

都市近郊平地林における夏季の暑熱環境 -茨城県つくば市の「葛城の森」を例として- Thermal environment at suburban plain forests in summer - A case of "Katsuragi Forest" in Tsukuba city, Ibaraki Prefecture-

横山 仁^{*1} 足永 靖信^{*2} 秋田 寛己^{*1,3} 本條 毅^{*4}
Hitoshi YOKOYAMA Yasunobu ASHIE Hiromi AKITA Tsuyoshi HONJO

^{*1} 防災科学技術研究所 National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

^{*2} 建築研究所 Building Research Institute

^{*3} 現所属 長野大学 Nagano University

^{*4} 千葉大学 Chiba University

Corresponding author: Hitoshi YOKOYAMA, E-mail : yokoyama-h@bosai.go.jp

ABSTRACT

We measured thermal environment in a suburban plain forest in Tsukuba, Ibaraki Prefecture, during summer in 2022, and compared with in and outside forest. Inside forest, air temperature and globe temperature were lower and humidity was slightly higher than outside, but WBGT (Wet Bulb Globe Temperature) was lower. While the WBGT exceeded 31°C for 70% of the daytime hours outside forest, it never exceeded 31°C inside forest. There was a high correlation between solar radiation, air temperature, and the difference in WBGT inside and outside forest. The results of thermal environment measurements in Katsuragi Forest were generally similar to those of previous studies, suggesting that suburban plain forests, like green spaces such as parks, can be expected to have heat mitigation effects, such as reducing heatstroke.

キーワード: 都市近郊平地林, 夏季, 暑熱環境, 暑さ指数 (WBGT)

Key Words : Suburban plain forests, Summer, Thermal environment, Heat index (WBGT)

1.はじめに

関東地方は、洪積台地の平野部に平地林が広く分布することで知られ⁽¹⁾, 茨城県においても県央、県南地域を中心に多く残る。しかし、茨城県内における平地林面積は30年間で約2割減少し⁽²⁾, つくば市においても、里地里山を構成する緑の基盤と特徴づけられているものの、筑波研究学園都市開発やつくばエクスプレス（以下、TX）の沿線開発等によりその面積は減少している⁽³⁾。平地林は、里山林や二次林、雑木林などとも呼ばれ、以前は農用林や薪炭林として、燃料や肥料、木材の供給源であるとともに、防風や保水等の機能を発揮する農村と密接な関係をもった空間であった。しかし、化石燃料の急速な普及や化学肥料の使用、さらには外材の輸入等によって利用価値は急速に低下した⁽⁴⁾。また、残存する平地林も、管理不足により放任状態となっているものが増え、不法投棄や防犯・防火上の問題等も指摘されている^{(1),(5),(6)}。一方、近年の気象災害の激甚化、頻発化とともに、今後の気候変動の進展に伴うさらなる災

害リスクの増大が懸念され、防災、減災に向けたインフラ整備が急務とされるなか、自然生態系を活用したグリーンインフラやEco-DRRといった考えにも大きな期待が寄せられている。グリーンインフラには、防災や景観維持、生物多様性保全等さまざまな機能があるが、ゲリラ豪雨や熱中症との関連が指摘されるヒートアイランド現象や地球温暖化対策としての機能もその重要な役割の一つとされる。特に、熱中症は、近年、国内死亡者数が1000人を超える年も珍しくなく、最近では、2022年が1477人、2023年が1651人、2024年にはついに2000人を超え、2160人が死亡するなど⁽⁷⁾、熱中症対策は我が国における喫緊の課題となっている⁽⁸⁾。そうしたなか、緑地による気温低下等気候緩和に関する研究も今までに数多く行われてきた^{(9)~(17)}。その結果、緑地には一定の効果があることが確認されているが、研究対象のほとんどが大規模な公園等のいわゆる公共の緑地であり、都市近郊に残る身近な緑地としての平地林を対象とした熱環境に関する研究は非常に少なく（例えば、原田ら⁽¹⁸⁾）、特に、熱中症の軽減等夏季の暑熱環境に着目した

平地林の研究は見当たらない。前述の通り、平地林は本来暑熱環境の緩和を主目的として存在していたわけではないため、今まで研究が行われてこなかったのは不思議ではないが、大都市の中心市街地を除き、現在も関東地方を中心に平地林が多く存在していることを考えれば、都市近郊の主要なグリーンインフラとして位置づけ、今後の有効な活用や保全が検討されるべきである。特に、大都市近郊に比べ、開発が一般に大きく進展していない中小都市近郊においては、その存在意義はより大きいと考えられる。

そこで本研究では、人口約 26 万人の中規模な地方都市でありながら、2023 年に人口増加率が全国 1 位⁽¹⁹⁾となるなど、近年、発展が目覚ましい茨城県つくば市において、中心市街地近郊に残る平地林の夏季の暑熱環境を調べた。

2. 研究方法

2.1 測定地の概要

測定を行ったのは、TX 研究学園駅から北に約 1.4km に位置する約 24ha の平地林で、一般に、「葛城の森」と呼ばれ、約 14ha が茨城県有地（葛城大規模緑地）、約 10ha が民有地（保健保安林）となっている（図 1）。人口増加が著しいつくば市において研究学園駅の近辺は特に開発が進む地域であり、葛城の森はそうしたなかで貴重な緑地空間となっている。つくば市の夏季における夜間の気温分布を調べた例では、葛城の森付近で気温が低くなる傾向も認められている⁽²⁰⁾。また、つくば市の生物多様性つくば戦略においても「主な重要地域」の一つとされており⁽²¹⁾、敷地内には約 2.5ha の草地が存在するほかは森林で覆われ、かつては、

