

研究助成実施報告書

助成実施年度	2021 年度
研究課題（タイトル）	都市街区の流体解析の導入による ES と CFD の連成解析の高度化
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 2021 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	都市街区の流体解析の導入による ES と CFD の連成解析の高度化
<p>(概要) ※最大 10 行まで</p> <p>都市街区の Computational Fluid Dynamics (CFD) の知見は建築分野を中心として集積されている。しかし、Energy Simulation (ES) との連成解析の知見は ES 側の建物を一つの質点系として表現した検討がなされており、ES と CFD の連成解析に与える影響度の検討は行われていないのが実情である。都市街区の影響を考慮すれば室内の熱環境は大きく変動するのは想像するに容易い。2019 年度に大林財団に採択された山本の報告（以下大林_2019）では、夏期の街区の影響を考慮した室内側の熱環境に与える影響に関して報告している。</p> <p>しかし、これらの検討は段階的な展開を想定しており、屋外側の対流熱伝達率に関しては慣用値を与えて計算を行っている。そこで本研究では、都市街区の流体解析による微気候を計算する事により、ES 側の屋外側対流熱伝達率の影響を精緻に検討する。</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、都市街区の流体解析が ES と CFD の連成解析に与える影響を調査するものである。着目すべき点は屋外側の対流熱伝達率を考慮した ES と CFD の連成解析による室内温熱環境の変動を確認する部分である。山本の報告（大林財団_2019）では、都市街区の有無による室内側の日照面・日陰面の影響による室内側対流熱伝達率の影響に関して検討を行った。しかし、この際の屋外側の対流熱伝達率に関しては慣用値を用いており、段階的な検討の第一歩としてまずは日照面・日陰面の影響度を相対評価した。</p> <p>ES と CFD の連成解析に関する知見に関しては Zhai ら（2002）が体系化しているが、複数のシミュレーションツールを連成する難易度の高さから既往研究が非常に少ない。そのため、やり残された課題が無数に存在する上、汎用性の高いことから、社会的にも価値のある技術である事が言える。室内側の連成解析の技術展開として数は多くないものの若干の知見が集積されている状況である。しかし、都市街区の影響度を考慮した ES と CFD の連成解析の技術は知見の集積がなされていないのが実情である。</p> <p>また、ES と CFD の連成解析の技術は需要のあるオフィスの検討が多く存在するが住宅スケールにも適用可能な技術の展開は知見が少ない。従って、住宅スケールにもオフィスのスケールでも利用可能な技術の開発が待たれている。</p> <p>オフィスでは設備機器との連成解を主とした検討が複数展開されているが、住宅側のエアコンや放射パネルに関する検討に関しては山本ら（2022）によって手法が確立されており、オフィス</p>	

の空調設計にも応用可能な技術として大変有益である。しかし、これらの技術も屋外側の対流熱伝達率や微気候などの影響を考慮した解析までは行われていない。その理由としては、質の高い技術であるため、環境試験室を利用しており、段階的な手法の確立として実験と解析を融合しているためである。

このような背景から本研究では、「流体解析の導入による屋外微気候の影響度」に関する検討を行い、設計時に利用可能なデータベースの一部を構築する事を目指すものとする。本研究は段階的な検討の途中段階であり、更なる展望（例えば都市のエネルギーなど）を持って行われるものである。

2. 研究の経過

(注) 必要なページ数をご使用ください。

都市街区の有無による日陰面の影響に関しては山本の報告（大林財団_2019）で夏期を対象として明らかとなっている。本研究では、この検討を更に拡張し、屋外側の対流熱伝達率および微気候に着目して検討を行う。屋外側の対流熱伝達率や微気候を算定するにあたり、メッシュの解像度が重要となってくる。対象建物周りの街区を中心に詳細にメッシュ分割を行うこととした。対流熱伝達率の算定式は標準壁関数を用いているため、低 Re 型タイプの乱流モデルは適用しないこととした。しかしながら、メッシュ解像度は高めに設定しており、熱流の計算に耐えうる第一層厚さとしている。

対流熱伝達率はせん断応力に基づく速度スケールに準拠しており、精緻に風速の影響を考慮することが可能である。参照温度は無次元距離 y^+ によって参照している。プラントルの壁法則から乱流域の温度を精度よく参照することが可能である。この参照温度を用いた対流熱伝達率と建物の周囲温度を外気温度とした解析を山本の報告（大林財団_2019）から発展させる形で検討を進めている。連成解析のフローを明確に示し、微気候の影響まで精緻に考慮した室内側の ES と CFD の連成解析の高度化および詳細な評価まで行なっている。

