Cross-feeding 系のダイナミクスと共存種数について: 土壌微生物群集系の理解を目指して

島田 尚[1]、金子 邦彦[2]

[1] 東北大学 データ駆動科学・AI 教育研究センター
[2] コペンハーゲン大学 ニールス・ボーア研究所

あらまし　本発表では、土壌微生物群集系が示す高い多様性と外乱への応答特性について紹介し、このような系を念頭に構築した cross-feeding を含んだ栄養競争型の生態系モデルの動態について報告する。cross-feeding 相互作用は取り込み数と取り入れ数の非対称性が高い場合に頻繁に高次元カオスを生み、資源となる化学物質の種類数を大幅に超える種の共存を可能にすることが分かった。この領域では、群集構成は準定常状態の間を間欠的に経巡ることも典型的に観察される。
キーワード 微生物群集、代謝物の相互供給、競争排除則、高次元カオス

On the number of coexisting species in a cross-feeding system: for the understanding of the soil-microbe systems

Takashi SHIMADA[1], Kunihiko KANEKO[2]

[1] Center for Data-driven Science and Artificial Intelligence, Tohoku University
[2] Niels Bohr Institute, University of Copenhagen

Abstract　In this presentation, we introduce the high diversity and characteristic responses to perturbations exhibited by soil microbial communities, and report the dynamics of a nutrient-competition-based ecological model incorporating cross-feeding interactions, which was developed with such systems in mind. We demonstrate that cross-feeding interactions can generate high-dimensional chaos when the asymmetry between the numbers of chemicals taken up and those leaked is high, thereby enabling the coexistence of a number of species far exceeding the number of chemical compounds serving as resources. In this regime, the community composition is also typically undergo intermittent transitions among quasi-steady states.
Key words Microbial community, cross-feeding, competitive exclusion, chaos

1. はじめに

土壌の微生物群集系では、Zipf 則よりもなだらかな種のランクサイズ分布で特徴づけられる高い多様性を示す。また、この系に施肥などの外乱を与えた場合についての応答には、恒常性と可塑性の両立に特徴づけられる興味深い性質が見出されている [1]。この系では無機物や代謝物の利用を介しての種間相互作用が重要であり、また代謝物については各種から漏れてくるものも多いと考えられるが、それらを介した cross-feeding の相互作用が系全体の多様性と安定性に寄与する可能性も示唆されてきた [2, 3]。以下では、このような代謝物の取り入れ競争と漏らしに

よる種間相互作用をモデル化したポピュレーションダイナミクスモデルの振る舞いについて報告する [4]。

2. Cross-feeding モデル

以下では、我々が導入した、このような代謝物の取り入れ競争と漏らし (cross-feeding) による種間相互作用取り入れたポピュレーションダイナミクスモデル

$$\begin{aligned} \dot{x}_\mu &= \left(-\chi_\mu + \sum_i^C \frac{\tau_{\mu i} b_i \bar{c}_i}{1 + U_i/K_i} \right) x_\mu, \\ \bar{c}_i &= \frac{L_i}{U_i} = \frac{\sum_v^N x_v \lambda_{vi}}{\sum_v^N x_v \lambda_{vi} + \sum_\nu^N x_\nu \tau_{\nu i}} \end{aligned}$$

を扱う。ここで x_μ は微生物種のポピュレーション、$\bar{c}_i$ は（断熱消去された）化学物質の濃度、$\tau_{\mu i}$ と λ_{vi} はそれぞれ取り入れと漏らしの強さである。

3. モデルの動態と共存種数

このモデルでは、各種がどの化学物質を取り込み、どの化学物質を放出するかのネットワーク（$\tau_{\mu i}, \lambda_{vi}$）の構造によって、系は定常状態、周期的な振動、低次元カオス、高次元カオスなどの多様な振る舞いを示す。

定常状態や周期的振動の場合は、この系で共存できる種の数は、種どうしでやり取りされる化学物質の数を超えない。これは伝統的に知られる「競争排除則」と一致する [5]。また、低次元カオスの場合にも、この上限を少し超える程度の共存しか起こらない。

これに対して、高次元カオスの場合には、さらに多くの種が長期間にわたって共存できる。高次元カオスの状態では、種-個体数分布が指数分布よりも幅広くなり、また、各種の個体数は、しばらくほぼ一定の状態にとどまった後、別の状態へ不規則に切り替わるといった間欠的ダイナミクスも示す。

このような高次元カオスは、一つの種が取り込む代謝物の数が、放出する代謝物の数よりも適度に多い場合に生じやすい。以上の結果は、化学物質の放出と取り込みのクロスフィーディングが、準定常状態の間を断続的に切り替わる高次元カオスを通じて、競争排除則による上限を超えた多様性の高い微生物群集の維持に関係している可能性を示している [4]。

参考文献

[1] T. Shimada, K. Mise, K. Morino, and S. Otsuka, “Simple measures to capture the robustness and the plasticity of soil microbial communities”, arXiv:2409.03372.

[2] J. F. Yamagishi, N. Saito, and K. Kaneko, “Adaptation of metabolite leakiness leads to symbiotic chemical exchange and to a resilient microbial ecosystem”, PLoS Computational Biol 17(6): e1009143 (2021).

[3] T. Clegg and T. Gross, “Cross-feeding creates tipping points in microbiome diversity”, PNAS 122 e2425603122 (2025).

[4] T. Shimada and K. Kaneko, “Cross-feeding yields high-dimensional chaos and coexistence of species beyond exclusion principle”, New Journal of Physics (2026) DOI: 10.1088/1367-2630/aec28d.

[5] R. MacArthur and R. Levins, “The limiting similarity, convergence and divergence of coexisting species”, Am. Nat. **101**, 377 (1967).