

林業廃材を活用した吸湿炭による熱回収換気システムの研究

Study of Heat Recovery Ventilation System Using Steam Adsorption Charcoal

鍋島 佑基*, 石川 春乃*

Yuki NABESHIMA and Haruno ISHIKAWA

Abstract: Forestry is one of the main industries in Shizuoka Prefecture. 70% of the country is forested, Japanese cypress and cedar are produced as wood that have high commercial value. However, these are more expensive than foreign-maid wood, this is responsible for the decline of forestry. In addition, low-valued wood called “C-stuff” is generally processed into Chips and Pellets however they traded at low price. From these backgrounds, we planned to make a new value for C-stuff to revive the forestry. Charcoal having vapor adsorption performance is created. This charcoal made from cedar that is calcinated at 800 degrees C is capable of adsorbing 40 % of its own weight of water vapor. Then we conducted an experiment to clarify the latent heat recovery of the filter filled with the absorbent. As the results, 50% of the heat loss during ventilation can be recovered by this charcoal.

1. はじめに

静岡県では、県の面積の 70 %が林であり、林業は県内の主要な産業の一つといえる。しかしながら、国産材料は海外からの輸入木材と比べて高価であること、さらに国内の木材使用量が減少していることから衰退の一途にある。加えて伐採時には、C 材と呼ばれる商品価値の少ない木材が大量に出るが、これらの一部がチップやペレットに加工されて使用されているのが現状である。また上質な杉材や、ヒノキ材においても需要の低さから加工用木材として使用されているのが現状である。

一方で、著者らは吸着材料を用いた水蒸気吸着や住宅の熱負荷低減手法の研究を行っており、住宅の省エネルギー技術としての木炭活用技術に着目した。本研究では C 材を炭化させ、換気時の熱回収フィルターを作成することで、廃材の有効活用手法の提案を目標に研究開発を行った。

本研究ではまず、静岡県産の杉チップを焼成した木炭を作成し、水蒸気吸着が可能な木炭の焼成条件を明らかにした。次に試作した木炭を用いた換気熱回収装置を試作し、熱交換能力を測定したのでその成果を報告する。

材チップはステンレス容器に入れて一定温度で焼成する。この時、炉内の温度は 180 分程度をかけて緩やかに上昇させて焼成温度に達した後さらに 180 分焼成させた。焼成条件は Table1 に示す通り、400℃、600℃、800℃の3条件とした。本実験では生産コストの観点から吸着性能を高める賦活処理は行わずに、単純な焼成でも水蒸気を吸着可能かどうか検討した。

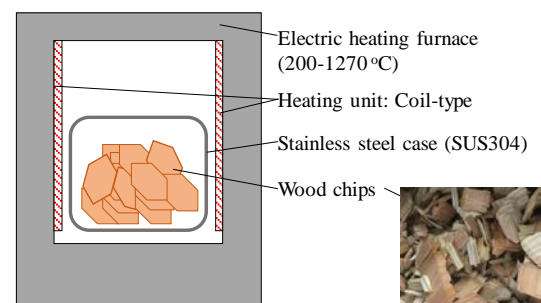


Fig.1 Diagram of calcination test.

Table 1 Calcination conditions

Wood chips	Cedar
Calcination temperature	400°C
	600°C
	800°C
Calcination time	360 minutes
Activation treatment	none

2. 杉材から成る吸湿炭の焼成手法の検討

2.1 木材の焼成試験

(1) 焼成条件

まず静岡県産の木材を炭化させるための焼成条件について検討する。本研究では県産の杉材を用いることを想定した。選定理由は杉が遠州西部地方において最も一般的な間伐材であるからである。Fig.1 に焼成実験の概略図を示す。杉

