

3. 暑熱対策技術の導入検証事業の実施のための基礎検討

3.1 暑熱対策の効果に関する基礎調査

検証事業対象地に暑熱対策を施した際の人の行動の変化を想定するため、熱環境と人の行動についての既往の研究を収集した。それぞれの結果をまとめると、以下のように整理できる。

- ・SET*と人の利用状況（利用人数・利用時間）や快適感・受容域には、関係性があり、SET*が高いほど利用人数が減るなどの傾向がある。
- ・空調空間か非空調空間かどうかにより、人の受容域・快適域に違いがある。
- ・室内移動前の屋外暑熱環境により、室内での温熱感が異なる可能性がある。

1) 屋外熱環境の違いによる利用状況の違い

安藤ら(2012)¹の調査では、東京駅周辺の大丸有地区の屋外アメニティ空間を対象として、夏季と秋季に熱環境測定及び利用人数の調査、利用者アンケート調査を行った。その結果、下記のようなことがわかった。

- ・屋外アメニティ空間では、33℃以上の高いSET*を示す地点（図 3.1、⑥・⑦A）では、SET*と利用人数に負の相関の傾向が確認できる。
- ・夏季と秋季を比べると、利用時間が最も長いSET*の値は夏季のほうが高く、夏季のほうが暑さに馴化したことで許容できる範囲が広がったためと考えられる。（図 3.2）
- ・利用時間とSET*にも負の相関が確認できる。（図 3.2）
- ・利用者アンケートで、最も利用時間の長いサンプルに注目すると、快適>やや快適>普通>やや不快の順に利用時間が短くなっており利用時間がSET*に左右されることが示唆される。（図 3.3）

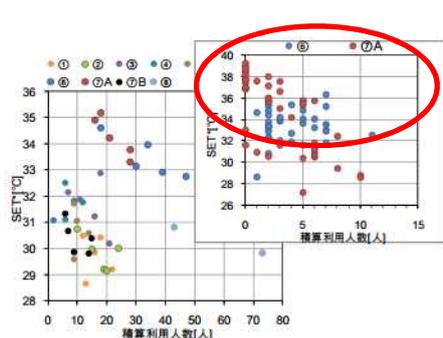


図 3.1 SET*と利用人数の関係

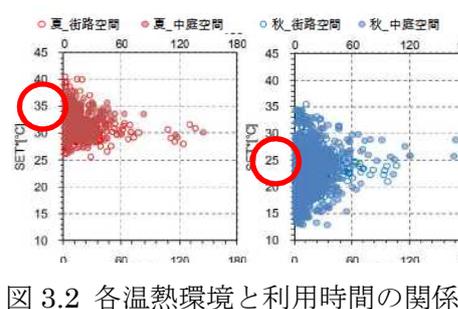


図 3.2 各温熱環境と利用時間の関係

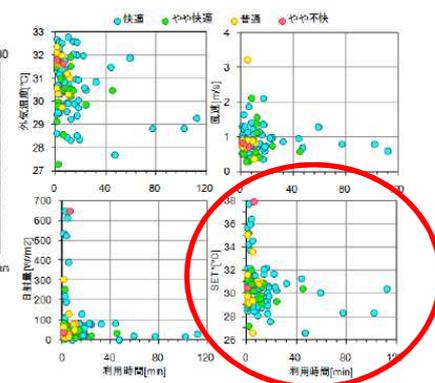


図 3.3 アンケート評価別の各パラメータと利用人数の関係

¹ 安藤ほか、人が利用する屋外空間における環境評価に関する研究 その3 屋外アメニティ空間の利用状況に関する考察と秋季温熱環境、日本建築学会大会学術講演梗概集, 2012

また、安藤ほか（2013）²の調査でも、同様に都内オフィスビル屋外アメニティ空間で、温熱環境と利用状況について調査が行われている。その結果、下記のようなことがわかった。

- ・ オフィスビル屋外アメニティ空間では、SET*=35℃が屋外利用の限界値であることが示唆された。
- ・ 夏季は微風が形成され、日射量が 200W/m²程度以下に遮られる範囲を利用者が好むことがわかった。

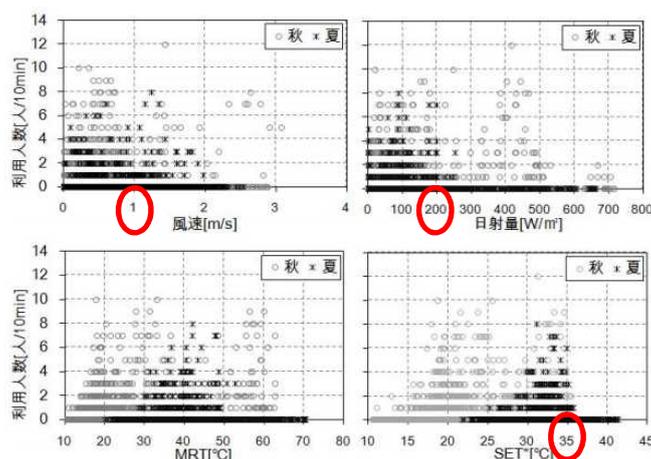


図 3.4 各温熱環境パラメータと利用人数の関係

2) 熱的快適域と受容域について（非空調駅）

中野ら（2012）³の調査では、空調が導入された駅と非空調駅で、利用者の熱的快適域・熱的受容域の分析を行っているが、中でも非空調駅においては以下の結果が得られている。