3. 研究の成果

(注) 必要なページ数をご使用ください。

※ 各種検討内容の前提条件（申請の内容に基づく）

3.1 連成の方法

STEP1 では、都市街区の存在による日照面・日陰面の計算を行う。STEP2 では、CFD 解析により風速と温度の流入プロファイルを適切に設定し、対象建物の屋外側の対流熱伝達率と微気候を明らかとする。ここで重要なのは室内側の STEP1 の次の STEP である室内側の放射計算は山本の報告（大林財団_2019）で明らかとなっている。本研究では、申請書に基づき、屋外側の対流熱伝達率と微気候（主として熱を対象とする）を変動させたケースを検討する。STEP3 では屋外側の諸条件を変更した上で（対流熱伝達率の固定値 $18 [W/m^2K]$ 、外気温度 AMeDAS 標準年気象データを CFD 解析結果に変更する。）ES で解析を行う。STEP4 では、室内側の対流熱伝達率やゾーン間の移流量を連成する事により室内側の解析を行う。STEP5 では STEP4 の結果を踏まえて PMV などを算出し、解析結果を評価する。

3.2 対象建築物の概要

外形はX : 3600Y : 4850 Z : 3624 [単位 : mm] の単純な室とした。これは山本の報告 (大林財団_2019) と同様の建物モデルを利用している。

3.3 解析内容およびケース検討の条件

表 1 にケース検討表を示す。Case0 に関しては、山本の報告 (大林財団_2019) に基づく結果である。本研究では、Case0 の最終的な結果を用いて延長線上に追加で検討を行っている。Case1～Case3 に関しては風速の流入が南、南東、東と代表的なケースを選定した。他の方位は対称性により除外した。また微気候の検討として Case4 を設定している。

図 1 に解析モデルを示す。高さ方向 (Z) に関しては閉塞率 5%として設定している。水平方向に関しては、外縁から代表的建物高さ H の 5 倍程度離れた位置に流入・流出境界を設定した。流入風速に関してはべき乗則に基づいて流入条件を設定している。本研究では、基準高さの平均風速を 2.12 [m/s] として、べき指数を 1/7 としている。

表 1 ケース検討表

Case	隣棟	CFD による外気の考慮	流入方向	微気候
Case0	あり	×	×	×
Case1		○	南	-1°C
Case2			南東	
Case3			東	
Case4			南	-5°C

