



統合的気候モデル高度化プログラム 令和3年度公開シンポジウム

気候は今 どうなっている？ どうなっていく？

～IPCC最新報告書を読み解く～

全球スケールの気候変動と人類活動の影響 – IPCC AR6にまとめられた知見 –

東京大学先端科学技術研究センター 准教授

小坂 優

第2章～第4章: 全球スケールの変化

IPCC AR6WGIの章立て

- 第1章: 構成、背景、手法
 - 第2章: 気候システムの変化状態
 - 第3章: 人間が気候システムに及ぼす影響
 - 第4章: 将来の世界の気候
- 大洋/大陸～全球
スケールの変化
- 第5章: 地球規模の炭素／生物地球化学的循環
 - 第6章: 短寿命気候強制因子
 - 第7章: 地球のエネルギー収支・フィードバック・気候感度
 - 第8章: 水循環の変化
 - 第9章: 海洋、雪氷圏、及び海面水位の変化
- プロセス
理解
- 第10章: 世界規模と地域規模の気候変化のつながり
 - 第11章: 気象及び気候の極端現象
 - 第12章: 地域規模の影響とリスクの評価のための情報
 - アトラス
- 地域スケール
の変化

第2章
観測された気候の変化



第3章
過去の気候の変化
に対する人間の影響
+
全球気候モデルの評価



第4章
将来の気候の予測

第2章～第4章: 全球スケールの変化

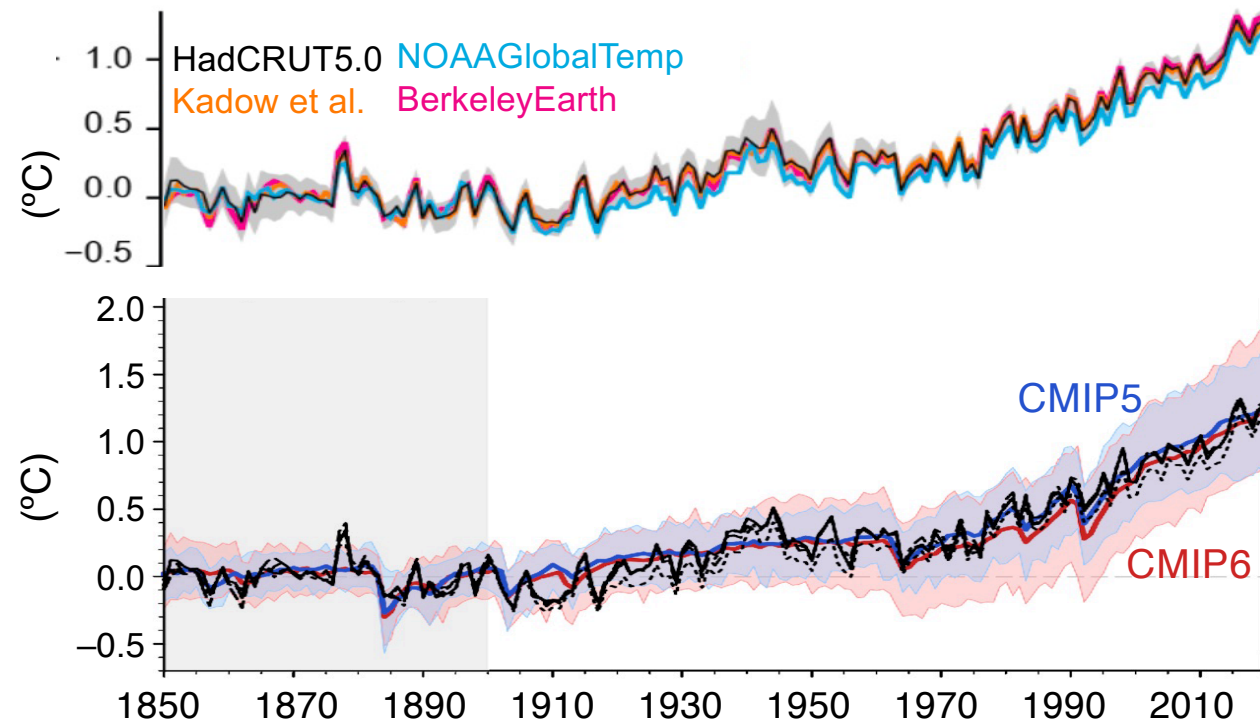


Figure 2.11

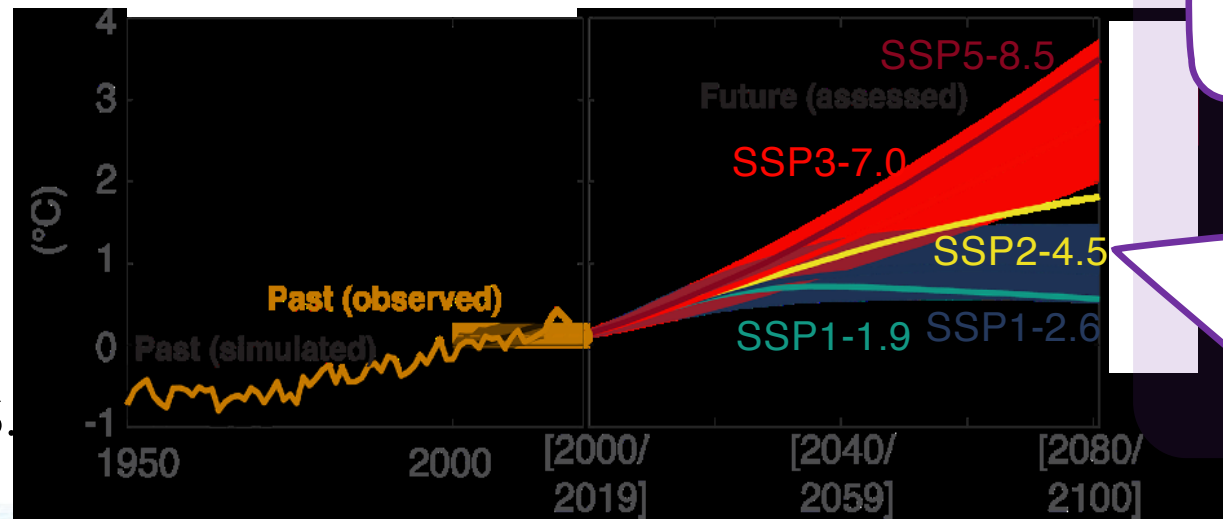
Figure 3.4

第2章
観測された気候の変化

第3章
過去の気候の変化
に対する人間の影響
+
全球気候モデルの評価

第4章
将来の気候の予測

Figure TS.



第2章～第4章で扱う気候変化指標

Cross-Chapter Box 2.2

・大気及び地表面

- 気温
- 湿度・水蒸気・降水量・河川流量等
- 大気循環

・雪氷圏

- 海氷
- 積雪
- 氷河・氷床

・海洋

- 水温・貯熱量
- 塩分
- 海面高度
- 海洋循環
- 酸性度・溶存酸素

・生物圏

- CO₂の季節サイクル
- 海洋生態系
- 陸上生態系

・変動モード

- NAO/NAM (北大西洋振動/北半球環状モード)
- SAM (南半球環状モード)
- ENSO (エルニーニョ・南方振動)
- IOB・IOD (インド洋海盆モード・ダイポールモード)
- AZM・AMM (大西洋東西モード・南北モード)
- PDV (太平洋十年規模変動)
- AMV (大西洋数十年規模変動)

