

Two design frameworks for optimizing microbial community functions

Deux cadres de conception pour optimiser les fonctions des communautés microbiennes

微生物の群集機能を最適化するための二つの枠組み

Shota Shibasaki

Department of Fundamental Microbiology, University of Lausanne

Abstract (for public)

Many microorganisms are beneficial in human societies. For example, some microbial species can produce food, beverage, and biofuels, while other species can remove toxic compounds from environments. In addition, recent studies suggest that human microbiota are associated with host health. For these reasons, many researchers have tried to design optimal microbial communities that maximize these benefits. However, ecological and evolutionary dynamics can decrease these benefits. In my thesis, I theoretically investigated two approaches for maximizing the benefits from microbial communities: introducing environmental fluctuations by changing growth media, and introducing hierarchical spatial structures by combining multiple chemostats. Chapters 2 and 4 show how we can optimize the benefits from microbial communities by introducing the environmental fluctuations and the spatial structures, respectively. In addition, these two design frameworks affect species diversity and community stability. Chapter 3 investigates how environmental fluctuations between harsh and mild conditions affect species diversity. Because harsh environments decrease the numbers of individuals in microbial communities and thus increase demographic stochasticity, the rate of environmental fluctuations affects species diversity. In Chapter 5, I analyze the stability of downstream communities in a simple hierarchical spatial structure. In this structure, the upstream species can affect the growth of downstream species while the downstream species cannot interact with upstream species. The statistical analyses suggest that positive interactions from upstream species to downstream ones increase the stability of the downstream communities. These results suggest that environmental fluctuations and spatial structures are important for designing optimal microbial communities and understanding ecological and evolutionary dynamics of microorganisms.

Résumé (pour le grand public)

De nombreux micro-organismes sont bénéfiques dans les sociétés humaines. Par exemple, certaines espèces microbiennes peuvent produire des aliments, des boissons et des biocarburants, tandis que d'autres espèces peuvent éliminer des composés toxiques de l'environnement. De plus, des études récentes suggèrent que le microbiote humain est associé à la santé de l'hôte. Pour ces raisons, de nombreux chercheurs ont essayé de concevoir des communautés microbiennes optimales qui maximisent ces avantages. Cependant, les dynamiques écologiques et évolutives peuvent diminuer ces bénéfices. Dans ma thèse, j'ai théoriquement étudié deux approches pour maximiser les bénéfices des communautés microbiennes : l'introduction de fluctuations environnementales en changeant les milieux de croissance, et l'introduction de structures spatiales hiérarchiques en combinant plusieurs chimostats. Les Chapitres 2 et 4 montrent comment nous pouvons optimiser les bénéfices des communautés microbiennes en introduisant respectivement des fluctuations environnementales et des structures spatiales. De plus, ces deux cadres de conception affectent la diversité des espèces et la stabilité des communautés. Le Chapitre 3 examine comment les fluctuations environnementales entre les conditions difficiles et douces affectent la diversité des espèces. Étant donné que les environnements difficiles diminuent le nombre d'individus dans les communautés microbiennes et augmentent ainsi la stochasticité démographique, le taux de fluctuations environnementales affecte la diversité des espèces. Dans le Chapitre 5, j'analyse la stabilité des communautés en aval dans une simple structure spatiale hiérarchique. Dans cette structure, les espèces en amont peuvent affecter la croissance des communautés en aval alors que les communautés en aval ne peuvent pas interagir avec les espèces en amont. Les analyses statistiques suggèrent que les interactions positives des espèces en amont vers celles en aval augmentent la stabilité des communautés en aval. Ces résultats suggèrent que les fluctuations environnementales et les structures spatiales sont importantes pour concevoir des communautés microbiennes optimales et comprendre les dynamiques écologiques et évolutives des micro-organismes.

要旨 (一般向け)

微生物は人間社会にさまざまな利益をもたらす。例えば、食料品やアルコール飲料、バイオエネルギーの生産だけでなく、環境中に存在する有害物質の除去にも微生物を使うことができる。近年の研究では、細菌叢がヒトの健康に関与することも報告されている。このような理由から、微生物から得られる利益を最大化する、最適な微生物群集を作ろうという試みがなされている。しかし、進化あるいは生態学的な要因によって、微生物からもたらされる利益は減少してしまう。そこでこの博士論文では、微生物の利益を最大化する二つの枠組みを数理モデルで研究した。第二章では環境変動を、第四章では階層的な空間構造を導入することで、微生物群集の最適化をそれぞれ考える。また、環境変動と空間構造は種多様性や群集の安定性にも関わる。第三章では、環境変動により微生物の個体数が減少することで生じる人口学的な揺らぎが、どのように種多様性に影響を与えるかを調べる。第五章では、上流と下流があるような空間構造で、上流の種が下流の群集安定性に与える影響を調べた。これらの結果は、環境変動と空間構造が微生物群集の最適化にも、微生物動態の理解にも重要であることを示している。

