

機関番号：18001

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2010

課題番号：21710039

研究課題名（和文） 空間的統合モデルを用いた外来生物リスク軽減の経済分析

研究課題名（英文） Economic Analysis of Invasive Species Risk Using A Spatial Integrated Model

研究代表者

木島 真志（KONOSHIMA MASASHI）

琉球大学・農学部・准教授

研究者番号：10466542

研究成果の概要（和文）：

侵略的外来生物は在来生物と競合し、その結果、農産物被害など様々な経済・生態的損失をもたらす。それゆえ、その効果的かつ効率的な管理が求められている。外来生物は一旦侵入し定着すると、時間に応じて定着場所から近隣地域に拡散し、被害を広げる。ここでは、外来種の拡散メカニズムをセルオートマンで再現し、様々な管理の空間配置が外来種の拡散にどのような影響を及ぼすかシミュレーション分析を行った。外来種として、マメ科の落葉高木を取り扱い、拡散制御の管理の様々な時空間パターン配置が、この外来種の拡散に及ぼす影響を、時空間的シミュレーションモデルにより定量化し、比較分析した。本研究結果は、拡散制御のための空間管理は、その管理の結果生じる外来種の拡散程度と、管理費用の違いを考慮し、比較することが経済効率性の観点から重要であることを示唆した。

研究成果の概要（英文）：

Invasive species often compete with native species causing various economic and ecosystem loss such as damages to agricultural crops. Therefore, efficient and effective invasive species management is an important issue for achieving a sustainable society. Once invasive species invade and establish, they spread to neighboring areas over time and cause extended damages. However, an appropriate management for controlling their spread, can slow down the speed of spread or can stop their spreading at least temporally. Therefore, in order to control their spread cost efficiently, it is necessary to apply dynamic and spatial management allocation problem framework. We integrate management allocation model and a Cellular Automaton model that project the spread of invasive species and search for the efficient management strategy for mitigating the spread of invasive species.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	700,000	210,000	910,000
2010 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,200,000	360,000	1,560,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学・環境影響評価・環境政策

キーワード：外来生物, 空間モデル, 経済分析, 最適管理

1. 研究開始当初の背景

外来生物は在来生物と競合し、植生を変化させ、生物多様性の喪失や農産物被害を引き起こす。また、外来生物の侵入による植生の変化が、森林火災など自然災害リスクの可能性を高める場合がある。このように外来生物の侵入・定着・拡散は様々な生態的・経済的損失をもたらす。近年、世界中でこれら外来生物リスク軽減の対応策が議論されている。我が国においても、外来生物は「新・生物多様性国家戦略」の中で「3つの危機」のうちの1つに挙げられており、その効果的な管理の在り方に関する研究が求められている（日本学術会議環境学委員会自然環境保全再生分科会，2007）。

外来生物リスク軽減に関しては、侵入に対する「予防：prevention」、すでに侵入している個体群を取り除く「根絶：eradication」、そして「個体群の分布拡大を抑制する：control」という3つの対策が考えられる。しかし、無数の潜在的な侵入経路が存在することから、「予防」のみに頼ることはできない状態である（Mehta et al., 2007）。一方、根絶事業には膨大な費用が掛かることに加え、根絶可能であるのは侵入のごく初期であるのに対して、初期における侵入の検知が困難である（小池，2007）ことなどが指摘されており、根絶事業もまた限られた場合に適応されるものであると考えられる。

本研究では、より現実的で、頻繁に実施されうる、control、つまり、定着した外来生物の分布拡大を「いかに効率的に管理・コントロールするか」をセルオートマンによるシミュレーション分析を通して検討する。

外来生物が一旦定着すると、分布拡大抑制のための管理工フォートは限られた予算内で長期にわたり、繰り返し行われる必要がある。また、適切な管理が施されなければ、一般的に外来生物は定着場所から時間に応じて近隣地域に拡散し新たに定着し、被害を拡大させる。一方、適切な管理を施すことで拡散速度を遅くする、あるいは（少なくとも）一時的に拡散を停止することが可能である（Williams et al., 2007; Alofs and Fowler, 2010）。それゆえ、費用効率的に分布拡大を抑制するためには動的かつ空間的な管理配置問題のフレームワークを用いて外来生物の空間的な拡散メカニズムを的確に捉える必要がある。