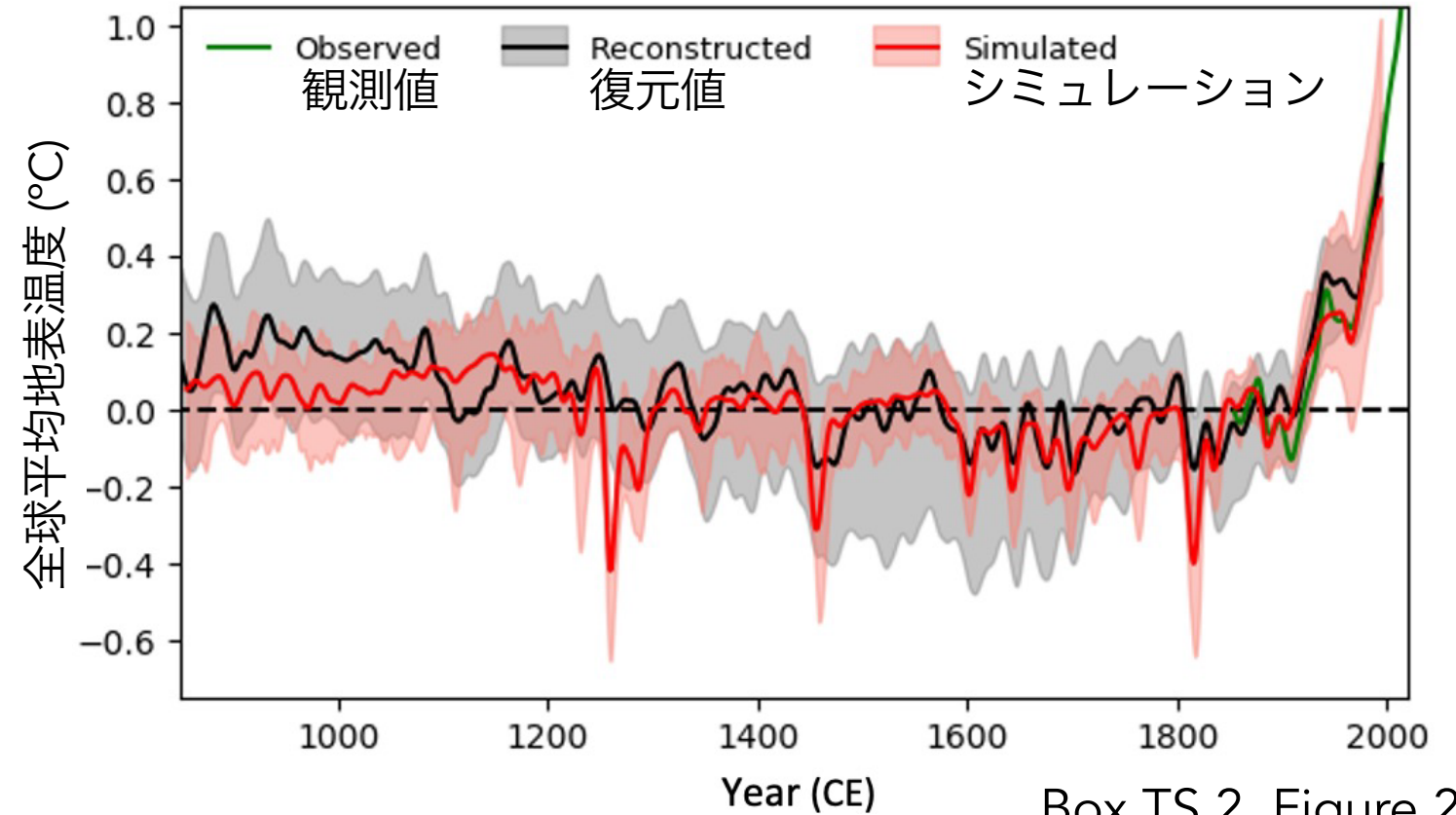
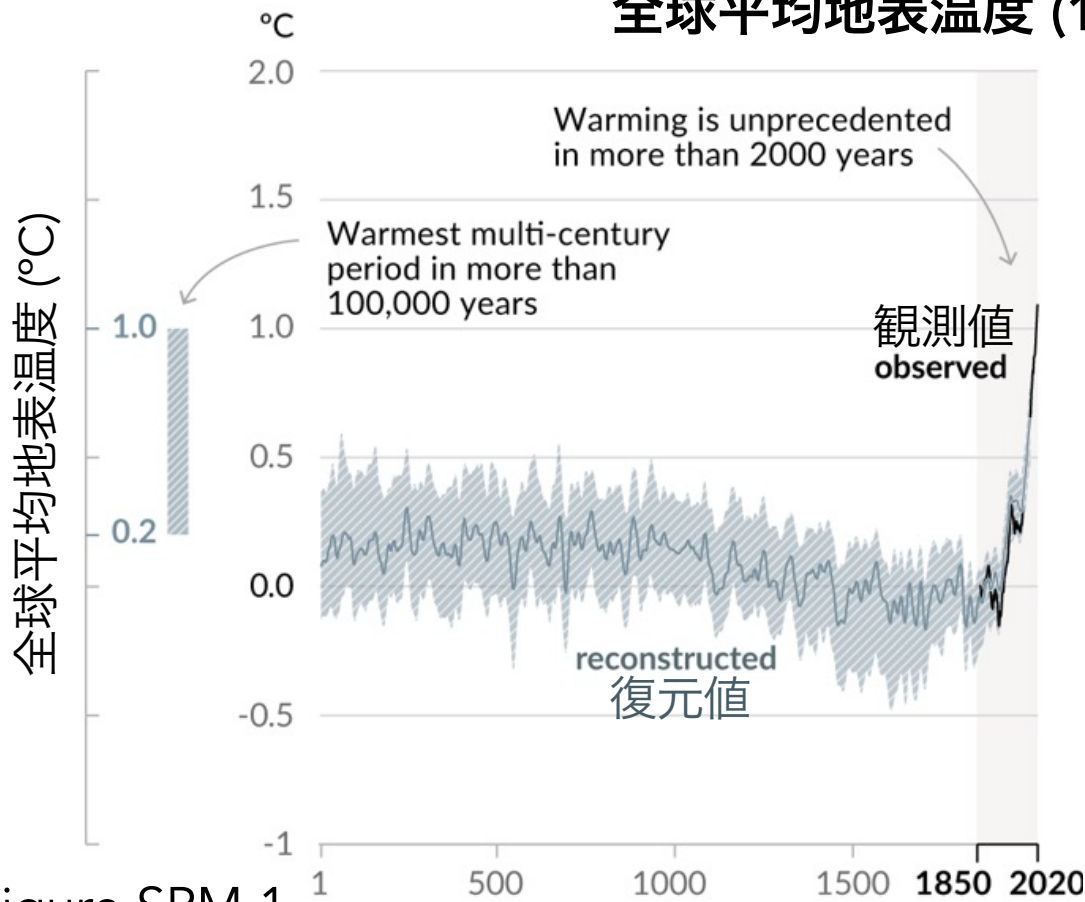
※ 加えて

第2章では 気候強制因子の変化

第4章では「ジオエンジニアリング」への応答等も

古気候の時間スケールでの全球平均地表温度変動

全球平均地表温度 (1850-1900年平均からの差)

