

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

OPTIMIZATION AND EVALUATION OF TREE ARRANGEMENT IN OPEN SPACE FOR URBAN HEAT ADAPTATION AND HEAT ISLAND MITIGATION

藤原邦彦^{*1}, 浅輪貴史^{*2}, 清野友規^{*3}

Kunihiko FUJIWARA, Takashi ASAWA and Tomoki KIYONO

We conducted optimization of tree arrangement to reduce the mean radiant temperature (MRT) and to increase transpiration, targeting an open space with no buildings around it and sunny summer weather. Comparisons between effective and ineffective arrangements in the solutions showed that the daily average MRT differed up to 7.5°C and the daily transpiration rate differed up to 20%, even when the same amount of trees were used. The solutions showed that distributed arrangements are effective for both reducing MRT and increasing transpiration, and that separation between trees in the east-west direction is more effective than separation in the north-south direction.

Keywords : Tree arrangement, Optimization, Heat adaptation, Heat island mitigation, MRT, Transpiration rate

樹木配置, 最適化, 暑熱適応策, ヒートアイランド緩和策, MRT, 蒸散量

1. はじめに

夏季における都市の熱環境の改善策として、樹木の日射遮蔽や蒸散による効果の活用が期待されている。樹木の効果について議論する上では、ヒートアイランド現象自体を抑制する「ヒートアイランド緩和策」とヒートアイランド現象等によって生じる暑熱ストレスを軽減する「暑熱適応策」の二つの観点が必要となる¹⁾。樹木は蒸散によるヒートアイランド緩和、日射遮蔽や熱放射環境改善による暑熱適応の両面で効果を有する手法であり、都市におけるオープンスペースの緑化を考える上では、それぞれの効果を最大限活用できるような樹木配置計画が望ましい。

暑熱適応とヒートアイランド緩和を目的とすれば、緑被率を高めてより多くの樹木を置くことが有効と考えられるが、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。しかし、筆者の知る限り、樹木配置の熱環境への影響について議論し、緑地計画の際に参照できる有効な配置方法についての知見を示している既往研究（例えば、成田ら²⁾）は非常に少ない。

樹木配置の熱環境への影響に関する研究例として、ヒートアイランド緩和に着目した成田ら²⁾のオアシス効果に関する実験があり、樹木の密集、分散による蒸散量への影響を検討している。

一方、陳ら³⁾は熱環境の数値解析と最適化手法を連携させ、暑熱適応策の効果の最大化を目的とした樹木配置の最適化を実施してい

る。陳らの手法を効果の最大化／最小化それぞれを目的に実施し、最適解の配置を観察することで、配置がどの程度効果に影響するか、どのような配置が効果の向上のために適切／不適切であるかについての知見が得られると考えられる。しかし、陳らは樹木配置を最適化する手法の提案に主眼を置いており、配置による影響の程度や、適切／不適切な配置の特徴については議論していない。また、陳らは暑熱適応策の効果の評価する目的関数として SET*（標準新有効温度）を用いている。SET*は人の暑熱ストレスに影響する気温、湿度、放射、気流の4要素を考慮しており、暑熱適応策の効果の総合的な評価が可能な指標である。しかし、最適化に適用するにあたって下記の課題がある。

1. 熱、湿気、放射輸送の連成解析が必要であるため計算コストが大きく、設計実務の計算リソース、時間の制約下では最適化を収束させるために十分なケース数を計算するのが難しい
2. CFDの境界条件となる風向・風速の代表性や、メッシュの分割設定、使用するモデル・スキームに依存して設計案の評価が大きく変わり得ることから、解析により評価された効果と実環境における効果が乖離してしまう恐れがある

このように、SET*は最適化に適用するのが困難な指標であると言える。そのため、暑熱適応を目的とした樹木配置の最適化の観点において有効な評価指標を選定することが重要となる。

一方、MRT（平均放射温度）は暑熱適応を目的とした樹木配置の最適化に適した評価指標であると考えられる。萩島ら⁴⁾は街路樹周

^{*1} 竹中工務店技術研究所 修士(工学)

^{*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)(元東京工業大学 研究員)

Takenaka Research & Development Institute, M.Eng.

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

National Institute for Environmental Studies, Dr.Eng.

辺の実測により得られた SET*と MRT を比較し、樹木の熱環境改善効果として MRT 低減の効果が支配的であることを示している。他にも複数の研究（例えば三坂ら⁸⁾、森山ら⁹⁾、幡谷ら⁷⁾）が実測や数値解析を基に、夏季の屋外における暑熱ストレスに対して MRT の影響が支配的であることを示している。また、MRT は一般的に放射輸送計算と熱伝導計算のみにより算出可能であるため計算コストが比較的小さく、境界条件やメッシュの分割方法、モデル・スキームによる計算結果への影響も SET*と比較して格段に小さいと言える。そのため、屋外熱環境の予測評価指標として MRT を採用している既往研究は多い（例えば Park et al.⁸⁾、Thorsson et al.⁹⁾等）。

そこで本研究では、暑熱適応策としての効果を評価する指標として夏季の MRT を採用し、適切な樹木配置を得るための MRT の最小化を目的関数とした樹木配置の最適化、反対に不適切な配置を得るための MRT の最大化を目的関数とした最適化を実施する。さらに比較のためヒートアイランド緩和に着目し、蒸散量の最大化／最小化それぞれを目的関数とした最適化を実施する。以上により、①配置が暑熱適応策・ヒートアイランド緩和策の効果にどの程度影響するのか、②どのような配置が暑熱適応策・ヒートアイランド緩和策のために適切／不適切であるのかを、定量的な分析結果を基に示すことを目的とする。

なお、都市における樹木は主に街路樹、もしくはオープンスペースの樹木として存在している。オープンスペースにおける樹木は、一次的に配置される街路樹と比較して配置の自由度が高く、その分配による熱環境への影響が大きいことが推測される。そのため、本研究では街路樹ではなく都市のオープンスペースにおける樹木配置を対象とする。また、実際のオープンスペースにおける緑地計画では樹形や樹高の異なる樹木の三次元的な配置を考慮する必要があるが、本研究ではその基礎的な検討のため、一様な樹高、樹形を設定し、樹木の二次元配置のみを考えた。また、本研究におけるヒートアイランド緩和は潜熱輸送量の増加に伴う顕熱輸送量の減少を指し、夜間の放射冷却による影響は議論の対象としないこととした。

2. 樹木配置の最適化手法

2. 1. 最適化問題の設定

2. 1. 1. 解析対象

周囲に建物のないオープンスペースを対象とし、計算領域内に最適化の際に樹木が配置される樹木配置領域(tree arrangement area)と MRT や蒸散量を評価する評価領域(evaluation area)を設定した (Fig.1)。樹木配置領域は 36m×36m、評価領域は 12m×12m とした。ここで評価領域を樹木配置領域よりも小さくした理由については 2.1.3 にて説明する。

なお、都市のオープンスペースの多くは周囲の建物による日射遮蔽の影響を受けている。緑地計画においてはその影響を考慮した樹木配置の検討が必要となるが、本研究ではそのための基礎的な知見を得るため、周囲に建物がない条件で最適化を実施した^{注1)}。

2. 1. 2. 目的関数

本研究では、暑熱適応策の効果を評価する指標として MRT を、ヒートアイランド緩和策の効果を評価する指標として蒸散量^{注2)}を、樹木の量を評価する指標として緑被率（樹木の本数）を用いた。樹木の量を評価したのは、植樹等による初期コストや剪定や灌水等に

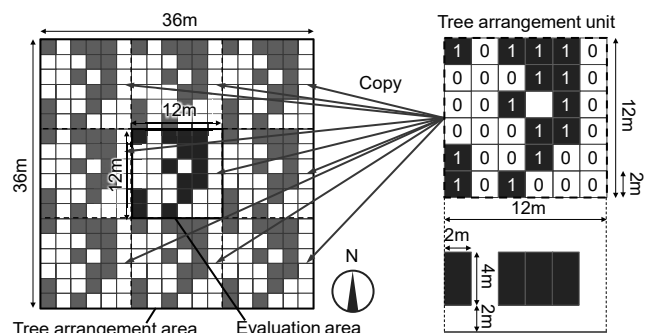


Fig.1 Tree arrangement area, evaluation area, tree arrangement unit and design variables

