J. Jpn. Soc. Soil Phys., March 2013, Vol. **123**, 65−71

論文
Original Paper

土壌の通気メカニズムにおける二領域モデルとパーコレーション理論の関係

深田耕太郎[1]・中村公人[2]

Relationship between two−region model and percolation theory for mechanisms of air flow in soils

Kotaro FUKADA[1] and Kimihito NAKAMURA[2]

Abstract：Applying percolation theory to air flow in soil is suggested. A two−region model indicated the applicability of the theory but the model−theory relationship is not clear. We have therefore tried to settle this issue so as to explain air flows in soils from the standpoint of air phase continuity. For experimental input, Tottori Dune sand was used to obtain a suitable measure of air content and air conductivity. Dividing the air content into two regions based on the boundary where the continuous air content equals the total air content, we invoked a power law to develop a relationship between continuous air content and air conductivity. We found that each region developed different values for the power index, indicating different airflow mechanisms. Near the critical point, the power index was 2.12 ± 0.40, which agrees with percolation theory. However, the power index also featured a component of 1.72 ± 0.15, more related to air connectivity.
KeyWords：acoustic measurement, critical point, power law, air conductivity, continuity

1. はじめに

地球温暖化への関心が高まり，その原因とされる温室効果ガスの，土壌中における挙動が注目されている．通気係数とガス拡散係数は，ガスの挙動を記述するパラメータである．そして，これらと気相率の関係は間隙の構造や土性を反映する．特に通気係数は，拡散係数に比べて気相の連続性，すなわち，気相が土壌中の二地点をつなぐことの影響を強く受ける（Moldrup et al., 2003）．そのため，気相の連続性という視点で土壌の通気メカニズムを理解することは重要である．

Demond and Roberts（1993），Dury et al.（1999）は既往の通気係数のモデルをまとめている．例えば，Pirson（1958）のモデルは，

$$k \sim (p - p_c)^2 \tag{1}$$

である．ここで，k は通気係数（cm s^{-1}），p は全気相率（%），p_c は通気性の生じる気相率（%）である．また，“〜”は比例関係を表す．式（1）は，べき乗則，あるいはArchie の法則（Archie, 1942；Hunt, 2004b；Hamamoto et al., 2011）とも呼ばれる．Wyllie（1962）のモデルは式（1）で指数を 3 に変えたものである．他に，Brooks and Corey−Burdine のモデル（Brooks and Corey, 1966；Burdine, 1953）は，$s = p - p_c$ として，

$$k \sim s^2[1 - (1-s)^{(2+\lambda)/\lambda}] \tag{2}$$

と書ける．$p \cong p_c$ のとき，$s \cong 0$ より大括弧内の二項目を展開できて，

$$\begin{aligned} k &\sim s^2[1 - (1 - \{(2+\lambda)/\lambda\} s)] \\ &\sim s^3 \\ &\sim (p - p_c)^3 \end{aligned} \tag{3}$$

が近似的に成り立つ．つまり，式（2）は気相率の小さい範囲で Wyllie（1962）のモデルと一致し，気相率の大きい範囲で同モデルから離れる．このことから，べき乗則が気相率の小さい範囲ですべてのモデルに共通していることが分かる．

上記のモデルでは，気相率全体を一つのモデルで表している．しかし Moldrup et al.（2003）は，実験で得た気相率と通気係数の関係から，気相率を二つの範囲に分けることで，両者の関係がより明確になると指摘した．このような考えは二領域モデルと呼ばれる．Hamamoto et al.（2011）は，同様の実験結果に対して二領域モデルを適用し，有効性を示している．

一方，Hunt（2005）は，土壌の気相率と通気係数の関係がパーコレーション理論の予測とある程度一致することを示した．パーコレーション理論は，臨界現象と呼ばれる一連の物理現象を，連続性という視点から説明するものである．その適用例の一つに，通気係数と気相率の関係に対する指数 2 のべき乗則がある（2 章参照）．

[1] Faculty of life and environmental science, Shimane University, Nishikawatsu−cho, Matsue city, Shimane prefecture, 690−8504, Japan. Corresponding author：深田耕太郎，[1]島根大学生物資源科学部
[2] Graduate school of agriculture, Kyoto University, Kitashirakawa Oiwake−cho, Sakyo ward, Kyoto prefecture, 606−8502, Japan.
2012 年 6 月 27 日受稿，2012 年 11 月 19 日受理
土壌の物理性 123 号，65−71（2013）

