

市民科学による東京のチョウと植物の 共生ネットワークモニタリングの可能性

海老原 健吾^{1,**}・安川 雅紀²・永井 美穂子¹・喜連川 優^{3,4}・鷺谷 いづみ^{1,*}

¹ 中央大学理工学部

² 東京大学地球観測データ統融合連携研究機構

³ 国立情報学研究所

⁴ 東京大学生産技術研究所

Feasibility of citizen science monitoring of mutualistic networks between butterflies and plants in Tokyo, Japan

Kengo Ebihaha^{1,**}, Masaki Yasukawa², Mihoko Nagai¹, Masaru Kitsuregawa^{3,4} and Izumi Washitani^{1,*}

¹ Faculty of Science and Engineering, Chuo University

² Earth Observation Data Integration & Fusion Research Initiative, the University of Tokyo

³ National Institute of Informatics

⁴ Institute of Industrial Science, the University of Tokyo

要旨：ヒトが優占する年代であるアンソロポセン（Anthropocene）の複合的環境変化をもたらす生物多様性・生態系変化の監視においては、共生的生物間相互作用ネットワーク（共生ネットワーク）のモニタリングが重要であると考えられる。本研究では、市民科学プログラムによって東京のチョウと植物の共生ネットワークをモニタリングする可能性を、すでに収集されたデータの分析によって検討した。用いたデータは、生活協同組合「パルシステム東京」および保全生態学（中央大学理工学部）ならびに情報工学（東京大学生産技術研究所）の研究室が協働で進めている市民科学プログラム「市民参加の生き物モニタリング調査」により公開されているものである。2015-2017年に報告された利用可能なチョウの写真データのうち、訪花もしくは樹液吸汁の対象植物の同定が可能なデータ（4,401件）を用いて、チョウと植物の共生ネットワークを階層型クラスタリングとネットワーク図化によって分析した。チョウは利用植物群の類似性から6グループに分けられ、そのうち4グループは特定の植物グループ利用のギルド、残りの2つのうち一方はジェネラリストの範疇に入る植物利用を特徴とするグループであり、他はそれらに含まれない植物との関係がいろいろ多様な種を含むグループであると解釈できた。市民科学プログラムによるモニタリングの可能性が確認され、今後のモニタリングのベースラインとなるネットワーク情報が整理された。

キーワード：階層型クラスタリング、共生的相互作用、生物多様性モニタリング、ネットワーク図化、フィージビリティ・スタディ

Abstract: Mutualistic biological interaction networks are thought to be essential targets for monitoring the effects of anthropogenic environmental changes on biodiversity and ecosystem function. The aim of the present study was to evaluate the feasibility of citizen science monitoring of the mutualistic network between butterflies and plants in Tokyo, Japan. We analysed 4,401 photograph-derived data points describing butterfly visits to flower and tree sap of identified plant species during 2015–2017. These data were reported to the internet-based participatory butterfly monitoring program Butterflies in Tokyo, which is operated jointly by the regional consumer co-operative Pal-system Tokyo and conservation ecology and data engineering

* 〒 112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 中央大学理工学部

Faculty of Science and Engineering, Chuo University, 1-13-27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8551, Japan

e-mail: washizu.22r@g.chuo-u.ac.jp 2019年7月24日受付、2020年4月27日受理、2020年8月31日早期公開（J-STAGE）

** 現所属：日鉄日立システムエンジニアリング株式会社

**Present address: Nittetsu Hitachi Systems Engineering, Inc.

scientists. We performed hierarchical clustering analysis and drew a network graph according to the similarity of plant species visited by the butterflies. We categorised the butterflies into six groups including four guilds or specialist groups, one generalist plant utilisation group, and one group comprising ambiguous species. The results of this study demonstrate the feasibility of this citizen science program for monitoring the mutualistic network of butterflies and plants in Tokyo and provide baseline information for future monitoring.

Keywords: biodiversity monitoring, feasibility study, hierarchical clustering, mutualistic relationship, network graph analysis

はじめに

生物多様性の損失とそれに伴う生態系サービス供給ポテンシャルの低下は、気候危機と相まって、持続可能な人類社会を築く上でのもっとも重大な危機として認識されており (Rockström et al. 2009)、生物多様性モニタリングのための指標と手法の開発は、保全生態学のもっとも重要な課題の一つとなっている (鷺谷・鬼頭 2007; Lindenmayer et al. 2015; Proença et al. 2017)。その課題に取り組むにあたって、生物多様性保全と生態系機能の安定性維持の要として認識されている生物間相互作用のネットワーク (Bawa 1990; Bascompte et al. 2006; Bascompte and Jordano 2007; Gómez et al. 2011; Stouffer and Bascompte 2011; Wilson 2019) に目を向けることが重要である。アンスロポセン (現在の地質時代は「Holocene 完新世」だが、人間活動が絶大な環境変化をもたらしている特殊性から「Anthropocene」との時代名が提案され、環境関連の科学等で広く使われるようになった。「人新世」という日本語訳もあるが、カタカナ表記されることが多い) (Lewis and Maslin 2015; Sterner et al. 2019) の複合的な人為的駆動要因がもたらす影響を分析・評価し今後の影響を予測するには、ネットワーク構造の理解が欠かせない (Fortuna et al. 2010)。また、モニタリングプログラムの立案にあたっては、ベースラインとなる現状のネットワーク情報の整理が必須である (Bennett et al. 2018)。

生物間相互作用で結ばれた生態ネットワークのうち、すでに人為的環境変化がもたらす影響が比較的広く把握されているのはコーヒーなどの嗜好作物の生産や野生植物の繁殖にかかわる植物と授粉動物の間の送粉ネットワーク (Jacobsen 2008; Potts et al. 2016) であり、それが担う生態系サービスの経済評価も多様な地域を対象に広く実施され、その重要性が認識されている (Breeze et al. 2016; Costanza et al. 2017)。社会的なニーズの大きさからみて、送粉ネットワークの適切なモニタリングシステ

ムをデザインすること (O'Connor et al. 2019) は、生物多様性モニタリング研究においてとくに優先度の高い課題であるといえる。

ベースラインデータ (継続研究やモニタリングを開始する時点での現状に関する基準データ) による現状の把握には、データサイエンスのアプローチ、すなわち、いくつものデータソースを統合的に用いたメタ分析が有効である (Bennett et al. 2018)。データサイエンスアプローチによる定量的な送粉データを用いて、花の形質にかかわる「シンドローム」概念 (Fenster et al. 2004) の有効性が確認され (Rosas-Guerrero et al. 2014)、ブラジルの森林域の植物 126 種のうち 36% にポリネータ不足による「花粉制限」が認められ (Wolowski et al. 2014)、外来植物除去が送粉ネットワークのレジリエンスと機能向上をもたらすことが見いだされ (Kaiser-Bunbury et al. 2017)、訪花動物の機能的多様性が生産へ寄与することが示される (Woodcock et al. 2019) など多くの研究成果があがりつつある。ヨーロッパの半自然草原の送粉ネットワークについては、モニタリングに向けてベースライン情報を整理したメタ分析研究 (Bennett et al. 2018) が実施されている。

メタ分析によるデータ科学的アプローチは、今後ますます重要性を高めると考えられるが、その有効性は、既存データの存在に絶対的に依存する。適切な空間スケールを扱った既報の研究成果が利用できない地域でモニタリングを計画するにあたっては、ベースラインデータの収集を兼ねて「市民科学」 (Bonney et al. 2009; Schmeller et al. 2009; Bonney et al. 2014; Brown and Williams 2019) プログラムを試行し、モニタリング手法や体制についても順応的に検討することが有効であると思われる。本研究は、東京を対象地域としたそのような目的のフィージビリティ・スタディ (本格的なプロジェクト研究の実施前にその可能性や有効性を検討する科学研究) である。

生物多様性に関するデータ収集には、市民科学 (Theobald et al. 2015; Kobori et al. 2016; McKinley et al.

