

熱放射環境と景観の両面に配慮した都市のオープンスペースにおける樹木配置の多目的最適化

MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION FOR TREE ARRANGEMENT IN URBAN OPEN SPACE CONSIDERING THERMAL RADIANT ENVIRONMENT AND SCENERY

藤原邦彦 — * 1 浅輪貴史 — * 2
清野友規 — * 3

Kunihiko FUJIWARA — * 1 Takashi ASAWA — * 2
Tomoki KIYONO — * 3

キーワード：
樹木配置, 多目的最適化, 熱放射環境, MRT, 緑視率, 天空率

Keywords:
Tree arrangement, Multi-objective optimization, Thermal radiant environment, MRT, Green view factor, Sky view factor

We propose a method for multi-objective optimization of tree arrangement in urban open space. The Pareto solutions of the optimization consider trade-offs between thermal radiant environment, green visibility, and sky visibility. The result captures the trade-offs reasonably and shows that even when the amount of trees is the same, tree arrangement can have nonnegligible impacts on mean radiant temperature, green visibility, and sky visibility. Furthermore, we show procedures for utilizing the Pareto solutions, which summarize the characteristics of the optimum tree arrangement or extract a reference solution for green space planning based on requirements from a planning scenario.

1. はじめに

夏季の都市における熱環境の改善策として、樹木による効果の活用が期待されている。暑熱適応策としての樹木の効果に着目すると、日射遮蔽による人体への熱放射の低減が支配的となることが報告されている^{例えは 1) ~ 3)}。熱放射環境の改善を目的とすれば、より多くの樹木を配置することが有効であるが、それには植樹のための初期費用や剪定・灌水等の維持管理費の増大といった制約が伴う。そのため、必要最小限の樹木により最大限の効果を得られるよう配置することが重要となる。

熱環境改善のための樹木配置の検討には、最適化を用いた手法が有効と考えられる。Chen et al.⁴⁾ は熱環境の数値解析と最適化手法を連携させることで樹木配置の最適解を得る手法を提案している。さらに、藤原ら⁵⁾ 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ている。

一方、緑地計画においては、景観などの熱放射環境以外の環境要因も考慮することが一般的であり、それにより熱放射環境改善とのトレードオフが生じることがある。熱放射環境以外の影響としては、視野における緑の比率(緑視率)の増加による景観への印象向上について多数の報告がある^{例えは 6) 7)}。しかし、景観の開放感に視野における天空の比率(以下、天空視率^{注 1)}) が寄与するとの報告^{例えは 8) 9)} があり、樹木による天空の遮蔽が開放感を減少させることが懸念される。熱放射環境の改善と緑視率の向上は同時に達成することが可能と考えられるが、それらと天空視率の向上にはトレードオフが生じる。緑地計画においては、そのトレードオフを考慮した多目的最適化によ

る検討が重要となる。なお、周囲に建物がなければ全ての樹木は天空への視線を遮蔽するため緑視率と天空視率は完全にトレードオフし、両者を最適化の目的に設定するのは不適切である。しかし、周囲に建物がある場合、建物への視線を遮蔽する樹木は天空への視線を遮蔽しないため、緑視率と天空視率が完全にはトレードオフしない。そのため、最適化により天空視率の減少を最小限に抑えつつ緑視率を増加させる(トレードオフを最小限にする) 樹木配置を導き出すことが可能と考えられる。

また、樹木配置の最適化を緑地計画に活用するためには、最適解から有用な情報を抽出することが重要である。熱放射環境・緑視率・天空視率といった 3 以上の目的関数を設定した多目的最適化を実施した場合、最適解が多次元のパレート解(互いに優劣のつけられない最適解の集合。詳細は 2 章にて説明) となり、解釈が困難になるためである。多次元のパレート解を理解しやすいよう整理する手法、さらに設計案作成時に参照する解を抽出する手法の検討が必要となる。

そこで本報告では、熱放射環境と景観のトレードオフを考慮した樹木配置の多目的最適化手法を提案し、それにより①実都市空間において熱放射環境・緑視率と天空視率のトレードオフを最小限にする最適解が得られるか、②同等の樹木量での配置の違いが熱放射環境と緑視率・天空視率にどの程度影響するか、の 2 点を確認することを目的とする。さらに、緑地計画における本提案手法の使用の一例として、設計要求水準のシナリオを想定した場合の計画手順を示す。

次章では提案する樹木配置の最適化問題の設定を示す。3 章では目的関数に設定した熱放射環境と景観に関する指標の計算方法を示す。4 章では最適化の結果を示すとともに、多次元のパレート解をクラス

¹⁾ 竹中工務店技術研究所 博士(工学)
(〒270-1352 印西市大塚1-5-1)

²⁾ 東京工業大学 准教授・博士(工学)

³⁾ 国立環境研究所 博士(工学)

¹⁾ Takenaka Research & Development Institute, Dr.Eng.

²⁾ Assoc. Prof., Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng.

