

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：32613

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K18198

研究課題名(和文) 建築設備システムの省エネ化投資のリスク評価を可能にする確率モデルの開発

研究課題名(英文) Development of probabilistic model for risk assessment of energy conservation in building equipment

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) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、オフィスの運営側と使用者側に対して大規模調査を行うことで、建築設備システムの不確実性の源である「実建物の使われ方」を明らかにし、リスク評価を行う上で不可欠となる建物使用条件の確率モデルを開発・整備することを目的とした。執務者および建物管理者にアンケートを行うことで、建物の利用者側と運営側の双方からの不確実性を捉え、確率モデルを開発した。さらに両モデルを組み合わせ、建物のエネルギーシミュレーションモデルにモンテカルロ法を適用することで、省エネルギー化投資の効果を確率分布として捉えることを可能にした。本研究に関しては3本の査読付論文を投稿しており、内2本が採用済、1本が査読中である。

研究成果の概要(英文)：In this research, we investigated "the state of use of real building" which is the source of the uncertainty of the building facility system with the aim of developing a probability model of the building use condition which is very important for risk evaluation.

By conducting questionnaires to officials and building managers, we investigated the uncertainty from both the user side and the administrative side of the building and developed a probabilistic model. By combining both models and applying the Monte Carlo method to the energy simulation model of the building, it was possible to express the effect of energy conservation investment as a probability distribution. With regard to this research, we have posted three refereed articles, two of which have been adopted and one by peer review.

研究分野：建築環境

キーワード：省エネルギー 建築設備 不確実性 リスク アンケート 金融工学 不動産価値

1. 研究開始当初の背景

建築の省エネルギー化を推進するためには、省エネルギー化投資が経済的に合理的であることを示す必要がある。一般に、金融商品は投資に伴う不確実性と、投資によって得られるリターンによって評価される。しかし、これまでの多くの研究では、建築の省エネルギー化投資によって得られる不確実性を評価してはいない。

2. 研究の目的

本研究の最終目標は、建築の省エネルギー化投資の不確実性を評価し、その価値を一般の金融商品と比較可能な形で表現することである。このため、本研究では特に、不確実性評価を評価する際に必要となる、建築省エネルギー化投資に影響を与える各種の要素について調査を行い、確率モデル化を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

建築省エネルギー化投資に影響を与える要素として「建物内の執務者行動」と「建物管理者の運用方針」を取り上げ、これらについてアンケート調査を実施する。また、それらの確率的な特性を把握するとともに、確率モデルで表現する。さらに、確率モデルを建物エネルギー消費予測モデルと組み合わせることで、モンテカルロ法を適用することで、省エネルギー化投資の不確実性を定量的に捉える。計算結果に金融工学的手法を適用することで、リスクとリターンの両面から建築省エネルギー化投資の価値を評価する。

4. 研究成果

(1) 省エネ投資リスク評価のための確率的執務者行動モデルの開発

省エネルギー投資のリスクを不動産賃貸事業のリスクとの関係性の中で捉えるために、省エネルギー投資が持つ不確実性の1つである事務所の執務者行動の確率的モデル化について検討し、以下の成果を報告した。

①アンケート調査の実施

Webリサーチシステムを用いて、全国の事務所執務者にアンケートを行い、性別および年代別で1,000件の回答を得た。実施したアンケート調査と回答者属性の概要を表-1に示す。

②確率モデルの構築

アンケート結果をもとに、入社・退社時刻、徹夜作業、休日出勤、昼休み、その他の一時入退室、について確率モデルを構築した。モデル化の対象は「入社・退社時刻」「徹夜作業の発生確率」「休日出勤の発生確率」「昼休み取得時間」「入退室確率」とした。モデルの構造は基本的には式(1)~(5)に示すようにジョーンソン S_U 分布とジョーンソン S_B 分布とし、必要に応じてこれらに一様分布モデルなどを加えた。モデルのパラメータはアンケート結果より推定した。

③年間計算の試行

開発したモデルを用いて在室率の計算を行った。執務者の数は100名、男性比率は90%、契約社員は0名とした。年齢構成は総務省統計局の労働力調査(年齢階級別就業者数)を参考に、20代が8%、30代が18%、40代が24%、50代が22%、60代が28%とした。完全週休2日制とし、土曜日と日曜日を休日とした。始業時刻は9:00、終業時刻は18:00、昼休みは12:00~13:00とした。

