

—第3部 技術情報編—

第6章 暑さ指数(WBGT)の把握

6.1 人が感じる暑さの指標

- ・人が感じる暑さの指標は複数の温熱要素で計算され、人が感じる暑さや涼しさを単一の尺度で表す指標
- ・暑さ指数 (WBGT) は熱中症予防、体感温度 (SET) は快適性の評価に適した指標

人が感じる暑さには気温、湿度、風速、日射・赤外放射、風の4つの環境側の要素と、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。人が感じる暑さの指標は、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。暑さ指数(WBGT)は環境側の要素を用いて、体感温度(SET)は環境側と人間側の要素を用いて計算されます。暑さ指数(WBGT)は熱中症予防に、体感温度(SET)は快適性の評価に適した指標です。暑さ指数(WBGT)は4頁、体感温度(SET)は以下のコラムを参照下さい。

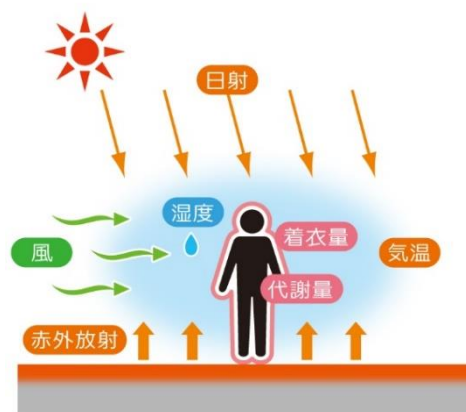


図 6.1 人が感じる暑さに影響する要素

【体感温度 (SET : Standard Effective Temperature (標準有効温度))】

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指標で、温熱的に同等な標準環境の気温 (°C) と言えます。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 が 32°C を超えるあたりで「不快」と感じる傾向にあるようです。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¹⁴⁵では、SET32°Cが温熱的に受容できる上限であると報告されています。

表 6.1 SET と快適感との関係

SET (°C)	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¹⁴⁶を参考に作成

¹⁴⁵ 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

¹⁴⁶ 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

6. 2 実測等による把握方法

- ・JIS B 7922 に準拠した携帯型暑さ指数(WBGT)計を用いて簡単に暑さ指数(WBGT)を計測できる
- ・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気温、湿度、風速、日射・赤外放射、風の要素を測定
- ・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暑さ指数(WBGT)を計算

1) 携帯型暑さ指数(WBGT)計による測定

暑さ指数 (WBGT) は湿球温度、黒球温度、乾球温度から計算しますが、それぞれの温度は表 6.2 に示す環境側の温熱要素の影響を受けます。

JIS B 7922「電子式湿球黒球温度 (WBGT) 指数計 (2017)」に準拠した小型の暑さ指数(WBGT)計測器 (以下「携帯型暑さ指数(WBGT)計」という。)を用いることで比較的簡単に暑さ指数(WBGT)を計測することができます。黒球がないタイプのもの (室内用等) も市販されていますが、屋外では正しく暑さ指数 (WBGT) が計測されない可能性があるため、屋外の測定には黒球付きのものを推奨します。携帯型暑さ指数 (WBGT) 計は表 6.3 のように測定精度によってクラス分けされています¹⁴⁷。ただし、携帯型暑さ指数 (WBGT) 計を用いる場合、0.3m/s 未満の弱風環境では暑熱環境を過小評価する可能性があるため、より正確な計測が必要な場合には標準黒球 (直径 15cm) を用いた計測方法もあります¹⁴⁸。



図 6.2 携帯型暑さ指数(WBGT)計のイメージ

表 6.2 暑さ指数 (WBGT) の温熱要素

測定値	環境側の温熱要素
湿球温度	気温、湿度
黒球温度	気温、日射・赤外放射、風
乾球温度	気温

表 6.3 携帯型暑さ指数 (WBGT) 計のクラス¹⁴⁷

クラス	WBGT 指数の誤差限界
1	±1
1.5	±1.5
2	±2

日向の暑さ指数を正確に測定するためのポイントとして、以下の測定方法が挙げられます。

- ・黒球に日射を当てる (黒球が陰にならない)
- ・地上から 1.1m 程度の高さで測定
- ・壁等の近くは避ける
- ・値が安定してから (10 分程度) 測定値を読み取る

※屋外の計測は熱中症の危険性が高まるため、事前に水分補給をし、帽子を被り測定するようにしましょう。

¹⁴⁷ JIS B 7922「電子式湿球黒球温度 (WBGT) 指数計 (2017)」

¹⁴⁸ 標準黒球温度計を用いた測定方法については、JIS Z 8504 を参照ください。

一方、正確に測定できない要因として、以下のような測定方法が挙げられます。

- ・測定器に日射が当たらない
- ・地面、朝礼台等の上に直接置く
- ・黒球を握る、通気口をふさぐ

正確に測定できない可能性がある測定方法

例1 測定器に日射が当たらない。



例2 地面、朝礼台等の上に直接置く。



例3 黒球を握る、通気口をふさぐ。



図 6.3 携帯型暑さ指数計の使い方¹⁴⁹

¹⁴⁹ 環境省「屋外日向の暑さ指数計の使い方」https://www.wbgt.env.go.jp/pdf/heatillness_leaflet_wbgtmeter.pdf

2) 暑さ指数 (WBGT) と体感温度 (SET) の測定方法

①測定場所の選定

暑さ指数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暑さ指数が高くなる可能性があります。歩行者の暑さ指数を評価する場合には地上高 1.1m¹⁵⁰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。

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遮蔽する必要があります。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、6.5 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¹⁵¹。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。



