北海道における高断熱戸建て住宅の温熱環境とエネルギー消費の実態

熱損失係数が $1.3\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ レベルの住宅を主たる対象とした調査THERMAL ENVIRONMENT AND ENERGY CONSUMPTION
OF WELL-INSULATED DETACHED HOUSES IN HOKKAIDOAn investigation of houses whose heat loss coefficients are mainly around $1.3\text{W}/\text{m}^2\text{K}$

立松 宏一*, 福島 明**, 鈴木大隆***, 月館 司***

廣田 誠一****, 高倉政寛***, 池田裕雅****

*Kouichi TATEMATSU, Akira FUKUSHIMA, Hirotaka SUZUKI,
Tsukasa TSUKIDATE, Tomohito HIROTA, Masahiro TAKAKURA
and Hiroki IKEDA*

In this study, we researched the thermal performance of well-insulated detached houses in Hokkaido. The heat loss coefficients of these houses are mainly around $1.3\text{W}/\text{m}^2\text{K}$. The space heating and hot-water supply systems use electricity in many of these houses. The results of our research are as follows: 1) Remarkably high temperatures were not found in these houses during summer. This is probably because of cross-ventilation and a small amount of solar heat gain. 2) The room temperature is stable throughout heating season, in spite of the high thermal performance. 3) The factors that influence the room temperature in each season were verified using multiple regression analysis. 4) The primary energy consumption of well-insulated houses with electric heating devices is greater than that of conventional houses equipped with fossil fuel boilers.

Keywords : Natural Room Temperature, Thermal Sensation, Primary Energy Consumption, Questionnaire Survey, Multiple Regression Analysis

自然室温, 温冷感, 一次エネルギー, アンケート調査, 重回帰分析

1. はじめに

住宅の更なる省エネルギー化が求められる中、北海道では従来の断熱性能を大きく上回る住宅の建設が進んでいる。2008年には、熱損失係数 $1.3\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ 以下、相当隙間面積 $1.0\text{cm}^2/\text{m}^2$ 以下を必須要件とする「北方型住宅 ECO モデル」が、国土交通省の実施する超長期住宅先導的モデル事業として採択され、同年度内に 123 件のモデル住宅が建設された。また、灯油価格が急激な値上がり傾向にあったことから、これらの住宅の多くは設備を全電化としている。

これまで、温熱環境向上と省エネルギー性を両立させる技術として住宅の高断熱化が推進されてきたが、それが実際の効果を伴っているかどうかは、その時々技術水準で建てられた実住宅において温熱環境やエネルギー消費量を調査し、実態を見極める必要がある。

北海道における住宅の温熱環境やエネルギー消費量に関する実態調査は、部分間欠暖房から全室連続暖房への移行草創期に行われた事例として、繪内ら^{1)~3)}による 1974~1976 年にかけての調査があり、1992~1993 年に行われた坊垣ら⁴⁾の全国 8 都市域を対象とし

た調査では、札幌の住宅の冬季の日平均室温がほかの地域に比べて高く住戸間のばらつきが少ないこと等、仙台以南の住宅と明らかに傾向が異なることを示している。近年では、鈴木ら⁵⁾が、北海道全域の 879 世帯を対象としたアンケート調査を実施し、冬季の居間室温と住戸形態、暖房に関する全体像を明らかにしている。

一方、住宅内の温度やエネルギー消費特性は、断熱性能のみならず住宅設備やライフスタイルによっても変わり、ばらつきが大きい。なるべく多くの住宅を対象にした調査を行うことが重要であるが、熱損失係数が $1.3\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ レベルの住宅については、これまで建設戸数が少なかったため、本格的な実態調査は行われていない。

本論文では、北方型住宅 ECO モデルをはじめとする高断熱戸建て住宅 95 件を対象として、温熱環境とエネルギー消費量の実態調査を行い、室温形成要因に関する考察や設備仕様とエネルギー消費量の関係について考察を行った。これらの検討により、温熱環境の快適性と維持しつつ、確実に省エネルギー化を図るための課題を明確化することを目的とした。

本論文は、参考文献17)~19)の内容に新たな解析結果と考察を加えて加筆し、まとめたものである。

* 北海道立総合研究機構北方建築総合研究所 工修

** 北海道立総合研究機構建築研究本部 博士(工学)

*** 北海道立総合研究機構北方建築総合研究所 博士(工学)

**** 北海道立総合研究機構北方建築総合研究所

Northern Regional Building Research Institute, Hokkaido Research Organization, M. Eng. Building Research Department, Hokkaido Research Organization, Dr. Eng.

