

多摩川流域における都市部から山間部へかけて
の生物間相互作用の変異と環境教材開発
：植物－送粉者系をもちいて

2014年

堂園 いくみ

東京学芸大学教育学部自然科学系広域自然科学講座環境科学分野 准教授

共同研究者：丑丸敦史 神戸大学大学院人間発達環境学研究科 教授

多摩川流域における都市部から山間部へかけての生物間相互作用の 変異と環境教材開発：植物-送粉者系をもちいて

東京学芸大学教育学部広域自然科学講座環境科学分野 堂園いくみ

要旨

都市化の進行により多くの生物の生育環境が急速に失われつつあり、山間部から都市部にかけて生物多様性が連続的に低下している。生物多様性の低下は、植物と送粉者のような生物間相互作用に影響を及ぼすと考えられ、日本最大の都市東京では、都市化の影響が強いと予想される。そこで本研究では、東京の都市部・郊外から山間部に生育するツユクサ（ツユクサ科）集団を用いて、都市化が送粉者量と繁殖形質に与える影響を明らかにすることを目的とした。野外調査は2012・2013年7～10月に東京都の13集団で行った。各集団で訪花昆虫の観察と花粉持ち出し量、結果率、繁殖形質（花卉サイズ、雌雄離熟の程度（葯と柱頭の距離）、P0比（花粉数／胚珠数）、雄花比（雄花数／開花数））を測定し、都市化の進行が送粉者に与える影響を調べた。その結果、ツユクサ集団から半径250m内の人工地面積が増加すると、訪花頻度が有意に低下した。しかし、都市部であっても緑地面積が大きい調査地点では、訪花昆虫の頻度が高く、都市部においても生物多様性が保たれていると考えられる。都市部の繁殖形質は自殖型を示すと予想されたが、都市部でP0比が他殖型を示した（訪花頻度が低くてもP0比が高かった）。また、結実率は都市部で低かった。このことから都市部でP0比が高かった理由として、都市部の主な送粉者コハナバチが他殖を促進していたというより、コハナバチの花粉収集による受粉用花粉損失が選択圧となり、都市部で花粉生産量が多かったと考えられる。

1. はじめに

現在、地球規模で都市化が進行し（Mark et al. 2010）、都市化によって生物の生育地が分断化・縮小化し生育環境の大きな変化が起こっている（Cheptou et al. 2006）。例えば歩行虫の多様性が山間部から都市部にかけて連続的に低下することが知られている（Sadler et al. 2006）。また植物では開花数と種の多様性が減少したり（Cheptou et al. 2006）、送粉者の減少が報告されている（Bates et al. 2011, Henning and Ghazoul 2011）。都市化による送粉者の減少は花粉制限をもたらし、その結果、種子生産の減少や自殖率の増加をもたらす

（Cheptou et al. 2006, Andrieu et al. 2009, Eckert et al. 2009）。さらに、このような花粉制限が、植物の繁殖形質に影響を与えることが示されており（Eckert et al. 2009）、例えば、花卉サイズ、雌雄離熟の程度（柱頭と葯の距離）、P0比が小さくなることが知られている（Ornduff, 1969, Cruden 1977, 2000, Murcia 1990, French et al. 2005）。

阪神地区においてツユクサ（*Commelina communis*）を対象に、都市化が送粉者量および繁殖形質に与える影響を解析した研究では、人工地面積の割合が高くなるような都市部では、送粉者の訪花頻度が低くなり、種子生産量も低いことが示された（Ushimaru et al. 2014）。

また、都市部では雌雄離熟の程度が小さくなり、雄花の割合が少ないなど自殖を促進する形質がみられ、都市化が花形質の進化をもたらすことが示唆された (Ushimaru et al. 2014)。

日本最大の都市である東京は、都市部の人工地面積の割合は高いが、都市部には比較的面積の広い緑地が点在している。人工地面積の割合が高い都市部においても、公園のような緑地では昆虫の多様性が高く、元々そこに生息していた生物の避難場所になっている場合もある

(McIntyre 2000, Goddard et al. 2010)。よって、東京では都市部においても、広い緑地では生物多様性が高く、植物と送粉者の関係も維持されていると予想される。そこで本研究では、東京の都市部から山間部にかけて生育するツユクサを対象に、送粉者量および繁殖形質ついて都市化の影響を明らかにすると共に、阪神地区と比較し、地域特性の違いを考察する。

2. 材料と方法

2.1 材料

ツユクサ (*Commelina communis*) は雄性両全同株性の一年草で、道端や草地など日本全土に分布している。個体は多数の花序を持ち、7~9 月頃に両性花と雄花が咲く。明け方5時前後に開花し、正午を過ぎると閉じる一日花である。個体群内の雄花の割合は一定ではなく、花期の進行とともに増加する (森田・濁川 1999)。

ツユクサの両性花は、長雄蕊2 本、中雄蕊1 本、短雄蕊3 本の機能の異なる3種類の雄蕊を持ち、長雄蕊と中雄蕊が生産する花粉は稔性を持つが、短雄蕊が生産する花粉は不稔性である (図1、森田・濁川1999)。雄花は雌蕊が発達しないが、花弁や雄蕊の形やサイズは両性花と違いがなく、長雄蕊、中雄蕊の花粉の生産も両性花と同様に見られる (森田・濁川 1999)。ツユクサは蜜腺がなく、送粉昆虫への報酬は花粉のみである。主な送粉者はホソヒラタアブ (*Episyrphus balteatus*) で (Ushimaru and Hyodo 2005 Ushimaru et al. 2007)、長雄蕊の花粉は他殖に貢献しているが、中雄蕊の花粉は送粉者への報酬として機能していると考えられている (Ushimaru et al. 2007)。マルハナバチ類やミツバチ類、単独性のハナバチ類なども訪花することが知られている (Ushimaru and Hyodo 2005 Ushimaru et al. 2007; Ushimaru et al. 2009)。また、ツユクサは自家和合性で遅延受粉やつぼみ受粉も行う (森田・濁川 1999)。花が閉じる際、雌蕊と長雄蕊は巻き上がり、柱頭と葯の先端が接触して自動自家受粉が起きる (森田・濁川 1999)。

2.2 調査地

調査は東京都市部から山間部にかけて、都市部3 地点 (a-c)、緑地2 地点 (d-e)、郊外4 地点 (f-j)、山間部4 地点 (l-m)、計13 地点で行った。2012 年8 月8 日~10 月2 日に3 地点 (d: 池上本門寺、g: 東京学芸大学、m: 数馬、図2)、2013 年7 月17 日~8 月31 日に、その他の10 地点で野外調査を行った (図2)。調査は天気の良い日を選んで2~3 日、各地点で2~3 日間隔を空けて調査を行った。2012 年は各地点につき1 × 3 m のコドラートを5つ、2013年は3つ設定し、開花数と雄花数の計測、訪花昆虫の観察、雄蕊と雌蕊に付着した花粉数測

