

古紙を原材料とした環境配慮型不燃天井材の開発

DEVELOPMENT OF ENVIRONMENTALLY FRIENDLY NON-COMBUSTIBLE CEILING MATERIAL
MADE FROM RECYCLED PAPER

栗木 茂^{*1}, 一條 真人^{*2}, 右田 周平^{*3}, 大塚 洋之^{*4}, 小泉 穂高^{*3},
市川 菜奈絵^{*3}, 山本 拓弥^{*3}
Shigeru KURIKI, Masato ICHIO, Shuhei MIGITA, Hiroyuki OOTSUKA, Hodaka KOIZUMI,
Nanae ICHIKAWA and Takuya YAMAMOTO

In order to realize a sustainable society, there is a need to reduce the use of plastic building materials made from fossil fuels and to utilize renewable raw materials. Pulp molding material, which is made from recycled paper and used for packaging materials, is an eco-friendly material with low environmental impact in that it can be reused even after use. It is also lightweight and has excellent air permeability, water retention, and shape flexibility. However, its high flammability makes it difficult to use as a building material for interiors. Based on the above background, we obtained certification as a noncombustible material by blending an additive agent with molded pulp material and applying a flame retardant treatment. The certification made it possible to use the material as a ceiling material, and it was installed in the Green Office Building of Tsukuba Technology Research Institute as a system ceiling material.

The sound absorption characteristics of the ceiling material were measured, and the sound absorption performance was higher than that of rock wool sound absorbing boards. Since the main material is paper, uneven coloration, lot-to-lot variation, aging, and changes in mass due to moisture absorption and desorption are possible. Therefore, the color difference, visual reflectance, gloss, and mass change due to moisture absorption and desorption were measured. The results showed that the variation from lot to lot was small, and no deformation or significant change in appearance due to moisture absorption and desorption was observed.

Keywords : Pulp mold material, Non-combustible material certification, Ceiling material, Sound absorption properties, Glossiness, Mass change

パルプモールド材, 不燃材料認定, 天井材, 吸音特性, 色差, 光沢度, 質量変化

1. はじめに

持続可能な社会の実現に向け、化石燃料を原料としたプラスチック製建材の削減とともに、再生可能な原料の活用が求められている。古紙を原材料とし梱包材料等で使用されるパルプモールド材（事例写真1）は、使用後もさらに再利用可能であるという点で、環境負荷の小さいエコ素材である。また、金型次第で自由な形状が形成可能であり、かつ、軽量で通気性、保水性、形状の柔軟性に優れている。しかしながら、可燃性が高いため、内

装材等の建材として使用するには難しい状況であった。そのため、パルプモールド材に添加剤を配合し、難燃薬剤処理を施すことにより不燃材料とする開発を行い、認定を取得した。それにより、天井材として使用することが可能になり、筑波技術研究所のグリーンオフィス棟に試験導入を経て、新本社である TODA BUILDING への採用に至った。

本報にて、不燃材料の認定取得状況、および採用した天井材の吸音特性、色差・視感反射率・光沢度、吸放湿による質量変化を評価したので報告する。



写真1 パルプモールド材事例 たまごパック

2. パルプモールド材の不燃化検討

2.1 難燃薬剤、無機充填剤の配合検討

パルプモールド材の不燃化の検討は、日本モールド工業（株）と実施した。不燃化には、原材料のパルプモールド材に難燃薬剤、無機充填剤を配合する方法で行った。難燃薬剤は、リン酸系またはホウ酸系などの化合物を使用した。無機充填剤は、カーボン繊維、ガラス繊維等を使用した。試験体をコーンカロリメータ試験（以下、CCM 試験）にかけ、評価を実施した。いくつかの配合を検討した結果、手作業で作成した試験体で合格範

*1 戸田建設(株)技術研究所

*2 戸田建設(株)建築設計第1部 修士(工学)

*3 戸田建設(株)技術研究所 修士(工学)

*4 戸田建設(株)技術研究所 修士(理化学)

Technology Research Institute, TODA CORPORATION

1st Design Division, TODA CORPORATION, M.Eng.

