

—第3部 技術情報編—

第5章 体感温度の把握

5.1 体感温度指標

- ・体感温度指標は複数の温熱要素から計算され、人が感じる暑さや涼しさを単一の尺度で表す指標
- ・数多くの体感温度指標がそれぞれの目的に応じて開発されており、評価に適した環境条件が異なる
- ・屋外の評価で使われる指標の例として、標準有効温度 SET*、湿球黒球温度 WBGT などがある

体感温度には気温や湿度、風速、放射（日射、路面などからの赤外放射）の4つの環境側の要素（以下、「温熱4要素」と言う。）と、運動量（代謝量）と着衣量の2つの人間側の要素が影響します。体感温度指標は、これらの複数の要素を用いて計算され、人が感じる暑さや涼しさを単一の尺度で表す指標です。

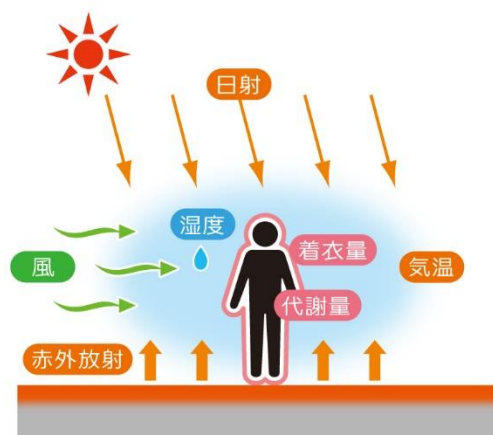


図 5.1 体感温度に影響する要素

数多くの体感温度指標がそれぞれの目的に応じて開発されており、世界的には PET、ETU などが多く使われています。各体感温度指標は、一定の環境条件、人間条件のもとで最も適切な評価ができるため、地域の気候特性の違いなどを考慮して体感温度指標を選ぶ必要があります。以下では、日本で屋外の評価

に使われている指標の例として、標準有効温度 SET*と湿球黒球温度 WBGT を紹介します。また、気温と放射の2つの要素で計算する作用温度 OT については、巻末の参考資料で紹介します。

1) 標準有効温度 SET* (Standard Effective Temperature)

SET*は研究者や空調分野の技術者などの間で広く使われている体感温度指標で、温熱的に同等な標準環境の気温（℃）とすることができます。屋内の熱環境の評価を基本としていますが、日射などの条件を適切に設定¹¹⁹し、屋外の評価にも使われています。人の温冷感や快適感と良い関係性を示し、SET*で 32℃ を超えるあたりで「不快」と感じる傾向にあるようです。

表 5.1 SET*と快適感との関係

SET* (℃)	快適感
33.3	非常に不快
32.1	不快
30.8	やや不快
28.4	どちらでもない
27.0	やや快適
	快適

日本人の屋外における快適感の申告試験結果¹²⁰を参考に作成

¹¹⁹ 条件設定の一例は 71 頁のコラムを参照ください。

¹²⁰ 石井ほか, 屋外気候環境における快適感に関する実験的研究, 日本建築学会計画系論文報告集, 386, 28-37, 1988

また、非空調空間を対象に SET*と人の許容度との関係を調べた研究¹²¹では、SET*32℃が温熱的に受容できる上限であると報告されています。

2) 湿球黒球温度 WBGT (Wet Bulb Globe Temperature)

WBGT は、暑熱環境での労働や運動時の熱中症の予防措置に用いられている指標で、環境省では「暑さ指数」として全国約 840 地点の実況値と予測値を公表しており¹²²、関心のある地域の暑さの状況を簡単に確認することができます。

対応する熱中症の予防指針が示されており、WBGT28℃以上では嚴重警戒等となっています。

表 5.2 日常生活における熱中症予防指針¹²³

WBGT (°C)	注意すべき生活活動の目安	注意事項
危険 (31 以上)	すべての生活活動でおこる危険性	高齢者においては安静状態でも発生する危険性が大きい。外出はなるべく避け、涼しい室内に移動する。
嚴重警戒 (28~31)		外出時は炎天下を避け、室内では室温の上昇に注意する。
警戒 (25~28)	中等度以上の生活活動でおこる危険性	運動や激しい作業をする際は定期的に十分に休息を取り入れる。
注意 (25 未満)	強い生活活動でおこる危険性	一般に危険性は少ないが激しい運動や重労働時には発生する危険性がある。