³⁾ National Institute for Environmental Studies, Dr.Eng.

一化することで最適な樹木配置の特徴を示す。5章では要求水準のシナリオを設定することでパレート解から参照解を抽出し、それを基にした緑地計画のイメージ図を作成する。6章では結論と課題を示す。

2. 樹木配置の最適化問題

2.1 解析対象と計算領域

東京都心オフィス街の実在街区を基に設定した周囲に建物があるオープンスペースを対象とした（図1）。周囲に高さの異なる複数の建物があり、その日射遮蔽の影響を受ける点、一定の日照があり樹木の生育が見込める点から、都市のオープンスペースにおける緑地の題材として適切と考えた。144 m × 144 m の計算領域の中に 36 m × 40 m の樹木配置領域を、さらにその中に 3 か所の分散的な評価領域を設定した。評価領域は机・椅子等の什器が設置された滞在スペースを想定している。

2.2 設計変数

樹木配置を生成するモデルと設計変数を図2に示す。樹木は 4 m × 4 m × 4 m の樹木メッシュの集合として表現し、計 90 メッシュの各メッシュが 0:空、1:樹木のどちらにあたるかを設計変数とした。

2.3 目的関数

熱放射環境に着目した暑熱適応策の効果の指標として平均放射温度（Mean Radiant Temperature, MRT）を、景観を評価する指標として緑視率・天空視率を設定した。更に、緑地の初期コスト・維持管理コストの指標となる緑被率（樹木の量）を設定した。天空視率は人間にとっての天空の視認性を評価するために本報告で新たに設定した指標である。人間の標準的な体位の視線方向である水平方向¹⁰⁾に大きな重みを与えて天空の視認性を評価するものであり、水平面からみた天空部分の立体角投射率として算出される天空率とは異なる。算出方法の詳細は3.2節に示す。以上の指標を用い、本報告では下記のように目的関数を設定した。

- ① MRT を 3 つの評価領域・日中（8～16 時）で空間・時間平均した値（以下単に MRT）の最小化
- ② 緑視率を 3 つの評価領域で空間平均した値（以下単に緑視率）の最大化
- ③ 天空視率を 3 つの評価領域で空間平均した値（以下単に天空視率）の最大化
- ④ 樹木配置領域における緑被率（以下単に緑被率）の最小化

MRT の計算には、拡張アメダスの東京における 2007 年 7 月 24 日の気象条件²⁾（図3）を用いた。計算方法は後述する。

なお、本報告の目的関数の設定は緑地計画における普遍的な価値観ではなく、目的関数は緑地の与条件に応じて個別に設定されるべきものとしている。特定の建築ファサードやランドマークへの視線が加算対象となる場合も考えられるが、加算対象が置換されても本報告で提案する手法により計算可能である。

2.4 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。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4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'

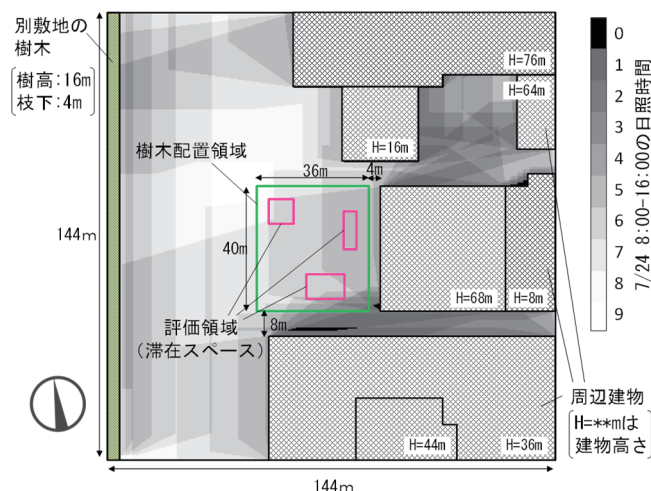


図1 計算対象と樹木配置領域・評価領域（評価領域の位置・寸法の詳細は図2参照。計算領域は三次元であり、高さは80m）

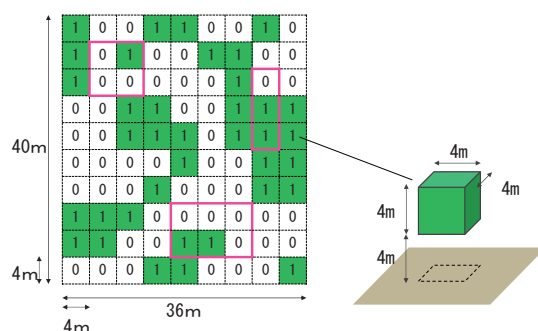


図2 樹木配置モデルと設計変数（1：樹木あり、0：樹木なし。色付きの枠線は評価領域の範囲）

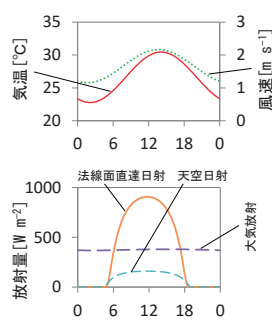


図3 気象条件

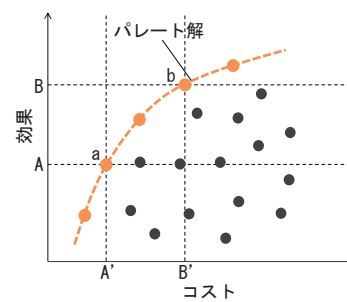


図4 パレート解の例

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。

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 SHERPA¹¹⁾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。

