東日本大震災における応急仮設住宅の空気環境に関する調査研究

A STUDY ON INDOOR AIR ENVIRONMENT OF TEMPORARY HOUSES AFTER THE GREAT EAST JAPAN CALAMITY

柳 宇^{*1}, 吉野 博^{*2}, 長谷川 兼一^{*3}, 東 賢 一^{*4}
大澤 元毅^{*5}, 鍵 直樹^{*6}, 猪野 琢也^{*7}
*U YANAGI, Hiroshi YOSHINO, Kenichi HASEGAWA,
Kenichi AZUMA, Haruki OSAWA, Naoki KAGI
and Takuya INO*

This paper describes the measured results on carbon dioxide concentrations in 27 temporary houses in summer and winter in Sendai city after half a year of the Great East Japan Earthquake. The carbon dioxide concentrations in temporary houses were high generally. In summer, the median value in 7 temporary houses (26%) and 75% tile value in 20 temporary houses (74%) exceeded 1,000 ppm. Moreover, concentrations in 17 residences (63%) exceeded 5,000 ppm, and highest was about 11,000 ppm. In winter, the median value and 75% tile value were both higher than that in summer respectively. Although ventilation is effective to reduce the indoor carbon dioxide concentrations, temporary house where air volume is small, when an open type combustor was used in winter, indoor carbon dioxide concentration might exceed 10,000 ppm.

Keywords: Great East Japan Calamity, Temporary house, Indoor air quality, Carbon dioxide, Ventilation

東日本大震災, 応急仮設住宅, 室内空気質, 二酸化炭素, 換気

1 はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災は、阪神・淡路大震災、新潟中越沖地震と異なり広域に被害をもたらしたため、復興住宅の建設が完了するまでに長期間を要し、被災者らは未だに応急仮設住宅（以後仮設住宅と略す）での生活を送っている。今後30年以内に東海・東南海・南海でM8.5クラスの地震が発生する確率が60～87%とされている¹⁾ことから、これに備える上でも現状の仮設住宅における空気質の実態を把握し、問題があればその対策を検討する必要がある。

直近20年間に起きた大規模な震災についてみると、1995年1月17日に起きた阪神・淡路大震災後に立てられた仮設住宅戸数は49,681戸、入居者数は47,911世帯、2004年10月23日に起きた新潟県中越地震後に立てられた仮設住宅戸数は3,460戸、入居者数は9,649人であった。阪神・淡路大震災後の仮設住宅での入居期間は1995年2月2日～2000年1月14日、新潟県中越地震後の仮設住宅での入居期間は2004年10月23日～2007年12月31日となっており²⁾、被災者らは長期間、仮設住宅で過ごすことを余儀なくされている。これまで、仮設住宅の室内環境について、温熱環境に関する調査結果はいくつか報告されているが³⁾、仮設住宅内の空気質に

関する詳細な調査報告は殆ど見当たらない。

そこで、本研究では仮設住宅の室内空気環境を明らかにするために、宮城県内にある仮設住宅を対象に2011年夏期と2012年冬期に詳細な調査を行った。本報では室内空気汚染の代表指標または換気量の指標とされる二酸化炭素濃度の測定結果について述べるほか、二酸化炭素濃度の上昇要因と住まい方との関係について検討を行った。

2 研究方法

2.1 調査対象住宅と測定方法

(1) 夏期測定

筆者らは仙台市内にある40件の仮設住宅について、住まい方の聞き取り調査、温熱環境、真菌汚染、化学物質汚染の実態に関する継続的な調査を行った^{4～10)}。本報では、2011年8月末と10月初旬から行った宮城県内の40件住宅のうち、二酸化炭素濃度測定器を設置できた27件（8月末15件、10月初旬12件、何れも家族の滞在時間が長い居間に設置）の室内二酸化炭素濃度を中心に報告する。測定に用いた測定器は温湿度CO₂レコーダMCH-383SD（Lutron製、以後CO₂センサーと呼ぶ）であった。測定間隔は10分間とし、8月開

*1 工学院大学建築学部 教授・博士(公衆衛生学, 工学)

*2 東北大学 名誉教授・工博

*3 秋田県立大学 教授・博士(工学)

*4 近畿大学 講師・博士(工学)

*5 国立保健医療科学院 統括研究官・博士(工学)

*6 東京工業大学 准教授・博士(工学)

*7 東北大学大学院 修士課程

Prof., School of Architecture, Kogakuin University, D.P.H., Dr. Eng.

