

建物周りや半屋外空間の温熱環境を予測する技術

Technology to Predict the Thermal Environment around Buildings and Semi-Outdoor Space

高木 賢二 近藤 宏二 挟間 貴雅
中山 かおる 福井 三穂 三浦 克弘

I. はじめに

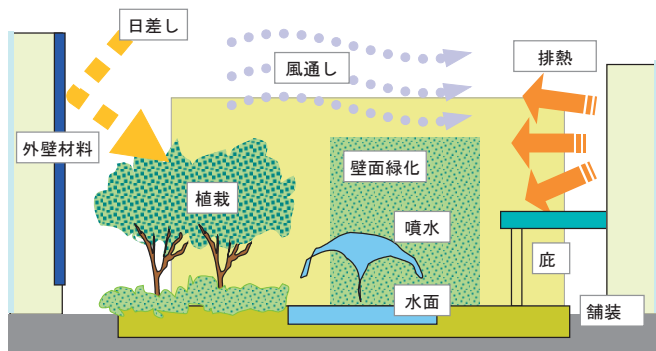
地球温暖化とともに都市温暖化いわゆるヒートアイランド現象が顕在化しており、社会問題となっている。ヒートアイランド現象とは、都市開発により緑地や土壌面が減少して水分蒸発が抑制され、都市部の気温が郊外に比べ島状に高くなることである。事実、気象データを見ると年平均気温が東京では過去 100 年間で 3.0℃、名古屋で 2.6℃程度上昇しており、地球温暖化による上昇（100 年間で 0.6℃）をはるかに上回る速度で高温化が進んでいる。

こうした事態を受け、政府はヒートアイランド対策に関する国、地方自治体などの基本方針と実施すべき対策を体系的に取りまとめた「ヒートアイランド対策大綱」を策定した¹⁾。これに従い現在は、各自治体が屋上緑化を始めとした緑地整備などを進めている。

一方、建設業界では「2020 東京オリンピック」を契機に都市部での大規模な開発や更新工事が増加していく状況にあり、大規模な開発ではヒートアイランド対策として CASBEE Heat_Island²⁾ による格付けが普及し始めている。更には屋外の活動を促進し空間の積極的な活用のために、人の流れに基づく外構設計も求められている。

建物スケールでの屋外環境の改善は、Fig.1 に示すように、風通しに配慮した建物配置計画、効果的な植栽計画、建物外壁材料や外構材料の選定など、屋外空間の快適設計を行うことにより可能である。特に、人の感覚（快適感）に大きく作用する要素をよく把握し制御すれば、大幅な快適感の改善が期待できる。

快適感とは、たとえば気温が高くても適切な風速や湿度であれば向上する。こうした快適感を表す指標として人間の体感温度があり様々な種類がある。その中で人の体感に近い指標として SET*



風通し：適度に風通しがあれば夏は快適です。しかし、冬の冷風は、建物で遮りたいものです。それには、季節毎に良く吹く風向を知り、その風向を考慮した建物配置が重要です。

日差し：夏は照り返しが強烈です。庇の設置、壁面の材料や地面の舗装材を工夫することにより、照り返しを軽減できます。

樹木：冬は冷風を遮り、夏は日陰を提供してくれます。

Fig.1 屋外空間快適設計の概念⁹⁾
(Concept of Design for Comfort Outdoor)

(Standard New Effective Temperature : 標準新有効温度, 以降 SET*と表示)³⁾ と呼ばれる指標がある。SET*は、気温に加えて、風速や湿度、日射や周囲からの熱赤外放射など環境要素と、人間の活動状態や着衣量といった人体側の要素を考慮したモデルを用いて、より快適感と相関の高い要素が多く用いられている。SET*は屋外環境の気温・湿度・放射温度・風速などの物理量を単一指標として表現することができるため、評価の指標として有用である。本報では、屋外の温熱環境の評価方法を解説するとともに、その適用事例について報告する。

II. 屋外温熱環境評価方法

SET*は屋内の快適感評価では一般的に用いられており、温熱環境と快適感との相関が高いことが明らかになっている。一方、屋外環境でも、日射の取扱には検討を要するが SET*を用いた評価が試みられている。

