HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	ローエネルギーハウスにおける多元室内空気質の長期測定と解析
Author(s)	横山, 真太郎; 内見, 裕聡; 泉, 温子 他
Description	第7回衛生工学シンポジウム（平成11年11月11日（木）-12日（金） 北海道大学学術交流会館） . 4 室内環境・エネルギー利用 . P4-1
Citation	衛生工学シンポジウム論文集, 7, 109-114
Issue Date	1999-11-01
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/7274
Type	departmental bulletin paper
File Information	7-4-1_p109-114.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

4－1　ローエネルギーハウスにおける多元室内空気質の長期測定と解析

横山　真太郎　（北海道大学）　　内見　裕聡　（北海道大学）
○泉　　温子　（北海道大学）　　中村　真人　（北海道大学）
濱田　　靖弘　（北海道大学）　　落藤　澄　（北海道大学）
神　　和夫　（北海道立衛生研究所）　小林　智　（北海道立衛生研究所）
桂　　英二　（北海道立衛生研究所）

1．はじめに

本報は、地球環境問題が要請する省エネルギー性と住宅本来の目的である健康増進性の両者を同時に満足する方法論の確立に向けてなされたものである。北海道に代表される積雪寒冷地では、冬季の過剰な機械換気は省エネルギー性の観点から当然避ける必要があり、一方、極端な過少換気はシックビルディング症候群（SBS）をもたらす。

表 1　測定項目および測定機器一覧

Mesuring items	Measuring instruments
Air Temperature	Assman Psychrometer(Shibata) Thermo Recorder(TR-72,T and T) Anemomaster(Model 6071,Kanomax)
Relative Humidity	Assman Psychrometer(Shibata) Thermo Recorder(TR-72,T and T)
Carbon Monoxide	Potentiostatic electrolysis CO Meter (Model 2322,Kanomax)
Carbon Dioxide	ZFP5 (Fuji Electric)
Suspended Particulate	Digital Aerosol Monitor (Model 3421,Kanomax)
Radon Daughters	TDC-103・105 (Aloka) ZDS-451B,ZD-Fu (Aloka)
Airborne Bacteria	Biotest Air Sampler(Gunze Sangyo) Agar Strip TC (for bacteria)
Airborne Fungi	Biotest Air Sampler(Gunze Sangyo) Agar Strip YM (for fungi)
Formaldehyde (HCHO)	L-6000(Hitachi) L-4000(Hitachi) Chromatopac C-R5A
Volatile Organic Compounds (VOCs)	QP-5000(Shimadzu) ATD400(Perkin Elemer)

それらの背景の中で、1997 年 3 月に北海道大学構内にエネルギー自律をめざした実験住宅であるローエネルギーハウスが建設された[1)]。われわれはこの住宅を対象としたエネルギーの有効利用の研究を進める[2)]と共に、竣工直後より定期的に多元室内空気質の測定を行ってきた。

本報では、現在まで得られた多元室内空気質の長期測定結果とこれらの多元計測データの中から室内化学汚染物質に関する多変量解析結果を中心に報告する。

2．測定対象と測定概要

北海道大学構内に建設されたエネルギー自律をめざしたローエネルギーハウスは地下室付の木造 2 階建住宅で、高気密・高断熱仕様とした。建築面積をわが国の平均値に近い 64m^3 と設計し、延べ床面積は地下室を含め 196.41m^3 である。厚さ 236mm の発泡ポリスチレン板を主体とした断熱パネル工法を採用し、住宅全体の相当隙間面積として 0.81cm^2/m^2 という値が得られている[3)]。エネルギー自律をめざしたローエネルギーハウスでは、太陽電池、ソーラーコレクター、ヒートポンプをはじめ、いくつかの新しい設備システムが導入されている[1) 2)]。アースチューブを通して地下室部に取り入れられた外気を、室内外の温度差と煙突効果を利用して、室内換気を行うパッシブ換気システムもその一つである。これまでの換気性能の実測値として、測定時の設定条件により異なるが、ある 2 条件の場合で 0.55 と 0.66[/h][4)]、および 13 条件の設定の場合 0.57 から 1.24[/h][5)]の間の値が得られている。

