

# 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

常松 展充・瀬戸 芳一

## 要 旨

都市再開発に伴う公開空地の緑地創出が暑熱環境の改善に及ぼす効果を調査するため、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）を対象とし、両再開発地区における竣工前の年（2019年；緑地創出前）と竣工後の年（2021年；緑地創出後）について、夏期2ヶ月間にわたる現地での地上気温計測や、リモートセンシング（遠隔計測）による地表面温度計測、熱流体解析モデルによる暑熱環境シミュレーションを実施した。その結果、公開空地への植樹による緑地創出がもたらす夏期の気温低下量は、緑化規模に比例することが気温計測データから示唆された。また、再開発に伴う公開空地の緑地創出等により、猛暑下で、再開発事業敷地内の体感温度が明瞭に低下することに加え、その風下側隣接市街地においてもやや体感温度が低下することが、熱流体解析モデルを用いた数値シミュレーション結果から示された。

キーワード：都市再開発、緑化、公開空地、現地計測、リモートセンシング、熱流体解析、シミュレーション、電力消費量

## 1 はじめに

地球温暖化と都市高温化により東京都内においても暑熱化が進行しており、それを緩和する施策（緩和策）や、暑熱化に適応する施策（適応策）のさらなる推進が喫緊課題である。このような中、国土交通省主導で開発された建築環境総合性能評価システム（Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency）ヒートアイランド（CASBEE-HI<sup>1)</sup>）や都の建築物環境計画書制度<sup>2)</sup>などにより、暑熱環境にも配慮した市街地再開発が行われているが、再開発前後の暑熱環境の変化について、十分に評価が為されているとはいえない。

そこで本研究では、2019年度（令和元年度）より、都内の複数の再開発地区を対象として、都市再開発に伴う公開空地の緑地創出等による暑熱環境改善効果を調査している。本稿では、北青山三丁目再開発地区（現名称：ののあおやま）及び四谷駅前再開発地区（現名称：コモレ四谷）を対象に、公開空地に緑地が創出される前後の暑熱環境変化について調査した結果を示す。

## 2 方法

### 2.1 地上気温の現地計測

ののあおやまとコモレ四谷において、2019年と2021

年の各年7月末から9月末までの2ヶ月間、昼夜連続でIoT計測センサ（Sens'it V3；STMicroelectronics製HTS221温度湿度センサ）を用いて気温の常時計測を実施した。ただし、2019年のコモレ四谷については工事の影響で9月上旬から9月末まで計測を行った。使用した計測センサは、手の平サイズであり、バッテリー駆動かつデータ送信機能内蔵（Sigfox回線）のため電源不要・別途通信機器不要であることに加え、防水・防塵対応（IEC規格IP54準拠）である。各再開発事業敷地内部とそれらの隣接市街地の複数箇所に、地上約1.5mの高さにセンサを設置し、1時間または10分間隔で計測を行った。

### 2.2 地表面温度のリモートセンシング（遠隔計測）

ののあおやま及びコモレ四谷付近の暑熱環境を把握するため、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）を搭載し、快晴に近い真夏の晴天日となった2019年8月2日と2021年8月19日の最高気温出現時間に、体感温度に大きく影響する地表面温度の計測を実施した。これは、「物体の表面から放射されるエネルギーは表面温度の4乗に比例する」というシュテファン・ボルツマンの法則を利用して計測したものである。すなわち、地表面から放射される上向き

の赤外放射量を計測し、地表面の放射率が一様に1であると仮定したうえで、地表面温度を推計した。なお、使用したサーモカメラの測定波長帯域は8~14 $\mu\text{m}$ で、測定精度は $\pm 2\%$ である。ヘリコプターの飛行高度は約610mで、その高度から得られる地表面温度計測データの空間解像度は1mである。また、得られた計測データについて、地図に合うように正射投影(位置関係を正確に投影)する補正(オルソ幾何補正)を施した。

