

◇技術紹介 Technical Report

難燃化断熱工法の開発

—現場吹き付け施工可能な火災安全性に優れた断熱工法—

高橋 晃一郎 Koichiro Takahashi

堀 長生 Nagao Hori

田口 信子 Nobuko Taguchi

Development of the Nonflammable Heat Insulation System

— Highly Fire Resistant Heat Insulation Spray System —

1. はじめに

現場発泡硬質ポリウレタンフォーム（以下、ポリウレタン）は断熱性能も良く施工も容易であることから多用されていたが、大変燃焼しやすいことが以前から問題視されおり「爆燃」といわれる激しい燃焼を伴う火災事故が後を絶たなかった。

このような事故を防止するため難燃性のポリイソシアヌレートフォーム（以下、イソシアヌレート）や不燃性のセメント系断熱材などが開発されているが、従来工法より火災に対し安全性が高く、既存の有機系発泡断熱材なみの断熱性能を有する現場吹き付け型の断熱材を開発したので概要を紹介する。

2. 開発のコンセプト

本開発のコンセプトは現場吹き付けポリウレタンのように「爆燃」しない断熱材の開発である。

ここで述べる「爆燃」とは爆発的に火炎の拡大が生じ、その速度が速いために避難ができず、時に人命を損なう危険な火災現象を指す。

爆燃を避けるためには材料自体に無機系の不燃材を用いれば良いのであるが、その場合は断熱性能が低くなったり、施工性も悪くなりコストも上がってしまった。

そのため燃焼しても自己消火し、「爆燃」が発生しない断熱材の開発を目指し、開発の必要条件を以下のように設定した。

- 1) 熱伝導率は0.035kcal/mh°C (0.041W/m・k)以下 (グラスウールに近い) の性能
- 2) 爆燃しない(着火はしても自己消火性を有する。)
- 3) 既存有機系断熱材並みのコスト
- 4) 現場施工型 (下地形状を選ばない。)

これらの性能を確保するため熱伝導率については発泡スチロール破砕片（以下、スチロール破砕片）を骨材に

利用することで高い断熱性能を確保し、爆燃防止のためには無機の不燃性を生かした、有機・無機複合化による難燃化断熱材の開発を行った。

3. 難燃化断熱材の性能評価

3.1 試験体

性能評価用試験体は特に熱伝導率と燃焼性を考慮し、Table 1に示す配合により厚さの基準を10mmとし、有機含有率を変え作製した。

試験体はこれらの配合に基づいた粉体とスチロール破砕片を骨材として規定量の水を加え十分に混練後型枠に流し込み成型し、室温で7日間養生後、脱型し試験に供した。比較用試験体としてポリウレタンとイソシアヌレート（難燃2級）、イソシアヌレート（難燃3級）を用いた。

3.2 評価項目および試験法

3.2.1 燃焼性 コーンカロリー計試験機 Cone2（アトラス社製）外部加熱強度:50kW/m²で測定した。

3.2.2 爆燃性 規格化された試験がないため以下に示す手順で行った。Fig. 1に試験装置の概略を示す。

- 1) 金属製燃焼箱の左側面と底面に試験体を設置する。
- 2) 溶接棒（φ3.2×350mm）一本分のアーク火花を飛ばす。（約50秒）
- 3) 同一試験体で2)の作業を2回行う。
- 4) 燃焼時の様子および試験後の試験体を金属製燃焼箱から取り出し観察する。

3.2.3 熱伝導率 迅速熱伝導率計QTM-3D(京都電子工業社製)により測定した。

3.2.4 強度 オートグラフAG-5000E(島津製作所社製)にて試験速度50mm/minで行った。

3.2.5 密度 脱型試験体を室温で1日間、80°Cで1日間乾燥後測定した。

3.2.6 乾燥性 25°C65%, 5°C50%の環境下で試験体重量の経時変化を求め、次式にて残存水分率を求めた。

Table 1 断熱材の配合
Proportions of Heat Insulation Slurry

	基本	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8
普通ポルトランドセメント	59.3	←	←	←	←	←	←	←	←
無機発泡体	35.0	29.0	25.0	21.0	17.0	13.0	9.0	5.0	0.0
有機繊維・混和剤	5.7	←	←	←	←	←	←	←	←
スチロール破砕片	0.0	6.0	10.0	14.0	18.0	22.0	26.0	30.0	35.0
合計 (wt%)	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
有機含有率 (wt%)	5.7	11.7	15.7	19.7	23.7	27.7	31.7	35.7	40.7

