

海外特別研究員最終報告書

独立行政法人日本学術振興会 理事長 殿

採用年度 2018 年
受付番号 201860500
氏 名 辰 晋一

(氏名は必ず自署すること)

海外特別研究員としての派遣期間を終了しましたので、下記のとおり報告いたします。
なお、下記及び別紙記載の内容については相違ありません。

記

1. 用務地（派遣先国名）用務地： トロント （国名： カナダ）
2. 研究課題名（和文）※研究課題名は申請時のものと変わらないように記載すること。
環境 DNA と系統的多様性に立脚した森林・林業動態予測
3. 派遣期間：平成 31 年 2 月 24 日 ～ 令和 3 年 2 月 14 日
4. 受入機関名及び部局名
受入機関名： トロント大学
部局名： Department of Biological Sciences
5. 所期の目的の遂行状況及び成果…書式任意 **書式任意(A4判相当3ページ以上、英語で記入も可)**
(研究・調査実施状況及びその成果の発表・関係学会への参加状況等)
(注)「6. 研究発表」以降については様式 10－別紙 1～4 に記入の上、併せて提出すること。

研究・調査実施状況

本研究では、環境 DNA を使って、近自然型林業が行われている森林における植物と土壌微生物の生物多様性 (α ・ β ・系統的多様性) を定量化し、その生物多様性が森林の動態・成長にフィードバックする効果を明らかにすることを目的とした。

オンタリオ州にある Rouge National Urban Park の森林において土壌・樹木根サンプルを収集した。それらのサンプルから環境 DNA を抽出し、真菌類ユニバーサルプライマーを使って PCR を行った。森林ごとに異なる樹種数を植林した試験地において、DNA メタバーコーディングによって土壌微生物の α ・ β 多様性を明らかにした (成果 1—Tatsumi et al. 2020, *bioRxiv*)。野外実験データを使って樹木の種多様性 (樹木種数) が森林全体の成長に与える影響を解明した (成果 2—Tatsumi 2020, *Forest Ecosystems*)。近自然型林業が行われている森林において、林床植物の α ・ β 多様性を評価した (成果 3—Tatsumi et al. 2020, *Ecology*)。 β 多様性の時間変化を絶滅・移入成分へと分解する手法を考案した (成果 4—Tatsumi et al. 2020, *Ecology Letters*)。派遣先のトロント大学の学生・教員らと共同研究を行った (Malloch et al. 2020, *Journal of Animal Ecology*; Sookhan et al. 2021, *Environmental DNA*)。以下、成果 1-4 の詳細を報告する。

成果 1— 樹種数が土壌菌類の α ・ β 多様性に与える影響を解明 (Tatsumi et al. 2020, *bioRxiv*)

本研究では環境 DNA を使って、森林ごとに異なる樹種数を植林した試験地間で、土壌微生物の α ・ β 多様性を比較した。本研究の結果は、多種共存を志向する近自然型林業が土壌微生物の多様性に与える影響を評価するうえで役に立つ。

異なる数の樹種 (0、1、3 種) を植栽した試験地、および天然林において、土壌サンプルを採取した。サンプルから環境 DNA を抽出し、真菌類ユニバーサルプライマーを使って PCR を行った。次世代シーケンサー Roche 454 を使って、サンプル中に存在する微生物の種数 (α 多様性) および種組成 (β 多様性) を推定した。その結果、土壌微生物の α 多様性は、樹種数に関わらず天然林よりも植栽地で高かった (図 1)。反対に、 β 多様性は植栽地よりも天然林で高かった。こうした多様性パターンから、3 つの生態学的プロセスが推察された。1 つ目は環境フィルタリングである。天然林では環境異質性が高いため、場所ごとに異なる微生物種が選択 (フィルタリング) された結果、 β 多様性が高くなった可能性がある。一方で、各環境の空間サイズは小さくなるため、局所絶滅が起きやすくなり、 α 多様性が低下したと考えられる。2 つ目は、時間に伴う遷移である。天然林では十分に種の選択が進んだ結果、 α 多様性が低下した可能性がある。3 つめは、分散制限で