- ・ 非空調駅における熱的快適域（不快申告が 20%以下）は SET*19~29℃であった。
- ・ 一方同じ非空調駅における熱的受容域（非受容申告（「受け入れられない」かつ暖/涼要望）が 20%以下）は SET*19~32℃であった。

² 安藤ほか, 人が利用する屋外空間における環境評価に関する研究その4 都内オフィスビルの屋外アメニティ空間における調査, 日本建築学会大会(北海道)学術講演会・建築デザイン発表会, 2013

³中野ほか, O 駅及び非空調駅の熱的快適域の比較, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), 2012

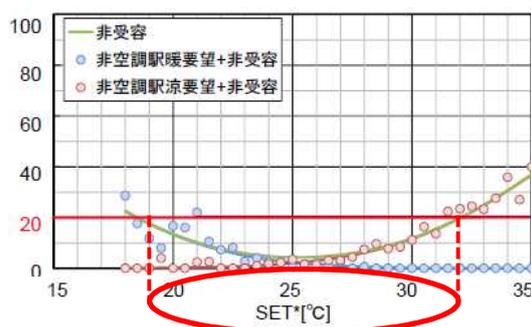
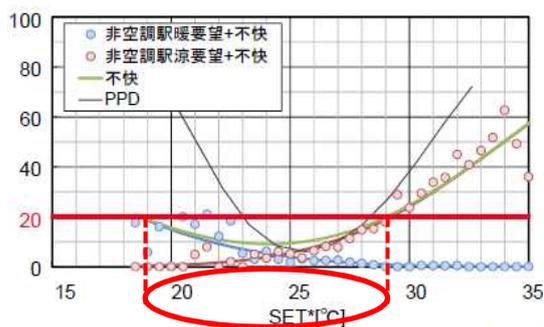


図 3.5 「暖涼要望・不快」申告者率の回帰曲線 図 3.6 「暖涼要望・非受容」申告者率の回帰曲線

3) 温熱環境適応 (Thermal Adaptation) について

de Dear ら (1998) は、温熱環境適応は行動適応、生理的適応、心理的慣れや期待に起因し⁴、人の行動的・心理的適応により、自然換気オフィスの熱的快適条件が全館空調オフィスと異なる⁵と述べている。

前述の中野ら (2012) の調査でも、空調が導入された駅の熱的快適域は SET*23~29°C であり、非空調駅の快適域 (SET*19~29°C) よりも下限が高かったことがわかっているほか、中野ら (2013) ⁶では、空調空間では、非空調空間よりも熱的快適域が狭まることわかっている。

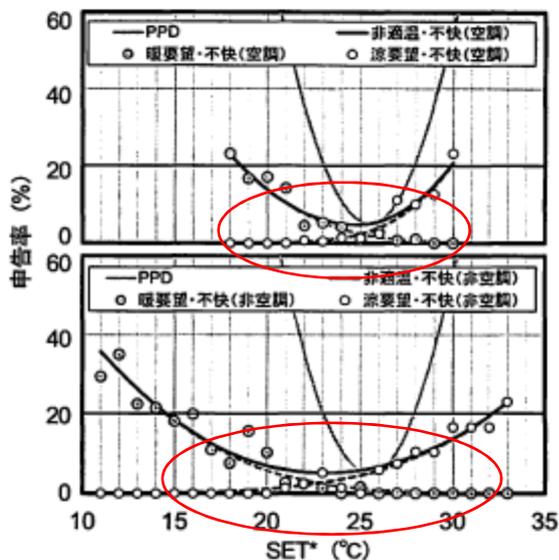


図 3.7 SET*に対する非適温かつ不快の申告率

⁴ de Dear et al., Thermal Adaptation in the Built Environment: a Literature Review, Energy and Buildings Vol 27 No.1 pp. 83-96, 1998

⁵ de Dear et al., Developing an adaptive model of thermal comfort and preference, ASHRAE Transactions, Vol. 104(1), 1998

⁶ 中野, 環境の文脈と温熱環境適応を考慮した温熱環境計画, 日本建築学会シンポジウム 大震災から2年9ヶ月ー環境工学はどう変わったか 発表資料, 2013

4) 受熱環境の違いによる空調空間移動後の温熱感の違い

杉岡ら (1999) ⁷⁾ の調査では、30 分間人工舗装面のある日向の屋外を歩行した後、空調室に入りその後の温冷間隔の申告調査を行っている。外気温約 28.5℃ (8月 18 日) と約 33℃ (8月 20 日) の日に被験者が屋外から冷房室 (25℃) に移った際の温熱感覚の経時変化では、空調機から冷風が一回目に出た時は「寒い」の申告が外気温約 28.5℃の日では見られ、外気温約 33℃の日では見られなかった。冷風が二回目に出た時は両日共に「寒い」の申告がみられた。このことから、涼しい屋外環境を経て入室すると、入室直後の設定温度を過度に低くしなくても、十分に涼しさを得られる可能性があることがわかっている。

