

# Philip 式に基づく浸透量集約化規範の導出と 浸透パラメータ分布の集約化

仲江川 敏之<sup>1</sup>・沖 大幹<sup>2</sup>・虫明 功臣<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 博士(工学) 東京大学生産技術研究所 助手 (〒106-0088 東京都港区六本木 7-22-1)

<sup>2</sup>正会員 博士(工学) 東京大学生産技術研究所 助教授 (〒106-0088 東京都港区六本木 7-22-1)

<sup>3</sup>正会員 工学博士 東京大学生産技術研究所 教授 (〒106-0088 東京都港区六本木 7-22-1)

本研究は水移動に関わる土壌パラメータが分布している場合の領域平均浸透量を算定するに際し、分布量が集約して扱えるかを明らかにすることが目的である。まず、水移動に関係する5つの土壌パラメータそれぞれに対するパラメータ平均法の集約化規範を Philip 式に基づいて導いた。この集約化規範は、土壌パラメータの平均値で表される浸透量集約化指標という新たに提案した指標に対する不等式として、5つのパラメータ全てについて統一的に表すことができた。この集約化規範を用いて、同一サイト内で観測された土壌パラメータの分布統計量を用いて、分布が浸透量算定に与える影響を検討したところ、飽和透水係数と初期飽和度の集約化は土壌毎に定まる集約化指標と許容誤差、パラメータの変動係数等の集約化条件の両方に大きく依存するが、それ以外のパラメータの変動は小さくあまり影響を与えないことを明らかにした。

**Key Words** : infiltration, aggregation criteria, aggregation index of infiltration, Philip's equation, spatially-averaged infiltration, heterogeneity

## 1. はじめに

土壌空隙分布の不均一性のため、同一土壌サイトで採取された小型試料から計測される土壌の水移動に関するパラメータが大きく変動することは数多くの研究から示されている。これはある地点での浸透を再現する場合に、少数の試料から求められる平均値を用いると、大きな誤差を含む可能性を意味している。また、ある程度の広がりを持った領域では土壌種類が複数入り込むので、均質な土壌として水移動を扱うと大きな誤差を免れない。これらは分布型流出モデルで数値実験を行う時に、常に付きまとう問題である。同一土壌と見做せる領域よりも細かく離散化しても、同一土壌サイトでのパラメータの変動を扱うことはできないし、大陸河川を対象にした場合や、大気モデルと結合する際に大気側の数百～数十 km のグリッドサイズに合わせる場合などでは、離散化されたグリッド内部に複数の土壌種類が混在していても、個別に扱うことはできない。このような場合には、サブグリッドスケールでの状態あるいはフラックスの『分布値を領域代表値として集約すること』<sup>1)</sup>と定義される集約化を行う必要がある。

同一土壌サイト内の不均一性と複数の土壌が入りこむような領域の不均一性のうち、前者が水移動に与える影響を調べるために、仲江川ほかは Philip 式を基にして検討を行った<sup>2)</sup>。そこでは、飽和透水係数、空気侵入圧、飽和体積含水率、保水特性曲線パラメータ  $\lambda$  のうち

のどれか一つだけが分布している時の、対象領域内での平均浸透量を算定する式を導き、また集約化に際して許容される誤差、対象領域での変動係数、浸透開始からの経過時間を与えると定まる集約化規範を示した。これにより、不確定要素たるパラメータの分布が浸透量の算定に与える影響を評価する方法や分布量の集約化手続きが確立したと言える。この集約化規範に基づき、飽和透水係数のサンプルスケール毎の集約化の可能性について測定データを用いて検討を行った。その結果、殆どのスケールで浸透量計算の集約化が可能であるが、スケール間では集約化ができないことを明らかにした<sup>3)</sup>。

そこで本研究では、未だ導出されていない初期飽和度が分布している場合の領域平均浸透量算定式と集約化規範を示した後、実際の観測結果を基に同一サイト内でのパラメータ分布が浸透量に与える影響を定量的に評価し、集約化の可否を検討する。本論文はまず、上で述べた5つのパラメータに対する集約化規範を導き、導出過程で得られた全ての規範に共通の浸透量集約化指標が実際の土壌でどのような値を取るかについて明らかにする。次に導出した式を用いて、与えられた許容誤差など、集約化条件により集約化指標に対する制限がどのように変化するかを検討する。そして、計測されたパラメータの分布統計量に基づき、実際の分布がどの程度浸透量に影響を与えているか、その際の分布量の集約化は可能かどうかについて検討する。

## 2. 既往の研究

土壌パラメータの不均一性については、プロットスケール<sup>4)</sup>から100kmスケール<sup>5)</sup>までの空間スケールでの分布特性や、土壌分類の一つである三角座標での同一土性内での変動<sup>6)</sup>など数多くの土壌物理的立場に重点の置かれた研究がみられる。土壌パラメータの変動の大きさはパラメータ毎におおよそ決まっており、その変動の大きさによって分類することができる。変動の小さいものとしては乾燥密度、飽和体積含水率、中程度のものとしては土壌構成比、湿潤状態の同一毛管ポテンシャルに対する体積含水率、大きいものとしては飽和・不飽和透水係数、拡散係数、電気伝導度などが挙げられる<sup>7)</sup>。とりわけ小サンプルを用いて計測された飽和透水係数は変動が大きく、不均一性に関する広範な研究が行なわれてきた。水平空間分布について、積分スケール、空間相関、構造的、非構造的変動の定量化(ヴァリオグラムの決定)などを、アメリカ国内の20の流域で行なったもの<sup>5)</sup>や、20mトレンチで417個のサンプリングを行なったもの<sup>4)</sup>などがその例である。特に同一サイト内における飽和透水係数は対数正規分布にほぼ従い、対数変換後の標準偏差は、平均値と同じオーダーであることが明らかとなっている<sup>7)</sup>。

こうした結果を踏まえて、土壌パラメータ分布の水移動に与える影響がMonte Carlo法等により調べられている。飽和透水係数が分布している場合、浸透量、灌水時間を計算すると、変動係数が大きいほど平均浸透量は減少し、平均灌水時間の変動係数は大きくなることが知られているし<sup>8),9)</sup>、初期体積含水率が分布している場合、分布を考慮しないと浸透量が過小評価され、初期値では一様分布を仮定していた体積含水率分布が平均値の変化と共に複雑な変化をすること<sup>10)</sup>などが示されている。この様な問題は、大流域に分布型水循環モデルを適用する場合、グリッドサイズが大きくならざるを得なくなるので非常に重要な問題となる筈であるが、実際には、不均一性の影響は無視されて、グリッドサイズは計算効率や実用性から決められてしまっている。この不均一性に由来する浸透量算定誤差を解消するために、支配方程式のアップスケーリング<sup>11),12),13)</sup>やそれに伴うサブグリッドスケールプロセスのパラメタリゼーション<sup>10)</sup>などが行われている。

しかし、Monte Carlo法を用いた研究では飽和透水係数以外のパラメータが不均一であることによる浸透量への影響を評価したものは限られており、土壌特性や変動の大きさ、その他各種条件が与えられた場合に、分布を考慮する場合としない場合の算定量の違いを定量的に見積もるには、数値計算をしなければならない。また、不均一領域を乱流と同様に、土壌水分量の平均値と

その偏差とで表した場合、高次のモーメント項を完結しなければならなくなったり<sup>14),15)</sup>、不均一性を考慮した実効パラメータの同定がスケールに依存してしまったり、実際には殆んどの場合、構成方程式が摂動近似でなくなったり<sup>10)</sup>してしまうという、モデルが内包している問題もあれば、モデル自体が非常に複雑で、一つの素過程だけをシミュレーションする場合は良いけれども、流域全体の水循環モデルのサブモデルとして導入することは非常に難しいという外因的な問題も抱え込んでいる。

以上のように、不均一性に関する問題を如何に解決するかが、水文・水資源学における重要な研究課題になっており<sup>1)</sup>、これを解決する一つの方法として、「状態量あるいはフラックスが真値から許容誤差範囲内で算定されれば良い」という新しい視座を仲江川ほかは提案した<sup>16)</sup>。上述の不均一領域を対象としたモデルでは、真値を得るために複雑な方程式系を解かねばならない。これに対し、仲江川ほかの提案は方程式系は均一領域のものを領域積分し、パラメータ平均値、もしくは分布統計量だけで記述する代りに、許容範囲内で真値からずれた結果でも許容しようという、発想の転換が含まれている。

以上を踏まえて、すべての水移動に関わるパラメータに対してその分布量、または変動量が浸透量算定に与える影響を定量評価できる領域平均浸透量算定式をPhilip式から導出し、それを用いて、仲江川ほかの提案した視座に基づき、与えられた条件下での集約化の可否を明らかにできるような規範を導く。最後に、この規範を用いて、実際の土壌パラメータとその分布統計量から集約化の可能性について検討を行なう。

## 3. Richards式とPhilip式

不飽和帯における鉛直方向の土壌水分移動を記述するRichards式は、土壌の水理特性が鉛直一様の場合、

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K(\psi) \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) \quad (1)$$

と表される。ここで、 $\theta$ は土壌の体積含水率( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )、 $K$ は不飽和透水係数( $\text{m/s}$ )、 $\phi$ は全ポテンシャル( $\text{m}$ )で、 $\psi$ はマトリックポテンシャル( $\text{m}$ )、 $z$ は鉛直下向きを正にした地表面からの深さ( $\text{m}$ )で、 $\phi = \psi - z$ と表される。鉛直不飽和浸透を解析的に解くことは大変難しく、ある特殊な初期・境界条件でのみ解が得られている。その一つが巾級数で表されるPhilip式<sup>17)</sup>である。導出に当たっては、鉛直一様な初期土壌水分量と、浸透開始後、地表面土壌は飽和に近い水分量に保たれる、という二つの仮定をし、巾級数展開法によって解かれている。普通、

Philip 式は次に示すような第 2 項までが用いられる。

$$f_i(t) = \frac{1}{2} S_i t^{-1/2} + A_i \quad (2)$$

$$I(t) = S_i t^{1/2} + A_i t \quad (3)$$

ここで  $f_i$  は浸透速度 (m/s),  $I$  は浸透量 (m),  $A_i$  (m/s) と  $S_i$  (m/s<sup>1/2</sup>) はそれぞれ土壌パラメータと初期土壌水分量によって定まるパラメータで、後者は特に sorptivity と呼ばれている。この 2 つのパラメータをどのように与えるかによって、Philip 式の精度が異なってくるが、本論文では Eagleson<sup>18)</sup> と Entekhabi<sup>19)</sup> のパラメタリゼーションを用いて、

$$A_i = \frac{1}{2} K_s (1 + s_i^c) - W \quad (4)$$

$$S_i = P(s_i, \lambda) Q(K_s, \psi_b, \theta_s) \quad (5)$$

$$P = \left( \frac{1}{1 + 4\lambda} + \frac{\lambda s_i^{(1/\lambda+4)}}{(1 + 4\lambda)(1 + 3\lambda)} - \frac{s_i}{1 + 3\lambda} \right)^{1/2} \quad (6)$$

$$Q = \sqrt{2\theta_s K_s \psi_b} \quad (7)$$

$$\psi = \psi_b \left( \frac{\theta}{\theta_s} \right)^{-1/\lambda} \quad (8)$$

と表す。ここで、 $\lambda$  は保水特性曲線の一つである Brooks and Corey 式 (式 (8)) のパラメータ (ここでは保水特性曲線パラメータと呼ぶ) で、 $K_s$  は飽和透水係数 (m/s),  $s_i$  は初期飽和度 (無次元),  $W$  は毛管力フラックスの補正項 (m/s),  $c = 2/\lambda + 3$ ,  $\psi_b$  は空気侵入圧 (m),  $\theta_s$  は飽和体積含水率 (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>) で、 $P$  は  $s_i$  と  $\lambda$  の関数、 $Q$  は  $K_s$  と  $\psi_b$  と  $\theta_s$  の関数であり、 $S_i$  は式 (5) のように、変数分離表示ができる。