よる維持管理コストの目安とするためである。本研究では、得られる効果が同等であれば、樹木の量が少なく、低コストの樹木配置がより適切と考えた。最適解の特徴を比較するため、暑熱適応策のための最適化、ヒートアイランド緩和策のための最適化は別々に実施した。樹木の効果を活用する上で適切な配置と不適切な配置を明らかにするため、下記の①～④に示す目的関数の組み合わせを用いた。

暑熱適応のための樹木配置最適化

- ① 評価領域における MRT の日中（8-16 時）の平均値^{注3)}（以降単に MRT と表記）の最小化^{注4)}、樹木配置領域の緑被率（以降単に緑被率と表記）の最小化の二つを目的関数とする
 - ② MRT の最大化、緑被率の最大化の二つを目的関数とする
- #### ヒートアイランド緩和のための樹木配置最適化
- ③ 評価領域における樹木からの日蒸散量（以下単に蒸散量と表記）の最大化、緑被率の最小化の二つを目的関数とする
 - ④ 蒸散量の最小化、緑被率の最大化の二つを目的関数とする

①③の最適化で得られる解は最小限のコストで最大限の効果を得られる適切な配置、②④の最適化で得られる解は反対に最大限のコストを投じて最小限の効果しか得られない不適切な配置となる。

2. 1. 3. 樹木配置モデルと設計変数

樹木配置モデルと設計変数について Fig.1 に示す。樹木配置は 2m×2m×4m のボックスの集合で表現した。6×6 の計 36 ボックスで一つの樹木配置ユニット(tree arrangement unit)を構成し、各ボックスが樹木(1)であるか空(0)であるかを設計変数とした。そのため樹木配置ユニットの設計変数は計 36 となった。なお、樹木配置ユニットは 12m×12m で評価領域と同サイズである。この樹木配置ユニットを評価領域とその周囲を含む樹木配置領域に複製して配置し、樹木配置モデルの全体を構成した。

ここで評価領域を樹木配置領域よりも小さく設定し、樹木を周期的に配置しているのは、密集・分散といった樹木同士の位置関係による影響のみを最適解に反映するためである。以下にその詳細を説明する。評価領域を樹木配置領域と同じ位置、大きさに設定する非周期配置とした場合、評価領域の端部の樹木の陰の一部は評価領域外に形成され (Fig.2 a, b)、MRT 低減への寄与は中央の樹木と比較して小さくなる。このように非周期配置とした場合は樹木と評価領域の位置関係の影響により MRT の評価が異なり、最適解の配置には中央に樹木が集まる傾向が生じると推測される^{注5)}。一方で樹木を

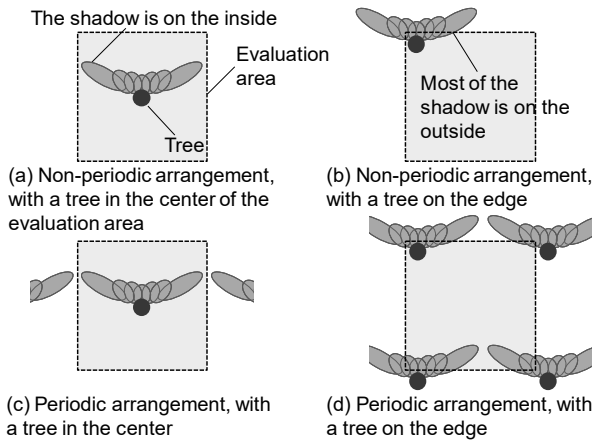


Fig.2 Comparison between periodic and non-periodic arrangements of trees

周期配置とした場合、中央の樹木と端部の樹木が評価領域内につくる陰はそれぞれ同等面積となるため、MRT の低減は同等に評価される (Fig.2 c, d)。そのため、最適解の配置には樹木と評価領域の位置関係による影響は生じず、樹木同士の位置関係による影響のみが反映されと考えられる。

2. 1. 4. 気象条件

MRT と蒸散量の計算には典型的な夏季の快晴日であった東京(北緯 35 度 41.4 分、東経 139 度 45.8 分)における 2007 年 7 月 24 日の気象条件を用いた。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、湿度、風速には拡張アメダス気象データ^{注6)}の時別値を正弦曲線 (sine curve) でフィッティングした値を用いた (Fig.3)。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^{注7)}、天空日射量は Berlage の式^{注7)}、大気放射量は Brunt の式^{注7)}による算出値を用いた。

2. 2. 最適化手法

本研究では樹木配置が効果にどの程度影響するか、どのような配置が効果の向上のために適切／不適切であるかを定量的に示すため、効果を最大化／最小化する配置を網羅的、効率的に探索可能な最適化手法^{注8)}を用いた。以下に、用いた最適化手法の詳細を示す。

2. 2. 1. 多目的最適化とパレート解

本研究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はトレードオフの関係にあるため、最適解は単一の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(Pareto solutions)として導出される。Fig.4 にその例として、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。パレート解の一要素である解 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 を採用し、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。

2. 2. 2. 最適化のアルゴリズム

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 SHERPA¹⁸⁾19)

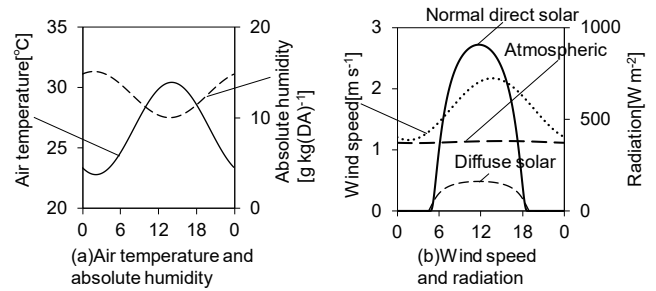


Fig.3 Weather data

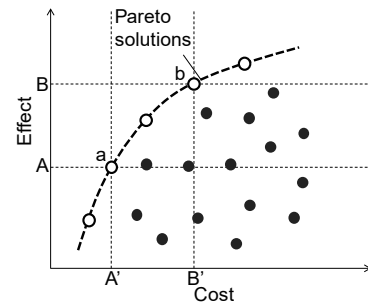


Fig.4 Concept of Pareto solutions

(Systematic Hybrid Exploration that is Robust, Progressive, and Adaptive) 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 (Genetic Algorithm、GA)、焼きなまし法 (Simulated Annealing、SA)、逐次二次計画法等を使い分ける手法である。

3. MRT と蒸散量の計算

3. 1. MRT

本研究では計算領域内の三次元の空間形態を表現し、まず計算領域内の地表面温度を計算した。その結果を用い、MRT を計算した。以下に各過程における計算方法の詳細を示す。

3. 1. 1. 空間形態の表現

計算領域は、地面、樹木の 2 要素により構成した。地面は 2m × 2m の正方形のサーフェスメッシュ (地面メッシュ)、樹木は 2m × 2m × 2m の立方体のボクセルメッシュ (樹木メッシュ) により表現した。樹冠のみを考慮し、幹は考慮しなかった。同様の空間形態でメッシュサイズを 2m としたもの、0.25m に解像度を上げたもので後述の計算を実施したが、MRT の計算結果の誤差は約 0.1℃であったことから、2m というメッシュサイズの妥当性を確認した。

3. 1. 2. 表面温度の計算

(a) 熱収支

本研究では地面メッシュの熱収支を基に表面温度計算を実施した。樹木メッシュは表面温度が気温相当^{注9)}で一律であるとし、熱収支を考慮しなかった。

地面の表面温度計算に用いた熱収支を式(1)に示す。

$$R_{net} = H + G \quad (1a)$$

$$H = \alpha_c(T_s - T_a) \quad (1b)$$

R_{net} : 正味放射量[Wm⁻²], H : 顕熱輸送量[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], G : 地中への伝導熱量[Wm⁻²]