2017; 鷺谷 2019) が大きく貢献している。市民が研究者との協力の下に収集したデータの分析・評価によって得られた知見は、生物多様性条約にかかわる国際的な政策や各国の環境政策の科学的根拠としても利用されている (Secretariat of Convention of Biological Diversity 2014; Chandler et al. 2017; Brown and Williams 2019)。日本においても、現行の第五次環境基本計画には、自然環境データの整備に向けた市民参加型モニタリング活用を推奨する記述があり (環境省 2018)、生物多様性と生態系機能・生態系サービスのモニタリングに寄与する市民科学プログラムの可能性の検討は、保全生態学が優先的に取り組むべき課題の一つである。

市民参加型生物多様性モニタリングプログラムは、研究者が単独で行う調査よりも空間的に広域かつ時間的に稠密なデータ取得が可能であるという科学的な利点がある (Schmeller et al. 2009)。保全上重要な種や侵略的な外来種を対象としたモニタリングは、生物多様性保全について学び実践する貴重な機会としても重要である (鷺谷ほか 2013; Lewandowski and Oberhauser 2017; Schuttler et al. 2018)。

市民参加型生物多様性モニタリングプログラムでは、人々の居住地域で観察しやすい鳥類やチョウが対象にされているものが多い (Kobori et al. 2016)。イギリスでは 1967 年からイギリス全域をカバーしたチョウを対象とした大規模な市民参加型生物多様性モニタリングプログラム the UK Butterfly Monitoring Scheme が開始され、収集されたデータは、自然環境政策や農業環境政策の立案・評価などに用いられている (United Kingdom Butterfly Monitoring Scheme 2018)。チョウは都市域でも普通に観察でき、分布・生態・生息環境などの情報が蓄積されており、モニタリングで把握される種構成は、温暖化などの環境変化の指標ともなる (Hardy and Dennis 1999; Thomas et al. 2004; Thomas 2005)。

送粉者の役割も果たすチョウのモニタリングは、共生的ネットワークのモニタリングとしての可能性を持つ。幼虫は狭食性で、餌利用に関しては概してスペシャリストである一方で、花蜜や樹液等をエネルギー源として吸蜜する成虫は、利用する植物の範囲が限定されているものから多様な植物を利用するものまでみられる (Bawa 1990; 大崎・佐藤 1993; 鷺谷 2003; Mukherjee et al. 2018)。

最近では、チョウと植物の共生的相互作用のネットワークは、生態系サービスの視点からも強い関心が寄せられ、熱帯域の自然保護区 (Martinez-Adriano et al. 2018)

および都市 (Mukherjee et al. 2018) におけるネットワーク分析の結果が報告されている。都市で行われた例としては、インドのカルカッタにおいて緑化植物の選定の観点からチョウ 48 種と種子植物 30 種の共生的相互作用ネットワークを分析した研究で、植物では園芸植物が主な対象とされ、中米原産の園芸植物 *Lantana camara* が 37 種のチョウと相互作用していることが明らかにされた (Mukherjee et al. 2018)。

本研究では、2009 年より生活協同組合パルシステム東京、中央大学理工学部保全生態学研究室 (2015 年までは東京大学大学院農学生命科学研究科保全生態学研究室)、および東京大学生産技術研究所喜連川研究室が協働で実施している、チョウを対象とした市民参加型生物多様性モニタリングプログラム「市民参加の生き物モニタリング調査 (別称: 東京チョウモニタリング)」(生活協同組合パルシステム東京ほか 2010) で収集され、インターネットで公開されているデータベース (<http://butterfly.diasjp.net/>) に登録された写真データからチョウと植物の共生的生物間相互作用のネットワークを把握してベースライン情報としてまとめた。その過程で、この市民科学プログラムを共生ネットワークのモニタリングプログラムとして発展させる可能性を検討した。公開されているモニタリングのデータは島嶼と亜高山帯・山地帯をのぞく東京の広い空間的範囲の多様な生息環境から集められている。その中から、訪花もしくは樹液を吸汁している植物の種・分類群が同定できる写真データを用い、「東京のチョウに多く利用されている植物」を把握するとともに、市街地域・非市街地域を問わず、また、庭園・緑地、園芸植物に限定せず、チョウと植物の共生的相互作用を広く把握するためのネットワーク分析を行った。

方 法

データ収集

東京チョウモニタリングは、東京都内に住む市民調査員 (モニタリングへの参加を希望したパルシステム東京の組合員) によって 2009 年より試行されている。調査員は東京都内 (島嶼を除く) の任意の時間・場所で調査をおこない、チョウ類を発見した場合は写真を撮影し、表 1 に示した項目の情報と共に Web サイトの個人ページもしくはスマートフォンのアプリケーションからインターネット上にアップロードする。対象とした「チョウ類」は、鱗翅目のアゲハチョウ上科とセセリチョウ上科

表 1. 調査員の報告項目。

項目	小項目	報告
調査日時	日付	
	調査開始時刻	必須
	調査終了時刻	
天候	天気	必須
	風	
種名	種名	必須
性別	性別	必須
行動	飛翔	必須
	静止	
	摂食・吸蜜	
	交尾	
	産卵	
	不明	
調査地	市町村	必須
	丁目以降	任意
	施設名	
画像	画像	任意
訪れていた植物など	植物名など	任意
備考	備考	任意

の昆虫（日本チョウ類保全協会 2012）である。アップロードされたデータは、データ管理者によるクレンジング（種の同定を確実にするために、保全生態学研究室作業員、およびチョウの分類に詳しい専門家による写真のダブルチェック）を経て信頼性が担保された上で公開される。これにより、公開データは、専門家の調査で得られるデータと同等の同定の水準を保つことができる。

データセット

写真データは、正確な同定に必要なだけでなく、「訪花している植物」や「周辺環境」、「撮影日時」なども記録されており、「位置情報」（緯度・経度）の正確な記録を伴う。本研究では、データベースに含まれているチョウの写真データのうち、2015-2017年の3年間に295名の市民調査員によって得られた83種11,956件のデータを用いた。この3年間に限定したのは、調査員との対面での情報交換（ミーティング）において訪花植物や環境を読み取れる写真データを登録して欲しいと伝えたことが効を奏し、プログラム初動当時と比べてその面での写真データの質が向上したことに加え、本論文の第一著者がこの3年間のデータのクレンジングを担当し、チョウ、植物、いずれの同定にも責任をもつことができることによる。

写真データに写っている植物を目視にて精査し、訪花もしくは樹液吸汁の対象植物が同定できたデータ（69

種4,401件）を解析に用いた（植物の同定方法については後述）。選別されたデータは中野区、昭島市、狛江市、東久留米市、福生市、三鷹市、瑞穂町を除く22区21市3町村にわたり、また市街地のみならず険しい山地を除き森林地域からも253件（全体の5.7%）が寄せられており、島嶼を除く東京の都市域および非都市域から広く収集されたものといえる（図1、表2）。

植物の同定

写真データをもとに、チョウが訪れている植物種を同定した。アザミ類など、花や花序の画像から種を同定することが難しいものは、近縁種をまとめて1分類群として扱った。学名の表記はYList（米倉・梶田 2003-）、世界有用植物事典（堀田ほか 1989）、The Plant List（The Plant List 2013）、Australian Plant Name Index（Australian National Botanic Gardens and Centre for Australian National Biodiversity Research 2015）にしたがい、和名の特定が難しい一部の園芸植物については流通名を用いた。

同定された種・分類群は在来植物、外来植物、園芸植物のカテゴリーに分けた。なお、外来植物と判定したのは、導入年代がはっきりしているもの、もしくは、導入年代は明瞭ではなくとも、おおむね明治時代以降に導入されたと推定されるものである（鷺谷・村上 2002）。在来、外来植物を問わず、園芸品種として園芸目的で栽培されている植物は園芸植物のカテゴリーに含めた。

