住宅における暖房水準とエネルギー消費量の分析

ANALYSIS OF STANDARDS OF SPACE HEATING SERVICES AND ENERGY CONSUMPTION IN RESIDENTIAL BUILDINGS

岩船 由美子*, 西尾 健一郎**

Yumiko IWAFUNE and Ken-ichiro NISHIO

Residential energy consumptions for space heating depends on climate conditions, floor areas, dwelling structures, thermal insulation performances, types of heating supply systems, inhabitant preferences. A standard indicator of space heating services independent of above conditions is advanced based on actual measurement values on 61 dwellings in Japan area on this paper. The indicator is calculated using average room temperatures during a space heating period, room floor areas and numbers of space heating days. A space heating efficiency in a dwelling can be analyzed by examining the correlation between the indicator and energy consumption. The dwellings having electric storage thermal heating systems or electric boilers consume larger energy for their space heating standards. An efficiency of a space heating by air conditioners cannot be observed in this study.

Keywords: Residential energy, Space heating standard, Heat loss coefficient

住宅用エネルギー, 暖房水準, 熱損失係数

1. はじめに

本来、エネルギー利用の目的はエネルギーの消費ではなくそれを用いて得られる効用の増加であり、それにより人間の享受できる快適性、生産性の維持向上である。従って、多様な利用形態を持つ家庭/業務分野において、そこで必要とされる本来のサービスの質と量を把握し、これに対して必要最小限のエネルギーを供給することで、環境負荷を大幅に低減できるものと考えられるが、現実の省エネルギー政策としては機器や建物性能の向上に主眼が置かれ、効用そのものについて議論される機会は少ない。

本研究では、住宅における暖房需要を対象に、居住者が実際に必要としているエネルギーサービス水準を指標化し、エネルギー消費量や住宅属性との相関について分析することを目的とする。住宅における暖房用エネルギー消費量は、気候、住宅構造、性能、暖房設備種類、嗜好などによって大きく異なり、灯油や電力等の消費量の情報だけからその世帯がどの程度の暖房水準を必要しているかを判断することは困難である。居住者が必要としている暖房水準を定量化し、同等の水準をより効率的な手段で維持することを提案できれば、大幅な省エネルギーが実現できる。また、暖房水準とエネルギー消費量の相関が明らかになると、その家の暖房設備が適切に設計され適切に運転されているかを判断することが可能となる。同じ設備を有する住宅の傾向と著しく乖離している場合には、その要因を分析、改善することにより、暖房の省エネルギーに寄与できる。さらに、暖房水準の地域別、世帯類型別の特徴を時系列的に把握でき

れば、将来の暖房用エネルギー消費量を見通すための重要な手掛かりとなりうる。

住宅内の冬季の温熱環境やエネルギー消費に関しては、住宅性能や設備種類、ライフスタイルなどによる影響を分析するために、全国各地で実測調査が多数実施され、有用な知見が得られている¹⁾²⁾が、各調査における計測の対象や方法が異なるために、得られた結果を比較することは困難である。これに対し、澤地、坊垣らは、全国8都市において、暖冷房の仕方、期間などに関するアンケートを実施し、短期実測による居住室温データと合わせて分析を行っており、地域による暖冷房特性の違いを明らかにしているが、温熱環境とエネルギー消費量データの相関は検討されていない^{3)~5)}。

2002年から2005年に日本建築学会が実施した「住宅内のエネルギーに関する実態調査研究」における全国80件の住戸における実測データ⁶⁾⁷⁾は、全国規模で住宅のエネルギー消費量を詳細に把握する上で非常に貴重なデータであるが、暖房のエネルギー消費に関しては、全国ベースでの分析は年間消費量を積算する程度にとどまっており、温熱環境や暖房方法と関連させた詳細分析は主として地域ごとにしか行われていない⁸⁾。

本研究においては、この全国実測データの二次分析を行い、住宅における暖房水準とエネルギー消費量や住宅属性との相関について分析する。本研究の特徴は、気候特性や住宅属性、使用する暖房設備種類に依存しない暖房水準指標を定義することによって、全国ベースでの暖房水準比較が可能となり、さらに、暖房設備機器効率に

本研究の一部は2009年1月第25回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス(東京)にて発表した²²⁾。

* 東京大学生産技術研究所エネルギー工学連携研究センター
講師・工博

** 電力中央研究所社会経済研究所 主任研究員

Lecturer, Institute of Industrial Science, Collaborative Research Center for Energy Engineering, The University of Tokyo, Dr. Eng.
Central Research Institute of Electric Power Industry

関する評価を暖房水準と切り分けて行うことが可能となる点である。

2 住宅における暖房水準を表す指標の定義

2.1 暖房水準指標に関する先行研究事例

室内温熱環境における快適性を表す指標として、予測平均温冷感申告（PMV）、標準新有効温度（SET*）などが一般に用いられているが、実際の住宅全体の暖房水準を表す指標についての研究事例は限られている。

小林らは、暖房システムの性能評価の在り方について検討し、PMV の空間分布・時間変動、暖房システムの経済性（固定費・運転費）を要素とした総合指標を検討しているが、具体的な定式化には至っていない⁹⁾。PMV は温冷感（暖房快適性）に影響を及ぼす 6 つの要素（図 1 参照、気温、放射温、風速、湿度の 4 つの物理的要素と着衣量、代謝量の 2 つの人間側要素）により算定されるため¹⁰⁾、その空間分布や時間変動に関する情報をすべて得られれば、実際の暖房水準を表す指標として非常に適切である。ただし、風速や人間側の要素を与条件としても、温湿度のほかに放射温度が入力として必要となるという問題がある。放射温度は室内の壁や家具等の熱容量によって決定されるため、居住者がコントロールできない値であり、かつ実住宅において容易に観測できる値ではない。

