



Title	優良ストック形成に向けた北海道の戸建住宅の省エネルギーに関する研究
Author(s)	立松, 宏一
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第11899号
Issue Date	2015-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k11899
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/58847
Type	doctoral thesis
File Information	Koichi_Tatematsu.pdf



博 士 論 文

優良ストック形成に向けた
北海道の戸建住宅の省エネルギーに関する研究

2015 年 2 月

北海道大学大学院工学院
空間性能システム専攻

立 松 宏 一

目 次

第 1 章 序論

1.1 近年（2008 年以降）の住宅を取り巻く状況	1
1.1.1 高断熱化の機運の高まり	1
1.1.2 長期耐久性の検証ニーズの高まり	2
1.1.3 全電化住宅の普及と設備の多様化	3
1.1.4 一次エネルギー基準と外皮平均熱貫流率の導入	3
1.1.5 ライフスタイル、ピーク電力抑制、地域間格差是正	3
1.2 本研究の目的	4
1.3 本論文の構成	5

第 2 章 断熱と設備に関する取り組みの変遷と研究の基本方針

2.1 はじめに	9
2.2 断熱水準	9
2.2.1 断熱水準の変遷	9
2.2.2 断熱水準に関する本研究の基本方針	12
2.3 断熱材の耐久性	13
2.3.1 耐久性向上に関する取り組みの経緯	13
2.3.2 断熱材の耐久性に関する本研究の基本方針	15
2.4 一次エネルギー消費量による評価	15
2.4.1 住宅設備の変遷と一次エネルギー評価の導入	15
2.4.2 一次エネルギー評価に関する本研究の基本方針	18
2.5 住まい方と省エネルギー	18
2.5.1 住まい方とエネルギー消費に関する既往の研究	18
2.5.2 住まい方と省エネルギーに関する本研究の基本方針	19
2.6 本章のまとめ	21

第 3 章 断熱水準の実態とさらなる高断熱化の可能性

3.1 はじめに	27
3.2 調査方法	29
3.2.1 調査対象	29
3.2.2 調査票の配布および回収方法	29

3.2.3 調査項目	29
3.3 断熱仕様の調査結果	31
3.3.1 回答事業者の属性	31
3.3.2 断熱位置	32
3.3.3 断熱仕様	33
3.4 U_A 値の推定	35
3.4.1 各種条件の仮定	35
3.4.2 推定結果	37
3.4.3 推定 U_A 値に関する考察	40
3.5 高断熱化の可能性	45
3.5.1 付加断熱の代表事例	45
3.5.2 高断熱仕様の事例	45
3.5.3 事業者の推奨仕様	48
3.6 本章のまとめ	50

第 4 章 断熱材の耐久性に関する検討

4.1 はじめに	53
4.2 研究対象と劣化要因、要求性能の整理	54
4.2.1 対象とするグラスウール	54
4.2.2 劣化要因と要求性能	55
4.3 熱、水分によってグラスウールに生じる変化の把握	56
4.3.1 試験の目的と方法	56
4.3.2 測定結果	58
4.3.3 「へたり」のメカニズム	62
4.4 現場採取グラスウールの調査	63
4.4.1 調査の目的と概要	63
4.4.2 調査結果	63
4.4.3 考察	67
4.5 突き刺し試験の提案	68
4.5.1 評価方法の要件	68
4.5.2 試験方法の検討	68
4.5.3 促進試験体と現場採取グラスウールの比較	70
4.5.4 目標性能の設定	72
4.6 寿命予測モデルによる長期性状変化の予測	73
4.6.1 温湿度促進試験における突き刺し試験力の変化	73
4.6.2 寿命予測モデルの検討	74
4.6.3 経年変化の予測	76

4.7 本章のまとめ	78
------------------	----

第 5 章 設備仕様の実態と一次エネルギー消費量による評価

5.1 はじめに	81
5.2 調査方法	83
5.2.1 事業者調査	83
5.2.2 居住者 Web 調査	83
5.3 設備仕様の調査結果	84
5.3.1 回答数	84
5.3.2 使用設備の内訳	84
5.3.3 使用熱源の推移	86
5.3.4 事業者規模と設備仕様の関係	87
5.3.5 U_A 値と設備仕様の関係	88
5.3.6 地域性	89
5.4 地域別の一次エネルギー消費量の推定	92
5.4.1 検討の目的	92
5.4.2 各種条件の仮定と一次エネルギー消費量の推定方法	92
5.4.3 一次エネルギー消費量の推定結果	95
5.5 設備仕様の選択要因	97
5.5.1 設備仕様の選択要因に関する調査結果	97
5.5.2 設備仕様の選択要因に関する考察	97
5.6 本章のまとめ	100

第 6 章 住まい方と消費エネルギーの検証

6.1 はじめに	103
6.2 調査対象	105
6.2.1 北方型住宅 ECO	105
6.2.2 北方型省 CO_2 住宅	106
6.2.3 本章の調査対象住宅	107
6.3 室内温熱環境の調査	109
6.3.1 調査の目的	109
6.3.2 調査対象住宅	109
6.3.3 調査方法	110
6.3.4 調査住宅の属性	111
6.3.5 温度の調査結果	112
6.3.6 室温の形成要因	117

6.4 居住者アンケート調査	123
6.4.1 アンケートの内容	123
6.4.2 夏季・冬季の温冷感	125
6.4.3 夏季の温熱環境	125
6.4.4 冬季の温熱環境	128
6.5 エネルギー消費量調査	133
6.5.1 北方型住宅 ECO	133
6.5.2 北方型省 CO ₂ 住宅	138
6.5.3 既往の調査との比較	143
6.5.4 予測誤差に関する考察	146
6.6 本章のまとめ	150

第 7 章 結論

7.1 本研究のまとめ	153
7.2 今後の課題と展望	157
謝辞	158

第1章 序論

1.1 近年(2008 年以降)の住宅を取り巻く状況

2008 年の夏、石油価格はオイルショック以来の高騰を生じた。さらに 2011 年 3 月の東日本大震災を経て、住宅の省エネルギーに関わる取り組みが加速するとともに、政策にも目まぐるしい変化があった。以下に、本研究の背景として、主に 2008 年以降の住宅の省エネルギーに関する動向を述べる。

1.1.1 高断熱化の機運の高まり

2008 年、国土交通省が創設した「超長期住宅先導的モデル事業」に、北海道が主体となって提案した「北方型住宅 ECO プロジェクト」が採択された^[1]。このプロジェクトでは、当時の住宅の省エネルギー基準^[2]で規定されていた熱損失係数 $Q \leq 1.6\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ を大きく上回る $Q \leq 1.3\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ が要件の一つとされた (図 1-1)。2009 年 1 月には、「住宅事業建築主の判断基準 (以下、「事業主基準」という)」^[3]が定められ、新たに $Q \leq 1.4\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ の断熱性能の区分が設けられた。事業主基準は建売戸建住宅を対象とした基準であるが、住宅金融支援機構の融資基準などにも反映され、一般住宅に対しても高断熱化のインセンティブとなった。2010 年 3 月に申請受付が始まった住宅エコポイントは、断熱材の入手難を引き起こすほどの影響を市場に及ぼした^[4]。同年 6 月、北海道は北方型住宅基準を改正し、 $Q \leq 1.3\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ を一要件とする「北方型住宅 ECO」の基準を新たに設けた。さらに、北海道が共同提案者となり国土交通省の住宅・建築物省 CO₂ 先導事業に採択された、「低炭素社会の実現に向けた北方型省 CO₂ マネジメントシステム構築プロジェクト (以下、「北方型省 CO₂ 住宅」という) では、 $Q \leq 1.2\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ が断熱性能の要件となった。一方、札幌市は 2012 年に「札幌版次世代住宅基準」を創設し、 $Q \leq 0.5\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ ^{注 1} を基準とするトップランナー等級が設定された。これらの誘導施策により、従来の住宅の省エネルギー基準レベルを大きく上回る断熱水準の住宅が、道内各地に建設された。

また、2011 年の東日本大震災では、燃料不足のパニックや計画停電を首都圏が含まれる広範囲で経験したことにより、エネルギー供給が途絶えた際に室温を確保するた

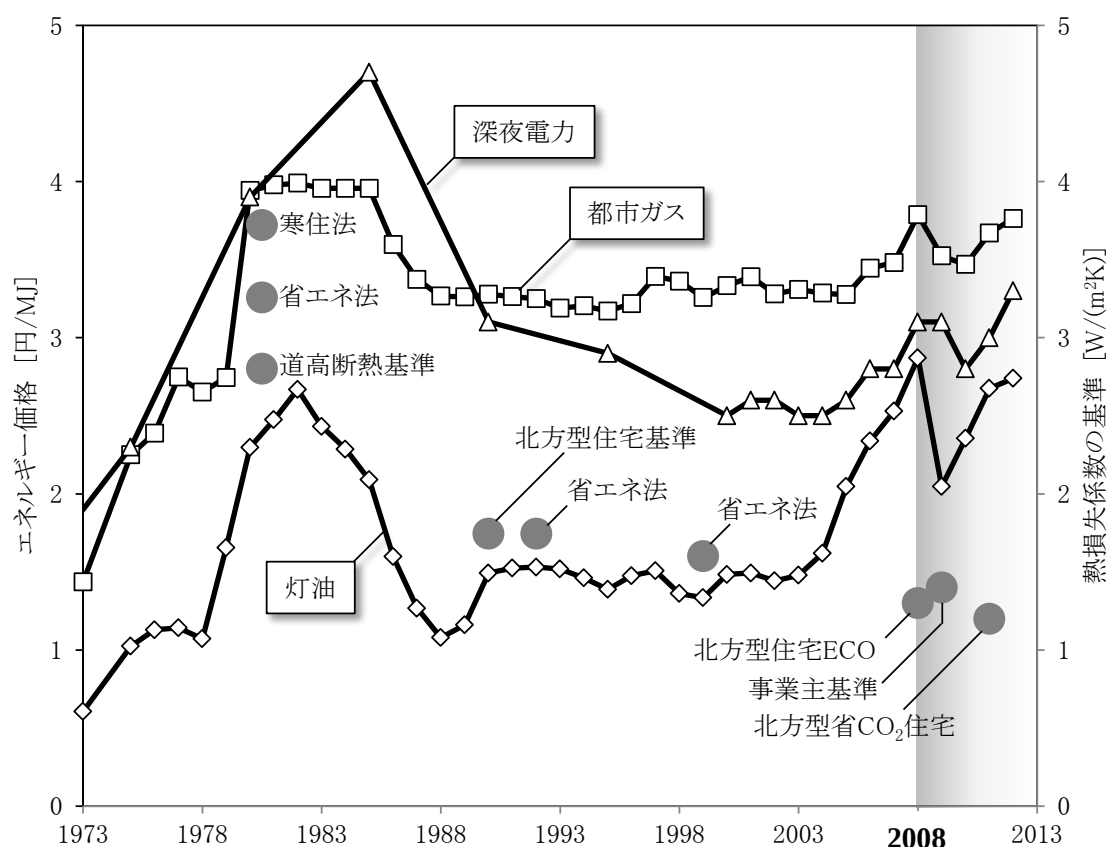


図 1-1 エネルギー価格（全国価格）と熱損失係数（Q 値）の基準値の推移^{[5][6]}

めの断熱の重要性が、全国的にも認識された。

住宅建設事業者主体の動きとしては、2007 年 8 月に北海道無暖冷房住宅研究会が設立され、高断熱化と蓄熱により無断房化を目指す研究が実施された^{[7][8]}。また、2008 年には NPO 法人新木造住宅技術研究協議会が取り組んできた Q1.0 住宅が住宅雑誌で特集される^[9]など、高断熱化の機運が高まった。

1.1.2 長期耐久性の検証ニーズの高まり

福田元首相が所信表明演説で掲げた「200 年住宅」への取り組みを受け、国土交通省社会資本整備審議会は「長期にわたり使用可能な質の高い住宅を整備・普及させていくための方策について」^[10]を 2008 年 2 月に答申し、同年 12 月に「長期優良住宅の普及の促進に関する法律」が公布された。さらに、2010 年の新成長戦略^[11]で「ストック重視の住宅政策への転換」が重点政策として掲げられた。

「200 年住宅」というこれまでの耐久性の概念を大きく上回るスローガンによって、各種建材製造事業者においても、長期耐久性の検証が大きな課題としてとらえられるようになった。特に気泡中のガス置換により使用中の性能変化が見込まれる発泡プラスチック系断熱材については、「断熱材の長期断熱性能評価に関する標準化調査」^[12]を契機として検証が進み、2014 年 7 月に JIS A1486「発泡プラスチック系断熱材の熱抵抗の長期変化促進試験方法」^[13]が制定された。

1.1.3 全電化住宅の普及と設備の多様化

2008 年をピークとした灯油価格の高騰が生じた一方、電気料金が相対的に低く抑えられたことから、住宅の暖房、給湯設備の電化が急速に進んだ。また、石油に関しては、価格高騰とともに、2011 年の消防法改正を一因として、灯油の配達を担うガソリンスタンドの減少が特に過疎地域で深刻化した。

新設住宅における全電化住宅の比率は 2005 年まで 20%未満だったのに対し、2009 年度には 50%を超えた^[14]。さらに 2009 年 11 月の太陽光発電の余剰電力買い取り開始も、設備の電化に拍車をかけた。

しかしながら、2011 年の東日本大震災による原子力発電所事故の影響で、北海道でも 2012 年夏から節電要請が実施され、熱源としての電気に対する意識は再び変化している。

一方、電気以外の熱源機器については、潜熱回収型のガス熱源機器（エコジョーズ）や灯油熱源機器（エコフィール）が一般化し、また、エコジョーズと空気熱ヒートポンプのハイブリット暖房給湯システム（2008 年発売）、家庭用ガスエンジンコージェネレーションシステム（2011 年発売）、家庭用燃料電池（2011 年発売）、地中熱と空気熱のハイブリッド家庭用ヒートポンプ式温水暖房システム（2014 年発売）が道内市場に現れるなど、設備システムの多様化が進んだ。

1.1.4 一次エネルギー基準と外皮平均熱貫流率の導入

住宅の省エネルギー基準は、制定以来、年間暖冷房負荷により規定され、設備機器の仕様については定めがなかった。2009 年 1 月告示の事業主基準において、初めて一次エネルギー消費量を用いた評価基準が採用され、暖房、冷房、換気、照明、給湯の各設備が評価の対象となった。2013 年改正の住宅・建築物の省エネルギー基準^[15]では、この考え方がすべての住宅に拡大された。

また、従来努力義務だった住宅の省エネルギー基準は、2012 年 7 月に「2020 年までにすべての新築住宅・建築物について段階的に省エネ基準への適合を義務化する」方向性が打ち出された^[16]。適合義務化への環境整備の一環として、2013 年 10 月の省エネ基準改正では、住宅の外皮性能を表す指標として従来の熱損失係数（Q 値）に代わり、外皮平均熱貫流率（ U_A 値）が導入された。

北海道においては、「あったか長持ちともに育む北の住まい」をキャッチフレーズとし、快適性や耐久性に重きを置いて「北方型住宅」を施策展開していたが、2010 年の北方型住宅基準改正で、省エネ性能を向上させた「北方型住宅 ECO」を位置づけるとともに、暖房エネルギー消費量の表示を導入し、エネルギー削減の観点が強まった。

このように国や道の規基準により、省エネルギー性能をより実効的に評価できる環境の整備が進んだ。

1.1.5 ライフスタイル、ピーク電力抑制、地域間格差是正

従来の建築法規においては、建物の使い方に関わらず、備えとして一定水準の性能を確保することが基本的な考え方であった。しかし、エネルギー消費量は住まい方による影響も大きいことから、居住者のライフスタイルにも踏み込んだ施策に踏み込ま

ざるを得ない状況に直面している。資源エネルギー庁の「エネルギー基本計画 2014」では、「2030 年までに新築住宅の平均で ZEH（ネット・ゼロ・エネルギー・ハウス）の実現を目指すこと」に加え、「生活の質を向上させつつ省エネルギーを一層推進するライフスタイルの普及を進めること」が掲げられている^[17]。

ライフスタイル改善のための取り組みとして、一般消費者向けの普及資料^{[18][19][20]}の整備や、家庭の省エネエキスパート検定^[21]の創設（2009 年～）、うちエコ診断士・うちエコ相談員の養成（2011 年から施行、2014 年に環境省公認の資格化）が実施された。

また電力については、震災後に道外の一部地域で実施された計画停電の経験から、ピーク電力抑制の重要性が認識された。前述のエネルギー基本計画 2014 では、2020 年代早期にスマートメーターを全世帯に導入し、HEMS（家庭単位のエネルギー需給管理システム）との連携などにより、総合的なエネルギーの需給管理を行うこととしている。

北海道にはおいては、道消費者協会が実施している家庭用エネルギー消費実態調査^[22]において、地域ごとのエネルギー消費量に大きな差があることが明らかとなっている。これを受け、2010 年の北海道立総合研究機構発足時に立ち上がった戦略研究『新たな住まい』と森林資源循環による持続可能な地域の形成^[23]では、地域間格差の是正が研究テーマの一つとなった。

1.2 本研究の目的

環境負荷の低減は喫緊の課題であり、住宅行政と連携して研究を行っている立場としては、上記に述べた動向を的確に把握し、道民の生活の質を維持しつつ、省エネルギーを実現する優良ストック形成のための方策を示していく必要がある。

住宅に関わる環境負荷の低減には、ライフサイクル評価、再生可能エネルギー利用、地域材の利用という観点も重要であるが、本研究では断熱材と住宅設備のうち主に暖房、給湯設備に対象を絞り、1.1 で述べた背景を踏まえて、①断熱水準、②断熱材の耐久性、③一次エネルギー消費量、④住まい方と省エネルギーの 4 項目について検討を行う。

対象とする住宅は、道内に建設される新築戸建住宅とする。既存住宅の改修や、共同住宅についても当然取り組まなければならない課題は多いが、これらに関する施策も新築戸建住宅における研究成果をもとにしている部分が多く、近年の動向から、既往研究の多い新築戸建住宅についても新たな課題が山積していると考えられるからである。

したがって、本研究の目的は、北海道の戸建住宅を対象として、断熱と設備の実態を把握するとともに、長期耐久性や一次エネルギー消費量の検証を行い、優良ストック形成に向けた住宅の省エネルギーに関する今後の住宅行政や普及啓発に知見を与えることにある。

1.3 本論文の構成

本論文は図 1-2 に示す全 7 章より構成している。各章の概要は以下のとおりである。

第 1 章「序論」では、研究の背景として 2008 年以降の住宅を取り巻く状況を述べた。また、本研究の目的が、道内の新築戸建て住宅を対象に、断熱と設備に着目して、優良ストック形成に向けた住宅の省エネルギーに関する実態把握と検証を行うことであることを述べ、具体的な検討項目として、①断熱水準、②断熱材の耐久性、③一次エネルギー消費量、④住まい方と省エネルギーの 4 項目を抽出した。

第 2 章「断熱と設備に関する取り組みの変遷と研究の基本方針」では、第 1 章で示した 4 項目について、それぞれに関する取り組みの変遷と既往の研究を概観し、これまでに解決されてきたことや残されている課題、新たに検討が必要な課題を整理した上で、各項目の研究の基本方針を具体的に示した。

第 3 章「断熱水準の実態とさらなる高断熱化の可能性」では、道内の新築戸建て住宅を対象とした断熱仕様の実態調査を行った。また、エネルギー消費量の推定には、断熱仕様から U_A 値を推定する必要があるため、推定手法を検討し、各種条件の仮定のもと U_A 値を推定した。さらに、高断熱仕様の事例を調査するとともに、住宅建設事業者を対象とした高断熱化に関するアンケート調査を実施し、さらなる高断熱化の可能性を検討した。

第 4 章「断熱材の耐久性に関する検討」では、住宅の断熱材として最も一般的に使用されており、長期耐久性の検証が求められているグラスウールを対象とした検討を行った。まず、劣化要因の検討を行い、促進試験によってグラスウールに生じる変化を把握した。次に、現地採取調査を行い、促進試験による性状変化と比較した。さらに、本研究における性状変化の検証方法として、新たな試験を提案した。最後に、促進試験に寿命予測モデルを適用し、経年変化の予測を試みた。

第 5 章「設備仕様の実態と一次エネルギー消費量による評価」では、新築戸建て住宅の設備仕様の実態調査を行い、第 3 章で推定した U_A 値を用いて住宅の省エネルギー基準判定用 Web プログラムによる一次エネルギー消費量の推定を行った。また、道内における地域性や事業者属性による分析を行った。今後、省エネルギーの面から適切な設備が選択されるよう、誘導を図っていく必要があると考えられることから、誰がどのような観点で設備を選択しているのかについて、アンケートを実施し、選択要因の考察を行った。

第 6 章「住まい方と消費エネルギーの実態」では、従来の断熱水準を大きく上回る $Q \leq 1.3 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ を主な条件とする北方型住宅 ECO（2008 年度建設）を対象とし、温熱環境とエネルギー消費の実態を調査した。また、北方型住宅 ECO での反省を踏まえ、さらに $Q \leq 1.2 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ と断熱性能を強化し、エネルギー消費量による設計要件を加えた北方型省 CO_2 住宅（2011～2013 年度建設）の省エネ効果を検証した。

第 7 章「結論」では、各章で述べてきた結果を総括し、住宅行政と連携して研究を行っている立場から、今後の住宅施策や研究に関する課題と展望について述べた。

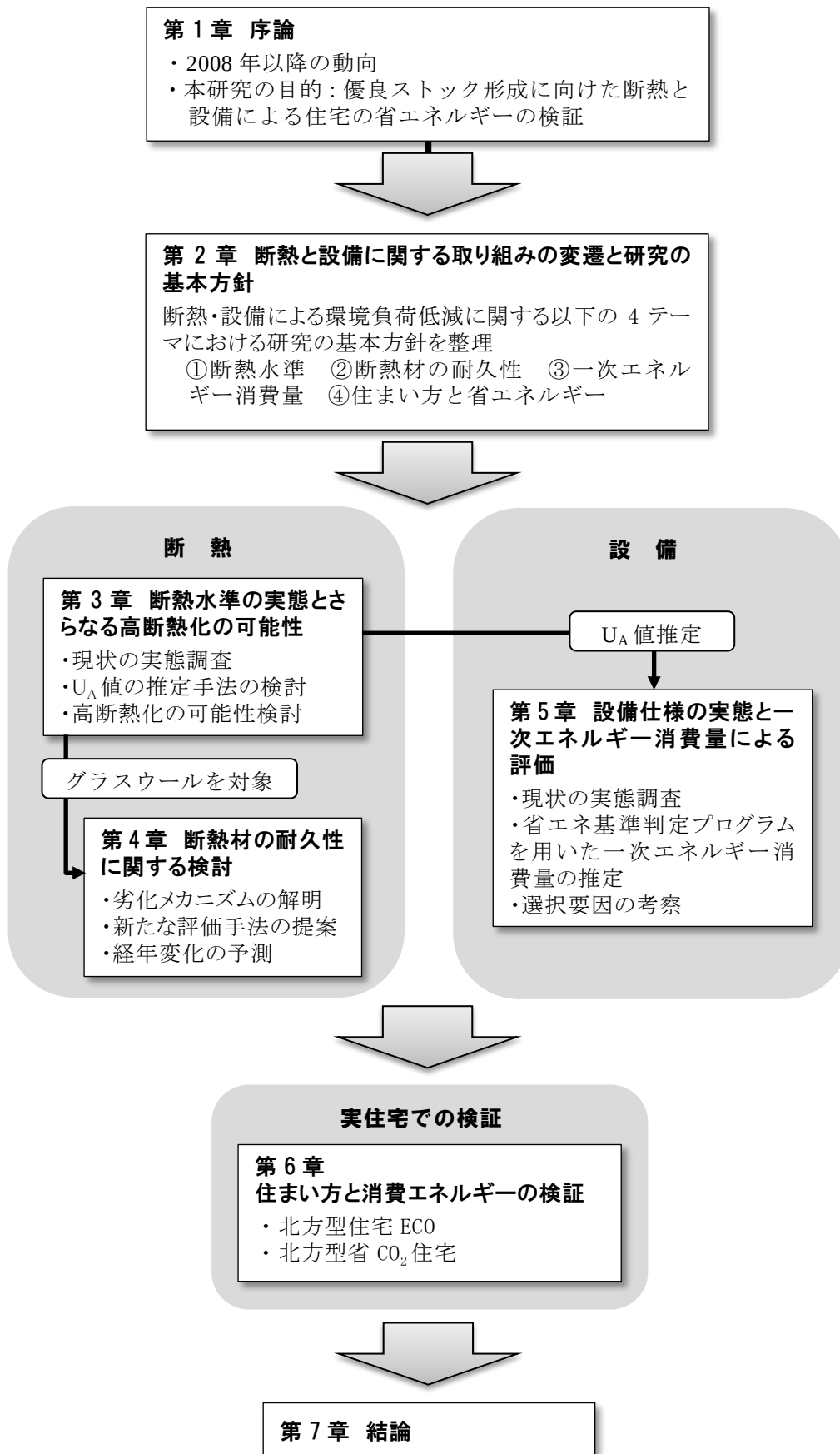


図 1-2 本論文の構成

注

注1 札幌版次世代住宅基準では、換気熱回収の効果を考慮してQ値を算出することができる。一方、北方型住宅ECOと北方型省CO₂のQ値の要件は、換気熱回収の効果を算定上含めないこととしている。新たな外皮性能の評価指標として2013年10月の省エネ基準改正で導入された外皮平均熱貫流率（U_A値）は、換気による熱負荷を含めず外皮の熱貫流率のみにより計算されるため、Q値のように換気熱回収の考慮有無で算出結果が異なる不都合は解消される。

参考文献

- [1] 福島明, 池田裕雅, 長谷川雅浩, 立松宏一, 大柳佳紀: 北方型住宅プロジェクトの概要 新しい北方型住宅に関する研究 第1報, 日本建築学会北海道支部研究報告集, pp.389-390, 2010.7
- [2] 建築物に係るエネルギーの使用の合理化に関する建築主等及び特定建築物の所有者の判断の基準, 平成11年3月30日通商産業省・建設省告示第1号
- [3] 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
- [4] グラスウール製品の納期調整に関するお願い, 旭ファイバーグラス株式会社, 2010.10.25 プレスリリース ほか
- [5] 日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット: EDMC/エネルギー・経済統計要覧(2014年版), p.59, 2014.2
- [6] 住環境計画研究所: 家庭用エネルギーハンドブック(2014年版), 省エネルギーセンター, p.13, 2013.12
- [7] 繪内正道, タギサデギアン: 北海道無暖冷房住宅に向けた試み, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp.99-100, 2008.7
- [8] タギサデギアン, 繪内 正道: 北海道無暖冷房住宅に向けた試み その2, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp.101-102, 2008.7
- [9] エコ住宅 Q1.0[キューワン], リプラン東北版臨時増刊, 2008.1
- [10] 長期にわたり使用可能な質の高い住宅を整備・普及させていくための方策について, 社会資本整備審議会, 2008.2.22
- [11] 新成長戦略～「元気な日本」復活のシナリオ～, 2010.6.18 閣議決定
- [12] 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合研究機構: 平成19年度断熱材の長期断熱性能評価に関する標準化調査成果報告書, 2008.3
- [13] JIS A1486: 発泡プラスチック系断熱材の熱抵抗の長期変化促進試験方法, 2014
- [14] オール電化住宅が15万戸(累計)を突破, 北海道電力プレスリリース, 2010.4.20

-
- [15] 住宅に係るエネルギーの使用の合理化に関する建築主の判断の基準，平成 25 年 1 月 31 日経済産業省・国土交通省告示第 1 号
- [16] 「低炭素社会に向けた住まいと住まい方」の推進方策について中間とりまとめ，経済産業省・国土交通省・環境省，2012.7
- [17] 経済産業省資源エネルギー庁:エネルギー基本計画 2014, 経済産業調査会, pp.58-59, 2014.8
- [18] 家庭の省エネ 2012 年版，省エネルギーセンター，2012.4
- [19] 家庭で取組む節電マニュアル，一般社団法人 地球温暖化防止全国ネット，2012.5
- [20] おうちで省エネ，経済産業省北海道経済産業局，2012.12
- [21] 家庭の省エネエキスパート検定（改訂 3 版），省エネルギーセンター，2014.6
- [22] 平成 20 年度北海道家庭用エネルギー消費実態調査（2008 エコファミリー省エネアンケート）報告書，北海道消費者協会，2009.3
- [23] 道総研戦略研究(住と森)の概要，北海道立総合研究機構，
<http://www.hro.or.jp/develop/system/subject.html>，参照 2014.11.6

第2章 断熱と設備に関する取り組みの 変遷と研究の基本方針

2.1 はじめに

第1章では、北海道の住宅が、環境負荷低減の観点で大きな転換期に差し掛かっている状況を述べたが、これまでもオイルショックなど、社会的な問題を背景とした住宅施策の転換を何度か経験している。そして、そのような転換の局面では、現在における課題の多くが既に検討されており、一定の解決をみた課題もあれば、危機感が薄れるにつれて元の状況に戻ったもの、あるいはいまだに解決されずに取り残されている課題もある。

本章では、第1章で取り上げた断熱と設備による環境負荷低減に関わる4つの研究項目、①断熱水準、②断熱材の耐久性、③一次エネルギー消費量、④住まい方と省エネルギーについて、これまでの取り組みの変遷や、その時々に行われた研究成果を概観し、本研究の基本方針を具体化する。

2.2 断熱水準

2.2.1 断熱水準の変遷

(1) 断熱材の普及

北海道の住宅建設で、断熱が強く意識されるようになったきっかけは、1953年の議員立法による北海道防寒住宅建設等促進法（以下、「寒住法」という）の制定である。

寒住法の制定を前にした1952年度の北海道建築部委託研究（受託者：建築計画研究会委員長 渡辺要）では、防寒防露のための部位別熱貫流率が提案され^{[1][2]}、1960年代まで道内の住宅の設計条件として参考にされた（表2-1）。

実際に断熱材が使用されるようになったのは、1957年に道内でロックウールが生産されるようになってからで、1959年頃には、グラスウール、フォームポリスチレン板も市販されるようになった^[3]。ただし、1963年に道内17か所の建築施工技能者講習会受講者を対象として行われたアンケート（回収数1,303、回収率51.4%）^[4]によれば、

オガクズ、モミガラ、ダンガラの利用もまだ多く、天井では約 4 割、床は 9 割にこれらの既製品ではない断熱材が使用されていた。しかも、何らかの断熱材が使用された住宅は 20%前後にとどまっていた（記入漏れもあるため、実際の使用割合はもう少し高いだろうと考察されている）。

次いで、1968 年の同じく建築施工技能者講習会受講者を対象に行われたアンケート（回収数 394、回収率約 10%）^[5]では、部位ごとの断熱材種別と断熱厚さから、熱貫流率を推定している。断熱厚さは 25mm 以下が外壁、天井で約 6 割、床で 4 割を占めるものの、先の熱貫流率基準への適合率は極寒の丁地域を除き 6 割以上に達しており、断熱化が急速に進みつつあった様子がうかがえる。

(2) 寒住法改正

1969 年 7 月の寒住法改正で、住宅金融公庫の融資対象を木造住宅にも拡大するとともに、各部位の熱貫流率を表 2-1 の 2 段目の値以下とすることが融資の要件となった^[3]。公的基準として断熱性能が示されたのは、全国でもこれが初めてである。

このとき求められていた断熱水準は、冬季に夜間の暖房を止めた場合に、朝方に主要室の水が凍らない 0℃以上が保たれていることであった。また当時、償却年数を 10 年とした場合の経済厚さは、外壁でグラスウール 110mm 厚程度と試算され、断熱厚さが 75mm 以上であれば室内気候を満足して経済性にもあまり差がないと考えられていた^[6]。

(3) 寒地住宅の性能水準に関する研究

1969 年の寒住法改正後、1 年を経ずして基準を満たすための外壁 50mm 断熱が一般化した。しかし想定した断熱性能はなかなか得られず、さらに 100mm 厚の断熱が実施されるようになり、1973 年のオイルショック後、100mm 断熱が常識化した。これ

表 2-1 熱貫流率および熱損失係数に関する基準の変遷

基準	地域区分	屋根または天井	外壁	外気に接する以外の床	開口部	熱損失係数
防寒防露のための熱貫流率(1953年)	甲(函館、室蘭、浦河)	2.1 (1.8)	1.7 (1.5)	2.2 (1.9)		
	乙(留萌、札幌、苫小牧、稚内、釧路、岩見沢、網走)	1.6 (1.4)	1.4 (1.2)	2.0 (1.7)		
	丙(旭川、帯広、北見)	1.3 (1.1)	1.2 (1.0)	1.6 (1.4)		
	丁(陸別、弟子屈)	1.0 (0.9)	0.9 (0.8)	1.4 (1.2)		
寒住法(1969年改正)	石狩、渡島、桧山、後志、空知、留萌、胆振日高	1.0 (0.9)	1.0 (0.9)	1.2 (1.0)		
	上記以外	0.8 (0.7)	0.8 (0.7)	1.2 (1.0)		
寒住法(1981年改正)	石狩、渡島、桧山、後志、空知、留萌、胆振日高	0.58 (0.5)	0.58 (0.5)	0.70 (0.6)	4.07 (3.5)	3.72 (3.2)
	上記以外	0.47 (0.4)	0.47 (0.4)	0.58 (0.5)	4.07 (3.5)	3.49 (3.0)
北海道高断熱基準(1980年制定)	石狩、渡島、桧山、後志、空知、留萌、胆振日高	0.29 (0.25)	0.41 (0.35)	0.41 (0.35)	2.91 (2.5)	2.79 (2.4)
	上記以外	0.23 (0.20)	0.35 (0.30)	0.41 (0.35)	2.91 (2.5)	2.67 (2.3)
住宅の省エネルギー基準(1980年制定)	I 地域	0.35 (0.30)	0.41 (0.35)	0.41 (0.35)	3.49 (3.0)	3.26 (2.8)
住宅の省エネルギー基準(1992年改正)	I 地域	0.23 (0.20)	0.42 (0.36)	0.36 (0.31)	2.33 (2.0)	1.74 (1.5)
住宅の省エネルギー基準(1999年改正)	I 地域	0.17	0.35	0.34	2.33	1.6

単位: W/(m²K)、カッコ内は kcal/(m²h℃)

らの事態は、集中暖房^{注1}の導入により灯油消費量が増加している実態が明らかになりつつあったことや^{[7][8]}、全国的に省エネルギー論が活発化した背景もあって、道内の住宅関係者で大きな問題と認識され、1978年度に産官学の共同で「寒地住宅の性能水準に関する研究」（研究代表者：洪悦郎、研究担当者：荒谷登ほか）^[9]が実施された。

研究の前提となったのは次の事項である。

- ・ 現在、北海道の住居の断熱と気密化が急速に進みつつあること
- ・ それが暖房面積の拡大につながることは必然的な趨勢であること
- ・ わが国の住居規模が住居の中に寒さを残さなければならぬほど大きくないこと
- ・ 暖地の伝統の強い影響下で、独自の寒地住居をつくるには強い指導と明確な主張が必要であること
- ・ 徹底的な燃料消費量の削減を将来の課題とするならば、居住性の向上と方向の一致する新しい閉鎖系の中で考えるべきこと

開放系と閉鎖系の本質的な差異を意識しないまま、我が国伝統の開放系住居に閉鎖系の技術を取り入れたことに種々の混乱の原因があるとして、断熱の役割や結露への対応方針が明確に打ち出された提言内容は、今日まで寒冷地における住宅づくりの指針となってきた。また、断熱材の厚さに見合った性能を発揮させるには、壁内気流を防止するための気密化が必須であることが実験による検証により明らかにされている。

報告書では、断熱の役割は、室内から「寒さを取り除いて」、外とは異なる「室温」をつくることにありと主張しているが、「あえてエネルギーを指標とする場合」には、燃料消費量の現状を維持してセントラル暖房に移行するために 190kcal/(h°C)以下、節約を強く意識するのであれば少なくとも 150kcal/(h°C)以下を目標にすべきとしている。また、検討されている中での最高水準は 100kcal/(h°C)である。ここでは床面積を 100m²としているので、Q 値に換算すると、それぞれ 2.2、1.7、1.2W/(m²K)となる。そして、150kcal/(h°C)以下とすることは、「日射や内部取得熱あるいは廃熱を有効活用するための鍵であり、わずかな工夫や維持管理上の注意によってエネルギー消費量に大きな違いをもたらすだけに、省エネルギーへの関心と努力を促進し、節約と居住性の向上と地域特性の尊重という真の意味での省エネルギーを可能にし、そこに魅力や創造性を見出すためにも、必要な水準である」と指摘している。

(4) 北海道高断熱基準、住宅省エネルギー基準

「寒地住宅の性能水準に関する研究」や関連する調査研究^[3]を受けて、道は 1980 年に「高断熱基準」を定めた。その趣旨は「現在の各個暖房のエネルギー消費量をあまり増加させないで、全室連続暖房が可能」にすることであった。高断熱基準は「北海道持ち家建設資金貸付制度」の割増し融資基準として用いられた^[10]。基準上は、1969 年の寒住法の熱貫流率が単純に小さくなった形であるが、その背景では、気密化の技術や室内環境の目標設定に転換が生じている。

一方、オイルショックを契機に 1979 年に制定施行された「エネルギーの使用の合理化に関する法律」（以下、「省エネ法」という）に基づき、1980 年に「建築主の判断基準」^[11]「設計及び施工の指針」^[12]（以下、「住宅の省エネルギー基準」という）が

定められた。住宅の省エネルギー基準上の地域区分では、函館周辺の一部地域を除き北海道はⅠ地域に区分されるため、表 2-1 にはⅠ地域の基準値のみ記載している。断熱水準は高断熱基準を上回るものではないが、外壁の断熱厚さを 100mm とし、熱貫流率の基準を満たそうとすると、相当密度 10K のグラスウールでは性能が不足するため、16K のグラスウールの普及が進んだ。

(5)「北方型住宅」の創設

1990 年度に創設された道の北方型住宅の認定制度では、 $Q \leq 1.5 \text{ kcal}/(\text{m}^2 \text{ h}^\circ \text{C})$ ($1.7 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$) が断熱性能の基準となり、現行の住宅省エネルギー基準に近い水準となった。また、それまで工法や気密測定の有無に応じて 0.5~1.5 回/h で設定されていた換気回数が、気密施工技術の確立により 0.5 回/h とし、計算することとされた^[13]。

追って、住宅の省エネルギー基準が 1992 年に改正された。これは、オイルショック以降横ばいであったエネルギー消費量が、1987 年から増加に転じ、暖房の時間的、空間的拡大等居住水準の拡大が見込まれる中で、現在のエネルギー消費量を増加させることなく、この水準を達成できるよう熱損失係数の基準値を引き上げることを趣旨としたものである^[14]。北海道においては、北方型住宅でこれに先駆けた対応がなされていたため、住宅の省エネルギー基準が北方型住宅の基準に追従する形となった。

さらに、1997 年 12 月の気候変動枠組条約第 3 回締約国会議（COP3、京都会議）を経て、国際的にも CO₂ 排出量削減が強く求められるようになったことから、住宅の省エネルギー基準は 1999 年に 3 度目の改正がなされ、Q 値基準は $Q \leq 1.6 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ に引き上げられた。以降、現在に至るまで、Q 値から U_A 値への評価指標の変更はあったものの、住宅の省エネルギー基準で求められる断熱水準は変わっていない。

(6)海外における断熱基準の動向

諸外国においても、省エネルギーを目的として外皮の断熱性能に関する基準が定められており、徐々に基準が強化されている。1999 年の省エネルギー基準改正時、全国的には海外と比べて基準が低い傾向にある中で、1、2 地域（当時はⅠ地域）の基準値はイギリス、アメリカ、フランス、ドイツなどと同レベルに達していた^[15]。しかしながら、現在では 1、2 地域も海外と比べて遅れをとっている傾向が見られる。特に、窓の断熱性能について、熱貫流率が $1.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ を切る極めて厳しい基準値を設けている国がある。また、省エネ基準への適合義務化も進んでおり、OECD 加盟国の中で、新築・増改築時に省エネ基準の適合を義務化していないのは少数派となっている^[16]。このような海外の動向を受け、日本においても 2020 年までの省エネ基準の適合義務化が検討されているが、その際には諸外国における住宅・建築物の省エネルギーに関する規制とのバランスについて勘案することとされている^[17]。

2.2.2 断熱水準に関する本研究の基本方針

近年の高断熱化に関する傾向は、第 1 章で述べたとおりで、「寒地住宅の性能水準に関する研究」で最高水準と位置付けられた、 $Q \leq 1.2 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ の断熱水準を上回る住宅が、既に多数建設されている。30 数年来目標とされてきた性能が、現実になった今、どこまで性能向上を目指すのか、目標を見失った時代に入ったとも言える。これまで

の性能向上の歩みを振り返り、新たな目標を探る動きもあるが^[18]、新たな目標像を提示するには至っていない。

一方、一般の新築住宅における断熱性能の実態は十分に把握されていない。1987年以降は、住宅金融公庫（現住宅金融支援機構）が融資住宅建設事業者を対象に抽出調査を行って結果を公表しており^{[19][20]}ほか、各部位の断熱の種類や厚さに関するデータも含まれている。しかし、北海道の新築住宅における住宅金融公庫融資の利用率は2000年以降低下しており、融資住宅の調査結果で全体像をとらえることは難しい。

したがって、現状の断熱水準の実態を把握することと、次の目標へ向けてさらなる高断熱化の可能性を検討することが課題であると考ええる。そこで本論文の第3章では、道内の新築戸建て住宅を対象とした断熱仕様の実態調査を行うとともに、さらなる高断熱化の可能性を検討する。

2.3 断熱材の耐久性

2.3.1 耐久性向上に関する取り組みの経緯

(1) 北海道の住宅の耐久性に関する研究のはじまり

1958年発刊の「家の寿命」^[21]によれば、主要柱径3.5寸の木造住宅の実際の耐用年限は40～50年とされている。しかし、このころ、構造が同じであれば、北海道の住宅は本州に比べて20年くらい寿命が短いと言われていた^[22]。その最大の原因は凍上であった。したがって、北海道の住宅の耐久性に関する研究は、当初凍上対策が大きなテーマとなっていた^{[23][24]}。

(2) 断熱の普及に伴い生じた結露問題

1960年代後半以降は、断熱の普及により、結露の被害が顕在化した。構造体の寿命に影響を及ぼすほどの結露被害の惨状は、福島が住宅結露史としてとりまとめている^[25]。「寒地住宅の性能水準に関する研究」^[9]では、湿気に対して開放することで結露を処理するという暖地で培われた住宅に対する考え方を残したまま、寒冷な気候条件への対応が行われことに結露被害の原因があるという問題認識が示された。さらに、鎌田ら^[26]や寒地建築研究所^[27]を中心に結露問題解消に向けた実証的な研究が行われた。内部結露対策については住宅の断熱が行われるようになった当初から、防湿層の必要性が認識されていた^[28]ものの、寒地建築研究所が1987年にとりまとめた「木造住宅の耐久性を向上させるための手引き」^[29]では、防湿層のみでの力任せの対策では不十分であり、水処理、防湿施工、気密施工、外気への開放という、現在では常識的に行われている一連の結露対策が重要であることが示されている。このころには結露とともに気密化により、壁内気流の問題も一応の技術的な解決を見たことから、北海道の断熱・気密施工技術は道外からも注目されるに至った^[30]。1985年には、これらの断熱・気密施工技術の開発に関わってきた北海道の研究者や技術者が中心となり、JASS24断熱工事標準仕様書^[31]をとりまとめている。

しかしながら、これらの結露対策は、構造体である木材を乾燥状態に保ち、腐朽の

予防を図ろうとするもので、断熱材そのものの耐久性については問題視されていない。

(3) 耐久性向上に関する社会的ニーズの高まり

1980～1984 年度には経済の安定成長化に伴う投資余力の衰退、資源問題の顕在化などを背景に、建設省総合技術開発プロジェクトの一環として「建築物の耐久性向上技術の開発」^[32]が実施された。主体構造、非構造部材、建築設備の全般にわたり耐久設計、劣化診断、維持保全の指針が示されたが、ここでも断熱材そのものについては取り扱われていない。

さらに、環境問題が叫ばれるようになると、環境保全や資源保護といった社会背景からも住宅の耐久性向上のニーズが高まり、「100 年住宅」に向けた研究が実施された^[33]。断熱材については、竣工後 100 年間にわたる維持保全において、施工精度の向上により劣化要因はほとんど解消されるとして、内外装材の交換などに伴う部分的な補修は考えられるものの、全面的な交換は想定されていない。1997 年には内部結露を防ぐための防湿フィルムに関して JIS A6930^[34]が制定され、90±2℃、34 週養生による耐久性試験の方法が示された。

(4) 北方型住宅における耐久性の位置づけ

「北方型住宅」創設に向けた検討を行うために、1988 年に道内に居住する戸建て持ち家階層を対象に行ったアンケートでは^[35]、住宅の耐久年数の希望として 30～40 年が大多数を占めていた。より長期に渡り住宅の資産価値が認められるよう、住宅の耐久性に関する意識を変えていくことが必要との問題認識から、北方型住宅の認定基準には優良ストックの形成に向けた各種要件が盛り込まれた。乾燥材の使用、木材防腐措置、ゆとりある平面計画による機能上の耐久性確保をはじめ、集中暖房を原則としたのも非暖房空間での結露防止による耐久性向上が大きな目的であった。

2005 年からの北方型住宅の新展開では、住宅履歴情報の登録・保管システム（北方型住宅サポートシステム）が導入された。追って、住宅履歴情報の整備に関しては、国土交通省の「200 年住宅」への取り組みにも盛り込まれ、北方型住宅 ECO プロジェクトの超長期住宅先導的モデル事業採択につながった。

(5) 断熱材の長期断熱性能評価

木造住宅では断熱材が軸組内に充填されることが多いため、断熱材は躯体並みの耐久性能を要求される。これまで述べた耐久性向上に関する取り組みでは、断熱材は初期性能が長期にわたって維持されているものとして取り扱われてきたが、各種建材の耐久性検証の進展とともに、断熱材に関しても耐久性の検証が求められるようになった。2005 年度から 2007 年度にかけて、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託事業として「断熱材の長期断熱性能評価に関する標準化調査」(以下「標準化調査」という)^[36]が行われ、近藤ら^{[37][38][39]}により成果が報告されている。その中で、特に発泡プラスチック系の断熱材については、ガス置換により熱伝導率の経年変化を起す場合があるため詳細な検討が行われ、長期断熱性能に関する知見が蓄積されつつある。

一方、繊維系断熱材については、振動と水分(水蒸気や液水)を性能変化要因として

いくつかの検証が行われている状況にとどまっている。振動に関しては、壁と天井に施工されたグラスウールとロックウールを対象に、断熱材の寸法と断熱性能の変化に関する実験が行われ、天井の吹込み施工の場合に、振動による沈降により断熱材厚さや熱抵抗の変化が生ずることが確認されている^[38]。この沈降現象については、設計厚さよりも厚く施工することを標準仕様とすることで従来から対策が行われている^[40]。また沈降試験の方法は ISO 18393 において策定が進められている^[41]。水分と性能変化の関係については、断熱材の含水率が増加するにしたがって熱伝導率が直線的に増加することや、グラスウールでは含水により厚さが減少し、乾燥後においても含水前の厚さに完全に戻らないことが報告されている^[39]。これらの検証結果をもとに、標準化調査では繊維系断熱材の長期性能評価方法の考え方として、交通などによる振動の影響で沈降の著しい場合や、水分による影響が著しいなど特別の場合を除き、経年変化は考慮せず、湿度による年間周期変動を考慮することが提案されている。標準化調査における断熱材の長期性能の考え方を表 2-2 に示す。

表 2-2 標準化調査における断熱材の長期性能の整理

断熱材の種類 \ 変化の種類	(A) 経年変化	(B) 年間周期変動
(1) 繊維系断熱材	(特別な場合※を除き) 考慮しない	考慮する
(2) 発泡系断熱材	考慮する	考慮することが望ましい

※“特別な場合”とは、交通などによる振動の影響で沈降が著しい場合や、天井吹込み施工の水分による影響が著しい場合などが想定されている。

2.3.2 断熱材の耐久性に関する本研究の基本方針

標準化調査では、断熱材メーカー各社に対するヒアリング調査により、熱や水分は繊維系断熱材の要求性能に対して関係がないと整理されているが、一方で、その根拠となる技術資料やデータはないことが明記されている^[38]。

実態として、繊維の固定に用いられている樹脂バインダーが水分によって劣化することがあるとの指摘もなされており、例えば JASS24(解説)には「内部結露や雨水の浸入が生じた場合は、フェルト状断熱材では繊維を結合しているバインダーの劣化などによってへたりを生じ、ずり落ちる場合もある」^[40]との記載がある。

水分、結露対策による構造材の耐久性向上に関しては、一応の技術的解決がなされ、断熱材についても発泡系プラスチック系断熱材の長期性能評価の規格化が進む今日、繊維系断熱材についても経年変化とその要因に関する検証が必要であると考ええる。

そこで本論文の第4章では、繊維系の中でも特に北海道の住宅で多く用いられているグラスウールを対象として、長期性状変化に関する検証を行う。

2.4 一次エネルギー消費量による評価

2.4.1 住宅設備の変遷と一次エネルギー評価の導入

(1) 暖房・給湯設備の近代化

住宅の断熱化が進むまでの戦後しばらくの間、北海道の住宅で暖を採るには、ストーブ、ペーチカおよびオンドルという放射型の採暖設備が現実的な選択肢として挙げられていた^[42]。その中で圧倒的な普及を見たのがストーブであった。ストーブの熱源は1964年の調査^[4]で石炭・薪炭が8割だったのが、1969年^[5]には石油と石炭・薪炭がほぼ同数となっており、機器の発達とともに取り扱いの容易な石油への移行が急速に進んだ。

給湯設備は、風呂釜と別に設ける場合、暖房用ストーブの排気煙突に湯沸かし器を取り付けて、台所や洗面所で利用することから始まった。1960年代以降、ガス瞬間式の給湯器や、ガス・石油熱源の貯湯式給湯器も普及し始めた。

また、北海道電力では1966年に深夜電力料金制度を導入し、絶対数は少ないものの、蓄熱暖房機や電気温水器が同年以降急速に増加した。原子力発電所のなかった当時（1970年）においても、夜間余剰電力約70万kWのうち、1/9～1/10くらいしか利用されていないという状況があり、煤煙など衛生上の問題を解決する蓄熱暖房機は、「今後急速な普及を見るだろう」との期待が寄せられていた^[43]。

(2) 集中暖房の普及

1970年代になると、断熱が普及するとともに、集中暖房が高所得者層を中心に導入され始めた。1978年には集中暖房の普及率が全道で8～10%（新築では20～30%）に達していると推定されている^[44]。一方で、前述のとおり不完全な断熱気密施工のままに、集中暖房を取り入れたことで暖房エネルギーの増加を招いた事実は、「寒地住宅の性能水準に関する研究」での提言を受けて、「CH住宅における省エネルギー手法への反省、検討」として広く啓蒙され^[45]、1990年に北方型住宅が打ち出されるまで、全室暖房への流れを一時的に減退させるほどの影響があったという^[46]。

北方型住宅の認定基準では「住宅の暖房方式は、集中暖房など住宅内の室温が適正に確保できるものであること」と、集中暖房の採用が原則とされた。その理由として、部分暖房では非暖房室の結露防止が難しいこと、開口部からの冷気流の防止、ストーブでは室温が上昇し過ぎることが挙げられている^[10]。

(3) 石油依存度の高まり

1970年代のオイルショックを経て、省エネルギーとともに脱石油が課題となった。しかし、道内では石炭が採掘されていたことから、絵内ら^[47]により、石炭焚きの集中暖房も検討されたが、結局石炭に回帰することはなかった。また、1979年に始まる通産省の新エネルギー技術開発計画（サンシャイン計画）によって、北海道でも太陽熱利用の機運が高まり、先進的な導入^[48]や寒冷地向けソーラーシステムの研究開発^[49]が実施された。しかし、1975～1984年における道内のソーラーシステムの設置件数は5,254台（国内シェア2.3%）、凍結により冬季使用できない太陽熱温水器に至っては

2,565 台（同 0.3%）^[50]と、限定的な普及にとどまり、以降は減少の一途をたどっている。結局、オイルショック以降も 1990 年頃までは石油への依存が高まり続けた。1989 年の道内の住宅金融公庫融資住宅を対象とした調査^[51]によると、暖房設備の熱源は 95%以上が石油、給湯設備も 8 割以上が石油と、圧倒的に石油の使用割合が多くなっている。

(4) 熱源、設備の多様化

オイルショック後の脱石油政策の一環として電源三法（発電用施設周辺地域整備法、電源開発促進税法、電源開発促進対策特別会計法）が制定され、原子力発電が推進されることになった。北海道でも 1989 年に泊発電所が運転を開始し、1990 年代以降、全電化住宅の普及が進んだ。ヒートポンプ式機器の開発も進み、自然冷媒ヒートポンプ給湯機（愛称：エコキュート）は、給湯専用機が 2001 年、暖房・給湯兼用機が 2007 年に道内販売を開始している。地中熱ヒートポンプも 2004 年に量産型の地中熱対応ヒートポンプユニットが販売開始となり、一般住宅での採用が見られるようになった。

また、燃焼機器では石油に先駆けて 2000 年に潜熱回収型ガス給湯暖房器（愛称：エコジョーズ）を販売開始、2006 年には石油も潜熱回収型給湯器（愛称：エコフィール）を販売開始（暖房用は 2013 年販売開始）している。オイルショックから 20 年余りを経てようやく熱源の多様化の時代に入ったと言える。

その後の灯油価格高騰や、東日本大震災に伴う動向は第 1 章で述べたとおりである。

(5) 一次エネルギー評価の導入

1980 年に住宅の省エネルギー基準が策定された際には、直ちに実施可能で最も効果のある方法として、断熱性能の向上が取り上げられ、住宅の熱損失係数の基準が定められた^[14]。そして、1992 年、1999 年の 2 度にわたる住宅の省エネルギー基準改正の際にも、基本的にこの考え方は踏襲された。

たしかに、特に北海道では暖房エネルギーの割合が多く、その熱源の大部分が石油であるならば、住宅の熱負荷の低減が省エネルギーに直結する。しかし、熱源や設備が多様化した場合には、設備の選択によってもエネルギー消費量（特に一次エネルギー消費量）が大きく変わる。また、図 2-1 に示すように、暖房については断熱化の進展でエネルギー消費量が減少傾向にあるものの、生活水準の向上とともに給湯や照明・家電などによる消費割合が増えていることから、暖房以外の用途を含めて住宅の省エネルギーを考えていく必要がある。

このような中で、2001 年から 2004 年にかけて、国土交通省総合技術開発プロジェクト「エネルギー自立循環型建築・都市システム技術の開発」が実施され、成果としてまとめられた「自立循環型住宅への設計ガイドライン」^[52]の中で、一次エネルギー消費量を指標とした設計の考え方が示された。そして第 1 章で述べたように、2009 年 1 月告示の事業主基準において、住宅の省エネルギー性能が断熱・遮熱性能のみではなく、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として規定され、2013 年改正の住宅・建築物の省エネルギー基準では、この考え方がすべての住宅に拡大された。

一方、海外においても、設備機器に比べて更新が難しい外皮の断熱性能を重視してきたのは日本と同じであるが、断熱性能と設備機器の省エネ性能を統合したエネルギー消費量基準（一次エネルギー消費量またはCO₂消費量）を設ける国が多くなっている^[16]。

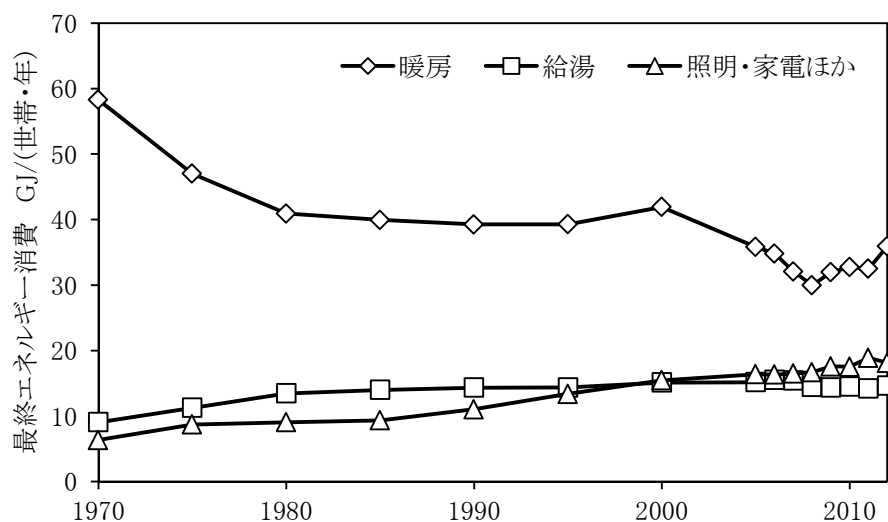


図 2-1 北海道の家庭用エネルギー消費の推移

2.4.2 一次エネルギー評価に関する本研究の基本方針

オイルショック以降の目標とされてきた、熱源の多様化や、潜熱回収、ヒートポンプによる熱効率の向上は、近年急速な進展を見ている。しかし、2009年に事業主基準で一次エネルギー消費量による住宅のエネルギー性能の評価が導入されるまで、住宅設備に関する施策の根拠がなかったため、設備の普及については市場任せの状態であり、実態は十分に把握されていない。設備仕様の実態に関する既往の調査は、住宅金融支援機構の住宅仕様実態調査報告^{[19][20]}ほかや業界団体による出荷統計^{[53][54]}、インターネットによるアンケート調査事例^[55]に限られている。また、既存統計資料の分析により、灯油、ガス、電力の消費構成には明確な地域性があることがわかっている^{[56][57]}。しかしながら、一般住宅を対象に建設地や事業者属性を明らかにした調査は行われておらず、年々変化していると考えられる住宅の断熱・設備仕様や、北海道内におけるエネルギー消費量の地域性までは把握することができていない。

特にエネルギー消費量への影響が大きい住宅設備の選択要因については、エンドユーザーを対象としたアンケートによる調査事例^[58]があるものの、誘導を図る観点では、住宅建設事業者と建築主のどちらに選択の主導権があるのかという点での実態把握も必要と考えられる。

今後は、エネルギーに関する政策目標、既存のエネルギー供給システム、ユーザーのニーズなどとの整合を図りながら、適切な設備の選択を行うことができるよう誘導を行っていく必要があり、そのためには、設備仕様の現状や、選択のされ方、エネルギー消費の実態を把握することが必要である。

