

1.2 街区の熱環境と人の熱ストレスの関係

熱ストレスのうち、暑熱環境が主要因の一つとして起こり得る熱中症は、社会的な関心が高く、多面的な対策が求められている。ここでは、特に熱中症に着目し、街路空間の熱環境との関連性について整理を行った。

なお、既往調査では、気温や湿度など都市スケールの気象データと熱中症による救急搬送者数等の関連性が指摘されているが、本調査では、街路空間における詳細な熱環境と熱中症の関係性を検討するため、都市スケールの気象と熱中症の関係は扱わないこととした。

街路空間の熱環境と熱中症の関係は、図 1.11 に示したように大きく 2通りの関連付けが考えられる。1つは熱中症予防指針等を活用する方法であり、もう一つは熱環境が人体生理に及ぼす影響を推定し熱中症と関連付ける手法である。

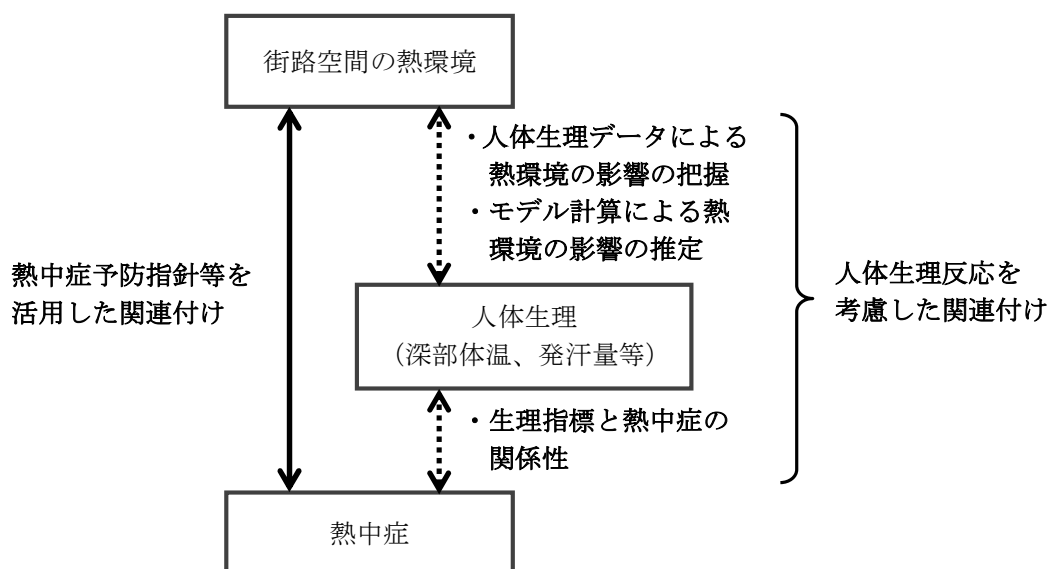


図 1.11 街路空間の熱環境と熱中症の関連付けのイメージ

1.2.1 熱中症予防指針等を活用した関連付け

熱中症に係る予防指針は、(公財)日本体育協会、日本生気象学会、ISO によるものなどがあり、それぞれ運動時、日常生活時、労働時の指針である。これらの指針はいずれも WBGT を熱環境の指標とし、WBGT 値に対する危険性や対応方針などを示している。

WBGT (°C)	湿球温 (°C)	乾球温 (°C)	運動は原則中止	WBGT31°C以上では、皮膚温度より気温のほうが高くなり、体から熱を逃すことができない。特別の場合以外は運動を中止する。
31	27	35	嚴重警戒	熱中症の危険が高いので、激しい運動や持久走などは避ける。体力の低いもの、暑さに慣れていないものは運動中止。運動する場合は積極的に休息をとり、水分補給を行う。
28	24	31	警戒	熱中症の危険が増すため、積極的に休息をとり、水分を補給する。激しい運動では30分おきくらいに休息をとる。
25	21	28	注意	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しながら、運動の合間に積極的に水分を補給する。
21	18	24	ほぼ安全	通常は熱中症の危険は少ないが、水分の補給は必要。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する。