ローエネルギーハウスの 1 階、2 階、地下室を対象に、竣工直後の 1997 年 4 月以来、ほぼ 5 週毎に、多元室内空気質の測定を行ってきた。測定項目は、1)気温、2)相対湿度、3)二酸化炭素、4)一酸化炭素、5)浮遊粒子状物質、6)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(HCHO)、10)揮発性有機化合物（VOCs）である。表1に測定項目とともに使用した測定機器を示す。表2は、その中でも最近注目されているホルムアルデヒドとVOCsに関する測定機器と測定条件のまとめである。尚、VOCsの同定対象として、主要な37種類とした。

3．ローエネルギーハウスにおける長期測定結果と考察

3．1　一般室内空気質の測定結果と考察

ローエネルギーハウスの多元室内空気質の測定結果として、これまで全20回のデータが得られた。その中から、測定項目の1)気温から8)浮遊真菌までの測定結果のまとめを表3に示す。

二酸化炭素、一酸化炭素および浮遊粒子状物質の平均値は測定期間中、ビル管理法で定めらている各々の基準値1000ppm、10ppmおよび150 $\mu g/m^3$ 以下[6]のレベルをほぼ維持していた。自然放射性物質の平均値も、地下室を含むすべての階でWHO、EPAおよびASHRAEの指針値以下[6]のレベルを維持していた。これらの結果は、消費エネルギー削減のために採用されたパッシブ換気システムがローエネルギーハウスでは有効に機能していることを示唆していると考えられた。表3から各項目の変動係数を計算してみると、浮遊細菌と浮遊真菌の変動係数が他の項目と比較して大きな値をとっているこ

表2　HCHOおよびVOCsの測定機器および測定条件

HCHO		
device	high-performance liquid chromatography	L-6000(Hitachi)
	detector	L-4000(Hitachi)
	device of data processing	Chromatopac C-R5A
	column	MightySil RP-18 (4.6mm × 250mm)
condition	mobile phase	CH_3CN-H_2O-CH_3COOH (60:40:0.1)
	velocity	1.0mL/min
	wavelength	360nm
	temperature of column	37℃
VOCs		
device	gas chromatography /mass spectrometry	QP-5000(SHIMADZU)
	device of thermal disorption	ATD400(Perkin Elemer)
	column	Rtx-VolatileS(ReStec) (0.25mm × 60m × 1.0 μm)
	trap tube	Air Monitoring (Perkin Elemer)
	carrier gas	He, 120kPa
	sumpling time	24hours
condition	disorption of sample tube	
	disorption temperature	270℃
	disorption velocity	50mL/min
	disorption time	10min
	disorption of trap tube	
	trap temperature	-30℃
	disorption temperature	300℃
	disorption velocity	10mL/min
	disorption time	10min
	temperature of column	40℃(5 min)→4℃/min →200℃(10 min)

