

# 論文 廃 EPS 熱減容インゴット破砕材を用いた軽量コンクリートの諸物性

福島 誠司<sup>\*1</sup>・谷山 潤<sup>\*2</sup>・吉田 晋<sup>\*2</sup>・笠井 哲郎<sup>\*3</sup>

**要旨**：廃 EPS の中間処理材であるインゴット破砕材を軽量骨材として用いると，単位容積質量が  $1.76\sim 1.83\text{t/m}^3$  で，圧縮強度が  $15\sim 33\text{N/mm}^2$  程度の軽量骨材コンクリートが製造できる。本研究は，インゴットの材質であるポリスチレン樹脂の比熱および熱伝導率がそれぞれ  $13.4\text{ J/kg}$ ， $0.08\sim 0.12\text{W/m}\cdot\text{K}$  と従来の人工軽量骨材に比べ大幅に小さいことに着目し，インゴット破砕材を用いたコンクリートの熱的性質について実験的検討を行った。この骨材を使用することにより，従来の人工軽量骨材コンクリートに比べ熱伝導率が大幅に小さい( $0.3\sim 0.9\text{W/m}\cdot\text{K}$  程度)軽量コンクリートが製造できた。

**キーワード**：廃発泡スチロール，インゴット，軽量骨材，軽量骨材コンクリート，熱伝導率

## 1. はじめに

我が国における発泡スチロール (Expanded-Polystyrene, 以下 EPS と称す) の国内流通量は，2001 年実績で 17.6 万トン (生産量は 20.1 万トン) であり，その内約 6.6 万トン (37.8%) が回収され再資源化 (マテリアルリサイクル) されている<sup>1)</sup>。廃 EPS の再利用の実態は，主に加熱処理により EPS を熔融減容化し常温で固化させたインゴット塊をペレット状に粉砕して再樹脂化したり，インゴット塊のまま中国に輸出され再資源化されている。特に回収された 6.6 万トンの内，中国への輸出の依存度は 6 割以上と非常に高い。しかし，今後予想される廃棄物の越境問題や急激な発展を遂げる中国経済の状況の変化によっては，この輸出量が大幅に減少していく可能性も有り，国内での新たな用途を早急に開発していく必要がある。このような現状を踏まえ，単一材料を大量に使用する土木・建築分野への用途展開が有望であると考えられ，碎石状に破砕したインゴット破砕材を盛土材や裏込め材として利用する検討が行われている<sup>2),3)</sup>。しかし，インゴット破砕材は従来の礫材料に比

べ高価であり，経済性の面でその使用が限定されるため，更に付加価値の高い分野への用途開発が望まれる。これまでに著者ら<sup>4)</sup>は，インゴット破砕材を軽量粗骨材として使用したコンクリートの力学的性質について検討し，単位容積質量が  $1.76\sim 1.83\text{t/m}^3$  で，圧縮強度が  $15\sim 33\text{N/mm}^2$  程度の軽量骨材コンクリートが製造できることを示した。

本研究は，インゴットの材質であるポリスチレン樹脂の比熱および熱伝導率がそれぞれ  $13.4\text{ J/kg}$  および  $0.08\sim 0.12\text{W/m}\cdot\text{K}$  と従来の人工軽量骨材に比べ大幅に小さいことに着目し，インゴット破砕材を用いたコンクリートの熱的性質について実験的検討を行った。また，廃 EPS の種類および減容化方法等の相異によるインゴット破砕材およびこれを用いたコンクリートの性質の変動についても評価・検討を行った。

## 2. インゴットおよびインゴット破砕材

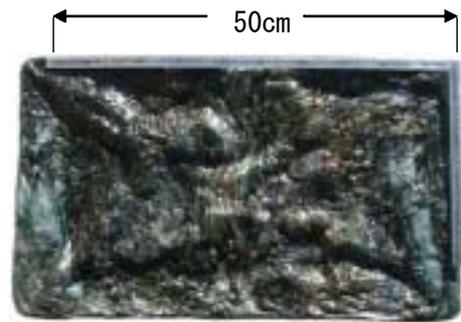
廃 EPS は主にポリスチレン樹脂と約 98% を占める空気で構成されており，再生利用のための

\*1 東海大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)

\*2 東海大学 工学部土木工学科

\*3 東海大学助教授 工学部土木工学科 (正会員)

