

研究助成実施報告書

助成実施年度	2019 年度
研究課題（タイトル）	都市街区を考慮した光環境シミュレーションの導入による ES と CFD の連成解析の高度化に向けた基礎的検討
研究者名※	山本 竜大
所属組織※	久留米工業大学 建築・設備工学科 助教
研究種別	研究助成
研究分野	都市環境工学
助成金額	150 万円
発表論文等	

※研究者名、所属組織は申請当時の名称となります。

() は、報告書提出時所属先。

大林財団 2019 年度研究助成実施報告書

所属機関名

久留米工業大学

申請者氏名

山本竜大

研究課題	都市街区を考慮した光環境シミュレーションの導入による ES と CFD の連成解析の高度化に向けた基礎的検討
<p>(概要) ※最大 10 行まで</p> <p>建物周りの都市街区の有無に応じて室内側の熱環境には相違が生じる。例えば Energy Simulation (ES) では一般的には、都市街区の日射の影響は考慮しない。実際には日照面・日影面で相違が生じるため考慮する必要がある。特に都市街区の影響は隣棟間隔にもよるが、非常に重要な要素である。都市の解析は Computational Fluid Dynamics (CFD) でも行われているが、室内側の計算は ES に頼るのが現状である。また、室内側の室温を非定常に精緻に解析する手段として ES と CFD の連成解析が存在する。</p> <p>そこで本研究では、都市街区をモデル化した際の日射の日照面・日影面の ES と CFD の連成解析に与える影響に関して基礎的検討を行う。</p>	

1. 研究の目的	(注) 必要なページ数をご使用ください。
<p>本研究は、都市街区を考慮した ES と CFD の連成解析への影響度を確認するものである。特に着目するのは、入力変数である対流熱伝達率である。日射受熱の影響により対流熱伝達率の値や表面温度は変動する。この変動する変数に関して本研究ではアプローチをかける。具体的には建築基準法に準拠した街区を作成し、街区の有無による影響度を確認する方法が考えられる。ES と CFD の連成解析の既往研究に関しては Zhai らが体系的に連成方法に関してまとめており、近年では、空調機器との連成解析も行われている。しかし、これらはオフィスを対象としており、住宅に対するアプローチは過去の研究に留まっている。オフィスを対象とした研究が盛んである理由としては多くの人数に対してのアプローチが可能であるからである。特に、オフィスではサーカディアンリズムを考慮した照明なども開発されており、知的生産性の向上に向けた取り組みも多く行われている。このような背景からこれまでに ES と CFD を活用した種々の検討はオフィスで数多く行われている。近年増加傾向にある放射空調やダブルスキン、ペリメーター負荷に対応した解析なども CFD は得意としているため、需要が大きいと言える。</p> <p>一方で、住宅においても ES や CFD での検討は数多く存在し、室内側の影響を考慮した検討は数多くなされている。しかし、設備機器の種類がエアコンや放射空調、床暖房などに限定されることや知的生産性などの社会に対する付加価値を付与する検討は需要という側面から行われていないのが現状である。</p> <p>住宅やオフィスの検討では基本的には都市街区の影響まで考慮して計算されることは近年までは無かった。近年になって、設計段階で街区の影響を考慮するような試みはなされているが、</p>	

精緻に検討されているという訳ではなく、あくまで設計時の参考となる解析データを得る目的によるものである。即ち、精緻な計算を設計段階に落とし込むような知見は完全には集積されていない。

そこで本研究では、特に知見の集積の不足する「ES と CFD の連成時の街区の有無による影響度」に着目し検討を行うこととした。なお、本研究の目指すところは設計時に有用な研究レベルのデータベースの一部を構築する事にある。将来的な研究レベルのデータベースと設計レベルのデータベースの乖離を解消する事を期待している。

2. 研究の経過

(注) 必要なページ数をご使用ください。

都市街区を再現し、直達日射量と散乱日射量を住宅の境界条件として入力する事により、日影面への影響を精緻に考慮することが可能となる。ES と CFD を連成する際に重要となるのは、モデルが一致している事である。特に、CFD では、モデルに対してメッシュ分割を行うため、その取扱いが $wally+1$ 未満として詳細に粘性低層を解像する必要がある。この場合には、乱流モデルは低 Re 型 $k-\epsilon$ を用いて解析を行う。その理由としては、粘性低層の解像度が対流熱伝達率の計算精度に大きく影響するためである。対流熱伝達率はせん断応力に基づく速度スケールを用いている。これが意味することは一般的には壁関数を用いてモデル化している乱流域までの領域を詳細に解像し、表現する必要があるという事である。特に、対流熱伝達率の参照温度には無次元距離 y^+ を用いている。この対流熱伝達率を用いて夏期の基礎的検討を進めている。最終的には、夏期の露点温度の評価まで行っている。