また、快適な屋外環境の設計指標として「不満足者の削減」が設計関係者間の理解を得やすい尺度として活用できると考え、屋内の温熱環境評価で用いられている予測不満足者率 PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied)⁵⁾ の概念を、SET*とともに屋外環境評価において適用している。

1. 屋外温熱環境評価指標

(1) 体感温度

体感温度とは、温湿度や風速のような周囲の温熱環境によって影響され易い人間の肌を感じる気温を数値で表したもので、風や日射など温熱環境や着衣の種類が変化すれば体感温度も変化する。肌で暑さ、寒さを感じる主な要素は、以下の 6 要素といわれている (Fig.2)。

- a. 周囲気温
- b. 周囲湿度
- c. 風速
- d. 周辺からの放射熱 (放射温度)
- e. 着衣量抵抗
- f. 活動量 (代謝量+運動量)

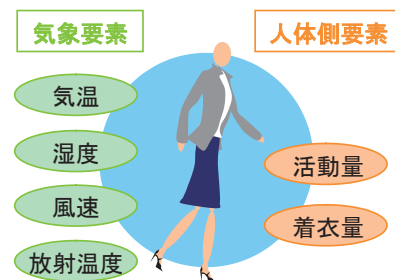


Fig.2 体感温度に影響する主要因⁹⁾
(Main Factors that Influence Sensible Temperature)

上記の a ~ d は周囲温熱環境の気象要素であるが、e, f は人体側の要素である。これまでに体感温度といわれている指標は幾つか提案されており、かつて数多く用いられていた式は主に気温、湿度、風速を考慮したものである。最近では、上記の 6 要素を全て考慮した上で一つの温度で表現する方法である有効温度が多く提案されている。

(2) SET* (標準新有効温度)

寒暑感を表す指標として、現在工学的に最も一般的な指標として用いられる標準新有効温度 (Standard New Effective Temperature) が挙げられる。この指標は、室内の寒暑感を表現する指標として Gagge³⁾ らによって開発され、現在では ISO の室内空調基準⁴⁾ でも採用されている。近年では、室内に限らず屋外での寒暑感の研究に於いても、SET* に幾つかの拡張を加えて用いられることが多い。日本でも標準的な温熱快適性指標として認知されつつあり、建物の環境評価を目的とした建築物総合環境性能評価システム²⁾ (CASBEE HI) に於いても屋外環境を評価する指標として SET* を用いた評価が採用されている。

SET* は、まず、前記 6 要素の実環境下において、生理現象による熱交換を組み込んだ仮想の人体を用いて皮膚温度・発汗量を算出し、それらが標準環境下¹⁰⁾ で等価となる周囲気温を逆算することで算出される。実際の温熱環境をその標準温熱環境の気温に変換して表現するため、実際の温熱環境下で肌が感じる仮想気温といえる。SET* 算出の際に用いる標準温熱環境は以下のとおりである。

- a. 日射はなく周囲気温と同じ温度の壁体に囲まれている
- b. 湿度は相対湿度で 50%
- c. 風速は 0.13 m/s
- d. 着衣量は代謝量 1.0Met (=58.2 W/m²) あたり 0.67 clo

計算は皮膚表面での熱収支と深部体内の熱収支で構成される 2 ノードの人体熱モデル (Fig. 3) を使用して実際の温熱環境下での皮膚温度と発汗強度を求める。人体熱モデルの詳細は紙面の都合上省略するが、以下のように皮膚表面で熱的な平衡状態が保たれていると考えて、皮膚温度、人体深部温度、発汗強度、発汗量を計算する。

$$M + W + Qr + Qh + Ql + Qsw + Qre = 0 \quad (1)$$

M: 代謝量 (W)

W: 運動量 (W)

Qr: 熱放射量 (日射+赤外放射) (W)

Qh: 温度差による顕熱量 (W)

Ql: 湿度差による潜熱量 (W)

Qsw: 発汗による潜熱量 (W)