地面からの蒸発による潜熱輸送量はないものとし、正味放射量に

は後述の放射輸送計算の結果を用いた。対流熱伝達率はユルゲスの式^{注10)}の算出値を用い、気温と風速は全メッシュで一定^{注11)}とした。

(b) 放射輸送

天空率・形態係数

三次元の放射輸送を計算するにあたり、レイトレーシングにより各地面メッシュの天空率、地面メッシュからみた樹木メッシュの形態係数を算出した。計算領域内の放射輸送には樹木による遮蔽が生じるため、天空率や形態係数の算出の際にはその影響を考慮した。このときの遮蔽量の計算には Monsi & Saeki²³⁾に倣い、Beer-Lambert 則に基づく式(2)を採用した。

$$\tau = \exp(-kaL) \quad (2)$$

τ :経路長 l における透過率[-], k :消散係数[-], a :葉面積密度[m⁻¹], l :樹木メッシュ内を通過した経路長[m]

吉田ら²⁴⁾のモデルを参考に、 a は 1.0m⁻¹、 k は 0.60 で一定とした。

短波長放射量

地面メッシュに到達する直達日射量は法線面直達日射量に式(2)により算出される樹木の透過率、太陽高度の正弦(sin)を乗じることで算出した。樹木メッシュを透過する距離は地面メッシュの中心から太陽方向に射出した探索線の追跡により算出した。天空日射量は地面メッシュの天空率に天空日射量を乗じることで算出した。樹木の日射吸収率は 1.00 とし、樹木からの反射日射は考慮しなかった。地面メッシュの日射吸収率は 0.88 とした。

長波長放射量

地面メッシュの正味の長波長放射量は式(3)により算出した。

$$L_{gi,abs} = \varepsilon_g f_{gi,sky} L_{sky} + \varepsilon_g \sum_j f_{gi,tj} \sigma \varepsilon_t T_{tj}^4 - \varepsilon_g T_{gi}^4 \quad (3)$$

$L_{gi,abs}$:地面メッシュ i が吸収する全樹木メッシュからの長波長放射量[Wm⁻²], ε_g :地面メッシュの放射率[-], $f_{gi,sky}$:地面メッシュ i の天空率[-], L_{sky} :大気放射量[Wm⁻²], $f_{gi,tj}$:地面メッシュ i からみた樹木メッシュ j の形態係数[-], σ :ステファンボルツマン係数[Wm⁻²K⁻⁴], ε_t :樹木メッシュの放射率[-], T_{tj} :樹木メッシュ j の表面温度[K] (本研究では気温相当), T_{gi} :地面メッシュ i の表面温度[K]

ε_g は 0.95 とした。 ε_t は 1.0 とし、長波長放射の反射は考慮しなかった。 T_{gi} には後述する表面温度計算の結果を用いた。

(c) 熱伝導

地面の表面温度は一次元非定常熱伝導計算により算出した。熱伝導計算では、地中深さ 0.50m を温度指定境界とした。時間ステップは 5 分とし、同一の気象条件を用いた 1 日分の助走計算の後に本計算を実施した。地面メッシュの熱物性値として、熱伝導率: 0.17W m⁻¹K⁻¹、比熱: 1674Jkg⁻¹K⁻¹、密度: 700kgm⁻³を用いた。

3. 1. 3. MRT の計算

計算点に仮想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。正味放射量の算出には式(4)を用いた。

$$R_{h,net} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 (a_b R_{h,si} + \varepsilon_b L_{h,li}) \quad (4)$$

$R_{h,net}$:立方体が受ける正味放射量[Wm⁻²], a_b :日射吸収率[-], $R_{h,si}$:面 i が受ける日射量[Wm⁻²], ε_b :放射率[-], $L_{h,li}$:面 i が受ける長波長放射量[Wm⁻²]

座位での滞在を想定し、計算高さは 1.0m とした。日射吸収率は 0.96、放射率は 0.95 とした。

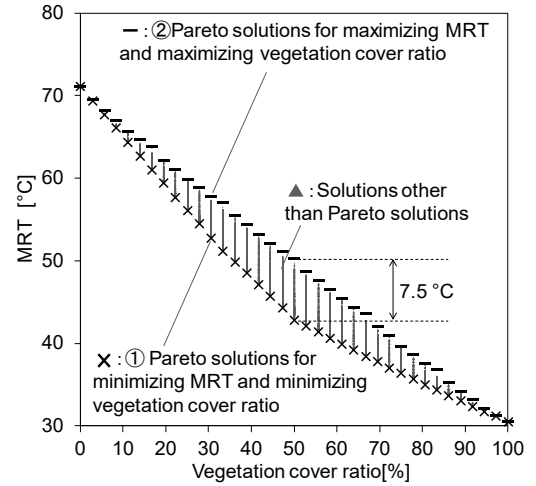


Fig.5 Relationship between MRT and vegetation cover ratio for all solutions

3. 2. 蒸散量の算出方法

3. 2. 1. 蒸散モデル

本研究の蒸散量の計算では樹木と土壌の水収支は計算せず、十分な灌水により水ストレスがない条件を前提とした。また、湿気の移流による影響、いわゆるオアシス効果は考慮せず、樹木の配置によって異なる正味放射量の影響のみを考慮した。蒸散量の算出には Priestley and Taylor²⁵⁾ による式(6)を用いた。

$$ET_{pt} = \alpha_{pt} \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_n}{l} \quad (6)$$

ET_{pt} :日積算蒸散量[md⁻¹], α_{pt} :Priestley Taylor 係数[-], Δ :温度・飽和水蒸気圧曲線の勾配[kpa°C⁻¹], γ :乾湿計定数[kpa°C⁻¹], R_n :葉面における日積算正味放射量[Jm⁻²d⁻¹], l :水の蒸発潜熱[Jm⁻³]

式(6)は移流のない広大で均一な水平面で生じる蒸発量を推定するモデルとして提案され、森林蒸発散を精度良く推定できることが知られている²⁶⁾。式(3)の理論的導出は広大な水平面を前提とするため単木スケールは元々適用対象外であるが、Pereira et al.²⁷⁾は十分に灌水された果樹の樹液流量と正味放射量の実測により単木への適用可能性を検討し、日単位の蒸散量であれば単木スケールでも精度良く推定ができることを示している。 α_{pt} は樹木の蒸散能力を表すパラメータであり、Pereira et al.の検討に倣い 1.26 とした。 γ は常温範囲で慣用されている 0.066kpa°C⁻¹とした。

蒸散量は各樹木メッシュ、日単位で算出した。日射のある時間帯を考慮し、 Δ は 5~19 時の平均気温を用いて算出した。各樹木メッシュの正味放射量の算出方法は 3.2.2 に示す。

3. 2. 2. 樹冠の放射収支計算

正味放射量は樹冠の三次元の放射収支計算により算出した。一定の密度で天空側から日射方向に射出した探索線を追跡し、通過した樹木メッシュに吸収量を加算していくことで算出した。樹木メッシュに探索線が通過する際に吸収される日射量の算出には式(2)を用いた。天空日射、反射日射、長波長放射については、3.1.2 に示した方法と同様にメッシュ同士の形態係数と天空率を用いて算出した。日射のある時間帯を考慮し、日積算正味放射量は 5 時~19 時の積算値として算出した。

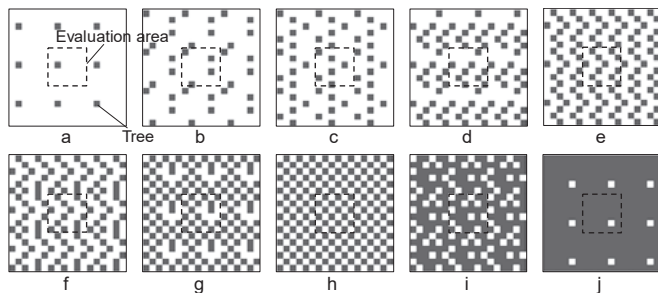


Fig.6 Tree arrangements of Pareto solutions for minimizing MRT and minimizing vegetation coverage ratio (① in Fig. 5)

