

## 木造戸建住宅の LC における発生物質の環境へのインパクト評価

主査 岩下 剛\*1

委員 黒木 荘一郎\*2, 鳥居 修一\*1, 甲斐 敬美\*1

本研究は、木造住宅から発生する物質の環境へのインパクト評価手法の構築を目的として、ライフサイクル評価、居住環境実測、被験者実験による快適性評価を行った。木造住宅から発生する物質の環境影響については、LCA ソフトウェアを用いて、マクロな視点での分析・評価法を調査した。木造住宅から発生する化学物質の実態は、内装材に無垢の杉が使用されている木造住宅、通常の壁紙が使われている在来軸組木造住宅で実測を通して調査した。これにより、木質系建材から放たれる天然由来の化学物質の発生が長期にわたって顕著であることがわかった。また、天然由来の化学物質の臭気が、人間の知覚空気質に及ぼす影響を被験者実験により調査した。

キーワード： 1) 木造住宅 2) 居住環境インパクト 3) 化学物質 4) テルペン類

### ASSESSMENT ON IMPACT OF SUBSTANCES EMITTED FROM WOODEN HOUSES IN LIFE CYCLE ON ENVIRONMENT

Ch. Go Iwashita

Mem. Soichiro Kuroki, Syuichi Torii and Takami Kai

Life cycle assessment, field investigation on residential environment, and subjective experiment on perceived air quality were conducted for the purpose of development of the impact evaluation technique to the environment of the substance emitted from wooden houses. Influence of the substance emitted from wooden houses on the environment was analyzed using LCA software with a macroscopic viewpoint. The survey of the chemical pollutants emitted from wooden houses was performed through field investigation in houses with the conventional wooden frame construction method, and where the pure Japan cedar is used for interior material. The volatile organic compounds from wooden materials were founded in the above houses. The effects of the natural VOCs from wooden material on perceived air quality was also investigated through the subjective experiments.

#### 1. はじめに

##### 1.1 研究の目的

建築物の建設、使用期間、解体時に発生する環境負荷は多量であり、それが地球温暖化、大気汚染、居住者への健康悪影響の要因の一つになっている。現在、建築物のライフサイクルアセスメント（以下 LCA）の手法開発が行われており、ライフサイクルCO<sub>2</sub>、ライフサイクルSO<sub>x</sub>などの算定は実際に行われるようになってきている。このような手法はオフィス、ホテル、集合住宅等の大規模な建物を対象としていることが多く、ライフサイクル負荷の原単位も、産業連関表から導かれるのが主である。それに対し、木造戸建住宅では、建材の選択具合、施工法の違い、施工現場の地域性などの影響が大きく、産業連関表から算定し

た原単位を用いることが難しい。また、シックハウス症候群に代表される、建材からの空気汚染物質の居住者への健康影響の把握のためには、CO<sub>2</sub>やSO<sub>x</sub>以外の物質についても、発生量のデータを蓄積することが必要である。汚染物質発生量のデータ化については、将来、ISO 14024や14025 という環境ラベリングが一般化されることによって実施されると考えられるが、現状ではデータベースは未整備であることが多い。そこで、本研究では、木造住宅の建築行為から発生する汚染物質が、大気、水、土壌、人間に及ぼす環境インパクトを算定するための手法を調査する。特に居住者へ健康影響を及ぼすと考えられる物質については実測を通して実態を把握する。木質系建材から発生される化学物質は、ホルムアルデヒドのような人工化学物質以

\*1 鹿児島大学 助教授

\*2 北九州市立大学 教授

外に、テルペン類化学物質などの天然由来の化学物質がある。時にはアロマテラピーにも用いられる天然由来の化学物質は、癒しの効果があると言われるが、一方でシックハウス問題の主要因といわれる VOC（揮発性有機化合物）の一種でもある。これらの天然由来の VOC が、通常の木造住宅から、どの程度の濃度で放たれているか、また、それは人間の健康性・快適性のどのような影響を及ぼすのかを考察することも本研究の目的の一つである。

## 1.2 研究の概要

本研究では、第2章にて、海外で開発されている、地球環境へのインパクトを評価する LCA ソフトウェアを用いて、木造住宅の有効性を調査する。また、ソフトウェアでは十分に評価されていない項目について考察する。第3章では、地球環境への配慮を行った環境共生住宅における実測結果について報告する。これは鹿児島県屋久島において建設された環境共生住宅である。第4章では、異なる構法の木造住宅において室内環境実測を行い、木材由来の天然化学物質の影響について考察を行う。最後に、第5章では、天然の化学物質の人間への生理・心理影響について、被験者実験を行った結果について報告する。

## 2. LCA ソフトウェアによる木造住宅の評価

### 2.1 製品の環境評価

現在の我々の生活は多数の元素や化合物を含む様々な製品を使用することで成立している。製品の製造・使用・廃棄の過程において環境に排出される物質の中には、水質・土壌・大気に被害を及ぼしたり、人間をはじめとする生物に悪影響を及ぼす場合がある。その影響、リスクを算定す

る際には、排出される物質の量・濃度を知ることが重要である。国際的な取り組みとしては、OECD（経済協力開発機構）が加盟国に対して環境汚染物質排出移動登録（Pollutant Release and Transfer Register, PRTR）の導入勧告を行っている。日本においても1996年よりPRTRの導入が検討された後、1999年に法制化され、対象事業者は2001年度から対象化学物質の環境中への排出量等の把握を開始し、2002年度からそれを届け出ることが予定されている。

PRTRの対象となる事業者には、建設産業関連の事業者も含まれるため、建設ライフサイクルにおける有害物質物排出の流れを量的に把握することも、今後可能になってくると考えられる。

一方、製品の人体への健康影響に関しては、MSDS（化学物質安全データシート）の普及等のレスポンシブルケアへの自主的な取り組みが進められている。MSDS制度とは、事業者による化学物質の適切な管理の改善を促進するため、対象化学物質を含有する製品を他の事業者へ譲渡又は提供する際には、その化学物質の性状及び取扱いに関する情報（Material Safety Data Sheet, MSDS）を事前に提供することを義務づける制度であり、2001年1月から実施されている。MSDS制度の対象となる化学物質は、法律上「第一種指定化学物質」及び「第二種指定化学物質」として定義されており、具体的な物質としては、人や生態系への有害性（オゾン層破壊性を含む）があり、環境中に広く存在する又は将来的に広く存在する可能性がある認められる物質として、政令で計435物質が指定されている。シックハウス問題で取り上げられているトルエンやキシレンなどもMSDS制度の対象となる物質である。例外的にMSDSを提供

表 2-1 PRTR の各国比較（環境省ホームページより<sup>\*)1)</sup>

国名	制度	対象物質	対象施設	届出されたデータの扱い	開始時期
米国	TRI (有害物質排出目録)	約 620 物質	製造業等 (業種指定。従業員数及び年間取扱量で裾切り)	個別データ及び 集計データを公表	1986年
カナダ	NPRI (全国汚染物質排出目録)	268 物 質	製造業等 (業種指定。従業員数及び年間取扱量で裾切り)	個別データ及び 集計データを公表	1993年
オーストラリア	NPI (全国汚染物質目録)	90 物質	製造業 (年間取扱量で裾切り)	個別データ及び 集計データを公表	1998年
英国	PI (汚染目録)	約 150 物質	製造業等 (業種を列挙。年間排出量で裾切り)	個別データを公表	1990年
オランダ	IEI (個別排出目録システム)	約 170 物質	環境管理法上の許可が必要とされる施設等	集計データを公表 (個別データも閲覧可能別途)	1974年
日本	PRTR (環境汚染物質排出・移動登録)	354 物 質	製造業等 (業種を列挙。従業員数及び年間取扱量で裾切り)	集計データを公表 (個別データは請求により開示)	2001年4月より 排出量の把握及び 推計開始

