

暖房時の窓近傍の温熱環境を快適にするための空調計画

Design Method for Comfort Thermal Environment of Perimeter Zone in Heating Condition

加藤 正 宏 荒井 良 延
弓野 沙 織 篠塚 貴 志¹⁾

I. はじめに

暖房時のオフィスビルなどをはじめとする大面積の窓を有する空間においては、温度などの不均一性により温熱環境が悪化しやすく、クレームの発生が懸念されることが多い。特に近年、窓面積の増大や内部発熱の減少により、設計時の建築・設備仕様の事前検討の重要性が増している。

暖房時の温熱環境の不均一性による課題を Fig. 1 に示す。①冬期の暖房期間には夜間の非空調時間帯における温度低下により、空調開始前の室温や床表面温度が低くなる一方で、空調時間帯には室内を温めるため空調吹出温度が高くなることで、暖気が室上部に滞留し上下温度差が発生することが多い。②冬期は夏期と比較して室内外の温度差が大きいため（例えば室温 22℃に対して外気温度 2℃となる場合）、窓表面温度が低下しやすく、窓面からの冷放射により直接室内の居住者が冷却され、不快感を生じさせる場合がある。③低温のガラス室内側表面は室内空気を冷却し、ガラスに沿って室下部に下降する気流（コールドドラフト）が発生するため、上下温度差を増大させるとともに、床面近傍の風速増加もクレームの要因となり得る。

以上のような、不均一な温熱環境に対して、建築・設備計画やコストへの影響が大きい対策を検討するために、設計時にその効果を予測しておく必要がある。本報では、暖房時に窓面が冷却されている状態での温熱環境の基礎的な特性を実験・シミュレーションにより把握・分析した結果を示すとともに、設計段階に応じて用いるために当社で開発した詳細・簡易検討手法と、温熱環境の体感実験により合意形成を支援した事例について述べる。

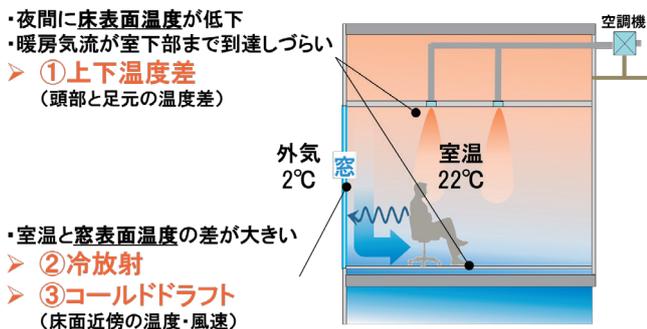


Fig. 1 暖房時温熱環境の不均一性による問題
(Ununiformity of Thermal Environment in Heating Condition)

II. 窓面冷却時の温熱環境

暖房時に窓面が冷却された場合の詳細な風速・温度分布や、それが人体に与える影響を把握することで、後述するシミュレーション

の妥当性を確認しながら、適切な建築・設備計画を行うことが可能になると考えられる。そこで、大面積の窓を有するペリメータゾーンを想定し、実験による詳細データ取得およびシミュレーションによる分析を行った¹⁾。Fig. 2 に示す高さ 2.76m のフルハイト窓の断熱性能を変化させた実験を行った。室温 22℃・外気温度 2℃を想定し、窓ガラスの熱貫流率を単板ガラス (5.5) ~ Low-E^{注)} ガラス (1.6) [W/(m²・K)] とし、室内側総合熱伝達率 9.3 [W/(m²・K)] を用いて計算により窓ガラス室内側表面温度 10.2~18.6℃を求め、この値を実験装置の窓ガラス表面温度設定値とした。

注) 複層ガラスの内表面に特殊な金属膜を設け、熱性能を向上させたもの

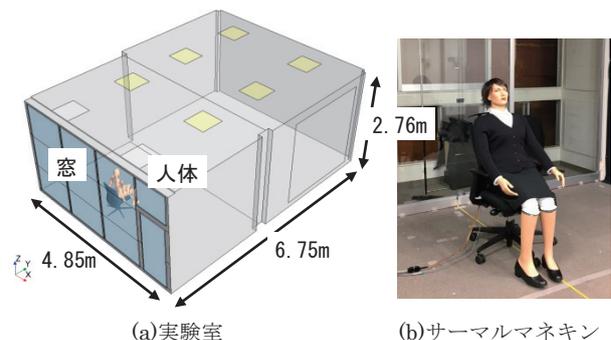


Fig. 2 実験状況
(Experimental Setup)

