

温熱環境改善を主眼とした都市樹木の最適な樹冠サイズ及び形状の効果検証

公益財団法人 都市緑化機構 研究部 主任研究員 手代木 純
東北大学大学院工学研究科 都市・建築学専攻 教授 持田 灯
同 大学院生 新井 千秋

はじめに

(1) 研究の背景

樹木は屋外環境設計上の極めて重要な要素であり、特に暑熱環境緩和にはもっとも効果の高い方策である。この機能は、日射の遮蔽による緑陰の形成機能と、蒸散による潜熱消費による気温低減効果という両面によっている。このような樹木を都市の空間に適切に配置することにより、人間の活動域での熱ストレスを低減させ、いかに快適性を向上させるかが課題となってくる。

この課題に対応するためには都市における樹木、特に高木を、快適性確保と管理の両面から、最大ではなく最適なサイズ、規模による樹冠を形成しその効果を確認することが、快適な都市環境の形成のために重要である。

高木においては枝葉を上げ大きな緑陰を作るものほど効果が高い¹⁾が、都市空間においては枝が上げられる空間を確保する必要があるだけでなく、植栽空間の管理にかかる剪定などの手間やコスト、管理上のリスクなど、多くの課題がある。筆者らは既報^{2,3,4)}において、単木や樹林といった樹冠のまとまりの違いによる蒸散量の差異と気温等の環境条件の関係を整理している。蒸散量をもとに詳細な潜熱消費量の把握が可能となり、日射遮蔽の効果と切り分けての評価が可能となった。

本研究は、これまでの知見をもとに街路樹や公園等における都市樹木の最適な樹冠のサイズ・規格、および配置間隔を、実測およびシミュレーションの両面から検討することをめざし、これまで別個に検討されてきた、歩行者空間の温熱快適性とメンテナンス上のリスクの評価を統合して、この両面から最適な樹冠の大きさ、高さを提案する試みを行う。

具体的には、樹木の最適な樹冠サイズを造園・緑化分野の視点で検討し、その上で建築環境工学の視点で樹冠による都市環境面における熱的な効果をシミュレーションにより明らかにする。

(2) 研究の目的と方法

都市内の樹木による人間の活動域の快適性を向上させるため、最適な樹冠の大きさを導き出すことを目的とする。その方法として、シミュレーションベースで複数のケースを比較し、温熱環境面、実際の維持管理面の両面を踏まえて最適な樹冠を検討した（図1）。

最初に、樹木を検討する際の比較項目について枝張りを段階的に変化させて検討した。この結果を踏まえて樹木の形状、要素の比較ケースを作成した。このケースを用いて、放射解析および流体解析を行い、さらに解析内容の要因を切り分けて分析した。

