

プレーナー屑を原料とする住宅用断熱材の蓄熱効果と材内水分傾斜

関野 登*・安喰 萌**

Heat-storage capacity and moisture gradient of
wood-shaving insulation panels for building use

Noboru SEKINO* and Moe AJIKI**

1. はじめに

低炭素社会の実現には、あらゆる分野でのCO₂排出削減が必要であり、住宅の高断熱化による省エネ推進が一層重要となっている。また、住宅用断熱材には様々な種類があるが、断熱性能に加えて、製造エネルギーが小さい製品や住まい手と施工作業者の健康を配慮した製品が重視されつつある。たとえば、ドイツ“エコテスト社”の調査結果からの引用¹⁾では、断熱材1 m³あたりの製造エネルギーは、硬質ウレタンフォーム (PUF) が1585kWhと最大で、グラスウール (GW) とロックウール (RW) が750kWh、ポリスチレンフォーム (EPSやXPS) が695kWh、そして木質系のインシュレーションボード (IB) の560kWhと続く。一方、ココヤシ繊維マットは95kWh、フラックス繊維マットは50kWh、ウールマットは30kWh、そして木質系のセルローズファイバー (CF) は僅か14kWhに過ぎない。米国では住宅用断熱材におけるCFのシェアは35%を占め²⁾、欧州では木質系マット断熱材のシェアが急速に拡大している³⁾。これに対し、わが国ではGWやRWといった無機繊維系が65%程度、次いでPUF、EPS、XPSなどの発泡プラスチック系が32%程度を占める³⁾。残り3%程度がCFを主体とする木質繊維系および多種多様な天然系輸入断熱材で構成され、天然繊維系断熱材のシェアは極めて小さい。

断熱材にも環境性能が求められる今日、木質系の断熱材は、①低い製造エネルギー、②木造

Received December 25, 2008

Accepted February 13, 2009

* 岩手大学環境学系

**元 岩手大学農学部農林環境科学科森林科学講座

本研究は平成19年度文部科学省科学研究費補助金 (基盤研究 (C) 課題番号18580160、研究代表者: 関野登) の一部として行った。また、本研究の概要は、第58回日本木材学会大会 (2008年3月、つくば) において発表した。

住宅の炭素ストック増加, ③間伐材等の活用による森林整備の促進, などの可能性を秘めている。最近の研究事例としては, 低密度で厚物の繊維板がある。Kawasakiら⁴⁾は密度50~500kg/m³の範囲で繊維板を製造し, 強度面での低密度化の限界値, 密度と熱伝導率の関係を明らかにした。さらに, その繊維板をコア材とする複合パネルの断熱性能を調べ, 例えば9mm合板でサンドイッチした厚さ96mm, 密度340kg/m³のパネルで, 0.070 W/mKの熱伝導率と0.14mm²/sの熱拡散率を得ている^{5,6)}。また, 山内ら⁷⁾はスギ樹皮小片を原料に床暖房用基材(厚さ50mm)を開発した。ボード密度400kg/m³で0.06 W/mK程度の熱伝導率を得ており, 木部小片のボードよりも断熱性は若干高い。一方, ドイツを中心に普及が進む乾式加熱製造の木質繊維マット断熱材⁸⁾はわが国にも技術導入され, 北海道の間伐材を利用した商業生産が2009年9月に開始予定となっている。

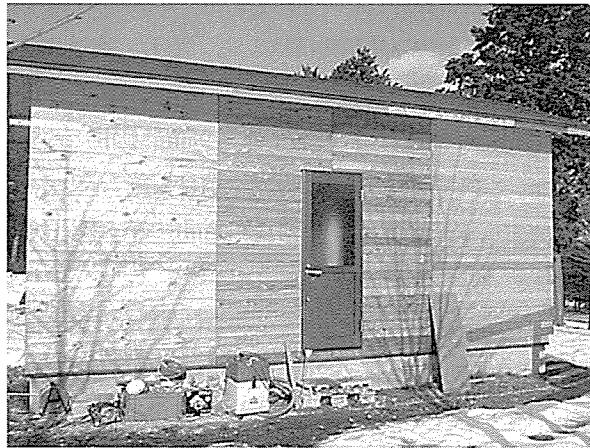
木質系断熱材に関する以上のような研究開発状況の中, 筆者らは接着剤も加熱も不要な木質マット断熱材(以下, 本断熱材と呼ぶ)を2003年に考案した。背の高い型枠中で木質小片のマットを常温圧縮し, 小片間摩擦力とマットの周囲被覆によりパネル形状を維持する仕組みで⁹⁾, GWの代替を目的とした非構造用の断熱部材である。これまで各種小片の原料適性¹⁰⁻¹⁴⁾を調べた結果, 断熱性能や製造エネルギーの両面で有利な原料は, 乾燥した製材品のプレカットで発生するプレーナー屑であることが分かり, プレーナー屑を原料とする商品化の推進¹⁵⁾とともに, 遮音性の測定¹⁶⁾, 燃焼挙動の把握¹⁷⁾および耐火性能の検証¹⁸⁾を行ってきた。

さて, 木質系では断熱材内部に独立気泡を作り難く, かつ, 熱の伝導経路となる“熱橋”も多い。そのため, 熱伝導率は一般に0.035W/mK以上¹⁹⁾であり, 他の断熱材より値は大きい。熱伝導率だけを見れば, 木質系の断熱性能は高いとは言えないが, 現実の温度非定常下では, 熱拡散率(熱伝導率を密度と比熱で除した値)による評価も重要である。たとえば, IBの熱拡散率は0.29mm²/sで, GWの1.1mm²/sの3割程度であり, 本断熱材では熱拡散率は0.35~0.45mm²/sで, GWの約1/2である¹⁸⁾。熱拡散率が小さければ熱容量が生かされ, 外気温の変動に対する室温変動が小さくなると考えられる。