1. 温度・風速の詳細測定と温熱環境指標

(1) 室温・表面温度

実験時の室温は単板ガラス：22.5℃、複層ガラス：22.2℃、Low-E ガラス：22.4℃であり、窓ガラス表面温度の平均値は単板：10.9℃、複層：16.6℃、Low-E：18.5℃である。

(2) 冷放射

表面温度より床上 1.1m の窓側平均放射温度 (Mean Radiant Temperature: MRT) を算出すると、窓から 1m の位置での窓側 MRT は単板：16.5℃、複層：19.0℃、Low-E：20.1℃である。

(3) 窓面の気流・温度

窓中央断面での風速・温度分布を Fig. 3 に示す。窓面に最も近い、窓面から 30mm の測定位置で、窓面に沿う下降流の最大風速は床上 0.2~0.5m 付近に発生し、単板：0.34m/s、複層：0.19m/s、Low-E：0.14m/s である。最低温度は床近傍で、単板：16.9℃、複層：19.3℃、Low-E：19.9℃である。窓面から 150mm 以上離れた領域では、風速は非常に低くなっている。

(4) 居住域の気流・温度

下降流の存在する窓面付近を除いた、窓面から室内側に 0.4~5m

1) 建築設計本部 Architectural Design Division

の範囲での最大風速は単板:0.31m/s, 複層:0.25m/s, Low-E:0.17m/sである。最低温度は単板:19.7℃, 複層:20.5℃, Low-E:20.9℃である。風速0.15m/sを超える領域は単板で床上0.2m, 複層・Low-Eでは床上0.1mの範囲でのみ発生している。窓から1mの位置での上下温度差(床上1.1m-0.1m)は単板で2.3℃, 複層で1.1℃, Low-Eで1.2℃であり, 不快感は小さいと予測される。

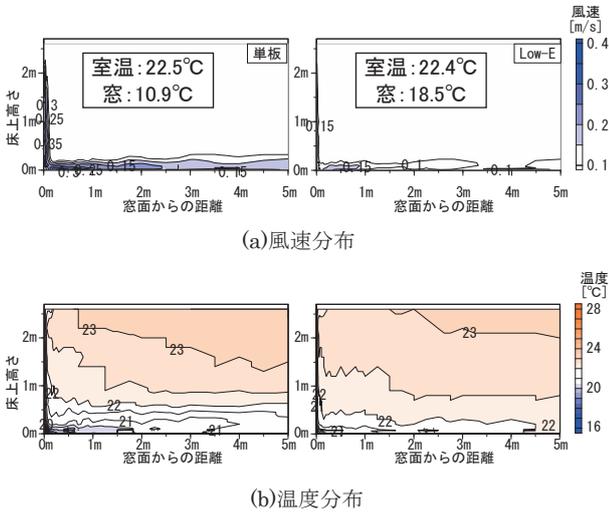


Fig. 3 風速・温度分布

(Temperature and Velocity Distribution)

2. サーマルマネキンによる測定

前節と同様の設定にて, 窓面に背を向け着席したサーマルマネキン(着衣量:0.92 clo)の顕熱損失量と皮膚表面温度を測定した。また, 窓面の冷却の影響がない均一・静穏な環境として天井面を除く窓・壁・床面が22℃になるように制御した条件(標準環境)を追加し, 標準環境下の着衣抵抗を用いて各条件の等価温度を算出した(Fig. 4)。全身等価温度は標準環境:22.1℃, 単板:20.6℃, 複層:21.5℃, Low-E:21.7℃であり, 単板条件では標準環境より1.5℃低下していることになる。部位別に見ると, 単板条件では標準環境に対して背中中で3.3℃, 腰後で2.7℃, 右足で2.1℃低かった。露出部である下肢だけでなく, 着衣・椅子の影響がある背中中の等価温度が標準環境に対して大きく低下しているが, 温度・風速測定結果では座面から頭部(床上0.4~1.1m付近)における温度・風速は実験条件によって大きく変わらないため, 上半身に対する窓面からの冷放射が影響していると考えられる。