※ WBGT(湿球黒球温度)の算出方法
 屋外: WBGT = 0.7 × 湿球温度 + 0.2 × 黒球温度 + 0.1 × 乾球温度
 屋内: WBGT = 0.7 × 湿球温度 + 0.3 × 黒球温度
 ※ 環境条件の評価はWBGTが望ましい。
 ※ 湿球温度は気温が高いと過小評価される場合もあり、湿球温度を用いる場合には乾球温度も参考にする。
 ※ 乾球温度を用いる場合には、湿度に注意。湿度が高ければ、1ランクきびしい環境条件への注意が必要。

温度基準 (WBGT)	注意すべき生活活動の目安	注意事項
危険 (31°C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°C)		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°C)	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°C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。

(ここでのWBGTはその日の最高気温時の気温と湿度から推定されるものである)
 (28~31°Cは28°C以上31°C未満の意味)

(a) 日本体育協会⁴

(b) 日本生気象学会⁵

代謝率区分	代謝率 M		WBGT 基準値			
	単位体表面積 W/m ²	総表面積 (平均体表面積 1.8m ²) W	熱に順化している人 °C		熱に順化していない人 °C	
0 (安静)	M ≤ 65	M ≤ 117	33		32	
1 (低代謝率)	35 < M ≤ 130	117 < M ≤ 234	30		29	
2 (中程度代謝率)	130 < M ≤ 200	234 < M ≤ 360	28		26	
3 (高代謝率)	200 < M ≤ 260	360 < M ≤ 468	気流を感じないとき 25	気流を感じるとき 26	気流を感じないとき 22	気流を感じるとき 23
4 (極高代謝率)	M > 260	M > 468	23	25	18	20

備考 これらの数値は最高直腸温度 38°Cを許容限度として設定されている。

(c) JIS Z 8504 (ISO7243) ⁶

図 1.12 熱中症予防指針

1.2.2 人体生理反応を考慮した関連付け

1) 人体生理データによる熱環境の影響の把握

人体生理データを基に、熱環境が人体に及ぼす影響を整理した。整理に当たっては文献収集のほか、以下の有識者へのヒアリングを実施し、知見を収集した。ヒアリングシートについては、参考資料 1-2 「街区の熱環境と人の熱ストレスの関係に関するヒアリング結果」に示した。

- ・ 福永龍繁氏 (東京都監察医務院 院長)
- ・ 三宅康史氏 (昭和大学医学部 救命救急センター・救急医学講座 教授)

⁴ (公財)日本体育協会ホームページ

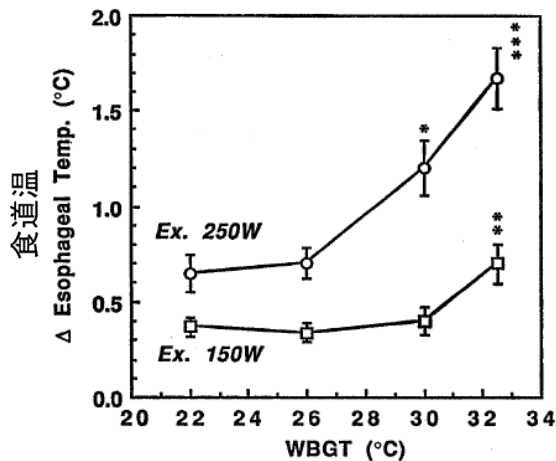
⁵ 日本生気象学会: 「日常生活における熱中症予防指針」 Ver.2, 2012

⁶ JIS Z 8504: 1999 (ISO7243: 1989), 人間工学—WBGT(湿球黒球温度)指数に基づく作業者の熱ストレスの評価—暑熱環境

①被験者データによる熱環境の影響の把握

熱環境の違いが人体生理に与える影響について、既往知見を基に情報整理を行った。文献整理の結果は、参考資料1-3「熱環境と人体生理に関する文献収集結果」に記載した。

例えば寄本(1992)⁷では、人工気象室にて行った被験者実験により、一定の運動強度における WBGT と食道温の関係では、高 WBGT 時に食道温が高くなることを明らかにしている(図 1.13)。このような熱環境と深部体温の関係を示した被験者実験データは多くはないが、既存知見の中では温熱指標として WBGT が多く用いられていた。