### 2.3 暑熱環境の数値シミュレーション

CFD (Computational Fluid Dynamics : 熱流体解析) の数値モデル (アドバンスドナレッジ研究所製 FlowDesigner2022) を使用し、ののあおやま及びコモレ四谷付近の建築物の3次元CADデータ(ゼンリン製3D都市モデルデータ)をモデルに組み込み、各再開発前後のWBGT (Wet Bulb Globe Temperature : 湿球黒球温度) (例えばStull, 2011<sup>3)</sup>; ISO7726, 1998<sup>4)</sup>)等のシミュレーションを実施した。乱流計算には $k-\epsilon$ モデル(乱流エネルギー $k$ と乱流消失率 $\epsilon$ から空気の乱れを計算する数値モデル)を適用した。初期時刻は猛暑日となった2019年8月2日の午前9時であり、初期・境界条件には都心の気象庁観測値(1時間値)を用いた。気温、湿度、日射、地面・壁面からの輻射、風速等の計算に加え、再開発後のシミュレーションでは緑化図面等を参考に各公開空地に相当する領域に樹木を一本一本仮想的に配置し、それらの蒸散作用も計算した。なお、モデルのメッシュサイズ(格子点間隔)は、基本的に3mに設定したが、地面と大気との熱のやりとりの計算精度を向上させるため、高さ方向(Z方向)6m以下については100分割して0.06mとした。

### 2.4 電力消費量データの収集・解析

ののあおやまとコモレ四谷の公開空地における緑地創出が、それらの隣接市街地における夏期の電力消費量に及ぼす影響を調べるため、スマートメーターによる電力消費量データ(グリッドデータバンク・ラボ有限責任事業組合提供)の解析を行った。このデータは、両再開発事業敷地の隣接市街地(無作為に抽出した範囲; 図5参照)でそれぞれ平均した、2019年(再開発竣工前・緑地創出前)と2021年(竣工後・緑地創出後)の7~8月の日別・時別の低圧電力消費量である。

## 3 結果と考察

### 3.1 地上気温計測結果

図1に、ののあおやまとコモレ四谷における公開空地における緑地創出後の地上気温計測結果を示す。いずれも、2021年7月31日~9月30日の期間平均気温である。この図を見ると、ののあおやまでは、公開空地の緑地2地点平均気温が隣接市街地2地点平均気温よりも0.44 $^{\circ}\text{C}$ 低い(図1a)。また、コモレ四谷では、公開空地の緑地2地点平均気温が隣接市街地2地点平均気温よりも0.19 $^{\circ}\text{C}$ 低い(図1b)。すなわち、ののあおやまにおける公開空地緑地と隣接市街地の気温差(気温低下量)は、コモレ四谷のその2倍程度である。ののあおやまの地上部分の緑化面積(5,524 $\text{m}^2$ )はコモレ四谷における地上部分緑化面積(2,846 $\text{m}^2$ )の2倍程度であることから、公開空地への植樹により創出される緑地の規模と、その緑地がもたらす気温低下量は比例することが示唆される。なお、ののあおやまにおいて公開空地緑化前の2019年同期間に実施した気温計測の結果、公開空地に相当する範囲2地点平均の期間平均気温は、隣接市街地2地点平均よりも逆に0.29 $^{\circ}\text{C}$ 高かった(図省略)。

### 3.2 地表面温度リモートセンシング結果

図2は、地上気温の計測とは別に、ののあおやまとコモレ四谷の竣工前(緑地創出前)と竣工後(緑地創出後)に、類似した気象条件下で地表面温度のリモートセンシングを実施した結果である。公開空地に緑地が創出された場所(図2の点線で囲った所)では、真夏炎天下の最高気温出現時間帯の地表面温度(樹冠の表面温度を含む平均値)が、ののあおやまで緑地創出前の43.4 $^{\circ}\text{C}$ から35.4 $^{\circ}\text{C}$ に、コモレ四谷で緑地創出前の46.3 $^{\circ}\text{C}$ から34.3 $^{\circ}\text{C}$ に低下しており、両者を平均すると約10 $^{\circ}\text{C}$ 低下している。このように、公開空地の緑地創出に伴って、図1にみられるような気温の低下に加え、地表面温度の低下が明瞭である。なお、地表面温度の低下は、前述のように地表面から放射される赤外放射の減少を示しており、体感温度の低下につながる。