ただしこの関係は，通気性が発現する気相率の近傍，つまり臨界点の近傍で適用されるもので，気相率全体にわたって適用されるとは限らない．

以上をまとめると，土壌物理学で独自に発展した通気係数のモデルや二領域モデルはいずれも，一つのべき乗則が成り立つ気相率の範囲は全範囲の一部であることを示している．そして，パーコレーション理論の観点から見ると，その一部の気相率範囲が臨界現象として理解できる領域にあたると考えられる．パーコレーション理論を利用することで，二領域モデルに物理的な意味を与え，土壌の通気メカニズムを連続性という視点から説明できる可能性がある．しかし，二領域モデルとパーコレーション理論の関係は議論されたことがない．

パーコレーション理論は，臨界点に近づく場合の系のふるまいに注目するため，適用範囲を指定するものではない．ところが，上記のように，臨界点の近傍が気相率の範囲の一部と考えられる場合には，具体的な適用範囲が問題となる．そこで，本論文における臨界点近傍を，通気性が発現してからすべての気相が連続するまでの気相率範囲と定義する．パーコレーション理論より，この範囲では一つのべき乗則が成り立つことが予想される．本研究では，この範囲の特定を目的の一つとする．

臨界点は，通気性と気相率の関係などに関数を当てはめたときのフィッティングパラメータとして扱われることが多い．この方法で求められたものの中で，土壌中の溶質の拡散に関する臨界点については，土壌の表面積（Moldrup et al., 2001）や，粘土と有機物量（Moldrup et al., 2007）と関係があることが分かっている．一方，Stonestrom and Rubin（1989b）は，Oakley Sand の通気性が発現，または消失する臨界点を通気試験から求め，全気相率 1 ～ 16% の範囲にあると報告した．また，Stonestrom and Rubin（1989a）は，連続気相率の測定によって，封入空気の存在する全気相率を最大 17 %程度と報告している．したがって，この場合の臨界点近傍は全気相率 1 ～ 17 % となる．

音響法は，大気と連続した気相の量や通気性を評価する方法である（深田ら，2010）．その測定対象に封入空気が含まれないため，連続気相率は重量法による全気相率と必ずしも一致しない．しかし，両者が一致すれば封入空気がないことが分かる．したがって，上記の定義における臨界点近傍は，音響法と重量法の結果が一致しない全気相率範囲として求めることができる．また，気相率と通気性の関係に，一つのべき乗則が成り立つという性質を利用するために，音響法による連続気相率と通気性の関係を調べることも，臨界点近傍の特定に有効と考えられる．以上より本研究では，音響法の測定結果をもとに臨界点近傍を推定し，二領域モデルの一部がパーコレーション理論の適用範囲であることを明らかにすること，および，土壌の通気メカニズムを連続性の視点から説明することを目的とする．

2. パーコレーション理論

パーコレーション理論は，ランダムに配置された要素間のつながりによって系全体のふるまいを記述する確率理論である．濃度が低いと要素はばらばらに散っているが，濃度の上昇により，各要素は連続するようになる．そして，濃度がある臨界点を超えたとき，要素のつながりは系全体に広がることになる．このイメージが，臨界現象と呼ばれる一連の自然現象を定性的に説明する．その例は，相変化（Stauffer and Aharony, 1994），導体と絶縁体の混合物における電気伝導の発現（Last and Thouless, 1971；Kirkpatrick, 1973），氷中における水の流れの発現（Golden et al., 1998），土壌中における空気の流れの発現（Hunt, 2004b；2005）などである．これらの現象に共通するのは，濃度，温度，気相率などがある臨界点を超えると，水が氷る，不導体が導体になるというように，系全体の性質が変わるというものである．

臨界点近傍では，系全体に広がる連続した要素の集合（浸透クラスター）の他に，大小さまざまなクラスターが存在する．これは，試料の両端を連続する気相，試料内で途切れる気相，そして封入空気が存在することに対応する．したがって，ここでは，気相の一部しか流れに寄与しないような状況を考えている．

パーコレーション理論の特徴は，べき乗則と臨界指数の普遍性にある．例えば，土壌の通気性に関して以下の式が成り立つ．

$$k \sim (p - p_c)^t \tag{4}$$

ここで，t は物質の移動度に関する臨界指数（無次元）である．t の値は理論的に $1 \le t \le 2$ であり（Golden, 1990；1997），数値シミュレーションの結果（Gingold and Lobb, 1990; Berkowitz and Balberg, 1992；Clerc et al., 2000）と合わせて，3 次元格子の場合，正確に 2 と考えられている．p_c は要素を配置するための格子の種類によるが，t=2 は格子によらない．これを土壌の通気性に置き換えてみると，臨界点近傍では，t=2 のべき乗則は土性によらず普遍的なもので，土性の違いは p_c の値に現れるということになる．Moldrup et al.（2003）は土性の異なる複数の試料を用いて $k \sim p^t$ の適合性を検証し，土性によらず t=2 が妥当であることを示した．p_c=0 ならば，この結果はパーコレーション理論の実験による検証である．また，Archie（1942），Hamamoto et al.（2010）は，砂質土の電気伝導度と溶液の体積割合が t=2 のべき乗則にしたがうことを示している．

