

特別寄稿**住宅における温熱・空気環境と健康**

～これまでの歩みとこれから～

吉野 博

東北大学名誉教授

**Thermal environment and indoor air quality of residential buildings and occupants' health
-History and future-**

Hiroshi Yoshino

Tohoku University, Professor Emeritus

要旨

筆者は、長らく住宅の温熱空気環境と健康にかかわる調査研究に携わってきた。1980年代からは、脳卒中の発症と室内温熱環境との関係について、2000年頃からは、シックハウス問題、並びに児童のアレルギーと室内環境との関連について、2011年の東日本大震災後には、応急仮設住宅や浸水住宅における室内環境と健康問題について調査を実施してきた。これらの、或いは関連する研究は今日まで様々な機会を通して継続しており、その成果については書籍の発刊や学会の提言の発出などを通して社会発信に繋げてきた。本報では、これまでの研究を振り返ると共に、これからの課題についても触れることとする。脱炭素化に対する社会的な要請の一方で健康快適な環境が求められる時代にあって、これらの課題は避けて通れない事項であり、これからの住宅の室内環境設計を進める上で参考となればと願うものである。

(臨床環境 31 : 45 - 61, 2022)

《キーワード》 温熱空気環境、健康、実態調査、断熱・気密

Abstract

The author has long been involved in survey research related to the thermal environment and indoor air quality of residential buildings and occupants' health. Since the 1980s, he has studied the

受付：2022年9月30日 採用：2022年11月14日

責任著者：吉野 博

住まいと環境 東北フォーラム事務局

〒980-0821 宮城県仙台市青葉区春日町3-8春日町ファインビル4F

yoshino@sabine.pln.archi.tohoku.ac.jp

relationship between the onset of stroke and the indoor thermal environment. Since the 2000s, he has studied the relationship between the sick house problem/children's allergies and the indoor environment. After the Great East Japan Earthquake in 2011, he has been investigating the indoor environment and health problems in emergency temporary housing and flooded housing. These and other related studies have continued to this day through various opportunities, and the results have been disseminated to society through the publication of books and the issuance of academic societies' proposals. The author looks back on the research so far and touches on future issues. In an era where there is a social demand for decarbonization and on the other hand, a healthy and comfortable environment is required, these issues cannot be avoided. It is hoped that this will serve as a reference for future indoor environmental design of houses.

(Jpn J Clin Ecol 31 : 45 – 61, 2022)

《Key words》 Thermal environment and indoor air quality, Health, Field investigation, Thermal insulation and airtightness

1. はじめに

筆者は、長らく住宅の温熱空気環境と健康にかかわる調査研究に携わってきた。1980年代からは、脳卒中の発症と室内温熱環境との関係について、2000年頃からは、シックハウス問題、並びに児童のアレルギーと室内環境との関連について、2011年の東日本大震災後には、応急仮設住宅や浸水住宅における室内環境と健康問題について調査を実施してきた。これらの、或いは関連する研究は今日まで様々な機会を通して継続しており、その成果については書籍の発刊や学会の提言の発出などを通して社会発信に繋げてきた。本報では、これまでの研究を振り返ると共に、これからの課題についても触れることとする。

2. 健康・快適性から見た住宅熱環境

(1) 東北地方の住宅の温熱環境

1978年に東北大学に赴任した後、東北地方各地の住宅における冬季の室内環境の実態調査を開始した。これは研究課題を発掘するという意味合いもあったが、まず初めに都市住宅を対象とし農村住宅にも広げていった。都市住宅において明らかになった室内温熱環境の典型的な特徴¹⁾は図1に示すように、外気温度が0℃前後で変化するとき、①暖房している居間では、暖房時間帯の床上1.1mの温度は20℃近くに維持されているが、②同じ居間の床近辺の温度は床上1.1mよりも5℃

から10℃ぐらい低い、③居間の明け方の温度は、暖房されていないことから10℃以下にまで下がる、④暖房をしていない寝室や廊下の温度は5℃ぐらいになっている、等であり、快適性の面で問題のあることが分かった。

(2) 脳卒中の発症と室内熱環境

農村住宅については、山形大学医学部による脳卒中の発症と衣食住の関係を調査するプロジェクトに参加することで1982年と1983年に調査²⁾を行った。農村住宅は、規模が大きく断熱材も施されていないために、都市住宅よりもさらに快適性の面で問題があったが、脳卒中死亡率の高い町(八幡町：脳卒中標準化死亡比、男：195.6、女：190.0)と平均的な町(朝日町：脳卒中標準化死亡比、男：78.6、女：80.1)との調査結果の比較から、次のような興味ある知見が得られた。①寝室とトイレの温度は、両町で差が無かった。②居間の団欒時の温度は、八幡町の方が朝日町よりも平均で4℃高い(図2)²⁾、③八幡町の居住者の着衣は朝日町よりも薄着である、④八幡町の方が朝日町よりもみそ汁などの塩分摂取量が多い。このことから八幡町の方で脳卒中死亡率が高い理由の一つは、暖房している部屋と、していない部屋の温度の差が大きいことであると推察した。それらの成果を踏まえて、脳卒中発症の防止のために、寒い部屋での暖房や建物断熱の必要性につい

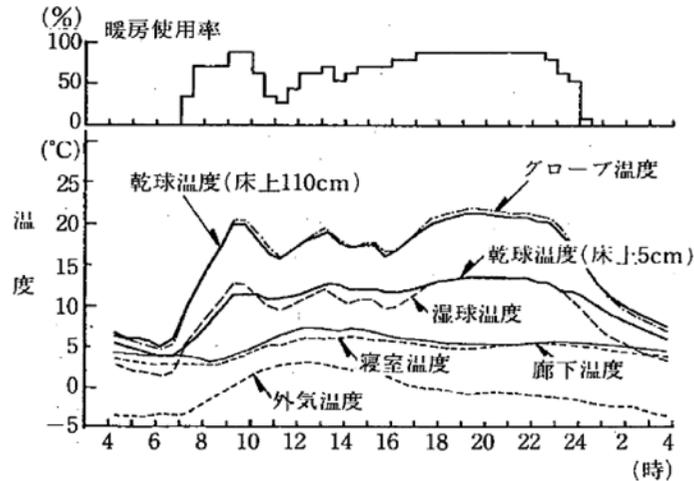


図1 東北地方の都市住宅の平均温度変化の一例¹⁾

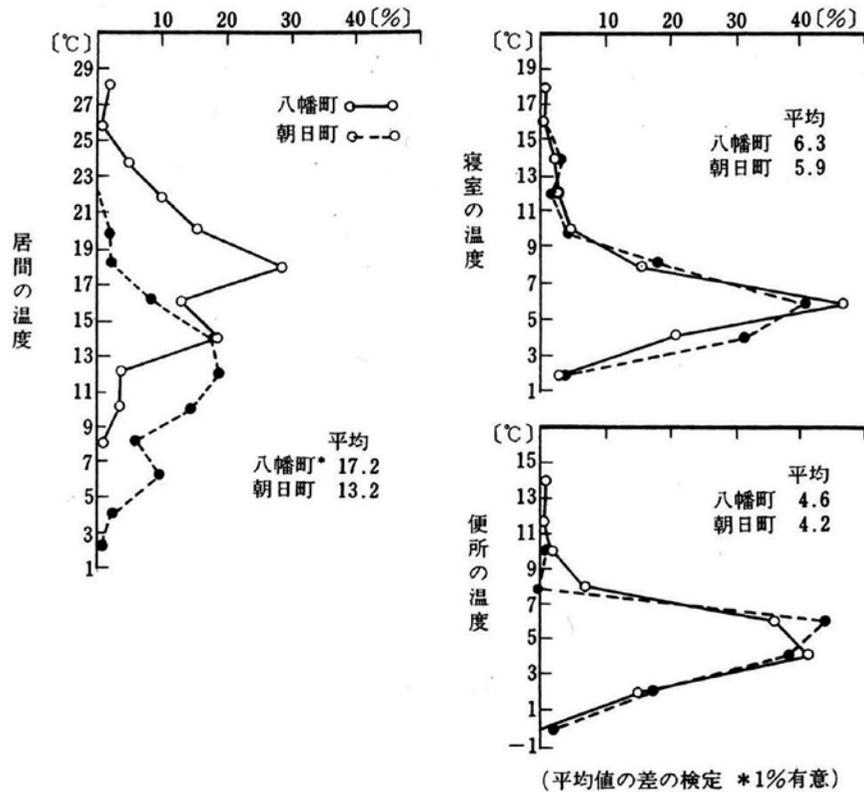


図2 外気温が0°Cの時の室温の度数分布²⁾

て報告会や健康祭、広報などを通して町の住民に情報を発信した。4年後に八幡町の同じ住宅を調査³⁾したが、ほとんどの住宅で室内温熱環境の変化はなかった。そして、33年後の2015年に同じ町を対象として調査⁴⁾したところ、二つの町での温度の差はなくなったが、寝室温度は60%の住

宅で、トイレの温度は殆どの住宅で暖房が無いために外気温が0°Cの時に10°C以下であり、依然として温度差のある室内環境となっていることが明らかとなった。なお、脳卒中標準化死亡比は、2011~2013年の男女平均で、旧八幡町では164.2、旧朝日町では61.6であった。

