

生存時間分析による居住者の快適温度の推定

Estimation of comfortable room temperature by survival analysis

竹内 亮介*¹
Ryosuke Takeuchi

今原 修一郎*¹
Shuichiro Imahara

矢野 亨*¹
Toru Yano

*¹ 株式会社東芝 研究開発センター システム技術ラボラトリー
Toshiba Corporation, Corporate Research & Development Center, System Engineering Laboratory

This paper proposes a way to estimate appropriate temperature approved by each resident based on room temperature and room staying data by survival analysis. When appropriate preset temperature of heater consuming much energy is too high, lots of energy would be consumed. Therefore, setting appropriate preset temperature for the resident is necessary for low energy consumption. Our experimental results with raw dataset shows that temperature estimated with feature quantities of Weibull distribution is nearly acceptable for the resident.

1. はじめに

近年、再生可能エネルギーの大量導入などによる電力網の不安定さを解消するため、供給だけではなく需要を制御するスマートグリッドや、エネルギーに加えて水道、交通、医療などを考慮したスマートコミュニティへの関心が高まっている。スマートグリッドで制御対象となる需要家は家庭、ビル、工場などがあり、このうち家庭部門に関しては、家庭内のエネルギー消費の見える化や太陽電池や蓄電池と連携したピークカット・ピークシフト制御、家庭内機器の遠隔制御を行う HEMS(Home Energy Management System)がある。

東芝は HEMS を生活習慣の異なる海外に展開するため、海外での実証を進めている。その一つに 2011 年から 2016 年にかけてフランス・リヨン市にスマートコミュニティを構築する実証プロジェクト(図 1)があり、この事業の中で省エネと居住者の快適性を両立した機器自動制御を行う HEMS を導入する[竹内 2013]。この HEMS では自動制御により居住者の快適性を損なわない継続性のある省エネ 10%を目指しており、見える化だけではなく、暖房や照明などの自動制御により省エネを支援する。制御対象の中でもエネルギー消費量の大きい暖房が重要であり、高すぎる設定温度の自動調節が省エネに有効である。しかし設定温度を低くしすぎると居住者が室温について不快に感じてしまうため、不快にならない程度の許容可能な室温の推定が重要である。推定した室温を用いて居住者に設定温度を推薦することで今まで無駄に使っていた暖房のエネルギーを削減できる。

本論文では居住者が在室中の室温データから生存時間分析[赤澤 2010]を用いて許容可能な室温を推定する方法を提案する。また、提案手法をフランスでの実証を行う前に日本のデータを用いて評価する。

2. 許容可能室温推定手法

設定温度推薦を行うには、居住者が許容可能な室温を知る必要がある。山本らは温度や湿度、ユーザの状況や置かれているデバイスの動作状況などの空間の状態(コンテキスト)とコンテキスト中の各物理量に対するユーザの快適さ(満足度)の組

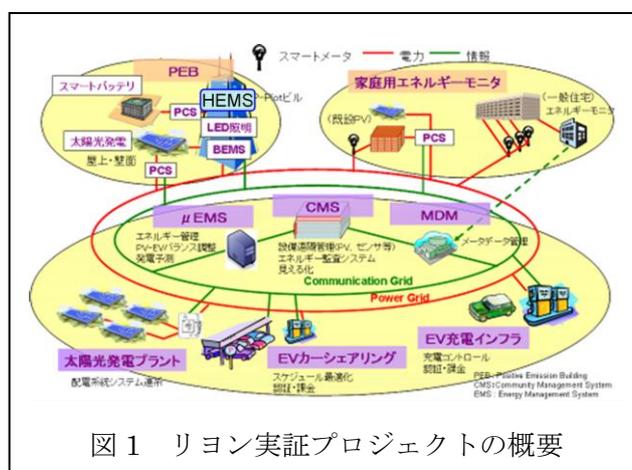


図 1 リヨン実証プロジェクトの概要

が既知として与えられている場合、その既知の情報や必要最低限のアンケートにより任意のコンテキストに対するユーザの満足度を得る方法[山本 2010]を提案しているが、快適な室温をアンケートで回答するのは一般居住者にとって負担であり、かつ現在の設定温度を快適室温だと回答される場合、居住者が想定している許容室温と実際の許容室温が乖離してしまい、省エネができなくなる可能性がある。居住者から入力情報なしで、実データから許容室温を推定することが望ましい。

