児童の在室を想定した教室内放射環境の空間分布に関する研究

教室内の温熱環境評価手法の開発 その1

STUDY ON THERMAL RADIATION DISTRIBUTIONS
IN CLASSROOMS OCCUPIED BY STUDENTS

Development of numerical estimating method for classroom thermal environment Part 1

飯野 由香利*, 倉 渕 隆**, 本田 大作***

Yukari IINO, Takashi KURABUCHI and Daisaku HONDA

Thermal radiation distributions in several types of classrooms occupied by students were simulated using the VLITE algorithm and a newly proposed "absorption factor of a surface into a student (AFSS)" that determines the radiant effects of a particular primary surface on a seated student. We determined (1) the absorption factor for each body surface of a student, (2) the distribution of AFSSs for each student, and (3) variations in AFSSs due to student occupancy, (4) seating orientation, (5) addition of an adjacent open space, and (6) use of personal partitions. In addition, the resultant distributions of mean radiant temperature (MRT) were evaluated for four cases in which the primary surface was heated. The floor and personal partitions were found to have the greatest influence on MRT of the majority students, while walls most strongly affected students seated nearby them.

Keywords : classroom, student, thermal radiation, distribution, absorption factor, mean radiant temperature

教室、児童、熱放射、空間分布、吸収係数、平均放射温度

1. はじめに

関東地域の大多数の教室には冷房設備は設置されておらず、夏季において風通しが良い座席の児童は涼しく感じるものの、風通しが悪い席に座っている児童は暑く感じる傾向¹⁾がある。一方、冬季には暖房設備の近くに座っている児童は暑く、廊下側の児童は寒いと感じており、一教室内でも熱・空気環境の空間分布に対応した座席位置によって各児童の周辺環境には分布がみられる。

ほとんどの公立小学校の教室では、30～50人の児童は互いに近接して座り、机や椅子などの多くの家具に囲まれている。また、児童の多くは座席などの決められた場所に一定の期間および時間帯に座ることを半ば強いられており、自分の周辺環境を享受しなければならない状況に置かれている。小学校における教室環境は、児童の健康および成長に少なからず影響を及ぼすと考えられることから、全ての児童にとって良好な環境を確保することは重要である。

従って、各々の児童の周辺環境、すなわち、教室内の熱・空気環境の空間分布を事前に詳細に把握し、必要に応じて対策を講じることが望ましいと考えられ、教室内の温熱環境の予測・評価手法の開発が必要である。しかし、既往研究^{2)～6)}は、冬季における教室内の室温や気流の上下分布および水平分布に関する実測などの事例報告に留まっており、空間分布の構造を解析するには至っていない。

教室内の熱・空気環境は対流、放射、伝導の各要素が関連しており、これらの環境を把握する上で、近年大空間等の空調設計に多用されている対流-放射連成型のCFD手法が原則として応用可能と考えられる。しかし、教室のように多くの児童や机が存在し、これらのスケールが空間のスケールに比して無視できない場合には、その取り扱い方法に関して検討の余地が残されている。これまで、大空間の空気分布予測にCFD手法を適用する場合、これらの存在は熱発生やラフネスなど空間中のヒートソースや境界条件として処理されてきた。しかし、児童周辺の環境は児童の存在そのものにより多大な影響を受けていると考えられるため、従来のような処理方法では実状が正しく評価されない可能性がある。

従って、教室空間における放射・対流環境を予測・評価するためには、人や家具などの障害物の影響を可能な限り実状に忠実に表現した上で、①多数の障害物を含む各面の形態係数の効率的な算出方法、②人体回りの対流熱移動の精度良い評価方法の確立が必要となる。筆者らは、教室における温熱環境評価手法の開発に関する一連の研究の一環として、本報では形態係数を比較的容易に求めることができるアルゴリズム VLITE⁷⁾を利用することにより①の算出方法に対応し、静穏気流(0.1m/s)で短波長放射による熱移動が無視できる条件の教室における放射環境の解析手法の開発を試みた。

* 東京理科大学 嘱託補手・工修

** 東京理科大学 助教授・博士(工学)

*** 東京工業大学 大学院生

Research Assoc., Science University of Tokyo, M. Eng.
Assoc. Prof., Science University of Tokyo, Dr. Eng.
Graduate Student, Tokyo Institute of Technology

教室内の放射環境は非対称、不均一であることが多く、冬季における窓面からの冷放射や夏季の最上階の教室における天井からの熱放射などが事例として挙げられる。このような放射環境は、天井、床、壁、窓や戸などの教室を構成する面（以下、教室構成面と称する）や児童および机や椅子などの教室に存在する面間の放射熱授受により形成される。これらの教室内の放射熱授受に関連する全ての面を室内放射面と名づける。

