

設置式緑化技術による街中緑化実験と水噴霧の効果

Tree-planting Experiment in City Area by Constructable Tree-planting Technique and Effect of Water Spray

吉田匡利^{*1} 石田祐也^{*2} 岩崎春彦^{*3} 天谷賢児^{*3} 鶴飼恵三^{*4}
Masatoshi Yoshida Yuya Ishida Haruhiko Iwasaki Kenji Amagai Keizo Ugai
宮下邦彦^{*5} 畠山忠之^{*6}
Kunihiko Miyashita Tadayuki Hatakeyama

^{*1} 群馬県立太田産業技術専門校 Ohta Industrial Technology Tranning School, Gunma Prefecture

^{*2} 地方独立行政法人 東京都立産業技術研究センター Tokyo Metropolitan Industrial Technology Research Institute

^{*3} 群馬大学大学院理工学府 Faculty of Science and Technology, Gunma University

^{*4} 群馬大学名誉教授 Emeritus Professor, Gunma University

^{*5} 群馬県沼田土木事務所 Numata Civil Engineering Office, Gunma Prefecture

^{*6} 館林市役所 Tatebayashi City Office

Corresponding author: Kenji Amagai, E-mail : amagai@gunma-u.ac.jp

ABSTRACT

In order to form a cool space in the city area at summer season, the experiments which installs an artificial small forest was conducted at Tatebayashi city in Gunma Prefecture, Japan. 12m×8m area forest was build up near the train station of Tatebayashi city. Trees of various types were used for making the forest. Water spray was used to enhance the air temperature reduction in the forest. Air temperatures and humidities at several points in the artificial forest were measured. Temperature reduction effects by the artificial forest and water spray were analysed from long-term experimental data during about one month. The questionnaire about the comfortable was also carried out for the citizens. As the results, it was confirmed that an artificial forest and water spray was effective in order to form the cool space into a city area.

キーワード：緑化、水噴霧、熱中症、WBGT、アンケート、実証実験

Key Words : Tree planting, Water spray, Heat stroke, WBGT, Questionnaire, Field experiment

1. はじめに

近年、夏季の猛暑日や熱帯夜の日数が増加する傾向にあるが、それに伴って熱中症の発症数も増加していることが報告されている。例えば、国立環境研究所は「熱中症患者の発生状況と今後の予測」⁽¹⁾を公表しており、この中では地球温暖化の直接的影響として、熱ストレスの典型例である熱中症が、今後ますます増加することが予想されている。また、急激な都市化によるヒートアイランド現象の進展も、都市部での気温上昇の一因と考えられている。このような猛暑日の増加は大都市部に限ったものではなく、内陸部の地方都市においても顕著に表れており、熱中症対策は全国的な課題になりつつある。

例えば、群馬県館林市は、関東地方北部群馬県の南東部に位置する市であり、改良ケッペンの気候区分では西日本および関東地方に広くみられる、Cfa（温暖湿潤気候）に属しているが⁽²⁾、同市は関東平野内陸域に位置するため、暖候期には日最高気温が36℃を超える日も多く⁽³⁾⁽⁴⁾、国内有数の高温都市として知られている。こうした地域では熱中症対策が急務となっている。

屋外の暑熱環境に対する緩和策のひとつとしてミストの利用が挙げられる。FCraig *et al.*⁽⁵⁾は半屋外空間で様々な

高さから噴霧を発生させる実験を行い、ザウター平均粒径41 μmの粒子が、地面を濡らすことなく地表付近の温度を0.7 K低下させたことを確認した。児玉ら⁽⁶⁾は微小液滴のミストと濡れに関する研究として快適感を調査し、その評価を行っている。著者らもミスト噴霧による快適感の時間的な変化を評価し、高温環境からミスト中に入ると快適感が向上するが、時間とともに徐々に快適感が低下することを明らかにした⁽⁷⁾。

他の緩和策として、樹木による緑化がある。吉田ら⁽⁸⁾は対流・放射・湿気輸送を組み込んだ三次元樹木モデルを用いたシミュレーションにより、樹木配置が及ぼす風速、気温低下や湿度上昇を確認し、樹木植栽の際の密度や配置の検討の重要性を示した。しかしながら、このような緑化効果に関する研究はシミュレーションを手段としたものが多く、実験による検証は必ずしも十分とはいえない。

