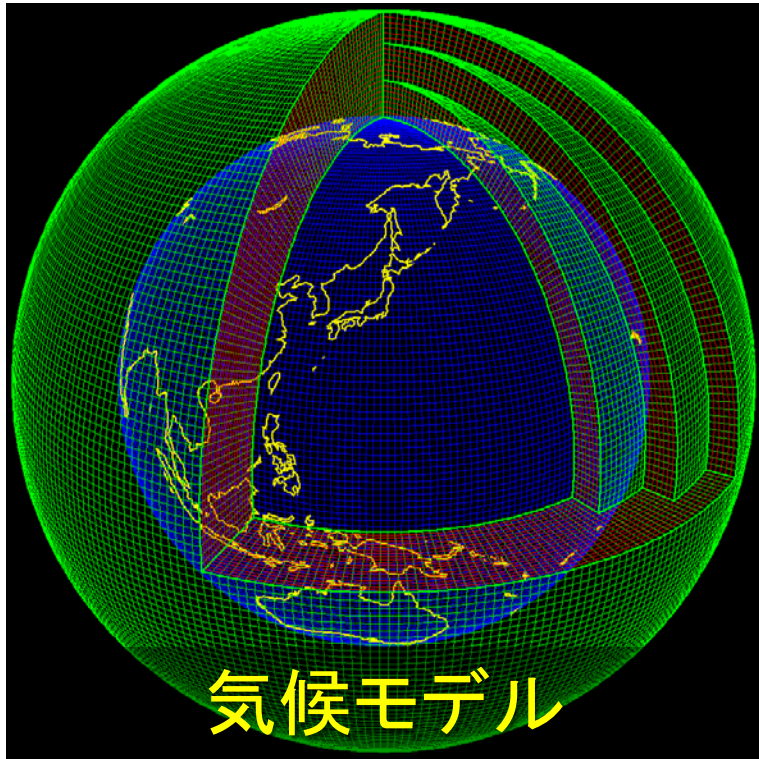
の考え方で。



1秒後は20m先

10秒後は200m先に移動

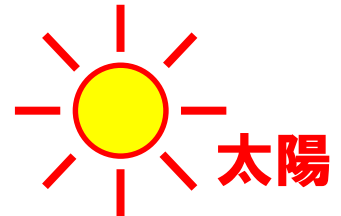
気候を再現・予測するには・・・



基本は、

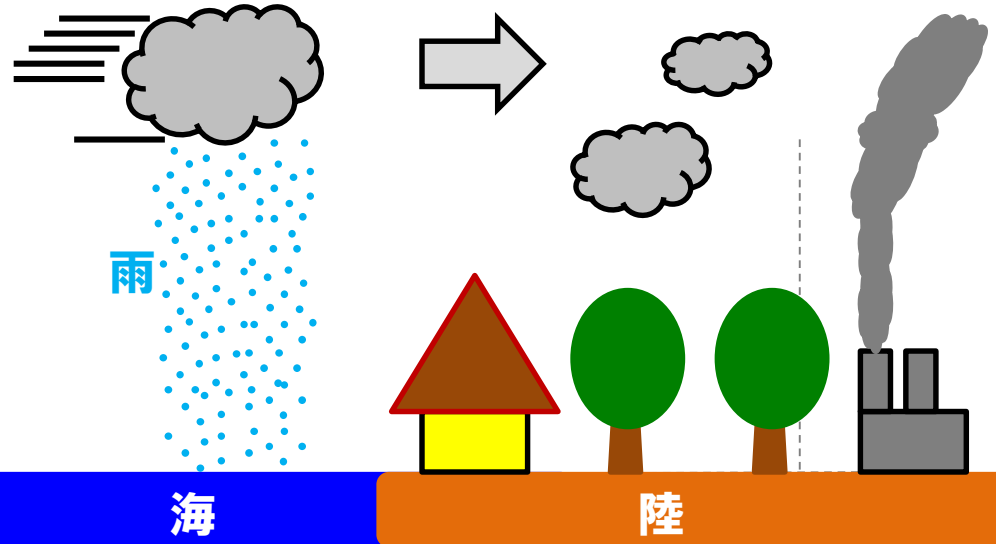
$$\text{道のり [L]} = \text{速さ [v]} \times \text{時間 [t]}$$

