都市孤立林におけるアリの種数に影響する要因

由井亜右子¹・夏原由博¹・村上健太郎¹・森本幸裕^{1,2}

摘要：京都市内の孤立林38地点において、アリの分布を調査し、種数に影響を及ぼす要因を探った。調査は単位時間採集法を用い、1回の採集あたり250m²を15分間探索し発見したアリの種を記録した。調査回数は孤立林の面積と比例させたが、最大で24回とした。調査努力による種の発見率の違いを考慮して、Jackknife法によって種数を推定し、比較した。種数と相関の高い要因は微小生息場所の多様度 ($r = 0.667$)、面積 ($r = 0.624$)、樹木の種数 ($r = 0.623$) であったが、いずれの要因に対しても、実際の採集種数の方が推定種数よりも高い相関を示した。アリの種数は孤立林の面積や形状などマクロな要因と林内の管理、微小生息場所の多様性というミクロな要因が作用しているという仮説をたて、共分散構造モデルを検討した。その結果単独の環境要因よりも説明力の高い結果が得られた。単相関係数と共分散構造分析の結果に共通して、アリの種数には孤立林面積などのマクロな要因より、微小生息場所の多様性がより大きな影響を与えていることが明らかになった。

キーワード：アリ、Jackknife推定、景観生態学、共分散構造分析、都市緑地

Yui, Ayuko, Natuhara, Yoshihiro, Murakami, Kentaro, and Yorimoto, Yukihiro: **Factors influence the species richness of ants in urban woods.**

Abstract : We analysed environmental factors affecting species richness of ants at 38 woodlots in Kyoto City. Ants were recorded by a time unit sampling method with a unit of 250m² / 15min. The number of the sampling unit increased by 24 with the area of woodlots. We estimated species richness of ants with the Jackknife estimation to reduce bias derived from the difference in sampling effort. Some environmental variables correlated with ant species richness were micro-habitat diversity ($r = 0.667$), woods area (log-transformed; $r = 0.624$), and tree species richness (Tree S; $r = 0.623$). These values were lower than that of tree species and area. We analysed the causal relationship with the structural equation modeling.

Key words : ant, jackknife estimate, landscape ecology, structural equation modeling, urban woods

1. はじめに

都市緑地に生息する種数に影響を及ぼす要因については、都市の自然として保護、復元する対象として認識されている鳥^{3,10)}やチョウ⁴⁾、樹木^{5,7)}など多数報告されている。アリは、上記の生物群ほど人に親しまれてはいないが、都市緑地の環境指標として優れていると考えられている²¹⁾。孤立した生息場所においては、一般に生息場所の面積が種数に大きな影響を及ぼしていることが明らかにされているが、出現パターンについては、鳥・チョウと樹木・アリとでは種の分布パターンが異なることが指摘されている⁹⁾。すなわち、鳥やチョウは種数の多い生息場所には種数の少ない生息場所に分布する種が必ず含まれるという入れ子集合型の分布であるのに対して、樹木やアリは種数の少ない生息場所にいる種が必ずしも種数の多い生息場所に分布するとは限らずランダムないしは排他的な分布を示す。都市のエコロジカル・ネットワークの目標を、特定の種の保護でなく生態系全体の健全性の回復とした場合に、このように異なる分布パターンを持つ生物群の比較は重要である。しかし、アリについては島嶼を対象とした一連の研究はあるものの¹⁰⁾、都市を対象としては、比較的少数の緑地について比較したもの²⁰⁾や種数面積関係だけを取

り上げたもの²⁾、建設後の年数の影響を受けているもの¹⁾など断片的であった。そこで、比較的長期間存続している京都市内の38の孤立林について、種数に影響する環境要因の推定を試みた

2. 調査地の概要

調査は、京都市の市街地約15km四方の範囲にある38ヶ所の孤立林でおこなった。調査地の概要と環境は既報⁷⁾に記したが、これらは過去の空中写真や地形図の判読によれば、孤立林として成立してから少なくとも35年以上経過している。

