

AI時代のヒューマンファクターデザイン

立命館大学・教授 近本知行

■ヒューマンファクターの導入

従来、建築や室内環境の制御では、空間のどこにいても誰もが快適に過ごせるよう、温度、湿度、気流、CO₂濃度、照度などの物理量をセンシングし、それらを「快適とされる一定範囲」に維持することを目標としてきた。しかし、人が感じる快適性は単純な物理条件だけで決まるものではない。体温や皮膚温、活動量、心拍数、さらには睡眠状態や疲労度など、人の生理状態によって同じ環境でも感じ方は大きく異なる。また、人の状態は時間帯や作業内容、心理状態によって常に変化している。

このような人の非定常的な特性を考えると、環境要素のみを一定範囲に保つ従来の制御だけでは、本質的に快適な環境を実現することは難しい。人が環境をどのように知覚し、どのような生理反応や心理反応を示すのかという視点を取り入れることが重要となる。

こうした人の特性を中心に据えて環境や設備システムを設計する考え方は「ヒューマンファクター」^{※1)}と呼ばれ、近年、建築環境工学や空調分野においても注目されている。さらにAIやセンシング技術の進展により、人の状態をリアルタイムで把握しながら環境制御を行う可能性が現実のものとなりつつある。本稿では、人の生理・心理特性と環境との関係を示す研究事例を紹介するとともに、AI時代の建築環境制御の可能性について考えてみたい。

●人の移動による環境体験の違い

同じ環境でも実際に人の感じ方が異なってくる例として兵庫県立芸術文化センターで検討した内容を紹介する^{※2)}。この研究では夏期に、駅からホールに着席するまでの移動過程において、人がどのように感じるかを検討した。実験は、夏場の非常に暑い32°Cの屋外から、ホールに至る経路で32°Cから28°C、ホールでは26°Cとゆっくりと温度を変えていってあげる「順応ケース」と、それとは反対に、一旦、寒い環境を経験する「コールドショックケース」の2つを設定した。コールドショックケースは、暑い屋外から喫茶店に入ったとき寒いくらいクーラーをかけていると気持ちいいと感じるイメージである。

順応ケースでは26°Cのホールに到達した後に、実線で示した快適感が上がり、点線の温冷感は涼に近づく。コールドショックケースだと、一旦、快適感、温冷感ともに中立に近づくが、ホールに入ると温かさが増し、快適性が崩れてしまう結果となった。この違いは、体の中の生理反応が影響していると思われる。脳血流計を用いたTOIという「生理活動量の強度」の計測では、順応ケースでは生理量の大きな変化は見られない反面、コールドショックケースでは、寒さに対する適応で生理量が高まり、血流が活発になったことで、産熱し、結果的にホール到着後に涼しさが薄らいだ(図2)。

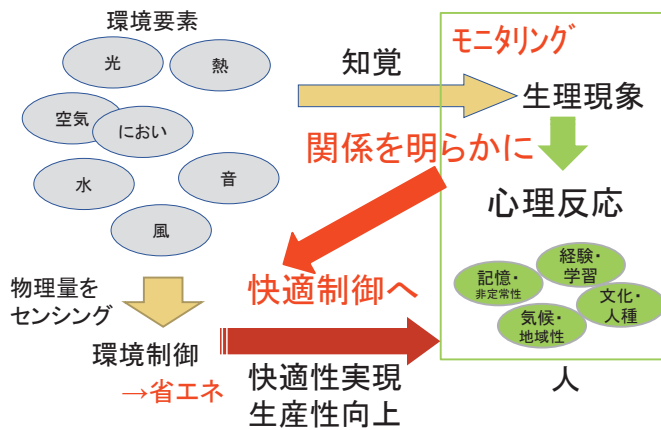


図1 ヒューマンファクターによる快適制御

■人の感じ方は環境条件だけでは決まらない

ヒューマンファクターを考えるにあたっては、その人が環境要素をいかに知覚し、人の体内で起こる生理現象、さらに、そのことによってどのような心理反応が促されているかということを知ることが重要となる。生理現象さえわからないことが多い上に、心理に至っては、記憶・非正常性、あるいは経験・学習、文化・人種、気候・地域性などに大きく左右され複雑極まりない。家庭では自分自身で気持ちいいと感じるようにエアコンや照明のスイッチをオン、オフし、吹き出し口の向きや風量を変え、カーテンや窓の開閉をすればいいのかもしれないが、多くの執務者と同じ空間を共にしているオフィスではなかなか難しく、空調システムや制御法の開発とともに人の特性から学ぶことが鍵となる。

