

断熱改修と床暖房による伝統民家の温熱環境改善効果と
暖冷房負荷の数値計算SIMULATION OF ENVIRONMENTAL PERFORMANCE AND HEATING LOAD OF A
TRADITIONAL TIMBER HOUSE BY HEAT INSULATION AND FLOOR HEATING

吉浦温雅*, 中園真人**, 小金井真***, 水沼信****, 志賀均*****

Atsumasa YOSHIURA, Mahito NAKAZONO, Makoto KOGANEI,
Makoto MIZUNUMA and Hitoshi SHIGA

The renovation technique which uses *Taiko-shoji* and wooden pair glass sash for a window, filling an insulation material outside the mud wall layer can realize an improvement of indoor thermal environment of a traditional timber house at low installation cost. Combined use of a floor heating and an air-conditioner forms comfortable environment at low energy after the start of heating. In this paper, the simulations of the indoor thermal environment with these techniques were performed for the existing traditional timber house. In addition, annual heating and cooling loads were calculated and the results were compared with those of the traditional timber house for various insulation and heating conditions.

Keywords: Traditional Timber House, Renovation, Insulation Performance, Floor Heating, Simulation

伝統民家, 改修, 断熱性能, 床暖房, 数値計算

1. 序論

伝統民家の改修においては、冬季の室内温熱環境の改善と暖房エネルギーの削減が主要な課題となるが、床・天井・外壁に断熱材を充填した改修事例では、改修後も上下温度差が大きく改修手法再検討の必要性が指摘されている¹⁾。また高性能断熱材を用いた外壁・屋根断熱、断熱気密プラスチックサッシと複層ガラスによる開口部断熱、地盤の防湿・断熱措置が施された伝統民家の断熱気密性能と暖房エネルギー削減効果の報告や²⁾、外壁全体を断熱材・気密シートで覆い、現代住宅と同等の温熱環境を実現した改修事例の報告が行われているが³⁾、このような民家全体に及ぶ大規模改修は相当の費用を要するため実施例は少ない。伝統民家の改修費が増大する要因として、床下・天井裏の断熱に加え、木枠と単板ガラスによる建具が多用されかつ面積の広い開口部の建具改修と、施工手間を要す土壁の断熱改修の必要性が指摘されるが、施工手間やコストを考慮した開口部と壁の改修仕様に関する提案研究は少ない。

関連して、筆者らはこれまでに太鼓障子と木製複層ガラスサッシによる開口部断熱改修仕様を提案し、室内実験と実験住宅の計測によりその性能を確認した⁴⁾。土壁断熱に関しては、「ちり」部分を利用した充填断熱工法を考案し実験によりその性能を確認した^{5)~6)}。また縁側の冬季日射取得による室温上昇(以下、温室効果と称す)に着目し、実測と数値計算により温室効果の存在を示した⁷⁾。これより、冬季の日射取得が見込まれる南面縁側を断熱化し、温度上昇した縁側空気を建具開放により隣接居室へ流入させ、暖房エネルギーを削減する手法も検討に値すると考えられる。

一方暖房方式に関しては、天井が高く床座の起居様式が基本の伝

統民家の場合、床暖房を採用すれば室内温度分布を均一に保ち、人体と床面との熱の授受を主に放射により行うため、床面接触効果⁸⁾により温風暖房と比較し床座時に高い快適性を得ることが可能である。しかし床暖房は暖房開始時の温度上昇に時間を要するため、エアコンと併用すれば短時間に均一な室内温度分布と十分な室温を確保することが可能と考えられ、筆者らは床暖房とエアコンが敷設された伝統民家の実測によりその効果を示した⁹⁾。

ただし、これらの断熱方法に関する技術的検討は民家の部位別に個別に取り組んだもので、暖房に関しても1室のみを対象としたものである。従って上記の開口部断熱工法、土壁断熱工法(ちり部分充填断熱)、南面縁側断熱工法とエアコン併用床暖房システムを適用した民家改修を計画・設計する上では、住宅1棟全体の断熱性能の確認が必要であり、また伝統民家の改修に望まれる居室と非居室間の室温の差異解消や床座時の室内の快適性についても、断熱・暖房方式の違いによる比較検討が求められる。さらに熱環境計画の観点からは、断熱・暖冷房の省エネルギー性と年間暖冷房負荷の削減効果に関しても、定量的な検討が必要である。これらの検討をふまえその効果が確認されれば、伝統民家の断熱改修及び暖冷房設備設計の指針を示すことが可能となると同時に、その実用性を定量的に検証することが出来るものと考えられる。

そこで本論では、山口県に実在する伝統民家1棟を対象に、(1)太鼓障子と木製複層ガラスサッシを用いた開口部断熱仕様、(2)土壁「ちり」部分の充填断熱工法、(3)冬季縁側の温室効果を利用した暖房エネルギー削減手法、(4)エアコンと床暖房を併用した暖房手法を用いた場合の温熱環境の数値計算を行い、室内温熱環境改善効果と年間

* 山口大学大学院理工学研究科 博士後期課程・工学

** 山口大学大学院理工学研究科 教授・工博

*** 山口大学大学院理工学研究科 准教授・博士(工学)

**** 山口県産業技術センター
グループリーダー・博士(工学)

***** (株)ジャスト東海 代表取締役社長

Doctoral Course, Graduate School of Science and Eng., Yamaguchi Univ., M. Eng.

Prof., Graduate School of Science and Eng., Yamaguchi Univ., Dr. Eng.

Assoc. Prof., Graduate School of Science and Eng., Yamaguchi Univ., Dr. Eng.

Group Leader, Yamaguchi Prefectural Industrial Technology Institute, Dr. Eng.

President, Just Tokai Corporation

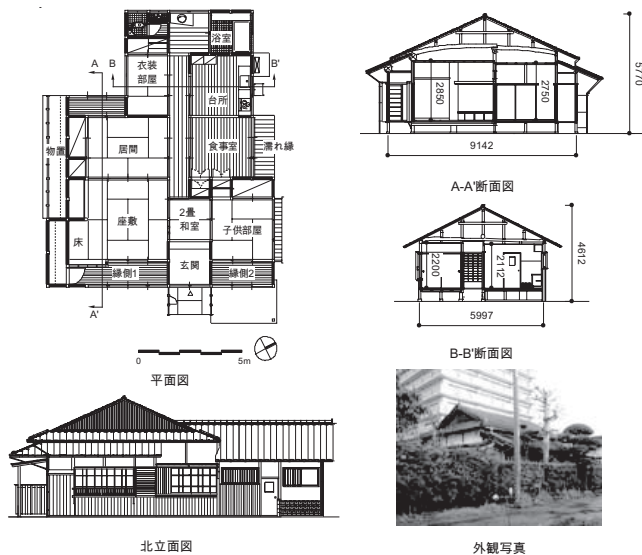


図1 計算対象の平面・立面・断面図及び外観写真

表1 計算に用いた物性値

材料	熱伝導率 [W/m・K]	容積比熱 [kJ/m ³ ・K]	出典
天然木材 (杉, 桧など)	0.120	519.070	12)
合板	0.160	715.815	12)
土壁	0.690	1126.047	12)
漆喰	0.700	1092.559	12)
畳床	0.110	527.442	12)
透湿防水シート	0.330	808.374	13)
気密シート	0.093	808.374	13)
住宅用グラスウール断熱材 24K	0.038	20.093	12)
稲藁もみ殻断熱材 (リサイクル断熱材)	0.051	318.632	7)
中空層	0.000	1.298	12)

窓	熱貫流率 [W/m ² ・K]	日射遮蔽係数SC	放射遮蔽係数SCR	対流遮蔽係数SCC	出典
単板ガラス	6.51	1.000	0.986	0.014	14)
複層ガラス (as6)	3.49	0.898	0.867	0.030	14)
太鼓障子 (as16) + 複層ガラス (as6)	1.71	0.246	0.170	0.077	注1)