定、花形質の測定を行った。

周辺の景観構造がツククサの繁殖に与える影響を調べるため、GIS（地理情報システム）を用いて、調査地点から半径50、250、500～5000 m（500 m ごと）に、バッファ内の人工地面積を算出した。景観要素の面積算出には（財）日本地図センター発行の細密数値情報（10 mメッシュ土地利用）首都圏1994 のデータを用いた。

2.3. 訪花昆虫の観察

Ushimaru ら（2014）の方法に従い、コドラートごとに咲いている両性花を5 個（個体別）マークし番号をつけた。コドラート内に入った送粉者の訪花行動を30～60分間観察した。2012 年は、1 コドラートにつき30-50分間続けて観察した。2013年は、1 コドラートでの観察を15分間に区切り、3～4 回（30-60分間）繰り返し観察した。その際、訪花者をコハナバチ、ホソヒラタアブ、クロアブ、ミツバチ、トラマルハナバチ、クマバチの6つに分類した。マークした花への訪花回数や、訪花した雄蕊タイプと、訪花行動を記録した。番号をつけた花50～75個体の訪花頻度（訪花回数（1 個のマークした花に訪花した回数）／15 分／花（マークしていた1 個の花あたり））の平均値を出し、その値を各調査地での訪花頻度とした。

2.4. 雌雄の繁殖成功

送粉者による花粉持ち出し量および柱頭上の花粉付着量を評価するために、Ushimaru ら（2014）の方法に従い、開花前（朝6 時に新しく開いたもの）と開花後（11 時頃まで送粉者が訪花可能な状態にしたもの）の両性花7 個から短雄蕊3 本、中雄蕊1本、長雄蕊2本、雌蕊1本をサンプルチューブ（1 ml の70%エタノール入り）に採取した。実験室に持ち帰り、薬を潰してボルテックスミキサーで30 秒ほど攪拌した後、10 μ l をスライドガラスに取り、光学顕微鏡（10 \times 40 倍）で花粉数を計測した。計測は3 回行い平均値を求め、1 ml 中の花粉量に換算した。各雄蕊タイプの開花前と開花後の花粉の持ち出し量（開花前の平均花粉数－開花後の平均花粉数）を計算した。開花前と開花後の柱頭上の花粉量（開花後の柱頭上花粉数開花前の柱頭上付着数）を計算した。2012 年は、柱頭をアニリンブルーで染色し、蛍光顕微鏡（10 \times 10 倍）で柱頭上の花粉数と花粉管伸長を観察した。2013 年は、スライドガラス上に置いた雌蕊を両刃カミソリで切断して柱頭部分だけにし、カバーガラスをかぶせた後、上からピンセットで押しつぶして、柱頭上の花粉数を蛍光顕微鏡（10 \times 10 倍）で観察した。

自然状態の種子生産について、2012 年は調査の最終日に各調査地10 個体採取し、個体内の果実の有無を調べ、結果率（果実数／花数）を算出した。2013 年は、調査終了後およそ14日後に各調査地20～30個体を採取し、1 シュート中での果実の有無を調べ、結果率（果実数／シュート全花数）と結実率（果実中の種子数／胚珠数(4)）を算出した。

2.5. 花形質の測定

開花後の花を14-21 個を採取し、花卉サイズ・雌雄離熟の程度・P0 比を測定した。

Ushimaru ら (2003) に従い、柱頭の高さと同雄蕊の長さをデジタルノギスで測定し、その後、1 枚の花弁を取り外し、2 枚のスライドグラスに挟み、花弁の長さを測定した。柱頭と葯の距離(雌雄離熟の程度)は、柱頭の高さ-同雄蕊の長さから算出した。

P0比は開花前の花を14-21 個を採取し、同雄蕊・中雄蕊・同雄蕊の総花粉数/胚珠数にて算出した。調査日ごと両性花数と同花数を数え、1 日あたりの開花数(調査期間全体で観察された総開花数/調査日数)と同花比(1 日あたりに全ての調査区内で観察された同花の総数/開花している花の総数)を算出した。

2.6. 統計解析

(1) 人工地面積の割合と同花頻度・同花数の関係

各調査地集団から半径50、250、500~5000 m (500 m ごと) 内の人工地面積が各調査地の同花頻度に影響しているかどうか検討するため、一般化線形モデル (GLM、分布族に正規分布、リンク関数にidentity) を用いて解析を行った。人工地面積を説明変数、同花頻度の平均値を応答変数とした。また、人工地面積が1 日あたりの開花数に影響しているかどうか、GLM (分布族にポアソン分布、リンク関数にlogarithmic) を用いて解析を行った。各調査地の人工地面積を説明変数、1 日あたりの開花数を応答変数とした。さらに、調査地1 日あたりの開花数と同花頻度の関係について、GLM (分布族は正規分布、リンク関数はidentity) を用いて、1 日あたりの開花数を説明変数、同花頻度の平均値を応答変数として解析を行った。

(2) 雌雄の繁殖成功

同花頻度が花粉持ち出し量(同・中・同雄蕊全ての合計) に対し影響があるかどうか、GLM (分布族に正規分布、リンク関数はidentity) を用いて解析を行った。各調査地での同花頻度の平均値を説明変数、花粉の持ち出し量をそれぞれ応答変数とした。

同花頻度が結果率および結実率に影響しているかどうか検討するため、GLM (分布族に二項分布、リンク関数はlogit 関数) およびGLMM (分布族に二項分布、リンク関数はlogit 関数) を用い、同花頻度の平均値を説明変数、果実数種子及び数を応答変数として解析を行った。

(3) 花形質

同花頻度と花形質に関係があるか調べるために、GLM (分布族に正規分布、リンク関数はidentity) を用いて解析を行った。各調査地の同花頻度の平均値を説明変数に、各調査地の同花サイズ・雌雄離熟の程度・P0 比・同花比の平均値をそれぞれ応答変数として解析を行った。本研究における全ての解析は、統計解析パッケージR (2.15.0) を使用した。