3. 高断熱高気密住宅の室内環境と健康、並びに暖房エネルギー消費量

(1) 室内環境と健康

1990年代から断熱気密性能の高い住宅、即ち「高断熱高気密住宅」が出現してきた。それらの住宅（北海道、東北が中心）を対象とした測定⁵⁾では、暖房していない部屋でも室温が大きく下がらないことや上下の温度差が小さいことが明らかになった。そしてアンケート調査⁵⁾では、図3に示すように①それまでの住宅と比較して、60%ぐらいの住宅で「朝の起床が楽になった」、「夜のトイレが億劫でなくなった」と回答し、以下「裸足で過ごすようになった」(40%)、「子供や高齢者の室内での活動範囲が増えた」(20%)など、快適性は高まったことが判明した。さらに健康への良い影響があったと答えた住宅は40%程度あり、図4に示すように具体的には「風邪をひかなくなった」がその内の50%、割合は低いが「喘息が良くなった」、「アレルギー性鼻炎がなくなった」、「アレルギーの症状が軽くなった」、「神経痛・腰痛・肩凝りがなくなった」(東北地方の住宅で15%)などの回答を得ている。しかし、健康への悪い影響があった住宅が15%程度見られ、具体的には「乾燥肌になった」、「喉の具合が悪くなった」(いずれも40%)等の指摘があった。その原因として室内の乾燥が考えられるが、それらの住宅を対象とした温度、湿度の測定結果からは、乾燥を感じている居住者の室内の相対湿度

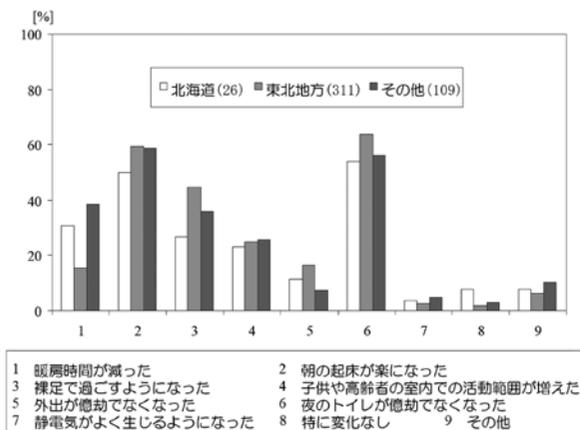


図3 高断熱高気密住宅に移転後の生活の変化⁵⁾

は、必ずしも低いわけではない。乾燥感は室内空気に含まれる化学物質によることが示唆される文献があったことから、筆者らはホルムアルデヒド濃度を測定し、乾燥感との関係を分析⁶⁾したが、明確な関係をとらえることは出来なかった。乾燥感に影響を及ぼす因子についての研究は今後の課題である。

(2) 高断熱高気密住宅の暖房エネルギー消費量

高断熱高気密住宅は、本来、省エネルギーを目的として設計されているので、それらの住宅ではどのくらい暖房用エネルギー消費量が減少しているのかについても調査した。その結果、既設の断熱の無い住宅と比較すると不思議なことに図5⁷⁾に示すように70%近い住宅で既設住宅よりも暖房エネルギー消費が増えてしまっていることが明らかとなった。その理由は、比較した既設住宅では暖房器具の利用が居間だけを対象に団欒時を中心に行っていること、即ち空間的、時間的に限定されているのに対して、高断熱高気密住宅では、全部の空間を一日中暖房しているケースが多いからである。仙台の典型的な住宅における1月の暖房負荷を計算すると図6⁷⁾にとおりとなる。即ち、全室連続暖房の場合には断熱性能が高まれば負荷は減少するが、現在の省エネ基準の次世代レベルでも、部分間欠暖房の場合の既設住宅よりも多く、それよりも暖房負荷を少なくするためには、

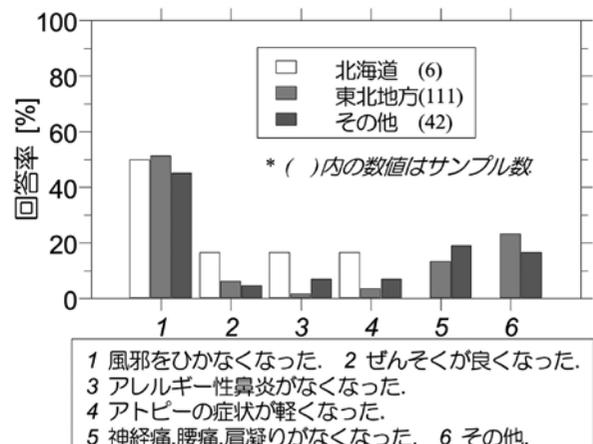


図4 高断熱高気密住宅に移転後の健康へ良い影響⁵⁾

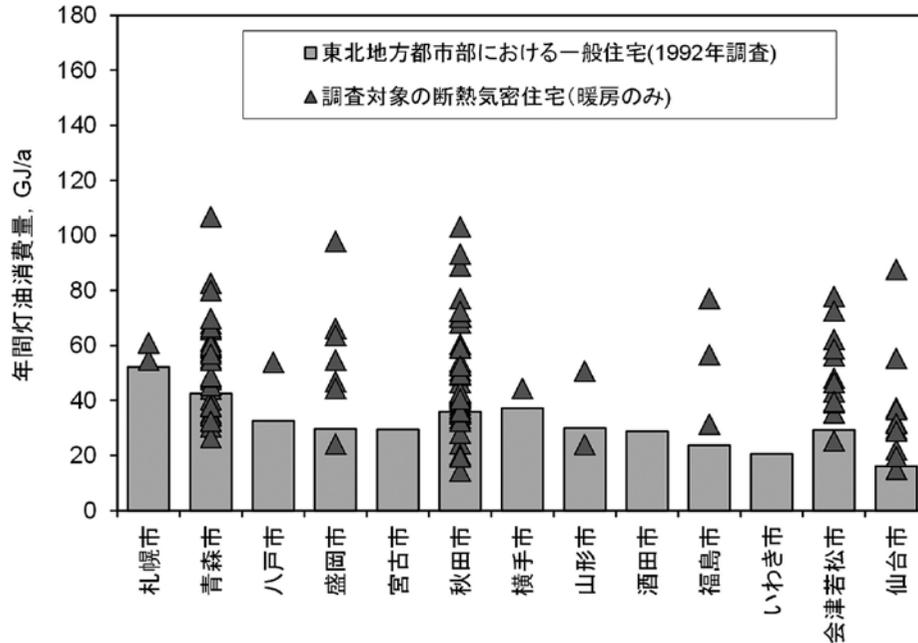


図5 高断熱高気密住宅における暖房消費量⁷⁾

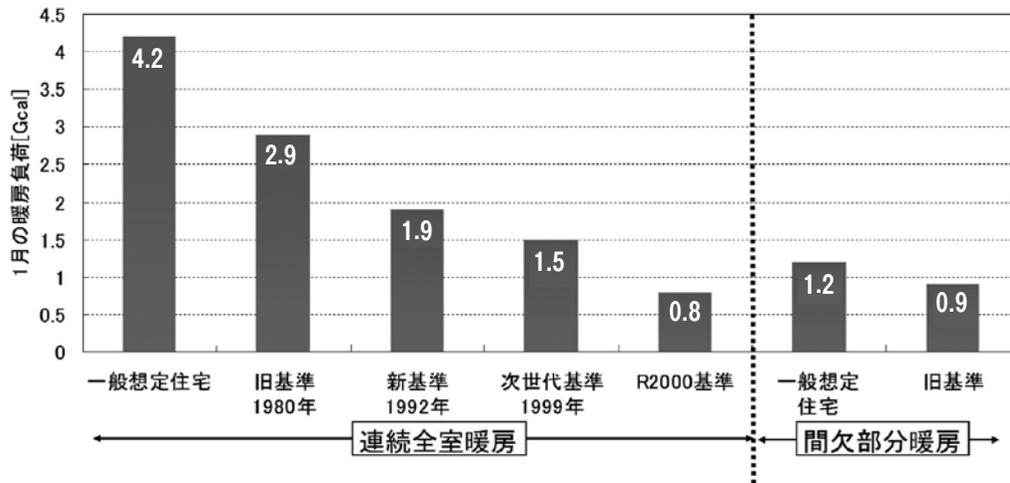


図6 断熱性能の向上と1月の暖房負荷 (仙台市の場合)⁷⁾

カナダ R2000住宅の仕様^{注1}に相当する断熱性能の向上が必要であることが分かった。最近の断熱レベルでいえば、ZEH相当^{注2}ということになる。関連して1988年9月にカナダ R2000の断熱性能の仕様で住宅を建設し、2年間測定⁸⁾したが、その住宅の暖房エネルギー消費量は、東北の住宅における平均値よりも少ないこと、また室内は全ての部屋が快適に保たれていることがわかった。

(3) 室内熱環境と健康に関する大規模調査—国交省スマートウェルネス住宅等推進事業

断熱化による健康への効果については、国交省スマートウェルネス住宅等推進事業が2014年度から開始^{注3}された。2000件の断熱改修した住宅を対象とした詳細な調査からは、下記に示すような重要な知見⁹⁾が得られている。