$$\text{残存水分率(\%)} = \frac{\text{試験体中の水分量：経時}}{\text{試験体中の水分量：初期}}$$

3.3 試験結果

3.3.1 燃焼性 本材料開発の最大の目的は火災に対する安全性向上であるため、コーンカロリー計試験による材料の燃焼性の結果より配合を絞っていった。

燃焼のし易さを表す最高発熱速度はポリウレタンの場合約400kW/m²、イソシアヌレート(難燃3級)で約320kW/m²、イソシアヌレート(難燃2級品)の場合でも約180kW/m²とかなり高い値であった。¹⁾

本報で検討した配合の断熱材についてFig. 2, Table 2に示すように基本配合(有機成分5.7%, スチロール破砕片は無添加)以外は全て着火したが、有機含有率35.7wt%のNo. 7試験体でも最高発熱速度は120kW/m²程度であり、この値はイソシアヌレート(難燃2級)の185kW/m²に比べ低かった。

3.3.2 爆燃性 試験中の様子、および試験後の試験体の燃焼状態をPhoto 1, Photo 2に示した。

目視による観察より、ポリウレタンは試験開始約30秒で爆燃を生じ、危険回避のため試験を1回目の途中で強制的に終了したが、開発品については溶接火花がなくなると約60秒後に自己消火し、爆燃は生じないことが確認された。

3.3.3 熱伝導率 Fig. 3は有機含有率と熱伝導率の関係を示したものであるが、有機含有率約20wt%程度で目標とする熱伝導率0.035kcal/mh°C(0.041W/m・k)以下となり、30wt%以上では0.033kcal/mh°C(0.038W/m・k)となりそれ以上の顕著な値の向上は認められなかった。