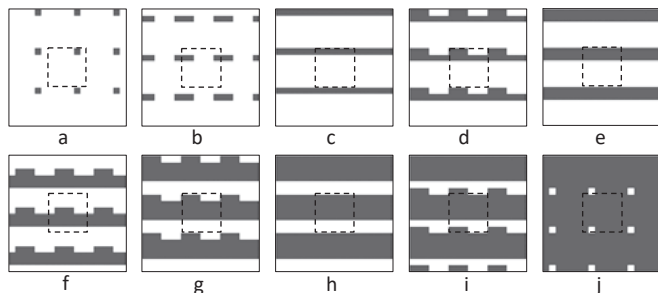


Fig.7 Tree arrangements of Pareto solutions for maximizing MRT and maximizing vegetation coverage ratio (② in Fig. 5)

4. 結果

4. 1. MRT 低減のための樹木配置の最適解

4. 1. 1. MRT と緑被率

最適化の過程で得られた計 40000 個の解の MRT と緑被率(Vegetation cover ratio)、さらに①MRT 最小化×緑被率最小化、②MRT 最大化×緑被率最大化それぞれのパレート解を Fig.5 に示す。緑被率 0% のとき MRT が 71.1℃、100% のとき約 30.5℃ となり、MRT 低減効果は最大で 40.6℃ となった。同一の緑被率の解における MRT の最高値と最低値の差は緑被率 50% のときに 7.5℃ で最大となり、本研究と同様の条件下では樹木配置が暑熱適応策の効果に無視できない影響を及ぼすことが示された。緑被率 50% 前後で計画する際は、配置への配慮が特に重要であると考えられる。緑被率 50% 前後で配置による影響が大きいのは、生じ得る配置がより多様であるためと考えられる。また、①のパレート解が形作る曲線の勾配が緑被率 50% を境に顕著に小さくなっており、これは①のパレート解の樹木配置を採用する場合に、緑被率 50% を超えると樹木による暑熱適応策のコストパフォーマンスが低下することを示している^{注 12)}。

4. 1. 2. 最適解の樹木配置の特徴

次に Fig.5-①,②に示したパレート解の樹木配置の一部を抜粋^{注 13)}し、Fig.6、Fig.7 に示す。①MRT 最小化×緑被率最小化のパレート解の樹木配置 (Fig.6) には、■樹木同士が離れて分散(a, b, c, d)、■南北、ジグザグの列状に配置(e)、■南北の列状に配置(f, g)、■市松状に配置(h)、といった傾向がある。樹木同士が離れて分散する傾向やジグザグ、市松状に配置する傾向は、樹木同士の離隔の MRT 低減への寄与を示唆している。また、南北の列状に配置される傾向は、MRT 低減への東西の離隔の寄与が大きいことを示唆している。

②MRT 最大化×緑被率最大化のパレート解の樹木配置 (Fig.7) からは、■密集して配置、■東西の列状に配置、といった傾向が確認できる。これらの傾向は、樹木を密集させることが MRT の低減

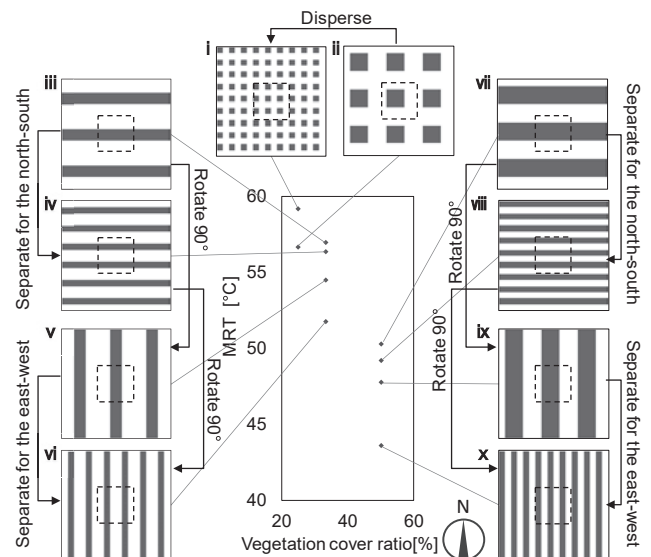


Fig.8 Influence of tree arrangement patterns on MRT

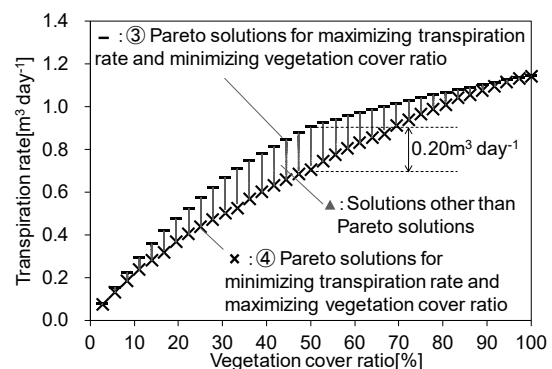


Fig.9 Relationship between transpiration rate and green coverage ratio for all solutions

を小さくしてしまうこと、さらには南北に離隔をとることの MRT 低減への寄与が小さいことを示唆している。

4. 1. 3. 樹木配置の特徴が MRT に及ぼす影響

ここでは、4.1.2 で MRT 低減への寄与が大きいことが示唆された特徴による MRT への影響を明確にするため、それら特徴を有する典型的な配置 i ~ x を作成し、その MRT を比較した (Fig.8)。ii → i は「密集→分散」という配置の変更であり、これによる MRT 低減量の向上は 2.5℃ だった。iii → iv、vii → viii は「南北に隔離」という変更であり、この変更による MRT 低減量の向上は 0.6℃、1.1℃ だった。これに対し、v → vi、ix → x は「東西に隔離」という変更であり、それによる MRT 低減量の向上は 2.7℃、4.2℃ だった。また iii → v、iv → vi、vii → ix、viii → x に共通するのが「東西の列状配置を 90° 回転して南北の列状配置に変換」という変更であり、それによる MRT 低減量の向上は 2.5~5.6℃ となった。これら結果から 4.1.2 における示唆が裏付けられ、さらに本研究と同等の条件下では、樹木同士の離隔や離隔の方位に関する特徴の違いが暑熱適応策の効果に無視できない影響を及ぼし得ることが示された。

4. 2. 蒸散量増加のための樹木配置の最適解

4. 2. 1. 蒸散量と緑被率

MRT を目的関数としたときの結果と同様に、最適化の過程で得

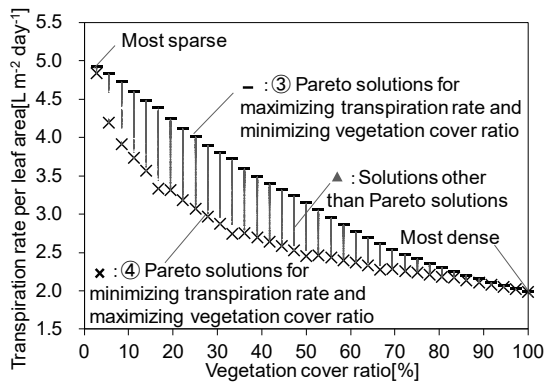


Fig.10 Relationship between transpiration rate per leaf area and vegetation coverage ratio for all solutions

られた計 40000 個の解の蒸散量、緑被率とそのパレート解を Fig.9 に示す。同一の緑被率での最高値と最低値の差は日蒸散量の約 20% にあたる $0.15\text{m}^3\text{day}^{-1}$ で最大となり、本研究と同様の条件下では樹木配置が蒸散量に無視できない影響を及ぼし得ることが示された。なお、水の蒸発潜熱を 2442kJkg^{-1} とすると、蒸散量 $0.15\text{m}^3\text{day}^{-1}$ による評価領域の地表面積あたりの潜熱輸送量は $2.5\text{MJm}^{-2}\text{day}^{-1}$ となる^{注 14)}。また MRT と同様に、最高値と最低値の差が大きい緑被率 50% 付近では配置による蒸散量への感度が高いこと、③のパレート解の勾配が小さい緑被率 50% 以上のときは樹木によるヒートアイランド緩和のコストパフォーマンスが小さいことが示唆された。