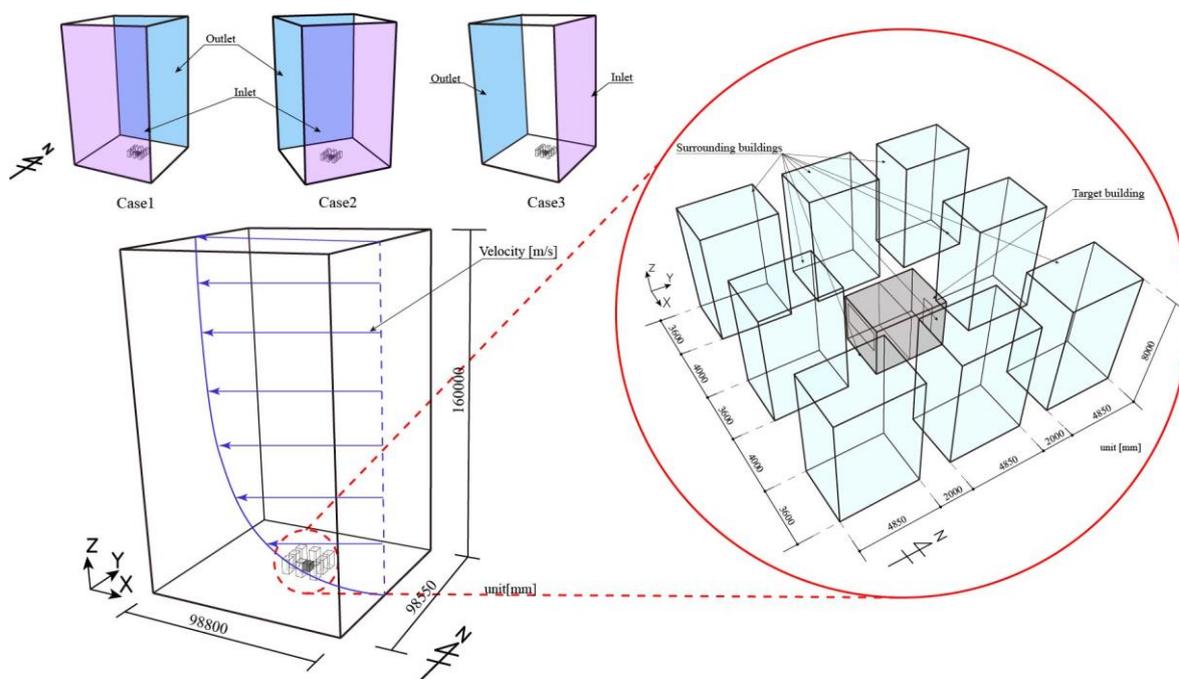


図 1 解析モデル

【ES と CFD の連成解析条件】

ES は TRNSYS.Ver.18 を用いて解析を行った。南中時である 12 時を対象とした。理由としては窓面が南面に取り付けられており、日射受熱の影響を最も受けており、安全側の解析として定常部分の比較検討を行う目的が挙げられる。TRNSYS の設定は基本的には山本の報告（大林財団_2019）に準拠している。

CFD は商用コードである STAR-CCM+を用いている。ここでの設定項目は「乱流モデルは低 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。」山本の報告（大林財団_2019）である。屋内側の対流熱伝達率は山本の報告（大林財団_2019）の最終ステップの継続として設定して行った。これに付随して、屋外側の流入の乱流強度は 0.05 [-] とした。なお、対流熱伝達率は CFD の計算値を用いた。乱流モデルは対流熱伝達率が標準壁関数を用いている関係から Realizable k-ε 2 層を用いて解析を行った。メッシュ数は約 230 万メッシュであった。メッシュ独立性の検討ではメッシュ数は約 540 万メッシュとしたところ対流熱伝達率の最大誤差は 0.84 [W/m²K] 程度であったため、大きな問題は生じないと判断した。その理由として、本研究の主眼とする目的は実測値の無い相対比較であるため考察内容に大きな差異は見受けられないと判断されるからである。

3.4 解析結果および考察

前提として全天日射量は山本の報告（大林財団_2019）と同様のため割愛するが、天井の全天日射量の値は 600 [W/m²] と低い値を示している。これは太陽高度が関係していると推察される。

【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の影響を受けている事が右辺第一項から推察できる。熱流の計算を式（2）に示す。せん断応力に基づく速度スケールを用いて気流の影響を考慮している。せん断応力に基づく速度スケールは山本らの研究（2021）によって強制対流場ではあるが、境界層理論との精度が確認されている。対流熱伝達率は式（3）で示される。参照温度の定義を無次元距離 y⁺ で表現しており、精緻に乱流域の温度を参照している。

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

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

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

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], $\bar{c}\bar{\gamma}$ 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], cγ: 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_c : 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、申請書の内容に基づき、以下の項目を検討し、考察を行う。

1. 微気候の考慮による室内側の ES と CFD の連成解析への寄与の項目

- ① 屋外側の壁面毎の対流熱伝達率の影響
- ② 流入プロファイルの影響
- ③ 建物周りの温度の影響

2. ES と CFD の連成解析への寄与の項目

- ① 室内側対流熱伝達率への影響
- ② ゾーン分割による移流量への影響
- ③ PMV への影響

● 夏期検証結果

【1-①、1-②、1-③、2-①】

図2に室内側対流熱伝達率の微気候の影響度を示す。微気候は対流熱伝達率に大きく寄与しない事が明らかとなった。最大誤差は0.001 [°C] である。室内側表面温度にも殆ど影響が無い様子が見受けられる。対流熱伝達率に関しては窓面が屋外側対流熱伝達率を固定値で与えるよりも南面の窓面の対流熱伝達率の値が大きくなっている。逆にドアに関しては屋外側の対流熱伝達率が固定値の方が高い値を示している。屋外側の対流熱伝達率の寄与は室内側にも影響する事が確認できた。