放射熱授受は、各面の放射率、反射率、表面温度、面積、および2面間の形態係数から算出された吸収係数⁶⁾により定まる。図1に示すような閉空間の教室で、室内放射面の表面温度が異なる場合には、各児童と各室内放射面との間の吸収係数が大きく影響する。図中の面3と児童aとの吸収係数は、児童fとの吸収係数と明らかに異なり、児童aとそれぞれの室内放射面との吸収係数も違う。

これらのことを考慮すると、放射環境の空間分布を把握することは、空間分布に対応した各座席位置における児童の放射環境、すなわち、各児童と各室内放射面との間の吸収係数を捉えることに相当する。そこで本研究では、1人の児童の全体表面と1室内放射面との吸収係数を意味する放射影響度という指標を提示し、標準教室、オープンスクールやインテリジェントスクールの教室において一連のケーススタディを実施し、放射影響度について詳細に検討する。さらに、放射による児童の温冷感をみるために教室内の平均放射温度の空間分布について、放射影響度の結果を踏まえて考察する。

2. 解析概要および平均放射温度の検討

2-1 VLITEによる形態係数の算出方法および精度評価

a) VLITEによる形態係数の算出方法

従来の形態係数の算出方法は大きく2つの方法に分けられる。1つの方法は、各面を面要素に分割し、各面要素の中心点間の幾何学的な関係からその形態係数を計算する方法により二重面積分を数値近似する半解析的方法^{8,1)}である。この方法の問題点は、障害物がある場合に積分範囲を限定する必要があるために計算アルゴリズムが煩雑になること、および高精度計算のためには多数の面要素分割が必要なことである。一方、モンテカルロ法や放射熱線追跡法などにみられる放射束の追跡に基づく方法がある。これはある面内の一点から Lambert の余弦法則に基づいて放射束をランダムに射出し、放射束の到達率によって形態係数を求める方法である。この方法は障害物がある場合でも計算アルゴリズムを本質的に変更する必要はなく、計算精度への影響は少ないものの、実用的な精度を得るには相当の計算量が要求される点が問題となる。

本研究で用いた形態係数算出アルゴリズム VLITE は、基本的には前者の方法によるものであり、数種類の計算方法から構成されている。図2に VLITE の概要を示す。まず、計算対象物の面の頂点座標、面の分割数および放射率などの入力データから、それぞれの面の面積、単位法線ベクトルの成分、中心座標、中心からの最小半径を算出した後、自己障害と障害物判定を実施し、各々の面間の関係に適した計算（障害物のない場合には、面々間の形態係数はガウス積分した Mitalas and Stephenson 法または周積分法に基づく計算。障害物がある場合には、障害物の影を面に投影し、影の部分を経元の面から削除した後に正味の形態係数を周積分法、または面積積分法で計算）を行うことにより形態係数を求める。計算対象の幾何学的

図1 教室内の放射熱授受

図2 VLITEの計算アルゴリズム

条件に応じて適当な計算方法を使い分けることにより、計算時間の短縮化と計算の高精度化が計られる点が特徴となる。出力結果は、形態係数、総和則に対する誤差、各面の面積、計算時間、および必要な場合に形態係数の合計が完全に1になるように補正された形態係数である。2-4節以降の解析では、総和則が厳密に成り立つように補正された形態係数を用いる。

b) VLITEによる形態係数算出の精度評価

計算精度に影響を与える面分割数について検討する。図3に示す2面間に1障害面がある場合の面1から面2に対する形態係数と面の分割数との関係を図4に示す。この場合の解析解は0.115621である。面分割数が8以上である場合の誤差は0.1%以内に収まる。計算時間の短縮化も考慮して、以後の解析では面分割数を8とする。

さらに、図5に示す実験装置の構成面および結露許容型パネル面間の総和則の修正をしない形態係数をVLITEで求めた結果、全ての面における総和則誤差の最大値は0.005361と概して小さく、計算精度が高いことが間接的に示された。次に、実験装置の面1と他面との形態係数をVLITEとモンテカルロ法により算出し、両者の差を図6に示す。最大でもその差は0.004600程度となり、最大総和則誤差と同程度に小さい。以上の結果を踏まえると、VLITEは実用上十分な精度で形態係数を算出できることが示された。

なお、計算時間に関し、総数68面の相互間の形態係数を算出す

るのに、大型コンピュータを使ったモンテカルロ法の場合には、所要時間は4～5分と報告されている⁹⁾。一方、VLITEによる同一問題の計算は486DX4(90MHZ)のパソコンを使って実施したが、CPU時間は47秒となった。