Prof. Emeritus, Tohoku University, Dr. Eng.

Prof., Akita Prefectural University, Dr. Eng.

Lecturer, Kinki University, Dr. Eng.

Research Managing Director, National Institute of Public Health, Dr. Eng.

Assoc. Prof., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

Graduate School, Tohoku University

写真1 台所換気扇

写真2 浴室換気扇

図1 2LDKの間取りの例 (プレハブ建築協会)

始と10月開始の測定の何れにおいても11月中旬に回収した。なお、仮設住宅の換気設備と間取りの例を写真1, 2と図1に示す。台所にはプロペラ扇 (定格風量: 450m³/h), トイレ及び浴室には天井埋め込み型換気扇 (定格風量それぞれ: 85 m³/h, 75 m³/h) が備えられている。なお、トイレと浴室のファンの運転は連動していない。

(2) 冬期測定

2011年12月下旬から2012年3月下旬の間、2011年夏期に測定した27件のうち、さらに協力が得られた9件について、前述したものと同様の方法で室内温湿度と二酸化炭素濃度の連続測定を行った。

2.2 CO₂ センサーについて

本研究に用いたCO₂センサーには、国際規格化されている二酸化炭素濃度の測定法に適用されている非分散型赤外線吸収法 (non-dispersive infrared spectrometry, NDIR)¹¹⁾を用いている。なお、本センサーはゼロガスとスパンガスによる校正が難しい構造となっているため、本研究では予め全てのCO₂センサーについて同原理で、ゼロガスとスパンガスによる校正済みのIAQモニター (カノマックス製) を標準計測器とし、CO₂センサーの校正を行った。さらに、本センサーは高濃度の二酸化炭素の測定に適しているかどうかを確認するために、陰圧のチャンバー (ドラフトチャンバー) 内でドライアイスによりチャンバー内の二酸化炭素濃度を高めて10,000ppmまで測定できるUM-300 (光明理化学工業製, NDIR法) との同時測定を行った結果、本センサーが高濃度の二酸化炭素を測定可能であることが確認された (図2)。

3 結果

3.1 換気扇の運転状況

表1に夏期と冬期に行った聞き取り調査の結果のうち換気運転状況の一覧を示す。換気扇を終日運転する住宅 (No.9), 終日停止する住宅 (No.26) がある一方、必要に応じて運転する住宅が最も多かったことが分かる。なお、表1に示したのは聞き取り調査時点での回答であり、その後の居住者の換気行動を保証するものではない。