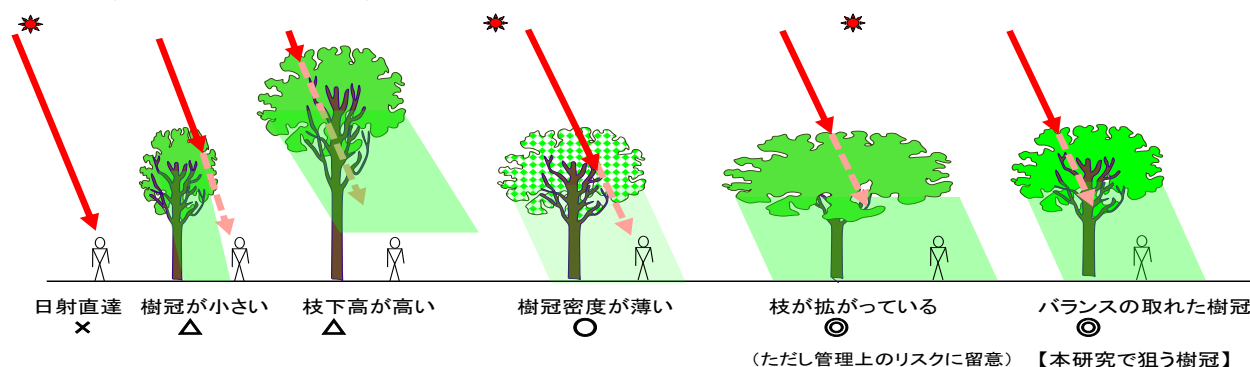


図1 樹冠サイズの設定の相違による生活面への効果の差異の概念

1. 樹木の最適な樹冠サイズの検討

(1) 背景

近年、街路樹をはじめとした公共空間の樹木は、管理コストの縮減に伴って剪定、点検の回数が減る一方、大木化や老朽化といった課題に直面している。

2014年4月、川崎市宮前区で商業施設敷地内の樹木の枝が落ちて女兒が重傷を負う事故が発生するなど、老朽化した樹木の管理、更新は喫緊の課題となっている。

こうしたなか、名古屋市では、2015年8月に公表された街路樹再生指針⁵⁾において、従来の量的拡大の観点を転換し、質的な向上として、①安全性の確保、②都市の魅力の向上、③管理コストの縮減をはかる、としている。また取組方針の中では安全性確保のための大高木の樹高抑制を行うこととしている。具体的には枯れ枝落下事故のリスクを低減し、汎用リフト車で点検や管理が可能な高さまで樹高を下げるために、従来15～20mの樹高を8～12m程度で剪定し、街並みと調和の取れた樹形に再生していくというものである。

しかしこうした取組では、剪定頻度など、管理コスト面からの対応やリスク回避からの視点が中心となりがちで、実際の都市生活者にとって重要な、樹冠の減少に伴う緑陰による快適性の減衰にまで言及しているとは言い難い。

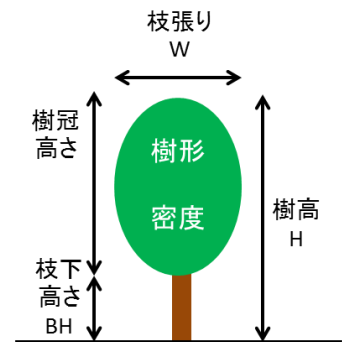


図2 樹冠サイズの設定要素

(2) 造園・緑化分野の視点での検討

都市内の高木として多く植栽されている街路樹における管理実態について、造園・緑化分野の専門家や実務家と協働するとともに現場のヒアリング等を実施した。現在の街路樹の剪定作業は、人力で木に登る場合と高所作業車を用いる場合があるが、ここでは人力による剪定作業を想定して検討する。その場合、幹から剪定する枝先まで横幅で片側3mはそれほど難しくはないが片側4mの場合は作業上厳しくなることが指摘された。

樹高については、樹木の成長とともに伸張するが、樹高>枝張りとなる条件で、かつ剪定作業に要する労力・コストを抑制することもあり、8mを基本として検討することとした。

(3) シミュレーションによる枝張りの検討

① 比較パラメータの検討

都市環境に関する研究で広く用いられている手法であるCFD(Computational Fluid Dynamics, 数値流体力学)解析と3次元放射解析を行う。これは数値流体力学上の計算により都市に形成される複雑な熱や空気や風の流れを再現する手法である。解析に当たり樹冠の大きさを示すパラメータとして入力する要素として、樹高、枝下高、枝張を設定した。また樹冠内密度は葉面積密度とした。

② 樹種

わが国の街路樹として広く使用されている上位6樹種を選択した。ただし、ハナミズキは実際の管理状況を勘案し、適切な樹冠形状を設けることが難しいと判断し、また常緑樹のクスノキも対象外とした。この結果、検討対象樹種はイチョウ、サクラ類、ケヤキ、トウカエデの4種とした。

③ 同一樹冠形状による影響の差異の分析

樹木の枝張りに着目して、樹木(イチョウを想定)の大きさを変更した場合の解析を

表1 各ケースのパラメータ

枝張り [m]	樹高 [m]	枝下高さ [m]	体積 [m ³]	葉面積密度 [m ² /m ³]
2	3	0.7	3.15	0.86
3	4.6	1.0	7.42	
6	9.2	2.0	29.7	
8	12.3	2.6	53.1	