2020 年 5 月 15 日受理

* 理工学部 建築学科

(2) 水蒸気吸着量の評価方法

木炭の水蒸気吸着量の測定について説明する。水蒸気吸着量は材料の重量変化から測定した。恒温恒湿室内に電子天秤を設置し、任意の温湿度環境下における重量変化を測定した。Fig.2に実験装置の概要を示す。恒温恒湿室内の温度は25℃一定とし、相対湿度を20～95%に変化させて、それぞれの相対湿度に応じた吸着材の重量変化量を測定した。(Table2)。

測定材料について、本研究では試作した木炭400℃焼成杉材(以下, CC-4), 600℃焼成杉材(以下, CC-6), 800℃焼成杉材(以下, CC-8)の三種類に加えて、比較対象として市販の活性炭(AC), A型シリカゲル(Silica-A)の吸着量を測定した。材料は実験後、水分量計を用いて含水量を計測し、実験結果の確認をした。

材料は実験前まで110℃に維持された乾燥機内に8時間以上静置した。実験直前に乾燥機から取り出して資料の絶乾重量を測定し、恒温恒湿室内の電子天秤に乗せて実験を開始した。測定は重量変化がなくなるまで、2~8時間程度実施した。定常状態であることを確認した後に湿度を上昇させ、重量変化を再び測定した。電子天秤からのデータの出力は300 msecごとに行い、データはPCに連続出力した。

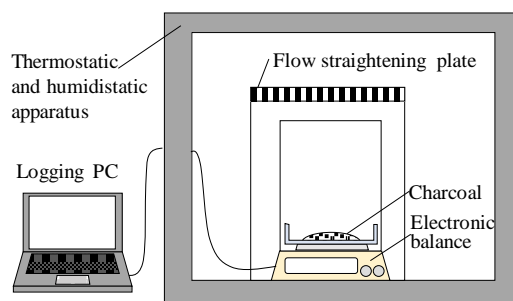


Fig.2 Schematic diagram of adsorption amount measuring devices.

Table2 Condition of adsorption measurement	
Items	Condition
Ambient temperature	25℃
Humidity	20, 40, 60, 70, 80, 90, 95 %
Measuring time	2hr - 8hr
Sampling rate	300 msec
Materials	CC-4:Cedar-charcoal (400℃)
	CC-6:Cedar-charcoal (600℃)
	CC-8:Cedar-charcoal (800℃)
	Activated carbon silica gel A type

2.2 吸着量測定結果

(1) 焼成温度と吸着量の関係

Fig.3に各材料の相対湿度の上昇に対するCC-4, CC-6, CC-8の重量変化率を示す。木炭は相対湿度の増加に応じて増加しており、水蒸気の雰囲気濃度に応じて木炭内部に水蒸気が吸着されることで重量増加につながったと考えられる。重量変化率は雰囲気の水蒸気圧上昇に対して直線的であり、特定の蒸気圧における水蒸気の引き付け効果は確認できない。特に、25%の低湿域の吸着量は全てのケースで0.1より小さいことから、マイクロ孔の存在は考えにくい。また、60%以上の中-高湿域においても吸着等温線は直線的であることからメソ孔も確認できない。今回の焼成では賦活処理を施していないため、木炭内部の細孔径が大きく、マクロ孔による吸着が行われていたと推測できるが、細孔分布の測定による確認が必要である。

重量増加率の最大値は焼成温度の上昇に伴って増加しており、CC-4では自重の20%程度の増加であるのに対し、CC-8は40%に達していた。吸着量が増加した理由として、焼成温度の上昇に伴って木炭内の間隙率が増加し、水蒸気の吸着に有効な細孔容量が増加したためと考えられる。今回は装置の制約上、焼成温度を800℃以上に上げての実験が出来なかったが、1000℃以上の焼成温度についても確認する必要がある。以上のことから、本報では800℃を最適な焼成条件とした。