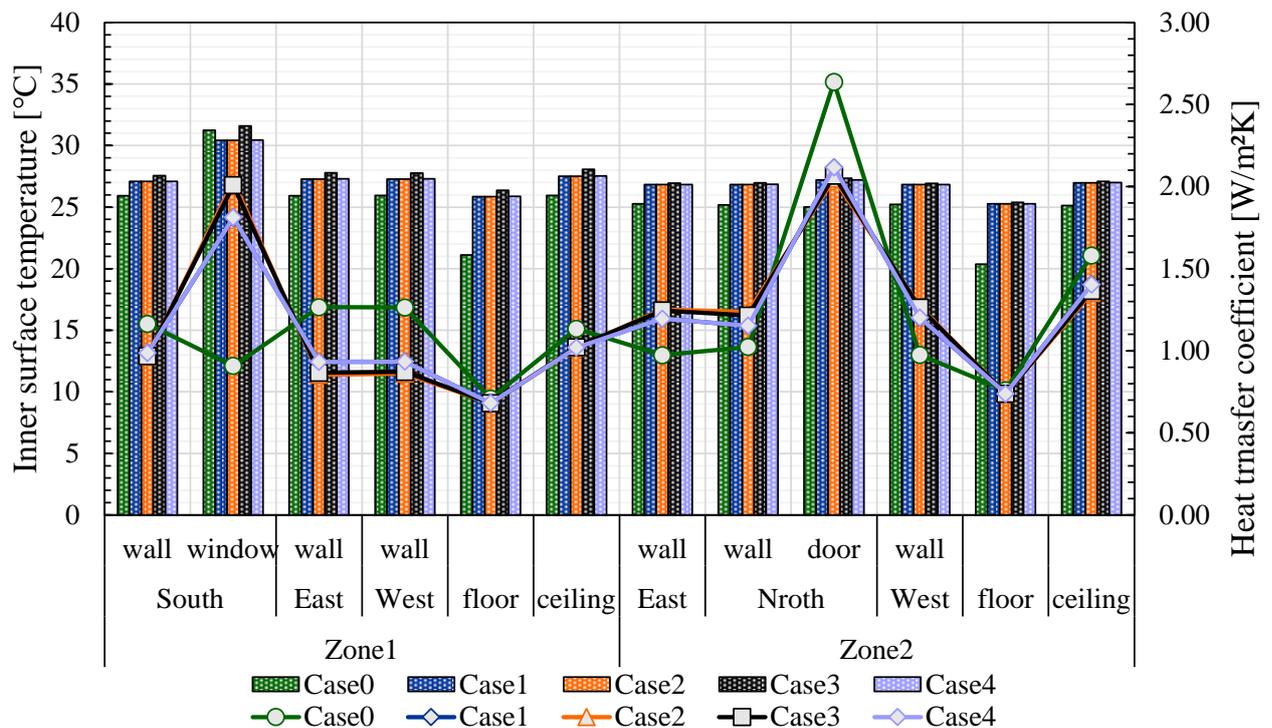


図2 室内側対流熱伝達率の微気候の影響度

図3に屋外側の対流熱伝達率の微気候の影響度を示す。風向による影響度が良く確認出来る結果が得られている。例えば、Case1とCase2では窓面の対流熱伝達率が10 [W/m²K]程度相違が生じている。Case2では西面の対流熱伝達率が8 [W/m²K]程度と小さい値を示している。全体で見ると上下で10 [W/m²K]以上の開きが生じている。図1と照らし合わせると室内側表面温度には大きく寄与しないという事が理解出来る。図2の表面温度は最終STEPにおける室内側の連成解析後の屋外側表面温度の差異である。ただし、窓面の対流熱伝達率はかなり相違が生じているため、最大2 [°C]程度の差異が出ている事が確認できた。対流熱伝達率の相違は最終的な屋外側表面温度に大きく寄与する事が確認された。ただし、対流熱伝達率の相違にも関わらず、大きく屋外側表面温度が変動していない様子も見受けられた。この原因として考えられるのは貫流熱流、即ち断熱性能の相違によるものであると予想される。

