

第2章 シミュレーションによる適応策効果の把握

2.1 評価指標の検討

シミュレーションを用いて歩行者の熱ストレスを把握するために用いるべき評価指標について検討を行った。本調査では、以下の2項目の評価に適した指標を検討した。

- (a) 歩行者への熱ストレス低減効果の評価項目
- (b) 快適な熱環境の創出効果の評価項目

1) 歩行者への熱ストレス低減効果の評価項目

歩行者の熱ストレスを評価するのに当たっては、熱中症発症に関係する生理指標に着目した。

熱中症と関連性の高い生理指標で、かつシミュレーションで見ることのできる指標として下記の3指標を候補として挙げた上で、最終的に本調査で用いる指標について検討した。	
「深部体温」 「発汗量」 「皮膚温」	
文献調査の結果 (熱中症及び熱環境指標との関連性)	「深部体温」 ・重症度の高い熱中症は「深部体温」が高い ・ISO7243:1989では作業者の暑熱負担の評価の基準値としてWBGTは直腸温が「38℃」にならないように設定されている ・WBGTの上昇に伴い上昇する 「発汗量」 ・体液バランスの異常が熱中症のいずれの症状にも関連する ・日本体育協会では熱中症予防の目安として発汗量が体重の2%を超えないこととしている ・WBGT、気温の上昇に伴い上昇する 「皮膚温」 ・熱中症との直接的な関係はみえないが、深部体温で変化が見られない領域において、中間指標として用いることは有用である ・気温、SET*、WBGTの上昇に伴い上昇する ・同じ気温下においては、日なたよりも日陰で約2℃平均皮膚温が低い
検討会の結果 (妥当性のある指標の具体化)	・「深部体温」が目的地に着く時にどこまで上がるかという一律の評価をするのに、歩行終了時での値は有効である。 ・「深部体温」が長く高い状態にあるヒトの方が、相対的に熱ストレスは大きい。 ・「発汗量」は歩行終了時の積算値で見るのが良い。 ・生理的な負担を見るには、無効発汗、有効発汗、総発汗量の中では、「総発汗量」が有効と考えられる ・「皮膚温」は結果的な温度であり高いからどうと言うものではない。また、汗の状態にも大きく依存する
シミュレーションに用いる評価指標 (生理指標) 深部体温 (時間平均・歩行終了時) 累積分泌発汗量	
ただし、以上の生理指標についてはその値自体には個人差が非常にあるため、絶対値ではなく相対的な評価を行う。また、経路上の熱環境を物理的に評価するため、熱環境4要素及びそれらの要素を総合的に評価できる体感指標WBGT、SET*を用いる。これらSET*等についても、絶対値ではなく相対比較として用いる。	

以下に、文献調査の概要を示す。

熱中症と関連性の高い生理指標の候補として挙げた3指標「深部体温」、「発汗量」、「皮膚温」について、本検討に用いる妥当性を明らかにするために行った。ヒトの暑熱に対する生理反応の整理、及びそれらと熱中症・熱環境指標との関連性についての既往研究調査の結果を取りまとめる。