Abstract

In the contexts of food or beverage production, biotechnology, and human health, microbial communities provide human societies with many types of benefits called microbial community functions. Although researchers have tried to optimize these microbial community functions, ecological and/or evolutionary dynamics can drive the communities away from the states where community functions are maximized. In this thesis, I theoretically investigate two design frameworks to optimize microbial community functions. One approach is to control the microbial dynamics by fluctuating environmental conditions (Chapter 2), and the other approach is to introduce hierarchical spatial networks (Chapter 4) so that we can restrict species interactions. I show algorithms to reveal the optimal control of the environmental conditions and the optimal allocations of microbes into a given hierarchical spatial structure, respectively. In addition, the environmental fluctuations and the hierarchical spatial structures can affect the fundamental aspects of ecology. When the environmental conditions become harsh, the intensity of demographic noise increases, which affects species diversity (Chapter 3). In a hierarchical spatial structure, stability of a downstream community depends on upstream species because the upstream communities can change the downstream environments by secreting or absorbing chemical compounds that flow downstream. In this case, positive interactions from upstream species to downstream species increases the stability of downstream communities (Chapter 5). These studies show the importance of environmental fluctuations and spatial structures in applied and fundamental microbial ecology and evolution.

Résumé

Dans les contextes de la production d'aliments ou de boissons, de la biotechnologie et de la santé humaine, les communautés microbiennes offrent aux sociétés humaines de nombreux types d'avantages appelés fonctions des communautés microbiennes. Bien que les chercheurs aient tenté d'optimiser ces fonctions, les dynamiques écologiques et/ou évolutives peuvent éloigner les communautés des états où les fonctions des communautés microbiennes sont maximisées. Dans ma thèse, j'étudie théoriquement deux cadres de conception pour optimiser les fonctions des communautés microbiennes. Une approche consiste à contrôler les dynamiques microbiennes en faisant fluctuer les conditions environnementales (Chapitre 2), et l'autre approche consiste à introduire des réseaux spatiaux hiérarchiques (Chapitre 4) afin de restreindre les interactions entre espèces. Je montre des algorithmes pour révéler le contrôle optimal des conditions environnementales et les allocations optimales des microbes dans une structure spatiale hiérarchique, respectivement. De plus, les fluctuations environnementales et les structures spatiales hiérarchiques peuvent affecter les aspects fondamentaux de l'écologie. Quand les conditions ambiantes deviennent sévères, l'intensité du bruit démographique augmente, ce qui affecte la diversité des espèces (Chapitre 3). Dans une structure spatiale hiérarchique, la stabilité des communautés aval dépend des communautés en amont car les communautés en amont peuvent modifier les environnements en aval en sécrétant ou en absorbant des composés chimiques qui s'écoulent en aval. Dans ce cas, les interactions positives des espèces en amont aux espèces en aval augmentent la stabilité des communautés en aval (Chapitre 5). Ces études montrent l'importance des fluctuations environnementales et des structures spatiales au sein de l'écologie et l'évolution microbiennes appliquées et fondamentales.

要旨

食糧あるいは飲料の生産、バイオテクノロジー、さらには健康など多くの場面で微生物は人類に利益をもたらす。このような利益の最適化において、個体数あるいは進化動態による障害は数多く報告されている。すなわち、時間と共に、微生物がもたらす利益の生産性が減少するという問題が生じる。この博士論文では、環境変動(第二章)及び階層的な空間構造(第四章)をもちいて微生物群集を最適化する理論的な枠組みを示す。また、環境変動も空間構造も、種多様性や群集安定性などの生態学の基礎的な面に影響することが知られている。例えば、環境条件が悪化すると、微生物の個体数が減少して人口学的な揺らぎの効果が強まり、種多様性に最終的に影響を与える(第三章)。階層的な空間構造では、上流に位置する種は、下流の種に影響を与えることができる。特に、下流の種の個体数を大きくするような上流の種の影響は、下流の群集の安定化に寄与することが因果推論により示唆される(第五章)。これらの研究結果は、環境変動と空間構造の重要性を、応用及び基礎微生物生態学において示すものである。