

室内環境を改善する多機能住宅用建材の開発

小幡 透*, 西元研了**

Development of Residential Multi-functional Building Materials for Improving Indoor Conditions

Toru OBATA and Kenryo NISHIMOTO

竹炭および竹炭ボードは優れた調湿効果を持つことから、これらの室内における結露防止効果について検討した。竹炭ボード存在下では温度変化による急激な湿度変化が抑制されることや、竹炭存在下では温度降下による結露の発生が見られない等の結果が得られた。従来の結果に併せて、これらの結果から竹炭をはじめとする炭化物製品により室内環境を効率よく改善できることが示唆された。

Keyword : 竹炭, 竹炭ボード, 結露, 吸放湿試験, ガス吸着試験

1. 緒 言

鹿児島県は全国有数の竹の産地として知られており、竹林面積は約160km²と全国一を誇っている¹⁾。したがって竹材と成り得る量も多く、その蓄積量は約437万束¹⁾ (モウソウチク換算で約13.1万 t) と言われているが、竹材生産量は約39万束¹⁾ (同約1.2万 t) と蓄積量の1割にも満たないのが現状であり、未利用竹材の有効活用が急務の課題となっている。

著者らはこれまで未利用竹材の有効活用の1つとして、竹炭の利用を考え、モウソウチクを炭化して得られた竹炭の物性や機能性に関する研究^{2)~5)}や、竹炭を原料とした竹炭ボードの開発^{6)~9)}および製造に関する特許の取得や出願を行った¹⁰⁾¹¹⁾。

昨今、化石燃料の燃焼等により排出される二酸化炭素等の温室効果ガスの増加によって起こる地球温暖化が、世界規模での問題となっている。先進国をはじめとする各国は、二酸化炭素排出量削減についての様々な取り組みを始め、日本でも二酸化炭素排出量を1990年比で25%削減することが政府より発表された。一方、バイオマスは自然界に存在し、燃焼させても炭素の総量が変わらないことから「カーボンニュートラル」と言われている。さらに炭化物については、炭素を「炭」として固定化し、最終的には土壤に投入し炭素貯留できることから、炭素量を減少させられる有効な手段とも言われており、バイオマスを炭化して得られた炭を各方面に利用する動きも見られる。また、国内クレジット制度も導入され、企業や各種団体が様々な形で二酸化炭素排出量削減に取り組み始めている。

ところで、前述の竹炭ボードについては、調湿性能やガス吸着性能について評価し、市販の吸着性建築材料と同等以上の性能を有することが明らかになっている⁴⁾⁵⁾。また、竹炭ボードを天井や壁に施工した際の温湿度測定により、調湿・断熱効果も確認できた⁶⁾⁹⁾。本研究では特に竹炭の調湿性能に着目し、住宅等で発生する結露の問題を解決するために、竹炭ボードをはじめとする炭化物製品による結露防止効果を見いだすことにより、調湿・結露防止・ガス吸着等の様々な機能を持つ住宅用竹炭ボードを開発することを目的とする。また、湿度一定で温度を変化させた際の竹炭の吸放湿特性や、異なる炭化温度の竹炭を混合した際のガス吸着性能等についても報告する。

2. 実験方法

2. 1 竹炭の製造

5年生以上の鹿児島県産のモウソウチク (県森林技術総合センターの試験林にて伐採) を長さ5~10cm, 幅1~3cm程度に裁断したものを、電気加熱式炭化炉 (内容積約400ml) により窒素雰囲気下で炭化した。炭化条件は以下のとおりである。

窒素流量 : 約100ml/min

昇温速度 : 3℃/min

炭化温度 : 400, 500, 600, 700, 800, 900℃

保持時間 : 3時間 (炭化温度に達してからその温度を保持する時間)

2. 2 吸放湿試験

小型恒温恒湿器 (タバイエスペック (株) 製 LHU-112) を用いて温湿度を設定し、恒温恒湿器内に静置した試料の重量を測定することにより試料の含水率を求めた。試料は

*化学・環境部 (現 地域資源部)

