



今さら解説—気候感度って何？
～定義からWCRP評価論文、パターン効果まで～

渡部雅浩
東京大学大気海洋研究所
2021/04/27



Menu

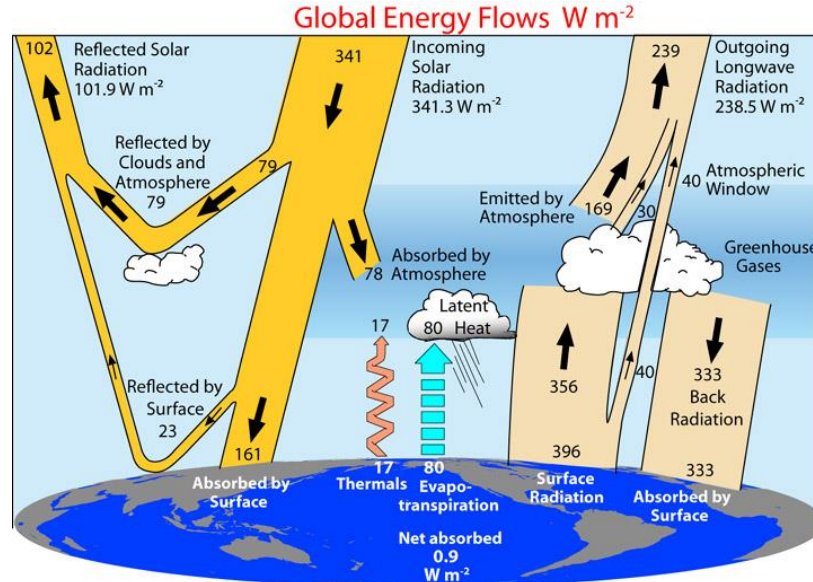
- 気候感度ってなんですか
- 気候感度の意義は
- AR5までの問題
 - ✓ 不確実性
 - ✓ 観測データから気候感度を推定すると？
 - ✓ パターン効果が分かってきた
- WCRP ECS assessment
- CMIP6の気候感度
- 何を気にすべきか

気候システムの根本的な制約はエネルギーである

ちょっと覚えておくとよい数字： 正味の入射エネルギー \approx 射出エネルギー $\approx 240 \text{ W/m}^2$

大気中 CO_2 濃度が倍になるとシステムに $\approx 4 \text{ W/m}^2$ の余剰エネルギー

\Rightarrow これ自身は地球表面気温を $\approx 1^\circ\text{C}$ 上昇させるが、実際の温度上昇は気候フィードバックに大きく依存する



大気上端での全球エネルギー収支

$$\Delta N = \Delta F + \lambda \Delta T$$

エネルギーの
不均衡

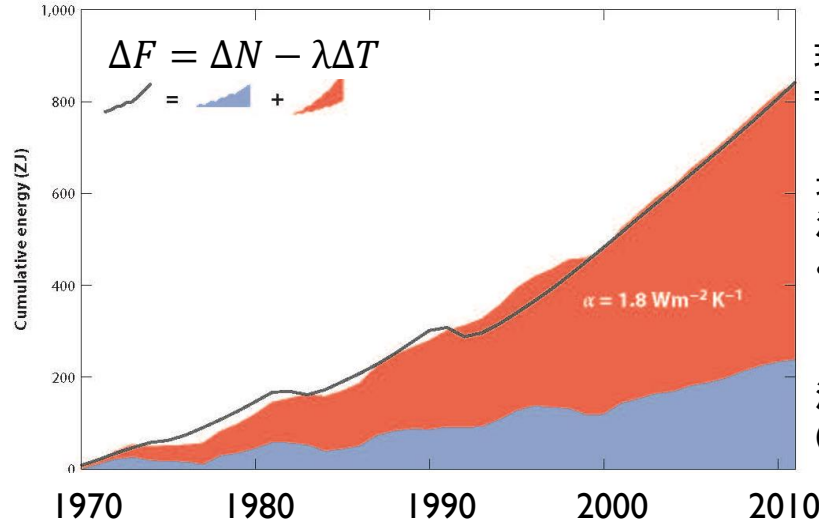
有効放射
強制力(ERF)

気候フィードバック

$$\left(\frac{d}{dt} \Delta H \equiv \Delta N \right)$$

海洋蓄熱量変化

累積エネルギー(ZJ)



現在の放射強制 $\sim 2.5 \text{ Wm}^{-2}$
= 平衡時の昇温 $\sim 1.9^\circ\text{C}$

地球表面が
温暖化 ($\sim 1.2^\circ\text{C}$) したこと
によるフィードバック

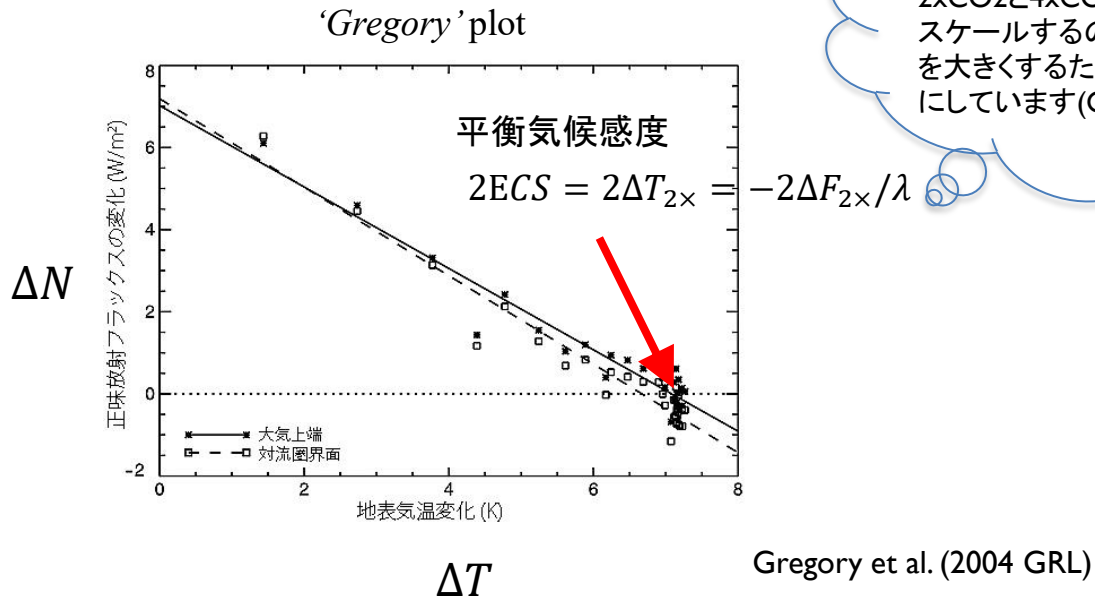
海洋への熱の蓄積
($\sim 0.7^\circ\text{C}$)

平衡気候感度

Equilibrium Climate Sensitivity (ECS)

4xCO₂時($\Delta F = 2\Delta F_{2\times}$)の全球気温応答

2xCO₂と4xCO₂は線形にスケールするので、S/N比を大きくするために4xCO₂にしています(CMIP5以来)

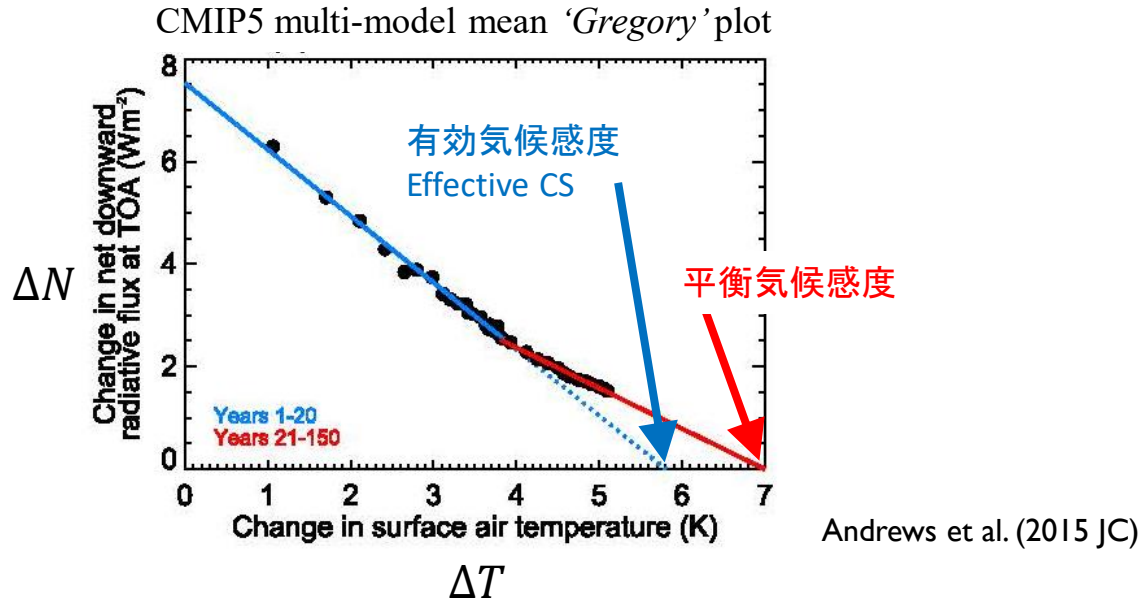


CMIP abrupt4xCO₂実験(150年)から、回帰直線でECSが分かる！

平衡気候感度

Equilibrium Climate Sensitivity (ECS)

実際には一



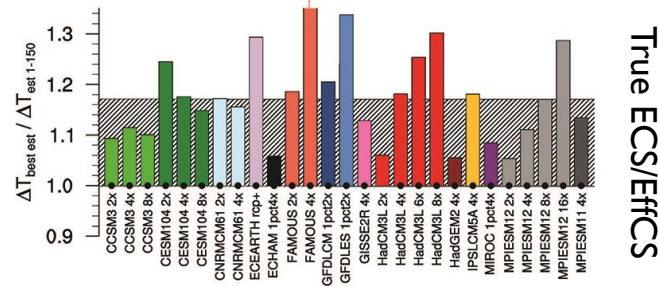
後半では、海洋熱吸収が弱まるために昇温分布が変わり、正の気候フィードバックが強まる('efficacy')

平衡気候感度

Equilibrium Climate Sensitivity (ECS)

