J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 162, p.15～25 (2026)

シンポジウム特集
総　説
Reviews

ダイズ種子の出芽に悪影響を及ぼす粘土質転換畑の砕土不良な作土層における乾燥過程の水分動態

松本宜大 [1]

Water dynamics during the drying process in poorly tilled plow layer of clayey paddy field adversely affecting soybean germination

Yoshihiro MATSUMOTO[1]

Abstract: In Japan, most soybeans are cultivated in paddy fields, but its yields remain low. The causes are thought to be wet damage due to low drainage efficiency, dry damage due to summer drought, and reduced available nitrogen, which have been the focus of intensive research. However, less attention has been paid to poor soil tilth, which is particularly pronounced in clayey paddy field. In such poorly tilled plow layer, greater soil moisture depletion occurs, potentially leading to reduced germination rate of soybean seeds. This paper reviewed existing research on soil friability in the clayey paddy field, optimal clod size for germination of soybean seed, characteristic unsaturated liquid and water vapor movement in the soil layer composed of clods, and resulting soil desiccation. It also introduced farming techniques to overcome the poor soil tilth. Based on these reviews, future research topics were proposed.
Key Words : clayey paddy field, tillage, clod, soil desiccation, germination

1. はじめに

「田」は，農林水産省の作物統計における面積調査では，「たん水設備（けい畦等）と，これに所要の用水を供給し得る設備（用水源・用水路等）を有する耕地」と定義されている（農林水産省, 2025a）．その内，畑作物が栽培されている田は「転換畑」と呼ばれ，ダイズやムギ，トウモロコシが栽培されることが多い．なかでもダイズは，2024 年時点で 78 % が転換畑で栽培されている（農林水産省, 2025b）．しかし，収量は 2023 年時点で 1686 kg ha^{-1} であり，主要な生産国であるアメリカやブラジルの半分程度しかない（FAO, 2025）．これは，転換畑におけるダイズの収量が低いことを意味している．その要因として，これまで，排水不良に伴う湿害（Kubota et al., 2023）や夏季の干ばつ（熊谷ら, 2018），可給態窒素の減少（Ichinose et al., 2023）等が挙げられてきた．一方で，これまで研究対象として注目されることが少なかったのが，耕うん時の砕土不良である．特に，粘土質な転換畑では，センチメートルスケールの大きな土塊が形成される（Takahashi et al., 1999; Sato et al., 2003）．このような砕土不良な作土層では，種子と土塊の接触不良により種子の吸水が阻害されたり（Hadas and Russo, 1974），表層の乾燥が速く進んだりする（Matsumoto et al., 2025）ことで，種子の出芽率が低下する場合がある．その実例として，Fig. 1 に，乾燥が進んだ砕土不良な作土層の断面を示した．今後ダイズの収量を向上させるためには，転換畑の砕土性にも目を向け，直播栽培における出芽の安定に取り組む必要がある．

本稿では，粘土質転換畑における砕土性と，砕土不良な作土層における乾燥過程の水分動態について，これまでに得られた知見を整理することを目的とする．なお，本稿では，耕うんによって人為的に形成された二次粒

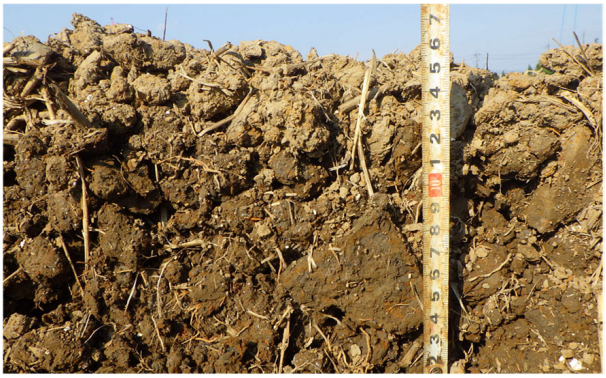


Fig. 1　乾燥層（地表面付近の白い土層）の発達した，砕土不良な粘土質転換畑の作土層の断面．メジャーの単位はセンチメートル．
Cross-section of poorly tilled plow layer in clayey paddy field with the dry soil layer, i.e., white soil layer near the soil surface. The unit of tape measure is centimeter.

