

4.7 太陽活動変動の気候影響評価実験－地球システムモデルシミュレーション

吉田 康平 (気象庁気象研究所)

(2019年11月5日受付、2021年5月31日公開)

4.7.1 太陽活動変動の気候への影響シミュレーションの意義

日々の天気予報や、長期の季節予報、ひいてはより長期の気候予測の数値シミュレーションにおいて太陽からの放射加熱の効果は必ず取り入れなければならない。それは地熱を除けば地球を暖めるのは基本的には太陽放射のみだからで、太陽放射を与えなければ瞬く間に地球が冷え切ってしまうからである。そして地球が生物の生存可能な現在の気温を保っているのは二酸化炭素や水など温室効果気体が太陽放射を吸収・赤外線でも再放出することによって大気下層を暖めているからである。加えて近年重大な問題となっている地球温暖化についてはその温室効果気体が増加し働きが強まることで、太陽放射による大気加熱の分配が変わり、大気下層がより暖められることを原因としている。それゆえ、太陽放射は地球の気象・気候シミュレーションに必要不可欠である。加えて太陽の11年周期変動や27日周期変動、マウンダー極小期のような太陽活動の大極小期 (grand solar minimum) などの変動は大気や海洋に短期的・長期的な変動をもたらす。例えば、温暖化が進行中の気候において顕著な太陽活動極小期が訪れると気候はどのような影響を受けるのかを、シミュレーションで調査することも行われている (後述)。また、太陽フレアやコロナ質量放出によって加速された高エネルギー粒子 (ソーラープロトン) や太陽活動によって地球に降り注ぐ量が左右される銀河宇宙線などが、大気にどのような影響を与え得るのかについても、近年研究が進んできている。さらには、そのような太陽活動変動がある程度予測可能であれば、気象・気候の予測の精度向上につながり得る。このように太陽活動変動を地球の気象・気候シミュレーションに取り込むことは重要であり、様々な利点がある。ただし、ただ太陽の全放射照度 (Total solar irradiance; TSI) の値を与えればよいのかというと、そのように簡単な話ではない。次節に太陽活動変動をどのようにシミュレーションに取り込むのかを解説する。

4.7.2 太陽活動変動の気候への影響をどうシミュレーションに取り込むか

太陽放射による加熱をモデルに取り込むには、TSI を単に与えるのではなく、波長ごとのス

ペクトル放射照度 (Spectral solar irradiance; SSI) を考慮しなくてはならない。それは各大気成分による吸収・散乱・透過といった放射特性が波長依存性をもっているためである。オゾンによる紫外線吸収や水・二酸化炭素による近赤外線吸収などがイメージしやすいだろう。前述の太陽活動変動の気候への影響が、成層圏・中間圏を通して地表に至るまでの、いわゆるトップダウンメカニズムをモデルが適切に再現するには、成層圏・中間圏でのオゾンなどの大気組成に強く影響を受ける紫外線放射加熱の適切な取扱いが必要になる。個々の大気成分による詳細な波長ごとの放射計算を行う、いわゆる Line-by-line 法は、理想的ではあるが膨大な計算時間がかかり、現状ではとても地球全体を解像し長期計算を行う気候モデルでは使うことができない。放射過程は気候モデルの様々な過程を扱うモジュールの中でも計算コストがとりわけ高いもので、ただ単に精度だけを気にすればよい訳ではなく、精度を維持しながら計算効率の高いものが必要とされる。複雑な波長ごとの吸収係数分布を吸収係数ごとの滑らかな確率密度・累積確率分布に変数変換して計算の効率化・単純化を図る、k-分布法のような手法が必要となる（例えば関口, 2011; 藪ら, 2005）。さらに、放射過程には雲やエアロゾルが太陽放射を反射・散乱・透過・吸収する効果や、雪面や海氷など地表での反射・吸収効果もあり、放射過程のスキームさえちゃんとしていけばよいわけではなく、雲やエアロゾル、地表面状態の分布や放射特性も正しく再現できなければならない。