しなくても良い製品としては、対象化学物質の含有率が1%未満のもの（第一種指定化学物質は0.1%）、家庭用洗剤や殺虫剤のような一般消費者用のもの等が挙げられる。しかし、住環境における健康影響という観点からは、洗剤、ワックス、殺虫剤、防臭剤、芳香剤などのMSDSも重要であると考えられる。

## 2.2 LCA ソフトウェアによる木質系建材・木造住宅評価

LCA ソフトウェアの多くは欧米で開発され、その多くが市販されている<sup>2)</sup>。たとえば、オランダで開発されたEco-indicator95というソフトウェアでは、環境インパクトとして、温室効果、オゾン層破壊、酸性雨、富栄養化、スモッグ、毒物汚染などを評価しており、日本のLCAがCO<sub>2</sub>に特化したものが多いのとは対照的である。本研究では、デルフト大学で開発されたIdeMATというLCAソフトウェアを用いて、木質系建材のLCA評価を行うこととする<sup>3)</sup>。IdeMATは設計段階で材料を選択し、評価するためのツールであり、このプログラムには様々な建設材料、仕上げ材料のデータが含まれている。また、データには材料の密度、強度、弾性、耐化学性、オランダでの価格、その他多くの項目が含まれている。

IdeMATは以下の6つの機能から構成されている。

1. フィルター Filter
2. エディター Editor
3. データブック Data book
4. ハイロー グラフ High-low graph
5. 散布図 Scattergram
6. データ表 Table

フィルターはIdeMATに収められている膨大なデータから目的に適した材料を抽出するための機能である。たとえば住宅構造用の木材を選択するという場合を想定した場合、フィルター画面を開き、要求されるヤング率や硬度の条件を入れると、その条件を満たす材料データが表示される。既存のデータに新しい材料や工法、部品のデータを追加する作業を行う機能がエディターである。データブックは、材料の一般的特徴、構造的な特性値、値段、Eco indicator 95などの環境指標の値、リサイクル可能性、生産時のインベントリーデータなどの項目が含まれている。インベントリーデータには、Input-Outputデータとして、材料を生産する際に投入する原料やエネルギーの量と排出される環境汚染物質が表示されている。High-low グラフはいくつかの材料を選んで、その性能を比較するためのワークシートである（図2-1参照）。ここでは横軸には環境指標としてEco indicator 95を適用してある。図2-1では、Eco indicator 95の値が小さい材料ほど、横軸の値が小さく、環境インパクトの小さいものといえる。たとえば、木材であるOakのEco indicator値は0.16mPt、鉄Feの値は、4.66mPtであって、鉄の方が30倍、環境にインパクトを与

えているといえる。Eco indicator 値は、図2-3に示すような各材料のインベントリー分析結果によって自動的に算定される。

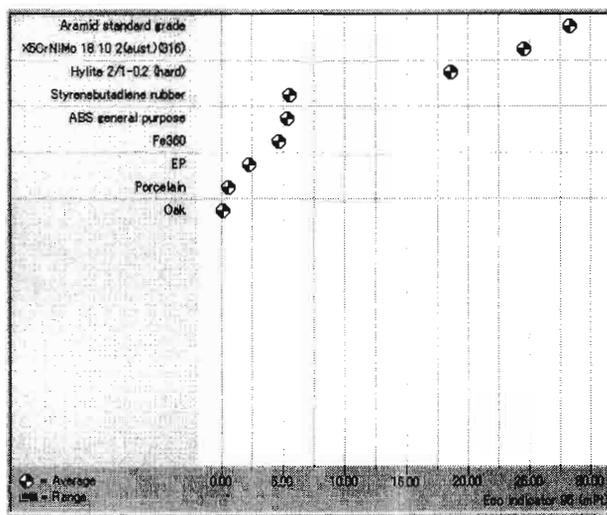


図2-1 High-low graph画面

散布図は2つの評価指標を用いて複数の材料の性能を比較するためのワークシートである。例えば横軸に価格を、縦軸に環境指標としてEco indicator 95を選択すると図2-2のような画面が得られる。これによって、費用と環境性能のトレードオフを検討できる。

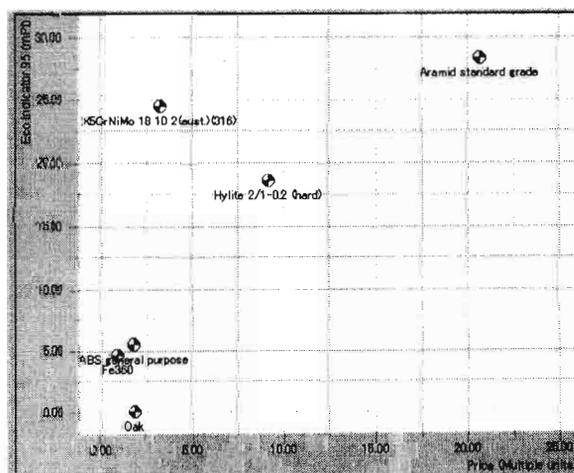


図2-2 Scattergram画面

図2-3にはライフサイクルにおいて鋼材から放たれる汚染物質の量がOutputインベントリーとして示されている。ここには、炭化水素化合物(HC)やホルムアルデヒド、トルエンなど、各物質の大気・水・土壌への放出量がワークシートに表されている。材料単位を対象としたLCAソフトウェアのIdeMATによる算定では木材は、鋼材やコンクリートよりも低いEco Indicator95の値(すなわち環境インパクトが少ないという評価)が得られた。

Output *	Air (g)	Water (g)	Soil (g)	%
waste (radioactive)			2.881e-0...	
sodium ions		2.657e-0...		
soot	9.198e-0...			
dust (coal)	1.392e-0...			
HC	1.528e+0...	2.727e-0...		2
NO2	1.155e+0...			2
-	3.394e-0...			1
metal ions		6.807e-0...		
-		3.422e-0...		
fluor ions		1.619e-0...		
-			1.642e-0...	
metals	1.190e-0...			
chloride ions		1.171e-0...		
dust (unspecified)			3.846e-0...	
-		4.139e-0...		
N2O	9.259e-0...			
methane	3.702e-0...			
pentane	1.653e-0...			
oil		6.812e-0...	1.616e+0...	
crude oil		4.343e-0...		
formaldehyde	7.213e-0...			
aldehydes	3.137e-0...			
benzene	1.230e-0...			
toluene	3.024e-0...			
ethylbenzene	4.809e-0...			
phenol		2.288e-0...		

図 2-3 建材の環境インパクトインベントリ (鋼材)

一方、材料単位ではなく、住宅単位で LCA 評価を行うソフトウェアが Athena である<sup>※4)</sup>。Athena は設計者、研究者が主に住宅を計画する際のデザインツールであり、カナダの ATHENA™ Sustainable Materials Institute にて開発された。Athena は 2 つ以上の設計候補を、6 種類の評価軸で比較することができる。設計項目の入力後、評価項目は自動的に計算される。その結果は、一覧表か、グラフで見ることができる。環境評価軸は以下の 6 つである。

- ・ エネルギーの消費量
- ・ 固形廃棄物放出量
- ・ 空気毒性インデックス
- ・ 水毒性インデックス
- ・ 地球温暖化ポテンシャル
- ・ 資源使用量

エネルギー消費量の評価単位はジュールであり、加工、輸送、製造、構築、全てのエネルギーが含まれている。固形廃棄物放出量の単位はキログラムであるが、それぞれの固形廃棄物の環境への危険度に関する評価は行われていない。空気・水毒性インデックスの単位は index 点数である。様々なライフサイクル段階で、放出された毒性、人間の健康に与える影響などが考慮に入れている。毒性は、取り入れ可能なレベル (飲料水基準や空気質基準) まで汚染物質を薄めるために必要な空気、水の量によって比較されている。地球温暖化ポテンシャル) は、温室効果ガスを