[1]Institute for Rural Engineering, National Agriculture and Food Research Organization, NARO. 2-1-6 Kannondai, Tsukuba, Ibaraki, 305-8609, Japan. Corresponding author: 松本宜大，農研機構農村工学研究部門
2025 年 12 月 18 日受稿　2026 年 2 月 20 日受理

子を土塊（clod）と呼ぶこととするが，引用文献で団粒（aggregate）と記されているときには，それに従うこととする．

2. 粘土質転換畑における砕土性

耕うんは，土層を砕いてバラバラな土塊とすることで，透水性や通気性が高く，土壌硬度の低い作土層を作り出す営農作業である．これにより，種子の出芽やその後の生育に適した土壌環境がもたらされる．特に粘土質転換畑では，土壌マトリックスの飽和透水係数が極めて小さい（ときに 10^{-7} cm s^{-1} のオーダー）．そのため，耕うんを行うことで，作土層の透水性を高め，暗渠および暗渠疎水材に過剰な水を効率的に導く必要がある（Nishida et al., 2020）．

耕うんは，農家の所有する農機や土壌によるが，代表的には，播種前に 2 回実施される．1 回目の耕うんは「耕起」と呼ばれ，プラウやチゼルプラウ，ロータリー等が用いられる．上方と下方の土層を反転させることで，土層を砕いたり，もともと下方にあった土層を乾燥させたり，作物残渣を鋤き込むことを目的とする．2 回目の耕うんは「砕土」と呼ばれ，ロータリーやドライブハロー，バーチカルハロー等が用いられる．耕起によってできた土塊をより細かくすることを目的とする．ダイズの場合，作土深は 15–25 cm が多い．播種は，トラクターやロータリーの後方に播種機を連結して，砕土時や，砕土後に別途行われる．ダイズの場合，播種深度は 3–5 cm が多い．Fig. 2 に，ロータリーとそれに連結した播種機を用いた，砕土および播種の様子を示した．

砕土の良否は，Utomo and Dexter（1981）によって，“the tendency of a mass of unconfined soil to breakdown and crumble under applied stress into a particular size range of smaller fragments” と定義された，「フライアビリティー」によって表される．その評価法はいくつか考案されているが，最も代表的なものは，大きさの異なる複数の土塊に対して一軸圧縮試験（Dexter and Kroesbergen, 1985）を行い，間接的に引張破壊を引き起こすものである．それぞれの土塊の体積と引張強度を両対数グラフ上にプロットし，その傾きの絶対値をフライアビリティーとする（Utomo and Dexter, 1981）．フライアビリティーが大きいと，大きい土塊の引張強度が小さい土塊の引張強度よりも低くなる．すなわち，大きい土塊が砕かれて小さくなりやすいため，砕土性が良いとみなされる．



Fig. 2　ロータリーとそれに連結した播種機を用いた砕土および播種の様子．本機は，第 8 節で説明する「耕うん同時畝立て播種機」である．
Tillage and sowing using a rotary tiller and planter. This implement can simultaneously plow, make ridges, apply fertilizer, sow seeds, and compress soil, which was explained in Section 8.

フライアビリティーに影響を及ぼす要因として，Munkholm（2011）は，粘土含量，交換態陽イオン量，水分量，有機物量，そして乾燥密度を挙げている．粘土質転換畑では，これらの内，特に粘土含量と水分量が関係すると考えられる．粘土含量が増加すると，土塊の引張強度は増加する（Obour et al., 2019）．そのため，ときに粘土含量が 40 % に達する粘土質転換畑の砕土性は低い．水分量については，土壌が乾燥すると引張強度が高まり砕土が困難になる一方で，飽和に近づくと土壌は破壊されずに塑性変形するようになる．すなわち，耕うんに適した土壌水分量は，乾きすぎず湿りすぎてもいない範囲にある．Dexter and Bird（2001）は，いくつかの研究をまとめた上で，耕うんに最も適した土壌水分量を，塑性限界の 90 % としている．一方で，久津那ら（1974）は水稲作付後の圃場（Loam）で，川崎（1990）は水稲および麦作付後の圃場（Clay loam）で，土壌水分量を変えながら耕うん試験を行った．その結果，久津那ら（1974）は，土壌水分量が減少するにつれて，砕土率は単調に増加したと報告している．また，川崎（1990）は，水稲および麦作付後の圃場のいずれでも，土壌水分量が塑性限界よりも湿潤なときに，砕土率が最大となったと報告している．これらの報告は，転換畑では，耕うんに最も適した土壌水分量が，塑性限界の 90 %（Dexter and Bird, 2001）とは異なる可能性を示している．

