

復興住宅の断熱気密等環境性能の実態

-東日本大震災復興住宅の断熱気密施工に関する実態調査-

主査 林 基哉*¹

委員 本間 義規*² 長谷川 兼一*³

本研究は、東日本大震災の復興住宅の環境性能の向上が、被災者の健康的な生活の基礎となることを最終的な目標としている。震災後3年が経過し、敷地の確保、材料不足、工賃の高騰が、復興住宅建設の課題となっている中、断熱気密性能等の環境性能の向上と普及のために、以下の研究を行った。地域型復興住宅生産グループへの環境性能に関するアンケート調査では、復興住宅建設の遅れと環境性能の多様性が明らかとなった。復興住宅の環境性能測定でも、気密性能(c値)の多様性:0.27~5.14 (c m²/m³)が明らかとなった。簡易気密測定方法の開発と検証では、厨房ファンによる簡易測定の可能性が確認され、簡易気密測定法の普及と気密性能担保の基礎が得られた。

キーワード: 1)復興住宅 2)省エネルギー基準 3)健康維持 4)地域型復興住宅生産グループ 5)アンケート調査
6)簡易気密性能測定法

STATE OF PERFORMANCE ON INSULATION AND AIRTIGHT OF HOUSES FOR VICTIMS SURVEYS ON INSULATION AND AIRTIGHT CONSTRUCTION IN HOUSES FOR VICTIMS OF GREAT EAST JAPAN EARTHQUAKE

Ch. Motoya Hayashi

Mem. Yoshinori Honma, Kenichi Hasegawa

The aim of this study is to use the building environmental performance as a base of healthy life of victims after great east Japan earthquake in 2011. The environmental performances of the houses for victims were investigated using questionnaires and measurements. The results showed that the performance varied and are not enough for the latest building code for energy saving in some cases under the high housing demand. An easy measurement method using a fan in kitchen is proposed and the performance was checked. The method was expected to be a method to expand the airtight houses for victims.

1. はじめに

1.1 研究の背景と目的

2011年3月11日に発生した東日本大震災は、関東東北の太平洋側を中心に、地震と津波、福島第一原発の事故により、多くの被害をもたらし、生活環境を失った多くの被災者が、避難所、仮設住宅での生活を余儀なくされた。震災後数年を経ても、32万人近くの被災者が仮設住宅等で、復興住宅などによる通常的生活環境の回復を待っている。仮設住宅では、多様な生活環境に関する指摘があったが、なかでも東北の気象条件に起因する問題が注目され、断熱材や内窓付加などの応急的対応が行われてきた。これから建設が本格化する復興住宅においても、気象条件への対応が重要な要素となる。2012年度に、住まいと環境・東北フォーラムは、「地域の特性を活かした省CO₂型復興住宅の環境設計」

をまとめた。このマニュアルは高齢者が多く、また様々な心身の負荷を受けてきた被災者が健康的に持続的に生活できる住宅に必要な配慮事項をまとめたものである。復興住宅の建設はすでに徐々に始まっているが、その担い手は、地元の工務店やホームビルダーばかりではなく、全国規模の住宅メーカーであり、全国より施工者が集まっている。被災地は、東北の太平洋側に分布し、比較的温暖な福島南部から、寒冷な岩手北部までに広がっている。また、復興住宅の建設地は、主に津波による被害を受けた沿岸ばかりではなく、土砂崩れなどの地震動による被害を受けた内陸部にも広がっている。これらの地域は、程度の差はあるが、冬期の寒さ対策としての断熱気密性能が基本的要件となっている。この基本的要件の実現において、気密性能とそれに関連する防露性能は、施工者の技量によって大きく左右され

*1 国立保健医療科学院 建築・施設管理研究分野 統括研究官

*2 岩手県立大学盛岡短期大学部 教授

*3 秋田県立大学システム科学技術部 教授

る。震災時点において、これらの地域は断熱気密化が普及段階にあり、その技量も発展途上であった。このような中で、断熱気密化に関する設計・管理の経験、施工者の技量が十分ではない条件下で、復興住宅の建設が急務となっている。

本研究では、地域の工務店等による復興住宅の建設を促進するための、地域の住まいづくりにかかわる団体と県（岩手、宮城、福島）が連携した地域型復興住宅の取組みに注目し、その推進協議会へのヒアリングを行い、登録された生産グループを対象に断熱気密性能等のアンケート調査を実施した。また、アンケート調査中で環境性能に関する測定の協力依頼を行い、気密測定などの実地調査を行った。また、復興住宅の環境性能の基礎となる気密性能の向上と気密工法の普及を目的に、一般的に行われている気密測定法よりも簡便な方法を検討した。

2. 地域型復興住宅に関するアンケート調査

2014年7月における仮設住宅の居住者は、3県（福島県、宮城県、岩手県）で約9万人であり、材料労働力不足、住宅用地整備の遅れによる復興住宅の建設の遅れから、5年以上の仮設住宅居住が2万人を超えると推定されている。宮城県地域型復興住宅推進協議会では、復興住宅の建設実績に関する調査を試みているが、復興住宅に関する住宅供給者の認識の多様性など、実態を把握することが難しい状況がある。同協議会によると、着工数は回復・増加しており、省エネルギー地域区分のⅢ地域においては、ほとんどが次世代省エネルギー基準レベル（等級4）となっているが、宮城県北部の栗原市はⅡ地域で、等級4に満たない場合があるのが現状となっている。岩手県においては、次世代省エネルギー基準（等級4）を標榜しているが、モデル住宅でも等級4を満たしていないものもあり、実物件の仕様も多様である。沿岸部はⅢ地域で比較的温暖であるが、県都（盛岡市）から距離があり情報・施工技術の伝達が

少ないため、断熱気密性能に関する理解が低いことが従来指摘されている。また、Ⅱ地域においては、等級4のコストアップに対応できないために等級3とする場合があることが指摘されている。福島においても基本的状況は共通であるが、原発の影響による復興住宅建設の遅れが指摘されている。

2.1 アンケートの方法と回収率

東日本大震災の地域型復興住宅の地域型復興住宅生産グループとして公表されている287グループを対象に、その代表者連絡先にメールで、復興住宅の断熱気密仕様に関するアンケート調査へのご協力依頼を行った。アンケート用紙はエクセルで作成し、そのファイルをメールで送り、記載後に返信してもらうこととした。2014年7月～8月に回答をもらった。復興住宅の遅れが課題となっている状況で、回収数が少なくなることが予想されたが、全体で19.2%の生産グループから回答を得た（表2-1）。復興住宅を受注していないために回答しなかったとする生産グループがあることが確認されており、その比率は比較的多い可能性がある。従って、受注実績のある生産グループの実態を反映した結果と見る必要がある。今後は、復興住宅の建設が進んだ段階で、再度調査することが望まれる。

2.2 アンケートの結果

1) 受注状況及び建設地（図2-1）

受注数は、回答者全体で2011年度が1551戸、2012年度が1978戸、2013年度が2324戸と増加傾向にある。受注数別の生産グループ数の推移を見ると、0棟及び10以上25未満の数が減少傾向にあり、25以上50未満、100以上が増加傾向にある。受注規模によらず、全体的に受注数が増加している。

回答のあった生産グループによる復興住宅建設地は、人口が多い県庁所在地近隣の市町村と沿岸部が多くなっている。岩手県においては、盛岡市、花巻市、北上市、奥州市、一関市等の内陸部と陸前高田市から宮古市までの沿岸部、宮城県においては、仙台市、名取市等の仙台圏、東松島市、石巻市、気仙沼市等の沿岸部、福島県においては、福島市、会津若松市、郡山市、須賀川市、白河市等の内陸部と福島第2原発近辺の地域を除くいわき市などの沿岸部であった。

2) 生産グループの特色と住宅の概要（図2-2～図2-5）

各生産グループの特色に関する自由記述でのキーワードは、高断熱高気密、耐震防災、地場産木材、長期優良住宅、地元職人、自然エネルギー利用などが挙げられており、県による差は顕著ではなかった。

基礎は、コンクリート＋土間基礎が多い。基礎換気口

表2-1 アンケート対象と回収状況

	岩手	宮城	福島	合計	
全体数	131	71	85	287	
回答あり	受注あり	21	10	17	48
	受注なし	2	3	2	7
回収率	17.6%	18.3%	22.4%	19.2%	