3. 結果

3.1. 訪花昆虫相

主に観察された訪花昆虫は、コハナバチ、ホソヒラタアブ、クロアブ、ミツバチ、トラマルハナバチであった(図3)。都市部ではコハナバチの訪花頻度が高かったが、山間部(秋川、日ノ出、数馬)ではほとんど見られずホソヒラタアブ、トラマルハナバチの訪花頻度が高かった(図3)。都市部の広い緑地ではミツバチが観察された(池上本門寺:セイヨウミツバチ、代々木公園:ニホンミツバチ、図3)。大井鹿島公園でのみクマバチの訪花が確認された。

3.2. 人工地面積と訪花頻度・開花花数の関係

各調査地集団から半径50、250、500~5000 m (500 m ごと) 内の人工地面積と訪花頻度の関係を解析したところ、半径250 m 内の人工地面積が高いほど訪花頻度は減少していた(係数 ± 標準誤差, $-4.596 \times 10^{-6} \pm 1.937 \times 10^{-6}$, $t = -2.372$, $P = 0.039$, 図4)。その他の範囲では、人工地面積と訪花頻度との間に有意な相関は見られなかった。また、人工地面積と1日あたりの開花の関係を、いずれの半径においても有意な相関は見られなかった(係数 ± 標準誤差, $8.20 \times 10^{-3} \pm 1.69 \times 10^{-2}$, $z = 0.49$, $P = 0.637$)。さらに、調査地1日あたりの開花数と訪花頻度の間に有意な相関は見られなかった(係数 ± 標準誤差, $-1.39 \times 10^{-6} \pm 5.68 \times 10^{-6}$, $t = -0.244$, $P = 0.812$)。

3.3. 雌雄の繁殖成功

短雄蕊3本、中雄蕊1本、長雄蕊2本それぞれの開花前・開花後の花粉持ち出し量と訪花頻度の間に有意な相関は見られなかった(短雄蕊:係数 ± 標準誤差, 1328.43 ± 3637.95 , $t = 0.37$, $P = 0.72$, 中雄蕊: -28445.10 ± 18277.50 , $t = -1.56$, $P = 0.15$, 長雄蕊: 17057.30 ± 52628.50 , $t = 0.32$, $P = 0.75$, 図5)。柱頭上の花粉量および結実率と訪花頻度の間に有意な相関が見られた(係数 ± 標準誤差, 柱頭上の花粉: 52.70 ± 19.69 , $t = 2.68$, $P = 0.028$, 結実率: 66.51 ± 13.64 , $z = 4.87$, $P < 0.0001$, 図6, 7A)。しかし、結果率と訪花頻度の間には有意な相関は見られなかった(係数 ± 標準誤差, 3.03 ± 10.52 , $z = 0.29$, $P = 0.773$, 図7B)。

3.4. 花形質

P0比と訪花頻度には有意な相関があり、訪花頻度が低いほどP0比は高い値を示した(係数 ± 標準誤差, -44322.8 ± 15492.7 , $t = -2.86$, $P = 0.016$, 図8)。その他の花形質(花卉サイズ・雌雄離熟の程度・雄花比)と訪花頻度には有意な相関はみられなかった(花卉サイズ: 56.06 ± 51.39 , $t = 1.09$, $P = 0.30$, 雌雄離熟の程度: -48.02 ± 27.39 , $t = -1.75$, $P = 0.11$, 雄花比: 3.23 ± 4.44 , $t = 0.73$, $P = 0.48$)。

4. 考察

人工地面積が大きい都市部では、送粉者の訪花頻度は低下するが、都市部でも面積の大きい緑地では訪花頻度も高く（図3, 4）、都市部の公園は元々生息していた生物の避難場所になっている可能性が示唆された。また、東京都市部の訪花頻度が低いにもかかわらず、PO 比が他殖型の傾向を示し、阪神地区の都市部で花形質が自殖の傾向を示した報告と逆の傾向がみられた（図8、Ushimaru et al. 2014）。しかし、結実率は都市部で低かった（図7A）。このことから都市部で花粉量が多かった理由として、主に訪花していたコハナバチが他殖を促進していたというより、コハナバチの花粉収集による受粉用花粉の損失を補うためだと考えられる。

4.1. 都市部の緑地 と生物多様性

ツユクサの生育地から半径250m 以内の人工地面積が大きいほど、訪花頻度が低下していた（図4）。都市部においても大きな緑地公園では人工地面積は小さく、訪花頻度は高い傾向があった（図3, 4）。訪花昆虫種の都市部と山間部の違いは、都市部ではコハナバチが観察されたのに対し、山間部ではほとんど観察されなかった。また、ツユクサの主な送粉者であるホソヒラタアブは、山間部で高い頻度で観察され、都市部においても観察されたが頻度は低く、郊外域ではほとんど観察されなかった（図3, 4）。都市化による生物の生息地の分断化や生息環境の悪化が、送粉昆虫に影響を与えているという報告があるが（Bates et al., 2011, Henning and Ghazoul 2011）、東京都市部においても都市化が送粉者量に影響を与えていることが示唆された。しかしながら、都市部の中の面積の大きい緑地（代々木公園、池上本門寺）では、昆虫の訪花頻度は高い傾向があり、生物多様性が維持されていると考えられ、元々生息していた生物の避難場所になっていると考えられる（McIntyre 2000, Goddard et al. 2009）。

Ushimaru ら（2014）の阪神地区の研究において、ツユクサ生育地から半径250m 以内の人工地面積が大きくなると訪花頻度が低くなり、今回の東京の結果と同様であった。よって、ツユクサの送粉昆虫量は、ツユクサの生育場所から半径250m 以内の環境が重要だといえる。また、阪神地区ではツユクサ集団の開花数と訪花頻度に有意な関係はみられず、東京でも同様の結果だった（Ushimaru et al. 2014）。つまり、植物の開花数が減少していることが訪花頻度の減少をもたらしているわけではなく、人工地の増加による生息地や餌資源の減少が要因と考えられる。しかしながら、阪神地区では都市部でほとんど訪花昆虫が観察されなかったのに対し（Ushimaru et al. 2014）、東京ではコハナバチの訪花が観察された。その要因については本研究では明らかにできなかったが、コハナバチの営巣環境や餌利用をふまえて、阪神地区と東京の違いを明らかにする必要がある。

4.2. 都市部と山間部の繁殖成功

花粉持ち出し量と訪花頻度に有意な関係は見られなかった（図5）。Ushimaru ら（2014）の阪神地区の調査では、花粉持ち出し量と訪花頻度に有意な関係が見られた。阪神地区では都市部でほとんど訪花昆虫が観察されなかったのに対し、東京は都市部でも昆虫の訪花が観察された