そして，粘土質転換畑に顕著な特徴として，水田からの転換年数が経過するにつれて，砕土性が改善することが挙げられる．Takahashi et al.（1999）は，畑転換から 3 年間で，耕うんでできた土塊の平均径が 2.1 cm から 1.3 cm まで減少し，以降は一定になったと報告している．その要因は，畑転換により，土壌が湿潤 · 嫌気的な環境から乾燥 · 好気的な環境になるためと考えられる．中野（1978）は，畑転換により，圃場容水量近傍の pF 1.8 における土壌水分量が大きく減少し，塑性限界に近づいたと報告しており，降雨後に早く耕うんを行うことが可能になったと指摘している．Takahashi et al.（1999）は，畑転換により，pH 3.0 酢酸緩衝液で抽出される鉄酸化物の量が減少することが，砕土性の改善に寄与している可能性を指摘している．これは，鉄酸化物が，団粒の接着物質の一つとして考えられていること（Tisdall and Oades, 1982）と関連している可能性がある．

3. ダイズ種子の出芽に適した土塊の大きさ

土塊は小さすぎても大きすぎても，ダイズ種子の出芽には適さない．Braunack（1995）は，径が＜1 mm，1–2 mm，2–5 mm，5–15 mm の粘土質な団粒を充填した後，深さ 2.5 cm にダイズを播種し，土壌表面に穴を開けたアルミホイルを被せてポット実験を行った．その結果，出芽率はそれぞれ 47，80，63，68 % になったと報告している．孫ら（2004）は，径が＜4 mm，4–10 mm，10–20 mm，20–40 mm，40–50 mm の土塊（Silty Clay）を充填した後，深さ 2 cm にダイズを播種し，土壌表面に不織布をかけてポット実験を行った．その結果，播種後 7 日目の出芽率はそれぞれ 75，84，53，16，1 % になったと報告している．これらの研究から，ダイズの出芽に適した土塊の大きさは，1–10 mm の範囲内にあると考えられる．

日本では，砕土の良否を示す経験的な指標として，目開き 2 cm のふるいを通過した土塊の質量割合として定義される「砕土率」が用いられている．この値が 70 % を上回ると，砕土が良好と評価される（例えば，秋田県農林水産部, 2024）．Fig. 3 に，砕土率が 70 % より高い圃場と低い圃場の実例を示した．また，Fig. 4 に，筆者の論文（Matsumoto et al., 2022; 2025; 2026）のデータから作成した，砕土率と平均土塊径の関係を示す．ここで，平均土塊径は，土塊径の分布に Rosin-Rammler 分布を適用することで求めた（Takahashi et al., 1999）．砕土率 x（%）と平均土塊径 y（cm）の間の線形回帰式は以下で表される．

$$y = -0.04x + 4.33 \quad (1)$$

この式を用いると，砕土率 70 % に相当する平均土塊径は 1.5 cm となる．先述のダイズの出芽に適した土塊径（1–10 mm）と比較すると，この値はやや大きい．しかし，圃場では土塊の大きさにばらつきがあり，1.5 cm よりも小さい土塊も含まれていることを考えれば，概ね妥当な基準であると考えられる．

4. 土壌からの蒸発の進行と乾燥層の発達

本節では，土塊から成る土壌（土塊土壌）について扱う前に，土塊の無い一般的な土壌からの蒸発の進行と，それに伴う乾燥層の発達について説明する．土壌を飽和状態から蒸発させていくと，蒸発量は一定の値で推移する（恒率乾燥段階）（Fig. 5a）．その後，地表面がある程度まで乾燥すると，蒸発量が低下していく（減率乾燥段階）（Bittelli et al., 2015）．恒率乾燥段階では，土壌が湿っており，下層から地表面に向けた水供給が十分に行われる．そのため，蒸発量（ポテンシャル蒸発量）は，日射や気温，大気の相対湿度，風速といった気象条件によって決定される．

蒸発が進むと，地表面付近で土壌の乾燥が進み，ポテンシャル蒸発量に見合うだけの水が下層から供給されなくなる．そのため，蒸発量が低下し始め，減率乾燥段階に移行する（Fig. 5a）．このとき，蒸発面が低下し，土壌中で蒸発が生じるようになる（Shokri et al., 2009）（Fig. 5b）．この低下した蒸発面と地表面との間の土層を，乾