表 5.3 運動に関する熱中症予防指針¹²⁴

WBGT (°C)	熱中症予防運動指針	
31 以上	運動は原則中止	WBGT31℃以上では、特別の場合以外は運動を中止する。特に子どもの場合は中止すべき。
28~31	嚴重警戒 (激しい運動は中止)	WBGT28℃以上では、熱中症の危険性が高いため、激しい運動や持久走など体温が上昇しやすい運動は避ける。運動する場合には、頻繁に休息をとり水分・塩分の補給を行う。体力の低い人、暑さになれていない人は運動中止。
25~28	警戒 (積極的に休息)	WBGT25℃以上では、熱中症の危険が増すので、積極的に休息をとり適宜、水分・塩分を補給する。激しい運動では、30 分おきくらいに休息をとる。
21~25	注意 (積極的に水分補給)	WBGT21℃以上では、熱中症による死亡事故が発生する可能性がある。熱中症の兆候に注意するとともに、運動の合間に積極的に水分・塩分を補給する。
21 未満	ほぼ安全 (適宜水分補給)	WBGT21℃未満では、通常は熱中症の危険は小さいが、適宜水分・塩分の補給は必要である。市民マラソンなどではこの条件でも熱中症が発生するので注意。

¹²¹ 中野ほか、O 駅及び非空調駅の熱的快適域の比較-大規模空調空間を有する駅の熱的快適域に関する研究その 3、日本建築学会大会学術講演梗概集(環境工学 II)、319-320、2012

¹²² 環境省「熱中症予防情報サイト」<http://www.wbgt.env.go.jp/>

¹²³ 日本生気象学会、日常生活における熱中症予防指針 Ver.3

¹²⁴ 公益財団法人日本体育協会、スポーツ活動中の熱中症予防ガイドブック、2013

5. 2 実測等による把握方法

- ・現地で日当たりや風通しの状況を確認し、黒球温度計等を用いて温熱 4 要素を測定
- ・実測による方法は、測定場所の局所的な影響を受けやすいことに注意
- ・測定した複数の温熱要素を用いて SET*や WBGT などの体感温度指標を計算

夏季日中などに実際に現地を訪れることで、測定するまでもなく、日当たりや風通しの状況など、熱環境の重要な要素を確認することができます。体感温度を定量的に把握するには、体感温度指標の算出に必要な温熱要素を測定し、計算して求めることができます。

SET*と WBGT について、測定方法や留意事項、計算方法などを整理しました。

1) SET*

SET*を把握するには気温(℃)、相対湿度(%)、風速(m/s)、黒球温度(℃)もしくは平均放射温度 MRT¹²⁵(℃)の温熱 4 要素に加え、人の代謝量(met)と着衣量(Clo)が必要になります。

温熱 4 要素をそれぞれ測定するのは煩雑ですが、気温や相対湿度、風速、黒球温度の測定をパッケージ化した測定機器が市販されています。このような機器を用いることで比較的簡単に測定することができます。以下に測定上の留意事項の例を示します。

①測定場所の選定

体感温度は日当たりや風通しの状況などの局所的な影響を受けやすいため、計測場所周辺の建物状況などを観察し、評価に適した場所に計測器を設置します。また、計測センサーの設置高さについて、高温化した路面上で測定する場合などは低い位置ほど体感温度が高くなる可能性があります。歩行者の体感温度を評価する場合には地上高 1.1m¹²⁶が基本になりますが、着座時を評価する場合にはより地面に近い位置で測定する必要があります。



図 5.2 温熱 4 要素を測定する機器の例

②気温の測定

気温センサーが日射や路面からの赤外放射を受けないように物理的に囲う必要があります。気温センサーを筒や放射シールドで遮蔽する場合、通風を確保する必要があります。その際、自然通風式は強制通風式(気温センサーを入れた筒などにファンで強制的に風を導入する方式、図 5.3 参照)の温度計にくらべて、日向では日射などの影響をかなり受けることが指摘されています¹²⁷。日向では、気温を強制的な通風条件で測定することで正確な値を測ることができます。

¹²⁵ MRT (Mean Radiant Temperature) : 周囲から受ける放射熱量の全方向に対する平均値と等価な放射熱量を出す黒体放射の温度 (℃)