3. MRT と緑視率・天空視率の計算方法

本報告における MRT の計算手法は藤原ら⁵⁾と基本的に同一であり、詳細は当該文献を参照されたい。以下にその概要と本報告で新た

に検討した緑視率・天空視率の計算方法を示す。

3.1 MRT

本報告では計算領域内の三次元の空間形態を表現し、まず放射輸送と表面熱収支の計算により領域内の地物の表面温度を算出した。その結果を用い、MRTを計算した。以下に各過程の概要を示す。

空間形態の表現

計算領域は地面・建物・樹木の3要素で構成した。地面・建物は2m×2mの正方サーフェスマッシュ（地面・建物メッシュ）、樹木は2m×2m×2mの立方ボクセルメッシュ（樹木メッシュ）で表現した。

樹木・地面・建物の熱収支計算

樹木メッシュは葉面の三次元的な分布を多孔質のボクセルとして表現している。そのため、多孔質の表面である葉面を想定して熱収支をモデル化³⁾した。樹木メッシュにおける葉面の熱収支を式(1) (2) (3)に示す。微気候評価において葉の蓄熱量 G の影響は小さいことから、0であるとした。対流熱伝達率 α_c には浅輪ら¹²⁾のケヤキを対象とした実験による式を適用した。

$$S_{abs} + L_{abs} = LE + H + L_{oe} + G \quad (1)$$

$$H = \alpha_c(T_s - T_a) \quad (2)$$

$$L_{oe} = \sigma \epsilon T_s^4 \quad (3)$$

S_{abs} : 吸収日射量[Wm⁻²], L_{abs} : 吸収長波長放射量[Wm⁻²],

LE : 潜熱輸送量[Wm⁻²], H : 顕熱輸送量[Wm⁻²],

L_{oe} : 長波長放射射出量[Wm⁻²], G : 蓄熱量[Wm⁻²],

α_c : 対流熱伝達率[Wm⁻²K⁻¹], T_s : 表面温度[K], T_a : 気温[K],

σ : 長波長放射率[-], ϵ : ステファンボルツマン定数[Wm⁻²K⁻⁴]

各建物・地面メッシュにおいても同様に式(1) (2) (3)により熱収支を計算した。建物・地面では表面蒸発はないものとし、潜熱輸送量 LE は0とした。蓄熱量 G は一次元非定常熱伝導計算により算出した。建物メッシュには普通コンクリートの熱物性を設定し、開口部のない一様な壁面であるとした。樹木メッシュと建物・地面メッシュに共通して、顕熱輸送量 H の計算には図3の気温と風速を用い、計算の各時間ステップにおいて全メッシュで一様とした。

放射輸送の計算

本報告では各要素（樹木・建物・地面）への直達日射はレイトレーシングにより算出し、他の要素からの日射・長波長放射の吸収量は形態係数を用いて算出した。天空日射・大気放射は天空率を用いて算出した。形態係数・天空率はレイトレーシングにより算出した。日射吸収率は樹木: 0.48、建物: 0.80、地面: 0.85とし、3回反射までを計算した。樹木メッシュ内の放射輸送にはMonsi & Saeki¹³⁾に倣い、Beer-Lambert 則に基づく式(4)を採用した。葉面積密度 LAD は1.5 m⁻¹とした。

$$T = \exp(-kLADl) \quad (4)$$

T : 経路長 l における透過率[-], k : 消散係数(= 0.60)[-],

LAD : 葉面積密度(= 1.5)[m⁻¹], l : 葉群内の経路長[m]

蒸散速度の計算

樹木メッシュの蒸散速度と潜熱輸送量 LE はPenman-Monteith法により算出した。気孔コンダクタンスはBMFモデル^{14) 15)}により算出し、境界層コンダクタンスは対流熱伝達率からルイス則により換算した。BMFモデルの計算に用いる光合成有効放射量には前述の放射輸送計算の結果を用いた。BMFモデルのパラメータは浅輪ら¹²⁾、押尾ら¹⁶⁾の実測結果によりフィッティングした。

