

2. 測定評価方法提案

研究分担者 中野 淳太 東海大学工学部建築学科 准教授

研究分担者 開原 典子 国立保健医療科学院 主任研究官

研究分担者 李 時桓 信州大学工学部建築学科 助教

研究要旨

空間の用途、空調方式、立地の多様性を考慮した、空気環境の測定方法の提案を目的とし、国際的温熱環境基準の文献調査を行った。ASHRAE 55 基準に準拠した測定方法を提案し、北海道、関東、東海、近畿、九州の実際のオフィスを夏季と冬季に分けて調査した。また衛生管理基準と最新の温熱環境基準による評価結果を比較した。提案した測定方法と最新の評価基準により、季節・建物規模・空調方式の特徴を分類できることがわかった。健康影響評価に必要な環境因子の知見と本測定方法をリンクさせることで、時間的・空間的な温熱環境分布評価の解像度を高めることが可能である。

A. 研究目的

A1. 用途、空調方式、立地の多様性を考慮した、空気環境の測定方法の提案

建築物衛生法が制定されたのは、1960年代の高度経済成長期にあわせてビルへの空調設備の普及が急速に進んだ時期であった。それから50年経ち、社会状況は大きく変化している。2014年4月に閣議決定された「エネルギー基本計画」において、「2020年までに新築公共建築物等で、2030年までに新築建築物の平均でZEB（ネット・ゼロ・エネルギー・ビル）の実現を目指す」とする政策目標が掲げられている。ZEBとは、建物で消費する年間の一次エネルギーの収支をゼロにすることを目指した建物のことで、建物の全消費量の約3割に相当する空調エネルギーの削減が重要な課題となっている。一方で、室内環境に対するニーズは高度化しており、衛生的な環境の確保だけでなく、快適性、知的生産性、健康性を高める環境が求められている。

建築物衛生法の「空気環境」における温熱環境の管理基準（以下、衛生管理基準）は、室内全体を

均一な温湿度に維持するという従来の空調設計思想が前提となっている。社会的な省エネの要請から、あえて不均一な環境を意図した空調設計や、放射に着目した空調方式の採用も今後増えていくと予想される。新しい空調方式や建物の使われ方に対応した空気環境測定法が望まれる。

これまで建築物衛生法の管理基準（以下、衛生管理基準）では、温熱環境に関連する項目として空気温度、湿度、気流速度を対象としてきた。しかし、国際的な温熱環境基準であるASHRAE 55（初版1966年）とISO 7730（初版1984年）では、より詳細な熱的快適性評価を目的とした測定項目と評価基準が定義されている。特にASHRAE 55基準では、既存建物を評価するための測定方法が詳述されており、2017年に最新版が発行されている。また、カテゴリ分けされた室内環境基準に関するISO 17772-1が2017年に制定されている。これらの基準を調査し、建物の用途、空調方式、立地の多様性を考慮した、空気環境の測定方法および評価基準のあり方の提案を目的とする。

B. 研究方法

B1. 用途、空調方式、立地の多様性を考慮した、空気環境の測定方法の提案

国際的に参照されている室内温熱環境基準である ASHRAE 55-2017¹⁾および ISO7730:2005²⁾の文献調査を行い、ここに規定される温熱環境を評価するための測定方法を明らかにする。これらの基準を参考に空気環境測定法を提案し、実際の測定を通じてその有効性の検証を行う

B1.1. ASHRAE 55-2017

ASHRAE 55 基準では、伝統的に湿り空気線図上に温湿度条件の範囲として熱的快適域を示す手法がとられてきた。2017年に改定された最新版では、複数の手法から熱的快適域の選択が可能となっている。また、ドラフトによる不快条件を緩和し、気流速度の上昇による熱的不快の改善が可能になっている。

(1) Graphic Comfort Zone Method

伝統的な ASHRAE 基準に沿った熱的快適域の表現方法で、空調設計の観点から、湿り空気線図上の範囲として示している。代謝量 1.0~1.3 met、着衣量 0.5~1.0 clo の条件で、不満足者率が 20% 未満となる範囲を示している。この中には、全身温冷感による不満足者 10%と局所の熱的不快による不満足者 10%が見込まれている。この手法を選択した場合のみ絶対湿度の上限、12 g/kg(DA) が適用される。熱的快適性の観点からの下限値はないが、低湿度になると目や鼻の乾燥、静電気等の非温熱的影響はあることが記されている。気流速度は基本的に 0.2 m/s 未満にすることとなっているが、所定の要件を満たすことで気流速度の上限値をなくすことが可能である。

(2) Analytical Comfort Zone Method

代謝量 1.0~2.0 met、着衣量 1.5 clo 以下であれば、任意の温熱環境 6 要素の組み合わせから PMV (予測平均温冷感申告: Predicted Mean Vote) および PPD (予測不満足者率: Predicted Percentage

of Satisfied) の計算により熱的快適域を求めて良いとしている。全身温冷感の基準として、 $-0.5 < PMV < +0.5$ ($PPD < 10$) が示されている。ただし、気流速度の上限は 0.2 m/s となっており、これを超える場合は、別の気流速度上限に関する(3)項を参照することとなっている。

(3) Elevated Air Speed Comfort Zone Method

気流は熱的作用だけでなく、皮膚に対する触覚刺激をもたらす。また、局所的に加熱または冷却されることが不快をもたらすこともあり、気流は小さい方が良いという考えからドラフトに関する基準が設けられている。しかし、2010年度版以降、省エネの観点から気流の増加による夏季室温設定の緩和が認められるようになった。特に、執務者により気流速度が調節できる状態であれば、 $-0.5 < PMV < +0.5$ ($PPD < 10$) の快適範囲で気流速度の上限がなくなった。ただし、「執務者により気流が調節可能な状態」とは、以下のいずれかの要件を満たす必要がある:

- ・ 6 人以下のゾーン単位で調節が可能なこと
- ・ 84 m² 以下のゾーン単位で調節が可能なこと
- ・ 教室のようなグループで作業する空間の場合、例外として最低 1 カ所にて調節できること。可動間仕切りで区切られている場合は、それぞれのゾーンにて調節できること

これらの要件はパーソナル空調等への応用が想定されており、空間全体で均一な温熱環境を目指す従来の空調設計思想とは一線を画す。

B1.2. ISO 7730:2005

(1) 推奨環境のカテゴリ分けと EPBD

本基準のタイトルは、“Moderate thermal environments, Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort”である。ISO 7730: 2005 が 1994 年以前の版と大きく異なるのは、1 組しかなかった全身温冷感と局所不快の温熱環境推奨値が、A~C の 3 カテゴリに分かれた点である。これに

は、EU 加盟国の建物省エネルギー性能の向上を目的として 2003 年に施行された EPBD (建物のエネルギー性能にかかわる欧州指令 : Energy Performance of Buildings Directive) が大きく影響している。

指令では、EU 加盟国に建物エネルギー性能の算定方法の枠組みを策定することが求められている。エネルギー性能算定には、冷暖房・換気・照明に関わる一次エネルギー使用量の予測が必要となる。しかし、建物のエネルギー使用量は、目標とする室内環境の質によって大きく異なる。建物の種類によっては、高い質が求められる場合や、成り行きでも問題とならない場合もある。ニーズに合った室内環境の質の選択を可能とするため、既存の ISO 室内環境推奨値にカテゴリ分けが導入されることとなった。

(2) 熱的快適域

ISO 7730:2005 における全身温冷感に基づく熱的快適域の推奨値を表 1 に示す。PMV と PPD のセットとして示されており、A~C の順に快適性が高く設定されている。ASHRAE 55-2017 は、本基準のカテゴリ B に相当する。

(3) 局所不快

体の一部で極端な冷却や加熱がある場合は、不快の要因となる。これを局所不快という。熱的快適の実現には、全身温冷感が適切な範囲に収まっていると同時に、局所不快がないことが求められる。ISO7730 では局所不快に関して詳述されており、本基準に準拠して解説する。

・ドラフト 気流は、対流による熱交換を促進させる効果がある。体の一部に継続的に気流が当たることで局所的な加熱/冷却が行われ、不快につながる。また、熱的作用だけでなく、皮膚に対する触覚刺激をもたらす。望まれない気流をドラフトという。

・上下温度分布 古くから頭寒足熱という言葉があるが、頭が涼しく足下が暖かい状態が快適だと言われている。しかし、物理的な法則から暖かい

空気は部屋の上部に、冷たい空気は部屋の下部にたまりやすい。断熱性能の低い部屋では、不適切な暖房方法により容易にこのような状況が発生する。足下と頭の位置での空気温度差 ($\Delta t_{a,v}$) により PD (不満足者率 : Percentage of Dissatisfied) が定義されているが、評価高さは立位と座位で異なる。足元の高さは 0.1m で共通であるが、立位頭部の高さは 1.1m、座位頭部の高さは 0.6m となる。より広い範囲で同じ温度差を満たさなければならぬため、立位の方がより厳しい基準となる。

・非対称放射 体の片側や頭部などの一部が放射により加熱/冷却されると不快の要因となる。冬の冷たい窓面や日射で熱せられた最上階の天井面などがその原因となりうる。不均一な放射環境は、相対する微小面温度の差 (Δt_{pr}) で評価し、温度差が大きいほど不満足者率が高くなる。