¹²⁶ 日本建築学会, 日本建築学会環境基準 ALJES-H002-2009 室内温熱環境測定規準・同解説 を参考とした。

¹²⁷ 気象庁, 気象観測の手引き, 1998 年 9 月

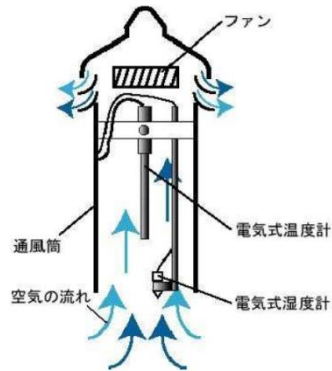


図 5.3 気温センサーを入れる通風筒の例 (断面と外観) ¹²⁸

③放射環境の測定

放射環境を簡単に測るには黒球温度計を uses。黒球は全方位からの日射（短波放射）と路面等からの赤外放射（長波放射）の全ての放射熱を同時に測定します。黒球温度の値が安定するまでには時間がかかるため 15 分以上、放置する必要があります。視覚的には、サーモカメラを用いて熱画像を撮影することで、赤外放射量が多い高温部分を容易に特定することができます。スマートフォンなどを用いて簡単に熱画像を撮影できる機器も市販されています。

長短波放射収支計を用いて波長帯別、方向別に計測する方法もあります。短波、長波の別に上下 2 方向を計測¹²⁹したり、より詳細には 6 方向（上下、左右、前後）を計測（次頁のコラムを参照ください）し、波長帯別、方向別に重み付けして MRT を算出することで、人が受ける放射により近い値を知ることができます。

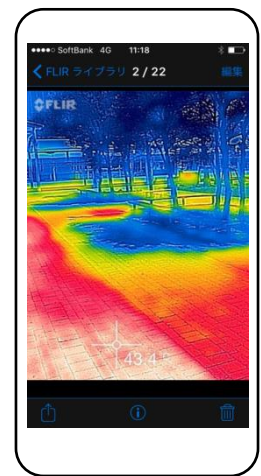


図 5.4 スマートフォンによる熱画像撮影のイメージ

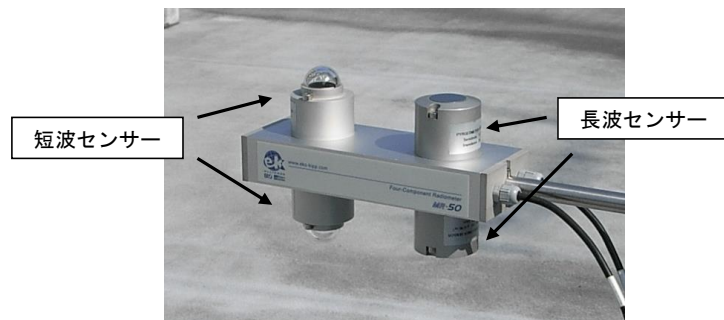


図 5.5 直径 15cm の黒球温度計（左）と長短波放射収支計（右）の例

なお、以下の式を用いて黒球温度などから MRT を求めることができます。

$$MRT = \left[(t_g + 273)^4 + 2.5 \times 10^8 \times V_a^{0.6} (t_g - t_a) \right]^{0.25} - 273 \quad (\text{ISO7726})$$

ここで、MRT：平均放射温度(℃)、 t_g ：黒球温度(℃)、 t_a ：気温(℃)、 V_a ：風速(m/s)。ただし、標準的な黒球温度計（直径 15cm）の場合。

¹²⁸ 気象庁，気象観測ガイドブック，2002 年 12 月

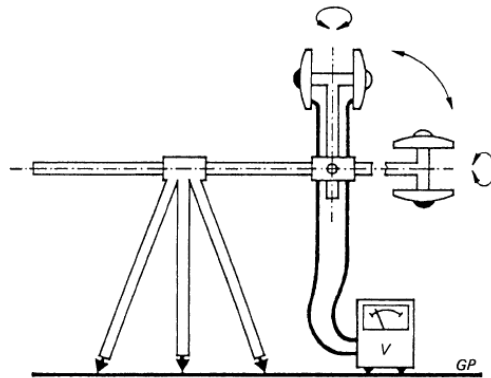
¹²⁹ 渡邊ほか，屋外における平均放射温度の算出法の比較，日本建築学会大会学術講演梗概集(環境工学 II)，357-358，2013