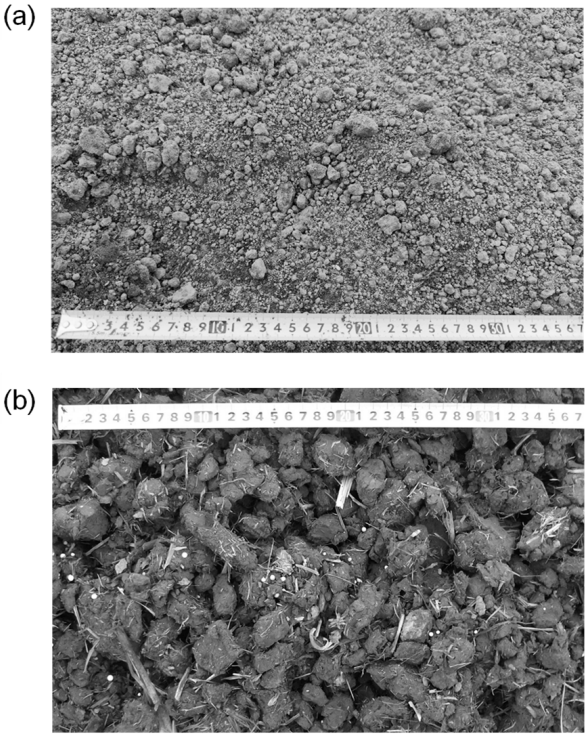


Fig. 3　（a）砕土率が 87 % で砕土良好な圃場と（b）砕土率が 9 % で砕土不良な圃場．メジャーの単位はセンチメートル．
(a) Fairly tilled plot where mass fraction of clods < 2 cm was 87 % and (b) poorly tilled plot where mass fraction of clods < 2 cm was 9 %. The unit of tape measure is centimeter.

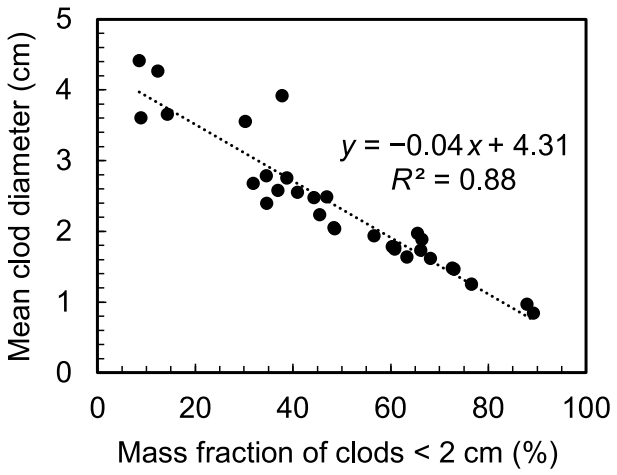


Fig. 4　Matsumoto et al.（2022; 2025; 2026）より計算した砕土率と平均土塊径の関係．
Relationship between mass fraction of clods < 2 cm and mean clod diameter. The data was obtained from Matsumoto et al. (2022; 2025; 2026).