重み付け合計した値で表されている。資源使用量は、資源採取の際に生じる環境への影響 (例、地下水品質および野生生物生息地に対する影響など) を考慮した重み付けを用いて計算される。ここで、実際に建てられている床面積 250m<sup>2</sup> の二階建て戸建住宅をモデルとして想定し、これを軽量鉄骨造住宅 (steel house) とした場合と、在来軸組住宅 (wooden house) で建設した場合について Athena を用いてエネルギー消費量の比較を行った。その結果を図 2-4 に示す。

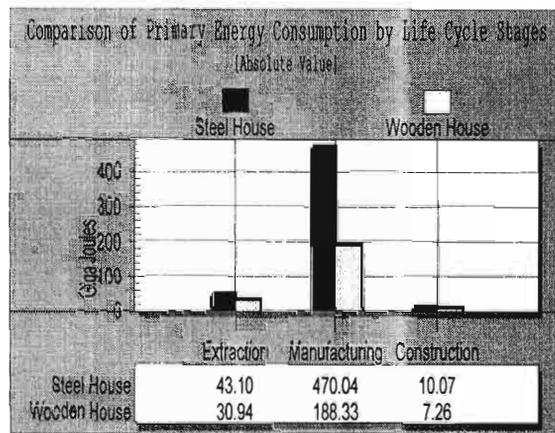


図 2-4 Athena によるエネルギー消費量比較

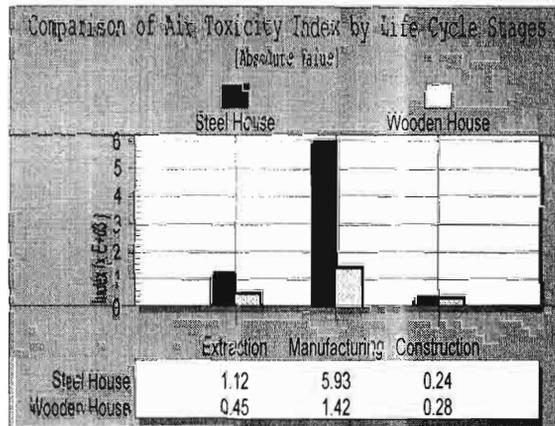


図 2-5 Athena による空気毒性インデックス比較

なお、ここで用いた Athena はベータ版であり、あくまでも試験的な比較手段として使用した。エネルギー消費量は、資源採取 (Extraction)、建材製造 (Manufacturing)、建設 (Construction) の各ライフサイクルで評価されており、鉄骨住宅では特に、建材製造段階において、木造住宅よりもエネルギー消費量が多いことがわかる。図 2-5 に、前述の 2 種の住宅について、空気毒性インデックスを比較したものを示すが、やはり建材製造段階において鉄骨住宅の空気毒性インデックスが木造に比べて非常に高いことがわかる。しかし、図 2-5 には、実際に人間が居住する、居住時における空気毒性インデックスは示されていない。カナダの森林組合も、Athena を用いて延床面積 223m<sup>2</sup> のモデル住宅について、木造、鉄骨造、RC 造、それぞれについてケーススタディを行っている<sup>※5)</sup>。その結果によると、エネル

ギー消費量は木造が 255 GJ, 鉄骨造が 389 GJ, RC 造が 562 GJ であった。また, CO<sub>2</sub> 排出量は, 木造が 62183 kg, 鉄骨造が 76453 kg, RC 造が 93573 kg と, 木造が最も少なかった。空気毒性インデックスも, 木造が鉄骨造, RC 造の約半分であり, 木造住宅の環境負荷の少なさが報告されている。

前述した 6 種類の環境評価軸のどれについても, 今回の算定では, 木造住宅の方が環境負荷が, 鉄骨住宅よりも少ないという結果が得られたが, 実際には, 居住時の在室者への健康影響や, 廃棄時の環境汚染の問題も考慮する必要があると思われる。現実には, 木材から発生する天然由来の化学物質を TVOC (総揮発性有機化合物) として勘定すべきかどうかの検討も始まっており, 木材由来物質の環境影響評価の重要性は増している。このような評価は, まだ研究段階であり, ソフトウェアでの算定は困難なため, 木材由来の物質の挙動・リスク評価については, 実測, 実験を通して行うこととする。

### 3. 屋久島環境共生住宅における空気環境実測

#### 3.1 研究の背景

木質材料の LCA 評価及び, 木造住宅の LCA 評価を LCA ソフトウェアを用いて行ったところ, 木造住宅の環境性能の良好さが確認された。これはマクロな点からの評価ではあるが, 今後の木造住宅の動向を考える上で大事な点と考えられる。特に木材から環境へ排出する物質が少ないという点は木造住宅の長所と考えられる。最近, 問題となっているシックハウス問題においても, 尿素ホルムアルデヒド樹脂接着剤を用いた合板や, 揮発性有機化合物を多く含む溶剤等からの汚染物質の発生が指摘されており, このような汚染物質発生量の少ない, もしくは含まれていない建材を用いた住宅づくりが注目されている。特に, 無垢の木材を構造材としてだけでなく, 内装材として用いた住宅が, 「健康・自然住宅」と呼ばれ, 建設数も増えている。これらは家に入った時に「木の香り」をもたらす, 居住環境への負のインパクトは少ないと考えられているが, 木の香りの元となる天然の物質もやはり, 揮発性有機化合物の一種であり, その健康性・快適性は検討する必要があると考えられる。厚生労働省シックハウス検討会のガイドラインでは, TVOC (全揮発性有機化合物) 濃度として 400  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  という暫定指針値を設けており, 木材から発生する  $\alpha$ -ピネンのような天然の物質も, TVOC に含まれるのである。そこで, 木材を内装材として用いた環境共生住宅にて室内空気環境を行い, その居住環境インパクトについて考察することを計画した。

#### 3.2 屋久島環境共生住宅の概要

近年, 地球温暖化の要因物質である CO<sub>2</sub> の発生量を抑制するために住宅における冷暖房用エネルギーの消費量低減が試みられている。そのために建物の高断熱・高气密化が

進められているが, 一方ではシックハウス等の室内空気汚染の問題も増えつつある。屋久島環境共生住宅はこのような背景のもと, 地球環境志向及び健康性を配慮して計画された公営住宅団地であり, 鹿児島県熊毛郡上屋久町宮之浦にある約 19,750m<sup>2</sup> の敷地に建つ 50 戸 (県営住宅 24 戸, 町営住宅 26 戸) の在来木造平屋建ての住宅からなる。計画・設計は鹿児島県土木部住宅課/上屋久町建設課および, 岩村アトリエ・鹿児島県建築設計監理事業協同組合設計業務企業体である。この事業は鹿児島県のまちづくり施策と上屋久町の町づくり施策, 国の環境共生住宅の普及・推進とが一つになって実現されたものである。また, 屋久島は世界自然遺産の島ということで, 屋久島の気候・風土, 歴史文化, 建材を立地環境特性として活かすようにしている。今回の実測の対象として, 屋久島環境共生住宅のうち, 敷地の北部に位置する 4 号棟と 5 号棟を用いた。実測を行った 2000 年 8 月の時点では, 約半数の住戸が完成されており, 4 号棟及び 5 号棟も完成済みの住宅である。4 号棟, 5 号棟の位置関係としては, 4 号棟が北側で海岸線に近く, 海風が来る場合, 5 号棟が風下側に存在することになる。5 号棟の南側写真を図 3-1 に示す。なお, 4 号棟のみ床下に木炭を詰めた袋が敷き詰めてあり, 調湿・吸湿効果を図っている。