Technology Research Institute, TODA CORPORATION, M.Eng.

Technology Research Institute, TODA CORPORATION, M. Sci. & Che.

囲に収まる配合を見出した。

2.2 製品化に向けた検討

製品とする場合、金型で製作し、最終的にプレス掛けを実施する。手作業で実施した配合にて金型を用いて製作した試験体で CCM 試験を実施したところ、縮みや亀裂・変形が発生した。そこで、配合を変更して再度 CCM 試験を実施し、合格範囲に収まる配合を決定した。また、パルプモールド材内部に対してエネルギー分散型 X 線分析 (EDX 分析) を実施した。EDX 分析は、真空中で数100V～30KV に加速した電子線を試料に照射することで生じる特性 X 線を半導体検出器で検出することで試料に含まれる元素の特定が出来る。その結果、その内部まで難燃薬剤が含浸していることを確認した。

2.3 不燃認定の取得

日本建築総合試験所にて、不燃材料の認定を申請した。不燃材料の認定合格に必要な条件は、発熱性試験において、輻射強度50kW/m²にて加熱開始後20分間の①総発熱量≤8MJ/m²、②防火上有害な裏面まで貫通する亀裂及び穴がない、③発熱速度が10秒以上継続して200kW/m²を超えない、ガス有害性試験において、決められた計算式(表2内)においてマウスの平均行動停止時間の値が6.8分以上、となる。

表1、2および図1～5、写真2～5に試験結果を示す。国土交通大臣より不燃材料の認定(認定番号: NM5548)を取得した。

表1 日本総合試験所 コーンカロリーメータ試験結果

試験体	質量 [g]	総発熱量 [MJ/m ²]	最高発熱速度 [kW/m ²]	防火上有害な変 形の有無	最高発熱速度 が継続して 200kW/m ² を 超過した時間	着火時間 [秒]	発熱速度および 総発熱量の測定 結果
A	5.9	0.7	9.08	なし	0	着火せず	図1
B	5.7	0.7	7.96	なし	0	着火せず	図2
C	5.9	1.3	10.18	なし	0	着火せず	図3

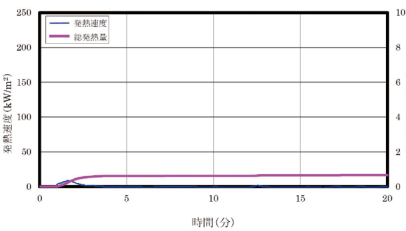


図1 発熱速度及び総発熱量 (試験体 A)

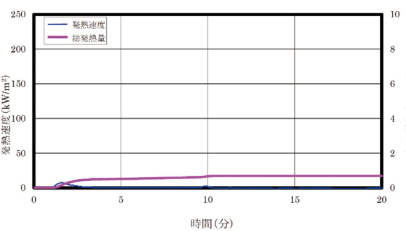


図2 発熱速度及び総発熱量 (試験体 B)

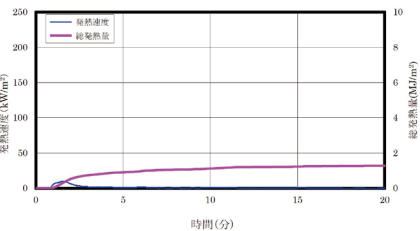


図3 発熱速度及び総発熱量 (試験体 C)



