

暖房制御と見える化システムを備えた 省エネサポートシステムの開発

Development of an energy saving support system with heating control and visualization features

中村美紀子¹ 鶴崎 敬大¹ 平山 翔¹ ユウ ローリン¹ 中村 充² 菊地 準² 徳田 彩佳²
Mikiko Nakamura¹, Takahiro Tsurusaki¹, Sho Hirayama¹, Ruo Lin Yaw¹,
Mitsuru Nakamura², Jun Kikuchi², Ayaka Tokuta²

¹ 株式会社住環境計画研究所

¹Jyukankyo Research Institute Inc.

² 北海道ガス株式会社 スマートエネルギー推進室

² Smart Energy Planning Group, Hokkaido Gas Co., Ltd.

Abstract: We have conducted a three-year demonstration project to develop a household heating control system which provides a comfortable living environment and reduces CO2 emissions. The ICT-integrated system encourages energy savings by providing energy saving tips, which are constructed based on behavioral science insights and take into account indoor environment and energy consumption data. The tips are related to heating, including adjustment of temperature settings and stop using the heater at an earlier time of the year. In this paper, we report the results of the demonstration project.

1. はじめに

1.1. 行動とエネルギー消費に関する国内外の取り組み

英国や米国では心理学などの行動科学の知見を、マーケティング分野にとどまらず公共政策全般、すなわち省エネルギーや環境対策の分野にも応用している。欧米における行動とエネルギー消費に関する研究は1970年代後半から続けられているが、近年はその注目度を増しており、米国の BECC (The Behavior, Energy & Climate Change Conference) や欧州の BEHAVE (The European Conference on Behaviour and Energy Efficiency) など、代表的な国際会議においてその知見や取り組みが報告されているところである。実際の行動に関する省エネプログラム(施策)は、北米だけで100以上のエネルギー事業者により数多く実施されており、情報通信技術の発達やスマートメータの導入等を背景に、家庭内ディスプレイやWEBサイト、請求書等を通じた家庭向けのエネルギー消費量フィードバック(見える化)等のプログラムが近年増加している。

国内では2012年以降、エネルギー消費を見える化する等の HEMS (Home Energy Management System)

を標準仕様とする大手ハウスメーカーが出現し、また経済産業省の HEMS 導入補助金の後押しもあり、一般住宅において HEMS が普及し始め、省エネルギーを促す取り組みがなされている。本報告の実証期間の前後には、経済産業省や環境省による大規模な実証事業も行われ^{注1)}、また、行動科学の知見を活用した低炭素化への取り組み成果を政策に活用すべく、2017年には環境省主導による「日本版ナッジ・ユニット (BEST)」が発足したところである。更には、米国の BECC に倣い、2014年より BECC JAPAN が開催されており、エネルギー業界、住宅・建築業界、メーカー、大学・研究機関、行政機関などが参加し、国内における最新の知見と成果が共有されている。

1.2. 本実証の目的と背景

地球温暖化対策に向けて、政府は2050年までに温室効果ガスの80%削減を目指す長期目標を掲げ¹⁾、家庭部門においても、より一層の対策を進めなければならない。対策としては住宅の省エネ性能向上や機器の高効率化等が第一であるが、新たに閣議決定された第5次エネルギー計画²⁾で掲げられたとおり、HEMS等を通じた情報提供により消費者の行動変容を促すことも省エネルギーを推進する策のひとつと

考えられる³⁾。現在は熱エネルギーの総量を測定し、消費者へ一般的な省エネ行動を促すシステムは存在しているが、熱エネルギーの利用状況と密接に関連のある温熱環境や生活パターン等を考慮した省エネ行動を促すシステムについては確立されていない。

本実証では、ICT と機器制御技術を駆使し、行動科学の側面から省 CO₂ の実現を支援することを目指す。具体的には、特に暖房需要の多い寒冷地の戸建住宅において、消費者の熱エネルギー利用用途と正確な住環境情報を把握し、温熱環境とエネルギー利用状況の関係を取得・分析することによって、温熱環境や生活パターンに応じた暖房熱源機の自動制御を行う。併せて取得した温熱環境やエネルギーの情報を消費者にフィードバックすることで省エネ行動を促す技術を確立し、温室効果ガス削減に資することを目的とする。本報では、本システムの概要と本システムで開発した情報提供手法の内容を中心に報告する。

