

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	都市熱環境からみたオープンスペースにおける樹木配置最適化に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	藤原邦彦
Author(English)	kunihiko fujiwara
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11649号, 授与年月日:2020年9月25日, 学位の種別:課程博士, 審査員:浅輪 貢史,中村 芳樹,室町 泰徳,大風 翼,湯浅 和博,小林 秀樹
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11649号, Conferred date:2020/9/25, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

都市熱環境からみた  
オープンスペースにおける樹木配置最適化に関する研究

2020年9月

藤原邦彦



# 目次

第1章	序論	1
1.1	はじめに	1
1.2	既往の研究	3
1.2.1	熱環境改善効果の予測・評価	3
1.2.2	樹木配置が熱環境へ及ぼす影響の評価	4
1.2.3	樹木が周辺環境に及ぼす多面的影響の考慮	6
1.3	本研究の目的	6
1.4	各章の構成	7
第2章	実測による単木の樹冠における熱収支の評価	9
2.1	はじめに	9
2.2	既往研究の整理	10
2.2.1	境界層コンダクタンスに関する既往研究	10
2.2.2	葉面の対流熱伝達率の測定方法に関する既往研究	10
2.3	対流熱伝達率の算出方法	12
2.3.1	樹木の熱収支の概要	12
2.3.2	熱収支式の連立	14
2.4	葉温・近傍微気象の測定	17
2.4.1	個葉の測定	17
2.4.2	樹冠の測定	21
2.5	葉温変化にみる樹木の熱収支特性	26
2.5.1	個葉の熱収支特性	26
2.5.2	樹冠の熱収支特性	29
2.5.3	葉の蓄熱の熱収支へ及ぼす影響	30
2.6	単木の顕熱・潜熱輸送量の同定	32
2.6.1	樹木の対流熱伝達率	32
2.6.2	樹木から周辺大気への顕熱輸送量	39
2.6.3	熱収支の検証	39
2.7	まとめ	41

第3章	熱環境シミュレーションのための樹木の熱収支モデルの構築	42
3.1	はじめに	42
3.2	熱収支の計算方法の検討	42
3.2.1	既往研究における樹木の熱収支モデル	43
3.2.2	既往研究における熱環境改善効果の評価指標	45
3.3	樹木の熱収支モデルの構築	46
3.3.1	空間形態の表現	46
3.3.2	熱収支計算	47
3.3.3	放射輸送	50
3.3.4	蒸散速度	52
3.3.5	熱伝導	54
3.3.6	平均放射温度	54
3.4	実測結果によるパラメータの同定とモデルの検証	54
3.4.1	気孔コンダクタンスモデルのパラメータの同定	54
3.4.2	モデルの検証	56
3.5	まとめ	57
第4章	最適化手法を用いた樹木配置が熱環境改善効果に及ぼす影響の評価	59
4.1	はじめに	59
4.2	最適化問題の設定	59
4.2.1	解析対象と計算領域	59
4.2.2	目的関数	60
4.2.3	樹木配置モデルと設計変数	61
4.2.4	気象条件	63
4.2.5	最適化手法	65
4.3	樹木配置が熱放射環境に及ぼす影響の評価	66
4.3.1	MRT と緑被率	66
4.3.2	熱放射環境の改善に寄与する樹木配置の特徴	67
4.3.3	樹木配置の特徴が MRT に及ぼす影響	69
4.4	樹木配置が蒸散速度に及ぼす影響の評価	70
4.4.1	蒸散速度と緑被率	70
4.4.2	蒸散速度の増加に寄与する樹木配置の特徴	71
4.5	考察	74
4.5.1	樹木同士の離隔による日射遮蔽への影響	74
4.5.2	樹木同士の離隔の方位による日射遮蔽への影響	75
4.5.3	太陽高度・太陽方位の季節変化による影響	76

4.5.4	目的関数の違いによるパレート解の樹木配置への影響	78
4.5.5	気温・湿度・風速の空間分布が及ぼす影響	78
4.6	まとめ	79
第5章	都市のオープンスペースにおける樹木配置最適化	81
5.1	はじめに	81
5.2	天空・樹木への視認性を考慮した樹木配置最適化	82
5.2.1	樹木配置が影響を及ぼす熱環境以外の環境要素	82
5.2.2	最適化問題の設定	82
5.2.3	樹木配置の最適解	85
5.2.4	最適解を用いた緑地計画	90
5.3	パレート解による樹木配置優先度マップの作成	94
5.3.1	樹木配置優先度マップの作成方法	94
5.3.2	最適化問題の設定	95
5.3.3	樹木配置優先度マップの作成	97
5.4	まとめ	99
第6章	結論	101
6.1	本研究の総括	101
6.2	今後の課題	102
6.2.1	樹種・樹形による影響の考慮	102
6.2.2	気流解析による気温・湿度・風速分布の考慮	103
6.2.3	普及・展開先の検討	103
参考文献		105
謝辞		114
公表論文リスト		115

## 第 1 章 序論

### 1.1 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。樹木の熱環境改善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」の二つの観点が重要となる [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し、CASBEE-HI [2]、都市緑地法、緑化地域制度 [3]といった各種の精度・認証がその設置を奨励している。それらの制度・認証は樹木の本数の増加が都市熱環境の改善に寄与するとの前提に立ち、樹木の水平面投影面積から算出される緑地面積<sup>1</sup>を基準値としている。実際に、村上ら(2012) [4]は条件の異なる複数の緑地におけるヒートアイランドポテンシャル(Heat Island Potential, HIP)<sup>2</sup> [5]を数値解析により算出し、緑地による HIP の減少量と緑地面積(緑被率)との正の相関を示している。しかし、村上らは同時に、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の方法によって HIP が大きく異なることを指摘している(図 1-1)。この結果は、同等の形状の樹木を同数配置した場合でも、樹木の配置によって熱環境改善効果が大きく異なり、樹木の本数を確保しても十分な効果が得られない可能性があることを示唆している。

<sup>1</sup> 実際の緑地面積には樹木だけでなく、芝生等の草本や壁面緑化の面積も含まれるが、ここでは簡単のため樹木についてのみ説明する。

<sup>2</sup> ヒートアイランドポテンシャル(Heat Island Potential, HIP)は特定の領域の大気を暖めるポテンシャルを評価する指標であり、下式により評価される。

$$\text{HIP} = \frac{\int_{\text{全土地被覆面積}} (T_s - T_a) dS}{S_d}$$

$T_s$  : 表面温度[K]

$T_a$  : 気温[K]

$S$  : 微小表面積[m<sup>2</sup>]

$S_d$  : 領域の水平面投影面積[m<sup>2</sup>]

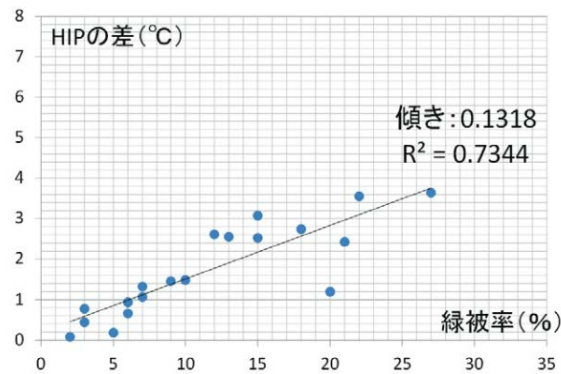


図 1-1 HIP の減少量と緑被率 (村上ら, 2012 [4])

樹木の設置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。樹木による熱環境改善効果を現実的に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、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。

そのため、緑化空間の設計の際には、設計者が与条件を基に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熱環境改善効果を定量的に予測し、それにより効果が向上する樹木配置を選択する手法(図 1-2 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性能が事前に設計案を作成する設計者の屋外熱環境への原理的もしくは経験的な理解に依存してしまうという課題があった。設計者の理解に依存せず、設計案の熱環境改善効果を担保するためには、設計の初期段階で樹木配置が熱環境へ及ぼす影響に関する定量的な知見や熱環境シミュレーションを用いて効果の大きい樹木配置を導き出し、それを基に設計者が最終案を作成すること(図 1-2 下)が有効であると考えられる。

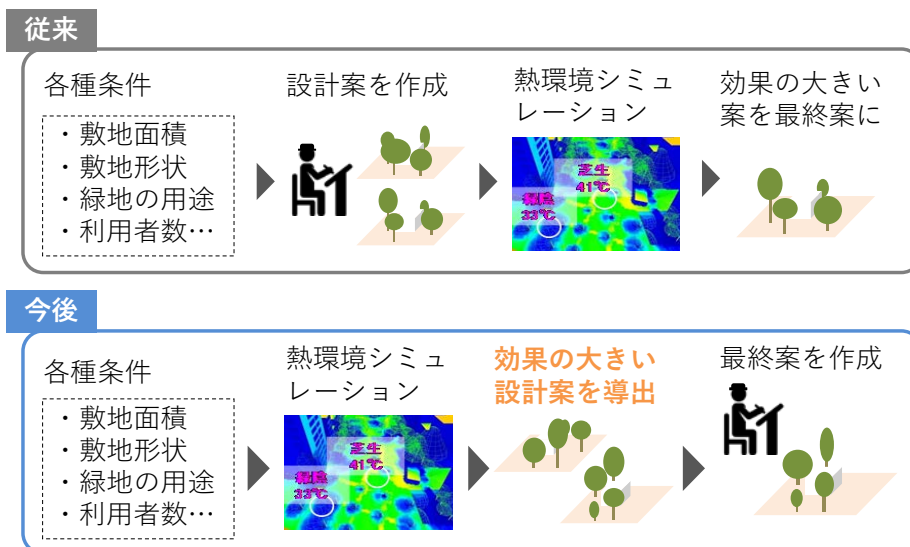


図 1-2 熱環境シミュレーションを用いた緑地計画のフロー



筆者がランドスケープ設計者や建築設計者<sup>3</sup>を対象に実施したヒアリングの結果（表 1.1）は、実際にそのような知見や手法に対する設計者のニーズがあることを示している。

表 1.1 ランドスケープ設計者・建築設計者へのヒアリング結果

対象者	聴取されたニーズ
ランドスケープ設計者 A	緑陰を最大化できる樹木の配置方法を知りたい。 熱環境改善のための樹木と建物との適切な位置関係を知りたい。
建築設計者 B	熟練した造園技術者であれば、熱環境の改善のための適切な配置の設定が可能と考えられるが、経験の浅い設計者にはそれが難しい。適切な配置を定量的に導き出す手法があると良い。
建築設計者 C	緑化部分を設計する際、緑地面積が制度や認証の基準値を達成することに注力し、樹木配置の熱環境改善の観点での妥当性への配慮ができないことが多い。適切な配置を定量的に導き出す手法があれば、活用したい。

しかし、樹木配置が熱環境改善効果に及ぼす影響に関する知見や熱環境改善効果の大きい樹木配置を導き出す手法に関する既往研究は筆者の知る限り非常に少ない。

## 1.2 既往の研究

前節では、熱環境シミュレーションを用い、効果の大きい樹木配置を生成する手法や、樹木配置が熱環境改善効果に及ぼす影響に関する知見が必要であることを示した。緑地計画において設計者が活用できる手法や知見の整備が求められるが、そのためには、①熱環境改善効果の予測・評価、②樹木配置が熱環境へ及ぼす影響の評価、③樹木が周辺環境に及ぼす多面的影響の考慮、において課題がある。

### 1.2.1 熱環境改善効果の予測・評価

都市における樹木の主な熱環境改善効果は、日射遮蔽による熱放射環境の改善と蒸散による潜熱輸送による顕熱負荷抑制の二つであり、前者が暑熱適応策に、後者がヒートアイランド緩和策に対応する。それらを熱環境シミュレーションにより定量的に予測・

<sup>3</sup> 一般に、建築の緑化部分の設計はランドスケープ設計の専門職能を有する設計者ではなく、建築設計者が実施することが多い。大規模な緑地計画を伴うプロジェクトにおいては、ランドスケープ設計者が緑化部分の設計を実施することがある。

評価するためには、単木スケールでの樹木の熱収支、具体的には樹木の葉群中の放射輸送や周辺大気への顕熱・潜熱輸送を三次元でモデル化し、適切に評価することが重要となる。

葉群中の放射輸送に関する研究としては、Beer-Lambert 則に基づくモデル化 (Monsi & Saeki, 1953 [6]; 吉田ら, 2006 [7]) や、モンテカルロレイトレーシングに基づき散乱過程を物理則に基づき精緻に扱う手法 (平岡, 1997 [8]; Kobayashi et al., 2013 [9]) 等があり、既に一定の精度での計算手法が確立されている。

顕熱・潜熱輸送量の評価のためには、葉面における蒸発散過程や顕熱輸送のモデル化が必要となる。蒸発散過程の予測・評価に関する研究としては、蒸発効率によりモデル化したもの (吉田ら, 2000 [10]; Matsuda et al., 2018 [11])、気孔の開閉やそれに伴う水蒸気コンダクタンスの変化をモデル化したもの (平岡, 2001 [8]; 清野, 2017 [12]) がある。これらの知見を用い、モデルに必要なパラメータが整備できれば、一定の精度での予測が可能となっている。一方で顕熱輸送については、面的に拡がりがあり、一次元のフラックスを仮定できるような森林スケール、もしくは一枚の葉を対象とした個葉スケールの研究事例 (Barr et al., 1994 [13]; Katul et al., 1996 [14]) は散見されるが、単木スケールでの例は見受けられない。単木スケールでの樹冠から周辺大気への顕熱輸送の過程は、葉の揺らぎや樹冠内の葉の三次元的な分布などにより複雑であり、実測による評価やそれに基づくモデル化が困難であるためと考えられる。

以上から、樹木の都市熱環境を改善する効果の予測・評価のためには、単木スケールの熱収支を顕熱輸送における葉の揺らぎや三次元的な分布といった特性を考慮してモデル化し、それにより単木の顕熱・潜熱輸送量を評価することが課題であると言える。

### 1.2.2 樹木配置が熱環境へ及ぼす影響の評価

設計への活用を見据えると、樹木配置が熱環境に及ぼす影響の大きさや、熱環境改善に寄与する樹木配置の特徴に関する知見が整備されていることが望ましい。そのような樹木配置の熱環境への影響に関する研究は前述のように少ないが、実測や数値シミュレーションを用いた以下のような例がある。

成田ら (2006) [15] は、樹木によるヒートアイランド緩和策の効果に着目し、樹木の密集、分散による蒸散速度への影響を検討している。実測を用いる方法は樹木配置の影響を評価するために有効であるが、検討する配置パターンを増やすことが難しく、多様な配置パターンを網羅的に検討するのは難しい。実際に、成田ら (2006) の研究においても、単木、疎、密の 3 パターンの樹木配置のみの比較を示している。

Yang et al. (2018) [16] や Zhao et al. (2018) [17] は複数パターンの街路樹の配置を対象とした熱環境シミュレーションを基に、熱環境改善効果への配置の影響を検討している。街路樹の配置は街路に沿う 1 次元で表現できるため、オープンスペースにおける配置と比較するとパターンのバリエーションが少なく、恣意的に設定した複数の配置パタ

ーンでもある程度の網羅的な検討が可能と考えられる。しかし、オープンスペースを対象とした場合は、樹木配置が2次元で表現されるためバリエーションが膨大となり、網羅的な検討のための何らかの工夫が必要になると考えられる。

一方、熱環境シミュレーションと数理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オープンスペースにおける樹木配置の最適化を実施している研究例（陳ら, 2004 [18]; Ooka et al., 2008 [19]; Chen et al., 2008 [20]）がある。この手法は、図 1-3 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、数理最適化手法により構成される。樹木配置モデルは本数や樹形といったパラメータから樹木配置を生成し、熱環境シミュレーションは生成された樹木配置と樹木や周辺事物の熱収支モデルを用いて熱環境改善効果を算出する。さらに、数理最適化手法は熱環境シミュレーションにより算出される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。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ことができる。熱環境シミュレーションにより樹木による熱環境改善効果を妥当に予測でき、かつ樹木配置1ケースの計算負荷が過大とならなければ、この手法により多様な樹木配置の網羅的な検討が可能である。陳ら(2004) [18]や Ooka et al.(2008) [19]、Chen et al.(2008) [20]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、樹木配置が熱環境改善効果に及ぼす影響に関する検討は実施していないが、同様の手法によりオープンスペースにおける樹木配置のバリエーションについての網羅的な検討が可能であると考えられる。

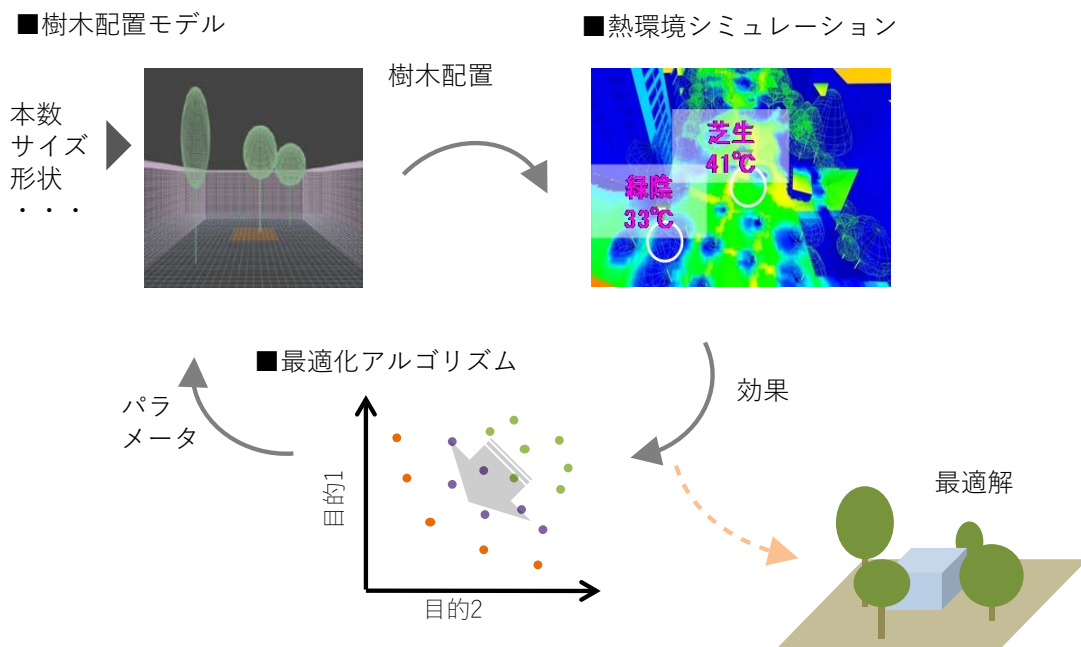


図 1-3 樹木配置最適化手法の構成

以上から、配置のバリエーションが膨大になると考えられる都市のオープンスペースにおいて、熱環境改善効果を最大化する樹木配置を導き出し、樹木配置が効果に及ぼす影響について検討するためには、熱環境シミュレーションと数理最適化による手法が有効であると考えられる。

### 1.2.3 樹木が周辺環境に及ぼす多面的影響の考慮

ここまでは熱環境のみに焦点を絞って論を進めていたが、樹木は熱環境の改善だけではなく、各種の環境要素への多面的な機能を有することが知られている (Tyrväinen, 2005 [21], Roy et al., 2012 [22])。都市における樹木の機能についての研究事例は多く、熱環境以外では、都市景観の評価の向上に関するもの (Aoki, 1991 [23]; Asgarzadeh et al., 2014 [24]; 邊敬ら, 2013 [25])、空気中の汚染物質の吸着による空気環境の改善に関するもの (Grundström and Pleijel, 2014 [26]; Pelkonen, 2020 [27]; Vos, 2013 [28]) 等、非常に多岐に渡る。緑地計画においてはその多面的な機能を考慮することが重要となる。

## 1.3 本研究の目的

以上を踏まえ、本研究では、熱環境シミュレーションと数理最適化による手法を用い、樹木配置が熱環境に及ぼす影響の大きさや熱環境改善に寄与する樹木配置の特徴を示すこと、さらに樹木配置の最適化手法の緑地計画における応用可能性を示すことを目的とする。

前節に示した既往の知見を踏まえると、上述の目的のためには、下記の点に課題がある。

- ① 熱環境シミュレーションにおいて樹木の熱環境改善効果を妥当に評価するため、葉の揺らぎや三次元的な分布といった特性を考慮して、単木スケールの熱収支をモデル化する
- ② 都市のオープンスペースにおける樹木配置のバリエーションについて網羅的に検討し、樹木配置が熱環境に及ぼす影響の大きさや熱環境改善効果に寄与する樹木配置の特徴を示す
- ③ 数理最適化手法を用いた樹木配置の最適化において、熱環境改善効果だけではなく、樹木による多面的な影響を考慮する

そこで本研究では、まず単木を対象とした実測に基づき、葉の揺らぎや三次元分布といった樹木の特性を考慮した熱収支のモデル化を行う。次にその熱収支モデルを用いた熱環境シミュレーションと数理最適化による樹木配置の最適化を用い、樹木配置が熱環境に及ぼす影響の大きさや熱環境改善効果に寄与する樹木配置の特徴を示す。さらに樹

木の熱環境以外の環境要素への影響を考慮した樹木配置の最適化を実施する。以上により、樹木配置が熱環境に及ぼす影響の大きさや熱環境改善に寄与する樹木配置の特徴を示すとともに、樹木配置の最適化手法の緑地計画への応用可能性を示す。

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、前述のように一次元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、樹木配置を議論するうえでは、樹種ごとに異なる樹形・樹高や葉面積密度、葉の形状や傾斜角の分布といった特徴、さらには成長や季節によるそれら特徴の経時変化を考慮することが必要となる。しかし、本研究ではそのための基礎的な研究として、一様な樹高、樹形や葉面積密度、葉の形状や傾斜角の分布を設定し、樹木の二次元配置のみを考える。

## 1.4 各章の構成

本論文は本章と以下5章の全6章により構成した。

第2章「実測による単木の樹冠における熱収支の評価」では、葉の三次元分布や揺らぎといった樹木の特性を考慮した対流熱伝達率の算出により、樹木から周辺大気への顕熱輸送量を評価すること目的に、屋外環境下のケヤキを対象とした熱収支と周辺微気象の実測を行った。

第3章「熱環境シミュレーションのための樹木の熱収支モデルの構築」では、樹木の対流熱伝達の特性を考慮した熱環境シミュレーションを実施することを目的に、2章で得られた対流熱伝達率を組み込んだ樹木の熱収支モデルを構築した。

第4章「最適化手法を用いた樹木配置が熱環境改善効果に及ぼす影響の評価」では、樹木配置が熱環境改善効果に及ぼす影響の大きさ、さらに熱環境改善効果に寄与する樹木配置の特徴を示すことを目的とし、3章の熱収支モデルによる熱環境シミュレーションと数理最適化手法を用いた樹木配置の最適化を実施した。

第5章「都市のオープンスペースにおける緑地計画のための樹木配置最適化」では、都市のオープンスペースの緑地計画における樹木配置最適化の活用の可能性を示すことを目的に、周囲に建物があるオープンスペースを対象とし、利用者の滞在スペースや熱環境だけでなく天空や樹木への視認性といった景観に関する目的関数を設定した樹木配置の最適化を実施した。

第6章「結論」では、各章で得られた知見を総括して結論を示すとともに、今後の課題を示した。



## 第2章 実測による単木の樹冠における熱収支の評価

### 2.1 はじめに

1章で示したように、都市における樹木の熱環境改善効果の主要な要素として、蒸散に伴う潜熱輸送によるヒートアイランド緩和がある。そのため、樹木配置の熱環境改善効果への影響を評価するためには、樹木からの蒸散速度を適切に評価する必要がある。蒸散は、葉内と大気との水ポテンシャル勾配により駆動される気孔を介しての水蒸気拡散現象であり、それに伴い潜熱輸送が生じる。この蒸散速度と潜熱輸送はポロメータ法 [29] や樹液流量法 (Granier 法) [30]、ライシメータ法 (重量計測法) [31] 等の測定方法が開発されている。単木あたりの蒸散速度はライシメータ法により直接求めることが可能である。一方、樹木が周辺大気に及ぼす熱的影響を評価するためには、潜熱輸送とともに、大気を直接暖める要因である顕熱輸送の特性を明らかにしなければならない。しかし、樹冠から大気への顕熱輸送量は蒸散速度のように直接測定できないうえに間接的な測定も困難であるため、森林等の面的に拡がりがあり鉛直一次元のフラックスが仮定できるような条件以外では、その特性は十分には明らかにされていない。

個葉に着目すると、葉面から大気への熱や物質の輸送量は、葉面と周辺大気とのスカラー濃度差 (温度差、物質濃度差)、及び葉面境界層コンダクタンス (Leaf boundary layer conductance,  $g_a$ ) によって記述できる (蒸散の場合は、これに加えて気孔コンダクタンスが関与する)。これまで、主に農業気象学の分野において、光合成に伴う植物の物質生産の観点から二酸化炭素の吸収効率や水利用効率を把握する目的で、 $g_a$  に関する理論的考察や数多くの実験が行われてきた [32]。

顕熱輸送の観点から  $g_a$  を表す指標として、対流熱伝達率 (Convective heat transfer coefficient,  $\alpha_c$ ) がある。この  $\alpha_c$  は、葉の形状や寸法とともに葉面近傍の流れ場によって支配されるが、屋外の自然風条件下においては枝葉の揺れを伴うため、伝熱理論に基づく無次元数を用いた統一的な定式化は困難であることが予想される [33]。さらには、樹木の樹冠は建物壁面のように面的に拡がりを持ったものではなく、個葉の集合体である葉群で構成されており、葉群としての樹冠全体の特性を知る必要が生じる。以上の背景に基づき本章では、単木の樹冠から大気への顕熱輸送量を定量化するための主要なパラメータである樹冠部の対流熱伝達率  $\alpha_c$  を屋外実測に基づき明らかにし、それにより単木の顕熱輸送量を評価することを目的とする。対象とする樹木は、日本で街路樹や都市緑化に多く用いられているケヤキとする。

## 2.2 既往研究の整理

葉面の $g_a$ や $\alpha_c$ に関する既往研究は多く、本研究で導入する $\alpha_c$ の算出方法について詳細に検討するため、 $g_a$ に関する既往研究、葉面の $\alpha_c$ の測定方法に関する既往研究の二つに分けて整理する。

### 2.2.1 境界層コンダクタンスに関する既往研究

葉面の $g_a$ に関して、農業気象学の分野では物質輸送と熱輸送の両者に関するコンダクタンスが調べられてきた。伝熱工学の無次元数の理論に基づく葉の寸法や近傍気流の影響に基づくもの [34]から、自然風の乱れ [35]と風に伴う葉の揺らぎがもたらす影響 [36]まで非常に多くの研究がなされてきている。特に、自然風に葉がそよぐことで葉面境界層が薄くなり $g_a$ が増加することが、様々な実験結果により示されている [36]。これらは、自然風の条件下における $\alpha_c$ の評価が重要であることを示している。

### 2.2.2 葉面の対流熱伝達率の測定方法に関する既往研究

まず、スカラー輸送の中で物質輸送に着目すると、個葉および単木の蒸散速度は前述の通り計測可能なため、水蒸気拡散コンダクタンス (Vapor diffusion conductance,  $g_v$ ) も同定されてきている。特に、ライシメータ法により重量計測を行えば、単木 (植物) あたりの蒸散速度と $g_v$ が精度よく同定可能である [37] [38] [39]。小規模なポット植栽を対象としたものが多いが、浅輪らは実大樹木への適用を可能としている [40]。ここで、 $g_v$ は $g_a$ と気孔コンダクタンス (Stomatal conductance,  $g_s$ ) により決定されるため、 $g_a$ を求めるためには、 $g_v$ から $g_s$ を分離する必要がある。人工的に模擬した小規模な樹木を対象にして、葉を湿潤させることで重量計測により葉面境界層抵抗 ( $g_a$ の逆数) を直接同定した研究も見られる [41]。建築環境工学の分野においては、壁面等を対象に、湿潤濾紙等を用いた水分蒸発による物質伝達率 ( $g_v$ ) の測定結果にルイス則を適用して $\alpha_c$ を推定する方法が用いられてきている [42]。 $\alpha_c$ に関しては、上記のような物質伝達との相似性を利用するほかには、次に示す熱収支を利用する方法が用いられている。

個葉や樹木の熱収支を用いる方法も多くの研究事例があり、代表的な方法として正味放射量、蒸散速度等を計測し、残差として得られる顕熱輸送量を葉温と気温との差で除することで $\alpha_c$ を算出する方法 (熱収支法) がある [37] [43] [44]。この方法は、実際の葉と、人工葉の両方に適用されている。主に人工葉の場合には、ヒーター等で加熱することで、気温との温度差を付け、 $\alpha_c$ の算出制度を向上させる方法も見られる [45] [46]。

熱収支法を応用し、放射吸収量が同等とみなせる2枚の葉に蒸散速度などの条件差を強制的に与え、放射吸収量の計測が困難な項目を熱収支式の連立により消去する方法も用いられてきている (以下、熱収支連立法)。葉面の蒸散速度に差をつける方法としては、片方の葉にワセリンを塗布し蒸散を物理的に抑制する方法 [47]や、蒸散抑制剤 (ア



ブシジン酸)により生理的に気孔を閉鎖させるなどの方法 [38]が用いられている。これらの方法は、上述の通り両者の放射吸収量が等しいと仮定できることが前提条件である。式(2.1)、(2.2)に蒸散がある場合とない場合の個葉(両面)の熱収支式を示す。これらを連立させることで式(2.3)により $\alpha_c$ が求まる。

$$R_{abs} = lE + \alpha_c(T_{l1} - T_a) + \sigma\epsilon T_{l1}^4 \quad (\text{葉1:蒸散あり}) \quad (2.1)$$

$$R_{abs} = \alpha_c(T_{l2} - T_a) + \sigma\epsilon T_{l2}^4 \quad (\text{葉2:蒸散なし}) \quad (2.2)$$

$$\alpha_c = \frac{lE - \sigma\epsilon(T_{l1}^4 - T_{l2}^4)}{T_{l1} - T_{l2}} \quad (2.3)$$

$R_{abs}$  : 吸収放射量[W/m<sup>2</sup>]

$\alpha_c$  : 対流熱伝達率[W/(m<sup>2</sup>·K)]

$T_l$  : 葉温[K]

$T_a$  : 気温[K]

$\sigma$  : 長波長放射率[-]、

$\epsilon$  : ステファンボルツマン定数[W/(m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>)]

後者の蒸散抑制剤を用いる方法 [38]は、植物(キュウリ、レタス)の個体全体にも適用されており、蒸散速度を重量計測により明らかにすることで、植物全体の平均境界層コンダクタンス( $g_a$ )が同定されている。本手法では、蒸散速度差が葉温に明確な差を与えることが連立の必要条件となるが、樹木の水ストレスを葉温から検出する試みをも数多く行われていることから、蒸散速度と葉温が連動して変化することは原理的にも妥当な仮定といえる [48] [49] [50]。また、人工葉の場合には、蒸散速度の代わりに片方の葉をヒーター等で加熱することで、温度差を付けることも行われている [51] [52]。

熱収支法、熱収支連立法とも、小規模な植物を対象とした研究を除いては、個葉を対象とした研究が殆どであり、葉群で構成される樹冠の総合的な $\alpha_c$ を算出した例は見受けられない。一方、どちらの手法も日射や自然風などの屋外暴露環境における建築外表面の $\alpha_c$ 算出 [53] [54] [55] [56] [57]にも適用されている手法であり、応用性は高い。計測項目が増えれば、その分最終誤差が大きくなることに留意する必要があるが、その点で、熱収支法は式(2.3)に示す通り、放射吸収量が同等とみなせれば、葉温差と計測可能な蒸散速度か既知であるヒーターの発熱量のみで $\alpha_c$ が定式化される点で有利な方法である。

## 2.3 対流熱伝達率の算出方法

既往研究における $\alpha_c$ の算出方法を整理すると、樹冠部に適用する上で重要な知見は次の6点であると考えられる。①自然風条件下において、枝葉が風に揺らいている状態での算定が重要である。②2対の試験体の熱収支を連立させることは、測定誤差の積み重ねや伝搬を抑える上で効果的である。③計測可能なフラックス差と葉温差を用いることが有効である。④蒸散速度は葉温に明確な差を生じさせるために有効に利用可能なフラックス成分である。⑤単木の蒸散速度と潜熱輸送量はライシメータ法により制度の高い計測が可能となってきた。⑥機差等の系統誤差が生じうるため、機材と測定項目は最小限にとどめる必要がある。これらを踏まえ、本研究では熱収支連立法を樹冠部に適用し、蒸散速度の異なる2本の樹木の熱収支を連立させることで、 $\alpha_c$ を算出する方法を提案する。

本節では、まず樹木の熱収支の概要を示し、単木の顕熱輸送量の枠組みを示す。その上で、熱収支を踏まえた対流熱伝達率の具体的な算出方法について述べる。

### 2.3.1 樹木の熱収支の概要

#### 個葉

樹木を構成する葉の熱収支においては、式(2.4)、(2.5)、(2.6)のように短波長・長波長放射による吸収放射量( $R_{abs}$ )が、蒸発散による潜熱輸送量( $LE$ )、顕熱輸送量( $H$ )、長波長放射射出量( $L_{oe}$ )、蓄熱量( $G$ )の和と等しくなる(図 2-1)。なお、葉の熱容量が小さいため既往研究において蓄熱量は無視することが多く、本研究においても蓄熱量を無視して熱収支計算を行う。蓄熱性を無視することの妥当性については 2.5.3 にて検討する。

$$R_{abs} = LE + H + L_{oe} + G \quad (2.4)$$

$$H = \alpha_c(T_l - T_a) \quad (2.5)$$

$$L_{oe} = \sigma \varepsilon T_l^4 \quad (2.6)$$

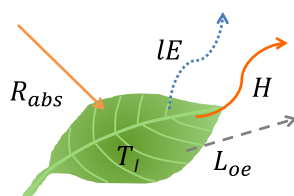


図 2-1 葉の熱収支

## 樹冠

## 【土壌条件と樹木の熱収支】

樹木全体の熱収支を考えると、熱収支の各項目のバランスは、図 2-2 に示すように、土壌条件の影響を受けて変化する。十分な灌水がなされており、水ストレスが小さい場合は蒸散による潜熱輸送量が大きく、顕熱輸送量は相対的に小さくなるが、灌水が十分でなく土壌ストレスが大きい場合は顕熱輸送量が大きくなる。