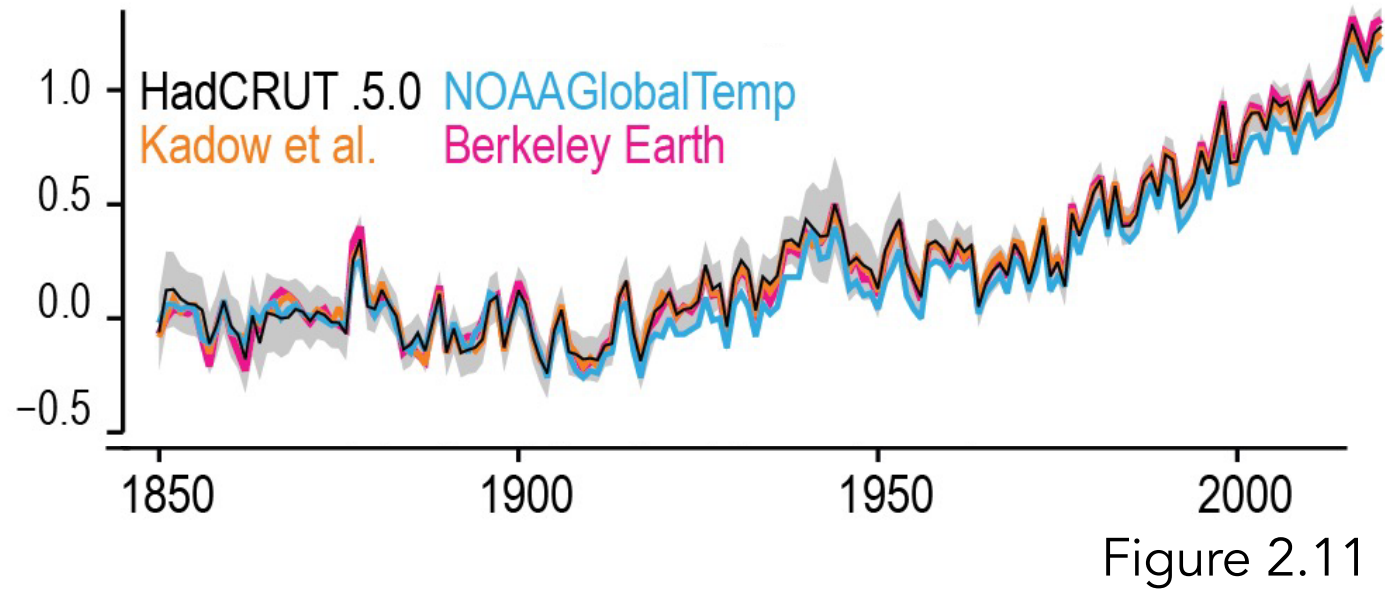


- 古気候データの拡充とその処理技術の発展
- モデルの改善と強制要素の更新

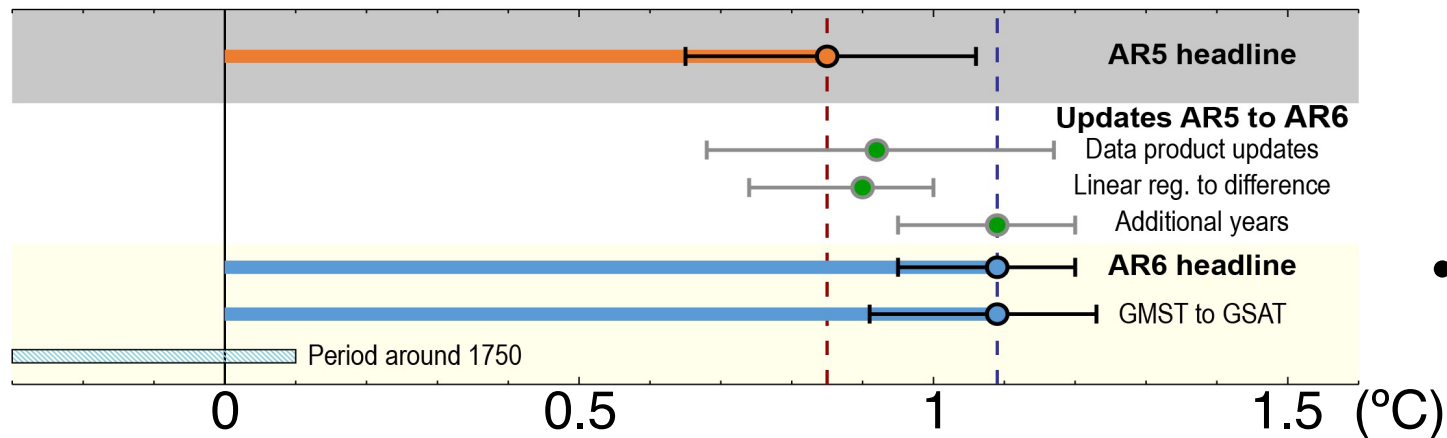
モデルシミュレーション ("last millennium") と古気候データからの復元値がよく合う

19世紀後半以降の全球平均地表気温変化

年平均全球平均地表気温 (1850-1900年平均からの差)



- 1850-1900年を基準とした
2011-2020年平均 = **+1.09 °C**
 - その後のさらなる温暖化
 - 過去データの更新 ← データレスキュー etc
 - 線形トレンドから期間の差に
 - GMST (陸上・海氷上では気温、海域では海面水温を用いる) と GSAT (全球で地表気温を用いる) の変化は同等 (±10%以内)



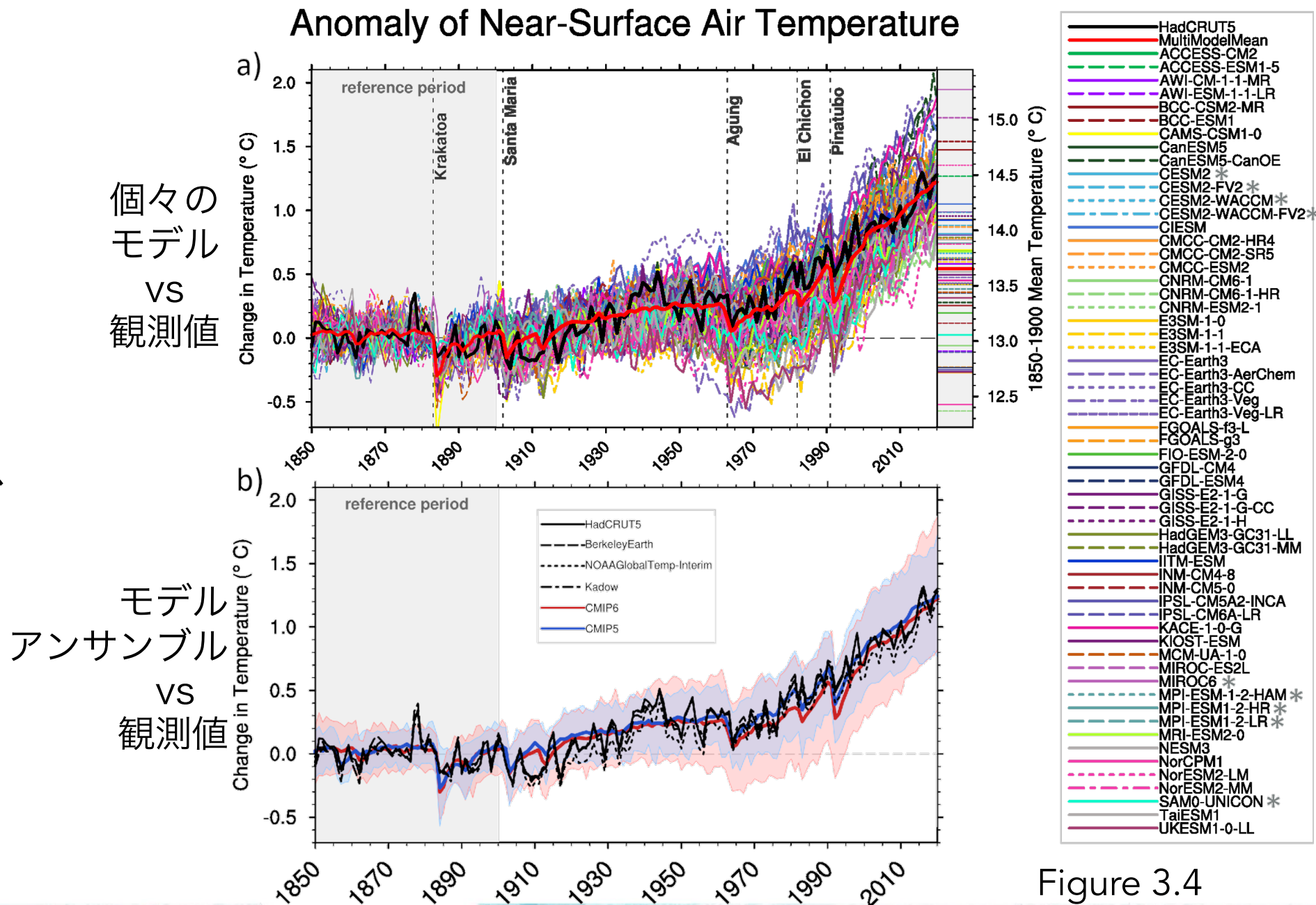
- AR5: 1880-2012年変化 = +0.85 °C

全球平均地表気温変化の再現性

- Historical実験

(観測データに基づく過去の
強制要素で駆動; 2014年まで)