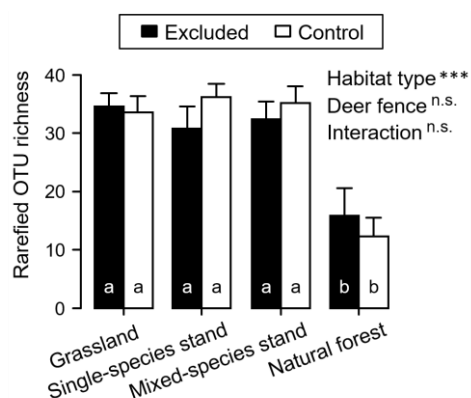


図 1. 非植栽地 (Grassland)、一樹種を植栽した試験地 (Single-species stand)、三樹種を植栽した試験地 (Mixed-species stand)、および天然林 (Natural forest) における微生物の種数 (Rarefied OUT richness)。■ = 防鹿柵内、□ = 防鹿柵外。Habitat type = 植栽の効果、Deer fence = 防鹿柵の効果、Interaction = 両者の交互作用。n.s., $P \geq 0.05$; ***, $P < 0.001$ (共分散分析)。

ある。天然林では、各環境に特化したスペシャリスト種が分散・定着できたのに対し、植栽地では、分散能力に優れたジェネラリスト種しかまだ定着できておらず、結果的に天然林で β 多様性が高くなっていると考えられる。以上の結果から、微生物の多様性を天然林で見られるパターンに近づけるためには、土壤環境の異質性を高めたり、分散能力の低い種を人為的に導入したりすることが有効だと示唆された。また、天然林で α 多様性が低かったことから、種を人為的に導入する際は、なるべく限られた数のスペシャリスト種を選択的に導入することが良い考えられる。

成果 2 — 樹木多様性が森林生産性を高めることを実証 (Tatsumi 2020, *Forest Ecosystems*)

本研究では、樹木種数の多様性 (α 多様性) が森林の生産性に与える影響を明らかにした。ここで得られた成果は、生物多様性が森林動態にフィードバックする効果を定量化するうえでの基盤となる。

3 樹種 (カバノキ、ナラ、モミ) を混植したプロット (10m×10m) と、各樹種を単植したプロットを設置し、成長量 (バイオマス) を測定した。植栽密度はプロット間で統一した。解析の結果、3 つの単植プロット (Monoculture) の森林材積の平均値よりも、混植プロット (Mixture) の材積の方が高かった (図 2a)。また、樹高を見ると、混植プロットでは上層からカバノキ、ナラ、モミという階層構造が発達していた (図 2b)。以上の結果は、種の多様性 (α 多様性) がシステム全体の生産性を上げることを示唆している。また、混植プロットでは林冠の階層性が発達していたことから、他の生物 (鳥や着生植物) の棲家の供給といった、公益的機能の面で優れていることが示唆された。さらに、単植プロットは皆伐した後は裸地化するが、混植プロットは、上層のカバノキを伐っても下層にナラやモミが控えている点も、木材生産や土壌流出防止の考えるうえで重要である。混植プロットにおける生産性の増加は、正の相補性効果 (Complementarity effect) によって説明された。つまり、異なる生態的ニッチ (ある種が利用する環境や戦略) を持つ種間では、住み分けによって競争が緩和されたり、物質循環や環境変化を通じて互いの成長が促進されたりすることが示唆された。正の相補性効果は、森林発達初期は樹木成長量の増加によって、発達後期は生存率の増加によって説明された。本研究で得られた成果は、多種混交 (高い α 多様性) や非皆伐を志向する近自然型林業の実施が、森林の多面的機能に与える影響を評価するうえでの足掛かりとなると期待される。

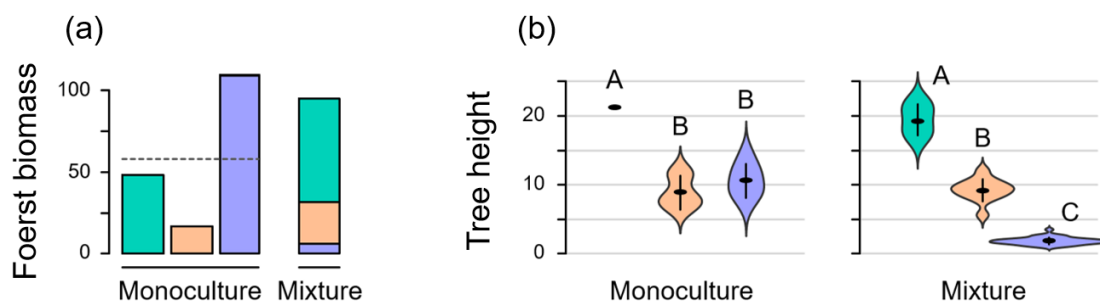


図 2. 樹木を 1 種ごとに単植したプロット (Monoculture) と 3 種を混植したプロット (Mixture) における (a) 森林のバイオマス (林分材積) と (b) 樹高。緑=カバノキ、橙=ナラ、紫=モミ。破線 (水平線) は、3 つの単植プロットのバイオマスの平均値を示す。アルファベット (ABC) は、樹高が有意に異なると判断されたグループを表す (Tukey の多重検定; $P < 0.05$)。

