



令和4年8月15日
気象研究所
海洋研究開発機構

物理的な推定指標を用いて 下層雲による温暖化の増幅が説明できることを示しました

気象研究所と海洋研究開発機構の研究チームは、最新の気候モデルによる温暖化実験結果に対し、大規模な大気の温度や湿度の鉛直構造をもとに考案した推定指標を用いることで、温暖化時の下層雲量変化が説明できることを初めて示しました。その結果、亜熱帯海洋上の下層雲量は温暖化時にほぼ確実に減少することがわかりました。これは、下層雲によって将来の温暖化が増幅することを意味しています。この結果は、多くの気候モデルの予測結果を支持するとともに、その不確実性の幅を大きく狭め、温暖化時の下層雲量変化に対して新たな物理的解釈を提示するものです。本研究結果は、2022年7月11日付で、国際科学誌「米国科学アカデミー紀要 (PNAS)」に掲載されました。

温室効果気体の増加によって生じる将来の地球の昇温量を正確に予測することは、地球温暖化研究において未だ喫緊の課題となっています。その予測を困難にしている主な原因として、日射を反射して地球を冷やす効果を持つ下層雲の被覆率（下層雲量）が、温暖化によってどのように変化するかははっきりとわかっていないことが挙げられます。温暖化時に下層雲量が増加すると温暖化を抑制する方向に（負のフィードバック）、減少すると温暖化を増幅する方向に（正のフィードバック）、それぞれ働きますが、世界の最新の気候モデルの多くは、温暖化時に下層雲量は減少すると予測しています。しかし、大きな減少を予測する気候モデルから僅かな増加を予測する気候モデルまで幅広く存在しており、依然として大きな不確実性の幅があります。

一方で、下層雲量は大規模な大気の温度や湿度の鉛直構造を表す指標と非常によい関係があることが、これまでの観測データにもとづいた研究からわかっています。気候モデルから得られる温度や湿度の将来変化は、下層雲量そのものの将来変化と違って比較的信頼性が高いため、こうした指標の将来変化を用いることで、より信頼性の高い下層雲量の将来変化が推定できると期待されます。ところが、気温の鉛直分布にもとづく従来の下層雲量の推定指標では、想定される下層雲量の変化と一致せず、近年大きな議論となっていました。

今般、気象研究所と海洋研究開発機構の研究チームは、最新の気候モデルによる温暖化実験結果において、推定雲頂エントレインメント指標（Estimated Cloud-Top Entrainment Index: ECTEI）という湿度の鉛直分布も考慮した新しい推定指標が、下層雲量の変化を非常によく説明していることを初めて示し

ました。ECTEIによる推定は、温暖化時に亜熱帯海洋上の下層雲量がほぼ確実（99%以上の可能性）に減少することを示しています。この結果は、下層雲によって温暖化が増幅することを意味しており、多くの気候モデルの予測結果を支持するとともに、その不確実性の幅を大きく狭め、これまで物理的な説明ができなかった温暖化時の下層雲量変化に対して、雲頂エンTRAINMENT過程の変化を通じて理解できるという新たな解釈を提示しています。

本研究成果は、観測から得られた相関関係にもとづいて将来気候予測の不確実性の幅を狭め、気候変動のメカニズムに関する理解をより深めるものであり、今後の気候変動予測の高度化や精度向上にも大きく貢献すると考えられます。

< 発表論文 >

掲載誌 : *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*

タイトル : Estimated cloud-top entrainment index explains positive low-cloud-cover feedback

著者名 : Tsuyoshi Koshiro¹, Hideaki Kawai¹, and Akira T. Noda²

所属 : 1 気象庁気象研究所. 2 海洋研究開発機構.

DOI : 10.1073/pnas.2200635119

URL : <https://doi.org/10.1073/pnas.2200635119>

< 関連情報 >

本研究は、文部科学省「統合的気候モデル高度化研究プログラム」（JPMXD0717935457、JPMXD0717935561）および「気候変動予測先端研究プログラム」（JPMXD0722680395、JPMXD0722680734）、環境再生保全機構「環境研究総合推進費」（JPMEERF20202003）、宇宙航空研究開発機構「第2回地球観測研究公募」および「第3回地球観測研究公募」、ならびに日本学術振興会「科学研究費助成事業」（JP18H03363、JP19K03977、JP19H05699）の支援を受けて実施されました。