本研究では群馬県館林市において、駅前広場に樹木を多数設置して小さな森林を人工的に作り出し、周囲環境よりも低温の空間が形成されるかどうかを検討する目的で実験を行った。また、その一部に水道水噴霧を行い、より低温の空間を形成することも試みた。この人工林内の各所に温度・湿度計を設置し人工林の暑熱緩和効果を調べた。さら

に、市民へのアンケート調査も実施した。

2. 設置式緑化技術

本研究では地域の造園組合の協力を得て、館林駅前の広場に人工林を設置した。設置前の写真を図1に、設置後の写真を図2に示す。これには樹木の運搬設置による緑化技術が利用されている。すなわち街中への樹木の植え付けや、栽培を行うのではなく、必要に応じて森林空間を作り上げる技術で、イベントでの活用や本格的な植え付けの前の景観や日照の検証などに利用できるものである。また、すでにコンクリートやブロックなどで整地された場所でも容易に森林を作ることができ、特に、都市部での利用拡大が考えられる。これまでに、大型の樹木をコンテナに入れて様々な場所に設置する技術に関する研究が行われてきた⁹⁾。本研究ではこのような従来の「コンテナ緑化」技術を用いた樹木による緑化に加え、整地された部分に盛り土をして、複数の樹木を植え付けることで人工的な森林空間を形成する



Fig.1 Photograph of experimental site before set up



Fig.2 Photograph of experimental site after set up

方法を、設置式緑化と呼ぶことにする。この技術は、レンタル形式での樹木の貸し出しにより、地域の造園業の新しいビジネスモデルとなりうる可能性があるほか、自治体にとっては樹木の永続的な管理の負担を低減できるなどのメリットも期待できる。ただし、設置においては強風時の倒伏防止などにかかる安全性確保、設置時期、設置場所の環境に合わせた適切な樹木の選定など専門的ノウハウも必要になる。また、設置期間における樹木の傷みなどに関する基礎データは必ずしも十分ではない。本研究ではこれらの観点から、低温空間の形成に関する実験以外に、ここで提案するような設置式緑化技術における樹木の選定法や管理法についても研究対象とした。

今回の実験における設置作業は館林邑楽造園事業協同組合の協力を得て行った。実験期間は2014年7月9日から9月30日までの約3か月間である。設置面積は南北に8m、東西に12m程の約96m²で、通り抜けが出来るように緑化空間内部には歩道を設けた。設置した樹木の一覧を表1に示す。ツツジやサツキなどの樹高(Height)が比較的小さな低木樹(0.5-1m)やシャラやシマトネリコなどの中木樹(1-3m)、そしてイロハモミジなどの高木樹(3m以上)を計21種選び、合計樹木数31本とした。また、表中のCircumferenceは「目通り」と呼ばれるもので、地表1.2mの高さの幹周りの外周の長さを指している。さらに、Widthは「葉張り」と呼ばれる葉の茂っている部分の最大直径を指している。本研究では緑陰の形成を目的としているため、比較的小葉張りの大きくなる株立ちの樹木を多く選定した。

Table 1 Data of used trees

樹名 (Number)	Binomina	Height [m]	Circumference [m]	Width [m]
P アオハダ (1)	<i>Ilex macropoda</i>	2.8	0.40	1.0
P イロハモミジ (1)	<i>Acer palmatum</i>	2.4	0.56	2.0
P サルスベリ (2)	<i>Lagerstroemia indica</i>	2.5-2.6	0.18-0.19	0.8-0.9
P シャラ (2)	<i>Stewartia pseudocamellia</i>	2.5-2.8	0.15	0.8
P シマトネリコ (1)	<i>Fraxinus griffithii</i>	2.5	0.18	0.8
P トネリコ (1)	<i>Fraxinus japonica</i>	2.5	0.18	0.6
P ヒメシャラ (1)	<i>Stewartia monadelphica</i>	2.8	0.21	1.2
G アセビ (1)	<i>Pieris japonica</i> subsp. <i>japonica</i>	2.5	0.36	2.5
G イロハモミジ (4)	<i>Acer palmatum</i>	3.5-5.2	0.60-0.83	2.5-4.0
G シマトネリコ (1)	<i>Fraxinus griffithii</i>	2.5	0.38	0.8
G ジュンペリー (1)	<i>Amelanchier canadensis</i>	2.5	0.30	2.1
G シラカシ (1)	<i>Quercus myrsinifolia</i>	2.6	0.19	0.9
G ソヨゴ (2)	<i>Ilex pedunculosa</i> Miq	1.7-4.0	0.10-0.51	1.0-2.0
G ナツハゼ (1)	<i>Vaccinium oldhamii</i>	3.5	0.20	1.8
G ヒメシャラ (1)	<i>Stewartia monadelphica</i>	2.8	0.20	1.0
G ヤマボウシ (1)	<i>Benthamidia japonica</i>	3.0	0.18	1.4
G ツツジ類 (5)	<i>Rhododendron</i> spp.	0.6		0.6
G サツキ (1)	<i>Rhododendron indicum</i>	0.6		0.6
G ヤマモモ (1)	<i>Morella rubra</i>	2.6		0.8
G ミカン類 (1)	<i>Citrus</i> spp.	1.4		0.6
G ブルーベリー (1)	<i>Vaccinium corymbosum</i>	0.5		0.4

