九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

室内要素の熱的影響に関する簡易表現について

細川, 隆行
九州大学大学院総合理学研究科環境エネルギー工学専攻

林, 徹夫
九州大学大学院総合理学研究科環境エネルギー工学専攻

小島, 昌一
九州大学大学院総合理学研究科環境エネルギー工学専攻

野村, 幸司
九州大学大学院総合理学研究科環境エネルギー工学専攻

https://doi.org/10.15017/16694

出版情報：九州大学大学院総合理工学報告. 25 (2), pp.221-225, 2003-09. 九州大学大学院総合理工学府
バージョン：
権利関係：

KYUSHU UNIVERSITY

九州大学大学院総合理工学報告
第25巻 第2号 221-225頁 平成15年9月

Engineering Sciences Reports, Kyushu University
(KYUSHU DAIGAKU SOGORIKOGAKU HOKOKU)
Vol. 25, No. 2 pp. 221-225 SEPT. 2003

室内要素の熱的影響に関する簡易表現について

細川 隆行*1・林 徹夫*2・小島 昌一*2・野村 幸司*2

(平成13年7月31日 受理)

Thermal Effects of Indoor Elements and Its Simplified Expression

Takayuki HOSOKAWA. Tetsuo HAYASHI, Shoichi KOJIMA and Kouji NOMURA
†E-mail of corresponding author: *hosokawa@hrmbox.eee.kyushu-u.ac.jp*

We propose a simplified calculation method for thermal effects of indoor elements to improve predictive accuracy on thermal performance simulations. The proposed method assumes that indoor elements are represented as concentrated masses and have own surface temperature. This paper describes the outline of the calculation method and verifies the proposed mothod comparing with the detailed calculation using three dimensional finite differences. As a result the proposed method agrees with the detailed calculation.

Key words: *Indoor elements, multi-room calculation, heat capacity*

1. 緒　　言

室内の温度変動や熱負荷を予測する場合，壁体の一次元伝熱，室内空気の瞬時一様拡散を仮定することが多い．一次元伝熱と見なしにくい室内の家具類など(以後，室内要素と称す）に起因する熱応答の遅れの影響は，室内要素と室内空気が同一の熱挙動をすると仮定して，室内要素の熱容量の一部を単に室内空気に付加して処理する．この理由としては形状・寸法，材料，設置状況が多様である室内要素の三次元伝熱を考慮する煩雑さ，あるいは熱応答の遅れを考慮しなくても日積算空調負荷の計算結果はほとんど変わらないという結果[1)]から，期間積算空調負荷を算出する場合には特に問題にならないことが挙げられる．また，瞬時の空調負荷（特に冷暖房の立ち上がり時）における室内要素に起因する熱応答の遅れを考慮する重要性については，文献1)，2）で示されている．特に文献1)では事務所建築における家具類の実態調査をもとに，個々の家具類の空気温度に対するステップ吸熱応答を実験的に求め，室全体の家具類吸熱応答を求める方法が示されており，熱負荷の算出については有効である．

しかし，室内空気と室内要素の熱挙動は本来，異なるものである．また，パッシブシステムの評価や湿度計算との連成を考えれば，室内要素の表面温度を陽な形で求める必要がある．そこで，本稿では室内空気と室内要素の温度を別個に取り扱う計算法を提案する（以下，簡易法と称す）．室内要素の熱容量と表面積をパラメータとして室内要素を1質点で近似し，室内空気とは別に室内要素の熱収支式を立てて計算する．

*1 環境エネルギー工学専攻博士課程
*2 環境エネルギー工学専攻

2. 計 算 法 の 概 要

室内要素内部を差分法により3次元計算した結果(以下，詳細法と称す)と，簡易法を比較し，簡易法の計算精度を確認する．また，従来の室内空気に室内要素の熱容量を付与する計算（以下，従来法と称す）と詳細法を比較し，従来法の問題点について確認する．あわせて室内要素の影響を無視した計算も行う．

本章では，計算法の概要のみを述べ，計算条件および計算結果については次章に記す．

2.1 簡易法

日周期程度の室温変動を考えた場合に，あらゆる室内要素について，その全熱容量が室温変動に影響を及ぼすとは考えにくい．たとえば，テーブルなどの平板上の室内要素であれば，全熱容量が影響すると考えられるが，書籍の収まった書棚や衣類の詰まったタンスなどの厚みのある室内要素については，室内要素の表面からある程度の厚みまでの熱容量が室温変動に影響を与えると考えられる．そこで，室内要素の室温変動

