

気候調節サービス

伊藤 昭彦*

人間社会が生態系から受ける様々な恩恵は「生態系サービス」と総称されている (Millennium Ecosystem Assessment 2005)。このような概念が注目されるようになった背景として、人間活動による環境負荷の深刻化とともに、自然の恩恵は有限であることが広く認識されるようになり、自然資本としての生態系の価値を踏まえて、保全や管理の意志決定を行う必要性が高まってきたことがあげられる。国際連合の主導で実施された『ミレニアム生態系評価』による整理では、生態系サービスは「基盤」「供給」「調節 (調整)」「文化」のカテゴリーに分類されており、そのうち「調節」には災害制御や有害物質の浄化などと共に気候調節 (climate regulation) サービスが含まれている (第1表)。生態系サービスの評価は、自然科学と社会科学にまたがる学際的な課題となっており (例えば、TEEB 2010)、本稿では気候調節サービスについて気象学の観点から現状と問題点をまとめる。

気候調節サービスは、生態系の機能によって地表環境や大気組成を調節し、人間や生物の活動に適した状態を維持するはたらきを指す。地球スケールでは、大規模な植林のように、特に地球温暖化の緩和効果を指して用いられる場合もある。広い意味では、大気汚染や気象災害を低減する効果も含まれるが、通常それらは浄化あるいは防災サービスとして区分される。生態系の素過程としては、地表での水・エネルギー交換による物理的効果 (biophysical effect) と、温室効果ガスをはじめとする微量ガスの交換による生物地球化学的効果 (biogeochemical effect) から構成される。第1表では全球スケールと地域～局地スケールとに分けられているが、それは大気科学の観点からも自然な

考え方であろう。ただし、気象学では古気候や長期予測を行う分野があるのに対し、生態系サービスについては社会の価値観や経済評価が介在するため時間スケールを長くとることが難しく、現状解析やシナリオに基づく近未来予測を行うことがほとんどである。

物理的効果は、植生や土壌が存在することで、裸地の場合と比較して、粗度、アルベド、地表コンダクタンス (その逆数の抵抗) などが変化することで生じる。それは地表での正味放射、その潜熱と顕熱への分配、温度、湿度、さらに境界層や大気の循環の改変につながる。緑地のヒートアイランド緩和効果は、そのよく知られた例であろう。Anderson-Teixeira *et al.* (2012) は、物理的効果による気候調節 (CR_p , $W m^{-2}$) を

$$CR_p = -\Delta R_n + \Delta LE \quad (1)$$

と定義している。ここで Δ は、裸地状態と比較した場合のエネルギー収支の変化を指す。つまり、純放射の変化分 (ΔR_n) が負になるほど、また蒸発散による潜熱変化 (ΔLE) が増加するほど、地表を冷却する方向にはたらいいて一般的に気候調節が大きいと考える。

生物地球化学的効果は、主として温室効果ガスについて、生態系が吸収・放出することで大気中の濃度を一定近くに保ち、気候の変化 (特に地球温暖化) を緩和する効果を指す。森林や草原では二酸化炭素 (CO_2) の寄与が大きいが、湿原や水田はメタン (CH_4) の大きな放出源であり、耕作地は肥料に起因する亜酸化窒素 (N_2O) 放出が無視できない。これらのガスによる効果の合計を考える場合、大気中での平均滞留時間と放射強制力から求められる温暖化係数 (Absolute Global Warming Potential, AGWP, $W m^{-2} yr kg^{-1}$) などで重み付けを行う。生物地球化

* Akihiko ITO, 国立環境研究所. itoh@nies.go.jp

© 2014 日本気象学会

第1表 大気と関係する生態系サービス。ミレニアム生態系評価報告書 (MEA 2005) などより。

サービス	人間利用	向上・劣化	説明	
気候の調節	(全球)	↑	↑	エネルギーや温室効果ガス・エアロゾルを吸収・放出することで地球の気候に与える影響。二酸化炭素については放出源から吸収源に変わりつつある。土地利用変化によるアルベドの増加は正味で冷却効果としてはたらいとと考えられる。
	(地域～局地)	↑	↓*	メソ気象や微気象のスケールで気温や降水などの気候因子に与える影響。地域により増加と減少が混在するが、減少した場所の方が多いと考えられる。
大気質の調節	↑	↓*	化学物質を吸収・放出することで大気質に与える影響。産業革命前と比較して10%を超えない程度で低下してきたと考えられる。	

