

## 産業廃棄物を利用した断熱材および防音材の開発

### Development of Adiabatical Material and Insulator Using Industrial Waste

稲田 善紀\*・木下 尚樹\*・川口 隆\*

Yoshinori INADA\*, Naoki KINOSHITA\* and Takashi KAWAGUCHI\*

In this study, the development of adiabatical material using the industrial waste such as paper sludge incineration ash, crushed stone sludge, iron slag and gypsum was tried. That is the thermal insulation performance was examined. And, the case in which the vacuum was used jointly was also examined. Then, the development of insulator was tried. The soundproofing performance was also examined and discussed.

*Key Words:* adiabatical material, insulator, recycle, industrial waste

#### 1. 緒 言

筆者らは、循環型社会構築の観点から、産業廃棄物を利用した新しい断熱材の開発を目的とし、これまでに、製紙汚泥焼却灰（以下 PS 灰）、砕石スラッジ、高炉スラグ、鉄鋼スラグを用いた断熱材を試作し、検討を行った<sup>1)</sup>。その結果、試料の粒径が小さい方が断熱性は向上し、検討した廃棄物の中では PS 灰が最も断熱性に優れていることがわかっている。本研究では、さらに廃石こうを加え、微粉末試料を用い、かさ比重の小さい PS 灰と他の廃棄物を混合した場合の断熱性について検討し、試料の空隙率、かさ比重、真比重が断熱性に及ぼす影響について考察した。また、建設材料として用いた場合の防音性能について基礎的な評価を行った。

#### 2. 断熱材の現状および使用する試料の種類と性質

##### 2.1 断熱材の現状

我が国における断熱材の歴史はまだ 40 年程度である。第一次世界大戦中の石綿（アスベスト）不足により、石綿の代用品としてガラス繊維が開発された。その技術が住宅の断熱材として利用されることになる。断熱の目的としては主に 3 つ挙げられる<sup>2)</sup>。(1)省エネルギー（暖冷房負荷の低減）：冬は室内で作り出した熱を室外へ逃げるのを防ぐ役割がある。また夏は室外から流入する熱を遮る役割がある。(2)表面結露の防止：室内側壁面等の表面温度を、露点温度以上に保つことによって、結露の発生を防止する役割がある。(3)温度変化の減少（建物の物理的負荷の減少）：日射あるいは気温の変化による躯体の温度変化を小さくすることによって、躯体の熱応力を抑制し、クラックの発生や躯体の劣化を防止する。

\*愛媛大学大学院 理工学研究科 生産環境工学専攻

\*Specialty of Engineering for Production and Environment, Graduate School of Science and Engineering, Ehime University

我が国の断熱材の現状としては、グラスウールが 60～80%もの割合を占めている<sup>3)</sup>。グラスウールとは、綿状に加工されたガラス繊維のことで、断熱性及び吸音性に優れている。グラスウールは、ガラス繊維の間に大量の空気を含んでおり、その絡み合った細い繊維が空気を動きにくくすることによって断熱性能を生み出している。グラスウールが多く使用される理由の一つに他の断熱材に比べて安価であるということがあげられる。しかし、グラスウールは壁体内の結露やカビが発生し、グラスウール自体が垂れ下がるという欠点を持っている。ポリスチレンを加熱溶解し、発泡剤、難燃剤を添加して、これを定尺加工して製品となる押出法ポリスチレンフォーム等の発泡プラスチック系断熱材は、断熱材の垂れ下がりといった問題は解消できるが、価格が高く人体への影響（環境ホルモン問題等）も懸念され、さらに火災時の人体や環境に与える影響を考えると断熱材が抱える問題は未解決部分が多い。住宅の温熱環境・断熱に関する性能の重要な部分を占める断熱材の性能としては、断熱性の熱抵抗値（熱伝導率）、透湿抵抗値、熱容量（蓄熱量）、ヒート・リレーなどがあげられる。現状では断熱材の性能として熱伝導率と結露関係の透湿抵抗値が重要視されている。これからは、生産エネルギー、フロン使用、廃棄時処理などの環境への負荷の大きさだけでなく、新築建造物に多い環境ホルモンや化学物質過敏症の問題、さらには火災・廃棄処分の燃焼時による人体への負担など多くの問題を解決する必要がある。

## 2.2 製紙汚泥焼却灰（PS 灰）

我が国では平成 15 年度 1 年間で約 3000 万トンもの紙類を生産し、そのうち古紙で賄っている割合は 60%の約 1800 万トンである<sup>4)</sup>。古紙は通常リサイクル工程を経て再生紙として再利用されるが、古紙の再生紙へのリサイクル工程を繰り返し行くと、紙の繊維が脆くなり、再生紙として使えない短い繊維が増えてくる。この短い繊維がペーパースラッジと呼ばれる有機性の汚泥となり排出される。PS は原料である古紙の 20～30%発生し、汚泥を焼却処理した灰が年間 100 万トン以上廃棄されている<sup>4)</sup>。PS 灰は繊維に付着しているインクや光沢化のために使用された微粒分が PS と一緒に汚泥として排出されたものを焼却されたものであるため、古紙の種類によって灰の質が安定しない。PS 灰の一部は海砂利の代用品や道路舗装材として使用され、人口ゼオライト化の研究も進められてはいるが、大部分は埋め立て処分されているのが現状である。製紙産業はリサイクル産業と呼ばれており、古紙の再利用や間伐材の利用など様々な取り組みがなされているが、PS 灰というリサイクルの過程から排出される産物を、再度リサイクル循環の中で使うシステムを見出すことでよりよい循環システムとなる。PS 灰は古紙の再生過程から排出された脆い食物繊維であるため、減量化のために焼却した後の PS 灰は非常に軽く、試料層内に多くの空隙を含んでいる。過去の研究により粒状加工 PS 灰の粒径による断熱性の比較が行われ、粒径の小さい廃棄物を用いた試料の方が熱伝導率は低い（断熱性能が高い）ことが確認されている<sup>1)</sup>。そこで本研究では後述の方法で微粉末（0.15mm 以下）の粒径の試料を用い、PS 灰と他の廃棄物を配合することで配合割合の変化による断熱効果の向上を目的としている。