Philip 式の導出に際して課された条件は特殊な場合で、この論文で考えているような集約化規範を導出するための基本式として用いるには一般性に欠けるが、集約化規範はその性質上、集約化に伴う許容誤差を簡単に評価できなければならない。以上を鑑みると、Philip 式は不飽和浸透の集約化規範を導出するのに最適と考えられるので、以下では Philip 式に基づき各土壌パラメータの集約化規範を導出する。

#### 4. 初期飽和度に対する集約化規範

ここでは仲江川ほか<sup>2)</sup>で、集約化規範の導出を行なっていない初期飽和度について考える。Philip 式では土壌水分量は初期飽和度として現れるが、仲江川ほか<sup>2)</sup>で扱った他の水移動に関するパラメータが定数であったのに対して、土壌の乾湿を表す状態量であるため、平均値と変動係数の関係が一意に定まらない点で他のパラメータとは異なる。

複数の物理量が必要な浸透量の算定の集約化手法として、各均一土壌毎にフラックスを算定し、領域積分する手法と、一様な物理特性の場で成り立つ算定式に領域

平均を適切に代表する物理量を適用する手法とに分けられる。前者としては、土壌パラメータの面積平均を与えるもの (パラメータ平均法)、物理量分布の影響をモーメント項で表すもの (モーメント法) が、後者としては、最大の面積率を持つ土壌種類の地表面パラメータを与えるもの (最大面積率代表法)、集約化された物理量から集約化されたフラックス等を算定できる実効パラメータを求めるもの (実効パラメータ法) が挙げられる<sup>16)</sup>。以下では、前者の考えを基に領域平均浸透量算定式と集約化規範を導出する。

平らで均一と考えられる土地被覆内の土壌水分量分布は多くの場合、正規分布していることが知られている<sup>20)</sup>。飽和度の定義は  $\theta/\theta_s$  ( $\theta$  は体積含水率) で、飽和体積含水率が分布していると、その影響も考慮しなくてはならないが、体積含水率と飽和体積含水率には相関が無いものとし、飽和度も体積含水率と同様に、正規分布あるいはそれに類似した分布をするものとする。Philip 式中の  $S_i$ ,  $A_i$  はともに  $s_i$  を変数として含んでいるので、この 2 つを平均値周りに Taylor 展開することにより平均値 ( $\bar{s}_i$ ) と偏差 ( $s_i'$ ) で、 $A_i$ ,  $S_i$  は次のように表すことができる。

$$A_i \approx \frac{1}{2} K_s \left\{ 1 + (c_0 + c_1 s_i' + c_2 s_i'^2 + c_3 s_i'^3) \right\} \quad (9)$$

$$S_i \approx Q \left( p_0 + p_1 s_i' + p_2 s_i'^2 + p_3 s_i'^3 \right) \quad (10)$$

ここで、 $c_m$  と  $p_m$  はそれぞれ  $A_i$ ,  $S_i$  を Taylor 展開した際の  $m$  次項の係数であり、 $c_0 = \bar{s}_i^c$ ,  $p_0 = P(\bar{s}_i, \lambda)$  で、これ以外の具体的な項については式を別掲する<sup>21)</sup>。

以上から 3 次のモーメント項までで近似された Philip 式は

$$\begin{aligned} I(t) &= \frac{1}{2} K_s \left\{ 1 + (c_0 + c_1 s_i' + c_2 s_i'^2 + c_3 s_i'^3) t^{-1/2} \right\} t \\ &\quad + \left( p_0 + p_1 s_i' + p_2 s_i'^2 + p_3 s_i'^3 \right) Q \sqrt{t} \\ &= \frac{1}{2} K_s (1 + c_0) t + Q p_0 \sqrt{t} + \left( \frac{1}{2} K_s c_1 t + Q p_1 \sqrt{t} \right) s_i' \\ &\quad + \left( \frac{1}{2} K_s c_2 t + Q p_2 \sqrt{t} \right) s_i'^2 \\ &\quad + \left( \frac{1}{2} K_s c_3 t + Q p_3 \sqrt{t} \right) s_i'^3 \end{aligned} \quad (11)$$

と表すことができる。3 次のモーメント法による領域平均値は上式を領域積分することによって得ることができて、

$$\begin{aligned} \overline{I(t)}_3 &= \frac{1}{2} K_s (1 + c_0) t + Q p_0 \sqrt{t} \\ &\quad + \left( \frac{1}{2} K_s c_2 t + Q p_2 \sqrt{t} \right) \overline{s_i'^2} \\ &\quad + \left( \frac{1}{2} K_s c_3 t + Q p_3 \sqrt{t} \right) \overline{s_i'^3} \end{aligned} \quad (12)$$

と表される。この式でパラメータ平均法 ( $\overline{I(t)}_p$ ) は右辺第 2 項までを、2 次のモーメント法 ( $\overline{I(t)}_2$ ) は右辺第 3

項までを取ったものである。

パラメータ平均法で十分に良い精度の近似ができる条件は、2次のモーメント法による近似を真値と考えて、それに対する相対誤差  $\delta I_r$  が許容算定誤差  $\delta I_t (> 0)$  よりも小さいとすれば、

$$\frac{|\bar{I}_p - \bar{I}_2|}{\bar{I}_2} = \frac{\left| \left( \frac{1}{2} K_s c_2 t + Q p_2 \sqrt{t} \right) \overline{s_i'^2} \right|}{\left\{ \frac{1}{2} K_s (1 + c_0) t + Q p_0 \sqrt{t} + \left( \frac{1}{2} K_s c_2 t + Q p_2 \sqrt{t} \right) \overline{s_i'^2} \right\}}$$

$$= \delta I_r < \delta I_t \quad (13)$$

となる。この不等式を変形すると、

$$a_2 \sqrt{\frac{K_s}{\theta_s \psi_b}} + a_1 \sqrt{\frac{K_s}{\theta_s \psi_b}} + a_0 > 0 \quad (14)$$

と、 $\sqrt{K_s/(\theta_s \psi_b)}$  の2次式で表される。 $\sqrt{K_s/(\theta_s \psi_b)}$  は土壌特性だけで定まるもので、浸透量集約化指標と呼ぶことにする。上式中、 $a_i$  は  $i$  次項の係数 ( $i = 0 \sim 2$ ) で、それぞれ

$$a_2 = -c_2^2 (1 - \delta I_t^2) \overline{s_i'^2}^2 + 2(1 + c_0) c_2 \delta I_t^2 \overline{s_i'^2} + (1 + c_0)^2 \delta I_t^2 \quad (15)$$

$$a_1 = \left\{ -c_2 p_2 (1 - \delta I_t^2) \overline{s_i'^2} + \{c_2 p_0 + p_2 (1 + c_0)\} \overline{s_i'^2} + p_0 (1 + c_0) \delta I_t^2 \right\} \frac{4\sqrt{2}}{\sqrt{t}} \quad (16)$$

$$a_0 = \left\{ -p_2^2 (1 - \delta I_t^2) \overline{s_i'^2}^2 + 2p_0 p_2 \delta I_t^2 \overline{s_i'^2} + p_0^2 \delta I_t^2 \right\} \frac{8}{t} \quad (17)$$

と、 $\overline{s_i'^2}$  の2次式で表される。不等式 (14) が成立する場合として、 $a_0, a_1, a_2$  の値により代数的には8通りの場合が考えられるが、集約化指標の取りうる値を考えると6通りとなる。この全ての場合分けについては別掲する<sup>21)</sup>。しかし、 $a_i$  同士は互いに独立ではなく、土壌パラメータ  $\lambda$  や  $\overline{s_i'^2}$  の変域に対する制限 ( $0 < \lambda \leq 12, 0 \leq \overline{s_i'^2} \leq 1$ ) もあることを考慮すると、実際には不要な場合分けも含まれる。ここでは集約化する際の条件となる許容誤差、変動係数、経過時間 (秒) の変域を次のような範囲とする。

$$0.01 \leq \delta I_t \leq 0.20 \quad (18)$$

$$0.10 \leq CV \leq 1.00 \quad (19)$$

$$100 \leq t \leq 14400 \quad (20)$$

すると不等式 (14) が成立する浸透量集約化指標の値の範囲、つまり集約化規範は

$$a_2 > 0 \text{ かつ } a_1 > 0 \text{ かつ } a_0 > 0 \text{ かつ } D > 0 \text{ の時,}$$

$$0 < \sqrt{\frac{K_s}{\theta_s \psi_b}} \quad (21)$$

$a_2 > 0$  かつ  $a_0 < 0$  かつ  $D > 0$  の時、

$$\beta < \sqrt{\frac{K_s}{\theta_s \psi_b}} \quad (22)$$

$a_2 < 0$  かつ  $a_1 > 0$  かつ  $a_0 < 0$  かつ  $D > 0$  の時、

$$\alpha < \sqrt{\frac{K_s}{\theta_s \psi_b}} < \beta \quad (23)$$

$a_2 < 0$  かつ  $a_0 > 0$  かつ  $D > 0$  の時、

$$0 < \sqrt{\frac{K_s}{\theta_s \psi_b}} < \beta \quad (24)$$

となる。ここで、 $\alpha$  と  $\beta$  ( $\alpha < \beta$ ) は不等式 (14) の左辺を2次方程式として解いた時の実数解である。

同様に、2次のモーメント法に対する規範を導出することができるが、ここでは詳しく述べない。

## 5. 土壌パラメータに対する集約化規範

筆者らは、飽和透水係数、空気侵入圧、飽和体積含水率、保水特性曲線パラメータについて、浸透量に対する集約化規範を、仲江川ほかで導出した<sup>2)</sup>。この導出過程で、土壌特性すべての集約化規範に用いる共通の浸透量集約化指標を提案したが、初期飽和度についても同じ指標が使えることが前章で示された。ここでは、初期飽和度以外のパラメータに対する集約化規範をまとめることにする<sup>2)</sup>。

### (1) 飽和透水係数と空気侵入圧

飽和透水係数と空気侵入圧のパラメータ平均法による領域平均浸透量算定式と集約化規範は、この両者それぞれの変動が対数正規分布に従うことに基づいて、

$$\bar{I}_p = \frac{1}{2} (1 + s_i^c) t e^{\mu_x + \frac{1}{2} \sigma_x^2} + \sqrt{2\theta_s y P} \sqrt{t} e^{\frac{1}{2} \mu_x + \frac{1}{2} \sigma_x^2} \quad (25)$$

$$\bar{I}_\infty = \frac{1}{2} (1 + s_i^c) t e^{\mu_x + \frac{1}{2} \sigma_x^2} + \sqrt{2\theta_s y P} \sqrt{t} e^{\frac{1}{2} \mu_x + \frac{1}{2} \sigma_x^2} \quad (26)$$

$$\sqrt{\frac{K_s}{\theta_s \psi_b}} > \frac{2\sqrt{2} P \left\{ (1 + CV_x^2)^{\frac{1}{2}} - (1 + \delta I_t) \right\}}{(1 + s_i^c) (1 + CV_x^2)^{\frac{1}{2}} \delta I_t \sqrt{t}} \quad (27)$$

と表される。ここで  $x$  は  $K_s$  と  $\psi_b$  のいずれかで、 $y$  は  $x$  でない方、 $\mu_x, \sigma_x$  はそれぞれ対数変換後の  $x$  の平均値と標準偏差である。但し、左辺の  $\overline{K_s}$  と  $\overline{\psi_b}$  は  $x$  と一致する方が平均を表し、他方は分布のしていない確定値とする。

式 (25)、式 (26) はそれぞれ、パラメータ平均法と無限次のモーメント法による算定式で、後者では近似を行っていないので、集約化規範は無条件で満たされる。式 (25) と式 (26) は非常に良く似た形をしており、両者の違いは、両式の右辺第2項の指数部だけである。パラメータ平均法の方が指数部が大きいので、領域平均値だ