そこで本論文の第5章では、まず道内の新築戸建て住宅を対象に、設備仕様の調査を行う。対象とする設備は、暖房設備、給湯設備、および暖房用エネルギーに影響する換気設備とする。また、第3章で推定した U_A 値を用いて、一次エネルギー消費量の推定し、地域性や事業者属性による分析を行う。さらに、適切な設備の選択を行うことができるよう誘導を行うという観点から、誰がどのような観点で設備を選択しているのかについて、住宅建設事業者を対象にアンケートを実施し、選択要因の考察を行う。

2.5 住まい方と省エネルギー

2.5.1 住まい方とエネルギー消費に関する既往の研究

(1) 室温の実態

住宅のエネルギー消費量を問題とするとき、住まい方の実態の調査分析を行うことも重要である。堀江ら^[59]は、コンクリートブロック造住宅の湿害問題への対応として実施された室内環境の長期実測を通じて、自然温度の室温変動や熱負荷に対する影響を理論的に明確にし、自然温度を考慮したデグリーデー法を構築した。当時の時代背景として、室内での温度むらが極めて大きく、室温とは何かというところから研究が始まっており、1970年代に入ってもなお、緊急時に下げるべき室温がないというような意味で、そもそも真に室温と呼べるものは日本の住宅にはまだないのではないかと指摘もされていた^[9]。

繪内らは、さらなる暖かさが強く志向されていた時代の部分・間欠暖房の住宅を主な対象として、1974年から1976年にかけて温熱環境や燃料消費量の実態を調査し、室温変動パターンの類型化^[60]や、燃料消費量との関係の分析^[61]を行っている。暖房の設定室温については、暖房習慣の改善と設備的な面での配慮があれば、確実に20～22℃の範囲にあると指摘している^[62]。

1992～1993年に行われた坊垣ら^[63]の全国8都市域における当時の新築住宅を対象とした調査では、札幌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など、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。この調査結果は、札幌で寒冷地対応の断熱水準や暖房システムが確立しつつあったことを示していると言える。一方、道外でも快適性を求めて暖冷房に依存する度合いが増加することが危惧されており、こたつや部分暖冷房の効果を活かすこと、札幌では着衣を増やすことで室温を下げることの重要性が指摘されている。

(2) エネルギー消費実態

初期の集中暖房住宅を対象にした寒地建築研究所の調査では、建設地の外気温度の違いは燃料消費量に明確に現れていないこと、断熱厚さ100mmと50mmの効果の違いが燃料消費量で確認できないこと、同じ面積を暖房する場合の間欠暖房と連続暖房の違いが具体的に明らかにならなかったことが報告されている^[64]。これらの課題認識が「寒地住宅の居住水準に関する調査研究」につながったことは前述のとおりである。

1998～1999 年には、濱田ら^[65]が札幌近郊における住宅の用途別エネルギー消費量を実測により調査し、1973 年に行われた調査結果と比較して暖房用エネルギー消費量が大幅に低減していることを明らかにしている。札幌以外では、北方建築総合研究所^[66]が 1999～2001 年新築の旭川近郊の戸建て住宅を対象に、住宅属性や室温、エネルギー消費量調査を実施している。

(3) 住まい方

住宅の属性が同様であっても、エネルギー消費量は世帯間のばらつきが大きいことが知られている。井上ら^{[67][68]}は、このばらつきに注目した全国規模アンケートを実施し、個々の住宅のエネルギー消費量のばらつきへの影響は「世帯人数」「保有機器第数」「省エネルギー実行度」が大きいこと、「延床面積」「世帯年収」は影響が少ないことを指摘している。また鈴木ら^[69]は、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、着衣状態や居住者属性、暖房方式と冬季の室温との関係を分析している。

2.5.2 住まい方と省エネルギーに関する本研究の基本方針

これまで見たように、近年住宅の高断熱化や設備の多様化が進んでおり、それに伴うエネルギー消費への影響は、先行研究と同様に実態調査により見極める必要がある。

特に、無暖房を目指すほどの高断熱住宅では、計算上オーバーヒートが生ずるとの指摘がなされており^{[70][71]}、外気温の高い夏季や太陽高度が下がり取得日射の増える中間期、また暖房負荷が極めて小さくなる暖房期との端境期に、室内の温熱環境が悪化する懸念がある。

また、第 1 章で述べたように、地球温暖化防止や節電要請を背景とした切実な省エネルギーニーズから、一般消費者を対象とした省エネルギー診断や、HEMS の導入も進んでおり、住宅供給に関わる立場からも、住まい方とエネルギー消費量の実態を把握しておく必要がある。

本論文の第 6 章では、まず、 $Q \leq 1.3 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ を主な条件として建設された「北方型住宅 ECO」（2008 年度建設）を対象に、温熱環境やエネルギー消費の検証を行う。また、北方型住宅 ECO での反省を踏まえ、断熱性能の要件を $Q \leq 1.2 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ に強化し、エネルギー消費量による設計要件を加えた「北方型省 CO₂ 住宅」（2011～2013 年度建設）の実態調査を行い、省エネルギー性能を検証する。さらに、これらの高性能住宅とともに、一般の住宅居住者を対象にしたアンケート調査を行い、今後の住まい方改善に関する施策に向けての知見を得る。

2.6 本章のまとめ

本研究では、北海道の戸建住宅を対象として、断熱と設備の実態を把握するとともに、長期耐久性や一次エネルギー消費量の検証を行う。具体的には、①断熱水準、②断熱材の耐久性、③一次エネルギー消費量、④住まい方と省エネルギーの4項目に着目し、本章で各項目の既往の成果の概観と、本研究の基本方針の整理を行った。表 2-3 にその結果を要約する。以降の各章では、ここで示した基本方針に基づき、研究を進める。

表 2-3 既往の成果と各項目における本研究の基本方針

項目	既往の成果	各項目における本研究の基本方針
①断熱水準 →第3章	- 断熱施工技術の確立 - 目標性能への到達 - U_A 値基準の導入	- 高断熱化の機運が高まっている現状の断熱仕様の全体像を明らかにする - 新たに導入された U_A 値での評価を行う - さらなる高断熱の可能性を検討する
②断熱材の耐久性 →第4章	- 内部結露を防止する気密工法の確立 - 住宅の長期使用を支える法規、家歴システムの整備 - 発泡プラスチック系断熱材の耐久性に関する知見の蓄積	既往の知見に乏しい繊維系断熱材の長期耐久性を検証する
③一次エネルギー消費量による評価 →第5章	- 熱源の多様化 - 設備の高効率化 - 一次エネルギー消費量基準の導入	- 多様化が進む設備仕様の全体像を明らかにする - 新たに導入された一次エネルギー消費量基準での評価を行う - 設備仕様の選択要因を考察する
④住まい方と省エネルギー →第6章	- 実態調査による知見の蓄積 - 住まい方による省エネのための情報整備	- 従来の断熱性能を大きく上回る住宅の住まい方や温熱環境と省エネルギーの実態を把握する。 - 設計にエネルギー消費量による評価を取り入れた住宅の、実際の省エネ効果を検証する。

注

注 1 中央暖房、セントラルヒーティング、CH ともいうが、本論文では集中暖房と記す。

参考文献

- [1] 寒地共同住宅の居住性に関する研究―防寒・防露・換気・暖房計画設計資料―（昭和 27 年度委託研究），北海道住宅改善研究報告書，北海道建築部，1953.4
- [2] 渡辺要：寒地アパートの防寒防露構（北海道の建築気候区と防寒防露構造のための熱貫流率），日本建築學會研究報告 24 号，pp.311-312，1953.10
- [3] 寒地住宅の省エネルギー化に関する研究，北海道立寒地建築研究所調査研究報告，No.43，1983.3
- [4] 関谷嵐子：北海道の新築住宅に関する一調査，北海道立寒地建築研究所調査研究報告，No.22，pp.25-51，1966.1
- [5] 許士武雄，斎藤健人，河野寛，鴨井博，万徳昭夫，井上貞弘：北海道の住宅に使われた建築材料の調査，北海道立寒地建築研究所調査研究報告，No.26，pp.61-94，1969.2
- [6] 寒地住宅の構造と設計，第 16 回寒地建築技術講習テキスト，北海道建築士会・北海道建築指導センター，p.110，1973.2
- [7] 上野栄，日下研二，石川松四郎，五十嵐照男，福島明：住宅の暖房実態調査，日本建築学会北海道支部研究報告集 No.50，pp.259-262，1979.3
- [8] 省エネルギー住宅の計画と設計―魅力ある省エネルギー住宅を求めて―，第 23 回寒地建築技術講習テキスト，北海道建築士会・北海道建築指導センター，p.42，1981.1
- [9] 寒地住宅の居住水準に関する調査研究―望ましい規模水準・性能水準―，北海道住宅建設促進会，1980.3
- [10] 「これからの寒地建築」―木造住宅編―，第 31 回寒地建築技術講習テキスト，北海道建築士会，pp.36-37，1988.1
- [11] 住宅に係るエネルギーの使用の合理化に関する建築主の判断基準，昭和 55 年 2 月 28 日通商産業省・建設省告示第 1 号
- [12] 住宅に係るエネルギーの使用の合理化に関する設計及び施工の指針，昭和 55 年 2 月 29 日建設省告示第 195 号
- [13] 北方型住宅の設計と施工，第 34 回寒地建築技術講習テキスト，北海道・北海道建築士会・北海道建築指導センター，1991.1
- [14] 住宅新基準解説書編集委員会：住宅の新省エネルギー基準と指針，住宅・建築省エネルギー機構，1992.6
- [15] 次世代省エネルギー基準解説書編集委員会：住宅の次世代省エネルギー基準と指針，住宅・建築省エネルギー機構，p.40，1999.11

- [16] 野村総合研究所：住宅省エネ基準の国際比較と更なる省エネから向けて，NRI パブリックマネジメントレビュー，vol.138，2015.1
- [17] 「低炭素社会に向けた住まいと住まい方」の推進方策について中間とりまとめ，経済産業省・国土交通省・環境省，2012.7
- [18] 北海道住まいづくり市民セミナー計画実行委員会：住まいづくり市民セミナー@北海道報告書，2013.11
- [19] 昭和 62 年度住宅・建築主要データ報告，住宅金融公庫，1988.9
- [20] フラット 3 5 住宅仕様実態調査報告ー在来木造工法の戸建住宅ー，住宅金融支援機構，http://www.jhf.go.jp/about/research/tech_flat35_siyou.html，参照 2014.11.13
- [21] 新海悟郎：家の寿命，建築文庫 30，彰国社，p.31，1958.6
- [22] 北国の住まい第 4 集「新しい農漁村の住宅」，建設情報社，p.59，1961.6
- [23] 清原潔・木村宏：家屋並びに土地凍上に関する試験，建築衛生に関する報告第 1 号，北海道衛生部，1950.10
- [24] 清原潔：住宅の凍上被害対策に関する調査研究，北海道立寒地建築研究所調査研究報告，No.4，1960.8
- [25] 福島明：北海道の住宅結露と地域性への研究，学位論文，1997.8
- [26] 鎌田紀彦，鈴木大隆，平向邦夫：寒冷地における断熱壁体の内部結露に関する研究その 1，北海道における一般的な構成の壁について，日本建築学会学術講演梗概集計画系，pp.1337-1338，1984.10 ほか
- [27] 住宅耐久性研究開発，北海道立寒地建築研究所調査研究報告，No.47，1986.3
- [28] 北海道建築部住宅課：寒地住宅読本，北海道建築士会，p.44，1959.2
- [29] 木造住宅の耐久性を向上させるための手引き，技術資料 No.14，北海道立寒地建築研究所，1987.3
- [30] 北国に学ぶ「暖かい住宅」，建築知識，Vol.29，No.344，1987.1
- [31] 建築工事標準仕様書・同解説 JASS24 断熱工事，日本建築学会，1985.3
- [32] 建設省建築研究所：建設省総合技術開発プロジェクト 省エネルギーシステム住宅の開発，建設省大臣官房技術調査室，p.839，1982.12
- [33] 省エネルギー 100 年住宅に関する研究，北海道立寒地住宅都市研究所調査研究報告，No.68，p.131,149，1997.3
- [34] JISA6930：住宅用プラスチック系防湿フィルム，1997.12
- [35] 北方型住宅に関する研究，北海道立寒地建築研究所調査研究報告，No.49，p.30，1992.3
- [36] 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合研究機構：平成 19 年度断熱材の長期断熱性能評価に関する標準化調査成果報告書，2008.3
- [37] 近藤靖史，長澤康弘，藤本哲夫，田坂太一：発泡プラスチック系断熱材の長期断熱性能変化の測定および数値解析，日本建築学会環境系論文集，第 634 号，pp.1361-1368，2008.12

-
- [38] 近藤靖史，岩前篤，長澤康弘，藤本哲夫，菊地裕介，田坂太一：断熱材の性能変化要因の検討と振動による断熱性能変化の実験 建築用断熱材の長期断熱性能変化に関する研究，その 1，日本建築学会環境系論文集，第 643 号，pp.1049-1057，2009.9
- [39] 近藤靖史，岩前篤，長澤康弘，藤本哲夫，菊地裕介，田坂太一：水分による断熱材の断熱性能変化に関する実験 建築用断熱材の長期断熱性能変化に関する研究，その 2，日本建築学会環境系論文集，第 649 号，pp.261-269，2010.3
- [40] 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS24 断熱工事，日本建築学会，2013.2
- [41] ISO 18393-1：Thermal insulation products - Determination of ageing by settlement - Part 1: Blown loose-fill insulation for ventilated attics, 2012
- [42] 北海道建築部住宅課：寒地住宅読本，北海道建築士会，p.131，1959.2
- [43] 寒地住宅の設備と設計，第 15 回寒地建築技術講習テキスト，北海道建築士会・北海道建築指導センター，1972.2
- [44] 寒地住宅の設計―寒さによる障害の事例とその対策―，第 21 回寒地建築技術講習テキスト，北海道建築士会・北海道建築指導センター，p.26，1978.2
- [45] 省エネルギー住宅の計画と設計―魅力ある省エネルギー住宅を求めて―，第 23 回寒地建築技術講習テキスト，北海道建築士会・北海道建築指導センター，pp59-63，1981.1
- [46] 鈴木大隆：積雪寒冷地における断熱外壁の防露・防水・断熱性向上，および，屋根の積雪障害防止に関する研究―環境と地域に向けた住宅断熱外皮技術の再構築と具現化への提案―，学位論文，1998
- [47] 絵内正道，荒谷登：住宅暖房のための石炭焚中央暖房の可能性，日本建築学会北海道支部研究発表会報告，pp.157-160，1972.3
- [48] 北海道内における太陽熱利用暖房の実態，技術資料 No.6，北海道立寒地建築研究所，1983.6
- [49] 寒研型・太陽熱利用暖房システムのマニュアル，技術資料 No.9，北海道立寒地建築研究所，1985.3
- [50] ソーラーシステム・太陽熱温水器地域別設置実績，<http://www.ssda.or.jp/energy/result.html>，ソーラーシステム振興協会，参照 2014.11.15
- [51] 平成元年度住宅・建築主要データ報告―戸建住宅編―，住宅金融公庫，1990.12
- [52] 国土交通省国土技術政策総合研究所，建築研究所監修：自立循環型住宅への設計ガイドライン エネルギー消費 50%削減を目指す住宅設計，建築環境・省エネルギー機構，2005.6
- [53] ガス石油機器の販売実績と予測，日本ガス石油機器工業会，<http://www.jgka.or.jp/industry/toukei/kougyo-toukei/hanbai-jisseki/>，参照 2014.6.9
- [54] 家庭用エアコン・業務用エアコン・ガスヒートポンプエアコン，家庭用ヒートポンプ給湯機の月ごとの国内出荷の推移，日本冷凍空調工業会，<http://www.jraia.or.jp/statistic/>，参照 2014.6.9
- [55] 岸田真一，中村美紀子，三浦尚志，桑沢保夫，石婷：アンケートによる住宅設備・機器の使用状況に関する実態調査，その 1 調査の目的・概要および調査方法，日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2，pp.987-988，2010.9

- [56] 三浦秀一：全国における住宅の用途別エネルギー消費と地域特性に関する研究，日本建築学会計画系論文集，No.51，pp.77-83，1998.8
- [57] 福代和宏：二人以上世帯エネルギー源別年間消費量の地域性の要因，空気調和・衛生工学会論文集，No.145，pp.9-19，2009.4
- [58] 久米薫，海藤俊介，松野勉，横尾昇剛，岡建雄：住宅設備・部材の選択要因に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2，pp.1407-1408，2010.9
- [59] 堀江悟郎：居住室の室内気候に関する一連の研究，建築雑誌，pp.327-329，1966.7
- [60] 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
- [61] 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
- [62] 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
- [63] 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，林撤夫，森田大：夏期および冬期の居住室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
- [64] 釜田幹男：住宅の暖房実態調査－その3 CH燃料消費量（独立住宅），昭和54年度北海道立寒地建築研究所調査研究報告集，pp.86-90，1979
- [65] 濱田靖弘・中村真人・落藤澄・村越千春・鶴崎敬大・横尾美雪・成田涼子・嶋原亮・長倉香織・横山真太郎：札幌における家庭用エネルギー消費量とその季時別変動に関する実測と評価，空気調和・衛生工学会論文集，No.82，pp.29-37，2001.7
- [66] 鈴木大隆，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
- [67] 長谷川善明，井上隆：全国規模アンケートによる住宅内エネルギー消費の実態に関する研究 世帯特性の影響と世帯間のばらつきに関する考察 その1，日本建築学会環境系論文集，No.583，pp.23-28，2004.9
- [68] 井上隆，水谷傑，田中俊彦：全国規模アンケートによる住宅内エネルギー消費の実態に関する研究 影響を及ぼす要因に関する分析 その2，日本建築学会環境系論文集，No.606，pp.75-80，2006.8
- [69] 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
- [70] タギサデギアン，絵内正道：北海道無暖冷房住宅に向けた試み その2，日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2，pp.101-102，2008.9
- [71] 立松宏一，鈴木大隆：寒冷地の住宅の暖房負荷低減に向けての一考察，日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2，pp. 21-22，2008.9

第3章 断熱水準の実態と さらなる高断熱化の可能性

3.1 はじめに

本章の目的は、道内の戸建住宅の断熱水準を明らかにし、住宅の省エネルギー基準で新たに導入された外気平均熱貫流率（ U_A 値）の推定を行うことと、次の目標へ向けてさらなる高断熱化の可能性を検討することである。本章の研究フローを図 3-1 に示す。まず、断熱水準の全体像を把握するため、道内で新築住宅の建設実績がある全住宅建設事業者を対象に実態調査を行う。ただし、現状では U_A 値による設計を行っている事業者は多くないと考えられ、直接 U_A 値を調査することは困難である。そこで、躯体の断面構成や住宅形状を仮定し、 U_A 値を推定する方法を検討する。推定した U_A 値は第 5 章の一次エネルギー消費量の推定でも用いることとなる。また、 U_A 値の推定に関連して、次の点で考察を行う。

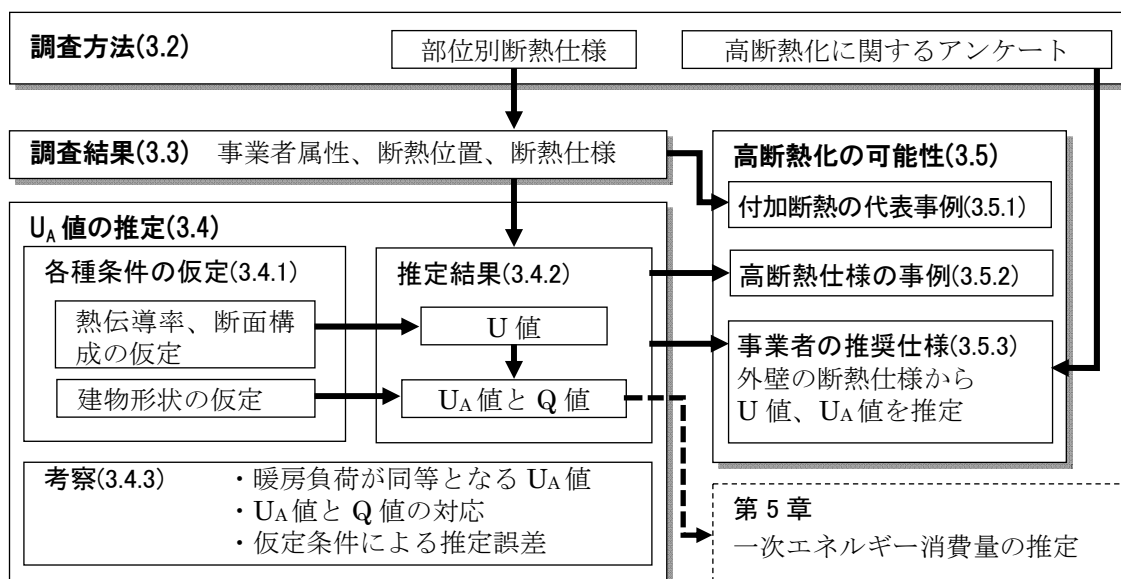


図 3-1 本章の研究フロー

-
- ・第1章で述べたように、消費エネルギーの道内における地域間格差が課題となっていることから、外気温や日射量を考慮した暖房負荷計算により、地域別の U_A 値と暖房負荷の関係を考察する。
 - ・改正前の住宅の省エネルギー基準で用いられていた Q 値（熱損失係数）も、併せて推定することとし、 U_A 値と Q 値の対応を考察する。
 - ・ U_A 値の推定のためにいくつかの仮定を行っているため、仮定条件による推定値への影響について考察する。

一方、高断熱化の可能性については、断熱仕様の調査結果から高断熱仕様の事例を分析し、高断熱化の限界と可能性を検討する。また、断熱性能を向上させる場合、コストが一つの大きな判断要素になると考えられることから、住宅建設事業者を対象に、コストを抜きにした場合に推奨したい断熱仕様をアンケートで調査し、各事業者の現状の仕様と比較することで、さらなる高断熱化の可能性を検討する。

なお、本章は道受託研究「北海道型ゼロエミッション住宅に関する研究」（受託者：北方建築総合研究所）の一環として実施したものである。また、各年の調査票の配布、回収および集計は、民間コンサルタントへの再委託により実施した。

3.2 調査方法

3.2.1 調査対象

調査は2011年から2013年にかけて年に1回実施し、調査年の前年1月～12月に道内において戸建住宅で1棟以上の建築確認を受けた全事業者を対象とした。該当する事業者は北海道住宅通信社の「北海道住宅データバンク」から抽出した。また、回答の対象となる住宅は、2010年から2012年に新築された木造戸建住宅としたが、本論文では2012年の新築住宅を主な分析対象とし、一部動態把握のため、2010年および2011年新築住宅の調査結果も扱う。

3.2.2 調査票の配布および回収方法

調査は調査票の郵送により実施し、当該事業者が1年間に建設した住宅についてまとめて回答を求めた。

調査票の回収は、同封した返信用封筒による郵送またはFAXにより行った。締め切りまでに返送がなかった事業者に対しては、電話またはFAXにより再依頼を行った。

3.2.3 調査項目

各年の調査内容を表3-1に示す。また、2012年新築戸建住宅の調査に用いた調査票を図3-2に示す。回答率の向上のためには極力回答者の負担とにならない調査内容とする必要があるため、断熱性能については各部位の断熱材種別と断熱厚さのみ調査することとし、 U_A 値は、標準的な断面や住宅規模を設定して算出することとした。また、1事業者で複数の仕様を有する場合は、施工棟数の多い順に2仕様（以下、順に「第1仕様」「第2仕様」という）を調査することとし（2010年、2011年新築住宅については3仕様まで調査）、それぞれの仕様の棟数を把握した。さらに、推奨する断熱仕様に関してのアンケートを設けた（2012年新築住宅の調査のみ）。なお、調査項目に含まれている設備仕様の調査については、第5章で述べる。

表 3-1 各年の調査内容

調査対象	2010年新築	2011年新築	2012年新築
断熱仕様	○ 代表3仕様 建設棟数上位10社を除く	○ 代表3仕様	○ 代表2仕様
設備仕様	×	○ 代表3仕様	○ 代表2仕様
アンケート	×	×	○

○: 調査対象、×: 対象外

・調査対象は昨年平成24年（1月～12月）建設の新築戸建住宅（大建）についてお答えください。一概でも施工実績があればご協力をお願いいたします。（※平成25年ではおひまっせんので、お気を付け下さい）

・仕様の異なる場合は、施工程の異なるものに多い仕様様式について回答してください。棟別には番号表から該当する番号を速히回答欄にご記入ください。

・戸内で複数の異なる場を用いている場合は、面積が大きいものとしたる仕様についてお答えください。

壁・屋根・天井・床・基礎の断熱材の番号表

換気設備の番号表

①ダクト式(第1種)	⑥壁付け同時給排気型ファン (熱交換あり)
②ダクト式(第1種熱交換あり)	⑦壁付け給気型ファン
③ダクト式(第2種)	⑧壁付け排気型ファン
④ダクト式(第3種)	⑨その他
⑤壁付け同時給排気型ファン	

② 溫水暖房(電氣)

給湯設備の番号表

①ガス瞬間式(従来型)	⑥電気温水器
②ガス貯留式(従来型)	
③ガス貯留式(省エネ型)	
④ガス貯留式(省エネ型)	
⑤ガス貯留式(省エネ型)	
⑥ガス貯留式(省エネ型)	
⑦ガス貯留式(省エネ型)	
⑧ガス貯留式(省エネ型)	
⑨ガス貯留式(省エネ型)	
⑩ガス貯留式(省エネ型)	
⑪ガス貯留式(省エネ型)	
⑫ガス貯留式(省エネ型)	
⑬ガス貯留式(省エネ型)	
⑭ガス貯留式(省エネ型)	
⑮ガス貯留式(省エネ型)	
⑯ガス貯留式(省エネ型)	
⑰ガス貯留式(省エネ型)	
⑱ガス貯留式(省エネ型)	
⑲ガス貯留式(省エネ型)	
⑳ガス貯留式(省エネ型)	
㉑ガス貯留式(省エネ型)	
㉒ガス貯留式(省エネ型)	
㉓ガス貯留式(省エネ型)	
㉔ガス貯留式(省エネ型)	
㉕ガス貯留式(省エネ型)	
㉖ガス貯留式(省エネ型)	
㉗ガス貯留式(省エネ型)	
㉘ガス貯留式(省エネ型)	
㉙ガス貯留式(省エネ型)	
㉚ガス貯留式(省エネ型)	
㉛ガス貯留式(省エネ型)	
㉜ガス貯留式(省エネ型)	
㉝ガス貯留式(省エネ型)	
㉞ガス貯留式(省エネ型)	
㉟ガス貯留式(省エネ型)	
㊱ガス貯留式(省エネ型)	
㊲ガス貯留式(省エネ型)	
㊳ガス貯留式(省エネ型)	
㊴ガス貯留式(省エネ型)	
㊵ガス貯留式(省エネ型)	
㊶ガス貯留式(省エネ型)	
㊷ガス貯留式(省エネ型)	
㊸ガス貯留式(省エネ型)	
㊹ガス貯留式(省エネ型)	
㊺ガス貯留式(省エネ型)	
㊻ガス貯留式(省エネ型)	
㊼ガス貯留式(省エネ型)	
㊽ガス貯留式(省エネ型)	
㊾ガス貯留式(省エネ型)	
㊿ガス貯留式(省エネ型)	

②ガス瞬間式(エコシ

⑤石油燭間式(埃来型) ⑥石油燭間式(埃来型) ⑦石油燭間式(埃来型) ⑧石油燭間式(埃来型) ⑨石油燭間式(埃来型) ⑩石油燭間式(埃来型) ⑪石油燭間式(埃来型) ⑫石油燭間式(埃来型) ⑬石油燭間式(埃来型) ⑭石油燭間式(埃来型) ⑮石油燭間式(埃来型) ⑯石油燭間式(埃来型) ⑰石油燭間式(埃来型) ⑱石油燭間式(埃来型) ⑲石油燭間式(埃来型) ⑳石油燭間式(埃来型) ㉑石油燭間式(埃来型) ㉒石油燭間式(埃来型) ㉓石油燭間式(埃来型) ㉔石油燭間式(埃来型) ㉕石油燭間式(埃来型) ㉖石油燭間式(埃来型) ㉗石油燭間式(埃来型) ㉘石油燭間式(埃来型) ㉙石油燭間式(埃来型) ㉚石油燭間式(埃来型) ㉛石油燭間式(埃来型) ㉜石油燭間式(埃来型) ㉝石油燭間式(埃来型) ㉞石油燭間式(埃来型) ㉟石油燭間式(埃来型) ㊱石油燭間式(埃来型) ㊲石油燭間式(埃来型) ㊳石油燭間式(埃来型) ㊴石油燭間式(埃来型) ㊵石油燭間式(埃来型) ㊶石油燭間式(埃来型) ㊷石油燭間式(埃来型) ㊸石油燭間式(埃来型) ㊹石油燭間式(埃来型) ㊺石油燭間式(埃来型) ㊻石油燭間式(埃来型) ㊼石油燭間式(埃来型) ㊽石油燭間式(埃来型) ㊾石油燭間式(埃来型) ㊿石油燭間式(埃来型)	⑤壁付け同時給排気型ファン (熱交換あり) ⑥壁付け給気型ファン ⑦壁付け排気型ファン ⑧壁付け同時給排気型ファン ⑨その他
--	---

図 3-2 調査票（2012 年新築戸建）

3.3 断熱仕様の調査結果

3.3.1 回答事業者の属性

表 3-2 に調査対象件数と有効回答数を示す。返送された調査票には一部の回答が欠落しているものがあつたが、各部位の断熱仕様がもれなく把握できる場合を有効回答として扱った。事業者数の集計（表 3-2(a)）には、事業者の年間建設棟数別（建築確認申請棟数に基づく）の内訳を示している。棟数の集計（表 3-2(b)）には事業者所在地別の内訳を示している。事業者所在地は本社または北海道内における代表営業拠点所在地（各社 1 か所）により振興局別に分類した。「道外」に分類されているのは、北海道内に営業拠点を持たない事業者である。参考に図 3-3 に振興局と省エネルギー基準の地域区分を示す。また、回答のあつた事業者のうち建設棟数の上位 5 社は建設地が北海道全域にわたるため、事業者所在地別の集計では「大規模事業者」として別枠で扱う。対象棟数は建築確認申請がなされた住宅について計上しているが、回答棟数には建築確認不要の住宅も含まれている。なお、対象棟数 12,366 棟に対し、同期間の建築確認不要の住宅も含む国土交通省の住宅着工統計による新築戸建住宅棟数は 13,940 棟である。

表 3-2 有効回答数

(a)事業者数

建設年		対象事業者数	回答事業者数	回答率
2010年		1,697	676	40%
2011年		1,748	572	33%
2012年		1,709	506	30%
年間 建設 棟数 別内 訳	1棟	740	142	19%
	3棟以下	448	130	29%
	10棟以下	310	133	43%
	50棟以下	175	77	44%
	51棟以上	36	24	67%

(b)棟数

建設年		対象棟数	回答棟数	回答率
2010年		8, 976	5, 620	63%
2011年		12, 316	6, 870	56%
2012年		12, 366	7, 254	59%
事業 者所 在地 別内 訳	大規模事業者	1, 902	1, 925	100%
	空知・石狩・後志	5, 614	2, 841	51%
	胆振・日高	886	472	53%
	渡島・桧山	744	239	32%
	上川・留萌・宗谷	1, 254	740	59%
	オホーツク	534	310	58%
	十勝	915	548	60%
	釧路・根室	482	176	37%
	道外	35	3	9%

3.3.3 断熱仕様

(1) 断熱外皮

図 3-5 に部位別の断熱厚さの累積頻度を示す。グラフが垂直に大きく立ち上がっている部分が使用割合として大きいことを示している。

外壁の充填部は構造材の断面寸法に応じ、100mm（または 105mm、3 寸 5 分）、次いで 120mm（4 寸）、90mm（または 89mm、2×4）、140mm（2×6）が多く、これらのいずれかの厚さで大半を占めている。付加部の厚さは 60mm 以下が約 8 割、外壁の厚さの合計は 130mm 以下が約 8 割である。一方、外壁で 200mm 以上の断熱厚としている住宅が 3.5%ある。

天井は 200mm から 400mm まで 50mm 刻みで厚さが分布されており、300mm が過半を占める。屋根は 100mm から 400mm まで厚さが広く分布している。

床の断熱厚さは 100、150、200、235mm のいずれかとしている住宅が多い。基礎は約半数が厚さ 100mm 未満である。

図 3-6 には、部位ごとに、使用されている断熱材種別の割合を示す。外壁充填部は繊維系断熱材が約 9 割を占め、その他硬質ウレタンフォーム板、吹付ウレタンも比較的多く使用されている。付加部は主に発泡プラスチック系断熱材が使用されている。天井は吹込み用の断熱材が約 9 割を占める。屋根は 170mm 以下で押出法ポリスチレンフォーム板、200mm で高性能グラスウール、210mm 以上で吹込み用断熱材の割合が多い。床は 100mm 未満の場合は主に発泡プラスチック系の断熱材が使用されている。100mm～200mm では高性能グラスウールが大半で、235mm 以上で過半が吹込み用断熱材となる。基礎立上りは 100mm 以下で押出法ポリスチレンフォーム板の使用が多いが、100mm を超えると過半がビーズ法ポリスチレンフォーム板を使用している。

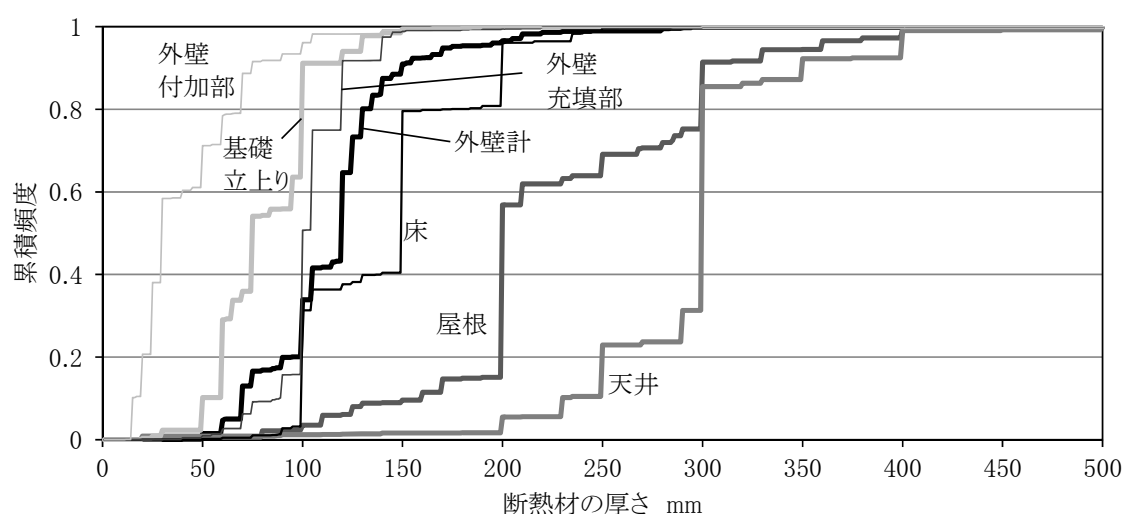
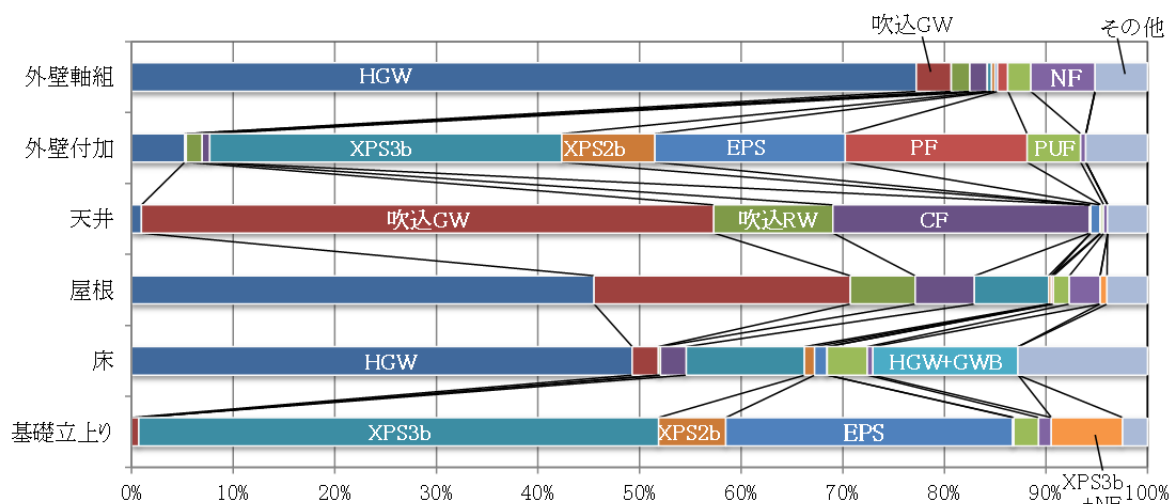


図 3-5 部位別断熱厚さの累積頻度（2012 年新築、棟数ベース）



凡例 HGW：高性能グラスウール、吹込 GW：吹込グラスウール、吹込 RW：吹込ロックウール、CF：吹込セルローズファイバー、XPS3b：押出法ポリスチレンフォーム板 3 種 b、XPS2b：押出法ポリスチレンフォーム板 2 種 b、EPS：ビーズ法ポリスチレンフォーム板、PF：フェノールフォーム板、PUF：硬質ウレタンフォーム板、NF：吹付ウレタン

図 3-6 各部位の断熱材種別の割合（2012 新築、棟数ベース）

(2) 窓

窓仕様別の棟数を表 3-3 に示す。98%以上が Low-E ガラスを採用している。また、トリプルガラスの採用率は、2010 年が 2.5%、2011 年が 7.9%、2012 年が 8.5%と年々上昇している。

複層ガラスの空気層厚さを表 3-4 に示す。2011 年は戸建の 90%以上が 12mm であったが、2012 年は 16mm 以上の採用が増加している。

表 3-3 窓仕様別棟数（2012 年新築）

枠材	ガラス	Low-E	ガス	棟数	割合
樹脂または木	ペア	なし	空気	100	1.4%
樹脂または木	ペア	あり	空気	293	4.0%
樹脂または木	ペア	あり	ArまたはKr	6,203	85.5%
樹脂または木	トリプル	あり	ArまたはKr	618	8.5%
アルミ	ペア	あり	ArまたはKr	-	-
その他				40	0.6%

表 3-4 複層ガラスの空気層厚さ（2012 年新築）

空気層厚さ[mm]	棟数	割合
6	45	0.7%
12	4,345	68.3%
16	1,748	27.5%
18	66	1.0%
その他	161	2.5%

凡例 Low-E：低放射膜、Ar：アルゴン、Kr：クリプトン

3.4 U_A 値の推定

3.4.1 各種条件の仮定

調査により得られた各部位の断熱仕様から、 U_A 値を推定する方法を以下に述べる。 U_A 値は式(3-1)で表される。

$$U_A = \left(\sum_i^n (A_i \times U_i \times H_i) + \sum L_F \times U_F \right) / A \quad (3-1)$$

ここで、

U_A	: 外皮平均熱貫流率	[W/(m ² K)]
A_i	: 外皮の面積（基礎を除く）	[m ²]
U_i	: 熱貫流率	[W/(m ² K)]
H_i	: 温度差係数（床断熱の場合 0.7、その他は 1.0）	
n	: 外皮の部位数（基礎を除く）	
L_F	: 基礎の外周の長さ	[m]
U_F	: 基礎外周の熱貫流率	[W/(mK)]
A	: 外皮面積の合計	[m ²]

であり、まず、各部位の熱貫流率（ U_i および U_F ）の推定が必要となる。

(1) 熱貫流率（ U 値）推定のための仮定

表 3-5 に調査票の選択肢として示した断熱材の種類と、計算に使用する熱伝導率を示す。断熱材の熱伝導率は文献^[1]に掲載されている値を用いる。複数の規格がある断熱材の場合は、最も一般的に使用されていると考えられる規格の熱伝導率を採用する。せっこうボード、合板、木材の熱伝導率はそれぞれ、0.22、0.16、0.12W/(mK)とする。

図 3-7 に各部位の U 値を算定するための断面構成を示す。熱橋面積比率は工法により異なるが、文献^[1]で工法別に示されている簡略計算方法の熱橋部面積比率を使用することとし、木造軸組工法を想定して設定する。道内では天井は吹込み工法が多く、外壁の付加部は下地を用いない工法が多い実態から、天井と外壁付加断熱部には熱橋が生じないものとする。基礎断熱を採用している場合の U_F は、すべて床下空間を有し、躯体の外側で断熱されていると想定し、文献^[1]で詳細計算法として示されている式を用いて計算する。

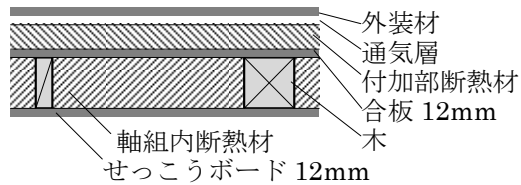
サッシの U 値は建具とガラスの仕様に応じ、文献^[1]をもとに表 3-6 のとおり設定する。玄関ドアの U 値は 2.33W/(m²K)とする。

(2) 各部位面積、基礎外周長さの仮定

U_A 値の算定にはさらに建物外皮の各部位面積などが必要となる。住宅の省エネルギー基準の検討に用いられているモデルや、建築学会の標準住宅モデルを用いる方法もあるが、より実態を反映させるため、建築主から了解を得た北方型住宅を対象に各部位面積を図面から調査し計算に用いることとする。 U_A 値の推定に用いる 157 件の実データを図 3-8 に示す。玄関ドアの面積は 2m²とする。外皮面積の合計 A は、天井または屋根の面積、外壁面積、1階床面積、開口部面積の計となる。 U_A 値の算出は調査で得られた各断熱仕様に対し図 3-8 の部位面積の組み合わせ 157 通りで行う。

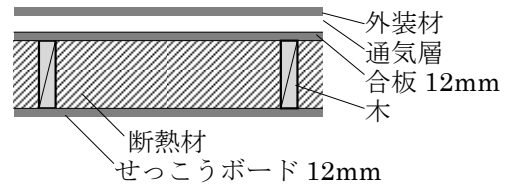
表 3-5 断熱材の熱伝導率

断熱材種類	計算に使用した熱伝導率(W/mK)		本論文中的略号
	壁	天井	
高性能グラスウール	0.038	0.038	HGW
グラスウールボード(密度が32K以上)	0.036	0.036	GWB
吹込グラスウール	0.040	0.052	吹込GW
ロックウール	0.038	0.038	RW
吹込ロックウール	0.039	0.047	吹込RW
吹込セルロースファイバー	0.040	0.040	CF
押出法ポリスチレンフォーム3種b	0.028	0.028	XPS3b
押出法ポリスチレンフォーム2種b	0.034	0.034	XPS2b
押出法ポリスチレンフォーム1種b	0.040	0.040	XPS1b
ビーズ法ポリスチレンフォーム	0.034	0.034	EPS
フェノールフォーム	0.022	0.022	PF
硬質ウレタンフォーム	0.024	0.024	PUF
吹付ウレタン	0.032	0.032	NF



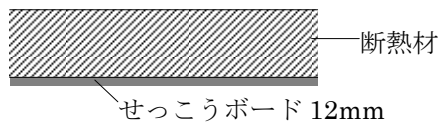
熱橋部面積比率 17%
熱伝達抵抗[m²K/W]
室外側 0.11 (通気層)、室内側 0.11

(a)外壁



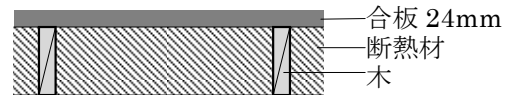
熱橋部面積比率 14%
熱伝達抵抗[m²K/W]
室外側 0.09 (通気層)、室内側 0.09

(b)屋根



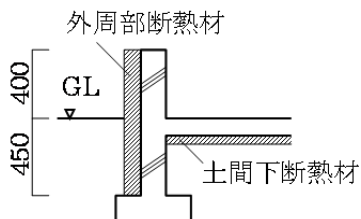
熱伝達抵抗[m²K/W]
室外側 0.09 (小屋裏)、室内側 0.09

(c)天井



熱橋部面積比率 20%
熱伝達抵抗[m²K/W]
室外側 0.15 (床裏)、室内側 0.15

(d)床



基礎の熱貫流率 U_F (W/(mK))の計算式

$$U_F = 1.80 - 1.36(0.85R_w)^{0.15} - 0.01(6.14 - R_w)((0.5R_f)0.9)^{0.5}$$

ただし、 $U_F \geq 0.05$

R_w : 外周部断熱材の熱抵抗[m²K/W]

R_f : 土間下断熱材の熱抵抗[m²K/W]

(e)基礎

図 3-7 各部位のU値算出上の断面構成

表 3-6 窓のU値の設定

窓の種類	熱貫流率[W/(m ² K)]
樹脂または木枠 普通ペアガラス	2.91
樹脂または木枠 Low-Eペアガラス ガス無し	2.33
樹脂または木枠 Low-Eペアガラス ArまたはKrガス封入	1.90
樹脂または木枠 Low-Eトリプルガラス ArまたはKrガス封入	1.60

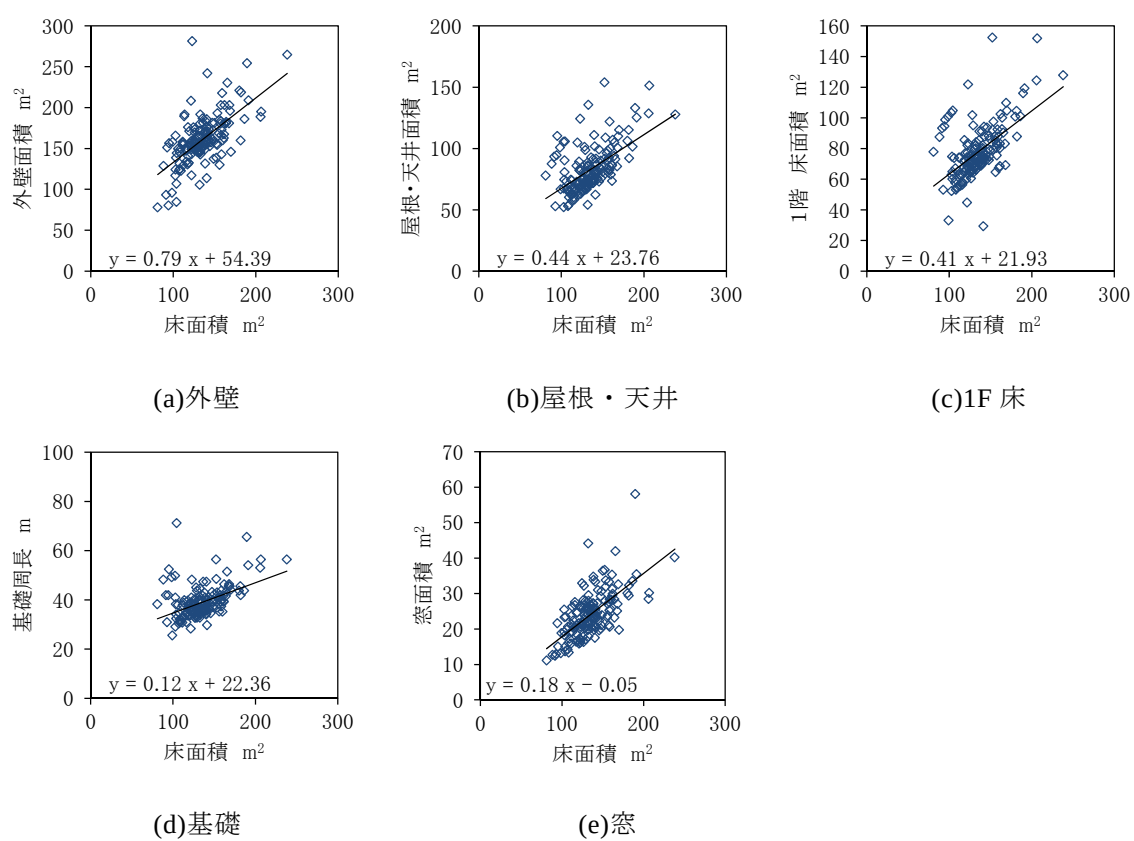


図 3-8 U_A 値の推定に用いる各部位の面積・周長（実住宅 157 件）

3.4.2 推定結果

(1) 各部位の U 値の推定結果

前項の仮定にもとづき推定した各部位の U 値の累積頻度分布を図 3-9 に示す。図中には設計施工指針^[2]で示されている U 値の基準値を併せて示している。平成 25 年 10 月改正後の住宅の省エネルギー基準でも、開口部の面積比率が著しく大きい場合を除き、この U 値の基準値により外皮性能基準の適合性を判断することができる。

部位別では天井、屋根、床、外壁の順に U 値の値が小さい傾向があること、屋根の U 値基準適合率が、他の部位に比べて低いことなどがわかる。ただし、屋根については図 3-7(b)のとおり、熱橋の影響を受けやすい断面構成を設定したことも考慮する必要がある。なお、次の U_A 値基準に適合すれば、部位別の U 値基準は必ずしも満足する必要はない。

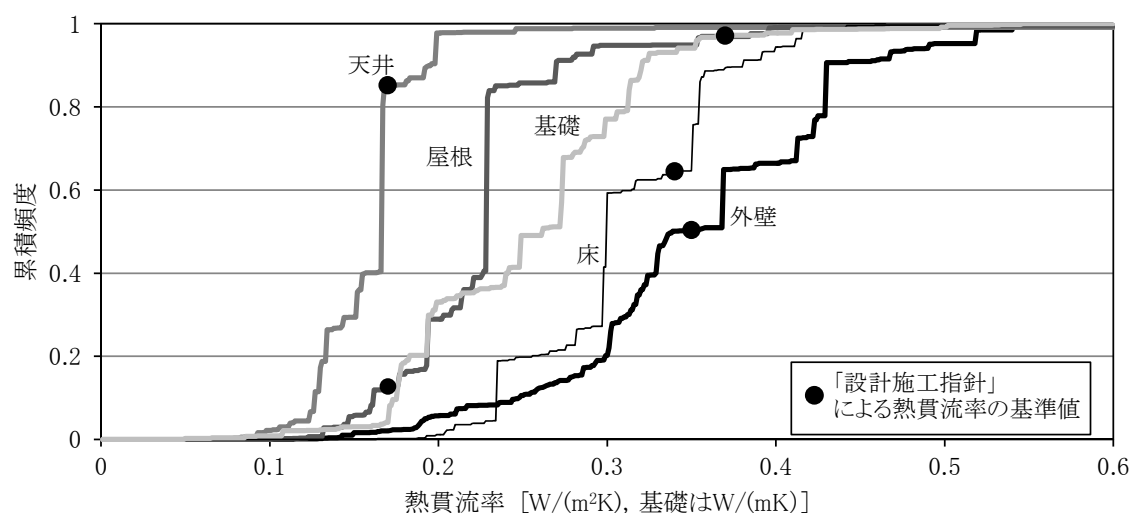


図 3-9 U 値の累積頻度

(2) U_A 値および Q 値の推定結果

推定した部位別の U 値から、さらに各部位の面積を用いて推定した U_A 値および Q 値の相対度数分布を図 3-10 に示す。なお、 Q 値は現行の住宅の省エネルギー基準には存在しない指標であるが、既往研究との比較の便を考慮して、以降では U_A 値と併せて示すこととする。 Q 値算出の際の換気熱負荷は、気積を床面積(m^2) $\times 2.4m$ とし、換気回数を 0.5 回/h として算出している。

相対度数分布は、正規分布形状と比べて、住宅の省エネルギー基準値を上回るカテゴリでの度数が少ない。また、 U_A 値基準 (1、2 地域 $U_A \leq 0.46W/(m^2K)$ 、3 地域 $U_A \leq 0.56W/(m^2K)$) を満たす割合は 1、2、3 地域それぞれ 89%、90%、99% となった。

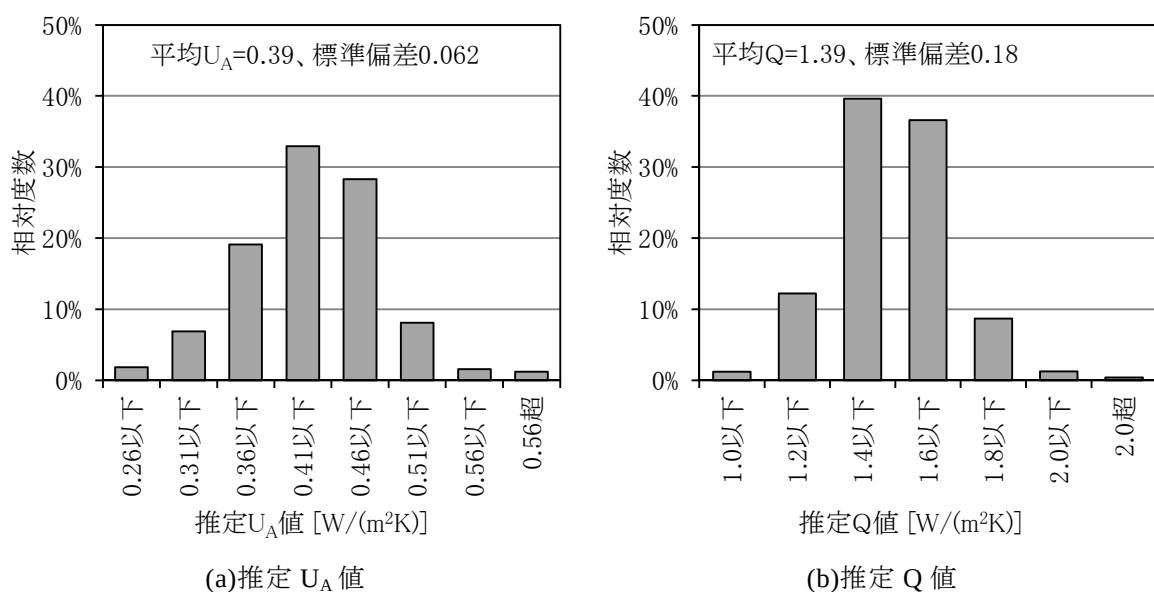


図 3-10 推定した U_A 値および Q 値の度数分布 (棟数割合)

表 3-7 に、調査を行った 3 か年の U_A 値と Q 値推定値の比較を示す。わずかな差ではあるが、断熱性能は 2010 年が最も高く、次いで 2012 年が高いという結果になった。その原因としては、2010 年に省エネ基準適合住宅が住宅エコポイントの発行対象になったことや、2011 年には断熱材製造工場の罹災により断熱材の入手難が生じたことが考えられる。

表 3-7 各年の推定 U_A 値と推定 Q 値の比較

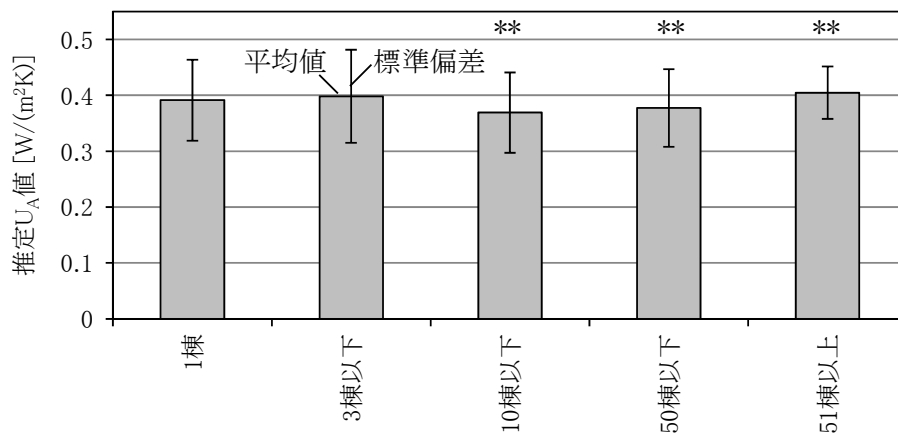
	回答仕様数	$U_A[W/(m^2K)]$		$Q[W/(m^2K)]$	
		平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
2010年新築	917	0.37	0.067	1.37	0.189
2011年新築	764	0.39	0.064	1.42	0.184
2012年新築	666	0.38	0.069	1.41	0.197

各年の母集団を一致させたため図 3-10 の平均値、標準偏差とは一致しない

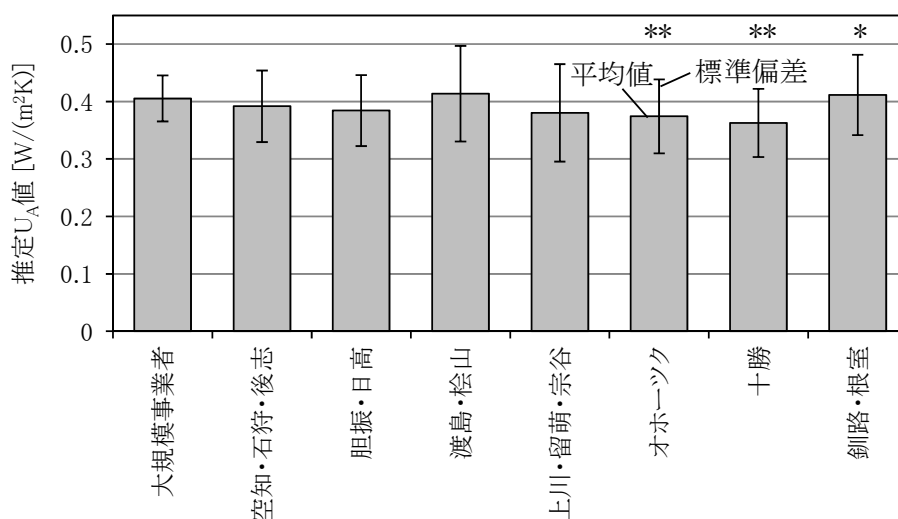
(3) 事業者規模と事業者所在地による推定 U_A 値の違い

図 3-11 に建設事業者の規模（年間建設棟数）別と所在地別の推定 U_A 値を示す。平均値は棟数による加重平均で算出している。また、各カテゴリーにおいて、当該カテゴリーと当該カテゴリーを除くその他カテゴリーをまとめた標本の 2 群で母平均の差の検定を行った。有意水準 0.01 または 0.05 で有意差があったカテゴリーに**、*を付している。検定方法は Z 検定（両側）とした。なお、平均値や標準偏差は棟数を考慮して算出したが、p 値はサンプルサイズが大きくなるほど小さくなる傾向があるため、サンプルサイズは実回答数（679）として検定を行った。

