

都内再開発地における都市緑地の創出および成長前後の暑熱環境調査

瀬戸芳一・崔麗華・國分優孝・鷲見泰弘・上野広行・本田有紀

【要約】市街地再開発地区を対象として、2019年～2024年の夏季2ヶ月間、環境計測センサによる気温常時計測を実施し、ヘリコプター搭載サーモカメラによる表面温度計測を行うことで、再開発に伴う都市緑地の創出および成長前後における暑熱環境の実態を把握した。さらに、熱流体解析モデルによる暑熱シミュレーションを実施し、暑熱緩和効果を評価した。その結果、最高気温出現時において緑地創出後の体感温度が低下することが示された。緑化面積の大きい地区では緑成長後にさらなる気温低減が認められ、近隣への効果も示唆された。

【キーワード】都市再開発、緑化、暑熱環境、WBGT、現地計測、リモートセンシング、熱流体シミュレーション
【目的】

グリーンインフラは、自然環境が有する機能を社会における様々な課題解決に活用しようとする考え方であり¹⁾、地球温暖化やヒートアイランド現象による暑熱化に対処するための費用対効果の高い手段の一つである。本研究は、再開発による都市緑地の創出および成長前後における暑熱環境改善効果を定量的に明らかにすることを目的とする。本研究では、緑化規模の異なる4地区を対象に暑熱環境調査を行った(図1)。昨年度までに報告した²⁾³⁾北青山三丁目再開発地区(現名称「ののあおやま」)と四谷駅前再開発地区(現名称「コモレ四谷」)における、2019年(竣工前)、2021年(竣工後)、2023年(緑成長後)の夏季調査結果に加えて、緑化規模の比較的小さい、武蔵小山駅前通り再開発地区(現名称「シティタワー武蔵小山」)および調布ヶ丘一丁目計画地区(現名称「ブランズシティ調布」)を対象に、2020年(竣工前)、2022年(竣工後)、2024年(緑成長後)の夏季に同様に実施した調査結果を比較検討し、緑化規模の違いによる暑熱環境改善効果の差異についても評価した。

【方法】

各再開発地区において、各年7月下旬から9月下旬までの約2ヶ月間、昼夜連続で小型環境計測センサ(Sens'it V3; STMicroelectronics 製 HTS221 温湿度センサ)による気温の常時計測を実施した。使用した計測センサは、横幅52mm×高さ82mmでデータ送信機能を内蔵しており、本体裏面に発泡スチロールを付けて熱伝導の影響を軽減するようにした(図2)。再開発地内部と隣接市街地の複数箇所において、地上約1.5mの高さにセンサを1台または2台ずつ設置し(図3)、1時間間隔で計測を行った。

また、ヘリコプターにサーモカメラ(日本アビオニクス製サーモレーサ TS7302、2024年のみ同社製 InfReC R500EX-S)を搭載し、8月晴天日の最高気温出現時間帯において、体感温度の温熱要素として重要な表面温度(上向き赤外放射量)計測および可視画像の撮影を実施した。飛行高度は約610m、計測データの解像度は0.5～1mであり、地表面の放射率は一律に1と仮定して表面温度を推計した。

さらに、熱流体解析モデル(アドバンスドナレッジ研究所製 FlowDesigner)を使用し、体感温度等の数値シミュレーションを行った。

年度	ののあおやま	コモレ四谷	シティタワー武蔵小山	ブランズシティ調布	夏季調査(7～9月)
2019	緑化工事 定着	緑化工事 定着	建築工事 定着	建築工事 定着	竣工前(緑化前)
2020	緑化工事 定着	緑化工事 定着	緑化工事 定着	緑化工事 定着	竣工前(緑化前)
2021	緑化工事 定着	緑化工事 定着	緑化工事 定着	緑化工事 定着	竣工後(緑化後)
2022	成長	成長	成長	成長	竣工後(緑化後)
2023	成長	成長	成長	成長	緑成長後
2024			成長	成長	緑成長後
緑化面積 m ² (地上部)	5,524	2,846	896	1,448	

