



The Canon Institute for Global Studies

CIGS Working Paper Series No. 26-024J

## 日本の日射強度の増大と体感温度への影響

全国の長期観測、東京・大阪の晴天時の日射、人体と路面の熱収支による試算

杉山 大志（キャノングローバル戦略研究所 研究主幹）

2026. 9. 8.

※Opinions expressed or implied in the CIGS Working Paper Series are solely those of the author, and do not necessarily represent the views of the CIGS or its sponsor.  
※CIGS Working Paper Series is circulated in order to stimulate lively discussion and comments.  
※Copyright belongs to the author(s) of each paper unless stated otherwise.

General Incorporated Foundation

**The Canon Institute for Global Studies**

一般財団法人 キャノングローバル戦略研究所

Phone: +81-3-6213-0550 <https://cigs.canon/>

# 日本の日射強度の増大と体感温度への影響

全国の長期観測、東京・大阪の晴天時の日射、人体と路面の熱収支による試算

杉山大志 キヤノングローバル戦略研究所

2026 年 9 月 8 日

## 平易な概要

日本では地表に届く日射量が広い範囲で増えている。東京では 8 月の日射量は過去 50 年で 26.3%も増加した。正午前後に限って晴天時の日射強度を比較すると、1989～1998 年から 2016～2025 年に東京で 12.1%、大阪で 18.7%増えていた。この日射強度の増加に加え、照り返しと路面温度の上昇による赤外線放射を考慮すると、体感温度 AT は東京で約 1.4℃、大阪で約 2.1℃上昇すると試算された。二つの比較期間の中央年の差 27 年で換算すると、東京では約 0.52℃/10 年、大阪では約 0.79℃/10 年に相当する。晴天時の日射が強くなり、気温の上昇に加わる形で、屋外の暑さを厳しくする要因となっていることが示された。

## 要約

全国の 1982～2025 年の観測を比較すると、通年では 46 地点中 45 地点、8 月では 43 地点で全天日射量が増加傾向にあった。増加は一様ではなく、東京・大阪では 10 年当たり約 8～10 W/m<sup>2</sup>と大きく、北海道などには小さい地点や減少した地点もある。

東京・大阪の 7～17 時を対象に、日照がほぼ途切れない時間帯を選び、時刻と季節の構成をそろえると、1989～98 年から 2016～25 年に晴天時の日射強度はそれぞれ 12.2%、18.5%増えていた。1975 年まで遡って雲量の少ない日の日射量を比較した結果も、晴天時の日射強度が強まったことを示唆する。日射量の増加には、晴れる時間の増加に加えて、晴れている間の日射強度の強まりが寄与している。

正午前後の暑さへの影響を調べるため、11～13 時における晴天時の 1 時間平均日射強度を別途集計した。同じ二つの期間の差は、東京で 93.2 W/m<sup>2</sup> (12.1%)、大阪で 140.8 W/m<sup>2</sup> (18.7%)であった。この増加量を人体と路面の熱収支計算に用いると、体感温度 AT の上昇は東京で 1.41℃、大阪で 2.13℃となった。なお一方では、日照時間も増加していることから、日射を受ける時間や路面の蓄熱への影響が別途考えられる。

本稿の特長は、全国の日射量の長期変化を整理するとともに、東京・大阪の正午前後の観測から日射強度の増加量を求め、気温上昇とは区別して体感温度への影響を試算した点にある。

# 目次

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 平易な概要.....                    | 1  |
| 要約 .....                      | 1  |
| 1. 全国で進む日射量の増加.....           | 4  |
| 1.1 全国の観測から何が分かるか .....       | 4  |
| 1.2 増加の大きさには地域差がある .....      | 7  |
| 1.3 日射量、日射強度および日照時間 .....     | 7  |
| 2. 東京・大阪での 8 月の日射量の増加.....    | 8  |
| 2.1 8 月の日射量は長期的に増えた .....     | 8  |
| 2.2 日照条件をそろえても日射は強まっている ..... | 8  |
| 2.3 1975 年まで遡る雲量による確認 .....   | 9  |
| 3. 日射増加は体感温度をどれほど上げるか .....   | 10 |
| 3.1 正午前後の観測に基づく計算 .....       | 10 |
| 3.2 路面がさらに熱くなる効果.....         | 10 |
| 3.3 この試算が示す暑さの大きさ .....       | 11 |
| 3.4 日照時間の増加による影響.....         | 12 |
| 4. 本稿の成果と今後の検証.....           | 12 |
| 付録 A 人口密度・SPM との関係を探る分析 ..... | 13 |
| A.1 人口密度のデータ .....            | 13 |
| A.2 SPM 濃度のデータ .....          | 13 |
| A.3 相関の比較方法.....              | 14 |
| A.4 人口が集積する地点ほど日射が増えたか.....   | 14 |
| A.5 過去の SPM 濃度と、その後の低下幅.....  | 14 |
| A.6 条件を変えた場合 .....            | 16 |
| A.7 結果の解釈 .....               | 16 |
| A.8 統計と標本の補足.....             | 17 |
| 付録 B 日射の集計方法と観測の連続性 .....     | 19 |

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| B.1 全国の月別データ .....          | 19 |
| B.2 東京・大阪の毎時値と雲量による選別 ..... | 19 |
| B.3 移設と測器の変更.....           | 20 |
| 付録 C 体感温度計算の式と設定 .....      | 22 |
| 付録 D 暑さ指数（WBGT）による試算 .....  | 24 |
| D.1 計算方法と条件.....            | 24 |
| D.2 計算結果.....               | 24 |
| 参考文献・データ出所.....             | 26 |

# 1. 全国で進む日射量の増加

## 1.1 全国の観測から何が分かるか

気温が同じでも、日なたは日陰より暑い。長期的に地表へ届く日射が強くなっているならば、屋外で感じる暑さの変化を気温だけで評価することはできない。筆者は以前、東京の 8 月の日射量について、1975～2025 年の直線トレンドの両端を比べると約 26%増加していると指摘した [\[1\]](#)。本稿では対象を全国に広げ、晴天時の日射強度の変化を確かめ、体感温度への影響も検討する。

全国の分布を示した図 1a・図 1b は、1982～2025 年の全天日射量の変化を、通年と 8 月に分けて示す。気象庁で継続観測中の国内 48 地点のうち、長期系列のそろそろ 46 地点を比較した [\[2\]](#)。各年の観測値に直線を当てはめ、10 年あたりにどれほど増えたかを色で表している。赤・紫に近いほど増加が大きく、白付近は変化が小さく、青は減少を示す。

通年では 46 地点中 45 地点、8 月では 43 地点で傾きが正だった。各地点を等重みにした平均の増加量は、通年で約 3.7、8 月で約 3.5 W/m<sup>2</sup>/10 年である。つまり、増加は、全国の多くの地点に共通している。

## 通年

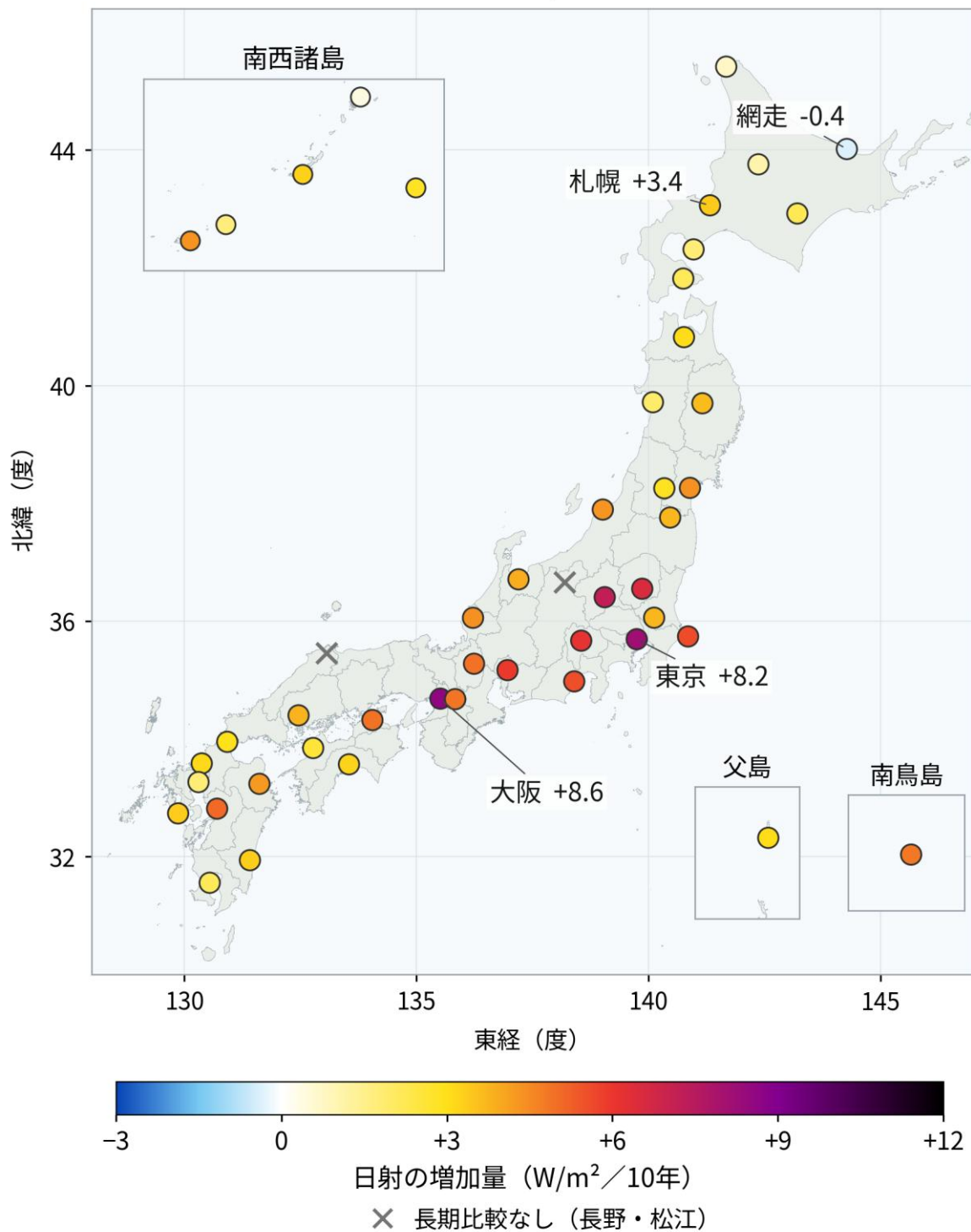


図 1a 全天日射量の増加量：通年、1982～2025 年。単位  $\text{W/m}^2/10\text{年}$ 。0 は白、正側は黄・赤・紫・黒、負側は水色・青。目盛りは正負とも 3 刻みの線形尺度。長野・松江は長期比較の対象外。色は統計的有意性を示さない。出所：気象庁観測値 [\[2\]](#) から計算。海岸線は国土地理院「地球地図日本」[\[3\]](#) 由来のデータを加工。離島は別枠に表示。