参考資料2-1に、収集した文献の一覧表、個々の文献概要を付した。本章で示した文献番号は、この文献一覧表及び文献概要の文献番号と対応している。

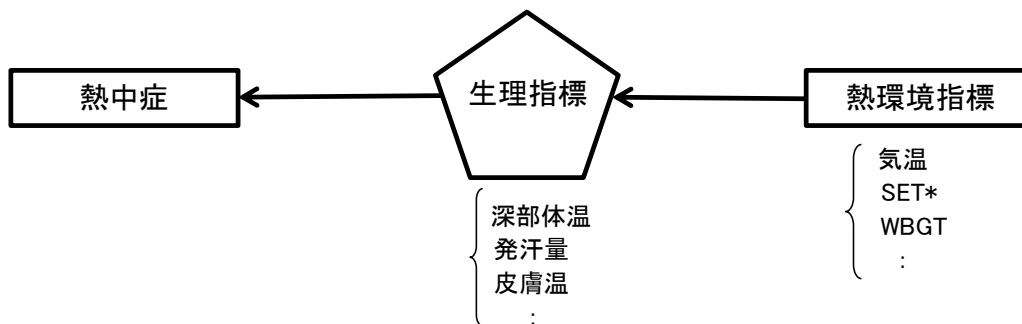


図2-1 熱中症に関わる指標の関係図

表2-1 生理指標との関係性に関する文献調査の方法

検索サイト	CiNii (NII 論文情報ナビゲータ) JDreamII (科学技術医学文献データベース)
検索用語	「熱中症 and 新分類」 「ヒト and 暑熱 and 影響」 「体温上昇 and 暑熱環境」 「深部体温上昇」 「温熱環境 and 生理 and 影響」 「暑熱環境 and 生理」 「温熱環境 and 人体 and 影響」 「発汗 and 暑熱/温熱」
* 以上の検索用語より検出された論文ならびに、それら論文の引用文献、共著者などを追って文献を収集した。	

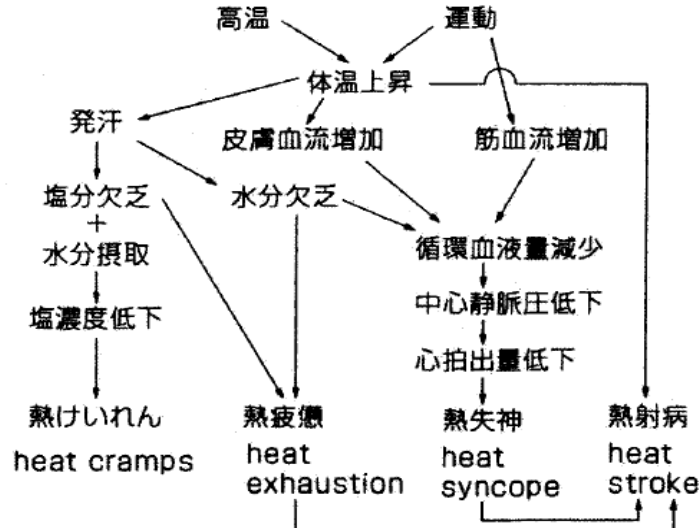
①温熱生理反応の整理

熱中症の症状は、重症段階によって異なり、またその症状に至るヒトの体内で起こる生理状態も大きく異なり、一括りに扱うことはできない。そこで、ここでは、日本救急医学会による全国規模の熱中症の実態調査 Heatstroke STUDY で熱中症の診断基準であり広く普及している、安岡¹考案の日本神経救急医学会が提唱した熱中症の分類を用い、表2-2、図2-2に温熱生理反応のメカニズムを示した。これらにより、熱中症と関連性の高い生理指標として挙げた、「深部体温」「発汗量」「皮膚温」が熱中症に至るメカニズムの中でどのような位置付けにあるかを明らかにした。

この分類では、重症型の診断基準を定めることにより、潜在的重症例を早期に発見・診断することができ、誤診、手遅れを防ぐことができる。また熱中症が軽症から重症まで連続した病態であり、誤った治療をすれば重症化するという認識を持つことにも役立つ（文献1）-2）。