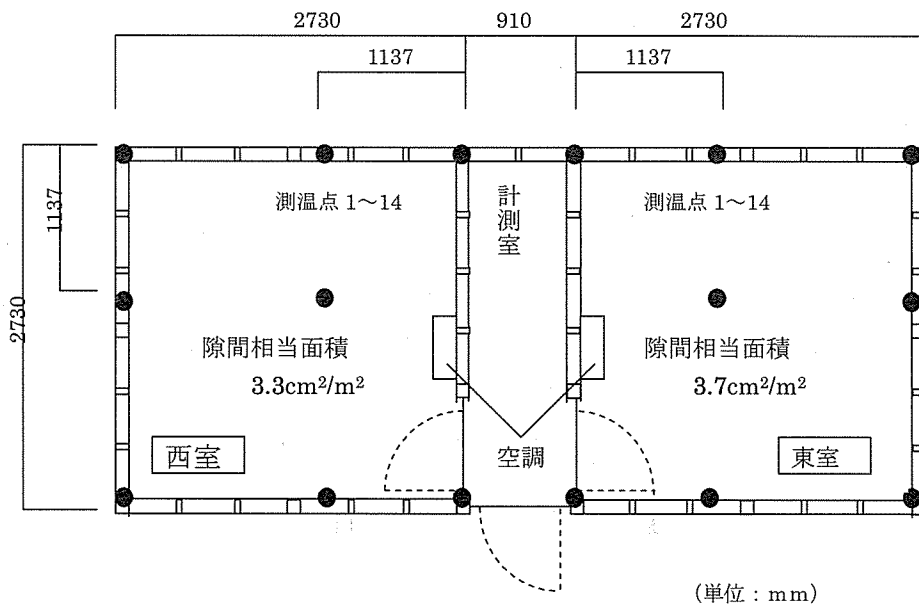
そこで本研究では, GWおよび本断熱材が施工された小型の実験住宅を用いて, 冬季の暖房停止後の室温降下を調べ, 本断熱材の蓄熱性に基づく保温効果をGWとの比較から検証した。また, 暖房時のエアコン消費電力の測定を行い, 暖房負荷に及ぼす断熱材の差異の影響を調べた。

ところで, 本断熱材は周囲が建築用防湿フィルム(厚さ150 μ mのポリエチレン)で被覆されており, 水蒸気の流出入は極めて少ない。しかし, 断熱材内部の小片間には多数の粗大空隙があり, 水蒸気移動は容易と言える。そのため, 断熱材両面で大きな温度差が生じると, 高温側の小片は放湿して, その水分を低温側の小片が吸湿し, 断熱材の厚さ方向で水分傾斜が生じることになる。低温側が著しく高湿度になった場合, フィルム内側に結露発生恐れや, それに起因する断熱性の低下も危惧される。そこで本研究では, 冬季暖房時に材内の温湿度を測定

し、水分傾斜が断熱性能に及ぼす影響ならびに内部結露発生の有無を調べた。



図一 1. 実験住宅の外観(南面)



図一 2. 実験住宅の平面図 (●印は測温点の平面位置)

II. 実験方法

1. 実験住宅の概要

実験住宅の外観を図1に、平面図を図2に示す。岩手県林業技術センター（岩手県紫波郡矢巾町）の敷地内に、在来軸組構法（柱は105mm角のスギ材）で2004年12月に建設されたもの

で、中央の計測室と4畳半大の東西2室（無窓）で構成される。西室と東室は、構造部材、内・外装部材ともに共通で、使用された断熱材のみが異なる。すなわち、床・外壁・天井には、西室に本断熱材（木質）が、東室にGWが使用されている。なお、構造体の仕様は、以下の通りである。

壁：内装下地（9mmOSB）+ 断熱材 + 外装下地（9mmMDF）+ 防風透湿シート
+ 通気層胴縁18mm + 外装材（15mmアカマツ羽目板）

床：床下地（9mmOSB）+ 断熱材+ 床下空間（300mm）+ 木炭（100mm）
+ 乾燥砂（30mm）+ 防湿シート+ 地盤面

天井：天井板（9mm石膏ボード）+ 断熱材 + 小屋裏下地（9mmMDF）
+ 小屋裏空間（東西室連結）

西室の断熱材（木質）は、寸法1350×380×105mm（高さ×幅×厚さ）で、密度は100kg/m³である。その原料小片はベイマツ、ベイヒの混合プレーナー屑（重量比6:4）で目開き3mmの篩で微粉は取り除いており、プレカット工場の廃材である。なお、製造時の小片含水率は11%であった。また、断熱材側面の形状安定板には市販薄物MDF（厚さ2.6mm、密度783kg/m³、熱伝導率0.133W/mK）が、周囲被覆材には建築用防湿フィルム（厚さ150μmのポリエチレン、密度992kg/m³、熱伝導率0.34W/mK）が使用されている。一方、東室のGWは、密度32kg/m³、熱伝導率カタログ値0.036W/mKであり、両室で断熱材の熱抵抗が同等（1.8m²K/W）となるよう、厚さ62mmで施工されている。

なお、各室の気密性に関して、西室の相当隙間面積は3.3cm²/m²、東室は3.7cm²/m²であり、漏気による熱損失は両室でほぼ同等の条件である。したがって、両室は断熱材のみが異なり、躯体構造、各部位の熱抵抗および気密性は、ほぼ同等条件にあると判断できる。

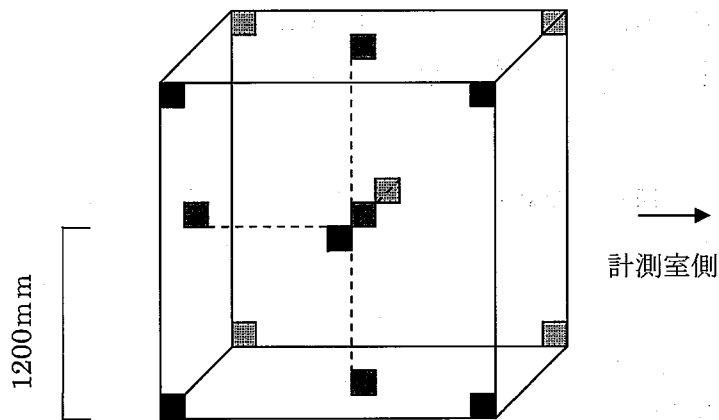


図-3. 測温点（■印の14点）の配置模式図

2. 暖房停止後の室温降下の測定

温度の測定箇所を図2および図3に示す。両室とも、床面中央の高さ0, 120, 240 (天井面) cmの3点, 床・壁・天井の隅角8点, および計測室側の壁を除く3壁の各中央点の計14箇所とした。また, 外気温は各室の北面中央の軒下 (計2点) で測定した。温度測定には熱電対 (JIS T型0.65φ) を用い, 計測器室に設置されたデータロガー (KEYENCE社製NR-600およびGRAPHTEC社製GL200) に測定データを15分間隔で収集した。

暖房には, 図1に示す位置に設置したエアコン (サンヨー: 室内機; SAP-NT22P, 室外機; SAP-CNT22P) を用いた。また, エアコンの消費電力を測定するため, 電力計 (HIOKI社製: 3168クランプオンパワーハイトスタ) を各エアコンの主電源配線部に設置し, 15分間隔で電力を記録した。

暖房停止後の室温降下の測定は, 次の要領で行った。エアコンの暖房設定温度を20℃とし, 正午に暖房開始, タイマー設定で深夜0時に停止させた。毎日12時間の暖房とそれに続く12時間の非暖房を1サイクルとして, 計6サイクル (2007年12月4日~7日および12月10日~13日) の温度測定と電力測定を行った。