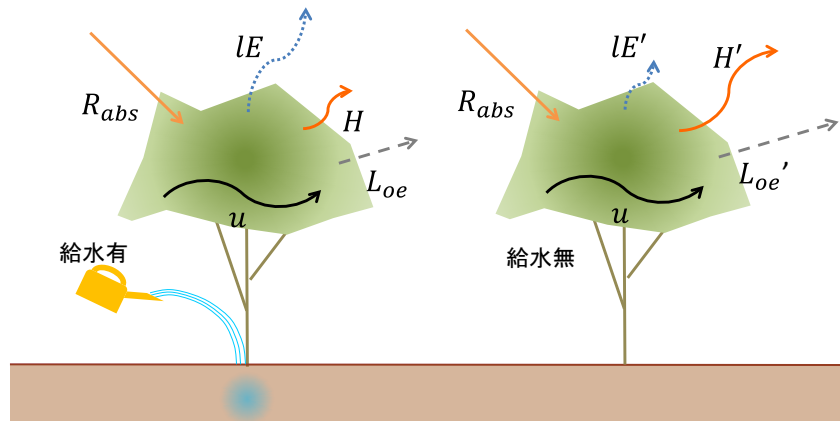


図 2-2 土壌条件と熱収支

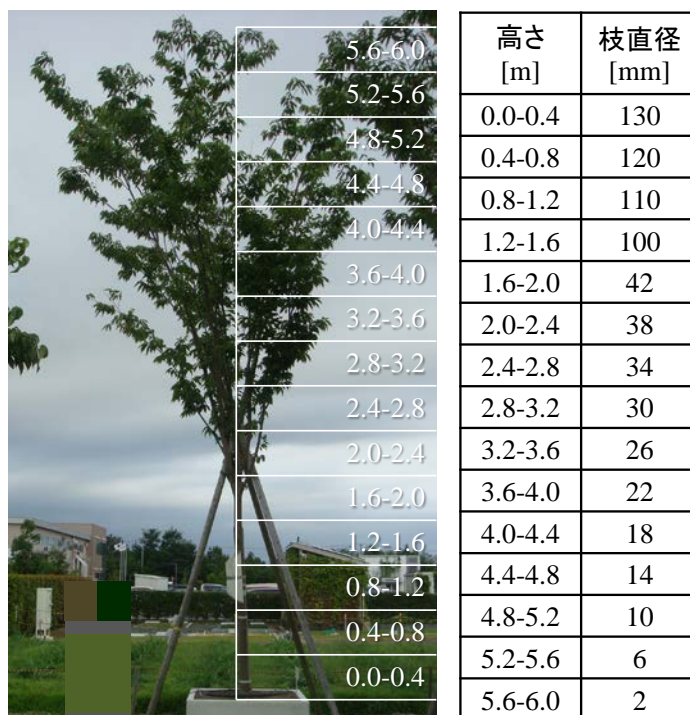
## 【葉・枝・幹それぞれの熱収支への寄与】

樹木は、葉、枝・幹により構成されるが、それぞれ全表面積に占める割合が異なり、周辺の熱環境への寄与はそれぞれに異なると考えられる。

樹木のそれぞれの構成要素の周辺熱環境への寄与の大きさを比較するため、本研究の対象とするケヤキを例に、表面積ベースでの構成比率を表 2.1 に示す。なお、表 2.1 に示す構成比率はケヤキの刈取りの際に測定した葉・枝の重量を基に推定し、表面積の推定の際に算出に用いる枝の直径は、当該樹木の画像を参考に高さ別に (図 2-3) のように設定している。

表 2.1 樹冠の全表面積における葉・枝の構成比

	全表面積に 占める割合[%]
葉	89.6
枝・幹	10.4



高さ [m]	枝直径 [mm]
0.0-0.4	130
0.4-0.8	120
0.8-1.2	110
1.2-1.6	100
1.6-2.0	42
2.0-2.4	38
2.4-2.8	34
2.8-3.2	30
3.2-3.6	26
3.6-4.0	22
4.0-4.4	18
4.4-4.8	14
4.8-5.2	10
5.2-5.6	6
5.6-6.0	2

図 2-3 高さ別の枝直径

ここからは全表面積の大部分を葉が占めており、周辺熱環境への寄与の大部分を葉が担っていると考えられる。そのため、本研究においては葉面の熱収支のみを対象とする。

### 2.3.2 熱収支式の連立

前述のように、個葉、樹冠の対流熱伝達率を直接測定するのは困難であり、他の熱収支項を明らかにすることで顕熱輸送量を算出し、そこから対流熱伝達率を算出するのも困難である。そのため 1 時刻の実測結果から対流熱伝達率を算出することは困難である。その理由として以下のような点が挙げられる。

- ・ 個葉の蒸散速度を測定できるポロメーターでは、葉の一点の蒸散速度を測定することが可能であるが、1 枚の葉でも各部で蒸散速度は異なり、葉の単位面積あたりの潜熱輸送量を明らかにするのは困難である。
- ・ 樹冠各部で放射環境が異なるため、樹冠の全表面の平均吸収放射量を明らかにするのは困難である。

これらの点を踏まえ、本研究では、測定困難な熱収支項の等しい 2 時刻、または 2 樹木の熱収支式を連立することでそれを消去し、対流熱伝達率を算出する方法を提案する。

#### 個葉

まず一定時間風速(以下 $u$ )が安定し、吸収放射量(以下 $R_{abs}$ )が顕著に増減するときの熱収支を考える。数分間の気象要素の変動に対する蒸散速度の応答変動は十分小さいと考えられるため  $IE$  は一定であり、 $u$  の変化が小さいため  $\alpha_c$  は一定であると考え(図

2-4)。この間の2時点 A、B のうち A の熱収支式が式(2.4)、(2.5)、(2.6)であるとき、B の熱収支式は式(2.7)、(2.8)、(2.9)のように表される。

$$R_{abs}' = lE + H' + L_{oe}' \quad (2.7)$$

$$H' = \alpha_c(T_l' - T_a') \quad (2.8)$$

$$L_{oe}' = \sigma \varepsilon T_l'^4 \quad (2.9)$$

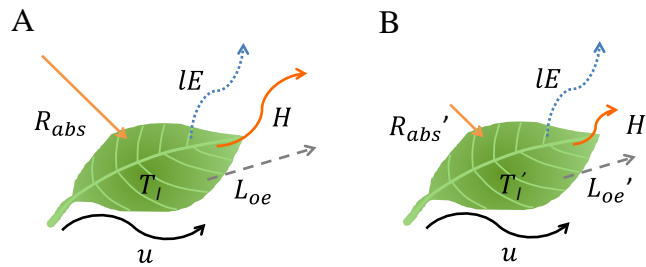


図 2-4 放射吸収量の変化が顕著な2時刻の葉の熱収支

A、B の  $lE$ 、 $\alpha_c$  が同値であるため、連立により式(2.10)が導出される。

$$\alpha_c = \frac{(R_{abs} - R_{abs}') - \sigma \varepsilon (T_l^4 - T_l'^4)}{(T_l - T_a) - (T_l' - T_a')} \quad (2.10)$$

式(2.10)の条件に見合う実測データを抽出し(7)式に代入することで $\alpha_c$ が算出される。条件に合うデータが多数得られれば定式化が可能であるが、一定時間風速が安定し、かつ日射量が顕著な変化を示すデータを十分に得ることは困難な場合も考えられる。その場合はさらに以下のような方法を用いる。

まず一定時間 $R_{abs}$ が安定し、 $u$ の増減が顕著なときの熱収支(図 2-5)を考える。前述のように蒸散速度の変動は小さいと考えられるため $lE$ は一定であると仮定する(2.11)。この間の2時点 C、D のうち、C の熱収支式が式(2.4)、(2.5)、(2.6)となるとすると、D の熱収支式は(2.11)、(2.12)、(2.13)のようになる。

$$R_{abs} = lE + H' + L_{oe}' \quad (2.11)$$

$$H' = \alpha_c'(T_l' - T_a') \quad (2.12)$$

$$L_{oe}' = \sigma \varepsilon T_l'^4 \quad (2.13)$$

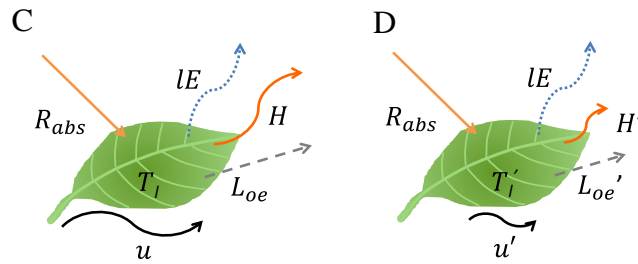


図 2-5 放射吸収量の変化が顕著な 2 時刻の葉の熱収支

2 時点の  $R_{abs}$ 、 $lE$ 、が同値であり、 $u$  が変化するため  $\alpha_c$  は異なる。そのため連立により 2 時点の  $\alpha_c$  の関係式(2.14)が導出される。

$$\alpha_c = \frac{\alpha_c'(T'_l - T'_a) + \sigma\varepsilon(T_l'^4 - T_l^4)}{T_l - T_a} \quad (2.14)$$

式(2.10)での算出により風速  $u$  のときの  $\alpha_c$  が既知であれば、一方を風速  $u$  の時刻とし、もう一方を異なる風速  $u'$  の時刻とすることで、風速  $u'$  での  $\alpha_c$  を算出できる。

### 樹冠

まず、同一の屋外環境下に置かれ、灌水条件の調整により潜熱輸送量の異なる 2 本の樹木 E、F の単位葉面積あたりの熱収支を考える (図 2-6)。なお、E、F は形状の類似する同樹種の樹木であるとする(図 2-6)。E の樹木の熱収支式が式(2.4)、(2.5)、(2.6)であるとき、F の熱収支式は式(2.15)、(2.16)、(2.17)のように表される。

$$R_{abs}' = lE + H' + L_{oe}' \quad (2.15)$$

$$H' = \alpha_c(T'_l - T'_a) \quad (2.16)$$

$$L_{oe}' = \sigma\varepsilon T_l'^4 \quad (2.17)$$

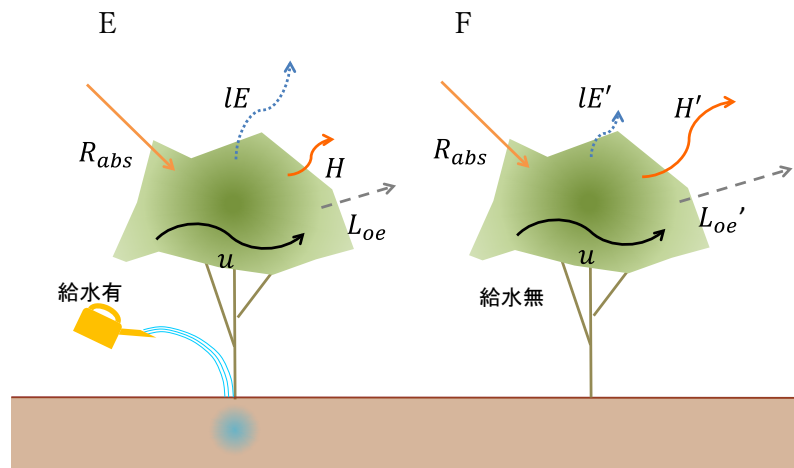


図 2-6 蒸散速度の異なる2樹木の熱収支

同一環境下であり、形状が類似するため E、F で  $R_{abs}$ 、 $\alpha_c$  は同値となり、連立により  $\alpha_c$  の算出式(2.18)が導出される。

$$\alpha_c = \frac{-(LE - LE') - \sigma\varepsilon(T_l^4 - T_l'^4)}{T_l - T_l'} \quad (2.18)$$

式(2.18)に条件に合う実測値を代入することで、樹冠部の平均  $\alpha_c$  を算出できる。

## 2.4 葉温・近傍微気象の測定

### 2.4.1 個葉の測定

#### 測定項目

2章に示した対流熱伝達率の算出方法を適用するにあたり、必要となる測定項目を以下に示す。

#### 【近傍微気象条件に関する項目】

・気温 ・葉に入射する短波長放射量、長波長放射量 ・風速

#### 【熱収支に関する項目】

・葉温

### 近傍微気象条件の測定方法の検討

近傍微気象条件は、できるだけ葉に近く、かつ測定機器が葉の熱収支に影響を与えないよう、0.5m 程度離れた位置に設置することが望ましいと考えられる。葉に入射する下向き、上向きの短波長放射量、 $R_{s\_down}$ 、 $R_{s\_up}$ 、下向き、上向き長波長放射量、 $R_{l\_down}$ 、 $R_{l\_up}$ 、は図 2-7 のように、葉の傾斜角、方位角に合わせて、長短波放射計を設置することで測定する。葉の十分近くに設置すれば、葉に入射する上向き短波長放射量・長波長放射量と同等量が長短波放射計に入射すると考えられる。ただし対象個葉が他の葉の陰になるときは、葉に入射する長波長放射量、短波長放射量は気象条件によらず不安定に変化すると考えられ、測定値との間に無視できないずれが生じることが推測される。そのため、対象個葉として、他の葉の陰になりにくい南側周縁部に位置するものが望ましいと考えられる。

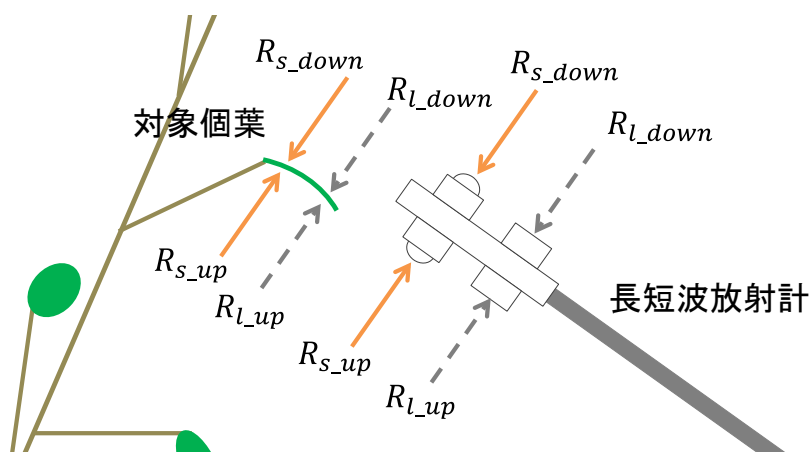


図 2-7 葉に入射する短波長・長波長放射量の測定方法

### 葉温の測定方法の検討

葉温を取得する方法として、熱電対による測定、熱画像による測定の二つが考えられるが、図 2-8 の熱画像に示すように、葉の表面温度は一枚の葉の中でも一様ではなく、数℃程度の範囲での分布を示す。そのため熱電対による測定では個葉の平均葉温を取得するのは難しく、さらに熱電対による測定では葉を透過した日射の影響で実際の葉温より高い温度で測定されてしまう可能性がある。

そこで本研究においては、赤外線熱放射カメラによる測定に着目した。



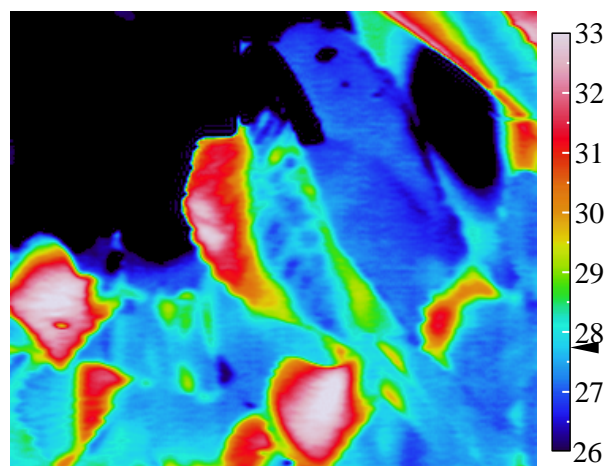


図 2-8 個葉の表面温度分布

なお、実際の測定では、図 2-9 のように熱画像の葉面部を抽出し、抽出された全画素の平均温度を葉温とした。

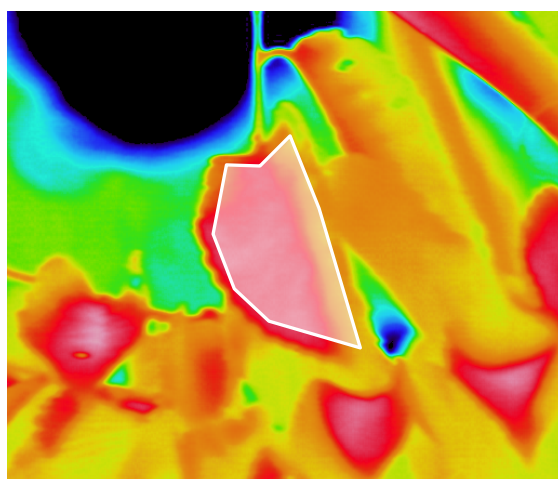


図 2-9 熱画像からの葉温抽出方法

### 測定方法

前項の検討を踏まえ、以下に示す測定場所、測定期間にて実測を行った。

測定場所：ケヤキ(樹高 6.4m)の南側周縁部の個葉

測定場所：愛知県三好市黒笹の実験圃場内

測定期間：2012 年 8 月 28 日、11:00-14:00

8 月 29 日、8:00-18:00

8 月 30 日、9:00-13:00

9 月 12 日、9:00-18:00

9 月 13 日、9:00-18:00

測定項目と測定機器を表 2.2 に、測定方法を図 2-10、図 2-11 に示す。なお、以降では、長短波放射計の上部での測定値を、下向き短波長放射量( $R_{s\_down}$ )、下向き長波長放射量( $R_{L\_down}$ )、下部での測定値を、上向き短波長放射量( $R_{s\_up}$ )、上向き長波長放射量( $R_{L\_up}$ )と表記する。

表 2.2 測定項目と測定機器

測定項目	測定機器	測定間隔
葉の表面温度分布	赤外線放射カメラ (1.25mrad)	5or10 秒
気温	通風筒付気温計	1 秒
風速	プローブ熱式風速計	1 秒
上下方向長短波放射量	長短波放射計	1 秒



図 2-10 対象樹木と測定対象個葉の位置



図 2-11 対象個葉と測定機器の設置

## 2.4.2 樹冠の測定

### 測定項目

2章に示した対流熱伝達率の算出方法を適用するにあたり、必要となる測定項目を以下に示す。

#### 【微気象に関する項目】

- ・ 気温
- ・ 風速

#### 【熱収支に関する項目】

- ・ 葉温
- ・ 樹冠全体の蒸散速度
- ・ 総葉面積

樹冠部の単位葉面積当たりの熱収支を議論するためには、葉温として樹冠部の全葉面の平均表面温度を測定する必要があり、樹冠全体の蒸散速度だけでなく総葉面積を測定する必要がある。蒸散速度の測定には大型重量計を用い、プランターを含めたケヤキの全重量の変化から風の影響を除去し蒸散速度を算出する [58]。なお、この方法では±100gの誤差で蒸散速度が計測できることが確認できている [40]。総葉面積は、押尾ら(2016) [59]が対象樹木の3次元レーザースキャナによる計測結果を基に算出した値を用いる。樹冠部の平均葉温を取得する方法として、多数の熱電対による測定、熱画像による測定、の二つが考えられるが、本研究においては一回の撮影で樹冠全体の表面温度の分布を計測できる熱画像を用いて樹冠の平均表面温度を測定した。

### 樹冠の平均葉温の測定方法の検討

熱画像により樹冠部の平均表面温度を取得するためには、熱画像から樹冠部分のみを抽出する必要がある。以下では熱画像から樹冠部を抽出する方法について検討する。

熱画像から樹冠の表面温度を抽出するためには、背景である空のセル、空と樹冠のミ

クセルを除去する必要がある。空のセルは樹冠のセルと比較して温度が低いため、温度の閾値を設定することで取り除くことが可能である。また、空と樹冠のミクセルは隣接するセルとの温度差が大きく（図 2-12）、その特徴を利用して除去することとした。

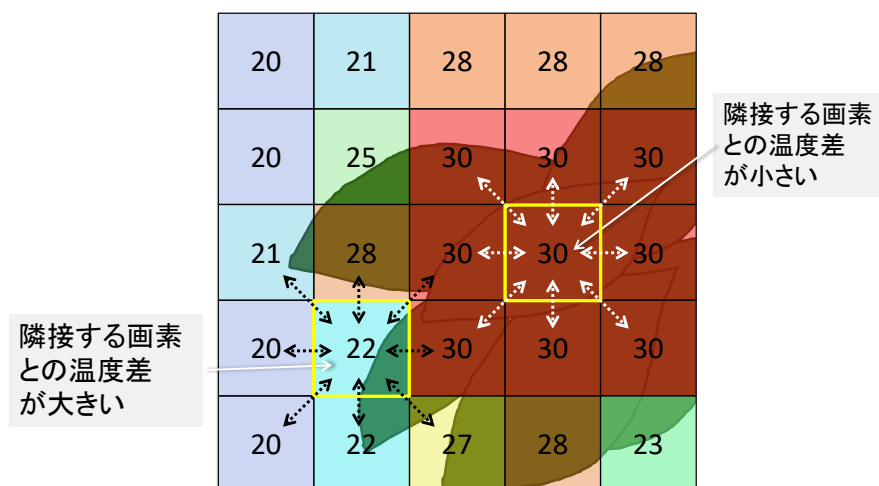


図 2-12 ミクセルの周辺画素との温度差

そこで、隣接する画素との温度差を評価するため、「微分値」という値を定義し、適当な閾値を設定することでミクセルを判別した。図の中心の画素の微分値 $D_0$ は以下のように、隣接する8画素との温度差の絶対値の総和と定義した。（図 2-13）。

$T_1$	$T_2$	$T_3$
$T_4$	$T_0$	$T_5$
$T_6$	$T_7$	$T_8$

$$D_0 = \sum_{i=1}^8 |T_0 - T_i|$$

図 2-13 微分値の定義

上記の方法で微分値を算出し作成した微分値の分布と温度の分布を図 2-14 に示す。葉と空の境界部分で値が大きく、微分値によりミクセルの抽出が可能であることが確認できる。

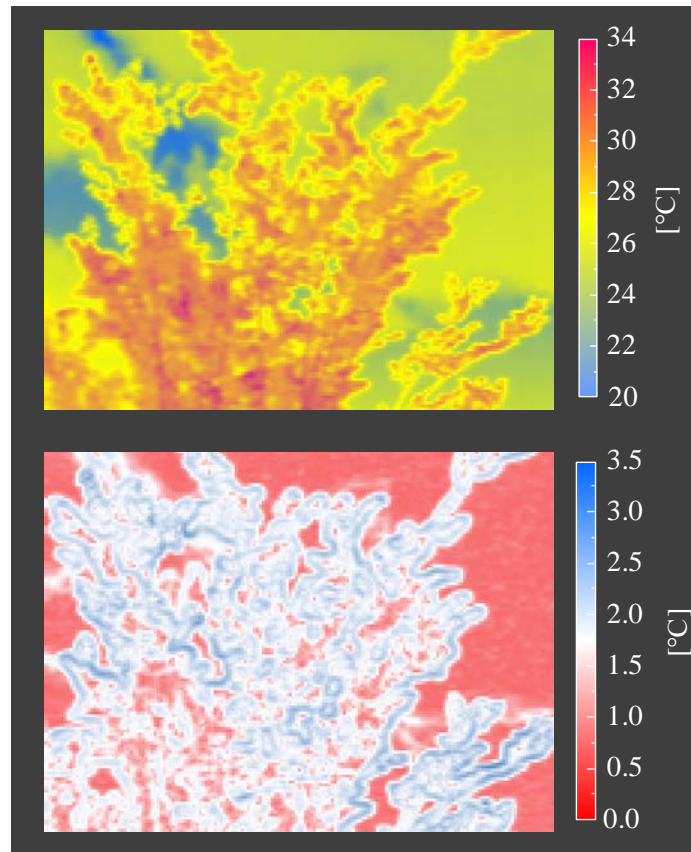


図 2-14 表面温度の分布と微分値の分布

微分値の閾値に対する抽出画素数やその分布は空の温度と葉温の温度差によって変化すると考えられる。空の温度、葉温は気象条件によって変動するため、それら条件に合わせて閾値を変更することが必要となる。そこで、抽出画素数に閾値を設定し、熱画像ごとに抽出画素数が一定となるように微分値の閾値を変動させた。

抽出画素数の閾値の決定には以下のような方法を用いた。

1. 熱画像と近い角度で撮影された実画像を熱画像の画素サイズに分割し、葉だけが含まれる画素を抽出する (図 2-15)。
2. 実画像から抽出された葉だけが含まれる画素の数と、熱画像から微分値を利用して抽出した画素の数が最も近くなるように閾値を設定する。

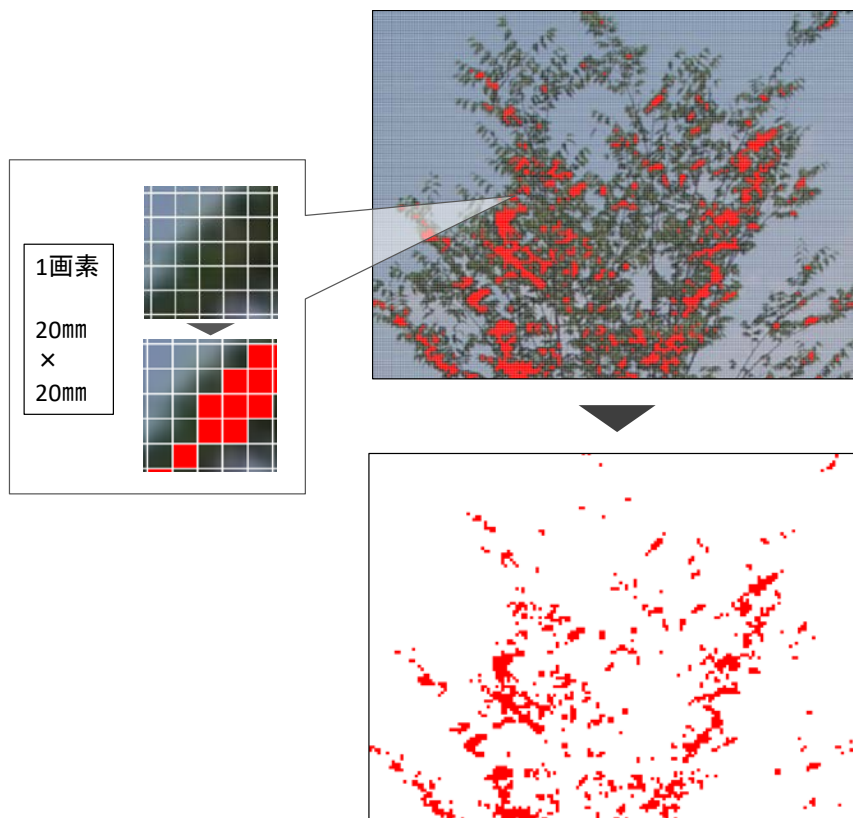


図 2-15 実画像による葉だけの含まれる画素の抽出

### 測定方法

前項の検討を踏まえ、以下に示す測定場所、測定期間にて実測を行った。

測定対象：ケヤキ(樹高 6.4m)

測定場所：愛知県三好市黒笹の実験圃場内

測定期間：2010年6月～現在も計測継続中

測定項目と測定機器を表 2.3 に、測定方法を図 2-16 に、測定機器の配置を図 2-17 に示す。なお、比較樹木として樹形の近いケヤキを対象とし、灌水を停止して蒸散を抑制した上で対象樹木と同様の方法により葉温を測定した。樹冠の全葉面近傍の平均値と樹冠の外部での測定値でのずれは十分小さいと考え、周辺微気象に関する項目は樹冠外部の一地点で測定した。

表 2.3 測定項目と測定機器

測定項目	測定機器	測定間隔
蒸散速度	ロードセル式重量計 (秤量 1500kg、測定精度 1/6000)	1 秒
樹冠の表面温度分布	赤外線放射カメラ (1.25mrad)	1 分
気温	白金抵抗温度計	1 分
風向・風速	三次元超音波風向風速計	1 分
上下方向長短波放射量	長短波放射計	1 分



図 2-16 測定の様子

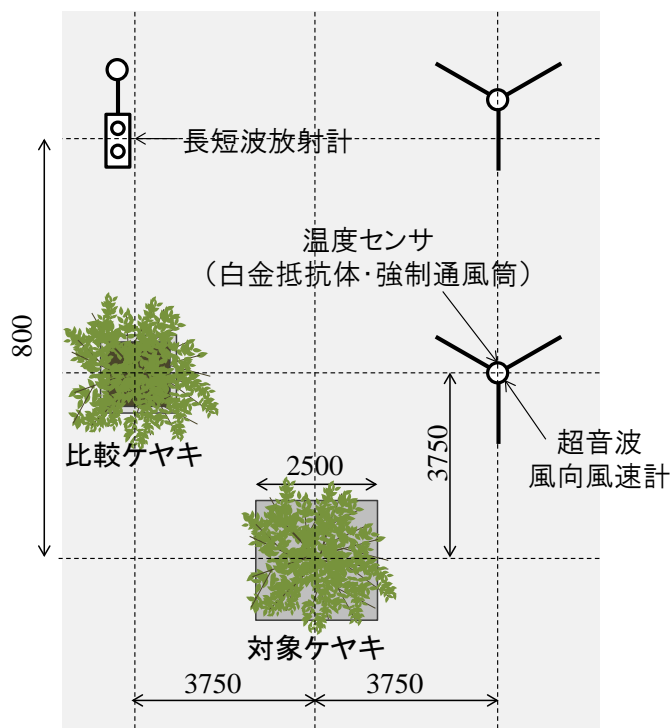


図 2-17 測定機器の配置

## 2.5 葉温変化にみる樹木の熱収支特性

### 2.5.1 個葉の熱収支特性

#### 測定結果の概要

2012/9/12、12:00～12:10 を例に、微気象条件に関する測定結果の概要を示す(図 2-18)。なお、図 2-18 には 1 秒間隔の測定データの 15 秒間の平均した値を示している。

図 2-18 のように、10 分間程度の時間スケールでその間の微気象要素の変動をみると、風速  $u$ 、下向き日射量  $R_{s,down}$  は顕著な変化を示すが、その他の微気象要素の変動は小さい。そのため、葉の吸収放射量  $R_{abs}$  の変動は  $R_{s,down}$  の増減と一致すると考えられる。そこで、2 章にて示した、 $R_{abs}$  の変動が顕著である、または変動がなく安定しているデータを抽出するに当たり、 $R_{s,down}$  の変動が顕著、もしくは安定しているかどうかを選定基準とした。



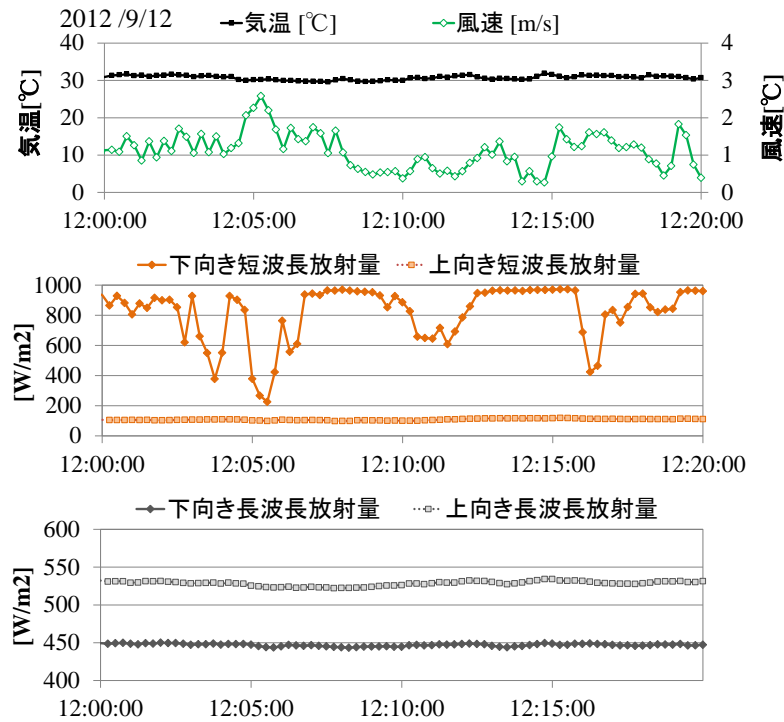


図 2-18 微気象条件の測定結果

近傍微気象の葉温への影響

式(2.10)の条件に見合う、 $u$  が安定し、 $R_{s\_down}$  の増減が顕著なデータとして 2012/8/28/14:34-14:36 のデータを例にその間の葉温の変化をみる(図 2-19)。なお、以下に示す $R_{s\_down}$ 、 $u$  は 1 秒間隔の測定データの 15 秒間の平均値であり、葉温は 5 秒間隔の測定データの 15 秒間隔での平均値である。

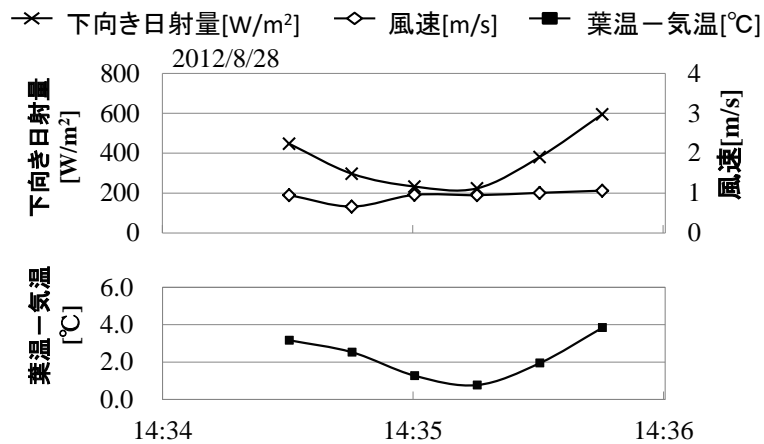


図 2-19  $R_{s\_down}$  の変化が顕著、 $u$  が安定のときの葉温変化

2章にて示したように、この間の蒸散速度変動は小さいと考えられるため $IE$ は一定であり、 $u$ の変化が小さいため $\alpha_c$ は一定であると考えられる。そのため熱収支式からは、葉温-気温の変化要因は $R_{abs}$ の変化のみであると考えられる。またこのとき、長波長放射量の増減は小さいため、 $R_{abs}$ 増減は $R_{s\_down}$ の増減と対応すると考えられる。以上から、 $R_{abs}$ が増大(減少)すれば、顕熱輸送量が増大(減少)し葉温-気温が増大(減少)することが推測される(図 2-20)。葉温-気温の測定結果の増減は $R_{s\_down}$ の増減と一致し、熱収支式と対応した変化を示す。

$$R_{abs} = \underbrace{IE}_{\text{増大(減少)一定}} + \underbrace{H}_{\text{増大(減少)}} + \underbrace{L_{oe}}_{\text{増大(減少)}} \quad H = \underbrace{\alpha_c}_{\text{一定}} \underbrace{(T_l - T_a)}_{\text{増大(減少)}} \quad L_{oe} = \underbrace{\sigma \epsilon T_l^4}_{\text{増大(減少)}}$$

図 2-20  $R_{s\_down}$  の変化が顕著、 $u$  が安定しているときの熱収支

また、14:34:45 前後の $R_{abs}$ の変化が下に凸であるに対し、葉温-気温の変化はわずかであるが上に凸となっているが、これは 14:34:45 の他の時刻と比較して 0.4[m/s]程度小さくなっているため対流熱伝達率が他の時刻と比較してわずかに小さくなっているためであると考えられる。

次に式(2.14)の条件に見合う、 $R_{s\_down}$ が安定し、 $u$ の増減が顕著な測定データとして 2012/9/12/9:32-9:36 を例にその間の葉温の変化をみる(図 2-21)。なお、以下に示す下向き日射量、風速は 1 秒間隔の測定データの 20 秒間の平均値であり、葉温は 5 秒間隔の測定データ 20 秒間隔の平均値である。

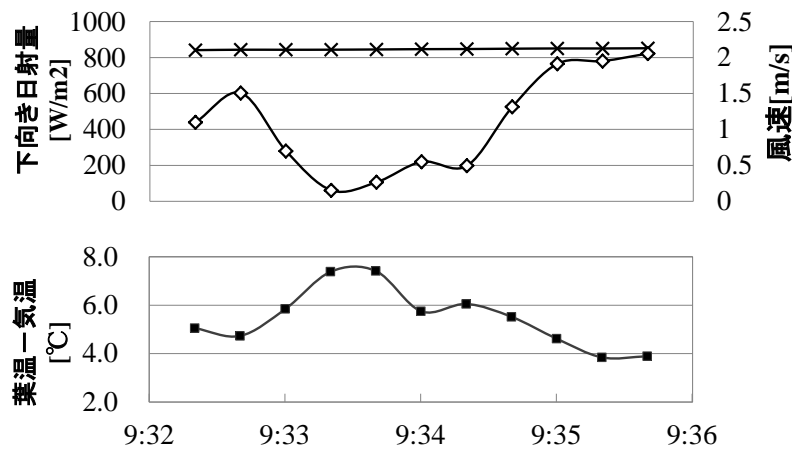


図 2-21  $u$  の変化が顕著、 $R_{s\_down}$  が安定のときの葉温変化

上述のようにこの間の蒸散速度変動は小さいと考えられるため $IE$ は一定であり、 $R_{s\_down}$ の変化が小さいため $R_{abs}$ は一定であると考えられる。以上から、 $u$ が増大(減少)すれば、 $\alpha_c$ が増大(減少)し葉温-気温が減少(増大)することが推測される(図 2-22)。

