J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 148, p.17～30 (2021)

シンポジウム特集
総　説
Reviews

# 耕地における土壌の物理性評価のための貫入抵抗及び他の物理的性質の活用方法

江口定夫 [1]

# Usage of penetration resistance and other soil physical properties to evaluate soil physical conditions in croplands

Sadao EGUCHI[1]

## 1. はじめに

土壌が持つ様々な物理的性質（soil physical properties）に基づき，農地土壌の物理性（ここでは，物理的条件［soil physical conditions］の意味）を評価する際，その目的としては，（1） 良好な作物（根）生育の実現（根の伸長，呼吸，水・養分吸収，病虫害予防等），（2） 人や機械の作業性・管理能力の向上（地耐力，砕土性，均平度等），（3） 食（人の健康）の安心・安全性の確保（重金属・農薬・放射性核種等有害化学物質の吸収低減，放射性核種による汚染土壌からの被曝低減等），（4） 農地内外の環境保全（土壌・水・大気環境，生態系等の保全）等が考えられる．中でも（1）は，食料生産の場としての農地土壌にとって，最も重要と言える．

土壌の層位・層厚・層序（鉛直土壌断面），微視的～巨視的構造，保水性・通気性・透水性，そして，農地内外の微地形や明渠・暗渠設備の有無を考慮した排水性等は，上記（1）～（4）のどの目的にとっても，極めて重要な基本的情報となる．但し，評価の目的に応じて，その測定では特にどこに注意すべきか，その測定値をどのように活用すべきか等は一般に大きく異なる．また，特に目的（4）では，農地系内だけでなく，根域下の不飽和帯～帯水層の環境負荷物質輸送に関わる物理的性質，地形～流域スケールでの水文地質環境（hydrogeological setting）（Vidon and Hill, 2004; 江口, 2008）に関わる物理的性質等，農地系外の情報が不可欠となる．さらに，どれを目的としても，様々なスケールでの物理的な性質・現象の時空間的変動性（不均一性）は，ときに問題解決のための障壁の一つとなり，また，粗大間隙を通じた選択流が速やかな内部排水を促し表面湛水を抑制する効果がある

[1]Institute for Agro-Environmental Sciences, NARO, Kannondai 3-1-3, Tsukuba, Ibaraki 305-8604, Japan. Corresponding author: 江口定夫，農研機構農業環境研究部門
2021 年 6 月 21 日受稿　2021 年 6 月 30 日受理

ように（暗渠排水等），解決策の一つともなる．

近年，農地土壌の物理性を広域多地点で迅速に評価するための実用的・汎用的手法に対する社会的ニーズが高まっている．日本の農業人口の減少・高齢化，農地一筆面積の大規模化等に伴い，「ロボット，AI（Artificial Intelligence），IoT（Internet of Things）など先端技術を活用する農業」と定義される「スマート農業」が注目され，生産現場の課題を先端技術で解決することで，農業分野における Society 5.0（内閣府, 2020）の実現に貢献することが期待されている（農林水産省, 2020c）．新たな食料・農業・農村基本計画（2020 年 3 月 31 日閣議決定）においても，農業データ連携基盤（WAGRI）（農業データ連携基盤協議会, 2020）等を活用した「スマート農業の加速化など農業現場でのデジタル技術の利活用の推進」が求められている（農林水産省, 2020b）．

スマート農業では，圃場内の土壌肥沃度や作物生育を対象としたセンシング結果のバラつきに応じて，臨機応変に対応する可変施肥，可変防除（農薬散布），選別収穫，気象条件に応じた散水・止水等がクローズアップされ，実用化が進んでいる（農林水産省, 2020c）．これらは「データ駆動型（精密）農業」と呼ばれ，農林水産省（2018）は，2025 年までに，農業の担い手のほぼ全てがデータを活用した農業を実践できる環境を整備することを目標に掲げている．

これら国の政策・社会情勢を背景に，生産現場から多くのニーズが寄せられている土壌の物理性や圃場の排水性の評価・改善・センシング手法，豪雨や干ばつへの対応技術，土壌水分予測に基づく潅水支援システム（高橋ら, 2020）等の技術開発が様々なレベルで進められている．その中で，最近，簡易な土壌物理性診断手法として，次節で詳述する貫入式土壌硬度計（諸遊, 1986a; 在原, 1997）を用いた土壌の貫入抵抗（penetration resistance, PR）測定値が，作物生育と関連付けた広域多地点での土壌の物理性評価に活用されつつある（望月ら, 2016; 江波戸, 2018; 江波戸・岡崎, 2018; Ebato, 2020; 高橋ら, 2020）．

この手法は，土壌試料を採取する必要がなく，試坑を作成する必要もなく，比較的短時間で多地点での測定ができるという点で，他の物理的性質の測定と異なり，データ駆動型農業に活用できるツールとして期待されている．一方，PR は土壌の物理性の一側面を見ているに過ぎず，営農現場における土壌評価 · 診断に活用する上では，問題や課題も多いと思われる．

本稿では，土壌の物理的性質の中で，現在，特に注目されている PR について概説すると共に，作物（根）の生育に対する農地土壌の物理性評価手法や改善指針について，既往の知見を整理する．更に，日本の農地土壌の平均的な物理的性質の特徴を把握した上で，営農現場への適用 · 普及を考えたときの PR の活用方法や課題等について検討する．

## 2.　コーンによる土壌の貫入抵抗（PR）の測定法

土壌中へのコーン貫入過程では，コーンの頂点周辺土壌の圧縮と底面周辺で生じる剪断（shear）によって周辺土壌の体積減少と変形が生じ，このときの変形応力（deforming stress）が PR 値に反映される．農地土壌では，以前より，この PR 値を簡易な土壌物理性評価法の一つとして利用してきた．以下，PR 測定法を大きく 2 つの方法に分けて，それぞれの特徴や両者の関係，活用事例等について概説する．

### 2.1 土壌硬度（SH）

コーン先端の一部を鉛直土壌断面に対して垂直に，静的に水平挿入するときの PR は，土壌硬度（soil hardness, SH），土壌強度（soil strength），土壌抵抗（soil resistance）等と呼ばれ，土壌の緻密度（compactness）の指標として用いられる．SH の測定は，土壌の試坑側の大気開放面で行われるため，SH 値は土圧の影響を受けない．SH は，現場で簡便に測定できる物理的性質だが，通常，測定対象とする深さ以上の試坑を作成する必要があるため，広域多地点での迅速な物理性評価には向いていない．なお，不攪乱土壌コアを採取し，実験室内で土壌の水分条件や圧縮条件を変えながら SH を測定する方法（瀧島 · 佐久間, 1969; 遅澤ら, 1990）もある．

SH 測定器の代表例としては，標準型山中式硬度計（頂角 25° 20′，底面直径 18 mm，荷重 8 kg でバネが 40 mm 縮む）（諸遊, 1986b; 田中, 1997）がある．SH 値は，山中式硬度計のバネが縮んだ距離（mm）で読み取り，必要に応じて，圧力（kgf cm$^{-2}$，kPa 等）の値に換算する．なお，鉛直下方へコーンを挿入する際には，硬度計の自重を考慮する必要がある（瀧島 · 佐久間, 1969）．

SH は，鉛直土壌断面上における巨視的土壌構造の把握（江口 · 長谷川, 2002），機械走行跡の土壌の緻密化（中野ら, 1998），耕起法の違いによる緻密度の変化の評価（渡辺, 1992）等に有用である．また土壌断面調査では，通常，移植ごての先端等を深さ別に軽く突き刺しながら，手にかかる反力の触感の変化から SH の変化を推測し，緻密度やかさ密度（bulk density）の変化を伴う層界（e.g., 作土層と耕盤層の層界）の特定を行う．一方，SH と透水性（飽和透水係数）の関係を調べた報告（e.g., 中野ら, 1998）はあるが，両者に明瞭な関係性を見出した報告は見当たらない．これは即ち，粗大間隙の量 · 形状と SH の間には，特段の関係性がないことを示唆する．

### 2.2 鉛直下方へのコーン貫入抵抗（VPR）

土壌表面からコーン全体を鉛直下方へ静的または動的に深く挿入していくときの PR（以下，VPR とする）は，コーン周囲から土圧の影響を受けるという点で，SH とは測定対象が本質的に異なる．このため，同じ層位ならば，一般に，VPR は土圧の影響を受けない SH よりも大きな値を示す（Fig. 1：静的 VPR の例）．特に砂丘未熟土は，砂粒子間の結合力が小さく，大気開放面である鉛直土壌断面上では崩れやすい（コーン先端により容易に剪断される）ために SH は小さいが，周囲から土圧を受ける VPR 測定では，砂粒子自体は圧縮しないため，コーンは土圧下にある砂粒子を押しのけて（剪断して）貫入する必要がある．このため，他の土壌タイプにおける VPR–SH 関係を表す経験式から予想されるよりも，2 ～ 5 倍も大きな VPR 値を示す（Fig. 1）．なお，VPR 測定器のコーン頂角や底面直径は，SH 測定器とは異なる場合が多く，この VPR–SH 関係（Fig. 1）にはその影響

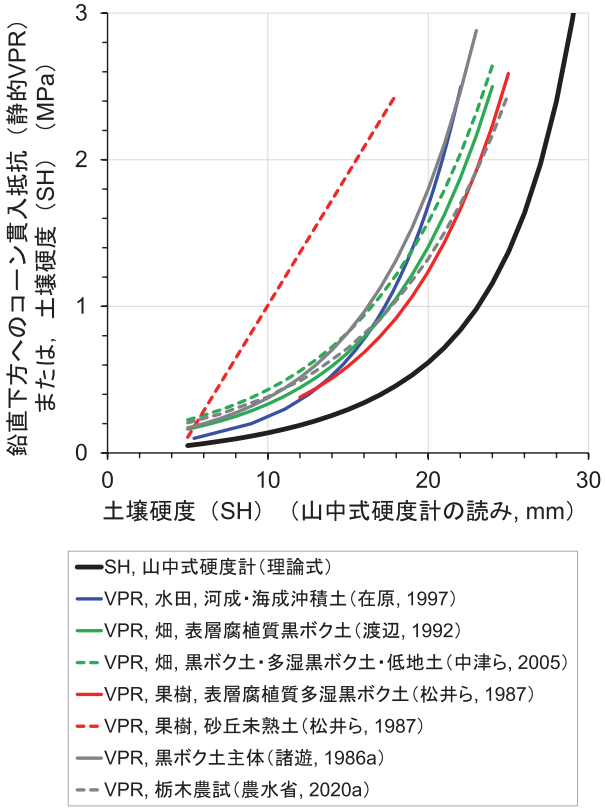



**Fig. 1**　様々な地目 · 土壌タイプで得られた鉛直下方への静的コーン貫入抵抗（静的 VPR）と土壌硬度（SH）の関係を表す経験式と，山中式硬度計の読み（mm）を圧力（MPa）に変換する理論式（瀧島 · 佐久間, 1969）．

も含まれている．

農地では，コーンを人力で，約 1 cm $s^{-1}$ の一定速度で土壌中へ貫入させていく静的 VPR を適用することが多い．代表例としては，貫入式土壌硬度計（頂角 30°，底面積 2.0 $m^2$［底面直径 16 mm］）（諸遊, 1986a; 在原, 1997）がある．静的 VPR は，人力で貫入速度を一定に保つことが難しく，測定者の経験・能力・腕力（体重）等に依存する部分がある．但しこれを機械化すれば（近江谷, 1998; Grunwald et al., 2001），この問題は解消する．