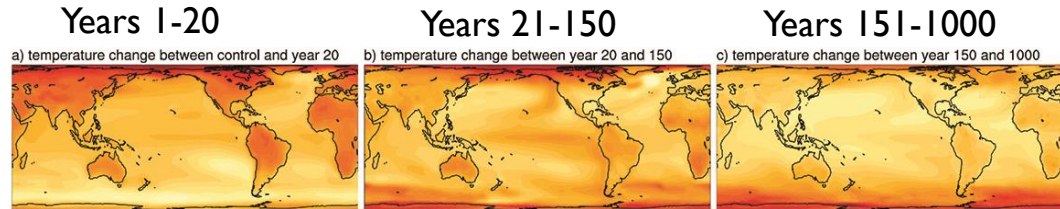
力業でCGCM abrupt4xCO₂を1000年やってみました(LongRunMIP)

Efficacyを無視しているEffective CSは、真のECSを10-20%過小評価



実際的な理由から、Effective CSをECSと呼んでしまうことも多い、デス

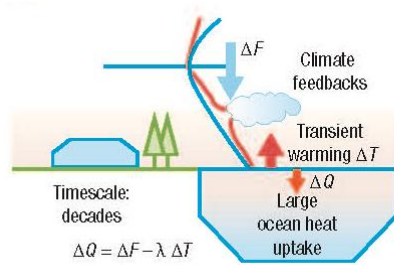
Multi-model mean Δ SAT



CO2倍増で実際に起こることは

CO2倍増直後

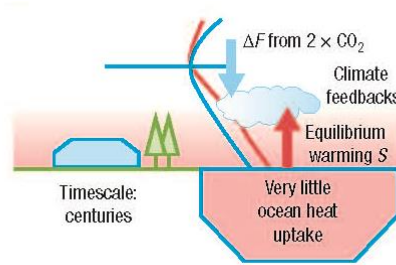
ΔN 大



ΔF が決まる

過渡応答

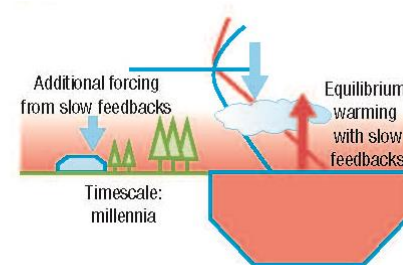
ΔN 小



λ が決まる

平衡応答

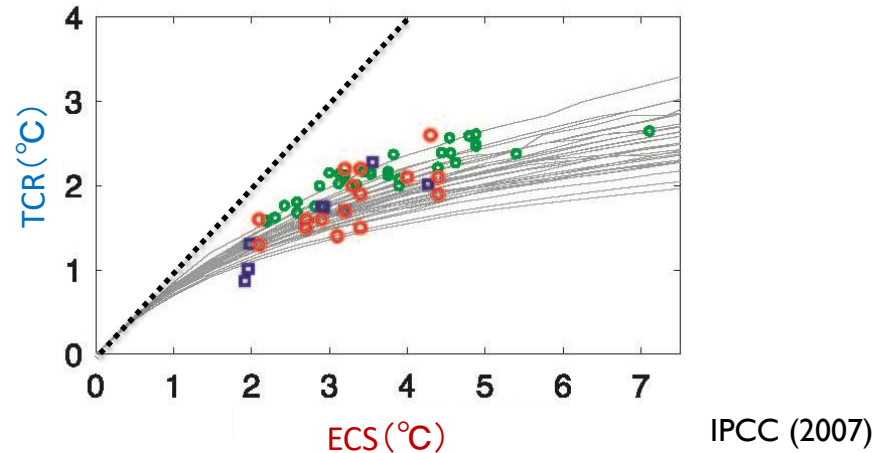
$\Delta N=0$



ECSが決まる

平衡気候感度と過渡気候応答

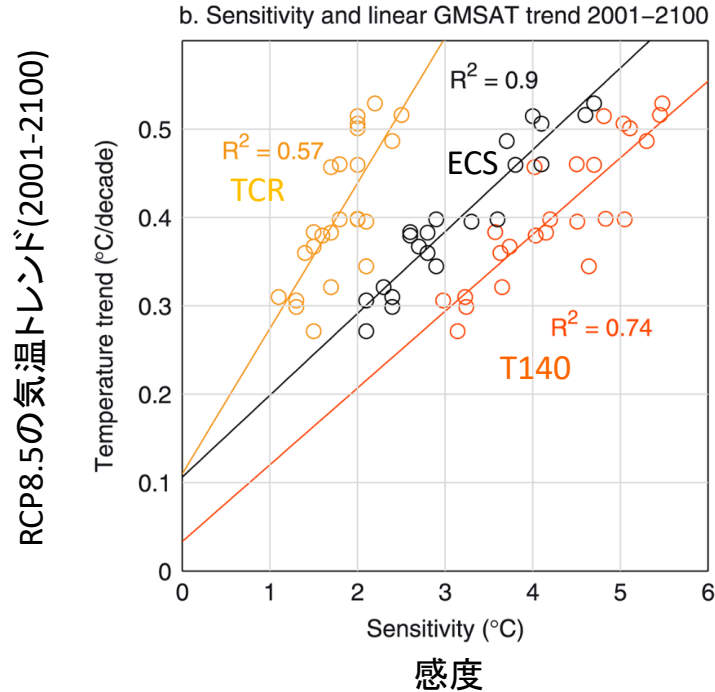
- ・平衡気候感度(equilibrium climate sensitivity; **ECS**)
大気中CO₂濃度を倍(あるいは4倍)にして、気候システムがふたたび平衡化した時の全球地表気温上昇量(の半分)
- ・過渡的気候応答(transient climate response; **TCR**)
大気中CO₂濃度を漸増(1%/年)して、倍になる70年目の全球地表気温上昇量



