

ランドスケープ設計のための樹木配置最適化に関する研究と展開  
—生態池における水生生物の生育環境改善のための適用事例—

株式会社竹中工務店 藤原 邦彦  
三輪 隆  
宮田 弘樹  
鈴木 康平  
井上 竜太

1. はじめに

都市環境を改善するグリーンインフラとして、樹木の暑熱緩和・景観改善・風環境緩和といった多面的効果の活用が期待されている。暑熱緩和に着目すると、樹木の効果は多くの研究により実証されており、樹木の設置を奨励するCASBEE-HI<sup>(1)</sup>、都市緑地法、緑化地域制度<sup>(2)</sup>といった制度・認証が整備されてきた。それら制度・認証は、樹木の本数の増加が暑熱緩和に寄与するとの前提から樹木の水平面投影面積から算出される緑地面積を基準値としている。実際に村上ら<sup>(3)</sup>は緑地による暑熱緩和と緑地面積(緑被率)との正の相関を示しているが、同時に、緑地面積が同等でも樹木の配置や建物との位置関係といった緑化方法によって暑熱緩和効果が大きく異なることも指摘している。村上らの指摘は、同等形状の樹木を同数配置した場合でも、その配置によっては十分な効果が得られないことを示唆している。また、樹木の設置には植樹や剪定・灌水等の維持管理のためのコストが伴う。樹木の効果を活用していくためには、いたずらに本数を増やすのではなく、最小限の樹木により最大限の効果をえられるよう配置することが重要である。

そのため、緑地計画の際には、ランドスケープ設計者が作成した複数の設計案について熱環境シミュレーション等により暑熱緩和効果を定量的に予測し、効果が向上する樹木配置を選択する手法(図1上)が有効となる。しかし、この手法には、最終的な樹木配置の効果が設計者の熱環境への原理的、経験的な理解に依存してしまうという課題があった。なお、ランドスケープ設計は景観、植栽生育、衛生といった広範な領域を総合的に考慮する必要があるため、設計者に都市熱環境に特化した素養を求めることは現実的ではない。設計者の理解に依存せず、設計案の暑熱緩和効果を担保するためには、設計の初期段階で熱環境シミュレーションにより効果の大きい樹木配置を導き出し、設計者による最終案の決定を支援すること(図1下)が有効であると考えられる。

そのためには、熱環境シミュレーションと数理最適化手法を連携させることによる樹木配置の最適化手法<sup>(4)(5)(6)(7)</sup>が有効である。筆者らは、最適化を適/不適の両方向に実施することで樹木配置が熱放射環境へ及ぼす影響の大きさや最適な樹木配置の特徴を明らかにし<sup>(6)</sup>、さらに最適解を基に優先的に樹木を配置すべきエリアを示すマップを出力する方法を提案する<sup>(7)</sup>など、手法の活用に関する検討を進めてきた。本報では、その緑地プロジェクトへの活用事例として、生態池の水生生物の生育環境の改善のために周囲の樹木配置を最適化した事例を紹介する。

本報は以下の通り構成する。2章では樹木配置最適化に関する技術の概要を示す。3章では技術の適用事例について、最適化の問題設定や計算方法を示す。4章では適用事例における最適化の結果とそのランドスケープ設計への利用について示す。5章では本報の総括と今後の展望を示す。

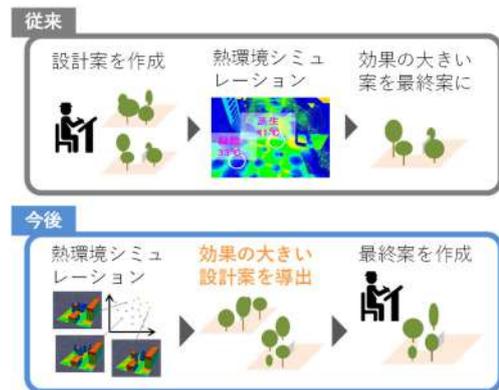


図1.熱環境シミュレーションを用いた緑地計画

## 2. 技術の概要

筆者らが検討を進めてきた樹木配置最適化は、図2に示すように樹木配置モデルと熱環境シミュレーション、最適化アルゴリズムにより構成される。樹木配置モデルが生成した配置を基に熱環境シミュレーションが暑熱緩和効果を算出し、最適化アルゴリズムによりその効果を最大化するような樹木配置モデルのパラメータを探索する。樹木配置最適化は、このサイクルを繰り返すことで樹木配置の最適解を導き出す手法である。本章は、樹木配置モデル、熱環境シミュレーション、最適化アルゴリズムそれぞれの概要と、得られた最適解のランドスケープ設計への活用方法を説明することで、技術への理解を助けることを目的とする。