表注) 表中のasは空気層の厚さを示す。

表2 シミュレーションの概要

CASE	内容	断熱部位	換気回数	暖房機器	仕様				
					天井	外壁	床(畳床・板床)	開口部	
1	伝統民家を再現したケース	なし	1回/時	エアコン	天井 CE1	外壁 WA1	床(畳床・板床) FT1	開口部 WH1	
2	一般的な断熱改修したケース	天井・床 開口部			天井板7	漆喰3/土壁60/漆喰3	畳60/床板15	床板15	単板ガラス3
3	CASE-2にリサイクル断熱材による土壁の断熱化を加えたケース	天井・床 開口部・外壁			CE2	WA1	畳60/床板15/GW24K70	床板15/GW24K70	複層ガラスas6
4	CASE-3に太鼓障子による開口部の断熱化を加えたケース				CE2	WA2	畳60/床板15/GW24K70	床板15/GW24K70	複層ガラスas6
5	CASE-4で温度上昇した縁側空気を建具開放により隣接居室へ流入させるケース				CE2	WA2	畳60/床板15/GW24K70	床板15/GW24K70	複層ガラスas6/中間空気層90/太鼓障子as16
6	高断熱・高气密化したケース				CE2	WA2	畳60/床板15/GW24K70	床板15/GW24K70	複層ガラスas6/中間空気層90/太鼓障子as16
7	CASE-4で床暖房を使用したケース				CE2	WA2	畳60/床板15/GW24K70	床板15/GW24K70	複層ガラスas6/中間空気層90/太鼓障子as16
8	CASE-4でエアコン・床暖房を併用したケース				CE2	WA2	畳60/床板15/GW24K70	床板15/GW24K70	複層ガラスas6/中間空気層90/太鼓障子as16

暖冷房負荷低減効果を定量的に明らかにすることを目的とする。尚、数値計算に入力する太鼓障子と木製複層ガラスサッシを用いた開口部断熱仕様と土壁「ちり」部分の充填断熱工法の断熱性能は既報^{4)~6)}の実験・実測結果より得られた値を用いる。

2. 数値計算の概要

(1) 計算対象

対象住宅は山口市中心市街地に位置する延床面積 113.3 m²の木造戸建ての伝統民家で、昭和初期の典型的な中廊下型住宅である。平面・立面・断面図と外観写真を図1に示す。

(2) 断熱仕様と暖房条件

計算に用いた物性値を表1、断熱仕様と暖房方式を表2に示す(各部位の断熱仕様と暖房機器設定条件は付図1に示す)。CASE1は標準的な伝統民家、CASE2は天井・床・開口部(複層ガラス)の断熱改修を行う一般的な場合である。CASE3はCASE2に土壁と外装材間の30mmの空隙(ちり)に炭化もみ殻をボード状に加工したリサイクル断熱材を充填した土壁断熱を行う場合である。表1中のリサイクル断熱材の熱伝導率は既報⁵⁾の実験結果に基づいており、採用した断熱工法は既報⁶⁾において断熱防露性能を検証したものである。CASE4

はさらに太鼓障子と木製複層ガラスサッシによる開口部断熱を行う場合で、太鼓障子と木製複層ガラスサッシを用いた断熱仕様の熱貫流率は、既報⁴⁾において実験結果より導出した設計式より求めた。日射遮蔽係数は、文献¹³⁾に従い理論計算により求めた。CASE5は縁側と居室間の建具開放による縁側暖気の居室流入を設定した場合である。CASE4・5では縁側1と座敷間・縁側2と子供室間の建具を太鼓障子とし、縁側の日射取得を遮らず温室効果の拡大を意図している。CASE6は高断熱・高气密化の場合で、外気とのすきま風による換気回数0.2回/時を設定した^{注1)}。全熱交換器を設置したことにより0.5回/時の換気を行い、外気導入による負荷はないものと考えた。

CASE1~6の暖房機器は、居間・座敷・台所+食事室・子供部屋はエアコン、廊下・2畳和室・洗面・トイレはカーボンヒーター、浴室は浴室暖房専用機(カーボンヒーター)とした。一方CASE7はCASE4の断熱仕様のもとで床暖房を敷設した場合で、CASE8はさらにエアコンと床暖房を併用する場合である。床暖房敷設箇所は、居間・座敷・台所+食事室・子供部屋・洗面・トイレとし、居間・座敷・台所+食事室・子供部屋でエアコンを併用する。床暖房敷設時の子供部屋の床は板張り、居間・座敷は床暖房用畳(13mm)とする。

(3) 計算方法

		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	(時刻)
在室人数	座敷(リビング)												
	食事室				3		1				2	1	
	台所				1		1				1	2	
	居間(主寝室)		2		1								1 2
暖冷房機器の使用	子供部屋		1										1
	座敷												
	食事室+台所												
	居間												
	子供部屋												
照明の使用	2畳和室・廊下・洗面・トイレ												
	浴室												
	座敷 300W				80%							100%	
	食事室 100W				100%							100%	
	台所 60W				100%							100%	
	居間 100W				100%							100%	
	子供部屋 180W				44%							100%	
	玄関 60W				100%							100%	
	洗面 40W				100%							100%	
	浴室 60W												100%
断熱機器の使用	座敷 テレビ 100W				100%							100%	
	台所 調理 600W				100%		50%				100%		
	台所 冷蔵庫 45W				100%								
	洗面 100W						100%					100%	

図2 一日の生活スケジュール

本論では学会標準問題¹⁵⁾の一日の生活スケジュールに準拠した方法(計算法1)と、省エネルギー基準¹⁶⁾による年間暖冷房負荷計算法(計算法2)を適用する。図2に計算法1の一日の生活スケジュールを示す。平面構成より家族構成を標準問題の4人(夫婦+子供2人)から3人(夫婦+子供1人)へ変更し、座敷をリビングに設定する。座敷(リビング)・食事室・台所の在室人数はLDK在室人数スケジュールに準拠し、2畳和室・廊下・洗面・トイレ・浴室の暖房機器は独自に設定する。暖冷房期間は暖房期を日平均気温が15.0℃以下の期間、冷房期を日平均気温が23.0℃以上の期間、中間期を暖房期・冷房期以外の期間とする。暖冷房温湿度は省エネルギーセンターの推奨設定温度より、暖房温度22.0℃湿度なりゆき、冷房温度26.0℃湿度50%に設定する。

ここでCASE5の縁側の温熱環境制御は、縁側の室温が20.0℃以上になった時点で縁側と居室間の換気^{注2)}を始め、日没する17時に建具を閉鎖する。夏期排熱換気は、全天日射量がない時間帯は太鼓障子を閉鎖し、日射量がある時間帯は開放する。縁側の室温が30.0℃以上かつ外気温35.0℃以下の場合には13回/時^{注3)}の換気を行う。

計算法2は、暖冷房対象空間を小屋裏・床下空間を除く全室とし、暖冷房期間は暖房期間を日平均外気温が15.0℃以下となる全期間、冷房期間は暖房期間以外の全期間とする。暖冷房温湿度は、暖房温度18.0℃湿度なりゆき、冷房温度27.0℃湿度60%とする。内部発熱は省エネルギー基準に準拠し、全床から一様に常時一定量発熱するものと仮定し、顕熱を16.7kJ/m²h、潜熱を4.2kJ/m²hに設定する。