いろんな影響受けて、
ずっと秒速20mではない

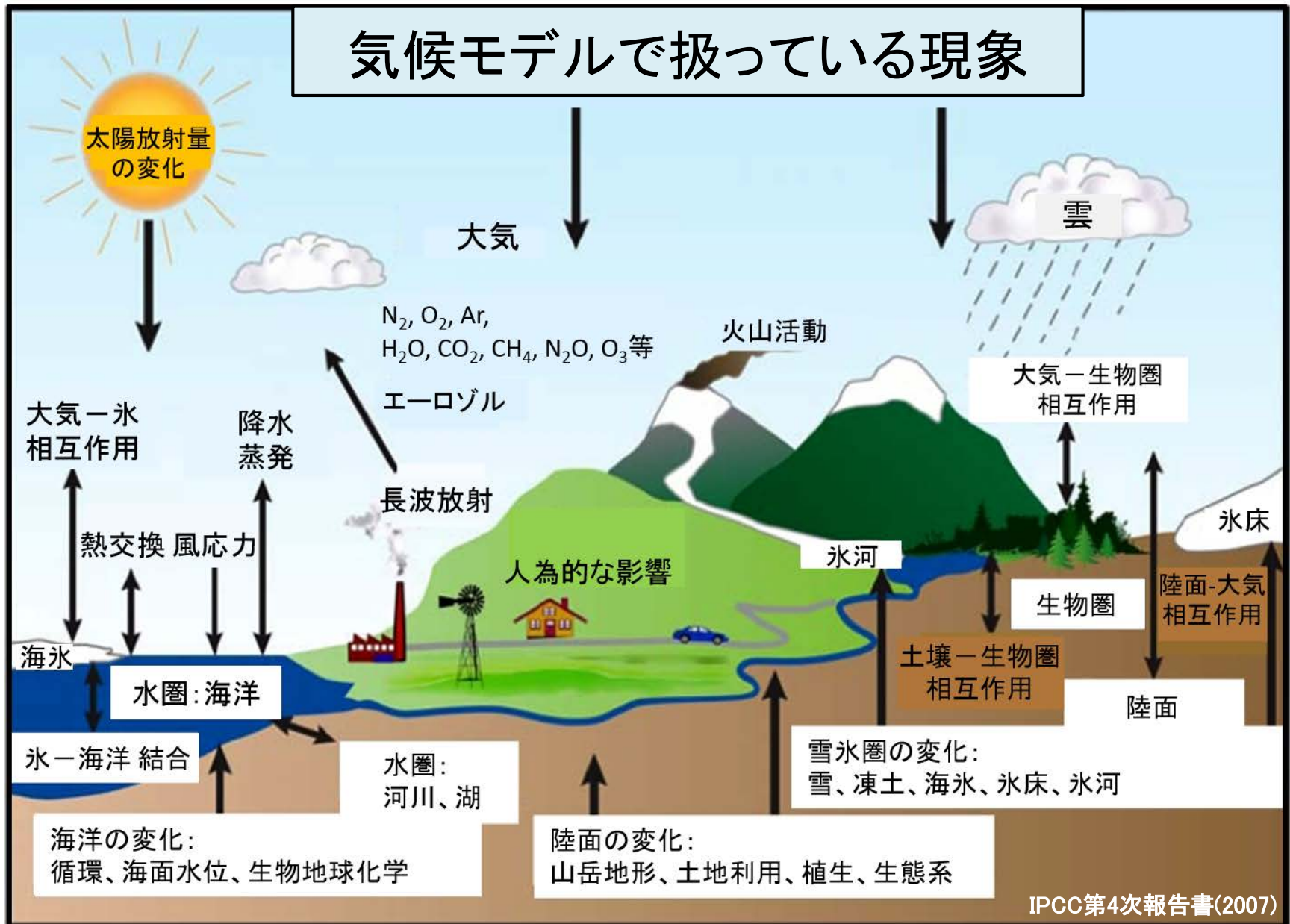


雲

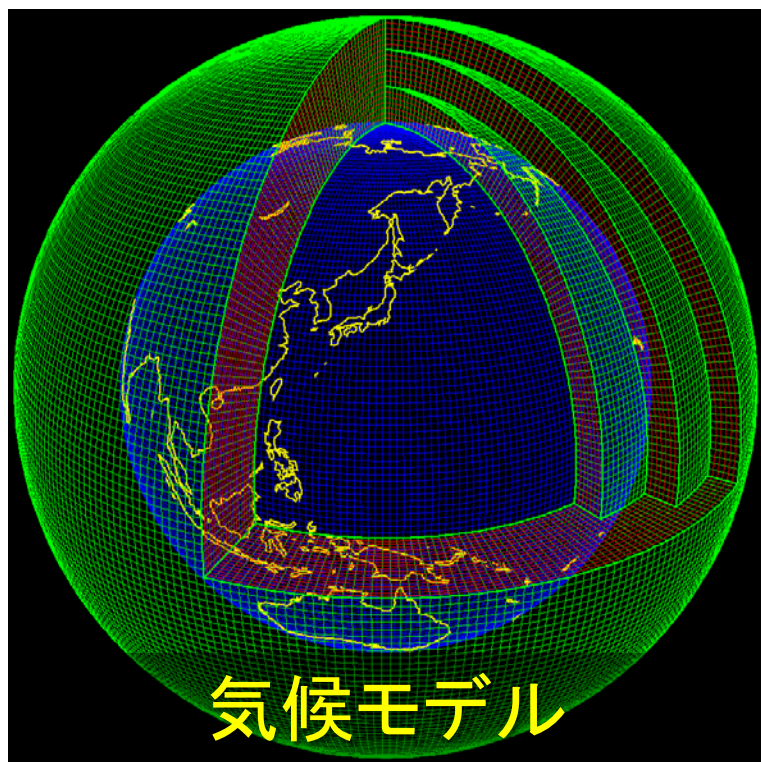
風は常に加速/減速!



気候を再現・予測するには・・・



気候を再現・予測するには・・・



大気の流れを解く方程式

運動方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \omega \frac{\partial u}{\partial p} - f v + \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \omega \frac{\partial v}{\partial p} + f u + \frac{\partial \phi}{\partial y} = 0$$

静力学平衡の式

$$\frac{\partial \phi}{\partial p} = -\frac{1}{\rho} = \alpha$$

質量保存則(連続の式)

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial p} = 0$$

熱力学の第1法則
(エネルギー保存の法則)

