



The Canon Institute for Global Studies

CIGS Working Paper Series No. 26-021J

気候モデルは自然変動の時間構造を再現しているか

CMIP6年平均全球気温における自己相関・変動振幅・スペクトルの個別モデル検証

杉山 大志（キャノングローバル戦略研究所 研究主幹）

第2版 2026. 9. 10.

※Opinions expressed or implied in the CIGS Working Paper Series are solely those of the author, and do not necessarily represent the views of the CIGS or its sponsor.
※CIGS Working Paper Series is circulated in order to stimulate lively discussion and comments.
※Copyright belongs to the author(s) of each paper unless stated otherwise.

General Incorporated Foundation

The Canon Institute for Global Studies

一般財団法人 キャノングローバル戦略研究所

Phone: +81-3-6213-0550 <https://cigs.canon/>

気候モデルは自然変動の 時間構造を再現しているか

CMIP6 年平均全球気温における
自己相関・変動振幅・スペクトルの個別モデル検証

第2版 2026 年 9 月 10 日

杉山 大志

キャノングローバル戦略研究所

目次

要旨	3
1 問題設定	4
2 揺動応答関係と自然変動の検証	5
2.1 自然変動と強制応答	5
2.2 必要条件としての時間構造	5
2.3 イベントアトリビューションとの関係	6
3 先行研究	6
4 データと方法	7
4.1 データと前処理	7
4.2 指標	8
4.3 観測幅基準	8
4.4 ラン持続性と観測幅感度	9
4.5 判定語の意味	9
5 結果	10
5.1 観測範囲を外れるモデル数	10
5.2 年平均時系列に現れる振幅と持続性の違い	11
5.3 自己相関関数	15
5.4 時間スケール別変動振幅	16
5.5 AR(4)スペクトル	17
5.6 観測からのずれの方向とモデル間の広がり	18
5.7 モデル別の不一致	20
5.8 不一致は同じモデルの複数ランで繰り返される	21
5.9 観測幅を広げた感度分析	22
6 考察	23
6.1 単純な比較が示す重大な不一致	23
6.2 ラン間の広がりもモデルの検証対象である	23
6.3 揺動応答原理への含意	24
6.4 イベントアトリビューションへの含意	24
6.5 限界	25
7 結論	25
付録 A 58 モデルの代表曲線が観測幅を外れる割合	27
付録 B 全ランにおける不一致の持続率	29
付録 C 指標点別の観測幅とモデル数	32
付録 D 計算仕様	34
付録 E 揺動応答原理について	35
参考文献	37

要旨

気候モデルが外力に対する気温の応答を正しく計算するためには、外力を加えなくても生じる自然変動を現実的に再現できなければならない。とりわけ、ある年の高温・低温がその後何年残るか、変動の大きさが時間平均によってどのように減るか、どの周期帯の変動が強いのかという時間構造が重要である。本稿は、第 6 期結合モデル相互比較計画(Coupled Model Intercomparison Project Phase 6: CMIP6)の過去再現実験(historical experiment)318 ラン・58 モデルと、5 種類の観測気温系列を用い、個々のモデルが 1880~2014 年の年平均全球気温の自然変動を再現しているかを検証する。ここでランとは、同じモデルを異なる初期値で計算した 1 回のシミュレーションをいう。

自然変動を測る指標には、自己相関関数(autocorrelation function: ACF)のラグ 1~20 年、1・5・10・20 年平均の標準偏差、4 次自己回帰モデル(autoregressive model of order 4: AR(4))から推定した正規化スペクトル 32 点、および 13 点の統合指標を用いる。同じモデルの全ランについて指標点ごとの中央値を取り、それらを結んだ曲線を、そのモデルの「代表曲線」とする。5 観測系列が示す最小値から最大値までを「観測幅」とし、各モデルの代表曲線がこの範囲を外れる点数を数える。事前に定めた指標点の半数以上が観測幅を外れた場合を、主たる不一致判定とする。これは仮説検定ではなく、モデルと観測の差がどの程度広範に現れるかを示す単純な診断である。

すべての指標点が入ったモデルは、自己相関関数で 0/58、変動振幅で 10/58、AR(4)スペクトルで 0/58、統合指標で 0/58 であった。反対に、指標点の半数以上が観測幅を外れたモデルは、それぞれ 53/58、36/58、57/58、42/58 である。58 モデルと各指標点の組み合わせをすべて数えると、観測幅を外れたのは、自己相関関数 804/1,160、変動振幅 133/232、スペクトル 1,476/1,856、統合指標 494/754 であった。

各モデルに含まれるランの過半数で、指標点の半数以上が観測幅を外れたモデルは、自己相関関数 56/58、変動振幅 43/58、スペクトル 58/58、統合指標 54/58 である。さらに、観測幅を上下それぞれ 2 倍に広げても、同じ不一致判定となるモデルが、自己相関関数 33、変動振幅 17、スペクトル 39、統合指標 24 残った。

自己相関、変動振幅、スペクトルは、自然変動と外力に対する応答を結び付ける揺動応答関係の基礎となる統計量である。また、イベントアトリビューションで計算する事象の発生確率や確率比も、モデル内の自然変動の大きさ、極端な値の現れ方、持続性、地域間の相関に左右される。本稿で検討した年平均全球気温の自己相関、変動振幅、スペクトル構造に照らすと、CMIP6 モデルの大半は、自然変動を適切に表現しているとは言い難い。したがって、強制応答の計算にもイベントアトリビューションにも、使用する個々のモデルが観測された自然変動を再現しているかを事前に確かめる必要がある。

1 問題設定

気候モデルの検証は、平均気温や長期的な上昇傾向が観測と合うかどうかだけでは不十分である。外力による変化を除いた後に残る自然変動についても、その大きさと時間構造を調べる必要がある。自然変動の振幅、ある年から翌年以降への持続性、数年から数十年の周期別の強さが観測と異なるなら、モデルが表現する熱容量、大気・海洋循環、海洋との熱交換、ランダムな擾乱、フィードバックのいずれかに問題がある可能性がある。自然変動を現実的に再現できることは、個々のモデルに求められる基本的な性能である。

そこで本稿では、個々のモデルが観測された自然変動の時間構造を再現しているかを問う。単一の代表値だけで判断せず、自己相関が時間差とともにどのように弱まるか、1年平均を5年・10年・20年平均にすると変動幅がどのように減るか、変動の強さが周期2～64年の間にどのように配分されているかを調べる。集計の単位はモデルとし、ラン数の多いモデルが結果を過度に左右しないよう、58モデルを等しく1モデルずつ数える。

2 揺動応答関係と自然変動の検証

2.1 自然変動と強制応答

揺動散逸定理 (fluctuation-dissipation theorem: FDT) から導かれる揺動応答関係は、外力を加えていない状態で観測される自然な揺らぎと、外力を加えた後の平均的な応答を結び付ける。直感的には、気候系が自然変動のなかでどのように揺れ、どのくらい長くその状態を保つかを調べれば、弱い外力を受けたときの応答に関する情報が得られるという考え方である。線形の変量系では、複数の状態変数について、時間差 t を置いた共分散行列 $C(t)$ と、同じ時点の共分散行列 $C(0)$ から、外力に対する時間的応答を表す演算子 $R(t)$ を概念的に次式で表す。

$$R(t) = C(t) C(0)^{-1}$$

実際の気候系は完全な線形系ではなく、変動の確率分布も正規分布とは限らない。また、応答は気候の状態や外力の空間分布にも依存する。それでも、モデルが観測された共分散やその時間的な減衰を再現できなければ、その自然変動から導かれる応答演算子を信頼する根拠は弱くなる。したがって揺動応答関係は、自然変動の再現性と、外力に対する応答の物理的一貫性を結び付ける診断原理になる。

2.2 必要条件としての時間構造

応答演算子に関係するのは、隣り合う2年の相関、すなわちラグ1の自己相関だけではない。1年、2年、5年、10年、20年と時間差を広げたときに相関がどう弱まるか、変動の絶対的な大きさがどれほどか、どの周期帯に変動が多いか、さらに変数間・地域間の変動がどのように連動するかが関係する。

したがってラグ 1 が観測と一致しても、5 年・10 年・20 年の持続性や、数十年規模の変動の強さまで一致するとは限らない。本稿では、年平均全球気温について、自己相関関数、時間尺度別の変動振幅、スペクトル構造を検証する。これらが観測と合わなければ、強制応答の信頼性を疑う理由になる。なお付言すると、これらが一致したとしても、それだけでは強制応答の正しさが証明されるわけではない。

2.3 イベントアトリビューションとの関係

確率的イベントアトリビューションは、例えば『人為的な温暖化によって今回の熱波は何倍起こりやすくなったか』を計算する手法である。現在の外力を含む気候条件での発生確率を p_1 、人為的外力を除いた反実仮想の気候条件での発生確率を p_0 とし、両者を比較する。代表的な指標である確率比 (probability ratio: PR) と寄与リスク割合 (fraction of attributable risk: FAR) は次式で定義される。

$$PR = p_1 / p_0, \quad FAR = 1 - p_0 / p_1$$

p_0 と p_1 は、外力によって平均気温などがどれだけ変わるかだけで決まるのではない。自然変動の大きさ、極端な値が現れる確率分布の裾、暑さや乾燥が何日・何年続くか、数年から数十年の変動、地域間の相関にも左右される。モデルの自然変動が観測と異なれば、稀な事象が平均して何年に 1 回起こるかという再現期間、継続事象の発生確率、統計的に独立とみなせる標本数、PR、FAR が系統的に偏る可能性がある。したがって、自然変動の再現性は、イベントアトリビューションに使用するモデルの適格性を判断するうえでも必要条件となる。

3 先行研究

Cox et al.(2018) は、第 5 期結合モデル相互比較計画 (CMIP5) のモデル間で、気温変動の指標と平衡気候感度 (equilibrium climate sensitivity: ECS) の関係を示し、観測された自然変動から ECS を制約した (<https://doi.org/10.1038/nature25450>)。この研究は、自然変動統計が強制応答に関する情報を持ち得ることを示した。

Williamson et al.(2024) は CMIP6 を用いて、この創発制約が成り立つための前提を検証した。その結果、自然変動を駆動する実効的なランダム擾乱の強さがモデルごとに異なることなどが、気温変動指標と ECS の関係を左右すると示した (<https://doi.org/10.5194/esd-15-829-2024>)。本稿では、自然変動統計そのものを個別モデルの性能指標として用いる。

Craigmile and Guttorp(2023) は 5 観測系列を統合し、長期トレンドと、AR(4) で表した残差のスペクトルについて、関数全体を同時に覆う 95% 信用帯を構築した (<https://doi.org/10.1029/2022EA002468>)。スペクトル曲線の全体が観測の信用帯に入ったのは、318 ラン中 69 ランであった。本稿は同じ公開データを使うが、まず各モデルの代表曲線を 5 観測系列の最小値～最大値と点ごとに比べ、範囲を外れた点数を数える。これにより、どの指標のどの部分が観測と異なるかを直接示す。

イベントアトリビューションの標準的な手順は、対象とする極端事象をモデルが適切に再現できるか、事前に検証するよう求めている。Philip et al.(2020)は、平均的な気候特性、極値の統計、事象を生み出す物理過程を検証項目として挙げた。また、モデルが自然変動を過大に表現したため、正式なアトリビューションを実施できなかった事例も報告している(<https://doi.org/10.5194/ascmo-6-177-2020>)。van Oldenborgh et al.(2021)も、対象事象を生み出す物理過程と変動をモデルが表現できることをアトリビューションの前提としている(<https://doi.org/10.1007/s10584-021-03071-7>)。

