

UC Davis

UC Davis Previously Published Works

Title

コネクテッドサーモスタット実測調査に基づく米国一般住宅の空調利用の実態把握とシミュレーション条件パターンの生成手法の提案

Permalink

<https://escholarship.org/uc/item/4dj4c9v8>

Journal

空気調和・衛生工学会 論文集, 44(265)

ISSN

0385-275X

Authors

剛, 上野

Pritoni, Marco

Meier, Alan

Publication Date

2019-04-05

DOI

10.18948/shase.44.265_9

Peer reviewed

コネクテッドサーモスタット実測に基づく 米国一般住宅の空調利用実態の調査と シミュレーション条件パターンの生成手法の提案

上 野 剛^{*1*2} Marco Pritoni^{*3} Alan Meier^{*3}

コンピュータシミュレーションによる熱負荷・エネルギー計算を行う際、有用な結果を得るためには、空調の設定温度や利用時間数等に関してできるだけ実態に沿った条件で検討を行う必要がある。本論文では米国内の約 10,000 軒に設置されたコネクテッドサーモスタット(インターネット接続型空調機コントローラ)の実測データを用いて、設定温度や実温度等、米国における空調の使い方を明らかにした。更に得られた結果から、設定温度・在宅スケジュールに関して、シミュレーションを行うにあたって入力条件として利用可能なパターンを生成するための手法を開発し、その手法を実装したツールのプロトタイプを構築した。

キーワード：コネクテッドサーモスタット・米国・空調利用実態・住宅

はじめに

高効率機器の導入や機器リプレース、また室内温度変更等の省エネ運用等、空調に関する各省エネ方策による効果を比較検討するために、コンピュータシミュレーションによる熱負荷・エネルギー計算が広く行われている。有用な結果を得るためには、空調の設定温度や利用時間数等に関して、できるだけ実態に沿った条件で検討を行う必要があるが、米国においては空調利用の実態が十分に明らかではないため、単純なパターンでのシミュレーションが行われていることが多く、空調の利用温度や利用時間等の実態、また地域や世帯人数等の条件がこれらに及ぼす影響等を明らかにすることが求められている。

米国では、DOE(Department of Energy, 米国エネルギー省)所管の EIA(Energy Information Administration, エネルギー情報管理局)によって、住宅のエネルギー消費に関する統計調査 RECS¹⁾(Residential Energy Consumption Survey) が約 4 年ごとに実施されている。RECS では、世帯の分布や、空調機器の導入率等、実態の把握やシミュレーションに有用な統計情報がまとめられ、公表されているが、調査票によるアンケート調査のため、利用方法に関する詳細までは調査できておらず、利用方法については、空調時の室温(設定温度か実温度かは指定されておらず、回答者は

り、「利用時間」については調査されていない。

そこで本論文では、インターネット接続型空調機コントローラ(Connected Thermostat, 以下 CT と呼ぶ)の実測データを用いて、全米の空調機器の利用実態について調査した結果について述べるとともに、比較可能なものについては、RECS との比較を行う。また得られた結果から、設定温度とスケジュールに関して、シミュレーションを行うにあたって入力条件として利用可能なパターンを生成するための手法を開発し、ウェブベースのツールのプロトタイプを構築する。

なお日本と米国では空調機器の種類や使い方、気象条件等、異なる面が多いが、日本においても全館空調が増加しており、また日本のメーカーが海外での販売網を拡張するためにも、米国における空調機器の利用実態、また本論文で提案するシミュレーション用入力条件の生成手法についてまとめておくことは有用であると考えられる。

1. 米国における空調システムの概要

ここでは、RECS の最新版である 2015 年の結果に基づいて、米国における空調システムの概要を述べる。以下では、調査結果のうち家族向け個別戸建て住宅(Single-Family Detached House、以下 SD 住宅と呼ぶ)の結果を示している。

米国の住宅では、日本で広く用いられている各室用のエアコンとは異なり、ダクト式等の全館空調が一般的である。図-1 に、米国内の SD 住宅におけるメインの暖房機器の割合²⁾を示す。日

^{*1} (一財)電力中央研究所 正会員

^{*2} Lawrence Berkeley National Laboratory 正会員

^{*3} Lawrence Berkeley National Laboratory 非会員

区別できていないと考えられる)が調査されるにとどまってお

本で広く使われている個室用のエアコン(mini split と呼ばれる)は「ヒートポンプ式」に含まれるが、これにはヒートポンプを用いた全館空調用熱源も含まれているため、mini split の割合は図-1 に示す 14%よりも更に低くなる。また冷房についても、SD 住宅の 70%以上で全館空調が用いられており、個別のエアコン(窓用含む)の利用は 20%程度となっている(図-2)。