¹ 安岡ほか『熱中症（暑熱障害）Ⅰ～Ⅲ度分類の提案；熱中症新分類の臨床的意義』（救急医学 Vol. 23、1999年）（文献1）-9）。

表 2-2 熱中症の重症度別の症状と生理反応

熱中症の分類 ¹	I 度 (軽度) heat cramp/heat syncope (熱痙攣/熱失神)	II 度 (中等度) heat exhaustion (熱疲労)	III 度 (重度) heat stroke (熱射病)			
<p>症状^{1,2} (診断基準)</p>	<p>暑熱曝露があり、熱中症以外の他疾患（中枢神経疾患、全身感染症、内分泌疾患、中毒など）ではないこと³。</p> <table border="1" data-bbox="416 436 1404 1041"> <tr> <td data-bbox="416 436 751 1041"> <p>【熱痙攣】 高温多湿環境下での長時間の運動中の大量発汗に対して十分な塩分補給がされないまま水分補給のみがされたことによる Na 欠乏、筋肉の興奮性亢進による筋肉攣縮。 [症状] こむら返り、大量の発汗、筋肉痛</p> <p>【熱失神】 直射日光の長時間曝露による皮膚血管などの末梢血管の拡張による脳血流量の低下による短時間の失神発作。起立性低血圧の一種。[症状]めまい、立ちくらみ、欠伸</p> </td> <td data-bbox="756 436 1091 1041"> <p>深部体温が高温 [診断基準] III 度以外</p> <p>[症状の例] めまい感、疲労感、虚脱感、頭重感、失神、悪心、嘔吐、下痢、集中力・判断力の低下、電解質異常や末梢血管拡張による循環不全など多様な症状が認められる。</p> </td> <td data-bbox="1096 436 1404 1041"> <p>①～③のいずれかが認められること。</p> <p>①脳機能障害：意識消失、譫妄状態、小脳症状、痙攣 ②肝・腎機能障害：GOT、GPT、BUN、クレアチニンの上昇 ③血液凝固障害：DIC（播種性血管内凝固症候群）</p> <p>⇒多臓器不全から死亡に至る（III度の死亡率 10%）⁴</p> </td> </tr> </table>			<p>【熱痙攣】 高温多湿環境下での長時間の運動中の大量発汗に対して十分な塩分補給がされないまま水分補給のみがされたことによる Na 欠乏、筋肉の興奮性亢進による筋肉攣縮。 [症状] こむら返り、大量の発汗、筋肉痛</p> <p>【熱失神】 直射日光の長時間曝露による皮膚血管などの末梢血管の拡張による脳血流量の低下による短時間の失神発作。起立性低血圧の一種。[症状]めまい、立ちくらみ、欠伸</p>	<p>深部体温が高温 [診断基準] III 度以外</p> <p>[症状の例] めまい感、疲労感、虚脱感、頭重感、失神、悪心、嘔吐、下痢、集中力・判断力の低下、電解質異常や末梢血管拡張による循環不全など多様な症状が認められる。</p>	<p>①～③のいずれかが認められること。</p> <p>①脳機能障害：意識消失、譫妄状態、小脳症状、痙攣 ②肝・腎機能障害：GOT、GPT、BUN、クレアチニンの上昇 ③血液凝固障害：DIC（播種性血管内凝固症候群）</p> <p>⇒多臓器不全から死亡に至る（III度の死亡率 10%）⁴</p>
<p>【熱痙攣】 高温多湿環境下での長時間の運動中の大量発汗に対して十分な塩分補給がされないまま水分補給のみがされたことによる Na 欠乏、筋肉の興奮性亢進による筋肉攣縮。 [症状] こむら返り、大量の発汗、筋肉痛</p> <p>【熱失神】 直射日光の長時間曝露による皮膚血管などの末梢血管の拡張による脳血流量の低下による短時間の失神発作。起立性低血圧の一種。[症状]めまい、立ちくらみ、欠伸</p>	<p>深部体温が高温 [診断基準] III 度以外</p> <p>[症状の例] めまい感、疲労感、虚脱感、頭重感、失神、悪心、嘔吐、下痢、集中力・判断力の低下、電解質異常や末梢血管拡張による循環不全など多様な症状が認められる。</p>	<p>①～③のいずれかが認められること。</p> <p>①脳機能障害：意識消失、譫妄状態、小脳症状、痙攣 ②肝・腎機能障害：GOT、GPT、BUN、クレアチニンの上昇 ③血液凝固障害：DIC（播種性血管内凝固症候群）</p> <p>⇒多臓器不全から死亡に至る（III度の死亡率 10%）⁴</p>				
<p>熱中症に至る生理反応⁵</p>	 <pre> graph TD A[高温] --> B[体温上昇] C[運動] --> B B --> D[発汗] B --> E[皮膚血流増加] B --> F[筋血流増加] D --> G[塩分欠乏 + 水分摂取] D --> H[水分欠乏] G --> I[塩濃度低下] I --> J[熱けいれん / heat cramps] H --> K[熱疲労 / heat exhaustion] F --> L[循環血液量減少] L --> M[中心静脈圧低下] M --> N[心拍出量低下] N --> O[熱失神 / heat syncope] N --> P[熱射病 / heat stroke] L --> P </pre>					