2-2 解析対象のモデル化

a) 教室のモデル化

教室の大きさは、川崎市に実在するk小学校の教室の大きさを参考にして、幅8m×奥行き7m×高さ3mとした(図7)。教室には柱や梁などの凹凸が多くあり、机、椅子、棚およびテレビなどの家具が存在する。表面積が小さい家具や教室構成面の凹凸は省略し、教室構成面は天井、床、および窓や黒板を含む8壁面からなる。

b) 児童と机のモデル化

これまでの放射熱授受に関する研究^{10), 11)}における人体モデルは、人体と周壁間の放射熱移動量の計算や平均放射温度の算出をするためのセンサーとして取り扱われることが多かった。本研究における児童のモデルは、センサーとしての役割の他に、センサーの周囲に位置する発熱体としての役割をも担っている。さらに、実際の場合と同程度に放射熱授受において障害物となるようなスケールを有するモデルとする。児童は教室において、授業または学習で長時間机の前に座って過ごすことが多いことから、机の存在を無視できないと考え、椅座位の児童と机とを一体にしたモデル化を計った。

児童の全表面積(約1m²)に対する有効放射面積率や机による放射熱授受の遮蔽率を考慮し¹²⁾、さらに平均的な日本人の1年から6年の小学生の身体の平均値と成人の身体の寸法から計算して、児童のモデルは成人の5分の4の大きさが妥当であると判断した¹³⁾。また、6面から構成される箱型の教室における放射の方向性を考慮して、上下、左右、前後の6方向の指向性を持つ立体が望ましいとした。さらに、堀越ら¹⁰⁾は成人の椅座位人体モデルとして各辺0.5mの立方体を用いているが、机が存在することから直方体の方が妥当であると考えた。児童の体の面数に関し、机の存在により児童の前面の上下で放射熱授受の様相が異なることから、児童モデルの前面を2分割し、計7面から構成されるとした。これらの条件を踏まえて、直方体(0.4m×0.4m×0.15m、表面積は0.56m²)を児童モデルとした。机と児童の寸法と体の各面(以下、体面と称する)の名称を図8に示す。

一方、机に関しては、実在する机の大きさと対応させ、面積の小さい脚部や教科書などの収納スペースを省略し、表裏面からなる一面とした。また、椅子には児童が座っており、露出面積が小さいことから、椅子は考慮しないこととした。

2-3 放射影響度の提示

1人の児童の放射環境を平均放射温度に基づいて検討する。児童1人の一体面における平均放射温度(MRT_i)は、(1)式に示すように、一体面*i*と各室内放射面*j*との間の吸収係数と表面温度との積の和で表せる。

$$MRT_i = \sum_j B_{ij} \theta_j \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (1)$$

B_{ij} : 吸収係数(体面*i*から出た放射のうちで室内放射面*j*に吸収される割合)

次に、(2)式に示すように、児童1人当たりの平均放射温度は、各体面の平均放射温度に表1に示す各体面の面積に従った重み係数

図3 2面間に障害面がある場合の面分割

図4 障害面がある場合における面の分割数と形態係数との関係

図5 実験装置と結露許容型パネル(多板型)の面分割と面番号

(結露許容型放射パネル(多板型)の場合)

図6 VLITEとモンテカルロ法によって算出した形態係数の差

図7 教室のモデル

○内は体面の名称を示す
図8 児童と机のモデル

(児童1人の全体表面積に対する各体面の面積比)を掛けた和とした。

$$\overline{MRT} = \sum_{i=1}^7 w_i \sum_j B_{ij} \theta_j \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (2)$$

$\overline{MRT}$: 各児童の平均放射温度
 w_i : 児童の各面の重み係数
 θ_j : 室内放射面 j の表面温度

さらに、(3)式に示すように児童1人の全体表面と1室内放射面(例えば、 g 面)との吸収係数($\sum_{i=1}^7 w_i B_{ig}$)を求め、これを放射影響度と定義する。放射影響度は各児童の平均放射温度に各室内放射面が及ぼす影響を表したものである。

$$\begin{aligned} \overline{MRT} &= \sum_{i=1}^7 w_i \sum_j B_{ij} \theta_j \\ &= \sum_{i=1}^7 w_i \sum_{j \neq g} B_{ij} \theta_j + \theta_g \sum_{i=1}^7 w_i B_{ig} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (3) \end{aligned}$$

(g 面以外の面からの MRT) (g 面からの MRT)