## 2.3 砕石スラッジ

砕石は道路やコンクリート、道床バラスト、割栗石など多くの土木事業に使われ、我が国における砕石の生産量は年間およそ 3 億 5000 万トン（平成 13 年度）である<sup>5)</sup>。そのうち選別し分級、沈殿、脱水し水分 25～30%程度の廃泥にしたものを砕石スラッジと呼んでおり、砕石から 2～3%排出される。砕石スラッジは窯業製品の一部として使用されている事例があるが、再生利用が可能な量が少なく、リサイクルという観点からみると現実的にはほとんど再生されていないのが現状である。また、砕石スラッジに焼却処理や固化剤を施して、セメント用骨材や路盤材に利用する研究もなされているが、砕石汚泥を回収する際に用いられる高分子凝集剤（PAC）や硫酸バンド（ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ）など凝集剤が含まれている場合が多いため、焼却すると塩素ガスが発生することや固化剤と脱水汚泥の混合が均一にならない等の問題を抱えており、実際に社会の中で使用するまでには至っていない。海砂の採取禁止により、コンクリ

ートの骨材にも碎石が使用されるようになり、碎石の増加に伴って碎石スラッジの廃棄が増えてくることが予想される。現時点では碎石スラッジの有効な利用法が確立されておらず、処理場などの問題解決やリサイクルに向けてさらなる研究が期待されている。

## 2.4 スラグ

スラグとは、鉄、銅、亜鉛等の金属を鉱石から分離精錬する工程において発生する。鉄鉱石を精錬する工程において排出される鉄鋼スラグは、高炉で溶解された鉄鉱石の中で鉄以外の成分がコークス中の灰成分や石灰石と混じりあって回収されたものであり、成分としては天然の岩石に類似している<sup>6)</sup>。鉄鋼業の副産物として排出される鉄鋼スラグの年間生成量は、高炉スラグが年間約 2300 万トン、製鋼スラグが年間約 1300 万トン、合計量は全国で年間約 3600 万トンにものぼり、銑鉄 1 トンから約 300kg のスラグが排出される<sup>7)</sup>。溶鉱炉中で金属と分離して溶解状態にあるスラグの冷却方法によって除冷スラグ、水砕スラグ、スラグウール、膨張スラグに分類される。除冷スラグは空気もしくは空気と少量の水を用いて除冷したもの、水砕スラグは水で急速に冷却し粒状物としたもの、スラグウールは冷却過程においてガラス繊維状としたもの、膨張スラグは適量の水、空気等を吹き付けて発泡化し冷却したものである。本研究ではスラグの中でも量が多く、省資源、省エネルギー、廃棄物の有効利用の観点から、利用について特に関心の高い除冷スラグに分類される製鋼スラグと水砕スラグに分類される高炉（水砕）スラグを用いる。スラグは硬度が高いため、両スラグ共微粉末にする際にロサンゼルス試験機を使用した。

## 2.5 廃石こう

石こうを芯材として両面をボード用原紙で被覆し、板状に形成したものを石こうボードいい、石こうには天然に産出する石こうと火力発電所などから発生する排煙脱硫石こう等がある<sup>8)</sup>。石こうボードの特徴は、(1)石こうボードの芯材は無機質で火に強い。(2)遮音性能が優れているため、吸音材との併用で優れた遮音性能を得ることができる。(3)下地材や仕上げ材として使用が容易であり、気密性・断熱性が得られる。(4)温度や湿度の変化に影響されず、伸び縮みや歪みがほとんどみられない。などがあげられる。石こうボードのリサイクルの現状は、古くなった建物を取り壊す際に、壁や間仕切り、天井材として利用された石こうボードが廃棄物として排出される。住宅の廃棄物としての石こうは廃石こうボードとして再利用されるのが一般的であるが、回収した廃石こうの他の廃棄物混入率が 10%以下でないとなれば廃石こうボードとしての機能が満たされない為、リサイクルの観点からいえば回収の方法を検討すると同時に新たな再利用方法を必要とする。廃石こうを微粉末にする際には、ボード用原紙は除去し、石こう自体の粉末を使用した。

# 3. 廃棄物を利用した断熱材の断熱性能

## 3.1 断熱性能の考え方

断熱性とは、一般的には伝導、対流及び輻射または放射からなる熱の移動をできるだけ効果的に防止する性質あるいは性能のことである。伝導とは物質の移動なしに、原子や分子の熱振動により、熱が伝わることであり、対流とは空気や水のような流体分子の移動に伴って熱が伝わることであり、輻射または放射とは電磁波の形で放出されたエネルギーを受けて熱が伝わることであり<sup>9)</sup>。つまり、熱移動のメカニズムを考える場合、この 3 種の運動を考えればよい。すなわち、断熱性能を向上ということは熱の運動をいかに抑えるかということである。本研究では、試料粒子部分における熱移動が伝導によって行われ、また試料層内の空隙部分における熱移動が対流によって行われる。

### 3.2 熱伝導率の測定方法

本研究において熱伝導率を計測する方法としてプループ法を採用した。プループ法とは非定常熱線法の原理をもとにして、プループを用いて測定するものである<sup>10)</sup>。プループ法による測定機器の一例を図-1に示す。平面の得られている試料表面に加熱線と直線状に張った測定センサーを設置したプループを60秒間押し当て、自動演算処理により被測定物の熱伝導率が得られる。非定常熱線法とは、無限円筒とみなせる形状の試料の中心に細い加熱線（ヒーター線）を直線状に張り、時間  $t=0$  からヒーター線に一定電力（熱量）を与え続けると、ヒーター線の温度は時間とともに上昇する。この時間に対する温度上昇の割合と、理論値に対し1%以内の近似を満足する条件を使って試料の熱伝導率  $\lambda$  を求めると次式になる。

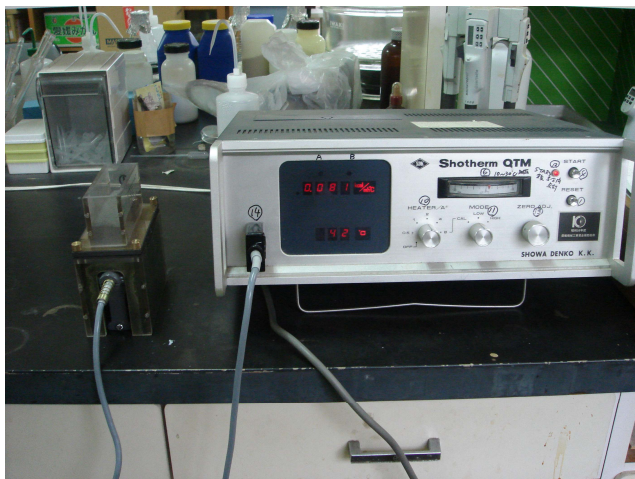


図-1 迅速熱伝導率計の外観

$$\lambda = \frac{q \ln(t_2 / t_1)}{4\pi(T_2 - T_1)} \quad (1)$$

ここで  $q$  : 加熱線の単位長さ当りの発熱量 [ $W/(m \cdot h)$ ] であり、式 (2) で表される。

$$q = RI^2 = \frac{VI}{L} \quad (2)$$

ここで  $V$  : 電圧 [ $V$ ],  $I$  : 電流 [ $A$ ],  $L$  : 電圧降下を測定している加熱線の長さ [ $m$ ],  $R$  : 加熱線の単位長さあたりの抵抗 [ $\Omega/m$ ],  $t_1, t_2$  : サンプル時間 [ $s$ ],  $T_1, T_2$  : サンプル時間  $t_1, t_2$  におけるそれぞれの温度 [ $K$ ] である。