人工気象室
 被験者：成人男性 6 名
 年齢：23～35 歳(平均 28.8 歳)
 体重：67.31±2.00 kg
 着衣：短パンのみ
 VO2max*：3.61±0.16 l/min
 時間：20min×3セット
 (エルゴメーターによる負荷)

*：VO2max (最大酸素摂取量)
 人が体内に摂取できる酸素の 1 分間あたりの最大量。全身持久力の指標として用いられている。

図 1.13 WBGT と深部体温 (食道温) の関係

②高齢者の体温調節機能

ここで、高齢者の熱中症リスクが高いことは Hoshi et al. (2007)⁸などにより多くの指摘が見られるが、その要因の一つに体温調節機能の低下が挙げられる。ここでは、高齢者の体温調節機能について情報整理を行った。以下に概要を示すが、詳細については参考資料1-3に示した。

高齢者における体温調整機能の低下には、主に発汗能力の低下と皮膚血管拡張反応の低下が挙げられる。

高温下での同一相対強度下の運動における深部体温上昇に対する発汗量が、若年者より高齢者で低いのは、加齢が直接の原因でなく、加齢による VO2max (最大酸素摂取量) の低下に起因すると言われている。Havenith et al. (1995)⁹では、VO2max を説明変数として直腸温を推定する式について高い相関が得られてことを報告している。

$$T_{re}(^{\circ}\text{C}) = 39.16 - 0.25 \cdot \text{VO2max}(\text{in l / min}) \quad (r=0.51, p<0.001)$$

<実験条件>

人工気象室、気温：35°C、相対湿度：80%、風速：0.15m/s 以下、運動強度：60W(エルゴメーター)、時間：60min

⁷ 寄本 明：WBGT を指標とした暑熱下運動時の生体応答と熱ストレスの評価，体力科学，41(4)，477-484，1992

⁸ Akio Hoshi, Yutaka Inaba：Prediction of Heat Disorders in Japan, Global Environmental Research, 11, 45-50, 2007

⁹ George Havenith, Yoshimitsu Inoue, Viktor Luttikholt, W. Larry Kenney：Age predicts cardiovascular, but not thermoregulatory, responses to humid heat stress, European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology, 70, Issue 1, pp 88-96, 1995

また、皮膚血管拡張反応が若年者より高齢者で低い要因としては、以下が挙げられている。

- ・VO₂max の低下
- ・血管収縮神経のトーンス*の低下が小さいこと
- ・発汗に伴い作動する能動的血管拡張システムの減弱
- ・心拍出量の増加反応の減弱（血液量と心機能の低下による1回拍出量の減少）
- ・内臓・腎から皮膚血管への血液再分配反応の減弱

*：筋の伸張に対する受動的抵抗、または筋に備わっている張力。血管収縮神経のトーンスの低下が小さいと血管が十分に拡張せず、血流増加の程度も小さい。

このように、高齢者は体温調節機能が低く、熱的弱者であることが明確である。しかし、図 1.13 に示したような被験者実験データは、運動時の人体生理反応に関する知見が多く、若者を対象とした高代謝時のデータが主であり、高齢者の日常生活を想定できる被験者データは見られなかった。したがって、屋外街路空間において日常生活をおくる中で、熱中症を発症している高齢者などのような適応策が必要か検討するためには、被験者実験などの実施による更なるデータ収集が必要である。

なお、下記有識者にヒアリングを実施したところ、高齢者を対象とした被験者実験については、然るべき機関の協力の下で、一定条件下であれば実施することは可能であることが明らかとなった。ヒアリングシートについては、参考資料 1 - 2 に示した。

- ・都築和代氏（(独)産業技術総合研究所 ヒューマンライフテクノロジー研究部門 環境適応研究グループ グループ長）

また、高齢者の体温調節機能が VO₂max の低下に大きく影響されることを活用し、若年者等を仮想高齢者とした試験を行うことも考えられる。

③子どもや既往歴保有者の体温調節機能

高齢者でなくとも、子どもや既往歴保有者は体温調節機能が低いと考えられている。

井上（2008）¹⁰によると、子どもは若年成人より活動汗腺密度は高いが、汗腺のサイズおよび機能が未発達であるために発汗量が少なく、この未発達な発汗機能を代償するために、頭部や躯幹部の皮膚血流量を増大して暑熱・運動に対処しているとされている。したがって、気温が皮膚温度よりも高くなると、熱の放散が難しくなり、深部体温が上昇してしまう。