成果 3 — 近自然型林業と植物 α ・ β 多様性の関係を説明 (Tatsumi et al. 2020, *Ecology*)

本研究では、近自然型林業が林床植物の α ・ β 多様性に与える影響を明らかにした。局所的な種数 (α 多様性) だけでなく、複数地点の種組成の違いを表す β 多様性も評価することは、近自然型林業が地域全体の生物多様性に与える影響を理解するうえで役に立つ。

近自然型林業が 10 年前から行われている野外実験地で集められたデータを解析した。その結果、伐採を行った森林では、近自然型施業・皆伐施業のどちらの場合でも、 α 多様性が増加していることが明らかになった (図 3a)。一方で、 β 多様性は伐採によっては変化しなかった (図 3b)。これまで森林生態学では、「伐採を行うと森林内の環境異質性が失われ、場所ごとの種組成の違いも薄れる (β 多様性が低下する)」と仮定されることが多かった。本研究で得られたパターンは、こうした従来の仮定に反する興味深いものである。このパターンが、種の局所絶滅 (種数の減少) によるものか、種の移入 (種数の増加) によるものかを解析した。その結果、場所間で共通の種が絶滅し、その後、場所間で共通の種が移入していることが分かった。前者は β 多様性を高める効果があり、後者は下げる効果がある。つまり、伐採がもたらす絶滅と移入のバランスが、 β 多様性の維持に繋がっていることが明らかになった。最近の研究から、 β 多様性は地域レベルの生態系機能 (地球温暖化の防止など) の発揮に大きく貢献することが分かってきている。本研究は、近自然型林業が α 多様性や β 多様性にどういった影響を与え、そうした多様性が生態系機能にどのように結びつくかを予測するうえで重要である。

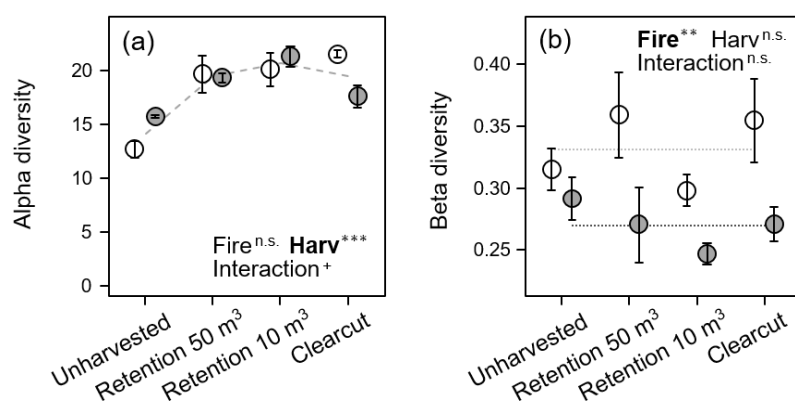


図 3. 非伐採(Unharvested)、近自然型林業(Retention 50 m³ 及び 10 m³)、皆伐(Clearcut) および火入れが行われた森林における、(a) α 多様性と (b) β 多様性。○ = 火入れなし、● = 火入れあり。Fire = 火入れの効果、Harv = 伐採の効果、Interaction = 両者の交互作用。n.s., $P \geq 0.10$; +, $P < 0.10$; **, $P < 0.01$; ***, $P < 0.001$ (共分散分析)。

成果 4 — β 多様性の時間変化を数学的に分解 (Tatsumi et al. 2021, *Ecology Letters*)

一見すると同じような姿の森林でも、詳しく調べると場所ごとに異なる生物群集が形成されていることが多い。こうした生物群集の空間異質性 (β 多様性) は、生物多様性の大切な構成要素となっている。近年、土地改変や外来種の導入といった人間活動によって、もともと自然に備わっていた β 多様性が徐々に失われてきていることが問題となっている。しかし、その度合いを種の絶滅と移入に分けて数値で表すことは行われていなかった。本研究では、種の局所的な絶滅・移入によって β 多様性が時間と共にどれくらい増減するかを、数学的に導いた。この手法を森林長

期モニタリングデータに適用したところ、 β 多様性は樹種の局所絶滅によって増加（広く分布していた樹種が、一部の場所からいなくなることで空間異質性が増加）していた。一方で、 β 多様性は移入によって減少（一部の場所にしかいなかった樹種が、分布を拡大させたことで結果的に空間異質性が減少）していることが分かった。つまり、樹種の絶滅・移入の絶妙なバランスによって、森林内の空間異質性は保たれていることが実証された。今回開発した手法は、近自然型林業が β 多様性に与える影響を評価する際に役に立つと期待される。