葉温-気温の測定結果の増減は $u$ の増減と一致し、熱収支式と対応した変化を示した。

$$R_{abs} = \underbrace{lE}_{一定} + \underbrace{H}_{一定} + \underbrace{L_{oe}}_{一定} \quad H = \frac{\alpha_c}{\text{増大(減少)}} (T_l - T_a) \quad L_{oe} = \frac{\sigma \epsilon T_l^4}{\text{減少(増大)}}$$

図 2-22  $u$ の変化が顕著、 $R_{s\_down}$ が安定しているときの熱収支

以上のように個葉の葉温は熱収支式と対応する変化を示したことから、式(2.10)に示す対流熱伝達率の算出方法が適用可能であると考ええる。

### 2.5.2 樹冠の熱収支特性

測定結果の概要

図 2-23、図 2-25、図 2-24 に、2010/8/30 における、対象樹木、比較樹木の葉温-気温、下向き日射量、風速、対象樹木、比較樹木の葉温差、蒸散速度の測定結果を示す。

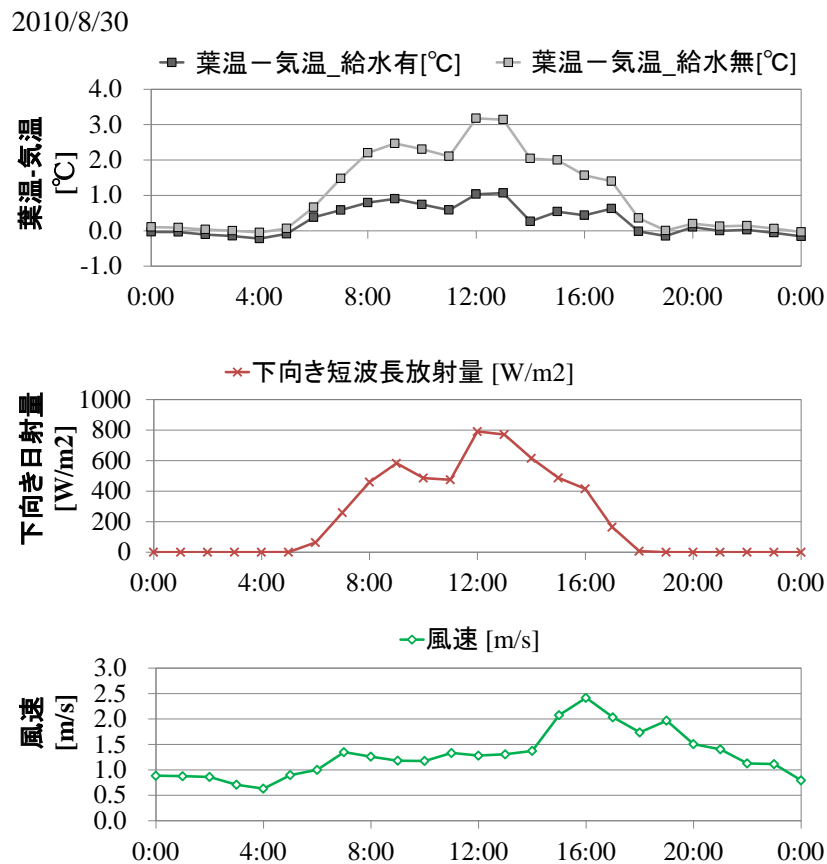


図 2-23 周辺微気象条件と蒸散速度・葉温の測定結果

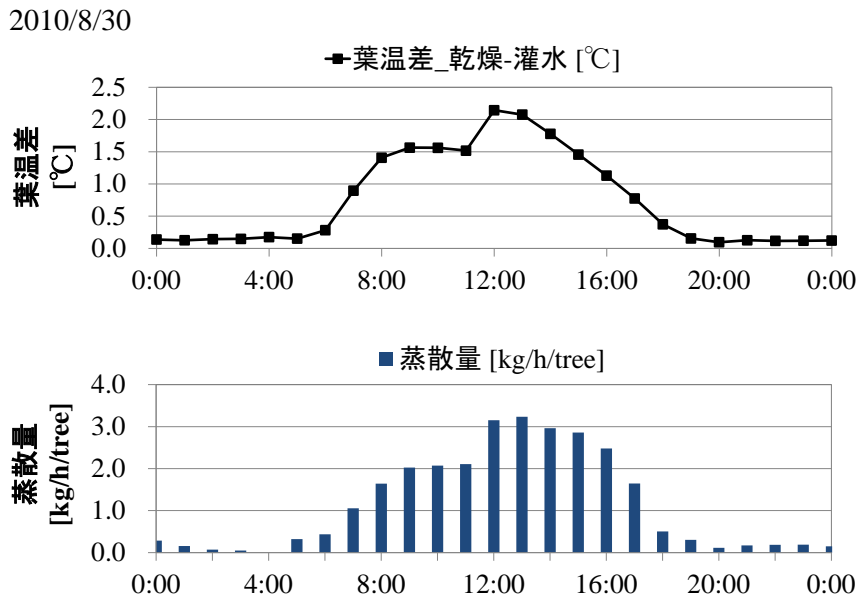


図 2-24 周辺微気象条件と蒸散速度・葉温の測定結果

### 近傍微気象の葉温への影響

葉温-気温の日変化をみると、水平面全天日射量と顕著に対応しており、これは吸収放射量とともに顕熱輸送量が増加しているためであると考えられる。

また、対象ケヤキと比較ケヤキは同一環境下に置かれ、形状が類似しているため、 $R_{abs}$ 、 $\alpha_c$ 、は両ケヤキで等しくなる(図 2-25)。そのため対象ケヤキと比較ケヤキの葉温差の要因は潜熱輸送量の差のみとなると考えられ、実際に対象ケヤキの葉温と蒸散速度は顕著な対応を示した。

$$\frac{R_{abs}}{\text{同値}} = \frac{LE}{\text{大(小)}} + \frac{H}{\text{小(大)}} + \frac{L_{oe}}{\text{同値}} \quad H = \frac{\alpha_c}{\text{同値}} \frac{(T_l - T_a)}{\text{小(大)}} \quad L_{oe} = \frac{\sigma \epsilon T_l^4}{\text{小(大)}}$$

図 2-25 潜熱輸送量のみが異なる 2 樹木の熱収支

以上のように、樹冠全体の葉温の測定結果は熱収支式と対応する挙動を示したことから、式(2.14)に示す対流熱伝達率の算出方法が適用可能であると考えられる。

### 2.5.3 葉の蓄熱の熱収支へ及ぼす影響

ここでは、葉の蓄熱の熱収支への影響を推定し、熱収支計算において無視することの妥当性を検討する。なお、葉の蓄熱だけでなく、流入水分の蓄熱の影響も検討する。

葉の単位葉面積・単位時間あたりの蓄熱量の影響は、単位葉面積当たりの容積比熱、

に単位時間あたりの葉温変化( $\Delta T$ )、を乗じた値により評価し、流入水分の蓄熱量の影響は単位体積、単位時間あたりの流入水分の容積比熱に、葉内水分と流入水分の温度差( $\Delta T$ )を乗じた値により評価する。

表 2.4 に、刈取りの際に測定した葉面積、生重量、乾燥重量、蒸散速度から推定した葉、流入水分の容積比熱、 $\Delta T$ 、それにより算出した蓄熱量を示す。葉温変化( $\Delta T$ )は実測値の温度変化から設定し、流入水分と葉内水分の温度差( $\Delta T$ )は枝部の温度と葉温の差に等しいと仮定し、晴天日であった 2010/8/18 の 12 時の熱画像(図 2-26)を基に設定している。なお、枝を通過する水分は、葉に到達する前に枝よりも直径の小さい葉柄を通過し、このときの顕熱輸送により気温に近づくため、実際の流入水分と葉内水分の温度差( $\Delta T$ )はここで設定している $\Delta T$ よりもさらに小さいと考えられる。

他の熱収支項は $10^1 \sim 10^2 [W/m^2]$ 程度のオーダーとなるため、葉・流入水分の蓄熱量はともに十分小さく、熱収支計算において考慮する必要がないことが確認できた。

表 2.4 葉と流入水分の蓄熱量

	容積比熱	$\Delta T$	蓄熱量 $[W/m^2]$
葉	$3.3 \times 10^2 [J/(K \cdot m^2)]$	$3.0 [^\circ C/h]$	$3.3 \times 10^{-1} [W/m^2]$
流入水分	$1.9 \times 10^{-1} [J/(s \cdot K \cdot m^2)]$	$3.0 [^\circ C]$	$5.7 \times 10^{-1} [W/m^2]$

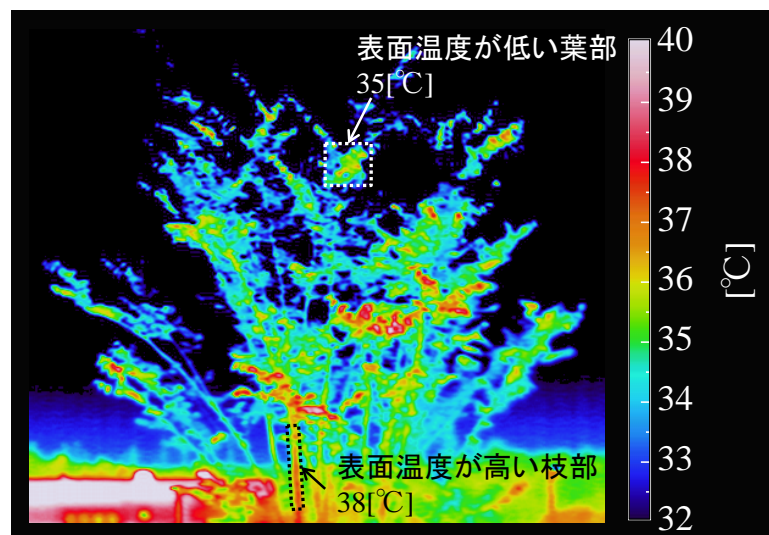


図 2-26 枝・幹と葉の温度差

## 2.6 単木の顕熱・潜熱輸送量の同定

## 2.6.1 樹木の対流熱伝達率

## 個葉の対流熱伝達率の算出

## 【式(2.10)による算出】

実測データから式(2.10)に見合うデータとして2012/8/28/14:34-14:36のデータが抽出された。図 2-27 に測定データを示す。

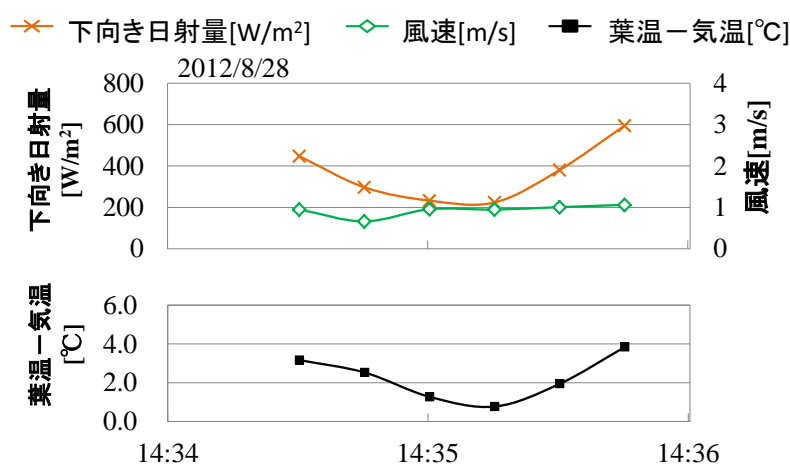


図 2-27 式(2.10)による算出に用いる測定データ

図 2-27 に示す測定データから任意の2時刻を抽出し、その2時刻の熱収支式を連立することで対流熱伝達率を算出した。なお、この区間内の潜熱輸送量の差は小さいと考えられるが、それによる算出誤差をより小さくするため、連立する2時刻として時間差が30秒以内の組を抽出した。また算出式(2.10)の分母で2時刻間の葉温-気温の差が小さい場合も算出誤差が大きくなると考えられるため、そこからさらに葉温-気温の差が一定以上となる組を抽出し算出に用いた。算出の結果を表 2.5 に示す。

表 2.5 対流熱伝達率の算出結果

連立した2時刻	対流熱伝達率の算出値 [W/m²/K]	算出値の平均 [W/m²/K]	算出に用いた全時刻の平均風速 [m/s]
14:34:30 - 14:35:00	25.9		
14:35:15 - 14:35:45	26.6	26.0	1.0
14:35:30 - 14:35:45	25.6		

## 【式(2.14)による算出】

式(2.14)に見合うデータとして1区間のデータが抽出されたため、さらに式(2.14)に見合うデータとして快晴であった2012/9/12/9:00-14:00から5区間のデータを抽出して用いた。抽出した測定データを図2-28、図2-29に示す。

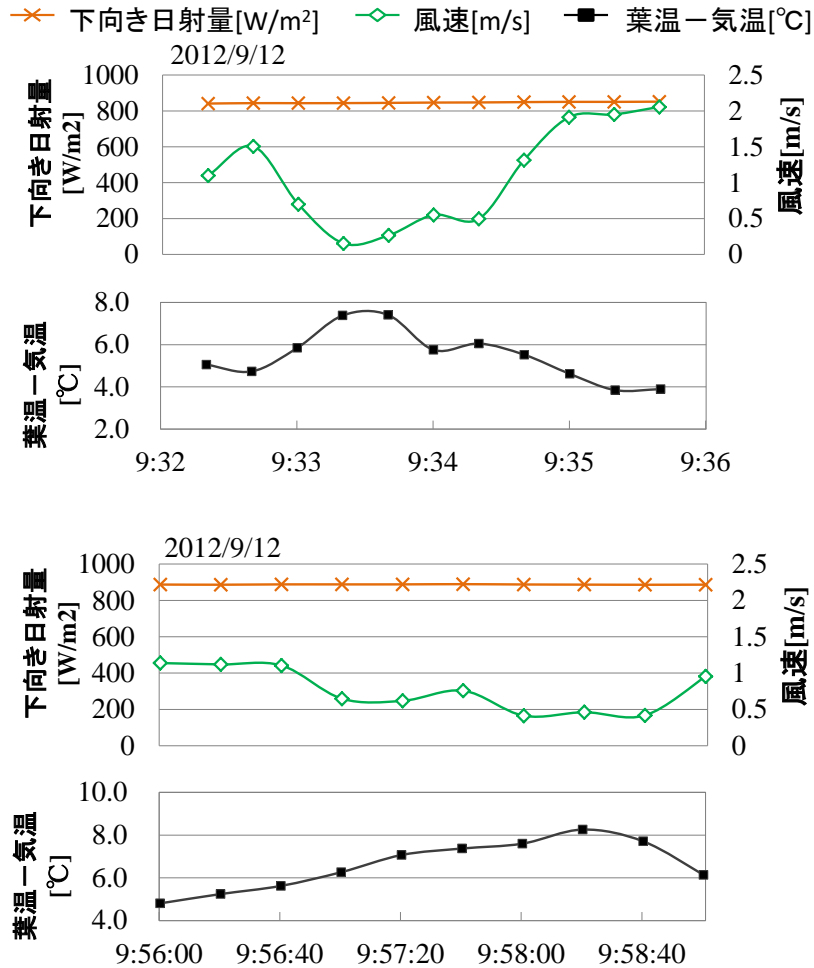


図2-28 式(2.14)による算出に用いる測定データ①

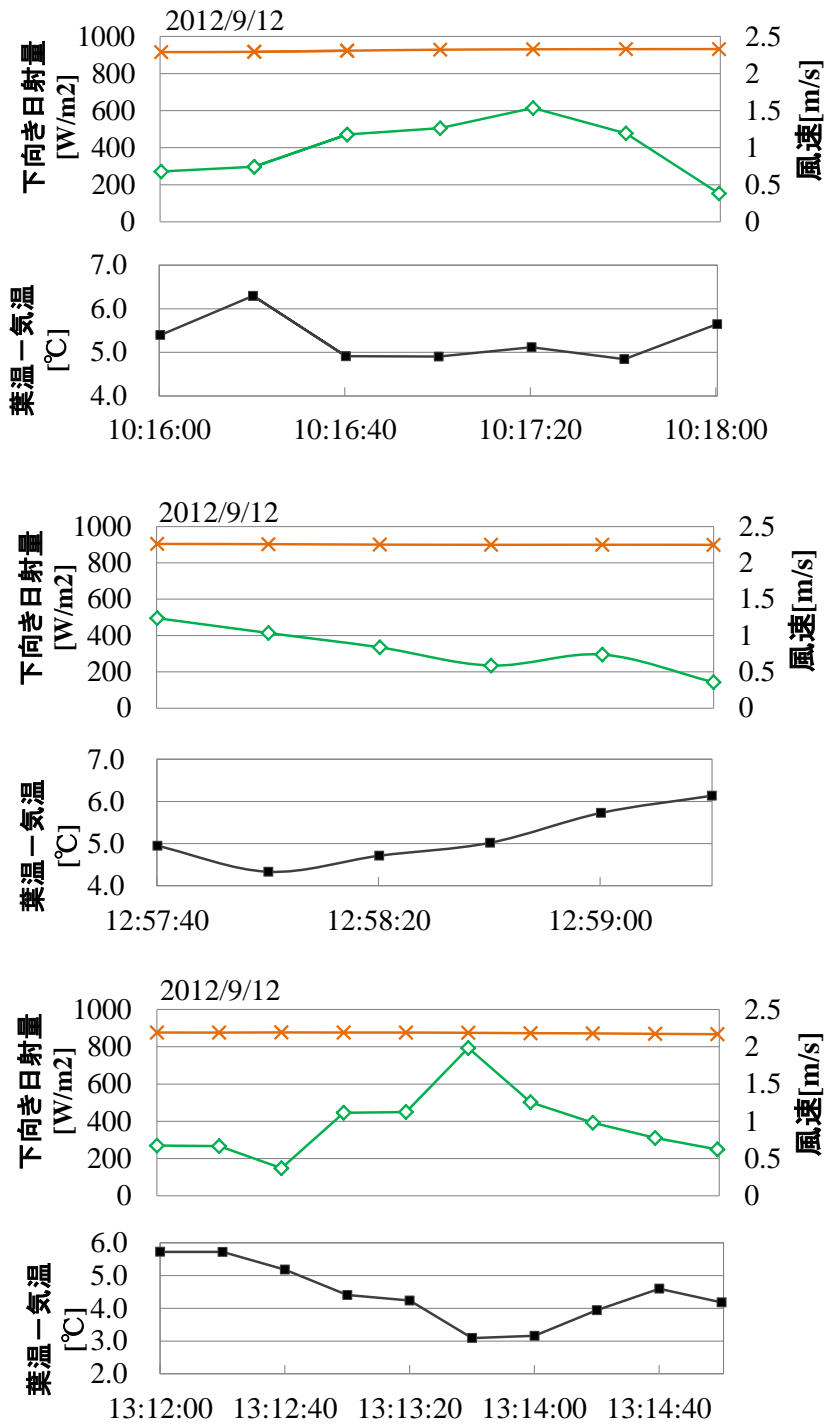


図 2-29 式(2.14)による算出に用いる測定データ②

式(2.10)の算出値が風速 1.0[m/s]のときに得られた値であるため、それぞれの区間において、連立する 2 時刻のうち一方を風速が 1.0[m/s]である時刻とし、もう一方を風速がことなる時刻とすることで、異なる風速のときの対流熱伝達率を算出した。算出結果を図 2-30 に示す。算出結果は風速との相関を示し、算出に用いた 5 区間すべてで同



様の傾向を示した。

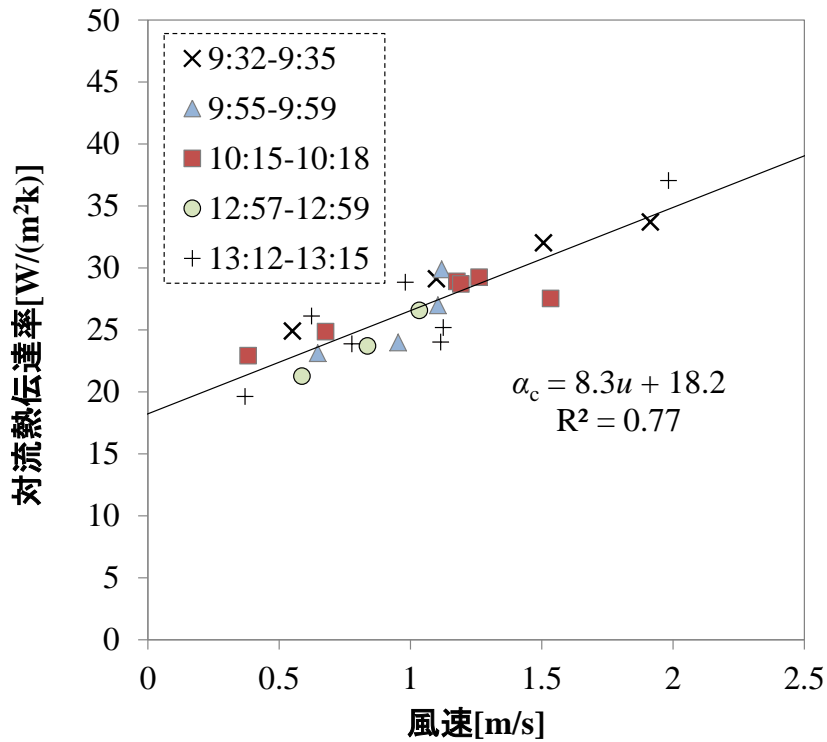


図 2-30 個葉の対流熱伝達率の定式化

#### 樹冠の対流熱伝達率の算出

夏季晴天日において葉温の測定を実施した 2010/8/30 の実測値を基に樹冠全体の対流熱伝達率の算出を行った。図 2-31 に算出に用いる葉温-気温、蒸散速度の測定結果と、対象ケヤキ、比較ケヤキそれぞれの樹下の土壌深さ 250[mm]における pF 値の測定結果を示す。

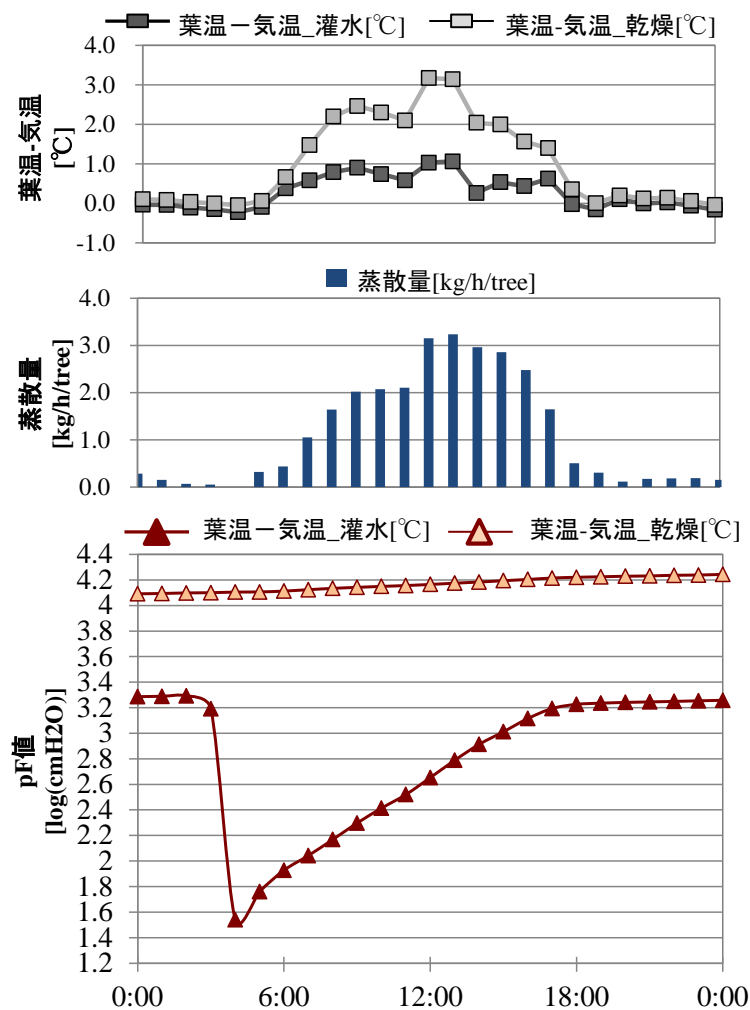


図 2-31 式(2.18)による算出に用いる測定データ

灌水を行っている対象ケヤキの土壌の pF 値と比較して、灌水を行っていない比較ケヤキの土壌の pF 値は高い値を示し、1 日を通して永久しおれ点の 4.2 に非常に近い値となっている。そのため比較樹木の蒸散速度（潜熱輸送量）は 0 であると見なした。また、式(2.18)からは、潜熱輸送量が小さいこと、また葉温差が小さいことが対流熱伝達率の算出値の誤差を大きくする要因となると考えられる。そのため、潜熱輸送量、葉温差が一定以上の値のデータを用いて算出を行った。算出結果を図 2-32 に示す。

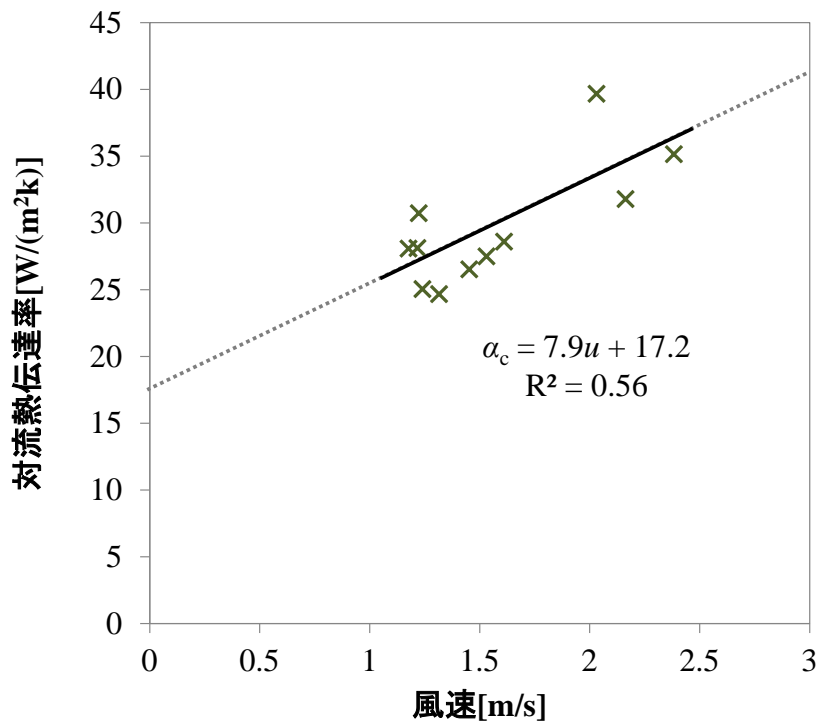


図 2-32 樹冠の対流熱伝達率の定式化

個葉における算出結果同様に、樹冠における算出結果も風速と相関を示し、算出に用いた各区間において同様の傾向を示す。1[m/s]以下と 2.5[m/s]以上の風速域での算出値は得られていないが、既往研究や個葉において得られた実験式に基づき、風速 1[m/s]以下の対流熱伝達率は 1[m/s]以上の算出値により得られた実験式により補完した。

#### 既往研究との比較

個葉と樹冠それぞれにおいて得られた算出値と、既往研究において示されている実験式または理論式による算出式を図 2-33 に示す。

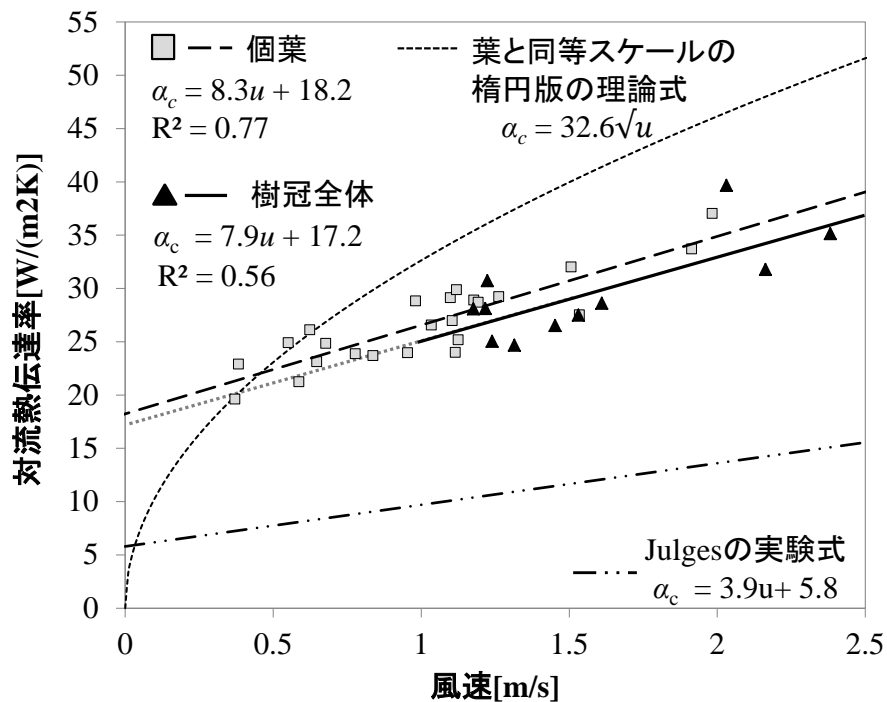


図 2-33 既往研究における対流熱伝達率との比較

個葉と樹冠で、対流熱伝達率は類似した傾向を示し、個葉が樹冠を上回る。これは、個葉では近傍風速により定式化を行っているのに対し、樹冠の $\alpha_c$ は樹冠から数メートル離れた位置の風速を基に定式化を行っているため、葉面近傍の風速が式中の風速よりも小さいためと考えられる。

既往研究での $\alpha_c$ の算出式と比較すると、本研究の算出プロットは算出値の存在する全風速域において Jülgés の実験式 [60]の2倍以上の値を示した。これは Jülgés の式が葉のスケール効果を考慮していないことが原因であると考えられる。また、風速 0.4[m/s]以下の弱風速域においては葉と同等スケールの楕円版での強制対流による $\alpha_c$ を算出する理論式 [61]よりも大きい値となっており、これは理論式の想定する風速 0[m/s]が完全な静止状態を表すのに対し、実環境における風速 0[m/s]の下では気流の乱れが生じていること、さらに弱風速域では強制対流だけでなく自然対流の影響が無視できないほどに大きいためであると考えられる。0.4[m/s]以上の風速域では本研究の算出プロットは楕円版の理論式 [61]よりも小さい値となった。これは前述の弱風条件と一見矛盾するようではあるが、自然風に対する枝葉のそよぎ方を観察してもわかるように、ある程度の風が吹くと枝葉が風の流れて沿って変移し（風になびき）、流体力学的抵抗が減少することが原因であると推測される。このように枝葉が風にそよぎやすい樹木では、風速の増加により抵抗係数が減少することは既往研究でも明らかとなっている [62] [63]。抵抗係数が減少するという事は、運動量輸送と熱伝達の相似性により $\alpha_c$ も減少することが類推でき、原理に鑑みて矛盾のない解釈が可能である。また、風速方向へ葉

が変位することで葉面に対する相対風速が減少することも考えられる。その他、既往研究において、気流の方向や葉の迎え角（気流方向に対する葉面の傾き）によって葉面境界層抵抗が異なるとの報告 [64] もあるため、その影響に関する今後の詳細な検討が必要であるが、本研究の $\alpha_c$ は、そのような影響が複合的に合わさった結果として位置づけることができ、工学利用上有効な実験式であろうと考えられる。

### 2.6.2 樹木から周辺大気への顕熱輸送量

2010/8/30 の実測結果を基に算出した樹冠の顕熱輸送量の日変化を図 2-34 に示す。灌水を停止しているケヤキの顕熱輸送量は灌水しているケヤキと比較して最大で約 2000[W]大きく、ほぼ全時刻において灌水しているケヤキの潜熱輸送量を上回る。ここからは灌水条件の違いにより樹木の周辺大気への顕熱、潜熱の放散割合が大きく異なり、灌水が十分でない樹木は顕熱輸送が卓越することで周辺大気を加熱する作用がより大きくなることが確認できた。

また、0時から5時、18時から0:00時の夜間は放射冷却の影響により顕熱輸送量が0以下となる場合が多く、最も小さい時で-160[W]となっている。ここからは、にじみ出し現象 (Spronken-Smith and Oke, 1999 [65]; 成田ら, 2004 [66]; 成田・菅原, 2011 [67]) の要因と考えられている樹木が夜間に周辺大気を冷却する作用が確認できた。

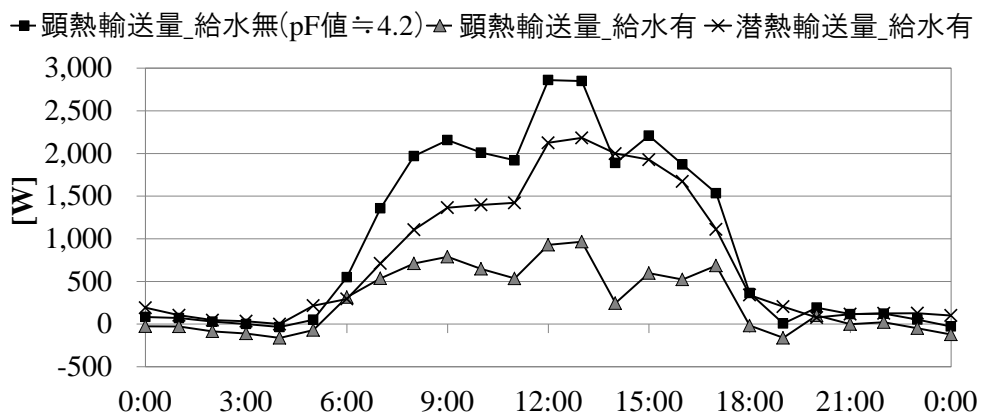


図 2-34 灌水有の樹木、灌水無の樹木の顕熱輸送量と潜熱輸送量

### 2.6.3 熱収支の検証

ここでは、本研究で算出した対流熱伝達率の算出結果の妥当性を検証することを目的に、日射による熱取得が同等であり、灌水条件が異なる 2010/8/30（灌水あり）と 2010/8/26（灌水なし）の実測結果から算出した熱収支を比較する。図 2-35 に上記の日程において算出した潜熱・顕熱輸送量と日射量の実測結果を示す。なお、