そこで本提案手法では室温データと在室データに基づいて、在室時の室温の上昇を居住者の不満ととらえ、不満までの時間を生存時間分析の枠組みでモデル化し、モデルの特徴量を用いて各部屋の許容室温を推定する(図 2)。

まず、室温・在室データから、不満や在室終了など区切りまでの継続時間と不満か否かのフラグのデータの組である生存時間データを取得する。次に生存時間データを各部屋、各室温について、生存時間分析の枠組みでワイブル分布に適合させて、特徴量を算出する。別途収集した許容室温の正解データにより予め構築したモデルを利用して許容室温を推定する。

提案手法を詳細に述べる。まず、単位時間ごとに在・不在の 2 値とする在室データを得る。次に在室時の 1 度幅の室温を、在室時に室温が上昇する場合はイベントとみなし、在室終了、室温低下、一定時間経過した場合は打ち切りとみなして、生存時間データを得る。ただし、今回は室温を上げるために暖房をつけた時点の室温に着目するため、室温が上昇し始めてからは一定時間室温が継続しない限り、生存時間データには含まないとする。ここでイベントとは観察される事象のことであり、打

連絡先: 竹内亮介

株式会社東芝 研究開発センター システム技術ラボラトリー
神奈川県川崎市幸区小向東芝町 1
ryosuke.takeuchi@toshiba.co.jp

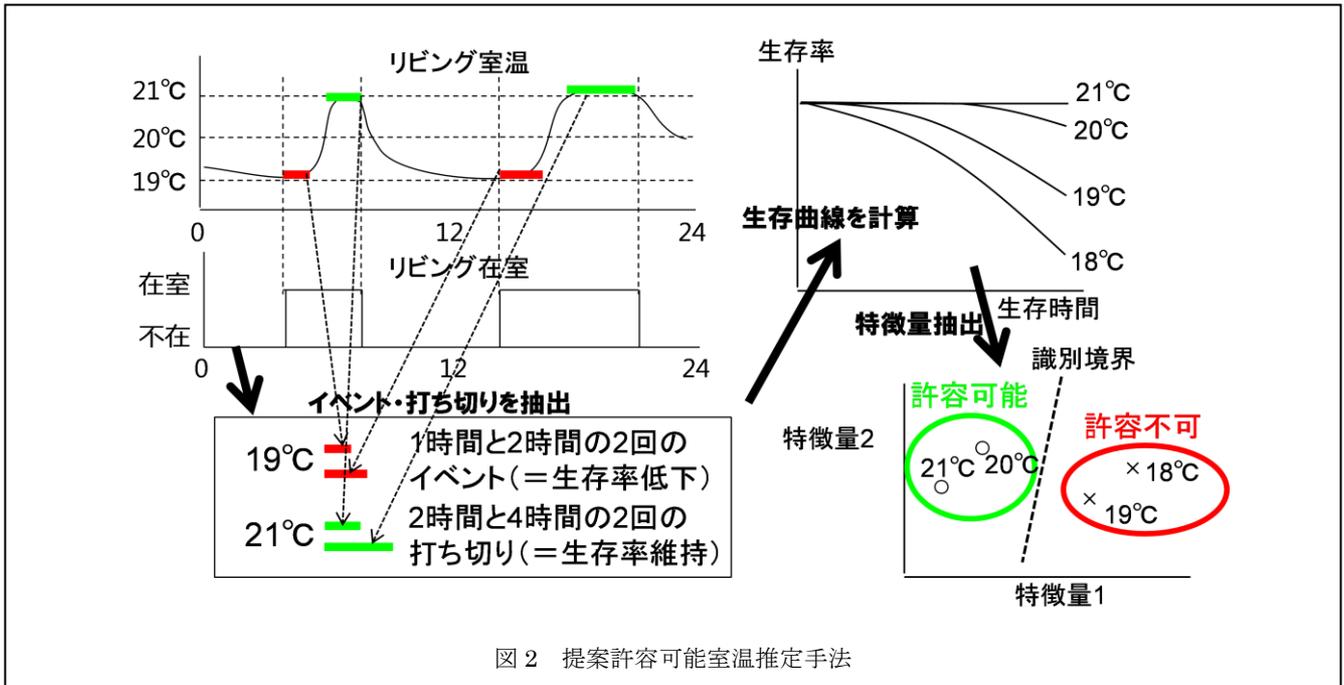


図2 提案許容可能室温推定手法

ち切りとは観察が途中で打ち切られることを指す。観察開始からイベントが発生するまでの時間を生存時間と言い、観察から打ち切られるまでの時間を打ち切り時間と言う。生存時間、打ち切り時間の集合を生存時間データと呼び、イベント、打ち切りと時間の関係性に注目する分析手法を生存時間分析と呼ぶ。

次に各部屋、各室温の生存時間データを、ワイブル分布に適合させて、特徴量を算出する。ワイブル分布の説明の前に、準備としていくつか定義する。生存時間を表す非負の確率変数を T とする。生存率関数 F は T を用いて

$$F(t) = P(T > t), \quad 0 < t < \infty$$

と定義される。 $F(t)$ の定義より、時間 t における生存率はイベントが t 以下では観察されないことを意味する。 T が連続である時のハザード関数 $\lambda(t)$ を

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0+} \frac{P(t \leq T < t + \Delta t | T \geq t)}{\Delta t}$$

