計測自動制御学会東北支部 第181回研究集会（1999.5.21）
資料番号　181-5

ステップ加圧法による非線形拡散係数の測定について

A New Measuring Procedure for Non-linear Diffusivities with the One-step Outflow Method

○原　道宏，宮本和佳
○Michihiro Hara，Kazuyoshi Miyamoto
岩手大学
Iwate University

キーワード：　計測(measurement)，水分容量(water capacity)，水理特性(hydraulic characteristics)，ステップ加圧法(one-step outflow method)，透水係数(hydraulic conductivity)，閉じた表現形(closed form expression)，土壌(soil)，非線形水分拡散係数(non-linear water diffusivity).

連絡先：　〒020-8850 盛岡市上田3-18-8 岩手大学 農学部 農林生産学科 生産環境学講座 農業環境制御工学研究室　原 道宏，Tel.: (019)621-6125，Fax.: (019)621-6125，E-mail: mrhara@iwate-u.ac.jp

はじめに

土壌水分拡散係数（以下、拡散係数）は土壌の体積含水率の関数であり、乾燥時には湿潤時の数千分の1になること、また、多くの土壌について、この関数形が体積含水率の指数関数で近似できる(Gardner 土壌)ことも知られている。

そこで、Gardner 土壌について、ある圧力のもとで平衡状態にある土壌にさらに一定の圧力を印加したときに得られる流出水量を求める「ステップ加圧法」に関する数値解を差分法により求めた。さらに、数値解について見られた規則性をもとに、解を閉じた形の数式として表した。

一方、園芸用床土土壌 "ソイルフレンド"（三井東圧肥料（株）の商標名）を対象に、ステップ加圧法を実施し、従来法により拡散係数を求め、それが指数関数に近いことが分かった。

ついで、上述の閉じた形の解をソイルフレンドの流出水量に当てはめたところ、水分域を限れば、実測値と良く一致した。したがって、この「流出水量を閉じた形の解により curve fitting する方法」は、拡散係数の数値が広範囲にわたって変化する Gardner 土壌に対して適用しうる測定方法であるといえる。

拡散係数のさらに複雑な関数形に関する検討等、今後に残された課題は多いが、流出水量を代数式で表し得たこと、また、それを拡散係数の測定に応用し得ることが分かった。

理論

水分拡散係数が体積含水率の指数関数であるときの直線一次元流についての理論解を求める。

1．支配方程式と初期条件、境界条件

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(D[\theta]\,\frac{\partial \theta}{\partial x}\right) \qquad [1]$$

$$\theta = \theta_i,\ 0 \le x \le L,\ t = 0 \qquad [2]$$

$$\theta = \theta_f,\ x = 0,\ t > 0 \qquad [3]$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} = 0,\ x = L,\ t > 0 \qquad [4]$$

2．拡散の初期段階についての解

拡散開始直後は試料長が有限であることの影響は小さく、試料長を無限大としたときの解で近似される。試料長が無限大のときはボルツマン（Boltzmann）変換 [5] により支配方程式は常微分方程式 [6] になる。

$$y = \frac{x}{2\sqrt{D[\theta_f]\,t}} \qquad [5]$$

$$\frac{d}{dy}\left(f[\theta]\,\frac{d\theta}{dy}\right) + 2y\,\frac{d\theta}{dy} = 0 \qquad [6]$$

$$f[\theta] = \frac{D[\theta]}{D[\theta_f]} \qquad [7]$$

$$\theta = \theta_i,\ y \to \infty \qquad [8]$$

$$\theta = \theta_f,\ y = 0 \qquad [9]$$

式 [7] の$f(\theta)$ は、ここでは、指数関数である場合を扱う。

$$f[\theta] = \exp[B(\theta - \theta_f)] = \exp[\Theta - \Theta_f] \qquad [10]$$

$$\Theta = B\theta$$

$$r = B(\theta_i - \theta_f) = \Theta_i - \Theta_f \qquad [11]$$

2.1　数値解

式 [6] の数値解を求める際、式 [8] の条件は直接には使えず、代わりに式 [12] を仮定する。式 [12] のgをある値に設定して常微分方程式を解いたとき、解が条件 [8] を満たすようなgを探すわけである。そのようなgと式 [11] の$r = \Theta_i - \Theta_f$ との組を **Table 1** に示す。また、解を**Fig.1**に示す。

$$\frac{d\theta}{dy} = g,\ y = 0 \qquad [12]$$

Table 1　$r = \Theta_i - \Theta_f$に適合するg、g_iの組み、およびSD_iと$2\,e^r\,SD_i$

$r = \theta_i - \theta_f$	$\log_{10}[g]$	$\log_{10}[g_i]$	SD_i	$\log_{10}[2\,e^r\,SD_i]$
1	0.137241	0.354389	0.415971	0.354388
2	0.535310	0.969604	0.630938	0.969606
3	0.821061	1.472503	0.738910	1.472505
4	1.068049	1.936638	0.791465	1.936640
5	1.298582	2.384318	0.816231	2.384316
6	1.521709	2.824592	0.827547	2.824589
7	1.741485	3.261516	0.832574	3.261514
8	1.959764	3.696941	0.834754	3.696944
9	2.177393	4.131718	0.835679	4.131720
10	2.394742	4.566214	0.836066	4.566215
11	2.611972	5.000592	0.836225	5.000592
12	2.829154	5.434921	0.836289	5.434920
13	3.046314	5.869228	0.836316	5.869229
14	3.263467	6.303528	0.836327	6.303529
15	3.480617	6.737825	0.836331	6.737825
16	3.697765	7.172120	0.836332	7.172120

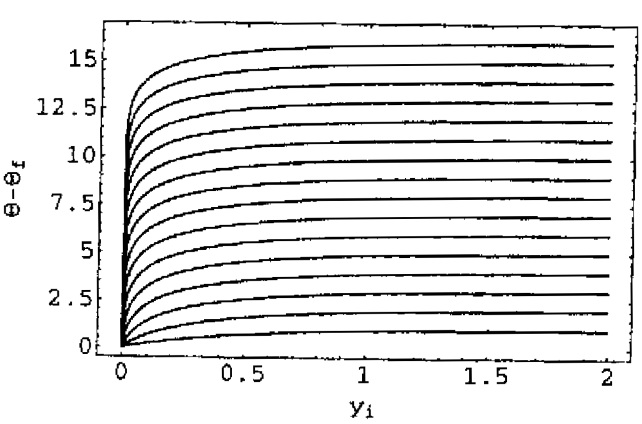


Fig.1　ボルツマン方程式の数値解

横軸は $y_i = x/(2/\sqrt{D[\Theta_i]\,t})$、縦軸は$\Theta - \Theta_f$。

曲線は、上から、$r = 16, (-1), 1$ に対する解。

2.2　排水量

実際問題として、$0<y_i<Y$における土壌水分の減少量が総排水量のξ倍（$\xi<1$）になるYの値がいかほどになるかはボルツマン解の適用範囲を知る上で重要である。式 [13a]による計算結果を**Fig.2** に示す。総排水量は式 [14] による計算結果を**Fig.3** に示されるが、r が大きくなると一定値に近づくのが分かる。単位断面積当たりの実排水量は式 [16] により求められる。