Northern Regional Building Research Institute, Hokkaido Research Organization, Dr. Eng. Northern Regional Building Research Institute, Hokkaido Research Organization

2.1 調査対象住宅

建設地は図 1 に示すように、道内 31 市町村に分布している。熱損失係数は $0.92 \sim 1.83 \text{ W/m}^2\text{K}$ の範囲にあり、平均値は $1.31 \text{ W/m}^2\text{K}$ である。なお、本論文で用いる熱損失係数は、熱交換換気による熱回収を考慮せず、換気回数を 0.5 回/h として算出している。

世帯主の年齢は 30 代～40 代が中心であり、15 歳以下の子を持つ親と子からなる世帯が 46 件（61%）を占め、次いで夫婦のみの世帯が 16 件(21%)と多い。換気設備は第 1 種換気設備を採用している住宅が 25 件(30%)あり、うち 24 件は熱交換式であることを確認している。

暖房は電気熱源を採用している住宅が 61 件（79%）を占めている。なお、図 2 は主たる暖房設備により分類しており、例えば、蓄熱式暖房機を採用している 27 件のうち 18 件は、電気パネルヒーターまたは電気ボイラーを併用している。

2.2 調査方法

(1) 温湿度実測調査 本調査では、なるべく多くの住宅の温湿度データを得ることを優先し、代表的な室について各室 1 箇所の温湿度を測定した。全住宅について居間と主寝室の 2 箇所の温湿度を測定することとし、うち 25 件は脱衣室を加えた 3 箇所の温湿度を測定した。測定間隔は 1 時間とした。気象データは建設地最寄りの気象官署またはアメダス観測地点のデータを入手して分析に用いた。

測定には温湿度ロガー（T&D 社製 RTR-53、TR-72U、TR-72S、エスベック社製 RS-12、RS-11、LASCAR 社製 EL-USB2 のいずれか）を用い、各住宅への設置は、表 1 の注意事項を伝えた上で当該住宅の建設業者に依頼した。測定期間は、2009 年 5 月から 2010 年 4 月までとしたが、個々の住宅により測定期間が異なる。表 2 に温湿度データを回収できた調査対象住宅数を示す。

(2) 設計図書調査 すべての調査対象住宅について、図面及び熱損失係数計算書から、床面積、熱損失係数、各部位熱貫流率、各方位開口部面積、ガラス仕様等を調査した。

(3) 事業者アンケート調査 暖房、給湯、換気設備の種類については設計図書のみで十分な把握ができなかったことから、建設事業者を対象としたアンケートによりデータを補足した。有効回答数は 77 件である。

(4) **居住者アンケート調査** 居住後概ね1年以上を経過した2010年2月に、居住者を対象としたアンケート調査を実施し、世帯主年齢、世帯人数、冷房装置有無や温冷感に関して調査した。有効回答数は75件である。

(5)エネルギー消費量調査 2009年4月から2010年3月までの電気、ガス、灯油の使用量を検針票等により調査した。記録は居住者に依頼した。有効回答数は67件である。

図1 調査対象住宅の分布

図2 調査住宅の属性

図2 調査住宅の属性

表 1 設置上の注意事項

- ①床から概ね1m～2mの高さの棚や台の上（又は壁等にヒモで吊るす）に置いてください。
- ②日射（太陽光）が直接当たる場所は避けてください。
- ③窓の下は避けてください。
- ④放熱器（ストーブ・パネルなど）や家電製品（テレビなど）の熱の影響を受ける場所は避けてください。
- ⑤子どものいたずら・紛失などに注意してください。

表2 月別の温湿度実測調査対象住宅数

[illegible]

3. 温度の調査結果

3.1 通年の実測結果概要

(1) 札幌市及び旭川市内の住宅の調査結果

表 3 に、札幌市及び旭川市内の調査対象住宅のうち、2009 年 5 月から翌年 4 月までの通年調査を実施した住宅の一覧を示す。これらの住宅のうち、1 月の月平均居間室温で最大値、中央値、最小値を示した 3 住宅の測定結果を図 3 に示す。5 月から 10 月頃まで室温が外気温の影響を受けて変動しているが、以降は暖房期に入り、室温がほぼ一定で推移している。居間室温の最高値は、それぞれ、札幌⑧の住宅が 8 月 11 日 14 時に記録した 30.4℃、旭川③の住宅が 8 月 10 日 15 時に記録した 33.2℃であり、既往の住宅と比べて目立った過熱状況は確認されなかった。

次に、表 3 に掲げた住宅の外気温と居間室温の関係を図 4 に示す。毎時の外気温に対応する居間室温の実測値を、外気温 2℃刻みで平均化した値を図上にプロットしている。外気温が低いときには、住宅によって外気温の影響の度合いが異なるが、暖房によって居間室温が 17℃～24℃の範囲で維持されている。一方、自然室温が暖房設