と定義する。これは時刻 t の直前までイベントが発生していない条件下で時刻 t においてイベントが発生する条件付き確率を表している。今回用いるワイブル分布とは生存時間分析で用いるモデルの一つで、ハザード関数は

$$\lambda(t) = \lambda p (\lambda t)^{p-1}, \quad \lambda, p > 0$$

と定義される。ここで λ は形状パラメータ、 p はスケールパラメータである。今回はこの λ, p を特徴量として用いる。

最後に、全部屋、全室温について抽出した各 λ, p を説明変数、居住者へのヒアリングにより得た各室温が許容可能か許容不可かを目的変数として、SVM(Support Vector Machine)のモデルを構築し、そのモデルを識別器として各部屋の許容室温を推定する。

3. 実験

提案推定手法を事前に評価するため、日本における一般的な住居に温度センサと人感センサを配置し 1 分間隔の温度計測および人体検知データを取得した。評価に使用したデータは冬期 46 日間、5 世帯分となる。本手法で利用する在室データは人体検知データから 1 分ごとの在・不在を算出している。在・不在と温度計測データから前述の生存時間データを計算する

際、サンプル数が 10 未満の室温については生存時間分析の対象外とした。

このデータを利用し、本論文では以下の評価を行う。

- (1) 生存時間分析を用いた特徴量の評価
許容室温が異なる世帯(暑がり、寒がり)の特徴量の分布を図示し、識別の可能性と世帯間の識別境界の類似性を評価する。
- (2) SVMによる許容可能室温の推定精度の評価
各室温についてヒアリングした許容可能、許容不可と推定結果から、適合率、再現率を計算し、本手法の推定精度を評価する。

4. 結果

- (1) 生存時間分析を用いた特徴量の評価

図 3 の左列に各室温の特徴量を図示する。横軸は生存・打ち切り時間、縦軸は生存率で、実線の曲線はその室温が許容可能であることを示し、点線の曲線は許容不可であることを示す。低い室温が短時間で生存率が低下するのは居住者が室温を許容できず暖房により室温を上げているためと考えられ、逆に高い室温で生存率が下がりにくいのは室温を許容できているためと考えられる。

ヒアリングした居住者 1, 2, 4 の許容室温はそれぞれ 18°C、22°C、19°C であり、各世帯の許容室温が異なる場合でも、同一世帯で見ると概ね高い室温では生存率は低下しにくく、低いと低下しやすい傾向がある。しかし、居住者 1 の不可室温である 17°C は 60 分時点で生存率が 80% 以下に低下する一方、居住者 4 の不可室温 18°C は 120 分時点でも生存率が 80% 以上であり、各居住者の生存率の絶対値で単純に識別することは難しいことが分かる。