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\theta}{C_p T} \dot{Q}$$

$$\alpha = \frac{\theta R_d}{p} \left(\frac{p}{p_{00}} \right)^{R_d/C_p}$$

※変数 $u, v, \omega, \phi, \theta, \alpha$ の連立方程式

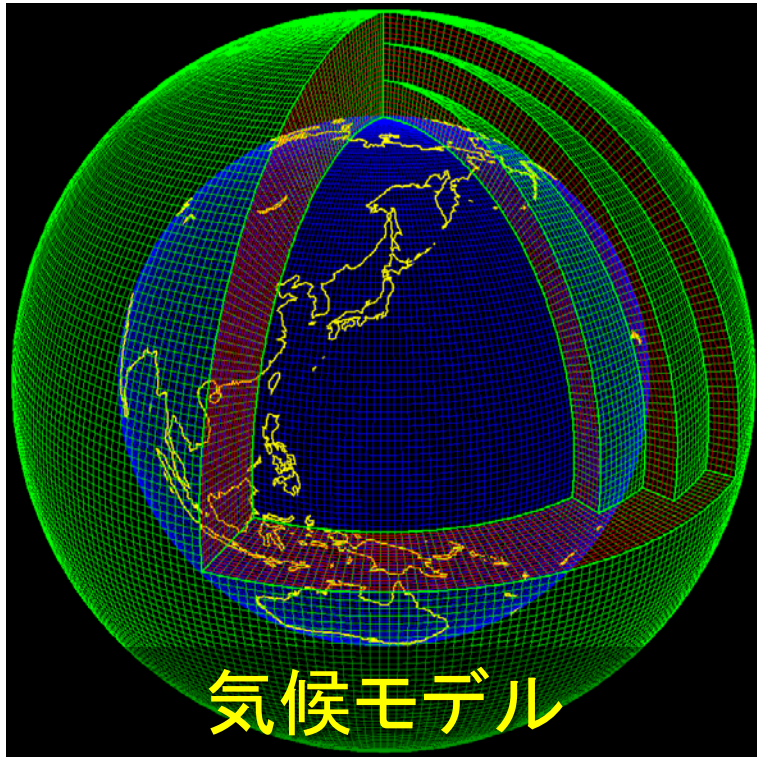
気候を再現・予測するには・・・



スーパーコンピュータ
で計算

※変数 $u, v, \omega, \varphi, \theta, \alpha$ の連立方程式

気候を再現・予測するには・・・



```
...
do kz = kzst, kzen
  do jy = jystlc, jyenlc
    do ix = ixstlc - 1, ixenlc
      workfx(ix, jy, kz) = umx(ix, jy, kz) * fmap_ss(ix,
jy, 2) & ! U
& * (vr dx2(ix + 1 + basex1) * u(ix + 1, jy, kz) & ! V
& + vr dx2(ix   + basex1) * u(ix   , jy, kz)) &
& * vr dx2_r(ix + basex1)
    end do
  end do
end do
end if
!
```

とにかく
プログラミング!

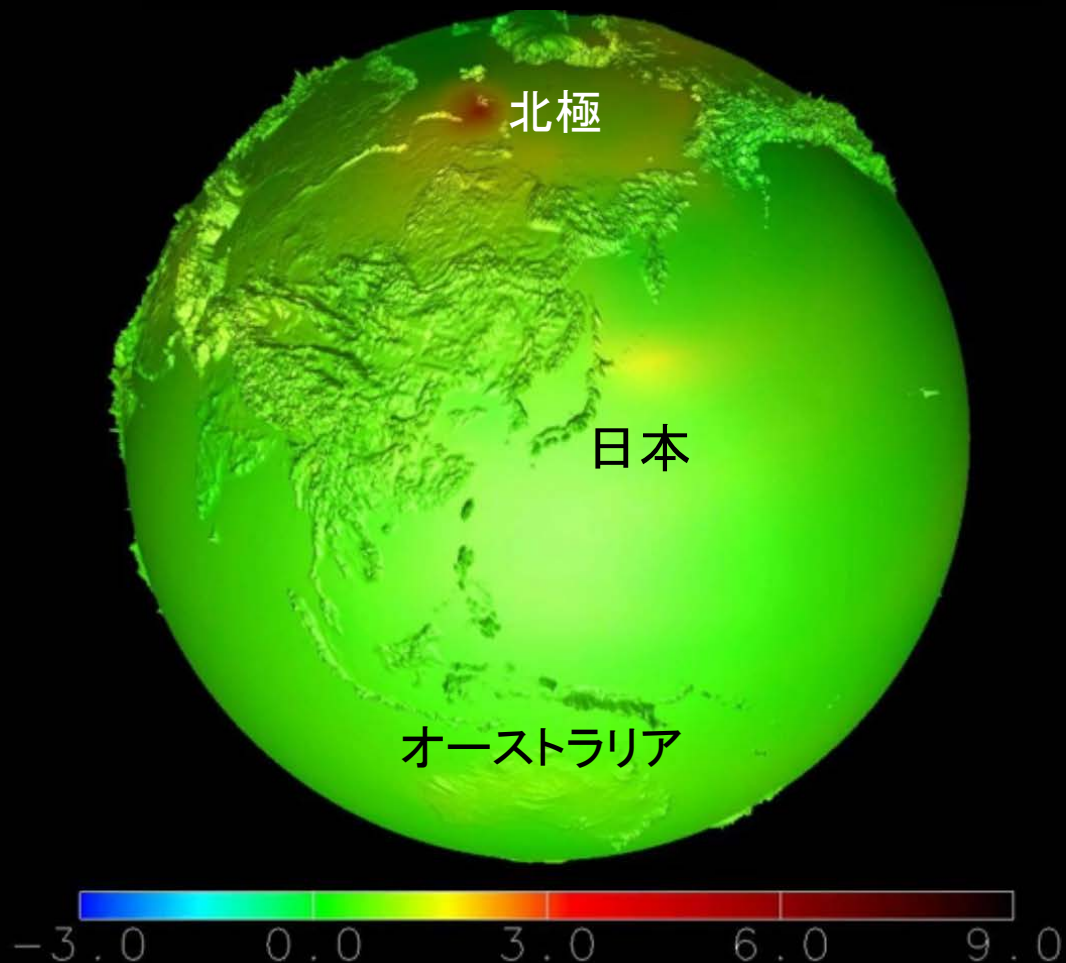
```
! "advu" <-- m_1 d(Uu)/dx  at (i-1/2,j,k).
do kz = kzst, kzen
  do jy = jystlc, jyenlc
    do ix = ixstlc_u, ixenlc_u - 1
      advu(ix, jy, kz) = fmap_uu(ix, jy, 1) &
& * (workfx(ix, jy, kz) - workfx(ix - 1, jy, kz)) &
& * vr dx2(ix + basex1)
    end do
  end do
end do
...
```