$$\int_0^Y (r - \theta[y_i])\, dy_i = \xi\, SD_i[r] \qquad [13a]$$

$$Y = a - b\exp[-c\,r] \qquad [13b]$$

$$SD_i = \int_0^\infty (\theta_i - \theta)\, dy_i \qquad [14]$$

$$y_i = \frac{x}{2\sqrt{D[\theta_i]\,t}},$$

$$\theta = \theta[y_i],\quad \theta[0] = \theta_r,\quad \theta[\infty] = \theta_i$$

$$SD_i[r] = a\,(1 - \mathrm{Exp}[-b\,r - c\,r^2]) \qquad [15]$$

$$a = 0.836161,\quad b = 0.674238,\quad c = 0.0145675$$

$$M = \frac{1}{B}\int_0^\infty (\theta_i - \theta)\, dx = \frac{1}{B} \times SD_i[r] \times 2\sqrt{D[\theta_i]\,t} \qquad [16]$$

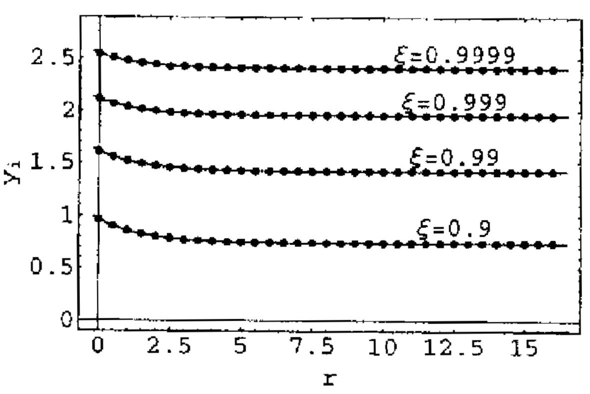


Fig.2　土壌水分の減少量が排水量のξ倍になるYの値

点は数値解、曲線は　Y=a-b*exp[-cr]　によるあてはめ。

ξ=0.9999:　a=2.40676,b=0.137864,c=0.701828,

ξ=0.999:　a=1.95556,b=0.158387,c=0.67245,

ξ=0.99:　a=1.41634,b=0.190649,c=0.664498,

ξ=0.9:　a=0.739864,b=0.224916,c=0.648064 .

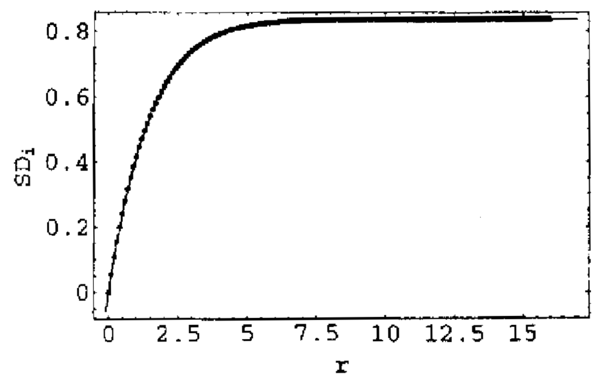


Fig.3　式 [14] により求められる排水量

点は数値計算、曲線は式 [15] によるあてはめ。

2.3　排水量と排水端における水分勾配

排水量と排水端における水分勾配にはゼロ次モーメント（式 [17]）の制約からくる関係（式 [18a] ～[18c]）がある。式 [18b] の関係は、**Table 1** の数値解により確認される。

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_0^\infty (\theta_i - \theta)\, dx = -\int_0^\infty \frac{\partial}{\partial x}\left(D[\theta]\,\frac{\partial \theta}{\partial x}\right) dx = D[\theta_r]\,\frac{\partial \theta}{\partial x}\Big|_{x=0} \qquad [17]$$

$$g = \frac{d\theta}{dy}\Big|_{y=0} = 2\int_0^\infty (\theta_i - \theta)\, dy = 2\,SD[r],\quad y = \frac{x}{2\sqrt{D[\theta_r]\,t}} \qquad [18a]$$

$$g_i = \frac{d\theta}{dy_i}\Big|_{y_i=0} = 2e^r\int_0^\infty (\theta_i - \theta)\, dy_i = 2e^r\, SD_i[r],\quad y_i = \frac{x}{2\sqrt{D[\theta_i]\,t}} \qquad [18b]$$

$$g_i = \sqrt{e^r}\, g,\quad SD_i[r] = SD[r]/\sqrt{e^r} \qquad [18c]$$

2.4　初期段階における水分分布の代数表現

式 [20] の $\phi[\Theta]$ を $(\phi-1)/(e^{r}-1)$ の形に規格化すると、 **Fig.4(a)** のように16本のグラフがおおむね重なり合う。そこで、$\phi[\Theta]$を式 [20] の形に表現することを試みた。べきpと端点y_Lは、ゼロ次モーメントの制約を満たすべく、数値解のg_iとSD_iと一致するようにした。このとき、pとy_Lの値は式 [22] 、[23] の解として得られる。式 [22] の ${}_2F_1$ は超幾何関数である(Abramowitz and Stegun, p556-566)。このようにして得られたpとy_Lは、それぞれ、 **Fig.4(b)** および **(c)** の点として示される。曲線は、式 [23] , [24] によるあてはめである。**Fig.4 (b)** および**(c)** から、$7 \le r \le 16$,の範囲においてはおおよそ p=4.0 および y_L=2.4 であることが分かる。

$$\phi[\Theta] = D[\Theta]/D[\Theta_f] = \exp[\Theta - \Theta_f],\quad \Theta = \Theta_f + \ln[\phi] \qquad [19]$$

$$\phi[y_i] = \begin{cases} 1 + (\phi_L - 1)\left\{1 - \left(1 - \frac{y_i}{y_L}\right)^p\right\}, & 0 \le y_i \le y_L \\ \phi_L, & y_i \ge y_L \end{cases} \qquad [20]$$

$$\phi_L = \phi[y_L] = \exp[\Theta_i - \Theta_f] = \exp[r] = \text{constant},$$

$$\Theta = \Theta[y_i],\quad \Theta[0] = \Theta_f,\quad \Theta[y_L] = \Theta_i,$$

$$y_i = \frac{x}{2\sqrt{D[\Theta_i]\,t}}$$

$$g_i = \left.\frac{\partial \Theta}{\partial y_i}\right|_{y_i=0} = \frac{1}{y_L}\left((\exp[r] - 1)\,p\right) \qquad [21]$$

