

第 23 回 人間-生活環境系シンポジウム (札幌 平成 11 年 12 月)  
THE 23rd SIMPOSIUM ON HUMAN-ENVIRONMENT SYSTEM (SAPPORO 1999)

## 北海道の住宅における室内空気質の多元計測とその解析

横山真太郎・○内見裕聡・泉温子・中村真人・濱田靖弘・落藤 澄

北海道大学

### Multi-component Measurements and the Analysis of Indoor Air Quality in Hokkaido Residences

Shintaro YOKOYAMA, Hiroaki UCHIMI, Nagako IZUMI, Makoto NAKAMURA  
Yasuhiro HAMADA and Kiyoshi OCHIFUJI

Hokkaido University

We performed multi-component measurements of indoor air quality in several types of residences in Hokkaido. The measured items of indoor air quality consisted of 1) air temperature, 2) relative humidity, 3) carbon dioxide, 4) carbon monoxide, 5) suspended particulate, 6) radon daughters, 7) airborne bacteria, 8) airborne fungi, 9) formaldehyde and 10) volatile organic compounds. By using the multi-component measuring data we conducted a multivariate analysis of indoor air quality in Hokkaido residences. Secondly we discussed the principal factors affecting the concentration level of indoor air quality.

#### 1. はじめに

我々は、省エネルギー性を考慮に入れ、かつ健康で快適な室内空気環境を創り出すための評価法と制御法の確立に向けて、研究を進めている。そのためには、基礎的なデータを収集し、その現状の把握、および室内空気汚染物質の挙動メカニズムの解明が必要と考えている。本報では、北海道における多様な住宅を対象に行ってきた室内空気質の多元計測結果の概要とその多変量解析結果について報告する。

#### 2. 測定対象・測定概要

測定対象は、北海道内にある 51 軒の住宅である。住宅の構造と設備面からそれらを以下の 6 種類に分類した。すなわち一般木造住宅（以下木造住宅と呼ぶ）14 軒、R-2000 仕様住宅<sup>1)</sup> 8 軒、ブロック造住宅 13 軒、RC 造住宅 9 軒、パッシブ換気住宅<sup>2)</sup> 4 軒、北海道大学ローエネルギーハウス<sup>3)</sup> を含むローエネルギータイプの住宅 3 軒である（表 1 参照）。

次に、測定項目と測定機器を表 2 にまとめた。多元室内空気質の測定項目としては、ビル管理法に定められている 1) 気温、2) 相対湿度、3) 一酸化炭素、4) 二酸化炭素、5) 浮遊粒子状物質のほか 6) 自然放射性物質のラドン娘核種、7) 浮遊細菌、8) 浮遊真菌、9) ホルムアルデヒド

と 10) 揮発性有機化合物 (VOCs) の計 10 項目である。

1) 気温から 8) 浮遊細菌（以下、本報では主要室内空気質と呼ぶ）については、51 軒の全 295 回測定し、9) ホルムアルデヒドと 10) VOCs の化学汚染物質については、295 回中 103 回測定した。

表 3 に高速液体クロマトグラフによるホルムアルデヒドおよびガスクロマトグラフ/質量分析計による VOCs の分析機器の詳細と分析条件を示す。

#### 3. 主要室内空気質とその多変量解析

##### 3. 1 主要室内空気質の測定結果

表 4 に、8 項目からなる主要室内空気質について、構造と設備の両面から分類された 6 種類の住宅の平均値、

表 1 測定対象住宅・測定回数

	住宅軒数	測定回数 (春,夏,秋,冬)	データ数
木造	14	63 (11,8,24,20)	353
R-2000	8	53 (7,14,7,25)	402
ブロック造	13	63 (10,10,22,21)	383
RC造	9	64 (12,9,24,19)	382
LEH	3	44 (16,6,10,12)	347
パッシブ換気	4	8 (8,0,0,0)	54
計	51	295	1921

LEH:ローエネルギータイプの住宅

標準偏差，最大値をまとめた。表 5 には，パッシブ換気住宅を除く 5 種類の住宅についての冬季の測定結果をまとめた。

気温について，住宅の種類を問わず平均値は 23℃前後であり，変動係数も比較的小さいことが示された。すなわち北海道の住宅では良好で安定した室内気温条件が得られていると言える。

