

## 強制要素の efficacy (エフィカシー)

釜 江 陽 一\*1・吉 森 正 和\*2

大気中の CO<sub>2</sub>濃度が2倍に増えて平衡に達した時の全球平均地上気温上昇値は、平衡気候感度 (Equilibrium Climate Sensitivity (ECS), 吉森ほか 2012) と呼ばれ、様々な研究手法によりその推定が進められている。ECS を推定する手法には、主に①数十年から100年程度の時間スケールで、計器により直接的に観測されている気温や放射強制力等の推定量から求める方法、②火山噴火やエルニーニョ・ラニーニャなど、年々スケールの大きな変動から求める方法、③気候モデルに放射強制を与えたときの気温上昇量から推定する方法、④古環境の代替指標や、それをもとにしたモデリングの結果を利用した古気候学的なアプローチ、などが存在する (例えば Knutti and Hegerl 2008)。いずれの推定にも大きな不確実性の幅が存在するが、その中でも19世紀以降の観測データをもとに推定した ECS は、他の手法で求められた ECS よりも低い値をとる場合がある。Otto *et al.* (2013) と Lewis and Curry (2014) はそれぞれ、19世紀後半から21世紀初期にかけての地上気温の観測データと、放射強制力、海洋熱吸収の推定量をもとに、ECS とその 5-95%信頼区間を、1.9°C (0.9-5.0), 1.6°C (1.1-4.1) と推定した。これは、最新の気候モデルから得られる ECS (23種類のモデルで2.1-4.7°Cの範囲; IPCC 2014) の値よりも低めであり、様々な古気候の時代を対象にした ECS の推定 (2.2-4.8°C; Rohling *et al.* 2012) よりも低い。このように、推定手法によって大きな開きがあることで、気候変動に関

する政府間パネル第五次評価報告書でも、ECS の不確実性の幅は依然として大きいままである (1.5-4.5°C; Collins *et al.* 2014)。このような ECS の差を説明する一つの要素として、強制要素のエフィカシー (efficacy, Hansen *et al.* 2005; Yoshimori and Broccoli 2008) が注目されている。

強制要素 (温室効果気体, エアロゾル, 土地利用) のエフィカシーは、CO<sub>2</sub>以外の放射強制力とそれによる気温上昇量との比を、CO<sub>2</sub>のものと比較した値によって定義される。CO<sub>2</sub>濃度の上昇によって放射強制力が働き ( $F_{\text{CO}_2}$ ), それによって地上気温が全球平均値で  $\Delta T_{\text{CO}_2}$  だけ上昇したとき、特定の強制要素による  $F$  と  $\Delta T$  の比を CO<sub>2</sub>のものとは比べた、

$$E = (\Delta T / F) / (\Delta T_{\text{CO}_2} / F_{\text{CO}_2}) \quad (1)$$

で求められる比  $E$  を、その強制要素のエフィカシーと呼ぶ (Hansen *et al.* 2005)。 $E$  が1より大きければ、 $F_{\text{CO}_2}$ と同じ大きさの  $F$  が働いても、それによる  $\Delta T$  は  $\Delta T_{\text{CO}_2}$  よりも大きくなる。すなわち、 $F$  と  $F_{\text{CO}_2}$  が既知であっても、観測された  $\Delta T$  から換算して求められる  $\Delta T_{\text{CO}_2}$  (ECS) は  $E$  の値によって左右される。

Shindell (2014) は、複数の気候モデルによって行われた、19世紀以降の各強制要素 (温室効果気体と自然起源強制要素) の寄与を切り分ける実験の結果を用いて、オゾンとエアロゾルのエフィカシーは1より大きい (約1.5) と見積もった。Kummer and Dessler (2014) は、エアロゾルとオゾンのエフィカシーを1.33と仮定すると、20世紀の観測をもとにした ECS の推定幅が、エフィカシーを1として扱ったとき (1.6-4.1°C) に比べて、他の手法による推定幅とよく一致する (1.9-6.8°C) ことを指摘した。