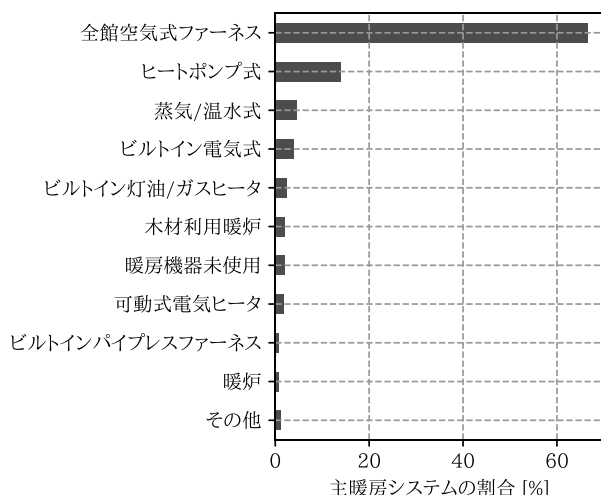


図-1 利用されているメインの暖房機器の割合

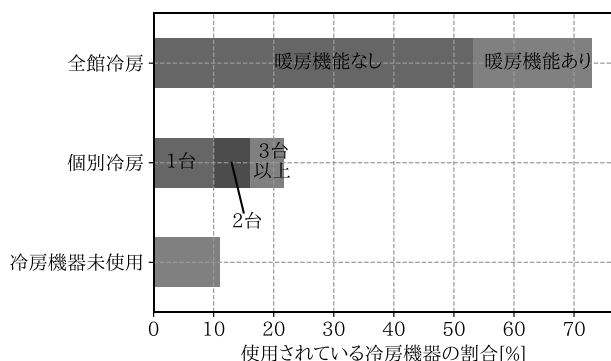


図-2 利用されている冷房機器の割合(重複あり)

全館空調は、以前はサーモスタット(空調コントローラ)を持たないものや、プログラム機能を持たないサーモスタット(図-3a)が多かったが、最近では、例えば曜日別にスケジュールモードごと(在宅時、不在時、就寝時)の時間と温度等を設定できる、スケジュール機能を持ったサーモスタット(図-3b)の利用が 50%を占めている。また近年、インターネットにつながることで、外気温度等の取得等の付加機能をもった CT(図-3c)が普及し始めており、2015 年時点で 4%程度の住宅で利用されている。

2. 利用したデータの概要

2.1 ecobee 及び DYD の概要

本研究では、ecobee 社 DYD(Donate Your Data)²⁾の CT の計測データを用いた。ecobee は、米国およびカナダで複数の CT を販



(a)従来のサーモスタット (b) プログラム可能サーモスタット



(c) コネクテッドサーモスタット(CT)

図-3 各種のサーモスタットの例

売・運営している会社であり、ユーザデータは ecobee が管理するサーバに集められている。DYD は、研究用途にユーザから寄付してもらう仕組みで、希望するユーザが自身で登録を行うオプトイン方式になっている。データは 5 分毎の実室温/相対湿度や冷暖房設定温度、冷暖房機器の稼働時間、スケジュールモード(在宅時、不在時、就寝時)等、空調に関する設定値・実測値であるが、住所、世帯人数、延床面積、住宅の築年数等に関する情報もユーザが設定できるようになっており、個人情報を含まない一部の情報については研究者に共有されている。なお、住所は州内の街レベルの粒度で共有されている。また入力された住所に基づいた近隣の気象(外気温度湿度)についても、近隣のウェザーステーションからデータが自動的に取得され、共有されている。一方で、空調機のエネルギー消費量に関する情報は得られておらず、また全館空調につながっていない個別の空調機が同一住宅にあった場合、仮にその機器が稼働しても、その情報は得られない。

2.2 利用したデータの概要と測定例

データ自体は 2015 年 1 月から 2017 年 9 月まで得られており、2017 年 9 月の時点では米国内に 20,000 個程度のデータがあるが、初期はデータ数が少なく、またユーザ数は当然、当該地域の人口と相関があるため、人口の多い地域のデータが多くを占めている。以下では、1)CT が SD 住宅以外に設置されている場合、2)一人のユーザが 3 台以上の CT を持っている場合(商業利用の可能性が高い)、3)計測している期間が 3 カ月未満の場合、を除き、合計 9,925 個の CT のデータ(2017 年 8 月までの 3 カ月~1 年間)を用いて分析を行った。図-4 に、利用したデータの属性を RECS と比較した結果の例を示す。RECS と比べると、1 人世帯の割合が少なく 4 人世帯の割合が高い等の差は見られたが、居住地域、世帯人数、延床面積(図割愛)、建築年数(図割愛)等に

ついて、大きな差は見られなかった。なお地域区分はアメリカ合衆国国勢調査の定義(Division)³⁾に沿っており、RECS もこの地域区分でデータが整備されている。

図-5 に CT の測定例として、ある世帯の室温の年間推移を示す。縦軸に 1 週間(5 分×24 時間×7 日)、横軸に 1 年間の週(52 週)を示している。縦方向から、昼と夜間の差や平日と休日の差、横方向から、季節による差が見られる。またネットワークエラー等によるデータ欠損があったことも分かる。