年間受注数

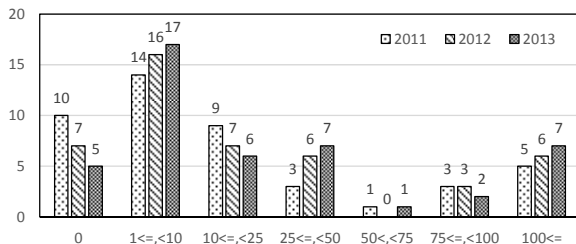


図2-1 受注数別の生産グループ数の推移

は、基礎パッキンによる通気が多く、一般の戸建住宅における傾向と同様である。その他は、基礎断熱であると考えられる。基礎及び床の断熱は、床断熱が多く基礎断熱が25%程度である。構造は、在来木造がほとんどである。以上の概要に顕著な地域差は見られなかった。

3) 断熱仕様 (図 2-6~図 2-10)

断熱仕様は、省エネルギー基準の等級 3~等級 4 超

まで多様である。岩手では等級 3 の件数が多いが、いずれの県においても等級 4 超があり断熱性能向上の取組みが見られる。壁の断熱材は、繊維系が過半であるが、プラスチック系も多い。その他は、ウレタン吹付が多い。天井又は屋根の断熱材は、繊維系が主流であるが、岩手ではプラスチック系がある程度見られる。なお、セルロースファイバーが「その他」として複数記載

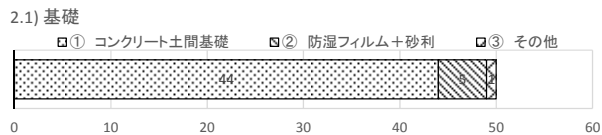


図 2-2 基礎の仕様

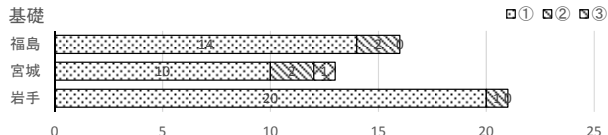


図 2-3 基礎換気口の仕様

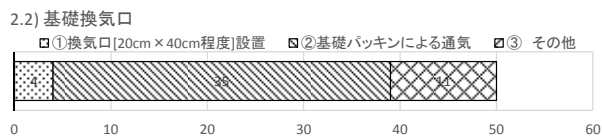


図 2-4 基礎の断熱仕様

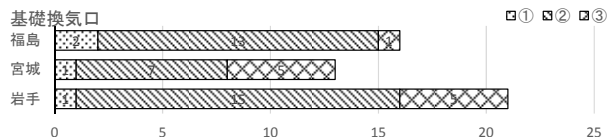


図 2-5 構造の種類

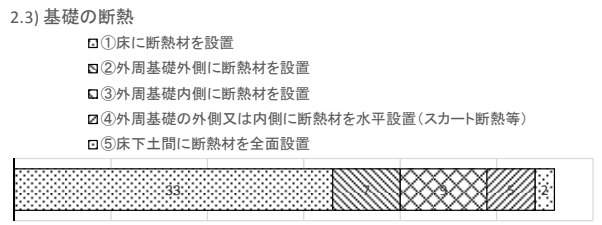


図 2-6 主な断熱仕様 (省エネルギー等級)

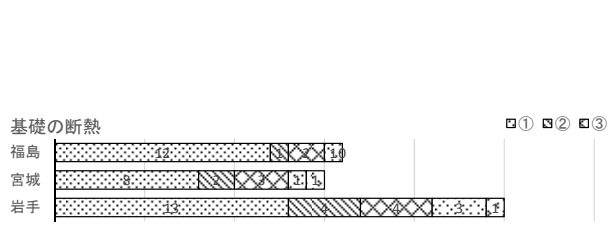


図 2-7 壁の断熱材

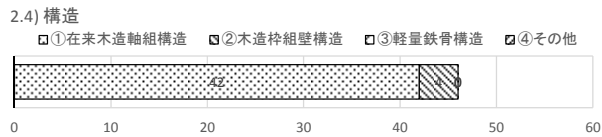


図 2-8 天井又は屋根の断熱材

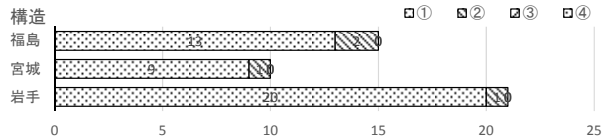


図 2-9 開口部枠の種類

されている。開口部枠は、木、プラスチックから断熱アルミまで、多様であるが、プラスチックと断熱アルミが主流となっている。ガラスは、単板は無く、普通ペアとLow-Eペアが主流で、岩手県でLow-Eトリプルが見られる。

4) 気密仕様 (図 2-11~図 2-13)

気密仕様は、「①気密工事を特段行わない」から「⑤気密測定を行い性能確認する」まで、多様である。福島県及び岩手県では、①の数が多いが、いずれの県でも⑤が見られる。壁の気密材は、気密シート、タッカー止め、テープなど多様である。岩手県では、気密シート全面張

りが多く、他県よりも気密化に取り組んでいる面がある。天井又は屋根についても多様であるが、岩手県では気密シート全面張りが多い。これは、繊維系断熱材が多いことと対応している。その他には、ウレタン吹付や合板での気密化が見られる。

5) 設備仕様 (図 2-14~図 2-16)

換気設備は、第3種換気が主流であるが、岩手県では、他県に比べて第1種換気が多い。暖房設備は、エアコンが最も多い。岩手県では、灯油及びヒートポンプによる温水暖房が他県よりも多い。冷房は、3県ともにエアコンがほとんどである。

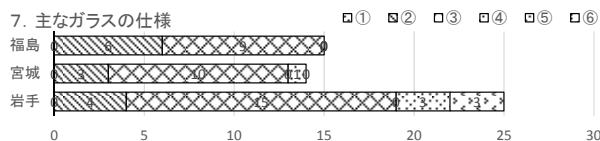
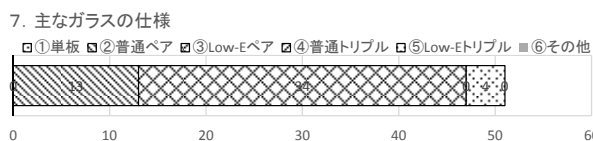


図 2-10 ガラスの仕様

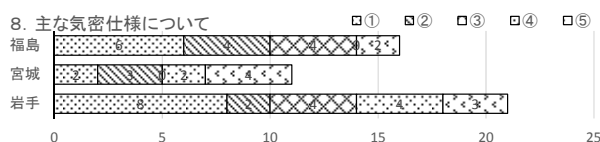
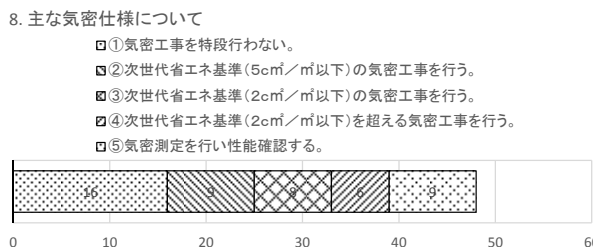


図 2-11 主な気密仕様

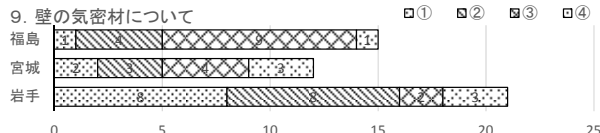
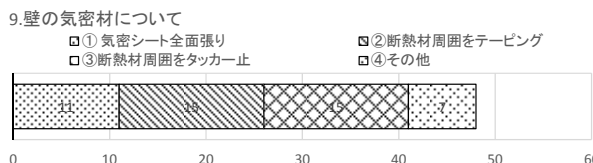


図 2-12 壁の気密材

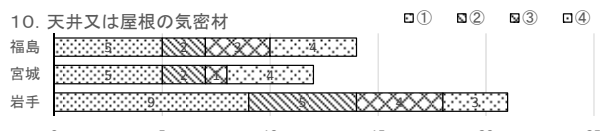
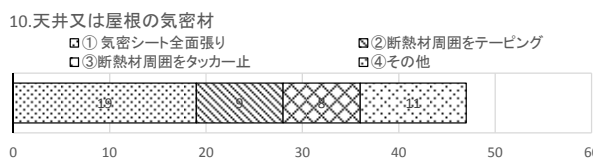


図 2-13 天井又は屋根の気密材

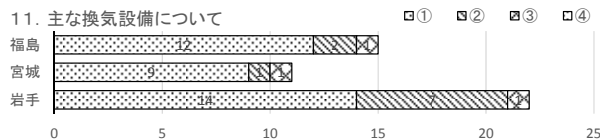
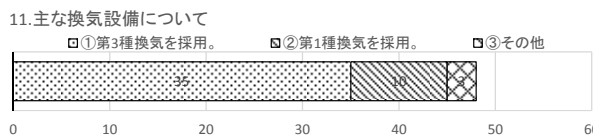