² 小野寺ほか『熱中症』（治療 Vol. 83, No. 5、2001 年）（文献 1）－ 8）参照。

³ 中村、有賀『熱中症』（救急医学 Vol. 33、2009 年）（文献 1）－ 1）参照。

⁴ 嶋津ほか『熱中症における中枢神経障害』（日本災害医学会会誌 Vol. 45, No. 8、1997 年）（文献 1）－ 11）。

⁵ 森本武利『運動時の熱中症予防』（体力科学 56、2007 年）より図抜粋。

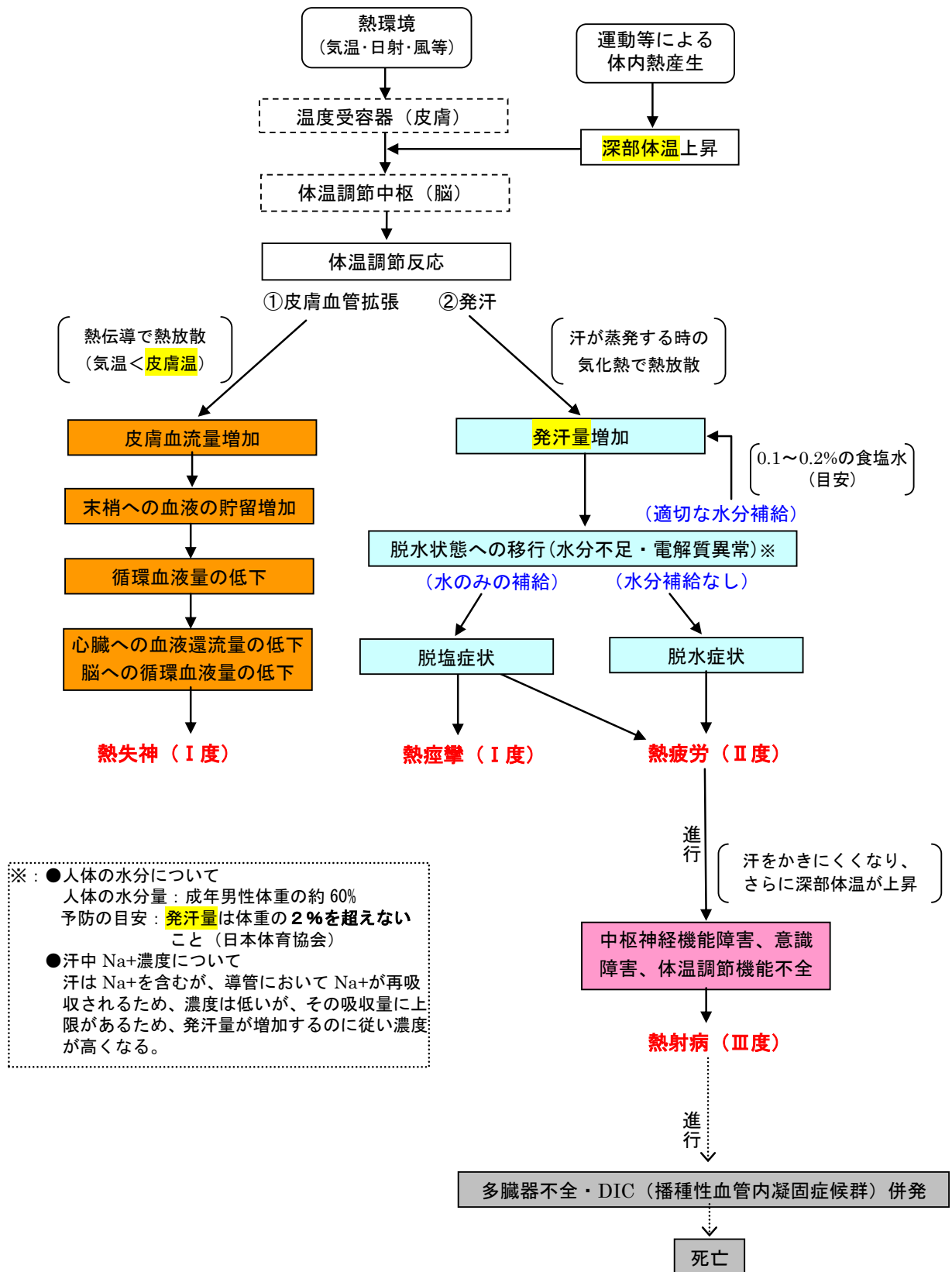


図 2 - 2 生理反応の整理

その結果、「深部体温」に関して、個人差が大きいためあくまで目安ではあるが、重症度の高い熱中症患者は「深部体温」が高いこと、ISO7243:1989（暑熱環境—WBGT 指数に基づく作業者の熱ストレス評価）では作業者の暑熱環境における負担評価の WBGT 基準値として直腸温が 38℃にならないように設定されていること（表 2-3）、40℃を境に体温調節機能が機能しなくなること等が明らかとなった。