以下では、人の感じ方が環境条件だけでは説明できないことを示すいくつかの研究事例を紹介する。

(1) Case 1.2 (順応、共通ロビーに30 min 滞在)

(2) Case 2.2 (コールドショック、エントランスロビーに30 min 滞在)

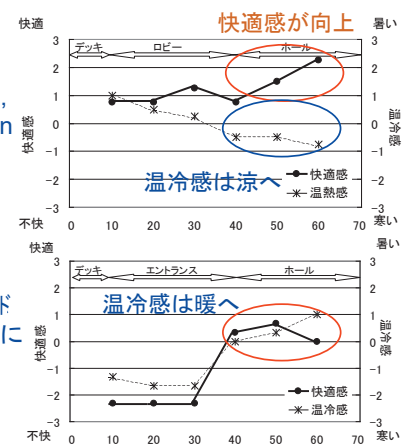


図2 Case 1.2 (順応) とCase2.2 (コールドショック) の比較

●外気温度の変化による快適温度（中立温度）の変化

次に、夏期に空調された屋内で過ごしながら、快適と感じる中立温度が変化するかを検討した研究である^{※3)}。

結果は省略するが、まず普通に室内にいた状態での実験である。室内にいて、当然ではあるが外気温度が変化しても快適と考える中立温度は変わらないはずである。しかし外気温が上昇している時間帯にその変化をある程度感じるという結果が現れた。室中で過ごしているのに、外気温度が上昇していることを想像し、自分自身で中立温度を変化させた可能性がある。

今度は、室内で過ごしながらも外気温を教えるという実験である。結果は外気温が高ければ高いほど、自分が快適だと思う温度を自身で高めに誘導してしまうというものだった。

さらに、1回外に出て暑さを体験するという行為を挟んだ実験である。これまでよりもさらに中立温度が上がり、また高い温度となっても快適だと認識しているという結果であった。

●一日の気温の変化の感じ方に合わせた制御の可能性

一般的に空調の設定温度は終日一定に制御されている。一方でオフィスワーカーの代謝量は入社後や昼食後をはじめ、一日の行動履歴に合わせて変化している。この代謝量の変化により、室温一定の空間内であっても暑い・寒いなど不快に感じることがある。そこで代謝量の変化に合わせて、不快感を和らげる方向に室温を制御することにより、オフィスワーカーにとってより快適で生産効率の高い空間を生み出せるのではないだろうか、と考えた。

そこで、一日の行動パターンに基づいて室温変動を行った被験者実験を行い、室温変動がオフィスワーカーの心理・生理に及ぼす影響を調査した^{文4)}。実はこの制御は設計者時代に1999年竣工のアジア経済研究所で実際に導入したもので、その検証でもある。

実験の室温設定及び手順を示す(図3)。case1を室温一定(26°C)、case2を室温変動(25~28°C)としている。まず、被験者に前室(24°C)で安静にてもらい(15分)、次に出勤時の代謝量を再現するためにスクワット運動(5 Mets)を行った(5分)。その後、実験室にて実験準備を行いつつ、実験開始まで安静にてもらった(10分)。

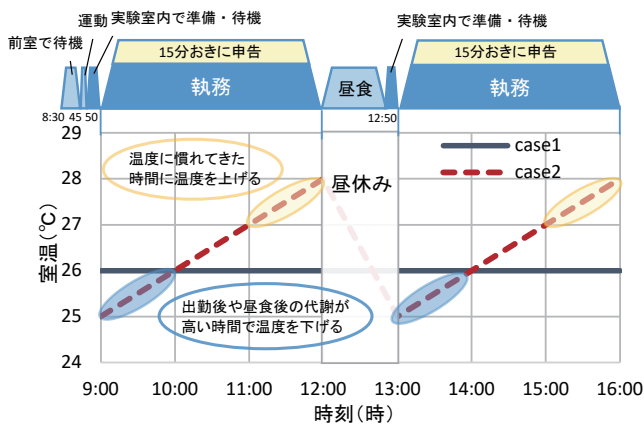


図3 一日の変化を与えた実験

結果は省略するが、9時台、13時台は暑い・不快側の申告が緩和され、9時台は出勤を模擬した運動、13時台は食事によって代謝量が大きくなるが、設定室温低下が有効であった。一方、10時台、11時台、14時台には、室温を緩和しても許容され、室温が高いにも関わらず、温冷感や快適感で不利になっていないという結果となり、1日の外気温度変化に対する経験や情報・体感は、快適と感じる中立温度を修正することがわかり、室温変動制御が有効であった。