他方、源城らは居間における温度 4 項目（団らん時床上 1 m の温度、団らん時上下温度差、団らん時グローブ温度差、明け方の最低気温）及び団らん時寝室温度、団らん時便所廊下温度の計 6 項目を取り上げ、それぞれの項目を 5 段階のグレードで定義している¹¹⁾。東北地域の実住宅で実測を行い、各グレードの平均値と灯油消費量の相関を示しているが、明確な相関は見られず、暖房性能は居住者の快適性への要求の度合いに基づく暖房の使用法の違いに大きく左右されていると推察している。ただし、実測結果からは居間温度や非空調室温度がエネルギー消費量に与える影響が大きい傾向が伺えるため、各項目の寄与度の違いを反映させるとより相関が明確になった可能性がある。

以上のような既往研究を踏まえて、本研究では、観測が容易で居住者がコントロールできるパラメータを用いて住宅の暖房水準を決定する方法について検討するものとした。

2.2 本研究における暖房水準の概念および定式化

既述のとおり、温熱環境における人間の快適性は図 1 の 6 つの要素の組み合わせで評価され、必要な暖房水準が決定される。しかし、実際に住宅内で実現される暖房水準は、経済的な理由、理念上の理由（もったいない等）、嗜好により、必ずしもこの必要暖房水準を満足しているとは限らない。この「実際の暖房水準」を実現するべく、暖房負荷が決まり、暖房機器効率より暖房エネルギー消費量が決定される。室内の温熱環境を一定に保つための暖房負荷は以下の式で算定される。

暖房負荷＝

$$\text{貫流熱負荷} + \text{換気負荷} - \text{日射熱取得} - \text{内部発熱負荷} + \text{蓄熱負荷} \quad (1)$$

上記の式における各熱負荷は、住宅の構造・性能、居住者の生活パターン、室内に設置された什器（照明家具等）、内外温度差（外気温度、室内温度）によって決定される。本研究においては、これら

のパラメータのうち、居住者がコントロールできる室内温度を説明変数とし、さらに（1）式の暖房負荷を除去するか否かを決定する暖房期間を考慮に入れて、暖房用エネルギー消費量に寄与する「実際の暖房水準」を定量化するものとする。

なお、省エネルギー基準の年間冷暖房負荷基準値においては、暖房では加湿が一般化していないため、潜熱負荷を算入する必要がないと判断されており、本研究でも顕熱のみを検討の対象とする¹²⁾。また、（1）式の蓄熱負荷に影響を及ぼす放射温度については、既述の通り、居住者がコントロールできない値であるため本研究では考慮しない。

図 1 暖房快適性を決定する要因と暖房水準

以上の想定のもと、各住戸で実現されている実際の暖房水準を表す指標を以下の様に定式化する。

暖房水準指標 H：

$$H = \sum_{i \in I} \frac{T_i - T_{base}}{T_{max} - T_{base}} \times \frac{A_i}{A} \times \frac{D_i}{D_{14}} \quad (2)$$

- I : すべての室数（居室以外も一つの室としてカウントする）
- i : 室インデックス
- T_i : 室 i の暖房期間平均温度（℃）（ただし 14℃以上のみ）
- T_{base} : 暖房が必要となる基準温度（14℃）
- T_{max} : 暖房期間平均温度最大想定値（23℃）
- A_i : 室 i の面積（ m^2 ）
- A : 住宅延べ床面積（ m^2 ）
- D_i : 室 i で使用される主要暖房設備の暖房期間日数（日）
- D_{14} : 必要暖房日数（日）（平均外気温度が 14℃以下となる日数）

本指標は、各室の暖房期間平均温度と各部屋面積、各暖房設備の暖房期間によって決定される。平均外気温度 14℃以下と想定した必要暖房日に全館平均 23℃を維持した場合にちょうど 1 に等しくなる。暖房期間は、各室の温度を維持する主要暖房設備の稼働実態から推計する。稼働率が極端に低い暖房設備は考慮しない。

本指標は、気候や住宅構造、住宅の広さ、住宅性能、用いる暖房設備種類に依存しない暖房水準を表しており、全国ベースの比較が可能である。

なお、ここでの論点として、室内温度として平均温度を採用することの是非がある。本研究で定義した指標により算定すると、24 時間 18℃暖房を実施している部屋と、在室時のみ 23℃で暖房し期間平均で 18℃を実現している部屋の暖房水準が同じということになる。この両条件における暖房負荷の差が大きく異なるようであれば、本指標を暖房水準として用いることは適切とはいえない。この点に

関して、熱負荷計算シミュレーションを実施し、室内温度のばらつきが暖房負荷に与える影響について検証を行った。詳細は注 1 に示すが、平均温度を用いることによっても暖房水準を適切に表現することができると判断している。

また、上下温度差も室内快適性を考える上で重要な要素であるが、データの制約上各室の室内温度一点を取るものとした。なお、文献 11 では熱損失係数 $2.7\text{W/m}^2\text{K}$ 以下の東北地区の住宅における居間団らん時の上下温度差が 2.5°C 以下となっており、今回分析対象とする住宅が比較的断熱性能が高いことを考慮すると、影響はそれほど大きくないことが予想される。

3. 分析データ

分析対象データは、日本建築学会学術委員会「住宅内のエネルギー消費に関する全国的調査研究委員会」が 2002 年から 2005 年にかけて実施した全国 80 戸における住宅のエネルギー消費量の計測調査データである。電力、ガス、灯油の機器別消費量 1・5 分間隔値、及び 15 分間隔の戸内温湿度、水温、外気温が得られている。戸建て・集合住宅に住む 3・4 人世帯が対象となっており、比較的性能（断熱性能・気密性能）の高い住宅が選択されている点が特徴的である。計測方法の詳細については文献 13 を参照されたい。