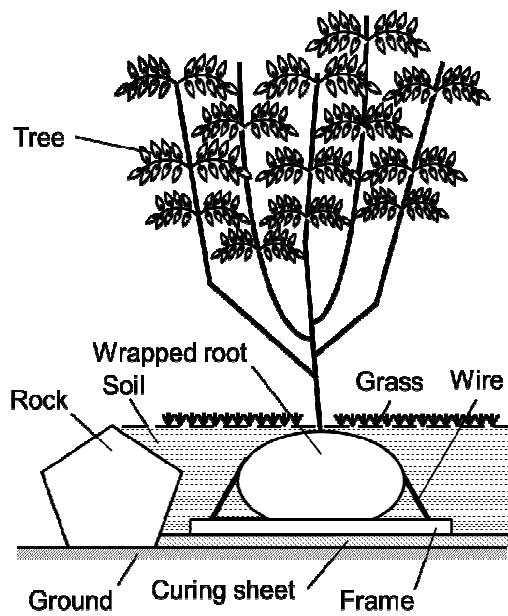


Fig.3 Schematic view of planting in the ground



Fig.4 Photograph of construction process for planting in the ground

本研究の人工林形成は盛り土型とコンテナ緑化の二タイプを組み合わせで行った。表1にPと記されたものがコンテナ緑化、Gと記されたものが盛り土型の樹木である。図3に盛り土型の設置方法の概略図を、図4にその施工過程の写真を示す。コンクリート上に防水養生シートおよび樹木固定用の枠組を設置し、転倒防止のために、樹木の根をワイヤーで固定した。なお、樹木は根を布で巻いた「根巻き」の状態にしている。この枠組の周囲に庭石や木製の土留めを配置し、平均土壌厚400mmとなるよう土を盛り、芝生の植え付けを行った。図5にコンテナ緑化の植付方法の概略図を、図6にその施工過程の写真を示す。ポットは木製であり、幅700mm、奥行700mm、高さ700mmの大きさである。これに、盛り土型と同様の根巻きにした樹木を固定し土を盛った。ポットと樹木一基の重量はおおよそ500kgである。