4 データと方法

4.1 データと前処理

分析期間は 1880～2014 年の 135 年間である。モデルデータは、CMIP6 の historical 実験から得た年平均・全球平均の地表付近気温 (near-surface air temperature、CMIP 変数名 tas) で、318 ラン・58 モデルを使用する。観測データは Berkeley Earth、HadCRUT5、NOAA GlobalTemp、NASA GISTEMP、Cowtan-Way V2 の 5 系列である。気象庁 (Japan Meteorological Agency: JMA) の系列は期間初期に欠測があるため、主分析には用いない。

火山噴火、温室効果ガス、太陽活動など、複数のモデルと観測に共通して現れる外力起源の変化を、自然変動の持続性として数えないように前処理を行う。まず各モデルについて全ランの平均系列を求め、次に 58 モデルの平均系列を等しい重みで平均して、共通外力の影響を近似する代理系列を作る。この代理系列をすべてのモデルランと 5 観測系列から差し引き、さらに残った系列から 135 年間の直線的な傾向を除く。これは外力による変化と内部変動を完全に分離する方法ではないが、モデルと観測にまったく同じ処理を施すことで比較条件をそろえる。

基礎データと先行研究コード: <https://github.com/petercraigmile/ComparingCMIP6toData>、恒久識別子: <https://doi.org/10.5281/zenodo.8347096>

4.2 指標

自己相関関数は、ある年の気温偏差と、1 年後、2 年後、…、20 年後の気温偏差がどの程度似ているかを表す。相関がゆっくり低下する系列ほど、自然変動の『記憶』が長い。変動振幅には、1 年値と 5 年・10 年・20 年移動平均の標準偏差を用いる。平均期間を長くしたときに標準偏差がどの程度小さくなるかを見ることで、短期変動と長期変動の配分が分かる。

スペクトルは、気温変動の強さを周期別に分けて示す。本稿では、現在の値を過去 4 年の値から説明する AR(4)モデルを各系列に当てはめ、周期 2～64 年に対応する 32 点でスペクトルを計算する。スペクトル全体の積分を 1 にそろえるため、ここで比較するのは変動の絶対量ではなく、どの周期帯に変動が多く配分されているかである。

領域	指定点	検証する性質
----	-----	--------

領域	指定点	検証する性質
自己相関関数 (ACF)	時間差 1～20 年の 20 点	自然変動が何年持続し、どのように弱まるか
変動振幅	1・5・10・20 年平均の標準偏差 4 点	平均期間を長くしたときの変動幅の減り方と絶対的な大きさ
AR(4)スペクトル	周期 2～64 年の 32 点	短周期から長周期までの相対的な変動配分
統合指標	ACF 7 点 + 変動振幅 4 点 + 周期帯比 2 点	持続性・振幅・周期配分を合わせた 13 点の診断

4.3 観測幅基準

比較の考え方は以下のとおりである。各指標点について、5 観測系列の最小値を下限 L 、中央値を O 、最大値を上限 U とする。例えばラグ 5 年の自己相関なら、5 観測系列が示す最小値～最大値が、その点の観測幅になる。モデルについては、同じモデルの全ランから各指標点の中央値を求め、これらをつないだ代表曲線を作る。代表曲線の値が観測幅より小さいか大きい場合、その点を『観測幅外』と数える。

以下の式では、モデル m 、指標点 j について、観測幅外なら $I_{mj}=1$ 、観測幅内なら $I_{mj}=0$ とする。 J 個の指標点のうち観測幅外となった割合を q_m と表す。

$$I_{mj} = 1\{f_{mj} < L_j \text{ または } f_{mj} > U_j\}, \quad q_m = (1/J) \sum_j I_{mj}$$

主判定は $q_m \geq 0.5$ 、すなわち、あらかじめ指定した点の半数以上が観測幅を外れるかどうかである。以下ではこれを『代表曲線の多数点不一致』と呼ぶ。ただし 50%だけに結論を依存させず、25%以上、50%以上、75%以上、全点という 4 段階をすべて示す。

4.4 ラン持続性と観測幅感度

代表曲線だけでなく、各ランについても同じ観測幅外の割合を計算する。そして、そのモデルの全ランのうち、指標点の半数以上が観測幅を外れたランの割合を求める。この割合が 50%以上なら、その不一致はモデル内の多数のランで繰り返し現れると判断する。これを『ラン間で持続する不一致』と呼ぶ。

5 観測系列の最小値～最大値は、観測誤差を厳密な確率で表す信頼区間ではない。そこで感度分析として、観測中央値から下限・上限までの距離を上下それぞれ 1.5 倍、2 倍、3 倍に広げる。観測幅をかなり緩くした場合にも、指標点の半数以上が範囲を外れるモデルがどれだけ残るかを調べる。

4.5 判定語の意味

『観測幅』は 5 観測系列の最小値～最大値であり、95%信頼区間ではない。したがって『観測幅外』は仮説検定による棄却ではなく、観測系列間の差を基準にした診断である。

5 結果

5.1 観測範囲を外れるモデル数

表 1 58 モデルの代表曲線が観測幅を外れる割合

指標	点数	全点が 観測幅 内	25%以上 が 観測幅外	50%以上 が 観測幅外	75%以上 が 観測幅外	全点が 観測幅 外	観測幅外の割合 中央値[四分位範囲]
自己相関関数(ACF)ラ グ 1～20 年	20	0/58	58/58	53/58	25/58	2/58	70% [60%–80%]
1・5・10・20 年平均の変 動振幅	4	10/58	48/58	36/58	28/58	21/58	50% [25%–100%]
AR(4)スペクトル 32 点	32	0/58	58/58	57/58	42/58	0/58	84% [69%–91%]
統合指標 13 点	13	0/58	56/58	42/58	24/58	3/58	69% [46%–85%]

注：代表曲線は、各モデルの全ランについて指標点ごとの中央値を取り、それらを結んだもの。『50%以上外』は、指定点の半数以上が観測幅を外れるモデル数を示す。出所：本稿計算。

最も大きな不一致はスペクトルに現れた。58 モデル中 57 モデルで、32 の周期点のうち半数以上が観測幅を外れた。さらに 42 モデルでは、4 分の 3 以上の周期点が観測幅外であった。自己相関関数でも、58 モデル中 53 モデルが、時間差 1～20 年の 20 点のうち半数以上で観測幅を外れた。変動振幅は他の指標より観測と一致しやすいが、それでも 36 モデルが 4 点中 2 点以上、28 モデルが 4 点中 3 点以上で観測幅を外れた。

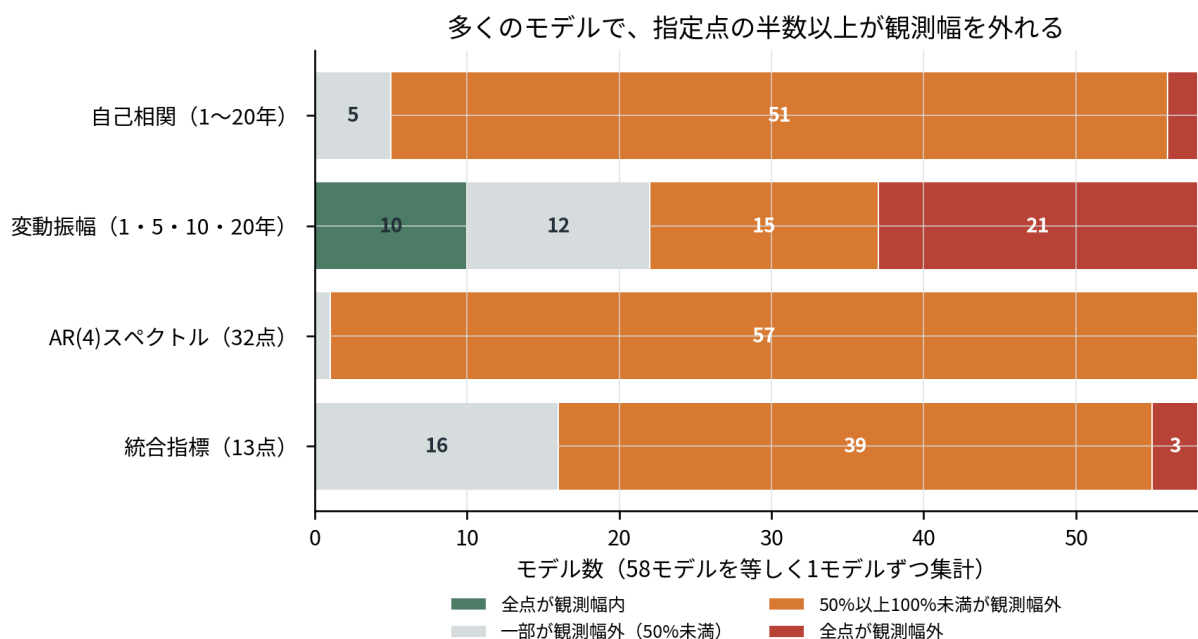


図1 観測幅を外れる指標点の割合による58モデルの分類

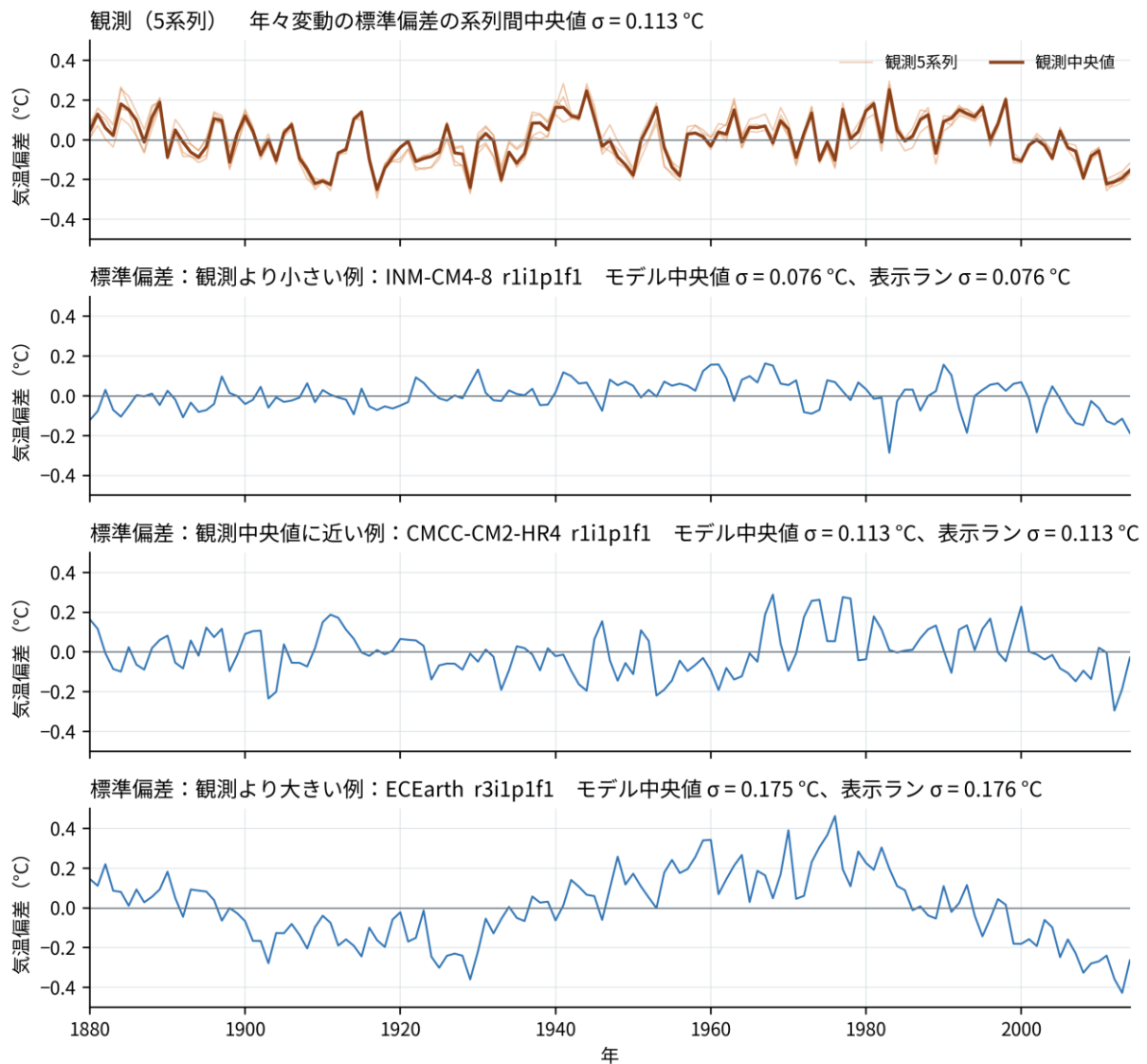
注: 橙色は指定点の50%以上100%未満、赤色は全点が観測幅外。各モデルの代表曲線を評価した。出所: 本稿計算。