1.3. エネルギー削減の可能性

寒冷地の住宅は、本州と比較して断熱性能が高く、室温が高めの傾向であることに加え、24 時間連続して暖房を行う世帯が多い。近年は、各居室にパネルラジエータを設置し、温水を循環して室内を暖房するセントラル温水暖房方式が主流である。住宅全体を連続的に暖房することで、暖房負荷が安定し、空間や時間による温度ムラを抑えることで快適な空間が実現できる。一方で、居室に誰もいない時間帯や日中の日射取得時に必要以上に室温が高く維持されている可能性もあり、適切な室温制御により暖房エネルギーを削減できる可能性がある。本実証では、これらの事象に対し、エネルギー削減の可能性のある時間帯やライフスタイルについて仮説を立て、室温状況の実態を把握し、エネルギー削減を可能とするシステムを開発して、制御状況並びにシステムを導入することによる効果検証を実施する。

2. 省エネサポートシステムの概要

2.1. システム構成

本システムは大きく 4 要素で構成される（図 1）。ユーザー宅に設置したセンサで温度や湿度等の住環境データを計測し、計測したデータを HEMS ゲートウェイに収集する。その後、収集したデータを HEMS サーバへ送信した後、コンシェルジェサーバとデータ連携する。コンシェルジェサーバは、各戸のデータ分析を行い、その結果を省エネサポートアプリで見える化する他、省エネアドバイスという形でユーザーに通知する。コンシェルジェサーバは、室内の

暖房制御の制御判定を行い、計測データを基に暖房運転可否を判断して暖房制御ユニットへの運転指令を发出する。その後、指令を受けた暖房制御ユニットが各戸の暖房熱源機を制御する。

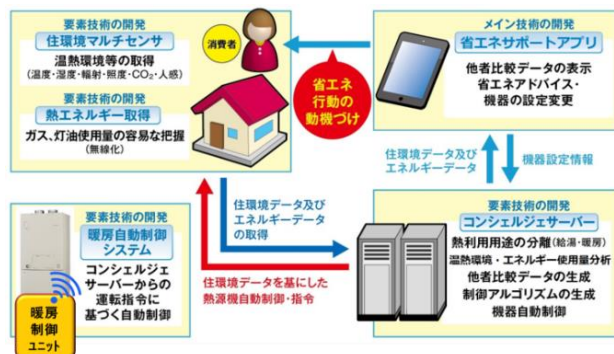


図 1 システム概要



(a) ホーム画面



(b) スケジュール設定画面

図 2 省エネサポートアプリ画面例

2.2. 省エネサポートアプリの特徴

1) 省エネサポートアプリのコンセプト

一般的な HEMS が抱える課題として「閲覧・操作が継続しないこと」がよく指摘されている。この要因には情報提供内容（消費電力等）への利用者の関心度が低いことや、HEMS 自体が利用者の閲覧を待つプル型であること等が考えられる。

以上を踏まえ、本実証で開発した省エネサポートアプリ（以下、省エネアプリ）では、ホーム画面に室温や湿度を常時表示することで、温湿度計として

リビングに設置してもらうことを想定した画面設計とし(図 2)、継続的に閲覧していただく機会を増やすこととする。コンテンツは、計測データの効果的な見える化(室温、湿度、光熱費等)とパーソナライズされた省エネアドバイスの通知をメインに、曜日別時間帯別の暖房制御の設定機能も有する。

省エネアドバイスは省エネアプリが常に閲覧されていることを前提とせず、センサ検知等に基づき必要な情報をプッシュ通知することで行動変容の促進を図っている。なお、本実証では Android タブレットで稼働するアプリケーションソフトとして省エネアプリを開発している。