TCRがECSよりも小さくなるわけ: 海洋熱吸収が地表気温上昇を緩やかにしている

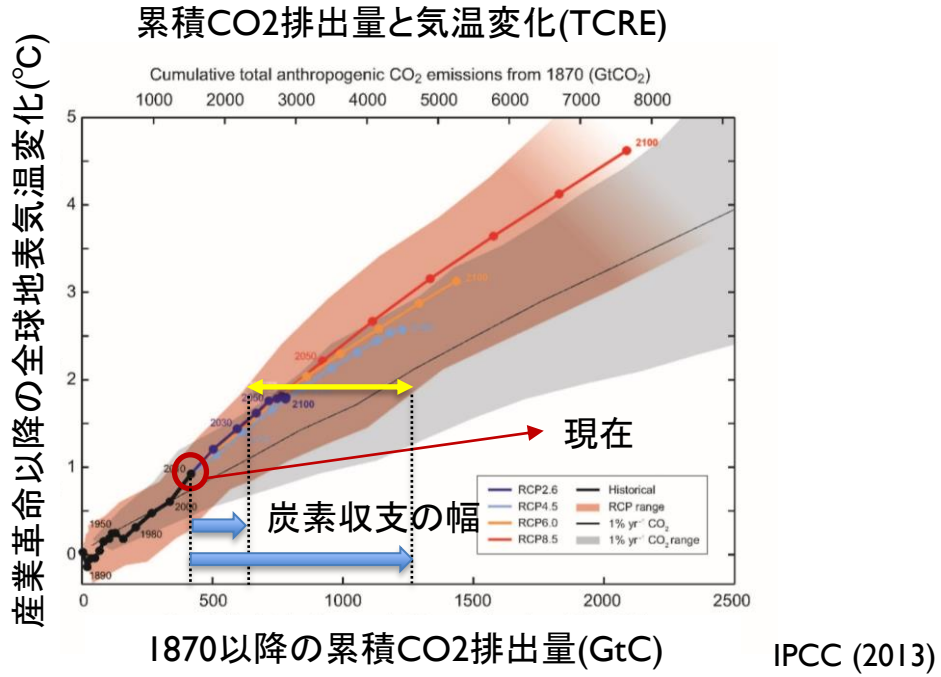
ECS, TCRとシナリオ実験の温暖化

将来の温暖化については、(想定に反して)TCRよりもECSの方がよい指標になる





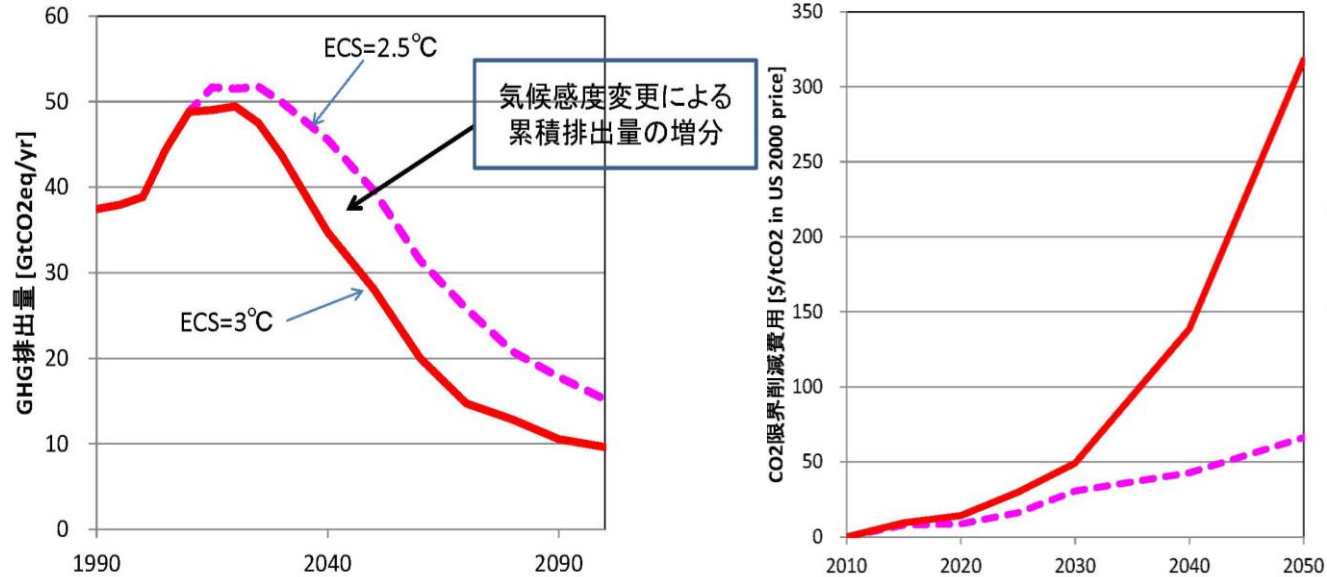
緩和のメトリック



TCREの不確実性に対する最大の要因は、ECSの不確実性

気候感度と緩和コスト

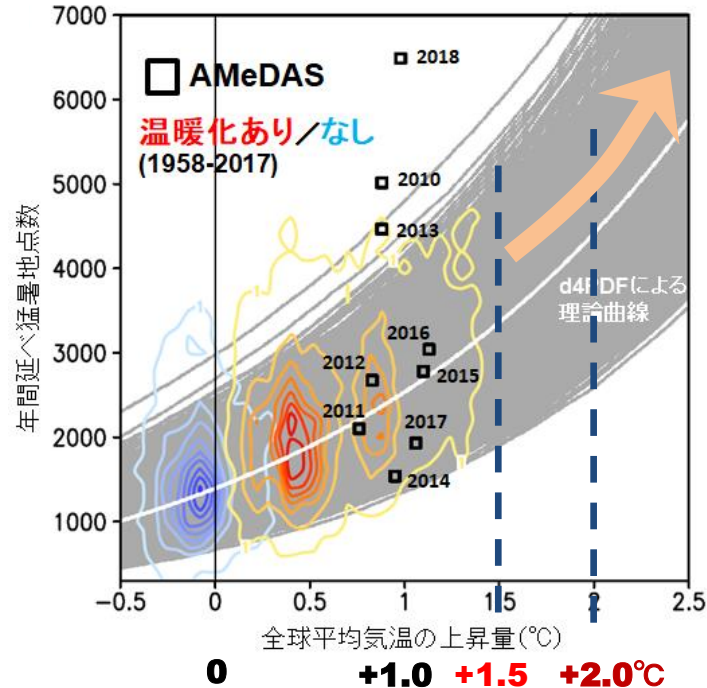
2°C安定化のためのGHG可能排出量とCO2排出削減コスト



全球気温と極端気象

異常気象に対する温暖化の寄与推定(EA)

全球気温上昇と日本の熱波頻度

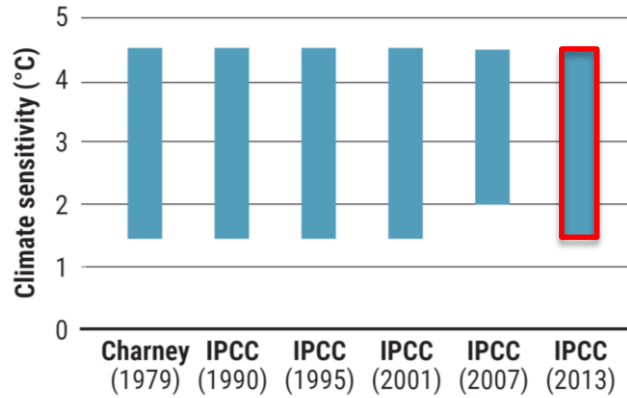




- 気候感度 (ECS) ってなんですか
 - ✓ 大気中CO₂濃度倍増時の全球地表気温上昇量で定義、ただし細かく言うと異なる定義がいくつか（目的による）
- 気候感度の意義は
 - ✓ 過渡応答だけでなく、シナリオ実験の昇温量をよく説明する
 - ✓ ECSが不確実だと、TCREさらには緩和の政策にまで影響する
 - ✓ 過去から将来の全球気温変化で説明可能な範囲で、極端気象などの地域の温暖化の評価にもかかわる
- AR5までの問題

AR5までの問題

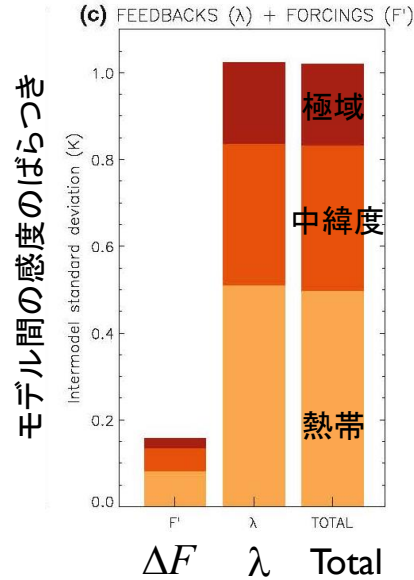
ECS likely range in AR5: 1.5~4.5 °C



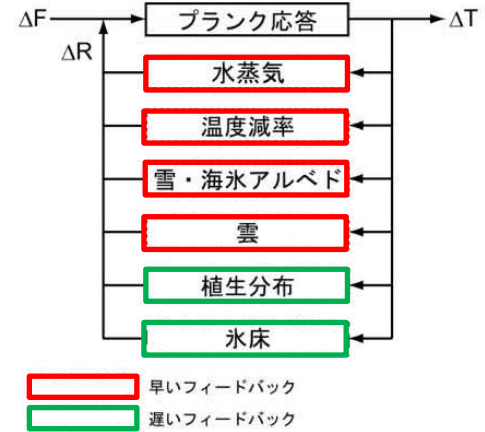
Science, 2020.07.22

CMIP5の感度不確実性要因

$$\lambda = \lambda_p + \sum_i \lambda_i$$



モデル間の感度のばらつき



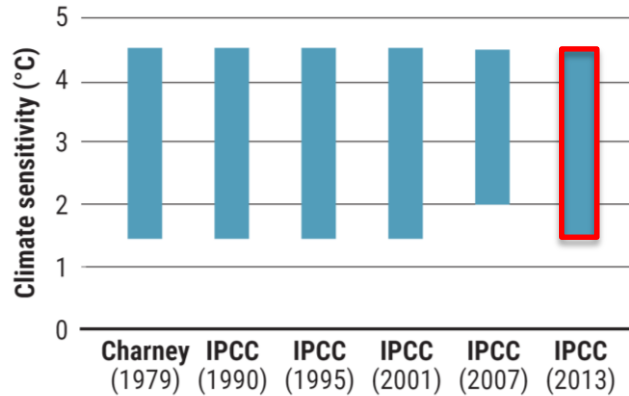
吉森ら (2012)

- 感度の幅は過去40年間、ほとんど変わっていない
- あれ、AR5ではさらに広がったぞ
- CMIP5では、フィードバックの不確実性がECSの幅の8割を説明

Vial et a. (2013 CD)

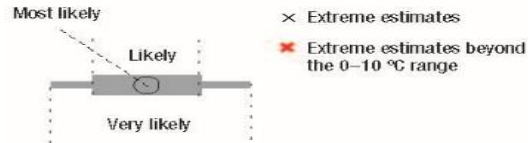
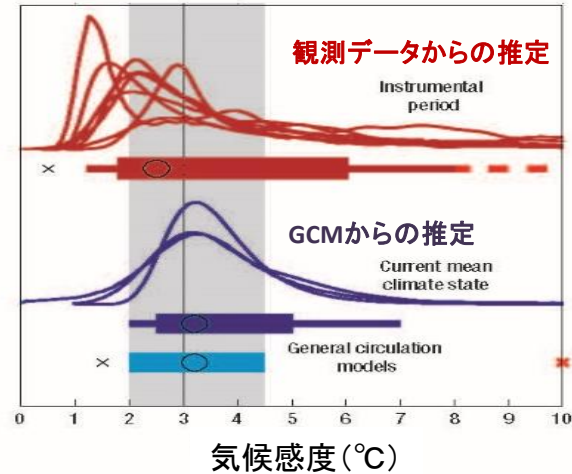
AR5までの問題

ECS likely range in AR5: 1.5~4.5 °C



Science, 2020.07.22

- 感度の幅は過去40年間、ほとんど変わっていない
- あれ、AR5ではさらに広がったぞ
- 観測データからの推定値は、系統的に低くなる



観測データからECSを推定する

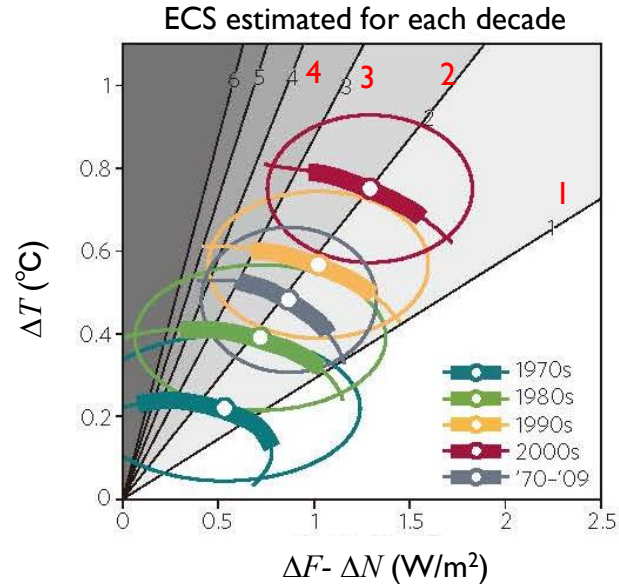
$$\lambda = (\Delta N - \Delta F) / \Delta T$$

より、観測データから右辺を推定すると

$$\begin{aligned} \text{ECS} &= -\frac{\Delta F_{2\times}}{\lambda} \\ &= \frac{\Delta F_{2\times} \Delta T_{obs}}{\Delta F - \Delta N} \end{aligned}$$

- 観測データから推定されるECSが低いことは、懐疑論で(都合よく)利用された
- しかし、観測データの推定(ΔN や ΔF)には大きな誤差がある
- 加えて、上記手法では $\lambda = \text{一定}$ が仮定されている