1) 家庭血圧と室温 ①起床時の居間室温が低いほど血圧が高い (ex.60歳男性: 20℃ ->

10℃では、7.8mmHg 上昇)、②居住者の血圧は、部屋間の温度差が大きく、床近傍の室温が低い住宅で有意に高い、③断熱改修後に、居住者の起床時の最高血圧が有意に低下(-3.5mmHg)

- 2) 夜間頻尿 ①就寝前の室温が低い住宅ほど、夜間頻尿の人が有意に多い、②断熱改修後に就寝前居間室温が上昇した住宅では、夜間頻尿が有意に緩和
- 3) 疾病・自覚症状と室温 ①床近傍の室温が低い住宅では、様々な疾病・症状を有する人が有意に多い、(高血圧、糖尿病、骨折・捻挫、脱臼など)
- 4) 身体活動量と室温 断熱改修に伴う室温上昇によって暖房習慣が変化した住宅では、住宅内身体活動時間が有意に増加

以上のように、断熱気密化は必ずしも暖房エネルギー消費の削減には結びつかないが、健康増進という観点からは積極的に取り組むべき手法である。因みに、建築物省エネ法¹⁰⁾が、2022年6月に改正され、2025年からすべての新築住宅は省エネルギー基準に適合することが義務付けられることとなった。

4. シックハウス問題の解明と換気的作用

(1) シックハウス問題への取り組み

断熱気密化による自然換気量の減少などが原因で1990年後ごろからシックハウス問題が顕在化した。臨床環境医学会が設立されたのは1992年であるが、その背景としてシックハウス問題への対応があった。また、日本建築学会では研究委員会(室内化学物質空気汚染調査研究委員会)^{注4)}が1998年に発足し、学際的な研究が開始された。その関連で2000年から故石川哲先生らと共に仙台でシックハウス研究会と称して研究グループを組織^{注5)}し、約10年にわたってシックハウス問題の解決に向けた調査研究を実施した。調査対象は、宮城県内のシックハウスと疑われた住宅62軒(延べ104軒)である。調査項目は、室内化学物質濃度、換気量の測定、居住者の健康状態などである。

(2) シックハウス調査結果からの知見

シックハウス調査の結果¹¹⁾、対象となった住宅におけるホルムアルデヒドの濃度は、図7に示すように宮城県の一般の住宅よりも明らかに高く、厚生労働省のガイドラインの値を超える割合は、一般の住宅の32%に対してシックハウスと疑われる住宅では82%となっていた。また、シックハウスと疑われる住宅の居住者を、問診によって症状のある群(SHS群)と自覚症状のない群(コントロール群)に分けて、その住宅の化学物質濃度を比較¹²⁾すると、図8に示すようにSHS群では、トルエン、エチルベンゼン、キシレン、p-ジクロロベンゼン、TVOCが有意に高濃度となった。また、症状を示す6歳以下の児童を、軽症状と重症状二つに分けて化学物質濃度を比較¹³⁾すると、表1に示すように粘膜・結膜では、「重症状」の幼児がいる住宅では、p-ジクロロベンゼン、「皮膚」ではキシレン、TVOCの化学物質濃度が、「軽症状」の住宅よりも高いことが分かった。

対象住宅の中の23件については、数年にわたり継続的に室内空気質や居住者の健康状態を調査し

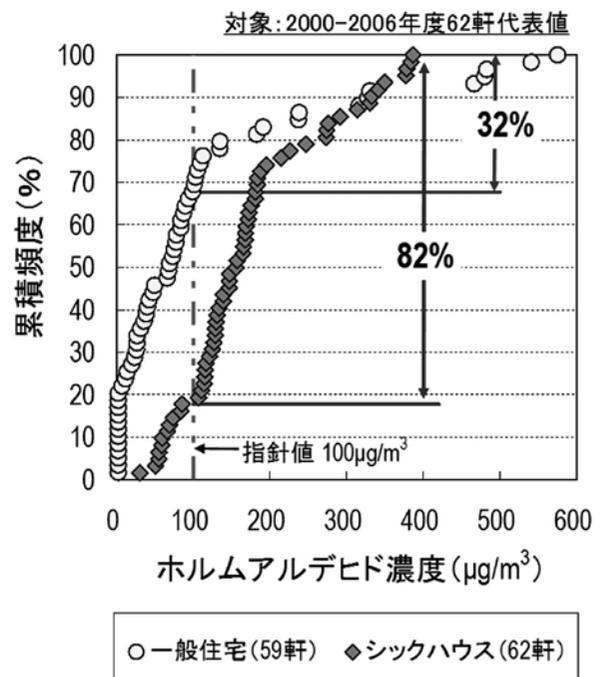


図7 シックハウスと疑われた住宅と一般中のホルムアルデヒド濃度¹¹⁾

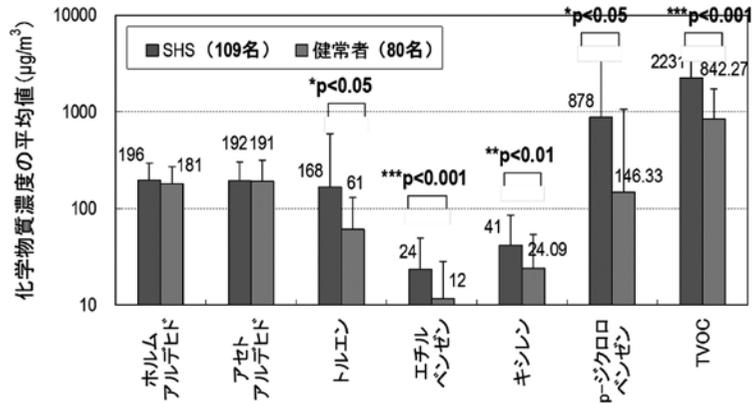


図8 「SHS群」と「control群」の室内空気汚染物質の濃度比較¹²⁾

表1 低年齢群の症状（軽症状と重症状）と化学物質濃度¹³⁾

症状		N	ホルムアルデヒド	トルエン	エチルベンゼン	キシレン	p-ジクロロベンゼン	TVOC
粘膜・結膜	軽症状	30	147.9	39.0	7.3	21.8	23.0*	624.8
	重症状	16	136.7	66.4	18.2	32.5	68.1	712.4
皮膚	軽症状	27	156	49.6	11.6	18.0*	37	604.0*
	重症状	19	129	63.6	11.7	38.6	74.9	919.9

単位 µg/m³

*は有意差あり

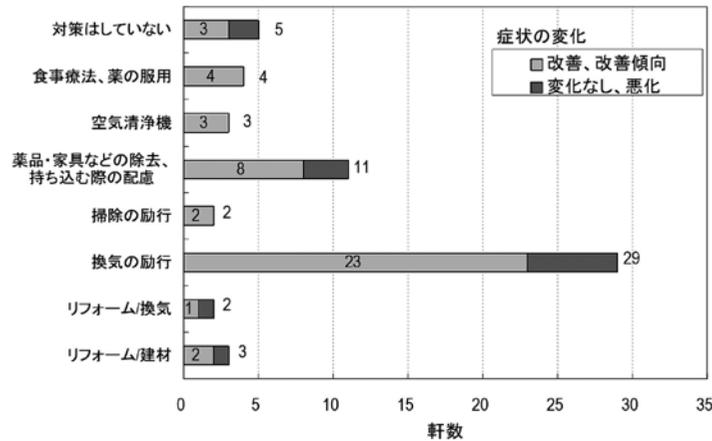


図9 シックハウス対策の内容と症状の変化¹⁴⁾

た。その結果¹⁴⁾ から、ホルムアルデヒド濃度は、新築・リフォーム後、4～5年かかっても減衰しにくいこと、一方、トルエン、キシレンなどは減衰が比較的早いことが明らかとなった。ホルムアルデヒドは合板などの接着剤に使用され長期にわたって徐々に揮発していくので室内のホルムアルデヒド濃度は減衰しにくい、トルエン、キシレンなどは塗装用に使われており、短期間で揮発することがその理由である。

数年にわたり継続して測定した住宅は30件あるが、調査を行った最初と最後のときの居住者の健康状態とその間のシックハウス対策の関係を調べてみた。その結果¹⁴⁾、図9に示すように、症状が改善した、或いは改善傾向にあると居住者が答えた住宅では、23戸で「換気を励行した」、8戸で「薬品・家具などの除去、持ち込む際の配慮を行った」と回答しており、発生源の制御と換気が重要であることが示唆された。

(3) 換気システムの完成検査と維持管理

対象とした住宅では、換気量の測定も行っている。その結果¹⁵⁾によれば図10に示すように25件のうちの80%は換気回数で0.5回/hを満たしていないことが分かった。シックハウス防止のための建築基準法改正の前に建設されているので、法律上の問題となることは無いが、住宅の換気設計の目安としては既にその値が採用されている。なぜ換気量が少ないのかについていくつかの住宅で調べたところ、換気口や熱交換換気扇付属のフィルターにゴミや虫が溜まっていることやダクトが途中で接続されていないといった施工上のミスもみつかった¹⁵⁾。このことから、施工後の完成検査や維持管理が極めて重要であることが明らかになった。