問い合わせ先 : 気象研究所 全球大気海洋研究部 研究官 神代 剛

メール : tkoshiro@mri-jma.go.jp

気象研究所 気象予報研究部 主任研究官 川合 秀明

メール : h-kawai@mri-jma.go.jp

海洋研究開発機構 地球環境部門 研究員 野田 暁

メール : a_noda@jamstec.go.jp

(広報担当)

気象研究所 企画室 広報担当 電話 : 029-853-8535

海洋研究開発機構 海洋科学技術戦略部 報道室

電話 : 045-778-5690 メール : press@jamstec.go.jp

1. 背景と経緯

大気中の二酸化炭素増加にともなって地上気温がどの程度上昇するのかは、気候モデルの予測結果に今なお大きな不確実性があります。その主な原因の一つが下層雲です。下層雲は雲の上端（雲頂）が高度約3kmより低い雲で、カリフォルニア沖やペルー沖など大陸西岸の亜熱帯海洋上に広く分布しており、海面に比べて太陽光を効率よく反射する性質があるため、地球を冷やす効果を持ちます。そのため、温暖化時に下層雲の被覆率（雲量）が増加すると温暖化を抑制する方向に（負のフィードバック）、減少すると温暖化を増幅する方向に（正のフィードバック）、それぞれ働きます。世界の最新の気候モデルを相互比較した結果では、その多くが温暖化時に下層雲量は減少すると予測しています。しかし、個々の気候モデルを見ると、大きな減少を示すものもあれば、やや増加するものもあり、結果は大きくばらついています。

一方で、気温や湿度の大規模な鉛直分布は、温暖化時にどのように変化するか比較的良好にわかっています。したがって、こうした情報を表す指標と下層雲量の間に関係があれば、その指標の温暖化時の変化から、より信頼できる下層雲量の変化を推定できると考えられます。実際に、高度約3kmと地上付近の気温から求められる下層大気の安定度が、下層雲量のよい推定指標となることが観測的に知られています。大気が不安定になると対流が生じて雲ができるという一般的な雲の発達過程とは異なり、下層大気が安定であるほど、それを超えて上空に水蒸気が逃げにくくなるため、下層大気の湿度は高い状態が維持され、下層雲量は大きくなります。しかし、多くの気候モデルでは、温暖化時にこの安定度指標が増加するにもかかわらず、下層雲量は減少していることがわかってきました。観測から得られた両者の正比例の関係に反して、温暖化時の変化の符号が一致しておらず、近年大きな議論となっていました。

ここ数年の研究では、この安定度指標を下層雲量の推定指標ではなく、下層雲量の変動要因の一つと捉え、これを含めた様々な気象要素の変化の線形結合によって温暖化時の下層雲量変化を推定することが試みられてきました。その結果、この安定度指標と海面水温が主要な変動要因であり、安定度指標による増加を海面水温による減少が上回るために、温暖化時の正味の雲量変化が負になることが指摘されています。しかし、こうした経験則的な手法では、物理的な解釈を得るのが難しいという問題がありました。

こうした中、本研究チームのメンバーが、新しい下層雲量の指標を2017年に提案し、従来の安定度指標と同様に、下層雲量との間に全球的に強い正相関があることを観測データの解析から示しました。この新指標は、雲頂エントレインメントの発生基準の式にもとづいており、推定雲頂エントレインメント指標（Estimated Cloud-Top Entrainment Index: ECTEI）と名付けられました

（Kawai et al. 2017）。雲頂エントレインメントとは、雲頂の上の乾いた大気が雲内に取り込まれると下層雲が壊されるという、下層雲の存在量を左右する非常に重要な物理過程です。上空の大気と雲のある下層大気の湿度差（高度約3kmと地上付近の水蒸気量から求められる）が大きいほど、取り込まれた大気に雲粒がより多く蒸発して下層雲は壊れやすくなります。一方、従来の推定指標で表わされる下層大気の安定度が高いと、上空の乾いた大気は雲内に入り込

めず、下層雲は壊れにくくなります。ECTEIはこの2つの効果（湿度差項と安定度項）の和で定義された指標です。湿度差項の変化は海面水温の変化に強く依存するので、先行研究の指摘した下層雲量変化の安定度指標および海面水温依存性は、ECTEIの定義式から自然に導出されます。したがって、ECTEIを用いて温暖化時の下層雲量減少が推定できるとKawai et al. (2017)は予想していました。