表3　ローエネルギーハウス内における一般室内空気質測定結果

		mean	standard deviation	max	min
Air temperature [℃]	BF	15.7	3.6	22.5	8.6
	1F	22.0	4.4	30.2	12.6
	2F	22.5	4.8	32.2	13.7
Relative humidity [%]	BF	62.2	21.4	91.0	27.0
	1F	50.3	18.4	81.0	18.0
	2F	46.2	15.2	75.0	16.0
CO_2 [ppm]	BF	510.5	97.2	750.0	310.0
	1F	647.1	151.5	1100.0	370.0
	2F	590.0	124.0	900.0	400.0
CO [ppm]	BF	0.0	0.1	0.5	0.0
	1F	1.1	5.1	24.0	0.0
	2F	0.9	4.0	19.0	0.0
Suspended particulate [$\mu g/m^3$]	BF	35.7	23.4	94.0	8.0
	1F	30.7	25.2	120.0	9.0
	2F	25.8	20.5	90.0	9.0
Radon [Bq/m^2]	BF	40.4	11.4	101.6	8.5
	1F	37.3	29.0	130.7	10.7
	2F	28.6	16.0	66.6	12.0
Airborne bacteria [cfu/m^3]	BF	582.5	719.9	2675.0	50.0
	1F	981.3	1055.2	3625.0	0.0
	2F	649.5	627.4	2400.0	0.0
Airborne fungi [cfu/m^3]	BF	1477.4	2122.9	8575.0	0.0
	1F	865.5	1805.4	7850.0	0.0
	2F	340.0	695.8	2400.0	0.0

とが示された。微生物汚染物質である浮遊細菌と浮遊細菌には季節変動があり、その反映と考えられた。

３．２室内化学汚染物質の測定結果と考察

この節ではローエネルギーハウスの中の居室に相当する１階と２階で得られたホルムアルデヒド(HCHO)と揮発性有機化合物(VOCs)の測定結果について述べる。図１に VOCs の代表格とされるトルエン濃度とホルムアルデヒド濃度変化を気温と共に示す。

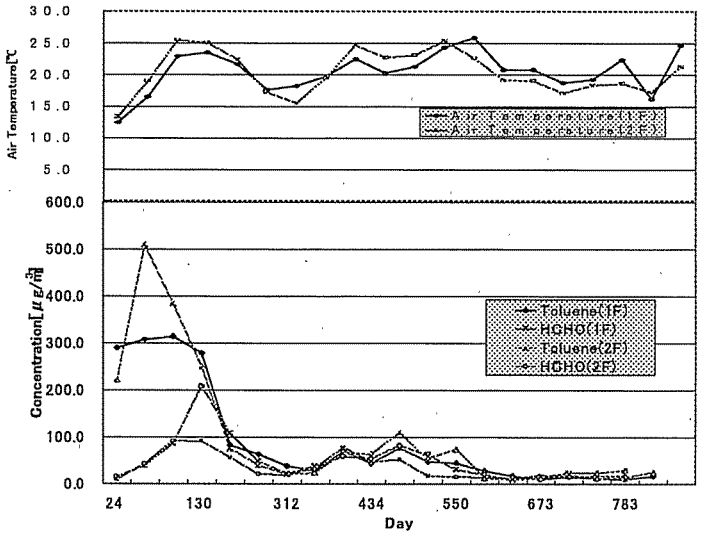

図１　ローエネルギーハウス内における
トルエン濃度、HCHO 濃度および気温の変化

わが国の室内ホルムアルデヒド濃度の指針値は 30 分平均で 100μg/m^{3}であるが、ローエネルギーハウスではほとんどこの値以下の濃度となった。また、VOCs の測定では 37 種類を同定対象としたが、これまでの測定で検出されたのは、その中の 8 種類である。図２にローエネルギーハウスの１階において実際に検出された主要な 6 種類の濃度変化を気温の変化と共に示す。図３は同様に 2 階の測定結果を示したものである。