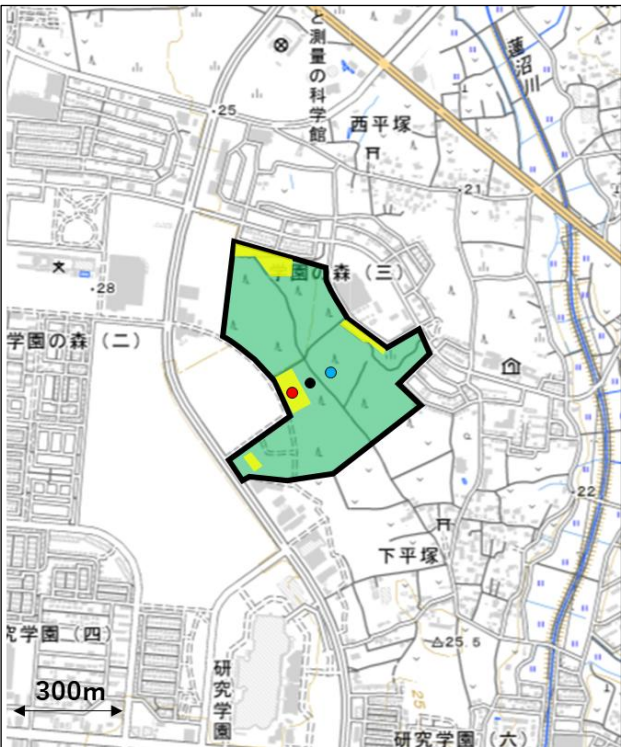


図 1. 葛城の森(太実線で囲まれたエリアが全敷地で緑色が森林、黄色が草地のエリア、●は林外、●は A 林、●は B 林の各測定地点、地理院地図より作成)

他の平地林同様に地域の農用林、薪炭林として利用されてきた。現在は、整備中のため一般開放はされていないが、NPO 法人「つくば環境フォーラム」が中心となって維持管理や観察会等市民参加型の里山公園づくりをめざした取り組みを進めている⁽²²⁾。葛城の森内は、つくば環境フォーラムの活動によって下草刈りや枝打ち、間伐等の管理が行われているエリアと、こうした管理が行われておらず、人が立ち入れないほど植生が密で鬱蒼とした状態となっているエリアがほぼ同面積で混在している。

2.2 測定の概要

葛城の森における夏季の暑熱環境を調べるために、2022 年 7 月 5 日～8 月 31 日に敷地内に気象測定機器を設置した（図 2、表 1）。測定を行ったのは 3 カ所で、まず、暑熱環境の実態を明らかにすることが主目的であることから、下草刈りや枝打ち、間伐等の管理が行われ、人が立ち入ることのできる林（以下、A 林）に機器を設置した。一方、前述の通り、管理されず放任状態にある平地林の存在が社会的な問題となっていることも事実であることから、そうした平地林の暑熱環境の実態を把握することも重要と考え、葛城の森内の未管理の林にも機器を設置した（以下、B 林）。A 林は、高木層が平均胸高直径 18.3cm のアカマツで構成された約 70a の林で、立木密度 2.5 本/a、群落高さ約 15m で、中～低層にかけて樹木はなく、林の両端が見渡せる状態であった。林内は下草刈り等が定期的に行われていたが、林床全体が覆われている状態ではないものの、測定当時約 30cm 高さの草本類が生えていた。それに対し B 林は、高木層が平均胸高直径 28.8cm のコナラやスギ等で構成された林で、立木密度 10.0 本/a、群落高さ約 20m で、地面から約 2m の高さまではタケ、ササ類が密生し人が立ち入れない状態であった。これらの対照地点として、A 林の西側に隣接する草地においても測定を行った（以下、林外）。林外は面積約 60a で、高さ約 30cm の草本類が地表面が見えないほど高密度に繁茂していた。ところで、森林による気候緩和等の効果は森林内のみで発揮されるわけではなく、森林内の低温空気の移流やにじみ出し等によって周辺にももたらされることが知られている^{(10)～(13)}。今回は測定を行っていないが、今後、葛城の森が周辺地域にもたらす効果を



図 2. 暑熱環境測定状況（左から林外、A 林、B 林）

表 1. 測定項目

項目	機器	型式	製造	測定法等	地上高(m)
気温	温度計	TR42A	T & D 社	強制通風	1.5
相対湿度	温湿度計	RTR503B	T & D 社	強制通風	1.5
黒球温度	温度計	TR42A	T & D 社	15cm グローブ球	1.2
風向風速	総合気象観測器	Vantage Vue	Davis Instruments 社	三杯式	1.8