盛り土型については3日に1度の頻度で適量の灌水を行った。コンテナ緑化については基本的には後述するミストの土壌到達分を灌水のための水とし、土壌の乾き具合によ

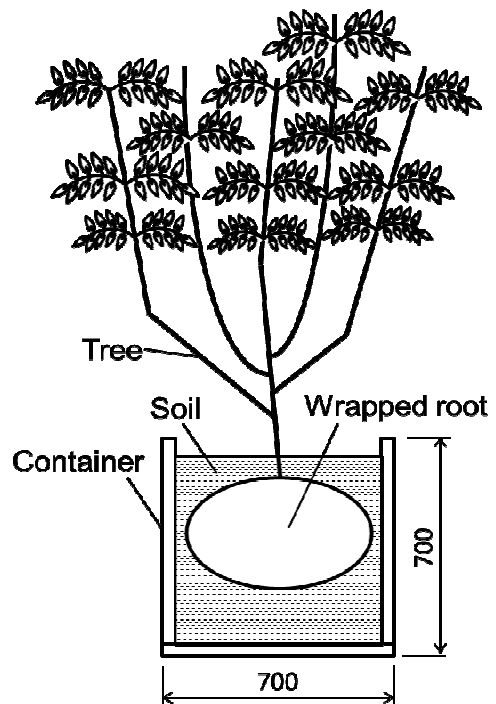


Fig.5 Schematic view of planting in the pot



Fig.6 Photograph of construction process for planting in the pot



Fig.7 Photograph of artificial forest

り別途灌水を行った。なお、本実験で用いた土壌は保水性の高いものであり、一般的な灌水量よりも少ない水量で灌水を済ませることができるよう工夫した。

図7は完成した設置式の緑化区域の様子である。日光の遮蔽効果を高め、かつ空間内部の空気の通り抜けを想定し地表から傾けて樹木を固定した。これにより、人工林が木々のトンネルとなり歩道を覆うような設置とした。なお、本研究の人工林の設置には3日間を要し、撤去には2日間を要した。また、人工林設置後数日でバッタや蝶、鳥などの飛来が確認され、生物多様性の確保にもある程度効果があることが示唆された。

3. 水道水噴霧と大気温度ならびに湿度の計測

図8に人工林の配置図を示す。実験区域として緑化を行っていない街並区 (Town street area)、人工林内の緑陰区 (Tree-planting area) および噴霧発生装置を設置した緑陰ミスト区 (Tree-planting with spray area) を設定した。また、ノズルの噴射方向は木々に覆われた歩道に揃えた。

図9にミスト形成のための水道配管およびノズル (霧のいけうち社製 1/4M KBN 80 125TPACVW) 位置に関する概略図を示す。本研究では水源として水道を使用し、噴射圧力は図中の圧力計で常に観測ができるようにした。群馬県内の複数自治体へのヒアリングを行った結果、群馬県各市の水道圧は比較的高い値であることが確認できた。実験を行った館林市もおよそ0.25MPaであり、加圧を行わずとも、100 μ m程度の粒径のミストを発生させることのできる圧力であることが予備実験により確認できた。また、水道水を利用することで、加圧用タンクなどの水保持用容器の設置や、それに伴う容器内の衛生管理を行う必要がなく、実証的な実験には最適であると考えられた。

配管経路には水道水の停止弁の下流に、タイマー付制御装置を設けた。この制御装置を用い、噴射時間は9時から18時までとし、5分間ごとに噴射と停止を繰り返すようにした。噴射ノズルは下向きと上向きを一对として、人工林内の歩道の両側にそれぞれ4ヶ所設置した。ノズル間距離 L は0.4~0.6mとし、上側のノズル高さ H は2.0~2.5mとした。また、下側のノズルは設置高さを約0.7mとした。本研究で使用したノズルは、ザウター平均粒径35~60 μ mであり、噴霧量は1ノズルあたりおよそ2.7L/hourである。

図10に温度等の計測装置とその設置に関する概略図を示す。なお、今回の実験では実験区域内に自由に一般の人が出入りできるようにすることから、温度計測には配線のいらないボタン型のロガー付き温度センサー (KN ラボラトリーズ社製サーモクロン) を用いた。温度センサーはそれぞれ地表面から500, 1000, 1500 mmの高さに取り付け、図8中の×印の7か所に配置した。ただし、直射日光の影響を避けるために、直径70mm、高さ35mm、厚さ0.2mmのPET製透明半球に、白色ラッカー塗料を用いて塗装を行った日よけ傘をセンサー上部に取り付けた。なお、電気配線ができないために強制通風等を行って正確な温度計測が行えないことから、ここでは得られた温度データについて、街並区、緑陰区、緑陰ミスト区の間での相対的な比較を行うことにし、各データの測定値自身についての議論は行わないようにした。また、この方式では上面からの直射日光の影響はある程度避けられるものの、地表面からの輻射の影響を避けられないことから、それを踏まえた分析を行うことにした。また、同図中の□の位置で比較的正确な気象データを測定できる統合気象観測装置 (Davis 社製 Weather

Station) を設置し、風向風速と日射量測定を行った。この装置にも上述のボタン型センサーを取り付け、統合気象観測装置の測定値をもとに各位置でのセンサーの温度測定値の誤差を修正した。また、図8中の○の位置では、温度、湿度、黒球温度、WBGTの測定を行う熱中症計 (カスタム社製 HI-2000SD) を設置した。WBGTは乾球温度、湿球温度、黒球温度により求められる暑さ指数とも呼ばれるもので、熱中症の危険レベルを示す指標として用いられている。これらの計測に加え、赤外線サーモグラフィ (FLIR Systems 社製 FLIR i3) により温度の可視化画像の撮影も行った。