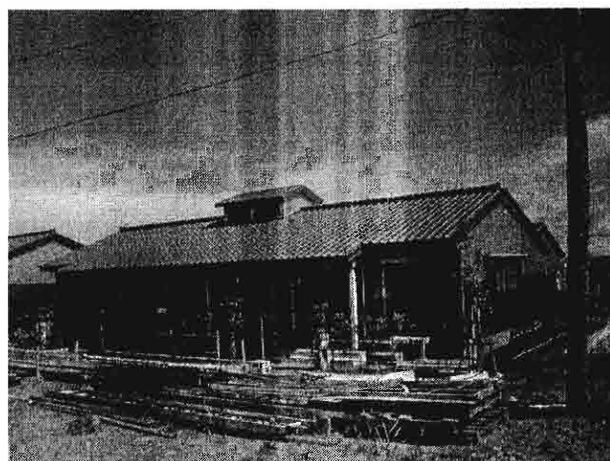


図 3-1 5 号棟住戸南側写真

#### 3.3 実測方法

実測期間は夏季測定が 2000 年 8 月 2 日～2000 年 8 月 26 日, 秋季測定が 2000 年 11 月 9 日で, 入居者が住み始める前に実測を行った。各測定日の測定条件及び測定項目を表 3-1 に, 測定機器を表 3-2 に示す。換気量は, トレーサーガス一定濃度法を用いて測定を行った。

VOC 濃度の分析は, 室内空気を採取したテナックスチューブを実測後に研究室に持ち帰ってガスクロマトグラフ/質量分析 (GC/MS) により行い, HCHO 濃度分析のための TEA 含浸シリカゲルチューブは, 分析を外注した。これらの測定項目以外は, 現地で行った。

表3-1 各日の測定状況及び測定項目

測定日	窓	換気塔	床下換気	間仕切り	測定項目
夏季	8月22日	×	×	×	温湿度、室内風速、PMV グローブ温度
	8月23日	×	×	×	温湿度、HCHO濃度、VOC濃度 換気量、室内風速、PMV、グローブ温度 放射温度、照度
	8月24日	○	○	○	温湿度、HCHO濃度、VOC濃度 換気量、室内風速、PMV、グローブ温度 放射温度、照度
	8月25日	○	×	○	温湿度、HCHO濃度(検知管のみ) VOC濃度、換気量、室内風速、PMV グローブ温度、放射温度
	8月26日	○	○	○	温湿度 VOC濃度
秋季	11月9日	×	×	○	温湿度、HCHO濃度(検知管のみ) VOC濃度

○・・・開いている状態    ×・・・閉まっている状態

表 3-2 測定機器

測定項目	測定機器
温湿度	おんどり RH-TR72S (T&D社)
HCHO濃度	北川式ガス検知管HCHO710型 捕集ポンプS-20 (光明理化学工業株式会社) TEA含浸シリカゲルチューブ (柴田科学器械工業株式会社)
VOC濃度	テナックスチューブ (スベルコ社) ガスクロマトグラフ/質量分析装置 (パーキンエルマー社)
PMV	アメニティメータ AM-101(京都電子工業株式会社)
グローブ温度	おんどり(T&D社)、グローブ球
換気量	マルチポイントサンプラー&ドザー TYPE1303 マルチガスモニター TYPE1312 (イノーパ社)
風速	アネモマスター-6011、クリモマスター-6511 (日本科学工業株式会社)

3.4 実測結果

8月22日～26日の空気温度経時変化を図3-2に、絶対湿度経時変化を図3-3に示す。

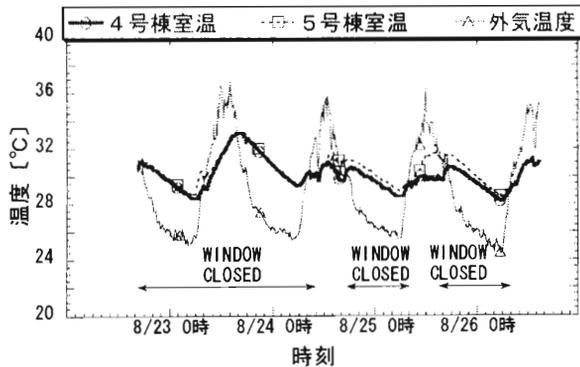


図 3-2 室温及び外気温の経時変化

温度変化において4号棟、5号棟を比較すると、窓を開けてから4号棟の温度がやや低くなり、その後、窓を閉めてからもその状態がしばらく続いている。これは4号棟の方が5号棟よりも換気量が大きいためと考えられる。絶対湿度変化においては、窓を閉めた状態の時に、4号棟の絶

対湿度が5号棟のそれよりも低くなっており、窓を開けた状態の時は、4号棟、5号棟の間にそれ程の違いは見られなかった。この結果により、窓閉鎖時には4号棟の敷炭の吸着効果が出ていると考えられる。

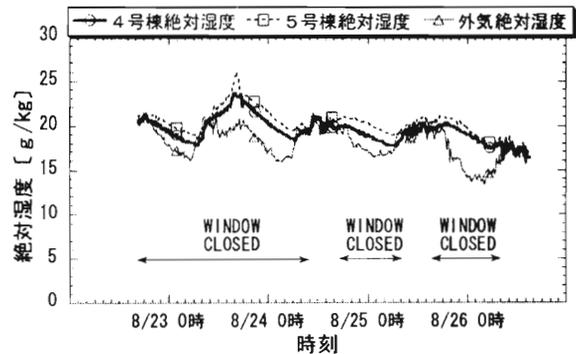


図 3-3 絶対湿度の経時変化

表 3-3 各日の換気量平均値 (m³/h)

	8月23日	8月24日	8月25日
4号居間	53.6±10.6	4252.4±3232.8	8259.6±4609.2
4号北和室	9.8±3.5	3878.5±2136.3	4481.2±2323.6
4号南和室	2.8±5.6	2190.0±974.2	1951.5±646.0
5号居間	21.7±6.8	1868.3±1394.6	896.6±678.4
5号東和室	0.8±0.9	821.8±470.5	498.8±155.4
5号西和室	12.0±2.3	1626.5±1217.0	1155.3±972.0

※平均値±SD

換気量の測定結果を表3-3に、8月23日、24日、25日の外気風速と風向の経時変化および換気量の経時変化を図3-4、図3-5、図3-6に示す。8月23日の開口部の閉鎖状態においては、各部屋とも換気量が100m³/h以下となっている中で、4号棟居間の換気量は他の室に比べて、高い値となっている。これは4号棟居間の部屋容積が一番大きく、また風上側にあるためと考えられる。

図 3-4 8月23日における換気量の経時変化

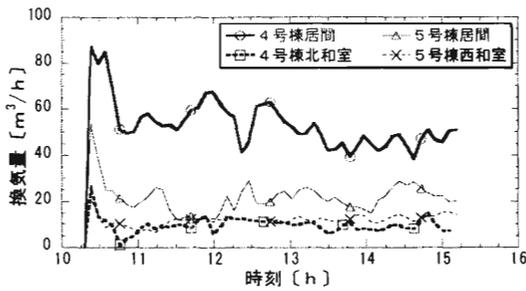


図 3-5 8月24日における換気量の経時変化

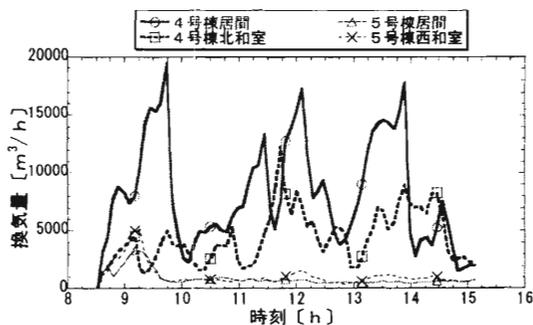
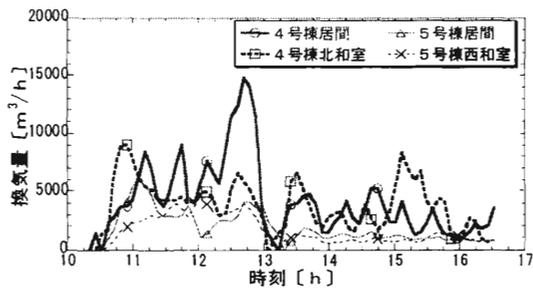