ISO 7730:2005 における局所不快による不満足者率のカテゴリ分けを表 2 に示す。

B1.3. ISO 17772-1:2017

本基準のタイトルは、”Energy performance of buildings - Indoor environmental quality - Part 1: Indoor environmental input parameters for the design and assessment of energy performance of buildings”で、2017 年に制定された。本基準では、以下の 3 点について解説している : ①室内環境設計基準を設定し、環境設備システムの要件定義に使用するための方法、②建物のエネルギー計算および室内環境の長期的評価に用いられるパラメータの定義、③室内環境のモニタリングおよび表示に用いられるパラメータの定義。

本基準では、温熱環境、空気環境、光環境、音環境に関する推奨値を示している。これらは居住者に期待される室内環境の質のレベル (高、中、ひかえめ、低) に応じて、I-IV のカテゴリに分けられている。表 3 に温熱環境に関するカテゴリ別不満足者率推奨値を示す。評価項目とカテゴリ I~III の推奨値は、ISO7730 の A~C と一致している。ISO

17772-1 では 4 つめのカテゴリを設定している点
が異なる。

本基準は、温熱環境に関する国際的な推奨値と
して現時点で最新のものであり、既存の ISO7730
や ASHRAE 55 の推奨値を包含した上で、さらに
カテゴリを拡張している。そのため、ISO 17772-
1 のカテゴリ評価を用いて、衛生管理基準による
評価結果と比較を行うこととする。

B1.4. 最新の温熱環境基準の特徴

最新の温熱環境基準の特徴を一言で表すならば、
「多様化」である。1 組のみであった基準値・推奨
値から、カテゴリ分けや条件付き基準緩和等によ
り選択肢が増える傾向にある。多様化の背景には、
温熱環境に対する省エネニーズ、そして環境適応
の概念がある。安定した快適温熱環境の確保を目
指した従来路線を継続させる一方で、必要な快適
性を確保した上でのエネルギー削減という新たな
視点で基準値・推奨値を追加している。基準の多
様化により、設備設計や運用の自由度は高まった
といえる。

ASHRAE55、ISO7730 および ISO17772-1 は、
建物用途を限定した基準とはなっていない。利用
者の代謝量と着衣量の組み合わせを変化させるこ
とで、幅広い用途の空間に対応している。また、時
代のニーズに合わせて快適性の基準値は変化させ
ているものの、環境の測定項目や測定方法につい
ては、大きな改定はされていない。これらの基準
の測定方法は国際的な実績があり、これまでの空
調方式にも、新しい空調方式にも対応できると考
えられる。

ISO7726⁴⁾では、温熱環境に関わる測定項目の定
義や測定原理、使用機器の測定精度等が規定され
ている。ISO7726 と ASHRAE 55 は密接な関係に
あり、互いに整合性がある。しかし、ASHRAE 55
ではより細かい測定手順に関する規定があり、こ
の中から日本の状況に合わせたアレンジをしてい
くことが有効と考えられる。

C. 研究結果

C1. 用途、空調方式、立地の多様性を考慮した、 空気環境の測定方法の提案

C1.1. 測定項目に関する提案

熱的快適性評価には、以下に示す環境側の 4 要
素と人体側の 2 要素が関連している。現衛生管理
基準に含まれない 3 項目をカッコで示してある。

- ・環境側要素： 空気温度、湿度、気流速度、
(放射温度)
- ・人体側要素： (着衣量)、(代謝量)

評価項目を 3 つから 6 つに増やすことで、衛生
確保を目的とした管理基準では不適合となった場
合も、より厳しい熱的快適性の基準には適合とな
る場合が考えられる。逆に、これまで見えなかつ
た問題点を顕在化できる可能性がある。

人体側要素については、必ずしも測定は必要な
く、快適性基準でも建物の用途や季節に応じて一
般的な固定値を用いている。そのため、衛生管理
基準には含まれていない放射温度を環境測定項目
に追加することを検討する。

評価には個別の基準値のみではなく、6 つの要
素を考慮した総合的な温熱環境指標である PMV
と PPD を用いる。また、不均一環境（ドラフト、
非対称放射、上下温度分布）についても評価する
ことで、中央式、個別式、放射式等の異なる空調方
式の温熱環境特性を明らかにする。

(1) 平均放射温度

平均放射温度（mean radiant temperature：
MRT）の測定法には、2 種類ある。両手法を採用
し、評価の精度と作業負担のバランスを検討する。

・グローブ温度： 正式には直径 15cm の銅製の
黒球を用いるが、測定値が定常に達するまでに 20
～30 分を要する。黒色塗装のプラスチック製小径
球（ピンポン球）を用いることで定常に至る時間
を短縮できるが、対流の影響を受けやすくなるた
め、MRT への換算時に異なる式を用いる。ただし、
気流速度の高い環境では放射温度の精度が低くな

るため、注意が必要である。

$$\bar{t}_r = \left[(t_g + 273)^4 + \frac{1.1 \cdot 10^8 \cdot v_a^{0.6}}{\varepsilon_g \cdot D^{0.4}} (t_g - t_a) \right]^{0.25} - 273$$

\bar{t}_r : 平均放射温度 [°C]、

D : グローブ球の直径 [m]

t_g : グローブ温度 [°C]

t_a : 空気温度 [°C]

v_a : 気流速度 [m/s]

ε_g : グローブ球の放射率

(2) 微小面放射温度

微小平面に入射する放射束が実環境と同等になる均一な黒体閉空間の内表面温度と定義される。逆に向いた 2 方向を測定することで、非対称放射温度差 (Δt_{pr}) による不均一環境の局所不快を評価できる。また、6 方向を測定し、重み付け平均をすることで人体の形状を考慮した平均放射温度を求めることができる。

座位 :

$$\bar{t}_{pr} = \frac{0.18(\text{上+下}) + 0.22(\text{右+左}) + 0.30(\text{前+後})}{2(0.18 + 0.22 + 0.30)}$$

立位 :

$$\bar{t}_{pr} = \frac{0.08(\text{上+下}) + 0.23(\text{右+左}) + 0.35(\text{前+後})}{2(0.08 + 0.23 + 0.35)}$$

C1.2. 測定位置

(1) 平面分布

衛生管理基準では、居室中央部の、直接空調吹出し口の影響を受けない位置を選定することとなっている。しかし、快適性基準では居住者が滞在している、または滞在すると想定される場所を選定することとなっている。滞在場所がわからない場合は、以下を測定点とする。

1. 部屋または空間の中央
2. 壁中央から 1m 内側。窓のある外壁では、最も大きな窓の中央から 1m 内側。

極端な環境になる場所（窓際、吹出し口付近、コーナー、入り口付近等）であっても、居住者が滞在すると相対される場合は、測定点に含める。特に、室内環境と屋外環境の差が大きくなる気候・季節や時間帯に不均一環境が顕著になるため、測定点の選定に注意する。

(2) 測定高さ

衛生管理基準では、床上 75~150cm の高さにて測ることとなっている。空気温度の測定高さについて、椅坐位の居住者は 0.1m・0.6m・1.1m、立位の居住者は 0.1m・1.1m・1.7m とする。0.1m はくるぶし、0.6m は椅坐位の体中心、1.1m は椅坐位の頭部と立位の体中心、1.7m は立位の頭部の高さに相当する。作用温度と PMV の評価高さについて、衛生管理基準と共通する 1.1m とする。床表面温度が局所不快の要因となる場合は、床表面を接触温度計または赤外放射温度計で測定する。しかし、二重床となっている OA フロアでは問題となりにくいいため、評価項目から除外した。

局所不快の要因となる非対称放射は、影響を受ける居住者の位置にて温度差が最大となる方向にて評価する。

(3) 測定時間

評価対象期間（季節、代表日）の代表となる時間帯、または滞在時間中の重要と思われる時間帯を選択する。

C1.3. 測定装置

上記の測定条件を満たす測定装置を作成した。図 1 に高さ 4 点の温湿度、高さ 1.1m のグローブ温度と気流速度を同時に測定できる装置を示す。高さは下から順に、0.1m、0.6m、1.1m、1.7m とした。グローブ温度には、直径 40mm の黒色塗装プラスチック球を用いた。

図 2 に微小面放射温度計を示す。CAPTEC 製の輻射センサー（RF シリーズ）を用い、銅板の両面に熱伝導性の高い接着剤で固定してある。銅板はセンサー温度を安定させるヒートシンクの役割を

果たす。

C1.4. 事務所ビルにおける実測調査

(1) 調査概要

新たな測定方法の有効性の検証を目的とし、気候の異なる事務所ビルにおいて2017年～2019年の夏季と冬季に温熱環境実測調査を行った。立地は、北海道、東京、埼玉、横浜、名古屋、大阪、福岡にある事務所建築物27件とした。測定対象建築物の詳細を表4に示す。規模に応じて特定建築物と3,000㎡以下の建築物、空調方式は中央方式と個別方式を交えて選定した。建物によっては、複数階の事務所を測定し、測定点は居住者の滞在する室中央部（インテリア：*i*）と窓近傍（ペリメータ：*p*）の2点とした。

測定高さは、温湿度が床上0.1m、0.6m、1.1m、1.7mの4点、その他の項目は床上1.1mとした。空気温度、湿度、グローブ温度は15分間測定の終了前30秒間の平均値、気流速度は3分間の平均値を記録した。微小面放射温度は、2方向を5分間ずつ測定し、それぞれの終了前30秒間の平均値を記録した。