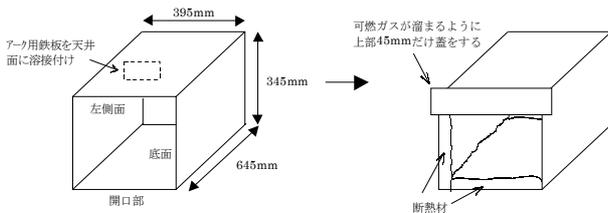


Fig. 1 燃焼箱の概要

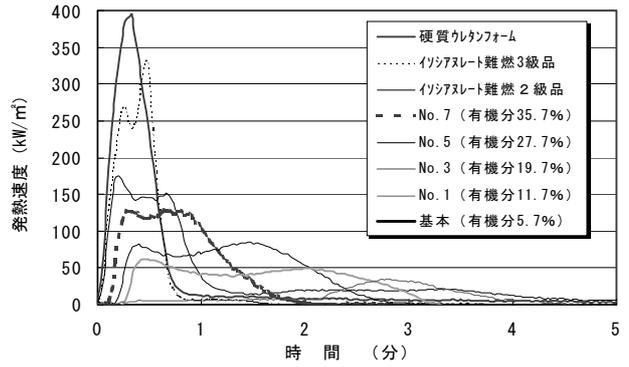


Fig. 2 発熱速度の経時変化 HRR vs. Time by Cone-calorimeter

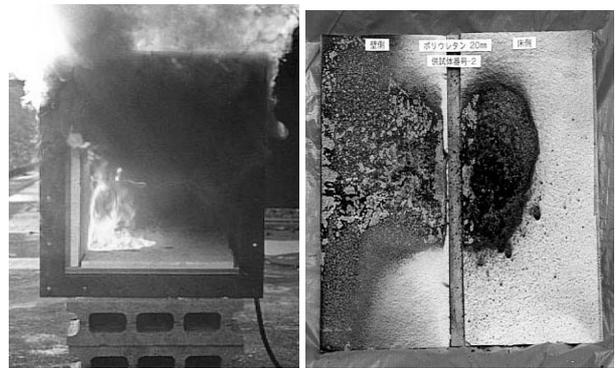


Photo 1 ポリウレタンの燃焼状態
View of Flame Test and Polyurethan Test Piece

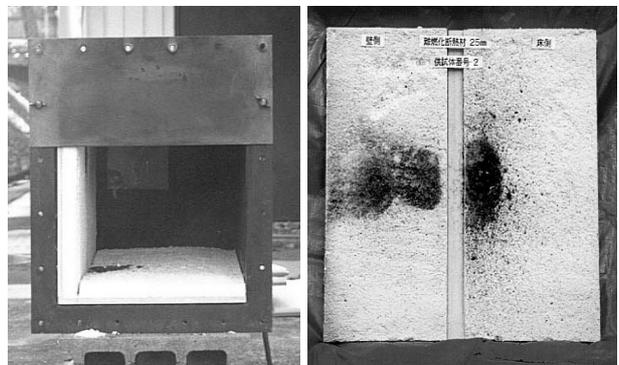


Photo 2 開発品の燃焼状態
View of Flame Test and Development Test Piece

Table 2 有機含有率の違いにより物性の違い
Results of Properteis for Different Organic Component test pieces

	基本	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8
スチロール破砕片	0.0	6.0	10.0	14.0	18.0	22.0	26.0	30.0	35.0
有機含有率	5.7	11.7	15.7	19.7	23.7	27.7	31.7	35.7	40.7
密度	0.26	0.20	0.18	0.15	0.14	0.12	0.10	0.08	0.08
熱伝導率 (kcal/m・h・r・°C)	0.053	0.047	0.045	0.041	0.039	0.038	0.035	0.033	0.033
(W/m・k)	(0.062)	(0.055)	(0.052)	(0.048)	(0.045)	(0.044)	(0.041)	(0.038)	(0.038)
付着強度(N/mm ²)	0.061	0.059	0.051	0.043	0.040	0.023	0.022	0.018	0.008
曲げ強度(N/mm ²)	0.216	0.152	0.136	0.121	0.103	0.069	0.057	0.053	0.043
圧縮強度(N/mm ²)	0.521	0.272	0.212	0.180	0.176	0.128	0.103	0.112	0.092
着火時間(sec)	N.I.	89.90	34.12	18.50	10.85	10.57	-	7.05	-
消炎時間(sec)	-	203.00	200.00	173.50	177.50	135.00	-	105.00	-
最高発熱速度(kW/m ²)	-	35.02	52.28	63.37	80.45	89.31	-	120.44	-
総発熱量(MJ/m ² :5分間)	-	2.89	5.62	7.31	9.12	8.59	-	8.28	-

また、No.7, No.8配合の開発品の熱伝導率はFig.4に示すように他の代表的な断熱材と比較しても遜色ない値であった。

3.3.4 力学物性 Fig.5に示すように付着、圧縮、曲げ強度は有機含有率の増加に伴い、減少していき有機含有率がほぼ30wt%以上での変化は微少であった。

3.3.5 乾燥性 Fig.6, Fig.7はそれぞれ条件を変え、試験体の残存水分量を経過時間ごとに測定した結果である。25℃65%の定常状態では50mmの厚さでも約2週間で乾燥するが、5℃50%のように低温多湿の場合は強制対流により風を循環させることで、定常状態に近い乾燥性を得ることができ、現場などでは十分な換気が乾燥を促進するものと考えられる。

4 開発品の基本配合

以上の結果より今回評価した配合の中で有機含有率が最も高いNo.8配合ではNo.7と比べ熱伝導率や強度はほぼ同じであった。コーンカロリー試験の結果より燃焼性についてはNo.7の最高発熱速度はイソシアヌレート難燃2級品よりも十分に低く爆燃の危険性も低いと予測され、溶断火花を用いた爆燃試験の結果からもNo.7の配合では自己消化が生じ、爆燃しないことが確認されたため、これ以上有機含有率を増やすことは、吹き付けた際の形状保持など他に悪い影響を与えられられるため、No.7の配合を開発品の基本配合とした。

5 施工確認 (吹付け試験)