欧米などでは、90年代後半より外来生物管理に関する経済分析（Archer et al., 1996; Finnoff et al., 2005; Mehta et al., 2007）が活発に行われており、管理行為と外来生物リスクの相互作用を捉えた動的最適化モデルの構築と分析による費用効率的な管理に関

する政策提言などが行われている。しかし、外来生物の空間的な拡散メカニズムを考慮した効率的な管理空間配置パターンの分析は、まだほとんどなされていない。一方、生態学の分野においては、外来生物の分布拡大を予測する手法はほぼ確立されている（小池，2007）が、それらの知見を費用効率的な管理の探索に活かすような研究や、管理の費用効率性を評価できるようなフレームワークは確立されていない。

2. 研究の目的

本研究では、様々な環境及び経済的被害を引き起こしている外来生物の効率的な管理について理解を深めるため、管理配置決定モデルと生態系モデルを統合し、効率的な管理空間配置の意思決定をサポートしうるシステムを提案する。具体的には、管理空間配置モデルと生態学における動的・空間的な外来生物の拡散メカニズムに関する知見を統合したモデルを構築し、数値シミュレーションを行い、効率的な管理空間配置パターンについて検討する。

3. 研究の方法

ここで提案する統合モデルは、管理行為の空間配置パターンと外来生物拡散の相互作用を明示的に取り扱う。この相互作用を捉えることにより、ある「場所」における外来生物の拡散が、その「場所」の管理行為だけでなく隣接する「場所」の管理行為にも依存することをモデルに反映できる。また、外来生物が引き起こす被害のリスクは、動的・空間的拡散メカニズムを基に、動的に変化する。それゆえ、上記の相互作用を的確に捉え、空間上のトレードオフを検討することが費用効率的な管理を探索する際に重要である。

(1) 外来生物拡散モデル

外来生物の分布拡散メカニズムに関しては、すでに明らかにされている生態学の知見をもとにモデルの構築を行った。ここでは、Cannas et al. (2003) の外来生物分布拡散モデルをもとに、C言語ソフト開発環境を提供する Visual C++TM6 (Microsoft Corp. 1995) を用いて、経済・管理モデルと統合可能なモデルに新たに構築し直した。

Cannas et al. (2003) は外来生物の生活史特性を考慮に入れ、時空間的な外来生物拡散を予測できるセルオートマンモデルを構築した。セルオートマンモデルとは、格子状のセルを用いて自然現象を模する離散的計算モデルである。各セルには「内部状態」が格納されており、離散的に表された時間, t , が進むと共に「内部状態」は変化していく。 $t+1$ における1つのセルの「内部状態」は、時

刻 t におけるそのセル自体および近隣のセルの「内部状態」によって決定される。

Cannas et al. (2003) が考慮した外来生物（マメ科の落葉高木）の生活史特性は下記の通りである。

平均種子散布距離, d

最大寿命, t_{max}

単年成木生存確率, q

繁殖可能齢, t_m

平均種子生産量, n

結実間隔, t_s

平均発芽確率, f_g

幼木の生存確率, P_s

幼木バンクにおける平均苗木年齢, t_j

ここで、幼木バンクとは閉鎖樹冠（Closed Canopy）のもとで発芽し、日陰において生存可能であるが、樹冠のギャップがない状態では生殖できるまで成長できない苗木の集合を指す。

Cannas et al. (2003) のモデルに従うと、セル i に外来生物が侵入する確率は下記のように表される。

$$p_i = 1 - (1 - P_s \bar{r} f_g)^{S_i}$$

$S_i(t)$ は、時間 t においてセル i に侵入する種子の数で、次式で表される。

$$S_i(t) = n \bar{r} g_j(t)$$

ここで $g_j(t)$ は、セル j からセル i に拡散する種子の割合を示すもので、平均種子散布距離と、繁殖可能齢、結実間隔に依存し、 $g_j(t) > 0$ となるためには、セル j にある個体が繁殖できる年に達しており、かつ、ちょうど結実期である必要がある。