けを使っていると真値に対して常に過大評価されてしまうことが分かる。

### (2) 飽和体積含水率

飽和体積含水率のパラメータ平均法と2次のモーメント法による領域平均算定式はそれぞれ式(28)と式(29)で、与えられた許容誤差に対するパラメータ平均法の集約化規範は式(30)である。

$$\bar{I}_p = \frac{1}{2} K_s (1 + s_i^c) t + \sqrt{2\psi_b} P \sqrt{t} \sqrt{\theta_s} \quad (28)$$

$$\bar{I}_2 = \frac{1}{2} K_s (1 + s_i^c) t + \sqrt{2K_s \psi_b} P \sqrt{t} \sqrt{\theta_s} \left( 1 - \frac{1}{8} CV_{\theta_s}^2 \right) \quad (29)$$

$$\sqrt{\frac{K_s}{\theta_s \psi_b}} > \frac{2P \{ CV_{\theta_s}^2 - (8 - CV_{\theta_s}^2) \delta I_t \}}{(1 + s_i^c) (8 - CV_{\theta_s}^2) \sqrt{t} \delta I_t} \quad (30)$$

ここで  $CV_{\theta_s}$  は  $\theta_s$  の変動係数である。

### (3) 保水特性曲線パラメータ $\lambda$

保水特性曲線パラメータ  $\lambda$  に対する集約化規範の導出に当たっては、初期飽和度に対する導出と同様に行なうことができる。ここでは、Philip 式に現れる  $A_i$  と  $S_i$  を  $\lambda$  について Taylor 展開すると次のように表される。

$$A_i \approx \frac{1}{2} K_s \left\{ 1 + (c_0 + c_1 \lambda' + c_2 \lambda'^2 + c_3 \lambda'^3) \right\} \quad (31)$$

$$S_i \approx Q \left( p_0 + p_1 \lambda' + p_2 \lambda'^2 + p_3 \lambda'^3 \right) \quad (32)$$

ここで、 $\lambda'$  は  $\lambda$  の偏差、 $c_m$  と  $p_m$  はそれぞれ  $A_i$ 、 $S_i$  を Taylor 展開した際の  $m$  次の係数であり、これについても具体的な式は別掲する<sup>21)</sup>。すると、3次までのモーメント項までで近似された Philip 式は、式(11)で  $s_i'$  を  $\lambda'$  で置き換えたもので表される。但し、 $c_m$  と  $p_m$  は  $\lambda$  に対するものであることに注意されたい。今述べた置換えを、式(12)に対して行うことにより、3次のモーメント法による領域平均算定式は

$$\begin{aligned} \bar{I}(t)_3 = & \frac{1}{2} K_s (1 + c_0) t + Q p_0 \sqrt{t} \\ & + \left( \frac{1}{2} K_s c_2 t + Q p_2 \sqrt{t} \right) \lambda'^2 \\ & + \left( \frac{1}{2} K_s c_3 t + Q p_3 \sqrt{t} \right) \lambda'^3 \end{aligned} \quad (33)$$

と表すことができる。同様の置換えを式(14)~式(17)まで行い、集約化する際の条件となる許容誤差、変動係数、経過時間(秒)の変域を  $s_i$  と同一の式(18)~式(20)を用いると、 $\lambda$  に対する集約化規範は式(34)~式(36)として表すことができる。

$a_2 > 0$  かつ  $a_1 > 0$  かつ  $a_0 > 0$  かつ  $D > 0$  の時、

$$0 < \sqrt{\frac{K_s}{\theta_s \psi_b}} < \beta \quad (34)$$

$a_2 < 0$  かつ  $a_1 > 0$  かつ  $a_0 < 0$  かつ  $D > 0$  の時、

$$\alpha < \sqrt{\frac{K_s}{\theta_s \psi_b}} < \beta \quad (35)$$

$a_2 < 0$  かつ  $a_0 > 0$  かつ  $D > 0$  の時、

$$0 < \sqrt{\frac{K_s}{\theta_s \psi_b}} < \beta \quad (36)$$

初期飽和度の場合分けと違い、実際に現れるのは上記3つの場合だけで、式(22)に対応する場合分けが無いことがわかる。

## 6. 浸透量集約化指標

以上でまとめたように、集約化規範は全て浸透量集約化指標に対する不等式として表すことができた。状態量の初期飽和度を除いて、4つの水移動に関係する土壌パラメータがあれば、Philip 式はもちろん、Richards 式でも浸透量を計算することができる。従って、飽和透水係数、空気侵入圧、飽和体積含水率で表される浸透量集約化指標と、保水特性曲線パラメータ  $\lambda$  で、土壌への浸透量の集約化に関して、各種土壌の類似性を見ることができるといえる。

小杉は Mualem の土壌カタログ<sup>22)</sup>に掲載されている土壌について Brooks and Corey 式(8)のパラメータを決定している<sup>23),24)</sup>。その中から土壌カタログに飽和透水係数の値が記載されているものを選び出し、水移動に関係する4つの土壌パラメータとそれから計算された浸透量集約化指標をまとめたのが表-1である。

これを図化したものが、図-1である。図中の記号は土壌タイプを表しており、Mualem の文献<sup>22)</sup>中のカタログ番号と土性、図中記号、サンプル数を表-2にまとめておく。

殆んどどの土壌は  $0 < \lambda \leq 4$ 、 $10^{-3} \leq \sqrt{K_s / (\theta_s \psi_b)} \leq 10^{-1}$  の領域に集中していること、また土性にはあまり依らないことも見てとれる。集約化指標  $\sqrt{K_s / (\theta_s \psi_b)}$  の土壌パラメータの中、分母に現れる  $\theta_s$  と  $\psi_b$  の値は各々 0.21~0.55、0.05~1.29 で、分母  $\theta_s \psi_b$  では 0.015~0.716 と 50 倍程の変動がある。一方分子の  $K_s$  は  $1.23 \times 10^{-7} \sim 7.20 \times 10^{-3}$  と  $10^4$  以上の開きがあり、 $\sqrt{K_s / (\theta_s \psi_b)}$  では  $K_s$  が支配的であることが分かる。また  $\lambda$  が 5 以上の領域では sand, glass-beads だけに限られており、これらの土壌では  $\sqrt{K_s / (\theta_s \psi_b)}$  は  $5 \times 10^{-2}$  の周りに集まっている。図上で隣接する土壌同士は、パラメータの変動が同様の場合、集約化のし易さも同程度であるということの意味しているのであって、そのもの同士の集約化が容易であることを必ずしも示している訳ではない点は注意を要する。

## 7. 浸透量集約化規範の場合分け領域

集約化規範の導出のところで述べたように、保水特性曲線パラメータ  $\lambda$  と初期飽和度 ( $s_i$ ) の集約化規範には、

表-1 水移動に関わる土壌パラメータと浸透量集約化指標. Mualem の土壌カタログ<sup>22)</sup> に掲載されている土壌のうち, 飽和透水係数の値が記載され, 更に小杉が Brooks and Corey 式 (8) のパラメータを決定した土壌<sup>23),24)</sup> について示している. 保水特性曲線パラメータと集約化指標の関係は図-1 に示されている.

土壌種類	飽和透水 係数 $K_s$ (m/s)	空気 侵入圧 $\psi_b$ (m)	飽和体積 含水率 $\theta_s$ ( $m^3/m^3$ )	保水特性曲線 パラメータ $\lambda$	集約化指標 ( $s^{-0.5}$ )
<i>CLAY</i>					
Lamberg	$3.44 \times 10^{-5}$	0.048	0.537	0.505	$3.653 \times 10^{-2}$
<i>SILT</i>					
Silt Columeia	$5.83 \times 10^{-5}$	0.270	0.400	0.248	$2.323 \times 10^{-2}$
Silt of Nave Yaar	$7.20 \times 10^{-3}$	0.067	0.577	0.423	$4.315 \times 10^{-1}$
Slate Dust	$1.18 \times 10^{-4}$	0.848	0.455	4.681	$1.748 \times 10^{-2}$
<i>SILTY-CLAY-LOAM</i>					
Weld Silty Clay Loam	$5.68 \times 10^{-6}$	1.156	0.470	1.895	$3.233 \times 10^{-3}$
<i>CLAY-LOAM</i>					
Rideau clay loam	$2.66 \times 10^{-5}$	0.378	0.416	1.110	$1.300 \times 10^{-2}$
Yolo Light Clay	$1.23 \times 10^{-7}$	0.174	0.495	0.248	$1.195 \times 10^{-3}$
<i>SILT-LOAM</i>					
Caribou silt loam	$1.66 \times 10^{-6}$	0.648	0.442	0.572	$2.407 \times 10^{-3}$
Touched silt loam	$2.51 \times 10^{-6}$	1.492	0.480	1.753	$1.872 \times 10^{-3}$
Ica Silt Loam	$4.17 \times 10^{-6}$	0.409	0.530	0.290	$4.386 \times 10^{-3}$
Ica Silt Loam	$1.66 \times 10^{-6}$	0.459	0.554	0.231	$2.555 \times 10^{-3}$
Touchet Silt Loam	$7.00 \times 10^{-7}$	0.150	0.469	1.856	$3.154 \times 10^{-3}$
Silt Loam GE 3	$5.74 \times 10^{-7}$	1.285	0.396	0.286	$1.062 \times 10^{-3}$
<i>LOAM</i>					
Guelph Loam	$3.66 \times 10^{-6}$	0.467	0.520	0.520	$3.882 \times 10^{-3}$
Rubicon Sandy Loam	$3.00 \times 10^{-6}$	0.676	0.381	2.296	$3.413 \times 10^{-3}$
<i>SAND</i>					
Sand	$1.08 \times 10^{-2}$	0.170	0.272	1.225	$4.833 \times 10^{-1}$
Sand	$1.44 \times 10^{-4}$	0.214	0.258	1.655	$5.107 \times 10^{-2}$
Del Monte Fine Sand	$4.39 \times 10^{-6}$	0.905	0.298	1.558	$4.035 \times 10^{-3}$
Botany Sand Fraction	$1.86 \times 10^{-4}$	0.399	0.350	8.680	$3.650 \times 10^{-2}$
Fine Sand GF 13	$1.25 \times 10^{-6}$	0.382	0.360	2.384	$3.015 \times 10^{-3}$
Oakley Sand	$1.00 \times 10^{-6}$	0.054	0.283	0.536	$8.089 \times 10^{-3}$
Oso Flasco Fine Sand	$2.00 \times 10^{-4}$	0.259	0.266	2.229	$5.388 \times 10^{-2}$
Volcanic Sand	$8.10 \times 10^{-4}$	0.324	0.350	2.129	$8.452 \times 10^{-2}$
GE 2 Sand	$1.61 \times 10^{-6}$	0.187	0.375	1.484	$4.792 \times 10^{-3}$
Sand Fraction	$1.13 \times 10^{-4}$	0.399	0.372	4.605	$2.759 \times 10^{-2}$
Crae Creek Sand	$1.31 \times 10^{-5}$	0.130	0.375	2.715	$1.639 \times 10^{-2}$
Sable De Riviere	$1.81 \times 10^{-4}$	0.167	0.342	2.803	$5.629 \times 10^{-2}$
Rehovot Sand	$7.64 \times 10^{-5}$	0.095	0.400	0.603	$4.489 \times 10^{-2}$
Sinai Sand	$3.33 \times 10^{-5}$	0.312	0.270	1.925	$1.988 \times 10^{-2}$
Pouder River Sand	$2.26 \times 10^{-5}$	0.291	0.364	3.665	$1.461 \times 10^{-2}$
Sand	$5.30 \times 10^{-4}$	0.609	0.400	2.338	$4.664 \times 10^{-2}$
Hygiene Sandstone	$1.78 \times 10^{-7}$	1.056	0.250	3.026	$8.211 \times 10^{-4}$

表-1 (つづき) 水移動に関わる土壌パラメータと浸透量集約化指標.