年間の計算を行い、平日の平均の在室率を計算した結果を図-1に示す。上段には既往研究における実測調査結果を合わせて表示した。昼間に80%程度の在室率となる太線がモデルの計算結果であり、マーカーのある細線が既往研究の報告値である。

始業時刻には急速に在室率が立ち上がり、終業時刻では残業の影響により緩やかに在室率が低下する様子が表現できていることがわかる。また、昼休みに関しては、休憩開始時に集中して外出するために速やかに在室率が低下した後、各自バラバラの時間に帰社するために緩やかに在室率が回復する様子が表現できている。

表-1 アンケート調査と回答者属性の概要

媒体	Webリサーチシステム
実施期間	2016年5月23日~5月25日
回答者数	性別および年齢別(20、30、40、50、60代)にグループニングし、各100名ずつ、計1,000名
地域	全国47都道府県:回答数の上位から順に東京21.5%、神奈川9.4%、埼玉7.3%、大阪6.6%、千葉5.3% 回答数最下位は若山・鳥取・宮崎の1件(0.1%)。
職業	会社勤務(一般社員) : 59.4% 会社勤務(管理職) : 10.4% 会社勤務(経営者・役員) : 5.6% 公務員・教職員・非営利団体職員 : 9.7% 派遣社員・契約社員 : 14.9%
婚姻状況	未婚:40.3%、既婚(離別・死別含):59.7%
世帯年収	700万未満:50.7%、700万以上:29.8% 不明・未回答:19.5%

$$p_{SU}(x) = \frac{\delta \exp \left[-0.5 \left\{ \gamma + \delta \ln \left(\frac{x-a}{b} + \sqrt{\left(\frac{x-a}{b} \right)^2 + 1} \right) \right\}^2 \right]}{\sqrt{2\pi} \sqrt{(x-a)^2 + b^2}} \quad (1)$$

$$p_{SB}(x) = \frac{\delta(b-a) \exp \left[-0.5 \left\{ \gamma + \delta \ln \left(\frac{x-a}{b-x} \right) \right\}^2 \right]}{\sqrt{2\pi} (x-a)(b-x)} \quad (2)$$

