

# 特集 都市域でのグリーンインフラ適用に向けての取り組み

## Approach to Apply Green Infrastructure in Urban Areas

### Summary

Green infrastructure is a new concept of infrastructure that focuses on ecosystem services provided by nature. It is a new way of thinking that creates various values and realizes a sustainable society by utilizing the multi-faceted functions of nature and creating various ways of using them. It is also a concept that focuses on the flexible, multi-faceted, integrated functions and roles of nature over conventional social infrastructures, such as concrete artificial structures. In Europe and the United States, green infrastructures are collectively referred to as various names such as Natural Infrastructure and Nature-based solutions, and are considered cost-effective solutions.

Green infrastructure has been prevalent in Europe and the United States since the mid-2000s, and is a concept that is rapidly gaining attention in Japan since the mid-2010s, but its definition varies from country to country. The Green Infrastructure Study Group in Japan defines it as “infrastructure and land use plans that contribute to the development of a sustainable society and economy by using the diverse functions of nature wisely”. In addition, the national land formation plan decided by the Cabinet in 2015 stated that “Japan will promote efforts related to green infrastructure that promotes sustainable and attractive national land and regional development by utilizing the diverse functions of the natural environment in both hardware and software such as social capital development and land use”.

In recent years, green infrastructure has been attracting attention in Japan, and it has been actively taken up by governmental and local government administrative plans, and efforts toward social implementation are being rapidly promoted. This is because it is expected to be an innovative and effective solution to various social issues faced by Japan. In other words, Japan’s major social issues include population decline, declining birthrate and aging population, stagnation in the regional economy, widening disparities, financial difficulties, increased disaster risk, and serious global and regional environmental problems. As well as aiming for an approach that comprehensively solves the problem, multipurpose solution and economy that can meet the complex and diverse goals that are the characteristics of green infrastructure are expected.

In this way, although green infrastructure is highly promising in Japan, the efforts to build a green infrastructure have just begun, and many issues remain for social implementation.

In this paper, we first describe the outline of the green infrastructure (definition, background, features, applicable areas, issues), and then mention research related to the planning and construction of the green infrastructure that we have implemented.

In Chapter 3, the development and evaluation of rainwater infiltration type green zone (bioretention) and the technology that uses rainwater after passing through the green zone for irrigation (rainscape) are described. This Chapter shows the results of evaluating long-term effects, focusing on the rainwater storage function and water purification function among the various functions of these technologies. In urban areas, by installing these spaces around the site, it has become possible to delay rainwater flowing out from the target site or to cut beaks during heavy rain. As a result of the measurement exceeding 3 years, it was shown that the effects such as beak cut at the time of rain were continuously exhibited.

In Chapter 4, focusing on the creatures among the multi-functionality of the green infrastructure, we introduced green space planning support in consideration of the biodiversity conservation of the city and research examples on how to use the creatures. A lot of research has been done on the conditions of green spaces and the richness of biodiversity, which are the habitats of living creatures, but there have been few studies on small green spaces such as urban rain gardens. We focused on urban birds, which are indicators of biodiversity, and conducted research on the relationship between the design conditions and the biodiversity of small-scale green spaces that can function as green infrastructure.

**Keywords:** green infrastructure, biodiversity, rainscape, rain garden, urban areas, birds, ecosystem services

## 1 はじめに Introduction

三輪 隆 Takashi Miwa\*1

グリーンインフラとは、自然から提供されるサービスに注目した新しい概念であり、自然に備わっている多面的な機能に着目し、それらの多様な活用方法を生み出すことで、さまざまな価値を創出し、持続可能な社会を実現しようとする新しい考え方である。また、コンクリートなどの人工構造物に代表される従来型の社会基盤に対して、自然の持つ柔軟かつ多面的で一体的な機能や役割に着目した概念でもある。グリーンインフラは、欧米ではNatural InfrastructureやNature-based solutionsなどの様々な名称で総称され、費用対効果の高い解決策であるとされている。

グリーンインフラは、2000年代半ばから欧米で先行して普及し、2010年代半ば以降に日本国内でも急速に注目されつつある概念であるが、その定義は国によって多様であり、日本の研究者や実務家などが参加するグリーンインフラ研究会は「自然が持つ多様な機能を賢く利用することで、持続可能な社会と経済の発展に寄与するインフラや土地利用計画」と定義している。また、2015年に閣議決定された国土形成計画には「社会資本整備や土地利用等のハード・ソフト両面において、自然環境が有する多様な機能（生物の生息・生育の場の提供、良好な景観形成、気温上昇の抑制等）を活用し、持続可能で魅力ある国土づくりや地域づくりを進めるグリーンインフラに関する取組を推進する。」と記されている。

ここ数年は国内でもグリーンインフラが国や自治体の行政計画に取り上げられるなど、社会実装に向けての取り組みが急速に進められつつあるが、その理由は一言でいえば、日本が直面する様々な社会課題に対する革新的で有効な解決策になると期待されているからと考えられる。つまり、日本における大きな社会課題として、人口減少・少子高齢化、地域経済の停滞、格差の拡大、財政難、災害リスクの高まり、地球・地域環境問題の深刻化などが山積しているが、2015年に国連で採択されたSDGs（Sustainable Development Goals）が、持続可能な世界を実現するための17の様々な社会課題を一つひとつに単純化して効率的に解決しようとするのではなく、複雑な問題を包括的に解決しようとするアプローチを目指しているのと同様に、グリーンインフラの特長である複雑で多様な目標に対応できる多目的な解決力と経済性こそが期待されているのである。

このように、我が国でも大きく期待されるグリーンインフラではあるが、取り組みはまだ緒に就いたばかりであり、社会実装に向けての課題も多く残されている。その一例を挙げると、生態系機能に依拠したグリーンインフラならではの不確実性や機能、費用・便益の定量評価の困難性、提供すべき生態系サービスの定量的目標値の設定方法、グリーンインフラを計画・設計・施工・維持管理するための知識・技術の不足などである。

本稿では、先ず2章でグリーンインフラの概要（定義、背景、特徴、適用対象領域、課題）について述べた上で、3章以降で当社が実施しているグリーンインフラの計画や施工に関連する研究開発の取り組みについて述べる。

\*1 技術研究所 リサーチフェロー Research Fellow, Research & Development Institute

## 2 グリーンインフラの概要 Outline of Green Infrastructure

三輪 隆 Takashi Miwa\*1

### 2.1 グリーンインフラの定義と機能 Definition and Function of Green Infrastructure

国内におけるグリーンインフラに関する前述の定義に対して、米国環境保護庁の定義は、「管渠・ポンプ・貯水トンネル、汚水・下水排水と組合せて用いられてきたハードインフラの代わり、もしくは付加するものとして土壌や植生を用いること」とされており、その導入目的は「下水道管をはじめとする社会インフラの再整備コストの縮減と長寿命化、及び水質浄化を図ること」とされている。一方、欧州における定義は、「水質浄化、大気質、レクリエーションと気候緩和と適応のための広範な生態系サービスを提供するように設計され、管理されている自然環境や半自然環境の戦略的計画ネットワーク」としており、その導入目的は「生態系サービスの維持・形成を主目的に自然環境や半自然環境で形成する戦略的なネットワークの形成を図ること」である<sup>1)</sup>。

このように国や地域によって定義や導入目的に違いはあるが、いずれの定義にも共通するのは、自然に備わっている柔軟で多面的かつ一体的な機能や役割に着目し、それらの多様な活用方法を生み出すことで、さまざまな価値を創出し、持続可能な社会を実現しようとする新しい考え方であることである。

我が国のグリーンインフラに期待される多様な機能のうち主要なものとして下記のようなものがある<sup>2)</sup>。

(1) 治水、(2) 土砂災害防止、(3) 地震・津波減災、(4) 大災害時の避難場、(5) 水源・地下水涵養、(6) 水質浄化、(7) 二酸化炭素固定、(8) 局所気候の緩和、(9) 地域のための自然エネルギー供給、(10) 資源循環、(11) 人と自然にやさしい交通路（グリーンストリート）、(12) 害虫抑制・受粉、(13) 食料生産、一次産業の高付加価値化、(14) 土砂供給、(15) 観光資源、(16) 歴史文化機能の維持、(17) 景観向上、(18) 環境教育の場、(19) レクリエーションの場、(20) 福祉の場、(21) 健康増進・治療の場、(22) コミュニティの維持・醸成