**化学・環境部 (現 研究主幹 (食品・化学担当))

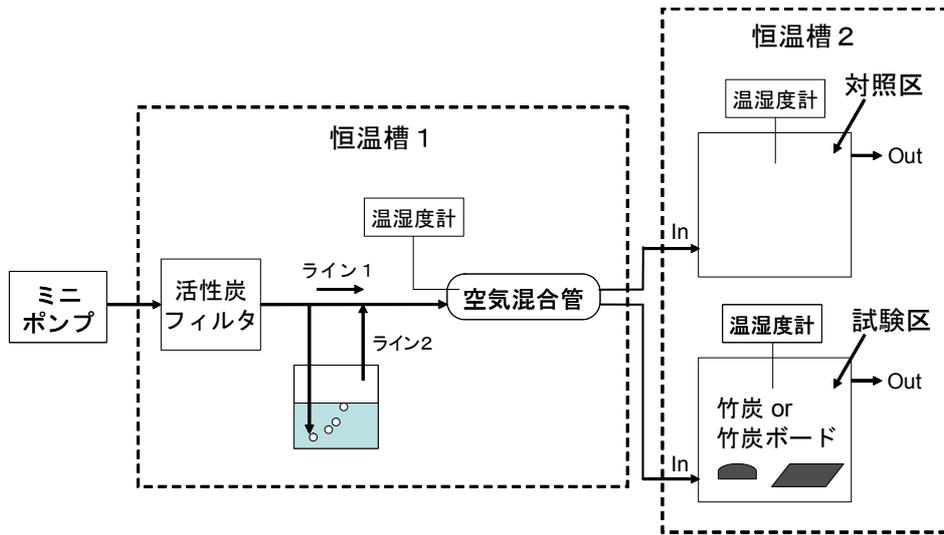


図1 結露試験装置概略図

105℃で1日乾燥させて絶乾重量を求めた竹炭を用い、含水率の経時変化を追跡することにより吸放湿性能を評価した。

2. 3 結露防止効果の検討

結露試験装置の概略を図1に示す。ミニポンプを用いて恒温槽1内に設置した活性炭フィルタへ空気を送り、その後湿潤割合調整のため2つのラインに分岐した。その一方(ライン2)を水の入ったフラスコに通気して湿潤空気を作製し、これを分岐したライン(ライン1)に戻し、空気混合管の中で乾燥空気と湿潤空気が均一に混ざり合うようにした。このとき、ライン1、2のそれぞれの流量を調節することにより、空気混合管内の湿度を調整した。なお、ライン1、2の合計流量は約1Lとなるようにした。空気混合管で混合した空気は、2つに分岐されて恒温槽2内に設置した2つのガス置換デシケータ(体積約32L)に送った。ガス置換デシケータは、空の状態のものを対照区、竹炭または竹炭ボードを設置したものを試験区とし、それぞれサーモレコーダ(エスペック(株)製RS-11)により雰囲気中での温湿度の測定を行った。このとき、それぞれのガス置換デシケータの換気回数は、約1回/時間である。

試験中は、恒温槽1は25℃での継続運転とし、恒温槽2は設定温度を適宜変更した。

2. 4 ガス吸着試験

ガス吸着試験は、テドラーバッグ法で行った。試料を容積10Lのテドラーバッグ内に封入・脱気し、これにあらかじめ調整した吸着ガスを約10L導入し、試料に吸着させ、濃度の経時変化をガス検知管((株)ガステック製 気体検知管)で測定することによりガス吸着性能を評価した。なお、吸着ガスはホルムアルデヒド、アンモニア、トルエンを用いた。

2. 5 ボード用竹炭の製造

竹炭ボード製造に用いている市販の竹炭は、製造に用い



図2 試験炭化炉写真

る炭化炉の温度を設定できるものもあるが、実際の炭化温度は不明のことが多い。したがって、炭化温度の履歴が明らかでない竹炭を用いてボードを試作するために、(有)チャコール豊新の所有する試験炭化炉(図2)により竹炭を製造した。この試験炭化炉には側面にセンサ挿入口が5箇所あり、それぞれ底部から10、30、50、70、83cmの位置にある。これらに熱電対センサを挿入し、データロガ((株)共和電業製 UCAM-70A)に接続することにより、試験炭化炉内の温度をモニタした。炭化炉内の温度調整は空気導入バルブの開閉によって行い、排煙部に取りつけられた熱電対センサで排煙温度をモニタし、排煙温度を設定することにより空気導入バルブの開閉を自動制御できるようになっている。本研究では、炭化炉内部の温度をデータロガでチェックしながら、手動で空気導入バルブの開閉を行うことにより炭化温度を制御した。