これに対して，動的 VPR は，ある一定の高さから一定重量のハンマーを落下させたときの打撃によるコーン貫入深さを記録するものであり，人力ではコーン貫入が不可能な硬い層や深い層にも適用できる．動的 VPR は林地土壌に適用されることが多く，基岩までの土層深度の面的分布の調査等で利用される（大貫, 1999）．農地でも，難透水層の面的分布（Eguchi et al., 2009b）や地形連鎖系を通じた砂礫質帯水層の連続性の把握（今井ら, 2006）等で利用される．動的 VPR 測定器の代表例としては，土研式簡易貫入試験器（頂角 60°，底面直径　25 mm, ハンマー重量 5 kg，落下高さ 50 cm）（三浦ら, 1993; 大貫, 1999; Eguchi et al., 2009a; 2009b）がある．

動的 VPR は，深さ 5 cm 毎（Eguchi et al., 2009b）または 10 cm 毎（三浦ら, 1993; 大貫, 1999）のコーン貫入に必要なハンマー打撃回数で表すことが多い．しかし打撃 1 回毎に，貫入深さを ±1 mm 以内の精度で読み取り，単位貫入深さ当たりの打撃回数（$m^{-1}$）（今井ら, 2006）や圧力（MPa）（Eguchi et al., 2009a）で表せば，土層の物理性について，より詳細な定量的情報が得られる．例えば，粘土層は動的 VPR がほぼ均一な層であるのに対して，礫を含む層は動的 VPR の不均一性が非常に大きい等，PR 値が同じであっても層の中身は異なることが把握できる．なお，貫入深さの読みを圧力に変換する際は，動的 VPR 測定器の自重等を考慮する（Vaz and Hopmans, 2001）．

動的 VPR は，検土杖による土層調査に比べると，(a) 主観的判断が入る余地がなく（層界の判定等で迷うことなく）測定者の経験・能力によらず，全く同じデータが得られること，(b) 土層が崩れやすくても，また，地下水面下の土層でも作業能率が低下しないこと，(c) 検土杖では定量化できない土層の緻密さや不均一性を数値化できること，(d) 調査後に何度でも測定データを見返して判定基準の検討・変更ができること（調査後にじっくり迷えば良い）等の点で優れている（江口, 2008）．一方，検土杖の最大の利点は，深さ別の試料を直接採取・目視できる点にある．試料を作成せずに下層土を調査する際には，静的 VPR や動的 VPR と検土杖を併用することが望ましい．

### 2.3 VPR の変動要因，活用事例と課題

PR 値は，かさ密度や固相率と共に増大し（瀧島・佐久間, 1969），湿潤状態では，PR は粘土質土壌で低く，砂礫質土壌で高い傾向がある．これを利用すれば，沖積地帯の水田下層における砂・粘土の互層から成る複雑な土層構成を，土壌断面を作成することなく，比較的容易に把握することが出来る（今井ら, 2006; Eguchi et al., 2009a）．VPR は，広域多地点（中津ら, 2003; 望月ら, 2016）あるいは圃場スケール（近江谷, 1998; Grunvald et al., 2001; Eguchi et al., 2009b; 江波戸・岡崎, 2018; Ebato, 2020）での対象とする土層の物理性評価や三次元的な土層調査，更には特定の作物を対象とした土壌の物理性改良目標の提案（瀧ら, 2005）等に活用される．

土壌が湿っているときほど，圧縮に対する土壌の降伏応力は小さく（加藤, 1989），PR 値は低下する（Da Silva et al., 1994; Eguchi et al., 2013）．Fig. 2 は 1 つの圃場内で，異なる日に VPR を測定した例だが，土壌の乾湿により，表層（0 ～ 30 cm）で約 2.5 倍，下層（30 ～ 100 cm）で約 2 倍の違いがある．また，VPR 値と土壌水分量の関係は，表層と下層で大きく異なる（Fig. 2）．このことが，土壌の物理性評価指標として VPR 値を利用する上で，一番大きな問題となる．例えば，異なる土壌・作物管理による物理性の変化を VPR で調査するとき，多くの場合，異なる管理下では土壌水分も変化するため，VPR 値の違いが土壌水分の違いによるものか，物理性の変化によるものかを判断することが出来ない．一つの解決策としては，VPR 測定と TDR（time domain reflectometry）による土壌水分測定を同時に行う（Vaz and Hopmans, 2001; Miyamoto et al., 2012）ことだが，異なる処理区間の差を出そうとすれば，Fig. 2 のように異なる乾湿条件の日に VPR 測定を行う必要があるだろう．

VPR 値と SH 値の関係は，土壌構造の異方性により大きく異なる場合がある（Fig. 3）．長期間裸地管理下（まばらに生える雑草を鋤き込むため年 2 ～ 3 回のみロータリー耕起する）にある黒ボク土畑の表層は，鉛直土壌断

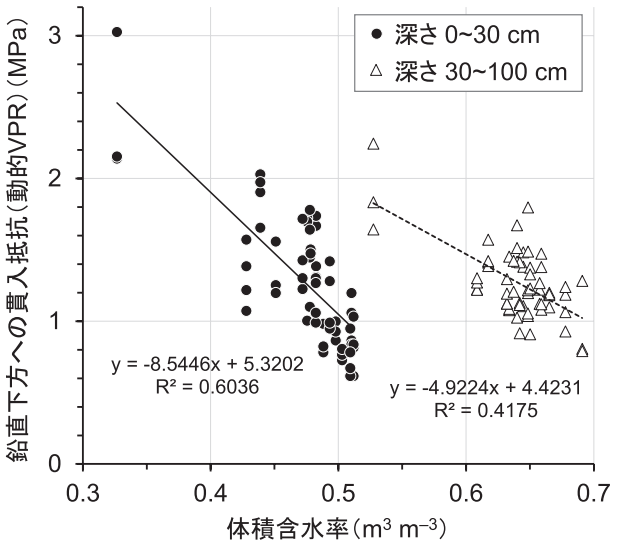



**Fig. 2**　黒ボク土野菜畑圃場（面積 0.1 ha）において異なる日に測定した深さ別土層の鉛直下方への動的コーン貫入抵抗（動的 VPR）（Eguchi et al. [2009b] より算出）と体積含水率（Eguchi and Hasegawa [2008] より算出）の関係.

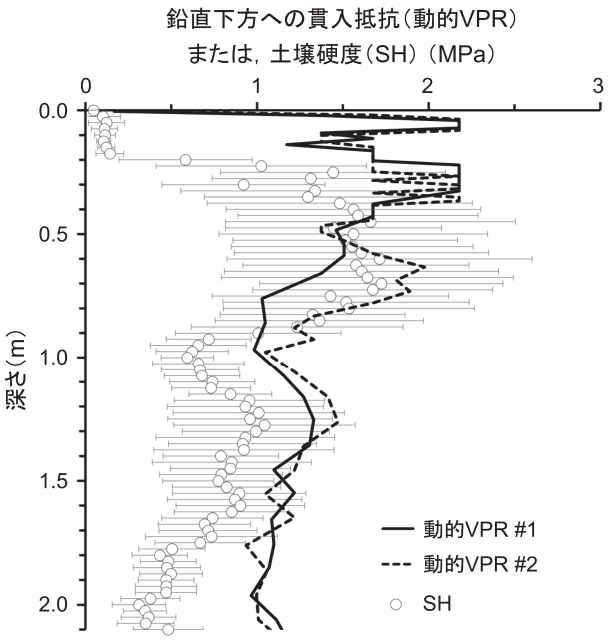



**Fig. 3** 長期裸地管理下の黒ボク土畑における鉛直下方への動的コーン貫入抵抗（動的 VPR 測定を 2 回実施）（Eguchi et al. [2009b] より作成）とポケット型山中式土壌硬度計による土壌硬度（江口・長谷川 [2002] より作成）の比較．エラーバーは標準偏差．

面上の SH（ポケット型の山中式硬度計［頂角 25° 20′，底面直径 9 mm，荷重 8 kg でバネが 20 mm 縮む］を使用）は 0.1 MPa 程度だったが，動的 VPR による測定では最大 2 MPa 以上の大きな値を示した．これは，表層付近は鉛直上方から機械による踏圧の影響を受け，巨視的にはある程度の締固めが生じていたと考えられるが，小さなコーンの先端を土圧のない条件で水平貫入させても，大きな抵抗は受けなかったためと考えられる．一方，深さ 40 ～ 90 cm 付近（弱い柱状構造が発達）では，VPR と SH はほぼ同じ値を示した．この深さの SH のバラつきは非常に大きく，柱状構造では SH の小さい部位が鉛直方向に繋がっている．VPR 測定のコーンは単位構造間の SH が小さい部位に貫入して行き易いのかもしれない．

VPR 値が大きい程，土壌の透水性が低いことを仮定した研究はあるが，その関係が一般的に成り立つことを実測データに基づき明示した報告は見当たらない．反対に，Eguchi et al.（2009a）は，沖積低地の水田下層を対象に，VPR が大きい砂礫層は，VPR が小さい粘土層よりも飽和透水係数が高いことを示した．VPR と土壌の透水性の間に何らかの関係が成り立つかどうかについては，各調査地において実測データによる確認が必要である．

## 3. 作物生育と関連づけた土壌の物理性評価

### 3.1 最小制限水分域（LLWR）

作物の生育改善・収量向上等を目的とした土壌の物理性評価手法としては，35 年以上前に提案された非制限水分域（non-limiting water range, NLWR）（Letey, 1985; 遅澤ら, 1990）がある．これは，後に，最小制限水分域（least limiting water range, LLWR）（Da Silva et al., 1994）と名称変更され，現在も世界各地で多くの研究が進められている（Mishra et al., 2015; Oliveira et al., 2019; Kazemi et al., 2020; Li et al., 2020）．