3. 研究の成果

(注) 必要なページ数をご使用ください。

※：各検討内容の前提条件（申請書の内容に基づく）

3.1 連成の方法

STEP1 では、都市街区を形成の有無による日照面・日陰面の計算を行う。STEP2 では、室内側の直達日射到達分の表面温度上昇に伴う放射計算などを行い、室内熱環境を計算する。対流熱伝達率に関しては未知数であるため $4 [W/m^2K]$ の慣用値を用いた。慣用値を用いて計算された室内側表面温度を CFD に受け渡し、対流熱伝達率とゾーン間の移流量を計算する。これらの物理量を ES に受け渡し、再度室内熱環境を計算する。

3.2 対象建築物の概要

外形は $X : 3600 Y : 4850 Z : 3624$ [単位 : mm] の単純な室とした。南面に $1500 [mm] \times 3000 [mm]$ の窓面が設置されている。北側には、ドアが配置されている。ES の解析モデルとしては空間を 2 分割したモデルと、分割していないモデルを用意した。街区のモデルとしては、X 方向の隣棟間隔は、4m、y 方向の隣棟間隔は 2m とした。これは、建築基準法に基づいた街区の形成寸法となっている。

3.3 解析内容およびケース検討の条件

【ケース検討の内容】

ケース検討の内容を表1に示す。天井、壁面に関しては合板12 [mm] を外壁側と内壁側に設定し、合板の間に断熱材を挿入する形とした。窓面に関しては、フロートを10 [mm] として、ケース間で統一してある。この理由としては変数を断熱材のみとする事によるノイズの削除である。ケースは1～3まで存在し、断熱材の厚みおよび断熱材無のケースを用意し、ケース間の比較を簡便にした。

表1 ケース検討の内容

Case	断熱材	Case	都市街区	Case	都市街区	Case	都市街区
			夏季		露点温度 夏季		単室 夏季
Case-1	断熱無	Case1-1	×	-	-	-	-
		Case1-2	○	-	-	-	-
Case-2	グラスウール40 [mm]	Case2-1	×	Case2-1-1	×	Case2-1-2	×
		Case2-2	○	Case2-2-1	○	Case2-2-2	○
Case-3	グラスウール80 [mm]	Case3-1	×	-	-	-	-
		Case3-2	○	-	-	-	-

【ES と CFD の連成解析条件】

ES は TRNSYSVer.18 を用いて解析を行った。南中時である12時を対象として解析を行っている。その理由としては、窓面への街区の影響が最も出やすい時間帯であると予想されるからである。夏季日時の設定根拠としては最大気温を示した日を対象とした。夏季は8月5日12時とした。場所は東京とした。理由としては、東京は日本で代表的な都市であり、世界的に知られている地域であることから、代表性があると判断した。気象データに関しては標準年の拡張アメダス気象データ(2001年～2010年)を用いて解析を行った。空調はあえて行わず自然状態での比較とした。予備計算日数は7日間としたが、単純な壁体構成であり、熱容量も小さいため、十分収束した。計算時間間隔は精緻に行うため1分間隔とした。ゾーン間の移流量に関しては慣用値である20回換気とした。換気回数は0.5回/hとして建築基準法に則って設定した。

CFDは商用ソフトウェアであるSTAR-CCM+を用いた。乱流モデルには低Re型k-εモデルを用いた。メッシュ数は約400万であり、詳細に分割した。y+1を満たすように壁近傍の解像度を高めた。北側のドアのスリット部分から空気が流入していると仮定した。乱流強度は0.01[-]長さスケールはスリット幅の1/7として設定した。流入の流量に関しては、0.5回換気を想定して設定した。夏季の流入空気温度は34.80 [°C]、質量流量は0.011 [kg/s]とした。出口境界は圧力出口(0 [Pa])として設定した。

3.4 解析結果および考察

ここからは申請書の内容に基づき、解析結果を示し、考察を行う。

【前提条件としての都市街区の有無による全天日射量の比較】

都市街区の有無による建物に入射する全天日射量の比較を図1に示す。夏期における計算時刻は、南中時の12時である。全体の傾向としては冬期および夏期ともに隣棟有の場合は全天日射量が低い値を示している。ただし、夏期に関しては太陽高度の関係から天井の全天日射量の値は600 [W/m²]程度と低い値を示している。