5.2 年平均時系列に現れる振幅と持続性の違い

以下では、58モデル全体について指標ごとの比較結果を示す前に、観測とモデルの違いが実際の年平均時系列にどのように現れるかを、図2～図4の具体例によって示す。5.3節以降では、自己相関関数、時間スケール別変動振幅、スペクトル構造を順に検討する。使用する系列は、4.1節で説明した共通外力代理を差し引き、全期間の一次傾向を除いた年平均全球気温残差である。時間方向の平滑化は行っていない。したがって、ここで比較するのは年ごとの山谷の位相ではなく、変動の大きさと、正または負の偏差が年をまたいで持続する性質である。

例示するモデルは、個々のランを直接順位付けして選んだものではない。まず、同じモデルの全ランについて指標の中央値を求め、58モデルのうち、年々変動の標準偏差または1年差自己相関係数について最小のモデル、5観測系列の中央値に最も近いモデル、最大となるモデルの3つを選ぶ。次に、それぞれのモデル内で、モデル中央値に最も近い値を示すランを図示する。この手順により、モデル内の例外的なランではなく、各モデルの代表的なランを比較する。

年平均残差時系列をそのまま比べると、変動振幅の違いが見える



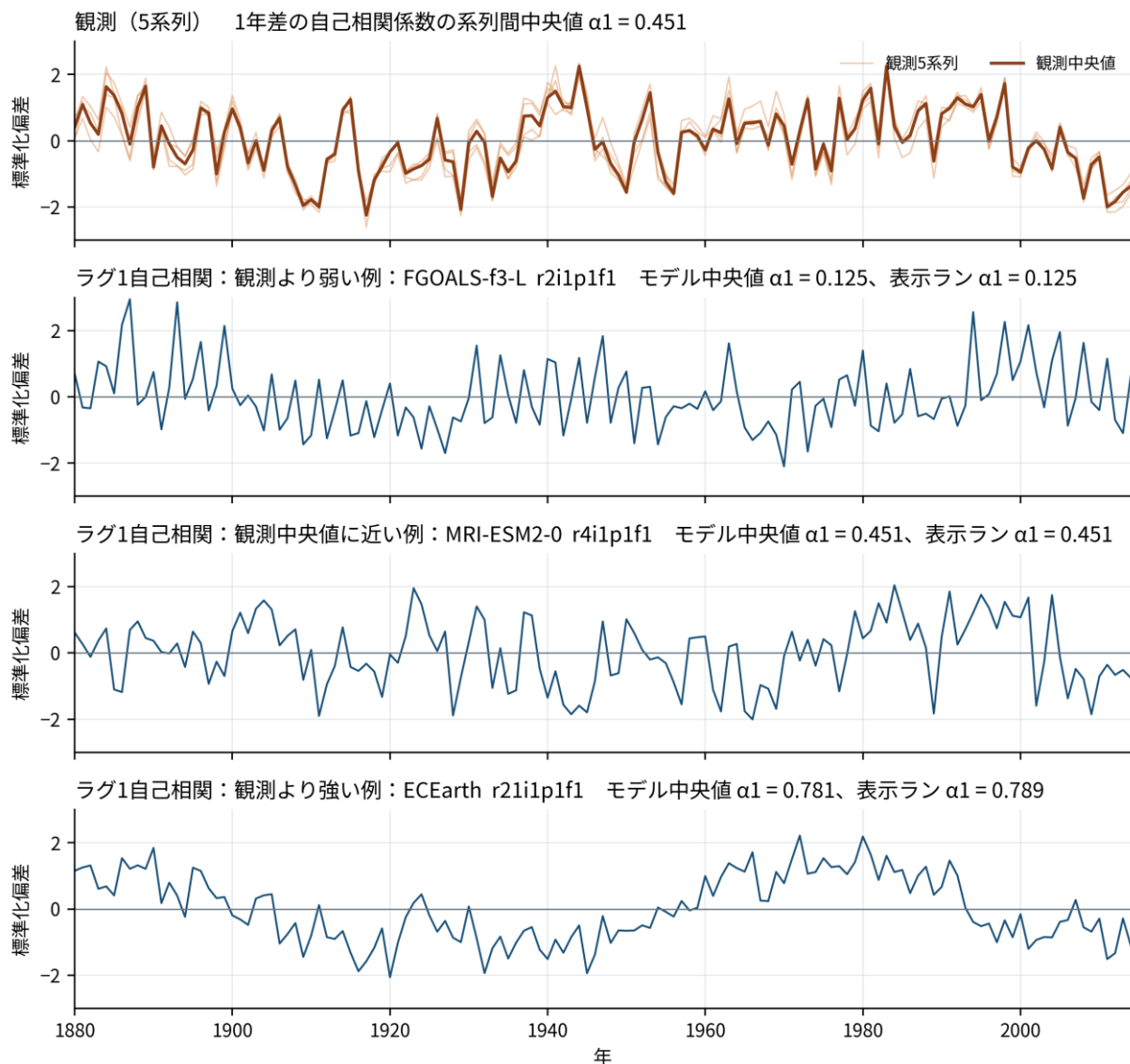
共通外力代理を差し引き、全期間の一次傾向を除去。年平均値には平滑化を行っていない。年ごとの位相一致ではなく、変動振幅を比較する図である。

図2 年平均全球気温の残差時系列：年々変動の標準偏差が観測より小さい例、近い例、大きい例

注：観測5系列と各モデルランから共通外力代理と全期間の一次傾向を除いた年平均残差を、同じ縦軸で示した。表示モデルは全ラン中央値によるモデル代表値から選び、表示ランはその代表値に最も近いランとした。年ごとの位相一致ではなく、変動振幅を比較する。出所：本稿計算。

5 観測系列における年々変動の標準偏差の中央値は 0.113°C である。これに対して、58 モデルの代表値が最小となる INM-CM4-8 は 0.076°C で、観測中央値の約 68%にとどまる。最大となる ECEarth は 0.175°C で、観測中央値の約 156%である。両者を同じ縦軸で比較すると、変動振幅の過小・過大は年平均時系列だけでも明瞭に確認できる。CMCC-CM2-HR4 の標準偏差は 0.113°C で、年々変動の振幅については観測中央値に近い。ただし、ここで観測に近いのは年々変動の標準偏差 1 点であり、他の時間尺度の振幅、自己相関、スペクトルまで観測と一致することを意味しない。

標準偏差をそろえると、年から年への持続性の違いが見える



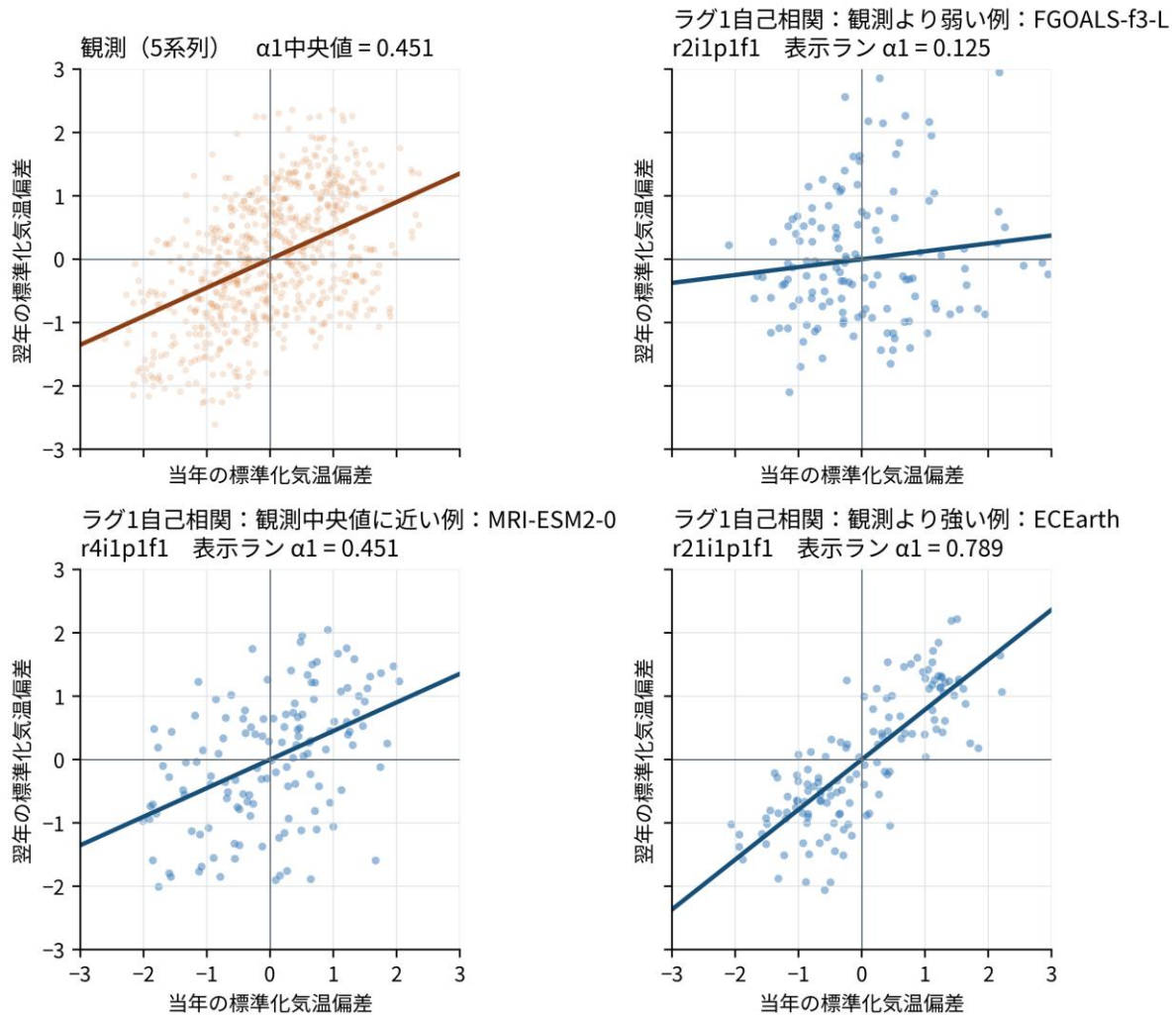
各系列の標準偏差を1にそろえ、振幅差を除いた。共通外力代理除去・一次傾向除去後の年平均値であり、時間方向の平滑化は行っていない。