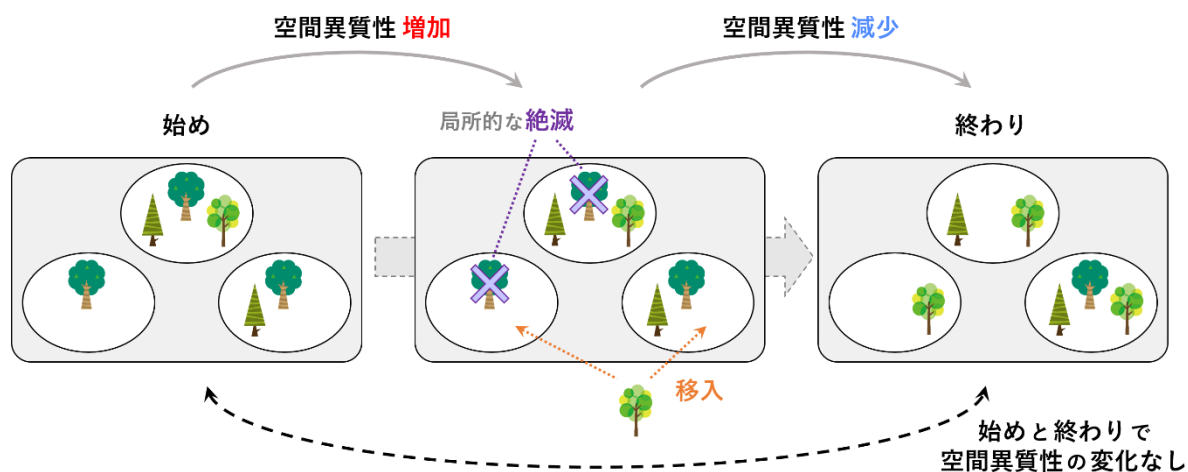


図 4. β 多様性の時間変化の例。この例では、始めは 3 か所にいた樹種が 2 か所で絶滅し、その代わり、始めは 1 か所にしかいなかった樹種が新たに 2 か所に移入した。 β 多様性は前者（絶滅）によって増加し、後者（移入）によって減少した。結果的に、 β 多様性は始めと終わりで変化していない。つまり、始めも終わりも「3 か所にいる種が 1 種、2 か所にいる種が 1 種、1 か所にいる種が 1 種」という状況は変化していない。

成果の発表・関係学会への参加

派遣期間中（2019 年 2 月～2021 年 2 月）に、5 編の査読付き論文と 1 編のプレプリントを発表した。学会発表を 2 回行った。

原著論文（査読あり）

- **Tatsumi S**, Iritani R, Cadotte MW (2021) Temporal changes in spatial variation: partitioning the extinction and colonization components of beta diversity. *Ecology Letters*, in press.
- Sookhan N, Lorenzo A, **Tatsumi S**, Yuen M, MacIvor JS (2021) Linking bacterial diversity to floral identity in the bumble bee pollen basket. *Environmental DNA*, in press.
- **Tatsumi S**, Strengbom J, Čugunovs M, Kouki J (2020) Partitioning the colonization and extinction components of beta diversity across disturbance gradients. *Ecology* 101(12): e03183.
- **Tatsumi S** (2020) Tree diversity effects on forest productivity increase through time because of spatial partitioning. *Forest Ecosystems* 7: 24.
- Malloch B, **Tatsumi S**, Seibold S, Cadotte MW, MacIvor JS (2020) Urbanization and plant invasion alter the structure of litter microarthropod communities. *Journal of Animal Ecology* 89(11): 2496–2507.

プレプリント（査読なし）

- **Tatsumi S**, Matsuoka S, Fujii S, Makoto K, Osono T, Isbell F, Mori AS (2020) Reassembly of soil fungal communities under reforestation and herbivore exclusion. *bioRxiv* 10.1101/2020.05.09.086025.

学会発表

- **Tatsumi S** (発表者), Strengbom J, Čugunovs M, Kouki J. Partitioning the colonization and extinction components of beta diversity: Spatiotemporal species turnover across disturbance gradients. アメリカ生態学会 第 105 回大会. オンライン開催. 2020 年 8 月.
- **Tatsumi S** (発表者), Strengbom J, Čugunovs M, Kouki J. Partitioning the colonization and extinction components of beta diversity across disturbance gradients. イギリス生態学会 年次大会 (Festival of Ecology). オンライン開催. 2020 年 12 月.