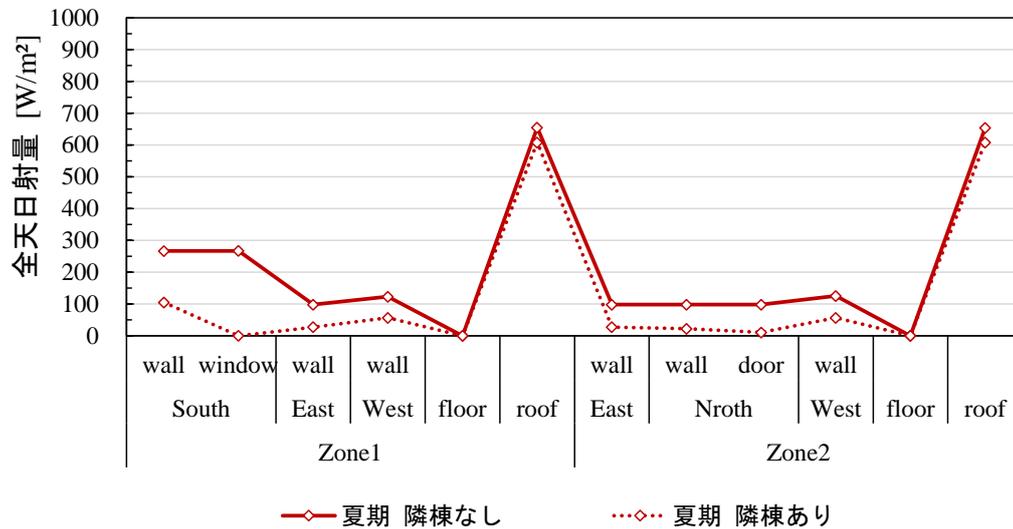


図1 都市街区の有無による冬期および夏期の建物に入射する全天日射量の比較

【前提条件としての対流熱伝達率の計算方法】

空間の熱収支式を式(1)に示す。壁面からの対流による熱輸送が支配的であるという事が分かる。熱流は式(2)で表現される。せん断応力に基づく速度スケールを利用しているため、強制対流場にも対応可能な数式となっている。参照温度の取り扱いには諸説あるが、プラントルの壁法則から乱流域を捉える事が可能な y^+ を用いて参照温度を定義した(式(3))。

$$V_{oi} \bar{c} \bar{v} \frac{dT_i}{dt} = \sum_{j=1}^J S_{i,j} h_{i,j} (T_{i,j} - T_i) + V_o c \gamma (T_o - T_i) \quad (1)$$

$$q_{wall} = \frac{\rho_f(y_c) C_{p,f}(y_c) u_\tau}{T^+(y^+_{fluid})} (t_{wall} - t_{fluid}) \quad (2)$$

$$h_{wall} = \frac{q_{wall}}{(t_{wall} - t_{fluid})} \quad (3)$$

記号： C_p : 熱容量 [J/kg·K], γ : 比重 [kg/m³], $T_{i,j}$: 対象 j の温度 [K], $\bar{c} \bar{v}$: 家具を含めた見かけの熱容量 [J/m³·K], $S_{i,j}$: j 面の面積 [m²], $h_{i,j}$: j 面の室内側対流熱伝達率 [W/m²·K], V_o : 外気との換気量 [m³/s], $c\gamma$: 空気の体積比熱 [J/m³·K], q_{wall} : 壁面の熱流 [W/m²], ρ_f : 空気密度 [kg/m³], $C_{p,f}$: 流体の比熱容量 [J/kg·K], y_c : 壁面法線方向の距離 [m], u_τ : 壁面せん断応力に基づく速度スケール [m/s], T^+ : 無次元温度 [-], y^+_{fluid} : 乱流域までの無次元距離 [-], h_{wall} : 壁体表面の対流熱伝達率 [W/(m²·K)], t_{wall} : 壁面の温度 [K], t_{fluid} : 流体の参照温度 [K]

本研究では申請書に基づき、以下の項目を比較検討する事により考察を進める。

- ① **ES** モデルへの連成の影響
- ② ゾーン分割の検討 ※単室と2室の結果を比較する。
- ③ 対流熱伝達率の比較 ※部位別の対流熱伝達率の比較を行う。
- ④ 壁体の構成による貫流熱流の影響 ※3つの断熱性能の比較を行う。
- ⑤ **CFD** モデルへの連成の影響
- ⑥ 表面の分割数への影響 ※単室と2室の結果を比較する。
- ⑦ **PMV** に与える影響 ※代表性のある Case2 に限定し、計9点（1室：南面窓の放射による危険側の影響）の経時変化を考察する。
- ⑧ 湿度分布への影響 ※湿気が問題となる夏季に限定して解析結果を考察する。