図 2-14 換気設備

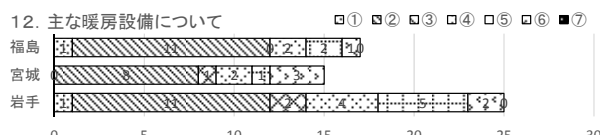
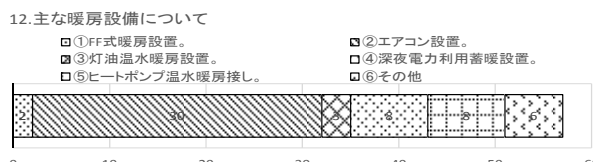


図 2-15 暖房設備

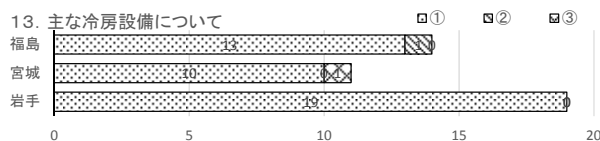
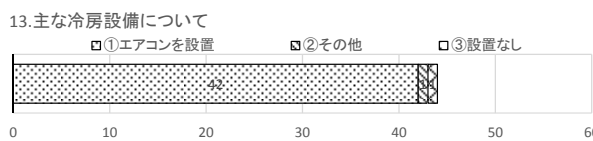


図 2-16 冷房設備

6) 省エネルギー地域区分と断熱気密仕様 (図 2-17, 18, 19)

岩手県は、沿岸部が温暖で内陸が寒冷である傾向を持つ。内陸の都市部はⅡ地域で、断熱気密仕様は等級 3 または等級 4 が主であるが、気密については、「気密工事を特段行わない」との回答もあり多様である。沿岸部南側はⅢ地域であるが、断熱気密仕様は、内陸都市部と同様に多様である。沿岸部北側の久慈市などはⅠ地域であるが、等級 4 超など高いレベルとなっている

宮城県は、ほとんどがⅢ地域である。仙台市とその近辺では、等級 4 以上となっている。また石巻市においても同様である。気密性能については多様で、生産グループによる差が顕著となっている。

福島県は、中通り(福島、郡山等の内陸)と浜通り(沿岸部)の北部及び会津若松市周辺がⅢ地域で、その他はⅡ地域である。ただし、沿岸南部のいわき市はⅣ地域である。福島市、郡山市、会津若松市などの都市では、等級 4 以上が主であるが、気密仕様は多様である。また、沿岸部でも等級 3 及び 4 が主であるが、「気密工事を特段行わない」との回答もあり、多様である。

都市部から離れると、断熱気密化のコスト負担、高断熱高气密に関する情報や施工実績の不足によって、断熱気密性能の維持向上が難しいことが従来指摘されている。しかし、特に気密性仕様に関しては、都市部においても多様であることから、生産グループの気密化に関する認識の多様性が実態に反映していると考えられる。

7) 工事及び工期 (図 2-20)

復興住宅の工期は、宮城県と岩手県の平均が 5.4 ヶ月で、木造住宅の一般的工程から想定される 4~5 ヶ月よりもやや長い。福島県の工期が全体的に長く、平均で 7 ヶ月であり、最長は 12 ヶ月であった。岩手県では、受注数が 200 以上の規模の生産グループでは 3 ヶ月であるが、最長は 10 ヶ月であった。いずれの県でも、工期の遅れの要因として、労働力と資材の不足が挙げられている。

8) 居住環境の感想及び省エネルギー性能・室内環境に関する意見

居住者から生産グループへの声については、断熱気密化及び暖房等の設備による、快適性や省エネルギー性に関する好意的なもの、が多く記載されている。また、生産グループからの、復興住宅の断熱気密性能等の省エネルギー性能、室内環境についての自由記述では、主流となる

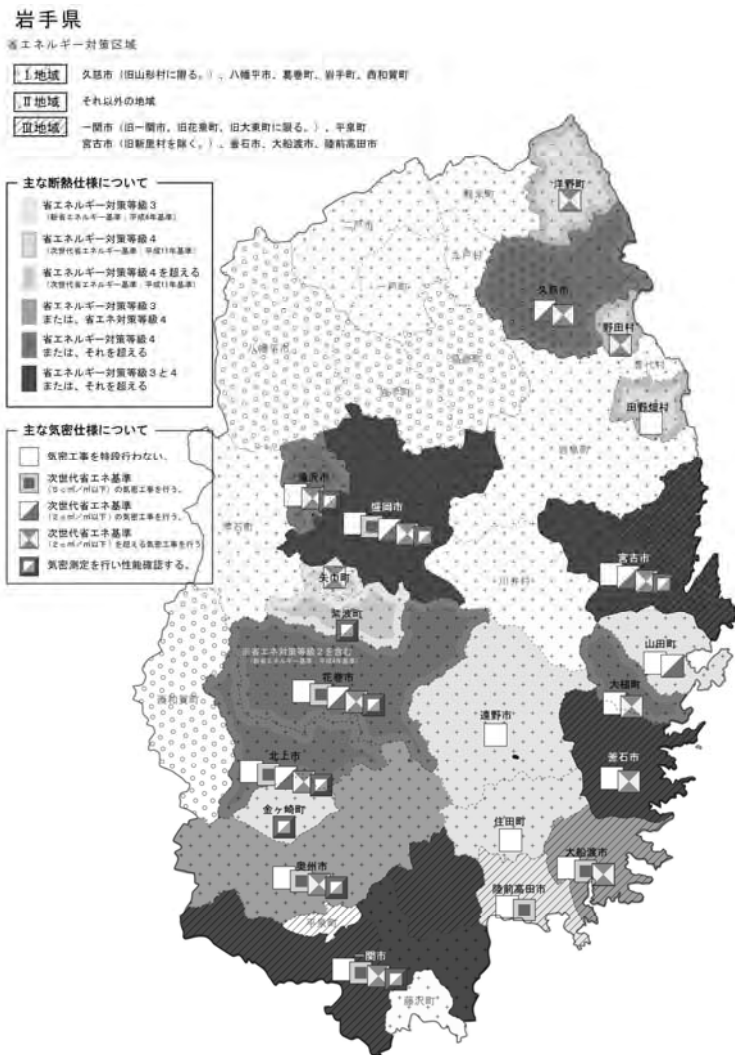


図 2-17 断熱気密仕様 (岩手県)

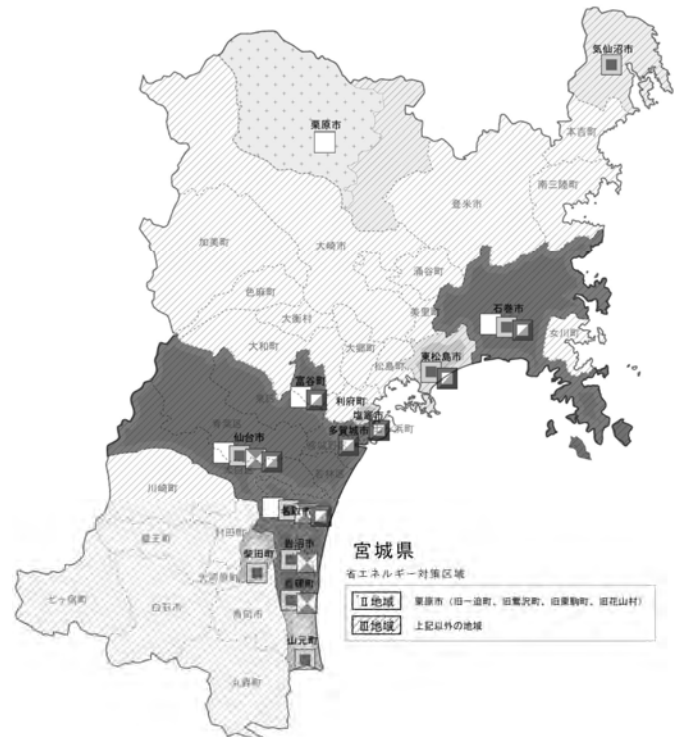


図 2-18 断熱気密仕様 (宮城県)

福島県

省エネルギー対策区域

- II地域** 会津若松市(旧河東町に限る地域)、新藤村、糠苗代町、大玉村、山内村、小野町金山町、喜多方市(旧塩山町を除く)、昭和村、北塩原村下郷町、白河市(旧大儀村に限る)、只見町、天栄村、須賀川市(旧長沼町に限る)、田村市(旧宮都路)、西金津町、磐梯町楡枝鶴城村、平田村、三島町、南金津町、矢吹町
- III地域** それ以外の地域
- IV地域** いわき市、大熊町、富岡町、楢葉町、広野町、双葉町

