

リサイクル廃石膏とアセチルセルロースの複合による 耐火性高強度ボードの開発*

戸 高 昌 俊**
古 賀 一 人***
佐 藤 研 一****
重 松 幹 二*****

Development of High Strength and Fireproof Gypsum Board Produced by Recycled Waste Gypsum and Cellulose Acetate

MASATOSHI TODAKA**, KAZUYA KOGA***, KENICHI SATO****, MIKIJI SHIGEMATSU*****

Recycled waste gypsum powder was combined with cellulose acetate (CA) by using acetone and molded to board. At 10mm thickness, the fireproof satisfied quasi-nonflammable at 10 or 15 wt% CA and flame-retarded at 20 wt% CA, but no fireproof at above 30 wt% CA. On the other hand, the bending strength satisfied GB-R standard at above 8 wt% CA and GB-R-H at above 10 wt% CA. Further, the wet bending strength satisfied GB-S at above 15 wt% CA. By integrating their results, the recycled waste gypsum board having both high fireproof and high bending strength was achieved in the range of 10-20 wt% CA.

Key Words : Recycled waste gypsum, Cellulose acetate, Material recycle, Fireproof

1. はじめに

石膏ボードは硫酸カルシウム2水和物 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) を主成分し、耐火性、遮音性、寸法安定性、施工の容易性等の性能を有するため、建築材料としてなくてはならない存在である¹⁾。石膏の耐火性は、石膏に含まれる結晶水（重量で約20%）が材料温度を下げる効果によるものと考えられている。一方で、強度が劣る欠点を有するため、表面に石膏ボード原紙の貼り付けによる補強が必要となる。

近年、新築工事や解体工事由来の廃石膏ボードの排出量が年々増加しており、一年間に新築系廃石膏ボード29.5万トン、解体系廃石膏ボード79.6万トン合わせて約100万トンが廃棄されている¹⁾。新築系廃石膏ボード

の約75%は石膏ボード原料として再利用されているが、解体系廃石膏ボードのほとんどは廃棄されている²⁾。これは、石膏ボードにビニルクロス等の他の建材が混入しているためリサイクルが困難であることが要因であると考えられる。

これまでの廃石膏ボードを取り巻く環境として、最終処分場での廃石膏ボードから発生した硫化水素による悪臭問題が挙げられていた。この問題についての研究により、硫化水素の発生を抑制する方法が提案され、現在は安全な石膏ボードの処分がなされている³⁾。一方で、資源循環や環境保全の観点から、廃石膏ボードのリサイクルについての研究もおこなわれている。廃石膏ボードのマテリアルリサイクルにおいて、廃石膏は既に二水石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) となっており、この状態では水添加による凝結成形ができないため、180℃で30分間加熱して脱水した半水石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) にする必要がある⁴⁾。このことが廃石膏の再利用を妨げており、二水石膏のまま有効利用できれば、リサイクルが促進するものと考えられる。

* 平成30年11月30日受付

** 工学研究科

*** 建築学科

**** 社会デザイン工学科

***** 化学システム工学科

一方、アセチルセルロースは、セルロースの水酸基をアセチル基に置換した高分子材料であり、その置換度の違いによりフィルム、シート、コーティング膜や、たばこのフィルターなど用途は多岐にわたる。さらに、アセチルセルロースは、他の合成樹脂と比較して耐熱性が高いことが知られている。塩化ビニルやポリエチレンの融点が、それぞれ 85 ～ 210 °C および 112 ～ 135 °C であるのに比べ、アセチルセルロースは 230 ～ 300 °C と高い値を示す⁵⁾。また、発熱量は、塩化ビニルやポリエチレンがそれぞれ約 19 MJ/kg および、約 46 MJ/kg であることに對し、アセチルセルロースは約 17 MJ/kg と低い値であることが報告されている⁵⁾。一方で、アセチルセルロースは生産の拡大により製造工程での規格外品が増加しており、その有効利用が望まれている。

そこで本研究では、リサイクル廃石膏ボードとアセチルセルロースを複合化した耐熱性材料へのリサイクル方法を検討した。具体的には、石膏の水和物である二水石膏にアセチルセルロースを種々の添加率で混合してボード形状に成型し、その強度と耐火特性から、両特性が活かされる最適な添加率を決定した。なお、本法の一部は特許出願済みである⁶⁾。