クラスターの構造を表すパラメータの一つに，相関距離がある．これは，平均的なクラスターの差し渡しの長さといわれる．例えば，臨界点では浸透クラスター内の要素を一つ取り除くと，系全体に広がる連続性が切れてしまう．したがって，相関距離は系の大きさとなる．このように，相関距離は連続性の影響が及ぶ長さの目安を与える．

パーコレーション理論では，移動度や相関距離の他にも複数のパラメータを扱う．そして，それぞれのパラメータに臨界指数が存在し，それらの間にある関係式が成り立つと考えられている．Hunt and Ewing（2009）は t に関して以下の式を提案した．

$$t = 2\nu + (D_{\min}\nu - \nu) \quad (5)$$

ここで，ν は相関距離に関する臨界指数（0.88），$D_{\min}$ は通気経路のフラクタル次元（1.37）である．相関距離は連続性の影響が及ぶ長さであり，その二乗は連続性の影響が及ぶ面積を表す．したがって，その逆数は，連続性に影響を及ぼす要素の面積密度である．このような考えから，式（5）の 2ν（=1.76）が連続した通気経路の数に関する臨界指数と解釈できる．そして，残りの $D_{\min}\nu - \nu$（=0.33）が経路の屈曲度に関する臨界指数と解釈できる．これらの値を 4.2 節で用いる．

以上がパーコレーション理論の枠組みである．本研究では，その適用が臨界点近傍に限られるという性質を利用する．しかし，本研究のアプローチとは別に，パーコレーション理論の枠組みを拡張することで，臨界点から離れた領域を含む全領域に対して，移動度を説明する試みもある．その場合は，本章で述べた概念全体を特にスケーリングと呼ぶ．二つのアプローチは，異なる通気メカニズムが支配的となる二領域を考えるという点で同じである．しかし，本研究では，二領域の境界を実験によって明らかにするのに対し，拡張したパーコレーション理論では二領域の境界も理論によって与えられる．土壌物理の分野では，水分特性曲線（Hunt, 2004a）や透水係数と体積含水率の関係（Ghanbarian-Alavijeh and Hunt, 2012）に対し，拡張したパーコレーション理論の適用が検討されている．

3. 方法

土壌試料として，鳥取砂丘砂を 1 ～ 15 % の所定の含水比に調整したものを用いた．これらを内径 5 cm，長さ 2.5 cm のステンレス製円筒容器に 2，3 回に分けて締固め，表面を整形した．試料数は 114 個，乾燥密度は 1500 ～ 1590 kg m^{-3}，土粒子密度は 2660 kg m^{-3}，間隙率は 40 ～ 42 % である．

深田ら（2010）の方法により，土壌試料の表面音響インピーダンスを測定し，試料表面と連続した気相の体積割合（連続気相率）v（%）を求めた．同様に，表面音響インピーダンス測定から振動抵抗を求め，ダルシー則によって通気係数の次元に変換し，κ（cm s^{-1}）とした．次に Grover（1955）の方法により試料に空気を流し，フラックスと圧力水頭の測定から通気係数 k（cm s^{-1}）を求めた．κ については，行き止まり（dead end）の気相についても通気しているとみなしてしまうため，k よりも高めの値となる可能性がある．このような物理性を用いるのは，v との関係や，k との比較から，臨界点近傍の特定に利用できると考えられるためである．

最後に試料を炉乾燥し，全気相率 p（%）を求めた．p と v の関係から p_c を求め，$p=v$ を基準に v を二領域に分けた（4.1 節）．そして，v と k，v と κ の各対数値に対して線形回帰を行い，べき指数の推定値と 95 % 信頼区間を求めた．それらを以降の章で 2.12 ± 0.40 のように表す．また，v 全範囲を一領域として同様の計算を行い，二領域の場合と比較した．

4. 結果と考察

4. 1 臨界点近傍の推定

Fig. 1 は p と v の関係を示したものである．$p \leq 23$ % で $v \leq p$，$p \geq 23$ % で $v=p$ となっている．この図は気相率の増加によって連続気相率が増加し，23 % 以上で気相全体が連続したことを示している．

$p \geq 23$ % は気相がすべて連続しているため，明らかに臨界点から離れている．また，$p=20$ % 付近で v のばらつきが大きい．これは，臨界点近傍では大小様々の連続気相のクラスターが形成されることで，連続気相率として 0 から 20 % までのあらゆる値をとる可能性があるためと考えられる．以上より，二領域の境界として $p=20$ ～ 23 % のどこかに設定するのが妥当と判断した．そこで本研究では，$p < 21.4$ %（$v < 20$ %）を臨界点近傍（試料数 62）とし，$p > 21.4$ %（$v > 20$ %）を臨界点から離れた領域（試料数 52）として区別する．