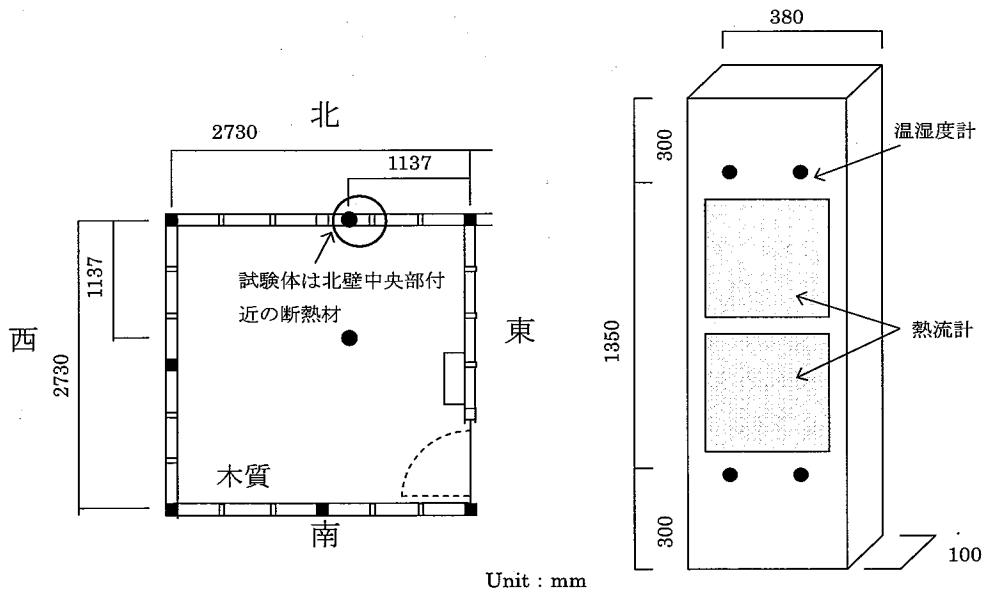


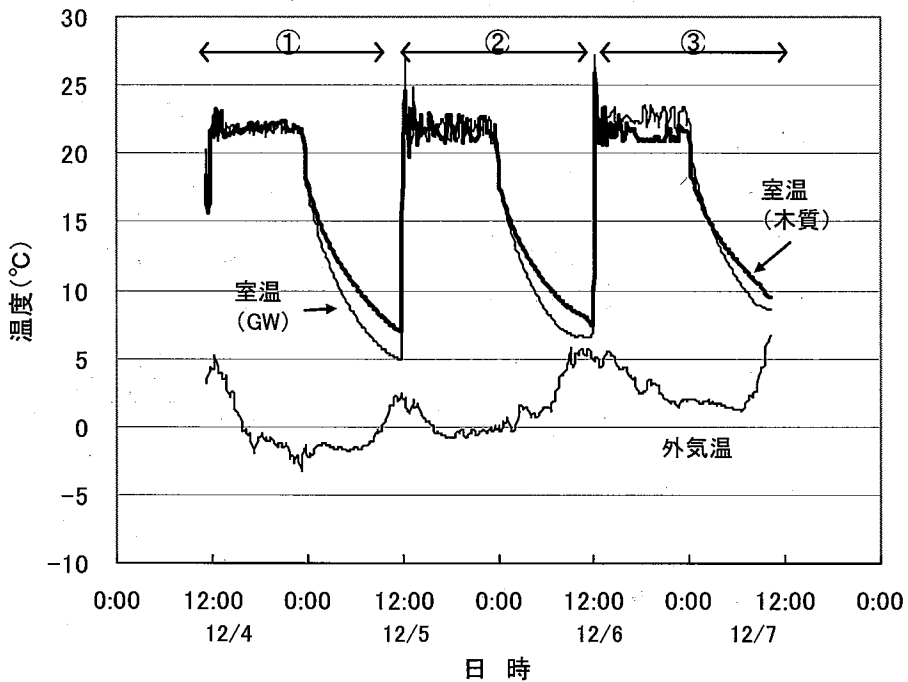
図4. 水分傾斜測定用の試験体設置位置 (左) と試験体 (右)

3. 断熱材の温湿度測定

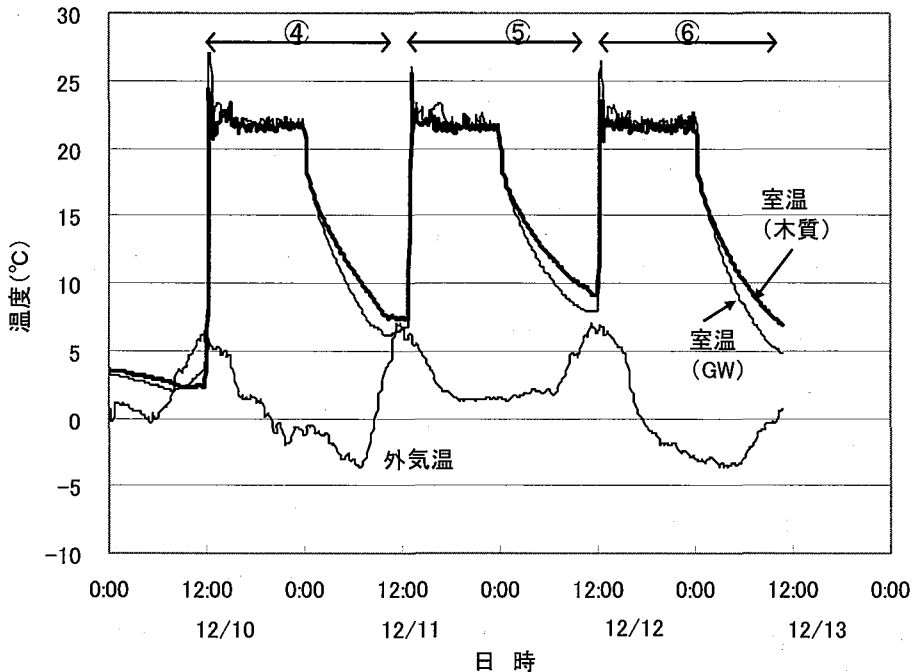
図4 (左) に示す西室の北壁中央付近では, 床面から1350mmの高さまで内装下地および断熱材が取り外し可能となっている。本断熱材の材内水分や断熱性能に関する検討は, この部分を用いて行った。図4 (右) に示すように, 断熱材表面のフィルム内側には, 片面に4個, 両

面で計8個の温湿度センサー（ESPEC社製RS-12：厚さは約5mm）を取り付け、断熱材表面から深さ5mm程度における平均的な温湿度を測定した。なお、センサー取り付け時にフィルムに部分的な切り込みを入れたが、取り付け後は防湿テープで十分に補修した。また、断熱性能の変化の有無を知る目的で、断熱材表面には高精度熱流センサー（英弘精機：MF-190、寸法30cm×30cm×厚さ0.7mm）を片面に2枚ずつ取り付けた。センサー出力は直流増幅器（KYOWA：DA510B）で500倍に増幅され、データロガー（KEYENCE社製：NR-600）に15分間隔で収録した。また、室内外の温度測定も前述と同様の方法で収集した。