(2) 建築物衛生法管理基準の適合状況

全測定点104件における高さ1.1mの測定結果から、衛生管理基準の適合状況を分析した。空気温度、相対湿度、気流速度の適合状況を図3に示す。不適合率で見ると、気流速度は0%、空気温度は2%であったのに対し、相対湿度は35%と最も高かった。

次に、季節および建築物の種別（規模・空調方式）で傾向を分析した。各分類に該当する測定点数を図4に示す。個別方式の中規模建築物が最も多く、夏季に54件、冬季に50件であった。建物種別の不適合率について、空気温度を図5、相対湿度を図6、気流速度を図7に示す。空気温度の不適合は、夏季の個別方式の中規模建築物2点のみであった。相対湿度は冬季に顕著に不適合率が高

く、中央式よりも個別式が高い傾向が見られた。気流速度の不適合はなかった。

夏季調査の全測定結果を図8に示す。図中の*i*はインテリアゾーン、*p*はペリメータゾーンまた、建物コードの下の○は、特定建築物を示している。空気温度の不適合は、個別方式の中規模建物F1のインテリアおよびペリメータで、上限の28℃を上回っていた。相対湿度は個別方式の特定建築物A3で上限の70%を上回っていた。調査時は雨が降っており、外気湿度が90%を超えていたことが影響していた。個別方式の中規模建築物において、気流速度が0.45 m/sを超える測定点が2点見られたが、0.5 m/sは超えていなかった。

冬季調査の全測定結果を図9に示す。空気温度が20℃を下回る測定点はなく、下限値に関して問題は見られなかった。個別方式の中規模建築物W1のインテリアでは、むしろ上限の28℃に近い値が見られた。相対湿度の衛生管理基準を満たしていたのは全体の32%のみであった。気流速度は、すべての測定点で0.2m/sを下回っていた。

以上を総括すると、冬季の相対湿度を除けば、すべての測定点で概ね衛生管理基準を満たしていた。冬季に相対湿度が不適合となった測定点に、地域、建築物の規模による差は小さかったが、中央方式よりも個別方式でより高くなる傾向が見られた。また、すべての適合状況判定結果において、インテリアゾーンとペリメータゾーンによる差は見られなかった。

(3) インテリアとペリメータの環境比較

インテリア測定結果を基準としたペリメータ測定結果の差の度数分布を図10～15に示す。

図10に示す空気温度は、±2℃の範囲で広く分布しており、特にプラス側に偏る傾向が見られた。差を平均すると+0.2℃であった。

図11に示す相対湿度は±5%以内に概ね納まっており、測定誤差の範囲に収まるため、差は小さかった。

図12に示す絶対湿度は、±0.5 g/kg(DA)の範囲

内に 85%が収まっており、差は小さかった。

図 13 に示す気流速度差は、 -0.1 m/s が最も多かったが、差を平均すると 0 m/s であった。

図 14 に示す平均放射温度は、 $-2 \sim +4.5^\circ\text{C}$ の範囲に分布していた。特に正の分布が多く、ペリメータゾーンで高めの結果となることがわかった。差を平均すると $+0.6^\circ\text{C}$ であった。

図 15 に PMV の結果を示す。インテリアゾーンと比較してペリメータゾーンの空気温度と平均放射温度が高くなるため、PMV も平均で 0.2 高くなることがわかった。

全体を平均すると差は小さくなるものの、インテリアゾーンとペリメータゾーンでは温熱環境に差が見られ、異常を検知するという観点では、両ゾーンを測定することが望ましいと考えられる。

(4) 平均放射温度の測定方法による差

図 16 にグローブ温度から求めた平均放射温度 (GMRT) と空気温度の関係を示す。GMRT は概ね対角線の周りに分布しており、空気温度とほぼ同値であった。夏季は対角線の上側に位置するプロットも見られ、空気温度よりも高いことを示す。

図 17 に 6 面の微小面放射温度を平均して求めた平均放射温度 (MRT) と空気温度の関係を示す。GMRT と比較してばらつきが大きく、夏季は空気温度よりも高かった。夏季の平均温度差は 1.5°C 、負の最大差が -1.8°C 、正の最大差が 5.4°C であった。冬季の MRT は空気温度よりも低く分布しており、平均 -0.5°C 、負の最大差が -6.1°C 、正の最大差が 1.1°C であった。

図 18 に GMRT に対する MRT の関係を示す。MRT は GMRT よりも夏は高く、冬は低いエリアに広く分布していた。夏季の平均温度差は 1.2°C 、負の最大差が -3.6°C 、正の最大差が 5.8°C であった。冬季の MRT は、平均 -0.7°C 、負の最大差が -5.1°C 、正の最大差が 0.9°C であった。6 方向の微小面放射温度測定では、特にペリメータゾーンで窓面からの日射や冷放射の影響を大きく受ける。放射環境の違いをより繊細に評価していると考えられる。

(5) ISO17772-1 によるカテゴリ評価

ISO 基準による評価に当たり、高さ 1.1 m の空気温湿度、平均放射温度、気流速度の測定結果、代謝量 1.1 met から PMV を求めた。着衣量は夏季 0.5 clo 、冬季は 1.0 clo とした。

全測定点のカテゴリ評価結果を図 19 に示す。局所不快感については推奨値がカテゴリ III まで示されているため、上限値を超えた場合は IV 評価とした。PMV の推奨値はカテゴリ IV まで示されているため、上限値を超えた場合は「N/A (不適合)」とした。総合評価は、4 つの評価項目のうち、最も低い評価を適用した。

総合評価のカテゴリ I は 13%、カテゴリ II が最も多い 35%、カテゴリ III と IV がそれぞれ 29%、21%、評価対象外が 2%となった。衛生管理基準においては、冬季の相対湿度以外は概ね適合していたのに対し、ISO17772-1 による総合評価では、全体の約 1/4 が「期待される環境の質」において最も低いレベルまたは不適合に相当することがわかった。

項目別に見ると、全測定点の評価結果で、最もカテゴリ I の評価が低かったのが PMV であった。反対に、非対称放射はすべての測定点でカテゴリ I の評価であった。以下の分析は、季節および建築物の種別に分けて行う。

季節および建築物の種別による各項目のカテゴリ評価を図 20 に示す。総合評価では、冬季における特定建築物・個別方式のカテゴリ I 評価が 50% と最も高かったものの、その他の種別ではカテゴリ I の割合は 25%以下であった。総合評価と PMV 評価の傾向は類似しており、PMV 評価の影響が大きいといえる。PMV の評価について、夏季は空調方式に関係なく、中規模建築物で I~IV までの評価の分布が大きいことがわかった。また、冬季は中央式で評価の分布が小さく、個別方式での分布の大きさが顕著であった。評価の分布の大きさは、測定点による環境の差が大きいことを示している。

PMV の評価結果を図 21 に示す。冬季における

個別方式の中規模建築物と個別方式の特定建築物でカテゴリ I の評価が約 50%であった。また、いずれの季節、建築物の規模であっても、個別方式ではカテゴリ評価が広く分布する傾向が見られた。

上下温度分布の評価結果を図 22 に示す。冬季の中規模建物における個別空調方式で III～IV 評価が 6 割を超えており、高さ方向の温度分布が大きかった。

ドラフトの評価結果を図 23 に示す。概ねカテゴリ I の評価が 60%を超えていたが、いずれの季節も中規模建築物の個別方式で評価が低くなる傾向が見られた。

夏季における全測定点の PMV 評価結果を図 24 に示す。カテゴリ I の評価には PMV が ± 0.2 以内、カテゴリ II には ± 0.5 以内である必要がある。夏季には $+0.5$ を超えていたのは、主にペリメータゾーンであった。 -0.5 を下回る測定点も見られたが、これらに特定の傾向は見られなかった。冬季における全測定点の PMV 評価結果を図 25 に示す。 -0.5 を下回る測定点はなく、 ± 0.5 を逸脱していたのはすべて上限を超えたためであった。PMV の算出条件として、ASHRAE 55 における Graphic Comfort Zone Method の着衣量である夏季 0.5clo、冬季 1.0clo を一律で適用した。しかし、利用者が環境に合わせて着衣を調節している可能性もある。実態に合わせて着衣量を推定することで、より現実に即した評価が可能になると考えられる。カテゴリ評価の閾値が比較的狭い範囲内にあるため、適切な着衣量の評価が重要であることがわかった。

夏季における全測定点の全項目評価結果を図 26 に示す。PMV とドラフトで低評価が目立ち、PMV はインテリアよりもペリメータゾーンで低くなる傾向にあった。ドラフト評価は、ゾーンによる差は見られなかった。冬季における全測定点の全項目評価結果を図 27 に示す。PMV と上下温度分布で低評価が目立っていたが、ゾーンによる差は見られなかった。

(6) 管理基準適合環境のカテゴリ評価

建築物衛生法の管理基準に適合する環境（以下、適合環境）を ISO17772-1 で評価することとした。空気温度 17～28℃（1℃刻み）、放射温度 15～30℃（1℃刻み）、相対湿度 40～70%（10%刻み）、気流速度 0.1～0.5m/s（0.1m/s 刻み）、着衣量 0.5clo（夏季）と 1.0clo（冬季）、代謝量 1.1met の環境条件の組み合わせ 7680 通りについて PMV、PPD、ドラフトによる不満足者率を求め、カテゴリ評価の分布について分析を行った。