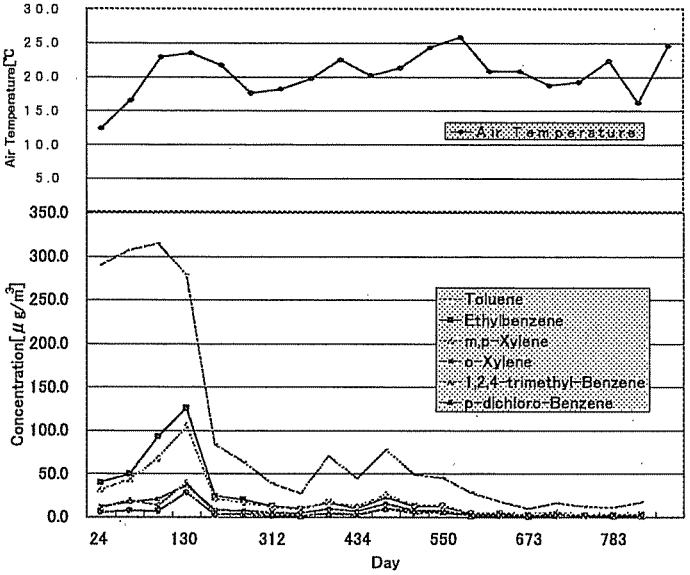

図２　ローエネルギーハウス１階における
VOCs および気温の変化

今回同定されたトルエンを含む主要な 6 種類の VOC は、竣工日から日数が経つにつれ濃度低下を示し、夏季に再び濃度上昇に転じ、その後また低下するという様相を示した。この変化様相は、1 階、2 階とも類似の傾向を示している。すなわち、VOCs の濃度変化は、経過日数とともに気温に代表される温熱環境条件にも依存していると考えられた。

３．３　HCHO および VOCｓに関する多変量解析と考察

前述のローエネルギーハウス内において同定された VOCs とホルムアルデヒドのデータを用いて多変量解析を行った。表４に相関行列の計算結果を示す。表４によれば、図２と図３にその挙動が掲げられている x1 のトルエンから x6 の p-クロロベンゼンの６種類と HCHO の間の相関係数が高く、その中でも、特にエチルベンゼン、m,p-キシレンと o-キシレン間の相関係数が高いことがわかる。一方、スチレンとベンゼンは他のどの物質に対しても比較的低い相関係数となっていることが示された。

主成分分析により得られた固有値(Eigenvalue)と累積寄与率(Accumulated proportion)を表 5 にまとめた。

表5の結果は、第1主成分ですでに69%、第3主成分までで変動の90%以上が説明されることを示している。表現を変えれば、少なくともここで測定された化学汚染物質全体の挙動は第1から第3主成分までの少数の変数に集約して説明される可能性を示している。図4に第1主成分と第2主成分の固有ベクトルの分散図を示す。図4は、室内化学汚染物質全体を一般化学汚染物質、ベンゼン、スチレンの3つのグループに分類できる可能性を示しているといえる。

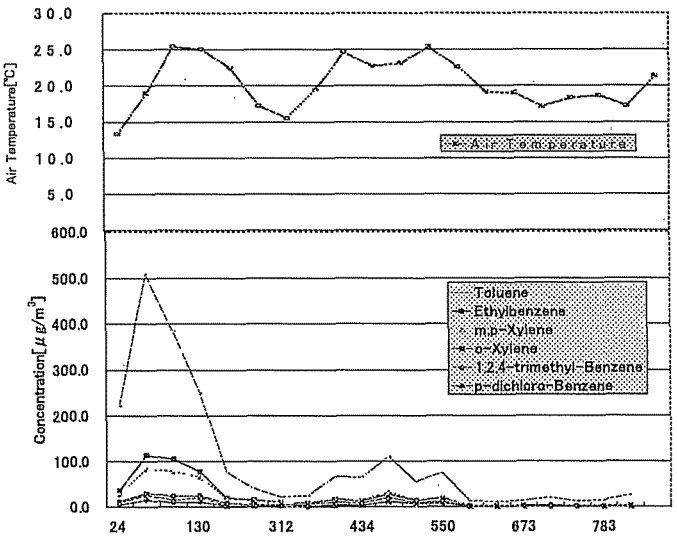

図3　ローエネルギーハウス2階における VOCs および気温の変化

次に、ホルムアルデヒド濃度およびVOCsの代表格のトルエン濃度を予測するための重回帰分析を行った。今回試みた重回帰分析は、情報入手が容易な経過日数、気温および相対湿度を説明変数に採用し、ホルムアルデヒド濃度およびトルエン濃度を目的変数とするものである。表6にホルムアルデヒド濃度について、表7にトルエン濃度の重回帰分析結果についてまとめた。また、図4と図5には、それぞれホルムアルデヒドおよびトルエン濃度の実測値と重回帰式によって得られる推定値との比較を示した。