アリの種数に影響を及ぼす可能性のある要因として、調査地の面積 A 、周囲長 P 、形状指数 (Shape Index) SI 、最も近い山からの距離 D 、孤立林内の樹木の総種数 $Tree\ S$ と方形区 (15mx15m) 単位で求めた樹木の多様度指数 $Tree\ \beta$ 、下列の有無などのデータは既報^{7,11)}によったが、記号は変更した。面積の最大値は186,530m²、最小値は569m²である。

3. 調査方法

アリの調査は単位時間調査法を用いた^{14,19)}。これは一定

¹大阪府立大学大学院農学生命科学研究科, Osaka Prefect. Univ., Grad. School of Agri. & Biol. Sci.

²現所属：京都大学大学院農学研究科, Kyoto University, Grad. School of Agri.

時間に発見した種を記録する方法で、基本的には見取り調査であるが、 A_0 層の篩い採りや石下、樹幹部、朽木なども調査し、地上徘徊性の種以外の発見にも努めた。単位時間15分間ごとに250m²の範囲を調査し、そのうち10分を見取りにあて、残り5分間で篩い採り調査を行った。調査反復数は、上限を24回として孤立林の面積に比例させた。採集したアリは研究室に持ち帰り、実体顕微鏡下で同定した。種名は日本蟻類研究会^[1,12,13]にしたがった。

単位時間調査時に、アリの微小生息場所として、裸地、草地、芝生、コケ（以上1m²以上）、落葉層（厚さ5cm以上）、朽木、切り株、木のうろ、石（石の短径20cm以上）に分類してその有無を記録・集計し、各調査地におけるこれら微小生息場所の種類数を微小生息場所の多様度 *Micro* とした。

調査は2000年7月9日から9月14日の間に行った。

3. 統計解析

短期間の調査によりすべての種を記録することは不可能であるため、Jackknife法による調査地全体の種数推定を試みた^[5]。Jackknife推定種数 *Est* は、出現総種数 *S* に加えて *n* 個繰り返しサンプル中に1回ないし2回だけ出現した稀な種の数 (RS_1 , RS_2) に基づき、以下の式により求められる。

$$Est = S + RS_1 \frac{2n-3}{n} - RS_2 \frac{(n-2)^2}{n(n-1)}$$

また、種数に影響をおよぼす要因を探るために回帰分析と共分散構造分析を用いた。共分散構造分析は、直接観測できない潜在変数を仮定し、潜在変数と観測変数との間の関係を明らかにすることを通じて、現象を理解するための統計的アプローチであり、因子分析と回帰分析（パス解析）の拡張だと言える。これらの計算にはSTATISTICA ver5.5 (StatSoft 1999)を用いた。

Table 1 Number of ant species collected and the jackknife estimate

表1 アリの採集種数および推定種数

No	<i>n</i>	<i>S</i>	<i>Est</i>	<i>Local S</i>
1	24	16	20.7	4.8 ± 1.7
2	24	17	20.9	5.2 ± 1.6
3	24	19	25.6	6.1 ± 1.8
4	24	16	20.7	5.4 ± 1.6
5	24	15	17.0	5.3 ± 1.5
6	24	15	17.9	5.3 ± 1.5
7	24	12	11.1	4.8 ± 1.4
8	24	12	9.4	4.3 ± 1.9
9	24	12	13.9	5.8 ± 1.6
10	24	15	11.5	4.8 ± 1.5
11	24	12	14.0	3.8 ± 0.9
12	24	15	25.4	4.4 ± 1.7
13	24	12	13.0	5.2 ± 1.4
14	24	15	16.1	6.2 ± 1.3
15	24	10	10.0	4.5 ± 1.3
16	24	14	11.4	5.2 ± 1.7
17	24	7	7.0	3.3 ± 1.3
18	24	13	9.5	4.1 ± 1.3
19	23	12	13.0	4.4 ± 1.4
20	22	11	11.1	4.4 ± 1.1
21	9	14	18.6	5.7 ± 1.4
22	18	16	26.2	5.8 ± 1.5
23	16	16	22.4	5.4 ± 1.9
24	14	13	12.4	6.0 ± 1.9
25	13	17	20.8	6.2 ± 1.6
26	13	15	21.5	4.1 ± 1.3
27	12	12	19.0	5.0 ± 1.0
28	11	13	16.7	4.9 ± 1.2
29	11	13	18.4	4.5 ± 1.6
30	7	13	16.1	7.3 ± 1.1
31	7	9	8.8	4.9 ± 0.4
32	6	11	13.9	4.8 ± 0.8
33	5	9	10.5	4.6 ± 1.1
34	5	14	21.5	6.8 ± 0.8
35	5	10	15.2	5.0 ± 1.0
36	4	5	8.8	2.5 ± 1.0
37	3	10	11.3	7.3 ± 1.2
38	2	5	5.5	4.5 ± 0.7