本研究では、この調査データのうち、温度及びエネルギー消費量データが通年利用可能な住戸のみ 61 戸の 15 分データを分析した。対象住宅の属性は表 1 に示すとおりであり、このうち、熱損失係数が次世代基準を満足する住戸は 40 戸、新省エネ基準を満足する住戸は 53 戸である（東北集合 4 のみ熱損失係数が不明）。

指標の算定に用いた調査データにおいて得られている温度データは各住戸につき数点であり、面積データは、延べ床面積と間取り情報（一部は平面図あり）が与えられている。提案指標を厳密に得るためには、各室の温度、各室の面積、暖房機器との対応が必要であるが、得られているデータの制約上、下記の様な想定を行い、指標を算定した。

(1) 各室の温度

調査データでは、リビングとそれ以外（寝室、子供室、非空調室（洗面所、台所、ホール等））の床上 1.1m 付近で各戸につき 2～4 点の温度が測定されている。リビング以外の温度データと部屋の対応は必ずしも 1 対 1 ではないため、暖房設備の稼働状況を考慮に入れて、例えば、暖房設備があっても稼働していない部屋には非空調室温度を適用するなど、調査温度データをすべての室に対応させた。

(2) 各室の面積

居室以外の面積比率を 0.2 とし、残りを居室数で除した。ただしリビングダイニングは他の部屋の 2 倍の面積とした。

(3) 暖房期間

端境期には、散発的にごくわずかな時間暖房設備が利用されることがある。また、セントラル灯油暖房設備を保有する住戸の中には、用途が不明であるが夏期にも灯油消費が継続的に消費されている住戸もある。このような暖房端境期の影響を取り除くために、暖房期間は、前後 1 週間のうちに 4 日以上暖房設備が稼働した期間とし、暖房日とカウントする数居値をピークエネルギー消費量/24（24 時間暖房であれば一日 1 時間以上稼働する日のみが暖房期間となる）とした。

また、調査データでは、ガス暖房住戸において、ガス全体の消費量から厨房、給湯、暖房用途別に推計を行っているが、室内の温度とガス消費量の相関および、給湯用ガス消費量の月別推計値から判断する限り、5 月、10 月の暖房用ガス消費量推計が過大と考えられる値があったため、そのような住戸については 11 から 4 月までの期間を暖房期間とした。なお、外気温のデータは、実測されていない住戸については気象庁地上気象観測時間別データを用いた。

表 1 分析対象住戸の仕様

住戸名	建築年	床面積 [㎡]	構造・工 法	熱損失係 数 [W/(㎡・ K)]	隙間 相 当 面 積 [㎡ /㎡]	主な暖房設備
北海道戸建 1	1999	147.4	木造	1.4	0.5	電気ボイラ
北海道戸建 2	1999	118.92	木造	1.5	0.4	電気蓄暖
北海道戸建 3	2001	157.34	ブロック+ 木造	1.7	0.52	灯油ボイラ
北海道戸建 4	2000	134.57	木造	2.1	1.08	灯油ボイラ
北海道戸建 5	1997	115.71	2×4 造	1.5	0.69	灯油ボイラ
北海道戸建 6	2000	128.28	木造	1.69	0.6	灯油ボイラ
北海道戸建 7	1999	239	1 階 RC+ 木造	1.44	0.79	灯油ボイラ
北海道戸建 8	2002	119.24	ブロック	2.05	1.12	灯油ボイラ
北海道戸建 9	1984	185.9	木造+地下 室 RC	1.87	0.35	灯油ボイラ
北海道集合 1	2001	104	SRC 造	1.67	0.72	灯油ボイラ
北海道集合 3	1990	99.13	SRC 造	0.61	0.16	ガスボイラ
北海道集合 4	1990	87.05	SRC 造	0.83	1.06	ガスボイラ
東北戸建 1	2002	159	木造パ ネル造	2.33	1.18	灯油ボイラ+エアコン
東北戸建 2	1999	153.44	2×4 造	1.79	1.06	蓄熱暖房+エアコン
東北戸建 3	1999	115.9	木造パ ネル造	1.72	0.76	エアコン+灯油温水ルームヒーター
東北戸建 4	2000	109.3	木造パ ネル造	1.77	0.87	エアコン
東北戸建 5	2000	141.6	木造パ ネル造	1.79	0.77	蓄熱暖房
東北戸建 7	2000	169.06	木造	1.01	0.7	蓄熱暖房
東北戸建 8	1988	178.2	木造	1.16	0.29	灯油ボイラ
東北集合 1	2000	72.33	SRC 造	2.47	1.74	エアコン+ボットカーベット
東北集合 3	1993	78.3	RC 造	1.68	1.52	灯油 FH
東北集合 4	2000	80	RC 造	—	0.71	オイルヒーター+石油赤外線ヒーター
北陸戸建 1	1996	150.00*	木造（一 部 RC）	1.4	0.77	蓄熱暖房+エアコン
北陸戸建 2	2001	133.86*	木造（一 部 RC）	2.2	0.71	蓄熱暖房+エアコン
北陸戸建 3	2002	117.49	木造	2.18	0.95	エアコン
北陸戸建 4	2002	130.83	木造	2.24	0.39	灯油+オイルヒーター+ボットカーベット
北陸戸建 5	1995	148.57	木造	2.66	4.41	灯油ストーブ+こたつ
北陸戸建 6	1999	176.37	木造	2.33	2.38	灯油ボイラ+ボットカーベット
北陸戸建 7	2001	187.75	木造	4.35	4.91	灯油ボイラ+エアコン
北陸戸建 8	2002	178.23	木造	2.61	0.91	エアコン
北陸戸建 9	1990	140.08	木造	3.19	2.85	灯油 FF ヒーター
北陸集合 1	1964	101.6	RC 造	6.21	8.5	灯油 FH
北陸集合 2	1985	80.61	RC 造	7.74	2.88	灯油 FH
北陸集合 3	1995	70.35	RC 造	3.52	1.25	ガス FF+灯油 FH
北陸集合 4	1989	81.67	SRC 造	2.44	1.47	灯油 FH
関東戸建 1	2002	92.73	木造	3.32	—	エアコン
関東戸建 2	2001	106	木造	3.21	2.5	エアコン
関東戸建 3	2002	105.68	木造	2.93	1.4	電気蓄熱床暖房
関東戸建 4	2001	89.85	木造	3.34	1.07	ガス FH+ボットカーベット
関東戸建 6	2000	108.06	木造	3.08	5.6	灯油 FH+エアコン
関東集合 1	1994	80	RC 造	3.89	1.1	灯油 FH+エアコン
関東集合 3	2000	72	RC 造	2.18	0.3	エアコン
関西戸建 1	2001	158.75	木造	1.49	2.51	エアコン+電気床暖房
関西戸建 2	1998	111.51	木造	2.04	4.39	灯油 FH+エアコン+こたつ
関西戸建 3	2000	117.99	S 造	2.41	4.83	灯油 FH+エアコン+電気床暖房
関西戸建 4	1999	125.82	木造	1.79	6.5	灯油 FH+ガス個別
関西戸建 5	2000	97	木造	2.37	12.15	灯油個別+ボットカーベット
関西戸建 6	2000	143.56	S 造	1.37	5.36	ガス+エアコン
関西戸建 7	1991	124.82	木造	2.61	6.4	ガス個別+エアコン
関西集合 1	2000	73.67	RC 造	1.09	0.9	エアコン
関西集合 2	1996	76.2	RC 造	1.34	1.28	ガス個別+エアコン
関西集合 3	1995	84.94	RC 造	0.87	0.96	ボットカーベット+エアコン
関西集合 4	1988	110	RC 造	1.55	1.58	エアコン
九州戸建 1	2002	134.7	S 造	1.7	3.9	エアコン
九州戸建 2	2001	156.2	S 造	2.4	4.5	エアコン
九州戸建 3	1998	123.66	木造	3.7	4.5	エアコン+こたつ
九州戸建 4	2001	158.9	木造	2.3	4	エアコン+電気 FH+ボットカーベット
九州戸建 6	2001	145.7	木造	2.5	3	電気ヒーター+ボットカーベット
九州集合 1	2001	82.4	RC 造	1.9	1.2	ボットカーベット+こたつ+エアコン
九州集合 2	1996	72.6	RC 造	3.5	2.4	エアコン
九州集合 3	1996	72.6	RC 造	2.5	2.2	エアコン+ボットカーベット