運搬コストが非常に高くなるため、通常、発生場所または全国に150箇所以上存在する最寄りの処理拠点（エプシー・プラザ）において直ちに熱処理により熔融・脱泡し減容化される<sup>5)</sup>。この減容化されたものをインゴットと呼ぶ。インゴットをせん断式クラッシャ等で破碎したものがインゴット破碎材である。インゴットの物性は、一般に熱処理時の際の加熱温度（120℃～330℃程度）や加熱時間等により脱泡の程度が異なるため、処理装置の型式や時間当たりの処理量によって異なる。インゴット及びインゴット破碎材の一例を写真－1，2に示す。



写真－1 インゴット(IG③)



写真－2 インゴット破碎材(IG③)

### 3. 各種インゴットの性能評価

#### 3.1 各種インゴットの物性

本研究では、EPSの用途と減容処理条件の異なる7種類のインゴットを対象とした。

各種インゴットからダイヤモンドカッターを用い、30x30x60mmまたは25x25x50mmの供試体を切り出し、圧縮強度試験および線膨張試験等を行った。表－1に各種インゴットの試験結果を示す。表より、各インゴットとも線膨張係数はバージンポリスチレンと同等の値を示しているが、密度および圧縮強度はそれより小さい値となった。これは、目視でも確認できるが、インゴットは減容処理において完全には脱泡されておらず、かなりの空気泡が残っていること、および熱減容処理の際にポリスチレン樹脂の高分子鎖が切断され低分子化したこと等が原因であると考えられる。また、インゴットの弾性係

数は普通骨材（ $3\sim 12 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ ）に比べ一桁小さく、線膨張係数はセメントペースト（ $10\sim 20 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ）、普通骨材（ $6\sim 12 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ）に比べかなり大きい値である。

#### 3.2 各種インゴット破碎材の物理的性質

表－1に示した各種インゴットをせん断式ジョークラッシャで破碎し、5～15mmフルイに掛けたインゴット破碎材に対し、コンクリート用粗骨材としての評価試験として密度および吸水率試験をJISに準拠し行った。表－2にインゴット破碎材の物理試験結果を示す。破碎材の密度に関しては、表－1の結果の説明でも述べたように、減容処理条件により脱泡の程度が異なるため、最大と最小で $0.4\text{g/cm}^3$ 程度の差が生じ

表－1 インゴットの材質および基礎物性

項目 \ インゴットの種類	IG①	IG②	IG③	IG④	IG⑤	IG⑥	IG⑦	ポリスチレン <sup>6)</sup>
EPSの用途	化粧型枠	ブイ	魚箱	魚箱	魚箱	緩衝材	露受け材	—
処理方法	蒸気温風	蒸気温風	熔融脱法	摩擦熱	熱風	蒸気温風	蒸気温風	—
減容処理温度(℃)	300	330	～250	120	230	280	330	—
不純物質	釘・針金	貝殻	紙・ラベル	紙・ラベル	紙・ラベル	なし	難燃剤	—
不純物混入率*(%)	1.41	0.13	0.42	0.29	0.01	0	0	—
密度( $\text{g/cm}^3$ )	0.93	1.05	0.98	0.70	0.60	0.71	0.92	1.04～1.06
線膨張係数( $\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ )	71.9	71.3	71.8	72.5	71.8	71.9	73.6	60～80
圧縮強度( $\text{N/mm}^2$ )	54.2	56.5	60.8	40.5	25.5	36.1	15.9	100
圧縮静弾性係数( $\times 10^3 \text{N/mm}^2$ )	3.08	3.18	3.04	2.07	1.49	1.89	2.98	2.48(引張)

\*質量比

ている。吸水率に関しては、EPSの種類により例外もあるが、密度が大きいものほど吸水率は小さい値となっている。なお、表-1のインゴットの密度よりインゴット破砕材の密度の方が大きい、これは、前者は気乾状態で、後者は表乾状態で測定したためである。

### 3.3 インゴット破砕材を用いたコンクリートの力学的性質

3.2で製造したインゴット破砕材（以下、プラスチック骨材と称す）を粗骨材として用いたコンクリートを製造し、圧縮強度試験を行った。

コンクリートの使用材料および配合条件を表-3に示す。表のように、粗骨材にプラスチック骨材IG①～IG⑦を用い、その他の使用材料および配合条件を同一として行った。

コンクリートの練混ぜは、容量100lのパン型強制練りミキサーを使用し、全材料を投入後、3分間練混ぜて行った。その後、φ100x200mmの強度試験用供試体を作成した。養生条件は、打込みから24時間後に脱型し、27日間水中(20℃)養生とした。圧縮強度試験時、コンプレッソメータを用いて、圧縮ひずみの測定を行った。