【屋外日射環境における平均放射温度 MRT の測定方法の紹介】

屋外日射環境における MRT について、ドイツ技術者協会規格 (VDI) に示されている測定方法を紹介します。

<VDI 3787 Part 2 Annex A : 平均放射温度 MRT>

- ・長短波放射収支計を使い、下方や上方へ 90°ずつ動かし、6 つの方向からの放射フラックスを測定
- ・測定高さ：地上 1.1m ※立位の人間の重心位置にほぼ一致



- ・6 方向別の重み係数と短波・長波別の吸収率から、人体に吸収される平均放射フラックス密度 S_{Str} (W/m^2) を計算

$$S_{Str} = \sum_{i=1}^6 W_i \cdot (a_k \cdot K_i + a_l \cdot L_i)$$

6 方向別の重み係数 W_i ($i = 1$ to 6)

$$\left[\begin{array}{l} \text{東・南・西・北の方向からの放射フラックス : 0.22} \\ \text{上または下からの放射フラックス : 0.06} \end{array} \right]$$

K_i : 短波放射 (日射) フラックス (W/m^2)

L_i : 長波放射 (赤外放射) フラックス (W/m^2)

a_k : 短波放射に対する吸収率 0.7

a_l : 長波放射に対する吸収率 0.97

- ・MRT ($^{\circ}C$) を計算

$$t_{MRT} = [S_{Str}/(\epsilon_p \cdot \sigma)]^{0.25} - 273.2$$

σ : ステファンボルツマン定数 5.67×10^{-8} ($W/(m^2 \cdot K^4)$)

ϵ_p : 人体の放射率 0.97

SET*の計算は複雑ですが、演算ソフトが一般に公表されており¹³⁰、計測した気温、相対湿度、風速、黒球温度（グローブ温度）などから求めることができます。

また、代謝量（作業量）と着衣量は状況に応じた適当な数値を入力します。以下に代謝量と着衣量の例を示します。例えば、静かに椅子に座っている場合で1.0[met]、男性の夏の服装で0.43[clo]などが使われます。

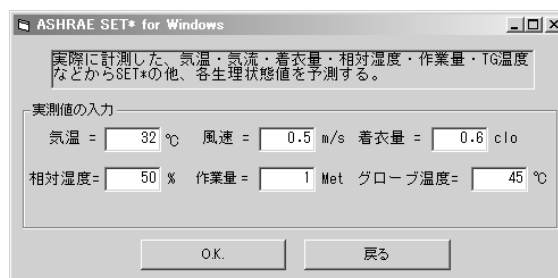


図 5.6 SET*演算ソフトの例¹³⁰

表 5.4 代謝量（met 値）の例¹³¹

活動	代謝量 (met)
いす座安静	1.0
立位安静	1.2
歩き回り	1.7
平坦歩行：3.2km/h	2.0
平坦歩行：4.8km/h	2.6

表 5.5 着衣量（clo 値）の例¹³¹

男性		女性	
服装	着衣量 (clo)	服装	着衣量 (clo)
1) 半ズボン、半袖シャツ、サンダル等	0.3	1) 夏ワンピース、サンダル等	0.21
2) 夏ズボン、半袖ワイシャツ、靴等	0.43	2) 夏ブラウス、夏スカート、サンダル等	0.26
3) 2)に夏上着、ネクタイ	0.56		

2) WBGT

WBGT を把握するには、気温（乾球温度）、自然湿球温度、黒球温度を計測し、下の計算式で求めることができます。

$$\text{WBGT (屋外)} = 0.7T_w + 0.2T_g + 0.1T$$

T_w : 自然湿球温度(°C)、 T : 気温(°C)、 T_g : 黒球温度(°C)

気温、黒球温度を測定する際の留意事項は、1) SET*に記した内容と同様です。

¹³⁰ ASHRAE SET*演算ソフト（空気調和・衛生工学会，新版 快適な温熱環境のメカニズム 付録，2006年3月）

¹³¹ 空気調和・衛生工学会，新版 快適な温熱環境のメカニズム，2006年3月

自然湿球温度は、湿球温度計（アウグスト温湿度計）を自然の風に当てて測定します。しかし、現在の測定機器は相対湿度を測定する機会が多く、表 5.6 を使うことで気温と相対湿度から湿球温度を求めることができます。屋外日向で気温と相対湿度を測定して湿球温度を求める場合、本来の自然湿球温度より低くなる可能性があります。