土壌種類	飽和透水 係数 $K_s$ (m/s)	空気 侵入圧 $\psi_b$ (m)	飽和体積 含水率 $\theta_s$ ( $m^3/m^3$ )	保水特性曲線 パラメータ $\lambda$	集約化指標 ( $s^{-0.5}$ )
<i>SAND</i>					
Berea Sand Stone	$4.81 \times 10^{-7}$	0.849	0.206	3.290	$1.658 \times 10^{-3}$
Fragmented Fox Hill (Sandstone)	$1.61 \times 10^{-5}$	0.176	0.503	1.206	$1.349 \times 10^{-2}$
Fine Sand GE 13	$2.85 \times 10^{-6}$	0.761	0.360	2.563	$3.225 \times 10^{-3}$
Volcanic Sand	$1.10 \times 10^{-5}$	0.313	0.365	1.944	$9.812 \times 10^{-3}$
Gravelly Sand	$2.78 \times 10^{-6}$	0.466	0.326	1.123	$4.278 \times 10^{-3}$
Fine Sand	$2.27 \times 10^{-5}$	0.921	0.330	1.297	$8.642 \times 10^{-3}$
Sand Fraction	$1.86 \times 10^{-4}$	0.407	0.350	11.28	$3.613 \times 10^{-2}$
Sand Fraction	$1.46 \times 10^{-3}$	0.165	0.375	8.412	$1.536 \times 10^{-1}$
Sand Fraction	$7.27 \times 10^{-4}$	0.258	0.364	6.775	$8.798 \times 10^{-2}$
Fragmented Mixture	$1.50 \times 10^{-5}$	0.330	0.441	2.351	$1.015 \times 10^{-2}$
Plainfield Sand	$3.12 \times 10^{-5}$	0.213	0.307	1.379	$2.184 \times 10^{-2}$
<i>GLASS BEADS</i>					
Porus Body Made of Sintered Glass Beads	$1.05 \times 10^{-5}$	0.126	0.262	3.417	$1.783 \times 10^{-2}$
Glass Beads	$1.05 \times 10^{-5}$	0.575	0.383	6.493	$6.905 \times 10^{-3}$
Monodispersed Glass Bead	$3.30 \times 10^{-4}$	0.575	0.366	7.231	$3.960 \times 10^{-2}$

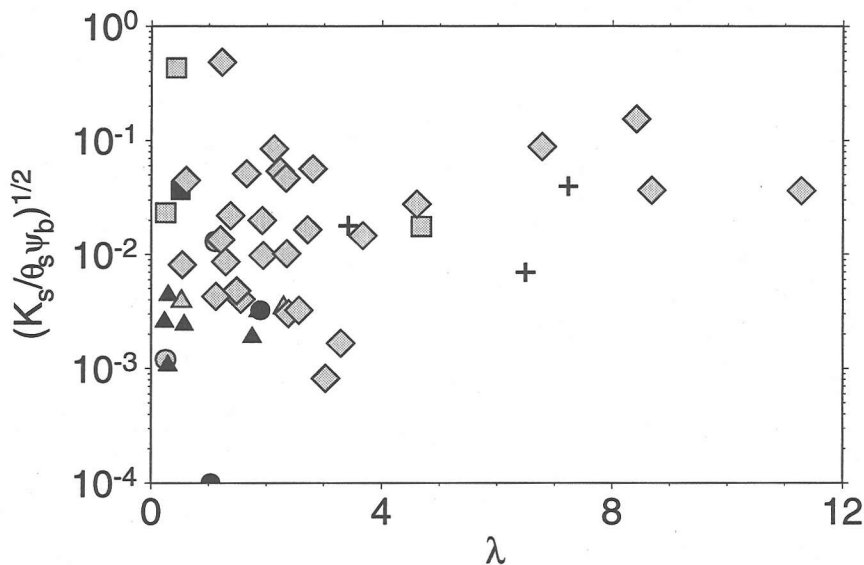


図-1 保水特性曲線パラメータ $\lambda$ と浸透量集約化指標. 図中の各値は表-1を参照. 各記号は土性分類を表している(表-2).

場合分けが存在していた. ここでは, $\lambda-s_i$ 平面上に集約化規範を示す場合, その場合分け領域がどのような配置

関係になっているかを明らかにする. 集約化する条件である許容誤差, 変動係数, 経過時間を式(18)~式(20)

表-2 図-1中の記号と土性の対応。土性、記号、サンプル数の他に、Mualemの文献<sup>22)</sup>中のカタログ番号も示してある。

番号	土性	形	色調	数
10	clay	四角	黒	1
20	silt	四角	灰色	3
30	silty-clay-loam	円	黒	2
31	clay-loam	円	灰色	2
33	silty-loam	三角	黒	7
34	loam	三角	灰色	1
40	loamy-sand	ダイヤ	黒	1
41	sand	ダイヤ	灰色	29
50	glass-beads	十字	黒	3

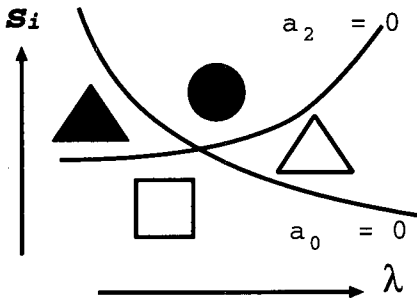


図-2 領域の配置とその境界。図中の記号は表-3を参照のこと。

で与える。但し、飽和透水係数については  $CV_{K_s} = 2.0$  まで考える。各場合分け領域間の配置を模式的に示したのが図-2である。また図中の領域記号と規範の場合分けを示す番号の対応表が表-3である。□と△の境界と●と▲の境界は  $a_0 = 0$  の曲線であり、△と●の境界と□と▲の境界は  $a_2 = 0$  の曲線で、白抜き記号は  $a_2 > 0$ 、塗り潰し記号は  $a_2 < 0$  の領域を表している。また、□と●、△と▲は対称の位置関係にある。各領域に対応する式を見ると、白抜き記号の領域は上限に関しては集約化指標に対する制限が無く、□領域については下限も0なので集約化指標、 $\lambda$ 、 $s_i$  によらず常に集約化できる領域である。塗り潰し記号の領域は上限、下限両方に制約があるが、▲領域については下限の条件が0であるから実際には上限だけに制約があることになる。

### (1) 保水特性曲線パラメータ $\lambda$

$\delta I_t = 0.10$ ,  $t = 3600$  秒で、 $CV_\lambda = 0.1, 0.5$  とした時の場合分けされる各領域を  $\lambda$ - $s_i$  平面上に示したのが図-3である。対象土壌を決めると、浸透量集約化指標と保水特性曲線パラメータ  $\lambda$  が定まるから、対象土壌毎

表-3 保水特性曲線パラメータ  $\lambda$  と初期飽和度 ( $s_i$ ) の集約化規範の場合分けと領域記号の対応。

$\lambda$	$s_i$	図中記号
式 (34)	式 (21)	□
	式 (22)	△
式 (35)	式 (23)	●
式 (36)	式 (24)	▲

に  $\lambda$ - $s_i$  平面の  $s_i$  軸に平行な直線が定まり、その直線上で浸透量集約化指標と集約化規範から得られる上下限を比較することになる。図-3に加えて、後に示す図-7も見ると、集約化条件のうち変動係数が変わると場合分け領域の配置が大きく変化することがわかる。 $t = 100$  秒で  $CV_\lambda = 0.10$  (図-7 (a-1)) から  $CV_\lambda = 0.25$  (図-7 (b-1)) に変化すると、大半を占めていた□領域が半分以下にまで縮小する。そして  $t = 3600$  秒で  $CV_\lambda = 0.50$  になると□領域はほぼ  $\lambda < 1$  の範囲のみにまで縮小し (図-3 (b)) し、 $CV_\lambda = 1.00$  に達すると□領域は消滅して、代って  $\lambda$  が小さく  $s_i$  が飽和に近いところに●領域が現れる (図-7 (c-1))。また、集約化条件のうち経過時間には敏感でないことは図-3 (a) と図-7 (a-1) を比較することにより分かる。

### (2) 初期飽和度

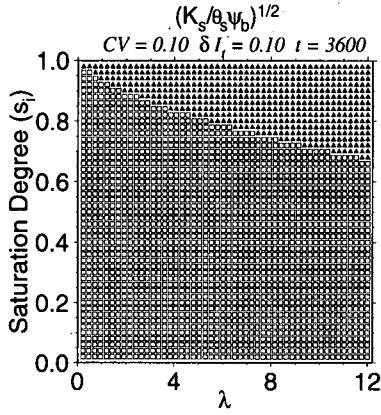
保水特性曲線パラメータ  $\lambda$  の場合分けと違い、初期飽和度は4つの場合分けが存在する。図-4は  $\delta I_t = 0.05$ ,  $t = 3600$  秒で、 $CV_{s_i} = 0.1, 0.5$  とした時の場合分け領域を記号で表したものである。図-4 (a) では  $a_2$  が負となる領域 (●領域と▲領域) は  $s_i > 0.9$  の範囲に限られているが、図-4 (b) ではおよそ  $s_i > 0.5$  の範囲にまで広がっており、図-3と同様、変動係数という集約化条件によって場合分け領域の配置が大きく変化するが、 $s_i$  軸方向にほぼ平行移動するのが特徴的である。図-8を合わせて見ると、図-4 (a) と図-8 (a-1) から  $\delta I_t$  と  $t$  の影響が相殺し合って、大きな領域の配置移動は起らないことや、 $\delta I_t = 0.05$  (図-4 (b)) から  $\delta I_t = 0.10$  (図-8 (b-1)) へ変化しても、 $a_2 = 0$  の境界が  $s_i = 0.5$  から  $s_i = 0.6$  へ押し上げられる程度であることが分かる。

以上から、規範の場合分けの配置には、集約化条件のうち変動係数が最も支配的で、次いで許容誤差と盲える。

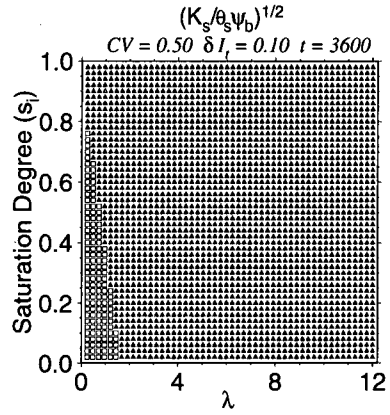
## 8. 集約化規範を用いた浸透量の集約化

ここでは集約化が可能な浸透量集約化指標に対する許容範囲の上下限を実際に計算し、集約化の難易を明らかにする。次いで、実際に観測された同一サイト内での



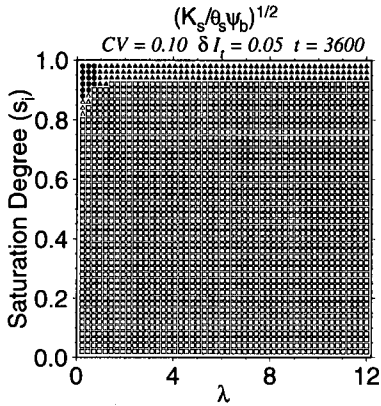


(a)  $CV_\lambda = 0.10$

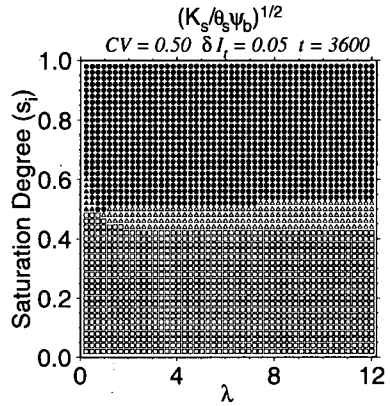


(b)  $CV_\lambda = 0.50$

図-3 保水特性曲線パラメータ  $\lambda$  が分布している場合の集約化規範の場合分け領域.  $\delta I_t = 0.10$ ,  $t = 3600$  秒は一定とし,  $CV_\lambda = 0.1, 0.5$  とした時の場合分け領域を示している. 集約化規範の場合分けと領域記号の対応については表-3を参照.



(a)  $CV_{s_i} = 0.10$



(b)  $CV_{s_i} = 0.50$

図-4 初期飽和度が分布している場合の集約化規範の場合分け領域.  $\delta I_t = 0.05$ ,  $t = 3600$  秒は一定とし,  $CV_{s_i} = 0.1, 0.5$  とした時の場合分け領域を示している. 集約化規範の場合分けと領域記号の対応については表-3を参照.