ホルムアルデヒド濃度の重回帰式については、重相関係数が0.777と比較的高い値となった。また、変数間の相関係数を比較すると、ホルムアルデヒド濃度は経過日数とは負の相関が、気温および相対湿度とは正の相関関係があることが示された。相関係数の絶対値の比較では相対湿度との相関が比較的高いことが示された。すなわち、ホルムアルデヒド濃度の変化はこれまで指摘されている経過日数および気温と共に、湿度の影響を比較的受けているという結果となった。

建材からのホルムアルデヒド発生メカニズムには、1)接着剤中の未硬化の自由ホルムアルデヒドの直接蒸発と 2)硬化接着剤樹脂の加水分解による脱ホルムアルデヒド反応が考えられている。その時間経過の特徴について、前者は時間とともに急激に減衰するという特徴を有し、後者は温湿度の影響を受けながら発生量が緩やかに減衰するという特徴をもつと考えられる。図4によれば、ホルムアルデヒド濃度の測定値と重回帰式による計算値は、実測値と比較すると、おおむね一致していることが、読みとれる。すなわち、ここで得られた重回帰式は、その変数構造から、硬化接着剤樹脂の加水分解による脱ホルムアルデヒド反応による発生量が緩や

表4　室内化学汚染物質の相関行列

[Correlation matrix]

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9
X1. Toluene	1.000	0.920	0.901	0.866	0.830	0.704	−0.051	−0.248	0.452
X2. Ethylbenzene		1.000	0.994	0.948	0.920	0.853	−0.027	−0.269	0.709
X3. m,p-Xylene			1.000	0.973	0.947	0.894	0.039	−0.276	0.753
X4. o-Xylene				1.000	0.956	0.935	0.226	−0.308	0.757
X5. 1,2,4-Trimethyl-Benezen					1.000	0.951	0.083	−0.245	0.723
X6. p-Dichloro-Benzene						1.000	0.216	−0.290	0.801
X7. Styrene							1.000	−0.127	0.151
X8. Benzen								1.000	−0.232
X9. HCHO									1.000

かに減衰するプロセスを反映したものと考えられた。

他方、主要な VOC を代表するトルエン濃度に関する重回帰式の重相関係数は 0.801 とホルムアルデヒド濃度同様、比較的高い値となった。また、変数間の相関関係を見てみると、ホルムアルデヒド濃度と同様に経過日数とは負の相関が、気温および相対湿度とは正の相関が認められた。しかし、相関係数の絶対値は経過日数、相対湿度、気温の順となり、経過日数のそれは 0.765 という比較的高い値をとった。すなわち、トルエン濃度の重回帰式自体としては、3 種類の説明変数のうち竣工日からの経過日数の影響を大きく受けており、次いで相対湿度の影響を受けて、気温の影響は小さいという結果となった。一方、建材からの VOCs 発生のメカニズムについては、時間とともに減衰する塗料の蒸発発生が支配的とされ [7]、今回の重回帰式も、それを反映した変数構造となっている。しかし、図5をみると、中期の適合は良好であるが、初期段階の適合性は悪い。予測精度を向上させるためには、蒸発現象を説明するのに関連性がより深い変数を導入することが考えられる。たとえば、情報入手の容易性を損なわず精度向上をはかる方策の1つしては、気温にかわり壁面温の導入などが考えられる。