(4) 計算プログラムと気象データ

SMASH for Windows Ver.2を使用する。計算モデルの室と外気間の換気は表2に示す換気回数とし、建具閉鎖の場合の空間空気移動は考慮しない^{注4)}。計算法1に用いたエアコンの暖房能力は、室の面積に応じ2500・2800・3600Wとし(付図1)、床暖房能力は畳床の場合に131.1W/m²、板床の場合に127.6W/m²と設定した^{注5)}。気象データは次世代省エネルギー基準の地域区分が山口県と同じ福岡のデータ(SMASH付属)を使用する。尚、計算モデルの妥当性は、伝統民家改修事例の実測値と計算値の比較により確認している^{注6)}。

3. 断熱仕様をパラメータとした数値計算結果

3.1 一日の温度変動の比較

図3にCASE1~6の供給熱量と室温の数値計算結果を示す。1日の結果は、対象住宅が立地する地域の冬期の標準的^{注7)}気象と判断される12月25日で、4章においても同様に用いる。

(1) 伝統民家を再現したCASE1の温度変動

暖房開始時の早朝6時(外気温4.3℃)の各室の室温は、座敷と廊下が7.2・7.6℃である。洗面・食事室+台所では窓ガラスからの熱損失により、夫々6.6・6.7℃と低い。居室の食事室+台所・座敷においても外気温と比較し2.4~2.9℃高い程度で、早朝に快適な室温を維持することは難しい。暖房開始2時間後の室温は、食事室+台所が19.2℃、座敷・廊下が夫々16.0・15.3℃と室温で温度差がある。暖房開始3時間後はいずれの室温も設定温度の20.0℃に達しておらず、暖房立ち上がり時には十分な室温確保が難しいことが分かる。暖房停止後の10時には座敷・洗面・廊下の室温は14.0~14.7℃と大幅に低下している。食事室+台所の室温が16.4℃と比較的高く、暖房が再開される12時まで温度上昇しているが、これは食事室+台所の窓ガラスから外気温と日射取得の影響を受けるためである。

暖房再開の13時の座敷・食事室+台所の室温は、夫々20.0・19.7℃となるが、廊下・洗面の室温は16.0・15.0℃で、暖房居室と非居室間に最大5.0℃の差が生じており、非居室の断熱性能の不足がうかがえる。17~22時の各室の室温は、食事室+台所では窓ガラスからの熱損失により20時から暖房停止まで0.3℃の室温低下が確認されるが、概ね設定温度の20.0℃に保たれている。暖房停止2時間後の室温は座敷・廊下が約15℃で、洗面・食事室+台所では夫々13.8・13.5℃となり、暖房時から5.1~6.1℃低下している。

(2) 断熱仕様が早朝・夜間の室温低下抑制に及ぼす効果

一般的な断熱改修のCASE2では、6時の洗面と食事室+台所で夫々8.4・8.8℃で、CASE1より1.8~1.9℃上昇している。座敷と廊下も10.4℃と約3℃上昇し、早朝の室温低下が抑制されている。CASE2に土壁充填断熱工法を付加したCASE3では、6時の座敷・廊下・洗面の室温は夫々13.1・12.9・12.6℃で、洗面の室温はCASE2より4.2℃上昇しており、座敷・廊下との温度差が縮小している。また食事室+台所も11.9℃とCASE2に比べ3.1℃高く、土壁充填断熱による室温低下抑制効果の大きさが認められる。CASE3に太鼓障子による開口部断熱を加えたCASE4では、6時の座敷・廊下・洗面の室温は13.4・13.5・13.6℃で室間の温度差は認められない。また、食事室+台所も13.0℃とCASE3より1.1℃高く、4室の温度差は1℃以下で太鼓障子を用いた断熱効果が確認できる。高気密・高断熱化したCASE6では、6時の座敷・廊下・洗面・食事室+台所の室温は16.1・15.3・15.1・14.3℃で、各室とも全ケース中最も高く、ガラスウールによる外壁の断熱化と気密化の効果が確認される。しかし開口部断熱仕様が複層ガラスのため、4室間には最大1.8℃の温度差が生じている。

次に、暖房停止後の室温変動に関しては、各ケースの暖房時と暖房停止2時間後の4室の温度差は、CASE1は5.1~6.1℃なのに対し、CASE2は3.0~4.0℃、CASE3は2.0~2.7℃、CASE4は1.8~2.2℃、CASE6は1.2~1.7℃と縮小している。これより、太鼓障子による開口部の断熱化と土壁の充填断熱による室温低下抑制効果が確認できる。また、早朝の室温低下の変動と同様、太鼓障子を用いた開口部の断熱化により室間の温度差の縮小が認められ、高断熱・高気密仕様のCASE6が最も暖房停止後の室温低下が小さいが、CASE4とは0.5~0.6℃の差が認められる。