図1 本研究における各地区の暑熱調査実施年および緑化面積。



図2 計測に使用した小型環境計測センサ。



図3 環境計測センサの設置例。

計算領域には、建築物の3次元CAD（ゼンリン製3D都市モデルデータ）を配置した。k-εモデルによる乱流計算から、午前9時00分を初期時刻として、計算領域内の気温、相対湿度、日射、地面・壁面からの輻射、風向・風速等を推定した。そして、体感温度の一種であるWBGT（Wet Bulb Globe Temperature：湿球黒球温度）を、一般に用いられている式⁴⁾（ $WBGT = 0.7 \times \text{湿球温度} + 0.2 \times \text{黒球温度} + 0.1 \times \text{気温}$ ）から算出した。シミュレーションの初期・境界条件には、表面温度計測を実施した日における北の丸公園の毎時観測値（気温・相対湿度・風向・風速）を与えた。また、初期時刻の地表面温度と建物表面温度は、それぞれ40℃と35℃とした。竣工後（緑創出後）のシミュレーションでは、建築物に加え、緑化図面に基づく場所に樹木を配置した。各樹木の形状は、現地測定した各樹木の樹高・樹幹直径・枝下高のデータ、ならびにそれらのデータから推定された樹冠幅を反映した。また、既往研究の知見を参考に、樹木のパラメータに発熱量（潜熱量） -100 W/m^3 、発湿量 $50 \text{ g/(h} \cdot \text{m}^3)$ 、表面温度25℃を設定し、これにより樹木の蒸散もモデルに考慮した。

【結果の概要】

図4に、ののあおやまにおける緑成長後（2023年）の気温計測結果例を示す。期間中、晴天日が多かったため、最高気温が35℃を超えている日も多い。また、隣接市街地で最低気温が高めであるが、日々の気温日変化が明瞭に現れており、気象庁観測値と整合している。

図5に、ののあおやまとコモレ四谷における各年（8月1日～9月20日）の晴天日における北の丸公園の気象庁観測値との気温差（各地点の気温－北の丸公園の気温）の出現頻度分布を示す。晴天日は、日降水量1mm未満、日照3時間以上の日とした。出現頻度は、気温差0.5℃間隔で集計し、再開発地内と近隣

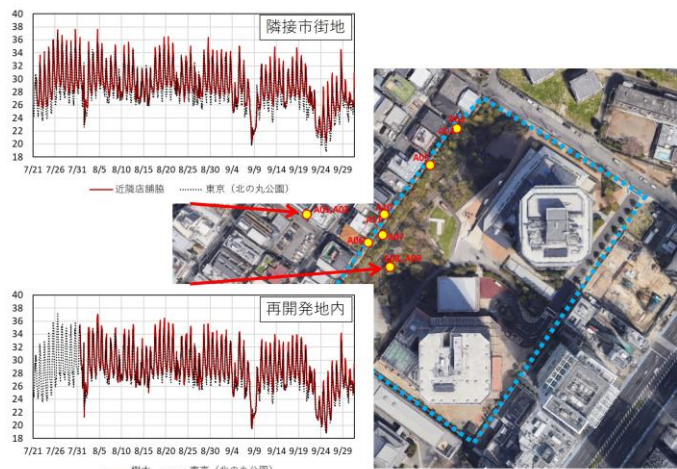


図4 ののあおやまと隣接市街地における緑成長後の気温（℃）計測結果（赤太線；2023年7月21日～10月1日）。青点線は再開発事業範囲。各グラフの黒点線は気象庁観測による北の丸公園の気温。Google 航空写真を使用。

