J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 147 p.17 ～ 22 (2021)

生産性向上の立場からみた 水田転換畑における「すき床」の評価のあり方

高橋智紀 [1]

Evaluation of plow sole in upland field converted from paddy field from the point of view for plant production

Tomoki TAKAHASHI[1]

1. はじめに

現在，わが国の農地では大区画化・大規模化が急速に進んでいる（農林水産省, 2005; 農林水産省, 2010; 農林水産省, 2015; 農林水産省, 2020）．経営耕地面積規模別の経営体数をみると 2005 年から 2020 年の 15 年間で，100 ha 超の規模の経営体数は 864 から 1,959 に，10 ～ 100 ha 規模は 28,067 から 53,306 へと大幅に増えている．経営体数全体に占める割合についても 2005 年当時は 10 ha 超の経営体割合は全体の 1.4 % であったのに対し，2020 年には 5.2 % と 3.7 倍に増加している（Fig. 1）．

将来的には，このような大規模経営体が，日本の農業の中心を担うことが予想される．さらに水田作を詳しくみると，経営規模が大きな層は法人経営の割合が高く，稲単作ではなく複合化を志向している（農林水産省, 2016）．農地の借入れにも積極的であり，特に転作畑は法人経営が委託を受けるケースが多い．筆者が経験した範囲でも大規模に水田転作を請け負う法人は多数存在している．法人経営体はデータの活用にも積極的である．個人経営体では「データを活用した農業を行っている」経営体数割合が 17.0 % であるのに対し，団体経営体では 45.6 % がなんらかの形でデータを活用した農業を実践している（農林水産省, 2020）．

大規模化と並走するかのようにトラクターの大型化も進行している．2005 年から 2015 年のトラクターの国内向け生産台数（一般社団法人日本農業機械工業会, 2020）によると，トラクターの生産台数は全体としては減少しているが，50 PS 以上のトラクターの生産台数は維持されており，全体に対する割合は 2019 年では 25 % に達している（Fig. 2）．

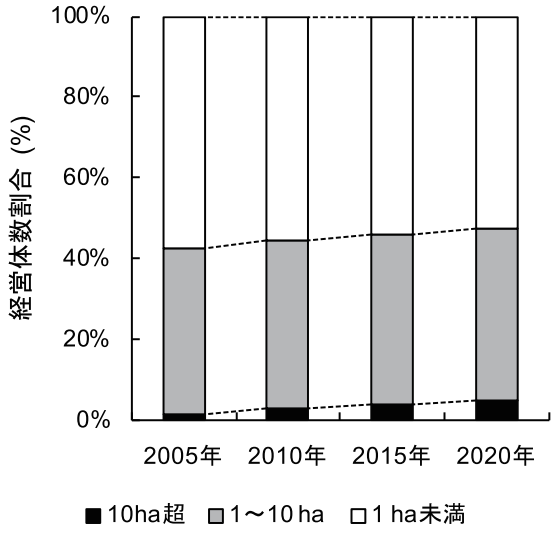


Fig. 1　経営耕地面積規模別農業経営体数割合の推移．
「農林業センサス (農林水産省, 2005; 農林水産省, 2010; 農林水産省, 2015; 農林水産省, 2020)」より作成．

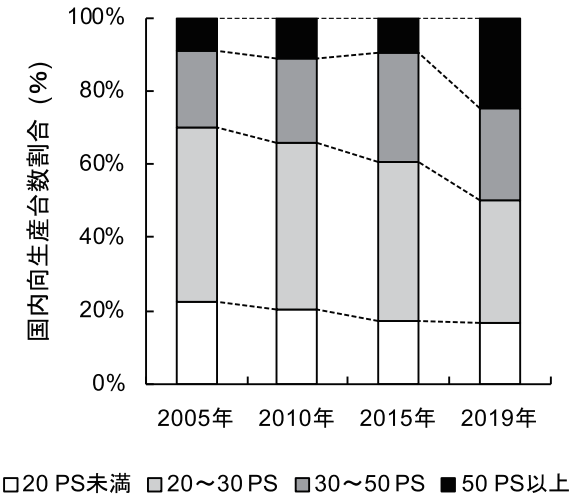


Fig. 2　馬力別の国内向トラクターの生産台数割合．
一般社団法人日本農業機械工業会（2020）より作成．

[1]Tohoku Agricultural Research Center, NARO; Shimofurumichi 3, Daisen City, Akita Prefecture, Japan. Corresponding author: 高橋智紀, 農研機構　東北農業研究センター．
2020 年 12 月 21 日受稿　2021 年 2 月 27 日受理