に影響を与える部分を，室内要素の熱容量層と称する．この層内での温度分布はないものとし，室内要素を一質点で代表させる．簡易法は室内要素について室内空気とは別の熱収支式をたてるため，室内要素の代表温度が得られる．ここではその温度を室内要素の表面温度として取り扱う．室内空気（式(1)）および室内要素（式 (2)）の熱収支式を以下に示す．

・室内空気の熱収支

$$c_{ia}\rho_{ia}V_{ia}\frac{d\theta_{ia}}{dt}=\sum_{i=1}^{I}\alpha_i S_{w,i}\left(\theta_{ia}-\theta_i\right)+\sum_{j=1}^{J}\alpha_j S_{f,j}\left(\theta_{ia}-\theta_f\right)+c_{oa}\rho_{oa}G_{oa}\left(\theta_{oa}-\theta_{ia}\right)+H_{ia} \quad (1)$$

・室内要素の熱収支

$$c_f\rho_f L_f S_f\frac{d\theta_f}{dt}=\sum_{j=1}^{J}\alpha_j S_j\left(\theta_{ia}-\theta_f\right)+\left(\sum_{k=1}^{I+J}\varepsilon_k\sigma S_j\beta_{k,f}\theta_k^4-\sum_{j=1}^{J}\varepsilon_j\sigma S_{f,j}\theta_f^4\right) \quad (2)$$

式(1)右辺第一項は，壁面との対流熱伝達で，第二項は室内要素との対流熱伝達を表す．第三項は換気の項で，第四項は除去・供給熱量を表す．

式(2)左辺は．右辺第一項は室内空気からの対流熱伝達で，第二項は周囲壁面および周囲の室内要素間の放射熱伝達を表す．βはGebhertの放射吸収係数[7]で，室内の室内要素の表面および壁面間の形態係数の算出には大森らのモンテカルロ法による方法を用いた[8]．

2.2 詳細法

室内要素の熱的影響を正確に表現するために，室内要素内部を3次元差分法により計算した．室内要素の基礎式を式(3)に，境界条件を式(4)に示す．

$$c_f\rho_f\frac{\partial\theta_f}{\partial t}=\lambda_f\nabla^2\theta_f \qquad \left(\nabla=\frac{\partial}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial z}\right) \quad (3)$$

$$\lambda_f\nabla\theta_f=\alpha_j\left(\theta_{ia}-\theta_j\right)+\left(\sum_{k=1}^{K}\varepsilon_k\sigma S_k\beta_{k,j}\theta_k^4-\varepsilon_i\sigma S_i\theta_{f,j}^4\right)\Big/S_i \quad (4)$$

$$S_i=\sum_{m=1}^{M}S_m \quad (5)$$

$$\theta_i=\frac{\sum_{m=1}^{M}\theta_m S_m}{S_i} \quad (6)$$

$$\varepsilon_i=\frac{\sum_{m=1}^{M}\varepsilon_m S_m}{S_i} \quad (7)$$

長波の相互放射は面単位で放射授受熱量を求めた後に，面積によって各要素に分配する．面の温度および長波放射率は面積加重平均値を用いる（式(6), 式(7)）．

Gebhertの放射吸収係数βについては簡易法と同様に，形態係数算出にはモンテカルロ法を用いた．式(8)に詳細法の室内空気の収支式を示す．

$$c_{ia}\rho_{ia}V_{ia}\frac{d\theta_{ia}}{dt}=\sum_{i=1}^{I}\alpha_i S_i\left(\theta_{ia}-\theta_i\right)+\sum_{j=1}^{J}\alpha_j S_j\left(\theta_{ia}-\theta_{f,j}\right)+c_{oa}\rho_{oa}G_{oa}\left(\theta_{oa}-\theta_{ia}\right)+H_{ia} \quad (8)$$

2.3 従来法

室内要素と室内空気の熱挙動が一致するものと仮定して，室内要素の熱容量を室内空気の熱容量に付加して計算する方法である．従来法の空気の熱収支式を式(9)に示す．

$$\left(c_{ia}\rho_{ia}V_{ia}+c_f\rho_f V_f\right)\frac{d\theta_{ia}}{dt}=\sum_{i=1}^{I}\alpha_i S_i\left(\theta_{ia}-\theta_i\right)+c_{oa}\rho_{oa}G_{oa}\left(\theta_{oa}-\theta_{ia}\right)+H_{ia} \quad (9)$$