さらに太陽活動変動は、放射過程による加熱だけでなく紫外線や可視光による光化学反応過程にも影響を及ぼす。成層圏や中間圏におけるオゾンの生成と消失に関わる光化学過程（オゾン化学）への影響が代表的であるが、この過程においても詳細な波長ごとの取り扱いが必要になる。成層圏・中間圏においてオゾン濃度が正しく再現されなければ、放射加熱とそれに伴う気温の分布が歪み、トップダウンメカニズムによる太陽活動変動の気候影響が正しく再現されない。また、単に光化学反応に用いる放射の取り扱いさえ適切であればよいわけではなく、オゾン化学に関連する多くの大気微量成分の濃度とそれら成分間で生じる様々な光化学反応をモデルが適切に再現する必要があるのに加え、化学反応や物質輸送の再現に重要な大気モデルの気温と大気循環、さらにはオゾン破壊前駆物質などの放出に至るまで、高い再現性を持たなければならない。

近年、気候モデルに取り入れられ始めた太陽活動変動に関する要素に、ソーラープロトンや中間エネルギー電子（ここでは 60-90km 高度で影響の強い 30-1000 keV 程度を考慮）、宇宙線による化学的影響がある。これらを適切に取り扱うには、本来、電氣的に中性な大気中での光化学過程だけでなく、熱圏より高高度で特に重要なイオン種を含めた複雑な化学過程を取り扱う数値モデルを用いなければならない。しかし、ある程度細かい空間解像度を持ち、10~100年のオーダーの長い年数を計算する気候計算において、これらの過程を取り扱うことは、計算機負荷が高く困難である。現在、気候モデルにおける大気化学過程で広く使われているのは、大気のイオン対生成率 (ion-pair production rate) を入力として窒素酸化物ラジカル NOx (NO, NO₂) と水素酸化物ラジカル Hox (OH, HO₂) を生成するパラメタリゼーションなど単純化した手法であり、例えば Mathes et al. (2017) でその手法が紹介されている。Poter et al. (1976) による

と、何らかの高エネルギー粒子を起点としてイオン対 1 つが生成されるにあたり窒素 $1.25N$ が生成され、それらの約 45%が基底状態の $N(^4S)$ 、約 55%が励起状態の $N(^2D)$ となる。 $N(^4S)$ はモデルに組み込まれた化学反応過程を経て NO_x およびそのリザーバーを含めた化学ファミリー NO_y を生成し得る。また $N(^2D)$ は速やかに NO に変換されると仮定する。 HO_x についてはモデルで取り扱うには複雑なイオン化学過程の組み込みが必要なので、 HO_x 生成率を高度とイオン対生成率の関数で与える簡便なパラメタリゼーション (Solomon et al., 1981; Jackman et al., 2005) を用いる。また近年の気候モデルの平均的な上端高度は中間圏界面付近 (80 km) 程度であるが、その場合に熱圏下部で生成された NO_y の中間圏への下方移流がモデルで表現できない。これに関しては詳細なイオン化学過程を組み込んだ数値モデルや経験モデルによって別途作成された NO_y 濃度か NO_y フラックスを気候モデルの上部境界条件に与えて対応する方法がある。

4.7.3 気象研究所地球システムモデルによるシミュレーション

太陽活動変動の気候影響のシミュレーションの例を紹介する。図 1 は、世界の気候モデルの結果を比較する国際プロジェクトである結合モデル相互比較プロジェクト (CMIP) の第 5 期 (CMIP5) に参加したモデルによって実施された、1850 年から 2005 年までの気候変動を再現する歴史実験 (historical) を用いて、太陽 11 年周期変動に対する気候応答を TSI を含む線形重回帰分析により求めたものである (Mitchell et al., 2015)。ここで用いられているモデルは、ハイトップモデル (モデル上端が成層圏界面付近 (50km 程度) かそれ以上にあり、上層の大気を精度良く表現していると考えられるモデル) 13 種類である。右下は再解析と呼ばれるもので、観測で拘束 (データ同化) したモデル実験を実施することにより観測では網羅できない要素を補足したデータであり、この場合、概ね観測と考えるとよい。再解析では、成層圏界面 (1 hPa) 全域で 1 度程度の気温の正偏差が見られる。ほとんどの気候モデルの結果においても気温の有意な正偏差が見られるものの、その大きさは小さい (ただしこれにはデータ期間の違いの影響も含まれているので注意が必要)。加えて、気温偏差の南北勾配がモデル間で異なるため、東西風の応答にも差異があり、モデル間の一致は見られない。