8月

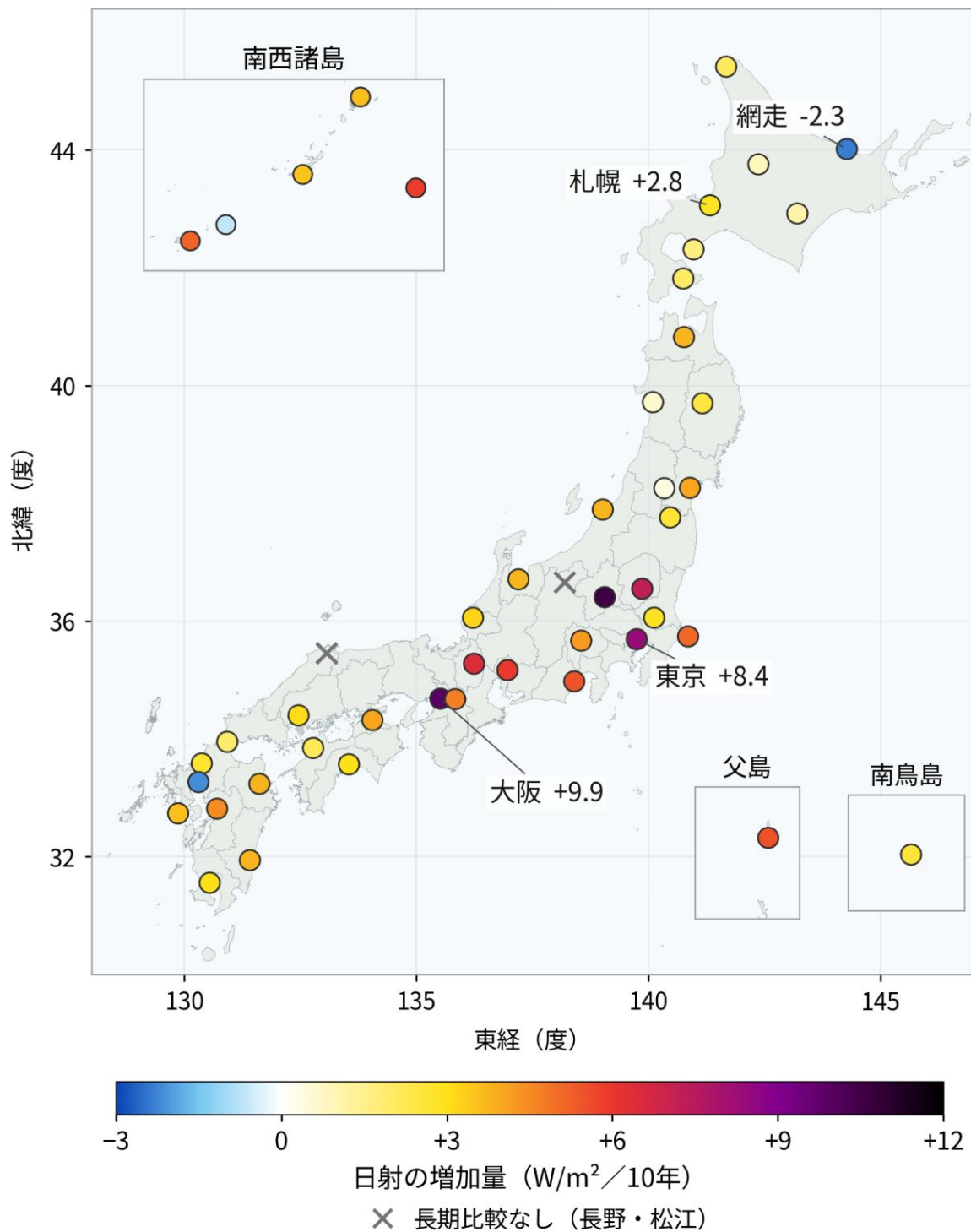


図 1b 全天日射量の増加量：8 月、1982～2025 年。単位  $\text{W/m}^2/10\text{ 年}$ 。図 1a と同じ色尺度で、正負の 1  $\text{W/m}^2/10\text{ 年}$  当たりの目盛り幅は等しい。長野・松江は長期比較の対象外。色は統計的有意性を示さない。出所：気象庁観測値 [\[2\]](#) から計算。海岸線・離島の表示は図 1a と同じ。

## 1.2 増加の大きさには地域差がある

通年の増加が最も大きいのは大阪の+8.6 W/m<sup>2</sup>/10 年で、東京の+8.2 が続く。前橋、宇都宮、甲府、名古屋などでも増加が大きい。8 月では前橋の+10.6、大阪の+9.9、東京の+8.4 が大きく、関東から近畿にかけて増加の大きい地点が目立つ。

一方、北海道では札幌が通年+3.4、8 月+2.8 なのに対し、網走は通年−0.4、8 月−2.3 である。北海道 7 地点の平均は通年約+1.6、8 月約+1.2 で、全国の地点平均より小さい。北海道が一様に減少しているわけではないが、増加の大きさには本州の一部と明瞭な違いがある。

| 地点       | 通年の増加量 | 8 月の増加量 |
|----------|--------|---------|
| 東京       | +8.2   | +8.4    |
| 大阪       | +8.6   | +9.9    |
| 前橋       | +7.2   | +10.6   |
| 宇都宮      | +6.5   | +7.2    |
| 名古屋      | +5.9   | +5.9    |
| 札幌       | +3.4   | +2.8    |
| 網走       | −0.4   | −2.3    |
| 46 地点の平均 | +3.7   | +3.5    |

表 1 主な観測地点の全天日射量トレンド、1982～2025 年。単位 W/m<sup>2</sup>/10 年。最下段は地点を等重みにした平均で、国土面積で重み付けした平均ではない。数値は丸めている。

例えば 10 年当たり+8 W/m<sup>2</sup>という傾きが続くと、1982 年から 2025 年までの 43 年間に約 34 W/m<sup>2</sup>増える計算になる。東京・大阪では、長期の日射変化を考えるうえで無視できない大きさである。

## 1.3 日射量、日射強度および日照時間

全天日射量は、水平面に届く直射日光と天空からの散乱光の合計である。図 1 および図 2 では、観測データの日合計を 24 時間平均の W/m<sup>2</sup>に換算して比較したが、これは、晴れている時間の長さ、その間の日射の強さの両方で変わる。「日照時間」は日が照っていた時間であり、「日射強度」は届く光のエネルギーの強さである。この二つを分けて調べる必要がある。

なお、地表に届く日射の増加の理由は、雲やエアロゾルの変化などによると考えられる [\[4\]](#) が、その要因の探索は付録 A で扱う。以下本稿では、観測された日射の変化と暑さへの影響に焦点を絞る。

全国比較は 1970 年代の日射計変更などを避けて 1982 年からとしたが、観測環境の影響を完全に取り除いた均質化済み系列ではない。Ma et al. [\[5\]](#) は異なる期間・手法の均質化済み系列で

日射の長期増加を報告している。データの定義、観測履歴、先行研究との違いは付録 B にまとめる。

## 2. 東京・大阪での 8 月の日射量の増加

### 2.1 8 月の日射量は長期的に増えた

東京・大阪の 8 月の月平均日射量を 1975 年から 2025 年まで並べると、年ごとの大きな上下動の中に、長期的な増加が見える（図 2）。全 51 年間の観測値に当てはめた直線の両端を比べると、東京は 26.3%、大阪は 27.0% 増えている。二つの都市ではほぼ同じ規模の増加が観測される。

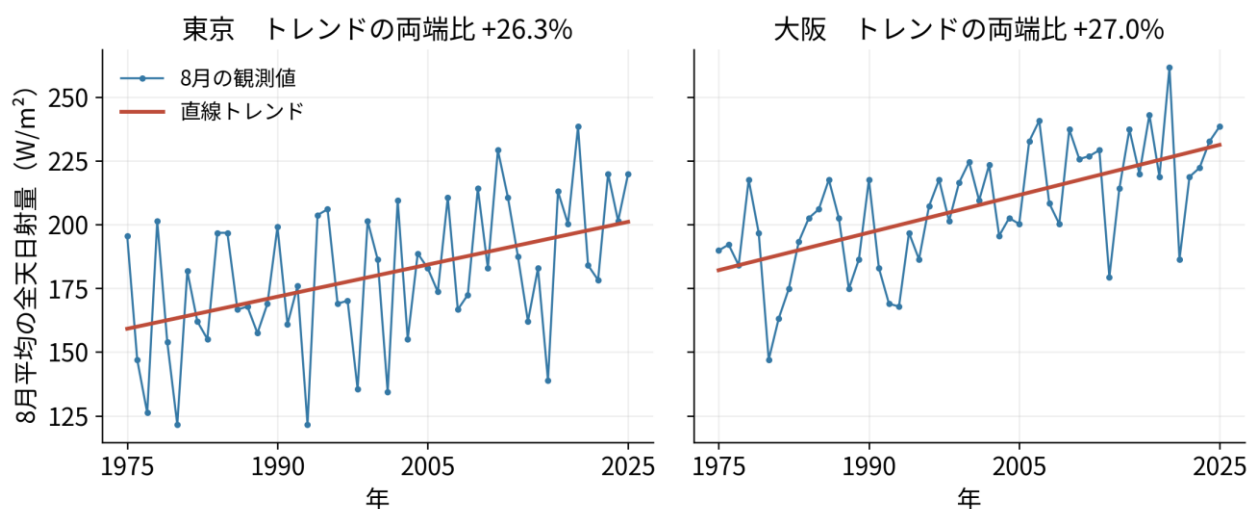


図 2 東京・大阪の 8 月の全天日射量、1975～2025 年。各年 8 月の日合計平均を 24 時間平均の  $\text{W/m}^2$  に換算。直線トレンドの 1975 年値と 2025 年値の比は東京+26.3%、大阪+27.0%。出所：気象庁観測値 [\[2\]](#) から計算。