2.4 室内要素を無視した計算

室内要素の存在を無視した場合の室内空気の熱収支式を示す．この方法では，蓄熱項には空気の熱容量のみを考慮する．(10)式に空気の熱収支式を示す．

$$c_{ia}\rho_{ia}V_{ia}\frac{d\theta_{ia}}{dt}=\sum_{i=1}^{I}\alpha_i S_i\left(\theta_{ia}-\theta_i\right)+c_{oa}\rho_{oa}G_{oa}\left(\theta_{oa}-\theta_{ia}\right)+H_{ia} \quad (10)$$

3. 簡易法と従来法の計算精度

詳細法を精算解として簡易法と従来法の計算精度を確認する．

3.1 計算条件

計算対象建物は幅，奥行き6m，高さ3mの窓のない単室である．壁体は室内側からポリスチレンフォーム25mm，普通コンクリート150mmの内断熱で，各方位の壁体構成はすべて同じとした．換気回数は0.2回/hとした．比較するすべての計算方法において建物側の計算方法は共通である．壁体の熱伝導計算には，近似伝達関数を用いた逐次状態遷移法[3),4),5)]を用いる．対流については，対流熱伝達率を空調時には定数(7.2[W/(m²・K)])で与え，非空調時には時刻ごとに空気と表面の温度差および熱流の方向によって計算する[6)]．放射については，前時刻の温度を用いて一旦既知として連立方程式を解き，計算結果を逐次置き換える収束計算を行う[6)]．

室内要素は室の中央に配置し，材料には木材を仮定した．また，室内要素の表面積の違いによる影響を確認するために，Table 1に示す同体積で表面積の異なる2種類の室内要素での検討を行う．Table 2に計算に用

いた熱物性値を示す．従来法の空気に付与する熱容量は，設置した室内要素の熱容量（Type 1，Type 2ともに649[kJ/K]）を付加する．

室内条件は8時から17時までを空調時間帯とし，設定温度は22℃である．気象条件には，室内要素が熱負荷に与える影響がでやすいように，福岡の標準気象データ中で最大暖房負荷が生じる1日分のデータを抜き出した(Fig. 1)．

以上の条件の下，計算時間間隔1時間で周期的に，定常状態になるまで計算する．

3.3 計算結果

Fig. 2に室内空気温度と室内要素表面温度の計算結果を示す．Fig. 3に熱負荷の時刻変動，Table 3に日積算負荷の比較を示す．室内空気温度について，従来法は表面積の大きなType 1の場合で，詳細法と最大1.8℃の差が生じる．一方，表面積の小さなType 2で最大5℃の差が生じる．Type 2の様な体積に対して表面積の小さい室内要素がある場合に大きな温度差が生じている．一方，簡易法はいずれのTypeにおいても誤差は0.3℃程度で詳細法とほぼ同じ温度変動を見せる．

時刻別負荷について，従来法は他の計算に比べ空調立ち上がり時に非常に大きな負荷が生じている．これは従来法が空気に熱容量を付加しているため，立ち上がりの8時から9時の間に設置した室内要素全体を設定温度にする熱量を必要とするためである．空調立ち上がり時以降の変動は室内要素の影響を考慮しない計算と同じ値を示す．一方，簡易法はすべての時刻において，負荷が詳細法よりも小さめにでる傾向が見られるが，その差はわずかであり，よく一致していると言える．また，空調立ち上がり時以降にも，室内要素の影響を考慮しない計算よりも大きな負荷が生じており，室内要素の熱応答の遅れを十分に表現できている．

日積算負荷について，従来法は最大でもType 2で約7%程度の差しかなく，詳細法との相違は見られない．簡易法は時刻別負荷が全体的に小さめにでる傾向が見られたが，誤差は最大4%程度である．

簡易法の特徴は室内要素の平均表面温度を算出できることにある．詳細法の平均表面温度の計算結果と比較して，簡易法はType 1の様に厚みのない室内要素に対しては，詳細法とほぼ同程度の計算結果が得られ，誤差は空調立ち上がり直後の9時に最大の2℃を示すほかはすべて0.5℃以内である．Type 1に比べ表面積の小さいType 2の場合，簡易法は詳細法に比べて温度変動が詳細法に比べて大きく，立ち上がり直後9時，10時に3℃，2℃の誤差が生じている．また空調停止直後18時にも2℃前後の誤差が生じる．家具の形状によっては室内要素表面温度に詳細法と差が生じる．