定温度に一致する時期が、暖房期と非暖房期の端境期となり、このときの外気温は住宅の熱性能や日射取得熱量によっても異なるが、概ね 10℃前後である。端境期寄りの暖房期は小負荷で暖房を行うことから、過熱状況を生じることが懸念されたが、一部の住宅で端境期に比べて高い温度を示しているものの、より外気温が低いときと比べて、特に室温が高くなる状況にはなっていない。

端境期より外気温が高くなると、外気温の上昇に伴い、居間室温も自然室温に従って上昇している。さらに外気温が 26℃以上では、外気温よりも室温が低い住宅が現れている。この要因を考察するため、8 月 10 日から 11 日にかけての温度推移を図 5 に示す。グラフは、札幌市及び旭川市の調査対象住宅のうち、居間への冷房装置の設置有無を確認できた住宅の、それぞれ平均値を示している。冷房装置を設置している住宅は、昼から夜にかけて室温の低下が見られ、冷房装置の利用が外気温よりも室温を低くしている一つの要因である。もう一つの要因として、住宅の熱容量によって、外気温の日変動に対し室温の日変動の振幅が小さく抑えられ、室温のピークが外気温のピークより低くなっていることが挙げられる^{注1}。

(2) 全住宅の調査結果

図 6 に、全住宅を対象とした月別平均室温の統計値を示す。居間の年平均室温は 23.3℃であった。また、12 月から 2 月の居間の平均室温は 22.5℃（標準偏差 1.8℃）であり、一般住宅を対象とした調査である文献 5) の平均値 20.9℃（標準偏差 2.7℃）と比べて、1.6℃高く標準偏差が 0.9℃小さい。

測定を行った 3 室のうち、居間と脱衣室は年間を通じて平均値としてはほぼ同様の温度推移を示している。一方、主寝室は冬季に居

住宅名	床面積 [m ²]	熱損失係数 [W/m ² K]	月平均居間室温[℃]		住宅名	床面積 [m ²]	熱損失係数 [W/m ² K]	月平均居間室温[℃]	
			8月	1月				8月	1月
札幌①	115.0	1.11	25.4	19.8	旭川①	131.7	1.18	25.5	22.7
札幌②	125.0	1.22	26.7	20.2	旭川②	92.7	1.23	27.2	21.2
札幌③	147.5	1.26	25.0	21.9	旭川③	140.6	1.26	26.7	23.1
札幌④	129.5	1.31	27.0	23.1	旭川④	123.1	1.27	25.4	21.6
札幌⑤	87.4	1.33	25.4	20.9	旭川⑤	119.3	1.28	25.9	22.5
札幌⑥	150.4	1.35	26.2	21.3	旭川⑥	130.8	1.28	25.0	22.3
札幌⑦	148.0	1.47	25.5	23.7	旭川⑦	97.7	1.56	24.8	20.6
札幌⑧	131.1	1.61	26.0	20.6	旭川⑧	129.2	1.63	25.3	21.2
札幌⑨	141.4	1.68	26.4	22.7	旭川⑨	103.3	1.66	27.6	20.2
					旭川⑩	126.3	1.79	26.3	20.4

(a) 札幌市内の住宅

(b) 旭川市内の住宅

図 3 居間の室温の測定事例

(a) 札幌市内の住宅

(b) 旭川市内の住宅

図 4 外気温と居間の室温の関係

間より低い温度で推移しており、12月から2月における主寝室の平均室温は20.9℃（標準偏差2.4℃）と、同期間の居間の平均値より1.6℃低く、標準偏差が0.6℃大きい。

図7に、日較差（日最高室温と日最低室温の差）の月別平均値の統計値を示す。日較差は年間を通じて2℃～3℃程度で推移している住宅が多い。夏季は特に日較差が小さく、住宅や室によるばらつきも小さい。これは住宅の熱容量により室温変動が抑えられているとともに、日射による室内の過熱がそれほど生じていないことも示唆している。ただし、一部の住宅の主寝室では日射の影響により一時的に室温が高くなっており、8月～9月の日較差の最大値が大きくなっている。冬季は、基本的に連続暖房が行われていると考えられるが、夏季と比べて日較差が大きくなる傾向がある。断熱性能や気象条件、設備仕様等との関係を検証したところ、非暖房期においては熱損失係数の小さな住宅が日較差も小さい傾向にあった。暖房期は、基礎断熱の住宅や家族人数の多い住宅で日較差が小さい傾向があったものの、その他の要因との明瞭な相関は見出されず、住まい方や暖房設備の使い方による影響が大きいと考えられる。

3.2 夏季及び冬季の調査結果

(1) 暑さのピークの出現時期

図8、図9に居間の最高室温を記録した旬、時刻の度数分布を示す。併せて温湿度から計算した不快指数DIについても示している。温度、不快指数とも最高値の出現時期は8月の上中旬に集中する結果となった。時刻別では夕方にピークが生じており、不快指数は相対湿度が高くなる夜間に最高値が生じるケースも少なくない。