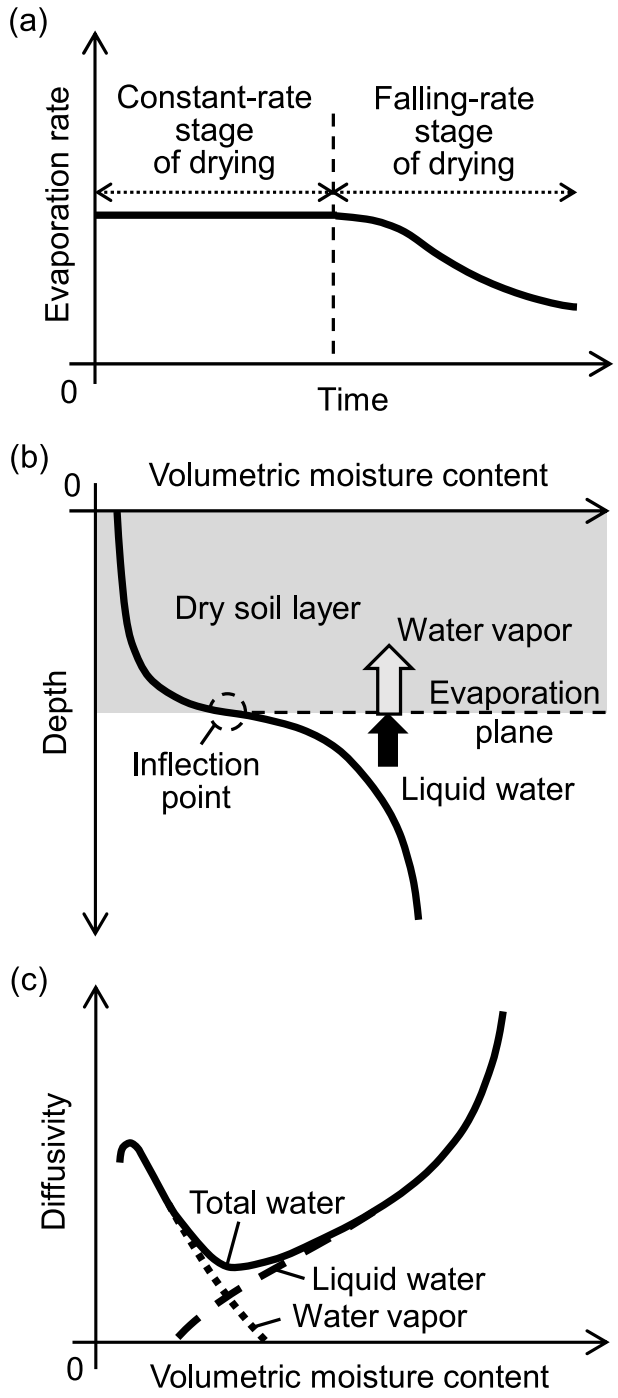


Fig. 5　(a) 土壌からの蒸発量の経時変化．(b) 減率乾燥段階における水分プロファイル．(c) 土壌の液状水拡散係数，水蒸気拡散係数，およびそれらの和である水分拡散係数．
(a) Time course of evaporation rate from the soil. (b) Soil moisture profile in the falling-rate stage of drying. (c) Liquid water diffusivity, water vapor diffusivity, and the sum of those, i.e., water diffusivity, in the soil.

燥層と呼ぶ．乾燥層の底部では，水分プロファイルに変曲点が見られる（Hillel, 1998）．その理由として，土壌水分量が減少すると，水分拡散係数（液状水拡散係数と水蒸気拡散係数の和）は一度減少した後，増加に転じ，再度減少するという特徴を持つことが挙げられる（Philip, 1957）（Fig. 5c）．これは，水分量が減少するにつれて，液状水が移動可能な間隙が少なくなり，液状水拡散係数は低下する．その一方で，水蒸気が移動可能な間隙は増加し，水蒸気拡散係数が増加することによる．乾燥層内では，水分プロファイルが下に凸な形状をしていることから，水分量が減少するにつれて水分拡散係数が大きくなる．すなわち，乾燥層内の水分量は水蒸気拡散係数が液状水拡散係数より大きくなる領域に相当し，水蒸気輸送が水輸送の大半を占める．Shokri et al.（2009）は，Fick 則より計算した乾燥層内の水蒸気フラックスが，減率乾燥段階における蒸発量とよく一致したと報告した．片岡 · 塩沢（1998）は，この特徴を利用して，乾燥層の形成された土壌からの蒸発量を，大気境界層と乾燥層内の水蒸気輸送抵抗の直列抵抗から計算するモデルを提案した．

ダイズ種子（エンレイ）の発芽限界は −1.4 MPa であること（高橋ら, 2008）から，乾燥層が播種深度（3–5 cm）に及ばないことがダイズ種子の出芽にとって重要である．一方で，耕うんに適しているとされる土壌水分量は塑性限界の 90 %（Dexter and Birds, 2001）と，比較的乾燥している．また，粘土質な土壌では下方からの水供給が限られる．そのため，粘土質転換畑では，土塊の有無にかかわらず，恒率乾燥段階の期間は短く，速やかに減率乾燥段階に移行し，乾燥層が形成される．そして，土塊が存在する場合には，乾燥層はより速やかに深くまで発達する．その影響を明らかにするためには，土塊土壌における不飽和透水係数（≒ 液状水拡散係数）と水蒸気輸送係数（≒ 水蒸気拡散係数）の特徴を理解する必要がある．

5. 土塊土壌の不飽和透水係数

土塊土壌は粗大な土塊間間隙を持つ（Fig. 6）．そのため，不飽和状態では，液状水は土塊間間隙を移動できず，土塊間の接触面を通って移動しなくてはならないため，土塊の無い土壌に比べ液状水移動が制限される（Youngs and Leeds-Harrison, 1990）．Carminati et al.（2007a）は，高水分量の大団粒（4–8 mm）と低水分量の小団粒（2–4 mm）を容器に充填し，団粒間での水分の再分布を観測した．その結果，一定時間の経過後も，大団粒内または小団粒内の水分量は比較的均一であった一方で，大団粒と小団粒の水分量には著しい違いがあり，団粒間の接触面で液状水移動が制限されていたと報告した．Carminati et al.（2007b）は，団粒間の不飽和透水係数 $k_{\mathrm{cont}}(h)$ を以下の式で定義した．

$$k_{\mathrm{cont}}(h) = \frac{a_{\mathrm{cont}}(h)}{{a_{\mathrm{cont}}}^{\mathrm{max}}} k_{\mathrm{agg}}(h) \tag{2}$$

ただし，h はマトリックポテンシャル，$a_{\mathrm{cont}}(h)$ は液状水移動に寄与する実効的な団粒間の接触面積，${a_{\mathrm{cont}}}^{\mathrm{max}}$ は $a_{\mathrm{cont}}(h)$ の最大値，$k_{\mathrm{agg}}(h)$ は団粒内（土壌マトリック