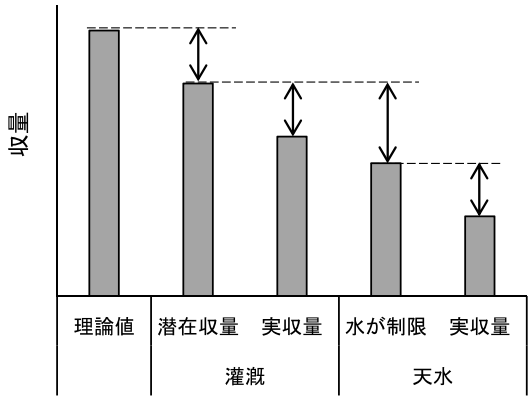


Fig. 3 収量ギャップの概念.
矢印は様々な収量ギャップを示している．FAO and DWFI（2015）をもとに作成.

以上の変化は，生産者が耕作しなければならないほ場面積が増加する一方，トラクターの大型化により，営農的に解決できる作業の種類は増えていることを意味する．また，水田作においては複合経営を積極的に進め，データの取得 · 解析も厭わない層が増大しつつあることが読み取れる．例えば公共事業による基盤整備だけでは満足せず，必要に応じて営農的な排水対策を行いたいというニーズは徐々に増えている．このような動向を裏付けるように，「食料 · 農業 · 農村基本計画」中の「令和 12 年度における食料消費の見通し及び生産努力目標」では，小麦，大麦 · はだか麦および大豆作について，「ほ場条件に合わせて単収向上に取り組むことが可能な環境の整備」が「克服すべき課題」とされている（農林水産省, 2020）．ほ場条件に合わせた単収向上技術に，営農的な排水対策が含まれることは容易に想像される．

多ほ場の中から排水対策を施すほ場を選定するためには，事前のほ場診断は不可欠である（高橋ら, 2020a）．また，選定したほ場について暗渠の最適な施工間隔や施工深さを提示する処方箋も望まれるだろう．研究者や技術者はこうしたニーズに応えられる診断技術を準備しておく必要があると思われる．ここでは，転作ダイズを対象とし，近年提唱されている「データ駆動型農業」を活用することで，上記のニーズに応えるための研究の展望について考えてみたい．

2. 生産性に関わる土壌物理性の広域的な評価

2.1 生産性に関わる土壌物理性の評価の難しさ

土壌の物理性を診断する際の困難の 1 つは，湿害や乾燥害のようなストレスが土壌と気象の相互作用として現れるケースである．この場合，生産現場において収量との因果関係を考察することが難しい．例えばダイズの播種時期が異なると，開花期のような重要なステージにおける気象条件が変わる．このため甚大な被害を受けるほ場がある一方，ほ場条件が悪いにも関わらず被害が軽微なほ場もありえる．このような場合「○○ほ場は排水性が悪いために湿害だった．今年の多雨の影響だろう」といった厳密さを欠く解釈や定性的な結論に落ち着くケースが多い．結果的に，リスクを正確に評価できず，適切な対策を打つことは難しくなってしまう．

2.2 収量ギャップの解析

収量とほ場の水環境等を直接結びつけるのは難しいが，その土地固有の性質が収量にどの程度の影響を与えるか，という点には「収量ギャップの解析」という手法で考察できる（FAO and DWFI, 2015）．「収量ギャップの解析」とは実際の収量と達成しうる収量の差を解析する手法である（Fig. 3）．達成しうる収量はその地域の最大の収量や作物生育モデルから求める（Lobell, 2013）．近年ではこのための様々な農業情報の取得が容易になってきており，収量コンバイン，1 km メッシュ農業気象情報（大野ら, 2016），隔測による NDVI のセンシング等を使えば，必要なデータを簡単に集めることができる（Toriyama, 2020）．