$$X_{SU} = a + b \sinh(Z) \quad (3)$$

$$X_{SB} = \frac{a + b \exp(Z)}{\exp(Z) + 1} \quad (4)$$

$$Z = (N(0,1) - \gamma) / \delta \quad (5)$$

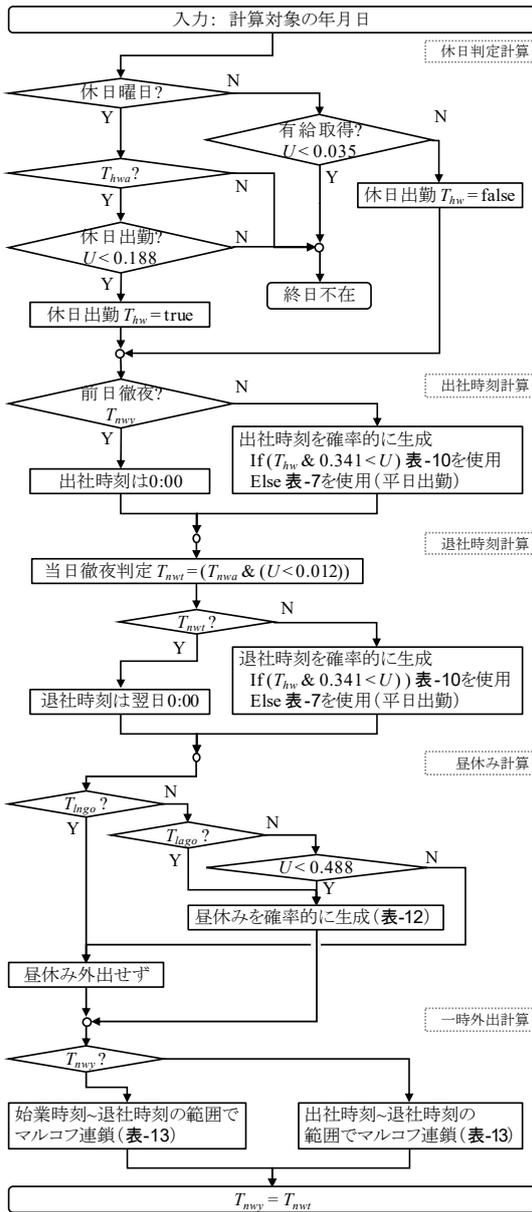


図-2 1日の行動計算処理

④最終退室時刻の計算例

開発したモデルの応用の一例として、25人、50人、100人、200人が利用する室を想定し、退社時刻の計算を行った。各室で最も退社時刻が遅い者の退社時刻を最終退室時刻と定義し、終業時刻との差の確率密度分布をモンテカルロ法で算出した結果を図-3に示す。終業時刻はいずれのグループも18:00とし、原点の0は最終退室時刻=終業時刻を意味する。それぞれの平均値は、193、230、268、308minとなった。1人でも残業者がいれば最終退室時刻はその者によって決まるため、グループの規模の増加とともに分布が右方に移動し、分布の裾も広がることになる。

このような情報は、例えば空調機の分割の価値を定量化することに応用することができる。執務室の人員密度を0.2人/m²、単位床面積あたりの供給空調空気を25CMH/m²と仮定すると、前記グループのそれぞれの供給風量は、3,125、6,250、12,500、25,000CMHとなる。いずれも単体の空調機で供給する風量であるが、仮に最終退室時刻まで空調を停止しないという運用を行うとすれば、毎日の運転時間の期待値は異なることが明らかである。25,000CMHの空調機は3,125CMHの空調機に比較して平均的には115min程度、運転時間が長くなる。従って、空調機の最適分割規模を判断するためには、空調機分割に伴うスペースとイニシャルコストの増と、運転時間の減少によるランニングコストの低下のトレードオフを評価する必要がある。

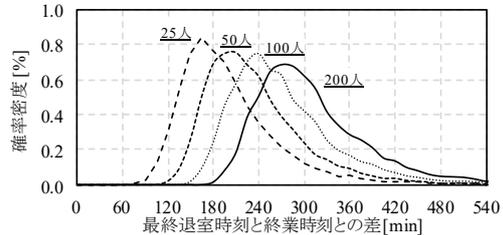


図-3 最終退室時刻と終業時刻の差の確率密度分布

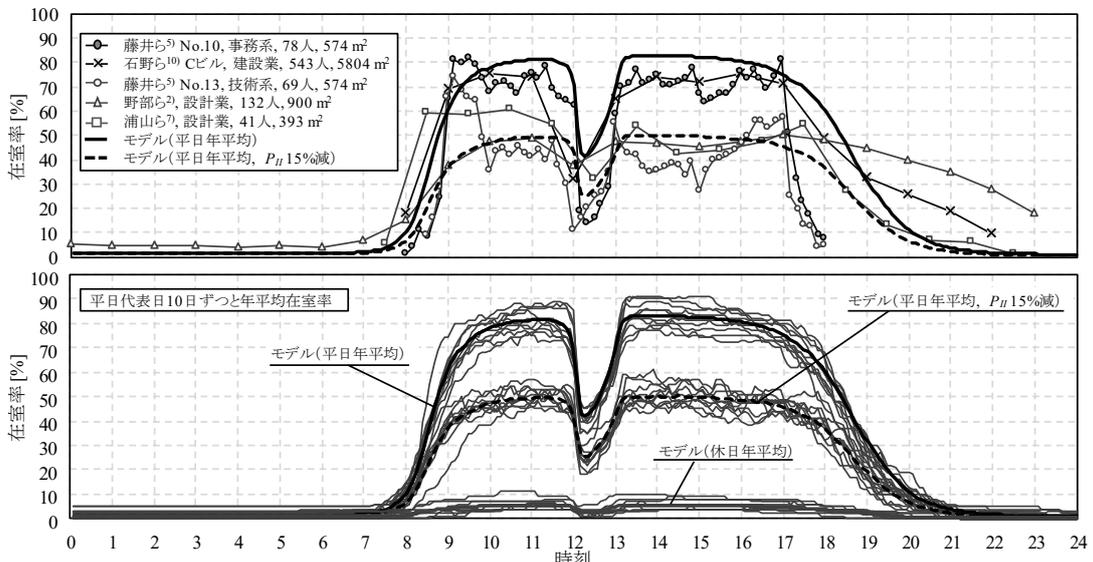


図-1 在室率の計算例と実測値の比較

(2) テナント属性の確率モデルの開発

省エネルギー投資のリスクを不動産賃貸事業のリスクとの関係性の中で捉えるために、省エネルギー投資が持つ不確実性の1つである事務所のテナント属性の確率モデルを構築した。また、既往研究のテナント入退去モデルと組み合わせることで、建物全体の人員密度の不確実性を評価した。