図 3 の右列は各室温の生存曲線から計算した特徴量を示し、横軸が形状パラメータ λ 、縦軸がスケールパラメータ p 、○印は許容可能な室温、×印は許容不可の室温を示す。特徴量化した場合には、高い室温では λ が小さく、低い室温では λ が大きい傾向があり、どの世帯も線形識別が可能と分かる。また、識別境界は各世帯共通して概ね $\lambda = 0.05$ と思われ、推定モデルは全世界帯で共通に利用できる可能性がある。次項では全世界帯で構築した推定モデルの精度評価を行う。

(2)SVMによる許容可能室温の推定精度の評価

各世帯の各室温について、識別閾値を60%とした場合の推定結果の適合率、再現率を表1に示す。全室温について許容不可と推定したため、適合率を計算できなかった居住者1を除くと適合率は各世帯で75%~100%、全部屋で92%となった。適合率は許容不可な低い室温を許容可能と誤識別した場合に値が低くなり、居住者への不快が多くなることを示している。再現率は許容可能な室温を許容不可と誤識別した場合に値が低くなるが、省エネ機会を失うだけで居住者への温熱的な不快は発生しない。図4に全世帯の全室温について特徴量 λ 及び p と、SVMの識別閾値を60%として推定した許容可能、許容不可室温を示す。許容不可の室温を許容可能と誤識別したのは居住者3の15°Cのみであった。ヒアリングにより居住者3はエアコンなどの空間暖房だけでなくこたつも利用しており、こたつ利用時・非利用時で許容室温が異なるため誤識別したと考えら

れる。居住者3では省エネ機会損失はないが、この誤識別により不快が発生している。

次節では不快の発生と省エネ機会損失について考察する。

5. 考察

識別閾値を70%、60%、50%、40%としてそれぞれ評価した結果を表2に示す。ここで不快世帯割合とは許容不可を可能と誤識別した世帯の割合である。期待省エネ量とは基準温度22°Cと推定許容可能室温の下限の差の全世帯平均であり、下げることができる設定温度の量を表す。基準温度は日本の世帯向けにアンケートで確認した暖房温度の平均温度とした。省エネ機会損失とは実際は許容可能だが許容不可と誤識別した室温の幅の全世帯平均である。全世帯で1.6°C~4.4°Cの省エネが期待できることが分かる。識別閾値が70%の場合、適合率が100%で不快世帯割合は0%になるが、再現率が43%と小