3. 数値サーマルマネキンによる分析

実験結果の室内側表面温度を境界条件とし, 数値サーマルマネキンにより放射・対流熱量を算出した。単板条件での顕熱損失量(放射+対流)をFig. 5(a)に示す。露出部である下肢・手の顕熱損失量が大きく実験結果に近い値が得られている。

Fig. 5(b)に対流成分の割合の表面分布を示す。単板条件では全身で放射25 W/m²・対流23 W/m²となりやや放射が大きい。部位別にみると, 下肢では対流成分が大きく, コールドドラフトによる温度・気流の影響を受けていることがわかる。また, 頭部や背中では放射成分が大きく, 前述の実験結果と対応している。

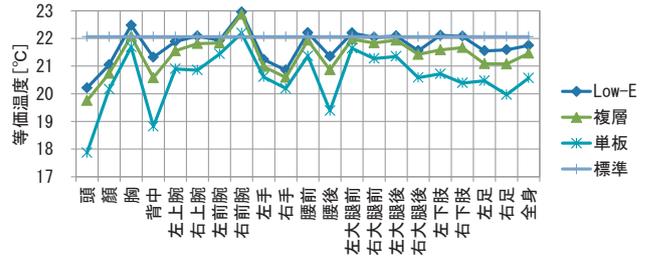


Fig. 4 サーマルマネキンによる等価温度測定結果
(Equivalent Temperature Measured by Thermal Manikin)

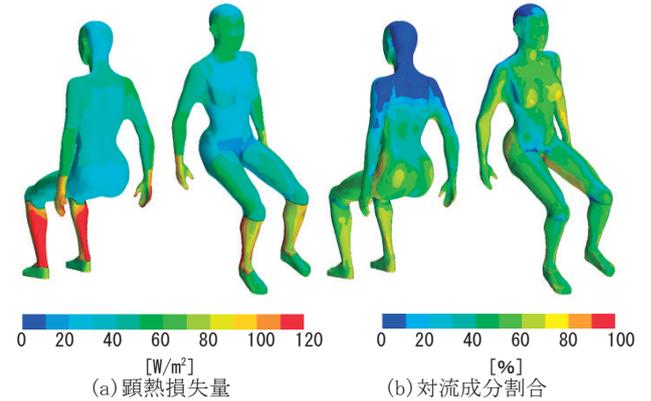


Fig. 5 数値サーマルマネキンによる顕熱損失量算出結果
(Sensible Heat Loss Calculated by Numerical Manikin)

III. 詳細検討手法

実際の設計時には, 暖房時の室内の温度変動や温熱環境を詳細に予測するために, 当社が開発した「上下温度分布予測モデル」²⁾や, 一般的に用いられている気流数値計算(Computational Fluid Dynamics:CFD)を用いた検討を, それぞれの特長を活かして実施している。本章では両手法の概要と実施例について述べる。

1. 上下温度分布予測モデルによる検討

特定日あるいは年間にわたる温度や空調負荷の変動を計算する場合, 「上下温度分布予測モデル」を用いた検討を実施する。このモデルでは, Fig. 6のように空間を大まかなブロックに分割し(数十分割程度), 温度分布を計算する。計算時間が短いため, 長期間の非定常計算(例:1分間隔での年間365日の計算)が可能である。壁体の熱伝導計算を組み込んでおり, 特に暖房立ち上がり時に顕著な, 躯体や家具などの熱容量の影響を考慮できる。また, 空調制御を取り扱っているため負荷の状態に見合った吹出温度を計算できる。Fig. 7に冬期ピーク日の温度変動の計算結果例を示す。7時に空調開始し吹出温度が26~27℃程度まで上昇, 室内側の室温は22℃となっているが, 窓側の室下部は20~21℃で上下温度差が生じると予測されている。

2. 気流数値計算による検討

平面的な温度分布や, 居住域での風速を詳細に予測する場合, CFDによる検討を実施する。CFDでは空間を細かい計算格子に分割し(数100万分割程度), 風速・温度分布を計算する。計算時間が長いため, 通常は特定時刻の定常計算のみを実施する。一般的に用いられる手法であるが, 妥当な検討結果を得るためには, 入力条件の設定方法が重要である。