この手法の最大の特徴は，それまで個別または多元的に評価されることが多かった複数の土壌物理性因子を，LLWR という体積含水率の指標（$m^3\ m^{-3}$ または vol%）により，定量的かつ一元的に表した点にある．即ち，作物の根生育を制限する主な物理的要因として，①根伸長に対する機械的阻害（mechanical impedance）が制限とならない土壌硬度（SH）（<2 MPa [Letey, 1985]，または，<1.2 MPa [遅澤ら, 1990]），②土壌水のマトリックポテンシャルから見た根吸水に対する有効水分域の下限（永久萎凋点：−15 MPa）から上限（圃場容水量：−10 kPa [Letey, 1985]，または，−6 kPa [遅澤ら, 1990]）までの体積含水率，③根呼吸を阻害しない通気性（気相率：>10 vol% [Letey, 1985]，または，相対ガス拡散係数 $D/D_0$：>0.005 ～>0.02 [Lima et al., 2020; 遅澤ら, 1990]）の 3 因子に注目し，これらが制限とならない水分域を LLWR と定義している．LLWR の 3 因子のうち，②有効水分域の体積含水率（以下，有効水分率）と③通気性は勿論，①機械的阻害も土壌水分（とかさ密度［bulk density］）の関数として表され（Da Silva et al., 1994），乾燥による土壌の硬化と水分不足から，過湿による酸素不足までを考慮することができる．したがって，LLWR が大きい土壌は，干害や湿害を受け難い土壌，と言うことが出来る．

また，LLWR の① ～ ③の因子に加えて，土壌の透水性も考慮した積分水分容量（integral water capacity, IWC）（Groenevelt et al., 2001; Kazemi et al., 2020）や，これら① ～ ③の閾値を固定値としない LLWR（Lima et al., 2020）等が提案されている．土壌の物理的な質の定量的評価指標としては，Dexter（2004）が提案した $S$ 値（$cm^{-1}$）（土壌水のマトリックポテンシャルの自然対数に対する土壌の重量含水率の曲線の変曲点における傾き）があるが，Asgarzadeh et al.（2010）は，LLWR や IWC と $S$ 値との間には，有意な正の相関関係があることを示している．

これら LLWR 等の物理性の指標に共通する特徴は，いずれも，土壌の水分特性曲線が中心的役割を果たす点にある． LLWR は，根の生育に対する土壌の物理性の影響を単純化し過ぎている面はあるが，実用的・汎用的な簡易評価指標として，また，何が主な物理的制限要因となっているかを理解し，現象と原因の関係をできるだけ単純化して整理する上で，更に，土壌の物理性診断（問題の所在を特定し，処方箋を出す）を行う上で，有用である．上記① ～ ③の因子が根生育の制限となるそれぞれの閾値は，土壌・作物条件によって変化しうるものであり（長谷川, 1994），適用対象に応じて変更することも必要だろう．例えば $D/D_0$ <0.02 となる気相率は，黒ボク土は <15 ～ 20 vol%，非黒ボク土は <10 ～ 15 vol% で

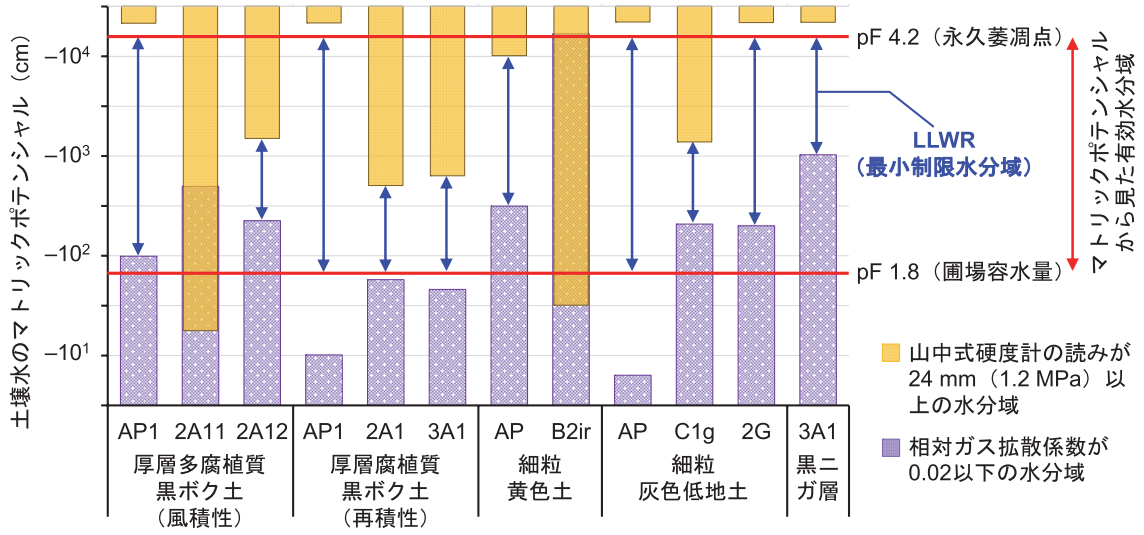



**Fig. 4**　異なる土壌の最小制限水分域（LLWR）．遅澤ら（1990）より作成．

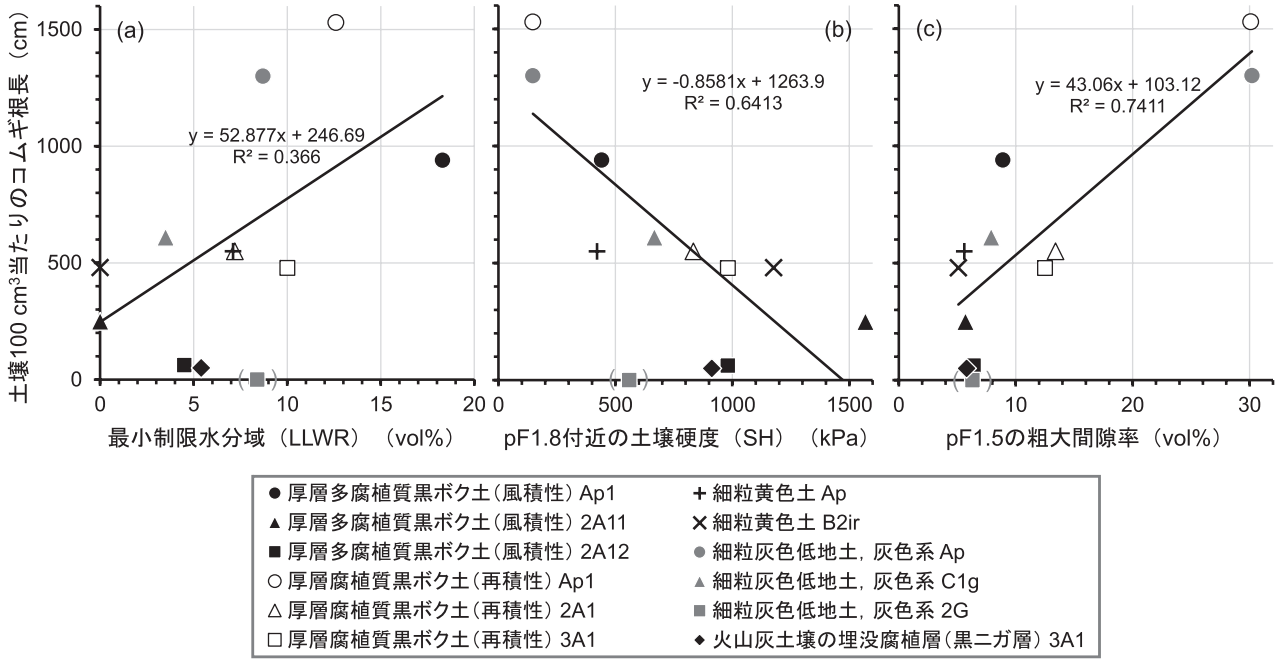
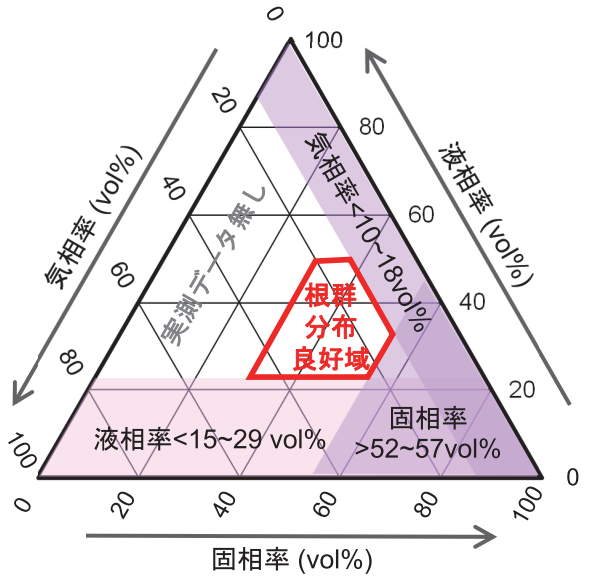



**Fig. 5**　コムギ幼植物の根長密度と（a）土壌の最小制限水分域（LLWR），（b）土壌硬度（SH）及び（c）粗大間隙率の関係．遅澤ら（1990）より作成．回帰式は，硫化物等の影響により根長ゼロだったプロットを除外して作成．なお（a）に相当する原著のグラフでは，有効水分域の上限をコムギ栽培土壌の水分状態に近い pF1.5 として LLWR を求め直してプロットしたと思われ，高い相関係数 0.71 が示されている．

ある（遅澤, 1998）．

遅澤ら（1990）は，熊本県内の異なる土壌タイプの不撹乱土壌コアの LLWR を測定（Fig. 4）すると共に，マトリックポテンシャルを −30 cm に調節した砂柱上に各コアを置き，コムギを播種して幼植物の根長密度を計測した．その結果，LLWR が大きい程，根長密度が高くなる関係が得られ（Fig. 5a），根の生育に対する土壌の物理性指標としての LLWR の有効性が示された．但し，土壌水分状態がほぼ一定だったことが原因と考えられるが，LLWR よりも土壌硬度（Fig. 5b）や粗大間隙率（Fig. 5c）の方が，根長密度との関係が明瞭だった．現地土壌では，乾湿が繰り返されるため，干害・湿害の受け難さの指標である LLWR の有効性は，より高まると考えられる．あるいは，基本的に天水依存で畑農業を広く実施可能な日本の湿潤気候下では，畑灌が必要不可欠な諸外国の乾燥地農業に比べて土壌水分の変動幅が比較的小さく，LLWR を導入する利点はさほど大きくないのかもしれない．そのためかどうかは不明だが，残念ながら，日