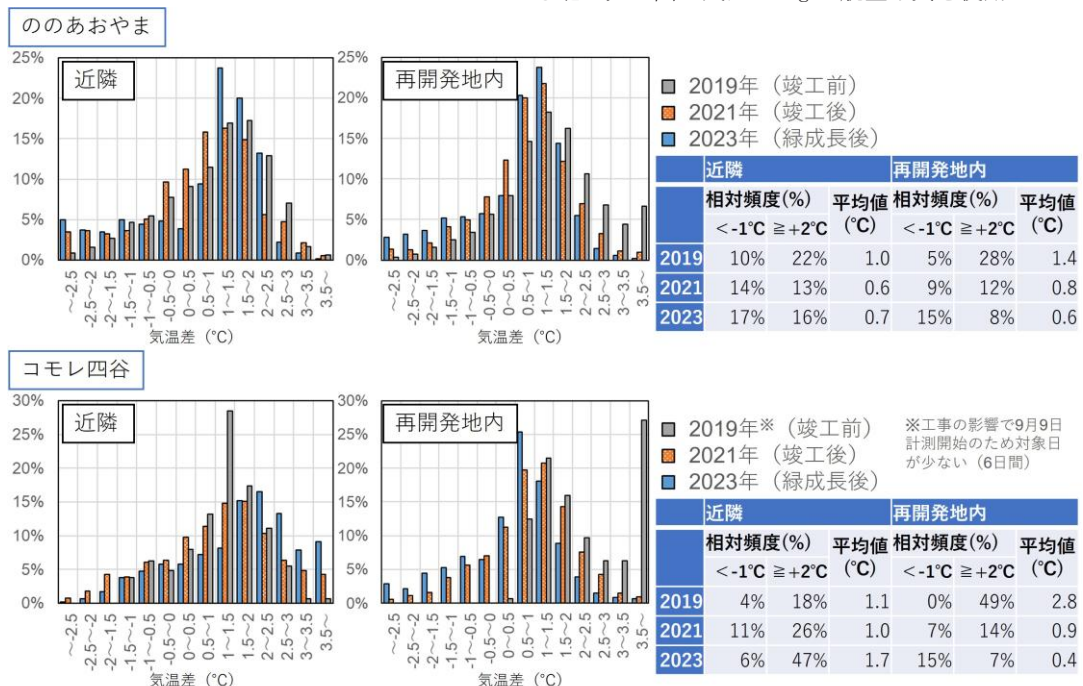


図5 （上）ののあおやまと（下）コモレ四谷の近隣と再開発地内における竣工前（2019年）、竣工後（2021年）、緑成長後（2023年）の晴天日における北の丸公園との気温差（℃）の出現頻度分布。

それぞれの代表地点（1～4 地点）の平均を示した。ののあおやまでは、相対的に低温となる頻度（北の丸公園との気温差 $<-1^{\circ}\text{C}$ ）は、竣工後の再開発地内および近隣において増加しており、緑成長後の出現頻度が最も高くなっていた。高温となる頻度（気温差 $\geq+2^{\circ}\text{C}$ ）は、竣工後の再開発地内を中心に減少しており、再開発地内では緑成長後の出現頻度が最も低かった。また、竣工後の近隣においても低温頻度の増加傾向がみられており、緑地創出に伴う気温低減効果が隣接市街地へもある程度及んでいる可能性が示唆された。コモレ四谷においても、竣工後と比べて緑成長後の再開発地内で、相対的に低温となる頻度が増加し、高温となる頻度は減少していた。

次に、緑化規模の比較的小さいシティタワー武蔵小山とブランズシティ調布における、各年の晴天日における気温差の出現頻度分布を、図 6 に同様に示す。両地区においては、竣工前と比べて竣工後の再開発地内において相対的に低温となる頻度がともに増加傾向にあったが、緑成長後における変化は小さかった。また、両地区の近隣においては、竣工後および緑成長後ともに低温頻度の変化は認められなかった。

さらに、各地区における晴天日の最高気温出現時間帯（13 時～15 時）における高温（北の丸公園との気温差 $\geq+2^{\circ}\text{C}$ ）と低温（気温差 $<0^{\circ}\text{C}$ ）の出現頻度を、表 1 に示した。すべての時間帯の場合と同様に、高温の出現頻度は、各再開発地内で竣工後に大きく減少し、緑化面積の大きいののあおやとコモレ四谷では、緑成長後にさらなる減少がみられた。低温の出現頻度についても、竣工後に各再開発地内で増加しており、ののあおやとコモレ四谷では、緑成長後にさらなる増加がみられた。一方、各地区の近隣においては、高温の出現頻度がやや増加傾向にあった。既報²⁾における再開発着工前後のシミュレーション結果によれば、近隣での体感温度（WBGT）の変化は小さく、WBGT への寄与が大きい湿球温度も、境界条件として一様の相対湿度を与えていることから変化はわずかであった。これらのことから、再開発により近隣の気温が上昇したとは考えにくく、近隣における高