ス）の不飽和透水係数である．そして，$k_{cont}(h)$ を評価するために，2，3 個積み上げた団粒（< 5 mm）に対して，注射器で水を注入する浸潤実験を行い，水分分布の変化を中性子ラジオグラフィーで，団粒の形状を中性子 CT により測定した．得られた団粒形状を基に，三次元の Richards 式を解き，実測の水分分布に一致するように $a_{cont}(h)$ を求めた．$a_{cont}(h)$ の最大値 ${a_{cont}}^{max}$ は，CT により得られた団粒間の接触面積とした．結果として，$k_{cont}(h)$ は，h が −100 cm より大きいときは $k_{agg}(h)$ とほぼ同じであったが，h が小さくなるにつれ急激に値が減少した．h が −1000 cm のときには，$k_{cont}(h)$ は，$k_{agg}(h)$ に比べて 2 オーダー小さくなったと報告した．

土塊土壌全体のマクロな不飽和透水係数を求めるためには，$k_{cont}(h)$ からのスケールアップが必要であり，そのモデル化が試みられている．Carminati et al.（2007b）は，マクロな不飽和透水係数の構成要素として，1 つの団粒と 1 つの団粒間接点から成る “Basic element” を提案している．そして，Basic element 全体の不飽和透水係数（k_{eq}）を，k_{agg} と団粒または団粒間接点の断面積の積の，団粒から団粒間接点までの調和平均を用いて表した．Carminati et al.（2008）は，k_{eq} は，Mualem-van Genuchten モデルで表した k_{agg} において，水分特性を表すパラメータである α と n をそのままに，屈曲度 τ を 0.5 から 5 にすることで表されると報告した．Carminati et al.（2009）は，多数充填した団粒（4–8 mm）への浸潤および再分布実験で得られた水分分布の経時変化に対し，Mualem-van Genuchten モデルで屈曲度 τ を 5 とした k_{eq} を用いて水分分布を計算したところ，実験結果をよく再現できたと報告している．これらの一連の研究の他に，Berli et al.（2008）は，団粒土壌を鎮圧した際の不飽和透水係数を表すモデルとして，径の均一な球形の団粒を単純立方格子に充填した “Unit cell” を提示した．そして，飽和時には団粒間の粗大な間隙が，不飽和時には団粒間の接触面積が液状水の流れを規定するとして，Unit cell における透水係数をモデル化した．

土塊土壌全体のマクロな不飽和透水係数を実測した研究としては，Sławiński et al.（2011）と Matsumoto et al.（2026）がある．Sławiński et al.（2011）は，径が < 0.25，0.25–0.5，0.5–1，1–3，3–5，5–10 mm の団粒を充填した土層の不飽和透水係数を，水分分布法により測定した．その結果，団粒径が 1 mm より小さい範囲では，団粒が大きくなると，不飽和透水係数（h: −850 cm）が桁違いに小さくなった．一方で，団粒径が 1 mm より大きい範囲では，団粒が大きくなっても，不飽和透水係数のオーダーは変わらなかったと報告している．Matsumoto et al.（2026）は，平均土塊径が 1.7–4.1 cm の 4 種類の土塊土壌の不飽和透水係数を，h が -1.4×10^5 cm から −100 cm の範囲で，定常蒸発法により測定した．その結果，平均土塊径と不飽和透水係数との間に明確な関係は見られかった．また，同一の h での，土塊径の違いによる不飽和透水係数の差は，1 オーダー以下であったと報告している．これらの研究をまとめると，土塊径が 0 mm（土塊の無い土壌）から 1 mm の範囲では，土塊が大きくなると，不飽和透水係数は著しく（最大で 2 オーダー）減少すると考えられる．一方で，土塊径が 1 mm から 4 cm の範囲では，土塊が大きくなっても，不飽和透水係数のオーダーは変化しないと考えられる．

このように値が小さくなりがちな土塊土壌の不飽和透水係数を大きくする方法として，土壌を鎮圧することで，土塊間の接触面積を増大させることが挙げられる．Tamari（1994）は，2–3 mm の団粒から成る土壌を鎮圧し，乾燥密度を 0.96–1.55 g cm^{-3} とした土壌の不飽和透水係数を，水分分布法により測定した．その結果，含水比が 0.20 以下で，乾燥密度が高い（鎮圧強度が大きい）団粒土壌の方が不飽和透水係数が大きくなった．ただし，その差は 1 オーダー以下であったと報告している．Richard et al.（2001）は，耕うんを行った区（径が 0.2 cm 以下の団粒を 27 %，4 cm 以上の土塊を 8 % 含む）と，トラクターのタイヤにより鎮圧を行った区の不飽和透水係数を蒸発法により測定した．その結果，h が −150 cm 以下のとき，鎮圧を行った区の不飽和透水係数は，耕うんを行った区の不飽和透水係数よりも大きくなった．h が −800 cm のときには，その比率が 2.1 であったと報告している．