統計量に基づき, 各パラメータ毎に, 平均値だけから, 即ちパラメータ平均法を用いて, 許容誤差範囲内で浸透量を算定できるか検討する.

実際の土壌では浸透量集約化指標は殆んどが  $1.0 \times 10^{-4} \sim 10^0$  に含まれているので (図-1, 表-1), 以下の図では, この範囲内でのみ集約化可能な集約化指標の上・下限値について等値線を描く. また,  $10^{-4}$  以下の領域には明るい陰を,  $10^1$  以上の領域には暗い陰をつけてある. 言い替えると, 明るい陰の領域は実際の土壌の浸透量集約化指標の下限値を暗い陰の領域は上限値を表していると言える. 従って, 集約化規範から得られる上限の図に現れる暗い陰の領域と下限の図に現れる明るい陰の領域は集約化指標の値によらず集約化が可能な領域で, 逆に上限の図に現れる明るい陰の領域と下限の図に現れる暗い陰の領域はどんな集約化指標の値であっ

ても集約化できない領域となる. また, 表-4には集約化指標の上下限値を描くときに与えた条件を各パラメータ毎にまとめている.

### (1) 飽和透水係数

5.(1)でも述べたように, 飽和透水係数は同一サイト内では対数正規分布することが知られており, 領域平均値と分散が既知であれば, 分布を考慮した領域平均値の真値  $\bar{I}_\infty$  を計算することができる<sup>2)</sup>. 分散を使わずに平均値のみで領域平均を算定するパラメータ平均法の集約化規範は式 (27) で表される. 式 (27) から明らかであるが, 飽和透水係数の集約化規範は下限についてのものだけであり, 場合分けも存在しない.  $t = 3600$  秒として, 変動係数と許容誤差を変えて集約化指標の下限値を図示したものが図-5である. 3つの図とも共通して,

表-4 集約化規範を図化する際に与えた、各パラメータ毎の集約化条件. ここに CV は変動係数,  $\delta I_t$  は集約化許容誤差,  $t$  は経過時間 (秒) を示している. 式 (18)~式 (20) の範囲内で与えているが,  $CV_{K_s} = 2.0$  は例外である (図-5 (c)).

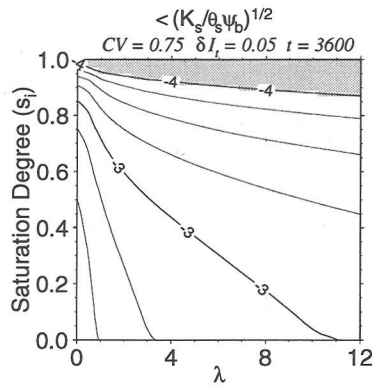
土壌パラメータ		CV	$\delta I_t$	$t$
飽和透水係数	(a)	0.75	0.05	3600
空気侵入圧	(b)	1.00	0.05	3600
(図-5)	(c)	2.00	0.10	3600
飽和体積含水率	(a)	0.75	0.05	100
	(b)	1.00	0.05	100
(図-6)	(c)	1.00	0.10	3600
保水曲線	(a)	0.10	0.10	100
パラメータ	(b)	0.25	0.10	100
(図-7)	(c)	1.00	0.05	3600
初期飽和度	(a)	0.10	0.10	100
	(b)	0.50	0.10	3600
(図-8)	(c)	1.00	0.05	100

$\lambda$ ,  $s_i$  が共に大きい程集約化しやすい.  $\delta I_t = 0.05$  と固定して,  $CV_{K_s} = 0.75, 1.00$  とした時はそれぞれ,  $10^{-3}, 10^{-2.5}$  の付近の集約化指標を持つ土壌が  $\lambda$ ,  $s_i$  の組み合わせで集約化できるかできないかが定まる (図-5 (a), (b)). また  $CV_{K_s} = 2.00$  としても,  $\delta I_t = 0.10$  と許容誤差を大きくすれば,  $CV_{K_s} = 1.00, \delta I_t = 0.05$  の時 (図-5 (b)) と集約化指標に対する下限値は殆んど変わらない (図-5 (c)).

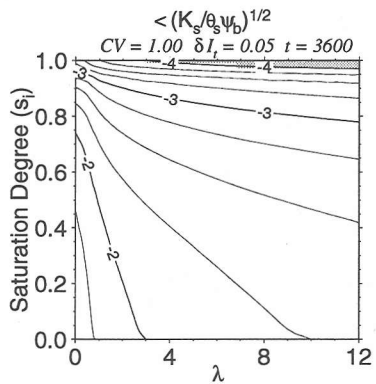
同一サイト内の同一土壌に対して測定された飽和透水係数の平均値と変動係数を, 既往の研究からまとめたのが表-5である.  $CV_{K_s} \approx 1.0$  以下の土壌が多く見られ, 大きいものでも  $CV_{K_s} \approx 2.0$  以下である. 表-5に掲げた土壌の集約化指標を概算するために,  $\theta_s \psi_b = 0.1$  とすると,  $10^{-5}$  オーダの透水係数を持つ土壌の集約化指標は  $10^{-2}$  程度になる. 今, 集約化指標が  $10^{-2}$  程度である土壌を考え, 許容誤差を  $\delta I_t = 0.05$  とすると  $CV_{K_s} = 0.75$  では, 図の範囲の全ての  $\lambda$ ,  $s_i$  について, 集約化規範を満たす. 許容誤差はそのまま  $CV_{K_s} = 1.00$  とするとおよそ  $s_i > -3\lambda/4 + 0.75$  の範囲で集約化が可能であるが, その下側では  $\lambda$ ,  $s_i$  に依らず集約化ができない (図-5 (b)). 図示はしないが, 許容誤差を  $\delta I_t = 0.10$  と大きくすると  $\lambda$ ,  $s_i$  に関係なく集約化が可能となる.  $CV_{K_s} = 2.0$  の場合,  $\delta I_t = 0.10$  とすると上で述べたように集約化指標に対する下限値の等値線は図-5 (b) と似たものとなるので (図-5 (c)), 集約化についても同じことが当てはまる.

## (2) 空気侵入圧

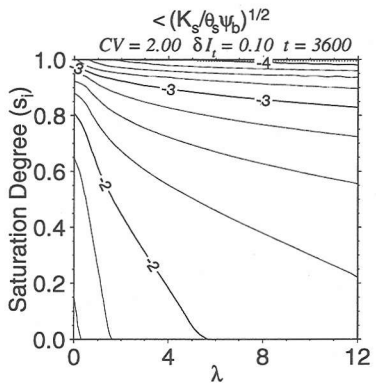
集約化規範を導いたときに述べたように, 飽和透水



(a)  $CV_x = 0.75, \delta I_t = 0.05, t = 3600$  秒の時の下限値.



(b)  $CV_x = 1.00, \delta I_t = 0.05, t = 3600$  秒の時の下限値.



(c)  $CV_x = 2.00, \delta I_t = 0.10, t = 3600$  秒の時の下限値.

図-5  $K_s$  と  $\psi_b$  の分布に対する浸透量集約化指標の許容範囲. (a), (b), (c) は異なる集約化条件での浸透量集約化指標の下限値を表している. 等値線は常用対数表示で, 間隔は 0.25 である.  $x$  は  $K_s$  または  $\psi_b$  である.

係数と空気侵入圧に対する集約化規範は同一である. 従

表-5 同一サイト内で観測された飽和透水係数の平均値  $\bar{K}_s$  と変動係数  $CV_{K_s}$ 。N はサンプル数で、文献については第一著者のイニシャルと西暦の下 2 桁で代表させている。

$\bar{K}_s$ (m/s)	$CV_{K_s}$	N	文献
$4.37 \times 10^{-6}$	1.00	330	W65 <sup>25)</sup>
$2.31 \times 10^{-6}$	1.90	205	N73 <sup>26)</sup>
$3.89 \times 10^{-5}$	1.90	64	G78 <sup>27)</sup>
$1.05 \times 10^{-5}$	1.02	25	H88 <sup>28)</sup>
$2.74 \times 10^{-5}$	1.57	130	R92a <sup>29)</sup>
$7.41 \times 10^{-5}$	1.29	417	R92b <sup>4)</sup>
$3.26 \times 10^{-6}$	0.51	73	R93 <sup>30)</sup>
$1.89 \times 10^{-5}$	0.80	31	R93 <sup>30)</sup>
$1.04 \times 10^{-5}$	0.94	91	R93 <sup>30)</sup>
$6.29 \times 10^{-6}$	0.90	185	K94 <sup>31)</sup>
$6.17 \times 10^{-7}$	1.21	446	R96 <sup>32)</sup>

表-6 同一サイト内で観測された空気侵入圧の平均値  $\bar{\psi}_b$  と変動係数  $CV_{\psi_b}$ 。N はサンプル数で、文献については第一著者のイニシャルと西暦の下 2 桁で代表させている。

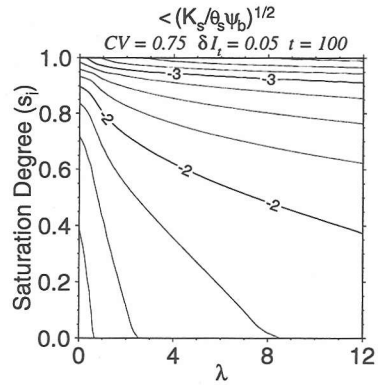
$\bar{\psi}_b$ (m)	$CV_{\psi_b}$	N	文献
0.470	0.100	225	C78 <sup>33)</sup>
0.277	0.110	417	R92b <sup>4)</sup>
0.139	0.630	448	R96 <sup>32)</sup>

って、(1)で述べたことはすべて空気侵入圧についても当てはまるので、ここでは実際の変動に対する集約化についてのみ議論する。

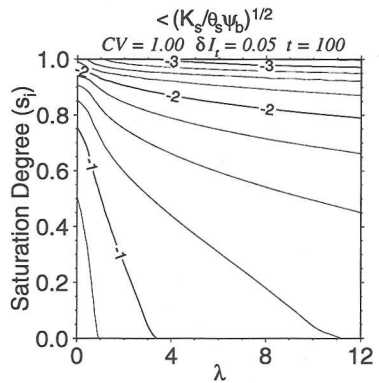
空気侵入圧の分布を調べた研究は極めて少なく、それをまとめたのが表-6である。空気侵入圧は対数正規分布に従っていることが観測<sup>7)</sup>から分かっているの、分布を考慮すれば領域平均浸透量の真値  $\bar{I}_\infty$  を求めることができる。表-6では  $CV_{\psi_b} = 0.1 \sim 0.6$  程度と大きな開きがあるが、データが不足しており、どの程度が一般的な変動の大きさかは判断し兼ねる。 $CV_{\psi_b} = 0.10$  の場合は、許容誤差  $\delta I_t < 0.05$  ですべての土壌に対して、 $\lambda, s_i$  に依らず集約化が可能と言えるが、 $CV_{\psi_b} = 0.63$  は、図-5 (a) に近い条件なので、集約化できるかどうかは、集約化指標の値と  $\lambda, s_i$  で決定される。但しこの場合でも、 $\delta I_t = 0.10$  とすれば集約化指標の値に関わらず集約化が可能である。

### (3) 飽和体積含水率

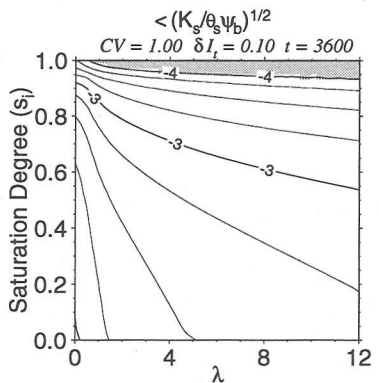
飽和体積含水率の集約化規範、式 (30) を満たす下限値を図示したものが図-6である。この規範も、飽和透水係数、空気侵入圧と同じで、下限に対してのみ制約があ



(a)  $CV_{\theta_s} = 0.75, \delta I_t = 0.05, t = 100$  秒の時の下限値。



(b)  $CV_{\theta_s} = 1.00, \delta I_t = 0.05, t = 100$  秒の時の下限値。



(c)  $CV_{\theta_s} = 1.00, \delta I_t = 0.10, t = 3600$  秒の時の下限値。

図-6  $\theta_s$  の分布に対する浸透量集約化指標の許容範囲。(a), (b), (c) は異なる集約化条件での浸透量集約化指標の下限値を表している。等値線は常用対数表示で、間隔は 0.25 である。x は  $K_s$  または  $\psi_b$  である。

り、場合分けがない。図-5 と非常に良く似ているが、それは両規範、式 (27) と式 (30) が類似していることから分かる。図-6 で共通している点は、 $(\lambda, s_i) = (0, 1)$  付

表-7 同一サイト内で観測された飽和体積含水率の平均値  $\bar{\theta}_s$  と変動係数  $CV_{\theta_s}$ . N はサンプル数で、文献については第一著者のイニシャルと西暦の下 2 桁で代表させている.