適合環境のカテゴリ評価を図 28 に示す。衛生管理基準では上下温度分布と放射環境に関する規定がないため、総合評価は PMV とドラフトのうち、最も低い評価結果が適用された。総合評価では、IV 評価と不適合が 77%であり、最も高い I 評価となったのは 3%のみであった。PMV は、45%がカテゴリ評価において不適合、14%が IV 評価となり、ドラフトも半数を上回る 55%が最も低い IV 評価となった。I～III はそれぞれ 15%程度であった。

図 29 に季節ごとの総合評価の結果を示す。冬季よりも夏季の評価結果が低く、IV 評価と不適合が 80%となっていた。図 30 に季節ごとの PMV 評価の結果を示す。こちらも冬季よりも夏季の評価結果が圧倒的に低く、不適合が約 40%増えていた。図 31 に示す季節ごとのドラフト評価結果には、季節差は見られなかった。以上を総合すると、夏季の PMV 評価の低さが、適合環境の総合評価の低さに大きく影響していたと考えられる。

適合環境の PMV 分布を図 32 に示す。PMV の冬季平均値は -0.2 で $PMV=0$ が最頻値となっている。しかし、夏季平均値は -1.5 であり、 -1 より低い負の値を中心に分布していることがわかった。相対湿度 50%、気流速度 0.1m/s、代謝量 1.1met とし、空気温度と平均放射温度が等しいと見なすとき、 $PMV=0$ となる温度は夏季 25.4℃、冬季 22.4℃である。この条件を基準に考えると、衛生管理基準における空気温度およびその ± 2 ℃の範囲に設定した放射温度は、低い方に広く分布している。一方で気流速度は高い方に広く分布しており、

結果的に、着衣量の低い夏季は PMV も低い方に広く分布することがわかった。PMV = -3 の度数が高くなっているのは、-3 以下となる結果が合算されているためである。また、PPD 分布を図 33 に示す。冬季は約 6 割が 10%であったが、夏季は 10～100%に至るまで広く分布していた。

適合環境のドラフト不満足者率分布を図 34 に示す。ドラフトの不満足者率は、入力パラメータのひとつである「気流の乱れの強さ」が等しい場合、空気温度と気流速度の組み合わせで決まる。そのため、夏季と冬季では差は見られなかった。最も割合が高いのは 10%であったが、100%まで広く分布していることがわかった。PD が 30%を上回ると IV 評価となるため、全体の 50%以上が IV 評価となることがわかった。

以上により、衛生管理基準に適合する環境の範囲は、夏季に寒い側に広く、暑い側に狭いという特徴が示された。また、ドラフトによる不快の度合いが高いという評価になった。建築物衛生法に着衣量や代謝量に関する言及はないものの、環境に合わせた個人の調節を前提とした環境範囲になっていると考えられる。環境を基準内に維持するだけでなく、環境に合わせた着衣調節の重要性を強調する必要がある。

D. 考察

北海道、東京、埼玉、横浜、名古屋、大阪、福岡にある事務所建築物 27 件、測定点 104 点の温熱環境の調査を夏季および冬季に行った。

冬季の相対湿度を除けば、すべての測定点で概ね衛生管理基準を満たしていた。冬季に相対湿度が不適合となった測定点に、地域および建築物の規模による差は小さかった。しかし、中央方式よりも個別方式で不適合率がより高くなる傾向が見られた。また、すべての適合状況判定結果において、インテリアゾーンとペリメータゾーンによる差は見られなかった。

インテリアゾーンとペリメータゾーンの環境を

比較すると、相対湿度と気流速度においては差が小さかった。しかし、空気温度と放射温度はペリメータゾーンで高くなる傾向が見られ、PMV も高くなっていた。環境の異常を検知するには、両ゾーンを測定することが望ましいといえる。

グローブ温度と微小面放射温度を用いた平均放射温度により、放射環境を比較した。グローブ温度と比較して、微小面放射温度により評価した方が極端な放射環境の分布を評価することが可能であった。

ISO17772-1 による温熱環境の総合評価を行ったところ、全体の約 1/4 が「期待される環境の質」において最も低いレベルまたは不適合に相当することがわかった。項目別の評価では、PMV においてカテゴリ I 評価の割合が最も低く、個別方式ではカテゴリ評価が広く分布していることがわかった。夏季も冬季も閾値の上限を超えたためにカテゴリ評価が低下する傾向が見られた。また、利用実態に応じた着衣量の見積もりが重要であることがわかった。

上下温度分布は、冬季における個別方式の中規模建築物で問題となっており、カテゴリ III と IV の評価が 6 割以上を占めていた。ドラフトも中規模建築物の個別方式で評価が低くなっていた。非対称放射についてはすべてカテゴリ I 評価となり、問題は見られなかった。

建築物衛生法の管理基準に適合する環境を ISO17772-1 で評価したところ、IV 評価および不適合が 77%であり、最も高い I 評価となったのは 3%のみであった。衛生管理基準に適合する環境の範囲は、夏季に寒い側に広く、暑い側に狭いという特徴が示された。また、ドラフトによる不快の度合いが高いという評価になった。建築物衛生法に着衣量や代謝量に関する言及はないものの、環境に合わせた個人の調節を前提とした環境範囲になっていると考えられる。環境を基準内に維持するだけでなく、環境に合わせた着衣調節の重要性を強調する必要がある。

E. 結論

空間の用途、空調方式、立地の多様性を考慮した、空気環境の測定方法の提案を目的とし、世界的に参照されている温熱環境基準の文献調査を行った。快適性の基準が時代の要請に合わせて改定されているのに対し、測定方法には大きな変更が見られなかった。そこで ASHRAE 55 基準に準拠した測定方法を提案し、北海道、関東近辺、名古屋、大阪、福岡の実際のオフィスを夏季と冬季に分けて調査した。また、衛生管理基準と最新の温熱環境基準である ISO17772-1 による評価結果を比較した。

衛生管理基準で不適合となったのは主に冬季の相対湿度で、特に個別空調方式の不適合率が高くなる傾向が見られた。しかし、他の項目については建物規模や空調方式による差は見られず、衛生管理基準に適合していた。

同じ環境を ISO 17772-1 で評価すると、全項目の総合評価において約 1/4 が最も低いカテゴリ IV 評価または評価対象外となり、最も高いカテゴリ I は 13%のみであった。その要因は PMV による評価の低さにあり、夏季は中規模建築物、冬季は個別空調方式で IV 評価が多く見られた。また、これらのオフィスでは評価結果が I~IV まで広く分布しており、環境が多様であったことを示している。冬季の中規模建物・個別空調方式では、上下温度分布が大きくなる傾向にあることがわかった。インテリアゾーンとペリメータゾーンの環境比較では、空気温度と平均放射温度がペリメータゾーンにおいて高くなる傾向が見られ、PMV も高くなっていた。

衛生管理基準に適合する 7680 通りの環境条件の組み合わせについて ISO 17772-1 で評価した結果、夏季の 83%、冬季の 71%が総合評価において最も低い IV 評価または評価対象外となった。衛生管理基準の適合環境は、快適な温熱環境条件から見て寒い側に広く分布しており、居住者の着衣調節が前提となっていることが確認された。

建築物衛生法の目的は衛生的な環境の確保であり、快適性の維持ではない。また、理論上の適合環境の組み合わせと実際の環境の分布は異なる。しかし、衛生管理基準に適合する環境は、現在の快適性の水準からすると著しく低い範囲を広く含んでいる。現在の空調に対するニーズを踏まえた温熱環境評価を行うには、より高い水準の環境も評価できるような測定方法や評価基準を選択肢として示していくことが望ましいと考えられる。

今回提案した測定方法により、季節、建物規模、空調方式、室内におけるゾーニングによる温熱環境特性の違いを明らかにすることが可能であった。長期的な曝露が健康影響を及ぼす環境因子とリンクさせることで、必要な時間的・空間的な温熱環境分布の評価解像度を高めることができる。

F. 研究発表

1. 論文発表

なし

2. 学会発表

- 1) 中野淳太、小林健一、金勲、林基哉、開原典子、柳宇、鍵直樹、東賢一、長谷川兼一、李時桓. 事務所建築の室内空気環境管理に関する調査 その5 建築物衛生法と国際温熱環境基準による室内温熱環境評価の比較, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集; 2019.9.18-20; 札幌. pp.61-4.
- 2) 中野 淳太、林 基哉、小林 健一、金 勲、開原典子、柳 宇、鍵 直樹、東 賢一、長谷川 兼一、李 時桓、建築物衛生法と ISO 基準による国内事務所建築の室内 温熱環境評価の比較、令和 1 年室内環境学会学術大会講演要旨集; 2019.12.5-7; 沖縄. C-17, pp.394-5.