### 2.2 グリーンインフラが今求められる背景 Background where Green Infrastructure is Now Emphasized

欧米でグリーンインフラが注目されるのは、社会資本の効率的な利用、資金獲得、維持管理コストの低減、環境保全、社会・経済活動の振興などにつながると考えられているからである。そして、わが国で今グリーンインフラが求められる背景として、国交省グリーンインフラ懇談会が挙げている下記7項目がある<sup>1)</sup>。

- ①気候変動への適応策として、自然環境を活用しつつ、防災・減災対策を進めることが重要
- ②グローバル化時代の地域の発展には、自然環境を活かしたインフラ整備や都市空間の形成が鍵となる
- ③SDGs（持続可能な開発目標）との親和性が高く、我が国が直面する様々な課題解決に資する可能性がある
- ④豊かな生物多様性を保全し、その恵みを将来にわたり享受できる自然と共生する社会の実現が必要である
- ⑤我が国特有の地域の歴史、生活、文化等に根ざした環境・社会・経済の基盤となる可能性がある
- ⑥人口減少や少子高齢化が進展する中、管理が困難となる土地や低利用・未利用地の増加への対応が課題である
- ⑦インフラの維持管理が課題となる中で、既存ストックの有効活用とそれにあわせた維持管理が重要である

### 2.3 グリーンインフラの特徴 Characteristics of Green Infrastructure

グリーンインフラの特徴として、上述のグリーンインフラ懇談会は①多機能性、②多様な主体の参画、③経時的に機能発揮することを挙げており、そのほかに、平時にも機能発揮すること、機能発揮の不確実性、費用対効果の高さなどがある。その具体的内容は以下の通りである。

#### ①機能の多様性

- イ) 施設や空間そのものが多様な機能を有する（生物の生息・生育の場の提供、防災・減災、良好な景観形成、気温上昇の抑制、一次生産、土壌の創出・保全等）
- ロ) 様々な活動の場となり、多様な機能が発揮される（コミュニティ形成、環境教育、健康増進、観光や農業

など地域のブランディングや稼ぐ力、価値の創造等)

- ハ) 1つの社会資本にとどまらず、エリア全体の資源を活かすことで、より効果的に機能を発揮
- ②多様な主体の参画
- イ) 地域住民との協働や民間企業との連携により、多様な主体が維持管理等に関与
- ロ) グリーンインフラを基点とした新たなコミュニティやソーシャルキャピタル（社会関係資本）の形成
- ハ) 多様な主体が参画するからこそ、適切なマネジメントが必要
- ③時間の経過とともにその機能を発揮
- イ) 年月を重ね、自然環境の変化にあわせて機能を発揮する、又は新たな機能が発現
- ロ) 時間の経過とともに、地域の歴史、生活、文化等を形成
- ハ) 自然環境が有する不確実性を踏まえた順応的管理が必要
- ④非常時のみでなく平時にも機能を発揮
- 非常時に高い単機能を発揮する既存インフラと比べて、平時に常にプラスの生態系サービスを提供することで、安全安心かつ住みやすい都市環境を形成
- ⑤機能発揮の不確実性
- グリーンインフラは、遷移と攪乱によって生態系が変化することも許容する必要がある、その場合は既存インフラと比べて機能の不確実性を伴う
- ⑥費用対効果の高さ
- 既存インフラとの併用策も含めて、既存インフラ単体の解決策に比べて費用対効果が高いケースがあることが明らかになりつつある

## 2.4 グリーンインフラの適用対象領域 Applicable Area of Green Infrastructure

自然環境が有する多様な機能を活用しつつ、多様な主体の幅広い連携のもとに行うグリーンインフラの取り組みを、社会資本整備や土地利用等を進めるに際しての検討プロセスに組み込むことにより、地域の課題の解決と持続可能で魅力的な社会の形成への貢献が可能である。その具体的な適用領域の例を以下に示す。

- ①気候変動への適応の観点から、一定程度の機能発揮が想定されるグリーンインフラについて、既存インフラと相互補完的に活用
- ②都市のサステナビリティ配慮の潮流やSDGsやESG投資、都市間競争の文脈から、グリーンインフラにより都市やエリアの付加価値を高め、新たな投資や人財を呼び込む都市空間を形成<sup>3)</sup>
- ③自然環境と調和したオフィス空間・都市空間形成の観点から、ワークスペースの変革の手段として活用<sup>3)</sup>
- ④持続可能な国土利用・管理の観点から、管理コストを低減させる工夫を行うとともに、過去に損なわれた湿地等の自然再生などに活用
- ⑤人口減少、開発圧力の低下等により発生する低・未利用地を活用する観点から、中長期的な時間軸で、自然環境を保全・形成
- ⑥住みやすい都市空間形成の観点から、都市の既存のストックの更新に際して、緑と水のネットワーク形成等を通して豊かな自然環境を形成
- ⑦生態系ネットワーク形成の観点から、生物の生息・生育環境の確保

## 2.5 グリーンインフラ推進のための技術的側面の方策と課題 Technical Measures and Challenges in Promoting Green Infrastructure

従来の国土管理・土地利用のあり方や意思決定のしかたは、単一目的を達成するために効率よく作られてきたため、グリーンインフラの最大の特長である多機能性を組み込んだものに転換していくのが困難である。したがって、従来の考え方を転換し、多目的に対応した計画・設計・施工技術や順応的維持管理手法を確立し、それを政策や意思決定に反映させる必要がある。例えば、グリーンインフラの雇用創出やコミュニティ醸成なども含む多機能性の価値や魅力を利害関係者に理解してもらい、意思決定に結び付くような判断材料を提示できないと、問題の解決は進まないと考えられる。

それらを踏まえたグリーンインフラ推進のための技術的課題を以下に示す。

- ①グリーンインフラの機能と費用・便益に関する定量評価手法の整備
  - イ) 個別の機能評価と総合的な機能評価手法の開発, マイナス面も含んだ評価手法の開発
  - ロ) グリーンインフラ整備・運用・維持の費用に関する情報の蓄積
  - ハ) グリーンインフラの便益に関する評価手法の整備
- ニ) グリーンインフラの整備目標の設定方法に関するガイドラインの整備
- ②グリーンインフラの計画, 設計, 施工, 維持管理技術の開発や技術基準等の整備
  - イ) グリーンインフラの計画において定量的検討を支援する計画支援技術
  - ロ) グリーンインフラの技術基準の先進事例創出
  - ハ) グリーンインフラの標準仕様書, 施工管理指針の整備
- ニ) グリーンインフラの維持管理ガイドラインの整備
- ホ) グレーとグリーンを複合させたハイブリッド型インフラの計画, 設計, 施工, 維持管理技術の知見整備
- ヘ) 技術情報や優良事例集の整備

欧米でも, グリーンインフラを社会実装する上で同様の課題が存在し, それに対して例えば米国森林局や米国環境保護庁などは様々な評価ツール等を提供している<sup>4)-6)</sup>。しかしながら, グリーンインフラは適用する国や地域ごとに気候, ニーズ, 費用・便益等も異なることから, 国外の評価ツール等をそのまま国内に適用することは困難であり, わが国での実装を進めるためには, 地域ごとの自然環境条件等に即した機能評価が必要である。以上の課題を踏まえ, 次章以降では, 当社が実施しているグリーンインフラの計画や施工に関する研究開発の取り組みについて述べる。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省:「グリーンインフラ推進戦略」, p.2, 2019年6月
- 2) 吉田丈人:「グリーンインフラがもたらすしなやかさ」, 農村計画学会誌, pp.430-434, 2017年12月
- 3) DBJ都市の骨格を創りかえるグリーンインフラ研究会:「グリーンインフラを核にした持続可能な都市創生のための提言」, pp.38-42, 2018年5月
- 4) CNT's Green Values<sup>®</sup> Calculator, <http://greenvalues.cnt.org/national/calculator.php>
- 5) i-Tree Tools, <http://www.itreetools.org/tools>
- 6) National Stormwater Calculator, <https://www.epa.gov/water-research/national-stormwater-calculator>