- CMIP6モデル群全体として、
観測された気温変化をよく
捉える



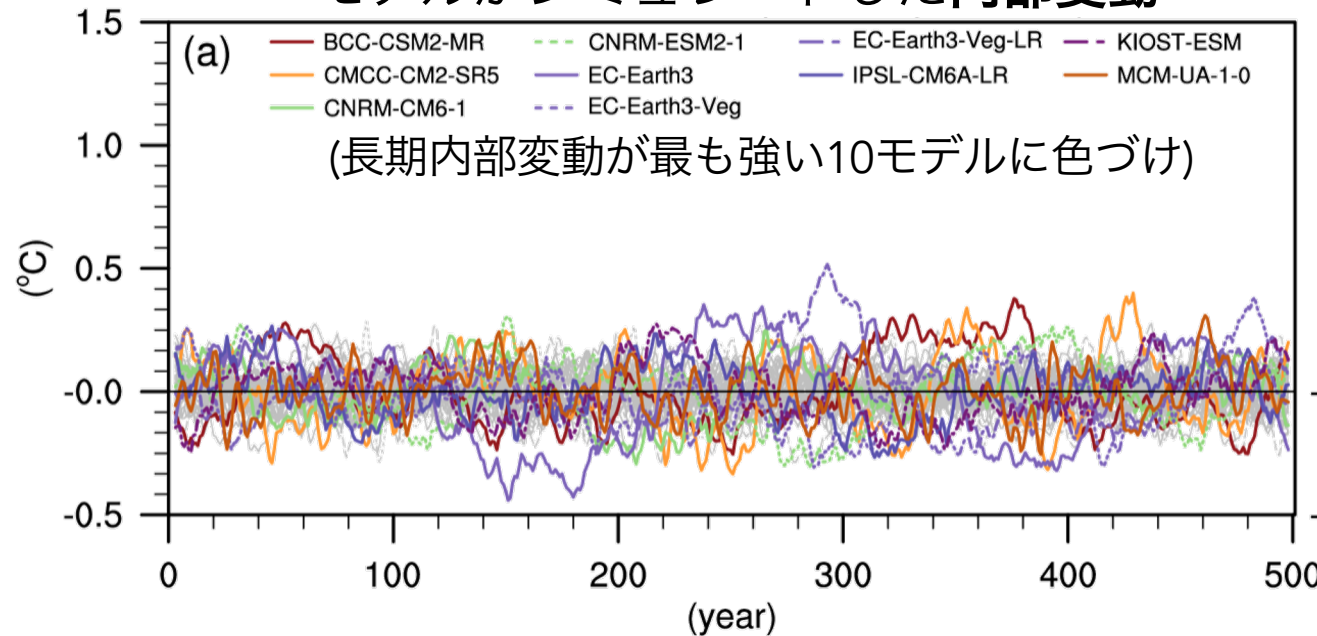
Detection & Attribution 検出と原因特定

- 検出 Detection 「観測された変化は内部変動だけで起こりうる範囲を超えているか」

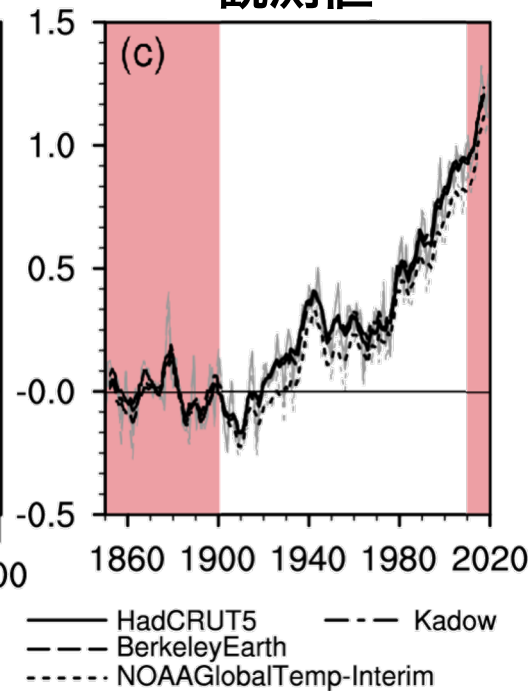
CO₂などの外部強制力なしでも存在する変動 ≡ 自然変動

- 全球平均地表気温については...

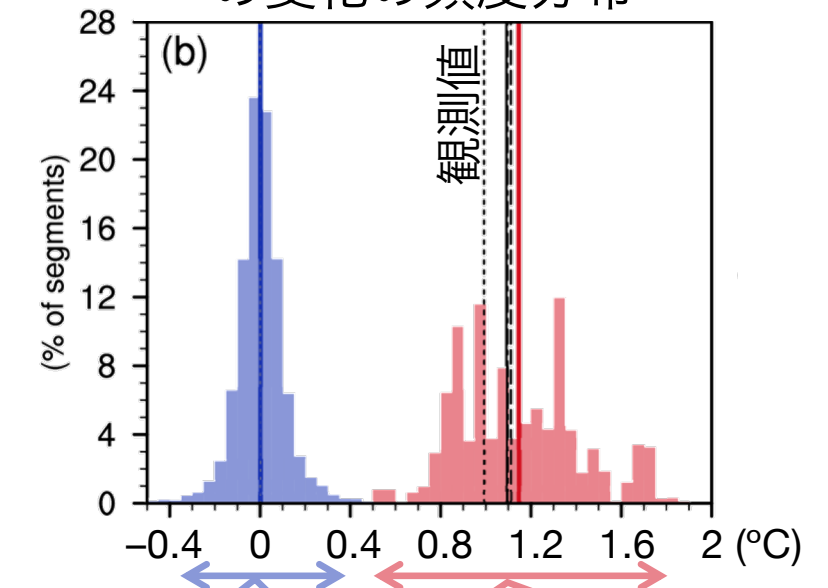
モデルがシミュレートした内部変動



観測値



1850-1900年 ~ 2010-2019年
の変化の頻度分布



内部変動のみで
起こる範囲

内部変動+強制力の影響
で起こる範囲
(応答感度のばらつきを含む)

mean
piControl

mean
historical-ssp245

Figure 3.6

Detection & Attribution 検出と原因特定

- **原因特定 Attribution** 「検出された変化には人間の影響 (正味、あるいは各強制源) がどれだけ寄与したか」
 - ↑
 - CMIP基本実験群に加えて...
 - **DAMIP (Detection & Attribution Model Intercomparison Project)**
 - 温室効果ガス
 - エアロゾル
 - 成層圏オゾン
 - 自然起源強制力 (火山噴火・太陽活動変動)等の各強制力を個別に与える実験群
- 13のモデルが参加
日本からは

 - **MIROC6**
 - **MRI-ESM2-0**
- AR5では「気候モデル評価」と「検出と原因特定」は別々の章
 - 「検出と原因特定」には、モデルに適切な強制要素を与えれば観測された変化を捉えられることが前提
→ AR6ではモデル評価とセットで

全球平均地表気温変化の原因特定



- 1850-1900年平均を基準として...
- 2010-2019年の温暖化レベル: **1.06°C** [0.88-1.21°C]
- 第3章での人為起源温暖化推定: **1.07°C** [0.8 - 1.3°C]