では、単に晴れる時間が長くなったのだろうか。それとも、晴れている間の日射が強くなったのだろうか。この違いを調べるため、毎時データから日照がほぼ途切れない時間帯を選んで比較した。

### 2.2 日照条件をそろえても日射は強まっている

1 時間中 0.9 時間、すなわち 54 分以上の日照がある時間帯を抽出した。さらに、時刻と 8 月の上旬・中旬・下旬の構成をそろえ、太陽高度や観測時刻の偏りが比較を左右しないようにした。1989～98 年と 2016～25 年を比較すると、東京では、日射強度が約 578 から 648  $\text{W/m}^2$  へ 12.2%、大阪では約 565 から 670  $\text{W/m}^2$  へ 18.5% 増えていた（図 3）。

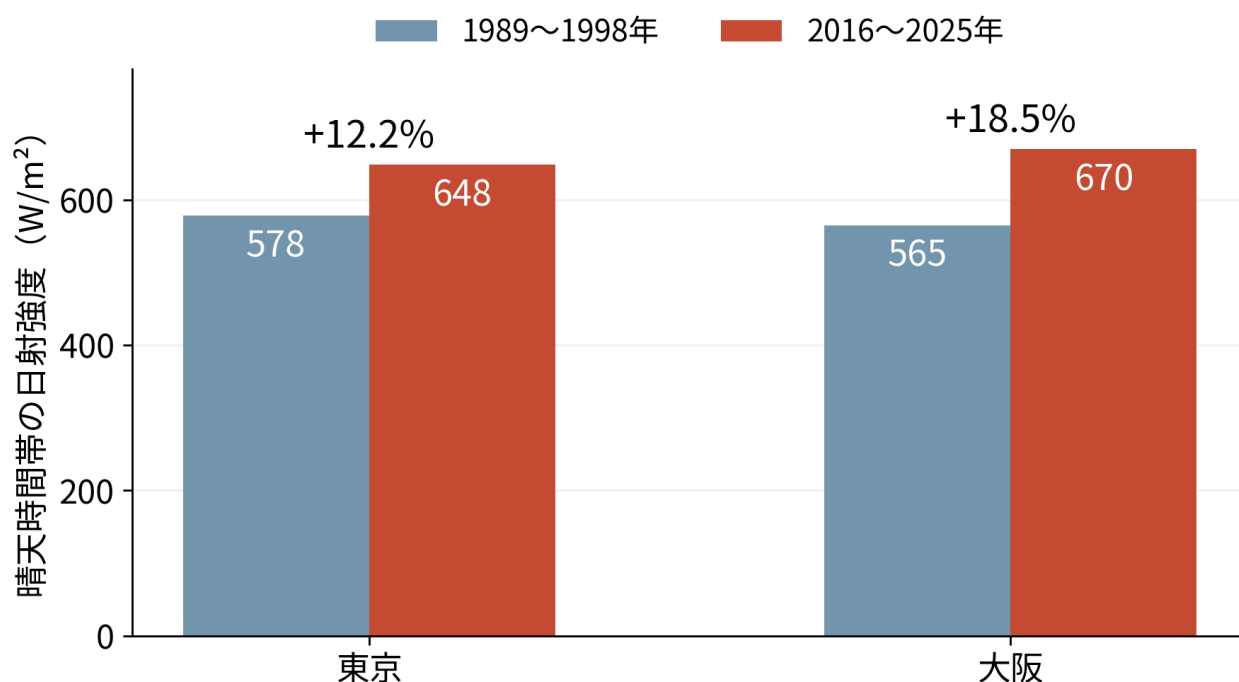


図3 日照条件・時刻・旬の構成をそろえた8月の日射強度。1時間の日照時間0.9時間以上、7～17時JSTを対象とする標準化した期間平均。正午だけの値ではない。出所：気象庁の毎時観測値 [\[2\]](#) から計算。

なお、同じ期間の8月の日照時間は東京で6.3%、大阪で8.8%増えている。つまり東京も大阪も、良く晴れるようになり、また晴れた場合の日射は強くなっている。

## 2.3 1975年まで遡る雲量による確認

毎時の日射を同じ方法で比較できる公開データは、今回の取得範囲では1989年以降だった。そこで、1975年まで遡れる日別の日射と雲量を用い、別の方法でも確認した。9時・12時・15時の雲量がいずれも空の半分以下の日を選び、日付による太陽条件の違いを補正して比較した。

1975～85年から2015～25年に、選んだ日の日射強度は東京で14.4%、大阪で16.1%増えている。図3の分析に加えて、雲量を使っても増加傾向が一致していることが示された。

| 比較方法と期間                      | 東京     | 大阪     |
|------------------------------|--------|--------|
| 月平均の日射量直線トレンド両端比、1975→2025   | +26.3% | +27.0% |
| 晴天時間帯の日射強度、1989～98→2016～25   | +12.2% | +18.5% |
| 同期間の8月の日照時間                  | +6.3%  | +8.8%  |
| 雲量で選んだ日の日射強度、1975～85→2015～25 | +14.4% | +16.1% |

表2 東京・大阪の8月の日射と日照時間。比較期間・選択条件・推定対象が異なるため、各行の増加率は足し引きできない。

なお以上において、増加幅の正確な推定には観測環境や条件選択が影響する。これについて詳しくは付録Bにまとめた。

### 3. 日射増加は体感温度をどれほど上げるか

#### 3.1 正午前後の観測に基づく計算

正午前後の暑さを評価するため、8月の11～13時について、晴天時の日射強度を1989～1998年と2016～2025年で比較した。日照時間が1時間当たり0.9時間以上の観測値を選び、1時間の日射積算量を平均日射強度 ( $\text{W/m}^2$ ) に換算した。時刻と旬の構成をそろえて求めた期間平均は、東京で771.1から864.3  $\text{W/m}^2$ 、大阪で753.6から894.4  $\text{W/m}^2$ へ増加した(表3)。以下の計算には、それぞれの差である93.2  $\text{W/m}^2$ と140.8  $\text{W/m}^2$ を用いる。月平均日射量の増加率26.3%を正午の日射強度に当てはめる操作は行わない。

表3 正午前後の晴天時の日射強度。8月の11～13時における1時間平均値を、時刻と旬の共通構成で平均した。

| 地点 | 1989～1998年<br>$\text{W/m}^2$ | 2016～2025年<br>$\text{W/m}^2$ | 増加量<br>$\text{W/m}^2$ | 増加率   |
|----|------------------------------|------------------------------|-----------------------|-------|
| 東京 | 771.1                        | 864.3                        | 93.2                  | 12.1% |
| 大阪 | 753.6                        | 894.4                        | 140.8                 | 18.7% |

計算では、太陽高度70度、立位で身体の向きを平均した人体、短波吸収率0.7、地面反射率0.3、全天日射に占める散乱光の割合0.25を想定した。気温・湿度・風速は比較する二つの条件で同じとし、10m高度の風速を2 m/sとした。この条件では、人体が追加的に吸収する短波放射は、全身表面積当たり東京で18.27  $\text{W/m}^2$ 、大阪で27.60  $\text{W/m}^2$ となる。人体形状の扱いはSolarCalの方法を参照した[\[6\]](#)。

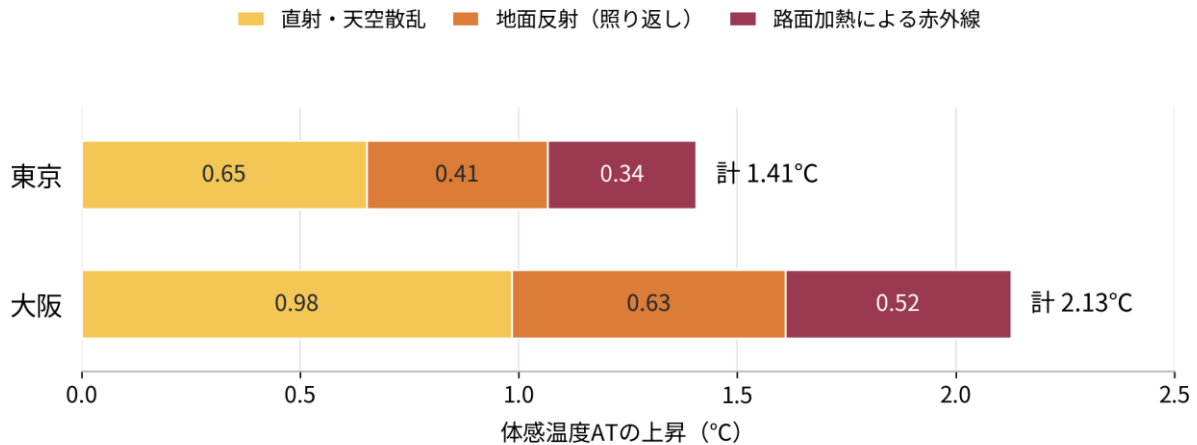
オーストラリア気象局[\[7\]](#)が示す日射を含む体感温度ATの式によれば、この短波放射の増加は東京で1.07°C、大阪で1.61°Cの上昇に相当する。内訳は、直射と天空散乱が東京で0.65°C、大阪で0.98°C、地面が反射した日射がそれぞれ0.41°C、0.63°Cである。したがって、これらの値には短波の照り返しが含まれている。

別の熱環境指標であるUTCI[\[8\]](#)でも補助計算を行った。気温33°C、相対湿度60%、風速2 m/s、背景となる長波の平均放射温度33°Cという設定では、短波放射の増加によるUTCIの上昇は東京で0.72°C、大阪で1.09°Cとなった。ATとUTCIは計算方法と尺度が異なるため、同じ放射の増加に対する換算値は一致しない。また、平均放射温度の変化を、そのまま体感温度の変化とみなすことはできない。

