J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 134, p.41～ 49 (2016)

古典を読む

B.W. EAVIS 著
「土壌の物理的条件が幼植物根の生育に与える影響 I. 砂質壌土における乾燥密度と水分状態により影響される力学的抵抗，通気性，水分利用の難易度・利用可能性」

佐藤泰一郎 [1]

Reviewing classical studies in soil physics

"Soil physical conditions affecting seedling root growth. I. Mechanical impedance, aeration and moisture availability as influenced by bulk density and moisture levels in a sandy loam soil" by Eavis, B.W., Plant and Soil 36: 613–622 (1972).

Taiichirow SATO[1]

1. はじめに

土壌中を生育する根は，呼吸，養水分の吸収を行うために，間隙中に侵入，伸長，分布する．この土壌中の根には，間隙の量や性質，間隙中の水や空気の量が生育に対するストレスとして働く．つまり，土壌の三相分布と水分状態（マトリックポテンシャル）の影響が強く示唆される．一方で，生育する根は，土壌の硬さによる抵抗を受ける．土壌の硬さもまた土壌の三相分布により異なる．このように，土壌中を生育する根には，土壌の物理的な条件が関与している．

ここで，紹介する B.W. Eavis は，園芸学が専門であり，Ratliff や Taylor といった作物生育に対する土壌の物理性の影響について数多くの成果を残した著名な研究者と共に研究を行っている．そして，彼らから学んだ知識を基礎として，その時代の先端を行く新しい機器を利用して，実験を中心とした一連の研究のひとつであり，根の生育に影響を及ぼす土壌の通気性，水分ストレス，力学的抵抗（mechanical impedance）について，それぞれの要因を個別に評価することを試みた秀逸な論文である．

本論文「I. 砂質壌土における乾燥密度と水分状態により影響される力学的抵抗，通気，水分利用の難易度・利用可能性」（Eavis, 1972a）は第 1 部であり，第 2 部「II. 珪砂の粒径分布，含水率の影響を受ける力学的抵抗，通気，水分利用の難易度・利用可能性」（Warnaars and Eavis, 1972），第 3 部「III. 異なる酸素分圧条件下における通気不良土壌中の根の成長の比較」（Eavis, 1972b）と一連の研究としてまとめられている．第 1 部は主要な論文であり，第 2，第 3 部がこれを補足している．したがって，本論文を読み進めるためには，これらが参考になる．

2. 論文概要

2.1 実験試料および方法

この研究では，乾燥密度と水分を制御した土壌カラムを用いた作物生育実験が行われた．供試土壌には砂壌土を使用し，カラムに乾燥密度を制御して充填した．充填密度は，4 種類（うち 1 種類は水分利用の難易度・利用可能性と生育の関係のみに使用）であった．これら充填した土壌カラムは，水分を 12 段階に調整（うち 6 段階は通気性と生育のみの関係で使用）した．供試作物は，エンドウの幼苗を使い，20 °C ± 2 °C の温度の下で 48 時間生育させ，染色して根の長さ，直径，生体質量，乾燥質量を測定した．実験は，根の生育に対して土壌水分が高く通気性が影響を与える範囲と水分利用の難易度・利用可能性が把握できる -10 cm H_2O から -10^5 cm H_2O（pF 1 から pF 5）の範囲でそれぞれ行った．

力学的抵抗と通気性の効果を把握するために，マトリックポテンシャルが -10 cm H_2O から -210 cm H_2O の土壌カラムの三相および水分特性が 3 種類の乾燥密度別に Fig. 1 にあらわされている．乾燥密度が大きな試料

[1]Faculty of Agriculture and Marine Science, Kochi University, 2-5-1 Akebono-cho, Kochi-shi, Kochi 780-8520, Japan. Corresponding author: 佐藤泰一郎, 高知大学 農林海洋科学部 農林資源環境科学科.
2016 年 5 月 9 日受稿　2016 年 9 月 13 日受理

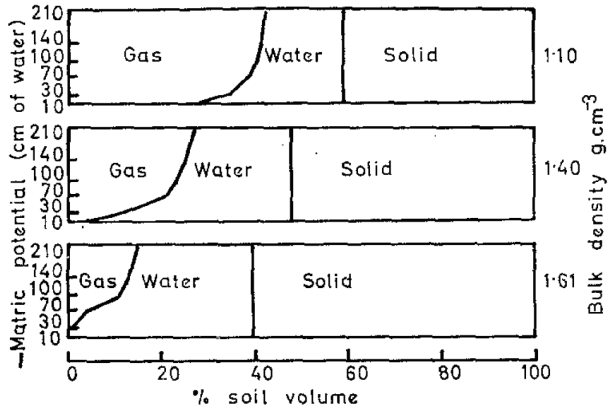


Fig. 1 3 種類の乾燥密度で充填し 6 段階のマトリックポテンシャルに調整した砂壌土の固相率，液相率，気相率.
Volumes of solid, water and gas present in sandy loam soil maintained at six matric potentials and three bulk densities.