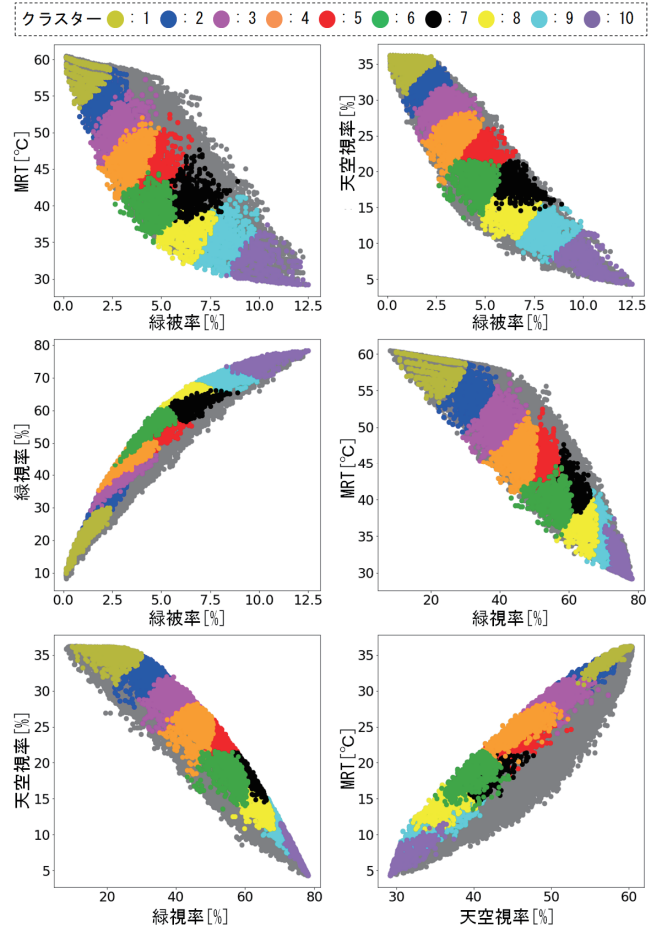


図5 全ての解の目的関数の算出結果／パレート解のクラスタ化（灰色プロットが非パレート解、色付きプロットがパレート解）

MRTの計算

中大窪・梅干野¹⁷⁾の研究を参考に、計算点に仮定の微小立方体を置き、その各面の正味放射量を基にMRTを算出した。座位での滞在を想定し、計算高さは1.0mとした。

3.2 緑視率と天空視率

緑視率と天空視率はレイトレーシングにより算出した。座位の想定高さ1.5mの点から天球方向に探索線を射出し、空に抜ける探索線の比率を天空視率、樹木メッシュに入射する探索線の比率を緑視率とした。探索線の射出を天球方向に限定しているのは、本報告の条件では算出高さ1.5mから下向きに射出した探索線は全て地面もしくは建物に衝突し、天空視率、緑視率の結果には影響しないためである。なお、滞在者の視線は全方位に一律な確率で生じると仮定した。注視傾向や有効視野に関する既往の知見^{10) 18)}に基づけば、人の視覚による認知が水平方向に偏重していると考えられることから、水平に近い方向のときに探索線の密度が大きくなるよう、式(5)により立体角あたりの探索線密度を算出した。

$$D_{ray} = a \cos \theta \quad (5)$$

D_{ray} : 探索線密度[sr⁻¹], a : 定数[-], θ : 探索線と水平面のなす角[rad]

本報告では θ の余弦により偏重を仮定したが、この設定は最適化の結果に大きな影響を及ぼすと考えられる。また、動線やベンチ等の什器の設置方向といった計画の条件によっては注視方向が限定されることもあり、方位別の重み付けが必要となることも想定される。都市

空間における人間の視線の遷移や周辺視野の傾向を考慮したより詳細な検討は本報告以後の課題とする。

4. 樹木配置の最適解

ここでは前述の方法で計算されたパレート解を示すとともに、パレート解をクラスター化することで最適な樹木配置の特徴を整理する。

4.1 樹木配置による MRT・緑視率・天空視率への影響

最適化の過程で得られた全ての解の MRT・緑視率・天空視率・緑被率の算出結果とパレート解を図 5 に示す。解の傾向を概率的に把握するため、パレート解を K-means 法によりクラスター化した(K=10)。解の合計数は 100000、パレート解の合計数は 6444 となった。目的関数の値は、MRT が 29.1~60.4℃、緑視率が 7~82%、天空視率が 4~42%であった。同等の樹木量(緑被率)であっても、配置によって MRT は最大 23℃、緑視率は最大 20%pt、天空視率は最大 18%pt の差が生じている。

Xi et al.¹⁹⁾ の MRT と温冷感の主観申告値である Thermal sensation vote(TSV) の関係に関する実験結果によると、23℃の MRT 上昇は TSV における 2 スコアの上昇に相当する。TSV=0 が中立、TSV>1.5 が暑い側の不快域であることから、2 スコアの上昇は顕著な変化と言える。遑ら⁸⁾ は天空の立体角比が 12%pt 減少(36%→24%)することで圧迫感への不満が顕著に増加することを示している。Aoki⁶⁾ は緑視率が 30%を超えると街路景観に好印象を抱きやすいことを示している。遑ら⁸⁾ や Aoki⁶⁾ と同等の指標ではないが、本報告の天空視率・緑視率の 20%程度の変化が顕著な影響を及ぼし得ることは推測できる。以上から、樹木配置より評価領域の熱環境と景観に無視できない影響を及ぼしうることが示された。