測定日は2007年12月28日～2008年1月8日（前期）および1月8日～15日（後期）の二つの期間とした。前・後期とも、エアコンの連続暖房により室内温度を約22℃に保った。一方、室内の湿度は、前期では加湿を行わない成り行き状態とし、後期では気化式の加湿器および湿度制御器により、55～60%RHに維持した。



図一五．冬季暖房時の室温変化 その1 (2007年12月4日～7日)



図一六．冬季暖房時の室温変化 その2 (2007年12月10日～13日)

III. 結果および考察

1. 暖房停止後の室温降下

室温変化の測定結果を図5 (第1～3サイクル) および図6 (第4～6サイクル) に示す。室温は床面中央の高さ1.2mにおける測定値で、外気温は2測定点の平均値で示した。暖房停止後の室温降下を両室で比較するため、各サイクルにおける暖房中の平均室温(T_{av})、午前6時の室温(T_6)、室温降下幅($\Delta T_L = T_{av} - T_6$)を求め、表1に一覧にした。

室温 T_6 は、東室(GW)で8.1～10.8°Cの範囲に、西室(木質)で10.2～12.1°Cの範囲にあり、全6サイクルの平均値は西室(木質)の方が1.8°C高かった。木質の蓄熱効果の表れと言える。ただし、両室で T_{av} に若干の差異があったため、室温降下幅 ΔT_L に着目してみる。東室(GW)では11.6～13.7°Cの範囲に、西室(木質)では9.3～11.6°Cの範囲にあり、全6サイクルの ΔT_L の平均値は、西室の方が2.2°Cだけ小さかった。以上の結果より、本断熱材の蓄熱効果が検証されたと言える。

さて、暖房停止後の室温降下は、漏気による熱損失と構造体の熱貫流による熱損失で生じる。両室とも気密性能はほぼ等しく、漏気による熱損失はほぼ同様と見なせるから、室温降下の相違は構造体の熱貫流の差異に依存すると考えられる。西室(木質)の午前6時の室温は、東室

表一．暖房停止後の室温降下

測定サイクル		①	②	③	④	⑤	⑥
暖房時平均室温 T_{av} (°C)	木質	21.9	21.8	21.4	21.7	21.7	21.6
	GW	21.8	22.0	22.7	22.0	22.1	21.9
午前6時の室温 T_6 (°C)	木質	10.3	10.4	12.1	10.9	12.1	10.2
	GW	8.1	8.5	10.8	9.1	10.5	8.4
室温低下幅 (°C) $\Delta T_L = T_{av} - T_6$	木質	11.6	11.4	9.3	10.8	9.6	11.4
	GW	13.7	13.5	11.9	12.9	11.6	13.5

表二．午前6時における室温および室内表面温度（床面、天井面、各壁）

	①		②		③		④		⑤		⑥		
	木質	GW	木質	GW	木質	GW	木質	GW	木質	GW	木質	GW	
室温	10.3	8.1	10.4	8.5	12.1	10.8	10.9	9.1	12.1	10.5	10.2	8.4	
(差)	+2.2		+1.9		+1.3		+1.8		+1.6		+1.8		
室内表面	床	10.6	8.31	10.6	8.5	12.4	10.9	11.3	9.3	12.4	10.7	10.6	8.7
	天井	10.2	9.3	10.3	9.6	12.0	12.0	10.7	10.1	12.0	11.6	10.0	9.3
	北壁	10.0	8.5	10.2	9.0	11.8	11.3	10.5	9.5	11.8	10.9	9.9	8.7
	南壁	10.2	8.5	10.5	9.0	12.1	11.4	10.8	9.5	12.1	11.0	10.1	8.7
	他壁	10.1	8.6	10.3	9.1	12.0	11.4	10.8	9.5	12.1	11.0	10.0	8.7
	平均	10.2	8.6	10.4	9.0	12.1	11.4	10.8	9.6	12.1	11.0	10.1	8.8
	(差)	+1.6		+1.4		+0.6		+1.2		+1.1		+1.3	

(単位：°C)

(GW) より約2°C高かったが、この理由を同時刻での室内表面温度から考察してみる。表2は、床、天井および3壁面で測定された室内表面温度を示すが、各サイクルでの室内表面温度の平均値は、西室(木質)の方が0.6~1.6°C高かった。すなわち、木質小片断熱材に蓄積された熱が徐々に戸外に放出されたことで(熱拡散率はGWの約1/2)、室内表面温度が東室(GW)よりも高く保たれ、結果として室温降下幅が小さかったと解釈できる。

表三．暖房消費電力量の比較

測定リサイクル		①	②	③	④	⑤	⑥
消費電力量	木質 (Wh)	2038	2732	1996	2452	2074	2242
	GW (Wh)	1919	2722	2068	2334	1923	2129
	木質 / GW	1.06	1.00	0.97	1.05	1.08	1.05
室温上昇幅 $\Delta T_H = T_{av} - T_{12}$	木質 (°C)	—	14.8	13.9	18.3	14.2	12.4
	GW (°C)	—	17.0	15.9	17.7	15.2	14.0
	(GW)-(木質)	—	2.2	2.0	0.6	1.0	1.6
隅角部8点の暖房中の平均温度	木質 (°C)	14.4	13.6	14.9	14.6	14.5	14.6
	GW (°C)	15.5	14.7	16.8	16.1	16.1	15.8
	(GW)-(木質)	1.1	1.1	1.9	1.5	1.6	1.2

表-4. 実験住宅に施工された両断熱材の熱容量の比較

	木質小片断熱材	グラスウール
密度 (kg/m ³)	100	32
厚さ (m)	0.100	0.062
面密度 (kg/m ²)	10.0	1.98
比熱 (J/gK)	1.16	0.84
単位面積当たりの熱容量 (kJ/m ² K)	11.6	1.66

2. 暖房消費電力量の比較

表3に各サイクルでのエアコン消費電力量を示す。外気温の影響を受けるため、12時間暖房の消費電力量は、1.9から2.7kWhの範囲で変動した。いま、両室の電力量をサイクル毎に比較すると、その比率（木質/GW）は0.97から1.08の範囲にあった。6サイクル中の2サイクルは比率が1.0以下であるが、他の4サイクルでは1.0を越え、本断熱材はGWと比べて暖房エネルギーの点で同等か若干不利と言える。ちなみに、6サイクル平均での比率は1.04となり、GWに対して4%ほど消費電力量が大きくなった。この理由について、以下、考察を進める。