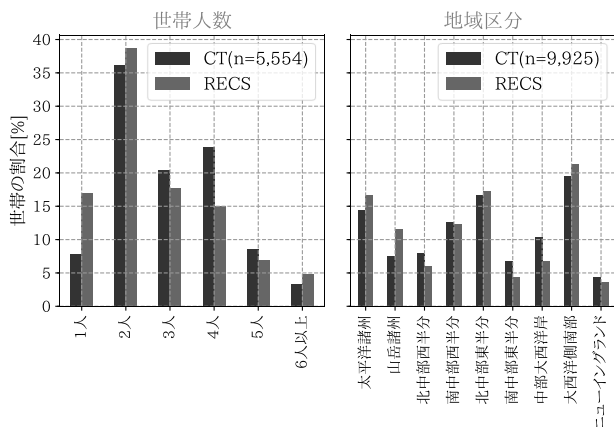


図-4 利用したデータの特性と RECS との比較

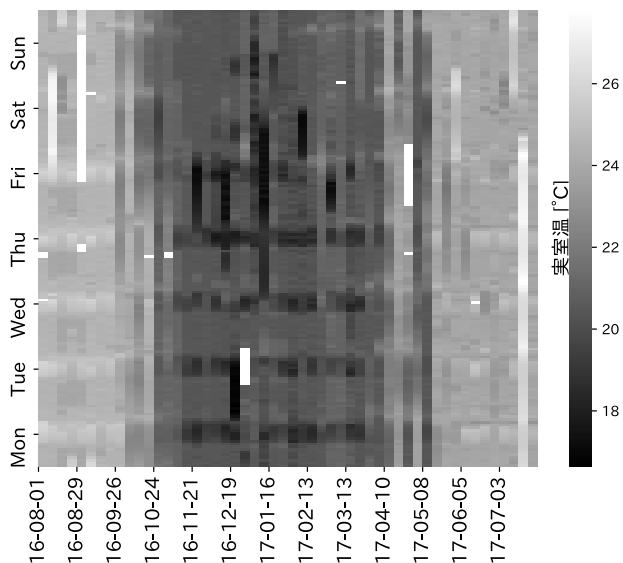


図-5 測定例(あるユーザの年間の室温変動)

3.CT の実測データを用いた米国の空調の利用実態

3.1 スケジュールモード(利用パターン)の実態

図-6 に、スケジュールモードの計測結果として、曜日(平日・休日)別の時刻別割合(全世帯平均値)を示す。CT やプログラム機能を持つサーモスタットでは、設定されたスケジュールモードに従って冷暖房機器が稼働するため、スケジュールモードの把握は非常に重要となる。平日は休日では在宅率が大きく異なり、また休日には平日よりも 1 時間程度起床時間が遅くなる等の特

性が分かる。また図-7 に、世帯人数ごとの「在宅時」モードの時間数を示す。人数が減るに従って不在確率が増えるため、特に平日には、世帯人数による差が顕著に見られた。なお地域差についても検討したが、地域間で、スケジュールモードのパターンに大きな差は見られなかった。

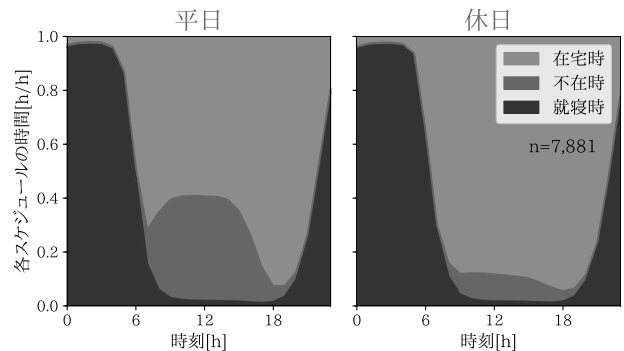


図-6 スケジュール(全体平均)

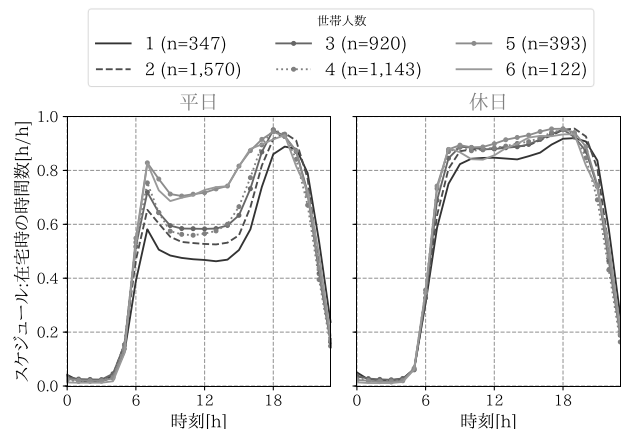


図-7 世帯人数とスケジュールモード(在宅時)の関係

3.2 設定温度、実室温の実態

図-8 に、冷暖房別・スケジュールモード別の空調設定温度、期間全体の実室温、冷暖房機器利用時の実室温の計測結果(全世帯平均値)を示す。RECS の値については、公開値は階級別回答数(ヒストグラム)であるため、階級別の中央値を用いて平均値を推定した。