次に、熱線法による式(1)を書き改めると式(3)になる。

$$\lambda = 0.0277RI^2 \ln \frac{t_2 / t_1}{V_2 - V_1} \quad (3)$$

ここで、 $V_1, V_2$  は熱電対の  $mV$  出力であり、

$$V_1 = \eta T_1 \quad (4)$$

$$V_2 = \eta T_2 \quad (5)$$

である。 $\eta$  は熱電対の熱電能であり、 $-10 \sim 200^\circ C$  で  $0.0405 mV/^\circ C$  で計算する。通常の熱線法では試料で挟み込んで測定するが、一方の試料を熱伝導が既知で、断熱性能に富んだ材料に置き換えて測定した場合、式(6)で表される。

$$\lambda = K \frac{I^2 \ln(t_2 / t_1)}{V_2 - V_1} - H \quad (6)$$

ただし、 $K, H$  : 定数

これを実用化したものがプループであり、ヒーター線の抵抗や、熱電対の熱電能、熱伝導率が既知の基材の熱伝導率などによって定まる各プループ定数の  $K, H$  の値を用いることで非定常測定法であるにもかかわらず、熱拡散とは無関係に直接試料の熱伝導率が求まる。測定には  $110^\circ C$  で 18 時間以上乾燥させた後、常温に戻した試料を用いた<sup>11),12)</sup>。

### 3.3 試料の物理的性質

本実験で使用した廃棄物微粉末の物性を表-1に示す。断熱材はその種類や素材も様々であるが、いずれも熱伝導率の低い空気を閉じ込めるような構造で開発されている。空気を閉じ込める断熱建材の原理として、複雑に絡み合った繊細な繊維間に空気を閉じ込めるものや、微細な独立した空気を閉じこめるものなどが主流である。本実験では、産業廃棄物を微粉末状態で試料として使用するが、断熱

表-1 使用した廃棄物微粉末の物性

廃棄物	かさ比重	真比重	空隙率 (%)	熱伝導率 W/(mK)
PS 灰	0.40	2.29	72.0	0.09
碎石スラッジ	0.88	3.11	60.4	0.14
高炉スラグ	0.94	2.49	61.8	0.14
製鋼スラグ	0.86	2.86	51.5	0.17
廃石こう	0.87	2.27	69.2	0.07

\*微粉末状態で脱気無しの場合

材として用いる場合、試料だけで形状を保つことは困難である。そこで試料を支えるために容器状のものを補助的に使用せざるを得なく、本実験では形状の保持として袋を利用した。固化した断熱材に比べ、試料層が疎な状態となる為、層内の空気量が多くなり断熱効果が期待できる。本実験では大気状態、脱気状態で熱伝導率を計測する。大気状態、脱気状態は袋状構造の断熱材を再現するため、チャック付袋を使用した。原料樹脂はポリエチレン、ポリアミドで、厚さは 0.04mm、耐熱温度は 100℃のロール袋を幅 280mm×長さ 200mmの長方形にカットし、ヒーターで加熱することによって密封した。各廃棄物の微粉末試料を図-2に示す。また、図-3に袋状構造の試料の例を、図-4には熱伝導率の測定状況を示した。

### 3.4 実験結果および考察

本研究では PS 灰と他の廃棄物との割合を変えて配合させた試料を用い、プルーブ法による熱伝導率の測定を行った。その際、熱伝導率と空隙の関係調べる為、各試料の空隙率を測定し、その結果をもとに考察した。実験結果より、各廃棄物における熱伝導率と PS 灰混入率（質量比）の関係をまとめたものが、図-5である。グラフの左端が各廃棄物単体の熱伝導率を、右端が PS 灰単体の熱伝導率を表している。碎石スラッジ、高炉スラグ、鉄鋼スラグでは、PS 灰の混入率が高くなると熱伝導率が小さくなる傾向にあり、ピーク値などは特にみられない。このことより、今回用いた廃棄物に PS 灰を混合して

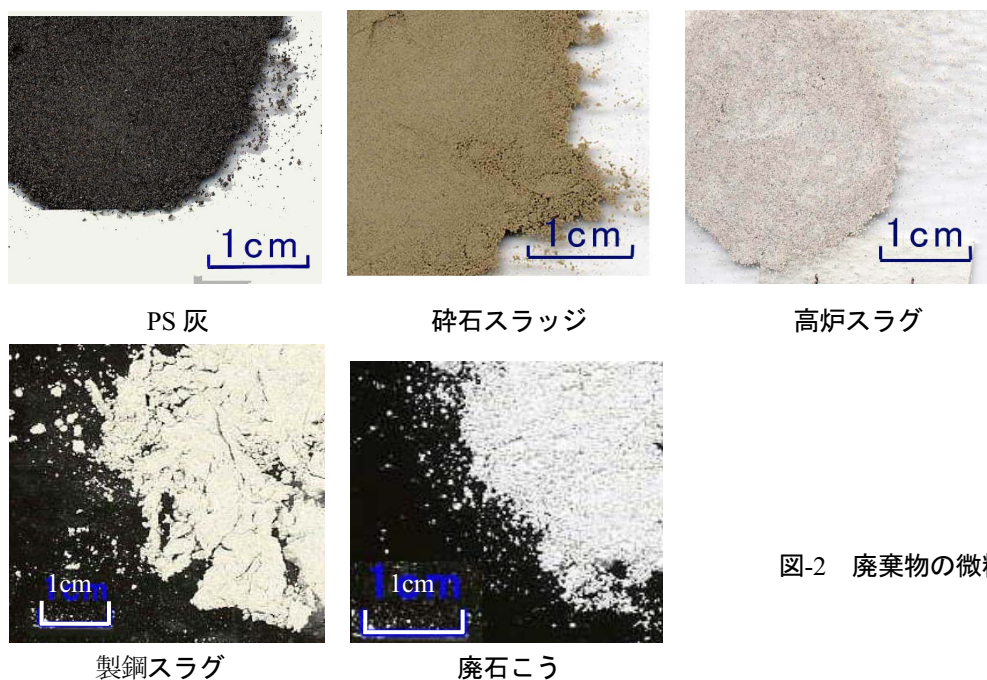


図-2 廃棄物の微粉末試料





図-3 袋状構造の試料の外観  
(左：脱気無し，右：脱気密封)