主な断熱仕様について

- 省エネルギー対策等級3
(新築工法エネルギー基準、平成14年基準)
- 省エネルギー対策等級4
(次世代省エネルギー基準、平成11年基準)
- 省エネルギー対策等級4を超える
(次世代省エネルギー基準、平成11年基準)
- 省エネルギー対策等級3
または、省エネルギー対策等級4
- 省エネルギー対策等級4
または、それを超える
- 省エネルギー対策等級3と4
または、それを超える

主な気密仕様について

- 気密工事を特段行わない。
- 次世代省エネルギー基準
(2×4の枠組)の気密工事をを行う。
- 次世代省エネルギー基準
(2×4の枠組)以下の気密工事をを行う。
- 気密測定を行い性能確認する。

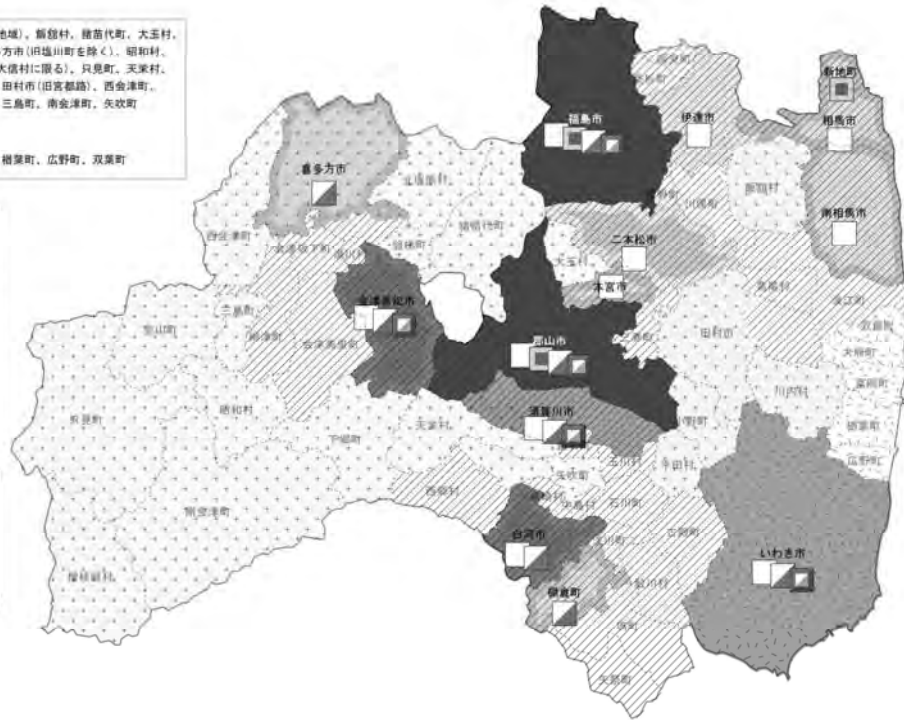


図 2-19 断熱気密仕様(福島県)

断熱気密性の必要性に関する声に加えて、多様な声を確認される。岩手県では、断熱気密化と適切な暖房等设备などの基本性能の確保が重要であることに加えて、仕上げ材としての木材の魅力に注目している。また、断熱気密化への需要が低いことを指摘する声もある。宮城県では、基本性能の重要性を示すと共に、効率的構法の開発、供給者への技術的支援、被災者への財政的支援の必要性を要望している。福島県では、基本性能の確保に加え、効率的構法の開発、自然エネルギー設備の利用などの必要性を示している。

以上のように、生産グループの省エネルギー及び室内環境に関する認識は、基本的には共通していることが伺える。

3. 復興住宅の環境性能調査結果

表 3-1 に、復興住宅の調査対象及び測定結果を示す。この対象は、任意に選択した対象ではなく、地域型復興住宅生産グループのアンケート調査において、測定協力が得られたものであるため、平均的な対象ではないことに留意する必要がある。対象住宅は、次世代省エネルギー基準(等級4)に概ね準じた断熱性能を有した木造であるが、一般的な断熱気密工法(宮城1、岩手1-5)と、地域産木材を活用するための新たな構法による断熱気密工法(福島1、宮城2、岩手8)がある。なお、気密性能の測定は、一般的に用いられている気密測定器(コーナー札幌:KNSシリーズ)によって行われた。内外気圧差が4~50(Pa)の範囲で、5~9段階の差圧と

風量に関するデータを取り、c値、n値の換算を行った。なお、差圧と風量の相関係数Rの2乗は0.99以上で、高い精度の測定が行われたと考えられる。

一般的な断熱気密工法におけるc値は、0.27~5.14と多様であった。気密フィルムを用いていても、気密工事の状況によって気密性能に大きな開きが生じている。宮城1は、気密工事が行き届いた例で、気密性能が非常に高い。岩手1~3は同様の気密仕様で、気密性能も近い。岩手4、5は、同様の気密仕様であるが、岩手4のc値は特に大きくなっている。岩手4については、気密工事の状況ばかりではなく、床面積に対する外皮面積の比が大きい平屋であることが要因と考えられる。

新たな構法による断熱気密工法におけるc値は、0.92~3.16とある程度の差がある。福島1は、真壁構造で柱間に杉板を積層させた壁の外気側での吹込断熱である。宮城2及び岩手8では、合板及び杉板の外壁の外側にプラスチック系断熱材を用いている。後者のプラスチック系断熱材を用いた場合が、比較的気密性能が高い結果となっている。これらの新しい工法の気

14. 工事について

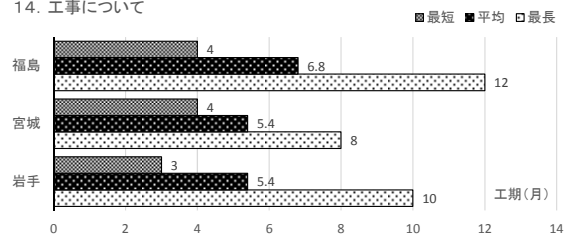


図 2-20 工期(受注から入居までの期間)

密性は、一般構法と同等以上となっている。

図3-1に、復興住宅のc値とn値の測定結果を示す。c値が小さい場合にn値が1.0に近く、小さな隙間で構成されていることがわかる。また、c値が大きい場合にn値が2.0に近くなっており、通気経路の断面が比較的大きな隙間で構成されていることがわかる。開口部建具は、アルミ、複合、樹脂であるが、ほとんどの開口部の気密性能が高い(JIA・A-4レベル)ため、c値の大小は、気密仕様及び施工の程度によって左右されていると考えられる。

c値は、平屋の岩手4を除けば5.0以下であるが、2.0以下のものは、10件中3件にとどまった。2.0以下となった物件は、気密フィルムを用いた一般構法で気密に留意した宮城1、新たな構造でプラスチック断熱材を用いた宮城2、岩手10であった。特に気密フィルムを用いた一般構法で2.0以上のものが多い要因としては、短い工期や気密工事に対する配慮の程度などが挙げられる。

4. 簡易気密測定法の可能性

健康的で快適な室内環境の実現にとって、気密性能の確保は、復興住宅ばかりではなく、特に寒冷地においては必須の要素である。これまで一般的に利用されている送風機などを用いた気密測定器は、一定の精度を実現する方法で、その普及が望まれる^{3),4)}。しかし、測定機器のコスト、比較的大掛かりな機器の運搬などの手間などによって、一部の建物での利用にとどまっている。これまでも、簡易な気密測定法の検討が行われてきた^{5),6),7),8)}。気密性能は、気密仕様の設定ばかりではなく、現場での施工、その確認などによって、確実に性能を実現すべきものであるため、全ての建物で、気密性能を測定することが本来は必要である。

本研究では、全ての復興住宅で気密測定を実現することを目的に、簡易な気密測定法の可能性を検討した。簡易な気密測定法は、簡易な機器を用い、短時間で測定することが出来ることが条件であり、場合によっては、

居住者による測定も視野に入れることが必要である。この場合には、マニュアルの整備や、機器が現場や工務店に郵送される貸出しのシステムが必要となると考えられる。

このような簡易な気密測定法は、新築や改築などでの気密性能の確認、既存住宅の気密性能劣化の確認での使用を可能にすると考えられる。復興住宅ばかりではなく、必要な気密性能を広く実現するためには、簡易気密測定による診断の結果を見て、必要に応じて精度が高い気密性能値を行う体制が整備されることも望まれる。