表 2-3 ISO7243:WBGT の基準値⁶

Metabolic rate (W m ⁻²)	WBGT reference value	
	Acclimatized (°C)	Not acclimatized (°C)
Resting $M < 65$	33	32
$65 < M < 130$	30	29
$130 < M < 200$	28	26
$200 < M < 260$	25 (26)*	22 (23)*
$M > 260$	23 (25)*	18 (20)*

The values given have been established allowing for a maximum rectal temperature of 38°C for the persons concerned.

*: Figures in brackets refer to sensible air movement.

「発汗量」に関しては、個人差があるが、体液バランスの異常が熱中症のいずれの症状にも関連すること、日本体育協会では発汗量が体重の 2%を超えないことを呼びかけていること、大量の発汗があった後は発汗が止まり、体温調節機能が機能しなくなること等が明らかとなった。

「皮膚温」に関しては、熱中症との直接的な関係は見えないが、上述の他の生理指標との関連が指摘されている。「深部体温」との関連では、深部体温が平均皮膚温に比例して上昇し始める臨界平均皮膚温があり（図 2-3）、

「発汗量」とも有意な正の相関関係が認められている。また、本調査では、街区内での歩行における評価を行うため、「深部体温」の上昇という反応までは見られない可能性があるため、その際の間接指標として、補助的に「皮膚温」を用いることは有用である。

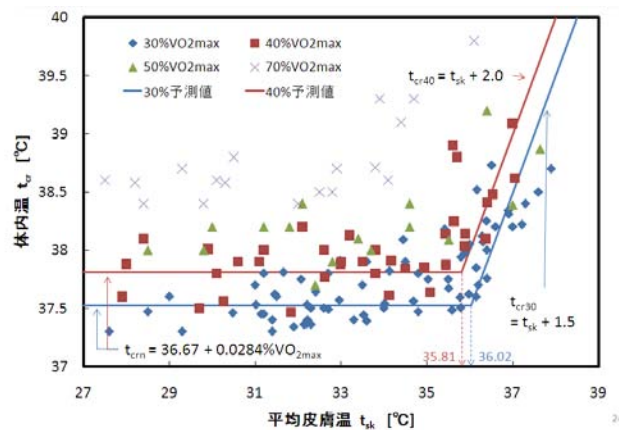


図 2-3 相対作業強度別の平均皮膚温と体内温の関係⁷

⁶ Ken PARSONS, Heat Stress Standard ISO7243 and its Global Application(Industrial Health 44, 2006) 表中の、Acclimatized は「順化している」場合、Not acclimatized は「順化していない」場合を指す。

⁷ 桑原浩平「屋外環境における人体の温熱生理反応、心理反応」（平成 21 年度環境省ヒートアイランド現象による環境影響等に関する調査業務 第 1 回検討会講演資料）より抜粋。

②熱環境指標との関連性の整理（文献調査結果）

熱環境指標との関係性についての文献調査の結果を整理する。

「深部体温」「発汗量」とも、WBGTの上昇に伴い上昇することが明らかとなっている（図2-4、図2-5）また、「発汗量」については気温との関連についても認められている（図2-5、図2-7）。「皮膚温」については気温、SET*、WBGTの上昇に伴い上昇することが明らかになっている（図2-6）。その他、同じ気温下においては、日なたよりも日陰で約2℃平均皮膚温が低い、という研究結果が出ている（図2-8）。

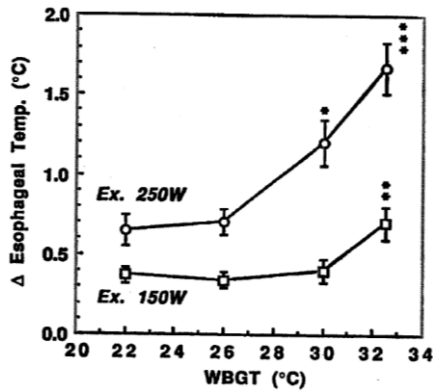


図2-4 WBGTと食道温の関係図
(文献1)-18)