#### 3.2 路面がさらに熱くなる効果

日射が強くなると、路面が吸収する熱も増える。地面反射率を0.3とすると、路面への追加の吸収は東京で65.3  $\text{W/m}^2$ 、大阪で98.6  $\text{W/m}^2$ となる。この熱は、対流、地中への伝導・蓄熱、および路面温度の上昇に伴う赤外線放射の増加に配分される。

増加前の路面温度を 45°C、放射率を 0.95 とし、対流・伝導・蓄熱をまとめた放射以外の有効係数  $H$  を 10～30 W/m<sup>2</sup>/K とした。中心設定の  $H=20$  W/m<sup>2</sup>/K で熱収支を解くと、路面温度の上昇は東京で 2.42°C、大阪で 3.64°Cとなる。路面からの赤外線放射の増加を人体の吸収量に換算すると、AT への追加分はそれぞれ 0.34°C、0.52°Cである。熱収支式は路面温度モデルの先行研究を参照した [9]。  $H$  の範囲は実測から推定したものではなく、本稿の感度分析のために設定した。



1989～1998年と2016～2025年の8月・11～13時を比較  
 気温・湿度・風速などを固定した試算。路面の有効係数  $H=20$  W/m<sup>2</sup>/K。

図4 正午前後の日射強度の増加による体感温度 AT の上昇。1989～1998 年と 2016～2025 年の 8 月・11～13 時の観測差（東京 93.2 W/m<sup>2</sup>、大阪 140.8 W/m<sup>2</sup>）を用いた。風速 2 m/s、地面反射率 0.3、路面の有効係数  $H=20$  W/m<sup>2</sup>/K などの中心設定による試算。合計は四捨五入前の値から算出した。

以上を合計すると、中心設定における AT の上昇は東京で 1.41°C、大阪で 2.13°Cとなる。路面の有効係数  $H$  を 10～30 W/m<sup>2</sup>/K の範囲で変えると、東京で 1.31～1.61°C、大阪で 1.99～2.43°Cとなった。この幅は、路面の熱輸送に関する仮定を変えた計算結果の幅であり、統計的な信頼区間ではない。人体の吸収率、風速、姿勢、周囲の形状を変えた場合にも結果は変わる。

### 3.3 この試算が示す暑さの大きさ

正午前後の晴天時の日射強度は、東京・大阪のいずれでも比較した二つの期間の間に増加していた。この観測差を人体と路面の熱収支に与えると、気温・湿度・風速が同じでも、中心設定では東京で約 1.4°C、大阪で約 2.1°Cの AT 上昇が生じる。日射強度の変化を考慮することは、気温だけでは捉えられない屋外の暑さを評価するうえで意味がある。

ただし、この値は 1989～1998 年と 2016～2025 年の観測差に基づく条件付きの試算であり、1975 年以降の体感温度上昇を表すものではない。実際の気温・湿度・風速の変化や、建物壁面の加熱は含めていない。路面の蓄熱も一定の係数で近似している。さらに、日射に占める直射と散乱光の比率、観測機器や観測環境の変化には不確実性が残る。したがって、実際の体感温度がこの数値だけ上昇したと断定することはできない。

### 3.4 日照時間の増加による影響

第2章で示したように、8月の日照時間も、1989～1998年と2016～2025年の比較で東京では6.3%、大阪では8.8%増加している。日射強度が同じでも、日照時間が長くなれば日積算日射量は増える。屋外で日射を受ける時間が長くなり、路面や建物への日中の熱の蓄積が増す可能性もある。

一方、月間の日照時間だけでは、どの時間帯の日照が増えたかは分からない。このため、日照時間の増加率を正午のAT上昇に加算することはしていない。本章の試算は正午前後の日射強度の増加による影響を示すものであり、日照時間の変化に伴う曝露時間や蓄熱への影響は、別途検討する必要がある。

## 4. 本稿の成果と今後の検証

全国の多くの地点で全天日射量が増加し、東京・大阪では晴天時の日射強度も増していた。正午前後の11～13時に限った比較でも、1989～1998年から2016～2025年に東京で12.1%、大阪で18.7%の増加が認められた。この時間帯の日射強度の増加量を用いた熱収支計算では、日射、地面反射、路面加熱によるATの上昇は、中心設定で東京1.41℃、大阪2.13℃となった。これは、気温が同じでも日射の長期的な変化が屋外の暑さに影響することを、観測差に基づいて定量的に示したものである。

日本の晴天時の日射増加はKudo et al. [\[10\]](#) が、体感暑熱指標の長期上昇はHiroki et al. [\[11\]](#) が既に報告している。後者は気温・放射・湿度・風の変化を含めたUTCIを扱う。本稿の特徴は、2025年までの日射観測を整理し、東京・大阪の晴天時の変化を確認したうえで、気温上昇とは分けた日射の影響を、人体と路面の熱収支から具体的に示した点にある。

今後は、移設や測器変更の前後の比較により観測系列の連続性を検証するとともに、直射と散乱光を分けた観測から放射負荷の変化を確かめる必要がある。また、路面温度と人体が受ける放射を実測し、日照時間の変化と路面の蓄熱を時間別に扱うことで、実際の屋外熱環境に近い評価が可能となる。日射強度と日照時間の両方の変化を、暑さの長期的な評価に組み込むことが課題である。

## 付録 A 人口密度・SPM との関係を探る分析

本付録の相関分析からは、日射増加を一貫して説明できる人口密度や SPM との関係、および各要因の独立した寄与は明確になっていない。通年には正の相関が見られる一方、8 月には SPM 低下幅との明確な相関が見られず、人口との相関も尺度や東京・大阪の扱いに左右される。従って、これらを本文の中心的な結論や、日射増加の原因を確定する証拠とはしない。得られた数値と制約を、今後の検証のために以下へまとめる。

### A.1 人口密度のデータ

主指標は、国土数値情報の 500m メッシュに収録された 2020 年国勢調査に基づく人口である。2024 年版のデータにある 2020 年基準人口だけを使い、将来推計人口は使わない。この基準人口には不詳属性の補完と市区町村総数への調整が含まれる [\[12\]](#) [\[13\]](#)。

観測地点の固定座標から半径 25km 以内に中心があるメッシュの人口を合計し、円全体の面積で割った。分母には海面も含むため、行政区域の人口密度や陸地面積当たりの密度とは一致しない。半径 10km・50km でも同じ計算を行った。全国 47 都道府県を結合したメッシュ人口の総計は、国勢調査総人口 126,146,099 人と丸め誤差内で一致した。

2020 年の人口密度は現在の都市集積を表し、1982 年当時の人口を直接測った値ではない。この制約を補うため、GHS-POP の 1980 年推計も参考にした [\[14\]](#)。ただし、日本の同推計は 2010 年市区町村人口などの空間配分に基づき、独立した 1980 年の国勢調査メッシュではない。小離島の配分にも不整合があり、父島を欠測として扱った 45 地点の補助分析にとどめた。

### A.2 SPM 濃度のデータ

国立環境研究所「環境展望台」の大気汚染常時監視データから、1982～86 年度と 2019～23 年度の SPM 濃度を取得した [\[15\]](#)。一般環境大気測定局のうち環境基準適用局を対象とし、沿道の自動車排出ガス測定局などは除いた。主比較では、両期間とも利用できる同一局コードの測定局を使う。

年平均は年間 6,000 時間以上、8 月平均は月の 80%以上の測定時間を条件とした。各局が各 5 年間のうち 3 年以上を満たす場合に期間平均を求め、その局別平均を日射地点の 25km 圏内で等重みに平均した。低下幅は、通年では「1982～86 年度平均－2019～23 年度平均」、8 月では同じ各年の 8 月平均の差とし、正なら SPM が減ったことを表す。通年の日射には年平均 SPM、8 月の日射には 8 月の SPM を対応させた。SPM 年値は 4 月～翌 3 月の年度平均 [\[16\]](#) であり、日射の暦年平均とは厳密な期間が異なる。また、利用した SPM は 2023 年度までであり、日射トレンドの終点 2025 年と一致していない。

1980 年代前半は SPM 観測網が整備途上だった。半径 25km の同一局条件で長期の日射と比較できるのは 23 地点である。欠測をゼロ濃度に置き換えず、人口分析の 46 地点とは標本数を分けて示す。

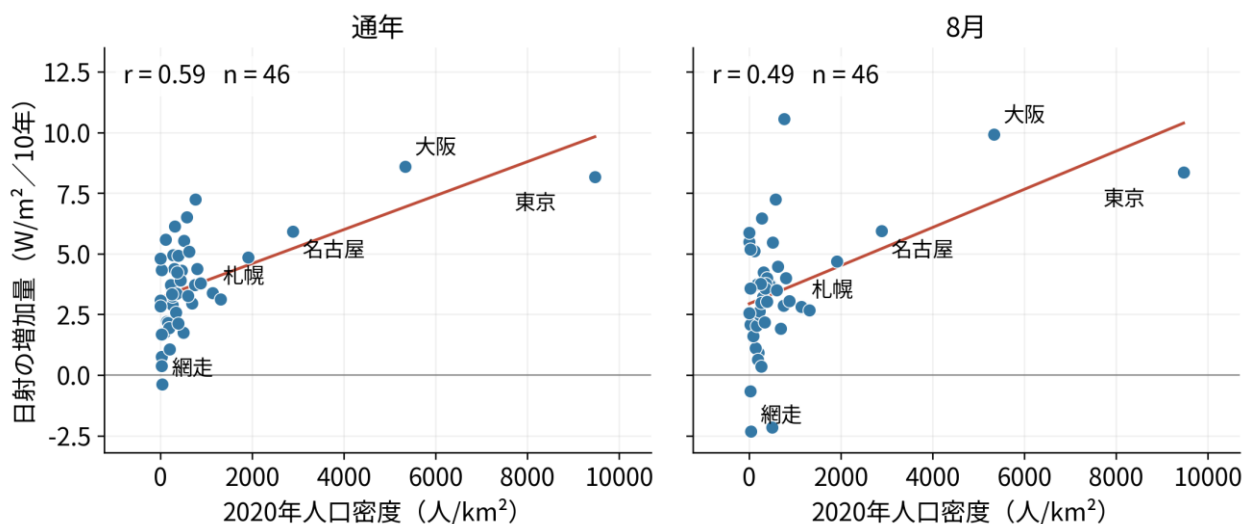
### A.3 相関の比較方法

まず人口密度や SPM と日射トレンドの散布図を描き、Pearson 相関係数  $r$  を求める。「比例」を原点を通る式と解釈することはせず、回帰直線の切片は自由とした。都市間の人口密度差が大きいと、人口の対数変換、順位相関、東京・大阪の除外、緯度・経度の統制も併用する。

