

廃棄物を利用した新しい断熱材の開発について

On the Development of New Adiabatical Material Using a Waste.

稲田 善紀*・木下 尚樹*

Yoshinori INADA* and Naoki KINOSHITA*

The large paper sludge is discharged from the paper industry which is key industry in the Toyo district in Ehime Prefecture. However, the recycling rate of the paper sludge is low. The paper sludge is utilized as a usual combustion aid material. Most is disposed in ground the paper sludge incineration ash. It gropes for the utility value of incinerated ash. The part has already been used as an improved material for earth worker, and in search of further value added, the examination begins to have been made at present. In this study, from the background like the above, the development of adiabatical material using the paper sludge incineration ash was tried. To begin with, the granular sample was produced experimentally by the granulator by the agitation granulation system in respect of the paper sludge ash. Next, adiabatical material was produced experimentally using the granulation sample, and the thermal insulation performance was examined. And, the case in which the vacuum was used jointly was also examined.

Key Words: adiabatical material, paper sludge ash, recycle, granulation

1. 緒 言

我が国の平成12年度における産業廃棄物総排出量は約4.6億tであり、このうち全体量の45%にあたる1.8億tは再生利用されている。廃棄物を種類別にみると工場廃水処理および製造工程等で排出される汚泥は前述の4.6億tに対し約47%を占めている。そのうち再生利用されているのは8%程度であり、これらの再生利用を含めた処理問題解決は急務である。さらに愛媛県においては平成11年度の産業廃棄物排出量は9,676千tで、業種別にみると製造業が大半を占め約67%であり、また、廃棄物の種類でみると全体の約65%が汚泥である。それらの処理状況は全体の排出量9,676千tに対して中間処理による減量化量は5,763千t(60%)で、再生利用も含めたリサイクル量は2,576千t(27%)であり、全国平均45%と比較しても低い値であった。これは愛媛県東予地方における基幹産業である製紙業から排出される製紙汚泥の排出量が多いという特徴から減量化率は高いもののリサイクル率は低い状況からくるものである。製紙業ではこれらの状況から再生利用率を高めるために有機性汚泥である製紙汚泥を腐敗防止と減量のため焼却処分し、その焼却灰(以下PS灰)の利用価値を模索している。すでに一部は土工用の改良材として使用されており、更なる付加価値を求め、現在検討がなされ始めている。

*愛媛大学工学部 環境建設工学科

*Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Ehime University

原稿受理 平成16年10月29日

表1 PS 灰の再資源化利用方法の例

処理方法	利用例	特徴
熔融結晶化（スラグ化）	タイル、ブロック、レンガ、コンクリート用粗骨材、砂	再燃焼によるエネルギー消費大、CO ₂ の発生、製造方法が煩雑、強度大
固化剤（セメント等）による固化	タイル、ブロック、レンガ、軽量骨材	エネルギー消費が少ない、製造方法が簡易、強度がやや低い
灰の状態での利用	セメント混和剤	品質が不安定、有機分含有、資源化量が少ない、加工が不要

表2 PS 灰の主成分

<u>主成分</u>
二酸化珪素、酸化第二鉄、酸化カルシウム
<u>製造工程で添加</u>
炭酸カルシウム、カオリン

表3 PS 灰の性状

粒子密度	2.29-2.36 g/cm ³
粒子径	5-425 μm
最大乾燥密度	0.65 g/cm ³
pH	7-12

以上のような背景から、本研究ではPS 灰を用いた断熱材の開発を試みた。まず、PS 灰を造粒装置にて攪拌造粒方式により粒状試料を試作した。つぎに造粒試料を用いて断熱材を試作し、断熱性能を検討した。また、真空を併用した場合についても検討を行った。

2. 粒状加工 PS 灰の性状

PS 灰の再資源化利用方法として従来提案されているものは表1のようなものである。ただし、これらが全て実用化されているわけではない。表2および表3はPS 灰の成分および性状を示したものである。本研究では、PS 灰を粒状加工することを前提としているが、これは粉体よりは粒状で用いる方が断熱材として用いる場合、リサイクルが比較的容易であることが利点であると考えられる。試料を粉状で石膏ボード等に混入して固化した場合に比べて、試料そのものに付着物が発生することなく2次利用がしやすい。固化した場合は、試料が石膏ボードと混ざり合って密な状態を形成するが、そのまま粒状で用いると固化する場合に比べて試料層が疎な状態となり、多孔質化するため、試料層内の空隙が多くなり断熱効果も期待できる。しかし、試料だけで形状を保持することが困難であり、その改善のために袋状もしくは容器状になったものを補助的に使用することが試料層の形状保持対策として必要になる。また、外部への試料流出を防ぐための構造設計や、湿気に対する対策といった、既存の断熱材や石膏ボードに粉状試料を直接混入したものを利用する場合とは異なった問題点も生じる。