収量ギャップを地理情報と関連付けることで，土地固有の問題が収量に与える影響を抽出することが試みられている．例えば Lobell（2013）は土地固有の低収要因を抽出するために，複数年次の収量データを活用することを提案している．年次間での収量の変動は恐らく気象や病虫害に由来する．そこで，Lobell（2013）は，各ほ場について複数年次の収量の平均を求め，最大収量を達成したほ場との収量のギャップを解析した．彼は，一般的に長期間の平均収量を計算すると収量ギャップは小さくなるが，それでもなお，地理的に収量の偏りが存在することを見出し，このギャップは生産者の技術か土地固有の問題に起因すると推察している．例えば先に挙げた生育ステージと降水のタイミングが合致したために低収となるような例は，複数年次の平均をとることで，問題ほ場とみなされなくなることが期待される．このような解析を生産者レベルで行える環境が整えば，各年の偶然生じた事象に影響されることなく，湿害リスクや干ばつリスクが高いほ場を抽出することが可能となるだろう．

2.3 転換畑の苗立ちの解析事例

水田転換畑では砕土性の悪さや過乾燥によって，ダイズの発芽苗立ちが低下し（吉田ら, 2013），低収要因となるケースがしばしば観察される．筆者の研究グループでは広域に散らばった異なる管理履歴を持つほ場について，収量ギャップと類似の考え方で苗立ち以降の生育が劣るほ場の特定を試みた．対象地域は中山間部から沿岸部までを含み 10 km 以上の範囲を持つ広域であり，耕作者が異なる 12 ほ場を選定している．これらのほ場についてドローンによる植被率のセンシング，地域の気象データおよび播種日等の営農情報を組み合わせた解析を行った．その結果，当該年 · 当該地域でのダイズの播種期間は 7 月 7 日 ～ 8 月 2 日と長く，7 月 27 日以降の播種では生育が大幅に遅延し，植被率が 80 % に達する暦日が大きくばらついたことがわかった（Fig. 4）．この地

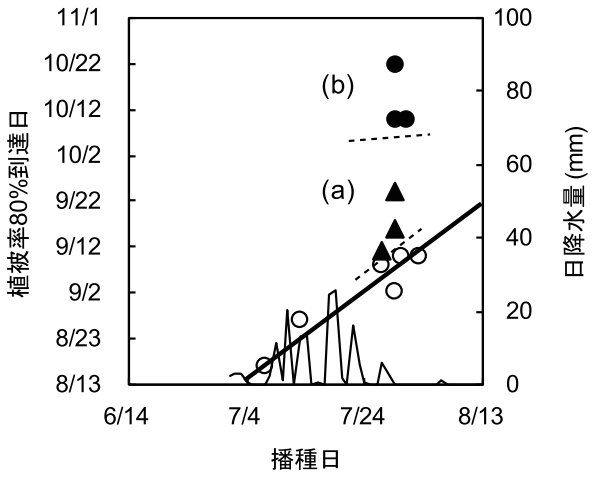


Fig. 4　調査地域における播種日と植被率 80 % 到達日，日降水量の関係．
プロットは植被率 80 % 到達日，折れ線は日降水量を示す．図中の実線は播種から植被率 80 % 到達日までの日数が 40 日となる線．点線とアルファベットについては Fig. 5 を参照．（未発表データ）

域では 7 月 28 日以降まとまった雨がなく，過乾燥による生育不良が植被の進展遅延の主因であったと考えられる．次に播種日（x）が 1 日遅れると，植被率が 80 % に達する暦日（y）が 1 日遅れると仮定し，$y = x + a$ となる直線を Fig. 4 に加えた．すなわち，この線上に位置するプロットは播種した暦日の遅れが植被の進展の遅れになっているプロットであり，この直線からの上方に逸脱したプロットでは何らかの理由によって植被の進展が遅延したと考えられる．すなわち植被進展速度の正常値からのギャップである．このギャップをマップ化すると，沿岸部と中山間部で生育遅延が大きく，中間部では比較的軽度という地理的な分布を示した（Fig. 5）．