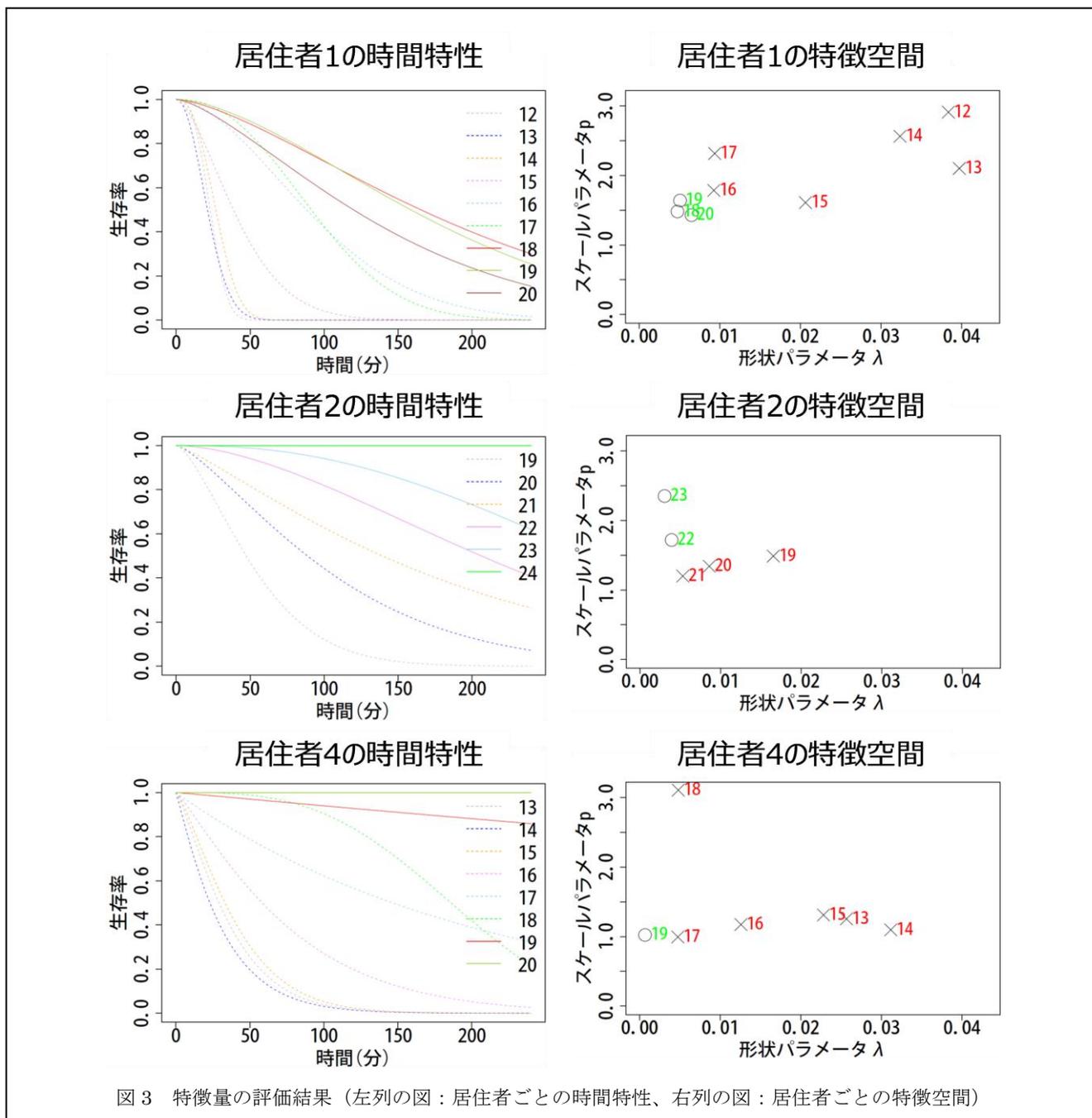


表 1 推定精度評価結果

世帯	適合率	再現率
居住者1	-	0%
居住者2	100%	100%
居住者3	75%	100%
居住者4	100%	100%
居住者5	100%	100%
全世帯	92%	79%

さいため省エネ機会損失は 1.6℃と大きくなる。識別閾値が 60%の場合、適合率が 92%で不快世帯割合は 20%、再現率が 79%で省エネ機会損失は 0.6℃となり、不快の発生と省エネ機会損失はバランスがよく、2.8℃の期待省エネ量がある。識別閾値が 50%、40%の場合、適合率がそれぞれ 74%、67%と小さく、不快世帯割合が 60%と大きくなってしまったため、多くの居住者が不快に感じるおそれがある。

これらの結果を踏まえると、不快を発生させないように許容可能室温を推薦する(識別閾値 70%の場合に相当)、不快世帯割合を一定以下にしながらか許容可能室温から徐々に低い設定温度を推薦する(識別閾値 60%の場合に相当)などの方針での設定温度の推薦が考えられる。また、これらの方針を評価指標化し、クロスバリデーションにより識別閾値を求めることもできる。

6. まとめ

本論文では暖房の省エネのための設定温度推定手法を提案し、日本のデータを用いて推定精度を評価した。設定温度を推薦するために、室温データと在室データに基づいて、在室時の室温の上昇を居住者の不満ととらえ、不満までの時間を生存時間分析の枠組みでモデル化して、そのモデルの特徴量と、別途収集した許容室温の正解データを用いて予め構築したモデルを利用して、各部屋の許容室温を推定した。本提案手法ではモデルとしてワイブル分布を用いて、特徴量としてワイブル分布の形状パラメータ λ 、スケールパラメータ p を利用した。

