

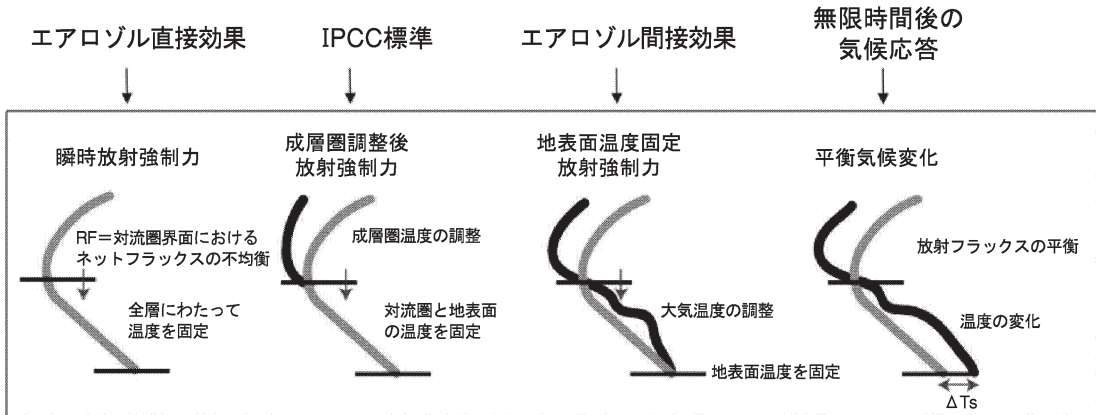
## 放射強制力

放射強制力 (radiative forcing) とは、何らかの要因 (例えば二酸化炭素濃度の変化, エアロゾル濃度の変化, 雲分布の変化等) により地球気候系に変化が起こったときに, その要因が引き起こす放射エネルギーの収支 (放射収支) の変化量 ( $\text{Wm}^{-2}$ ) として定義される。その最もわかりやすい例は, 太陽11年周期などによる太陽照度の変化である。太陽照度が増加すれば, 地球系に入射する放射エネルギーが増加するために, 系の温度が増加して気候変化が起こる。この場合, 太陽照度の増加分が正の放射強制力となる。この例で示されるように, 放射強制力とは, ある気候変化要因によって駆動される気候変化の大きさ (全球平均地表面気温など) を, その要因が最初に引き起こす放射収支の変化で表すことを目的として導入された概念で, 気候研究でよく使われる。そのために, 気候強制力 (climate forcing) と呼ばれることもある。近年では, 地球温暖化問題が社会的に大きな関心事となっていることから, 温室効果ガスが引き起こす放射強制力などが, 専門家のみならず, 一般社会においても耳にする概念になってきた。

しかし, 第1図に示すとおり, 放射強制力にはいくつかの定義があり, 問題によっては厳密な定義を理解しておくことが重要である。最も単純な定義は, 瞬時放射強制力 (instantaneous radiative forcing) と呼ばれるものである。例えば二酸化炭素の産業革命後の瞬時放射強制力を計算するには, まず, 気候変化が起こる前の産業革命時の地球大気の構造と地表面温度を仮定したうえで, 大気に産業革命以前と現在の二酸化炭素量を与えて, 二酸化炭素が引き起こす太陽放射と地球放射 (地球系から射出される熱放射) の収支を大気上端, あるいは対流圏界面で計算し, その差を放射強制力とする。この場合, 現在の二酸化炭素量を与えた計算の方が上向きの地球放射が減少するために正の放射強制力を得る。しかし, 上層ほど気温が高く, 全

球平均的にはほぼ放射平衡が成り立っている成層圏では, 大気上端における放射収支が正であっても成層圏上層では気温の低下が起こり, 大気上端での放射強制力は実際の気候変化の指標としては不十分である。そこで, 気候変動に関する政府間パネル (IPCC) では, 成層圏調整後放射強制力 (stratospheric-adjusted radiative forcing) と呼ばれる定義を採用している。この定義では, 瞬時放射強制力を計算した後に, 成層圏とその上層が放射平衡になるように気温場を調整する。そのように成層圏の温度構造を調整した上で, 再び産業革命以前と現在の二酸化炭素が引き起こす対流圏における放射収支の変化を計算し, その変化を対流圏界面で算定したものを放射強制力と呼ぶ。対流圏では温室効果ガスによる放射加熱分は, 対流混合によって対流圏全層の加熱に利用されるので, 対流圏界面での放射収支の変化と対流圏の温度上昇が良い相関を持つ。したがって, 地球温暖化の問題においては対流圏の温度変化と最も相関の良い成層圏調整後の放射強制力が使われるのである。一方, 太陽照度, 土地利用変化による地表面反射率, 人為起源エアロゾルの直接効果 (エアロゾルが直接放射を散乱・吸収・射出する効果) などの放射強制力の場合は, 成層圏での放射収支の変化が小さいので, このような調整を行わず, より計算が単純な瞬時放射強制力を用いても, 成層圏調整後放射強制力とほぼ同じ値が得られる。また, 算定する高度は, 大気上端でも対流圏界面でもほとんど変わらない。