(図3)。コハナバチは幼虫のために長雄蕊から花粉を収集する行動が見られたため(木野田 2006)、都市部では頻度が低いにもかかわらず、山間部と同じくらいの持ち出し量となったと考えられる(図5)。

雌の繁殖成功としての柱頭上の花粉数と結実率は、訪花頻度が高い山間部で高い傾向がみられた(図6, 7A)。しかし、結果率は都市部と山間部で差は見られなかった(図7B)。ツユクサは開花終了時に自動自家受粉をするので、訪花頻度が低くても自殖で種子生産が可能である。柱頭上の花粉数と結実数に相関があったことから、昆虫による送粉が重要で、おそらく他家花粉が優先的に受精している可能性が示唆された。山間部ではツユクサの有効な送粉者であるホソヒラタアブの頻度が高く、また都市部でもホソヒラタアブの訪花が高い代々木公園では、結実率が高くなっていることから、効率のよい送粉および他殖が行われていたと考えられる(図7A)。一方、都市部では、コハナバチがある程度の頻度で訪花していても、結実率は低く、送粉効率が低いことが示唆された(図3, 図7A)。阪神地区では結実率は測定していないため、比較はできないが、都市部では訪花昆虫が観察されなくても果実ができており、自動自家受粉によって受粉がおこなっていることが示唆されている(Ushimaru et al. 2014)。自殖と他殖による果実の質に差があるかどうか、今後分子マーカーによる自殖率の推定が必要である。

4.3. 都市部と山間部の繁殖形質

繁殖形質のP0比と訪花頻度は有意な関係がみられ、訪花頻度が高くなるとP0比が低くなり、他殖型の形質を示した(図8)。他の繁殖形質(花卉サイズ、雌雄離熟の程度と雄花比)については、訪花頻度との関係は検出されなかった。阪神地区の都市部では、雌雄離熟の程度と雄花比が自殖型を示していたが、P0比は有意な関係が見られていない(Ushimaru et al. 2014)。東京の都市部で繁殖形質が自殖型を示さなかった理由としては、都市部でもコハナバチなど訪花昆虫が観察され、ある程度他殖が行われていることが考えられる。しかしながら、結実率が低かったことから(図7A)、コハナバチが他殖に貢献していることは考えにくい。コハナバチは地中に巣を作り、花粉や蜜を多く集めて巣に持ち帰る習性があるため(木野田 2006)、集められた花粉は受粉に寄与せず損失していると考えられる。この花粉損失が選択圧となり、花粉生産量が増加しているとも考えられる。コハナバチがツユクサの繁殖成功にどの程度貢献しているか明らかにするためには、コハナバチの送粉効率を調べる必要がある。

5. まとめ

東京都市部では、都市化の進行により送粉昆虫の訪花頻度が低下していたが、広い緑地が保たれている場所では、都市部であっても訪花頻度が高く、都市部の緑地が生物の避難場所となっている可能性が示唆された。また、都市化に伴い繁殖形質が自殖型を示すことが予想されたが、訪花頻度が低い都市部でも自殖型の花形質は見られず、むしろP0比は他殖型を示した。これは、東京都市部で送粉者として機能しているコハナバチの送粉効率や訪花行動が関係していることが示唆された。

5. 謝辞

本研究の実施にあたり、郡麻里博士にGIS の人工地面積算出に関して多大なご尽力をいただきました。夢の島公園、東京都林業試験場、品川区役所、代々木公園、資紙業株式会社、日野市役所の方々には、調査地への立ち入りに関して多大なるご協力いただきました。データ収集・解析に関しては、研究室の大石成美氏ほか学生諸氏に協力していただきました。本研究にご協力いただきました関係各位に、この場を借り厚く感謝申し上げます。

6. 引用文献

- Andrieu, E., Dornier, A., Rouifed, S., Schatz, B. and Cheptou, P-O. 2009. The town *Crepis* and the country *Crepis*: How does fragmentation affect a plant-pollinator interaction? *Acta Oecologia* 35:1-7.
- Bates, A. J., Sadler, J. P., Fairbrass, A. J., Falk, S. J., Hale, J. D. and Matthews, T. J. 2011. Changing bee and hoverfly pollinator assemblages along an urban-Rural gradient. *PLoS One* 6:e23459
- Cheptou, P-O., Lyz, G. and Avendaño, V. 2006. Pollination process and the Allee effect in highly fragmented populations: consequences for the mating system in urban environments. *New Phytologist* 172:774-783.
- Cruden, R. W. 1977. Pollen-ovule ratio: a conservative indicator of breeding system in flowering plants. *Evolution* 31:32-46
- Cruden, R. W. 2000. Pollen grains: why so many? *Plant Systematics and Evolution* 222:143-165
- Eckert, C. G., Kalisz, S., Geber, M. A., Sargent, R., Elle, E., Cheptou, P-O., Goodwillie, C., Johnston, M. O., Kelly, J. K., Moeller, D. A., Porcher, E., Ree, R., Vallejo-Marin, M. and Winn, A. A. 2009. Plant mating systems in a changing world. *Trends in Ecology and Evolution* 25:35-43.
- French, G. C., Ennos, R. A., Silverside, A. J. and Hollingsworth, P. M. 2005. The relationship between flower size, inbreeding coefficient and inferred selfing rate in British *Euphrasia* species. *Heredity* 94: 44-51.
- Goddard, M. A. Dougill, A. J. and Benton, T. G. 2010. Scaling up from gardens: biodiversity conservation in urban environments. *Trends in Ecology & Evolution* 25:90-98.
- Hennig, E. I. and Ghazoul, J. 2011. Plant-pollinator interactions within the urban environment. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics* 13:137-150.
- 木野田君公. 2006. 札幌の昆虫, 346pp. 北海道大学出版会.
- McIntyre, N.E., and Hostetler, M.E. 2001. Effects of urban land use on pollinator (Hymenoptera: Apoidea) communities in a desert metropolis. *Basic Appl. Ecol.* 2, 209-218.
- Mark, A. G., Andrew, J. D. and Tim, G. B. 2010. Scaling up from gardens: biodiversity conservation in urban environments. *Trends in Ecology and Evolution* 25:90-98