6. 土塊土壌における風による水蒸気輸送の促進

土塊の無い土壌では，水蒸気を含むガスの移動は主に分子拡散による．一方で，粗大な土塊間間隙が存在する土塊土壌（Fig. 6）では，風により水蒸気輸送が促進される（Levintal et al., 2019; Matsumoto et al., 2022）．その要因として，風が吹くことにより生じる大気中の微差圧変動が土中に伝播し，大気と土壌中の空気が混合されること（Pressure pumping）が挙げられる．Fukuda（1955）

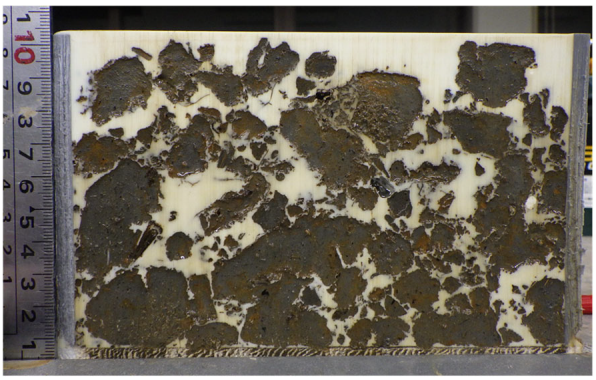


Fig. 6　白色塗料で着色したエポキシ樹脂を注入した土塊土壌の断面．白い部分が土塊間間隙に相当する．標尺の単位はセンチメートル．
Cross-section of soil layer composed of clods injected with white-pigmented epoxy resin. The white area corresponds to inter-clod pore space. The unit of the ruler is centimeter.

は，土壌中の空気についての連続式と，移流速度を表す Darcy 則を組み合わせることで，土壌間隙中の気圧の変化を表す鉛直方向の偏微分方程式を導いた．これについて，地表面では周期的な気圧変動を，深さ方向には無限遠の境界を与えて解いた．Farrell et al.（1966）はこの方程式を三次元に拡張し，有限の深さに底面がある状況について解いた．Ishihara et al.（1992）は，乱流拡散のアナロジーにより，Pressure pumping によるガス移動を表す，Fick 則と同じ形式の方程式を導いた．一方で，彼らは，Pressure pumping が支配的になるのは，粒径が 0.2 または 0.5 mm の砂のように，通気性のそれほど高くない多孔質体であるとした．径が 10 mm 程度のガラスビーズのような，通気性がより高い多孔質体では，風により土壌中に水平方向の乱流が生じることによる乱流拡散が支配的なメカニズムであると述べている．こちらのメカニズムについても，森林群落内の鉛直方向の風速分布のアナロジーを用いて，Fick 則と同じ形式のガス移動を表す方程式を導いている．

このように，風による水蒸気輸送の促進には，土壌の通気係数が大きく影響している．土塊の無い土壌では，通気係数が小さいため，促進効果は無視し得るほど小さい．一方で，土塊土壌では，土塊が大きくなるにつれて通気係数も大きくなり，促進効果も高くなる．促進効果は，見かけのガス拡散係数（D_a）を用いて評価されることが多い．ここで，D_a は以下の式で与えられる．

$$D_a = D_w + D_m \tag{3}$$

ただし，D_w は風によるガス輸送係数，D_m は分子拡散係数である．多くの研究では，D_a を求めるために，土壌中のガス濃度の経時変化に対して，地表面でのガス濃度を一定の値と仮定し，鉛直方向のガス拡散方程式を適用している．Fuchs and Hadas（2011）は，0.2–1 mm の団粒から成る土層では，風（高さ 12.5 cm で 0.5–4.2 m s^{-1}）が吹いても水蒸気輸送抵抗は変わらないとした．一方で，1 mm より大きい団粒から成る土層では，風速が増加するにつれて，水蒸気輸送抵抗が減少したと報告した．Pourbakhtiar et al.（2017）は，地表面から高さ 10 cm における風速が 1.2–3.4 m s^{-1} のときの，径が 6.3–14 mm の礫を充填した層における D_w を測定した．その結果，地表面から深さ 10–15 cm までの区間では，D_w が D_m の 20–70 倍に達したとした．一方で，深さ 15–25 cm で D_w は急激に減少し，ほぼ 0 になったと報告した．Levintal et al.（2019）は，径が 0.6–1 mm の砂，3–6.25 mm，6.25–9.50 mm，1.2–1.9 cm の礫，平均径が 7 cm の団粒を充填したカラムの D_a を測定した．その結果，高さ 10 m における平均風速が 4 m s^{-1} のとき，D_a と，大気中でのガス拡散係数（D_o）との比が，それぞれ 0.2，0.5，1.1，1.9，3.1（回帰式より算出）であったと報告した．Matsumoto et al.（2022）は，細砂では，風によるガス輸送の促進は確認されなかったとした．しかし，平均土塊径 1.9 cm と 3.4 cm の土塊土壌では，高さ 20 cm における平均風速が 1.5 m s^{-1} のときに，D_a/D_m がそれぞれ 2.0 および 3.6（回帰式より算出）になったと報告した．以上の研究をまとめると，風によるガス輸送の促進効果が顕著になるのは，1 mm より大きい土塊から成る土壌である．そのような土壌では，土塊が大きくなったり，風速が高くなるにつれて，促進効果が高まる．センチメートルスケールの土塊から成る土壌では，D_a は D_m の数倍から数十倍大きくなる．