数十万行！

**100年後、
地球は、日本は、
どうなっていくのか？**

将来の気候を予測する

地上気温の変化 2010 年



将来の気候を予測する

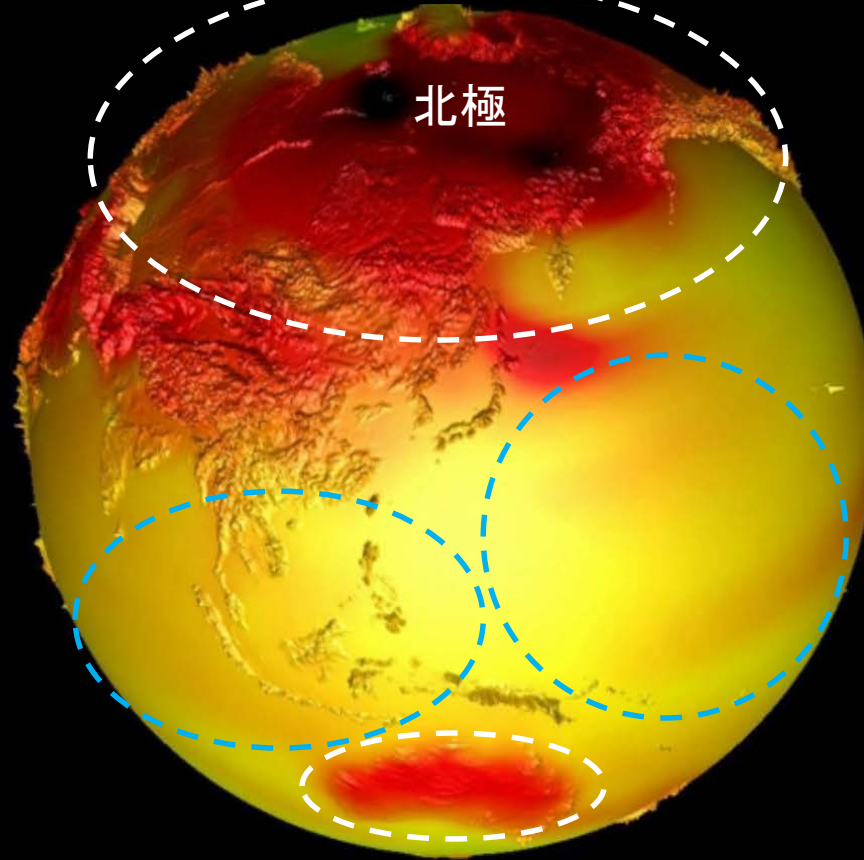
気温が上がり
やすい地域

◎ 北極域

○ 陸域

地上気温の変化

北極



気温が上がり
にくい地域

◎ 海域

○ 熱帯域



将来の気候を予測する

**気温が上がり
やすい地域**

◎ **北極域**

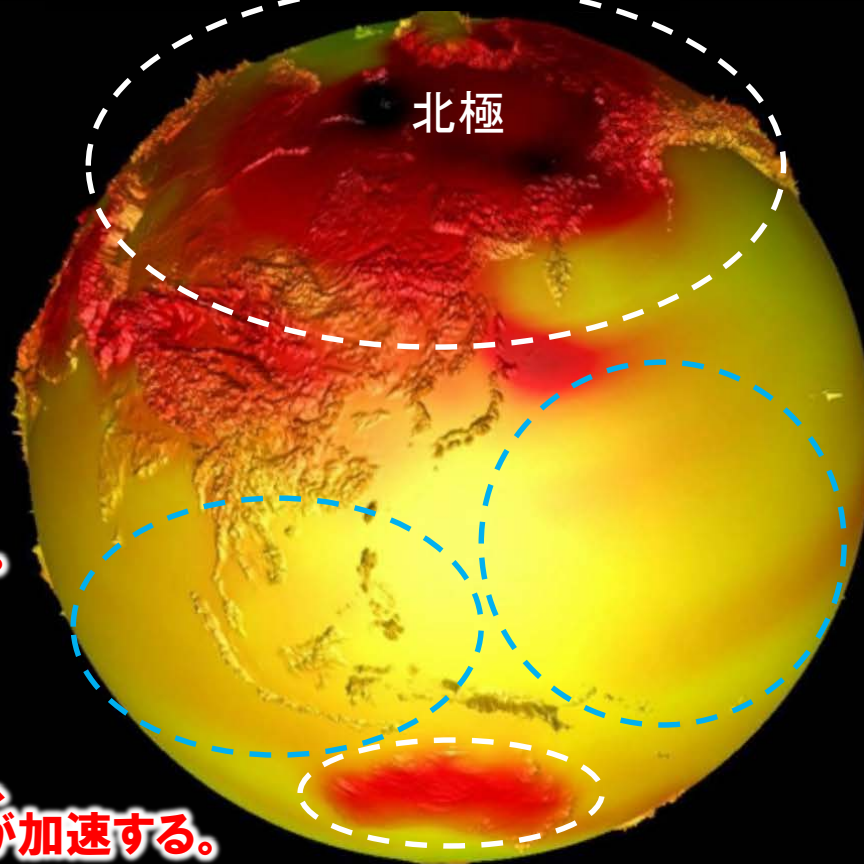
○ **陸域**

北極や大陸では、
現在は雪や氷が多く、
