

内装材としての土壁のライフサイクル評価

現代版「土壁の家」づくりのための基礎的研究

5. 建築計画 4. 構法計画

土壁 ビニル壁紙 ライフサイクル

CO₂排出量 エネルギー消費量

正会員 ○ 竹中 徹^{*1} 正会員 石川 恒夫^{*2}
正会員 三田村 輝章^{*3} 非会員 大井 明弘^{*4}

1. はじめに

近年、建物に使用される内装材の選択には、施工性や価格のみが重要視され、居住性や建材そのものの環境負荷は考慮されていないのが実情である。それゆえそういった工業的に生産された建材を使用することで、住まいづくり全体での環境負荷が自然素材に由来する建材を用いた場合のそれよりも大きくなってしまいう傾向がある。そのため近頃は土や木材といった建材の利用に関心が集まっている。その中でも土を建材として用いた場合、製造段階で合成物質を一切用いないことから CO₂ 排出量や使用エネルギー量の削減に効果があると考えられている。

そこで本研究では、内装材のみ異なる二つの実験棟(土壁棟とビニル壁紙棟)を対象に、建材の生産から運送、施工までのライフサイクル分析を行う¹⁾。それにより土壁の性能を多角的かつ定量的に把握し、現代的な活用可能性を明らかにすることを目的としている²⁾。材料の寿命、維持だけを考えるのであれば、建築材料学の研究であるが、ライフサイクルの分析、そしてその知識は建築計画研究でこそ必要であると考えた。

2. 実験棟の概要

研究対象とする 2 つの実験棟は、長野県上田市の(有)デフ本社敷地内に建設されている。東西対称に 1 つの屋根で連結された形状をとっており、方位による二棟の環境差が少なく抑えられている(図 1)。また戸建住宅に適用できるよう間口一間半、奥行二間の 6 畳サイズの居室を半間の外部通路で分けることで居室を 4 面の壁で構成している。コンクリート基礎から木造骨組、断熱材の充填、日射を得るためのサッシなどは、小さいといえども実際の戸建住宅と同様の仕様として、内部の壁仕上げだけをごく一般的に普及している内装(ボード下地³⁾にビニル壁紙)と厚さ 30mm の土壁に設えている(写真 1)。

2-1. 調査データの入手方法とシステム領域

建材を生産するための材料採取から破棄・リサイクルまでのプロセス全体での環境負荷(CO₂ 排出量とエネルギー消費量)を定量的に把握する為、算出には主に産業環境管理協会の公開しているライフサイクルアセスメント実

施のためのソフトウェア「MiLCA(みるか)」⁴⁾を使用し、積み上げ方式にて算出した⁵⁾。尚、入手困難なプロセスのデータにおいては可能な限りメーカーへのヒアリング等より収集を試みているが、それでも得られなかった場合に過去に発表された報告書や論文のうち本事例の条件にそごうデータを用いた。また算出には以下のようなシステム領域を設定する(図 2)。算出はこのように生産領域、運送領域、施工領域の各プロセスにおける算出結果をそれぞれ比較する。最終的に全プロセスにおける総合的な環境負荷を分析・比較し、土壁の現代的な活用可能性を明らかにする。