本研究では、PS 灰に水、セメントを混合した粒状試料を作製するために、造粒処理に関して特徴のあるA社のミキサーを使用した。このミキサーは一定速度で原料が回転する混合パンの中に偏心して配置された高速回転する混合工具で処理されることで、混合パン内で高速に抵抗する原料の流れが生まれ、混合パンと混合工具の速度差が有効に作用し原料がぶつかり合うことで最密充填され粒状を得るものである。このミキサーを使用した場合の造粒処理については、粉体と凝集を開始するのに必要な液体量の混合により微細な凝集体を作り、成長させ造粒粒子を得る方法を用いた。この方法では、初期の凝集体が発生した後、可能最大径8mmに至る任意の段階で、希望粒径の造粒物を得ることができる。この場合、造粒過程において粒子同士の付着による成長が見られ、造粒産物内に空隙を多く持つ粒体ができる。本実験においては、このミキサーを用いて4種類の粒状試料を作製した。試料は、粒状にする際の粒径

表4 粒状加工 PS 灰の配合 (質量比)

試料名	PS 灰	水	セメント	粒径(mm)
sample 1	1.0	0.38	0.0	4.0-8.0
sample 2	1.0	0.38	0.0	1.25-2.5
sample 3	1.0	0.38	0.1	4.0-8.0
sample 4	1.0	0.38	0.1	1.25-2.5