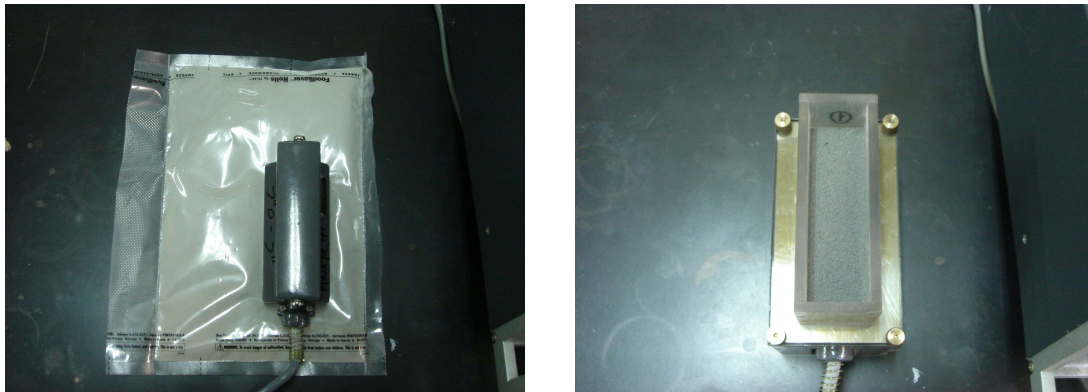


図-4 熱伝導率の測定状況  
(左：袋状構造試料，右：微粉末状態)