MRT と緑視率、緑視率と天空視率は負の相関を示し、MRT と天空視率は正の相関を示した。MRT と緑視率の負の相関は、評価領域の近くに樹木が多い場合には緑視率が向上し、緑陰の増加により MRT は減少することによる。MRT と天空視率の正の相関、緑視率と天空視率の負の相関は、前述のように評価領域の周囲に樹木が多い場合に MRT が減少、緑視率が増加し、樹木の遮蔽により天空視率が減少することによる。天空視率と緑視率の関係(図 5 下段左)は完全なトレードオフにはなっておらず、同等な緑視率であっても天空視率には最大で 10%pt 程度の差が生じている。以上から、本報告の提案手法により実際に熱放射環境改善・緑視率向上と天空視率のトレードオフを最小限とするパレート解が得られることが示された。

4.2 最適解の樹木配置の特徴

図 6 にパレート解の樹木配置をクラスターごとに示し、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した。各クラスターで MRT・緑視率の達成度と天空視率の達成度の増減は相反しており、これは前述の相関関係によるものである。MRT・緑視率を重視したクラスターは評価領域の直上に樹木が多く、天空視率を重視したクラスターは評価領域の直上の樹木が少ない。これらは直上の樹木が日射や視線を遮蔽しやすいためであり、直感的に予測可能な傾向と考えられる。クラスター1 から 10 を順に観察すると、東南の周縁部にまず樹木が配置され、クラスター番号が進むにつれてその付近の樹木が増加していくことが確認できる。さらに、クラスター3、4からは北西に飛び地的な樹木の配置が生じ、以降は徐々に全体が樹木に覆われていくことが確認できる。この傾向は、本報告の敷地条件に

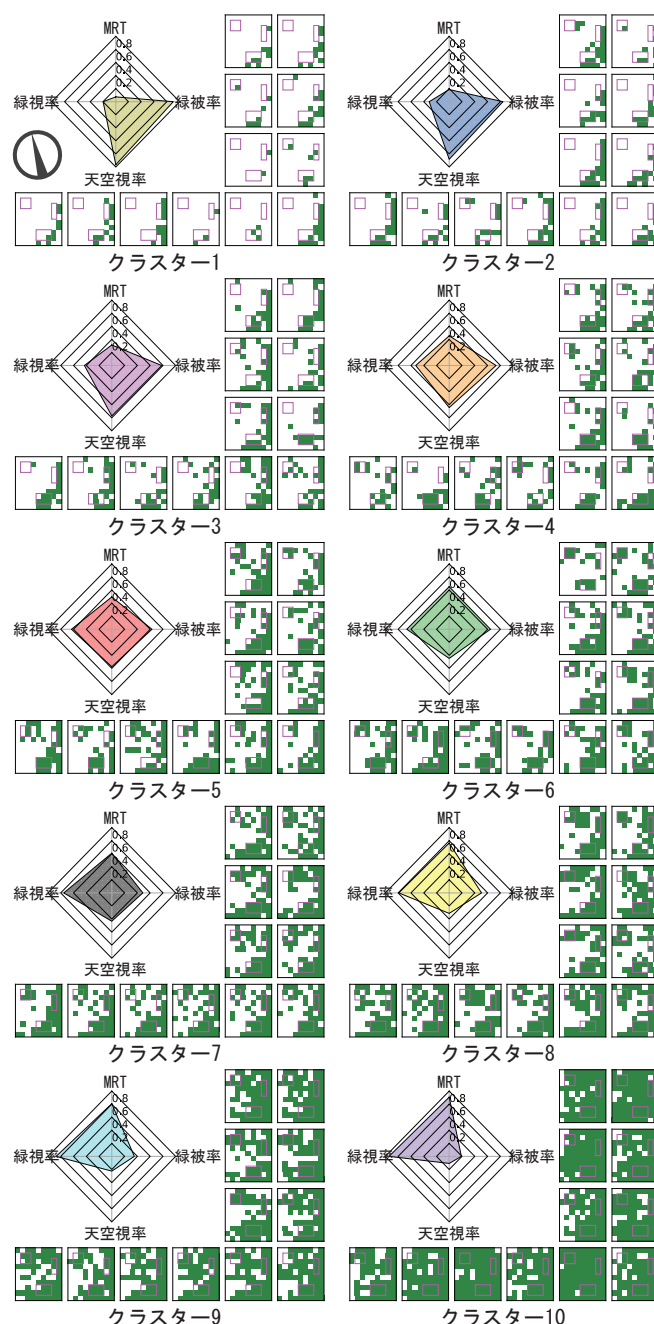


図6 パレート解のクラスター別の樹木配置(レーダーチャートは各目的の達成度。達成度は各目的関数を、最大化であれば全パレート解における最大値が1、最小値が0となるように、最小化であれば全パレート解における最小値が1、最大値が0となるように正規化した値。レーダーチャートの色は図5の凡例に合致させた)