### 3 内水氾濫リスクを軽減するレインスケープの開発 Development of “Rainscape” to Reduce the Flooding Risk

古川 靖英 Yasuhide Furukawa\*1

#### 3.1 バイオリテンションの概要とレインスケープ

##### Overview of the Bioretention System and Rainscape

既存インフラの更新機会の増大に対し、自然や生態系のもつ力を最大限に活用するグリーンインフラ<sup>1)</sup>に関わる技術開発が進められている。グリーンインフラにおいて、“バイオリテンション”や“レインガーデン”、“バイオスウェル”と呼ばれる技術は、主に浸透・流出抑制機能を担う雨水浸透型の緑地帯を指す。欧米を中心に、これらの技術に関わる総エネルギー算出による有効性の評価や持続可能性評価の研究が進められており、実際の適用事例において、降雨時の効果に関わる研究が進められている<sup>2), 3)</sup>。筆者らはこれらの関連技術の中でも特に、緑地帯通過後の雨水を灌水等に利用する技術をレインスケープと称し、開発を行っている。

#### 3.2 研究の背景

##### Background

レインスケープ及びこれに類似する技術の多くは、透水性の高い材料を充填した地下部を有しており、敷地や道路から集めた雨水を一時的に貯留あるいは地中に浸透させることで、豪雨時のピークカット効果の向上や水質の改善を図っている。都市部においては、これらの空間を敷地周囲に設置することで、対象敷地から流出する雨水を遅延させる、あるいは豪雨時に敷地外に流出する雨水のピークカットを図ることが可能となる。関連する技術が保有する、主な機能を以下に列記する。

- ①内水氾濫に対するピークカット機能
- ②水質の浄化機能
- ③浸透による地下水涵養機能
- ④植栽による生物多様性保全の機能
- ⑤景観形成機能
- ⑥文化的機能

これらの技術について、海外では適用事例が急増してきているものの、我が国において、従来型のインフラが担ってきた機能をどれだけ担えるかを定量的に示した事例は、ほとんど見られない。また、長期的にその効果が継続するかどうかを確認した事例も少ない。そこで本章では上述した機能のうち、主に①ピークカット機能、②水質の浄化機能についての長期実証試験の結果と、⑤景観形成機能および⑥文化的機能に配慮した事例を示す。

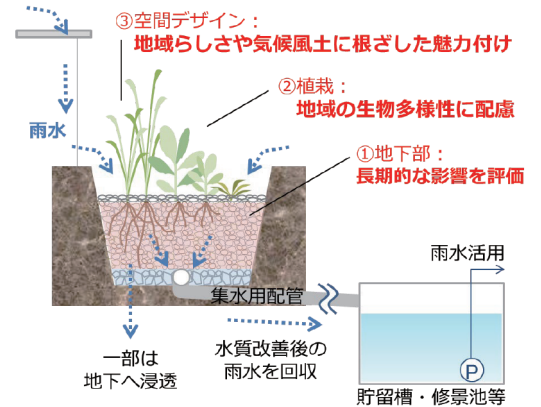


Fig. 1 適用技術の多様な機能  
Various function of Rainscape

#### 3.3 レインスケープの長期実証

##### Long-term Substantiation of Rainscape

##### 3.3.1 評価方法

千葉県印西市に位置する試験区において、長期実証を図った。本実証においては、実際のコンクリート面を利用し、降雨時のピークカット効果や窒素・リン等の栄養塩類、有機物に係る水質の経時変化を計測した。試験区は掘削深さ約0.6m、延長方向は総延長で40m、植栽部の幅は0.5~1.2mとした。試験区のうち、従来のバイオリテンションの仕様に近い砂を充填したエリアを試験区A、比較対象区として礫を充填したエリアを試験区B、試験区Aと同様な砂を充填し、雨水の一部を循環利用するエリアを試験区Cと称した。既往研究から、回収した雨水に含まれる有機汚濁物質はそのほとんどが地表から0.3m以内に吸着していることから、砂や礫を充填する深さは0.3mとした<sup>4)</sup>。本実証サイトでは、対象となる深度の透水係数が低いため、それぞれの試験区を通過した雨水について、観測用集水栓に個別に集めた後、各種計測を行い、既存の雨水側溝に排出した。各種計測は水量については週1回、水質については月2回以上の計測を行った。

\*1 技術研究所 自然・生態環境部 主任研究員 博士(工学) Chief Researcher, Research & Development Institute, Dr. Eng.

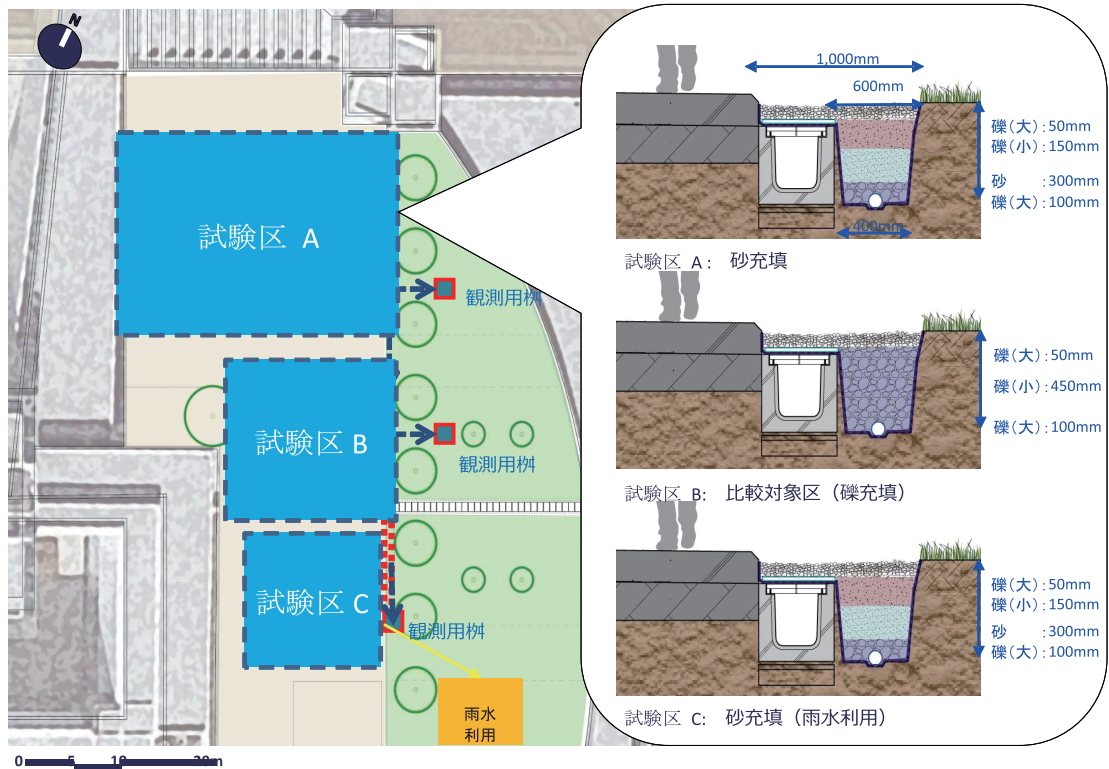


Fig. 2 設置エリアの概要  
 Test cases of the long-term substantiation  
 Test area A: Sand, Test area B: Gravel, Test area C: Sand (use rainwater)

### 3.3.2 水量計測結果

月別の降雨量の積算と最も集水面積の大きい試験区A, 比較対象として試験区Bでの通過水量を計測した結果を Fig. 3に示す。また, 2019年4月の降雨時の雨水の回収状況をFig. 4に示す。