### 3.3 暑熱環境シミュレーション結果

図3は、ののあおやまの着工前、竣工前(緑地創出前)、竣工後(緑地創出後)の各ケースにおける2019年8月

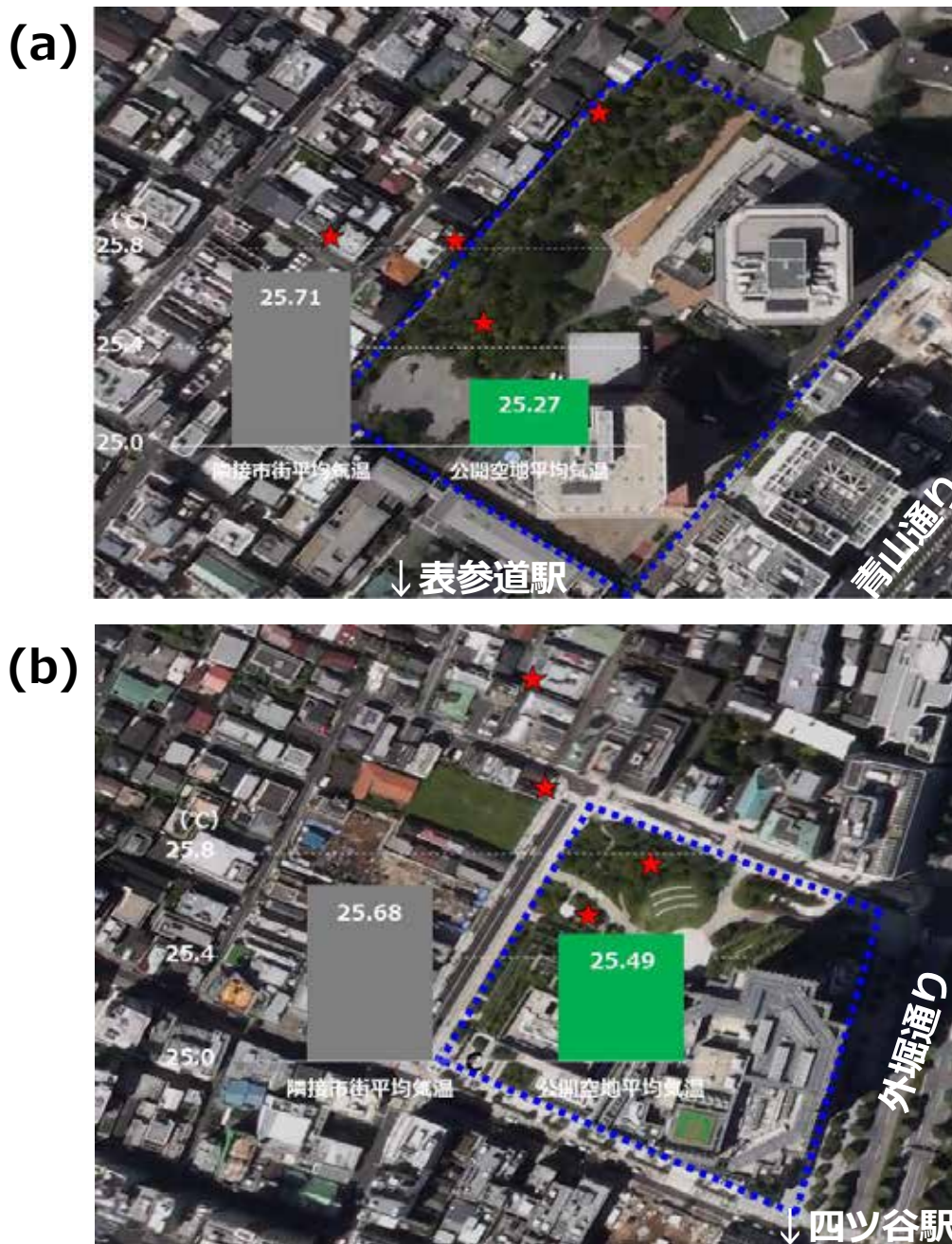


図1 (a)ののあおやまと (b) コモレ四谷における再開発竣工後（緑地創出後）の公開空地緑化箇所2地点と隣接市街地2地点でそれぞれ平均した2021年7月31日～9月30日の期間平均気温(°C). 青色点線は再開発事業敷地範囲.

2日13時30分の地上1.5mの体感温度(WBGT)をシミュレーションした結果である。まず、着工前(図3a)と竣工前(図3b)を比較すると、再開発事業敷地内(黒色点線で囲った所)では新規に建設された2棟の高層ビル近傍でWBGTが低下していることがわかる。また、竣工前(図3b)と竣工後(図3c)を比較すると、再開発事業敷地内では植樹により緑化された公開空地でWBGTの低下が顕

著である。これらの影響により、再開発事業敷地内における竣工後のWBGT(図3c)は、着工前(図3a)に比べて明らかに低くなっており、平均で約0.9°C低下している。さらに、その風下側(北北西側)の隣接市街地(図3a・3cの青色枠線で囲った範囲内)でも、竣工後におけるWBGT(図3c)が着工前(図3a)と比較してやや低くなっており、平均で約0.2°C低下している。これは、植