2) 暖房制御による室温管理

前述のとおり、寒冷地の住宅は、断熱性能が高く、室温は本州に比べると高めの傾向である。また居室のみを暖房する間歇運転でなく、住宅全体を継続的に暖房している住宅が多い。パネルヒータによるセントラル温水暖房方式を行っている住宅では、室温の調整を熱源機本体の電源 ON/OFF や送水温度の変更、またパネルヒータのサーモバルブ調節の組み合わせによって行っており、居住者が任意の室温を実現することは難しい。実証モニターにおいても、電源操作やパネルヒータのサーモバルブ操作をあまり行わないと回答した世帯が約半数あり、適切に暖房熱源機を制御(以下、暖房制御)することでエネルギー削減の可能性は十分にある⁴⁾。

本システムの暖房制御は、省エネアプリで設定した、ユーザーの生活パターンに合わせた暖房スケジュールを基に行う。スケジュール設定は在宅・外出・就寝時の設定温度を入力し、曜日ごとに各モードの時間帯を設定する。ここでいう暖房制御とは、中核となるコンシェルジュサーバにて、入力された設定温度とユーザー宅で計測した住環境データから熱源機の運転要否を判断し、現在室温≒設定室温となるよう、暖房 ON/OFF や送水温度の制御を行うものである。

3. 効果検証

3.1. 効果検証手法

本実証は、札幌市内でガス温水式パネルラジエータを設置している 100 件の実証モニター宅にて実施し、2016 年 11 月より予備計測、2017 年 1 月より本システムを設置した介入を開始している。なお、3 年間の効果検証の後に 2018 年度より商用化する。

本システムの効果は、ランダム化比較試験^{注 2)}(Randomized Controlled Trial: 以下、RCT)により評価する。本システムの介入要素には、住環境データ(室温、湿度、エネルギー等)の見える化やパーソ

ナライズされた省エネルギーアドバイスの通知(以下、情報提供)と、生活パターン(在宅・外出・就寝時)ごとのスケジュール設定や住環境データに基づく暖房制御の 2 種類がある。本実証では、各介入要素の効果を検証するため、実証モニター 100 件を下記 3 群へランダム割付により分類し、群間のエネルギー消費量の差や、暖房の使い方の差から、本システムの導入効果を評価する。

- ・ AT 群: 情報提供と暖房制御を導入するグループ(32 件)
- ・ FB 群: 情報提供のみを行うグループ(34 件)
- ・ CT 群: 情報提供も暖房制御も行わず、計測のみを行う対照グループ(34 件)

群分類については、各モニターの実証前のエネルギー消費量(ガス 2 年分、電気 1 年分)と、属性情報を事前に収集し、それらのデータを基に、主なアウトカムとなる温水暖房用途のガス削減量を 2015 年度の冬期ガス消費量の群間差が最小になるよう min-max t-statistic randomization method⁵⁾を用いてランダム割付している⁶⁾。

4. 情報提供手法の開発

4.1. アプリによる省エネアドバイス提供

本実証では、行動科学の知見に基づき省エネアドバイスを作成することで、実証モニターの行動変容を効果的に促すことを目指す。情報提供手法については、国内外における関連サービスの事例調査等を実施し、行動変容分野で先行する行動療法分野を参考に、①暖房エネルギー削減余地となる行動を特定し、②計測された住環境データをもとに削減余地の分析を行い、③適用する技法を検討・適用し、④その効果を検証・結果に基づき改善点を洗い出す、というステップで省エネ行動変容策を検討している。