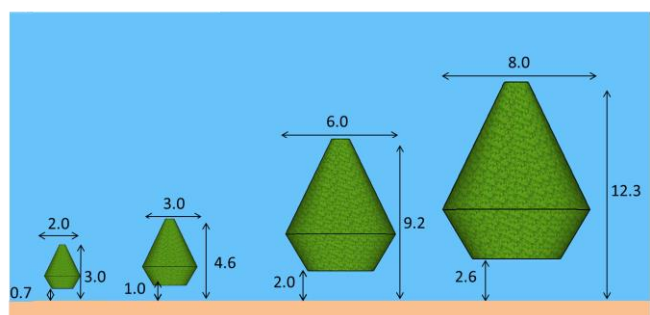


図3 各ケースの樹木形状

行った。文献⁵⁾より成木樹形を読み取り、枝張りが2m、3m、6m、8mの時にそれぞれ他のパラメータを拡大縮小して与え、計4ケースの解析を行った(表1)。図3に樹形のイメージを示す。

④放射・流体解析結果

③のイチョウ型パラメーターモデルに対して、平均的な夏日として2011年8月8日を選び、8月7日の0時から8月9日の0時までの48時間を対象に放射解析を行った。流体解析の対象時間は気温が最も上昇した13:00(最高気温33.0℃)とした。

更地に1本の樹木が植えられている状況を想定した。メッシュ分割を表2に示す。すべてのケースにおいて樹冠風上側の距離を等しく設定(76.05m)している。

図4に、各ケースにおける歩行者空間(地上から2.0mを設定)のSET*¹の体積率頻度分布を示す。評価領域は水平方向にH(樹高)×H、鉛直方向に2.0mとしている。枝張りが2m、3mのケースではSET*が32.0～32.2℃の体積率が一番多く、6m、8mのケースでは32.2～32.4℃の体積率が一番多い。枝張りが広いケースほど、SET*の頻度分布が幅広く分布しており、枝張りが小さいケースほど頻度分布が集中していると言える。SET*の重みづけ平均値では、6m、8mがそれぞれ32.2、32.1℃となり、両者に顕著な差は見られなかった。

(4)樹冠サイズの検討のまとめ

枝張りは(3)での温熱環境の検討で示したように、6m、8mに大きな差が見られなかったことから、温熱環境面、管理面の両面を踏まえた適切な枝張りは6mを基本として検討する。樹高については、(2)で述べたとおり樹高>枝張りとなる条件も考慮し、8mを基本とした。比較の際はいくつかのケースを設定する。

表2 流体解析メッシュ分割

枝張り	(1)2m	(2)3m	(3)6m	(4)8m
メッシュ分割数 (i×j×k)	41×49×36	45×51×40	54×56×46	56×59×52
解析領域 (x[m]×y[m]×z[m])	42.4×102.0 5×330	67.4×117.2 5×350.3	136.6×157. 35×350	160.1×202. 1×350
総メッシュ数 (個)	72324	91800	139104	171808

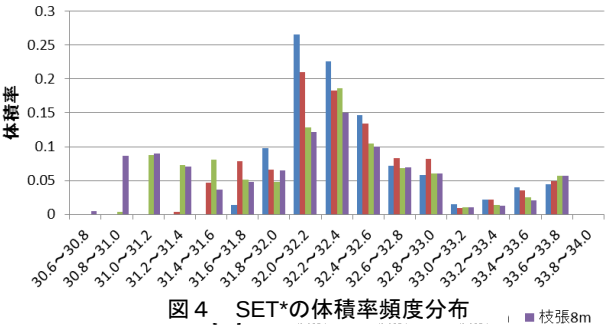


図4 SET*の体積率頻度分布

2. シミュレーションによる樹木の樹冠サイズの比較検討

(1)葉面積密度の設定

樹冠の枝張りの粗密さは日射遮蔽や樹木周辺の風環境の予測に不可欠な要素である。このシミュレーションでは葉面積密度として扱い、以下の方法で算出した。「原色樹木大図鑑」⁵⁾に掲載されている自然樹形をもとに1.(3)②で述べた4樹種のモデル樹形を作成し、樹種ごとの成木の最低樹高から枝下高さや枝張りを求め、樹冠の体積、水平投影面積(地上占有面積)を算出した。さらに、葉面積指数LAIを5.0(近藤純正：地表面に近い大気科学、p44)と与え、以下の式で葉面積密度を求めた。

$$a = \text{全葉面積} / \text{樹冠体積} = (\text{LAI} \times \text{地上占有面積}) / \text{樹冠の体積}$$

このようにして求めた4種類の樹木のaの値の平均をとると、0.86[m2/m3]となった。この値を基本ケースとし、葉面積密度が小さいケースとしてイチョウのa=0.45[m2/m3]、大きいケースとしてサクラのa=1.59[m2/m3]の3パターンの値にて比較した。