$\bar{\theta}_s$	$CV_{\theta_s}$	N	文献
0.400	0.110	205	N73 <sup>26)</sup>
0.470	0.100	225	C78 <sup>33)</sup>
0.391	0.101	25	H88 <sup>28)</sup>
0.406	0.086	32	H88 <sup>28)</sup>
0.267	0.235	448	R96 <sup>32)</sup>
0.416	0.057	417	R92b <sup>4)</sup>

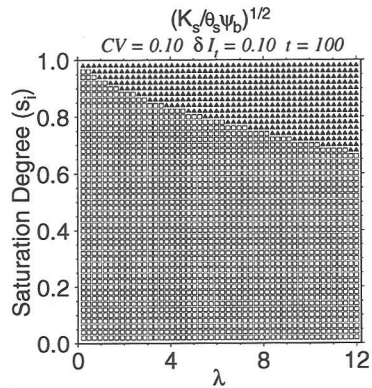
近から放射状に等値線が描かれていて、原点に近いほど下限値が大きく集約化が難しくなっている点である。

式 (18)~式 (20) の条件で計算したところ、許容誤差が 0.05 の時は変動係数が 0.75 以上の場合、許容誤差が 0.10 の時は変動係数が 1.00 以上の場合だけ等値線が現れた。図-6(a), (b) では  $10^{-3} \sim 10^{-2}$  のオーダーが大半の領域を占めているが、これは図-1に示されているように、もっとも土壌が集中している領域であり、今考えている集約化条件下の集約化の可否が集約化指標の値と  $\lambda, s_i$  に大きく依存すると言える。図-6(c) は、変動係数は図-6(b) と同じだが、許容誤差を 0.10、経過時間を 3600 秒とした場合である。この場合、集約化指標の値と図の範囲の  $\lambda, s_i$  に依らない部分が  $s_i = 1.0$  付近に現れ、また下限値の等値線も最大で  $10^{-2}$  程度なので、図-6 (b) に比べ集約化がかなり容易になると言える。

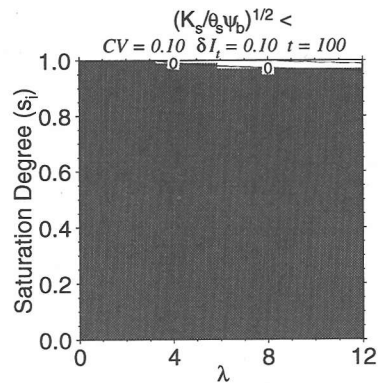
実際のデータを見ると (表-7)、飽和体積含水率の変動係数は高々 0.2 程度である。上で述べたように、変動係数が 0.75 以上でない等値線は現れなかったため、飽和体積含水率の変動は浸透量算定には殆んど影響を与えず、平均値を用いれば十分良い精度の集約化が行える。

#### (4) 保水特性曲線パラメータ $\lambda$

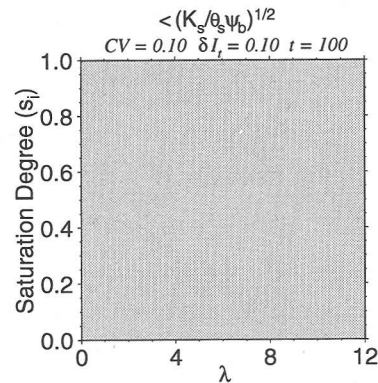
図-7は式 (34) から式 (36) を用いて、 $\lambda$  の変動に対する集約化指標の上・下限値を図示したものである。この図で (1) は集約化規範の場合分けの領域を、(2), (3) はそれぞれ集約化可能な集約化指標の上限値と下限値を示している。図-7 (a) は  $CV_{\lambda} = 0.10$  と変動が小さい場合である。下限の等値線が現れない (図-7 (a-3)) 理由は場合分け (図-7 (a-1)) で式 (34) の領域である  $\square$  領域と式 (36) の領域である  $\blacktriangle$  領域とから明らかである。上限の等値線については、後者の領域のみ、 $s_i \approx 1.0$  の近傍に現れるだけである。  $CV_{\lambda} = 0.25$  とした場合、下限は常に集約化指標の値より小さく (図-7 (b-3)), 上限の等値線は  $(\lambda, s_i) = (0, 1)$  近から放射状に伸びている (図-7 (b-2)).  $s_i = 1$  近傍で上限が  $10^{-1}$  オーダにな



(a-1)  $CV_{\lambda} = 0.10, \delta I_t = 0.10, t = 100$  秒の時の場合分け毎の領域。



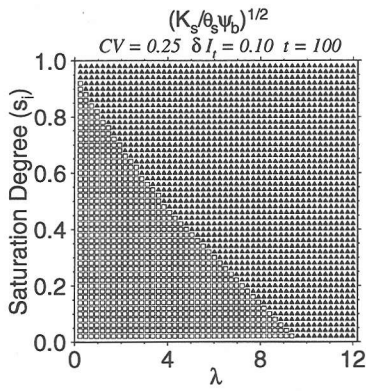
(a-2)  $CV_{\lambda} = 0.10, \delta I_t = 0.10, t = 100$  秒の時の上限値。



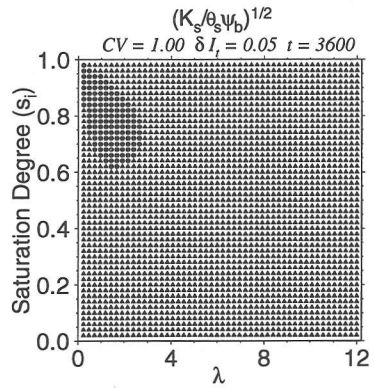
(a-3)  $CV_{\lambda} = 0.10, \delta I_t = 0.10, t = 100$  秒の時の下限値。

図-7  $\lambda$  の分布に対する浸透量集約化指標の許容範囲。(a), (b), (c) はそれぞれ、異なる集約化条件に対する許容範囲である。また (1) は場合分け領域の配置を、(2) と (3) は浸透量集約化指標の上限と下限の等値線をそれぞれ表している。等値線は常用対数表示で、間隔は 0.25 である。

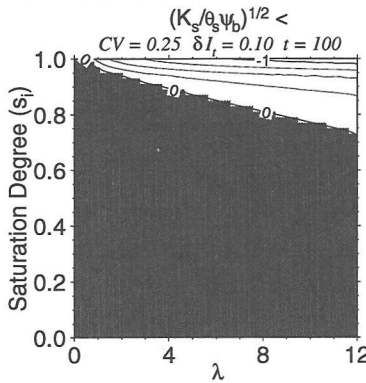
るものの、図-1からわずかに種類の土壌だけが集約できな



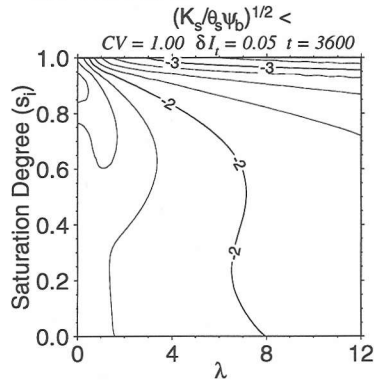
(b-1)  $CV_\lambda = 0.25, \delta I_t = 0.10, t = 100$  秒の時の場合分け毎の領域。



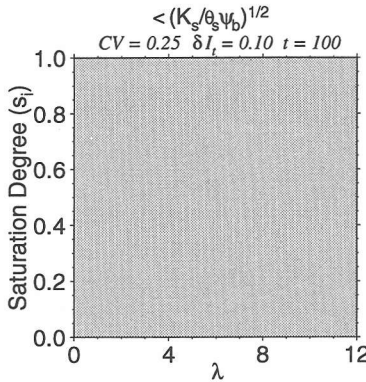
(c-1)  $CV_\lambda = 1.00, \delta I_t = 0.05, t = 3600$  秒の時の場合分け毎の領域。



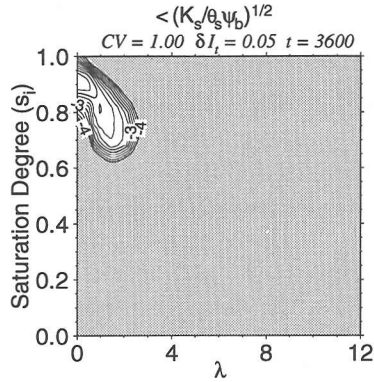
(b-2)  $CV_\lambda = 0.25, \delta I_t = 0.10, t = 100$  秒の時の上限値。



(c-2)  $CV_\lambda = 1.00, \delta I_t = 0.05, t = 3600$  秒の時の上限値。



(b-3)  $CV_\lambda = 0.25, \delta I_t = 0.10, t = 100$  秒の時の下限値。



(c-3)  $CV_\lambda = 1.00, \delta I_t = 0.05, t = 3600$  秒の時の下限値。

図-7 (つづき)  $\lambda$  の分布に対する浸透量集約化指標の許容範囲。

表-8 同一サイト内で観測された保水特性曲線  $\lambda$  の平均値  $\bar{\lambda}$  と変動係数  $CV_\lambda$ .  $N$  はサンプル数で, 文献については第一著者のイニシャルと西暦の下2桁で代表させている. \* は van Genuchten 式のパラメータ  $n$  から算定したものである.

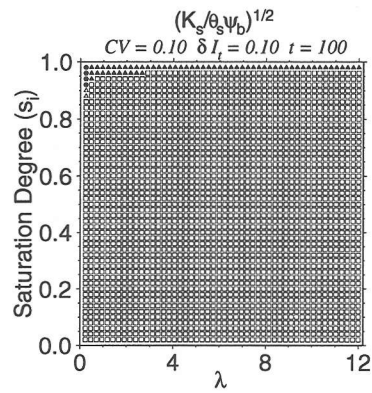
$\bar{\lambda}$	$CV_\lambda$	$N$	文献
0.400	0.110	205	N73 <sup>26)</sup>
0.470	0.100	225	C78 <sup>33)</sup>
1.413	0.128	52	H88 <sup>28)</sup> *
1.215	0.050	32	H88 <sup>28)</sup> *
1.811	0.015	417	R92b <sup>4)</sup> *
0.322	0.105	448	R96 <sup>32)</sup>

いだけで, それ以外はすべて集約化指標と  $\lambda$ ,  $s_i$  に関係無く集約化が可能と言える. 図-7 (c) は  $CV_\lambda = 1.00$ ,  $\delta I_t = 0.05$  と集約化条件を厳しくした場合である. この図では, 図-7 (a), (b) に存在する式 (34) の領域である□領域が消滅した代わりに, 式 (36) の領域である●領域が現れている. この領域だけに下限の等値線が現れて,  $10^{-3}$  程度である(図-7 (c-3)). 上限値の図の右下側の領域は  $10^{-2}$  程度以上であるが,  $s_i = 1.0$  近傍では上限が  $10^{-3}$  以下まで下がっている(図-7 (c-2)). 従って集約化条件が厳しい場合には土壌の集約化指標と  $\lambda$ ,  $s_i$  によって, 集約化の可否が敏感に定まると言える. 特に集約化が難しいのは  $\lambda$  によらず飽和に近い場合と, ●領域である.