一方，相対湿度については，無人の実験住宅であるローエネルギーハウスの冬季の低湿度を除けば，平均的には 40~70%になっていることがわかる。

二酸化炭素濃度の通年の平均値をみると，RC 造集合住宅を除き，ビル管理法の基準値である 1000 ppm 以下となっていることがわかる。冬季のみの測定結果に着目すると，平均値が基準値以下となったのは R-2000 仕様

住宅およびローエネルギーハウスであり，その変動係数は 20%以下と安定した値であった。表 4 と表 5 のデータを用いて，有意差検定を行った。その結果，継続換気を行っている R-2000 仕様住宅は，ローエネルギーハウスを別として，他の 5 種類の住宅と比較して有意に低濃度傾向であった。冬季にはその傾向が，一段と強まることが有意水準の値からも示された。つまり R-2000 仕様住宅はローエネルギーハウスとともに，他の 5 種類の住宅に比べて，通年ならびに冬季に低濃度であることが統計的に確かめられた。

一酸化炭素濃度は冬季においても常に低濃度であり，基準値の 10 ppm を超えるものはなかった。しかし，変動係数は比較的高く，居住者の炊事や喫煙などの生活行為による影響が大きいと考えられる結果であった。

浮遊粒子状物質では，平均値が住宅の種類を問わず冬季でもビル管理法の基準値以下であった。しかし，変動係数は一酸化炭素より高く，居住者の喫煙，清掃ならびに幼児やペットの生活行為によって変動していると考えられた。

土壌やコンクリートなどから発生するラドンの平均値は，いずれの住宅でも指針値である WHO，ASHRAE

表 2 測定項目・測定機器

測定項目	測定機器
室温	アスマン通風乾湿計 (Shibata) Thermo Recorder (TR-72, ティアンドティ) アネモスター (Model 6071, カ/マックス)
湿度	アスマン通風乾湿計 (Shibata) Thermo Recorder (TR-72, ティアンドティ)
一酸化炭素	ホータル型一酸化炭素ガス測定器 (Model 2322, カ/マックス)
二酸化炭素	非分散型赤外線分析計 (ZFP5, 富士電機)
浮遊粒子状物質	光散乱式デジタル粉塵計 (Model 3421, カ/マックス)
自然放射性物質	α線用シンチレーションカウンタ (TDC-103, 105, 70功) α線用シンチレーションディテクタ (ZDS-451B, ZD-Fu, 70功)
浮遊細菌	バイオテストエアサンプラー (ケンセ産業) 一般細菌用専用生培地 (TC)
浮遊真菌	バイオテストエアサンプラー (ケンセ産業) 真菌用専用生培地 (YM)
ホルムアルデヒド	SILSET (島津製作所) L-6000 (日立製作所) L-4000 (日立製作所) CROMATOPAC C-R5A
VOCs	HEWLETT PACKARD 5890 SERIES II CHROMPAK CP-4020 HEWLETT PACKARD 5972 QP-5000 (島津製作所) ATD400 (Perkin Elemer)

表 3 ホルムアルデヒド・VOCs 分析条件

ホルムアルデヒド	
分析装置	高速液体クロマトグラフ 日立製作所製 (L-6000) 日立製作所製 (L-4000) 島津製作所製 (C-R5A) Mightysil RP-18 (4.6mm × 250mm)
分析条件	移動相 流速 検出波長 カラム温度
VOCs	
分析装置	ガスクロマトグラフ / 質量分析計 加熱導入装置 カラム トラップチューブ キャリアーガス 吸着剤 サンプリング時間
分析条件	サンプルチューブ脱着条件 脱着温度 脱着流量 脱着時間 トラップチューブ脱着条件 トラップ温度 脱着温度 脱着流量 脱着時間 カラム温度