①テナント属性の確率モデルの開発

既往の調査結果をもとに、産業別に雇用形態別・職業別の就業者比率と年齢別の就業者比率などを推定した。表-2に産業別・雇用形態別・職業別の就業者比率を示す。表-3に産業別・年齢別の就業者比率を示す。

表-2 産業別・雇用形態別・職業別の就業者比率 [%]

産業	性	管理	技術		事務		営業	
			正規	非正規	正規	非正規	正規	非正規
建設業	男	18.5	27.0	5.6	18.0	3.7	22.5	4.7
	女	3.0	2.2	0.8	66.9	24.1	2.2	0.8
製造業	男	11.9	27.0	5.7	30.0	6.3	15.8	3.3
	女	2.0	4.3	4.6	41.1	44.1	1.9	2.0
電気・ガス 他	男	0.0	21.2	1.8	63.8	5.5	7.1	0.6
	女	0.0	0.0	0.0	75.0	25.0	0.0	0.0
情報通信業	男	2.7	61.5	7.2	16.6	2.0	9.0	1.0
	女	0.0	26.6	14.9	34.0	18.9	3.6	2.0
運輸業・郵便業	男	10.5	2.6	0.9	56.6	18.9	7.9	2.6
	女	3.3	0.0	0.0	30.6	66.1	0.0	0.0
卸売業・小売業	男	11.5	4.8	1.6	19.7	6.6	41.8	14.0
	女	2.5	3.0	6.3	26.0	55.4	2.2	4.6
金融業・保険業	男	7.2	3.9	0.4	47.3	5.0	32.8	3.4
	女	0.0	0.8	0.4	44.1	24.2	19.7	10.8
不動産業 他	男	14.9	1.5	0.6	36.7	14.3	23.0	9.0
	女	6.1	0.0	0.0	50.9	33.9	5.5	3.6

表-3 産業別・年齢別の就業者比率 [%]

産業	性	~29歳	30~39歳	40~49歳	50~59歳	60歳~	男性比
建設業	女	8.1	17.6	29.7	20.3	24.3	
製造業	男	15.9	22.2	27.0	20.6	14.3	69.9
	女	14.4	20.1	27.5	21.1	16.9	
電気・ガス 他	男	12.5	16.7	29.1	29.2	12.5	86.2
	女	0.0	33.3	66.7	0.0	0.0	
情報通信業	男	16.2	29.9	29.9	18.2	5.8	73.7
	女	27.3	30.9	27.3	10.9	3.6	
運輸業・郵便業	男	9.6	18.8	28.1	22.5	21.0	81.1
	女	14.3	20.6	31.8	22.2	11.1	
卸売業・小売業	男	18.0	20.8	23.5	17.8	19.9	49.1
	女	19.8	18.3	24.1	20.0	17.8	
金融業・保険業	男	14.3	15.7	28.6	27.1	14.3	45.8
	女	18.3	20.7	30.5	22.0	8.5	
不動産業 他	男	10.7	16.0	20.0	17.3	36.0	62.5
	女	13.6	18.2	20.5	18.2	29.5	

先に実施したアンケート結果をもとに、始業時刻、昼休み開始時刻、昼休み時間の頻度を計算した。これらの情報と執務者に関する確率モデルを統合し、テナント属性を確率的に決定する方法を示した。図-4にテナント属性の不確実性の計算フローを示す。

②建物全体の確率モデルの開発

既往研究におけるテナント入退去モデル(刈屋モデル)と上記のテナント属性モデルを組み合わせた。建物全体と1テナントとでそれぞれに時刻別の人員密度を計算した結果を図-5に示す。ただし、土日を含まない平日のみの集計値とした。グラフには、最大値、最小値、平均値、四分位数を示している。