Fig. 8にCFDによる暖房時の風速・温度分布の予測結果例を示す。この例では、まず上下温度分布予測モデルにより、温熱環境上の問題が発生しやすいと考えられる、暖房が立ち上がる9時の時点での壁面熱量・吹出温度を計算した。その値をCFDに入力することで、より精度の高い結果を得られるよう工夫を行っている。室上部からの吹出気流が室下部に到達し上下温度差を緩和しつつ、居住域風速が過大となっていないことが予測されている。また、ペリカウタに設置した面状ヒータにより窓下への冷気の流入が抑えられていることが確認できる。

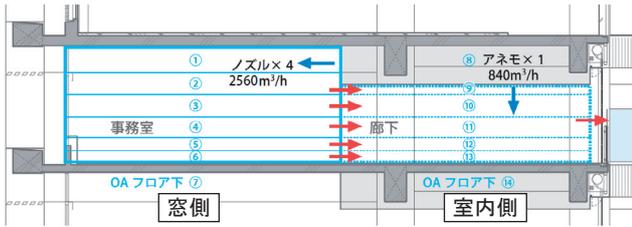


Fig. 6 計算対象空間 (Calculation Model)

設定、および計算を行うことは困難である。そこで、建築・設備仕様が上下温度差に及ぼす影響を設計初期段階に予測できる簡易評価チャートを提案し活用している。

1. 簡易評価チャートの作成方法

既往研究³⁾によると、「空調開始直前の床表面温度」と「空調時間帯の上下温度差」に密接な関係がある。そこで、一般的なオフィスを想定した基準条件 (Fig. 9) を設定し、断熱性や空調吹出・吸込方式などを変化させた場合の両者の関係を上下温度分布予測モデルによって求め、その結果に基づいて評価チャートを作成した⁴⁾。

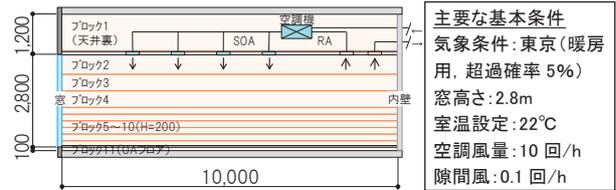


Fig. 9 オフィスを対象とした計算条件 (Calculation Model and Condition)

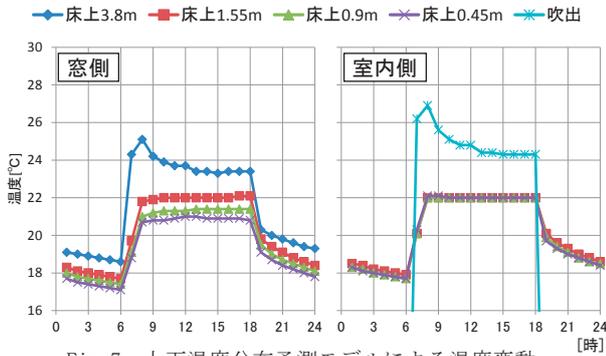


Fig. 7 上下温度分布予測モデルによる温度変動 (Temperature Change Calculated by Macroscopic Model)

2. 上下温度分布予測モデルによる計算結果

(1) 窓仕様による比較

断熱性が異なる窓ガラスの毎の床表面温度、上下温度差の推移を Fig. 10 に示す。空調開始前 (7 時) の床表面温度は「単板」で 15.1°C、「Low-E: 空気層 12mm」で 18.0°C であり、空調時間帯 (8~20 時) の上下温度差は「単板」で 4.1°C、「Low-E: 空気層 12mm」で 2.7°C であった。空調開始前の床表面温度と空調時間帯の上下温度差の関係を Fig. 11 (a) に示す。既往研究³⁾と同様に両者に強い相関がみられる。窓の断熱性能が高くなると空調開始前の床表面温度が高くなり、空調時間帯の上下温度差が小さくなることわかる。

(2) 空調吹出・吸込条件による比較

オフィスで用いられること多いアネモ型吹出 (拡散性の高い天井吹出口)、ブリーズライン (窓近傍で室下部まで気流を到達させる細長い吹出口)、床吹出口 (床面から居住域に空調気流を拡散させる) を想定し、空調吹出・吸込条件を変更した場合の比較を行う。Fig. 11 (b) に示すように、この場合も、吹出・吸込方式毎には空調開始前の床表面温度と空調時間帯の上下温度差に強い相関がみられる。