原料は長さ約10cm、幅3～5cm程度に加工したモウソウ

チクを用い、1回の炭化で約50kg用いた。このとき炭化炉内部は、原料のモウソウチクにより図2のセンサ位置の70cmと83cmの間まで満たされる。

2. 6 炭化温度の異なる竹炭を用いたボードの試作

前項で製造した竹炭を原料に用いた竹炭ボードを、プレス圧5MPa、プレス温度100℃、プレス時間10分の製造条件で試作した。

試作した竹炭ボードについては、精密万能強度試験機((株)島津製作所製 AG-100kNE)で曲げ強度を測定した。

3. 結果および考察

3. 1 炭化温度別竹炭の吸放湿試験

これまでの研究における吸放湿試験は、温度を25℃で固定し相対湿度を50%と90%で行い、竹炭の含水率を求めてきた。本研究では、相対湿度を50%または90%に固定して温度を10~50℃の間で変化させた際の炭化温度別竹炭の含水率を測定し、温度変化における動向を調査した。相対湿度50%で10℃から50℃に昇温したときの含水率変化を図3、50℃から10℃に降温したときの含水率変化を図4に、また相対湿度90%で10℃から50℃に昇温したときの含水率

変化を図5、50℃から10℃に降温したときの含水率変化を図6に示す。相対湿度の相違に関わらず、低温時に含水率が高く、高温時に含水率が低い結果となった。温度が高くなると分子運動が活発になることから、水分子が脱着しやすくなったものと推察される。また、このような含水率変化の現象は木材においても見られ、木材についても同様の傾向になることが知られている。

3. 2 結露防止効果の検討

図1の恒温槽2の温度を12時間毎に、15℃と25℃のサイクル運転になるように設定し、試験区に240×250×5mmの竹炭ボードを2枚設置した状態で、ライン2の流量を0とし、ライン1のみの空気を導入して、試験区および対照区の温湿度をモニタするサイクル試験を行った。温湿度データの一部を図7に示す。図7において、25℃および15℃での相対湿度はそれぞれ試験区が54%、56%、対照区が44%、55%でほぼ一定になっている。このときのそれぞれの飽和水蒸気圧、および飽和水蒸気量を表1に示す。25℃のときと15℃のときの水蒸気量の差を見ると、試験区のほうが対照区の約1.6倍になっている。これは竹炭が吸着していた水蒸気を放出したことを意味しており、このことから竹炭

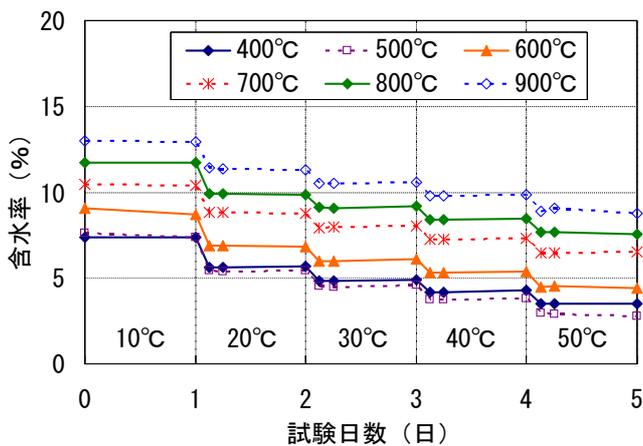


図3 相対湿度50%における竹炭の吸放湿試験 (昇温)

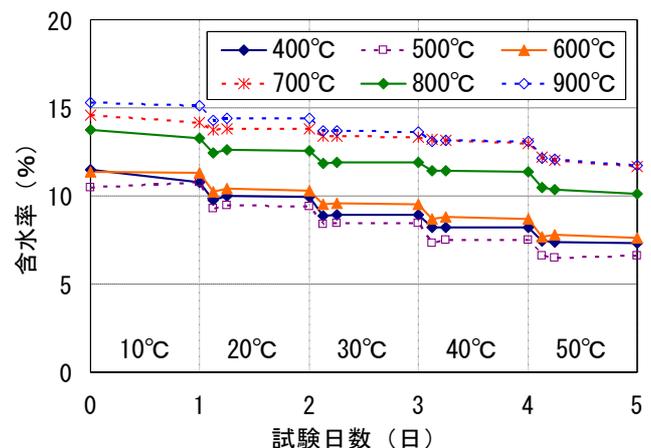


図5 相対湿度90%における竹炭の吸放湿試験 (昇温)