- 森田竜義・濁川朋也. 1999. 花の性型の可塑性-雄花を咲かせるツユクサの不思議な性表現. pp227-242. 大原雅編著『花の自然史』北海道大学図書刊行会,札幌
- Murcia, C., 1990. Effect of Floral Morphology and Temperature on Pollen Receipt and Removal in *Ipomoea Trichocarpa*, *Ecology* 71:1098-1109
- Ornduff, R. 1969. Reproductive biology in relation to systematic. *Taxon* 18:121-133
- Sadler, J. P., Small, E. C., Fiszpan, H., Telfer, M. G. and Niemela, J. 2006. Investigating environmental variation and landscape characteristics of an urban-rural gradient using woodland carabid assemblages. *Journal of Biogeography* 33:1126-1138
- Ushimaru, A. and Hyodo, F. 2005. Why do bilateral symmetrical flowers orient vertically? Flower orientation influences pollinator landing behavior. *Evolutionary Ecology Research* 7:151-160.
- Ushimaru, A., Watanabe, T. and Nakata, K. 2007. Colored floral organs influence pollinator behavior and pollen transfer in *Commelina communis*. *American Journal of Botany* 94:249-258.
- Ushimaru, A., Dohzono, I., Takami, Y. and Hyodo, F. 2009. Flower orientation enhances pollen transfer in bilaterally symmetrical flowers. *Oecologia* 160:667-674.
- Ushimaru A., Kobayashi A. and Dohzono I. 2014. Does urbanization promote floral diversification?: Implications from changes in herkogamy with pollinator availability in an urban-rural area. *The American Naturalist* 184: 258-267