(4) シックハウス研究成果の還元

長期に亘る綿密な調査研究によって多くの成果が得られたが、それに基づいて故石川哲先生のご尽力によって二つの出版物を刊行することができた。一つは、石川先生とご一緒に編著者となり、東北大学出版会から2011年2月に刊行した「シックハウス症候群を防ぐには—長期に亘る実態調査をふまえて—」(図11¹⁶⁾)である。もう一つは、柳沢幸雄先生(東京大学名誉教授)、石川先生、宮田幹夫先生(そよ風クリニック院長)らとの共編著でCRC Pressから2017年1月に刊行した“Chemical Sensitivity and Sick-Building Syndrome”(図12¹⁶⁾)である。筆者としては、このような形で成果を残すことができうれしく思っている。

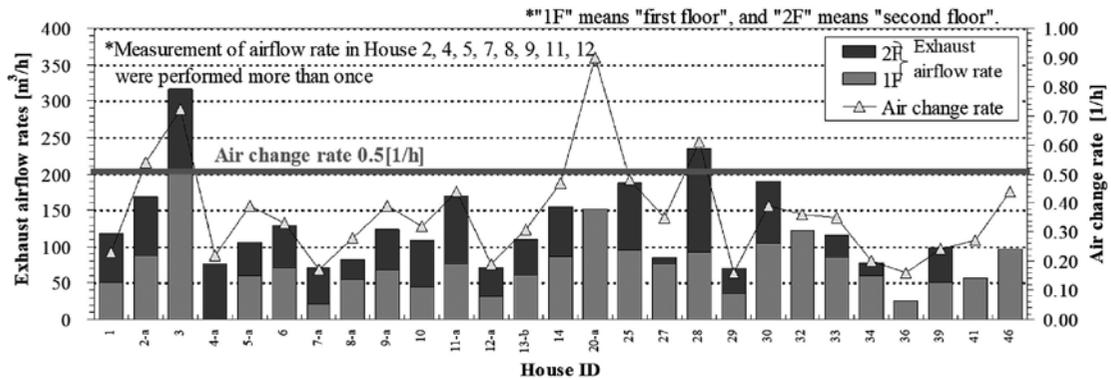


図10 換気量の測定結果 (風量測定器による)

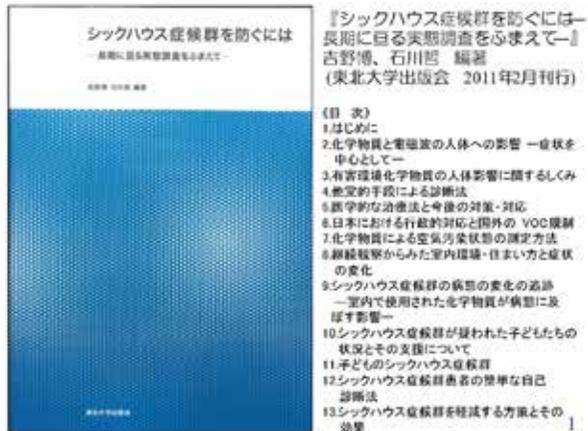


図11 「シックハウス症候群を防ぐには—長期に亘る実態調査をふまえて—」東北大学出版会、2011年2月¹⁶⁾ (編著：吉野博、石川哲、他著者10名)

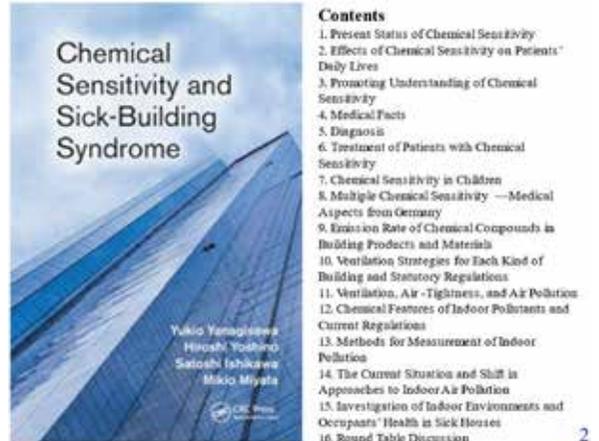


図12 “Chemical Sensitivity and Sick-Building Syndrome” CRC Press、2017年1月¹⁶⁾ (編著：柳沢幸雄、吉野博、石川哲、宮田幹夫、他著者10名)

5. アレルギーと室内環境の関係

(1) 調査の背景と概要

児童のアレルギー疾患、特に喘息が2000年頃から増加していた。その原因として建物のダンプネス、即ち結露、カビの発生と関連があると示唆する研究がヨーロッパで行われていた。例えば、Bornehag 他¹⁷⁾は、文献研究によって、ダンプネスが咳、喘鳴、喘息などの健康影響のリスクを高めることを示している。そこで、筆者らは研究グループを結成^{注6}して全国的な調査を2007年から開始した。調査は、簡易調査(7501人)、詳細アンケート(1662人)、実測調査(約90件)からなる。簡易調査からは、図13、図14に示すように以下の

点が明らかとなった¹⁸⁾。①アレルギー疾患を患う児童が約半数である、②症状別では、鼻炎が多く(33.4%)、続いてアトピー性皮膚炎(15.5%)、喘息(12.3%)、結膜炎(9.8%)である。③アレルギー性疾患の原因として「花粉」「ダニ」「ハウスダスト」をあげた割合が高い。④地域的な特徴として、北海道や東北、九州・沖縄では「ハウスダスト」の割合が高いこと、「ダニ」「ハウスダスト」は東日本の方が割合は高くなる傾向がある。

(2) ケース・コントロール調査の結果

ケース・コントロール調査¹⁸⁾からは、表2に示すように、①居間と子供室でカビが窓・サッシ

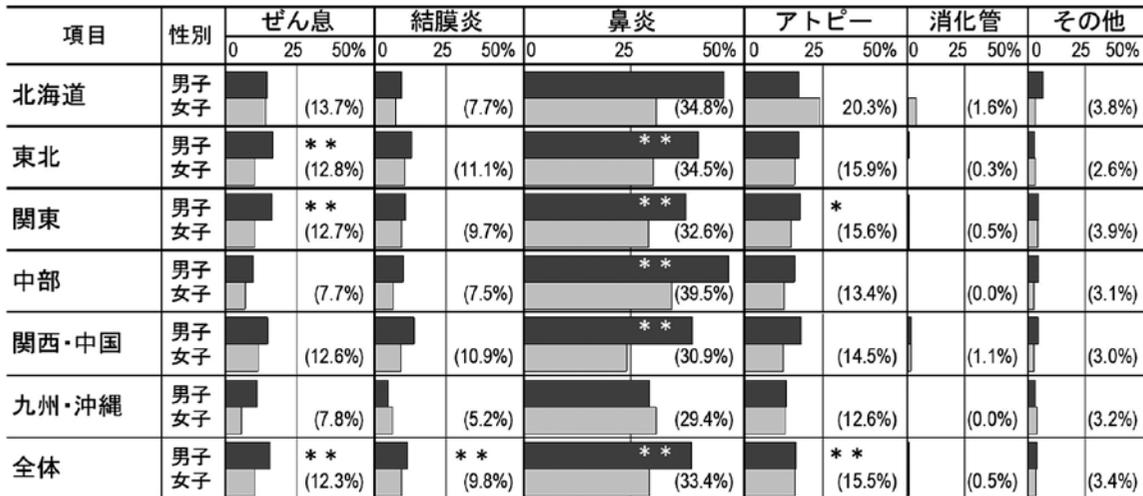


図13 アレルギー疾患の症状¹⁸⁾

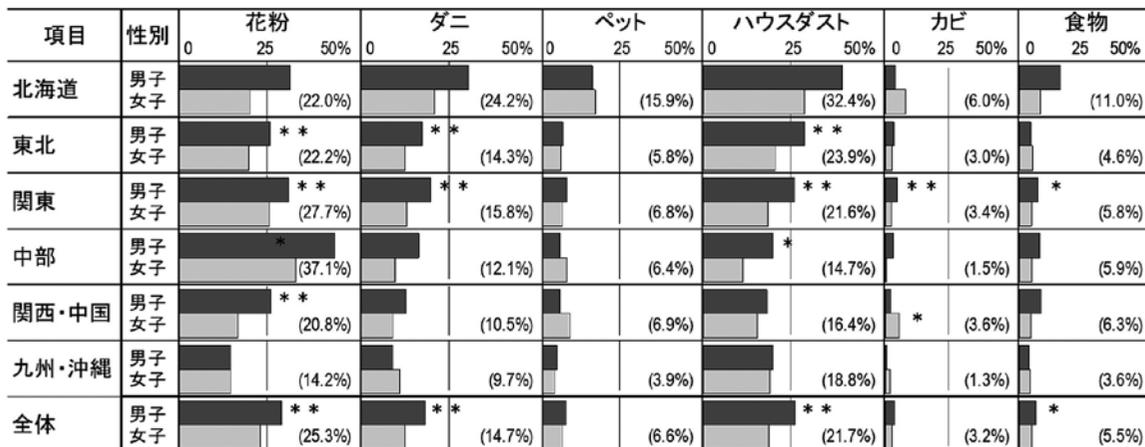


図14 アレルギー性疾患の現因¹⁸⁾

以外の部位に発生している場合には、喘息様症状（現在）（OR=3.05）、気道過敏症（OR=1.99）の発症リスクが有意に増加する、②カビ汚染、水シミの程度が深刻化するほど、症状へのリスクが増加する、また、ダンプネスの状態を表すダンプネスインデックスとアレルギー症状の関係を分析すると、表3に示すように、子供室の方が居間よりも症状に与える影響は強く、喘息様症状（現在）と気道過敏症に対するORがそれぞれ2.12（ $p < 0.05$ ）、1.99（ $p < 0.05$ ）で有意となった、ことなどが明らかになっている。