4.1 戸建住宅の気密測定の見直し

気密測定法は、JIS A2201:2003「送風機による住宅の気密性能試験法」に記載されている。図4-1に示すように、送風機で内外の気圧差(以後、差圧と記す。)を設けて、送風機通気量Qと内外気圧差 ΔP の関係から、通気率a、相当隙間面積(c値)、及び隙間特性値(n値)を求める。この測定法は、財団法人建築環境省エネルギー機構による講習で普及が図られている¹⁾。測定誤差の要因は、差圧測定誤差及び風量測定誤差であるが、実際の現場測定における、それぞれの測定誤差われている⁹⁾。図4-2には、測定誤差を抑制するための要点について検討した結果を示す。

風量(Σq)は、隙間を介して流れる空気量の合計を意味するが、この測定法では、この風量が送風機を通過

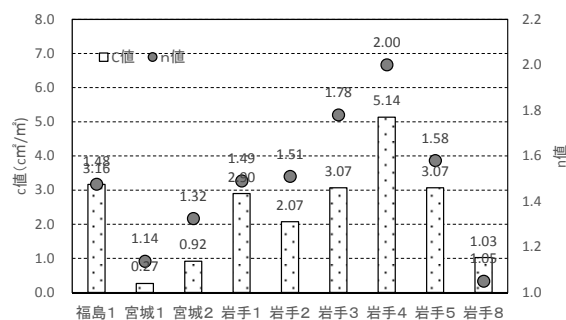


図3-1 復興住宅の気密測定結果

表3-1 測定対象の概要と測定結果

	福島1	宮城1	宮城2	岩手1	岩手2	岩手3	岩手4	岩手5	岩手8
述床面積/吹抜含(m ²)	152	137	120	87	133	119	50	113	110
構造	在来軸組	在来軸組	在来軸組	在来軸組	在来軸組	在来軸組	在来軸組	在来軸組	在来軸組
外壁	真壁	真壁	大壁	大壁	大壁	大壁	大壁	大壁	真壁
断熱材	壁	繊維系吹込	繊維系	プラスチック系	プラスチック系	プラスチック系	プラスチック系	繊維系	繊維系
	天井・屋根	繊維系吹込	繊維系	プラスチック系	繊維系	繊維系	繊維系	繊維系	プラスチック系
	床断熱		繊維系	プラスチック系	プラスチック系	プラスチック系	プラスチック系	繊維系	
	基礎断熱	プラスチック系							
気密材	窓	木・ペア	アルミ・ペア	アルミ・ペア	複合・ペア	複合・ペア	複合・ペア	複合・ペア	樹脂・ペア
	壁	杉板	フィルム	合板	フィルム	フィルム	フィルム	フィルム	杉板
天井・屋根	杉板	フィルム	合板	フィルム	フィルム	フィルム	フィルム	フィルム	杉板
換気設備	第3種	第3種	第3種	第3種	第3種	第3種	第3種	第3種	第3種
その他	分離空気集熱		合板・断熱パネル						木材合体パネル
総隙間相当面積(cm ²)	481.00	36.52	109.89	252.50	275.07	366.18	255.12	345.99	113.12
C値	3.16	0.27	0.92	2.90	2.07	3.07	5.14	3.07	1.03
n値	1.48	1.14	1.32	1.49	1.51	1.78	2.00	1.58	1.05

する通気量に等しいと考え送風機の通気量を測定している。しかし、図 4-3 に示すように、内外温度差が大きい場合には、上下に内外気圧差の分布が発生するために、上階で逆流が発生する可能性が生じる¹⁰⁾。の要因は多様であるため、測定誤差に関する検討も特に、気密性能が低い場合には、内外気圧差が全体的に小さくなるため、逆流域が大きくなる。逆流がある場合には、送風機通気量よりも逆流量の分だけ、風量(隙間経路の流入量)が大きくなるため、測定誤差が発生する。これによる誤差は、c 値ばかりではなく n 値にも発生する。従って、図 4-4 に示すように、階数が大きいほど、内外温度差が大きいほど、より大きな差圧を確保することが必要となる。

差圧については、外部風の影響を避けるために、外部風速が大きい場合の測定を避けることが基本である。また、内外温度差によって生じる気圧差の影響を避けることが望ましい。しかし、既往の気密測定法ではこの影響を考慮しておらず、送風機を塞いだ状態での差圧が 3 (Pa) 以下であることのみを条件としている¹⁾、注 1。

風量と差圧の誤差を抑制する基本要件は、外部風速が低いことを前提に、十分な風量と差圧を確保することである。一般的に用いられている気密測定器(コーナー札幌:KNS シリーズ等)でも、50(Pa)程度の差圧を確保できる大きな送風機が用いられている。

4.2 簡易気密測定の可能性

戸建住宅の気密性能(c 値:床面積当りの総隙間相当面積)は多様である。新省エネルギー基準においては、c 値で 5.0(c m²/m²)以下、2.0(c m²/m²)以下を、地域に対応した気密住宅の基準としている。近年では、c 値が 0.5(c m²/m²)以下の事例も多数報告されている一方で、5.0(c m²/m²)を超える報告もある。

復興住宅の簡易気密測定としては、c 値が 2.0 以下または、5.0 以下であることを確認できることが望ましいと考えられる。設計時の想定と異なる場合には、必要に応じて従来の気密測定を実施するとすることで、気密測定の普及が図られ、気密性能の底上げにつながる考えられる。

このような要求精度であれば、すべての住宅に設置されている厨房レンジファンの利用の可能性が出てくる。レンジフードファンの最大風量は、300~500(m³/h)程度であり、既往の気密測定器(1000 m³/h 程度)より少ない。低風量では差圧も小さくなり、測定精度が低下することとなる。

以上を踏まえて、隙間が外皮に一様分布していると仮定して、2階建て戸建モデル(総2階及び下屋がある場合)で C 値が 2.0(c m²/m²) の場合に、気密性能測

定の数値実験を行い、以下の知見を得た。

- ① 通気量ゼロ(送風機を塞いだ状態)の基準高さの内外差圧をゼロとすることで、内外温度差による誤差を小さくすることができる^{注1)}。なお、1階と2階の床面積に違いがあっても、この効果に顕著な影響はない。

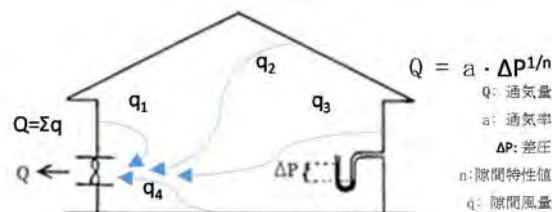


図 4-1 気密測定の原理(排気の場合)

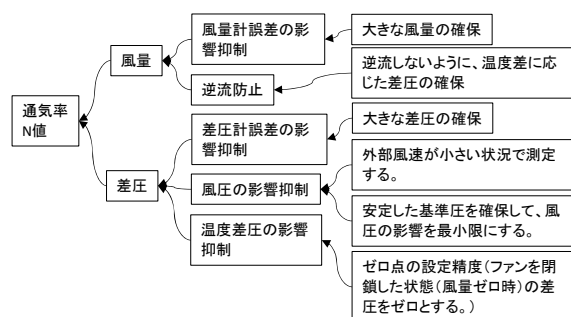


図 4-2 気密測定における精度維持の要点

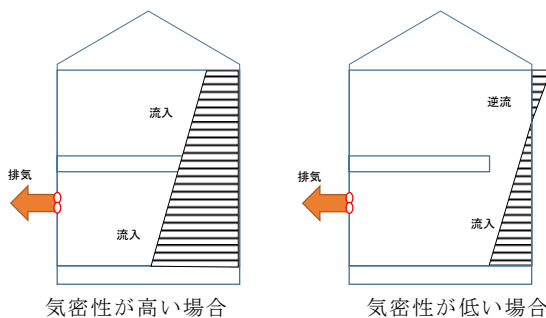


図 4-3 差圧(内外気圧差)と逆流発生のお考え方

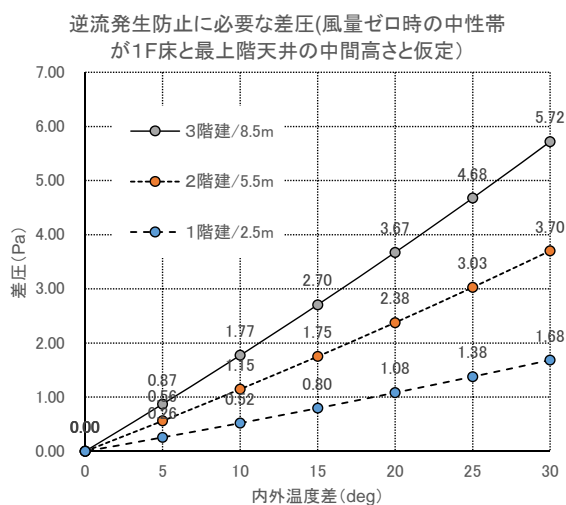


図 4-4 内外温度差と逆流発生防止に必要な差圧

② 外部風で差圧が変わると、測定精度に影響がでる。風速 1.0(m/s)で、内外差圧 20 (Pa)、通気量 300 (m³/h) 程度の気密測定で、c 値の誤差が 30% 程度である。ただし、n 値の誤差は 40% 以上である。なお、風速 0.5(m/s)であれば、c 値で 10% 程度、n 値で 20% 程度である。

n 値の誤差は、主に上階での逆流によるものである。c 値については、上記のような差圧の 0 点設定に関する工夫をすれば、外部風の影響が小さい条件下で、通気量が 300 (m³/h) 程度以下のファンによる換気気密測定の可能性があると考えられる。