(2) 冷房装置の影響

冷房装置を設置している住宅は、居住者アンケートで回答があった74件のうち19件（26%）だった。年間の運転日数は2週間程度以内の住宅が15件と多い。また、1日あたりの運転時間は13件が3時間程度以内と回答している。一方、図5に示したとおり、室温がピークとなる時間帯には既に外気温が下がり始めていることから、通風による防暑対策も十分に可能であるといえる。

(3) 温冷感との関係

図10に「夏季において住宅内の温度はどうか」「冬季の住宅内の温度はどう感じますか」という居住者アンケートの設問に対する回答者数の対応を示す。夏、冬ともに「心地よい」「ちょうどよい」と回答のあった住宅が約半数と最も多く、次いで夏季は「心地よい」が冬季は「やや寒い」、夏季は「やや暑い」が冬季は「ちょうどよい」の順に回答数が多い結果となった。

図11には夏季についてのアンケートの回答と実測値との対応を示す。実測による温熱環境の指標として、室温及び不快指数の居間の年間最高値と、主寝室の日最低値の年間最高値を示している。アンケートとの相関が明瞭なのは、居間の年間最高値であり、居間の室温が30℃、不快指数は80を超える場合があると、「暑い」「やや暑い」という回答が増える傾向が見られた。

冬季については、2月上旬における日中（6時～21時）居間室温と夜間（21時～6時）主寝室室温との対応を図12に示している。日中居間の温度が25℃程度、夜間主寝室の温度が20℃以上の住宅の中には「暑い」「やや暑い」と回答した住宅があった。「ちょうどよい」と回答している住宅における日中居間の温度は22.3℃、夜間主寝室温度は20.1℃であった。

図5 夏季の温度推移

図6 温度の月別統計値（全住宅）

図7 室温の日較差の月別統計値（全住宅）

図8 居間室温・不快指数の最高値の出現時期

図9 居間室温・不快指数の最高値の出現時刻

図 10 温冷感のアンケート調査結果

(a)室温との関係

(b)不快指数との関係

図 12 冬季の温冷感と実測値との関係

4. 室温形成要因に関する考察

4.1 自然室温の算出

各時期における室温の形成要因を検証するため、以下の方法により、実気象データや各住宅の熱性能を考慮した自然室温を算出した。自然室温は日平均値として扱い、日平均外気温に日平均の自然温度差を加えて算出した。自然温度差は室内取得熱を住宅の総熱損失係数で除することにより求めた。室内取得熱として日射取得熱、人体発熱及び家電等の発熱を計上した。

水平面全天日射量は気象官署の測定値がある場合はその値を採用し、ない場合は最寄りの気象官署またはアメダス気象データの日照時間、降水量、気温から、拡張アメダス気象データ作成の方法⁶⁾を用いて推定した。次に、この水平面全天日射量を日ごとに積算し、MONSOLA05(801)⁷⁾で与えられている地点・月・方位別の全天日射量の比率を用いて、方位別の全天日射量を算出した。日射取得熱は、方位別の全天日射量に、窓面積、日射侵入率、ガラス比率を乗じて求めた。日射侵入率は、すべての窓にレースカーテンが設置されていると仮定し、低放射複層ガラスは0.50、低放射三層ガラスは0.47とした⁸⁾。ガラス比率は0.8とした。

人体発熱は世帯人数に1人あたりの顕熱発熱量(60W)及び在室率(0.5)を乗じて求めた。家電等の発熱はエネルギー消費量調査で把握した照明ほかの電力消費量の平均値を使用した。

総熱損失係数は熱損失係数に床面積を乗じた値とし、熱交換換気を採用している住宅については熱交換効率を70%と想定し、換気回数0.5回/hとして計算した換気熱損失の70%を差し引いた値とした。

4.2 分析と考察

(1) 自然室温と実測室温

分析の対象期間は図13に示す5つの旬を選定した。酷暑期の8月上旬、厳寒期の2月下旬ほか、図4の外気温の頻度分布を参考に、暖房期、非暖房期の代表として2月下旬及び7月中旬、並びに端境期の10月下旬を分析対象に加えた。

4.1の方法により算出した各住宅の旬別の自然室温と、実測旬平均室温との関係を図14に示す。実測旬平均室温は居間と主寝室の平均値で示している。暖房期は自然室温によらず暖房により実測室温が20℃～25℃程度に維持されている。一方、酷暑期は自然室温が30℃以上となる場合でも、実測室温は25～27℃程度で頭打ちになっている。この原因として、外気温が室温よりも低くなる時間帯における通風等による温度降下や、建物周囲の状況により日射取得熱量が計算上の想定より少ないことが考えられる。