n: number of samples, *S*: number of species collected, *Est*:

jackknife estimate of species richness, *Local S*: average number of species in a 15min sample

Table 2 Correlation coefficient among variables

表2 環境要因間の相関係数

	Log <i>A</i>	<i>P</i>	<i>SI</i>	<i>D</i>	<i>Micro</i>	<i>Tree S</i>	<i>Tree β</i>	<i>Local S</i>	<i>S</i>
<i>P</i>	0.073								
<i>SI</i>	0.474	0.241							
<i>D</i>	0.240	-0.116	-0.015						
<i>Micro</i>	0.611	0.225	0.146	-0.019					
<i>Tree S</i>	0.884	0.393	0.469	0.082	0.637				
<i>Tree β</i>	0.022	-0.104	0.021	-0.004	0.258	0.113			
<i>Local S</i>	-0.037	-0.030	-0.088	0.104	0.039	0.011	0.418		
<i>S</i>	0.624	0.176	0.224	0.170	0.667	0.623	0.431	0.462	
<i>Est</i>	0.351	0.137	-0.010	0.155	0.554	0.372	0.359	0.391	0.810

Log *A*: logarithm of woods area (ha), *P*: peripheral of woods (m), *SI*: shape index, *D*: distance to the nearest forest, *Micro*: diversity of micro habitat, *Tree S*: species richness of trees, *Tree β*: species diversity of trees (Simpson's β), *Local S*: average number of species collected in 15 min. sample, *S*: number of species collected in a site, *Est*: jackknife estimate of species richness
Bold figures indicate $P < 0.05$

Fig.1 Species-area relationships for ant species in isolated woods. Circle: number of species collected, triangle: jackknife estimate of species richness.

図1 アリの種数面積関係

Fig.2 Relationship between species richness of ants and diversity of micro habitats.

図2 アリの種数と微小生息場所との関係

Fig.3 Relationship between diversity of micro habitats and area of woods.

図3 孤立林面積と微小生育環境の多様度との関係

4. 結果

今回の調査で4亜科20属33種が確認された(Appendix)。これはこれまでに京都府内で記録されている72種(18)の58%にあたる。孤立林あたりでは、5種から19種であり、大きな差がみられた。15分間の調査単位あたり平均種数は、2.5種から73種であった。Jackkni 法による推定種数の最小値と最大値は、5.5種と27.4種で、直接採集した種数よりも調査地間の差が拡大した(Table 1)。但し、Jackknife法による推定では、サンプル数が少ない場合には、推定の精度が低くなると予想されるため、全調査地で比較することは問題があろう。そこで、サンプル数が24回と等しい調査地だけを比較すると、種数の最小値と最大値は直接採集の場合が7種と19種、推定種数では7.9種と27.4種で、やはり推定種数では調査地間の差が拡大した。

採集種数と相関が高かった環境変数は、微小生息場所の多様性、面積、樹木種数であった(Table 2)。推定種数についても採集種数の場合とほぼ同様であったが、相関係数はより

低かった。15分間の調査単位時間当たりの平均種数と総採集種数や環境要因との間に有意な相関はみとめられなかった、これは単位面積当たりの種数と孤立林全体での種数が独立した要因によって決まり、孤立林全体での種数の増加は環境の多様化によって起きていること、すなわち、林内でのベータ多様性の増加が主たる要因であることを示唆をている。