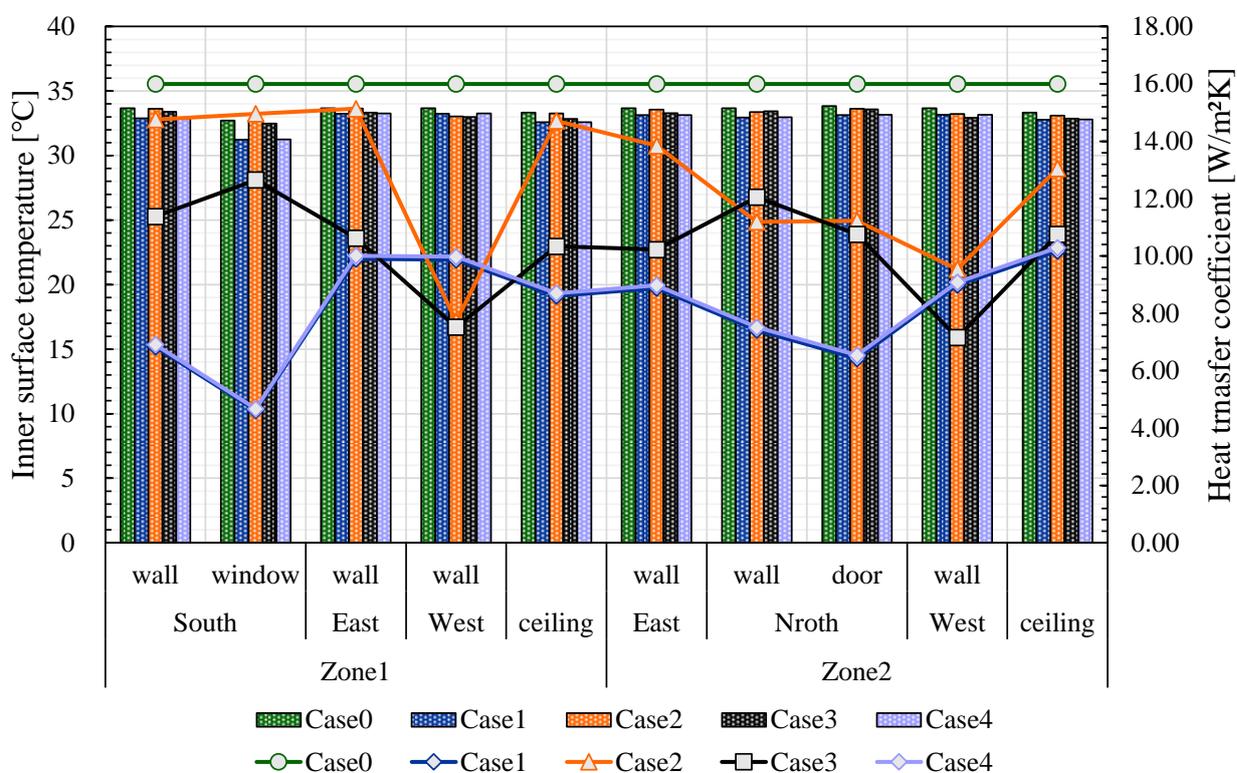


図3 屋外側の対流熱伝達率の微気候の影響度

【1-②、1-③、2-②】

ゾーン間の移流量連成結果を図4に示す。ケース間における誤差は殆ど存在しない事が分かった。この結果が示唆する事は、街区の流体解析を含めたES-CFD連成では、差異が殆ど生じない事からモデル毎に解析コストを削減可能である。本報告では、自然対流場におけるゾーン間移流量に関して考察しているが、強制対流場においては屋外側の対流熱伝達率の影響は考察するまでもなく影響が無いので検討を行っていない。合計が純流の方向に向いているのはCFDのモデリングの関係上である。北面のドアから流入して窓面から流出するよう設定されているためこの様な結果が生じている。なお、建物モデリングの詳細に関しては山本の報告(大林財団_2019)を参照されたい。