2. 主な結果

そこで本研究では、世界各国の研究機関が参加した第5次および第6次結合モデル相互比較計画（CMIP5およびCMIP6）で実施された、15の気候モデルによる実験結果を用いて、亜熱帯海洋上における下層雲量と従来の安定度指標および新指標ECTEIの温暖化時の変化を調べました。現在気候実験（現在気候の海面水温を与えた大気実験）と温暖化実験（現在気候の海面水温を、大気海洋結合実験で予測された将来の昇温分布で全球平均 4°C 上昇させて与えた大気実験）について、10年分のデータを平均した気候値を用い、両者の差をとることで、温暖化時の変化が得られます。

図1Aに、15の気候モデルの結果を平均した温暖化時の下層雲量の変化を示します。下層雲の卓越する5つの領域（北東太平洋、南東太平洋、北大西洋、南大西洋、南インド洋）のいずれでも、増加している場所も一部ありますが、下層雲量の減少が広く見られることがわかります。ところが、従来の安定度指標は全域で増加しています（図1B）。一方、ECTEIの変化は下層雲量の変化の符号と整合的で、分布もよく一致していることが明らかになりました（図1C）。これらの変化傾向は、図1A–Cに黒点で示されているとおり、多くの領域で気候モデル間の一致度が高く、信頼性の高い結果であると言えます。

過去の研究で、これらの指標と下層雲量の比例関係の傾き（回帰係数）が観測的に得られています。図1B, Cに示したそれぞれの指標の変化に、その回帰係数を掛けると、推定される下層雲量の変化に換算することができます。気候モデルが実際に予測した下層雲量変化（図1A）と比較して、従来の安定度指標から推定される下層雲量変化（図2A）は、全域で非常に大きな値になってしまっていますが、ECTEIから推定される下層雲量変化（図2B）は、強いピークは見られないものの、定量的によく一致した分布になっていることがわかります。また、このECTEIから推定される下層雲量変化は、安定度項の寄与（図2C）と湿度差項の寄与（図2D）に分けることができます。これを見ると、安定度項の寄与は全域で正になっており、その分布は与えた温暖化時の海面水温の昇温分布（図2E）に強く依存していることがわかります。一方、湿度差項の寄与は全域で負になっており、その分布は比較的一様で、気候平均的な海面水温分布の影響を受けるために、各領域の低緯度側および西側でやや大きくなっています。このように、ECTEIを用いることで、雲頂エントレインメントという物理過程を通じて温暖化時の下層雲量変化を説明できるということが、最新の気候モデルによる温暖化実験結果から示されました。

図2の結果をより定量的に見るため、図3に5つの下層雲域および対象領域全体で平均した値を示します。棒グラフで示した15の気候モデルの平均値を比較

すると、すべての領域で、従来の安定度指標から推定される下層雲量変化（赤）は、実際の下層雲量変化（黒）から大きく外れており、符号も基本的に逆向きなのに対し、ECTEIから推定される下層雲量変化（緑）は、実際の下層雲量変化と定量的によく一致しています。特に、南東太平洋や南大西洋では、領域内南北の変化のコントラストまで非常によく再現しています。そして、対象領域全体の平均として、安定度項による増加（黄）を湿度差項による減少（青）が上回っているために、正味の下層雲量変化が負になっていることがわかります。さらに、丸印で示した個々の気候モデルの結果を比較すると、ECTEIから推定される下層雲量変化は、実際の下層雲量変化に比べて非常にばらつきが小さくなっています。統計的に解析すると、ECTEIから推定される温暖化時の下層雲量変化は、対象領域全体で平均して、 1°C あたり $-0.41\pm 0.28\%$ （90%信頼区間）であることがわかりました。この値は、温暖化時に亜熱帯海洋上の下層雲量はほぼ確実（99%以上の可能性）に減少することを示しており、下層雲によって温暖化が増幅することを意味しています。ECTEIによる推定は、多くの気候モデルが予測した温暖化時の下層雲量減少を支持するとともに、その不確実性の幅を大きく狭めています。