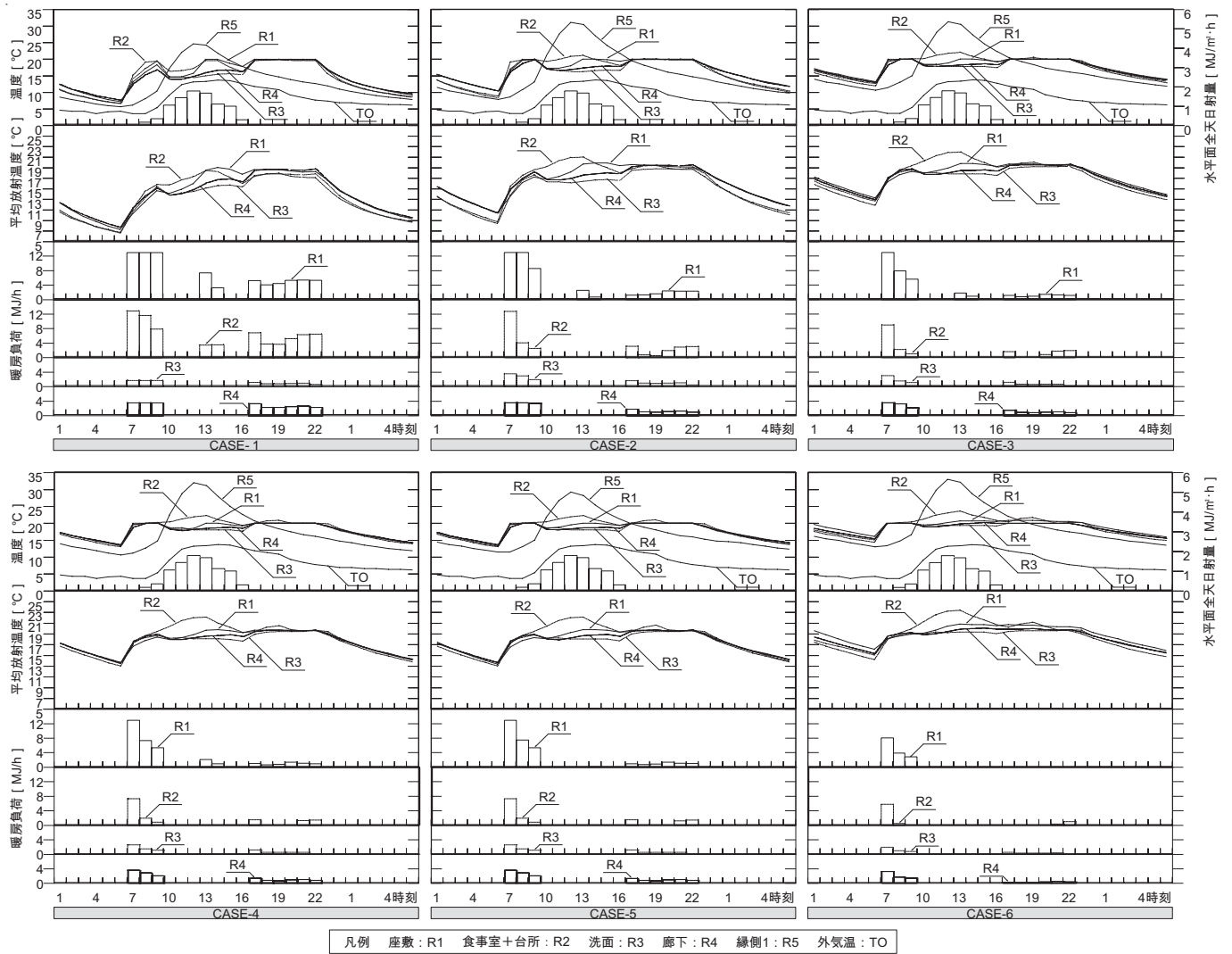


図3 暖房負荷と室温の数値計算結果

表3 室温と平均放射温度(MRT)の数値計算結果

		CASE-1	CASE-2	CASE-3	CASE-4	CASE-5	CASE-6			CASE-1	CASE-2	CASE-3	CASE-4	CASE-5	CASE-6		
6時	座敷	室温[°C]	7.2	10.4	13.1	13.4	13.1	16.1	13時	座敷	室温[°C]	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.7
		MRT[°C]	7.3	10.5	13.2	13.4	13.3	16.1		MRT[°C]	18.5	19.6	19.7	19.6	19.7	20.8	
	食事室+台所	室温[°C]	6.7	8.8	11.9	13.0	13.0	14.3	食事室+台所	室温[°C]	19.7	21.2	22.1	22.2	22.2	23.6	
		MRT[°C]	6.7	8.8	11.9	13.0	13.0	14.2		MRT[°C]	18.3	21.1	21.9	22.1	22.1	23.4	
	洗面	室温[°C]	6.6	8.4	12.6	13.6	13.5	15.1	洗面	室温[°C]	15.0	16.3	17.8	18.0	18.0	19.3	
		MRT[°C]	6.6	8.4	12.7	13.7	13.6	15.1		MRT[°C]	15.1	16.4	17.8	18.0	18.0	19.3	
	廊下	室温[°C]	7.6	10.4	12.9	13.5	13.5	15.3	廊下	室温[°C]	16.0	17.5	18.3	18.5	18.6	19.8	
		MRT[°C]	7.7	10.4	12.9	13.6	13.6	15.3		MRT[°C]	16.1	17.6	18.5	18.6	18.7	19.9	
20時	座敷	室温[°C]	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.6	24時	座敷	室温[°C]	14.9	17.0	18.0	18.1	18.0	19.3
		MRT[°C]	18.3	19.2	19.6	19.6	19.6	20.4			MRT[°C]	14.7	16.9	18.0	18.1	18.1	19.3
	食事室+台所	室温[°C]	19.7	19.9	20.0	20.1	20.1	20.8	食事室+台所	室温[°C]	13.5	15.8	17.2	17.8	17.8	18.3	
		MRT[°C]	17.4	18.9	19.4	19.8	19.8	20.3		MRT[°C]	13.1	15.6	17.1	17.7	17.7	18.1	
	洗面	室温[°C]	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	洗面	室温[°C]	13.8	16.0	17.7	18.2	18.2	18.7	
		MRT[°C]	17.7	18.7	19.2	19.4	19.4	19.5		MRT[°C]	13.6	15.8	17.7	18.2	18.2	18.6	
	廊下	室温[°C]	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	廊下	室温[°C]	14.8	16.9	17.7	17.9	17.9	18.6	
		MRT[°C]	18.6	19.4	19.5	19.5	19.5	19.8		MRT[°C]	14.6	16.9	17.7	17.9	17.9	18.6	

(3) 断熱仕様が居室と非居室間の室温の差異解消に及ぼす効果

一般的断熱改修のCASE2では、13時の廊下・洗面の室温は17.5・16.3°Cで、設定温度(20.0°C)に保たれた座敷との温度差は2.5~3.7°Cとなり、伝統民家を再現したCASE1の場合(温度差4.0~5.0°C)からほぼ半減している。充填断熱工法のCASE3では、13時の廊下・洗面の室温は、18.3・17.8°Cで座敷との温度差は1.7~2.2°Cとさらに小さく

なり、土壁断熱による居室と非居室間の室温差解消効果が認められる。開口部断熱を加えたCASE4では、13時の廊下・洗面の室温は、18.5・18.0°Cで座敷との温度差は1.5~2.0°Cとなり断熱効果が認められる。高断熱・高气密仕様のCASE6では、廊下・洗面の室温は19.8・19.3°Cで、座敷との温度差は1°C以下に縮小している。

(4) 断熱仕様と平均放射温度の関係

表3に室温と平均放射温度(MRT)の数値計算結果を示す^{注8)}。一日で比較的室温が安定し、団欒の時間帯が想定される20時の平均放射温度を見ると、CASE1~4の順に上昇しており、高断熱・高気密仕様のCASE6が最も高い。外壁断熱のCASE3では、座敷・食事室+台所・洗面の放射温度が19.6・19.4・19.2℃とCASE2より0.4~0.5℃高く、外壁断熱が放射温度に及ぼす影響が認められる。開口部断熱を加えたCASE4では、大きな開口部を有す食事室+台所で19.8℃となり、CASE3より0.4℃高く、太鼓障子を用いた開口部断熱化による放射熱環境改善効果が認められる。

早朝6時の平均放射温度は全仕様において室温と同程度で、CASE1~4の順に室温の上昇に伴い上昇している。暖房停止2時間後の24時では、伝統民家のCASE1と一般の断熱改修のCASE2は平均放射温度が室温より低く、室内が冷放射環境となっているが、外壁断熱と太鼓障子による開口部断熱のCASE3と4では、平均放射温度が室温と同程度まで上昇しており、これらの手法による放射熱環境改善効果が認められる。特に洗面では土壁断熱により1.9℃、開口部断熱により0.5℃と他室と比較し大きな上昇が確認できる。また居室と非居室間の温度差が広がる13時の洗面では、土壁断熱により1.4℃、開口部断熱により0.2℃上昇しており、非居室の室温上昇に伴い放射熱環境の差も解消されている。

3.2 暖房エネルギー削減効果

CASE2の暖房負荷をCASE1と比較すると、7~9時・13~14時・17~22時の各時間帯において暖房負荷の低減が確認できる。特に13時の座敷では4.8 MJ/h低減(65%削減)している。また17時の食事室+台所では3.7 MJ/h低減(54%削減)され、特に暖房立ち上がり時に大きく低減している。CASE3では、CASE2と比較すると7時の食事室+台所で3.4MJ/h、洗面も0.5MJ/hの低減が確認できる。座敷では暖房されていない居間や縁側への熱移動のため暖房負荷の低減は見られないが、7時を除く時間帯では低減しており、外壁断熱の効果が認められる。CASE4では、CASE3と比較すると開口部が断熱された食事室+台所と洗面で7~9時・17~22時の暖房負荷の低減が認められる。7時の食事室+台所では1.7MJ/h、洗面も0.5MJ/h低減している。

さらにCASE3の食事室+台所では、21~22時にかけて外気温の低下に伴い暖房負荷は増え、22時の時点で2.0MJ/hであったものが、CASE4では1.4MJ/hに低減しており、開口部断熱効果が認められる。縁側の温室効果を活用したCASE5では、CASE4と比較すると13~14時の座敷の2時間の暖房負荷合計が3.1MJ/hから0.2MJ/hへ低減している。CASE4と高断熱・高気密仕様のCASE6を比較すると、7時の座敷において13.1MJ/hから8.1MJ/hへ低減(38%削減)しており、13~14時の時間帯では暖房負荷がなくなり、17~22時の時間帯では各室とも1.0 MJ/h以下と、高断熱・高気密化の効果が認められる。