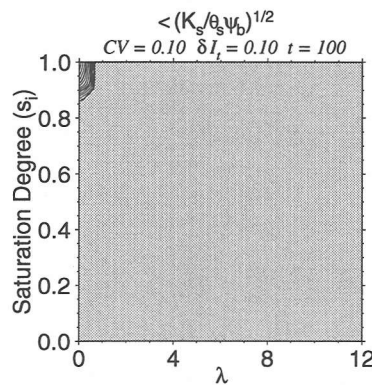
実際の同一土壌内での  $\lambda$  の変動に関する研究は極めて少ない. Brooks and Corey 式以外で良く用いられている水分保水特性曲線として van Genuchten 式  $\theta = (1 + \alpha|\psi|^n)^{-m}$  がある ( $\alpha, m, n$  はパラメータ). 十分に  $|\psi|$  が大きいときには, Brooks and Corey 式と一致し, 理論的に  $m = 1 - 1/n$ <sup>34)</sup> と示されるので,  $\lambda = n - 1$  という関係が得られる. この関係を用いれば,  $n$  の平均, 分散から,  $\lambda$  の平均, 変動係数も計算することができる. このようにして,  $n$  から求めた保水曲線パラメータ  $\lambda$  の平均値と変動係数をまとめたのが表-8である. これによれば,  $CV_\lambda = 0.02 \sim 0.15$  程度の値を取ることが分かる. 但し, 平均値が2以下の土壌しか無いという点ではデータに偏りがあることは否めない. 図-7 (a) を見れば分かるように,  $CV_\lambda = 0.10$  程度の時は, ほぼ図の全ての  $\lambda, s_i$  で集約化可能と言えるので, 表-8に掲げた観測結果については集約化が容易である.

### (5) 初期飽和度

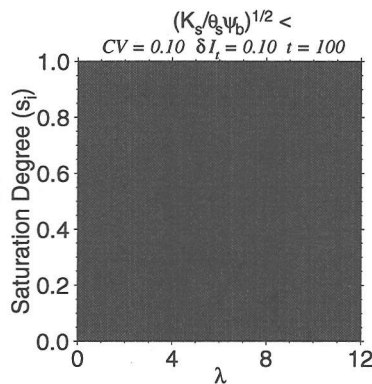
図-8は式 (21) から式 (24) を用いて,  $s_i$  の変動に対する集約化指標の上・下限値を図示したものである. この図中の (1)~(3) は図-7のものと同じく, 場合分けの配置, 許容範囲の上下限を表している.



(a-1)  $CV_{s_i} = 0.10$ ,  $\delta I_t = 0.10$ ,  $t = 100$  秒の時の場合分け毎の領域.



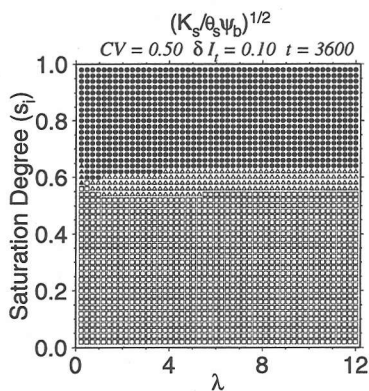
(a-2)  $CV_{s_i} = 0.10$ ,  $\delta I_t = 0.10$ ,  $t = 100$  秒の時の上限値.



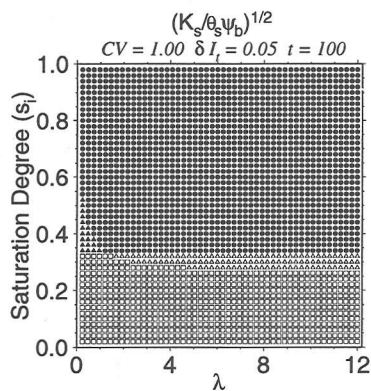
(a-3)  $CV_{s_i} = 0.10$ ,  $\delta I_t = 0.10$ ,  $t = 100$  秒の時の下限値.

図-8  $s_i$  の分布に対する浸透量集約化指標の許容範囲. (a), (b), (c) はそれぞれ, 異なる集約化条件に対する許容範囲である. また (1) は場合分け領域の配置を, (2) と (3) は浸透量集約化指標の上限と下限の等値線を, それぞれ表している. 等値線は常用対数表示で, 間隔は 0.25 である.

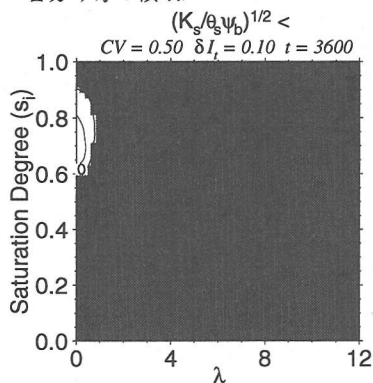
図-8 (a) は  $CV_{s_i} = 0.10$  の場合で, 殆んどが□領



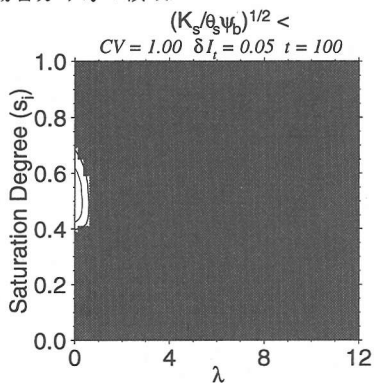
(b-1)  $CV_{s_i} = 0.50$ ,  $\delta I_t = 0.10$ ,  $t = 3600$  秒の時の場合分け毎の領域.



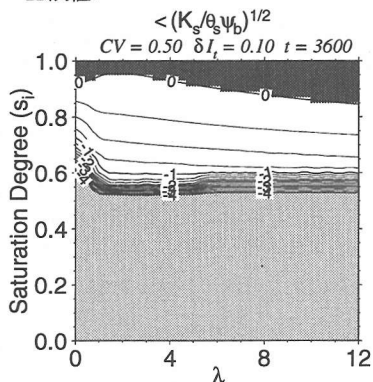
(c-1)  $CV_{s_i} = 1.00$ ,  $\delta I_t = 0.05$ ,  $t = 100$  秒の時の場合分け毎の領域.



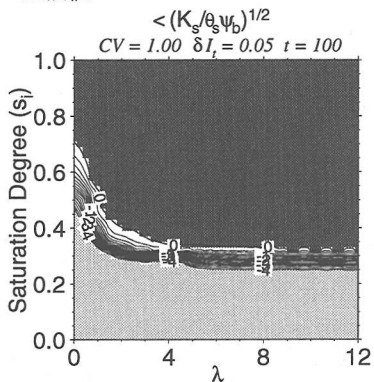
(b-2)  $CV_{s_i} = 0.50$ ,  $\delta I_t = 0.10$ ,  $t = 3600$  秒の時の上限値.



(c-2)  $CV_{s_i} = 1.00$ ,  $\delta I_t = 0.05$ ,  $t = 100$  秒の時の上限値.



(b-3)  $CV_{s_i} = 0.50$ ,  $\delta I_t = 0.10$ ,  $t = 3600$  秒の時の下限値.



(c-3)  $CV_{s_i} = 1.00$ ,  $\delta I_t = 0.05$ ,  $t = 100$  秒の時の下限値.

図-8 (つづき)  $s_i$  の分布に対する浸透量集約化指標の許容範囲.



域で(およそ  $s_i < 0.9$  の領域), 上限の図では等値線が  $(\lambda, s_i) = (0, 1)$  の周辺(●領域)のみに現れ(図-8(a-2)), 下限では全ての  $\lambda, s_i$  で集約化可能と言えるので(図-8(a-3)), ほとんどの場合, 集約化指標の値に関わらず集約化ができる。図-8(b)では  $s_i < 0.5$  の領域は□領域にはほぼ対応し, 土壌種類を問わず集約化できる。上限の等値線は  $(\lambda, s_i) = (0, 0.7)$  付近のみに現れ, 値は 10°程度であるので, 特殊な土壌かつ条件の場合以外は集約化指標の値には上限が無いと考えて良い(図-8(b-2))。下限については, 飽和付近の領域に集約化ができない暗い陰の部分が存在しており, 等値線が見られる  $s_i > 0.5$  の領域(ほぼ  $a_0 < 0$  の領域に対応し, ●領域と▲領域)では, 下限の等値線は  $\lambda$  によってはあまり変化せず,  $s_i$  によって変わり(図-8(b-3)), 湿潤になるほど集約化が難しいことが分かる。図-8(c)は  $CV_{s_i} = 1.00$  と変動係数が大きい場合である。上限については,  $(\lambda, s_i) = (0, 0.5)$  付近にのみ等値線が描かれるだけなので(図-8(c-2)), ほぼ集約化指標に対する上・下限値は無いと言える。下限については, 集約化ができない暗い陰領域(●領域に対応)と, 常に集約化が可能な明るい陰領域(□領域に対応)が共に現れている(図-7(c-3))。遷移領域である△領域と▲領域では等値線が非常に混んでおり, 集約化できるかどうかが集約化指標と  $\lambda, s_i$  によって峻別される領域と言える。

初期飽和度に対する変動係数を直接調べた研究は, 体積含水率の他に飽和体積含水率も計測しなくてはならないため, 殆んど見当たらない。4.で行なったように, 初期飽和度と飽和体積含水率に相関がないとすれば, 体積含水率の変動係数を初期飽和度の変動係数と考えて良い。

体積含水率の変動係数は, 領域の大きさやサンプリング密度に依存するが, ここでは一様な土地被覆で, およそ 100m 四方の領域で観測された変動係数の結果をまとめた(表-9)。

この表から平坦なところでは, 初期飽和度の変動係数は 0.3 以下であり, 土地起伏があると最大で 0.5 程度を取ることが分かる。ここで変動係数の最大値 0.54 に近い変動係数  $CV_\theta = 0.5$  の場合図-8(b), ●領域では許容範囲の下限が大きく, 集約化が難しいことが見て取れる。これは初期飽和度と飽和体積含水率とが独立な場合である。しかし, 実際には飽和度と平均値と変動係数は互いに独立ではないことが知られている。このことを考慮して, 表中の原著を見直すと, F93 と C92 では土壌が湿潤になるに連れ変動係数が小さくなり, F93 では  $s_i > 0.5$  で  $CV_\theta < 0.3$ , C92 では  $s_i > 0.5$  で  $CV_\theta < 0.2$ ,  $CV_\theta = 0.54$  の時は  $s_i = 0.25$  程度である。これと図-8(a), (b) から, F92 の領域, C92 の三つの領域では平均土壌水分量と変動係数の関係を考慮すれば湿潤な初

表-9 同一サイト内で観測された土壌水分量の変動係数 ( $CV_\theta$ )。この表には同一土地被覆でおよそ 100m 四方の領域を対象としたものを集めてある。N はサンプル数で, 文献については第一著者のイニシャルと西暦の下 2 桁で代表させている。

$CV_\theta$	N	文献
0.07~0.29	49	C92 <sup>35)</sup> (Flat)
0.07~0.54	49	C92 <sup>35)</sup> (Slope)
0.10~0.39	49	C92 <sup>35)</sup> (Valley)
0.10~0.30	77,70	F93 <sup>36)</sup>
0.10~0.20	15,21,98	S95 <sup>20)</sup>

期状態でも集約化指標に関係なく集約化が可能になる。S95 では変動係数が 0.1~0.2 程度で, 初期飽和度には依らないという。図は示さないが,  $\delta I_t = 0.10$ ,  $CV_\theta = 0.2$  の場合, 上限についてはほぼ  $\lambda, s_i$  によらないと言えるが, 下限についてはおよそ  $s_i > (2/70)\lambda + 0.8$  (ほぼ●領域に相当)の範囲で暗い陰の領域が現れてしまい, この領域のすべての土壌に対して集約化ができない。しかし, およそ  $s_i < (2/70)\lambda + 0.8$  の範囲であれば集約化指標と  $\lambda, s_i$  の組み合わせ次第で S95 でも集約化が可能ながある。