においては評価領域の MRT の低減や緑視率の増大、天空視率の増大のために東南の樹木が有効であることを示している。東南の樹木は各評価領域から建物への視線を遮蔽するため天空視率を顕著に減少させず、かつ南側の評価領域への日射を遮蔽することで MRT を低減できるためと考えられる。また、東周縁部の樹木はさらに西側建物への日射遮蔽により表面温度上昇を抑制し、MRT の低減に寄与していると推測される。北西の評価領域周辺は相対的に優先度が低いため、東南の評価領域周辺がある程度カバーされた後に樹木が配置されてい

るものと考えられる。なお、東南の樹木が有効であることは微気候学等の一定の素養があれば事前に予測できるかもしれないが、東南周縁と北西側にどのようなバランスで樹木を配置すべきかを最適化を用いずに予測するのは困難である。

5. 最適解に基づく緑地計画フローの例

ここでは要求水準シナリオによりパレート解から参照解を抽出し、それに基づいた設計案のイメージ図を作成する。それにより、樹木配置最適化を用いた緑地計画フローの例を示す。

5.1 最適解の絞り込み

パレート解から緑地計画の設計案を作成するためには、まず使用する解を絞り込む必要がある。そのためには、緑地計画の条件に応じて各目的関数の要求水準を設定し、それを満たす解を抽出することが有効である。ここでは表 1 に示す要求水準シナリオを設定したところ、パレート解の中から条件を満たす解が複数抽出された（結果は省略）。要求水準の設定により解が一つに絞り込めない場合は、さらに何らかの条件を設定する必要がある。今回は抽出された解の中から、最も MRT の値が小さい解を選定した（図 7 左）。選定されたのは、図 5、6 のクラスター6に属する解であった。なお、要求水準シナリオを事前に設定し、それを満たす範囲に絞って最適化することも可能である。どの時点で要求水準シナリオを設定するかは緑化計画のプロジェクトマネジメントの方法による。

5.2 最適解に基づく設計案の作成

選定した解を下敷きにして樹木配置計画を作成する（図 7 右）。なお、ここで樹木配置モデルが設定していた 4 m × 4 m × 4 m、枝下高さ 4 m の樹形から大きく逸脱する樹木を配置することは望ましくない。枝下高さや樹冠幅が大きく異なれば、日射や視線の遮蔽（吸収）のされ方が大きく異なり、最適解の性能が担保されないためである。次に図 7 の樹木配置に草本等の植栽、什器や照明等のその他の要素を追加することで、図 8 に示す最終的な設計案を作成する。作成された設計案は、パレート解を基に作成したものであるため、以下に列挙するように各目的関数が考慮されたものとなっている。

- ・ 各滞在スペース直上には樹木を配置して MRT 低減、緑視率増加
- ・ 背後に建物がある南東側には樹木を集中的に配置し、天空視率を低下させずに MRT 低減、緑視率増加
- ・ 建物がない西側には樹木を置かず天空視率低下を抑制

なお、微気候学に関する一定の素養があれば、最適解において樹木が集中する部位がどの辺りか、といった概略の予想は可能かもしれないが、樹木を配置すべき場所の優先順位や配置と各目的関数の対応を事前に予測するのは困難である。本報告の手法は、その点を定量的に示すことで各目的関数の要求水準シナリオと対照させることが可能となり、設計実務における意思決定に役立つと考えられる。さらに、ある程度事前に予測ができる樹木配置であったとしても、定量的な最適解として提示することで、プロジェクト関係者間の円滑な合意形成に役立つと考えられる。また、微気候学に関する素養が十分でない設計者は概要的な予想すら困難であると予想されるため、本報告の手法は微気候学の専門家が携わることのないプロジェクトにおいて性能を担保する方法として価値があると考えられる。

本章で提示した事例はあくまで一つの活用例であり、本報告の手法の有効な使用法は緑地計画の条件によって異なる。

表 1 緑地計画の要求水準シナリオ

MRT	: 夏季にイベント利用したいので 42℃以下
緑視率	: 緑を十分に感じられる場所にしたいので 40%以上
天空視率	: ある程度の開放感は確保したいので 20%以上
緑被率	: 植樹に配分できる予算の都合により 30%以下



図 7 選定した解に基づく樹木配置計画（汎用レンダリングソフトにより作成したイメージ図）

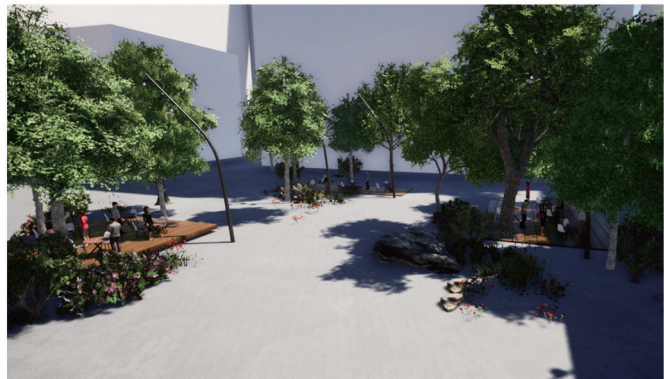


図 8 設計案の作成（汎用レンダリングソフトにより作成したイメージ図。追加した草本等の植栽・什器等のその他の要素の位置は最適化の結果からではなく、恣意的に決定した）