Cannas et al. (2003) の研究では、管理が外来生物拡散へ及ぼす影響を評価予測できなかったが、本研究では、管理と外来生物拡散の相互作用をモデルに組み込むため、彼らのモデルを拡張する。具体的には、管理を施すことにより、平均種子散布距離が短くなると仮定する。つまり、 d は管理処方依存し、適切な管理により、拡散速度を遅くできると

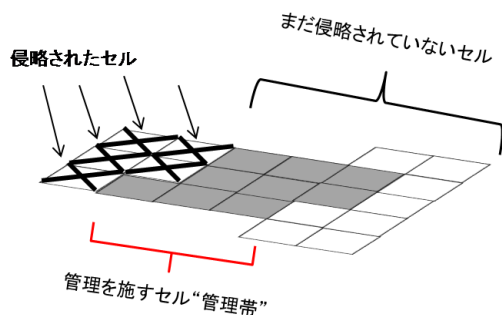


図1 「管理帯」形成の例

考える。特に、ここでは、管理を施すことで、平均種子散布距離を半減できると仮定する。

(2) 管理配置評価モデル

本研究では、一人の土地管理者が所有するランドスケープに外来種が侵入したと仮定し、土地管理者は、その拡散を効率的に抑制・防止することを目的とする。管理配置モデルは、土地管理者が検討する様々な管理エフォートの空間配置パターンを評価・比較する。

ここでは、土地管理者は t 期の始めに、 $t-1$ 期において侵略されたセルの近隣に位置する「まだ侵略されていない」セルに対して拡散速度を遅くするための管理を施す（図1）。侵略されたセルに直接的に接するセルのみに管理を施しただけでは、十分な拡散防止に繋がらない可能性がある。一方、より効果的な拡散防止を目指し、侵略されたセルからより遠く離れたセルに至るまで管理を展開するためには多くの費用が必要になる。それゆえ、「侵略されたセルからどの程度離れたセルにまで管理を施すか」という問題は、管理費用と外来生物拡散メカニズムの両方を考慮に入れて検討する必要がある。本研究では、次節で説明するように、侵略された各セルから4つの異なる距離内に位置するすべての「まだ侵略されていない」セルを管理する「管理帯」を形成し、それら異なる幅を持つ「管理帯」が外来生物の拡散に与える影響をシミュレーションし、比較・評価する。

(3) シミュレーション

ここでは、100セル×100セル（10,000セル）からなる仮想的なセルベースのモデルを構築する。管理の計画期間は20年間とし、管理者は $t-1$ 期に侵略されたセルの情報をもとに毎期、 t 、ごとに管理を施す。ここでは、下記の5つの管理戦略を検討する。

- 1) 管理を施さない。(以後、No management と呼ぶ)
- 2) 侵略されたセルから平均種子散布距離内（3セル分に相当）に位置するすべてのセルを管理する。(以後、3-cell management zone と呼ぶ)
- 3) 侵略されたセルから平均種子散布距離の2倍の距離内に位置するすべてのセルを管理する。(以後、6-cell management zone と呼ぶ)
- 4) 侵略されたセルから平均種子散布距離の3倍の距離内に位置するすべてのセルを管理する。(以後、9-cell management zone と呼ぶ)
- 5) 侵略されたセルから平均種子散布距離の4倍の距離内に位置するすべてのセルを管理する。(以後、12-cell management zone と呼ぶ)

management zone と呼ぶ)

2) ~ 5) は、それぞれ異なる幅の「管理帯」(管理されたセルの集合)を外来生物の拡散方向に設置することで、管理セルに侵入してきた外来生物の拡散速度を遅らせ、その拡散を抑制する。外来生物はランドスケープの左下コーナーに位置するセルから侵入・定着したと仮定し、表1のパラメータに基づいて拡散する。

各セル, i , へ外来生物が侵入するかどうかは p_i に依存する。具体的には、0 から 1 までの値をとる一様乱数, p_i^u , を外来生物が未侵入のセル, i , について発生させ、 $p_i > p_i^u$ ならば外来生物がセル, i , に侵入する。

4. 研究成果

(1) No management の時の外来生物拡散パターン

計画期間において拡散スピードを遅くするための管理を施すことなく、侵入してきた外来生物を放置した場合、計画期間を通した外来生物拡散パターンと侵略されたセルの数は、それぞれ図2と図3のようになった。これらの図からも分かるように、計画期間の最終期には対象ランドスケープ(10,000セル)の75%以上が外来生物による侵略を受けることが示された。