● 夏期検証結果

【①、③、④、⑤】

図2に街区無しの室内側表面温度および対流熱伝達率の計算結果を示す。室内側表面温度のケース間の差異は3 [°C] ~4 [°C] 程度となっている。これは断熱性能の相違によるものであり、断熱性能が高いほど外気の影響を受けづらいため、室内側表面温度の値は小さくなる傾向が見受けられる。天井面では断熱材を入れていないケースでは日射受熱の影響により、Case 1 では40 [°C] 程度の温度となった。対流熱伝達率の値は概ね0.5~2.5 [W/m²K] 程度の値を示している。断熱性能が高いと対流熱伝達率の値も高くなる傾向が見受けられた。これは、表面温度と空間温度の温度差の影響や流入する空気温度との温度差が大きくなる事に起因すると予想される。

図3に街区有りの室内側表面温度および対流熱伝達率の計算結果を示す。街区無と比較して概ね5 [°C] 程度は低い値を示している。外気温度も高い影響で街区が存在しても温度の差異は大きくは見受けられなかった。これは気象データが都市街区に対応した外気温度になっていない事にも起因すると考えられるが、考察が複雑となるため原因の一つとして挙げるに留めておく。対流熱伝達率の傾向に相違は殆ど見受けられなかった。しかし、天井に関しては、太陽方位角の影響も受けており、街区の有無によらず、40 [°C] 程度の値を示す結果となっている。