G. 知的財産権の出願・登録状況（予定含む）

1. 特許取得

なし

2. 実用新案登録

なし

3. その他

なし

<参考文献>

- 1) ASHRAE : ANSI/ASHRAE Standard 55-2017, Thermal environmental conditions for human occupancy, 2017
- 2) ISO: ISO7730 Moderate thermal environments, Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort, 2005
- 3) ISO: ISO17772-1, Energy performance of buildings — Indoor environmental quality — Part 1: Indoor environmental input parameters for the design and assessment of energy performance of buildings, 2017
- 4) ISO: ISO7726 Ergonomics of the thermal environment -- Instruments for measuring physical quantities, 1998

表 1 ISO 7730:2005 の熱的快適域推奨値

カテゴリ	全身温冷感	
	PPD(%)	PMV
A	< 6	-0.2 < PMV < +0.2
B	< 10	-0.5 < PMV < +0.5
C	< 15	-0.7 < PMV < +0.7

表 2 ISO 7730:2005 の局所不快推奨値

区分	ドラフト	上下 温度差	床表面 温度	非対称放射温度差				
				天井		壁		
				熱	冷	熱	冷	
A	PD	< 10%	< 3%	< 10%	< 5%		< 5%	
	環境		< 2°C	19 - 29°C	< 5°C	< 14°C	< 23°C	< 10°C
B	PD	< 20%	< 5%	< 10%	< 5%		< 5%	
	環境		< 3°C	19 - 29°C	< 5°C	< 14°C	< 23°C	< 10°C
C	PD	< 30%	< 10%	< 15%	< 10%		< 5%	
	環境		< 4°C	17 - 31°C	< 7°C	< 18°C	< 35°C	< 13°C

表 3 ISO17721-1 の不満足者率(%)推奨値

区分	PPD	ドラフト	上下温度分布	非対称放射
I	< 6	< 10	< 3	< 5
II	< 10	< 20	< 5	< 5
III	< 15	< 30	< 10	< 10
IV	< 25			



図1 温湿度・グローブ温度・気流速度



図2 微小面放射温度

表4 調査対象建物

都道府県	建築物区分	ID	季節	調査日	測定階	測定場所面積 [m ²]	天井高 [m]	空調設備
北海道	特定建築物	H01	夏	2017/8/25	3F	200	2.5	中央式 (AHU)
	3,000㎡未満	H02	夏	2017/8/25	6F	25	2.5	個別式 (PAC+換気)
	3,000㎡未満	H03	夏	2017/8/25	2F	75	2.6	個別式 (PAC)
東京	特定建築物	E01	夏 冬	2018/9/18 2018/1/10	6F	118	2.4	個別式 (PAC+換気)
埼玉	3,000㎡未満	E02-1	夏	2018/8/23 2018/1/10	1F	328	2.8	個別式 (PAC+換気)
		E02-2	冬		2F	409	2.8	個別式 (PAC+換気)
		E02-3			3F	614	2.8	個別式 (PAC+換気)
東京	3,000㎡未満	E03	夏	2018/8/23	3F	169	2.54	個別式 (PAC+換気)
東京	特定建築物	E04	夏 冬	2018/9/18 2018/12/19	27F	1178	3	中央式 (外調機+放射)
東京	特定建築物	E05	秋	2018/9/18	1F	133	2.56	個別式 (PAC)
神奈川	3,000㎡未満	E06-2	夏	2019/8/2	2F	123	2.9	中央式 (外調機)
		E06-1	冬	2018/12/18	1F	204	2.9	中央式 (外調機)
東京	3,000㎡未満	E07	夏 冬	2019/8/1 2020/1/15	3F	55	2.41	個別式 (PAC+換気)
東京	特定建築物	E08	夏	2019/8/1 2020/2/17	9F	1050	2.71	中央式 (外調機)
東京	3,000㎡未満	E09	夏 冬	2019/8/1 2020/2/14	3F	92	2.4	個別式 (PAC+換気)
東京	3,000㎡未満	E10	夏 冬	2019/8/27 2020/2/21	5F	93	2.5	個別式 (PAC+換気)
東京	3,000㎡未満	E11	夏 冬	2019/8/27 2020/2/17	5F	196	2.4	中央式 (外調機)
東京	3,000㎡未満	E12	夏 冬	2019/8/27 2020/1/15	2F	110	2.5	個別式 (PAC+換気)
群馬	3,000㎡未満	E13	冬	2020/2/21	2F			個別式 (PAC+換気装置)
東京	特定建築物	E14	冬	2020/2/21	8F			中央式 (外調機)
名古屋	特定建築物	A01	夏 冬	2019/8/29 2020/2/13	6F	96	2.5	中央式 (外調機)
	3,000㎡未満	A02	夏 冬	2019/8/30 2020/2/13	4F	176	2.7	個別式 (PAC+換気)
	特定建築物	A03	夏 冬	2019/8/30 2020/2/13	4F	266	2.5	個別式 (PAC+換気)
大阪	3,000㎡未満	W01	夏 冬	2018/8/28 2018/3/5	2F	124	2.3	個別式 (PAC+換気)
	3,000㎡未満	W02	夏 冬	2018/8/29 2018/3/5	2F	109	2.7	個別式 (PAC)
	特定建築物	W03	夏 冬	2018/8/29 2019/1/10	2F	193	2.4	中央式 (外調機+PAC)
福岡	3,000㎡未満	F01	夏 冬	2018/8/27 2019/1/11	6F	44	2.5	個別式 (PAC+換気)
	3,000㎡未満	F02	夏 冬	2018/8/27 2019/1/10	2F	93	2.4	個別式 (PAC+換気)
	3,000㎡未満	F03	夏 冬	2018/8/27 2019/1/11	2F	122	2.6	個別式 (PAC+換気)
	特定建築物	F04	夏 冬	2018/8/28 2019/1/11	4F	383	2.45	個別式 (PAC+換気)