事業者規模別（図 3-11(a)）では、建設棟数の少ない事業者で U_A 値のばらつきがやや大きく、平均値は年間建設棟数 4 棟～50 棟の事業者がやや小さい（断熱性能が高い）傾向がある。また、全国的には事業者の規模が小さいほど、省エネ基準に適合する住宅を建設した実績のある割合が顕著に低下する傾向が見られるが^[3]、道内ではそのよ



(a) 事業者規模（年間建設棟数）別



(b) 事業者所在地別

** : $p < 0.01$ 、* : $p < 0.05$

図 3-11 カテゴリー別の推定 U_A 値

うな傾向が見られない。小規模事業者においても、断熱性能に有意差が見られないほどに、高断熱化は浸透していると考えられる。

事業者所在値別（図 3-11(b)）では、オホーツク、十勝の U_A 値が小さく、釧路・根室がやや大きい傾向があった。

3.4.3 推定 U_A 値に関する考察

(1) 暖房負荷が同等となる U_A 値

第1章で述べたように、家庭用消費エネルギーの道内における地域間格差が課題となっている。ここで、図 3-11(b) で見た事業者所在地別の推定 U_A 値の平均値と、断熱性能の向上により暖房負荷の平準化を図ろうとする場合に必要な U_A 値にどのような関係があるか試算を行う。

暖房負荷計算には室内取得熱を考慮したデグリーデー法^[4]を用い、デグリーデーや日射量は 2000 年版の標準年 EA 気象データ^[5]をもとにした文献値^[6]を用いた。計算地点は各地域で人口が最大の都市（図 3-3 に示している都市）、その他の条件は表 3-8 に示すとおりとした。

図 3-12 に、調査結果による事業者別の推定 U_A 値に重ねて、道内の代表的地域である空知・石狩・後志の平均 U_A 値と暖房負荷が同等となる各地域の U_A 値を併せて示す。

平均 U_A 値には地域差が見られるが、上川・留萌・宗谷、オホーツク、釧路・根室の各地域では、気候の違いによる暖房負荷の差を埋め合わせるほどの断熱性能の違いはないことがわかる。言い換えると、断熱性能に起因して道内の値の地域より暖房負荷が大きくなっている可能性が否定できないということになる。ただしパッシブソーラーなどの手法により暖房負荷の差を解消している住宅もあるかもしれないが、 U_A 値推定の際の仮定では建物形状の地域差を考慮していないため、今回の分析では反映されていない。

表 3-8 同等 U_A 値の計算に用いる各係数

項目	値	根拠
外皮面積[m ²]	347	図 3-8 に示す住宅の平均値
換気対象容積[m ³]	324	
窓面積(南面)[m ²]	11.6	
窓面積(東西面計)[m ²]	8.9	
暖房期の窓の日射熱取得率	0.33	Low-E 複層ガラス(日射取得型)の日射熱取得率 0.64×取得日射量補正係数 0.51
室内発生熱[W]	621	文献[7]による調理・照明ほかの実測値に人体発熱 120W(4 人、在室率 0.5 を想定)を加算
室温設定[°C]	21.7	文献[7]による 12 月～2 月の居間および主寝室実測 値の平均値

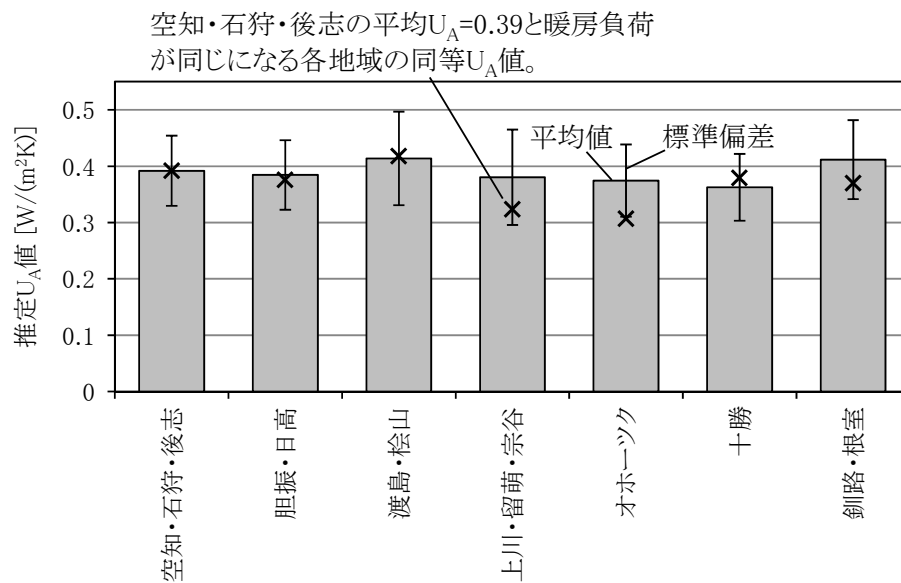


図 3-12 調査結果による推定 U_A 値と石狩・空知・後志の暖房負荷と同等となる U_A 値

(2) U_A 値と Q 値の対応

前項では U_A 値と Q 値の平均値や標準偏差を求めるため、断熱仕様の回答数 679×157 形状 = 106,603 通りで計算を行った。 U_A 値と Q 値の計算結果の対応を図 3-13 に示す。旧基準の $Q=1.6\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ と新基準の $U_A=0.46\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ は概ね対応する形にはなっているものの、回帰直線から離れて対応している点も存在する。これは建物形状の影響が大きいと考えられる。

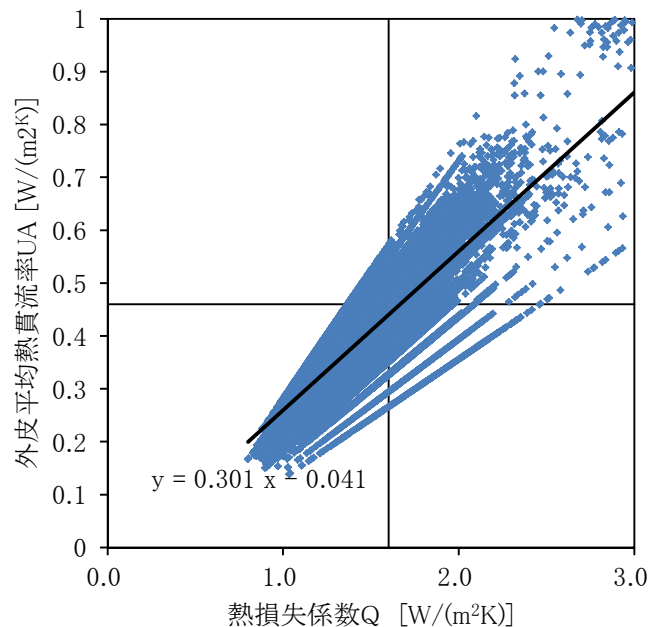
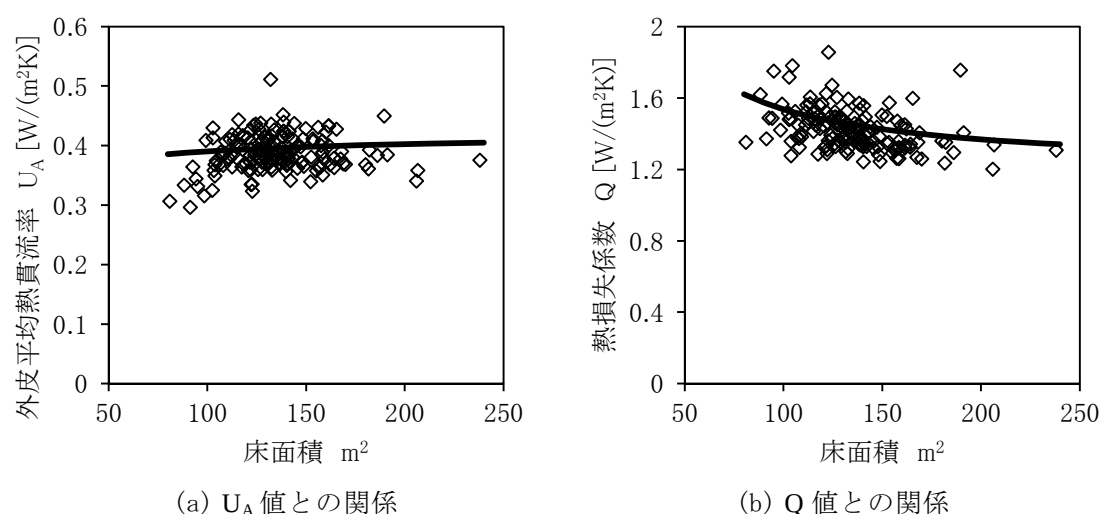


図 3-13 Q 値と U_A 値の対応

図 3-14 には、各部位の U 値を調査結果の棟数による加重平均値とし、各部位面積を図 3-8 の 157 通りで計算した U_A 値と Q 値を示す。 U_A 値、 Q 値とも、開口面積比率など形状の影響を受けるが、 U_A 値は床面積の影響を受けにくいことがわかる。これは新しい住宅の省エネルギー基準で U_A 値が導入された理由でもある。例えば、世帯人数が減少傾向にある中で、一人あたりの消費エネルギーを減らすためには、住宅のコンパクト化も一つの方向であり、小規模住宅の場合、 Q 値計算による設計では、所定の Q 値を確保するために開口部を小さくしなければいけないなど、無理が生じやすいという課題があった。一方、 U_A 基準は住宅の規模にかかわらず、熱性能を適切に評価できる指標であると言える。



図中の実線は床面積に応じ、各部位面積を図 3-8 に記載の回帰式を用いて算出した値として U_A 値、 Q 値を計算した場合

図 3-14 建物形状と U_A 値、 Q 値

(3) 仮定条件による推定 U_A 値への影響

U_A 値および Q 値を推定するため、3.4.1 で各種条件の仮定を行った。ここで条件の仮定が及ぼす推定結果への影響を考察しておく。

熱伝導率の仮定

調査票の選択肢から熱伝導率が一意に決まらない主な断熱材について、断熱材の性能差がもたらす推定誤差の参考とするため、熱伝導率を複数ある規格値のうち計算に使用した値から最も乖離した値に置き換えて平均 U_A 値を計算した結果を表 3-9 に示す。変更前の平均 U_A 値（図 3-10 に記載の平均 U_A 値を小数点以下第 3 位まで記載すると $0.392\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ となる）に対し、それぞれの断熱材で熱伝導率を変更したことによる平均 U_A 値の変化は 1%以内に収まっている。

工法の仮定

2011 年 2 月に道内の住宅建設事業者を対象に実施した調査^[8]では、木造軸組工法が 73.1%、枠組壁工法が 26.4%、その他木造が 0.5%の新築棟数割合となっているが、本

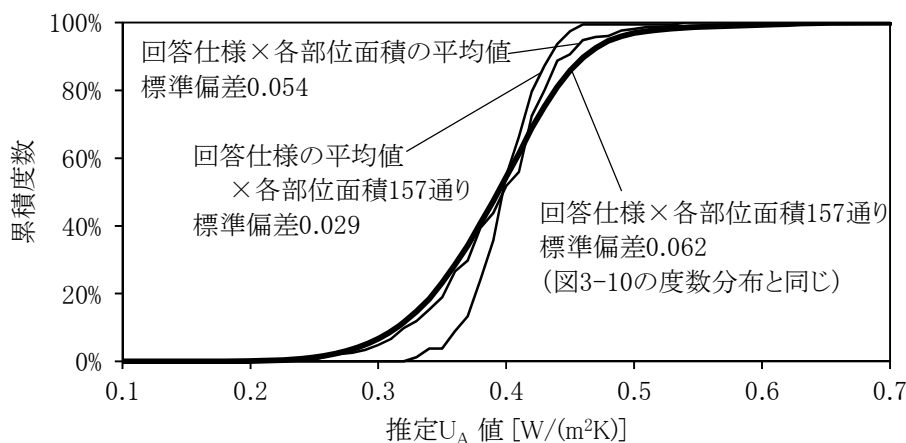
表 3-9 断熱材の性能差による U_A 値推定への影響

断熱材の種類	本文の計算に使用した値		置き換える値		①をすべて②の値に置き換えて計算した平均U _A 値[W/(m ² K)]
	規格	①熱伝導率 [W/(mK)]	規格	②熱伝導率 [W/(mK)]	
高性能グラスウール	16K相当	0.038	24K相当	0.036	0.388
ビーズ法ポリスチレンフォーム特号	特号	0.034	4号	0.043	0.396
吹付けウレタンフォーム	A種1	0.032	A種3	0.040	0.394

調査では工法を尋ねていないため、すべて木造軸組工法の熱橋面積比率を用いた。なお、文献^[1]には U 値の簡略計算方法として、木造軸組工法と枠組壁工法に分けて熱橋面積比率が示されており、すべて木造軸組工法の熱橋面積比率で算出した平均 U_A 値 0.392W/(m²K)に対し、両工法の熱橋面積比率を用い上記の棟数割合による加重平均（その他木造は考慮しない）で算出した平均 U_A 値は 0.394W/(m²K)であり、平均 U_A 値の変化は 1%以内に収まる。

各部位面積の仮定

U_A 値の推定は、調査で得られた「断熱仕様（679 仕様）」と「各部位面積の組み合わせ（157 通り）」のすべての組み合わせで行った。参考に、調査で得られた「断熱仕様（679 仕様）」と「各部位面積の組み合わせ（157 通り）」の一方を平均値で固定して計算した U_A 値の累積度数を併せて図 3-15 に示す。U_A 値の度数分布や標準偏差は、住宅形状のばらつきを考慮したほうがより現実になると考えられる。ただし、地域別の建物形状傾向の違いは反映できていない。

図 3-15 U_A 値の累積度数

以上の仮定条件による推定値への影響のほか、熱橋の計算方法や基礎断熱の場合の基礎の U 値の計算方法など、住宅の省エネルギー基準の中で複数の計算方法が示されている場合には、採用する方法によっても推定値に差が生じることに留意が必要である。

3.5 高断熱化の可能性

3.5.1 付加断熱の代表事例

充填部と付加部の断熱材と厚さの組み合わせには、特に指針となるものがなく、様々な組み合わせが存在している。調査結果から集計した、主な厚さの組合せを表3-10に示す。充填部の断熱厚さは、木造軸組み工法の柱材の規格である3寸5分(105mm)、4寸(120mm)、枠組壁工法の枠材の規格である2×4(89mm)、2×6(140mm)に概ね集約される。一方、付加部の断熱厚さは自由度が大きいため様々である。しかしながら、表3-10に示す10パターンで付加断熱を採用している棟数の約8割を占めている。外壁の付加断熱に関しては、軸間に全充填し、15～30mmを付加するのが、代表的な仕様になっていると言える。

表 3-10 代表的な付加断熱の組合せ (2012 新築)

充填部厚さ[mm]	付加部厚さ[mm]	付加断熱における棟数割合
140	30	2.7%
120	15	2.3%
100(105)	15	10.2%
100(105)	20	9.5%
100(105)	25	19.2%
100(105)	30	18.0%
100(105)	50	7.2%
100(105)	100(105)	4.9%
90(89)	25	2.3%
90(89)	30	3.1%

3.5.2 高断熱仕様の事例

ここでは、実績としてどの程度高断熱の住宅が建設されているかを把握するため、2010年～2012年の新築戸建住宅の断熱仕様調査から、特に断熱性能の高い仕様を抽出して、具体的な断熱仕様を分析する。

図3-16に推定 U_A 値が $0.28\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ 以下の住宅における各部位の U 値を示す。また、各部位の断熱材の厚さと種類の構成を図3-18に示す。回帰直線の傾きが大きい基礎、次いで外壁が、高断熱化しようとする場合に特に断熱強化されている部位であると言える。屋根は断熱厚さを大きくすることが難しく、一方、天井は300mmの断熱厚とすることが一般化しているため、断熱強化の余地が少ない状況にあると考えられる。

図3-17には、 U_A 値上位10仕様について、部位別の熱損失の内訳を示している。グラフの上端の値が U_A 値となる。ただし、開口部は文献^[1]に基づき $U=1.6\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ を最高性能として計算しているため、高断熱の建物では熱損失の半分以上を開口部が占めることになる。現在では U 値 $1.0\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ 程度のサッシも普及しており、開口部の U 値を $1.0\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ に置き換えた場合、 U_A 値は図中に折れ線で示した値となり、 $U_A=0.15\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ 程度が、現在の最高の断熱水準であり、また限界でもあると言える。なお、 U 値が $1.0\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ を下回るサッシも市販されているが、日射取得率が極端に低

下するため、本検討ではサッシの最高性能を $U=1.0\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ に留めた。

図 3-18 には高断熱仕様の各部位の断熱材の厚さと種類の事例を示す。 $U_A=0.20\sim 0.22\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ (開口部が $U=1.0$ の場合は $0.15\sim 0.17$) 程度に相当する仕様として、外壁が厚さ $300\sim 400\text{mm}$ 、天井・屋根が $400\sim 600\text{mm}$ 程度、 $U_A=0.25\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ (開口部が $U=1.0$ の場合は 0.20) 程度に相当する仕様として、外壁が厚さ $200\sim 300\text{mm}$ 、天井・屋根が $300\sim 400\text{mm}$ 程度が該当する。

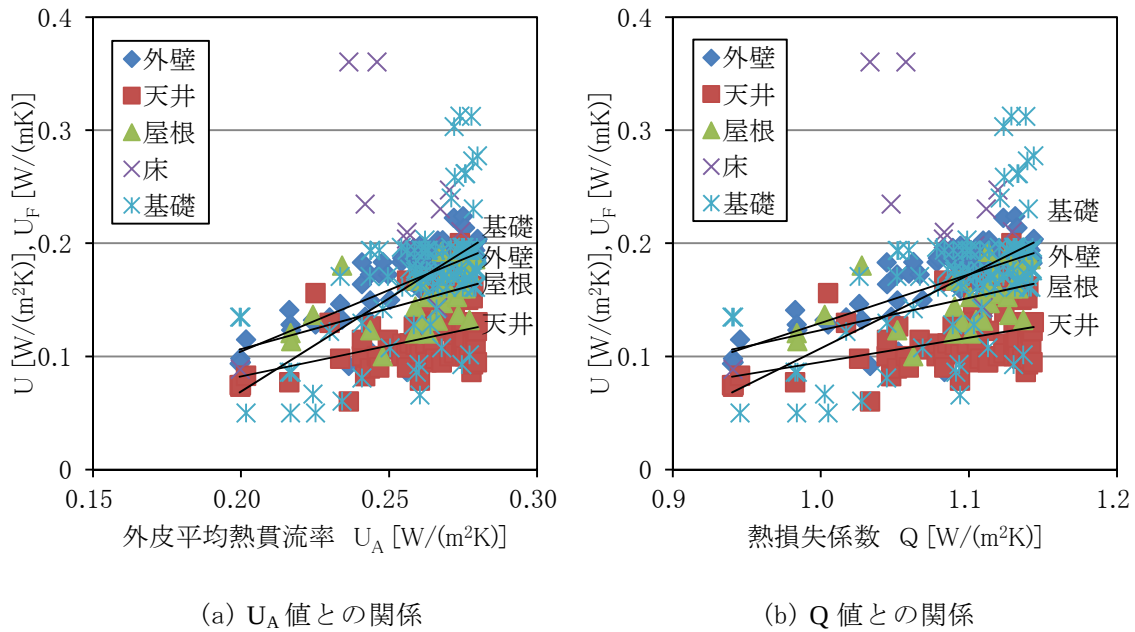


図 3-16 高断熱仕様の各部位の熱貫流率

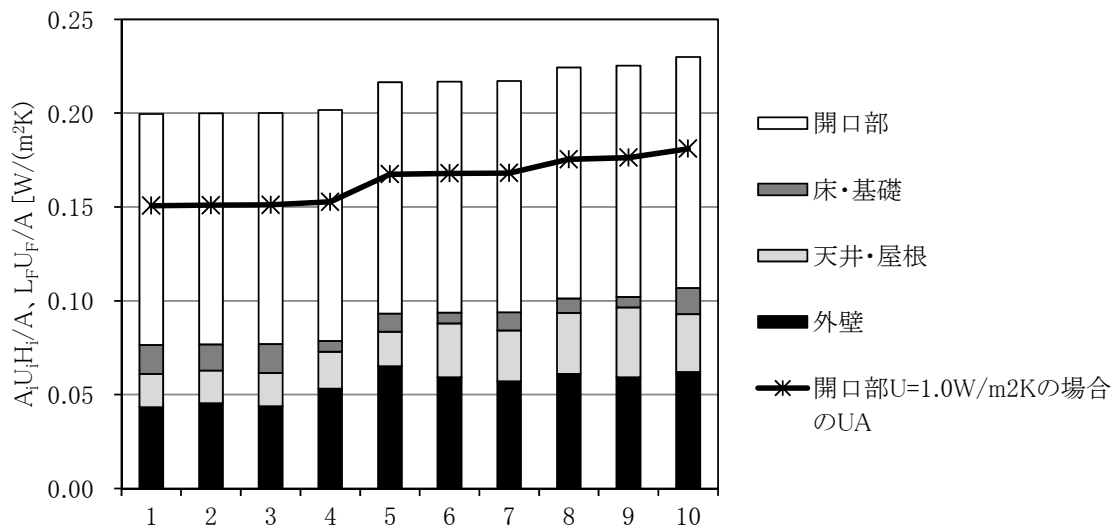
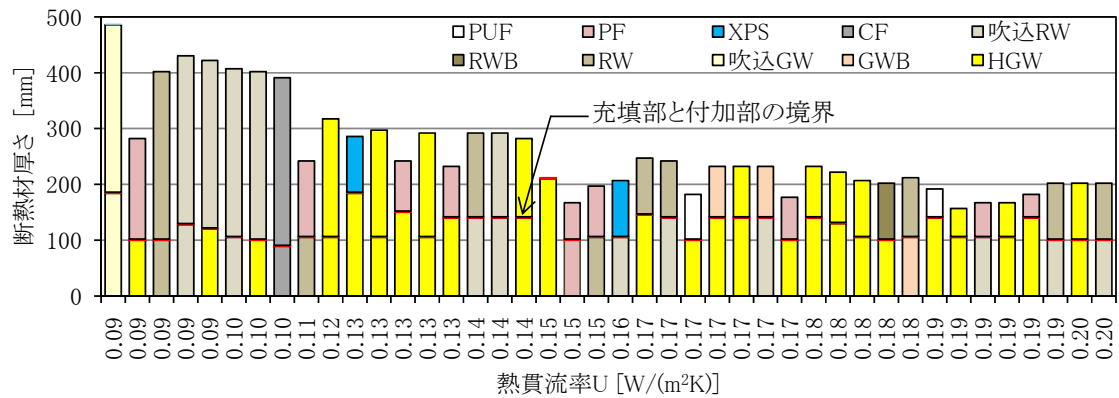
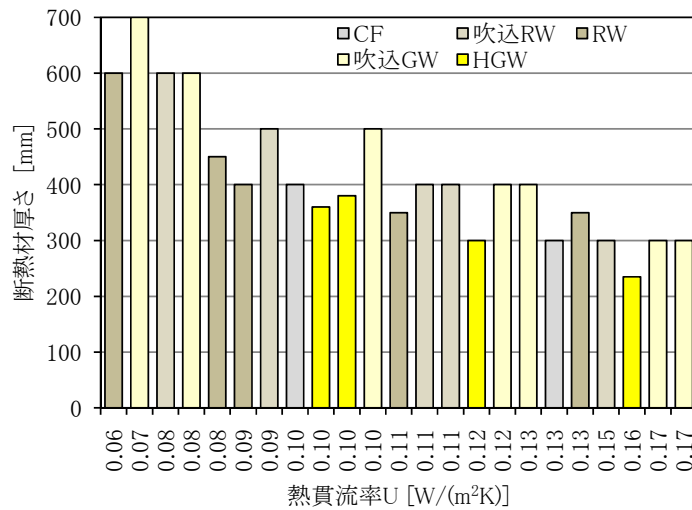


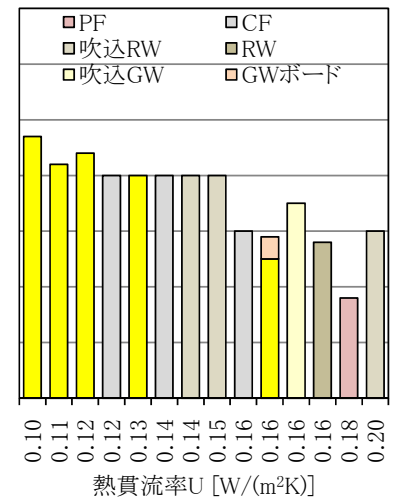
図 3-17 熱損失の内訳 (U_A 値上位 10 仕様)



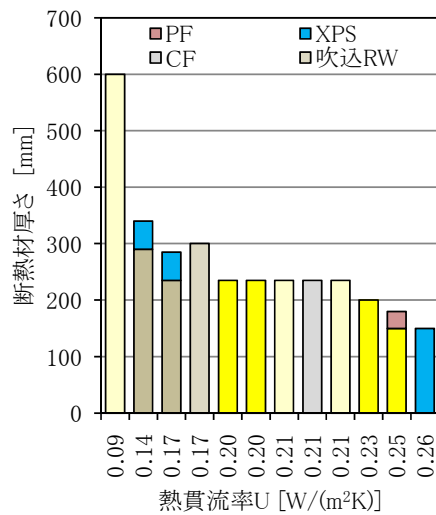
(a)外壁



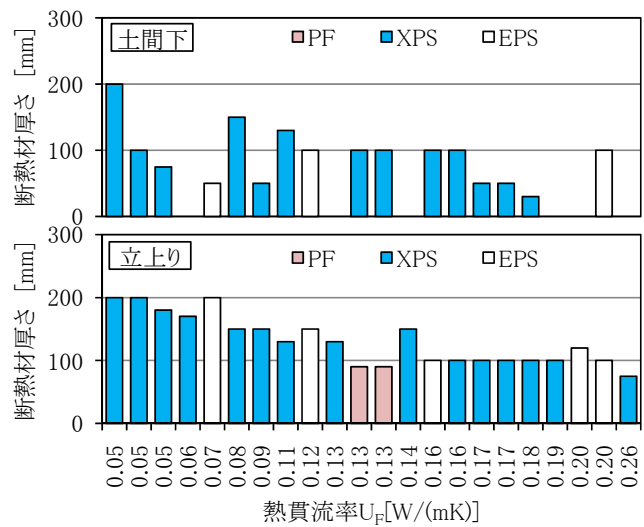
(b)天井



(c)屋根



(d)床



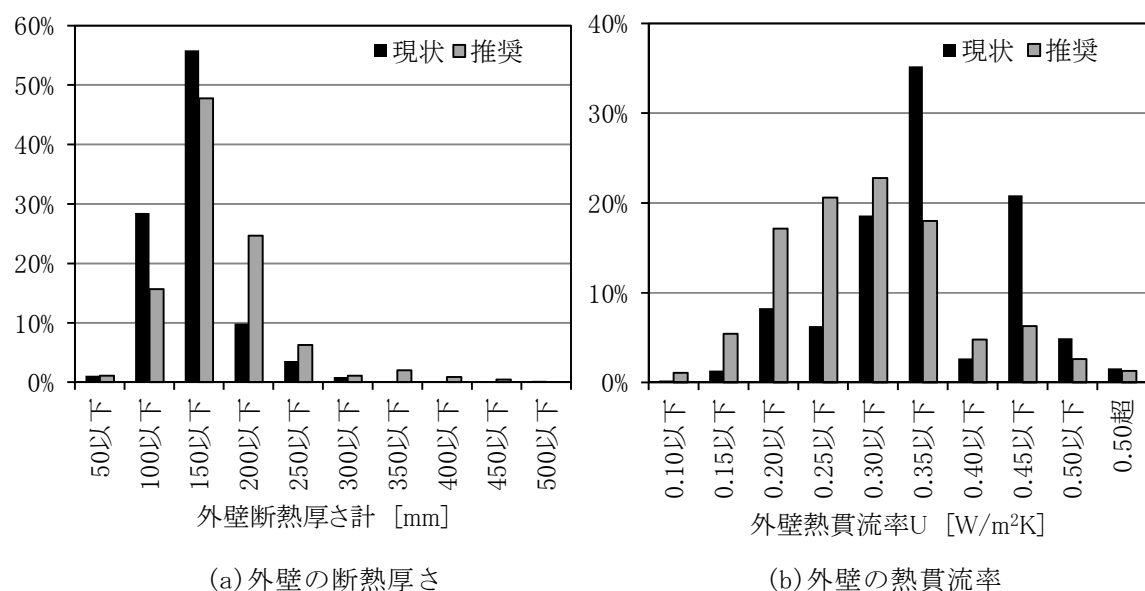
(e)基礎

図 3-18 高断熱仕様の例

3.5.3 事業者の推奨仕様

事業者が望ましいと考えている断熱水準を探るため、アンケートでは「外壁の断熱仕様として、コストを抜きにして、お客さんにおすすめしたい仕様をお答えください」という質問を設け、外壁の軸組内(柱間)、付加部それぞれの断熱材の種類および厚さの記入を求めた（(本設問に対する回答仕様を、以下「推奨仕様」という））。

図 3-19 は各事業者の現状と推奨仕様の度数分布である。現状の仕様に比べて、推奨仕様は厚さが大きく、U 値が小さい傾向がある。105mm の軸組内のみの充填断熱に相当する $U \leq 0.45 \text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ のカテゴリーは、現状では 2 割程度あるが、推奨仕様では大きく減る。また、厚さ 200mm 以下、U 値 $0.20 \text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ 以下のカテゴリーまでは、推奨仕様で 2 割程度の回答があり、この程度の断熱水準まではコストを抜きにすれば多くの事業者が施工可能と考えていることがわかる。外壁 U 値の平均値は現状 $0.33 \text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ に対し、推奨仕様は $0.27 \text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ であった。



現状：回答事業者の第 1 仕様の外壁 U 値、推奨：コストを抜きにして推奨する U 値

図 3-19 現状仕様と推奨仕様の度数分布（事業者数ベース）

さらに図 3-20 の外壁 U 値と U_A 値の関係を用いて、現状と推奨仕様の U_A を推定して比較したのが、図 3-21 である。平均値は現状 $0.41 \text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ に対し、推奨 $0.38 \text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ である。事業者の志向としても、現状より熱損失を低減させる余地はあると言える。

図 3-22 は外壁の現状と推奨仕様の断熱材種別である。充填部については、推奨仕様で高性能グラスウール(HGW)が半数以下となり、吹込み用断熱材や、硬質ウレタンフォーム板(PUF)、吹付ウレタン(NF)の割合が増えている。吹込み用断熱材はより厚さを増やす方向、PUF、NF は熱伝導率の小さい断熱材に置き換える方向を指向していると考えられる。外壁付加部については、推奨仕様は価格が高いが熱伝導率の小さいフェノールフォーム板(PF)と硬質ウレタンフォーム板(PUF)の割合が増えており、現状はコストの問題で他の断熱材が選択されていると考えられる。

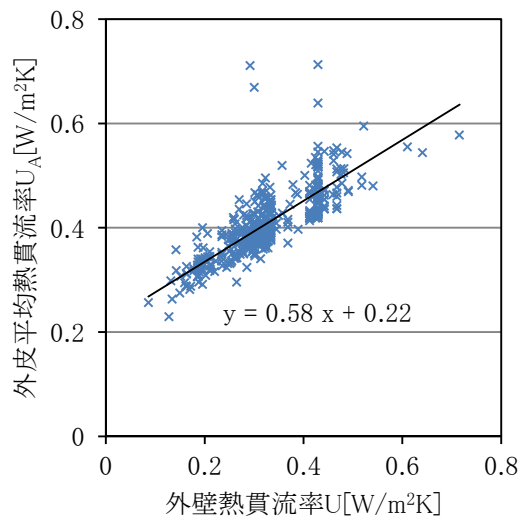


図 3-20 外壁 U 値と U_A 値の関係

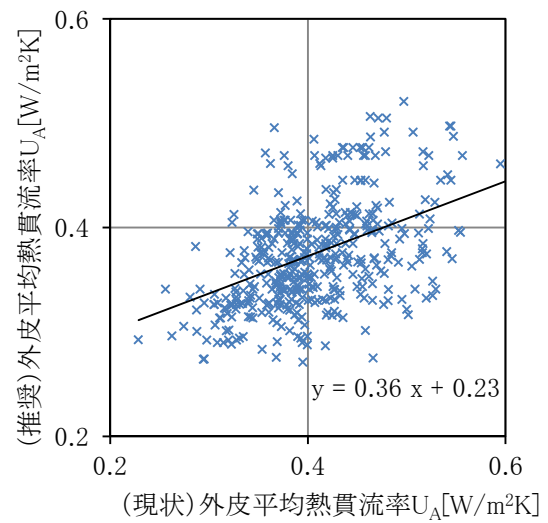


図 3-21 現状と推奨仕様の U_A 値の対応

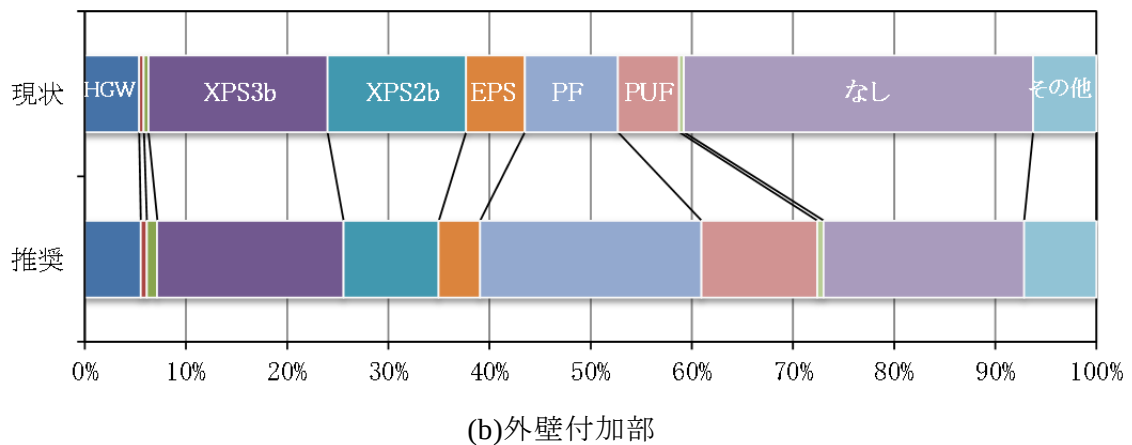
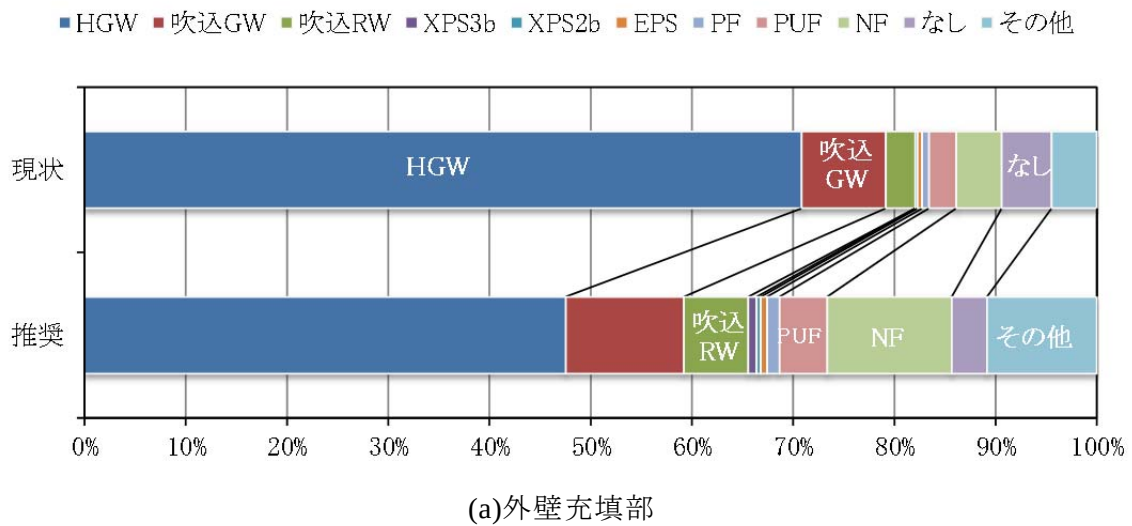


図 3-22 外壁断熱材の現状と推奨する種類（事業者数ベース、 $n=489$ ）

3.6 本章のまとめ

本章では、断熱水準の実態把握と、さらなる高断熱化の可能性を検討するため、道内で戸建住宅の建設実績がある全事業者を対象に調査を行った。回答率は、事業者数で3～4割、棟数で6割程度であった。得られた主な知見は、次のとおりである。

現状の断熱仕様

- (1)外壁は約4割が付加断熱を採用し、付加部のみの外張り断熱は1割にとどまっている。屋根、天井は天井断熱の採用率が約8割、床断熱と基礎断熱は、床断熱がやや多く55%となっている。
- (2)トリプルガラスの採用率が、2010年2.5%、2011年7.9%、2012年8.5%と年々上昇している。また複層ガラスの空気層厚さは12mmとするものが多いが、16mm以上のケースも増加している。

U_A 値の推定

- (1)各部位の断熱仕様の調査結果から外皮断面構成や各部位面積などを仮定し U_A 値の推定を行った。その結果、2012年新築戸建住宅で U_A 値基準を満たす割合は1、2、3地域それぞれで89%、90%、99%と推定された。
- (2)2010年から2012年の3か年で比較した場合、平均値としては U_A 値が向上する傾向がみられない。
- (3) U_A 値は年間建設棟数4棟～50棟の中規模事業者がやや小さい（断熱性能が高い）傾向がある。また、道外のように小規模事業者の省エネ基準達成率が著しく劣る傾向はみられない。
- (4)地域間で建物形状を同一とする仮定のもとでは、 U_A 値の平均値には地域差が見られるものの、気候による暖房負荷の差を埋め合わせるほどの断熱性能の違いはない。

高断熱化の可能性

- (1)付加断熱のパターンは様々だが、軸間に全充填し15～30mmの断熱材を付加するのが現状の代表的な仕様と言える。
- (2)現在の最高の断熱水準は、 $U_A=0.15\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ 程度（開口部 $U=1.0\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ の場合）で、外壁が厚さ300～400mm、天井・屋根が400～600mm程度に相当する。
- (3)事業者にコストを抜きのした外壁の推奨仕様を尋ねたアンケートによると、現状の平均 U_A 値が $0.41\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ に対し、外壁の推奨仕様からの推定値平均は $0.38\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ で、事業者の志向としても、現状より熱損失を低減させる余地はある。また、外壁の断熱厚さ200mm、 U 値 $0.20\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ 程度までは、一般に普及する可能性が十分にある。
- (5)外壁の断熱材は、軸間に高性能グラスウールを充填し、発泡プラスチック系を付加するパターンが一般的だが、コストを抜きのした場合、吹込み用断熱材により厚さを増す方向や、高性能の発泡プラスチック断熱材に置き換えて性能を向上させる方向が志向されている。

参考文献

- [1] 平成 25 年住宅・建築物の省エネルギー基準解説書編集委員会，平成 25 年省エネルギー基準に準拠した算定・判断の方法及び解説（Ⅱ 住宅），建築環境・省エネルギー機構，2013.5
- [2] 住宅に係るエネルギーの使用の合理化に関する設計，施工及び維持保全の指針，平成 25 年国土交通省告示第 907 号
- [3] 今後の住宅・建築物の省エネルギー対策のあり方について（第一次報告）（案）参考資料集、国土交通省住宅局住宅生産課，2015.1，<http://www.mlit.go.jp/common/001066470.pdf>，参照 2015.1.30
- [4] 堀江悟郎，荒谷登，本間宏，横平昭：木造住宅の自然温度，日本建築学会論文報告集号外，p.421，1966.10
- [5] 拡張アメダス気象データ 1981-2000，日本建築学会，2005.8
- [6] 北方型住宅の熱環境計画，北海道建築技術協会，2010.1
- [7] 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：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 $1.3\text{W/m}^2\text{K}$ レベルの住宅を主たる対象とした調査，日本建築学会環境系論文集，No.679，pp.713-720，2012.9
- [8] 高倉政寛，伊庭千恵美，遠藤卓，長谷川雅浩，鈴木大隆：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 6 新築戸建住宅の属性（工法，仕様等），日本建築学会北海道支部研究報告集，No.84，pp.409-414，2011.7

本章に関連する既発表文献

- [9] 立松宏一，廣田誠一，高倉政寛，月館司，鈴木大隆，羽山広文：北海道における新築戸建て住宅の断熱および設備仕様調査 一次エネルギー消費量の推定と設備の選択要因に関する考察，日本建築学会環境系論文集，Vol.80，No.707，pp.67-77，2015.1
- [10] 立松宏一，廣田誠一，鈴木大隆，福島明：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 11 北海道の新築戸建て住宅を対象とした断熱仕様調査，日本建築学会北海道支部研究報告集，No.85，pp.223-226，2012.6
- [11] 立松宏一，廣田誠一，鈴木大隆，遠藤卓，福島明：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 13 北海道の新築住宅の断熱・設備仕様調査，日本建築学会北海道支部研究報告集，No.86，pp.229-232，2013.6
- [12] 遠藤卓，立松宏一，高倉政寛，月館司，鈴木大隆：北海道内の新築戸建て住宅の断熱・設備仕様実態調査，その 1 さらなる高断熱化の可能性と課題，日本建築学会大会学術講演梗概集，環境工学 I，pp.1003-1004，2014.9

第4章 断熱材の耐久性に関する検討

4.1 はじめに

第3章の調査結果が示すとおり、現在、住宅の断熱材はグラスウールが主体となっている。一方、第2章で述べたように、グラスウールは発泡プラスチック系断熱材と比べての長期性能に関する知見が少ない。良質な建築ストックの形成を図り、その長期利用の促進を図ることはライフサイクルエネルギー削減のためにも重要な課題である。そこで、本章は住宅の耐久性向上に向けて、グラスウールの長期性能を検証することを目的とする。

図4-1に本章の研究フローを示す。まず、長期断熱性能評価に関する標準化調査(以下「標準化調査」という)^[1]の知見などから、検討の対象とする劣化要因と要求性能を整理する。次に、実験室での促進試験と実住宅で長年使用されたグラスウールの採取

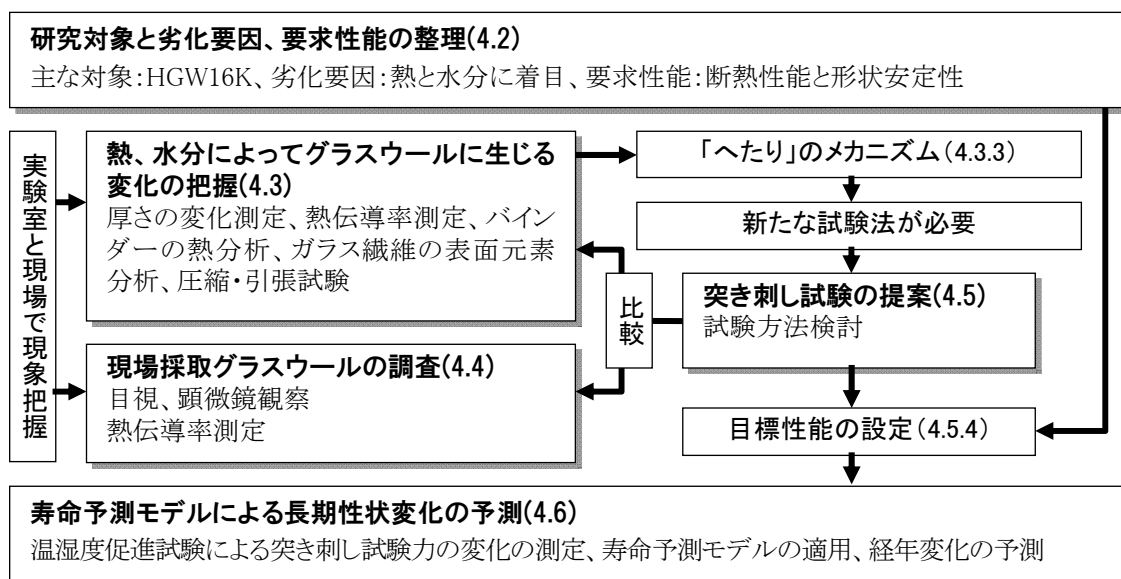


図 4-1 本章の研究フロー

を併行して行い、グラスウールに生じる変化の内容を把握する。さらにグラスウールに生じる変化を評価するため、新たに「突き刺し試験」を提案し、形状安定性を確保する観点から突き刺し試験による目標性能を設定する。最後に、温湿度促進試験による突き刺し試験力の変化に寿命予測モデルを適用し、実使用条件での長期性状変化の予測を試みる。

なお、本章は硝子繊維協会と北方建築総合研究所の共同研究として実施した。

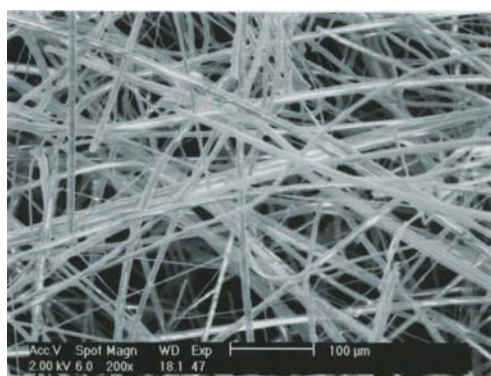
4.2 研究対象と劣化要因、要求性能の整理

4.2.1 対象とするグラスウール

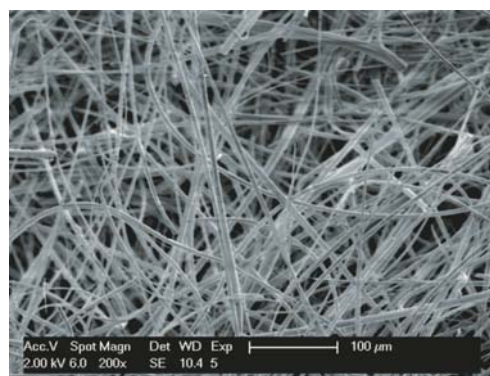
グラスウールはガラスを熔融して遠心法などで細く繊維状にし、バインダーを混ぜて固めた材料である。グラスウールの顕微鏡画像を写真 4-1 に示す。使用されているガラスは、一般に、ホウ酸 B_2O_3 を加えたホウケイ酸ガラスである。ホウケイ酸ガラスは耐熱性、耐薬品性に優れ、理化学器具などにもよく用いられる。ただし、各メーカーは繊維化装置の特性によりガラスの性状を変えているため、組成には多少の差がある。原料としては近年リサイクルカレットが多量に使用されている。繊維径は $7\sim 8\mu m$ の住宅用グラスウールと $4\sim 5\mu m$ の高性能グラスウールがそれぞれ流通している。

バインダーはガラス繊維どうしを接着するためのフェノール樹脂を主成分とする接着剤であり、ほかに、尿素、鉱物油、シランカップリング剤などを含んでいる。バインダーは繊維化工程で吹き付けられ、 $200\sim 300^{\circ}C$ の熱風により所定の密度および厚さになるよう乾燥、成形される。

グラスウールの形状による分類としては、フェルト状、ボード状およびばら状（吹込み用）の製品がある。また、フェルト状およびボード状の製品には、繊維径が $7\sim 8\mu m$ の「通常グラスウール」と $4\sim 5\mu m$ の「高性能グラスウール」がある。本研究では、住宅の外壁や床の断熱材として多く使用されている、フェルト状のグラスウールを主な対象とし、促進試験に用いるグラスウールは、寒冷地の住宅に多く使用されている高性能グラスウール 16K 相当(以下「HG16K」という)を主とする。



(a)住宅用グラスウール



(b)高性能グラスウール

写真 4-1 グラスウールの顕微鏡画像

4.2.2 劣化要因と要求性能

標準化調査では、断熱材の要求性能と経年変化要因について、表 4-1 のように整理している。

断熱材の要求性能には、「断熱性」のほかに、壁体内部結露を防止するための「防湿性」、隙間風を防ぎ室内温熱環境の確保と計画換気を成立させる「気密性」、さらに外張り工法などで外装仕上げ材を支持するという使い方の際に問題となる「形状安定性」を取り上げている。道内ではグラスウールを用いる場合、「防湿性」と「気密性」は別張り防湿フィルムに委ねるのが一般的であるため、これらの要求性の中では、「断熱性」と「形状安定性」がグラスウールが長期的に維持すべき性能となる。

経年変化要因としては、8 項目が取り上げられており、グラスウールに関係があるとされているのは、「紫外線」、「振動」（吹込み用のみ）、「微生物・昆虫／小動物」「薬品、（溶剤）」である。このうち、紫外線は通常躯体内では問題にならず、振動については第2章で述べたとおり一定の知見が得られている。微生物・昆虫／小動物、薬品・溶剤については、実態調査での問題把握にとどめることとする。

一方、JASS24 には「内部結露や雨水の浸入が生じた場合は、フェルト状断熱材では繊維を結合しているバインダーの劣化などによってへたりを生じ、ずり落ちる場合もある」^[2]との記載があるが、このような、グラスウールに「へたり」をもたらすメカ

表 4-1 性能変化要因マトリクス（グラスウール関連を抜粋）

		物性の構成要素																	
		密度			繊維径(または繊維長)			基材(繊維方向を含む)			バインダ・添加剤			断熱材表面(面材)					
		フェルト状	ボード状	吹込み用	フェルト状	ボード状	吹込み用	フェルト状	ボード状	吹込み用	フェルト状	ボード状	吹込み用	フェルト状	ボード状	吹込み用			
断熱材の要求性能	断熱性: 熱伝導率	●	●	●	●	●	●	○	○	○	×	×	×	●	●	—			
	防湿性: 透湿率	●	●	●	○	○	○	○	○	○	×	×	×	●	●	—			
	気密性: 透気度	●	●	○	○	○	○	○	○	×	×	×	●	●	—				
	形状安定性	●	●	●	●	●	●	○	●	○	○	●	○	○	○	—			
		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	—	熱	基材の熱可塑性(耐熱性)、バインダの熱可塑性(熱分解性)	経年変化要因
		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	—	湿気(水蒸気)	基材・バインダの加水分解	
		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	—	水分	基材・バインダの加水分解	
		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	—	紫外線	基材の耐UV性、バインダ耐UV性	
		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	—	酸素	基材の耐酸化性、バインダ耐酸化性	
		×	×	○	×	×	×	×	×	○	×	×	×	×	×	—	振動	振動による密度変化、沈下	
		○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	—	微生物・昆虫／小動物	防カビ性、防蟻性、防虫性／毒性、忌避性	
		×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	○	○	○	—	薬品、(溶剤)	大薬品性、(耐溶剤性)	

●関係ある(データあり)

○関係ある(データなし)

×関係ない(データなし)

ニズムについては、これまでのところ知見がない。

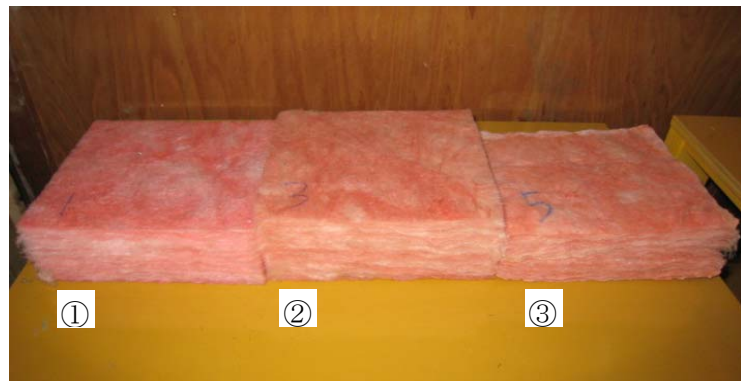
そこで、予備実験として、常用環境よりも高温、高湿の環境にグラスウールを置いて20日間養生したところ、試験体：D社 HG16K 300×300×50(mm)

養生条件：①50℃dry、②50℃水蒸気飽和、③ 50℃水中

写真 4-2 のように温度 50℃、水蒸気飽和の条件で厚さ方向(繊維の向きに対して概ね垂直方向)に膨張が生じた。また、同条件において赤色のバインダーの顕著な退色が観察された。一方、温度 50℃で加湿を行わなかった場合(dry)は外観上の変化が確認できなかった。温度 50℃の水中に浸した場合は、水が黄褐色に変色したが、グラスウールを取り出して乾燥させるとほぼ元通りに復元した。化学反応は温度に依存するため、高温で短期的に生じる変化は、長期的には常温でも生じる可能性がある。そこで本研究では、「熱」「水分」によるグラスウールへの影響について検証することに主眼を置く。



(a) 養生中



(b) 20日間養生後乾燥させた状態

試験体：D社 HG16K 300×300×50(mm)

養生条件：①50℃dry、②50℃水蒸気飽和、③ 50℃水中

写真 4-2 予備実験における試験体の変化

4.3 熱、水分によってグラスウールに生じる変化の把握

4.3.1 試験の目的と方法

予備実験により、高温高湿環境でグラスウールに変化が生ずることを確認できたことから、以下では温度および相対湿度を加速因子とした促進試験を行い、具体的な性状の変化を把握する。

試験項目の一覧を表 4-2 に示す。まず、予備実験で確認されたグラスウールの膨張について定量的な把握を行うため、厚さを継続的に測定する。温度は 50℃一定、湿度は加湿なし、相対湿度 50%、95%(以下それぞれ「50%RH」「95%RH」と記す)の3条件とする。また、高温、高湿環境が形状安定性に及ぼす影響を把握するため、高温高湿養生を行った試験体の圧縮、引張試験を行う。

次に、高温高湿条件下におけるグラスウールの変化が断熱性能に及ぼす影響を把握するため、高温高湿養生による熱伝導率の変化を測定する。

さらに、グラスウールの構成要素である、バインダーとガラス繊維それぞれ単体を対象とし、高温高湿養生により両者に変化が生じていることを確認する。バインダーについては、示差走査熱量測定(DSC)、ガラス繊維については走査型電子顕微鏡(SEM)による観察と、エネルギー分散型 X 線分析(SEM-EDX)を行う。

表 4-2 測定項目

実験項目	(1)厚さの変化の測定	(2)圧縮試験	(3)引張試験
目的	相対湿度とグラスウールに生じる膨張の関係の把握	高温、高湿環境が形状安定性に及ぼす影響の把握	高温、高湿環境が形状安定性に及ぼす影響の把握
試験体の種類	HG16K 50mm 厚	HG16K 50mm 厚	HG16K 50mm 厚
メーカー	D	D	D
試験体のサイズ	300×300×50[mm]	150×150×50[mm]	100×150×50[mm]
サンプル数	3	8	4-
養生条件	(a) 50℃dry (b) 50℃50%RH (c) 50℃95%RH	50℃95%RH(34 日間)	50℃95%RH(34 日間)
測定方法	・JIS A9521 ^[3] の「厚さの測定手順」による。 〔測定時に 150mm 角で質量が 100g の加重板を載せる。針径は 0.3mm、測定箇所は中央部のみ 1 か所とする。〕	・圧縮板を 10mm/min で下降させ、厚さ 25mm のときの荷重を測定	・破断するまでの最大荷重を測定

実験項目	(4)熱伝導率測定	(5)バインダーの熱分析	(6)ガラス繊維の表面元素分析
目的	高温、高湿環境が断熱性能に及ぼす影響の把握	高温、高湿環境がバインダーに及ぼす影響の把握	高温、高湿環境がガラス繊維に及ぼす影響の把握
試験体の種類	HG16K 50mm 厚	バインダー(グラスウールの製造工程と同じ温度履歴となるよう処理したもの)	バインダーが付着していないグラスウール
メーカー	D	D	A,B,C
試験体のサイズ	300×300×50[mm]	-	-
サンプル数	3	-	-
養生条件	50℃95%RH(乾燥後測定)	(a)常温保管 (b)50℃95%RH(27 日間) (c)オートクレーブ(10 時間、108℃、ゲージ圧 37kPa 程度で加水)	50℃95%RH
測定方法	・JIS A1412-2 ^[4] による。 〔試験体の下面を 35℃、上面を 15℃、測定時の厚さは呼び厚さの 50mm とする。〕	・示差走査熱量測定(DSC) 〔窒素雰囲気下で昇温速度を 10℃/min とする。〕	・走査型電子顕微鏡(SEM)による観察 ・エネルギー分散型 X 線分析(SEM-EDX)

4.3.2 測定結果

(1) 厚さの変化の測定

図 4-2 は各条件における厚さ変化率の推移を示している。厚さ変化率は、養生中の実測厚さを養生前の実測厚さで除した値である。相対湿度が高いほど厚さの変化が速いことがわかる。また、50℃95%RH では、養生開始後 30 日目前後をピークとして、以降は厚さが減少している。これは JIS A9521 に準じ、150mm 角で質量が 100g の加重板を試験体に乗せて厚さを測定しているが、試験体の復元力が低下するため、測定を行うたびに荷重板の負荷に耐えられず、沈み込みが生じたことによる。なお、バインダーの退色は復元力の低下が始まる以前から生じており、50℃50%RH の条件においても若干の退色が見られた。

(2) 圧縮試験

図 4-3 に養生前後の圧縮試験の結果を示す。養生条件が同じ図 4-2(c)を参照すると、34 日間養生後は、厚さ測定用の荷重板の沈み込みが生じ始める時期に相当し、この段階では明らかに圧縮荷重として測定される復元力が低下していることがわかる。