2010/8/30 と 2010/8/26 で日射量の日積算値が同等であり、日変化の傾向が類似していることから、日射による熱取得量が同等であるとみなした。

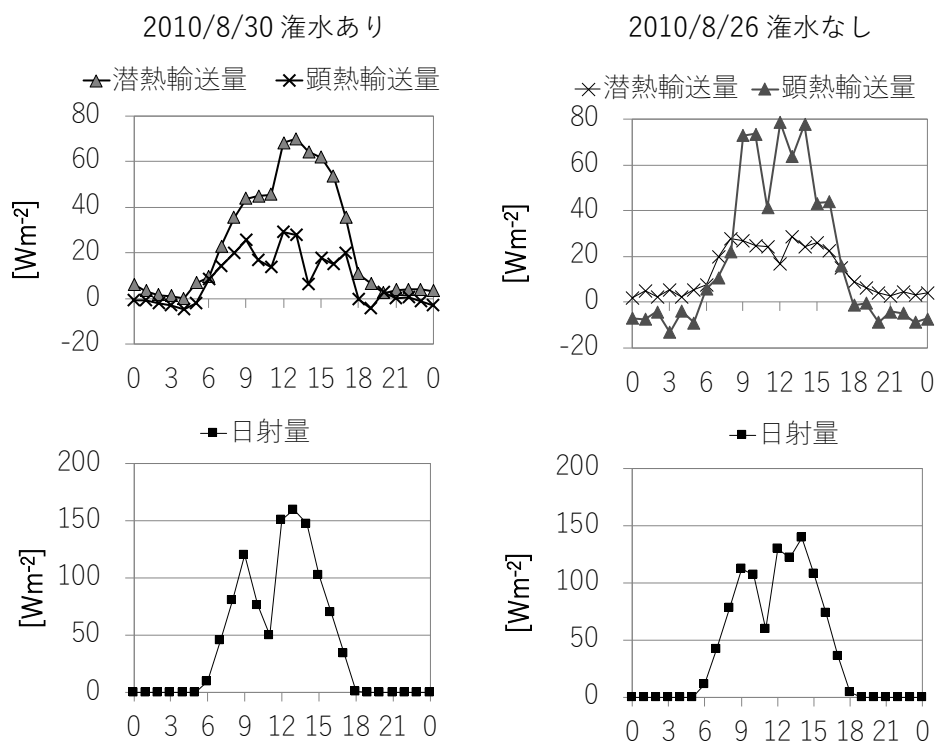


図 3-35 2010/8/30 と 2010/8/26 の潜熱・顕熱輸送量と日射量

日射による熱取得量が同等であり、算出に用いた対流熱伝達率が妥当であれば、潜熱輸送量と顕熱輸送量の総和が同等となるはずである。表 2.8 2010/8/30 と 2010/8/26 における熱収支の日積算値の比較に①2010/8/30 と②2010/8/26 における熱収支の日積算値の比較を示す。実際に①と②の潜熱輸送量と顕熱輸送量の総和の差は 5%程度となっており、本研究において算出した対流熱伝達率と顕熱輸送量の妥当性が示された。

表 2.1 2010/8/30 と 2010/8/26 における熱収支の日積算値の比較

日積算値 (葉面積あたり)	①2010/8/30 (十分な灌水あり)	②2010/8/26 (灌水なし)	① - ②
日射量	3.79	3.69	0.10
顕熱輸送量	0.77	1.97	-1.21
潜熱輸送量	2.04	0.98	1.05
顕熱輸送量 + 潜熱輸送量	2.80	2.96	-0.15

## 2.7 まとめ

本章では、葉の三次元分布や揺らぎといった樹木の特性を考慮した対流熱伝達率を算出し、それに基づく樹木から周辺大気への顕熱輸送量を評価することを目的に、屋外環境下のケヤキを対象とした熱収支と周辺微気象の実測を行った。樹木の対流熱伝達率は直接的な測定が困難であるため、同一環境下に置き、灌水条件を変えて潜熱輸送量に差を生じさせた2本のケヤキの熱収支式を連立し、測定の困難な熱収支項を消去することで間接的に算出した。その結果、本研究の対象ケヤキの樹冠・個葉の対流熱伝達率はユルゲスの式と比較して2倍以上に大きく、楕円板の式と比較すると、約0.4[m/s]以下では大きく、約0.4[m/s]以上では小さい値となった。算出した対流熱伝達率を基に樹木から周辺大気への顕熱輸送量を算出し、日射による熱取得量が同等となる2条件において顕熱・潜熱輸送量の総和が同等となったことから、得られた対流熱伝達率の妥当性を確認した。

なお、本章の結果はケヤキの若木の一個体における結果であり、他の個体、さらには他の樹種の樹木を対象とした場合には異なる結果を示すはずである。本章の成果を都市樹木一般に拡張するためには、樹種や個体による樹形や葉面積密度の違いが $\alpha_c$ に及ぼす影響について検討する必要がある。既に石丸ら(2014) [68]がその検討を行っている。しかし、その成果の展開については本研究以後の課題とし、次章以降では本章で得られたケヤキの $\alpha_c$ を使用する。

## 第3章 熱環境シミュレーションのための樹木の熱収支モデルの構築

本章では、2章における樹冠の対流熱伝達率とそれによる顕熱・潜熱輸送量の算出結果を用い、熱環境シミュレーションのための熱収支モデルを構築する。

### 3.1 はじめに

樹木の熱収支は、式(2.4)に示したように、日射、長波長放射による吸収放射量、周辺大気への顕熱輸送量、潜熱輸送量、自己放射、熱伝導（蓄熱）により構成される。中でも樹木特有の計算が必要となるのが、樹冠の葉群中の放射輸送、気孔の開閉による影響を受ける蒸散速度、葉群の三次元分布や揺らぎを考慮した顕熱輸送である。樹木の熱収支を計算するためには、それらを適切にモデル化し、それらをサブモデルとした熱収支モデルを構築することが必要となる。

また、樹木による熱環境改善効果を評価するためには、上記の熱収支モデルを用いた熱環境シミュレーションにより、周辺熱環境への影響を評価する必要がある。1章に述べたように、樹木は暑熱適応策、ヒートアイランド緩和策の両面で効果を有するため、それぞれの効果について適切な指標を決定し、その計算手法を構築する必要がある。

以上から、本章では樹木の熱収支モデルや熱環境改善効果の評価についての既往研究を整理したうえで熱収支の計算方法を決定し、それに基づき熱環境シミュレーションのための樹木の熱収支モデルを構築する。

### 3.2 熱収支の計算方法の検討

ここでは、樹木の熱収支のモデル化について検討するため、関連する既往研究について整理する。樹木の熱収支計算についての既往研究を放射輸送、蒸散速度、対流熱伝達率の3つの観点で、熱環境改善効果の評価についての既往研究を暑熱適応策、ヒートアイランド緩和策の2つの観点で整理する。



### 3.2.1 既往研究における樹木の熱収支モデル

#### 放射輸送

葉群中の放射輸送計算においては、葉一枚一枚を詳細に再現した形状モデルを用いるのは過大な計算コストにつながるため、樹冠部分を葉面積密度の情報を持つ三次元的な領域として表現する方法が用いられるのが一般的である。多くの研究（例えば、Monsi & Saeki, 1953 [6]; 吉田ら, 2006 [7]）において、この樹冠領域における放射の透過（吸収）率は式(3.1)の Beer-Lambert 則を用いて算出される。

$$\tau = \exp(-kLADl) \quad (3.1)$$

$\tau$	: 透過率[-]
$k$	: 消散係数[-]
$LAD$	: 樹冠領域の葉面積密度[m <sup>2</sup> m <sup>-3</sup> ]
$l$	: 放射束が樹冠領域を通過した距離[m]

式(3.1)の消散係数 $k$ を葉の傾斜角や分布の関数として表現し、より詳細な計算を実施している例もある（平岡, 2001 [8]; Kobayashi et al., 2013 [9]）。都市熱環境分野においては、放射の波長域を短波長、長波長に2分し、それぞれについての放射輸送計算を実施する方法が一般的であるが、光合成の計算を目的としている場合、短波長放射の波長域を例えば光合成有効放射、近赤外、紫外というように細分化している研究事例（平岡, 2001 [8]; Kobayashi et al., 2013 [9]）もある。

樹木配置を議論するうえでは、樹種ごとに異なる樹形・樹高や葉面積密度、葉の形状や傾斜角の分布といった特徴、さらには成長や季節によるそれら特徴の経時変化を考慮することが必要となる。しかし、本研究ではそのための基礎的な研究として、一様な樹高、樹形や葉面積密度、葉の形状や傾斜角の分布を設定し、樹木の二次元配置のみを考える。短波長放射の波長域の扱いについては、1次精度としては問題ないと推測できることから、波長域を細分化した放射輸送計算は実施しないこととした。そのため、放射輸送計算は長波長、短波長の二つの波長域で実施した。

#### 蒸散速度

蒸散速度の計算方法は、完全湿潤面（水面）に対する蒸散速度の比率である蒸発効率を用いるもの（例えば、吉田ら, 2000 [10]; Matsuda et al., 2018 [11]）、光合成や呼吸等の植物生理に伴う気孔の開閉の影響を気孔コンダクタンスとしてモデル化するもの（例えば、平岡, 2001 [8]; 清野, 2017 [12]）、に大別される。前者の蒸発効率を用いた計算

は主に都市熱環境分野で用いられている手法であるが、この方法では本来気孔の開閉によって変化する蒸発効率を一定値とみなして計算するため、蒸散速度の算出結果に大きな誤差を生じてしまう可能性がある。そのため、気孔コンダクタンスを用いることが妥当であると考えられる。

気孔コンダクタンスは大気/葉面飽差 $D$ 、光合成有効放射量 $PAR$ 、気温 $T_a$ 、土壌水分量等の環境要因の関数としてモデル化されるのが一般的である。既往研究において、様々な型の気孔コンダクタンスモデル(Damour et al., 2010 [69])が提案されてきたが、本研究においては、より少ないパラメータで精度の良い予測が可能な最新の気孔コンダクタンスモデルである BMF モデル (Buckley, Mott & Farquhar, 2003 [70]; 清野, 2017 [12]) を用いた。また、土壌水分量に関しては、十分な灌水により水ストレスが生じない条件を想定し、その変化の影響を除外して計算した。

### 対流熱伝達率

既往研究における樹冠の対流熱伝達率の設定は、流体力学の観点から無次元数を用いて定式化を行うもの、建築環境工学の分野で用いられる壁面における算出方法を流用するものに大別される。平岡 (2002) [71]、Hiraoka(2005) [72]は、葉群内の熱収支計算において、Daudet et al.(1998) [73]による葉型の金属板における実験式を用いている。これは風洞実験において得られた実験式であり、枝葉の揺れの影響は考慮されていない。なお、Daudet et al.(1998) [73]は同様の葉型を用いて屋外での植生キャノピーを対象に自然風下での実験も行っている。また、温室内の植物を対象とした Kichah et al.(2012) [39]や Nebbali et al.(2012) [74]の研究では、Montero et al.(2001) [75]や Boulard et al.(2002) [76]に基づき流体の無次元数( $Nu$ ,  $Gr$ ,  $Pr$ ,  $Re$  数)を用いて $\alpha_c$ を算出している。神田ら (1990) [77]は流体力学の観点から植生の物理モデルを構築しており、その中の $\alpha_c$ にはやはり流体の  $Re$  数との関係に基づく式を用いている。なお、自然対流の取り扱いには研究ごとに差異がみられる。

建築外部空間の熱環境予測において、Robitu et al.(2006) [78]は Dauszat et al.(2001) [79]に基づき $\alpha_c$ に風速と葉の代表長さから求める実験式を適用している。建築・都市環境工学分野に着目すると、建築壁面等の $\alpha_c$ として環境的に用いられる式として、風洞内に設置された 50cm 四方の銅板を対象に同定された Jürges の式 [60]がある。街区スケールの熱環境予測における樹木の熱収支モデルにおいて、このような建築壁面と同等の $\alpha_c$ の値を用いている研究も見られる [10]。

以上に整理した多くの研究においても、樹木一大気間の熱収支の算出のための重要な情報の一つである樹冠全体の $\alpha_c$ について、屋外条件下において直接求めたものは見受けられない。そのため、2章にて屋外条件下の実測により算出した樹冠全体の $\alpha_c$ を熱収支計算に導入することで、より妥当な算出が可能になると考えられる。

### 3.2.2 既往研究における熱環境改善効果の評価指標

#### 暑熱適応策

陳ら [18]は暑熱適応策の効果を評価する目的関数として SET\* (標準新有効温度) [80]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(1999) [81]は街路樹周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, 2017 [82]; 森山ら, 2002 [83]; 幡谷ら, 2007 [84]) 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., 2018 [85]; Thorsson et al., 2014 [86])。

以上から、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 を採用する。

#### ヒートアイランド緩和策

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、都市熱環境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 [87] [88] [89]がよく知られている。CASBEE-HI [2]やヒートアイランド対策ガイドライン [1]においても、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、本研究ではヒートア

イランド緩和策の効果の指標として蒸散速度を採用する。なお、夜間の放射冷却によるヒートアイランド緩和策の効果は議論の対象としないこととした。

### 3.3 樹木の熱収支モデルの構築

3.2 に整理した既往研究を踏まえ、樹木の熱収支モデルにおける計算方法を決定した。ここではその詳細を説明する。

#### 3.3.1 空間形態の表現

樹木は図 3-1 に示すように LAD の情報を有するボクセル（以下樹木メッシュ）の集合として表現し、各樹木メッシュで熱収支の計算を実施することとした。

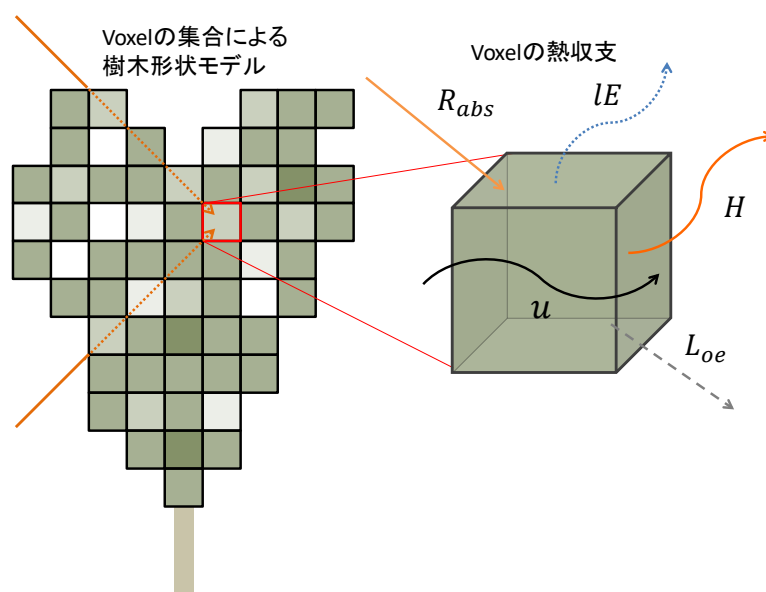


図 3-1 ボクセルによる樹木の表現

なお、樹木の周辺の建物、地面の形状については図 3-2 に示すように、サーフェスマッシュ（以下建物・地面メッシュ）の集合として表現した。

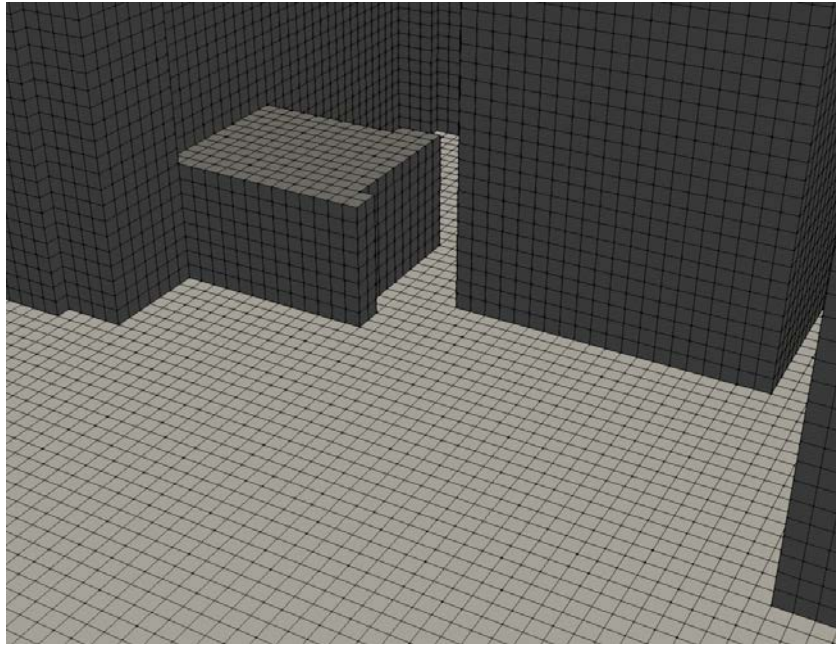


図 3-2 サーフェスメッシュによる建物・地面の表現

本研究においては、上述の樹木メッシュと建物・地面メッシュにより対象とする空間形態を表現し、その熱収支計算を実施する。以降では、その計算モデル全体を“樹木の熱収支モデル”と表現することとする。

### 3.3.2 熱収支計算

#### 樹木

各樹木メッシュにおいて計算する葉面の熱収支を式(3.2)、(3.3)、(3.4)に示す。熱収支を計算するためには式(3.2)の各項を算出する必要があるが、蓄熱量 $G$ は2.5.3にて示したように、熱収支への影響は小さく、熱収支モデルにおいても0とみなした。対流熱伝達率 $\alpha_c$ には2章で得られた実験式を適用した。気温と風速は全樹木メッシュで一定とした。

$$S_{abs} + L_{abs} = lE + H + L_{oe} + G \quad (3.2)$$

$$H = \alpha_c(T_l - T_a) \quad (3.3)$$

$$L_{oe} = \sigma \varepsilon T_l^4 \quad (3.4)$$

$S_{abs}$  : 吸収日射量[W/m<sup>2</sup>]

$L_{abs}$  : 吸収長波長放射量[W/m<sup>2</sup>]

$H$	: 顕熱輸送量[W/m <sup>2</sup> ]
$L_{oe}$	: 長波長放射射出量[W/m <sup>2</sup> ]
$\alpha_c$	: 対流熱伝達率[W/(m <sup>2</sup> · K)]
$T_l$	: 葉温[K]
$T_a$	: 気温[K]
$\sigma$	: 長波長放射率[-]
$\varepsilon$	: ステファンボルツマン定数[W/(m <sup>2</sup> · K <sup>4</sup> )]

### 建物・地面

各建物・地面メッシュにおいて計算する熱収支を式(3.2)、(3.3)、(3.4)に示す。地面蒸発はないものとし、潜熱輸送量 $IE$ は0であるとした。気温と風速は全建物・地面メッシュで一定<sup>4</sup>とした。

$$S_{abs} + L_{abs} = IE + H + L_{oe} + G \quad (3.5)$$

$$H = \alpha_c(T_s - T_a) \quad (3.6)$$

$$L_{oe} = \sigma\varepsilon T_s^4 \quad (3.7)$$

$T_l$	: 表面温度[K]
$T_a$	: 気温[K]
$\sigma$	: 長波長放射率[-]
$\varepsilon$	: ステファンボルツマン定数[W/(m <sup>2</sup> · K <sup>4</sup> )]

### 計算フロー

樹木と建物・地面メッシュにおける計算フローについて図 3-3 に示す。

まず、気象データ、日射反射率、放射率等の各種物性値、LAD 分布を Input とし、樹木メッシュと建物・地面メッシュの全体において、その相互反射を考慮した放射輸送計

<sup>4</sup> 陳ら [112]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、一様と仮定して問題ないと考えた。

算を実施する。それにより、それぞれのメッシュの吸収日射量、吸収長波長放射を計算する。さらに、その結果を用いて樹木メッシュと建物・地面メッシュではそれぞれ異なるフローにより熱収支の各項を計算する。

樹木メッシュでは、放射輸送計算の結果を基に蒸散速度計算を実施し、さらにその結果を基に葉温計算を実施する。葉温計算においては熱収支式が成立する葉温を反復計算により算出した。建物・地面メッシュでは、放射輸送計算の結果を基に熱伝導計算を実施する。それらの結果に基づき、樹木メッシュの葉温もしくは建物・地面メッシュの表面温度の数値を更新し、再度放射輸送計算を実施する。樹木メッシュ、建物・地面メッシュの計算結果が収束するまでこのサイクルを繰り返す。

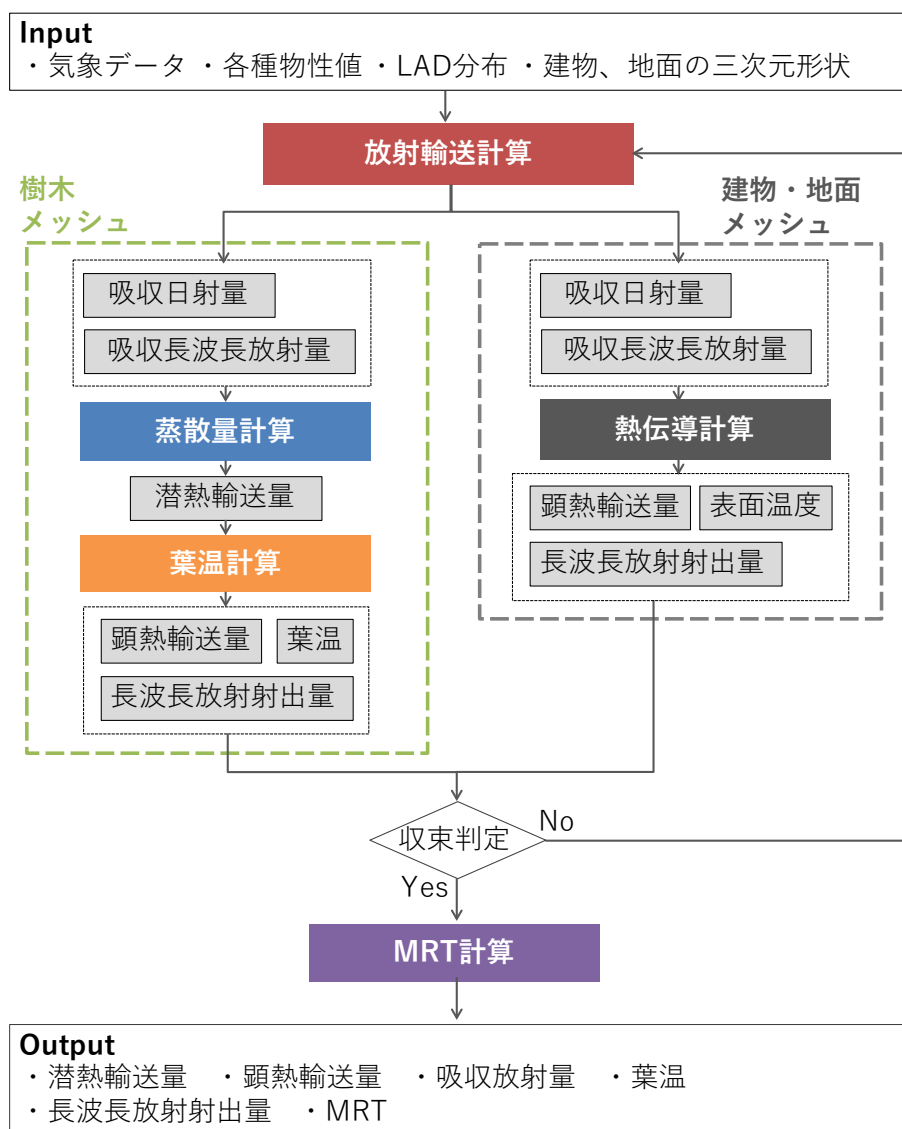


図 3-3 樹木の熱収支モデルの計算フロー

## 3.3.3 放射輸送

本研究では各要素（樹木メッシュ、建物・地面メッシュ）への直達成分についてはレイトレーシングにより算出し、要素間の相互反射については形態係数を用いて算出した。以下にその詳細を説明する。

## 日射

要素 $k$ （樹木メッシュもしくは建物・地面メッシュ）の吸収日射量 $S_{abs,k}$ は式(3.8)に示すように、要素 $k$ に吸収される直達日射量 $S_{dir,k}$ 、天空日射量 $S_{sky,k}$ 、反射日射量 $S_{ref,k}$ の総和として算出した。

$$S_{abs,k} = S_{dir,k} + S_{sky,k} + S_{ref,k} \quad (3.8)$$

$S_{dir,k}$  : 要素 $k$ に吸収される直達日射量[W/m<sup>2</sup>]

$S_{sky,k}$  : 要素 $k$ に吸収される天空日射量[W/m<sup>2</sup>]

$S_{ref,k}$  : 要素 $k$ に吸収される反射日射量[W/m<sup>2</sup>]

式(3.8)における吸収される直達日射量 $S_{dir,k}$ は一定の密度で天空側から日射方向に射出した探査線を追跡し、式(3.9)のように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。樹木メッシュに探査線が通過する際に吸収される日射量の算出には、Beer-Lambert 則に基づく式(3.10)を用いた。消散係数 $k$ は Uniform 型(平岡, 1993 [90])(=0.5)で一定とした。

$$S_{dir,k} = \sum_{i=0}^n S_{dir,k,i} \quad (3.9)$$

$$S_{dir,k,i} = a_s S_{ray,i} (1 - \tau_{k,i}) \quad (3.10)$$

$$\tau_{k,i} = \exp(-kLAD_k l_{k,i}) \quad (3.11)$$

$S_{dir,k}$  : 樹木メッシュ $k$ が吸収する直達日射量[Wm<sup>-2</sup>]

$S_{dir,k,i}$  : 樹木メッシュ $k$ が探査線 $i$ から吸収する直達日射量[Wm<sup>-2</sup>]

$a_s$  : 日射吸収率[-]

$S_{ray,i}$  : 樹木メッシュ $k$ に到達したときの探査線 $i$ の放射量[Wm<sup>-2</sup>]

$\tau_{k,i}$  : 樹木メッシュ $k$ の探査線 $i$ に対する透過率[-]



- $k$  : 消散係数[-]  
 $LAD_k$  : 樹木メッシュ $k$ の葉面積密度[m<sup>2</sup>m<sup>-3</sup>]  
 $l_{k,i}$  : 樹木メッシュ $k$ を探索線 $i$ が通過した距離[m]

なお、建物・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。

式(3.8)における要素 $k$  (樹木メッシュもしくは建物・地面メッシュ) に吸収される天空日射量 $S_{sky,k}$ は、式(3.12)により算出した。

$$S_{sky,k} = F_{sv,k} S_{sky} \quad (3.12)$$

- $S_{sky,k}$  : 要素 $k$ が吸収する天空日射量[Wm<sup>-2</sup>]  
 $F_{sv,k}$  : 要素 $k$ の天空率[-]  
 $S_{sky}$  : 天空日射量[Wm<sup>-2</sup>]

樹木メッシュの天空率 $F_{sv,k}$ は各樹木メッシュの中心から全球方向に探索線を射出し、天空に到達した探索線の比率により算出した。建物・地面メッシュの天空率 $F_{sv,k}$ は、サーフェスの法線側の半球方向<sup>5</sup>に探索線を射出し、天空に到達した探索線の比率により算出した。樹木メッシュによる探索線の遮蔽については式(3.11)により算出される透過率を考慮した。

式(3.8)における要素 $k$  (樹木メッシュもしくは建物・地面メッシュ) に吸収される反射日射量 $S_{ref,k}$ の算出には、形態係数の概念を用いた式(3.13)により算出した。式(3.13)による計算を繰り返すことで、3回反射までを計算した。要素 $k$ からみた要素 $j$ の形態係数 $f_{k,j}$ はレイトレーシングを用いて算出した。

$$S_{ref,k} = a_{s,k} \sum_j f_{k,j} \frac{1 - a_{s,j}}{a_{s,j}} S_{ref,j} \quad (3.13)$$

- $S_{ref,k}, S_{ref,j}$  : 要素 $k$  (or  $j$ )が吸収する天空日射量[Wm<sup>-2</sup>]  
 $a_{s,k}, a_{s,j}$  : 要素 $k$  (or  $j$ )の日射吸収率[-]

<sup>5</sup> 建物・地面メッシュの天空率を算出する際の探索線の密度はランベルトの余弦法則により決定した。

$f_{k_j}$  : 要素 $k$ からみた要素 $j$ の形態係数

### 長波長放射

要素 $k$ （樹木メッシュもしくは建物・地面メッシュ）の吸収長波長放射量 $L_{abs\_k}$ は式(3.14)に示すように、要素 $k$ に吸収される大気放射量 $L_{atm\_k}$ 、周辺事物から射出される長波長放射量 $L_{obj\_k}$ 、周辺事物から反射される長波長放射量 $L_{ref\_k}$ の総和として算出した。 $L_{atm\_k}$ は式(3.15)により天空率を基に算出し、 $L_{obj\_k}$ と $L_{ref\_k}$ は式(3.16)、(3.17)により形態係数を用いて算出した。 $L_{ref\_k}$ は1回反射までを計算した。

$$L_{abs\_k} = L_{atm\_k} + L_{obj\_k} + L_{ref\_k} \quad (3.14)$$

$$L_{atm\_k} = \varepsilon_k F_{sv\_k} L_{atm} \quad (3.15)$$

$$L_{obj\_k} = \varepsilon_k \sum_j f_{k_j} (\sigma \varepsilon_j T_j^4) \quad (3.16)$$

$$L_{ref\_k} = \varepsilon_k \sum_j f_{k_j} \frac{1 - \varepsilon_j}{\varepsilon_j} L_{ref\_j} \quad (3.17)$$

$L_{atm\_k}$  : 要素 $k$ に吸収される大気放射量 [ $\text{Wm}^{-2}$ ]

$L_{obj\_k}$  : 要素 $k$ に吸収される周辺事物から射出された長波長放射量 [ $\text{Wm}^{-2}$ ]

$L_{ref\_k}$  : 要素 $k$ に吸収される周辺事物で反射した長波長放射量 [ $\text{Wm}^{-2}$ ]

$\varepsilon_k$  : 要素 $k$ の放射率 [ $\text{Wm}^{-2}$ ]

$L_{atm}$  : 大気放射量 [ $\text{Wm}^{-2}$ ]

$T_j$  : 要素 $j$ の表面温度（樹木メッシュの場合は葉温） [K]

### 3.3.4 蒸散速度

蒸散速度と潜熱輸送量は Penman-Monteith 法に基づく式(3.18)により算出した。気孔と境界層による水蒸気コンダクタンスは電気回路のアナロジーを用いた式(3.19)により算出した。気孔コンダクタンスは式(3.20)の BMF モデル (Buckley, Mott & Farquhar, 2003 [70]; 清野, 2017 [12]) により算出し、境界層コンダクタンスは2章で得られた対流熱伝達率をルイス則により水蒸気のコンダクタンスに変換する式(3.22)により算出した。式(3.21)の $APAR$ には 3.3.3 にて示した放射輸送計算の結果を用いた。Frouin and Pinker(1995) [91]が示した PAR/全天日射量の値を基に、吸収日射量 $S_{abs\_k}$ に 0.45 を乗じることで $APAR$ を算出した。本論文では樹木に対する十分な灌水があり、水ストレス

がない状況を想定しているため、上流部の水ポテンシャル $\Psi_s=0$ とした。BMFモデルのパラメータである $\pi_e$ 、 $x$ 、 $\alpha$ 、 $b_1$ 、 $b_2$ は2章の実測結果を基にフィッティングを行った。その詳細は3.4に示す。

$$\lambda E = \frac{s(R_{abs} - \varepsilon\sigma T_a^4) + \gamma^* \lambda g_v D / P_a}{s + \gamma^*} \quad (3.18)$$

$$g_v = \frac{g_s g_a}{2(g_s + g_a)} \quad (3.19)$$

$$g_s = \frac{k_p(\Psi_s + \pi_e)}{k_p/x\alpha + D} \quad (3.20)$$

$$\alpha = (1 - b_1 \exp(-APAR/b_2)) \quad (3.21)$$

$$g_a = k_{h \rightarrow v} a_c / c_p \quad (3.22)$$

- $E$  : 蒸散速度 [mol/m<sup>2</sup>·s]  
 $D$  : 葉面飽差 [kPa]  
 $P_a$  : 大気圧 [kPa]  
 $g_v$  : 水蒸気コンダクタンス [mol/m<sup>2</sup>/s]  
 $g_s$  : 気孔コンダクタンス [mol/m<sup>2</sup>/s]  
 $g_a$  : 境界層コンダクタンス [mol/m<sup>2</sup>/s]  
 $s$  : 水蒸気飽和モル分率関数の勾配 [°C<sup>-1</sup>]  
 $\gamma^*$  : みかけの乾湿計定数 [°C<sup>-1</sup>]  
 $k_p$  : 植物体の通水コンダクタンス [molm<sup>-2</sup>(leaf)s<sup>-1</sup>MPa<sup>-1</sup>]  
 $\Psi_s$  : 上流部の水ポテンシャル [MPa (負値)]  
 $\pi_e$  : 表皮細胞の浸透圧 [MPa (負値)]  
 $x$  : 膨圧 →  $g_{vs}$  の変換係数 [molm<sup>-2</sup>(leaf)s<sup>-1</sup>MPa<sup>-1</sup>]  
 $\alpha$  : PARに対する経験的なストレス関数 [-]  
 $b_1, b_2$  : 回帰係数 [-]  
 $APAR$  : 吸収光合成有効放射量 [ $\mu$  mol/m<sup>2</sup>s]  
 $k_{h \rightarrow v}$  : 熱 → 水蒸気のコンダクタンス変換係数 [-]  
 $c_p$  : 空気の定圧比熱 [Jmol<sup>-1</sup>°C<sup>-1</sup>]

### 3.3.5 熱伝導

建物・地面メッシュにおける蓄熱量 $G$ は一次元非定常熱伝導計算により算出した。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。

### 3.3.6 平均放射温度

中大窪・梅干野(2008) [92]の研究を参考に、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(3.23)を用いた。

$$R_{h\_net} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 (a_b R_{h\_s_i} + \varepsilon_b L_{h\_l_i}) \quad (3.23)$$

$R_{h\_net}$  : 立方体が受ける正味放射量 [ $\text{Wm}^{-2}$ ]

$a_b$  : 日射吸収率 [-]

$R_{h\_s_i}$  : 面 $i$ が受ける日射量 [ $\text{Wm}^{-2}$ ]

$\varepsilon_b$  : 放射率 [-]

$L_{h\_l_i}$  : 面 $i$ が受ける長波長放射量 [ $\text{Wm}^{-2}$ ]

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。

## 3.4 実測結果によるパラメータの同定とモデルの検証

3.3 にて示した樹木の熱収支モデルについて、気孔コンダクタンスの算出に用いた BMF モデルのパラメータ  $\pi_e$ 、 $x$ 、 $\alpha$ 、 $b_1$ 、 $b_2$  を実測結果によりフィッティングした。その上で、フィッティングに使用しなかった実測データを用いてモデルの精度を検証した。以下にその詳細を示す。

### 3.4.1 気孔コンダクタンスモデルのパラメータの同定

フィッティングの際の計算では、押尾ら(2016) [59]の研究成果として得られた LAD 分布 (図 3-4) を用いた。押尾ら(2016) [59]は 2 章のケヤキを対象とする三次元レーザーキャナを用いた測定を実施し、 $0.3\text{m} \times 0.3\text{m} \times 0.3\text{m}$  のボクセル単位で LAD の分布を算出している。

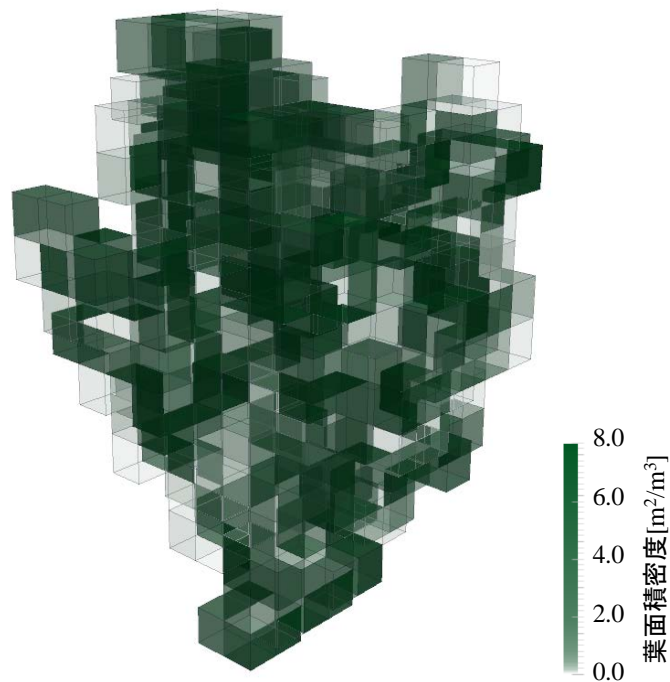


図 3-4 実測対象ケヤキの LAD 分布 (押尾ら, 2016 [59])