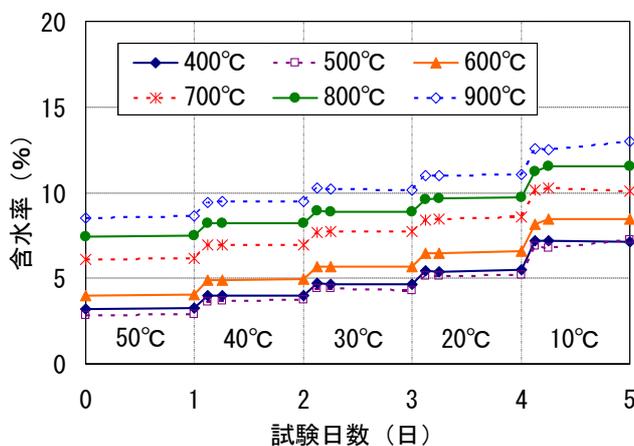


図4 相対湿度50%における竹炭の吸放湿試験 (降温)

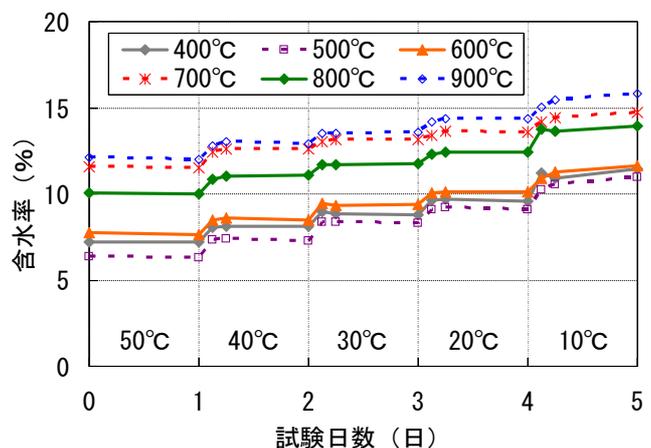


図6 相対湿度90%における竹炭の吸放湿試験 (降温)

表 1 飽和水蒸気圧および飽和水蒸気量

	温度 (°C)	相対湿度 (%)	飽和水蒸気圧 (hPa)	飽和水蒸気量 (g/m ³)	相対湿度における水蒸気圧 (hPa)	相対湿度における水蒸気量 (g/m ³)	水蒸気量の差 (25°C-15°C) (g/m ³)
試験区	15	56	17.06	12.85	9.55	7.20	—
	25	54	31.69	23.06	17.11	12.45	5.25
対照区	15	54	17.06	12.85	9.21	6.94	—
	25	44	31.69	23.06	13.94	10.15	3.21