3通りの手法

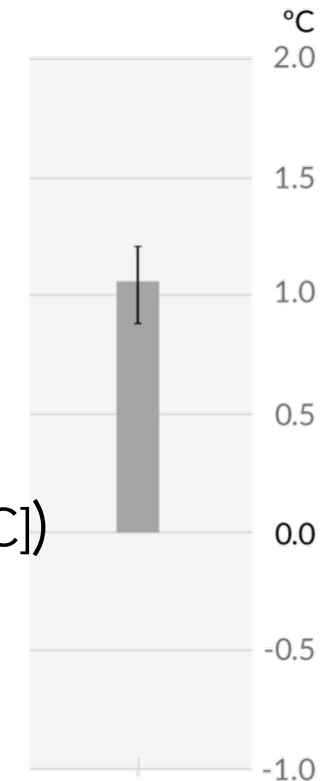
(cf. 第7章の独立な推定 (含自然起源強制力) は 1.14°C [0.89 - 1.45 °C])

- 内訳 (第3章の推定)
- 温室効果ガス: +1.0 - 2.0 °C
 - その他人為起源: -0.8 - 0.0 °C
 - 自然起源強制力: -0.1 - 0.1 °C
 - 内部変動: -0.2 - 0.2 °C

※ AR5では1951年からの温暖化に対する原因特定のみ

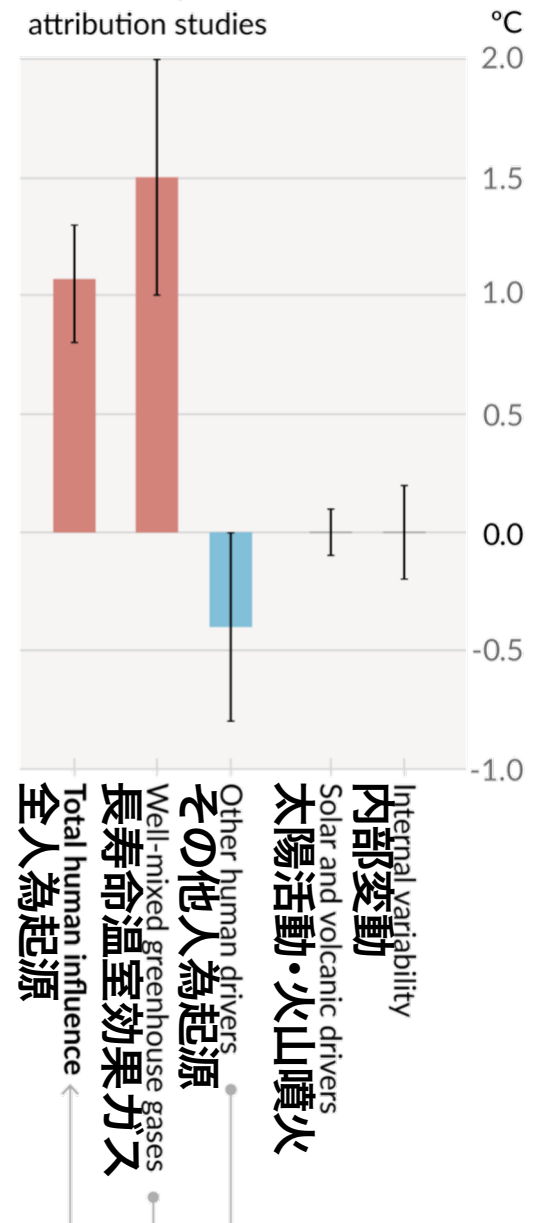
観測値

a) Observed warming
2010-2019 relative to
1850-1900



外部強制力による温暖化

b) Aggregated contributions to
2010-2019 warming relative to
1850-1900, assessed from
attribution studies



今世紀初めの地球温暖化の停滞

- 1990年代末~2010年代初めまで全球平均地表気温上昇が鈍化 (いわゆる「ハイエイトス」)

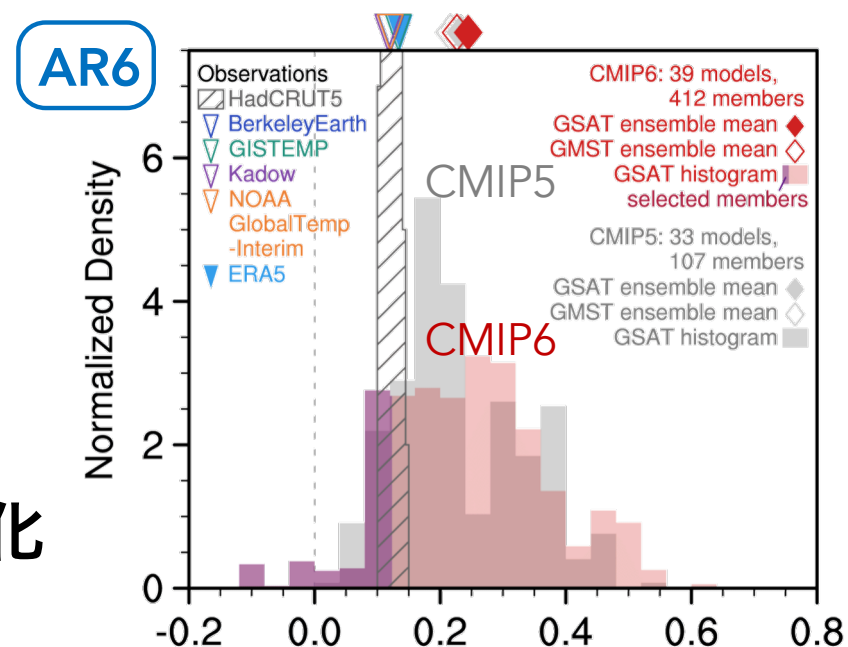
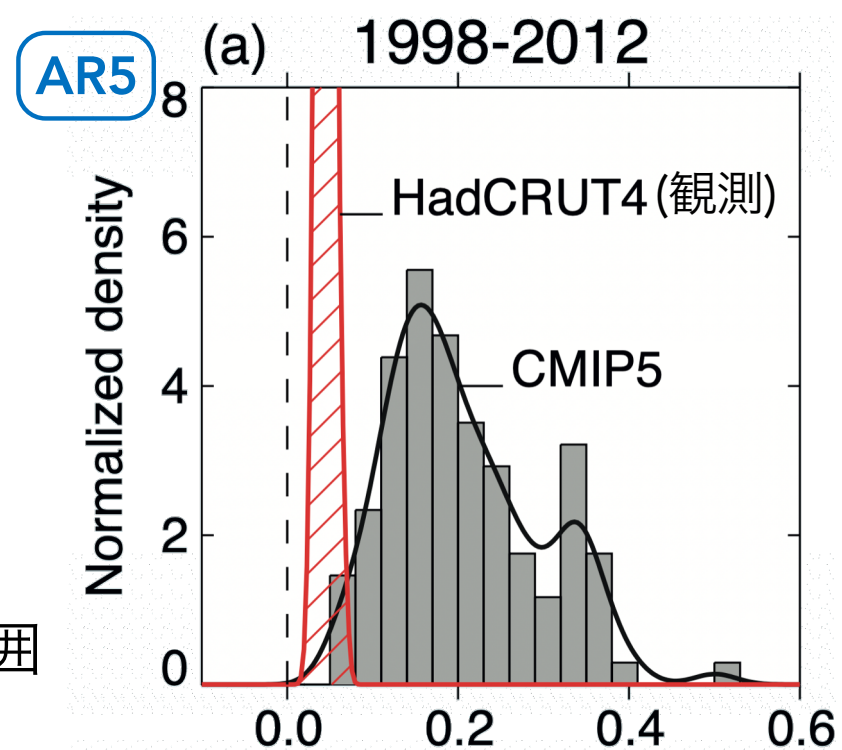
AR5 Box 9.2では