在宅時については、冷暖房利用時の室温と設定温度は近く、概ね設定通りに(少なくともサーモスタットが温度を検知した場所については)温度が保たれていることが分かる。不在時、就寝時については、室温は設定温度よりも冬季は高め(夏季は低め)になっている。これは、不在時、就寝時の設定温度は、「超えて欲しくない温度(許容限界値)」が設定されており、実際の温度はそれよりも快適側にあるためである。また期間全体の実室温は、冬季には設定温度より高め(夏季は低め)になっているが、これは冷暖房が不要だった時間帯が含まれているためである。

設定温度と RECS の調査結果を比べると、RECS に比べ、設定

温度は冬季が低め、夏季が高めとなっていた。また図は割愛するが、RECSの方が世帯による温度のばらつきが大きいという違いが見られた。これはRECSの回答者がそもそも室温を把握していないという可能性もあるが、CTのデフォルト設定温度による影響(設定温度の初期値から変更しないため)、またDYDの参加者の環境意識が高いため、というバイアスがかかっている可能性も考えられる。

3.3 気象条件と空調の利用実態の関係

前節に示したように、設定温度と実室温は異なっている。そこで本節では、気候区別に、夏季と冬季における室内温熱環境の実態を確認する。図-9に、各地域の室温と設定温度を示す。ここでは、DOEによる建築用気候区分⁴⁾によって地域の分類を行った。また図-10に5つの気候区分の位置、並びに月の平均気温の最高・最低月・年間平均値を示す。また参考に、日本のいくつかの都市の気温(平年値)⁹⁾についても同図に併記する。DOEによる気候区分は基本的に、気温と降水量で決定されているが、DYDでのデータには降水量のデータは含まれていないため、こ

こでは気温のみを示している。先に述べたように、室温は設定温度より快適側にあり、気候区分によって異なるものの、概ね快適な温度範囲に保たれていることが分かる。

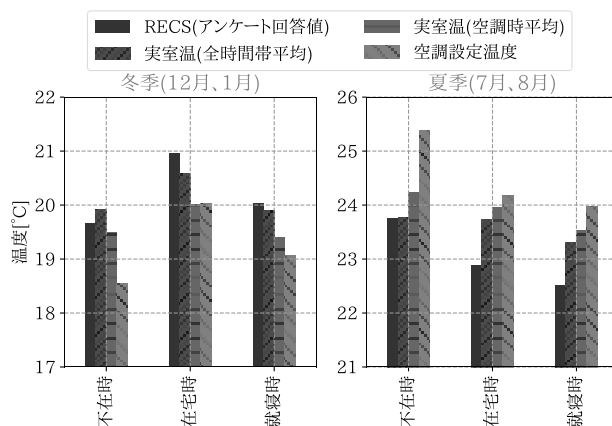


図-8 各スケジュールモードの設定・実温度(全時間帯平均)