(3) 実測調査の結果

更に、実測調査の結果に基づいてケース群（児童がアレルギー疾患に罹っている）とコントロール群に分けて分析¹⁹⁾すると図15に示すように、居間の壁近傍において相対湿度が70%を超える割合は、ケース群の方が有意に高く、その他の部位でも高い傾向にあることがわかった。以上の結果から、ダンプネスが児童のアレルギー疾患に影響を及ぼしている可能性が高いと言える。これらの成果を受けて他の要因も含めて幅広く議論を進めるために、2018年9月に本学会の下に環境アレルギー分科会（代表：平久美子（東京女子医科大

表2 アレルギー症状と室内環境の関係¹⁹⁾

要因	喘息様症状(現在)(N=85)		気道過敏症(N=203)		花粉症様症状(N=974)	
	OR	調整OR(95%CI)	OR	調整OR(95%CI)	OR	調整OR(95%CI)
結露						
窓サッシのみ/発生なし	0.99	0.86(0.42-1.73)	1.16	1.01(0.62-1.65)	1.26	1.32(0.97-1.80)
一室(窓サッシ以外)発生/発生なし	1.94	1.80(0.73-4.43)	1.79*	1.64(0.85-3.15)	1.18	1.33(0.83-2.13)
両室(窓サッシ以外)発生/発生なし	1.03	0.90(0.29-2.85)	1.63	1.37(0.66-2.86)	2.02**	2.26(1.29-3.95)**
カビ						
窓サッシのみ/発生なし	1.28	1.21(0.69-2.11)	1.16	0.99(0.68-1.45)	1.32*	1.27(0.98-1.64)
窓サッシ以外発生/発生なし	1.34	1.26(0.62-2.56)	1.72*	1.46(0.93-2.28)	1.24	1.13(0.81-1.58)
両室 窓サッシ以外発生/発生なし	2.88**	3.05(1.38-6.73)**	2.21**	1.99(1.10-3.59)*	1.43	1.30(0.80-2.11)
水シミ						
窓サッシのみ/発生なし	1.43	1.33(0.65-2.71)	1.51	1.33(0.83-2.12)	1.42*	1.37(0.96-1.95)
窓サッシ以外発生/発生なし	2.13*	2.35(1.23-4.48)**	1.70*	1.73(1.08-2.76)*	1.20	1.26(0.88-1.81)
両室 窓サッシ以外発生/発生なし	2.48*	2.62(1.11-6.20)*	2.59***	2.48(1.36-4.50)**	1.07	1.02(0.61-1.71)

有意確率: *** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$

表3 アレルギー症状と Dampness Index の関係¹⁹⁾

Characteristics	Adjusted OR (95%CI) ^a		
	Current asthma (N=85)	Bronchial hypersensitivity (N=203)	Current Allergic rhinitis (N=974)
Dampness index in the living room			
0	1.0	1.0	1.0
1	0.65(0.32-1.30)	0.96(0.61-1.52)	1.26(0.94-1.68)
2	1.21(0.61-2.41)	1.18(0.73-1.90)	1.57(1.14-2.16)**
3	1.75(0.83-3.68)	1.74(1.03-2.92)*	1.44(0.98-2.09)
Dampness index in the children's bedroom			
0	1.0	1.0	1.0
1	0.71(0.35-1.45)	0.89(0.54-1.45)	0.99(0.73-1.34)
2	0.96(0.46-2.02)	1.23(0.74-2.03)	1.41(1.01-1.97)*
3	2.12(1.00-4.51)*	1.99(1.17-3.41)*	1.43(0.97-2.11)

p-value: *** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$

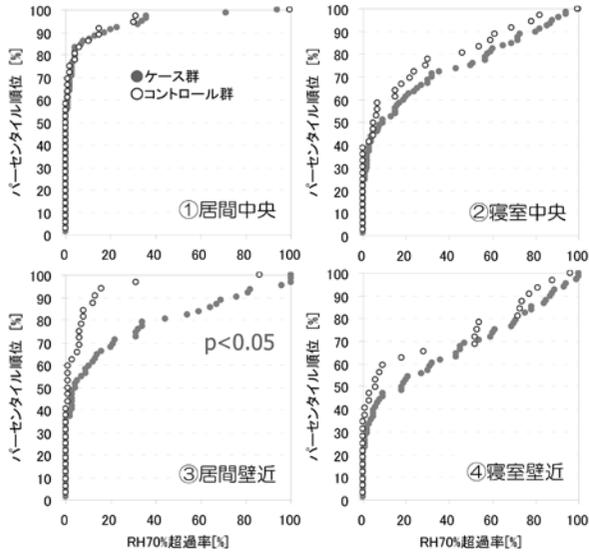


図15 相対湿度70%超過率のパーセンタイル順位¹⁹⁾

学))²⁰⁾が設けられ、活動を行っている。

6. 仮設住宅における室内環境調査と環境設計に関する提案

(1) 応急仮設住宅における環境問題

東日本大震災後に52,000戸という膨大な応急仮設住宅が建設された。様々な制約条件がある中での建設であるため、隣棟間隔が狭い、長屋形式である、居住面積が狭い、断熱が不十分であるといったことから、室内環境の面から見ると様々な問題点が観察され、また居住者から指摘された。

これを受けて実態を把握するための研究グループを結成^{注7)}し、宮城県を中心としたアンケート調査(夏期77戸、冬期88戸)、実測調査(27戸)を行った。

(2) 実態調査結果の概要

アンケート調査²¹⁾では、居住者が健康被害として「眼症状」、「鼻症状」、「喉症状」、「皮膚症状」を訴える割合はいずれも40%前後であり、一般住宅の場合よりも高いこと、冬期の「鼻症状」、「喉症状」、「皮膚症状」は、「洗濯物の室内干し」、「結露」などダンプネスと関連が見られたこと、夏期の「眼症状」、「喉症状」、「皮膚症状」は、周辺に幹線道路、廃棄物焼却施設、工場があることと関連性が見られたこと、等が明らかとなった。

また、実測調査の結果²²⁾より、10月3日から11月19日にかけての5戸の住宅の日平均室温を示すと図16のようになる。10月に入ると住戸による室温の差が現れ始め、11月の半ばにはその差がさらに大きくなり、三つの住宅で15℃よりも低い日が現れている。これらの住宅では、一日のある時間では相当に温度が低くなっている可能性がある。健康の面から言えば避けたいところである。

CO₂濃度については、8月27日から11月25日の19戸の週平均値の変化を図17に示す。秋から冬に向かって、CO₂濃度が全体的に上昇しているが、これは外気温が下がり窓を開放する時間が減少す