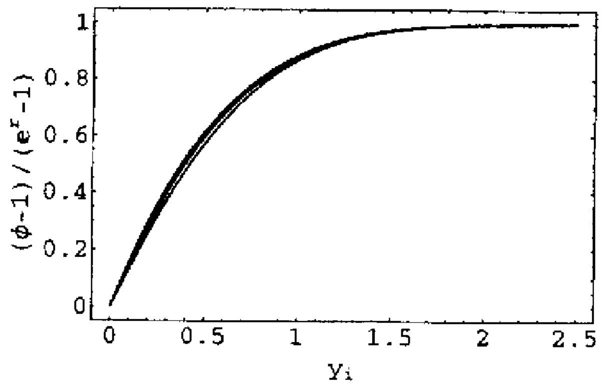
$$\begin{aligned} SD_i &= \int_0^{y_L} (\Theta_i - \Theta[y_i])\,dy_i \\ &= y_L\left(r - \int_0^1 \ln[1 + (\exp[r] - 1)(1 - z^p)]\,dz\right) \\ &= y_L\left(r - p\left({}_2F_1[1/p, 1, 1 + 1/p, 1 - \exp(-r)] - 1\right)\right) \end{aligned} \qquad [22]$$

$$p = a - b\exp[-c\,r - d\,r^2] \qquad [23]$$

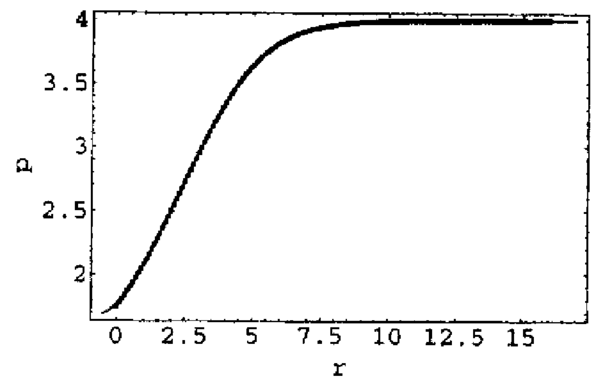
$$a = 3.99576,\ b = 2.23022,\ c = 0.0912678,\ d = 0.0546735$$

$$y_L = a - b\exp[-c\,r - d\,r^2] \qquad [24]$$

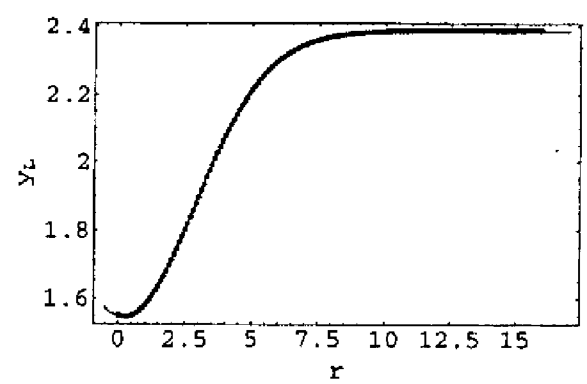
$$a = 2.38585,\ b = 0.836383,\ c = -0.029306,\ d = 0.0693623$$



(a)



(b)



(c)

Fig.4　規格化されたϕと指数p および端点y_L
(a) 規格化されたϕ 、 **(b)** 指数p 、 **(c)** 端点y_L

3．中期段階以降についての解

3．1　差分法による求解方法

中期以降の解は、式 [19] で導入した拡散係数比ϕを従属変数とする式 [25] を条件 [26] ～ [28] のもとに求めた。初期値には、X=1、$T = T_0$ において 10^{-6}のオーダー以上の誤差を出さないよう、y_i =6 に対するボルツマン解を用いた。求解はクランク-ニコルソンの陰解法（差分法）で、時間刻みは $\Delta T = 10\ (\Delta X)^2 / \phi_L$　とし、解の誤差は $10^{-8}\ \phi_L$ 以下とした。解の収束を速めるため、T, T-ΔT, T-2ΔT, T-3ΔTにおける解からT+ΔTにおける解を予測した。これにより計算時間は約 1/10 になった。得られた ϕ[X,T] から式 [30] により平均含水率を求め、M=V(Θ_i-$\bar{\Theta}$)/B により排水量を求めた。

$$\frac{\partial \phi}{\partial T} = \phi \frac{\partial^2 \phi}{\partial X^2} \qquad [25]$$

$$X = \frac{x}{L} \qquad T = \frac{D[\Theta_f]\, t}{L^2}$$

$$\phi = \exp[z],\quad 0 \le X \le 1,\quad T = 0 \qquad [26]$$

$$\phi = 1,\quad X = 0,\quad T > 0 \qquad [27]$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial X} = 0,\quad X = 1,\quad T > 0 \qquad [28]$$

$$y_i = \frac{L}{2\sqrt{D[\Theta_i]\, t_0}} = \frac{1}{2\sqrt{e^z\, T_0}} \qquad [29\,a]$$

$$T_0 = \frac{D[\Theta_f]\, t_0}{L^2} \qquad [29\,b]$$

$$\bar{\Theta} = \bar{\Theta}[T] = \int_0^1 \Theta[X, T]\, dX = \int_0^1 \ln[\phi[X, T]]\, dX + \Theta_f \qquad [30]$$

3．2　差分法による数値解

3．2（1）排水量 M

Fig.5 は排水量を規格化して示したものである。点が数値解、実線は解の代数表現（後述）である。

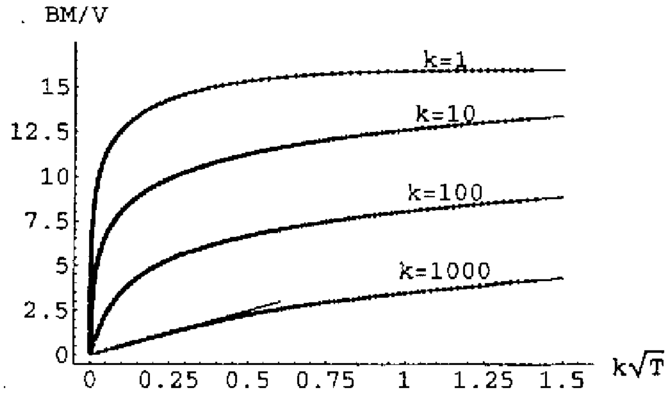


Fig.5　規格化された排水量ＢＭ/Ｖ

点が数値解、実線は解の代数表現

Ｂは式 [28] の定数、Ｍは排水量、Ｖは土壌試料の体積

k=1000 に付随する直線は初期段階の数値解

3．2（2）拡散係数比 ϕ の分布（数値解）

Fig.6 中の点は拡散係数比 ϕ の分布を示す。実線は、式 [31] によるあてはめである。べき p は、つぎの3とおりの方法で定めてみた。p(1) 平均含水率が合致する、 p(2) 排水端における勾配が合致する、 p(3) 二乗誤差が最小になる。このようにして定められたべき p の値を **Fig.7** に示したが、p(1) と p(3) は類似しており、平均含水率の合致するものは同時に、二乗誤差もほぼ最小になる。$\bar{\Theta} - \Theta_f$　の5以上の範囲では、 いずれの p も 2.0 にきわめて近い。5以下の $\bar{\Theta} - \Theta_f$ に対しては、p(1) は式 [32] で近似され、**Fig.6** 中の実線により示されている。