### (1) 樹木配置モデル

樹木配置モデルは特定のパラメータを基に樹木配置を生成するモデルである。例えば図3のように樹木を回転楕円体で表現するモデルの場合、各樹木について回転楕円体の径  $a$ 、 $b$  と中心の  $xyz$  座標がパラメータとなる。そのほかにも、図4のように樹木を配置する領域(以下、樹木配置領域)をメッシュ分割し、各メッシュについて 1:樹木あり、0:樹木なしのパラメータを設定する方法もある。このように様々な樹木配置モデルが考えられるため、適用するケースによって使い分ける必要がある。

### (2) 熱環境シミュレーション

熱環境シミュレーションは、暑熱緩和効果を評価するために実施される。暑熱緩和効果の指標は、気温・湿度・風速・放射の4要素を考慮した SET\* (新標準有効温度) や熱中症の危険度を評価するために広く用いられている WBGT、夏季の屋外の温熱快適性において支配的な要素である MRT (平均放射温度) や日射量等、多岐に渡る。そのため、目的に応じて評価指標やその計算手法を選択する必要がある。

### (3) 最適化アルゴリズム

最適化アルゴリズムは、特定の関数やプログラムの出力が最適な状態となるような変数の組み合わせを効率的に探索するために機能する。ここで簡単に最適化に関連する用語を整理すると、最適な状態に近づく関数やプログラムの出力を“目的関数”、そのインプットとなる変数を“設計変数”という。樹木配置最適化においては樹木配置モデルのパラメータが設計変数、熱環境シミュレーションの結果である暑熱緩和効果が目的関数にあたり、効果を最大化するような樹木配置モデルのパラメータを探索する。また、目的関数が一つである最適化を“単目的最適化”、複数ある場合を“多目的最適化”という。多目的最適化においてそれぞれの目的関数がトレードオフするとき、最適解は単一解ではなく互いに優劣のつけられない最適解の集合である“パレート解”となる。図5に例として、効果の最大化、コストの最小化の二つの目的関数によるパレート解を示す。パレート解の要素である解  $a$  は効果が  $A$  以上の解の中でコストが最小の解、もしくはコストが  $A'$  以下の解の中で効果が最大の解である。解  $b$  も同様である。設計実務においては、効果の要求が  $A$  以上もしくはコストの要求が  $A'$  以下であれば解  $a$  を、効果の要求

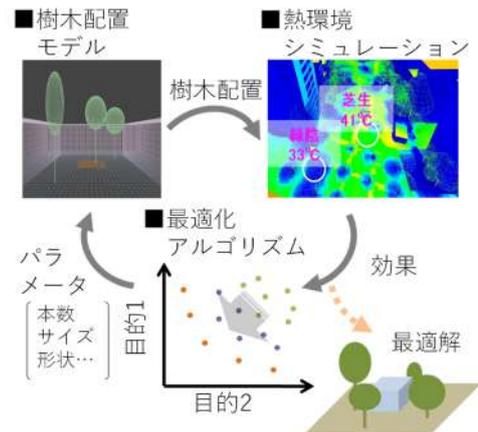


図2. 樹木配置最適化手法の構成

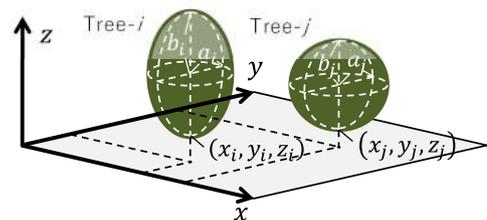


図3. 樹木配置モデルの例①

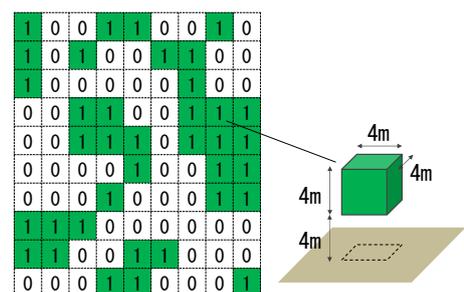


図4. 樹木配置モデルの例②

が B 以上もしくはコストの要求が B' 以下であれば解 b を採用するといった形でパレート解が利用される。

#### (4) 最適解のランドスケープ設計への利用

ランドスケープ設計では単一目的のみを考慮することはあまりなく、暑熱緩和効果とコストというような複数の目的を同時に考慮する必要があることが多い。そのため、多くのケースにおいて多目的最適化による樹木配置のパレート解が導出される。ランドスケープの設計者はパレート解から、効果・コストの要求水準や審美性といった何らかの判断基準により解を抽出し、それを基に設計を行う(図 6)。