⇒ efficacyを考えれば、 λ も過去から将来にかけて一定ではないのでは？

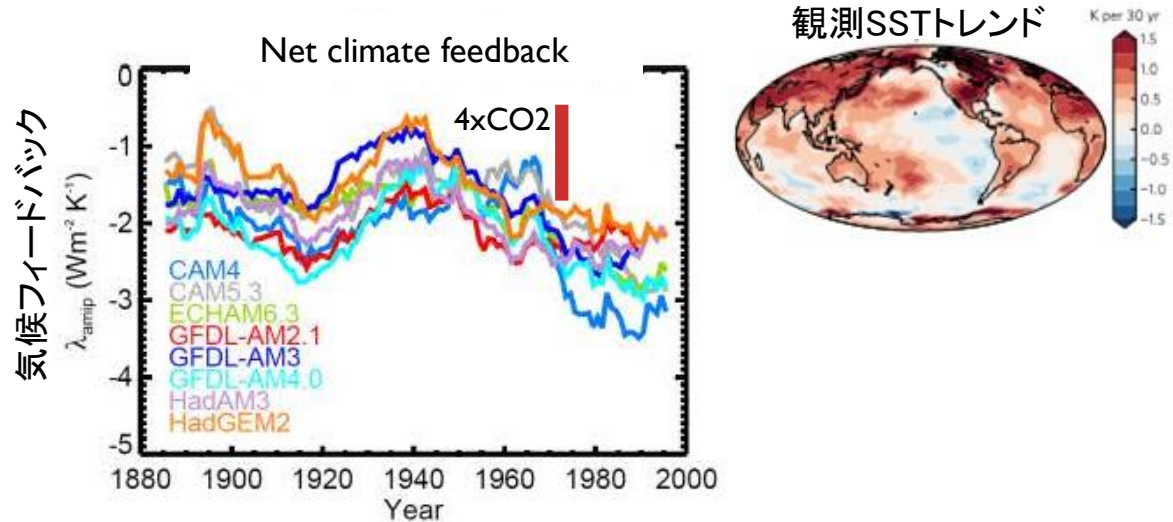


20世紀以降、フィードバックの値は一定ではなかった

過去のフィードバック、どうしたら推定できる？



SSTだけ観測値を与えて、放射強制を一定にすれば($\Delta F=0$)、
AMIPで推定可能 \Rightarrow CFMIP AMIP-piForcing

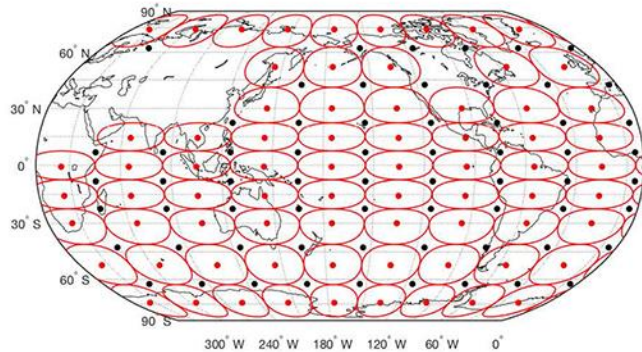


Andrews et al. (2018 GRL), Zhou et al. (2016 Nature Geo)

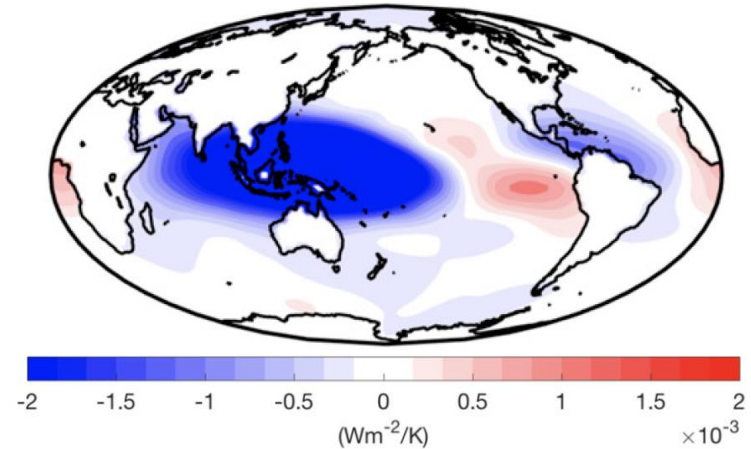
20世紀後半以降、気候フィードバックは4xCO₂実験より系統的に負だった \Rightarrow 低い感度

気候フィードバックはどここのSST変化に敏感か

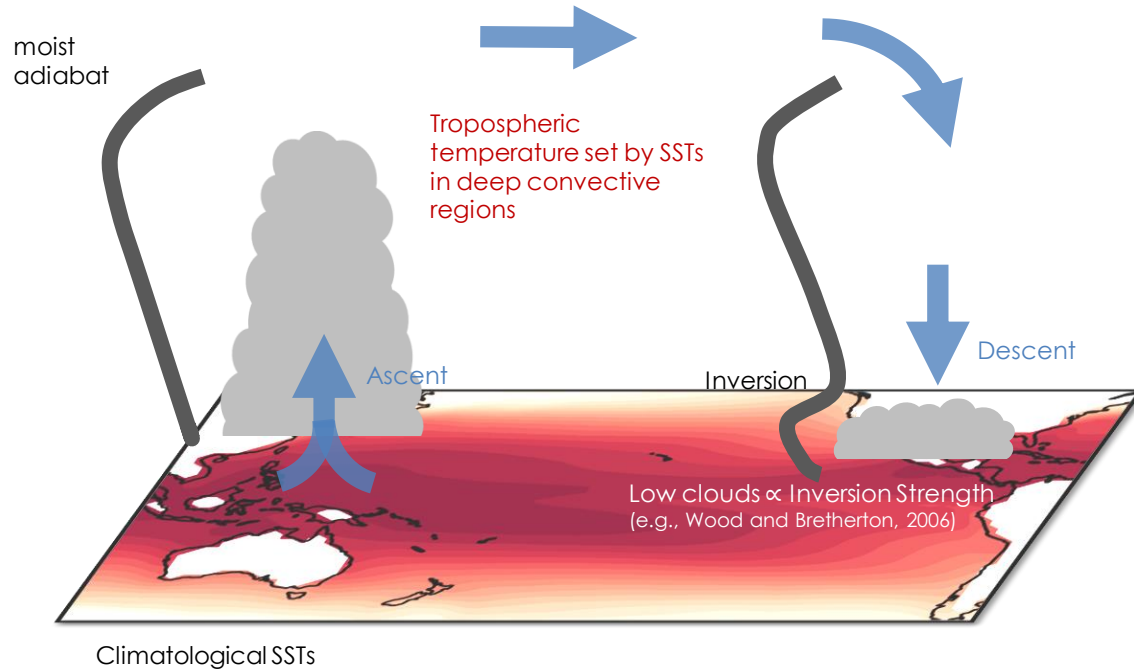
Green's function approach w/ CAM4 AMIP



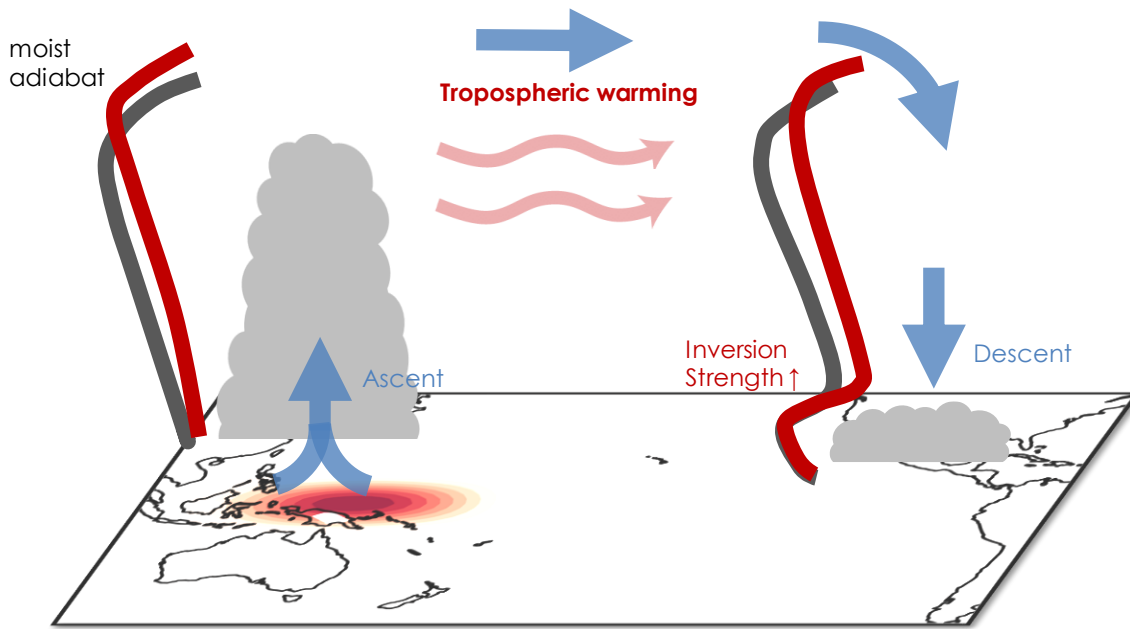
全球気候フィードバックに最も影響する
SST変化パターン(フィードバックがより
正の方向になる場合)