2. 実験方法

2.1 複合ボードの製造

複合ボードはアセトンを用いた溶媒混練法で作成した。3 mm メッシュのふるいを通過した中央環境開発(株)製リサイクル石膏の所定量をポリエチレン袋にとり、アセトンで湿らせた後、ダイセル製アセチルセルロース L-70 (アセチル化度 55%) の所定量を粉末状に加えた。そして、アセチルセルロースの溶媒であるアセトンを加えて粘土状になるまで練り、続いてニーダーで約 15 分間混練した。混練物を、耐火性試験には 100 mm × 100 mm の型枠に、強度試験には幅 50 mm × 高さ 10 mm の型枠に押し込んで表面を平滑にし、型枠から外してアセトンを揮発させ、アセチルセルロース含有石膏ボードを作成した。なお、混練物量を変えることで耐火性試験片の厚さは 5 ～ 15 mm に調整し、強度試験片は長さ 400 mm 以上になるように調整した。

2.2 耐火性試験

耐火性試験は、ISO-5660 に準拠する東洋精機製作所 C3 型コーンカロリメータにより燃焼試験を行った。即ち、サンプルホルダにセットした試験片の上面開口部 95 × 95 mm を電気ヒーターで加熱するとともにスパークを照射し、発火もしくは着火による燃焼によって消費された酸素量を経時的に測定し、発熱量に換算した。そして、建設省告示⁷⁾に準じ、総発熱量が 7.2 MJ/m² に達するまでの時間が 20 分以上のものを「不燃材」、10 分以上のものを「準不燃材」、5 分以上のものを「難燃材」、

5 分未満のものを「不合格」と判定した。

2.3 酸素指数

酸素指数(燃焼を継続するために必要な最小酸素濃度)は JIS K 7201-2 に準拠する酸素指数式燃焼性試験(燃焼試験機 ON-1、スガ試験機(株))を用い室温約 23 °C において測定した。酸素/窒素比を調整しつつ、複合ボードの試験片(厚さ 10 mm、長さ 150 mm、幅 15 mm)が燃焼しない酸素/窒素比を調査した。燃焼の定義は JIS に従い、着火後 3 分間継続して燃焼することとした。

2.4 強度試験

スパン L = 200 mm とし、0.02 mm/sec の荷重速度での 3 点曲げ破壊試験による破壊荷重 P (N) を測定した。測定後、破断面の幅 w (mm) と厚さ h (mm) を測定し、曲げ破壊強度 $\sigma = 3LP/(2wh^2)$ を求めた。測定は混合率ごとに 6 ～ 8 試験体で行い、平均値と標準偏差を求めた。さらに、湿潤時における強度試験を JIS A 6901 に準拠し、温度 40 °C、湿度 85 % の条件下で 96 時間保持した検体にて行った。

評価基準として、JIS A6901(2014)における石膏ボード(GB-R)の規格値である曲げ破壊荷重 360N 以上(スパン 300 mm、幅 300 mm、厚さ 9.5 mm)、すなわち曲げ強度では 6 N/mm² 以上とし、同様に GB-R-H (普通硬質石膏ボード)の規格値である曲げ破壊荷重 500 N 以上(スパン 300 mm、幅 300 mm、厚さ 9.5 mm)、すなわち曲げ破壊強度では 8.3 N/mm² 以上とした。また、湿潤時の評価基準として、GB-S (シーリング石膏ボード)規格の曲げ破壊荷重 220 N 以上(スパン 300 mm、幅 300 mm、厚さ 9.5 mm)、すなわち 3.7 N/mm² 以上を適用した。

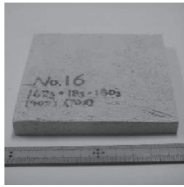
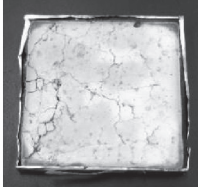
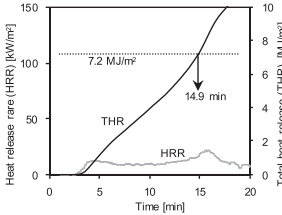