また、一部の既往歴保有者や一部の薬を服用している人は、体温調節能力が健常者より低いことが指摘されている。それらの既往歴としては以下が挙げられる。

¹⁰ 井上 芳光：老若男女の暑熱適応能，日本建築学会環境工学委員会熱シンポジウム，38，49-54，2008

表 1.5 体温調節との関連がある既往歴

既往歴	熱中症・体温調節との関連	
糖尿病	腎機能が低い。尿糖による浸透圧利尿で多尿となり脱水傾向が見られる。また、暑さを感じにくい。	
高血圧 心疾患	血圧を下げているために血液循環が悪く、熱放散がしにくい。血圧降下薬の中には利尿薬もあり脱水をきたしやすい。	
精神疾患	副反応として汗をかきにくい薬を飲んでいる場合があるほか、室内にこもりがちな場合は暑熱順化が進まないことがある。	
慢性肺疾患	より酸素交換が起こりにくい事が、代謝そのものに悪影響を与えている。	
肝臓病 腎臓病	解毒作用が弱まるので、身体全体が弱まる。	
内分泌系疾患	水分の排出や吸収に関わっている。中でも甲状腺機能は体温調整に関わり、副腎皮質ホルモンは代謝全体に関係している。	
その他、右記の薬を服用している人	抗コリン作用のある薬（鎮痙薬 [*] 、頻尿治療薬 [*] 、パーキンソン病治療薬 [*] 、抗ヒスタミン薬、抗てんかん薬、睡眠薬・抗不安薬、自律神経調節薬、抗うつ薬、β遮断薬、ある種の不整脈薬、麻薬）	発汗抑制を来す可能性がある。
	利尿剤	脱水を生じさせやすい。
	興奮剤、覚せい剤	代謝を亢進させる。
	その他の多くの抗精神薬病薬 [*]	体温調節中枢を抑制する可能性がある。

* 医薬品添付文書に、「発汗（あるいは体温調節中枢）が抑制されるため、高温環境では体温が上昇するおそれがある」との記載があるもの

④暑熱順化の体温調節機能への影響

熱環境が身体に及ぼす影響は、同じ熱環境でも人側の暑熱順化の有無で異なる事が知られている。ここでは、熱環境と人の熱ストレスを論じる上で、暑熱順化がどの程度影響し得るのか、既往知見を整理した。以下に概要を示す。調査結果の詳細は、参考資料 1－4 「暑熱順化が熱中症に及ぼす影響の整理」に示した。

表 1.6 暑熱順化の原理と発現・消失条件の整理

	短期暑熱順化	長期暑熱順化
原理	<ul style="list-style-type: none"> ・発汗が開始される深部体温閾値の低下 ・汗中の塩分濃度の低下 ・皮膚血管拡張が開始される深部体温閾値の低下 ・循環血液量の増加 	<ul style="list-style-type: none"> ・汗の蒸散効率の向上（汗腺密度の増加、総発汗量の低下） ・皮膚血管拡張機能の亢進（高い皮膚温）
発現・消失条件	<ul style="list-style-type: none"> ・環境条件（環境温、放射熱など） ・運動条件（強度や持続時間など） ・着衣条件（衣類の種類や着衣量など） ※：全条件が揃わなくとも発現する。環境条件では、日最高気温平均：32.3℃、日平均気温平均：27.4℃、約 10 日間で発現。日最高気温平均：29.5℃、日平均気温平均：24.2℃、9 日間で消失。（中村ら(2009) ¹¹ の実験結果による）	<ul style="list-style-type: none"> ・遺伝因子（汗腺密度の違い） ・環境因子（暑熱環境への長期滞在で発現、日本など一般環境への長期滞在で消失）

日本の夏には、連続的な暑熱暴露などにより発汗機能や皮膚血流反応の亢進が促され、短期暑熱順化が起きると考えられる。一方で、その消失も比較的容易に起きることが指摘されている。