表 4 住宅種類別の主要室内空気質の測定結果

		気温	湿度	CO2	CO	浮遊粉塵	Rn	浮遊細菌	浮遊真菌
木造 データ数 n=63	平均	22.3	58.6	968.2	2.0	33.4	22.1	1685.2	827.1
	標準偏差	3.25	12.70	458.99	1.88	39.79	9.78	2344.78	1730.80
	変動係数	14.56	21.68	47.41	95.08	119.24	44.28	139.14	209.27
	最大値	29.8	95.0	2050.0	8.3	183.3	48.6	11075.0	8000.0
R-2000仕様 データ数 n=53	平均	25.1	48.2	640.9	2.0	11.7	13.4	2757.8	314.6
	標準偏差	2.32	5.96	233.68	1.83	9.36	4.49	2123.68	842.50
	変動係数	9.26	18.58	36.46	91.58	80.04	33.50	77.01	267.82
	最大値	29.8	65.0	1200.0	7.6	50.0	29.6	8250.0	4675.0
ブロック造 データ数 n=63	平均	22.9	58.4	988.0	1.9	38.0	33.7	1049.4	281.3
	標準偏差	2.45	13.70	361.22	2.19	54.01	33.38	1181.53	393.89
	変動係数	10.70	23.45	36.81	113.90	142.20	105.12	112.59	140.05
	最大値	29.5	88.0	2600.0	9.9	220.0	173.0	6200.0	1500.0
RC造 データ数 n=64	平均	22.8	58.1	1119.6	1.9	27.8	28.0	1391.7	214.2
	標準偏差	2.98	12.36	800.32	1.70	38.51	23.62	1009.21	345.31
	変動係数	13.04	21.26	71.48	91.77	138.54	84.41	72.52	161.22
	最大値	29.0	83.0	4400.0	6.3	249.3	144.4	4325.0	1700.0
LEH データ数 n=44	平均	22.5	48.2	623.2	0.0	28.3	34.5	779.1	575.3
	標準偏差	4.62	17.00	144.89	0.00	22.59	20.94	870.46	1366.86
	変動係数	20.55	35.24	23.25	—	79.80	60.72	111.73	237.57
	最大値	32.2	51.0	1100.0	0.0	120.0	106.7	3625.0	7850.0
パッシブ換気住宅 データ数 n=8	平均	23.1	66.6	—	0.0	40.0	29.3	1381.3	1393.8
	標準偏差	1.73	6.54	—	0.00	48.61	16.42	482.30	1098.06
	変動係数	7.50	10.26	—	—	121.53	56.09	34.92	78.78
	最大値	25.4	75.0	—	0.0	154.0	63.7	2000.0	3250.0

表 5 5種類の住宅における冬季の測定結果

冬		気温	湿度	CO2	CO	浮遊粉塵	Rn	浮遊細菌	浮遊真菌
木造 n=20	平均	20.7	42.7	1022.5	1.9	27.5	23.8	1054.5	830.8
	標準偏差	3.68	9.43	298.78	1.09	34.01	9.31	1167.64	2091.29
	変動係数	17.78	22.08	29.22	58.55	123.45	39.11	110.72	251.73
	最大値	25.7	59.0	1750.0	3.3	148.0	48.6	4200.0	8000.0
R-2000仕様 n=25	平均	23.4	45.2	821.2	1.9	14.3	14.4	719.1	132.1
	標準偏差	1.48	11.79	150.87	0.78	12.08	4.50	332.99	260.51
	変動係数	6.36	26.09	18.37	41.08	84.50	31.18	74.12	197.14
	最大値	27.0	63.0	1200.0	3.3	50.0	27.6	2450.0	825.0
ブロック造 n=21	平均	21.9	48.7	1136.9	1.8	43.0	55.1	755.4	105.4
	標準偏差	1.50	14.50	377.22	1.42	61.86	50.58	807.34	124.35
	変動係数	5.82	29.78	33.18	80.41	143.91	91.83	106.88	118.03
	最大値	24.4	88.0	2000.0	3.9	211.3	173.0	3450.0	450.0
RC造 n=19	平均	22.2	48.2	1428.9	2.1	28.1	28.4	1118.8	67.5
	標準偏差	3.75	9.03	967.43	1.77	24.88	13.63	981.56	94.24
	変動係数	15.92	18.74	67.70	82.53	88.41	48.05	87.74	139.62
	最大値	29.0	83.0	4400.0	6.3	249.3	144.4	4325.0	1700.0
LEH n=12	平均	21.0	29.3	635.8	0.0	26.7	28.2	1189.5	39.6
	標準偏差	4.75	3.69	112.14	0.00	17.96	22.28	940.69	74.62
	変動係数	22.58	19.43	17.64	—	67.37	79.11	79.08	188.52
	最大値	27.6	35.3	900.0	0.0	68.0	101.1	3625.0	275.0