写真 1 左：実験棟外観 中：土壁棟内観 右：ビニル壁紙棟内観

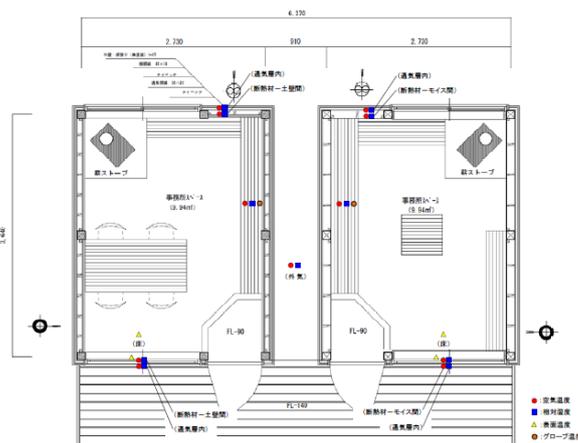


図 1 実験棟平面図

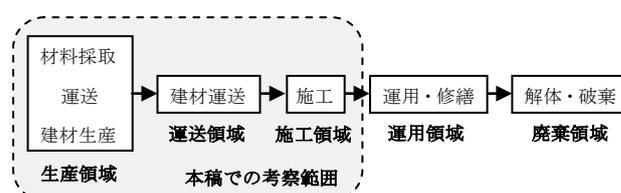


図 2 システム境界

3. 分析結果と考察

3-1. 生産領域

(1) 分析方法および境界設定

生産領域の算出範囲は建材を生産する為の素材の採取から工場への運送、製造までとし、環境負荷の算出には主に産業環境管理協会の公開しているライフサイクルアセスメント実施のためのソフトウェア「MiLCA」を使用した。尚、ボード下地の環境負荷は公開データが存在せず、一般的な石膏ボードにおける環境負荷を代用した。

(2) 生産領域における環境負荷の比較分析

図3に生産領域の環境負荷を示す。各棟の環境負荷を比較すると、ビニル壁紙棟のCO₂排出量は土壁棟に比べ約22倍、エネルギー使用量に至っては約28倍とその差が顕著に表れた。この理由は土壁棟にのみ用いられる藁を混ぜた粘土質の土やスギの木小舞は自前の加工場での手工業が主であるのに対し、ビニル壁紙棟にのみ用いられるビニル壁紙の製造過程において合成物質を多量に用い、その物質を生成する過程でも多くのエネルギーを消費するためであると考えられる。またボード下地に用いた「MOISS(モイス)」は天然鉱物に由来する物質を用いて生産されているため、生産領域における環境負荷はビニル壁紙と比べるとさほど大きくはないと考えられる。

3-2. 運送領域

(1) 分析方法および境界設定

図4に運送領域の環境負荷を示す。運送領域の算出範囲は建材の生産・加工を終えた拠点(サッシメーカーや建材メーカーの提携先工場など)から建設現場までとし、環境負荷は燃料法⁶⁾にて算出した⁷⁾。一般的には部材を輸送する時、復路でも何かしらの輸送を行うことが多いが、全ての運送状況を把握することは現実的ではない。そのため復路は積載率0と仮定し、それに伴う輸送車両の燃費の違いのみ算出に考慮している。また算出に当たって現場納入の上流ステップ(部材製造工場から現場一つ手前の代理店まで)では輸送車両それぞれ平均積載量で運送しているものと仮定し、本実験棟における環境負荷は使用部材の重量当たりの燃料消費量にて算出している⁸⁾。

(2) 運送領域における環境負荷の比較分析

運送領域におけるビニル壁紙棟と、土壁棟に用いた建材の違いは、土壁棟には長野県長野市から運送した0.75m³の藁入り粘土分の環境負荷が加算されること、そしてビニル壁紙棟においてはボード下地とビニルクロス⁹⁾の運送による環境負荷が加算されることである。それぞれ環境負荷を比較すると、土壁棟のCO₂排出量はビニル壁紙棟に比べ約53%、エネルギー使用量にいたっては約52%に抑えられていることが分かった。今回の事例では敷地から道のり44.8km離れた商会から土を取り寄せているため、ビニル壁紙棟における運送領域よりも環境負荷を抑えることができています。

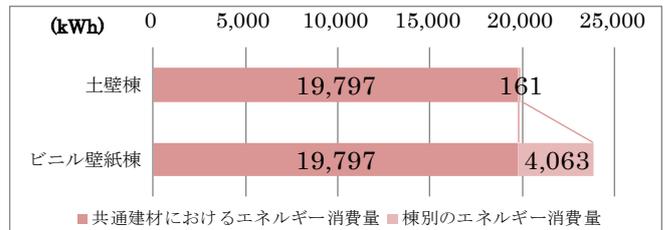
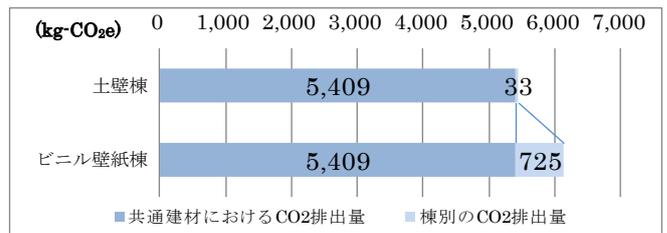