(3) 引張試験

図 4-4 に養生前後の引張試験の結果を示す。圧縮試験の結果と同様、引張による破断荷重も低下していることがわかる。

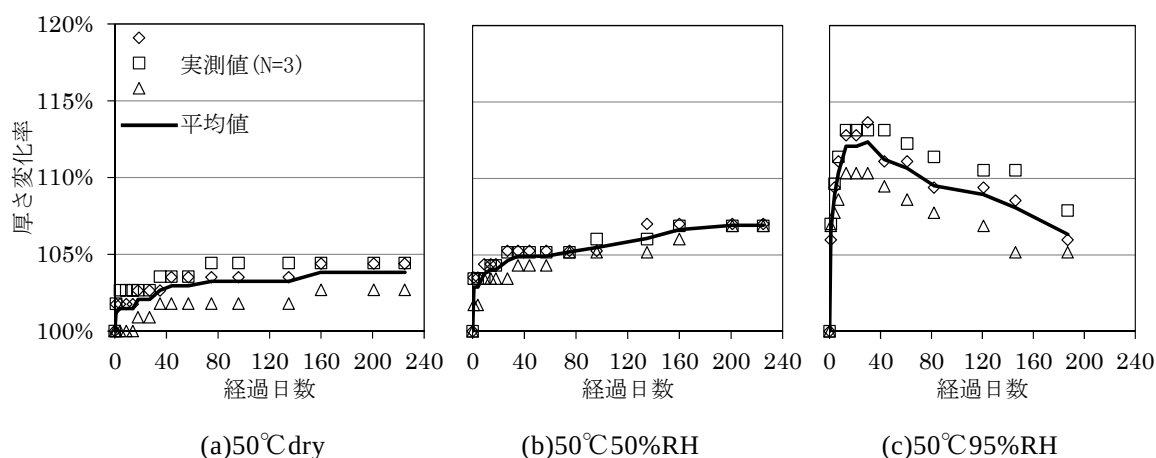


図 4-2 厚さの変化

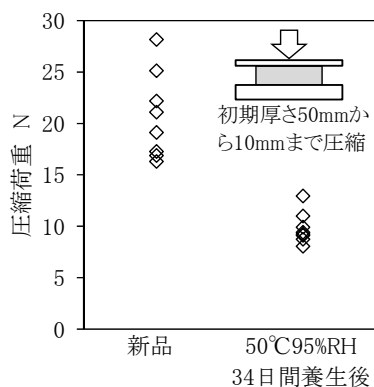


図 4-3 圧縮試験の結果

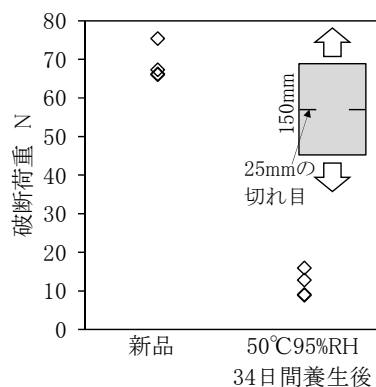


図 4-4 引張試験の結果

(4) 熱伝導率測定

図 4-5 は熱伝導率の推移を示している。養生によって試験体が膨張するが、測定之都度乾燥させ、製品呼び厚さの 50mm まで圧縮し、測定している。図 4-2(c)と比較すると、復元力の低下を起こす状態に至っても、呼び厚さにおける熱伝導率の増大は見られず、むしろわずかに小さくなる傾向にある。

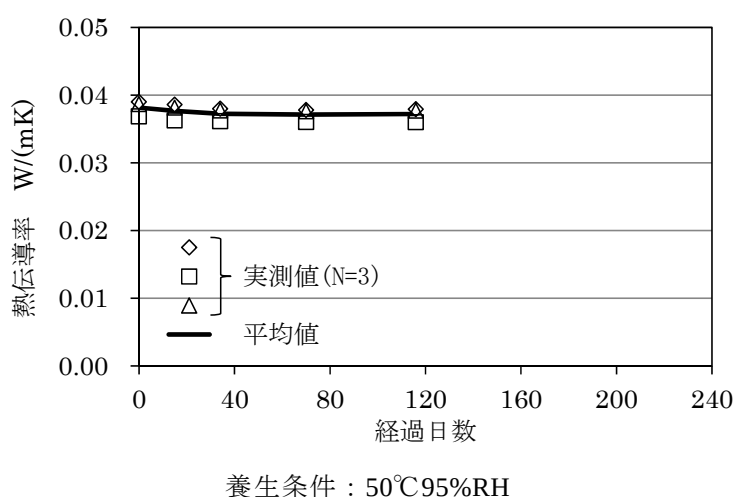


図 4-5 熱伝導率の変化

(5) バインダーの熱分析

示差走査熱量測定(DSC)は熱分析手法の一つで、試料を一定の昇温速度で加熱したときの熱の出入りを計測することにより、相転移や化学反応など熱の出入りを伴う現象を、温度と関連付けて把握できる。

試験体の作成は D 社にて行った。まず、アルミカップにバインダー液を入れ、105℃で 3 時間乾燥させた。次に、乾燥した樹脂を剥ぎ取り、200℃で 4 分間硬化させた。この 200℃における硬化処理は通常のグラスウール製造工程においても行われる処理である。作成した試験体を写真 4-3 に示す。この試験体をさらに常温保管したもの、50℃95%RH で 27 日間養生したもの、108℃、蒸気圧 0.375kg/cm² で加水しながら 10 時間オートクレープ処理したものを分析対象とした。粉碎前のバインダーの顕微鏡画像を写真 4-4 に示すが、外観上明らかな変化を生じている。

DSC 測定の結果を図 4-6 に示す。常温保管の試料では 200～300℃の範囲で吸熱反応が生じているが、50℃95%RH で養生したものや、オートクレープ処理を行ったものは、吸熱反応が明瞭でなくなっている。ここからわかることは、バインダーの中で吸熱反応を起こすものがなくなっているということのみであるが、バインダーが何らかの変化を起こしていることは確かである。



(a) バインダー乾燥後



(b) はぎ取った樹脂



(c) 分析前に粉砕した樹脂

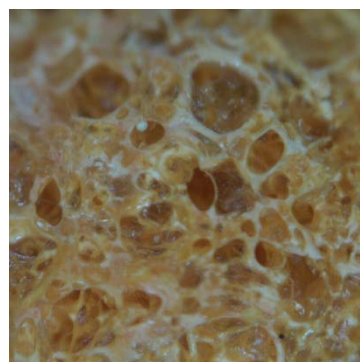
写真 4-3 熱分析試験体の作成



(a) 常温保管



(b) 50°C95%RH27 日間養生



(c) オートクレープ処理

写真 4-4 養生後（粉砕前）の顕微鏡画像（200 倍）

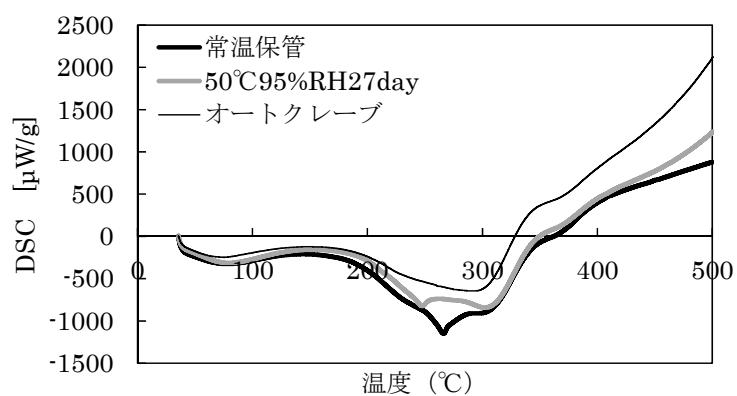


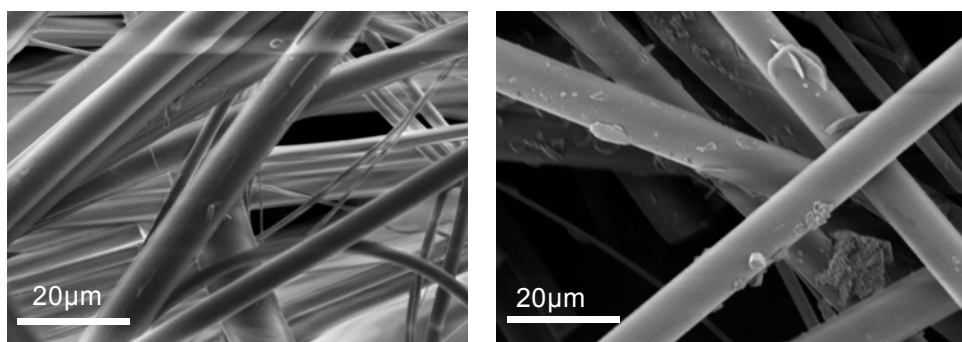
図 4-6 バインダーの DSC 測定結果

(6) ガラス繊維の表面元素分析

写真 4-5 に、養生前後の電子顕微鏡画像を示す。養生によって繊維表面に異物が現れていることがわかる。この異物は、A～C 社いずれの試験体においても、養生開始後数日で繊維表面の凹凸として現れ、しだいに大きくなった。

この異物の内容を確認するため、エネルギー分散型 X 線分析(SEM-EDX、SEM-EDS との呼ばれる)による表面元素分析を実施した。走査型電子顕微鏡における試料への電子線照射により発生する特性 X 線のエネルギーは元素に固有であり、その強度 (X 線光子数の数) が元素濃度に比例するので、SEM-EDX により X 線のエネルギースペクトルから表面付近に存在する元素の定性定量分析ができる。

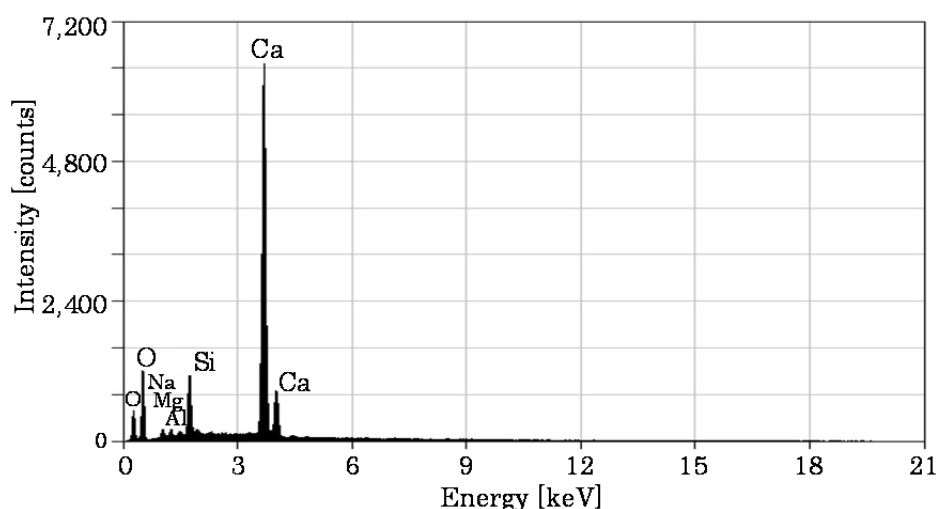
図 4-7 は 21 日間養生後の異物付近の EDX スペクトルの例であるが、いずれのメーカーの試料でも Ca が多く検出された。なお、異物のない部位では、ガラスの主成分である Si と O が主に検出された。また、分析試料作成時に、高温高湿養生によって、明らかにガラス繊維が折れやすくなることを確認した。



(a) 養生前

(b) 50°C95%RH18 日間養生後

写真 4-5 養生前後の電子顕微鏡写真 (A 社ホワイトグラスウール)



A 社ホワイトグラスウール析出部

図 4-7 EDX スペクトル

4.3.3 「へたり」のメカニズム

フェルト状のグラスウールは通常圧縮梱包されているため、壁体に施工した場合も、通気層側をシート状防風材で支持しているなど厚さ方向の伸縮が完全に拘束されていない施工環境下では、100 日以上長期にわたって膨張を生じることが報告されている^[5]。ただし、これまで膨張と環境条件の関係は明らかではなかったが、相対湿度をパラメータとした促進試験により、相対湿度が膨張を加速させることがわかった。また、高温高湿養生をさらに継続すると、復元力が低下した。これが「へたり」に相当すると考えられる。一方、断熱性能に関しては、呼び厚さが確保されている限り、性能の低下がないことがわかった。

次に、グラスウールの構成要素をそれぞれ単体で高温高湿養生した結果、バインダーとガラス繊維ともに変化を生じることがわかった。高温高湿養生によってグラスウールが膨張するのは、バインダーの劣化によってガラス繊維の拘束が解けることが原因として考えられる。また、ガラスは飽和水蒸気圧以下であっても表面への水の吸着が生じ、表面の変質が生じることが知られており^[6]、SEM-EDX で確認したように、水分による侵食を受けてガラス成分の一部が繊維表面で結晶化し、ガラス繊維の機械強度の低下が引き起こされたと考えられる。復元力の低下やいわゆる「へたり」は、バインダーの劣化に加え、ガラス繊維の強度低下にも起因すると考えられる。

4.4 現場採取グラスウールの調査

4.4.1 調査の目的と概要

温湿度促進試験によって、グラスウールに膨張や復元力の低下が生じることが確認されたが、実使用時の経年変化の内容との対応は不明である。そこで、住宅の改修または解体の現場からグラスウールを採取し、各種分析を行う。

採取を行った住宅の建設年代は 1974 年から 1997 年で、10 棟から 17 種類を採取した。採取したグラスウールの一覧を表 4-3 に示す。このうち、3 棟 10 種類(K1、K2、TA～TF、KA、KB)については、採取時に立会した。建設地は東京の 1 棟 1 種類を除き、北海道内である。使用部位は、外壁、小屋裏または床で、いずれもフェルト状のグラスウールである。

採取したグラスウールは 350mm 角に切り取り、サンプル数を 3 とする(量の少ない KO と KB は 2 サンプルとする)。各サンプルは、表 4-2 の(1)と同じ方法で厚さを測定し、実測密度を算出する。

表 4-3 現場採取グラスウールの一覧

記号	メーカー	色	使用部位	建設地	施工年	通常/ 高性能	実測厚さ [mm]	実測密度 [kg/m ³]
K1	A	黄	外壁	旭川	1974年	通常	42.4	9.7
K2	C(推定)	赤	外壁	旭川	1974年	通常	40.4	11.7
KO	不明	黄	外壁	旭川	1991年	高性能	79.0	15.1
DA	不明	黄	外壁	札幌	1982年頃	通常	60.0	20.3
DB	不明	黄	小屋裏	札幌	1982年頃	通常	36.3	12.8
DC	不明	赤	小屋裏	札幌	1982年頃	通常	38.0	10.4
DD	不明	黄	小屋裏	札幌	1982年頃	通常	93.7	10.7
DE	不明	黄	小屋裏	札幌	1997年頃	通常	90.7	15.7
TA	D(推定)	黄	和室床	旭川	1978年	通常	32.3	15.3
TB	A(推定)	黄	2F外壁(南)	旭川	1978年	通常	98.7	10.8
TC	A(推定)	黄	寝室外壁(東)	旭川	1978年	通常	75.0	12.7
TD	不明	赤	寝室外壁(改修)	旭川	1990年頃	高性能	101.0	14.2
TE	不明	黄	間仕切り壁	旭川	1978年	通常	46.0	11.0
TF	不明	黄	1F外壁(北)	旭川	1978年	通常	101.3	10.7
KA	不明	黄	通気止め	旭川	1981年	通常	93.0	16.2
KB	不明	黄	床	旭川	1981年	通常	106.5	14.6
YA	B	黄	外壁	東京	1994年	通常	38.3	12.1

4.4.2 調査結果

(1) 目視および顕微鏡観察

採取したグラスウールの例を写真 4-6 に示す。外観上は、バインダーの退色によると考えられる色あせや、黒く変色した箇所が一部で見られたほかは、概ね健全に見えた。また、一部復元力が低下している感触はあったが、現地を確認した 3 棟において

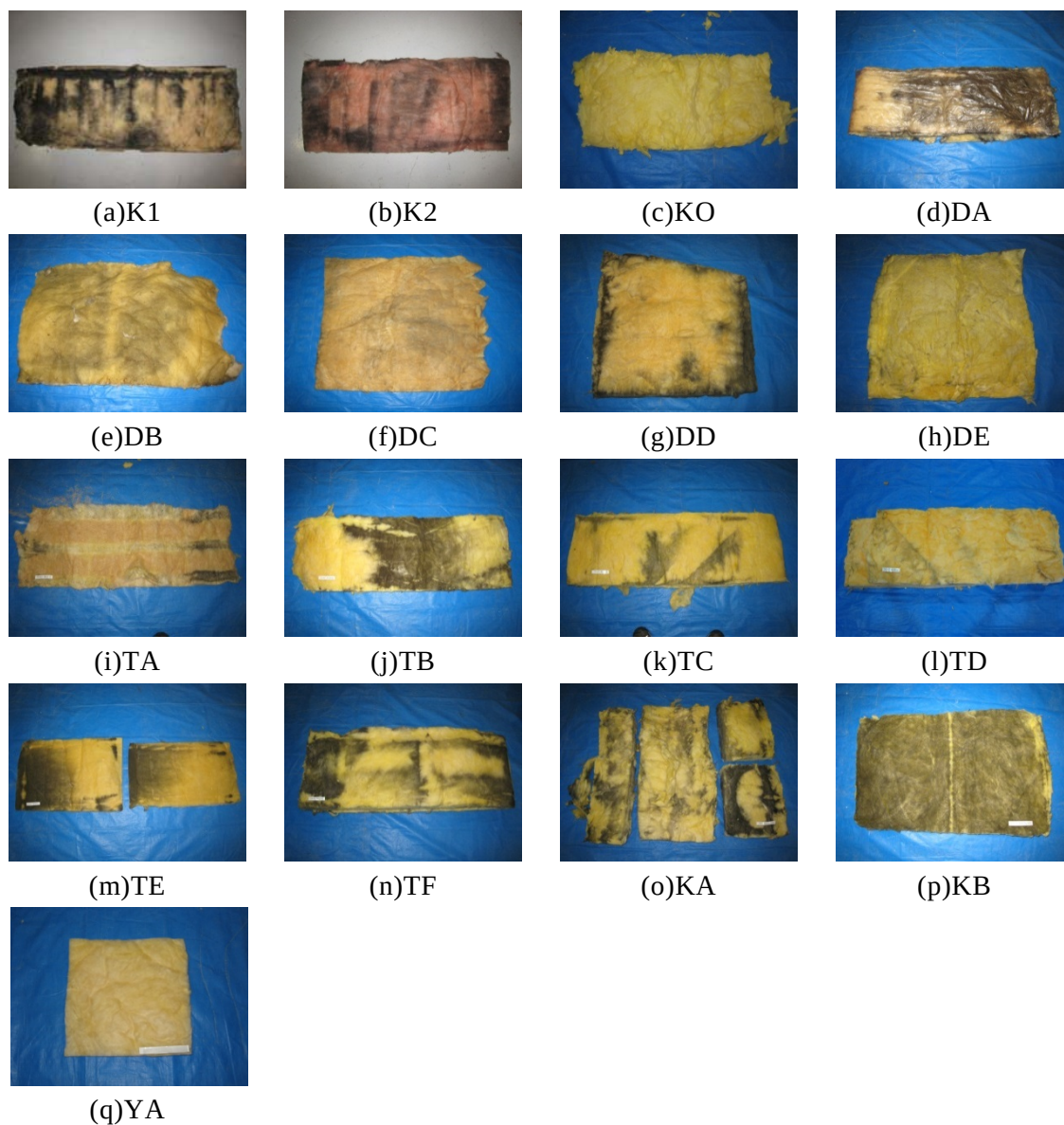


写真 4-6 現場サンプリング材の写真

は、ずり落ちや垂れ下がりなど、形状保持に支障をきたしているケースはなかった。

各試験体の黒く変色した部分と非変色部の電子顕微鏡(SEM)画像を、写真 4-7-1、写真 4-7-2 に示す。非黒色化部は概ね表面が平滑だった。グラスウールによっては繊維表面に異物が確認されたものの、その量は温湿度促進試験で確認された異物と比べて少なかった。異物のうち促進試験同様に SEM-EDX で Ca が主成分として検出されたのは 17 種類中 2 種類(KO、DE)のみだった。SEM-EDX の分析領域は数 μm のため、異物の量が少ない場合は異物中の成分を検出できなかった可能性がある。

一方、黒色化した部分はいずれのサンプルも一様に表面に細かな付着物が確認された。台所用中性洗剤で洗浄を行うと元のバインダーの色が現れ、SEM でも洗浄後は平滑な表面が観察されたことから、変色はバインダーやガラス繊維の変化によるものではないと考えられる。また、表面の付着物について、検査機関((株)衛生微生物研究セ

ンター)に分析を依頼したところ、顕微鏡観察および培養の結果、変色原因はカビなどの微生物ではないとの見解が得られた。変色原因は、壁内気流により空気中の塵埃が付着したものだと考えられる。

その他、性能変化要因とされている「微生物・昆虫／小動物」「薬品・溶剤」の影響とみられる変化は確認されなかった。

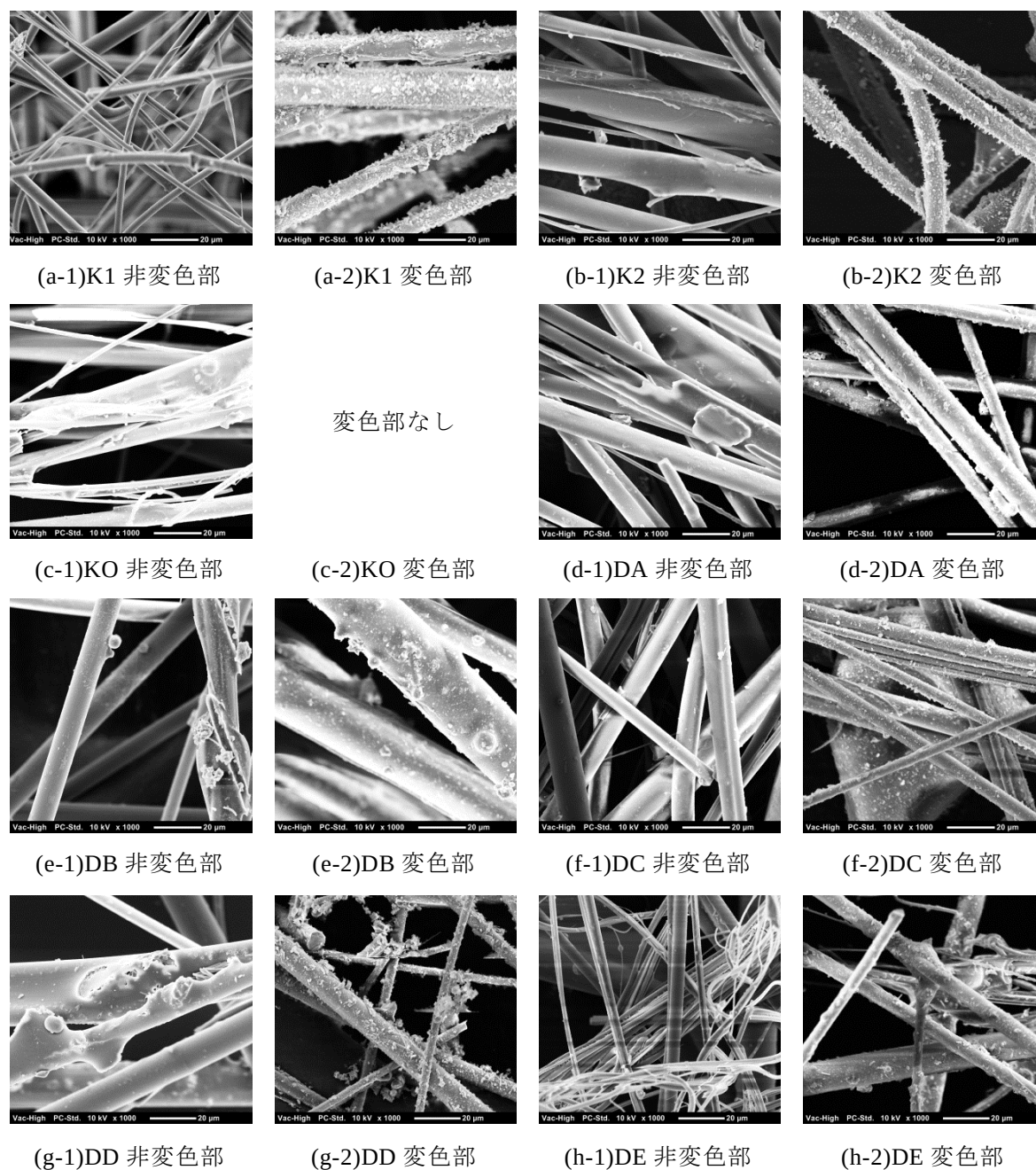


写真 4-7-1 各試験体の黒く変色した部分と非変色部の電子顕微鏡画像

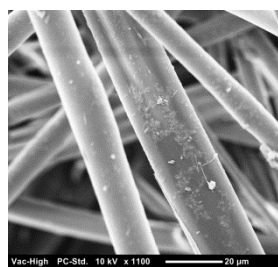


(i-1)TA 非変色部

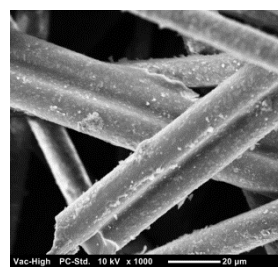
変色部なし



(i-2)TA 変色部



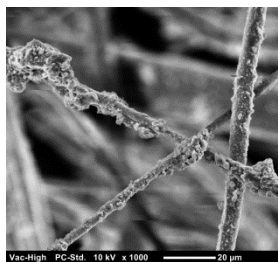
(j-1)TB 非変色部



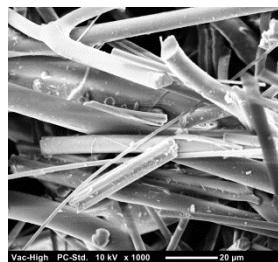
(j-2)TB 変色部



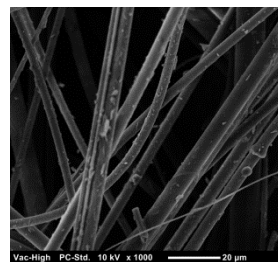
(k-1)TC 非変色部



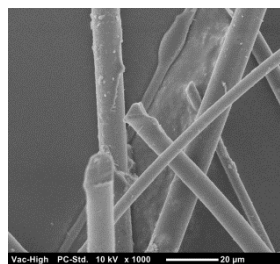
(k-2)TC 変色部



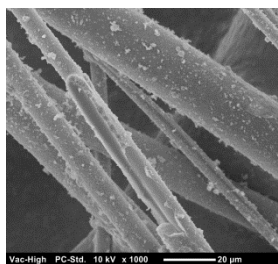
(l-1)TD 非変色部



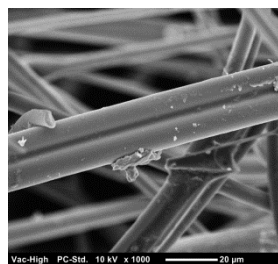
(l-2)TD 変色部



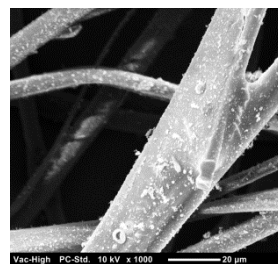
(m-1)TE 非変色部



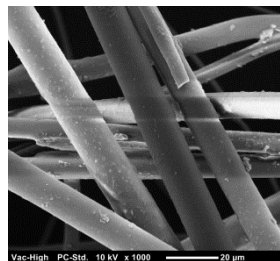
(m-2)TE 変色部



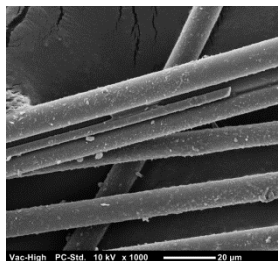
(n-1)TF 非変色部



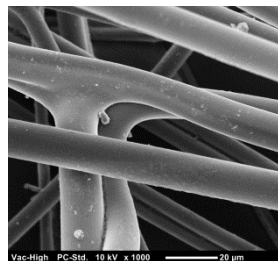
(n-2)TF 変色部



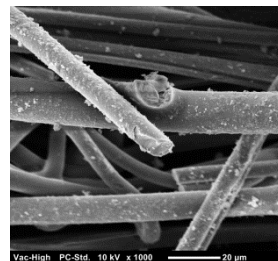
(o-1)KA 非変色部



(o-2)KA 変色部



(p-1)KB 非変色部



(p-2)KB 変色部



(q-1)YA 非変色部

変色部なし



(q-2)YA 変色部

写真 4-7-2 各試験体の黒く変色した部分と非変色部の電子顕微鏡画像

(2) 熱伝導率の測定

熱伝導率は、17 種類、計 49 サンプルすべてを対象として、表 4-2 の(4)と同じ方法で測定した。ただし、測定時の厚さは JIS A9521 に準じ荷重板を用いて測定した実測厚さとした。図 4-8 に、経過年数および実測密度と熱伝導率の関係を示す。高性能グラスウールかどうかは、施工年、熱伝導率および通気度による平均繊維径測定の結果から判別した。熱伝導率は密度との相関が見られるが、使用年数との明瞭な関係は見られない。

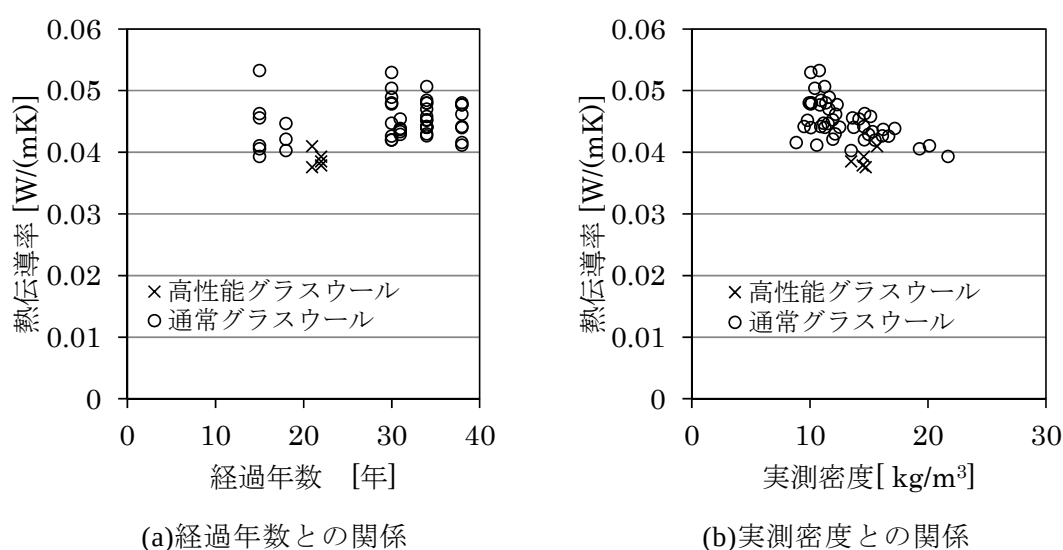


図 4-8 現場採取グラスウールの熱伝導率測定結果

4.4.3 考察

現場採取グラスウールの調査においては、バインダーの退色や復元力の低下、部分的な黒色化などが観察されたものの、現場を確認した範囲では、断熱性能に影響を及ぼすと考えられる脱落、収縮などの形状の変化は見られなかった。

熱伝導率については、製品の初期値や規格値との比較が難しく、先の温湿度促進試験で熱伝導率にほとんど変化が生じなかった(図 4-5)ことから考えても、形状安定性を含めたグラスウールの長期性能の評価指標として十分とは言えない。

したがって、促進試験と現場採取グラスウールの調査結果を結び付け、グラスウールの長期性能を検証するためには、より定量的に評価可能な別の方法を検討する必要がある。

4.5 突き刺し試験の提案

4.5.1 評価方法の要件

評価方法の要件としては、経年変化の定量的な評価が可能であることのほかに、促進試験や現場採取材の測定を行うため、同じ試験体で繰り返し試験が可能なこと、不整形のサンプルでも試験可能なこと、測定に要する時間が比較的短いことなどが求められる。表 4-4 に各種評価方法での対応可否を示すが、既存評価方法でこれらの要件をすべて満足する方法は見当たらない。一方、厚さの変化を測定する過程において、針を突き刺す際の抵抗が、ガラスウールの変化とともに小さくなることが確認され、その抵抗力を測定することが、本研究における評価手法として有用であると考えられた。そこで、以下のように試験方法の検討を行った。

表 4-4 評価方法の比較

	経年変化の定量的評価	繰り返し測定	不整形サンプル測定	測定に要する時間
厚さ測定	△	△	×	○
引張、圧縮試験	○	×	×	△
熱伝導率測定	△	○	×	△
DSC	△	○	○	△
顕微鏡観察	△	○	○	△
突き刺し試験 (本研究で提案する方法)	○	○	○	○

○:可, △:一部可, ×:不可

4.5.2 試験方法の検討

(1) 圧縮力の測定方法

日本電産シンポ製デジタルフォースゲージ FGP-0.2 にピアノ線を垂直に取り付け、電動スタンドに設置する。試験状況を写真 4-8 に示す。ピアノ線をガラスウール突き刺したときの抵抗は、フォースゲージにより圧縮力として測定される。圧縮力は、一定速度でフォースゲージを下方に移動しながら、0.1 秒間隔で 10 秒間継続測定を行う。

(2) ピアノ線の太さ

通常入手できる直径 0.3mm および直径 0.6mm のピアノ線で試験を行ったところ、直径 0.6mm ではガラスウール自体が圧縮されてピアノ線が突き刺さらないことがあった。そのため、直径 0.3mm のピアノ線を採用することとする。

(3) ピアノ線の先端形状

写真 4-9 に示すように、ピアノ線カッターで切断したままのもの、砥石で先端を平滑に処理したもの、円錐状に処理したものの 3 種類について試験を行った。試験体は D 社 HG16K である。各条件 10 か所で突き刺しを行った結果は図 4-9 のとおりで、測定値のばらつきが少なく、先端処理形状の再現性が高い平滑処理を採用する。



写真 4-8 突き刺し試験の状況



(a) 切り放し

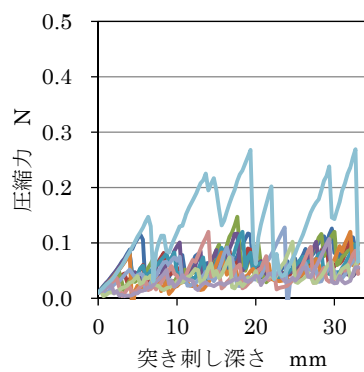


(b) 平滑処理

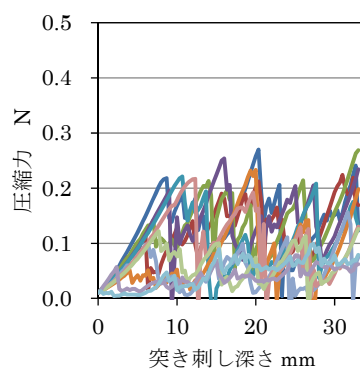


(c) 円錐処理

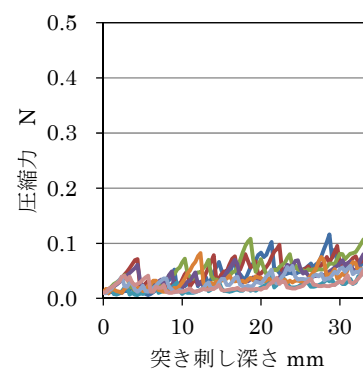
写真 4-9 ピアノ線先端形状拡大写真



(a) 切り放し



(b) 平滑処理



(c) 円錐処理

図 4-9 先端形状による圧縮力の違い(突き刺し速度 200mm/min)

(4) 突き刺し速度

突き刺し速度を 100、200、300mm/min の 3 段階に設定して比較を行った。試験体は D 社 HG16K である。各条件 10 か所で突き刺しを行った結果を図 4-10 示す。100mm/min では、突き刺し行程が 16.7mm であり、材料内での密度むらが大きいグラスウールを評価するには、より行程を大きくとることが望ましい。一方、300mm/min とすると、突き刺し行程が 50mm となり、薄い試験体に対応できないため、突き刺し速度は 200mm/min とする。

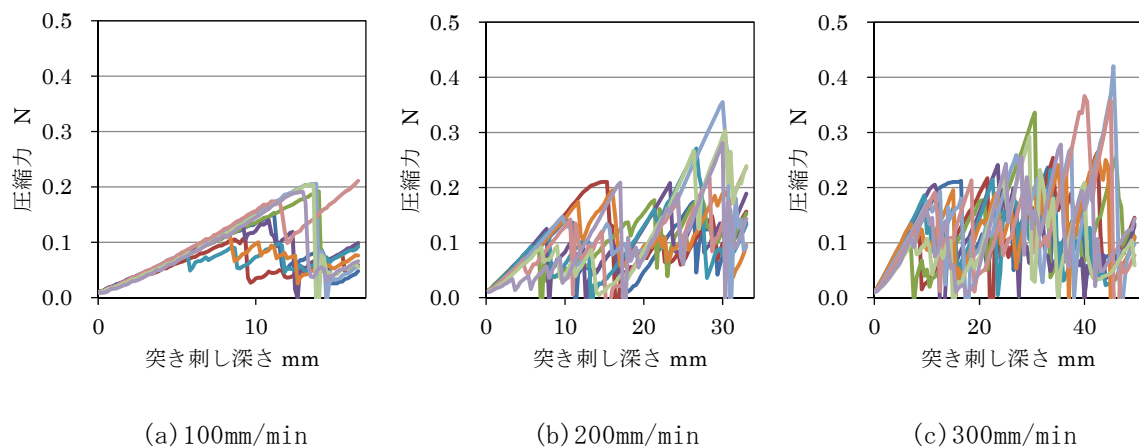


図 4-10 突き刺し速度による圧縮力の違い(針先端平滑処理)

(5) 突き刺し試験力の定義

試験結果にはガラス繊維の径、配向、密度が均一でないことに起因するばらつきが生じるため、1 仕様 1 条件につき 10 か所で突き刺しを行う。また、突き刺しを行った箇所はマーキングし、次に突き刺しを行う箇所とは 5mm 以上の間隔を確保する。さらに、10 か所それぞれで突き刺し中に測定される圧縮力の平均値を算出し、10 か所の中央値を「突き刺し試験力」と定義する。なお湿潤状態にある試験体は乾燥後に突き刺し試験を行う。以降では、この突き刺し試験力を用いて評価を行う。

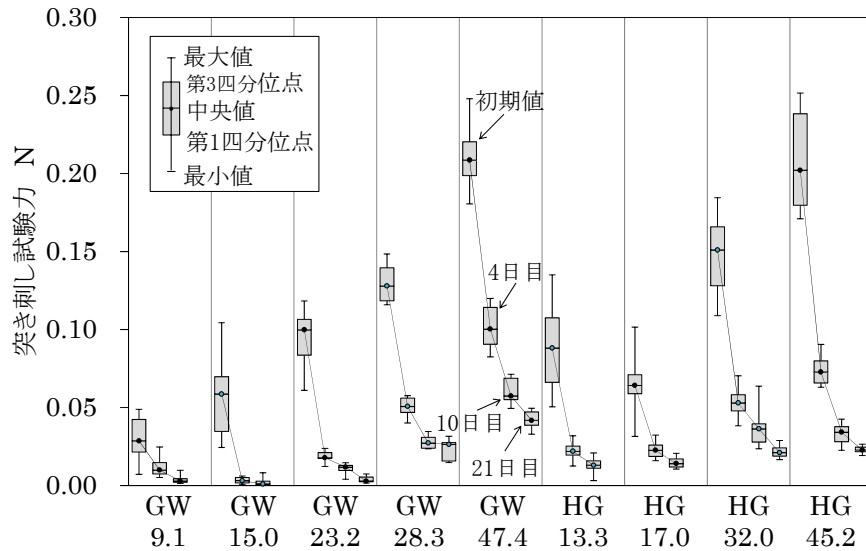
4.5.3 促進試験体と現場採取グラスウールの比較

(1) 促進試験の突き刺し試験による評価

4.5.2 で検討した方法を用い、各種グラスウールの促進試験における突き刺し試験力の変化と、現場採取グラスウールの突き刺し試験力を比較する。

図 4-11 に各種グラスウールを 75℃95%RH で養生を行い、突き刺し試験力の変化を調べた結果を示す。グラフには各回 10 か所の突き刺し試験力の最大・最小値と四分位点を表示している。グラスウールの密度が大きいほど突き刺し試験力も大きくなることと、いずれも高温高湿養生により突き刺し試験力が低下することがわかる。バインダーの劣化とガラス繊維強度の低下が、それぞれ突き刺し試験力の低下に寄与する度合いは明確ではなく、各回の試験力にばらつきもみられるが、中央値で評価すること

により、同じ種類のグラスウールであれば、突き刺し試験により性状の変化を定量的に把握できると考えられる。



GW：通常グラスウール、HG：高性能グラスウール、数字は実測密度(kg/m³)

養生条件：75℃95%RH

各試験体とも左から養生前の初期値、養生後4日目、10日目、21日目の試験結果を示す
(一部仕様では21日目の試験を実施していない)

図 4-11 各種グラスウールの突き刺し試験力の変化

(2) 現場採取グラスウールの突き刺し試験による評価

図 4-12 に 17 種類の試験体における突き刺し試験結果を示す。図中に点線で示したように、同じ住宅から採取したグラスウールは、メーカーや製品が異なっても突き刺し試験力が比較的近い範囲にあった。また、小屋裏で使用されていたグラスウー

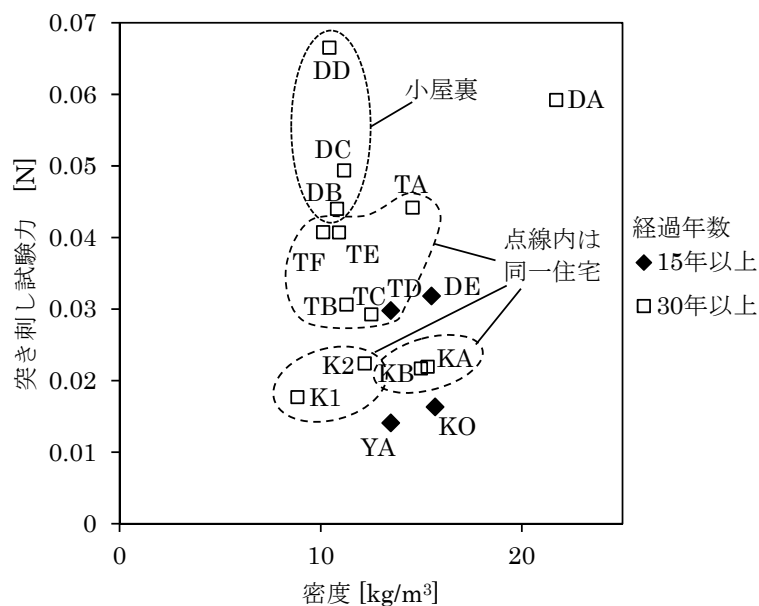


図 4-12 現場採取グラスウールの突き刺し試験結果

ルは比較的大きな突き刺し試験力を有していた。一方、同程度の密度でも突き刺し試験力は大きくばらついており、使用環境の差が表れていると考えられる。中には図 4-11 の初期値と比較して突き刺し試験力が小さく、長期使用により復元力が低下した可能性のあるグラスウールもあり、これらは実際に「へたり」を生じている感触があった。このように、現場採取グラスウールについても、突き刺し試験を用いて促進試験と同様の指標で評価でき、促進条件と実環境における比較も可能になると考えられる。

4.5.4 目標性能の設定

4.3.2(4)で述べたように、復元力の低下によってグラスウール自体の熱伝導率が大きくなることはない。グラスウールの変化が断熱性能の低下を起こすとすれば、復元力の低下によって形状安定性に支障をきたし、実際にずり落ちや垂れ下がりが生じるに至った場合である。そのような状況が生じうるのは、図 4-2(c)の場合で言えば、少なくとも载荷により厚さが減少に転じる 30 日目以降であると考えられる。

ここで問題とする復元力は、突き刺し試験力と同様にガラス繊維強度やバインダーの付着力が関係していることから、突き刺し試験力と復元力は互いに関連付けられると考えられる。

一方、図 4-2(c)と同条件で養生し、突き刺し試験を行った結果を図 4-13 に示す。30 日目における突き刺し試験力はメーカーによる違いはあるが、0.02N 程度である。したがって、0.02N の突き刺し試験力を有していれば、形状を保持するための復元力は、まだ十分に余裕がある状態であると考えられる。よって、形状安定性維持の観点から、ここでは突き刺し試験力が 0.02N 以上を保持していることを目標として次の検討に進む。

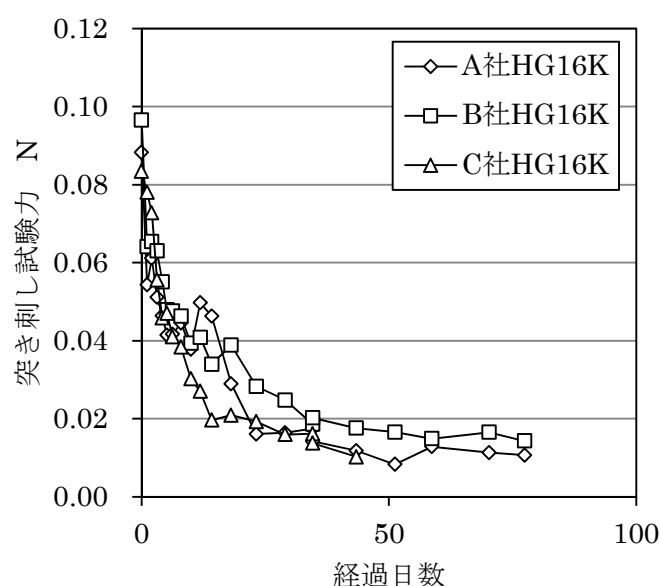


図 4-13 50°C95%RH における突き刺し試験力の変化

4.6 寿命予測モデルによる長期性状変化の予測

4.6.1 温湿度促進試験における突き刺し試験力の変化

(1) 試験方法

これまでの検証により、促進試験体と長期使用した現場採取グラスウールの両方で、突き刺し試験力の低下が確認された。また、突き刺し試験力の低下には温度および相対湿度が関係していると考えられる。そこで、温度および相対湿度をパラメータとして促進試験を行い、経年変化の予測を試みる。

促進試験の条件は、寿命予測モデルの適用を想定して、温度を 25℃、37.5℃、50℃、75℃の 4 水準、相対湿度を 75%、85%、95%の 3 水準とする。なお、グラスウールは製造時に 200℃～300℃でバインダーの硬化処理を行っており、図 4-6 でバインダーに吸熱反応が起こるのが 200℃以上であることから考えて、十分低い温度として 75℃という促進条件を設定した。

試験体は、A 社、B 社、C 社の HG16K、呼び厚さ 100mm の製品とし、200mm 角で切り出す。評価方法は突き刺し試験とする。

(2) 試験結果

試験の結果を図 4-14 に示す。また、同図には式(4-1)による試験結果の回帰曲線を併せて示す。

$$y = a \cdot \ln(x) + b \quad (4-1)$$

ここで、 y は突き刺し試験力[N]、 x は経過日数[日](ただし $X > 1.5$)、 a と b は断熱材の仕様と養生条件ごとに決まる定数を表す。

温度、相対湿度ともに、突き刺し試験力低下の速度と明瞭な関係があることがわかる。なお C 社の HG16K は、ガラス繊維の耐久性に関係があるとされる B_2O_3 を添加していない。このため、特に高温条件で他の製品よりも突き刺し試験力の低下が早く進んでいると考えられる。

4.6.2 寿命予測モデルの検討

温度を含む複数の加速因子を用いた促進試験により工業製品の寿命を予測するためには、次式のアイリングモデルが使用される^{[7][8]}。

$$L = \alpha \cdot \exp(E_a / kT) \cdot f(S) \quad (4-2)$$

ここで、 L はある状態に至るまでの時間、 α は定数、 E_a は活性化エネルギー[eV]、 k はボルツマン定数[eV/K]、 T は絶対温度[K]、 S は温度以外のストレス因子を表す。

温度以外のストレスを相対湿度としたときの関数モデルはいくつか提案されているが、ここでは $f(S) = \exp(\beta / RH)$ を採用すると、式(4-2)は次のようになる。

$$L = \alpha \cdot \exp(E_a / kT) \cdot \exp(\beta / RH) \quad (4-3)$$

ここで、 β は定数、 RH は相対湿度[%]を表す。

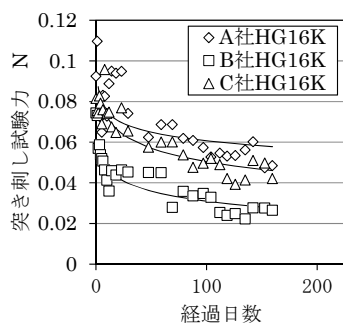
さらに両辺の対数をとると次式となる。

$$\ln L = \ln \alpha + E_a / kT + \beta / RH \quad (4-4)$$

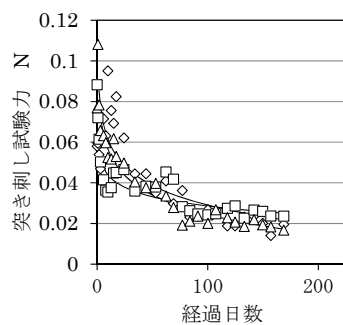
よって、 $\ln L$ は $1/T$ と $1/RH$ に関する 1 次式で表される。したがって、 T と RH をパラメータとする促進試験から、重回帰により断熱材の種類ごとに定まる定数 $\ln \alpha$ 、 E_a/k 、 β を求めることができる。

ここでは 4.5.4 で示した、形状安定性維持のための目標性能である、突き刺し試験力=0.02N にまで低下するまでの日数を指標として、各係数を求める。

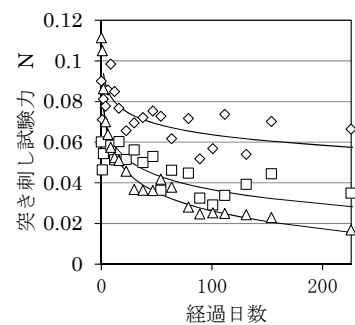
L は式(1)で $y=0.02$ としたときの x とする。なお期間中に突き刺し試験力が 0.02N までは低下していない一部の条件では、式(4-1)による外挿により L を求めるが、25℃



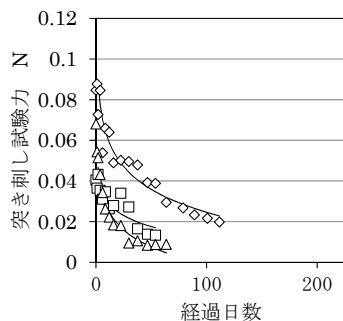
(a) 25℃95%RH



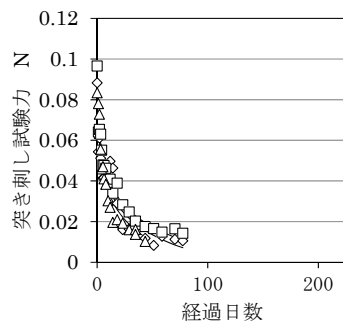
(b) 37.5℃95%RH



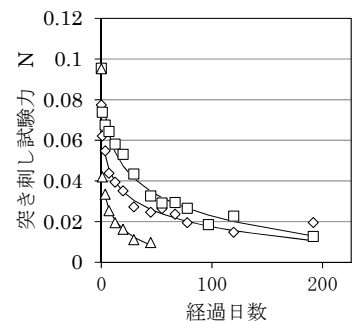
(c) 50℃75%RH



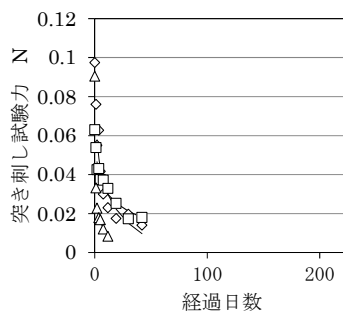
(d) 50℃85%RH



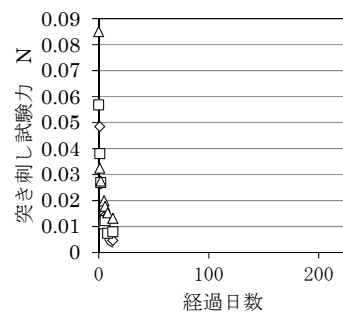
(e) 50℃95%RH



(f) 75℃75%RH



(g) 75℃85%RH



(h) 75℃95%RH

図 4-14 温湿度促進試験の結果

95%RH のうち A 社品、C 社品、50℃75%RH のうち A 社品は十分なデータが得られていないため除外する。

表 4-5 に重回帰により求めた $\ln \alpha$ 、 E_a/k 、 β の値を示す。これらの各係数を用いて、横軸を $E_a/kT + \beta / RH$ 、縦軸を L の対数とした試験結果のプロットと、式(4-4)による回帰直線を図 4-15 に示す。実験結果は、概ね回帰直線上に分布している。

この直線関係が、より低温、低湿の条件でも成り立つとの仮定のもとに、外挿によって実際に製品が使用される環境での寿命を予測するのが、実用的に行われている寿命予測の方法である。ここでも、同様の仮定のもと、グラスウールの経年変化の予測を試みる。

表 4-5 各断熱材の $\ln \alpha$ 、 E_a/k 、 β

	A社HG16K	B社HG16K	C社HG16K
$\ln \alpha$	-41.0	-35.0	-42.8
E_a/k	10,630	9,318	12,309
β	1,116	942	729

L を突き刺し試験力が0.02Nまで低下するまでの日数とした場合

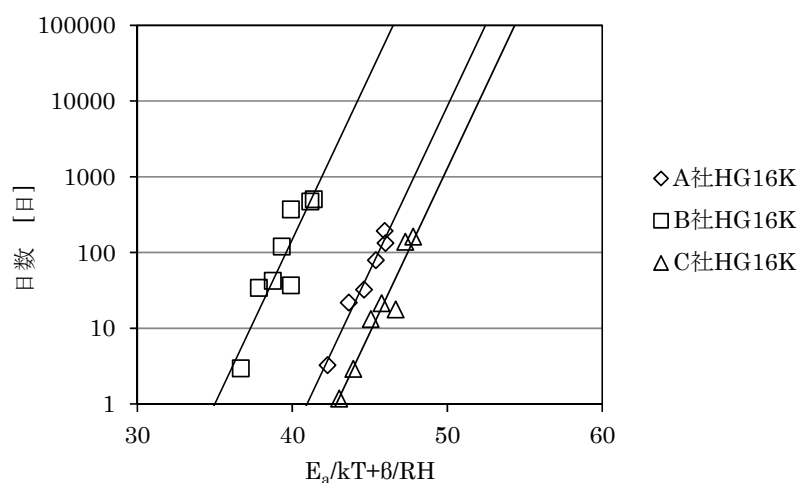


図 4-15 式 (4-4) に基づく試験結果のプロットと回帰直線

4.6.3 経年変化の予測

(1) 温湿度一定の場合

表 4-6 に、例として 3 つの温湿度条件において突き刺し試験力が 0.02N に低下するまでの年数求めた結果を示す。表 4-6 の温湿度条件は、年間を通じた壁体内の温湿度としては高めの値であるが、常温でも相対湿度が高い状態が続けば、建物の使用期間中にグラスウールの復元力低下などの経年変化が相当進む可能性のあることが示された。

表 4-6 任意温湿度における L の計算例

温度 [°C]	相対湿度 [%]	E _a /kT+B/RH			L[年]		
		A社HG16K	B社HG16K	C社HG16K	A社HG16K	B社HG16K	C社HG16K
25	60	54.2	46.9	53.4	1627	427	110
25	95	47.4	41.2	49.0	1.7	1.3	1.3
30	70	51.0	44.2	51.0	63	27	10

(2) 温湿度履歴を考慮した場合

計算方法

防湿条件による経年変化の違いを確認するため、気象データを用いて壁体内部の温湿度履歴を計算し、グラスウールの経年変化の予測を行う。

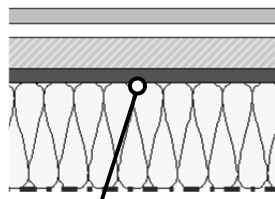
計算を行う壁体の構成を図 4-16 に示す。室内側の透湿抵抗は同図中に示す①～③の 3 条件とする。計算地点とした札幌市の場合、①の防湿フィルム B 種相当が、通常使用されている防湿材である。各材料の物性値は定数とする。外気条件は拡張アメダス気象データの札幌標準年、計算方位は北面とする。計算プログラムには非定常熱・湿気計算システム H&M(ver.2.3.1)を用い、一般部に注目した一次元解析を行う。その他室内の条件などは文献^[9]により、計算開始後 3 年目のデータが毎年繰り返されるものとする。経年変化の度合いは、突き刺し試験力の変化により表すこととし、式(4)により計算時間間隔ごとの突き刺し試験力の減少分を計算するが、 $\ln \alpha$ 、 E_a/k 、 β の各定数は、突き刺し試験力の低下とともに変化する。そこで、突き刺し試験力が 0.01N 低下するごとに各定数の値を計算し直し、そのとき保持している突き刺し試験力に応じた各定数の値を用いて計算を行う。初期値は各社とも 0.06N とする。

計算結果

壁体内の温湿度の計算結果を図 4-17 に示す。室内側に①防湿フィルム B 種相当の透湿抵抗を与えた場合は、グラスウールの室外側境界の相対湿度は年間を通じて 40%～50%で推移する。②付属防湿層相当の場合は、65%～85%程度となる。一方、③有孔 PE 相当の場合は冬季に長期間結露を生ずることとなる。

このとき、突き刺し試験力の 30 年間の変化を試算した結果を図 4-18 に示す。通常使用されている①防湿フィルム B 種相当の場合、A 社品および B 社品は計算上変化せず、C 社品もわずかな低下にとどまっている。②付属防湿層相当の場合は各社とも突き刺し試験力が低下する傾向が現れる。③有孔 PE 相当の場合は各社とも 5 年程度で

0.02N 以下まで低下するという結果になった。



計算箇所

壁体構成

- ・外装材
- ・通気層 18mm
- ・XPS2b 30mm
- ・合板 12mm
- ・HG16K 105mm

室内側透湿抵抗($\text{m}^2\text{sPa/ng}$)

①0.144(JIS A6930 の防湿フィルム B 種相当)

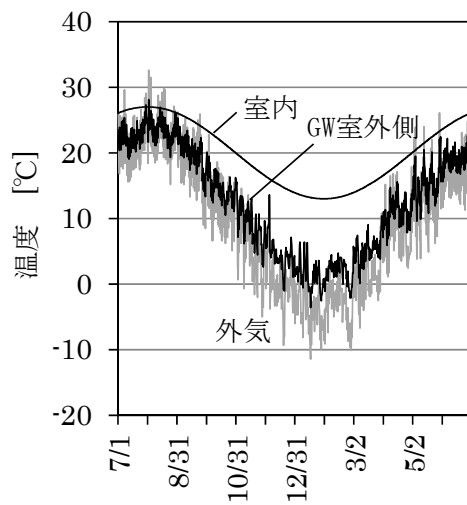
②0.0288(付属防湿層の例)

③0.0015(有孔 PE 相当)