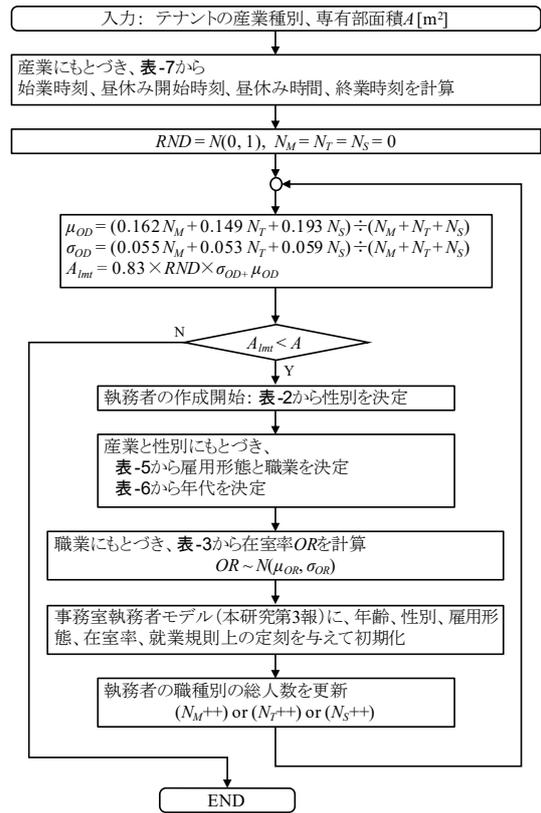


図-4 テナント属性の不確実性の計算フロー

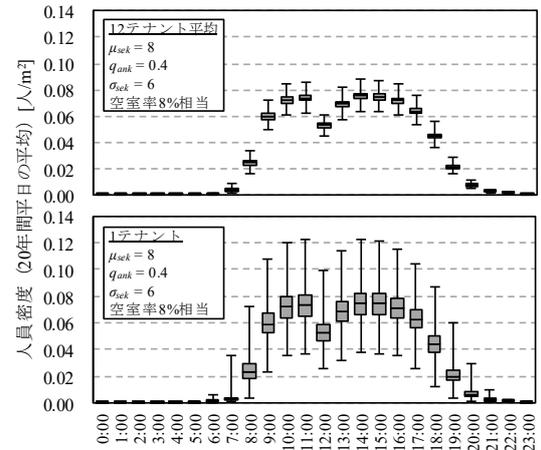


図-5 時刻別の人員密度の分布

上段は全12テナントの平均であり、全在室者数を12テナントの合計面積である7,200 m²で除した値である。下段は1テナントの結果である。12テナント平均の場合には空室やテナント別の人員密度の違いが平準化されるため、1テナントの結果に比較してばらつきが小さくなるのがわかる。熱源機、冷却塔、ポンプなど、建物全体に対応する大型の設備機器は上段の不確実性に影響を受け、空調機や換気ファンなどのテナント別に設けられる可能性も高い小型の設備機器は下段の不確実性に影響を受けることになる。また、上記は途中解約の不確実性に関するパラメータ $q_{ank}=0.4$ とした結果であるが、 q_{ank} が小さくて長期安定的なテナントが多い場合には変動が小さくなり、逆に q_{ank} が大きい場合に

は変動が大きくなる。従って、省エネルギー化投資の価値は、投資対象とする設備機器の種類やそもそものテナントの不確実性に応じて異なる。問題は、このような境界条件の不確実性の違いが設備システムごとの省エネルギー化投資の効果の不確実性にどのように影響するかであるが、この点に関する定量的評価は今後の研究課題である。

(3) モンテカルロ法を用いた省エネ投資リスクの定量化と評価法

各種の確率モデルを建築設備エネルギー計算モデルと統合し、金融工学的手法によって省エネルギー化投資の評価を行った。

①水道光熱費削減額の確率分布の作成

外部気象条件、執務者行動、テナント属性、テナント入退去に関する確率モデルと建築設備エネルギーシミュレーションモデルとを統合し、20年間×1,000回の計算を行い、省エネルギー化投資別の水道光熱費削減額の時系列を作成した。

②省エネルギー化投資別のリスクプレミアムの推定

調達金利を割引率として用いて水道光熱費削減額の現在価値を求め、1,000個の現在価値の分布を求めた。図-6に省エネ投資別のIRR頻度分布を示す。この分布を用い、下方リスクの測度として期待ショートフォールを採用し、省エネルギー化投資別のリスクプレミアムを計算することで、省エネ投資別の還元利回りを推定した結果を表-4に示す。これにより、各省エネ投資の不確実性を前提とした価値評価が可能となった。

