

# 健康・快適・省エネに向けた 熱・空気センシング

東京理科大学 創域理工学部 建築学科 准教授 <sup>たか</sup>高瀬 <sup>こうぞう</sup>幸造

## 1. はじめに

意匠、計画、構造、材料、防災等、いくつもの専門分野に分かれている建築学の中で、私の専門分野は建築環境工学というものである。さらにその中でも、主に熱環境を専門とし、室内における空調方式ごとの温熱環境や、外皮（外壁・天井・床や窓等）の断熱性能および遮熱性能が室内環境や空調消費エネルギーに与える影響について日々研究を行っている。

近年、建設業界では建設資材と人件費の高騰に加えて、エネルギーコストの上昇に伴い、建物が建設された後に人が利用し始めてからの運用コストの削減もこれまで以上に重要視されるようになってきた。住宅においては、高断熱・高气密化の必要性が一般にも急速に認識されてきており、快適で省エネな住宅に住むことを希望する建主も急増している印象がある。書店には専門家向けだけでなく、一般向けにも省エネ住宅の解説書が多く並び、YouTube では「住宅 省エネ」とか「住宅 断熱」などと検索すると、沢山の動画がヒットする。ただし、YouTube には科学的根拠に基づかないで誤解を招くような動画も多くアップロードされているので、必ずしも視聴者が正しい知識を得ることができるとは限らないという点において注意が必要である。

また、建築物省エネ法において 2025 年 4 月よりすべての住宅および建築物に対して、省エネ基準に適合することが義務づけられた。一方で、ギリギリで省エネ基準適合となる程度の住宅の外皮性能では十分に快適な室内環境を得ることができないということが広く認知されている。東京などの温暖地における戸建住宅を対象とした温熱シミュレーションでは、暖房を就寝時間中に停止している状況では、冬期の最低室温は 10℃ 程度まで低下することになる。そのためハウスメーカーや工務店も、自社が建設する住宅の性能競争を繰り広げており、冬に暖かく夏に涼しい快適かつ省エネな住宅を購入できる状況が整ってきている。省エネ基準に関する情報は、国交省のホームページ等で一般の方向けのチラシやパンフレット、マンガも公開さ

れているので、興味がある方は参考にさせていただきたい。

## 2. 建物の環境総合性能評価

省エネルギーや環境負荷の少ない資機材の使用といった環境配慮はもとより、室内の快適性や景観への配慮なども含めた建物の品質を総合的に評価するシステムとして、国内では 2001 年以降に CASBEE（キャスビー）というものが開発された。この特徴は以下の 3 点である。

- ・建築物のライフサイクルを通じた評価が可能
- ・「建築物の環境品質 (Q)」と「建築物の環境負荷 (L)」の両側面から評価
- ・「環境効率」の考え方をを用いて新たに開発された評価指標「BEE (建築物の環境性能効率, Built Environment Efficiency)」で評価

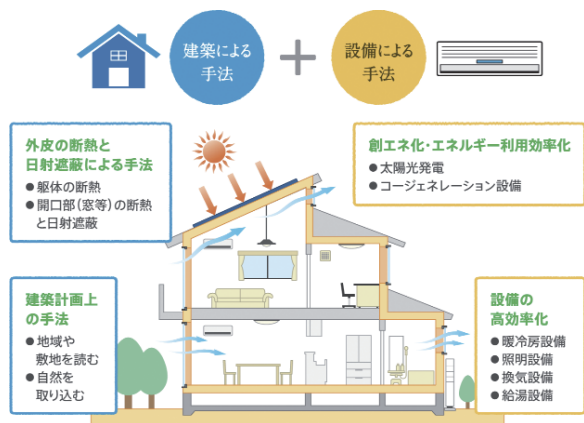
「建物の環境品質 Q (Quality)」を「環境負荷 L (Load)」で割った BEE 値による評価結果として、「S ランク (素晴らしい)」から、「A ランク (大変良い)」「B+ ランク (良い)」「B- ランク (やや劣る)」「C ランク (劣る)」という 5 段階のランキングが与えられる。建物内の環境品質 Q が高いほど、また敷地外への環境影響 L が小さいほど BEE 値が高得点となる。

また国内でも米国で開発された LEED (リード) という環境総合性能評価システムが用いられることも増えてきた。LEED で評価される項目は、以下のとおりである。