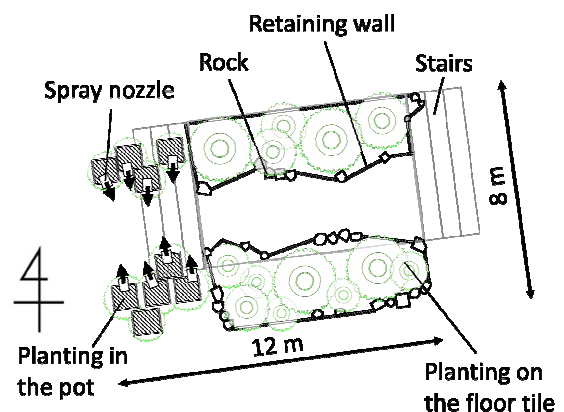
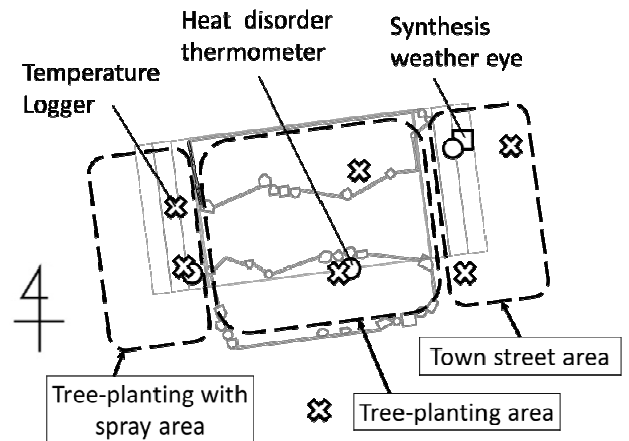


Fig.8 Arrangement of artificial forest and measurement points

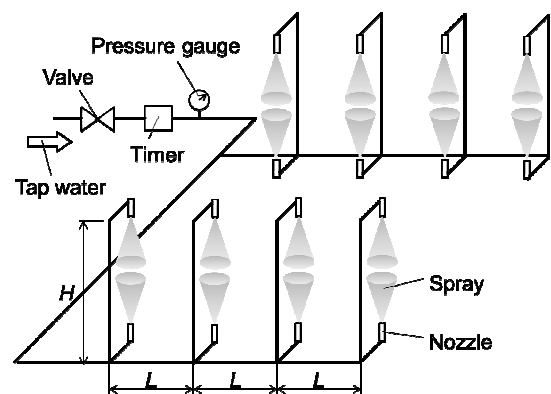


Fig.9 Schematic view of laying pipes and spray nozzles

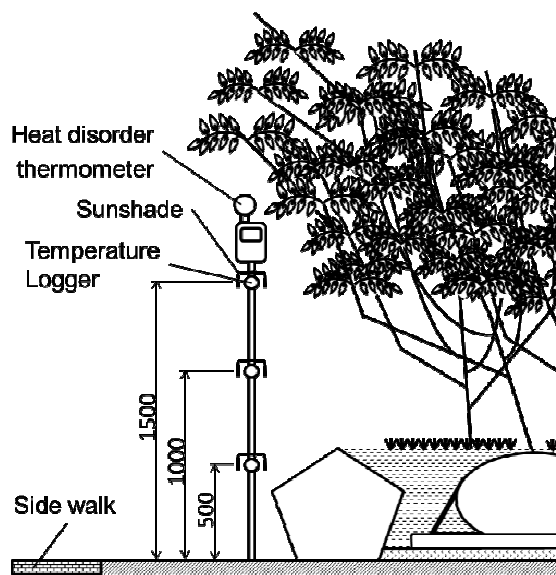


Fig.10 Schematic view of measuring instrument

4. 実験結果および考察

4.1 緑陰ならびにミストによる大気温度への影響

図 11 は街並区から緑陰区にかけての範囲における午後 2:00 の写真および赤外線サーモグラフィによる温度可視化画像を示したものである。写真手前に広がるタイル床部は街並区となっている部分で、日光の当たっている地面は 50℃を超える高温になっている。一方、奥側の緑陰区の木陰の地面は 35℃程度の比較的低温な地面温度となり、木陰の有無による温度差がきわめて大きいことが確認できる。