図-1、2は各種プラスチック骨材を粗骨材として用いたコンクリートの圧縮強度とヤング係数を示したものである。また、各図には表-1の各種インゴット供試体の圧縮強度とヤング係数の値も示した。図より、インゴットの強度が15～60N/mm<sup>2</sup>程度と最大で4倍程度の差があるにも拘わらず、コンクリートの強度は、22～28N/mm<sup>2</sup>程度の範囲なり、インゴットの強度(粗骨材強度)とコンクリートの強度には相関性が見られない。一方、ヤング係数はIG⑤の場合を除いて、使用したインゴットのヤング係数が大きい場合ほどコンクリートのヤング係数が若干大きくなり、1.0x10<sup>4</sup>～1.2x10<sup>4</sup>N/mm<sup>2</sup>の範囲となった。

以上のことより、本実験で対象にした範囲においては、インゴットは廃EPSの種類やその減容処理条件の相違により、強度・ヤング係数が大幅に異なるが、これを粗骨材として用いたコ

表-2 インゴット破砕材の物性

インゴットの種類	IG①	IG②	IG③	IG④	IG⑤	IG⑥	IG⑦
密度(g/cm <sup>3</sup> )	1.00	1.06	0.99	0.82	0.68	0.74	0.94
吸水率(%)	3.44	1.91	3.65	9.00	7.88	4.46	2.72

表-3 使用材料と配合条件

使用材料	セメント	普通ポルトランドセメント	密度=3.16g/cm <sup>3</sup> 比表面積=3280cm <sup>2</sup> /g
	細骨材	大井川産砕砂	密度=2.58g/cm <sup>3</sup> 吸水率=2.28%、粗粒率=2.85
	粗骨材	プラスチック骨材①～⑦	表-2のIG①～⑦の密度および吸水率を参照、G <sub>max</sub> =15mm
		富士川産砕石	密度=2.66g/cm <sup>3</sup> 吸水率=1.53%、G <sub>max</sub> =15mm
混和剤	AE減水剤	リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体	
	AE剤	アルキルアシルスルホン酸化合物	
配合条件	W/C=50%、目標スランプ=10±1cm s/a=50%、目標空気量=5±1% 粗骨材容積=330l/m <sup>3</sup> および単位水量177kg/m <sup>3</sup> (一定) 粗骨材の粒度…5～10mm：10～15mm=1：1		