Qre: 呼吸による熱移動 (W)

$$Qr = I + D + R + A + E - E_{KM} \quad (2)$$

I: 直達日射量 (W)

D: 天空日射量 (W)

R: 日射反射量 (W)

A: 大気放射量 (W)

E: 周辺表面からの赤外放射量 (W)

E_{KM}: 人体表面からの赤外放射量 (W)

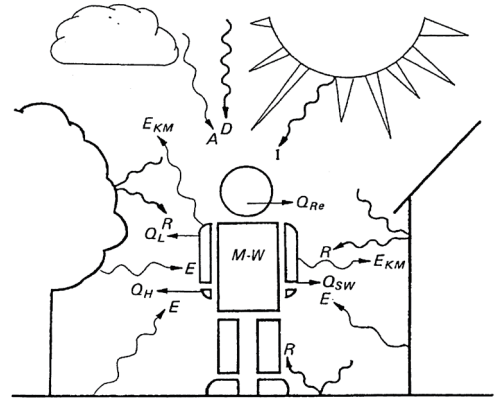


Fig. 3 人体熱モデル概念図; 2 ノードモデル⁹⁾

(Human Body Heat Model Concept Chart ; 2 Node Model)

(3) 予測不満足者率; PPD

屋外の温熱環境評価では、SET* に加え予測不満足者率⁵⁾ (PPD) を用いて温熱環境を評価することが多い。PPD とは、その環境を不満足と感じる人の割合を示す指標で、ある空間の滞在者の内、何パーセントの人がその環境に不満足かを表すのに用いられる。基本的にこの指標は、屋内などの通常人が居住する比較的快適な温度範囲に近い温熱環境を評価するのに適しており、ISO7730⁵⁾ に於いても室内環境の評価に用いられているが、中野ら⁶⁾ によって温熱環境実測調査及び申告結果を基にした半屋外空間などの非空調空間への拡張が行われ、SET* と PPD との関係が求められている。この調査では、ガレリア、ウッドデッキ、サンクンガーデンなどの建物に隣接した「半屋外」の非空調空間に自発的に滞在する人の不満足感を分析している。

これを用い、ASHRAE 55-2004⁷⁾ で定められている「少なくとも 80% の居住者に快適であること」という室内環境基準を準用すると、非空調空間 (半屋外) で許容される SET* の範囲は Fig. 4 のように約 16°C ~ 34°C となり、室内環境の約 3 倍の範囲となる。これは、屋外が温熱環境を詳細に制御できる空間ではないために、多少暑くても寒くても不満が少ないためであろうと考えられる。すなわち、同じ SET* でも屋内に対するほどの不満足が発生しにくいと考えられる。

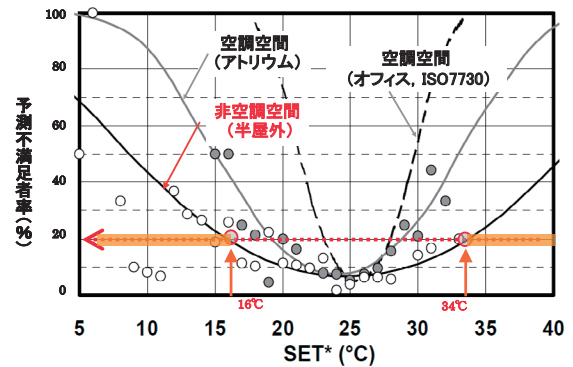


Fig. 4 標準新有効温度; SET* と予測不満足者率; PPD との関係⁶⁾

(Relation between Standard New Effective Temperature (SET*) and Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD))

(4) 熱ストレス

都市の温暖化緩和効果には熱中症など熱ストレスによる悪影響を緩和する効果も期待できる。そこで、SET*を算出する際に使用する人体熱モデルを用いて、熱ストレスの効果を評価する。

屋外熱環境による熱ストレスの評価はヨーロッパを中心に幾つかの方法が開発されているが、ここではドイツの技術基準であるVDI3787²¹⁾に基づいて熱ストレスを評価する。ドイツではこの基準により熱中症の予報や熱中症の危険のある地域を地図化して対策を促進する行政サービスを行っている。VDI3787 に記載されている熱ストレスの基準値は以下のとおりである。