Fig.9 の縦軸の評価領域の全樹木メッシュからの蒸散量を評価域の葉面積当たりの蒸散量に換算したものを Fig.10 に示す。Fig.9 の緑被率と評価領域全体の蒸散量が正の相関を示すのに対し、Fig.10 の緑被率と葉面積当たりの蒸散量は負の相関を示しており、緑被率の増加によって葉面積あたり（樹木あたり）の蒸散量は減少することを示している。葉面積当たりの蒸散量は緑被率が 2.8%（樹木メッシュが 1 つのみ）のときに $4.9\text{Lm}^{-2}\text{day}^{-1}$ で最大となり、緑被率が 100% のときに $2.0\text{Lm}^{-2}\text{day}^{-1}$ で最小となった。最も疎な配置で値は最も密な配置に対して 2.5 倍であった。

4. 2. 2. 樹木配置の最適解の特徴

次に、Fig.9、Fig.10 の③、④に示したパレート解の樹木配置の一部を抜粋^{注 13)}し、Fig.11、Fig.12 に示す。

③蒸散量最大化×緑被率最小化のパレート解の樹木配置 (Fig.11) は MRT を目的関数としたときのパレート解の樹木配置と類似し、■樹木同士が離れて分散(a, b, c, d)、■南北のジグザグ列状(d, e)、■南北の列状(f, g)、■市松状(f, g, h)、といった傾向が確認できる。

④蒸散量最小化×緑被率最大化のパレート解の樹木配置 (Fig.12) も同じく MRT を目的関数としたときの樹木配置と類似し、■密集して配置、■東西の列状に配置、といった傾向が確認できる。

以上の結果から、MRT を低減するための樹木配置は蒸散量を増加させるための樹木配置としても同様に有効である可能性、すなわち、ヒートアイランド緩和策と暑熱適応策の両面において最適な樹木配置が共通化できる可能性が示された。

5. 考察

5. 1. 樹木同士の離隔による日射遮蔽への影響

MRT の低減、蒸散量の増加には樹木同士の離隔が大きい分散的

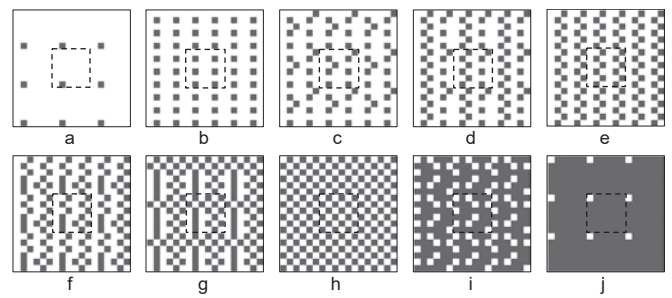


Fig.11 Tree arrangements of Pareto solutions for maximizing transpiration rate and minimizing vegetation coverage ratio (③ in Fig.9 & 10)

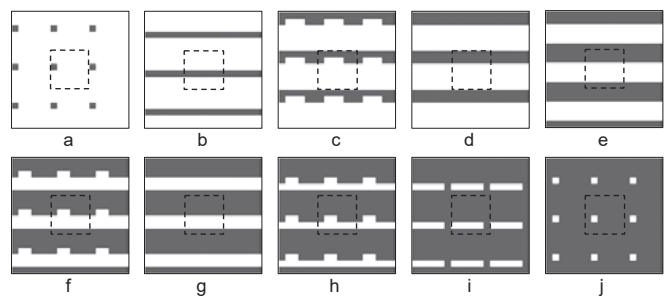


Fig.12 Tree arrangements of Pareto solutions for minimizing transpiration rate × maximizing vegetation coverage ratio (④ in Fig.9 & 10)

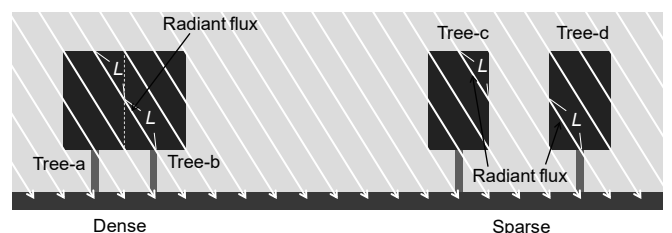


Fig.13 Schematic of solar radiation shielding by dense or sparse tree arrangement

な配置が有効であることを示したが、ここではなぜそのような配置が有効であるのかについて考察する。

Fig.13 に樹木による日射遮蔽の模式図を示す。白の斜線は直達日射の放射束を示しており、左は樹木が密集した状態、右は樹木が分散した状態を示している。まず密集配置の樹木を通過する放射束を取り出し、その遮蔽過程を示す。樹木 a、樹木 b を通過した距離を L 、透過距離 L による日射遮蔽率を $S(L)$ 、遮蔽される前の放射束の強度を I とすると、樹木 a、b による遮蔽量 A は式(7)で表される。

$$A = IS(L) + I(1 - S(L))S(L) \quad (7)$$

式中の $I(1 - S(L))S(L)$ に示されるように、樹木 b には樹木 a の遮蔽により強度 $I(1 - S(L))$ まで減衰した放射束が到達するため、その遮蔽量は小さくなる。このように樹木が日射方向に重複するとき、樹木 b のような陰側に位置する樹木の遮蔽量は小さくなる。

次に分散配置の樹木を通過する放射束についても同様に遮蔽過程を示す。樹木 c を L 通過した放射束、樹木 d を同じく L 通過した放射束をそれぞれ取り出すと、その合計の遮蔽量 A' は下式で表される。

$$A' = IS(L) + IS(L) \quad (8)$$

A と A' の大小関係を比較すると、

$$A' - A = IS(L)^2 > 0 \quad (9)$$

となり、密集配置における樹木bのように他の樹木の陰により遮蔽量が小さくなることのないため、分散配置の遮蔽量がより大きい。樹木同士の離隔がMRT低減に有効なのはそのためである。日射遮蔽量が大きいことは日射吸収量、ひいては蒸散量が大きいことと言い換えられ、蒸散量の増加にも樹木同士の離隔が有効なのはそのためである。成田ら²⁾は樹木への十分な灌水がなされていれば、樹木同士の離隔をより大きくとった分散配置とすることで樹木1本あたりの蒸散による潜熱輸送量が増大することを示しており、本研究の結果と合致している。

4.1.1 ではMRT低減を目的としたパレート解の形作る曲線の勾配が緑被率50%以上になると顕著に小さくなることを示した。最適化の結果によると、これは緑被率50%までは市松状等の配置とすることで樹木同士の隣接を避けて分散的に配置することができるが、それ以上に樹木を増やす場合に樹木同士の隣接を避けることができないため密集してしまい、それにより日射遮蔽への寄与が小さくなるためと考えられる。

また、密集することによる遮蔽量の減少を示す式(9)の $A' - A$ は各樹木の日射遮蔽率の積である $S(L)^2$ に比例する。そのため、樹木の葉面積密度が大きく、日射遮蔽率が大きい程、密集することによる日射遮蔽量の減少が大きくなると考えられる。4.2.1 で示したように、最も疎な配置の単位葉面積あたりの蒸散量は最も密な配置に対して約2.5倍であり、成田ら²⁾の実験の最大約1.8倍と比較して大きい値となった。これは本研究の樹木は成田らの実験の樹木よりも日射遮蔽率（葉面積密度）が大きく、密集することによる日射吸収量の減少が大きかったためと考えられる。なお、成田らの実験では湿気の移流効果も含まれるため、同一の樹木を用いていれば本研究よりも密集と分散の差がより大きくなるはずであるが、それ以上に日射遮蔽率の違いによる影響が卓越したものと考えられる。