明らかにする際の基礎資料となるものと考えられることから、葛城の森の大部分を占める森林全体の代表値として A、B 両林の平均値を求めた（以下、林内）。

気温および相対湿度の測定は、温度計 TR42A（T&D 社製）および温湿度計 RTR503B（T&D 社製）を用い、それぞれ岡田・中村⁽²³⁾に基づいて製作した強制通風筒内にセンサー部を取り付けることにより行った。通風筒表面には白色塗装を施し、通風ファンの駆動には太陽電池及びカーバッテリーを用いた。また、黒球温度は 15cm 径の黒球内に温度計（TR42A、T&D 社製）のセンサー部を挿入して測定した。測定時における風の状況を把握するため、各測定地点に三杯式風向風速計が付いた総合気象観測器（Vantage Vue, Davis Instruments 社製）を設置した。測定間隔はいずれも 10 分である。なお、B 林はタケやササが繁茂していたことから、測定機器に茎や葉が触れないように、必要最小限の範囲でセンサー部付近の茎葉を刈り取った。

測定結果をもとに、熱中症に対する軽減効果を把握するため、林内外で測定した気温（乾球温度）と相対湿度から、Tetens の式と Sprung の式を用いて湿球温度を求め、次式に乾球温度、湿球温度、黒球温度を入力することによって、暑さ指数（湿球黒球温度 WBGT: Wet Bulb Globe Temperature）を算出した。

$$WBGT=0.7T_w+0.2T_g+0.1T_d$$

ここで、 T_w : 湿球温度 (°C)、 T_g : 黒球温度 (°C)、 T_d : 乾球温度 (°C)

なお、ISO7243 によると、湿球温度は自然気流中の直射日光が当たる条件下で測定することになっているが、高根ら⁽²⁴⁾は、自然気流中の直達日光が当たる条件下における風速とアルベドに伴う湿球温度測定の不確実性を軽減するため、強制通風条件下で測定している。また、乾球温度（気温）も含め強制通風により観測している気象庁の通常観測気象要素を用いて WBGT を推定した小野・登内⁽²⁵⁾の手法は、現在、環境省の熱中症警戒アラート等の発表に使用されており⁽²⁶⁾、足永⁽²⁷⁾も、国内の熱中症アラート判別においては、強制通風条件下において測定した湿球温度をベースとした暑さ指数（WBGT）の計算式を用いる必要があるとしている。このほか、Yaglou and Minaed⁽²⁸⁾も、熱中症抑制に関する研究において、通風条件下で測定する sling 乾湿計を用いて湿球黒球温度を算出している。こうしたことから、本研究においても、強制通風条件下で測定した気温、相対湿度から WBGT を算出した。市内の基準となる気象状況には、葛城の森から直線距離で北に約 3.6km 離れた防災科学技術研究所内気象観測露場（以下、防災科研）の観測データを用いた。

曇天日の南中時には、魚眼レンズ（魚露目 8 号, FIT）を装着したデジタルカメラ（IXY200, キヤノン社製）で、林内外の気象測定場所付近の上空を 1.2m 高で撮影し、それぞれの天空率を算出した。その結果、天空率は林外で 0.85、A 林で 0.18、B 林で 0.11 であった。なお、天空率が示す通り、林外は隣接する A 林による日陰の影響を受けている可

能性があるため、解析にあたっては太陽高度が十分高く林による日陰の影響を受けないと考えられる 9:00 以降の測定データを用いた。以下、9:00~15:00 を日中と称する。

3. 結果と考察

3.1 暑熱環境の測定結果

(1) 解析対象期間

解析は、夏型の気圧配置となり晴天となった 7 月 30~8 月 3 日の 5 日間について行った。連日晴天が続き、風速は日中平均で林外で 0.5m/s、A 林 0.2m/s、B 林 0.0m/s であった（図 3）。また、地上 6m 高で観測している防災科研の風速も 1.2m/s と弱かった。なお、解析期間前の 7 月 26 日に 86.2mm、28 日には 4.6mm の降雨が林外の総合気象観測器で観測されたが、解析期間中、降雨は観測されなかった。

(2) 気温の測定結果

図 4 は、各地点の日中の気温変化である。日中の気温は林外が最も高く、ついで A 林、B 林の順であった。林外の気温は 7 月 30 日（最高気温 32.5°C）を除き、4 日間すべてで猛暑日の基準となる 35°C を超えており、つくばアメダスにおいて 2022 年の年間最高気温（37.4°C、14:43）を記録した 8 月 3 日には、14:20 に測定期間中の最高気温となる

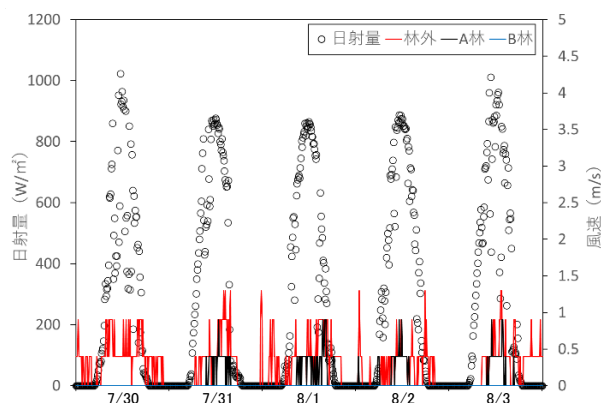


図 3. 葛城の森における解析期間中の日射量及び風速（2022 年 7 月 30 日～8 月 3 日、日射量は防災科研における観測データ）

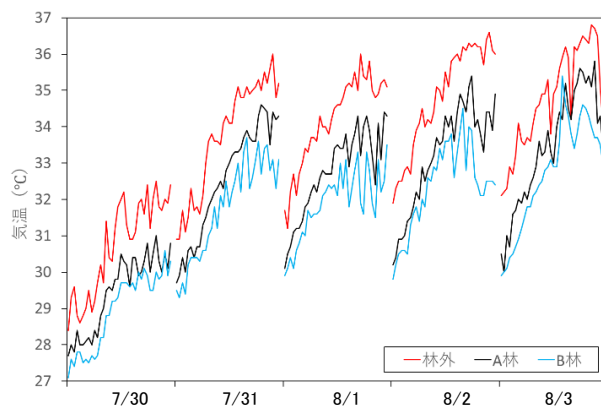


図 4. 葛城の森における気温変化（2022 年 7 月 30 日～8 月 3 日 9:00～15:00）

表 2. 葛城の森の気温 (°C, 2022 年 7 月 30 日～8 月 3 日 9:00～15:00)