- ・ 平均皮膚温度が40℃以上
- ・ 人体深部温度の上昇が1.3℃以上
- ・ 発汗強度（皮膚の濡れ面積率）が25%以上で不快、70%以上でストレス大
- ・ 発汗による水分の損失が1時間で750g以上

これらの数値は全て前述の人体熱モデルにより求めることができる。したがって、屋外に滞在する人を対象に上記を基準として熱ストレスが発生するまでの時間を検討すれば、熱ストレス低減効果を評価することができる。

2. 観測による屋外温熱環境評価

現状の屋外温熱環境を把握する場合は、屋外温熱環境評価に必要な風速、気温、湿度、放射温度を対象とする場所での観測により求めて評価を行う。

我々はPhoto 1のような測定架台を設置して観測を行っている。測定項目は風向・風速、気温、グローブ温度である。評価には評価地点での放射温度が必要となるが、観測したグローブ温度、気温、風速から放射温度MRTを推定⁸⁾することができる。

$$\sigma \times MRT^4 = hm \times (Tg - Ta) + \sigma \times Tg^4 \quad (3)$$

ここで、 hm ：熱伝達率 (W/mK)

$$hm = \frac{\lambda}{r} Nu, \quad Nu = 2 + 0.6 \times Pr^{\frac{1}{3}} \times Re^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

Ta ：大気温度 (K), Tg ：グローブ温度 (K)

λ ：空気の熱伝導率 (W/mK), r ：グローブ半径 (m)

Nu ：ヌセルト数 (-), Pr ：プラントル数 (空気=0.7)

Re ：レイノルズ数 ($=r \times U/v$),

v ：空気の動粘度 ($=1.52 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$), U ：風速 (m/s)

σ ：ステファン・ボルツマン係数 ($=5.67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2\text{K}^4$)

これら環境要素に加え、人体側要素である着衣量や代謝量を設定することにより、上記の屋外温熱環境指標であるSET*, PPDおよび熱ストレスを算出して屋外温熱環境を評価する。

3. 数値シミュレーションによる屋外温熱環境評価

観測による屋外温熱環境評価と同様に、屋外温熱環境評価に必要な風速、気温、湿度、放射温度を数値シミュレーションによって求めることにより評価を行うことができる。当社では屋外の温熱環境をコンピュータ上で再現するシステム、「鹿島都市気候評価システム (KaUCES)」⁹⁾を開発している。このシステムは、都市気候を予測して得られる温度、湿度、風速や建物スケールなどの屋外の様々な気象要素から、人体側の条件を考慮して屋外の快適感との相関が高いSET* (新標準有効温度)を体感温度として計算する。これにより建物周辺の温熱環境をより体感に近い形で評価することができる。

本システムでの計算は、領域の大きさや計算対象となる気象要素が異なる3つのサブシステム (広域環境, 風環境, 熱環境)を連結して温熱環境予測を行う。システムの計算フローをFig.5に示す。最初に、気象と土地利用のデータを入力した広域環境シミュレーションにより、400km四方の領域を対象として、3段階のNesting計算を行い、1km四方平均の風向風速、気温湿度の日変化を求める。次に、対象地点での広域計算の風向風速の日変化を流入境界条件とした風環境シミュレーションを行い、構造物周辺の風向風速の日変化を求める。最後に、風環境計算の結果と広域環境計算の気温湿度などの日変化を入力とした熱環境シミュレーションを行い、地面と構造物表面の温度及び任意地点での日射量や赤外放射量などの日変化を求める。



Photo 1 観測概要

(Schematic Image of Outdoor Thermal Environment Measurement)