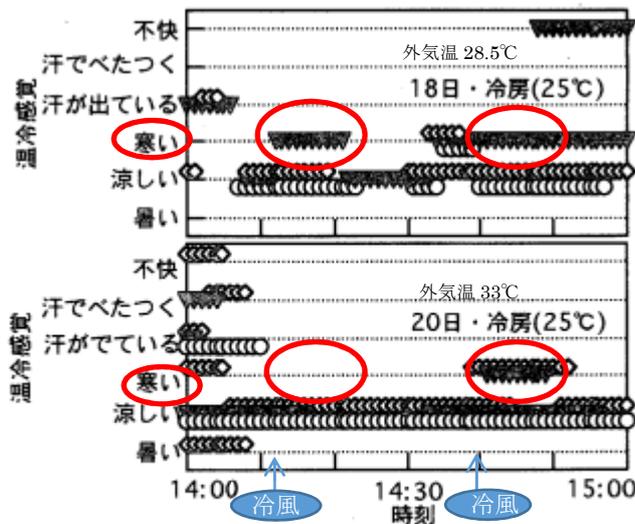


図 3.8 18 日と 20 日の冷房室 (25℃) における温冷感覚の経時変化

一方、34℃または 37℃から 22~31℃への 2 室への移動実験では、高温条件 (37℃) からの空調室内へ移動直後には 30℃以上でも熱的に中立と感ずるという結果もある⁸⁾。厳しい暑熱環境からの移動の場合にはオーバーシュートして高い室温でも涼しく感じていると考えられる。

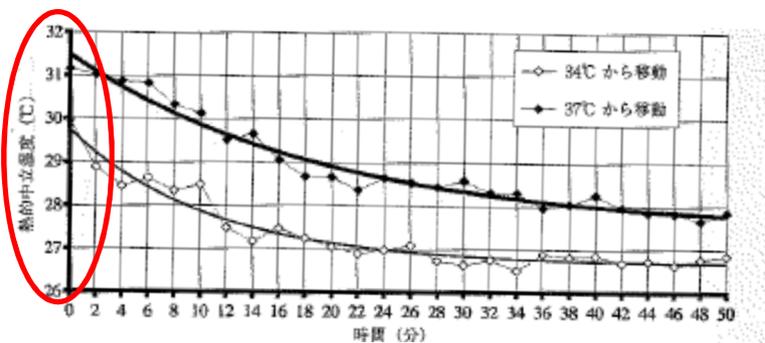


図 3.9 空調室移動後の熱的中立程度の経時変化

⁷⁾ 杉岡ほか, 暑さへの対処方法が個人の温冷感覚と行動に与える影響に関する研究その 2 入室に至るまでの屋外熱環境と着衣の影響, 1999, 建築学会学術講演梗概集

⁸⁾ Nagano et al., 2005, Effects of ambient temperature steps on thermal comfort requirements, Int J Biometeorol 50(1).

3.2 CO2 排出量削減効果のメカニズムの検討

3.2.1 CO2 排出量削減効果メカニズムの想定

3.1 の調査結果を踏まえ、暑熱対策技術の導入が、CO2 排出量の削減につながるメカニズムを検討する。まずは、CO2 排出量削減効果のメカニズムを下記の3通り想定した。

1) 屋外利用促進型

3.1 1) で述べたように、屋外利用人数や利用時間は熱環境によって変化し、厳しい暑熱環境では利用が減少することが明らかである。そこで、オフィスビルなどに隣接する屋外休憩スペースで、現状では暑熱対策が施されていない箇所に暑熱対策技術を施すことで、熱環境が改善されると、屋外の利用が増加することが見込まれる。オフィスビルなどの室内滞在者が、屋外を利用することで、オフィスビルの空調負荷や照明などの電力消費量が削減すると考え、CO2 排出量削減につながると考える。

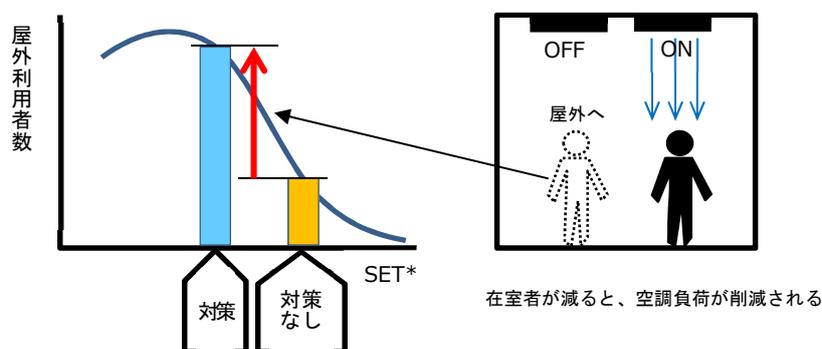


図 3.10 屋外利用促進型の考え方

2) 空調利用代替型

バスや電車の待合場所など、ある程度の時間滞在を要する場所において空調室の導入が進められている。しかし、一方で、電力消費による CO2 排出量の増大が懸念される。そこで、パッシブな暑熱対策技術を施し、空調機器の代替することで CO2 排出量の増加を回避できると考える。