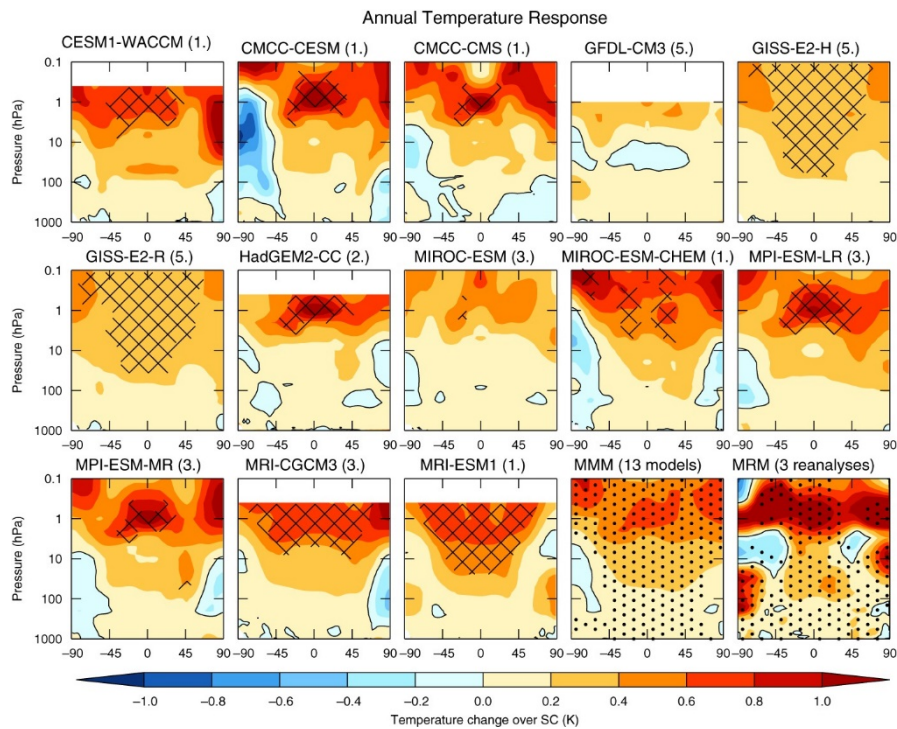


図 1. 11 年の太陽サイクルに対する年平均温度応答。CMIP5 に参加した各ハイトップモデルの結果、およびマルチモデル平均 (MMM)。使用されるデータは 1850~2005 年。個々のモデルのハッチング領域は、95%の有意性を示している。右下のパネルは、1979~2009 年の複数の再解析の平均値 (MRM) を示す。MRM 上の点描された領域は、すべての再解析が同符号の応答をしていることを示す。MMM の場合、点描の領域は、モデルの 80%以上が同符号の回帰係数を持つ場所を示す。Mitchell et al. (2015) より引用。

前節のどの過程をどの程度の精度で取り込んでいるかはモデルによって異なる。例えば太陽放射の波長帯分割数は 6 から 23 と大きく異なり、また大気オゾン化学過程を大気循環や放射と相互作用させて詳細に扱っているモデルは 7 つほど、太陽活動変動の気候影響に重要とされる成層圏準二年周期振動 (QBO) を再現できているモデルも 4 つしか存在しなかった。ただし、これらの要素の取り扱いの精密さとモデルの気候応答の再現性が必ずしも一致するわけではなく、気候モデルの大気海洋循環の再現性といった基本的な性能も重要な要素であると考えられる。

図 2 は、CMIP の第 6 期 (CMIP6) に参加した気象研究所地球システムモデル MRI-ESM2.0 によって計算された、2003 年 10 月末の大規模な高エネルギー粒子降下起きたハロウィンイベント時の極域のオゾン変動を示す。左は衛星 MIPAS で観測されたオゾン変動 (Funke et al., 2011) で、10 月末に大規模なオゾン減少が生じていることが分かる。右は MRI-ESM2.0 の計算結果で、衛星観測に見られる変動を、大きさを含めて良く再現できていることがわかる。MRI-ESM2.0 は前節の NO_x、HO_x の簡易パラメタリゼーションを用いており、それによりハロウィンイベント時のオゾン減少を再現できている。