**＜根量の判定＞**
土壌断面調査データに基づき，根群分布を以下の3段階で区分
『良好』（根量の判定が「富む」または「含む」）
『粗』（同じく「粗」）
『不良』（同じく「殆ど無し」）

**＜根群分布良好域（非火山灰土壌の場合のみ）＞**
根の分布が『良好』な土層の殆どが分布する三相分布の領域を作物別に決定（または準決定）

固相の上限：52~57 vol%
固相の下限：準決定（<20~42 vol%はデータ無し）
液相の上限：決定できず
液相の下限：準決定（>15~29 vol%は根の分布が『粗』または『不良』の土層の殆ど無い）
気相の上限：決定できず
気相の下限：10~18 vol%

**Fig. 6** 非火山灰土壌の三相分布と根群分布良好域．三好（1972）より作成．

本の LLWR の研究は遅澤ら（1990）以外には見当たらず，現地土壌へ適用した事例もない．しかし，国際的には LLWR の研究は非常に盛んであり，LLWR は，土壌の耕起やカバークロップの影響に対して感受性が高いこと（Oliveira et al., 2019），土壌炭素との関係が見られるが作物生産性との関係は不明瞭であること（Mishra et al., 2015），トウモロコシ収量変動をよく説明できること（Li et al., 2020）等が報告されている．

### 3.2 土壌硬度（SH）及び他の物理性因子と根生育の関係

日本では LLWR の研究は殆ど実施されていないが，同様の方向を目指していたと思われる研究として，土壌の三相分布と SH が土壌中の作物根（水稲以外）の分布に与える影響を包括的に調べた三好（1972）の研究がある．この著者は，土壌断面調査での目視判定による根量を 3 区分して，不撹乱土壌コアの三相分布の三角座標上に多数（計 3285 点）プロットし，土壌タイプ別・作物別に分けて，「根群分布良好域」（根量が「富む」または「含む」と判定される土層の殆どが持つ三相分布の領域）を決定しようとした．その結果，「根群分布良好域」は，土壌タイプ別・作物別に異なるが，(i) 固相率の上限（52 ～ 57 vol%），(ii) 液相率の下限（15 ～ 29 vol%），(iii) 気相率の下限（10 ～ 18 vol%）でおよそ区切られる範囲内に存在していた（Fig. 6）．これら (i) ～ (iii) の境界は，それぞれ，LLWR の①機械的阻害，②有効水分率，③通気性の各因子の閾値と深く関係する．しかし「根群分布良好域」は，非火山灰土壌でのみ決定でき，火山灰土壌では決定できなかった．それは，噴出起源・年代が異なる火山灰の累積層を母材とする黒ボク土では，表層よりも固相率が低い下層の方が，SH が大きい傾向を示す（三好, 1972; 農林水産省農業環境技術研究所, 1984）等，非黒ボク土とは異なる物理性を有するためである．

三好（1972）は更に，SH と根群分布良好比率（根量が「富む」または「含む」と判定される土層の割合）の関係を調べた（Fig. 7）．その結果，個別に見れば土壌タイプ別・作物別に大きく異なる部分もあるが，全体的には，火山灰土壌も含めて，SH : 22 ～ 23 mm（0.84 ～ 0.98 MPa : Fig. 1 の理論式による）付近が閾値となり，それ以上の緻密な土層では根の生育が不良になることが示唆された．

水稲における土壌の SH と根の生育の関係については，瀧島・佐久間（1969）の研究がある．この著者らは，人工的な充填土壌と不撹乱土壌の両方について，SH や他の基本的な土壌物理的性質と，水稲の根量や収量との関係を調べ，水稲収量を殆ど制限しない SH 値として，湛水時 <17 mm（落水後 <23 mm）を提案している．また，不撹乱土壌では根が伸長可能な間隙構造の発達が顕著であり，人工的な充填土壌に比べて，圧縮による SH の上昇に対する根量・収量の低下傾向が弱いこと，土壌タイプ（土性等）の違いが不明瞭になること等を示した．即ち，土壌の不均一な間隙構造が，圧縮による土壌マトリクスの物理性の悪化がもたらしうる根生育への負の影響を緩和したと言える．

三好（1972）と瀧島・佐久間（1969）に共通するのは，根の生育を説明する上で有用な土壌の物理性の指標として，最終的には SH（LLWR の①機械的阻害）という一つの因子を抽出したことである．これらの研究により，SH は測定が簡便かつ有用な物理性指標として認識され，現場でも広く普及したと考えられる．

しかしここで注意すべき点は，国際的に広く使われている LLWR の機械的阻害の閾値が 2.0 MPa（Da Silva et al., 1994）であるのに対して，三好（1972）の結果はその半分にも満たない（0.84 ～ 0.98 MPa）ことである．日本と世界では同じような作物を栽培しているにも拘わら

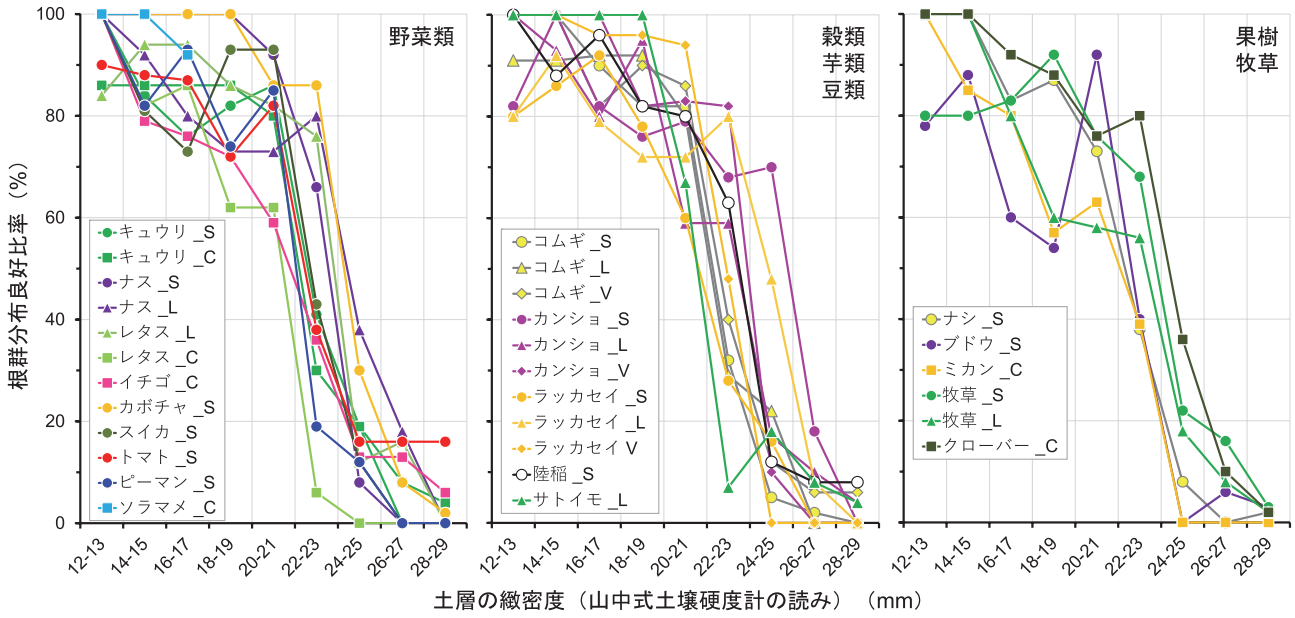



**Fig. 7**　様々な作物の根群分布良好比率と土壌硬度（SH）の関係．三好（1972）より作成．作物名の後の S は砂質土，L は壌質土，C は粘質土，V は火山灰土壌を示す．

ず，作物の根自体の強さにこれだけ大きな差が生じるとは考えにくい．SH は土壌の物理性のある一側面を示す値に過ぎず，見かけ上，SH が根の生育を説明する因子として抽出されたとみなす方が妥当かもしれない．例えば，Fig. 5b が示す根長密度と SH の間の負の相関関係は，コムギの根が僅か 0.5 MPa 未満の SH で既に機械的阻害を受けていたことを示すのではなく，粗大間隙率が 10 vol% に満たないこと（Fig. 5c）が，通気性の低下をもたらし，酸素不足で根の呼吸が阻害された結果，根の伸長が制限されたと解釈（診断）できるだろう．国際的に広く利用されている 2.0 MPa（山中式硬度計：27 mm）が，根の伸長に対する機械的阻害の閾値のデフォルト値として妥当かどうかについても検討すべきだが，日本国内でよく利用される閾値（22 ～ 24 mm）は，土壌の通気性（気相率）の低下等の影響を含む結果であることは認識すべきであり，見かけ上の簡易指標とみなすべきである．

### 3.3 地力増進基本指針

国としての農地土壌の具体的な改善目標値は，地力増進法（農林水産省, 1984）に基づく地力増進基本指針（農林水産省, 2008）の中で，地目別（水田，普通畑，樹園地）の土壌の物理的・化学的性質について示されている．Table 1 では，その中から物理的性質について抜粋し，整理した（一部，表現を改変）．

この指針は，LLWR とほぼ同じ物理性因子に注目しているが，各因子が制限となる閾値は異なっている．例えば，普通畑の改善目標値について，①機械的阻害については，SH <22 mm（圧力：<0.84 MPa），②有効水分率は，易有効水分域のみを対象に，−49 ～ −6 kPa（pF：1.8 ～ 2.7），③通気性は，重力排水後の粗大間隙量（透水性とも密接に関係する）として，>10 vol%，が示されている（Table 1）．

### 3.4 多元的な視点と一元的な指標の使い分け

地力増進基本指針（Table 1）に沿った土壌物理性の改善方向は，LLWR とほぼ同じと思われるが，多元的に示されている．同様に，瀧ら（2005）は，ハウスミカン園の土壌改良目標値として，静的 VPR による貫入可能深度（静的 VPR <25 kgf cm$^{-2}$ の土層深）や主要根群域の厚さ等に加えて，下層土については，SH：<20 mm，固相率：40 vol% ～ 50 vol%，粗大間隙率：10 vol% ～ 20 vol% を提案し，多元的な視点の必要性を示している．営農現場における農地土壌の物理性診断（安西, 2016）においても，必ず土壌断面調査が行われ，土壌から得られる多元的な情報と作物生育の状況を照らし合わせながら（一般的な推論と現実とのギャップの擦り合わせを行いながら），その場に合った解釈・診断を行い，処方箋（改良方針）を提示している（その後の経過観察も行う）．