Table 1　Properties of Indoor Element

	Type 1	Type
Size[m]	4.472x4.472x0.05	1.414x1.414x0.50
Volume[m³]	1.0	1.0
Surface Area [m²]	40.89	6.83
Thickness of Heat Capacity Layer [m]	0.023	0.038

Table 2　Thermal Properties

	Thermal Conductivity [W/(m・K)]	Specific Heat Capacity [kJ/(kg・K)]	Specific Weight [kg/m³]
Plywood	0.186	1.300	550
Foamed Polystyrene	0.037	1.256	28
Pine	0.120	1.300	480

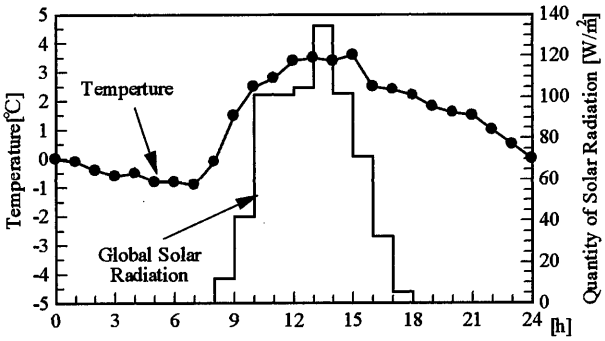

Fig. 1 Outdoor Condition

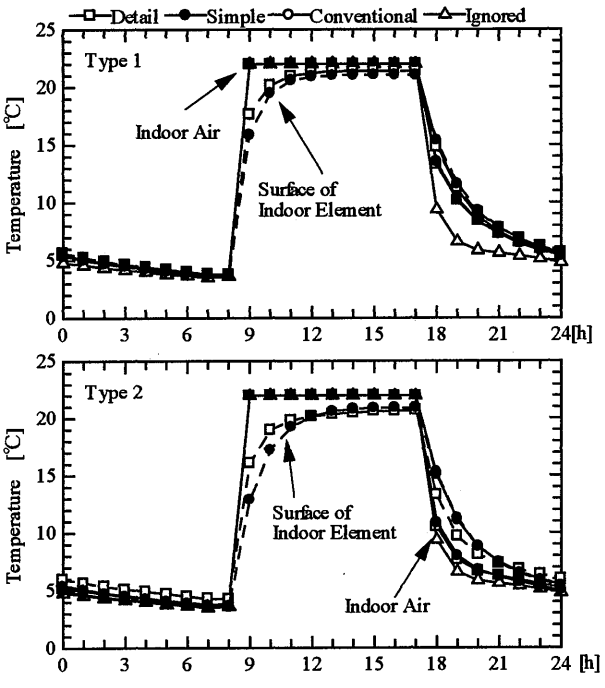

Fig. 2 Comparison between Temperature of Indoor Air and Surface of Indoor Elements

4. 熱容量層の特性

前章では，熱容量層の厚さを詳細法と比較して，誤差が最も小さくなるように設定した．しかし，実際に一般のシミュレーションに用いるには，設置する室内要素の熱特性や形状から熱容量層厚さが決定されなければならない．そこで熱容量層の厚さと，室内要素の形状および熱物性値との関係について検討する．検討する際，熱容量層厚に表面積を乗じた体積（実質体積と称する．記号：V_e）を用いる．

特定の形状，熱物性値における室内要素の実質体積を決定する方法は，前章と同じく詳細法と簡易法，両者の計算結果から室内要素の表面温度を比較し，その誤差二乗和が最小となる値を用いる．

計算条件は室内要素に関するもの以外については前章と同じである．設置する室内要素の材料は木材，毛織物，紙の3種類である．使用した熱物性値はTable 1に示す．室内要素の配置は室の中央とする．形状については体積を0.027m³，0.125m³，0.512m³，1m³，1.728m³，3.375m³に固定し表面積を変化させ，それぞれ熱容量層の厚さを求める．以上の条件のもと，前章と同じく周期的に，定常状態になるまで計算を行う．

Fig. 4に各材料における実質体積と表面積との関係を示す．材料が変わっても実質体積はほとんど変化しない．実質体積は室内要素の形状によって決まる値であるといえる．そこで，実質体積を室内要素の体積および表面積を説明変数とする回帰式によって求める．

Fig. 4より実質体積は表面積が大きくなるに伴い，室内要素の体積に漸近する．そして，表面積の最小値は体積で異なるため，実際の表面積と同体積の立方体の表面積との差を用い，次式で回帰する．

$$L=\frac{V_e}{S_f}=\frac{V_f}{S_f}\left[1-\exp\left\{a(S_f-6V_f^{2/3})+b\right\}\right] \qquad (11)$$