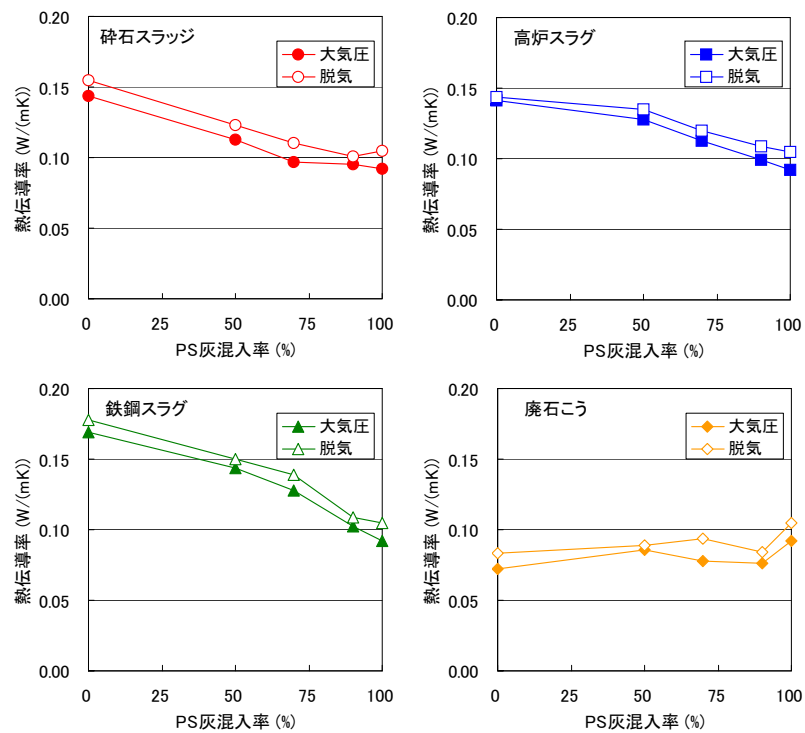


図-5 熱伝導率と PS 灰混入率の関係

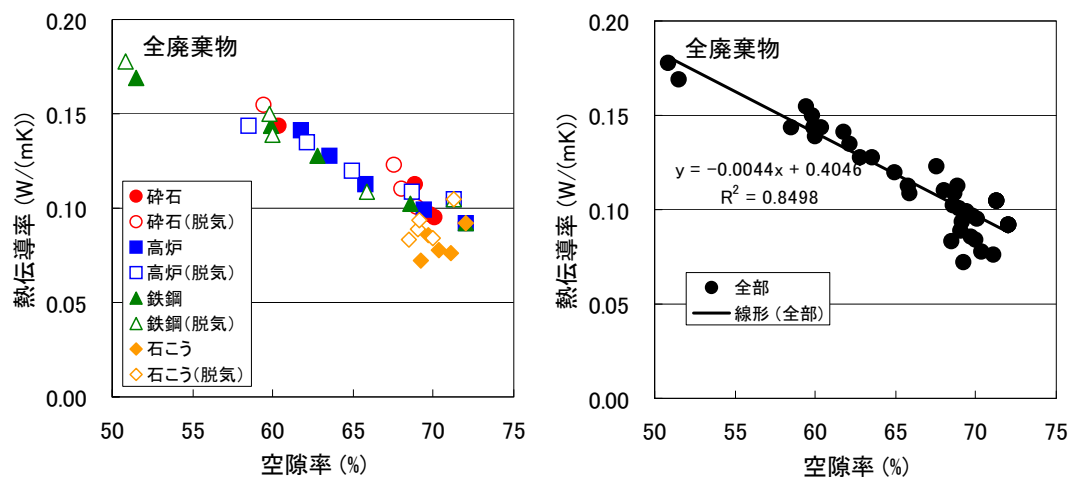


図-6 熱伝導率と空隙率の関係

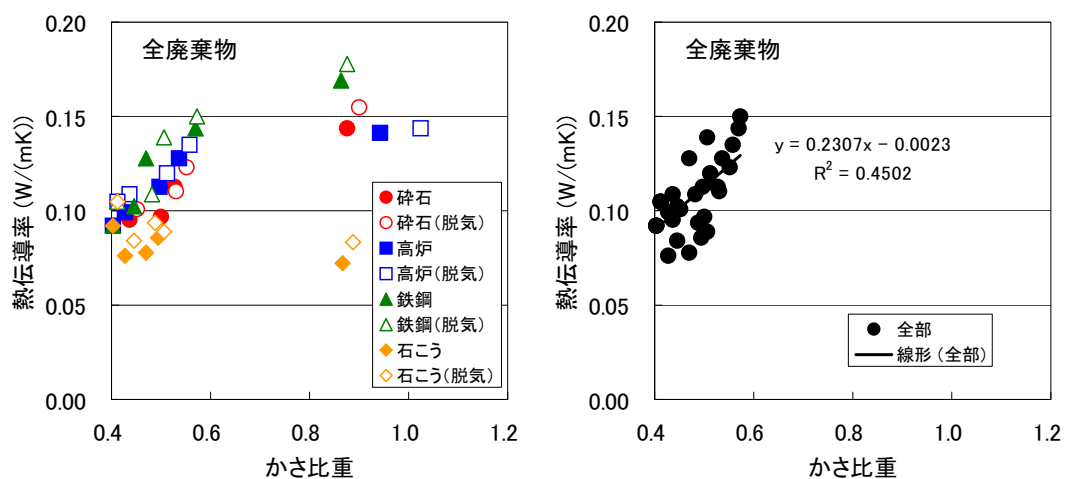


図-7 熱伝導率とかさ比重の関係

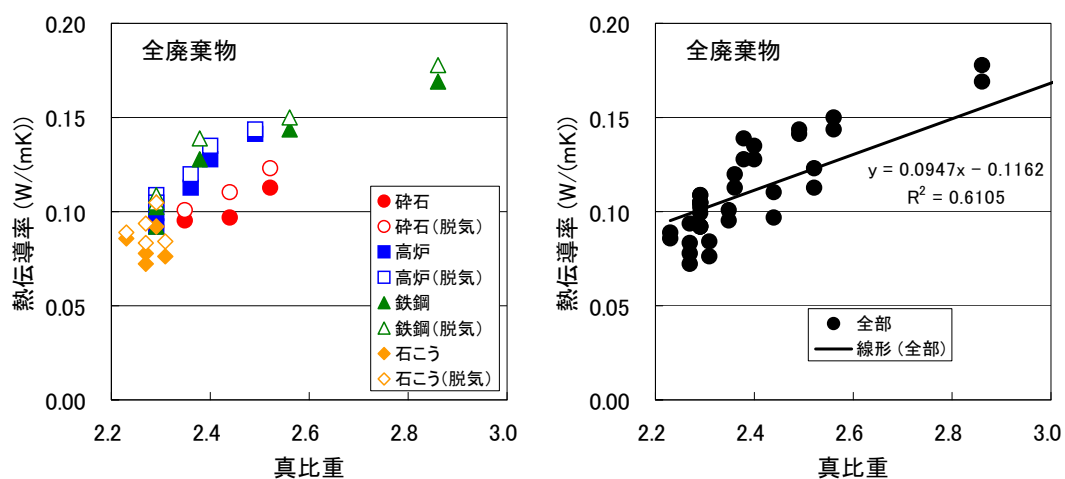


図-8 熱伝導率と真比重の関係

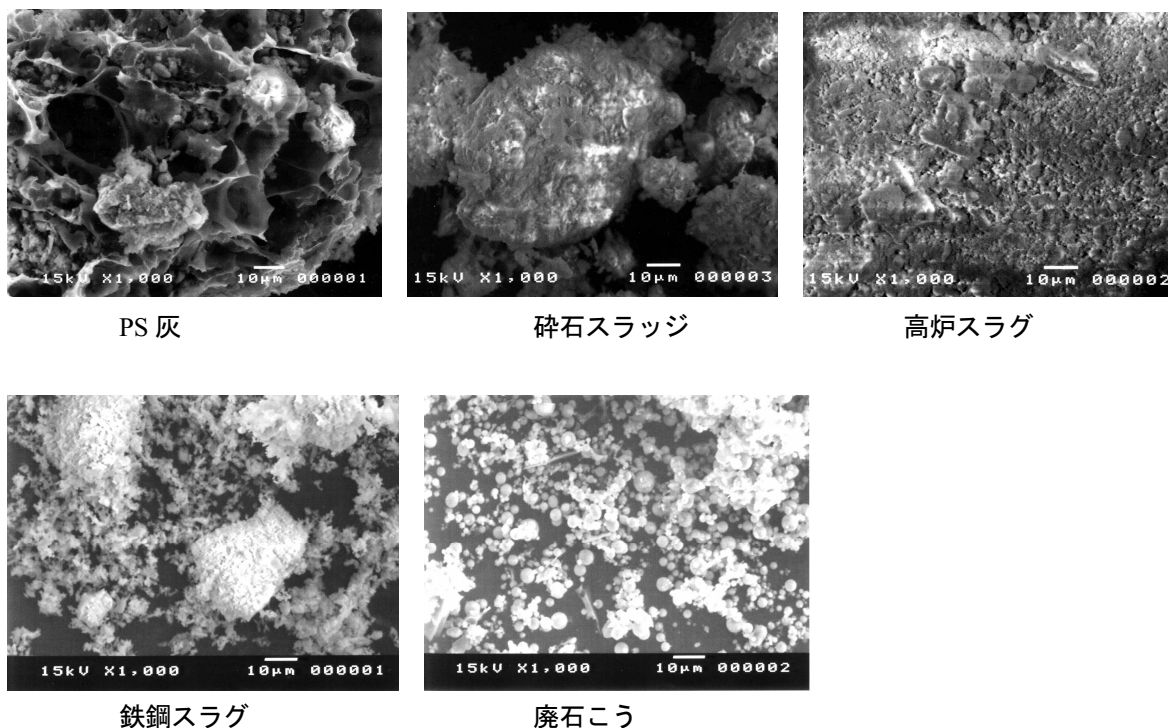


図-9 各廃棄物の電子顕微鏡(SEM)写真

も相乗効果により断熱性が向上するようなことはないと考えられる。廃石こう微粉末は単体で PS 灰とほぼ同程度の熱伝導率を示しているため、PS 灰を混合しても熱伝導率はほとんど変化しなかった。

つぎに、全試料を対象に熱伝導率と空隙率、かさ比重、真比重の関係をまとめたものが、図-6～図-8 である。熱伝導率は空隙率の増加に伴い小さくなる傾向にあり、ほぼ直線関係で相関係数は-0.92 であった。また、かさ比重との関係では、PS 灰を混合した試料については正の直線関係がみられ、相関係数は 0.67 である。碎石スラッジ、高炉スラグ、鉄鋼スラグの単体はかさ比重、熱伝導率とも大きく、この関係からは外れている。真比重との関係は正の直線関係がみられ、相関係数は 0.78 であった。以上のことから熱伝導率、すなわち断熱性は空隙率に大きく依存しているものと考えられる。