LLWR は，多元的な土壌の物理性評価手法を一元化し，定量的な評価指標として取り扱い易くした．しかしその結果（Fig. 5a）を，診断や改良に結び付けるためには，再び多元的な視点（Figs. 5b, 5c）が必要となる．Fig. 5 の例では，低い通気性（気相率）（Fig. 5c）による酸素不足が一番の問題であり（診断），気相率を増大させるための改良方針を提示すべきだろう．また，複数の因子の改良が必要と診断される場合には，どの因子をどれだけ改善すれば一番効果的か？ といった判断が必要となる．その際には，LLWR のように一元化した指標を用いれば，異なる因子の改善効果を数値化でき，最適な改善シナリオを提示することが可能である．

**Table 1** 地力増進基本指針（農林水産省, 2008）における土壌の物理性の改善目標（表現方法を一部改変 [1]）.

| | 改善目標値 | | |
|---|---|---|---|
| | 水田 | 普通畑 | 樹園地 |
| 作土の厚さ | 15 cm 以上 | 25 cm 以上 [9] | – |
| 主要根群域 [2] の厚さ | – | – | 40 cm 以上 |
| 根域 [3] の厚さ | – | – | 60 cm 以上 |
| 鋤き床層（水田）の緻密度 [4]（貫入抵抗）の最小値 | 14 mm 以上（0.26 MPa 以上） | – | – |
| 鋤き床層（水田）の緻密度（貫入抵抗）の最大値 | 24 mm 以下（1.2 MPa 以下） | – | – |
| 主要根群域（水田・普通畑）・根域（樹園地）の緻密度（貫入抵抗）の最大値 | 24 mm 以下（1.2 MPa 以下） | 22 mm 以下（0.84 MPa 以下） | 22 mm 以下（0.84 MPa 以下） |
| 主要根群域（普通畑）・根域（樹園地）の粗孔隙量 [5] | – | 10 vol% 以上 | 10 vol% 以上 |
| 主要根群域の土層 40 cm（普通畑）・の土層 60 cm（樹園地）当りの易有効水分保持能 [6] | – | 20 mm 以上 | 30 mm 以上 |
| 湛水透水性 [7] | 20 mm 以上 30 mm 以下 [8] | – | – |

[1] 本指針における用語の定義や改善目標値の留意点などについて，できるだけ原典と同じ表現を使用したが，読者の理解のために一部改変した

[2] 主要根群域の定義は，水田では深さ 30 cm までの土層，普通畑では深さ 40 cm までの土層，樹園地では細根の 70 ～ 80 vol% 以上が分布する土層のことであり，改善目標値は，樹園地についてのみ提示されている

[3] 根域（樹園地についてのみ定義）は，根の 90 vol% 以上が分布する範囲のことであり，この根域土層が，樹園地土壌の物理性改善目標の対象となる

[4] 緻密度の改善目標値は，山中式硬度計の読み（mm）で示されているが，この表では参考値として貫入抵抗値を併記

[5] 粗孔隙量は，降水等が自重で透水することができる粗大な孔隙（粗孔隙）が占める容積割合を百分率（vol%）で表した値

[6] 易有効水分保持能は，対象土層が保持する易有効水分量（pF1.8 ～ 2.7 の水分量）を水柱（mm）で表した値

[7] 湛水透水性は，水田の日減水深（mm）

[8] 日減水深は，水稲の生育段階等により，10 mm 以上 20 mm 以下，で管理することが必要な時期がある

[9] 普通畑の作土の厚さは，根菜類等では 30 cm 以上，特にごぼう等では 60 cm 以上確保する必要がある

## 4. 日本の農地土壌の平均的な物理性とその改良方向

個々の営農現場での土壌の物理性評価・診断をより効果的に行う上で，日本の農地土壌の平均的な物理性を把握しておくことは有用と考えられる．また国全体として，日本のダイズ（農林水産省, 2021），コムギ（関根・梅本, 2015），トウモロコシ（農林水産政策研究所, 2019; 菅野, 2017）等，主な穀物の単収は諸外国に比べて低く，その原因の一つが土壌の物理性にあるかどうかを検討する上でも，有用と考えられる．ここでは，日本の農地土壌の物理的性質データベース（SolphyJ）（江口ら, 2011）に基づき，日本の農地土壌の平均的な物理性を概観する．このデータベースは，土壌統群別（60 区分）・地目別（5 区分）・層位別（最大 6 層）の土壌の物理的性質の全国平均値を収納している．これを土壌 2 区分（黒ボク土，非黒ボク土），地目 2 区分（水田，畑［樹園地，草地，施設畑を含む］）に大別し，各土壌統群毎の物理的性質の全国平均値の分布を層位別または土壌断面別に示す（Figs. 8 ～10）と共に，LLWR や地力増進基本方針における各閾値との比較を行う．

### 4.1 機械的阻害

土壌断面調査時の SH（Fig. 8）は，畑の耕盤層（第 2 層）以深では，ごく一部の土壌統群で 2 MPa に近い値を示しているが，全体的には 1 MPa 以下を示す土壌統群が殆どである．即ち，日本の農地土壌では，通常の水分状態で機械的阻害が根の伸長を強く妨げる土壌は，かなり少ないと考えられる．なお，地力増進基本方針（Table 1）では，畑・樹園地については 0.84 MPa 以下が目標とされる．これを上回る SH 値は，特に非黒ボク土畑（Fig. 8d）の耕盤層以深で顕著に見られるが，前述したように，この目標値は低い通気性（気相率）の影響を含むものであり，機械的阻害そのものが根の伸長に直接影響する土壌は少ないと考えられる．

### 4.2 有効水分域の体積含水率（有効水分率）

土壌の全間隙量を深さ方向に積算すると（Fig. 9a），黒ボク土は非黒ボク土よりも間隙量が大きいこと，また，水田と畑では明瞭な差がないことが分かる．黒ボク土は，採土時の保水量（Fig. 9b）は非黒ボク土より大きいが，作物に利用可能な有効水分量（Fig. 9c）は非黒ボク土と同等である．これを有効水分率に変換すると，多くの土壌統群は 25 ～ 35 vol% の範囲にあり，深さ 1 m ま