(2) 管理パターンの比較

各期, t , において前期, $t-1$, に侵略されたセルを基準に4つの異なる幅の「管理帯」を設置した場合の外来生物拡散パターンの拡散規模を比較した。図3はそれぞれの管理パターンにより外来生物拡散が計画期間においてどのように変化するかを示している。図4は4つの異なる幅の「管理帯」をそれぞれ計画期間を通して採用した際の計画期間の最終期(20年目)における外来生物拡散空間パターンを比較したものである。これらの図からも分かるように、我々のシミュレーション結果では12-cell management zoneを採用した場合に侵略の規模は最も小さくなる。つ

表1 外来種拡散モデルのパラメータ

Parameter	
t_m	1
n	14,000
t_s	1
P_s	0.4
f_g	0.2
d (lattice unit)	3

まり、侵略されたセルからできるだけ遠くに位置するセルに対しても管理を施し、「管理帯」を「厚く」し、拡散スピードを大幅に減少させることで、計画期間内において、外来生物の拡散を抑制する可能性が示唆された。12-cell management zoneを採用した場合、計画期間の最終期において、外来生物による侵略を対象ランドスケープのおよそ20%にとどめることができた。一方、我々のシミュレーション結果では、予想通り、「管理帯」の幅を狭くするほど、外来生物の拡散範囲は広がり、3-cell management zoneを採用した場合、外来生物に侵略されるセルの数はNo managementの場合とほとんど変わらないことが示された。

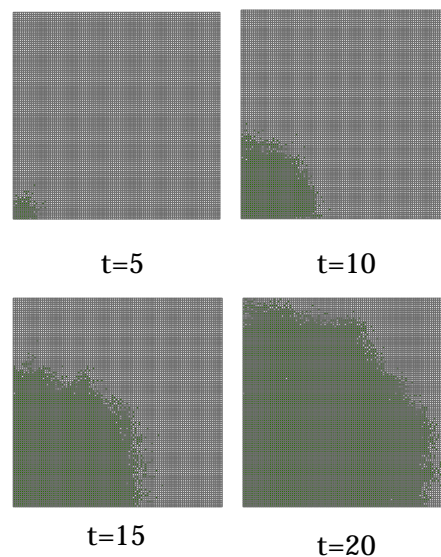


図2 No management の時の外来生物拡散パターンの変化

(3) 管理費用の比較

図5は5つの異なる管理戦略を採用した場合において管理されるセルの数を比較したものである。No managementを採用すると計画期間を通して管理が施されないため、管理されるセルの数はゼロである。

ここで、仮に管理に掛かる費用がすべてのセルにおいて一定で同じと仮定すると、管理されるセルの数が多ければ、管理の総費用が大きくなる。つまり、管理されるセルの数を評価・比較することで、管理費用を間接的に比較・評価できるのである。

図5が示すように、管理されるセルの数が多いのは6-cell management zoneであった。次に多いのは、9-cell management zoneで、最も少ないのが3-cell management zoneであることが分かった。

4つの異なる幅の「管理帯」のなかで、

12-cell management zone は侵略セルから最も離れたセルにまで管理を施すので、「管理帯」の幅が最も広くなる。しかし、侵略されるセルの数は各期において少なく押さえられる（図3）。つまり、1つの侵略セルを基準として、その隣接セルから展開される「管理帯」に最も多くのセルが組み込まれるが、そもそも侵略されるセルの数が少ないのである。

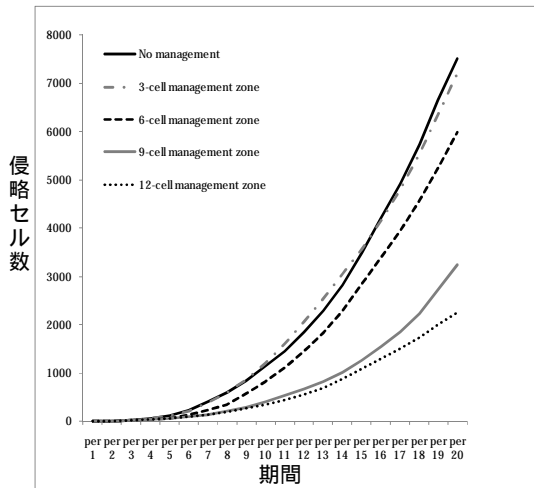


図3 侵略されたセルの数の変化

一方、例えば、6-cell management zone は12-cell management zone に比べて「管理帯」の幅は「厚く」ない、つまり、1つの侵略セルを基準として、その隣接セルから展開される「管理帯」に組み込まれるセルの数は少なく、「管理帯」の幅は小さい。しかし、各期