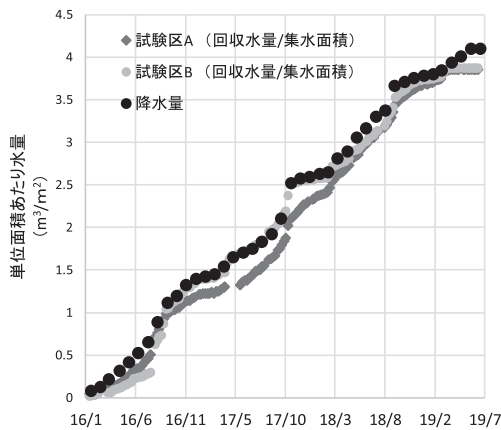


Fig. 3 長期回収水量  
 Volume of collected rainwater

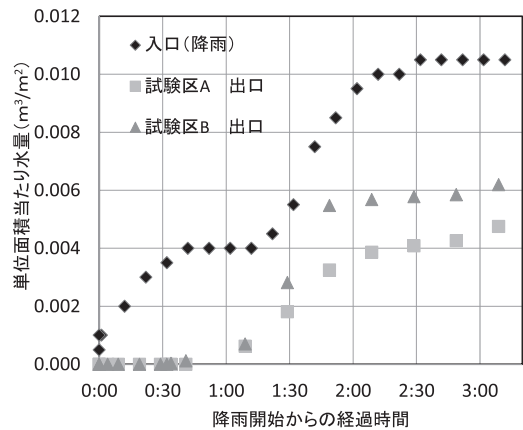


Fig. 4 降雨時における流出傾向  
 Peak cut through the heavy rain event

対象地域における計測期間中 (2016年~2018年) の年間降雨量は1200mm~1400mm (単位面積あたり水量では1.2~1.4m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>) であり, 3年半にわたる長期的な水量計測の結果, 総降水量は約4100mmに達した。多少の時間遅れはあるものの, 停電等で計測ができなかった期間を除いて, 試験区A, 試験区B共に確実な雨水の回収を行えていることが示された (Fig. 3)。

Fig. 4に示す降雨時の流量計測の結果では, 降雨開始から約1時間後に試験区に水が流入し, 試験区Bの礫区間においては, その1時間後 (2:00) には単位面積あたり水量で0.006m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> (6mm/hr相当) まで水量が増加した。一方, 試験区Aの砂区間においては2時間後 (3:00) においてもその水量は0.005m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> (5mm/hr相当) 以下であった。以上の結果, 本試験区において, 試験区Bと比較しても, 20%近いピークカット効果が長期的に継続していることが

示された。Fig. 5に、設置3年後に試験区表層部に水道水を直接注水した試験結果を示す。本試験においても、試験区B（礫）においては試験開始20分後にほぼすべての水が回収された。一方、試験区Aにおいては、注水開始90分を超過しても一部の水は、砂の間隙内に残存し、その結果、出口側では回収されておらず、15%近い雨水のピークカット効果が確認された。これらの結果より、砂を充填した試験区Aにおいては3年間継続して雨水を回収する一方、比較対象区である礫区画と比較しても15~20%程度のピークカット効果を継続していることが推測された。ただし、既往研究では、総降水量が多くなるほど、1回の降雨あたりのピークカット効果が小さくなる傾向も報告されており<sup>4)</sup>、より多くの降雨が発生した際の計測が今後必要である。

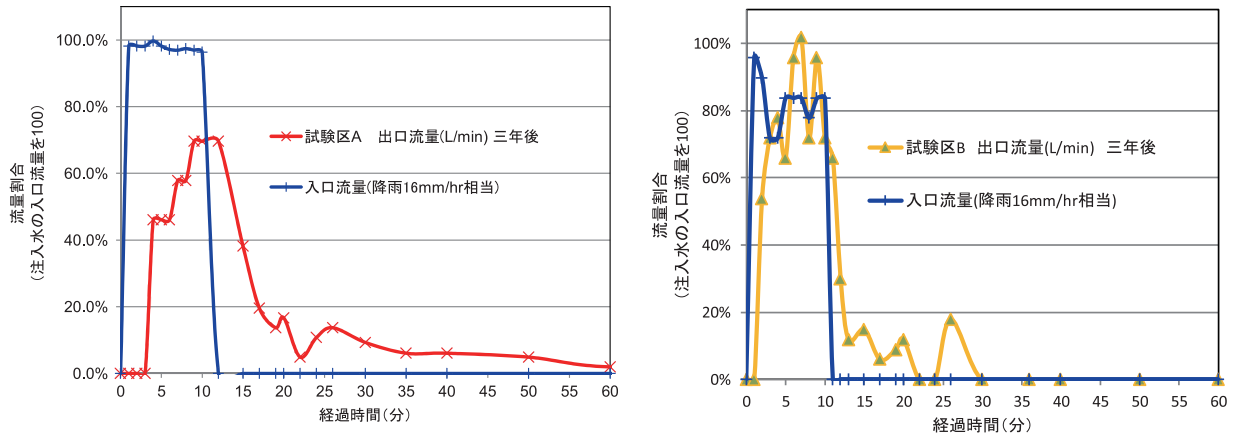


Fig. 5 注水試験における流出傾向  
Results of water injection tests

### 3.3.3 水質計測結果

水質浄化機能把握のために、試験区通過後の回収水について、リン酸態リン、全鉄、全有機性炭素、全窒素を計測した結果をFig. 6に示す。水質浄化機能に関わる計測の結果、リン酸態リンについては約10%。全鉄については約59%、全有機性炭素については33%、全窒素については約20%の除去効果を確認した。除去について、初期の除去は砂への吸着によるところが大きい。その後は、砂に吸着した有機物とこれを分解する微生物による効果が大きいと推測された。

### 3.3.4 メンテナンスと長期的な外観の変化

貯留・浸透機能を持つバイオリテンションでは他の同様なインフラと同様、メンテナンスについての知見が不足している。対象サイトでは冬季をのぞく春季、夏季、秋季において、それぞれ簡易なメンテナンス（枯れ葉除去、雑草除去）を行った。良好な景観を保持するために必要な年間の工数は、対象面積30m<sup>2</sup>で平均7~8人・日/年程度と推測された。

また、長期的な運用において、当初、目詰まり等に伴う効果の劣化が懸念された（Photo 1）。3年半の運用の後、本試験区においても表層部に粒子の小さい泥状のものが付着しており、これが多い箇所について透水性の低下が推測された。そこで、豪雨時に目視により、水の溜まっている状況を確認したところ、部分的に水たまりとなつてはいるものの、透水能力は有しており、引き続き、ピークカット効果を発揮している（Photo 2）。特に透水性の低い部分は全体の一部と想定され、試験区画全体としてはFig. 4のように機能を継続していると推測された。

その他、本サイトにおいては、地上部の植栽について、地域植生の再現による地域の生物多様性に配慮した。また、地産材

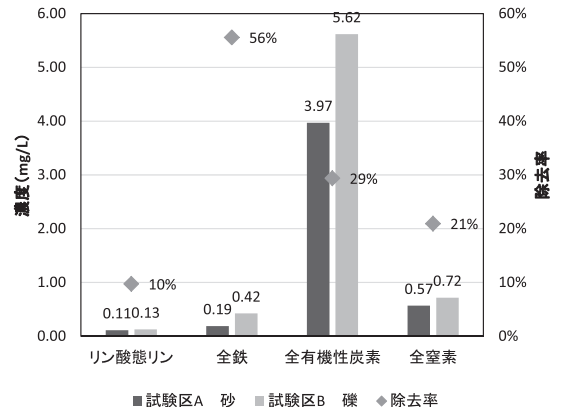


Fig. 6 通過雨水の水質計測結果  
Results of water treated by test area



Photo 1 設置時の状況  
Start of the substantiation



料の活用とともに、地域の気候風土に根ざした空間デザインにより、地域との連続性に配慮した。具体的には、地域（千葉県印西市）の文化的景観である『野馬土手』をモチーフに試験区のランドスケープをデザインすると共に（Photo 3）、千葉県産の房州石（Photo 4）や砂利を使用した。