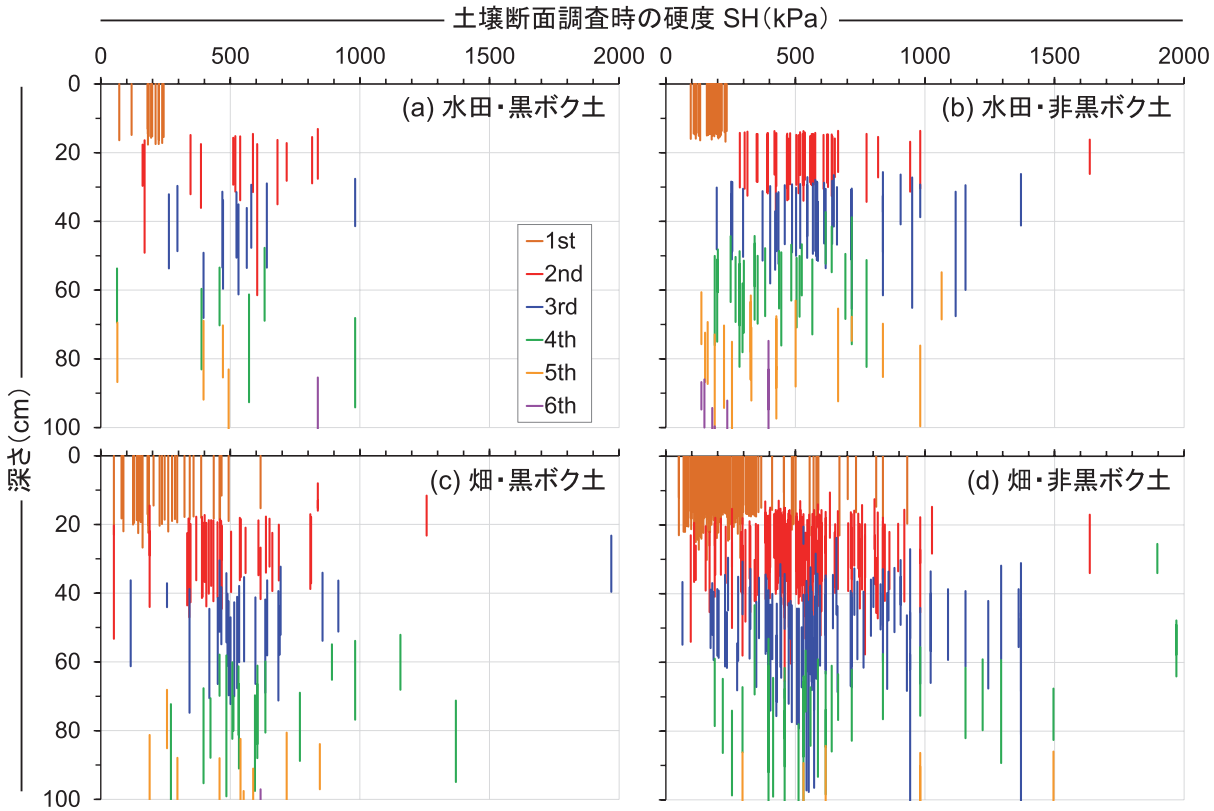



**Fig. 8**　日本の農地土壌の層位別（第 1 ～ 6 層）の土壌硬度（SH）．江口ら（2011）より作成．各プロットは地目別 · 土壌統群別の全国平均値，プロットの長さは層厚を表す．

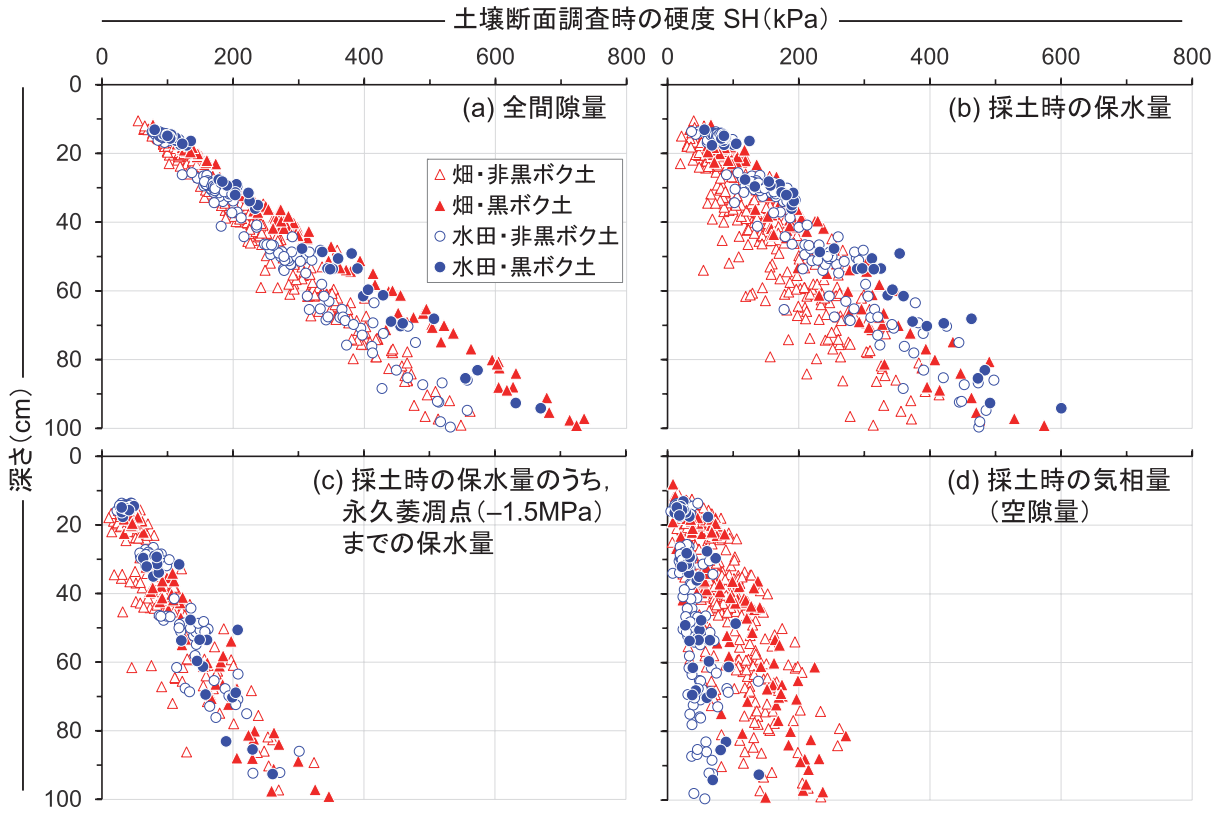



**Fig. 9**　日本の農地土壌における（a）間隙量，（b）採土時の保水量，（c）採土時の保水量のうち永久萎凋点（−1.5 MPa）までの保水量，（d）採土時の気相量（空隙量）の深さ方向への積算値（江口ら [2011] より作成，江口 [2021] を一部改変）．

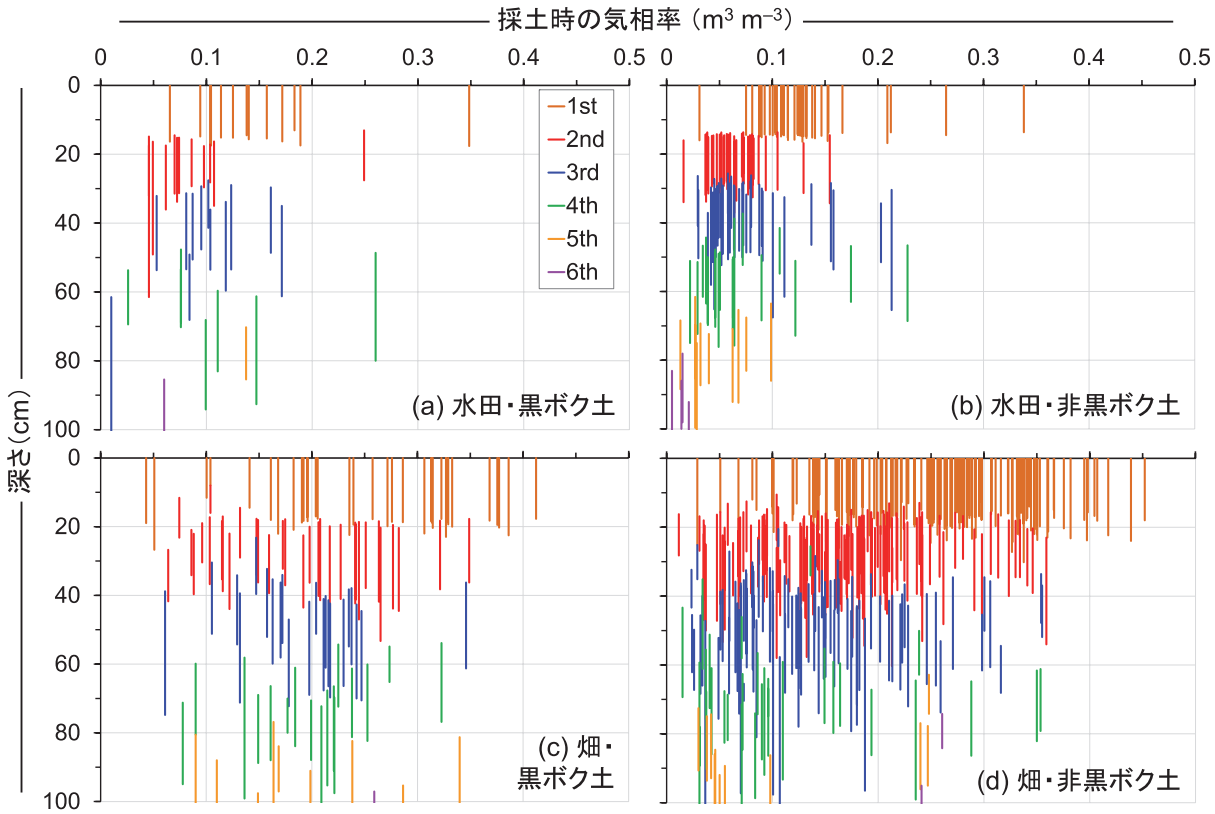



**Fig. 10** 日本の農地土壌における層位別（第 1 ～ 6 層）の採土時の気相率．江口ら（2011）より作成．各プロットは地目別・土壌統群別の全国平均値，プロットの長さは層厚を表す．

での土壌断面で考えれば十分な有効水分量（250 ～ 350 mm）を保持している（Fig. 9c）．これは日本の温暖湿潤な気候条件と密接に関係していると思われる．

### 4.3 通気性（気相率）

採土時の気相率を深さ方向に積算すると（Fig. 9d），畑では深さと共に積算気相量（空隙量）が増加し，深さ 1 m までを見ると 100 ～ 300 mm の水を貯留可能な空隙量が存在する．一方，水田の空隙量は，耕盤層以深では殆ど増加せず（Fig. 9d），落水時（採土時）でも耕盤層以深の土壌水分状態は飽和に近いと言える．

土壌の気相率を層位別に見ると（Fig. 10），水田の耕盤層以深では殆どの土壌統群が ＜10 vol% の気相率を示し，ほぼ全ての土壌統群において通気性が作物（畑作物）の根呼吸にとって阻害要因になると考えられる．水田を畑転換すると，耕盤層以深の気相率は徐々に増加することも考えられるが，数年間隔で田畑輪換する栽培体系では，大きな変化は期待できないのではないだろうか．

畑については，黒ボク土では気相率 ＜10 vol% の土壌統群は少数だったが（Fig. 10c），非黒ボク土では全体の 3 割程度が ＜10 vol% の気相率を示し（Fig. 10d），土壌タイプによっては，耕盤層以深の酸素不足による根呼吸の阻害が大きな問題になると推察される．

### 4.4 粗大間隙による土壌の通気性の改良

日本の農地土壌の物理性を土壌統群別・地目別の平均値で見たとき，通気性（Fig. 10）が一番の問題であるとする上記の推察（診断結果）が正しいとすると，どのような処方箋（改良方針）を提示すべきだろうか．

まず作土層（第 1 層）を見ると，少数ではあるが，気相率 ＜10 vol% の土壌統群が存在する．こういった土壌では，表面排水や暗渠排水等による排水性改善のための対策は勿論，土壌の物理性自体を改善する対策として，堆肥や緑肥等の有機物施用により，粗大間隙率を増大させることが有効と考えられる．また Takahashi et al.（2018）は，水田転換ダイズ畑を対象に，農業土木的な対策として，地表面から深さ 15 ～ 20 cm，幅 1.5 cm の粗大間隙（スリット）を播種位置に沿って作成し，これによる通気性向上（酸素供給）がダイズ根の伸長と収量の向上に繋がったと報告した．一方，耕盤層の破砕は効果がなかったとしている．即ち，土壌マトリクスの物理的性質（容積 100 mL 程度の不攪乱土壌試料で把握できるもの）は変化せず，耕盤層破砕による物理性改善効果はなくても，人工的な粗大間隙を作り，それに沿って根が伸長することで，根呼吸の阻害は大幅に軽減されたと言える．

Fig. 4 の厚層多腐植質黒ボク土（風積性）の耕盤層（2A11）及び細粒黄色土の耕盤層（B2ir）では，LLWR が算出できず（ゼロとなる），土壌の物理性はこれらの試料の中では最も不良だったと言える．しかしコムギの根長密度は中庸であり（Fig. 5），瀧島・佐久間（1969）が指摘しているように，土壌の粗大間隙や土壌と円筒管の間の壁面に沿った根の伸長が優勢だったことが推察され

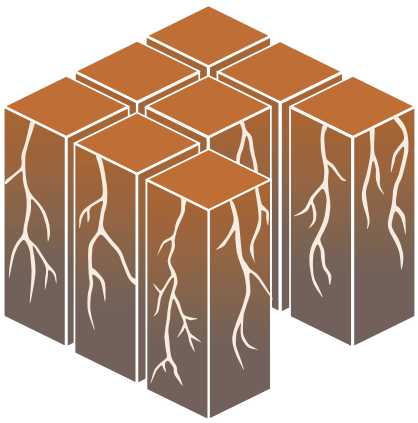


**Fig. 11**　重粘土質転換畑における収縮亀裂の発達した土壌構造とダイズ根の分布の模式図．Hasegawa and Sato（1987）を参考に作成．

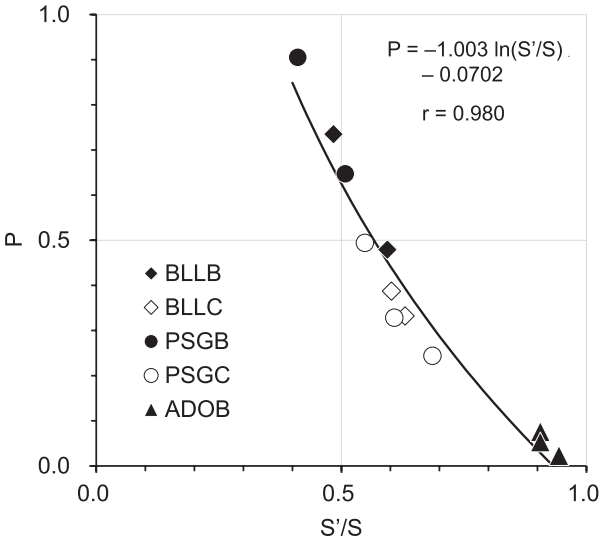



**Fig. 12**　異なる土壌（BLLB 及び BLLC は褐色低地土 B 層及び C 層，PSGB 及び PSGC は疑似グライ土 B 層及び C 層，ADOB は黒色火山性土 B 層）の大型不攪乱土壌カラム内におけるトウモロコシ根の分布が粗大間隙の位置と一致する割合（P）と混合エントロピーの相対値（S′/S）との関係．Hatano et al.（1988）より作成．