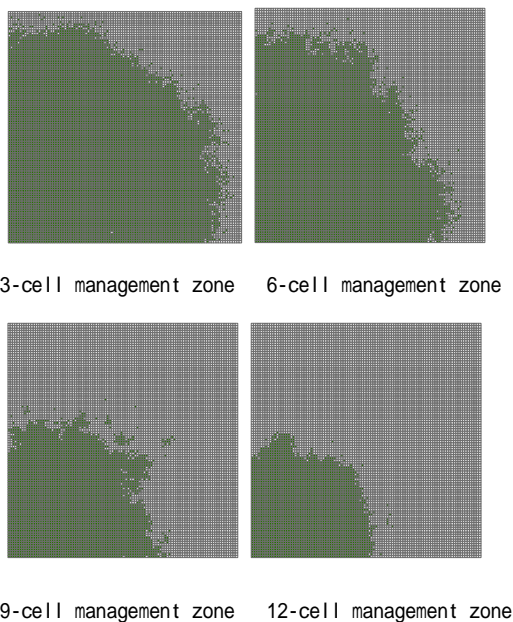


図4 t=20 外来生物拡散規模の比較

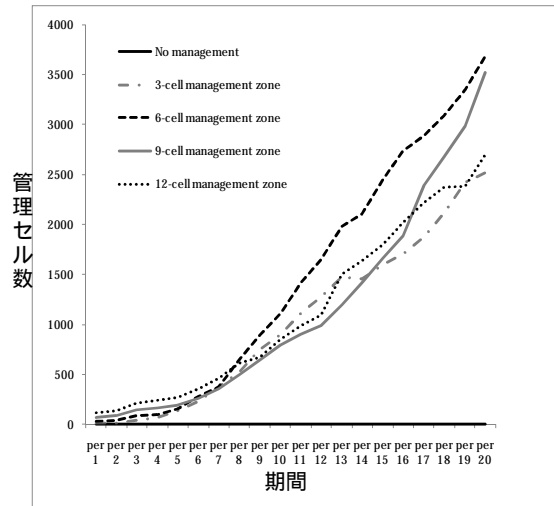


図5 管理セル数変化の比較

において侵略されるセルの数は多い、その結果、「管理帯」を広範囲に形成する必要がある。今回のシミュレーションの結果では、6-cell management zone を採用した場合、外来生物拡散速度を十分に遅くすることが出来ず、每期、 t において、ある程度の侵略を許してしまう。そのため、 $t+1$ 期の始めに、広範囲に「管理帯」を設置する必要が生じた。その結果、この場合の管理すべきセルの数は、より幅の広い「管理帯」を設置する9-cell management zone や12-cell management zone に比べて多くなった。

(4) まとめ

効果的かつ効率的に外来生物拡散をコントロールするためには、管理の規模・強度に関して的確な判断が必要になる。上記の結果から、規模・強度が十分でない場合、例えば、3-cell management zone のように、管理費用が掛かるが、拡散抑制・防止の効果については、管理費用の伴わないNo management の場合と比べて、ほとんど変わらない可能性が示唆された。

また、管理費用の分析結果によると、土地管理者は、「管理帯」の幅と外来生物侵略セル数のトレードオフに直面することが示唆された。「管理帯」の幅を大きくする、つまり、侵略されたセルからより遠くに位置するセルにいたるまで管理を展開すると当然管理費用は高くなるが、このような強度な管理を施すことで、外来生物侵略セル数を少なくすることができる。そのため、次期、 $t+1$ における管理の範囲が限られたものになり、その結果、管理するセルの数は減り、管理費用も減る。しかし、「管理帯」の幅を狭くした場合、より多くのセルに外来生物が拡散し、次期、 $t+1$ において「管理帯」をより広範囲に展開する必要が生じる。その結果、管理する