5. 2. 樹木同士の離隔の方位による日射遮蔽への影響

MRTの低減、蒸散量の増加には東西の離隔が大きい樹木配置が有効であることを示したが、ここではなぜそのような配置が有効であるのかについて考察する。

まず、最適化の境界条件として用いた8-16時における太陽方位、法線面直達日射量をFig.14に示す。日射の方位が南寄りになるのは11時過ぎから13時前の約1時間半のみであり、その他の約6時間半は東寄りもしくは西寄りの日射となっている。また、日射が南寄りのときと東寄りもしくは西寄りのときの法線面直達日射は100～200Wm²程度の差しかないことから、日射のエネルギー積算量としても西寄り、東寄りの日射の割合が大きいと言える。東西方向の離隔が有効なのは、日射のエネルギー積算量の大きい東西方向の離隔を大きくすることで樹木が日射方向に重複することによる遮蔽量の減少を効果的に抑えることができるためである。

なお、東西の離隔をとることが日射遮蔽量（吸収量）の増加に有効であることは、農業気象分野におけるトマトや大豆といった作物の正味放射量が東西方向の畝としたときよりも南北方向の畝としたときに大きいという知見²⁸⁾²⁹⁾と対応しており、本研究の結果はそれら知見が都市緑化においても適用可能であることを示唆している。

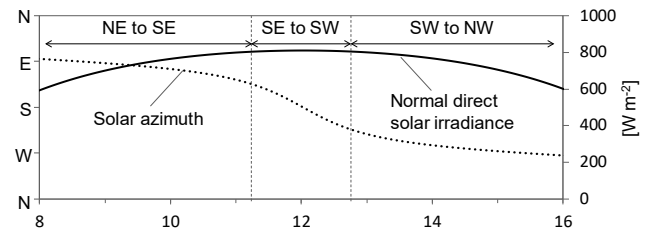


Fig.14 Diurnal patterns of solar azimuth and direct normal solar irradiance

6. まとめ

本研究では、暑熱適応策とヒートアイランド緩和策の両面から樹木配置の最適化を行い、配置による効果の差異を検討した。東京の夏季晴天日、周囲に建物がないオープンスペースを対象に実施した結果、下記の結論を得た。

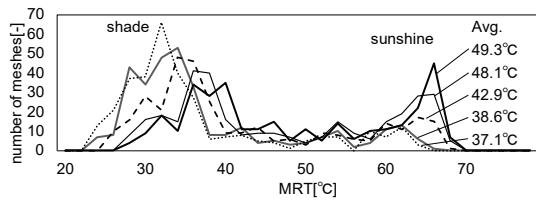
- ・ 同量の樹木を配置した場合でも、配置によってMRTの日平均値が7.5℃、蒸散量は20%程度変化し得る。
 - ・ MRTの低減と蒸散量の増加を目的とした最適化の結果は、整合的な配置の特徴を示した。
 - ・ 緑被率50%前後のときは生じる樹木配置がより多様になるため、樹木の配置によるMRT、蒸散量への影響が大きく、設計の際の配慮が特に重要となる。
- 以下、両指標への効果を同列に述べる。
- ・ 樹木同士の離隔をとることで樹木の日射方向の重複による遮蔽量の減少を抑えられ、樹木による効果を向上させることができる。
 - ・ 東西方向の日射を遮蔽（吸収）することが重要であり、南北の離隔よりも東西の離隔を大きくとって配置することが有効である。
 - ・ 緑被率50%を超える場合は樹木の密集を避けられないため、樹木を増やすことによる影響は小さくなり、樹木による効果のコストパフォーマンスが悪化する。

以上、本研究によりオープンスペースの樹木配置が暑熱適応策、ヒートアイランド緩和策としての効果に無視できない影響を及ぼすこと、そして緑地計画において有効な配置の特徴を示した。本研究では樹木配置を二次元かつ周囲に建物がない条件に単純化し、目的関数をMRTや蒸散量、緑被率に限定したため、最適解が定性的に予想し得る配置と近いものであった可能性がある。しかし、緑地計画の実務で重要となる周囲の街区形状、樹形、樹高、葉面積密度等の設計変数や人の動線、滞在場所等の条件を付加した場合、最適解の予想がさらに困難となり、最適化手法の利用がより有効なものとなると考えられる。そのため、今後は実務への適用を見据え、上述の各種パラメータを加えたより詳細な樹木配置の最適化を実施していきたい。

注

注1) 参考のため、周囲に建物がある条件でも最適化を実施した。最適解には日中を通じて建物の陰となる部分に樹木が配置されないという傾向が見られたが、それ以外の日向となる部分においては後述する周囲に建物がない条件での結果と類似した配置の特徴を示した。

注2) ヒートアイランド現象緩和の直接的な要因となるのは顕熱輸送量の減少だが、建築屋外環境評価や都市気候の分野では顕熱輸送量を減少させる支配的な要因が潜熱輸送量の増大であること^{10) 11) 12)}がよく知られている。CASBEE-HI¹³⁾やヒートアイランド対策ガイドライン¹⁾において



Appended Fig.1 Histogram of MRT on all meshes of evaluation area for each tree arrangement

も、ヒートアイランド現象の緩和策として植生や保水性舗装等の蒸発散が生じる地表面被覆を用いることが推奨されている。そのため、効果の指標として蒸散量を用いた。

- 注3) 本研究では夏季晴天日の気象条件を用い、樹木の葉面積密度を一樣としたことから、評価領域内の MRT は値の大きい日向と値の小さい日陰の二値的な分布となる。そのため、その空間・時間平均値を用いることで、より快適な日陰が生じる頻度を評価でき、それにより空間の熱的快適性を評価できると考えた。Appended Fig.1 に、後述の方法で設定した 5 つの樹木配置で算出した評価領域の全 36 メッシュ×全 9 時刻 (8~16 時) = 324 メッシュでの MRT の頻度分布と、各樹木配置の MRT の平均値 (以下 MRT) を示す。頻度分布には実際に日向、日陰の二つのピークが生じている。各樹木配置の頻度分布を比較すると、MRT の高い樹木配置パターンは日向のピークがより大きく、逆に MRT の低い樹木配置パターンでは日陰のピークがより大きい。ここから、実際に MRT の空間・時間平均値により日陰が生じる頻度が評価できると考えられる。
- 注4) 本研究で想定している夏季晴天日における屋外の日射暴露環境下において、MRT は樹木による遮蔽があったとしても気温を大きく下回ることではない。本研究では気温約 26-30℃の気象データを用いたこと、さらに SET* の中立温度が 22-26℃¹⁴⁾であることから、MRT の値が低いほど中立に近づくこととなる。そのため、MRT の最小化を目的関数とした。
- 注5) 参考のため、評価領域の直上に同じサイズの樹木配置領域を設定した非周期配置での最適化も実施したが、実際に最適解の樹木配置は評価領域の中心部に樹木が集まる傾向を示した。
- 注6) 拡張アメダス気象データの風速は各地点での観測データをベキ指数則 (ベキ指数=0.25) により高度 6.5m の値に補正したものとなっている¹⁵⁾。本研究では拡張アメダス気象データの風速値をそのまま用いた。
- 注7) Bouguer の式¹⁶⁾を(i)、Berlage の式¹⁶⁾を(ii)、Brunt の式¹⁶⁾を(iii)に示す。

$$I_{dir} = I_0 P \sin h \quad (i)$$

$$I_{sky} = \frac{1}{2} I_0 \sin h \frac{1 - P \sin h}{1 - 1.4 \ln P} \quad (ii)$$

I_{dir} :法線面直達日射量[Wm⁻²]、 I_0 :法線面直達日射量[Wm⁻²]、 P :大気透過率[-]、 h :太陽高度[radian]、 I_{sky} :天空日射量[Wm⁻²]

$$L_{sky} = \sigma T_a^4 (A + B e^{1/2}) \quad (iii)$$

L_{sky} :大気放射量[W m⁻²]、 σ :ステファンボルツマン係数[Wm⁻²K⁻⁴]、 T_a :地表付近の気温[-]、 $A = 0.51[-]$ 、 $B = 0.076[\text{hpa}^{-1/2}]$ 、 e :地表付近の水蒸気分圧[hpa]