基本条件の「アネモ水平+ブリーズライン (以下、BL)」の天井レターチャンバ (以下、天井 RC) に対し「アネモ垂直」の上下温度差が小さい。床面近傍を混合する風量がアネモ垂直のケースの方が多いためと考えられる。「アネモ水平+BL」で床吸込とした場合、「天井 RC」に対し上下温度差は 0.6°C~0.8°C 小さくなった。「アネモ垂直」のケースでは、単板で 1.3°C、そのほかのケースでは 0.2°C~0.5°C 小さくなった。したがって、床吸込口を設けることによる上下温度差の改善効果は概ね 1°C 以下であると考えられる。床吹出方式で OA チャンバ方式を採用すると、空調開始前の床表面温度が高く、単板ガラスでも 16°C 程度であった。空調時間帯の上下温度差は 1°C 以下となっている。以上のように、空調吹出・吸込条件について比較すると空調時間帯の上下温度差に違いがみられることから、空調条件毎に上下温度差を評価可能なチャートを作成する必要がある。

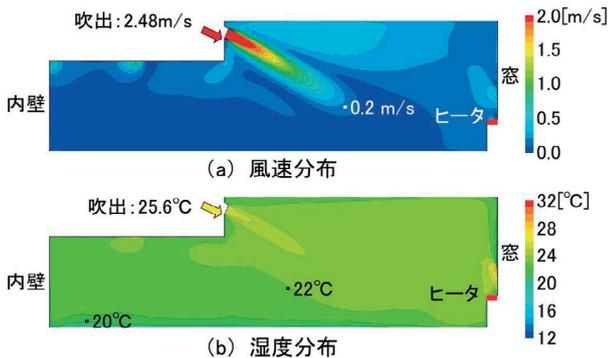
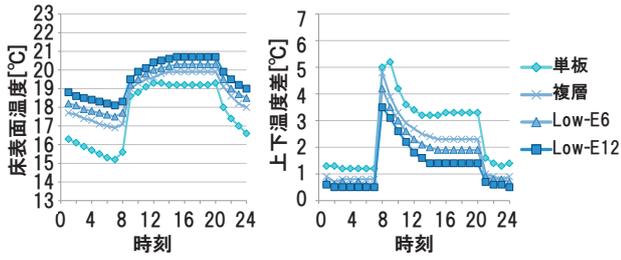


Fig. 8 CFDによる風速・温度分布の予測 (Velocity and Temperature Distribution by CFD)

IV. 簡易検討手法

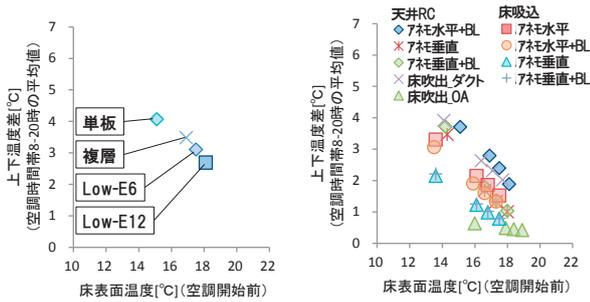
開口部断熱性能の向上やヒータの増設といった暖房対策は建築・設備計画やコストへの影響が大きく、設計初期段階に対策の要否を判断することが望ましい。しかし、暖房時の温熱環境には建築・設備仕様が複雑に関わるため、設計上のパラメータとなる要素が多く、詳細な仕様が決定していない設計初期段階にモデル作成、入力条件



(a)床表面温度の時変動 (b)上下温度差の時変動

Fig. 10 非定常計算結果

(Result of Unsteady State Calculation)



(a)窓仕様の違い (b)空調吹出・吸込方式の違い

Fig. 11 床表面温度と上下温度差の関係

(Relationship between Floor Surface Temperature and Vertical Temperature Difference)

3. 上下温度差の簡易評価チャート

空調開始前の床表面温度と空調時間帯の上下温度差の関係について、代表的な条件でモデル化を行った。窓仕様(断熱性能)・外気温度・隙間風・窓面積比・上下階隣室条件が変わった場合も空調開始前の床表面温度と上下温度差の関係は概ね一意に決まるため、窓仕様を変更したプロットでチャートを作成する。空調条件は基準条件(アネモ水平+BL)を「天井吹出」方式の代表とし、「アネモ水平」に床吸込口を設けたケースを「床吸込」方式の代表とした。また、床吹出方式として「床吹出_OA」の計算結果を用いた。モデル化の結果を Fig. 12 に示す。