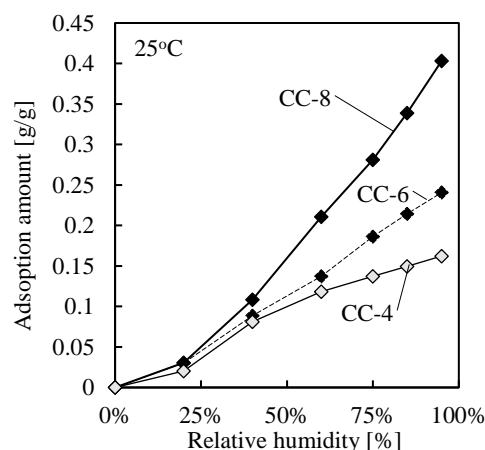


Fig.3 Adsorption isotherm of charcoals calcinated from 400- 800 degrees C.

- (2) Fig.4 に活性炭(AC)と Silica-A 及び CC-8 の重量変化を比較したものを示す. 本図から CC-8 の最大重量変化率は AC と同じく 40%であることから, CC-8 の吸着容量は AC と同等であることが推測できる. ただし, 賦活処理を施した AC の重量は 60%近傍で急激に立ち上がり, 80%において吸着は完了しており, それ以上高湿な条件の場合において吸着量増加は微増である. その反面, 低湿域の吸着量は少なく, 40%近傍までは水蒸気の吸着は殆ど見られない. このことから, AC はメソ孔による吸着が行われているものの, マイクロ孔はほとんどないことが推測でき, 中湿域における有意な吸着が確認できた.

次に Silica-A については低湿域である 20%近傍から吸着量の増加が始まっており, 75%近傍まで吸着量が増加し続けた. 一方, 高湿域では吸着量に変化が見られなくなった. A 型シリカゲルは一般的に細孔径が 2.4 nm であること, シラノール基による化学的な吸着特性を有していることが知られており, 低湿域から吸着が発言している今回の結果はそれらの知見とも一致する. Silica-A の吸着量は 50%以下の領域において, CC-8 よりも高い値を示しているが, 60%近傍では同等の値を示し, 高湿域では逆転した.

これらのことから, 杉材を焼成した木炭 CC-8 は市販の吸着材と同程度の容量を有しており, 低湿・高湿域でも雰囲気相対湿度に応じて吸着が可能であることから, 季節間の湿度変化が大きい日本の気候に対応できると考えた.

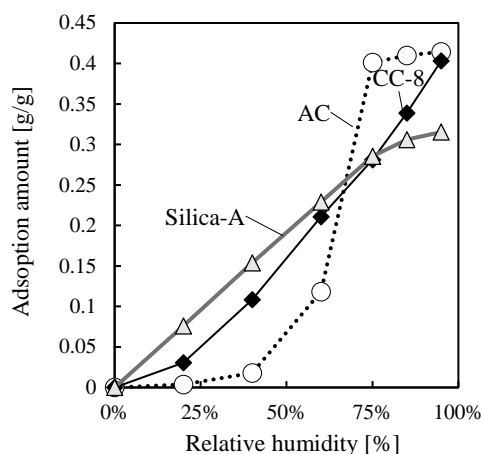


Fig.4 Differences in the adsorption isotherm between activated carbon, silica gel-A and CC-8.

3. 冬期を想定とした潜熱回収性能評価

3.1 通風実験概要

前章において, CC-8 の吸着特性は市販吸着材と比較して吸着容量に大きな差がなく, 潜熱回収に使用できると考えた. そこで, 本研究では熱回収型ダクトレス換気空調装置のフィルターに焼成した木炭を試用することを計画した. そこで, 市販品を改造し, CC-8 のエレメントを試作し, 通風試験装置による能力評価を実施した.