この例が示すように隔測と農業データを組み合わせることで，生育不良の原因をおおまかに解析し，問題が大きい地域を特定することができる．ほ場は広域に散らばっており，気象イベントは不規則であることを考慮すれば，効果的な診断に向けた大きな前進だといえる．Fig. 4 は過乾燥が生育遅延の原因であることを暗示しているが，過乾燥から生育遅延に至る具体的なメカニズムは不明なままである．詳細な原因特定には原位置における診断との組合せが不可欠であろう．

3. すき床の簡易診断の重要性

収量ギャップの解析等から，土壌の物理性が低収要因となるリスクが高いほ場が特定された場合，次のステップとして，これらのほ場や地域に対して適切な対策技術を策定し，実行することになる．この段階では，地下の情報が求められるため，原位置においてほ場や土壌の診断を行うことが重要になると思われる．

ダイズの生産性については，全国的な実態調査から，作土層が厚く，有効水分量が多い土壌ほど収量が高いことが報告されている（中野ら, 2017）．このことは根域が十分確保され，根域土壌中の有効水分量が大きいことが多収に貢献することを示している．根域は土壌の通気性，硬度，土壌水分（乾燥ストレス）といった物理的因子で制限される（Eavis, 1972）．水田転換畑のすき床はこれらの 3 因子に直接的な影響を与えるため，極めて重要な診断対象である．

3.1 土壌断面調査

土壌断面調査を行えば，すき床の性質と作物への影響を様々な角度から評価することができる．作土の厚さ，すき床の土壌硬度および根の分布などの観察は根域の広さや，その制限要因を考察する際の重要な判断材料となる．さらに，土壌調査は改善方策についても技術選択のヒントを与えてくれる．例えば，プラウ耕が有効土層を拡大したかどうか，耕深が適切であったかどうか，などを評価すること（髙橋ら, 2020b），心土破砕をすることで次作の水稲作で漏水してしまうか否かといったリスクを見積もることもできる．

しかし一方で土壌断面調査は非常に手間がかかること，特別な技能が必要であること，空間的な変動が分か

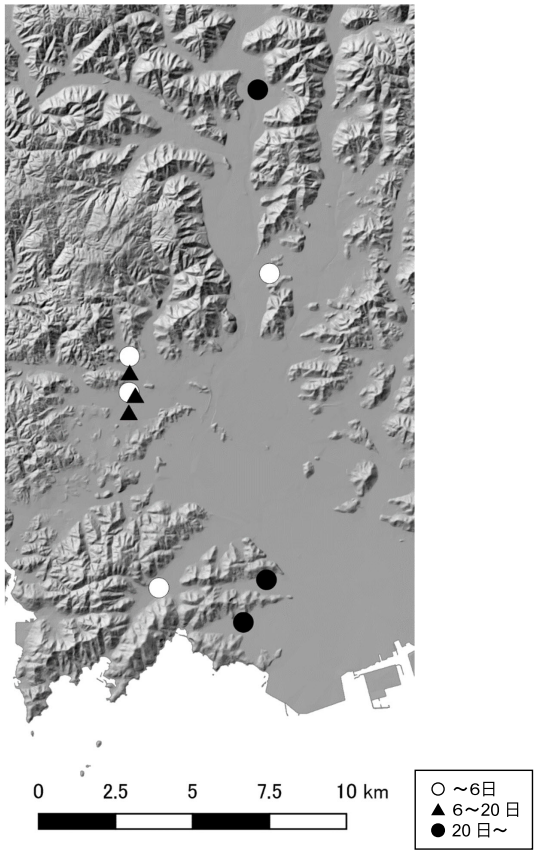


Fig. 5　植被の進展の遅延マップ．
植被率の進展から Fig. 4 の実線から 6 日未満のもの，6 ～ 20 日の地点（Fig. 4 中の (a) 群），20 日以上の地点（Fig. 4 中の (b) 群）に分けてプロット．（未発表データ）