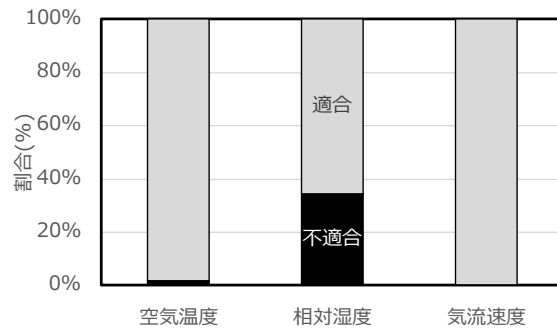


図3 建築物種別調査件数

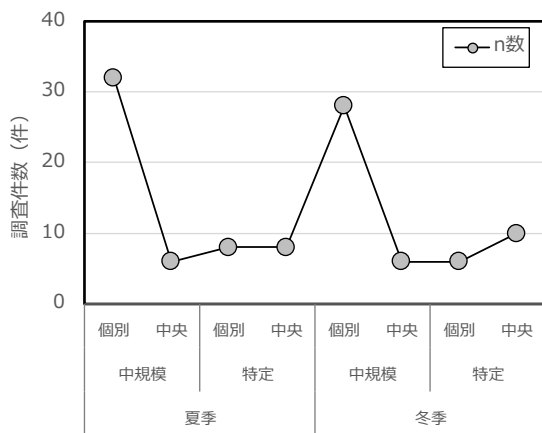


図4 建築物種別調査件数

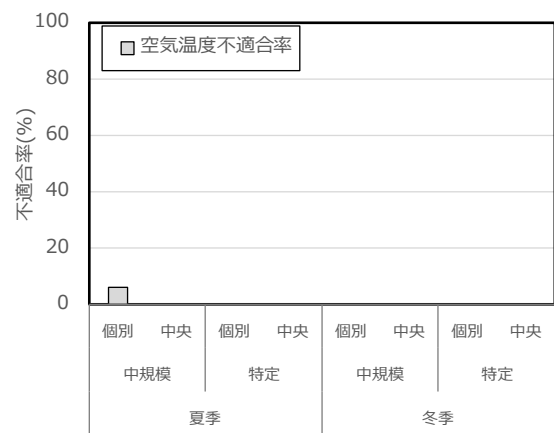


図5 建築物種別空気温度不適合率

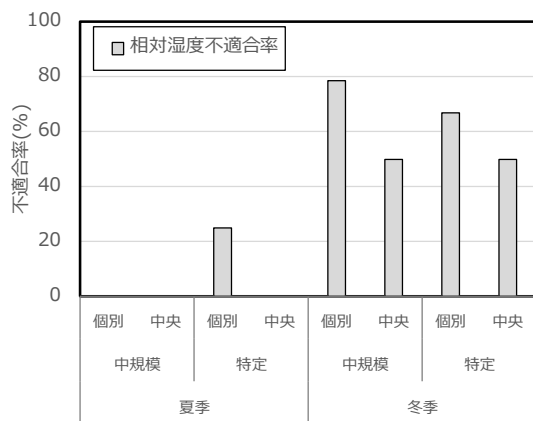


図6 建築物種別相対湿度不適合率



図7 建築物種別気流速度不適合率

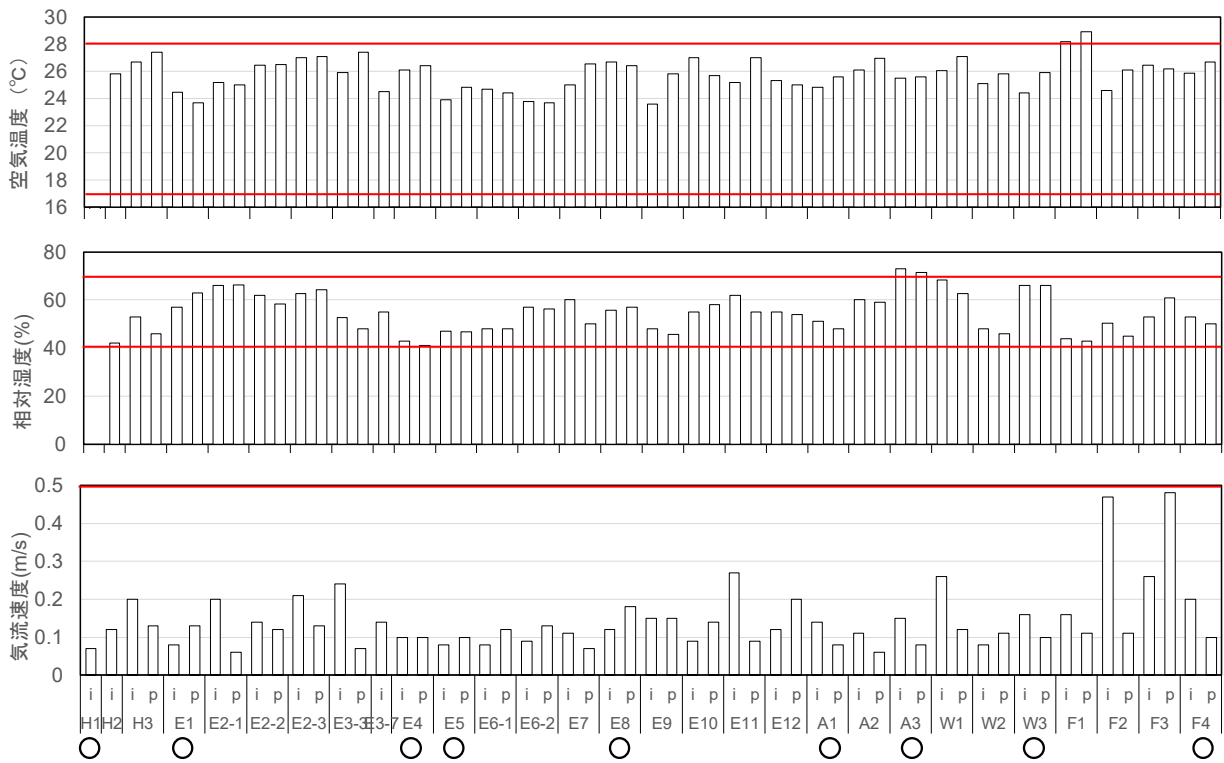


图 8 夏季調查全測定結果

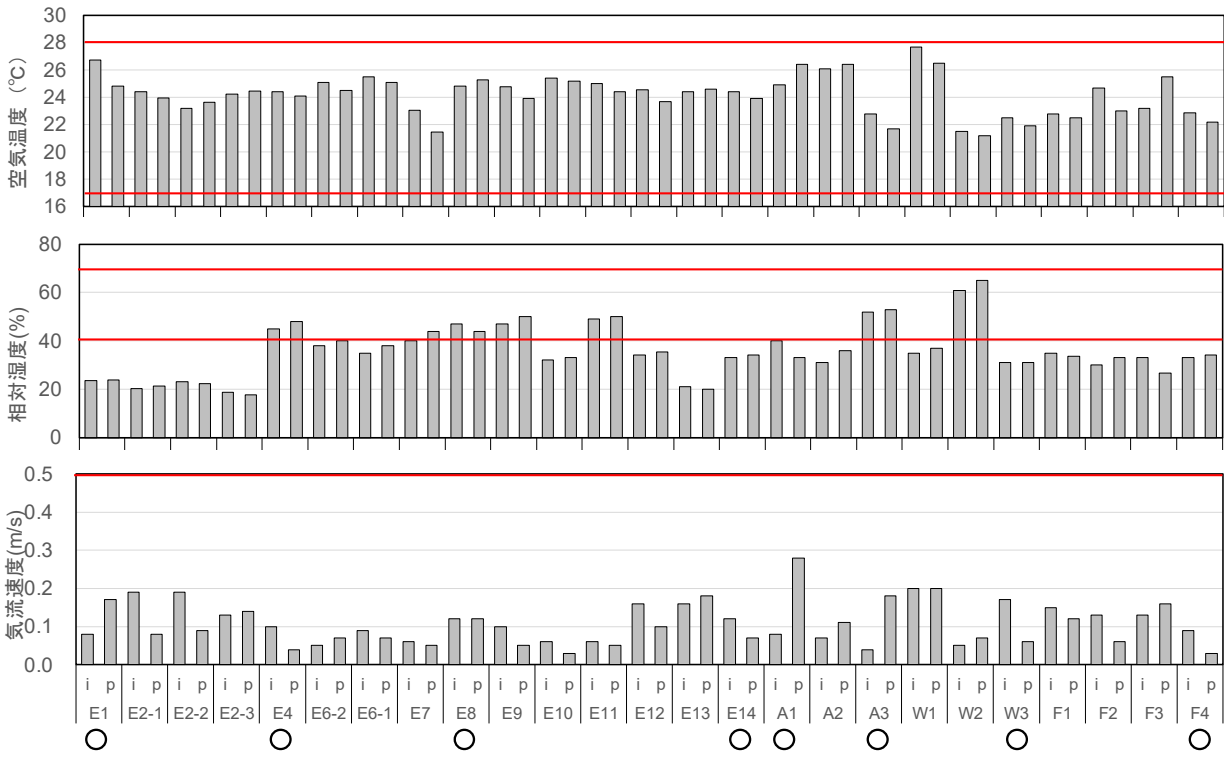


图 9 冬季調查全測定結果

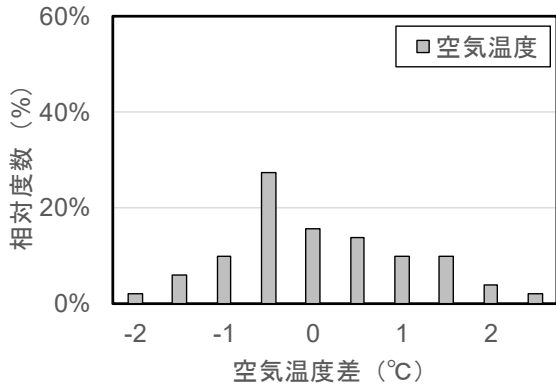


図10 インテリアとペリメータの空気温度差 (インテリアを基準)

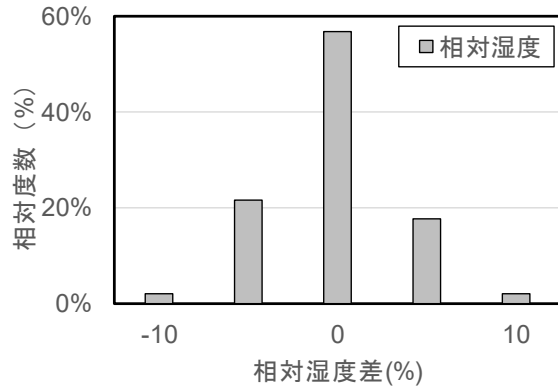


図11 インテリアとペリメータの相対湿度差 (インテリアを基準)

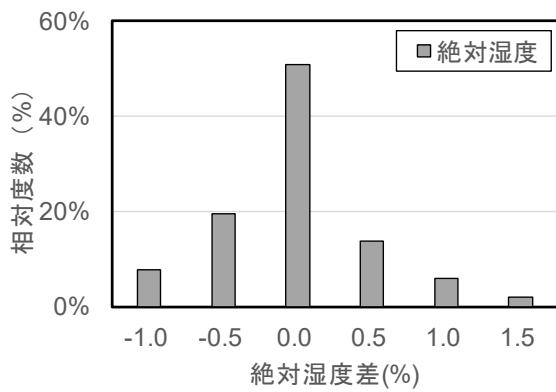


図12 インテリアとペリメータの絶対湿度差 (インテリアを基準)

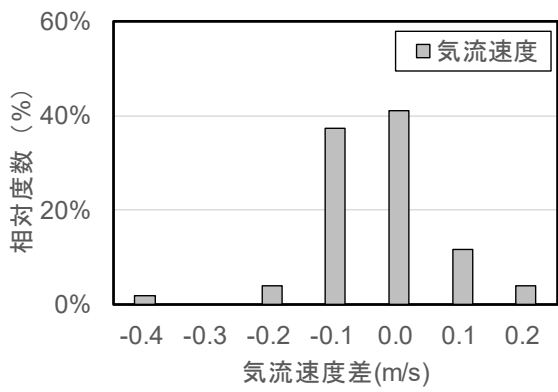


図13 インテリアとペリメータの気流速度差 (インテリアを基準)

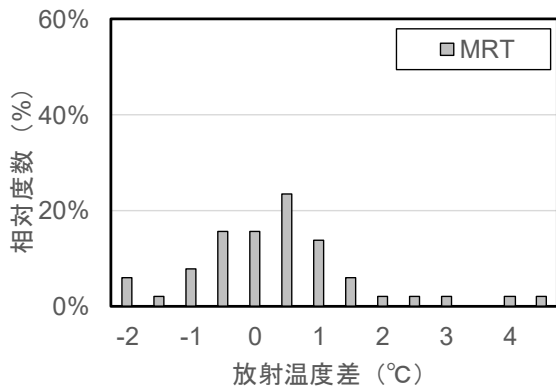


図14 インテリアとペリメータの放射温度差 (インテリアを基準)