$p < 21.4$ % における p と v の関係は線形性が強い．そこで，Fig. 1 に回帰直線を示した．ただし，$p > 23$ % で $v=p$ となることを考慮し，$p=v=23$ % を与えた．結果は，

$$v = 2.1(p - 12.0) \quad (6)$$

となった．

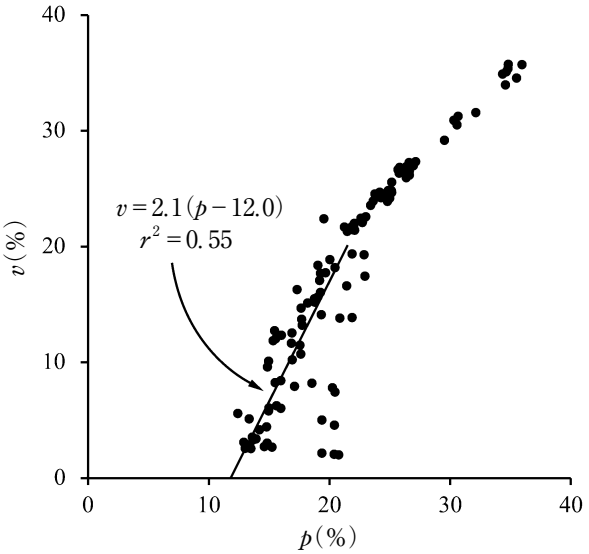


Fig. 1　全気相率 p と連続気相率 v の関係．
Relationship between total air content p and continuous air content v.

4. 2 パーコレーション理論と二領域モデルの適用

Fig. 2 は各領域に対して v と k の関係を示したものである．Fig. 2（b）は両対数軸による表示である．合わせて，べき関数 $k \sim v^x$ を当てはめた結果を示した．当てはめは，一領域の場合と v=20 % を境界とした二領域の場合でそれぞれ行った．また，指数 x，決定係数 r^2，および，条件付き標準偏差 $s_{\log k|\log v}$ の値を Table 1 にまとめた．一領域と二領域の場合を比べてみると，一領域における指数は二領域における二つの指数の中間的な値で，推定幅は二領域より小さい．また，決定係数は一領域の方が大きい．これらは，領域が広がることで log k と log v の線形な相関の程度が増したためである．一方，一領域における条件付き標準偏差は，v < 20 % の場合より若干小さく，v > 20 % の場合よりも大きい．これは，一領域の場合の回帰直線と測定値の差が v > 20 % において大きくなることを示している．