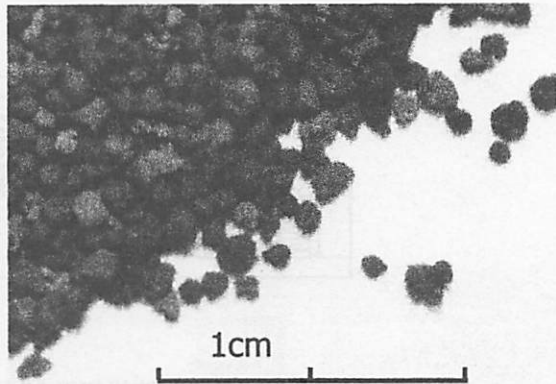


図1 粒状加工 PS 灰の外観

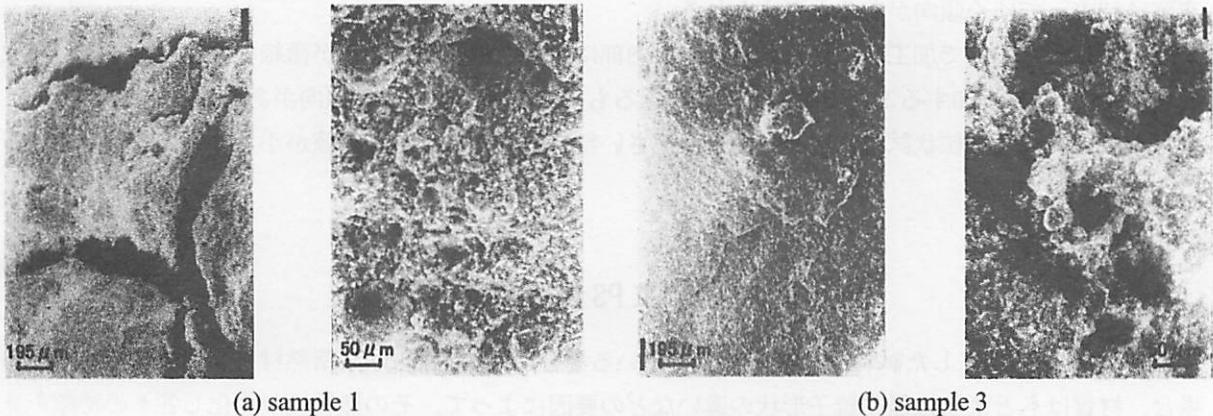


図2 粒状加工 PS 灰の電子顕微鏡拡大写真

とセメント添加という点について比較, 考察するため, 表4のような配合比率, 粒径で作製した. 粒径の決定については, 小さいものは取り扱いを考慮し, 肉眼で粒子が確認できる大きさとし, 大きいものについてはその倍程度の大きさとした. セメントの添加については, 本来更なるリサイクルを考えると添加物を加えないほうがよいと思われるが, 試料の強度を出すことと, 加工した粒状試料からの PS 灰の飛散を防ぐ凝結材として用いた. 水のみで加工した粒状加工 PS 灰の真比重は 2.47, セメントを添加した粒状加工 PS 灰の真比重は 2.53 である. 粒状試料の外観を図1に示す.

4種類の粒状試料の断面について, それぞれ顕微鏡で確認した. 顕微鏡写真を図2に示す. 水のみで加工した粒状試料は内部に微細で独立した空隙が多く含まれていることが確認できる. また, 大きくて深い亀裂が生じる傾向がある. 粒径の大きな粒状試料の方が大きな亀裂がはっきりと確認できるが, 粒径が小さい粒状試料にも小さな亀裂が確認できた. セメントを添加して加工した粒状試料では, 水のみで加工した粒状試料で見られた大きな亀裂は確認できなかった. これは水のみで加工した粒状試料では乾燥する際に試料内部の最も弱い部分に応力が集中し亀裂が生じたと思われるが, セメントを添加した粒状試料ではセメントが硬化することで大きな亀裂が生じなかったのではないかと推測される. セメントを添加することで大きな亀裂を低減し強度は上がったものの, 水のみで加工した粒状試料に比べて独立した微細な空隙は少なく, 空隙相互で連続して大きな空隙が含まれることがわかった.

粒径の違いによる断面の傾向としては, 粒径が小さい粒状試料に比べ粒径が大きな粒状試料のほうが, 空隙の量がわずかに多く, 大きさも若干小さい. 粒状加工の手順が, 小さな粒径の粒状を更に攪拌し,

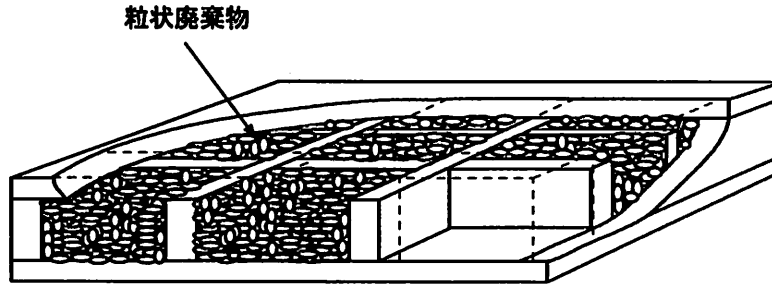


図3 粒状加工 PS 灰を利用した断熱材の概念図

徐々に大きな粒径へと成長させていくというものであることから、その過程で粒径の大きな試料の内部空隙は詰まってゆく傾向があると考えられる。

以上より、水のみで加工した粒状試料は試料内部に大きな亀裂が生じるが微細で独立した空隙が形成され、セメントを添加することで亀裂は低減できるものの空隙が連続する傾向があることが確認された。また、粒径が大きい粒状試料に比べ、粒径が小さい粒状試料のほうが、空隙が小さく多いことがわかった。

3. 粒状加工 PS 灰の断熱性能

PS 灰を粒状に加工した試料を断熱材として用いる場合の検討を行った。断熱材として粒状で使用する場合、材質はもとより粒径や粒子形状の違いなどの要因によって、その熱物性が変化し各々の特徴を見ることができる。そして、粒体層が含有する空隙の量はその断熱材としての特性を大きく支配する。本章では、熱物性として、特に熱伝導率について着目し、粒状試料の粒径の違いやセメントの添加などの材質による熱伝導率の違いについて考察を行った。本研究では図3のように粒状加工 PS 灰を板状材料で挟み込んだ断熱材を想定している。