図3 生産領域における環境負荷の比較
上:CO₂排出量 下:エネルギー消費量

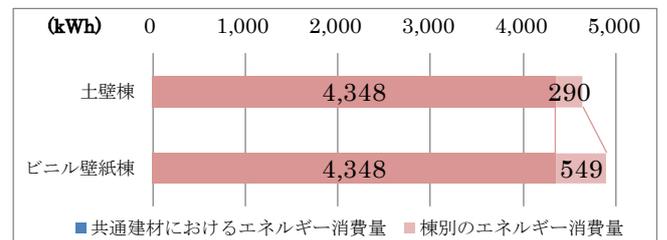
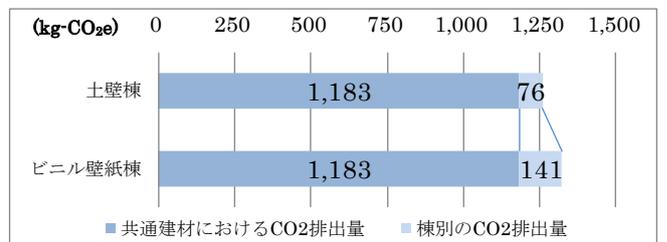


図4 運送領域における環境負荷の比較
上:CO₂排出量 下:エネルギー消費量

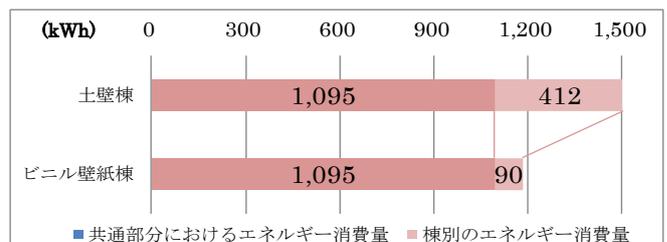
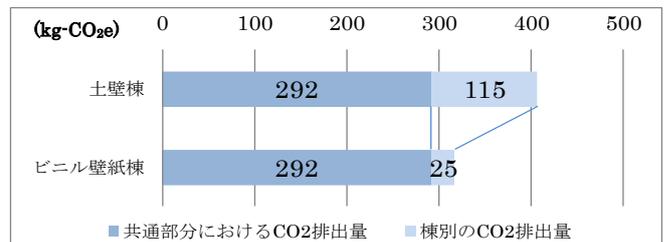


図5 施工領域における環境負荷の比較
上:CO₂排出量 下:エネルギー消費量

(3) 運送距離と環境負荷の関係性

当然のことながら運送距離が長ければ長いほど環境負荷は大きくなる。土壁に用いる土はある程度の粘度が必要である。建設残土を使えば、運送距離は0になり理想的である。しかし土壁を施工するのに適した土の採取地が、敷地および敷地の近隣に必ずしも存在するとは限らず、そのような土を安定的に供給できる土場が整っていないのが実情である。またビニル壁紙棟特有の建材を運送する際に消費した軽油量は合計で52.4Lであった。ここで、これを元に土の最大運送距離を求める。同じ土の量を今回と同様に2回に分けて運送する場合には約88km、一度に全ての土を運送する場合だと約131kmとなる。つまりこの範囲内であれば土壁棟における運送領域の環境負荷はビニル壁紙棟のそれを超えないという目安が得られた(図6)。採取地の距離とそれによる環境負荷のバランスを取ることが土壁を使用することの課題である。

3-3. 施工領域

(1) 分析方法および境界設定

図5に施工領域の環境負荷を示した。施工領域の算出範囲は仮設工事、地業、基礎、主体工事、仕上げ、副産物処理までとする。環境負荷の算出には作業員の移動やレンタル重機の移動、重機使用に伴う燃料消費量を算出し、運送領域と同じ燃費法を用いる。さらに人工当たりの電力消費量原単位⁹⁾を用いてヒアリングにより得た各工事における工期、人工数、出面のデータより作業に由来する環境負荷を算出する。