次に暖房期熱損失量の内訳を図4に示す。CASE2の熱損失量をCASE1と比較すると、床・天井・開口部において熱損失量の低減が確認され、特に天井では147.8MJ/m²と大きく低減している。またCASE2では換気と壁からの熱損失量が上昇しているが、これは床・天井・開口部の断熱性能向上により暖房時間帯以外の室温が高くなり、換気と壁からの損失が増加したためと考えられる。CASE3では、CASE2と比較すると壁からの熱損失量が83.2MJ/m²低減し、外壁断熱効果が認められる。CASE4では、CASE3と比較すると開口部からの熱損失量が18.8MJ/m²低減しており、窓に太鼓障子を取り付けた効果が認め

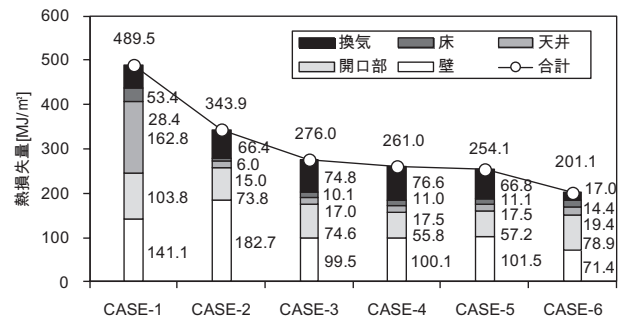


図4 暖房期(11月3日~4月20日)熱損失量の内訳

られる。CASE1とCASE4を比較すると、開口部の熱損失量は太鼓障子と複層ガラスを用いた断熱化により46%削減され、壁では土壁の断熱化により29%削減されている。CASE4の熱損失量の合計は261.0MJ/m²で、伝統民家を再現したCASE1(489.5MJ/m²)に対し大きく低減している。またCASE4とCASE6を比較すると、CASE4の熱損失量合計がCASE6を59.9MJ/m²上回るが、これは主に換気の熱損失量の差によるもので、充填断熱工法及び開口部断熱工法を組合せた効果が認められる。

4. 暖房方式をパラメータとした数値計算結果

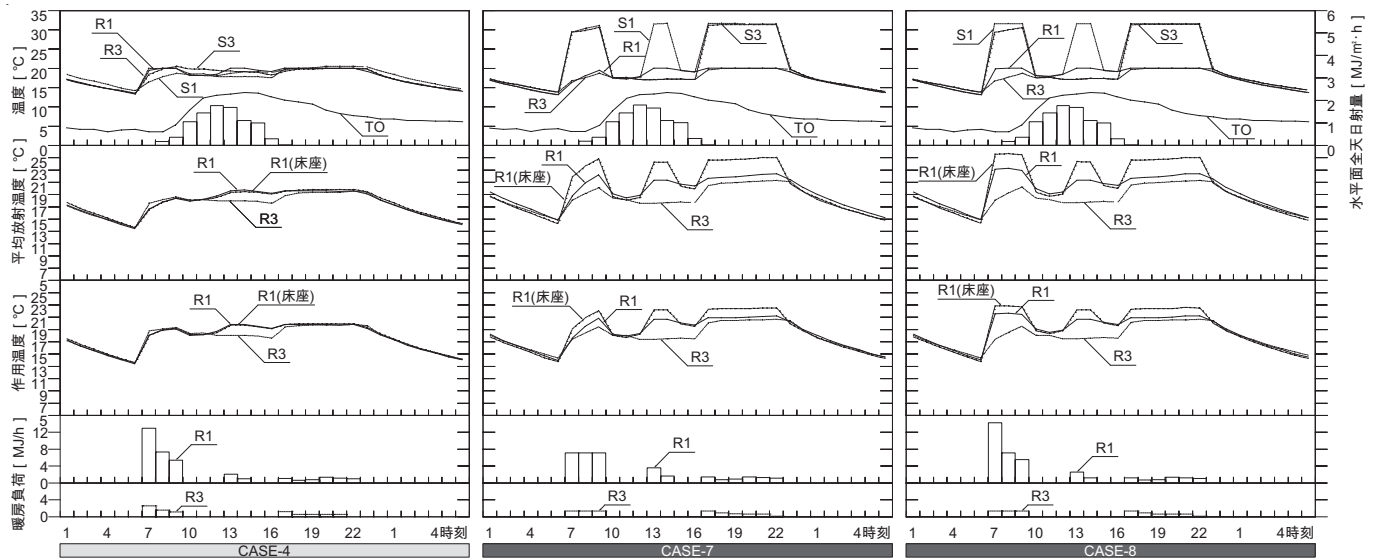
座敷と洗面を居室と非居室の典型として抽出し、CASE4・7・8の暖房負荷と室温・作用温度の数値計算結果を図5に示す。

4.1 暖房方式と平均放射温度の関係

一日の間で室温が安定した時間帯の20時のCASE4の座敷の室温と床表面温度は20.0℃と20.5℃で、平均放射温度は19.6℃と室温を下回る。一方、同時刻のCASE7の場合室温20.0℃、床表面温度が31.6℃で、平均放射温度は22.1℃と室温を上回る。作用温度はCASE4で19.8℃、CASE7では21.1℃となり、床暖房では床面の加熱により良好な放射熱環境が形成されている。次に床座時の平均放射温度^{注9)}(20時)を比較すると、CASE4は19.9℃、CASE7は24.9℃となり、床暖房の床面接触効果が確認できる。CASE7の床座時の作用温度は22.5℃で、床暖房による床座時の快適性が認められる。CASE8の暖房開始1時間後の室内代表点と床座時の作用温度は21.6・22.8℃で、和室での床座が一般的な伝統民家を改修する場合には、エアコンと床暖房の併用が有効と考えられる。

4.2 暖房方式と作用温度の関係

エアコンのみ使用したCASE4の座敷室温は、暖房開始6時(13.4℃)から1時間後には19.5℃となり、2時間後には設定温度の20.0℃に達している。CASE7の床暖房を敷設した座敷の室温は、暖房開始の6時(13.1℃)から1時間後には16.3℃に上昇しているものの、設定温度とは3.7℃の差がある。CASE4とCASE7の暖房開始1時間後の作用温度は18.1℃、17.6℃で、室温差(2.3℃)と比較して作用温度差は0.5℃と小さく、床暖房による放射熱環境の改善が認められるが、CASE7の室温と作用温度はCASE4を下回る。これは、CASE4とCASE7の7時の暖房負荷に示されるように、エアコンが室内に熱を13.0MJ/h供給するのに対し、床暖房では6.4MJ/hと少ないためである。一方、CASE8のエアコンと床暖房を併用した座敷の室温は、暖房開始6時(13.2℃)から1時間後には20.0℃に達し、作用温度も21.6℃とエアコン併用効果が認められる。またCASE8の7時時点の暖房負荷は



凡例 座敷: R1 洗面: R3 座敷床表面: S1 洗面床表面: S3 外気温: TO

図5 暖房負荷と室温・作用温度の数値計算結果

表4 作用温度の数値計算結果

		CASE-1	CASE-2	CASE-3	CASE-4	CASE-5	CASE-6	CASE-7	CASE-8
座敷	暖房開始1時間後	11.6	15.0	17.8	18.1	18.0	19.0	17.6	21.6
	団欒時平均	19.1 (19.4)	19.6 (19.8)	19.8 (19.9)	19.8 (19.9)	19.8 (19.9)	20.4 (20.5)	21.1 (22.5)	21.2 (22.5)
	入浴時	18.9	19.5	19.7	19.8	19.8	19.9	20.7	20.7
洗面	暖房開始1時間後	12.5	16.9	18.6	18.8	18.8	19.0	17.4	17.4
	入浴時	18.9	19.5	19.7	19.8	19.8	19.9	20.7	20.7

表注) 表中の暖房開始1時間後とは7時であり、入浴時は22時である。団欒時は20時~22時までを示し、団欒時平均の作用温度の()内の値は床座時における作用温度を示す。