図 12 は街並区、緑陰区、および、緑陰ミスト区の地上高 1.5 m の位置で、熱中症による救急搬送者数の多くなる午後 2:00 の大気温度を毎日測定した結果を日ごとに並べた結果である。また、図 13 は図 12 のデータを測定した 27 日間で地上高 1.5 m での大気温度を平均したもので、同図中には近くの気象台の気温データによる平均値も示した。これらのデータからわかるように、日中の街並区と緑陰区の温度データは、気象台の気温データと近い値を示している。また、緑陰区による大気温度の低下は大きくないが、緑陰ミスト区は低下していることがわかる。

この結果より、大気温度に対する緑陰の効果は必ずしも大きくないことが分かる。これは今回設置した人工林程度の規模では周囲大気温度を大きく低下させることは難しいことを示している。一方、ミストの導入による大気温度の低下はある程度効果があることが示された。

4.2 緑陰ならびにミストによる WBGT 低減効果

本研究は「設置式緑化技術」および水噴霧による、熱中症等予防のための暑熱緩和効果の検証を目的の一つとしている。そのため、大気温度や日射量などの計測のみならず、快適性指標により暑熱緩和効果を評価する必要がある。図 14 は毎日の午後 2:00 における区域ごとの WBGT の平均値を比較したものである。街並区に比較して、緑陰区は WBGT の値が大幅に低くなっている。WBGT に影響を与える黒球温度は日射の影響を含んでおり、人工林の木陰が WBGT の低下に極めて有効であることがわかる。

緑陰ミスト区については現在ミストが含まれる環境で用いることのできる一般的な快適性指標は存在しない。そ

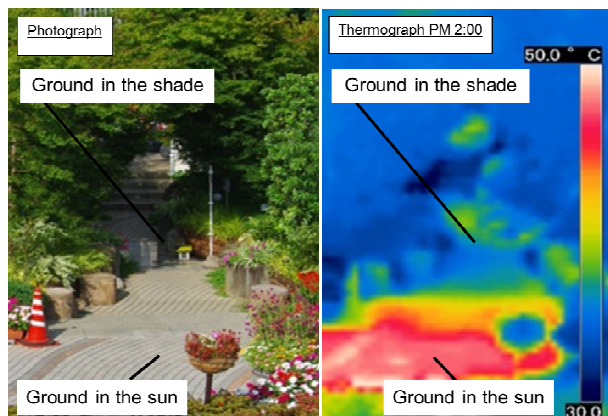


Fig.11 Thermography in the tree-planting area and town street area

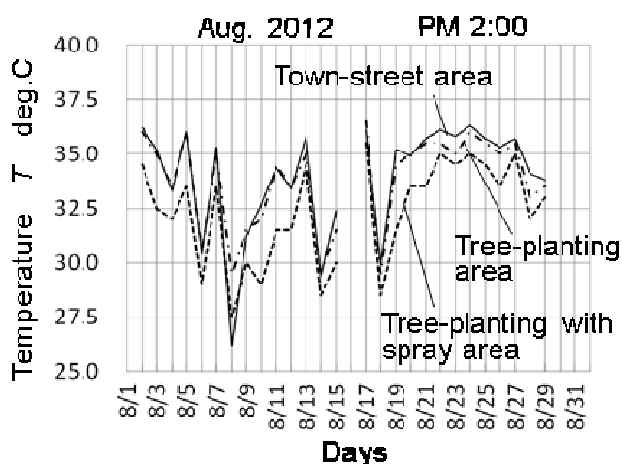


Fig.12 Air temperatures at PM2:00 measured in Aug.