(1) 住宅の換気熱損失

住宅ではネットゼロエネルギー化の観点から, 高気密・高断熱住宅が一般的になっている. これら高性能住宅は, 高い外皮性能を有する反面, 換気時に外気を直接導入することによる空調負荷(換気負荷)は相対的に増加してしまった. このような背景から, 換気による熱損失を低減することを目的に熱回収換気システムが提案されてきた. これは積層型やローター型の熱交換器を用いて給排気を行うものであり, 熱回収型第一種換気装置と呼ばれる. 本システムは現在の工業住宅への導入が強く推奨されているが, 全館換気空調は設備投資費用が高く, 住宅内に換気用ダクトを施工しなければならない. また, 建築時の計画上ダクトスペースが無い場合や予算の関係から全館換気空調を導入できない場合において, 局所換気装置が未だに選択されている.

このように局所換気を余儀なくされた物件において, 現在, ダクトレスタイプの熱回収換気装置が提案されている. Fig.5 に本報で用いるダクトレス換気ユニットの概略図を示す. 本ユニットは, 外壁に直接取り付けられるタイプであり,

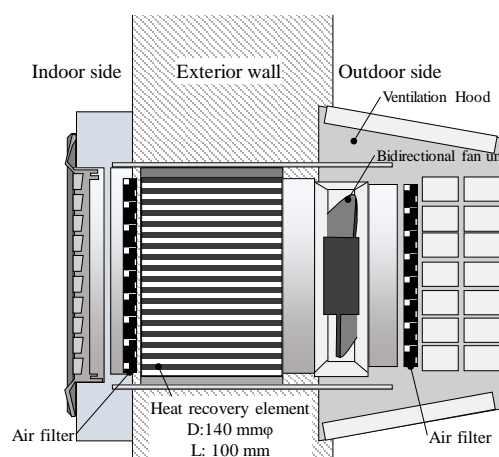


Fig.5 Schematic diagram of duct-less ventilation unit.

外壁上に 150 mm のダクト穴をあけ、その中に熱回収用のエレメントを設置する。換気ファンは 70 sec の間隔で正転と反転を繰り返すことで給気と排気を交互に行う。市販品の熱回収エレメントは顕熱回収型のセラミックスタイプであり、エレメント直径は 140mm ϕ 、長さは 200 mm である。排気時に室内の熱をセラミックス内に蓄熱し、70 sec 後に給気に切り替わる。給気時には外気の導入空気がセラミックスの熱で加熱または冷却されることで室内の熱損失を低減する。また、本装置は 2 機で一つのシステムとなっており、給気と排気を交互に切り替えながら行うことで連続的な顕熱回収(70 %)が可能になる。Fig.6 に本システムの構成と動きを示す。例えば、冬期に外気 5 $^{\circ}\text{C}$ 、室内 25 $^{\circ}\text{C}$ の場合、顕熱回収を行うことで 19 $^{\circ}\text{C}$ で空気を供給できるようになる。従来換気方式であれば直接外気導入の 5 $^{\circ}\text{C}$ であることから、14 $^{\circ}\text{C}$ 高い給気温度が実現できる。しかし、本装置内のエレメントは水蒸気吸着を行わないため潜熱回収は不可能である。

本研究では、このエレメントに代わって CC-8 を充填した簡易な潜熱回収エレメントを作成し、潜熱回収 効率の測定実験を実施した。

(2) 潜熱回収性能評価

潜熱回収効率を測定するため、杉炭製のエレメントを作成した。これは、外径 150 mm ϕ 、長さ 100 mm の塩化ビニル製パイプ内に CC-8 を充填したものである。CC-8 は粉碎した後にふるいで大きな木炭を除去し、粒形を 5 mm 以下に揃えた。エレメントの外部は不織布で覆うことで、木炭の飛散が起きないようにしてから通風試験を行った。

Fig.7 に実験装置図を、Table 3 に使用したセンサーの仕様を示す。実験装置は市販のダクトレス換気装置を改造して作成した。室内である RA は恒温恒湿空気供給装置を用いて、屋外空気 OA を想定した空気は恒温空気供給装置を用いて作成し、簡易のチャンバー内で循環させた。次に、両チャンバーを換気装置によってダクト接続し、OA-RA 間の空気を行き来できるようにした。それぞれの簡易チャンバーには圧力調整機構を取り付け、大気開放とすることでチャンバー間の測定するため、フィルターの前後に高精度温湿度プローブを設置した。同様に極細の熱電対を