太陽の光が反射される。

温暖化によって
雪や氷が融けると、
太陽の光が地面に入り、
地球が温まり、温暖化が加速する。

地上気温の変化

北極

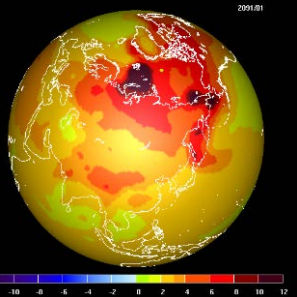


**気温が上がり
にくい地域**

◎ **海域**

○ **熱帯域**



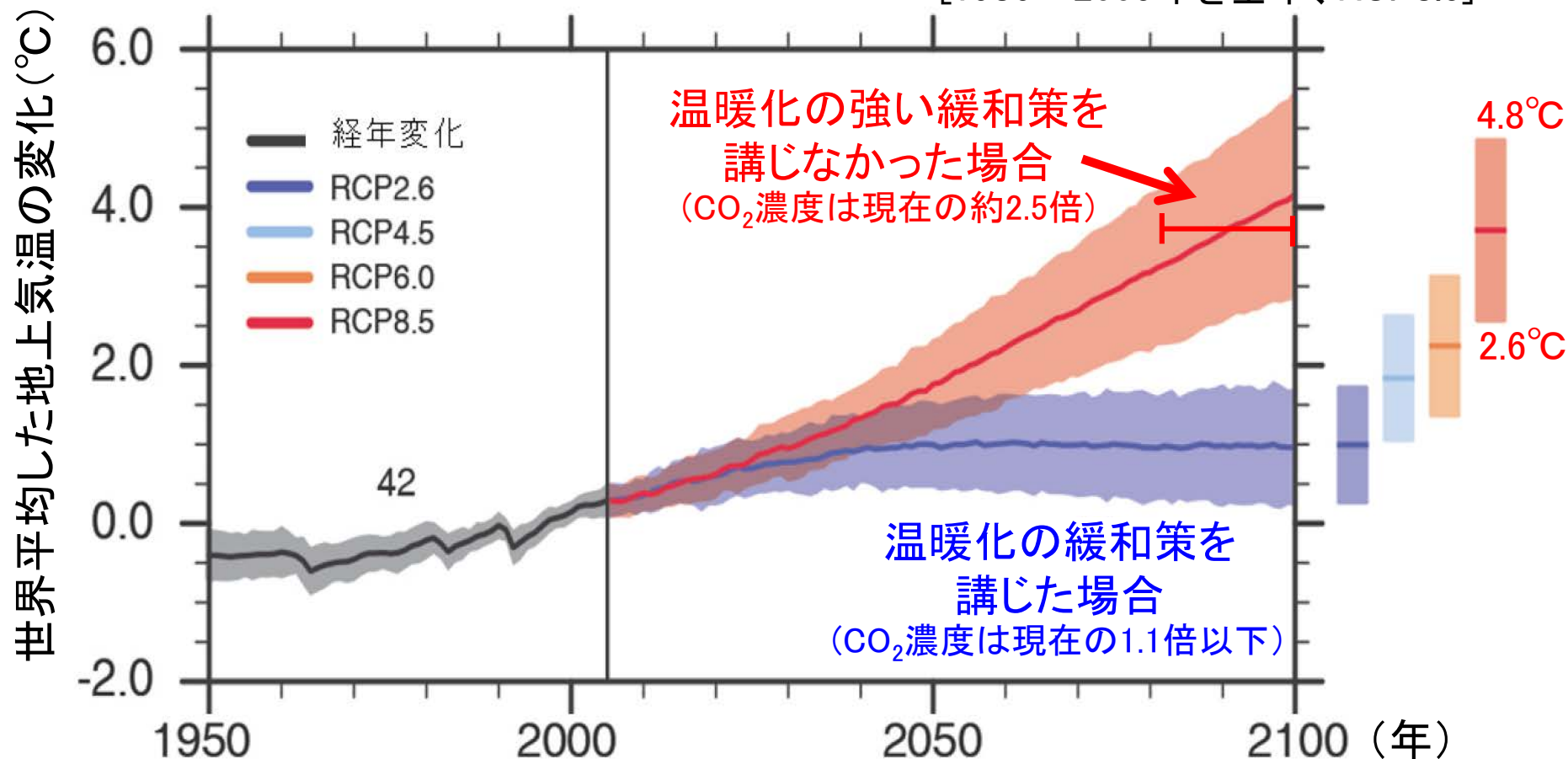


世界平均地上気温の変化予測

IPCC第5次報告書(2013)

21世紀末に現在+約4°Cの気温上昇

[1986~2005年を基準、RCP8.5]



猛暑日(最高気温35度以上)

日本
(21世紀末)