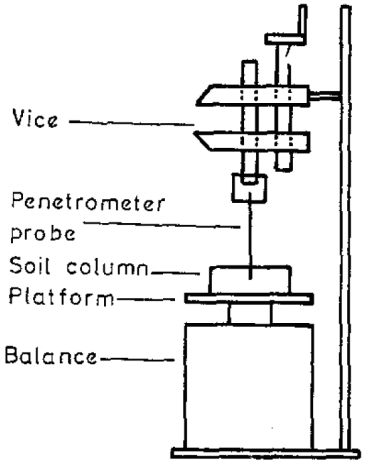


Fig. 2 根状探針と天秤を利用したペネトロメータ抵抗測定装置.
Apparatus used to determine penetrometer resistance using a root-shaped probe and a balance for force measurement.

では，固相率が増加して気相率が減少するが，同じマトリックポテンシャルに対する体積含水率は高くなる．また，このときの土壌抵抗が根を模した探針（root shaped probe）を土壌カラムに貫入させたときの反力（Force opposed to penetrometer ; gwt.）として測定された（Fig. 2）．根を模した探針は，直径 1 mm で先端が丸められている．この探針とバイスを使って土壌面に対して垂直に 1 mm min^{-1} の速度で 1 mm 貫入させ，平衡した天秤の値を貫入抵抗（penetrometer resistance）であらわした．ペネトロメータによる抵抗は，充填した試料の乾燥密度とマトリックポテンシャルの影響を受ける．

2.2 結果および考察

2.2.1 力学的抵抗と通気性の効果

土壌カラムの力学的抵抗が，Fig. 3 に示されている．ここでは，マトリックポテンシャルが −210 cm H_2O までのペネトロメータ反力を抵抗として示している．ペネ

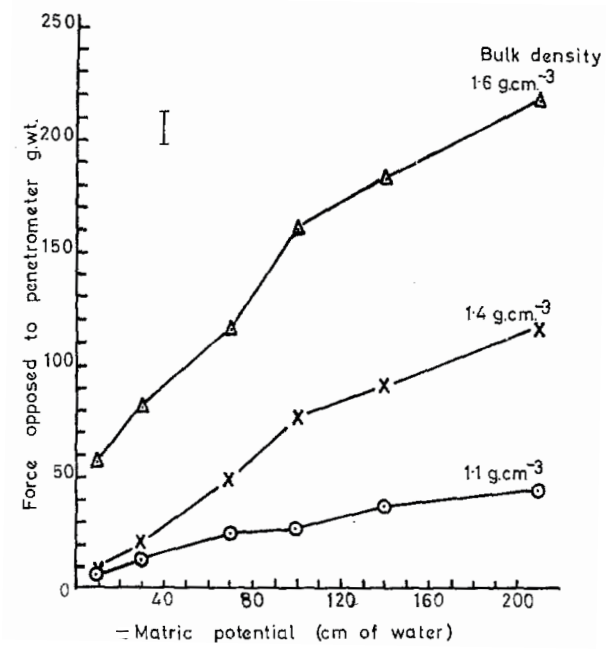


Fig. 3 3 種類の乾燥密度と 6 段階のマトリックポテンシャルにおけるペネトロメータ抵抗への影響，有意水準 5 %.
Effect of three bulk densities and six matric potentials on penetrometer resistance.L.S.D. 5 % shown.

トロメータによる抵抗は，充填した試料の乾燥密度が大きいほど，また土壌が乾燥してマトリックポテンシャルが低下するほど大きくなる．そして，異なる乾燥密度，酸素濃度における根の生育長さ，根の直径に対するマトリックポテンシャルとペネトロメータ抵抗の関係を Fig. 4 a) ～ d) にあらわしている．図中に数字として示される酸素濃度は第 3 部からの引用である．この図は，この論文の前半部分を端的に示している．それは，根の伸長と直径の相補的な関係をあらわしていることにある．つまり，ペネトロメータ抵抗が小さくマトリックポテンシャルが高いときには，酸素濃度が低く通気性が低いため（湿害），根が伸長せず根径が太くなる．ペネトロメータ抵抗が徐々に増加しマトリックポテンシャルが低下していくと，酸素濃度が上昇して通気性が確保され，根が伸長し根径が細くなる．いずれの乾燥密度でも酸素濃度が 21 %（大気とほぼ同等）に達したときに，根の伸長が最大（根径が最小）となるが，ペネトロメータ抵抗の増加により根の伸長が阻害されることを指摘した．このように，根の生育に対して通気性が制限する領域と力学的抵抗により制限される領域について言及した．

そこで，Eavis は通気欠乏指数（aeration deficiency index）を次のように定義した．

通気欠乏指数 =（1− 力学的抵抗と通気効果の影響 / 力学的抵抗のみが作用する影響）×100 %
=（1 − 実際の根の伸長速度 / 通気性の効果がない力学的抵抗下で期待される根の伸長速度）×100 %