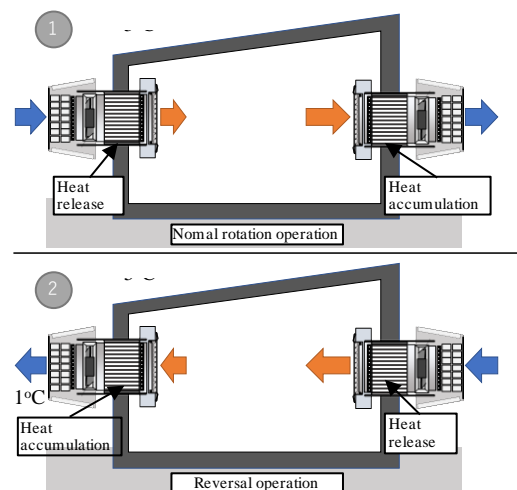


Fig.6 System diagram of the ventilation system.

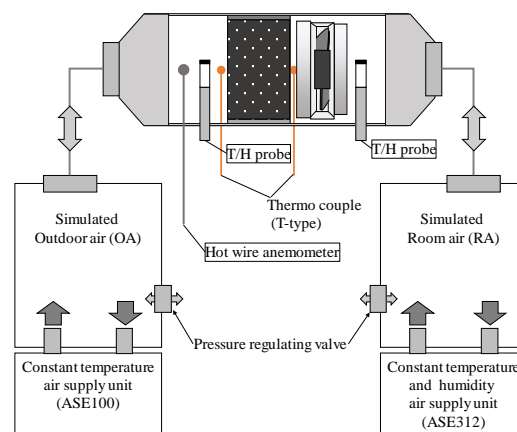


Fig.7 Schematic diagram of experimental set up.

Table 3 Specification of sensors

Items	Sensors	Accuracy
T	Thermistor	$\pm 0.1^{\circ}\text{C}$
H	Capacitance type	$\pm 1.0\% \text{ RH}$
T_a	T-type (TC)	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$
V_a	Hot wire anemometer	$\pm 0.1 \text{ m/sec}$

Table 4 Experimental conditions

Items	Set value
Adsorbent	CC-8 filter (150mm ϕ \times 100mm)
OA condition	20 $^{\circ}\text{C}$, 7.5 g/kgDA
RA condition	0 $^{\circ}\text{C}$, 1.5 g/kgDA
Switching time	70 sec

圧力差が生じないようにした。潜熱回収効率を設置し、温度変化を瞬時に捉えられるようにした。ダクト内には無指向性の熱線式風速センサーを設置し、風量を算出した。

Table 4 に実験条件を示す。本実験は冬期の熱回収性能評価を行うため、OA 条件を 20°C 、 7.5 g/kgDA 、RA 温湿度条件を 0°C 、 1.5 g/kgDA とした。換気ファンの正転/反転の切り替え時間は 70sec とし、製品と同じ条件で実験を行った。