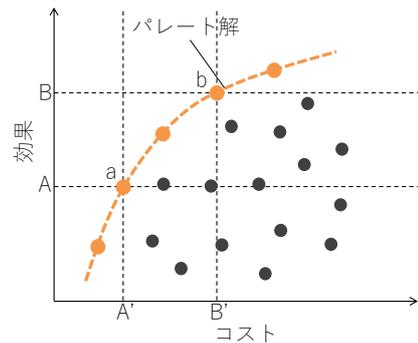


図 5. パレート解の例

### 3. 設計コンセプトに応じた最適化の問題設定

本章では技術の適用事例を紹介するにあたり、まず事例で用いた最適化の問題設定を説明する。

#### (1) プロジェクト概要と設計コンセプト

適用対象とした緑地プロジェクト「調の森“SHI-RA-BE”」の概要を表 1 に、その全体像を図 7 に示す。調の森“SHI-RA-BE”は樹林エリア、水域エリア、有機菜園・原っぱエリア、実験区エリア、養蜂エリアにより構成されており、樹木配置最適化の対象としたのは樹林エリア+水域エリアである。水域エリアには生態池があり、それを囲うように樹林エリアの樹木が配置される。生態池は生物多様性保全に関連する研究開発フィールドと位置付けられており、水草や魚類・水生昆虫等をはじめとする水生生物にとって良好な生育環境を整備することが課題となった。その観点では日照が大きな影響要因となり、樹木の日射遮蔽による日照環境の調整が求められた。樹木配置最適化は人間にとっての暑熱緩和を目的に開発している技術であるが、ここでは生態池の生育環境の緩和に応用することとした。

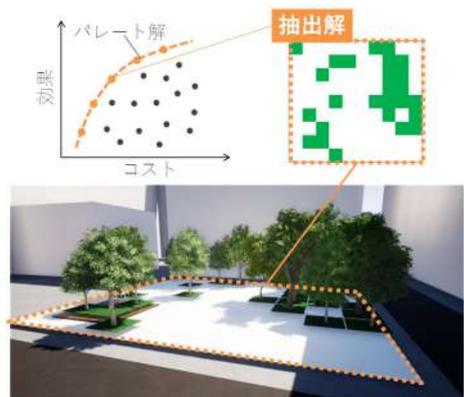


図 6. 抽出解を用いた設計案作成

表 1. 適用対象プロジェクトの概要

プロジェクト	調の森 “SHI-RA-BE”
緑地のプログラム	樹林+水域+有機菜園・原っぱ+実験区+養蜂
コンセプト	地域社会の課題を多目的に解決するグリーンインフラ・生物多様性保全の研究開発フィールド
工事期間	2018年7月～2019年10月
所在地	千葉県印西市(竹中工務店技術研究所の敷地内)

#### (2) 計算対象

前述のように、樹林エリア+水域エリアを計算対象とした。計算領域内には生態池と最適化の際に樹木を配置する樹木配置領域を設定した(図 8)。生態池の形状は事前に決定されており、樹林エリアの樹木配置のみを最適化の対象とした。

#### (3) 樹木配置モデルと設計変数

樹木配置は 3m×3m×6m のメッシュの集合で表現した(図 8)。樹木配置領域の計 171 のボックスについて、各メッシュが 0:空、1:常緑樹、



図 7. 調の森 “SHI-RA-BE” の全体像

2: 落葉樹のどれにあたるかを設計変数とした。常緑樹のメッシュは夏・冬ともに日射を遮蔽し、落葉樹のメッシュは夏のみ日射を遮蔽する。予算等の制約から、常緑樹と落葉樹のメッシュはそれぞれ11個(計22個)で固定した。