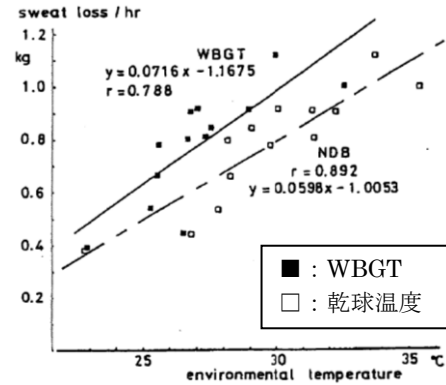


図2-5 WBGTと発汗量の相関関係
(文献1)-19)

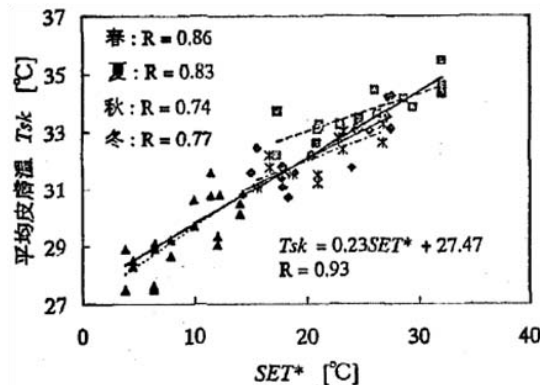


図2-6 SET*と平均皮膚温の関係 (文献1)-17)

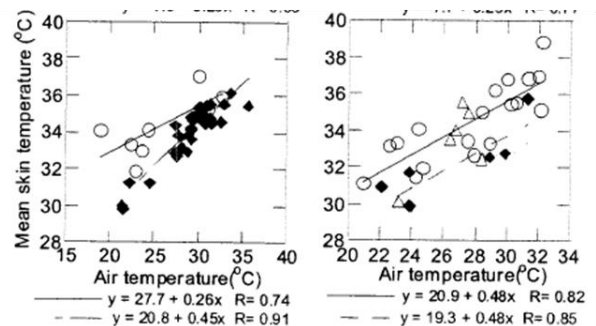
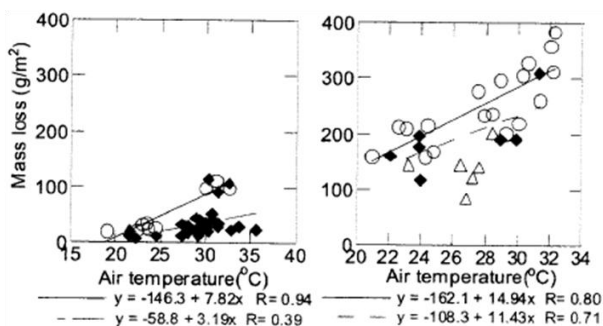


図2-7 気温と体重減少量の関係

図2-8 気温と平均皮膚温の関係

(文献1)-12) (左図：安静時、右図：運動時、○：日なた、△：曇天、◆：日陰)

2) 快適な熱環境の創出効果の評価項目

快適性指標と関連性の高い生理指標及び環境指標について行った既往文献調査の概要を整理した。

対策を講じることで快適な熱環境の創出効果を評価するため、快適性指標と関連性の高い生理指標及び環境指標について、既往文献調査を行った。既往文献調査の結果、既往研究で用いられている事が多く、その研究間の結果のばらつきも大きくない、環境4要素（気温、放射、風、湿度）、人体2要素（着衣、代謝）全てを評価できる指標として、以下の熱環境指標が挙げられた。