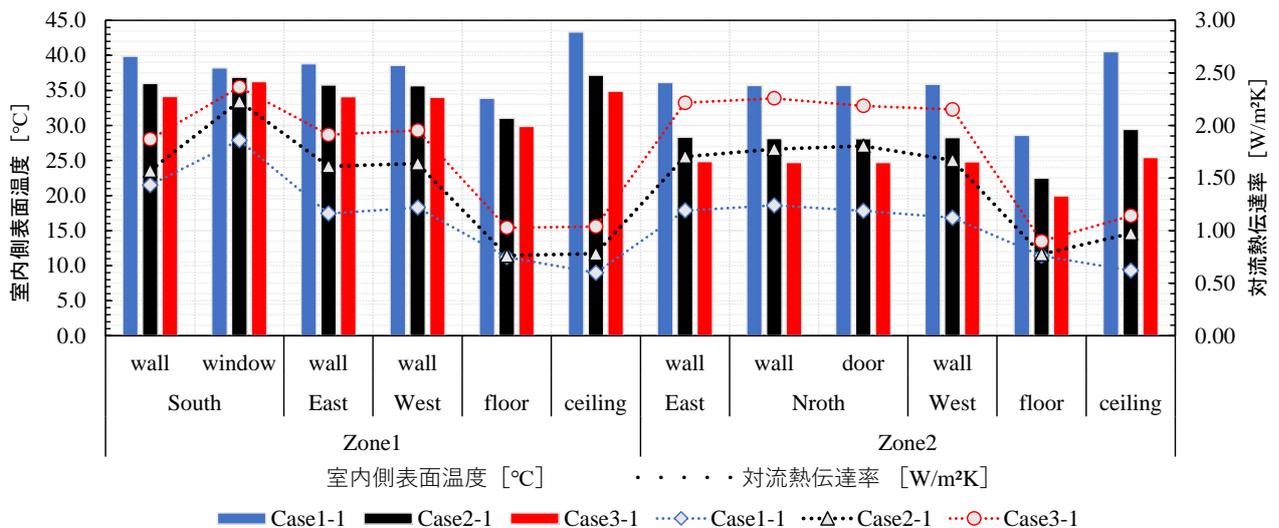


図2 室内側表面温度および対流熱伝達率【街区無】

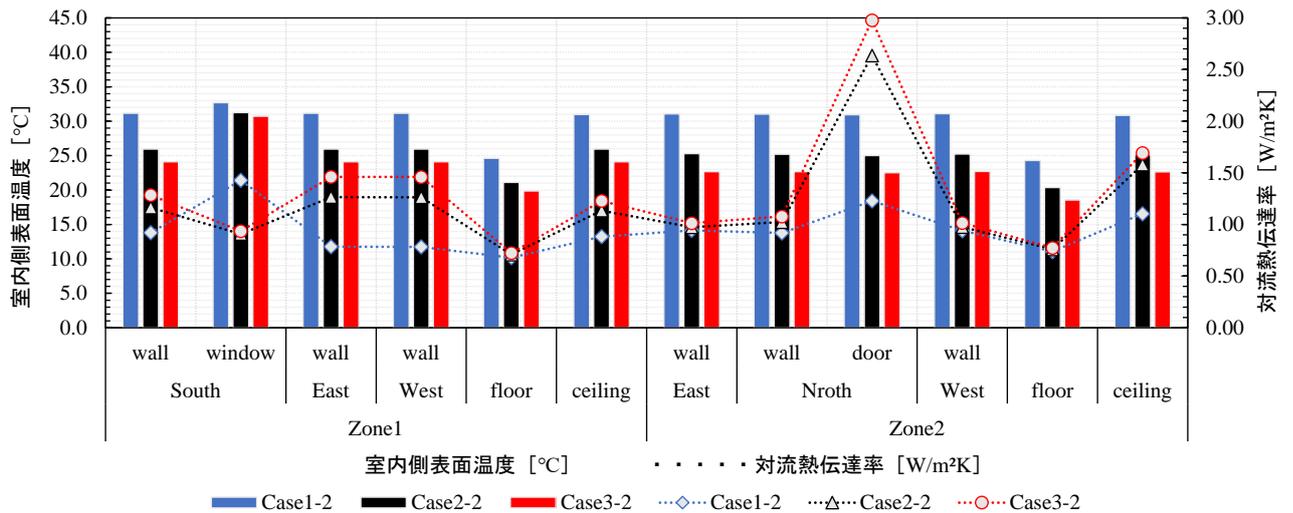


図3 室内側表面温度および対流熱伝達率【街区有】

【②、③、⑤、⑥】

図4にケース間のゾーン間の移流量を示す。純流と逆流は殆ど同じ値を示している。断熱性能が向上するとともに絶対値は大きな値を示している事が理解できる。対流図2および図3により断熱性能が高くなるにつれて対流熱伝達率の値は大きくなる傾向が見受けられるため、自然対流が卓越している可能性が高いと予想される。しかし、TRNSYSに導入する移流量の合計は30 [m³/h]と窓面の出口境界に向かって熱輸送が行われる想定となる。この値に関してはドアスリット部からの流入空気により正圧となったため若干出口境界に向けて純流が加算されていると考えられる。また、都市街区があるCase1-2~Case3-2に関しては断熱をしているほどゾーン間の移流量の減少率が大きい結果が得られた。断熱性能が高いと外気導入の影響を受けやすいと予想される。

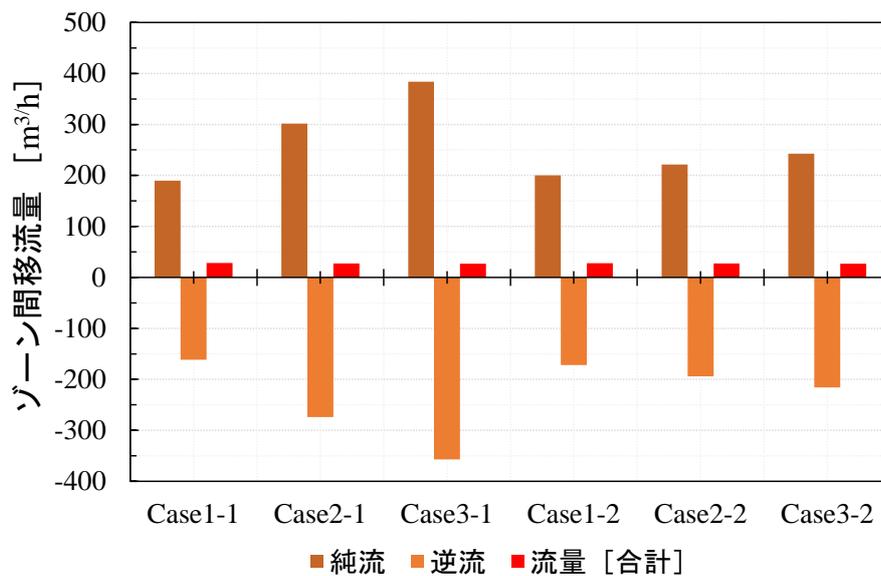


図4 ゾーン間の移流量の計算結果

図5に街区無の場合の単室と2室の室内側表面温度と対流熱伝達率の比較を示す。表面温度の値はZONE1では、単室の方が低い値を示しており、ZONE2では単室の方が高い値を示した。これは日射受熱がZONE1の窓面で大きく、室内側で相互放射したためであると考えられる。図6に街区有りの単室と2室の室内側表面温度と対流熱伝達率の比較を示す。単室の表面温度の方が高い傾向が見受けられた。これは単室の場合壁の分割が単純なため、放射熱量を過大に見積もっているためであると考えられる。室内側に入射する日射量は0 [W/m²] であるが、外壁から貫流してくる熱流が合計のものとなるため、若干過大に見積もられている可能性がある。単室と2室を厳密に比較するには壁体への入射する日射量が合うように調整が必要となる可能性が高い。2室に分割する方がより精緻な解析が可能となると予想される。対流熱伝達率に関しては街区無の場合は単室の対流熱伝達率が小さい値を示した。一方で、街区有りの場合は対流熱伝達率の値相違ない結果が得られた。街区無の場合に差が生じている理由としては日射受熱による巡回流が発生しているためだと推察される。