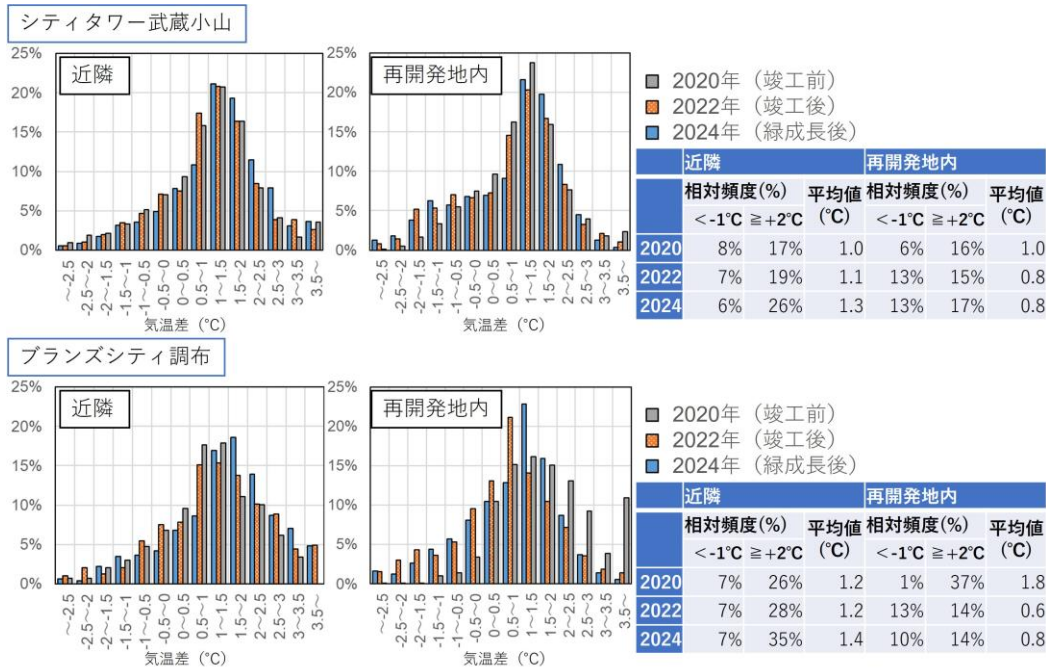


図 6 （上）シティタワー武蔵小山と（下）ブランズシティ調布の近隣と再開発地内の竣工前（2020 年）、竣工後（2022 年）、緑成長後（2024 年）の晴天日における北の丸公園との気温差（ $^{\circ}\text{C}$ ）の出現頻度分布。

表 1 各再開発地内と近隣における北の丸公園との気温差 0°C 未満と 2°C 以上の出現頻度（13 時～15 時）。

ののあやま				コモレ四谷				シティタワー武蔵小山				ブランズシティ調布					
近隣		再開発地内		近隣		再開発地内		近隣		再開発地内		近隣		再開発地内			
相対頻度(%)		相対頻度(%)		相対頻度(%)		相対頻度(%)		相対頻度(%)		相対頻度(%)		相対頻度(%)		相対頻度(%)			
<0℃ ≧+2℃		<-0℃ ≧+2℃		<0℃ ≧+2℃		<0℃ ≧+2℃		<0℃ ≧+2℃		<0℃ ≧+2℃		<0℃ ≧+2℃		<0℃ ≧+2℃			
2019	51%	5%	7%	45%	28%	14%	0%	100%	2020	30%	20%	37%	15%	9%	19%	1%	60%
2021	19%	19%	16%	25%	42%	23%	7%	16%	2022	29%	24%	56%	2%	8%	38%	45%	15%
2023	17%	13%	20%	11%	18%	35%	28%	6%	2024	24%	31%	52%	8%	5%	59%	41%	13%

温頻度の増加は、年による気象条件の差異や測定箇所の違い、局所的な環境変化等の影響によると考えられた。

以上のように、対象の4地区において、公開空地の緑地創出に伴う気温低減効果が確認され、ののあおやまとコモレ四谷では、緑成長後においてさらに気温低減効果が大きくなっていると考えられた。一方、緑化規模の比較的小さいシティタワー武蔵小山とブランズシティ調布では、緑成長後における気温低減効果は竣工後とおおむね同様であった。ののあおやまとコモレ四谷における地上部緑化面積は、ほか2地区の2倍以上であり規模が大きいことから、公開空地の緑化規模が大きいほど気温低減効果も大きくなると考えられる。