Photo 2 長期実証後の雨天時  
Situation of the heavy rain after three years



Photo 3 デザインベースとした野馬土手  
Typical "earthen wall" as design motif



Photo 4 房州石  
Boushuu stone

### 3.4 まとめ Summary

ここでは、レインスケープについて、主に豪雨時のピークカット機能と水質浄化機能とに着目し、同時に長期的な影響や地域の文化的側面に配慮した事例を紹介した。欧米での検討事例は多くあるものの、アジア圏、特に国内での定量評価に関わる報告は少ない。今後はより大規模なエリアに適用した際の効果検証や適用後のメンテナンスに関わる研究に取り組んでいく予定である。

#### 参考文献

- 1) 決定版！グリーンインフラ，グリーンインフラ研究会，三菱UFJリサーチ&コンサルティング日経コンストラクション，日経BP社，2017
- 2) Eugene P. L., Stewart A. W. D., & Timothy R. T., A sustainability comparison of green infrastructure interventions using emergy evaluation, *Journal of Cleaner Production*, 145, pp.374-385, 2017.
- 3) Belinda E. H., Tim D. F., & Ana D., Hydrologic and pollutant removal performance of stormwater biofiltration systems at the field scale, *Journal of Hydrology*, 365, Issues 3-4, pp.310-321, 2009.
- 4) Damien T., Ghassan C., Daniel P., Yves K., & Marie-Christine G., Impact of runoff infiltration on contaminant accumulation and transport in the soil/filter media of Sustainable Urban Drainage Systems: A literature review, *Science of the Total Environment*, 569-570, pp.904-926, 2016.

## 4 都市鳥類に配慮した緑地計画支援技術 A Supporting Tool for Green Space Planning with Consideration to Urban Birds

北野 雅人 Masato Kitano\*1

### 4.1 グリーンインフラと都市鳥類の多様性 Green Infrastructure and Diversity of Urban Birds

グリーンインフラの最大の特徴は、その多機能性であり、都市では貴重な生物の生息空間として機能する特性も評価されている。自然の仕組みが支えるしなやかさ・レジリエンスは、生態系がより健全であり生物多様性が豊かであるほど高い効果や働きが期待できる。生物の生息空間となる緑地の条件と生物多様性の豊かさ等に関しては数多く研究されてきているものの、近年注目されている都市のレイナーデンのような小規模な緑地を対象にした研究は少なく、グリーンインフラとして機能し得る小規模緑地の設計条件と生物多様性の関係性についての知見は現状では限られている。

一般に生物多様性の保全を進める現実的な手段としては、生態系全体を考慮するよりも、指標となる種等を選定し、その指標に応じた保全を進める方が低コストであり、また世間の関心や環境保全に対する投資の分かり易さの面でも適しているとされている<sup>1), 2)</sup>。都市において指標となる生物は、生態系ピラミッドの上位種であること (Fig. 1) や生息地の変化に対する脆弱性、観察の容易さ等の理由から、鳥類が対象になることが多い<sup>3)</sup>。そのため当社では、都市の生物多様性の指標とされる鳥類に着目し、都市鳥類の生息に配慮した緑地計画に反映させることを目的として、鳥類の生息に影響し得る緑地条件に関する研究を行った。



Fig. 1 生態系ピラミッド  
 (https://watarase.or.jp/wild/) Ecological pyramid

### 4.2 現地調査を基にした都市鳥類の生息確率のモデリング Modeling About Habitat Probability of Urban Birds Based on Field Surveys

#### 4.2.1 研究の背景

生物多様性に配慮した緑地を計画する上で、一つの環境要因がどの程度鳥類の種組成や種数に影響を及ぼすのか、定量的な知見がより重要である。定量的な知見は政策決定者や都市計画者、緑地設計者等とのコミュニケーションが促進される等が指摘されていることから<sup>4), 5)</sup>、アウトプットとして定量的情報が得られる解析方法が望ましい。また、小規模緑地が多くを占める都市ならではの問題点として、「偽の不在」データの存在が挙げられる。都市鳥類は森林部よりも広い行動圏で活動しており<sup>6)</sup>、小規模な緑地間を幅広く移動しながら採餌等を行っていると考えられる。そのため、たまたま生息調査を実施した時間に緑地から離れていて見つからないことも多く、この「偽の不在」データの存在をないものと考えた解析は、鳥類の分布と環境選好性の関係を誤って判断してしまうことに繋がる。調査努力量を増やすことは発見確率を高める解決策に成り得るが、多大なコストがかかってしまうことから汎用的な解決策とはいえない。本研究では、都市緑地を対象にした鳥類相の現地調査データを基に、データに含まれる「偽の不在」を適切に処理し限られた分布調査データから様々な種の環境選好性を同時に定量評価できる手法である多種占有モデル (Multi-species occupancy model)<sup>7), 8)</sup>を用いた統計解析を行うことで、都市鳥類の生息モデルを構築した。

#### 4.2.2 現地調査および解析

##### 1) 鳥類の現地調査

東京都部において比較的規模の小さい企業や役所が所有する緑地 (屋上緑地を含む) または都市公園を24箇所選定し、調査地内で目視によるセンサスを行い、確認された鳥種や個体数等を記録した。調査は繁殖期と結実期、越冬期の3季に実施した。

\*1 エンジニアリング本部 製造・物流施設本部 主任 Chief, Manufacturing & Logistics Engineering Department

## 2) 調査地の環境条件抽出

一般に、鳥類の生息に影響を与える要因は大きく分けてサイトレベルの要因（調査地自体の環境特性）とランドスケープレベルの要因（調査地周辺の環境特性）に分けられる。既往研究を参考に、サイトレベルの環境変数は、階層ごと（高木層・低木層）の樹冠面積および密度とし、毎木調査を行うことでこれらを抽出した。またランドスケープレベルの環境変数は、調査地の中心から周囲500m以内の緑被率および大規模緑地までの距離とし、緑被率は衛星画像を基にした正規化差植生指数（NDVI）を使って抽出し、大規模緑地までの距離は10ha以上を大規模緑地と設定した上で調査地までの直線距離を計算した。

## 3) 評価

本稿では、各鳥種の発見確率を考慮した階層モデルである多種占有モデルを用いた。モデルの概念図をFig. 2に示した。鳥類の発見データは、調査地の占有状況の決定則を表す生態プロセスと、占有状況に依存した観測プロセスを表す2つのベルヌーイ分布によって表される。サイト*i*が種*s*によって利用されていることを「種*s*によるサイト*i*の占有」と定義し、これを $z_{si}=1$ と表す。このサイトを種*s*が利用していなければ、 $z_{si}=0$ である。 $z$ はサイトの占有状態を表す確率変数であり、以下で説明する発見誤差のために完全には観測されない状態変数である。占有確率は $z_{si}=1$ となる確率であり、これを $\psi_{si}$ と表す。観察される発見データの分布は、状態変数の値に依存して以下のようにモデル化される。サイトが占有されている（ $z_{si}=1$ ）の場合には、1回の調査あたり $p_{si}$ の確率で種*s*が観察される。一方で、種*s*がサイト*i*を占有していても、確率 $1-p_{si}$ で観察されないものとする。この仮定により、「偽の不在」データを考慮して鳥類相の過小評価を修正した推定が行われる。

種や環境による占有確率と発見確率の変動は以下のような線形モデルによりモデル化される。

$$\text{logit } \psi_{si} = a_{0s} + a_{1s} * (\text{環境1})_i + a_{2s} * (\text{環境2})_i + \dots \quad (1)$$

$$\text{logit } p_{si} = b_{0s} + b_{1s} * (\text{環境1})_i + b_{2s} * (\text{環境2})_i + \dots \quad (2)$$

環境と鳥類相の関係性はこの回帰式の係数を統計的に推定することによって明らかとなる。モデルは階層ベイズモデルとして定式化し、パラメータの事後分布はマルコフ連鎖モンテカルロ法を用いて推定した。各鳥種の占有確率には、サイトレベルとランドスケープレベルの環境変数が共に影響を与えると考えられる。一方発見確率は、そもそも規模が限定されている都市緑地では人為的な見落としよりも調査時に鳥類が緑地から離れていることによる「偽の不在」要因の方がはるかに大きいと考えられることから、発見確率にはランドスケープレベルの環境変数のみ考慮することにした。