*居住部分面積

4. 分析結果

4.1 暖房用エネルギー消費量と暖房時温度

まず、図2に各住戸の暖房用二次エネルギー消費量を示す。地域別には、北海道、東北、北陸の戸建住宅でエネルギー消費量が大きく、種類別には電気ボイラ、蓄熱、灯油ボイラの住戸でエネルギー消費量が大きい。エアコンが主に使用されている世帯では、温暖な

地域はもとより東北や北陸など寒冷地においても比較的エネルギー消費量が小さい。図3は図2を一次エネルギー換算した値と暖房期間平均の暖房室及び非暖房室温度を示したものである。北海道及び東北で室温が高めであり、暖房室と非暖房室の温度差が小さい。関西は比較的室温が低く、温度差が大きい。暖房室と非暖房室の温度差が最も大きい関西戸建2では8℃以上の差となっている。

図2 各住戸における暖房用エネルギー消費量（二次換算）

図3 各住戸における暖房用エネルギー消費量（一次換算）と暖房期間平均暖房室及び非暖房室温度

図4は地域毎に分析対象住戸の暖房期間平均室温を、非空調室も含めて面積別に並べた後、温度の高い方から並べかえたものである。横軸の面積比率は、地域ごとの住宅面積の積算値に対する比率である。北海道の対象住戸では温度水準が高く、ばらつきが小さい。北海道における暖房温度の高さおよびその変動の小ささは文献4によっても確認されているが、藤原らによる北海道セントラル暖房システム運転実態調査¹⁴⁾においても、24時間連続運転している4住宅における暖房期間平均室温が21～23.5℃となっており、本調査と同様の傾向を示している。東北は北海道よりも室温のばらつきが大きく低めであるが、これは長谷川らによる調査結果¹⁵⁾と合致している。関西の住戸の温度は総じて低く、20℃以上となっている面積比率は全体の1割に満たず、今回想定した暖房が必要となる基準温度14℃に満たない面積が全体の半分となっている。

図4 地域別暖房期間平均室温水準

4.2 暖房水準と暖房用エネルギー消費量の相関

2章で定義した暖房水準指標と床面積あたり暖房デGREEデイあたりの暖房用エネルギー消費量（一次換算）を図5に示す。住宅性能も勘案するために、暖房用エネルギー消費量を熱損失係数で除している。ばらつきはあるものの、暖房水準が高くなるにつれてエネルギー消費量が大きくなる傾向がみられ、北海道の暖房水準が高く、関西や九州では低い。北陸戸建1及び北陸戸建2は暖房水準が低い割にエネルギー消費量が大きくなっている。