3.2 実験結果

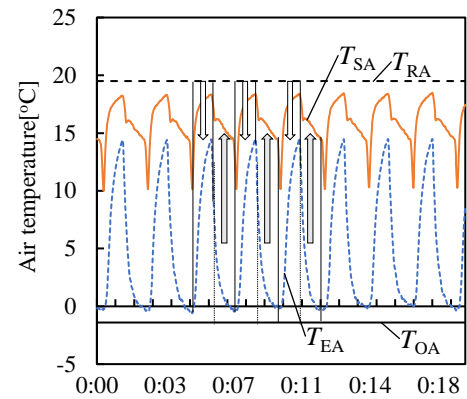
(1) 温湿度の時間変化

実験で得られた温湿度の時系列変化を Fig.8(a),(b)に、ダクト内風速を Fig.8(c)に示す。空気温湿度の変化の図では、空気温湿度がファンの正転/反転の切り替え時間である 70sec の周期で上下していることが分かる。図中の矢印は風の向きを示しており、上向きの矢印は給気 (SA)、下向きの矢印は排気 (EA) を意味する。風向きの切り替えによって絶えず空気の温湿度は変動していることが分かる。空気温度を見ると、給気時において、 T_{OA} が -1.5°C であるのに対し給気温度 T_{SA} は 17°C から徐々に低下し、 70sec 後には 14°C を示している。一方排気時は、室内 T_{RA} は 19°C であるのに対し、排気 T_{EA} は 0°C から 15°C に上昇した。従来の換気装置であれば、 -1.5°C の OA が直接導入されていることから、エレメント内の杉炭の蓄熱による顕熱回収が行われていたことが分かる。

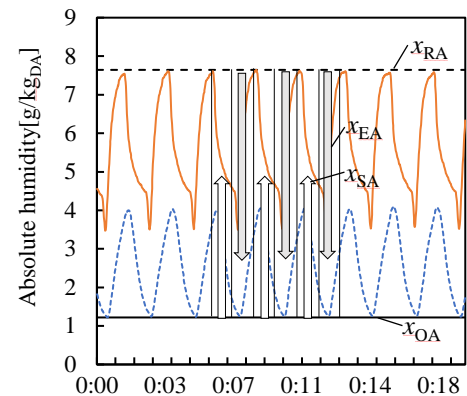
次に、Fig.8(b)の空気中の水分量である絶対湿度の変化に着目すると、Fig.8(a)と同様の傾向を示した。外気絶対湿度 x_{OA} は 1.3 g/kgDA であるのに対し、給気絶対湿度 x_{SA} は 7.5 g/kgDA から徐々に低下し、 4.0 g/kgDA に達した。一方排気時は室内絶対湿度 x_{RA} が 7.5 g/kgDA であるのに対し、排気絶対湿度 x_{EA} は 4.0 g/kgDA から 0 g/kgDA になっている。この結果から、前述と同様に杉炭による潜熱の回収が行われていることが確認できた。

杉炭による顕熱・潜熱回収が確認できたが、給気と排気で温度変化量、絶対湿度変化量に差があり、熱・物質バランスが取れていないように見受けられた。そこでダクト内風速変化に着目すると、排気時は 2.5 m/s であるのに対し、給気時は 1.3 m/s と半減していることが確認できた。実験用チャンバーは大気圧開放して圧力調

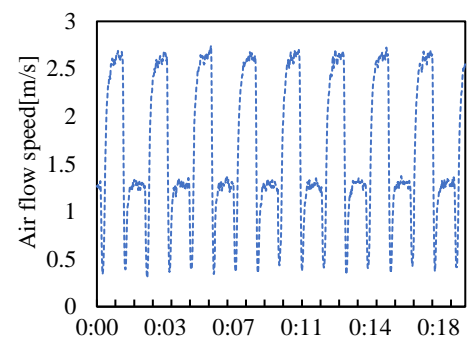
整しているため、これはファン自体の特性である。このことから、軸流ファンの正転/反転に応じて回転数制御やダンパー調整などを行い、給排風量の調整が今後必要である。



(a) Changes of air temperature.



(b) Changes of absolute humidity.



(c) Change of air flow speed inside the duct.

Fig. 8 Results of measurement for latent heat recovery rate.