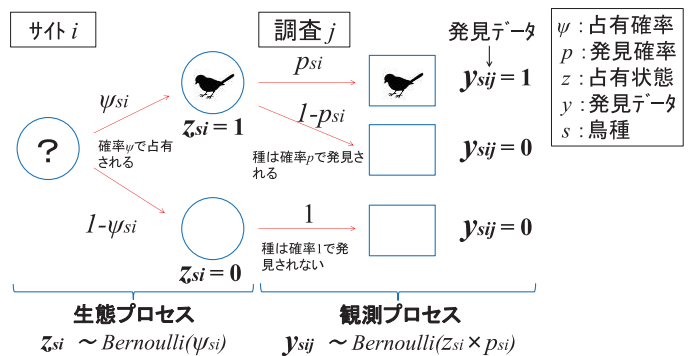


Fig. 2 モデルの概念図  
 Conceptual diagram of the model

多重共線性の影響を受けないよう環境変数の分散拡大要因（VIF）が10を超えないことを確認した<sup>9)</sup>。

### 4.2.3 結果

各鳥種の占有確率・発見確率と環境変数との間のパラメータ推定値の一部をTable 1に示した（係数の90%信用区間が0を含まないものを太字で示している）。多くの種の生息にプラスに影響を与えている環境変数は、サイトレベルの中高木層面積とランドスケープレベルの緑被率であった。中高木は多くの鳥類に餌資源や繁殖場所等を提供するため、量的に多いほど鳥類の生息には適した環境になる。Fig. 3にメジロの占有確率と高木層面積の関係性を示した。またサイトレベルの低木層面積も多くの種の生息にプラスに影響していた。カワラヒワやシメ、シロハラ、ツグミ、ルリビタキ等は地表を主な採餌場所として利用することから、隠れ場所として低木を利用していることが考えられる。この点は既往研究<sup>10)</sup>でも指摘されおり、発達した階層構造の重要性が本稿でも示唆された。またヤブや低木密集地を選好するウグイスの生息には、低木層植被率が+に影響しており低木層植被率が高くなるほど生息し易くなる傾向が見られた（Fig. 4）。一方同じ地表採餌タイプでも、ドバトやキジバト、ムクドリといった建物等の人口構造物に巣を作りその糞害が問題になることが多い鳥の生息には、逆に低木植被率がマイナスに影響しており、すっきりした林床を好む結果になった。大規模緑地までの距離は今回の解析では鳥類の生息に大きな影響を与えていなかった。発見確率については、半径500m内の緑被率がマイナスに影響している種が多かった。小規模

な緑地が大半の都市部においては、緑地間を幅広く利用しながら採餌等を行っており、緑地が周りに多いほど周辺に滞在する時間や頻度が増え、比較的緑地規模の小さな今回の調査地が利用される頻度が低下することが理由として考えられる。

Table 1 各鳥種の占有確率・発見確率と環境変数との間のパラメータ推定値（一部を抜粋）  
 Parameter estimates between occupancy and detection probability of each bird species and environmental variables

種名	占有確率				発見確率			
	サイトレベル		ランドスケープレベル		ランドスケープレベル		ランドスケープレベル	
	中高木層面積	中高木層植被率	低木層面積	低木層植被率	半径500m緑被率	大規模緑地までの距離	半径500m緑被率	大規模緑地までの距離
1 アオゲラ	<b>1.55</b>	0.02	<b>1.37</b>	-0.30	0.80	0.24	-0.11	-0.22
2 アオジ	0.91	0.48	<b>1.24</b>	-0.14	0.87	0.06	-0.21	-0.40
3 アカハラ	0.95	0.93	1.18	-0.22	<b>1.18</b>	0.25	0.11	-0.53
4 イソヒヨドリ	<b>1.66</b>	-0.93	1.26	-0.79	0.67	-0.01	-0.64	-0.29
5 ウグイス	0.35	<b>1.22</b>	0.92	0.32	0.95	0.17	0.44	-0.27
6 エナガ	1.07	0.23	1.22	-0.39	<b>1.06</b>	0.28	0.07	<b>-0.80</b>
7 オオタカ	1.27	0.24	1.24	-0.48	0.95	0.08	-0.07	-0.54
8 オナガ	<b>2.03</b>	<b>-1.55</b>	1.23	-0.17	0.55	0.30	<b>-0.58</b>	0.19
9 カワラヒワ	<b>1.75</b>	-0.68	<b>1.19</b>	-0.46	<b>0.74</b>	0.00	-0.21	-0.52
10 キジバト	1.37	-0.74	0.91	<b>-1.13</b>	0.47	-0.16	<b>-0.64</b>	-0.25
11 コゲラ	<b>1.52</b>	0.60	<b>1.23</b>	-0.67	<b>0.89</b>	-0.06	0.01	-0.42
12 シジュウカラ	0.91	0.50	1.01	-0.19	0.90	0.26	<b>0.38</b>	<b>-0.37</b>
13 シメ	<b>1.43</b>	0.28	<b>1.56</b>	-0.07	<b>1.15</b>	0.36	0.25	-0.61
14 ジョウビタキ	0.60	-0.20	0.40	<b>-1.03</b>	0.78	-0.18	-0.61	-0.42
15 シロ		0.28	<b>1.43</b>	-0.41	<b>1.04</b>	0.37	-0.05	<b>-0.83</b>
16				-0.83	0.65	-0.08	<b>-0.72</b>	

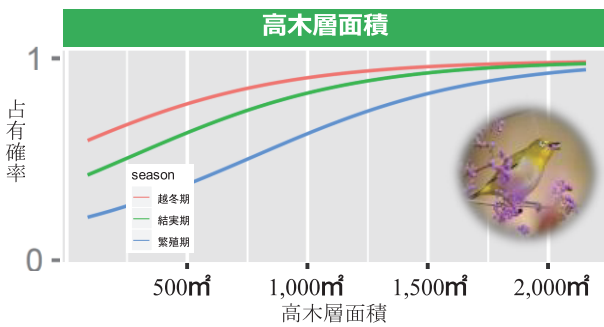


Fig. 3 メジロの占有確率と高木層面積  
 Occupancy probability of Japanese White-eye and canopy area

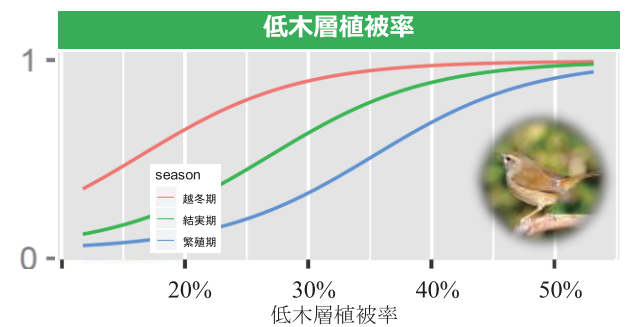


Fig. 4 ウグイスの占有確率と低木層植被率  
 Occupancy probability of Japanese Bush Warbler and shrub density

#### 4.2.4 研究結果の活用

##### 1) 敷地内の緑地計画への活用（サイトレベル・ランドスケープレベルの情報活用）

緑地計画においては、階層ごとの面積と密度によって実現される緑地の景観タイプが決定される。多くの鳥種の生息条件に影響する高木層・低木層の樹冠面積および密度が定量的に評価されたことで、許容できる緑地規模や設計者が意図する景観タイプ等を踏まえた場合の実現可能な目標種が選定できる。生息有無を判別する閾値を設定し（一般には0.5）、その閾値を超える種を累積することで、その緑地での生息期待種数も推定できるため、目標を種数に設定することも可能である。例えばFig. 5に事例を示した通り、すっきりした林床景観タイプのPlan Aでは期待種数は13種（都市適応タイプが12種、都市忌避タイプが1種）、林床の低木層を充実させた雑木林タイプのPlan Bでは20種（都市適応タイプが13種、都市忌避タイプが7種）といった種数による評価が可能になる。都市生態系の上位種である等の理由から鳥類が都市の生物多様性の指標になることは多いが、都市鳥類の何を目標に保全を進めていくべきか生息種数や多様性なのか、あるいは特定の種が生息することなのか、現状ではどのようなシチュエーションにも当てはまる明確な答えは無い。都市鳥類の目標設定における一事例として、建設時の近隣住民との意見交換