る．Hasegawa and Sato（1987）によれば，収縮亀裂（平均 15 cm 幅）が発達した重粘土ダイズ畑では，ダイズの根は土壌マトリクス内ではなく亀裂面上に分布し（Fig. 11），細根だけを土壌マトリクス内に伸ばして吸水を行う．土壌マトリクス内の鉛直上方への水フラックスは極めて小さく，ダイズが蒸発要求に見合うだけの吸水を行うためには，根が亀裂に沿って鉛直下方へ深く伸長することが必要不可欠としている．Hatano et al.（1988）は，大型不攪乱土壌カラム内におけるトウモロコシの根の空間的分布を異なる土壌タイプについて調査し，根の分布は，褐色低地土 B 層や疑似グライ土 B 層では，粗大間隙（亀裂幅または孔径：>0.5 mm）への依存度が高い（同じ位置に分布する）こと，一方，黒ボク土 B 層では，粗大間隙に依存しないことを示した（Fig. 12）．これらの研究は，特に土壌マトリクスの物理性が根の生育にとって不良なとき，根は粗大間隙を通じて伸長し，酸素不足による呼吸阻害を回避すること，また，根は基本的に，粗大間隙を利用して根の伸長や養水分の吸収を効率良く行っていることを示す．LLWR から見て土壌マトリクスの物理性が不良の土壌では，土壌マトリクスを根本的に改善する対策よりも，粗大間隙を利用する対策の方がより効率的で有効性も高いと考えられる．

日本の農地土壌の耕盤層以深の気相率を見ると（Fig. 10），<10 vol% となる土壌統群が多い．作土層とは異なり，耕盤層以深の粗大間隙を人工的に作成する方法は限られる（心土破砕，深耕等）．しかしその効果は一般に一時的であり，費用対効果や失敗するリスク，水田に戻したときの機械走行上の地耐力低下に繋がる可能性等を考えると，別の角度からより持続可能な改善対策が必要である．また，人工的な粗大間隙の作成と明渠・暗渠排水を組み合わせても，重力排水（pF：1.8 程度）以上の水分低下は期待出来ない．これに対して，重粘土質転換畑に耐湿性に優れた作物を導入することで，土壌水分量を低下させ，粗大間隙や土壌構造の発達を促す方法（吉田ら，1997）がある．また黒ボク土畑の締め固め土層では，キマメの主根がこれを貫通して下層へ伸長し，深さ 1 m 以上まで達した（松元ら，1992）という．耕盤層以深まで到達する鉛直下方への粗大間隙構造を発達させる持続可能な対策として，こういった作物根の能力（耕盤層を貫通する根成孔隙の作成）を利用し，これを輪作体系の中に位置付けることが出来れば，機械走行上の耕盤層の地耐力を低下させることなく，低コストかつ省力的に，通気性を改善できる可能性がある．不均一性は土壌の本質であり，不均一かつ持続可能な粗大間隙構造を意図的に作出・活用することが，日本の農地土壌の物理性改善及び作物単収増加にとって，最も必要な対策と考えられる．

## 5. おわりに

先日，事前に何も土壌情報がない，広い（と言っても約 2.2 ha）緩傾斜畑圃場（裸地状態）を目の前にして，そこで連作する飼料用トウモロコシの生育が悪いことと土壌物理性の関係について考える機会があった．最初に，圃場の中央付近で簡易な土壌断面調査と，活性二価鉄イオン及び活性アルミニウムの反応試験（日本ペドロジー学会，1997）を行い，耕盤層の上層は活性二価鉄イオンの反応が顕著で表層グライ化が進んでいること，周辺の土壌図からアロフェン質黒ボク土を予想したが深さ 40 cm 付近までは活性アルミニウム反応が殆ど無く，圃場造成時の客土層であることが推察された．作物の生育と土壌の関係を考える上でこれらの知見は必要不可欠であり，これらのデータと面的な VPR 値を組み合わせれば，点だけでなく面的にも有効な処方箋を出せるかもしれない．

VPR は，土壌の様々な物理的性質との相関が高いため

に，値の大小や空間的分布の原因，根の生育に対する意味等を，普遍的な手法・理論等で説明・理解するのは難しい．VPR は，土性やかさ密度の変化を伴う層界を面的に同定するには適しているが，三次元的に得られるデータの意味を解釈する上で，点での土壌断面観察と SH 測定は欠かせない．現地土壌の物理的環境（特に土壌水分，地下水位，巨視的な土壌構造等）は現地でしか把握できず，根生育の制限となっている土層も，現地土壌断面の根量の観察等を通してしか推定できない．例えば，根域以深の難透水層上には飽和帯が形成され易く，一般に排水不良の原因となるが，地下水位への感受性は作物によって大きく異なり（幸田, 1982），状況によっては貴重な水分供給源ともなる．VPR は基本的に，土壌断面調査で得られる点の知見を面に広げるためのツールとして捉えるべきであり，根の生育を対象とした土壌の物理性診断では，点の測定である LLWR 等，有効水分率や通気性も考慮した，総合的な物理性評価手法の枠組みの中に位置づけるべきである．例えば，VPR 値から耕盤層の透水性不良と作物生育不良の関係が推定されたなら，土壌断面調査を行うと共に，現地測定が容易な負圧浸入計（加藤, 1997）を利用した透水性の確認や，土壌の不攪乱試料から得られる基本的な物理的性質の把握が必要である．VPR 値の面的分布と土壌断面調査等による点の情報を組み合わせ，広大な一筆圃場にも適用可能な土壌の物理性評価・診断技術の今後の発展に期待したい．

## 謝辞

本研究の一部は，生研支援センター「イノベーション創出強化研究推進事業（02014B）」の支援を受けて行った．図の作成に協力いただいた農環研の平野七恵氏に感謝する．

## 引用文献

安西徹郎 (2016): だれにもできる土の物理性診断と改良, pp. 1–95. JA 全農 肥料農薬部編, 農文協, 東京.

在原克之 (1997): 貫入式土壌硬度計法. 土壌環境分析法編集委員会編, 日本土壌肥料学会監修, 土壌環境分析法, pp. 36–38. 博友社, 東京.

Asgarzadeh, H., Mosaddeghi, M.R., Mahboubi, A.A., Nosrati, A. and Dexter, A.R. (2010): Soil water availability for plants as quantified by conventional available water, least limiting water range and integral water capacity. Plant Soil, 335: 229–244.

Da Silva, A.P., Kay, B.D. and Perfect, E. (1994): Characterization of the least limiting water range of soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 58(6): 1775–1781.

Dexter, A.R. (2004): Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. Geoderma, 120: 201–214.

江波戸宗大 (2018): 農業機械による作業前後で簡易土壌物理性診断を行うと作業効果を定量化できる. 農研機構中央農業研究センター 2018 年研究成果情報, https://www.naro.affrc.go.jp/project/results/4th_laboratory/carc/2018/carc18_s19.html（2021 年 6 月 1 日）

江波戸宗大・岡崎圭毅 (2018): 土壌物理性簡易診断として圃場全面深さ 60 cm までの土壌硬度を三次元分布で評価する. 農研機構中央農業研究センター 2018 年研究成果情報, https://www.naro.affrc.go.jp/project/results/4th_laboratory/carc/2018/carc18_s18.html（2021 年 6 月 1 日）

Ebato, M. (2020): Evaluation of soil hardness in paddy fields by cone penetrometer as a simple soil physical diagnosis method. Agric. Inform. Res., 29(1): 24–39.

江口定夫 (2008): モデルによる土壌，農耕地，流域における窒素動態の理解. 3. 地形連鎖系スケールの窒素動態—調査技法とモデル化手法—. 土肥誌, 79(2): 213–227.

江口定夫 (2021): 農地土壌における水移動と環境保全. 農業および園芸, 96(1): 28–33.

江口定夫, 青木和博, 神山和則 (2011): 日本の農地土壌の物理的性質データベース SolphyJ の作成. 農業環境技術研究所研究成果情報, http://www.naro.affrc.go.jp/archive/niaes/sinfo/result/result27/result27_60.pdf（2021 年 6 月 1 日）

江口定夫, 長谷川周一 (2002): 畑地黒ボク土の土壌構造と溶質濃度分布の関係. 土肥要旨集, 48: 3.

Eguchi, S. and Hasegawa, S. (2008): Determination and characterization of preferential water flow in unsaturated subsoil of Andisol. Soil Sci. Soc. Am. J., 72(2): 320–330.

Eguchi, S., Nakajima, Y., Yabusaki, S., Kasuya, M., Shibayama, H., Tsunekawa, A. and Imai, K. (2009a): Denitrification during vertical upwelling at an alluvium-diluvium interface below the upland perimeter of a riparian paddy. J. Environ. Qual., 38(6): 2198–2209.

Eguchi, S., Sawamoto, M. and Shiba, M. (2009b): Field scale determination of the aquifer-aquitard boundary in Joso Clay by cone penetrometry. Soil Sci. Plant Nutr., 55(3): 337–348.

Eguchi, S., Sawamoto, M., Shiba M., Iiyama, I. and Hasegawa, S. (2013): Wellbore-wall compression effects on monitored groundwater levels and qualities. Groundwater, 51(3): 452–460.

Groenevelt, P.H., Grant, C.D. and Semetsa, S. (2001): A new procedure to determine soil water availability. Aust. J. Soil Res., 39: 577–598.

Grunwald, S., Rooney, D.J., McSweeney, K. and Lowery, B. (2001): Development of pedotransfer functions for a profile cone penetrometer. Geoderma, 100: 25–47.

長谷川周一 (1994): 作物の水・酸素要求に対する土壌の供給力. 土壌の物理性, 69: 55–66.

Hasegawa, S. and Sato, T. (1987): Water uptake by roots in cracks and water movement in clayey subsoil. Soil Sci., 143(5): 381–386.

Hatano, R., Iwanaga, K., Okajima, H. and Sakuma, T.(1988):

Relationship between the distribution of soil macropores and root elongation. Soil Sci. Plant Nutr., 34(4): 535–546.

今井克彦, 恒川 歩, 柴山浩子, 糟谷真宏 (2006): 茶園隣接水田における地下水中硝酸態窒素の動態と水稲被害. 愛知県農業総合試験場報告, 38: 7–13.