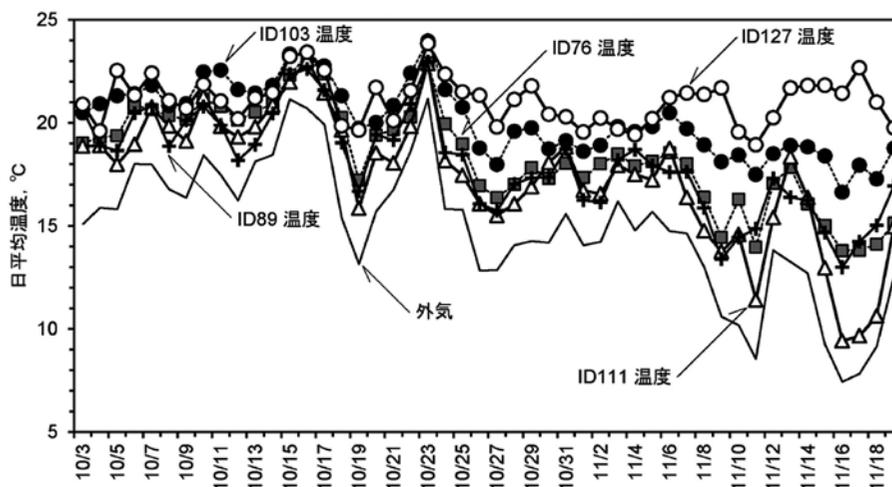


図16 5住戸の日平均室温と外気温の変化²²⁾

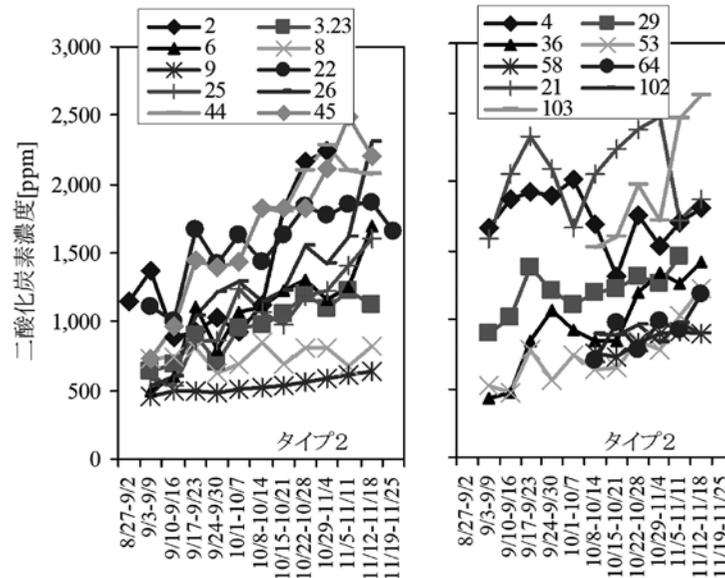


図17 19戸の二酸化炭素濃度の週平均値の変化²²⁾

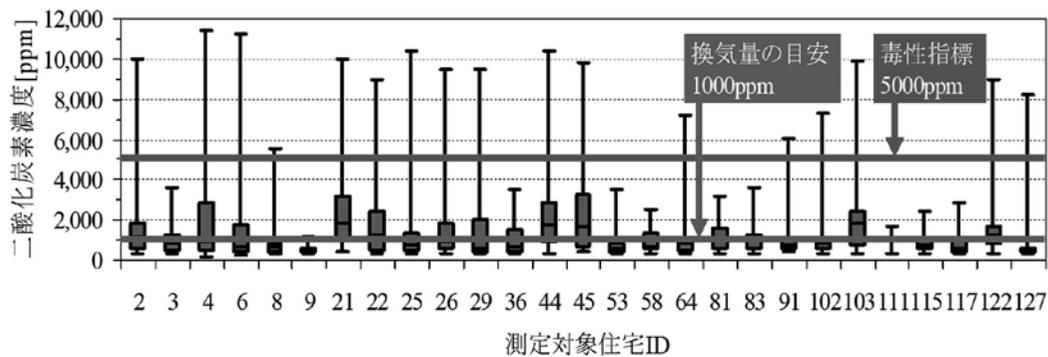


図18 19戸の二酸化炭素の分布²²⁾

るからである。一般ビルのCO₂濃度基準は1,000ppmであるが、多くの住宅でその値を越えていることが分かる。図18は住宅ごとにCO₂濃度の分布を示している。この図から、①全体的に二酸化炭素濃度が高い、②中央値と75%タイル値が1000ppmを上回ったのはそれぞれ7件(26%)と20件(74%)である、③最大値が5000ppmを超えたのは17件(63%)である。

(3) 仮設住宅の環境設計についての提言

本稿では、調査結果として示したのは室内温度とCO₂濃度だけであるが、それ以外に騒音問題、結露・カビの発生、夏の暑さの問題等が明らかにされた。これらの成果を踏まえて、日本建築学会

からは、「応急仮設住宅の環境設計と住まい方ガイドライン—健康に暮らすための室内環境に関する提言—」を2021年7月に公表^{注8,23)}した。基本的な考え方は、本文中にもあるように「応急仮設住宅といえども、安全・健康・快適を維持するための住宅性能は適切に確保されるべきである。むしろ、心身ともに疲労している被災者には、十分に快適な環境を提供することが極めて重要である。」ということである。目次は以下の通りである。提言の表紙と提言の項目を図19に示す。

1. 建設地の選定
2. 配置計画の面で配慮すべき事項
3. 小屋裏の結露防止対策
4. 適切な断熱性能・気密性能、日射制御性能の



1. 建設地の選定	・対象敷地内の騒音は 60dBA 程度以下となる建設地 ・廃棄物処理場やゴミ焼却場などから離れた敷地	提言 1-1 提言 1-2
2. 配置計画の面で配慮すべき事項	・冬季の日照を確保するための開口部の方位と隣棟間隔 ・夏季の通風を確保するための住棟配置	提言 2-1 提言 2-2
3. 小屋裏の結露防止対策	・天井面の気密性能 ・小屋裏の機械換気設備	提言 3-1 提言 3-2
4. 適切な断熱性能・気密性能、日射制御性能の確保	・現行の省エネルギー基準以上の断熱性能	提言 4-1 提言 4-2 提言 4-3
5. 健康・快適な温熱環境の確保	・適切な室温を確保するための暖房・冷房計画	提言 5-1
6. 室内空気汚染の防除	・居室の換気計画 ・室内空気汚染を引き起こす要因の排除	提言 6-1 提言 6-2 提言 6-3
7. 結露による被害の防止	・断熱性能の確保と換気計画	提言 4-1 提言 6-1
8. ストレスのない音環境計画	・建物部位別、音源別の遮音性能	提言 8-1

図19 日本建築学会「応急仮設住宅の環境設計と住まい方ガイドライン—健康に暮らすための室内環境に関する提言—」の表紙と提言の項目²³⁾

表4 居住者の健康に関する自覚症状：被害の無かった住宅に対する調整オッズ比²⁴⁾

症状や疾患	1週間以内	1か月以内	半年後	1年後	1年半後
呼吸器症状	5.24 (1.12-24.5) *	2.31 (0.81-6.66)	1.49 (0.48-4.61)	1.17 (0.38-3.60)	1.21 (0.34-4.23)
皮膚症状	2.32 (0.80-6.74)	2.81 (0.96-8.25)	3.67 (1.19-11.3) *	2.26 (0.80-6.35)	2.75 (0.99-6.35)
鼻の症状	2.95 (1.11-7.87) *	1.58 (0.72-3.48)	2.67 (0.56-12.8)	1.28 (0.53-3.11)	1.19 (0.12-12.1)
頭痛・めまい	4.23 (1.34-13.4) *	4.12 (1.32-12.9) *	1.91 (0.65-5.67)	1.18 (0.42-3.31)	1.15 (0.37-3.56)
ストレス	2.23 (1.14-4.36) *	2.47 (1.25-4.87) **	1.88 (0.96-3.68)	1.78 (0.48-6.66)	1.12 (0.55-2.31)

○交絡因子：性別、年代、喫煙の有無

○有意確率 * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$

○いずれの項目も Hosmer-Lemeshow の検定により $p > 0.05$

確保

- 5. 健康・快適な温熱環境の確保
- 6. 室内空気汚染の防除

7. 浸水住宅における湿気環境と健康問題

(1) 調査の概要

東日本大震災では、多くの住宅で浸水被害が発生した。例えば、宮城県内15市町村の浸水区域は、29,000ha に及び、建物の倒壊には至らず、床上、床下浸水にとどまった住宅の多くは、その後も被災した住宅で生活を送っている。これらの住宅は過度な水分に曝されたため、その後の居住空間では結露・カビの発生が生じている。筆者らは、浸水被害住宅の室内環境と居住者の健康の実態を把

握することを目的とし、アンケート調査と実測調査を実施した。

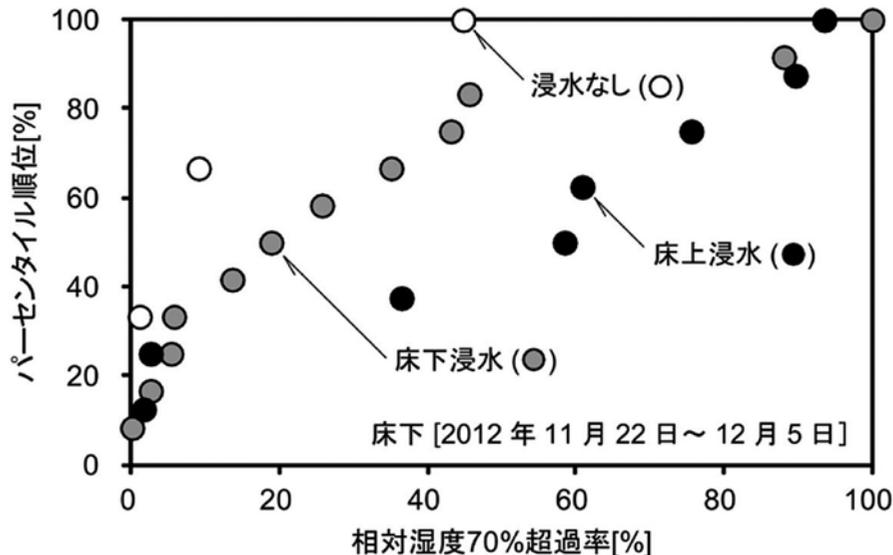
(2) アンケート調査の結果²⁴⁾

仙台市と石巻市内を対象とした調査では、床上浸水96戸、床下浸水29戸、浸水なし住宅41戸から有効回答を得た。その中の床上浸水住宅では半年が経過しても、約半数の住宅が湿気・衛生害虫・臭いの発生があったと答えている。表4は浸水被害住宅の居住者の健康に関する自覚症状について、被害の無かった住宅に対する調整オッズ比を示している。交絡因子は、性別、年代、喫煙の有無であり、ここでは有意確率が0.01以下の症状、疾患のみを示した。この結果によれば、「呼吸器