なぜ気候フィードバックはSST昇温パターンに依存するか



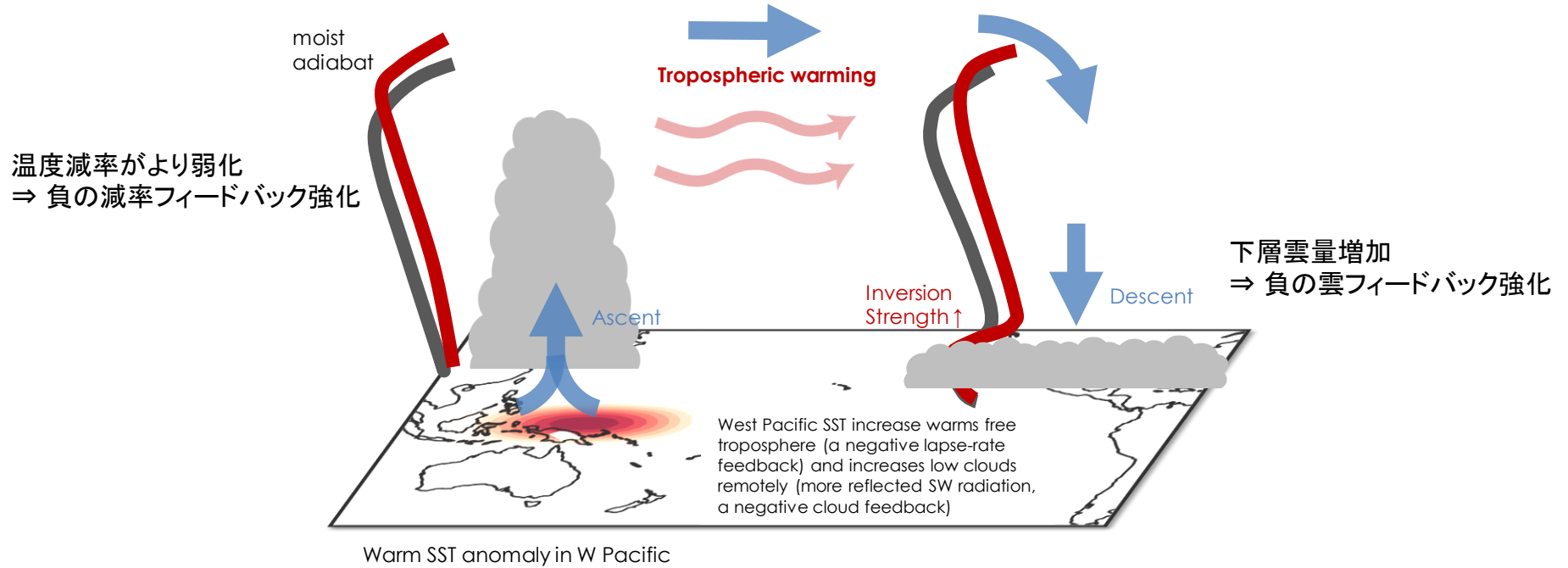
なぜ気候フィードバックはSST昇温パターンに依存するか



Warm SST anomaly in W Pacific

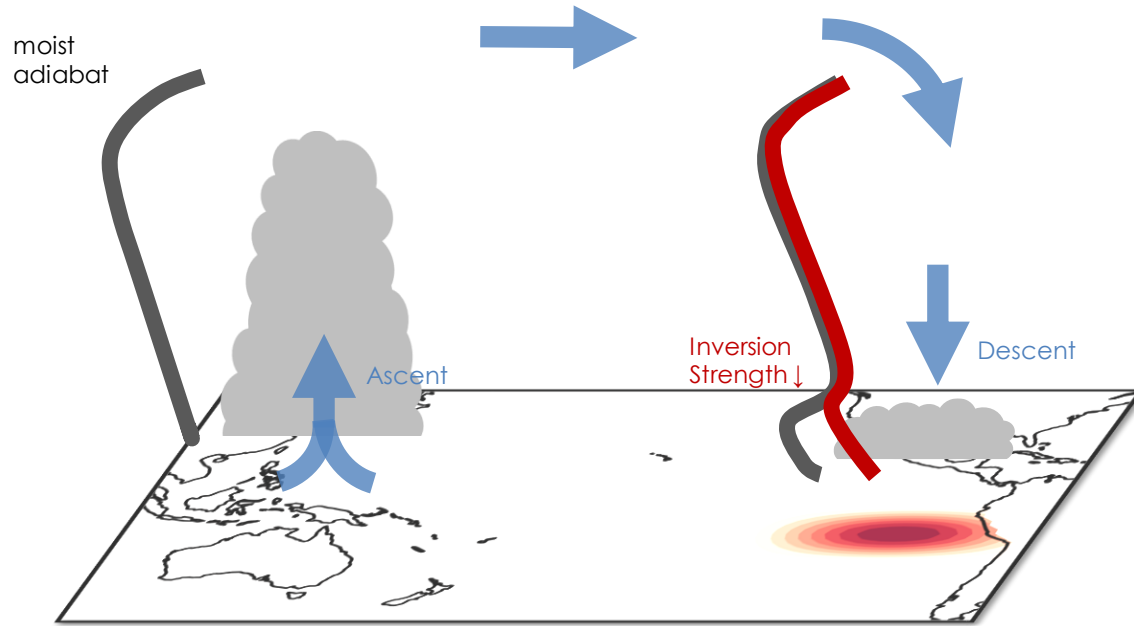
もし西部太平洋がより昇温すると一

なぜ気候フィードバックはSST昇温パターンに依存するか



もし西部太平洋がより昇温すると一

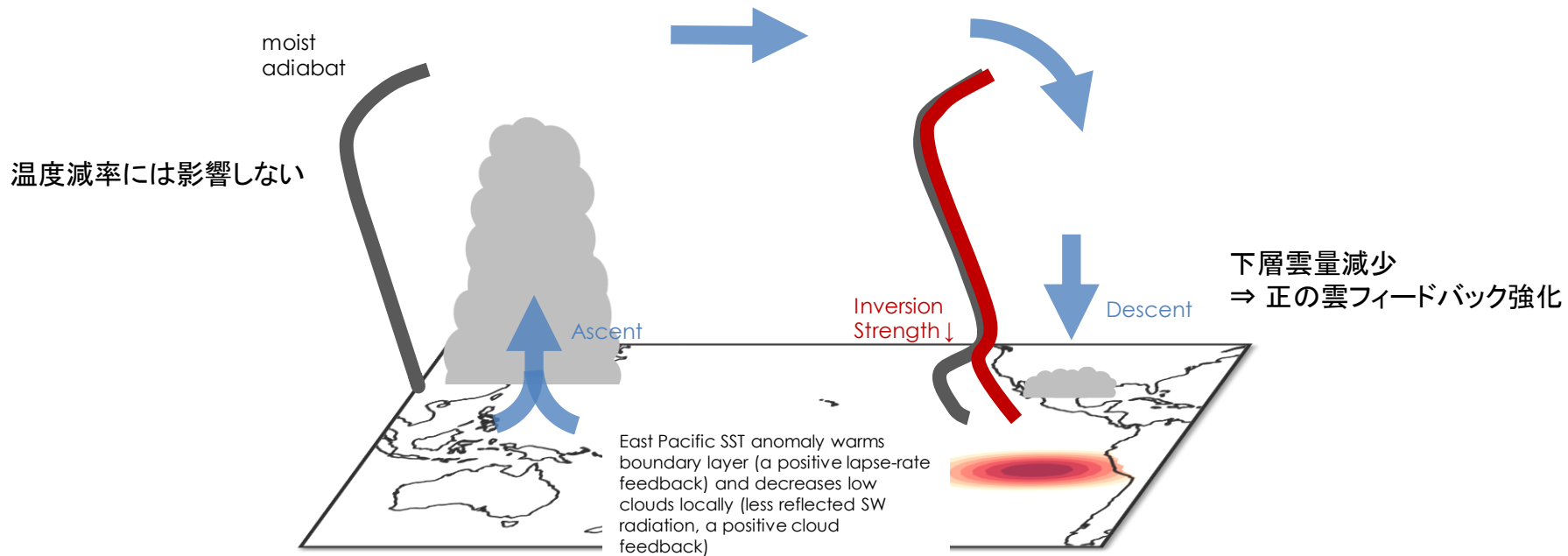
なぜ気候フィードバックはSST昇温パターンに依存するか



Warm SST anomaly in the E Pacific

もし東部太平洋がより昇温するとー

なぜ気候フィードバックはSST昇温パターンに依存するか



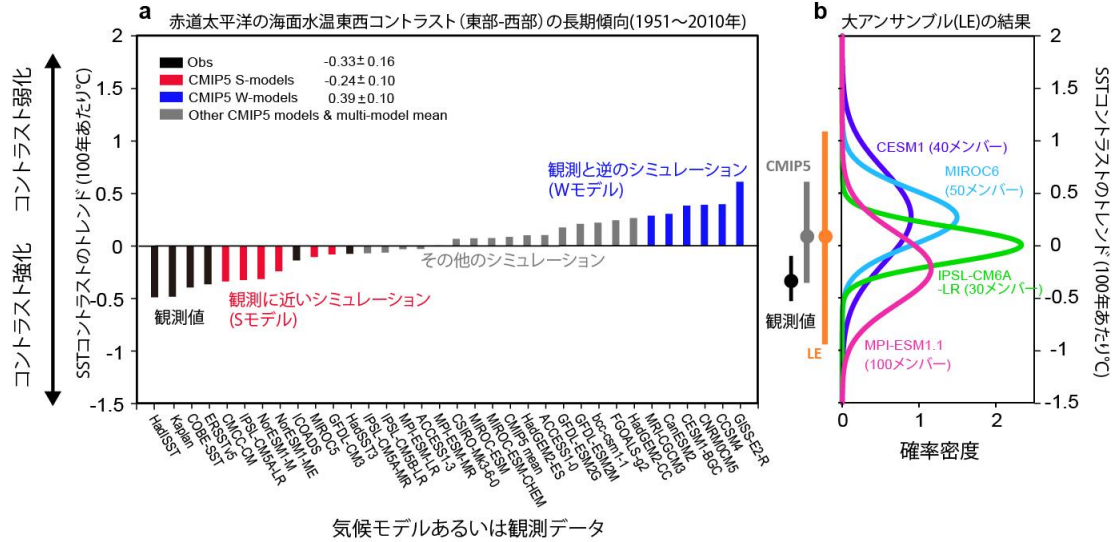
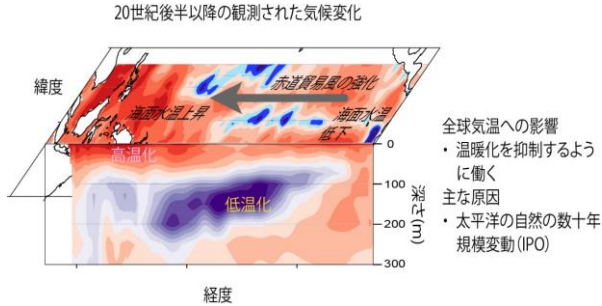
Warm SST anomaly in the E Pacific

もし東部太平洋がより昇温するとー

過去の熱帯太平洋SSTパターン変化

- 大気循環に重要なのはSST勾配—過去60年、熱帯太平洋のSST勾配は強化している(含 Hiatus)
- CMIPモデル群は観測の変化を再現できていない？

赤道太平洋SST勾配のトレンド(1951-2010)