図 13 分析対象期間の選定

図 14 計算自然室温と実測室温の関係

表 4 重回帰分析に用いた説明変数

変数	[単位]	変数	[単位]
熱損失係数	[W/m ² K]	世帯人数	[人]
床面積	[m ²]	世帯主年齢	[才]
階数		想像快適温度(冬季日中)	[℃]
天井断熱・屋根断熱(天井:0、屋根:1)		日中普段着(1:保温性小～4:保温性大)	
床断熱・基礎断熱(床:0、基礎:1)		日射取得(旬平均)	[W]
熱交換換気有無(0:なし、1:あり)		外気温(旬平均)	[℃]
冷房装置(0:なし、1:あり)		外部風速(旬平均)	[m/s]

(2) 室温の形成要因

次に、各旬の室温の形成要因を検証するため、外気温と実測旬平均室温との差(以下、内外温度差という)を目的変数、室温に影響を与える可能性があると考えられる項目を説明変数として重回帰分析を行った。表4に分析に使用した説明変数を示す。説明変数は多重共線性を生じないように選定した。質的変数のうち日中普段着の種別は、アンケートの選択肢として設けた「1.Tシャツと短パンなど夏と変わらない」「2.トレーナーとジーパンなど春や秋の衣服」「3.フリースの上下など保温性の高い衣服」「4.コート、ウインドブレーカーなどを室内でも着用」を等間隔の順序尺度と見なし、その他の

表 5 内外温度差に関する重回帰分析の結果

変 数	7月中旬(N=63)			8月上旬(N=62)			10月下旬(N=58)			2月上旬(N=49)			2月下旬(N=46)		
	偏回帰係数	t値	P値	偏回帰係数	t値	P値	偏回帰係数	t値	P値	偏回帰係数	t値	P値	偏回帰係数	t値	P値
床面積	-0.009	-2.11	0.04	-0.006	-1.70	0.09							-0.044	-2.91	0.01
熱損失係数	-1.87	-2.47	0.02				-2.40	-1.88	0.07	-4.14	-2.00	0.05	-6.27	-3.19	0.00
天井断熱・屋根断熱	0.36	1.47	0.15												
床断熱・基礎断熱	-0.40	-1.58	0.12	-0.54	-2.60	0.01									
熱交換換気有無	0.77	3.32	0.00	0.50	2.51	0.01	0.82	2.10	0.04	0.81	1.53	0.13	0.71	1.53	0.14
想像快適温度(日中)							0.23	1.86	0.07	0.26	1.76	0.09	0.23	1.76	0.09
日中普段着							-0.55	-1.81	0.08	-0.84	-2.17	0.04	-0.73	-2.13	0.04
外気温(旬平均)	-0.61	-6.97	0.00	-0.48	-7.09	0.00	-1.00	-7.54	0.00	-0.97	-6.73	0.00	-1.34	-7.47	0.00
外部風速(旬平均)	-0.28	-2.79	0.01	-0.59	-3.19	0.00									
日射取得													0.003	3.57	0.00
定数項	21.70	10.83	0.00	17.50	13.37	0.00	20.79	5.39	0.00	22.24	5.09	0.00	27.54	6.08	0.00
重回帰係数	R=0.83			R=0.83			R=0.79			R=0.79			R=0.84		

質的変数は 0 と 1 のダミー変数に変換した。

重回帰分析はすべての説明変数を対象に、変数増減法により有意水準 0.2 を基準として説明変数の選択を行った。

重回帰分析の結果を表 5 に示す。表には偏回帰係数のほか、目的変数への影響度を示す t 値と危険率 P 値を示している。熱損失係数は 8 月上旬を除いて説明変数として選択されており、熱損失係数が小さいほど室温が高くなる傾向となっているが、その影響度は他の説明変数と比べて必ずしも大きいわけではない。いずれの旬においても、最も影響力のある説明変数となっているのは外気温である。暖房期において外気温が内外温度差の最大の決定要因になるのは当然として、非暖房期も外気温の影響が大きいということは、通風等、居住者による意識的な室温の調整が行われていることを示唆している。実際、外部風速は 7 月中旬、8 月中旬のみ有意な説明変数となっており、通風が夏季の室温に影響を与えていると考えられる。

天井と屋根、床と基礎の断熱種別は夏季のみ説明変数として選択されており、7 月中旬については P 値が大きくあまり有意な差があるとは言えないが、8 月上旬については床断熱に比べて基礎断熱の住宅の室温が 0.54℃低い結果となっている。

熱交換換気の有無はすべての旬で有意な説明変数となっており、特に夏季における影響度が大きい。熱交換換気を有する住宅は冬季の室温保持に寄与する一方、夏季においては夜間換気による外気冷房効果が抑制されるため、室温が高くなると考えられる。