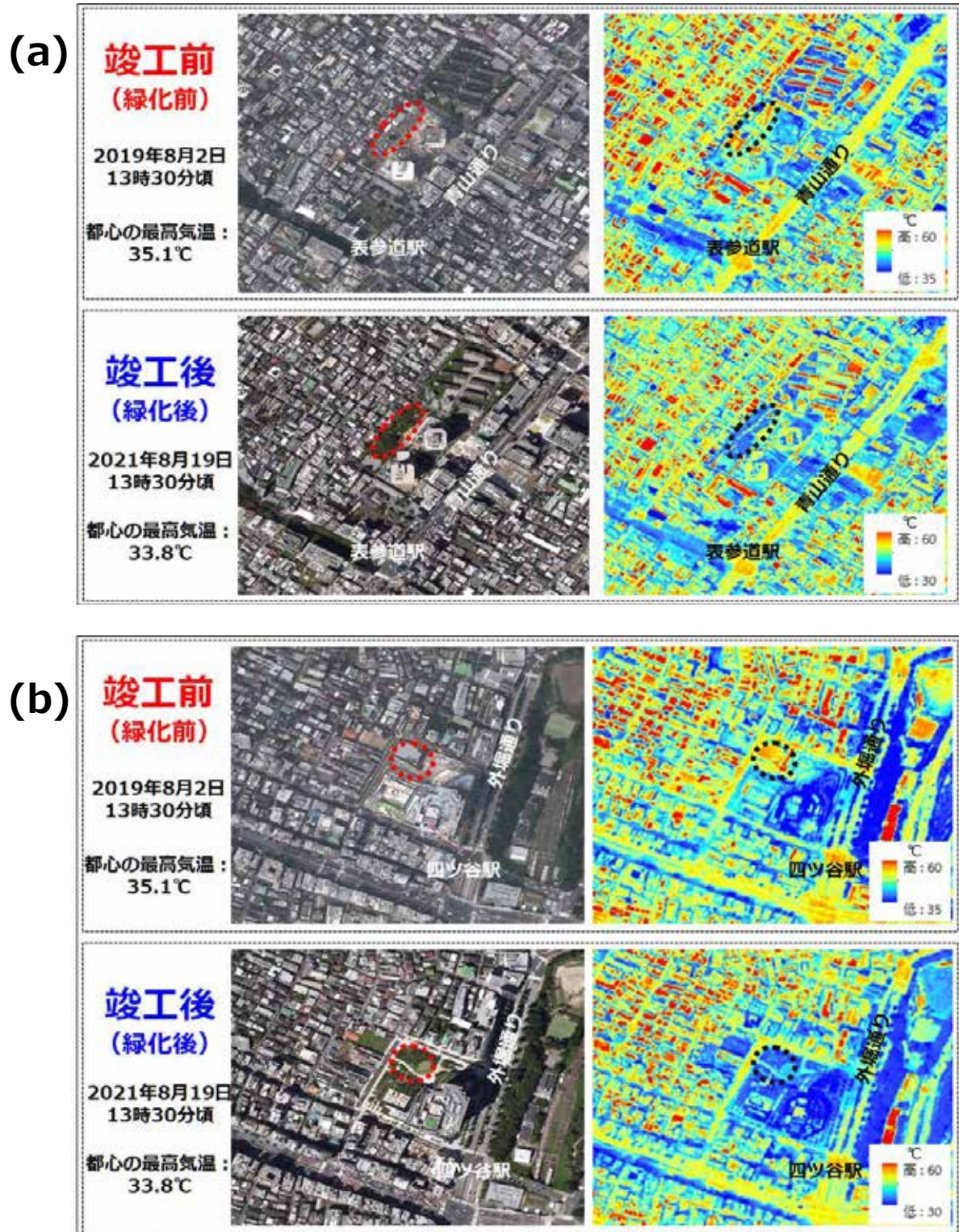


図2 (a)のあおやまと(b)コモレ四谷における竣工前(緑地創出前)と竣工後(緑地創出後)の航空写真(左)と地表面温度(℃)(右)。航空写真上の赤色点線及び地表面温度上の黒色点線は各再開発地区の公開空地における地上部分の緑化範囲を示す。