アリの採集種数Sおよび推定種数Estともに面積A(m2)の増加にしたがって増加したが、種数の範囲の上限は、約4×103m2で種数が飽和に達した(Fig.1)。一方、種数と最も高い相関が見られた微小生息場所の多様性が増加するとともに種数は比例をて増加した(Fig.2)。そこで、微小生息場所の多様性と孤立林の面積の関係を図示すると、微小生息場所の多様性は、面積が4×103m2付近以下では面積とともに増加し、それ以上では増加しなかった(Fig.3)。

微小生息場所の各要素の種数への寄与を見ると、朽木と石の存在する孤立林で有意(p<0.05、面積を共変量とする共分散分析)に種数が多かった(Table 3)。また、有意差の認められなかった要素もすべてそれらが存在する孤立林の方が存

Table 3 Differences of woods area (log) and of the species richness of ants by presence/absence of the micro-habitat element.

表3 微小生育環境要素の有無による孤立林面積(対数)とアリ種数の差

1) Average ± SD. 2) Average. 3) -: absence, +: presence of each element of microhabitat. 4) Significant probability of Student's t-test. 5) Significant probability of the analysis of covariance in which woods area (log) was covariable.

Fig. 4 Path diagram for the causal relationship between environmental variables and species richness of ant. Box: measured variables, ellipse: latent variables, numeric figures: path coefficient.

図4 環境要因とアリの種数の関係を示すパス図

在しない孤立林よりも平均種数が多かったが、面積も大きいことから、それらの要素の存在が種数を増加させたとは限らない。下刈りの有無は落葉層の有無と同じ組み合わせであり、種数の差は有意ではなかった。

以上より、微小生息場所の多様性と孤立林の面積が、アリの種数を増加させることが予想された。これを2つの潜在変数、孤立林全体のマクロな環境Env1と、孤立林内のミクロな環境Env2がアリの種数に影響を及ぼすと仮定し、パス図により示した (Fig. 4)。図で長方形は観測変数、楕円は潜在変数、矢印は因果関係の方向、数値はパス係数で関係の強さを示す。Env1およびEnv2には観測変数として、Log A, *P*, *SI*, *D*, *Micro*, *TreeS*, *Treeb*のあらゆる組み合わせについて検討したが、モデルが正しいとする帰無仮説に対する χ^2 統計量が有意でない、すなわちモデルが正しいとされたのは、Table 4に示した3通りのみであった。そのうちモデルの当てはまりの良さを示すGFIが最も高く (0.980)、また、 χ^2 統計量が小さな (1.968, $P=0.579$) ものをFig. 4に示した。ここでは、誤差分散を1と調整してあるため、2変数間の相関係数とみなせる。潜在変数Env1は孤立林の面積 (対数) *A*と形状指数 *SI*の潜在変数であり、Env2は微小生息場所の多様度 *Micro*と下刈りの有無 *Manage*の潜在変数で、この両者が、アリの生息空間の量と多様性に関する潜在変数Habitatに影響していると考えた。Habitatへの寄与はEnv2がEnv1より大きく、ミクロな環境の影響が大きいと考えられた。また、Env1とEnv2の間の相関係数も0.641と高かった。Habitatとアリの種数 *S*のパス係数は0.733であり、単独の環境要因との相関係数 (Table 2) より高い値が得られた。

5. 考察

生物の種数は、地球規模から微小生息環境にいたるいくつ

Table 4 Combinations of manifest variables statistically accepted in the structural equation models for ant species richness

表4 アリの種数を説明する共分散構造モデルにおいて棄却されなかった観測変数の組み合わせ

Env1	Env2	χ^2 (<i>P</i>)
LogA, TreeS, SI	Manage, Micro, Treeb	18.44 (0.142)
LogA, TreeS	Manage, Micro	9.427 (0.0513)
LogA, SI	Manage, Micro	1.968 (0.579)