強制要素によってエフィカシーが1以外の値を取る

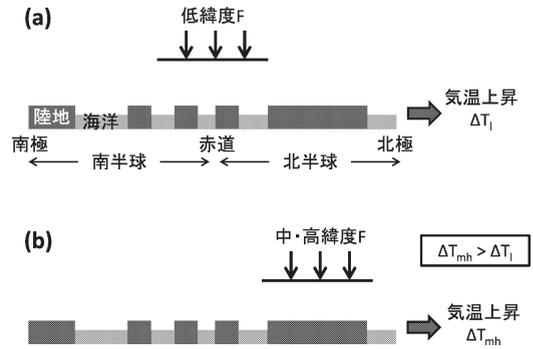
\*1 (連絡責任著者) Youichi KAMAE, 国立環境研究所, kamae.yoichi@nies.go.jp

\*2 Masakazu YOSHIMORI, 北海道大学大学院地球環境科学研究院.

要因として、強制要素の①三次元的な空間分布の違い、②放射吸収スペクトル分布の違い、が挙げられる (Hansen *et al.* 2005)。空間的一様性の高い CO<sub>2</sub> に比べ、エアロゾルや対流圏オゾンは北半球に集中している。大陸と海洋、雪氷圏の分布の非一様性により、全球で平均した放射強制力が同じでも、その分布によって、生じる気温上昇量は異なる (第 1 図)。Shindell and Faluvegi (2009) は、放射強制を与える緯度帯を変え、熱帯域よりも北半球中・高緯度に放射強制を与えたほうが、全球平均地上気温の上昇量が大きくなることを示した。また、鉛直分布の違いもエフィカシーに影響する。CO<sub>2</sub> は対流圏と成層圏を通してよく混合されている一方で、鉛直分布に偏りのある強制要素の場合、CO<sub>2</sub> と比べて雲や温度減率フィードバックの大きさが異なることで、地上気温の上昇量およびエフィカシーが変わる (Hansen *et al.* 1997, 2005; Yoshimori and Broccoli 2008)。また、強制要素によって、水蒸気や他の温室効果気体との吸収帯の重なり具合が異なることも、エフィカシーに差が生じる要因になる (気温が上昇して水蒸気量が増えたとき、水蒸気との重なりが多い強制要素ほど地表を暖める効果は小さい; Hansen *et al.* 2005)。

加えて、吸収性黒色炭素の場合、対流圏の気温プロファイルが変わることで雲量が変わり (対流圏調節)、その放射効果によってエフィカシーが変わることが指摘されている。吸収性エアロゾルはその放射効果により対流圏を暖め (直接効果)、相対湿度を低下させることにより雲を減らす働きがある一方で、加熱することで下層からの対流を抑制し、結果として下層の雲量を増やす効果もある (準直接効果)。Hansen *et al.* (2005) では、吸収性黒色炭素の準直接効果によって雲量が増え、地表に届く放射量が減り、エフィカシーが小さな値を取ることが報告されている。ただし、吸収性黒色炭素の鉛直分布の仮定によって、地表の昇温効果は大きく変わらう。温室効果気体やエアロゾルによる加熱・冷却効果 (放射強制力とエフィカシー) を正しく評価するには、気体濃度・数濃度の三次元的な分布と、その放射スペクトルをなるべく精確に取り扱うことが重要である。

特定の強制要素のエフィカシーが 1 以外の値を持ちうることは、様々な示唆を含んでいる。例えば、気候システムへの強制と応答を簡易なボックスモデルのエネルギー収支で議論する試みは、その応答を過大または過小評価する可能性がある。また、特定の強制要素



第 1 図 放射強制の空間的非一様性によってエフィカシーが 1 からずれることを示した概念図。低緯度だけに放射強制が加わった場合 (a) よりも、陸地が多く、大きな雪氷アルベドフィードバックを伴う北半球中高緯度に放射強制 (全球平均した放射強制力は a と同じ) が加わった場合 (b) のほうが、全球平均地上気温の上昇は大きくなる ( $\Delta T_{mn} > \Delta T_1$ )。Shindell and Faluvegi (2009) の結果をもとに作成。