* サービスの劣化は、森林伐採や沙漠化によって生じたと考えられる。

学的効果 (CR_B) は

$$CR_B = \sum_{gas} (AGWP_{gas} \cdot Budget_{gas}) \quad (2)$$

と定義される ($gas = CO_2, CH_4, N_2O$)。ここで $Budget$ は各ガスの正味収支 (生態系への吸収を正とする) であり、裸地状態ではそれぞれゼロとなる。

ある生態系がもたらす気候調節効果は、物理的效果 CR_P と生物地球化学的效果 CR_B の和であり、それぞれエネルギーと温室効果ガスのフローから求めることができる。その人間社会への利得として価値付けされた指標 (例えば金額) への換算は、炭素クレジット価格や、調節効果によって回避された気象災害の推定被害額に基づいた評価を行うことで (問題は残るがある程度まで) 可能と考えられる。例えば、生態系サービス評価の先駆的研究である Costanza *et al.* (1997) は、現在の森林による気候調節サービスを平均して 1 ha あたり年間141ドル、世界合計で年間6840億ドル相当と概算している。

現在、より信頼性の高い生態系サービス評価に向けた研究が進められているが、多くの要因が絡む複雑な問題であり、残された課題も多い。

- ①生態系の気候調節効果が及ぶ範囲は明らかにされていない。物理的效果と生物地球化学的效果とで空間スケールは異なり、対象範囲の選び方が問題となる。Anderson-Teixeira *et al.* (2012) のように全球を対象とした解析も行われている。
- ②注目する時間スケールによっても気候調節効果は変わる可能性がある。温室効果ガスは種類によって大気中の寿命が異なるため、式(2)中の AGWP の値が変わってくる (IPCC 2013)。また、将来にわたる効果を考える場合は、現在の価値に換算する割

引率を設定する必要があるが、その方法もまだ確立していない。

- ③気候調節サービスと、他の生態系サービスとの間にはトレードオフやコベネフィットがある (Foley *et al.* 2005)。例えば CO_2 をよく吸収する植林地は、生物多様性が低い場合が多い。このような異種の生態系サービスを総合的に評価する手法は研究段階にある。

- ④物理的效果や生物地球化学的效果を測定する代表的な手法として、微気象学的方法によるフラックス観測がある (例えば、三枝 2010)。しかし、その観測にも誤差が残されており、また裸地との比較や、別手法によるバイオマスなど炭素ストック測定との検証など、研究的課題も残されている。

前述のように生態系サービス評価は学際的課題であり、気象学に関連する問題もいくつかある。例えば、生態系が放出するイソプレン (森林など) や硫化ジメチル (海洋) などの微量物質が大気に及ぼす影響は、これまでの気候調節サービス評価ではほとんど考慮されていない。また、現在進行している気候変動や土地利用変化に伴って、特に tipping element と呼ばれる臨界状態に近づいているものは、気候調節効果が大きく変質する可能性がある。高緯度域では、将来的に凍土が融解し、それに伴って物理的效果と生物地球化学的效果が顕著に変化する可能性が指摘されている (Euskirchen *et al.* 2013)。これらは、生物圏からのフィードバックを取り入れた地球システムモデルの開発と応用にも共通する課題であり、今後の研究の進展が必要とされている。

生態系サービスの評価は、人間社会が享受している自然の恵みを分かりやすく示すだけでなく、地球環境

変動が生態系に与える影響・リスクの評価, 生態系管理や適応策の検討等において必要性が高まっている。特に気候調節など大気に関連するサービス分野では, 気象学者のより一層の貢献が期待される。

参 考 文 献

- Anderson-Teixeira, K. J., P. K. Snyder, T. E. Twine, S. V. Cuadra, M. H. Costa and E. H. DeLucia, 2012: Climate-regulation services of natural and agricultural ecoregions of the Americas. *Nature Clim. Change*, **2**, 177-181.
- Costanza, R. *et al.*, 1997: The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, **387**, 253-260.
- Euskirchen, E. S., E. S. Goodstein and H. P. Huntington, 2013: An estimated cost of lost climate regulation services caused by thawing of the Arctic cryosphere. *Ecol. Appl.*, **23**, 1869-1880.
- Foley, J. A. *et al.*, 2005: Global consequences of land use. *Science*, **309**, 570-574.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, 1535 pp.
- Millennium Ecosystem Assessment (MEA), 2005: *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island Press, Washington, DC, 137pp. (和訳: 生態系サービスと人類の将来, オーム社)
- 三枝信子, 2010: 森林生態系における炭素循環の観測的研究とそのアジアへの展開. *天気*, **57**, 819-833.
- The Economics of Ecosystems and Biodiversity (TEEB), 2010: *Mainstreaming the Economics of Nature: A Synthesis of the Approach, Conclusions and Recommendations of TEEB*. 36pp.