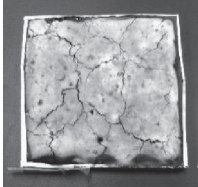
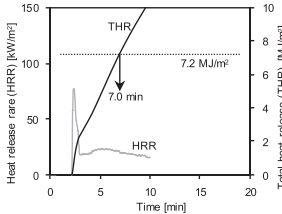

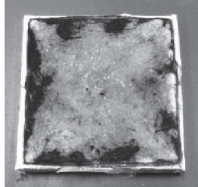
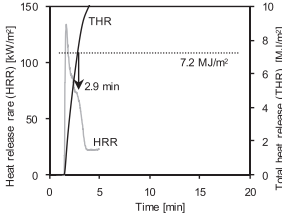
3. 実験結果

3.1 耐火性能

表 1 にコーンカロリメータによる耐火性試験の実施例を示す。燃焼前の検体の板厚の実測値はおおよそ 11 mm、密度は 1.15 ～ 1.18 g/cm³ であった。これらのサンプルの発熱プロファイルより、総発熱量 7.2 MJ/m² に達する耐火時間は、アセチルセルロース添加率 10 % のとき 14.9 分、20 % で 7.0 分、30 % で 2.9 分となり、添加率を増加させるほど、耐火時間は急激に低下した。燃焼試験後のサンプルはアセチルセルロースの添加率が高くなるほど焦げる様子が観察されたが、燃焼後も板状の形体を保っていた。

図 1 に、アセチルセルロースを 10 ～ 40 wt% になるように混合し 5 mm から 15 mm の板厚で製造した複合ボードの耐火時間を示す。板厚が厚いほど耐火時間は長くなる傾向にあり、添加率 10 ～ 20 wt% では板厚の増加とともに耐火性が不合格→難燃材→準不燃材へと評価が変遷した。ただし、添加率 30 ～ 40 wt% では板厚を

Table 1 Fireproof test by cone calorimeter of recycled waste gypsum board produced with different mixing ratio of cellulose acetate.

Cellulose acetate	Before test	After test	Profile of fireproof test
10%	 <p>Board thickness 11.3 mm Density 1.15 g/cm³</p>	 <p>After 20 min</p>	
20%	 <p>Board thickness 11.1 mm Density 1.18 g/cm³</p>	 <p>After 10 min</p>	
30%	 <p>Board thickness 11.7 mm Density 1.18 g/cm³</p>	 <p>After 5 min</p>	

厚くしても 5 分以上の耐火時間を達成することができず、全て不合格と判定された。

結論として、耐火性はアセチルセルロースの添加量が少ないほど良好であり、板厚 10 mm で比較すると、15 wt% 以下で準不燃材 (10 分耐火) に、20 wt% 以下で難燃材 (5 分耐火) の基準をクリアした。なお、タバコのフィルターとして用いられるアセチルセルロースと不燃性の石膏を原料とする材料であるため、有毒ガスの発生は生じないものと考えられる。

3.2 酸素指数

酸素指数式燃焼試験の結果を表 2 に示す。アセチルセルロース添加率 10 ~ 20 wt% の複合ボードでは、酸素濃度 100 % であっても着火しなかった。この配合比では、石膏の耐火性の影響が支配的であり、耐火材料としては非常に優れていると言える。また、30 wt% 混合の複合ボードでは酸素濃度 83.5 % で着火が確認された。アセチルセルロースの酸素指数が 22 ~ 40 % であることを考慮すると、廃石膏の存在により非常に高い耐火性が発現

Table 2 Oxygen index of recycled waste gypsum board produced with different mixing ratio of cellulose acetate.