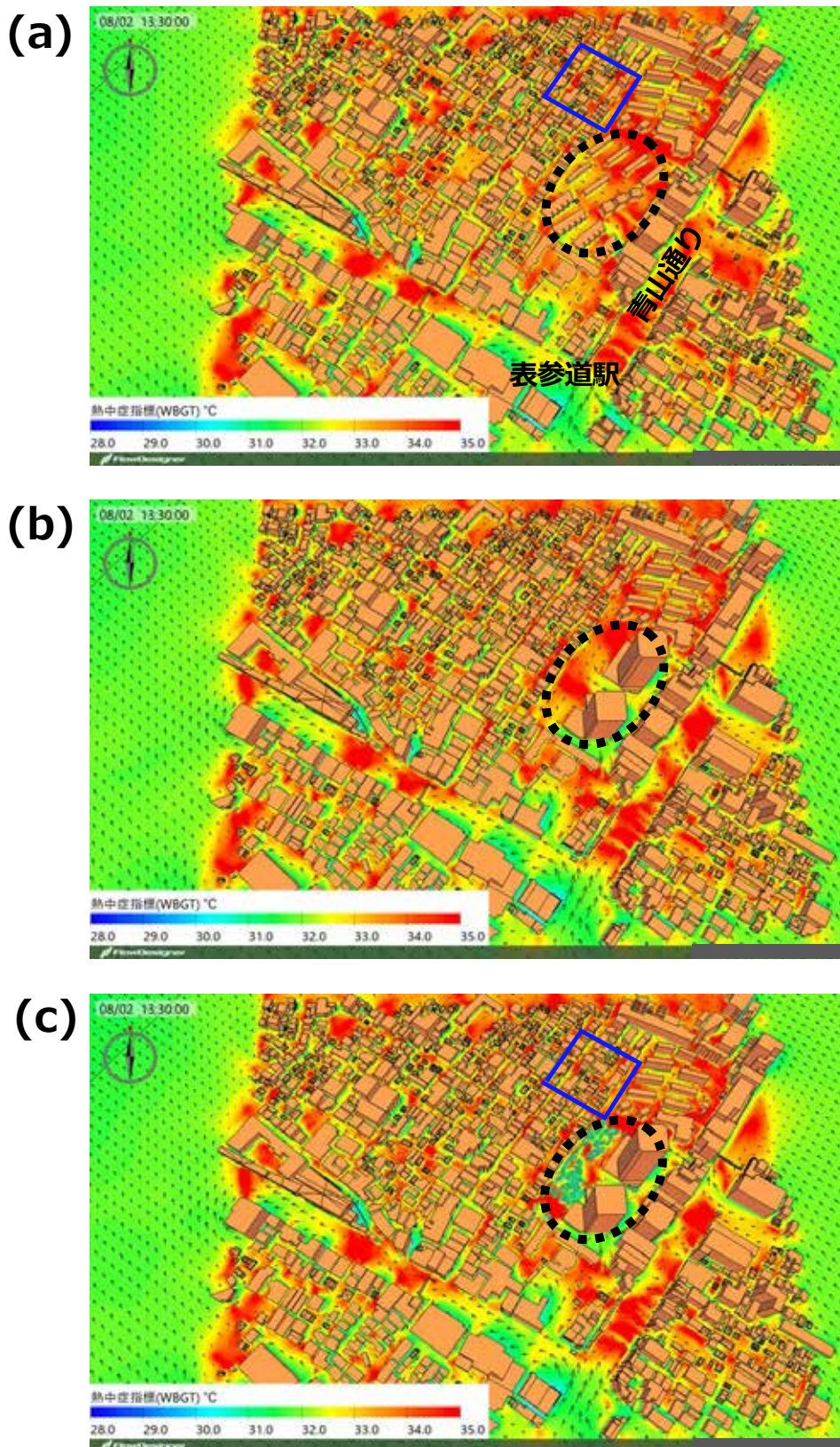
