

令和 3 年 4 月 20 日現在

機関番号：32613

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04462

研究課題名(和文) 建築の省エネ化投資の不確実性を反映した経済性評価

研究課題名(英文) Economic evaluation of risk of investment in energy conservation of building

研究代表者

富樫 英介 (Togashi, Eisuke)

工学院大学・建築学部(公私立大学の部局等)・准教授

研究者番号：00547078

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では建築の省エネルギー投資の価値を一般金融商品と比較可能な方法で定量化するため、その投資の不確実性を明らかにした。まず、気象条件や執務者行動などの確率モデルを取り込むことで、モンテカルロ法によりシミュレーションで不確実性を評価した。また、制御系を含む精緻なシミュレーションモデルを開発し、これらに対して仮想的な運用管理を競わせる選手権を開催することで、多数の仮想的な運用データを収集した。これらの運用データを分析することで、運用に伴う不確実性を定量的に捉えた。上記の成果は査読付の国内論文3報と国外論文3報にまとめられている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の建築エネルギーシミュレーションは確定的な境界条件によって期待値を予測するものであったが、本研究では投資評価に必要な不確実性を表現する方法を検討している。この結果、一般の金融商品への投資と建築省エネルギー投資の比較可能性が高まり、社会全体での最適資源配分につながる。また、設備の運用がエネルギー消費に影響を与えることは多くの者が経験的に知ることだが、その不確実性をはじめて定量的に評価することに成功しており、運用改善によるエネルギー削減への動機を高めることになる。

研究成果の概要(英文)：In order to quantify the value of investment in energy efficiency and conservation in buildings in a way that is comparable to general financial instruments, this study clarified the uncertainty of such investment. First, we evaluated the uncertainty by simulation using the Monte Carlo method by incorporating a stochastic model of weather conditions and office worker behavior. In addition, we developed an elaborate simulation model including the control system, and collected a large number of virtual operational data by holding a championship in which participants competed in virtual operations against the model. By analyzing these operational data, we quantified the uncertainty associated with the operations. The above results have been summarized in three refereed domestic refereed papers and three refereed international papers.

研究分野：建築環境

キーワード：建築設備 エネルギー 金融工学 リスク 運用 エミュレータ 不確実性 モンテカルロ法

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、建物の年間一次エネルギー消費量をネットでゼロ又は概ねゼロとする「ZEB (Zero Energy Building)」に関して多くの研究が開始されている。ZEB の普及と定着のためには、建築設備の省エネルギー化投資 (以下、建築省エネ投資) が経済的に成立し、十分に合理的であることを証明する必要がある。ところで、一般に投資はリスクとリターンの両面から評価が行われることが多い。従って建築省エネ投資と金融商品一般との比較可能性を確保するためには、建築投資に関わる不確実性を評価する技術を確立しなければならない。

2. 研究の目的

上記の研究背景を受けて、本研究は建築の省エネルギー化投資の価値を一般金融商品と比較可能な形で表現することで、不動産の環境性能に関する投資規模を社会全体で最適化し、良質な環境不動産のストックを拡大させることを最終目標とする。このため、建築のエネルギー消費に影響を与える各種の要素の不確実性を定量的に評価する技術を開発することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では以下に示す二つの手段によって建築のエネルギー消費の不確実性を捉えた。

(1) 建築のエネルギー消費に影響を与える各種の要素を確率モデルとして表現し、モンテカルロ法を適用することで、省エネルギー化設備の導入の効果を確率的に表現する。本研究では、この確率的特性を基礎に金融工学に基づく分析を行い、一般金融商品と同様の尺度で省エネルギー化に関する投資価値の定量的に評価した。

(2) リアリティの高いシミュレーションモデル (エミュレータ) を用いることで、全く同じハードウェア性能を持つ建物を仮想的に構築し、これらを複数の主体で運用することで運用に起因するエネルギー消費の不確実性を定量的に評価した。

4. 研究成果

(1) 省エネルギー投資の不確実性を反映した投資価値の金融工学的評価

典型的なオフィスビルを例に取り、執務者行動、テナント入退出、気象条件を確率モデルで表現することで、建物のエネルギー消費ならびに省エネ投資の内部収益率を確率分布として捉えた (図1)。これにより省エネ投資のリスクとリターンの関係や、個別の省エネ投資の相関性を定量的に評価することができるようになった。この確率特性を平均分散分析で評価することで金融工学的に省エネ投資の価値を評価した。現代ポートフォリオ理論を適用することで、