(2)モデルの設定

上記の検討結果を踏まえて、比較対象樹木の形状、スペックを、表3、図5の通りとした。
CaseDは上記で検討したイチョウ型の枝張り6mのケース、CaseEはCaseDを逆向きにしたも

¹ SET*: New Standard Effective Temperature(新標準有効温度)の略称。人体熱収支式と体温調節モデルに基づき、任意の熱環境を風速0.1m/s,代謝量1met,着衣量0.6cloで平均放射温度が気温と等しい熱環境の気温に換算した値。

ので箒状のケヤキ型を想定した形状である。従って CaseD と CaseE の樹冠は同じ容積であるが、枝張りの向きにより日射遮蔽の効果が変わる場合を想定し、設定した。また樹形の形状にあわせた結果、樹高は 9.7m となった。

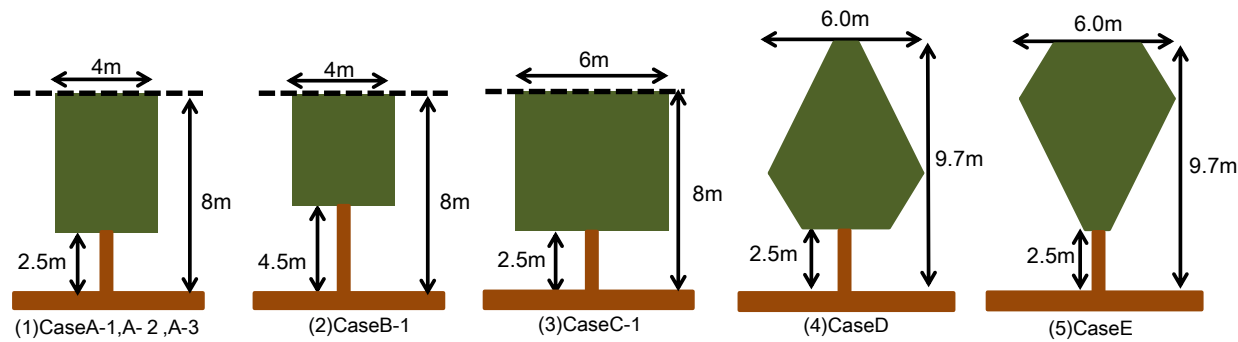


図 5 各ケースの樹木形状

表 3 解析ケース

ケース	枝張り m	樹高 [m]	枝下 高さ [m]	葉面積 密度 $a[m^2/m^3]$	樹形
CaseA-1	4	8	2.5	0.86	円柱形(基本ケース)
CaseA-2				0.45	円柱形(基本ケース)
CaseA-3				1.59	円柱形(基本ケース)
CaseB-1	6	9.7	4.5	0.86	円柱形(枝下高い)
CaseC-1			2.5		円柱形(枝張広い)
CaseD					イチョウ型(円錐形)
CaseE					ケヤキ型(逆円錐形)

表 4 放射解析メッシュ分割

メッシュ分割	38×38×23
解析領域(x[m]×y[m]×z[m])	430×430×211
総メッシュ数	33212

表 5 非等温 CFD 解析メッシュ分割

メッシュ分割	74×74×50
解析領域(x[m]×y[m]×z[m])	224×224×350
総メッシュ数	273800

3. 単木を対象とした放射・流体解析

2.（2）で検討したパターンを用いて放射解析・流体解析を行い、樹冠形状や葉面積密度が温熱 4 要素(風速・気温・平均放射温度 (MRT)²・絶対湿度)に及ぼす影響を明らかにする。

(1)放射解析概要

吉田らによる樹木 Canopy モデルを用いた⁶⁾。今回は平均的な夏日として 2011 年 8 月 8 日を対象日とし、前日 1 日分を助走計算として 8 月 7 日 0 時からの 48 時間を解析した。気象条件は東京管区気象台での測定値を与えた。メッシュ分割を表 4 に示す。

(2)流体解析概要

対象日の内、気温が最も上昇した 13 時を対象時刻とした。メッシュ分割を表 5 に示す。乱流モデルは Durbin 型 $k-\epsilon$ モデルを使用した。樹木の流体力学的効果については、文献⁷⁾のモデルを用いた。