菅野 勉 (2017): 国産濃厚飼料の可能性を探る. 飼料増産シンポジウム, pp. 1–30. 農林水産省, 一般社団法人日本草地畜産種子協会, https://www.maff.go.jp/j/chikusan/sinko/lin/l_siryo/attach/pdf/index-103.pdf（2021 年 6 月 1 日）

加藤英孝 (1989): 土壌構造悪化の面からみた農耕地土壌の圧縮特性. 土壌の物理性, 59: 7–16.

加藤英孝 (1997): 負圧浸入計法. 土壌環境分析法編集委員会編, 日本土壌肥料学会監修, 土壌環境分析法, pp. 69–73. 博友社, 東京.

Kazemi, S., Nasiri, M., Lajayer, B.A. and Hatami, M. (2020): Integral water capacity (IWC) and least limiting water range (LLWR): prediction using plant growth indices and soil properties. 3 Biotech, 10: 314.

幸田浩俊 (1982): 野菜類と普通作物による低湿地帯の田畑輪換栽培に関する研究 第 1 報 地下水位と作物の生育 · 収量（作土層の水分吸引圧 · 気相率, および土壌養分の動態との関係）. 茨城農試研報, 22: 25–64.

Letey, J. (1985): Relationship between soil physical properties and crop productions. Adv. Soil Sci., 1: 277–294.

Lima, R.P., Tormena, C.A., Figueiredo, G.C., da Silva, A.R. and Rolim, M.M. (2020): Least limiting water and matric potential ranges of agricultural soils with calculated physical restriction thresholds. Agric. Wat. Manage., 240: 106299.

Li, S., Wu, X., Liang, G., Gao, L., Wang, B., Lu, J., Abdelrhman, A.A., Song, X., Zhang, M., Zheng, F. and Degré, A. (2020): Is least limiting water range a useful indicator of the impact of tillage management on maize yield? Soil Tillage Res., 199: 104602.

松井 巌, 藤井芳一, 佐々木美佐子, 柿崎浩之, 森田 泉, 田口辰雄 (1987): 樹園地土壌診断への貫入式土壌硬度計の応用. 秋田果樹試研報, 18: 15–22.

松元 順, 久保田徹, 加藤英孝, 遅澤省子, 有原丈二, 阿江教司 (1992): キマメ根の締め固め土層中への貫入伸長. 土壌の物理性, 64: 3–9.

Mishra, A.K., Aggarwal, P., Bhattacharyya, R., Das, T.K., Sharma, A.R. and Singh, R. (2015): Least limiting water range for two conservation agriculture cropping systems in India. Soil Tillage Res., 150: 43–56.

Miyamoto, T., Fukami, K. and Chikushi, J. (2012): Simultaneous measurement of soil water and soil hardness using a modified time domain reflectometry probe and a conventional cone penetrometer. Soil Use Manage., 28: 240–248.

三浦 覚, 吉永秀一郎, 山家富美子, 河室公康 (1993): 筑波台地の平地林における浅層地下水の特性（I） 帯水層及び難透水層の土壌物理性について. 日本林学会論文集, 104: 389–390.

三好 洋 (1972): 根群発達の良好な土壌条件からみた畑地の有効土層の検討: 畑土壌生産力分級のための指標の再検討と千葉県畑土壌の生産力分級（第 1 報）. 土肥誌, 43(3): 92–97.

望月秀俊, 藤本 寛, 清水裕太, 髙橋英博, 松森堅治 (2016）:岡山県南部地域の乾田直播少量播種栽培における貫入式土壌硬度計による苗立ち予測法の開発. 土壌の物理性, 133: 11–18.

諸遊英行 (1986a): 貫入抵抗：SR-II 型土壌抵抗測定器法, 貫入式土壌硬度計（自動記録型）法. 土壌標準分析 · 測定法委員会編, 日本土壌肥料学会監修, 土壌標準分析 · 測定法, pp. 28–35. 博友社, 東京.

諸遊英行 (1986b): 硬度：山中式土壌硬度計法. 土壌標準分析 · 測定法委員会編, 日本土壌肥料学会監修, 土壌標準分析 · 測定法, pp. 23–28. 博友社, 東京.

内閣府 (2020): Society 5.0. https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/（2021 年 6 月 1 日）

中野恵子, 宮崎 毅, 中野政詩 (1998): 畑地の排水性から見た土壌の物理的肥沃度. 農土論集, 195: 101–112.

中津智史, 東田修司, 沢崎明弘 (2003): 耕盤層の簡易判定法と広幅型心土破砕による対策. 土肥誌, 75(2): 265–268.

日本ペドロジー学会 (1997): 土壌調査ハンドブック改訂版, pp. 1–169. 博友社, 東京.

農業データ連携基盤協議会 (2020): WAGRI. https://wagri.net/ja-jp/（2021 年 6 月 1 日）

農林水産省 (1984): 地力増進法. https://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/hozen_type/h_dozyo/attach/pdf/houritu-1.pdf（2021 年 6 月 1 日）

農林水産省 (2008): 地力増進基本指針. https://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/hozen_type/h_dozyo/pdf/chi4.pdf（2021 年 6 月 1 日）

農林水産省 (2018): スマート農業の実現に向けた取組について. https://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/miraitoshikaigi/suishinkaigo2018/nourin/dai8/siryou5.pdf（2021 年 6 月 1 日）

農林水産省 (2020a): 土壌の物理性の測定. https://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/hozen_type/h_sehi_kizyun/pdf/gum23.pdf（2021 年 6 月 1 日）

農林水産省 (2020b): 食料 · 農業 · 農村基本計画. https://www.maff.go.jp/j/keikaku/k_aratana/（2021 年 6 月 1 日）

農林水産省 (2020c): スマート農業について. https://www.maff.go.jp/j/kanbo/smart/attach/pdf/index-146.pdf（2021 年 6 月 1 日）

農林水産省 (2021): ダイズをめぐる事情. https://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/daizu/attach/pdf/index-141.pdf（2021 年 6 月 1 日）

農林水産省農業環境技術研究所 (1984): 農業技術研究所ほ場の土壌および三要素試験の概要. 農業技術研究所化学部資料, 3: 1–45.

農林水産政策研究所 (2019): 世界の食料需給の動向と中長期的な見通し—世界食料需給モデルによる 2028 年の世界食料需給の見通し—. https://www.maff.go.jp/primaff/seika/attach/pdf/190304_2028_02.pdf（2021 年 6 月 1 日）

Oliveira, I.N., de Souza, Z.M., Lovera, L.H., Farhate, C.V.V., Lima, E.D.S., Esteban, D.A.A. and Fracarolli, J.A. (2019): Least limiting water range as influenced by tillage and cover crop. Agric. Wat. Manage., 225: 105777.

大貫靖浩 (1999): 土層深度調査法. 森林立地調査法編集委員会編, 有光一登ら監修, 森林立地調査法—森の環境を測る—, pp. 16–19. 博友社, 東京.

遅澤省子 (1998): 土壌中のガスの拡散測定法とその土壌診断やガス動態解析への応用. 農環研報, 15: 1–66.

遅澤省子, 小財 伸, 久保田徹 (1990): 「根生育非制限有効水分域」による熊本県主要畑土壌の物理的評価. 土壌の物理性, 60: 6–14.

近江谷和彦 (1998): 土壌硬度計測システム. 農業機械学会誌, 60(5): 126–129.

関根久子, 梅本 雅 (2015): コムギ収量水準格差の形成要因—日本とドイツの比較分析—. 中央農研報, 24: 31–54.

Takahashi, T., Katayama, K., Nishida, M., Namikawa, M. and Tsuchiya, K. (2018): Effect of using subirrigation and slit tillage to increase soybean (*Glycine max*) yield in clayey soils in rice paddies converted to uplands. Soil Sci. Plant Nutr., 64(4): 491–502.

高橋智紀, 中川進平, 望月秀俊, 足立一日出, 中野恵子, 江波戸宗大, 熊谷悦史 (2020): 水田作の大規模化に対応した土壌物理性の診断と対策—データ駆動型水分管理を見据えて—. 土肥誌 91(3): 172–177.

瀧 勝俊, 成田秋義, 渡辺靖洋, 杉原巧祐, 鈴木寛之, 坂野 満 (2005): ハウスミカン園の土壌特性と改良目標の一試案. 愛知農総試研報, 37: 117–125.

瀧島康夫, 佐久間宏 (1969): 土壌の圧縮および硬度が水稲の根系発達ならびに生育におよぼす影響に関する研究. 農技研報 B, 21: 255–328.

田中 樹 (1997): 山中式土壌硬度計法. 土壌環境分析法編集委員会編, 日本土壌肥料学会監修, 土壌環境分析法, pp. 33–35. 博友社, 東京.

Vaz, C.M.P. and Hopmans, J.W. (2001): Simultaneous measurement of soil penetration resistance and water content with a combined penetrometer-TDR moisture probe. Soil Sci. Soc. Am. J., 65(1): 4–12.

Vidon, P.G.F. and Hill, A.R. (2004): Landscape controls on nitrate removal in stream riparian zones. Water Resour. Res., 40: W03201, doi:10.1029/2003WR002473

渡辺春郎 (1992): 表層腐植質黒ボク土畑地帯における土層改良に関する研究. 千葉県農業試験場特別報告, 21: 1–98.

吉田修一郎, 伊藤公一, 足立一日出 (1997): 重粘土転換畑への冬作物の導入による圃場の排水性の改善. 土壌の物理性, 76: 3–12.

## 要　　旨

本稿では，地表面から鉛直下方へのコーン貫入抵抗（VPR）の農地土壌における活用方法や課題に注目し，VPR は土性やかさ密度の変化を伴う層界・部位をある範囲内で広域評価するには有効だが普遍的な基準値等は設定困難であること，VPR の面的分布は基本的に土壌断面調査等で得られる点の知見を面に広げるツールであること，根の生育を対象とした土壌物理性診断では最小制限水分域（LLWR）等，根伸長に対する機械的阻害だけでなく有効水分域の体積含水率や通気性も考慮した総合的評価手法の中に VPR を位置づけるべきことを指摘した．不均一性は土壌の本質であり，土壌マトリクスの物理性が根生育にとって不良の場合は，収縮亀裂や根成孔隙等の粗大間隙を積極的に活用する物理性改善が有効である．LLWR から見て日本の農地土壌では耕盤層以深の通気性改善が最も必要であり，下層土まで貫通する粗大間隙構造を作物根により作出・維持可能な輪作体系が有効と考えられる．

キーワード：貫入抵抗（PR），根の生育，通気性，粗大間隙，最小制限水分域（LLWR）