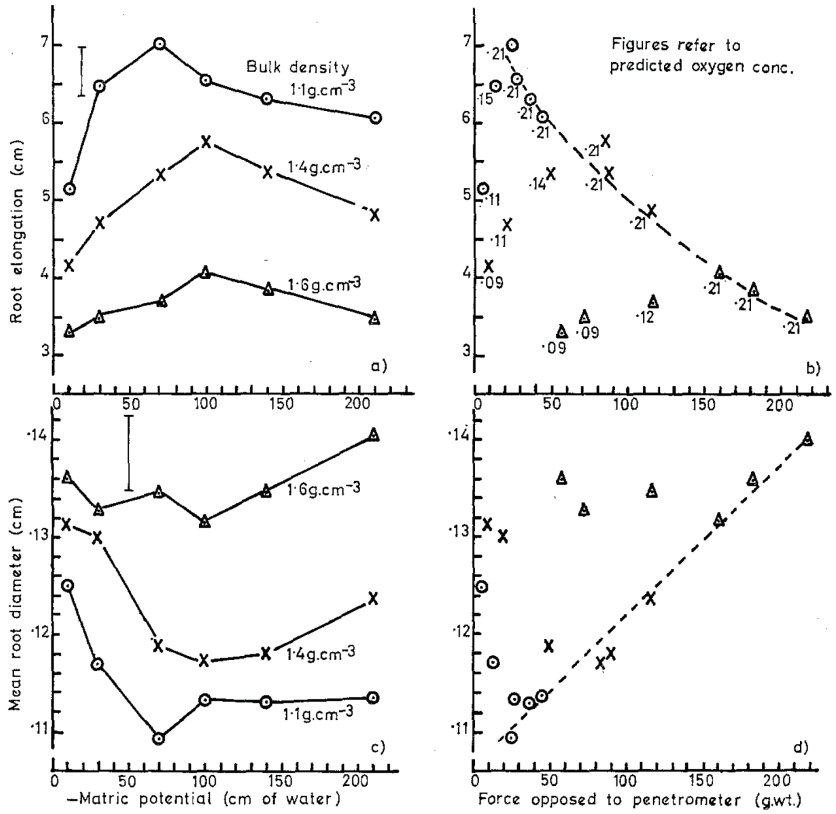


Fig. 4 a）3 種類の乾燥密度での 6 段階のマトリックポテンシャルに保った砂壌土における根の伸長速度 b）根の伸長速度とペネトロメータ抵抗 c）3 種類の乾燥密度での 6 段階のマトリックポテンシャルに保った砂壌土における生育後の最終平均根径 d）根径とペネトロメータ抵抗，有意水準 5 %.
a) Root elongation rate in sandy loam soil held at six matric potentials and three bulk densities.
b) Root elongation rates and penetrometer resistance.
c) Final mean root diameters after growth in soil held at six matric potentials and three bulk densities.
d) Root diameters and penetrometer resistance. L.S.D. 5 % shown.

この通気欠乏指数については，第 3 部でさらに詳しく述べられ，

通気欠乏指数 =（1 − 実際の根の伸長 / 大気と同じ酸素分圧での根の伸長）×100 %

としてあらわされている．通気欠乏指数は，0 % のときに十分な通気性が確保されていることをあらわし，100 % に近づくほど通気性が悪くなることをあらわしている．

Table 1 の Eavis が行った実験条件では乾燥密度 1.1 g cm^{-3} の場合にマトリックポテンシャルが −70 cm H_2O になると通気性が阻害されない．乾燥密度 1.4，1.6 g cm^{-3} ではマトリックポテンシャルが −100 cm H_2O になると通気性が阻害されなくなる．このことから，乾燥密度 1.1 g cm^{-3} の条件でマトリックポテンシャルが高くとも湿害に耐えることが示唆される．また，根の表面での酸素濃度が 21 % になると，大気との連続性が確保され，各乾燥密度で根の伸長が最も高くなる（Fig. 4 b）．このときの気相率（本文中では Gas-filled pore space）は，与えられた，乾燥密度，マトリックポテンシャルにより異なる．つまり，湿害は気相率によって決まるのではなく，大気との連続性が重要であることを示している．この結果は，Greenwood（1968）が示唆する根の周辺の土壌における気液界面での水分拡散係数を使った通気性の重要性を支持するものであった．

さらに Eavis は，通気性を気相との関係だけでなく，間隙の数に着目している．本文では明確な記述はないものの，根の先端土壌の間隙を，管径が異なる多数の毛細管の集合体と仮定し，管径と毛管上昇高の関係から，吸引圧（マトリックポテンシャル）を求め，各マトリックポテンシャルに寄与する間隙の数を求めた．このようにして，理論的に排水に関与する間隙の数を求めたと考えられる．これは，マトリックポテンシャルが高い領域では比較的大きな間隙が排水に寄与するため間隙数が少なく，マトリックポテンシャルが低い領域では排水に関与する小さい間隙が多くなることから推測できる．そこで，通気欠乏指数と間隙の関係を見てみると，乾燥密度が低い 1.1 g cm^{-3} では，間隙の数は少ないもの排水に関与する大きな間隙により，通気性が確保される．また，乾燥密度が高くなると数多くの小さい間隙が通気性の確保に関与している（Table 1）．

Table 1 乾燥密度とマトリックポテンシャルの変化に対する通気欠乏指数およびエンドウ根端近くの予測酸素濃度.
Aeration deficiency indices for sandy loam soils varying in bulk density and matric potential, and predicted oxygen concentration at surface of growing pea root tips.