時に、昔は計画地にウグイスが生息していたという情報があり、また建設前の生息調査でもウグイスの計画地付近での越冬例があったことから、目標種をウグイスと設定した事例があった。このように計画地の環境特性や文化的・時系列的な背景を踏まえ、ステークホルダーとのコミュニケーションを通じて取り組みの目標に関して合意形成し、計画地特有の目標を柔軟に設定することが望ましい。本稿で紹介した解析では、様々な都市鳥類の個別種ごとの占有確率を推定できることから、あらゆる目標に対して柔軟に対応できるようになったことも本解析方法のメリットである。

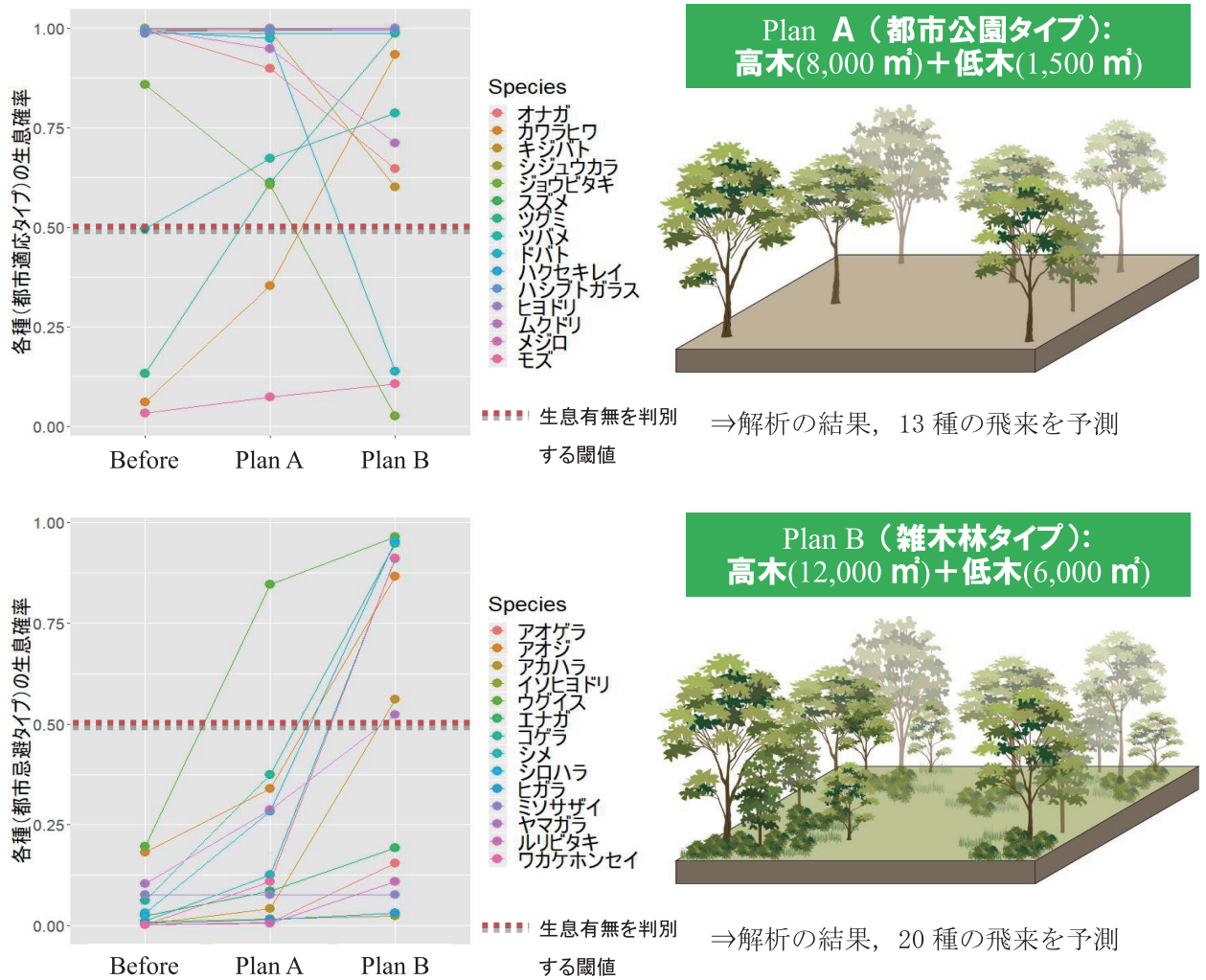


Fig. 5 緑地プランごとの各種の生息確率と飛来予測種数  
Occupancy probability of each specie and number of species predicted by this model for each green space plan

## 2) 都市計画への活用 (ランドスケールレベルの情報活用)

近年では、都市においても少子高齢化等に伴う空地の増加が社会問題化しており、増加する空地を計画的にグリーンインフラストラクチャ化することも検討されつつある。グリーンインフラの特徴の一つである生物多様性の保全に評価軸をおいた場合、今回の解析で得られたランドスケープレベルの環境変数を考慮することで、都市計画への活用も可能になる。鳥類を対象にした既往研究では、鳥類の種組成には緑地間の空間的繋がり（ネットワーク性）が重要であるとされている<sup>11)</sup>。今回得られた緑被率と鳥類の生息可能性の関係性を基にその場所の鳥類の生息ポテンシャルを評価することで、都市鳥類に配慮した場合に重点的に緑地活用すべきエリアや、緑地化によって得られる鳥類の多様性への貢献度を定量的に評価することが可能になる。

一例として本社のある江東区を対象にした事例をFig. 6に示した。江東区では、木場公園と猿江恩賜公園内において比較的規模の大きな緑地が確保されているが、その間には宅地や工場等が集中しており、緑地のネットワークを形成できておらず、鳥類の生息ポテンシャルは低い (Fig. 6 左図)。このエリア一帯を緑化重点地区とし、空地の緑地化や街路樹の植樹等を進めることで、ポテンシャルを大きく改善させることができる (Fig. 6 右図、赤枠部

分を緑化したと仮定し算出)。GISと本解析結果を組み合わせることで緑化すべきエリアと緑化後のその貢献度を可視的に評価可能になるだろう。

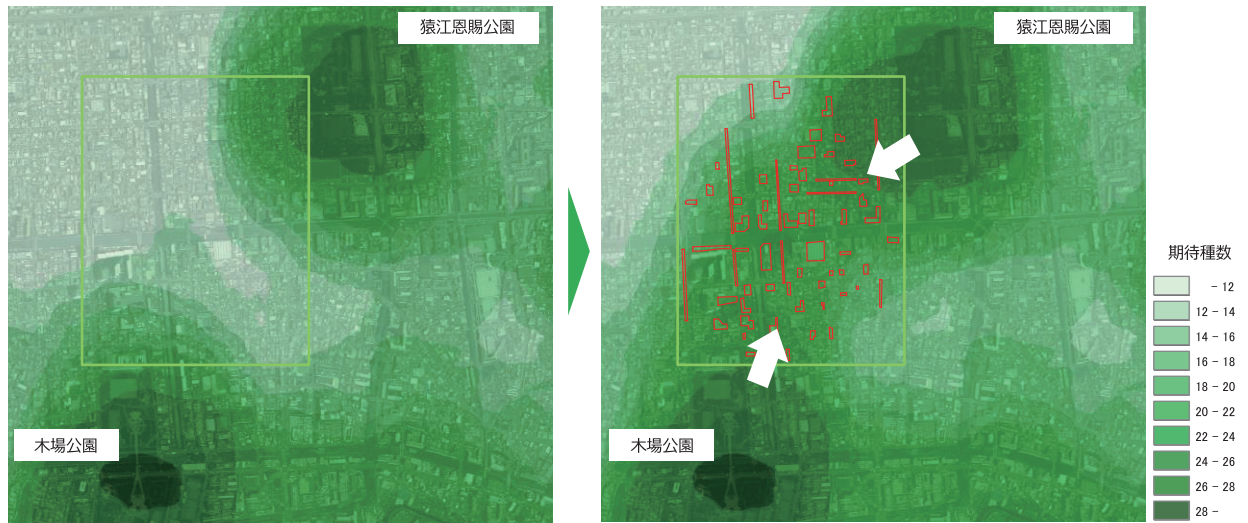


Fig. 6 江東区における特定エリアの緑地化前後における鳥類生息ポテンシャル評価  
 (Product © [2019] DigitalGlobe, Inc., a Maxar company)  
 The potential evaluation as a bird habitat before and after greening a specific area in Koto-ku