図 3-6 8月25日における換気量の経時変化

8月24日、25日の開放状態においては、どの部屋も閉鎖状態と比べて高い値を示している。4号棟、5号棟を比較すると、4号棟の換気量の方が、居間、和室ともに5号棟のそれを上回っている。4号棟は、海のある北側に位置しており、海からの風が主なため、4号棟が風上側になることが多いと考えられる。24日と25日の開放状態を比較すると、4号棟居間、4号棟北和室に関しては、25日の方が高い値を示している。なお、測定時間における平均換気回数で表すと、4号棟は開口部閉鎖状態の8月23日が0.77回/時、開放状態の24日が61回/時、25日が118回/時であり、5号棟は23日が0.31回/時、24日が26.7回/時、25日が12.8回/時となった。風下側の5号棟では、4号棟においてトレーサーガスを投与された外気空気が多く浸入しているため、換気量・換気回数の値が、4号棟に比べ低くなっている。たとえトレーサーガスを空気中に含有していたとしても、外気は新鮮外気であるとして扱えば、5号棟の換気量・換気回数は、より大きな値になる。

HCHO濃度結果を表3-4に示す。8月23日の閉鎖状

態において、簡易測定法である検知管でのHCHO測定結果は4号棟居間、5号棟居間ともに0.098ppmで厚生労働省ガイドライン値0.08ppmを若干上回っていた。これは、室温が30℃、相対湿度が70%を超えるような高温熱環境下であることが原因として考えられる。また、検知管によるHCHO濃度測定では、簡易測定法であるため、アセトアルデヒドにも反応する可能性が考えられ、室内にあるテルペン類のVOCがオゾンと反応してアルデヒド類を生成したためとも考えられる。8月24日、25日の開放状態での測定結果は、両住戸でHCHO濃度が低減し、ガイドライン値を大きく下回った。秋季での検知管によるHCHO濃度は、両住戸とも夏季の閉鎖状態での濃度よりも大きく低減していた。パッシブガスチューブ（シリカゲルチューブ）でのAHMT法による測定結果は、8月23日の閉鎖状態において4号棟居間が0.046ppm、5号棟居間は0.044ppmであり、厚生労働省ガイドライン値を大きく下回っていた。8月24日の開放状態での測定では、換気効果により濃度の低減がみられた。4号棟と5号棟では、4号棟の方が低いHCHO濃度となっている。

表 3-4 ホルムアルデヒド (HCHO) 濃度結果

観測日	観測場所	HCHO濃度 (ppm)	
		検知管法	AHMT法
8月23日	外気	0.010	0.036
	4号居間	0.098	0.046
	5号居間	0.098	0.044
8月24日	外気	0.005	0.034
	4号居間	0.006	0.027
	5号居間	0.015	0.034
8月25日	外気	0.005	—
	4号居間	0.007	—
	5号居間	0.020	—
	4号押入 (南和室)	0.055	—
	5号押入 (西和室)	0.029	—
11月9日	外気	0.000	—
	4号居間	0.024	—
	5号居間	0.024	—

「—」は測定を行わなかったことを示す

VOC濃度結果を表3-5に示す。8月23日の閉鎖状態において、4号棟、5号棟、ともにトルエン、キシレン、ウンデカンのような塗料に含まれるVOCが検出された。その他に、杉材に含まれる $\alpha$ -ピネンが検出された。パラジクロロベンゼンは、検出されなかった。厚生労働省の示した室内濃度指針値をみると、トルエンが $260 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、キシレンが $870 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、パラジクロロベンゼンが $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ となっており、どの物質も指針値以下であった。8月25日の開放状態においては、すべての物質でVOC濃度の低減が見られ、その約3ヵ月後の11月9日の閉鎖状態においては、さらにVOC濃度の低減が見られた。夏季、秋季を通じて天然由来のセスキテルペン類である、 $\text{C}_{15}\text{H}_{24}$ の化学物質が

表 3-5 各測定日における居間で検出されたVOC濃度 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

測定日	8月23日		8月25日	11月9日	
部屋状況	閉鎖状態		開放状態	閉鎖状態	
測定場所	4号棟居間	5号棟居間	5号棟居間	4号棟居間	5号棟居間
ベンゼン	-	-	2.71	-	-
トルエン	233.85	183.05	21.11	19.88	20.61
エチルベンゼン	31.21	21.08	9.49	3.55	1.62
p, m-キシレン	73.97	58.35	21.37	13.87	8.45
スチレン	42.68	18.26	4.47	7.52	2.77
o-キシレン	19.37	10.44	-	2.78	1.17
$\alpha$ ピネン	22.78	10.59	0.86	-	2.43
1,2,4-トリメチルベンゼン	18.55	4.12	9.04	-	-
デカン	30.19	12.51	-	-	-
ウンデカン	109.67	140.47	36.71	-	6.15
ドデカン	87.95	119.82	4.41	-	-

※「-」は検出できなかった物質

検出された。セスキテルペンとは、テルペンに属する化合物のうち炭素数 15 のものをいい、基本炭化水素およびその誘導体を総称するもので、植物体に存在し、精油の主成分をなすものである。これは床などに使用されている杉材から発生したと考えられる。図 3-7 に秋季の 5 号棟居間におけるクロマトグラムを示す。保持時間 17.5 分~20 分のところにセスキテルペン類のピークがみられるが、セスキテルペン類濃度をトルエン等価濃度で表すと、 $300\mu\text{g}/\text{m}^3$  を超える高い濃度となる。なお、セスキテルペン類の定量化は、標準物質の入手が現在、困難なためできていない。セスキテルペン類物質の安全性、環境リスクを考慮するためには、定量化が重要となってくる。

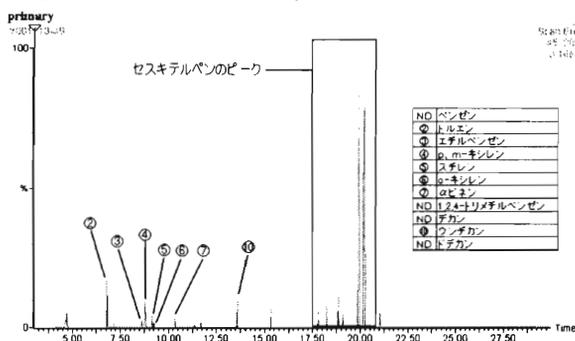


図 3-7 屋久島環境共生住宅 5 号棟居間の空気クロマトグラム (秋季測定)

#### 4. 木造住宅の室内空気環境実測

##### 4.1 研究の背景

3 章で述べた実測では、無垢の杉材を内装材に用いた環境共生住宅から、天然由来の VOC が多くの割合で検出されたことを報告した。天然由来であっても、これらの VOC は TVOC (総揮発性有機化合物) に含まれる物質であるため、天然由来の VOC の濃度が高い状態であっても、厚生労働省の提案した TVOC 濃度の指針値  $400\mu\text{g}/\text{m}^3$  を超える場合には、指針値の基準を満たさない空気環境といえる。そこで、木造住宅における VOC 濃度実測を行い、その VOC 濃度構成比

を検討することとした。

##### 4.2 実測概要

在来軸組構法の二階建住宅である A 邸、一階は RC 造のピロティであり二階・三階は在来軸組構法である B 邸、内装材に壁紙を用いず、無垢の杉材を用いた二階建住宅である C 邸を実測住宅として用いた。A 邸及び B 邸は、内装工事が終了して 5 日後の新築時に、C 邸は竣工後一ヶ月に測定を行った。測定住宅はすべて鹿児島市に建てられている。空気質実測時の各住宅の換気回数は、トレーサーガス濃度減衰法にて測定し、A 邸は 0.15 回/時、B 邸は 0.19 回/時、C 邸は 0.2 回/時であった。揮発性有機化合物 (VOC) は、固体捕集管 (テナックス TA) に測定箇所の空気を約 1 リットル、ポンプで 20 分吸引して、サンプリングした。また、各サンプリングを終えた固体捕集管は、研究室に持ち帰り、加熱脱着装置で加熱、コールドトラップし、GC/MS 分析装置にて分析を行った。測定住宅における実測時の温湿度を表 4-1 に示す。また、VOC 濃度の経時変化を考察するために、A 邸では一回目の実測 (2000 年 7 月) から 4 ヶ月後の 11 月に、B 邸では一回目の実測 (2001 年 3 月) から 3 ヶ月後の 6 月に、C 邸では一回目の実測 (2000 年 5 月) から 14 ヶ月後の 2001 年 7 月に再度 VOC 濃度測定を行った。二回目の測定時は入居後の測定である。