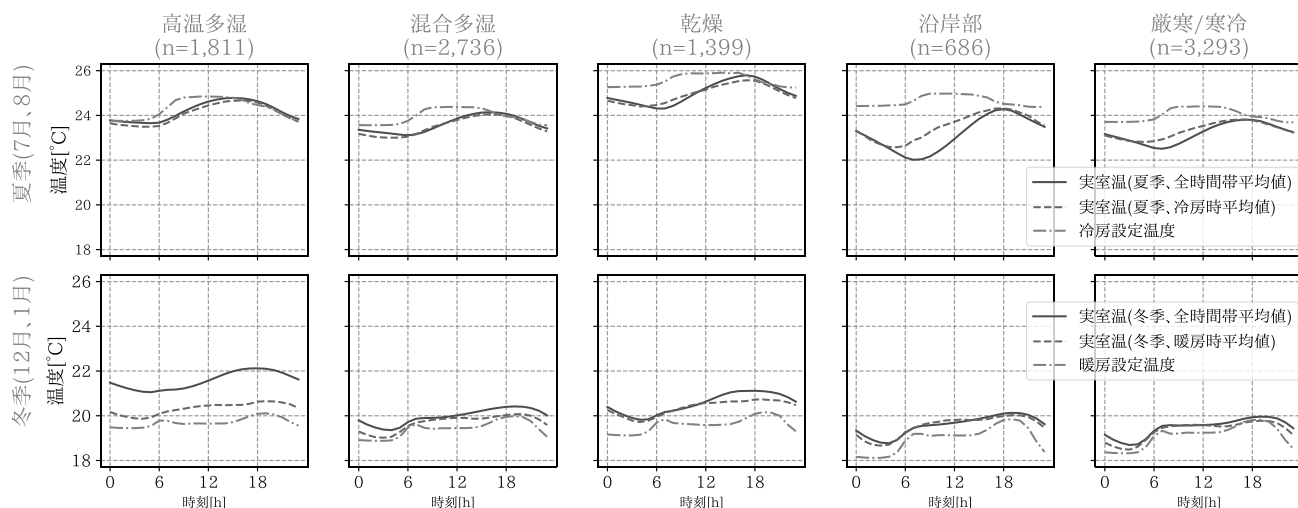
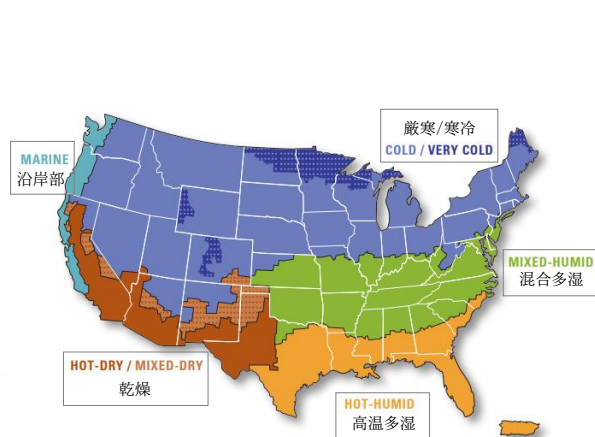
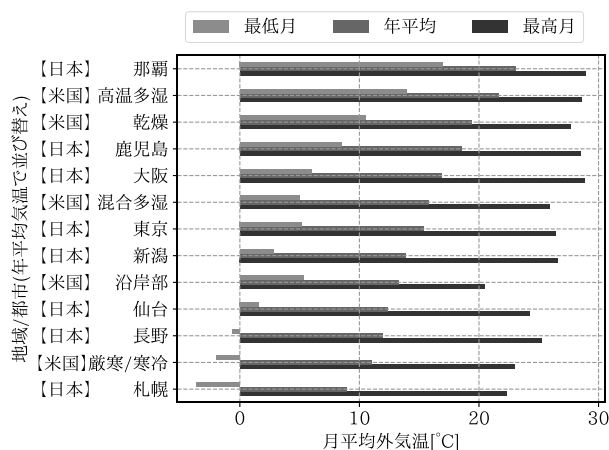


図-9 気候区分ごとの温度の時間変動



(a) 各気候区分の位置 4)図1から作成



(b) 各気候区分の外気温度

図-10 各気候区分の位置と外気温度

図-11 及び図-12 にそれぞれ、月別の 1 日あたり冷暖房利用時間、夏季・冬季の時間帯別の冷暖房利用時間を示す。日本で一般的な使い方である間欠運転の個別空調と異なり、また基本的にインバータ機ではないため、2、3 段階の熱源を持つ multi stage の機種もあるものの、基本的には空調機の稼動は On か Off のいずれかである。ここでは熱源の On の秒数から計算した、実稼動時間を示している。当然ながら、高温多湿地域では冷房利用時間が長く、代わりに暖房利用時間が短い等、気候による差が見られる。

時間帯別に見ると、暖房時には日本と同様に朝の立ち上がりがあるが、日本と異なり、深夜にも徐々に利用時間数が伸びている。これは、外気温度の低下に伴って、室温が就寝モードの設定温度に到達して空調が稼動する世帯数の増加に伴うものである。

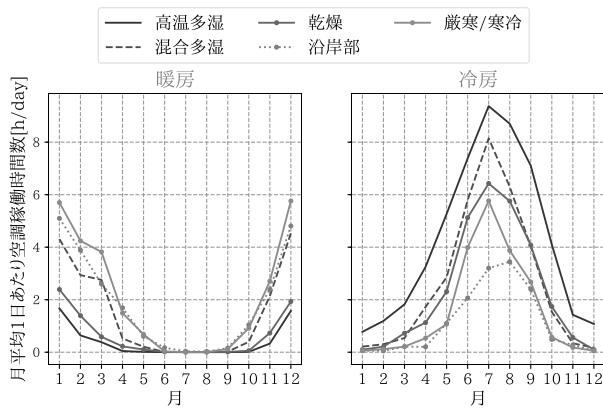


図-11 気候区分ごとの空調利用時間

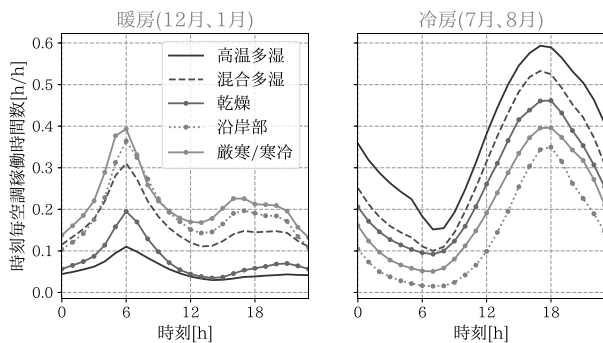


図-12 気候区分ごとの時間帯別空調利用時間

図-13 に、気候別・月別に、1 日あたりの平均外気温と、冷暖房利用時間の関係を示す。同程度の外気温で比較すると、厳寒/寒冷地域の住宅では、他の地域と比べて暖房利用時間が短い、これは断熱性能の差によるものと考えられる。また冷房では、高湿度の地域は低湿度の地域と比べて、同程度の気温に対して冷房利用時間が長くなっており、湿度の影響があると考えられる。