表5 室内環境に関する分析：被害の無かった住宅に対する調整オッズ比²⁴⁾

室内環境	1週間以内	1か月以内	半年後	1年後	1年半後
湿気	11.2 (4.77-26.6)***	8.79 (3.81-20.2)***	4.93 (1.99-12.2) **	1.02 (0.37-2.81)	1.41 (0.43-4.61)
結露	2.23 (0.89-5.56)	1.80 (0.75-4.32)	4.12 (1.13-14.9) *	5.16 (1.30-20.5)*	1.11 (0.45-2.72)
カビ	6.36 (1.38-29.4) *	4.27 (1.36-13.4) *	7.17 (1.96-26.2) **	16.1 (2.00-129.9) **	5.57 (1.21-25.7) *
衛生害虫	1.13 (0.42-3.06)	1.20 (0.52-2.78)	1.49 (0.70-3.18)	2.27 (0.76-6.81)	0.78 (0.28-2.18)
異臭	6.79 (2.96-15.6)***	6.24 (2.74-14.2)***	4.80 (2.04-11.3)***	1.40 (0.58-3.34)	2.62 (0.78-8.83)

○交絡因子：窓ガラスの種類、建築時期、床下の床面、床断熱繊維系の有無

○有意確率 * $p<0.05$, ** $p<0.01$ ○いずれの項目もHosmer-Lemeshow の検定により $p>0.05$ 図20 住宅30戸（浸水なし3戸、床下浸水12戸、床上浸水8戸）における床下相対湿度の70%超過率²⁴⁾

の疾患]、「鼻の症状」、「頭痛・めまい」、「ストレス」において浸水から1週間以内で有意に調整オッズ比が1以上となった。特に、「呼吸器の症状」については、5.24となり最も大きくなった。また、「頭痛・めまい」、「ストレス」については1か月以内、「皮膚の症状」については半年後においてもオッズ比が1以上となった。

次に室内環境に関する分析結果を表5に示す。交絡因子は、窓ガラスの種類、建設時期、床断熱繊維系の有無である。図によれば、「湿気」、「結露」、「カビ」については、浸水被害から半年後においてオッズ比が1以上となり、カビについては、1年半経過しても5.57という大きな値を示している。

さらに、症状・室内環境に影響を及ぼす要因に関して多変量解析を実施したところ、「床下の排

水を実施していない」住宅が、「実施している」住宅に比べて「呼吸器の症状」、「結露・カビの発生」のいずれにおいてもそれぞれ、オッズ比が10.2、2.57となった。

(2) 実測調査の結果

実測は2012年11月下旬から12月上旬において住宅30戸で行った。ここでは床下の相対湿度の分析結果²⁵⁾についてのみ図20に示す。図の横軸は相対湿度が70%を超える時間の割合を示している。柳ら²⁶⁾は、相対湿度70%以上の時間が継続すると、真菌の繁殖が進行することを示唆しているために、この値を使った。図によれば、明らかに浸水なしの住宅よりも床下浸水の住宅、更に床上浸水の住宅の方が超過率の高いことが分かった。

(3) 研究成果の還元

以上の調査研究の成果は、日本建築学会が2020年6月に発表した提言「激甚化する水害への建築分野の取組むべき課題～戸建て住宅を中心として～」²⁷⁾の中で次のような文章として反映されている。

①浸水により建築部位が含水すると耐久性や断熱性、衛生性が著しく損なわれる。②木造の戸建て住宅の場合、木材や断熱材など浸水後に乾燥しにくい部材が多い。特に浸水後の早い段階で、含水した内装材や繊維系断熱材を撤去し、木材等を乾燥させることが望ましい。③床下空間を乾燥させるために、浸水被害の状況や程度に応じた方法を検討すべきである。自然に乾燥させるのみではなく、床材を取り外さずに換気扇を用いた強制的な床下の換気も効果があると考えられる。④以上のような要求を踏まえた耐水性の高い材料・工法、および設計法、改修方法の整理・開発を進め、浸水後の生活再建をふまえた住宅を設計する必要がある。

8. 今後の課題

2019年に菅義偉首相(当時)が、我が国を2050年にカーボンニュートラルにすると宣言して以来、住宅建築分野では様々な方策による更なる断熱気密化が進められつつある。高断熱高気密化は冬期の室温を維持することにより健康の増進に繋がりが望ましいが、一方では室内空気質の劣化、ダンプネスの増加などが懸念される。また、温暖化にともなう異常気象により洪水災害が増えているようであるが、総合的な対策の一環として衛生面では浸水後の早期の湿気の除去が大切である。さらに、温暖化により感染症の発生が増えると推察されており、コロナ感染症も含めてその対策について検討する必要がある。

筆者の研究の成果をふまえて、以下に今後の課題をまとめる。

1) 住宅における断熱性能の向上は、健康を維持する上で極めて重要であることが多くのエビデンスにより明らかになりつつある。これらの情報を住まい手を含めて関係者に正しく伝

えていく必要がある。

- 2) シックハウス問題は建築基準法が改正されてからは下火になったが、決して無くなったわけではない。いわゆる香害問題は一般にも認知されるようになり、化学物質過敏症で苦しんでいる生活者は決して少なくない。その防止のためには、現在公表されている化学物質のガイドライン値の見直しや、それ以外の原因となる化学物質と健康影響の関係を明らかにする必要がある。この問題について、日本臨床環境医学会では環境過敏症分科会(代表:北條祥子(東北大学大学院歯学研究科))²⁸⁾において議論されている。
- 3) 換気は、シックハウスの防止やコロナ感染対策の基本である。ただし、コロナ感染の防止のための必要換気量については、未だ明快な根拠が示されていない。また、本文で述べたように、換気が設計通りに運用されるためには、施工完了時の換気システムの検査、定期的な維持管理が極めて重要である。
- 4) アレルギーの原因の一つは、カビ・ダニなどの生育を促す過度な湿気である。一方で、低湿度はウイルスの活性化やドライアイ、気道粘膜の異常などにつながる。相対湿度と健康性、快適性の関連についての研究は数多く実施されているが、まだ未解明な点が多い。
- 5) 住宅建築の洪水被害への対策は、総合的な視点で考えていく必要がある。この問題については、本文で述べたように建築学会で提言を公表²⁷⁾している。また、震災がつなぐ全国ネットワーク^{註9)}は、浸水被害にあったときの生活再建の手引き²⁹⁾を公開している。課題としては、浸水危険地域に建設される住宅の具体的な事前の対応策である。

以上、脱炭素化に対する社会的な要請の一方で健康快適な環境が求められる時代にあって、これらの課題は避けて通れない事項であり、これからの住宅の室内環境設計を進める上で参考となればと願うものである。

注

- 1) R-2000 住宅とは、カナダで開発され 1985 年にカナダ政府より日本に紹介された高気密・高断熱住宅。断熱性能値「R20」は、西暦 2000 年までに住宅の暖房エネルギーを 1/4 にしようという目標から命名された³⁰⁾。
- 2) ZEH ゼッチ (ネット・ゼロ・エネルギー・ハウス)³¹⁾とは、「外皮の断熱性能等を大幅に向上させるとともに、高効率な設備システムの導入により、室内環境の質を維持しつつ大幅な省エネルギーを実現した上で、再生可能エネルギーを導入することにより、年間の一次エネルギー消費量の収支がゼロとすることを目指した住宅」である。ここでは、それに相当する断熱レベルのことを指す。
- 3) 一般社団法人日本サステナブル建築協会に設けられた「マートウェルネス住宅等推進調査委員会」にて実施。委員構成は以下の通り。委員長：村上周三 (一般財団法人住宅・建築 SDGs 推進センター理事長、東京大学名誉教授)、副委員長：吉村健清 (産業医科大学名誉教授)、吉野博 (東北大学名誉教授)、菊尾七臣 (自治医科大学教授)、幹事：伊香賀俊治 (慶應義塾大学教授)、委員 58 名。
- 4) 平成 10～12 年度 文部科学省 科学技術振興調整費生活者ニーズ対応研究生活・社会基盤研究「室内化学物質空気汚染の解明と健康・衛生居住環境の開発」に対応して日本建築学会に設けられた³²⁾。
- 5) 研究会メンバーは次の通り。所属は当時。吉野博 (座長・東北大学)、石川哲 (北里大学)、池田耕一 (日本大学)、北條祥子 (尚綱大学)、野崎淳夫 (東北文化学園大学)、長谷兼一 (秋田県立大学)、菅原正則 (宮城教育大学)、林基哉 (宮城学院女子大学)、上山真知子 (山形大学)、角田和彦 (かくたこども&アレルギークリニック)、武田篤 (東北大学)、北澤幸絵、天野健太郎、飯田望、松本麻里、鈴木憲高 (東北大学大学院生)
- 6) 本研究は、国土交通省に設置されている「健康維持増進住宅研究委員会 (委員長：村上周三 (独) 建築研究所理事長)」、並びに民間企業等により構成される「健康維持増進住宅研究コンソーシアム (会長：村上周三 (独) 建築研究所理事長)」の活動の一環として実施。研究会メンバーは次の通り。所属は当時。吉野博 (東北大学)、池田耕一 (日本大学)、北條祥子 (尚綱大学)、三田村輝章 (足利工業大学)、野崎淳夫 (東北文化学園大学)、長谷川兼一 (秋田県立大学)、阿部恵子 (環境生物学研究所)、加藤則子 (国立保健医療科学院)、熊谷一清 (テキサス大学)、菅原正則 (宮城教育大学)、塩津弥佳 (国立保健医療科学院)、柳宇 (国立保健医療科学院)、長谷川あゆみ (住化学分析センター)、松田麻香、安藤直也、浜田健佑 (東北大学大学院生)
- 7) 日本建築学会東北支部・環境工学部会、震災関連住宅