WBGT を自動的に計算する測定機器も市販されています。ただし、黒球温度を測定しない装置は、妥当な値を示さない場合があります。



図 5.7 WBGT 測定装置 (演算型)の例

表 5.6 乾球温度と相対湿度から湿球温度 (°C) を求める表

		相対湿度 (%)														
		30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
気温 (乾球温度) (°C)	40	25	27	28	29	30	32	33	34	35	36	37	37	38	39	40
	39	24	26	27	28	30	31	32	33	34	35	36	37	37	38	39
	38	24	25	26	28	29	30	31	32	33	34	35	36	36	37	38
	37	23	24	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	35	36	37
	36	22	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	34	35	36
	35	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	33	34	35
	34	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	32	33	34
	33	20	21	22	24	25	26	26	27	28	29	30	31	32	32	33
	32	19	21	22	23	24	25	26	26	27	28	29	30	31	31	32
	31	19	20	21	22	23	24	25	26	26	27	28	29	30	30	31
	30	18	19	20	21	22	23	24	25	26	26	27	28	29	29	30
	29	17	18	19	20	21	22	23	24	25	25	26	27	28	28	29
	28	17	18	19	20	20	21	22	23	24	24	25	26	27	27	28
	27	16	17	18	19	20	20	21	22	23	24	24	25	26	26	27
	26	15	16	17	18	19	20	20	21	22	23	23	24	25	25	26
	25	15	15	16	17	18	19	20	20	21	22	22	23	24	24	25

なお、平成 29 年 3 月に JIS-B-7922「電子式湿球黒球温度 (WBGT) 指数計」が発行され、屋外日向における相対湿度などから自然湿球温度を近似的に求める方法が示されています。風速などの詳細なデータが必要になりますが、WBGT の精度を向上させることができます。

5. 3 シミュレーションによる把握方法

- ・シミュレーションツールを用いることで体感温度の面的な分布の把握や対策効果の予測が可能
- ・ただし、適切なツールの選定や詳細な入力データの作成など、専門的な知識と技術が必要

街路空間の体感温度を面的に把握するにはシミュレーションを活用することが有効です。放射環境や風環境などのまちなかの分布状況から対策すべき場所を検討したり、様々な対策効果を予測することなどができます。ただし、シミュレーションを実施するまでには、適切なシミュレーションツールを選定し、道路や建物等の情報を数値化、気象データを作成するなど、その準備にも専門的な知識と技術が必要になります。そこで、専門技術を有するコンサルタント等にツールの選定やシミュレーションに必要な作業等を委託する方法もあります。