表 4-1 実測時の温湿度

	A 邸	B 邸	C 邸
構法	在来軸組	在来軸組+RC 造	在来軸組
測定箇所	一階居間	二階和室	一階和室
内装材	壁紙	壁紙	杉材
温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	31.1 (1 回目) 22.0 (2 回目)	21.4 (1 回目) 31.2 (2 回目)	23.3 (1 回目) 31.25 (2 回目)
相対湿度 (%)	72.7 (1 回目) 47.9 (2 回目)	36.2 (1 回目) 64.7 (2 回目)	63.0 (1 回目) 72.1 (2 回目)

##### 4.3 測定結果

表 4-2 に各測定住宅における VOC 濃度測定結果を示す。C 邸は壁紙を用いず、塗料も自然塗料を使用するようにし、

また月桃紙や珪藻土を用いる等、自然住宅を志向した住宅であるため、エチルベンゼン、メチルイソブチルケトンなどの塗料由来の VOC 濃度が低いことがわかる。なお、C 邸の二回目の濃度測定では、セスキテルペン類以外は、濃度が  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  以下であったため、表 4-2 には表示していない。

表 4-2 VOC 濃度測定結果 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

VOC	A邸 (1回目)	A邸 (2回目)	B邸 (1回目)	B邸 (2回目)	C邸 (1回目)
ブタノール	177.8	ND	ND	6.1	ND
MIK	73.5	ND	52.0	30.0	18.1
トルエン	2850.4	715.1	944.3	740.5	145.5
酢酸ブチル	124.2	15.9	ND	27.9	ND
エチルベンゼン	182.6	38.5	115.0	30.1	37.9
p,m-キシレン	75.5	18.7	54.6	12.6	45.8
スチレン	378.4	35.5	ND	4.0	225.5
o-キシレン	69.3	14.1	49.6	9.0	40.0
$\alpha$ -ピネン	2207.7	269.5	2329.0	20172.2	101.3
1,3,5-TMB	37.2	9.0	84.8	ND	20.0
1,2,4-TMB	66.7	25.9	223.5	29.4	69.2
P-ジクロロB	ND	10103.3	ND	ND	ND
1,2,3-TMB	68.5	ND	10.3	34.9	28.3
リモネン	ND	ND	53.5	41.9	31.7
ウンデカン	ND	ND	36.2	2.2	27.1
デカナル	ND	ND	42.9	5.7	1.5
TVOC	7884.0	21852.0	3370.2	21435.0	6850.2

MIK:メチルイソブチルケトン、 P-ジクロロB:P-ジクロロベンゼン

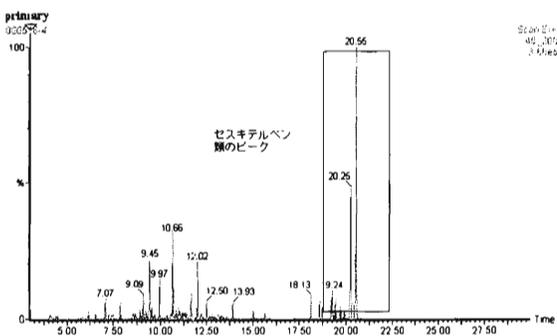


図 4-1 C 邸和室で採取した空気のカロマトグラフ

A 邸, B 邸では  $\alpha$ -ピネンの濃度が高いが、これは構造体である木材からの発生であると考えられる。A 邸, B 邸では天然由来の VOC である  $\alpha$ -ピネンだけで、厚生労働省の暫定目標値である TVOC 濃度  $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$  を上回ってしまうことになる。C 邸は一回目の測定では、A 邸・B 邸に比べ総じて VOC 濃度が低くなっているが TVOC 濃度は  $6000 \mu\text{g}/\text{m}^3$  を超えている。これは、標準物質が入手できないため、単体では定量できなかったセスキテルペン類の濃度が高いためであって、C 邸の一階和室では、TVOC 濃度の  $6850 \mu\text{g}/\text{m}^3$  のうち、 $2640 \mu\text{g}/\text{m}^3$  をトルエン等価のセスキテルペン類濃度が占めている。C 邸和室にて採取した空気のカロマトグラフを図 4-1 に示すが、この図からセスキテルペン類のピークが非常に大きいことがわかる。14 ヶ月後である二回目の C 邸で

の測定では、トルエン等価のセスキテルペン濃度は  $3476 \mu\text{g}/\text{m}^3$  であり、1 年を経過した後も多量のセスキテルペン類が発生していることがわかる。木材由来のテルペン類は住宅のライフサイクルの中でかなり長期間に渡って発生し続けるのではないかと推察される。

表 4-3 には定性を行ったセスキテルペン類の一覧を示す。セスキテルペン類は、杉材から発生される VOC の主成分であるため、杉材の使用面積が小さいと思われる A 邸, B 邸ではセスキテルペン類はあまり検出されなかった。A 邸, B 邸では TVOC 濃度のうち、 $\alpha$ -ピネンが占める割合が、A 邸では 28%, B 邸では 69% である。A 邸と B 邸は、同じ工務店によって建てられているため、内装は似通っているが、測定時期が大きく異なっている。A 邸は 7 月下旬の高温・多湿の時期に測定したため、総じて全ての VOC の濃度が高い傾向があるが、B 邸は 3 月下旬に測定したため、 $\alpha$ -ピネン以外は A 邸に比べ低濃度であるが、一方では、それが  $\alpha$ -ピネンの占める割合が高い原因の一つにもなっている。

表 4-3 セスキテルペン類の VOC

7-METHANOAZULENE
1H-3A,7-METHANOAZULENE, OCTAHYDRO-1,4,9,
ALPHA-FARNESENE
2-CYCLOHEXEN-1-ONE
TRICYCLO 4.1.0.02,4 HEPTANE
1,3,5-CYCLONONATRIENE, HEXAMETHYL
ALPHA-CUBEBENE
COPAENE
NAPHTHALENE
GERMACRENE D
1H-CYCLOPENTA 1,3 CYCLOPROPA 1,2 BENZENE

A 邸では一回目の測定 (夏季) に比べ、3 ヶ月後の二回目の測定 (秋季) で、特に塗料由来と思われる VOC の濃度が大きく減衰している。一方、二回目の実測では居住者が入居し、生活を始めていたため、防虫剤から発生したと考えられるパラジクロロベンゼンの濃度が高くなっている。 $\alpha$ -ピネンの濃度は二回目の測定時において大きく減衰しているが、これは  $\alpha$ -ピネン発生量の経時減衰に加え、温度下降が一因と考えられる。しかし、濃度は秋季においても  $260 \mu\text{g}/\text{m}^3$  と高い。B 邸では一回目の実測 (春季) に比べ、二回目の実測 (夏季) において塗料由来の VOC の濃度は減少しているが、 $\alpha$ -ピネンの濃度は急上昇している。 $\alpha$ -ピネンは発生量の経時減衰よりも温度影響の方が大きいのではないかと推察される。A 邸, B 邸どちらにおいても、竣工から時間が経つとともに、塗料由来の VOC は大きく減衰していく一方で、 $\alpha$ -ピネン濃度は時間が経過しても、TVOC 濃度において大きな比率を占めていることが特徴である。