の 100 Bq/m<sup>3</sup>, EPA の 148 Bq/m<sup>3</sup> 以下であった。またコンクリート系であるブロック造, RC 造で比較的高い値を示しているのに対し, 木造住宅, R-2000 仕様住宅で低い値となった。冬期では, その傾向が一段と強調される結果であった。

浮遊細菌の平均値の住宅間の差はあまりみられなかった。変動係数は後述の浮遊真菌同様大きく, これら微生物汚染物質はむしろ在室者数, ペット数, 清掃頻度など居住者のライフスタイルの違いによって大きく規定されていると考えられた。浮遊真菌の平均値の比較では, 相対的に木造系が高濃度傾向にあることがわかった。

北海道の住宅においては, 一般に冬季に室内空気質の悪化が懸念されているが, これらの結果から, 二酸化炭素を除けば, 現状の居住形態においては室内汚染物質濃度は, 比較的低レベルになっていることが確認された。しかし, 潜在的には高濃度になる可能性があり, 室内空気質に対して注目していく必要があると考えられる。

3. 2 主要室内空気質の多変量解析

次にこれらのデータを用いて, 主要室内空気質の 8 項目に関する主成分分析を行った。相関行列を表 6 に示す。最も相関の高かった一酸化炭素と二酸化炭素でも, 0.346 程度であり, それぞれの相関が比較的低い結果であった。相関係数が低い中で, 浮遊細菌・浮遊真菌に着目すると, 浮遊細菌は気温, 浮遊真菌は相対湿度の相関が相対的に高い。布上ら<sup>4)</sup>もこれと同様の報告を行っている。両者を比較してみると, 相関の高かった二酸化炭素と一酸化炭素, 浮遊粒子状物質の相関係数は今回の解析においては低くなっている。データの多様化によって項目間の相関関係が低くなることがわかる。また今回の解析ではデータ数は約 3 倍になっている。

各主成分の固有値と累積寄与率を表 7 に示す。最も寄与率の高い第 1 主成分でも 23% であり, その他の寄与率も 10~15% 前後であった。今回解析を行なった主要な 8 項目の多元空気質を少数の項目で集約することは難しいと考えられる。またこの結果は住宅の多様化によって室内空気質の多元計測が必要であることを示唆していると考えられる。

4. 化学汚染物質とその多変量解析

次に, 当研究室所有のローエネルギーハウスで 1997

年 4 月から定期的に化学汚染物質 (ホルムアルデヒド, VOCs) の測定を行ってきた。本節では, 化学汚染物質に関する測定結果の概要と多変量解析について述べる。