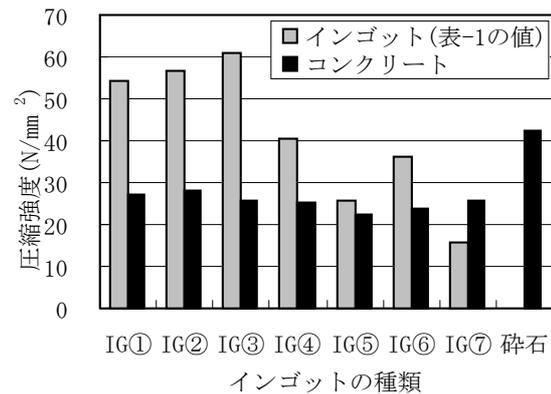


図-1 インゴットおよびコンクリートの圧縮強度

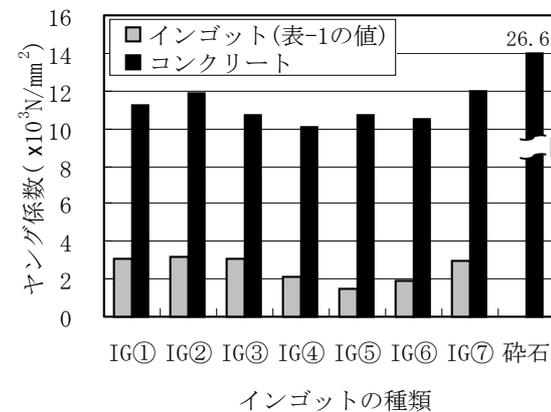


図-2 インゴットおよびコンクリートのヤング係数

ンクリートの圧縮強度とヤング係数の値に及ぼす影響は小さく、インゴットの種類に拘わらず、

表－４ 使用材料

使用材料	種 類	記号	物 性
セメント	普通ポルトランドセメント	OC	密度=3.16g/cm <sup>3</sup> , 比表面積=3280cm <sup>2</sup> /g
細骨材	大井川砕砂	CS	密度=2.58g/cm <sup>3</sup> , 吸水率=2.28%, 粗粒率=2.85
	プラスチック細骨材	PS	密度=0.99g/cm <sup>3</sup> , 吸水率=1.90%, 粗粒率=3.35
粗骨材	富士川産砕石	CG	密度=2.66g/cm <sup>3</sup> , 吸水率=1.53%, G <sub>max</sub> =15mm
	人工軽量粗骨材	AL	密度=1.58g/cm <sup>3</sup> , 吸水率=27.0%, G <sub>max</sub> =15mm
	プラスチック粗骨材	PG	密度=0.99g/cm <sup>3</sup> , 吸水率=3.65%, G <sub>max</sub> =15mm
混和剤	A E減水剤	AER	リグニンスルホン酸化合物とポリオールとの複合体
	A E剤	AE	アルキルアリルスルホン酸化合物

表－５ コンクリートおよびモルタルの配合

コンクリートおよびモルタルの種類	記号	使用骨材		W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						
		細骨材	粗骨材				W	C	S	G*	AER	AE	
普通骨材コンクリート	CCA	CS	CG	50	5	50	177	354	853	879	1.106	0.028	
プラスチック骨材コンクリート	CPA50	CS	PG			50	177	354	853	327	1.106	0.028	
	CPA40	CS	PG			40	177	354	682	393	1.106	0.028	
	CPSPG	PS	PG			50	185	370	321	321	1.156	0.030	
	CAL	CS	AL			50	177	354	853	522	1.106	0.028	
人工軽量骨材コンクリート	CAL	CS	AL			—	—	271	542	1307	—	1.695	0.043
普通骨材モルタル	MCS	CS	—			—	—	271	542	502	—	1.695	0.043
プラスチック骨材モルタル	MPS	PS1	—			—	—	—	—	—	—	—	—

\*5～10mm : 10～15mm=1 : 1の合計

W/C=50%のコンクリートで、圧縮強度が 22～28N/mm<sup>2</sup> およびヤング係数が 1.0x10<sup>4</sup>～1.2x10<sup>4</sup> N/mm<sup>2</sup> のコンクリートが製造できる。

なお、これらのプラスチック骨材を用いたコンクリートの単位容積質量は、1.73～1.82t/m<sup>3</sup> となった。

#### 4. プラスチック骨材を用いたコンクリートの熱的性質

##### 4.1 使用材料およびコンクリートの配合

使用材料を表－４に示す。表のプラスチック骨材については、表－１に示したインゴットにおいて最も排出量の多い IG③を破碎し 5～15mm フルイに掛け、5mm フルイに留まるものをプラスチック粗骨材、5mm フルイを通過するものをプラスチック細骨材として使用した。比較用の骨材として砕石・砕砂および人工軽量骨材を用いた。

コンクリートの配合は、W/C=50%一定とし、粗骨材の種類の影響を検討する配合では、s/a と単位水量を一定とし粗骨材容積が同一となるようにした。プラスチック骨材コンクリートについては、s/a を 40%と 50%としプラスチック粗骨材容積を変化させ、更に細骨材にプラスチ

ック細骨材を用いた配合についても検討した。モルタルの配合は、細骨材に CS と PS を用いたコンクリート中のモルタル部分と同一の配合になるようにした。モルタル・コンクリートの配合を表－５に示す。

##### 4.2 供試体の製造および試験方法

コンクリートの練混ぜ、強度試験用供試体の作製および養生条件は、3.3 に示した条件と同様である。熱伝導率試験用供試体は、寸法 150x150x50mm の型枠を用い、打込みから 24 時間後に脱型し、27 日間水中 (20℃) 養生後、更に 28 日間気中(20℃)養生し製造した。熱伝導率試験は、K 社製迅速熱伝導率計(非定常熱線法<sup>7)</sup>) を使用し、試験温度を 20℃として同一供試体に対し 4 回測定し、その平均値を各供試体の熱伝導率とした。

##### 4.3 モルタル・コンクリートの力学特性

図－３は、各種モルタル・コンクリートの単位容積質量と圧縮強度の関係を示したものである。図より、プラスチック骨材モルタル・コンクリートの圧縮強度は、他の骨材を用いたものに比べ大幅に小さい値となった。しかし、単位容積質量と圧縮強度の関係は、骨材の種類に無関係にほぼ一次比例の相関を示し、単位容積質