チョウと植物の共生的相互作用ネットワーク

チョウと訪れる植物にグループ構造があるかどうかを明らかにするために、階層型クラスター分析を用いて訪れる植物の類似性によってチョウを分類した上で、チョウと植物それぞれのノードとチョウ-植物間のリンクからなるグラフ（bipartite graph）を作図してチョウ（グループ）の植物群の利用（訪花・樹液吸汁）傾向を視覚化した。本研究では、このグラフを「共生的相互作用ネットワーク図」と呼ぶ。ここでは、生物学における一般的な用語法に則り、少なくとも一方が利益を受け、両方が不利益を受けない関係を共生的相互作用とする（大串 1992）。すなわち相利共生および片利共生の両方を含める。写真で確認できる訪花は授粉を介して相利共生に寄与する可能性がある一方で、樹液吸汁は、チョウが栄養を得るものの樹木には負の効果はもたらされないで、一般的な定義にもとづき、片利共生を表していると解釈して分析に含めた。

クラスター分析には統計解析ソフト R（version 3.5.1）

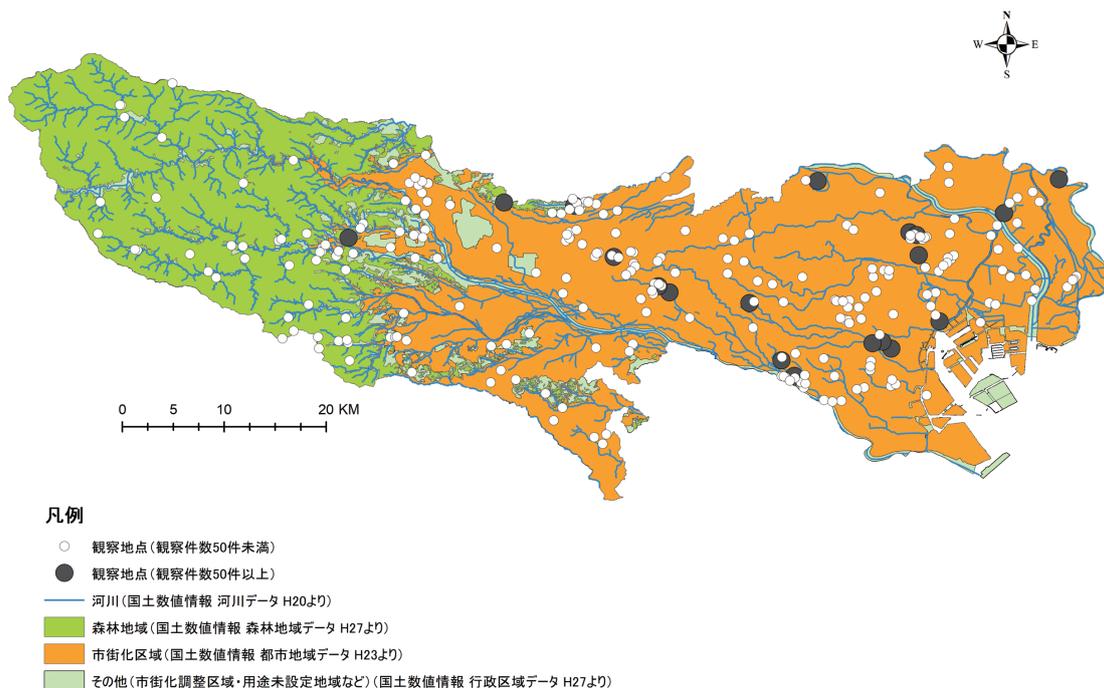


図1. 訪花・樹液吸汁が写真から確認できた報告地点の位置とその環境タイプ。環境タイプの区分は国土交通省国土数値情報のデータによる。

表2. 調査地の土地利用タイプ別面積とデータ件数。土地利用タイプの区分は国土数値情報森林地域データ（平成23年）および都市地域データ（平成23年）に基づき、「その他」には市街化調整区域、その他用途地域、用途未設定地域を含む。面積はArcGIS（ver.10.5）を用いて算出し、森林地域と市街化区域の重複部分は森林地域に含めた。

土地利用タイプ	面積 (km ²) (%)	データ件数 (%)
森林地域	476.15 (26.7)	253 (5.7)
市街化区域	1,082.22 (60.6)	3,346 (76.0)
その他	226.80 (12.7)	802 (18.2)
合計	1,785.17	4,401

を用いた。写真から読み取ったチョウの訪花あるいは樹液吸汁の対象植物に関するデータをもとに、チョウの種間類似度としてChao指数（Chao et al. 2005）をveganパッケージのvegdist関数を用いて算出した。なお、Chao指数は、サンプリングにおける出現頻度の低い希少種が多く含まれるデータセットにおける利用が推奨されている汎用性の高い指数である（土居・岡村 2011）。本研究で用いたデータには、チョウ、植物共に観察件数が1件のみの種が含まれていたことからChao指数を採用した。次にhclust関数を用いてWard法で階層型クラスター分析を行った。

クラスター分析で得られた結果をもとに、チョウと植物の共生的相互作用のネットワーク分析を行った。共生的相互作用ネットワーク図はExcel VBAを用いマクロを作成して作図した。共生的相互作用ネットワーク図ではノードの大きさにチョウと植物それぞれのデータ件数を反映させた。すなわち、ノードが大きいほどデータ報告頻度が高い。リンクの太さにはチョウごとにその植物への訪花もしくは樹液吸汁が確認された割合を反映させた。すなわち、リンクが太いほど他の植物に比してその植物への依存度が高いことを表す。

結果

チョウの訪花・樹液吸汁が確認された植物と調査地

チョウによる訪花・樹液吸汁が写真から確認できたデータについて、それぞれの種の確認件数、植物の種・分類群数とそのうち在来植物の割合（在来種依存率）、報告した調査員数、観察地点数を付録1表1に、植物（326種）の種・分類群名、学名、観察された件数、報告調査員数、観察地点数を付録1表2に示した。

訪花・樹液吸汁が確認できた植物の報告件数は、調査地の土地利用タイプ別にみると、「森林地域」では在来

表3. 土地利用タイプ別にみた、各植物タイプの訪花・樹液吸汁の観察件数とその割合(%)。土地利用タイプの区分は表2と同一である。市街化区域のうち自然教育園および小石川植物園で報告された件数を内数で示す。

土地利用タイプ	在来種 (%)	外来種 (%)	園芸種 (%)
森林地域	187 (73.9)	45 (17.8)	21 (8.3)
市街化区域	1,549 (46.3)	576 (17.2)	1,221 (36.5)
うち自然教育園	645 (96.3)	18 (2.7)	7 (1.0)
小石川植物園	134 (72.0)	33 (17.7)	19 (10.2)
その他	402 (50.1)	309 (38.5)	91 (11.3)
合計	2,138 (48.6)	930 (21.1)	1,333 (30.3)

種が報告数の73.9%をしめたが、「市街化区域」では46.3%にとどまった(表3)。園芸種の割合は市街化区域で36.5%と他の地域と比して高く、埋め立て地などを含む「その他」地域では外来種の割合が38.5%と相対的に高かった(表3)。市街化区域の中でも在来種の比率が高かったのは、報告数の比較的多い「国立科学博物館附属自然教育園」(自然教育園)(96.3%)および小石川植物園(72.0%)であった(表3)。100件以上の訪花・樹液吸汁が確認された種・分類群とその件数はアザミ類 *Cirsium* spp. (ノアザミ *Cirsium japonicum* Fisch. ex DC.、ノハラアザミ *Cirsium oligophyllum* (Franch. et Sav.) Matsum.、トネアザミ *Cirsium nipponicum* (Maxim.) Makino var. *incomptum* (Maxim.) Kitam. を含む) の481件、キバナコスモス *Cosmos sulphureus* Cav. (園芸植物) の226件、ハルジオン *Erigeron philadelphicus* L. (外来植物) の172件、キツネノマゴ *Justicia procumbens* L. var. *procumbens* (在来植物) の168件、クヌギ *Quercus acutissima* Carruth. (在来植物) の152件、ヤブカラシ *Cayratia japonica* (Thunb.) Gagnep. (在来植物) の141件、シロツメクサ *Trifolium repens* L. (外来植物) の140件、ヒメジオン *Erigeron annuus* (L.) Pers. (外来植物) の135件、マリーゴールド *Tagetes erecta* L. (園芸植物) の124件、ムラサキツメクサ *Trifolium pretense* L. (外来植物) の102件であった(付録2)。