図3 標準化した年平均全球気温の残差時系列：1年差自己相関が観測より弱い例、近い例、強い例

注：各系列の標準偏差を1にそろえ、変動振幅の差を除いた。観測値は5系列の中央値、モデル値は全ラン中央値である。表示ランはモデル中央値に最も近いランとした。共通外力代理と一次傾向を除去し、時間方向の平滑化は行っていない。出所：本稿計算。

各系列の標準偏差を1にそろえると、変動の大きさとは別に、年から年への持続性を比較できる。5観測系列の1年差自己相関係数の中央値は0.451である。これに対し、FGOALS-f3-Lは0.125で、正負の偏差が年ごとに反転しやすい。一方、ECEarthはモデル中央値が0.781で、同じ符号の偏差が複数年にわたって続く区間が目立つ。MRI-ESM2-0は、1年差自己相関係数については観測中央値に近い。

隣り合う年の散布図では、自己相関の強弱が傾きとして現れる



点は共通外力代理除去・一次傾向除去後の連続する年の組。直線の傾きは各表示系列の1年差自己相関係数（観測は5系列の中央値）。

図4 連続する2年間の標準化気温偏差:1年差自己相関の直接比較

注:横軸は当年、縦軸は翌年の標準化気温偏差である。各点は連続する2年間の組を示し、直線の傾きは表示系列の1年差自己相関係数を表す。観測は5系列を示し、直線には5系列の自己相関係数の中央値を用いた。出所:本稿計算。

この違いは、当年の気温偏差を横軸、翌年の気温偏差を縦軸に取った散布図ではさらに明瞭になる。自己相関が弱い FGOALS-f3-L では点群の傾きが小さいのに対し、自己相関が強い ECEarth では点群が右上がりに集中する。観測と MRI-ESM2-0 はその中間に位置する。自己相関係数は抽象的な統計量ではなく、実際の年平均時系列における翌年への持続性を表している。

図2～図4は、不一致の具体的な現れ方を理解するための例示である。不一致が多数のモデルに広がっていることは、表1と図1の全モデル集計によって示される。また、標準偏差または1年差自己相関係数が観測に近いモデルでも、別の時間尺度や周期では観測と異なる可能性がある。そこで以下では、1年差の1点だけでなく、時間差1～20年の自己相関関数全体、1～20年平均の変動振幅、周期2～64年のスペクトル構造を順に検討する。

5.3 自己相関関数

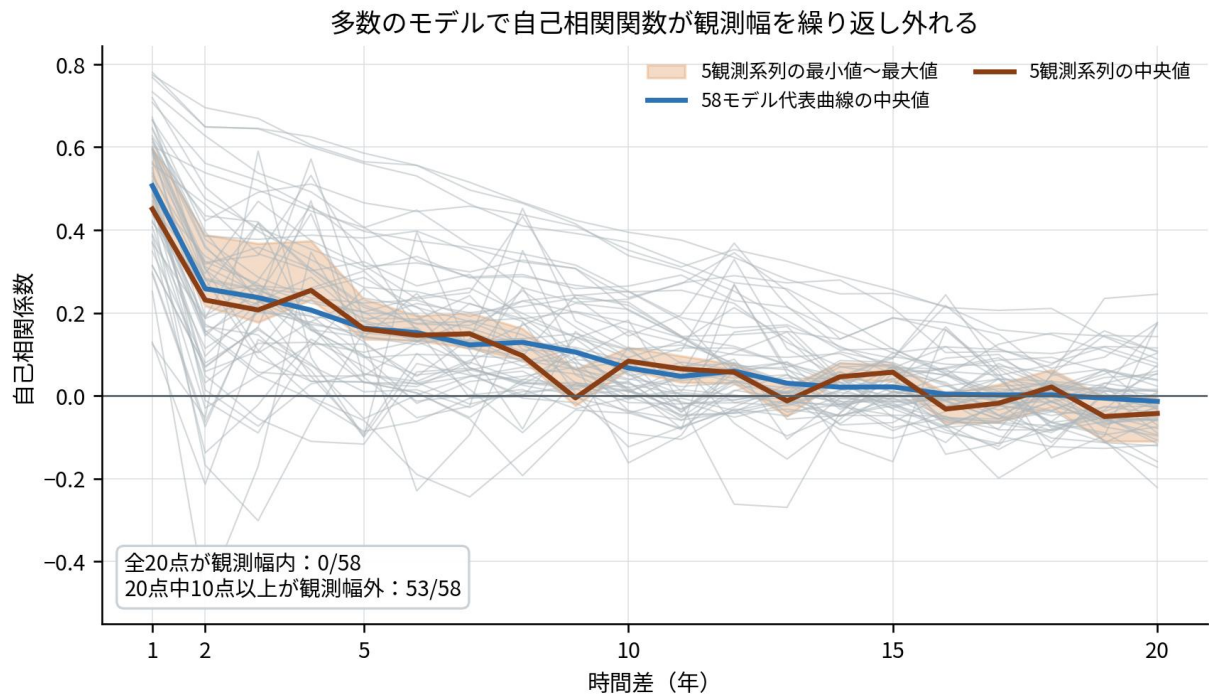


図5 自己相関関数(ACF): 観測幅と58モデルの代表曲線

注: 灰色の各線は各モデルの代表曲線、橙色の帯は5観測系列の最小値～最大値、茶色の線は5観測系列の中央値。横軸は時間差を表す。出所: 本稿計算。

5観測系列の自己相関関数は、多くの時間差で互いに近い値を取る。これに対し、58モデルの代表曲線は観測より高い側にも低い側にも大きく散らばる。時間差1～20年の全20点が観測幅に入るモデルは一つもない。各モデルについて観測幅を外れた点の割合を求めると、その中央値は70%、中央50%のモデルが入る範囲(四分位範囲)は60～80%である。1年後との相関だけを見れば25/58モデルが観測幅に入るが、20年までの曲線全体を見ると53/58モデルで半数以上の点が観測幅を外れる。したがって、ラグ1の自己相関係数1点だけでは、自然変動の持続性を十分に評価できない。

5.4 時間スケール別変動振幅

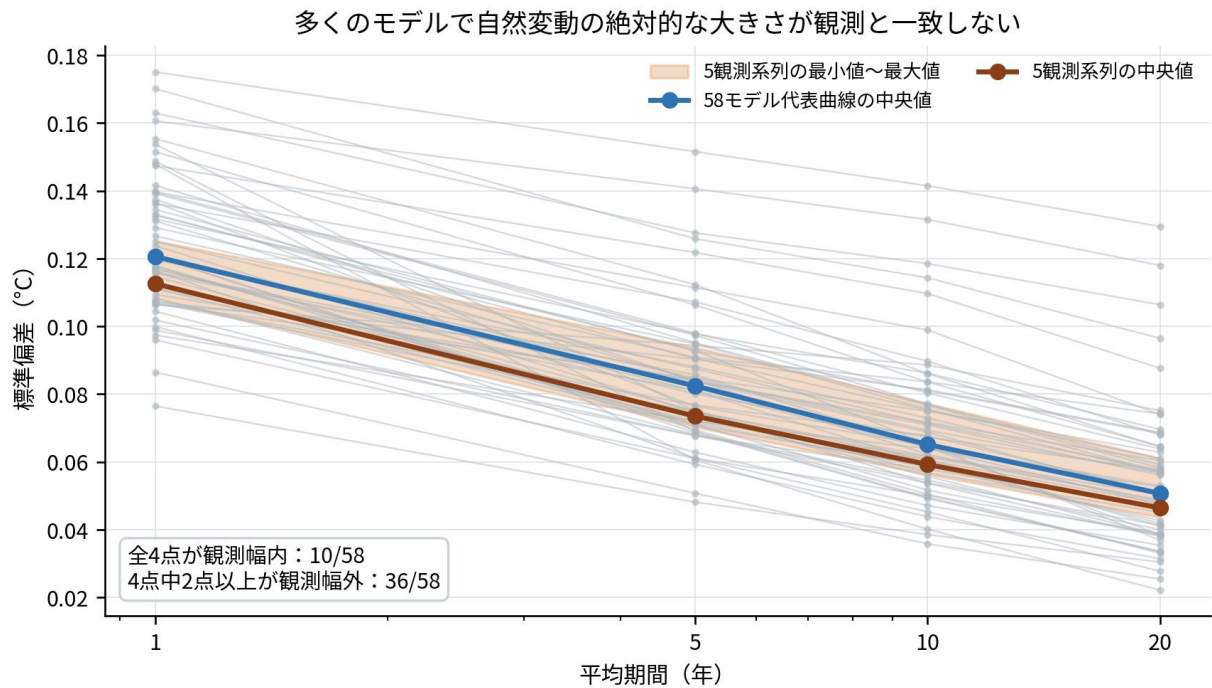


図6 1・5・10・20年平均の変動振幅：観測幅と58モデルの代表曲線

注：縦軸は、共通外力の代理系列を除いた後の標準偏差であり、自然変動の絶対的な大きさを $^{\circ}\text{C}$ で示す。出所：本稿計算。

変動振幅では、58モデル中10モデルが1・5・10・20年平均の4点すべてで観測幅に入った。一方、21モデルは4点すべてが観測幅外であった。モデル間の違いは1年ごとの変動だけでなく、10年平均、20年平均にして短期変動をならした後にも残る。年々の変動は観測に近くても、数十年規模の変動だけが大きすぎる、または小さすぎるモデルがある。このため、1年値の標準偏差だけではモデルの変動特性を識別できない。