図2 本センサーとUM-300の比較

表1 測定対象住宅の概要と換気運転状況

住宅ID	間取り	換気扇運転状況		
		台所	浴室	トイレ
2	2DK	停止	必要時	必要時
3,23	2DK+2DK	必要時	必要時	必要時
4	2DK	必要時	終日	—
6	2DK	必要時	日中停止	終日
8	2DK	必要時	終日	終日
9	2DK	終日	終日	終日
		終日 ^{注2}	終日 ^{注2}	終日 ^{注2}
21	2DK	殆どつけない	必要時	必要時
22	2DK	日中窓開け 夜間運転	日中窓開け 夜間運転	日中窓開け 夜間運転
		終日	終日	不明
25	2DK	終日	2時間位	使用後30分
		必要時	終日	終日
26	2DK	停止	停止	停止
29	2DK	必要時	必要時	必要時
36	2DK	必要時	必要時	必要時
		必要時	必要時	必要時
44	2DK	必要時	必要時	必要時
45	2DK	必要時	必要時	必要時
53	2DK	必要時	必要時	必要時
58	2DK	必要時	必要時	必要時
		必要時	必要時	必要時
64	2K	調理時	終日	終日
81	1DK	必要時	必要時	必要時
		必要時	必要時	必要時
83	2DK	必要時	必要時	必要時
		必要時	必要時	必要時
91	3K	必要時	必要時	必要時
102	2DK	帰宅時15分	必要時	必要時
103	2K	必要時	必要時	停止
111	2DK	必要時	必要時	必要時
		必要時	必要時	必要時
115	3K	必要時	終日	終日
		終日	終日	終日
117	1DK	必要時	必要時	必要時
122	2DK	必要時	必要時	必要時
127	2DK	必要時	終日	終日

注1: 住宅IDの欄に塗りつぶしている箇所は冬期の測定も行った住宅であり、上段は夏期、下段は冬期の状況を示す。

注2: 事後電話での確認では、寒いときに換気扇を止めることが分かった。

3.2 夏期の測定結果

図3に夏期に行った測定で得られた二酸化炭素濃度 (10分間測定値, 以後同) を示す。図3には4等分値 (最大値, 75%タイル値,

図3 室内二酸化炭素濃度（2011年8月～11月）

図4 室内温度（左）と二酸化炭素濃度（右）の週間推移の例（ID9）

図5 室内温度（左）と二酸化炭素濃度（右）の週間推移の例（ID26）

中央値、25%タイル値、最小値）を示している。全体的に最大値と75%タイル値の差が大きく、ときに高濃度になることが示された。中央値が換気量の目安となる1,000ppmを上回ったのは7件（26%）、75%タイル値が1,000ppmを上回ったのは20件（74%）であった。また、最大値が労働衛生環境の基準値5,000ppmを超えたのは17件（63%）であった。なお、労働衛生環境の基準値は8時間の平均値であり、本研究で得られた10分間値で5,000ppmを越えた住宅はあるものの、8時間平均値で5,000ppmを超えた住宅はなかった。

図4と図5に例として、終日換気扇を運転するID9宅と終日換気扇を止めるID26宅の室内温度と二酸化炭素濃度の4等分値の週間推移を示す。両宅ともに9月はじめから11月中旬にかけて室内温度が下がる傾向にあることがわかる。これは、仮設住宅が外界の温度低下の影響を受けやすいためであると考えられる。一方、二酸化炭素についてID9宅は1,000ppm以下に維持されているのに対して、ID26宅は測定期間中に1,000ppmを超えており、9月から11月にかけて上昇する傾向にあることが明らかになった。これは、外気温の

低下により窓など開口部での自然換気量の減少や、室内で二酸化炭素を発生させる燃焼器具の使用頻度の増加が原因であると推察された。

図6一例として、仮設住宅No.26の3日間の室内二酸化炭素濃度、温度、および絶対湿度の経時変化を示す。二酸化炭素濃度の高いところでは8,000～10,000ppmに達している。これは室内で炭酸ガスの発生があったことを示唆している。当該住宅の暖房器具には石油ストーブが使用されている。なお、図中二酸化炭素濃度の折れ線の切れている箇所は、センサーの表示がエラーとなっていたため、ここでは欠測データとして扱った。二酸化炭素濃度の変動パターンが温度の変化パターンとほぼ一致していることから、室内温度が下がると暖房器具が使用され温度が上昇し、暖房器具が止まると温度が下がることが推察される。また、絶対湿度が温度と同様の変動パターンを示すことから、石油ストーブが使用されていたことが考えられる。一方、浴室、台所、トイレの換気扇を終日運転させているID9宅の室内二酸化炭素濃度は測定期間中