これらのうち197件では写真からチョウの体に花粉が付着していることも確認できた。10件以上で明瞭に花粉の付着が認められたアザミ類(60件、チョウ18種)、センニチコウ *Gomphrena globosa* L. (16件、チョウ6種)、ハルジオン(14件、チョウ6種)の写真の例を付録1図1に示す。

植物との共生的相互作用からみたチョウのグループ

Chao 指数を類似度とした階層型クラスター分析において Height = 1.5 を基準にしてカテゴリ分けをしたと

ころ6つのグループが認められた(図2)。対象としたチョウ69種のうち、グループAには12種、グループBには21種、グループCには6種、グループDには17種、グループEには6種、グループFには7種が含まれた。

それらと対応する「共生的相互作用ネットワーク図」(図3)をみると、グループAに属するチョウから伸びるリンクはクヌギとコナラ *Quercus serrata* Murray に集中しており、いずれのチョウでもこの2種の利用割合は80%以上であった。グループAのチョウが樹液吸汁している報告写真の例を付録1図2に示す。このグループに含まれるチョウはすべてがタテハチョウ科のチョウであった。

グループBのチョウから伸びるリンクはいずれも細く、植物タイプを問わず多様な植物へ伸びていた。最も連結線の太い組み合わせはツバメシジミ *Everes argiades* とシロツメクサであり、ツバメシジミによる訪花・樹液吸汁が観察された植物のうちシロツメクサの割合は49%であった。なお、このモニタリングにおいて報告件数が多い上位5種のうち4種(ヤマトシジミ *Zizeeria maha*、モンシロチョウ *Pieris rapae*、ツマグロヒヨウモン *Argyreus hyperbius*、イチモンジセセリ *Parnara guttata*) がこのグループに含まれた。

グループCのチョウから伸びるリンクはクリ *Castanea crenata* Siebold et Zucc. に集中しており、このグループの全ての種でクリへの訪花が認められた。訪花・樹液吸汁の報告件数が5件以上のチョウにおけるその割合はイチモンジセセリ24%、ウラナミアカシジミ *Japonica saepestriata* 80%、アカシジミ *Japonica lurea* 90%であった。グループCのチョウがクリに訪花している報告写真の例を付録1図3に示す。

グループDはグループ全体で観察された訪花・樹液吸汁対象植物が69種に及び、観察件数が少ないため太いリンクが結ばれているものもあるが、グループを構成

チョウと植物の共生ネットワーク

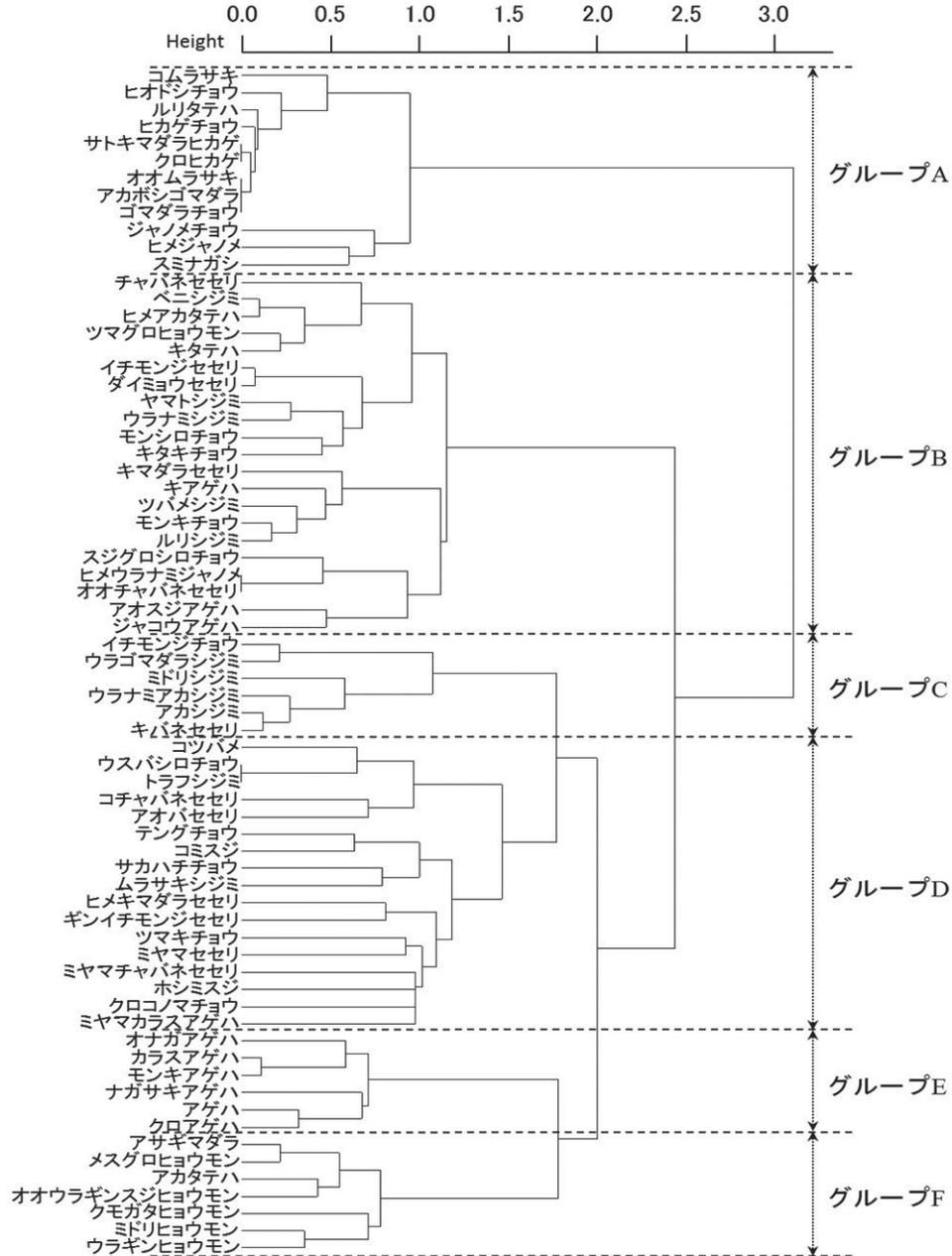


図2. 階層型クラスター分析の結果。訪花・樹液吸汁の観察件数から算出した類似度(Chao 指数)、階層型手法 (Ward 法) を用いた。Height = 1.5 を基準にグループの分割をした。

する 17 種のうち大多数のチョウによる特定植物への共通するリンクは認められなかった。グループ全体での利用比率で最も高かったのはハルジオン (11%) であったが、半数以上の種では同植物種の利用は認められず、このグループで報告件数が 5 件以上のものを見ると、ウスバシロチョウ *Parnassius citrinarius*、コチャバナセセリ *Thoressa varia* はハルジオンへの依存度が高く (それぞ

れ 49% および 29%)、マルバウツギ *Deutzia scabra* Thunb. (20%)、ボタンヅル *Clematis apiifolia* DC. var. *apiifolia* (20%) およびミツバウツギ *Staphylea bumalda* DC. (20%) への訪花が目立ったアオバセセリ *Chaospes benjaminii* や、カラシナ *Brassica juncea* (L.) Czern. (14%) をはじめ 23 種もの多様な植物への訪花が認められたツマキチョウ *Anthocharis scolymus* もハルジオンへの訪花