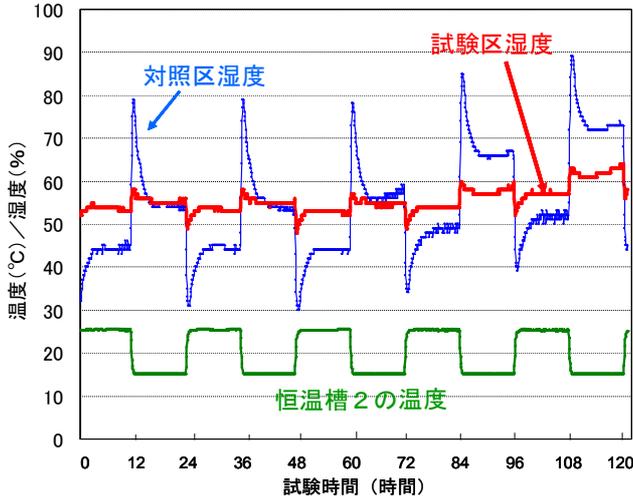


図 7 結露防止効果試験における温湿度の一例

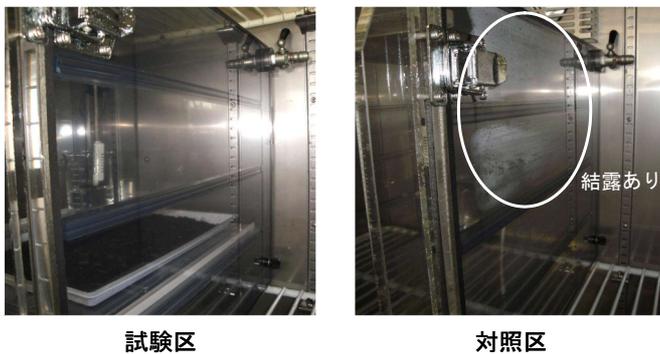


図 8 結露防止効果試験における結露の様子

による吸放湿が示唆された。

次に、試験区・対照区それぞれのガス置換デシケータ内に水を各100ml入れたビーカーを設置した。さらに試験区には粒状竹炭100gを設置した。デシケータのガス置換用コックを閉じて密閉空間とし、30°Cで数日間静置した。その後、恒温槽2の温度を15°Cとし、結露の様子を観察した。15°C、5時間後の試験区および対照区の写真を図8に示す。対照区は壁面の広範囲に結露が見られたが、試験区はほとんど結露が見られなかった。これらのことから、竹炭は結露防止に有用であることが明らかになった。

3. 3 混合竹炭のガス吸着試験

炭化温度400°Cおよび900°Cで炭化した竹炭を混合したものを用いてガス吸着試験を行った。混合割合および混合量を表2に、各竹炭のpHおよび比表面積を表3に示す。

表 2 竹炭の混合比

混合比 (400°C : 900°C)	試料重量 (400°C-900°C)
100 : 0	1g-0g
75 : 25	0.75g-0.25g
50 : 50	0.5g-0.5g
25 : 75	0.25g-0.75g
0 : 100	0g-1g

表 3 竹炭の物性

炭化温度	pH	比表面積 (m ² /g)
400°C	9.5	7
900°C	10.0	238

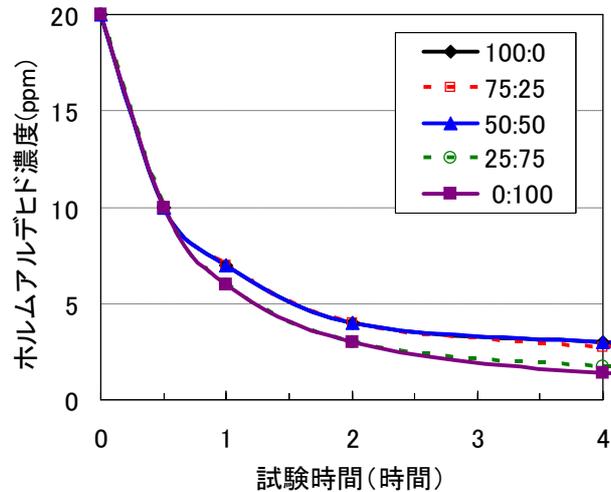


図 9 混合竹炭のホルムアルデヒド吸着試験

まず、ホルムアルデヒド吸着試験では、炭化温度900°Cの竹炭の多い方が若干吸着速度は大きかったが、それほど差は見られなかった(図9)。炭化温度別竹炭の吸着試験でも吸着速度に大差はないことが明らかになっている⁶⁾⁹⁾。次に、アンモニア吸着試験では、炭化温度400°Cの竹炭の方が吸着速度は大きかった(図10)。比表面積は900°Cの方が大きい、pHは400°Cの方が低い。炭化温度400°Cの竹炭は、まだ酸性を示す官能基が残存していることが考えられるために、酸性官能基と塩基性を示すアンモニアが化学的に結合する化学吸着が優位に起こっており、吸着速度が大きくなったと推察される。トルエン吸着試験では、表2に

示した比表面積値に比例して炭化温度900℃の竹炭の方が吸着速度が大きかった(図11)。

混合竹炭のガス吸着試験においては、竹炭の混合比率に比例してガス濃度も等間隔に変化すると予想していたが、アンモニアとトルエンにおいては吸着速度の大きな竹炭を少量加えるだけで、濃度の減少幅は大きくなった。例えば、アンモニア吸着試験において、4時間後の濃度を比較すると炭化温度900℃の竹炭のみの場合10ppmであったが、試料の4分の1を炭化温度400℃の竹炭に換えると、濃度は半分の5ppmまで減少した。