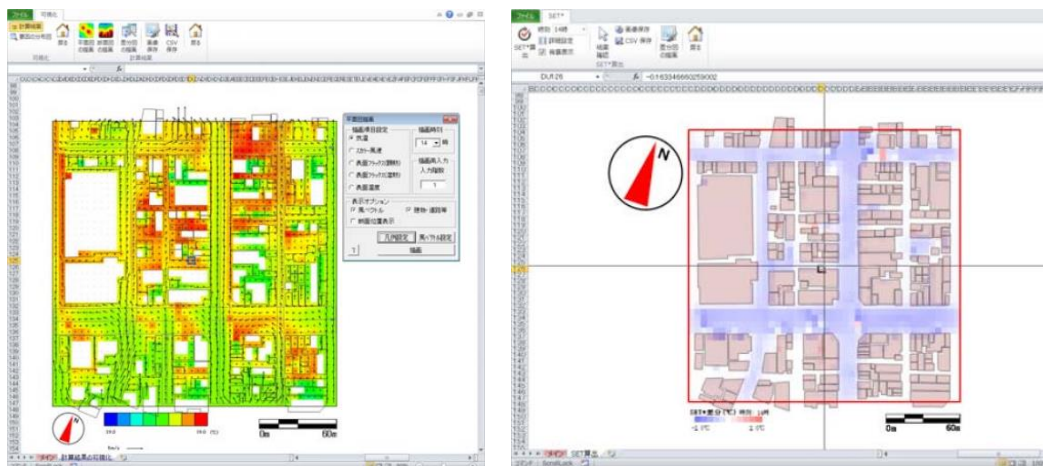
【シミュレーションツールの選定】

シミュレーションツールは研究機関等で保有するものが多くありますが、市販のシミュレーションツールも存在し、目的、費用等に応じて選定します。

体感温度を扱うことができるシミュレーションツールは、気温、湿度、風速、放射の複数の温熱要素を連成して計算するため、コンピューターの計算機負荷が高くなる傾向があります。そのため、どの程度のスケールの街区を対象とするのか、どの程度の解像度のデータが求められるのかを予め検討し、必要な計算機資源等を見積る必要があります。また、ツールによっては、出力可能な温熱要素や計算できる体感温度指標に制約があるため、どの種類の要素や指標が出力可能か、事前に確認しておく必要があります。

【国土交通省 – 都市の熱環境対策評価ツール – の紹介】

国土交通省は、地方公共団体等がヒートアイランド対策に資する「風の道」を活用した都市づくりを検討する際、パソコンを用いて、緑化や保水性舗装、「風の道」の確保などの様々な対策効果を予測できるシミュレーションツールを開発・提供しています。詳細版と簡易版が用意されており、詳細版では 500m 四方の地区を設定し、入力データの作成支援ツールを活用し、様々な対策の効果を生感温度（SET*）でも評価することができます。 <http://www.nilim.go.jp/lab/icg/hyouka-tool.htm>



都市の熱環境対策評価ツールの出力例（左：気温と風速分布、右：SET*の差分分布）

第6章 体感温度による対策効果の把握

- ・対策効果を体感温度指標で把握することで、人の実感に近い評価が可能
- ・暑さが厳しい夏季日中だけでなく、対策実施場所の利用状況に応じて夕方なども対象に評価
- ・効果予測にはシミュレーション等による複雑な計算が必要だが、簡易的に効果を把握する手法を紹介
- ・実測の場合、適切な比較対照地点で同時に測定することが望ましい

暑さ対策技術の導入による熱環境改善の効果は、標準有効温度 SET*や湿球黒球温度 WBGT などの体感温度指標で評価します。気温だけでは対策効果が明確にならない場合でも、体感温度指標を用いることで人の実感に近い評価が可能になります。また、対策効果を評価する際、暑さが最も厳しい夏季日中はもとより、対策実施場所の利用状況を想定の上、夕方なども対象として評価することが考えられます。その際、次の1)～3)のいずれの比較であっても、夏季日中や夕方等、同じ時間帯での測定結果を比較することが重要です。また、対策効果を明示する際には、効果を把握する際の気象条件を記載しておくことも重要です。

効果的に対策を進めるためには、事前に効果を予測すること、そして事後に効果を検証することが有効です。効果を定量的に予測するには、シミュレーションツールで面的に把握する方法と演算ソフト等を用いて局所的に計算する方法がありますが、専門的な知識等が必要になります。そこで本ガイドラインでは、巻末に参考資料として作用温度 OT を用いて簡易的に体感温度の改善効果を把握する方法を紹介しています。

シミュレーションによる方法は 5.3 を参照ください。以下では、実測による効果把握方法の例を紹介します。

1) 対策実施前と後で比較

対策を実施する前と対策を実施した後の熱環境を測定して、体感温度の違いを評価します。測定日の気象条件が異なると、測定結果には対策効果だけでなく気象の違いが影響するため、できるだけ同じような気象条件のもとで測定することが望まれます。

なお測定時、可能であれば 2) で説明するように、対策を実施していない基準地点でも同時に測定しておくことで、対策前後の単純比較ではなく、基準地点との差分を用いて体感温度の低下量を把握することができます。