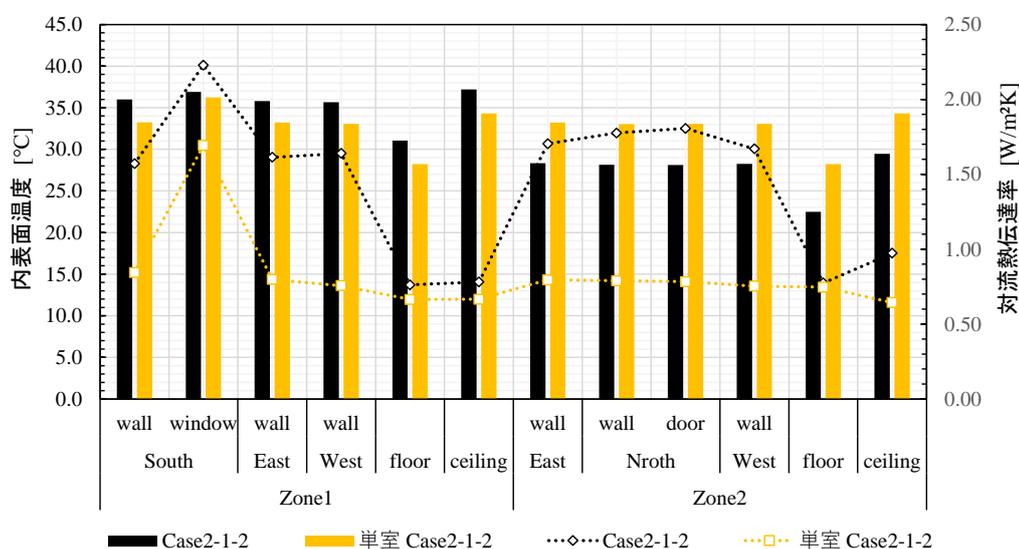


図5 単室と2室の室内側表面温度と対流熱伝達率の比較【街区無】

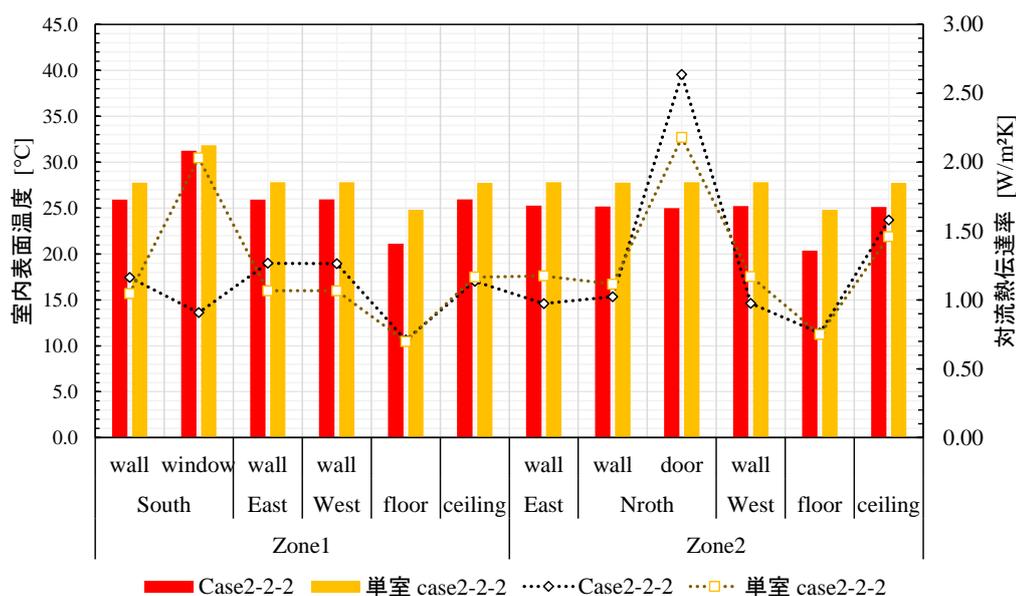


図6 単室と2室の室内側表面温度と対流熱伝達率の比較【街区有】

【⑦】 PMV の比較

Predicted Mean Vote (予想平均温冷感申告：PMV) を用いて暖かい～寒いの7段階スケールで評価を行う。特に放射の影響を受けやすい窓面近傍の ZONE の測定結果を示すこととする。PMV1 (Y:0.3,Z:3.0 [m]) を起点として Z 方向に PMV3 まで 0.6 [m] の間隔で配置した。同様にして Y 方向に 0.9 [m] の間隔で配置していき最終的に PMV9 (Y:2.1,Z:0.6 [m]) を配置した。放射の影響を非定常に評価するための方策として、測定点に分割する事で対応した。