- 「内部変動と自然起源強制力が寄与 (中程度の確信度)」
 - 観測データに基づくトレンドがCMIP5シミュレーション群の範囲ギリギリ ... モデルの信頼性に影響

AR6 Cross-Chapter Box 3.1

- **観測データの更新** → この期間の温暖化を上方修正
 - 様々な海面水温観測データの処理方法の改善
 - 観測データ欠損域 (特に急速に温暖化している北極域) の補完

→ **CMIP5・CMIP6ともに、観測された1998~2012年の温度変化をシミュレーション群の範囲内に十分捉える**



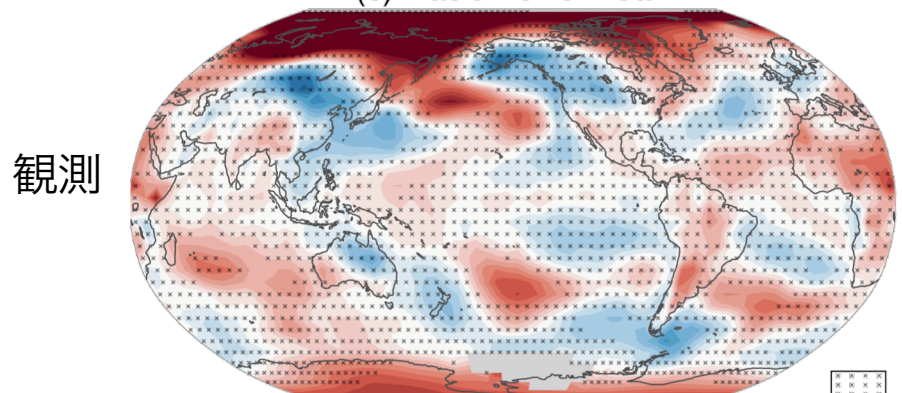
Cross-Chapter Box 3.1, Figure 1 (°C/decade)

今世紀初めの地球温暖化の停滞と太平洋十年規模変動

- 太平洋十年規模変動が正から負位相に遷移 → 人為起源温暖化を一部相殺

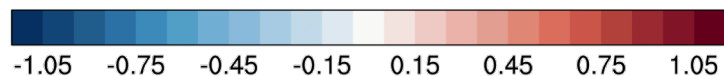
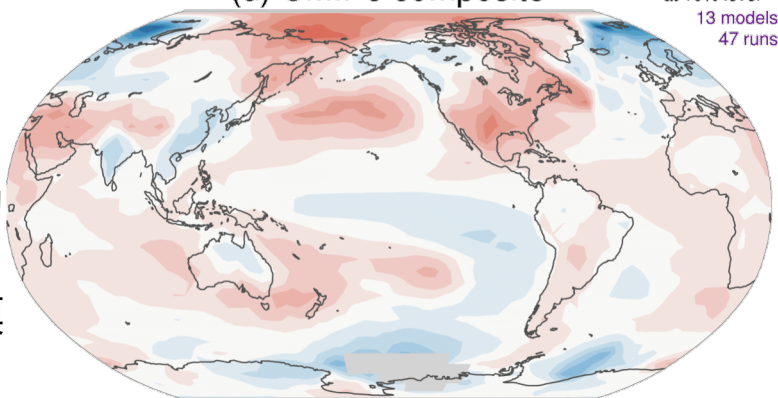
地表面温度トレンド (1998-2012年)

(c) HadCRUT5 mean



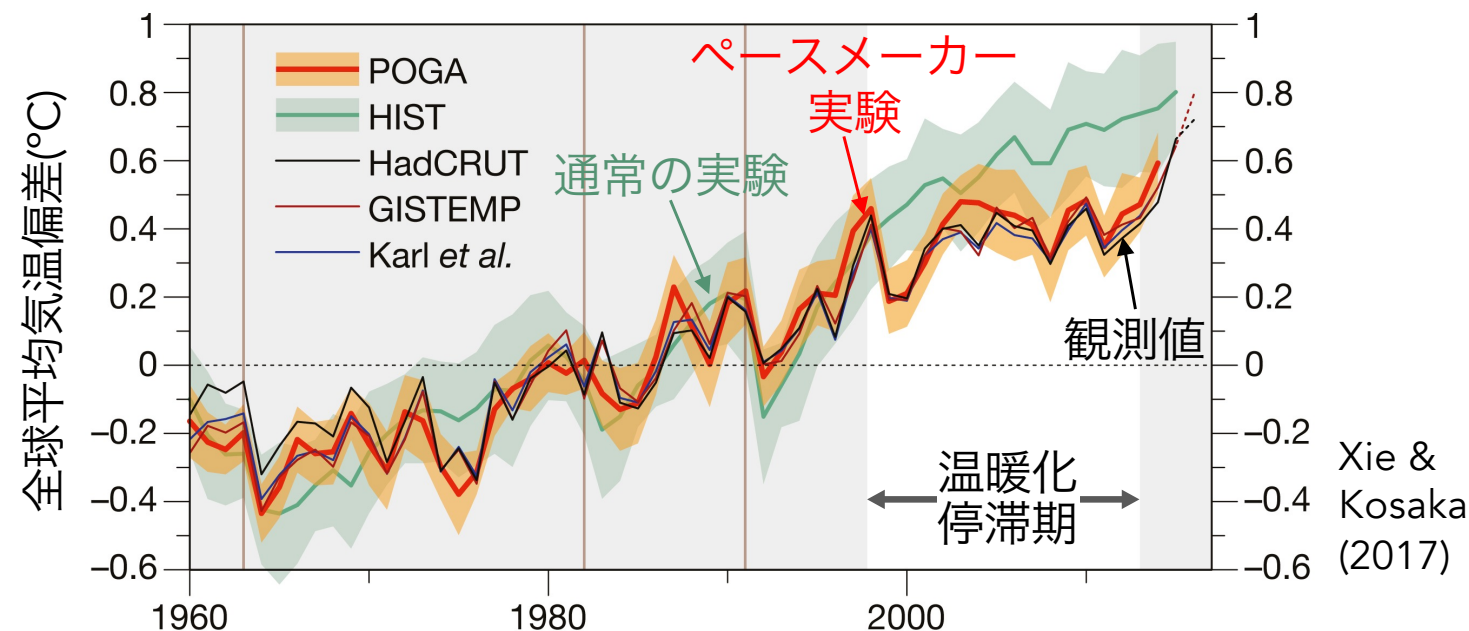
(d) CMIP6 composite

温暖化停滞を
捉えている
シミュレー
ション群の平均
↓
太平洋十年規模
変動の特徴



Near-surface temperature trend (°C (10 years)⁻¹)

基本的に内部変動
そのタイミングを気候モデルは再現しない



- 「ペースメーカー実験」で停滞を再現 (Watanabe et al. 2014; Kosaka & Xie 2013, 2016)
- 特徴的な空間分布・季節性
 - 日本では夏冬の気温差拡大 (Imada et al. 2017)
 - 極端高温頻度の増加は継続 (Kamae et al. 2014)

Cross-Chapter Box 3.1, Figure 1

十年規模内部変動の再現性とメカニズム

- CMIP5では太平洋十年規模変動や大西洋数十年規模変動が弱すぎるバイアス → CMIP6で改善 (Watanabe et al. 2021)