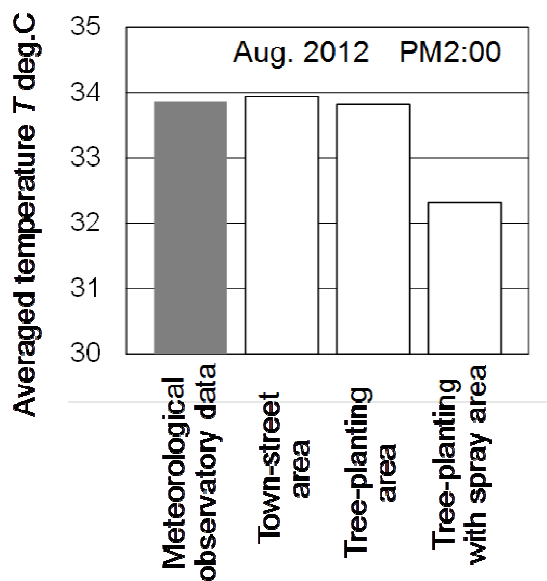


Fig.13 Averaged air temperatures at PM2:00

のため、この評価指標については今後の研究を待ちたい。今回は、人体にミストが付着して涼感を得る現象が、黒球

に少量のミストが付着して蒸発することで、黒球の表面温度が低下する現象と類似していると思われるので、ここではこの値を参考値として考えることとする。これによれば、図 14 のデータに対応する参考値は 28.2℃となっている。これは日射の影響を緑陰により抑制できたのに加え、ミストの潜熱効果に伴う大気温度の低下が作用していると考えられる。ただし、この計測状況は WBGT を求める条件（黒球表面が乾燥している状態）を満たしていないことを明記しておく。

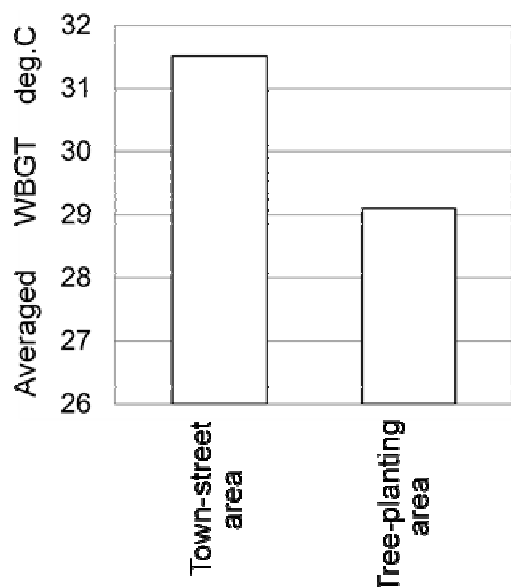


Fig.14 Averaged WBGT at PM2:00 in Aug.

4.3 大気温度の高さ方向分布

次に、街並区および緑陰ミスト区に設置した温度センサーの計測点高さごとの一日の温度変化を調べた。その結果を図 15 に示す。測定高さとしては、500 mm, 1000mm, 1500 mm とした。街並区では、この高さの範囲では測定データにはあまり差が見られないが、ピーク時には、高さ 500 mm の場合に 39℃に達するような高温状態が記録されている。また、1000 mm や 1500 m の位置でも 37℃以上の温度を記録している。一方、緑陰ミスト区ではいずれの高さでも、最高値が 35~36℃程度に抑えられている。これはミストの蒸発に伴う潜熱の効果と考えられる。

4.4 アンケートに基づく温熱感覚調査の結果

今回の実験では、アンケート調査も実施した。実施日は 8 月 10 日と 19 日（午後 2:00 の温度は 32.7℃と 35.2℃）の 2 日間で、10 時から 15 時までの間に行った。アンケート対象は 10 代から 80 代までの男女であり、15 歳の中学生までを子ども、それ以外を大人とした。男女比については、子どもは全 79 人中、女性が 29 人、男性が 47 人、無回答が 3 人であり、大人は全 173 人中、女性が 96 人、男性が 69 人、無回答が 8 人であった。アンケート内容は、「街並区、緑陰区、緑陰ミスト区ではどこが一番涼しかったですか？」で、成人と子供に対して調査し、それぞれの回答者数が 173 人と 79 人であった。その結果を図 16 に示す。どちらも緑陰ミスト区が涼しいという意見が最も多かった。この結果からも、木陰にミストを導入することが、涼しい空間を形成するために有効であることがわかった。