(2) 施工領域における環境負荷の比較分析

施工領域における各棟の環境負荷の大きな違いは作業性の違いによる人工の違いと左官作業の有無である。ビニル壁紙棟に用いられたボード下地はビス止めで安易に施工でき、またビニル壁紙も同様である。ゆえに現場での人工が1日分(2人工)抑えられた。結果としてビニル壁紙棟のCO₂排出量、エネルギー使用量は土壁棟に比べ約22%に抑えられている。

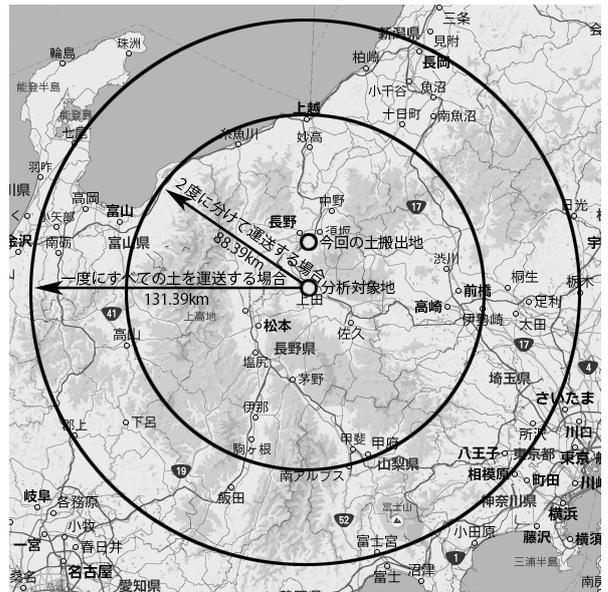


図6 ビニル壁紙棟の運送領域における環境負荷に対する土壁棟に使用する土の最大運送距離¹⁰⁾

表1 各領域における環境負荷算出の詳細

区分	項目	資材量 (m ³)	比重 (kg/m ³)	重量(kg)	排出CO ₂ 原単位 [kg-CO ₂ /kg]	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ e)	投入エネルギー原単位 (kWh/kg)	製品投入エネルギー (kWh)	備考							
										CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ e/m ³)	投入エネルギー原単位 (kWh/m ³)	製品投入エネルギー (kWh/m ²)				
生産	土	葉入り粘土	0.75	1200	902.16	0.01	9.02	0.051	46.01	耐火粘土のLCIを代用。						
	板類	スギ木小舞	0.46	380	174.80	52.4 [kg-CO ₂ e/m ³]	24.10	249.26 (kWh/m ³)	114.66	比重は木材博物館HPの木材の比重リストより引用。 http://www.wood-museum.net/						
	内装材	モイス	0.17	750	126.75	4.12 [kg-CO ₂ e/m ³]	0.70	3.61	457.57	製造エネルギーがモイスと石膏ボードより石膏ボードにて算出。(moissHPより) 比重8.03(kg/m ²)						
		ビニールクロス	0.15	1500	225.60	3.21	724.18	17.66	3984.10	ポリ塩化ビニル(PVC)のLCIを代用。						
共通部分						5409.31		19796.90								
計						6167.31		24399.23								
区分	項目	資材量 (m ³)	比重 (kg/m ³)	重量(kg)	出発拠点	到着拠点	移動回数	総移動距離 (km)	輸送手段	積載率(%) 計算値[適用値]*重量比	車両燃費(km/l) 往路[復路]	燃料使用量(L) 重量比換算	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ e)	運搬エネルギー (kWh)	備考	
運送	土	葉入り粘土	0.75	1200.00	902.16	長野県長野市(密会)	長野県上田市(現場)	2	179.2	2t	23[25]	6.2[7.4]	26.56	72.77	278.08	
	木摺	燐乾乾燥スギ	0.23	380.00	87.4	長野県諏訪郡(営業所)	長野県上田市(現場)	2	255.6	2t	66[75]	5.1[7.4]	1.11	3.04	11.62	下記以外の部位、気乾比重
	内装材	モイス	0.17	750.00	126.75	茨城県筑西市(工場)	山梨県甲府市(倉庫)	1	409	10t	[62]*0.01	3.0[4.2]	116.87*0.01	3.2	12.23	見かけ密度 0.6以上0.9未満
						山梨県甲府市(倉庫)	長野県上田市(現場)	1	259.6	2t	6[10]	7.4[7.4]	35.08	96.12	367.29	
		ビニールクロス	0.15	1500.00	225.60	茨城県常総市(工場)	東京都品川区(物流センター)	1	156.4	10t	[62]*0.02	3.0[4.2]	122.42*0.02	2.45	25.63	確定不能(物流センターに一番近い茨城工場と仮定)
						東京都品川区(物流センター)	長野県長野市(営業所)	1	513	10t	[62]*0.02	3.0[4.2]	116.66*0.02	8.04	24.43	
					長野県長野市(営業所)	長野県上田市(現場)	1	84.2	2t	11[10]	7.4[7.4]	11.38	31.18	119.15		
共通部分													1182.96	4347.97		
計													1399.76	5186.4		
区分	項目	工期 (日)	出面 (人)	必要人工	出発拠点	到着拠点	移動回数	総移動距離 (km) 人工換算	輸送手段	積載率(%) 計算値[適用値]*重量比	車両燃費(km/L) 往路[復路]	燃料使用量(L)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ e)	エネルギー使用量 (kWh)	備考	
施工	土壁棟	主体工事	2	2	4	長野県松本市(事務所)	長野県上田市(現場)	2	129.2	ライトバン	46[50]	7.3	17.7	47.08	170.1	2012年11月12日~19日(工事日数2日)
		左官	5	2	10	長野県上田市(自宅)	長野県上田市(現場)	5	225	軽トラ	56[50]	9.3	24.19	64.35	232.47	2012年12月20日~2013年1月31日(工事日数5日)
	ビニル壁紙棟	主体工事	1	2	2	長野県松本市(事務所)	長野県上田市(現場)	1	64.8	ライトバン	46[50]	7.3	8.85	23.54	85.05	2012年11月12日~19日(工事日数1日)
共通部分													291.92	1094.89		
計													426.89	1582.51		