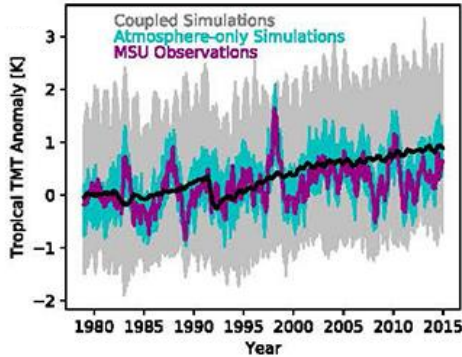


- Large ensembles (220メンバ)を使えば、観測されたSST勾配強化が内部変動として再現可能
- モデルに系統誤差があるという主張(Seager et al. 2019 Nature CC)を否定するものではない

過去の熱帯太平洋SSTパターン変化

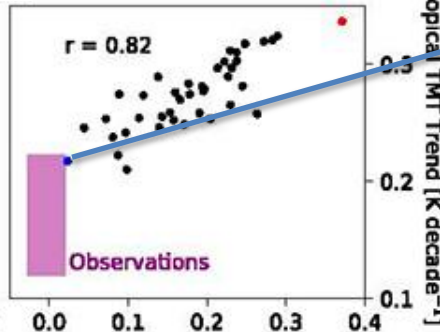
- CMIPモデル群は観測された対流圏気温上昇を過大評価？
- これもSSTパターンの内部変動を考慮すると説明可能

AMIPでは再現できるけどー



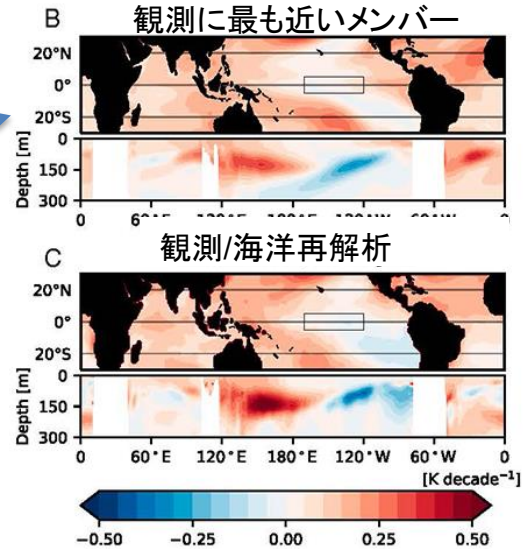
対流圏気温トレンド(1979-2018)

CESMI Large ensemble



Nino3.4 SSTトレンド(1979-2018)

SST・赤道水温トレンド(1979-2018)



Reviews of Geophysics

REVIEW ARTICLE
10.1029/2019RG000678

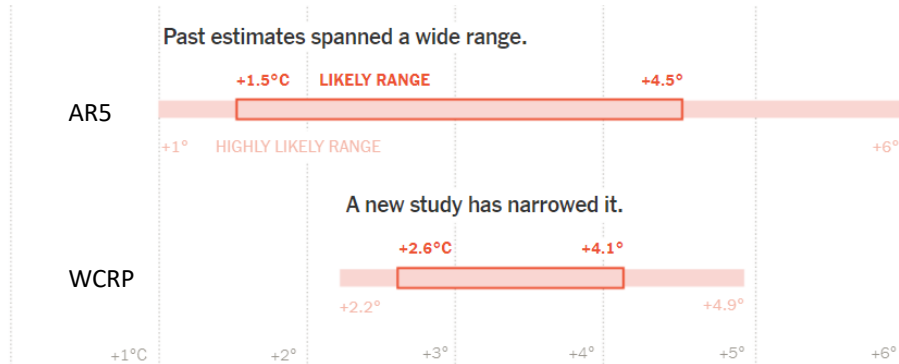
An Assessment of Earth's Climate Sensitivity Using Multiple Lines of Evidence

Key Points:

- We assess evidence relevant to Earth's climate sensitivity: S: feedback process understanding and the historical and paleoclimate records
- All three lines of evidence are difficult to reconcile with $S < 2$ K.

S. C. Sherwood¹ , M. J. Webb² , J. D. Annan³, K. C. Armour⁴ , P. M. Forster⁵ , J. C. Hargreaves³, G. Hegerl⁶ , S. A. Klein⁷ , K. D. Marvel^{8,9}, E. J. Rohling^{10,11} , M. Watanabe¹² , T. Andrews² , P. Braconnot¹³ , C. S. Bretherton⁴ , G. L. Foster¹¹ , Z. Hausfather¹⁴ , A. S. von der Heydt¹⁵ , R. Knutti¹⁶ , T. Mauritsen¹⁷ , J. R. Norris¹⁸, C. Proistosescu¹⁹ , M. Rugenstein²⁰ , G. A. Schmidt⁹ , K. B. Tokarska^{6,16} , and M. D. Zelinka⁷

WCRP Grand Challengeの一環として2016年に開始、誰もこんなにかかると思っていなかった、、、



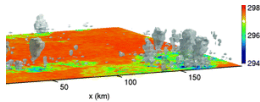
New York Times, 2020.07.22

Section leads meeting @ Edinburgh (2018.08)



Leads
Steve Sherwood and Mark Webb

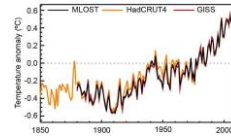
Process Evidence



Steve Klein, Masahiro Watanabe,
Chris Bretherton, Thorsten Mauritsen,
Joel Norris, Mark Zelinka

CO₂ radiative forcing
Feedbacks from climate models, CRM, and LES
Feedbacks from observed variability
Emergent Constraints

Historical Evidence



Piers Forster, Gabi Hegerl, Kate Marvel,
Kyle Armour,
Tim Andrews*, Zeke Hausfather, Maria Rugenstein,
Reto Knutti, Katarzyna Tokarska, Cristi Proistosescu

Historical warming / Historical forcing
Historical ocean heat uptake
SST Pattern effects from climate models

Paleoclimate Evidence

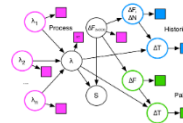


Julia Hargreaves, Eelco Rohling,
James Annan, Pascale Braconnot,
Anna Heydt, Gavin Foster, Gavin Schmidt

Forcing / warming estimates from
Last Glacial Maximum 20 K years BP
Mid-Pliocene Warm Period 4M years BP
Warm/Cold climate state dependence

WCRP Editors
Bjorn Stevens Sandrine Bony

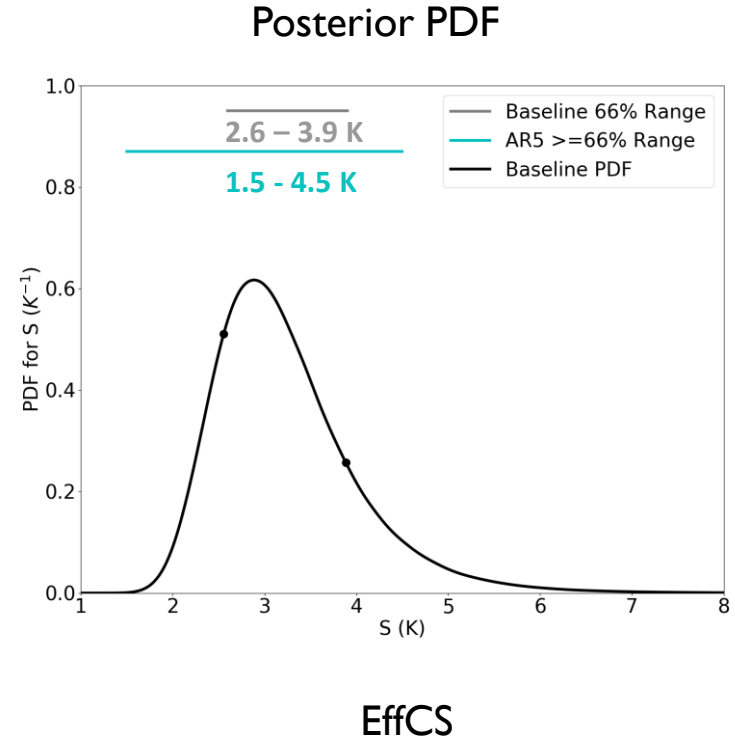
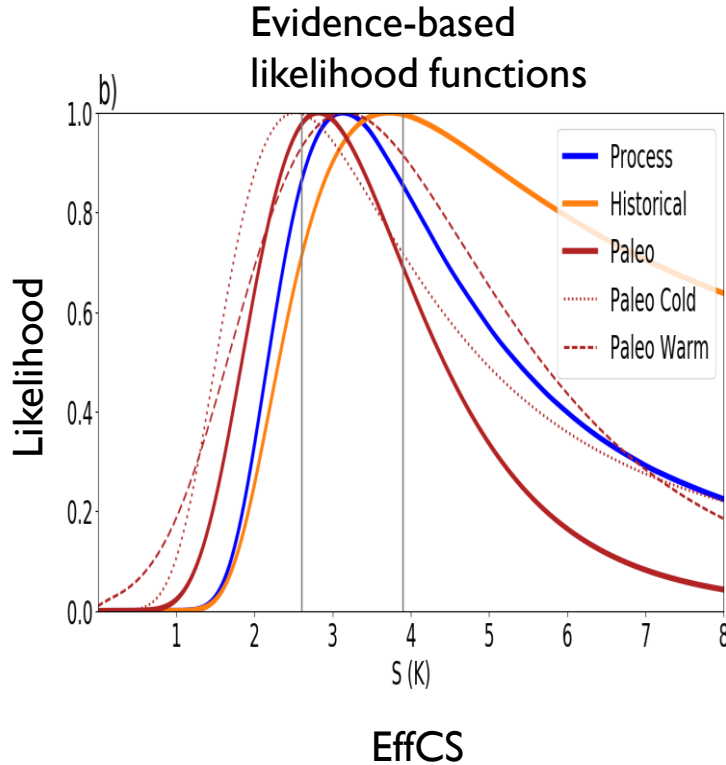
Bayesian Synthesis