5.1 試験材料

試験材料はNo.7配合 (スチロール破砕片30wt%品)を用いた。

5.2 吹付け機材

吹付けには、先端混合方式とプレミック方式の2種類の機材を用いた。概略をFig.8に示す。

5.3 試験方法

No.7 配合に基づき作製した粉体と骨材 (スチロール破

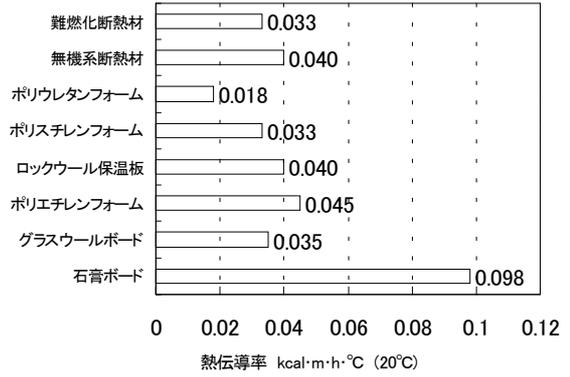


Fig.4 熱伝導率の比較
Comparison of Thermal Conductivity

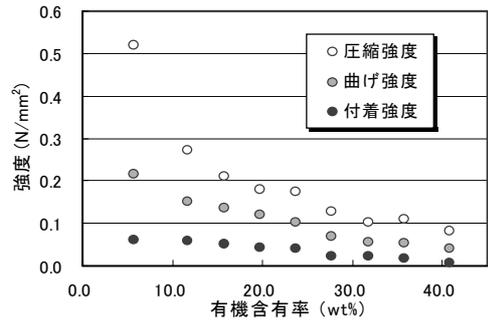


Fig.5 強度と有機含有率の関係
Relationships between Strengths and Organic Component

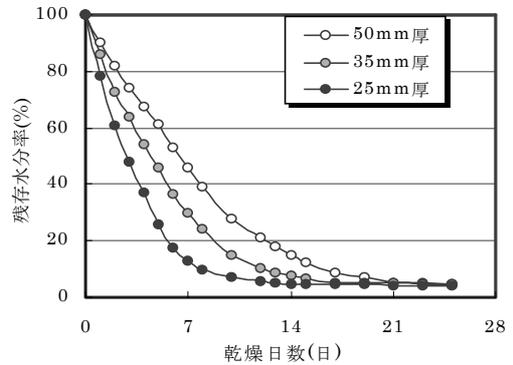


Fig.6 残存水分量の経時変化
(25℃65%養生での乾燥性)
Aging Change of Extant Water at 25°C, 65%

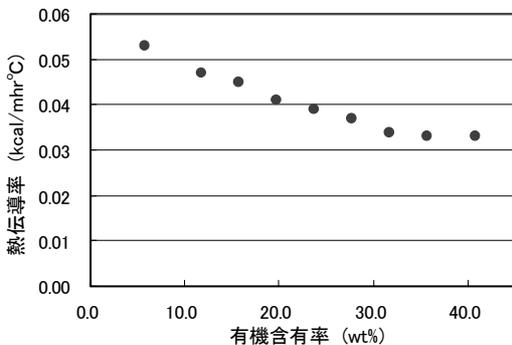


Fig.3 熱伝導率 vs. 有機含有率
Thermal Conductivity vs. Organic Component

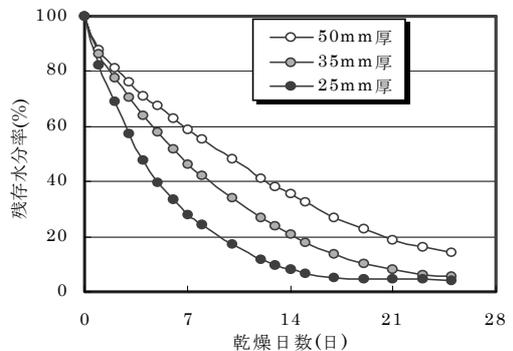


Fig.7 残存水分量の経時変化
(5℃50%養生での乾燥性, 強制対流)
Aging Change of Extant Water at 5°C, 50%

碎片) および規定量の水を準備し, Fig. 8に示した機材を用いて石綿スレート板(約2 m²: 壁面を想定して垂直に設置した)に対し吹付けを行った。その際, 1回で吹付け可能な最大厚み, および単位時間当たりの吹付け面積を測定した。さらに, それぞれの機材で得られた材料の乾燥後の密度, 熱伝導率, および強度を3. 2で示した試験方法で測定した。