日本のデータを用いて、部屋間で許容室温範囲が異なる場合の各室温の生存曲線と特徴量が類似性、および特徴量による許容・不可室温の識別可能性とその精度について調べた結果、高い室温では概ね生存率は低下しにくく、低い室温では低下しやすい傾向が見られたが、許容室温であっても部屋ごとに生存率の低下の仕方が異なっており、各居住者の生存率の絶対値で単純に識別するのは難しいことが分かった。特徴量については、概ね高い室温では λ が小さく、低いと λ が大きい傾向となり、どの世帯も線型識別が可能であると分かった。特徴量を用いて SVM で識別可能性の精度を調べたところ、全室温について許容不可と推定した一部屋を除いて、適合率は各部屋では 75%~100%となり、全部屋では 92%となった。許容不可を許容可能だと誤識別した一部屋では、空間暖房ではないこたつを利用して、設定温度推薦時は暖房の利用方法を考慮の必要性が分かった。識別閾値を 70%、60%、50%、40%にして、それぞれ評価すると、全世帯において省エネが期待できることが分かった。識別閾値を 70%とすると適合率が 100%で不快世帯割合が 0%、省エネ機会損失が 1.6℃と大きくなり、識別閾値を 60%とすると適合率が 92%で不快世帯割合が 20%になる一方、省エネ機会損失を 0.6℃におさえることができた。識別閾値 50%、40%では不快世帯割合が 60%となり、不快が多く発生することが分かった。不快を発生させないように算出した許容可能

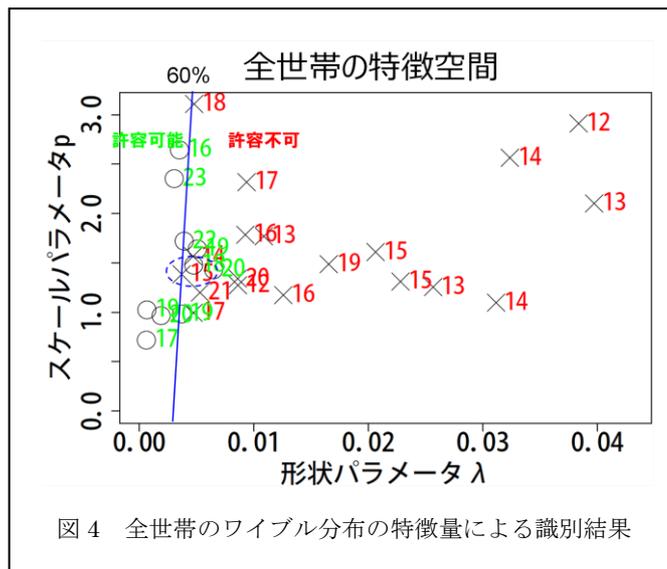


図 4 全世帯のワイブル分布の特徴量による識別結果

表 2 各識別閾値の評価結果

閾値	適合率	再現率	不快世帯割合	期待省エネ量	省エネ機会損失
70%	100%	43%	0%	1.6℃	1.6℃
60%	92%	79%	20%	2.8℃	0.6℃
50%	74%	100%	60%	4.2℃	0℃
40%	67%	100%	60%	4.4℃	0℃

室温を推薦する、不快世帯割合を一定以下にしながらか許容可能室温から徐々に低い設定温度を推薦する設定温度推薦方法が考えられる。また、これらの方針を評価指標化し、クロスバリデーションにより識別閾値を求めることもできる。

今後は暖房器具や断熱性能、生活習慣が異なるフランスについても同様の提案手法を用いることができるかを調べていく。

謝辞

本研究は平成 22 年度採択の独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託事業「国際エネルギー消費効率化等技術・システム実証事業 フランス・リヨン再開発地域におけるスマートコミュニティ実証事業」により実施したものである。

参考文献

- [竹内 2013]竹内亮介, 今原修一郎, 矢野亨: フランス・リヨン市における省エネと快適性を考慮した HEMS 実証の取り組み, 平成 25 年電気学会全国大会雑誌名, 一般社団法人電気学会, 2013.
- [赤澤 2010]赤澤宏平, 柳川堯: サバイバルデータの解析—生存時間とイベントヒストリデータ—, 近代科学社, 2010.
- [山本 2010]山本真也, 神山直也, 安本慶一, 伊藤実: 複数ユーザの嗜好を推測し快適性を実現するスマートスペースの提案, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル(DICOMO2010)シンポジウム, 2010.