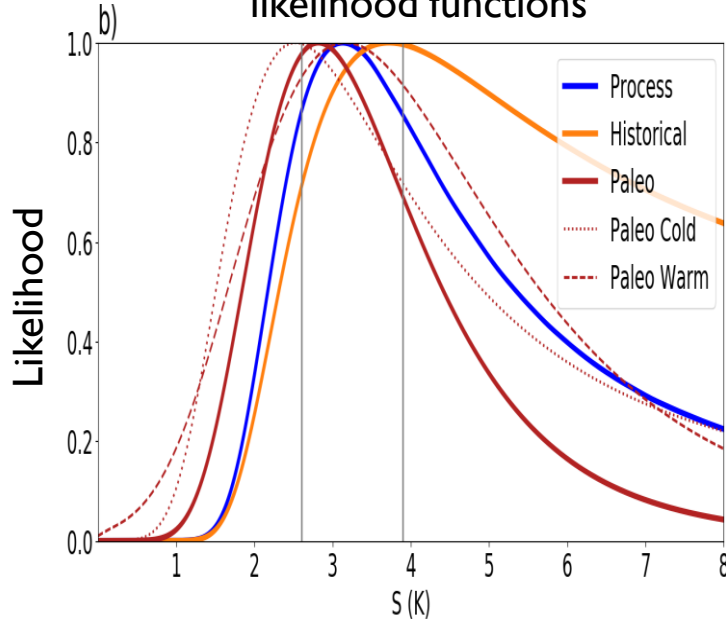
Bayesian Priors
Encoding Evidence as Likelihoods
Robustness Tests (Priors and Evidence)

Robust Ranges for Climate Sensitivity

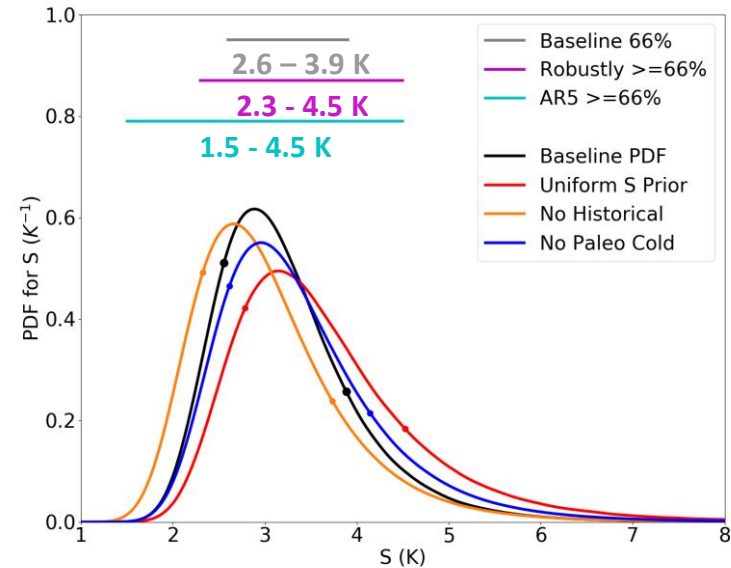
66% and 5-95% ranges for
Effective Climate Sensitivity
Equilibrium Climate Sensitivity
Transient Climate Response



Evidence-based likelihood functions



PDFs after sensitivity test



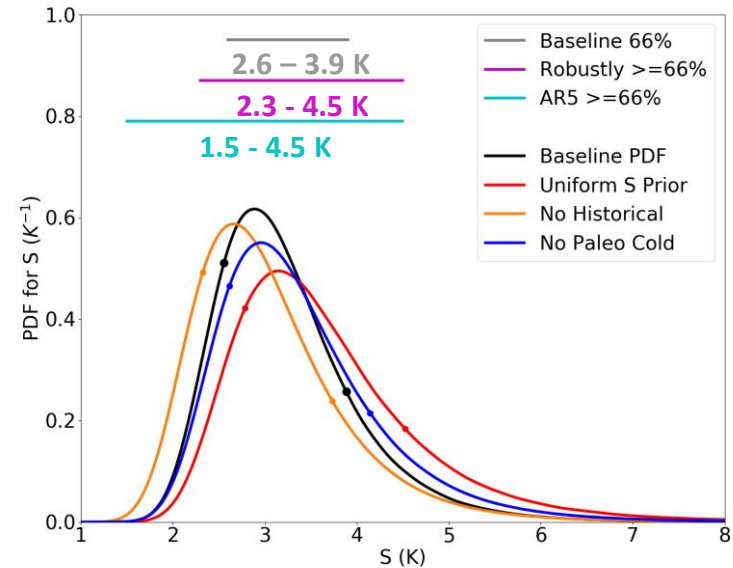
EffCS

EffCS

何がポイントか？

- 複数の証拠を統合することで、不確実性を小さくできる
 - Process evidenceには観測やLESなどの結果も活用
 - Historical evidenceにはパターン効果を考慮
- ⇒ ECSの下限値は明らかに縮まった、しかし上限値はそれほど制約できていない

PDFs after sensitivity test



EffCS

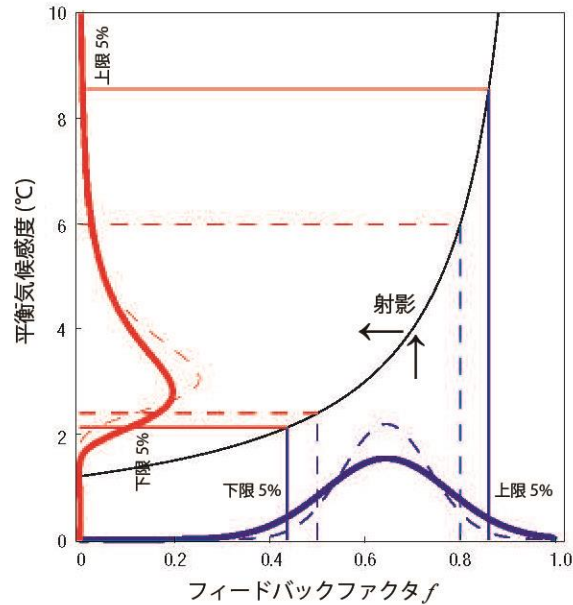
気候感度の上限値を制約するのは難しい

気候フィードバックを感度へ写像

$$f = - \sum_i \lambda_i / \lambda_p$$

$$\Delta T_{2x} = \frac{\Delta T_0}{1 - f}$$

フィードバックの推定が仮に正規分布に従っても、low-probability high sensitivityを却下できない



CMIP6モデルの平衡気候感度

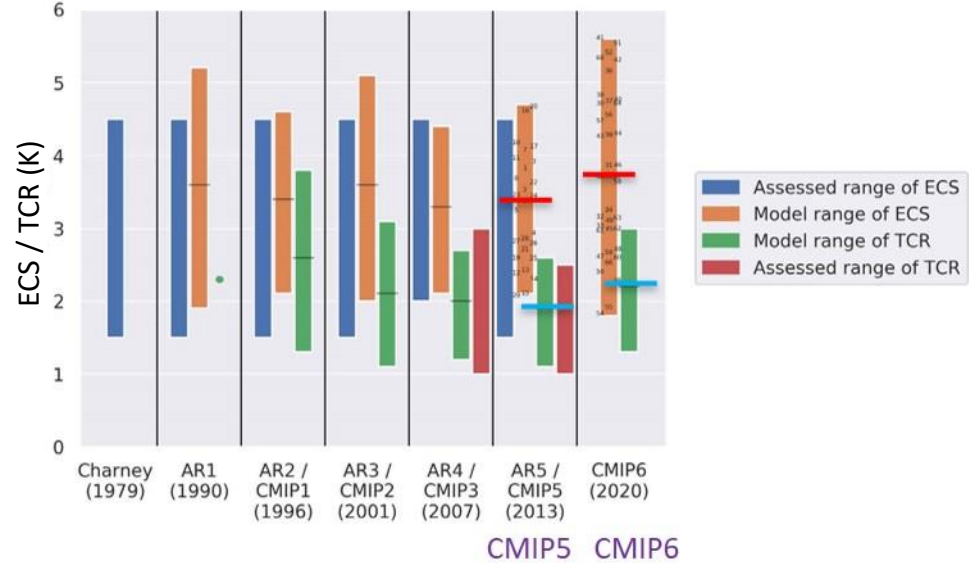
ECS and its range (SD)

CMIP5 3.3 ± 0.7 K

CMIP6 3.9 ± 1.1 K

Zelinka et al. (2020 GRL)

Equilibrium climate sensitivity (gregory method) and transient climate response



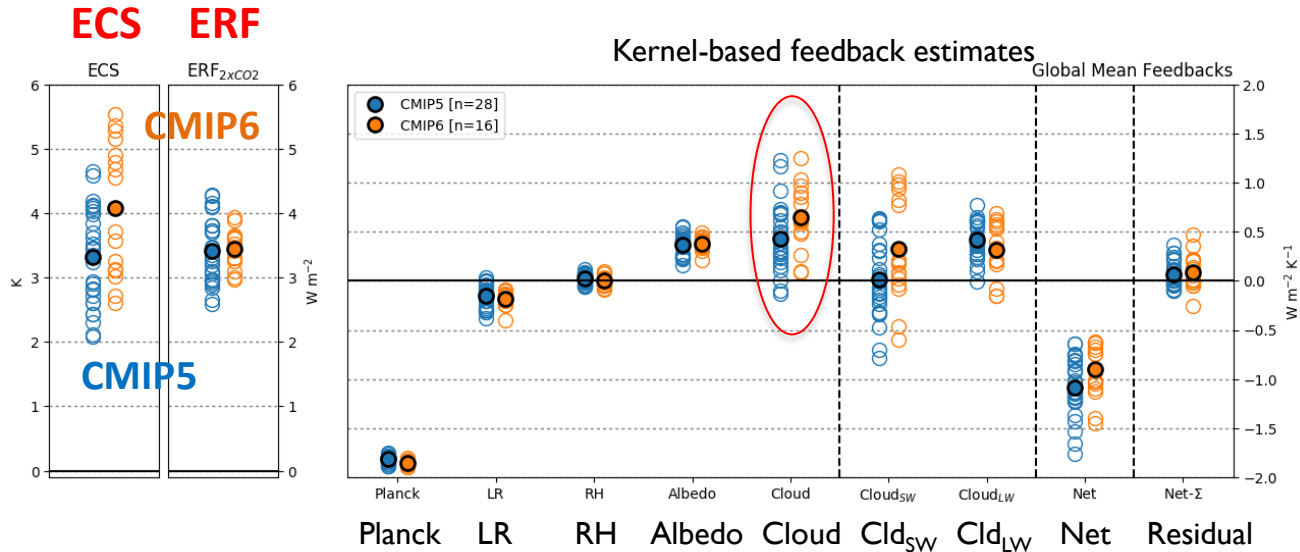
CMIP6感度高いぞ、もしモデルが(期待通り)upgradeしているなら、高い感度のほうがよりlikelyなのか？

