

厚生労働科学研究費補助金（健康安全・危機管理対策総合研究事業）
分担研究報告書

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、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、東京、大阪の実際のオフィスを 3 季節に分けて調査した。従来の測定法に比べ、水平方向や垂直方向の温熱環境の分布を詳細に評価できることが確認された。今後は、不均一な環境形成を目的とした空調方式の建物を対象とし、精度検証を進めていく必要がある。

A. 研究目的

A.1 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

ZEB に代表されるように、快適性と省エネルギー性を高度に両立させた建築物を増やしていくことがこれからの国策となっている。建築物の全消費量の約 3 割に相当する空調エネルギーの削減は重要な課題である。制定から 40 年以上が経つ建築物衛生法は、室内全体を均一な温湿度で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。建物の使われ方や新しい空調方式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、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。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の提案を目的とする。

B. 研究方法

B.1 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

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

B.1.1 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 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。

B.1.2 ISO 7730:2005

(1) 推奨環境のカテゴリ分けと EPBD

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「建物のエネルギー性能にかかわる欧州指令(EPBD)」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た。省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、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。目標とする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 2-1 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。

表 2-1 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

B.1.3 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 及び ISO7730 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。

ISO7726³⁾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

C.1 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

C.1.1 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るが、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。

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た一般的な固定値を用いている。そのため、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、タスクアン

ピエント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。径の小さい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：

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

立位：

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

C.1.2 測定位置

(1) 平面分布

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、以下を測定点に含める。

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。

また、測定点は、極端な環境になると想定される場所 (窓際、吹出し口付近、コーナー、入り口付近等) を含める。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

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、椅座位の居住者は 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 は椅座位の体中心、1.1m は椅座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、椅座位では 0.6m、立位では 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。

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。

空気温湿度および平均放射温度の測定間隔

は5分未満とし、気流速度は3分未満とする。

C.1.3 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2-1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2-2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。



図2-1 温湿度・グローブ温度・気流速度



図2-2 微小面放射温度

C.1.4 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、環境の異なる3季節に事務所ビルにおける温熱環境実測調査を行った。立地は、北海道、東京、大阪とした。測定期間は、2017/8/25、2018/1/10、2018/3/5の3日間とした。測定対象建物を表2-2に示す。事務所空間を対象とし、室中央部(インテリア:i)と窓近傍(ペリメータ:p)の2点にて測定した。

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。温度、湿度、グローブ温度は5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2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) 測定結果

高さ1.1mにおける室内環境測定結果を図2-3~2-7に示す。空気温度および気流速度はいずれの建物も衛生管理基準を満たしていた。湿度基準は、冬季の結果すべてが満たしておらず、春季もW01が40%の基準値に達していなかった。ASHRAEのドラフトに関する基準は満たされていた。

平均放射温度は空気温度とほぼ同様の傾向を示しており、いずれの建物でも両者の温度差が1を超えることはなかった。PMVはASHRAEの基準値 ± 0.5 を超える結果も見られたが、逸脱の度合いは小さかった。

上下温度分布の測定結果を図2-8に示す。ASHRAEやISOの基準では、足元と頭の位置での温度差を3未満にすることとしている。E02とW01では、立位時の基準(頭高さ1.7m)で3を超えていたが、その他の測定点は基準値以内であった。

6方向の微小面放射温度を図2-9に示す。W01

および W02 は欠測であった。すべて ASHRAE の非対称放射の基準値内であったが、冬季に測定した E02 の 3 フロアのペリメータで不均一な放射環境が形成されていることが確認された。

D . 考察

ASHRAE 55 に準拠した測定方法でオフィスの調査を行った。いずれの建物も湿度を除けば、衛生管理基準を満たしていた。しかし、本研究で提案した測定方法を使用することで、上下方向の温度分布や放射の不均一性、またインテリアとペリメータの環境の違いなどを評価できることがわかった。

今回、測定対象とした建物は、室内空気を攪拌して均一な室内温湿度を目標とした通常の空調が導入されていた。調査で確認された環境の不均一性は、意図されたものではない。今後は、あえて不均一な環境形成を目的としたタスク・アンビエント空調や積極的なゾーニングの行われた建物に測定対象を増やし、測定手法の有効性の検証を行う。

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、東京、大阪の実際のオフィスを 3 季節に分けて調査した。従来 of 測定法に比べ、水平方向や垂直方向の温熱環境の分布を詳細に評価できることが確認された。今後は、不均一な環境形成を目的とした空調方式の建物を対象とし、精度検証を進めていく必要がある。

参考文献

- 1) ASHRAE : Thermal environmental conditions for human occupancy, ANSI/ASHRAE Standard 55-2017, 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: ISO7730 Ergonomics of the thermal environment -- Instruments for measuring physical quantities, 1998