#### (4) 目的関数

生育環境の指標となる日照環境について、下記的设计目標が設定された。

夏: ①日中の水温上昇抑制 ②朝方の光合成活性化

冬: ③日中の水温上昇促進 ④朝方の光合成活性化

水温上昇、光合成はどちらも日射が主要因となるため、生態池水面の日射量により評価することとし、下記の①~④の目的関数を設定した。

夏: ①5-18時積算日射量(Summer day, 以下 Sd)最小化

②5-12時積算日射量(Summer morning, 以下 Sm)最大化

冬: ③5-18時積算日射量(Winter day, 以下 Wd)最大化

④5-12時積算日射量(Winter morning, 以下 Wm)最大化

日射量は樹木の葉群による減衰を考慮した三次元の放射輸送計算により算出した。計算には夏・冬の典型的な晴天日として緯度経度を基に作成した7/24(夏)2/3(冬)の日射量・太陽位置(図9)を用いた。

#### (5) 最適化手法

本報告では前述のように複数の目的関数を設定した多目的最適化を実施した。最適化計算は汎用最適化ソフト HEEDS(Ver. 2019. 1, Siemens) により実施した。アルゴリズムは HEEDS 搭載の SHERPA<sup>(8)</sup> を使用した。SHERPA は最適化問題に応じて遺伝的アルゴリズム、焼きなまし法、逐次二次計画法等を使い分ける手法である。

### 4. 最適化の結果とランドスケープ設計への利用

本章では、3章に示した問題設定の樹木配置最適化により得られたパレート解を示し、その樹木配置の特徴について整理する。さらに、最適解を基に作成された設計案を示す。

#### (1) 樹木配置のパレート解

最適化の過程で得られた全ての解の目的関数の算出結果とそのパレート解を図10に示す。樹木配置によって、①Sdは約14%、②Smは約24%、③Wdは約25%、④Wmは約27%変化した(各目的関数で最大値を

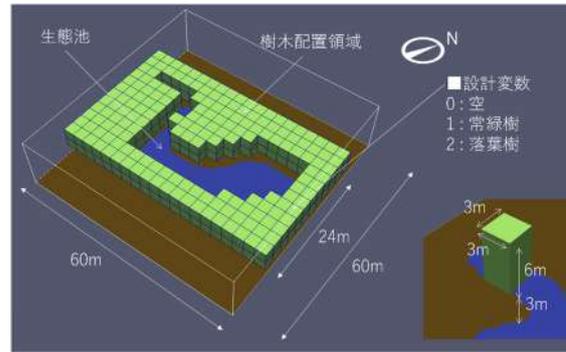


図8. 計算対象と樹木配置モデル

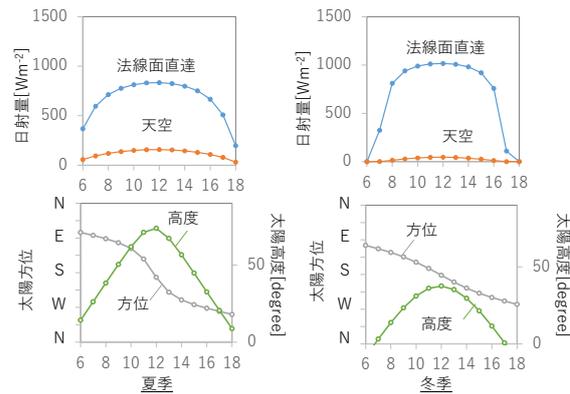


図9. 放射輸送計算に用いた日射量・太陽位置の特別値

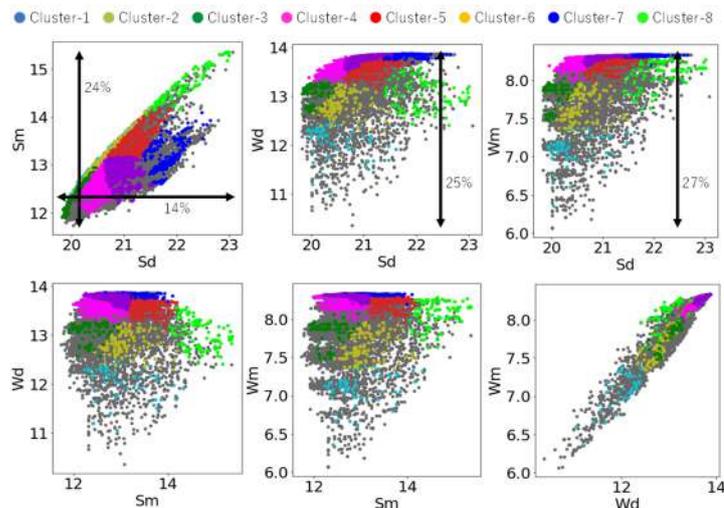


図10. 最適化の過程とパレート解のクラスター化(単位は全て MJm<sup>-2</sup>, 色付きがパレート解で灰色がその他の解)