図 6.4 気温センサーを入れる通風筒の例（断面と外観）¹⁵²

③自然湿球温度の測定

自然湿球温度は、湿球温度計（オーガスト温湿計）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ケースが多く、表 6.4 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。

なお、JIS B 7922「電子式湿球黒球温度 (WBGT) 指数計」では、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。

¹⁵⁰ 日本建築学会, 日本建築学会環境基準 AIJES-H002-2009 室内温熱環境測定規準・同解説 を参考とした。

¹⁵¹ 気象庁, 気象観測の手引き, 1998 年 9 月

¹⁵² 気象庁, 気象観測ガイドブック, 2002 年 12 月

表 6.5 乾球温度と相対湿度から湿球温度 (°C) を求める表 (標準気圧の場合)

		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	

④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¹⁵³したりし、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平均放射温度 MRT¹⁵⁴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。

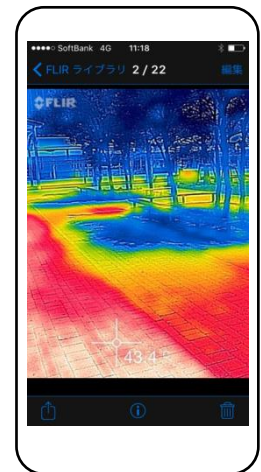


図 6.5 スマートフォンによる熱画像撮影のイメージ

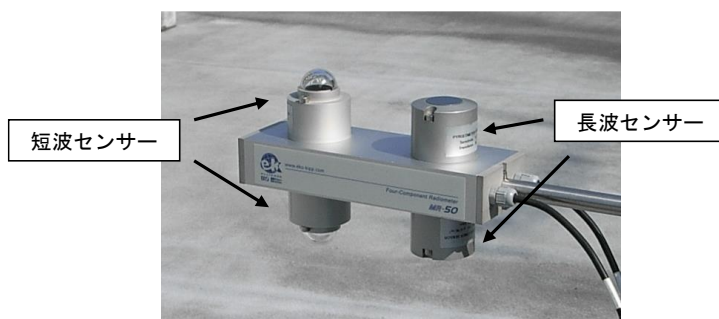


図 6.6 直径 15cm の黒球温度計 (左) と長短波放射収支計 (右) の例

¹⁵³ 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

¹⁵⁴ 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 (°C)

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(°C)、 t_g ：黒球温度(°C)、 t_a ：気温(°C)、 V_a ：風速(m/s)。ただし、標準的な黒球温度計（直径 15cm）の場合。

【体感温度(SET)の測定方法】

体感温度(SET)を把握するには気温(°C)、相対湿度(%）、風速(m/s)、黒球温度(°C)もしくはMRT (°C)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。

体感温度(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¹⁵⁵、計測した気温、相対湿度、風速、黒球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。

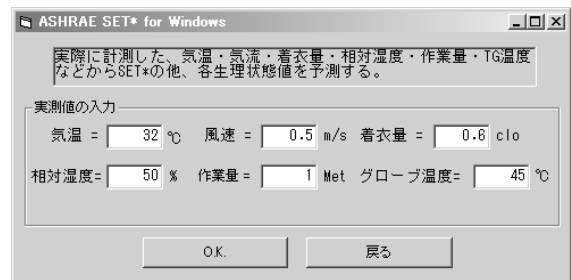


図 6.7 SET*演算ソフトの例¹⁵⁵

表 6.6 代謝量 (met) の例¹⁵⁶

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 6.7 着衣量 (clo) の例¹⁵⁶

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		

¹⁵⁵ 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）

¹⁵⁶ 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

6.3 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人が感じる暑さ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

街路空間の人が感じる暑さ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。放射環境や風環境等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したりすることができます。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等、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。

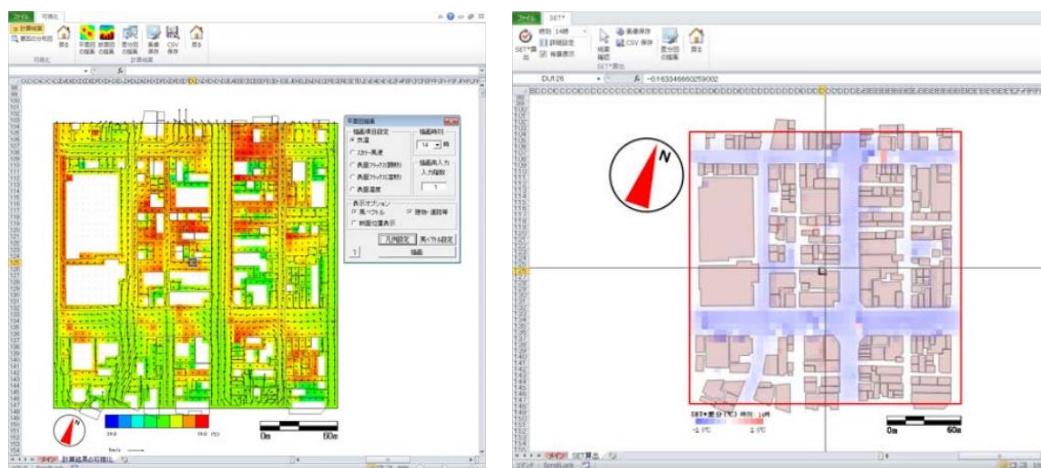
【シミュレーションツールの選定】

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。

人が感じる暑さ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人が感じる暑さに制約があるため、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】※ツールの推奨環境をご確認の上ご使用ください

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体感温度（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）