これらは原因を確定する分析ではない。人口密度には産業、交通、土地利用などが重なり、SPM にも自然起源の粒子が含まれる。また、近隣地点は気候や汚染を共有する。通常の  $p$  値は地点の独立性を仮定する参考値として示し、相関係数の二乗を日射増加の「原因別寄与率」とは解釈しない。

### A.4 人口が集積する地点ほど日射が増えたか

半径 25km 圏の人口密度と日射増加の単純相関は、通年  $r=0.585$ 、8 月  $r=0.486$  となった。全国地図から受ける「都市部ほど増加が大きい」という印象は、単純な数値比較でも確認できる。



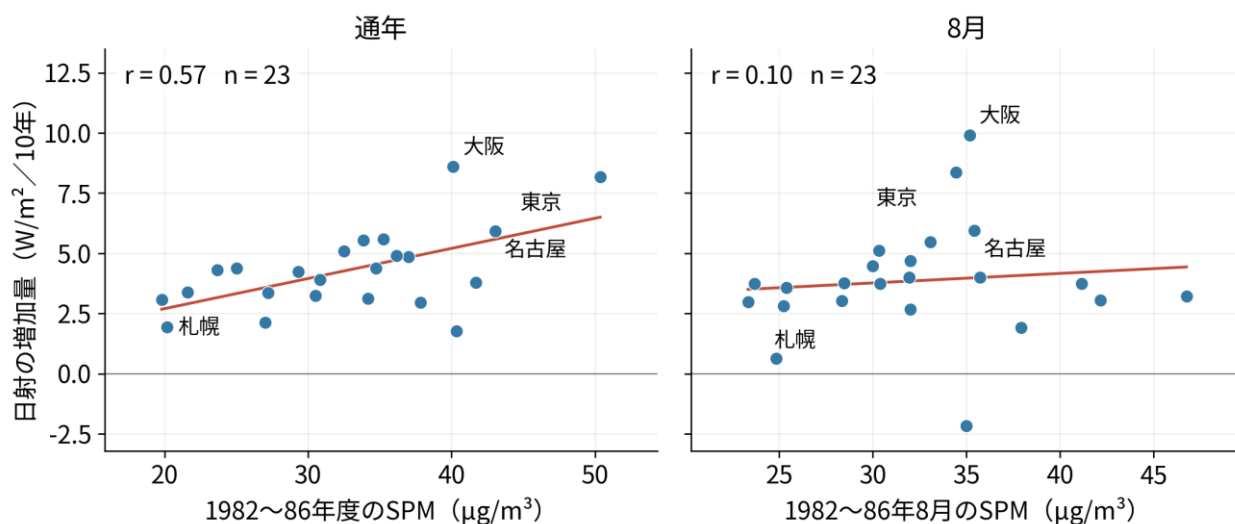
付図 A1 観測地点周辺の人口密度と日射トレンド。46 地点、半径 25km。赤線は切片を自由にした回帰直線。出所：気象庁 [\[2\]](#)、国土数値情報 [\[12\]](#) から計算。

ただし、散布図では人口密度の非常に高い東京・大阪の影響が大きい。両地点を除くと、相関は通年 0.405、8 月 0.271 に下がる。通年の正の関係は残るが、8 月は通常の 5%水準で明確とはいえなくなる ( $p=0.075$ )。人口密度を対数化した全 46 地点でも、通年  $r=0.489$  に対し、8 月  $r=0.284$  ( $p=0.056$ ) である。

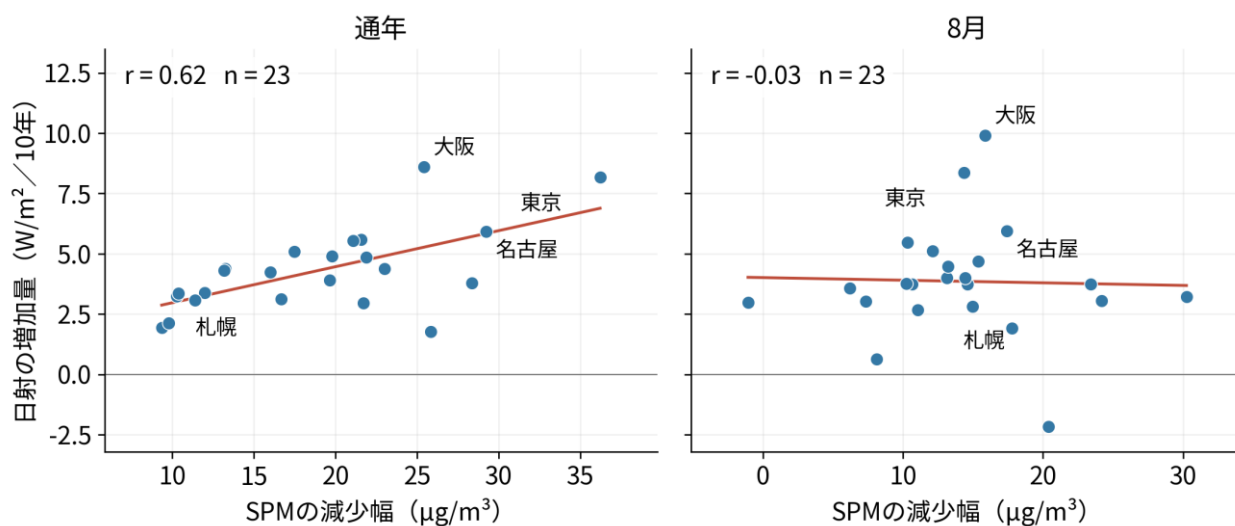
したがって、「人口密度に比例して日射が増えた」と一般化するよりも、「人口が集積した地点ほど増加が大きい傾向があり、通年では比較的安定している。8 月の単純相関は東京・大阪の影響を強く受ける」と述べるのが適切である。

### A.5 過去の SPM 濃度と、その後の低下幅

過去と近年を同一局で比較できる 23 地点では、初期の SPM が高いほど通年の日射増加が大きかった ( $r=0.570$ )。SPM の低下幅との相関はさらに大きく、 $r=0.624$  だった。



付図 A2 初期 SPM 濃度と日射トレンド。左は 1982~86 年度の年平均 SPM、右は 1982~86 年の 8 月平均 SPM。同一局条件、23 地点、半径 25km。出所：気象庁 [\[2\]](#)、国立環境研究所 [\[15\]](#) から計算。



付図 A3 SPM 低下幅と日射トレンド。左の低下幅は 1982~86 年度平均から 2019~23 年度平均を引いた値、右は同じ各年の 8 月平均の差。右に行くほど SPM が大きく減ったことを表す。同一局条件、23 地点、半径 25km。

通年では、東京周辺の SPM は  $50.4$  から  $14.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、大阪は  $40.1$  から  $14.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ へ低下した。札幌は  $21.6$  から  $9.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ で、濃度の低下幅は東京・大阪より小さい。こうした地域差が、日射トレンドとの正の相関に表れている。

一方、8 月に限ると結果は大きく異なる。初期 SPM との相関は  $0.102$ 、低下幅との相関は  $-0.030$  で、いずれもほぼ関係がない。東京・大阪で 8 月の SPM が減ったこと自体は確認できるが、全国の地点差を並べると、減少が大きいほど 8 月の日射増加も大きいという関係にはならない。

| 説明変数（半径 25km） | 地点数 | 通年の r | 8 月の r |
|---------------|-----|-------|--------|
| 2020 年人口密度    | 46  | 0.585 | 0.486  |
| 人口密度の対数変換     | 46  | 0.489 | 0.284  |
| 初期 SPM 濃度     | 23  | 0.570 | 0.102  |
| SPM の低下幅      | 23  | 0.624 | -0.030 |

付表 A1 主な単純相関。人口の対数変換は  $\log_{10}(1 + \text{人口密度})$ 。SPM は年平均同士、8 月同士を比較。人口と SPM では対象地点が異なる。

初期 SPM と低下幅の間にも通年で  $r=0.933$  という強い相関がある。低下幅の定義に初期濃度が含まれることもあり、付表 A1 の SPM の二つの行を独立した二つの証拠として数えることはできない。なお、近年の年平均 SPM 濃度そのものと通年の日射増加の相関は  $-0.005$  である。過去の汚染と改善幅を区別することが重要である。

## A.6 条件を変えた場合

半径を 10km、25km、50km と変えると、人口密度と通年日射の相関は 0.55～0.59、8 月は 0.43～0.49 となった。SPM 低下幅と通年日射の相関も各半径で正だったが、8 月はどの半径でもゼロに近い。

SPM 測定局を、記録された座標の変化が 1km 以内の局に限定しても、通年の相関は 0.627 である。さらに両期間とも  $\beta$  線吸収法を用いた局に限定すると、地点数は 17 に減るが、相関は 0.596 だった。したがって、通年の正の関係を、測定局構成や SPM 測定方式の変化だけで説明するのは難しい。

緯度・経度を統制した偏相関でも、通年の SPM 低下幅との関係は正に残る (0.542)。ただし、人口の対数値・緯度・経度・SPM 低下幅を同時に入れた 23 地点の回帰では、SPM の独立した係数は明確でなくなる ( $p=0.60$ )。人口集積と SPM 改善は重なる情報を含んでおり、この標本だけで各要因の効果を分離するのは難しい。

## A.7 結果の解釈

通年の単純相関は大気汚染改善の仮説と整合するが、人口・地理を同時に考慮すると SPM の独立した係数は明確でなくなり、8 月にも同じ説明は成り立たなかった。日射増加と人口・SPM を結び付ける明白な結論には至っていない。