表 4-3 に示したセスキテルペン類の VOC は、標準物質の入手が困難であり、定量化ができない。杉材を用いた住宅

では、前述したようにセスキテルペン類 VOC の発生が多いため、居住環境へのインパクトを算定するためには、定量化が重要な課題となる。一方、 $\alpha$ -ピネン、リモネンのテルペン類は、標準物質の入手が容易であり、定量化が可能である。木材から放たれる天然由来の VOC の居住環境へのインパクトを調査する第一段階としては、 $\alpha$ -ピネン、リモネンを取り扱うことが適切な手段と考えられる。

## 5. 天然由来の VOC が知覚空気質に及ぼす影響

### 5.1 研究の背景

木材の香りは一般的に、人に好まれ心地よさを与える。また、木から抽出した精油はアロマセラピーに使われるなど、心身へ様々な効果があるともいわれている。

新築木造住宅においては、化学物質の発生を低濃度に抑える材料を用いて建築されている木造住宅であっても、3章及び4章で報告したように、天然木から放出される天然由来の VOC が検出されることから TVOC 濃度は高濃度の値を示すという結果が得られている。これらテルペン類の VOC は、新建材や接着剤から発生し人体に悪影響を及ぼすことが確認されている VOC とは異なり、人の知覚空気質や快適性に与える影響については定かではない。そこで、生活空間内での木材の芳香及びその成分が居住者に与える影響を検討することを目的とし、被験者実験を行った。

### 5.2 実験方法

実験は2001年8月1日から6日に鹿児島大学構内の実験住宅において行った。図5-1に実験住宅平面図を示す。室2、3（各22.53m<sup>3</sup>）を被験者が在室する実験空間として用いた。実験条件を表1に示す。空気条件として異なる2条件を設定し、熱、光、音環境は一定の条件で制御した。

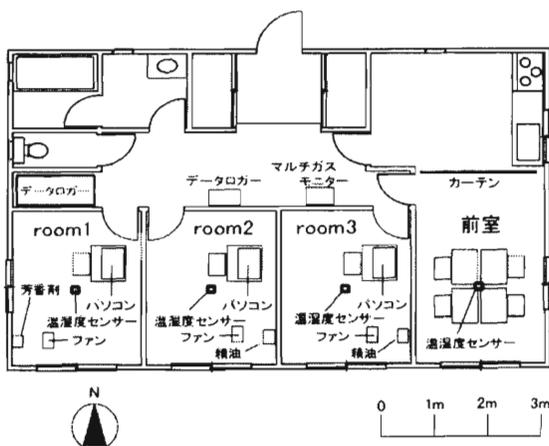


図5-1 実験住宅平面図

木材の香りとしては、パインから抽出した精油を芳香器に入れて設置した。表5-1に示すように異なる濃度を設定し、室内の空気は扇風機を用いて攪拌状態にした。被験者として健康な女性15名（19～22歳）が採用され、正当な

報酬が支払われた。実験に参加する条件として被験者は化粧品、香水などの臭いのするものを身につけることを禁じられていた。

表5-1 実験条件

条件1(室2)	精油(パイン)0.22g
条件2(室3)	精油(パイン)0.11g

実験スケジュールを図5-2に示す。被験者は各室に一名ずつ50分間滞在した。精油は被験者入室前に各室に設置し、被験者退室後にはすぐに撤去し室の開口部を全て開放して換気を行った。被験者は各室に入室した直後にアンケートの申告を行った。その後、椅座安静状態を保ち、スケジュールに示す指示された時点で申告を行った。アンケート項目を表5-2に示す。

1日の実験の流れ



実験スケジュール(詳細)



図5-2 実験手順

表5-2 アンケート項目

質問1	臭気強度	
質問2	温冷感	
質問3	空気の許容度	
質問4	刺激について	
	1 目の刺激	2 鼻の刺激
	3 喉の刺激	
質問5	室内環境について	
	1 室内の気流	2 室内の乾湿度
	3 室内の明暗	3 室内の静寂度
	5 空気の新鮮度	
質問6	室内からうける刺激について	
	1 鼻つまり感	2 鼻水感
	3 鼻の乾燥感	4 鼻のむずむずする感覚
	5 鼻のツーンとする感覚	6 喉の乾燥感
	7 喉の痛み	8 唇の乾燥感
	9 目の乾燥感	10 目の潤い
	11 目のチカチカする感覚	12 目のかゆみ
	13 皮膚の刺激感	14 皮膚の乾燥感
	15 頭痛感	16 発汗度
	17 吐き気感	
質問7	室内の快適性について	
	1 温度の許容度	2 湿度の許容度
	3 においの許容度	4 圧迫感
	5 安心感	6 総合的な快適性
質問8	被験者の状態について	
	1 積極性	2 集中力
	3 疲労度	4 覚醒度
	5 体調	6 精神的な気分
	7 身体的な気分	8 落ち込み度
	9 眼気	10 室外の音
	11 室内の音	

### 5.3 実験結果及び考察

実験中の気温は全条件を通して 27~27.5℃, 相対湿度は約 60%に保たれていた。また, 被験者の申告は全ての実験条件において, 温冷感において中立が保たれていた。表 5-3 に GC/MS 法により同定・定量化した VOCs 濃度の平均値を示す。パインは  $\alpha$ -ピネン及びリモネンを多く含んでいることから, この2つの VOC 濃度に関して, 実験期間中の室内空気における濃度の平均値を比較した。室 2 においては,  $\alpha$ -ピネン, リモネン共に濃度が高く, 室 3 においてはその約 1/3~1/4 程度である。

表 5-3 GC/MS 法によるテルペン濃度 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

	室2	室3
$\alpha$ -ピネン	437	130
リモネン	10657	2533

図 5-3 に各室における被験者全員の平均値による臭気強度の経時変化を示す。入室時の申告では室 2 の臭気強度が有意に高く, その後の申告においても高い値を示している。室 2 の経時減衰は大きいことから在室時間の経過と共に両室の申告の差が小さくなる傾向がみられる。図 5-4 に空気の許容度を同様に示しているが, 入室時の許容度においては, 室 2 の許容度が若干低く, その後も申告値は常に室 3 より低い。入室時の許容度の申告値を用いて, 各室における不快者率を算出したところ, 不快者率は室 3 では 7%であるのに対し, 室 2 では 33%であった。

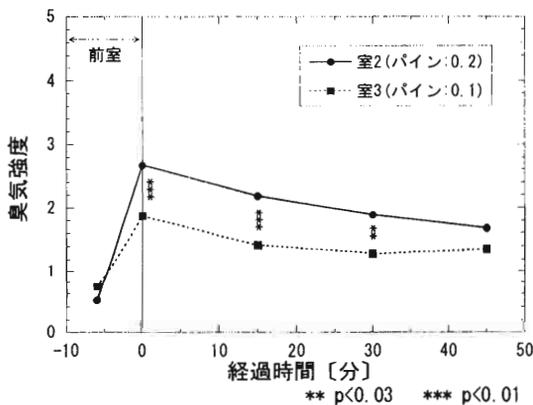


図 5-3 各室における臭気強度の経時変化 (平均値)

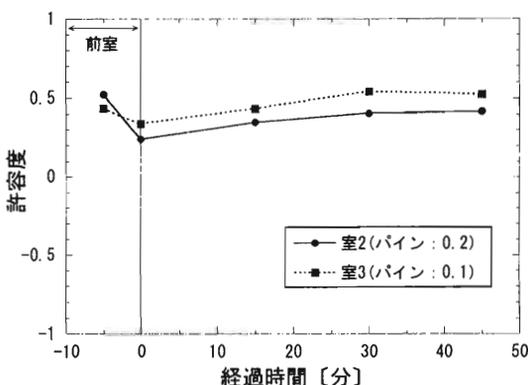


図 5-4 各室における許容度の経時変化 (平均値)

図 5-5 に“鼻がツーンとする感覚”, 図 5-6 に“鼻のむずむずする感覚”, における被験者全員の平均値による経時変化を示す。いずれの場合も, 室 2 の申告値は室 3 より高く, 特に入室時において有意に高い。