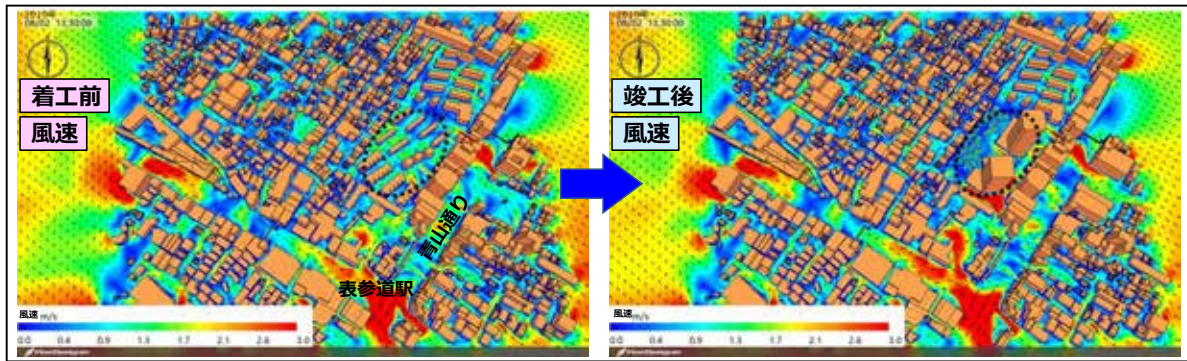