設計時に実施する単室の非定常熱負荷計算において、断熱性能などの建築的な条件を入力することで空調開始直前の室温を算出できる。床表面温度の最小値と室内温度(空間内の平均)の最小値は概ね一致すると考え、室温の最小値を評価チャートに入力することで、設備仕様毎に上下温度差を予測することが可能である。

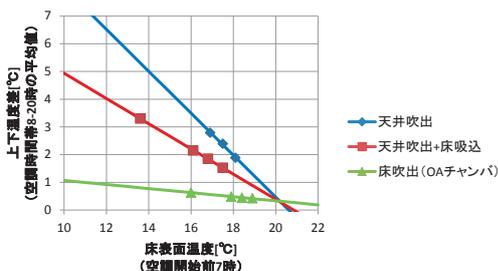


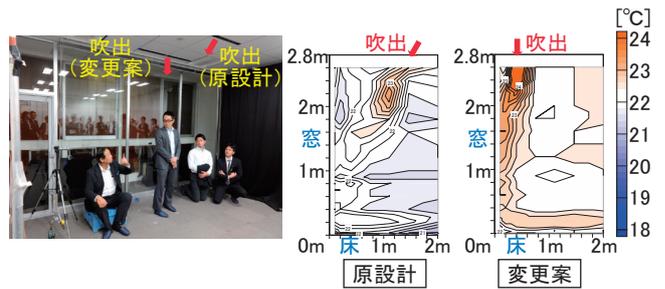
Fig. 12 上下温度差の評価チャート

(Evaluation Chart of Vertical Temperature Difference)

V. 体感による合意形成支援

前章までに述べた各種検討手法により、温熱環境を予測し一般的な温熱環境指標により評価することが可能である。一方、体感に基づいた評価を行うことで、関係者間での合意形成を支援し、竣工後運用時のクレーム発生を回避できる。ここでは、そうした体感による合意形成支援の事例を紹介する。

原設計では窓面から離れた位置に空調吹出口が計画された事例において、特に暖房時の空調気流による不快感に関するクレームが懸念されていた。そこで、上下温度差と気流不快感の発生防止のため、吹出口を窓際寄せ配置とすることを提案した。前章までに述べた手法での事前検討を行った後、実験室に吹出口を設置、暖房時・朝9時(室温22°C・吹出28°C・Low-Eガラス窓表面17°C)の条件を再現し、Fig. 13 (a)のように施主および設計者に原設計および変更案の吹出での気流の違いを体感してもらった。また、温度・風速の詳細測定を行い、空間内の分布を可視化した結果を Fig. 13 (b)のように提示した。原設計配置では座席位置頭部に気流を感じる可能性があり、かつ上下温度分布も生じやすいが、変更案では気流感・温度分布ともに改善されている。環境を実際に体感するとともにデータをわかりやすく提示することで、窓際寄せ配置への変更について、合意形成を図ることを支援した。



(a)体感実験の状況 (b)温度分布測定結果

Fig. 13 窓近傍吹出による温熱環境の体感

(Subjective Experiment of Air Supply near Window)

VI. おわりに

暖房時の窓近傍を中心とした温熱環境の計画手法について述べた。窓面の冷却や温度・風速分布が居住者に与える影響や建築・設備対策の効果を把握したうえで、適切な対策を行うことにより、良好な温熱環境の実現を図っている。

参考文献

- 1) 加藤正宏, 篠塚貴志, 弓野沙織; 暖房時窓近傍の温熱環境に関する基礎的検討(その1)~(その3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2017. 8.
- 2) 戸河里敏, 荒井良延, 三浦克弘; 大空間における上下温度分布の予測モデル 大空間の空調・熱環境計画手法の研究 その1, 日本建築学会計画系論文報告集, 第427号, 1991. 9, pp. 9-19.
- 3) 鹿島昭一, 小原俊平, 寒河江昭夫, 稲沼實, 戸河里敏; 事務所ビル室内における温度・気流分布の実態とその評価, 日本建築学会計画系論文報告集, 第375号, 1987. 5, pp. 28-38.
- 4) 篠塚貴志, 加藤正宏, 荒井良延; 暖房環境の不均一性を考慮した建築・設備仕様の評価(その1) オフィスにおける上下温度差の簡易評価手法, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, 2017. 9.