まず、本断熱材とGWの熱容量の差異を考える。両者の熱物性値等は表4の通りであり、実験住宅の壁・床・天井に同等の熱抵抗で充填された状態で、面密度に約5倍の相違がある。さらに、本断熱材の比熱はGWの1.4倍であり、結果として本断熱材の熱容量はGWの約7倍となる。実験住宅の両室の相違は断熱材の種類のみであるが、いま、断熱材における7倍の熱容量の差異が構造体の熱容量にどの程度影響するかを、壁を例に検討してみる。

壁の断面構成において、厚さ15mmの外装羽目板（アカマツ）、厚さ9mm構造用MDF、厚さ9mm内装OSBの密度をそれぞれ500、750、650 kg/m³とすると、これらの面密度の合計は、20.1kg/m²と算出される。一方、柱と間柱に用いたスギの密度を330kg/m³とすると、面密度は約5 kg/m²となる。これらの木質材料の比熱を1.16 J/gKとすれば、壁の単位面積当たりの熱容量は、29.1kJ/m²Kとなる。これに断熱材の熱容量を加算すると、西室（木質）と東室（GW）の壁の単位面積当たりの熱容量の比の概略値は、41:31（=1.3:1.0）となる。すなわち、本断熱材を充填した壁はGW充填の壁よりも3割程度、熱容量が大きいと試算される。断熱材自体の熱容量の7倍であったが、壁体全体では3割増しの熱容量に留まった。また、床や天井は断熱材以外の共通部材の面密度が壁に比べて小さいため、西室（木質）での熱容量は東室（GW）の3割増し以上と見積もられる。

以上より、西室（木質）における暖房消費電力量が東室（GW）より若干大きくなった理由は、両室での熱容量の差異にあると言えよう。また、興味深い測定結果として、表3に示す隅角部8点の平均温度（暖房時間中）がある。これを両室で比較すると、西室（木質）の方が1.1~1.9℃だけ低くなっていた。その原因は不明であるが、隅角部分の温度が低ければ室内空気からの熱伝達も大きく、結果として室温低下を招き、これを補うためにエアコンの消費電力

表一五．暖房開始直前の室温および室内表面温度（床面、天井面、各壁）

		②		③		⑤		⑥	
		木質	GW	木質	GW	木質	GW	木質	GW
室温		7.0	5.0	7.5	6.6	7.5	6.8	9.2	7.9
		+2.0		+0.9		+0.7		+1.3	
室内表面	床	7.3	5.0	7.6	6.4	7.5	6.5	9.3	7.8
	天井	6.7	5.8	7.4	6.9	7.4	8.0	9.1	8.5
	北壁	6.7	5.3	7.4	6.5	7.2	6.9	9.0	8.0
	南壁	7.1	5.2	8.1	6.8	8.2	7.4	9.3	8.1
	他壁	6.9	5.3	7.8	6.9	7.4	7.3	9.3	8.1
	平均	6.9	5.3	7.7	6.7	7.5	7.2	9.2	8.1
		+1.6		+1.0		+0.3		+1.1	

(単位：℃)

量が増加した可能性も考えられる。

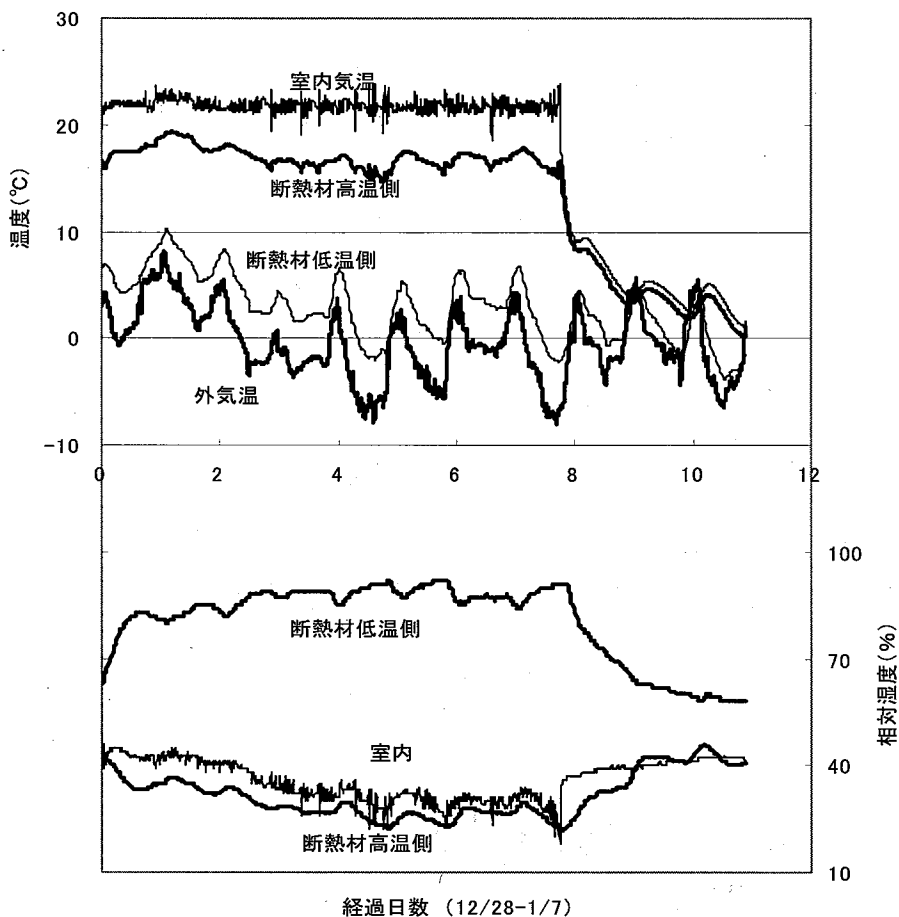
ところで、構造体の熱容量が3割以上異なる割には、両室での暖房消費電力量の差(4%)は小さいとも言える。その原因として、表3に示す室温上昇幅 ΔT_H (暖房開始直前の室温と暖房時平均室温との差)の違いが挙げられる。1サイクル目は欠測であるが、2サイクル目以降では、西室(木質)の方が0.6~2.2℃だけ室温上昇幅は小さかった。表5に示す暖房直前の室温および室内表面温度からも分かるように、西室(木質)の方が東室(GW)よりも室温、室内表面温度ともに若干高く、これが暖房設定温度までの室温上昇幅を相対的に小さくしている。すなわち、西室(木質)は東室(GW)と比べて、暖房停止後の室温降下が少ない分だけ、室温上昇に費やす電力量を抑えることが可能であり、構造体の熱容量が大きい割には暖房消費電力量に大差が生じなかったと解釈できる。

なお、今回の実験では、エアコンによる間欠暖房での消費電力比較に留まった。熱容量が大きな構造体は、暖房立ち上げ時にエネルギーを必要とするため、連続暖房の方が省エネ面で有利と考えられる。今後は、連続暖房における両室の温度変化や電力消費量を調べ、グラスウールを本断熱材で代替する際の得失について、さらに検討を深める必要がある。