3.1 熱伝導率の測定方法

固体壁面の温度を θ_1 および θ_2 とすると、面積 F を通って単位時間に伝わる熱量 Q は温度差 $\theta_1 - \theta_2$ に比例し、壁厚 δ に反比例することが実験的に知られるので、次式が成立する。

$$Q = \frac{\lambda}{\delta} F (\theta_1 - \theta_2) \quad (1)$$

上式の λ は、比例定数であり、壁の材料の熱伝導率という。

PS 灰を粒状化した4種類の実験試料について、熱伝導率を非定常熱線法の原理をもとにしたプローブ法により測定した¹⁾。非定常熱線法は無限円筒とみなせる形状の試料の中心に細い加熱線を直線状に張り、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共に指数函数的に上昇する。この時間に対する温度上昇の割合から、試料の熱伝導率を求める。その関係は次式で表される。

$$\lambda = \frac{q \cdot \ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right)}{4\pi(T_2 - T_1)} \quad (2)$$

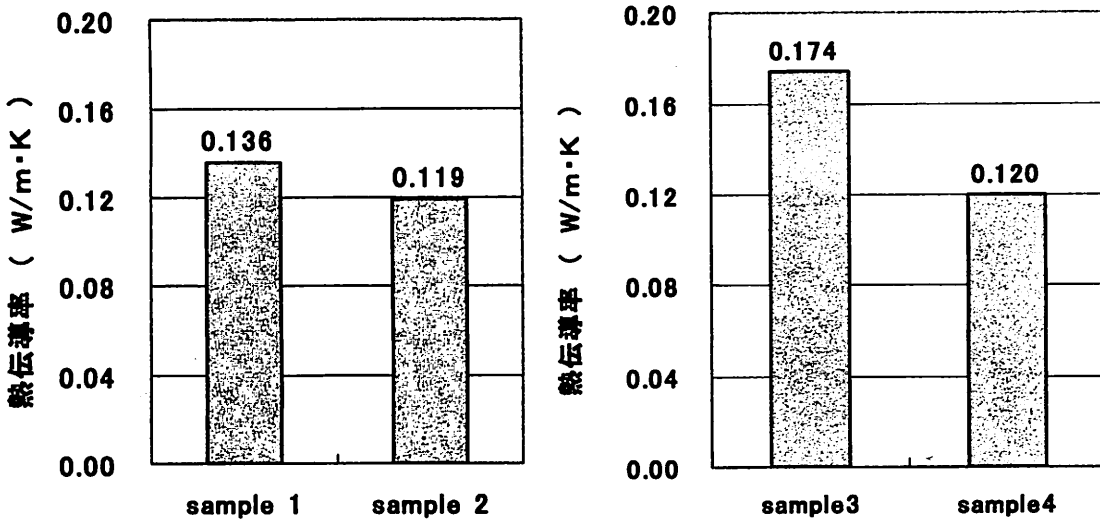


図4 粒状加工PS灰の熱伝導率

ここで、 q は加熱線の単位長さ当りの発熱量、 t_n は時間、 T_n は時間 t_n における温度である。

一方の試料を熱伝導率が既知で、断熱性能に富んだ材料に置き換えて測定した場合、式(2)は、次式で表される。

$$\lambda = K \frac{I^2 \cdot \ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right)}{V_2 - V_1} - H \quad (3)$$

ここで、 I はヒーター線を通る電流、 V_n は時間 t_n での熱電対の出力電圧である。 K 、 H は定数である。

ヒーター線の抵抗や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グループ定数 K 、 H の値を用いることで、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℃で18時間以上乾燥させた後、常温に戻した粒状試料を用いた。

3.2 実験結果

本実験で得られた熱伝導率の値は図4に示したとおりで、用いる試料やその状態によって特徴的な結果が得られた。まず、PS灰と水のみで加工したsample 1, sample 2の場合も、セメントを添加して加工したsample 3, Sample 4の場合も、粒径の小さい試料を用いた場合に低い熱伝導率の値が得られた。これは、一定容積内に粒状試料を並べた試料層内の空気量に関係していると考えられる。粒状試料を容器に詰めた場合、その容器の容積全てを粒状物質で充填することは難しく、隣接する粒状試料の間に空隙が形成される。この空隙は、一定容積内に粒径の大きいものを並べた場合より、小さいものを並べた場合の方が、不連続で細かな空隙が効率よく粒状試料の間に含まれることになる。また、熱源から伝わる試料間の空隙部分の温度上昇は、粒状試料と空隙との境界層における熱伝導および対流によって行われていると考えられる。試験容器内の粒子の粒径が小さい場合、密になった状態であるので、粒子の間の空隙も体積が小さくなり対流が発生しにくくなることで、空気による熱の受け渡しが抑制されると考えられる。メッシュ法により粒状試料間の空隙の体積割合を算出したところ、粒径の小さい試料の試料間の空隙は12~18%であったのに対し、粒径の大きい試料の試料間の空隙は7~10%と小さい値を得ることができた。粒状試料間の空隙の大きさについては、粒形が大きいものに比べ、小さいもののほうが1/5