なお、全ての室内放射面で放射影響度を合計すれば、当然のことながら1となる。

2-4 従来の平均放射温度と本モデルに基づく平均放射温度との差違

a) 検討方法

平均放射温度は一般に居住者の存在を無視し、周壁の表面温度を用いて計算される(以下、従来の平均放射温度と称する)。本節では、従来の平均放射温度と本モデルに基づいた児童の平均放射温度との相違を明らかにする。

従来の平均放射温度と本モデルの平均放射温度との相違は、①机と発熱体であり障害物としての児童の有無、②センサーとしての児童の大きさ、形状、および各体面の重み係数の相違、③近接した児童の影響、によるものと考えられる。①～③の違いによる平均放射温度の差を検討するために、図9に示す4ケースを想定した。(7)ではモデル化した児童と机の1組が存在する。(1)では従来の平均放射温度に対応する 1 cm^3 の微小立方体が床上56cmに位置する。(1)では児童1人と机1個を 1 cm^3 の微小立方体と 1 cm^2 の平面に縮小し、周囲にはモデル化した児童と机が39ずつ存在する。(1)ではモデル化した児童と机が40ある。

平均放射温度は室内放射面の表面温度や座席位置により異なる。表2に天井または床を放射冷暖房面として設定したa～d教室と実在する教室での夏季の実測値^{1,2)}を参考にして設定したe教室を示す。さらに、a～e教室毎の4ケースの平均放射温度として、図9のケース(1)中の黒丸で示した12地点の平均放射温度の平均値を用いることとした。以下、①～③の相違や放射の不均一性評価の考慮の有無による重み係数の相違を各教室毎に求めた各ケースの平均放射温度の平均値の差に基づいて検討する。なお、微小立方体の重み係数は、中村が提案した椅座位の重み係数^{14), 15)}を用いることとした。

b) 平均放射温度の差違

図10に①～③の相違、および重み係数の違いによる平均放射温度の平均値の差を示す。①の障害物の有無による差((7)と(1)および(1)と(1)の比較、図中▽と△で示す)の最大は、児童モデルで 1.0°C 、微小立方体で 1.3°C となる。②のセンサーとしてのモデルの形状の相違(微小立方体と直方体)や重み係数の相違(各面

表1 各体面の面積と重み係数

体面	下	上	左	右	後ろ	前上	前下
面積	0.06	0.06	0.06	0.06	0.16	0.05	0.11
重み係数	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.1	0.2

面積の単位: m^2

図9 解析対象ケース

表2 室内設定温度

教室	a b	c d	e
暖冷房	冷房	暖房	夏季の実測値
(1) 床または天井の表面温度($^{\circ}\text{C}$)	床天井 18 15	床天井 40 50	床 34°C 、天井 35°C 、室温・
(2) (1)の設定面以外の表面温度($^{\circ}\text{C}$)	33 33	15 15	机 33°C 、壁 34°C 、
(1)と(2)との差($^{\circ}\text{C}$)	15 18	25 35	最大温度差 2°C

※室温は(2)で示す温度。児童の表面温度は 35.0°C

図10 モデルの相違および障害物の有無による平均放射温度の差

の面積比と中村の提案したもの)による差((7)と(1)の比較、図中□で示す)は、最大 0.8°C 程度である。また、(1)と(1)の差(○で示す)には、②の相違による差と近接した児童の影響による差が含まれると考えられる。(1)と(1)の差は最大で 1.1°C となり、②の相違による最大差を引いた 0.3°C が近接した児童との幾何学的形状の差の影響とみなせる。

さらに、微小立方体の平均放射温度に関し、放射の不均一性を正しく評価するために提案された中村の重み係数を掛けた平均放射温度と算術平均値を用いた平均放射温度との差(図中×で示す)を検討した結果、床面を放射冷暖房したa教室とc教室における平均放射温度の平均値の差の絶対値は $0.7 \sim 0.8^{\circ}\text{C}$ であり、その他の教室での差は 0.1°C 前後である。下面の重み係数の相違により、平均放射温度が大きく異なる。

以上の検討結果から、児童が多く存在する教室における放射環境の把握では、発熱体としての児童の存在を無視することはできない

ことが示唆された。なお、今回検討した条件では、従来の平均放射温度と本研究の平均放射温度との平均値の差（(イ)と(エ)の比較）の最大は、3℃異なることが明らかになった。

3. 放射影響度の検討および考察

3-1 解析の流れおよび数値解析の設定条件

本解析の流れを図11に示す。VLITEにより全ての面々間の形態係数を求め、これを用いてGebhartの吸収係数を算出する。さらに、放射影響度や教室内の平均放射温度の空間分布について検討する。