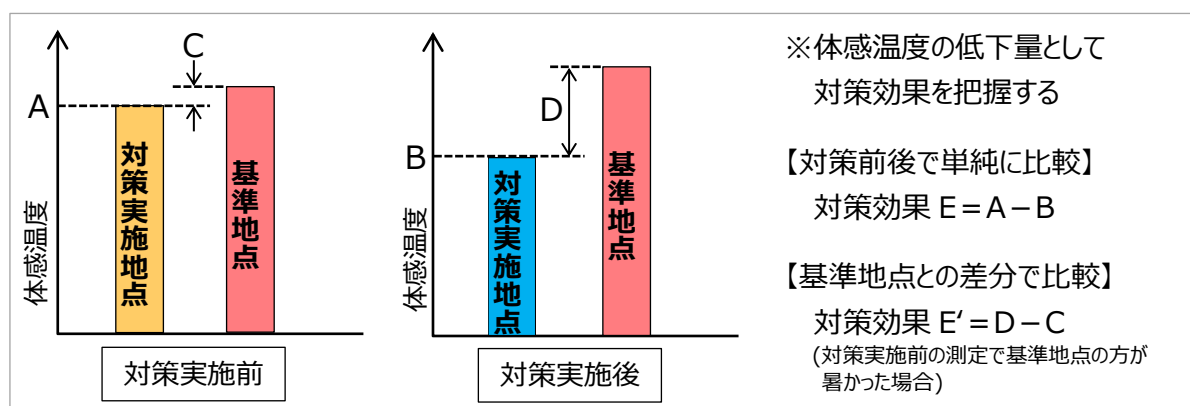


図 6.1 対策前後で結果を比較したイメージ

2) 対策実施地点と未実施地点（基準地点）で比較

対策実施地点での測定に加え、対策を実施していない比較対照（基準）となる地点でも測定する方法です。ただし、例えば基準地点の風が局所的に強い場合などには単純に比較できなくなるため、基準地点の選定には注意が必要です。基準地点を選定する際の留意事項の例を以下に示します。

- ・対策実施地点の近傍で、日当たりや周辺建物形状等が対策実施地点と大きく変わらないこと
(対策を導入する前に対策実施予定地点と基準地点の熱環境を同時に測定し、同程度の熱環境であることを確認しておくことが望ましい)
- ・対策実施地点の対策効果の影響を受けない地点であること
(例えば、微細ミストの効果을把握する場合、対策実施地点の風下側に効果が波及することが考えられるため、基準地点は対策実施地点の風上側であることが望ましい)

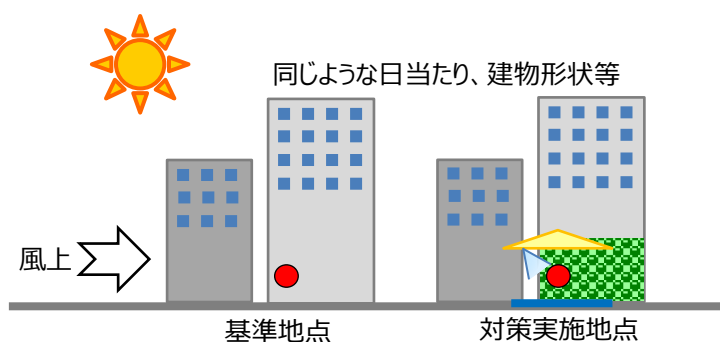


図 6.2 対策実施地点と未実施地点で比較するイメージ

3) 対策の稼働時と非稼働時で比較

対策技術の稼働と非稼働を繰り返すことにより、測定値の変化から対策効果を評価します。例えば、微細ミストの噴霧と停止を一定時間ごとに繰り返すことで、熱環境の変化を測定します。その際、可能であれば上記 2) と同様に、基準地点でも同時に測定することで、稼働時の効果を基準地点との差分として評価することができます。なお、気温などの変化を測定する場合には、センサーの応答時間を考慮して測定機器を選定する必要があります。

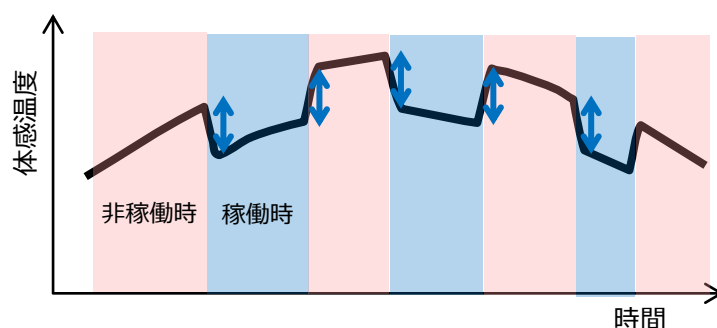


図 6.3 対策の稼働時と非稼働時で比較した結果のイメージ