1,000ppmを超えたことがなかった（図3）。

3.3 冬期の測定結果

図7に冬期に行った9件の測定で得られた二酸化炭素濃度の結果を示す。住宅IDにダッシュを付けている同住宅は2011年夏期の測定結果を合わせて示している。冬期の室内二酸化炭素濃度の中央値は全て、最大値は9件のうち7件がそれぞれ夏期の室内二酸化炭素濃度の中央値と最大値を上回った。2011年夏期の測定結果では常に室内二酸化炭素濃度が1,000ppmを下回ったID9の住宅では、75%タイル値が900ppmであり総じて良好であるが、最大値は10,000ppmを超えていた。No.9が最大値を示した2012年1月1日を含めた3日間の室内二酸化炭素濃度、温度、絶対湿度の経時変化を図8に示す。二酸化炭素濃度、温度、絶対湿度が同様に上昇していることから、これが前述したように開放型燃焼器具の使用に起因するものであることが推察された。なお、事後電話で確認したところ、No.9宅は冬期に台所と風呂場の換気扇を常に運転していないことが分か

図 6 二酸化炭素濃度・温湿度の経時変化の例 (ID26)

図 8 二酸化炭素濃度・温湿度の経時変化の例 (ID9)

図 7 二酸化炭素濃度の測定結果

った。この濃度の上昇は換気量が不足しているためであると考えられる。

4 考察

前述した通り、仮設住宅内の二酸化炭素濃度が高くなっているのは開放型燃焼器具が使用されたことに起因するものであると考えられる。ここでは室内二酸化炭素濃度について試算してみる。

図 6 に示す ID26 宅は 2DK であり、延べ床面積は 29.7m²、天井高は 2.4m である。ここで二酸化炭素の発生量を 0.131m³/h (燃焼器具に灯油を使用、室内 25℃)¹²⁾、換気回数を 0.5 回/h^{注1)}、気積率を 80% と仮定したとき、完全混合・定常状態での室内二酸化炭素濃度は下記試算の通りで約 4,600ppm 高まることになる。この試算結果には諸仮定が含まれているが、図 6 に示す実測値と概ね一致する。

室内濃度上昇分=発生量/換気量

$$=(0.131 \times 10^6) \div (29.7 \times 2.4 \times 0.5 \times 0.8) = 4,595 \text{ ppm} \approx 4,600 \text{ ppm}$$

なお、図 6 中の 8,000ppm 超えのピーク濃度は開放型ストーブの立ち上げ時の燃焼生成物によるものと推察される。しかし、仮に換気扇による換気を積極的に行う場合、先述した定格風量総量の半分であったとしても 4.3 回/h 換気量が得られ、約 530ppm しか上昇しないことが推測される。一方、宮城県内の一般住宅の延べ床面積 100m² (平成 20 年における宮城県 1 住宅当たりの延べ面積平均値¹³⁾) の条件で計算すると、同様な住まい方であっても室内二酸化炭素濃度の上昇が 1,365ppm にとどまることが分かる。ちなみに、これまでに一般住宅内の二酸化炭素濃度の測定値は数百 ppm～3,000ppm であると報告されており^{14～15)}、一般住宅に比べ、仮設住宅内では換気を積極的に行わないと、室内二酸化炭素濃度が非常に高くなる場合があることが明らかになった。

室内汚染物質濃度は、定常状態であれば室の気積に関係しないが、非定常状態であれば気積の小さい室内では室内汚染物質が放出された後の短い時間で高くなることもある。図 6 と図 8 ではピーク濃度に達するのに 10 分程度しか要しなかった。従って、以上の結果から