数値解析上の設定条件は次のとおりである。室温および室内放射面の表面温度には分布がなく、一様な温度とする。また、教室の面は様々な材質からなるが、全ての面は完全拡散面であると仮定し、放射率を0.9とした。既往の研究^{85), 14)}より、ほとんどの教室でカーテンを閉めることが多いことから、カーテンは窓面全体を覆っており、教室内に直達日射は入らないとした。

以下では標準教室や多種多様な教室における各室内放射面の放射影響度について考察する。

3-2 児童の各体面と各室内放射面との吸収係数

図12中の○で示した3地点における児童の各体面と各室内放射面との吸収係数を検討した結果、図13に示すように、いずれの児童でも上面を除くほとんどの体面では床が最も大きく、次いで天井が大きい。特に、児童の下面と床との吸収係数は96%以上で、上面と天井との吸収係数は47~76%と高く、児童に最も近い壁は50%以上と高い。他の児童の吸収係数は隣の児童に面する体面で26~28%、この面以外の体面では10%前後である。また、児童の前面の上面と机との吸収係数は18~20%で、前面以外の体面と机との吸収係数は5%以下となる。

3-3 児童毎にみた各室内放射面の放射影響度

40人が在籍する標準教室を対象に、座席位置の違いによる児童の放射環境の空間分布を各児童毎にみた各室内放射面の放射影響度に基づいて検討する。図14に示す40人の児童の各室内放射面の放射影響度は、床で34~38%、天井で12~21%、8面を合計した壁で22~43%、机で6~8%、他の児童で5~10%である。8壁面の各々の放射影響度をみると、外周に座っている児童に最も近い壁で13~21%となり、これ以外の児童と壁との放射影響度は10%以下となる。なお、床と天井では同じ面積であるにもかかわらず、放射影響度が異なるのは距離の違いによるものである。

次に、各児童毎にみた各室内放射面の放射影響度を検討する。壁の放射影響度は4隅の児童で38~45%となり、床の放射影響度（31~36%）よりもやや高い。さらに、4隅の児童を除く、外周の座席（以下、ペリメータゾーンと称する）の児童における壁の放射影響度は28~38%で、床の放射影響度と同程度か1~4%高い。また、ペリメータゾーンの内側の座席（以下、コアゾーンと称する）の児童における床の放射影響度は37~38%で、壁の放射影響度（22~29%）より高い。このように、床と壁の放射影響度の大きさは、ペリメータゾーンとコアゾーンで逆転する傾向が見られた。これらの面の放射影響度に著しい相違がある場合には、児童の平均放射温度に場所による大きな差をもたらす可能性を示唆するものである。

3-4 児童と机の数の増加に伴う放射影響度の変化

図15に示す児童と机が10、20、30、40と増加した標準教室における各室内放射面の放射影響度の平均値と標準偏差の変化を図16に示す。児童と机の数の増加に伴う放射影響度の平均値の変化をみると、床は39%から36%へ、天井は20%から18%へと低くなり、他の児童と机の放射影響度の平均値は2%から8%へ、5%から7%へと高くなる。ペリメータゾーンとコアゾーン別に壁の放射影響度の平均値の変化をみると、ペリメータゾーンでは34%から35%で、コアゾーンでは27%から26%となる。コアゾーンでの壁の放射影響度がペリメータゾーンでの放射影響度より低いのは、他の児童や机が障害物となるためと考えられる。

さらに、各室内放射面の放射影響度の標準偏差について検討した結果、他の児童とペリメータゾーンでの壁の放射影響度の標準偏差

図11 解析の流れ

図12 40人教室の座席位置とゾーニング

図13 児童の各体面と各室内放射面との吸収係数

が2～4%で、他の室内放射面のそれより大きい。これらの面は垂直面であること、および座席位置が異なると他の児童や机による遮蔽率が様々であることが要因と考えられる。

3-5 児童と机の向きの違いによる放射影響度の差

オープンスクールにおける多目的スペースでは、児童や机の向きが様々であることが多い。そこで、40人の標準教室における後方窓側の児童を例に取り、児童や机の向きの違いによる放射影響度について考察する。

教壇側に向けた時の各室内放射面の放射影響度と、児童と机の向きを時計回りに45度ずつ変えた時の放射影響度との差を図17に示す。向きによる放射影響度の差が最も大きいのはこの児童に最も近い後ろ壁や外壁で、その大きさ自体は3～6%であることから、向きの違いによる放射影響度の差は概して小さい。

3-6 オープンスペースがある教室と標準教室での放射影響度の差

オープンスクールでは教室と廊下間の仕切壁を除去し、廊下幅よりも広いオープンスペースを設ける例がよく見られる。図18に示すオープンスペースがある教室と標準教室における同位置の児童の室内放射面の放射影響度の差を図19に示す。