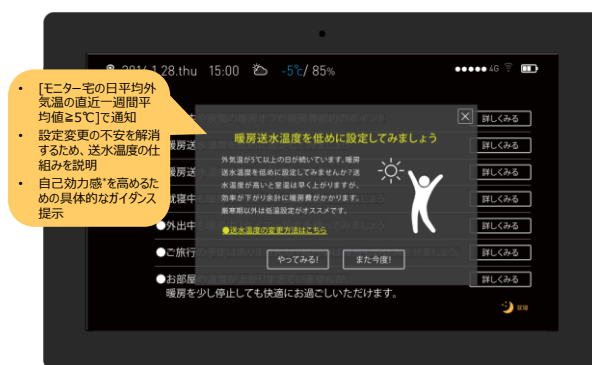


図 3 省エネアドバイス事例
「暖房温水の設定温度を低めに設定」

例えば、人は多くの他人の行動に従うという特性（社会規範）がある。この知見と実証モニター100件のデータに基づき、モニター平均と比べて室温が高い世帯には「室温が高めのようです」と伝えることで設定温度の見直しを提案する、あるいはモニターの半数が暖房を停止した際には「半分の世帯は暖房を止めています」と伝えて早期の暖房停止を促すといったアドバイスを提供する（図 3）。

また事前の調査から、居住者は暖房制御方法に十分な理解がないことを確認できている⁴⁾。このため、省エネ行動を促すと同時にリモコン操作方法を通知することでモニターの自己効力感を高める仕組みを設けている。表 1 に、本システムで提供する省エネアドバイスの事例を示す。

5. 省エネサポートアプリの利用実態に関する分析

省エネアプリの利用実態について、コンシェルジュサーバで記録した介入群（AT・FB 群）の省エネアプリへのアクセスログを分析する。アクセスログには、各世帯が閲覧・操作した画面が分単位で記録されているが、ここでは「暖房 ON・OFF 画面」「ヒートスケジュール画面」「お知らせ画面」「グラフ画面」「ご使用料画面」「部屋一覧ビュー」の主要 6 画面^{注 3)}の閲覧・操作数を群別・月別に集計し、経時的な傾向を確認する。

省エネアプリの月別の閲覧・操作数は（図 4）、AT 群は暖房期間（11 月～5 月）にアクセスが集中し、非暖房期間（6 月～10 月）にはほとんどアクセスがない。これに対し FB 群は、省エネアプリ導入直後にピークを向かえた後、徐々に減少しているが、閲覧・操作数の経時的な変動は比較的緩やかである。

次に、主要画面別の閲覧・操作数の構成比では（図 5）、AT 群は、閲覧・操作数が多い暖房期間においては、暖房制御に関連する「ヒートスケジュール画面」「暖房 ON・OFF 画面」の割合が大きく、FB 群は、時期によらず、「部屋一覧ビュー」「グラフ画面」が 7～8 割を占めている。

このように、AT 群と FB 群では、年間のアプリの操作傾向や閲覧する画面に違いがある。AT 群は暖房期間に集中的にアプリにアクセスし、暖房制御に関連する画面をよく閲覧・操作していることから、省エネアプリを暖房制御のためのツールとして扱っていることが示唆されている。一方、FB 群は年間を通じて室温やエネルギー消費量に関連する画面をよく閲覧・操作していることから、省エネアプリを室内環境やエネルギーの使い方について把握するためのツールとして認識していると考えられる。

表 1 省エネルギーアドバイス事例

タイトル	通知条件	通知内容
暖房スケジュールの設定見直し	モニター宅平均リビング室温>全戸平均リビング室温	今月の平均室温が他の世帯に比べて高めのようです。暖房スケジュールや設定温度を見直してみませんか？
暖房割合の通知	モニター 100 世帯の暖房使用率が 50% 以下	札幌にお住まいの方の半分は暖房を止め始めているようです。そろそろ暖房を停止していませんか？
暖房送水温度を低めに設定	モニター宅の日平均外気温の直近一週間平均値 $\geq 5^{\circ}\text{C}$	暖房送水温度を低めに設定しましょう
就寝時はタイマー設定で暖房停止	深夜 2～4 時に暖房している世帯	就寝中も暖房中？タイマー設定を使ってみましょう
室温上昇時の暖房停止	現在室温 $\geq$ 設定温度 $+2^{\circ}\text{C}$ で通知	お部屋の温度が上がりにすぎいませんか？暖房を少し停止しても快適にお過ごしいただけます。