(2) 潜熱回収効率の算出

熱回収換気装置の性能評価方法は JIS B 8628 に定められており、温度交換効率は Eq.(1)によって求められる。つまり室内外温度差に対する屋外と給気温度の差の比である

$$\eta_s = \frac{(T_{OA} - T_{SA})}{(T_{OA} - T_{RA})} \quad (1)$$

しかし、本研究で用いた換気装置は風量差が大きく、空気の温湿度も常に変化していることから、Eq.(2)で交換効率を求めることとした。ここに h_s は空気のエンタルピー、 t は時間であり、本式では毎秒のエンタルピー変化量を 70 秒間積算することで熱交換効率を求めた。

$$\eta_s = \sum_{i=0}^t \frac{(h_{sOA} - h_{sSA})}{(h_{sOA} - h_{sRA})} \quad (2)$$

Fig.9 に実験結果の中で測定結果が安定していた 1 サイクルについて、顕熱・潜熱及び全熱処理量の時間変化を示す。湿り空気の比エンタルピーは Eq.(3)で求めることが出来る。ここに C_a は空気の比熱、 C_v は水蒸気の比熱である。 θ_a は空気温度、 r は水蒸気の蒸発潜熱である。

$$h = C_a \theta_a + x(C_v \theta_a + r) \quad (3)$$

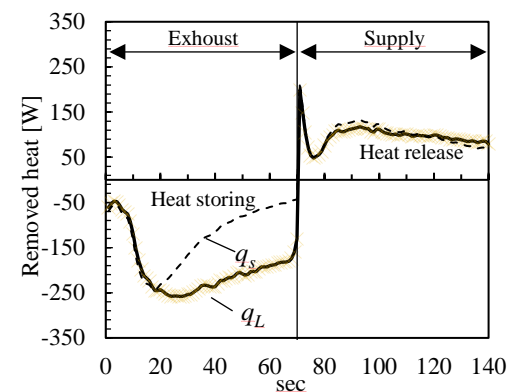
また、換気装置の処理能力はエレメント入口出口のエンタルピー差 Δh に処理空気の質量流量をかけることで計算できる。Fig.9(a)に顕熱処理量 q_s と潜熱処理量 q_L の変化を示す。排気側では顕熱・潜熱の蓄熱が行われており、 q_s は -240 W から時間の経過に伴って低下し -50 W に、 q_L は 300 W から 220 W まで低下しており、時間経過とともに蓄熱が完了していく様子が確認できる。特に q_s については殆ど蓄熱が完了していた。これは木炭の蓄熱量が小さいことが原因である。

一方 q_L はまだ蓄熱が完了しておらず、余力があるように見える。給気/排気の切り替え直後はそれぞれ蓄熱量、放熱量が小さいが、切り替えに伴う風量の低下と、センサーの応答遅れの影響が原因と考えられる。潜熱蓄熱は水蒸気が木炭に吸着されることで行われるが、通風速度が遅く、処理空気が少ないためか、潜熱の蓄熱が完了していないことが分かる。

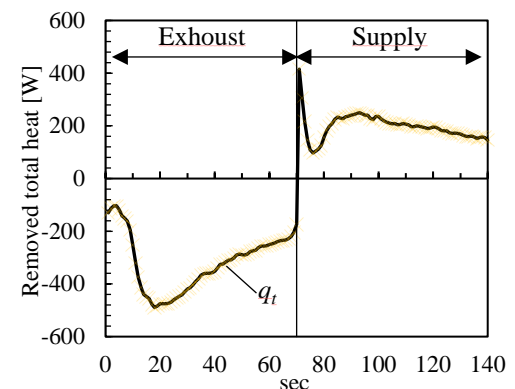
一方、給気側を見ると排気時に蓄えられた顕

熱・潜熱が放熱されていた。 q_s の放熱量は 150-220 W、 q_L の放熱量はおよそ 140-160 W である。

次に、Fig.9(b)に全熱回収量の変化を示す。排気時の蓄熱量は 20 秒近傍で最大の -450 W となった。放熱時は 100 秒近傍で 350 W を示した。蓄熱時は蓄熱量が急峻に立ち上がり、比較的最早い速度で蓄熱量が減少しているが、放熱速度はピークである 350 W からの減少が少ない。これは給排気時の風量に差があったことで、吸放熱速度に差が生じたためと考えられる。



(a) Changes of sensible heat and latent heat amount.



(b) Change of stored heat and released heat amount.