3. 今後の展望

今後は、ECTEIを用いた気候モデルの改良が進み、下層雲量の再現性や将来気候予測の信頼性がさらに向上することが期待されます。気候モデルでは、モデルの格子間隔より細かい物理現象を直接計算することができないため、その効果を格子スケールの物理量で表現して計算する、パラメタリゼーションと呼ばれる手法が導入されています。ECTEIを用いて雲頂での鉛直混合を制御することで、雲頂エントレインメント過程がパラメタライズされ、下層雲の表現が向上すると考えられます。実際に、気象研究所で開発された最新の気候モデルでは、このパラメタリゼーションが既に導入されています。これにより、本研究所の前世代の気候モデルに比べて下層雲量の再現性が大幅に向上し、地球大気放射収支の再現性をモデル間相互比較した結果でも世界トップクラスに位置しています。また、この手法は、気象庁の季節予報で今年2月から運用を開始した大気海洋結合モデル（第3世代）にも導入されています。世界各国の他の研究機関や現業機関でも、同様のパラメタリゼーションが採用されていく可能性があります。

一方で、ばらつきは大きいものの、現状でも多くの気候モデルが温暖化すると下層雲量が減少することを予測しています。下層雲の生成消滅過程には、雲頂エントレインメント過程だけでなく、放射による加熱・冷却や、雨粒となって除去される過程など、様々な要因が関係しています。こうした要因の温暖化時の変化が、下層雲量の変化にどのような影響を及ぼしているのか、その役割についての理解を深める研究が必要です。また、本研究結果は、温暖化時の下層雲量変化を予測する際に海面水温の昇温分布が重要であることも示唆しています。将来気候予測の精度向上のため、さらに信頼性の高い下層雲量変化を得るには、大気海洋結合実験で現在気候における海面水温の再現性を向上させることが不可欠で、この点についても今後の研究の進展が望まれます。

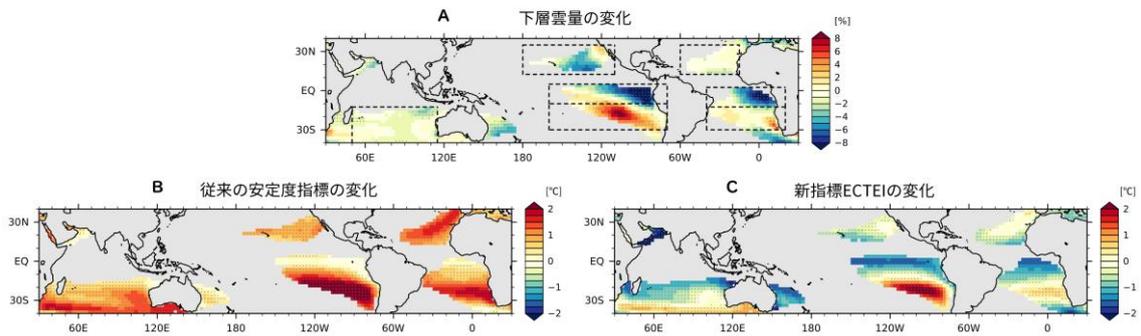


図1 温暖化時の下層雲量とその推定指標の変化の地理的分布

15 の気候モデルの平均から得られた、温暖化時の (A) 下層雲量、(B) 従来の安定度指標、(C) 新指標 ECTEI の変化。15 モデルのうち 12 モデル (全モデル数の 80%) 以上で解析対象 (南北緯度 40° 以内で上層雲量気候値 20% 未満の海洋上) と判定された領域のみを表示している (それ以外の領域は灰色)。黒点は 12 モデル以上で変化の符号が一致している領域を示す。(A) の破線は、図 3 で領域平均を示した 5 つの亜熱帯海洋下層雲域を表す：北東太平洋

(12.5° – 35° N, 110° – 180° W)、南東太平洋 (5° N– 30° S, 70° – 160° W)、北大西洋 (12.5° – 35° N, 15° – 60° W)、南大西洋 (2.5° N– 30° S, 20° E– 40° W)、南インド洋 (12.5° – 40° S, 50° – 115° E)。なお、南東太平洋と南大西洋は、領域内の南北で変化が対照的なため、それぞれ 10° S と 12.5° S で北部と南部に分けて領域を定義している。