写真2 試験体 A 試験前



写真3 試験体 A 試験後

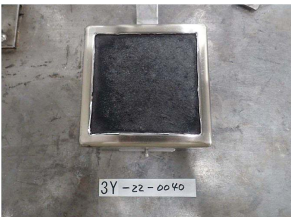


写真4 試験体 B 試験後

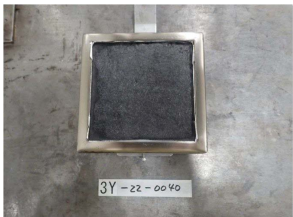


写真5 試験体 C 試験後

表2 日本総合試験所 ガス有害性試験結果

	厚さ [mm]	質量 [g]	加熱減量 [g]	マウス行動記録			
				$\bar{X}^*$	σ [分]**	X_s [分]**	行動記録
規定値	—	—	—	—	—	6.8分	
試験体	A	28.6	4.6	15.00	—	15.00	図4
	B	28.5	4.8	15.00	—	15.00	図5
備考	※: $\bar{X}$; 8匹のマウスの行動停止までの時間 (マウスが行動を停止するに至らなかった場合は15分とする) の平均値 σ ; 8匹のマウスの行動停止までの時間 (マウスが行動を停止するに至らなかった場合は15分とする) の標準偏差 $X_s = \bar{X} - \sigma$						

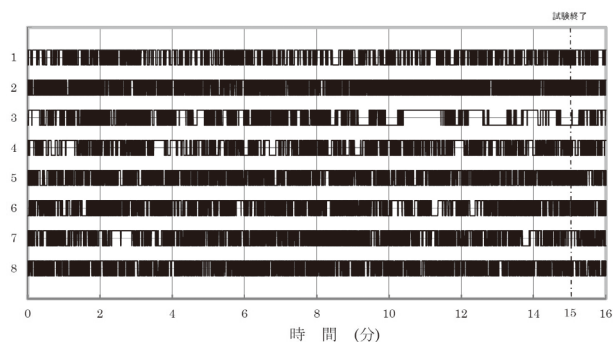


図4 マウス行動記録（試験体 A）

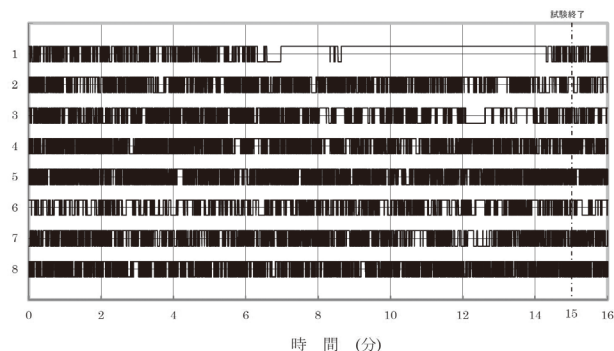


図5 マウス行動記録（試験体 B）

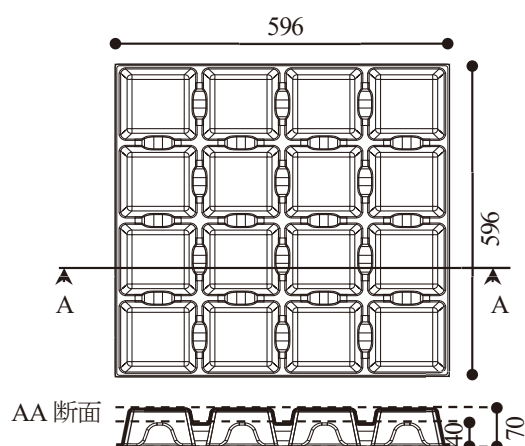


図6 システム天井用 天井材形状



写真6 グリーンオフィス棟設置状況

3. 天井材適用の検討

不燃材料の認定取得により天井材として使用できるようになった。図6にグリッド型システム天井用として設計した形状を示す。Tバーに載せるように約600角の大きさとし、凸部の間に高さの異なる補強部を有している。写真6のように筑波技術研究所のグリーンオフィス棟にて試作品を設置し、施工、寸法確認を行った。カーボン繊維を配合しており、想定よりも収縮が小さいことがわかった。

4. 吸音特性測定

4.1 測定方法

天井材として使用するにあたり、吸音性が求められる。そのため、JIS A 1409「残響室法吸音率の測定方法」に従い、天井材の吸音率を測定した。比較のため、岩綿吸音板9mmおよび12mmも同様の条件で測定した。使用した残響室は容積313m³の不整形残響室である。天井材1枚あたりの外形寸法は598×598mm最大高さ70mmであり、残響室内に30枚を敷き詰めて並べて測定した。残響室床スラブに直接設置した場合と天井懐が大きい設置条件を想定し図7の架台上に設置した場合の2通りの測定を実施した。架台は鋼製束に角スタッドを載せ、四周