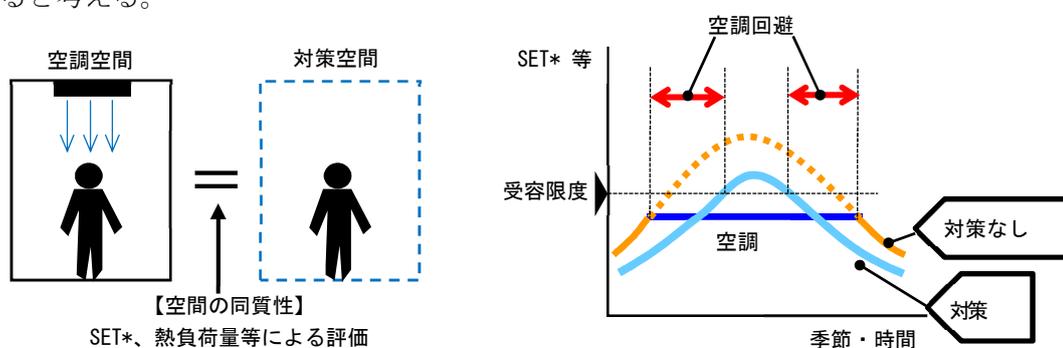


図 3.11 空調利用代替型の考え方

3) 省エネ促進型

バスや電車の待合場所の暑熱環境を改善すると、人の受熱量が減り、体温調節反応（発汗量の増大や心拍数の上昇）が抑制される（暑熱ストレスが軽減する）と考えられ、3.1 4) で述べたように、室内の設定温度を過度に低くしなくても、十分に涼しさを得られる可能性がある。すると、バス停や電停から乗り込む車両の冷房設定温度を現状より高めても、車両内における温熱的な中立性や通常の温熱生理の状態を確保しやすくなることが想定される。このメカニズムが成立すると、車内の設定温度を上げた分の電力消費が節約され、CO₂ 排出量削減に寄与すると考える。

ただし、車両の設定温度を上げるためには、運行経路のほぼすべての待合所の暑熱ストレスが軽減されている必要がある。

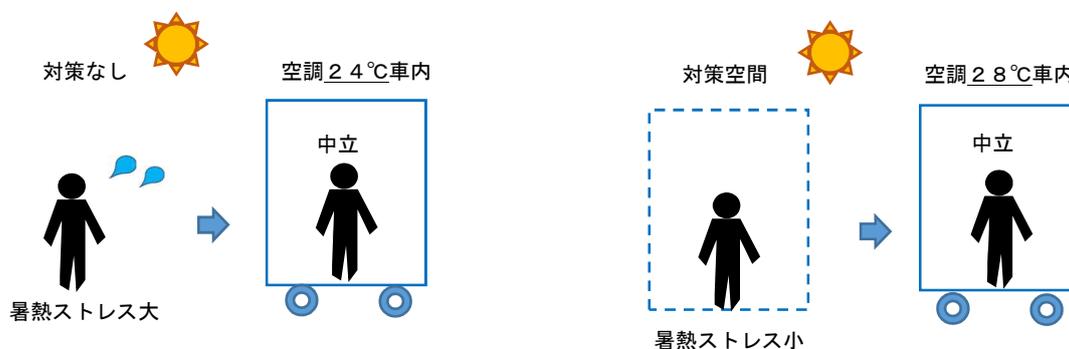


図 3.12 省エネ促進型の考え方

3.2.2 想定メカニズムの予備的検証

「空調利用代替型」及び「省エネ促進型」のメカニズムの検証のため、8月3日～8月6日に被験者8名を対象とした生理・心理実験を行った。

室内安静ののち、日向を歩行、その後熱環境の異なる4パターンのベンチに着座、さらにその後空調室内に移動し着座というスケジュールで実施し、移動後の室内温度条件を28°Cと24°Cの2パターン設定して実施した。実験中、生理反応指標として心拍数を測定、心理反応測定として5～10分毎に温冷感等を申告させた。詳細な実験の内容と結果は参考資料3にとりまとめた。

実験結果からは、「暑熱対策を施した屋外の着座環境では、生理状態が空調室内とほぼ変わらない状態となる」ことがわかり、「空調利用代替型」が成立することが裏付けられた。一方、屋外から空調室内に移動後の生理反応については条件の違いによる差がみられず、心理反応においても、「暑熱対策を施した屋外の着座環境から室内に移動すると空調設定温度が高くても許容できる（または快適感を感じるなど）」という結果は得られず、本実験では「省エネ促進型」の成立を裏付けることはできなかった。

3.2.3 想定メカニズムの適用と評価方法の検討

1) 評価の枠組みと考え方

本事業において検証する暑熱対策技術の効果の関係を図 3.13 に示す。暑熱対策技術の導入による暑熱ストレスの軽減は、厳しい暑熱環境の改善による健康リスクの軽減、や利用者の快適性の向上を目的に行われる場合が想定される。熱環境を評価する指標として、温熱要素や体感指標のほか、必要に応じて生理反応や主観申告を扱う。