Bulk density, g cm^{-3}	−Matric potential, cm of H_2O	Gas-filled pore space, %	Aeration deficiency index, %	No of pores drained *		Oxygen concentration at the root surface †
				Between suction intervals	Accumulated total	
1.1	10	28	29	2	2	11%
	30	34	7	3	5	15%
	70	39	0	190	195	21%
	100	40	0	252	447	21%
	140	42	0	300	747	21%
	210	43	0	694	1441	21%
1.4	10	3	41	0	0	9%
	30	12	32	4	4	11%
	70	22	10	380	384	14%
	100	24	0	329	713	21%
	140	25	0	511	1224	21%
	210	28	0	1572	2796	21%
1.6	10	1	44	0	0	9%
	30	1	36	0	0	9%
	70	4	23	150	150	9%
	100	11	0	1035	1185	12%
	140	13	0	595	1780	21%
	210	15	0	1575	3355	21%

* Number of pores which would theoretically drain at the given matric potential on an area in the soil equivalent to the area of the growing root tip. First column gives number of pores drained within each matric potential interval, and second column accumulated total (see text).
† See third paper in this series.
生育する根の先端部に相当する土壌の領域に指定されたマトリックポテンシャルでの理論的排水間隙数.
最初の列は各マトリックポテンシャル間隔で排水した間隙数，2 番目の列にはその累計を割り当てる（本文参照）.
† このシリーズの第 3 部参照

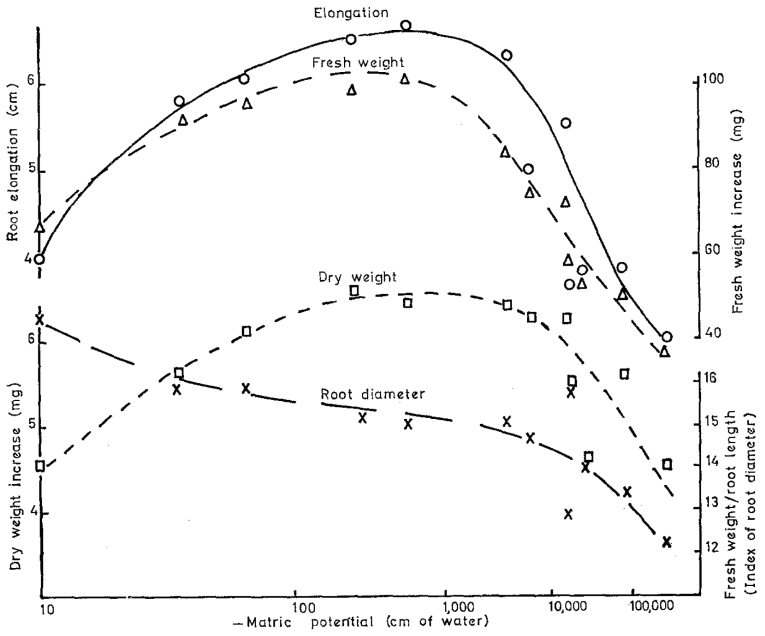


Fig. 5 力学抵抗を受けない条件下での根の伸長率，生体質量，乾燥質量，直径における土壌マトリックポテンシャルの影響.
Effect of soil matric potentials on root elongation rate, fresh weight, dry weight and diameter in the absence of any influence from mechanical impedance.

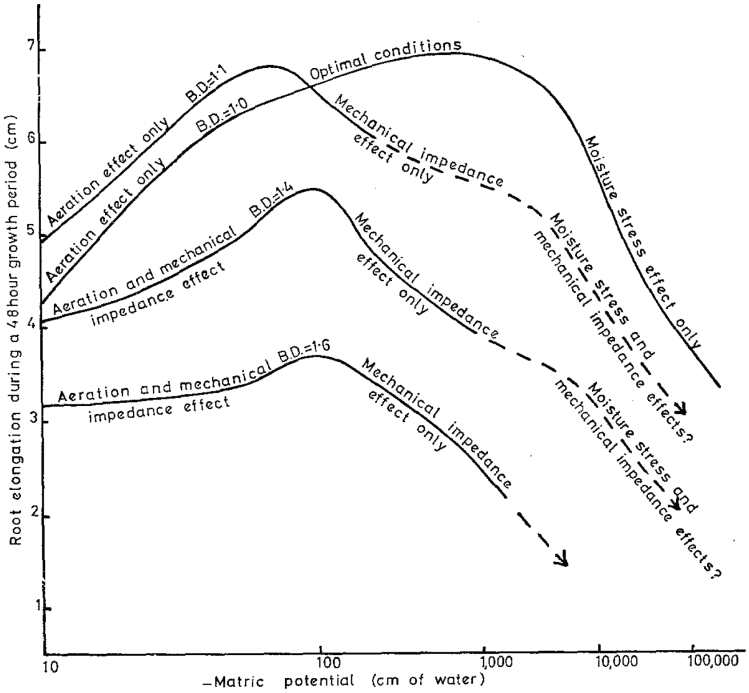


Fig. 6 異なるマトリックポテンシャルおよび乾燥密度の砂壌土でのエンドウ苗の根の伸長に対する力学的抵抗，通気性，水分ストレスの役割.
Summary of role of mechanical impedance, aeration and moisture stress on pea seedling root elongation in a sandy loam held at different matric potentials and bulk densities.