オープンスペースに近い列の児童ほど床や天井および壁の放射影響度の差は大きい。特に、8列目における5人の児童の放射影響度の差の平均値は、外壁2で15%低くなり、床や外壁2以外の壁で6%、天井で6%高くなる。

3-7 パーティションがある教室における放射影響度

a) 各児童毎にみた室内放射面の放射影響度

インテリジェントスクールとも関連する語学学習のためのLL教室では、1～3人の児童を囲むパーティションを見かける。図20は20人の児童の各々がパーティションに囲まれたLL教室を表したものである。

高さ70cmのパーティションの両面を放射面と想定した場合における各児童毎にみた各室内放射面の放射影響度を図21に示す。パーティションの放射影響度は、最後列座席以外のほとんどの席で33～37%と最も高く、次いで床と天井の放射影響度は17～20%および20%前後である。また、壁の放射影響度は、コアゾーンで17%前後、ペリメータゾーンで16～32%（最後列座席での放射影響度は28～32%、これ以外のペリメータゾーンの座席では16～23%）である。机や他の児童の放射影響度は6%前後である。

パーティションが存在しない20の児童や机が存在する標準教室での放射影響度と比較すると、パーティションがある教室での床の放射影響度は10%以上低く、壁の放射影響度は約5%低い。このように、パーティションが遮蔽物となり教室構成面の放射影響度は低くなる。

なお、最後列座席では、23%前後のパーティションの放射影響度より壁の放射影響度（28～32%）の方が高い。この傾向は他の座席でのこれらの室内放射面の放射影響度の傾向と比べて逆転している。他の座席では後部のパーティションからの放射の影響があるのに対して、最後列座席ではこの影響はなく、代わりに壁からの放射の影響があるためと推定される。

b) パーティション高さの違いによる放射影響度の変化

遮蔽率と関連するパーティションの高さを5cmまたは10cm変えた場合における各室内放射面の放射影響度の平均値の変化を図

図14 各児童ごとにみた各室内放射面の放射影響度

図15 児童数の異なる教室における各座席の配置とゾーニング

図16 教室内の児童や机の数が増加した場合における各室内放射面の放射影響度の変化

図17 児童および机の向きの違いによる放射影響度の差

22に示す。パーティションが10cm高くなるとその放射影響度は5%前後高くなるのに対して、壁の放射影響度は3~4%前後低くなり、その他の室内放射面の放射影響度の変化は1%以下と小さい。

4. 放射暖房した教室での平均放射温度の空間分布

前章で検討した結果、放射影響度が高かったパーティション（表裏面）、床、および天井を放射暖房面と想定し、その表面温度を40℃、児童を35℃、これらの面以外の面の表面温度や室温を15℃と設定した標準教室とし教室における平均放射温度の空間分布について検討する。

4-1 暖房効果の評価

(1) 床と(2)天井を放射暖房した40の児童と机が存在する標準教室と、(3)床と(4)70cm高のパーティションを放射暖房面とした20の児童と机があるL教室における各児童の平均放射温度を図23に示す。放射暖房した各教室における児童の平均放射温度の分布範囲は、(1)23~26℃、(2)19~23℃、(3)20~21℃、(4)21~25℃（最後列座席の平均放射温度は21℃前後で、他の座席の平均放射温度は23~25℃）である。各々の放射暖房面の放射影響度の平均値は、図16から(1)36%と(2)18%であり、図22から(3)21%と(4)32%である。同一の条件の教室においては、放射影響度が高いほど平均放射温度は高い。

このように、平均放射温度は放射影響度の相違により変化する値を定量的に捉えており、暖房効果の検討にこの種の評価が有効と考えられる。

4-2 平均放射温度の空間分布

教室内の平均放射温度の座席位置の相違による温度差の最大は、(1)3℃、(2)4℃、(3)1℃、(4)4℃（ただし、最後列座席以外の座席での平均放射温度の温度差は2℃）である。(3)と(4)のパーティションが存在する教室での平均放射温度の分布幅は、最後列座席を除くと小さい。これは、3-7節のa)での知見（パーティションが遮蔽物となり教室構成面の放射影響度は低くなる）により説明できる。なお、(4)のL教室の最後列座席での平均放射温度が低いのは、この席でのパーティションの放射影響度が低かったことによる。

一方、(1)と(2)の標準教室では、ペリメータゾーンの平均放射温度はコアゾーンの平均放射温度より1~2℃低い傾向が見られる。この傾向は、3-2節で明らかにしたペリメータゾーンにおける壁の放射影響度がコアゾーンより高いという知見から解釈できる。