表5 暖冷房負荷の内訳

	暖房負荷 [MJ/m ² ・年]		冷房負荷 [MJ/m ² ・年]		暖冷房負荷 [MJ/m ² ・年]		単位暖冷房時間当たりの負荷			
							暖冷房時間 [h]		負荷 [MJ/m ² ・h]	
	条件1	条件2	条件1	条件2	条件1	条件2	条件1	条件2	条件1	条件2
CASE-1	395.4	1073.6	94.5	323.7	489.9	1397.3	10,049	61,736	0.049	0.023
CASE-2	247.8	612.5	97.1	276.5	344.9	889.0	9,223	54,504	0.037	0.016
CASE-3	180.4	350.1	98.1	247.1	278.5	597.2	8,744	49,233	0.032	0.012
CASE-4	165.5	342.1	99.4	191.7	264.9	533.8	8,555	54,735	0.031	0.010
CASE-5	164.4	-	95.7	-	260.1	-	8,478	-	0.031	-
CASE-6	106.1	235.7	92.9	203.1	199.0	438.8	7,304	41,616	0.027	0.011
CASE-7	162.4	-	96.7	-	259.1	-	8,645	-	0.030	-
CASE-8	170.1	-	96.7	-	266.8	-	8,249	-	0.032	-

注) 表中CASE-6の()内の各値は、省エネルギー基準の換気回数の計算条件0.5回/時による計算結果である。

14.2MJ/hで、エアコンのみ使用時と比べ9%程度の増加に止まり、省エネルギー効果が認められる。床暖房開始1時間後の洗面室温は16.7°Cで、一定の室温が確保できている。次に各ケースの作用温度の数値計算結果を表4に示す。CASE8の座敷では、高断熱・高气密仕様のCASE6の暖房開始1時間後、団欒時(平均値)、床座時の作用温度を上回る熱環境が得られている。またCASE8の洗面では暖房開始1時間後の作用温度はCASE6を下回るが、入浴時には0.8°C程度高く、床暖房による室間の温熱環境の差異解消が認められる。

5. 暖冷房負荷の比較

計算法1, 2による暖冷房負荷内訳を表5, 計算法1による各ケースの暖冷房負荷を図6に示す。計算法1の算定結果をみると、冷房負荷はどのケースも93~99MJ/m²・年と大差ないが、暖房負荷はCASE1の395.4MJ/m²・年からCASE6の106.1MJ/m²・年まで3.7倍の差があり、かつ冷房負荷に比べ負荷量が多い点特徴で、断熱仕様が冬季の暖房負荷に及ぼす影響の大きさが指摘される。具体的には、暖冷房負荷は、CASE1からCASE4の順に低減し、CASE2とCASE3では66.4MJ/m²・年低減していることから外壁断熱工法の省エネルギー性が認められる。またCASE3とCASE4では13.6MJ/m²・年低減しており、太鼓障子と木製複層ガラスサッシを用いた開口部断熱仕様の省エネルギー効果が認められる。CASE4と高气密・高断熱仕様のCASE6を比較すると、暖房負荷量の差が約59.4MJ/m²・年あるため、

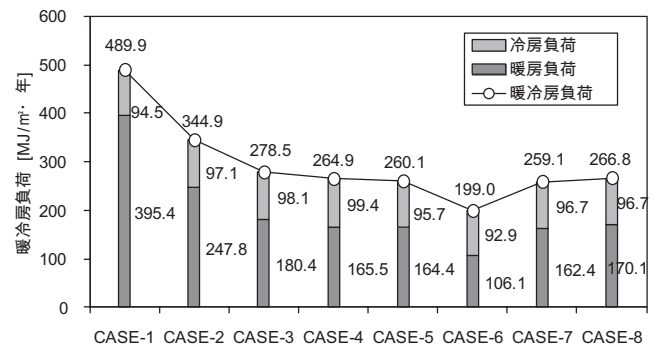


図6 計算法1の暖冷房負荷

暖冷房負荷の差は65.9MJ/m²・年となるものの、CASE6に対するCASE4の暖冷房負荷は、一般的改修仕様であるCASE2の約1.7倍から約1.3倍程度に低減しており効果が認められる。また床暖房とエアコン併用のCASE8では、エアコンのみのCASE4と比較して暖房負荷は4.6MJ/m²・年程度の増加に止まり、床暖房による室内の均一な温度分布と床面接触効果を考慮するとその効果は大きい。CASE5の冬季縁側の温室効果と夏季排熱換気効果も、若干ではあるがCASE4と比較すると1.1MJ/m²・年と3.7MJ/m²・年の低減が確認できる。

次に計算法2による暖冷房負荷をみると、最も暖冷房負荷が低いのは高断熱・高气密化したCASE6で、438.8MJ/m²・年と次世代省エネ

ルギー基準(460MJ/m²・年)をクリアしている。しかし伝統民家を再現した CASE1(1397.3MJ/m²・年)に対し、CASE3 で 597.2MJ/m²・年(57%削減)、CASE4 で 533.8MJ/m²・年(62%削減)に負荷が低減されており、相当の省エネルギー効果を有す結果が得られた。これより、天井・床の断熱と土壁の「ちり」部分を利用した充填断熱工法及び太鼓障子と木製複層ガラスサッシを用いた開口部断熱工法を組合せることにより、省エネルギー性向上の複合効果が期待される。

尚、年間暖冷房時間を比較すると計算法 1 はいずれのケースも全室連続運転の計算法 2 の 1/6 程度であるが、計算法 1 では隣室への熱損失、立ち上がり時の負荷の大きさや設定温度の差が影響し、計算法 2 と比較すると単位暖冷房時間当たり負荷は 2~3 倍程度となる。

6. 結論

本論では太鼓障子と木製複層ガラスサッシを用いた開口部断熱工法、土壁の「ちり」部分充填断熱工法による断熱仕様と、エアコンと床暖房の併用を含めた暖房機器の設定法をパラメータとした温熱環境と暖冷房負荷の数値計算を行い、以下の知見を得た。

- 1) 一般的断熱改修に外壁断熱工法を付加した場合、早朝 6 時の洗面室温は 4.2℃、食事室+台所室温は 3.1℃上昇した。太鼓障子による開口部断熱の場合、大開口部を有す食事室+台所の室温が 1.1℃上昇し、早朝時の平均放射温度も室温上昇と同程度の改善が認められた。暖房停止 2 時間後の平均放射温度は、標準的伝統民家と一般的断熱改修の場合室温より低いが、外壁断熱と太鼓障子による開口部断熱の場合、平均放射温度は室温と同程度まで上昇する。
- 2) 室温差解消に関しては、外壁断熱では 13 時の廊下・洗面と座敷(20.0℃)との温度差は 1.7~2.2℃で 0.8~1.5℃、開口部断熱では、廊下・洗面と座敷との温度差は 1.5~2.0℃で 0.2℃程度解消された。平均放射温度も温度差の解消と同程度の改善が認められた。
- 3) 暖房エネルギーは、外壁断熱では暖房立ち上がり時(7 時)の食事室+台所で 3.4MJ/h 低減し、洗面でも 0.5MJ/h の低減が確認され、開口部断熱では 21~22 時にかけて外気温の低下に伴い増加する食事室+台所の暖房負荷が 22 時において 0.6MJ/h 低減した。
- 4) エアコンと床暖房を併用した場合の座敷の室温は、暖房開始 1 時間後には設定温度 20.0℃に達し、エアコン併用効果を示された。また室内代表点と床座時の作用温度は 21.6℃・22.5℃で、ともに良好な室内温熱環境が得られることが確認された。
- 5) 外壁充填断熱工法を用いると標準的伝統民家に対し 66.4MJ/m²・年、開口部断熱工法では 13.6MJ/m²・年の負荷低減が可能となる。外壁充填断熱と開口部断熱を組合せた場合、暖冷房負荷は 533.8MJ/m²・年となり、標準的伝統民家の 1/2 以上の削減が可能で、次世代省エネルギー基準は満たさないものの相当の省エネルギー性が確認された。
- 6) エアコン・床暖房併用の場合、エアコンのみの場合と比較して 5MJ/m²・年程度の負荷増加で、冬季縁側の温室効果の活用と夏季排熱換気効果についても 1.1MJ/m²・年と 3.7MJ/m²・年の低減が確認された。以上より、一般的な断熱改修に加え、土壁の「ちり」部分を利用した充填断熱工法、太鼓障子と木製複層ガラスサッシを用いた開口部断熱工法を採用した場合、次世代省エネルギー基準の年間暖冷房負荷には及ばないものの、相当の省エネルギー性が確保され、加えてエアコンと床暖房を併用した暖房方式を採用すると、床座時に良好