3. 木質小片断熱材の水分傾斜

1) 室内加湿なしの場合

図7に温湿度の測定結果を示す。断熱材の温湿度は表裏面それぞれ4点の平均値で、また、室内温湿度は床面中央の高さ1.2mでの測定値で示した。なお、表示データは2007年12月28日午後0時より2008年1月8日午前9時までの約11日間であるが、エアコンの連続暖房は28日午前11時に開始され、室温は1月5日午前6時まで約22℃に保たれた。したがって、暖房開始1時間後からの表示であり、暖房停止後約3日間まで図示されている。なお、室内に人為的な水分発生源はなく、室内湿度は成り行き状態であった。



図一七．連続暖房中の断熱材表裏面の温湿度（室内加湿なし）

図7において、まず、断熱材低温側の表面の温湿度に着目する。低温側の温度は外気温に連動して周期的に変化した。また、相対湿度は温度の周期変化に対して逆位相で呼応し、やや増加傾向を示しながら80～90%の範囲を推移した。一方、断熱材高温側の表面温度は、ほぼ一定ながら外気温の周期性の影響を受けた。また、相対湿度は暖房停止まで減少傾向を示し、最低値は21%に達した。

図7に見られる断熱材両表面での相対湿度の顕著な差は、温度傾斜に基づく断熱材内部の水分移動で考えられる。そこで、断熱材表裏面の含水率を木材の平衡含水率図表²⁰⁾から推定してみる。暖房開始1時間後（計測開始時）の温湿度、暖房中の平均温湿度および暖房停止3日後の温湿度、およびこれらと平衡する含水率を表6に示す。計測開始時は既に温度勾配が発生しており、高温側表面の含水率は8.0%、低温側表面が11.8%と推定された（含水率差：2.8%）。その後の8日間平均の含水率は、高温側が5.8%、低温側が19.9%となり、約14%の含水率差が

表-6. 木質小片断熱材表裏面の温湿度と平衡含水率 (室内加湿なし)

	温度 (°C)		相対湿度 (%)		平衡含水率* (%)	
	高温側	低温側	高温側	低温側	高温側	低温側
計測開始時	17.0	7.0	42	63	8.0	11.8
暖房中の平均値	17.0	3.7	29	87	5.8	19.9
暖房停止3日後	2.0	2.0	41	58	8.5	11.1

*断熱材の高温側および低温側表面の温湿度に平衡する木材の含水率

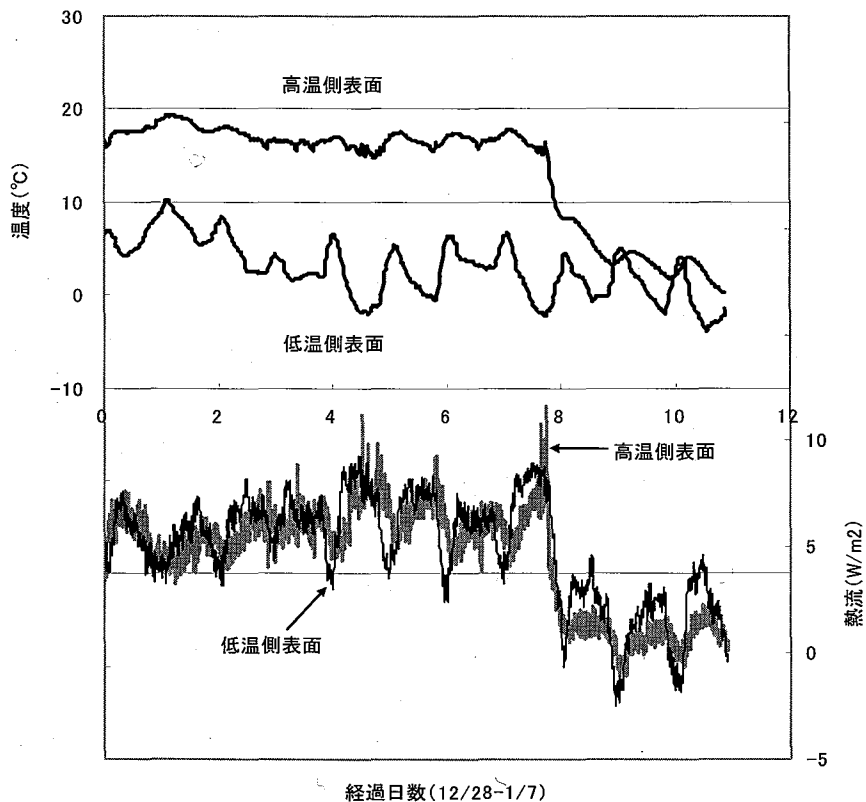
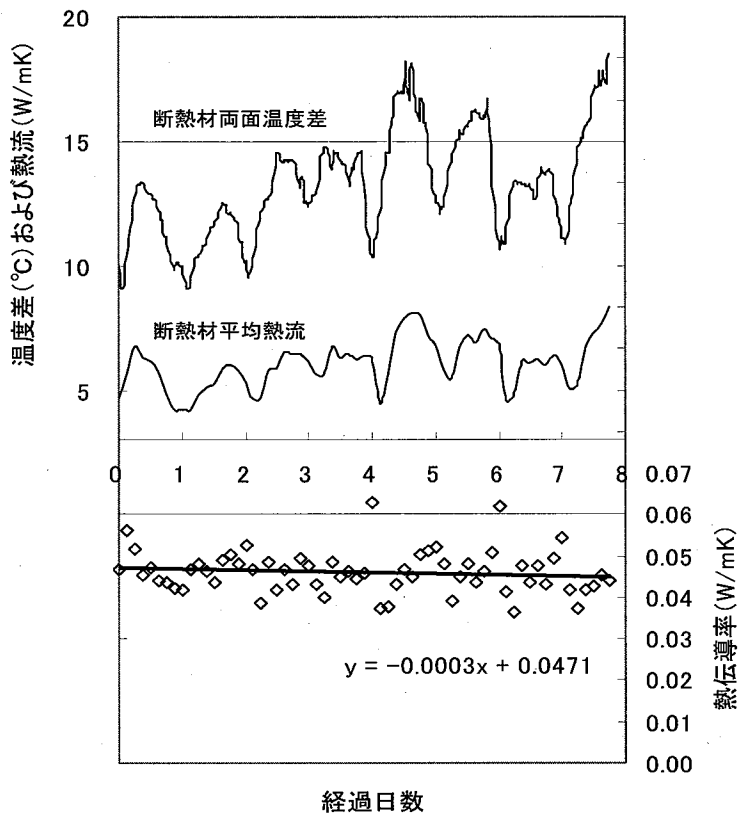