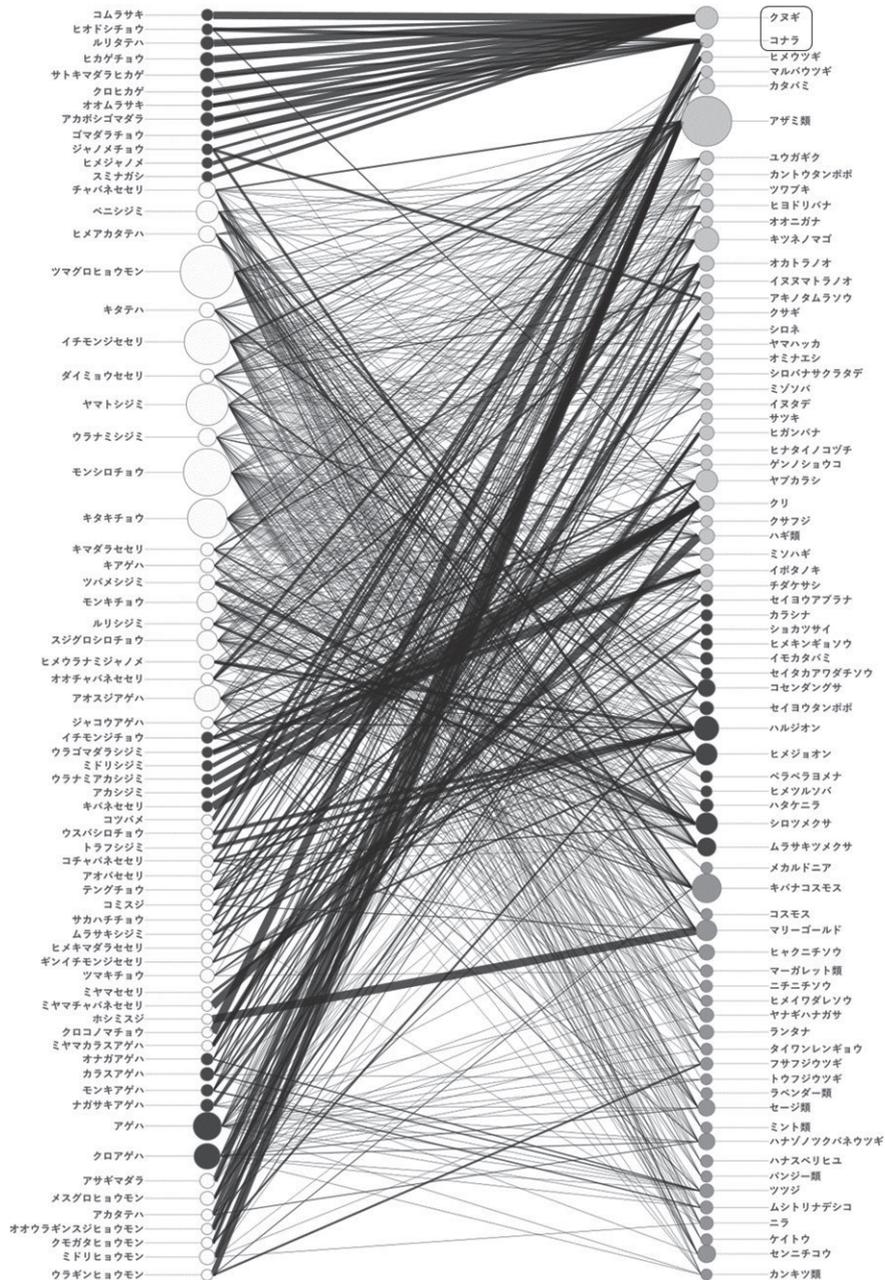


図3. チョウと植物の共生的相互作用ネットワーク図。観察数が10件以下の植物はグラフから除外した。左側のノードがチョウ、右側のノードが植物、ノードの大きさは観察件数、リンクの太さはそのチョウがその植物を利用する割合を表す。ノードの並びは、チョウは図2のグループ、科、属の順、植物は植物タイプ（在来種/外来種/園芸種）、相互作用の種類（樹液吸汁/訪花）、科、属の順。チョウはグループごと、植物はタイプごとにノードの色を変えている。植物のうち□で囲んだクヌギ・コナラは樹液吸汁、それ以外は訪花による相互作用を表す。

が記録された。サカハチチョウ *Araschnia burejana* はヒヨドリバナ *Eupatorium makinoi* T.Kawahara et Yahara への依存度がやや高かった (33%)。

グループEのチョウから伸びるリンクはツツジ類 *Rhododendro* spp.、ヒガンバナ *Lycoris radiata* (L'Hér.)

Herb.、クサギ *Clerodendrum trichotomum* Thunb. にやや集中しており、このグループの全ての種がこの3種を利用していた。オナガアゲハ *Papilio macilentus*、カラサアゲハ *Papilio dehaanii*、モンキアゲハ *Papilio helenus*、ナガサキアゲハ *Papilio memnon* では、観察された訪花のう

ちこの3種の割合は40%以上であった。このグループに含まれるチョウは全てアゲハチョウ科であった。

グループFのチョウからはいずれもアザミ類に伸びるリンクが認められ、ほとんどの種が50%以上の割合でアザミ類を利用していた。このグループに含まれるチョウは全てタテハチョウ科のチョウであった。

考 察

共生ネットワークモニタリングの可能性

本研究における東京チョウモニタリングのデータベースを用いたデータ統合・分析により、今後のモニタリングにおけるベースラインとなる共生ネットワークの概況を把握できた。東京には、減少が著しいとはいえ、かつてこの地域の二次的自然の代表であった「武蔵野の雑木林」の片鱗ともいえる樹林を含む緑地や私有地のほか、生産緑地も残されており、次項以下に整理するように、都市公園や住宅地の植栽スペースに限らず、多様な生息・生育環境に広がる共生ネットワークが残存している。

生物多様性にかかわる市民科学プログラムの多くは、種や種群の存在に関するデータを収集するもの (Van Strien et al. 2013 ; Wei et al. 2016 ; Dennis et al. 2017 ; Domroese and Johnson 2017 ; Gray et al. 2017 ; Sullivan et al. 2017) である。本研究により、画像・動画を登録データとするモニタリングは、対象とする生物グループの存在のみならず、相互作用する「生物環境」要素など、環境情報を同時にデータとして取得できるため、その成果はインベントリーにとどまらず、生態系機能のモニタリングとしても利用できることが示された。

現在では、インターネット上に、市民が「生物間相互作用」を記録した画像や動画が数多く存在する。データマイニングによって発掘したデータを用いてデータベースを構築し、本研究で試行したようなネットワーク分析・評価の可能性を検討することも、ビッグデータ時代にふさわしい新しいタイプの市民科学を通じてアンソロポセンの生物多様性モニタリングの高度化をめざす保全生態学が取り組むべき重要な課題といえるだろう。

チョウの訪花・樹液吸汁が写真データから読み取れた植物

本研究により、チョウの訪花が特に多く写真データから読み取れた植物はアザミ類である。アザミ類は管状花が集まって頭花を構成しているが、花序全体としてチョウの誘引効果が高く (牧林 2006)、個々の花もチョウによる送粉に適した形状である (田中・平野 2000)。アザ

ミ類に訪花したチョウの体に花粉が付着しており、送粉に寄与していることを示唆する写真も60件のほった。

アザミ類への訪花は、調査地点が自然教育園のデータで多く認められた。自然教育園は東京都心にありながら比較的自然性の高い常緑広葉樹林を含み (国立科学博物館 2009) かつての武蔵野の自然の面影を残す場所である。ここでは市街化地域の中でもとりわけ高い比率 (96.3%) で在来種への訪花データが得られた。

アザミ類に続いて報告の多い園芸植物のキバナコスモスや外来植物のハルジオンも舌状花と管状花の小花が集まり頭花を構成しており、チョウを引きつける植物である。キバナコスモスは住宅の花壇のほか都市緑地にも多く植栽され、そこで撮られた写真データから訪花が確認された。都市に多くみられる外来雑草のハルジオンは46地点で観察されており、本研究において最も多くの地点でチョウの訪花が認められた植物種でもある。