二領域の場合，式（6）を用いると，v < 20 % において，

$$k \sim v^{2.12 \pm 0.40} \sim (p - p_c)^{2.12 \pm 0.40} \quad (7)$$

である．ここで，p_c = 12.0 % である．また，v > 20 % においては，p=v であるから，

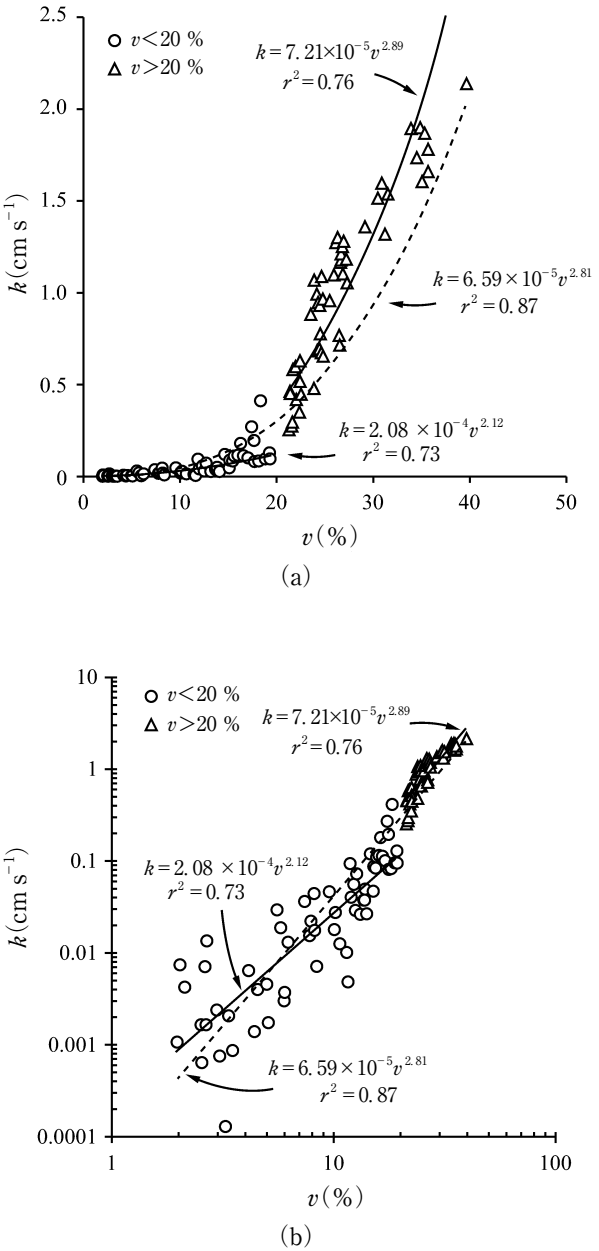


Fig. 2 連続気相率 v と通気係数 k の関係 (a) 線形グラフ表示 (b) 両対数グラフ表示.
Relationship between continuous air content v and air conductivity k (a) linear plot (b) double logarithmic plot.

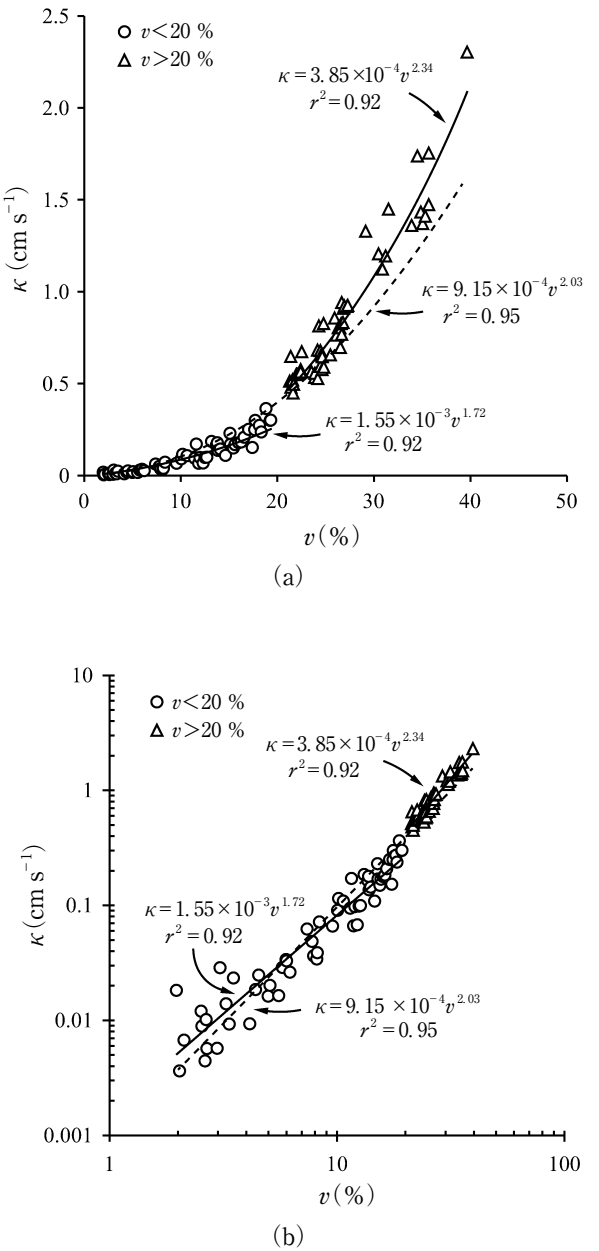


Fig. 3 連続気相率 v と連続気相の通気性 κ の関係 (a) 線形グラフ表示 (b) 両対数グラフ表示.
Relationship between continuous air content v and permeability for continuous air κ (a) linear plot (b) double logarithmic plot.

Table 1　log v と log k，log v と log κ に対する線形回帰分析．v は連続気相率，k は通気係数，κ は連続気相の通気性，x はべき指数，r^2 は決定係数，$s_{\log k|\log v}$ と $s_{\log \kappa|\log v}$ は条件付き標準偏差．± によって x の 95 % 信頼区間を表す．
Linear regression analysis to log v-log k plots, and log v-log κ plots. v is continuous air content, k is air conductivity, κ is permeability for continuous air, x is power index, r^2 is determination coefficient, and $s_{\log k|\log v}$ and $s_{\log \kappa|\log v}$ is conditional standard deviation. ± stands for 95 % confidence interval for x.