これは、8 月にエアロゾルの影響がないと証明したことでもない。SPM は地上の粒子の質量濃度であり、上空を含む大気全体の光学的な減衰、粒子の組成や吸収性を直接測っていない。雲、水蒸気、輸送経路の季節差も残る。Kudo et al. [\[10\]](#) は、日本の SPM とエアロゾル光学的厚さの年変動には相関がある一方、光吸収性の変化も日射増加に重要だと論じている。今回の夏季の結果は、粒子質量だけでは説明しきれない可能性を示している。

## A.8 統計と標本の補足

人口密度の対数値、初期 SPM、SPM 低下幅の 3 指標を同年・8 月に対応させた 6 比較を主検定とし、Benjamini-Hochberg 法 [\[17\]](#) で多重比較を補正した。人口の生の密度は単純な関係を示す図、1980 年推計・半径変更・標本変更は感度分析として扱った。

| 主指標             | 同年 $r$ | 同年 $p$ /補正 $p$  | 8 月 $r$ | 8 月 $p$ /補正 $p$ |
|-----------------|--------|-----------------|---------|-----------------|
| 人口の対数値 (46 地点)  | 0.489  | 0.00057/0.00343 | 0.284   | 0.0562/0.0843   |
| 初期 SPM (23 地点)  | 0.570  | 0.00453/0.00906 | 0.102   | 0.643/0.772     |
| SPM 低下幅 (23 地点) | 0.624  | 0.00146/0.00439 | -0.030  | 0.891/0.891     |

付表 A2 通常の地点独立を仮定した Pearson 相関の両側  $p$  値。補正後も空間的な依存関係を除いたことにはならない。

順位相関は、人口密度で同年 0.539・8 月 0.349、SPM 低下幅で同年 0.550・8 月 0.051。緯度・経度を線形に統制した偏相関は、人口の対数値で同年 0.768・8 月 0.492、SPM 低下幅で同年 0.542・8 月 0.020 だった。緯度・経度だけで雲や汚染輸送の地域差を十分に統制したとはいえない。

人口は 9 地域、SPM はデータのある 8 地域を単位として 2,000 回再標本化した粗い感度分析では、相関の 95%区間は人口の対数値で同年 0.21~0.80・8 月 -0.10~0.70、SPM 低下幅で同年 0.22~0.91・8 月 -0.38~0.32 となった。離島を一つの地域にまとめるなど区分は近似的であり、厳密な空間共分散モデルに基づく区間ではない。

| SPM 低下幅との相関：条件       | 同年 $n/r$ | 8 月 $n/r$ |
|----------------------|----------|-----------|
| 半径 10km、同一局          | 19/0.443 | 17/0.057  |
| 半径 25km、同一局 (主)      | 23/0.624 | 23/-0.030 |
| 半径 50km、同一局          | 31/0.612 | 31/0.091  |
| 半径 25km、東京・大阪除外      | 21/0.440 | 21/-0.097 |
| 半径 25km、局の位置差 1km 以内 | 23/0.627 | 23/-0.034 |
| さらに両期間 $\beta$ 線吸収法  | 17/0.596 | 17/-0.209 |

付表 A3 SPM の感度分析。半径により対象地点が変わるため、相関の違いを距離の効果だけには帰せない。

人口の 1980 年 GHS 推計を用いた 45 地点の補助分析では、生の密度との相関は同年 0.609・8 月 0.527、対数値では同年 0.486・8 月 0.346 だった。この結果は歴史的な都市集積とも整合するが、モデル推計の空間配分に依存するため独立した 1980 年観測による追証とは扱わない。

23 地点の同一標本上で、緯度・経度だけの通年回帰の決定係数  $R^2$  は 0.428、人口の対数値を加えると 0.725、さらに SPM 低下幅を加えると 0.732 となった。1 地点ずつ除外した予測誤差は人口追加モデル 1.06 に対し、SPM も追加すると 1.12  $\text{W/m}^2/10$  年だった。SPM の追加で標本内の当てはまりは改善するが、予測誤差は改善していない。係数の標準誤差は HC3 [\[18\]](#) で計算した。地点別の日射トレンド自体の推定誤差を別途重み付けする処理は行っていない。

気象庁の履歴 [\[19\]](#) では、1982～2025 年の対象日射系列に正式な「統計切断」はなく、「統計接続」とされた関連記録を持つ地点が 24 ある。記録の存在を統計切断と読み替えてはならない。この 24 地点をすべて除く保守的な感度では、通年の人口対数値との相関は 0.844 (22 地点)、SPM 低下幅とは 0.759 (12 地点) だった。ただし、標本の地域構成も大きく変わるため、「除けば真の関係が得られる」とは解釈できない。

SPM の古い局属性にも制約がある。1970～89 年度の位置情報は 1990 年度の属性、そこにはない局は 2002 年度の全局属性から復元されている [\[20\]](#)。従って、位置差 1km 以内の条件を満たしても、1982 年当時の厳密な位置や全ての移転を確認したことにはならない。初期 SPM 観測網の不足による欠測は都市部と地方で一様とは限らず、23 地点の結果を全国一律に外挿できない。

## 付録 B 日射の集計方法と観測の連続性

### B.1 全国の月別データ

気象庁の全天日射量の月別観測値 [\[2\]](#) を用い、継続観測中の国内 48 地点について 1961～2025 年の通年値と 8 月値を整理した。父島・南鳥島を含み、南極の昭和基地は含めない。過去に観測を終了した全地点を網羅する分析ではない。品質記号は正常値と準正常値を採用し、資料不足値・欠測は除外した [\[21\]](#)。

全国の主比較は 1982～2025 年とした。1971～74 年の全国的な日射計変更と、宮古島の 1981 年の変更を避けるためである。長期系列がそろわない長野・松江を除く 46 地点で、各年の値に直線を当てはめ、10 年当たりの増加量を求めた。

観測表の MJ/m<sup>2</sup>/日を W/m<sup>2</sup>へ換算する係数は  $1 \div 0.0864$  である。これは夜間も含む 24 時間平均に相当し、晴れた正午の瞬間的な日射強度とは異なる。通年値は気象庁の定義に従う月平均日合計の 12 か月平均であり、年積算量ではない。本文でいう「日射の増加」は、特に断らない限り W/m<sup>2</sup>/10 年で表す。

Ma et al. [\[5\]](#) の均質化済み系列は 1961～2014 年の年平均について +0.9 W/m<sup>2</sup>/10 年を報告している。本稿の 1982～2025 年の観測地点平均 +3.7 とは対象期間・再構成法が異なるため、数値を直接比較して矛盾や優劣を論じることができない。本稿は気象庁の品質情報と履歴を用いて比較可能な期間を選んだもので、新たな均質化補正を行った系列ではない。

### B.2 東京・大阪の毎時値と雲量による選別

毎時データは 1989～2025 年の各 8 月を対象とし、正常値と準正常値を用いた。前 1 時間の日射積算量を 1 時間平均 W/m<sup>2</sup>に換算し、日照 0.9 時間以上の時間帯を選んだ。7～17 時 JST の時刻と旬の 30 区分を共通の構成にそろえ、旬の重みは暦の 10 日・10 日・11 日に対応させた。日照が 54 分以上あっても薄雲、水蒸気、散乱光などの違いは残る。

第 3 章の正午前後の比較では、11～12 時と 12～13 時の観測値に対象を絞った。元データの時刻は観測区間の終了時刻を示すため、12 時と 13 時の値を用いた。全天日射量・日照時間の品質番号がともに 5 または 8 で、日照時間が 0.9 時間以上の値を個別に採用した。同じ日の 2 時間がともに条件を満たすことは要求していない。採用時間数は、東京が 1989～1998 年に 238 時間、2016～2025 年に 233 時間、大阪がそれぞれ 264 時間、278 時間であった。

終了時刻 2 区分と旬 3 区分を組み合わせた 6 区分ごとに、各期間の採用観測値の平均を求めた。各時刻の上旬・中旬には 10/62、下旬には 11/62 の重みを与え、両期間に共通の重みで平均した。各区分内では採用された全観測値を平均しており、年別平均を等しい重みで平均した値ではない。両地点・両期間とも全 6 区分に観測値が存在した。

年々の変動に由来する推定の幅は、各期間内で 8 月の観測を年単位で復元抽出するブートストラップにより評価した。各反復でも同じ 6 区分と重みで平均し、2,000 回の結果の 2.5・97.5 百

分位を 95%区間とした。日射強度の増加量の区間は東京で 78.9～109.7 W/m<sup>2</sup>、大阪で 88.7～193.7 W/m<sup>2</sup>となった。この区間は、機器変更・移設による系統誤差や、長期的な系列相関に伴う不確実性をすべて含むものではない。

1975 年からの雲量による比較は、9・12・15 時の雲量がいずれも 10 分の 5 以下の日を対象とした。厳しい 10 分の 2 以下の条件では初期の大阪が 5 日しかなかったため、標本を確保する感度分析として追加した条件である。日積算日射量を当日の大気外水平面日射で規格化し、日付による太陽条件の違いを補正した。3 時刻で雲量が少なくても、終日快晴だったとは限らない。

| 地点・比較              | 採用日数（前期→後期） | 日射増加率  | 95%区間       |
|--------------------|-------------|--------|-------------|
| 東京、1975～85→2015～25 | 57→48 日     | +14.4% | +11.2～17.4% |
| 大阪、1975～85→2015～25 | 36→42 日     | +16.1% | +12.9～19.5% |

付表 B1 雲量条件をそろえた日の日射。区間は年単位の 2,000 回再標本化による。探索的な日選びと観測環境の不確実性を全て含む区間ではない。

大阪の毎時比較は、1989～98 年から 2016～25 年に+104.7 W/m<sup>2</sup>で、年単位再標本化の 95%区間は+70.4～144.6 W/m<sup>2</sup>だった。1994～2003 年を初期期間にすると増加率は 13.8%、2000～09 年を初期期間にすると 3.4%となり、増加幅は比較期間に依存する。低い値だった 1994・95 年を除く感度分析でも 1989～98 年からの増加方向は変わらないが、誤観測とする根拠はないため、主比較では両年を含めた。

正午前後の比較についても、晴天の条件、対象時間帯、初期期間を変えた感度分析を行った（付表 B2）。日照時間の条件を 1.0 時間に厳しくした場合と、対象を 10～14 時へ広げた場合の増加率は、主比較とほぼ同じであった。一方、初期期間を新しくすると増加率は小さくなった。正午前後の試算結果を 1975 年からの変化に読み替えることはできない。