3. 4 炭化温度の異なる竹炭を用いたボードの試作

(有)チャコール豊新の試験炭化炉を用いて、500℃前後(以下、500℃と記す)、600~700℃(以下、650℃と記す)、800~900℃(以下、800℃と記す)を2時間程度保持するように制御しながら炭化を行った。試験炭化炉内の温度変化の一例を図12に示す。ここで、図12の凡例が表す数値は図2に示した炭化炉底部からのセンサ挿入位置である。炭化時間30分および120分での急激な温度の降下は、タール分をチェックするのに炭化炉底部を開放したためである。

炭化開始時は炭化炉下部の着火口からバーナーにより着火することから、炭化は底部から始まるため、最下部のセンサが最も高温を示している。炭化が進むと体積は減少し、炭化温度800℃のとき半分程度になる。したがって、炭化炉上部は空間になることから試料と接している部分と比較すると温度は低くなる。炭化後はモウソウチク50kgに対し約10~12kgの収量で、収率としては20%強であった。

このようにして得られた竹炭を粉砕・篩別し、粒径0.5~2mmのものをボード製造に用いた。原料を表4に示す。また、製造した竹炭ボードの強度試験結果を表5に示す。裁断した紙くずを入れることで曲げ強度が高くなり、これまでの研究⁶⁾⁹⁾における傾向と一致した。炭化温度650℃の竹炭で製造したボードが、紙くずの有無に関わらず1~2割程度曲げ強度が低かった。炉内温度の素早い調整ができるように吸気口バルブの開閉を手動で行ったが、特に650℃前後の中温域は温度調整が難しく、竹炭の品質が安定しなかったことが一因であると推察される。また、市販の土壌改良用竹炭を用いて製造した竹炭ボード⁶⁾⁹⁾と比較しても、曲げ強度が1~2割程度低くなった。これまでの研究において、ロータリーキルン方式で炭化された比較的柔らかい竹炭を原料に用いた竹炭ボードは、竹炭・表面素材等