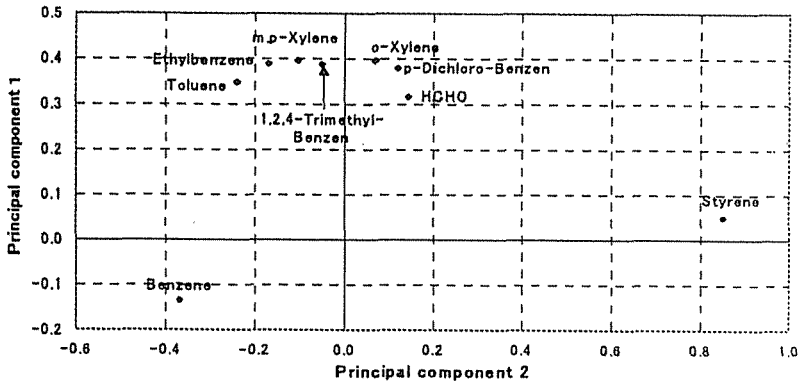

図 4　固有ベクトルの分散図

表 5　室内化学汚染物質の主成分分析結果

principal component No.	eigenvalue	accumulated proportion(%)
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

表 6　重回帰分析の結果（HCHO）

[Linear multiple regression model]

Criterion variable HCHO

Predictor variables	Partial regression coefficient	Standard partial regression coefficient	Partial correlation coefficient	Correlation coefficient
Day	-0.048	-0.318	-0.390	-0.476
Air temperature	4.322	0.441	0.563	0.459
Relative humidity	0.931	0.405	0.476	0.621
Constant term	-73.16			

Correlation matrix]

	Day	Air temperature	Relative humidity	HCHO
Day	1.000	0.106	-0.510	-0.476
Air temperature		1.000	0.126	0.459
Relative humidity			1.000	0.621
HCHO				1.000

[Accuracy]

Coefficient of determination	R^2 =	0.604
Multiple correlation coefficient	R =	0.777

表 7　重回帰分析の結果（トルエン）

[Linear multiple regression model]

Criterion variable Toluene

Predictor variables	Partial regression coefficient	Standard partial regression coefficient	Partial correlation coefficient	Correlation coefficient
Day	-0.26	-0.59	-0.591	-0.765
Air temperature	-1.36	-0.04	-0.052	0.026
Relative humidity	2.20	0.31	0.334	0.627
Constant term	147.31			

Correlation matrix]

	Day	Air temperature	Relative humidity	HCHO
Day	1.000	0.097	-0.569	-0.765
Air temperature		1.000	0.388	0.026
Relative humidity			1.000	0.627
Toluene				1.000

[Accuracy]

Coefficient of determination	R^2 =	0.641
Multiple correlation coefficient	R =	0.801