2.2.2 有効水分の効果（水分利用の難易度・利用可能性）

ここでは，根の生育に対して土壌の水分ストレスと通気性の影響を把握するために，力学的抵抗を除外した乾燥密度 1.0 g cm^{-3} に充填した試料をマトリックポテンシャルが -10 cm H_2O（pF 1）から -10^5 cm H_2O（pF 5）の間で 12 段階に水分調整して，エンドウの幼植物根を 48 時間生育させたときの根の直径と伸長，根の生体質量と乾燥質量の結果を Fig. 5 に示している．この図は，横軸を pF の値を平方根で示している．根の伸長は，マトリックポテンシャルが -1.8×10^3 cm H_2O から -3.5×10^3 cm H_2O の範囲で良好となる．また，-3.5×10^3 cm H_2O より低下すると水分ストレスによって根が細くなり，生体質量，乾燥質量の増分が低下する．逆に，-0.2×10^3 cm H_2O より増加すると通気性の悪化の影響が現れることを指摘している．

そして，この研究のまとめとして土壌の乾燥密度別のマトリックポテンシャルと 48 時間のエンドウ根の伸長の関係を Fig. 6 にあらわしている．Fig. 6 は，マトリックポテンシャルの低下に伴い，徐々に通気性が確保され根の伸長量が増加することを示している．乾燥密度 1.4, 1.6 g cm^{-3} では力学的抵抗も増加するが根の伸長を低下させるほど大きくない．そして，根の伸長が最大値（最適条件）になり，増加してきた力学的抵抗の影響により伸長量が低下しはじめる．その後，水分ストレスの影響で根の伸長はが低下していく．力学的抵抗の影響がない乾燥密度 1.0 g cm^{-3} は，水分ストレスの影響のみで，伸長が低下する．このように，Eavis は，根の伸長に対する影響として，通気性のみ，通気性と力学的抵抗，力学的抵抗のみ，水分ストレスのみ，そして，水分ストレスと力学的抵抗の示唆を，最適条件とともにあらわした．

3. 根を模したペネトロメータによる土壌の力学的抵抗の計測

Taylor and Ratliff（1969a）は，根を模した土壌への貫入硬度計（ピンペネトロメータ）を使用し，土壌硬度と土壌水分が根の伸長速度に与える影響をワタとマメを用いて品種間差を考慮した精密な測定を行った．また，金属探針の直径（Dexter and Tarnner, 1973）や先端角度（Bradford, 1980），および貫入速度（Voorhees et al., 1975）についての議論が深められ，その有用性が明らかにされた．このようにピンペネトロメータが活用されたのは，1940 年代に実用化されたひずみゲージが徐々に浸透し，20 世紀後半にはロードセルとして計測範囲を広げ，分解能を高めることで天秤や力学的な測定を行う研究に広く利用されるようになったためと考えられる．Eavis は，普及品である天秤を応用して貫入抵抗を測定した．ペネトロメータの直径を根に近づけると直径が，1 mm 前後になる．Bengough and Mullins（1990）は，力学的抵抗に関する総説でペネトロメータの直径，形状，摩擦，貫入速度について，Russell（1977）の考え方を基にまとめ，実際の根の伸長を物理的に表現することの難しさについて言及している．Eavis もペネトロメータ抵

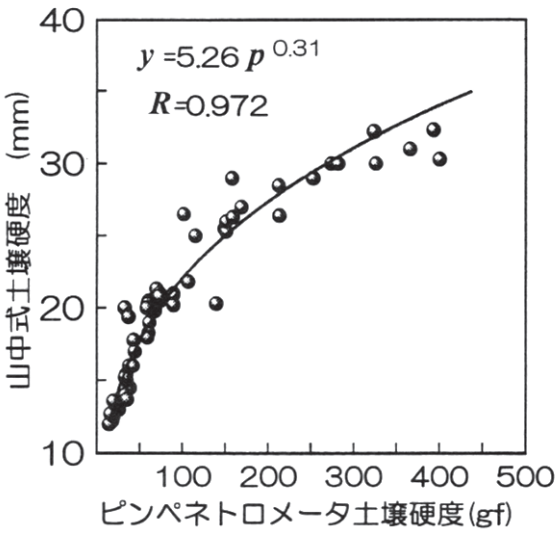


Fig. 7 山中式土壌硬度とピンペネトロメータ土壌硬度の関係.
Relationship of Yamanaka's Soil hardness and Pin-Penetrometer hardness.

抗と根の伸長時の抵抗を等価と考えていなかったと考えられる.

このような根を模したペネトロメータによる力学的抵抗（ピンペネトロメータ土壌硬度）と山中式土壌硬度の比較を Fig. 7 に示す（佐藤ら, 1998）. この図からピンペネトロメータと山中式硬度にはべき関数での相関が認められる. 山中式土壌硬度計は，柔らかい土壌では，円錐型のコーンの接触面積を大きくしながら一定の強さのバネを圧縮させる. 一方，ピンペネトロメータは，先端の形状が変わらないため圧力センサーの計測の限界値と分解能に影響される. したがって，ピンペネトロメータ土壌硬度が低い 100 gf 以下では，山中式土壌硬度計の方が、貫入深が細かく計測可能であった.