セルの数が逆に増え、それに伴い管理費用も上昇する可能性がある。以上のように、本研究で提案した生態系モデルと管理配置評価モデルを統合するアプローチは、管理と外来生物拡散の定量的な関係を明らかにできる。また、このような統合モデルは管理費用と外来生物被害拡散規模のトレードオフを捉える事が出来る。これらの情報は外来生物管理の意思決定において、客観的な評価として、非常に重要である。

本研究は、様々な仮定を設け、かつ、仮想的なランドスケープを用いた分析であり、実際の応用に向けては、モデルの改良・修正やデータの蓄積等が必要である。例えば、管理により「拡散速度をどの程度遅くすることができるのか」、あるいは、「拡散を止めることができるのか」は、管理処方や、対象とする外来生物種によって異なるため、様々なデータの収集と、その分析が必要になる。それゆえ、今後、被害データを蓄積し、植生状態あるいは管理と外来生物拡散速度の定量的な関係を明らかにし、理解を深めるとともに、新たな知見を反映するように生態系モデルを修正し、統合的なモデルの枠組みの中で、外来生物拡散による被害をよりの確に評価できるシステムに改善し、管理計画に結びつけていくことが課題である。

引用文献：

- Alofs, K.M. and N.L. Fowler (2010) *Journal of Applied Ecology* 47 (2): 338-347
- Archer, D.W., and J.F. Shogren (1996) *Agr.Econ.* 14, 103-122.
- Cannas, S.A., D.E. Marco and S.A. Páez (2003) *Math. Biosci.* 183, 93-110.
- Finnoff, D., Shogren JF, Leung B, Lodge D (2005) *Ecol. Econ.* 52, 367-381.
- 小池文人(2007) 外来生物リスクの評価と管理, pp.109-127, オーム社, 東京.
- Mehta, S.V., Haight, R.G., Homans, F.R., and Polasky, S. (2007) *Ecol. Econ.* 61, 237-245.
- Microsoft Corporation (1995) Microsoft Visual C++ User's Guide Microsoft Press.
- 日本学術会議環境学委員会自然環境保全再生分科会 (2007), pp28.
- Williams, D.A., E Muchugu, W.A. Overholt and J.P. Cuda (2007), *Heredity* 98: 284-293

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計5件)

Konoshima, M., (2011) An Economic Incentive for Habitat Preservation: Applying a Multi-Agent Model, 査読有り, *Journal of Environmental Information Science*, 39 (5): 9-20.

Konoshima, M., Marusak, R. and Yoshimoto, A. (2011) Spatially constrained harvest scheduling for strip allocation under Moore and Neumann neighbourhood adjacency, 査読有り, *JOURNAL OF FOREST SCIENCE*, 57 (2): 70-77

吉本 敦・木島真志・柳原宏和 (2010) 隣接空間制約による林分団地化最適パターンの探求. 査読有り, *統計数理* 58 (1) :113-126.

Konoshima, M., Albers, H.J., Montgomery, C.A., and Arthur, J.L. (2010) Optimal Spatial Patterns of Fuel Management and Timber Harvest with Fire Risk, 査読有り, *Canadian Journal of Forest Research* 40(1): 95-108

木島真志 (2009) 害獣管理の経済分析に向けて - 最適化モデルによる生息地環境コントロール. 査読有り, *環境情報科学論文集* 23:125-130

[学会発表](計3件)

Konoshima, M. "Spatial Management for Invasive Species" International Conference on Managing Forest Resources for Multiple Ecosystem Services under Robust and Fragile Environments, Sunway Phnom Penh Hotel, Cambodia, 9-10 August 2010,
木島真志・吉本 敦, 生物多様性保全に向けた森林管理・経済分析 日本森林学会学術講演集 121: 71, 2010年4月4日
木島真志・吉本 敦 (2011) 生物多様性保全を考慮に入れた森林経営計画モデル 日本森林学会学術講演集 122: 310, 2011年3月26日

[図書](計0件)

[産業財産権]
出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

6. 研究組織

(1)研究代表者

木島 真志 (KONOSHIMA MASASHI)
琉球大学・農学部・准教授
研究者番号: 10466542