～1/10程度の大きさである。このため、粒径の小さい試料を用いた場合の方が熱伝導率は低くなると考えられる。次に、PS灰と水のみで加工した Sample 1, Sample 2 と、セメントを添加して加工した Sample 3, Sample 4 を比較してみると、セメントを添加したものの方が粒径の大小にかかわらず高い熱伝導率を示している。粒径の違いによる熱伝導率の低下率は、粒径が大きいものに比べ小さいものが、PS灰と水のみで加工した Sample 1, Sample 2 については1割程度、セメントを添加して加工した Sample 3, Sample 4 については3割程度である。粒径については、4mm～6mm および 1.25mm～2.5mm としているので、両試料ともに同体積における粒子間の空隙の大きさと量はほぼ同じであると考えられる。この熱伝導率の違いは、粒状試料間における空隙の空気対流のため起こる熱の移動と、粒状試料内部の空隙特性の違いによる影響ではないかと推測される。

以上をまとめると、断熱性能の違いが生じる主要因としては、粒状試料固有の熱伝導率と、粒状試料の内部空隙の形状と連続性、および粒状試料間の空隙の大きさに起因することがわかった。

独立した微細な空隙を多く含むことで空気を媒介とする熱の対流が抑制され、かつ粒状試料自体を伝わる伝導が抑えられることで断熱効果を高めることができる。また対流による熱の移動を粒状試料固有の熱伝導率で緩和させる試料の場合、粒状試料間に微細な空隙を多く含んでも、熱伝導率の低下は少ないことがわかった。このため、大気圧状態で断熱材としての実用化を考えた場合、試料自身の熱伝導率が低くなるように、粒径や配合などを考慮して、粒状試料内部に微細な空隙を独立させた上で、粒状試料間にいかに効率良く空隙を形成させるかということが必要となる。

4. 真空を併用した場合の断熱性能

真空状態は一般的に熱伝導がないものと考えられる。したがって、空間内を真空状態にすることで断熱性能は格段に向上すると考えられる。現在実用化されている真空断熱材の熱伝導率は 0.008～0.002W/(m・K)と一般的に建設材として用いられている断熱材と比べ非常に低い。本章では、PS灰を用いた粒状試料に真空断熱材の手法を適用した場合の検討を行うために、実験容器内を真空にし、粒状試料の真空状態での熱伝導率を求めた。

4.1 真空併用時の熱伝導率の測定方法

真空状態での実験を行う為に、本研究では保護熱板法(JIS A 1412-1)を基にした平板比較法²⁾を用いて、熱伝導率を測定した。温度分布が時間的に変わらない定常状態においては、高温流体から固体壁面への単位時間における熱伝達量と、壁内の同じく単位時間の熱伝達量、さらに固体壁面から上部の低温流体への単位時間における熱伝達量とは、それぞれ同じ面積について等しくなければならない。そして、一般の熱伝導の場合は、物体各点の温度が時間的に変化しない定常状態として取り扱い、材質は均一で物理的性質が等しいものとして考える。平板が多層にわたる場合は、熱伝導率も各層ごとに異なるので、その境界面に与える伝熱量を仮定して各層ごとに式(1)に相当する式を作り、熱量を消去する方法をとる。すなわち、これを今回の実験において適用すると、各層における伝熱量を等しいものとするれば、供試体の熱伝導率 λ_1 は、次式で表される。

$$\lambda_1 = \lambda_2 \frac{L_1 U - U_2}{L_2 U_1 - U} \quad (4)$$

ここで、 λ_2 は比較片の熱伝導率、 L_1 , L_2 はそれぞれ供試体および比較片の厚さ、 U_1 , U_2 はそれぞれ供試体および比較片の表面温度、 U は供試体と比較片の接触面の温度である。

平板比較法は、熱伝導率が既知である比較片と測定する対象試料の詰まった試料層に一次元の同一熱流を生じさせることにより熱伝導率を求める方法である。実験では図5に示した試料層底面、比較片