### 4.3 緑地を訪れる鳥の利活用ツール

#### Tools for Effective Use of Birds Visiting Green Spaces

ここまでは生物多様性を高めることを目的にした取り組みについて述べてきたが、この項では生物の活用方法について記載したい。生物に関する取り組みについては、これまでCSRとしての意味合いが強く、実際の利活用技術に関しての事例は乏しい。緑地内を散策したり緑地を訪れる生きものと接したりすることで、リラックス効果等の心理面・精神面等に与える影響や、話題提供等のコミュニティ形成への貢献、生産性の向上等の様々な便益（生態系サービス）が得られると考えられている<sup>12)</sup>。オフィスビルにおいても、例えばAmazon本社ビルでは大規模的に室内緑化を行っている。これは単にCSRや建築基準の緩和対策として緑地を増やすためだけでなく、身近に自然とふれあう機会を創出することにより、これらの生態系サービスを積極的に享受することを目的とした取り組みである。緑地とオフィス空間とが離隔しており、気軽に緑地までアクセスできる環境ではない立地的制限があるケースや、高齢者施設などの身体的負担により屋外に出たくても出ることができない施設利用者があるケース、幼児または児童教育施設等の環境学習や情操教育などのツールが求められるケースにおいて活用することを目的として、現在室内に居ながら屋外環境を観察できるシステムを計画している。野鳥の生態を考慮し野鳥が利用しやすい水場や巣箱を作りこみ、屋外空間に設置したカメラと居室空間を通信ネットワークで繋げることで、普段は警戒心が強くあまり間近で目にすることができない野鳥の行動（水浴びや採餌など）や巣箱内での子育て等を、室内に居ながらリアルタイムで観察できる映像コンテンツ配信システムである（Fig. 7）。それによって、リラックス効果等の心理面・精神面へのポジティブな効果や、話題提供等のコミュニティ形成、さらに気分が乗れば緑地に足を伸ばし緑地内を散策することで体を動かす機会の少ない室内のオフィスワーカーの健康増進等にも繋がる可能性も期待できる。今後は、造られた緑地を最大限活用するためのツールとして展開していく予定である。

### 4.4 まとめ

#### Summary

ここでは、グリーンインフラの多機能性の中でも特に生物に着目し、都市の生物多様性保全に配慮した緑地計画支援の取組や、生物の活用方法に関する研究事例を紹介した。今後は対象の生物種も増やしつつ、継続して生物多様性保全に資する研究に取り組んでいく予定である。

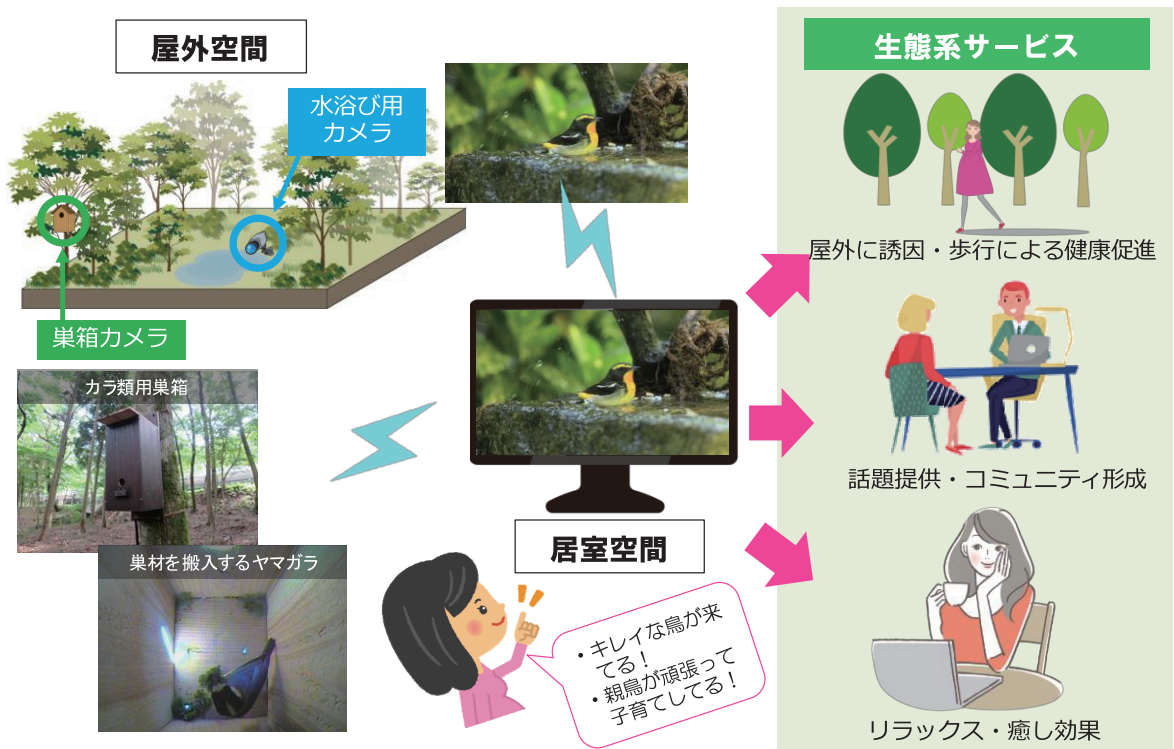


Fig. 7 システムのイメージ  
 The image of this system

## 参考文献

- White P. C. L., Gregory K. W., Lindley P. J., & Richards, G., Economic values of threatened mammals in Britain: A case study of the otter *Lutra lutra* and the water vole *Arvicola terrestris*, *Biological Conservation*, 82, 345-354, 1997.
- Simberloff D., Flagships, umbrellas, and keystones is singlespecies management passe in the landscape era, *Biological Conservation*, 83, 247-257, 1998.
- Savard J. P. L., Clergeau P., & Mennechez G., Biodiversity concepts and urban ecosystems, *Landscape and Urban Planning*, 48 (3-4), 131-142, 2000.
- McDonnell M. J., & Hahs A. K., The use of gradient analysis studies in advancing our understanding of the ecology of urbanizing landscapes: current status and future directions, *Landscape Ecology*, 23, 1143-1155, 2008.
- Stagoll K., Manning A. D., Knight E., Fischer J., & Lindenmayer D. B., Using bird-habitat relationships to inform urban planning, *Landscape and Urban Planning*, 98, 13-25, 2010.
- 生態計画研究所, 都市のエコアップ (その3) —シジュウカラとオナガの目から見た都市環境とその評価—, 1996年.
- Dorazio R. M., & Royle J. A., Estimating Size and Composition of Biological Communities by Modeling the Occurrence of Species, *Journal of the American Statistical Association*, 100 (470), 389-398, 2005.
- Kéry M., Royle J. A., Plattner M., & Dorazio R. M., Species richness and occupancy estimation in communities subject to temporary emigration, *Ecology*, 90 (5), 1279-1290, 2009.
- Quinn G. P., & Keough M. J., *Experimental design and data analysis for biologists*, Cambridge University Press, 537, 2002.
- 森本豪, 加藤和弘, 緑道による都市公園の連結が越冬期の鳥類分布に与える影響, *ランドスケープ研究*, 68(5), 589-592, 2005年.
- Fernandez-Juricic E., & Jokimaki J., A habitat island approach to conserving birds in urban landscapes: case studies from southern and northern Europe, *Biodiversity and Conservation*, 10, 2023-2043, 2001.
- Savard J. P. L., Clergeau P., & Mennechez G., Biodiversity concepts and urban ecosystems, *Landscape and Urban Planning*, 48 (3-4), 131-142, 2000.