4.3 レンジファンを利用した気密測定法

気密測定を簡易にするためには、レンジファンなどの既存送風機の利用に加えて、風量測定の簡略化が望まれる。一般的な気密測定器では、送風機での通気量をピトー管と差圧計を用いて測定している。レンジファンでの通気量又は隙間を介する風量を測定するには、A:風速計を用いる方法と、B:トレーサーガスを用いる方法が考えられる。

A については、風速計は比較的安価であるが、レンジフードの形状が多様で代表風速点や風速分布把握のための測定点等の想定が難しい。B については、厨房レンジやカセットコンロなどの、燃焼器後から発生する炭酸ガスをトレーサーガスとし、平均濃度が得やすいと考えられる排気で濃度測定をすれば、比較の実用的な測定方法となる可能性がある。ただし、炭酸ガス発生量を規定することが必要となる。ガスの消費量から炭酸ガス発生量を算出し、排気と室内空気中の炭酸ガス濃度測定結果を用い、一定発生法の仮定で通気量を算出することは可能であると考えられる。

表 4-1 本研究及び既往の気密性能測定結果

所在	構法	年	Sf m ²	C cm ³ /m ³	n値	測定者等
福島1	在来	2014	152.1	3.2	1.48	本研究
宮城1	在来	2014	136.5	0.3	1.14	
宮城2	在来	2014	120.0	0.9	1.32	
岩手1	在来	2014	87.0	2.9	1.49	
岩手2	在来	2014	132.6	2.1	1.51	
岩手3	在来	2014	119.3	3.1	1.78	
岩手4	在来	2014	49.7	5.1	2.00	
岩手5	在来	2014	112.6	3.1	1.58	
岩手8	在来	2014	110.0	1.0	1.05	
宮城	木パネル	2008	100.0	0.5	1.12	林
富山	在来	1991	206.0	0.4	1.10	垂水*
富山	在来	1992	125.0	0.2	1.20	
富山	在来	1992	149.0	2.2	1.70	
富山	在来	1992	217.0	0.3	1.40	
富山	在来	1992	171.0	1.0	1.70	
富山	在来	1992	148.0	2.5	1.60	
富山	在来	1992	167.0	3.6	2.00	
富山	在来	1993	181.0	1.7	1.80	
富山	在来	1993	131.0	2.5	1.50	
宮城	在来	2001	172.0	2.1	1.90	石川**
宮城	木枠	2001	238.0	0.6	1.20	
宮城	在来	2001	184.0	1.3	1.50	
宮城	木枠	2001	241.0	1.7	1.40	
宮城	在来	2001	230.0	1.5	1.70	菊田
宮城	在来	2001	227.0	2.4	1.50	
北海道	在来	2011	123.4	0.2	1.25	
北海道	在来	2010	114.9	0.2	1.08	
北海道	在来	2010	115.9	0.2	1.22	
北海道	在来	2012	130.8	0.3	1.23	

*垂水弘夫、久保志、高野勝、高気密住宅の気密測定結果と居住者に対するアンケート調査 富山・石川県の住宅を対象として、日本建築学会北陸支部研究報告集第36号、1993年7月
** 石川善美、佐々木健史、次世代省エネルギー基準施行後に建設された木造戸建住宅の気密性能実態調査、日本建築学会東北支部研究報告集、平成13年6月

レンジファンの強さ(強、中、弱)を段階的に変えることで、複数の通気量、差圧の測定点を得られれば、c 値と n 値が得られることとなる。ただし、差圧が小さい場合に発生しやすい内外温度差による逆流によって、特に n 値の誤差が大きくなることは前述の通りである。

4.4 既往の気密特性を利用した 1 点法

既往の気密測定及び本研究の気密測定の結果(表 4-1, 図 4-5)^{11)・16)}から、c 値と n 値には一定の相関があると考えられる。図 4-5 左は、気密測定で得られた c 値と n 値の関係を示している。同図右には、c 値と 1/n の関係を示す。原理的には、気密性能が高い住宅では、個々の隙間経路の幅が小さく毛細管隙間に近いと考えられるため、n 値が 1.0 に近くなると考えられる。また、気密性が低い場合には、隙間経路の幅の大きい n 値が 2.0 に近い隙間が多く、建物全体の n 値も 2.0 に近づくと考えられる。上記の原理に基づいて、c 値が 0 に近づくと、n 値が 1.0、1/n が 1.0 に近づくと、c 値が大きくなると、n 値が 2.0、1/n が 0.5 に近づくとをモデル化して以下の式を仮定した。

$$1/n = 0.5 + 0.5 \cdot e^{-DC} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここに、C (c 値) : 床面積当りの相当隙間面積 (c m³ / m²)

既往の測定結果を用いて、最小 2 乗法で D を求めた。この式による曲線を図 4-5 右に示す。この式を用いることで、最も差圧と通気量が大きくなるレンジファンの強運転時の測定結果 1 点で、c 値及び n 値を得ることが出来る可能性がある。

以上に基づいて、1 点法に関する数値実験を行った。レンジファンの通気量 Q₁ が 100、300、500(m³/h) の 3 ケースについて行った。通気量 Q₁ に対する差圧 Δ P₁ を、測定された c 値及び n 値から求めた。この Q₁ と Δ P₁ から、c 値及び n 値を以下のように算出した。

通気量 Q₁ と内外気圧差 Δ P₁ の関係は、以下のよう
に示すことが出来る。

$$Q_1 = a \cdot \Delta P_1^{1/n} \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここに、a: 通気率 (m³/hmmAq^{1/n}) 注 2

式 2 より、以下の式が得られる。

$$Q_1 = S_f \cdot C / \phi \cdot \Delta P_1^{1/n} \quad \dots \dots \dots (3)$$

ここに、S_f : 床面積、φ : 通気率に対する相当隙間面積の係数 (≒ 0.68)

式(3)を変形して、式 1 を用いると、以下の式が得られる。

$$C - \phi \cdot Q_1 / S_f \cdot \Delta P_1^{-0.5} \cdot e^{0.7085C} = 0 \quad (4)$$

式(4)を用いてニュートン法などでCを求めることが出来る。さらに、Cから式(1)を用いてnが得られる。

図4-6には、 Q_1 が100(m³/h)の場合の、c値の測定結果に対する1点法の数値実験結果の比を示す。この比は、1.0近辺であり、一定の測定精度があることを示している。同図には、n値が1.0と仮定した場合のc値：図中のQ100(N=1)、n値が2.0と仮定した場合のc値：図中のQ100(N=2)を示す。c値が大きい場合に、Q100(N=1)は大きくなる。また、c値が小さい場合に、Q100(N=2)は大きくなる。何れの場合も、測定精度が非常に低くなる事が確認される。図4-7、図4-8には、 Q_1 が300(m³/h)の場合、500(m³/h)の場合の結果を示す。いずれも100(m³/h)の場合と同様の傾向がある。ただし、Q500(N=1)の場合の比は、他の場合に比べれば、1.0に近い。図4-9には、n値に対する1点法によるn値の比を示す。この比は、大略的には1.0に近いが、0.7から1.4の範囲で分布している。