$$\phi[X, T] = 1 + (\phi_L - 1)\,\{1 - (1 - X)^p\},\quad 0 \le X \le 1 \qquad [31]$$

$$\phi[0, T] = 1,\quad \phi_L = \phi[1, T]$$

$$\Theta[X, T] = \Theta_f + \ln[\phi[X, T]]$$

$$p[\bar{\Theta} - \Theta_f] = a - b \cdot \mathrm{Exp}[-c\,(\bar{\Theta} - \Theta_f)] \qquad [32]$$

$$a = 2.00083,\ b = 0.268539,\ c = 0.818661$$

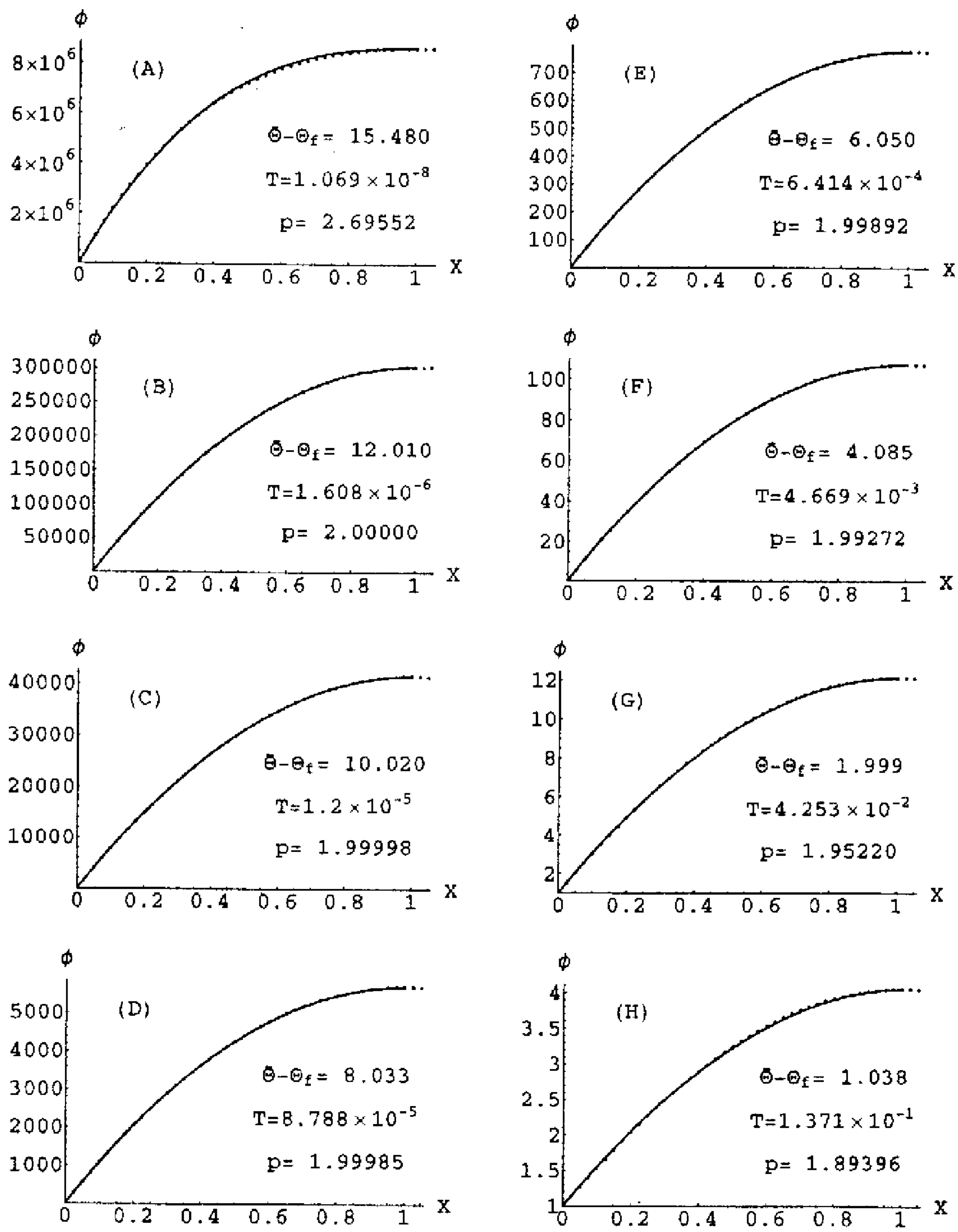


Fig.6 拡散係数比 ϕ の分布

点が数値解、実線は式 [31] によるあてはめ。

べき p は平均含水率が合致するよう定めた。

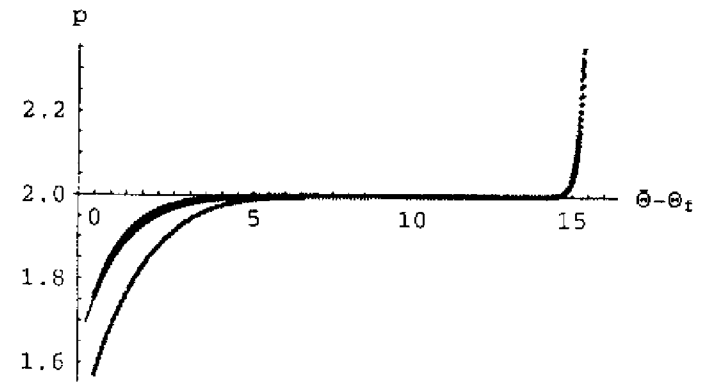


Fig.7 式[31]におけるべき p の値

上から、p(3), p(1), p(2) の順。

実線は式[32] による p(1) のはてはめ。

3.2 (3) Θ_Lと$\bar{\Theta}$の差

$\bar{\Theta}-\Theta_f$ に対する表現が式 [33] のように得られ、この積分は式 [34 a] となり、特に p=2 の時は式 [34 b] になる。$\bar{\Theta}$ と Θ_L の関係は**Fig.8** に示されるように、差$\delta=\Theta_L-\bar{\Theta}$ はほぼ一定で、 0.613 である。ちなみに、$e^{0.613}=1.846$ は、Muazu (1990) の公式に現れる係数 $e^2/4$ の値に等しい。