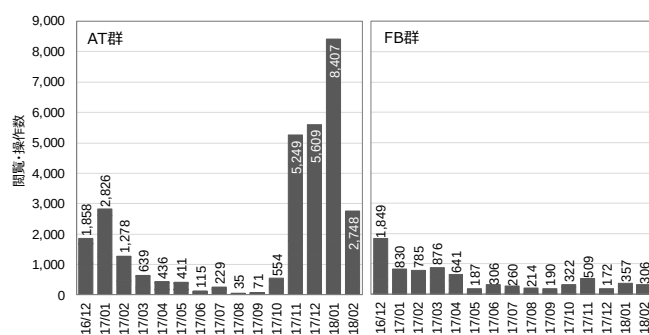


図 4 省エネサポートアプリの月別閲覧・操作数

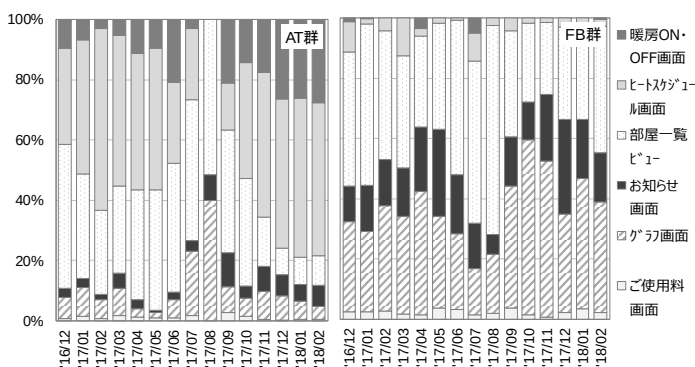


図 5 省エネサポートアプリの画面別閲覧・操作数の構成比

6. 省エネ対策の実施状況の変化に関する分析

本実証の 3 度にわたる冬期アンケート調査を通じて、システム導入による省エネ対策の実施状況の変化を分析する。該当する調査項目を表 2 に示す。

6.1. 省エネアドバイスの参考度合い・実践度合い

省エネサポートアプリから発出される各種省エネアドバイスの参考度合いに関しては（図 6）、両介入群とも半数以上の世帯が「参考になった」、約 3～4 割の世帯が「ほとんど／全く参考にならなかった」と回答している。参考にならなかった世帯は、「既知の情報しか届かないため」「通知のタイミングが不適切のため」「実践しても上手く行かなかったため」等を理由として挙げている。

省エネアドバイスの実践度合いに関しては（図 7）、約 2～3 割の世帯が「実践できた」、約半数の世帯が「ほとんど／全く実践できなかった」と回答している。実践の阻害要因として、「快適性が損なわれるため」「面倒・手間がかかるため」「アドバイスの通知に気付かず、タイムリーに行動できないため」等が挙げられている。

6.2. 暖房の省エネ対策の自己効力感

暖房の省エネの実施方法を理解しているかについて 2 カ年の結果を比較すると（図 8）、「そう思う」「ややそう思う」といった肯定的な回答をした世帯の割合は、AT 群では約 1 割増加し、FB 群では同程度であり、CT 群では約 1 割減少した。省エネアドバイスと暖房制御の導入により、AT 群の自己効力感が向上したと考えられる。

6.3. 外出前・就寝時における暖房の省エネ対策の実施率

外出前・就寝時における暖房の省エネ対策として、スケジュール制御、手動・タイマー制御による温水暖房停止、送水温度の変更、サーモバルブ操作が挙げられる。手動・タイマー制御による暖房停止やサーモバルブ操作の実施率は（図 9）、本システム導入前の 2015 年度冬期には、いずれの群も 2～3 割だったが、システム導入直後の 2016 年度冬期には、AT 群では 1 割弱まで減少、FB 群では 4 割強まで増加、CT 群では同程度となっている。2017 年度冬期には、いずれの群も微増している。

AT 群は、2016 年度冬期から本システムを通じて暖房制御するようになったため、相対的に手動・タイマー制御の頻度が低下したと考えられる。FB 群は、省エネアドバイスによる意識啓発が、省エネ対策の実施率の向上に寄与していると考えられる。一方 CT 群は、本実証による間接的な影響、もしくは本実証とは関係のない外的要因により、一部世帯の省エネ意識が変化している可能性がある。