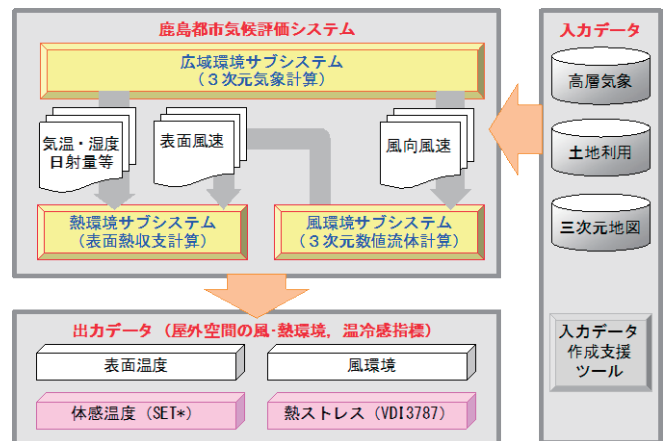


Fig.5 鹿島都市気候評価システム (KaUCES) の概要⁹⁾
(Outline of Kajima Urban Climate Evaluation System : KaUCES)

III. 適用事例

1. 観測による屋外温熱環境評価

大学キャンパスにおける屋外温熱環境を評価した事例¹⁰⁾を示す。Fig.6に観測した地点を示す。観測した地点は、屋外である桜並木、

銀杏並木、建物東側玄関前広場、半屋外であるアプローチテラスからアトリウムである。観測期間は2009年8月7日～17日である。

各測定点での風速、グローブ温度、空気温度からMRTを算定し、観測期間内の降雨日を除いてSET*の時刻別平均値を求めた結果をFig.7に示す。桜並木(屋外)→アプローチテラス(半屋外)→アトリウム(室内)の順で昼間のSET*が低くなり、天空率の減少に伴い日射が遮蔽され、遮熱効果が見られた。また、緑量が多い銀杏並木も遮熱効果が大きく、SET*はアトリウムと同程度であった。

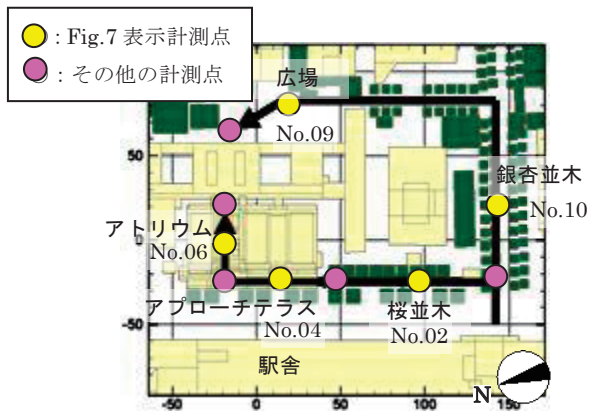


Fig. 6 観測地点¹⁰⁾
(Observation Points)

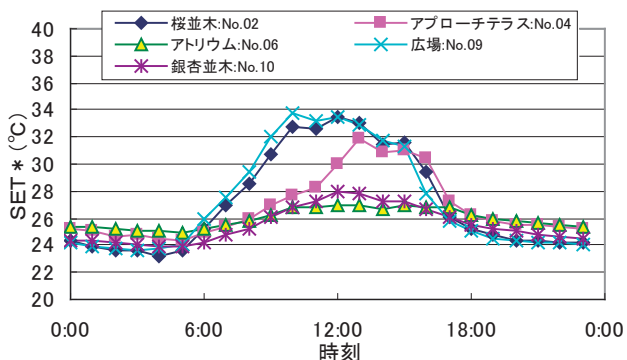


Fig. 7 観測 (時刻別平均値) による SET* の日変化¹⁰⁾
(Daily Change of SET* Obtained by Measurement)

2. 数値シミュレーションによる屋外温熱環境評価¹¹⁾

検討する対象は再開発計画中の某キャンパスとした。キャンパスでは屋外に滞在する機会が多く、快適な屋外計画の効果は大きい。

計画前及び将来計画の両者について、夏季の平均的な一日での屋外環境をシミュレーションにより予測し、それを基に計画前後の快適性の変化を評価した。

検討対象期間は8月の平均日とし、広域な気象条件として20年平均の気圧分布を入力した。SET*の計算では、気温と湿度は広域環境シミュレーション計算結果より算定し、日射及び放射は熱環境シミュレーション計算結果から放射温度を直達日射と天空日射、大気からの赤外放射と地面及び建物からの赤外放射により計算した。