付表 B2 正午前後の日射強度の増加率に関する感度分析。後期はすべて 2016～2025 年。

| 比較条件                    | 東京     | 大阪     |
|-------------------------|--------|--------|
| 主比較：11～13 時、日照 0.9 時間以上 | 12.09% | 18.69% |
| 11～13 時、日照 1.0 時間       | 12.19% | 19.45% |
| 10～14 時、日照 0.9 時間以上     | 12.13% | 18.73% |
| 初期期間を 1994～2003 年に変更    | 9.40%  | 14.12% |
| 初期期間を 2000～2009 年に変更    | 5.03%  | 3.73%  |

### B.3 移設と測器の変更

東京の日射感部の移設記録は 2007 年 11 月で、2014 年の露場移転とは区別する必要がある [\[22\]](#)。東京では 1996 年 [\[23\]](#)、大阪では 1999 年・2011 年 [\[24\]](#) に観測装置更新の記録が

あり、1975 年以来同じ機器を使い続けたわけではない。同じ機器でも周囲の遮蔽物や反射環境の変化は値に影響しうる一方、機器を交換しても校正や比較観測により統計を接続できる。

今回取得した東京の 1975～2025 年の日射量は、気象庁の同じ均質番号で接続されている。一方、日照時間は 1987 年の日照計変更と 2007 年の移設で区分されるため、日射量と日照時間の履歴を混同しない。全国の接続情報にも記録のある地点があり、メタデータ上の接続は全ての測定環境の影響がゼロであることを保証しない。観測史料、採用条件、期間を変えた結果は再現用資料に収録した。

## 付録 C 体感温度計算の式と設定

$G$  を水平面の全天日射強度 ( $\text{W/m}^2$ )、 $f$  を人体の有効放射面積率、 $p$  を立位・方位平均の投影係数、 $d$  を散乱割合、 $\rho$  を地面反射率、 $a$  を人体の短波吸収率、 $h$  を太陽高度とする。人体の全表面積当たりの短波放射吸収量  $q$  ( $\text{W/m}^2$ ) は次式で求めた。

$$q = a f \{ p (1 - d) / \sin h + d / 2 + \rho / 2 \} G$$

設定は  $a=0.7$ 、 $f=0.725$ 、 $p=0.13929$ 、 $d=0.25$ 、 $\rho=0.3$ 、 $h=70^\circ$  であり、 $q=0.195983G$  となる。東京では  $G$  が  $771.09$  から  $864.31 \text{ W/m}^2$  へ増加し、 $q$  は  $151.12$  から  $169.39 \text{ W/m}^2$  となる。大阪では  $G$  が  $753.60$  から  $894.42 \text{ W/m}^2$  へ増加し、 $q$  は  $147.69$  から  $175.29 \text{ W/m}^2$  となる。有効放射面積率は一度だけ掛け、地面反射項も重複して数えない。

日射を含む体感温度  $AT$  の式は、気温  $T$ 、水蒸気圧  $e$  (hPa)、地上  $10 \text{ m}$  の高さにおける風速  $v$  (m/s)、人体の正味放射吸収  $Q$  ( $\text{W/m}^2$ ) を用いて、次の形である [\[7\]](#)。ここでは  $T \cdot e \cdot v$  を固定するため、放射の差だけを換算した。

$$AT = T + 0.348 e - 0.70 v + 0.70 Q / (v + 10) - 4.25$$

$$\Delta AT = 0.70 \Delta Q / (v + 10)$$

$v=2 \text{ m/s}$  では、東京の  $\Delta Q=18.27 \text{ W/m}^2$  から  $\Delta AT=1.066^\circ\text{C}$ 、大阪の  $\Delta Q=27.60 \text{ W/m}^2$  から  $\Delta AT=1.610^\circ\text{C}$  を得る。短波吸収率  $0.57\sim 0.84$  と風速  $1\sim 3 \text{ m/s}$  を組み合わせて変えると、短波放射による増分は東京で  $0.80\sim 1.40^\circ\text{C}$ 、大阪で  $1.21\sim 2.11^\circ\text{C}$  となる。この幅は、路面の有効係数  $H$  を変えた本文の計算結果とは、対象となる条件が異なる。

路面については、増加前温度  $T_s=318.15\text{K}$ 、路面放射率  $\varepsilon_g=0.95$ 、放射以外の有効係数  $H$ 、Stefan-Boltzmann 定数  $\sigma$  を用い、次式を数値的に解いた。

$$(1 - \rho) \Delta G = H \Delta T_s + \varepsilon_g \sigma \{ (T_s + \Delta T_s)^4 - T_s^4 \}$$

右辺の第 2 項を路面からの追加長波  $\Delta L_g$  とし、地面の形態係数  $0.5$ 、人体長波吸収率  $0.95$ 、有効放射面積率  $0.725$  を掛けて人体の追加吸収を求める。これは広い水平路面を見渡す設定であり、実際の街路の建物形状は扱っていない。

| 地点 | H<br>W/m <sup>2</sup> /K | 路面温度<br>上昇 °C | AT 短波分<br>°C | AT 赤外線分<br>°C | AT 合計<br>°C |
|----|--------------------------|---------------|--------------|---------------|-------------|
| 東京 | 10                       | 3.82          | 1.07         | 0.54          | 1.61        |
| 東京 | 20                       | 2.42          | 1.07         | 0.34          | 1.41        |
| 東京 | 30                       | 1.76          | 1.07         | 0.25          | 1.31        |
| 大阪 | 10                       | 5.75          | 1.61         | 0.82          | 2.43        |
| 大阪 | 20                       | 3.64          | 1.61         | 0.52          | 2.13        |
| 大阪 | 30                       | 2.66          | 1.61         | 0.38          | 1.99        |

付表 C1 路面熱収支の感度分析。AT の短波分には地面反射を含む。H は各都市の実測で較正した値ではなく、対流と伝導・蓄熱を一定係数にまとめた近似である。

UTCI の補助計算 [\[25\]](#) [\[26\]](#) では、気温 33°C、相対湿度 60%、風速 2 m/s、背景となる長波の平均放射温度 33°Cを用いた。人体が吸収する短波放射を Stefan-Boltzmann の 4 乗式で平均放射温度に換算すると、東京は 62.25 から 65.31°C、大阪は 61.66 から 66.28°Cとなる。UTCI はそれぞれ 41.26 から 41.98°C、41.12 から 42.21°Cとなり、上昇幅は 0.72°Cと 1.09°Cである。この UTCI 計算には路面の追加加熱を含めていないため、本文の路面加熱を含む AT の合計とは直接比較できない。

日射強度の増加量の 95%区間を、H=20 W/m<sup>2</sup>/K などの設定を固定して AT に換算すると、路面加熱を含む上昇幅は東京で 1.19～1.66°C、大阪で 1.34～2.93°Cとなる。これは日射の年々の変動に由来する推定の幅だけを伝えたものであり、人体形状、反射率、路面の熱輸送、観測環境などに関する不確実性を含めた区間ではない。

10 年当たりの換算では、1989～1998 年の中央年 1993.5 年と 2016～2025 年の中央年 2020.5 年の差 27 年を用いた。中心設定の AT 上昇を 27 で割って 10 を掛けると、東京は 0.521°C/10 年、大阪は 0.788°C/10 年となる。これは二つの期間平均の差を年数で換算した参考値であり、年別の AT に回帰直線を当てはめて求めた上昇率ではない。

## 付録 D 暑さ指数 (WBGT) による試算

### D.1 計算方法と条件

日本で広く用いられている暑さ指数 (WBGT) についても、日射強度の増加による影響を試算した。日射のある屋外では、自然湿球温度を  $T_{nw}$ 、黒球温度を  $T_g$ 、気温を  $T_a$  として、次式で定義される [\[27\]](#)。

$$WBGT = 0.7 T_{nw} + 0.2 T_g + 0.1 T_a$$

自然湿球温度と黒球温度は、Liljegren et al. [\[28\]](#) の熱・物質収支式を数値的に解いて求めた。この方法は、気温・湿度・風速・日射を用いて屋外の WBGT を推定する方法として、Lemke and Kjellstrom [\[29\]](#) も推奨している。黒球については放射と対流、自然湿球についてはこれらに加えて蒸発による熱交換を計算した。したがって、自然湿球温度にも日射の変化が反映される。

日射強度は第 3 章と同じく、東京では 771.1 から 864.3  $W/m^2$ 、大阪では 753.6 から 894.4  $W/m^2$  への変化を与えた。両期間とも、気温 33°C、相対湿度 60%、気圧 1,013.25 hPa、太陽高度 70 度、散乱日射の割合 0.25、地面反射率 0.3 とした。黒球は標準的な直径 150 mm とし、放射率 0.95、短波反射率 0.05 を用いた。自然湿球の湿潤部は直径 7 mm、長さ 25.4 mm の円柱とし、放射率 0.95、短波反射率 0.4 とした。

風速は、Liljegren の公開コード [\[30\]](#) における市街地・大気安定度 B のべき乗則を用い、10 m 高度の 2 m/s を 2 m 高度の 1.57 m/s に換算した。換算式は  $v_2 = 2 \times (2/10)^{0.15}$  であり、両期間に同じ風速を与えた。

長波放射は付録 C の条件とそろえた。前期の路面温度を 45°C、地面の放射率を 0.95 とし、上空と地面の視野の割合をそれぞれ 0.5 とした。下向き長波放射を  $L_{\downarrow}$ 、地面からの上向き長波放射を  $L_{\uparrow}$ 、路面温度を  $T_s$ 、地面の放射率を  $\varepsilon_s$  とすると、 $L_{\uparrow} = \varepsilon_s \sigma T_s^4 + (1 - \varepsilon_s) L_{\downarrow}$  である。前期に  $(L_{\downarrow} + L_{\uparrow})/2 = \sigma (306.15 \text{ K})^4$  となるように設定すると、 $L_{\downarrow} = 423.2 \text{ W/m}^2$ 、 $L_{\uparrow} = 573.1 \text{ W/m}^2$  となり、長波放射による平均放射温度は 33°C に一致する。後期の計算では  $L_{\downarrow}$  を一定とし、付録 C の路面加熱による  $L_{\uparrow}$  の増加を加えた。中心設定  $H = 20 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$  での増加量は、東京 17.0  $W/m^2$ 、大阪 25.7  $W/m^2$  である。