表 2 省エネ対策の実施状況に関するアンケート調査項目

調査対象	調査項目（調査年度）
介入群	省エネアドバイスの参考度合いと参考にならなかった場合の理由（2017 年度）、省エネアドバイスの実践度合いと実践の阻害要因（2017 年度）
全群	暖房の省エネの実施方法への理解度（2016、2017 年度）、省エネ対策の実践状況（2016、2017 年度）

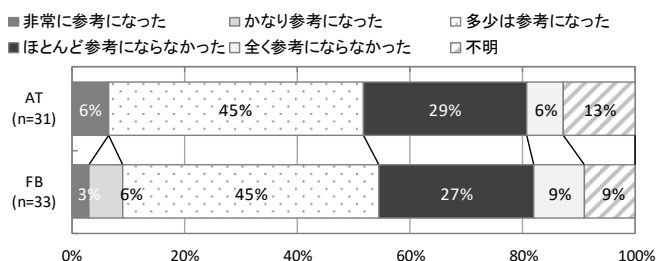


図 6 省エネアドバイスの参考度合い

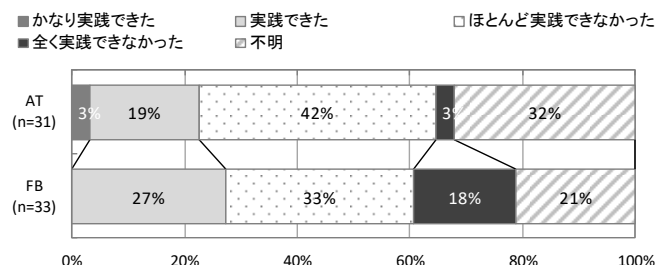


図 7 省エネアドバイスの実践度合い

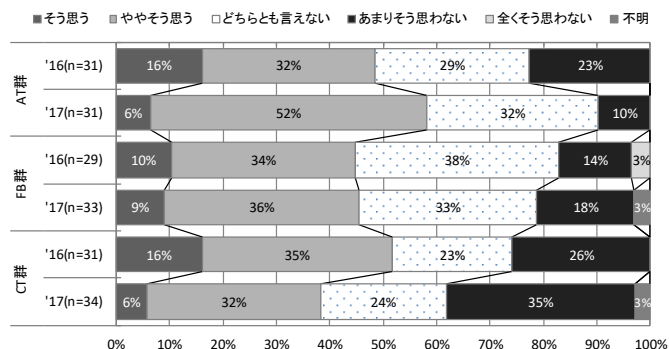


図 8 暖房の省エネの実施方法を理解しているか

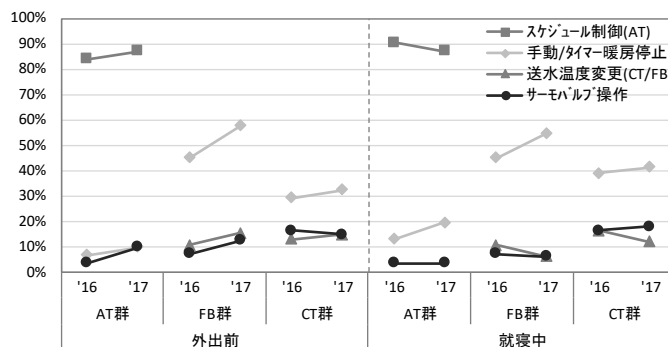


図 9 暖房の省エネ対策の実施率

7. おわりに

本報では、本システムの概要と本システムで開発した情報提供手法の内容を中心に報告した。なお、本システム導入による省エネ効果を検証した結果⁷⁾、システム導入による省エネ効果は暖房期間に大きく2017年2月、2017年11月（FB群のみ）、2017年12月、2018年2月（AT群のみ）には、有意水準5%で統計的有意差を確認できた。厳寒期の省エネ効果は省エネアプリと暖房制御を導入したAT群が、省エネアプリのみを提供したFB群よりも大きいことも明らかにした。一方で、期間平均の省エネ効果はAT群が2.6%減、FB群が2.8%減となりFB群がAT群を上回ること、FB群は中間期に近い10～11月の省エネ効果が大きいことを明らかにした。暖房の停止・開始時期の分析結果より、FB群はAT群に比べて暖房期間が短かったと推察され、群間の暖房期間の差が中間期の省エネ効果の差の要因になっている可能性を示した。