Mixing ratio of cellulose acetate [wt%]	Oxygen index [%]
10	No ignition
15	No ignition
20	No ignition
30	83.5

していると言える。

以上より、本研究で製造したアセチルセルロース添加率 20 wt% 以下の複合ボードは、酸素濃度 21 % の通常の空気中では燃焼を継続できず、耐火性に優れていると言える。

3.3 曲げ破壊強度

アセチルセルロース添加率と曲げ破壊強度の関係を図 2 に示す。アセチルセルロースをバインダーとする複

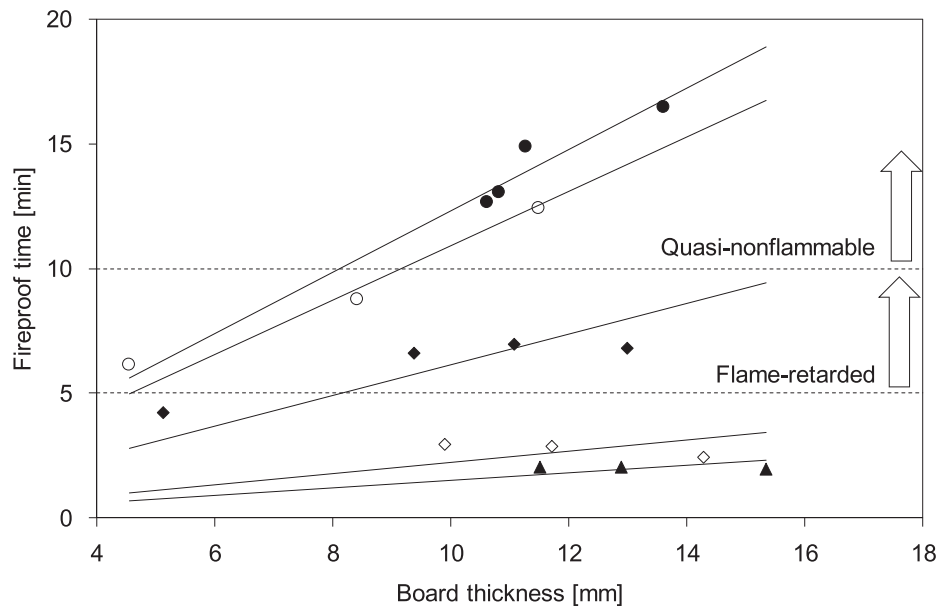


Fig. 1 Board thickness dependence of fireproof time of recycle waste gypsum board produced with different mixing ratio of cellulose acetate. Symbols show that ○, 10% cellulose acetate; ●, 15% cellulose acetate; ◆, 20% cellulose acetate; ◇, 30% cellulose acetate; ▲, 40% cellulose acetate.

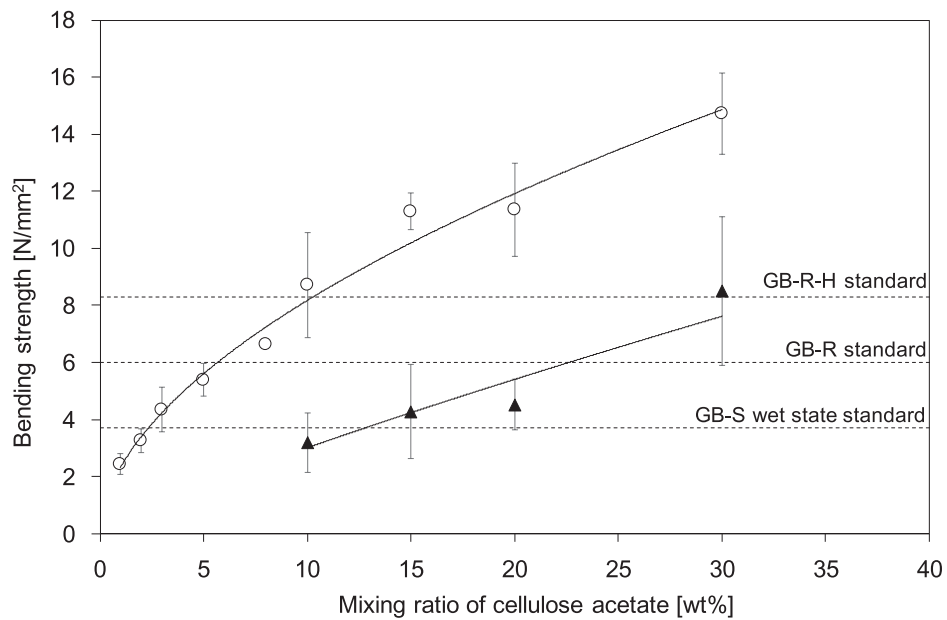


Fig. 2 Bending strength of recycled waste gypsum board produced with different mixing ratio of cellulose acetate. Circle and triangle shows dry state and wet state, respectively.