図1の様に中央部に対象建物が設置されており、それに応じてスリットが窓面とドアに設置されている。

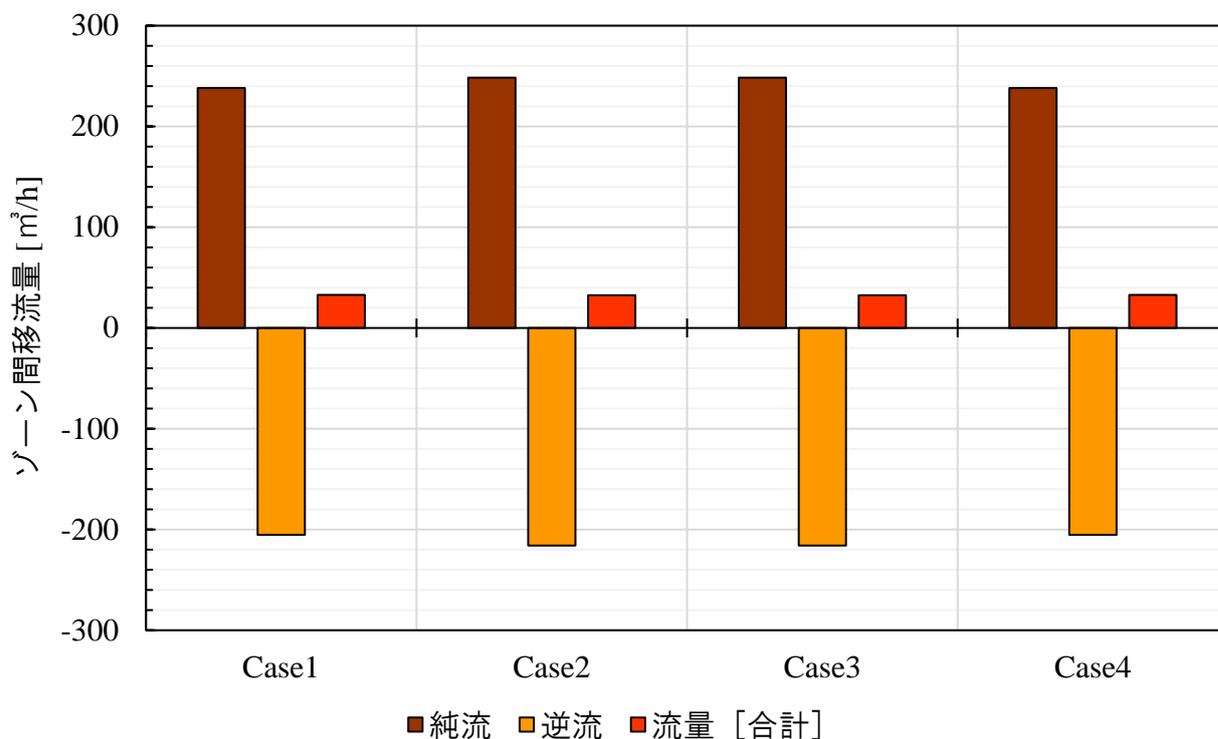


図4 ゾーン間の移流量連成結果

【1-②、2-③】

図5にPMVの出現率と出現回数を示す。PMVの出現率は概ね ± 0.5 の範囲に入っており、快適域であると考えられる。ただし、ZONE2の出現率は若干+1.0程度の値を示している。Case毎の差異に関してそこまで大きく生じていない事が明らかとなった。これらの結果から言える事は屋外側の対流熱伝達率は大きく室内側の快適性には寄与しないという点である。解析負荷を削減する意味では慣用値の利用も考えられる。ただし、精緻な計算を目指す上では屋外側の解析も設計上極めて重要な要素となる。PMVは環境側の6要素を兼ね備えたFangarが考案した実験に基づく指標である。一定の妥当性があるとして世界的に利用されている。本研究で、PMVを指標として室内側の快適性を評価しているのはそのような背景が存在する。

結果としては、空調をしていないにも関わらず快適域に入っている時間帯が多く存在した。これは街区の存在により、日射が妨げられた結果であると予想される。なお、都市街区の有無による考察は山本の報告(大林財団_2019)でなされているため割愛させて頂く。

【総括】

本研究では都市街区の流体解析の導入によるESとCFDの連成解析に与える影響について検討を行った。結論から述べると対流熱伝達率には影響はあったがゾーン間移流量や快適性指標であるPMVには大きな影響は無かった。ただし、微気候に関しては検討の余地を残しているし、屋外側対流熱伝達率も断熱性能を変更すれば影響が出る可能性は付記しておくこととする。