訪花・樹液吸汁対象植物からみたチョウのグループ

階層型クラスタリングおよびネットワーク図化で認められた6グループのチョウについて、グループ毎に、特に既存の知見との整合性に留意しながら以下に考察を加える。

1) グループA

このグループに含まれるチョウは、成虫が樹液を吸汁するチョウとして知られており (福田・高橋 1998 ; 白水 2006 ; 日本チョウ類保全協会 2012)、報告された写真データでも、クヌギやコナラの樹液を吸っている様子が多く認められた。アカボシゴマダラ *Hestina assimilis assimilis* (35件)、ゴマダラチョウ *Hestina persimilis* (10件)、オオムラサキ *Sasakia charonda* (8件)、クロヒカゲ *Lethe diana* (5件) の報告写真はすべて樹液を吸汁しているものであった。グループAはタテハチョウ科の樹液吸汁のギルドであると言える。

2) グループB

図3のリンクのほとんどが細く、チョウ1種が何種もの植物とリンクしていることから、このグループのチョウは特定の植物に強く依存することなく、ジェネラリスト的な植物利用を特徴とするものと解釈される。グループBに分類されたチョウは共生的相互作用がみられた植物種数が多く、在来種依存率が低いものが多かった (付録1表1)。人家周辺や公園などの環境でも見られるチョウ (日本チョウ類保全協会 2012) で園芸種もよく利用することから、都市の環境に適応したチョウのグループであるといえる。観察件数も多く、本市民科学プログ

ラムへの報告が多い上位5種のうちヤマトシジミ、モンシロチョウ、ツマグロヒヨウモン、イチモンジセセリの4種がこのグループに含まれる。市街地にも個体数が多いことから、観察が容易であり、報告数が多くなったものと考えられる。

3) グループC

このグループのチョウはクリの花を高い割合で利用していた。キバネセセリ *Burarra aquilina* 以外のすべてが「クリをよく利用する」と図鑑にも記載されている（白水 2006；日本チョウ類保全協会 2012）。キバネセセリは東京都レッドデータブック（東京都環境局自然環境部 2010）記載の絶滅危惧Ⅱ類のチョウであり、2009年から2017年までの報告は付録5に示した訪花写真1件のみである。

4) グループD

グループ全体でみて特定の植物に依存していないことからこのグループは報告数の少ない異質なグループを含む偽グループと解釈することもできる。ただしこのグループに含まれるチョウは森林や林縁などの環境に生息しており（日本チョウ類保全協会 2012）、園芸種をあまり利用していない。グループ全体として最も多く報告されている植物はハルジオン（11%）であり、生息場所の嗜好性と対応してそのような園芸種以外の花の利用によるグループとして認識することもできるだろう。

5) グループE

本グループに属する種が主に訪花していたツツジ類、ヒガンバナ、クサギは雄蕊雌蕊が長く、蜜源が深いため、アゲハチョウ科などの大型のチョウが花粉を媒介するとされている（田中・平野 2000）。本研究のデータの中にも翅への花粉付着が多くの写真で認められた（付録1図4）。このグループは大きな花や蜜源の深い花を利用するアゲハチョウ科のギルドにあたるといえるだろう。アゲハチョウ科でもキアゲハ *Papilio machaon* は草本の花をよく訪れること、アオスジアゲハ *Graphium sarpedon* は他のアゲハチョウ科のチョウよりも口吻が短く、蜜源の浅い小さな花からなる集合花（ヤブカラシ *Cayratia japonica* (Thunb.) Gagnep. など）をよく利用する（福田・高橋 1998）とされている。この研究でも、これらのチョウは、グループEではなく別グループに位置付けられた。

6) グループF

ヒヨウモン類はアザミ類によく訪花することが知られており（白水 2006；日本チョウ類保全協会 2012；西多摩昆虫同好会 2012）、タテハチョウ科のみがこのグルー

プでみられたことから、このグループはアザミ類を利用するタテハチョウ科のギルドであると解釈できる。アカタテハ *Vanessa indica* やアサギマダラ *Parantica sita* もこのグループに含まれる。このグループの種のアザミ類への訪花写真を付録1図5に例示した。なお、グループBのツマグロヒヨウモンも在来植物ではアザミ類をよく利用していることが示された（図3）。ツマグロヒヨウモンは人家周辺などの環境でよく見られ、園芸植物などアザミ以外の各種の花を頻繁に訪れることも、本研究により確認された。

結 論

本研究により、現行の市民科学プログラムのデータを用いて、東京におけるチョウと植物の共生的相互作用ネットワークの現状が把握され、それをベースラインとしたモニタリングのデータ収集、分析・評価の手法の有効性が示唆された。

写真データは、生物の正確な同定を可能にし、得られたデータの信頼性を担保する上で欠かせないだけでなく、対象生物と共に写っている生物的・非生物的環境の情報源としても有効であり、写真データを時空間的情報と共に公開するデータベースは、今後、利用者のアイデア次第で、多様な科学的・社会的な分析・評価に用いられる可能性がある。

地域のチョウ相とその変遷については、アマチュア研究者の採集記録をデータベース化して活用することで要因分析などができる（前角ほか 2010）。市民科学プログラムで収集されたデータおよび過去のデータの比較からは、温暖化、都市気候化によって東京に生息ようになった南方系のチョウなど、チョウの種特性に応じた生息空間の変化を把握できることも示唆されており（Kobori et al. 2016）、本研究で整理したベースラインは、今後のモニタリング成果の分析評価にも寄与するものと思われる。本研究では、試行中の市民科学プログラムで収集したデータを用いて、グループ化およびネットワーク図化ができたが、このような手法は、データ件数さえ確保されれば、種間ネットワークの把握と情報共有に広く利用できると思われる。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、東京チョウモニタリング（通称「いきモニ」）の活動に参加して下さった全ての市民

の皆さまおよびパルシステム東京の皆さまに、多大なご協力・ご支援を頂きましたことに深く感謝いたします。中央大学理工学部人間総合理工学科保全生態学研究室の須田真一氏にはチョウの同定に関して、境優助教にはデータ解析方法に関して有益なご教示を頂きました。なお、本研究の一部は文部科学省研究委託事業「地球環境情報プラットフォーム構築推進プログラム (DIAS-PF)」の支援を受けて実施されました。ここに記して感謝の意を表します。