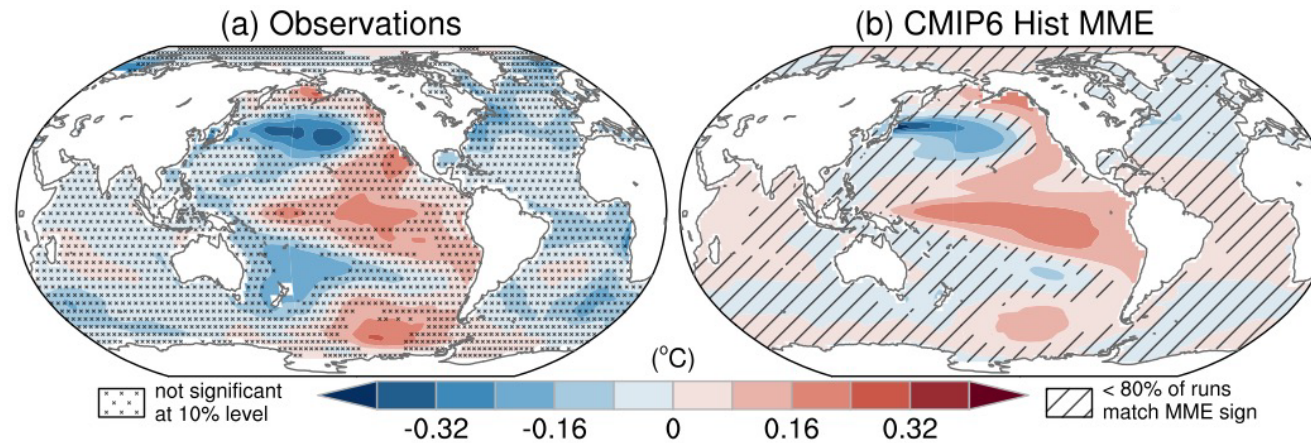
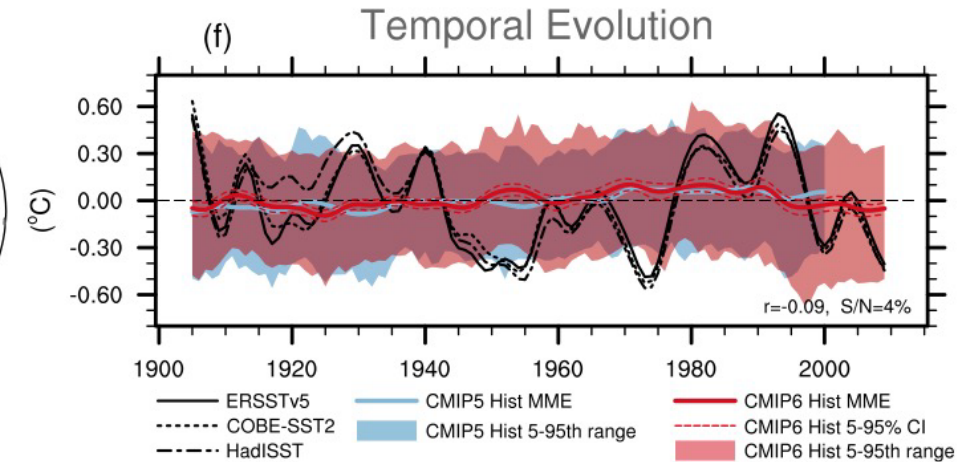


Figure 3.39



太平洋十年規模変動の駆動メカニズム

- 大西洋やインド洋での変動が大洋間をまたいで影響 (Mochizuki et al. 2016; Chikamoto et al. 2016)
- エアロゾルの影響

特に大西洋数十年規模変動にはエアロゾルが影響 (中程度の確信度) (Watanabe & Tatebe 2019)

→ 太平洋十年規模変動に遠隔に影響? (Takahashi & Watanabe 2016)

地球温暖化停滞の要因とその示唆

- **TS Cross-Section Box TS.1** “The observed slower global surface temperature increase (relative to preceding and following periods) in the 1998–2012 period, sometimes referred to as ‘the hiatus’, was temporary (*very high confidence*)”
1998-2012年の地球温暖化停滞は一時的 (非常に高い確信度)
- **Chapter 3 Executive Summary** “Internal variability, particularly Pacific Decadal Variability, and variations in solar and volcanic forcings partly offset the anthropogenic surface warming trend over the 1998-2012 period (*high confidence*).”
内部変動 (特に太平洋十年規模変動) と自然起源強制力が人為起源の地表気温上昇の一部を相殺 (高い確信度)

- **SPM C.1** “Natural drivers and internal variability will modulate human-caused changes, especially at regional scales and in the near term, with little effect on centennial global warming.
自然起源強制力と内部変動は人為起源の変化 (特に地域スケール・近未来) を変調するが、百年規模の地球温暖化にはほとんど影響しない
- 温暖化停滞に対するこれらのメカニズム理解は**人為起源温暖化推定の確信度向上にも寄与**

全球平均地表気温の将来予測 (第4章)

- 全球平均地表気温の予測については、
 - CMIP6シミュレーション群から、過去の温暖化の再現性に基づいてモデル群を選択(3通りの選び方)
 - 第7章の気候感度推定値に基づくエミュレーターによる予測
 - の結果を総合して算出 (CMIP6だけに依存しない)
- ▶ ◦ 地域気候変化を温暖化レベルで整理
- WG間をまたぐ整合性

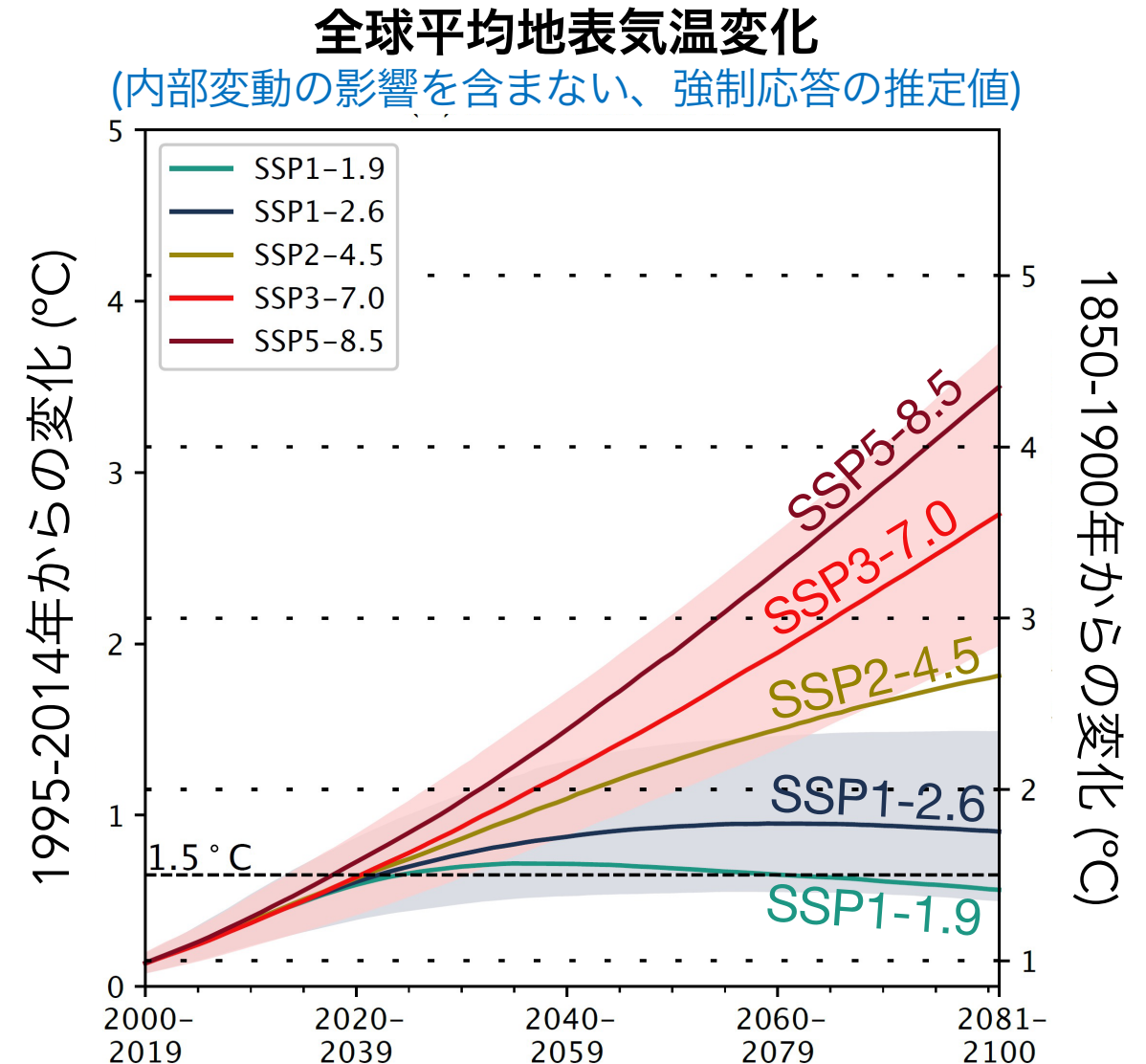


Figure 4.11

SSP1-2.6とSSP3-7.0のみに5-95%幅が付されている

全球平均地表気温の将来予測 (第4章)