4. Eavis（1972）の課題

Eavis は, Fig. 6 で乾燥密度が 1.1 g cm^{-3} と 1.4 g cm^{-3} の場合，根の伸長は土壌が乾燥すると力学的抵抗により減少することを明らかにした. さらに，本研究の測定領域を超えて乾燥が進みマトリックポテンシャルが低下すると，力学的抵抗の影響に加え水分ストレスも同時に影響すると考え，その範囲を破線で示唆し「？」を付けた. この曲線は，根の生育が力学的抵抗の影響の増加に伴い低下し，さらに水分ストレスの影響が加わり，より低下することを示唆したが，明確な考え方を示していない. これは，根の伸長力と土壌水分の関係が得られていないためだと考えられる.

根の伸長力（root growth force, root growth pressure）については，Gill and Bolt（1955）が，1893 年に Pfeffer が行った方法を真似て測定している. この方法は，土壌中を伸びてきた根がプルービングリングを押すときの重力方向，水平方向の力を測定するものである. その後，Storozy and Barley（1968）や Taylor and Ratliff（1969b）により同様の方法で，根の伸長力を測定した試験がある. また，Eavis et al.（1969）も，土壌を使わず錘を載荷した種子の伸びを水ポテンシャルと酸素濃度の関係で測定し，伸長力に変換した研究がある. なぜ，Eavis は「?」を付け考察をしなかったのだろうか. これらの方法は，発揮される伸長力の最大値に注目した研究であったためだと推測する.

この発揮される最大の伸長力より，根の伸長が阻害され始める伸長力に着目した研究がある. Barley（1963）は，Pressure cell（三軸試験機）を使用し，加圧による土壌の強度（有効応力）と 24，48 時間後のトウモロコシ根の生育（根長，質量）の関係を求めた. Goss（1977）も，調圧ができる根箱を用いてオオムギの生育を計測した. 両者とも加圧により，30 kPa までは急速に根の伸長量が低下し，成長がわずかになることを指摘している. しかし，圧力は，根に対してのみ作用するのではなく，土壌の水ポテンシャルや間隙にも影響するので，根の伸長を阻害する要因として考えるのには課題がある.

土壌中を伸長する根が発揮する力を直接長期に渡り，計測することは困難である. これは，根の吸水による土壌水分の変化，反力として計測する部分の硬さや位置，植物としての反応の変化（直径，伸長方向）がある. そして，Pfeffer 以降の 1 本の根を対象とした伸長力の測定では根端近くの乾燥に課題がある. そこで，植物のストレスに対する応答の遅れを利用して，乾燥や根の屈曲などの変形の影響が生じない短時間での計測が行われている.

5. Eavis の論文に先行する研究とその後の研究動向

この Eavis の論文が発表された時代の土壌物理性と根の生育についていくつかの研究を紹介する. Flocker and Nielsen（1960）は，異なる乾燥密度での圃場試験で，土壌水分と気相がトマト生育に与える影響を評価した. Taylor and Burnett（1964）は、土壌の圧縮と耕起により土壌硬度が変化するときの根の生育について圃場試験により検討した. Malik（1976）が土壌水分の不足，土壌硬度がワタの根の生育に与える影響について長期にわたる実験をした. 室内では Taylor and Gardner（1963）による根の伸長速度と土壌硬度との相関に関する研究が行われた. Aubertin and Kardos（1965）は，粒径の異なるガラスビーズを用いて，間隙径を変化させ，根の伸長を測定した. Babalola and Lal（1977a, b）は，土壌にレキを混入することにより，間隙分布が変化し水分特性が影響されることで，根の生育が抑制されることを，土壌への根の伸長深さ，根の質量で評価した.

このように，根の生育に影響する因子をそれぞれ個別に評価する試みがなされる中で， Eavis は通気効果，水分ストレス，力学的抵抗を緻密な実験を行うことでひとつの図に示した. また，第 2 部で土粒子の大きさを制御