表 2-2 調査対象建物

建物ID	測定日時	地域	測定場所	測定場所面積 [m ²]	天井高[m ²]	空調設備
H01	2017/8/25	北海道札幌市	事務所3F	200	2.5	中央式
H02			事務所6F	25	2.5	PAC + 換気装置
H03			事務所2F	75	2.6	PAC
E01	2018/1/10	東京都港区	事務所6F	118	2.4	PAC+換気装置
E02-1		埼玉県草加市	事務所1F	328	2.8	PAC+外調機 +換気装置
E02-2			事務所2F	409	2.8	
E02-3			事務所3F	614	2.8	
W01	2018/3/5	大阪府吹田市	事務所2F	124	2.3	PAC+換気装置
W02		大阪府大阪市	事務所2F	109	2.7	PAC

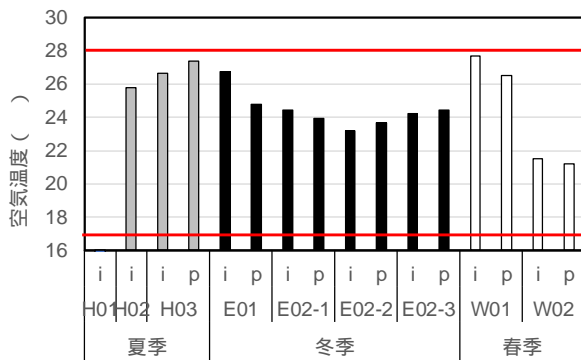


図 2-3 空気温度測定結果