5.5 AR(4)スペクトル

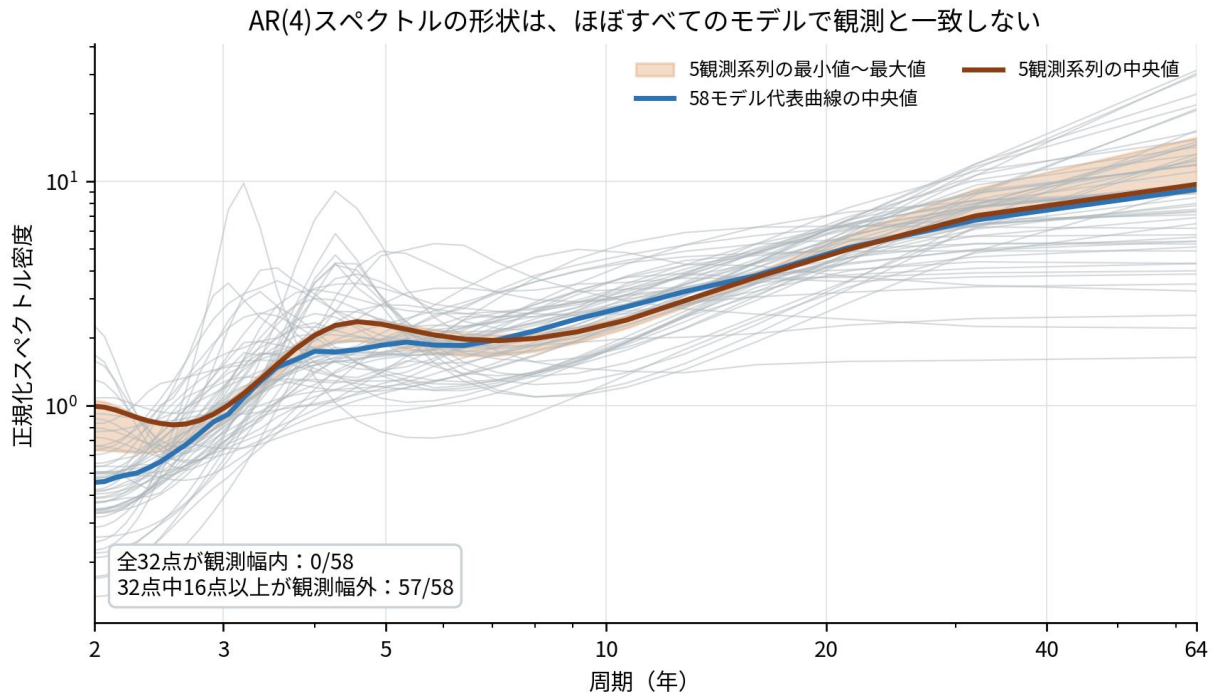


図7 AR(4)正規格化スペクトル:観測幅と58モデルの代表曲線

注:周期2～64年。各スペクトルは積分が1になるよう正規化したため、絶対振幅ではなく周期構成を比較する。出所:本稿計算。

周期2～64年のスペクトル曲線が、全32点で観測幅に入るモデルは一つもない。観測幅を外れた点の割合は、モデル間の中央値が84.4%、四分位範囲が68.8～90.6%である。自己相関関数とスペクトルは、どちらも同じ時間変動の統計的性質を、前者は時間差、後者は周期という異なる見方で表す。スペクトルを見ると、数十年規模の変動が大きすぎるモデル、反対に2～5年周期の変動が小さすぎるモデルなど、どの周期帯で不一致が生じているかが分かる。ずれの方向はモデルによって異なる。

5.6 観測からのずれの方向とモデル間の広がり

表2 観測幅からのずれの方向とモデル間の広がり

指標	観測幅より下	観測幅内	観測幅より上	観測幅外の合計	モデル間幅／観測幅 中央値[四分位範囲]
自己相関関数(ACF)ラグ1～20年	391	356	413	804/1160 (69.3%)	7.1倍 [4.9-9.2]
1・5・10・20年平均の変動振幅	62	99	71	133/232 (57.3%)	4.8倍 [4.2-5.4]
AR(4)スペクトル32点	923	380	553	1476/1856 (79.5%)	8.5倍 [6.5-11.7]
統合指標13点	254	260	240	494/754 (65.5%)	5.7倍 [4.4-7.3]

注:最後列は、各指標点における58モデルの最小値～最大値の幅を、5観測系列の最小値～最大値の幅で割った比率である。指標点間の中央値と四分位範囲を示す。出所:本稿計算。

モデルのずれは、一様に高すぎる、あるいは低すぎるという単純なものではない。自己相関関数では、58 モデル×20 点=1,160 通りの比較のうち、391 点が観測幅より低く、413 点が高い。スペクトルでは 1,856 通りの比較のうち、923 点が低く、553 点が高い。しかも、ずれやすい方向は周期帯によって変わる。各指標点における 58 モデルの広がり、5 観測系列の広がり比べて、中央値で自己相関関数 7.1 倍、変動振幅 4.8 倍、スペクトル 8.5 倍、統合指標 5.7 倍である。モデルと指標点の組み合わせ全体の 65~80%が観測幅を外れており、不一致は少数のモデルや一方向の偏りだけで説明できない。

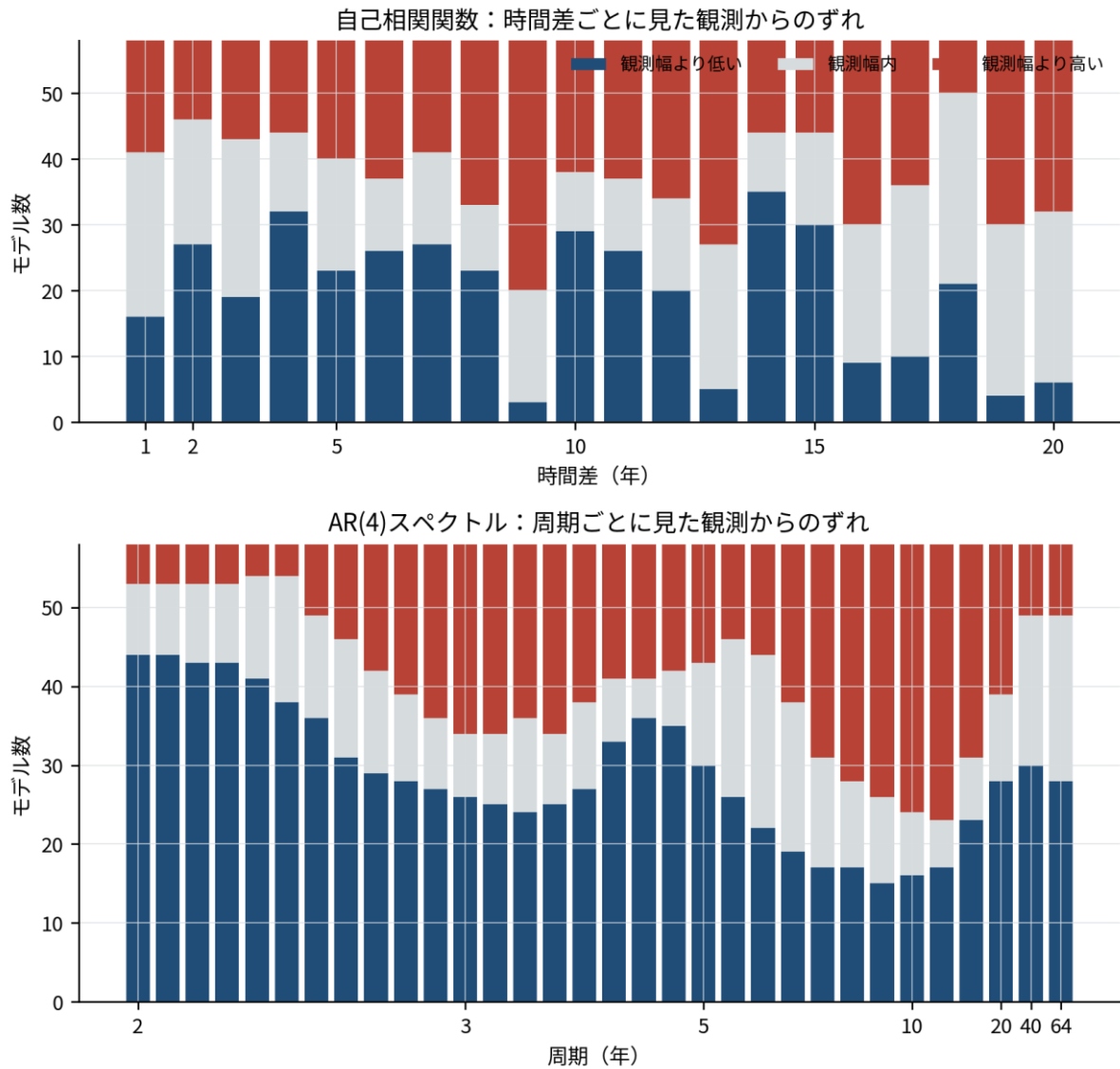


図8 時間差・周期別にみた観測からのずれの方向

注:各棒は 58 モデルを、観測幅より低い、観測幅内、観測幅より高い、の 3 群に分けたもの。上段は自己相関関数、下段は AR(4) スペクトル。出所:本稿計算。

5.7 モデル別の不一致

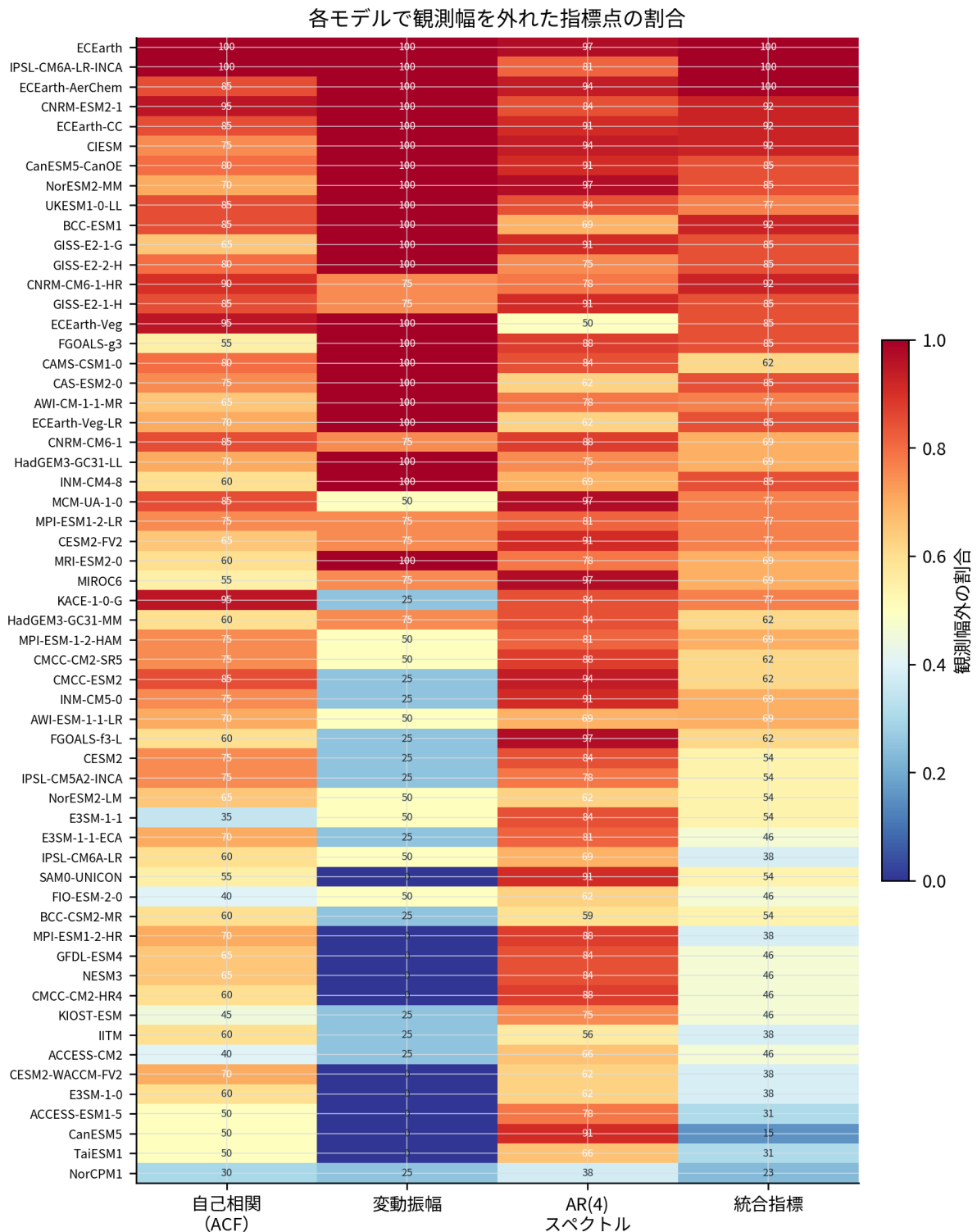


図 9 58 モデル別にみた観測幅外の指標点の割合

注: 各セルは、その領域で指定した点のうち観測幅を外れた点の割合(%)。行は 4 領域を平均した観測幅外の割合が高い順。出所: 本稿計算。

観測との不一致は、少数の極端なモデルだけに集中しているのではない。スペクトルでは 57/58 モデルで半数以上の点が観測幅を外れ、自己相関関数では 25/58 モデルで 4 分の 3 以上の点の外れる。また、モデルごとに不一致の現れ方が異なる。変動振幅は観測に近いのに、自己相関関数とスペ