なお、直達日射量と天空日射量の算出の際には大気透過率 P を東京における夏季の平均値¹⁷⁾である 0.63 とした。

- 注8) 本研究の目的の一つは、樹木の配置が暑熱適応策・ヒートアイランド緩和策の効果にどの程度影響するかを示すことであり、そのための最適化以外の手法として、①原理的考察あるいは直観に基づく恣意的配置を用いたケーススタディ、②総当たり計算の 2 種類が考えられる。上記の目的のためには、生じうる MRT (蒸散量) の最大値、最小値について議論する必要があるが、①は最大値、最小値を議論するには不十分である。また、②を実施した場合、樹木配置は 2³⁶ (687 億) 通りとなるため、計算負荷が過大であり、現実的ではない。一方、最適化を用いることで、効果を最大化/最小化する樹木配置を網羅的かつ効率的に探索することが可能となる。以上から、本研究では最適化手法の使用が妥当であると考えた。

- 注9) 萩島ら⁴⁾ 20) は赤外線放射カメラによる晴天時の樹冠の表面温度の実測により、樹冠内の表面温度分布の温度幅が小さくこと、樹冠の平均表面温度と気温との差の平均が 1℃未満であることを示している。本研究ではこの知見を参考に、樹木ボックスの表面温度が気温相当とした。

- 注10) ユルゲスの式²¹⁾は式(iv)の平滑面のものを用いた。

$$\alpha_c = 5.8 \times 3.9v \quad (v \leq 5.0[\text{m/s}]) \quad (iv)$$

$$\alpha_c = 7.1 v^{0.78} \quad (v \leq 5.0[\text{m/s}]) \quad v: \text{風速}[\text{m/s}]$$

- 注11) 陳ら²²⁾は冬季における高層建築物の日陰空間を対象とした微気象を実測し、局所的な気温低下や風速の増大が生じていることを確認しているが、それによる MRT への影響は小さいことを示している。本研究では周囲に建物がない条件を想定していることから、気温・風速分布による MRT への影響はさらに小さく、一樣と仮定して問題ないと考えた。

- 注12) MRT の温度帯、さらには気温、湿度、風速等の影響によって MRT の変化への人体温熱感覚の感度が異なる可能性があり、コストパフォーマンスについての厳密な議論のためには、その影響を考慮する必要がある。本研究では感度の影響は考慮しておらず、今後の課題としたい。

- 注13) ①MRT 最小化×緑被率最小化、②MRT 最大化×緑被率最大化のパレート解はそれぞれ全 37 個であったが、Fig.6、Fig.7 にはスペースの都合により 10 個の解を抜粋して示した。③、④についても同様である。

- 注14) 本研究における顕熱輸送量の減少は、地面に入射していれば顕熱として放散される放射量を樹冠が吸収し、潜熱として放散することで生じる。ここで簡単のために地表面積あたりの日積算値について考えると、蓄熱量が昼夜でキャンセルされ 0 とみなせることから、本研究で仮定している地面蒸発を無視できる条件においては、樹木の有無によらず地面からの顕熱輸送量は地面の正味放射量に一致する。また、樹冠の正味放射量は顕熱と潜熱のいずれかに分配されるため、樹冠においては潜熱の増分は等量の顕熱を減少させる。したがってもし仮に、正味放射量/入射放射量が樹冠・地面で一定であれば、バルク地表面でも潜熱の増分は等量の顕熱を減少させる。現実には日中の樹冠温度は地面よりも低温なため、正味放射量/入射放射量は樹冠の方が大きく (バルクでは潜熱増加量より顕熱減少量の方が小さく) なるが、長波放射放射量は絶対温度の 4 乗に比例するため、樹冠と地面での違いは比較的小さい (例えば、入射放射 1100Wm⁻²、地面温度 57℃、樹冠温度 27℃、樹冠、地面の放射吸収率を 1.0 とすると、正味放射量/入射放射量は樹冠/地面で 1.15)。以上の議論から、日単位では概ね潜熱輸送量の増大の 80~90%の顕熱輸送量の減少が生じていると考えられる。