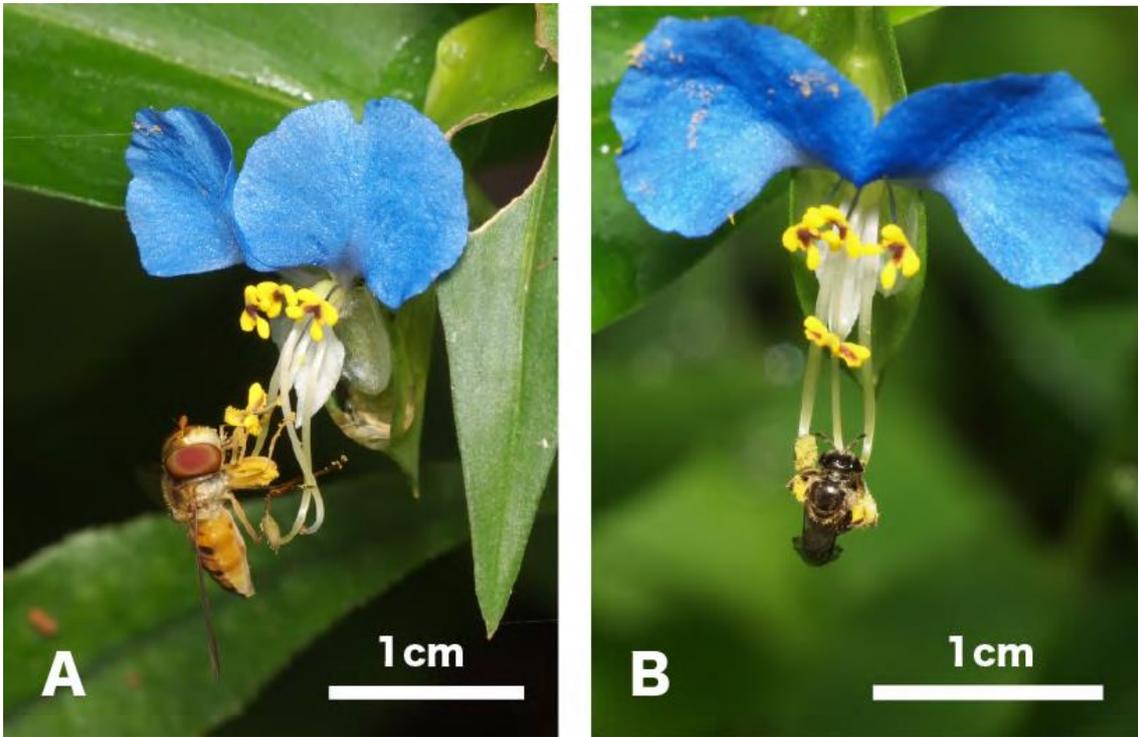


図1 ツユクサ両性花の訪花昆虫

中雄蕊の花粉を食べるホソヒラタアブ (A) と長雄蕊から花粉を集めるコハナバチ (B)。

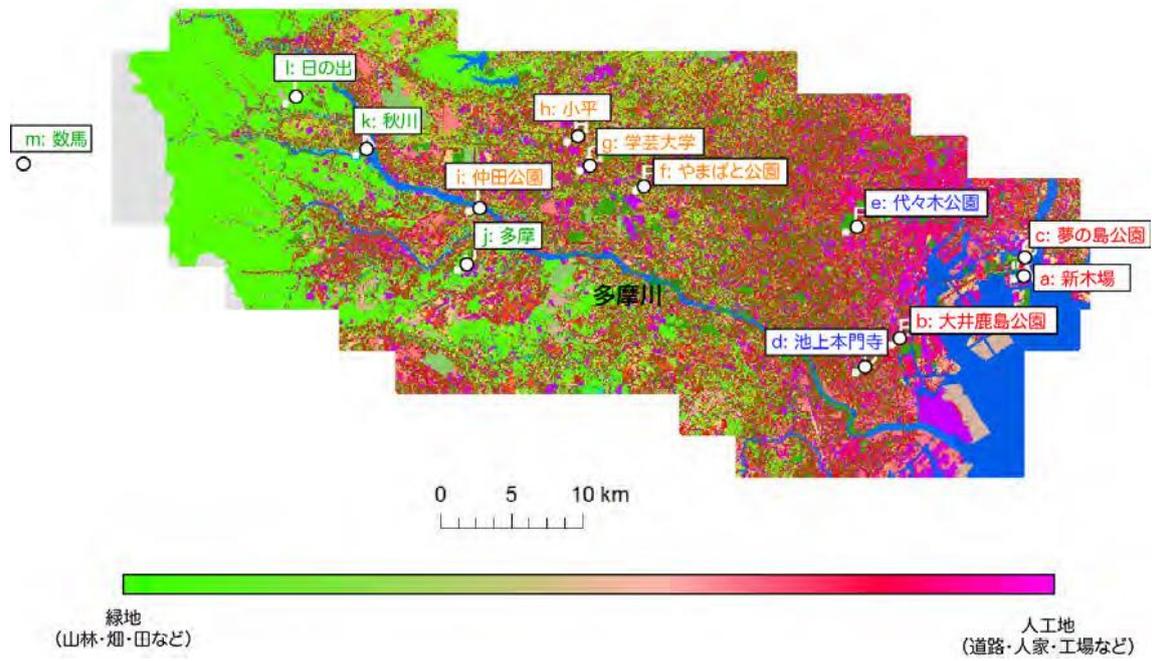


図2 調査地

都市部3 地点 (a-c)、都内緑地2 地点 (d-e)、郊外4 地点 (f-j)、
山間部4 地点 (l-m)、計13 地点で行った。

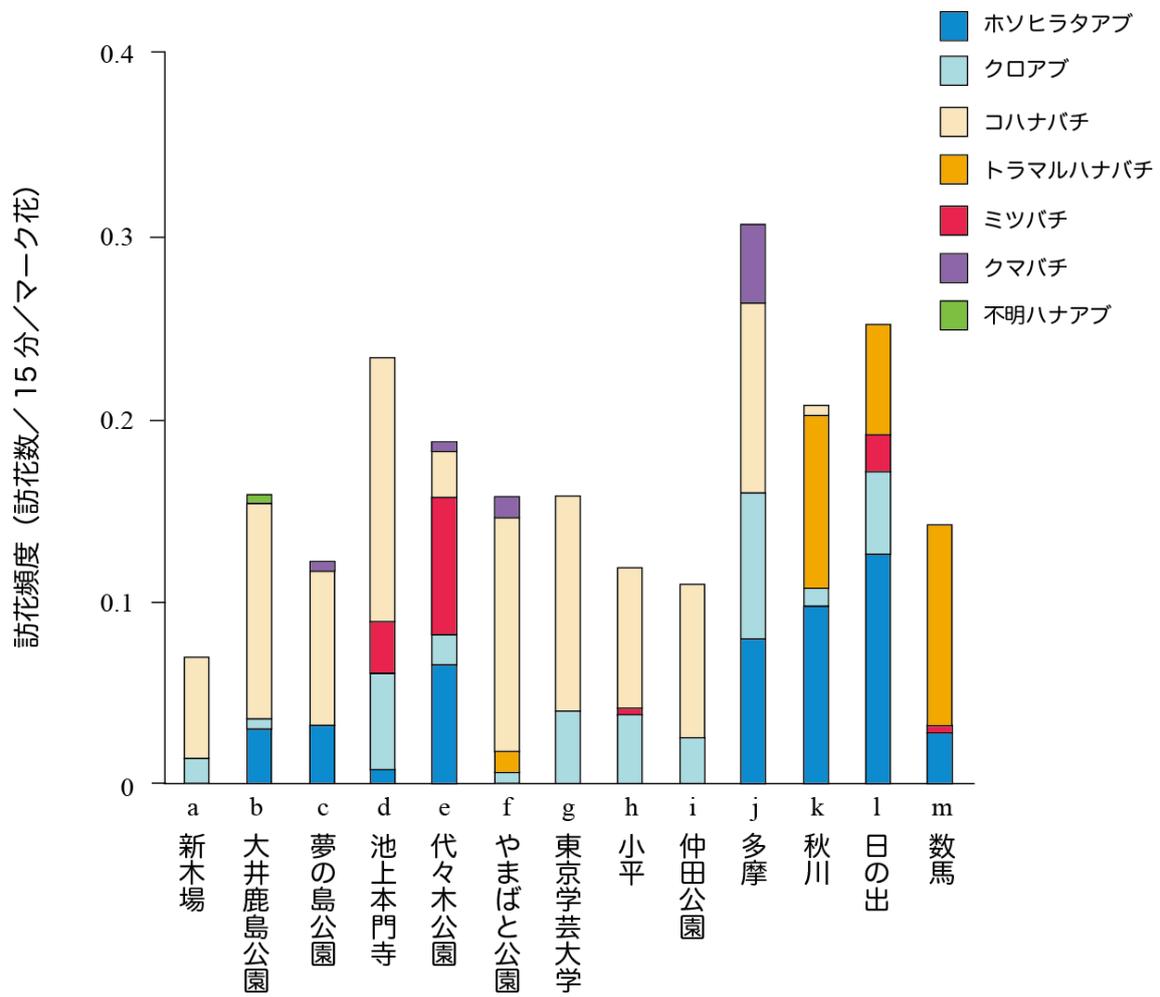


図3 各調査地の訪花昆虫種と訪花頻度

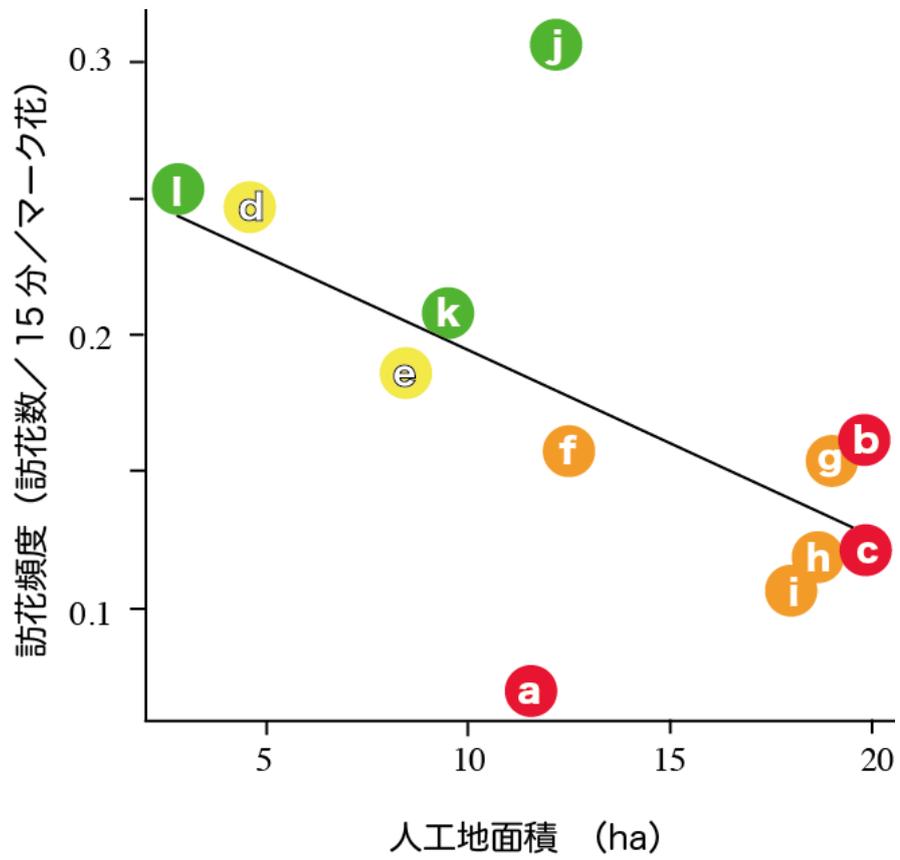


図4 調査集団から半径250 m 内の人工地面積と訪花頻度の平均値の関係 (アルファベットは各調査地を示す)。