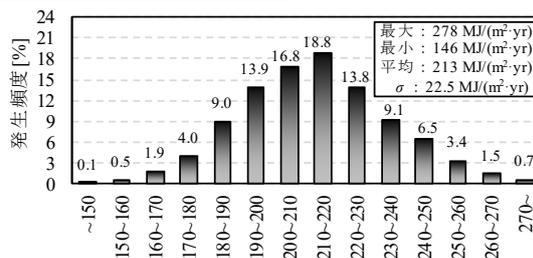


図1 建物エネルギー消費の確率分布

資金をそれぞれの省エネ投資に対してどのように割り振るかという最適投資配分の問題を解いた。従来のように単純投資回収年数が小さい順序で投資を行うのではなく、確率的な特性が逆傾向となる複数の省エネ投資を組み合わせることで、よりリスクが低くリターンの大きい投資ができることが示された。

(2) 建物運用の不確実性に起因する負荷の偏在がポンプのエネルギー消費に与える影響の評価

建築のシミュレーションにおいて一般に内部発熱条件は予め定められたスケジュールに沿って境界条件として与えられる。一方で、現実には執務者行動やテナント入退出という事象によって負荷は変化するため、その発生は不確実であり、偏在が生じる。本研究では確率モデルの導入によってこのような偏在を表現できるようになったため、この特徴を活かすことでポンプの省エネ制御の新たな評価方法を提案して報告した。近年、ポンプは系統ごとの二方弁開度を監視することで、負荷の偏在を反映して極限まで回転数を下げる最適運転法が導入され始めている。一方で、従来のシミュレーションモデルは二次側配管に簡易抵抗特性を仮定するため、このようなポンプの省エネ制御を適切に評価することができない。本研究では各系統の二方弁開度に影響を与える負荷の偏在を直接的に再現することで、現実にはポンプがどのような運転点で作動するのかを推定した。従来の簡易特性では、必要揚程はポンプ水量の2乗に比例するとみなすことが多かったが、本研究の計算によれば、平均的には水量の1.5乗に比例するということが明らかになった (図2)。

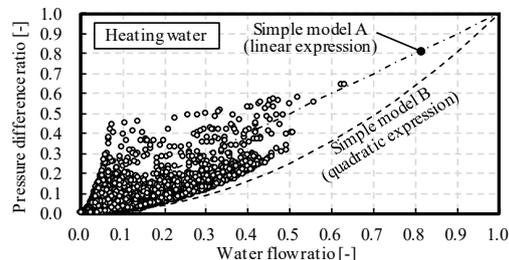


図2 負荷偏在を考慮したポンプの水量と必要揚程の関係

(3) 建物の運用技能に起因する不確実性を評価できるシミュレータの開発

従来の建物エネルギーシミュレータは、タイムステップを 1 時間とするものが主流だった。しかし、建物の運用技能の良否に起因する不確実性を評価するためには、各種の制御値による分秒単位の動作の違いを表現できる必要がある。そこでこのような高いリアリティを持つシミュレーションモデル(エミュレータ)を開発した。このため、(1)で開発したモデルに対して主に以下の機能拡張を行った。ア) 建物内を執務者が移動する様をマルコフ連鎖で表現、イ) 温湿度センサなどの計測器モデルと PID 制御などのモデルを導入することで分秒単位の制御を再現、ウ) 熱源や配管系にそれぞれ一時遅れモデルを追加、エ) 執務者の温冷感に関する確率モデルを導入して温冷感のばらつきを評価、オ) オープンプロトコルである BACnet 通信による設定値変更機能。これらの拡張により、例えば熱源システムの起動時間の適正化、PID パラメータの適正化、水や空気の設定温度の変更など、現実の建物で生じ得る各種の運用調整の効果が、省エネルギー性能と快適性の両面から評価できるようになった(図3)。多くの運用変更において、これらの両性能はトレードオフの関係になり、両性能をともに向上させるためには、適切に複数の運用調整を重ね合わせることが必要であることが示唆された。また、計算結果を踏まえて、両性能を組み合わせた総合評価指標を提案した。

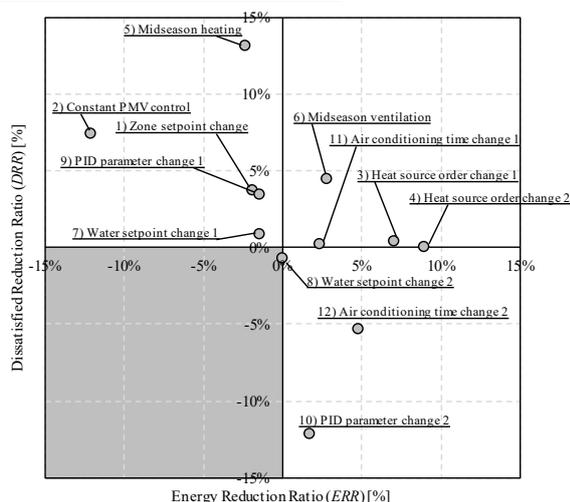


図3 運用の変更による建物性能の変化
(横軸：省エネルギー性、縦軸：快適性)