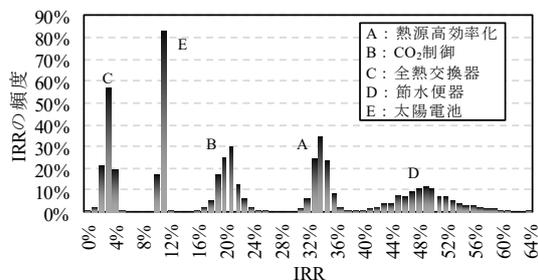


図-6 省エネ投資別のIRR頻度分布

表-4 省エネ投資別の還元利回り

	A. 熱源高効率化	B. CO ₂ 制御	C. 全熱交換器	D. 節水便器	E. 太陽電池
DCF_{AVE}	13,319	22,079	11,684	22,272	29,244
DCF_{MIN}	12,382	18,647	9,093	19,315	27,798
DCF_{MAX}	14,320	25,212	13,849	26,526	30,620
DCF_{SF}	105	414	277	427	188
rp	0.79%	1.88%	2.37%	1.92%	0.64%
$R=Y+rp$	3.59%	4.68%	5.17%	4.72%	3.44%

③省エネルギー化設備への最適投資配分比の推定

省エネルギー化投資の初期投資額を査定して上記の水道光熱費削減額と組み合わせることでIRRを求め、1,000個のIRRの分布を求めた。5つの省エネ投資を組み合わせる場合の

IRRの標準偏差と期待値を計算した結果を図-7に示す。A~Eの内の2つの投資を結ぶ細い曲線は、2つの投資を組み合わせる場合のIRRの標準偏差と期待値である。BとDのように共分散が負となる関係の場合には、組み合わせることで、図に示されるように標準偏差あたりの期待値を大きく向上させることができる。逆にBとCのように正の相関となる場合には、組み合わせても標準偏差あたりの期待値はほとんど変化しない。

省エネ投資を行う際には金利Yで資金を調達するため、投資を行わなければ、将来に渡って金利Yに相当する負のキャッシュフローを確定的に回避することができる。これは、図-7においてIRRの標準偏差を0、IRRの期待値を調達金利とした場合（図中のY1やY2）に相当する。省エネ投資を実行する場合には、これらの調達金利と省エネ投資を組み合わせることになるが、標準偏差あたりの期待値が最大化する組み合わせは、調達金利から有効フロンティアに対して引いた接線である。この時の接点T₁やT₂を接点ポートフォリオと呼び、これが省エネルギー化設備への最適投資配分比である。

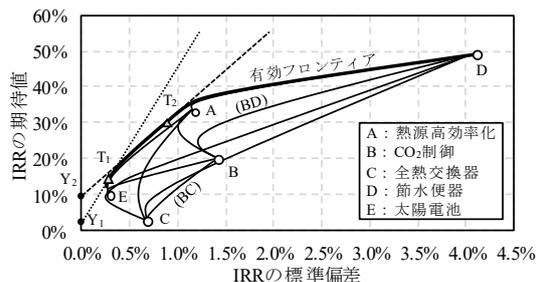


図-7 省エネ投資を組み合わせる場合のIRR

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- 1) 富樫英介: 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 第4報-テナント属性の確率モデルの開発, 査読無, 空気調和・衛生工学会論文集, Vol. 253, pp.31-37, 2018.04
- 2) 富樫英介: 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 第3報-省エネ投資リスク評価のための確率的執務者行動モデルの開発, 査読無, 空気調和・衛生工学会論文集, Vol. 240, pp.9-18, 2018.04

[学会発表] (計 2 件)

- 1) 富樫英介: 建築熱環境エミュレータの開発に関する研究, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 査読無, 2017
- 2) 富樫英介: 熱負荷計算のためのテナント属性の確率モデルの開発, 第51回空気調和・冷凍連合講演会講演論文集, 査読無, pp.183-186, 2017.04

[その他]

<http://www.hvacsimultor.net>

6. 研究組織

(1)研究代表者

富樫 英介 (TOGASHI Eisuke)
工学院大学・建築学部・准教授
研究者番号：00547078