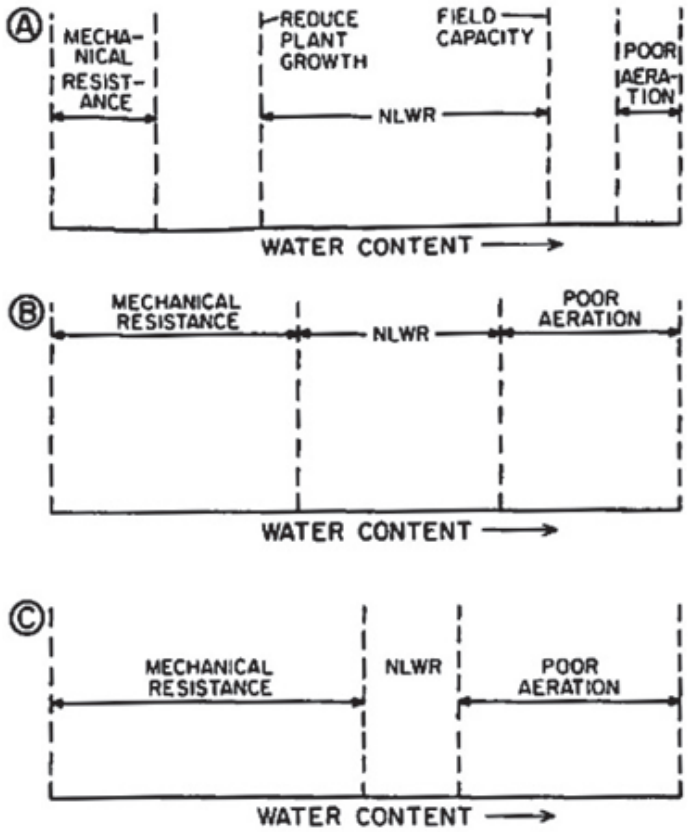


Fig. 8　A から C に乾燥密度が増加し構造が悪化する土壌の水分と植物生育のための制限因子の一般的な関係.
Generalized relationships between soil water content and restricting factors for plant growth in soils for soils with increasing bulk density and decreasing structure in going from case A to C.

することで間隙の量を制御した環境での成果をもとに，根の生育に対する通気性のかかわりについて言及し，間隙の質（間隙径分布，連続性，間隙の状態）の重要性を示唆した．この考え方は，後に Letty（1985）が同じように，土壌水分，酸素供給，土壌硬度を制限因子として土壌の非制限水分領域（Non-Limiting Water Range; NLWR）としてあらわしている（Fig. 8）.

その後，根の伸長をモデル化して作用する因子を明確にするための根の水吸収シミュレーション（Hillel and Talpaz, 1976）や根の近傍における土壌水分変化のシミュレーション（佐藤ら, 1990）が行われた．また， Dexter（1987）は，ペネトロメータ硬度と土壌水分ポテンシャルの実測値をもとに，根の力学的な伸長モデルを提案した．このモデルは，Bennie（1991）により，これまでの数多くの研究成果を使って，土壌硬度が根の伸長と根系発達をあらわすのに有効であることが証明された.

6. 終わりにかえて

土壌中を生育する根は生育に伴い変化する．また，根の生育に伴い土壌水分が変化し，通気性，硬度も変化する．したがって，土壌の物理性と根の生育を計測する場合にはその取扱いが非常に難しい．このよう状況で Eavis は，土壌の乾燥密度とマトリックポテンシャルを制御した丁寧な計測により，通気性の影響，力学的抵抗の影響，水分ストレスの影響を考慮した，根の生育に対する最適条件を示した.

しかし，未解明な部分があることも明示した．事象を実験により明らかにしようとする場合には，計測技術，装置の分解能，実験条件の制御などが十分ではないことがある．Eavis は，これらを考慮した上で，破線と「?」を用いたと考えられる．また，不完全さを明示することで，たとえ本人が行わなくとも研究の継続が期待される.

近年，測定技術の進歩により Eavis が活躍した時代にはなかった土壌中の水分を非破壊で連続的に計測する技術（たとえば TDR のような）が進歩し，これまで不十分であった領域での測定が可能になっている．プローブの間隔が狭く，細く，短い TDR の出現は，根の近傍の土壌水分をより精密に知ることができるだろう．また，土壌のマトリックポテンシャルだけではなく荷重ポテンシャルや浸透ポテンシャルが影響する系で研究の充実が望まれる.

土壌物理学では土壌の三相分布を考えることから始まる．その後，水分特性，透水係数，硬度を考え現象を理解しようとする．この水分特性，透水係数，硬度は，土壌の間隙の量のみならず間隙構造をあらわしていることにつながるのではないだろうか．土壌の間隙構造に関する研究は，毛管モデルから得られる当量直径，軟 X 線によ

る形態的特徴からのアプローチ（たとえば成岡, 1987），毛管状の粗間隙と緻密な土壌マトリクスに分けたモデル（原口, 2000）により，透水係数や間隙率との関係が評価された．しかし，植物の根の生育に寄与する間隙径分布，連続性，間隙の状態をあらわす間隙構造についての考え方や定量化するための知見は，十分ではなく今後の研究の成果の集積が望まれる．

引用文献

Aubertin, G.M. and Kardos, L.T. (1965): Root growth through porous media under controlled conditions: I. Effect of pore size and rigidity. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 29: 290–293.

Babalola, O. and Lal, R. (1977a): Subsoil gravel horizon and maize root growth. I. Gravel concentration and bulk density effects. Plant and Soil, 46: 337–346.

Babalola, O. and Lal, R. (1977b): Subsoil gravel horizon and maize root growth. II. Effects of gravel size, inter-gravel texture and natural gravel horizon. Plant and Soil, 46: 347–358.

Barley, K.P. (1963): Influence of soil strength on growth of roots. Soil Science, 96: 175–180.

Bengough, A.G. and Mullins, C.E. (1990): Mecanical impedance to root growth are view of experimental techniques and root growth responses. J. Soil Sci., 41: 341–358.

Bennie, A.T.P. (1991): Growth and mechanical impedance, pp. 93–414. In: Aisel, Eshel, Y.A. and Kafkaf, U. (Ed.) Plant root, the hidden half books in soils, plants, and the environment. Marcel Dekker, New York.

Bradford, J.M. (1980): The penetration resistance in a soil with well-defined structural units. Soil. Sci. Soc. Am. J., 44: 601–606.

Dexter, A.R. and Tanner, D.W. (1973): The force on spheres penetrating. Soil. J. Terramechanics, 9: 31–39.