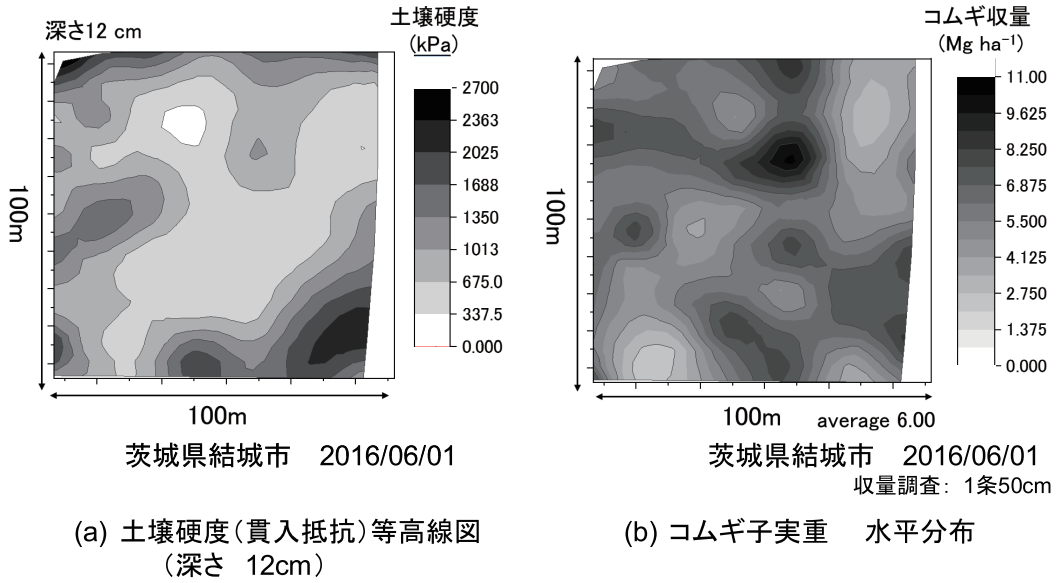


Fig. 6　深さ 12 cm の土壌硬度等高線図とコムギ子実重水平分布の比較.
耕盤層になると思われる深さ 15 cm より上の深さ 12 cm で比較したのは水の集積程度が判定できると考えたため (Ebato, 2020 より作成) .

らないこと，等の大きな欠点がある．これらの理由から水田作農家が自ら土壌断面調査に取り組むことは非常に稀であり，現実的な手段とはいい難い．

3.2 貫入抵抗値を用いた簡易広域評価

現在，下層の診断に最も多く用いられ，広域診断としての潜在能力が高いものは貫入抵抗値だと考えられる．貫入硬度計は誰にでも比較的容易に扱え，地下の情報を簡便にデジタル情報として取得できる．Ebato (2020) は 1 ha 規模のほ場において深さ 60 cm までの貫入抵抗値をメッシュ状に取得し，下層土の 3 次元地図を作成することを試みた．貫入硬度計による多点調査の成果としてまず，耕盤の深さと，そのばらつき（標準偏差）が定量化される．前述のようにこれらは生産性に影響する重要な因子である．さらに彼は作成された地図と耕盤深さ情報をもとに耕盤の直上に相当する深さ 12 cm の土壌硬度等高線を作図し，コムギの収量の空間変動との関係性を明らかにしている（Fig. 6）．Fig. 6 の結果は，耕盤付近における水平方向の水移動が収量のばらつきに影響していることを暗示している．このように地下部における面的な物理性の変動を可視化し，作物生育と関連づける試みは今まで為されてこなかった．貫入硬度計は簡易に扱え，地下部の空間変動の把握や，地下情報の収量との結びつけについて大きな可能性を持っている．上述した土壌診断を一部代替し，さらには欠点を補完し得るツールだといえる．

土壌の貫入抵抗値から得られる情報には限りがある．土壌の貫入抵抗値は一般的に「緻密度」と呼ばれることがあるが，両者は厳密には異なる．寺沢（1970）によると，乾燥密度と土壌硬度の間には正の相関があるが，礫質土壌や黒ボク土壌はこの関係から外れる．また，ばらつきは大きいものの，乾田化によってすき床の土壌硬度は高くなる傾向があり，水田土壌の土壌硬度は乾燥履歴の影響を大きく受けているようである．貫入抵抗値は透水性や通気性との間にも 1 : 1 の関係はない．例えば東北地域日本海側に広がる水田にはすき床部分に明確な土壌硬度のピークを持たないものが散見される．このような土壌でもすき床部の透水性は小さく，排水不良が問題となる（高橋ら, 2020b）．以上のように貫入抵抗値を決定する因子は複雑であり，精度の高い土壌診断を行うには，土壌型や乾燥履歴等の補助的な情報と組み合わせて考察することが必要だと考えられる．