参考文献

- Ministry of the Environment, Heat Island Countermeasures Guidelines, Revised, 2013.3 (in Japanese)
環境省: ヒートアイランド対策ガイドライン 改訂版, 2013.3
- Narita, K., Hagishima, A., Tanimoto, J., Takano, T.: Transpiration rate of trees in an urban area -Field experiments on oasis effect-, Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ), No. 608, pp. 59-66, 2006.10 (in Japanese)
成田健一, 萩島理, 谷本潤, 高野武将: 都市域における樹木の蒸散特性: オアシス効果に関する野外実験, 日本建築学会環境系論文集, No.608, pp.59-66, 2006.10
- Chen, H., Ooka, R., Kato, S.: A Study on optimum design method for pleasant outdoor thermal environment using genetic algorithm (GA) and coupled simulation of convection, radiation and conduction: Optimum arrangement of trees for design of pleasant outdoor thermal environment, Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ), No.576, pp.65-71, 2004.2 (in Japanese)
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, No.576, pp.65-71, 2004.2
- Hagishima, A., Katayama, T., Hayashi, T., Tanimono, 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 and Environmental Engineering (Transactions of AIJ), No.525, pp83-90, 1999.10 (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, No.525, pp83-90, 1999.10
- Misaka, I., Ishimaru, Y., Horiguchi, Y., 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, pp.131-136, 2017
- 6) 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, No.15, pp.199-202, 2002.5
- 7) Hataya, N., Junimura, Y., Iwata, T., Mochida, A., Watanabe, H., Yoshino, H., Sakaida, K.: Effect of Roadside trees on turbulent airflow, air pollutant diffusion and pedestrian thermal comfort within street canyons –Field measurements of summer thermal environment and air quality in the central part of Sendai (Part1)-, Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ), Vol.72, No.613, pp.95-102, 2007.3 (in Japanese)
幡谷尚子, 十二村佳樹, 岩田達明, 持田灯, 渡辺浩文, 吉野博, 境田清隆: 街路樹がストリートキャニオン内の気流分布, 空気汚染, 歩行者空間の温熱快適性に及ぼす影響の検討: 仙台市中心市街地の夏季の温熱・空気環境実測(その 1), 日本建築学会環境系論文集, Vol.72, No.613, pp.95-102, 2007.3
- 8) Park, C. Y., Lee, D. K., Kraysenhoff, E. S., Heo, H. K., Ahn, S., Asawa, T. Kim, H. G. : A multilayer mean radiant temperature model for pedestrians in a street canyon with trees, Building and Environment, vol.141, pp.298-309, 2018
- 9) Thorsson, S., Rocklöv, J., Konarska, J., Lindberg, F., Holmer, B., Dousset, B., & Rayner, D. : Mean radiant temperature—A predictor of heat related mortality, Urban Climate, Vol.10, p332-345, 2014
- 10) Myrup, L. O. : A numerical model of the urban heat island, Journal of Applied Meteorology, Vol.8, No.6, pp.908-918, 1969
- 11) Moriyama, M. : Applied study of earth surface heat budget's theory for regional environmental assessment, Transactions of the Architectural Institute of Japan, No.272, pp.97-103, 1978(in Japanese)
森山正和 : 地域環境アセスメントにおける地表面熱収支理論の応用研究 第3報 地表面熱収支の計算スタディ, 日本建築学会論文報告集, No.272, pp.97-103, 1978
- 12) Sugawara, H., Kondo, J. : Sensitivity test of urban surface temperature, Tenki, Vol.42, No.12, pp.813-818, 1995(in Japanese)
菅原広史, 近藤純正 : 都市における各種地表面温度の敏感度解析, 天気, Vol.42, No.12, pp.813-818, 1995
- 13) Institute for Building Environment and Energy Consumption, Comprehensive Assessment System for Build Environment Efficiency CASBEE HI Evaluation manual, 2017.10(in Japanese)
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, 2017.10
- 14) Fukai, K., Ito, H., Goto, S., Akui, T., Saito, J. : Experimental study on correlation between Standard New Effective Temperature (SET*) and Japanese thermal sensation, Part2 Comparison of thermal sensation in winter and summer seasons, Vol.18, No.51, pp.139-147, 1993(in Japanese)
深井一夫, 伊藤宏, 後藤滋, 阿久井哲, 斎藤純司 : 標準新有効温度 (SET*) と日本人の温熱感覚に関する実験的研究: 第 2 報-冬季および夏季における温熱感覚の比較, 空気調和・衛生工学会 論文集, Vol.18, No.51, pp.139-147, 1993
- 15) Architectural Institute of Japan, Extended AMeDAS Weather Data, 2000
日本建築学会: 拡張アメダス気象データ, 2000
- 16) Tanaka, S., Iwata, T., Tsuchiya, T., Akimoto, T., Terao, M., Takeda, H.: Latest Building Environmental Engineering 4th Edition, Inoueshoin, 2014.2 (in Japanese)
田中俊六, 岩田利枝, 土屋喬雄, 秋元孝之, 寺尾道仁, 武田仁: 最新建築環境工学改訂 4 版, 井上書院, 2014.2
- 17) Murai, K., Yamauchi, T.: Distribution of global solar radiation in Japan and effective atmospheric transmissivity, Tenki, Vol.22, No.10, pp.557-562, 1975.10 (in Japanese)
村井潔三, 山内豊太郎: 日本における全天日射量の分布と実効大気透過率について, 天気, Vol.22, No.10, pp.557-562, 1975.10
- 18) Red Cedar Technology: SHERPA - An Efficient and Robust Optimization/Search Algorithm, 2008.10
- 19) Ngo, L. C., Bello-Ochende, T., & Meyer, J. P. : Three-dimensional analysis and numerical optimization of combined natural convection and radiation heat loss in solar cavity receiver with plate fins insert, Energy conversion and management, Vol.101, pp.757-766, 2015
- 20) Hagisima, A., Katayama, T., Hayashi, T. Tanimono, J. : Field measurement of radiative temperature distribution on tree crown : Prediction of thermal comfort on street with roadside trees part1, Journal of Architecture, Planning and Environmental Engineering (Transactions of AIJ), No.516, pp79-85, 1999.2 (in Japanese)
萩島理, 片山忠久, 林徹夫, 谷本潤: 樹木の放射温度分布に関する実測: 街路樹のある街路の温熱環境予測 その 1, 日本建築学会計画系論文集, No.516, pp79-85, 1999.2
- 21) McAdams, W. H.: Heat Transmission (3rd ed.), McGraw-Hill, New York, pp 532, 1954
- 22) Chen, K., Asawa, T., Oshio, H.: Formation factors of microclimate around a high-rise building in winter season - Examining by coupled analysis of heat balance simulation and CFD -, Journal of Heat Island Institute International, Vol.12, pp.9-20, 2017 (in Japanese)
陳侃, 浅輪貴史, 押尾晴樹: 高層建築物の周囲に形成される冬季の微気候の形成要因-熱収支シミュレーションと CFD との連成解析手法を用いた検証-, 日本ヒートアイランド学会論文集, Vol.12, pp.9-20, 2017
- 23) 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
- 24) Yoshida, S., Murakami, S., Mochida, A., Ooka, R., Tominaga, Y. : Study on effect of greening on outdoor thermal environment using three dimensional plant canopy model, Journal of Architecture and Planning and Environmental Engineering (Transactions of AIJ), No.536, pp. 87-94, 2000.10 (in Japanese)
吉田伸治, 村上周三, 持田灯, 大岡龍三, 富永禎秀: 樹木モデルを組み込んだ対流・放射・湿気輸送連成解析による樹木の屋外温熱環境緩和効果の検討, 日本建築学会計画系論文集, No.536, pp. 87-94, 2000.10
- 25) Priestley, C. H. B., & Taylor, R. J. : On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. Monthly weather review, Vol.100, No.2, pp.81-92, 1972
- 26) Komatsu, H., Hotta, N. : What has been clarified by numerous forest evapotranspiration studies based on flux measurements?, J. Jpn. Soc. Hydrol. Water Resour, Vol.18, No.5, pp.613-626, 2005 (in Japanese)
小松光, 堀田紀文: 森林蒸発散フラックス計測大流行の産物, 水文・水資源学会誌, Vol. 18(2005), No.5, p613-626, 2005
- 27) Pereira, A. R., Green, S. R., & Nova, N. A. V. : Sap flow, leaf area, net radiation and the Priestley-Taylor formula for irrigated orchards and isolated trees, Agricultural water management, Vol.92, No.1-2, pp.48-52, 2007
- 28) Kurata, K., Okada, M., Sase, S.: Row orientation and direct solar radiation absorptance of tomato canopy: Fisheye photography analysis, Journal of Agricultural Meteorology, Vol.44, No.1, pp.15-22, 1988
蔵田憲次, 岡田益己, 佐藤勘紀: トマト群落のうね方位の直達光受光率魚眼レンズ撮影による解析, 農業気象, Vol.44, No.1, pp.15-22, 1988
- 29) BATEN, M. A., Kon, H., Matsuoka, N. : Comparisons of Moisture and Energy Balance Components as Influenced by Two Row Orientations of Soybean, Journal of Agricultural Meteorology, Vol.53, No.4, pp.291-300, 1997

OPTIMIZATION AND EVALUATION OF TREE ARRANGEMENT IN OPEN SPACE FOR URBAN HEAT ADAPTATION AND HEAT ISLAND MITIGATION

Kunihiko FUJIWARA^{*1}, *Takashi ASAWA*^{*2} and *Tomoki KIYONO*^{*3}

^{*1} Takenaka Research & Development Institute, M.Eng.

^{*2} Assoc. Prof., Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng.

^{*3} National Institute for Environmental Studies, Dr.Eng.

Urban trees as a heat adaptation measure by solar radiation shielding and as a heat island mitigation measure by transpiration are expected to improve the summer thermal environment. An increase in the amount of trees leads to an increase in the initial cost for tree planting and in maintenance costs such as pruning and irrigation. It is thus important when planning to green urban open spaces to consider the optimal tree arrangement to maximize the effect with the minimum amount of trees. However, very few studies have discussed the effect of the tree arrangement on the thermal environment. Therefore, we carried out tree arrangement optimization to both minimize the summer mean radiant temperature (MRT) as an urban heat adaptation measure and maximize the transpiration rate as a heat island mitigation measure. Based on optimization, we showed to what extent the MRT and the transpiration rate change by the arrangement and what kind of features of the arrangement contribute to improving the effect of the trees.

The target of optimization was an open space with no buildings around it with a 36 m × 36 m tree arrangement area and a 12 m × 12 m evaluation area in the center. The design variable of optimization was the two-dimensional tree arrangement in the 36 m × 36 m area. To derive tree arrangements with the maximum effect by the minimum number of trees, we conducted optimization to minimize both MRT and vegetation coverage ratio (number of trees) in the evaluation area as the objective functions, focusing on urban heat adaptation. We also conducted optimization to maximize the transpiration rate and minimize the vegetation coverage ratio in the evaluation area, focusing on heat island mitigation. We calculated the MRT and the transpiration rate using typical sunny summer weather in Tokyo. We conducted numerical optimization and derived Pareto solutions.

As a result, we obtained the following findings for typical sunny summer sunny weather in Tokyo at a location with no building around it. Comparisons between the effective and ineffective tree arrangements obtained by optimization showed the daily average MRT differed up to 7.5°C and the amount of transpiration differed up to about 20%, even when using the same amount of trees. This result shows that tree arrangement could have a non-negligible impact on the effects of urban heat adaptation and heat island mitigation. The arrangements of the optimal solutions for the MRT and the transpiration rate showed the same tendency, suggesting that similar tree arrangements could realize the maximization of effects for both urban heat adaptation and heat island mitigation. The tree arrangement of the optimal solutions showed that distributed arrangements with separation between trees are effective for reducing the MRT and increasing the transpiration rate, and that separation between trees in the east-west direction is more effective than separation between trees in the north-south direction. The difference of the MRT and the transpiration rate between effective and ineffective arrangements was large when the vegetation cover ratio was around 50%, suggesting that consideration to tree arrangement at the time of green planning is particularly important. The gradient of the Pareto solutions in the evaluation space was smaller when the vegetation coverage ratio was larger than 50%, suggesting that the cost performance of urban heat adaptation and heat island mitigation by trees decreased above a 50% vegetation coverage ratio.

(2019年6月7日原稿受理, 2020年2月28日採用決定)