4. 1 化学汚染物質の測定結果

図 1 にホルムアルデヒドと一般に VOCs の代表物質として考えられているトルエンについての測定結果をま

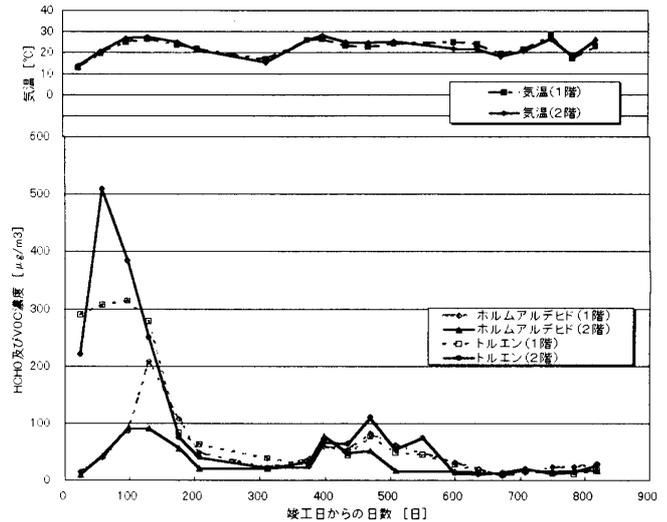


図 1 室内気温とホルムアルデヒド, トルエン濃度変動

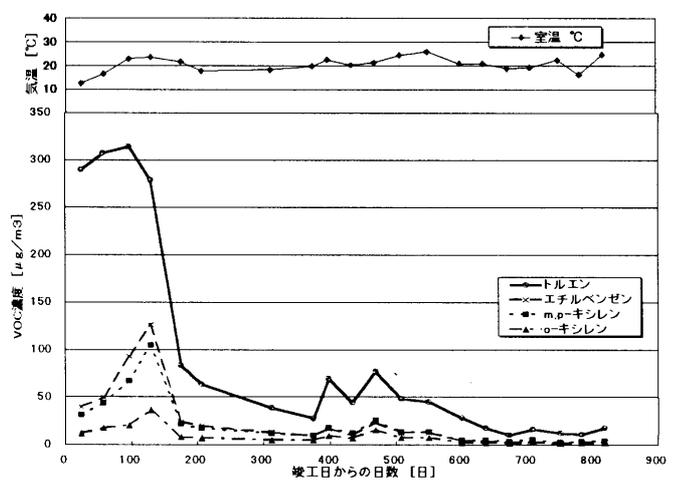


図 2 VOCs 濃度と気温変動 (1階)

表 6 主要室内空気質 8 項目に関する相関行列

相関行列	気温	湿度	CO	CO2	浮遊粉塵	浮遊細菌	浮遊真菌	Rn-Dts
気温	1.000							
湿度		1.000						
CO			1.000					
CO2				1.000				
浮遊粉塵					1.000			
浮遊細菌						1.000		
浮遊真菌							1.000	
Rn-Dts								1.000

表 7 主成分分析による固有値とその累積寄与率

主成分 No.	固有値	累積 (%)
1	1.8714	23.39
2	1.3022	39.67
3	1.1904	54.55
4	0.8653	65.37
5	0.8060	75.44
6	0.7392	84.68
7	0.6798	93.18
8	0.5458	100.00

表 8 ローエネルギーハウスで得られた 9 物質間の相関行列

相関行列	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9
x1 ホルムアルデヒド	1.000	0.452	0.709	0.753	0.757	0.723	0.801	0.151	-0.232
x2 トルエン		1.000	0.920	0.901	0.866	0.830	0.704	-0.051	-0.248
x3 エチルベンゼン			1.000	0.994	0.948	0.920	0.853	-0.027	-0.269
x4 m,p-キシレン				1.000	0.973	0.947	0.894	0.039	-0.276
x5 o-キシレン					1.000	0.956	0.935	0.226	-0.308
x6 1,2,4-トリメチルベンゼン						1.000	0.951	0.083	-0.245
x7 p-ジクロロベンゼン							1.000	0.216	-0.290
x8 スチレン								1.000	-0.127
x9 ベンゼン									1.000

表 9 主成分分析による固有値とその累積寄与率

固有値		
主成分No.	固有値	累積(%)
1	6.2229	69.144
2	1.1396	81.806
3	0.8683	91.454
4	0.5385	97.437
5	0.1706	99.333
6	0.0303	99.670
7	0.0217	99.910
8	0.0077	99.995
9	0.0004	100

とめた。ホルムアルデヒドとトルエンの濃度変動はほぼ同様な変化をしていることがわかる。またホルムアルデヒド濃度は初年度の夏季を除き、我が国の指針値である  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  以下であった。

図 2 に、1 階における VOCs と室内気温を示している。1 階と 2 階の挙動が類似しているため、ここでは 1 階について示した。VOCs 濃度は 1 年目の夏に最高濃度を記録し、その後徐々に減衰するものの、2 年目の夏にはまた濃度が高くなるという結果を得た。すなわち VOCs 濃度は、経過時間だけでなく気温に代表される温熱条件にも影響を受けていることを示している。