を12mm厚の合板で囲うことにより構成した。床スラブから角スタッド上端面までの距離は900mmである。架台設置の条件では、試験体なしの残響時間も架台がある状態で測定した。試験体は床スラブまたは架台上に直接設置し、接着処理は行っていない。

4.2 測定結果

吸音率の測定結果を図8、9に示す。床置きの場合、天井材の吸音率は500～1kHzをピークとした右上がりの特性であり500Hzを中心に大きなピークが発生した。原材料のパルプモールドが繊維系材料であることによる特性のほか、試験体の凹凸形状により床面との間に最大70mmの空気層が形成され、板振動型の吸音が得られていると考えられる。架台上設置では、床面までの空気層が約900mmと大きくなるため、160Hz以下の低周波数における吸音率が上昇した。またいずれの設置方法においても、ほとんどの周波数帯で岩綿吸音板9mmおよび12mmの吸音率を上回った。以上の結果から、本報の天井材は石膏ボード等の下地材に直接貼り付ける場合や、システム天井として施工する場合のどちらにおいても大きな吸音効果を発揮すると言える。

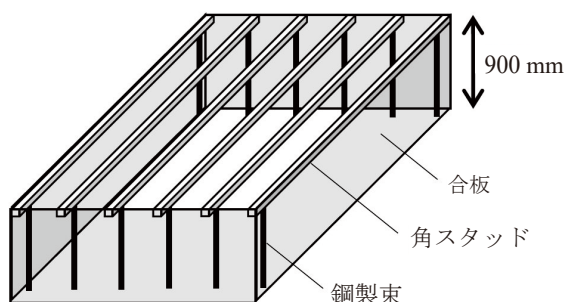


図7 架台 (天井裏 900mm 想定)

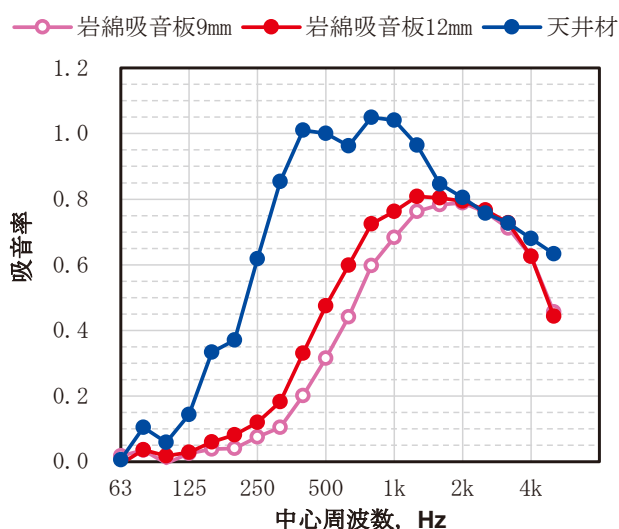


図8 天井材吸音率測定結果 (床置きの場合)

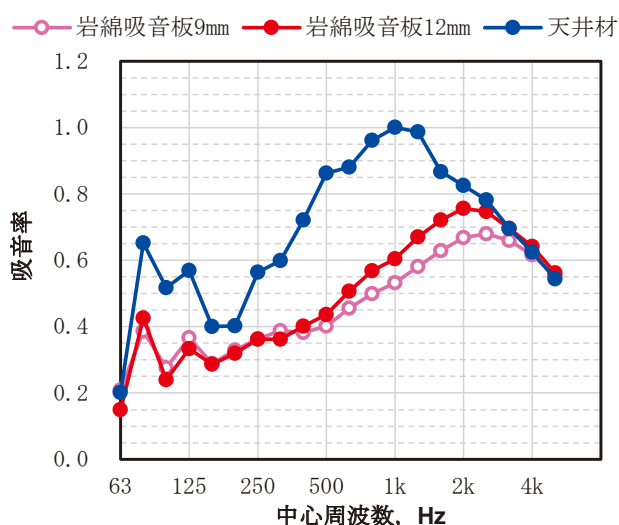


図9 天井材吸音率測定結果 (架台上設置の場合)