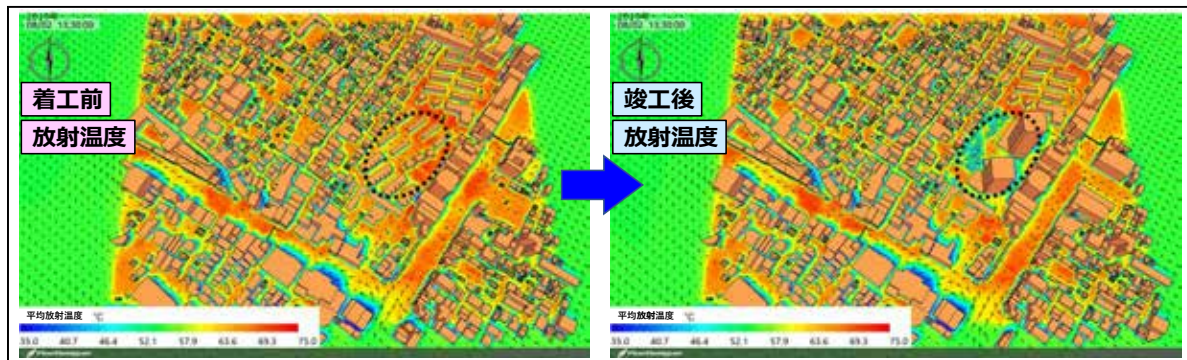
図3 (a)ののあやま着工前, (b)竣工前(緑地創出前), (c)竣工後(緑地創出後)のWBGT(°C)のシミュレーション結果. 2019年8月2日13時30分の地上1.5mのWBGT. 黒色点線は再開発事業敷地範囲を示す. (a)(c)の青色線枠はののあやまの風下側隣接市街地(無作為に抽出した範囲)における平均WBGTの算出範囲.



(a)



(b)



(c)

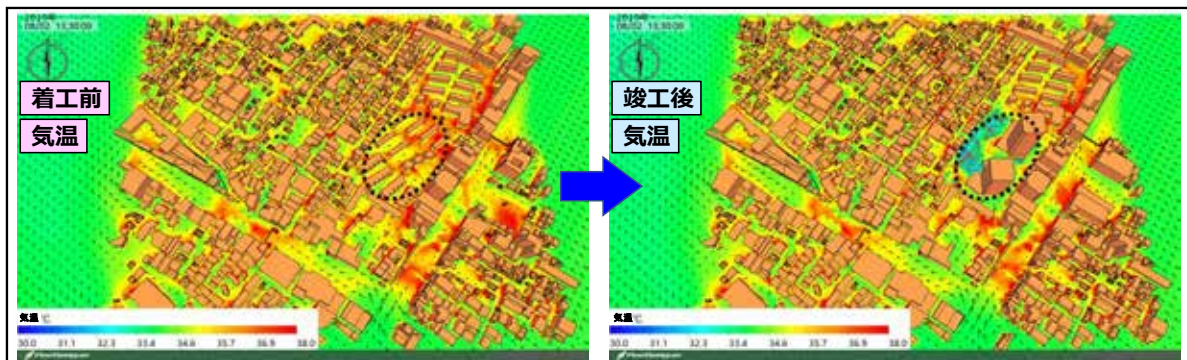


図4 ののあおやま着工前（左）と竣工後（右）における2019年8月2日13時30分の地上1.5mの(a)風速（m/s）、(b)放射温度（°C）、(c)気温（°C）。黒色点線は再開発事業敷地範囲を示す。

樹された樹木の蒸散作用による気温低下等に起因する。これらのことから、公開空地の確保と緑化は、再開発された場所だけではなく、その風下側の隣接市街地における体感温度の低下にもつながり、暑熱環境の改善に有効であると考えられる。

図4は、図3に示したWBGT低下の要因となる、風速、放射温度、気温のシミュレーション結果であり、着工前

と竣工後を比較したものである。まず、風速（図4a）を見ると、再開発事業敷地に新規に建設された2棟の高層ビル近傍で、いわゆるビル風により風速が大きくなっている。一方、公開空地の植樹された場所では、樹木が障害物となることで風速が低下している。この結果、再開発事業敷地全体では竣工後の風速が着工前に比べて平均で0.1m/s低下している。次に、放射温度（図4b）を



(a)



(b)



図5 (a)ののあおやまと(b)コモレ四谷の隣接市街地におけるスマートメーター電力消費量データの収集範囲(赤線で囲った範囲)。

見ると、新規建設された2棟の高層ビル近傍(当該時刻における太陽方位と反対の北東側)にそれらの日陰が形成され、また、公開空地に植樹された各樹木の木陰が形成されることで、日射及び地面・壁面からの赤外放射が減少し、再開発事業敷地全体で放射温度が平均 7.9℃低下している。さらに、気温は再開発事業敷地全体で平均 1.3℃低下している(図4c)。このように、再開発事業敷地内における着工前から竣工後にかけてのWGBTの低下(図3)に対して、放射温度の低下の影響が最も大きくなっている。