暑熱ストレスの軽減を通じて期待される CO2 排出量削減効果は、3.2.1、3.2.2 より、「屋外利用促進型」と「空調利用代替型」の 2 通りを考える。

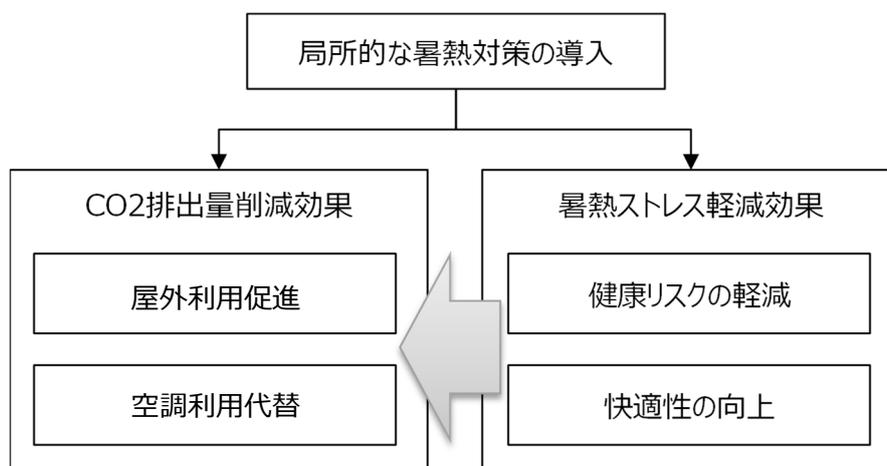


図 3.13 局所的な暑熱対策技術の効果の関係

バウンダリーは6月から9月の技術運用期間中の技術稼働時間内として CO2 排出削減量の算出を行う。技術稼働にエネルギーを要する場合もあるため、技術稼働による CO2 増加分は削減量より減ずる。

CO2排出削減量[kg-CO2/年]=

$$\begin{aligned}
 & \left[\begin{array}{l} \text{暑熱対策技術より} \\ \text{屋外利用促進、または空調利用代替} \\ \text{することで削減できた電力消費量} \\ \text{[kWh]} \end{array} \right] \times \left[\begin{array}{l} \text{電力} \\ \text{排出係数} \\ \text{[kg/kWh]} \end{array} \right] - \left(\begin{array}{l} \text{技術稼働に} \\ \text{係る電力量} \\ \text{[kWh]} \end{array} \times \left[\begin{array}{l} \text{電力} \\ \text{排出係数} \\ \text{[kg/kWh]} \end{array} \right] + \begin{array}{l} \text{技術稼働に} \\ \text{係る水量} \\ \text{[m}^3\text{]} \end{array} \times \left[\begin{array}{l} \text{上水} \\ \text{排出係数} \\ \text{[kg/m}^3\text{]} \end{array} \right] \right)
 \end{aligned}$$

図 3.14 CO2 排出削減量の算出イメージ

CO2 排出原単位は、5 箇所共通に電力「0.550kg-CO2/kWh」⁹、上水「0.348kg-CO2/

⁹ 環境省「地球温暖化対策事業効果算定ガイドブック」平成 25 年度電力排出係数代替値（総合エネルギー統計における外部用発電（卸電気事業者供給分）と自家用発電（自家消費分及び電気事業者への供給分）を合計した排出係数の直近 5 カ年平均を算出した値）

m³」¹⁰を用いる。

また、実施場所で熱環境を測定する際に、実施場所や測定年によりばらつきが生じるが、CO₂削減量評価を行う際には、地域特性、測定年の気候特性を排するために、対策技術が標準気象条件にあると想定して、SET*等の暑熱ストレス低減量を算出する。標準気象としては、2000年版標準年拡張アメダス気象データ（株式会社気象データシステム）の使用を想定している。

2) 技術導入検証実施場所と適用するメカニズム

実施場所ごとにそれぞれ適用するメカニズムを下記に示した。尚、各場所のより詳細な概要は3.～7.に記載している。

表 3.1 実施場所と適用する CO₂ 排出量削減効果メカニズム

実施場所	特長	適用するメカニズム
東京ビッグサイト前 海上公園	オフィスビルに隣接する公園内の 屋外休憩スペース	屋外利用促進型
大阪ビジネスパーク (クリスタルタワー)	オフィスビルの公開空地内の屋外 コミュニティスペース	屋外利用促進型
JR 前橋駅	鉄道駅のコンコース内の非空調の 半屋外空間	空調利用代替型
熊谷市役所前バス停	市役所前の屋外バス停	空調利用代替型
堺市綾之町電停	路面電車の屋外電停	空調利用代替型

3) CO₂ 削減量算出の考え方の検討

CO₂ 排出量削減効果メカニズムごとに、来年度の検証事業で把握すべき項目と、得られた結果から CO₂ 排出削減量を導く方法を検討した。

① 屋外利用促進型

屋外利用促進型を適用する実施場所での CO₂ 排出削減量算出手順のイメージを図 3.15 に示した。以下文中の[数字]は図中に記載した数字を示す。

温熱環境の測定することにより、暑熱対策技術による熱環境改善の把握し、同じ技術が標準気象下にある状態を想定して、SET*を算出する [1]。合わせて、利用人数調査を行い、後述する SET*と利用人数の関係式（後述）に検討を加えて[2]、屋外利用者増加数を推定する

¹⁰ カーボンフットプリントコミュニケーションプログラム「カーボンフットプリント制度試行事業 CO₂ 換算量共通原単位データベース ver. 4.01」(H22)