な室内温熱環境が得られることから、本改修手法は比較的温暖な地域では、温熱環境を改善する有効な方法になるものと期待される。尚、改修コスト低減効果の検討は今後の課題としたい。

注

注 1) 参考文献 14) に建築構造和風木造のすきま風による換気回数が 0.2~1.0 回/時と記載されていることから、最小値の 0.2 回/時を設定した。

注 2) SMASH for Windows Ver.2 のユーザーマニュアル¹⁰⁾には、異なる室を壁・床などを介さずに繋ぎ合わせる場合に、互いに同量の換気が行われるものとし、その換気量を室の容量の小さい方の 10 倍と設定するとされており、本計算の場合には縁側の容量の 10 倍の換気量を設定した。縁側 1 と座敷間では 142m³/h、縁側 2 と子供室間では 88m³/h と設定した。

注 3) 夏期の養蚕型建築における開口部開放時の換気回数が 12.7 回/時と報告¹⁷⁾されていることを参考に、夏期排熱換気の換気回数を 13 回/時と設定した。

注 4) SMASH for Windows Ver.2 では、空間相互の換気量はユーザーが判断して入力することとなるので、計算モデルには外部風向・風速や室間の温度差などを考慮した空間の空気移動は含まれない。しかし、本数値計算は改修を実施する上で想定される改善効果を把握することが目的であり、実用上に必要な精度を求めるとして汎用ソフトを援用した。上述したような複雑な要因を考慮した評価は、換気回路網計算や数値流体計算を用いる必要があり、改修事例の実測と併せて今後の課題である。

注 5) SMASH for Windows Ver.2 では、暖房機器の暖房能力を最大供給熱量として設定することができる。設定室温とするための暖房負荷が暖房能力を上回る場合に暖房能力を負荷とし、その時の室温を出力するものである。床暖房能力は、Kollmar-Lises の床暖房略算法¹⁸⁾を適用して求める。これは、床内に配管径と等しい厚さのフィンと仮定し、フィン効率の理論式を床暖房の場合に応用して、床から上側への放熱量を求めるものである。付図 2 に数値計算用床暖房システムを示す。略算法として、アルミ箔をフィンと仮定し、仮想フィンの熱伝導率と厚さを本システムで使用したアルミ箔の値を用いて、フィン効率 η_f を次式より求める。

$$\eta_f = \tanh(Z)/Z \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$Z = 0.5(W - D) \cdot \{C_f / (\lambda_f \cdot D_f)\}^{0.5} \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$C_f = C_{fu} + C_{fd} \quad \dots\dots\dots(3)$$

床暖房放熱効率 η は次式により表され、

$$\eta = D/W + \eta_f \cdot (W - D)/W \quad \dots\dots\dots(4)$$

床暖房時の床上側放熱量 Q_U ・下側放熱量 Q_D [W/m²]は次式より求める。

$$Q_U = \eta \cdot C_{fu}(t_h - t_{au}) \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$Q_D = \eta \cdot C_{fd}(t_h - t_{ad}) \quad \dots\dots\dots(6)$$

C_f : 仮想フィン上端から上部空気及び仮想フィン下端から下部空気までの熱コンダクタンスの和[W/m²K]

C_{fu} : 仮想フィン上端から上部空気までの熱コンダクタンス[W/m²K]

C_{fd} : 仮想フィン下端から下部空気までの熱コンダクタンス[W/m²K]

λ_f : 仮想フィン熱伝導率[W/m²K] D_f : 仮想フィン厚[m]

t_h : パイプ表面温度[℃] t_{au} : 上部空気温度[℃]

t_{ad} : 下部空気温度[℃] W : パイプピッチ[m] D : パイプ径[m]

床上側放熱量 Q_U [W/m²]を算出する際に用いる上部空気温度 t_{au} [℃]は暖房開始時の室温を想定して 10.0℃とし、パイプ表面温度 t_h [℃]は 50.0℃とする。各室に設定する床暖房の暖房能力は、床上側放熱量 Q_U [W/m²]に床パネル面積 A_p [m²]を乗じて求める。ここで、床パネル面積 A_p [m²]は各室の床面積に床暖房の敷設率 0.7 を乗じて求めたものであり、床暖房の敷設率は本システムを敷設した改修事例⁹⁾から判断した。

注 6) 既報 9) で報告した伝統民家を対象に、床暖房運転時の室温と床表面温度の実測値と計算値を比較した。計算対象は 3 棟構成の建物のうち床暖房が敷設された室を含む 1 棟とする。図面や各部位の仕様等については既報を参照されたい。床暖房の暖房能力は、注 5) の式(5)よりパイプ表面温度の実測値 49.0℃と暖房開始時の室温の実測値 6.8℃を用いて、139.5W/m²と算出したものを入力した。設定室温は定常時の実測値 18.0℃とした。気象データの外気温は実測値を用い、日射量については実測日の下関気象台の日積算水平面全天日射量を利用した。結果を付図 3 に示す。床表面温度の計算値は、立ち上がり時に実測値と比較して高温になる傾向を確認できる。しかし、暖房開始 3 時間後以降では実測値との差異は 1℃程度となり、室温の立ち上がり時の変動はほぼ近似しており、本計算モデルにより実用上必要な精度の計算結

果を得られると判断した。

注7) 山口測候所の30年間(1971~2000年)の各月の平年気温と、下関気象台(山口測候所では観測されていないため)の日積算水平面全天日射量を利用し、12月~2月の各平均値を算出した結果、平均気温は5.0℃、日積算水平面全天日射量は7.7MJ/m²となり、これを本事例が立地する冬季の標準的データとして、計算日の気候条件を標準的と判断した。

注8) 平均放射温度 t_r [℃]は全周壁平均温として以下の手順で求める。

$$t_r = \sum t_i A_i / A \quad \dots\dots\dots (7)$$

t_i : 各壁面の温度[℃] A_i : 温度 t_i の面積[m²] A : 全周壁面積[m²]

注9) 床暖房の平均放射温度 t_r [℃]は次式により求める。

$$t_r = (A_p t_p + A_w t_w) / A \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで、全周壁面積A[m²]は

$$A = A_p + A_w \quad \dots\dots\dots (9)$$

であり、床暖房時の床パネルを除く周壁平均表面温度 t_w [℃]は参考文献8)より式(4)を用いる。

$$t_w = [At_a - A_p t_p + n C_p \rho V (t_a - t_0) / \alpha_c] / (A - A_p) \quad \dots\dots\dots (10)$$

床暖房の床座時の平均放射温度 t_r [℃]は参考文献8)に従い次式により求める。

$$t_r = F_{b-p} t_p + (1 - F_{b-p}) [At_a - A_p t_p + n C_p \rho V (t_a - t_0) / \alpha_c] / (A - A_p) \quad \dots\dots\dots (11)$$