なお、これらの数値シミュレーション結果は計測結果と整合的であり、また、コモレ四谷についても、ののあおやま(図3・図4)と同様のシミュレーション結果が得られている(図省略)。

### 3.4 電力消費量解析結果

ここまで、公開空地における緑地創出が暑熱環境の改善に寄与することを示してきたが、さらに、それが隣接市街地の電力消費量に及ぼす効果を調査した。

図5に示す隣接市街地の範囲について、緑地創出前(2019年)と緑地創出後(2021年)の日電力消費量の平均値と、図1の各計測地点で平均した日最高気温の関係を解析したところ、ののあおやま隣接市街地・コモレ四谷隣接市街地ともに、両者の相関は、緑地創出前が0.5前後であるのに対して、緑地創出後は0.9を超える強い正の相関が認められ、また、緑地創出後のほうが緑地創出前よりも電力消費量が多い傾向がみられた。(現時点ではデータ提供元の規定により具体的な電力消費量の数値は公開不可のため、本稿では

解析結果の図を非掲載としている。) なお、時別の電力消費量を用いた解析においても、緑地創出前後で電力消費量の減少は認められなかった。これは、2020年春季から続く新型コロナウイルス感染拡大による外出自粛により、2021年夏期の空調機器の使用が2019年夏期よりも大きく増加した影響を受けているためであると考えられ、今後、再開発に伴う公開空地の緑地創出による電力消費量への影響を明らかにするためには、感染収束後のデータ等も収集し解析を行っていく必要がある。

#### 4 まとめ

7月末～9月末の2ヶ月間にわたる地上気温の現地計測の結果、公開空地に緑地が創出された場所の期間平均気温は、ののあおやまでは隣接市街地に比べて0.44℃、コモレ四谷では隣接市街地に比べて0.19℃低く、2倍程度の差がある。ののあおやまにおける地上部分の緑化面積はコモレ四谷のその2倍程度であることから、公開空地への植樹による緑地創出の規模と、その緑地がもたらす気温低下量は比例することが示唆される。さらに、ヘリコプターにサーモカメラを搭載して実施したリモートセンシングの結果、公開空地に緑地が創出された場所では地表面温度（地表面から放射される赤外放射エネルギー）の大幅な低下がみられた。

また、再開発事業敷地内では、①建物高層化に伴う風速の増大（ビル風）、②高層ビルの日陰形成と樹木の木陰形成に伴う日射及び地面・壁面からの赤外放射の減少、③樹木の蒸発散による気温低下により、WBGTが大幅に低下したことが数値シミュレーションの結果から示された。さらに、再開発事業敷地の風下側の隣接市街地においても、公開空地の樹木の蒸散作用による気温低下が要因となり、WBGTがやや低下することが示された。

加えて、公開空地の緑地創出が隣接市街地の電力消費量に及ぼす効果について調査するため、再開発竣工前後のスマートメーター電力消費量を収集し、そのデータと気温の現地計測データを比較解析したが、新型コロナウイルス感染拡大に伴う外出自粛によるものと思われる電力消費量の増加の影響により、両者の関係は未解明である。今後、感染収束後の電力消費量データ等を収集して解析を行う必要があると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 一般社団法人日本サステナブル建築協会：建築物環境総合性能評価システム CASBEE-HI 評価マニュアル（2017年版），153 pp（2017）
- 2) 東京都環境局：建築物環境計画書制度，  
<https://www7.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/building>（2020）
- 3) Stull：Wet-Bulb temperature from relative humidity and air temperature, Journal of Applied Meteorology and Climatology, 50, 2267-2269（2011）
- 4) ISO7726：Ergonomics of the thermal environment -Instruments for measuring physical quantities,  
<https://www.iso.org/standard/14562.html>（1998）