[3]。退室者一人あたりの空調使用による電力消費量[4]（後述）を用いて、得られた利用者増加数分の電力消費量を求め、対策による削減分とする[5]。一方で、対策技術稼働に電気や上水を使用した場合は実測をもとに算出する[6]。削減分と増分の差し引き分が CO2 排出削減量として求められる。

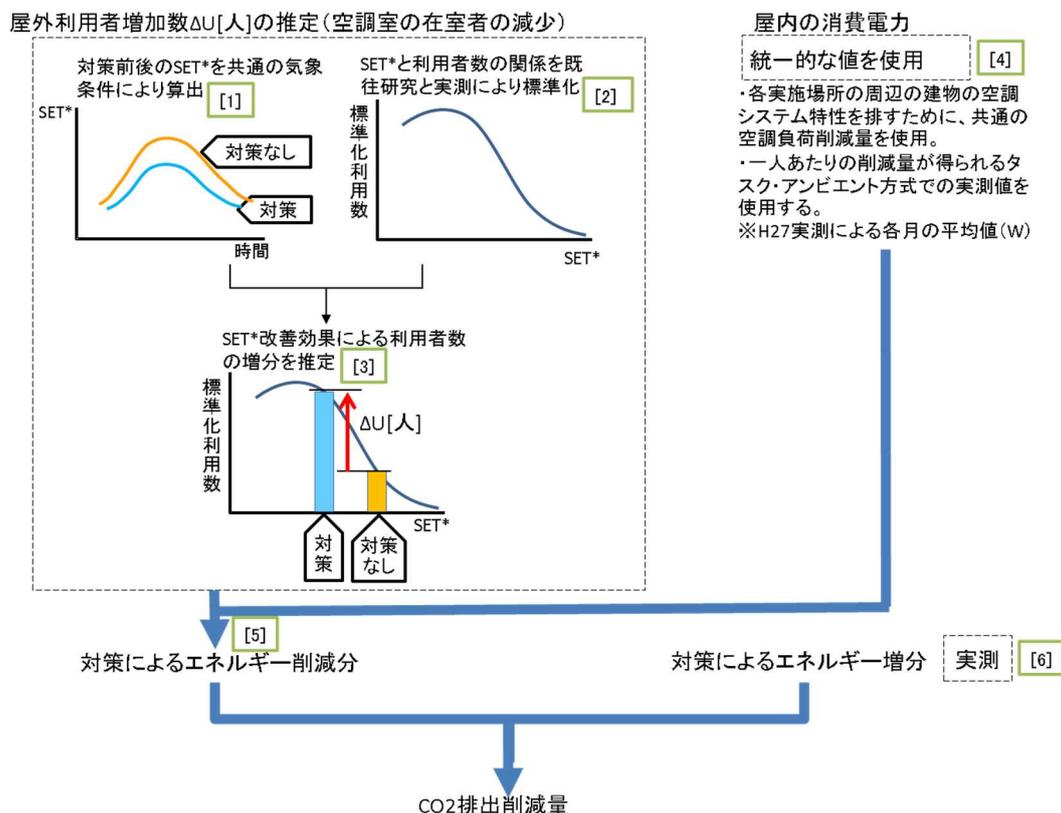


図 3.15 CO2 排出削減量算出手順のイメージ

[2]の過程で考える温熱環境の違いによる利用者数の増減傾向については、その変化の傾向は一律のものとし、既往研究を参考に SET*と利用者数の関係を標準化した。複数地点・複数測定日で調査された SET*による利用者数を平均化し、分布曲線に回帰させた。具体的な導出方法は参考資料 4 に示した。

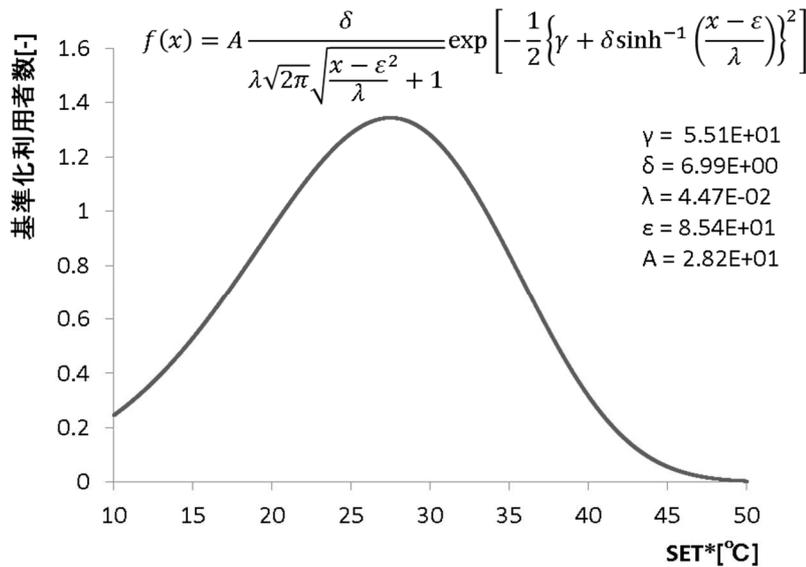


図 3.16 基準化利用者数と SET*の関係式

ここで検討した標準化手法を用いて来年度事業での熱環境及び利用者数調査を合わせて関係式を改善していくとともに、実施場所ごとの暑熱対策技術による利用者増加量も導出された関係式と実測結果をもとに算出する。