(3)放射解析結果

本報では、13 時の結果を示す。

①平均放射温度 (MRT) 図 6 に高さ 1.5m での MRT の水平分布を示す。CaseA-1~CaseC-1 の 5 ケースについては 13 時の最大日射透過率 τ も示す。 τ が高いほど日射が通りやすいため MRT が上がると推測されるが、基本ケース CaseA-1 と枝張りが広い CaseC-1 では τ が等しいにも関わらず MRT の最小値に差が生じている。

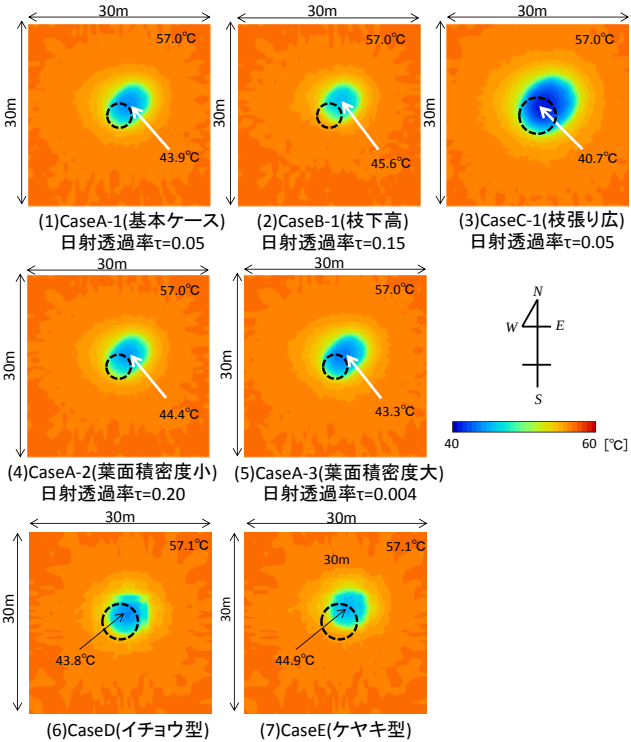


図 6 MRT 水平分布(13:00、h=1.5m)

²MRT：周囲の全方向から受ける熱放射を平均化した温度表示のこと。

これは樹冠の拡大により地表面温度の低下範囲が拡大し、地表面から人体が吸収する長波放射量が減少するためである。また枝下が高い CaseB-1 は a が小さい CaseA-2 より τ は低い MRT の最小値が高い。これは、枝下が高くなり緑陰の範囲が縮小し、地表面から人体が吸収する長波放射量が増加するためだと考えられる。

次に CaseD(イチヨウ型)と CaseE(ケヤキ型)を比較する。MRT が低い範囲は各ケースの緑陰部の影響を受けており、CaseEの方が樹冠位置から離れた部分に存在している。

② 人体が吸収する方向別短波・長波放射量

各ケースで、13時における歩行者高さ($h=1.5\text{m}$)の MRT が最小となる位置(図6の矢印部分)において人体が吸収する方向別短波放射量、長波放射量は、短波放射量はどの方向においても枝下が高い CaseB-1 が最も多く、枝張りが広い CaseC-1 が最も少ない結果となり、日射透過率が大きく影響していると考えられる。また、長波放射量は短波放射量と同じく上からの放射量以外は全て枝下が高い CaseB-1 が最も多く、枝張りが広い CaseC-1 が最も少ない。

CaseD、CaseEについては、短波放射量も長波放射量も CaseE(ケヤキ型)の方が多かった。

(4) 流体解析結果

①スカラー風速(図7) 枝下が高い CaseB-1 は基本ケース CaseA-1 と比べて樹冠後方の風速が大きくなっている。枝張りが広い CaseC-1 は CaseA-1 と比べて樹冠後方の風速が小さくなっており、樹冠が大きくなったことにより風速低減の度合いが大きくなっている。一方、葉面積密度 a が小さい CaseA-2 は CaseA-1 と比べて樹冠後方の風速は大きくなっており、 a が大きい CaseA-3 は CaseA-1 と比べて樹冠後方の風速は小さくなっている。一方、CaseD は CaseE と比べて樹冠風下側の風速が明確に低下している。これは、CaseD(イチヨウ型)は下に行くにつれて樹冠幅が広がっていくため、樹冠下部において風速がより低減されることが原因と考えられる。