東京

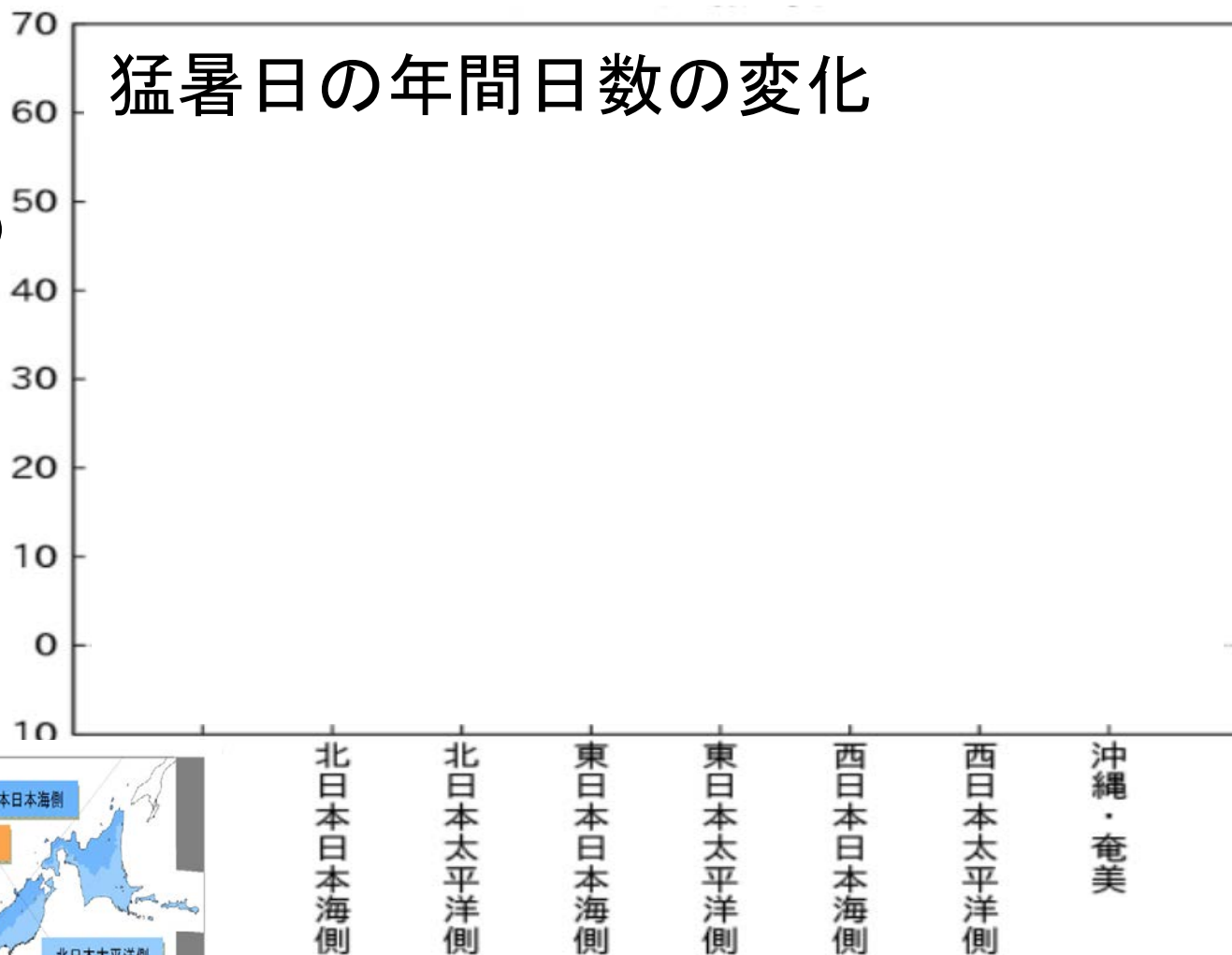
猛暑日日数(≥ 35 度)
12日(2020年)



?

※現在+3.8度を仮定

20世紀後半+4.1℃から近年の上昇分(+0.3℃)を考慮



(地球温暖化予測情報第9巻)

猛暑日(最高気温35度以上)

日本
(21世紀末)

東京

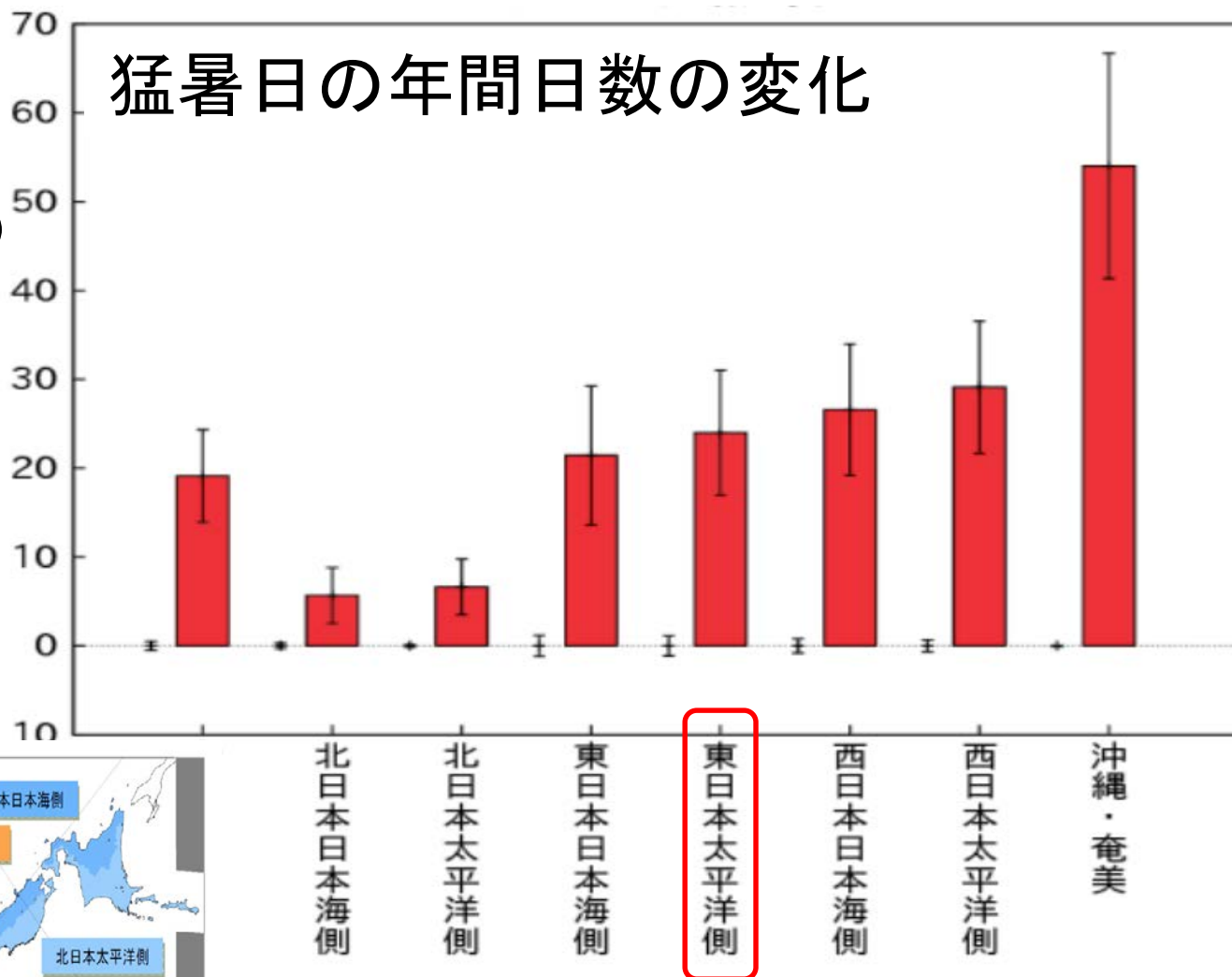
猛暑日日数(≥ 35 度)
12日(2020年)