図-8. 断熱材表裏面の温度変化と熱流変化

生じた。しかし、暖房停止3日後(計測終了時点)、温度勾配が消滅すると含水率差は2.6%に低減した。

続いて、上記のような水分傾斜が断熱性能に及ぼす影響を、断熱材表裏面の熱流変化から検討してみる。図8は断熱材表裏面における熱流の測定結果であり、熱流発生の基本となる表裏面温度も併記してある。高温側表面と低温側表面で熱流の周期変化の位相は若干異なったが、これは本断熱材の蓄熱性に由来すると言えよう。いま、低温側と高温側の熱流の平均値を求め(平均熱流: Q)、その推移を断熱材両表面の温度差 (ΔT) とともに図9に示した。さらに、



図一 9. 断熱材表裏面温度差、表裏面平均熱流および熱伝導率（室内加湿なし）

これらのデータを用い、各時点を定常状態と見なして、フーリエの法則、

$$Q = \lambda \cdot (\Delta T / d) \quad \text{ただし、} d = 0.105 \text{ (断熱材の厚さ：m)}$$

より熱伝導率 λ を算出し、同図中に示した。

図 9 より、平均熱流が温度差に呼応して変化する様子が読み取れ、熱伝導率はほぼ一定で推移している。また、熱伝導率の平均値は 0.047 W/mK であった。以上の結果より、本断熱材に表 6 に示す程度の水分傾斜が生じてても、断熱性能には影響しないと言える。なお、断熱材製造時の小片含水率は約 11% であったが、表 6 を見る限り、製造後 3 年経過しても製造時の含水率状態が維持されていると言える。

2) 室内加湿ありの場合

室内の相対湿度を 50~60% に保持した場合について、前節と同様の検討を以下に行う。温湿度測定結果を図 10 に示すが、表示データは 1 月 8 日午後 1 時より 15 日午後 1 時までの 7 日間である。なお、暖房および加湿は 8 日午前 11 時に開始され、13 日午前 1 時に停止された。したがって、表示データは暖房開始 2 時間後から停止後 36 時間の温湿度の推移も示されている。

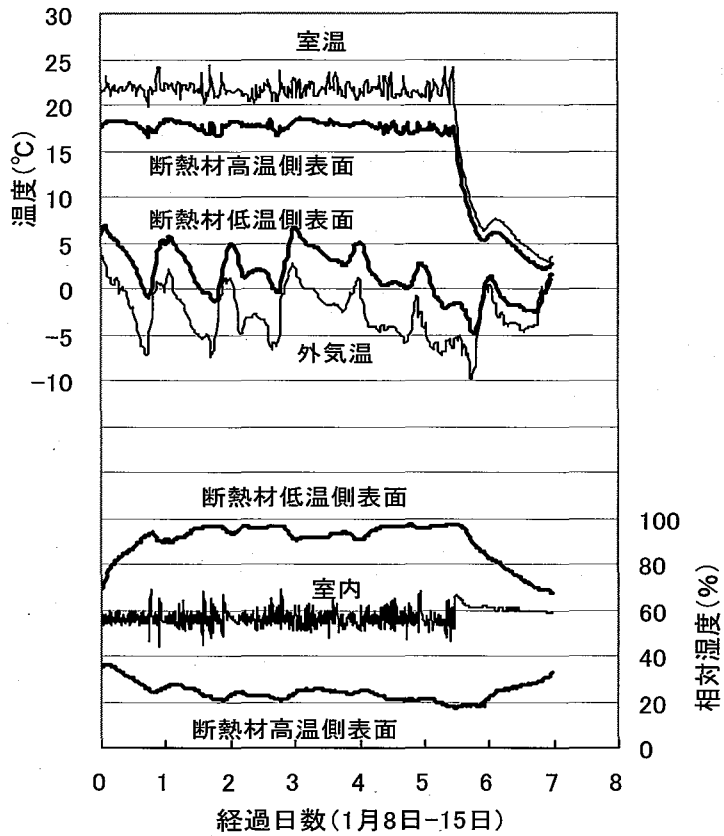


図-10. 連続暖房中の木質小片断熱材表裏面の温湿度（室内加湿あり）

表-7. 木質小片断熱材表裏面の温湿度と平衡含水率（室内加湿あり）

	温度 (°C)		相对湿度 (%)		平衡含水率* (%)	
	高温側	低温側	高温側	低温側	高温側	低温側
計測開始時	18.0	6.0	36	69	7.2	13.3
暖房中の平均値	17.7	2.4	24	93	5.2	24.2
暖房停止36時間後	3.0	1.0	33	68	6.8	13.1

*断熱材の高温側および低温側表面の温湿度に平衡する木材の含水率

断熱材表裏面の相对湿度に関して、変化の様子は前節とほぼ同様であるが、低温側表面の相对湿度は90%以上に達した。これは、前節の測定期間よりも外気温が低く、断熱材の温度勾配が若干大きくなったためと思われる。表7には、計測開始時、暖房中、暖房停止24時間後について、断熱材表裏面の温湿度とそれに平衡する含水率を示した。断熱材低温側表面の含水率は、暖房中の平均値で約24%となり、前節の測定結果よりも大きな水分傾斜が現れた。なお、暖房停止直後に断熱材を取り外し、断熱材の低温側表面の様子を観察した（一連の作業時間は5分

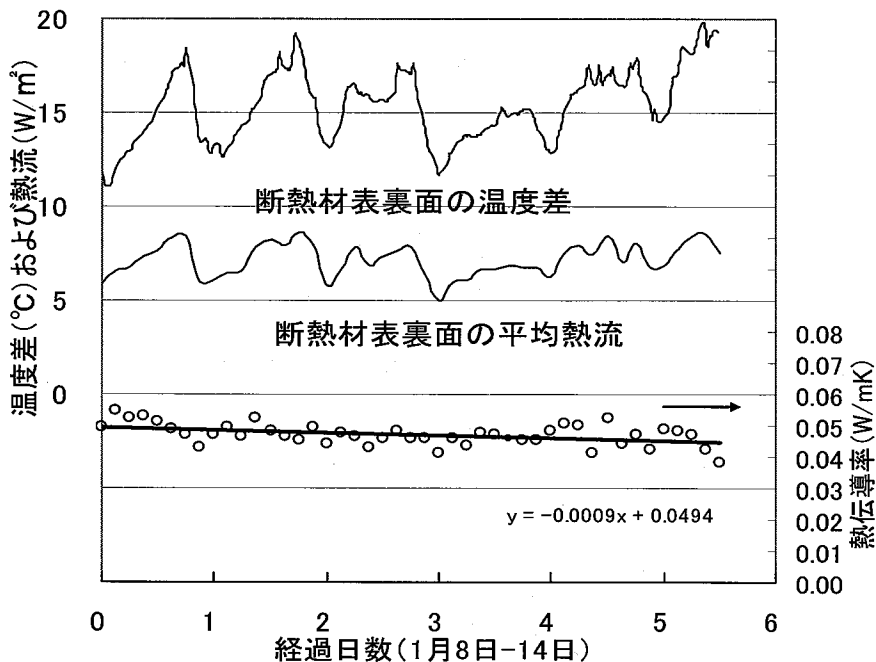


図-11. 断熱材表裏面温度差、表裏面平均熱流および熱伝導率（室内加湿あり）

以内)。断熱材低温側の温湿度は -2.0°C 、97%であったが、目視による結露は観察されなかった。このときの断熱材表裏面の温度差は 19.4°C であり、このような温度傾斜においても結露発生が認められなかったことは、吸湿性に富む木質特有の性質であり、興味深い結果である。また、表7で暖房停止後36時間に着目すると、温度傾斜の低減によって含水率の表裏面差も小さくなっていた。これは、断熱材内部の透湿抵抗が著しく小さいことを示唆する。