式(11)を $(S_f-6V_f^{2/3})$ を変数とする一次式に変換し，最小二乗法によりa，bと求めるとFig. 5，Table 4の関係が得られる．a，bは体積により変化するので，それぞれについて体積との関係を最小二乗法により求めると式(12)，(13)が得られる（Fig.6）．

$$a=-0.074967V_f^{-2/3}+0.017764V_f^{-1/3}-0.010546 \qquad (12)$$

$$b=-0.28152V_f^{-1/3}+0.01757 \qquad (13)$$

Fig. 7 に回帰曲線と詳細法との比較から得られた値の比較を示す．

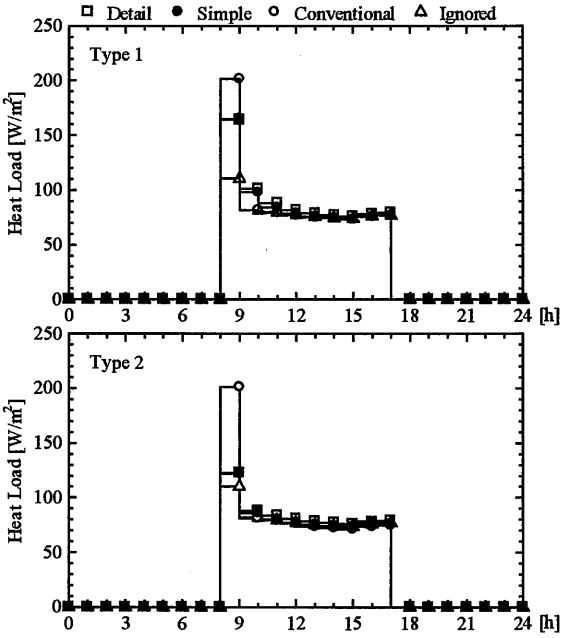

Fig. 3 Comparison of Heat Load

Table 3 Comparison of Dayly Heat Load

(Unit:[MJ/(m²・day)])

	Type 1	Type 2
Detail	2.963	2.746
Proposed	2.614	2.614
Conventional	2.935	2.935
Ignored	2.887	2.630

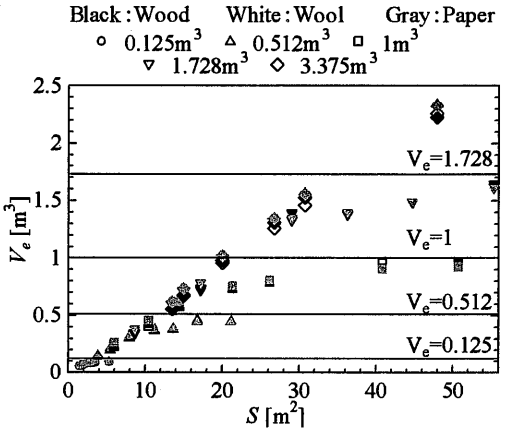

Fig. 4 Virtual Volume and Surface Area

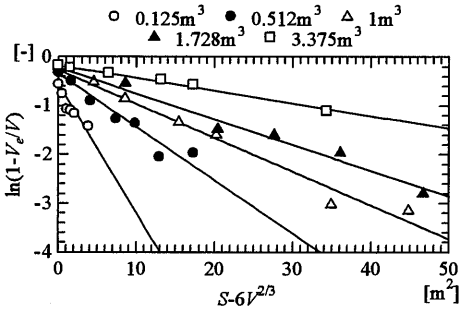

Fig. 5 Change of Regression Expression byVolume

6. 結　　言

室温変動シミュレーションによる室内温湿度環境の予測精度の向上を目的として，室内要素の熱的影響を把握する簡易計算法を示した．室内要素内部を三次元差分計算した詳細法，室内要素と室内空気の熱挙動が一致するとした従来法，そして簡算法を比較した．簡易法のパラメータ実質体積の特性を室内要素の材料および形状の関係により検討した

1．従来法では空調立ち上がり時の熱負荷に大きな誤差が生じる．
2．従来法は体積に対して表面積の小さい室内要素があった場合には室内空気温度にも大きな誤差が生じる．
3．簡易法の様に室内要素の計算点を1点持たせるだけで十分な計算精度が得られる．
4．簡易法のパラメータ熱容量層の厚さと室内要素の形状，熱物性値との関係を検討し，その結果，熱物性値が熱容量層の厚さに与える影響はほとんど無く，室内要素の形状のみが影響することがわかった．
5．本稿では室内要素の形態係数算出の際，モンテカルロ法を用いた．しかし，一般のシミュレーションで モンテカルロ法を用いることは困難であるため，形態係数の算出についても何らかの簡易化が必要になるが，今後の課題とする．