47日

※現在+3.8度を仮定

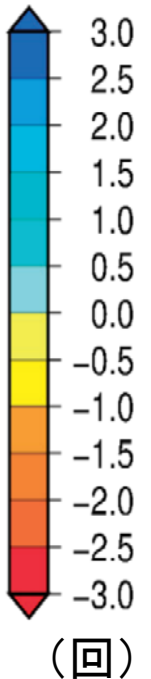
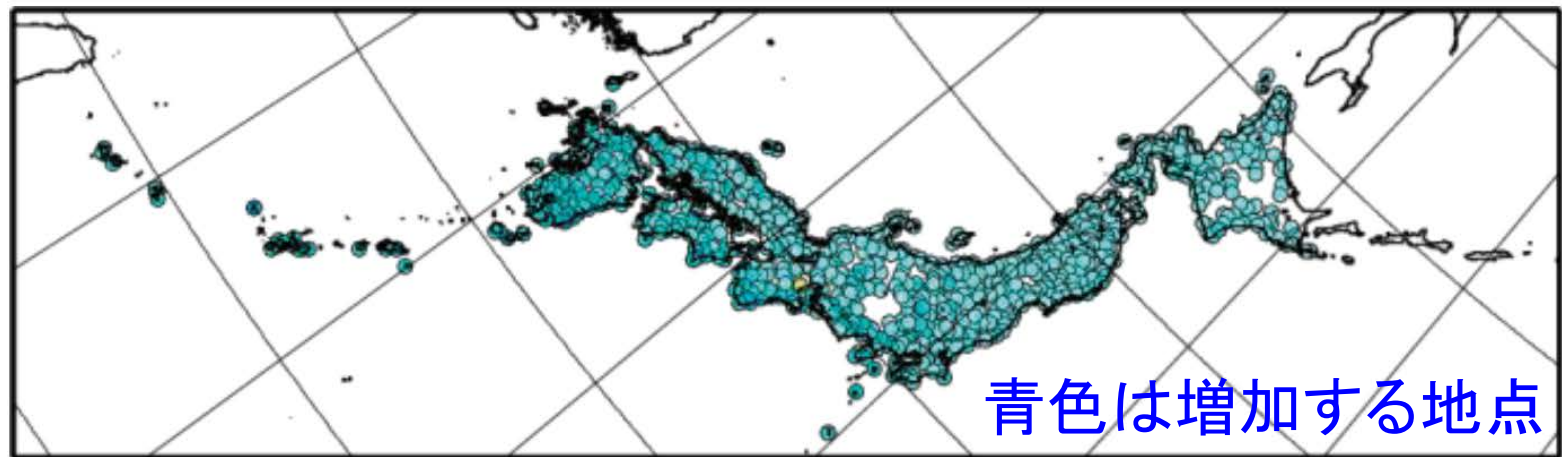
20世紀後半+4.1℃から近年の上昇分(+0.3℃)を考慮



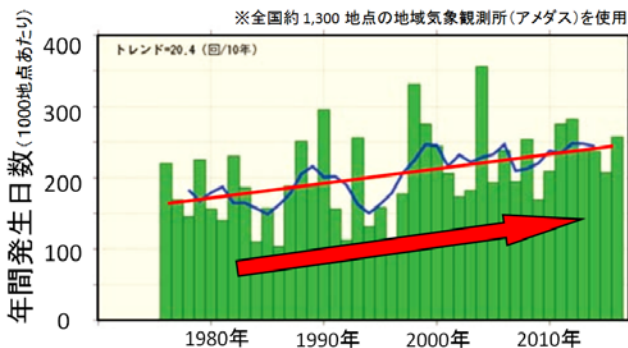
(地球温暖化予測情報第9巻)

日本の雨

非常に激しい雨も増加



短時間強雨(時間50ミリ以上)の年間発生回数の変化
(21世紀末)