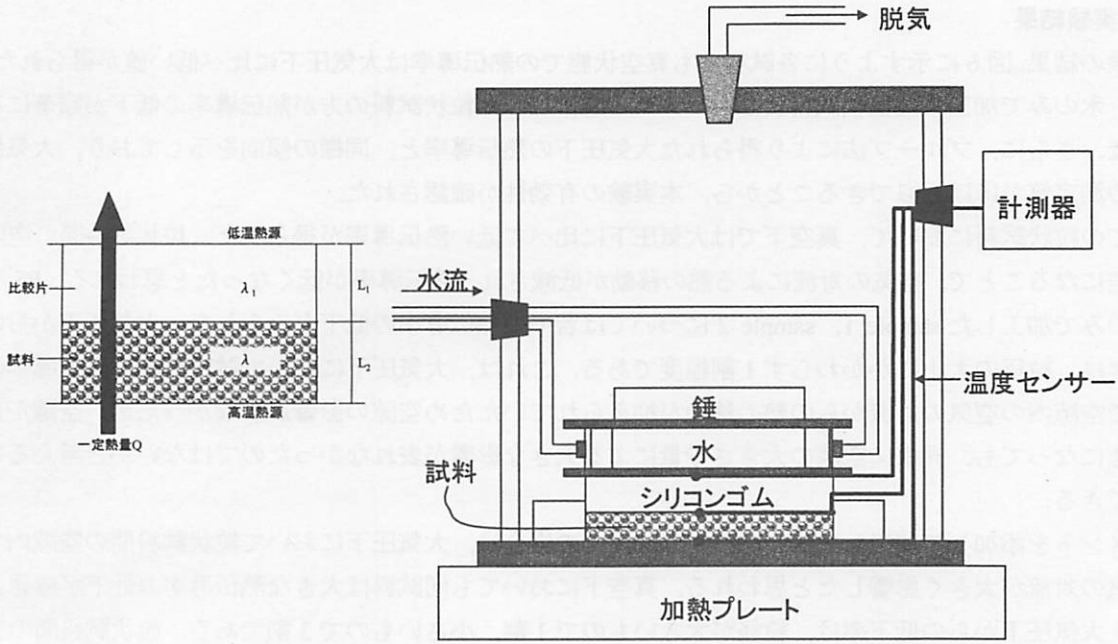


図5 真空併用時の熱伝導率測定装置の概念図

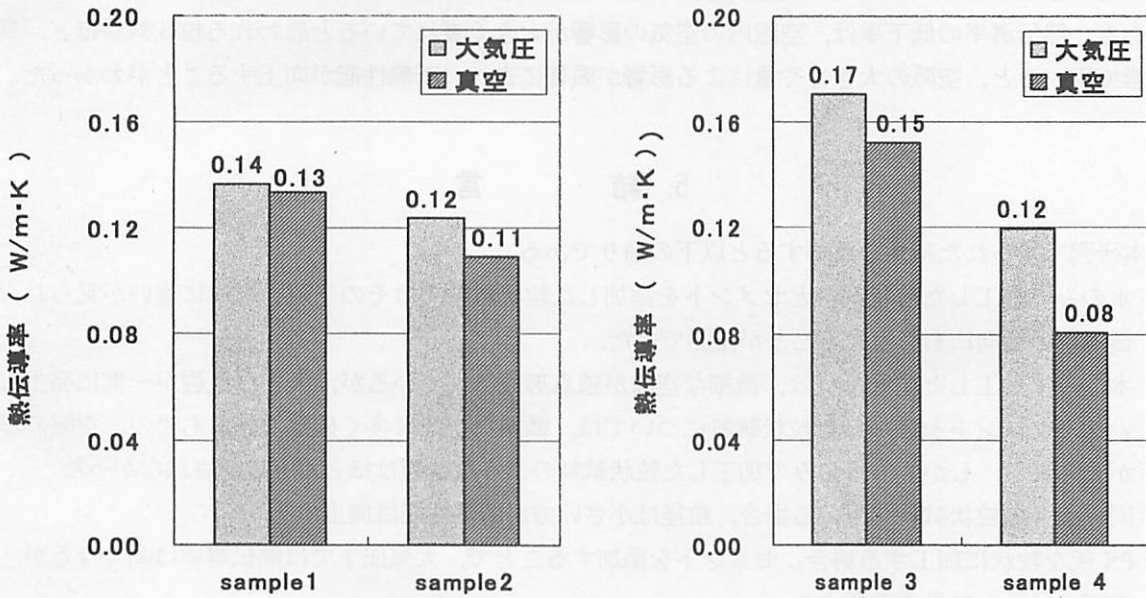


図6 真空を併用した場合の粒状加工PS灰の熱伝導率

表面および試料層と比較片の間に温度センサーを取り付け、これらの3点定常状態における温度を測定し、熱伝導率を求めた。容器内部を真空状態にし、下部の高温側熱源は開始後 50℃まで上昇させた後に一定に保ち、上部の低音側熱源の水温は容器内の水を常に循環させることにより 12℃前後に保って 180 分間実験を行った。本実験では比較片として厚さ 2cm のシリコンゴムボードを用いた。

真空とは本来、その空間に気体分子がまったく存在しない状態を意味するが、実際には完全な真空を得ることは難しい。本実験において使用した真空ポンプを用いて 10^3 mmHg の圧力になるまで排気した。この状態でも気体分子が残存していることになり、熱伝導率も厳密には 0 にはならない³⁾。

4.2 実験結果

実験の結果、図6に示すように各試料とも真空状態での熱伝導率は大気圧下に比べ低い値が得られた。また、水のみで加工した粒状試料よりもセメントを添加した粒状試料の方が熱伝導率の低下が顕著にみられた。さらに、ブリーブ法により得られた大気圧下の熱伝導率と、同様の傾向を示しており、大気圧下での測定値がほぼ近似できることから、本実験の有効性が確認された。

全ての粒状試料において、真空下では大気圧下に比べて低い熱伝導率が得られた。粒状試料間の空隙が真空になることで、空気の対流による熱の移動が低減され、熱伝導率が低くなったと思われる。PS灰と水のみで加工した sample 1, sample 2については若干の熱伝導率の低下がみられた。大気圧下からの低下率は、粒径の大小にかかわらず1割程度である。これは、大気圧下において試料自体の熱伝導率の影響で空隙内の空気の対流からの熱の移動が抑えられていたため空隙の影響が少なかったが、空隙が真空状態になっても、同様に空隙の大きさや量による大きな影響が表れなかったのではないかと考えることができる。