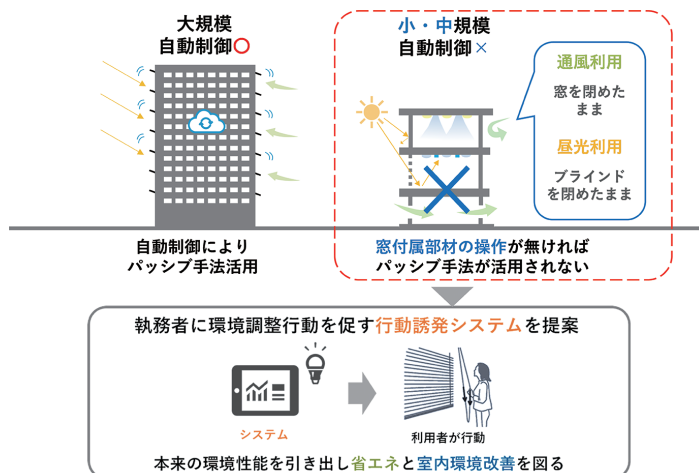
- ・立地と交通 (location & Transportation)
- ・敷地の持続可能性 (Sustainable Sites)
- ・効率的な水利用 (Water Efficiency)
- ・エネルギーと大気 (Energy & Atmosphere)
- ・材料と資源 (Materials & Resources)
- ・室内環境品質 (Indoor Environmental Quality)

評価としては、各項目の合計点に応じて「Certified, Silver, Gold, Platinum」の 4 段階で認証される。

さらに、WELL (ウェル) という、人間の健康に焦点を置いた国際的な環境評価システムもここ 10 年くらいで広く認知されてきており、国内での取得件数も



【図1】 建築による「パッシブ手法」と設備による「アクティブ手法」のイメージ(参考文献<sup>1)</sup>)



【図2】 自動制御と手動による環境調整行動誘発システムによるパッシブ手法の活用

増加している。WELLでは、空気・水・食物・光・運動・温熱快適性・音・材料・心・コミュニティの10のコンセプトについて、それぞれの評価項目(必須項目および加点項目)を満たす必要がある。

これらは一例であり、今日では住宅・建築の内外において、様々な環境要素の評価が必要となっている。

### 3. 実運用で「パッシブ手法」が機能するためには？

空調や照明等の設備によって室内環境を調整する手法を「アクティブ手法」といい、自然採光や通風利用、冬期に窓から入る日射熱によって室内を暖かくすること等、自然エネルギーを活用して快適性や省エネ性を得る手法のことを「パッシブ手法」という。前者の設備による手法によって消費されるエネルギーを低減するためには、後者の建築による手法によって機械・電気設備無しでも自然エネルギーで室内環境を適切に調整可能としておく必要がある【図1】。

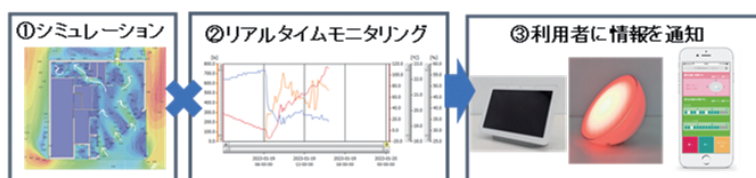
しかし、実際に建物が建設されて人々が利用し始めてから、その環境性能や省エネ性能が十分に発揮されているかという点、そうとは限らない。例えば、オフィスや家庭において、一日中ブラインドやカーテンが閉じっぱなしという状況は良くあることだろう。オフィス等では窓から入ってくる自然光によって室内が明るい時には、天井の明るさセンサーが感知してLED照明の出力を下げる制御によって照明のための消費電力を削減するという計画のものもあるが、太陽光が眩しくない時間帯においては、積極的にカーテンやブラインドなどの窓付属部材を操作しないと省エネ効果が小さくなってしまう。一方で、大規模ビル等では、自動制御で開閉するブラインドが備わっている場合もある。しかし、自動で動くことが建物利用者にとっては

煩わしいというクレームになることもあり、結局は手動に切り替えてしまっている建物も多いと聞く。

また、暑くも寒くもない時期には窓を開けて通風を行うことも重要である。設計者が工夫して窓開けができるような建物を計画したとしても、実際の運用において、一般の建物利用者が窓を開けるのに適した室内外環境になっているかを判断することは難しい。