図11に、暖房中の断熱材表裏面の温度差、表裏面の平均熱流、それらより算出した熱伝導率を示す。得られた熱伝導率は、 $0.038\sim 0.058\text{W/mK}$ に分布し、平均値は 0.049W/mK であった。この値は加湿なしの場合に得られた熱伝導率の平均値 0.047W/mK と近接しており、両者の間に統計的な有意差は認められなかった。さらに、図11から分かるように、測定期間中の熱伝導率の増加も認められなかった。すなわち、今回の測定では断熱材両面の温度差が最大 20°C 程度となる厳しい条件も含まれたが、それに伴って大きな水分傾斜が発生しても、断熱性能に悪影響を与えないことが明らかとなった。

IV. まとめ

本研究では、プレーナー層を原料とする住宅用断熱材について、蓄熱性に基づく保温効果を小型実験住宅で検証するとともに、材内水分傾斜に関する検討を行った。得られた知見は以下

のとおりである。

1) 暖房停止後の室温降下は、グラスウールよりも本断熱材の方が約2℃小さく、保温効果に優れることが検証された。その要因として室内表面温度が相対的に高く保たれたことが挙げられ、これは本断熱材に蓄積された熱が徐々に戸外に放出されたことに起因すると解釈された。

2) 暖房エネルギーは、グラスウールと同等か若干不利な傾向(4%増)にあった。ただし、構造体の熱容量はグラスウール施工の3割増しと推察され、熱容量の差の割には暖房エネルギーへの影響は小さかった。暖房停止後の室温降下が少ない分だけ、室温上昇に費やす電力量を抑制できたためと解釈できる。

3) 室内外の温度差が最大30℃となる厳冬期(断熱材の両面温度差は約20℃)では、本断熱材の両面で20%程度の大きな含水率差が生じたが、低温側表面に結露発生は認められなかった。また、温度差と熱流測定から算出した熱伝導率は、水分傾斜が発生しても一定値を保ち、水分傾斜に伴う断熱性能の悪化は認められなかった。さらに、断熱材両面の含水率差は、温度傾斜の低減とともに減少しており、断熱材内部の透湿抵抗が著しく小さいことが示唆された。

引用文献

- 1) 西方里見 (2002) 外断熱が危ない. 155-186, 242-266, 株式会社エクスナレジ, 東京.
- 2) 日本製紙木材株式会社 (2006) パンフレット "SUPER JET FIBER"
- 3) 小池洋平 (2007) 日本木材加工技術協会第16回木質ボード部会シンポジウム, 61-66.
- 4) T. Kawasaki, M. Zhang, S. Kawai (1998) *J. Wood Sci* 44: 354-360.
- 5) T. Kawasaki, M. Zhang, S. Kawai (1999) *J. Wood Sci* 45: 291-298.
- 6) T. Kawasaki, S. Kawai (2006) *J Wood Sci* 52: 75-83.
- 7) 山内秀文・馬霊飛・O.R. Pulido・佐々木 光・桜庭 司 (2002) 第52回日本木材学会大会研究発表要旨集: 576.
- 8) 株式会社NERC (2007) ホームテルム製品カタログ (日本版)
- 9) 関野 登 (2004) 特許第3607254号.
- 10) 関野 登・河村義大 (2003) 木材工業 58:364-369.
- 11) 河村義大・関野 登・山内英彦 (2004) 木材学会誌 50: 228-235.
- 12) 河村義大・関野 登・山内英彦 (2004) 木材学会誌 50: 397-403.
- 13) 関野 登・河村義大・山内 剛 (2005) 木材学会誌 51: 380-386.
- 14) 関野 登・山内 剛 (2007) 木材学会誌 53: 104-109.
- 15) 株式会社ヤマウチ (2006): カタログ "サーモカール".
- 16) 関野 登・谷内博規・山内 剛 (2006) 第24回日本木材加工技術協会年次大会要旨集: 202-203.

- 17) 関野 登・葭葉 恵・谷内博規・山内 剛 (2007) 岩大演報 38 : 1-21.
- 18) 谷内博規・関野 登・山内 剛 (2008) 木材保存 34: 60-68.
- 19) 坂本雄三監修 (2004) 住宅の省エネルギー基準早わかりガイド, (財) 建築環境・省エネルギー機構・(社) 日本建材産業協会
- 20) 森林総合研究所監修 (2004) 木材工業ハンドブック, 丸善, 東京

Summary

The thermal diffusivity of insulation panels consisting of wood shavings is smaller than that of the glass-wool panels that are commonly used in buildings as insulation material. In the present study, the heat-storage capacity of wood-shaving insulation panels was compared with that of glass-wool panels, focusing on daily changes in room temperature in winter. The moisture gradient of wood-shaving insulation panels was also examined with respect to the avoidance of dew condensation. The panels were installed in two different rooms, with the same structure and thermal resistance, of a small one-story house (18 m²) built in Morioka, Japan.

The rooms were heated for 12 hours a day (0-12pm, 20°C) by an air conditioner, and the surface and air temperatures of the two rooms were compared. Minimum room temperatures in the early morning were found to be 2°C higher in the room with wood-shaving insulation panels. This was due to the fact that room surface temperatures were 0.6-1.6°C higher, since the thermal diffusivity of the wood-shaving insulation panels is half that of the glass wool panels. However, the amount of heating energy required was 4% greater in the room insulated with the wood-shaving panels due to a 30% greater heat mass.

During one-week of continuous room heating in the dead of winter, a large moisture and temperature gradient developed throughout the thickness of the wood-shaving insulation panel. When the temperature gradient reached 20°C, the moisture content was 24% at the lowest-temperature surface and 5% at the highest-temperature surface. However, dew condensation was not observed. Measurement of heat-flow in the presence of this moisture gradient revealed that the thermal conductivity of the wood-shaving insulation panel did not change. Moreover, the moisture gradient disappeared within a couple of days following the disappearance of the temperature gradient, suggesting that moisture permeability is great inside the wood-shaving panel.