量が小さいほど圧縮強度が小さくなっている。

図-4は、各種モルタル・コンクリートの単位容積質量とヤング係数の関係を示したものであるが、圧縮強度の場合とほぼ同様な傾向を示している。

#### 4.4 モルタル・コンクリートの熱伝導率

図-5は、各種モルタル・コンクリートの熱伝導率の値を示したものである。図には、理科年表から引用したポリスチレン樹脂の熱伝導率の値も示した。熱伝導率の測定値は、測定方法（測定器の型式）や温度条件等により異なり、またコンクリートの測定では、コンクリートの表面粗さも測定値に影響すると考えられる。一般に普通骨材コンクリートの熱伝導率は、骨材の種類や配合によっても異なるが、1.5～3.5W/m・K程度である<sup>8)</sup>。図-5における普通コンクリート（図中のCCAに相当）の熱伝導率の値は1.82W/m・Kで、この範囲内にあり、本実験で行った方法によりコンクリートの熱伝導率を評価できるものと考えられる。図より、プラスチック骨材を用いたモルタル・コンクリートは、普通骨材および人工軽量骨材の場合に比べ熱伝導率が大幅に小さくなることわかる。

図-6は各種モルタル・コンクリートに占めるプラスチック骨材の体積分率と熱伝導率の関係を示したものである。プラスチック骨材を用いたモルタル・コンクリートでは、プラスチック骨材の体積分率が大きくなるほど、熱伝導率が小さくなっている。これは、セメントペーストまたはモルタル部分よりプラスチック骨材の方が熱伝導率が小さいためである。

図-7は、各種モルタル・コンクリートの単位容積質量と熱伝導率の関係を示したものである。骨材の種類に無関係に、単位容積質量が小さくなるほど熱伝導率は小さくなっているが、プラスチック骨材を使用した場合とそれを使用しない場合それぞれについて、単位容積質量と熱伝導率の関係は直線関係が得られ、その直線の傾きは、プラスチック骨材を使用した場合の方が大きくなっている。このことは、軽量骨材

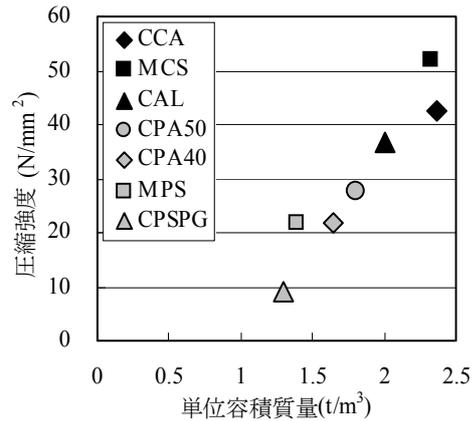


図-3 単位容積質量と圧縮強度の関係

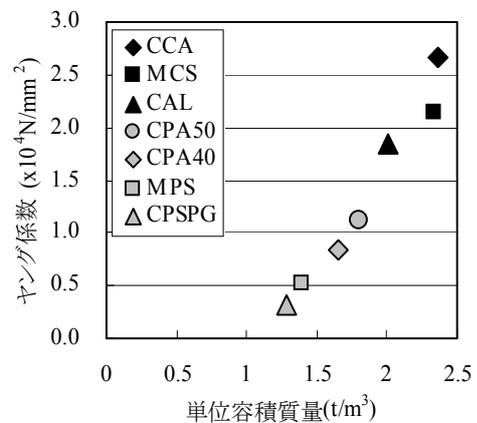
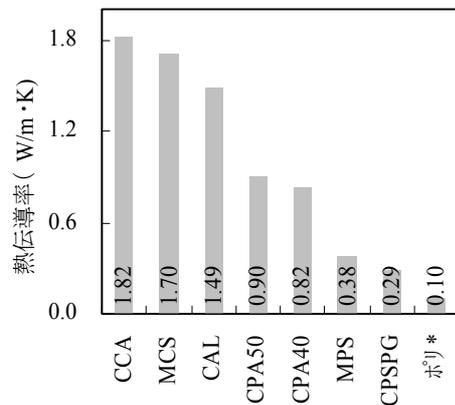


図-4 単位容積質量とヤング係数の関係



\*ポリスチレンの熱伝導率(理科年表より引用)