5. 色差・視感反射率・光沢度測定

5.1 測定概要

成型品の外観について、色むらやロットによるばらつき、主原料が紙であることによるやけなどの経年変化が懸念される。そこで CIE $L^*a^*b^*$: 1976色空間における L^* 、 a^* および b^* 、視感反射率 Y 、 60° 鏡面光沢度を測定した。試験体は2ロットから採取し、ロット①については運用中のグリーンオフィス棟天井に取り付け1年のばく露したものから採取した。1体あたり8~16ヶ所の測定を行った。

5.2 測定結果

測定結果を表3に示す。本材料は、ほぼ濃い無彩色で光沢は小さい。標準偏差は小さく色むらは大きくない。またロット①と②の差も小さく、ロットによるばらつきも小さいと考えられる。一方で、1年ばく露した試験体は暴露していない試験体と比べて明度 L^* が4以上小さい。この要因については、不明であるが、黄味青みに対応する b^* が同程度であることから、紙のやけの影響の可能性は低い。

6. 吸放湿による質量変化の確認

6.1 測定概要

主原料が紙であることから湿度に応じて吸放湿すると考えられる。そこで、湿度を変えた時の質量変化を測定した。試験体は天井材から切り出した $\square 125\text{cm}$ を用いた。20℃、60% RH の恒温槽で養生した試験体を23℃一定の恒温恒湿槽に入れ、湿度を80% RH 12時間、50% RH 12時間で静置した。試験体は2体とし、形状が複雑であるため吸放湿面積の制御はしなかった。

6.2 測定結果

試験開始時点からの質量の変化量の推移を図10に示す。試験体による差は見られるが、高湿度 (80% RH) 下ではおよそ6時間で吸湿による変化が小さくなり、低湿度 (50% RH) ではおよそ3時間で放出による変化が小さくなり平衡状態になっている。厚みが小さく、吸放湿量は限られるものと考えられる。また、吸放湿によって変形など大きな外観の変化は見られなかった。

表3 色差・視感反射率・光沢度測定結果

試験体		L^*	a^*	b^*	Y	G60
ロット①	平均	41.47	0.07	0.29	12.17	1.46
	標準偏差	0.97	0.10	0.13	0.61	0.11
ロット②	平均	41.39	-0.10	1.03	12.12	1.24
	標準偏差	0.95	0.09	0.26	0.60	0.08
ロット① 1年 ばく露	平均	37.19	0.00	0.24	9.65	
	標準偏差	0.92	0.41	0.41	0.51	