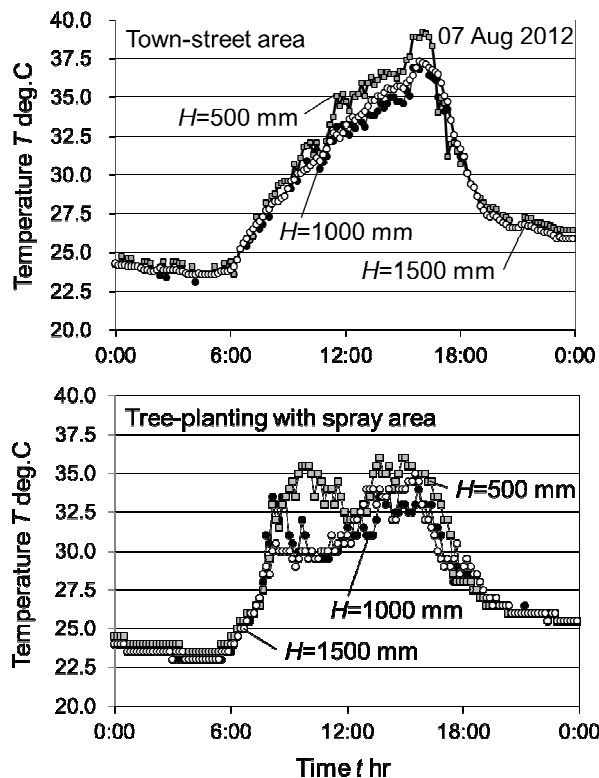


Fig.15 Temperature change of town-street area and Tree-planting with spray area

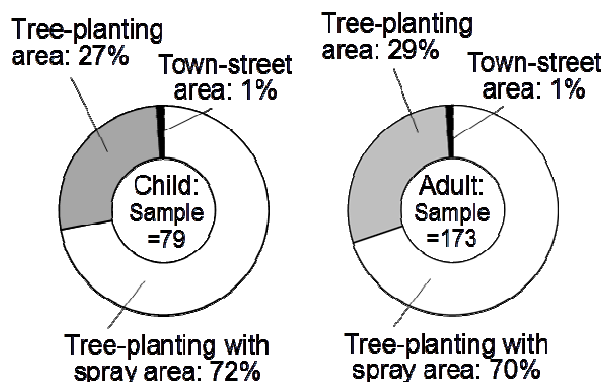


Fig.16 Questionnaire results

5. まとめ

盛り土型とコンテナ緑化の二方式による設置式緑化技術により人工的な森林を街中に作るとともに、水道水ミストを用いることで、低温な空間を形成する実験を行った。

その結果、大気温度の低下にはミストが有効であり、WBGT の低下には緑陰およびミストの組み合わせが有効であることが確認できた。また計測高さごとの温度変化の比較によりミストはいずれの高さの温度低下にも効果があることがわかった。さらに、大人・子どもに対する温熱感に関するアンケートにより、大人・子どもともに 70%以上が緑陰とミストの組み合わせが最も涼しいと感じていることを確認した。

謝辞

本研究は「花と緑のぐんまづくり推進協議会街中緑化推進検討部会」の研究として実施された。また、館林邑楽造園事業協同組合に協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- (1) 国立研究開発法人 国立環境研究所 「熱中症患者の発生状況と今後の予測」, <http://www.nies.go.jp/kanko/kankyogi/32/10-11.html> (2014/4/20)
- (2) M.C.Peel, B.L.Finlayson and T.A.McMahon, Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, **11** (2007), pp.1633-1644.
- (3) 藤部文昭, 関東内陸域における猛暑日数増加の実態と都市化の影響についての検討, *天気*, **45** (1998), pp.643-653.
- (4) 篠原善行・眞下国寛・桜井美菜子・須永次男, 関東地方で日最高気温が40℃を超えた2007年夏の高温その2～JMANHMによる日最高気温の再現実験と高温要因の考察～, *天気*, **56** (2009), pp.543-548.
- (5) F.Craig, M.Nakao, M.Nishioka, M.Nabeshima and T.Mizuno, Study of mist cooling for semi-enclosed spaces in Osaka, Japan, *Procedia Environmental Sciences*, **4** (2011), pp.228-238.
- (6) 児玉奈緒子・林啓紀・原田昌幸・奥宮正哉・辻本誠・佐藤治朗・山田英貴, ドライミスト散布によるヒートアイランド抑制システムの開発 (その5), *日本建築学会東海支部研究報告集* **44** (2006), pp. 429-432.
- (7) 天谷賢児・高橋侑基, ミストを伴う気流の快適性評価, 第17回微粒化シンポジウム講演論文集, (2008), pp.181-186.
- (8) 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** (2000), pp. 87-94.
- (9) 手代木純・高柳和江・井口義也・狩谷達之・半田真理子, 都心部に設置した緑陰空間の暑熱期における熱環境改善および医学的観点からの改善効果, *ランドスケープ研究*, **72(5)** (2009), pp.875-878.

(Received August 10, 2015, Accepted November 6, 2019)