図6は、主要暖房源別に暖房水準とエネルギー消費量の相関を見たものである。ジュール熱を用いる電気ボイラ、蓄熱のエネルギー消費量が比較的多いことがわかる。同じ暖房源でも暖房水準に比してかなりばらつきがあり、例えば、蓄熱保有住戸では、既述のとおり北陸戸建1及び戸建2で暖房水準に比してエネルギー消費量が大きく、東北戸建5では非常に小さくなっている。北陸戸建1及び2は、北海道戸建2に対し、投入エネルギーはそれほど差はないが、北海道戸建2が住宅全体で23～24℃という期間平均暖房温度になっているのに対し、北陸戸建1、戸建2の非空調室の平均温度がそれぞれ18℃、14℃と低いために暖房水準が低くなっている。一方、東北戸建5は、蓄熱設備の容量が他の住戸に比べ非常に小さく、そのわりに得られている温度水準が高い。1月の平均蓄熱用電力消費は東北戸建7（床面積169m²）、関東戸建3（床面積106m²）では2,600～2,800Wh/h程度であるのに対し、東北戸建5（床面積142m²）では約800Wh/hと小さく、住宅性能をみても東北戸建7とほとんど同じ熱損失係数となっている。したがってこの容量で他と遜色ない暖房水準を維持できている理由は本分析のみからは明らかにできない。

このように、暖房水準とエネルギー消費量の相関を求めた上で、その関係を合理的に説明できない点をヒアリングなどで補うことによって、各戸特有の問題を抽出することが可能となる。各戸の日当たり環境、内部発熱、換気がどの程度行われるか、暖房設備の設置位置による温度の不均一性、集合住宅であれば建物内の住戸位置、さらには設備や建物の不具合など、暖房の水準とエネルギー消費量に影響を及ぼす計測データからは得られない因子は多々存在する。これらを対象住戸すべてについて調査するのは容易ではないが、各戸の暖房水準を計算することによって、単なるエネルギー消費量の多寡ではなく、消費量にあった水準が得られているかを効率的にチェックすることができ、改善できる余地を発見できれば、省エネに寄与するものと考えられる。

個別暖房方式であるエアコン、灯油やガスファンヒータなどについては、暖房水準が低い領域では、運転時間が短く、暖房による部屋温度への寄与割合が小さくなり、ばらつきが大きい。エアコン暖房は一般に直接燃焼設備であるファンヒータに比べエネルギー効率が低いといわれるが、サンプル数が少ないこともあり、今回の分析のみからは判断できない。個別のデータをより詳細に検討するために、図7に示すようなエアコン稼働時の負荷率分布を調べた。エアコンのエネルギー消費効率に影響を与える要因としては、定格COPのほかに、稼働時の負荷率（定格消費電力に対する運転時電力消費量の比率）、寒冷地における低温暖房（除霜運転）の有無が挙げられる。エアコンは中間負荷程度でもっともCOPが高く、それより低負荷になるとCOPは急激に低下し、最低負荷を下回ると断続運転

状態となるために、さらにCOPは低くなるといわれている¹⁶⁾。また、外気温度が低い状態で除霜運転が必要になると、暖房能力が低下しCOPも低下する¹⁷⁾。図7より、負荷率が低いのは関東戸建1、九州集合3であり、負荷率が30%以下の時間帯が全稼働時間の半分以上を占めている。これらのエアコンを買い替える際には、より容量の小さい製品を選択の方が省エネとなる。東北戸建4のリビング、階段エアコンは負荷率が100%以上となっている比率が大きく、低温暖房状態の時間が長いものと考えられる。東北集合1が北陸戸建8と暖房水準は同じ程度でエネルギー消費量が倍近くになっているのは、定格COPが低いためと考えられる。

図5 暖房水準と暖房用一次エネルギー消費量／熱損失係数の相関（地域別）

図6 暖房水準と暖房用一次エネルギー消費量／熱損失係数の相関（主要暖房種類別）

図7 エアコンの負荷率分布、運転時間および消費電力量

4.3 暖房水準指標の決定因子に関する分析

図8、図9は暖房水準算定に用いた期間平均暖房室温度および暖房期間と暖房水準の相関を示したものである。暖房室温度と暖房水準の相関は高く、暖房期間と暖房水準の相関は低い。今回の算定方法では、室内温度のほうが暖房水準を決定する因子として支配的である。平均温度が17℃と23℃のときでは、(2)式の第1項は0.333と1であり、3倍の差があるためである。北海道の暖房期間平均リビング温度は20～24℃と高く、関東以西は20℃以下がほとんどである。図8中の九州戸建2、関東集合1は暖房水準に比して暖房室温度が大きい。図9の暖房期間と暖房水準の相関からは傾向は読み取りにくい。北海道で比較的ばらつきが小さく、九州では大きいことがわかる。ガスFH暖房利用の関東戸建4の暖房期間が非常に長くなっているのは、暖房開始が10月1日と関東の他の世帯に比べるとかなり早いことによるものである。既述のとおり、ガスは全体の消費量から、厨房、給湯、暖房と用途別に分解された値であるため、暖房用途のガス消費量が過大に推計された可能性がある。しかし、10月の暖房時間帯と非暖房時間帯の室温を比較したところ、明らかな不整合が存在しなかったため、この点については補正せず、一次解析における推計値を用いた。