## 9. まとめ

本論文では, 水移動に関係する 5 つのパラメータ, 飽和透水係数, 空気侵入圧, 飽和体積含水率, 保水特性曲線パラメータ  $\lambda$ , 初期飽和度, それぞれに対するパラメータ平均法の集約化規範を導いた。すべてのパラメータについて, 集約化規範は仲江川ほかが提案した集約化指標に対する不等式として表すことができた。この規範は同値変形により, 変動係数に対する不等式としても表すことができる。ここでは扱わなかった複数の土壌から構成される領域での集約化では変動係数を非類似度としたクラスター分析の考え方をそのまま利用できる<sup>16)</sup>。

導出した浸透量に対する集約化規範を用いて, 与えられた条件の下, 同一サイト内で観測された 5 つの土壌パラメータの統計量を用いて, 分布量がフラックス算定に与える影響を検討したところ, 次のような結果が得られた。

- 飽和透水係数の変動係数は大きく, 集約化の可否は集約化指標と集約化条件に大きく依存する。
- 空気侵入圧の変動係数は十分小さく, 変動の影響は小さい。
- 飽和体積含水率の変動係数は小さく, また集約化規範も緩やかなので, ほとんどフラックス算定に対する影響がない。



- 保水特性曲線パラメータ  $\lambda$  の変動係数は小さく、あまりフラックス算定に影響を与えない。
- 初期飽和度の変動係数と平均値は独立ではないので、相互関係を考慮すれば、殆どの場合でフラックス算定の集約化が可能である。

以上から、集約化の決定因子としては、まず飽和透水係数が、次に初期飽和度が挙げられ、空気侵入圧、飽和体積含水率、保水特性曲線パラメータ  $\lambda$  については常にその平均値だけで、精度良く浸透量が算定されることが示された。今述べた結論から得られる重要な点は、集約化が可能な場合、水移動に関するパラメータが分布している領域で、浸透量を Richards 式を用いて数値的に解かねばならないときに、分布しているパラメータを個々に与えて計算し、その結果を平均することにより領域平均を算定する必要は無く、パラメータの平均値を用いて計算した結果でも十分精度良く領域平均を表しているという点である。例えば、既往の観測の結果を参考にする時に、平均値しか与えられていなくとも、パラメータ平均法で計算しさえすれば、飽和透水係数の変動係数が大きい場合を除き、十分な精度で領域平均浸透量が計算できる。もちろん、現実には平均値だけが得られる場合はあり得ず、平均値が求められるのであれば、当然変動係数も求められる。変動係数も利用できる場合はモーメント法により計算すれば領域平均浸透量のより良い推定値が得られる。

今後は、分布型流出モデルや、大気モデルの陸面過程サブモデルにこの集約化規範を用いて、最適な土壌パラメータを与えてその効果を検討する必要がある。

謝辞： この研究は文部省科学研究費奨励研究 (A) 「複数の土地被覆からなる領域の地表面熱収支の集約化に関する研究」(代表:東京大学生産技術研究所, 仲江川敏之) ならびに日本学術振興会 未来開拓研究推進事業「環境負荷の影響評価と軽減」(代表:東京大学生産技術研究所, 虫明功臣) の成果の一部である。ここに記して甚大なる謝意を表します。

最後に、本論文を査読して頂いた匿名の三名の方との有意義な議論により、論文が洗練されました。この場を借りてお礼申し上げます。

#### 参考文献

- Blöschl, G. and Sivapalan, M. : Scale issues in hydrological modelling: A Review. *Scale Issues in Hydrological Modelling*, (Ed. by J. D. Kalma and M. Sivapalan), pp. 9-48. Wiley, 1995.
- 仲江川敏之, 沖大幹, 虫明功臣 : Philip 式による浸透量の領域平均算定式と集約化規範の導出. *水工学論文集*, Vol.42, pp.175-180, 1998.
- 仲江川敏之, 沖大幹, Herath, A., 虫明功臣 : 集約化規範を用いた飽和透水係数のサンプルスケールが浸透量算定に及ぼす影響評価. *水工学論文集*, Vol.43, pp.109-104, 1999.
- Russo, D. and Bouton, M. : Statistical analysis of spatial variability in unsaturated flow parameters. *Wat. Resour. Resear.*, Vol.28, No.7, pp.1911-1925, 1992.
- Hoeksema, R. J. and Kitandis, P. K. : Analysis of the spatial structure of properties of selected aquifers. *Wat. Resour. Resear.*, Vol.21, No.4, pp.563-572, 1985.
- McCuen, R. H., Rawls, W. J., and Brakensiek, D. L. : Statistical analysis of the Brooks-Corey and the Green-Ampt parameters across soil texture. *Wat. Resour. Resear.*, Vol.17, No.r, pp.1005-1013, 1981.
- Warrick, A. W. and Nielsen, D. R. : Spatial variability of soil physical properties. *Applications of Soil Physics*, (Ed. by D. Hillel), pp. 319-324. Academic Press, New York, 1980.
- Smith, R. E. and Hebbert, R. H. B. : A Monte Carlo analysis of the hydrologic effects of spatial variability. *Wat. Resour. Resear.*, Vol.15, No.2, pp.419-429, 1979.
- Sivapalan, M. and Wood, E. F. : Spatial heterogeneity and scale in the infiltration response of catchments. *SCALE PROBLEMS IN HYDROLOGY*, (Ed. by V. G. Gupta, I. Rodriguez-Iturbe, and E. F. Wood), pp. 81-106. D. REIDEL PUBLISHING COMPANY, 1986.
- Nakaegawa, T., Oki, T., and Musiaka, K. : Development of regionally averaged Richard's equation and its application to the infiltration. *Proc. of the Int. Conf. on Water Resour. & Environ. Res.*, Vol. I, pp. 285-292. Water Resource Research Center, Kyoto University, Oct. 29-31 1996.
- Indelman, P. and Dagan, G. : Upscaling of permeability of anisotropic heterogeneous formations 1. the general framework. *Wat. Resour. Resear.*, Vol.29, No.4, pp.917-923, 1993.
- Indelman, P. and Dagan, G. : Upscaling of permeability of anisotropic heterogeneous formations 2. general structure and small perturbation analysis. *Wat. Resour. Resear.*, Vol.29, No.4, pp.925-933, 1993.
- Indelman, P. and Dagan, G. : Upscaling of permeability of anisotropic heterogeneous formations 3. applications. *Wat. Resour. Resear.*, Vol.29, No.4, pp.935-943, 1993.
- Chen, F. and Avissar, R. : The impact of land-surface wetness heterogeneity on mesoscale heat fluxes. *Journal of Applied Meteorology*, Vol.33, pp.1323-1394, 1994.
- Chen, F. and Avissar, R. : Impact of land-surface moisture variability on local shallow convective cumulus and precipitation in large-scale models. *Journal of Applied Meteorology*, Vol.33, pp.1382-1401, 1994.
- 仲江川敏之, 沖大幹, 虫明功臣 : 線形化モデルによる地表面熱フラックスの集約化 I: 領域平均地表面フラックス算定式と集約化規範の導出. *水文・水資源学会雑誌*, Vol.11, No.3, pp.201-209, 1998.
- Philip, J. R. and de Vries : Moisture movement in porous materials under temperature gradients. *American Geophysical Union*, Vol.38, pp.222-232, 1957.
- Eagleson, P. S. : Climate, soil and vegetation 3: Simplified model of soil moisture movement in the liquid phase. *Wat. Resour. Resear.*, Vol.14, No.5, pp.722-729, 1978.
- Bras, R. L. : *Hydrology : An introduction to hydrologic science*, chapter Flow in Unsaturated Porus Media and

- Infiltration, p. 360. Addison-Wesley Publishing, 1990.
- 20) 砂田憲吾, 伊藤強, 宮野裕二: 裸地表層土壤水分の空間分布特性. 水文・水資源学会, Vol.8, No.2, pp.220-216, 1995.
  - 21) 仲江川敏之: Philip 式による浸透量の領域平均算定式と集約化規範の導出 -Philip 式の Taylor 展開 -, 1998. <http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/~tosi/Research/macro/philip.html>.
  - 22) Mualem, Y.: A catalogue of the hydraulic properties of unsaturated soils. Technical report, Israel Institute of Technology, 28-70, 1976.
  - 23) 小杉賢一朗: 対数正規分布モデルを用いた土壌の水分特性曲線の解析. Master's thesis, 京都大学, 1993.
  - 24) Kosugi, K.: Three-parameter lognormal distribution model for soil water retention. *Wat. Resour. Resear.*, Vol.30, No.4, pp.891-901, 1994.
  - 25) Willardson, L. S. and Hurst, R. L.: Sample size estimates in permeability studies. *J. Irr., ASCE*, Vol.91, pp.1-9, 1965.
  - 26) Nielsen, D. R., Biggar, J. W., and Erh, K. T.: Spatial variability of field-measured soil water properties. *Hilgardia*, Vol.42, No.7, pp.215-259, 1973.
  - 27) Gumma, G. S.: *Spatial variability of in situ available water*. PhD thesis, The Univ. of Arizona, Tucson, Arizona, 1978.
  - 28) Hopmans, J. W., Schukking, H., and Torfs, P. J. J. F.: Two-dimensional steady state unsaturated water flow in heterogeneous soils with autocorrelated soil hydraulic properties. *Wat. Resour. Resear.*, Vol.24, No.12, pp.2005-2017, 1988.
  - 29) Russo, D.: Upscaling of hydraulic conductivity in partially saturated heterogeneous porous formation. *Wat. Resour. Resear.*, Vol.28, No.2, pp.397-409, 1992.
  - 30) Ragab, R. and Copper, J. D.: Variability of unsaturated zone water transport parameters: implications for hydrological modelling. 1. in situ measurements. *J. Hydrol.*, Vol.148, pp.109-131, 1993.
  - 31) Kumar, A., Kanwar, R. S., and Hallberg, G. R.: Modelling spatial variability of saturated hydraulic conductivity using Fourier series analysis. *Hydrol. Sci. J.*, Vol.39, No.2, pp.143-156, 1994.
  - 32) Rockhold, M. L. and Rossi, R. E.: Application of similar media scaling and conditional simulation for modeling water flow and tritium transport at the Las Cruces Trench Site. *Wat. Resour. Resear.*, Vol.32, pp.595-609, 1996.
  - 33) Cameron, D. R.: Variability of soil water retention curves and predicted hydraulic conductivity in a small plot. *Soil Sci.*, Vol.126, pp.364-371, 1978.
  - 34) van Genuchten, M. T.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of American Journal*, Vol.44, pp.892-898, 1980.
  - 35) Charpentier, M. A. and Groffman, P. M.: Soil moisture variability within remote sensing pixels. *J. Geophys. Res.*, Vol.D17, pp.18,987-18,995, 1992.
  - 36) 湖上吾郎, 仲江川敏之, 沖大幹, 虫明功臣: 土壌水分サンプリングデータの空間代表性. 水工学論文集, Vol. 37, pp. 849-852, 1993.

(1998. 12. 24 受付)

## AGGREGATION OF DISTRIBUTIONS OF INFILTRATION PARAMETERS USING ITS AGGREGATION CRITERIA DERIVED FROM PHILIP'S EQUATION

Tosiyuki NAKAEGAWA, Taikan OKI and Katumi MUSIAKE

This paper explores aggregation of the total infiltration in an inhomogeneous area where infiltration parameters are distributed. The aggregation criteria of the infiltration are introduced based on Philip's equation for five parameters and they are expressed as an inequality of second polynomials of the aggregation index for infiltration introduced here. Using these criteria, the aggregation of the distributing parameters was conducted respectively. Observed hydraulic conductivity and initial saturation degree are difficult to aggregate by the mean parameter method, however the mean values of the other parameters provide better results without taking into account of the distributions.