	8/3 14:20	日中最高	日中平均
A 林	35.1	34.2	32.3
B 林	34.0	33.5	31.5
林内*	34.6	33.6	31.9
林外	36.8	35.6	33.6
林内－林外	-2.2	-2.0	-1.7

*各時刻の A 林, B 林の平均値であるため表中の値を平均したものとは必ずしも一致しない

36.8°Cを記録した(表 2)。同時刻における A 林の気温は 35.1°C, B 林は 34.0°Cであった。解析期間中の日中の最高気温の平均値は林外で 35.6°Cであったのに対して, A 林で 34.2°C, B 林で 33.5°C, 日中の平均気温は林外で 33.6°C, A 林で 32.3°C, B 林で 31.5°Cで, いずれも林外>A 林>B 林の順であった。天空率の差にも表れている通り, B 林は立木密度が A 林の 4 倍あり, しかも, B 林はタケ, ササ類で密に覆われ, A 林よりも太陽光が入射しない環境にあった。こうしたことが, A 林よりも B 林で気温が低かった要因と考えられる。原菌ら⁽¹⁸⁾も, 密度の高い群落では上層で日射エネルギーが吸収され見かけ上断熱的に作用するため, 群落内部の気温は外気温よりも低くなることを述べている。A 林, B 林の気温を平均した林内としての気温を林外と比較すると, 最高気温は林内が 33.6°Cで, 林外よりも 2.0°C低く, 平均気温では, 林内が 1.7°C低かった。過去の研究において, 緑地内外の気温差は 2～4°C程度⁽¹⁰⁾で, 日最高気温時では 2°C程度とする結果が多い(例えば, 成田ら⁽¹²⁾, 成田⁽¹³⁾)。しかし, 過去に行われた研究の多くは, 緑地外の基準測定地点として市街地を選定しており, 近傍の草地を林外の測定点とした本研究とは異なる。また, 過去の測定例のほとんどが自然通風条件で気温を測定しており, 強制通風条件で測定した本研究と直接比較することには問題がある。過去において, 強制通風条件で地上付近における緑地内外の気温を比較的長期間にわたり測定した研究は少ないが(例えば, 本條・高倉⁽⁹⁾, 原菌ら⁽¹⁴⁾, 近藤ら⁽¹⁵⁾), そのなかで, 今回の測定条件に近い近藤ら⁽¹⁵⁾の結果では, 夏季日中における明治神宮の森内の気温から芝地の気温を差し引いた値は-1.3～+0.3°Cの範囲にあるとしながらも, 降雨後の土壌が湿った状態では-2°C程度の気温差になったことが示されている。本研究においても, 解析期間の数日前に計約 90mm の降雨があり土壌は湿潤であったことから, 近藤ら⁽¹⁵⁾の結果に近い値が得られたものと考えられた。

(3) 湿度の測定結果

表 3 は湿度の測定結果である。相対湿度については, 最小湿度が林外で 47.8%であったのに対して, A 林で 49.4%, B 林で 58.4%となり, 日中の平均湿度は林外で 56.9%, A 林で 60.7%, B 林で 67.7%で, いずれも B 林>A 林>林外の順で高かった。比湿で比較した場合は, 最小比湿が林外で 16.3 g/kg であったのに対して, A 林が 16.0 g/kg, B 林が 17.8 g/kg であった。また, 平均比湿については, 林外が 18.3 g/kg であったのに対して, A 林が 18.0 g/kg, B 林が 19.3 g/kg であった。相対湿度と同様に B 林において最も値

表 3. 葛城の森の相対湿度 (%) 及び比湿 (g/kg) (2022 年 7 月 30 日～8 月 3 日 9:00～15:00)

	日中最小		日中平均	
	%	g/kg	%	g/kg
A 林	49.4	16.0	60.7	18.0
B 林	58.4	17.8	67.7	19.3
林内*	53.9	16.9	64.2	18.7
林外	47.8	16.3	56.9	18.3
林内－林外	6.1	0.6	7.3	0.4

*各時刻の A, B 林の平均値であるため表記の値を平均したものとは必ずしも一致しない

が大きかったが, これは, B 林内の密な植生からの蒸発散によるものと考えられた。B 林について大きかったのは A 林ではなく林外で, A 林は最も小さかった。林外よりも A 林で比湿が小さかったのは, 林外が高密度な草本類で覆われていたのに対して, A 林内は中～低木層に植生がなく, 定期的な下草刈りによって林床の草本類も林外よりも疎な状態であったことが主な要因と考えられた。林内としての値を林外と比較すると, 相対湿度が, 日中の最小値で 6.1%, 平均湿度で 7.3%, 比湿でも, 日中の最小値で 0.6 g/kg, 平均値で 0.4 g/kg, いずれも林内の方が高かった。