したがって、暑熱順化後では同様の熱環境における人の熱ストレスは低くなると思われるが、熱中症の視点も含めて適応策を検討する上では、安全側の配慮として、暑熱順化が起きていないことを前提とした議論を行うことが妥当であると考えられる。

⑤熱中症発症者の生理的特徴

熱中症による死亡者の所見には、以下のような特徴が見られる。ただし、外部所見のみで熱中症と判断するのは不十分である。また、熱中症の他にも、肺炎（感染症）、向精神病薬の副作用（悪性症候群）、脳内出血、頭部外傷による硬膜下血腫などの頭蓋内損傷、覚せい剤の使用の場合、高体温および脱水の症状が現れる。

表 1.7 熱中症発症者の生理的特徴

	生理的特徴
外部所見	<ul style="list-style-type: none"> ・高体温 ・皮膚の乾燥 ・脱水による眼球の陥凹（かんおう：凹んだり窪んだ状態）
内部所見	<ul style="list-style-type: none"> ・筋肉の色調が灰色になること※ ・ミオグロビンが肝臓の尿細管に詰まっていること※ ・肺の胸膜面や腸管の漿膜面が乾燥し密着するようになっていること ※：高体温が引き起こす症状である筋肉でのタンパク質融解（ミオグロビンの逸脱）による。高体温の症状は、深部体温が 42℃に近くなると現れると考えられる。

¹¹ 中村 泰人、岡本 孝美、安浪 夕佳：日常生活で生じる暑熱適応の人工気候室実験による実態把握，日本建築学会環境系論文集，74(636)，115-124，2009

2) モデル計算による熱環境の影響の推定

熱環境が人体生理に及ぼす影響を推定する手法として、人体温熱生理モデルを用いたシミュレーションがある。そこで、主要な人体温熱生理モデルについて整理を行うと共に、下記有識者にヒアリングを実施し、適応策の検討におけるモデル計算の活用可能性について情報を整理した。人体温熱生理モデルの一覧およびヒアリング結果については、参考資料1-5「人体温熱生理モデルに関する調査結果」に示した。

- ・大岡龍三氏（東京大学 生産技術研究所 建築学科 教授）
- ・田辺新一氏（早稲田大学 創造理工学部 建築学科 教授）

調査の結果、以下のことが明らかとなった。

- ・屋外街路空間の生理反応の推定に用いる人体温熱生理モデルとして、精度良く最適と言えるモデルはなく、その時々々の目的や条件に適したモデルを用いることになる。人体を球と仮定した2ノードモデルであっても、体温変化を見るのであれば屋外街路空間の評価は十分に可能。
- ・高齢者の生理反応を予測できるモデルは現時点では存在しない。高齢者の生理反応の特徴を入力可能なモデルはあるが、高齢者の生理反応についての被験者データが不足しており、十分な検討は行えていないのが現状。ただし、チューニング自体は2ノードモデルであっても可能である。

3) 生理指標と熱中症の関係性

熱中症の発症は、例えば深部体温などの人体生理の状況だけで説明できるものではない。しかしながら、統計的にどのような関係性があるか検討可能なデータとして、日本救急医学会が2006年から2年ごとに調査を行っているHeatstrokeSTUDYがある。これは、協力医療機関を受診した熱中症患者についての病態等を記録したデータベースであり、非症例者の情報はないが、例えば、深部体温と重症度の関係性などを検討することは可能である。そこで、HeatstrokeSTUDY 2008 および 2010 のデータについて、日本救急医学会から提供を受け、解析を行った。

深部体温と重症度割合などの関係性とそれに係る交絡要因を検討した結果、以下の事項が示された。データ解析結果の詳細については、参考資料1-6「HeatstrokeSTUDYによる生理指標と熱中症の関係性の検討」に示した。

- ・0～19歳は、深部体温が40℃程度までであれば、20歳以上に比べて重症化しにくい。
- ・20～64歳の既往歴がある人および65歳以上は、20～64歳の健常者と比べて、同程度の深部体温でも重症化割合が高くなる。