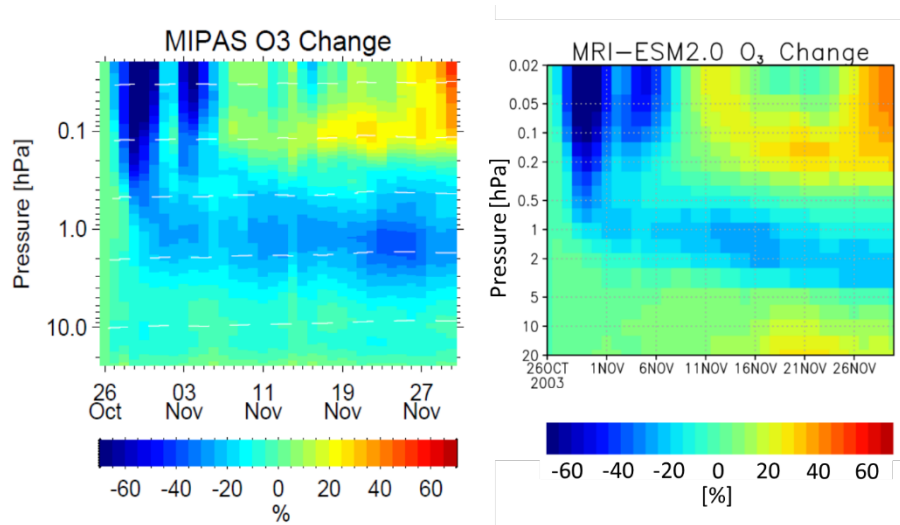


図 2. 2003 年のハロウィンイベント時の北極域（北緯 70-90 度）オゾン変化率で 10 月 26 日からの差を示す。（左）衛星観測 MIPAS（Funke et al., 2011 からの引用）、（右）気象研究所地球システムモデル MRI-ESM2.0 の観測の海面水温を与えたシミュレーション（CMIP6-AMIP）結果で 3 メンバーアンサンブル平均。

4.7.4 最新研究による太陽活動変動の気候への影響評価

気候変動に関する政府間パネル（IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change）は、人為起源による気候変化、影響、適応及び緩和方策に関し、科学的、技術的、社会経済学的な見地から包括的な評価を行うことを目的として、1988 年に世界気象機関（WMO）と国連環境計画（UNEP）により設立された組織であり、概ね 5-6 年ごとの評価報告書と、その時に応じた特別報告書を公表している。2013 年に第 5 次評価報告書が発刊され、今後第 6 次評価報告書の発刊が予定されている。また並行して世界気候研究計画（WCRP）と結合モデル作業部会（WGCM）が主導する CMIP には世界の気候モデルセンターが参加し、最新の気候モデルによる気候変動評価のための実験が共通のプロトコルで行われている（図 3）。複数のモデルで同様の気候変動評価実験を行うことで、モデルが異なることによって生じる結果の差（モデル不確実性）を相互比較によって可能な限り評価し、結果の信頼性を高めている。またモデルを構成する大気循環、雲、降水、海洋循環、オゾン、エアロゾルなどの要素のうち、どの要素の再現性が悪く、モデル不確実性の原因になっているのかを調べることで、モデルの再現性向上と不確実性の低減を目指す研究も進められる。CMIP の実験結果は IPCC 評価報告書の資料として積極的に利用されている。2020 年現在、CMIP6 が進行中で、各国の実験はほぼ終了し、世界中の研究者によって解析が進められているところである。

前回の IPCC 第 5 次評価報告書には気候変動と太陽活動変動の関係についてこれまでの研究から得られた知見がまとめられている。抜粋すると、以下の通りである。

太陽活動極大期と極小期間の全球平均地表気温の変化は、回帰分析を用いた研究と強制の推定値から 0.1°C 程度のオーダーであると推定されているが、この値も推定手法の問題で実際はさらに小さいという主張もあり、実際、気候モデルで見積もった場合にはこの変動は半分以下の値を示す。したがって、1950 年以降に観測された地球温暖化に対する太陽強制からの寄与が温室効果ガスからの寄与よりも大きかったとは極めて考えにくい (**extremely unlikely**)。加えて、将来の太陽活動度の変化の不確実性は大きいものの (**very low confidence**)、太陽活動極大期と極小期の範囲において太陽活動変動の影響が人為的影響の気候変動に与える影響はかなり小さい (**high confidence**)。