6. まとめ

本報告では、熱放射環境と景観のトレードオフを考慮し、都市のオープンスペースにおける樹木配置を多目的最適化する手法を提案した。さらに、本提案手法の緑地計画への利用の一例として、得られた多次元のパレート解から最適な樹木配置の特徴を整理し、要求水準シナリオにより抽出した解を基に緑地計画の設計案を作成する手順を示した。その結果、提案した計算手法によって実都市空間で熱放射環境・緑視率と天空視率のトレードオフを最小限に抑える最適解が得られること、同等の樹木の量（緑被率）でも樹木の配置により熱放射環境と天空視率、緑視率に無視できない影響を及ぼしうることを確認した。

なお、本報告では天空視率・緑視率の計算の際に水平面と視線のなす角の余弦により探索線を重みづけしたが、この仮定は最適化の結果に大きな影響を及ぼす。通過・滞在・イベントといった対象空間の用途やそれによる人間の視線の遷移・有効視野への影響を考慮したより詳細な検討は今後の課題である。また、5 章にて設定した要求水準のシナリオはあくまで一例であり、閾値の設定は対象空間の用途や敷地条件、設計コンセプト、さらには目的関数の変化に対する人間の感度を考慮して決定する必要がある。なお、本報告では熱放射環境と景観への影響を考慮したが、樹木による効果は防風・延焼防止・生物多様性保全等、多岐に渡る。それらの考慮も今後の課題である。

注

- 注1) 本報告で定義する指標であり、水平面からみた天空部分の立体角投射率として算出される天空率とは異なるものである。概念については2.3節にて、定義・算出方法については3.2節にてより詳細に説明している。文献(8)(9)で用いているのは本報告の天空視率と同一の指標ではないが、視野における天空の比率を議論している点では共通している。
- 注2) データの細かな時系列変動による最適解への影響を抑えるため、気温、風速は正弦曲線でフィッティングした。太陽高度、太陽位置は時刻毎に緯度経度から算出した値を、直達日射量はBouguerの式、天空日射量はBerlageの式、大気放射量はBruntの式による算出値を用いた。
- 注3) 樹木メッシュのボックス内には葉面が一樣に分布している状態を想定した。葉群が空間内に一樣に分布する場合、ある方向から侵入した光が空隙を通過する確率はBeer則で表せる¹³⁾。本報告ではそれによりメッシュ内の葉面の平均的な放射収支、さらには熱収支を計算した。