図7に街区無の ZONE1 (窓側) の PMV の各測定点の経時変化を示す。街区無の場合は、日射受熱の影響を日中大きく受けるため 13 時～15 時に PMV の適用範囲外の暑さを示している。これは断熱性能が悪い事にも起因するが、そのような傾向としての知見は得られた。また、窓面近傍は放射の影響を強く受けるため、若干 PMV 値が高い傾向が見受けられた。

図8に街区有の ZONE1 (窓側) の PMV の各測定点の経時変化を示す。街区無と大きく相違が見受けられるのは、13 時～15 時でも PMV 値は中央値を示しているところである。また、測定点のレンジ幅も街区無と比較すると大きくなっている結果が得られた。これは街区無の場合は窓面の温度と室内側表面温度に差異が殆どないからであると予想される。街区有の場合は図6に示すように窓面の温度が高く窓面近傍の測定点は放射の影響を受けて若干高い値を示している。全体を通して評価すれば、街区有の場合は中立に近い時間帯が多く、15 時～17 時頃を除けば快適域であると考えられる。

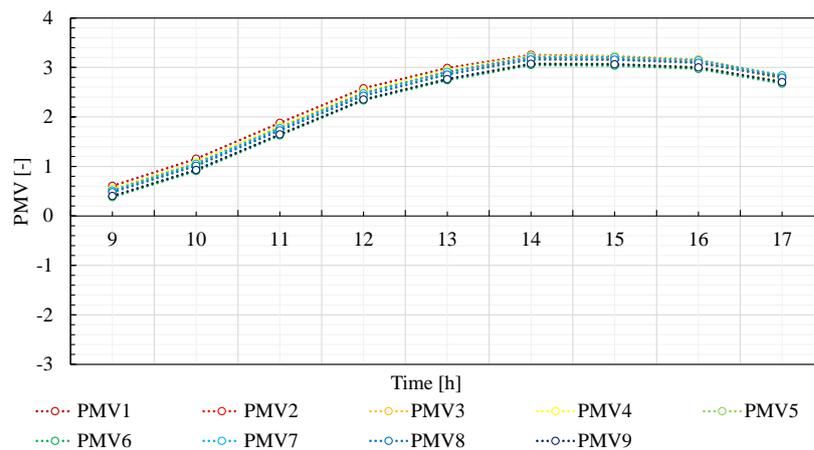


図7 ZONE1 (窓側) の PMV の各測定点の経時変化【街区無：Case2】

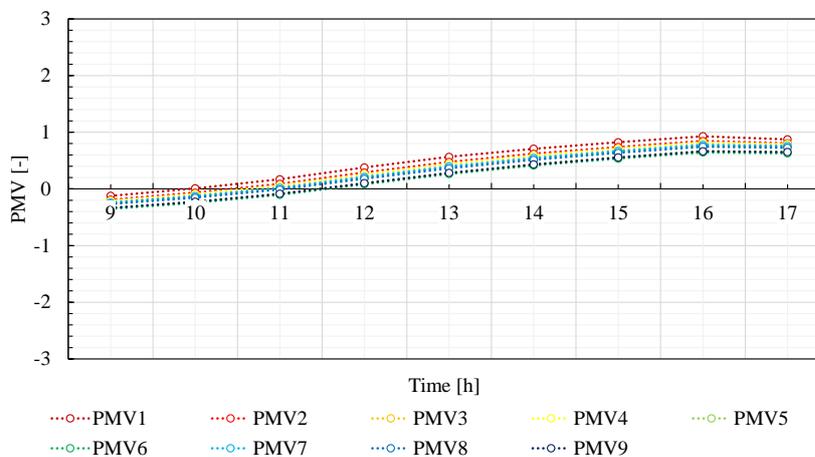


図8 ZONE1 (窓側) の PMV の各測定点の経時変化【街区有：Case2】

【⑧】露点温度の比較

図9に収束後の露点温度の解析結果に関して示す。街区なしと街区ありを比較すると2室の街区有りは若干露点温度が高くなっている。一方で、街区無しの場合には、ほとんど分布は変わらない結果が得られた。これは、街区有りの際の境界条件の表面温度が単室の方が高い事に起因すると考えられる。

なお、露点温度は飽和蒸気圧を式(4)により算出する。相対湿度が既知である場合、蒸気圧は式(5)で表現される。最終的に露点温度は、定数(-20~+50 [°C])の範囲の時に、 $A : 6.116441$ 、 $m : 7.591386$ 、 $T_n : 240.7263$ および蒸気圧 P_w [hPa] から式(6)により算出される。

$$P_{ws} = A \cdot 10^{\left(\frac{m \cdot T}{T + T_n}\right)} \quad (4)$$

$$P_w = P_{ws} \cdot RH / 100 \quad (5)$$

$$Td = \frac{T_n}{\left[\frac{m}{10 \log\left(\frac{P_w}{A}\right)} - 1\right]} \quad (6)$$