4. まとめ

(1) 3領域における環境負荷の比較分析

図7に今まで考察してきた生産、運送、施工の3つの領域における環境負荷の合計を比較した。土壁棟のCO₂排出量はビニル壁紙棟に比べ約21%、エネルギー使用量は約17%にまで抑えられていることが分かった。最も差の大きい領域としては生産領域が挙げられ、生産から施工までのライフサイクル分析において大きな割合を占めることが明らかとなった。

(2) 土壁活用の展望と課題

特筆すべき点として、土壁棟の左官工事には環境負荷に反映されない「乾き」の時間がかけられているということが挙げられる。一般的に土壁棟の施工は荒壁塗り2回、中塗り2回であり、季節にもよるがそれぞれ1か月ほど乾燥を待つ期間を設ける。結果として左官作業にかかる時間、ひいては全体の工期は長くなってしまいが、圧倒的に環境負荷を抑えられることがこの分析で明らかとなった。更に破棄する段階に至って土に石灰あるいはなんらかの合成物質を混入していない限り、その場に土を戻すことも可能であり、新たな土壁に再利用できるのである。つまり、循環する資材として破棄に由来する環境負荷を大きく抑えられる可能性を秘めているのである。

土壁は元々古い日本の文化の一つであったが、今は見た目が安価な、施工の容易なビニル壁紙が内装材の主流となり、今ではそれに伴い土そのものを扱う業者も減ってしまった。そのためにせつかく製造に由来する環境負荷を抑えられても、土の長距離運送によって土壁の持つメリットを損なってしまっているのが実情である。

(3) 現代版土壁の施策

本来、土壁の施工は両面塗りが一般的である(計荒壁塗り2回、中塗り2回)。それゆえ土壁の乾燥に長い時間を必要とし、工期の長期化が避けられなかった。本研究で取り上げた上田実験棟の土壁は、内側の面だけを塗り上げ、外側には断熱材や外装材などの工事を同時に進められた。これにより本来かかるはずの人工と乾燥時間を半分に抑えることができた。

また上田実験棟のように内側の土塗壁厚30mm以上であれば都市部における防火構造の認定を受けることができるため、断熱材や外装材の自由度が高くなる。当然従来通り両面塗りで土壁を施工すれば、強度も防火性能も向上させることができる。必要人工や乾燥時間が倍になることでの環境負荷上昇や工期延長を鑑みると、片面塗りによっても調湿効果や蓄熱効果(現在検証中)が見込めるのであれば、この方向性を推し進めることは有効であろう。施工領域において土壁棟はビニル壁紙棟の約2.2倍の費用がかかっているが、この数値は必ずしも居住性や機能、環境負荷を指し示すものではないことがわかる。