引用文献

- Australian National Botanic Gardens, Centre for Australian National Biodiversity Research (2015) "Australian Plant Name Index" <http://www.anbg.gov.au/apni/index.html>, 2019年1月17日確認
- Bascompte J, Jordano P (2007) Plant-animal mutualistic networks: The architecture of biodiversity. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 38:567-593. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.38.091206.095818>
- Bascompte J, Jordano P, Olesen JM (2006) Facilitate biodiversity maintenance. *Science*, 1:3-5. <https://doi.org/10.1126/science.1123412>
- Bawa K (1990) Plant-pollinator interactions in tropical rain forests. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 21:399-422. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.21.110190.002151>
- Bennett JM, Thompson A, Goia I, Feldmann R, Ştefan V, Bogdan A, Rakosy D, Beloiu M, Biro I, Bluemel S, Filip M, Madaj A, Martin A, Passonneau S, Kalisch DP, Scherer G, Knight TM (2018) A review of European studies on pollination networks and pollen limitation, and a case study designed to fill in a gap. *AoB PLANTS*, 10:1-10. <https://doi.org/10.1093/aobpla/ply068>
- Bonney R, Cooper CB, Dickinson J, Kelling S, Phillips T, Rosenberg KV, Shirk J (2009) Citizen science: A developing tool for expanding science knowledge and scientific literacy. *BioScience*, 59:977-984. <https://doi.org/10.1525/bio.2009.59.11.9>
- Bonney R, Shirk JL, Phillips TB, Wiggins A, Ballard HL, Miller-Rushing AJ, Parrish JK (2014) Next steps for citizen science. *Science*, 343:1436-1437. <https://doi.org/10.1126/science.1251554>
- Breeze TD, Gallai N, Garibaldi LA, Li XS (2016) Economic measures of pollination services: Shortcomings and future directions. *Trends in Ecology & Evolution*, 31:927-939. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2016.09.002>
- Brown ED, Williams BK (2019) The potential for citizen science to produce reliable and useful information in ecology. *Conservation Biology*, 33:561-569. <https://doi.org/10.1111/cobi.13223>
- Chandler M, See L, Copas K, Bonde AMZ, López BC, Danielsen F, Legind JK, Masinde S, Miller-Rushing AJ, Newman G, Rosemartin A, Turak E (2017) Contribution of citizen science towards international biodiversity monitoring. *Biological Conservation*, 213:280-294. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.09.004>
- Chao A, Chazdon RL, Colwell RK, Shen T (2005) A new statistical approach for assessing similarity of species composition with incidence and abundance data. *Ecology Letters*, 8:148-159. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2004.00707.x>
- Costanza R, de Groot R, Braat L, Kubiszewski I, Fioramonti L, Sutton P, Farber S, Grasso M. (2017) Twenty years of ecosystem services: How far have we come and how far do we still need to go? *Ecosystem Services*, 28:1-16. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.09.008>
- Dennis EB, Morgan BJT, Brereton TM, Roy DB, Fox R (2017) Using citizen science butterfly counts to predict species population trends. *Conservation Biology*, 31:1350-1361. <https://doi.org/10.1111/cobi.12956>
- 土居 秀幸, 岡村 寛 (2011) 生物群集解析のための類似度とその応用: Rを使った類似度の算出、グラフ化、検定. *日本生態学会誌*, 61:3-20. https://doi.org/10.18960/seitai.61.1_3
- Domroese MC, Johnson EA (2017) Why watch bees? Motivations of citizen science volunteers in the Great Pollinator Project. *Biological Conservation*, 208:40-47. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.08.020>
- Fenster CB, Armbruster WS, Wilson P, Dudash MR, Thomson JD (2004) Pollination syndromes and floral specialization. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 35:375-403. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.34.011802.132347>
- Fortuna MA, Stouffer DB, Olesen JM, Jordano P, Mouillot D, Krasnov BR, Poulin R, Ame C (2010) Nestedness versus modularity in ecological networks: Two sides of the same coin? *Journal of Animal Ecology*, 79:811-817. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2656.2010.01688.x>
- 福田 晴夫, 高橋 真弓 (1998) 蝶の生態と観察. 築地書館, 東京
- Gómez, JM, Perfectti F, Jordano P (2011) The Functional consequences of mutualistic network architecture. *PLoS ONE*, 6:e16143. <https://doi.org/10.1371/Citation>
- Gray S, Jordan R, Crall A, Newman G, Hmelo-Silver C, Huang J, Novak W, Mellor D, Frensley T, Prysby M, Singer, A (2017) Combining participatory modelling and citizen science to support volunteer conservation action. *Biological Conservation*, 208:76-86. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.07.037>
- Hardy PB, Dennis RLH (1999) The impact of urban development on butterflies within a city region. *Biodiversity and Conservation*, 8:1261-1279. <https://doi.org/10.1023/A:1008984905413>

- 堀田 満, 緒形 健, 新田 あや, 星川 清親, 柳 宗民, 山崎 耕宇 (編) (1989) 世界有用植物事典. 平凡社, 東京
- Jacobsen R (2008) *Fruitless Fall: The Collapse of the Honey Bee and the Coming Agricultural Crisis*. Bloomsbury Publishing, London
- Kaiser-Bunbury CN, Mougil J, Whittington AE, Valentin T, Gabriel R, Olesen JM, Blüthgen N (2017) Ecosystem restoration strengthens pollination network resilience and function. *Nature*, 542:223-227. <https://doi.org/10.1038/nature21071>
- 環境省 (2018) 第五次環境計画. 環境省大臣官房環境計画課, 東京
- Kobori H, Dickinson JL, Washitani I, Sakurai R, Amano T, Komatsu N, Kitamura W, Takagawa S, Koyama K, Ogawara T, Miller-Rushing AJ (2016) Citizen science: A new approach to advance ecology, education, and conservation. *Ecological Research*, 31:1-19. <https://doi.org/10.1007/s11284-015-1314-y>
- 国立科学博物館 (2009) 「附属自然教育園」 <http://www.ins.kahaku.go.jp/>, 2019年1月17日確認
- Lewandowski EJ, Oberhauser KS (2017) Butterfly citizen scientists in the United States increase their engagement in conservation. *Biological Conservation*, 208:106-112. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2015.07.029>
- Lewis SL, Maslin MA (2015) Defining the Anthropocene. *Nature*, 519:171-180. <https://doi.org/10.1038/nature14258>
- Lindenmayer D, Barton P, Pierson J (eds) (2015) *Indicators and Surrogates of Biodiversity and Environmental Change*. CSIRO Publishing, Clayton South, Victoria
- 前角 達彦, 須田 真一, 角谷 拓, 鷺谷 いづみ (2010) 東京区部西縁3区におけるチョウ相の変化とその生態的要因. *保全生態学研究*, 15:241-254. https://doi.org/10.18960/hozen.15.2_241
- 牧林 功 (2006) 蝶と訪花植物との関係について - 「北見の蝶 (1994)」の訪花記録から見えてくること - やどりが, 211:39-47. https://doi.org/10.18984/yadoriga.2006.211_39
- Martínez-Adriano CA, Díaz-Castelazo C, Aguirre-Jaimes A (2018) Flower-mediated plant-butterfly interactions in a heterogeneous tropical coastal ecosystem. *Peer J*, 6:e5493. <https://doi.org/10.7717/peerj.5493>
- McKinley DC, Miller-Rushing AJ, Ballard HL, Bonney R, Brown H, Cook-Patton SC, Evans DM, French RA, Parrish JK, Phillips TB (2017) Citizen science can improve conservation science, natural resource management, and environmental protection. *Biological Conservation*, 208:15-28. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.05.015>
- Mukherjee S, Banerjee S, Basu P, Saha G, Aditya G (2018) Butterfly-plant network in urban landscape: Implication for conservation and urban greening. *Acta Oecologica*, 92:16-25. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2018.08.003>
- 日本チョウ類保全協会 (編) (2012) フィールドガイド日本のチョウ. 誠文堂新光社, 東京
- 西多摩昆虫同好会 (編) (2012) 新版 東京都のチョウ. けやき出版, 東京
- O'Connor RS, Kunin WE, Garratt MPD, Potts SG, Roy HE, Andrews C, Jones CM, Peyton JM, Savage J, Harvey MC, Morris RKA, Roberts SPM, Wright I, Vanbergen AJ, Carvell C (2019) Monitoring insect pollinators and flower visitation: The effectiveness and feasibility of different survey methods. *Methods in Ecology and Evolution*, 10:2129-2140. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13292>
- 大串 隆之 (編) (1992) さまざまな共生 - 生物種間の多様な相互作用. 平凡社, 東京
- 大串 隆之 (1993) 送粉系と食植系. (井上 民二, 加藤 真 編) 花に引き寄せられる動物 - 花と送粉者の共進化, 233-251. 平凡社, 東京
- 大崎 直太, 佐藤 芳文 (1993) 天敵真空空間を利用したチョウの狭食性と広食性の進化. (鷺谷 いづみ, 大串 隆之 編) 動物と植物の利用しあう関係, 68-84. 平凡社, 東京
- Potts SG, Imperatriz-Fonseca V, Ngo HT, Aizen MA, Biesmeijer JC, Breeze TD, Dicks LV, Garibaldi LA, Hill R, Settele J, Vanbergen AJ (2016) Safeguarding pollinators and their values to human well-being. *Nature*, 540:220-229. <https://doi.org/10.1038/nature20588>
- Proença V, Martin LJ, Pereira HM, Fernandez M, McRae L, Belnap J, Böhm M, Brummitt N, García-Moreno J, Gregory RD, Honrado JP, Jürgens N, Opige M, Schmeller DS, Tiago P, van Swaay C (2017) Global biodiversity monitoring: From data sources to essential biodiversity variables. *Biological Conservation*, 213:256-263. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.07.014>
- Rockström J, Steffen W, Noone K, Persson Å, Chapin FS, Lambin EF, Lenton, Timothy M. Scheffer M, Folke C, Schellnhuber HJ, Nykvist B, de Wit CA, Hughes T, van der Leeuw S, Rodhe H, Sörlin S, Snyder P, Costanza R, Svedin U, Falkenmark M, Karlberg L, Corell RW, Fabry VJ, Hansen J, Walker B, Liverman D, Richardson K, Crutzen P, Foley JA (2009) A safe operating space for humanity. *Nature*, 461:472-475. <https://doi.org/10.1038/461472a>
- Rosas-Guerrero V, Aguilar R, Martín-Rodríguez S, Ashworth L, Lopezaraiza-Mikel M, Bastida JM, Quesada M (2014) A quantitative review of pollination syndromes: Do floral traits predict effective pollinators? *Ecology Letters*, 17:388-400. <https://doi.org/10.1111/ele.12224>
- Schmeller DS, Henry PY, Julliard R, Gruber B, Clobert J, Dziock F, Lengyel S, Nowicki P, D'Éri E, Budrys E, Kull T, Tali K, Bauch B, Settele J, Van Swaay C, Kobler A, Babij V, Papastergiadou E, Henle K (2009) Advantages of volunteer-based biodiversity monitoring in Europe. *Conservation Biology*, 23:307-316. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2008.01125.x>
- Schuttler SG, Sorensen AE, Jordan RC, Cooper C, Shwartz A (2018) Bridging the nature gap: Can citizen science reverse the extinction of experience? *Frontiers in Ecology and the Environment*, 16:405-411. <https://doi.org/10.1002/fee.1826>