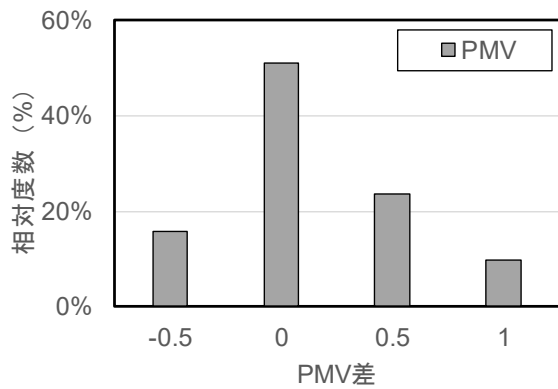


図15 インテリアとペリメータのPMV差 (インテリアを基準)

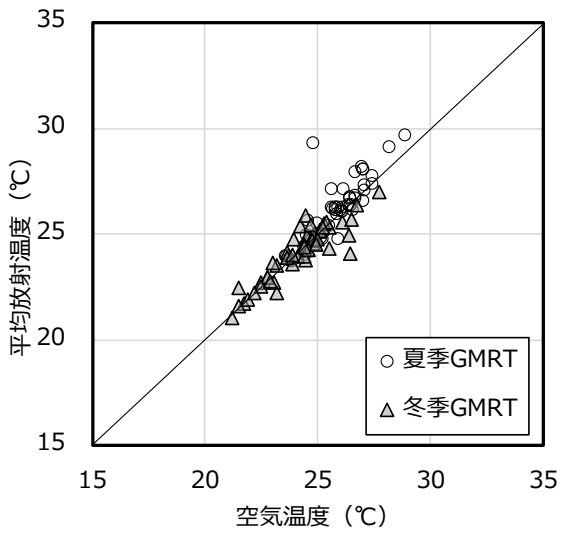


図 16 空気温度とグローブ温度から求めた GMRT

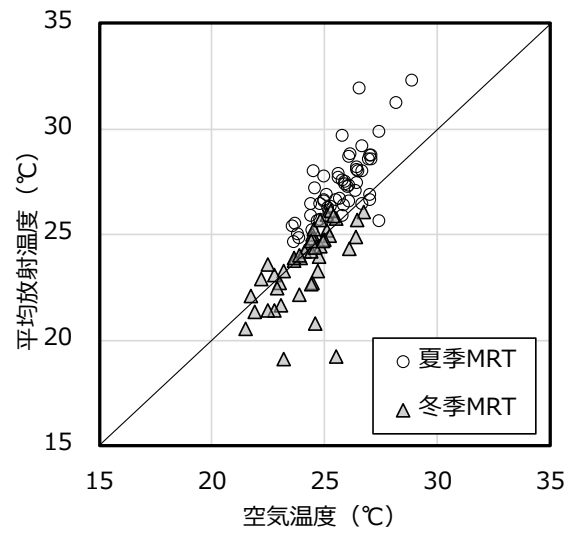


図 17 空気温度と微小面放射温度から求めた MRT

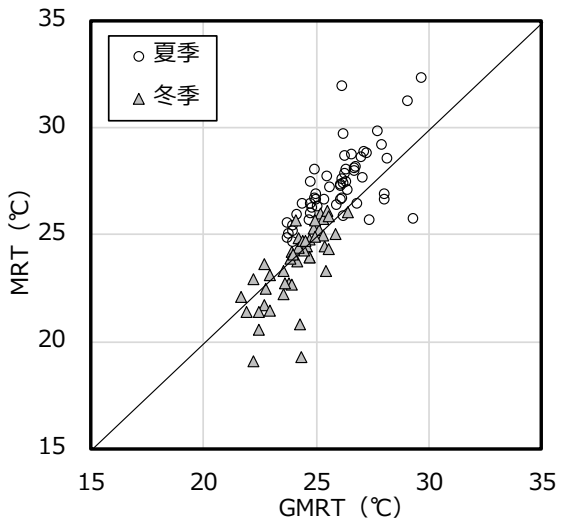


図 18 グローブ温度から求めた GMRT に対する微小面放射温度から求めた MRT

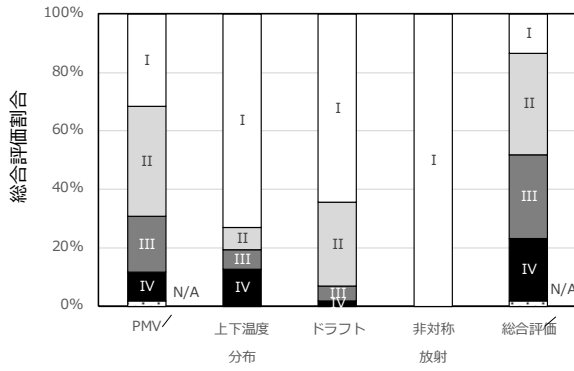


図 19 ISO17772-1 による全測定点評価結果

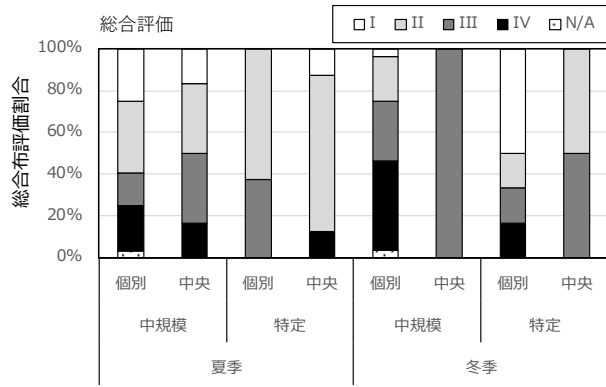


図 20 建築物種別総合カテゴリ評価結果

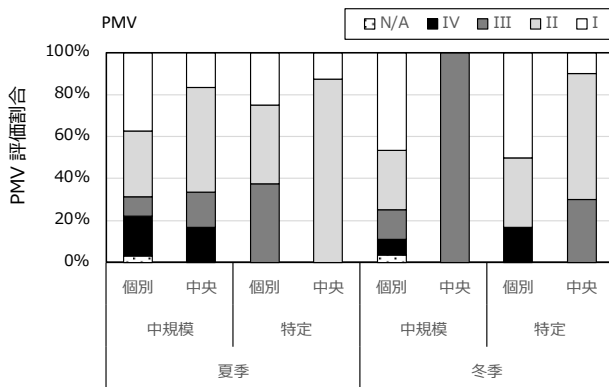


図 21 建築物種別 PMV カテゴリ評価結果

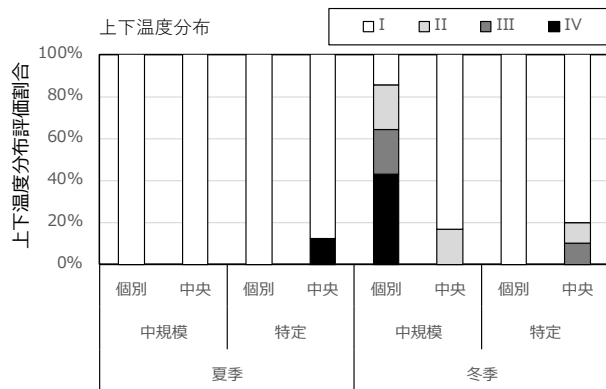


図 22 建築物種別上下温度分布カテゴリ評価結果

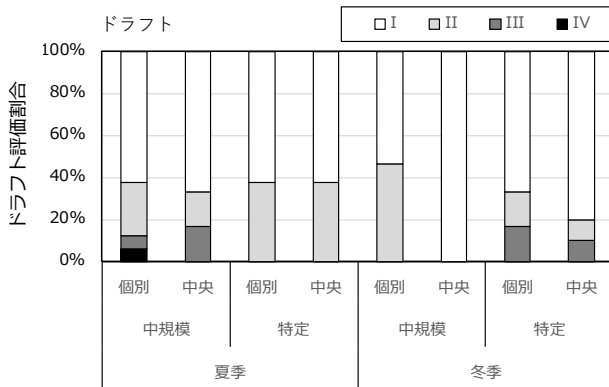


図 23 建築物種別ドラフトカテゴリ評価結果

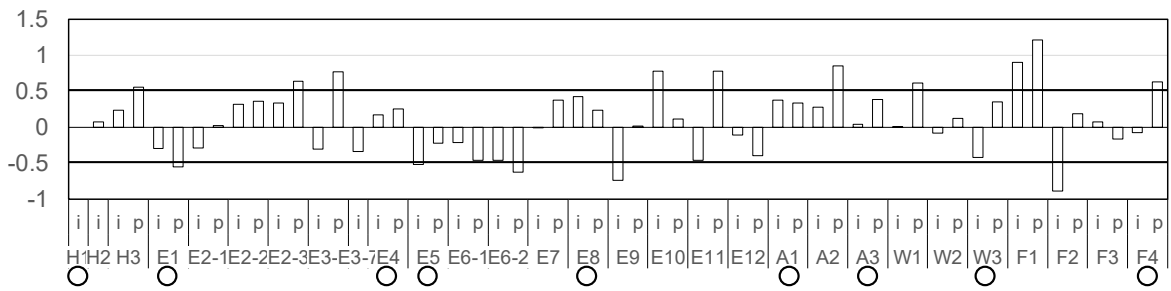