図7は、ののあおやまとコモレ四谷付近のそれぞれについて、ヘリ搭載サーモカメラによる航空写真および表面温度の計測結果を、竣工前（2019年）と竣工後（2021年）、緑成長後（2023年）で比較したものである。竣工後の再開発地付近では、高層ビル建設に伴い日陰が形成され、表面温度が大きく低下している。ののあおやまにおいては、公開空地の主要緑化部分付近の範囲（白線内）で平均した表面温度は、竣工前で47.8℃、竣工後で34.3℃と大きく低下している。緑成長後では38.9℃とやや上昇しているが、これは計測時の気温や日射、

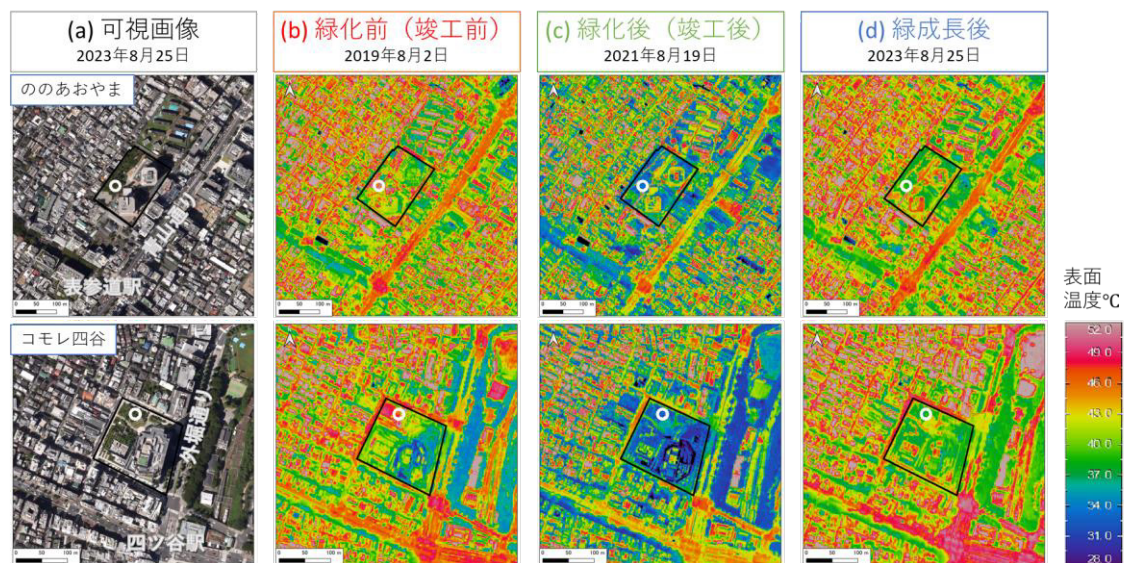


図7 ののあおやまとコモレ四谷周辺における (a) 航空写真 (2023 年) および (b) 竣工前, (c) 竣工後, (d) 緑成長後における表面温度 (°C) の分布 (13 時 30 分頃)。白色の円は公開空地の主要な地上緑化部分において平均温度を求めた範囲 (半径 10 m) を示す。黒色の線は再開発事業範囲。