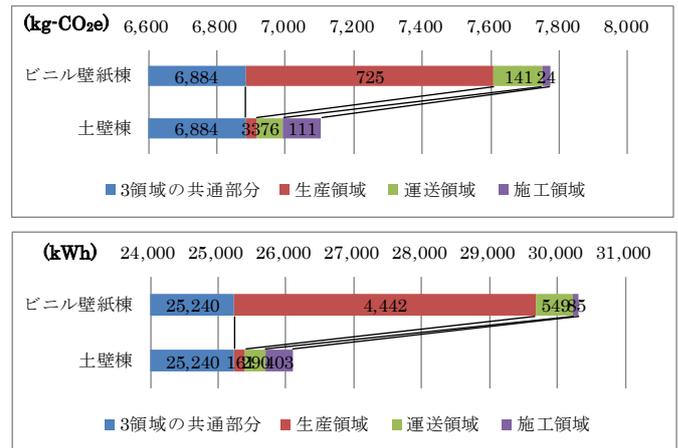


図7 3つの領域における環境負荷の比較
上:CO₂排出量 下:エネルギー排出量

参考文献及び註

- 1) 本研究は平成24年度前橋市公募型共同研究事業に基づき、(有)デフとの共同研究の一部である。
- 2) 研究対象である本実験棟それぞれの調湿作用や蓄熱性能等の室内環境の測定と分析は、既に行われ、土壁の優位性が証明されつつある。三田村輝章他『土壁建築の環境性能に関する研究－「現代版土壁の家」実験棟における初年度の実測調査－』第37回人間－生活環境系シンポジウム報告書 pp.235-238, 2013年12月
- 3) MOISS(モイス):天然鉱物であるパーミキュライトを主成分とした成形版(三菱マテリアル建材㈱)。製造エネルギーを石膏ボードより抑え、有害物質を含まず、成分を全て土に還すことができる点に特徴がある(肥料認定済)。今回ビニル壁紙棟のボード下地に用いた。
- 4) MiLCA(みるか):産業環境管理協会の公開しているLCA実施を支援するためのシステム。カーボンフットプリントに基づいた3000以上の製品のプロセスデータを搭載し、単一の製品製造における環境負荷を川上側まで遡及積算できる。
- 5) 積み上げ方式:製品のライフサイクルにおいて、分析対象として焦点を当てた範囲に含まれるプロセスを抽出し、プロセスごとに投入する資源・エネルギー量、ならびに排出する環境負荷物質量について調査データを収集しそれらを合計して、環境負荷の各項目を算出する。
- 6) 燃料法:経済産業省・国土交通省『物流分野のCO₂排出量に関する算出方法ガイドライン』より燃料消費量の直接把握が難しいが精度を重視する場合に利用される算出方法。運送車両ごとに計測した燃費データと運送距離データを用いて環境負荷を算出する。
- 7)道のり算出ソフト『NAVITIME』を用いて、工場と現場との最短ルートを送送距離として設定した。
- 8) 産業環境管理協会『カーボンフットプリント制度試行事業成果(CO₂換算量共通原単位データベース ver.4)』より『JP525007_道路貨物運送』における輸送車両の車種別平均積載量とそれに伴う車両燃費、CO₂排出量原単位を引用した。
- 9) 楊詩弘他『戸建住宅の生産プロセスにおける使用エネルギー評価方法に関する基礎的研究』日本建築学会計画系論文集第585号141-148(2004)における『使用エネルギー評価方法一覧』より引用。
- 10) Google Maps APIより筆者加筆。

謝辞

本研究を進めるにあたり、資料提供やヒアリング調査を(有)デフ近藤様に協力していただきました。ここに深く感謝申し上げます。

- *1 前橋工科大学大学院工学研究科建築学専攻博士前期課程
- *2 前橋工科大学大学院工学研究科建築学専攻教授・工博
- *3 前橋工科大学大学院工学研究科建築学専攻准教授・博(工)
- *4 アトリエ DEF 代表取締役