5. おわりに

児童や机が多く存在する教室内の放射環境の空間分布を把握するために、形態係数算出アルゴリズム VLITE を使い、放射影響度という新たな指標について検討した。さらに、教室内の平均放射温度の空間分布について、放射影響度の結果を踏まえて考察した。以下に得られた知見を示す。なお、放射影響度とは1人の児童の全体表面と1室内放射面との吸収係数を意味する。

- ①モンテカルロ法と VLITE により算出した形態係数を対比した結果、VLITE は実用上十分な精度で形態係数が計算できることを確認した。
- ②従来の平均放射温度と本モデルに基づいて求めた平均放射温度と

図18 オープンスペースのある教室

図19 標準教室とオープンスペースのある教室での各児童における各室内放射面の放射影響度の差

図20 20人が在籍するL教室

図21 L教室内の各児童毎にみた室内放射面の放射影響度

図22 パーティションの高さを変えた場合の各室内放射面の放射影響度の変化

図23 1面を放射暖房した標準教室とL教室における平均放射温度の空間分布

の差は、今回設定した条件では最大3℃となった。このうち、机と児童（障害物）の存在により最大1℃または1.3℃の差が生じ、モデルの大きさや形状および重み係数の相違による差の最大は0.8℃で、近接した児童による相違は0.3℃程度であった。

- ③各児童のそれぞれの体面と各室内放射面との吸収係数を検討した結果、床が最も大きく、次いで天井や児童に最も近い壁が大きい。
- ④40の机や児童が存在する標準教室での室内放射面の放射影響度は、床で34～38%、天井で12～21%と高い。また、壁の放射影響度はペリメータゾーン（外周の座席）で28～38%、コアゾーン（外周の座席の内側の席）で22～29%となる。机や他の児童の放射影響度は6～8%、5～10%である。
- ⑤児童や机の数が10から40まで10ずつ増加した教室における各室内放射面の放射影響度を検討した結果、他の児童や机の放射影響度が2%から8%、5%から7%へと高くなるのに対して、床や天井およびコアゾーンでの壁の放射影響度は1～3%低くなる。
- ⑥児童と机の向きの違いによる各室内放射面の放射影響度の差は3～6%と概して小さい。
- ⑦オープンスペースのある教室におけるオープンスペース側の児童での床や天井およびオープンスペース側の壁以外の壁の放射影響度は、標準教室における同位置の児童での放射影響度より3～7%高くなり、オープンスペース側の壁の放射影響度は15%前後低くなる。
- ⑧各児童を取り囲む70cm高のパーティションがあるL教室において、パーティションの放射影響度は最後列座席以外のほとんどの座席で33～37%と最も高く、次いで、床と天井の放射影響度

が17～21%である。また、パーティションの高さが10cm高くなるとその放射影響度は5%前後高くなり、壁の放射影響度は3～4%低くなる。

- ⑨放射影響度の高い室内放射面を暖房面とすると児童の平均放射温度が高くなり、放射影響度は暖房効果の評価に有効な指標となる。
- ⑩パーティションがない教室での平均放射温度の分布幅が3～4℃であるのに対し、児童を取り囲むパーティションがある教室における平均放射温度の分布幅は、パーティションにより各室内放射面からの放射が遮蔽されるために、最後列座席の平均放射温度を除くと1～2℃となる。また、床や天井を放射暖房面とした標準教室の平均放射温度は、壁の放射影響度が反映されてペリメータゾーンにおける児童の平均放射温度がコアゾーンにおける児童の平均放射温度より1～2℃低い。

本報では、多くの児童や机が存在する教室内の温熱環境評価手法の開発に関する一連の研究の中で、放射環境の評価手法を提示した。今後は、今回の手法に対流環境の評価手法を組み合わせ、気流性状や空気温度分布が与える影響について検討する予定である。

謝辞

形態係数算出アルゴリズムVLITEを提供してくださいましたGeorge N. Walton氏に、また、VLITEによる形態係数算出の精度の評価において、モンテカルロ法の計算値を提供してくださった東京大学の坂本雄三助教授と大林組の元田晃二氏に、および有効放射面積などに関して有益な助言をしてくださいましたお茶の水女子大学の田辺新一助教授に、深謝の意を表します。

注釈

- 1)直接的に積分する解析手法とは異なり、面を微小要素に分割し、各要素の中心点をその面の代表点とし、その点間の角度や距離から形態係数を算出することにより、その面の形態係数を求めることから、このような解析を半解析的手法とする。
- 2)建築設計資料集成3 単位空間(日本建築学会編 平成7年発行)の人体寸法より、小学校1～6年生の男女の平均的な身長と体重を導き、Duboisの算出式から全体表面積を算出した結果、約1㎡であった。椅座位・着衣時の有効放射面積率と机による遮蔽率を考慮した場合、全体表面積の約6割の表面積(0.56㎡)を持つ立体を目安にした。
- 3)上記建築設計資料集成3より、小学校1～6年生男女の身長および胸部矢状径の平均値は、1.31m、0.13mであり、成人の男女のこれらの平均値(1.60m、0.21m)と比較すると、5分の4に相当する。
- 4)中村が提案した重み係数を以下の表に示す。