●情報による温冷感の変化

快適だと思う温度を、自分自身で操作をしている可能性に関し、少しやり過ぎではあるものの、あえて「うその情報」を流す実験を行った^{文5)}。

正しい温度情報、外気温度を与えるケースに加え、「ちょっと高い」と、うその情報を与える。あるいは「低い」と反対の情報を与えるという実験である。正しい温度上昇に対して、少しだけ高いという情報を与えると、涼しい側の申告が増加した。外は暑いだろうから、それに比べて部屋の中は涼しいはずだと、外よりも十分涼しいという認識をしたものである。快適感に関しても同様に、快適と感じる比率が増えた。うそばかりついていると、そのうち慣れてしまうが、情報により温冷感を操作することができた。

●コミュニケーション、競争意識による温冷感の変化

コミュニケーションによっても感じ方が変わるという例である^{文6)}。実験は大阪ガスの北部事業所で行った。BEICSというBEMSにコミュニケーションシステムを載せたツールを入れてこういった画面を執務者に表示している(図4)。

ここでは、各フロアの温度を出し、各フロアでの省エネの達成率を表示して、そのフロアごとの競争をすることができるようにしており執務者の「競争意識」を促している。Opowerというアメリカの会社は顧客の省エネ対策推進にAIと行動科学を取り入れ、省エネ達成度によるランキングとランキングを上げるための具体的な省エネ対策のアドバイスという事業を進めている。こういったことは東京電力の「でんき家計簿」や関西電力の「はびeみる電」でも行われており、同じことがフロア間のエネルギー消費の対決による省エネ行動の向上につながっていた。



図4 コミュニケーションBEMSの画面例

●無知覚の環境要素による意識の変化

さらに、温熱環境の要素だけではなく他の要素も影響するのではないかと検討したのが、立命館中・高の長岡京キャンパスで、室内の環境の変化と生徒の図形テストの成績との関係を解析したものである(図5)^{文7)}。

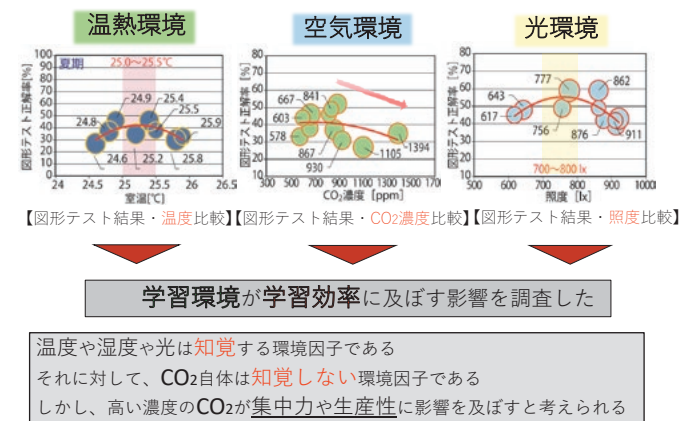


図5 環境の変化と学習効率の関係

まずは温熱環境と光環境。左側の結果が夏期冷房時の温熱環境による成績の変化のグラフ、右側が光環境と成績のグラフである。温熱環境では成績が一番高くなるのが25~25.5°Cということで、それより暑くなると成績が下がる。それよりも寒くなっても下がる。光環境も大体700~800ルクスぐらいでピークになる。

そして空気環境。CO₂は無味無臭なので実際の濃度なんて感じることはないはずだが、CO₂濃度が高くなると成績が下がってしまうという結果になった。建築基準法でのCO₂濃度の上限は1,000ppmで、学校建築の場合は1,500ppm上限ではあるが、学校の教室であっても1,000ppmから1,500ppmでも成績が下がってしまうという結果となった。