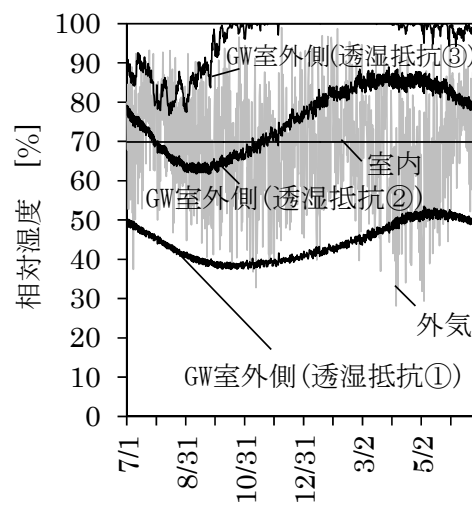
計算地点 札幌市

その他の計算条件は文献[9]による。

図 4-16 計算を行う壁体の構成



(a) 温度



(b) 相対湿度

図 4-17 壁体内温湿度のシミュレーション結果

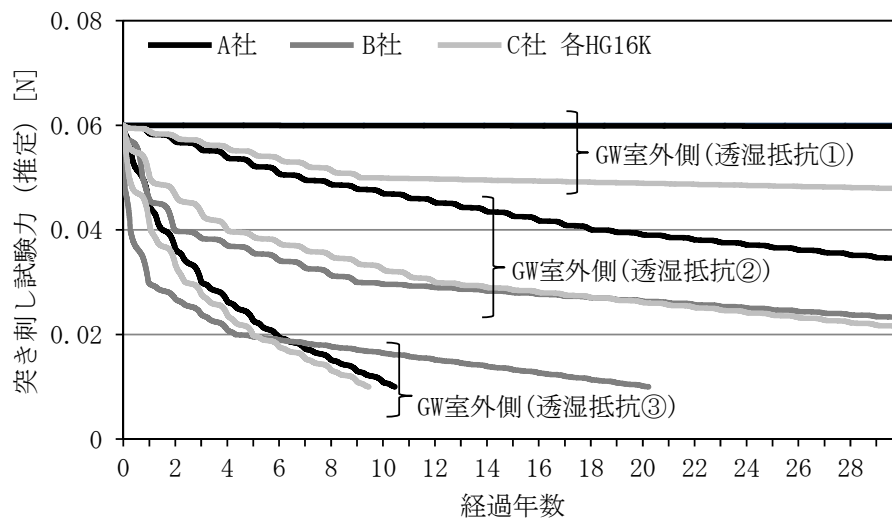


図 4-18 突き刺し試験力の計算結果

4.7 本章のまとめ

本章では、促進試験および長期使用した断熱材の実態調査により、グラスウールの長期性状変化を検証した。得られた主な知見は次のとおりである。

- (1)グラスウールの経年変化に影響を及ぼす要因として熱、水分を取り上げ、促進試験による検証を行った。その結果、高温高湿の条件下で、バインダーの劣化とガラス繊維の強度低下が生じ、厚さの増大と復元力の低下(いわゆる「へたり」)をもたらすことがわかった。
- (2)上記のような変化が生じても、呼び厚さにおける熱伝導率は大きくならない(断熱性能は低下しない)ことがわかった。
- (3)現場採取調査においても、促進試験と同様の色あせや復元力が低下していると考えられる状況が一部で確認された。しかし、形状保持に支障をきたしているような事例は確認されなかった。
- (4)グラスウールの経年変化の新たな評価方法として、定量的な評価や繰り返し測定が可能であること、不整形なサンプルの測定にも適用可能であり、測定に要する時間も比較的短いなどの長所を持つ突き刺し試験を提案した。
- (5)温度および湿度をパラメータとした促進試験を実施し、促進試験で得られた温湿度と変化の速度が、より低温、低湿の条件でも成り立つとの仮定のもとで、実用環境での経年変化の予測を試みた。
- (6)グラスウールの長期性能を保つには、これまでも言われているように、防湿層や通気層などによる壁内乾燥措置を講じ、水平部位については長期的な垂れ下がりを防止する措置を講ずることが重要である。それらの適切な施工が行われる前提においては、通常グラスウールの経年変化が問題になることはないと考えられる。

参考文献

- [1] 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合研究機構：平成 19 年度断熱材の長期断熱性能評価に関する標準化調査成果報告書，2008.3
- [2] 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS24 断熱工事，日本建築学会，2013.2
- [3] JIS A9521：住宅用人造鉱物繊維断熱材，2011
- [4] JIS A1412-2:熱絶縁材の熱抵抗及び熱伝導率の測定方法－第 2 部:熱流計法(HFM 法), 1999
- [5] 鈴木大隆，廣田誠一，福島明：シート状防風材を用いた木造断熱壁における通気層空隙の確保に関する実験的研究，日本建築学会計画系論文集，第 480 号，pp. 123-128，1996.2
- [6] 土橋正二：ガラス表面の物理化学，講談社，1979.5
- [7] 半導体デバイスの加速寿命試験運用ガイドライン，電子情報技術産業協会，2007.3
- [8] 石山央樹，腰原幹雄，中野一郎：アイリングモデルを利用した木造住宅における鉄釘の寿命予測，日本建築学会技術報告集，第 16 巻第 33 号，pp.453-456，2010.6
- [9] 計算の結果による温熱環境(結露の発生を防止する対策)に関する試験ガイドライン，住宅性能評価・表示協会，2009.11

本章に関連する既発表文献

- [10] 立松宏一，廣田誠一，鈴木大隆，谷口 円，布井洋二，鶴澤孝夫：グラスウールを対象とした熱，水分因子による長期性状変化に関する研究，日本建築学会環境系論文集，Vol.79，No.703，pp.753-762，2014.9
- [11] 立松宏一，廣田誠一，鈴木大隆，井上幹生，松村茂，松岡修，布井洋二，斎藤貴己，鶴澤孝夫：グラスウールの長期断熱性能に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集環境工学Ⅱ，pp.97-98，2013.8

第5章 設備仕様の実態と 一次エネルギー消費量による評価

5.1 はじめに

住宅の省エネルギーに向けては、特に北海道ではこれまで断熱性能の向上が重視され、第3章で推定したように、住宅の省エネルギー基準の U_A 基準の達成率は約9割に達している。また、断熱・気密施工も新築に関しては技術的な確立がほぼなされており、これまで知見のなかったグラスウール自体の長期耐久性についても、防湿層、通気層などの適切な施工が行われる限り問題は確認されないことを第4章で示した。

一方設備については、2012年10月改正の住宅の省エネルギー基準で、初めてすべての住宅を対象とした一次エネルギー評価が導入されたところであり、断熱一辺倒の省エネから、設備の選択を含めた省エネへとこれから転換を図っていく必要がある。

本章では、現在の新築戸建住宅で採用されている設備仕様を調査し、新たに導入された一次エネルギー消費量基準での評価を行うとともに、設備仕様の選択のされ方を明らかにすることを目的とする。本章の研究フローを図5-1に示す。

設備仕様の実態は、第3章と同様に、道内で新築戸建住宅の建設実績があるすべての事業者を対象に行う。対象とする設備は、暖房設備、給湯設備、および暖房用エネ

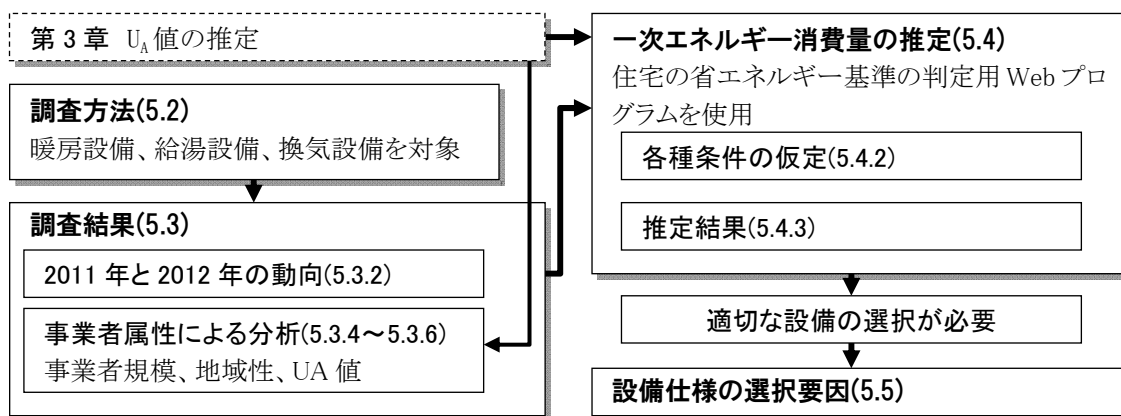


図 5-1 本章のフロー

エネルギーに影響する換気設備とする。そして、調査結果をもとに、調査を行った2年の動向の比較や、道内における地域性や事業者属性による採用傾向の分析を行う。さらに、第3章で推定した U_A 値を用いて住宅の省エネルギー基準判定用 Web プログラムによる一次エネルギー消費量の推定を行う。

また、今後、省エネルギーの面から適切な設備が選択されるよう、誘導を図っていく必要があると考えられることから、特に一次エネルギー消費量への影響が大きい暖房、給湯設備を対象に、誰がどのような観点で設備を選択しているのかについて、アンケートを実施し、選択要因の考察を行う。

なお、本章は道受託研究「北海道型ゼロエミッション住宅に関する研究」(受託者：北方建築総合研究所)の一環として実施したものである。また、各年の調査票の配布、回収および集計は、民間コンサルタントへの再委託により実施した。

5.2 調査方法

5.2.1 事業者調査

調査は、第3章の断熱仕様調査に用いた調査票に、設備仕様の設問も含めることで実施した。調査票は第3章の図3-2のとおりである。設備仕様については、2012年および2013年の2か年で調査を実施し、調査年の前年1月～12月に道内において戸建住宅で1棟以上の建築確認を受けた全事業者を対象とした。

設備仕様に関する調査項目は、暖房、給湯、換気の各設備種別で、住宅の省エネルギー基準の分類を参考に、選択肢を設け、同じ住宅で複数の設備を有する場合は複数回答を可能とした。また、1事業者で複数の仕様の有する場合は、施工棟数の多い順に2仕様（以下、順に「第1仕様」「第2仕様」という）を調査することとし、断熱仕様と設備仕様の組み合わせおよび設備仕様相互の組み合わせは関連付けせずに、断熱と各設備のそれぞれ仕様の建設棟数を調査した。さらに、アンケートとして設備の選択要因に関する質問を設けた（2012年新築住宅の調査のみ）。

本論文では2012年の新築住宅を主な分析対象とし、一部動態把握のため、2011年新築住宅の調査結果も扱う。

5.2.2 居住者 Web 調査

過去の設備仕様との比較を行うため、2012年2月に実施したインターネットアンケート調査の結果を引用する。本調査は、第5章で高断熱住宅との比較を目的として実施したもので、道内の戸建住宅の居住者2,000名を対象としている。関係する調査項目を表5-1に示す。

表 5-1 居住者 Web 調査の項目（関係分抜粋）

設問	回答の選択肢
Q1「あなたが現在の家に住み始めたのはいつですか」	年号を記載
Q30「あなたの家の主な暖房熱源を教えてください。 （いくつでも）」	電気／石油／ガス／太陽熱／ペレット／薪／わからない
Q32「あなたの家の主な給湯熱源を教えてください。 （いくつでも）」	電気／石油／ガス／太陽熱／ペレット／薪／わからない

5.3 設備仕様の調査結果

5.3.1 回答数

表 5-2 に第 1 仕様と第 2 仕様の回答数を示す（回答率は第 3 章の表 3-2 参照）。各調査項目とも、第 1 仕様の棟数が 8～9 割を占めている。すなわち、事業者ごとに建設する住宅の代表的な断熱・設備仕様を有していることになる。

表 5-2 第 1 仕様と第 2 仕様の回答数（2012 年新築）

2012年	第1仕様		第2仕様		計	
	回答社数	棟数	回答社数	棟数	回答仕様数	棟数
断熱仕様	506	6,507	173	747	679	7,254
暖房設備	506	5,490	237	1,447	743	6,937
給湯設備	500	5,551	217	1,372	717	6,923
換気設備	485	6,176	134	759	619	6,935

5.3.2 使用設備の内訳

図 5-2 に設備仕様の調査結果を示す。2011 年新築と 2012 年新築住宅の採用設備を比較すると、電気ヒーター式熱源機の温水暖房、電気蓄熱暖房器、電気式パネルヒーター、電気ヒーター温水器といった電気ヒーター式の機器の減少が顕著である。電気ヒートポンプ式の温水暖房、電気ヒートポンプ給湯器（愛称：エコキュート）は、両年で採用率に変化がほとんどないが、ルームエアコンディショナー（以下、「エアコン」という）は採用率が小さいものの、暖房設備としての採用が増加している。

一方、採用率が大きく増加しているのは、潜熱回収型のガス温水暖房、給湯機（愛称：エコジョーズ）である。1990 年ごろには道内で圧倒的多数を占めていた石油熱源の暖房、給湯設備は採用が極めて少なくなっている。なお、複数の暖房設備を使用しているケースのうち回答件数の多かった「電気式パネルヒーター＋エアコン」「電気式パネルヒーター＋電気蓄熱暖房機」の組み合わせ以外は「その他」に分類している。

換気設備はダクト式第三種が最も多く半数近くを占めており、次いでダクト式第一種（熱交換型）、壁付け式第三種が 2 割程度採用されている。

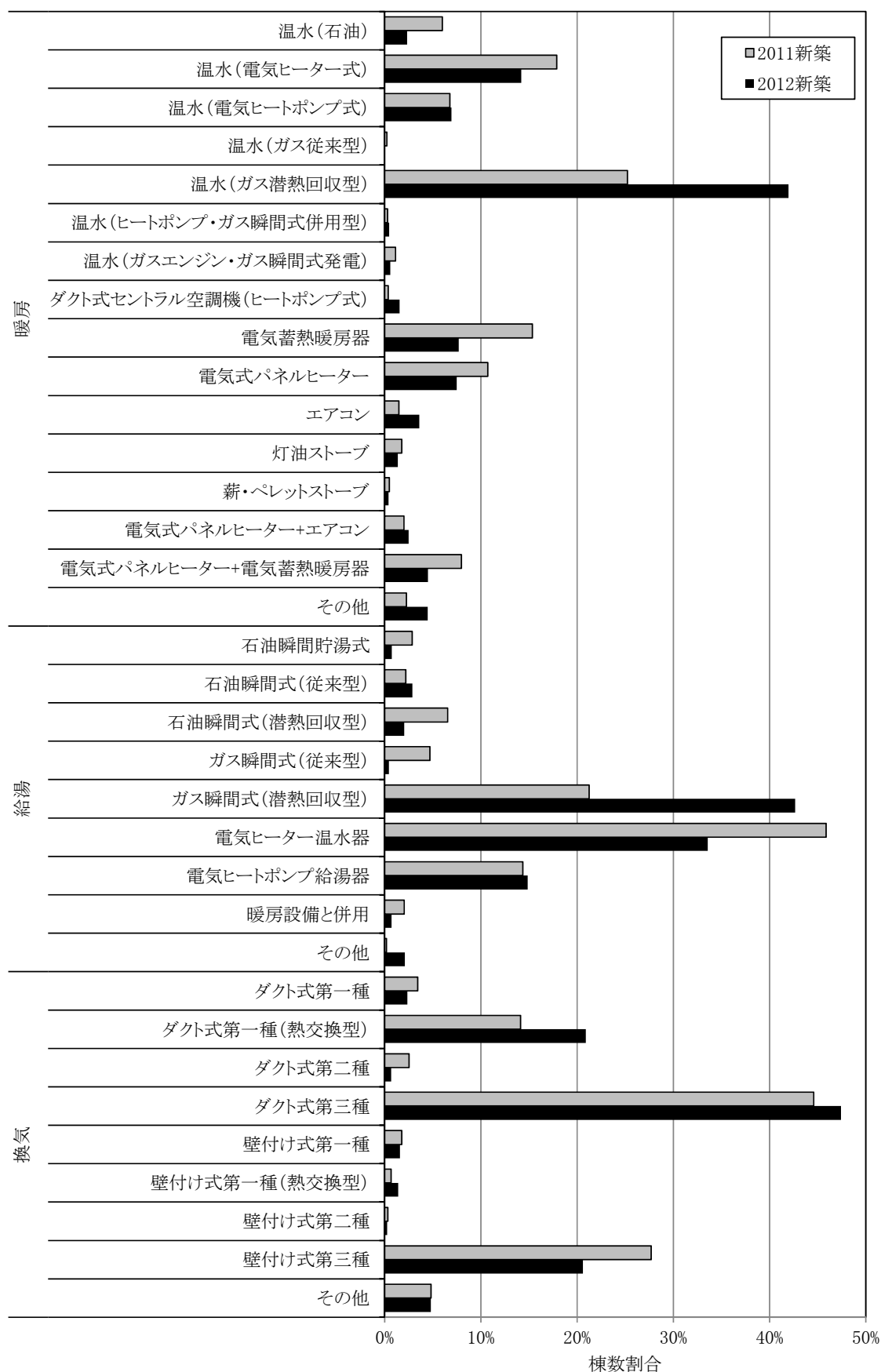


図 5-2 設備仕様の調査結果 (2011 年と 2012 年の比較)

5.3.3 使用熱源の推移

図 5-3 に居住者 Web 調査の結果と合わせた、暖房設備と給湯設備の熱源の推移を示す。居住者 Web 調査における居住年数は概ね建物の築年数に対応すると考えられる。ただし、中古住宅や貸家の場合、婚姻による転居が生じた場合などは築年数との違いが生じる。また、居住者による電気ストーブなどの機器の持ち込みや、経年による機器更新の影響も含まれていることに留意が必要である。

居住年数が 10 年を超えている住宅（建設年が 2002 年以前と推定される住宅）は、暖房、給湯ともに石油が 7～8 割を占めている。一方、電気熱源は居住年数 10 年以下の住宅から顕著な増加傾向がみられ、2011 年には 6 割を超えたが、2012 年は減少に転じている。石油熱源設備の減少と電気熱源設備の増加は、第 1 章で述べたように、2008 年をピークとする石油価格高騰が生じ、その際、電気料金の値上がりが相対的に小さく抑えられたためであると考えられる。

一方、2012 年に電気熱源設備が減少した分は、石油に回帰することなく、ガス熱源の設備に置き換わっている。ガス設備が増加した背景には、電気同様に、ガス料金が灯油に比べて安定していたこと（図 1-1 参照）、潜熱回収型の高効率機器の普及や、都市ガス供給地域での天然ガスへの転換が完了したことがあると考えられる。なお、北電の公表資料^[1]によれば、新設住宅（共同住宅含む）における全電化住宅採用率は 2009 年度の 54.1%がピークであり、以降、2010 年度 48.3%、2011 年度 41.5%、2012 年度 35.1%と減少傾向にある。全電化比率のピークが 2009 年だったことを考えると、その頃からガス熱源設備の普及が顕著となり、震災後の電力供給の逼迫によって普及がさらに加速したものと考えられる。

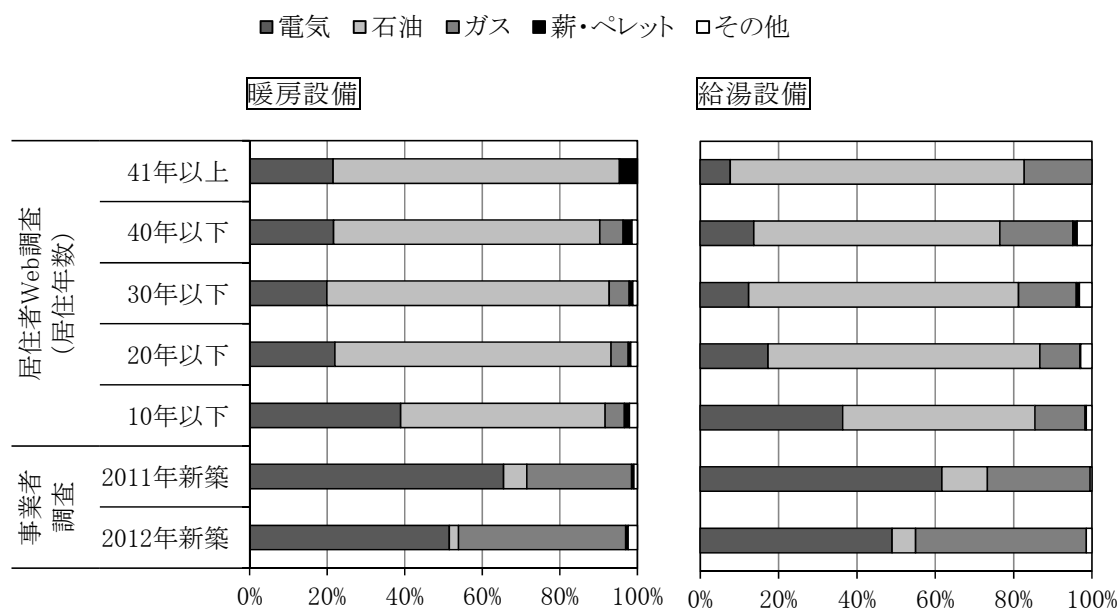


図 5-3 熱源の推移

5.3.4 事業者規模と設備仕様の関係

図 5-4 に、暖房、給湯、換気の各設備仕様について、事業者規模（年間建設棟数）、との関係を示す。図 5-4(a)に示すように、年間建設棟数が 10 棟を超える事業者で集中暖房（温水暖房とダクト式セントラル空調機が該当する）の採用が多い。集中暖房の多くは暖房・給湯併用のガス潜熱回収型熱源機を使用しており、結果としてこれらの事業者でガス給湯器の採用が多くなっている。電気ヒーターを使用した暖房設備は 51 棟以上の事業者で採用率が 2 割程度にとどまるが、その他の事業者では約 4 割で採用されている。エアコンは 4～10 棟の事業者を主として、中規模事業者での採用が目立つ。一方、灯油ストーブと石油給湯器は 3 棟以下の小規模事業者で比較的多く採用されている。

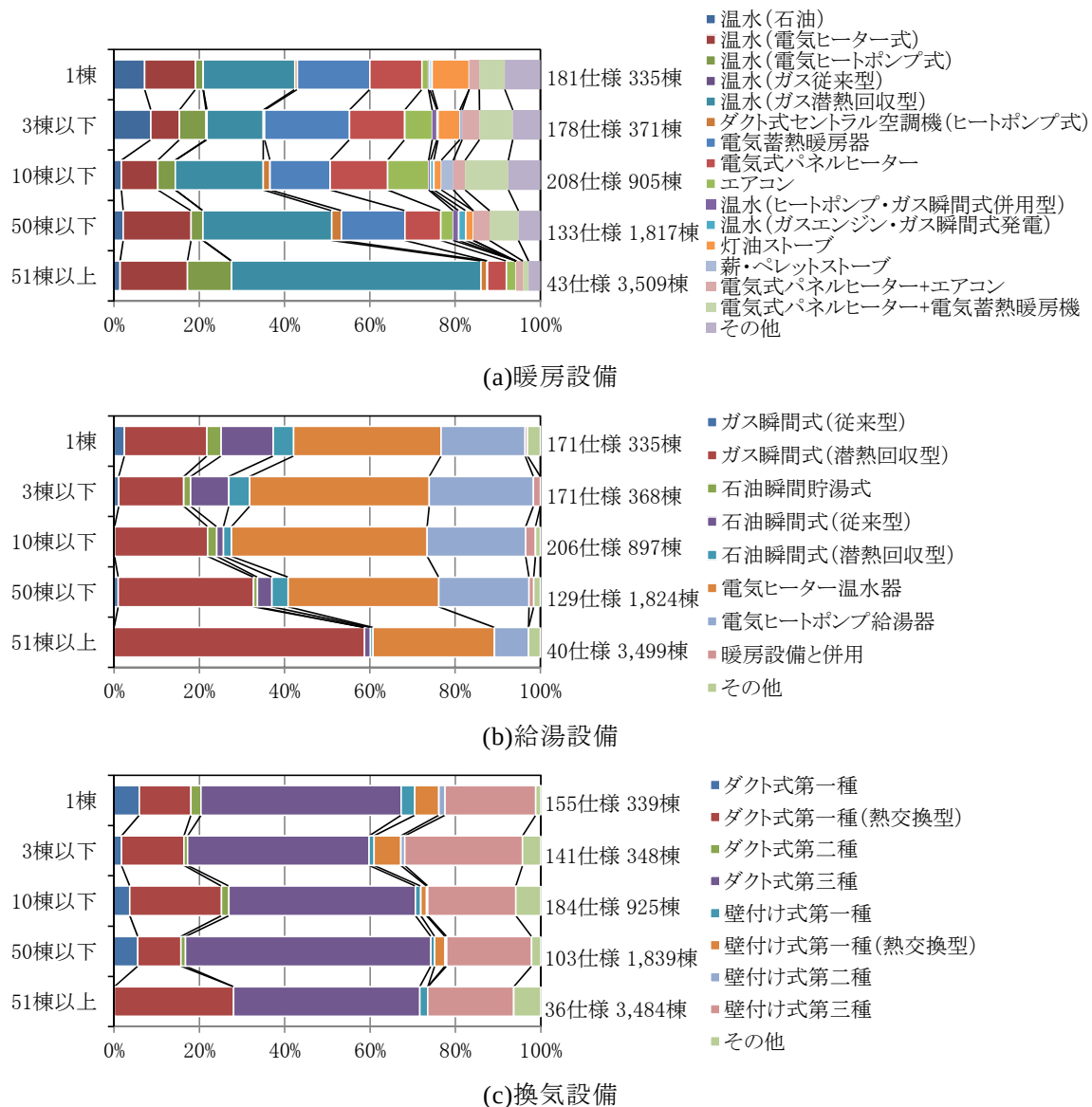


図 5-4 事業者年間建設棟数別の設備仕様（2012 年新築、棟数割合）

5.3.5 U_A 値と設備仕様の関係

図 5-5 には、事業者平均推定 U_A 値（第 1 仕様について第 3 章で推定した U_A 値の平均値）との関係を示す。1、2 地域の省エネ基準を満たす中で最も基準値に近い U_A 値 $0.46\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ 以下のカテゴリーとトップランナーと言える $0.31\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ 以下のカテゴリーでは、集中暖房やダクト式第一種換気設備など、比較的システム価格が高くなりやすい設備の採用が多く、住宅の断熱水準によって採用設備は双峰型の分布をなしている。これは、 $U_A \leq 0.46\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ のカテゴリーに大規模事業者の多くが含まれていることと、断熱性能の高い住宅では設備も高効率の機器が採用される傾向があることに起因すると考えられる。一方、 U_A 値が $0.46\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ を超える事業者は、電気ヒーター式の設備や壁付け式第三種換気設備など低価格の設備機器を比較的多く採用する傾向が見られる。

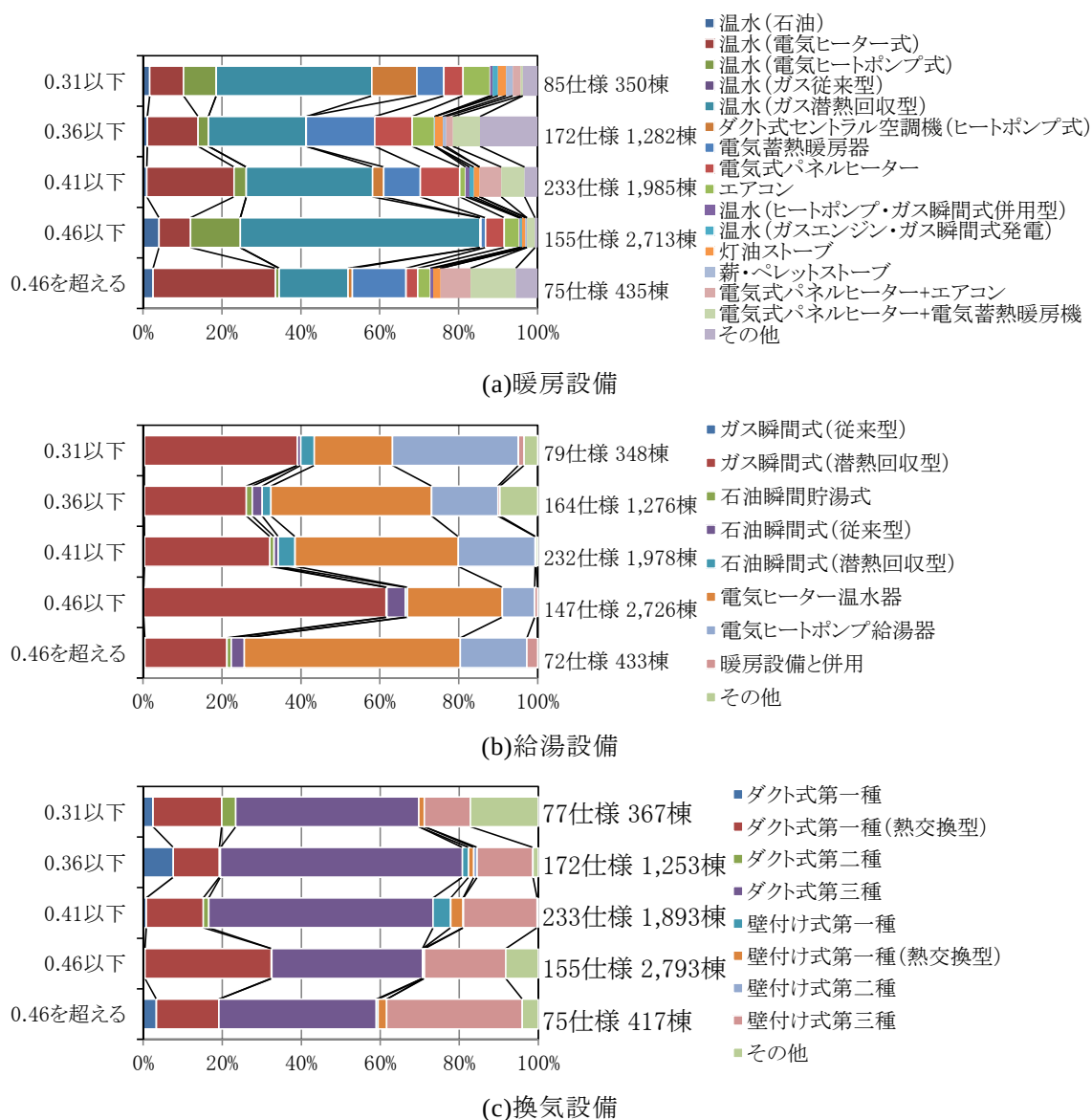


図 5-5 事業者平均推定 U_A 値別の設備仕様（2012 年新築、棟数割合）

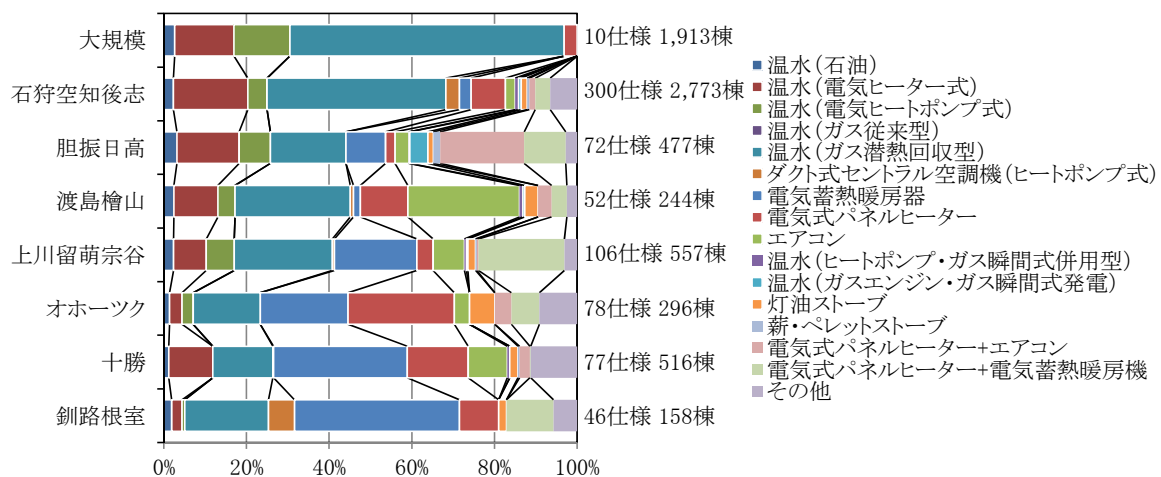
5.3.6 地域性

図 5-6 のとおり、集中暖房は建設地が全道にわたる大規模事業者のほとんど、また空知・石狩・後志の7割以上で採用されているが、その他の地域では半数以下であり、オホーツク、十勝、釧路・根室では2～3割と、地域差が極めて大きい。

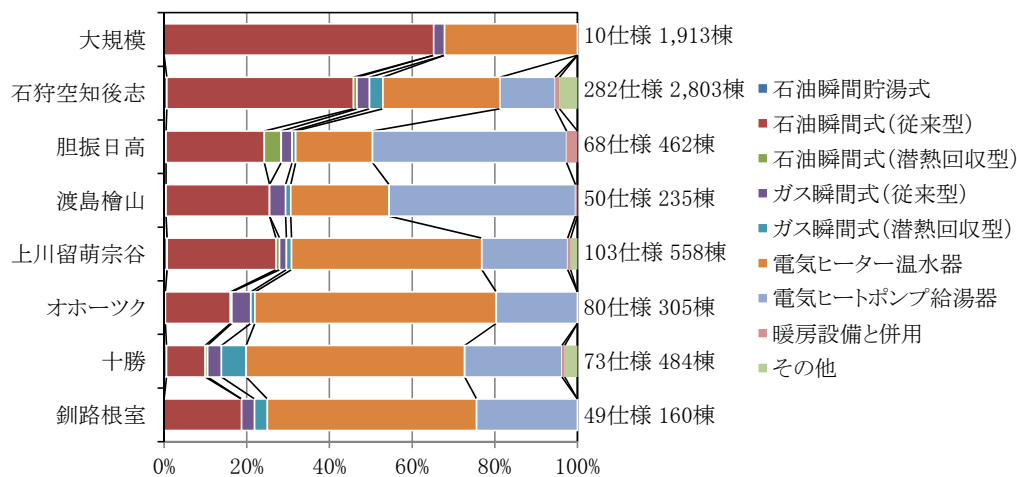
この地域差について参考とするため、都市ガスの普及率と価格、灯油価格、暖房デGREEーを表 5-3 に示す。都市ガスは LP ガスに比べて同一熱量で4～6割程度安価であるため^[2]、都市ガスの普及率がガスを熱源とする設備の使用割合に影響することが考えられる。そこで、表 5-3 に示す都市ガス普及率と都市ガス料金を説明変数として重回帰分析を行った結果を図 5-7 に示す。給湯設備については、都市ガス料金との相関がなかったため説明変数から除いた。都市ガスの普及率や価格がガス熱源設備の使用割合に影響を与えている可能性はあるものの、空知・石狩・後志では都市ガス普及率と比べてガス熱源設備の採用率が高い、釧路・根室は都市ガス普及率が最も高く料金も低いにもかかわらずガス熱源設備の採用率が低いなど、必ずしも都市ガスの供給状況だけでは説明できない点がある。灯油価格についてはガスに比べて地域差が少ない。

集中暖房の少ない地域について見ると、比較的温暖で暖房デGREEーが小さい胆振・日高、渡島・檜山においては、エアコンや電気ヒートポンプ給湯器（通称エコキュート）の使用割合が他地域に比べ多い。エアコンのみで暖房を行うケースは渡島・檜山で27%と突出しているが、胆振・日高でも「電気式パネルヒーター+エアコン」の組み合わせが20%を占めている。一方、上川、オホーツク、十勝、釧路・根室では、電気蓄熱暖房器、電気式パネルヒーターといった電気ヒーター式の暖房機器や電気ヒーター温水器を5～6割で採用している。

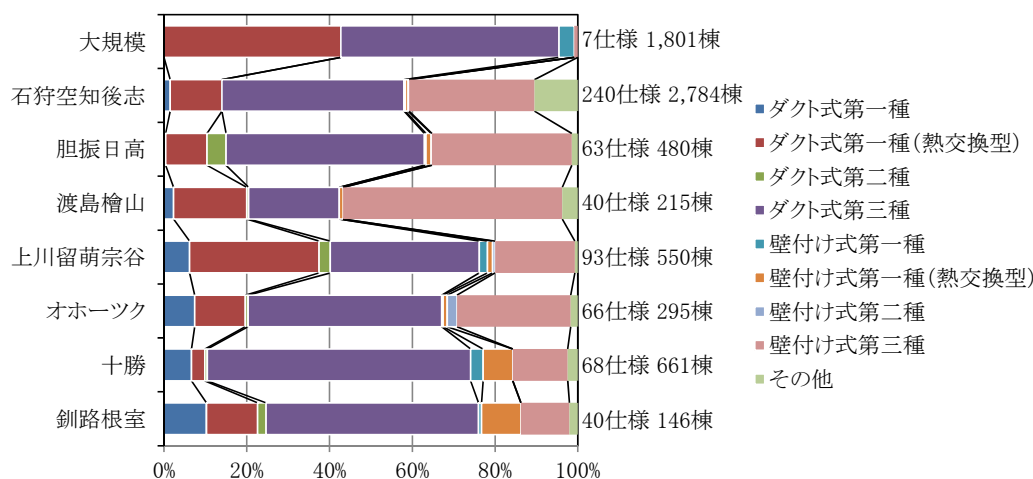
換気設備はダクト式が全体の過半を占めるが、渡島・檜山では約4割と少ない。ダクト式の第一種換気設備は大規模事業者と上川・留萌・宗谷で多く採用されている。



(a)暖房設備



(b)給湯設備



(c)換気設備

図 5-6 事業所在地別の設備仕様 (2012 年新築、棟数割合)

表 5-3 都市ガスの普及率・料金、灯油価格、暖房デグリーデー

振興局	都市ガス普及率	都市ガス料金 [円/月]	灯油価格 [円/L]	暖房デグリーデー D ₁₈₋₁₈ [K 日]
石狩・空知・後志	35%	9,393	89.7	3,587
胆振・日高	26%	10,094	93.1	3,849
渡島・檜山	29%	9,262	98.1	3,419
上川・留萌・宗谷	32%	8,396	93.9	4,270
オホーツク	12%	9,198	94.6	4,478
十勝	19%	11,346	90.9	4,247
釧路・根室	45%	7,932	95.9	4,264

算出根拠

都市ガス普及率： 文献^[3]による2011年度末のメーター取付け個数を2012年3月の住民基本台帳世帯数(供給区域外を含む当該振興局全域の世帯数)で除した値。

都市ガス料金： 文献^[2]による2009MJ/月(LPガス20m³の熱量相当)使用時の料金(税込)。複数の供給事業者数がある場合はメーター取付け個数による加重平均値とする。

灯油価格： 文献^[4]による多量買い、配達料込み、税込の価格。市町村別の値の世帯数による加重平均値とする。

D₁₈₋₁₈： 暖房温度18℃のときの暖房度日数。図3-3に記載の都市の標準年EA気象データ^[5]による。

目的変数: ガス熱源の暖房設備の使用割合

説明変数	偏回帰係数	p値
都市ガス普及率	0.52	0.37
都市ガス料金[円/月]	1.47E-05	0.78
定数項	-0.039	0.95
重相関係数	0.48	

目的変数: ガス熱源の給湯設備の使用割合

説明変数	偏回帰係数	p値
都市ガス普及率	0.48	0.30
定数項	0.10	0.45
重相関係数	0.46	

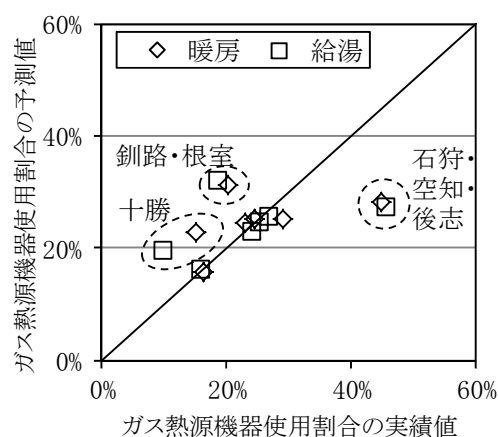


図 5-7 ガス熱源設備の使用割合に関する重回帰分析の結果

5.4 地域別の一次エネルギー消費量の推定

5.4.1 検討の目的

設備仕様の調査結果の事業者属性による分析から、地域による採用設備の傾向に違いが大きいことがわかった。特に電気ヒーター式の設備が多く採用されている地域では、一次エネルギー消費量が大きくなることが予想される。そこで、調査により把握した断熱・設備仕様により、地域別の一次エネルギー消費量の推定を行う。

5.4.2 各種条件の仮定と一次エネルギー消費量の推定方法

断熱仕様と暖房、給湯、換気の各設備仕様は互いに関連付けせずにそれぞれの代表仕様を調査しているが、表 5-2 を参照すると第 1 仕様の回答棟数が合計棟数の 8~9 割を占めているため、各事業者の第 1 仕様同士の組み合わせで検討しても概ねの傾向は把握できると考えられる。このことから、以下では各社の第 1 仕様で検討を行う。

計算条件を表 5-4 に示す。表 5-4(a)に記載のとおり、事業者ごとに断熱仕様（平均 U_A 値）、設備仕様および所在地の省エネルギー基準上の地域区分を反映させ、一次エネルギー消費量を計算する。事業者ごとの棟数は、各設備第 1 仕様の棟数のうち最小値を用いることとする。

計算には住宅の省エネルギー基準の告示に沿った計算方法として公開されている「住宅・住戸の省エネルギー性能の判定プログラム Version 1.12」^[6]を用い、表 5-4(b)のとおり計算条件を設定する。

外皮性能は U_A 値のほか、単位日射強度あたりの暖房期日射熱取得量(m_H 値)がパラメータとなる。暖房一次エネルギー消費量を U_A 値の関数として表すため、 m_H 値の計算に必要な外皮各部位の熱貫流率は調査データの線形回帰により U_A 値の一次関数として求めた。また、ガラスの日射熱取得率は本調査において Low-E 複層ガラスの採用率が 90%と大部分であったため、日射取得型の Low-E 複層ガラスの値 0.64 を用いることとした。取得日射量補正係数は、住宅の省エネルギー基準に準拠した簡易な計算方法として、庇の有無にかかわらず適用可能な定数として示されている 0.51 を用いる。なお、この係数は、暖房負荷が安全側（暖房負荷が増大する）で算出されるよう、日除けの条件が厳しく想定されている。方位別面積は図 3-8 に示す住宅の平均値を用いた。

設備の省エネルギー対策を行わないとした場合に特に効率が低く計算される石油およびガス熱源の給湯機については文献^[7]を参考に効率を設定し、その他の設備は「特に省エネルギー対策をしていない」を選択する。また、プログラムに選択肢がある設備の種類以外は「その他の機器」を選択する。

暖房一次エネルギー消費量は地域区分、設備仕様ごとに U_A 値の 2 次関数による近似式で算出する。図 5-8 にエアコンと温水暖房（ガス潜熱回収型）を例に、 U_A 値と暖房一次エネルギー消費量の関係を示す。暖房一次エネルギー消費量は U_A の 2 次関数によりよく近似できるため、各地域区分で U_A の最小値、平均値、最大値の 3 点で暖房一次エネルギー消費量を算出して 2 次関数の係数を求めておき、計算に用いた。近

似式の係数一覧を表 5-5 に示す。省エネルギー基準への適合は冷房、照明、家電などその他設備、発電量を加えた合計で判断されるが、ここでは調査対象とした暖房、給湯、換気に関する一次エネルギー消費量に限り計算を行う。

表 5-4 計算条件

(a)事業者ごとに変更する条件

項目	設定
U _A 値	第 1 仕様について図 3-8 の 157 通りの組み合わせで計算した平均 U _A 値
設備仕様	暖房、給湯、換気の各設備第 1 仕様の組み合わせ
地域区分	事業者が所在する市町村の省エネルギー基準上の地域区分 (大規模事業者は 2 地域に所在するとして扱う)
棟数	暖房、給湯、換気の各設備第 1 仕様の棟数の最小値

(b)共通の設定条件

分類	項目	設定
面積	主たる居室の面積[m ²]	57.11
	その他の居室の面積[m ²]	47.13
	床面積の合計[m ²]	135.08
	外皮面積[m ²]	347.3
日射取得	単位日射強度あたりの暖房期日射熱取得量(m _H 値) [W/(W/m ²)]	1 地域 5.61U _A +4.80 2 地域 5.48U _A +4.52 3 地域 5.49U _A +4.50
	蓄熱の利用	利用しない
暖房設備	温水式暖房の配管	断熱配管を採用する
	エアコン、灯油ストーブ、温水暖房の熱源機	特に省エネルギー対策をしていない
給湯設備	機器効率	石油従来型 77.8%、石油潜熱回収型 89.7%、ガス従来型 78.2%、ガス潜熱回収型 90.5%、その他機器は効率を入力しない
	ふろ機能の種類	ふろ給湯機(追焚あり)
	配管方式	先分岐方式
	水栓	2 バルブ水栓以外のその他の水栓
	節湯措置	採用しない
	浴槽の保温措置	高断熱浴槽を使用しない
	太陽熱利用給湯設備	採用しない
換気設備	換気設備の省エネルギー対策の有無および種類	特に省エネルギー対策をしていない
	換気回数	0.5 回/h
	第一種換気設備の場合における有効換気量率	1.00

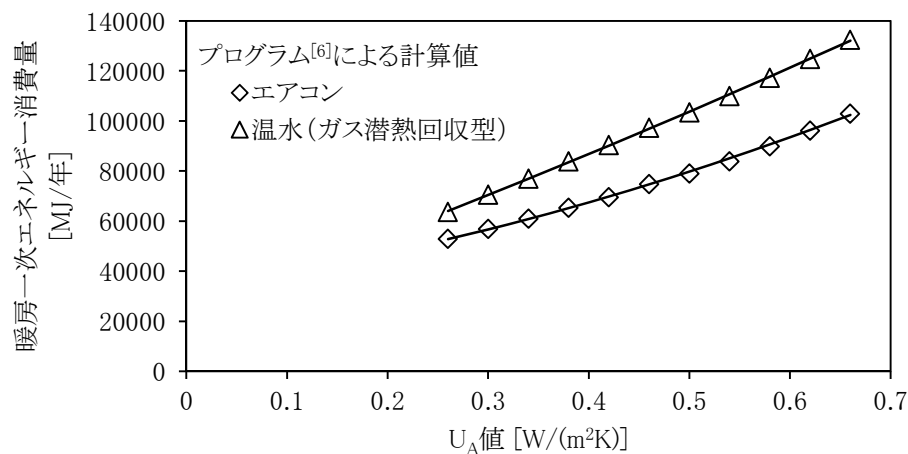


図 5-8 U_A 値と暖房一次エネルギー消費量の関係（1 地域、熱交換なし）

表 5-5 暖房一次エネルギー消費量の近似式の係数一覧

（a、b、c は図 5-8 中に記載の近似式の係数）

熱交換換気有無		なし			あり		
暖房種別	地域区分	a	b	c	a	b	c
温水(石油)	1地域	36,417	161,411	34,274	2,815	185,419	12,447
	2地域	54,057	54,057	54,057	54,057	54,057	54,057
	3地域	7,070	7,070	7,070	7,070	7,070	7,070
温水(電気ヒーター式)、電気式パネルヒーター	1地域	84,461	335,888	50,321	40,975	365,543	7,788
	2地域	54,057	54,057	54,057	54,057	54,057	54,057
	3地域	7,070	7,070	7,070	7,070	7,070	7,070
温水(電気ヒートポンプ式)	1地域	-39,222	180,307	16,750	-39,115	189,107	-1,357
	2地域	54,057	54,057	54,057	54,057	54,057	54,057
	3地域	7,070	7,070	7,070	7,070	7,070	7,070
温水(ガス従来型)	1地域	35,495	156,476	32,506	3,887	179,021	11,456
	2地域	54,057	54,057	54,057	54,057	54,057	54,057
	3地域	7,070	7,070	7,070	7,070	7,070	7,070
温水(ガス潜熱回収型)	1地域	30,673	141,711	25,173	9,931	156,135	7,314
	2地域	54,057	54,057	54,057	54,057	54,057	54,057
	3地域	7,070	7,070	7,070	7,070	7,070	7,070
ダクト式セントラル空調機(ヒートポンプ式)	1地域	-53,984	195,336	26,061	-32,052	192,499	8,147
	2地域	54,057	54,057	54,057	54,057	54,057	54,057
	3地域	7,070	7,070	7,070	7,070	7,070	7,070
電気蓄熱暖房器	1地域	103,728	358,204	50,340	59,553	387,668	4,104
	2地域	54,057	54,057	54,057	54,057	54,057	54,057
	3地域	7,070	7,070	7,070	7,070	7,070	7,070
エアコン	1地域	72,767	57,265	32,959	22,289	93,644	16,307
	2地域	54,057	54,057	54,057	54,057	54,057	54,057
	3地域	7,070	7,070	7,070	7,070	7,070	7,070
灯油ストーブ	1地域	26,774	93,476	26,311	1,731	118,579	9,239
	2地域	54,057	54,057	54,057	54,057	54,057	54,057
	3地域	7,070	7,070	7,070	7,070	7,070	7,070
その他の暖房設備機器	1地域	32,511	167,386	34,155	3,386	188,549	12,413
	2地域	54,057	54,057	54,057	54,057	54,057	54,057
	3地域	7,070	7,070	7,070	7,070	7,070	7,070

5.4.3 一次エネルギー消費量の推定結果

図 5-9 に推定した一次エネルギー消費量の内訳を示す。省エネルギー基準値は地域区分と暖房設備の仕様により異なるが、それぞれの棟数で加重平均した値を示している。電気ヒーター式の設備を使用すると一次エネルギー消費量が非常に大きくなる影響で、暖房、給湯とも平均値としては省エネ基準値を上回っている。換気設備も熱交換換気設備の影響により基準値を上回っている。

図 5-10 は事業者所在地別の一次エネルギー消費量推定値である。図中の*印は各カテゴリーにおいて、当該カテゴリーと当該カテゴリーを除くその他カテゴリーをまとめた標本の 2 群で母平均の差の検定を行った結果である。検定方法は Z 検定（両側）とした。なお、平均値や標準偏差は棟数を考慮して算出したが、p 値はサンプルサイズが大きくなるほど小さくなる傾向があるため、サンプルサイズは実回答数（471）として検定を行った。

地域による差は大きく、標準偏差の範囲内でも、消費量の少ない空知・石狩・後志、渡島・檜山と、主に省エネルギー基準の地域区分で 1 地域に所在する振興局では 3 倍以上の差がある。暖房、給湯、換気に関する一次エネルギー消費量の合計で省エネルギー基準値を満たす割合は、1、2、3 地域でそれぞれ 27%、60%、69%と推定され、1 地域で特に低い。

図 5-11 は特に一次エネルギー消費量が多い 1 地域について、電気ヒーター式の設備の使用有無と一次エネルギー消費量の関係を示している。暖房、給湯における電気ヒーター式設備の使用有無により、一次エネルギー消費量が大きく変わることがわかる。給湯、暖房のいずれかに電気ヒーター式の設備を使用している場合は、暖房、給湯、換気の合計で省エネルギー基準値を満たすケースがなかった。

以上のように、採用される設備の傾向の違いにより、一次エネルギー消費量に大きな地域差が生じ、特に電気ヒーター式の設備が多く使用されている地域では、省エネルギー基準を満たさない可能性のある住宅が多いことがわかった。

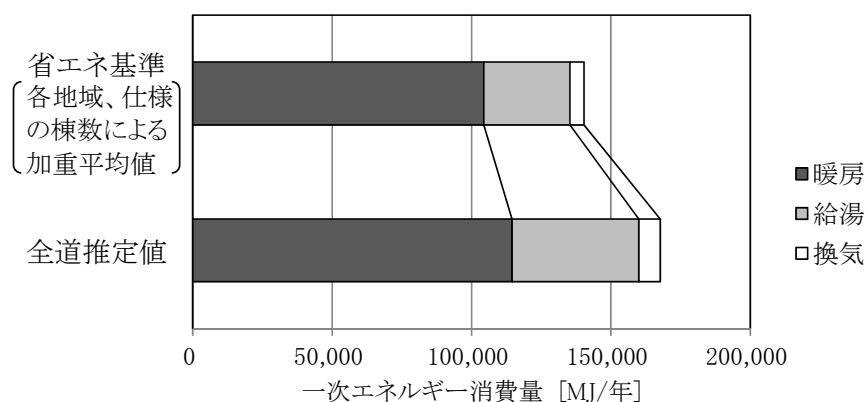


図 5-9 一次エネルギー消費量の内訳

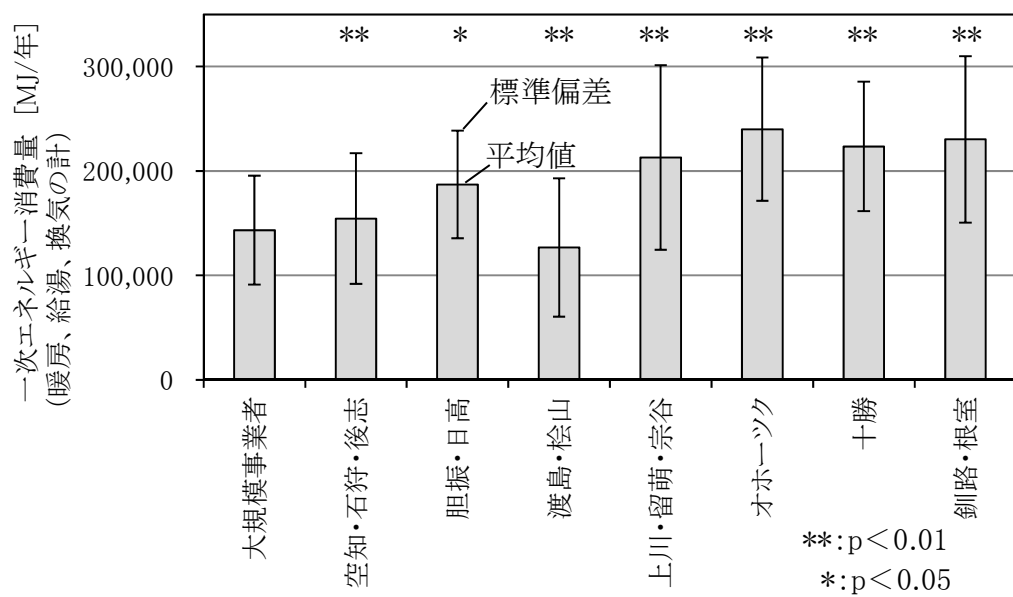


図 5-10 事業者所在地別の一次エネルギー消費量推定値

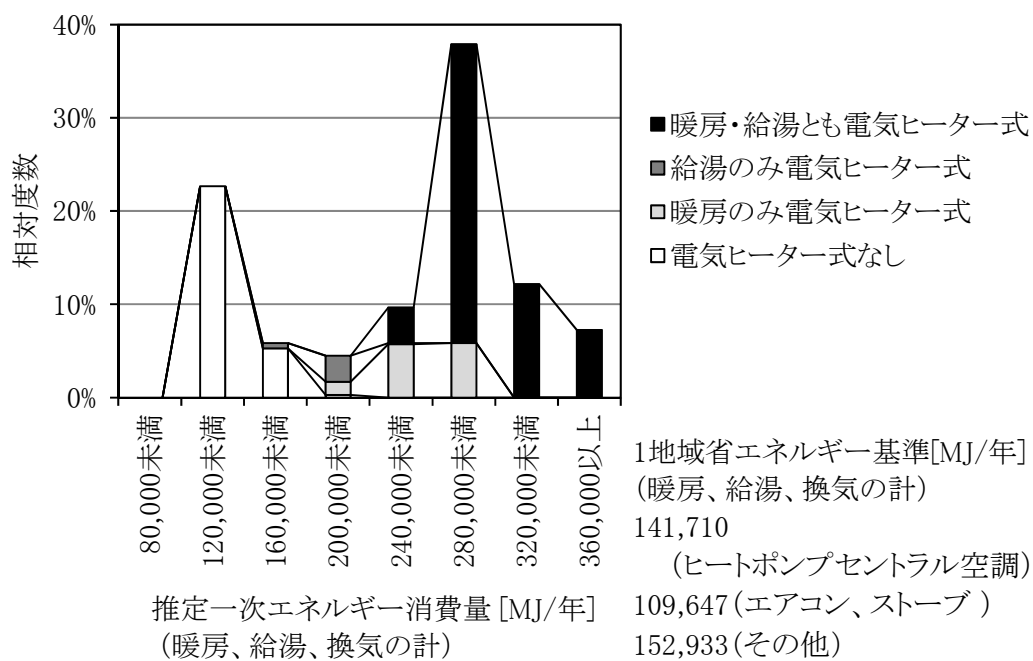


図 5-11 1 地域の設備仕様と一次エネルギー消費量

5.5 設備仕様の選択要因

5.5.1 設備仕様の選択要因に関する調査結果

先に見たように、設備仕様の地域性には気候（暖房デGREEデー）や都市ガスの供給状況が関係していると考えられる。一方、個々の住宅においては、いくつかの選択肢の中から、事業者や建築主の意向により採用する設備が決定されていると考えられる。

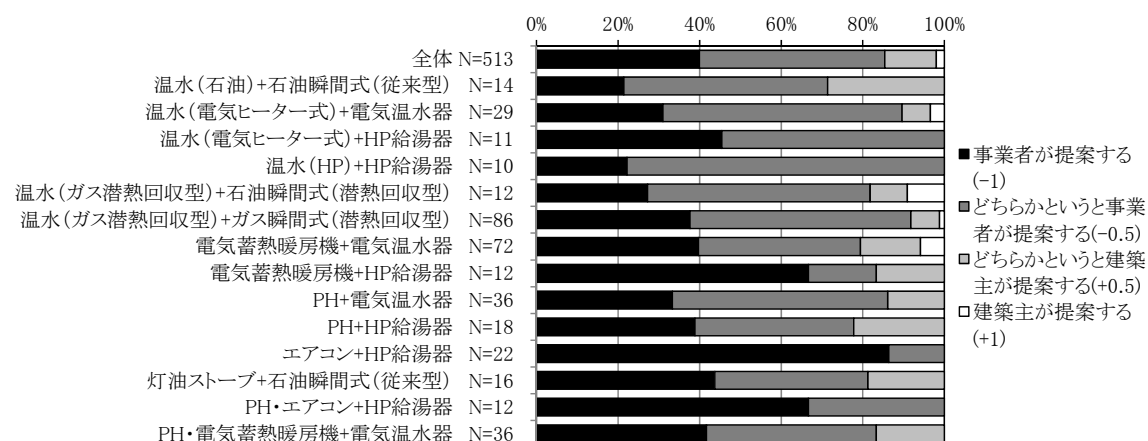
図 5-12 に設備（暖房・給湯）仕様の選択要因に関する調査結果を示す。全体集計のほか、設問では暖房と給湯設備を区別していないため、図 5-13 に示す各社第 1 仕様の設備の組み合わせのうち、10 社以上で回答のあった組み合わせを対象に、設備別の下回答も示している。