地域的な観点では太陽 11 年周期変動に関連する変動は、特にインド洋、太平洋、北アジア、北大西洋地域で、短期および季節的な気候偏差を引き起こすことも示されているが (**medium evidence**)、太陽変動シグナルをエルニーニョ/南方振動 (ENSO) 等の他の変動のシグナルと区別することが困難なため、不確かさが残る。さらに、Ineson et al., 2011 は、気候モデルを用いた感度実験から、北大西洋振動 (NAO) の負位相が太陽極小期に多く見られることを示唆しており、冬のヨーロッパでのブロッキング高気圧イベントの頻度増加の兆候を含むいくつかの観測的証拠も存在する。

また宇宙線によるエアロゾル新粒子生成に伴う雲生成については、「宇宙線は自由対流圏におけるエアロゾル新粒子形成を強化するが、雲凝結核濃度に対する効果は定量的に非常に弱く、太陽活動周期又は過去 1 世紀の間に検出可能な気候影響はない (**medium evidence and high agreement**)。宇宙線と雲量の変化の間に明確な関連性は見いだされていない。そのような関連性が存在するとして、それを説明するためには、宇宙線によるエアロゾル新粒子の核生成以外のメカニズムが必要となる」と述べられており、宇宙線の影響の可能性には現時点で厳しい評価がされているものの、発展途上の分野なので今後の研究動向を見ていく必要がある。

以上が、IPCC 第 5 次評価報告書にまとめられた内容である。それ以降の最新の研究の状況を以下に記す。

将来気候予測において、マウンダー極小期のような太陽活動が特に弱まるイベント (**grand solar minimum**) が起きたら温暖化はどの程度影響を受けるかを気候モデルシミュレーションによって調べる研究が行われている (例えば Meehl et al., 2013; Ineson et al., 2015; Maycock et al., 2015)。どの程度の太陽活動弱さを想定するかによって結果は異なるが、大気化学過程を含んだ米国の地球システムモデル CESM1 で TSI を 0.25% 減少させると 0.2 度程度の全球平均地表気温の低下が起きた。しかし、気温低下は極小期を与えている期間のみで、終了すると極小期を与えていない温暖化シナリオと同様の気温になった (Meehl et al., 2013)。また、英国の大気モデル HadGEM2-CC を用いた研究では、TSI を 0.12% 減させた場合、成層圏界面付近では年平均で 1.2 度の全球平均気温の低下が見られたが、地表付近では 0.1 度程度の低下しか見られなかった (Maycock et al., 2015)。紫外線の変化を大きくすると応答は変化し、同じ 0.13% 程度の TSI 弱化に対して紫外線を全く変化させない場合とほぼ紫外線のみを変化させた場合を比べると、冬季ヨーロッパ北部における気温低下が -0.4 度から -0.8 度変化した。この値は、温室効果ガス排

出量の最大排出シナリオ (RCP8.5) と中位安定化シナリオ (RCP4.5) の 21 世紀末冬季ヨーロッパ北部の気温差の 2-3 割程度に相当する (Ineson et al., 2015)。

宇宙線による雲帯電効果は IPCC AR5 では触れられていないが、Mironova et al. (2015) でレビューが行われており、例えば雲端の帯電が観測され、粒径の小さい水滴の荷電影響は理論上期待されているものの、その変化が雲形成や降雨に量的に重要な寄与があるという結論には至っておらず、こちらも今後の研究動向を見ていく必要がある。

また最新の研究 (Chiodo et al., 2019) において、これまで比較的信頼性が高いと考えられていた、太陽 11 年周期変動が北半球冬季中高緯度域の主要な大気循環変動モードである北大西洋振動 (NAO) に有意なシグナルとして現れるという結果に疑義が出ている。1960 年中頃以前にそのようなシグナルが見られないことや、全球化学気候モデル等のシミュレーションにおいて太陽変動を与えなくても NAO に太陽変動シグナルに類似した周期変動が確率的に現れることが、研究の疑義の根拠であった。この主張の真偽は今のところ明らかになっていない。用いたモデルや解析方法に問題がある可能性もあるが、今後の研究によってそれは明らかになっていくだろう。