4.4 住宅性能と暖房水準の相関

住宅の性能が上がると熱の損失が抑制され基本的には暖房用エネルギー消費量は小さくなるが、暖房面積の拡大、暖房時間の長期化も併せて生じるため、結局はその効果は相殺されてしまうのではないかという指摘がある。そこで、図 10 に示すように、住宅性能を表す熱損失係数と暖房水準の相関について検討した。北海道は住宅性能が良いと暖房水準が高いという左上がりの相関がみられるが、その他の地域ではあまり相関がみられない。関西は比較的性能が良い住戸が多いが、暖房水準は低い。図 4 からわかるように、今回の分析対象住戸においては、関西は暖房水準が低く住宅性能向上による水準の上昇という状況は生じていないように思われる。文献 1 では関西地区における断熱性能が異なる 3 種類の住宅群における温熱環境を調査しているが、比較的断熱性能の高い住宅においてファンヒーターやエアコンが主な暖房器具であり、団らん時の室温が 15～17℃であったことが例示されており、今回得られた知見と整合している。

図 10 熱損失係数と暖房水準の相関

5. まとめ

本研究では、住宅における暖房水準を指標化する方法について提案し、実測データをもとに、提案指標とエネルギー消費量等との相関について分析を行った。得られた知見を以下に示す。

(1) 気候特性や住宅属性、使用する暖房設備種類に依存しない暖房水準指標を定義した。本指標を用いることによって、全国ベースでの比較が可能となり、さらに、暖房設備機器の効率に関する評価を暖房水準と切り分けて行うことが可能となる。暖房水準とエネルギー消費量の相関を分析することによって、その家の暖房設備が適切に設計され適切に運転されているかを判断することが可能となる。

(2) 提案した暖房水準指標と暖房用エネルギー消費量の相関を分析した。暖房水準が高くなるにつれてエネルギー消費量が大きくなる傾向がみられ、北海道の暖房水準が高く、関西や九州では低い。暖房設備別では、ジュール熱を用いる電気ボイラ、蓄熱のエネルギー消費量が暖房水準に比して多いことがわかる。しかし、同じ暖房源でも実際にはばらつきが大きく、住戸別の状況をさらに調査する必要がある。

(3) 個別暖房方式であるエアコン、灯油やガスファンヒーターなど

については、暖房水準が低い領域ではばらつきが大きく、エアコンの省エネルギー性について今回の分析のみからは判断できない。エアコン稼働時の負荷率分布を調べることで、寒冷地の低温暖房運転の比率が大きいこと、負荷率が 30% 以下の時間帯が全稼働時間の半分以上を占めているような効率が低い状態で運転している住戸があることが確認された。

(4) 住宅の性能を表す熱損失係数と暖房水準の相関について検討した。北海道は住宅性能が良い住戸で暖房水準が高いという左上がりの相関がみられるが、その他の地域ではあまり相関がみられない。関西は比較的性能が良い住戸が多いが、暖房水準は低い。

最後に、本手法の適用可能性について、考察を加える。

本報告では各戸の比較による差異を見出して分析するという方法を用いたが、サンプルを増やすことができれば、暖房設備ごとに平均的な暖房水準—消費量相関が得られるものと考えられ、暖房設備毎の実際の機器効率を推計するのに非常に有効な手段となりうる。ただし、暖房水準が低い住戸に関しては、室内温度に対する暖房エネルギー投入の寄与率が小さいため、ばらつきが大きく、住宅の性能により水準が決定されてしまうため、本提案指標で直接判断するのは難しい可能性がある。ただし、そもそもこのような住戸は暖房エネルギー消費の実需要自体が小さいのでエネルギー効率改善の余地も小さいものと考えられる。

エアコンに関しては、使用条件によって効率が大きく変わるため、さらにサンプルを増やして、負荷率、暖房水準等について詳細に検討することが望ましい。家の性能と暖房水準、エネルギー消費量から、エアコンの効率を逆に推計できる可能性もある。

本提案指標は、住戸内の温度を計測できることが理想的であるが、温度を計測に頼らないやり方でもある程度推計可能である。アンケートによって、月別の光熱費、暖房期間、一日当たり暖房時間、暖房時設定温度、暖房部屋割合、住宅性能に関する情報を得て、非空調室温度を仮定すれば暖房水準と暖房用エネルギー消費量が推計することが可能となり、より多くのサンプルについて暖房水準とエネルギー消費量の相関について情報を得ることができる。

謝辞

本研究は、(社)日本建築学会学術委員会「住宅内のエネルギー消費に関する全国的調査研究委員会」が 2002 年から 2005 年にかけて実施した計測調査のデータを利用したものである。データの提供、分析に関して、新潟大学赤林伸一教授、新潟大学大学院石山洋平氏（現在新潟県南魚沼地域振興局地域整備部建築課）、そのほか計測調査に関わった担当の方々よりご協力いただいた。ここに記して深く感謝の意を表します。

注

注 1) 室内温度のばらつきが暖房負荷に与える影響に関する検証

暖房方式の違いによる室内温度のばらつきと暖房負荷の相関に関する先行研究事例としては、羽山らが行った暖房期室温の標準偏差と暖房負荷についてシミュレーションによる評価がある¹⁸⁾。室温分布の正規性を仮定し、最低基準温度の累積確率が同じという条件で、部分暖房のほうが全室暖房よりも暖房負荷が大きくなる可能性が示唆されている。しかし、同文献に示されるようにそもそも実住宅における室温分布の正規性が保証されない

ため、この結論の妥当性は十分に検証されているとはいいい難い。また小林らは、本研究と同じ調査データを用いて、各戸の空調用エネルギー消費量と室温の標準偏差の相関について分析しているが、北陸地域でエネルギー消費量が大きくなると室温の標準偏差が大きくなる傾向がみられるほかは明らかな相関は得られていない¹⁹⁾。

以上のように、既往文献からのみでは室内温度のばらつきと暖房負荷の相関について十分な情報が得られず、暖房方式の違いが本研究定義の暖房水準指標にどのように反映されるかは明らかではない。そこで、連続全館暖房住宅と間欠在室部屋のみ暖房住宅において本研究定義の暖房水準指標が同じ水準となることが現実起こりうるのか、またそのような状況で暖房負荷がどの程度違ってくるのかについて、熱負荷計算シミュレーションによる検証を行った。