- Secretariat of the Convention on Biological Diversity (2014) Global Biodiversity Outlook 4. Convention on Biological Diversity, Montréal
- 生活協同組合パルシステム東京, 中央大学, 東京大学地球観測データ統融合連携研究機構 (2010) 「市民参加による生き物モニタリング調査」<http://butterfly.diasjp.net/>, 2019年6月27日確認
- 白水 隆 (2006) 日本産蝶類標準図鑑. 学研出版, 東京
- Sterner T, Barbier EB, Bateman I, van den Bijgaart I, Crépin AS, Edenhofer O, Fischer C, Habla W, Hassler J, Johansson-Stenman O, Lange A, Polasky S, Rockström J, Smith HG, Steffen W, Wagner G, Wilen JE, Alþizar F, Azar C, Carless D, Chávez C, Coria J, Engström G, Jagers SC, Köhlin G, Löfgren Å, Pleijel H, Robinson A (2019) Policy design for the Anthropocene. *Nature Sustainability*, 2:14-21. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0194-x>
- Stouffer DB, Bascompte J (2011) Compartmentalization increases food-web persistence. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108:3648-3652. <https://doi.org/10.1073/pnas.1014353108>
- Sullivan BL, Phillips T, Dayer AA, Wood CL, Farnsworth A, Iliff MJ, Davies IJ, Wiggins A, Fink D, Hochachka WM, Rodewald AD, Rosenberg KV, Bonney R, Kelling S (2017) Using open access observational data for conservation action: A case study for birds. *Biological Conservation*, 208:5-14. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.04.031>
- 田中 肇, 平野 隆久 (2000) 花の顔実を結ぶための知恵. 山と溪谷社, 東京
- Theobald EJ, Ettinger AK, Burgess HK, DeBey LB, Schmidt NR, Froehlich HE, Wagner C, HilleRisLambers J, Tewksbury J, Harsch MA, Parrish JK (2015) Global change and local solutions: Tapping the unrealized potential of citizen science for biodiversity research. *Biological Conservation*, 181:236-244. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2014.10.021>
- The Plant List (2013) “The Plant List Version 1.1. Published on the Internet” <http://www.theplantlist.org/>, 2019年1月17日確認
- *Thomas JA (2005) Monitoring change in the abundance and distribution of insects using butterflies and other indicator groups. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 360:339-357. <https://doi.org/10.1098/rstb.2004.1585>
- *Thomas JA, Telfer MG, Roy DB, Preston CD, Greenwood JJD, Asher J, Fox R, Clarke RT, Lawton JH (2004) Comparative losses of British butterflies, birds, and plants and the global extinction crisis. *Science*, 303:1879-1881. <https://doi.org/10.1126/science.1095046>
- 東京都環境局自然環境部 (2010) 東京都の保護上重要な野生生物種 (本土部) - 東京都レッドリスト - 2010年版. 東京都環境局自然環境部, 東京
- United Kingdom Butterfly Monitoring Scheme (2018) “The UK Butterfly Monitoring Scheme” <http://www.ukbms.org/>, 2019年1月17日確認
- Van Strien AJ, Van Swaay CAM, Termaat T (2013) Opportunistic citizen science data of animal species produce reliable estimates of distribution trends if analysed with occupancy models. *Journal of Applied Ecology*, 50:1450-1458. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12158>
- 鷺谷 いづみ (2003) 受粉媒介者の生態. (三橋 淳 編) 昆虫学大事典, 518-523. 朝倉書店, 東京
- 鷺谷 いづみ (2019) 知って守る生物多様性. (日本生命財団 編) 人と自然の環境学, 7-24. 東京大学出版会, 東京
- 鷺谷 いづみ, 鬼頭 秀一 (編) (2007) 自然再生のための生物多様性モニタリング. 東京大学出版会, 東京
- 鷺谷 いづみ, 村上 興正 (2002) 日本における外来種問題. (日本生態学会 編) 外来種ハンドブック, 6-8. 地人書館, 東京
- 鷺谷 いづみ, 吉岡 明良, 須田 真一, 安川 雅紀, 喜連川 優 (2013) 市民参加による東京チョウ類モニタリングでみたヤマトシジミ. *科学*, 83:961-966
- Wei JW, Lee BPH, Wen LB (2016) Citizen science and the urban ecology of birds and butterflies - A systematic review. *PLoS ONE*, 11:1-23. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0156425>
- Wilson EO (2019) *Genesis: The Deep Origin of Societies*. Liveright Publishing Corporation, New York
- Wolowski M, Ashman TL, Freitas L (2014) Meta-analysis of pollen limitation reveals the relevance of pollination generalization in the Atlantic forest of Brazil. *PLoS ONE*, 9:e89498. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0089498>
- Woodcock BA, Garratt MPD, Powney GD, Shaw RF, Osborne JL, Soroka J, Lindström SAM, Stanley D, Ouvrard P, Edwards ME, Jauker F, McCracken ME, Zou Y, Potts SG, Rundlöf M, Noriega JA, Greenop A, Smith HG, Bommarco R, van der Werf W, Stout JC, Steffan-Dewenter I, Morandin L, Bullock JM, Pywell RF (2019) Meta-analysis reveals that pollinator functional diversity and abundance enhance crop pollination and yield. *Nature Communications*, 10:1-10. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09393-6>
- 米倉 浩司, 梶田 忠 (2003-) 「BG Plants 和名-学名インデックス (YList)」 <http://ylist.info>, 2019年1月17日確認 (*印を付したものは直接参照できなかった)

付 録

付録1 表1. 2015-2017年に植物への訪花・樹液吸汁が観察されたチョウの一覧。

付録1 表2. 2015-2017年にチョウによる訪花・樹液吸汁が観察された植物種・分類群の一覧。

付録1 図1. チョウの体に花粉の付着が10件以上確認できた植物の報告データ例。

付録1 図2. グループAのチョウが樹液を吸汁している様子の報告データ例。

付録1 図3. グループCのチョウがクリを利用する様子の報告データ例。

付録1 図4. グループEのチョウが体に花粉を付けた様子の報告データ例。

付録1 図5. グループFのチョウがアザミ類を利用する様子の報告データ例。

リンクが示されていない付録は本文のオンラインサイトに掲載。

<https://doi.org/10.18960/hozen.1929>