図 9 気積の違いによる二酸化炭素濃度の上昇のしかた

気積の小さい仮設住宅でこれまでと同様な住まい方をすると、室内二酸化炭素濃度が非常に高くなることが示唆された（図 9）。

室内二酸化炭素濃度の低減に換気が有効であることは周知の通りである。台所、浴室、トイレの全ての換気扇が終日運転している夏期の住宅 ID9 の室内二酸化炭素濃度が全体的には 1,000ppm 以下に抑えられていることが分かる（図 3）。しかし、冬期の同住宅では換気によって総じて二酸化炭素濃度は高くないが（75%タイル値：900ppm）、開放型燃焼器具が使用されたと思われる時間帯では室内二酸化炭素濃度が 10,000ppm に達したことがあり（図 8）、換気を積極的に行われない場合、気積が小さいだけに、燃焼器具を使用した時の室内空気質の問題が存在することが窺がえた。

5 まとめ

本研究ではこれまであまり研究されてこなかった仮設住宅内の空気環境の実態について、宮城県内にある 27 の仮設住宅の夏期およびそのうち 9 件の冬期における室内空気汚染指標である二酸化炭素濃度の詳細な測定を行い、以下に示す事柄が明らかになった。

- ① 2011 年夏期の測定結果では仮設住宅内の二酸化炭素濃度が総じて高く、中央値と 75%タイル値が 1,000ppm を上回ったのはそれぞれ 7 件（26%）と 20 件（74%）であった。また、最大値（10 分間値）が 5,000ppm を超えたのは 17 件（63%）であり、もっとも高かったのは約 11,000ppm であった。
- ② 2012 年冬期の測定結果では、室内二酸化炭素濃度の中央値と 75%タイル値の全て、9 件のうち 7 件の最大値はそれぞれ夏期の室内二酸化炭素濃度の中央値、75%タイル値、最大値を上回っており、仮設住宅内の二酸化炭素による汚染の問題が認められた。
- ③ 室内二酸化炭素濃度が高くなっているのは換気が積極的に行われていないほか、開放型燃焼器具の使用や、仮設住宅の気積が小さいなどのためであると考えられる。
- ④ 換気が室内二酸化炭素濃度の低下に有効であり、本調査対象の住宅のなかでも、台所・浴室・トイレの換気扇を終日運転させる ID9 宅の夏期の室内二酸化炭素濃度は 1,000ppm 以下に抑えられていることが明らかになった。

注

注 1) 仮設住宅の換気量は、居住者の住まい方によって大きく異なるものと考えられる。本論文の試算に用いた換気回数 0.5 回/h は、篠原らの仮設住宅における換気回数の測定結果を参考にしたものである¹⁶⁾。篠原の測定結果では、未入居の仮設住宅（空室）の換気回数は平均で 0.25 回/h、居住後の換気回数の平均で 1.0 回/h（窓明け行為のあった場合）であった。

本研究に関連する既発表論文

- *1) 柳 宇，吉野博，長谷川兼一，東賢一，大澤元毅，鍵直樹，浜田健佑，猪野琢也，角間隆之，石岡沙保里：震災関連住宅における温熱・空気環境に関する調査 第 8 報 仙台市内の応急仮設住宅における室内二酸化炭素濃度の測定結果，シンポジウム「東日本大震災からの教訓，これからの新しい国づくり」論文集，pp.369-372，2012
- *2) 柳宇，吉野博，長谷川兼一：仮設住宅における室内空気質の実態，シンポジウム：東日本大震災に学ぶこれからの環境工学，pp.65-72，2012