動的熱負荷計算シミュレーションソフト「Amenity」^{注2)}を用いて、文献20における126m²戸建住宅モデルを対象に、連続全館暖房と間欠在室部屋のみ暖房を想定し、本研究定義の暖房水準指標が同程度になるような暖房温度、および暖房負荷を算定した。生活スケジュール、換気回数、室内顕熱潜熱容量についても文献20を参照した。

シミュレーションケース及び結果は注・表1に示すとおりである。東京次世代省エネ基準住宅では、ほぼ同じ暖房水準を有する連続全館暖房住宅に比べて間欠在室部屋のみ暖房住宅の暖房負荷が15%程度大きくなった。間欠在室部屋のみ住宅では、非在室時非在室部屋で暖房負荷は0であるが、暖房を開始する朝の立ち上がりの負荷（(1)式における蓄熱負荷）が大きいため、合計としては連続暖房住宅を上回る値となった。東京新省エネ基準住宅、札幌次世代省エネ基準住宅で暖房負荷の差が小さいのは、(2)式において平均温度が最低基準温度14℃に満たない非空調室の温度水準が暖房水準算定にカウントされず、18℃全館連続暖房と同水準となる間欠暖房時の設定温度（注・表1におけるx℃）が控えめになったためである。仮に、これらの非空調室の温度水準も加えて算定すると、18℃全館連続暖房と同水準となる間欠暖房時の設定温度は26℃以上になり、現実の暖房設定温度²⁰⁾を大きく上回る。本提案指標において温度水準が低い非空調室をカウントしないということは、間欠暖房時には在室場所（空調室）の温度水準がより支配的になっていると解釈することができる。

したがって、本研究定義の指標において暖房方式の違いによって暖房負荷に差が生じる可能性があるのは、非寒冷地の次世代省エネ基準クラスの住宅であり、間欠暖房住宅の場合、エネルギー消費量が大きめになることが予想される。ただし、連続全館暖房住宅と間欠在室部屋のみ暖房住宅の比較は、時間的、空間的な偏差が最も大きい極端なケースの比較である。本研究定義の指標は室ごとの平均温度を用いるために室間の温度のばらつきは表現できるため、同じ暖房水準に対する暖房負荷の偏差は、今回試算された15%よりは小さくなるものと考えられる。さらに、既述の通り、新省エネ基準住宅や寒冷地などより暖房条件が厳しくなるケースでは、暖房水準が同じであれば暖房負荷に大きな差は生じない。すなわち、平均温度を用いることによって、暖房水準の高低を概ね表現することができるという。

暖房負荷（エネルギー消費量）は住宅構造や性能によって異なるため、本検証は必ずしも十分とはいえないが、指標は可能な限りシンプルな構造にしておく方が汎用性が高いと考え、このような誤差を考慮したうえで、本研究においては平均温度を使用するものとする。暖房方式の違いや、暖房時の温度分布については、分析の際に合わせて検討するものとした。

注2) 動的熱負荷計算シミュレーションソフト「Amenity」

「Amenity」は、財団法人電力中央研究所が開発した、国土交通省特別評価認定「住宅性能表示基準（年間空調負荷計算：IBEC 品試 SN-0007）」を受けた動的熱負荷計算シミュレーションソフトウェアである。室内の放射、対流、伝導による伝熱現象を三次元的に模擬し、居室者の温熱快適性および空調負荷を定量的に評価できるツールであり、温熱快適性に大きな影響を及ぼすにもかかわらず、従来粗雑に扱われてきた放射伝熱を高精度に扱えるという特徴を有している。

注・表1 連続全館暖房住宅と間欠在室部屋のみ暖房住宅における熱負荷計算シミュレーション

シミュレーションケース			シミュレーション結果	
地域	断熱水準	暖房設定	暖房水準	暖房負荷(MJ)
東京	次世代省エネ基準 (Q 値 2.60W/m ² K)	連続全館暖房（設定温度 18℃）	0.504	22,453
		間欠在室部屋のみ暖房（上と同じ暖房水準となる暖房設定温度 x℃）	0.498 (x=23.5℃、非空調室平均実現温度 14.3-15.6℃)	25,909 (連続全館暖房に比べて 15%増)
	新省エネ基準 (Q 値 3.93W/m ² K)	連続全館暖房（設定温度 18℃）	0.509	40,300
		間欠在室部屋のみ暖房（上と同じ暖房水準となる暖房設定温度 x℃）	0.506 (x=25℃、非空調室平均実現温度 12.9-14.6℃)	42,033 (連続全館暖房に比べて 4%増)
札幌	次世代省エネ基準 (Q 値 2.60W/m ² K)	連続全館暖房（設定温度 18℃）	0.478	61,294
		間欠在室部屋のみ暖房（上と同じ暖房水準となる暖房設定温度 x℃）	0.464 (x=25℃、非空調室平均実現温度 11.5-13.3℃)	63,529 (連続全館暖房に比べて 4%増)

*札幌新省エネ基準は、連続全館暖房と同等の暖房水準となる間欠在室部屋のみ暖房のシミュレーション結果において、非空調室の温度が著しく低くなるため、想定しなかった。

参考文献

1) 澤島智明, 松原斎樹, 蔵澄美仁: 住宅の断熱性能による冬期居間の温熱環境と暖房の仕方の差異-関西地域における住宅の温熱環境と居住者の住まい方に関する事例研究 その 1, 日本建築学会計画系論文集, No. 565, pp. 75-81, 2003. 3