最新の気候変動評価を行う IPCC 第 6 次評価報告書のために実施された CMIP6 においても気候変動を評価する実験が多数行われている。温暖化前の 1850 年程度を想定した産業革命前実験 (piControl)、そこから二酸化炭素濃度を年 1% ずつ増加させる CO₂ 漸増実験 (1pctCO₂)、二酸化炭素濃度を一気に 4 倍させる CO₂ 急増実験 (abrupt4xCO₂)、1850 年から現在までの気候を再現する歴史実験 (historical)、将来の温室効果ガスや人為エアロゾル排出を温暖化対策のレベルに応じて複数シナリオで与えて気候の応答を調べる各種シナリオ実験 (ssp) などである。他にも数多くの実験があるが、太陽活動変動影響に関連する実験では、上記の historical に対比させる形で、大規模火山噴火と太陽活動変動の自然変動だけを歴史変動させる自然歴史実験 (hist-nat) や、より直接的な太陽活動変動のみ歴史変動させる太陽歴史実験 (hist-sol) などがある。太陽活動変動の気候影響を評価する手法として、太陽活動極大期と極小期の差を取る手法や 11 年に近い周期変動を抜き出すという手法があるが、エルニーニョ南方振動 (ENSO) や大規模火山噴火など長期の大規模な変動シグナルを誤検出してしまう恐れがある。太陽活動変動のみ ON/OFF する長期の実験データでサンプル数を増やすことができれば、誤検出の可能性を小さくできる。また古気候実験も太陽の影響評価研究に有効で、軌道要素の変化により地球が受ける太陽放射を変化させる実験や、過去の grand solar minimum を含む太陽活動変動や巨大火山噴火を推定して与える過去千年実験 (past1000) を行っている。2020 年現在 CMIP6 のマルチモデル相互比較解析が世界中で精力的に行われており、太陽活動変動の気候影響に関する新たな知見が加えられていくはずである。

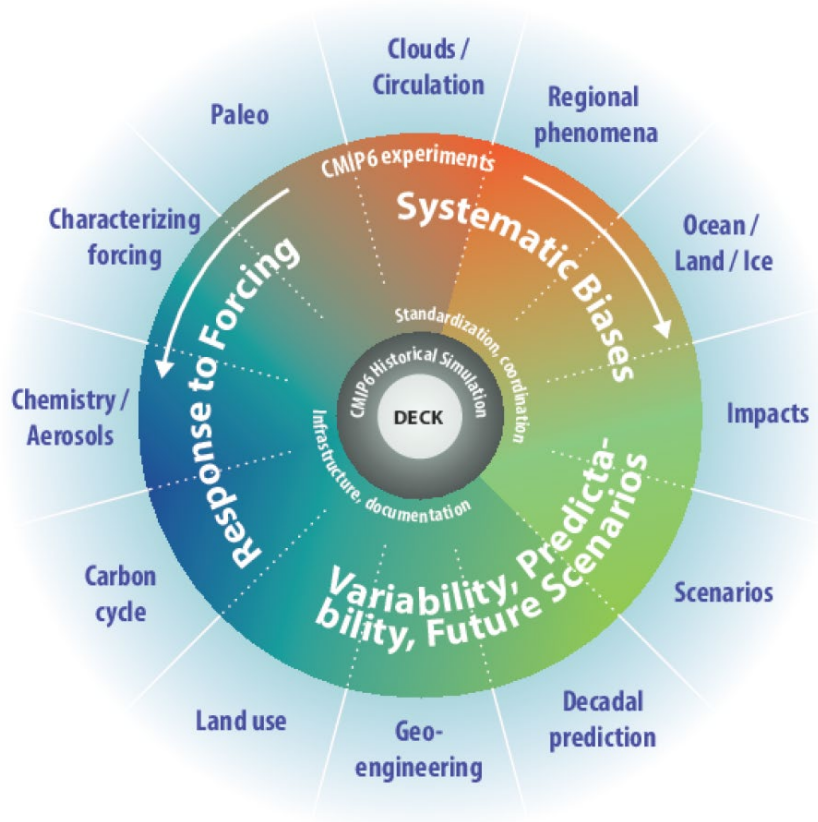


図3. Eyring et al (2016) より引用。CMIP6 実験デザインの概念図で内側に CMIP の基本実験である DECK と歴史実験 (historical) があり周囲の白文字で DECK 実験が持つ効用を示している。外側に詳細なモデル相互比較 (MIP) で解決するより特定の科学的トピックが青文字で書かれており、それぞれがどの科学的トピック (強制応答、変動性・予測可能性、モデルの系統的バイアス) を解決するためのものが外側の白文字で示されている。

参考文献

関口美保, 2011: GCM における放射過程のモデル化, 気象研究ノート, 223, 1-23.