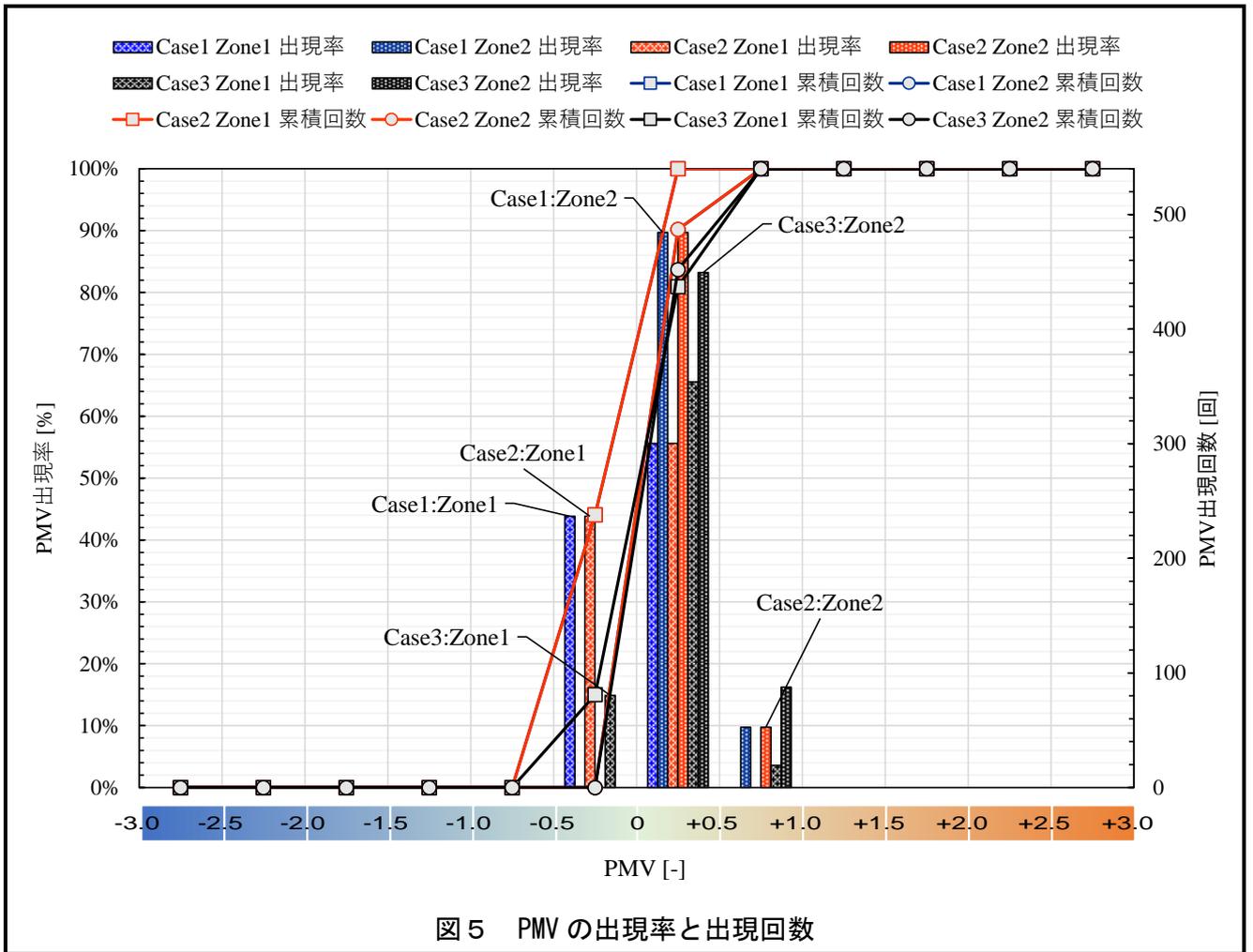


図5 PMVの出現率と出現回数

4. 今後の課題

(注) 必要なページ数をご使用ください。

本研究の成果は限定的であるが有益な情報を取得する事が出来たと考える。屋外側の流体解析を行ったが、その影響度はそれほど大きくなかった。更に、微気候の影響も行ったがこれも影響が大きくなかった。しかし、これらの解析結果は若干の課題を残している。例えば、屋外側の微気候の影響を壁面毎に連成する事が出来ていない。これによって、若干なりとも結果は異なってくると予想される。また流入のプロファイルに関しても乱流を模擬したプロファイルで流入させる検討が必要となってくると予想される。

また、本研究では、都市全体を模擬しておらず街区のみのモデリングとなっている。スーパーコンピュータが必要となってくるかもしれないが、都市街区全体をモデリングして流入の温度プロファイルや風速プロファイルを厳密に設定する事で微気候の影響をより精緻に予測可能であると考えられる。微気候を考える上で流入の温度プロファイルは重要ではあるが、本研究では、その定義付けまでは行っていない。段階的な検討としては十分な知見が得られたが今後の課題として挙げておく必要はある。本研究では、断熱性能を変更していないため、次のステップとして断熱性能による感度解析が考えられる。また流入空気量を流体解析で取得する事も今後の課題としては挙げる事が出来るが解像度をかなり高くする必要があり、実行には相応の工夫を要すると予想される。