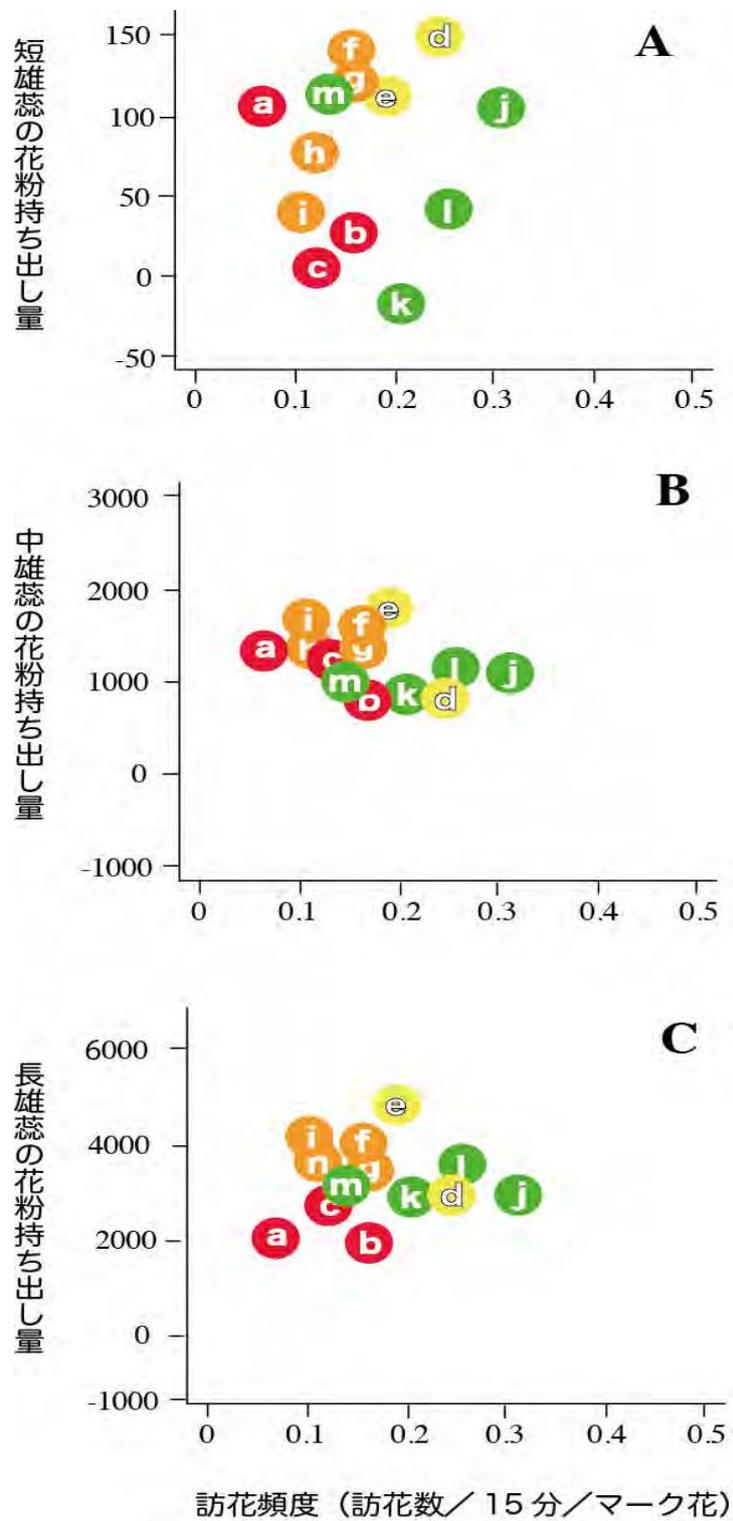


図5 訪花頻度と花粉持ち出し量の関係

A 短雄蕊, B 中雄蕊, C 長雄蕊

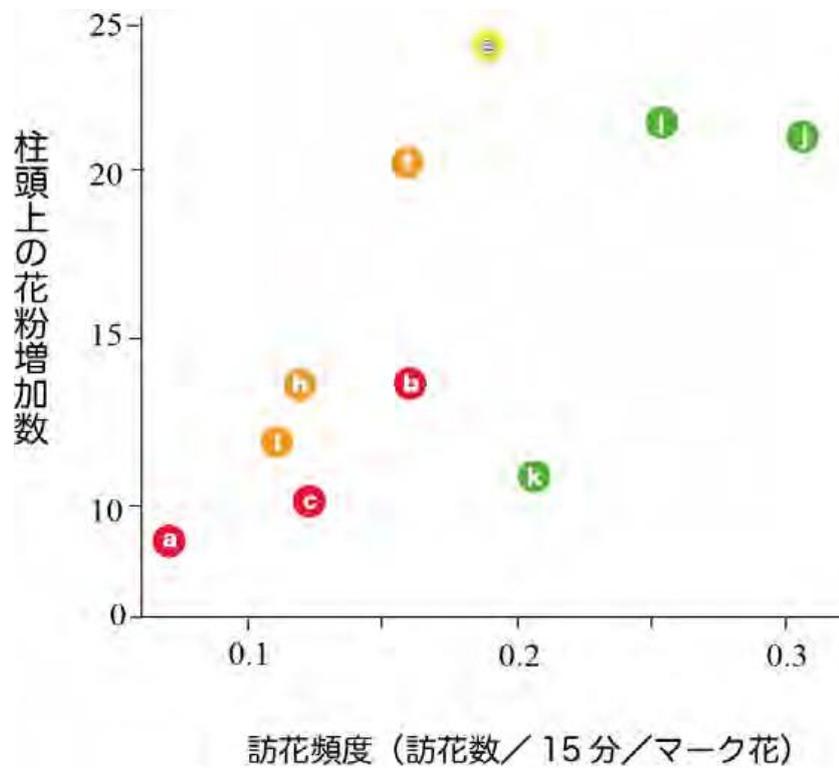


図6 訪花頻度と柱頭上の花粉増加数

訪花頻度が高くなると、柱頭上の花粉数は増加した (GLM, $P < 0.05$)。

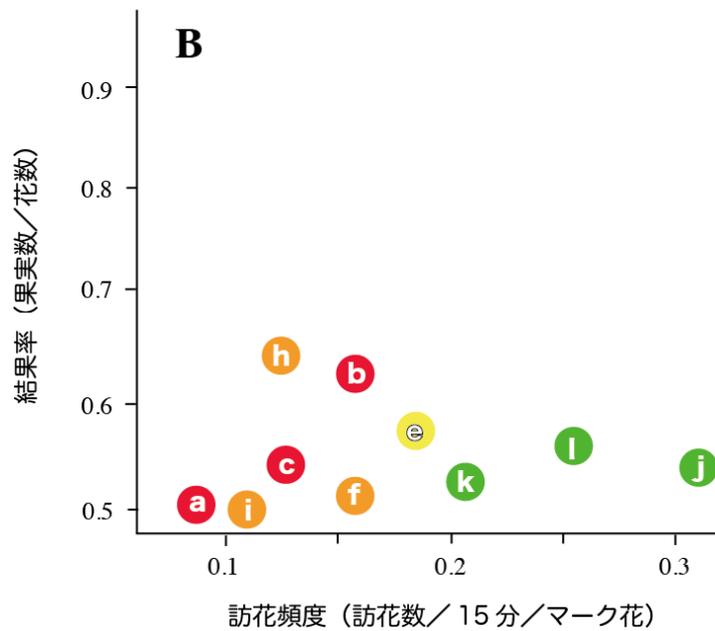
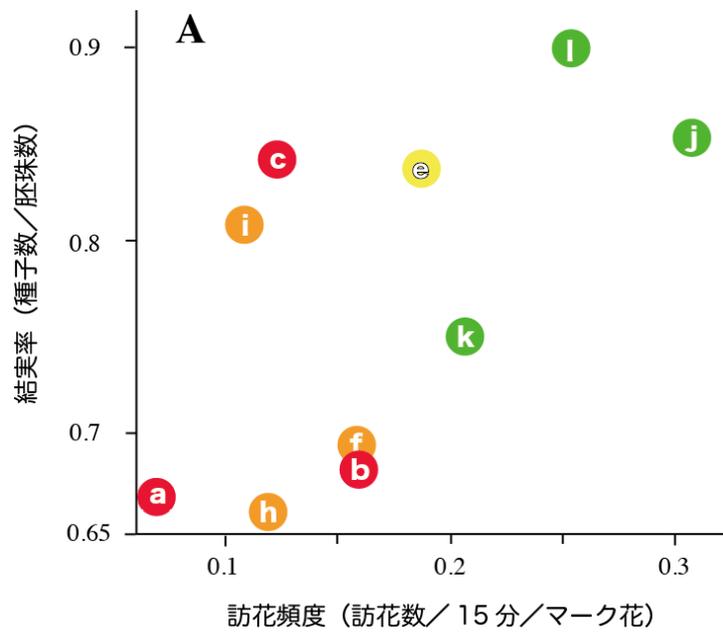


図7 訪花頻度とA 結実率, B 結果率の関係
 訪花頻度が高い地点では、結実率が高いが (GLMM,