記　　号

c：比熱 [kJ/(kg・K)]，ρ：密度[kg/m^3]，V：体積 [m^3]，t：時間 [h]，α：対流熱伝達率 [W/(m^2・K)]，S：面積 [m^2]，θ：温度 [K]，G：風量 [m^3/s]
H：除去・供給熱量 [W]，λ：熱伝導率 [W/(m・K)]，ε：長波放射率 [–]，σ：Stefan-Boltzmann 定数，β：放射吸収係数 [–]，V_e：実質体積 [m^3]

サフィックス

ia：室内空気，oa：外気，i：壁体表面，j：室内空気と接する室内要素の節点，k：壁体表面あるいは室内要素表面，m：jを含む室内要素の面を構成する節点，f：室内要素，I：壁体表面の総数，J：室内空気と接する室内要素表面の節点の総数，K：壁体表面と室内要素表面の総数，M：jを含む室内要素の面を構成する節点の総数

参 考 文 献

1) 石野久彌，郡公子：事務所建築における家具類の熱的影響に関する実測・実験研究，日本建築学会計画系論文報告集，No.372，pp.59-66，1987年
2) Masataka Yoshimura, Hirofumi Hayama, The Forth International Symposium on the Use of Computer Environment Engineering Related to Building, pp.213-218, 1983
3) 浦野良美，渡辺俊行：状態遷移行列による多層平面壁伝熱系の解析 その1 近似伝達関数モデルの作成とその精度，日本建築学会論文報告集，No.305，pp.97-113，1981年
4) 浦野良美，渡辺俊行：状態遷移行列による多層平面壁伝熱系の解析 その2 離散時間系の逐次計算方法とその精度，日本建築学会論文報告集，No.311，pp.57-66，1982年
5) 渡辺俊行，浦野良美，尾崎明仁，林徹夫，龍有二：離散時間系の壁体非定常伝熱計算式について，日本建築学会計画系論文報告集，No.391，pp.8-19，1988年
6) 林徹夫：マイコンによる多数室室温変動・熱負荷計算システムの開発，住宅総合研究財団研究年報，No.20，pp.337-346，1992年
7) Benjamin Gebhert : A New Method for Calculating Radiant Exchanges, ASHRAE Transactions, Vol. 65, pp.312-332, 1959年
8) 大森敏明，谷口博，工藤一彦：室内ふく射環境の解析法の開発と床暖房への適用，空気調和・衛生工学論文集，No.42，pp.9-18，1990年

Table 4 Coefficients of Regression Line in Fig.5

V	a	b
0.027m^3	-0.78520	-0.87893
0.125m^3	-0.27026	-0.55340
0.512m^3	-0.10958	-0.31858
1.000m^3	-0.06932	-0.25707
1.728m^3	-0.05264	-0.22232
3.375m^3	-0.02522	-0.17950

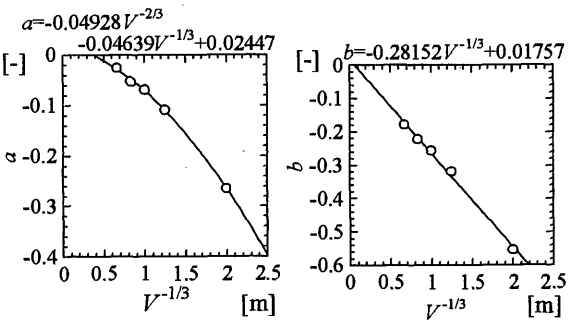

Fig. 6 Relation between a,b and $V^{1/3}$

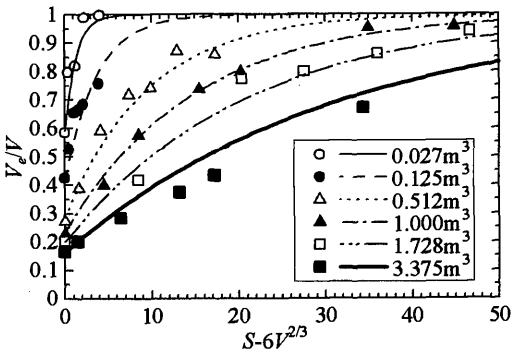

Fig. 7 Regression Line of Virtual Volume