事業者を対象とした調査結果ではあるが、図 5-12 を見ると、全体で 85%が「事業者が提案」または「どちらかという事業者が提案」と回答している。暖房設備と給湯設備では同時に決まるケースが過半だが、どちらかが先に決まる場合は暖房が優先することが多い（図 5-12(b)）。最終決定要因はコスト関係が全体で 8 割以上を占めている（図 5-12 (c)）。

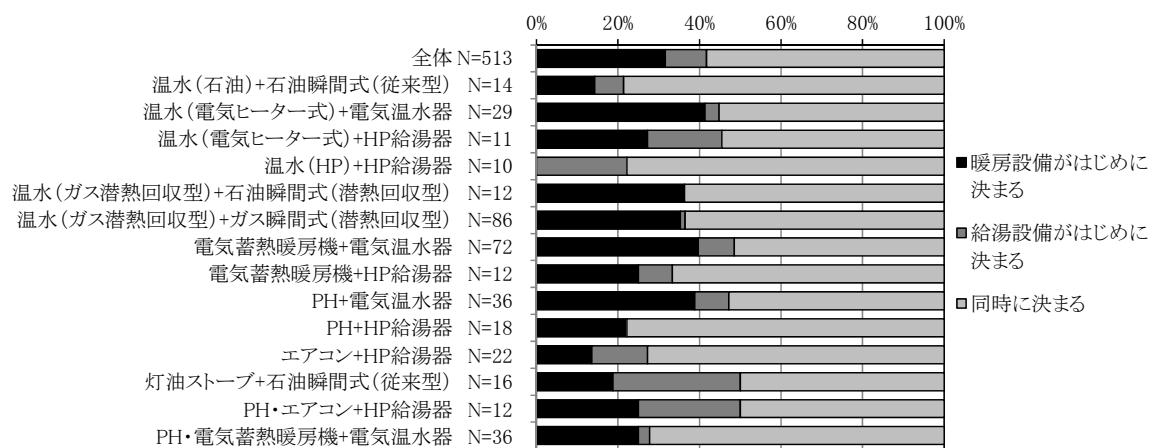
5.5.2 設備仕様の選択要因に関する考察

それぞれの設備仕様の提案者と最終決定要因の傾向を考察する。図 5-14 に、図 5-12 の凡例に括弧書きで示した点数により数値化した、設備仕様の提案者と最終決定要因の位置関係（平均値）を示す。最終決定要因については、イニシャルコストに相当する「設備価格・施工コスト」と運用コストに相当する「燃料代・電気代」のみに着目している。

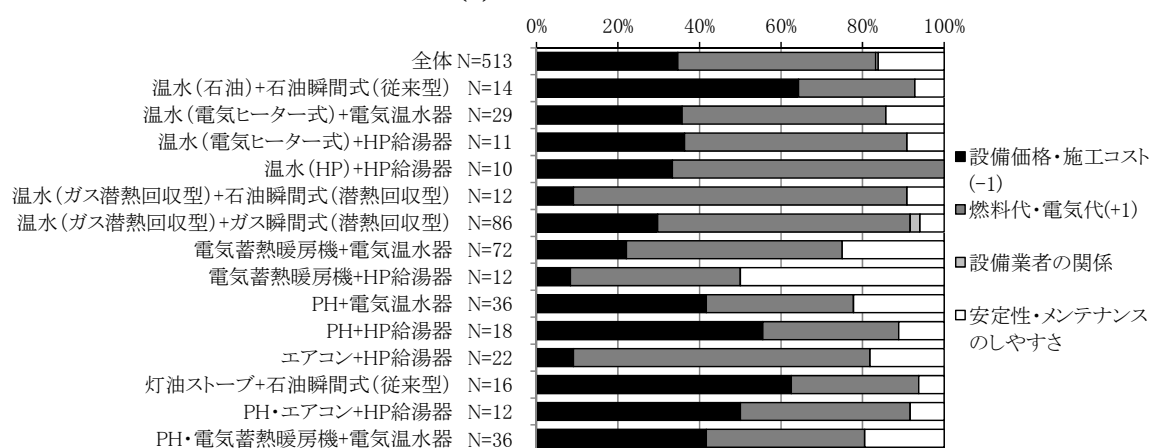
設備仕様の提案はいずれの組み合わせでも事業者側に主導権があることがわかる。特にヒートポンプ熱源の機器は事業者側の提案が強く、エアコンで暖房を行う方式はもっぱら事業者からの提案で選択されていると考えられる。一方、コストに関しては、設備によってイニシャルコストで決まる場合と運用コストで決まる場合とに分かれている。特にエアコンや電気ヒートポンプ給湯器は運用コストが最終決定要因になっているケースが多い。逆に、温水暖房（石油）や灯油ストーブ、電気式パネルヒーター、石油瞬間給湯器（従来型）など従来型の機器は、初期コストが優先しており、建築主側の提案によることが比較的多い傾向がわかる。



(a)設備仕様の提案者



(b)設備が決まる順序



(c)最終決定要因

図 5-12 設備（暖房・給湯）の選択要因（回答事業者の割合、N=513）

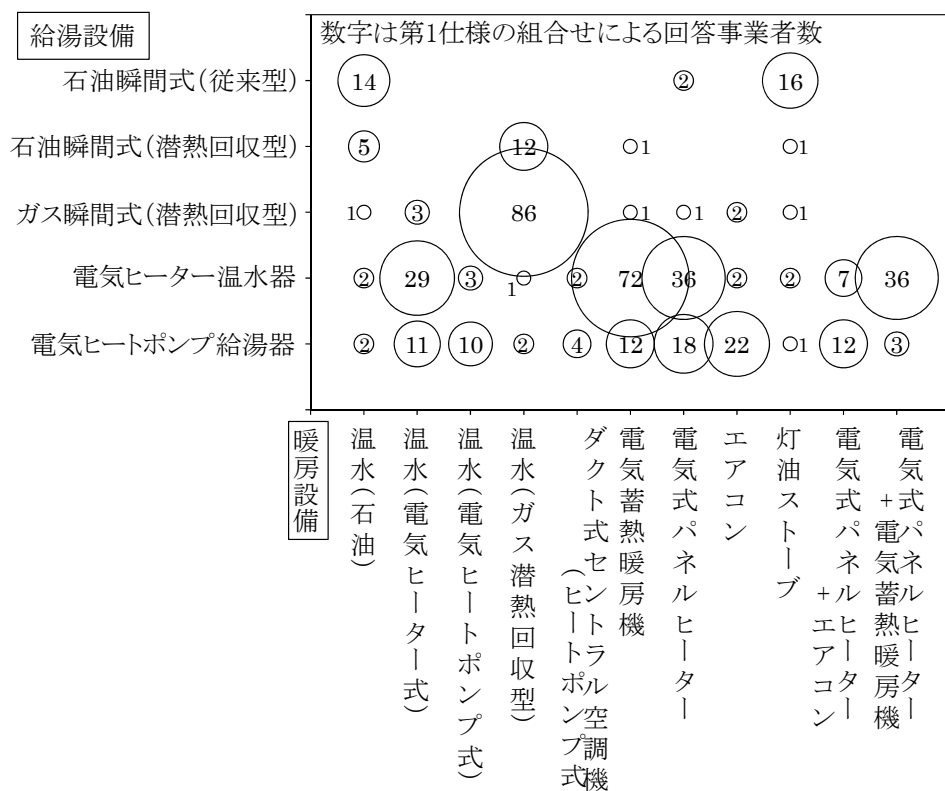
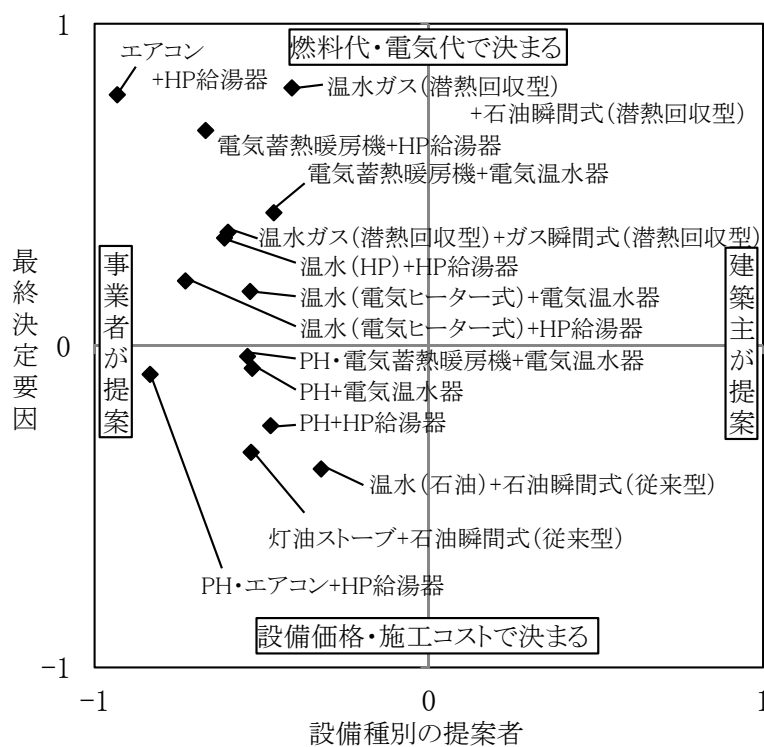


図 5-13 主な暖房・給湯設備の組み合わせと回答事業者数



凡例 暖房設備+給湯設備

略称 HP:電気ヒートポンプ、PH:電気式パネルヒーター、電気温水器:電気ヒーター温水器

図 5-14 暖房、給湯設備の組み合わせによる選択要因の傾向

5.6 本章のまとめ

本章では、北海道内の住宅建設事業者を対象に新築戸建住宅の設備仕様の実態調査を実施し、一次エネルギー消費量の推定と設備仕様の選択要因に関する考察を行った。得られた主な知見は次のとおりである。

- (1)2011 年新築と 2012 年新築の戸建住宅に採用された設備を比較すると、電気ヒーター式の設備の減少が顕著である一方、潜熱回収型のガス機器が大きく増加している。エアコンは採用率が小さいものの、暖房機器としての採用が増加している。
- (2)設備仕様と事業者属性との関係を分析した結果、特に事業者所在地による設備仕様の違いが大きく、空知・石狩・後志で集中暖房が多いこと、渡島・檜山、胆振・日高で暖房用のエアコンや電気ヒートポンプ給湯器の普及が進んでいること、上川・留萌・宗谷、オホーツク、十勝、釧路・根室で電気ヒーター式の機器が依然として多く採用されていることがわかった。
- (3)省エネルギー基準の判定用 Web プログラムを用いて各種仮定に基づき一次エネルギー消費量を推定した結果、暖房、給湯、換気の合計で省エネルギー基準を満たすのは、1、2、3 地域それぞれ 27%、60%、69%と、 U_A 値基準の達成率よりも低いことがわかった。特に、1 地域では電気ヒーター式の設備の使用割合が大きいことにより、一次エネルギー消費量が大きくなっている。
- (4)設備仕様の提案に際しては事業者に主導権があることがわかった。特に暖房用のエアコンなど新たな設備は事業者によって普及が進んでいると考えられることから、事業者に対して適切な情報を提供していくことが重要である。

参考文献

- [1] FACT BOOK2013, 北海道電力株式会社, p.23, 2013.9
- [2] 家庭用ガス料金一覧表, 経済産業省北海道経済産業局,
<http://www.hkd.meti.go.jp/hokpg/infopen/kateiyou.htm>, 更新 2013.12.5, 参照 2014.6.9
- [3] 第 120 回 (平成 25 年) 北海道統計書, 北海道
<http://www.pref.hokkaido.lg.jp/ss/tuk/920hsy/13.htm>, 参照 2014.6.9
- [4] 灯油・LP ガス・ガソリン価格調査 2012 年 3 月分, 北海道消費者協会,
<http://www.syouhisya.or.jp/research.html>, 参照 2014.6.9
- [5] 拡張アメダス気象データ 1981-2000, 日本建築学会, 2005.8
- [6] 住宅・住戸の省エネルギー性能の判定プログラム Version 1.12, 建築研究所,
<http://house.app.lowenergy.jp/>, 参照 2014.6.9
- [7] 平成 25 年住宅・建築物の省エネルギー基準解説書編集委員会: 平成 25 年省エネルギー基準に準拠した算定・判断の方法及び解説 (II 住宅), 建築環境・省エネルギー機構, 2013.5

本章に関連する既発表文献

- [8] 立松宏一，廣田誠一，高倉政寛，月館司，鈴木大隆，羽山広文：北海道における新築戸建て住宅の断熱および設備仕様調査 一次エネルギー消費量の推定と設備の選択要因に関する考察，日本建築学会環境系論文集，Vol.80，No.707，pp.67-77，2015.1
- [9] 立松宏一，廣田誠一，鈴木大隆，遠藤卓，福島明：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 13 北海道の新築住宅の断熱・設備仕様調査，日本建築学会北海道支部研究報告集，No.86，pp.229-232，2013.6
- [10] 立松宏一，高倉政寛，月館司，鈴木大隆：北海道内の新築戸建て住宅の断熱・設備仕様実態調査，その 2 設備種別の実態把握と決定要因に関する考察，日本建築学会大会学術講演梗概集，環境工学 I，pp.1005-1006，2014.9

第6章 住まい方と消費エネルギーの検証

6.1 はじめに

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、実態を検証する必要がある。特に、第3章で示したように、 U_A 値が $0.20\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ を下回るような極めて断熱性能の高い住宅も建設されており、オーバーヒートが生ずる懸念も既往研究^{[1][2]}で指摘されている。また、第5章で示したように、設備の多様化が進んでおり、それぞれの設備の実運用でのエネルギー性能を把握する必要がある。さらに、第1章で述べたように、地球温暖化防止や節電要請を背景とした切実な省エネルギーニーズから、一般消費者を対象とした省エネルギー診断や、HEMS の導入も進んでおり、住宅供給に関わる立場からも、住まい方とエネルギー消費量の実態を把握しておく必要がある。

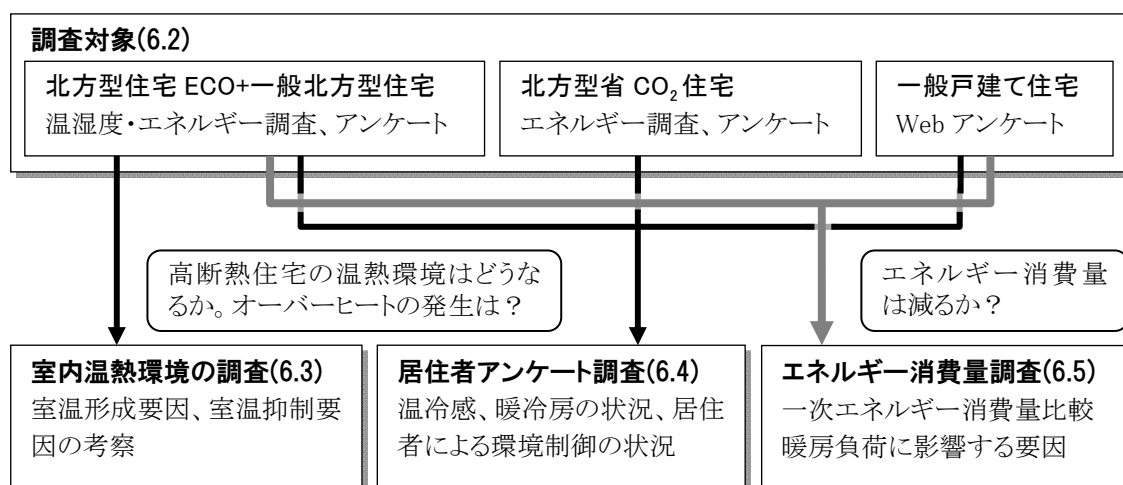


図 6-1 本章の研究フロー

図 6-1 に本章の研究フローを示す。実住宅を対象に、温熱環境や消費エネルギーの実態を調査しようとする場合、住まい方による結果のばらつきが大きいいため、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。

そこで本章ではまず、補助事業により建設事業者と居住者の協力を得ることができた、「北方型住宅 ECO」（2008 年度建設）をはじめとする高断熱戸建住宅 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う。

しかしながら、これらの住宅は建設当時の灯油価格高騰により、極めてオール電化比率が高く、しかもヒーター式の熱源機器が多く採用されたことから、断熱性能の向上にも関わらず、一次エネルギー消費量が増大する結果を招いた。

2011 年からプロジェクトを開始した「北方型省 CO₂ 住宅」では、「北方型住宅 ECO」の反省を踏まえ、断熱性能の強化や、設計時のエネルギー消費量確認など、一次エネルギー消費量を確実に減らすための対策を盛り込んだ。この「北方型省 CO₂ 住宅」についても、エネルギー消費量調査を実施し、省エネを目指した設計の効果を検証する。

また、温熱環境や住まい方に関する課題を把握するため、居住者アンケートを実施する。なお、「北方型住宅 ECO」も「北方型省 CO₂ 住宅」も、一般の住宅に比べると、かなり断熱性能が高いため、比較対象として一般の住宅居住者を対象にした Web アンケートを行う。

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。

なお、本章は道受託研究「新しい北方型住宅に関する研究」（2009～2010 年度）「北海道型ゼロエミッション住宅に関する研究」（2011～2013 年度）、「北海道に適した住宅用エネルギーマネジメントシステムの構築に関する研究」（2014 年度）（いずれも受託者：北方建築総合研究所）の一環として実施したものである。

6.2 調査対象

6.2.1 北方型住宅 ECO

本章の主な調査対象である「北方型住宅 ECO」の概要を表 6-1 に示す。北方型住宅は、北海道が研究機関や企業と連携し、北海道にふさわしい住宅の目標性能を提示し、1990 年から普及啓蒙を続けてきた社会運動である。「北方型住宅 ECO」は、北海道が道内の住宅建設事業者呼びかけて、断熱性能や耐久性など建物性能のさらなる強化と、2005 年に開始した家歴システム（北方型住宅サポートシステム）を中心としたシステム提案を行い、国土交通省が募集した超長期住宅先導的モデル事業に応募し、採択された。事業は 2008 年度から 2010 年度まで継続されたが、調査は初年度の 2008 年度建設住宅を対象に実施した。

断熱性能を要件は、当時の住宅の省エネルギー基準値である熱損失係数（Q 値） $=1.6\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ を上回る、Q 値 $1.3\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ 以下としている。これにより、暖房用エネルギー消費量を約 25%削減することを目指している。

表 6-1 「北方型住宅 ECO」の概要

事業概要	補助事業名		国土交通省超長期住宅先導的モデル事業
	応募事業提案名		北方型住宅 ECO モデル事業
	提案者		北海道建設部住宅局建築指導課
先導的提案の内容	構造躯体の耐久性		相当隙間面積 C 値： $1.0\text{cm}^2/\text{m}^2$ 以下 主要構造材等：含水率 20%以下の乾燥材または集成材使用
	超長期に利用される躯体において対応しておくべき性能	省エネルギー対策	熱損失係数 Q 値： $1.3\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ 以下 (Q 値算定上、換気による熱回収を含めず)
		高齢者等への配慮	階段の勾配：4 等級相当
		街並みや景観への配慮	外壁の後退距離：1m 以上
	記録の作成及び保存等		・ Web で作成できる北方型住宅サポートシステム ・ 建て主、住宅供給事業者、登録保管期間の三者による記録保管
本研究の調査対象住宅	建設年		2008 年度
	住宅の種類		木造新築戸建て、建設地は全道
	戸数		70 件（調査内容により有効回答数が異なる）
	断熱性能		平均 $Q=1.24\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ 、平均 $U_A=0.31\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$

6.2.2 北方型省 CO₂ 住宅

本章の後節で示すが、北方型住宅 ECO が建設された 2008 年当時の灯油価格高騰により、暖房、給湯設備の電化が進み、一次エネルギー消費量の増大を招くこととなった。その反省を踏まえ、2011 年度からの新規事業として提案した「北方型省 CO₂ 住宅」では、設計時に CO₂ 排出量の確認を行うこととした。なお、補助事業の趣旨から、CO₂ 排出量を指標としているが、考え方としては、2009 年制定の住宅事業主基準で採用されていた一次エネルギー消費量による評価と同様である。

「北方型省 CO₂ 住宅」の概要を表 6-2 に示す。設計時に Q 値、使用設備(暖房、給湯、換気、照明)の種類、太陽光発電設備容量などの設計仕様・条件を入力することにより、省 CO₂ の削減目標の達成状況が確認できる設計支援ツールを用い、CO₂ 排出量を当時の北方型住宅レベルと比較し 60%減とすることを要件としている。Q 値の要件もより厳しく、1.2W/(m²K)以下としている。

なお、基準となる「当時の北方型住宅レベル」の CO₂ 排出量は、Q 値=1.6W/(m²K)で、暖房の熱源種別が電気ヒーター77%、電気ヒートポンプ 7%、ガス 7%、灯油 6%、給湯は電気ヒーター67%、電気ヒートポンプ 16%、ガス 7%、灯油 4%として加重平均で求めている。また、太陽光発電量は全量 CO₂ 削減量として計上できることとしている。

表 6-2 「北方型省 CO₂ 住宅」の概要

事業概要	補助事業名	国土交通省住宅・建築物省 CO ₂ 先導事業
	応募事業提案名	低炭素社会の実現に向けた北方型省 CO ₂ マネジメントシステム構築プロジェクト (PPP による省 CO ₂ 型住宅の全道展開に向けた取組み)
	提案者	北方型住宅 ECO 推進協議会
先導的提案の内容	躯体の断熱・気密性能	相当隙間面積 C 値：1.0cm ² /m ² 以下 熱損失係数 Q 値：1.2W/(m ² K)以下 (Q 値算定上、換気による熱回収を含めず)
	省エネルギー設備	CO ₂ 排出量を現状の北方型住宅レベルと比較し 60%減とすること
	創エネルギー設備	太陽光発電：原則として 4kW 以上設置
本研究の調査	建設年	2011～2013 年度
対象住宅	住宅の種類	木造新築戸建て、建設地は全道
	戸数	39 件 (調査内容により有効回答数が異なる)
	断熱性能	平均 Q=1.16W/(m ² K)、平均 U _A =0.29W/(m ² K)

6.2.3 本章の調査対象住宅

本章では調査件数の多い「北方型住宅 ECO」を主として分析、考察を行い、エネルギー消費量については「北方型住宅 ECO」と「北方型省 CO₂住宅」の比較を行う。

またこれらの住宅は、現在道内で一般に新築されている住宅と比較して、断熱性能が高いため、以下の一般住宅を調査対象に加えた。

(1) 一般北方型住宅（25 件）

「北方型住宅 ECO」の施工事業者が建設した一般の新築住宅。2005 年から 2008 年にかけての建設で、断熱性能は、平均 $Q=1.52\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ 、平均 $U_A=0.43\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ である。これらの住宅については、「北方型住宅 ECO」と同じ内容で調査を実施し、一体として分析に用いた。

(2) 一般の戸建住宅

新旧含めた戸建て住宅との比較のため、道内の一般の戸建て住宅居住者を対象とした Web アンケートを実施した。回答者は 2,000 名、調査実施は 2012 年 2 月である。

なお、調査対象住宅の多くは U_A 値が導入された 2012 年 10 月の新しい住宅の省エネルギー基準施行前に設計されており、補助事業の要件も Q 値で規定されていることから、本章では、断熱性能の指標として Q 値を主に用いる。図 6-2 に調査対象住宅の Q 値と U_A 値の対応を示す。なお、基礎断熱の場合の基礎外周あたりの熱貫流率は、従来の計算式を用いた事業者による計算値を用いて U_A 値に換算している。また、北方型住宅 ECO については、統一した考え方で Q 値の再計算を行った結果、一部の住宅で Q 値が補助要件の $1.3\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ を上回っている。

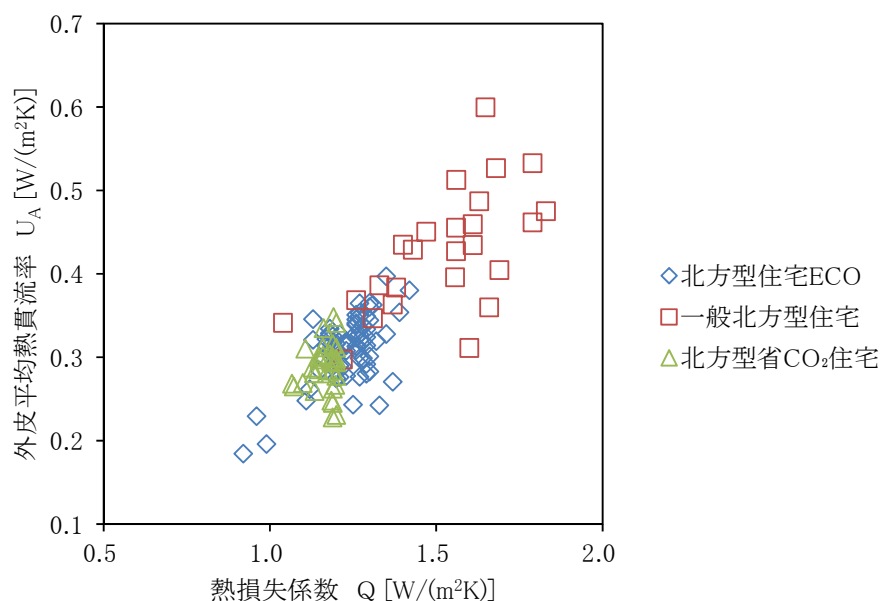


図 6-2 調査対象住宅の Q 値と U_A 値の対応

本章の各節と以上の調査対象住宅の関係を、表 6-3 にまとめる。詳細な調査方法はそれぞれ該当する箇所で記述する。

表 6-3 調査対象住宅と調査内容の関係

本章の節	調査対象	調査概要
6.3 室内温熱環境の調査	北方型住宅 ECO（一般北方型住宅を含む）（N=95）	2009 年 5 月からの 1 年間の居間、主寝室、脱衣室（一部のみ）の温湿度測定 「6.3.6 室温の形成要因」は居住者アンケートの結果を引用
6.4 居住者アンケート調査	一般の戸建住宅（N=2,000）	Web アンケートを 2012 年 2 月に実施
	北方型住宅 ECO（一般北方型住宅を含む）（N=81）	居住 1 年目の 2010 年 2 月と 3 年目の 2012 年 2 月に実施
	北方型省 CO ₂ 住宅（N=29）	入居後 1 年目の夏と冬に実施
6.5 エネルギー消費量調査	北方型住宅 ECO（一般北方型住宅を含む）（N=67）	2009 年 4 月から 1 年間の月別エネルギー消費量を調査
	北方型省 CO ₂ 住宅（N=17）	入居後 1 年間以上の月別エネルギー消費量を調査
6.4.5 暖房負荷に影響を与える要因の考察	北方型住宅 ECO（N=11）	2011 年 8 月に換気量測定実施

N は最大のサンプル数を示しており、調査項目により有効回答数は異なる

6.3 室内温熱環境の調査

6.3.1 調査の目的

暖房負荷低減のためには、断熱性能の向上が重要であるが、断熱性能の著しく高い住宅では、外気温の高い夏季や、太陽高度が低くなって日射取得が増える中間期に、（オーバーヒート）を引き起こす可能性が指摘されている^{[1][2]}。また、暖房期においても、暖房負荷に対し設備容量が過大である場合には、室温の調整が難しくなることが懸念される。したがって、調査の第一の目的は、高断熱化によって、温熱環境に過熱などの支障が生じないかを確認することである。

また、高断熱住宅における暖房負荷の予測を正確に行うためにも、温度の実態把握が必要であり、温度の実態によっては、住まい方の改善が今後の課題なることも考えられる。

これらの目的のため、本節では室温の実測調査を行い、実態の把握、室温の形成要因の考察を行う。

6.3.2 調査対象住宅

調査対象は、住宅の熱性能による温熱環境やエネルギー消費量の違いを把握するため、「北方型住宅 ECO」70 件に、「一般北方型住宅」25 件を加えた計 95 件とした。竣工年は 2005 年以降で、うち 75 件が 2008 年 4 月以降に竣工している。

建設地は図 6-3 に示すように、道内 31 市町村に分布している。Q 値は $0.92 \sim 1.83 \text{W/m}^2\text{K}$ の範囲にあり、平均値は $1.31 \text{W/m}^2\text{K}$ である。



図 6-3 調査対象住宅の分布

6.3.3 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6-4の注意事項を伝えた上で当該住宅の建設事業者に依頼した。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6-5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、図面および熱損失係数計算書から、床面積、Q値、各部位熱貫流率、各方位開口部面積、ガラス仕様などを調査した。

(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（エアコン）有無や冬季の服装に関して調査した。有効回答数は75件である。

表 6-4 設置上の注意事項

- ①床から概ね1 m～2 m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。

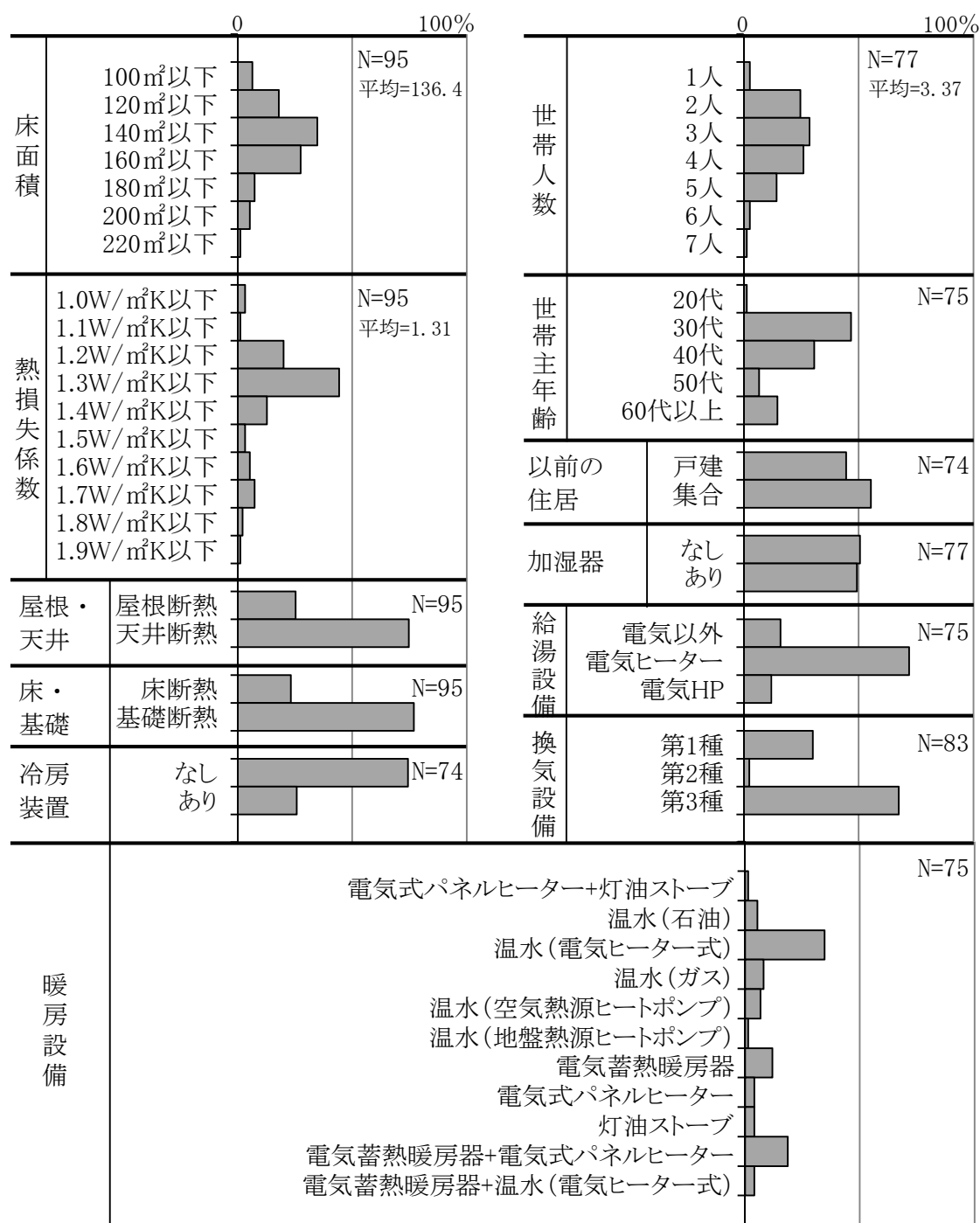
表 6-5 月別の温湿度実測調査対象住宅数

	2009年							2010年				
	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月
居間	90	91	93	94	94	89	87	77	77	68	27	26
主寝室	89	91	93	94	94	88	87	75	75	66	26	25
脱衣室	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25

6.3.4 調査住宅の属性

図 6-4 に調査対象住宅の主な属性を示す。総務省統計局の平成 20 年住宅・土地統計調査によると、北海道における一戸建て住宅の平均延べ床面積は 122.9m²、平均世帯人数は 2.6 人であり、調査対象住宅の平均値はいずれもこれらの値を上回っている。

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



N:サンプル数、HP:ヒートポンプ

図 6-4 調査住宅の属性

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。当然であるが新築住宅であるため、いわゆるマイホーム購入世代が多く、居住者のライフステージに偏りがあることに留意が必要である。

暖房は電気熱源を採用している住宅が 83%と多く、中でも蓄熱式暖房機、電気式パネルヒーター、温水暖房（電気ヒーター式）といった電気ヒーター式の暖房給湯設備の使用割合が 75%と高いことが本調査対象住宅の特徴である。これは、調査対象住宅が灯油価格の著しい上昇傾向が続いていた時期に建設されたことによると考えられる。給湯設備も同様に、電気ヒーター式の温水器が 72%を占める。

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。

冷房装置、加湿器の有無は居住者アンケートにより把握した結果である。冷房装置は 26%、加湿器は約半数の住宅で設置している。

6.3.5 温度の調査結果

(1) 札幌市および旭川市内の住宅の調査結果

表 6-6 に、札幌市およ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 6-5 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。

表 6-6 通年測定を行った札幌市および旭川市内の調査対象住宅

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

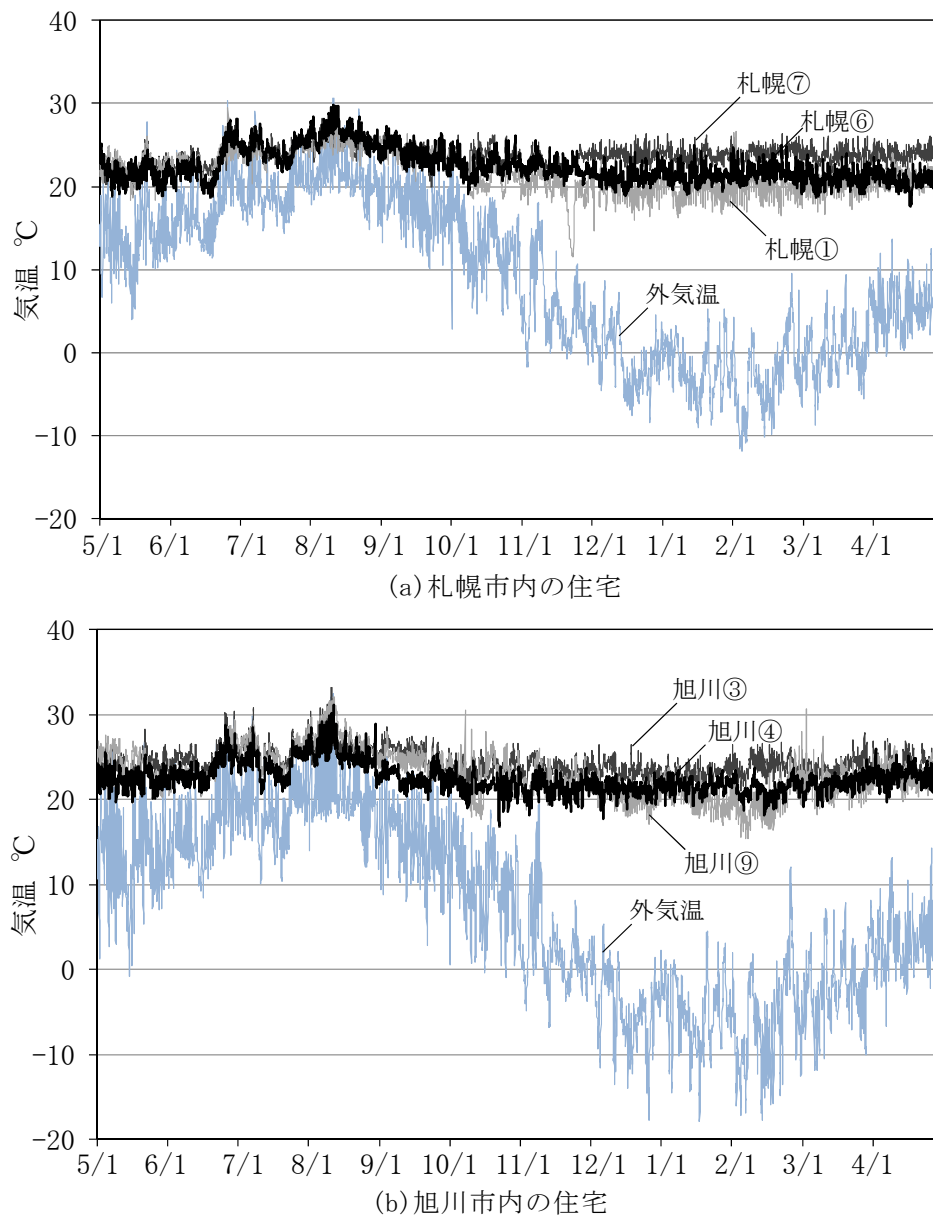
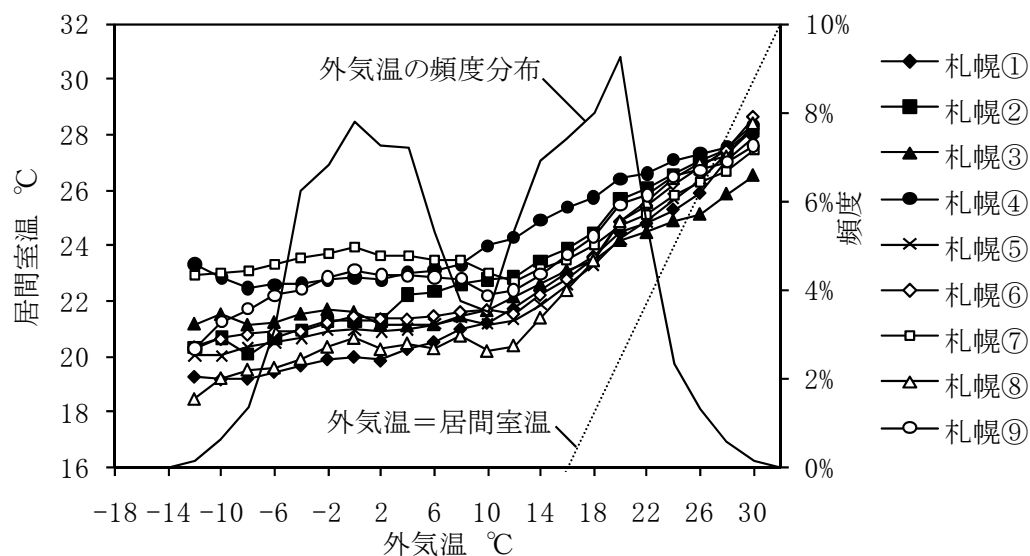


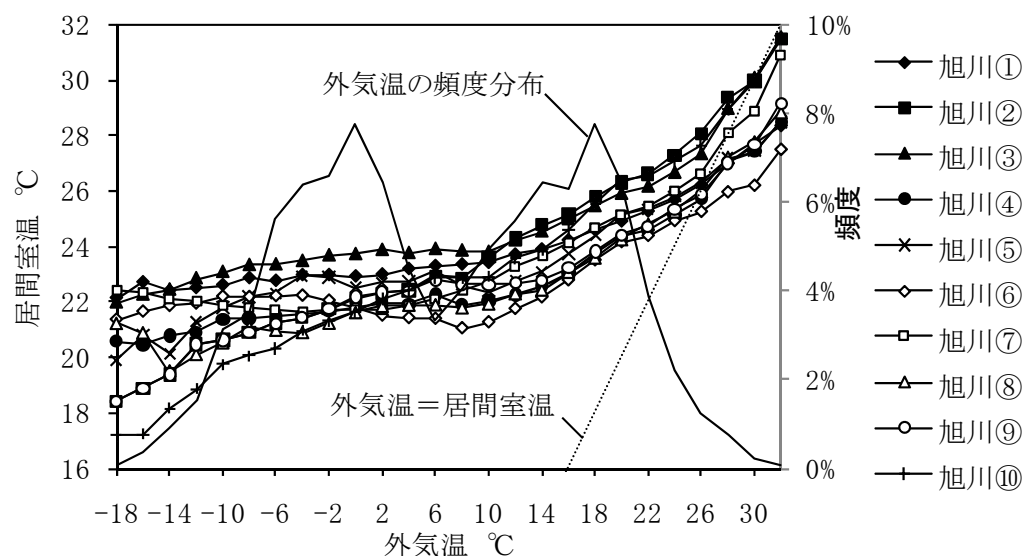
図 6-5 居間の室温の測定事例

次に、表 6-6 に掲げた住宅の外気温と居間室温の関係を図 6-6 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



(a) 札幌市内の住宅



(b) 旭川市内の住宅

図 6-6 外気温と居間の室温の関係

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、外気温 30℃以上ですべての住宅の室温が外気温よりも低くなっている。

(2) 全住宅の調査結果

図 6-7 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^[3]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°C 低く、標準偏差が 0.6°C 大きい。

図 6-8 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 $2^{\circ}\text{C} \sim 3^{\circ}\text{C}$ 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、設備仕様などとの関係を検証したところ、非暖房期においてはQ値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。

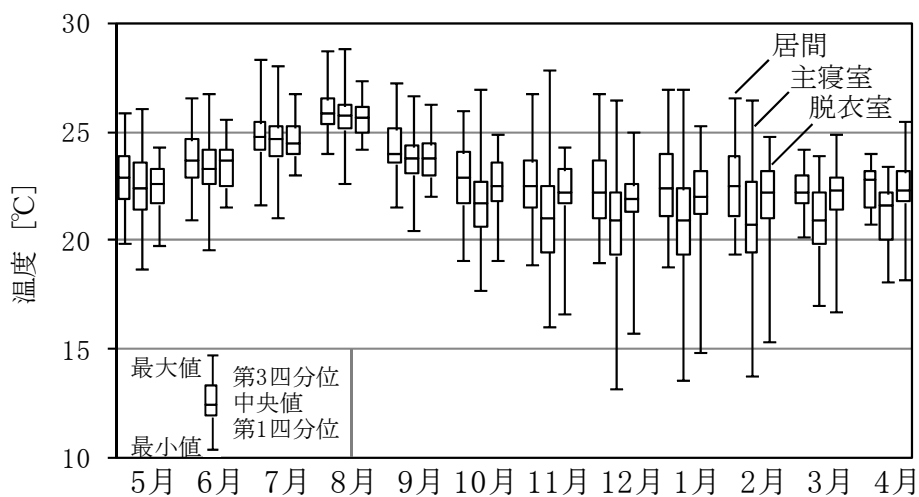


図 6-7 温度の月別統計値（全住宅）

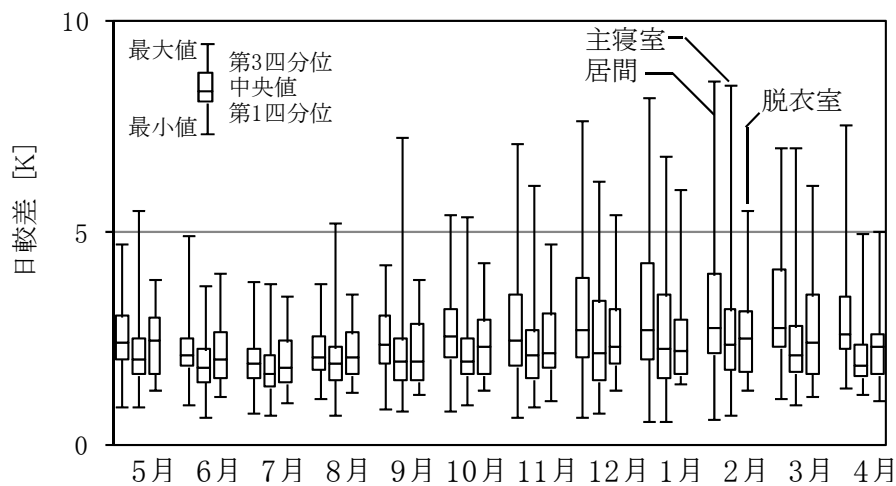


図 6-8 室温の日較差の月別統計値（全住宅）

(3) 暑さのピークの出現時期

図 6-9、図 6-10 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。既往研究^[1]では 9 月に最高温度が生じるという検討結果であったが、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。

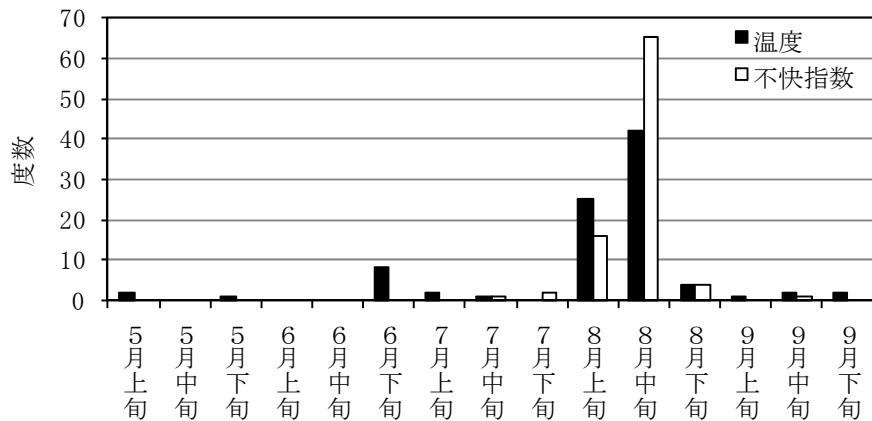
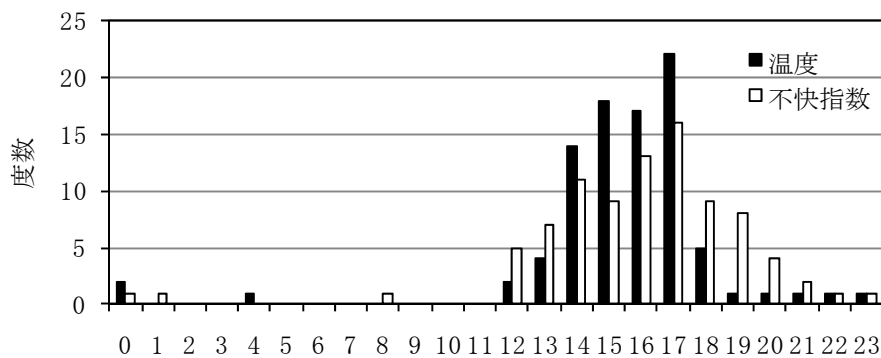


図 6-9 居間室温・不快指数の最高値の出現時期



不快指数 $DI = 0.81t_a + 0.01rh(0.99t_a - 14.3) + 46.3$ 、 t_a : 気温 (°C)、 rh : 相対湿度 (%)

図 6-10 居間室温・不快指数の最高値の出現時刻

6.3.6 室温の形成要因

(1) 自然室温との比較

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、人体発熱および家電などの発熱を計上した。

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^[4]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)^[5]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^[6]。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) および在室率 (0.5) を乗じて求めた。家電など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 Q 値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。

自然室温と実測室温の比較

分析の対象期間は図 6-11 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 6-6 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 月下旬および 7 月中旬、並びに端境期の 10 月下旬を分析対象に加えた。

上記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 6-12 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などによる温度降下や、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。

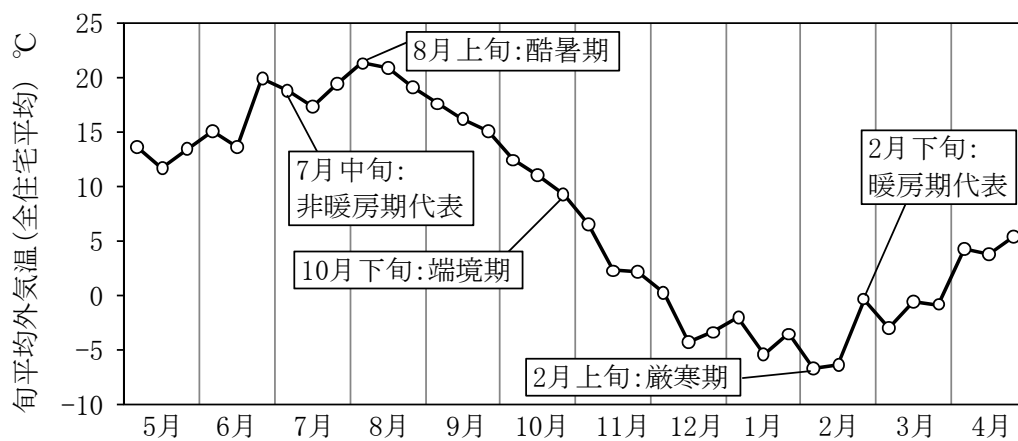


図 6-11 分析対象期間の選定

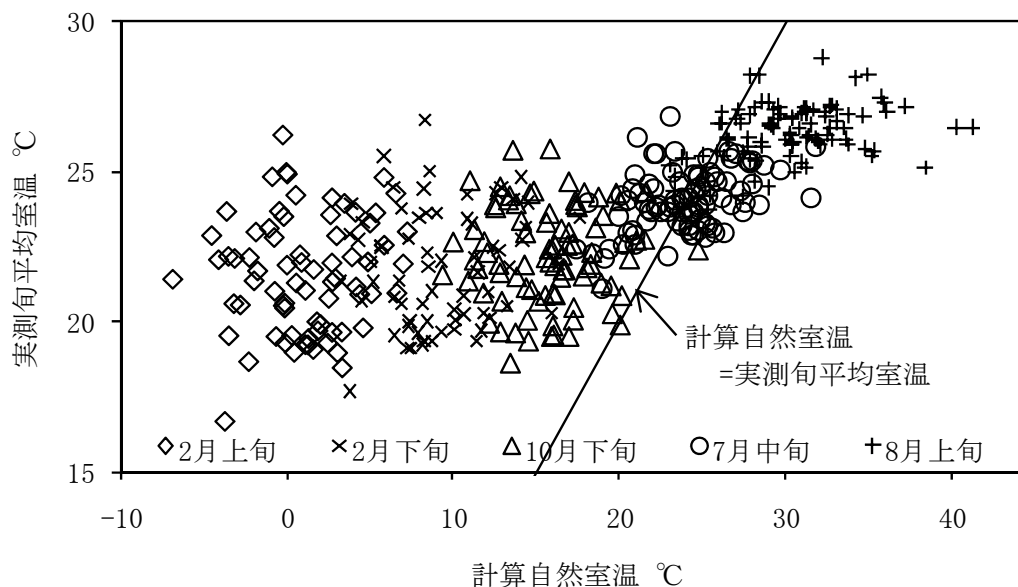


図 6-12 計算自然室温と実測室温の関係

(2) 室温の形成要因の分析

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 6-7 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。

表 6-7 重回帰分析に用いた説明変数

変 数	[単位]	変 数	[単位]
Q値	[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]

重回帰分析の結果を表 6-8 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。Q 値は 8 月上旬を除いて説明変数として選択されており、Q 値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、通風など、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、居住者アンケートで把握した想像快適温度（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、建物など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ことが原因として考えられる。

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。

表 6-8 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)		
	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			
Q値	-1.87	-2.47	0.02				-2.40	-1.88	0.07
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
想像快適温度(日中)							0.23	1.86	0.07
日中普段着							-0.55	-1.81	0.08
外気温(旬平均)	-0.61	-6.97	0.00	-0.48	-7.09	0.00	-1.00	-7.54	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									
定数項	21.70	10.83	0.00	17.50	13.37	0.00	20.79	5.39	0.00
重相関係数	R=0.83			R=0.83			R=0.79		

変 数	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
床面積				-0.044	-2.91	0.01
Q値	-4.14	-2.00	0.05	-6.27	-3.19	0.00
天井断熱・屋根断熱						
床断熱・基礎断熱						
熱交換換気有無	0.81	1.53	0.13	0.71	1.53	0.14
想像快適温度(日中)	0.26	1.76	0.09	0.23	1.76	0.09
日中普段着	-0.84	-2.17	0.04	-0.73	-2.13	0.04
外気温(旬平均)	-0.97	-6.73	0.00	-1.34	-7.47	0.00
外部風速(旬平均)						
日射取得				0.003	3.57	0.00
定数項	22.24	5.09	0.00	27.54	6.08	0.00
重相関係数	R=0.79			R=0.84		

(3) 夏季の室温抑制に関する考察

以上の分析により、夏季は計算上の自然温度よりも室温が低くなる場合があること、また夏季の室温には通風が影響を与えていること、日射の影響が少ないことが示唆された。ここで、実測室温でこれらの影響を確認する。

図 6-13 は、実測期間中に外気温が最も高くなった、8月 10 日から 11 日にかけての温度推移を示す。室温は、札幌市およ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。対象住宅の平均 Q 値は札幌市、旭川市それぞれ、 $1.26 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ 、 $1.33 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ である。

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、特に外気温の高い旭川で、冷房装置の影響が大きく出ている。ただし、冷房装置がない住宅でも、外気温より室温が低く抑えられている。その要因を検討するため、次の式(5-1)により、室温の非定常計算^[7]を行い、各パラメータの影響を分析する。

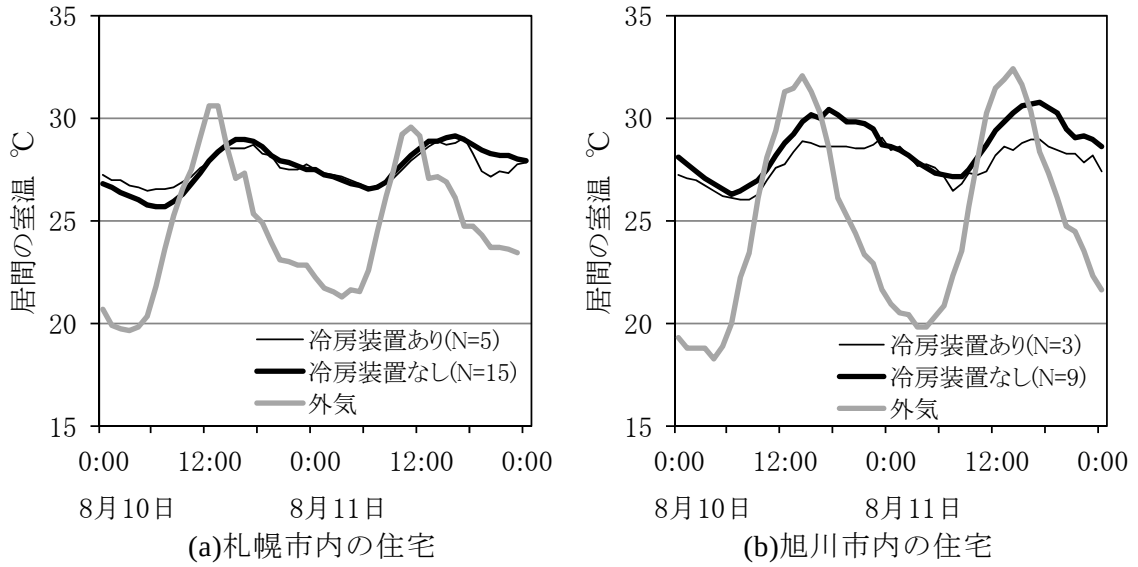


図 6-13 夏季の温度推移

$$\sum_{j=1}^J A_j \alpha_{i,j} (\theta_i^p - \theta_{si,j}^p) + c_a r_a Q (\theta_i^p - \theta_o^{p-1}) + (c_a r_a V + C_F) (\theta_i^p - \theta_i^{p-1}) / \tau = G_r^p + S_{Gst}^p \quad (5-1)$$

ここで、

A_j	: 面積	[m ²]
$\alpha_{i,j}$	: 総合熱伝達率	[W/(m ² K)]
θ_i	: 室温	[°C]
θ_o	: 外気温	[°C]
$\theta_{si,j}$	: 壁表面温度	[°C]
$c_a \gamma_a$	: 空気の容積比熱	[J/(m ³ K)]
Q	: 換気量	[m ³ /s]
V	: 室の気積	[m ³]
C_F	: 躯体、家具その他の熱容量	[J/K]
τ	: 時間	[s]
G_r	: 室内発熱	[W]
S_{Gst}	: 日射取得熱	[W]

である。

各部位の面積および断熱性能は図 6-13(a)の冷房装置を設置していない住宅の平均値を用い、窓の日射侵入率は 0.5 とする。計算結果を図 6-14 に示す。計算条件は表 6-9 に示す 4 つである。条件 1 では躯体、家具などの熱容量を考慮せず、換気量も常時 0.5 回/h のまま自然温度を計算した。この場合、日射によって昼間の温度が 40°C 近くに達する。

一方、文献^[8]によると木造住宅においても、熱容量 C_F は 11.7×10^6 J/K 程度見込めるとされているため、条件 2 では $C_F = 10 \times 10^6$ J/K として計算した。その結果、温度の振幅と外気温に対する位相の遅れは実測値と近づいている。

条件3はさらに、通風の効果を含めるため、外気温が室温よりも低いときに、換気回数を1.5回/hに増やす設定とした。まだ、実測値と比べて計算値が高く推移しているが、さらに条件4で、日射取得熱を半減させると、実測値と計算値がほぼ一致した。

ここでの換気回数や日射量の設定は仮定であるが、住宅が持つ熱容量や、日射量が想定より少ないことに加えて、居住者による通風が夏季の室温を抑制していることは確かだと考えられる。