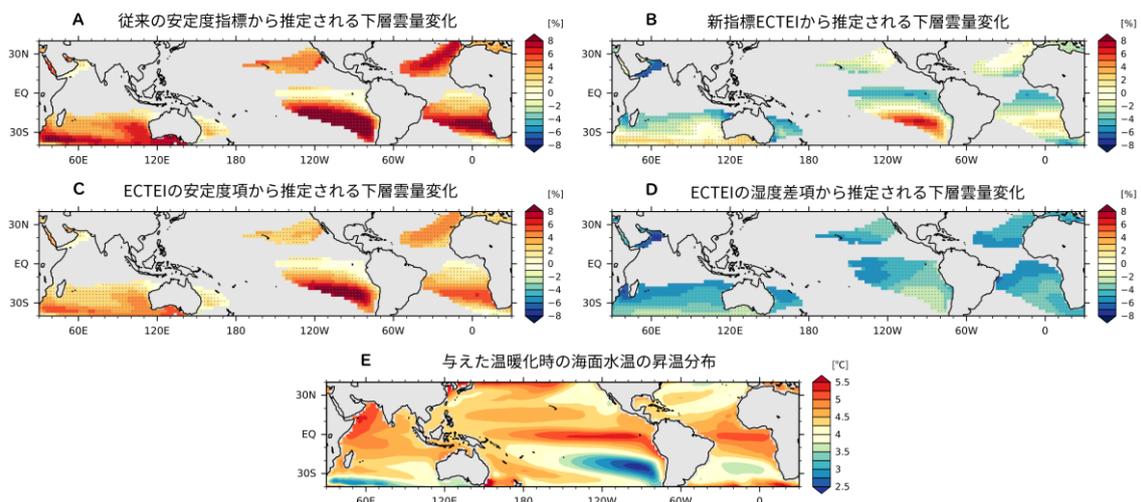


図2 指標から推定される温暖化時の下層雲量変化の地理的分布

(A–D) 図 1 と同様。ただし、(A) 従来の安定度指標、(B) 新指標 ECTEI、(C) ECTEI の安定度項、(D) ECTEI の湿度差項から推定される温暖化時の下層雲量変化。(E) 気候モデルに与えた温暖化時の海面水温の昇温分布。

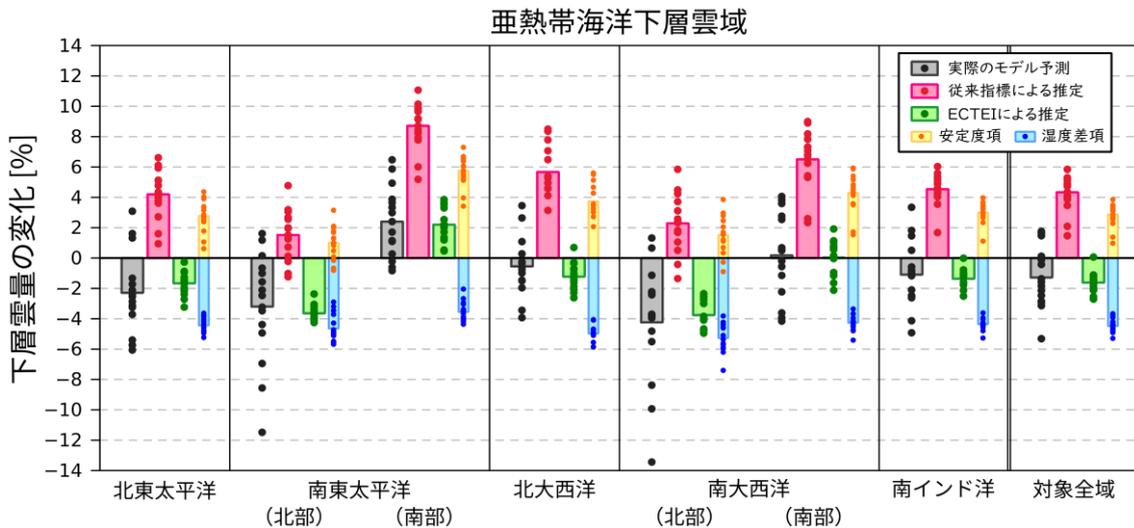


図3 実際のモデル予測および指標から推定される温暖化時の下層雲量変化の領域平均

図1Aに示した5つの亜熱帯下層雲域と対象領域全体で平均した、温暖化時の下層雲量変化：(黒) 実際のモデル予測、(赤) 従来の安定度指標による推定、(緑) 新指標 ECTEI による推定と、ECTEI による推定のうち (黄) 安定度項の寄与および (青) 湿度差項の寄与。棒グラフは15の気候モデルの平均、丸印は各気候モデルの値を示す。

<参考文献>

Kawai, H., T. Koshiro, and M. J. Webb, 2017: Interpretation of factors controlling low cloud cover and low cloud feedback using a unified predictive index. *J. Climate*, **30**, 9119–9131, doi:10.1175/JCLI-D-16-0825.1.