3.3 その他の診断に有効なツール

転換畑における最大の低収要因である湿害は酸素欠乏に起因するため，原位置においてガス環境を把握することは，有意義である．しかし原位置においてガス環境を測定する手法については，今まで良いものが無かった．最近開発された原位置におけるガス拡散係数測定装置（高橋ら, 2021）は，McIntyre and Phillip（1964）の提案した測定原理をもとに，半導体式ガスセンサーを採用し，測定の簡便性を高めたものである．ほ場に円筒をうちこみ，円筒上部に設けた空間にトレーサーガスを添加し，ガス濃度の低下速度からガス拡散係数を計算する（Fig. 7）．このような手法が普及すると，今まで取得が難しかったすき床層のガス環境に関する定量的な情報をほ場診断に利用できるようになる．診断の精度が高まることが期待される．一方，測定は貫入硬度計に較べると煩雑であり，多点の測定には適していない．

水田の診断では基盤整備の影響を考慮することも重要である．例えば基盤整備前のほ場の区画や地形に関する情報から，下層土の物理性の空間的な分布が類推

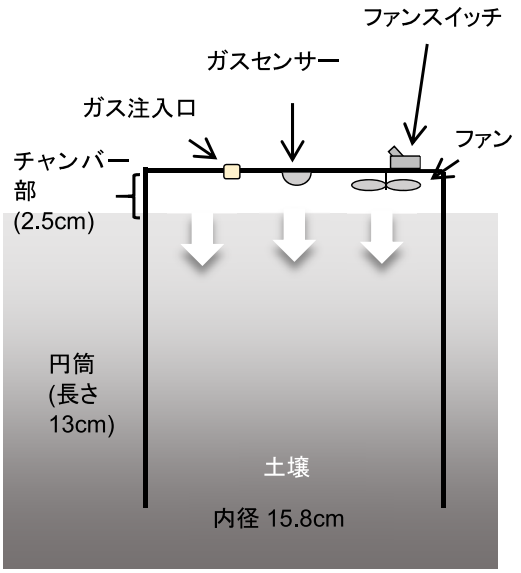


Fig. 7 原位置で測定可能なガス拡散係数測定装置の測定原理.
円筒を土壌に打ち込み，トレーサーガスをチャンバー部に添加，減衰速度からガス拡散係数を求める（高橋ら, 2021）.

できる．「空中写真閲覧サービス（https://mapps.gsi.go.jp/maplibSearch.do#1）」は加工の航空写真を参照できるサービスである．このようなサービスを活用すれば，基盤整備以前のほ場の様子を把握することができる．

本稿で紹介したアプローチの多くは本来ほ場診断を目的としたものではなく，ほ場診断のための要素技術でしかない．処方箋の作成に至る診断技術に仕上げるためには，これらの手法を組み合わせ，技術として体系化しなければならない．開発されるべき診断技術は，地理情報システムを軸に営農情報，インターネットから得られる基盤情報，原位置で測定調査結果等を統合し，営農作業の意思決定を支援するシステムになると考える．このようなシステムの開発で得られる知見は，生産性の向上だけでなく，土壌物理学の学問的な深化にも貢献することが期待される．

引用文献

Eavis, B.W. (1972): Soil physical conditions affecting seedling root growth. Plant Soil, 36: 613–622.

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

FAO and DWFI (2015): Yield gap analysis of field crops — Methods and case studies. FAO Water Reports No. 41, Rome, Italy.

一般社団法人日本農業機械工業会 (2020): 日農工統計, http://www.jfmma.or.jp/statistics.html（2020 年 12 月 14 日）

Lobell, D.B. (2013): The use of satellite data for crop yield gap analysis. Field Crops Res., 143: 56–64.