各廃棄物の電子顕微鏡写真を図-9 に示す。PS 灰は粒子自体に多数の開口空隙がみられ、このことが空隙率が大きく、熱伝導率が小さいことの原因となっているものと考えられる。碎石スラッジ、高炉スラグ、鉄鋼スラグには粒子自体には空隙はみられなかった。一方、廃石こうは粒子自体の開口空隙はみられないが、他の廃棄物と比較し粒径が小さく、球形でしかも単粒である。このことが粒子間の空隙を増加することにつながり、熱伝導率が小さくなったものと考えられる。

## 4. 廃棄物の防音性能

### 4.1 防音について

耳に響く不快な騒音をどのように防ぐかは現代の都市生活者の大きなテーマであり、解決すべき問題でもある。また、生活しやすい空間を築き上げるためには、音を防ぐことは避けては通れない条件である。防音には大きく分けて遮音、吸音、消音、防振、音響遮断といった 5 つの技術がある。遮音とは室内の騒音が外部に漏れないようにする技術であり、遮音の方法としては、壁の面密度を大きくして（壁を厚くする）遮音効果を高める、壁と壁との間を空間にして空気層を充填する、などが考えられる。吸音とは室内の音の反響を防ぐ技術であり、吸音材としてはグラスウール、ロックウール、セラミックな



どがあり、主に室内の反響調整に使用されている。消音とは開口部から漏れる音を防ぐ技術である。最後に防振・音響遮断とは壁や天井からの固体伝播音を消す技術である。また、音には固体音（固体伝播音）と空気音（空気伝播音）の2種類に分けられる。固体音とは壁・床などの固体を伝わってくる音であり、床衝撃音や排水音がその例として挙げられる。固体音の防音方法として、防振がある。ここで床衝撃音とは、床に衝撃力が加わることで床が振動して音が発生し、天井を通過し下階の部屋に放射され、それと同時に床の振動は下階の壁に伝わり、振動した壁から部屋の中へ音が放射されるような音のことをいう。床衝撃音は、衝撃源の重さによって2種類に分類される。椅子を引きずった際や、スプーンのように軽くて硬い物を落としたときに発生する軽量床衝撃音、もう1つは子供の飛び跳ねのように柔らかくて重い衝撃によって発生する重量床衝撃音である。この床衝撃音は騒音トラブルの主な原因の1つである。一方、空気音とは空気を伝わってくる音であり、車の騒音、人の話し声、テレビの声などが例として挙げられる。空気音の防音方法として、遮音と吸音がある。一般にデシベル（dB）で表される単位とは、音の大きさや電力または電圧の大きさなどを人間の感覚の増減に近い単位でわかりやすく表した単位と言われる。これは、音の強さを測定した単位のことであり、数値が大きいくらい、音がうるさいと感ずるということになる。通常、人間は60デシベル程度までを静かであると感じ、80デシベル以上になると日常生活上うるさいと感じる騒音となる。また、音の大きさのホーンの単位はデシベル（dB）である。ケーブル、コネクタまたはリンクの性能としての漏話減衰量、リターンロスおよび減衰量等を評価するための単位としてもデシベル（dB）が一般的に使われている。このデシベル（dB）という単位は、電力または電圧の対数比をBEL（ベル）と言い、対数で表した電力比、または、電圧比を意味する。真数の乗除算を対数にすることによって加減算として扱えるため、計算を簡単にすることができる。この対数で表されたBEL（ベル）という単位は、人間の感覚では大きすぎるため、一般的には10分の1の単位であるデシベル（dB）がほとんどの音の大きさや電氣的性能評価に使用されている。

#### 4.2 実験測定装置および測定方法

防音性能について、簡易的な評価を行うために図-10に示した実験装置を作製した。発生音源は、パソコンのアプリケーションで容易に波形および周波数の設定できる多機能高精度テスト信号発生ソフト（Wave Gene Ver.1.31）を用い、設定領域内の音声信号をアンプで増幅させ、スピーカーより発生させた。測定用ボックスは、内壁に固体振動音の抑制のため、厚さ12mmの免震ゴムを貼り合わせた。また、ボックス外部からの騒音、内部の共鳴の抑制対策として、発泡ポリスチレン（厚さ50mm）およびグラスウール（厚さ50mm）を用いた。ボックス内を中空壁（中空壁間内寸法370×350×20mm、壁材厚さ2mm）で仕切ることにより、信号発生空間、試料空間、信号受信空間を設けた。評価対象である廃棄物の試料は、この中空壁の空間内に設置する。デジタル騒音計（タスコジャパン(株)TMS865B）の測定位置は、発生・受信空間側の中空壁の中心壁面から10mm離れた位置に2台配置した。発生音源からの信号は、騒音計の周波数測定範囲である31.5Hz～8,000Hz間の25点の周波数信号とホワイトノイズおよびピンクノイズの波形を選定した。また、試料内を透過させる入射波および透過波の音圧測定は騒音計の外部出力端子により、信号をデータロガーで集積し、発生空間と受信空間で得られた波形を重ね合わせた最大値の差を透過損失値（R）とした。一般に遮音材料の評価方法は、材料中で音がどの程度音圧を損失させるのかを示す透過損失が用いられ、算出方法は、次式の通りである。