藪将吉, 村井臣哉, 北川裕人, 2005: 晴天放射スキーム. 数値予報課報告・別冊第 51 号. 気象庁予報部, 53-64.

Chiodo, G., Oehrlein, J., Polvani, L.M. et al. Insignificant influence of the 11-year solar cycle on the North Atlantic Oscillation. Nature Geosci 12, 94–99 (2019) doi:10.1038/s41561-018-0293-3

Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., and Taylor, K. E.: Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization, Geosci. Model Dev., 9, 1937–1958, <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>, 2016.

- Funke, B., Baumgaertner, A., Calisto, M., Egorova, T., Jackman, C. H., Kieser, J., Krivolutsky, A., López-Puertas, M., Marsh, D. R., Reddmann, T., Rozanov, E., Salmi, S.-M., Sinnhuber, M., Stiller, G. P., Verronen, P. T., Versick, S., von Clarmann, T., Vyushkova, T. Y., Wieters, N., and Wissing, J. M.: Composition changes after the "Halloween" solar proton event: the High Energy Particle Precipitation in the Atmosphere (HEPPA) model versus MIPAS data intercomparison study, *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 9089-9139, <https://doi.org/10.5194/acp-11-9089-2011>, 2011.
- Ineson, S., Maycock, A., Gray, L. et al. Regional climate impacts of a possible future grand solar minimum. *Nat Commun* 6, 7535 (2015) doi:10.1038/ncomms8535
- Jackman, C. H., DeLand, M. T., Labow, G. J., Fleming, E. L., Weisenstein, D. K., Ko, M. K. W., Sinnhuber, M., and Russell, J. M.: Neutral atmospheric influences of the solar proton events in October–November 2003, *J. Geophys. Res.*, 110, A09S27, <https://doi.org/10.1029/2004JA010888>, 2005.
- Matthes, K., Funke, B., Andersson, M. E., Barnard, L., Beer, J., Charbonneau, P., Clilverd, M. A., Dudok de Wit, T., Haberreiter, M., Hendry, A., Jackman, C. H., Kretzschmar, M., Kruschke, T., Kunze, M., Langematz, U., Marsh, D. R., Maycock, A. C., Misios, S., Rodger, C. J., Scaife, A. A., Seppälä, A., Shangguan, M., Sinnhuber, M., Tourpali, K., Usoskin, I., van de Kamp, M., Verronen, P. T., and Versick, S.: Solar forcing for CMIP6 (v3.2), *Geosci. Model Dev.*, 10, 2247–2302, <https://doi.org/10.5194/gmd-10-2247-2017>, 2017.
- Maycock, A. C., Ineson, S., Gray, L. J., Scaife, A. A., Anstey, J. A., Lockwood, M., Butchart, N., Hardiman, S. C., Mitchell, D. M., and Osprey, S. M. (2015), Possible impacts of a future grand solar minimum on climate: Stratospheric and global circulation changes, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120, 9043–9058, doi:10.1002/2014JD022022.
- Meehl, G. A., Arblaster, J. M., and Marsh, D. R. (2013), Could a future “Grand Solar Minimum” like the Maunder Minimum stop global warming?, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 1789–1793, doi:10.1002/grl.50361.
- Mironova, I.A., Aplin, K.L., Arnold, F. et al. *Space Sci Rev* (2015) 194: 1. <https://doi.org/10.1007/s11214-015-0185-4>
- Mitchell, D. M., Misios, S., Gray, L. J., Tourpali, K., Matthes, K., Hood, L., Schmidt, H., Chiodo, G., Thiéblemont, R., Rozanov, E., Shindell, D. and Krivolutsky, A. (2015), Solar signals in CMIP - 5 simulations: the stratospheric pathway. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 141: 2390-2403. doi:10.1002/qj.2530
- Porter, H. S., Jackman, C. H., and Green, A. E. S.: Efficiencies for production of atomic nitrogen and oxygen by relativistic proton impact in air, *J. Chem. Phys.*, 65, 154–167, <https://doi.org/10.1063/1.432812>, 1976.
- Solomon, S., Rusch, D.W., Gérard, J.-C., Reid, G. C., and Crutzen, P. J.: The effect of particle precipitation events on the neutral and ion chemistry of the middle atmosphere. II - Odd hydrogen, *Planet. Space Sci.*, 29, 885–892, 1981.