 $P < 0.0001$)、結果率は有意な相関はみられなかった。

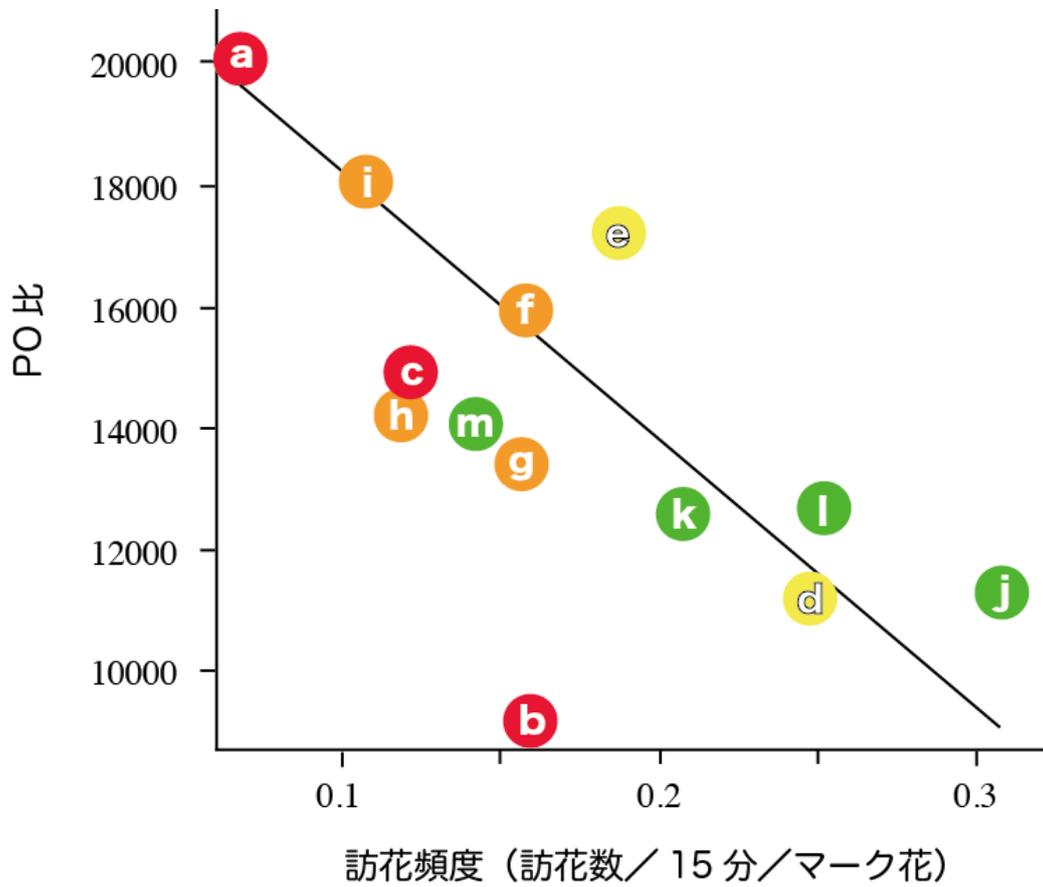


図8 訪花頻度とPO比の関係
 訪花頻度が低い地点で、PO比が高くなり他殖型を示した
 (GLM, $P < 0.05$)。

多摩川流域における都市部から山間部へかけての生物間相互作用の変異と環境
教材開発：植物－送粉者系をもちいて

(研究助成・学術研究VOL. 43—NO. 308)

著 者 堂 園 いくみ

発行日 2014年11月1日

発行者 公益財団法人とうきゅう環境財団

〒150-0002

東京都渋谷区渋谷1-16-14 (渋谷地下鉄ビル内)

TEL (03) 3400-9142

FAX (03) 3400-9141

<http://www.tokyuenv.or.jp/>