②気温(図8) 枝張りが広い CaseC-1、 a が大きい CaseA-3 は CaseA-1 と比べて樹冠後方に気温が低い範囲が存在している。枝下が高い CaseB-1 と a が小さい CaseA-2 は CaseA-1 と比べて気温が高い範囲がより後方に存在している。

CaseD と CaseE を比較すると、歩行者高さにおいては CaseD(イチヨウ型)の方が樹冠後方に周囲より気温が低い範囲が存在している。

4. 樹冠形状・葉面積密度の変更による各気象要素の変化が SET*増減に与える影響の分析

SET*を算出し、各ケースにおける各気象要素の SET*への寄与度を分析する。

(1) SET*の空間分布 図9に13時、歩行者高さ($h=1.5\text{m}$)の SET*水平分布を示す。この領域において、SET*の平均値は枝張りの広い CaseC-1 が最も低い値を取った。

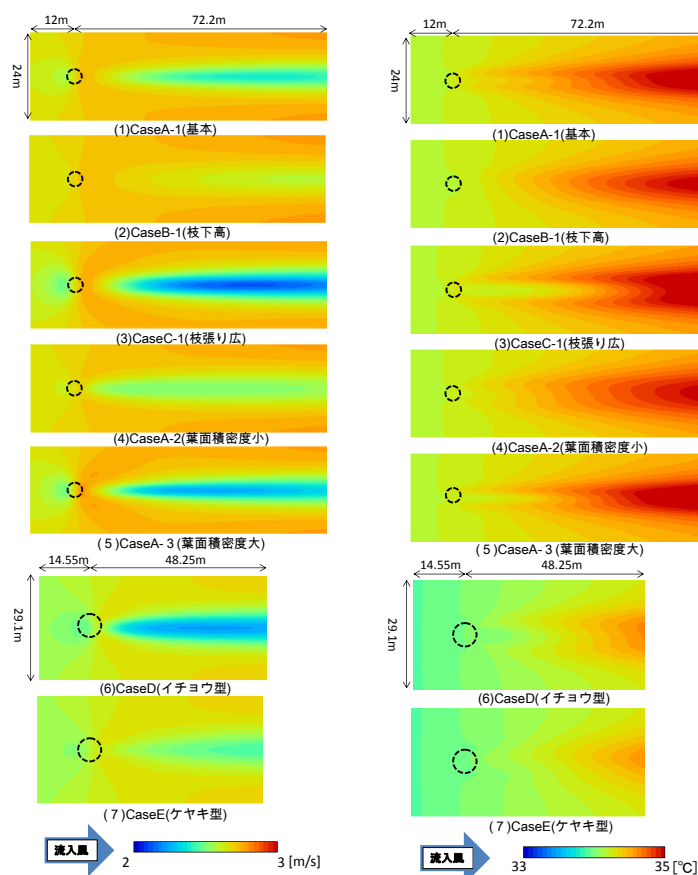


図7 スカラー風速の水平分布($h=1.5\text{m}$) 図8 気温の水平分布($h=1.5\text{m}$)

(2) SET*の増減に関わる各気象要素の影響の要因分解

① 要因分解の概要 樹冠形状や葉面積密度 a が変化することで、風速、気温、MRT、絶対湿度がそれぞれ変化し、結果として SET* も変化する。基本ケース CaseA-1 の各気象要素の一つを CaseB-1~CaseA-3 の気象要素で一つずつ入れ替えて算出した SET* と元の基本ケースの SET* との差を求めることにより、SET* の算出における各気象要素の影響を定量的に分析した。また、CaseD、CaseE に関しては、CaseD の各気象要素の一つを CaseE の気象要素で一つずつ入れ替えて算出した SET* と元の CaseD の SET* との差をとった。

② 要因分解の結果 各ケースの SET* の

要因分解の結果を確認したところ、CaseA-1~3、B-1、C-1 の 5 つのケースでは、MRT は気象要素の中で最も SET* への寄与度が高く、枝下高さが高いケース、葉面積密度が小さいケースでは正值になっており、これらの変更により放射環境が悪化している。一方枝張りが広いケース、葉面積密度が大きいケースでは負値となっており、これらの変更により放射環境が改善している。