ここで、 P_{ws} : 飽和蒸気圧 [hPa]、 P_w : 蒸気圧 [hPa]、 RH : 相対湿度 [%]、 T : 絶対温度 [K]、 T_n : 三重点温度 (273.16 [K]) である。

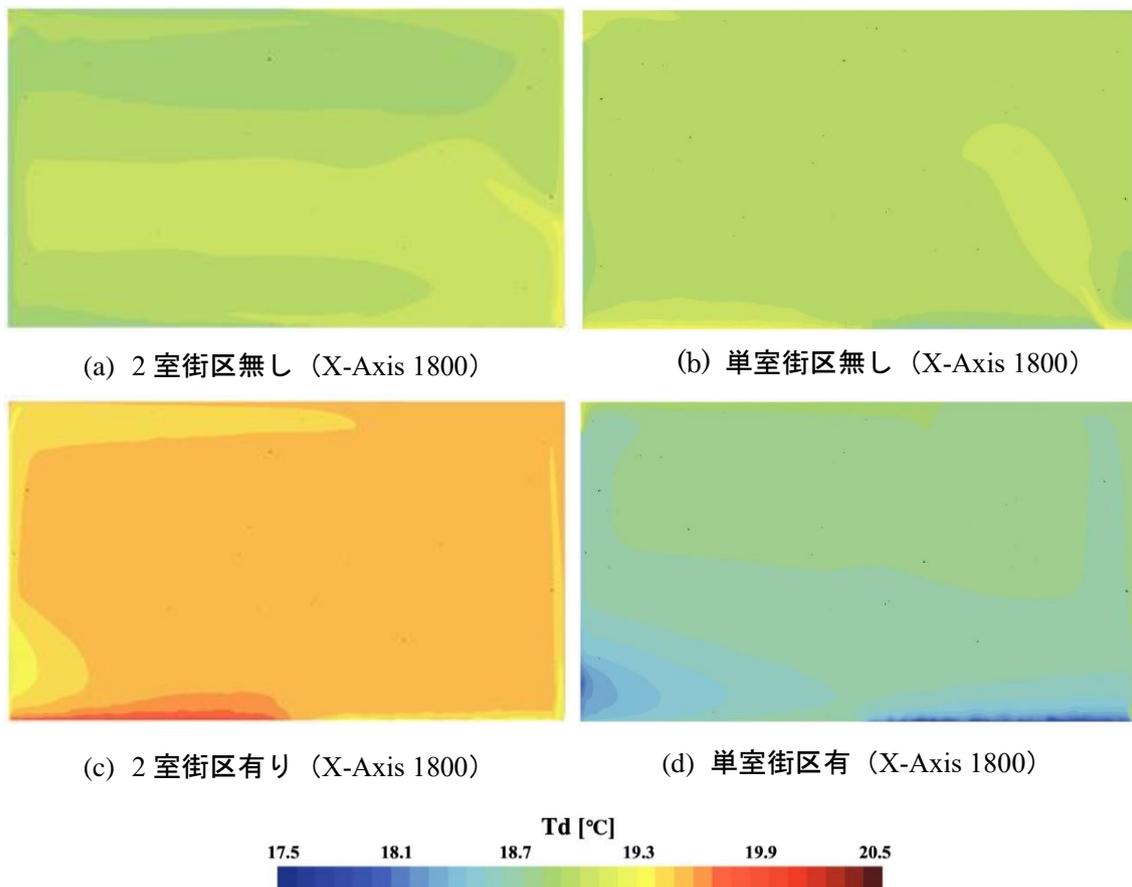


図9 露点温度の解析結果収束計算後【Case2】

4. 今後の課題

(注) 必要なページ数をご使用ください。

今回行われた検討は夏期に限定されている。従って、冬期の解析を今後は検討していく必要がある。本研究では、屋外側の対流熱伝達率を固定値 ($16 \text{ [W/m}^2\text{K]}$) で与えている。本来であれば、街区の CFD 解析が必要であるが、段階的な検討として本研究は一定の価値があると考えられる。敢えて固定値にする事によって余計なノイズを削除しているという見方も可能である。気象データは今回拡張アメダスを利用しているが、街区の影響を考慮したデータとなっていない。街区の有無で参照すべき外気温度は異なると考えられる。精緻に計算するのであれば、CFD 解析により、各壁面近傍の参照温度を計算して ES の境界条件として時々刻々反映させる連成解析が考えられる。しかし、この方法は解析負荷が高いため、何らかの簡易化に向けた方策が必要であると予想される。

これら全てを一度に行う事は困難であり、煩雑な考察となってしまう恐れがある。従って、上記に挙げられる内容は段階的に一つずつ潰していく必要があると想定される。