4. 2 化学汚染物質の多変量解析

上記のデータをもとに多変量解析を行った。ローエネルギーハウスでは、表 8 に示した 9 物質が 37 種類中常に検出された。スチレン (x8) とベンゼン (x9) を除く 7 物質間の相関係数は比較的高いことがわかる。特に、エチルベンゼン、m,p-キシレン、o-キシレン間の相関係数が高かった。これは互いに構造異性体であることが、その理由のひとつとして考えられる。

主成分分析の固有値と累積寄与率を表 9 にまとめた。第 1 主成分の累積寄与率は 69% であり、第 3 主成分の段階ですでに 90% を超えている。VOCs は第 1~3 主成分までの少数項目の測定で、全体の濃度変動が説明される可能性があると考えられた。

図 3 は第 1 主成分と第 2 主成分の固有ベクトルである。スチレンとベンゼンを除く成分が寄与率からも分かるように少なくとも 3 つのグループに分類できる可能性があると言える。

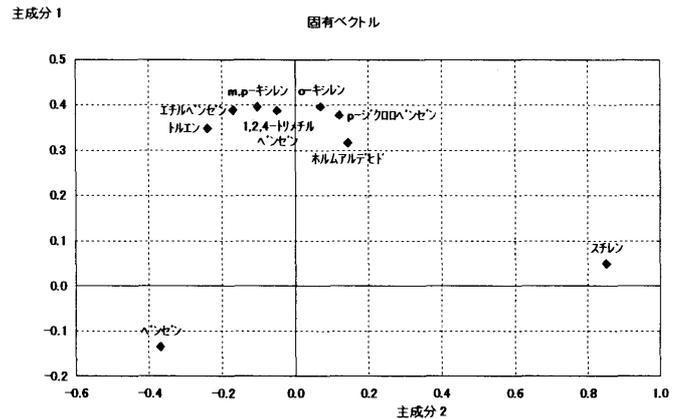


図 3 第 1, 2 主成分の固有ベクトル

った。主成分分析による結果から、これらの測定項目を少数の項目に集約することは難しいと考えられた。

- ローエネルギーハウスで得られたホルムアルデヒド、VOCs 濃度はほぼ同様の変動を示した。ホルムアルデヒド濃度は、初年度の夏季を除き我が国の指針値以下であった。またホルムアルデヒド、VOCs 濃度の変動はともに経過時間と温熱条件に影響を受けるという結果を得た。
- ホルムアルデヒドと VOCs について、多変量解析を行った。スチレン、ベンゼンを除く 7 物質間の相関係数が高かった。主成分分析の結果から VOCs の濃度レベルを少数の測定項目で説明される可能性が示唆された。

《参考文献》

- 西原栄二ら：高気密住宅における室内空気質の多元計測と解析，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，pp.741-744,1992.
- 泉温子ら：北海道における室内化学汚染物質に関する研究 - パッシブ換気住宅の測定を中心として -，空気調和・衛生工学会北海道支部第 33 回学術講演論文集，pp.49-52,1998.
- 濱田靖弘ら：自然エネルギーをハイブリットに活用したエネルギー自律型住宅に関する研究 第 1 報-建築・設備計画および実験住宅の建設- 空気調和・衛生工学会論文誌,73,pp.105-115,1999.
- 布上亮介ら：寒地住宅における室内空気質の調査と解析，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，pp.425-428,1989.
- 内見裕聡ら：多元室内空気質の測定および解析，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，pp.569-572,1998.
- 横山真太郎ら：戸建住宅における化学汚染の実態，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，pp.601-604,1998.
- 黄和寿ら：北海道におけるラドンならびに短寿命娘核種の放射能濃度に関する研究，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，pp.1333-1336,1998.

5. まとめ

- これまで得られた北海道の各種住宅における室内空気質の多元計測結果の概要について述べ、その多変量解析について報告した。
- 北海道の住宅においては、一般に冬季に室内空気質の悪化が懸念されているが、これらの結果から、二酸化炭素を除けば、現状の居住形態においては室内汚染物質濃度は、比較的低レベルになっていることが確認された。
- 室内空気質の多元計測結果を基に、多変量解析を行