これらを踏まえ、既往歴あり群が少なく、重症化しにくい0～19歳は除いた上で、健常成人群として20～64歳既往歴なし群のデータを、ハイリスク群として高齢者及び20～64歳既往歴あり群のデータを用いて、深部体温と重症割合および入院割合の関係を検討したところ、深部体温が38～39℃の熱中症患者において、健常成人群に比べてハイリスク群の重症割合が高かった（図1.14）。ハイリスク群の高齢者や既往歴保有者は、体温調節能力が低いために、深部体温の上昇を

招きやすく熱中症になりやすい旨は1)で示した通りだが、図 1.14 からは同じ深部体温でもハイリスク群の重症化傾向があることが示され、ハイリスク群に対する熱中症対策の必要性がより強く根拠づけられた。

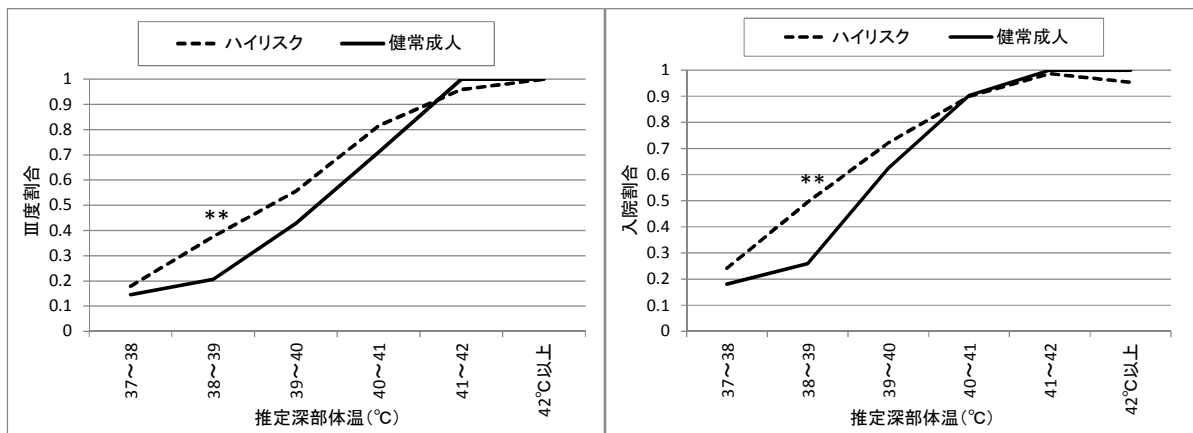


図 1.14 深部体温と重症度・入院割合の関係

** : $p < 0.01$ 発生確率が 1%未満で統計的に有意差が認められる状況。

注) III度：熱中症の重症度分類のうち最も重症のクラス。診断基準は①暑熱暴露があること、②熱中症以外の疾患でないこと、③深部体温が高温であること、④脳機能障害、肝・腎機能障害、血液凝固障害のいずれかが認められること、とされている。

1.2.3 まとめと課題

- ・既往知見において熱環境と深部体温の関係を示した被験者実験データにおいては、温熱指標として WBGT が多く用いられていることから、人体生理反応を考慮した熱環境と熱中症を関連付けに適した温熱指標の一つは WBGT である。
- ・屋外街路空間において熱中症を発症している高齢者は、体温調節機能が低いために体温が上昇しやすいと指摘されているが、これを示す高齢者の被験者データは不足しており、屋外街路空間における高齢者の熱ストレスを評価するには十分でない。今後、高齢者の被験者実験を実施する等が必要である。
- ・屋外環境からの受熱等により深部体温が上昇した場合、同様の温度であっても、20-64 歳の健常者を基準とすると、高齢者および 20-64 歳の既往歴を有する人に重症化傾向が見られた。一方で定熟時や、著しい高温時には高齢者及び既往歴を有する人と健常者とは顕著な差が生じなかった。
- ・一方で高齢者と既往歴を有する人の比較では、有意な差が生じなかった。
- ・これらのことから、高齢者に焦点を当て、受熱等により深部体温が上昇した場合の検討を進めることで、既往歴を有する人も含めた熱的弱者に対する熱中症ハザードの評価が可能になると考えられる。