### 4. 環境調整行動誘発システムの開発と実証

そこで、当研究室では、複数のセンサーを用いて室内外環境を計測したデータに基づいてリアルタイムで判断する自動制御と並行して、これらのデータを用いて手動による環境調整行動を誘発するシステムの開発・実証を進めている【図2】。これらシステムをうまく活用することで、建物利用者の満足度を得ながら、快適かつ省エネな運用ができるのではないかと期待している。自動制御によりパッシブ手法を最大限活用する建物は、大規模建築で施工費も膨大な場合が多い。それに対して、構想した環境調整行動誘発システムは、クラウド上で汎用製品の各種センサーの値を集約してアドバイス内容を判断して、建物利用者に通知するシステムを検討している。最近では市販の安価なセンサーでも、インターネット経由でクラウド上にデータをアップロードできる機能を持つものが多い。さらにAPI(Application Programming Interface)が公開されているものを組み合わせれば、ソフトウェア・ハードウェア間で、高度で複雑な制御が可能になる。これまでの自動制御システムは専門業者によって制御ロジックがブラックボックス化されており、改良するにもカスタマイズのためのコストや時間が多く費やされるものであったが、建築環境工学、建築設備に加えてプログラミングの多少のスキルがあれば、学生でも高度な制御を



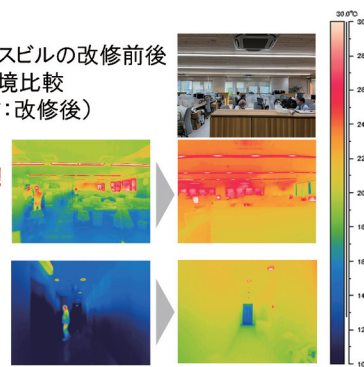
【図3】環境シミュレーションとリアルタイムモニタリングを活用した環境調整行動誘発システムのイメージ



【図5】オフィスビルで実証中の環境調整行動通知フロー

築30年のオフィスビルの改修前後の冬期・温熱環境比較  
(左:改修前、右:改修後)

足元まで暖かく  
廊下も寒くない！



【図4】オフィスビル改修における冬期温熱環境改善効果



【図6】環境調整行動誘発システム実装実験の協力依頼ポスター

組むことが可能となっている。これまでに、2019年度から2022年度にかけて、科研費(課題番号19K04738)「パッシブ型建築における環境シミュレーションを用いた環境調整行動誘発システムの開発」にて、環境調整行動誘発システムの開発と実証を行った。

開発にあたっては、計測によるモニタリングだけではなく、環境シミュレーションによる環境予測データも活用することとした。センサーを用いた測定では、コストや場所の制約から設置位置が限られているために、必要な場所のリアルタイムデータを得ることができない可能性もある。一方で、環境シミュレーションでは、条件さえ決まってしまう空間上の任意の点の環境要素を可視化したり定量化できるために、測定データを環境シミュレーションによって補完することが可能になると考えた【図3】。

システム開発と並行して、愛知県名古屋市の築30年のオフィスビルの改修プロジェクトの性能評価に携わる機会を得ることができた。この建物は中規模オフィスビルだが、外断熱や高断熱窓サッシへの更新によって室内温熱環境の大幅な改善を狙った計画とされており、【図4】に示す通り温熱環境において大幅な改

善が見込まれた。誌面の都合上、データは割愛するが、冬期だけではなく夏期においても、改修前よりも涼しい室内環境を実現できている。

建物自体の外皮性能については大幅な改善ができていたことが確認できたので、より自然採光や通風利用を促進するために開発している環境調整行動誘発システムを導入させていただくこととした。改修前の運用では、ブラインドが閉じっぱなしとなっており、眺望を得ることができない環境だったため、直射日光が眩しくない時間帯においてはなるべくブラインドやロールスクリーンを巻き上げるように操作してもらえることを狙って、アドバイスを通知するシステムを実装した【図5】。執務者への通知方法は様々考えられるが、事前に検討の上で、手元の小型デバイスでのLED点灯による通知を行ったうえで、共用スペースに設置したタブレット端末の画面に、より具体的な操作内容を示すこととした。また、通風利用についても、事前のシミュレーション結果に基づいて外部風向ごとに通風利用効果が認められる外部風速の閾値を検討したうえで、屋上の気象計測センサーによってリアルタイムで計測された風向風速データも用いて、どの窓を開ける

べきか、もしくは通風利用に適していないのかということを経営空間にて通知することとした。【図6】は環境調整行動誘発システム実装実験の協力依頼ポスターの例である。せっかく通知システムを導入したとしても、執務者各位がどのようなシステムなのかを理解して、自らの執務環境を調整する意識を持つことが重要であるため、省エネ効果や生産性向上といった効果も訴えて、システムを有効活用していただくように依頼した。