Dexter, A.R. (1987): Mechanics of root growth. Plant and Soil, 98: 303–312.

Eavis, B.W., Ratliff, L.F. and Taylor, H.M. (1969): Use of a dead-load technique to determine axial root growth pressure. Agronomy Journal, 61: 640–643.

Eavis, B.W. (1972a): Soil physical conditions affecting seedling root growth. I. Mechanical impedance, aeration and moisture availability as influenced by bulk density and moisture levels in a sandy loam soil. Plant and Soil, 36: 613–622.

Eavis, B.W. (1972b): Soil physical conditions affecting seedling root growth III. Comparisons between root growth in poorly aerated soil and at different oxygen partial pressures. Plant and Soil, 37: 151–158.

Flocker, W.J. and Nielsen, D.R. (1960): Relationship between soil moisture and air space associated with levels of bulk density that influence growth of tomatoes, pp. 347–353. In: Trans. 7th international congress of Soil Science, Madison, WIC , U.S.A.

Greenwood, D.J. (1968): Effect of oxygen distribution in the soil on plant growth. Proc. 15th Easter School on root growth ed. Whittington, W.J. (Butterworth Pnbl.): 202–223.

Gill, W.R. and Bolt, G.H. (1955): Pfeffer's studies of the root growth pressures exerted by plants. Agronomy Journal, 48: 166–168.

Goss, M.J. (1977): Effects of mechanical impedance on root growth in Barley (Hordeum vulgare L.). I. Effects on the elongation and branching of seminal root axes. Journal of Experimental Botany, 28(102): 96–111.

原口暢朗 (2000): 土壌間隙構造モデルに基づく土壌水分と間隙密度の不均一性に関する確率論的考察. 農土論集, 206: 1–12.

Hillel, D. and Talpaz, H. (1976): Simulation of root growth and its effect on the pattern of soil water uptake by nonuniform root system. Soil Science, 121(5): 307–312.

Letey J. (1985): Relationship between soil physical properties and crop production, pp. 277– 294. In: Stewart, B.A. (Ed.) Advances in Soil Science, Volume 1. Springer-Verlag Inc., New York.

Malik, R.S. and Turner, N.C. (1979): Influence of soil water deficits on root growth of cotton seedlings. Plant and Soil, 53: 109–115.

成岡 市 (1987): 軟 X 線映像による土壌孔隙の立体計測法. 農業土木学会誌, 55(9): 29–35.

Russell, R, Scott (1977): Plant root system: Their function and interaction with the soil. McGraw-Hill, London, UK. (作物の根系と土壌, pp. 61–62. 田中典幸 訳 (1981), 農文協, 東京).

佐藤泰一郎・長谷川周一・中野政詩・宮﨑 毅 (1990): 粘土質転換畑心土亀裂面に発達した根の吸水による亀裂近傍での水分分布. 土壌の物理性, 60: 24–27.

佐藤泰一郎 (1998): ダイズ主根の生育に寄与する土壌の三相および硬度に関する研究. 高知大学農学部紀要, 66: 1–90.

Stolzy, L.H. and Barley, K.P. (1968): Mechanical resistance encountered by roots entering compacted soil. Soil Science, 105(5): 297–301.

Taylor, H.M. and Burnett, E. (1964): Influence of soil strength on the root-growth habits of plants. Soil Science, 98: 174–180.

Taylor, H.M. and Gardner, H.R. (1963): Penetration of cotton seedling taproots as influenced by bulk density, moisture content and strength of soil. Soil Science, 96: 153–156.

Taylor, H.M. and Ratliff, L.F. (1969a): Root elongation rates of cotton and peanuts as a function of soil strength and soil water content. Soil Science, 108: 113–119.

Taylor, H.M. and Ratliff, L.F. (1969b): Root growth pressure of cotton, peas, and peanuts. Agronomy Journal, 61: 398–402.

Voorhees, W.B., Farrell, D.A. and Larson, W.E. (1975): Soil strength and aeration effects on root elongation. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 39: 948–953.

Warnaars B.C. and Eavis, B.W. (1972): Soil physical conditions affecting seedling root growth. II. Mechanical impedance, aeration and moisture availability as influenced by grain-size distribution and moisture content in silica sands. Plant and Soil, 36: 623–634.

要　　旨

実験により，砂壌土の乾燥密度と水分を制御したカラムを用いて，エンドウ幼苗根の生育を制限する要因として，土壌の力学的抵抗，通気性，水分利用の難易度・利用可能性に区分して評価を試みた Eavis（1972）の秀逸な論文を紹介した．Eavis は，丁寧な計測と数多くの実験条件を与えることで，通気性の影響，力学的抵抗の影響，水分ストレスの影響を考慮した，根の生育に対する最適条件を示した．そして，Eavis が活躍した時代の前後の土壌の力学的抵抗や根の伸長力の計測法や Eavis の課題について述べた．また，力学的抵抗と根の伸長，伸長力の測定，土壌水分，間隙および通気性について，圃場試験，室内試験，シミュレーションから根の生育と土壌の物理性関係について，その後の研究動向を含め紹介した．

キーワード：土壌の力学的抵抗，通気性，水分利用の難易度・利用可能性，根の生育