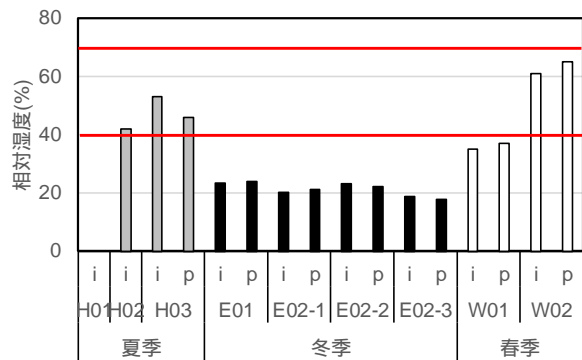


図 2-4 相対湿度測定結果

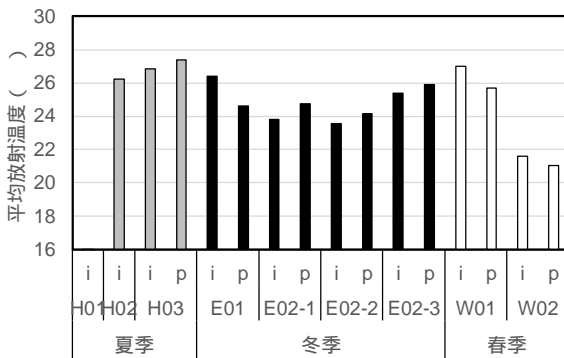


図 2-5 平均放射温度測定結果

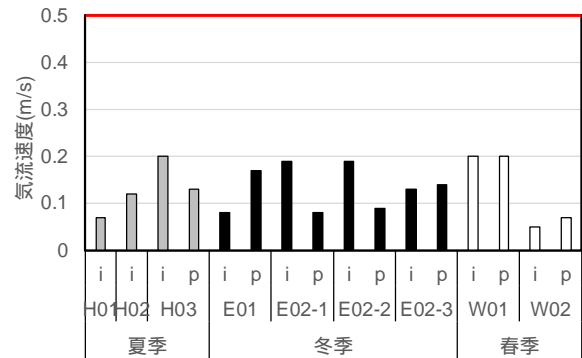


図 2-6 気流速度測定結果

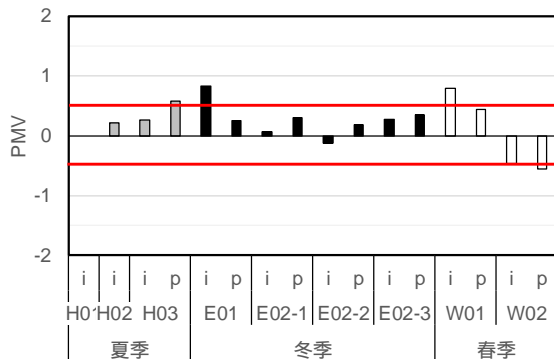


図 2-7 PMV 測定結果

注) 図中の「i」はインテリアゾーン代表点、「p」はペリメータゾーン代表点を意味する。

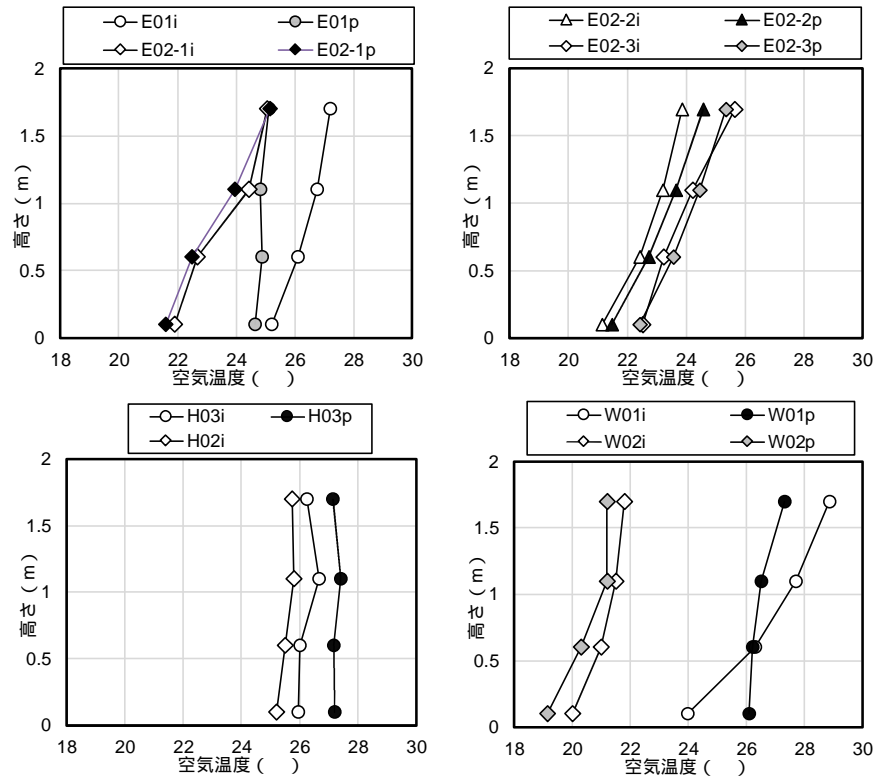


图 2-8 上下温度分布测定结果

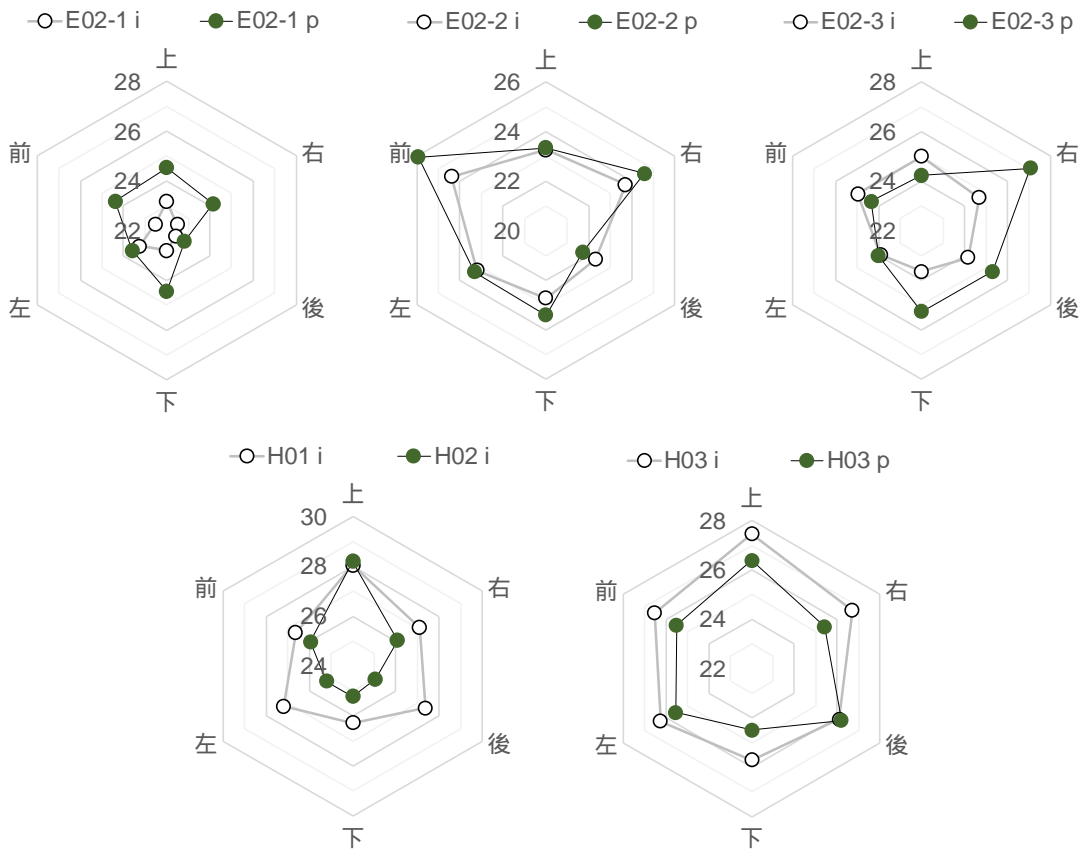


图 2-9 6面微小面放射温度