図 24 夏季全測定点 PMV

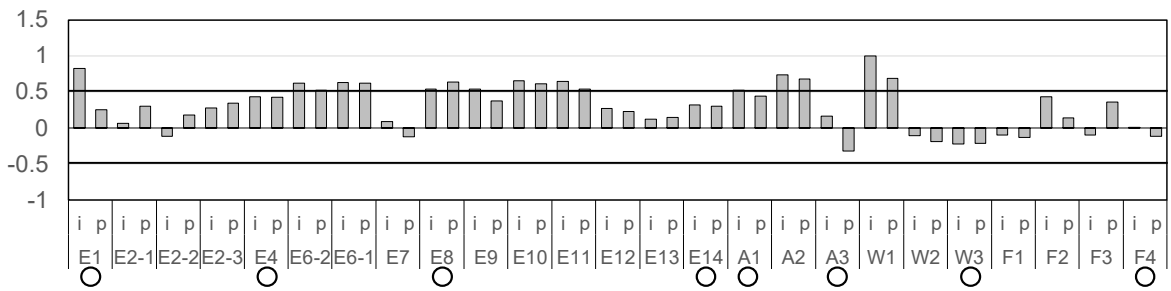


図 25 冬季全測定点 PMV

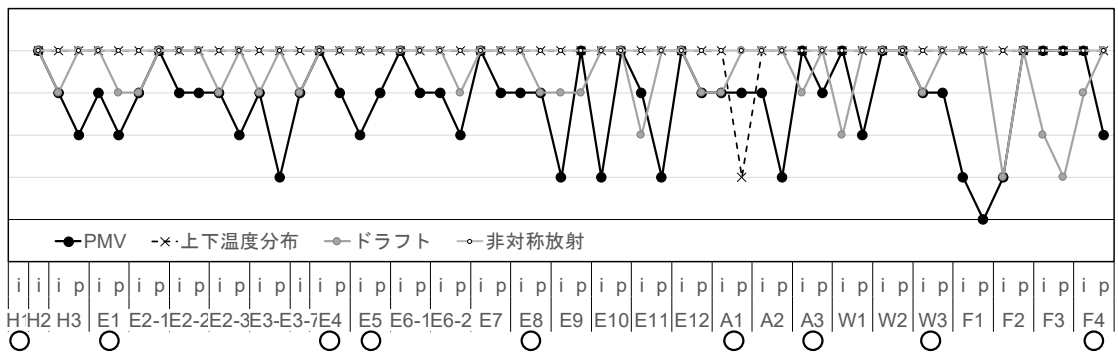


図 26 夏季全測定点カテゴリ評価結果

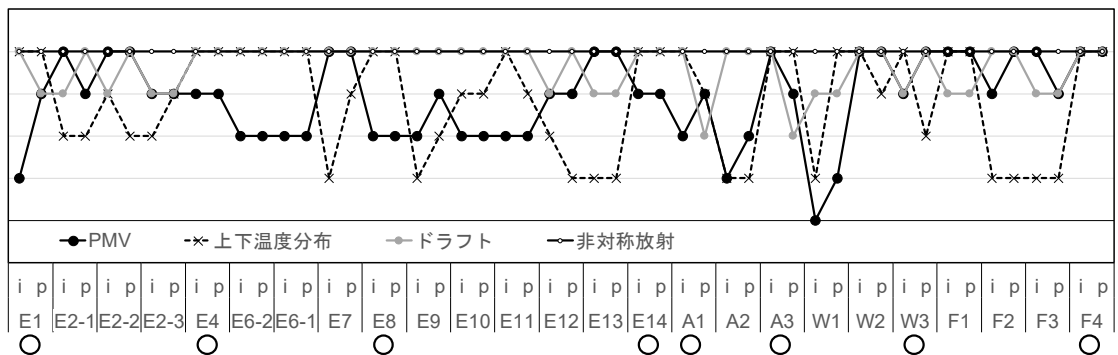


図 27 冬季全測定点カテゴリ評価結果

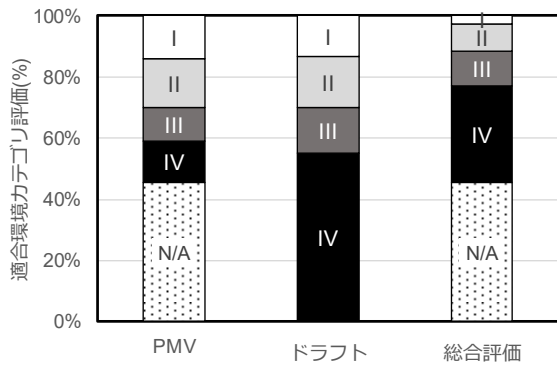


図 28 衛生管理基準適合環境のカテゴリ評価

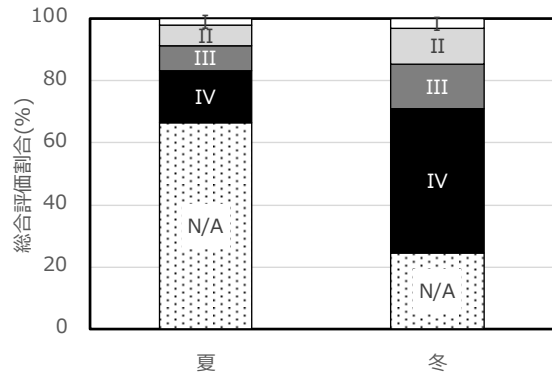


図 29 衛生管理基準適合環境の総合評価

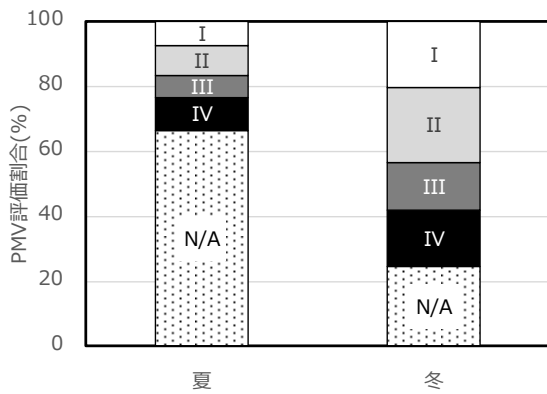


図 30 衛生管理基準適合環境の PMV 評価

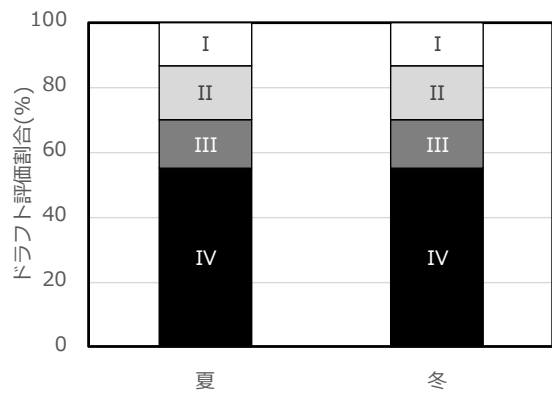


図 31 衛生管理基準適合環境のドラフト評価

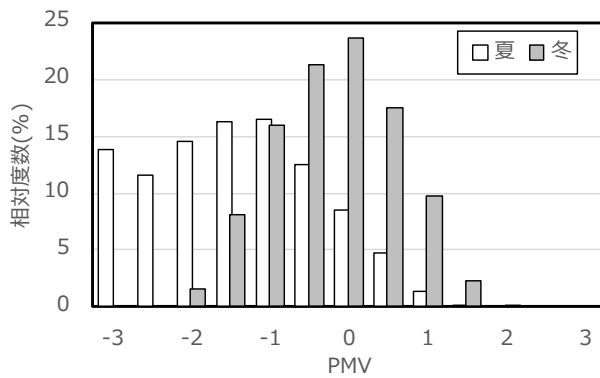


図 32 衛生管理基準適合環境の PMV 分布

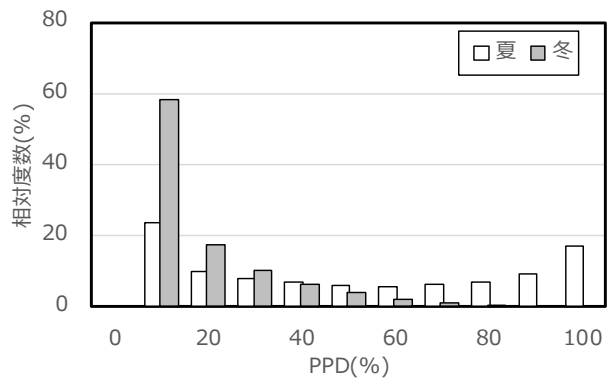


図 33 衛生管理基準適合環境の PPD 分布

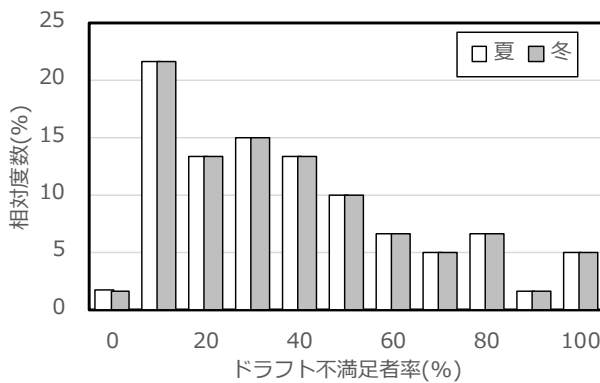


図 34 衛生管理基準適合環境のドラフト不満足者率分布