かのスケールでの面積や環境の多様性によって決定される。しかし、その相対的な寄与は場合によって異なっていることが知られている¹⁶⁾。

地理的スケールでは、南西諸島の島間 ($r=0.912$, $P<0.01$, $n=20$)¹⁶⁾や北海の群島 ($r^2=0.930$, $P<0.001$, $n=17$)¹⁾で、べき乗モデルすなわち面積の対数と種数の対数の間に高い相関係数が得られており、本州・四国・九州周辺の島ではこれより低い有意な相関係数 ($r=0.556$, $P<0.01$, $n=30$)¹⁶⁾が得られている。

都市や島内など狭いスケールでの孤立林の面積とアリの種数との関係を求めた例では、兵庫県三田市のニュータウン建設によって分断された孤立林で、種数と面積の間に、高い相関 ($r=0.936$, $n=10$)がみられたが、連続した森林 (102,700 m²) の種数33種に対して面積17,200m²の孤立林に32種が生息していた²⁾。三田市のデータでは10,000m²程度を下回る孤立林ではアリの種数は減少するが、17,200m²以上の面積では種数があまり増加しないことは我々の結果とも一致する。鳥では孤立林の面積が100,000m²以下では種数が増加せず、それ以上の面積で増加するという報告³⁾と比較して、種数面積関係のスケールあるいはパターンが著しく異なる。

一方、面積は異なるが比較的均質なクロマツ林での調査例では、種数と面積の間に有意な相関が得られていない¹⁶⁾。ただし、この例では、孤立林の形が細長いことから、他の例より林縁効果を受けやすいことも考えられる。また、植生と面積の両方が異なる調査地間で種数面積関係を求めたところ、相関係数はクロマツ林の場合よりも低下し、植生の違いがアリの種数に影響を及ぼすことが示された¹⁶⁾。また、アリの種数に影響を及ぼす植生の環境の多様性としては、植物種数やA0層の被度²⁰⁾あるいは、植生型の数、植生型の多様度指数、維管束植物の種数¹⁾などがあげられている。

本研究では、面積の増加とともに微小生息場所の多様度が増加し、それがアリの種数を増加させることが示唆された。これは、上記の文献^{1,16,20)}に見られる結果と整合する。しかし、面積の増加が微小生息場所の多様度の増加の原因であるという因果関係は明らかでないため、構造モデルでは、孤立林の面積や形状 (*SI*) などマクロな要因による潜在変数と微小生息場所や管理などミクロな要因による潜在変数を並列して、これらがアリの生息環境に影響して、アリの種数を決定するというモデルを仮定した (Fig. 4)。

また、このモデルによって、アリの種数を増加させるためには、緑地面積を拡大するだけでは不十分であり、植物種の

多様性や朽木を残すなど微小生息場所の多様性を高めることが必要であることが示された。

しかし、このモデルで、生育環境の多様性がアリの種数に及ぼす影響の大きさ（パス係数）は孤立林の面積が樹木種数に及ぼす影響の大きさ（ $r=0.884$; Table 3）とくらべて小さく、アリの生息環境として測定すべき環境要因が残されていることを示唆している。また、アリの種数と相関の高かった樹木種数 *Tree S* をモデルに組み込むことができなかった。アリの種数と樹木種数が共に孤立林の面積の関数であるのではなく、面積→樹木種数→アリの種数という関係が成立することが示唆されているが、その証明は今後の検討課題として残された。

6. まとめ

1. 京都市の孤立林に生息するアリの種数は、微小生息場所の多様度、孤立林面積、樹木種数など有意な正の相関が見られた。また、微小生息場所の多様度と孤立林面積との間にも正の相関が見られた。

2. 微小生息場所要素のうち、朽木や石の存在する孤立林でそうでない孤立林よりアリの種数が有意に多かった。

3. 面積と形状指数という孤立林全体の潜在変数と微小生息場所と下刈りという林内環境の潜在変数が並列にアリの生息に影響するという構造モデルを仮定して、共分散構造分析をおこなったところ、単独の環境要因よりも説明力の高い結果が得られた。