葉の日射吸収率には、本田(2013) [93]の研究において算出した 0.48 を用いた。なお、本田(2013) [93]は、分光放射計により測定したケヤキの葉の分光反射・吸収・透過率分布と Bird モデル [94]による太陽放射の分光分布により日射吸収率を算出している。葉の長波長放射率は 0.98 とした。気象データと潜熱輸送量、顕熱輸送量には十分な灌水がなされていた 2010.8.30 の実測結果を用いた。対流熱伝達率 $a_c$ には、2章の実験式を用いた。

以上の設定により熱収支モデルの計算を実施し、モデルによる計算結果が実測結果と合致するように、BMF モデルのパラメータ $\pi_e$ 、 $x$ 、 $\alpha$ 、 $b_1$ 、 $b_2$ をフィッティングした。フィッティング後の潜熱輸送量・顕熱輸送量の計算結果と実測結果を図 3-5 に示す。モデルによる計算結果が実測結果と比較してやや過大評価となったが、変化の傾向は再現できている。

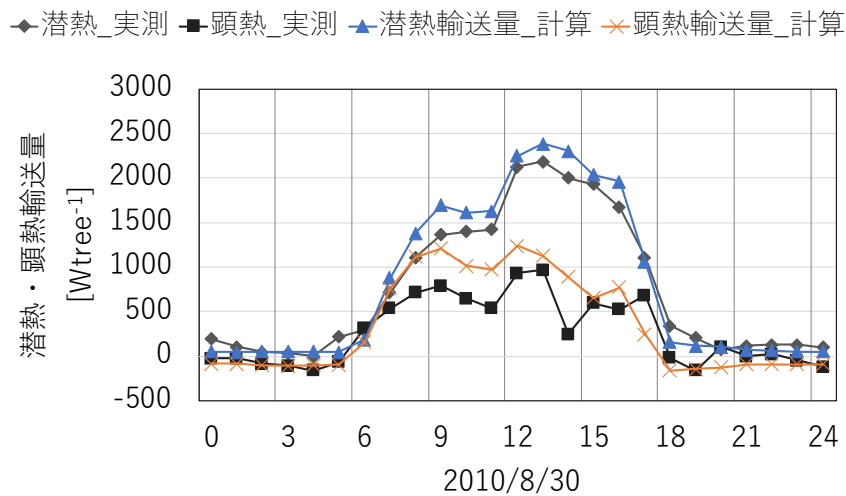


図 3-5 2010/8/30 における潜熱・顕熱輸送量のモデルによる計算結果と実測結果

### 3.4.2 モデルの検証

次に、フィッティングに用いておらず、かつ対象ケヤキに対する十分な灌水がなされていた 2010.8.21-8.23 の気象データ、潜熱輸送量のデータを基にモデルの精度を検証した。BMF モデルのパラメータは 3.4.1 にてフィッティングした値を用いた。潜熱輸送量のモデル計算値と実測値の関係を図 3-6、図 3-7 に示す。計算値と実測値間の決定係数は 0.97 となった。精度が重要となるピーク時のデータを抽出して計算した RMSE (root mean squared error, 二乗平均平方根誤差) は  $142 \text{ Wtree}^{-1}$  となり、潜熱輸送量の平均値の 6% 程度となった。日積算潜熱輸送量の RMSE は  $5.42 \text{ MJtree}^{-1}\text{day}^{-1}$  となり、日積算潜熱輸送量の平均値の 8% 程度となった。これらは、熱環境の解析においては十分な精度であり、本章のモデルで樹木の熱収支を議論可能であると考える。

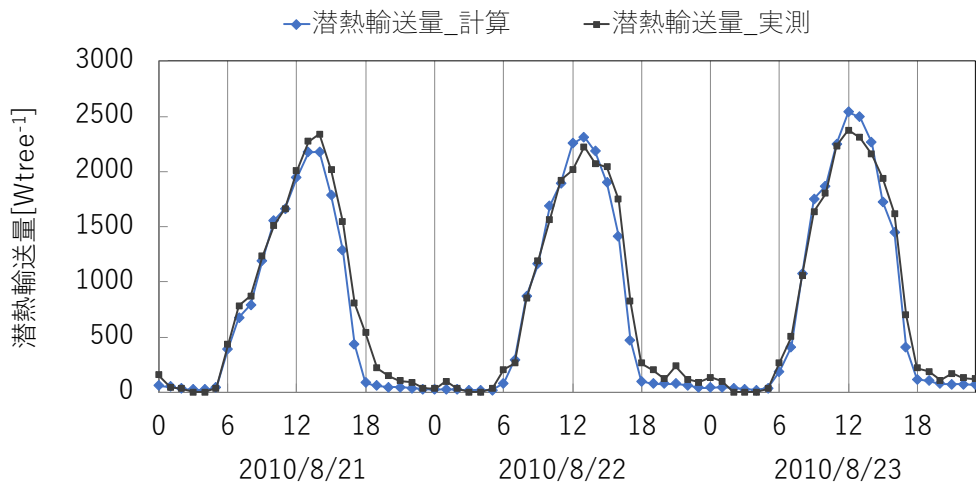


図 3-6 2010/8/21-8/23 における潜熱・顕熱輸送量の計算結果と実測結果

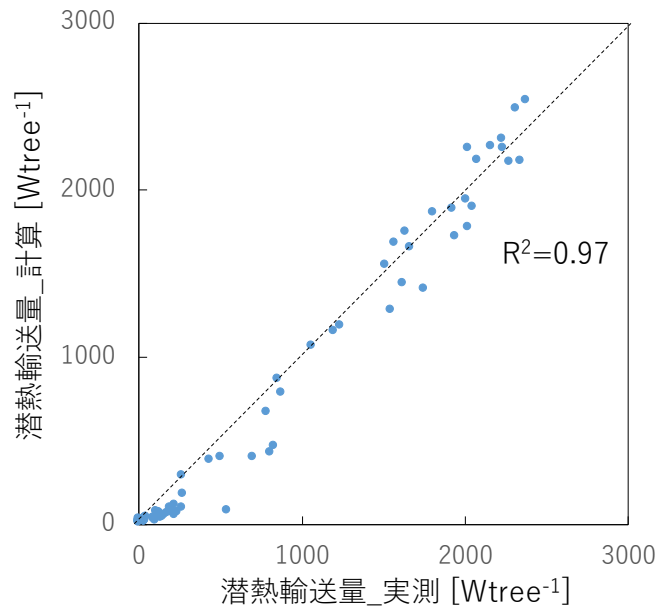


図 3-7 潜熱輸送量の熱収支モデルによる計算結果と実測結果の関係

### 3.5 まとめ

本章ではまず樹木の熱収支計算、樹木による熱環境改善効果の評価に関する既往研究について整理し、それを踏まえて本研究における樹木の熱収支モデルの計算方法を決定した。熱収支モデルは、Beer-Lambert 則に基づく葉群中の放射輸送計算、気孔コンダクタンスモデルを用いた蒸散量計算、2章の対流熱伝達率を用いた熱収支計算により構成した。2章の実測結果によりフィッティングした気孔コンダクタンスモデルのパラメータを用いたとき、潜熱輸送量の計算結果の誤差が7%程度となったことから、本モデルにより樹木の熱収支が議論可能であることを確認した。

なお、本章の気孔コンダクタンスモデルのパラメータは2章の実測対象としたケヤキの一個体におけるものであり、他の個体、さらには他の樹種の樹木を対象とした場合には異なるパラメータを設定する必要がある。多様な樹種が用いられる都市における緑地計画への活用を想定すると、樹種や個体による違いを考慮することが重要となる。樹種による違いがどのような影響を及ぼすかについては清野(2017)が検討しているが、その成果の展開については本研究以後の課題とし、次章以降では本章で得られたケヤキのパラメータを使用する。





## 第4章 最適化手法を用いた樹木配置が熱環境改善効果に及ぼす影響の評価

本章では、3章で作成した樹木の熱収支モデルを用いた熱環境シミュレーションと数値最適化手法を用い、オープンスペースにおける樹木配置が熱環境改善効果に及ぼす影響の大きさ、さらに熱環境改善効果に寄与する樹木配置の特徴を示す。

### 4.1 はじめに

1章では、樹木配置による熱環境改善効果への影響や熱環境改善に寄与する樹木配置の特徴を明らかにするためには、熱環境シミュレーションと数値最適化手法により樹木配置のパターンを効率的に探索することが有効であることを述べた。

実際に熱環境改善効果を目的関数として樹木配置の最適化を実施している例として陳ら(2004)の研究[18]があるが、陳ら(2004)[18]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、適切な配置の特徴については議論していない。一方、複数の樹木配置のケースを対象とした実測もしくは数値シミュレーションを基に、樹木配置と熱環境改善効果の相関を検討している例もある(成田ら, 2006[15]; 鈴木, 2008[95])。しかし、それらは恣意的に作成した数ケースを対象とした実測、シミュレーションにより、単木・分散・密集といった典型的な配置特徴のみの影響を検討しており、生じうる配置のバリエーションの網羅的な検討とはなっていなかった。

そこで本章では、3章の樹木の熱収支モデルを用いた熱環境シミュレーションと数値最適化手法により、生じうる樹木配置パターンを効率的かつ網羅的に検討し、オープンスペースにおける樹木配置が熱環境改善効果に及ぼす影響の大きさ、さらに熱環境改善効果に寄与する樹木配置の特徴を示すことを目的とする。

### 4.2 最適化問題の設定

ここでは、樹木配置が熱環境改善効果に及ぼす影響の大きさ、さらに熱環境改善効果に寄与する樹木配置の特徴を示すための最適化問題の設定を示す。

#### 4.2.1 解析対象と計算領域

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と MRT や蒸散速度を評価する評価領域を設定した(図 4-1)。

樹木配置領域は  $36\text{m} \times 36\text{m}$ 、評価領域は  $12\text{m} \times 12\text{m}$  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 4.2.3 にて説明する。

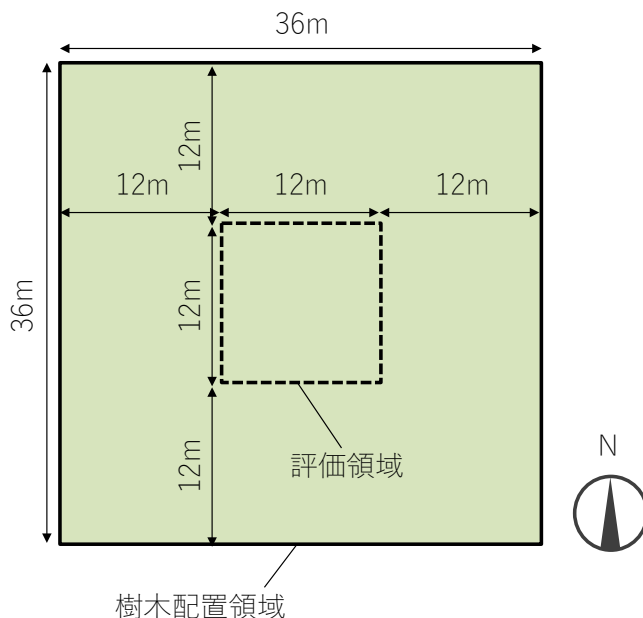


図 4-1 樹木配置領域と評価領域

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<sup>6</sup>。

#### 4.2.2 目的関数

3章に示したように、本研究では樹木による熱環境改善効果を暑熱適応策の効果、ヒートアイランド緩和策の効果の2つの視点で評価する。暑熱適応策の効果の評価指標として MRT を、ヒートアイランド緩和策の効果の評価指標として蒸散速度を、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

<sup>6</sup> 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。

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<sup>7</sup> (以降単に MRT と表記) の最小化<sup>8</sup>、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 評価領域における地表面積あたりの日平均蒸散速度 (以下単に蒸散速度と表記) の最大化、緑被率の最小化の二つを目的関数とする

④ 蒸散速度の最小化、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。

MRT と蒸散速度は 3 章の樹木の熱収支モデルを用いて算出した。モデルのパラメータは 0 と同じ値とし、LAD は全ての樹木メッシュで  $1.5\text{m}^2\text{m}^{-3}$  とした。地面メッシュにはアスファルトの熱物性値を設定し、熱伝導率:  $0.727\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 、容積比熱:  $2055\text{kJm}^{-3}\text{K}^{-1}$  とした。モデルの計算に用いた気象条件については 4.2.4 に示す。

### 4.2.3 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図 4-2 に示す。樹木配置は  $2\text{m} \times 2\text{m} \times 4\text{m}$  のボクセルの集合で表現した。 $6 \times 6$  の計 36 ボクセルで一つの樹木配置ユニット (tree arrangement unit) を構成し、各ボクセルが樹木(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  $12\text{m} \times 12\text{m}$  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。

<sup>7</sup> 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様としたことから、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。

<sup>8</sup> 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はない。本研究では気温約  $26\text{-}30^\circ\text{C}$  の気象データを用いたこと、さらに SET\* の中立温度が  $22\text{-}26^\circ\text{C}$  [110] 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。

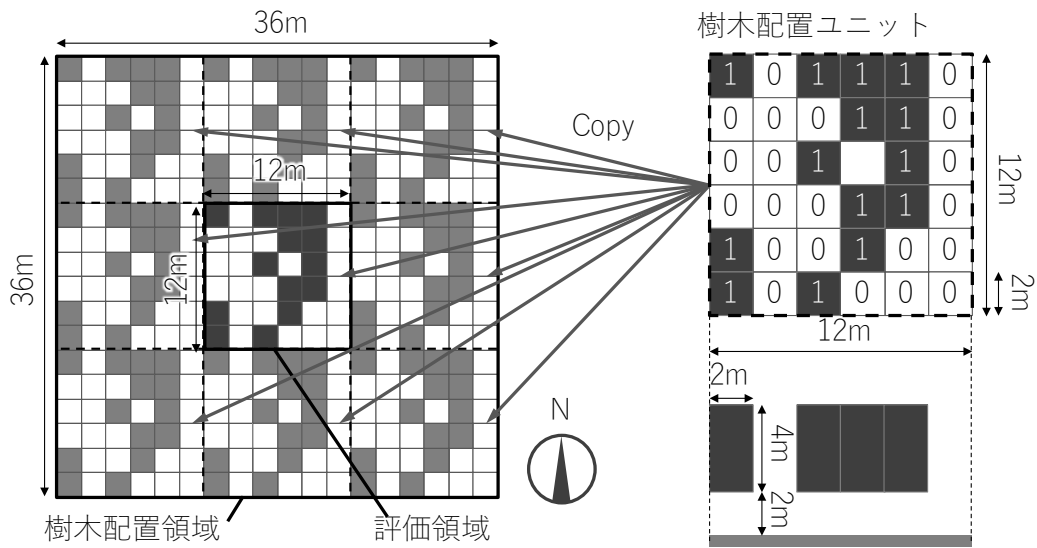


図 4-2 樹木配置モデルと設計変数

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る(図 4-3 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<sup>9</sup>。一方で樹木を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(図 4-3 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ると考えられる。

<sup>9</sup>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。

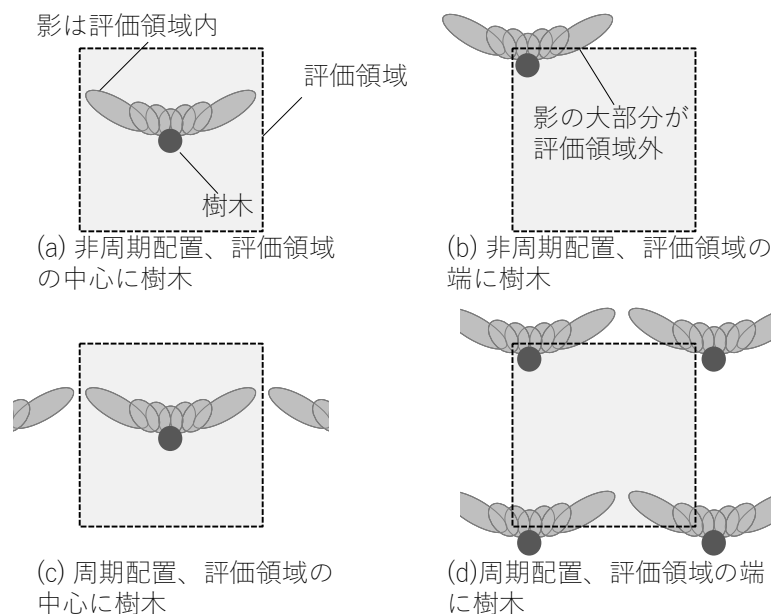


図 4-3 周期配置と非周期配置

また、樹木配置を議論するうえでは、樹種ごとに異なる樹形・樹高や葉面積密度、葉の形状や傾斜角の分布といった特徴、さらには成長や季節によるそれら特徴の経時変化を考慮することが必要となる。しかし、本研究ではそのための基礎的な研究として、一様な樹高、樹形や葉面積密度、葉の形状や傾斜角の分布を設定し、樹木の二次元配置のみを考えた。

#### 4.2.4 気象条件

MRTと蒸散速度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。データの細かい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 [96]<sup>10</sup>の特別値を正弦曲線 (sine curve) でフィッティングした値を用いた(図4-4)。

<sup>10</sup> 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 [96]。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。

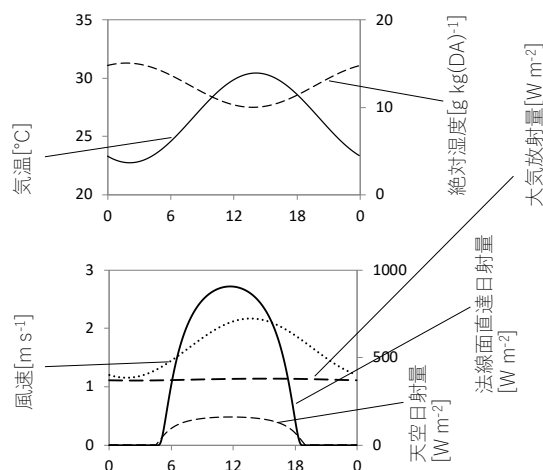


図 4-4 気象条件

本研究では図 4-4 の気象条件の風速値を樹冠外部の風速として、樹冠の対流熱伝達率を算出した。気流解析を行っていないため、対流熱伝達率には 20%程度の誤差 (Hagishima et al., 2012) が含まれる可能性があるが、配置最適化には大きな影響を及ぼさないと推測されるため、この値を採用した。この点には 4.5.5 にて考察をする。

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[77]の式(4.1)、天空日射量は Berlage [97]の式(4.2)、大気放射量は Brunt[77]の式(4.3)による算出値を用いた。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 [98]である 0.63 とした。

$$S_{dir} = S_0 P \frac{1}{\sin h} \quad (4.1)$$

$$S_{sky} = \frac{1}{2} I_0 \sin h \frac{1 - P \sin h}{1 - 1.4 \ln P} \quad (4.2)$$

$$L_{sky} = \sigma T_a^4 (A + B e^{1/2}) \quad (4.3)$$

$S_{dir}$  : 法線面直達日射量 [ $\text{Wm}^{-2}$ ]

$S_0$  : 太陽定数 [ $\text{Wm}^{-2}$ ]

$P$  : 大気透過率 [-]

$h$  : 太陽高度 [radian]

$S_{sky}$  : 天空日射量 [ $\text{Wm}^{-2}$ ]

$L_{sky}$  : 大気放射量 [ $\text{Wm}^{-2}$ ]

$T_a$  : 地表付近の気温 [K]

- $A$  : 回帰係数(= 0.51)[-]  
 $B$  : 回帰係数(= 0.076)[hpa<sup>-1/2</sup>]  
 $e$  : 地表付近の水蒸気分圧[hpa]

#### 4.2.5 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かつ効率的に探索可能な最適化手法を用いた。以下に、用いた最適化手法の詳細を示す。

##### 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。図4-5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。

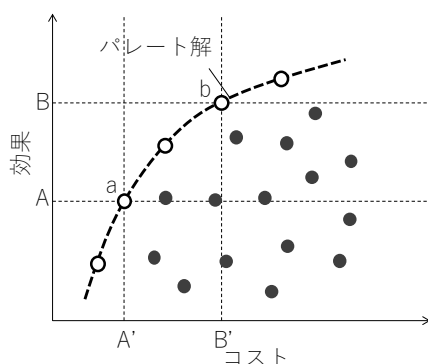


図 4-5 パレート解の概念

##### 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 SHERPA [99] [100] (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。

### 4.3 樹木配置が熱放射環境に及ぼす影響の評価

#### 4.3.1 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図 4-6 に示す。緑被率 0%のとき MRT が 71.1°C、100%のとき約 30.5°Cとなり、MRT 低減効果は最大で 40.6°C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 8.5°C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<sup>11</sup>。

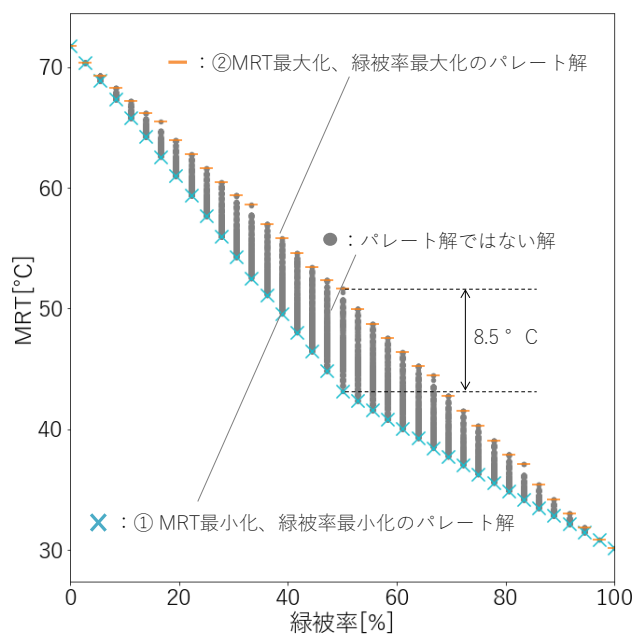


図 4-6 全ての解の MRT と緑被率

<sup>11</sup> MRT の温度帯、さらには気温、湿度、風速等の影響によって MRT の変化への人体暑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。



## 4.3.2 熱放射環境の改善に寄与する樹木配置の特徴

次に図 4-6-①,②に示したパレート解の樹木配置を、図 4-7、図 4-8 に示す。①MRT 最小化×緑被率最小化のパレート解の樹木配置 (図 4-7) には、■樹木同士が離れて分散、■南北、ジグザグの列状に配置、■南北の列状に配置、■市松状に配置、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。



図 4-7 ①MRT 最小化、緑被率最小化のパレート解の樹木配置

②MRT 最大化×緑被率最大化のパレート解の樹木配置（図 4-8）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。

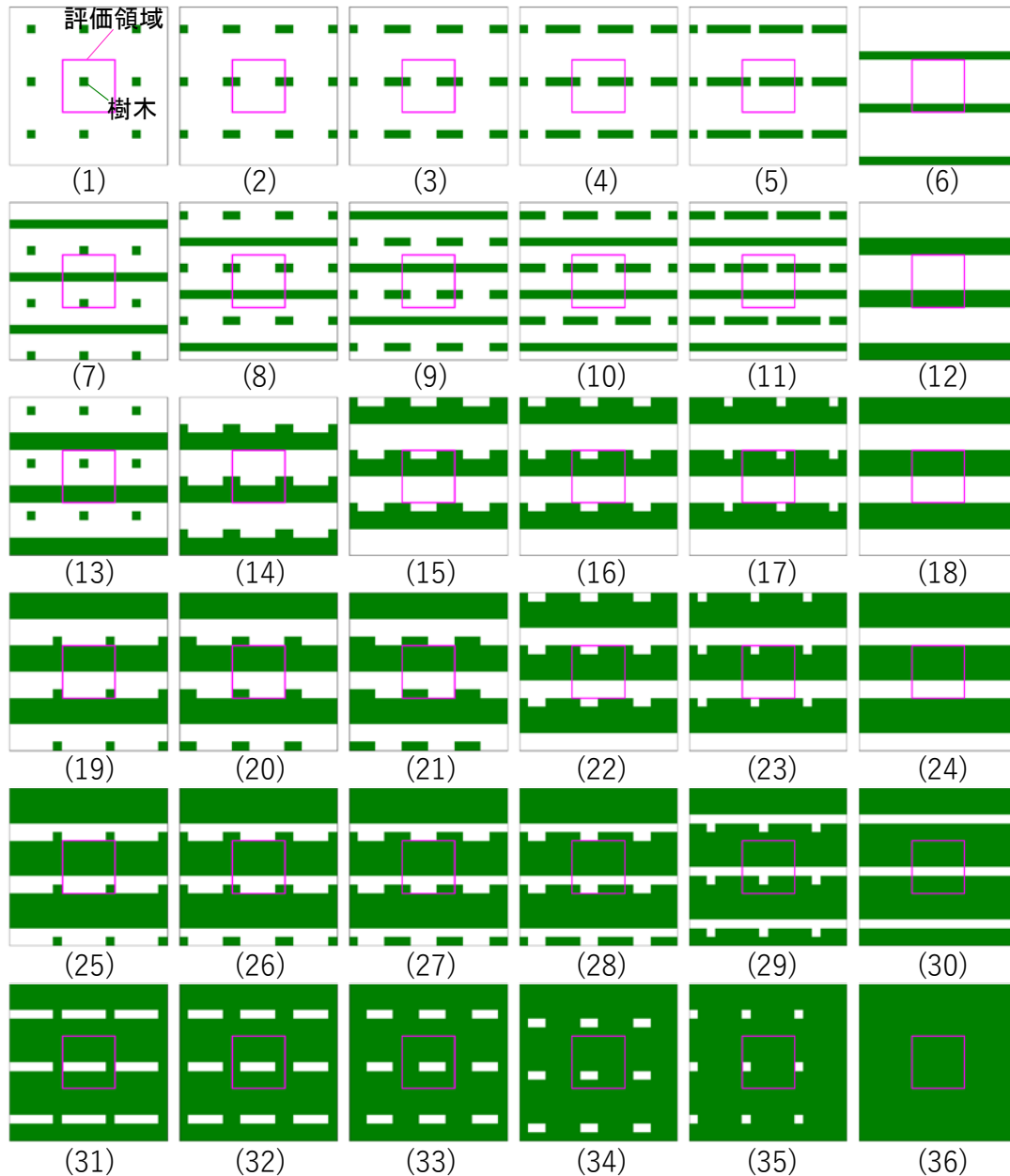


図 4-8 ②MRT 最大化、緑被率最大化のパレート解の樹木配置

## 4.3.3 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 (図 4-9)。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 1.9°C 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 0.1°C、0.7°C 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 2.5°C、4.3°C 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°C 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。

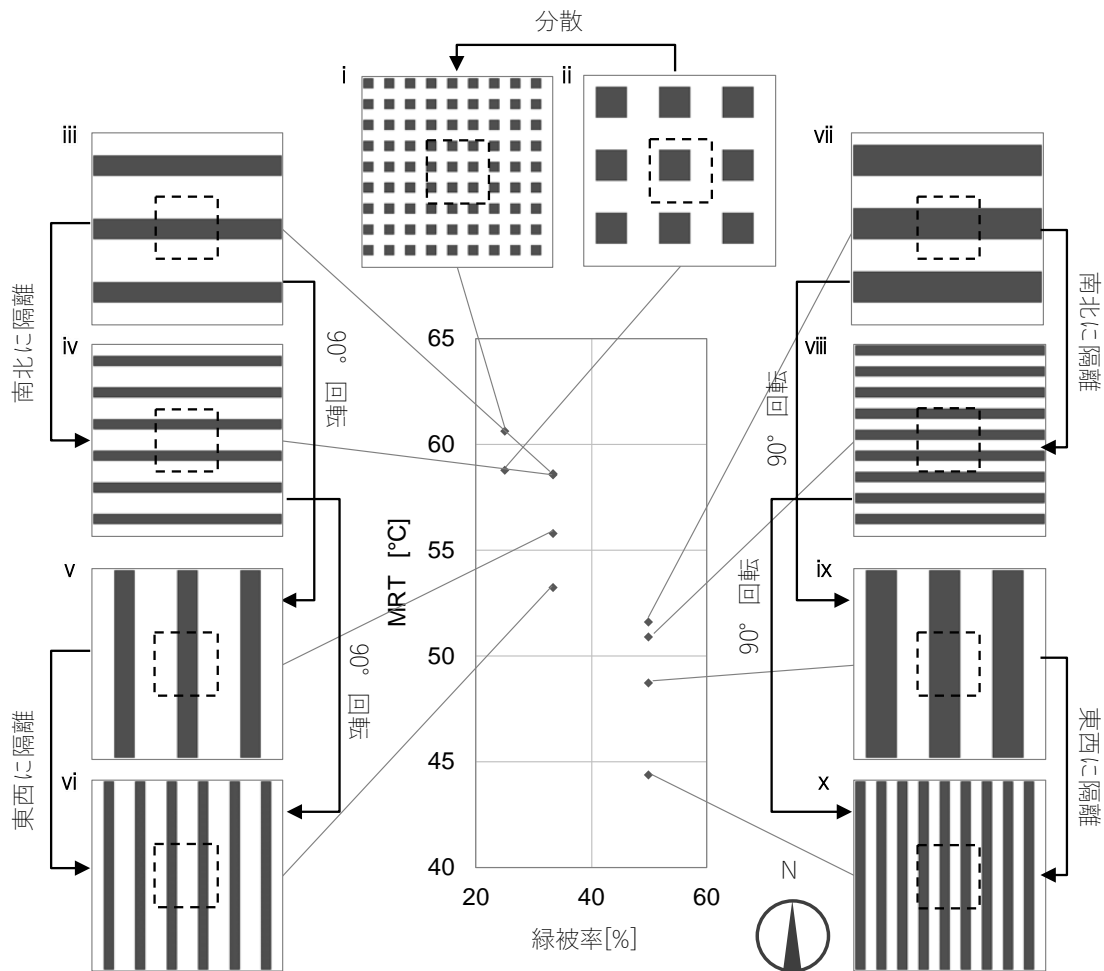


図 4-9 樹木配置の変更が MRT に及ぼす影響

## 4.4 樹木配置が蒸散速度に及ぼす影響の評価

### 4.4.1 蒸散速度と緑被率

MRT を目的関数としたときの結果と同様に、最適化の過程で得られた計 40000 個の解の蒸散速度、緑被率とそのパレート解を図 4-10 に示す。同一の緑被率での最高値と最低値の差は日蒸散速度の約 18%にあたる  $2.3\text{kgm}^{-2}\text{day}^{-1}$  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速度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  $2442\text{kJkg}^{-1}$  とすると、蒸散速度  $2.3\text{kgm}^{-2}\text{day}^{-1}$  による評価領域の地表面積あたりの潜熱輸送量は  $5.6\text{MJm}^{-2}\text{day}^{-1}$  となる。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速度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。

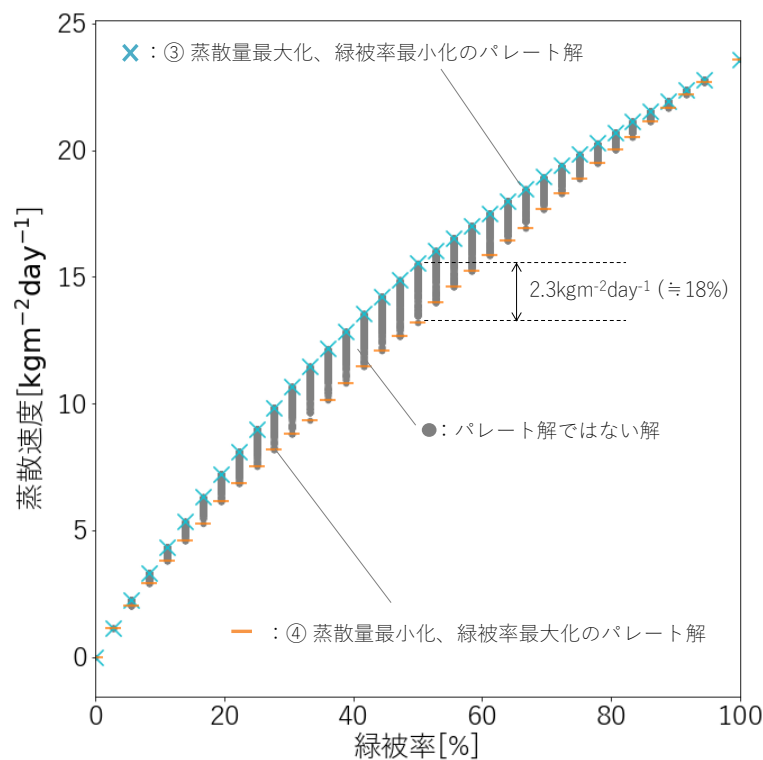


図 4-10 全ての解の蒸散速度と緑被率

図 4-10 の縦軸の評価領域の地表面積あたりの蒸散速度を評価領域の葉面積あたりの蒸散速度に換算したものを図 4-11 に示す。図 4-10 の緑被率と評価領域全体の蒸散速度が正の相関を示すのに対し、図 4-11 の緑被率と葉面積あたりの蒸散速度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）の蒸散速度は減少する

ことを示している。葉面積当たりの蒸散速度は緑被率が2.8%（樹木メッシュが1つのみ）のときに $3.4\text{kgm}^{-2}\text{day}^{-1}$ で最大となり、緑被率が100%のときに $2.0\text{kgm}^{-2}\text{day}^{-1}$ で最小となった。最も疎な配置での値は最も密な配置に対して1.7倍と、成田ら(2006) [15]の実験の約1.6倍と近い値となり、蒸散速度への樹木配置の影響が妥当に算出できていることが示唆された。

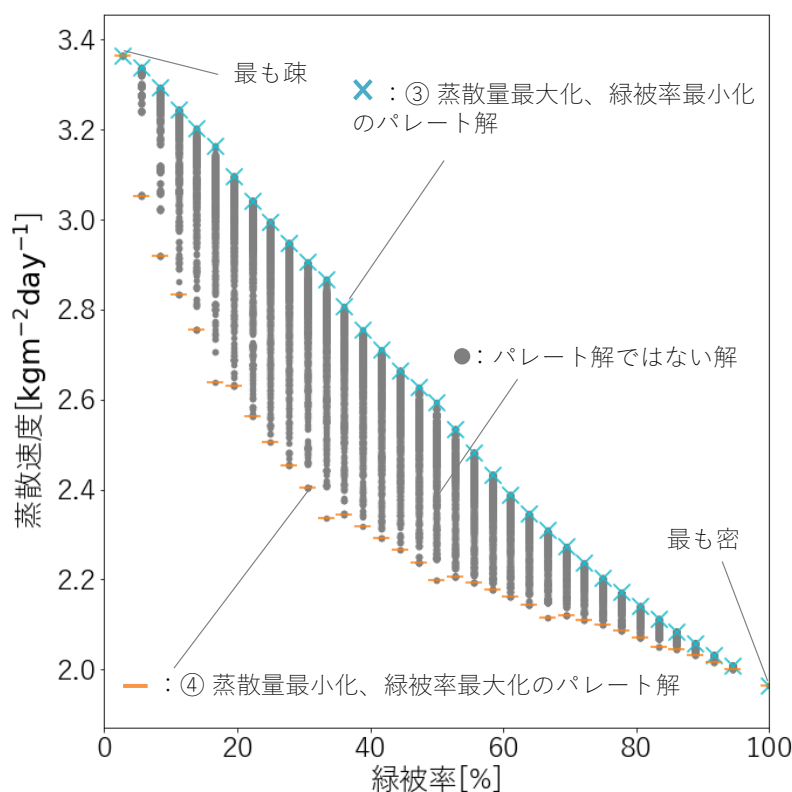


図 4-11 全ての解の葉面積あたりの蒸散速度と緑被率

#### 4.4.2 蒸散速度の増加に寄与する樹木配置の特徴

次に、図 4-10、図 4-11 の③、④に示したパレート解の樹木配置を図 4-12、図 4-13に示す。

③蒸散速度最大化×緑被率最小化のパレート解の樹木配置（図 4-12）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、■南北のジグザグ列状、■南北の列状、■市松状、といった傾向が確認できる。MRT を目的関数としたときのパレート解（図 4-7）と比較すると、緑被率が小さいときの分散的な傾向がより強く生じている。