CO₂は知覚しない環境因子であっても、集中力や生産性に影響を及ぼす。実験室でCO₂濃度を600、1,500、3,500ppmと変えていった^{文8)}。

1,500ppmは1人着座でしばらく作業した状態、3,500ppmが複数

人着座でのイメージになる。実際に温度と湿度それから照度を一定に保つことのできる実験室で実験したものである(図6)。

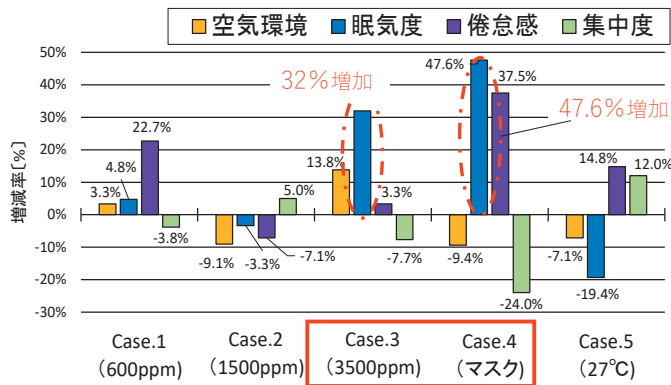


図6 CO₂濃度変化に伴う作業前後の申告値の変化

CO₂濃度が上がると、眠気感がまずは大きくなる。コロナ以降マスクをつけることも増えたが、マスク内のCO₂濃度は5,000ppmから20,000ppmと非常に高いCO₂濃度になっている。コロナ禍の期間中、日常的にマスクを付けていたと思うが、空気環境的にはあまりよくない状態を過ごしていたことになる。

比較対象として、26°Cから27°Cに温度を上げたケースを示しているが、温度を上げて、27°Cぐらいだと大した影響はでない。しかしながらCO₂濃度を上昇させると、倦怠感が特にマスクをした状態で大きく増えており、作業前後で集中力が下がったという結果になっている。部屋の環境要素の変化にあまり気づかない状態であっても、その人の快適性や、作業性、生産性にも影響を及ぼしている。CO₂濃度の上昇によりタイピング時の入力文字数も下がり、誤入力率も上昇した。さらに先ほどのTOIも変化し、血流量とも関係し、いろいろな生理量とも密接に関係しているというようところがわかってきた。

●渦輪を用いたパーソナル空調

さて今度はいかに設備システムに導入するかである。空調でヒューマンファクターを最も実現しやすいものに「パーソナル空調」が挙げられる。その中でも「渦輪」を使ったパーソナル空調に取り組んでいる。でんじろうの空気砲といったほうがわかるかもしれない。箱をぼんとたたくと、輪っかがぼんと出てくるものである。この輪っか、つまり「渦輪」は非常に直進性がある、ピンポイントに人に当てることができる(図7)。



図7 渦輪を用いたパーソナル空調

連続して十分な量の渦輪を送出可能な吹き出し装置を開発し、渦の送出量、送出間隔、送出速度などを変化して渦輪の挙動、渦の崩壊現象の解明の他、被験者を使った快適性の検証実験を行っている²⁹⁾。その結果、パーソナル空調としての有効性や、個人の好みに応じて快適性や涼しさを制御できることがわかってきた。これは人に当たったところの写真を見ているが、風量が多く背中全体に当たってしまうCase3は意外と気持ちよく感じず、人の首

筋に効率的に当たるCase2のほうが快適だという結果が得られた(図8)。

あくまでも次世代の空調の可能性として検討している一例ではあるが、個人個人をターゲットにした空調制御につながる。一方で、その人の位置や、その時々感じ方を把握したうえで快適性につなげることが前提となる。

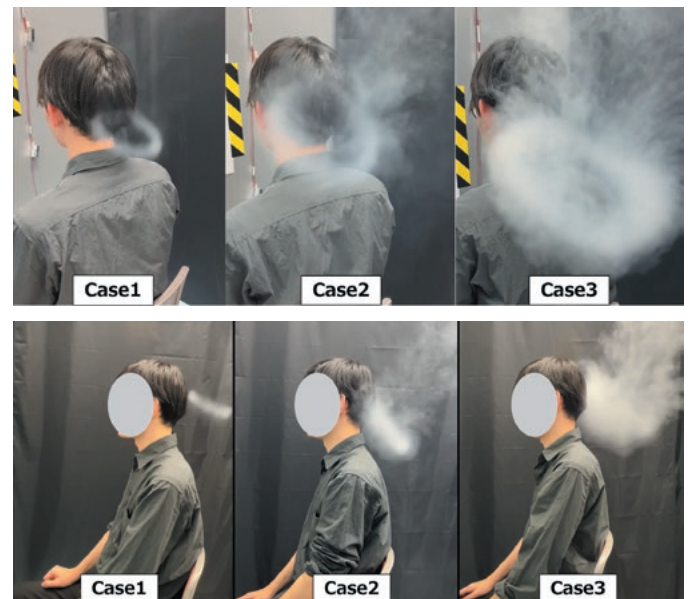


図8 風量変化による渦輪の到達 (case1→3で風量大)