参考文献

- Hagishima, A., Katayama, T., Hayashi, T. and Tanimoto, J.: Numerical analysis on cooling effect of a row of trees in an urban canyon: Prediction of thermal comfort on street with roadside trees part2, Journal of Architecture and Planning (Transactions of AIJ), vol. 64, no. 525, pp. 83-90, 1999 (in Japanese)
- 萩島理, 片山忠久, 林徹夫, 谷本潤: 数値計算による街路樹の暑熱緩和効果の評価: 街路樹のある街路の温熱環境予測 その2, 日本建築学会計画系論文集, vol. 64, no. 525, pp. 83-90, 1999.
- Misaka, I., Ishimaru, Y., Horiguchi, Y. and Narita, K.: Study on the Effective Utilization of Outdoor Space by Mitigating Thermal Environment, Journal of Environmental Information Science, Vol.31, pp.131-136, 2017 (in Japanese)
- 三坂育正, 石丸泰, 堀口恭代, 成田健一: 暑熱環境対策下における人の空間利用に関する研究, 環境情報科学 学術研究論文集, vol. 31, p. 131-136, 2017.
- Moriyama, M., Miyazaki, H., Yoshida, A., Takebayashi, H., Ashie, Y., Narita, K., Yoda, H., and Doi, T.: Observational study on comparison of thermal environments in some types of urban blocks, AIJ Journal of Technology and Design, Vol.8, No.15, pp.199-202, 2002.5 (in Japanese)
- 森山正和, 宮崎ひろ志, 吉田篤正, 竹林英樹, 足永靖信, 成田健一, 依田浩敏, 土井正一: 市街地形態の異なる街区の温熱環境比較に関する実測研究, 日本建築学会技術報告集, vol. 8, p. 199-202, 2002.5
- Chen, H., Ooka, R. and Kato, S.: Study on optimum design method for pleasant outdoor thermal environment using genetic algorithms (GA) and coupled simulation of convection, radiation and conduction, Building and Environment, vol. 43, p. 18-30, 2008.
- Fujiwara, K., Asawa, T. and Kiyono, T.: Optimization and evaluation of tree arrangement in open space for urban heat adaptation and heat island mitigation, Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ), vol. 85, no. 772, pp. 475-484, 2020. (in Japanese)
- 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.
- Aoki, Y.: Evaluation methods for landscapes with greenery, Landscape Research, vol. 16, p. 3-6, 1991.
- Asgarzadeh, M., Koga, T., Hirate, K., Farvid, M. and Lusk, A.: Investigating oppressiveness and spaciousness in relation to building, trees, sky and ground surface: A study in Tokyo, Landscape and Urban Planning, vol. 131, p. 36-41, 2014.
- Byun, K., Yoshizawa, N., Munakata, J., Koga, T. and Hirate, K.: A study of allowable value of the sense of physical oppression and the sense of openness by solid angle: A study on the sense of physical oppression and the sense of openness created in urban spaces part 3—, Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ), vol. 78, p. 437-444, 2013. (in Japanese)
- 邊敬花, 吉澤望, 宗方淳, 古賀誉章, 平手小太郎: 立体角による圧迫感と開放感の基準値の検討 一都市空間における圧迫感と開放感に関する研究 その3—, 日本建築学会環境系論文集, vol. 78, p. 437-444, 2013.
- Nishio, S. and Ito, F.: The effect of sky factor and the change on impression of townscape: with the experiment for evaluation impression while walking, Journal of Architecture and Planning (Transactions of AIJ), vol. 80, no. 710, pp. 907-914, 2015. (in Japanese)
- 西尾尚子, 伊藤史子: 天空率およびその変化が街並みの印象に及ぼす影響について 歩行移動時の印象評価実験をもとに, 日本建築学会計画系論文集, vol. 80, no. 710, pp. 907-914, 2015.
- Chibana, K.: A study on the spatial abilities by eye fixation behavior, Journal of Architecture and Planning (Transactions of AIJ), vol. 64, no. 520, pp. 159-164, 1999. (in Japanese)
- 知花弘吉, 歩行者の注視傾向からみた空間把握に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, vol. 64, no. 520, pp. 159-164, 1999.
- Red Cedar Technology: SHERPA - An Efficient and Robust Optimization/Search Algorithm, 2008.
- Asawa, T., Fujiwara, K., Hoyano, A. and Shimizu, K.: Convective heat transfer coefficient of crown of zelkova serrata, Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ), vol. 81, no. 720, pp. 235-245, 2016. (in Japanese)
- 浅輪貴史, 藤原邦彦, 梅干野晃, 清水克哉: ケヤキ樹冠の対流熱伝達率, 日本建築学会環境系論文集, vol. 81, no. 720, pp. 235-245, 2016.
- Monsi, M., Saeki, T.: Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion, Japanese Journal of Botany 14, pp.22-52, 1953
- Buckley, T. N., Turnbull, T. L. and Adams, M. A.: Simple models for stomatal conductance derived from a process model: cross-validation against sap flux data, Plant, Cell and Environment, vol. 35, no. 9, pp. 1647-1662, 2012.
- Kiyono, T.: Quantification and numerical modeling of tree transpiration characteristics for predicting urban thermal environment, Doctor thesis, 2017. (in Japanese)
- 清野友規: 都市熱環境予測のための樹木の蒸散特性の計量化と数値モデル化, 博士論文, 2017.
- Oshio, H. and Asawa, T.: Verifying the Accuracy of the Leaf Area Density Distribution of an Individual Tree Derived from Terrestrial Laser Scanning while Considering the Penetration of Beams into the Crown and the Influence of Wind, Journal of The Remote Sensing Society of Japan, vol. 36, p. 545-554, 2016. (in Japanese)
- 押尾晴樹, 浅輪貴史: 地上型レーザースキャナを用いた単木の葉面積密度分布推定におけるビームの入射状況と風の影響を考慮した精度検証, 日本リモートセンシング学会誌, vol. 36, p. 545-554, 2016.
- Nakaohkubo, K. and Hoyano, A.: Numerical analysis on radiant environment of outdoor living space considering the influence of spatial form and material, Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ), vol. 73, p. 957-964, 2008. (in Japanese)
- 中大窪千晶, 梅干野晃: 屋外生活空間における空間形態や構成材料の違いを考慮した放射環境の数値解析, 日本建築学会環境系論文集, vol. 73, p. 957-964, 2008.
- Miura, T.: Visual Attention and Traffic Safety: Focusing on Useful Field of View, Journal of The Illuminating Engineering Institute of Japan, vol. 82, no. 3, pp. 180-184, 1998. (in Japanese)
- 三浦利章: 視覚的注意と安全性: 有効視野を中心として, 照明学会誌, vol. 82, no. 3, pp. 180-184, 1998.
- Xi, T., Li, Q., Mochida, A. and Meng, Q.: Study on the outdoor thermal environment and thermal comfort around campus clusters in subtropical urban areas, Building and Environment, vol. 52, p. 162-170, 2012.

[2021年6月2日原稿受理 2021年7月28日採用決定]