本実証を通じて、寒冷地における暖房の使用実態を明らかにしたとともに、省エネサポートシステムによる省エネ効果を確認した。また、行動科学の知見に基づく情報提供手法を開発し、実証モニターによる検証を実施した。今回の実証では、暖房制御を中心に省エネルギーアドバイスを発出するAT群と省エネルギーアドバイスのみを発出する（暖房制御は自身で行う）FB群に分類して介入したが、AT群は暖房を制御するリモコン機能を主に、FB群はエネルギー消費の見える化やアドバイスを受けるHEMS機能を主に、介入の方法によって省エネアプリの閲覧頻度や操作に異なる対応が見られた。なお、両介入群ともに、長期的に省エネアプリの利用率を維持し、本システムによる省エネ効果を継続させるという点においては、ユーザーごとのニーズに合った省エネアドバイスをよりタイムリーに提供する等いくつかの課題は挙げられる。なお、2018年より本実証成果を基にした商用サービスを開始しており、引き続き、温室効果ガス削減に資するシステムの有効性やユーザーの使用性について検討を継続する。

注釈

- 1) 平成27年度経済産業省資源エネルギー庁「エネルギー使用状況等の情報提供による家庭の省エネルギー行動変容促進効果に関する調査」、平成29年度より環境省「低炭素型の行動変容を促す情報発信（ナッジ）による家庭等の自発的対策推進事業」。
- 2) RCTはランダム割付によって実験対象者全体を、プログラムの適用を受ける介入群（実験群、処理群）と、適用を受けない対照群（統制群、比較群）に分類し、

プログラム実施後に両群のアウトカムの差を比較する評価方法。

- 3) 暖房 ON・OFF 画面：暖房の起動・停止を行う画面。ヒートスケジュール画面：時間帯別・曜日別・モード別の暖房温度を設定する画面。お知らせ画面：各種省エネアドバイスを閲覧する画面。グラフ画面：ガス・電気消費量等のグラフを閲覧する画面。ご使用料画面：光熱費を確認する画面。部屋一覧ビュー：各部屋の室温を確認・調節する画面。

謝辞

本調査は、平成27年度から平成29年度に実施した環境省「CO₂排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業（住環境情報を活用した省エネサポートシステムの開発・実証（実施主体：北海道ガス株式会社、株式会社住環境計画研究所）」の技術実証成果の一部である。ここに記して関係諸氏に謝意を表す。

参考文献

- [1] 閣議決定「地球温暖化対策計画(平成28年5月)」,pp6
- [2] 閣議決定「第5次エネルギー基本計画(平成30年7月)」,pp35
- [3] 環境省「平成29年度家庭部門のCO₂排出実態統計調査 調査の結果（速報値）の概要」,pp15-17
- [4] 中村,他3名：寒冷地における温水暖房設備の使い方に関する調査,2016年度日本建築学会大会学術講演梗概集,pp1289-1290,2016.8
- [5] Bruhn and McKenzie (2009) "In Pursuit of Balance: Randomization in Practice in Development Field Experiments." *American Economic Journal of Applied Economics*, 1(4): 200-232.
- [6] 平山,他4名：暖房制御と見える化システムを備えた省エネサポートシステムの開発（その1）～（その3）,2017年度日本建築学会大会学術講演梗概集,pp969-974,2017.8
- [7] 平山翔, 鶴崎敬大, 中村美紀子, ユウ ローリン, 徳田彩佳：暖房制御と見える化システムを備えた省エネサポートシステムの開発（その4）～（その6）,2018年度日本建築学会大会学術講演梗概集,pp1517-1522,2018.9