④蒸散速度最小化×緑被率最大化のパレート解の樹木配置（図 4-13）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速度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。

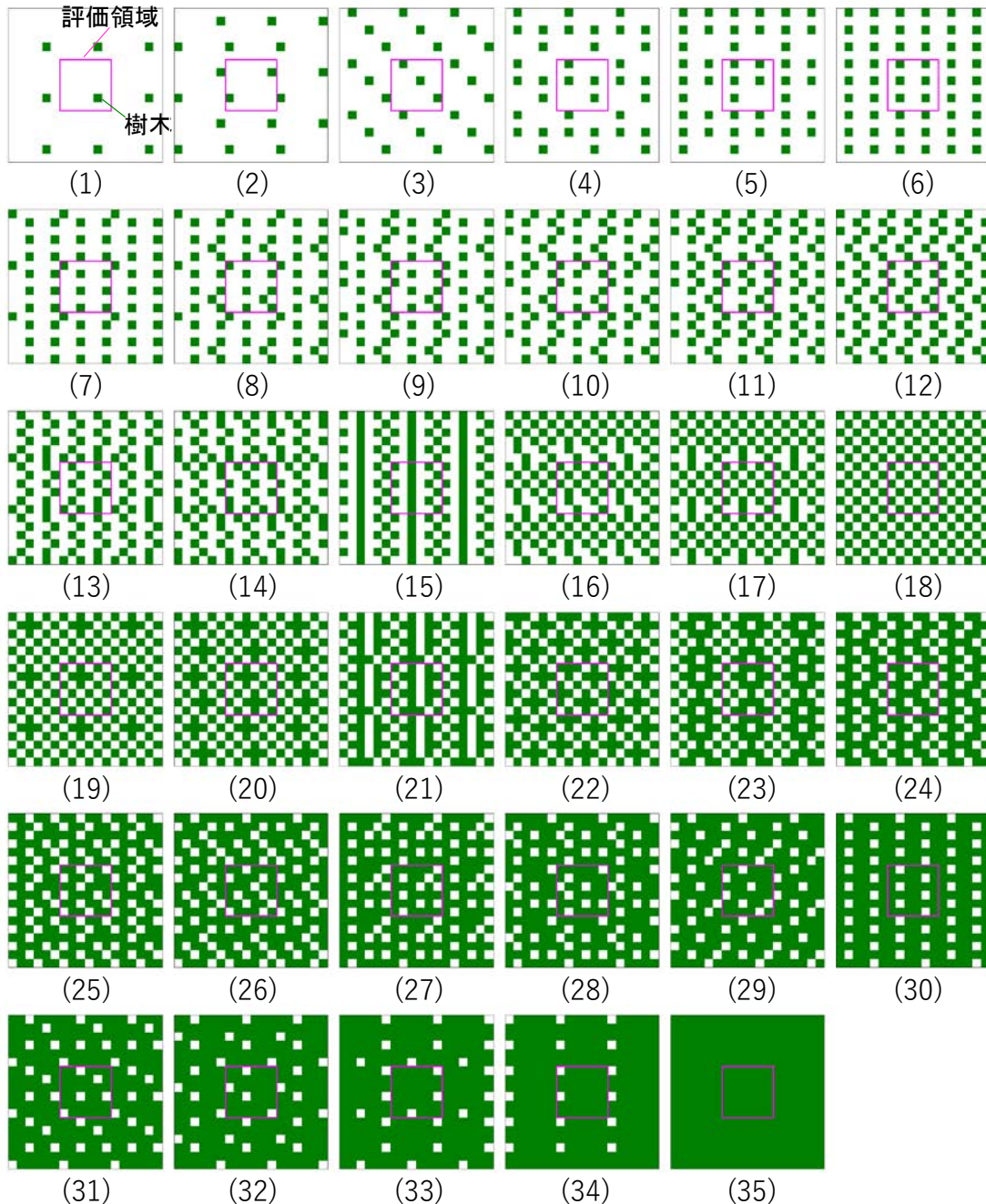


図 4-12 ③蒸散速度最大化、緑被率最小化のパレート解の樹木配置

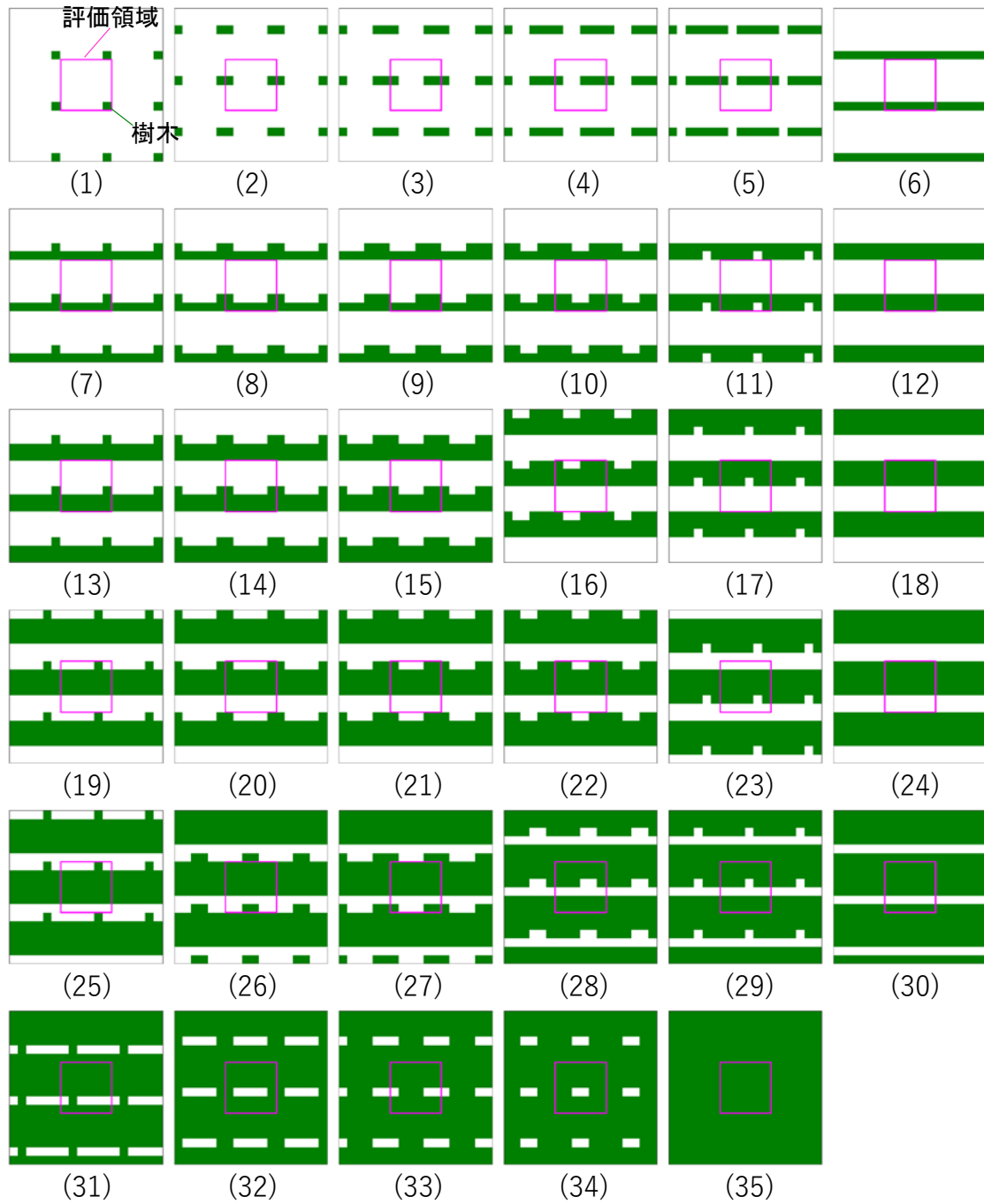


図 4-13 ④蒸散速度最小化、緑被率最大化のパレート解の樹木配置

## 4.5 考察

## 4.5.1 樹木同士の離隔による日射遮蔽への影響

MRT の低減、蒸散速度の増加には樹木同士の離隔が大きい分散的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。

図 4-14 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。

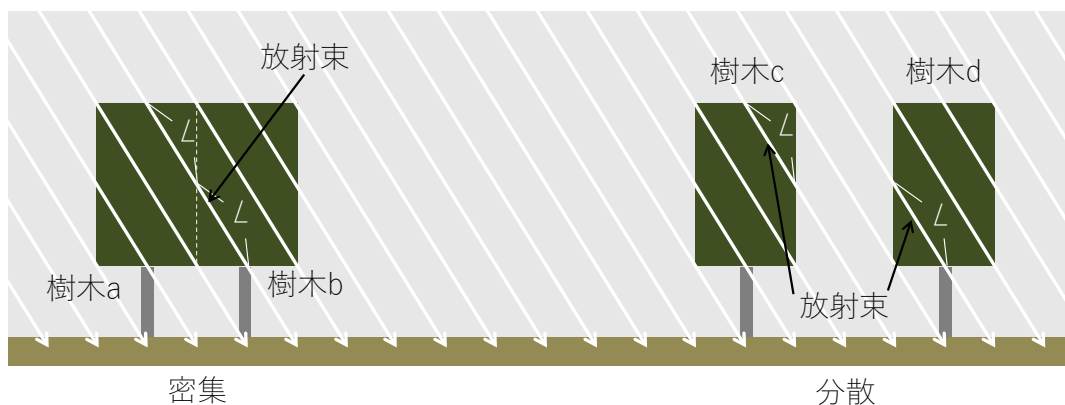


図 4-14 樹木の密集、分散による放射輸送への影響

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(4.4)で表される。

$$A = IS(L) + I(1 - S(L))S(L) \quad (4.4)$$

式(4.4)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  $A'$  は式(4.5)で表される。

$$A' = IS(L) + IS(L) \quad (4.5)$$

$A$  と  $A'$  の大小関係を比較すると、式(4.6)に示すように  $A'$  の方が大きい。



$$A' - A = IS(L)^2 > 0 \quad (4.6)$$

分散配置の遮蔽量 $A'$ がより大きいのは、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がないためである。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、ひいては蒸散速度が大きいことと言い換えられ、蒸散速度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(2006) [15]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。

#### 4.5.2 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、蒸散速度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図4-15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 $100 \sim 200 \text{Wm}^{-2}$ 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。

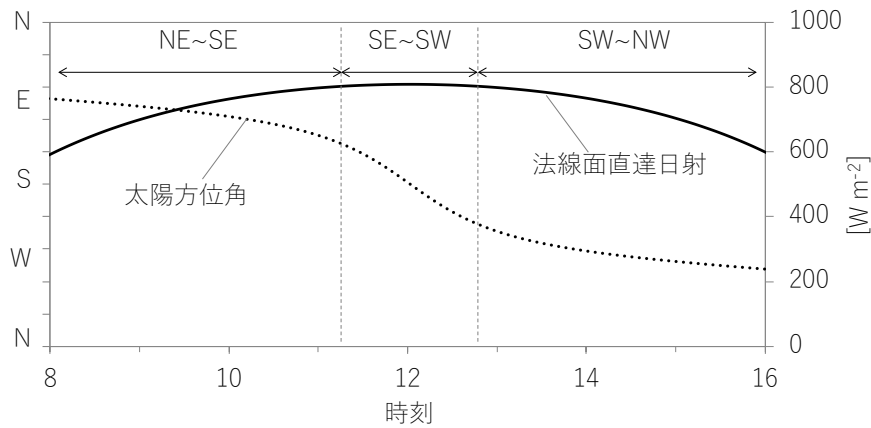


図 4-15 時刻別の法線面直達日射量と太陽方位角

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 [101]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。

#### 4.5.3 太陽高度・太陽方位の季節変化による影響

本研究においては最も酷暑になりやすく、都市の熱環境改善が重要となる時期の代表日として7月24日を設定し、その気象条件を用いた。なお、7月24日の正午の太陽高度は74°であり、これは6月～8月の平均値である73°と近い値となる(図4-16)。

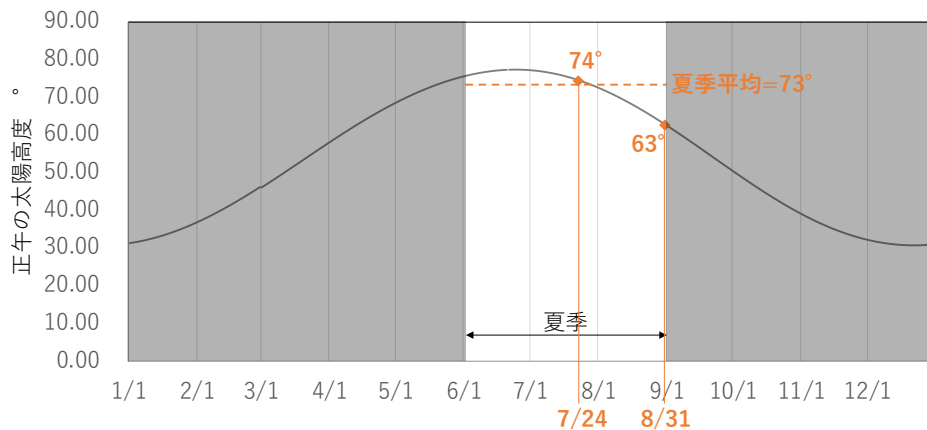


図 4-16 正午の太陽高度の年間変動

また、太陽高度・太陽方位の違いによる最適解の樹木配置への影響の検討のため、日射量と太陽高度・太陽方位を8月31日の値に変更した気象データを用い、同様の最適化を実施した。パレート解の樹木配置を図4.7に示した7月24日の結果と併せて図4-17に示す。なお、ここでは日射量と太陽高度、太陽方位以外の気象要素については7

月24日と同じ値を用いた。パレート解の樹木配置は分散的、南北の列状等の特徴を有し、7月24日の気象条件を用いた結果と類似していることから、7月24日の太陽高度・太陽方位が夏季を代表し得ると考えられる。

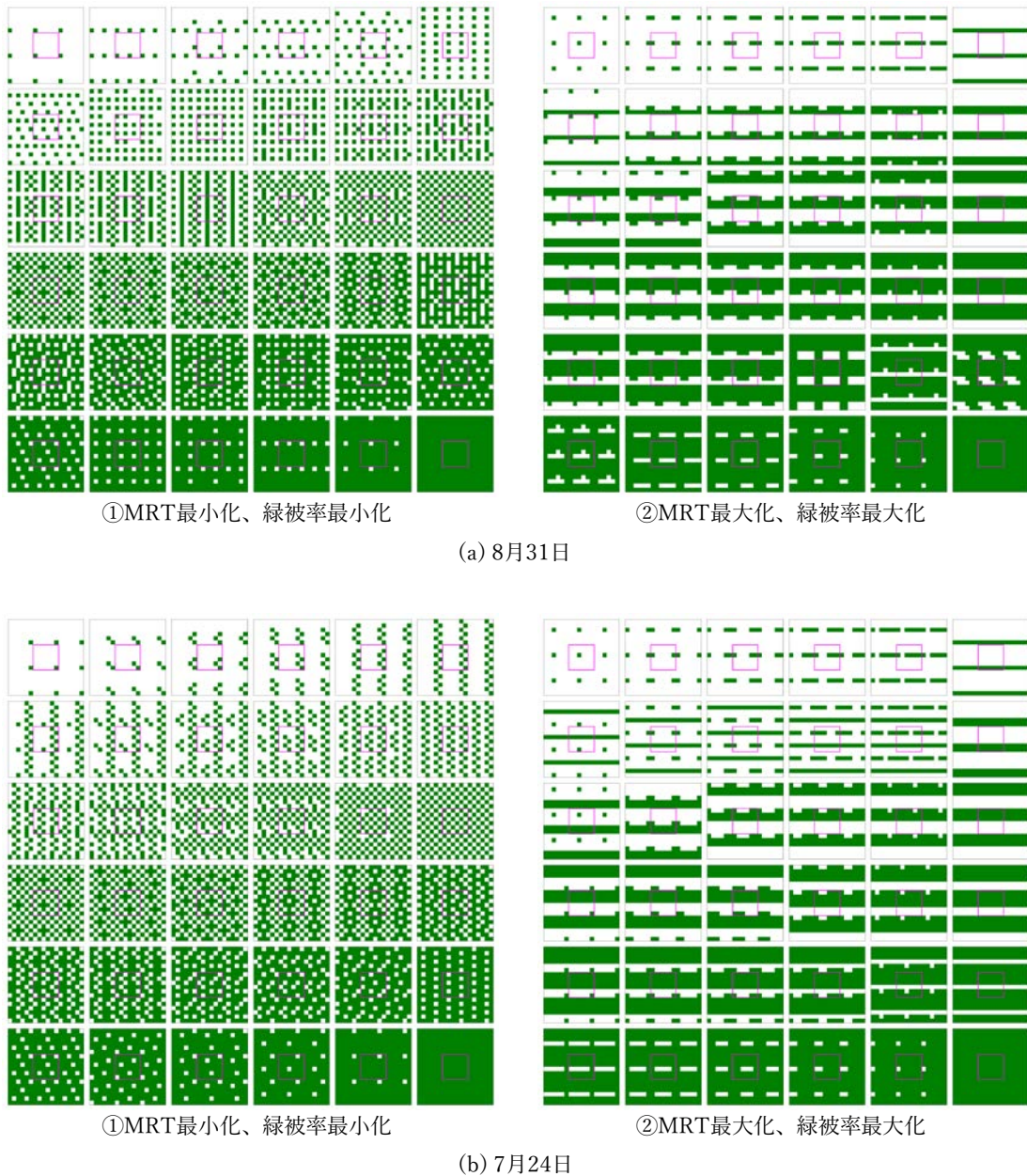


図 4-17 (a)8月31日、(b)7月24日の太陽高度・太陽方位を用いたときのパレート解の樹木配置の特徴

なお、設定すべき気象条件は緑地計画の設計コンセプトによって変わると考えられる。中間期、冬季等を考慮した最適化のための気象条件の設定方法の検討が重要となる緑地計画もあると考えられ、その点は今後の課題である。

#### 4.5.4 目的関数の違いによるパレート解の樹木配置への影響

パレート解の樹木配置は、MRTの最小化を目的関数としたものと蒸散速度の最大化を目的関数としたものでその特徴に大きな違いはなく、どちらも分散的かつ東西の離隔が優先される傾向を示した。4.3、4.4に示したように、そのような配置の特徴は、樹木による日射の遮蔽（吸収）量を最大化し、それによりMRTの最小化、蒸散速度を最大化していると考えられる。以上からは、樹木による日射遮蔽（吸収）量の最大化を目的関数とした最適化を実施すれば、同様の特徴を有する樹木配置が得られることが推測される。そのため、暑熱適応策もしくはヒートアイランド緩和策の効果を最大化する樹木配置を得ることを目的とすれば、より計算負荷の小さい日射遮蔽（吸収）量を目的関数とすることが有効である可能性がある。しかし、緑化計画における応用の観点では、樹木配置の暑熱適応策もしくはヒートアイランド緩和策の効果の具体的な評価が可能なMRT、蒸散速度として定量化することが重要と考えられる。樹木配置のパレート解を設計時に参照する場合、パレート解から目的関数の要求水準の設定により一つの解を選定する必要があり、要求水準はより具体的に効果を示す数値により設定することが望ましいためである。

#### 4.5.5 気温・湿度・風速の空間分布が及ぼす影響

本研究においては、前述のように全樹木メッシュに一律な気温・湿度・風速を用いているが、実際には空間的な分布が生じていると考えられる。ここではそのように一律な値を用いていることが本章の結果にどのような影響を及ぼしているかについて考察する。

樹冠内の風速分布については、2章の対流熱伝達率の実験式が樹冠全体の平均対流熱伝達率を算出するものであり、外部風速の関数として作成されたものであることから、同一樹冠内の全ボックスに一律な風速を設定することは問題ないと考えられる。この点は、個葉の対流熱伝達率と樹冠全体の対流熱伝達率とがほぼ等しいという2章の結果からも確認できる。樹木配置領域内の二次元的な分布については、成田ら(2006) [15]が樹木を密集させた群落を用いたフィールド実験により、群落内の風速がより小さくなることを示している。また、吉田ら(2000) [10]は樹木による気温低下と湿度上昇について示している。以上からは、本研究の樹木配置においても内外に風速・気温・湿度の分布が生じており、樹木配置領域の内部でより低風速、低気温、高湿度となることが推測される。しかし、低風速、低気温、高湿度であることは蒸散の阻害要因となるため、CFDを用いた計算によりそれらを考慮した最適化を実施した場合、樹木の密集による蒸散速度の減少分がより大きく評価されると考えられる。そのため、樹木の分散が蒸散速度の増加に寄与する点は変わらず、樹木配置のパレート解の特徴は本章の結果から大きくは逸脱しないものと推測される。

なお、風速・気温・湿度の空間分布がパレート解の樹木配置に大きな影響を与えない

としても、配置ごとの潜熱輸送量（蒸散速度）・顕熱輸送量を評価するうえで、2章における単木の顕熱輸送量の算出は重要であったと考える。また、風速・気温・湿度の空間分布が潜熱輸送量・顕熱輸送量に影響を及ぼすことは成田ら(2006) [15]も指摘しており、CFDにより分布を考慮した場合、より高精度な予測が可能となると考えられる。その点は本研究以後の課題である。

## 4.6 まとめ

本章では、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、周囲に建物が無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 8.5°C、蒸散速度は 18%程度変化し得る。
- ・ MRT の低減と蒸散速度の増加を目的とした最適化の結果は、統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、蒸散速度への影響が大きく、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、本章の検討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。本章では樹木配置を二次元かつ周囲に建物が無い条件に単純化し、目的関数を MRT や蒸散速度、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、都市のオープンスペースの緑地計画で重要となる周囲の街区形状、人の滞在場所等の条件、さらに熱環境以外の環境要素に関する目的関数を付加した場合、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。



## 第5章 都市のオープンスペースにおける樹木配置最適化

本章では、樹木配置の最適化手法の緑化空間設計への応用の可能性を示すため、①目的関数に熱環境だけでなく景観に関する目的関数を加えた樹木配置の最適化、②パレート解による樹木配置優先度マップの作成、の2つの最適化問題を実施した。

### 5.1 はじめに

4章では樹木配置のみの影響を示すため、周辺に建物がないオープンスペースにおける樹木配置の熱環境改善効果への影響や熱環境改善効果に寄与する樹木配置の特徴を示した。しかし、現実の都市におけるオープンスペースの多くは、周囲の建物の日射遮蔽の影響を受けるため、樹木による効果、効果に寄与する樹木配置もそれにより変化すると考えられる。また、実際の緑化空間の設計においては熱環境のみの観点で配置を決定することはなく、景観、空気環境、音環境といった様々な環境要因についての全体最適を図りながら設計案を決定していくことが必要となる。

また、上述のように目的関数を複数設定した多目的最適化を実施し、目的関数同士がトレードオフの関係にある場合、最適解はパレート解となる。そのため、緑地計画への応用に際しては、①設計者がパレート解の中から参照する解を選定する必要がある。②緑地計画の設計者がパレート解という概念を理解するのに一定の専門性を要する。といった課題があった。パレート解をそのまま設計者へのアウトプットとするのではなく、より平易に解釈でき、設計に反映し易いものに変換できれば、樹木配置最適化の実用において有効であると考えられる。

そこで本章では、樹木配置の最適化手法の緑化空間設計への応用の可能性を示すため、まず設計で考慮すべき熱環境以外の環境要因を選定し、それを目的関数に加えた最適化を実施する。さらに、樹木配置のパレート解に基づき、設計者がより平易に解釈でき、設計の初期段階で熱環境緩和効果を高める指針とできるような「樹木配置優先度マップ」を作成する手法を提案する。

## 5.2 天空・樹木への視認性を考慮した樹木配置最適化

### 5.2.1 樹木配置が影響を及ぼす熱環境以外の環境要素

都市における樹木の機能についての研究事例は多く、熱環境以外では、都市景観の評価の向上に関するもの(Aoki, 1991 [23]; Asgarzadeh et al., 2014 [24]; 邊敬ら, 2013 [25])、ビル風等による強風が発生する場所における風速の低減に関するもの(Bitog et al., 2012 [102]; 大橋, 2004 [103]; 眞下ら, 2015 [104])、空気中の汚染物質の吸着による空気環境の改善に関するもの(Grundström and Pleijel [26], 2014 [26]; Pelkonen, 2020 [27]; Vos, 2013 [28])、騒音の低減に関するもの等、非常に多岐に渡る。

景観への影響としては、樹木等の植栽や天空への視認性を評価する緑視率、天空率といった指標を扱う研究が多く、それら指標の値と被験者の印象の相関を検討している。Aoki(1991) [23];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おり、Asgarzadeh(2014) [24]は緑視率や天空率の増加が、街路景観による圧迫感の軽減に寄与することを示している。特定の視点からの樹木や天空の視認性は視点と樹木配置により大きく変化することが推測される。実際に張ら(2015) [105]は街路樹の配置と緑視率の関係について検討しており、配置方法により緑被率が変化することを示している。

空気環境への影響に関する研究には、街路樹による排気ガス中のNO<sub>2</sub>の吸着に着目したもの(Grundström and Pleijel [26], 2014 [26]; Pelkonen, 2020 [27])が多く、一定の吸着効果が示されている。風速の低減に関する研究においても一定の効果が確認されており、ビル風対策として実際に樹木が使用されることも多い。ただし、空気環境と風速低減については気流解析による評価が必要となるため、最適化への導入については3.2.2に示したSET\*の計算と同様の課題がある。

以上から、本研究においては景観に影響する樹木・天空への視認性を最適化における目的関数として用いることとする。風速の低減や空気環境の改善効果を目的関数とした樹木配置の最適化についても検討する価値は大きいと考えられるが、本研究の対象とはせず、本研究以後の課題とする。

### 5.2.2 最適化問題の設定

#### 解析対象と計算領域

実在の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5-1)。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、都市空間におけるオープンスペースの緑地の題材として適切であると考えた。144m×144mの計算領域の中に、36m×40mの樹木配置領域を設定し、さらにその中に3か所の分散的な評価領域を設定した。3か所の評



評価領域は、テーブル・イス等の什器が設置された滞在スペースを想定している。

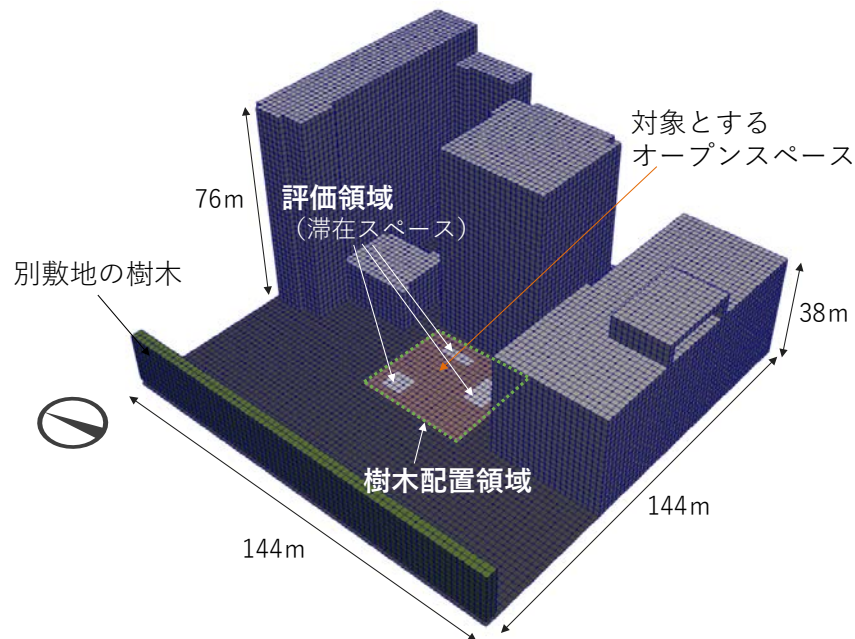


図 5-1 計算対象と樹木配置領域・評価領域

### 設計変数

樹木配置に関する設計変数について図 5-2 に示す。樹木は  $4\text{m} \times 4\text{m} \times 4\text{m}$  の樹木メッシュの集合として表現した。樹木配置領域の計 90 のメッシュについて、各メッシュが 0 : 空(Empty)、1 : 樹木(tree)のどちらにあたるかを設計変数とした。

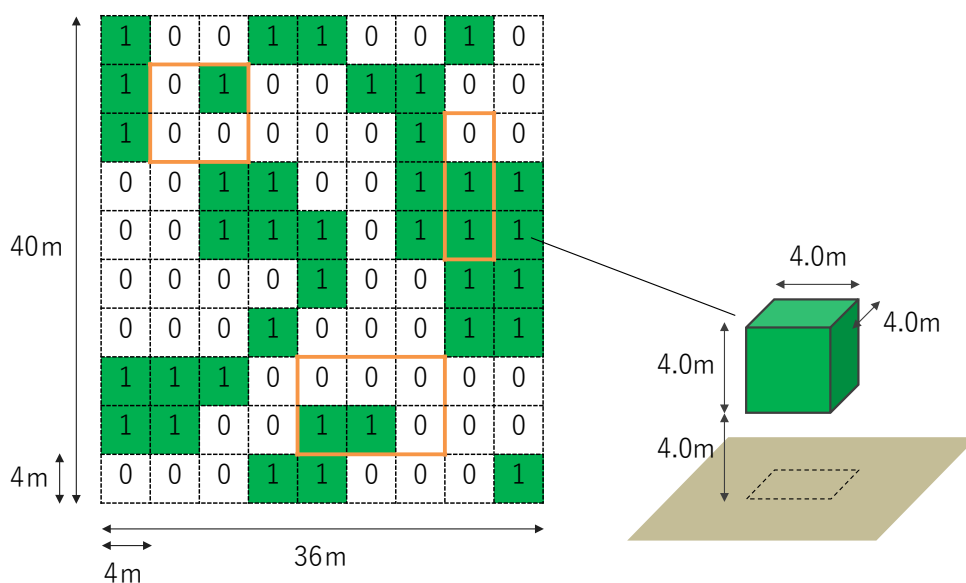


図 5-2 樹木配置モデルと設計変数

## 目的関数

本章では、暑熱適応策の効果の指標として MRT を、景観を評価する指標として天空視率、緑視率、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研究で新たに設定した指標である。算出方法は後述するが、人間の標準的な体位の視線方向である水平方向に大きな重みを与えて天空の視認性を評価する指標であり、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。以上の指標を用い、下記のように目的関数を設定した。

- ・ 評価領域における MRT の日中（8-16 時）平均値（以下、単に MRT）の最小化
- ・ 評価領域における天空視率の平均値（以下単に天空視率）の最大化
- ・ 評価領域における緑視率の平均値（以下単に緑視率）の最大化
- ・ 樹木配置領域における緑被率（以下単に緑被率）の最小化

4 章で蒸散速度を目的関数としていたが、最適解が MRT を目的関数とした最適化と類似した傾向を示したことから、ここでは使用しなかった。前述の緑視率や天空率の増加が街路景観の印象向上や圧迫感の軽減に寄与するという知見に基づき、天空視率、緑視率については最大化として目的関数に設定した。

MRT は 3 章の樹木の熱収支モデルを用いて算出した。その際のモデルのパラメータや気象条件は 4.2.4 と同じ夏季晴天日のものを用いた。建物・メッシュの熱物性値、建物メッシュには普通コンクリートの熱物性値 [97] を設定し、熱伝導率： $1.637\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 、容積比熱： $2013\text{kJm}^{-3}\text{K}^{-1}$  とした。地面メッシュの熱物性値は 4 章と同じ値を用いた。

天空視率と緑視率はレイトレーシングを用いて算出した。高さ 1.5m の点から天球方向に探査線を射出し、空に抜ける探査線の比率を天空視率とし、樹木メッシュに入射する探査線の比率を緑視率とした。探査線の射出を天球方向に限定しているのは、本研究の条件では算出高さ 1.5m から下向きに射出した探査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、低木や芝生等の低い位置にある植栽の緑視率への影響を評価したい場合は、天球方向ではなく、全球方向の探査線により算出する必要がある。また、標準的な姿勢においては人の視野が水平方向を中心としていることから、水平に近い方向のときに探査線の密度が大きくなるよう、式 (5.1) により立体角あたりの探査線密度を算出した。

$$D_{ray} = a \cos \theta \quad (5.1)$$

$D_{ray}$  : 探査線の密度 [ $\text{sr}^{-1}$ ]

- $a$  : 定数[-]  
 $\theta$  : 探査線と水平面のなす角[rad]

図 5-3 に式(5.1)による方法で探査線を射出した様子(b)を均等に射出した様子(a)と比較して示す。実際に水平方向が密になっていることが確認できる。

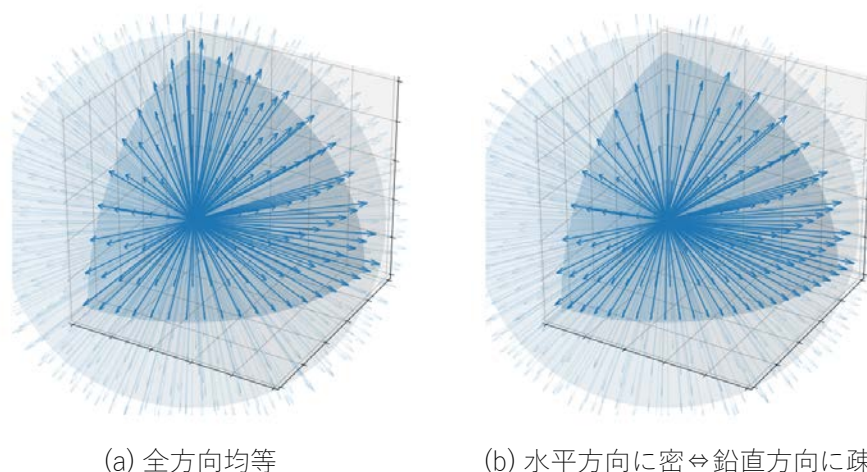


図 5-3 天空視率・緑視率算出のための探査線の射出方法

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、天空視率と緑視率は完全なトレードオフとなり、両者を目的関数に設定するのは不適切である。しかし、本章の最適化問題のように周囲に建物がある場合、完全なトレードオフとはならず、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樹木配置を導き出すことが可能と考えられる。これは、算出点から建物への視線を遮る位置に樹木が置かれた場合、樹木は天空への視線を遮蔽しないためである。

### 最適化手法

最適化計算は4章と同様に汎用最適化ソフト HEEDS (Ver.2019.1、Siemens) により実施し、アルゴリズムは HEEDS 搭載の SHERPA (Systematic Hybrid Exploration that is Robust, Progressive, and Adaptive) [99] [100]を使用した。

### 5.2.3 樹木配置の最適解

最適化の過程で得られた全ての解の MRT、天空視率、緑視率、緑被率の算出結果とそのパレート解を図 5-4 に示す。解の傾向を概要的に把握するため、パレート解を K-means 法によりクラスター化した。解の合計数は 44935、パレート解の合計数は 1934 となった。同等の樹木の量であっても、配置によって MRT は最大 23°C程度、天空視率は最大 18%程度、緑視率は最大 20%程度の差が生じた。ここからは、本問題と同等の

条件下では、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すことが示された。MRT と緑視率は正の相関を示し、MRT と天空視率、緑視率と天空視率は負の相関を示した。MRT と緑視率の正の相関は、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 も減少するためと考えられる。MRT と天空視率、緑視率と天空視率の負の相関については、前述のように評価領域の周囲に樹木が多い場合には MRT が減少、緑視率が増加し、樹木による遮蔽により天空視率が減少するためと考えられる。なお、5.2.2 にて説明した通り、天空視率と緑視率の関係(図 5-4、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%程度の差が生じている。