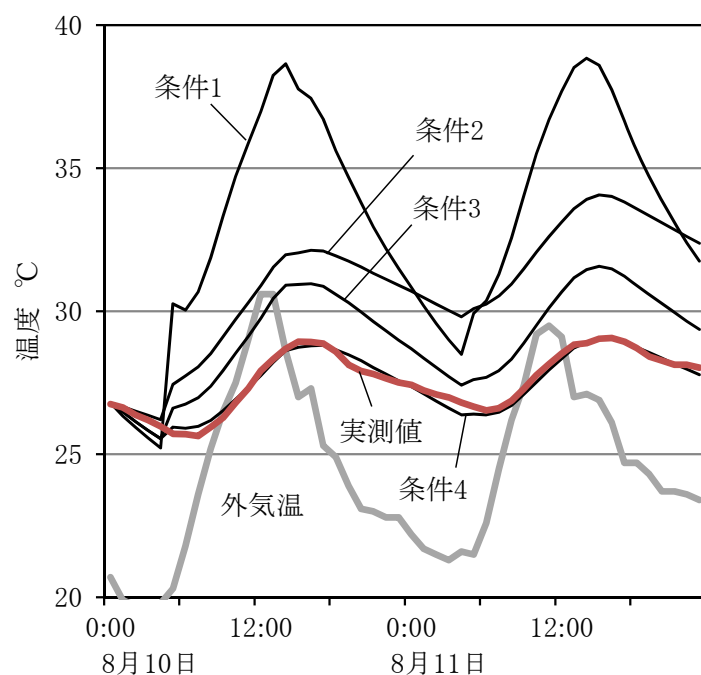


図 6-14 熱容量による室温変動の違い

表 6-9 図 6-14 の計算条件

	C_F	換気量	日射取得熱
条件 1	0	常時 0.5 回/h	外皮、開口部仕様による
条件 2	10,000kJ/K	常時 0.5 回/h	外皮、開口部仕様による
条件 3	10,000kJ/K	外気温<室温のとき換気 1.5 回/h	外皮、開口部仕様による
条件 4	10,000kJ/K	外気温<室温のとき換気 1.5 回/h	50%低減

6.4 居住者アンケート調査

6.4.1 アンケートの内容

前節では、実測による室温の状況を分析したが、居住者がどう感じているのか、また住まい方の実態を把握するため、居住者を対象にしたアンケートを実施した。

アンケートは、北方型住宅 ECO、一般北方型住宅および北方型省 CO₂ 住宅の居住者を対象としたほか、これらの近年建設された高断熱住宅との比較を行う目的で、道内の一般戸建住宅居住者を対象とした Web アンケートを実施した。実施時期、回答数は表 6-3 に示したとおりである。

本節で扱うアンケート項目の一覧を表 6-10-1、表 6-10-2 に示す。各アンケートはなるべく共通した問いを設けたが、一部のアンケートのみで設けた問いもあるので、分析の目的に応じ、表中に○で示した調査対象のアンケート結果を用いる。

表 6-10-1 本節で扱うアンケート項目一覧

項目	アンケートの文面	分析対象のアンケート			
		Web アンケ ート	北方型 住 宅 ECO 1 年目	北方型 住 宅 ECO 3 年目	北方型 省 CO ₂ 住宅
夏 季 温 冷 感	■夏季において住宅内の温度はどうですか？ 1.暑い 2.やや暑い 3.心地よい日が多い 4.やや涼しい 5.涼しい	○	○	○	
	実測温度との関係分析		○		
冬 季 温 冷 感	■冬季の住宅内の温度はどう感じますか？ 1.暑い 2.やや暑い 3.ちょうどよい 4.やや寒い 5.寒い	○	○	○	
	実測温度との関係分析		○		
冷房 装置	■エアコンを設置していますか？ 1.設置している .設置していない →設置している場合 ■エアコンはどの部屋に設置していますか？ 室名（ 階の ） ■年に何週間くらい使用しましたか？（ 週間） ■1日あたり何時間程度使用しましたか？ （ 時間）※北方型住宅 ECO1 年目アンケート以外は、主要室別に尋ねた	○	○	○	○
通 風	■夏季に、部屋を涼しくするために窓を開けて通風しますか。該当する項目に○を付けてください。 昼間 1.通風をすることがある 2.ほとんど窓は開けない 日没後 選択肢同上 就寝時間帯 選択肢同上	○		○	
	■上記の質問で「ほとんど行わない」と答えた方は、その主たる理由としてあてはまるもの全てに○をつけて下さい。 1.騒音が気になる 2.プライバシー確保 3.カーテンが邪魔になる 4.防犯 5.あまり効果がない 6.機械換気で十分 7.屋外の空気が汚い 8.花粉症などアレルギー対策 9.家の中のものが飛散する 10.暑いときは冷房をする 11.通風で熱気が入る 12.その他（ ）	○			

表 6-10-2 本節で扱うアンケート項目一覧

項目	アンケートの文面	分析対象のアンケート			
		Web アンケ ート	北方型 住 宅 ECO 1 年目	北方型 住 宅 ECO 3 年目	北方型 省 CO ₂ 住宅
冬季 日中 普段着	■真冬の室内では普段の日中は、どのような衣類を着用していますか？ひとつだけ○をつけてください ※平日の日中に最も在宅時間が長い方についてお答えください。(男・女 年齢 歳) 1.コート、ウインドブレーカーなどを室内でも着用 2.フリースの上下など保温性の高い衣服 3.トレーナーとジーンズなど春や夏の衣服 4.Tシャツと短パンなど夏と変わらない		○		
冬 季 過 熱 対 処	■冬季間に部屋が暑くなりすぎた場合は、主にどのように対処しますか。当てはまるものを全て選び、○をつけてください。 1.暖房を消す 2.暖房の設定温度や出力を下げる 3.廊下や隣室へのドアを開ける 4.窓を開ける 5.換気扇を回す 6.薄着になる 7.その他 ()	○		○	○
	暖房機器種別との関係分析	○			
暖房 方式	■1～2月の各部屋の暖房機の運転状況について、それぞれ、あてはまるものを1つ選び、○をつけてください。 居間 1.一日中同じ設定で暖房する 2.一日のうちに暖房の設定を変える 3.夜間や在室していないときは暖房を止める 4.暖房機(放熱器)が設置されていない 主寝室 選択肢同上	○		○	○
在宅 人員	■同居しているご家族の年齢構成(本人を含む)を記入してください。 15 歳未満 (人) 15～65 歳未満 (人) 65 歳以上 (人) 同居人数の合計 (人) ■各時刻での平日にご家族の在宅人数を記入してください。 11 時 (人) 12 時 30 分 (人) 14 時 (人) 18 時 (人) 20 時 (人)	○			
補助 暖房	■冬季間、次の補助暖房器具を使用していますか。あてはまるものを全て選び、○をつけてください。 1.石油ストーブ 2.電気ヒーター 3.電気カーペット 4.電気毛布 5.こたつ 6.湯たんぽ 7.どれもあてはまらない	○		○	○

6.4.2 夏季・冬季の温冷感

図 6-15 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。北方型住宅 ECO の入居 1 年目に実施したアンケートでは、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、一般住宅と比べて夏、冬とも温熱環境に優れているように見える。しかし、一般住宅のアンケートと同じ時期に実施した入居後 3 年目のアンケートでは、「やや暑い」「暑い」の回答が増え、夏に関しては北方型住宅 ECO と一般住宅が同程度の傾向となっている。これは、1 年目のアンケートを実施した 2009 年度は、比較的冷涼な夏であり、その後記録的な猛暑となった 2010 年、やはり暑い夏であった 2011 年を経たためと考えられる。ただ、一般住宅と比べて著しく暑い傾向にはない。

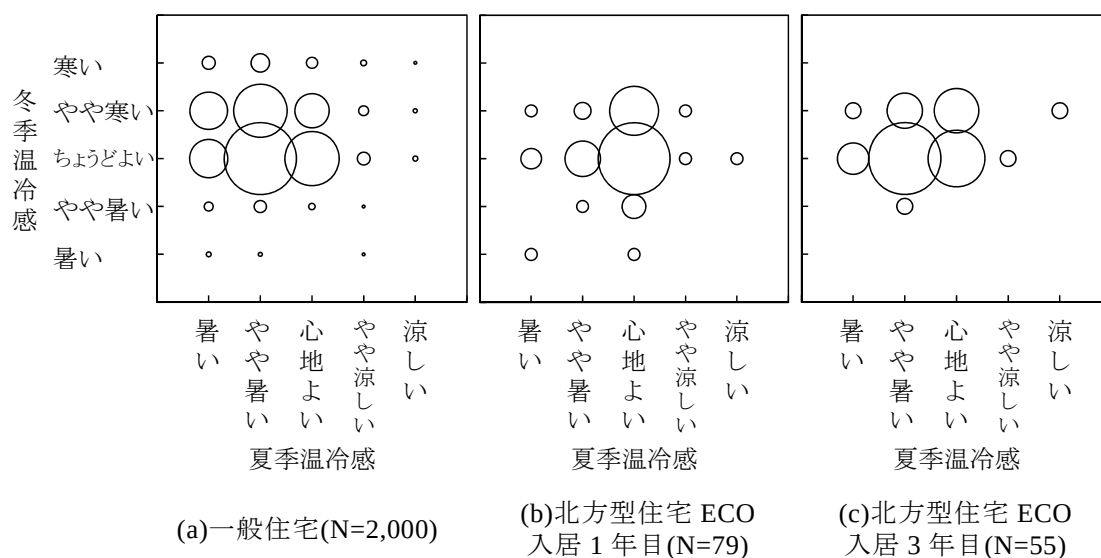


図 6-15 温冷感のアンケート調査

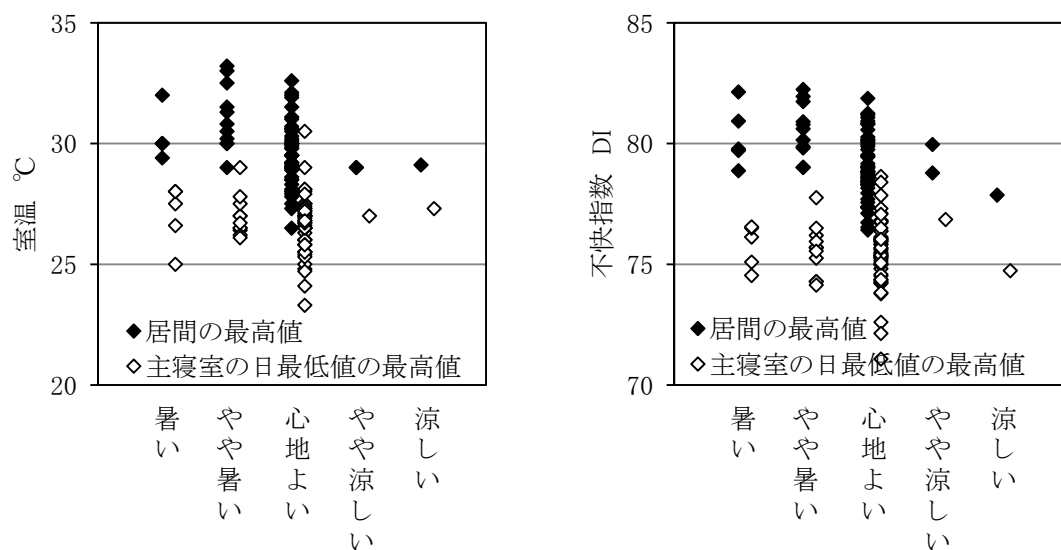
6.4.3 夏季の温熱環境

(1) 温冷感と実測温湿度との対応

図 6-16 に夏季についての北方型住宅 ECO の 1 年目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、室温およ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。

(2) 冷房装置の使用状況

各アンケートによる冷房装置の設置状況を図 6-17 に示す。Web アンケートによると、地域により設置率に差があり、北見や帯広では設置率が 50%を超えている。全道平均では約 3 割であり、北方型住宅 ECO でもほぼ同様の割合となっている。前述のとおり北方型住宅 ECO は竣工後 2 年目の 2010 年に猛暑を経験しているが、3 年目のアンケ



不快指数 $DI = 0.81t_a + 0.01rh(0.99t_a - 14.3) + 46.3$ 、 t_a : 気温 (°C)、 rh : 相対湿度 (%)

(a)室温との関係

(b)不快指数との関係

図 6-16 夏季の温冷感と実測値との関係 (北方型住宅 ECO)

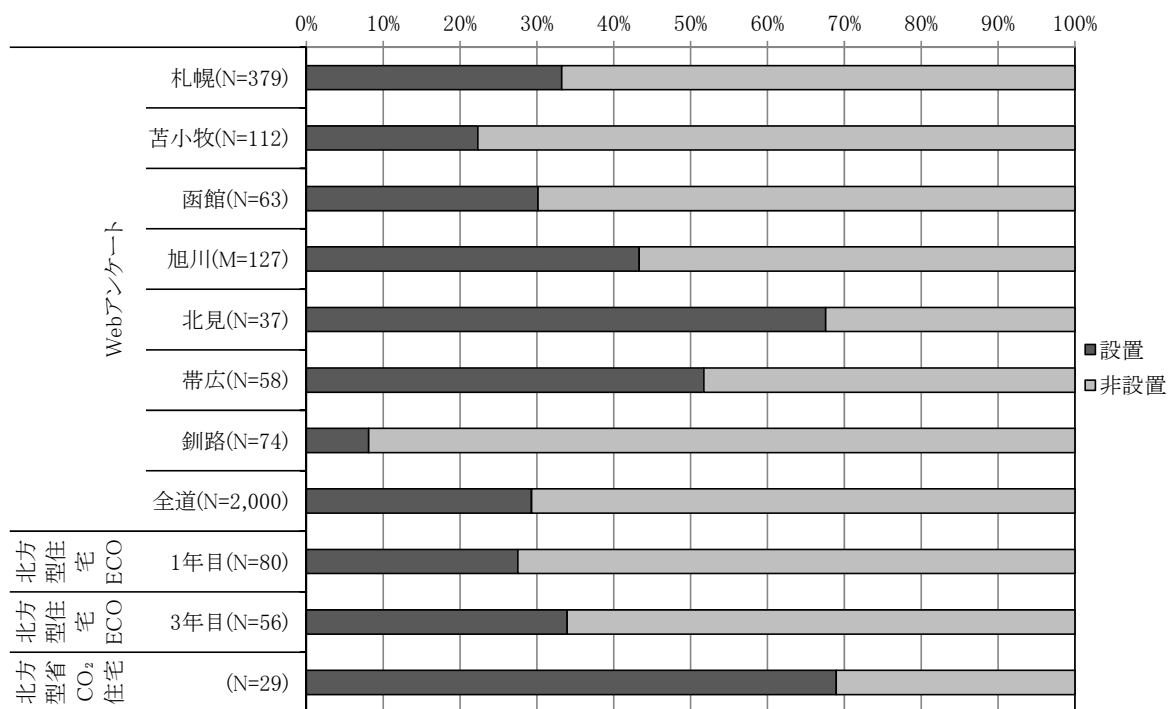


図 6-17 冷房装置の設置状況

ートでも設置率は大きくは変わっていない。北方型住宅 ECO の 1 年目アンケートによると、冷房装置の年間の運転日数は 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、暖房装置と比べると、冷

房装置の使用時間は非常に短い。

一方、北方型省 CO₂ 住宅では冷房装置の設置率が約 7 割と、大きく上昇している。これは暖房用エアコンの普及や、太陽光発電の有効利用の意向が背景にあると思われる。ただし、冷房装置の約 7 割が冷房装置を「昼間と夜間」または「夜間のみ」に利用していると回答しており、夕刻のピーク電力抑制の観点からは課題を有している。

(3) 通風の実施状況

6.3.6 で示したように、夏を涼しく過ごすためには、居住者による通風が重要である。図 6-18 に各時間帯の通風の実施率を示す。Web アンケート、北方型住宅 ECO とも、昼間は 8 割以上で通風を実施しているが、外気温が下がり外気冷房の効果が大きい日没後、就寝時間帯は通風の実施率が下がる。図 6-19 は通風を行わない理由であるが、「防犯」「プライバシー確保」の問題が多く挙げられている。これらの問題を解消しつつ常時通風可能な開口部の開発も、既往の研究で行われているおり^[9]、適切な開口部の設計が望まれる。

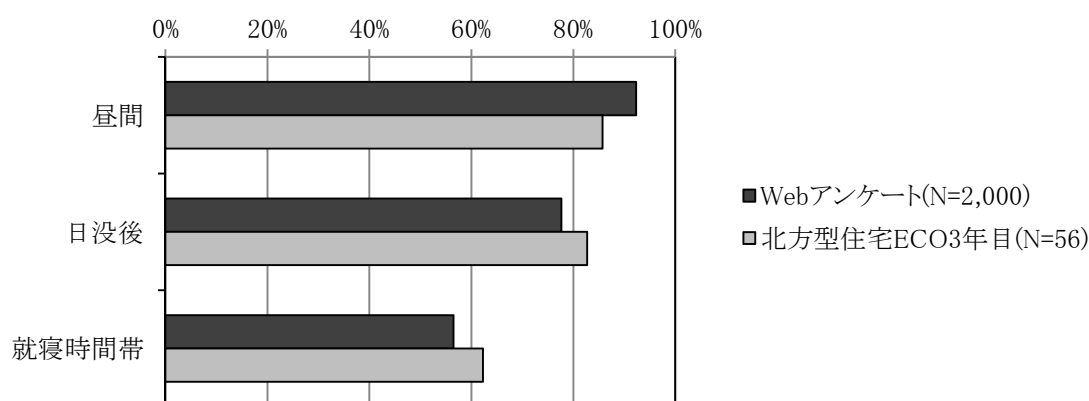


図 6-18 通風の実施率

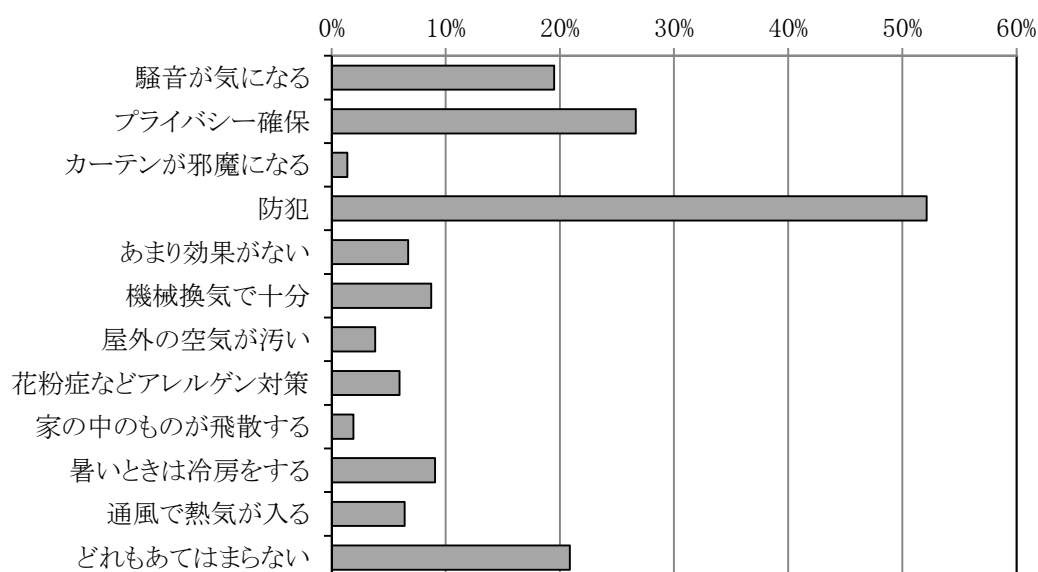


図 6-19 通風を行わない理由（Web アンケート、N=938）

6.4.4 冬季の温熱環境

(1) 温冷感と実測温湿度との対応

冬季の温冷感と実測室温の関係を、図 6-20 に示す。室温は 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）主寝室室温を採用している。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。不快指数は 70 程度で「暑い」「やや暑い」と回答する住宅が出ている。「暑い」「やや暑い」と回答のあった住宅 5 件の暖房種別は蓄熱式暖房器 3 件、ヒートポンプ温水暖房 1 件、ガス温水暖房 1 件であった。また、うち 1 件は居住者のコメントによると、土間への蓄熱を意図して南面に大開口を設けた結果、晴天日には室温が 25℃を超え、暑く感じるとのことだった。

表 6-11 に北方型住宅 ECO の 1 年目アンケートで把握した冬季の服装と実測室温の関係を示す。少数ながら、夏と変わらない薄着で過ごしている居住者もあり、実測温度も高い傾向がある。

(2) 冬季過熱への対処方法

高断熱住宅における冬季の課題は、過大な容量の暖房設備によるオーバーヒートで

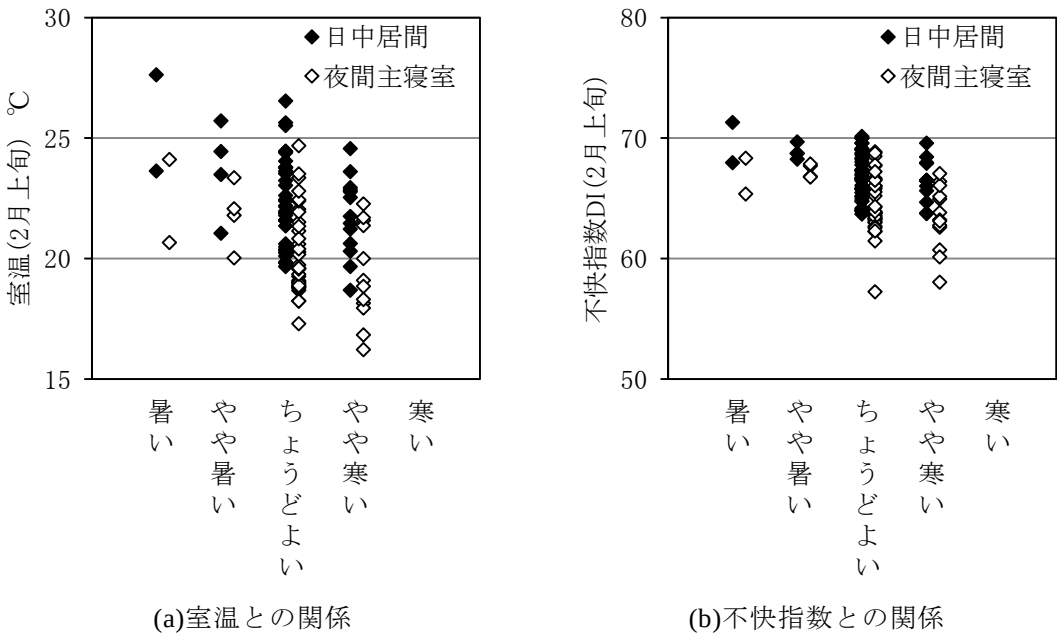


図 6-20 冬季の温冷感と実測値との関係（北方型住宅 ECO）

表 6-11 冬季の服装と実測室温（北方型住宅 ECO）

設問	選択肢	回答数	2月上旬居間(6-21時)温度[℃]
室内の日中の服装	コート、ウィンドブレーカーなどを室内でも着用	0	-
	フリースの上下など保温性の高い衣服	19	22.0
	トレーナーとジーパンなど春や夏の衣服	37	22.4
	Tシャツと短パンなど夏と変わらない	6	24.0

ある。図 6-21 は室内が冬季に暑くなり過ぎた場合の対処方法を尋ねた結果である。「暖房を消す」「暖房の設定温度や出力を下げる」は省エネルギーの観点から、適切な対処方法である。一方、「廊下や隣室のドアを開ける」「窓を開ける」「換気扇を回す」「薄着になる」という対処方法は、暖房負荷の増大を招き、暖房システムや機器容量に問題を有している可能性がある。ただ高断熱化によって特にこれらの対応が増加してわけではない。図 6-22 に冬季過熱へのそれぞれの対処方法を選択した居住者における暖房設備の種別を示す。明瞭な傾向として読み取れるのは、蓄熱暖房器は昼間の調整ができないため、暖房負荷を増やす方向での対応を取らざるを得ないことである。

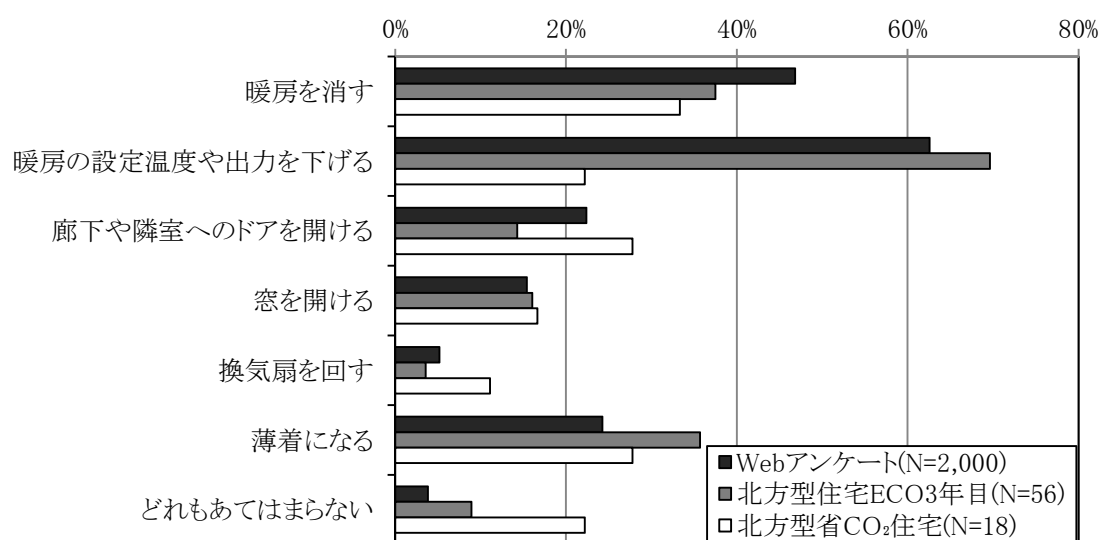


図 6-21 冬季に暑くなり過ぎた場合の対処方法

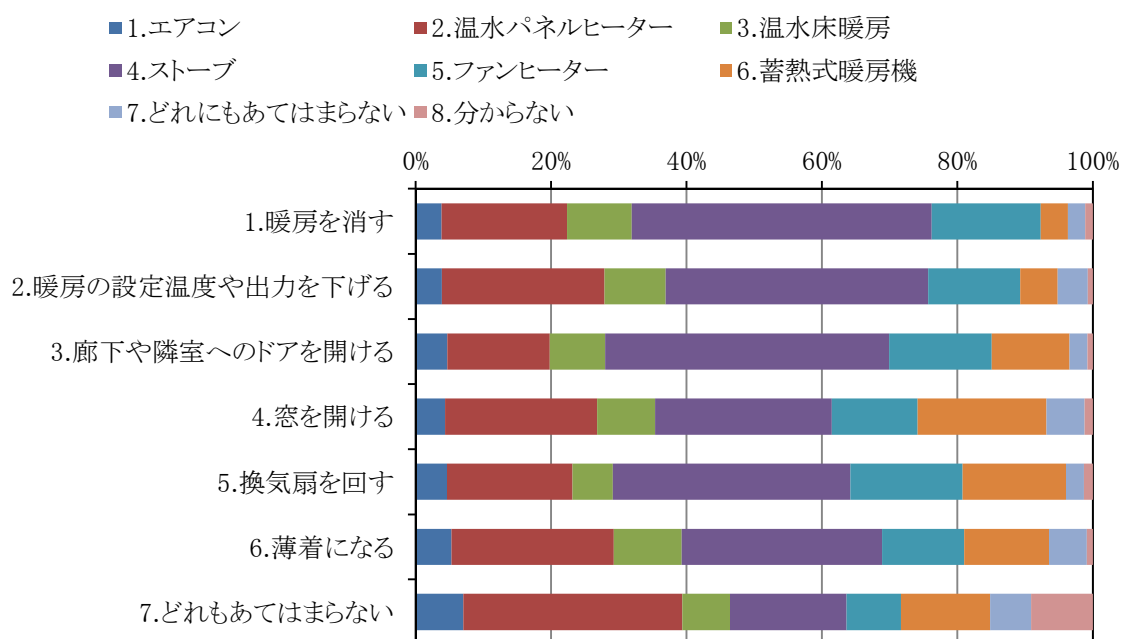


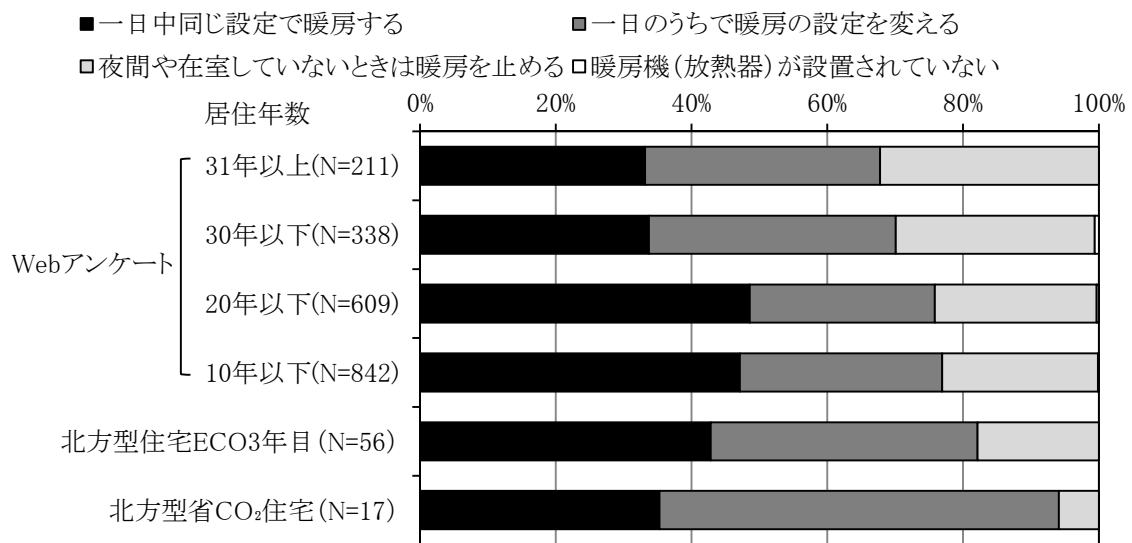
図 6-22 冬季過熱の対処方法と暖房設備の対応（Web アンケート、N=2, 000）

(3) 暖房の使用時間

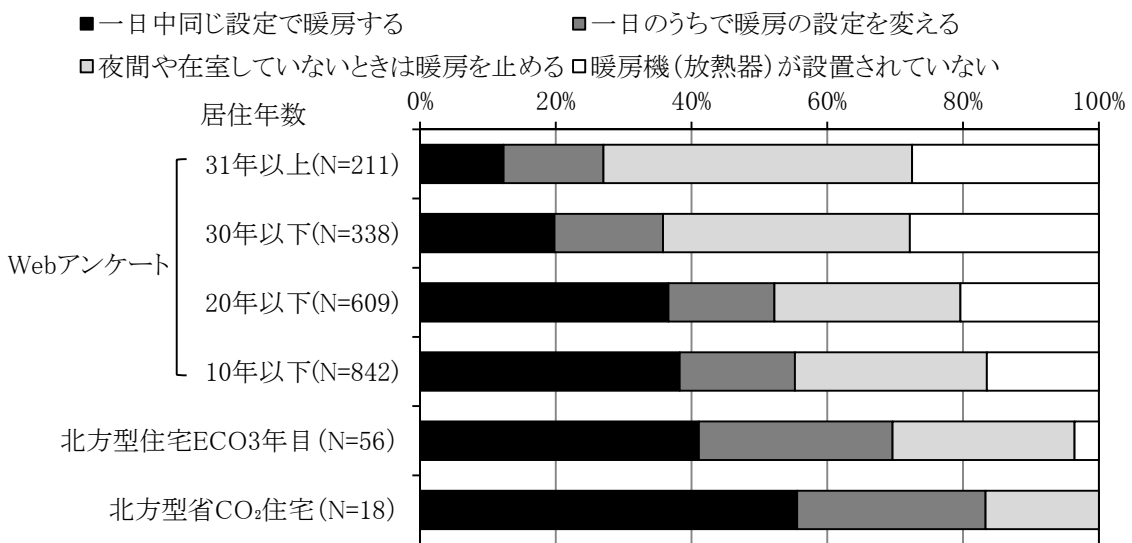
図 6-23 に、一日の暖房時間に関するアンケート結果を示す。「一日中同じ設定で暖房する」「一日のうちで暖房の設定を変える」が連続暖房に該当すると考えると、居間、主寝室とも年代が新しくなるにつれて、連続暖房の割合が増加している。

一方、居間に関しては、「一日中同じ設定で暖房する」割合が居住年数 20 年以下の Kategorie をピークとして、より年代の新しい住宅では、「一日のうちで暖房の設定を変える」割合が増えている。

次に、暖房時間には、居住者の在宅状況も関係していると考えられるため、アンケート結果からの分析を行ってみる。図 6-24 に居住年数による世帯構成人員の変化を示



(a) 居間



(b) 主寝室

図 6-23 一日の暖房時間

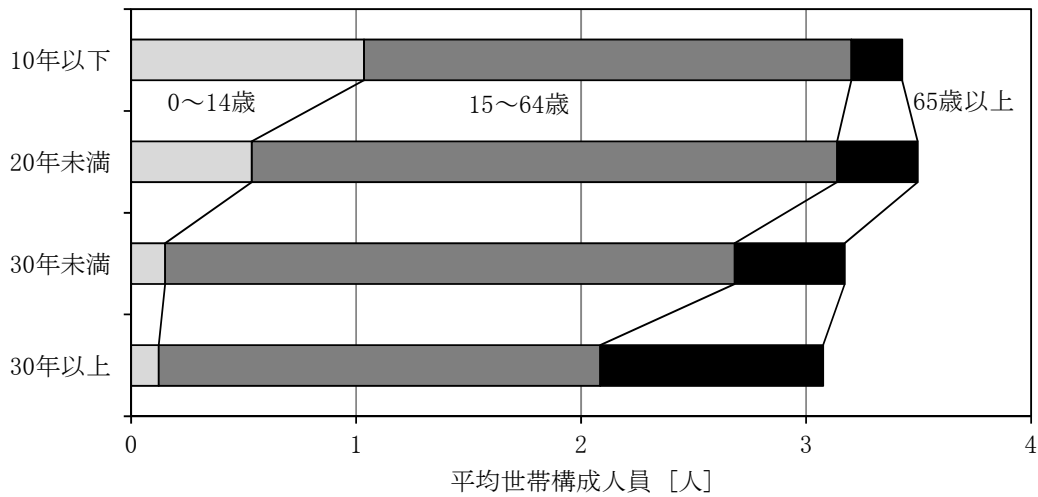


図 6-24 居住年数による世帯構成人員の変化 (Web アンケート、N2,000)

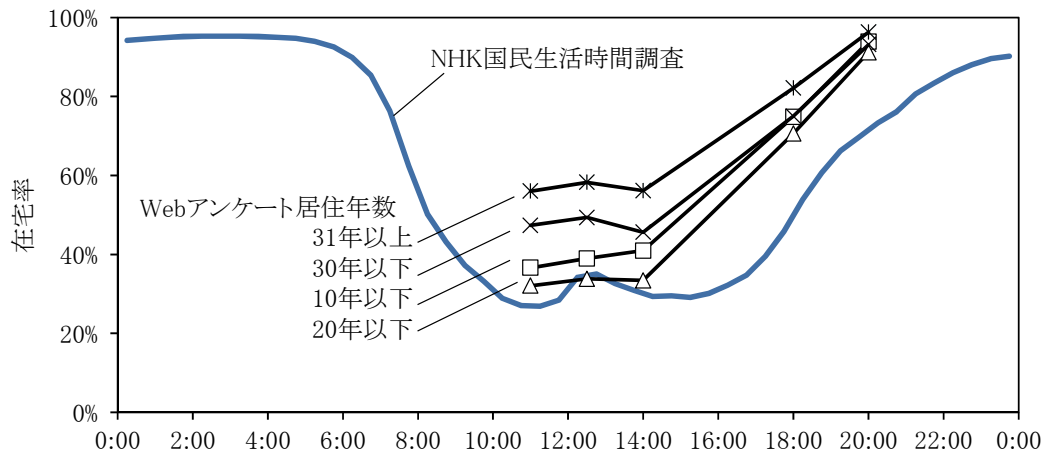


図 6-25 平日の在宅率の変化 (Web アンケート)

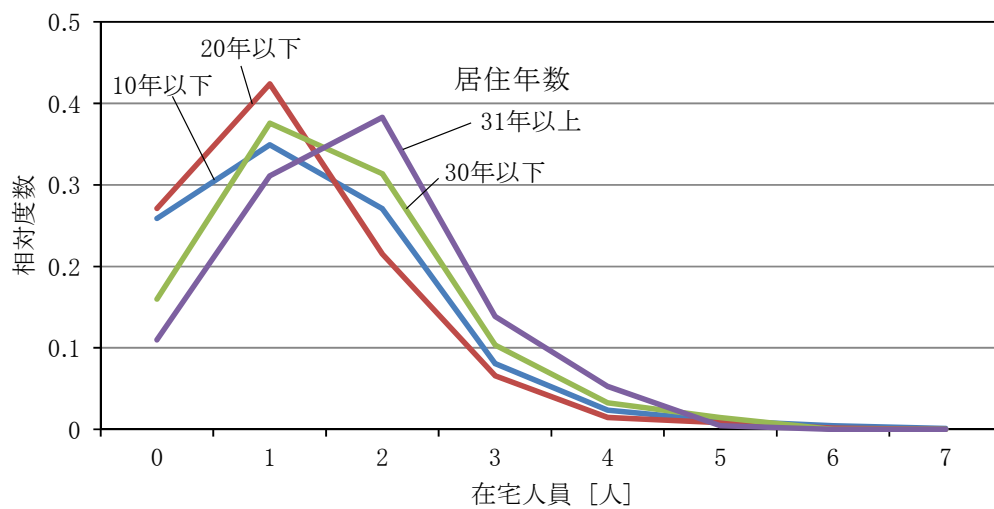


図 6-26 平日の12時30分における在宅人員 (Web アンケート)

す。居住年数の経過により、世帯員の中の子供の人数が減る一方、高齢者が増え、ライフステージが変化する様子がわかる。

図 6-25 は、Web アンケートで平日の 11 時、12 時 30 分、14 時、18 時、20 時における在宅人数を尋ね、その住宅の世帯員数で割った在宅率の日変化を示している。参考に NHK の国民生活時間調査^[10]による在宅率を合わせて示している。昼間の在宅率は居住年数により違いが大きいことがわかる。居住年数別では、居住年数が 20 年以下の住宅が最も昼間の在宅率が低い。

図 6-26 には 12 時 30 分における、居住年数別の在宅人員を示す。12 時 30 分は、昼食などで一時的に在宅率が高まる時間帯であり、この時点で在宅者がいない住宅は、日中居住者がいない住宅であると考えられる。全体でも 1 割以上、居住年数 20 年以下では 3 割近くの住宅が日中不在となっている。しかし、図 6-23(a)によれば、居住年数 20 年以下の住宅が、「一日中同じ設定で暖房する」割合が最も高いという結果を得ており、省エネルギーの点で問題がないか、今後の検証が必要である。

(5) 補助暖房の保有状況

図 6-27 に補助暖房器具の保有状況を示す。新しい住宅ほど、これらの保有が少なくなっており、「北方型住宅 ECO」「北方型省 CO₂住宅」では、いずれも保有していない住宅が 8 割以上となっている。

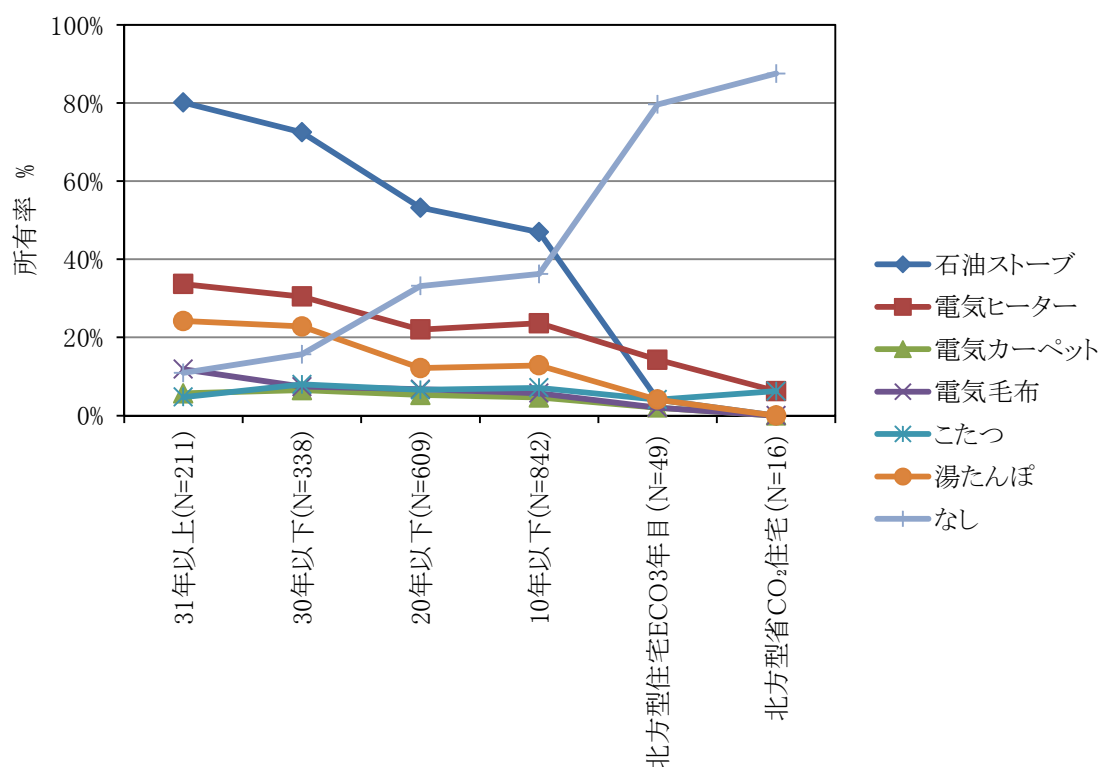


図 6-27 補助暖房器具の保有状況

6.5 エネルギー消費量調査

6.5.1 北方型住宅 ECO

(1) 用途別エネルギー消費量の推定

北方型住宅 ECO のエネルギー消費量は、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などにより調査した。記録は居住者に依頼した。有効回答数は 67 件である。

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 6-12 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^[11]を用いて設定した。調理は変動係数を一定とした。

時間帯別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^[12]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^[13]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 6-13 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。最も単純な用途分離パターンの例を図 6-28 に示す。

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。

表 6-12 用途別エネルギーの変動係数

	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
暖房	0.121	0.052	0.008	0.002	0.000	0.000	0.008	0.087	0.153	0.223	0.184	0.163
給湯	0.098	0.090	0.080	0.069	0.060	0.061	0.069	0.084	0.092	0.098	0.099	0.100
調理	0.083	0.083	0.083	0.083	0.083	0.083	0.083	0.083	0.083	0.083	0.083	0.083
照明ほか	0.079	0.083	0.065	0.075	0.083	0.080	0.078	0.089	0.083	0.105	0.086	0.093

表 6-13 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	○	○		

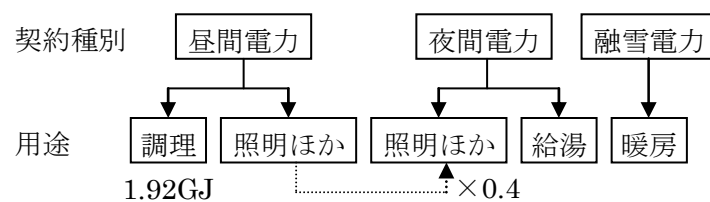


図 6-28 電力消費量の用途別分離の方法（例）

(2) 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 6-29 に示す。全住宅平均では最終エネルギー消費量で暖房が 35.0GJ(49%)、給湯が 21.2GJ(29%)、調理が 2.0GJ(3%)、照明ほかが 13.8GJ(19%)だった。

図 6-29(b)には一次エネルギーに換算したエネルギー消費量を示す。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。ヒートポンプを使用している場合には、最終エネルギー消費量が低減する結果、一次エネルギー消費量がガス、石油設備と同等に抑えられる場合もあるが、一部の住宅に留まっている。図 6-30 は Q 値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、Q 値が $1.3\text{W/m}^2\text{K}$ 以下の住宅に全電化住宅が多かったこともあり、Q 値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。全電化住宅における一次エネルギー消費量の削減は大きな課題である。

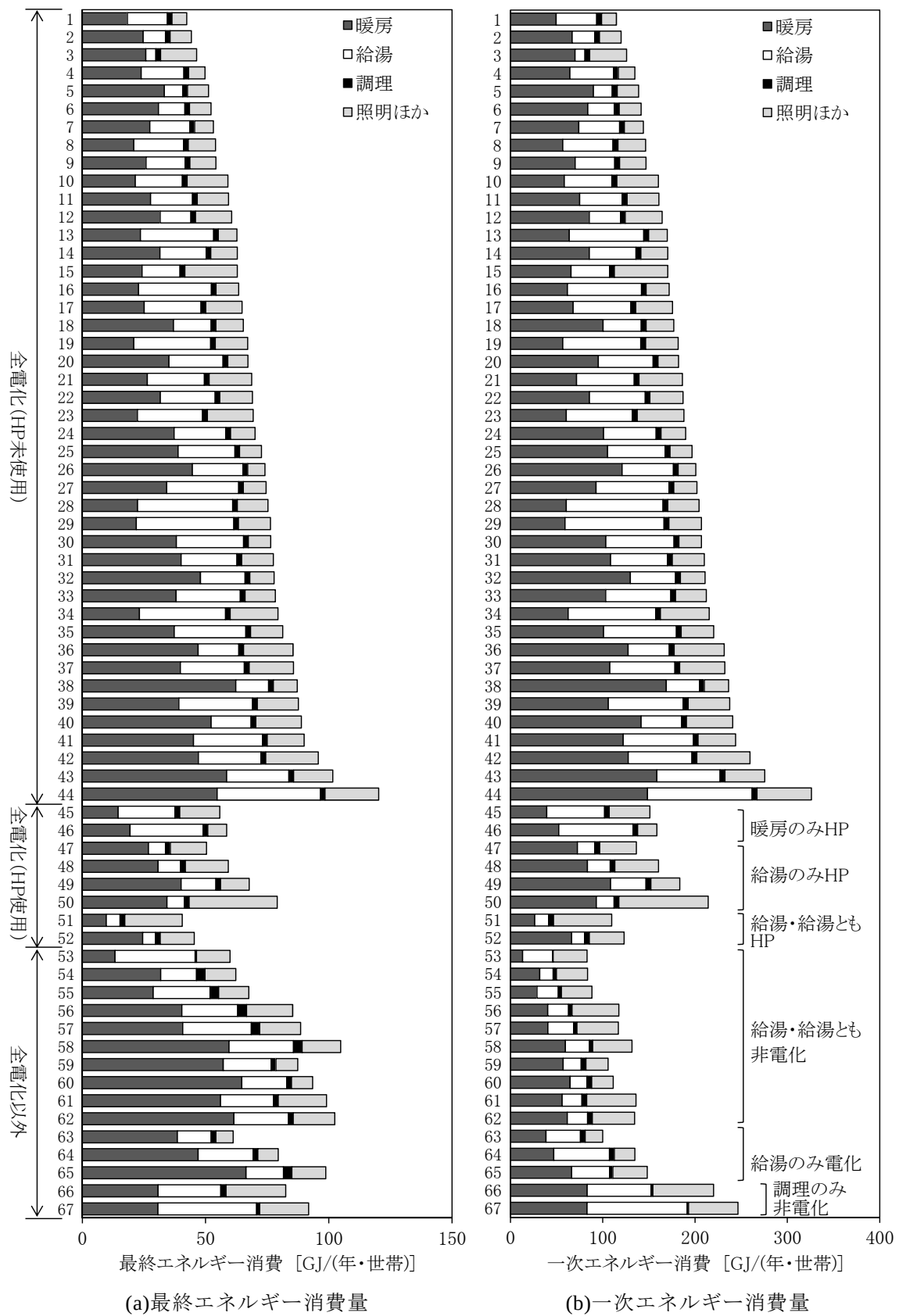


図 6-29 住宅別年間エネルギー消費量

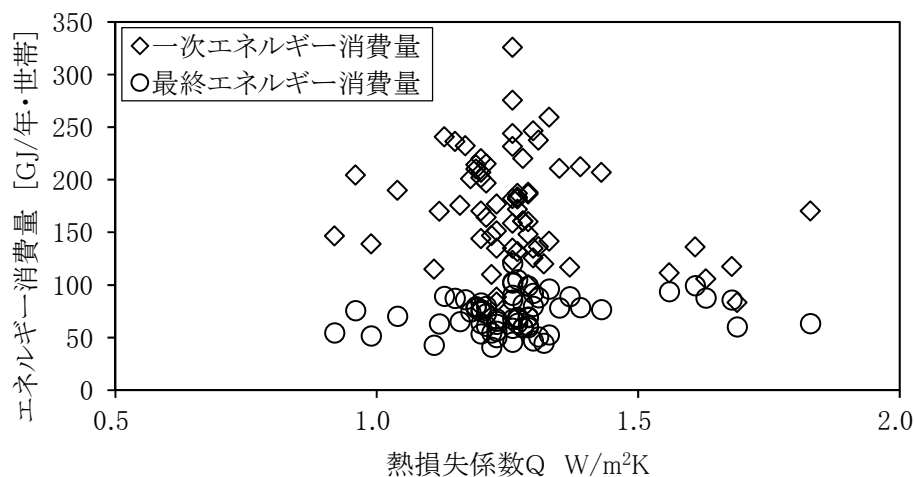


図 6-30 Q 値とエネルギー消費量の関係

図 6-31 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、Q 値が $1.3\text{W/m}^2\text{K}$ 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。

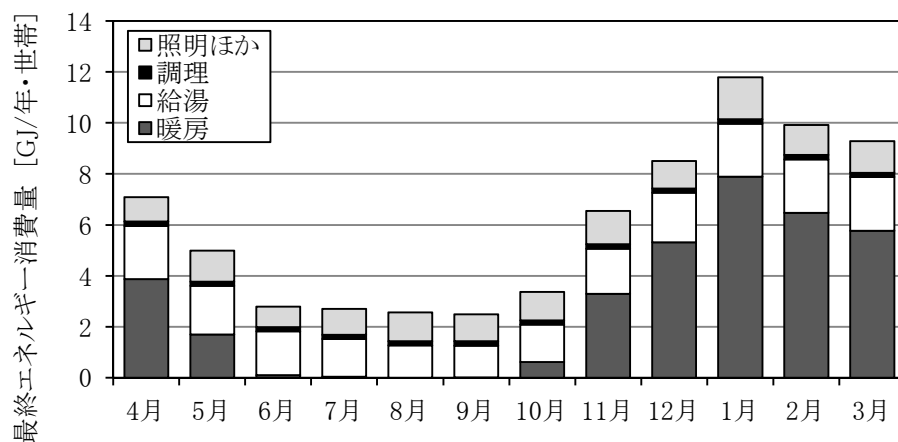


図 6-31 最終エネルギー消費量の月変動（全住宅平均）

(3) エネルギー消費量に影響を与える要因

表 6-14 は各住宅の年間の最終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。最終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 6-14 に掲げる変数のほか、暖房度日数、暖房期間（4～5 月および 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。

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。そこで、後の 6.5.4 項では、エネルギー消費量の用途分離を比較的精度良く行うことができたケースについて、暖房用エネルギーに影響を与える要因の分析を行う。

表 6-14 最終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		

6.5.2 北方型省 CO₂ 住宅

(1) 北方型省 CO₂ 住宅の属性

北方型住宅 ECO では、ヒーター式の熱源設備の使用が多く、断熱性能の向上にも関わらず、一次エネルギー消費量が増加した。この反省を踏まえ、2011 年にプロジェクトを開始した、「北方型省 CO₂ 住宅」では、設計時に CO₂ 排出量の確認を行うこととした。要件は 6.2.2 で述べたとおりだが、CO₂ 排出量削減率のチェックのため、図 6-32 に示す「設計支援ツール」と称する計算表を用意し、設計時に住宅建設事業者が設備仕様を選択する参考として提供した。設計支援ツールは、事業主基準の解説書などを参考に、Q 値、暖房、給湯、照明、換気の設備種別、太陽光発電容量から簡易に CO₂ 排出量を算出するもので、2009 年当時の標準的な北方型住宅と比べて、60%の CO₂ 排出量削減を補助の要件としている。

各住宅で、CO₂ 排出量の要件を満たすように選択された設備を表 6-15 に示す。暖房給湯の熱源は、電気が過半を占めているが、ヒートポンプ式がほとんどとなっている。潜熱回収型の温水暖房給湯も、北方型住宅 ECO と比べると増加している。換気設備は、熱交換換気の使用が約半数、照明設備も LED が約半数で使用採用されている。

CO₂排出量削減率チェック表

住宅名称					
住宅の所在地					

床面積	m ²	120	年間暖房負荷[MJ]	年間暖房負荷の計算方法	
Q値(熱回収を考慮しないこと)	W/m ² K	1.2	19098	43844	提案書で使用した回帰式
C値	cm ³ /m ²	0.9	熱交換換気の実質熱回収効率率は50%		

設備仕様		CO ₂ 排出量[kgCO ₂]			
暖房	空気熱源ヒートポンプ	1690	5693		
給湯	エコキュート	1311	3205		
照明	LDK	白熱灯なし	184	220	
	LDK以外の居室	白熱灯なし	159	169	
	非居室	白熱灯なし	82	205	
換気	第1種熱交換(DCモーター・効率85%以上)	420	210		
太陽光発電	kW	4	-624	0	
ガス種類	使用しない				

		本仕様	比較対象
CO ₂ 排出量合計	kgCO ₂	3222	9702
CO ₂ 排出削減量	kgCO ₂	6480	
CO ₂ 排出削減率		66.8%	

図 6-32 設計支援ツール (CO₂ 排出量削減率チェック表)

表 6-15 北方型省 CO₂ 住宅の設備仕様

(a)暖房設備と給湯設備の組み合わせ

暖房設備	給湯設備	件数
温水(石油潜熱回収型)	石油瞬間式(潜熱回収型)	1
温水(石油潜熱回収型)	電気ヒートポンプ給湯器	1
温水(電気ヒーター式)	電気ヒートポンプ給湯器	1
温水(電気ヒートポンプ式)	電気ヒートポンプ給湯器	11
温水(電気ヒートポンプ式)	ガス瞬間式(潜熱回収型)	1
温水(電気ヒートポンプ式)+エアコン	電気ヒートポンプ給湯器	2
温水(ガス潜熱回収型)	ガス瞬間式(潜熱回収型)	9
温水(ガス潜熱回収型)+エアコン	ガス瞬間式(潜熱回収型)	1
温水(ヒートポンプ・ガス瞬間式併用型)	ヒートポンプ・ガス瞬間式併用型	4
電気蓄熱暖房機+電気式パネルヒーター	電気ヒートポンプ給湯器	1
エアコン	電気ヒートポンプ給湯器	2
エアコン+電気蓄熱暖房機	電気ヒートポンプ給湯器	2
エアコン+電気式パネルヒーター	電気ヒートポンプ給湯器	3

(b)換気設備

換気設備	件数
第1種熱交換(効率85%以上)	5
第1種熱交換(DCモーター)	4
第1種熱交換(DCモーター・効率85%以上)	6
第1種熱交換(その他)	5
第2種・第3種(DCモーター)	10
第2種・第3種(その他)	9

(c)照明設備

照明設備	LDK	LDK以外居室	非居室
白熱灯なし	14	18	21
LED使用	25	19	16
白熱灯使用	0	2	2

(2) エネルギー消費量の方法

エネルギー消費量の調査は、北方型住宅 ECO の場合と同じく、毎月の熱源別消費量を居住者が検針票などをもとに調査票に記入する方法で実施した。太陽光発電については、検針票から売電量を転記してもらった。発電量は、太陽光発電モニターの表示画面から転記してもらうか、クランプ式の電流計測による自動計測器(アイフォーコム・スマートエコロジー製 EP01)の測定値を使用した。また、一部の全電化住宅では、同様にクランプ式の電流計測により、暖房と給湯の個別の電力消費量を測定した。

(3) エネルギー調査の結果

北方型省 CO₂ 住宅におけるエネルギー消費量調査は進行中であるため、現在までに、1年分以上の熱源別消費量が得られている住宅 17 件を対象として、以降の分析を行う。対象住宅 17 件の一覧を表 6-16 に示す。

これらの 17 件の住宅の熱源別年間エネルギー消費量を図 6-33 に示す。住宅番号 1～5 が、暖房設備に電気ヒーター式の機器を併用している住宅、6～13 が電気ヒートポンプ式のみ、14～17 がガスを使用している住宅で、それぞれ消費量の多い順に並べている。太陽光利用量は、太陽光発電量から売電量を差し引いた値としたが、発電量の調査漏れがあった住宅は、太陽光利用量を記載していない。