「SET*」

なお、本調査でSET*を取り扱う際には、歩行に伴い算出されるSET*が非定常値であることを考慮し、時間平均の値を用いることとした。

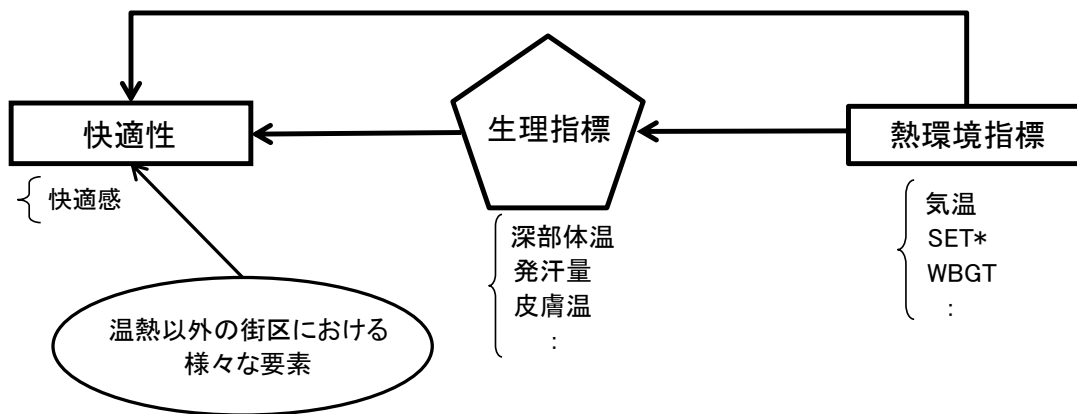


図 2-9 快適性に関わる指標の関係図

表 2-4 快適性指標と生理指標及び環境指標との関係性に関する文献調査の方法

検索サイト	CiNii (NII 論文情報ナビゲータ) JDream II (科学技術医学文献データベース)	
検索用語	温熱快適性	「温熱環境 and 生理心理反応」 「温熱快適性」 「快適感 and 屋外環境」
	温熱以外の要素と快適性	「緑 and 快適」 「街路樹 and 快適」 「都市 and 快適」 「日射 and 快適」 「ごみ and 快適 or 不快」 「ごみ and 都市 and 快適 or 不快」 「廃棄物 and 不快」 「舗装 and 快適」 「室外機 and 快適 or 不快」 「視覚的快適性」 「聴覚的快適性」 「嗅覚的快適性」
* 以上の検索用語より検出された論文ならびに、それら論文の引用文献、共著者などを追って文献を収集した。		

①温熱的快適性

温熱的快適性については、生理指標として「平均皮膚温」、熱環境指標として「SET*」「WBGT」「気温」が快適性に関わる評価指標として挙げられた。それぞれの指標の長短所を表2-5に整理した。これより、SET*が最も快適性と関連性の高い指標であるということが出来る。収集した文献の一覧表、文献概要は、参考資料2-1に取りまとめた。

表2-5 温熱快適性に関する指標の整理

指標		関連性	メリット	デメリット
生理指標	平均皮膚温	<ul style="list-style-type: none"> 複数の論文に共通する快適と感じる範囲は32.5℃～34.2℃(発汗しない条件)である 快適性の極大値は、夏季・冬季とも33.6℃である 		<ul style="list-style-type: none"> 皮膚温は発汗の有無に依存する性質がある
熱環境指標	SET*	<ul style="list-style-type: none"> 複数の論文に共通する快適と感じる範囲は22.5℃～24.0℃である やや快適も含めた広い範囲をとると、17.8℃～27.5℃が快適性の範囲である 中立SET*は23.5℃前後である 	<ul style="list-style-type: none"> 多くの既往研究があり、その研究間の結果のばらつきも大きくない 環境4要素(気温、放射、風、湿度)、人体2要素(着衣、代謝)全てを評価できる。 	
	WBGT	<ul style="list-style-type: none"> 快適性の範囲は24.2℃～28.2℃である 		<ul style="list-style-type: none"> 既往研究のWBGTに対する快適性回答値の分布はばらつきが大きい 人体2要素について評価できない
	気温	<ul style="list-style-type: none"> 快適性の範囲は20℃～25℃である 		<ul style="list-style-type: none"> 環境4要素の内、気温以外の要素について評価できない

②温熱以外の要素と快適性

温熱以外の要素と快適性に関わる評価指標については、被験者のアンケート調査による主観的評価等が多く、本検討の評価指標として用いることは難しいが、例えば生け垣の緑被率と快適性の関係等、対策ケースの検討に活用できる知見については参考とした。

参考資料2-1に、収集した文献の概略表、文献概要、文献一覧表を付した。