8月の平均日の正午のSET*の平面分布をFig.8に示す。建替え前にはPPDが20%を超える34℃以上のSET*の範囲が多かったが、将来計画では新規の建物による日射遮蔽効果と建物配置の変更による

風速の上昇、緑化計画により、敷地全体でのSET*が低下、とりわけバス停近傍で不満足率が大幅に低下している。

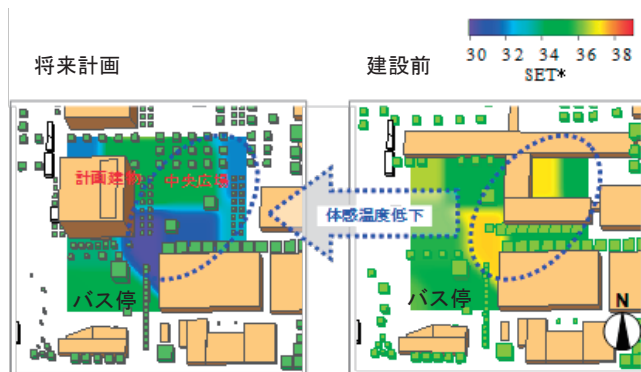


Fig. 8 夏季正午における SET* 分布
(SET* Distribution at Noon in Summer)

IV. おわりに

本報では、屋外温熱環境評価の方法について解説し、屋外温熱環境指標、観測による評価の方法、「鹿島都市気候評価システム：KaUCES」を用いた数値シミュレーションによる評価の方法について報告した。以上のように屋外の温熱環境は観測による評価のみならず計画時における予測も可能であり、SET*やPPD、熱ストレスといった快適感指標を用いた評価が可能である。

屋外の風・温熱環境の最適設計では、ベンチに長時間・自発的に滞在する休息空間や屋外での活動など、様々な「屋外環境と人の行動」の関係が必要となる。SET*と不満足率の関係は、上記のようなシチュエーションの差などにより微妙に変化すると考えられる。今後は、「屋外環境と人の行動」の関係に対する検討を進めていく。

参考文献

- 1) 環境省ヒートアイランド対策ホームページ http://www.env.go.jp/air/life/heat_island/index.html.
- 2) 財団法人建築環境・省エネルギー機構；建築物総合環境性能評価システムCASBEE-HI（ヒートアイランド）評価マニュアル2006年度版。
- 3) A. P. Gagge；A standard predictive index of human response to the thermal environment, ASHRAE Transaction., Vol. 92-1, 1986, pp.709-731.
- 4) ISO 7933; Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of heat stress using calculation of the predicted heat strain. 2004.
- 5) ISO; International Standard EN 7730, Moderate thermal environments- determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort, 1994.
- 6) 中野淳太ほか；半屋外空間における熱的快適性実測調査(その1)～(その5), 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), 2002, pp.383-392.
- 7) ASHRAE; ANSI/ASHRAE Standard 55-2004, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, 2004.
- 8) 近藤宏二ほか；建物周辺屋外環境の温熱環境設計手法の開発(その2) 大学キャンパスの実測値に基づく評価, 日本建築学会学術講演梗概集, 2007, pp.979-980.
- 9) 高木賢二ほか；鹿島都市機構評価システム；KaUCESを用いた屋外風・温熱環境評価, 鹿島技術研究所年報, 59号, 2011, pp.145-154.
- 10) 高木賢二ほか；建物周辺屋外環境の温熱環境設計手法の開発(その6) 半屋外空間を有する建物周辺の温熱環境評価観測, 日本建築学会学術講演梗概集, 2012, pp.997-998.
- 11) 井田卓造ほか；建物周辺屋外環境の温熱環境設計手法の開発(その1) 評価手法の概要とキャンパス将来計画への適用, 日本建築学会学術講演梗概集, 2008, pp.595-596.