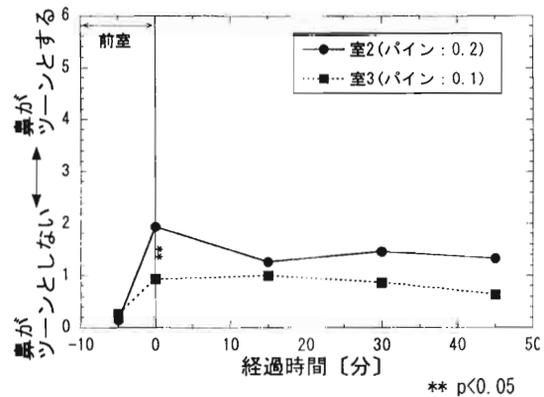


図 5-5 各室における“鼻がツーンとする感覚”の経時変化 (平均値)

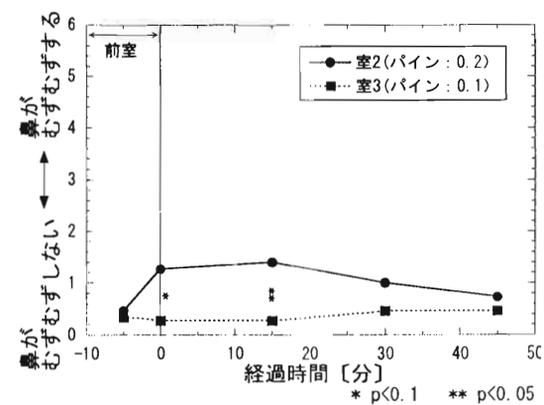


図 5-6 各室における“鼻のむずむずする感覚”の経時変化 (平均値)

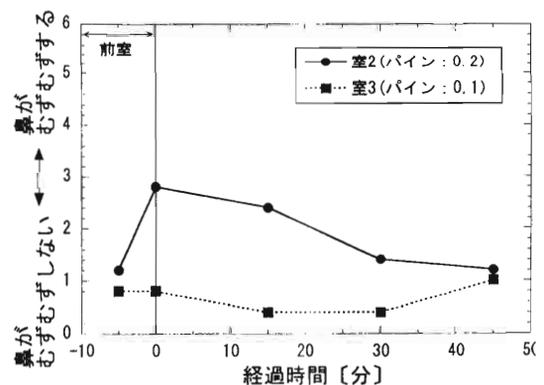


図 5-7 各室における“鼻のむずむずする感覚”の経時変化 (室 2 入室時に空気質を受け入れられない側に申告をした被験者の平均値)

室 2 入室時において空気質を許容できないと申告をした 33%の被験者を母集団とした場合の, “鼻のむずむずする感覚”の平均値を図 5-7 に, 許容できるという申告をした

67%の被験者を母集団とした場合の平均値を図5-8に示す。

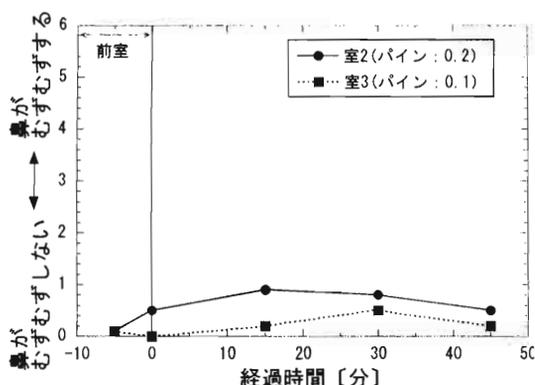


図5-8 各室における“鼻のむずむずする感覚”の経時変化(室2入室時に空気質を受け入れられる側に申告をした被験者の平均値)

室2入室時に空気質を受け入れられないと申告をした被験者は、“鼻のむずむずする感覚”を、室2においてより強く感じている。また、空気質を受け入れられると申告をした被験者の申告値と比較しても高い。よってこれらの感覚に不快感を感じることが空気質を許容できないと感じる一要因であると考えられる。

テルペン類のVOCについては、そのリスク評価が十分にされていない。最も多く計測されている $\alpha$ -ピネンであっても、その健康性・快適性上の基準値や指針値はみられない。例外的に、Tancredeらは、 $\alpha$ -ピネンの動物に対する発癌可能性値(carcinogenic potency)を $3.6E-4$  ( $mg/kg\text{-day}^{-1}$ )と見積もっている<sup>6)</sup>。これは動物実験で求めた値ではなく、あくまで間接的に推定した値である。これに対し、生物検定(bioassay)からTancredeらが求めたベンゼンの発癌可能性値は $1.0E^{-3}$ 、トルエンは $9.0E^{-4}$  ( $mg/kg\text{-day}^{-1}$ )である。ベンゼンやトルエンに比べ、 $\alpha$ -ピネンのリスクは低い、健康に悪影響を及ぼすのではないかという疑問は彼らによって指摘されている。

## 6. まとめ

- 1) LCA デザインツールソフトウェアを用いて、木造住宅を評価した。木材については、材料レベルでの評価をIdeMATというソフトウェアを用いて、木造住宅についてはAthenaというソフトウェアを用いて調査した。ソフトウェアを用いたマクロな評価方法では、木材・木造住宅の環境負荷の少なさが算定された。
- 2) 地球環境負荷の低減、健康性の指向などを考慮して計画・建設された屋久島環境共生住宅(木造)において、空気環境実測を行った。自然通風によって多くの換気量が得られることが確認できた。また、内装材に用いた無垢の杉板から発生すると考えられるセスキテルペン類のVOCが室内において多く検出された。

- 3) 鹿児島市内の新築の木造住宅三軒において、室内空気質実測を行った。内装材に壁紙を使わない住宅では、塗料由来のVOC濃度が低かったが、内装材として用いた杉材由来と考えられるセスキテルペン類のVOC濃度が高く、TVOC濃度の39%を占めていた。また、新築からほぼ三ヶ月後に二回目の測定を行ったところ、塗料由来のVOCの濃度の経時減衰は大きかったが、テルペン類である $\alpha$ -ピネンの濃度減衰は、特に温度が上昇した場合はみられなかった。また、セスキテルペン類は竣工後1年を経過した住宅でも多量に検出され、これらテルペン類VOCが、住宅のライフサイクルにおいて長期間発生する可能性が推察された。
- 4) テルペン類のVOCを実験住宅において人工的に発生させ、知覚空気質への影響を調査するための被験者実験を行った。テルペン濃度を高く設定した室において被験者は、高い臭気強度、高い不快者率を申告した。特に、鼻のむずむず感に影響がみられ、これが不快感の主因と考えられる。テルペン類VOCの居住者への健康性・快適性への影響についてはさらなる研究が必要である。

## <参考文献>

- 1) 環境省ホームページ: <http://www.env.go.jp/chemi/prtr>
- 2) 足立芳寛 編著: エントロピーアセスメント入門, オーム社, 1998
- 3) Delft University of Technology: IdeMAT, Design for Sustainable Program, Professional Edition, 2000
- 4) ATHENA™ Sustainable Materials Institute: ATHENA™ BETA 1.2 LIMITED RELEASE INSTALLATION INSTRUCTIONS AND USERS' MANUAL, 2000
- 5) Canadian Wood Council, Life Cycle Analysis for Residential Buildings, Wood the Renewable Resource No.5, 1999
- 6) M.Tancrede et al., The Carcinogenic Risk of Some Organic Vapors Indoors: A Theoretical Survey, Atmospheric Environment, Vol.21, No.10, pp.2187-2205, 1987

## <研究協力者>

合原 妙美	鹿児島県立短期大学非常勤講師
尾山 秀平	鹿児島大学大学院生
川田原寛信	鹿児島大学学生(当時)
清水 照彦	鹿児島大学学生(当時)
池田 大	鹿児島大学学生
柴原 洋人	鹿児島大学学生
津曲 徹也	鹿児島大学学生
森 唯郎	鹿児島大学学生