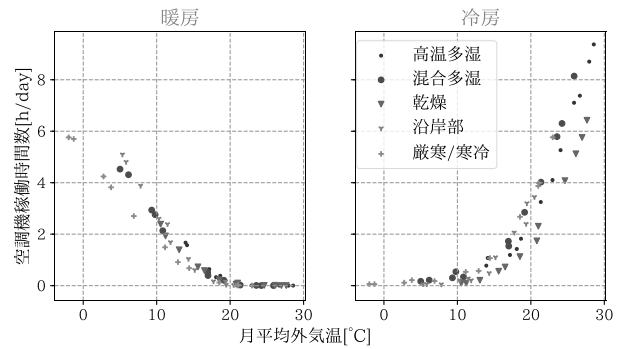


図-13 気候区分ごとの外気温と空調利用時間(月平均値)

4.空調利用実態に基づいたシミュレーション条件パターンの生成手法の提案

前章までに、米国内における空調利用実態について述べると共に、曜日や世帯人数、気象条件が空調の設定温度やスケジュールに影響を与えていることを明らかにした。

そこで本章では、これらの利用実態を元に、より実態にあったシミュレーションを行うために入力条件として利用可能な「典型的な設定温度とスケジュールモードのパターン」を生成するための手法を開発すると共に、当該手法を用いたウェブベースのツールのプロトタイプを構築する。

4.1 入力条件用設定温度の生成

ここでは、入力条件として作成したいサンプル数に応じて、実態に応じた設定温度を決定するための手法を述べる。

前章までに述べたように、設定温度は冷暖房種別、スケジュール種別、気候区分別に、それぞれ影響される。また、当然ながら世帯による差異が見られる。そこで、種別(夏季/冬季)、スケジュール種別(在宅時/不在時/就寝時)、気候区分(5 区分+全米)別に、実データに基づいて、設定温度の分布を昇順にソートしたデータベース(分布関数 $T(p)$)を作成する。次いで、作成したいサンプル数(N)に応じて、式-1 に従って、設定温度を決定する。

$$\text{入力条件用設定温度} = T(k/(N+1)) \text{ for } k \text{ in } 1, 2, \dots, N \quad \dots\dots(1)$$

すなわち、設定温度の分布全体を($N+1$)個に分け、その境界値を入力条件用の設定温度とする。 N が 1 の場合、 $T(0.5)$ 、すなわち分布の中央値が入力条件用の設定温度となる。また N が 4 の場合、 $T(0.2)$ 、 $T(0.4)$ 、 $T(0.6)$ 、 $T(0.8)$ の 4 つが入力条件用の設定温度となる。

4.2 入力条件用スケジュールモードパターンの生成

日本の住宅におけるルームエアコン等による間欠運転と異なり、米国住宅の一般的な空調システムでは毎日のスケジュールモード(在宅時、不在時、就寝時)によって空調の温

度を変更し、それによって空調の基本的な稼動状況が決まるため、スケジュールモードパターンの決定方法は非常に重要である。

前章までに述べたように、スケジュールモードパターンは平日と休日で異なり、また世帯人数によっても差異が生じている。そこで前節と同様に、空調スケジュールの実データを用いて、曜日種別(平日/休日)、世帯人数別(1-6人/全世帯)に対して、各スケジュールモードの時刻別(0-23時)の時間数(すなわち、その時間帯における当該スケジュールモードの出現確率)に関するデータベースを作成する。次いで、作成したいサンプル数(N)に応じて、スケジュールを決定する。

各時刻のスケジュールモードは互いに独立ではないため、1日24時間のデータを一つの固まりとしたクラスタ分析によって、スケジュールモードパターンを決定する。

具体的には、ある集合(例えば平日の一人世帯)に対して、そこに含まれる各世帯の時刻数(24個)×スケジュールモード数(3個)=72個の値(各スケジュールモードの出現確率を表すため、0から1の小数値となる)を持ったベクトルを作成し、分割数(クラスタ数)を与えることで、その集合をグループ化する。各グループに対し、その時刻で最も出現確率の高かったスケジュールモードを、その時刻のスケジュールモードとする。

ここで、クラスタ分析によるクラスタ数を入力条件とすることで、クラスタ内のスケジュールモードパターンが決定されると共に、そのクラスタが集合全体の何%を占めるかも出力されるため、そのスケジュールモードパターンが代表している世帯数の割合も同時に分かり、入力条件を作成・結果を評価する際の補助となる。

4.3 入力条件ジェネレータのプロトタイプの構築

前節までに述べた設定温度とスケジュールの生成手法を用いて、実際に稼動するウェブベースのツール(典型的な空調利用パターンのジェネレータ)のプロトタイプを構築した。

ここで、スケジュールモードパターンの生成時に用いるクラスタ分析は Python 2.7 の scikit-learn/cluster モジュールに含まれる K-Means 法の関数を用い、サンプル数(クラスタ数)以外は全て関数のデフォルト値を利用した。