また、[4]にあたるオフィスビルにおける1人あたりの電力消費量は、適用する実施場所2箇所（東京ビッグサイト前海上公園・大阪ビジネスパーク）で同じ値を用いる。具体的には、大阪ビジネスパーク内のクリスタルタワーに導入されているタスクアンビエント方式の電力消費量が、環境省「平成27年度CO2排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業（省エネルギーに繋がる居住者の移動を促すための空間設計と誘導システム構築）委託業務」において、平成27年度の各月の平均値が求められており、その値を用いる。

② 空調利用代替型

空調利用代替型を適用する実施場所でのCO2排出削減量算出手順のイメージを図3.17に示した。以下文中の[数字]は図中に記載した数字を示す。

温熱環境の測定することにより、暑熱対策技術による熱環境改善の把握し、同じ技術が標準気象下にある状態を想定して、SET*を算出する[1]。熱環境に対する受容限度と、空調導入する温度を想定し[2]、暑熱対策技術を施すことによって、受容限度を下回る時間帯を求める[3]（例えば対策なしの場合は朝9時から17時の8時間空調をしていたが、暑熱対策により9時～11時、15時～17時の間が受容限度以下の暑熱環境となると、6時間空調を回避できると考えられる）。空調が使用された場合を想定した消費電力を求め[4]（後述）、空調使用を回避した時間を掛けあわせて電力消費量を求め、対策による削減分とする[5]。一方で、対策技術稼働に電気や上水を使用した場合は実測をもとに算出する[6]。削減分と増分の差し引き分がCO2排出削減量として求められる。

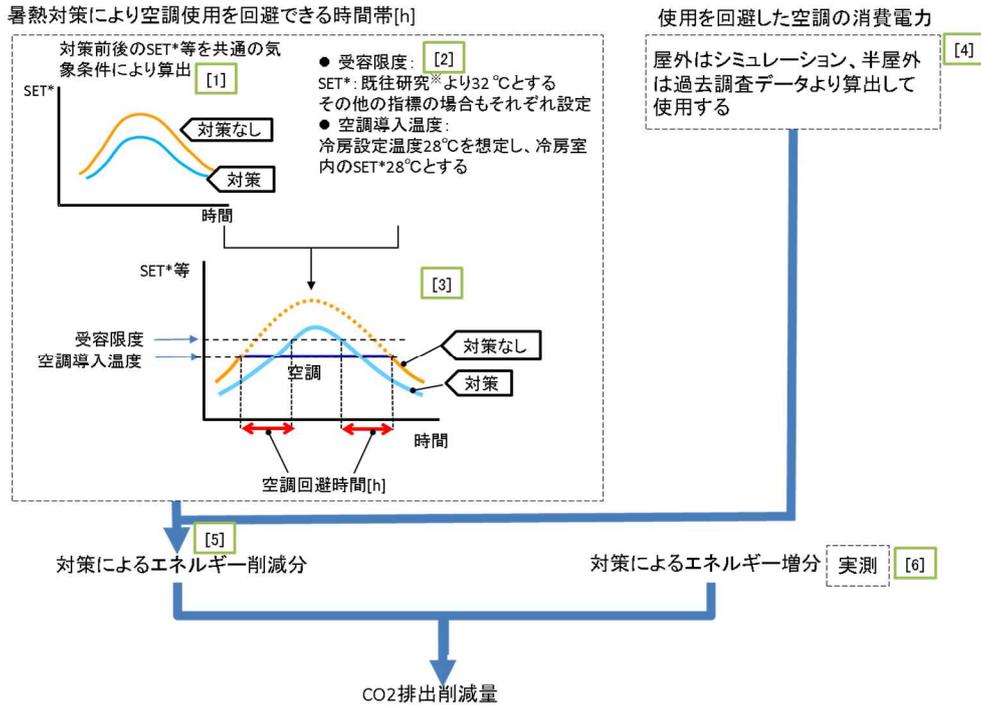


図 3.17 CO2 排出削減量算出手順のイメージ

[4]にあたる、暑熱対策技術で代替され得る電力消費量は適用する実施場所で同じ値を用いる。ただし、屋外空間に空調室を創出する場合と、半屋外空間空調を導入する場合とでは空調負荷に違いが出ると考えられるため、屋外空間である2箇所（熊谷市役所前バス停・堺市綾之町電停）で統一的な値を、半屋外空間の場合（JR 前橋）は別途求めた値を用いる。