(4) 黒球温度の測定結果

日中の黒球温度は, 気温と同様に最高温度, 平均温度ともに林外が最も高く, ついで A 林, B 林の順であった(表 4)。林外と林内で比較すると, 最高温度が林外で 51.5°Cであったのに対して林内は 35.8°Cで, 林内の方が 15.7°C低かった。また, 日中平均でも林内の方が 14.0°C低かった。期間中, 風が弱かったことを考えると, 林外よりも林内で, また, A 林よりも B 林で, それぞれ黒球温度が低かったのは気温と同様に日射の遮蔽の影響が主な要因と考えられた。

(5) 暑さ指数(WBGT)の算出結果

① WBGT の日変化

図 5 に示す通り, WBGT は常に林外で高かったが, 気温の場合とは異なり A 林と B 林の差は小さく, A 林の方が低い時間帯もあった。林外では, 5 日間すべてにおいて, 熱中症に対し「危険」とされる 31°C以上となる時間帯があったが, A 林, B 林では, 「嚴重警戒」の基準となる 28°C以上となることはあっても 31°C以上となることはなかった。林外の WBGT は 8 月 3 日 12:40 に, 測定期間中の最高値となる 33.7°Cを記録した(表 5)。これは, 熱中症に対し「危険」とされる 31°Cを上回るだけでなく, 環境省の熱中症警戒アラートの基準となる 33°Cも超えた値である。一方, 同時刻の A 林は 30.1°C, B 林は 29.8°Cで, ともに 31°Cを下回っていた。期間の平均的な値をみると, 日中最高 WBGT が林外では 32.8°Cであったのに対し, A 林で 29.2°C, B 林で 29.1°C

表 4. 葛城の森の黒球温度 (°C, 2022 年 7 月 30 日～8 月 3 日 9:00～15:00)

	日中最高	日中平均
A 林	36.4	34.0
B 林	35.8	32.1
林内*	35.8	33.1
林外	51.5	47.1
林内－林外	-15.7	-14.0

*各時刻の A, B 林の平均値であるため表記の値を平均したものとは必ずしも一致しない

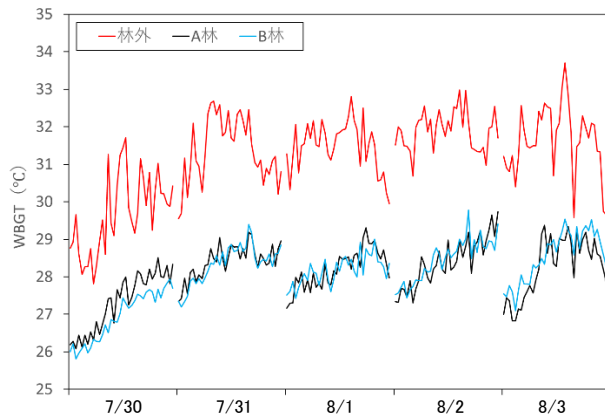


図 5. 葛城の森における WBGT の変化 (2022 年 7 月 30 日～8 月 3 日)

表 5. 葛城の森の WBGT (°C, 2022 年 7 月 30 日～8 月 3 日 9:00～15:00)

	8/3 12:40	日中最高	日中平均
A林	30.1	29.2	28.1
B林	29.8	29.1	28.1
林内*	30.0	29.1	28.1
林外	33.7	32.8	31.2
林内－林外	-3.7	-3.7	-3.1

*各時刻の A, B 林の平均値であるため表記の値を平均したものとは必ずしも一致しない

で、気温と同様に B 林の方がやや低かったものの差は非常に小さく、日中平均 WBGT では林外が 31.2°C であったのに対し、A 林、B 林ともに 28.1°C で差がなかった。

過去において緑陰の WBGT を調べた研究では、いずれも日向に比べ緑陰で WBGT が低いことが示されており、日向で 31°C を超えても、緑陰内で 31°C を超えることはなかったことが述べられている^{(29),(30),(31)}。また、山田・飯田⁽³⁰⁾は、日向と緑陰の 10:00～15:00 の WBGT 差が平均で 3.2°C であったことを報告している。本研究での日中 (9:00～15:00) の平均値は 3.1°C であるが、山田・飯田⁽³⁰⁾の結果と比較するために、10:00～15:00 の平均値でみたところ、WBGT 差は 9:00～15:00 の場合と変わらず 3.1°C であった (表略)。また、WBGT 差が 2.6°C であったとする山田・山本⁽³¹⁾と同じ 10:00～17:00 における差をみると 2.5°C (表略) で、いずれも既往の研究結果と近い値であった。公園における緑陰の WBGT を調べたこれらの研究とは、構成する樹種や群落構造等が異なるため単純な比較はできないが、WBGT がほぼ同値であったことは、葛城の森が公園等の緑地とほぼ同等の WBGT 低減効果があることを示すものといえる。

② WBGT 計算式各項の構成

表 6 に日中平均 WBGT の計算式各項の構成を示す。A 林、B 林及び林内と、林外の WBGT 計算式各項の差を比較すると、いずれも差の大部分を黒球温度項 (0.2Tg) の差が占めていた。このことから、黒球温度を低く抑えることが WBGT の低減には重要であるといえる。A 林と B 林を比較した場合においては、黒球温度項 (0.2Tg) は A 林が 6.8°C、B 林が 6.4°C で A 林の方が 0.4°C 高かったが、湿球温度項 (0.7Tw) は A 林が 18.1°C、B 林が 18.5°C で、逆に A 林の方が 0.4°C 低かった。A 林は B 林に比べ天空率が若干高か