参考文献

- 1) 山岡耕春：東日本大震災とこれからの備え，平成 23 年度空調調・衛生工学会公開講演会資料，p.11，2011
- 2) 「震災発 DATE 阪神・淡路大震災」http://www.shinsaihatu.com/data/kasetsu_hoka.html，閲覧日：2012.8.11
- 3) 例えば，五十嵐由利子，萬羽郁子：新潟県中越地震における応急仮設住宅の温熱環境，Proc. of The 30th Symposium on human-Environment System HES In Yokohama, 1-3, December, pp.89-92，2006
- 4) 吉野博，長谷川兼一，柳 宇：震災関連住宅における温熱・空気環境に関する調査 第 1 報 応急仮設住宅の特徴と簡易アンケート調査結果，シンポジウム「東日本大震災からの教訓，これからの新しい国づくり」論文集，pp.341-344，2012
- 5) 浜田健佑，吉野博，長谷川兼一，柳 宇，東賢一，猪野 琢也，角間 隆之：震災関連住宅における温熱・空気環境に関する調査 第 2 報 応急仮設住宅の居住環境と健康に関する夏期アンケート調査の単純集計結果，シンポジウム「東日本大震災からの教訓，これからの新しい国づくり」論文集，pp.345-348，2012
- 6) 大澤元毅，吉野博，長谷川兼一，柳 宇，東賢一，鍵直樹，浜田健佑，猪野琢也，角間隆之：震災関連住宅における温熱・空気環境に関する調査 第 3 報 宮城県応急仮設住宅における聞き取り調査の結果：シンポジウム「東日本大震災からの教訓，これからの新しい国づくり」論文集，pp.349-352，2012
- 7) 長谷川兼一，吉野博，柳 宇，東賢一，大澤元毅，鍵直樹，浜田健佑，猪野琢也，角間隆之：震災関連住宅における温熱・空気環境に関する調査 第 6 報 温熱環境の調査結果(1) 仙台市内の応急仮設住宅を対象とした夏期・秋期の実測調査結果，シンポジウム「東日本大震災からの教訓，これからの新しい国づくり」論文集，pp.361-364，2012
- 8) 石岡沙保里，吉野博，柳 宇，長谷川兼一，東賢一，大澤元毅，鍵直樹，浜田健佑，猪野琢也，角間隆之：震災関連住宅における温熱・空気環境に関する調査 第 9 報 仙台市内の応急仮設住宅における室内真菌の測定結果，シンポジウム「東日本大震災からの教訓，これからの新しい国づくり」論文集，pp.373-376，2012
- 9) 鍵直樹，吉野博，長谷川兼一，柳 宇，東賢一，大澤元毅，本間義規，浜田健佑，猪野琢也，角間隆之：震災関連住宅における温熱・空気環境に関する調査 第 10 報 応急仮設住宅室内における揮発性有機化合物の調査結果，シンポジウム「東日本大震災からの教訓，これからの新しい国づくり」論文集，pp.377-380，2012
- 10) 柳 宇，吉野博，長谷川兼一，東賢一，大澤元毅，鍵直樹，浜田健佑，猪野琢也，角間隆之，石岡沙保里：震災関連住宅における温熱・空気環境に関する調査 第 8 報 仙台市内の応急仮設住宅における室内二酸化炭素濃度の測定結果，シンポジウム「東日本大震災からの教訓，これからの新しい国づくり」論文集，pp.369-372，2012
- 11) ISO 16000-26 : Indoor air-Part 26 : Sampling strategy for carbon dioxide (CO₂)，First edition，2012-08-01
- 12) 空調調・衛生工学会：空調調・衛生工学会規格－換気規準・同解説，SHASE-S 102-2011，p.37，2012
- 13) 総務省統計局：「平成 20 年住宅・土地統計調査表番号 15」<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?bid=000001029530&cycode=0>，閲覧日：2013.3.21
- 14) 岩崎有喜：シックハウス対策と二酸化炭素濃度に関する考察，岩手県立産業技術短期大学校紀要，第 9 号，pp.29-32，2009
- 15) 松永潤一郎，その他 3 名：湿度により排気利用を制御する第 3 種換気システムの換気性能評価－その 3 夏期における換気システム消費電力および二酸化炭素濃度測定結果，日本建築学会大会学術講演梗概集，環境工学 II，pp.687-688，2005
- 16) 篠原直秀，柳宇，徳村雅弘，水越厚史，吉野博：震災関連住宅における温熱・空気環境に関する調査 第 18 報 南相馬市における応急仮設住宅の室内空気質，日本建築学会大会学術講演梗概集環境工学 I，pp.1059-1060，2012

（2013 年 4 月 4 日原稿受理，2013 年 8 月 27 日採用決定）