クトルが外れるモデルもあれば、持続性よりも変動の絶対量に大きな問題があるモデルもある。したがって、単一の総合点だけで順位を付けるのではなく、自己相関、振幅、スペクトルを分けて診断する必要がある。

5.8 不一致は同じモデルの複数ランで繰り返される

表 3 代表曲線の不一致と、全ランにおける不一致の持続性

指標	代表曲線が 50%以上外	過半数ランが 50%以上外	全ランが 50%以上外	代表曲線とランの 両方で不一致
自己相関関数(ACF)ラグ 1 ～20 年	53/58	56/58	49/58	53/58
1・5・10・20 年平均の変動 振幅	36/58	43/58	21/58	36/58
AR(4)スペクトル 32 点	57/58	58/58	54/58	57/58
統合指標 13 点	42/58	54/58	36/58	42/58

注:『過半数ラン』は、そのモデルの全ランの 50%以上で、指定点の半数以上が観測幅を外れることを示す。出所:本稿計算。

スペクトルでは、58 モデルすべてで、全ランの過半数が『32 点のうち半数以上が観測幅外』という条件を満たした。さらに 54 モデルでは、すべてのランがこの条件を満たした。自己相関関数でも 56/58 モデルで、不一致が過半数のランに繰り返し現れた。モデルの代表曲線と、各ランにおける不一致の持続性を別々に評価しても、自己相関関数とスペクトルの不一致は広範である。

5.9 観測幅を広げた感度分析

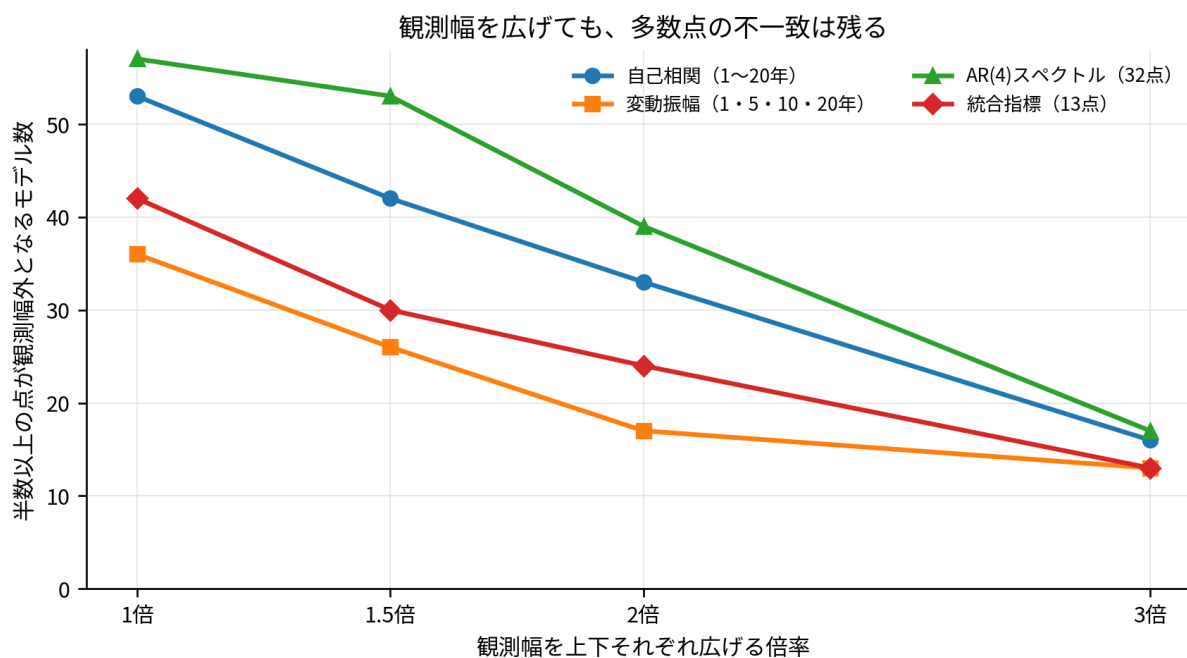


図 10 観測幅を広げた場合に、なお半数以上の点が範囲外となるモデル数

注:5 観測系列の中央値から元の下限・上限までの距離を、上下それぞれ 1.5 倍、2 倍、3 倍に広げた。出所:本稿計算。

表 4 観測幅拡張に対する主判定の感度

指標	1 倍	1.5 倍	2 倍	3 倍
自己相関関数 (ACF) ラグ 1～20 年	53/58	42/58	33/58	16/58
1・5・10・20 年平均の変動振幅	36/58	26/58	17/58	13/58
AR(4)スペクトル 32 点	57/58	53/58	39/58	17/58
統合指標 13 点	42/58	30/58	24/58	13/58

注:各セルは、指定点の半数以上が、拡張後の観測幅をなお外れるモデル数。出所:本稿計算。

観測幅を上下それぞれ 2 倍に広げると、半数以上の点が範囲外となるモデル数は減る。それでも自己相関関数 33、変動振幅 17、スペクトル 39、統合指標 24 モデルが残る。3 倍に広げても、各領域で 13～17 モデルが残る。したがって、5 観測系列の最小値～最大値を厳密な 95%区間とみなさなくても、観測との差が大きいモデルが少なくないという結論は変わらない。ただし、1.5 倍、2 倍、3 倍という倍率に確率的な意味はない。この分析は、判定範囲を緩めたときに結果がどの程度変わるかを確かめるためのものである。

6 考察

6.1 単純な比較が示す重大な不一致

本稿の主要結果は、複雑な統計検定を使わなくても確認できる。モデルと観測に同じ前処理を施したうえで、各モデルの代表曲線を 5 観測系列の最小値～最大値と点ごとに比べると、自己相関関数では 53/58 モデル、スペクトルでは 57/58 モデルで、半数以上の点が観測幅を外れた。また、指標点ごとにみた 58 モデルの最小値～最大値の広がり、5 観測系列の広がりの約 5～8 倍であった。つまり、モデルによって自然変動の持続時間や周期別の配分が大きく異なり、その多くが観測系列の範囲から外れている。

もちろん、20 点や 32 点のすべてが観測幅に入るという条件は、点数が多いほど厳しくなる。このため本稿では、『全点が範囲内』だけを合否基準にしていない。4 分の 1 以上、半数以上、4 分の 3 以上、全点という複数の段階を示し、観測より低い点と高い点の内訳、各モデルで範囲を外れた点の割合、観測幅を広げた感度分析も示した。これにより、1 点だけの偶然的なずれと、曲線の広い部分にわたる不一致を区別できる。

6.2 ラン間の広がりもモデルの検証対象である

同じモデルの複数ランが広く散らばっている場合、その広がりを単なる誤差として扱い、代表値と観測の差を小さく見せるべきではない。自然変動の確率的な性質を再現できるかという問題では、ラン分布の中心が観測に近い点と、ラン間の広がりが適切かという点は、別々に検証すべき性能である。本稿では、前者を全ラン中央値から作った代表曲線で評価し、後者を、同じ不一致が過半数のランまたは全ランに現れるモデル数で評価した。

6.3 揺動応答原理への含意

揺動応答関係では、自然変動の共分散、分散、スペクトルが、外力に対する応答を推定するための入力になる。したがって、これらが観測と合わないモデルでは、そこから推定される応答演算子の信頼性にも疑問が生じる。本稿で自己相関関数またはスペクトルの半数以上が観測幅を外れたモデルについては、同じモデルの内部変動と強制応答が、物理的に整合した仕組みから生じているかを改めて検証する必要がある。年平均全球気温の自己相関だけでなく、複数変数の時間差を伴う共分散、海洋熱含量、大気上端の放射収支、大気・海洋循環まで含めた診断が望まれる。

ここで述べているのは必要条件であって、十分条件ではない。自然変動が観測と一致しても、将来の気温応答が必ず正しいとは限らない。外力の大きさ、放射フィードバック、海洋の熱吸収、非線形性、気候状態による応答の違いは、別に検証しなければならない。しかし、応答推定の入力となる自然変動の統計が観測と大きく異なるなら、そのモデルの強制応答を信頼することはできない。

6.4 イベントアトリビューションへの含意

イベントアトリビューションでは、モデルが作り出す自然変動の確率分布が、反実仮想条件の確率 p_0 と現在条件の確率 p_1 の双方を決める。自然変動の分散が小さすぎるモデルでは、外力による平均値の移動が極端な閾値の超過確率に与える効果を、PR として大きく見積もりやすい。反対に分散が大きすぎれば、その効果を小さく見積もりやすい。確率分布の裾の形が誤っていれば、稀な事象の再現期間が変わる。自己相関や数年～数十年の変動が誤っていれば、熱波や干ばつのように長く続く事象、複数条件が重なる事象、統計的に独立とみなせる標本数の評価が変わる。地域間の相関が誤っていれば、広域事象や複数地域で同時に起こる事象の確率も変わる。

したがって、イベントアトリビューションを行う前に、そのモデルが対象事象に関係する自然変動を観測どおりに再現できるかを検証すべきである。対象地域、変数、季節、時間間隔、事象の継続時間に合わせ、平均と分散だけでなく、自己相関関数、スペクトル、極値分布、持続期間、地域間の依存関係を点検する必要がある。さらに、適格性を満たさないモデルを含めた場合と除外した場合で、PR と FAR がどの程度変わるかを示すべきである。

なお、本稿が直接検証したのは年平均全球気温である。地域の日最高気温、豪雨量、干ばつ指標など、イベントアトリビューションが通常扱う日・季節単位の極端現象を直接評価したわけではない。しかしながら、CMIP6 モデルが自然変動を対象事象について適切に表現していることを証明しない限り、イベントアトリビューションの結果も信頼できない。