次に、エアコンの平均放射温度 t_r [℃]は式(7)より求め、床座時の平均放射温度 t_r [℃]は、式(11)と同様次式により算出する。

$$t_r = F_{b-p} t_p + (1 - F_{b-p}) t_w \quad \dots\dots\dots (12)$$

床暖房とエアコンの室内代表点及び床座時の作用温度 t_0 [℃]は、平均放射温度 t_r と室内気温 t_a との相加平均とし、次式により求める。

$$t_0 = (t_r + t_a) / 2 \quad \dots\dots\dots (13)$$

F_{b-p} : 人体から床暖房パネルを見る形態係数=0.4[ND]

t_a : 室内気温[℃] t_p : 床パネル温[℃] t_0 : 外気温[℃]

t_w : 床パネルを除く周壁平均表面温度[℃] A_p : 床パネル面積[m²]

A_w : 床パネルを除く周壁の面積[m²] n : 換気回数[回/時]

V : 室の容積[m³] C_p : 空気定圧比熱=1.007[kJ/kgK]

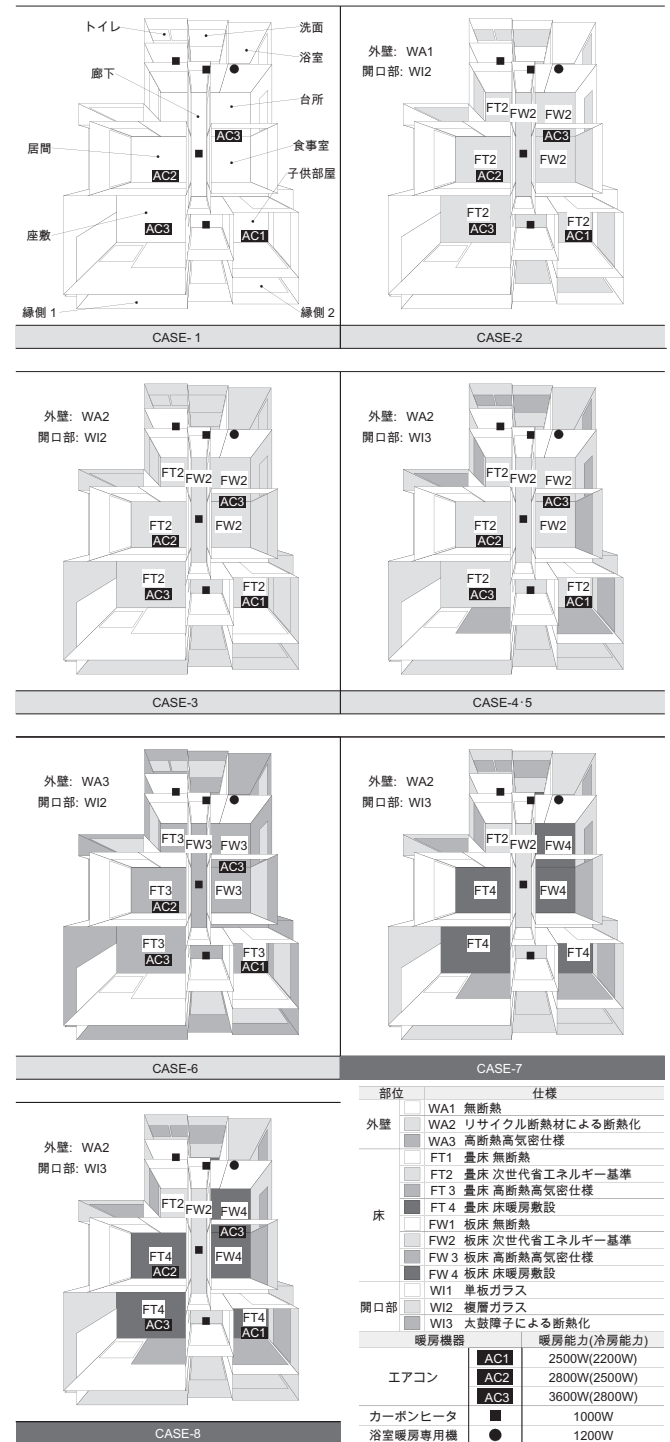
α_c : 対流熱伝達率=3.8[W/m²K] ρ : 空気密度=1.206[kg/m³]

参考文献

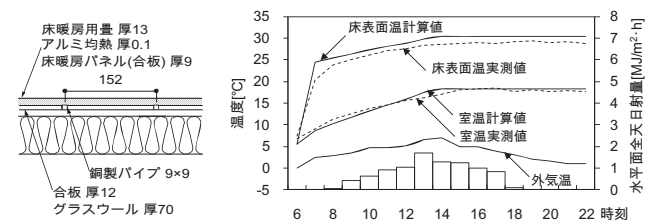
- 1) 長谷川兼一 他 2名:宮城県における民家を対象とした室内熱環境に関する実測調査,日本建築学会技術報告集,第3号,pp.189-192,1996.12
- 2) 内田哲晴 他 5名:古民家における断熱改修前後の温熱環境およびエネルギー消費量の実態把握,日本建築学会東北支部研究報告会,pp.17-20,2010.6
- 3) 安井妙子:高断熱高気密化による古民家修復,建築雑誌,No.1535, pp.26-27, 2005.7
- 4) 中園真人 他 3名:太鼓障子と木製複層ガラスサッシによる伝統民家の開口部断熱改修仕様の性能評価,日本建築学会環境系論文集,No.674,pp.241-249,2012.4
- 5) 水沼 信 他 2名:稲藁ともみ殻を主原料とするリサイクル断熱材の開発と基本性能評価,日本建築学会環境系論文集,No.616,pp.37-43,2007.6
- 6) 水沼 信 他 7名:温熱地における土壁住宅の外気側充填断熱工法の提案と断熱防露性能の検証,日本建築学会環境系論文集,No.624,pp.175-182,2008.2
- 7) 中園真人 他 4名:伝統民家縁側の緩衝空間としての温熱環境制御効果,日本建築学会技術報告集,第36号,pp.573-576,2011.6
- 8) 中村泰人 他 3名:床暖房室で熱的快適性を実現するための設計法の同定,日本建築学会環境系論文集,No.594,pp.61-67,2005.8
- 9) 中園真人 他 5名:断熱改修とエアコン・床暖房を組合せた伝統民家の温熱環境改善効果,日本建築学会技術報告集,第36号,pp.563-568,2011.6
- 10) 建築環境・省エネルギー機構:SMASH for Windows Ver.2-住宅用熱負荷計算プログラム-ユーザーマニュアル,2000.9
- 11) Kumaran,M.K 著 日本建築学会訳:建築材料の熱・空気・湿気物性値,2001年
- 12) (財)住宅・建築省エネルギー機構:次世代省エネルギー基準セミナーテキスト,1999.4
- 13) 田中俊六他:最新建築環境工学,改訂2版,井上書院,pp.202-211,2004
- 14) 井上宇市:空気調和ハンドブック,改訂5版,丸善株式会社,pp.68-69,2008
- 15) 宇田川光弘:標準問題の提案 住宅用標準問題:熱分科会第15回熱シンポジウムテキスト,日本建築学会環境工学委員会,pp.23-33,1985.9
- 16) <http://www.mlit.go.jp/common/000038489.pdf>,2012.11.12 参照
- 17) 王 岩他 4名:養蚕型建築に対応した伝統民家の温熱・空気環境の実態とそのメカニズム,日本建築学会環境系論文集,No.634,pp.1451-1455,2008.12

18) 井上宇市:改訂3版建築設備ポケットブック,相模書房,1985

19) 日本設備設計事務所協会:床暖房設計マニュアル,第1版,日本設備設計事務所協会,pp.62-63,2003



付図1 各部位の断熱仕様と暖房機器の設定条件



付図2 床暖房システム(床材畳) 付図3 実測値と計算値の比較

(2012年7月10日原稿受理, 2012年12月27日採用決定)