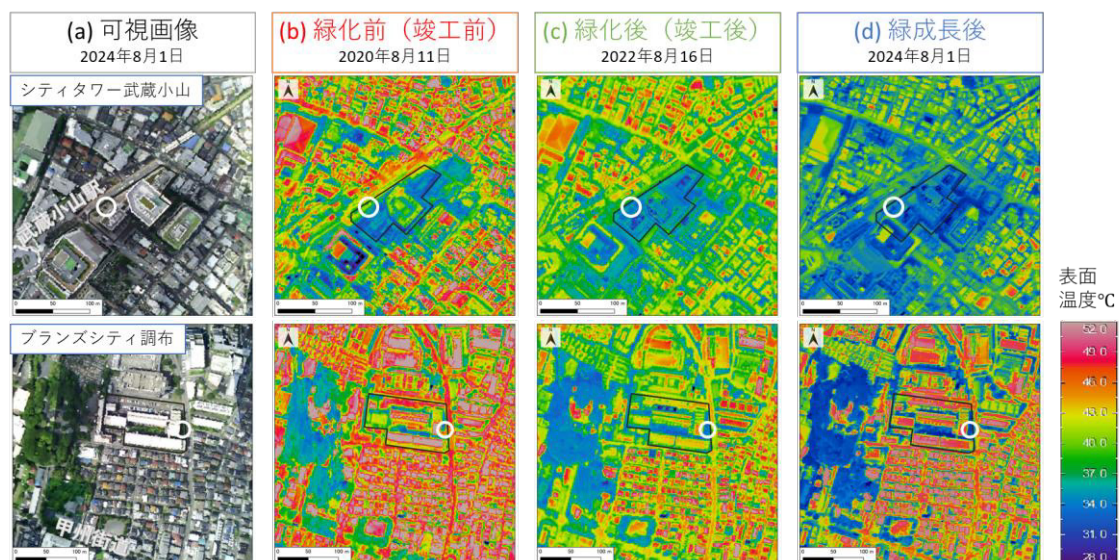


図8 シティタワー武蔵小山とブランズシティ調布周辺における (a) 航空写真 (2024 年) および (b) 竣工前, (c) 竣工後, (d) 緑成長後における表面温度 (°C) の分布 (13~14 時頃)。白色の円は公開空地の主要な地上緑化部分において平均温度を求めた範囲 (半径 10 m) を示す。黒色の線は再開発事業範囲。

風速などの気象条件の違いによるものと考えられる。撮影全範囲（周辺の約 1 km 四方）における各年の平均表面温度を基準とした温度差を求めると、竣工前、竣工後、緑成長後では、それぞれ+3.9℃、-6.1℃、-5.2℃となり、竣工後と緑成長後の表面温度は、竣工前と比較して約 10℃低下していた。

コモレ四谷における主要緑化部分付近の平均表面温度は、竣工前、竣工後、緑成長後において、それぞれ 46.1℃、32.5℃、38.0℃であり、竣工後が最も低かった。撮影全範囲の平均表面温度との差を同様に求めると、竣工前、竣工後、緑成長後において、それぞれ+3.4℃、-6.5℃、-6.4℃となり、コモレ四谷においても竣工後と緑成長後において竣工前より約 10℃低下していた。同様に、シティタワー武蔵小山とブランズシティ調布付近の航空写真および表面温度の計測結果を図 8 に示す。シティタワー武蔵小山における主要緑化部分付近の平均表面温度は、竣工前、竣工後、緑成長後において、それぞれ 39.0℃、35.0℃、34.2℃であり、隣接する高層ビルによる日陰の影響で、竣工前においても比較的低かった。撮影全範囲の平均表面温度との差は、竣工前、竣工後、緑成長後で、それぞれ-3.8℃、-4.9℃、-3.1℃となり、変化はあまり大きくなかった。ブランズシティ調布における主要緑化部分付近の平均表面温度は、竣工前、竣工後、緑成長後において、それぞれ 42.5℃、36.3℃、35.3℃であり、撮影全範囲の平均表面温度との差は、それぞれ-2.3℃、-4.5℃、-5.5℃となり、竣工後と緑成長後において竣工前より約 2~3℃低下していた。以上のように、計測時の気温や日射、風速などの気象条件の違いにより、年による表面温度の差異が大きく、緑成長前後の変化は明瞭ではなかった。しかし、公開空地における緑地創出の前後においては、シティタワー武蔵小山を除いた主要緑化範囲に共通して表面温度が相対的に低下しており、緑化規模の小さなブランズシティ調布では約 2~3℃、規模の大きなのあやまとコモレ四谷においては約 10℃、最高気温出現時間帯の表面温度が低下したことが示された。

次に、熱流体解析モデルによる体感温度（WBGT）のシミュレーション結果を示す。図 9 は、のあやまとその周辺についての竣工前後と緑成長後における WBGT の分布である。なお、シミュレーションに用いた緑成長後の樹冠分布については、衛星画像（WorldView-2/3、地上解像度 2 m）から推定した竣工後と緑成長後での樹冠面積の増大率（1.6 倍）に基づき、竣工後の樹冠分布を一律に 1.6 倍拡大させることで得た。再開発地内におい