ごとの異なる役割、さらには特定の緯度帯ごとの役割の違いを定量化することは、気候工学や気候変化の検出と要因特定、大気化学、古気候学、雲と気候フィードバックなど、様々な研究コミュニティ間に共通した、重要度の高い研究課題である。さらには、地上気温の上昇だけでなく、降水を含めた水循環への影響も指摘されており (例えば Shiogama *et al.* 2010)、気候変化の様々な側面においてエフィカシーの影響は無視することができない。

近年、ECS の不確実性の大きな要因として挙げられる雲フィードバック (釜江ほか 2014) について、そのプロセスに注目した場合、高い ECS のほうがより信頼性が高いとする研究結果が多く発表されている (Fasullo and Trenberth 2012; Sherwood *et al.* 2014)。一方で、近年は地上気温の上昇が緩やかな時期が続いている (渡部 2014)。過渡的な気温上昇の評価には、海洋熱吸収や内部変動に対する理解が不可欠であるが、その一環で、エフィカシーの不確実性が果たす役割についても理解を深めることが重要であろう。

## 参考文献

Collins, M. *et al.*, 2014: Long-term climate change: Projections, commitments and irreversibility. In: Climate

- Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F. *et al.* (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1029-1136.
- Fasullo, J. and K. A. Trenberth, 2012: A less cloudy future: The role of subtropical subsidence in climate sensitivity. *Science*, **338**, 792-794.
- Hansen, J., M. Sato and R. Ruedy, 1997: Radiative forcing and climate response. *J. Geophys. Res.*, **102**, 6831-6864.
- Hansen, J. *et al.*, 2005: Efficacy of climate forcings. *J. Geophys. Res.*, **110**, D18104, doi:10.1029/2005JD005776.
- IPCC, 2014: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F. *et al.* (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535pp.
- 釜江陽一, 小倉知夫, 神代 剛, 小玉知央, 野田 暁, 清木達也, Ying-Wen Chen, 塩竈秀夫, 川合秀明, 渡部雅浩, 2014: 雲フィードバックに関するモデル相互比較プロジェクト (CFMIP) 会議2014参加報告. *天気*, **61**, 997-1004.
- Knutti, R. and G. C. Hegerl, 2008: The equilibrium sensitivity of the Earth's temperature to radiation changes. *Nat. Geosci.*, **1**, 735-743.
- Kummer, J. R. and A. E. Dessler, 2014: The impact of forcing efficacy on the equilibrium climate sensitivity. *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 3565-3568.
- Lewis, N. and J. A. Curry, 2014: The implications for climate sensitivity of AR5 forcing and heat uptake estimates. *Clim. Dyn.*, doi: 10.1007/s00382-014-2342-y.
- Otto, A. *et al.*, 2013: Energy budget constraints on climate response. *Nat. Geosci.*, **6**, 415-416.
- Rohling, E. J. *et al.*, 2012: Making sense of palaeoclimate sensitivity. *Nature*, **491**, 683-691.
- Sherwood, S. C., S. Bony and J.-L. Dufresne, 2014: Spread in model climate sensitivity traced to atmospheric convective mixing. *Nature*, **505**, 37-42.
- Shindell, D. T., 2014: Inhomogeneous forcing and transient climate sensitivity. *Nat. Clim. Change*, **4**, 274-277.
- Shindell, D. and G. Faluvegi, 2009: Climate response to regional radiative forcing during the twentieth century. *Nat. Geosci.*, **2**, 294-300.
- Shiogama, H., S. Emori, K. Takahashi, T. Nagashima, T. Ogura, T. Nozawa and T. Takemura, 2010: Emission scenario dependency of precipitation on global warming in the MIROC3.2 model. *J. Climate*, **23**, 2404-2417.
- 渡部雅浩, 2014: ハイエイタス. *天気*, **61**, 277-279.
- Yoshimori, M. and A. J. Broccoli, 2008: Equilibrium response of an atmosphere-mixed layer ocean model to different radiative forcing agents: global and zonal mean response. *J. Climate*, **21**, 4399-4423.
- 吉森正和ほか 2012: 気候感度. Part 1: 気候フィードバックの概念と理解の現状. *天気*, **59**, 5-22.