図-14 及び図-15 にそれぞれ、設定温度とスケジュールモードパターンの生成に関するツールの GUI を示す。図-14 では例として、夏季/在宅時/全気候区分平均値について、設定温度の分布を示すと共に、20個のサンプルを出力している。また図-15 では、平日/全世帯に対して、スケジュールモードパターンの出現確率を表すと共に、20個のサンプルを出力している。

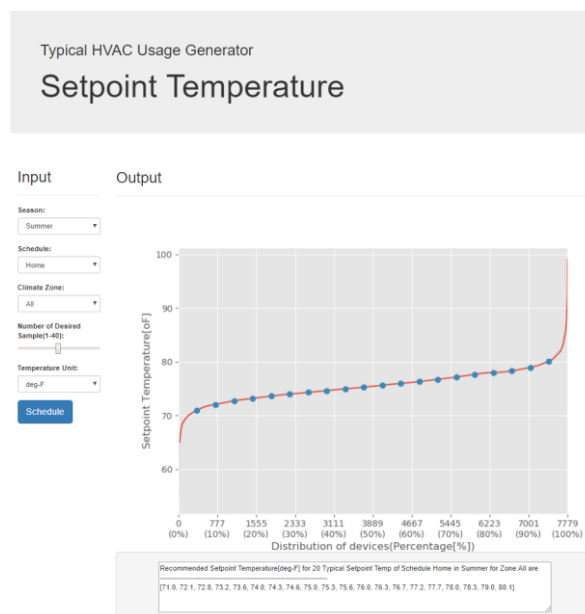


図-14 設定温度入力条件ジェネレータ GUI 例

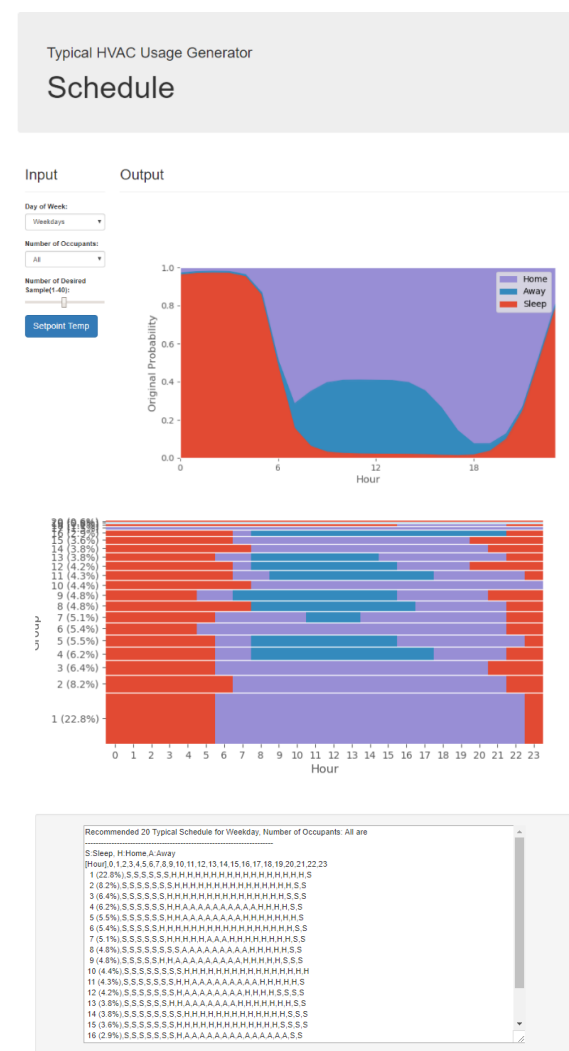


図-15 スケジュールモードパターンの入力条件ジェネレータ GUI 例

本プロトタイプでは、サンプル数は 1-40 個としており、また計算結果はユーザがシミュレーション等を行う際に容易に利用できるよう、テキストとしてページ下部に出力するようにしている。

表-1、表-2 はそれぞれ、設定温度とスケジュールモードパターンに関するツールの出力例をまとめたものである。ただし、サンプル数は 3 個としている。図-14、図-15 と比べてサンプル数が少ないため、設定温度のばらつきが小さく、またスケジュールモードパターンは類似の世帯がまとめられ、一つのグループの代表する世帯割合が大きくなっていることが分かる。