$$\bar{\Theta}-\Theta_f=\int_0^1 \ln[\phi[X,T]]\,dX$$
$$=\int_0^1 \ln[1+(\phi_L-1)(1-x^p)]\,dx \qquad [33]$$

$$\bar{\Theta}-\Theta_f=\eta[\phi_L,p] \qquad [34\,a]$$
$$=p\left({}_2F_1\left[\frac{1}{p},1,1+\frac{1}{p},1-\frac{1}{\phi_L}\right]-1\right)$$

$$\bar{\Theta}-\Theta_f=\eta[\phi_L,2] \qquad [34\,b]$$
$$=2\left(\frac{\tanh^{-1}\left[\sqrt{1-1/\phi_L}\right]}{\sqrt{1-1/\phi_L}}-1\right)$$

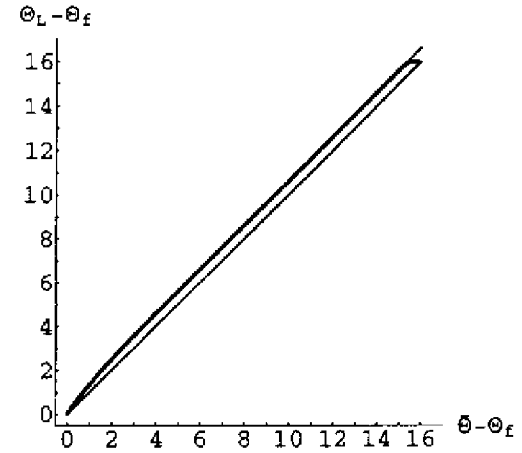


Fig.8 $\bar{\Theta}$ と Θ_L の関係

点が差分解、実線が式 [34b] 。

3.2 (4) 拡散係数比 ϕ の分布(代数表現)

$\bar{\Theta}-\Theta_f$ の 5 以上の範囲ではべき p が 2.0 にきわめて近いことから、ゼロ次モーメントの制約 [35] 、それから導かれる [36] を満たす形で、拡散係数比 ϕ の代数表現が得られる。即ち、これに式[31] の表現を代入すれば、式 [37] が得られる。ここで、T の関数なのはϕ_Lだけであるので、左辺を微分し、 式 [38] 、[39] が得られる。これを T について積分し、式[40]、[41]を得る。

$$\int_0^1 \frac{\partial\Theta[X,T]}{\partial T}dX=\int_0^1 \frac{\partial}{\partial X}\left(\phi\frac{\partial\Theta}{\partial X}\right)dX \qquad [35]$$

$$\frac{d}{dT}\int_0^1 \Theta[X,T]\,dX=-\frac{\partial\Theta}{\partial X}\Big|_{X=0} \qquad [36]$$

$$\frac{d}{dT}\int_0^1 \ln[1+(\phi_L-1)(1-x^p)]\,dx$$
$$=-(\phi_L-1)\,p \qquad [37]$$

$$\varphi[\phi_L]=\int_0^1 \frac{(1-x^p)}{1+(\phi_L-1)(1-x^p)}dx \qquad [38]$$

$$-\frac{\varphi[\phi_L]}{\phi_L-1}\frac{d\phi_L}{dT}=p \qquad [39]$$

$$h[\phi_L] = pT + c \qquad [40]$$

$$h[\phi_L] = \int \frac{-\varphi[\phi_L]}{\phi_L - 1}\, d\phi_L \qquad [41]$$

p=2の時、式[38]の$\varphi[\phi_L]$、$h[\phi_L]$は式[42]、[43]になる。Fig.9 に初期段階以降における $h[\phi_L]$ と T の関係を示すが、ごく初期を除き式 [40] の関係が成り立っていることが分かる。また、式 [43] に示される $h[\phi_L]$ は、ϕ_L の大きい範囲では、ほぼ、$1/(\phi_L - 1)$ にきわめて近い。式 [40] から T とϕ_L の関係が求まるので、順次、排水量 M が求められる。そのようにして求めたものが Fig.5 の規格化された排水量 B M / Vの実線として示されている。ごく初期段階を除き、Tの全域で数値解とよく合致している。

$$\varphi[\phi_L] = \frac{1}{\phi_L - 1}\left(1 - \frac{\tanh^{-1}\left[\sqrt{(\phi_L - 1)/\phi_L}\right]}{\sqrt{(\phi_L - 1)\,\phi_L}}\right) \qquad [42]$$

$$h[\phi_L] = \frac{1}{3(\phi_L - 1)} \times \left((2\phi_L - 3)\sqrt{\frac{\phi_L}{\phi_L - 1}} \times \ln\left[2\phi_L - 1 + 2\sqrt{(\phi_L - 1)\,\phi_L}\right] - 2(\phi_L - 1)\ln[4(\phi_L - 1)] + 2\right) \qquad [43]$$

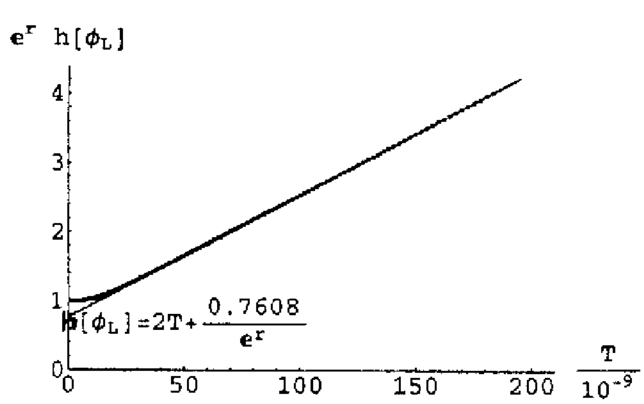


Fig.9 初期段階以降における$h[\phi_L]$とTの関係

4. 流出水量の測定と拡散係数の計算

4.1　実験装置及び測定結果

ステップ法の実験装置を **Fig.10** に示す。はじめ、圧力 50 cmH2O に調整した。圧力を100, 200, 400, 800, 1600 cmH2O に加圧したときの流出水量を **Fig.11** 中の点により示す。