■AIによりヒューマンファクターデザインが進化

●センサー技術

ヒューマンファクターを建築環境の制御に取り込もうとすると、近年急速に発展しているセンサーやAI技術の活用が大きな可能性を持つ。従来から、温度、湿度、CO₂濃度、照度といった物理量をセンシングして制御につなげていたと述べたが、多くの環境要素がセンシングされていたわけでもなく、居住域の環境や空間分布が把握できていたわけでもなく、環境要素の時間変化も詳細にわかっていただけでもない。

しかし、近年、安価で小型のセンサーが次々と開発されている。さらに人の状態そのものをセンシングし、それを環境制御に反映させる仕組みも整いつつあり、ウェアラブルセンサーや非接触型バイタルセンシング技術の進展により、心拍数、皮膚温、呼吸状態、活動量などの生体情報をリアルタイムで取得することが可能になってきている。

●AI解析

これらのデータをAIによって解析することで、人がどのような状態にあるのか、快適であるのか、あるいは疲労やストレスを感じているのかといった状態推定が可能となる。さらに、過去の環境条件と人の反応との関係を学習させることで、個人あるいは集団にとって望ましい環境条件を予測し、それに基づいた制御を行うことができるようになる。

●エッジコンピューティング

このような制御を実現するうえで重要となるのが、まずはIoT端末や、BEMSなどビル側のコンピューターでのデータ処理によるエッジコンピューティングの活用である。建物内に設置されたセンサーなどから得られるデータは非常に多く、また環境制御には即時性が求められる。例えば、執務空間において人の集中度が低下している兆候が検出された場合、照明の明るさや色温度を調整したり、空調の風量や気流を変化させたりすることで、短時間のうちに環境を変化させる必要がある。このようなリアルタイム制御では、クラウドを経由した処理では遅延が生じる可能性があ

るため、空間内のエッジコンピュータでデータ処理と制御判断を行うことが有効である。エッジコンピューティングによって、空間のセンシングと設備制御を一体化させた高速なフィードバックループを構築することができる。

●クラウドコンピューティング

一方で、エッジだけでは十分ではない。建物単体の制御を超えた最適化を考える場合、クラウドコンピューティングによる大規模なデータ分析と予測制御が重要となる。建築環境は、外気条件、日射、利用人数、時間帯など多くの要因によって変動する。これらのデータを長期間にわたって蓄積し、AIによって分析することで、将来の環境変化やエネルギー需要を予測することが可能になる。気象予測と建物利用パターンを組み合わせることで、翌日の空調負荷を事前に推定し、設備の運転計画を最適化することもできる。また、複数の建物データを統合的に分析することで、建物ごとの利用特性や地域特性を踏まえたエネルギー運用戦略を構築することも可能。

●地域全体のエネルギーマネージメント

さらに、こうした建物単位の制御は地域全体のエネルギー管理とも密接に関係してくる。近年、再生可能エネルギーの導入が進む一方で、その発電量は天候などによって大きく変動する。このような状況では、エネルギー供給側だけでなく需要側の制御、すなわちデマンドレスポンスが重要となる。AIによる需要予測と環境制御を組み合わせることで、建物の快適性や生産性を損なうことなく、エネルギー需要を調整することが可能になる。例えば、地域全体の電力需要が高まる時間帯には、AIが建物の熱容量や利用状況を考慮しながら空調運転を調整し、ピーク電力を抑制することができる。このような仕組みは、単なる建物制御にとどまらず、地域全体のエネルギーマネージメントを支える基盤となる。

また、エネルギー管理の対象は建物の内部に限られない。電気自動車の充電、蓄電池、さらには地域の再生可能エネルギー設備など、多様なエネルギー資源を統合的に管理することで、都市スケールでのエネルギー最適化が可能になる。クラウド上でこれらの情報を統合し、AIによって需給バランスを調整することで、脱炭素社会の実現に向けた新しい都市エネルギーシステムを構築することができるだろう。

このように、ヒューマンファクターを中心に据えた建築環境制御は、単に室内の快適性を高める技術にとどまらない。人の状態を理解し、それに応じて環境を柔軟に変化させる建築は、人間の健康や生産性の向上に寄与すると同時に、エネルギー利用の最適化にもつながる。AI、エッジコンピューティング、クラウドコンピューティングといった技術を組み合わせることで、人と環境、そしてエネルギーシステムを統合的に捉える新しい建築環境工学の姿が見えてきているのである。今後は、人間理解を基盤としたヒューマンファクター研究と、データ駆動型の環境制御技術とを融合させることで、人間中心で持続可能な建築・都市環境の実現が期待される。