図4-10は、c値と1点法のc値の相関を示す。 Q_1 が100、300、500(m³/h)のいずれの場合も、相関係数

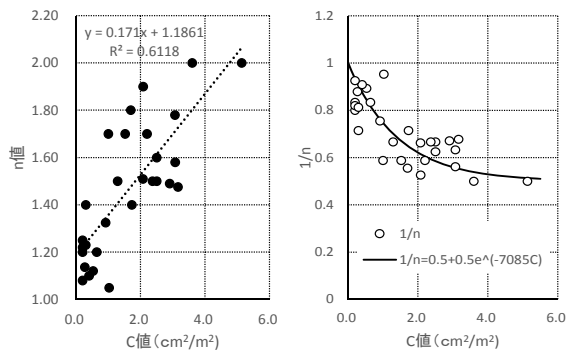


図4-5 既往測定結果におけるc値とn値の関係

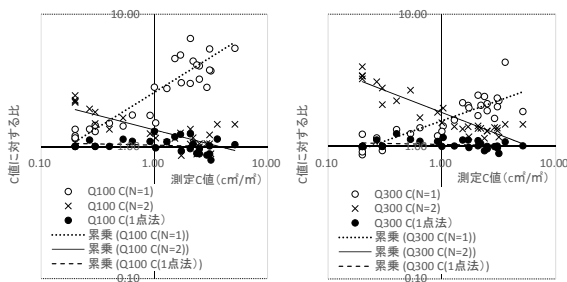


図4-6 Q100の推定誤差

図4-7 Q300の推定誤差

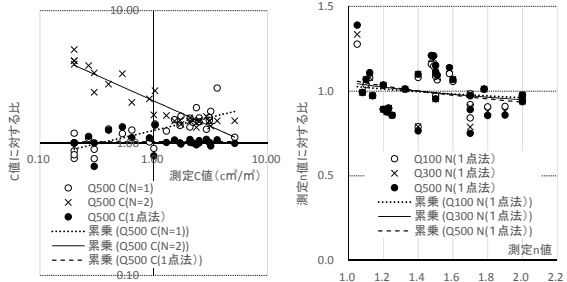


図4-8 Q500の推定誤差

図4-9 n値の推定誤差

の2乗: R^2 は、0.99以上で、高い相関性を示している。図4-11は、n値と1点法のn値の相関を示す。相関係数の2乗: R^2 は、0.56から0.74であり、 Q_1 が最も大きい500(m³/h)における相関が最も高くなるわけではないことを示している。

1) ガスコンロによる炭酸ガス発生量と濃度

住宅の厨房には、一般的にガスコンロまたは電磁調理器が設備されている。ガスコンロでは燃焼ガス中の炭酸ガスを用いることができる。電磁調理器の場合はカセットコンロなどを用いて炭酸ガスを発生させる必要がある。

表4-2に、都市ガス及びプロパンガスを用いて一口を燃焼させた場合の、炭酸ガス発生量とレンジ通気量から求めた排気の炭酸ガス濃度を示す。炭酸ガス濃度は、850~2900(ppm)程度であり、室内空気を対象とした炭酸ガス濃度計(最大5000(ppm))で測定可能な範囲となっている。なお、室内濃度を400(ppm)とし、レンジフード捕集率を90%としている。

2) レンジファンの排気による差圧

表4-3に、c値と床面積当りの通気量 Q_1/S_f から求め

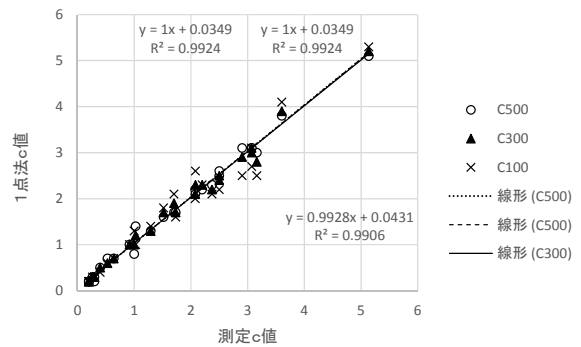


図4-10 c値と1点法のc値の関係

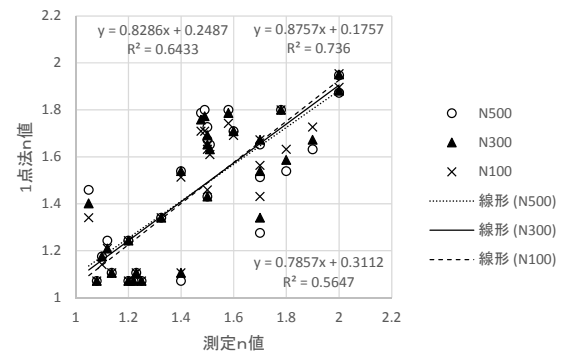


図4-11 n値と1点法のn値の関係

表4-2 炭酸ガス濃度(ppm)(室内空気:400ppm)

	フード補修効率	都市ガス	プロパンガス
	90.0%	一口コンロ	一口コンロ
炭酸ガス発生量(m ³ /h)		0.25	0.27
レンジ風量	100	2627.7	2874.2
	200	1513.8	1637.1
	300	1142.6	1224.7
	400	956.9	1018.5
	500	845.5	894.8

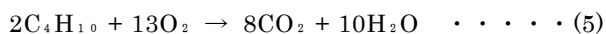
た内外気圧差 ΔP 、内外気圧差 $1.0(\text{mmAq})$ ^{註2)}に必要な床面積当りの通気量： $Q_1/S_f\text{-Req}$ を示す。c 値が大きい場合には、内外気圧差 ΔP は、小さくなる傾向がある。内外気圧差 ΔP が小さいと、差圧計の誤差の影響が顕著となると共に、外部風の影響を受けやすくなり、内外差圧測定誤差が大きくなる。また、内外差圧が小さいと、逆流による風量測定誤差も増大することとなる。

逆流防止が可能な内外気圧差の条件として、 $1.0(\text{mmAq})$ 以上確保するとした場合に、必要な床面積当りの通気量を、同表に示す。c 値が 5.0 の場合には、 $7.35(\text{m}^3/\text{h m}^2)$ と大きくなり、床面積が $100(\text{m}^2)$ 程度の住宅でも、通気量が $735(\text{m}^3/\text{h})$ と、一般的なレンジファンよりも大きな通気量が必要となる。c 値が 2.0 であれば、同様に $294(\text{m}^3/\text{h})$ となり、一般的なレンジファンで可能な通気量となる。ただし、通気量が固定され限界があるレンジファンを用いると、c 値が小さい場合に誤差が小さく、c 値が大きい場合に誤差が大きくなることとなる。

表 4-4 に、復興住宅を想定した規模における、レンジファンの風量毎の、差圧 $1.0(\text{mmAq})$ 以上で測定可能な c 値を示す。 $300 \text{ m}^3/\text{h}$ であれば、床面積 S_f が $100(\text{m}^2)$ まで、 $500(\text{m}^3/\text{h})$ であれば、 $140(\text{m}^2)$ までの場合に、c 値が 2.0 まで可能となる。従って、復興住宅のほとんどで c 値が 2.0 以下であることを確認することができると思われる。

3) カセットコンロを用いた通気量測定

ガスの消費量から、炭酸ガス発生量を算出し、排気の炭酸ガス濃度を用いて、通気量を算出することが出来ることを、カセットコンロを用いて検証した。カセットコンロの成分はブタン C_4H_{10} であり、その燃焼式は、以下ようになる。



燃焼開始から終了までの時間と、その間のカセットコンロの質量変化から、ブタンガスの消費速度が得られる。この質量変化から、式(5)より炭酸ガス CO_2 の発生量 M を算出することが出来る。排気濃度 C と室内濃度 C_{in} から、炭酸ガス CO_2 の質量収支式から、通気量： Q_1 が以下のように得られる。

$$Q_1 = M / (C - C_{in}) \quad \dots \dots (6)$$

図 4-12 に示すように、燃焼ガスの捕集効率が 100% となるようにして、室内及び排気の炭酸ガス濃度から通気量を測定した。ピトー管を用いた通気量が 100~500 (m^3/h) の範囲でファンの動力を設定して、上記の方法で通気量を測定した。その結果を、表 4-5 及び図 4-13 に示す。カセットコンロを用いた通気量の測定精度は高く、十分な実用性があることがわかる。ただし、