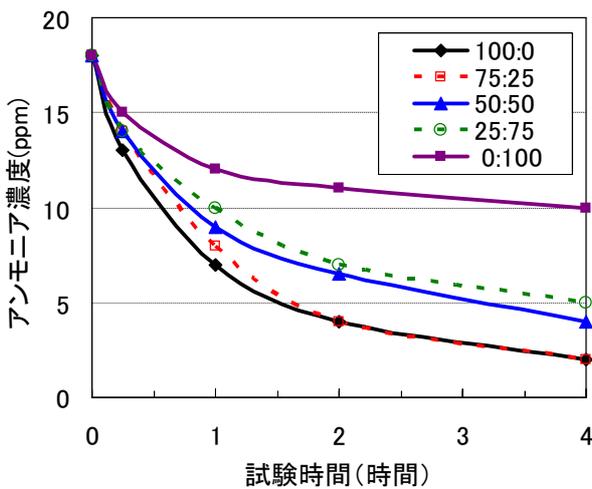


図10 混合竹炭のアンモニア吸着試験

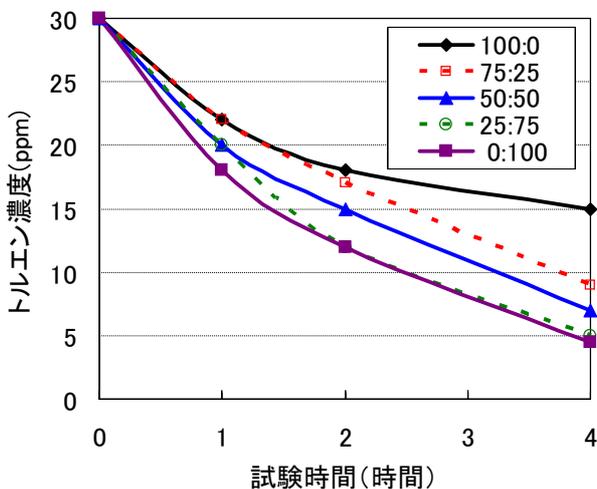


図11 混合竹炭のトルエン吸着試験

表4 竹炭ボードの原料

種類	単位(g)		
	竹炭	ゲルコマンソ	紙くず*
ボード1	300	30	0
ボード2	300	30	50

*事務用シュレッダーによる書類の裁断くず

表5 竹炭ボードの曲げ強度試験結果

種類	単位(MPa)		
	500℃	650℃	800℃
ボード1	3.5	2.7	3.1
ボード2	4.7	4.2	4.6

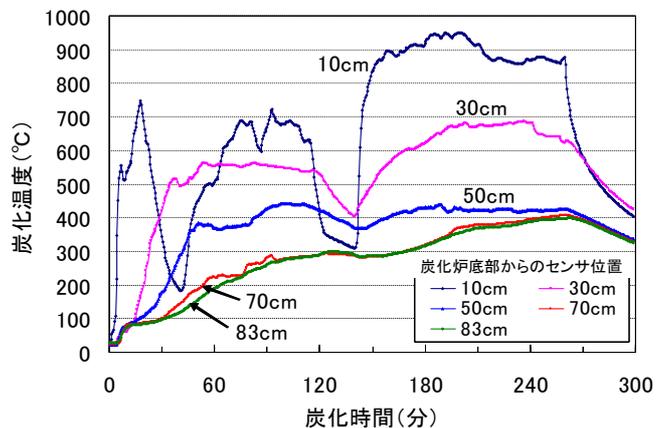


図12 炭化炉内温度の一例(800~900℃)

とグルコマンナンとの接着性がよく、曲げ強度が高くなり、土窯で製造した硬めの竹炭を用いた場合には接着性が弱く曲げ強度が低くなる傾向があった。本研究で得られた竹炭は土窯で製造された竹炭に近く、ロータリーキルン製の竹炭と比較して硬かったために接着性が悪くなり、曲げ強度が低くなったものと推察される。

4. 結 言

竹炭や竹炭ボードを用いた調湿・結露・ガス吸着について検討した結果、以下のことが明らかになった。

- (1)湿度一定条件における炭化温度別竹炭の吸放湿試験では、湿度に関わらず低温時に含水率が上昇し、高温時に含水率が減少する傾向が見られた。
- (2)炭化物製品（竹炭・竹炭ボード）を住宅内に設置・施工することにより、壁面・ガラス等に発生する結露を防止できる可能性が示唆された。
- (3)ガス吸着試験では、吸着速度の小さな竹炭に吸着速度の大きな竹炭を少量加えるだけで、吸着速度が大幅に改善された。

また、これまでの研究で竹炭ボードは他の建築材料（石膏ボード、セラミックボード等）と比較して同等以上のガス吸着性能を持つことが明らかになっている⁴⁾⁵⁾。

以上のようなことから、竹炭や竹炭ボードをはじめとする炭化物製品は、調湿・ガス吸着など複数の機能を持つことから、室内環境を改善する住宅用建材として有用な製品であることが示唆された。

謝 辞

本研究を行うにあたり、試験炭化炉の使用についてご協力いただきました、(有)チャコール豊新の唐仁原弓人氏に深謝いたします。

参考文献

- 1) 鹿児島県環境林務部：鹿児島県森林・林業統計(2010)
- 2) 松永一彦, 新村孝善, 西和枝, 國生徹朗：鹿児島県工業技術センター研究報告, 12, 47-52 (1998)
- 3) 松永一彦, 新村孝善, 西和枝, 神野好孝, 國生徹朗：鹿児島県工業技術センター研究報告, 13, 23-30 (1999)
- 4) 小幡透, 松永一彦, 笠作欣一, 前村記代, 西和枝, 神野好孝：鹿児島県工業技術センター研究報告, 15, 35-37 (2001)
- 5) 小幡透, 田島英俊, 森田慎一, 神野好孝：鹿児島県工業技術センター研究報告, 17, 33-37 (2003)
- 6) 小幡透, 日高富男, 西和枝, 新村孝善：鹿児島県工業技術センター研究報告, 21, 31-40 (2007)
- 7) 小幡透, 日高富男, 西和枝, 新村孝善, 山角達也, 西元研了：鹿児島県工業技術センター研究報告, 22, 7-12 (2008)
- 8) 日高富男, 小幡透, 新村孝善, 山角達也, 井口よう子, 宮本康太, 洪沢達也：鹿児島県工業技術センター研究報告, 22, 13-16 (2008)
- 9) 小幡透, 日高富男, 西和枝, 新村孝善：木質炭化学会誌, 5, 70-76 (2009)
- 10) 森田慎一, 新村孝善, 松永一彦, 荻原早準：特許第3357020号
- 11) 日高富男, 小幡透, 新村孝善, 荻原早準：特開2008-087348