- における健康影響の低減対策に関する研究 WG にて活動。委員構成は以下の通り。吉野博 (主査、東北大学)、長谷川兼一 (幹事、秋田県立大学)、柳宇 (工学院大学)、東賢一 (近畿大学)、阿部恵子 (環境生物学研究所)、池田耕一 (日本大学)、石川善美 (東京工業大学)、内海康雄 (仙台高専)、江村日奈子、大澤元毅 (国立保健医療科学院)、鍵直樹 (東京工業大学)、角田和彦 (かくたこども&アレルギークリニック)、熊谷一清 (テキサス大学)、佐々木隆 (岩手県立大学盛岡短期大学部)、篠原直秀 (産業技術総合研究所)、菅原正則 (宮城教育大学)、田島昌樹 (高知大学)、田中正敏 (福島大学)、米原英典 (放射線医学総合研究所)、野崎淳夫 (東北文化学園大学)、林基哉 (宮城大学女子学院)、長谷川麻子 (熊本大学)、本間義規 (岩手県立大学盛岡短期大学部)、山内毅 (住まいと環境東北フォーラム)
- 8) 日本建築学会東北支部環境工学部会「応急仮設住宅の環境設計・住まい方ガイドライン作成 WG」が取りまとめた。委員構成は以下の通りである。所属は当時。長谷川兼一 (委員長、秋田県立大学)、鍵直樹 (幹事、東京工業大学)、東賢一 (近畿大学)、井上勝夫 (日本大学)、大澤元毅 (元国立保健医療科学院)、角田和彦 (かくたこども&アレルギークリニック)、篠原直秀 (産業技術総合研究所)、菅原正則 (宮城教育大学)、田中正敏 (福島県立医科大学名誉教授)、中澤真司 (建設技術総合センター・鉄建建設)、野崎淳夫 (東北文化学園大学)、長谷川麻子 (熊本大学)、林基哉 (北海道大学)、渡辺麻衣子 (国立医薬品食品衛生研究所)、柳宇 (工学院大学)、吉野博 (東北大学名誉教授)
 - 9) 震災がつなぐ全国ネットワークは、「生の声に耳を傾け、一人ひとりに寄り添う」という想いに共鳴する災害支援・防災 NPO・ボランティア団体等の全国域のネットワーク組織³³⁾。

引用文献

- 1) 長谷川房雄, 吉野博, 他. 東北地方都市部の木造独立住宅における冬期の温熱環境に関する調査研究. 日本建築学会論文報告集 326: 91-102, 1983
- 2) 吉野博, 長谷川房雄, 他. 脳卒中の発症と住環境との関係についての山形県郡部を対象とした調査研究. 日本公衆衛生雑誌 32. 4: 181-193, 1985
- 3) 吉野博, 新井宏朋, 他. 積雪寒冷地の山形県八幡町における住宅暖房と室温の 4 年間の変化. 日本公衆衛生雑誌 34. 12: 774-782, 1987
- 4) 長谷川兼一, 吉野博, 他. 脳卒中死亡に関連する住環境要因に関する調査研究—山形県郡部を対象としたアンケート調査—. 日本建築学会環境系論文集 85. 768: 169-

- 176, 2020
- 5) 吉野博, 長谷川兼一. 高断熱高気密住宅における熱環境特性と居住者の健康に関する調査. 日本建築学会環境系論文集 507: 13-19, 1998
 - 6) 長谷川兼一, 吉野博, 他. 東北地方における断熱気密住宅の熱空気環境と居住者の湿度感に関する冬期調査. 日本建築学会大会学術講演梗概集: 783-784, 1998
 - 7) 長谷川兼一, 吉野博. 東北地方における断熱気密住宅のエネルギー消費量—暖房用を中心とした実態調査と数値計算—. 日本建築学会環境系論文集 557: 49-56, 2002
 - 8) 吉野博, 長友宗重, 他. カナダ R2000 仕様に基づいて建設された高断熱高気密住宅の熱空気環境に関する長期測定. 日本建築学会環境系論文集 471: 19-28, 1995
 - 9) 国土交通省. 住宅内の室温の変化が居住者の健康に与える影響とは? 調査結果から得られつつある「新たな知見」について報告します～断熱改修等による居住者の健康への影響調査 中間報告(第3回)～. https://www.mlit.go.jp/report/press/house07_hh_000198.html
 - 10) 一般財団法人住宅・建築SDGs推進センター. 建築物省エネ法概要. https://www.ibec.or.jp/ee_standard/outline.html
 - 11) 松本麻里, 吉野博, 他. シックハウスにおける室内空気質と居住者の健康状況に関する調査研究 その3 第2次調査の概要と室内化学物質濃度の測定結果. 日本建築学会大会学術講演梗概集 D2: 929-930, 2002
 - 12) 吉野博, 中村安季, 他. シックハウスにおける室内環境と居住者の健康に関する調査研究—その1 宮城県内の62軒の住宅における調査結果. 日本建築学会環境系論文集 74. 641: 803-809, 2009
 - 13) 中村安季, 吉野博, 他. シックハウスにおける室内空気質と居住者の健康状況に関する調査研究 その13 60軒の住宅に関する統計的解析. 日本建築学会大会学術講演梗概集: 893-894, 2007
 - 14) 吉野博, 中村安季, 他. シックハウスにおける室内環境と居住者の健康に関する調査研究—その2 宮城県内の30軒を中心とした住宅における長期継続観察—. 日本建築学会環境系論文集 75. 654: 705-712, 2010
 - 15) Takaki R, Yoshino H, et al. Study on Performance Evaluation of Mechanical Ventilation Systems for Occupied Houses. Proceedings of EPIC 2006 AIVC, Vol.3: 755-760, 2006
 - 16) 吉野博. 石川先生から学んだこと. CS 支援 128, 2022
 - 17) Bornehag C G, Blomquist G, et al. Dampness in buildings and health. Nordic interdisciplinary review of the scientific evidence on associations between exposure to “dampness” in buildings and health effects (NORDDAMP). Indoor Air 11. 2: 72-86, 2001. doi: 10.1034/j.1600-0668.2001.110202.x
 - 18) 吉野博, 長谷川兼一, 他. 児童のアレルギー性症状と居住環境要因との関連性に関する調査研究—アンケート調査結果を用いた健康影響要因に関する統計分析—. 日本建築学会環境系論文集 79. 695: 107-115, 2014
 - 19) 高松真理. アレルギー性疾患等をもたらす居住環境要因に関するケース・コントロール研究. 平成 21 年度秋田県立大学修士論文, 2010 年 2 月
 - 20) 日本臨床環境医学会環境アレルギー分科会. 2022 年度活動企画書. http://jsce-ac.umin.jp/200725/files_bunka/2022_kankyoall.pdf
 - 21) 長谷川兼一, 吉野博, 他. 仙台市を中心とする応急仮設住宅を対象とした屋内外環境の健康影響に関するアンケート調査. 日本建築学会環境系論文集 82. 741: 967-975, 2017
 - 22) 吉野博, 柳宇. 仮設住宅における室内熱・空気環境の課題. 建設設備&昇降機 97: 3-8, 2012
 - 23) 日本建築学会. 応急仮設住宅の環境設計と住まい方ガイドライン—健康に暮らすための室内環境に関する提言—. 2021 <https://www.aij.or.jp/jpn/databox/2021/210726.pdf>
 - 24) 大竹徹, 吉野博, 他. 津波による浸水被害住宅における室内環境と居住者の健康に関する調査研究 その2 津波による浸水が室内環境と健康に及ぼす影響に関する分析. 日本建築学会東北支部研究報告集計画系 76: 45-48, 2013
 - 25) 長谷川兼一, 吉野博, 他. 津波による浸水被害住宅における室内環境と居住者の健康に関する調査研究 その3 実測調査の概要と調査対象住宅の被害状況. 日本建築学会東北支部研究報告集計画系 76: 49-52, 2013
 - 26) 柳宇, 池田耕一: 空調システムにおける微生物汚染の実態と対策に関する研究. 日本建築学会環境系論文集 593: 49-56, 2005
 - 27) 日本建築学会. 提言 激甚化する水害への建築分野の取組むべき課題 ～戸建て住宅を中心として～. 2020 <http://www.aij.or.jp/jpn/databox/2020/20200629.pdf>
 - 28) 2022 年度環境過敏症分科会活動計画書. http://jsce-ac.umin.jp/200725/files_bunka/2022_kankyokabinsho.pdf
 - 29) 震災がつなぐ全国ネットワーク, ツール. <https://shint-suna.org/about-us/>
 - 30) R2000+ 上の住宅建材の先進的省エネモデルハウス <https://uenojuken.co.jp/r2000/before/index.html>
 - 31) 環境省 <https://www.env.go.jp/earth/ondanka/zeh/h30.html>
 - 32) 日本建築学会, 室内化学物質空気汚染調査研究委員会
 - 33) 震災がつなぐ全国ネットワーク. <https://shint-suna.org/tools/>
<http://news-sv.aij.or.jp/tokubetsu/s8/IAPOC.htm>