実住宅においては、レンジフードの燃焼ガス捕集効率によって、測定精度が左右されることに留意する必要

表 4-3 c 値と必要通気量： $Q_1/S_f\text{-Req}$
(内外気圧差 $1.0(\text{mmAq})$ に必要な床面積当り通気量： $Q_1/S_f\text{-Req}$)

c 値	n 値	Q_1/S_f					$Q_1/S_f\text{-Req}$
		1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	
		差圧 $\Delta P(\text{mmAq})$					
0.5	1.18	1.44	3.24	5.22	7.32	9.52	0.74
1.0	1.34	0.60	1.51	2.60	3.82	5.16	1.47
1.5	1.49	0.31	0.86	1.58	2.42	3.37	2.21
2.0	1.61	0.18	0.54	1.03	1.64	2.35	2.94
2.5	1.71	0.11	0.35	0.71	1.16	1.69	3.68
3.0	1.79	0.07	0.24	0.50	0.84	1.25	4.41
3.5	1.85	0.05	0.17	0.37	0.63	0.95	5.15
4.0	1.89	0.04	0.13	0.28	0.48	0.74	5.88
4.5	1.92	0.03	0.10	0.22	0.38	0.58	6.62
5.0	1.94	0.02	0.08	0.18	0.31	0.47	7.35

表 4-4 内外差圧 1.0mmAq 以上で測定可能な c 値

床面積： $S_f(\text{m}^2)$	80	100	120	140	
c 値 (cm^3/m^3)	Q300	2.5	2.0	1.7	1.5
	Q500	4.2	3.4	2.8	2.4

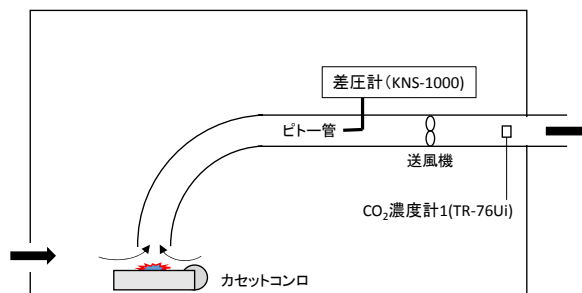


図 4-12 カセットコンロを用いた通気量測定の検証

表 4-5 カセットコンロを用いた通気量実験の結果

CO_2 (ppm)	温度 ($^{\circ}\text{C}$)	湿度 (%)	ピトー管 (m^3/h)	ブタン消費 (g/h)	CO_2 発生 (m^3/h)	風量換算 (m^3/h)
1071.0	22.9	47.3	538	211.0	0.35	527
1277.7	26.3	35.3	425	207.6	0.35	401
1304.5	28.0	31.5	342	172.8	0.29	326
1824.0	26.7	37.3	225	177.6	0.30	213
1870.7	29.5	29.7	183	159.6	0.27	188
2914.0	31.9	33.3	97	165.0	0.28	114

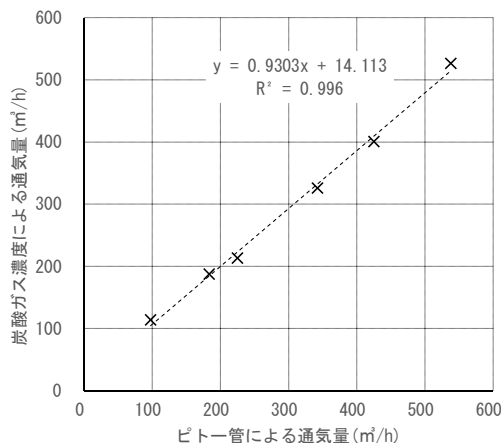


図 4-13 ピトー管による通気量とカセットコンロを用いた通気量の関係

がある。

カセットコンロの場合は、カセットの質量変化を測定する必要があるが、都市ガスやプロパンガスでは、既設のガスメータでガス消費量を把握する必要がある。なお、家庭医用のガスメータの製品差は 2%程度以内¹⁷⁾である。

5. おわりに

本研究では、東日本大震災復興住宅の環境性能の維持とより健康的で省エネルギー性能が高い復興住宅の普及のために調査研究を行い、以下の知見を得た。

- 1) 地域型復興住宅生産グループへの環境性能に関するアンケート調査によって、復興住宅建設が遅れていること、都市部で次世代省エネルギー基準の等級 4 がある程度普及しているものの、沿岸部も含めて全体を通じて等級 3 から等級 4 超まで多様である。気密仕様については、気密を行わない場合があるなど、生産グループによる差が大きいことが明らかとなった。
- 2) 復興住宅の環境性能測定では、気密性能について、一般的な構法と地域の木材資源を活用するための新たな構法に関わらず、気密化への配慮の程度に応じて、c 値は 0.27~5.14 ($c \text{ m}^2/\text{m}^2$) と多様であった。
- 3) 簡易気密測定方法の開発と検証では、厨房ファンを用いて、ガスレンジの燃焼ガスを用いた簡易測定の可能性が確認された。

本研究では、復興住宅建設の遅れによってアンケート調査及び環境性能測定の対象が限定される面があり、復興住宅の全体像を十分に把握するには至らなかった。今後の復興住宅建設の本格化に伴って、調査の追加・継続が望まれる。また、本研究による簡易気密測定法の実建物での実証を行った上で、簡易気密測定の定普が望まれる。これによって復興住宅の気密性能担保の基礎が得られると考えられる。また、断熱性能や適切な設備選択など、総合的な環境性能の維持向上に向けた、取組の継続が必要である。

最後に、地域型復興住宅推進協議会、アンケートに協力いただいた生産グループ、測定対象の復興住宅の関係各位、測定作業に参加した宮城学院女子大学生活文化デザイン学科学生、実験方法等に助力いただいた国立保健医療科学院金勲主任研究官に、謝意を表す。

<参考文献>

- 1) 財団法人建築環境省エネルギー機構、住宅の気密測定試験方法,2004

- 2) 地域型復興住宅推進協議会(岩手県,宮城県,福島県),(独)住宅金融支援機構東北支店 編集・発行,地域型復興住宅-住まい手と作り手が力を合わせて住宅再建を-第 2 版,2014
- 3) 村上周三,吉野博,住宅の気密性能に関する調査研究,日本建築学会論文報告集第 325 号,1983
- 4) 吉野博,倉淵隆,住宅の気密性能とその基準に関する動向調査,日本建築学会大会学術講演梗概集,1990
- 5) 福島明,入江雄司,鈴木憲三,小西一也,住宅の気密性能の実態と簡易気密測定法,日本建築学会北海道支部研究報告集 No.63,1990
- 6) 鈴木憲三,福島明,入江雄司,小西一也,ドラフトゲージを使った簡易気密測定法について,日本建築学会大会学術講演梗概集,1990
- 7) 内海康雄,長友宗重,吉野博,直流加圧法による室間の隙間量の測定法,日本建築学会大会学術講演会梗概集,1990
- 8) 内海康雄,角舎輝典,吉野博,交流加圧法による隙間量の測定原理と装置の校正についての基礎的検討,日本建築学会大会学術講演会梗概集,1995
- 9) 奥山博康,送風機による建物気密性測定のパラメータ推定法と信頼性評価方法,日本建築学会大会学術講演会梗概集,2011
- 10) 林基哉,荒谷登,集中排気型換気システムの利用に関する基礎的検討,冬期上階の給気確保に必要な能力,隙間相当面積,給気口の抵抗,漏気量の試算,日本建築学会北海道支部研究報告集 No.65,1992
- 11) 垂水弘夫,久保猛志,高断熱・高気密住宅の気密測定結果と居住者に対するアンケート調査 富山・市川県内の住宅を対象として,日本建築学会北陸支部研究報告集,1993
- 12) 鈴木哲矢,小峯裕己他,高気密住宅における隙間特性に関する研究その 2 集合住宅の各部相当隙間面積測定法に関する研究,日本建築学会大会学術講演梗概集,1995
- 13) 菅田大助,倉淵隆,小峯裕己他,高気密住宅における隙間特性に関する研究その 3 戸建て住宅を対象とした外表面及び室間相当隙間面積の詳細測定,日本建築学会大会学術講演梗概集,1995
- 14) 池田大治郎,榎本大樹,中島裕輔,尾島俊雄,伝統民家型住宅における気密性能に関する実測調査研究,日本建築学会関東支部研究報告集,2000
- 15) 石川善美,佐々木睦史,次世代省エネルギー基準施行後に建設された木造戸建住宅の気密性能実測結果,日本建築学会東北支部研究報告会,2001
- 16) 絵内正道,森太郎,外装・断熱気密改修に伴う熱・気密性能の変化,日本建築学会大会学術講演梗概集,2004
- 17) (株)矢野経済研究所,平成 22 年度一般計量行政調査事業 (LP ガスメーターの制度の経年変化調査) 調査報告書

<注>

- 1) 財団法人建築環境省エネルギー機構,住宅の気密測定試験方法,2004 では、差圧計のゼロ調整を行い、送風機を塞いだ状態で、内外差圧が 3(Pa)以下となることを測定条件としている。
- 2) $1.0 \text{ mmAq}(\text{mmH}_2\text{O}) = 9.8(\text{Pa})$