暖房期の室温は、想像快適温度(居住者が快適だと想像する温度)や日中普段着の種別も室温の形成要因になっている。冬季も「T シャツや短パンなど夏と変わらない」という回答が 6 件あり、それらの住宅の 2 月上旬の日中居間室温は 24.0℃と、「トレーナーとジーパンなど春や秋の衣服」(同 22.4℃)、「フリースの上下など保温性の高い衣服」(同 22.0℃)と回答のあった住宅に比べて高かった。

日射取得は 2 月上旬を除いて有意な説明変数とはなっていない。これは、実際の建物の周囲、特に東西面には、建物等が存在するケースが多く、計算上の想定ほどには日射取得がないためであると考えられる。

一方、階数、冷房装置、世帯人数、世帯主年齢はいずれの旬にお

いても有意な説明変数にはならなかった。冷房装置の使用は一時的かつ部分的であり、旬平均室温に影響を与えるほどのものではないと考えられる。

5. エネルギー消費量調査

5.1 用途別エネルギー消費量の推定

調査対象住宅のエネルギー消費特性を把握するため、エネルギー消費量調査の結果から、以下に示す方法で各住宅のエネルギー消費量を「暖房」「給湯」「調理」「照明ほか」の 4 区分に分解した。

はじめに、用途別分離や欠測値の補完に用いる変動係数(年間消費量に対する当該月の消費量の割合)を表 6 のとおり設定した。暖房と照明ほかの変動係数は、今回の調査結果から直接用途別の消費量を把握できた住宅の平均値を採用した。給湯については使用水量が年間を通じて一定、給湯温度を 40℃と仮定し、札幌の給水温度のデータ⁹⁾を用いて設定した。調理は変動係数を一定とした。

時間帯電力における照明ほかの昼と夜の使用比率は、全国を対象とした既往調査¹⁰⁾の 4 人世帯の時刻別の消費量データから、夜/昼=0.4 と設定した。厨房用エネルギー消費量は、北海道の戸建て住宅を対象とした調査結果¹¹⁾から、電気熱源の場合 1.92GJ/年、ガス熱源の場合 3.45GJ/年と設定した。

電力の契約種別、熱源の種別ごとに使用可能性のある用途は表 7 のとおり想定した。なお、ロードヒーティングまたは融雪装置を有する住宅が 6 件あり、融雪に使用する電力は暖房とともに契約上の融雪電力に含まれるが、暖房と融雪の用途分離は行っていない。

熱量換算値はプロパンガス 100.5MJ/m³、都市ガス 46.0MJ/m³、灯油 36.7MJ/L とした。電気の一次エネルギー換算係数は全日 9,760kJ/kWh とした。

5.2 調査結果の分析と考察

(1) 年間のエネルギー消費量

調査を行った 67 件の住宅の年間エネルギー消費量を図 15 に示す。全住宅平均では二次エネルギー換算で暖房が 35.0GJ(49%)、給湯が

表 7 契約種別・熱源別使用用途

	暖房	給湯	調理	照明ほか
一般電力	○ (時間帯別契約を行っていない場合)	○	○	○
時間帯電力(昼・ピーク)	○ (ヒートポンプ)		○	○
時間帯電力(夜)	○	○		
融雪電力	○			
ガス	○	○	○	
灯油	○	○

図 15 住宅別年間エネルギー消費量

図 16 二次エネルギー消費量の月変動（全住宅平均）

表 8 二次エネルギー消費量に関する重回帰分析の結果

変 数	偏回帰係数	t値	P値
床面積 [m ²]	0.27	4.24	0.00
熱損失係数 [W/m ² K]	15.5	1.45	0.15
世帯人数 [人]	2.10	1.48	0.14
全電化(非全電化:0, 全電化:1)	-13.4	-3.54	0.00
暖房HP(なし:0, あり:1)	-13.9	-2.17	0.03
給湯HP(なし:0, あり:1)	-13.5	-2.36	0.02
定数項	19.37	1.01	0.32
重相関係数	R=0.76

図 17 熱損失係数とエネルギー消費量の関係

図 18 地域別のエネルギー消費量

21.2GJ(29%)、調理が 2.0GJ(3%)、照明ほかが 13.8GJ(19%)だった。道内の新築戸建て住宅を対象とした既往の調査と比べると、文献 12)では暖房が 58.4GJ (札幌、1992 年度、N=26、平均床面積=118.9m²)、文献 13)では 49.7GJ (旭川、2001 年度、N=31、平均床面積=149.5m²)であるから、熱損失係数が小さくなった分、二次エネルギー換算の暖房エネルギー消費量は減少しているといえる。

図 16 には月別の用途別エネルギー消費量を示す。暖房用エネルギーの季節間変動の影響が大きく、暖房を行わない 6 月～9 月に対してピークの 1 月の総消費量は約 4.5 倍となっている。北海道では、熱損失係数が 1.3W/m²K レベルの住宅においても、冬季の省エネルギーや再生可能エネルギーの活用はなお重要な課題であるといえる。