100%としたとき)。本プロジェクトにおいては樹木配置が水面の日照に無視できない影響を及ぼし、配置の検討が生育環境の調整のために重要であることが示された。

パレート解中の各解は、例えば Sd の最小化に特化、Wd の最大化に特化、各目的関数をバランスよく達成、というようにそれぞれ特徴が異なる。樹木配置の特徴を整理して示すため、パレート解を各目的関数の値を基にした K-means 法により 8 の Cluster に分類した(図 10)。

## (2) パレート解の樹木配置の特徴

図 11 にパレート解の樹木配置をクラスター別(一部を抜粋)に示し、併せて各目的関数の達成度をレーダーチャートにより示す。達成度は各目的関数を最大化であれば全パレート解における最大値が 1 で最小値が 0 となるように、最小化であれば逆に全パレート解における最小値が 1 で最大値が 0 となるように正規化した値である。

Cluster-1 は①Sdの達成度が大きく、生態池の周縁部の南東～北東、南西～北西にかけて樹木が多い、真南には樹木が少ないといった特徴が確認できる。夏季日中の日射を遮蔽するために、南側の樹木による寄与が小さく、東、西側の樹木による寄与が大きいためであると考えられる。Cluster-3 は、Cluster-1 と比較して③Wd と④Wm の達成度が上昇している。生態池の周縁部の常緑樹が Cluster-1 と比較して北側に密集しており、それにより冬季の日射量が大きいと考えられる。Cluster-5 は③Wd、④Wm の達成度が最も大きく、Cluster-1,3 と比較して生態池南東側の樹木が少ないこと、常緑樹が池面と距離をとって配置されていることにより冬季の日射量が最大化されていると考えられる。Cluster8 は②Sm、③Wd、④Wm の達成度が比較的大きい。生態池の南東側、東側の樹木が Cluster-5 よりもさらに少なく、南西～北西に樹木が多い。これにより午前中の東方向からの日射量が最大化され、その分夏季の午前中の日射量も増加していると考えられる。全 Cluster に共通して落葉樹は南側に集中し、これにより冬季の日射量が最大化されていると考えられる。

## (3) パレート解を基にした最終案の決定

以上の結果を基に設計者が最終案を検討した。その際、最適化の実施時には考慮されていなかった下記の条件が新たに設定された。

- ・ 水質管理の観点から導入された水循環設備により一定の水温調整が可能となったことから、Sd の重要性が他の目的関数と比較して小さくなった
- ・ 水面への落葉による水質悪化を抑えるためには生態池に近接する樹木が少ない方が良い(水質管理の専門家からの指摘による)