6.5 限界

本分析には六つの限界がある。第一に、135 年の年次系列では、20 年を超える長周期の変動を精密に推定できない。第二に、5 観測系列は同じ観測データを多く共有しており、互いに独立ではない。このため 5 系列の最小値～最大値は、観測不確実性のすべてを表さない。第三に、分析で差し引いた共通外力の代理系列は、真の強制応答そのものではない。第四に、複数のモデルが共通のコードや開発系譜を持つため、58 モデルを統計的に独立な標本とはみなせない。第五に、全球平均だけを見

ると、地域間、海陸間、南北半球間で反対向きの誤差が相殺される可能性がある。第六に、AR(4)は滑らかなスペクトルを比較するための近似であり、他のスペクトル推定法でも確認する必要がある。

7 結論

5 観測系列の最小値～最大値を基準に、CMIP6 各モデルの代表曲線を点ごとに比較した。その結果、指定点の半数以上が観測幅を外れたモデルは、自己相関関数 53/58、変動振幅 36/58、AR(4)スペクトル 57/58、統合指標 42/58 であった。自己相関関数、スペクトル、統合指標では、すべての点が観測幅に入ったモデルは一つもなかった。

同じモデルのランの過半数で、指定点の半数以上が観測幅を外れたモデルは、自己相関関数 56/58、変動振幅 43/58、スペクトル 58/58、統合指標 54/58 であった。観測幅を上下それぞれ 2 倍に広げても、各領域で 17～39 モデルが、なお半数以上の点で範囲外に残った。

自然変動の共分散、分散、スペクトルを再現できないことは、揺動応答関係に基づく強制応答の推定を疑う理由になる。同時に、自然変動の確率分布に直接依存するイベントアトリビューションの PR、FAR、再現期間、継続事象の評価にも重大な意味を持つ。気候モデルを強制応答計算やイベントアトリビューションに使う前に、個々のモデルについて、その用途と対象の時間・空間尺度に即した自然変動の再現性を確認する必要がある。

付録 A 58 モデルの代表曲線が観測幅を外れる割合

各値は、そのモデルの全ラン中央値から作った代表曲線について、指定点のうち 5 観測系列の最小値～最大値を外れた点の割合である。本文では、この割合が 50%以上の場合を『代表曲線の多数点不一致』とした。

モデル	ラン数	自己相関 観測幅外率	変動振幅 観測幅外率	スペクトル 観測幅外率	統合指標 観測幅外率
ACCESS-CM2	3	40%	25%	66%	46%
ACCESS-ESM1-5	30	50%	0%	78%	31%
AWI-CM-1-1-MR	5	65%	100%	78%	77%
AWI-ESM-1-1-LR	1	70%	50%	69%	69%
BCC-CSM2-MR	3	60%	25%	59%	54%
BCC-ESM1	3	85%	100%	69%	92%
CAMS-CSM1-0	2	80%	100%	84%	62%
CAS-ESM2-0	4	75%	100%	62%	85%
CESM2	11	75%	25%	84%	54%
CESM2-FV2	3	65%	75%	91%	77%
CESM2-WACCM-FV2	3	70%	0%	62%	38%
CIESM	3	75%	100%	94%	92%
CMCC-CM2-HR4	1	60%	0%	88%	46%
CMCC-CM2-SR5	1	75%	50%	88%	62%
CMCC-ESM2	1	85%	25%	94%	62%
CNRM-CM6-1	3	85%	75%	88%	69%
CNRM-CM6-1-HR	1	90%	75%	78%	92%
CNRM-ESM2-1	5	95%	100%	84%	92%
CanESM5	3	50%	0%	91%	15%
CanESM5-CanOE	3	80%	100%	91%	85%
E3SM-1-0	5	60%	0%	62%	38%
E3SM-1-1	1	35%	50%	84%	54%
E3SM-1-1-ECA	1	70%	25%	81%	46%
ECEarth	16	100%	100%	97%	100%
ECEarth-AerChem	1	85%	100%	94%	100%
ECEarth-CC	1	85%	100%	91%	92%
ECEarth-Veg	4	95%	100%	50%	85%
ECEarth-Veg-LR	3	70%	100%	62%	85%
FGOALS-f3-L	3	60%	25%	97%	62%

モデル	ラン 数	自己相関 観測幅外率	変動振幅 観測幅外率	スペクトル 観測幅外率	統合指標 観測幅外率
FGOALS-g3	6	55%	100%	88%	85%
FIO-ESM-2-0	3	40%	50%	62%	46%
GFDL-ESM4	3	65%	0%	84%	46%
GISS-E2-1-G	10	65%	100%	91%	85%
GISS-E2-1-H	10	85%	75%	91%	85%
GISS-E2-2-H	5	80%	100%	75%	85%
HadGEM3-GC31-LL	4	70%	100%	75%	69%
HadGEM3-GC31-MM	4	60%	75%	84%	62%
IITM	1	60%	25%	56%	38%
INM-CM4-8	1	60%	100%	69%	85%
INM-CM5-0	10	75%	25%	91%	69%
IPSL-CM5A2-INCA	1	75%	25%	78%	54%
IPSL-CM6A-LR	32	60%	50%	69%	38%
IPSL-CM6A-LR-INCA	1	100%	100%	81%	100%
KACE-1-0-G	3	95%	25%	84%	77%
KIOST-ESM	1	45%	25%	75%	46%
MCM-UA-1-0	1	85%	50%	97%	77%
MIROC6	50	55%	75%	97%	69%
MPI-ESM-1-2-HAM	3	75%	50%	81%	69%
MPI-ESM1-2-HR	3	70%	0%	88%	38%
MPI-ESM1-2-LR	10	75%	75%	81%	77%
MRI-ESM2-0	5	60%	100%	78%	69%
NESM3	5	65%	0%	84%	46%
NorCPM1	10	30%	25%	38%	23%
NorESM2-LM	3	65%	50%	62%	54%
NorESM2-MM	3	70%	100%	97%	85%
SAM0-UNICON	1	55%	0%	91%	54%
TaiESM1	2	50%	0%	66%	31%
UKESM1-0-LL	3	85%	100%	84%	77%

出所：本稿計算。ACF は自己相関関数、スペクトルは AR(4)正規化スペクトル。

付録 B 全ランにおける不一致の持続率

各値は、そのモデルの全ランのうち、当該領域で指定点の半数以上が観測幅を外れたランの割合であり、モデル内で不一致がどの程度繰り返し現れるかを示す。

モデル	ラン数	自己相関 不一致持続率	変動振幅 不一致持続率	スペクトル 不一致持続率	統合指標 不一致持続率
ACCESS-CM2	3	100%	33%	100%	100%
ACCESS-ESM1-5	30	93%	60%	97%	77%
AWI-CM-1-1-MR	5	100%	80%	100%	80%
AWI-ESM-1-1-LR	1	100%	100%	100%	100%
BCC-CSM2-MR	3	100%	67%	100%	67%
BCC-ESM1	3	100%	100%	100%	100%
CAMS-CSM1-0	2	100%	50%	100%	100%
CAS-ESM2-0	4	100%	75%	100%	100%
CESM2	11	100%	45%	100%	73%
CESM2-FV2	3	100%	100%	100%	100%
CESM2-WACCM-FV2	3	100%	33%	100%	67%
CIESM	3	100%	100%	100%	100%
CMCC-CM2-HR4	1	100%	0%	100%	0%
CMCC-CM2-SR5	1	100%	100%	100%	100%
CMCC-ESM2	1	100%	0%	100%	100%
CNRM-CM6-1	3	100%	100%	100%	100%
CNRM-CM6-1-HR	1	100%	100%	100%	100%
CNRM-ESM2-1	5	100%	80%	100%	100%
CanESM5	3	100%	67%	100%	67%
CanESM5-CanOE	3	100%	100%	100%	100%
E3SM-1-0	5	100%	40%	100%	60%
E3SM-1-1	1	0%	100%	100%	100%
E3SM-1-1-ECA	1	100%	0%	100%	0%
ECEarth	16	100%	94%	100%	94%
ECEarth-AerChem	1	100%	100%	100%	100%
ECEarth-CC	1	100%	100%	100%	100%
ECEarth-Veg	4	100%	50%	75%	75%
ECEarth-Veg-LR	3	100%	100%	100%	100%
FGOALS-f3-L	3	100%	0%	100%	100%
FGOALS-g3	6	83%	67%	100%	100%

モデル	ラン 数	自己相関 不一致持続率	変動振幅 不一致持続率	スペクトル 不一致持続率	統合指標 不一致持続率
FIO-ESM-2-0	3	100%	67%	100%	67%
GFDL-ESM4	3	100%	67%	100%	67%
GISS-E2-1-G	10	100%	100%	100%	100%
GISS-E2-1-H	10	100%	90%	100%	100%
GISS-E2-2-H	5	100%	100%	100%	100%
HadGEM3-GC31-LL	4	75%	75%	100%	100%
HadGEM3-GC31-MM	4	75%	100%	100%	100%
IITM	1	100%	0%	100%	0%
INM-CM4-8	1	100%	100%	100%	100%
INM-CM5-0	10	100%	40%	100%	90%
IPSL-CM5A2-INCA	1	100%	0%	100%	100%
IPSL-CM6A-LR	32	100%	78%	97%	88%
IPSL-CM6A-LR-INCA	1	100%	100%	100%	100%
KACE-1-0-G	3	100%	67%	100%	100%
KIOST-ESM	1	0%	0%	100%	0%
MCM-UA-1-0	1	100%	100%	100%	100%
MIROC6	50	100%	80%	100%	100%
MPI-ESM-1-2-HAM	3	100%	67%	100%	100%
MPI-ESM1-2-HR	3	100%	33%	100%	67%
MPI-ESM1-2-LR	10	100%	80%	100%	100%
MRI-ESM2-0	5	80%	60%	100%	60%
NESM3	5	100%	60%	100%	60%
NorCPM1	10	90%	20%	80%	50%
NorESM2-LM	3	100%	100%	100%	100%
NorESM2-MM	3	100%	100%	100%	100%
SAM0-UNICON	1	100%	0%	100%	100%
TaiESM1	2	50%	50%	100%	50%
UKESM1-0-LL	3	100%	100%	100%	100%

出所：本稿計算。

付録 C 指標点別の観測幅とモデル数

観測欄には 5 観測系列の最小値／中央値／最大値を示す。モデル欄には、58 モデルの代表値のうち、観測幅より低いモデル数／観測幅内のモデル数／観測幅より高いモデル数を示す。

表 C1 自己相関関数(ACF)の時間差別集計

点	観測 最小／中央値／最大	下	内	上
ラグ 1	0.446 / 0.451 / 0.599	16	25	17
ラグ 2	0.216 / 0.231 / 0.389	27	19	12
ラグ 3	0.177 / 0.207 / 0.367	19	24	15
ラグ 4	0.232 / 0.254 / 0.374	32	12	14
ラグ 5	0.137 / 0.161 / 0.233	23	17	18
ラグ 6	0.133 / 0.146 / 0.193	26	11	21
ラグ 7	0.115 / 0.150 / 0.200	27	14	17
ラグ 8	0.086 / 0.097 / 0.162	23	10	25
ラグ 9	-0.024 / -0.005 / 0.064	3	17	38
ラグ 10	0.063 / 0.084 / 0.116	29	9	20
ラグ 11	0.032 / 0.065 / 0.096	26	11	21
ラグ 12	0.030 / 0.057 / 0.076	20	14	24
ラグ 13	-0.050 / -0.012 / 0.023	5	22	31
ラグ 14	0.040 / 0.046 / 0.079	35	9	14
ラグ 15	0.035 / 0.057 / 0.076	30	14	14
ラグ 16	-0.066 / -0.032 / 0.007	9	21	28
ラグ 17	-0.064 / -0.018 / 0.028	10	26	22
ラグ 18	-0.028 / 0.021 / 0.063	21	29	8
ラグ 19	-0.110 / -0.050 / -0.002	4	26	28
ラグ 20	-0.110 / -0.043 / -0.003	6	26	26