(2) エネルギー消費量に影響を与える要因

表 8 は各住宅の年間の二次エネルギー消費量を目的変数として、重回帰分析を行った結果である。説明変数は変数増減法により有意水準 0.2 を基準として有意なもののみ採用した。二次エネルギー消費量に対する影響は床面積が最も大きいことがわかった。次いで、全電化有無の影響が大きい。これは電気熱源の暖房、給湯機器はその他の熱源の機器より効率が高いためであると考えられる。ヒートポンプは採用件数が少ないものの、省エネルギーに大きく寄与している。なお、表 8 に掲げる変数のほか、暖房日数、暖房期間 (4～5 月及び 11～3 月) の平均気温、同期間の風速、融雪装置の有無も説明変数に加えたが、これらは有意差検定により除かれた。また、暖房エネルギー消費量を目的変数として重回帰分析を行った場合には、暖房用エネルギーへの分離の段階で誤差を生じていることから、説明変数との明瞭な相関を見出すことができなかった。

(3) 一次エネルギー換算値

以上は二次エネルギー換算値による考察であるが、特に電気熱源の設備の場合には、一次エネルギー換算で評価することも重要である。図 15 は一次エネルギー換算値についても併せて示しているが、電気熱源の設備を使用している場合には、一次エネルギー消費量の増大が顕著である。図 17 は熱損失係数と年間エネルギー消費量の関係をプロットしたものであるが、熱損失係数が 1.3W/m²K 以下の住宅に全電化住宅が多かったこともあり、熱損失係数の低減に伴って一次エネルギー換算値が減少する結果にはなっていない。

2009 年 1 月に定められた住宅事業建築主の判断基準¹⁴⁾では、暖房・冷房・換気・照明・給湯の各設備が消費する年間の一次エネルギー消費量の合計が目標水準として定められた。その値は、北海道の大半を占める Ia・Ib 地域で、換気方式により 113～129GJ/年・

戸の範囲で定められている。図 18 に I a・I b 地域に区分した用途別のエネルギー消費量を示すが、調理と一般家電用途のエネルギー消費量を差し引いたとしても、今回の調査対象住宅の多くが、住宅事業建築主の判断基準を満たしていないと考えられる。全電化住宅における一次エネルギー消費量の削減は今後の大きな課題である。

6. まとめ

本研究では従来の住宅の断熱性能を大きく上回る、熱損失係数 1.3W/m²K レベルの新築戸建て住宅を主たる対象として、温熱環境とエネルギー消費の実態を調査した。得られた主な結論は次のとおりである。

- (1)夏季は計算上の自然室温に比べて実測室温が低く、既往の住宅と比べて目立った過熱状況は確認されなかった。この要因として、居住者の窓開放等による意識的な温度調整がはたっていることや、日射取得熱が想定よりも少ないことが考えられる。
- (2)暖房期については、暖房負荷の少ない時期を含めて、暖房によりほぼ一定の室温が維持されている。12 月から 2 月における居間の室温は 22.5℃、主寝室の平均室温は 20.9℃であり、一般住宅を対象とした調査結果と比べて室温が高い傾向が見られる。
- (3)内外温度差を目的変数として重回帰分析を行った結果、外気温の影響が最も大きく、熱交換換気の採用はいずれの季節においても内外温度差の上昇にはたっている。ほかに、夏季については天井・屋根の断熱位置、床・基礎の断熱位置、外部風速が室温に影響を与えている。冬季は想像快適温度や日中普段着の種類が室温の形成要因となっている。
- (4)各住宅のエネルギー消費量は、熱損失係数の低減や設備機器の高効率化により、二次エネルギー換算では従来の住宅と比べて減少している。しかしながら、調査対象住宅の多くが、暖房、給湯設備をヒートポンプ式以外の電気熱源としているため、一次エネルギー消費量の削減が今後の大きな課題である。

謝辞

本研究は国土交通省の超長期住宅先導的モデル事業として採択された北方型住宅 ECO モデル事業の一環として実施した。調査に当たっては、北方型住宅 ECO 推進協議会会員各位及び居住者のみなさまに多大なご協力をいただいた。記して感謝の意を表します。

注

注 1)熱容量が室温の日変動に及ぼす影響を、以下の計算により検証した。

計算モデルは単室とし、次の熱収支式により室温変動を求めた¹⁵⁾。

$$\sum_{j=1}^J A_j \alpha_{i,j} (\theta_i^p - \theta_{si,j}^p) + c_a r_a Q (\theta_i^p - \theta_o^{p-1}) + (c_a r_a V + C_F) (\theta_i^p - \theta_i^{p-1}) / \tau = G_r^p + S_{Gst}^p$$