まだ検証中ではあるものの、一連の実装実験において、一部の執務者にとってはシステムの有効性を実感いただけるような結果が得られているが、窓周りのブラインド等の操作をするのはごく一部のひと々であり、全体への浸透は難しいとも感じている。これまでは自然採光に特化した通知を出していたが、2025年度は通風利用促進のための通知も加えて、引き続き実証を行っていく予定である。

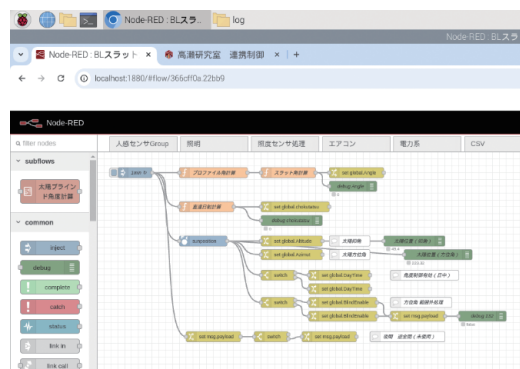
また、現在は私の研究室においても実証実験を行えるように設備機器の改修を行い、センサーとの連携制御ができるようにしている。【図7】は、研究室においてPCからの電文を受け付けるようにした天井吊りエアコンとLED電球、電動ブラインドの実装状況の写真である。別途キャンパス内に設置された屋外気象センサーのデータも読み込んで、【図8】に示すようなビジュアルプログラミング環境上でデータを処理して、各機器に制御指示信号を出している。システムの基本的な部分は専門業者の方に組んでいただいたが、センサーの追加や細かい制御内容の調整等については誰でもカスタマイズ可能となっている。センサーとPC（ここでは安価で小型のRaspberry Piを使用）間での通信が時折不安定な場面はあるものの、実際の環境の変化を感じながら制御を調整できることが楽しく、意図したように機器が動作した際には喜びを感じることもある。

## 5. さいごに

今回、様々な環境要素のセンシングを活用し、パッシブ手法を採用した建物における窓や設備機器の適切な操作を実現するための取り組みを紹介した。安価で使い勝手の良いセンサーやPC、マイコンが次々と登場しており、情報系が専門でない私たちのような研究室でもある程度自由に建物利用者に対する環境行動通知を出したり、設備機器に向かって自動制御指示を出すことが可能となっている。また今後は、AIや深層学習なども活用していきたいと考えている。Apple社のiPhoneやTesla社の電気自動車のような優れた使



【図7】 高瀬研究室で導入している照明・エアコン・ブラインドの自動制御実装状況



【図8】 Raspberry Pi上のNode Red環境における設備機器自動制御のためのビジュアルプログラミング

い勝手のスマートハウスやスマートビルの実現が待たれる一方で、人間が能動的に環境を感じながら室内環境の調整余地を持つことも必要なのではないかと思う。まだ試行錯誤の段階ではあるが、住宅の住まい手や建物の利用者がストレスなく適切に窓周りや設備の運用ができる将来を目指して、研究を進めていきたい。

## 【参考文献】

- 1) 一般社団法人 日本サステナブル建築協会・「住まい」から目指す幸せなエコライフ よくわかる住宅の省エネルギー基準  
<http://www.jsbc.or.jp/materials/ecolife.pdf>
- 2) 国土交通省・資料ライブラリー  
<https://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/house/04.html>
- 3) 一般財団法人 住宅・建築SDGs推進センター・CASBEE  
<https://www.ibecs.or.jp/CASBEE/>
- 4) GREEN BUILDING JAPAN・LEEDとは  
[https://www.gbj.or.jp/leed/about\\_leed/](https://www.gbj.or.jp/leed/about_leed/)
- 5) GREEN BUILDING JAPAN・WELLとは  
[https://www.gbj.or.jp/well/about\\_well/](https://www.gbj.or.jp/well/about_well/)
- 6) 独立行政法人 日本学術振興会・科研費研究成果トピックス「環境シミュレーションとIoTセンサを活用した環境調整行動を誘発するナッジシステムの開発」  
[https://www.jsps.go.jp/file/storage/kaken\\_37\\_topics/00429-32660-20739148.pdf](https://www.jsps.go.jp/file/storage/kaken_37_topics/00429-32660-20739148.pdf)