5.4 結果

Table 3に試験結果と組成の検討時に得られた試験体から得られた試験結果も同時に示した。

吹付け実験では先端混合方式, プレミックス方式のいずれの方式においても吹付け性に問題はなく, 1回の吹付け厚みも壁側面も天井面も最大50mm以上で結果であり, プレミックス法での圧送も50mまで可能であることがわかった。また, 乾燥後の材料の見掛け密度や熱伝導率にも顕著な差は認められず, 組成の検討時に得られたラボ試験体と比較しても同等であった。しかし, 先端混合方式で得られた硬化体の強度は, プレミックス方式やラボ試験体と比較して約30%程低下しており, 先端混合方式では材料の組成分布が不均一となっていたためと推察される。Photo 3はプレミックス法による吹付けと吹付け後のコテ均し作業の様子である。Photo 4はプレミックス方式により吹付け仕上げた実際の現場の様子であり, 施工性も良好であった。

6. まとめ

開発した難燃化断熱材の断熱性は既存のポリスチレンフォーム並みの値となり実用レベルの性能を有することが確認された。火災安全性については自己消火性能を有し, 溶接火花によってポリウレタン断熱材のように爆燃を生じないことがわかった。また, 施工性もプレミックス法により予め断熱材スラリーをミキサーで十分混練し, 圧送ポンプで送ることで現場吹き付けや吹き付け後もコテ均しも容易に可能であり実用化の目処が付いた。

また, 本開発品の機能性以外の特徴として, 主成分であるスチロール破砕片が挙げられる。これは主に工場などより回収された緩衝材などに使われる発泡スチロールの成型過程で発生する残材を破砕し, 密度や粒度を調整したりサイクル材料であり, 本材料のコストと環境負荷の低減を可能にしている。今後は建設現場で発生するこれら有機系発泡材などを現場内で破砕し, 再度こうした断熱材料の原料として再利用することで, より効果的なサイクルが可能となり環境への配慮も考えた材料, 工法を提案することで, 現場のゼロエミッションにも貢献出来るものと考えられる。

参考文献

- 1) 田口他;「有機系断熱材のコーンカロリー計による燃焼性評価」日本建築学会学術講演梗概集, 2000年, A-2, p. 33

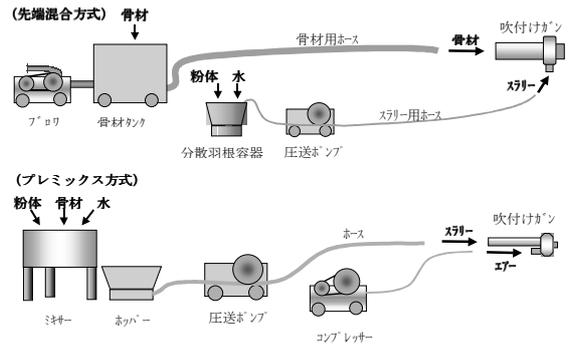


Fig. 8 吹き付け機(先端混合方式とプレミックス方式)の概要
Apparatus of Spray System
(Nozzle mixing and pre-mixing method)

Table 3 吹き付け方の違いによる性能の比較
Results of Properties by Different Spray Methods

	先端混合	プレミックス	ラボ試験体
吹付け最大厚み (mm)	60	50	—
速度 (m ³ /min・25mm厚)	1.4	1.0	—
密度	0.082	0.085	0.083
熱伝導率(kcal/m・h・r・°C)	0.032	0.033	0.033
(W/m・k)	(0.037)	(0.038)	(0.038)
付着強度 (N/mm ²)	0.015	0.020	0.018
曲げ強度 (N/mm ²)	0.042	0.057	0.053
圧縮強度 (N/mm ²)	0.085	0.115	0.112

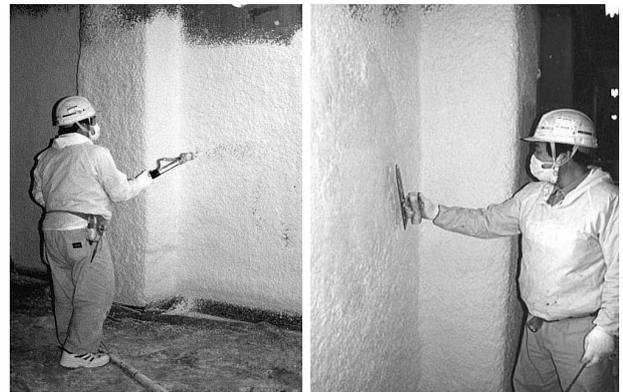


Photo 3 吹き付け(プレミックス方式)とコテ均しの様子
View of Spray and Troweling



Photo 4 吹き付け施工後の様子
View of Sprayed Wall with Development stuff