A_j: 面積、α_{i,j}: 総合熱伝達率、θ_i: 室温、θ_o: 外気温、θ_{si,j}: 壁表面温度、c_aγ_a: 空気容積比熱、Q: 換気量、V: 室の気積、C_F: 室内家具その他の熱容量、τ: 時間、G_r: 室内発熱 (=430W)、S_{Gst}: 日射取得熱

各部位の面積及び断熱性能は図 5(a)の冷房装置を設置していない住宅の平均値を用いる。窓の日射侵入率は 0.5 とし、日射遮へい物を考慮してさらに 0.5 を乗じ

付図 1 熱容量による室温変動の違い

る。換気回数は 0.5 回/h (室温が外気温より高いときは通風を考慮し 1.5 回/h) とする。

室内家具その他の熱容量 C_F をパラメータとした計算結果は付図 1 のとおりである。文献 16)によると、C_F は 11,700kJ 程度見込めるとされているが、図 5(a)の実測値は C_F=10,000kJ の場合に近い挙動を示している。木造住宅においても、ここに示す程度の温度の位相の遅れと変動の緩和は生じうるといえる。

参考文献

- 1) 絵内正道、荒谷登：居住室の温熱環境の実態 その 1・寒さに応じた住い方と室温変動パターンについて、日本建築学会論文報告集、No.264、pp.91-98、1978.2
- 2) 絵内正道、荒谷登：居住室の温熱環境の実態 その 2・寒さに応じた住い方と設定室温について、日本建築学会論文報告集、No.265、pp.105-113、1978.3
- 3) 絵内正道、荒谷登：居住室の温熱環境の実態 その 3・寒さに応じた住い方と熱消費量について、日本建築学会論文報告集、No.266、pp.97-103、1978.4
- 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、日本建築学会計画系論文集、No.505、pp.23-30、1998.3
- 5) 鈴木宏彬、斉藤雅也、吉野博：北海道の住まいにおける暖房時の居間室温と住戸形態・暖房対象室・暖房運転方法の関係、日本建築学会環境系論文集、No.662、pp.369-376、2011.4
- 6) 日本建築学会：拡張アメダス気象データ、丸善、pp.297-304、2000.1
- 7) 全国日射量年平値データマップ MONSOLA05(801)、日本気象協会、<http://www.jwa.or.jp/content/view/full/1947/>、(参照 2012-6-1)
- 8) 住宅の省エネルギー基準の解説編集委員会：住宅の省エネルギー基準の解説、建築環境・省エネルギー機構、pp.138-139、2010.12
- 9) ソーラーシステム標準気象データ及び給水温度、ソーラーシステム振興協会、p.85、2003.3
- 10) 平成 17 年度住宅におけるエネルギー使用に係る実態調査及び情報提供事業<2 次解析業務>に係る成果報告書、新エネルギー・産業技術総合開発機構、p.83、2006.2
- 11) 住環境計画研究所：平成 11 年度北海道クリーンライフリサーチ報告書、p.116、1999.12
- 12) 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
- 13) 鈴木大陸、高倉政寛、村田さやか、伊庭千恵美、高橋章弘、堤拓哉、植松武是、北谷幸恵：道北の地域特性に配慮した循環型住宅の技術開発、北海道立北方建築総合研究所平成 16 年度調査研究報告集、No.162、p.22、2005.3
- 14) 住宅事業建築主の新築する特定住宅の外壁、壁等を通しての熱の損失の防止及び住宅に設ける空気調和設備等に係るエネルギーの効率的利用のために特定住宅に必要とされる性能の向上に関する住宅事業建築主の判断基準、平成 21 年 1 月 30 日経済産業省・国土交通省告示第 2 号
- 15) 浦野良美、中村洋編著：建築環境工学、森北出版、p.254、1996.6
- 16) 国土交通省国土技術政策総合研究所・独立行政法人建築研究所監修：自立循環型住宅への設計ガイドライン、建築環境・省エネルギー機構、p.81、2005.6
- 17) 立松宏一、池田裕雅、高倉政寛、鈴木大陸、福島明：北海道における高断熱住宅の温熱環境調査 その 1 夏期・中間期の温湿度実測結果、日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2、pp.397-398、2010.9
- 18) 立松宏一、池田裕雅、高倉政寛、鈴木大陸、福島明：夏期・中間期の温湿度実測調査結果 新しい北方型住宅に関する研究 第 3 報、日本建築学会北海道支部研究報告集、pp.299-302、2010.7
- 19) 立松宏一、廣田誠一、池田裕雅：持続可能な地域のための住まいづくりに関する研究 その 7 高性能住宅の冬期温湿度実測調査日本建築学会北海道支部研究報告集、pp.415-418、2011.7

(2012 年 1 月 10 日原稿受理、2012 年 5 月 31 日採用決定)