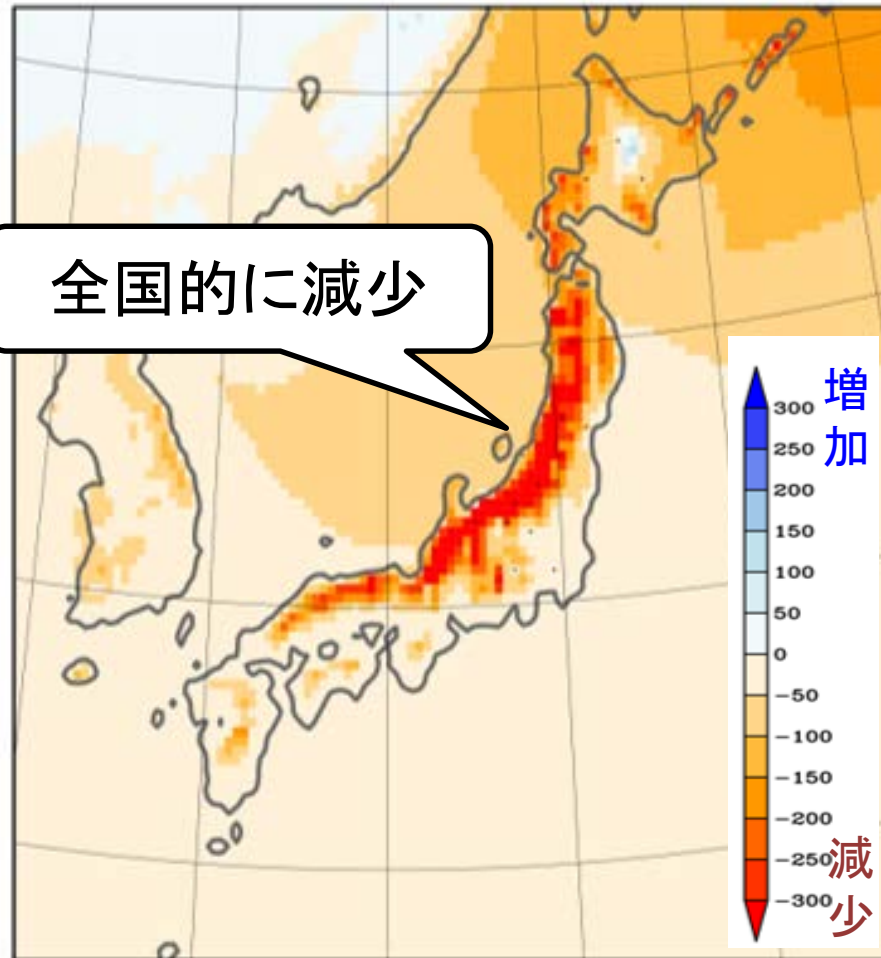
※変化傾向(増減)が明瞭な地点のみを表示
※現在・将来ともにゼロの場合は対象外

(地球温暖化予測情報第9巻)

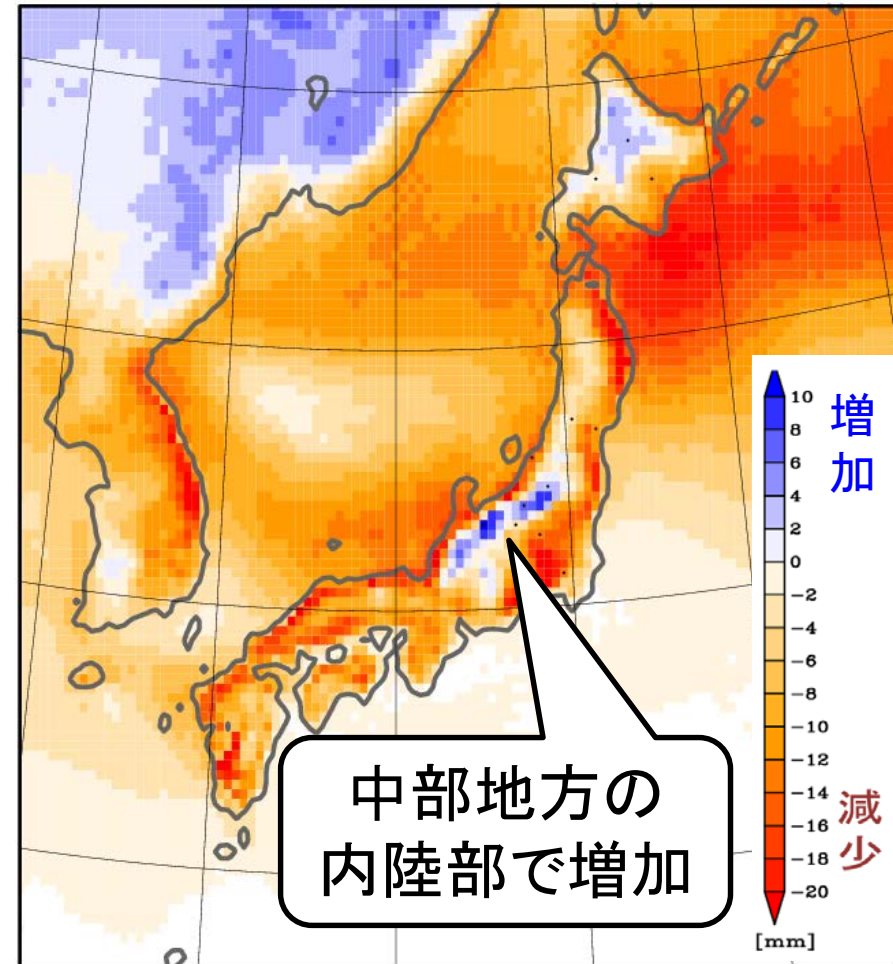
日本の雪

全体的には減少
一部で強い雪が増加

冬に降る雪の総量の将来変化



10年に1度の日降雪量
(大雪)の将来変化



まとめ

◎ 過去100年間の気温上昇

- ・ 世界の平均 +0.75度
- ・ 日本の平均 +1.26度

☆ 2020年の世界平均気温は観測史上最高タイ。

☆ 2015年以降が1位か6位を独占。

◎ 将来の気候は気候モデルで予測する。

◎ このまま何もしないと、20世紀末に比べて、 21世紀末に気温が4度程度上昇する予測。

◎ 温暖化すると、猛暑日が大幅に増加、 雪の減少、強い雨や北陸内陸の強い雪の増加。

おわり