### D.2 計算結果

表 D1 に、路面加熱の効果を含めた中心設定での計算結果を示す。比較する前期は 1989～1998 年、後期は 2016～2025 年である。

表 D1 日射強度の増加による自然湿球温度・黒球温度・WBGT の変化

| 地点 | 期間 | 自然湿球温度 (°C) | 黒球温度 (°C) | WBGT (°C) |
|----|----|-------------|-----------|-----------|
| 東京 | 前期 | 27.98       | 52.10     | 33.31     |
| 東京 | 後期 | 28.19       | 54.76     | 33.98     |
| 東京 | 差  | 0.21        | 2.65      | 0.68      |
| 大阪 | 前期 | 27.94       | 51.68     | 33.20     |
| 大阪 | 後期 | 28.27       | 55.69     | 34.22     |
| 大阪 | 差  | 0.32        | 4.01      | 1.03      |

注：後期には路面加熱の効果を含む。差は丸め前の値から計算した。これらの絶対値は仮定した気象・路面条件の下での計算値であり、観測された各期間の平均 WBGT ではない。

直達日射・散乱日射と地面で反射された短波放射の増加だけを与えた場合、WBGT の上昇幅は東京 0.57°C、大阪 0.86°C となった。路面加熱による長波放射の増加を加えると、それぞれ 0.68°C、1.03°C となる。H を 10～30 W/(m<sup>2</sup> K) の範囲で変えた場合の上昇幅は、東京 0.65～0.74°C、大阪 0.98～1.13°C であった。この範囲は路面の熱収支の仮定を変えた結果であり、統計的な信頼区間ではない。

両期間の中央年の差である 27 年を用いて 10 年あたりに換算すると、中心設定では東京 0.25°C/10 年、大阪 0.38°C/10 年となる。これは日射強度の変化だけを与えた条件付き試算であり、WBGT の観測時系列から推定した上昇率ではない。WBGT は本文で用いた AT とは定義・尺度が異なるため、両者の上昇幅が同じである必要はない。

## 参考文献・データ出所

- [1] 杉山大志 (2025) . 「8 月の東京の日射は 3 割も増えた」 . キヤノングローバル戦略研究所, 2025 年 9 月 11 日. [https://cigs.canon/article/20250911\\_9234.html](https://cigs.canon/article/20250911_9234.html)
- [2] 気象庁 (年不詳) . 「過去の気象データ・ダウンロード」 . <https://www.data.jma.go.jp/risk/obsdl/>
- [3] 国土地理院 (2016) . 「地球地図日本 第 2.2 版ベクタデータ」 . [https://www.gsi.go.jp/kankyochiri/gm\\_japan\\_e.html](https://www.gsi.go.jp/kankyochiri/gm_japan_e.html)
- [4] 気象庁 (2026) . 「全天日射量と下向き赤外放射量の経年変化」 . [https://www.data.jma.go.jp/env/radiation/diag\\_rad.html](https://www.data.jma.go.jp/env/radiation/diag_rad.html)
- [5] Ma, Q., Wang, K., He, Y., Su, L., Wu, Q., Liu, H., and Zhang, Y. (2022). Homogenized century-long surface incident solar radiation over Japan. *Earth System Science Data*, 14(2), 463–477. <https://doi.org/10.5194/essd-14-463-2022>
- [6] Arens, E., Hoyt, T., Zhou, X., Huang, L., Zhang, H., and Schiavon, S. (2015). Modeling the comfort effects of short-wave solar radiation indoors. *Building and Environment*, 88, 3–9. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.09.004>
- [7] Bureau of Meteorology (Australia) (年不詳) . Thermal Comfort observations: About the formula for the apparent temperature. [https://www.bom.gov.au/info/thermal\\_stress/#atapproximation](https://www.bom.gov.au/info/thermal_stress/#atapproximation)
- [8] Bröde, P., Fiala, D., Błażejczyk, K., Holmér, I., Jendritzky, G., Kampmann, B., Tinz, B., and Havenith, G. (2012). Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *International Journal of Biometeorology*, 56(3), 481–494. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0454-1>
- [9] Solaimanian, M., and Kennedy, T. W. (1993). Predicting maximum pavement surface temperature using maximum air temperature and hourly solar radiation. *Transportation Research Record*, 1417, 1–11. <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1993/1417/1417-001.pdf>
- [10] Kudo, R., Uchiyama, A., Ijima, O., Ohkawara, N., and Ohta, S. (2012). Aerosol impact on the brightening in Japan. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D7), D07208. <https://doi.org/10.1029/2011JD017158>
- [11] Hiroki, R., Varquez, A. C. G., Khanh, D. N., Rynazal, R., Renard, F., Alonso, L., and Kanda, M. (2025). Long-term changes of Universal Thermal Climate Index (UTCI) estimated from weather stations and gradient-boosted decision trees throughout Japan. *International Journal of Climatology*, 45(8), e8843. <https://doi.org/10.1002/joc.8843>
- [12] 国土交通省 (2024) . 「国土数値情報 500m メッシュ別将来推計人口データ (R6 国政局推計)」 . <https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-mesh500r6.html>
- [13] 国土交通省国土政策局総合計画課 (2025) . 「令和 2 年国勢調査を基準としたメッシュ別将来推計人口の試算方法について」 . [https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/r6\\_about\\_future\\_population.pdf](https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/r6_about_future_population.pdf)

- [14] Schiavina, M., Freire, S., Carioli, A., and MacManus, K. (2023). GHS-POP R2023A: GHS population grid multitemporal (1975–2030) [Data set]. European Commission, Joint Research Centre. <https://doi.org/10.2905/2FF68A52-5B5B-4A22-8F40-C41DA8332CFE>
- [15] 国立環境研究所（年不詳）．「環境展望台 大気汚染常時監視データファイル」．  
<https://tenbou.nies.go.jp/download/>
- [16] 国立環境研究所環境情報部研究情報室（2025）．「大気環境月間値・年間値データファイル利用説明書」．[https://tenbou.nies.go.jp/download/TD\\_manu.pdf](https://tenbou.nies.go.jp/download/TD_manu.pdf)
- [17] Benjamini, Y., and Hochberg, Y. (1995). Controlling the false discovery rate: A practical and powerful approach to multiple testing. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 57(1), 289–300. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1995.tb02031.x>
- [18] MacKinnon, J. G., and White, H. (1985). Some heteroskedasticity-consistent covariance matrix estimators with improved finite sample properties. *Journal of Econometrics*, 29(3), 305–325. [https://doi.org/10.1016/0304-4076\(85\)90158-7](https://doi.org/10.1016/0304-4076(85)90158-7)
- [19] 気象庁（年不詳）．「地上気象観測の統計接続情報」．  
[https://www.data.jma.go.jp/stats/data/mdrr/chiten/meta/discnt\\_sfc.csv](https://www.data.jma.go.jp/stats/data/mdrr/chiten/meta/discnt_sfc.csv)
- [20] 国立環境研究所環境情報部研究情報室（2025）．「大気環境測定局データファイル利用説明書」．[https://tenbou.nies.go.jp/download/TM\\_manu.pdf](https://tenbou.nies.go.jp/download/TM_manu.pdf)
- [21] 気象庁（年不詳）．「値欄の記号の説明」．過去の気象データ検索.  
<https://www.data.jma.go.jp/stats/data/mdrr/man/remark.html>
- [22] 気象庁観測部・東京管区气象台（2016）．「地上気象観測地点『東京』の露場移転について（その1 移転までの経緯について）」．『測候時報』83, 1–6.  
<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/sokkou/83/vol83p001.pdf>
- [23] 中山哲士・石野久彌（2006）．「日射の短時間変動と直散分離の予測精度に関する検討：日射の直散分離に影響を及ぼす気象要素の特性研究（その1）」．『日本建築学会環境系論文集』71（599），47–52. [https://doi.org/10.3130/aije.71.47\\_1](https://doi.org/10.3130/aije.71.47_1)
- [24] 大阪管区气象台（年不詳）．「大阪管区气象台での地上気象観測履歴」．  
[https://www.data.jma.go.jp/osaka/an-nai/history/cont/03\\_kansoku.pdf](https://www.data.jma.go.jp/osaka/an-nai/history/cont/03_kansoku.pdf)
- [25] Tartarini, F., and Schiavon, S. (2020). pythermalcomfort: A Python package for thermal comfort research. *SoftwareX*, 12, 100578.  
<https://doi.org/10.1016/j.softx.2020.100578>
- [26] pythermalcomfort 開発チーム（年不詳）．Models: Universal Thermal Climate Index (UTCI). pythermalcomfort documentation（使用ソフトウェア：version 4.4.2）．  
<https://pythermalcomfort.readthedocs.io/en/latest/documentation/models.html>
- [27] 環境省（年不詳）．「暑さ指数（WBGT）の詳しい説明」．熱中症予防情報サイト.  
[https://www.wbgt.env.go.jp/doc\\_observation.php](https://www.wbgt.env.go.jp/doc_observation.php)

- [28] Liljegren, J. C., Carhart, R. A., Lawday, P., Tschopp, S., and Sharp, R. (2008). Modeling the wet bulb globe temperature using standard meteorological measurements. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 5(10), 645–655. <https://doi.org/10.1080/15459620802310770>
- [29] Lemke, B., and Kjellstrom, T. (2012). Calculating workplace WBGT from meteorological data: A tool for climate change assessment. *Industrial Health*, 50(4), 267–278. <https://doi.org/10.2486/indhealth.MS1352>
- [30] Liljegren, J. C. (年不詳) . WBGT, Version 1.1: wbgt.c [ソースコード] (原版 2008 年, Max Lieblich による 2016 年改変版) . GitHub. <https://github.com/mdljts/wbgt/blob/master/src/wbgt.c>

本稿の計算値・図表は、上記の公開資料を基に作成した。

ウェブ資料の閲覧日：2026 年 9 月 8 日。公表年の記載がない資料は「年不詳」とした。