表 6. 葛城の森の日中平均 WBGT の計算式各項の構成 (°C, 2022 年 7 月 30 日～8 月 3 日 9:00～15:00)

	WBGT	0.7Tw	0.2Tg	0.1Td
A林	28.1	18.1	6.8	3.2
B林	28.1	18.5	6.4	3.2
林内*	28.1	18.3	6.6	3.2
林外	31.2	18.4	9.4	3.4
A地点－林外	-3.1	-0.3	-2.6	-0.2
B地点－林外	-3.1	0.1	-3.0	-0.2
林内－林外	-3.1	-0.1	-2.8	-0.2

*各時刻の A, B 林の平均値であるため表記の値を平均したものとは必ずしも一致しない

ったために、黒球温度も高かったものと考えられるが、比湿は小さかったことから、結果的に B 林との WBGT に差がない結果となった。すなわち、下草刈りや枝打ち等によって林の天空率が上がり黒球温度は高まるものの、比湿が下がることによって、WBGT において最も比重の大きい湿球温度項が下がり、結果的に WBGT の値が変わらなかった。密度の異なるアカマツ林で測定を行った原田ら⁽¹⁸⁾は、群落樹冠部の密度が高く日射吸収量が多いほど群落内部の気温は低下する一方で、整枝等により群落下層の通気を良くすることで、快適な空間が創造できる可能性があることも述べており、本研究結果はそれを裏付けている。

③ WBGT の時間割合

熱中症に対しては WBGT の各基準が占める時間も重要な指標である。WBGT の熱中症の基準を日中の時間割合で比較してみると、林外では「危険」とされる 31°C 以上の時間が日中の約 7 割を占め、9:00～15:00 のうち 4 時間以上が熱中症に対し危険な状態であったことを示している (図 6)。これに対し、A 林、B 林は、日中の約 6 割の時間が「厳重警戒」となっていたが、残りの 4 割は 28°C 未満の「警戒」で、31°C 以上の「危険」となる時間はなかった。

④ 日射量、気温と WBGT の林内外差との関係

図 7 に時間積算日射量と A 林、B 林の日中平均 WBGT の林内外差との関係を、また、図 8 には林外気温と A 林、B 林の日中平均 WBGT の林内外差との関係をそれぞれ示す。日射量及び気温と WBGT の林内外差との間には強い相関関係があり、日射量が大きくなるほど、また、気温が高くなるほど、WBGT の林内外差が大きくなる傾向が認められた。すなわち、よく晴れて気温が高い日ほど、林による WBGT の低減効果も大きくなることを示している。

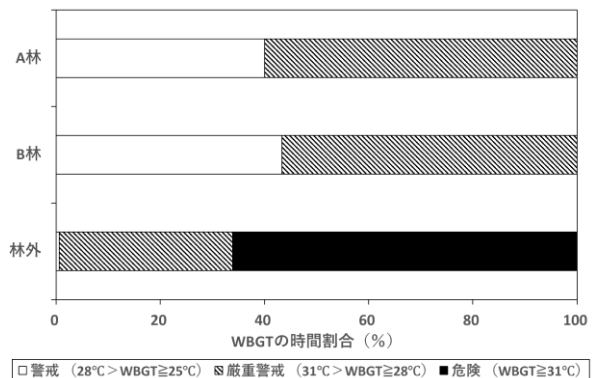


図 6. 葛城の森における WBGT の時間割合 (2022 年 7 月 30 日～8 月 3 日 9:00～15:00)

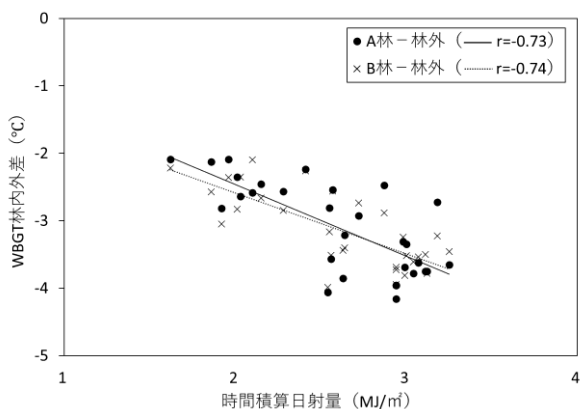


図 7. 葛城の森における時間積算日射量と日中平均 WBGT の林内外差との関係 (r は相関係数, 2022 年 7 月 30 日～8 月 3 日 9:00～15:00, 日射量は防災科研における観測データ)

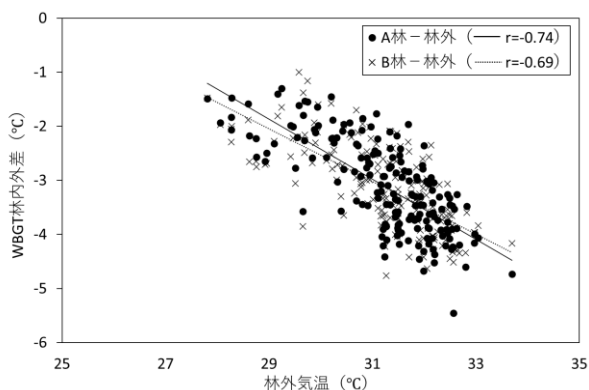


図 8. 葛城の森における林外気温と日中平均 WBGT の林内外差との関係 (r は相関係数, 2022 年 7 月 30 日～8 月 3 日 9:00～15:00)