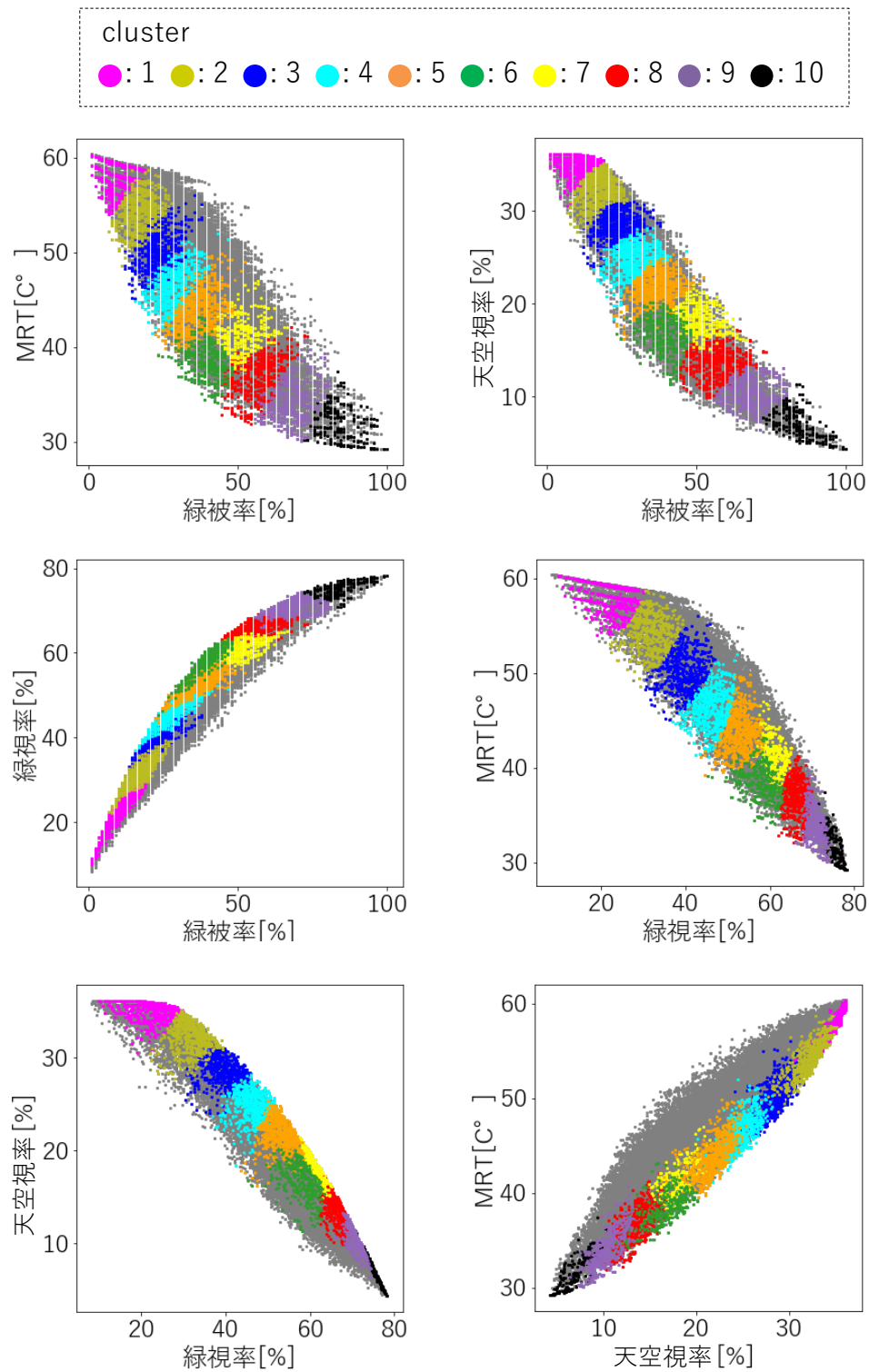


図 5-4 全ての解の目的関数の算出結果／パレート解のクラスター化（灰色のプロットが非パレート解であり、それ以外の色付きのプロットがパレート解である。）

図 5-5、図 5-6 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。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により表現した。

各クラスターの達成度を見ると、MRTの達成度と緑視率の達成度はどのクラスターでも同程度であり、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いる。これは前述の相関関係によるものである。各クラスターの配置を見ると、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。どのクラスターにおいても東南の角付近（図中の右下）に樹木が比較的多く配置されており、MRTの低減や緑視率の増大、天空視率の増大のために、このエリアに樹木を配置することが有効であることがわかる。

以上のように、パレート解をクラスター化して樹木配置の特徴を整理することは、パレート解の概要把握のために有用であると考えられる。

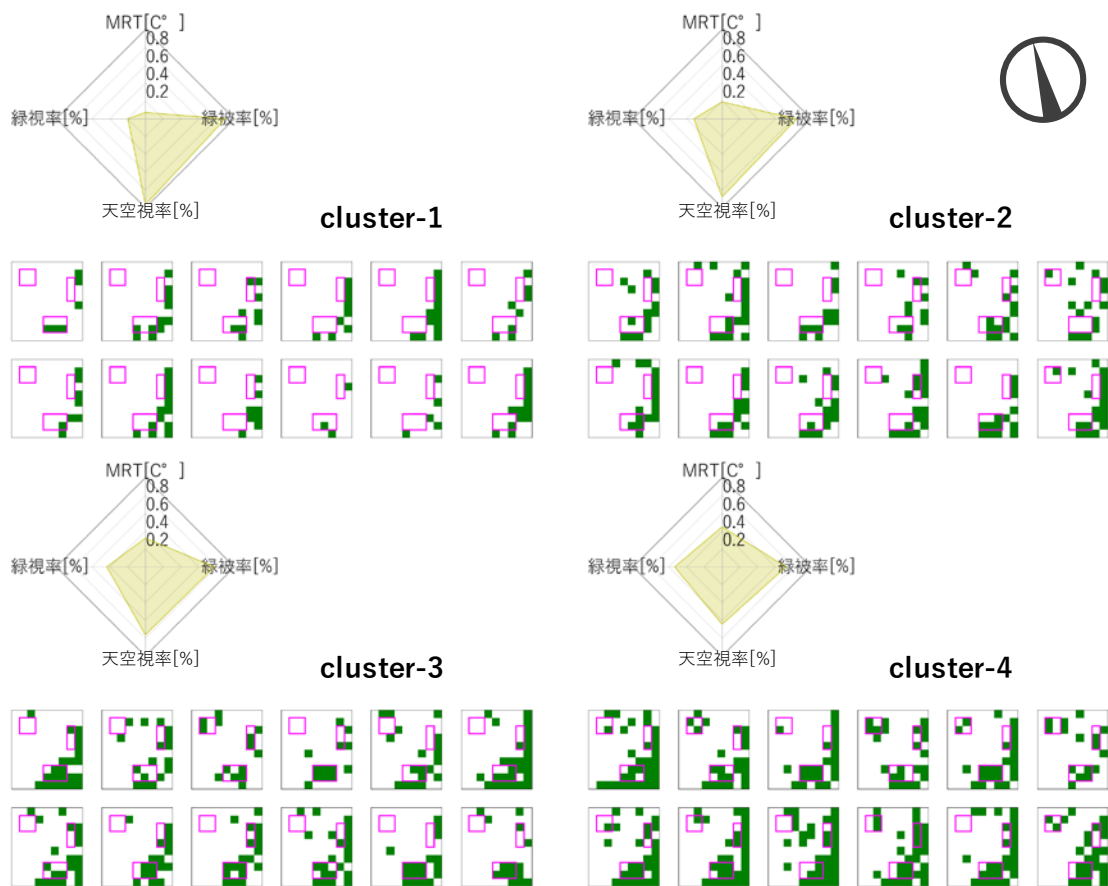


図 5-5 パレート解のクラスター別の樹木配置①

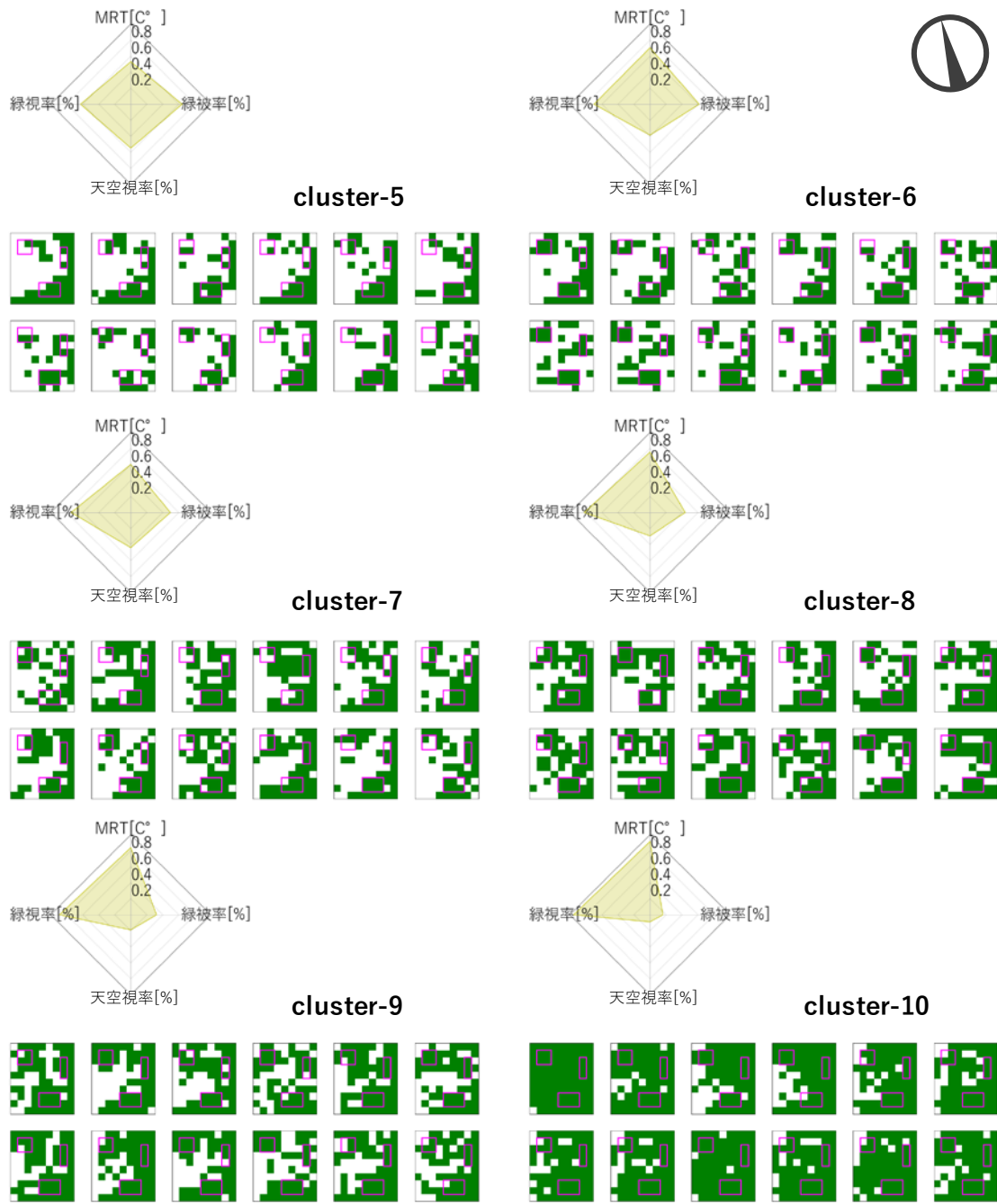


図 5-6 パレート解のクラスター別の樹木配置②

なお、本研究においては、同一クラスター内で樹木配置の特徴のばらつきを抑え、特徴の大きく異なる解が同一クラスター内に共存<sup>12</sup>することのないようにクラスター数=10を設定した。ただし、適切なクラスター数は最適化問題の設定により異なり、緑地計画の条件に応じて設定を変更する必要があると考えられる。

#### 5.2.4 最適解を用いた緑地計画

##### 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。本問題では下記の要求水準を設定した。

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

図 5-7 に示すように、まずパレート解の中から条件を満たす解が複数抽出され、されにその中から一つの解を選定した。図 5-7 に示した例のように、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。この解は、南東角に樹木が特に多く、滞在スペース直上に集中的、その周囲は分散的に配置されている。

<sup>12</sup> 例えばクラスター数=6としたときは下図のように、同一クラスター内に緑被率や樹木の分布傾向等の特徴が大きく異なる解が生じてしまう。

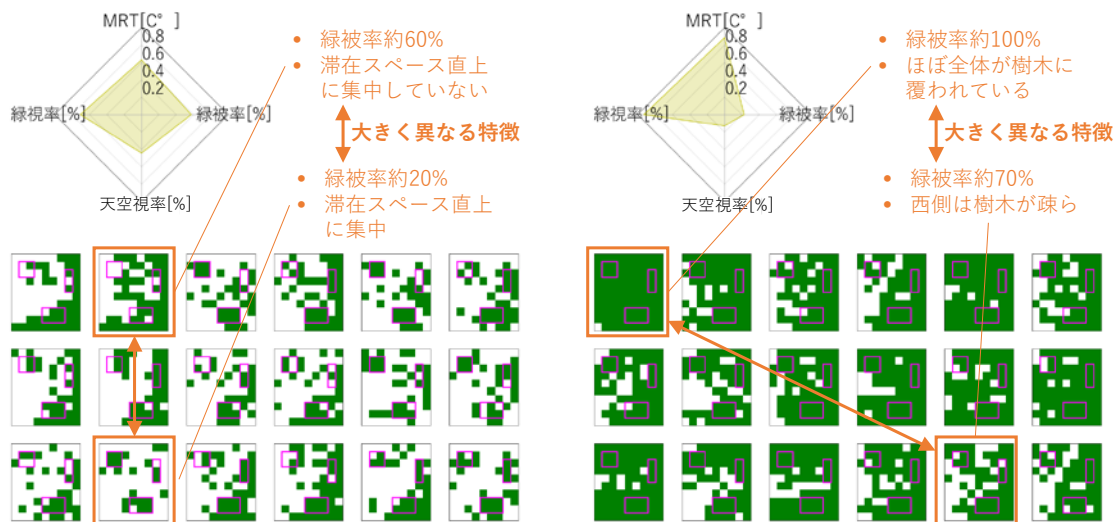


図 クラスター数=6としたときの各クラスターの樹木配置例



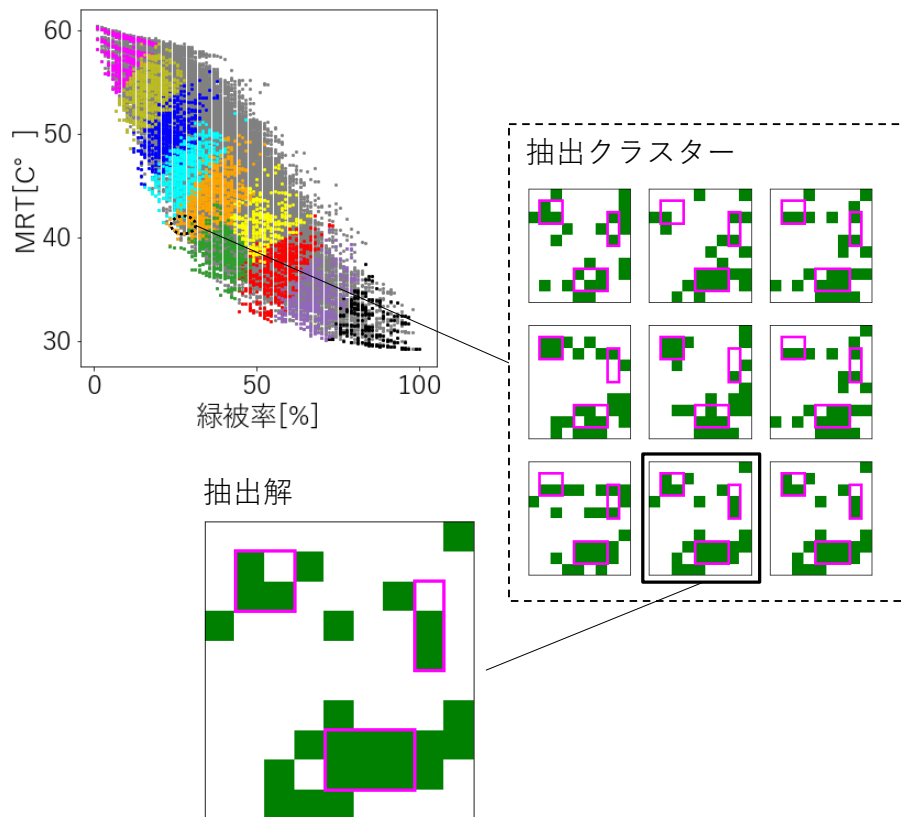


図 5-7 パレート解からの解の選定

なお、要求水準の設定は最適化を実施する前に設定し、それを満たす範囲に絞って最適解を得ることも可能である。どの時点で要求水準を設定でき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って変わると考えられる。

#### 最適解に基づく設計案の作成

次に選定した解を下敷きにして樹木を配置していく（図 5-8）。なお、ここで樹木配置モデルが設定していた  $3\text{m} \times 3\text{m} \times 3\text{m}$ 、枝下高さ  $3\text{m}$  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、日射遮蔽（吸収）のされ方も大きく異なり、最適解の性能が担保されないためである。

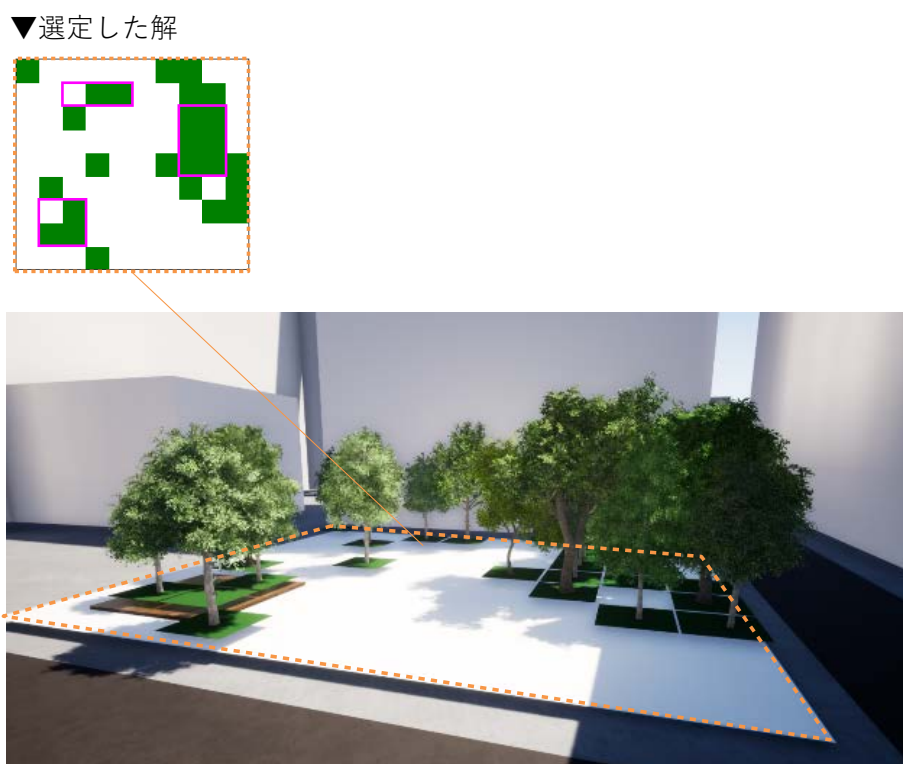


図 5-8 選定した解に基づく樹木配置計画

その樹木配置に対して、草本等の植栽、什器や照明等のその他の要素を追加<sup>13</sup>し、図 5-9 のような最終的な設計案を作成する。作成された設計案は、樹木配置の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、緑視率増加が図られている
- ・ 背後に建物があり、かつ日射が入射す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、緑視率増加が図られている
- ・ 建物がなく、開けている西側には樹木を置かず、天空視率低下が避けられている

<sup>13</sup>追加した図 5-9 の草本等の植栽、什器や照明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。村上・王(2014) [111]は MRT に及ぼす中・高木の日射遮蔽の影響と比較して、低木・芝生の表面温度上昇抑制の影響が大幅に小さいことを示している。さらに、追加した低木・草本等の植栽は小規模なものであるため、熱環境への影響は小さいものと考えられる。



図 5-9 設計案の作成（追加した草本等の植栽、什器や照明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。）

なお、都市環境工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。本研究の手法は、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、都市環境工学に関する素養が十分では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、本研究の手法は都市環境工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、本研究の手法の有効な使用方法は緑地計画の条件によって異なると考えられる。例えば、本章の検討のように事前に滞在スペースを設定せずに評価領域を樹木配置領域全体として最適化を実施し、最適解の樹木配置を基に滞在スペースを設定する方法も考えられる。図 5-10 にその例を示す。この方法を用いれば、図 5-10 のように最適解の樹木配置の特徴に応じて、MRT 低・緑視率大、天空視率大、中間的といったそれぞれ性格の異なる滞在スペースを設定することも可能であり、その点でも有効な使用方法となる。

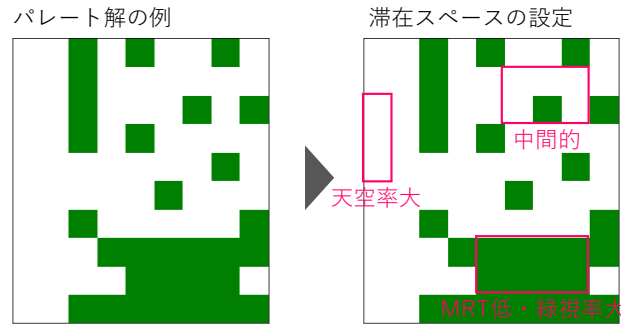


図 5-10 最適解の樹木配置に基づく滞在スペースの設定の例

### 5.3 パレート解による樹木配置優先度マップの作成

5.1 にて示したように、樹木配置最適化の緑地計画への応用に際しては、①設計者がパレート解の中から参照する解を選定する必要がある。②緑地計画の設計者がパレート解という概念を理解するのに一定の専門性を要する。といった課題があった。そこで本節では、樹木配置のパレート解に基づき、設計者がより平易に解釈でき、設計の初期段階で熱環境緩和効果を高める指針となるような「樹木配置優先度マップ」を作成する手法を提案する。

#### 5.3.1 樹木配置優先度マップの作成方法

熱環境改善効果は 5.2 と同様に MRT（平均放射温度）により評価し、樹木配置優先度は MRT 最小化、樹冠総体積<sup>14</sup>最小化を目的とした最適化により得られる樹木配置のパレート解を基に算出した。

樹木が配置される領域 A の地点 X における樹木配置優先度  $P(X)$  は、多くの最適解で樹木が配置された地点は樹木を配置する優先度が高いとの仮定の下、式(5.2)、(5.3)のように定義した。

$$P(X) = \frac{\sum_i^n (T_i(X))}{\max_{X \in A} \{ \sum_i^n (T_i(X)) \}} \quad (5.2)$$

$$T_i(X) = \begin{cases} 0 & (\text{パレート解 } i \text{ で } X \text{ に樹木が配置されていないとき}) \\ 1 & (\text{パレート解 } i \text{ で } X \text{ に樹木が配置されているとき}) \end{cases} \quad (5.3)$$

$n$  : パレート解の個数[-]

式(5.2)、(5.3)による算出のフローを図 5-11 と下記に示す。

<sup>14</sup> 樹冠総体積は樹木配置領域の緑被率に比例するため、緑被率と読み替えても問題ない。

- ① MRT 最小化および樹冠総体積最小化を目的とする多目的最適化によりパレート解を導き出す
- ② 各パレート解について、樹木が配置された位置の優先度を 1 とする ( $T_i(X)$ )
- ③ 全パレート解の優先度を足し合わせる ( $\sum_i^n(T_i(X))$ )
- ④ 領域全体における優先度の最大値が 1 となるように基準化する ( $\max_{X \in A} \{\sum_i^n(T_i(X))\}$  が領域における最大値)

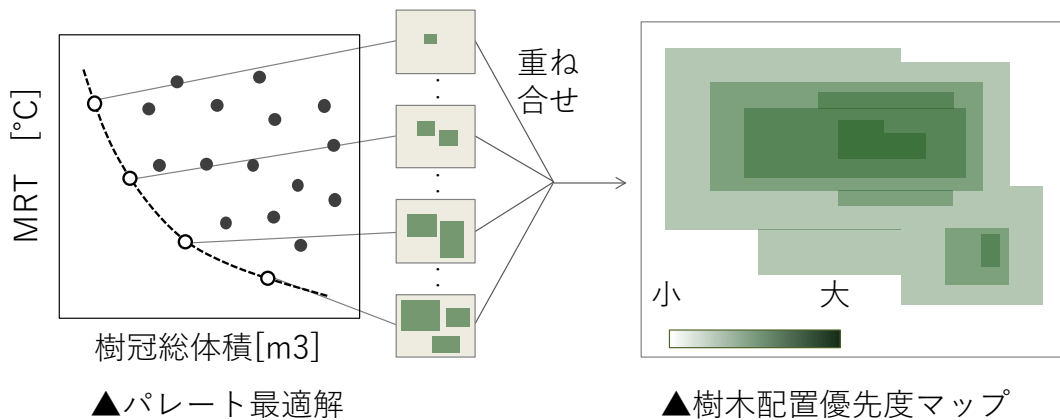


図 5-11 樹木配置優先度マップの作成方法

### 5.3.2 最適化問題の設定

次に、前項にて定義した樹木配置優先度を実際に算出するための最適化問題の設定について説明する。

#### 計算領域

実在建物の中庭を想定し、図 5-12 のように樹木を配置する樹木配置領域と熱環境の評価領域として滞在スペースを 5 か所設定した。

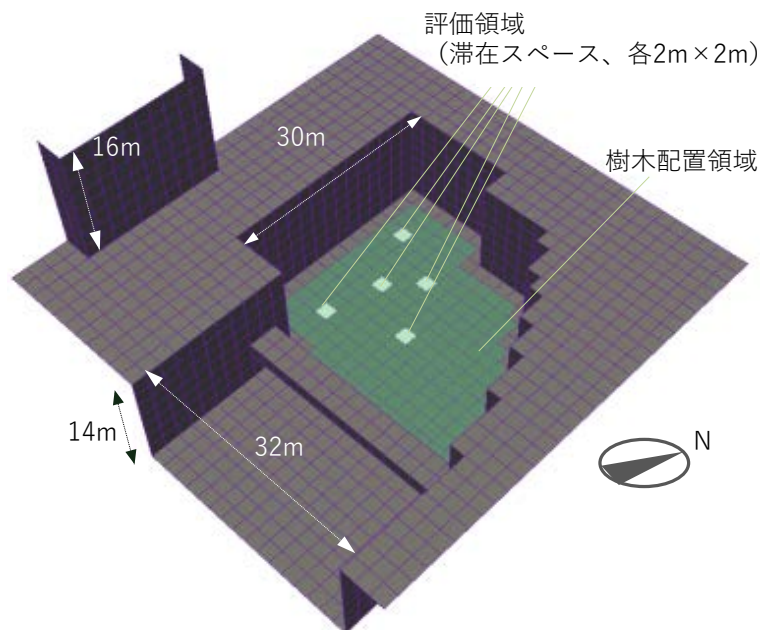


図 5-12 計算対象と樹木配置領域・評価領域

### 設計変数

樹木配置モデルと設計変数を図 5-13 に示す。直方体で樹冠を再現し、1つの樹冠につき樹冠位置の座標  $x, y$  と直方体の縦、横寸法  $a, b$  ( $0 \leq a, b \leq 5$ ) を変数とした。樹冠は計 15 個とし、 $(x, y, a, b)$  の 4 変数  $\times$  樹冠 15 個 = 60 変数となった。枝下高さ、樹冠の高さはそれぞれ 2m、4m で固定とした。

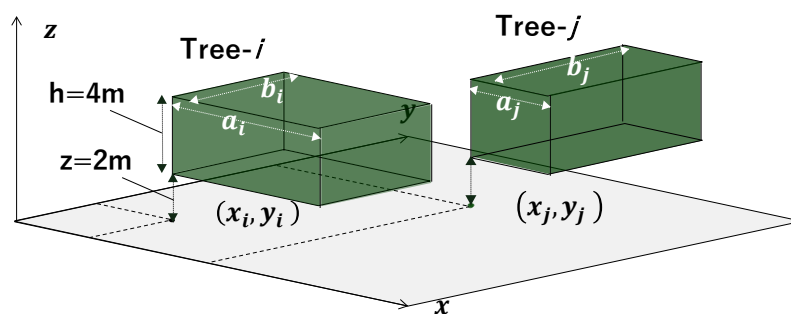


図 5-13 樹木配置モデルと設計変数

### 目的関数

中庭の 5 か所の滞在スペース (図 5-12) における MRT の平均値の最小化、樹冠総体積の最小化の二つを目的関数とした。MRT を算出する時間帯の異なる (a)9-17 時、(b)9-11 時、(c)12-13 時、(d)15-16 時の 4 つのケースに分けて最適化を実施した。MRT

は3章で示した方法で算出し、気象条件には晴天であった2010/8/22東京の実測値を用いた(図5-14)。

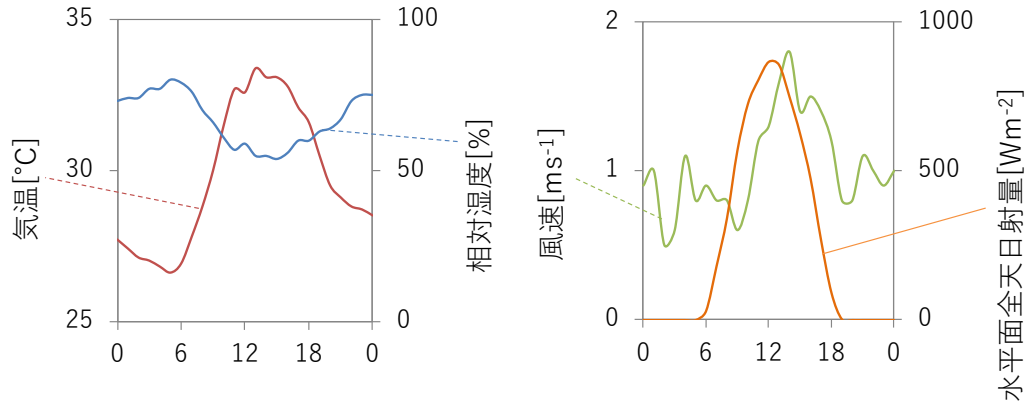


図 5-14 気象条件

### 5.3.3 樹木配置優先度マップの作成

#### 樹木配置のパレート解

設定した二つの目的関数がトレードオフの関係にあったため、最適化の結果パレート解が導出された。(a)9-17時、(b)9-11時、(c)12-13時、(d)15-16時の各ケースにおけるパレート解とそれぞれにおける樹冠体積約320m<sup>3</sup>、約640m<sup>3</sup>の配置例を図5-15に示す。(a)と(c)の樹木配置が類似しており、9-17時の平均MRTへの12-13時の値の寄与が大きいことがわかる。(d)の配置は他のケースと異なるが、これは15-16時には滞在スペースの多くが建物の陰に入ると考えられる。

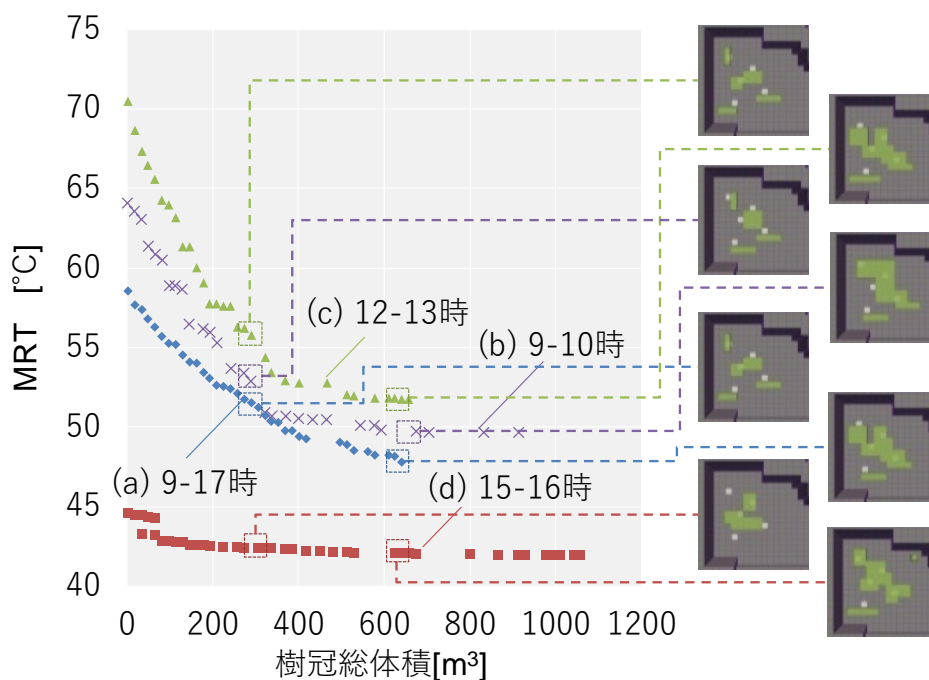


図 5-15 パレート解の MRT と樹冠体積[m<sup>3</sup>]

#### 樹木配置優先度マップ

(a)~(d)各ケースのパレート解から導出した樹木配置優先度マップを図 5-16 に示す。多くのケースで滞在スペースの南側の樹木配置優先度が高いが、値の大きさはばらついている。そのため、設計者はこの結果を指針として樹木配置優先度の大きい場所に樹木を優先的に配置するという対処が可能であると考えられる。また、(d)は優先度の分布が他のケースと異なり、目的の設定に応じて樹木配置優先度の分布が変化することが示された。



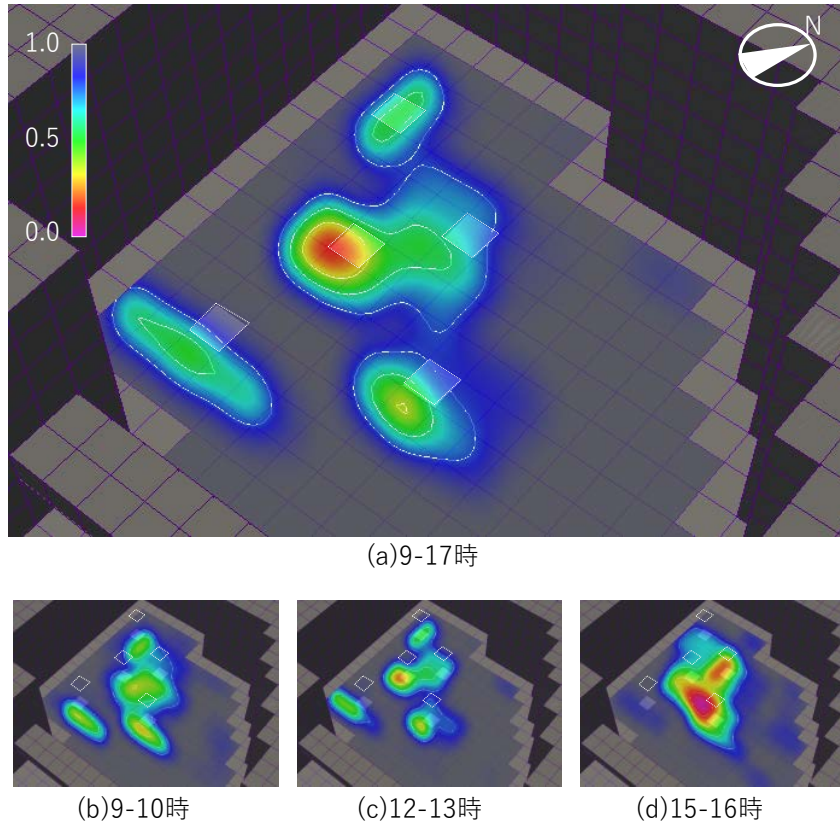


図 5-16 樹木配置優先度マップ

## 5.4 まとめ

本章では、樹木配置最適化の緑地計画への応用の可能性を示すことを目的とし、樹木配置の周辺に建物があるオープンスペースを対象に、MRTの低減に加えて天空視率と緑視率の最大化を目的関数に設定した樹木配置の最適化を実施した。得られた樹木配置のパレート解をクラスター化することで、パレート解の特徴を整理した。さらに、目的関数の要求水準を設定することで、それを満たす解をパレート解から抽出し、抽出した解を用いて設計案を作成する方法について示した。