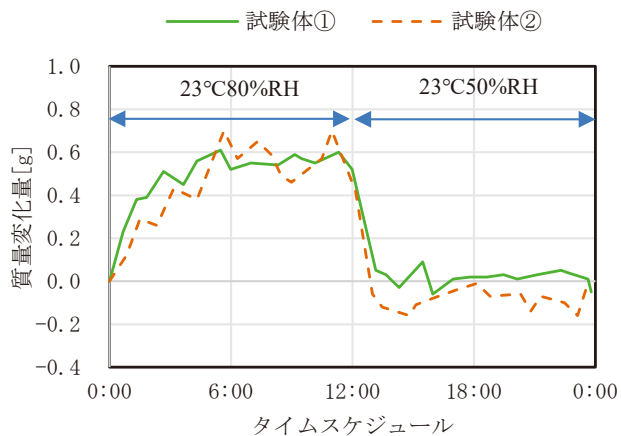


図 10 吸放湿試験における質量変化量の推移

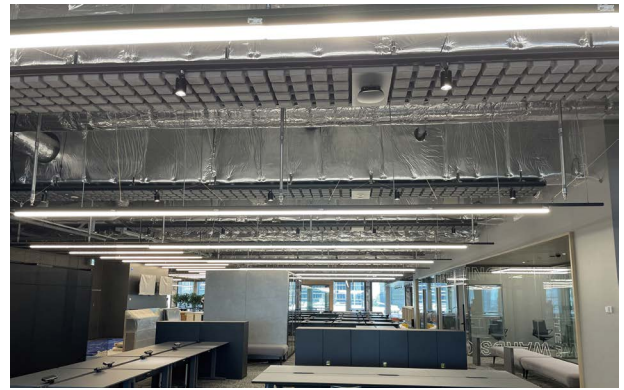


写真 7 TODA BUILDING 天井材設置状況

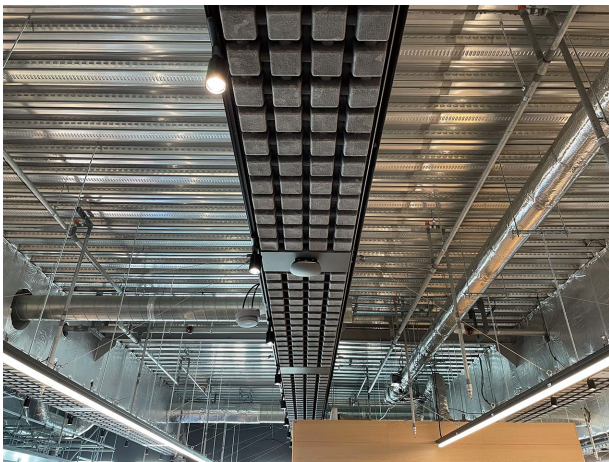


写真 8 TODA BUILDING 天井材設置状況

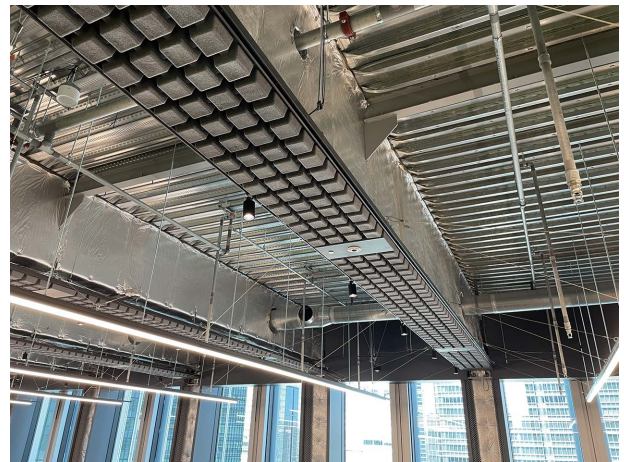


写真 9 TODA BUILDING 天井材設置状況

7. おわりに

古紙を原材料としたパルプモールド材にて、難燃薬剤、無機充填剤を配合し、不燃材料の認定を取得することができた。凹凸の大きい形状とすることで、高い吸音性能を得ることができた。しかしながら、カーボン繊維等を配合したため、現状では再利用はできない。分離・再利用の可能性の検討が必要である。

また、ロットによる色差は大きくないと思われるが、古紙が原材料のため、変形、変色などの耐久性について継続調査が必要である。写真7のように新本社であるTODA BUILDINGの当社が入居するフロアに設置した。実空間での経過観察を実施していく。

謝辞

開発にあたり、日本モールド工業（株）長尾氏、清水氏、戸田建設（株）建築設計第1部 小田氏に協力を頂いた。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 日本パルプモールド工業会 HP <http://www.pulpmold.gr.jp/index.html>
- 2) 小泉他「パルプモールドの吸音性能に関する研究」技術研究報告第46号 2020.11
- 3) 小泉他「パルプモールドの吸音特性に関する研究—角型凹凸形状における実験的検討」, 日本音響学会2020年秋季研究発表会講演論文集 2020.8