3.2 暑熱環境に関する考察

以上のように、既往の緑地の暑熱環境に関する研究と同様に、葛城の森の林内は林外に比べ、気温や黒球温度が低く、WBGT も低いことがわかった。このことから、都市近郊にある平地林においても、公園等の緑地と同様に、熱中症軽減等の暑熱緩和効果が期待できるものと考えられた。

また、下草刈りや枝打ち等の管理を行った林の暑熱環境は、天空率が低く高密度な状態の林と同等であることを示す結果も得られた。近年、自治体や NPO 等により、不法投棄や防犯、倒木、害獣対策等さまざまな目的で進められる平地林等緑地の管理作業は、緑地内を明るくし、結果的に気温や黒球温度は上がるものの、WBGT が上昇することはないことが示された。平地林の存在によって風害が軽減された事例が災害調査時に確認されているが⁽³²⁾、防風効果の面でも適した林の密度があることが示されており^{(33),(34)}、防災面でも林の管理作業は重要である。今回、暑熱環境面での平地林の効果が確認されたといえるが、本研究は多様な平地林があるなかでの一つのモデルケースとしての調査事例である。今後、さまざまな樹種や群落構造の林における調査事例を増やし、より詳細な実態の把握を進めることによって、暑熱環境面から見た望ましい平地林の管理についても検討を進めることが求められる。

4. まとめ

2022 年夏季に、茨城県つくば市の市街地近郊の平地林において、気温、相対湿度、黒球温度を測定し、暑さ指数 (WBGT) を算出することによって、林内外の日中の暑熱環境を比較した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 林内は林外に比べ、気温が低く、その程度は既往の緑地での研究結果とほぼ同等で最高気温で約 2℃であった。また、林内は黒球温度も低く相対湿度は高かった。
- (2) WBGT は林外よりも林内で低く、日中平均値の差は、公園等の緑地での既往研究とほぼ同じ約 3℃であった。また、管理された林と未管理の林との差は小さく、日中の平均値には差がなかった。
- (3) 熱中症に対し「危険」とされる WBGT が 31℃以上の時間は、林外で日中の 7 割みられたのに対して、林内で 31℃以上となることはなく、日中の 4 割は 28℃未満の「警戒」基準の時間であった。
- (4) 日射量及び気温と WBGT の林内外差の間には強い相関関係がみられ、日射量が大きいほど、また、気温が高いほど WBGT の林内外差が大きくなる傾向がみられた。
- (5) 葛城の森における暑熱環境測定の結果、既往研究と概ね同様の結果が得られたことから、都市近郊にある平地林も、公園等の緑地と同様に、熱中症軽減等の暑熱緩和効果が期待できると考えられた。

謝辞

葛城の森での測定にあたっては、茨城県ならびにつくば環境フォーラムの永谷真一代表、大塚太郎理事にお世話になった。また、国立環境研究所生物多様性領域の石濱史子主幹研究員には有益なアドバイスをいただいた。記して深く感謝申し上げる。群落構造の計測にあたっては、かなめ測量株式会社高島和宏氏に、WBGT をはじめとした熱中症関連の解析にあたっては、国立環境研究所の小野雅司博士にご指導・ご協力をいただいた。また、通風筒製作等測定機器の準備、調整にあたっては、防災科学技術研究所極端気象災害研究領域水・土砂防災研究部門 宇治靖専門技術員 (現：総合電子(株)) に、データの解析にあたっては、社会防災研究領域防災情報研究部門 長房駿技術員にそれぞれ指導、協力をいただいた。記して深く感謝申し上げる。

参考文献

- (1) 犬井正, 関東平野の平地林の歴史と利用, 森林科学, 18(1996), pp.15-20.
- (2) 茨城県, 茨城県森林・林業の動き, https://www.pref.ibaraki.jp/nourinsuisan/rinsei/kikaku_index/shinrin-ringyou/index.html, (2026 年 3 月 12 日閲覧)。
- (3) 第 3 次つくば市環境基本計画, <https://www.city.tsukuba.lg.jp/material/files/group/137/3hopen.pdf>, (2026 年 3 月 12 日閲覧)。
- (4) 清水夏樹・佐藤洋平, 都市近郊農業地域における平地