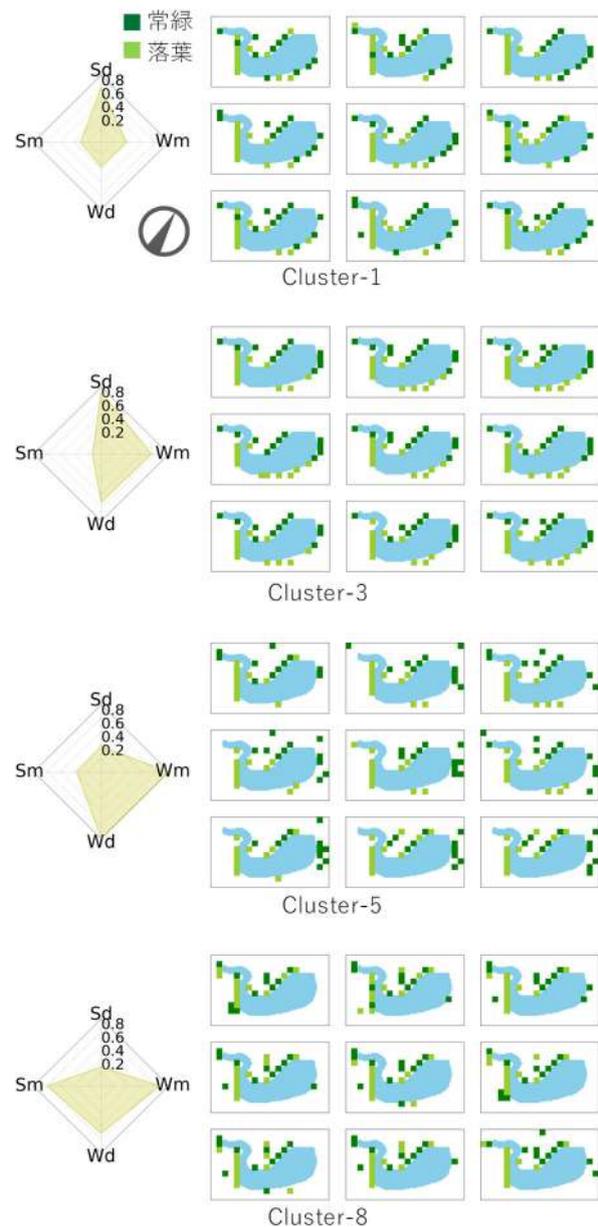


図 11. パレート解の各クラスターの樹木配置

Sdの重要度が小さい、生態池に近接する樹木が少ないという条件から、cluster-8のパレート解が適切であると判断された。cluster-8のパレート解を参考に、図12に示す最終案が作成された。一連の意思決定を円滑に実施するために、本手法のパレート解とそのクラスター化による整理が役立ったと考えられる。



図 12. 作成された緑地計画の最終案

## 5. おわりに

生態池の水生生物・植物の生育環境を改善することを目的とした樹木配置の最適化を実施した。得られたパレート解をクラスター化することで解の特徴を整理し、ランドスケープ設計における最終案の決定に利用する過程を示した。

その立地、街区、地域によって、ランドスケープ設計において解決したい課題や優先したい対策は大きく異なる。本報では、ランドスケープの重要な構成要素である樹木配置の最適化について、生態池を対象とした適用事例を示したが、人間の暑熱緩和のためにも利用可能である。また本技術は熱環境だけでなく、樹木による景観改善・風環境緩和等を加えた多面的な環境改善に展開可能であり、既にそのための検討を開始している。今後も本技術の開発を推進し、樹木のグリーンインフラとしての価値を最大限に活用した快適で魅力的なまちづくりに貢献していきたい。

### 【参考文献】

- (1) 建築環境・省エネルギー機構: "建築環境総合性能評価システム CASBEE HI 評価マニュアル 2017 年版," 2017.
- (2) 公園緑地・景観課, 国土交通省 都市局: "緑化地域制度導入の手引き," 2018.
- (3) 村上暁信, 佐藤理人, 原山祐太郎: "ヒートアイランド緩和効果からみた環境指標としての緑被率の有効性," 都市計画論文集, vol. 47, pp. 265-270, 2012.
- (4) 陳宏, 大岡龍三, 加藤信介: "対流・放射連成解析と遺伝的アルゴリズム (GA) を用いた屋外温熱環境の最適設計手法に関する研究: 屋外温熱環境設計のための樹木の最適配置," 日本建築学会環境系論文集, vol. 69, no. 576, pp. 65-71, 2004.
- (5) R. Ooka, H. Chen, S. Kato: "Study on optimum arrangement of trees for design of pleasant outdoor environment using multi-objective genetic algorithm and coupled simulation of convection, radiation and conduction," Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 96, pp. 1733-1748, 2008.
- (6) 藤原邦彦, 浅輪貴史, 清野友規: "暑熱適応策とヒートアイランド緩和策からみたオープンスペースにおける樹木配置の最適化と影響評価," 日本建築学会環境系論文集, vol. 85, no. 772, pp. 475-484, 2020.
- (7) 藤原邦彦, 浅輪貴史, 土屋直也: "ランドスケープデザインのための樹木配置最適化に関する研究 その 1 暑熱緩和のための樹木配置優先度マップの提案," 日本建築学会 2017 年度大会 学術講演梗概集 環境工学 I, pp. 717-718, 2017.
- (8) R. C. Technology: "SHERPA - An Efficient and Robust Optimization/Search Algorithm", 2008.

### 【備考】

本稿は、2020 年度日本建築学会大会にて発表済みの内容を含んでいる。