なお、本プロトタイプは開発した生成手法のアイデアを具現化したもので、現在のところ一般への公開は行っていない。

表-1 設定温度[°C]の入力条件ジェネレータの算出例

季節:		夏季			冬季		
スケジュールモード:		就寝時	不在時	在宅時	就寝時	不在時	在宅時
気候区分	計算条件数						
高温多湿	1	22.7	24.4	23.5	18.5	17.9	19.5
	2	23.7	25.4	24.4	19.7	18.9	20.3
	3	25.0	26.5	25.3	20.7	19.8	21.2
混合多湿	1	22.3	23.8	22.9	17.9	17.5	19.3
	2	23.4	25.0	23.7	19.1	18.5	20.0
	3	24.7	26.5	24.7	20.1	19.4	20.9
乾燥	1	23.9	25.3	24.3	17.9	17.2	19.3
	2	25.2	26.5	25.3	19.4	18.5	20.3
	3	26.4	27.9	26.1	20.6	19.9	21.3
沿岸部	1	23.3	24.8	23.5	16.8	17.0	19.1
	2	25.0	26.5	24.8	18.5	18.2	19.9
	3	26.6	27.7	25.6	19.7	19.4	20.6
厳寒/寒冷	1	22.5	24.1	22.9	17.3	17.2	19.1
	2	23.7	25.4	23.9	18.8	18.4	20.0
	3	25.1	26.9	25.0	19.9	19.4	20.8

表-2 スケジュールモードパターンの入力条件ジェネレータの算出例

日種別	世帯人数	計算条件数	割合[%]	就寝時	不在時	在宅時
平日	1	1	50.7	0-6, 22-23	8-16	7, 17-21
		2	43.8	0-6, 23	-	7-22
		3	5.5	0-12	13-15, 19-23	16-18
	4	1	43.4	0-5, 22-23	8-15	6-7, 16-21
		2	29	0-5, 23	-	6-22
		3	27.6	0-5, 21-23	-	6-20
休日	1	1	50.1	0-5, 23	-	6-22
		2	34.3	0-7, 23	-	6-22
		3	15.6	0-7, 22-23	8-17	18-21
	4	1	47.1	0-6, 23	-	7-22
		2	42.8	0-6, 21-23	-	7-20
		3	10.1	0-6, 22-23	9-16	7-8, 17-21

おわりに

本論文では、約 10,000 個の CT 実測データを用いて、全米の空調機器の利用実態について調査した結果について述べるとともに、また得られた結果から、設定温度・在宅スケジュールに関して、シミュレーションを行うにあたって入力条件として利用可能なパターンを生成するための手法を開発し、ウェブベースのツールのプロトタイプを構築した。

本研究における実態調査結果、また提案した手法を用いることで、より実態にあったシミュレーションが可能となり、精度の高い省エネ政策の検討や各種の省エネ方策の比較検討につながれば幸いである。

本研究では、スマートサーモスタット ecobee の研究用データ提供プロジェクト DYD によって提供されたデータを用いている。ecobee 社、並びにデータの提供を頂いた ecobee ユーザの皆様に深く感謝する。また本研究は米国 DOE/Office of Energy Efficiency & Renewable Energy の助成を受けている。ここに明記するとともに、深く感謝する。なお本報は拙著論文⁶⁾にシミュレーション条件の生成手法等に関する分析結果を加筆し、再構成したものである。

参考文献

- 1) EIA/Residential Energy Consumption Survey: <https://www.eia.gov/consumption/residential/data/2015/>
- 2) Ecobee DYD: <https://www.ecobee.com/donateyourdata/>
- 3) Wikipedia:アメリカ合衆国国勢調査局, <https://ja.wikipedia.org/wiki/アメリカ合衆国国勢調査局>
- 4) 米国エネルギー省 EERE/Guide to Determining Climate Regions by County https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/10/f27/ba_climate_region_guide_7.3.pdf
- 5) 気象庁: 過去の気象データ検索: 平年値 (年・月ごとの値, 気温平均値) <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
- 6) 上野, Pritoni, Meier: 「コネクテッドサーモスタット実測に基づく米国一般住宅の空調利用の実態調査」 空気調和・衛生工学会平成 30 年度大会 (名古屋) 学術講演論文集 pp. 253-256 (2018)

ウェブサイトは全て 2018 年 10 月 28 日閲覧

(平成 X. X. X 原稿受付)

Survey of Actual Condition of Residential HVAC Usage and a Proposal of Generation Method for Parameters for Simulation Input Based on Data Collected by Connected Thermostats in the United States

by Tsuyoshi UENO ^{*1*2}, Marco PRITONI ^{*3} and Alan MEIER ^{*3}

Key Words: Connected Thermostat, United States, HVAC Usage, Residential Buildings

Synopsis : Building energy simulation is an effective tool for establishing building codes and other policy determinations. However, the simulations are limited to very simple assumptions of temperatures and schedules because there are few measurements of actual HVAC usage. In this paper, real-world HVAC usage and temperature profiles were obtained from about 10,000 connected thermostats. The data clearly show the impact of climate, temperature settings, and number of occupants. In addition, based on the findings, a method of generating "typical schedule mode pattern and setpoint temperature" to be an input condition for simulation was developed.

(Received XX, 20XX)

*1 Central Research Institute of Electric Power Industry, Member

*2 Lawrence Berkeley National Laboratory, Member

*3 Lawrence Berkeley National Laboratory, Non-Member