MRT最小化、総樹冠体積の最小化を目的とした最適化により樹木配置のパレート解を導出し、そこから樹木配置優先度マップを作成した。樹木配置優先度は滞在スペース南側で高い傾向があったが、各滞在スペースで値の大きさは異なり、樹木配置優先度を根拠に樹木位置の優先順位を決定する方法の有効性が示唆された。



## 第6章 結論

### 6.1 本研究の総括

本論文は「都市熱環境からみたオープンスペースにおける樹木配置最適化に関する研究」と題し、以下の全6章により構成した。

第1章「序論」では、まず都市のオープンスペースにおいては樹木の配置や建物との位置関係といった緑化の方法によって熱環境改善効果が大きく異なること、熱環境改善効果のより大きい緑地方法を導き出す手法に対する設計者のニーズがあることを述べた。その上で、熱環境シミュレーションと数理最適化手法により、夏季の都市熱環境の改善を目的としてオープンスペースにおける樹木配置を最適化する手法の提案を研究対象に定めた。既往研究において、樹木の熱収支モデルが葉の三次元分布や揺らぎによる顕熱輸送の特性を十分に考慮できていないこと、樹木配置が熱環境改善効果に及ぼす影響、熱環境改善に寄与する樹木配置の特徴に関する検討が十分でないことを指摘した上で、研究目的と論文の構成を示した。

第2章「実測による単木の樹冠における熱収支の評価」では、葉の三次元分布や揺らぎといった樹木の特性を考慮した対流熱伝達率の算出とそれに基づく樹木から周辺大気への顕熱輸送量の評価を目的に、屋外環境下のケヤキを対象とした熱収支と周辺微気象の実測を行った。樹木の対流熱伝達率は直接的な測定が困難であるため、同一環境下に置き、灌水条件を変えて潜熱輸送量に差を生じさせた2本のケヤキの熱収支式を連立し、測定の困難な熱収支項を消去することで間接的に算出した。それを基に樹木から周辺大気への顕熱輸送量を算出し、日射による熱取得量が同等となる2条件において顕熱・潜熱輸送量の総和が同等となったことから、得られた対流熱伝達率の妥当性を確認した。

第3章「熱環境シミュレーションのための樹木の熱収支モデルの構築」では、上述の樹木の特性を考慮した熱環境シミュレーションを実施することを目的に、2章で得られた対流熱伝達率を組み込んだ樹木の熱収支モデルを構築した。熱収支モデルにおいて、樹木はVoxelの集合として表現し、各Voxelにおいて放射輸送計算、蒸散速度計算、熱収支計算を実施することとした。2章の実測におけるケヤキでの顕熱輸送量、潜熱輸送量の測定結果を基にモデルの精度を検証し、樹木の熱収支を一定の精度で予測できることを確認した。

第4章「最適化手法を用いた樹木配置が熱環境へ及ぼす影響の評価」では、樹木配置が熱環境改善効果に及ぼす影響の大きさ、さらに熱環境改善効果に寄与する樹木配置の

特徴を示すことを目的とし、3章の熱収支モデルによる熱環境シミュレーションと数理最適化手法を用いた樹木配置の最適化を実施した。ここでは樹木配置のみの影響を示すために周囲に建物の無いオープンスペースを対象とした。暑熱適応策の効果を評価するMRT、ヒートアイランド緩和策の効果を評価する蒸散速度、樹木の量を評価する緑被率を目的関数とした多目的最適化を実施し、樹木配置のパレート解を得た。その結果、夏季の晴天条件においては、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8.5°C程度、蒸散速度が18%程度変化し得ることを示した。さらに分散的な配置がMRTの低減と蒸散速度の増加に有効であるという合理的な結果が得られたことから、最適化手法の妥当性を確認した。

第5章「都市のオープンスペースにおける緑地計画のための樹木配置最適化」では、都市のオープンスペースの緑地計画における樹木配置最適化の活用の可能性を示すことを目的とした2つの最適化問題を実施した。一方では、周囲に建物があるオープンスペースを対象とし、利用者の滞在スペースや熱環境だけでなく天空視率や緑視率といった景観に関する目的関数を設定した樹木配置の最適化を実施した。得られた樹木配置のパレート解から各目的関数についての要求水準の設定により解を絞り込み、その解を基にした設計案の作成方法を示した。もう一方では、MRT最小化、総樹冠体積（緑被率）の最小化を目的とした最適化により樹木配置のパレート解を導出し、そこから樹木配置優先度マップを作成した。樹木配置優先度は滞在スペース南側で高い傾向があったが、各滞在スペースで値の大きさは異なり、樹木配置優先度を根拠に樹木位置の優先順位を決定する方法の有効性が示唆された。

## 6.2 今後の課題

### 6.2.1 樹種・樹形による影響の考慮

本研究では、都市のオープンスペースにおける樹木配置の最適化手法のための基礎的研究として、樹木に一律な樹高、樹形や葉面積密度、葉の形状や傾斜角の分布を設定し、その二次元配置のみを考えた。しかし、緑地計画においては、樹種や個体ごとに異なる樹形・樹高や葉面積密度、葉の形状や傾斜角の分布といった特徴、さらには成長や季節によるそれら特徴の経時変化を考慮することが必要となる。また、樹木の熱収支を評価するうえでは、気孔コンダクタンスモデルのパラメータといった、植物生理の違いについても考慮する必要がある。より現実の緑地計画に即した樹木配置の最適化手法を実施するためには、樹種ごとの上述の各種パラメータに関するデータベースを作成し、樹木配置モデルの設計変数に組み込む必要がある。本研究の対象としたケヤキ以外の樹種については、既に押尾ら(2016) [59]が葉面積密度や葉の傾斜角の分布を、清野ら(2017) [12]が気孔コンダクタンスモデルのパラメータを、石丸ら(2014) [68]が対流熱伝達

率を同定しており、それらの知見を組み込んでいくことが課題となる。

また、樹種や個体によってだけでなく、樹木の経年成長や季節変化によっても上述の各種パラメータが変化する。緑地計画の竣工時点だけでなく、10年後、20年後の状況を考慮した最適化を実施していくためには、樹木の成長モデル(例えば、Miyamoto et al., 2011 [106])を設計変数、もしくは目的関数として組み込む必要がある。樹木の成長モデルや、入力する未来の気象条件の不確実性が大きいという課題はあるが、設計者のニーズはあると考えられる。季節変化については、樹種ごとの落葉、常緑といった特徴に関する情報をデータベースに組み込み、さらに葉面積密度等の変化をモデル化する必要がある。暑熱適応策の効果については、夏季は緑陰が快適(涼しい)側に作用するのに対し、冬季は逆に不快(寒い)側に作用する可能性があり、目的関数の設定についても併せて検討が必要となる。

### 6.2.2 気流解析による気温・湿度・風速分布の考慮

本研究においては暑熱適応策の効果として影響が支配的である MRT を対象とし、その計算の際には一様な気温、湿度、風速を設定し、気流解析は実施しなかった。しかし、より精緻に効果を検討していくためには、MRT だけでなく気温、湿度、風速を考慮した総合的な熱的快適性指標(SET\* [80], UTCI [107]等)を用いることが有効であり、熱・湿気・放射輸送の連成解析が必要となる。また、ヒートアイランド緩和策の効果の指標とした蒸散速度の計算においても、MRT の計算と同様に一様な気温、湿度、風速を設定した。しかし、4.5.5 に示したように樹木群落の内外における風速・気温・湿度の空間分布は蒸散速度に影響を及ぼすことから、より精度の高い計算のためには、熱・湿気・放射輸送の連成解析が必要となる。さらに、熱・湿気・放射輸送の連成解析は気流解析の実施を伴うため、その導入により風速の低減、空気質の改善といった樹木の多面的な効果評価にもつながると考えられる。

以上のように、熱・湿気・放射輸送の連成解析の導入が重要であるが、3章に示したように、計算コストや計算結果の安定性の観点で課題がある。計算コストに関しては、計算機の性能や気流解析、数理最適化等の計算手法の性能向上が期待される。計算結果の安定性については、解のロバスト性を考慮した最適化に関する研究例(川口ら, 2010 [108]; 下山ら, 2009 [109])があり、そのような解の統計的な処理により担保できる可能性がある。樹木配置の最適化手法を緑地計画に活用していく上では、そのような解の統計処理についての検討も重要であると考えられる。

### 6.2.3 普及・展開先の検討

本研究の手法は都市環境工学の専門家が携わることのないプロジェクトにおいても性能を担保する方法として特に価値があると考えられる。そのため、緑地の設計業務を主な普及・展開先として想定しているが、その他にも①建物・樹木配置の同時検討、②

緑地の維持管理方法の検討、③果樹の配置検討、多様な応用可能性があると考えている。

①建物・樹木配置の同時検討は、5章の検討において固定していた周囲の建物を最適化における設計変数として、建物と樹木の配置の同時に検討するということである。建物配置を設計変数とすることで解の自由度が高くなり、より性能の高い解を導き出すことが可能であると考えられる。ただし、最適解の建物配置が斜線制限等の法規制を満足するか、また効率的な動線計画が可能か、効率的な施工が可能か、といった様々な要件をクリアしている必要がある。そのため、配置モデルにそれら要件を組み込む点で課題がある。

②維持管理への活用方法としては、維持管理費の削減や視認性の向上といった目的で樹木の間伐や剪定を実施するとき、熱環境改善効果の減少を最小限に抑えるような間伐・剪定方法の検討に活用できると考えられる。この場合は、現状の樹木配置をベースとし、樹木を植える位置ではなく、逆に樹木を間引く位置を設計変数により表現するような樹木配置モデルを用いる。樹木を間引くべき位置を示す最適解に基づき、間伐や剪定を実施することで、より効率的な維持管理が可能となると考えられる。また、樹木の維持管理において、樹木同士の相互被陰や建物の日影等による日照不足が問題となることがある。本研究では熱環境への影響に着目したが、同様の手法を樹木への日照の最大化を目的として実施し、生育を考慮した最適な樹木配置を導き出すことも可能と考えられる。

③果樹の配置検討は、上述の樹木への日照確保のための最適化を、果樹の生産性向上のための最適化に発展させた応用案である。収穫量をモデル化することができれば、最適化により収穫量や果実の質を向上させる果樹の配置を検討することが可能であると考えられる。しかし、そのためには、蒸散だけではなく、光合成、水ストレス、土壌養分、病害虫の発生等、多様な影響を考慮して果樹の生育を評価する必要があり、その点に課題があると考えられる。

## 参考文献

- [1] 環境省, "ヒートアイランド対策ガイドライン 改訂版," 2013.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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, p. 265-270, 2012.
- [5] 梅干野晁, 飯野秋成, 古賀和博, 佐野仁美, "サイドルッキング航空機 MSS データを用いた丘陵開発地域のヒートアイランドポテンシャルの計量及び土地被覆との関係の検討," *Journal of Architecture and Planning (Transactions of AIJ)*, Vol. 60, p. 29-37, 1995.
- [6] M. Monsi and T. Saeki, "Über den Lichtfaktor in den pflanzengesellschaften und seine bedeutung für die stoffproduktion," *Japanese Journal of Botany*, p. 22-52, 1953.
- [7] 吉田伸治, 中井敦, 大岡龍三, "樹木の成長, 樹種の違いが樹冠の葉面積密度・光学的深さに及ぼす影響: 実測に基づく街路樹の日射遮蔽効果の評価手法に関する研究," *日本建築学会環境系論文集*, vol. 71, no. 605, p. 103-110, 2006.
- [8] 平岡久司, "Ross の植物群落内放射輸送方程式の拡散近似解法に関する研究," *日本建築学会計画系論文集*, vol. 62, no. 495, p. 31-36, 1997.
- [9] H. Kobayashi, Y. Ryu, D. D. Baldocchi, J. M. Welles and J. M. Norman, "On the correct estimation of gap fraction: How to remove scattered radiation in gap fraction measurements?," *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 174, p. 170-183, 2013.
- [10] 吉田伸治, 大岡龍三, 持田灯, 富永禎秀, 村上周三, "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*, vol. 65, no. 536, p. 87-94, 2000.
- [11] K. Matsuda, R. Onishi and K. Takahashi, "Tree-crown-resolving large-eddy simulation coupled with three-dimensional radiative transfer model," *Journal of*

- Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 173, p. 53–66, 2018.
- [12] 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.
- [13] A. G. Barr, K. M. King, T. J. Gillespie, G. D. Hartog and H. H. Neumann, "A comparison of Bowen ratio and eddy correlation sensible and latent heat flux measurements above deciduous forest," *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 71, p. 21–41, 1994.
- [14] G. Katul, C.-I. Hsieh, R. Oren, D. Ellsworth and N. Phillips, "Latent and sensible heat flux predictions from a uniform pine forest using surface renewal and flux variance methods," *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 80, p. 249–282, 1996.
- [15] 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*, vol. 71, p. 59–66, 2006.
- [16] Y. Yang, D. Zhou, W. Gao, Z. Zhang, W. Chen and W. Peng, "Simulation on the impacts of the street tree pattern on built summer thermal comfort in cold region of China," *Sustainable Cities and Society*, vol. 37, p. 563–580, 2018.
- [17] Q. Zhao, D. J. Sailor and E. A. Wentz, "Impact of Tree Locations and Arrangements on Outdoor Microclimates and Human Thermal Comfort in an Urban Residential Environment," *Urban Forestry & Urban Greening*, vol. 32, p. 81–91, 2018.
- [18] 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, p. 65–71, 2004.
- [19] R. Ooka, H. Chen and 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, p. 1733–1748, 2008.
- [20] H. Chen, R. Ooka and S. Kato, "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.
- [21] L. Tyrväinen, S. Pauleit, K. Seeland and S. d. Vries, "Urban Forests and Trees, A Reference Book," p. 81–114, 2005.
- [22] S. Roy, J. Byrne and C. Pickering, "A systematic quantitative review of urban tree benefits, costs, and assessment methods across cities in different climatic zones,"



- Urban Forestry & Urban Greening*, vol. 11, p. 351–363, 2012.
- [23] Y. Aoki, "Evaluation methods for landscapes with greenery," *Landscape Research*, vol. 16, p. 3–6, 1991.
- [24] M. Asgarzadeh, T. Koga, K. Hirate, M. Farvid and A. Lusk, "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.
- [25] 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," *日本建築学会環境系論文集*, vol. 78, p. 437–444, 2013.
- [26] M. Grundström and H. Pleijel, "Limited effect of urban tree vegetation on NO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> concentrations near a traffic route," *Environmental Pollution*, vol. 189, p. 73–76, 2014.
- [27] V. Yli-Pelkonen, V. Viippola, D. J. Kotze and H. Setälä, "Impacts of urban roadside forest patches on NO<sub>2</sub> concentrations," *Atmospheric Environment*, vol. 232, p. 117584, 2020.
- [28] P. E. J. Vos, B. Maiheu, J. Vankerkom and S. Janssen, "Improving local air quality in cities: To tree or not to tree?," *Environmental Pollution*, vol. 183, p. 113–122, 2013.
- [29] T. R. DeRocher, R. F. Walker and R. J. Tausch, "Estimating Whole-Tree Transpiration of *Pinus monophylla* Using a Steady-State Porometer," *Journal of Sustainable Forestry*, vol. 3, p. 85–99, 1995.
- [30] B. Köstner, A. Granier and J. Cermák, "Sapflow measurements in forest stands: methods and uncertainties," *Annales des Sciences Forestières*, vol. 55, p. 13–27, 1998.
- [31] 吉田弘, 端野道夫, "大型ウェイングライシメータによる林木蒸散量計測の試み," *水工学論文集*, vol. 43, p. 67–72, 1999.
- [32] T. Defraeye, P. Verboven, Q. T. Ho and B. Nicolai, "Convective heat and mass exchange predictions at leaf surfaces: Applications, methods and perspectives," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 96, p. 180–201, 2013.
- [33] T. Haseba, "Convection Coefficient of Transfer across the Boundary Layer on Plant Leaf Surface," *Journal of Agricultural Meteorology*, vol. 40, p. 63–72, 1984.
- [34] F. R. Balding and G. L. Cunningham, "A Comparison of Heat Transfer Characteristics of Simple and Pinnate Leaf Models," *Botanical Gazette*, vol. 137, p. 65–74, 1976.

- [35] P. H. Schuepp, "Heat and moisture transfer from flat surfaces in intermittent flow: A laboratory study," *Agricultural Meteorology*, vol. 22, p. 351–366, 1980.
- [36] P. H. Schuepp, "Studies of forced-convection heat and mass transfer of fluttering realistic leaf models," *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 2, p. 263–274, 1972.
- [37] A. Kumar and N. Barthakur, "Convective heat transfer measurements of plants in a wind tunnel," *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 2, p. 218–227, 1971.
- [38] M. Kitano, J. Tateishi and H. Eguchi, "Evaluation of leaf boundary layer conductance of a whole plant by application of abscisic acid inhibiting transpiration," *Biotronics*, vol. 24, pp. 51–58, 1995.
- [39] A. Kichah, P.-E. Bournet, C. Migeon and T. Boulard, "Measurement and CFD simulation of microclimate characteristics and transpiration of an Impatiens pot plant crop in a greenhouse," *Biosystems Engineering*, vol. 112, p. 22–34, 2012.
- [40] 浅輪貴史, 梅干野晁, 清水克哉, 久保田光政, "大型重量計を用いた単木樹木の蒸散量の計測法とその精度確認," *日本緑化工学会誌*, vol. 38, no. 1, p. 67–72, 2012.
- [41] J. J. Landsberg and D. B. B. Powell, "Surface exchange characteristics of leaves subject to mutual interference," *Agricultural Meteorology*, vol. 12, p. 169–184, 1973.
- [42] 成田健一, 野々村善民, 小笠頭, "自然風下における窓面对流物質伝達率の実測 : 都市域における建物外表面对流熱伝達率に関する実験的研究(その 1)," *日本建築学会計画系論文集*, vol. 62, p. 49–56, 1997.
- [43] J.-Y. Parlange and P. E. Waggoner, "Boundary Layer Resistance and Temperature Distribution on Still and Flapping Leaves II. Field Experiments," *Plant Physiology*, vol. 50, p. 60–63, 1972.
- [44] T. A. Martin, T. M. Hinckley, F. C. Meinzer and D. G. Sprugel, "Boundary layer conductance, leaf temperature and transpiration of *Abies amabilis* branches," *Tree Physiology*, vol. 19, p. 435–443, 1999.
- [45] D. F. Parkhurst, P. R. Duncan, D. M. Gates and F. Kreith, "Wind-tunnel modelling of convection of heat between air and broad leaves of plants," *Agricultural Meteorology*, vol. 5, p. 33–47, 1968.
- [46] C. E. Murphy and K. R. Knoerr, "Simultaneous determinations of the sensible and latent heat transfer coefficients for tree leaves," *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 11, p. 223–241, 1977.
- [47] M. R. Thorpe and D. R. Butler, "Heat transfer coefficients for leaves on orchard apple trees," *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 12, p. 61–73, 1977.

- [48] H. G. Jones, "Application of Thermal Imaging and Infrared Sensing in Plant Physiology and Ecophysiology," *Advances in Botanical Research*, vol. 41, p. 107–163, 2004.
- [49] J. M. Blonquist, J. M. Norman and B. Bugbee, "Automated measurement of canopy stomatal conductance based on infrared temperature," *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 149, p. 2183–2197, 2009.
- [50] 森本幸裕, 武居二郎, 小南裕志, 花山秀文, 三輪賢志, "街路樹ケヤキの活性度診断," *日本緑化工学会誌*, vol. 17, no. 1, p. 9–15, 1991.
- [51] A. J. Brenner and P. G. Jarvis, "A heated leaf replica technique for determination of leaf boundary layer conductance in the field," *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 72, p. 261–275, 1995.
- [52] R. Leuning and I. J. Foster, "Estimation of transpiration by single trees: comparison of a ventilated chamber, leaf energy budgets and a combination equation," *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 51, p. 63–86, 1990.
- [53] 浦野良美, 渡辺俊行, "水平屋根スラブの外表面顕熱収支測定と伝熱応答解析," *日本建築学会論文報告集*, vol. 325, p. 93–103, 1983.
- [54] A. Hagishima and J. Tanimoto, "Field measurements for estimating the convective heat transfer coefficient at building surfaces," *Building and Environment*, vol. 38, p. 873–881, 2003.
- [55] S. Kobayashi and K. Morikawa, "Convective heat transfer coefficient of rooftop surface in downward heat flow," *Journal of Architecture and Planning (Transactions of AIJ)*, vol. 65, p. 21–27, 2000.
- [56] 佐藤鑑, 後藤滋, 関根孝, 関根毅, 岡樹生, 吉沢晋, 前川甲陽, 木村建一, 伊藤直明, 小原俊平, 片山忠久, "環境工学における市街地風の変動とその影響に関する総合的研究-7: 自然風による建築物外表面の対流熱伝達に関する研究-その 1," *日本建築学会論文報告集*, vol. 191, pp. 27–36, 1972.
- [57] S. Sharples, "Full-scale measurements of convective energy losses from exterior building surfaces," *Building and Environment*, vol. 19, p. 31–39, 1984.
- [58] 浅輪貴史, 梅干野晁, 清水克哉, 久保田光政, "大型重量計を用いた夏季におけるケヤキ単木の蒸散特性の分析," *日本緑化工学会誌*, vol. 39, pp. 534–541, 2014.
- [59] 押尾晴樹, 浅輪貴史, "地上型レーザースカ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.
- [60] H. McAdams W., "Heat Transmission (3rd ed.)," *McGraw-Hill, New York*, p. 532,

- 1954.
- [61] S. Campbell G. and M. Norman J., 生物環境物理学の基礎 第二版, 森北出版, 2010.
- [62] 神山健二, 大橋征幹, 成田健一, "葉面積密度を代表面積とした樹木の抵抗係数に関する風洞実験," *日本建築学会環境系論文集*, vol. 69, p. 71-77, 2004.
- [63] 石川仁, "樹木の流体力学特性の実験的解明," *日本流体力学会誌「ながれ」*, vol. 24, p. 483-490, 2005.
- [64] Y. Harazono and K. Yabuki, "Studies on the Effect of Leaf-Boundary Layer Resistance on the Matter Production of Crop," *Journal of Agricultural Meteorology*, vol. 37, p. 103-110, 1981.
- [65] R. A. Spronken-Smith and T. R. Oke, "Scale Modelling of Nocturnal Cooling in Urban Parks," *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 93, p. 287-312, 1999.
- [66] 成田健一, 三上岳彦, 菅原広史, 本條毅, 木村圭司, 桑田直也, "新宿御苑におけるクールアイランドと冷気のにじみ出し現象," *地理学評論*, vol. 77, p. 403-420, 2004.
- [67] 成田健一, 菅原広史, "都市内緑地の冷気のにじみ出し現象," *地学雑誌*, vol. 120, p. 411-425, 2011.
- [68] 石丸智貴, 浅輪貴史, 清野友規, 清水克哉, "熱画像を用いた樹木の対流熱伝達率の算出手法," in *日本ヒートアイランド学会第9回全国大会講演予稿集*, 2014.
- [69] G. Damour, T. Simonneau, H. Cochard and L. Urban, "An overview of models of stomatal conductance at the leaf level.," *Plant, cell & environment*, vol. 33, p. 1419-38, 2010.
- [70] T. N. Buckley, K. A. Mott and G. D. Farquhar, "A hydromechanical and biochemical model of stomatal conductance," *Plant, Cell and Environment*, vol. 26, p. 1767-1785, 2003.
- [71] 平岡久司, "植栽内熱・水分収支モデルの検証," *日本建築学会計画系論文集*, vol. 67, no. 558, pp. 31-36, 2002.
- [72] H. Hiraoka, "An investigation of the effect of environmental factors on the budgets of heat, water vapor, and carbon dioxide within a tree," *Energy*, vol. 30, p. 281-298, 2005.
- [73] F. A. Daudet, J. Silvestre, M. I. Ferreira, C. Valancogne and F. Pradelle, "Leaf boundary layer conductance in a vineyard in Portugal," *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 89, p. 255-267, 1998.
- [74] R. Nebbali, J. C. Roy and T. Boulard, "Dynamic simulation of the distributed

- radiative and convective climate within a cropped greenhouse," *Renewable Energy*, vol. 43, p. 111–129, 2012.
- [75] J. I. Montero, A. Antón, P. Muñoz and P. Lorenzo, "Transpiration from geranium grown under high temperatures and low humidities in greenhouses," *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 107, p. 323–332, 2001.
- [76] T. Boulard, M. Mermier, J. Fargues, N. Smits, M. Rougier and J. C. Roy, "Tomato leaf boundary layer climate: implications for microbiological whitefly control in greenhouses," *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 110, p. 159–176, 2002.
- [77] 神田学, 日野幹雄, "大気—植生—土壌系モデル(NEO SPAM)による数値シミュレーション (1)植生効果のモデリング," *水文・水資源学会誌*, vol. 3, no. 3, p. 37–46, 1990.
- [78] M. Robitu, M. Musy, C. Inard and D. Groleau, "Modeling the influence of vegetation and water pond on urban microclimate," *Solar Energy*, vol. 80, p. 435–447, 2006.
- [79] J. Dauzat, B. Rapidel and A. Berger, "Simulation of leaf transpiration and sap flow in virtual plants: model description and application to a coffee plantation in Costa Rica," *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 109, p. 143–160, 2001.
- [80] A. P. Gagge, A. P. Fobelets and L. G. Berglund, "STANDARD PREDICTIVE INDEX OF HUMAN RESPONSE TO THE THERMAL ENVIRONMENT.," 1986.
- [81] 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.
- [82] 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.
- [83] 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.
- [84] 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, p. 95–102, 2007.
- [85] C. Park, D. Lee, S. E. Krayenhoff, H. Heo, S. Ahn, T. Asawa, A. Murakami and H. Kim, "A multilayer mean radiant temperature model for pedestrians in a street

- canyon with trees," *Building and Environment*, vol. 141, pp. 298-309, 2018.
- [86] S. Thorsson, J. Rocklöv, J. Konarska and L.-F. Climate, "Mean radiant temperature—A predictor of heat related mortality," vol. 10, pp. 332-345, 2014.
- [87] L. O. Myrup, "A Numerical Model of the Urban Heat Island," *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 8, p. 908-918, 1969.
- [88] 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*, vol. 272, p. 97-103, 1978.
- [89] 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, p. 814-818, 1995.
- [90] 平岡久司, "植物群落内の放射伝達と運動量輸送のモデル化に関する研究," *博士論文*, 1993.
- [91] R. Frouin and R. T. Pinker, "Estimating Photosynthetically Active Radiation (PAR) at the earth's surface from satellite observations," *Remote Sensing of Environment*, vol. 51, p. 98-107, 1995.
- [92] 中大窪千晶, 梅干野晁, "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.
- [93] 本田友里香, "レーザースキャナによる樹木の三次元形態のモデル化と放射収支解析," *修士論文*, 2013.
- [94] R. E. Bird, "A simple, solar spectral model for direct-normal and diffuse horizontal irradiance," *Solar Energy*, vol. 32, p. 461-471, 1984.
- [95] 鈴木弘孝, "実在街区内での樹木配置・壁面緑化の違いによる温熱環境シミュレーション," *日本緑化工学会誌*, vol. 34, p. 399-408, 2008.
- [96] 日本建築学会, *拡張アメダス気象データ*, 2000.
- [97] 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.
- [98] 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, p. 557-562, 1975.
- [99] R. C. Technology, *SHERPA - An Efficient and Robust Optimization/Search Algorithm*, 2008.
- [100] L. C. Ngo, T. Bello-Ochende and J. P. Meyer, "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, p. 757–766, 2015.
- [101] 蔵田憲次, 岡田益己, 佐瀬勘紀, "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, p. 15–22, 1988.
- [102] J. P. Bitog, I.-B. Lee, H.-S. Hwang, M.-H. Shin, S.-W. Hong, I.-H. Seo, K.-S. Kwon, E. Mostafa and Z. Pang, "Numerical simulation study of a tree windbreak," *Biosystems Engineering*, vol. 111, p. 40–48, 2012.
- [103] 大橋征幹, "単独樹木周辺の気流解析に関する研究," *日本建築学会環境系論文集*, vol. 69, p. 91–96, 2004.
- [104] 眞下茜, 河野良坪, 中川純, 桃瀬一成, 池島薫, 乾久美子, "風速低減を目的とした樹木の最適配置に関する設計手法の提案; 随伴変数法を用いた CFD 逆解析の活用に関する研究," *日本建築学会環境系論文集*, vol. 80, p. 803–813, 2015.
- [105] 張心笛, 石井儀光, 雨宮護, 大澤義明, "緑視率から見た街路樹削減効果に関する数理的考察," *日本都市計画学会 都市計画論文集*, vol. 50, p. 273–278, 2015.
- [106] 宮本仁志, 盛岡淳二, 神田佳一, 道奥康治, 魚谷拓矢, 大地洋平, 阿河一穂, "流量変動のインパクトを考慮した河道内樹林動態の確率モデル," *土木学会論文集 B1 (水工学)*, vol. 67, no. 4, pp. 1405–1410, 2011.
- [107] K. Blazejczyk, Y. Epstein, G. Jendritzky, H. Staiger and B. Tinz, "Comparison of UTCI to selected thermal indices," *International Journal of Biometeorology*, vol. 56, p. 515–535, 2011.
- [108] 川口暁生, 小名国仁, 合羽輝彦, 高田倫行, "ロバスト性を考慮した吸気ポート形状最適化手法の開発," *自動車技術会論文集*, vol. 39, pp. 119–124, 2010.
- [109] 下山幸治, 鄭信圭, 大林茂, "応答曲面近似・可視化データマイニングを利用したロバスト設計最適化の実問題応用," *人工知能学会論文誌*, vol. 24, p. 13–24, 2009.
- [110] 深井一夫, 伊藤宏, 後藤滋, 阿久井哲, 斎藤順二, "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, p. 139–147, 1993.
- [111] 村上暁信, 王彦, "都市緑化による熱的快適性の改善効果に関する研究," *都市計画論文集*, vol. 49, p. 231–236, 2014.
- [112] 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, 2017.

## 謝辞

指導教員である東京工業大学准教授 浅輪貴史先生には、修士時代からの長きに渡り、テーマ・方法論の設定、論文の執筆、プレゼンテーションの作成等、研究の基盤となる多大なご指導を頂きました。行き詰ったときは必ずどこかに活路を見出して下さり、心救われることが数多くありました。深く感謝致します。

東京工業大学名誉教授 梅干野晃先生には、研究に対する心構え等、今後の人生の糧となるご指導を頂きました。深く感謝致します。

東京工業大学教授 中村芳樹先生、同准教授 室町泰徳先生、同准教授 湯浅和博先生、同准教授 大風翼先生、同特任准教授 小林秀樹先生には、中間発表から審査会にかけて、大変貴重なご意見、ご指導を頂きました。深く感謝致します。

トヨタ自動車バイオ・緑化事業部（当時）の清水克哉氏には本研究の軸となる様々な測定の機会を与えて頂きました。深く感謝致します。

国立環境研究所特別研究員（当時 東京工業大学特別研究員）清野友規氏には機会ある毎に的確な助言を頂き、大きな助けとなりました。また、その研究へのストイックな姿勢には大きな刺激を受けました。深く感謝致します。

浅輪研究室 秘書の薄葉千景氏には、各種の事務手続きや研究室での日常生活の中で多大なご支援を頂きました。その明るい笑顔に常に元気づけられました。深く感謝致します。

修士課程同期の佐藤翔太郎氏、中崎恵未氏、成瀬優佳氏、本田友里香氏、渡辺圭祐氏をはじめ、浅輪研究室の多くの方と研究の苦楽を共にしたことは、研究生活、日常生活を豊かなものとしてくれました。深く感謝致します。

本研究は、数多くの人々のご協力によりまとめることができたものであり、その全ての方に深く感謝致します。

最後に、研究生活、日常生活において常に心の支えとなってくれた家族に深く感謝致します。

2020年9月 藤原 邦彦



## 公表論文リスト

### 【審査付論文】

- 1) 浅輪貴史, 藤原邦彦, 梅干野晁, 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, 235-245, 2016.2.  
<http://doi.org/10.3130/aije.81.235>
- 2) Asawa, T., Fujiwara, K., Estimation of Sensible and Latent Heat Fluxes of an Isolated Tree in Japanese Summer, *Boundary-Layer Meteorology*, 175, 417-440, 2020.6.  
<https://doi.org/10.1007/s10546-020-00507-y>
- 3) 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.86, No.772, 2020.6.  
<https://doi.org/10.3130/aije.85.475>

### 【国際会議】

- 1) Fujiwara, K., Tsuchiya, N., A fundamental study on optimization of tree arrangements for heat mitigation, 6th International Conference on Landscape and Urban Horticulture, 20-25 June 2016, Athens, Greece (Poster presentation)
- 2) Fujiwara, K., Asawa, T., Tsuchiya, N., Optimization of Tree Arrangement for Landscape Design: Proposal Regarding Tree Arrangement Priority Maps for Heat Mitigation, 10th International Conference on Urban Climate, 6-10 August 2018, New York, United States (Oral presentation)

### 【国内会議】

- 1) 藤原邦彦, 浅輪貴史, 梅干野晁, 清水克哉, 樹木の熱・水収支特性のモデル化に向けた蒸散量と葉温の分析, 日本ヒートアイランド学会 第7回全国大会, 2012.7.25-7.27, 京都大学, (ポスター発表)
- 2) 藤原邦彦, 浅輪貴史, 梅干野晁, 清水克哉, 都市緑化を対象とした単木樹の熱・水収支特性の計量化と数値モデル化 その5 葉温に及ぼす蒸散量・周辺微気象条件の影響分析, 2012年度日本建築学会大会(東海), 2012.9.12-9.14, 名古屋大学(口頭発表)
- 3) 藤原邦彦, 浅輪貴史, 梅干野晁, 清水克哉, 都市緑化を対象とした単木樹の熱・水収支特性の計量化と数値モデル化 その8 ケヤキ樹冠の対流熱伝達率と周辺大気への顕熱輸送量, 2013年度日本建築学会大会(北海道), 2013.8.30-9.1, 北海道大学(口

頭発表)

- 4) 藤原邦彦, 土屋直也, 暑熱緩和のための樹木配置最適化に関する基礎的研究 -樹冠の形状と三次元位置を設計変数とした最適化計算の試行-, 日本ヒートアイランド学会 第10回全国大会, 2015.8.28-8.30, 日本工業大学, (ポスター発表)
- 5) 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 暑熱緩和のための樹木配置優先度マップの提案, 2017年度日本建築学会大会(中国), 2017.8.31-9.3, 広島工業大学(口頭発表)
- 6) 藤原邦彦, 浅輪貴史, 清野友規, 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2 樹木の二次元配置が熱放射環境に及ぼす影響, 2019年度日本建築学会大会(北陸), 2019.9.3-9.6, 金沢工業大学(口頭発表)