このように定義の厳密化をしても, 放射収支計算の基本となる系の全球構造 (気温, 水蒸気, 雲, 地表面反射率など) の設定の違いや, 複数の温室効果ガスが引き起こす放射強制力は加算的ではないことなどのために, 実際の計算法はそれほど統一されていないのが現状である。さらに, エアロゾルが雲に影響を及ぼす間接効果の放射強制力の算定には, そもそも上に述べた放射強制力に意味があるかどうかという問題が起こる。すなわち, エアロゾルが雲核になって雲粒数が増



第1図 様々な放射強制力の定義と気候応答。灰色曲線は調整前の温度プロファイル、黒曲線は調整後の温度プロファイルを示す (Forster *et al.* 2007)。

減するために、雲層の反射率が変化するエアロゾルの第一種間接効果 (Twomey 効果やアルベド効果とも呼ばれる) や、雲粒子の変化後に雲層の降雨効率が変わるために、雲水量・雲氷量が変化する第二種間接効果 (Albrecht 効果や雲寿命効果とも呼ばれる) における放射収支の計算では、地球気候系を構成する雲の変化を考慮せざるを得ない。このような計算では、そもそも現在のエアロゾル量とは何かが問題になる。すなわち、エアロゾル分布は雲場によって大きく変化を受けるし、雲層の中のエアロゾル分布はどのような雲場を設定するかで大きく異なる。そこで IPCC では、場合によっては、地表面温度のみを産業革命前に固定して、エアロゾル排出量が産業革命前と現在の2つの場合について2度気候モデルを走らせて、生じる放射収支の差を放射強制力 (地表面温度固定放射強制力) とするとしている。また、エアロゾル第二種間接効果について、IPCC 第3次評価報告書では放射強制力の大きさを求める努力がなされたが、第4次評価報告書では、これは気候系を駆動する放射強制力ではなく、変化の結果起こるフィードバックであるという考えのもとに、放射強制力の評価には含まれないことになった。しかしながら、このような雲の変化はせいぜい1週間くらいの間起こる変化であり、そのような変化はさらに長い時間スケールの気候変化の駆動力になるのであるから、強制力として考えるべきであるという議論も成り立つ。以上のように放射強制力の絶対的な定義が存在するわけではなく、気候変化の駆動力を表すより良い指標を求める努力の中で、その定義が今後も見直されてゆくであろう。例えば、対流圏界面での

放射収支と併せて、地表面での放射収支を考慮することの重要性が指摘されている。

以上の議論からも明らかなように、放射強制力の概念の導入は、気候系がどのように応答するかとの問題意識と密接に関連している。誰が最初にこの概念を提起したかを探るのはあまり意味がないかもしれないが、すでにミランコビッチの頃から太陽放射が気候システムの駆動力であることは認識されていて、古気候研究では「orbital forcing」という用語が1960年代から使われている。また、Budyko (1969) などの熱収支モデルにおいても、この forcing という概念はきちんと位置づけられていた。これが平衡気候感度  $\lambda$  との関連で使われ始めたのは、Hansen *et al.* (1984) の頃からであろう。

$$\Delta T_{eq} = \lambda \Delta F \tag{1}$$

ここで、 $\Delta T_{eq}$  は平衡地上温度、 $\Delta F$  は放射強制力である。雲の放射強制力については Ramanathan *et al.* (1989)、エアロゾルの放射強制力に関しては Charlson *et al.* (1992) が先駆的な研究である。

参考文献

Budyko, M. I., 1969 : The effect of solar radiation variations on the climate of the earth. *Tellus*, 21, 611-619.  
 Charlson, R. J., S. E. Schwartz, J. M. Hales, R. D. Cess, J. A. Coakley, Jr., J. E. Hansen and D. J. Hofmann, 1992 : Climate forcing by anthropogenic aerosols. *Science*, 255, 423-430.  
 Forster, P., V. Ramaswamy, P. Artaxo, T. Berntsen, R.

- Betts, D. W. Fahey, J. Haywood, J. Lean, D. C. Lowe, G. Myhre, J. Nganga, R. Prinn, G. Raga, M. Schulz and R. V. Dorland, 2007 : Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. *Climate Change 2007 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller, Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- Hansen, J., A. Lacis, D. Rind, G. Russell, P. Stone, I. Fung, R. Ruedy and J. Lerner, 1984 : Climate sensitivity : Analysis of feedback mechanisms. *Climate Process and Climate Sensitivity* (J. E. Hansen and T. Takahashi, eds.), AGU Geophys. Monogr. Ser., (29), 130-163.
- Ramanathan, V., R. D. Cess, E. F. Harrison, P. Minnis, B. R. Barkstrom, E. Ahmad and D. Hartmann, 1989 : Cloud-radiative forcing and climate : Results from the Earth Radiation Budget Experiment. *Science*, **243**, 57-63.
- (東京大学気候システム研究センター 中島映至)  
(九州大学応用力学研究所 竹村俊彦)
-