セメントを添加して加工した Sample 3, Sample 4 の場合は、大気圧下において粒状試料間の空隙内での空気の対流が大きく影響したと思われる。真空下においても同試料は大きな熱伝導率の低下が確認された。大気圧下からの低下率は、粒径が大きいもので1割、小さいもので3割である。粒状試料間の空隙内部を真空にすることで対流による熱の移動が低減されていると共に、熱伝導率への粒状試料間の空隙の影響が顕著に表れたものと思われる。

以上より、PS灰を加工した粒状試料に真空断熱材の原理を適用すると、熱伝導率が低下し、断熱性能が向上できることがわかった。真空状態にすることによる熱伝導率の低下率は1割から最大で3割程度である。熱伝導率の低下率は、空隙内の空気の影響が大きく表れていると思われる粒状試料ほど、真空状態で用いると、空隙の大きさや量による影響が顕著に表れ、断熱性能が向上することがわかった。

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) 水のみで加工した粒状試料とセメントを添加した粒状試料ではその空隙の形成に違いが見られ、熱伝導率の傾向にも影響することが確認できた。
- 2) 水のみで加工した粒状試料は、微細な空隙が独立形成されているが、大きな亀裂が一部に発生している。セメントを添加した粒状試料については、微細な空隙は多く確認できるものの、空隙の連結が見られる。しかし、水のみで加工した粒状試料のような亀裂はほとんど確認されなかった。
- 3) 同一配合の粒状試料を用いる場合、粒径は小さい方が断熱性能は向上する。
- 4) PS灰を粒状に加工する場合、セメントを添加することで、大気圧下では熱伝導率は高くなるが、真空下では最も効果を発揮する。
- 5) PS灰を用いた粒状試料を真空下で用いると、断熱性能は最大で3割程度向上する。

参 考 文 献

- 1) 望月貞成, 村田章: 伝熱工学の基礎, pp.1-26, 日新出版, 1999.
- 2) 森 康夫・一色尚次・河田治男: 熱力学概論, pp.111-120, 養賢堂, 1998.
- 3) 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.