4．まとめ

・ 1997 年 4 月からロー エネルギーハウスに

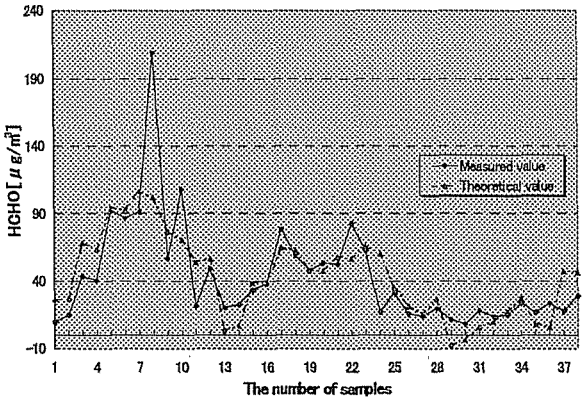

図 5　重回帰式による推定値と
実測値の比較（HCHO）

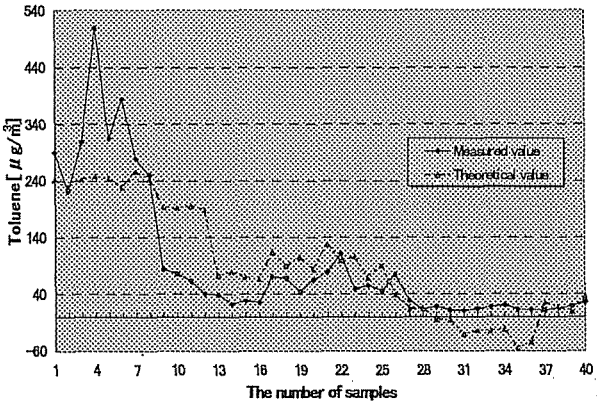

図 6　重回帰式による推定値と
実測値の比較（トルエン）

おいて多元室内空気質長期測定を行った。

・ローエネルギーハウス内の二酸化炭素、一酸化炭素、浮遊粒子状物質の平均値は、ビル管理法の基準値以下を示していた。自然放射性物質は、諸外国の一般的な指針値以下を示していた。浮遊細菌・真菌濃度の変動係数は大きく、季節変動が観察された。

・ローエネルギーハウス内では 37 種中 8 種類の VOCs とホルムアルデヒドの室内化学汚染物質が同定された。基準値をこえるホルムアルデヒド濃度を得ることはほとんどなかった。

・主成分分析を行った結果、室内化学汚染物質は第 3 主成分までで 90%以上を説明される可能性があることが示された。

・重回帰分析を行った結果、ホルムアルデヒドとトルエン濃度の重相関係数はそれぞれ 0.777 と 0.801 となった。ホルムアルデヒドは相対湿度、経過日数、気温、トルエン濃度は経過日数、相対湿度、気温の順に影響を受けているという結果が得られた。それらについて発生メカニズムの面から考察を加えた。

[謝辞]　この研究の一部は、科学技術振興事業団戦略的基礎研究推進事業における「環境低負荷型の社会システム」研究領域（研究統括：茅陽一）の公募研究「自立型都市をめざした都市代謝システムの開発（研究代表者：柏木孝夫）ならびに文部省科学研究・国際学術研究「室内空気質の評価法と制御法に関する国際共同研究：ローエネルギーハウスの室内空気質の最適化」（研究代表者：落藤澄）によった。

【参考文献】

1）濱田靖弘・落藤澄・長野克則・中村真人・横山真太郎・永坂茂之：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・衛生工学会論文集, 73, pp.105-115 (1999)
2）濱田靖弘・横山真太郎・中村真人・落藤澄・長野克則：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2報－実験住宅における運転実績とその評価．空気調和・衛生工学会論文集, 76,（投稿中）(1999)
3）島田潔・金田裕一・繪内正道・落藤澄・福島明：多種ガス法によるパッシブ換気の変動特性（その1）ローエネルギーハウスの換気特性．空気調和・衛生工学会北海道支部第 32 回学術講演論文集, 32, pp.49-52 (1998)
4）島田潔・繪内正道・落藤澄・福島明：多種ガス法によるパッシブ換気の変動特性（その4）室間換気量の算定と比較．空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp.21-24 (1998)
5）奥山博康：ローエネルギーハウスの多数室換気測定結果の見方について．私信(1998)
6）横山真太郎：室内空気質．現代の空気調整工学（落藤澄 編）．朝倉書店、東京 (1996) pp.59-85
7）B. A. Tichenor, Z. Guo and L. E. Spark: Fundamental Mass Transfer Model for Indoor Air Emissions from Surface Coatings. Indoor Air, 3, pp.263-268.
8）横山真太郎・黄永寿・内見裕聡・落藤澄：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.569-571 (1998)
9）横山真太郎・黄永寿・内見裕聡・落藤澄：戸建て住宅における化学汚染物質の実態について．空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp.601-604 (1998)
10）横山真太郎・黄永寿・内見裕聡・落藤澄：北海道におけるラドンならびにラドン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)
11）横山真太郎・黄永寿・内見裕聡・泉温子・落藤澄：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 (1999)
12）横山真太郎・黄永寿・内見裕聡・泉温子・落藤澄：多元室内空気質の測定と対策に関する研究－パッシブ換気住宅における多元室内空気質－．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.53-56 (1999)