			x	r^2	$s_{\log k\|\log v}$ $s_{\log \kappa\|\log v}$
$v-k$ (Fig. 2)	一領域		2.81 ± 0.23	0.87	0.37
	二領域	$v<20$ %	2.12 ± 0.40	0.73	0.40
		$v>20$ %	2.89 ± 0.52	0.76	0.12
$v-\kappa$ (Fig. 3)	一領域		2.03 ± 0.10	0.95	0.15
	二領域	$v<20$ %	1.72 ± 0.15	0.92	0.16
		$v>20$ %	2.34 ± 0.21	0.92	0.05

$$k \sim v^{2.89 \pm 0.52} \sim p^{2.89 \pm 0.52} \tag{8}$$

となる．二領域に分けたにもかかわらず x の二つの推定範囲は一部重なっている．つまり，二つのべき指数からは二領域の存在が明らかでない．しかし，$t=x$ とすると，2.12 ± 0.40 はパーコレーション理論の予測（$t=2$）を含むことから，二領域の境界は妥当と考えられる．

Fig. 3 は v と κ の関係を示したものである．Fig. 3 (b) は両対数軸による表示である．また，関係する同様の統計値を Table 1 にまとめた．一領域と二領域の統計値の傾向は v と k の関係で得たものと同様である．Fig. 3 と Fig. 2 を比べてみると，Fig. 3 の方がばらつきが小さい．それは Table 1 において決定係数が高く，条件付き標準偏差が小さいことに表れている．これから，v は k よりも κ をよく説明するといえる．これは，v と κ の両方が音響測定で得られたものであり，測定対象が同一なためである．べき関数 $\kappa \sim v^x$ を当てはめた結果，$v < 20$ % で $x=1.72 \pm 0.15$, $v > 20$ % で $x=2.34 \pm 0.21$ となった．したがって式（6）より，$v < 20$ % において，

$$\kappa \sim v^{1.72 \pm 0.15} \sim (p - p_c)^{1.72 \pm 0.15} \tag{9}$$

である．また，$v > 20$ % において，

$$\kappa \sim v^{2.34 \pm 0.21} \sim p^{2.34 \pm 0.21} \tag{10}$$

となる．1.72 ± 0.15 は 2 より小さく，気相の連続性の寄与とされる 1.76（Hunt and Ewing (2009)，第 2 章参照）に近い．$v < 20$ % における κ の指数が連続性による寄与とする解釈は妥当と考えられる．なぜなら音響測定の対象とする気相は，試料の片面を通して大気と連続しているため，行き止まりのように通気試験では評価されない気相も含めて，すべて流れているように評価するからである．したがって，通気性に関する臨界指数を 2 とすると，そのうち 1.72 が連続性の寄与であり，残り 0.28 は行き止まりの効果と考えられる．

各領域における指数（1.72 ± 0.15 と 2.34 ± 0.21）は重ならないため，明らかに v の範囲によって二つの領域が存在している．$v < 20$ % は気相の連続性の拡大によって通気性が増加する領域である．一方，$v > 20$ % は Fig. 1 より全気相が連続している領域であり，別の増加メカニズムが働くと考えられる．実際の土壌に近いイメージでは，全気相が連続した後も，気相率の増加にともない，水分を保持していた微細な間隙が通気経路となることで通気性が増すといった状況が考えられる．それを，より単純な円管束モデルで考えてみる．円管束の通気性が増すには，円管の数が増えるか断面積が増えるかしなければならない．例えば，一本の経路を 2 本にした場合と径を $\sqrt{2}$ 倍にした場合では，どちらも v は 2 倍になる．しかしフラックスは径の 4 乗に比例して増加するため，κ は前者の場合 2 倍になるが，後者では 4 倍になる．したがって，べき指数は前者が 1 に対して後者は 2 となる．このような簡単なモデルからべき指数の変化を説明できる．しかし，実験から得られたべき指数の差は $2.34 - 1.72 = 0.62$ であり，円管モデルの場合の差 $2 - 1 = 1$ より小さい．これは，気相の増加分が一部，行き止まりの解消に消費されているためと考えられる．以上から，通気係数の増加メカニズムに対して，気相率の増加に伴い，気相が連続し，通気経路の数を増やすことで通気性を増し（$v < 20$ %），すべてが連続した後，行き止まりの解消と径の拡大によって通気性を増す（$v > 20$ %）というイメージを考えることができる．$v > 20$ % におけるべき指数は，この領域がパーコレーション理論の適用から外れると考えられるため，土性によって異なる値を示す可能性がある．

最後に，k と κ の比較から二領域の違いを考察する（Fig. 4）．図からは，v < 20 % において κ /k の最大値が大きくなる傾向がみられる．深田ら（2010）より，κ には，音響インピーダンスの測定精度に起因する3倍程度の測定誤差がある．そして，k は連続気相の一部が行き止まりによって通気に寄与しないことで，κ よりも小さくなる可能性がある（3章参照）．これらを考慮すると，Fig. 4 は Figs. 1 ～ 3 と同様，気相率の増加とともに，気相が連続し，行き止まりの影響が無くなったことを示す図と見ることができる．v < 20 % のように，連続気相がどこかで途切れるような領域では，同じ連続気相率でも試料が短いほど k = κ となる可能性が高く，長いほど k が小さくなる可能性が高いと考えられる．このような通気係数と試料長さの関係を調べた研究は少ない．しかし，ある二地点間の通気性を，それより短い試料の通気性で評価するような場合に興味ある課題となる可能性がある．