$$R = V_A - V_B \quad (7)$$

ただし、R：透過損失（dB） $V_A$ ：入射する音圧（dB） $V_B$ ：反対側から放射される音圧（dB）

#### 3.3 実験結果および考察

各試料の31.5Hz～8,000Hz間で測定した周波数の変化と透過損失の関係を図-11に示す。4種類の廃棄

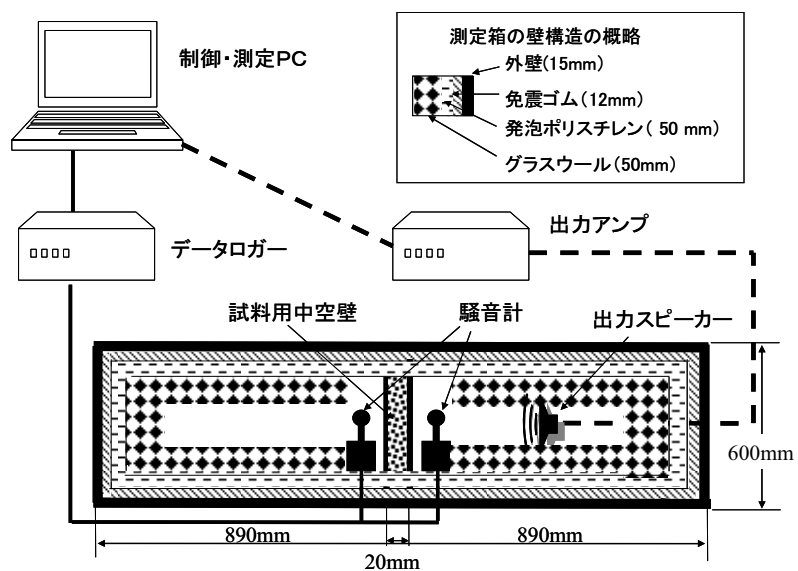


図-10 防音性能の測定装置の概念図

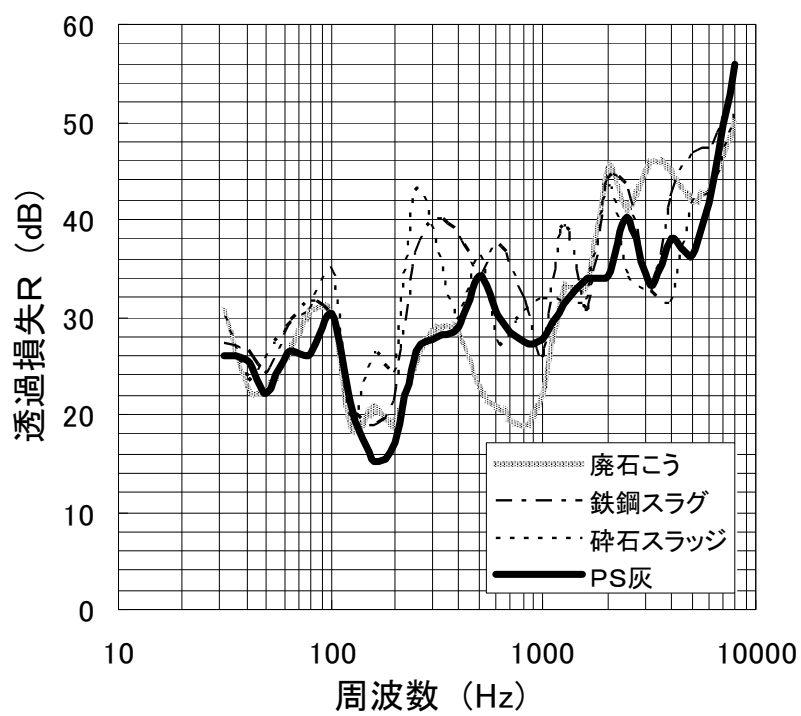


図-11 周波数と透過損失の関係

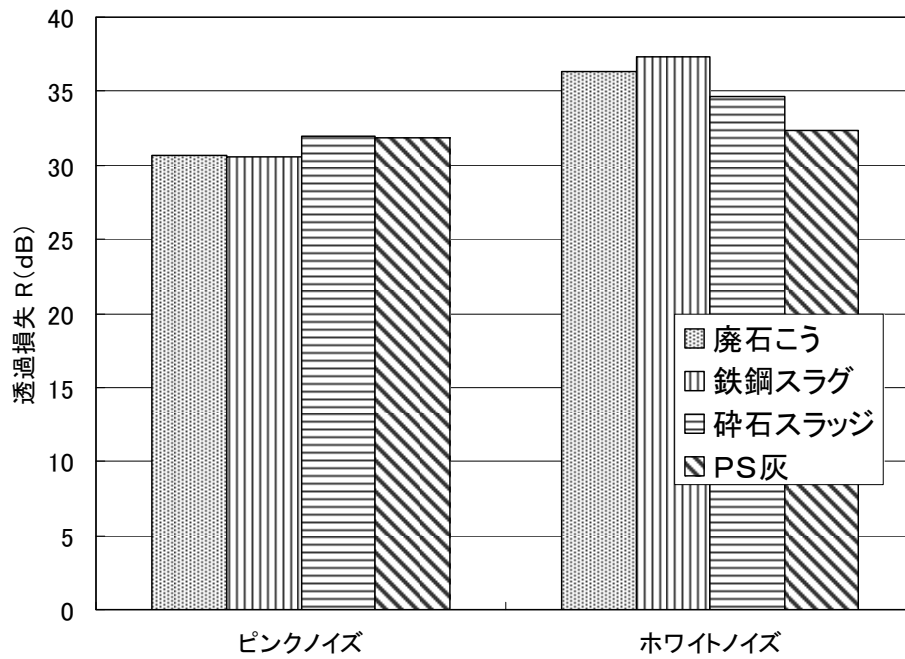


図-12 ノイズと透過損失の関係

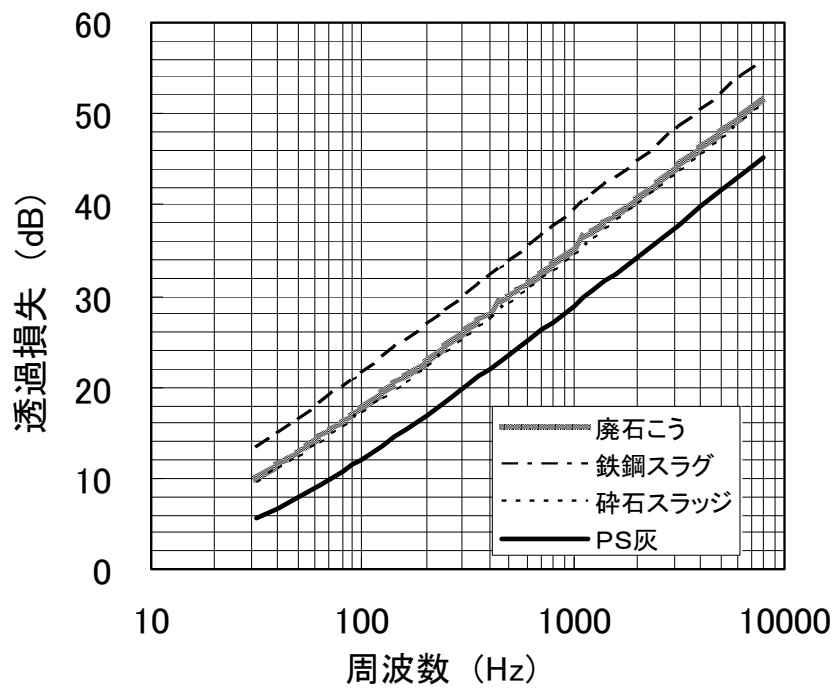


図-13 質量則によると透過損失の理論値

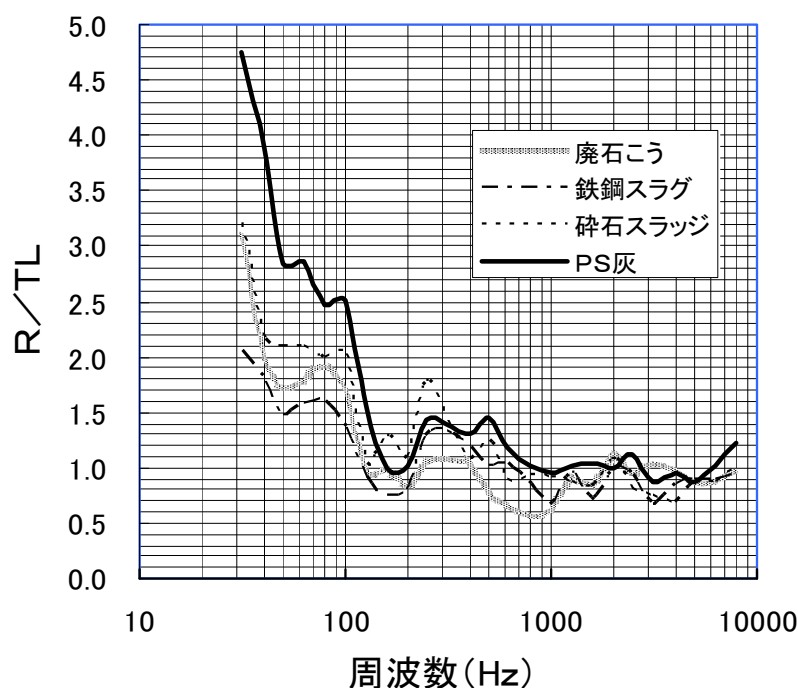


図-14 理論値と実験値の比較

物の曲線は互いに交差し合い、いずれの試料においても周波数が高くなるに従って透過損失も大きくなった。また、共通点として 100Hz から 200Hz の周波数域で損失値が約 10～15dB 低下する傾向が伺えた。ピンクノイズとホワイトノイズによる透過損失の関係を図-12 に示す。いずれの試料においても 30～35dB 程度の透過損失であった。図-13 は各試料の面密度から質量則による近似式を用いて、任意入射波の透過損失を各周波数で算出した理論値の結果を示したものである。用いた近似式は以下のとおりである<sup>13)</sup>。

$$TL_0 = 20 \log(fm) - 42.5 \quad (8)$$

ただし、 $TL_0$ ；垂直入射波による透過損失 (dB)、 $f$ ；周波数 (Hz)  $m$ ；面密度 ( $\text{kg/m}^2$ )

また、今回の実験では入射波の方向がランダムであるため、さらに以下の式を用いて透過損失  $TL$  を求めた。

$$TL = TL_0 - 10 \log(0.23TL_0) \quad (9)$$

ただし、 $TL$ ；任意入射波による透過損失 (dB)

面密度から算出した結果、鉄鋼スラグ、廃石こう、碎石スラッジ、PS 灰の順に理論値の透過損失は大きい。しかし、図-11 で示した実測値では、このような理論値ほどの明確な違いはみられなかった。

図-14 は理論値と実測値の比較を行うために、透過損失  $TL$  と透過損失  $R$  の割合を用いて周波数との関係を示したものである。比較した結果、PS 灰は低周波域で理論値よりも、実測値では透過損失の割合が大きく、防音効果を得ていることがわかった。PS 灰の実測値が理論値を超えた原因として、低周波数域で吸音性能による効果があったものと考えられる。PS 灰は他の試料と比べ、かさ高であり粒子に微細な開口空隙を有する多孔質な材料であるためと考えられる。この粒子構造の違いにより、入射波が PS 灰を振動透過する際に、他の試料よりも圧縮および膨張作用を繰り返すことにより、音エネルギーを熱エネルギーに変換し入射波が透過損失したものと推察される。