2) 西村仁, 池田真樹, 藤村知春, 垂水弘夫: 北陸の次世代省エネルギー基準全電化住宅を対象とした温熱環境と暖冷房用エネルギー消費に関する実態調査, 日本建築学会環境系論文集, No. 582, pp. 37-44, 2004. 8

3) 澤地孝男, 坊垣和明, 吉野博, 鈴木憲三, 赤林伸一, 井上隆, 大野秀夫, 松原斎樹, 林徹夫, 森田 大: 用途別エネルギー消費量原単位の算出と推定式の作成, 全国的調査に基づく住宅のエネルギー消費とライフスタイルに関する研究(第 1 報), 日本建築学会計画系論文集, No. 462, pp. 41-48, 1994. 8

4) 坊垣和明, 澤地孝男, 吉野博, 鈴木憲三, 赤林伸一, 井上隆, 大野秀夫, 松原斎樹, 林徹夫, 森田大: 夏期および冬期の居住室温とその地域性に関する研究,全国的調査に基づく住宅のエネルギー消費とライフスタイルに関する研究-第 2 報-用途別エネルギー消費量原単位の算出と推定式の作成, 日本建築学会計画系論文集, No. 505, pp. 23-30, 1998. 5

5) 坊垣和明, 澤地孝男, 吉野博, 鈴木憲三: 全国的調査に基づく住宅の暖冷房時間および暖冷房期間に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, No. 509, pp. 41-47, 1998. 6

6) 日本の住宅におけるエネルギー消費, 日本建築学会, 2006

7) 村上周三, 坊垣和明, 田中俊彦, 羽山広文, 吉野博, 赤林伸一, 井上隆, 飯尾昭彦, 鉾井修一, 尾崎明仁, 石山洋平: 全国の住宅 80 戸を対象としたエネルギー消費量の長期詳細調査, 日本建築学会環境系論文集, No. 603, pp. 93-100, 2006. 5

8) 石山洋平, 赤林伸一, 坂口淳, 山岸明浩, 浅間英樹: 暖冷房機器のエネルギー消費に関する検討: 新潟地域の住宅におけるエネルギー消費に関する調査研究 その 2, 日本建築学会環境系論文集, No. 608, pp. 75-80, 2006. 10

9) 小林理浩, 落合総一郎, 藤木利信: 暖房システムの快適性と経済性を考慮した指標の検討: その 1 天井暖房とエアコン暖房の実測比較, 日本建築学会大会学術講演梗概集. D-2, pp. 1077-1078, 2003

10) 空気調和・衛生工学会, 快適な温熱環境のメカニズム-豊かな生活空間をめざして, : (社) 空気調和・衛生工学会, 2006

- 11) 源城かほり, 松本真一, 吉野博, 石川善美, 澤田紘次, 佐々木隆, 三浦秀一, 中田亞洲生: 東北地域の戸建住宅における冬期の室内温熱環境と暖房エネルギーに関する実測調査, 日本建築学会技術報告集, No. 15, pp. 165-170, 2002. 6
- 12) 次世代省エネルギー基準解説書編集委員会: 住宅の省エネルギー基準の解説, (財) 建築環境・省エネルギー機構, 2007
- 13) 村上周三, 赤林伸一, 絵内正道, 吉野博, 飯尾昭彦, 坊垣和明, 鉾井修一, 渡辺俊行, 坂口淳: 住宅を対象としたエネルギー消費量の測定システムの開発研究, 日本建築学会技術報告集第 22 号, pp. 355-358, 2005. 12
- 14) 藤原陽三, 絵内正道, 鈴木憲三, 羽山広文: 北海道の高断熱・高気密住宅におけるセントラル暖房システムの運転実態に関する調査, 日本建築学会環境系論文集, No. 628, pp. 767-774, 2008. 6
- 15) 長谷川兼一, 吉野博, 石川善美, 松本真一, 源城かほり, 竹内仁哉: 熱環境から見た冬期の居住性能に関する地域特性の推移: 東北地方都市部を対象とした 20 年間の変化, 日本建築学会環境系論文集, No. 593, pp. 33-40, 2005. 7
- 16) 細井昭憲, 吉田光子, 澤地孝男, 三浦尚志, 辻原万規彦: 暖房モードにおけるルームエアコンディショナの COP, 日本建築学会九州支部研究報告(環境系), No. 46, pp. 189-192, 2007. 3
- 17) 月館司: 寒冷地におけるヒートポンプ暖房の高効率化に向けて, エレクトロヒート, No. 162, pp. 1-7, 2008
- 18) 羽山広文, 小林直樹, 絵内正道, 菊田弘輝, 渡邊均: 住宅の室温分布と熱負荷の評価方法に関する研究: その 1 累積確立を用いた室温分布と熱負荷の評価法, 日本建築学会北海道支部研究報告集, No. 81, pp. 173-176, 2008. 6
- 19) 小林直樹, 絵内正道, 羽山広文, 菊田弘輝: 住宅室内温度の標準偏差と暖房期・冷房期における空調用エネルギー消費量の関係, 日本建築学会北海道支部研究報告集, No. 80, pp. 215-218, 2007. 7
- 20) 宮永俊之, 占部亘: 住宅用室内温熱環境設計ツールの実用化 その 2: 運転特性を考慮した暖房機器の性能評価手法の開発, 電力中央研究所報告 R07034, 2008
- 21) (財) 省エネルギーセンター: 平成 17 年度「省エネルギー対策実施状況アンケート調査」, http://www.eccj.or.jp/pressrelease/060512_1.html (2009. 12. 24 参照)
- 22) 岩船由美子: 住宅における暖房水準に関する検討, 第 25 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文要旨集, p. 123, 2009

(2009年6月5日原稿受理, 2009年12月22日採用決定)