屋外空間の中に空調室を設置した場合の空調負荷は熱負荷シミュレーション¹¹を用いて算出した。下記にシミュレーション条件と空調負荷の結果を示す。

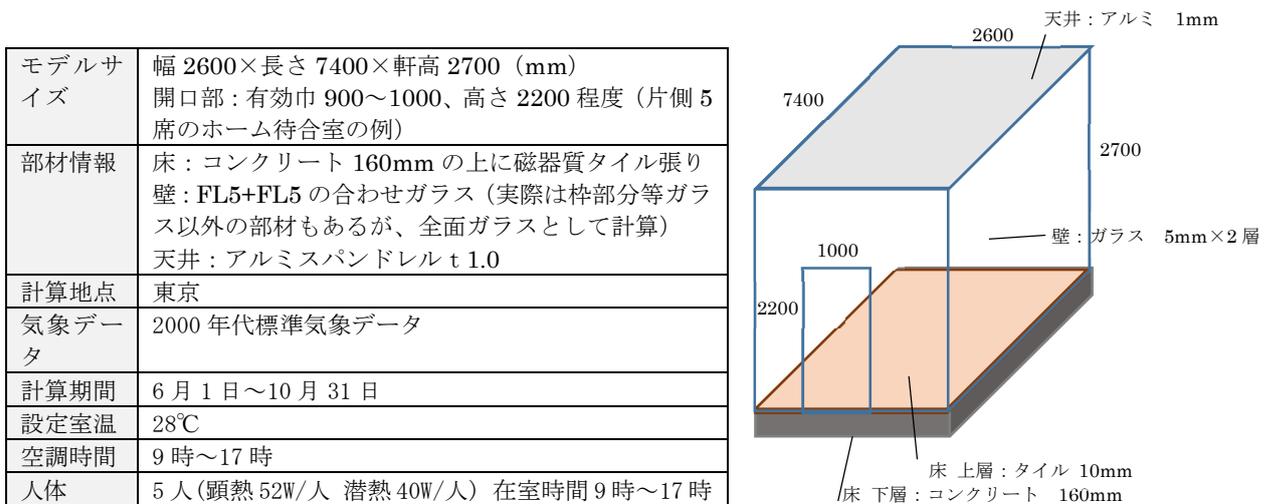


図 3.18 シミュレーション条件

¹¹ 計算プログラム LESCOM-mint を使用し、1 分間隔年間計算を行った。

表 3.2 シミュレーション結果

	6月	7月	8月	9月	10月
空調負荷(MJ)	2387	4908	8047	4222	1384

また、半屋外空間で空調を使用した場合の電力消費量は過去の鉄道駅における実測調査データ¹²を参考に推計する。6～9月の各月の日平均電力量の経時変化(W)を単位面積(平米)あたりで算出し、前橋駅の暑熱対策設備設置範囲の面積および評価期間を乗じることで、空調設備導入時の電力消費量データとして用いる。

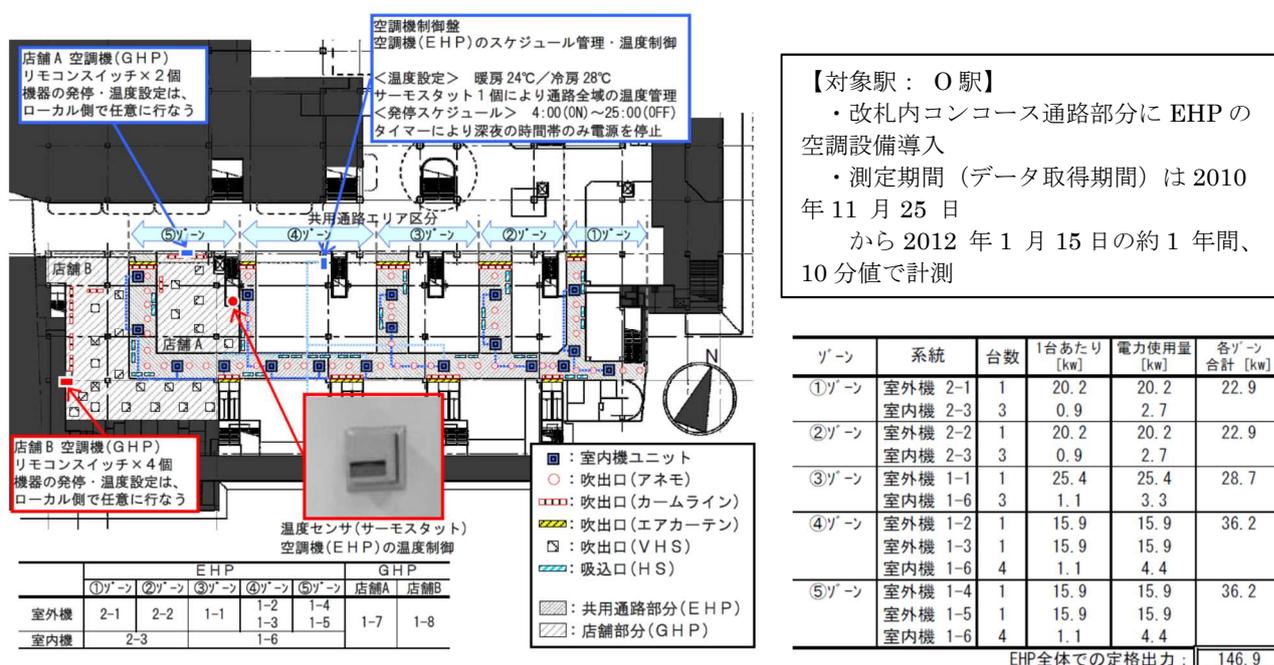


図 3.19 鉄道駅コンコースでの電力消費量調査の概要

¹² 飯野ほか, O駅における年間の空調用電力使用量の測定結果(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4), 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), 2012-09