あきらめずに地道に調べてみよう

Meehl et al. (2020 Sci Adv)

CMIP6モデルの平衡気候感度

いくつかのCMIP6モデルで感度が高いのは雲短波フィードバックがより正だから



ECS>5K: CESM2, UKESM1, HadGEM3, DOE ES3M

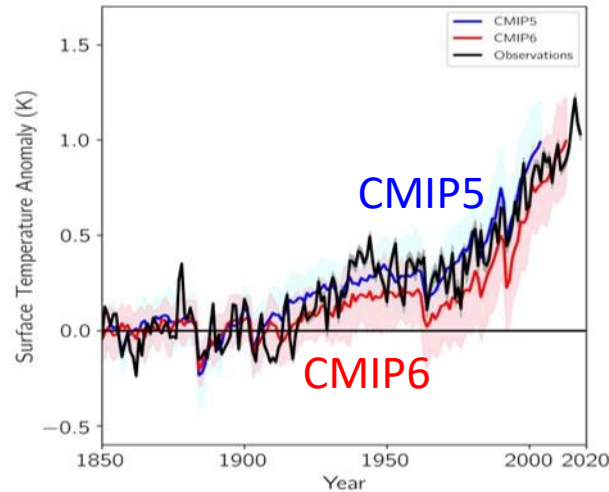
ECS>4.5K: IPSL-CM6A-LR, CESM2-WACCM, CNRM-ESM2, CNRM-CM6

ECS<3K: MIROC6, GISS-E2

Zelinka et al. (2020 GRL)

CMIP6モデルの過去昇温再現性

いくつかのCMIP6モデルでは高緯度混相雲の表現が向上、しかし20世紀全球地表気温 (surface air temperature, SAT)時系列の再現性はCMIP5よりも悪くなった



CMIP6での20世紀後半の変化

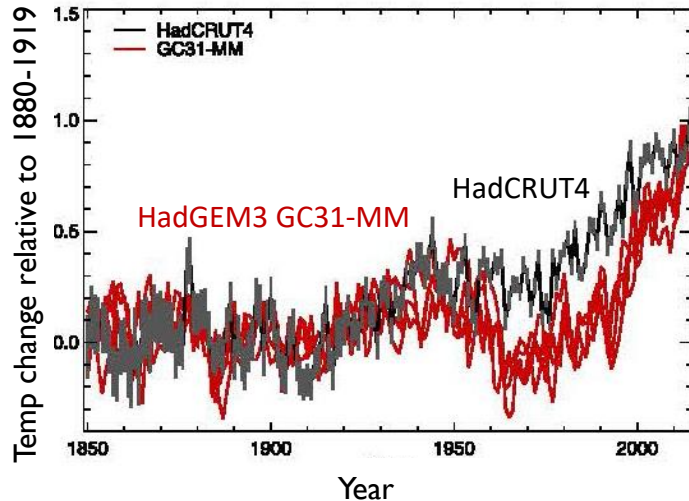
- ・昇温の遅れ (<1970s)
- ・急すぎる昇温 (>1970s)

CMIP6モデルの過去昇温再現： HadGEM3の例 (ECS=5.6°C)

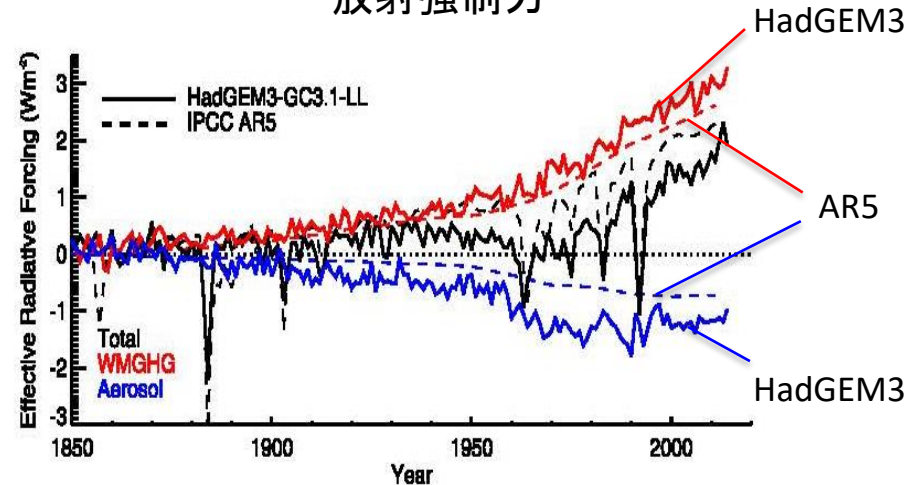
We find that the simulated time evolution of global mean surface temperature broadly follows the observed record but with important quantitative differences which we find are *most likely attributable to strong effective radiative forcing from anthropogenic aerosols and a weak pattern of SST response in the low to middle latitudes to volcanic eruptions*

要は一高い気候感度と強いエアロゾル冷却が部分相殺

全球SAT時系列



放射強制力





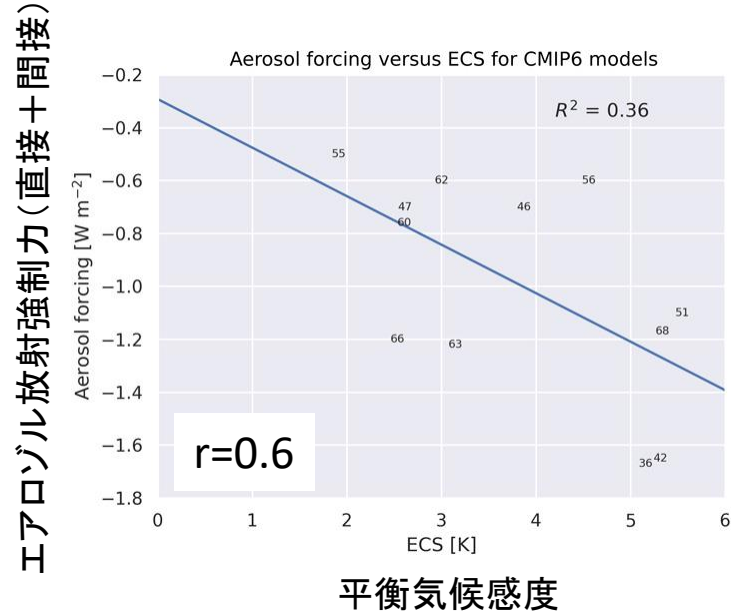
モデル記述論文から見えてきたもの

- プロセスレベルの雲表現や、地域ごと・変動の特徴などは改善
- モデルのECSはプロセス改良の結果として高くなったが、あえてチューンしていない（と思う）
- 20世紀以降の全球SAT変化は、エアロゾル放射強制力を強めることである程度再現できたが、10年規模では高いECSと強い放射冷却がうまく相殺しないので、SAT時系列は観測からのずれが大きい

疑問

- ① 一般に、高感度モデルではECSもエアロゾル放射強制力も過大なのではないか？
- ② 20世紀昇温トレンドから、高感度のlikelihoodが否定（あるいは肯定）できるか？

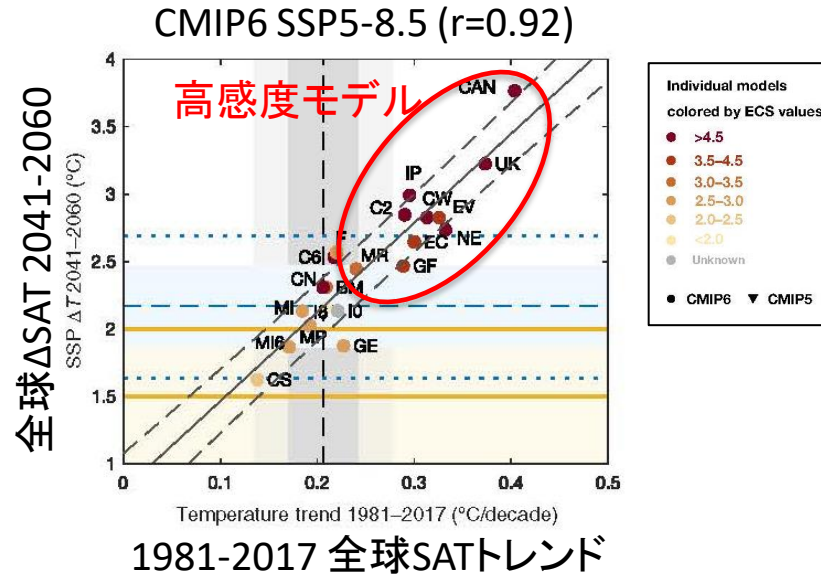
① ありました、そんな結果(でも相関それほどでもない)



Meehl et al. (2020 Sci Adv)

② ありました、そんな結果

The observationally constrained CMIP6 median warming in high emissions and ambitious mitigation scenarios is over 16 and 14% lower by 2050 compared to the raw CMIP6 median, ... *Observationally constrained CMIP6 warming is consistent with previous assessments based on CMIP5 models*



CMIP5でも同様、ECSとの相関も



- 気候感度ってなんですか
- 気候感度の意義は
- AR5までの問題
- WCRP ECS assessment
 - ✓ コミュニティによる評価⇒インパクト大
 - ✓ multiple lines of evidenceに基づき、ECSの不確実性を大きく低減
- CMIP6の気候感度
 - ✓ 一部のモデルは気候感度がAR6 likely range (4.5K)より高い
 - ✓ モデルの雲プロセス（部分）は改良されているが、emergent constraint研究は高感度を支持しない⇒WCRP assessmentと整合的
- 何を気にすべきか



何を気にすべきか

—力学的ダウンスケーリング(DDS)や地域の影響評価にあたって—

- 「温暖化レベル」で整理する分には問題なし（d4PDF的）
- 時間連続的にDDSする場合
 - 境界条件（SST,側面大気場など）が全球気温変化量でスケール可能なら補正して与える？
 - なにもせずそのまま与える？
 - Model selection? model weighting?
- CMIP6で気候感度（あるいは全球気温変化量）とアジア域の気候変化の間にはどの程度関係があるかを解析するのが優先
 - 高感度の主要因が南大洋雲フィードバックとすれば、あまり気にしなくてもよいかも？