4.2　今回の方法による拡散係数の計算結果

今回得られた理論式 [44] によりあてはめたものを**Fig.11** 中の実線により示す。はてはめは最小二乗法によった。得られたパラメータの値を **Fig.12** に示す。得られた拡散係数の関数値を **Fig.13** と **14** 中の直線により示す。

$$\bar{\theta} = \frac{2}{B}\left(\sqrt{\left(1 + \frac{2D(\theta f)}{L^2}(t + c)\right)} \cdot \mathrm{ArcTanh}\left[\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{2D(\theta f)}{L^2}(t + c)}}\right] - 1\right) + \theta f \qquad [44]$$

$\bar{\theta}$　: 試料$0 \le x \le L$におけるθの平均
B　: $D(\theta_f)e^{B(\theta - \theta_f)}$と表すときの係数
θ_f　: 流出が終了したときの、最終的なθ
$D(\theta_f)$: θ_fにおけるD (cm^2/min)
c　:定数
t　:時間 (min)
L　:試料長 (cm)

4.3　従来法による拡散係数の計算結果

Muazuら (1990) の計算式 [45] により求められた拡散係数の値を **Fig.13** と **14** の折れ線として示す。

$$D(\bar{\theta}) = \frac{2L^2}{e^2}\,\frac{-d^2M}{dt^2}\Big/\frac{dM}{dt} \qquad [45]$$

5.従来法と今回の方法との比較

Muazuら（1990）の計算方法により求められた拡散係数は今回の方法による値とおおよそにおいて一致しているが、低圧域（h=100, 200 cmH2O）の低水分域において合いが良くない。また、中圧域（h=400, 800 cmH2O）においてもやはり、低水分域において合いがやや良くない。高圧域（h=1600 cmH2O）においては、平均的には合致しているが、Muazuら（1990）の方法による計算結果にはノイズが多い。これは、測定系における電子天秤の影響かもしれない。

結論

今回、数値計算の結果を整理する形で、ステップ加圧法における流出水量（排水量）を代数式により精度良く表すことが出来た。適用は、拡散係数が体積含水率の指数関数である場合に限られる。今回供試したソイルフレンドは、200 cmH2O 以上の高圧域でこの性質を備えていると見られ、範囲を限れば、今回の結果が適用できる。指数の係数が水分域の違いによって異なる等、さらに複雑な拡散係数の場合については、なお検討を要する。

参考文献

1) Abramowitz, M., Stegun, I. A. 1972. Handbook of Mathematical Functions. Dover, New York, pp1046.

2) Crank, J. 1975. The Mathematics of Diffusion. 2nd ed. Oxford Univ. Press, London, pp414.

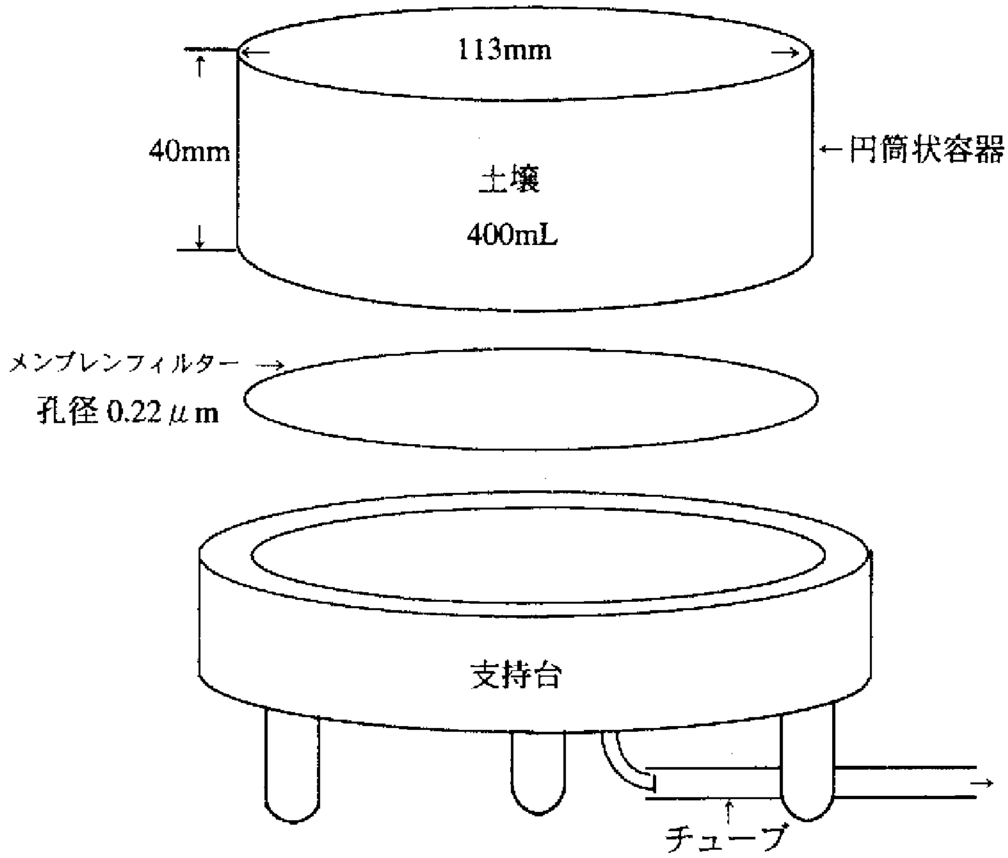
3) Doering, E. J. 1965. Soil water diffusivity by the one-step method. Soil Sci. **99** : 322-326.

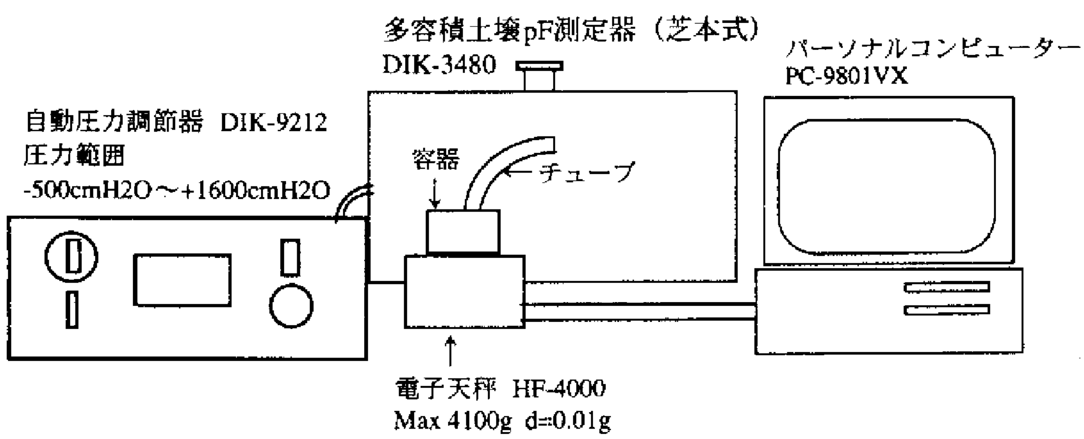
4) Gardner, W. R. 1956. Calculation of capillary conductivity from pressure plate outflow data. Soil Sci.Soc. Am. Proc. **20**: 317-320.