20年平均全球地表気温が各温暖化レベルを超えるタイミング

Table 4.5に基づく

	+1.5°C	+2°C	+3°C	+4°C
SSP1-1.9	2025-2044年 [2013-2032年~超えない]	超えない	超えない	超えない
SSP1-2.6	2023-2042年 [2012-2031年~超えない]	超えない [2031-2050年~超えない]	超えない	超えない
SSP2-4.5	2021-2040年 [2012-2031年~2037-2056年]	2043-2062年 [2028-2047年~2075-2094年]	超えない [2061-2080年~超えない]	超えない
SSP3-7.0	2021-2040年 [2013-2032年~2033-2052年]	2037-2056年 [2026-2045年~2053-2072年]	2066-2085年 [2050-2069年~超えない]	超えない
SSP5-8.5	2018-2037年 [2011-2030年~2029-2048年]	2032-2051年 [2023-2042年~2044-2063年]	2055-2074年 [2042-2061年~2074-2093年]	2075-2094年 [2058-2077年~超えない]

SPM B.1 “Global warming of 1.5°C and 2°C will be exceeded during the 21st century unless deep reductions in CO₂ and other greenhouse gas emissions occur in the coming decades.”

今後数十年の間にCO₂及びその他温室効果ガス排出が大幅に減少しない限り、
21世紀中に温暖化レベルは1.5°C及び2°Cを超える

その他の気候変化指標 (抜粋)

	観測された変化	人間の影響
1979年以降の 対流圏温暖化	事実	主要な駆動源 (非常に高い可能性)
20世紀中頃以降の 陸域降水増加	高い可能性	北半球中高緯度で検出 (高い確信度)
1980年代以降の ハドレー循環域拡大	非常に高い可能性	南半球で寄与 (高い可能性)
1970年代以降の 海洋貯熱量増加	ほぼ確実	主要な駆動源 (極めて高い可能性)
1970年以降の 全球平均海面上昇	事実	主要な駆動源 (非常に高い可能性)
1979年以降の 北極海氷域縮小	非常に高い可能性	主要な駆動源 (非常に高い可能性)
1990年以降の 南極氷床減少	非常に高い可能性	限定的な証拠 中程度の一致度

Table TS.1に基づく

※ 色が濃いほど高い確信度／可能性

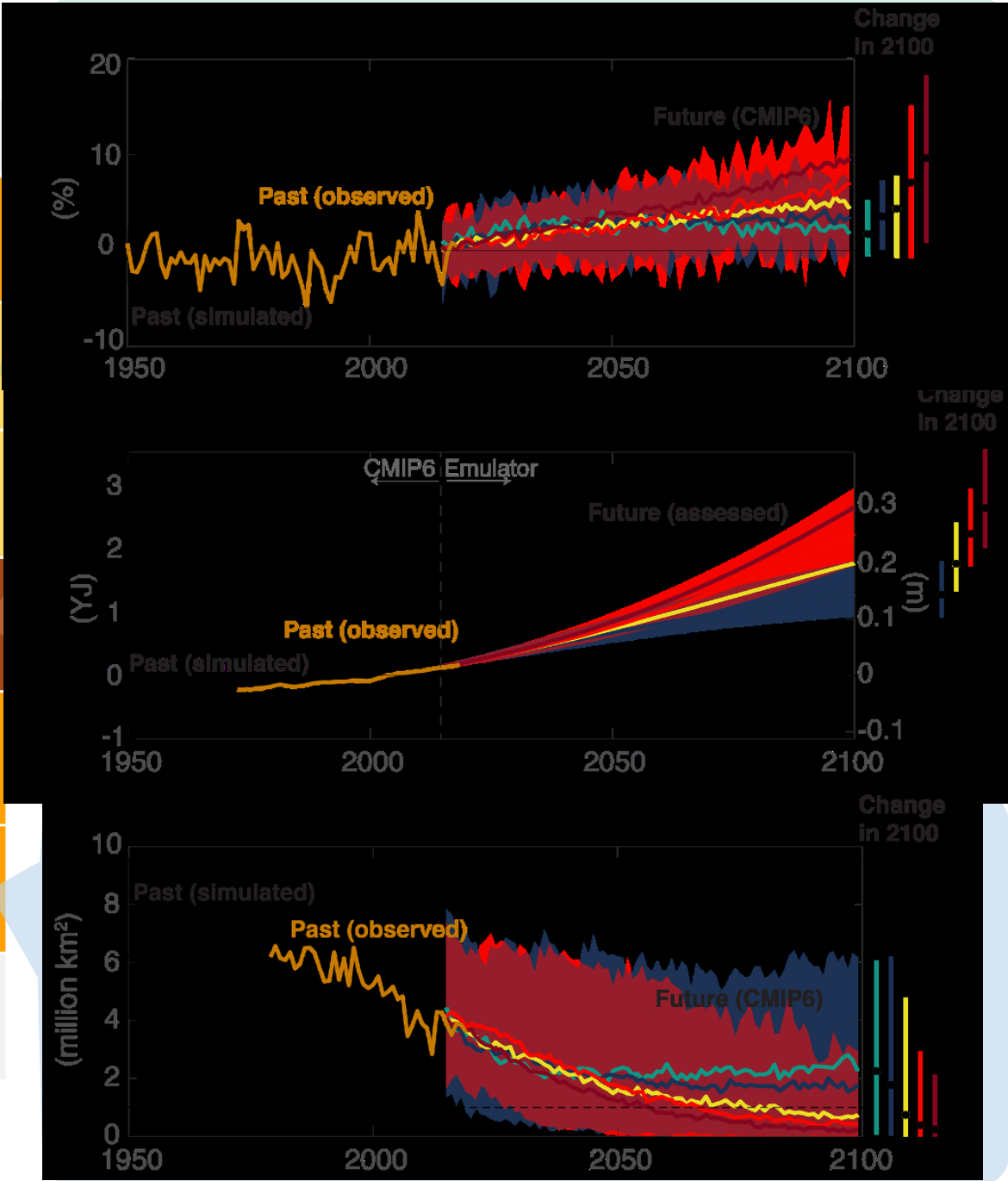


Figure TS.8

まとめ

• 観測データの高度化と蓄積

- 古気候データの発展
- 過去データの拡充
- データ処理手法の改善
- 新たな観測データ

• 気候モデルの高度化

- 高解像度化
- 素過程の表現の高度化
- 大規模アンサンブル

• 強制力の更新

• 気候変化のプロセス理解の深化

- 気候感度など

• 検出と原因特定の手法の発展

• 内部変動の理解の深化

- 特に十年規模変動

It is unequivocal that human influence has warmed the atmosphere, ocean and land.

人間の影響が大気、海洋、及び陸域を
温暖化させてきたことには
疑う余地がない。

より信頼できる将来予測へ