4. 単相関係数と共分散構造分析の結果から、アリの種数には孤立林面積などのマクロな要因より、微小生息場所の多様性などミクロな要因が大きな影響を与えていることが明らかになった。

広島県環境保健協会の和田秀次博士、大阪府立大学農学生命科学研究科緑地環境保全学研究室の中村彰宏助手に、コンピュータ・プログラムについてご指導いただいた。また、同研究室の神原恵氏には調査を手伝っていただいた。お礼申し上げます。

引用文献

- Boomsma, J. J., Mabelis, A. A., Verbeek, M. G. M. and Los, E. C. (1987) Insular biogeography and distribution ecology of ants on the Frisian islands, *Journal of Biogeography* 14: 21-37
- 橋本佳明・上甫木昭春・服部保 (1994) アリ類を通してみたニュータウン内孤立林の節足動物相の現状と孤立林の保全について, *造園雑誌* 57:223-228
- 樋口広芳・塚本洋三・花輪伸一・武田宗也 (1982) 森林面積と鳥の種数の関係, *Strix* 1: 70-78.
- 今井長兵衛・夏原由博 (1996) 大阪市とその周辺のチョウ相の比較と鳥の生物地理学の適用, *環動昆* 8:23-34
- 石田弘明・服部保・武田義明・小舘治 (1998) 兵庫県南東部における照葉樹林の樹林面積と種多様性, 種組成の関係, *日本生態学会誌* 48:1-16
- 村上健太郎 (2000) 京都市内孤立林における木本植物の種多様性とその保全に関する景観生態学的研究, 大阪府立大学大学院農学生命科学研究科修士論文
- 村上健太郎・森本幸裕 (2000) 京都市内孤立林における木本植物の種多様性とその保全に関する景観生態学的研究, *日本緑化工学会誌* 25:345-350
- 夏原由博 (1998) 大阪市および府内3地点でのアリの記録, *蟻* 22: 1-5
- 夏原由博 (2000) 生きものからみた都市デザイン, *国際景観生態学会日本支部会報* 5: 81-82
- Natuhara, Y. and Imai, C. (1999) Prediction of species richness of breeding birds by landscape-level factors of urban woods in Osaka Prefecture, Japan, *Biodiversity and Conservation* 8: 239-253.
- 日本蟻類研究会 (1989) 日本産アリ類の検索と解説 (I) ハリアリ亜科, クビレハリアリ亜科, クシフタフシアリ亜科, サスライアリ亜科, ムカシアリ亜科
- 日本蟻類研究会 (1991) 日本産アリ類の検索と解説 (II) カタアリ亜科, ヤマアリ亜科
- 日本蟻類研究会 (1992) 日本産アリ類の検索と解説 (III) フタフシアリ亜科, ムカシアリ亜科
- 緒方一夫・竹松葉子 (1999) アリ類. 緒方一夫編, 生物多様性モニタリングに及ぼす諸要因の研究, 平成8-10年度科学研究費補助金研究成果報告書 7-27
- Palmer, M. W. (1991) Estimating species richness: The second-order Jackknife reconsidered, *Ecology* 72: 1512-1513.
- 寺山守 (1991) アリ群集における種数・面積関係, *桐朋学園女子部研究紀要* 6: 2-16
- 寺山守・村田和彦 (1990) 自然保護区を設定する際の保護区の面積と分断の効果: アリ群集を用いての効果, *日本生物地理学会会報* 45, 11-17
- 寺山守・緒方一夫・崔炳文 (1994) 日本産アリ類都道府県別分布表, *蟻* 18:5-17
- 頭山昌都 (2000) 単位時間採取法に基づく種数の推定について—アリ類の調査への適用—, *環動昆* 11:51-60
- 頭山昌都・中越信和 (1994) 都市緑地の構造とアリ類の棲息, *日本緑化工学会誌* 20:13-20
- Yui, A., Njoroge, J. B., Natuhara, Y., and Morimoto, Y. (2000) An evaluation of the recovery conditions for reclaimed land using ant diversity, *IFLA Eastern Regional Conference - 0 Proceedings Book*: 179-186

(2001.6.30.受理)