出所: 本稿計算。

表 C2 時間スケール別標準偏差

点	観測 最小／中央値／最大	下	内	上
1 年	0.108 / 0.113 / 0.125 ° C	14	20	24
5 年	0.070 / 0.073 / 0.094 ° C	13	30	15
10 年	0.056 / 0.059 / 0.077 ° C	15	28	15
20 年	0.044 / 0.046 / 0.061 ° C	20	21	17

出所: 本稿計算。

表 C3 AR(4)スペクトルの周期別集計

点	観測 最小／中央値／最大	下	内	上
64.00 年	9.027 / 9.706 / 15.705	28	21	9
32.00 年	6.807 / 7.032 / 9.283	30	19	9
21.33 年	4.956 / 4.964 / 5.743	28	11	19
16.00 年	3.664 / 3.736 / 3.923	23	8	27
12.80 年	2.748 / 2.941 / 2.981	17	6	35
10.67 年	2.218 / 2.412 / 2.518	16	8	34
9.14 年	1.914 / 2.139 / 2.249	15	11	32
8.00 年	1.748 / 1.997 / 2.110	17	11	30
7.11 年	1.675 / 1.952 / 2.068	17	14	27
6.40 年	1.670 / 1.981 / 2.100	19	19	20
5.82 年	1.718 / 2.070 / 2.187	22	22	14
5.33 年	1.799 / 2.194 / 2.298	26	20	12
4.92 年	1.889 / 2.314 / 2.387	30	13	15
4.57 年	1.949 / 2.372 / 2.395	35	7	16
4.27 年	1.938 / 2.283 / 2.316	36	5	17
4.00 年	1.790 / 2.064 / 2.139	33	8	17
3.76 年	1.584 / 1.794 / 1.887	27	11	20
3.56 年	1.367 / 1.532 / 1.622	25	9	24
3.37 年	1.170 / 1.309 / 1.388	24	12	22
3.20 年	1.008 / 1.135 / 1.200	25	9	24
3.05 年	0.882 / 1.007 / 1.059	26	8	24
2.91 年	0.788 / 0.917 / 0.958	27	9	22
2.78 年	0.720 / 0.860 / 0.892	28	11	19
2.67 年	0.673 / 0.830 / 0.853	29	13	16
2.56 年	0.643 / 0.822 / 0.838	31	15	12
2.46 年	0.625 / 0.834 / 0.842	36	13	9

点	観測 最小／中央値／最大	下	内	上
2.37 年	0.618 / 0.856 / 0.864	38	16	4
2.29 年	0.618 / 0.887 / 0.907	41	13	4
2.21 年	0.623 / 0.924 / 0.958	43	10	5
2.13 年	0.629 / 0.960 / 1.006	43	10	5
2.06 年	0.633 / 0.986 / 1.042	44	9	5
2.00 年	0.635 / 0.995 / 1.056	44	9	5

出所: 本稿計算。

付録 D 計算仕様

自己相関関数は、平均を除いた系列 x について $\sum x(t)x(t+k) / \sum x(t)^2$ で計算した。 k は時間差を表す。変動振幅には、1・5・10・20 年移動平均の母標準偏差を用いた。AR(4)の係数は Yule-Walker 方程式で推定し、周期 2～64 年に対応する 32 点でスペクトルを評価した。スペクトルは、全周期帯の積分が 1 になるよう正規化した。

統合指標 13 点は、自己相関関数の時間差 1、2、3、5、10、15、20 年の 7 点、1・5・10・20 年平均の標準偏差の対数 4 点、周期 2～7 年と 7～20 年のパワー比、周期 7～20 年と 20～64 年のパワー比の対数 2 点からなる。すべての指標点は分析前に指定し、結果を見て都合のよい点を選んだものではない。

モデルの代表曲線は、各指標点について、そのモデルで利用できる historical 実験の全ランの中央値を取って作成した。モデル数を集計するときは 58 モデルを等しい重みで数えた。モデルによって利用できるラン数が異なるため、付録 B の不一致持続率は、同じモデル内で結果がどの程度繰り返されるかを示すために用い、58 モデル全体を集計する重みには使わない。

付録 E 揺動応答原理について

E.1 平衡系における揺動と応答

揺動応答原理は、外力を加える前の揺らぎと、外力を加えたときの応答を結び付けるものである。熱平衡にある古典系では、この関係が微小な外力に対する定理として成り立つ。例えば、外力 h が物理量 X に作用し、エネルギーが $H = H_0 - hX$ と変わるとき、静的な感受率 χ は次式で与えられる (Kubo, 1966)。

$$\chi = \left(\frac{\partial \langle X \rangle}{\partial h} \right)_{h=0} = \frac{\langle \delta X^2 \rangle}{k_B \theta} \quad (\text{E.1})$$

ここで、 δX は外力 $h=0$ での平衡平均からの偏差、 $\langle \delta X^2 \rangle$ はその分散である。分母はボルツマン定数と絶対温度 θ の積を表す。すなわち、平衡時の揺らぎが大きい量ほど、それに共役な外力に大きく応答する。また、応答の時間的な経過は、揺らぎの時間相関と結び付いている。

E.2 定常状態と一層モデル

気候は太陽からエネルギーを受け取り、宇宙へ放出する非平衡系である。統計的な性質が時間によらない定常状態であっても、平衡系と同じ厳密な揺動応答関係が必ず成り立つわけではない (Baiesi and Maes, 2013)。それでも、時間相関と気候感度に一定の関係があることは、次の一層モデルで示せる (Williamson et al., 2018)。

$$C \frac{dT}{dt} = F - \lambda T + \xi(t) \quad (\text{E.2})$$

T は基準状態からの気温変化、 F は放射強制力、 C は有効熱容量である。 $\lambda > 0$ は、昇温に伴って宇宙への正味の放熱が増える強さを表す。 ξ は、内部の不規則な擾乱を表す零平均の白色雑音とする。 F を一定に保った定常状態で、平均からの偏差 δT の自己相関関数 ρ と減衰時間 τ は次式となる。

$$\rho(s) = \frac{\langle \delta T(t+s) \delta T(t) \rangle}{\langle \delta T^2 \rangle} = \exp\left(\frac{-|s|}{\tau}\right), \quad \tau = \frac{C}{\lambda} \quad (\text{E.3})$$

ここで s は時間差であり、式 (E.3) は年平均化前の連続時間モデルについての関係である。一方、 CO_2 倍増による一定の放射強制力 $F_{2\times}$ に対する平衡昇温量、すなわち ECS は次式で与えられる。

$$\text{ECS} = \frac{F_{2\times}}{\lambda} = \frac{F_{2\times}}{C} \tau \quad (\text{E.4})$$

したがって、 C と $F_{2\times}$ が同じなら、相関時間が長いほど ECS が大きい。昇温を打ち消す復元力が弱いほど、自然に生じた高温が長く残り、持続的な外力に対する昇温も大きくなるためである。この例は、自然変動の時間構造と気候感度が共通の物理過程に関係することを示している。

E.3 気候モデルの検証への意味

気候モデルが自然の応答と内部変動の仕組みをよく表し、その一環として ECS も再現しているならば、同じ条件で比較した気温の揺らぎも観測と統計的に整合するはずである。その整合性の一部は、自己相関関数 ρ と、内部変動の振幅を表す標準偏差 σ の一致として調べられる。

$$\rho_{\text{model}}(s) \approx \rho_{\text{obs}}(s), \quad \sigma_{\text{model}} \approx \sigma_{\text{obs}} \quad (\text{E.5})$$

ここで、標準偏差 σ は気温偏差 δT の分散の平方根であり、 $\approx$ は観測誤差や有限の観測期間に伴う不確実性の範囲内での一致を表す。実際の比較では、対象期間や年平均化、外部強制成分の除去などの処理をそろえる必要がある。

気候モデルには、ECS の値に加えて、内部変動が生じ、時間とともに変化する仕組みも正しく表すことが求められる。時間相関や変動振幅の比較は、気候感度にも関わるモデルの物理的な整合性を検証する方法となる。本稿の時間相関の比較は、この検証の一部に位置付けられる。

参考文献

- Baiesi, M. and Maes, C. (2013), “An update on nonequilibrium linear response,” *New Journal of Physics*, 15, 013004.
<https://doi.org/10.1088/1367-2630/15/1/013004>
- Cox, P. M., Huntingford, C., and Williamson, M. S. (2018), “Emergent constraint on equilibrium climate sensitivity from global temperature variability,” *Nature*, 553, 319–322. <https://doi.org/10.1038/nature25450>
- Craigmile, P. F. and Guttorp, P. (2023), “Comparing CMIP6 Climate Model Simulations of Annual Global Mean Temperatures to a New Combined Data Product,” *Earth and Space Science*, 10, e2022EA002468.
<https://doi.org/10.1029/2022EA002468>
- Craigmile, P. F. and Guttorp, P. (2023), Data and code for the CMIP6 comparison study.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.8347096>
- Eyring, V. et al. (2016), “Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization,” *Geoscientific Model Development*, 9, 1937–1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
- Hasselmann, K. (1976), “Stochastic climate models Part I. Theory,” *Tellus*, 28, 473–485.
<https://doi.org/10.1111/j.2153-3490.1976.tb00696.x>
- Kubo, R. (1966), “The fluctuation–dissipation theorem,” *Reports on Progress in Physics*, 29, 255–284.
<https://doi.org/10.1088/0034-4885/29/1/306>
- Leith, C. E. (1975), “Climate response and fluctuation dissipation,” *Journal of the Atmospheric Sciences*, 32, 2022–2026.
[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1975\)032%3C2022:CRAFDT%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1975)032%3C2022:CRAFDT%3E2.0.CO;2)
- Philip, S. et al. (2020), “A protocol for probabilistic extreme event attribution analyses,” *Advances in Statistical Climatology, Meteorology and Oceanography*, 6, 177–203. <https://doi.org/10.5194/ascmo-6-177-2020>
- van Oldenborgh, G. J. et al. (2021), “Pathways and pitfalls in extreme event attribution,” *Climatic Change*, 166, 13.
<https://doi.org/10.1007/s10584-021-03071-7>
- Williamson, M. S., Cox, P. M., and Nijse, F. J. M. M. (2018), “Theoretical foundations of emergent constraints: relationships between climate sensitivity and global temperature variability in conceptual models,” *Dynamics and Statistics of the Climate System*, 3(1), dzy006. <https://doi.org/10.1093/climsys/dzy006>
- Williamson, M. S. et al. (2021), “Emergent constraints on climate sensitivities,” *Reviews of Modern Physics*, 93, 025004.
<https://doi.org/10.1103/RevModPhys.93.025004>
- Williamson, M. S., Cox, P. M., Huntingford, C., and Nijse, F. J. M. M. (2024), “Testing the assumptions in emergent constraints,” *Earth System Dynamics*, 15, 829–852. <https://doi.org/10.5194/esd-15-829-2024>