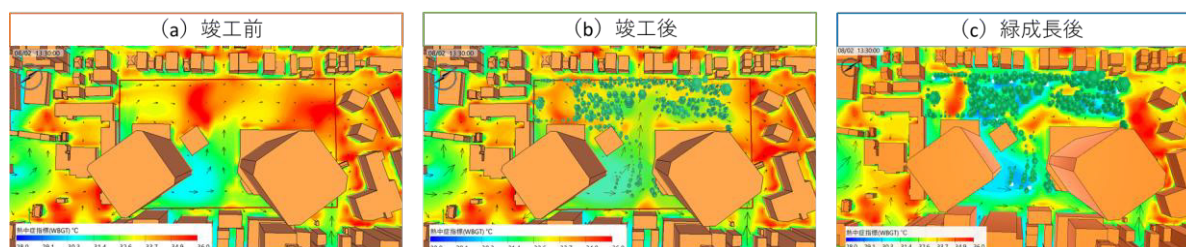


図 9 のあやまとその周辺の (a) 竣工前、(b) 竣工後、(c) 緑成長後における地上 1.5 m の WBGT (℃) のシミュレーション結果 (2019 年 8 月 2 日 13 時 30 分)。

ベクトルは風向風速。初期時刻：同日 9 時 00 分。境界条件：北の丸公園の気象庁観測値。計算領域：東西 1500 m×南北 1500 m×鉛直 180 m。格子間隔：3 m（地上～6 m は鉛直 0.06 m）。赤色線は再開発事業範囲。

■ 緑成長後－竣工前 (13:30)

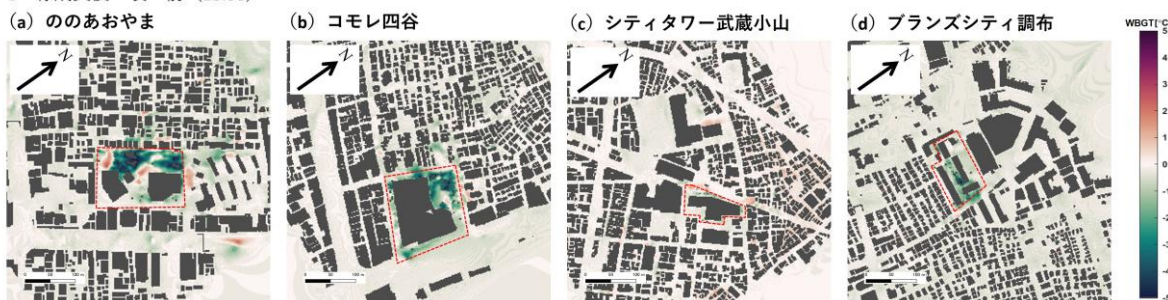


図 10 シミュレーションによる緑成長後における地上 1.5 m の WBGT (13 時 30 分) の竣工前との差 (℃)。

(a) のあやま、(b) コモレ四谷、(c) シティタワー武蔵小山、(d) ブランズシティ調布。濃い緑色ほど緑成長後の WBGT 低下が大きい。各地区の主風向は南風である。赤点線は再開発事業範囲。

ては、竣工前と比較して竣工後に WBGT が低下し、緑成長後にさらに大きく低下していた。これには、建物高層化に伴う日陰形成や風速増大（ビル風）の効果に加えて、樹木の蒸散による気温低下や緑地創出に伴う木陰形成による黒球温度低下も大きく寄与していると考えられ、コモレ四谷やブランズシティ調布においても同様の結果が得られた。一方、シティタワー武蔵小山では、隣接する高層ビルにより形成される日陰の影響で、竣工前の WBGT が比較的低かったため、竣工後における WBGT の低下はほとんどみられなかった。これらのことは、建物による日陰の期待できない部分における緑地創出が、より高い暑熱環境の改善効果をもたらすことを示唆する。各地区の緑成長後における WBGT のシミュレーション結果を竣工前と比較したものを図 10 に示す。竣工後では再開発地内の植樹部分を中心に WBGT が低下していたが、緑成長後には再開発地内の全体において WBGT が低下していた。また、緑化規模の大きなもののおおやまとコモレ四谷においては、再開発地内のみならず風下側の隣接市街地においても WBGT が低下しており、暑熱緩和効果の広がりが認められた。