McIntyre, D.D. and Phillip, J.R. (1964): A field method for measurement of gas diffusion into soils. Australian Journal of Soil Research, 2: 133–145.

中野恵子, 高橋智紀, 新良力也, 大橋優二, 工藤忠之, 谷川法聖, 今野智寛, 加藤優来, 安藤 正, 森谷真紀子, 松田 晃, 南雲芳文, 青木政晴, 上原敬義, 岡本 潔, 梅本英之, 向井吉崇, 中村憲治, 大島正稔, 加藤知美, 森崎耕平, 久野智香子, 田畑茂樹, 川原田直也, 水谷嘉之, 堂本晶子, 藤井清孝, 蓮川博之, 新谷浩樹, 鳥塚 智, 谷口真一, 大塩哲視, 伊藤淳次, 藤本順子, 仲谷敦志, 三原美雪, 山崎大貴, 樋口俊輔, 水田一枝, 竹下美保子, 持永 亮, 石塚明子 (2017): 16 道県調査から見えた生産者圃場の土壌特性と大豆収量の関係 — 物理性および降雨状況と大豆収量の関係. 日本土壌肥料学会講演要旨集, 64: 85.

農林水産省 (2005): 2005 年農林業センサス, https://www.maff.go.jp/j/tokei/census/afc/2005/houkokusyo.html（2020 年 12 月 14 日）

農林水産省 (2010): 2010 年世界農林業センサス, https://www.maff.go.jp/j/tokei/census/afc/2010/houkokusyo.html（2020 年 12 月 14 日）

農林水産省 (2015): 2015 年農林業センサス, https://www.maff.go.jp/j/tokei/census/afc2015/280624.html（2020 年 12 月 14 日）

農林水産省 (2016): 平成 28 年度 食料・農業・農村白書, p. 54. https://www.maff.go.jp/j/wpaper/w_maff/h28/attach/pdf/zenbun-66.pdf（2020 年 12 月 14 日）

農林水産省 (2020): 2020 年農林業センサス, https://www.maff.go.jp/j/tokei/census/afc/2020/index.html（2020 年 12 月 14 日）

大野宏之, 佐々木華織, 大原源二, 中 園江 (2016): 実況値と数値予報, 平年値を組み合わせたメッシュ気象・降水量データの作成. 生物と気象, 16: 71–79.

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 (2020a): 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: 172–177.

髙橋智紀, 渕山律子, 中川進平, 岡 紀邦, 江波戸宗大, 望月秀俊, 中野恵子 (2020b): 土壌調査から土壌物理性を診断する際の用語の整理 — 水田及び水田転換畑を対象に —. 土肥誌, 91: 464–465.

高橋智紀, 西田瑞彦, 浪川茉莉 (2021): 原位置において簡易に測定できるガス拡散係数測定装置, 土肥誌, 92: 11–18.

寺沢四郎 (1970): 水田土壌群の物理・工学的特性に関する研究（I）— 土壌硬度と 3 相分布について —. 農土論集, 33: 1–8.

Toriyama, K. (2020): Development of precision agriculture and ICT application thereof to manage spatial variety of crop growth, Soil Sci. Plant Nutri., 66: 811–819.

吉田修一郎, 細川 寿, 足立一日出 (2013): 播種時の過湿・過乾燥リスクを伴う粘土質転換畑におけるダイズの適切な播種条件の解析, 土壌の物理性, 125: 17–27.

要　　旨

水田転換畑ではほ場の大区画化・大規模化およびトラクターの大型化が急速にすすみ，必要に応じて営農的な排水対策を行いたいというニーズが徐々に増えている．これを行うには事前のほ場診断から対策が必要なほ場を特定し，適切な処方箋を提示することが不可欠である．本稿では広域の土壌物理性診断として，収量ギャップの解析を行うことで土地固有の低収要因を抽出し，対策が必要なほ場を選定することを提案する．また，原位置において「すき床」部分の診断技術を行うために，土壌断面調査，貫入抵抗値の測定，およびその他の補完的な手法を組み合わることを想定し，これらの手法の長所と欠点を考察する．

キーワード：転換畑，収量ギャップ，生育モデル，センシング，土壌診断