Fig.9 Experimental results of heat amount.

Table 5 Heat recovery rate of the CC-8 filter

	Exhaust	Supply
L_s	286 W	171 W
q_s	154.4 W	102.3 W
L_L	275.5 W	159.5
q_L	206.7 W	101.2 W
η_s	53.9 %	59.8%
η_L	75.0 %	63.5 %

Fig.9 から得られた結果をもとに、Table 5 に積算値によって算出した熱回収量及び熱回収効率を示す。表内の L は換気負荷である。これは OA を直接導入した際に流入する熱量である。この結果、排気時の顕熱回収効率 q_s は 53.9 %, 潜熱回収効率 q_L は 75.0 % を示した。一方給気時の q_s は 59.8 %, q_L は 63.5 % であった。給気/排気時の風量差が大きく、換気負荷、熱回収量に大きな差が見られた。しかしながら、杉炭を用いることで、冬期において排気時に損失する水分の少なくとも 60 % 以上が回収可能である結果が示された。このことから、杉炭を用いた保湿換気は実現可能性があるかと判断できる。また、杉炭の蓄熱性によって、顕熱も 54 % 以上の回収が可能であることが示された。

しかし前術の通り、軸流ファンの正転/反転を切り替える換気方式では給排気風量に約 2 倍の差が生じてしまい、正確な熱回収量の測定が困難であった。実験ではユニット単体による性能評価を行ったが、実際は 2 台のユニットが交互に動くため、実際の熱交換効率は今回の測定結果の平均となることが予測される。実性能の把握のためには 2 台を連携させて、風量バランスを取りながらの実験が必要である。

4. まとめ

静岡県産の木材廃材の有効利用技術開発を目的に、県産杉チップを材料とした木炭を焼成し、省エネ換気システムへの利用可能性を検討した。以下に本研究で得られた知見を示す。

1) 焼成温度をパラメーターに杉製の木炭を焼成し、水蒸気吸着量を測定した。400 °C から 800 °C で焼成した結果、800 °C 焼成の木炭 (CC-8) の吸着量が最も多く、相対湿度 95% において、自重の 40% の水蒸気を吸着可能であることが示された。ただし、吸着特性は雰囲気相対湿度に対して直線的であることからメソ孔・マイクロ孔は存在していないことが推測できた。

2) A 型シリカゲルと活性炭についても吸着量評価を行い CC-8 の結果と比較した。その結果、最大吸湿量については活性炭と同等であることが確認できた。しかし、低湿域においては A 型シリカゲルの方が CC-8 よりも吸着量が多く、また中・高湿域では活性炭の吸着能力が高いことが確認された。

3) 杉炭 CC-8 を焼成し、140mm ϕ 、100mm のシリンダ

一内に充填し、潜熱蓄熱エレメントを作成した。本エレメントを市販のダクトレス熱回収換気装置内に設置し、冬期の熱回収性能を検証した。その結果、63 % 以上の潜熱回収効率が期待できることが確認できた。また、顕熱回収効率は 54 % 以上を示していた。

謝辞

本研究は「2019 年度 提案型教育研究 研究プロジェクト A」による。本研究の遂行にあたり、協力いただいた関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Ahmad M.a., Wan Daud W.m.a. and Aroua M.k., "Adsorption kinetics of various gases in carbon molecular sieves (CMS) produced from palm shell", *Colloids and Surfaces. A. Physicochemical and Engineering Aspects*, **312**, No.2-3, (2008) 131.
- 2) Attia A. A., "Some Surface Properties of Activated Carbons Prepared by Gasification with Different Gases.", *Adsorption Science & Technology*, **15** No.9, (1997)707.
- 3) Buczek B, "活性炭粒子内のポア構造", *Zhurnal Royal Society of Chemistry*, **102**, (1992) 33.
- 4) 安田源, 玉井久司, "高度にメソポアが発達した炭素繊維", *化学*, **49**, No.9, (1994) 664.