【まとめ】

都内における緑化規模の異なる複数の再開発地区を対象に、竣工前、竣工後、緑成長後の 3 つの時期において、市街地再開発に伴う都市緑地創出等による暑熱環境改善効果の評価を行った。表 2 に、各再開発地区の竣工前後と緑成長前後それぞれにおける各計測項目の変化をまとめた。竣工後（緑創出後）における再開発地内の気温や表面温度の低下と高温出現頻度の減少、植樹部分を中心とした体感温度の低下が、各再開発地区において認められた。緑成長後には、再開発地内全体で体感温度が低下し、緑化面積の大きいもののおおやまやコモレ四谷において、気温や体感温度のさらなる低下が、実地計測ならびに暑熱環境シミュレーション結果から認められた。

緑の創出および成長による気温低減効果は最高気温出現時間帯においても確認され、緑地の規模（緑化面積等）が大きいほど暑熱環境の改善効果は大きく、風下側隣接市街地への暑熱緩和効果の広がりも示唆された。本研究により、都市緑地の創出および成長による暑熱環境改善効果が定量的に明らかとなった。都市緑地をはじめとしたグリーンインフラは、暑熱環境緩和だけでなく、生物多様性の保全や安らぎ効果といった様々な機能を有することから、これらの保全や創出に取り組んでいくことが望まれる。

表 2 竣工前後および緑成長前後における各計測項目の変化。

暑熱緩和効果	竣工（緑創出）前後				緑成長前後			
	の おおやま	コモレ 四谷	シティ タワー 武蔵小山	ブランズ シティ 調布	の おおやま	コモレ 四谷	シティ タワー 武蔵小山	ブランズ シティ 調布
近隣市街地との差 日平均の気温差（℃）	低下				さらに低下			
	-0.2	-1.8	-0.3	-1.2	-0.3	-1.2	-0.2	0.0
近隣市街地との差 13～15時平均の気温差（℃）	低下				さらに低下			
	-1.7	-5.5	-0.6	-2.9	-0.4	-1.6	0.0	-0.5
再開発地内（13～15時） 高温出現頻度の差（ポイント）	減少				さらに減少			
	-20	-84	-13	-45	-14	-10	+6	-2
再開発地内（13～15時） 低温出現頻度の差（ポイント）	増加				さらに増加			
	+9	+7	+19	+44	+4	+21	-4	-4
近隣市街地との差 熱帯夜日数（日）	変化なし				減少			
	-1	/	-1	0	-7	-9	-3	-2
主要緑化部分 平均表面温度（℃）	低下				変化なし			
	-10.0	-9.9	-1.1	-2.2	+0.9	+0.1	+1.8	-1.0
シミュレーション（13:30） 植樹部分の WBGT（℃）	植樹部分中心に低下				再開発地内中心に低下			
	-0.9	-1.3	-0.1	-1.0	-1.6	-0.7	-0.5	-0.6
シミュレーション結果から の周辺への影響	風下への 影響あり		風下への影響 小さい		風下への 影響あり		風下への影響 小さい	

【参考文献】 1) 国土交通省：グリーンインフラストラクチャー～人と自然環境のより良い関係を目指して～，
<https://www.mlit.go.jp/common/001179745.pdf>（2017）

2) 常松・瀬戸：都市再開発による公開空地の緑地創出前後の暑熱環境変化に関する調査研究，東京都環境科学研究所年報 2022，
 52-59（2022）

3) 瀬戸ら：都内再開発地における都市緑地成長前後の暑熱環境調査，東京都環境科学研究所年報 2024，80-81（2024）

4) Stull：Wet-Bulb temperature from relative humidity and air temperature, J. Appl. Meteor. Climatol., 50, 2267-2269（2011）

【謝 辞】本研究は、気候変動・環境エネルギー研究科 都市地球環境研究チーム（旧 環境資源研究科 都市地球環境研究チーム）に 2022 年度まで所属の常松展充氏が開始した研究を、同チームメンバーにおいて引き続いて計 6 年間にわたり実施したものです。また、環境計測センサの設置に際しては、各再開発地区の関係者の皆様ならびに近隣事業者・住民の皆様にも多大なご協力を賜りました。ここに感謝の意を表します。