体面	下	上	左	右	後ろ	前上	前下
重み係数	0.070	0.134	0.193	0.193	0.205	0.122	0.083

- 5)夏季、冬季ともにカーテンを使用しない教室は6%で、カーテンを閉めるのは直達日射がある場合に52%、OHP等の使用の際に40%である。

本論文に関連する既発表文献

- 飯野由香利、倉淵 隆、本田大作：児童の在室を想定した教室内放射環境の空間分布に関する基礎的検討、1995年度日本建築学会関東支部研究報告集、pp.109-112、1996年3月
- 本田大作、倉淵 隆、飯野由香利：障害物が存在する空間での形態係数算出方法と平均放射温度 児童の在室を想定した教室内放射環境の空間分布に関する基礎的検討 その2、日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)、pp.389-390、1996年9月
- 飯野由香利、倉淵 隆、本田大作：様々な教室空間における放射環境の検討 児童の在室を想定した教室内放射環境の空間分布に関する基礎的検討 その3、日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)、pp.391-392、1996年9月
- Y. Iino, T. Kurabuchi and D. Honda: Simulation of thermal radiation distributions in classrooms occupied by students, The 7th international conference on indoor air quality and climate, Vol. 2, pp.595-600, 1996
- Y. Iino, T. Kurabuchi and D. Honda: Simulation of thermal radiation distributions in classrooms occupied by students, The 7th international conference on indoor air quality and climate, Vol. 2, pp. 595-600, 1996
- 辻本 誠、奥宮正哉、中原信生：小・中学校の暖房時の熱空気環境の測定、空気調和・衛生工学会学術論文集、pp.261-264、1981年10月
- 吉野 博、石川善美：宮城県の小学校における暖房時の教室の温熱空気環境に関する実態調査、空気調和・衛生工学会学術論文集、pp.169-172、1986年10月
- 落藤 澄、横山真太郎、中村真人、浦山保昌：学校における暖房方式と温熱環境に関する調査研究、空気調和・衛生工学会学術論文集、pp.173-176、1986年10月
- 石野久彌、郡 公子、初山 隆、学校暖房環境の実測解析(1) 概要と基礎的環境、空気調和・衛生工学会学術論文集、pp.177-180、1986年10月
- 伊藤直明、宿谷昌則、射場本忠彦、梅干野 晃、吉野 博、須永 修通、伊藤 宏、須崎隆行：北陸地域の小・中学校における暖房環境の実測及びアンケート調査、日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)、pp.591-592、1988年10月
- George N. Walton: Computer Program for Simulation of Lighting/ HVAC Interactions, NISTIR, 1993
- B. Gebhart: A new method for calculating radiation exchanges, ASHRAE Trans. vol.65, 1959
- 元田晃二、坂本雄三、中原信生：結露許容型放射冷房パネルの性能評価に関する研究 その4、日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)、pp.791-792、1994年
- 堀越哲美、土川忠浩、蔵澄美仁、平山慶太郎、小林陽太郎：非対称および不均一熱放射環境の人体影響表現方法の研究、日本建築学会計画系論文報告集、第413号、pp.21-28、1990年7月
- Horikoshi, T., Kurazumi, Y., Hirayama, K., Tsuchikawa, T., and Kobayashi, Y.: Indication of the Effect of Asymmetric Thermal Radiation on the Human Physiological and Psychological Responses, The 2nd World Congress Heating, Ventilating Refrigerating and Air Conditioning- CLIMA 2000 III, pp.188-193, 1989
- 梁 郁、梅干野 晃、伊藤 直明：夏季における教室の熱環境実態(川崎市K小学校における実測調査)、日本建築学会大会学術講演梗概集(九州)、pp.809-810、1990年10月
- 中村泰人：建築都市空間内の人体に対する熱放射場の表現方法について、日本建築学会計画系論文報告集、第376号、pp.29-35、1987年6月
- 梅干野 晃、伊藤直明、朝倉由香利、梁 郁：夏季における小学校の教室環境に関する調査研究(その1 調査概要及び小学校の教室の実態)、環境の管理、NO.3、pp.1-4、1989年12月

(1996年10月10日原稿受理、1997年2月28日採用決定)