本研究では，土壌の通気性を連続気相率の範囲によって二領域に分けることで，異なるべき乗則が成り立つことを示した．その一つはパーコレーション理論の予測とある程度一致した．したがって，臨界点近傍と臨界点から離れた領域の存在が明らかとなった．砂丘砂の場合，二領域の存在は明確である．しかし，臨界点が土性に依存する可能性（Moldrup et al., 2001；2007）を考えると，臨界点近傍を表す気相率範囲も土性に依存する可能性は高い．したがって，様々な土壌の臨界点近傍を特定し，粒度分布や水分特性曲線に関するパラメータとの関係を調べることは，土壌の気相構造を理解するのに役立つと考えられる．また本研究では，音響法で得られる通気性パラメータ κ によって臨界指数 1.72 が得られ，これが Hunt and Ewing（2009）の関係式を裏付けた．土壌の通気性とパーコレーション理論との関連においてこのようなアプローチの仕方はこれまでになく，新しい視点といえる．

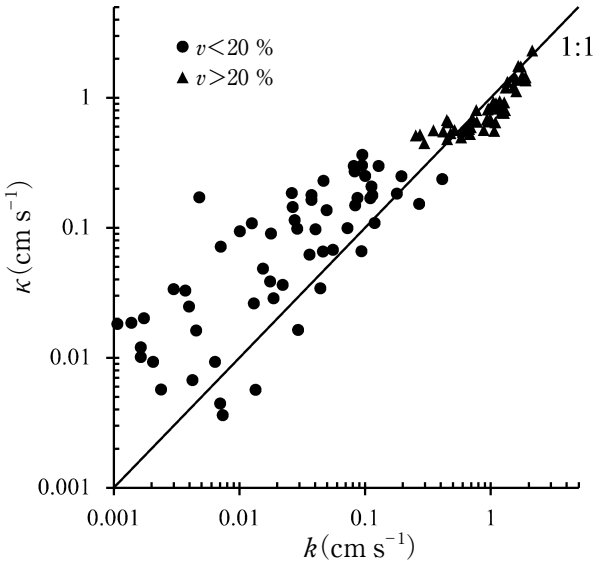


Fig. 4 通気係数 k と連続気相の通気性 κ の関係.
Relationship between air conductivity k and permeability for continuous air κ.

5. 結論

鳥取砂丘砂の通気係数と連続気相率の関係は，連続気相率の範囲によって二つの領域に分けられ，それぞれは異なるべき関数で表される．領域の境界はおよそ連続気相率が 20 % の所で，それより小さい領域はパーコレーション理論の適用が可能な臨界点近傍であり，指数2のべき乗則が成り立つ．もう一つの領域は連続した気相が径の拡大によって通気性を増す領域と考えられる．指数2のうち，およそ 1.72 が気相の連続性によって生じる通気性を表し，残り 0.28 が，気相の行き止まりの効果を表すと考えられる．

引用文献

Archie, G. E.（1942）：The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. Trans. Am. Inst. Mech. Eng., 146：54–61.
Berkowitz, B. and Balberg, I.（1992）：Percolation approach to the problem of hydraulic conductivity in porous media. Transp. Porous Media, 9：275–286.
Brooks, R. H. and Corey, A. T.（1966）：Properties of porous media affecting fluid flow. J. Irrig. Drain. Div.（ASCE）,92：61–89.
Burdine, N. T.（1953）：Relative permeability calculations from pore size distribution data. Trans. AIME, 198：71–77.
Clerc, J. P., Podolskiy, V. A. and Sarychev, A. K.（2000）：Precise determination of the conductivity exponent of 3D percolation using exact numerical renormalization. Eur. Phys. J. B, 15：507–516.
Demond, A. H. and Roberts, P. V.（1993）：Estimation of two–phase relative permeability relationships for organic liquid contaminants. Water Resour. Res., 29：1081–1090.
Dury, O., Fischer, U. and Schulin, R.（1999）：A comparison of relative nonwetting–phase permeability models. Water Resour. Res., 35：1481–1493.
深田耕太郎，三野徹，中村公人（2010）：音波の共鳴現象を利用した砂の連続空気量と通気係数の測定．土壌の物理性，115：3–13.
Ghanbarian–Alavijeh, B. and Hunt, A. G.（2012）：Unsaturated hydraulic conductivity in porous media：Percolation theory. Geoderma, 187：77–84.
Gingold, D. B. and Lobb, C. J.（1990）：Percolative conduction in three dimensions. Phy. Rev. B, 42：8220–8224.
Golden, K.（1990）：Convexity and exponent inequalities for conduction near percolation. Phys. Rev. Lett., 65：2923–2926.
Golden, K. M.（1997）：Critical behavior of transport in lattice and continuum percolation models. Phys. Rev. Lett., 78：3935–3938.
Golden, K. M., Ackley, S. F., and Lytle, V. I.（1998）：The percolation phase transition in sea ice. Science, 282：2238–2241.
Grover, B. L.（1955）：Simplified air permeameters for soil in place. Soil Sci. Soc. Proc., 19：414–418.
Hamamoto, S., Moldrup, P., Kawamoto, K., and Komatsu, T.（2010）：Excluded–volume expansion of Archie's law for gas and solute diffusivities and electrical and thermal conductivities in variably saturated porous media. Water Resour. Res., 46：W06514.
Hamamoto, S., Moldrup, P., Kawamoto, K., Schjønning, P., and Komatsu, T.（2011）：Two–region extended Archie's law model for soil air permeability and gas diffusivity. Soil Sci. Soc. Am. J., 75：795–806.