●カーボンニュートラルにつながる行動変容へ

人との関係を明らかにすることで、人の行動変容、無意識に行動を促すような、そういう仕掛けづくりを行うことでカーボンニュートラルにつなげることができると考えられる。いわゆる「ナッジ」と呼ばれているものである。

立命館大学大阪いばらきキャンパスH棟では、デジタルツインというコンセプトで、建物各所に温湿度やCO₂濃度、風速などを測定するセンサーを設置している。また、人流を計測できるシステムを導入しており、どこからどういうふうにな人が移動していったか、あるいは、その移動する場所の環境はどうだったかというようなところをセンシングできる仕掛けが盛り込まれている。この仕掛けを利用して、今まさに行動変容の実証実験を行っているところ

である。カーボンニュートラルに対する意識をどう植え付けていくか、あるいは体感させるのか、またインセンティブのあり方はどうすべきかなど考えて、学生の被験者にアプリを使ってもらいながら実験をやっていききたい。

■AI時代の建築環境工学の方向性

急速に、仕事でも生活でもAIが身近で欠かせなくなっている。このような時代だからこそ、自らが主となり、人を中心に考え（ヒューマンセントリック）、人の感じ方を重視することが必要と考える。一方、AIの利用の幅は大きく広がり、環境要素や人のモニタリング、人の感じ方との関係性を明らかにできれば快適制御につながるのではないかなと思っており、このメカニズムを少しずつでも解明することで快適性実現、あるいは生産性向上につなげることができると思っている。

同時に、オフィス環境をどう構築していくのか。そこで働く人の生理量、バイタルデータや心理量、主観申告値をモニターするというのはなかなか難しいが、働く人がどう感じているかということはある程度予測しながら、それらの関係性をより深く見ていくことで、いろいろな人に適合した、その人が自分の意思でいろいろと変更できる、それこそ人を中心としたオフィス環境につながっていくのではと思っている。

省エネや環境負荷削減に対する努力を強要するのではなく、自ら無意識の行動選択を取ることでエネルギーを節約することが重要であり、これらを目標に今後とも研究を進めていければと思う。

参考文献

- 文1) 日本建築学会編「環境のヒューマンファクターデザインー健康で快適な次世代省エネ建築へ」、井上書院、2020年9月
- 文2) 近本知行「人体周辺の温熱環境変化を考慮したアダプティブ制御」立命館大学政策科学会 政策科学17巻特別号、pp.137-143、2010年3月
- 文3) 近本知行、伊藤紘一他「夏期における外気温度変化が熱的快適性へ及ぼす影響に関する研究（その1～2）」日本建築学会大会環境工学II、pp.339-342、2013年8月
- 文4) 亀山大介、近本知行「ヒューマンファクターを組み込んだ空調システム・制御システムの構築（その6）一日の代謝量変化に合わせた緩やかな室温変化が人の快適性に与える影響の検証」日本建築学会大会環境工学II、pp.963-964、2017年8月
- 文5) 石田純音、近本知行他「ヒューマンファクターを組み込んだ空調システム・制御システムの構築（その11）夏期の外気温度・視覚・聴覚の情報操作及び変動制御が執務者に与える影響」空気調和・衛生工学会大会第3巻、pp.137-146、2018年9月
- 文6) 植田浩文他「H事業所低炭素化改修の運用効果の検証（その1～5）」日本建築学会大会環境工学II、pp.1137-1146、2013年8月
- 文7) 三村凌央、近本知行他「教室の学習環境と学習効果に関する研究（第6報）移転後の夏期・中間期・冬期における学習環境と学習効果に関する調査検証」空気調和・衛生工学会大会第8巻、pp.405-408、2016年9月
- 文8) Chikamoto, T., Nimura, R. "Influence of Carbon Dioxide Fluctuation and Thermal Environment on Workability, Physiology and Psychology", The 13th REHVA World Congress CLIMA 2019, 2019年5月
- 文9) Chikamoto, T., Ueda, K., (2023) Subject experiment on personal air-conditioning airflow using a vortex ring, The 11th International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation & Energy Conservation in Buildings (IAQVEC2023), E3S Web of Conf. Volume 396, 2023年5月



ちかもと・ともき

日建設計を経て、2004年より立命館大学理工学部建築都市デザイン学科。立命館大学サステイナビリティ学術センター長、東京大学生産技術研究所フェローを兼務。