Table 3 Summary from fireproof and bending strength results of recycled waste gypsum board produced from different mixing ratio of cellulose acetate.

Test		Mixing ratio of cellulose acetate [wt%]				
		10	15	20	30	40
Fireproof		Quasi-nonflammable		Flame-retarded	Unsatisfied	
Oxygen index		No ignition			Ignition	N.D.
Bending strength	Dry	Above GB-R-H standard				N.D.
	Wet	Unsatisfied	Above GB-S (wet) standard			N.D.

N.D.: No data

合石膏ボードは、市販の石膏ボードよりも曲げ破壊強度が高く、アセチルセルロースの添加率が増すとともに上昇する結果となった。よって、アセチルセルロースは補強材としての機能を十分に発揮しているといえる。添加率が 5 wt% 以下では GB-R（普通石膏ボード）規格よりも強度が劣るが、8 wt% 以上添加すると GB-R 相当に、さらに、アセチルセルロースを 10 wt% 以上添加と GB-R-H（普通硬質石膏ボード）規格以上の強度を有した。そして、さらに添加率を増すことにより、20 wt% では GB-R 規格の約 2 倍、GB-R-H 規格の約 1.5 倍の強度を有していた。

湿潤時における曲げ破壊強度は、アセチルセルロース 10 wt% 添加では GB-S（シーリング石膏ボード）規格に劣ったが、アセチルセルロース 15 wt% 以上の添加で GB-S 規格の強度を有した。

結論として、強度についてはアセチルセルロースの添加量が多いほど良好であり、10 wt% の添加で GB-R-H 規格の石膏ボードと同程度、20 wt% 添加すると、その 1.5 倍近い曲げ破壊強度を持つ材料となることがわかった。また、湿潤時の強度を考慮するとアセチルセルロース 15 wt% 以上の添加が望ましいと言える。

4. 結論

リサイクル石膏の有効利用として、アセチルセルロースをバインダーとした複合ボードの製造を行った。表 3 にアセチルセルロース添加率ごとの試験結果を簡潔に示す。アセチルセルロース 15 wt% 添加では、市販の石膏ボード以上の強度を持つ準不燃材、20 wt% 添加では、市販の石膏ボード以上の強度を持つ難燃材となることが明らかになり、リサイクル石膏を二水石膏のままでも有効利用できることが示された。

謝辞

本研究は、国立研究開発法人科学技術振興機構、平成 28 年研究成果開示事業地域産学プログラム「企業ニーズ解決試験」＜課題番号 MP28116771135＞の助成により行われた。アセチルセルロースを提供いただいたダイセル（株）、リサイクル廃石膏を提供いただいた中央環境開発（株）に感謝いたします。また、曲げ破壊強度試験の技術支援をいただいた福岡大学工学部建築学科助教本田悟氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) 一般社団法人石膏ボード工業会、石膏ボードハンドブック、2016.4
- 2) 環境省、平成 25 年度廃石膏ボードの再資源化促進方策検討業務調査報告書、2014.3
- 3) 正本博士、松清敦史、重松幹二、松藤康司、柳瀬龍二：廃石膏ボードの小型埋立実験槽による気相中への硫化水素放出抑制の検討、廃棄物資源循環学会論文誌, Vol.23, No. 3, pp. 144-153 2012.3
- 4) Y. Kojima and T. Yasue,; Synthesis of large plate-like gypsum dihydrate from waste gypsum board : Journal of the European Ceramic Society, vol.26, pp. 777-783 2006
- 5) J. Brandrup, E.H. Immergut Ed., POLYMER HANDBOOK, Third edition, Chapter V 1989: John Wiley & Sons, Inc.
- 6) 特願 2018-015668: 石膏組成物およびその製造方法、ならびに、当該石膏組成物を含む建築材料, 2018.1
- 7) 建設省告示第 1400 号：不燃材料を定める件、建設省告示第 1401 号：準不燃材料を定める件、建設省告示第 1402 号：難燃材料を定める件、2000.5