5) Muazu, S., Skopp, J., Swarzendruber, D. 1990. Soil water diffusivity determination by a modified one-step outflow method. Soil Sci. Soc. Am. J. **54** : 1184-1186.

6) Passioura, J. B. 1976. Determining soil water diffusivity from one-step outflow experiments. Aust. J. Soil Res. **15** : 1-8.

7) Reichardt, K., Nielsen, D.R., Biggar, J.W. 1972. Scaling of horizontal infiltration into homogeneous soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc. **38** ; 241-245.





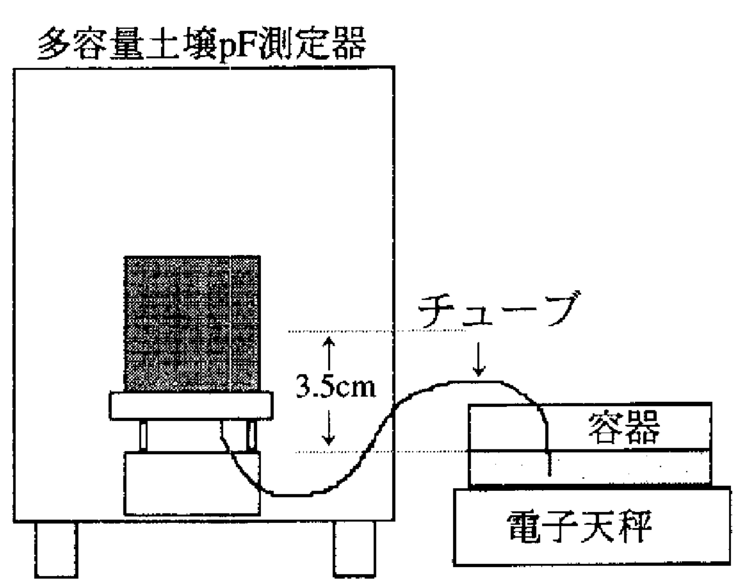


Fig.10 ステップ加圧法に用いた測定装置

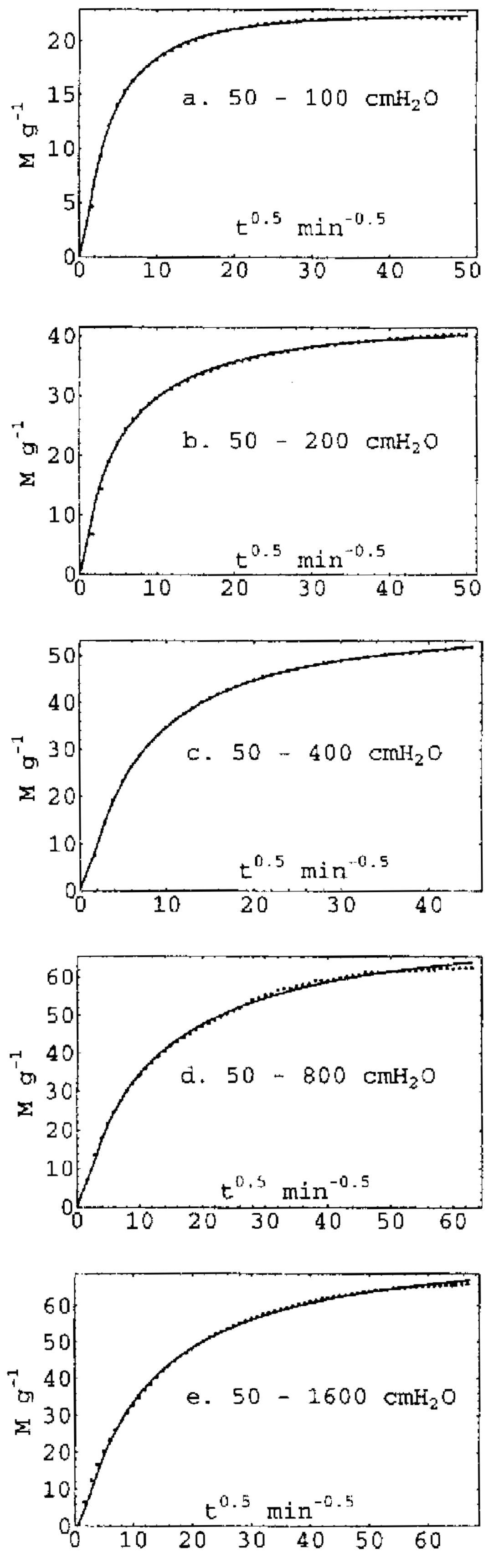


Fig.11 流出水量の測定値と理論値
点：　測定値、　曲線：　理論値

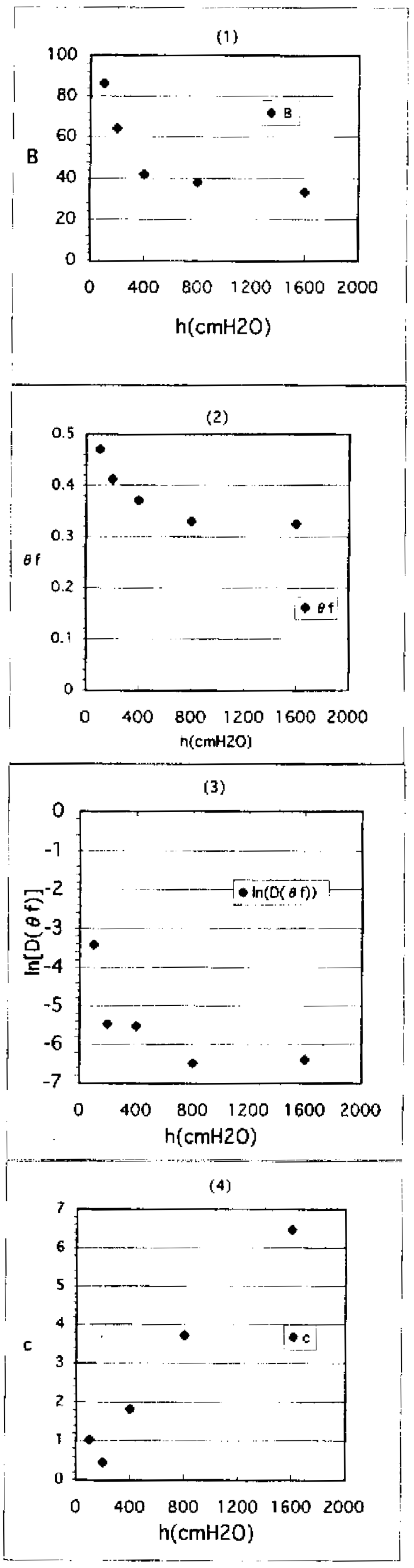


Fig.12 圧力hと各パラメーターの関係

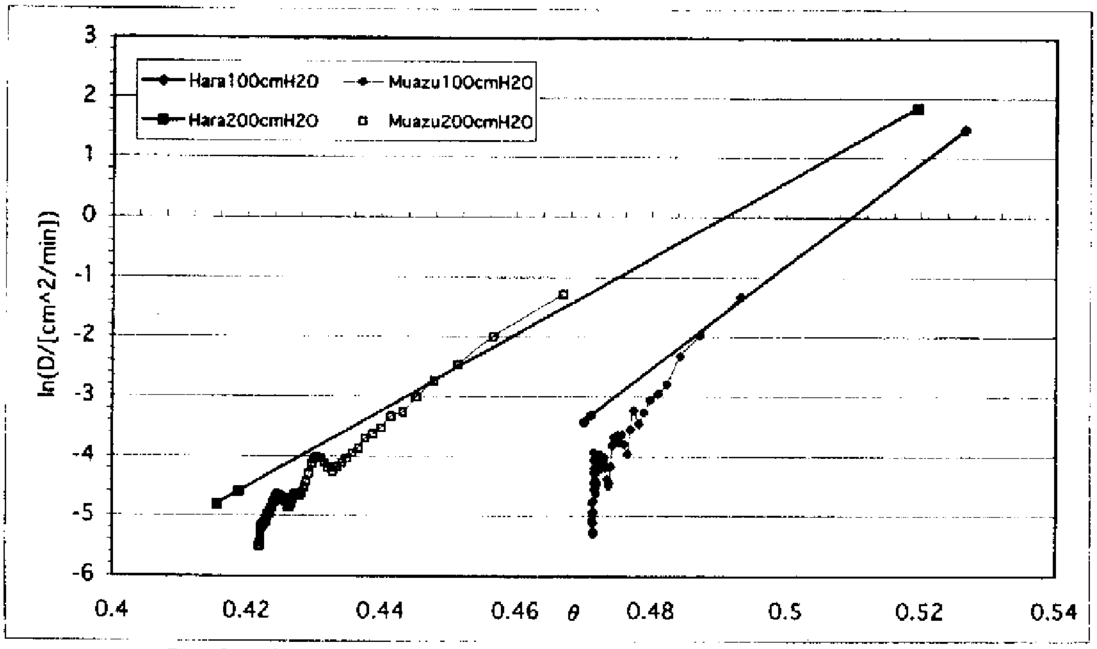


Fig.13 100cmH2O、200cmH2OにおけるMuazuの解析と原の解析の比較

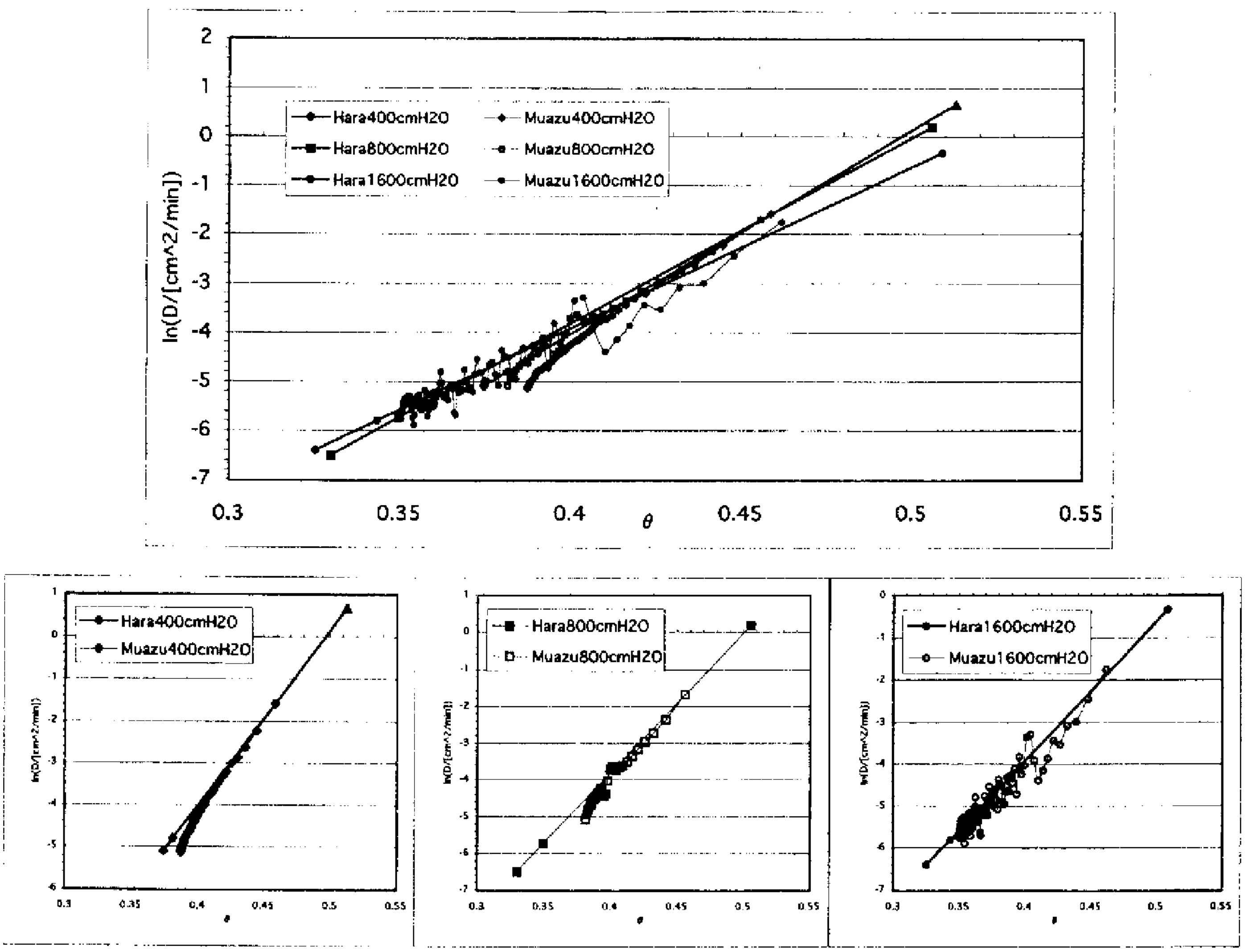


Fig.14 400cmH2O～1600cmH2OにおけるMuazuの解析と原の解析の比較