(4) 建物運用技能の良否に起因する不確実性の評価

(3)で開発したエミュレータを使うことで仮想建物の設備運用選手権を開催し、運用に起因する不確実性を定量的に評価した。サーバーにエミュレータを配置し、33組の運用者に仮想的な運用を行わせた。運用の評価は年間のエネルギー消費と快適性で評価され、1年間の計算は概ね現実時間の1日で終了する。各運用者は繰り返し運用改善に取り組むことが可能で、全部で339回の様々な運用が試行された。図4にそれぞれの運用結果を省エネルギー性と快適性の両軸にプロットした結果を示す。グラフで最も右上の点で運用できたものが選手権者であり、それぞれの運用者は右上方を目指して運用改善を続けた。選手権者はエネルギーを12.1%減らし、快適性を21.0%向上させる運用を考案した。

図5に建物の運用方法の違いによって生じるエネルギー性能(上)と快適性(下)の分布を示す。標準偏差は省エネルギー性能が5.9%、快適性が25.0%となった。参加者に提供されたエミュレータの建築躯体の仕様、設備の仕様、執務者行動、気象条件は全く同一条件としたため、このばらつきはハードウェアなどに起因するものではなく、純粋に設備の運用方法によるものである。選手権という形態をとったため、今回の試験には相対的に運用能力が高い者が参加していると推測できることから、このような運用技能の良否による性能の不確実性は、現実の建物ではさらに大きくなると予想される。

なお、本選手権を通じて生成された仮想的な運用データやエミュレータはすべて Web で公開し、後続の研究に自由に使えるようにした。

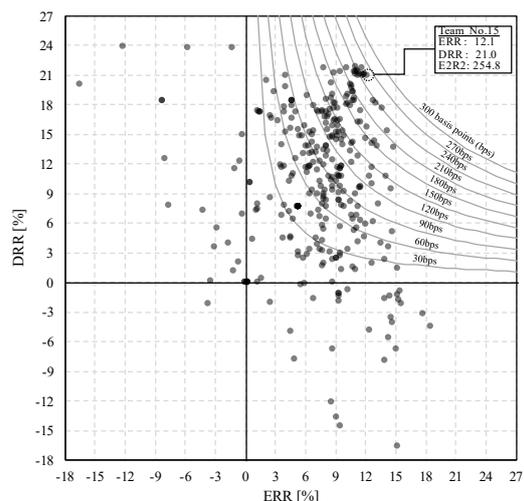


図4 339回の建物運用の結果の分布

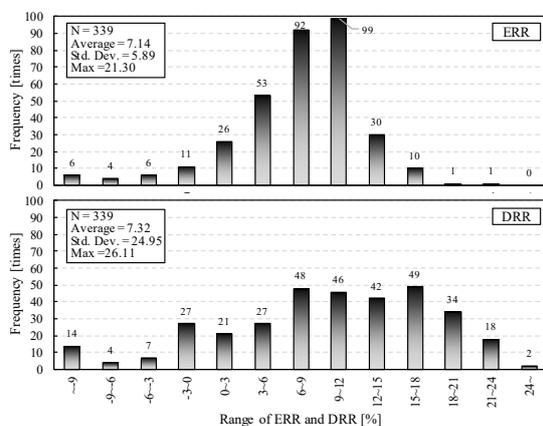


図5 建物の運用方法の違いによって生じるエネルギー性能(上)と快適性(下)の分布

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Togashi Eisuke, Miyata Masato	4. 巻 12
2. 論文標題 Development of building thermal environment emulator to evaluate the performance of the HVAC system operation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Building Performance Simulation	6. 最初と最後の頁 663 ~ 684
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/19401493.2019.1601259	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 富樫 英介	4. 巻 43
2. 論文標題 設備システムの省エネルギー化が不動産価値に与える影響の定量的評価方法に関する研究	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 空気調和・衛生工学会 論文集	6. 最初と最後の頁 31 ~ 37
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18948/shase.43.253_31	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 富樫 英介	4. 巻 43
2. 論文標題 設備システムの省エネルギー化が不動産価値に与える影響の定量的評価方法に関する研究	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 空気調和・衛生工学会 論文集	6. 最初と最後の頁 21 ~ 28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18948/shase.43.255_21	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Togashi Eisuke	4. 巻 12
2. 論文標題 Risk analysis of energy efficiency investments in buildings using the Monte Carlo method	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Building Performance Simulation	6. 最初と最後の頁 504 ~ 522
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/19401493.2018.1523949	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 TOGASHI Eisuke	4. 巻 84
2. 論文標題 PREDICTION OF ENERGY CONSUMPTION IN VWV SYSTEM BY MINIMUM DIFFERENTIAL PRESSURE CONTROL	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)	6. 最初と最後の頁 281 ~ 289
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aije.84.281	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Togashi Eisuke, Miyata Masato, Yamamoto Yoshihide	4. 巻 13
2. 論文標題 The first world championship in cybernetic building optimization	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Building Performance Simulation	6. 最初と最後の頁 391 ~ 408
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/19401493.2020.1741685	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------