電気ヒーター式の機器を併用している住宅では、どの機器を優先して使用するかで、

表 6-16 エネルギー消費量調査の対象住宅

番号	建設地	床面積	Q値	暖房設備	給湯設備	換気設備	照明設備(LDK/LDK 以外居室/非居室)	太陽光 発電
1	北見市	146.5	1.10	温水(電気ヒーター式)	電気ヒートポンプ給湯器	第1種熱交換	LED使用/LED使用/ 白熱灯なし・人感セン サー	5.0
2	旭川市	150.1	1.20	エアコン+電気蓄熱暖房機	電気ヒートポンプ給湯器	第2種・第3種 (DCモーター)	LED使用/白熱灯なし /白熱灯なし	4.0
3	北見市	137.6	1.16	電気蓄熱暖房機 +電気式パネルヒーター	電気ヒートポンプ給湯器	第1種熱交換 (DCモーター・効率 85%以上)	LED使用/LED使用 /LED使用	5.0
4	旭川市	101.0	1.19	エアコン+電気蓄熱暖房機	電気ヒートポンプ給湯器	第1種熱交換	白熱灯なし/白熱灯な し/白熱灯なし	3.7
5	札幌市	113.2	1.17	エアコン +電気式パネルヒーター	電気ヒートポンプ給湯器	第1種熱交換 (効率85%以上)	LED使用/白熱灯使 用/LED使用	4.6
6	長万部町	127.5	1.20	温水(電気ヒートポンプ式)	電気ヒートポンプ給湯器	第1種熱交換 (効率85%以上)	白熱灯なし/白熱灯な し/白熱灯使用	4.2
7	八雲町	138.5	1.15	温水(電気ヒートポンプ式) +エアコン	電気ヒートポンプ給湯器	第1種熱交換 (DCモーター・効率 85%以上)	LED使用/LED使用/ 白熱灯なし	4.8
8	函館市	135.8	1.15	温水(電気ヒートポンプ式)	電気ヒートポンプ給湯器	第2種・第3種 (DCモーター)	LED使用/LED使用 /LED使用	3.0
9	釧路市	169.1	1.17	温水(電気ヒートポンプ式) +エアコン	電気ヒートポンプ給湯器	第2種・第3種 (DCモーター)	LED使用/白熱灯なし /白熱灯なし	4.2
10	釧路市	112.0	1.19	温水(電気ヒートポンプ式)	電気ヒートポンプ給湯器	第2種・第3種 (DCモーター)	白熱灯なし/白熱灯な し/白熱灯なし	3.5
11	北斗市	198.7	1.19	温水(電気ヒートポンプ式)	電気ヒートポンプ給湯器	第1種熱交換 (DCモーター・効率 85%以上)	LED使用/白熱灯なし /LED使用	7.5
12	札幌市	112.6	1.18	温水(電気ヒートポンプ式)	電気ヒートポンプ給湯器	第2種・第3種 (DCモーター)	LED使用/LED使用 /LED使用	4.9
13	函館市	120.2	1.10	温水(電気ヒートポンプ式)	電気ヒートポンプ給湯器	第1種熱交換 (DCモーター・効率 85%以上)	LED使用/LED使用 /LED使用	5.7
14	北見市	139.8	1.19	温水(ガス潜熱回収型)	ガス瞬間式(潜熱回収型)	第1種熱交換 (効率85%以上)	白熱灯なし/白熱灯な し/白熱灯なし	3.8
15	登別市	110.7	1.13	温水(ガス潜熱回収型)	ガス瞬間式(潜熱回収型)	第1種熱交換 (DCモーター)	LED使用/LED使用 /LED使用	4.0
16	帯広市	108.5	1.19	温水(ガス潜熱回収型)	ガス瞬間式(潜熱回収型)	第2種・第3種 (DCモーター)	LED使用/LED使用/ 白熱灯なし	4.2
17	旭川市	156.1	1.07	温水(ヒートポンプ・ガス瞬間 式併用型)	温水(ヒートポンプ・ガス瞬間 式併用型)	第2種・第3種	白熱灯なし/白熱灯な し/白熱灯なし	4.5

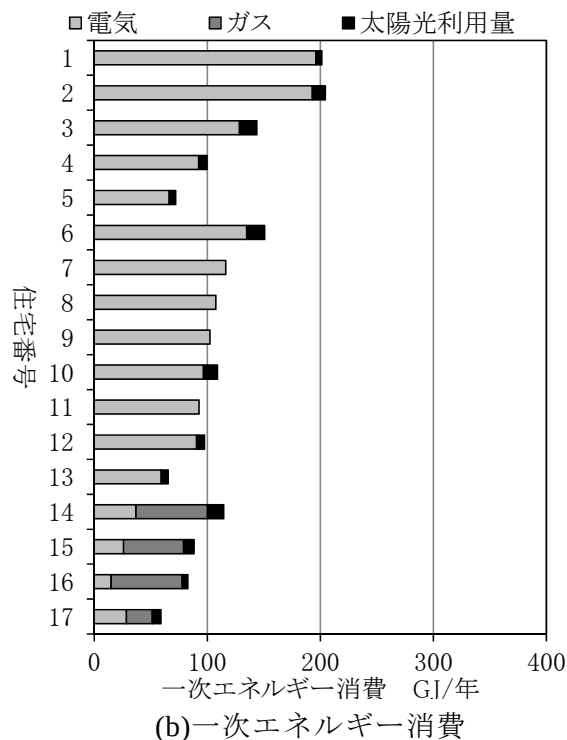
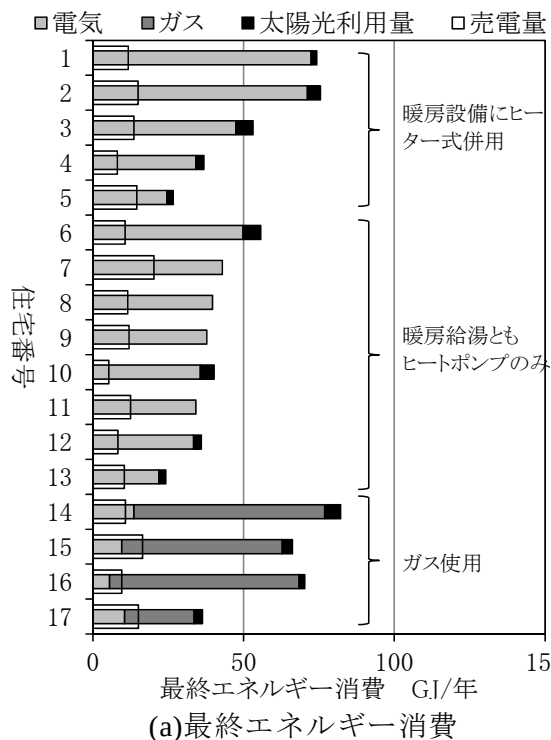


図 6-33 年間エネルギー消費量

一次エネルギー消費量が変わる。電気熱源の住宅 1～13 の平均一次エネルギー消費量は太陽光利用分を含めないで 114GJ/(年・世帯)で、北方型住宅 ECO と比べてかなり減っているが、ガス熱源の住宅 14～17 の平均 77 GJ/(年・世帯)と比べるとまだ大きい。

図 6-34 は、熱源種別とヒーター式熱源の有無で、調査住宅群を 3 つに分類した場合の、それぞれの月別最終エネルギー消費量の平均を示す。

用途分離の方法については次による。

暖房・給湯

電気熱源の住宅 1～13 については、全電力消費量から、「調理」と「照明ほか」分を差し引いたものを、暖房、給湯用の電力消費量とする。さらに、電流計測により暖房と給湯の電力消費量を計測した、3 件の住宅の暖房、給湯比率（表 6-17）を用いて、暖房と給湯の分離を行う。

ガス熱源の住宅 14～17 については、6.5.1(1)で述べた方法と同じく、給湯負荷の変動係数を用いた暖房と給湯の用途分離を行う。

調理

6.5.1(1)で述べた北方型 ECO で用いた値と同じとする。

照明ほか

全住宅とも、ガスを使用している 14～17 の住宅の平均値を用いる。これは、実際の「照明ほか」の電力消費量から、太陽光利用分の電力を差し引いた値に相当する。

太陽光利用量

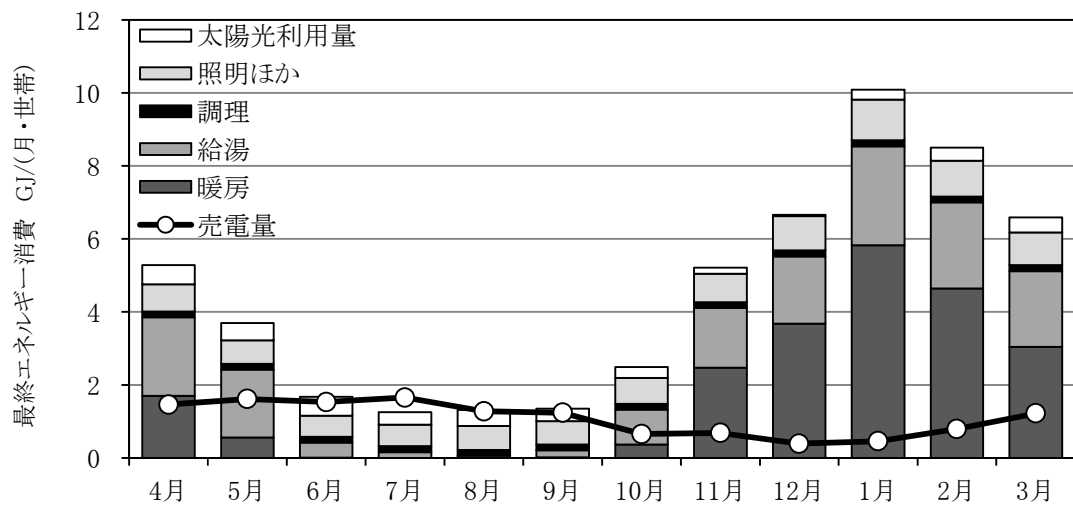
母数から不明の住宅を除いて平均化している。

表 6-17 暖房給湯エネルギー消費に対する給湯エネルギー消費の比率（住宅 6、7、13 の平均）

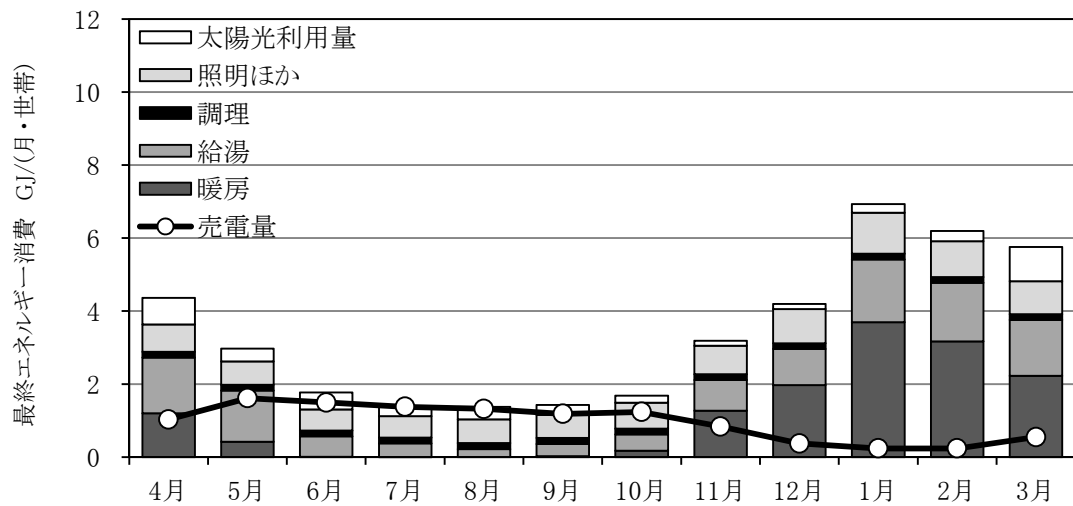
4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
0.56	0.77	0.98	1.0	1.0	0.93	0.73	0.40	0.33	0.32	0.34	0.41

夏季はヒートポンプの効率が良いため、ヒートポンプを使用している住宅では、6 月から 10 月まで、発電量と電気使用量が同程度となっている。ただし、発電量に対する自家消費分の割合は年間で 23%に過ぎない。

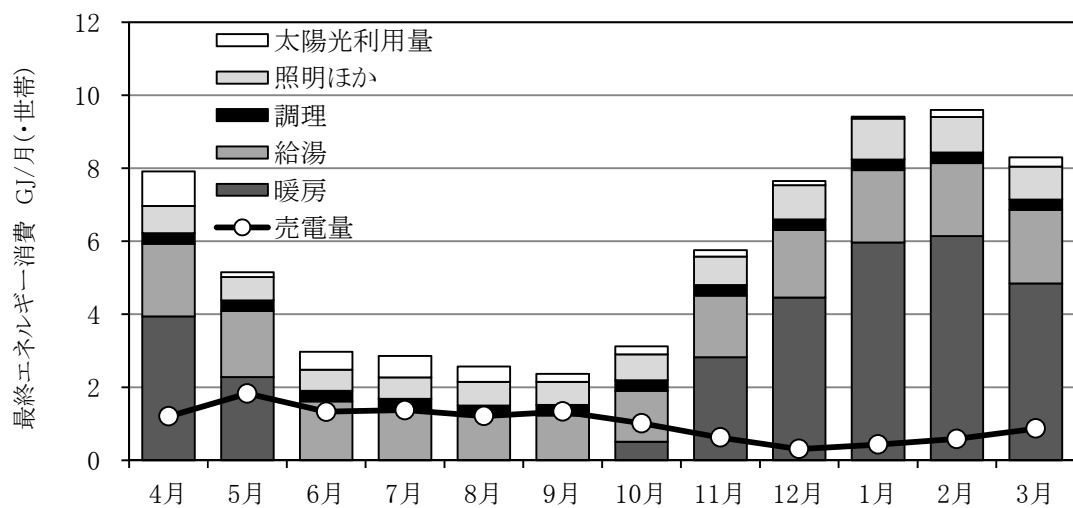
また、暖房、給湯にヒートポンプのみを使用している住宅 6～13 の、年間最終エネルギー消費は暖房、給湯それぞれ、14.2GJ/(世帯・年)、11.5GJ/(世帯・年)である。一方、ガスを使用している住宅 14～17 は、それぞれ、31.0GJ/(世帯・年)、20.2GJ/(世帯・年)である。ここから、ガス機器の効率を 0.9 と仮定して、年間のヒートポンプの COP を求めると、暖房が 2.0、給湯が 1.6 となる。用途分離の段階で誤差を生じている可能性があるが、対象住宅はすべて空気熱源ヒートポンプであり、年間のシステム COP は 2 をやや下回るのが現状だと考えられる。



(a)ヒーター式暖房設備を併用している住宅（住宅番号 1～5 の平均）



(b)暖房・給湯とも電気ヒートポンプ式の住宅（住宅番号 6～13 の平均）



(c)ガスを使用している住宅（住宅番号 14～17 の平均）

図 6-34 月別の最終エネルギー消費

6.5.3 既往の調査との比較

ここで、既往研究による住宅の消費エネルギー消費量調査結果と、本研究の調査結果の比較を行う。比較を行う既往研究などを表 6-18 に示す。

図 6-35、図 6-36 には用途別、熱源別に最終エネルギー消費量と一次エネルギー消費量の比較を示す。一部、既往の調査結果から消費量が判明しない場合は、グラフを示していない。

図 6-35(a)を見ると、一般北方型住宅、北方型住宅 ECO、北方型省 CO₂ 住宅と、断熱性能の向上により、暖房負荷が確実に減っていることがわかる。図 6-35(b)または図 6-36(b)を見ると、北方型住宅 ECO は既往研究と比べて、極めて一次エネルギーが増加したことがわかる。それに対して、北方型省 CO₂ 住宅は、電気の使用割合が高いにもかかわらず、一次エネルギー消費量が減少しており、多くの住宅でヒートポンプを採用したことや、断熱性能の向上、換気設備、照明設備を含めた高効率化の効果が現れていると考えられる。なお、太陽光発電の自家消費分も、一次エネルギー消費量の減少に寄与している。

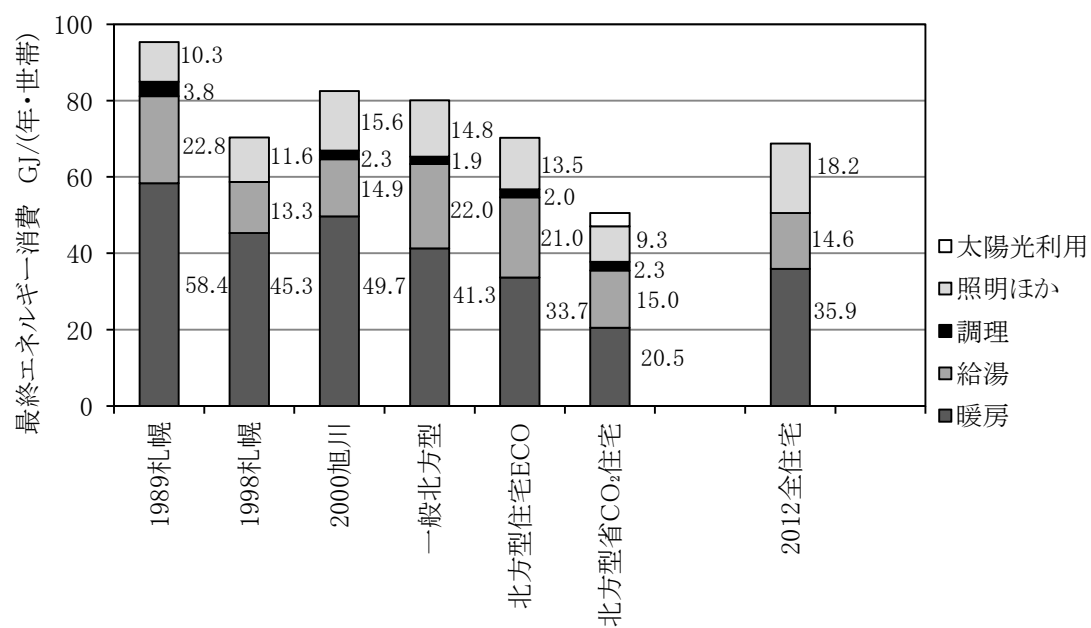
しかしながら、1989 年、1998 年の既往研究による調査結果、また一般住宅を対象とした文献値と比べると、必ずしも一次エネルギー消費量は減少していない。

北方型省 CO₂ 住宅は依然として電気熱源の暖房・給湯設備の使用率が高く、様々な省エネ対策を取り入れた結果、ようやく従来の石油集中暖房の住宅の一次エネルギー消費量に追いついたというのが現状である。

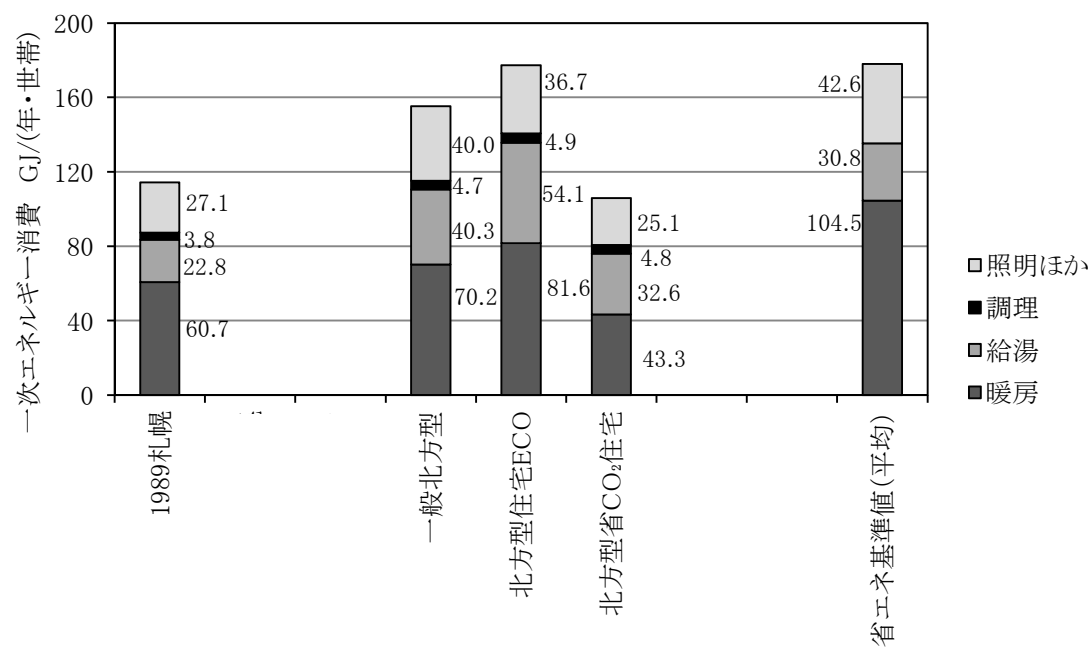
なお参考に、図 6-35(b)には、省エネ基準値として Web プログラムによる計算値を示している。省エネ基準判定用の Web プログラムは、実態との比較を目的としたものではないため、特に暖房負荷が実態よりも大きく算出される傾向がある。

表 6-18 エネルギー消費量の比較を行う調査群

調査名	建設地	建設年	調査棟数	Q 値 [W/(m ² K)]	平均 床面積[m ²]	出典
1989 札幌	札幌	1989	26 件	不明	118.9	文献[14]
1998 札幌	札幌近郊	1983-1997	8 件	不明	122.5	文献[15]
2000 旭川	旭川近郊	1999-2001	31 件	1.60	149.5	文献[16]
一般北方型	全道	2005-2008	12 件	1.24	139.2	本研究 6.5.1
北方型住宅 ECO	全道	2008-2009	55 件	1.52	135.4	本研究 6.5.1
北方型省 CO ₂ 住宅	全道	2011-2014	17 件	1.16	134.0	本研究 6.5.2
2008 一般戸建	全道	すべて	570 件	不明	126.4	文献[17]
2012 全住宅	全道	すべて(集合 含む)	-	不明	91.2	文献[18]
省エネ基準値 (平均)	全道	2012	-	1.43	135.1	本研究 5.4.3

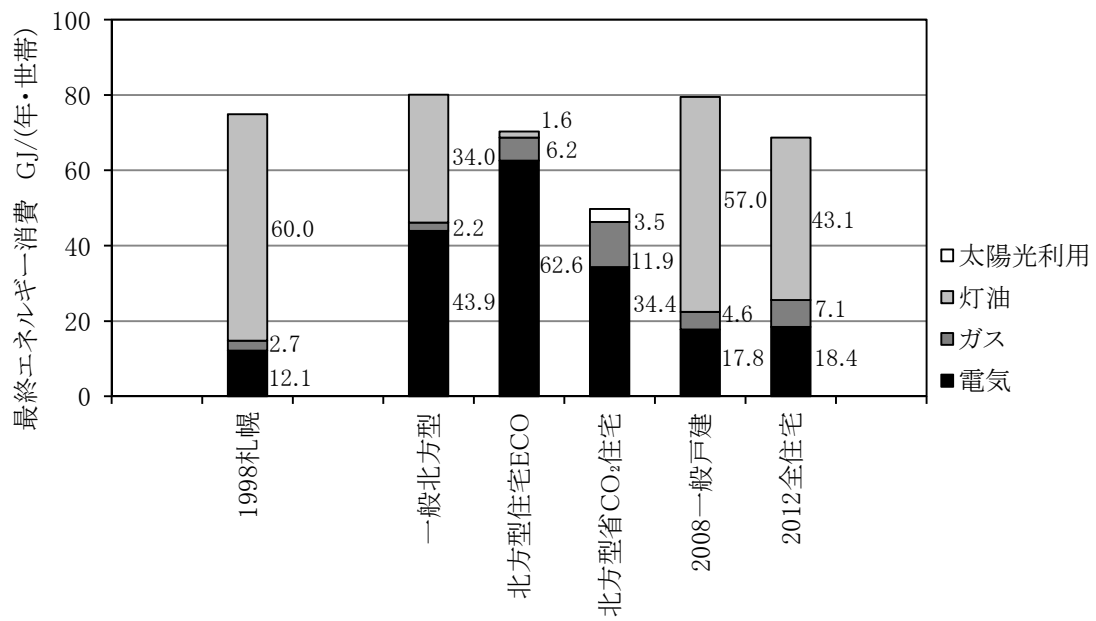


(a)最終エネルギー消費

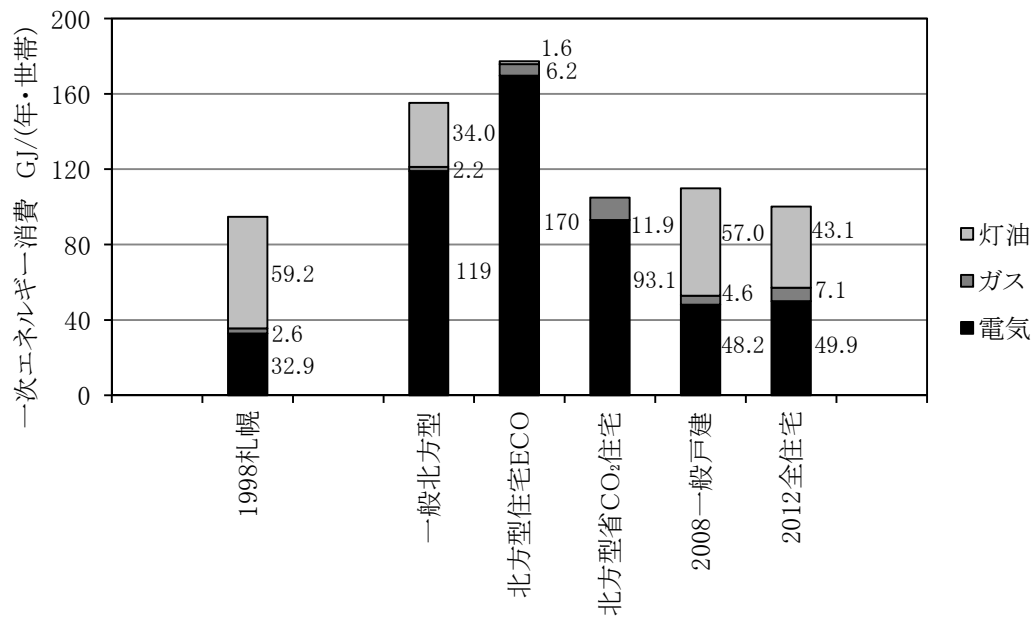


(b)一次エネルギー消費

図 6-35 用途別エネルギー消費量



(a)最終エネルギー消費



(b)一次エネルギー消費

図 6-36 熱源別エネルギー消費量

6.5.4 暖房負荷に影響を与える要因の考察

(1) 検討の目的

先に、6.5.1(3)で述べたとおり、暖房エネルギーに関する重回帰分析では、説明変数との間に明瞭な関係を見出すことができなかった。その原因として、暖房と給湯用エネルギーの分離に起因する誤差もあるが、高断熱住宅では換気熱損失や室内取得熱が暖房負荷に与える影響が相対的に大きくなることも考えられる。ここでは、エネルギー消費量の用途分離を比較的精度良く行うことができたケースを対象に、換気量の実測と、建物周囲の日射遮蔽物の調査を行い、それらがエネルギー消費量に及ぼす影響を考察する。

(2) 調査対象住宅の属性

調査対象は表 6-19 に示す 11 件とした。Q 値は換気回数を一律 0.5 回/h として計算した値である。すべての住宅が設備を全電化としており、温水式の集中暖房を採用している。図 6-37 に各住宅の熱損失の内訳を示す。熱交換換気設備を有する住宅 11 を

表 6-19 調査対象住宅の属性

住宅番号	建設地	家族人数 [人]	床面積 [m ²]	熱損失係数 [W/m ² K]	窓ガラス 仕様	暖房設備	給湯設備
1	札幌市	3	129.2	1.2	LowE三重	温水(電気ヒーター式)	
2	札幌市	2	121.3	1.2	LowE三重	温水(電気ヒーター式)	
3	札幌市	2	207.2	1.3	LowE二重	温水(電気ヒーター式)	電気ヒーター温水器
4	札幌市	3	132.9	1.3	LowE三重	温水(電気ヒーター式)	
5	札幌市	5	155.7	1.2	LowE二重	温水(電気ヒーター式)	電気ヒーター温水器
6	札幌市	2	87.4	1.3	LowE三重	温水(電気ヒーター式)	
7	恵庭市	6	155.9	1.1	LowE三重	温水(電気ヒーター式)	電気ヒーター温水器
8	札幌市	4	150.4	1.4	LowE二重	温水(電気ヒーター式)	電気ヒーター温水器
9	札幌市	不明	180.5	1.2	LowE二重	温水(電気ヒーター式)	電気ヒートポンプ温水器
10	札幌市	3	119.7	1.0	LowE三重	温水(電気ヒーター式)	電気ヒートポンプ温水器
11	札幌市	4	147.5	1.3	LowE三重	温水(電気ヒートポンプ式)	

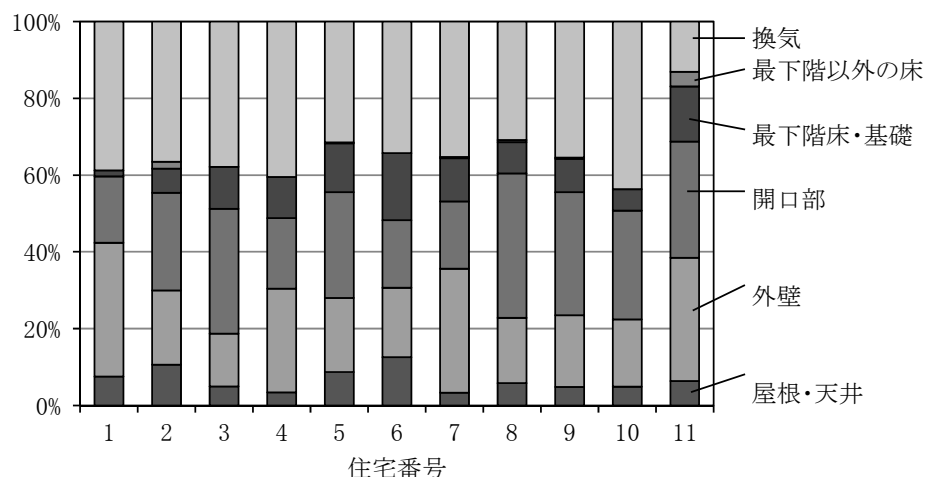


図 6-37 熱損失の内訳

除き、換気による熱損失が約40%を占めており、断熱性能の向上によって、換気による熱損失の割合が大きくなっている。

(3) 換気量の実測と日射遮蔽物の調査

換気量の実態を把握するため、各住宅の常時換気量の実測を行った。測定は2011年8月に実施したが、冬期間の暖房負荷との関係を分析することが目的であるため、居住者に確認の上、冬期間の常時換気時の風量設定で測定を行った。測定にはコーナ一札幌製風量測定器 SWF-125 型を使用し、フィルターなどが汚れている場合は清掃を行った後、室内側から各排気口の風量を測定した。第1種換気の住宅11は給気、排気両方で測定し、合計量の大きい給気量の値を採用した。

表6-20に測定結果を示す。11件中9件で実測換気回数が0.5回/hを下回っていたが、住宅2は常時換気用のセントラル換気システムのほか、レンジファンも常時稼働させており換気量が過大となっていた。

また、換気量測定に併せて、建物周囲の日射遮蔽物の状況を調査した。隣接建物や樹木などによる日射遮蔽の度合いに応じて日射侵入量の低減係数を表6-21のとおり1.0、0.7、0.3の3段階で設定した。

表 6-20 換気量の実測結果

住宅番号	換気方式		0.5回換気量 [m ³ /h]	設計換気量 [m ³ /h]	実測換気量 [m ³ /h]	実測換気回数 [回/h]
1	第3種	個別	139	155	86	0.31
2	第3種	集中	126	140	313	1.24
3	第3種	集中	255	380	150	0.29
4	第3種	集中	195	195	74	0.19
5	第3種	個別	164	179	220	0.67
6	第3種	個別	114	140	40	0.18
7	第3種	個別	174	192	143	0.41
8	第3種	集中	214	219	146	0.34
9	第3種	集中	191	200	93	0.24
10	第3種	集中	137	145	111	0.40
11	第1種(全熱交換)	集中	181	185	123	0.34

表 6-21 日射遮蔽物を考慮した係数

住宅番号		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
日射遮蔽物を考慮した係数	東	1.0	1.0	0.7	0.3	1.0	0.7	1.0	0.3	0.3	1.0	1.0
	南	0.7	0.7	0.7	1.0	0.3	0.7	0.3	1.0	0.7	0.3	1.0
	西	0.3	0.3	0.7	0.3	0.7	0.7	0.3	0.3	0.7	0.3	0.3
	北	0.3	1.0	0.7	0.3	0.3	0.3	1.0	0.3	1.0	1.0	0.3

(4) 予測暖房負荷と実測値との比較

換気量や日射遮蔽物など、各種パラメータの影響を考察するため、パラメータを個別に設定した場合と共通の値を用いた場合の暖房負荷を、室内取得熱を考慮したデグリーデー法^[19]で計算し、実際のエネルギー消費量と比較した。暖房負荷予測計算のパラメータは、表 6-22 に示す 5 項目で、各項目共通設定と個別設定の 2 水準とした。外気温は 2009 年度の気象庁観測データを用い、自然温度の算出方法は 6.3.6 項と同様とした。

表 6-22 計算パラメータの設定

項目	共通設定	個別設定
換気実測熱損失	0.5 回/h 相当	各住宅の実測換気量に相当する熱損失
平均室温	21.6℃	各住宅の 11 月～4 月の平均値(居間と主寝室の平均)
照明ほか発熱量	531W	エネルギー消費量調査による「照明ほか」の消費量の 11 月～4 月の実績値
日射遮蔽物	なし	各方位の開口部日射侵入量に 表 6-21 の係数を乗じる
人体発熱量	90W	家族数(不明の住宅は 3 人とする)×30W

(5) 予測値と実績値の比較

主なパラメータの組合せにおける結果を表 6-23 に示す。平均誤差率は各住宅の誤差率＝(予測値／実績値－1)×100[%]の平均値、相関係数は予測値と実績値と相関係数で、それぞれ暖房にヒートポンプを使用している住宅 11 を除く住宅で算出している。また、条件 1、2、4、5 における実績値と予測値の対応を図 6-38 に示す。これらの結果から、換気量の設定が予測誤差に大きな影響を及ぼしており、次いで日射遮蔽物や照明ほかの発熱量の影響が大きいことがわかる。

表 6-23 各計算条件における平均誤差率と相関係数

計算条件	換気実測熱損失	平均室温	日射遮蔽物	照明ほか発熱量	人体発熱量	平均誤差率	相関係数	平均絶対誤差率
条件1	共通	共通	共通	共通	共通	-1%	0.24	0.25
条件2	個別	共通	共通	共通	共通	-16%	0.75	0.23
条件3	個別	個別	共通	共通	共通	-16%	0.74	0.23
条件4	個別	個別	個別	共通	共通	-4%	0.74	0.23
条件5	個別	個別	個別	個別	共通	-5%	0.91	0.12
条件6	個別	個別	個別	個別	個別	-6%	0.90	0.12

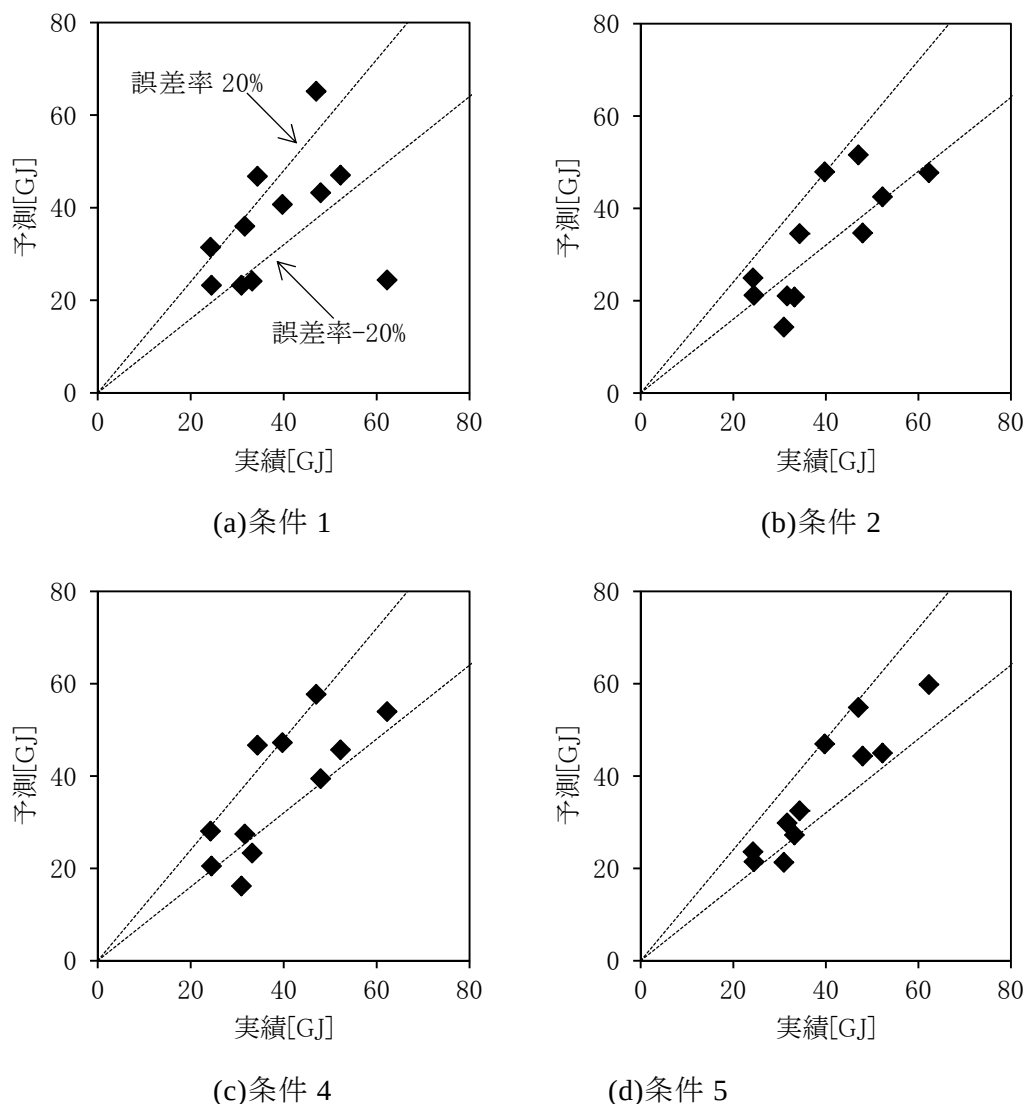


図 6-38 期間暖房負荷の実績値と予測値の比較

図 6-39 には、表 6-23 の条件 4 で、給湯用電力消費量を全住宅の平均値 17.9GJ（住宅 9～11 は 6.0GJ）、調理用電力消費量を 1.92GJ として計算した年間の総電力消費量と実績値の比較を示す。照明ほかの電力消費量は一律の値を使用しているが、その実績値との誤差は暖房負荷と相殺される。結果として、予測誤差は 11%以内に収まっている。つまり、換気量や日射侵入量を適切に評価すれば、計算によるエネルギー消費量の予測誤差は 10%程度に収められる可能性がある。

以上の検討より、高断熱住宅のエネルギー消費量には、換気量や日射侵入量の実態が大きな影響を及ぼしていることがわかった。

なお、換気量が過大または過小な住宅が散見された。換気をはじめ、住宅設備は居住者の使い方が、エネルギー消費量に影響を及ぼすと考えられるので、今後、設備の使い方とエネルギー消費のより詳細な検証や、居住者に対して適切な使い方を促す仕組みづくりも、必要になると考えられる。

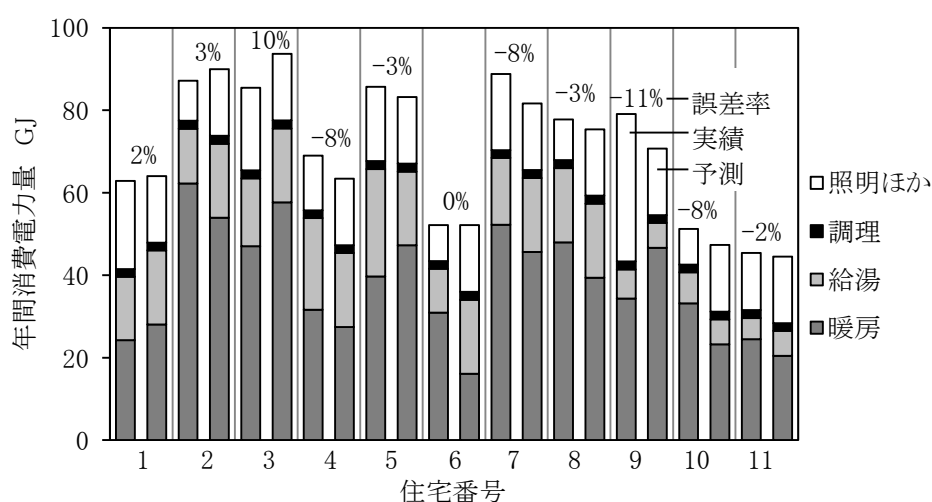


図 6-39 年間電力消費量の実績値と予測値の比較

6.6 本章のまとめ

本章では「北方型住宅 ECO」と「北方型省 CO₂ 住宅」を対象として、温熱環境とエネルギー消費の実態を調査した。得られた主な知見は次のとおりである。

北方型住宅 ECO の温熱環境調査

- (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らいっていることや、住宅の熱容量の効果、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らいっている。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、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。

居住者アンケート

- (1) 居住者アンケートによると、夏季は居間の室温が 30℃、不快指数が 80 を超える場合があると、「暑い」「やや暑い」と感じる居住者がいる。冬季は、日中の居間が 25℃を超える場合、夜間の寝室が 20℃を超える場合に、「暑い」「やや暑い」と感じる居住者がいる。冬季に「ちょうどよい」回答している住宅における平均温度は、日中の居間が 22.3℃、夜間の寝室が 20.1℃であった。
- (2) 冷房装置の設置率は、2012 年 2 月の Web アンケートによると全道平均 3 割で、地域による差が大きい。「北方型住宅 ECO」も同程度の設置率だが、太陽光発電の設置を必須とした「北方型省 CO₂ 住宅」では設置率が 7 割程度と高くなった。

- (3)夏季の通風は、多くの住宅で実施されているが、防犯や騒音、プライバシーの問題により、通風を行っていない住宅もあり、夏季の快適性確保のためには適切な通風開口部の設計が重要である。
- (4)冬季に暑くなりすぎた場合の対処方法は、「北方型住宅 ECO」と「北方型省 CO₂住宅」と一般住宅で大きな差がない。ただし、暖房負荷を増加させることでの対処が行われている場合がある。特に、蓄熱暖房機は窓を開けるなど暖房負荷を増加させるしか対処方法がない傾向がアンケート結果にも現れた。
- (5)世帯のライフステージによって、昼間の在宅率が変わること、また、昼間の在宅率が最も低い居住年数 20 年以内の住宅で「一日中同じ設定で暖房する」割合が最も高いことが明らかとなった。ライフステージの変化に対応できる、適切な暖房システムの設計は今後の課題である。

エネルギー消費量調査

- (1)「北方型住宅 ECO」は、断熱性能の向上により、最終エネルギー消費は従来の住宅と比べて減少したものの、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が大きく増えた。
- (2)「北方型省 CO₂住宅」は、設計時にエネルギー消費量の確認することで、「北方型住宅 ECO」と比べて一次エネルギー消費量が大きく削減された。しかし、従来の石油集中暖房の住宅と比べて同程度に留まっている。
- (3)実際の暖房負荷は換気量や日射侵入量の実態が大きく影響しており、設計値から予測した暖房負荷とは乖離する場合がある。また、換気量の実態を調査した結果、換気量が過大または過小な住宅が散見された。換気をはじめ、住宅設備は居住者の使い方が、エネルギー消費量に影響を及ぼすと考えられるので、今後、設備の使い方とエネルギー消費のより詳細な検証や、居住者に対して適切な使い方を促す仕組みづくりが必要になると考えられる。

参考文献

- [1] タギサデギアン，繪内正道：北海道無暖冷房住宅に向けた試み その2，日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2，pp.101-102，2008.9
- [2] 立松宏一，鈴木大隆：寒冷地の住宅の暖房負荷低減に向けての一考察，日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2，pp.21-22，2008.9
- [3] 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
- [4] 日本建築学会：拡張アメダス気象データ，丸善，pp.297-304，2000.1
- [5] 全国日射量平年値データマップ MONSOLA05(801)，日本気象協会，<http://www.jwa.or.jp/content/view/full/1947/>，（参照 2012-6-1）
- [6] 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

- [7] 浦野良美, 中村洋編著: 建築環境工学, 森北出版, p.254, 1996.6
- [8] 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
- [9] 鈴木大隆, 高倉政寛, 村田さやか, 廣田誠一: 常時開放可能な開口部を用いた外気冷房の設計手法について, 日本建築学会北海道支部研究報告集, pp.231-234, 2007.7
- [10] 2010 年国民生活時間調査報告書, NHK 放送文化研究所, 2011.2
- [11] 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
- [12] 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
- [13] 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
- [14] 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
- [15] 濱田靖弘・中村真人・落藤澄・村越千春・鶴崎敬大・横尾美雪・成田涼子・嶋原亮・長倉香織・横山真太郎: 札幌における家庭用エネルギー消費量とその季時別変動に関する実測と評価, 空気調和・衛生工学会論文集, No.82, pp.29-37, 2001.7
- [16] 鈴木大隆, 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
- [17] 平成 20 年度北海道家庭用エネルギー消費実態調査(2008 エコファミリー省エネアンケート) 報告書, 北海道消費者協会, 2009.3
- [18] 住環境計画研究所: 家庭用エネルギーハンドブック(2014 年版), p.13, 省エネルギーセンター, 2013.12
- [19] 堀江悟郎, 荒谷登, 本間宏, 横平昭: 木造住宅の自然温度, 日本建築学会論文報告集号外, p.421, 1966.10

本章に関連する既発表文献

- [20] 立松宏一, 池田裕雅, 高倉政寛, 鈴木大隆, 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
- [21] 立松宏一, 池田裕雅, 高倉政寛, 鈴木大隆, 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
- [22] 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

第7章 結論

7.1 本研究のまとめ

本研究では、「優良ストック形成に向けた北海道の戸建住宅の省エネルギーに関する研究」と題して、①断熱水準、②断熱材の耐久性、③一次エネルギー消費量、④住まい方と省エネルギーの4項目に着目し、実態把握と検証を行った。以下に要点をまとめる。

①断熱水準

第3章において、道内で戸建て住宅の建設実績がある全事業者を対象とした実態調査とアンケートを実施し、以下の知見を得た。

- ・2012年新築戸建住宅で U_A 値基準を満たす割合は1、2、3地域それぞれで89%、90%、99%と推定された。
- ・2010年から2012年の3か年で比較した場合、平均値としては U_A 値が向上する傾向がみられない。
- ・ただし、窓に関しては、トリプルガラスの採用率が、2010年2.5%、2011年7.9%、2012年8.5%と年々上昇している。また複層ガラスの空気層厚さは12mmとするものが多いが、16mm以上のケースも増加している。
- ・ U_A 値は年間建設棟数4棟～50棟の中規模事業者がやや小さい（断熱性能が高い）傾向がある。
- ・地域間で建物形状を同一とする仮定のもとでは、 U_A 値の平均値には地域差が見られるものの、気候による暖房負荷の差を埋め合わせるほどの断熱性能の違いはない。
- ・現在の最高の断熱水準は、開口部を $U=1.0\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ と仮定して、 $U_A=0.15\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ 程度である。外壁の厚さは300～400mm、天井・屋根が400～600mm程度に相当する。

-
- ・ 事業者コストを抜きの外壁の推奨仕様を尋ねたアンケートでは、各事業者の現状の仕様よりも、断熱性の高い仕様が回答として得られた。外壁の断熱厚さ 200mm 程度、U 値 $0.20\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ 程度までは、2 割程度の事業者が推奨仕様として回答しており、今後の普及の可能性はある。
 - ・ コストを抜きの場合、外壁では、吹込み用断熱材により厚さを増す方向や、高性能の発泡プラスチック断熱材に置き換えて性能を向上させる方向が志向されている。

②断熱材の耐久性

第 4 章において、住宅の断熱材として最も一般的に使用されており、長期耐久性の検証が求められているグラスウールを対象とし、促進試験および長期使用した断熱材の実態調査により、長期性状変化を検証した。その結果、以下の知見を得た。

- ・ グラスウールは、高温高湿の条件下で、バインダーの劣化とガラス繊維の強度低下が生じ、厚さの増大と復元力の低下(いわゆる「へたり」)をもたらす。
- ・ 上記のような変化が生じて、呼び厚さにおける熱伝導率は大きくならない(断熱性能は低下しない)。
- ・ 現場採取調査においても、促進試験と同様の色あせや復元力が低下していると考えられる状況が一部で確認されたが、形状保持に支障をきたしているような事例は確認されなかった。
- ・ グラスウールの経年変化の新たな評価方法として、定量的な評価や繰り返し測定が可能であること、不整形なサンプルの測定にも適用可能であり、測定に要する時間も比較的短いなどの長所を持つ突き刺し試験を提案した。
- ・ 温度および湿度をパラメータとした促進試験に寿命予測モデルを適用し、実用環境での経年変化を予測した結果、適切な防湿層や通気層の施工がなされている限り、グラスウールに支障が生じるという結果は得られなかった。すなわち、グラスウールの長期性能を維持するためにも、適切な断熱・気密施工が重要であるとの知見を得た。

③一次エネルギー消費量

第 5 章において、新築戸建住宅の設備仕様の実態調査を行い、一次エネルギー消費量の推定を行った。その結果、以下の知見を得た。

- ・ 2011 年新築と 2012 年新築の戸建住宅に採用された設備の比較では、電気ヒーター式の設備の減少が顕著である一方、潜熱回収型のガス機器が大きく増加している。エアコンは採用率が小さいものの、暖房機器としての採用が増加している。従来、道内で圧倒的に多かった石油熱源機器は、著しく減少している。
- ・ 事業者所在地によって採用される設備の違いが極めて大きい。空知・石狩・後志

で集中暖房が多く、渡島・檜山、胆振・日高で暖房用のエアコンや電気ヒートポンプ給湯器の普及が進んでいる。上川・留萌・宗谷、オホーツク、十勝、釧路・根室で電気ヒーター式の機器が依然として多く採用されており、一次エネルギー消費量の点で問題が大きい。

- ・各種仮定に基づく、省エネルギー基準の判定用 Web プログラムによる計算によると、暖房、給湯、換気の合計で省エネルギー基準を満たすのは、1、2、3 地域それぞれ 27%、60%、69%と、 U_A 値基準の達成率よりも低い。特に、1 地域では電気ヒーター式の設備の使用割合が高いため、一次エネルギー消費量が大きくなっている。
- ・設備仕様の提案に際しては住宅建設事業者に主導権がある。特に暖房用のエアコンなど新たな設備は事業者によって普及が進んでいると考えられることから、事業者に対して適切な情報を提供していくことが重要である。

④住まい方と省エネルギー

第6章において、従来の断熱性能を大きく上回る高断熱住宅である「北方型住宅 ECO」と「北方型省 CO₂ 住宅」の調査、また一般の戸建住宅居住者を対象としたアンケートを実施し、以下の知見を得た。

夏季の温熱環境

- ・ U_A 値が $0.20\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ 程度までの高断熱住宅では、心配されたオーバーヒートは、実態調査でほとんど確認されなかった。要因として、居住者の窓開放による通風や、住宅、家具などの熱容量の効果、日射取得熱が想定よりも少ないことが考えられる。
- ・ ただし、夏季の通風は、多くの住宅で実施されているが、防犯や騒音、プライバシーの問題により、通風を行っていない住宅もあり、夏季の快適性確保のためには適切な通風開口部の設計が重要である。
- ・ 夏季は居間の室温が 30°C 、不快指数が 80 を超える場合があると、「暑い」「やや暑い」と感じる居住者がいる。
- ・ 冷房装置（エアコン）の設置率は、2012 年 2 月の Web アンケートによると全道平均 3 割で、地域差が大きい。太陽光発電の設置を必須とした「北方型省 CO₂ 住宅」では設置率が 7 割程度と高くなった。

冬季の温熱環境

- ・ 北方型住宅 ECO の 12 月から 2 月における居間の室温は 22.5°C 、主寝室の平均室温は 20.9°C であり、一般住宅を対象とした調査結果と比べてやや高い。
- ・ 冬季は、日中の居間が 25°C を超える場合、夜間の寝室が 20°C を超える場合に、「暑い」「やや暑い」と感じる居住者がいる。冬季に「ちょうどよい」回答している住宅における平均温度は、日中の居間が 22.3°C 、夜間の寝室が 20.1°C であった。
- ・ 少数ではあるが、冬季も T シャツ、短パンなどの薄着で過ごしている居住者もお

-
- り、他の住宅に比べて日中の居間の温度が 2℃程度高い。
 - ・ 冬季に暑くなりすぎた場合の対処方法は、「北方型住宅 ECO」と「北方型省 CO2 住宅」と一般住宅で大きな差がない。ただし、暖房負荷を増加させることでの対処が行われている場合がある。
 - ・ 昼間の在宅率が最も低い居住年数が 10 年を超え 20 年以内の住宅で、「一日中同じ設定で暖房する」割合が最も高い。ライフステージの変化に対応できる、適切な暖房システムの設計が必要である。

エネルギー消費量

- ・ 「北方型住宅 ECO」は、断熱性能の向上により、最終エネルギー消費は従来の住宅と比べて減少したものの、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たため、一次エネルギー消費量が大きく増えた。
- ・ 「北方型省 CO2 住宅」は、設計時にエネルギー消費量の確認することで、「北方型住宅 ECO」と比べて一次エネルギー消費量が大きく削減された。しかし、従来の石油集中暖房の住宅と比べて同程度の消費量に留まっている。
- ・ 電気熱源の設備を採用する場合は、ヒートポンプなど、高効率の設備を選択し、少なくともガス、石油熱源機器と一次エネルギー消費量を同等以下に抑えることが必要であるが、さらなる削減に向けた課題は大きい。
- ・ 実際の暖房負荷は換気量や日射侵入量の実態が大きく影響しており、設計値から予測した暖房負荷とは乖離する場合がある。また、換気量や日射侵入量を適切に評価すれば、計算によるエネルギー消費量の予測誤差は 10%程度に収められる可能性がある。
- ・ 換気量の実態を調査した結果、換気量が過大または過小な住宅が散見された。

以上、本研究では、北海道の戸建住宅を対象に、断熱と設備による省エネルギーに関する実態把握と検証を行い、良質な住宅ストック形成のために重要な知見を明らかにした。

7.2 今後の課題と展望

北海道の戸建住宅の省エネルギーに関して、特に住宅行政と連携して研究を行う立場から、今後の課題と展望を以下に示す。

断熱水準の目標設定、技術開発

U_A 値という新しい指標が導入されて間もないこともあるが、現在、北海道の住宅が目指すべき断熱性能が定まっていない状況である。また、道内でも地域の気象条件により、エネルギーコストに差が生じており、エネルギーの供給事情も異なる。本研究で明らかとなった実態や、さらなる高断熱化への可能性を踏まえて、コスト検討を行い、その地域に住み続けるための目標値を示すことが必要である。さらに、低コストで高断熱化を実現する工法、材料開発や、既存住宅の改修工法の確立も必要である。

一次エネルギー消費量削減に向けた知見の集積

市場原理により暖房、給湯による全電化が一挙に進み、一次エネルギー消費量が増えた現実、かつて断熱気密施工技術が不十分なまま集中暖房が取り入れられエネルギー消費量が増大したのと状況が類似しており、住宅供給に関わる立場として危機感を持つ必要がある。本研究では事業者に向けて情報を発信することの重要性を示したが、発信すべき情報がまだまだ不足している。設備が多様化する中、道内各地の気象条件下における設備効率是不明な点が多く、設備の長期耐久性に関する検証も必要である。かつて、住宅に関わる関係者が一丸となって課題解決へ努力したように、再び、関係者が問題認識を共有化し、知見を結集して、北海道にふさわしい住宅と設備のあり方を示す必要がある。

自然エネルギー利用の推進

本研究では自然エネルギーの利用を具体的に扱わなかった。特に太陽熱利用は利用可能性が大きく、暖房、給湯負荷の削減に今後不可欠であると考ええる。太陽熱の給湯、暖房、給気予熱への利用は、既往の知見も多く、技術的には確立している部分が多い。問題は太陽熱利用システムが道内の市場に流通していないことである。まずは、少数であっても、太陽熱を利用したいというユーザーがシステムを使えるよう、メーカーへ製品展開を働きかけていく必要がある。

バイオマスや小水力などの分散型エネルギーは、住宅以外の用途も含めて、地域としての利用に取り組んでいく必要がある。

住まい方への関わり

既に、うちエコ診断など、第三者が住まい方に積極的に関与してエネルギー改善を図ろうとする取り組みが制度化されつつある。住宅のエネルギー消費は暖房と給湯の割合が多く、これらを設計施工する技術者には、入居後の住まい方にまで関わっていく役割が今後求められると考えられる。今後急速に普及が進むと考えられる HEMS などの動向も見極め、居住者に対して適切な住まい方、設備の使い方を促す仕組みを構築することが必要である。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、常に的確なご指導を賜りました北海道大学大学院工学研究院の羽山広文教授に深甚な感謝の意を表し上げます。1998 年春に卒論生として先生の研究室に在籍させていただいて以来、幾度も道を踏み外しかけてましたが、お陰様で何とか博士論文をまとめることができました。

学部、修士課程在籍時より多くのご示唆をいただいております長野克則教授、濱田靖弘教授、森太郎准教授には、このたび副査をお引き受けくださり、貴重なご助言を賜りましたことに深く感謝致します。

千歩修教授、飯場正紀教授、菊地優教授、岡田成幸教授、瀬戸口剛教授、森傑教授には審議委員として、論文の内容に関し本質を見据えた貴重なご意見やご指摘を賜りましたことに、心より謝意を表します。

いろいろと相談に乗っていただいた菊田弘輝助教ほか建築環境学研究室のスタッフや学生の方々には、直接的、間接的に励ましとご協力をいただきました。記して、謝意を表します。

本論文は、2008 年 4 月に私が北方建築総合研究所に赴任して以降、業務として実施した内容をもとに構成したものです。再び研究の道へと呼び戻していただいた福島明博士（現北海道科学大学教授）、親身なご指導をいただいた鈴木大隆博士に衷心より感謝申し上げます。また、論文執筆の追い込みの時期に集中して取り組む環境を与えていただいた、石塚弘所長、松村博文部長に心よりお礼申し上げます。

本研究はすべて、チームとして実施したものです。共同研究者の廣田誠一氏、月館司博士、高倉政寛博士、谷口円博士、北谷幸恵博士、村田さやか博士、池田裕雅氏、糸毛治氏、遠藤卓氏、阿部佑平氏ならびに北海道および北方建築総合研究所の関係職員の方々に感謝致します。皆様のご支援がなくしては、本研究は成し得ませんでした。また、調査にご協力をいただきました道内の住宅建設事業者の皆様、居住者の皆様、第 4 章に関して研究成果の発表の許可と論文執筆の機会を与えていただきました硝子繊維協会の各位にも深く感謝致します。

1996 年の後期に北海道大学の荒谷登名誉教授（当時教授）の講義に出席したことをきっかけに、私は建築環境工学の専攻を志望しました。しかしながら、住宅は私にとって難しいテーマであり、修士課程修了まで関わりを避けていました。そのような中で、社会人となってから、荒谷登名誉教授には、北海道建築技術協会の「北海道の特質を生かす自然エネルギー利用の研究委員会」を通じ、また、北海道大学の繪内正道名誉教授には日本建築学会北海道支部北方系住宅専門委員会で実施した住まいづくり市民セミナー「性能向上と住まいのこれから」の企画などを通じ、改めて住宅について深遠な学知に接する機会に恵まれたのは幸運でした。私の力不足を恥じるとともに、温かい励ましをいただきましたことに、心よりお礼申し上げます。

2015 年 2 月

立松宏一