CaseD(イチョウ型)と CaseE(ケヤキ型)の比較では、高さ 1.5m における樹冠風下側の風速は高くなるため、SET* の低下に寄与している。また、MRT に関しては、ケヤキ型はイチョウ型よりも樹冠位置から北東側に離れた位置に緑陰が生じているため、樹冠下付近では SET* の上昇に寄与、樹冠北東部分では SET* の低下に寄与している。また気温に関してケヤキ型はイチョウ型と比べ樹冠風下側において高くなっており、SET* の上昇に寄与している。

これらにより、樹冠形状や葉面積密度の変更による MRT の変化は気象要素の中で SET* への寄与度が最も高く、次に風速、気温の寄与度が高いという結果となった。また、枝張りが広いケースや葉面積密度 a が大きいケースでは樹冠下で下降流が生じるため、基本ケースと比べ樹冠風下側の風速が大きくなり、SET* の低下に寄与する結果となった。

5. おわりに

本研究では、樹木単木の効果について温熱環境改善を主眼とした都市樹木の最適な樹冠サイズ及び形状を検証した。今後は、最適な樹冠形成モデルとなる実大サイズの樹冠を実際に作成し、温熱環境低減効果を中心とした効果を実測し、その有効性を検証していく予定である。

なお本発表の一部は、日本建築学会 2016 年度大会にて発表する梗概を編集の上、加筆したものである。

【謝辞】

本研究の一部は、科学研究費助成事業（課題番号：15H04624）により行われたものである。研究にあたり連携研究者および研究協力者として、大恵朋彦、興水肇、藤田茂、水崎貴久彦、葉袋奈美子、柳雅之の各氏より有益なご示唆を頂きました。ここに記して感謝申し上げます。

【参考文献】

- 1) 日本ヒートアイランド学会編：ヒートアイランドの事典，p101, 2015
- 2) 手代木 純，内田大貴，弓野沙織，柳雅之，持田灯：実測に基づく実大高木樹木の蒸散量の評価(その 1) 長期測定結果に基づく各季節の蒸散量と日射量と風速の影響の検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1137-1138, 2014
- 3) 手代木純，弓野沙織，市林あゆみ，内田大貴，持田灯：実測に基づく実大高木樹木の蒸散量の評価(その 2) 夏期短期実測に基づく蒸散量と気象条件の測定結果，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.741-742, 2015
- 4) 市林あゆみ，弓野沙織，内田大貴，持田灯，手代木純：対流・放射解析による樹木の蒸散による歩行者空間への気温低減効果の影響範囲の分析，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.743-744, 2015
- 5) 邑田仁監修：原色樹木大図鑑 新訂版，2004
- 6) 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，(536)，pp.87-94, 2000
- 7) 岩田達明，木村敦子，持田灯，吉野博：歩行者レベルの風環境予測のための植生キャパシティーモデルの最適化，第 18 回風工学シンポジウム論文集，69-74, 2004

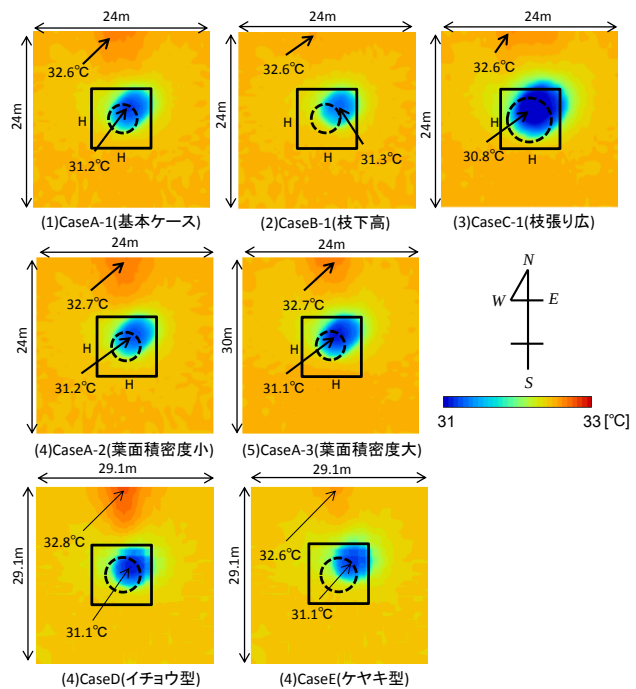


図 9 SET*の水平分布(13:00、h=1.5m)