図-5 コンクリートの熱伝導率

コンクリートにおいて軽量化と熱伝導率の低減または断熱性の向上を目的とした場合、骨材にプラスチック骨材を使用することが有効であることを示すものである。

## 5. まとめ

本研究の範囲内で以下の結論が得られた。

- (1) インゴットの力学的性質は、廃 EPS の種類やその減容処理条件の相違により大幅に異なり、圧縮強度およびヤング係数の最大値と最小値には、それぞれ 4 倍および 2 倍程度の差が生じた。
- (2) インゴット破砕材を粗骨材として用いたコンクリートの力学的性質に及ぼすインゴットの力学的性質の影響は小さく、インゴットの種類に拘わらず、 $W/C=50\%$  のコンクリートで、圧縮強度が  $22\sim 28\text{N/mm}^2$  およびヤング係数が  $1.0\times 10^4\sim 1.2\times 10^4\text{N/mm}^2$  の範囲となった。
- (3) プラスチック骨材を用いたコンクリートは、普通骨材および人工軽量骨材の場合に比べ熱伝導率が大幅に小さくなり、またプラスチック骨材の体積分率を大きくするほど更に熱伝導率は小さくなる。
- (4) プラスチック骨材の熱伝導率の低減効果は大きく、軽量骨材コンクリートにおいて軽量化と熱伝導率の低減または断熱性の向上を目的とした場合、骨材にプラスチック骨材を使用することは有効である。

今後、水路覆工版、排水性舗装、屋上緑化パネルなどのコンクリート部材への適用を検討する予定である。

## 謝辞

本研究の遂行にあたり、インゴット破砕材の提供並びに数々の助言を下された発泡スチロール再資源化協会・尾崎 滋氏、長山敏樹氏に深く感謝します。なお、本研究の一部は、平成 14 年度文部科学省科学研究費補助金（基盤研究(C)）を受けて行ったものである。

## 参考文献

- 1) 発泡スチロール再資源化協会：JEPSRA INFORMATION 2002, pp.7-8, 2002
- 2) 末次大輔，落合英俊ほか：廃棄 EPS インゴット破砕材の混入による地盤材料の軽量化と強度の改善，第 33 回地盤工学研究発表会，

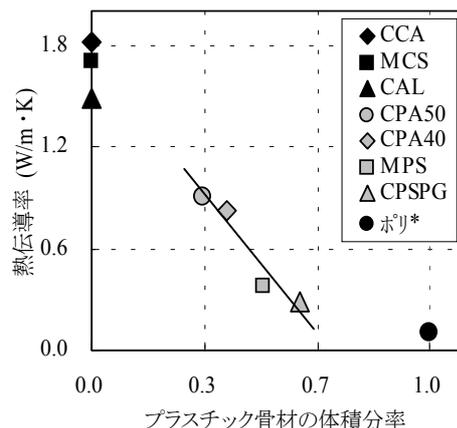


図-6 体積分率と熱伝導率の関係

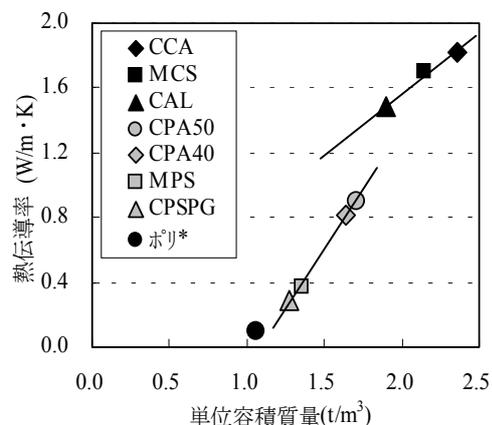


図-7 単位容積質量と熱伝導率の関係

pp.2451-2452, 1998

- 3) 白子博明，大滝恒雄ほか：発泡スチロール減容材の土木材量への適用生，土木学会第 54 回年次学術講演会講演概要集 3 部門，1999
- 4) 笠井哲郎ほか：廃 EPS 熱減容インゴット破砕材を粗骨材として用いた軽量コンクリートの基礎性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.24, No.1, pp.1305-1310, 2002,
- 5) 発泡スチロール再資源化協会：発泡スチロール減容品の用途開発事業報告書，pp.8-9, 1998.8
- 6) 旭化成アミダス(株)，プラスチック編集部：プラスチックデータブック，工業調査会，1999
- 7) 荒川ほか：第 10 回熱測定討論会講演要旨集，3104A, 1974
- 8) 岡田 清ほか：コンクリート工学ハンドブック，朝倉書店，pp.557-562, 1991