## 5. 結 言

本研究で得られた結果を要約すると以下の通りである。

- 1) 断熱性能に関する実験を行った結果、碎石スラッジ、高炉スラグ、製鋼スラグに PS 灰を混合すると熱伝導率が小さくなる傾向にあった。また、断熱性は空隙率に大きく依存していることがわかった。
- 2) 廃石こう微粉末の熱伝導率が小さいのは他の廃棄物と比較し粒径が小さく、球形でしかも単粒であることに起因しているものと考えられる。
- 3) 防音性能に関する実験を行った結果、いずれの試料においても周波数が高くなるのに従って透過損失も大きくなった。また、100Hz から 200Hz の周波数域で損失値が約 10～15dB 低下する傾向が伺えた。
- 4) 面密度から算出した結果、製鋼スラグ、廃石こう、碎石スラッジ、PS 灰の順に理論値の透過損失は大きい。しかし、実測値では、このような理論値ほどの明確な違いはみられなかった。
- 5) PS 灰は他の試料と比べかさ高であり粒子に微細な開口空隙を有する多孔質な材料であることから、入射波が PS 灰を振動透過する際に他の試料よりも圧縮および膨張作用を繰り返すことにより、音エネルギーを熱エネルギーに変換し、入射波が透過損失したものと推察される。

## 参 考 文 献

- 1) 稲田善紀，木下尚樹：廃棄物を利用した新しい断熱材の開発について，愛媛大学工学ジャーナル，Vol. IV，pp.157-164，2005.
- 2) 株式会社ノザワホームページ 断熱の目的，<http://www.nozawa-kobe.co.jp/Sotodan13.html>
- 3) NPO 白神ネットホームページ，<http://www.shirakami.or.jp/~nisi93/n2002/dannetu3.html>
- 4) 財団法人 古紙再生促進センター：紙リサイクル（統計資料）グラフ，<http://www.prpc.or.jp/>
- 5) 社団法人 日本碎石協会：骨材需給の推移，<http://www.saiseki.or.jp/>
- 6) 岩井達 他：土木工学大系 10 材料工学(II)，p.121，彰国社，1980.
- 7) 鉄鋼スラグ協会：鉄鋼スラグ協会ホームページ，平成 15 年度鉄鋼スラグ生産・利用状況，<http://www.slg.jp/>
- 8) 岩井達 他：土木工学大系 11 材料工学(III)，p.32，彰国社，1980.
- 9) 前掲 8) pp.43-54.
- 10) 日本熱測定学会：熱量測定・熱分析ハンドブック，pp.96-98，丸善，1999.
- 11) 日本建築学会：建築材料用教材 改訂第二版，pp.115-116，丸善，1998.
- 12) 日本建築学会：建築材料実験用教材 第四版，pp.148-152，丸善，2000.
- 13) 前川純一，森本政之，坂上公博：建築・環境音響学，p.104，共立出版，2000.