Hunt, A. G.（2004a）：Comparing van Genuchten and percolation theoretical formulations of the hydraulic properties of unsaturated media. Vadose Zone J., 3：1483–1488.
Hunt, A. G.（2004b）：Continuum percolation theory and Archie's law. Geophys. Res. Lett., 31：L19503.
Hunt, A. G.（2005）：Continuum percolation theory for saturation dependence of air permeability. Vadose Zone J., 4：134–138.
Hunt, A. and Ewing, R.（2009）：Percolation theory for flow in porous media, 2nd ed, Lect. Notes Phys. pp. 37–43, Springer, Berlin Heidelberg.
Kirkpatrick, S.（1973）：Percolation and conduction. Rev. Mod. Phys., 45：574–588.
Last, B. J. and Thouless, D. J.（1971）：Percolation theory and electrical conductivity. Phys. Rev. Lett., 27：1719–1721.
Moldrup, P., Olesen, T., Komatsu, T., Schjønning, P., and Rolston, D. E.（2001）：Tortuosity, diffusivity, and permeability in the soil liquid and gaseous phases. Soil Sci. Soc. Am. J., 65：613–623.
Moldrup, P., Yoshikawa, S., Olesen, T., Komatsu, T., and Rolston, D. E.（2003）：Air permeability in undisturbed volcanic ash soils：predictive model test and soil structure fingerprint. Soil Sci. Soc. Am. J., 67：32–40.
Moldrup, P., Olesen, T., Blendstrup, H., Komatsu, T., de Jonge, L. W., and Rolston, D. E.（2007）：Predictive-descriptive models for gas and solute diffusion coefficients in variably saturated porous media coupled to pore-size distribution：IV. Solute diffusivity and the liquid phase impedance factor. Soil Sci., 172：741–750.
Pirson, S. J.（1958）：Oil reservoir engineering. pp. 97–136, McGraw-Hill, New York.
Stauffer, D. and Aharony, A.（1994）：Introduction to percolation theory, Rev. 2nd ed. CRC Press, New York.
Stonestrom, D. A. and Rubin, J.（1989a）：Water content dependence of trapped air in two soils. Water Resour. Res. 25：1947–1958.
Stonestrom, D. A. and Rubin, J.（1989b）：Air permeability and trapped-air content in two soils. Water Resour. Res. 25：1959–1969.
Wyllie, M. R. J.（1962）：Relative permeability, in Petroleum Production Handbook, vol. II, Reservoir Engineering. pp. 25.1–25.14, McGraw-Hill, NewYork.

要　　旨

土壌の通気性に関して，パーコレーション理論の適用可能性が指摘されている．また，二領域モデルはパーコレーション理論の適用範囲の存在を示唆するものと考えられる．しかし，両者の関係は明らかになっていない．そこで本研究では，二領域モデルとパーコレーション理論の関係を明らかにし，連続性の視点から通気性を説明することを目的とした．鳥取砂丘砂を用いて気相率と通気係数を測定し，連続気相率が全気相率と等しくなる点を境に二領域を設け，通気係数と連続気相率の関係にべき乗則を当てはめた．その結果，各領域で異なるべき指数が得られ，それぞれで異なる通気メカニズムが働くことが示された．また，臨界点近傍における指数の値は 2.12 ± 0.40 となり，パーコレーション理論による値とおよそ一致した．その指数のうち，連続性による寄与が 1.72 ± 0.15 であることが明らかとなった．

キーワード：音響測定，臨界点，べき乗則，通気係数，連続性