- 林の減少要因, 農村計画学会誌, 18 (4)(2000), pp.265-274.
- (5) 横山恭子・増田美砂, 里山林縁に対するゴミの不法投棄, 筑波大学農林技術センター演習林報告, 17(2001), pp.23-40.
 - (6) 小山泰弘, 森はゴミ捨て場か? 一負の遺産として利用される都市近郊林の現状と実態, 環境情報科学, 45(1)(2016), pp.25-29.
 - (7) 厚生労働省, 熱中症による死亡数 人口動態統計(確定数)より, <https://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/jinkou/tokusyuu/necchusho24/index.html>, (2026年3月12日閲覧).
 - (8) 環境省, 令和7年版 環境・循環型社会・生物多様性白書, <https://www.env.go.jp/policy/hakusyo/r07/pdf.html>, (2026年3月12日閲覧).
 - (9) 本條毅・高倉直, 緑地が都市内熱環境に及ぼす影響 (1) 実測に基づく熱収支的解析, 農業気象, 40 (3) (1984), pp.257-261.
 - (10) 菅原広史・成田健一, 特集 クールアイランドの形成, 日本風工学会誌, 97 (2003), pp.23-27.
 - (11) 成田健一・菅原 広史・横山 仁・三坂 育正・松島 大, 皇居の冷氣生成機能と周辺市街地への熱的影響に関する実測研究, 日本建築学会環境系論文集, 76 (666) (2011), pp.705-713.
 - (12) 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氣のにじみ出し現象, 地理学評論, 77(6)(2004) pp.403-420.
 - (13) 成田健一, クールアイランド検証 皇居, 『環境浄化技術』, 2009年2月号(2009), pp.9-13.
 - (14) 原藺芳信・清田信・矢吹萬壽, 林地と造成された芝地の熱環境および水収支の特徴, 農業気象, 48 (2) (1992), pp.147-155.
 - (15) 近藤純正・内藤玄一・近藤昌子, K114. 明治神宮・代々木公園の日中の気温分布 (3), <https://www.asahi-net.or.jp/~rk7j-kndu/kenkyu/ke114.html>.2015, (2026年3月12日閲覧).
 - (16) 重田祥範・高岡利行・大橋唯太・亀卦川幸浩・平野勇二郎, 都市内の大規模緑地がもたらす大気冷却効果ー大阪城公園の事例ー, 日本生気象学会雑誌, 50 (1) (2013), pp.23-35.
 - (17) 神田学・森脇亮・高柳百合子・横山仁・浜田崇, 明治神宮の森の気候緩和機能・大気浄化機能の評価:(1) 1996年夏期集中観測, 天気, 44 (10) (1997), pp.713-722.
 - (18) 原藺芳信・村上智美・林陽生, 密度の異なるアカマツ林の緑陰の熱環境特性, 造園雑誌, 53 (5) (1989), pp.233-238.
 - (19) 国立社会保障・人口問題研究所, 日本の地域別将来推計人口(令和5(2023)年推計), <https://www.ipss.go.jp/pp-shicyoson/j/shicyoson23/6houkoku/houkoku.asp>, (2024年8月19日閲覧).
 - (20) 横山仁・長谷川薫・日下博幸, 夏季における茨城県つくば市の夜間の気温分布と緑地との関係, 日本ヒートアイランド学会論文集, 19(2025), pp.1-8.
 - (21) つくば市, 生物多様性つくば戦略, <https://www.city.tsukuba.lg.jp/material/files/group/145/senryaku.pdf>, (2026年1月28日閲覧).
 - (22) NPO 法人 つくば環境フォーラム, <https://tef298.sakura.ne.jp/>, (2026年1月28日閲覧).
 - (23) 岡田益己・中村浩史, 温度の正しい測り方 (1)通風式放射よけの作り方, 生物と気象, 10: A-2 (2010), pp.1-5.
 - (24) 高根雄也・日下博幸・高木美彩・岡田牧・阿部紫織・永井徹・富士友紀乃・飯塚悟, 岐阜県多治見市における夏季晴天日の暑熱環境の実態調査と領域気象モデル WRF を用いた予測実験, 地理学評論 Series A, 86 (1) (2013), pp.14-37.
 - (25) 小野雅司・登内道彦, 通常観測気象要素を用いた WBGT(湿球黒球温度)の推定, 日本生気象学会雑誌, 50 (4) (2014), pp.147-157.
 - (26) 環境省: 熱中症予防情報サイト <https://www.wbgt.env.go.jp/> (2025年4月23日閲覧).
 - (27) 足永靖信, 自然湿球温度の屋外観測データを活用した WBGT の各種計算式の精度検証, 空気調和・衛生工学会論文集, No.327 (2024), pp.31-35.
 - (28) Yaglou C.P. and Minard D., Control of heat casualties at military training centers, AMA Arch Ind Health, 16(4) (1957), pp.302-316.
 - (29) 野々村敦子・増田拓朗, WBGT を用いた樹林のもつ夏季の体感温度低減効果の分析, 環境情報科学論文集, ceis23 (2009), pp.161-166.
 - (30) 山田宏之・飯田敦也, 大阪府営大泉緑地の遊具広場における子供の利用動態からみた緑陰の評価, 土木学会論文集 G (環境), 77 (6) (2021), pp.II_121-II_130.
 - (31) 山田宏之・山本峻也, 大阪府営浜寺公園における温熱環境とベンチ利用者の滞留特性に関する研究, ランドスケープ研究, 85 (5) (2022), pp.439-444.
 - (32) 横山仁・鈴木真一・飯塚聡・内山庄一郎・岩波越・村上暁信, グリーンインフラとしての平地林による防災機能ー災害現場で確認された農業気象災害軽減事例ー, 防災科学技術研究所研究報告, 88(2023), pp.33-44.
 - (33) 檜山徳治, 内陸防風林, 林業技術, 309(1967), pp.23-26.
 - (34) 佐藤隆光, 防風林の構造が気象改良効果に及ぼす影響に関する研究, 北海道大学大学院農学研究科邦文紀要 24(2)(2002), pp.113-164.

(Received March 27, 2026, Accepted June 29, 2026)