一方で，上記の Levintal et al.（2019）と Matsumoto et al.（2022）では，礫や土塊が大きいときや，風速が大きいときには，地表面のガス濃度を一定とし，D_a も深さによらないとしたガス拡散方程式では，土壌中のガス濃度分布の経時変化をうまく表せなかったと報告している．Levintal et al.（2019）は，代わりに移流拡散方程式が精度よく適合したと報告している．また，Laemmel et al.（2019）は，鉛直方向の微差圧変動が同程度であっても，室内で測定した D_a は，屋外で測定した D_a よりも著しく小さかったと報告した．そのため，鉛直方向だけでなく，水平方向の Pressure pumping も考慮する必要があると指摘している．Poulsen（2019）は，粒径が 1.2–2.4 mm の砂層および 4.8–10.0 mm の礫層の上方で風が吹いている場合，層内でも水平方向の空気の移流が生じていたと報告している．これらの研究結果は，特に土塊が大きい場合や風速が高い場合には，風に伴う土壌中のガス移動を表現する支配方程式や，地表面における境界条件，計算を行う次元について，更なる検討が必要であることを示している．

7. 土塊土壌における乾燥の進行

第 5 節および第 6 節の結果から，1 mm 以上の土塊から成る作土層では，土塊が大きくなっても，下方からの液状水供給量は変わらない．一方で，風による水蒸気輸送はより強く促進されるようになり，表層の乾燥が速く進むようになると考えられる．Matsumoto et al.（2023）は，環境制御のために風（カラム上端より高さ 20 cm で 0.23 m s^{-1}）が吹いている温室内で，径が 1 cm と 3 cm の土塊を充填したカラムを用いた蒸発実験を行った．その結果，実験開始後 33 または 70 日後では，3 cm の土塊を充填したカラムの方が，土層全体（13 cm）を通して土壌水分量が少なくなったと報告している．一方で，このときの日蒸発量は，土壌水分量が少ないにもかかわらず，3 cm の土塊を充填したカラムの方が多かった．その要因として，D_a が，1 cm の土塊を充填したカラムと比べて，2.4–3.2 倍大きかったことを挙げている．Matsumoto et al.（2025）は，平均土塊径が 0.8–3.6 cm の粘土質転換畑 9 圃場で，播種後 7–8 日間の深さ 10 cm までの土壌水分プロファイルの経時変化を測定した．その結果，ダイズの播種深度である深さ 5 cm における土壌水分損失量が，平均土塊径と正の有意な相関を示した．また，平

均土塊径が 1.6 cm と 3.6 cm の圃場では，播種後 7 日目に深さ 5 cm における土壌水分量が永久シオレ点（−1.5 MPa）を下回り，特に後者では乾燥層が深さ 5 cm 付近まで発達したと報告している．その原因として，上記の圃場のデータは示されていないが，高さ 20 cm の平均風速が 1.0 m s^{-1} のとき，平均土塊径が 2.5 cm と 1.8 cm の圃場では，D_a/D_m が 5.1 および 2.0 となったことを挙げている．すなわち，平均土塊径が大きい圃場では，D_a/D_m が大きくなったためであると考察している．したがって，土塊の大きい圃場では，風により水蒸気輸送が促進されるために，土壌表層の乾燥が速く進み，ダイズ種子の出芽に悪影響を及ぼし得る．

このような土塊土壌における顕著な乾燥を緩和する手段の一つに，土壌の鎮圧がある．高橋ら（2008）は，平均土塊径が 1.2 cm の粘土質転換畑で鎮圧（6 kPa）を行った区では，行っていない区に比べて，表層 5 cm の土壌水分量が耕うん後に高く推移したと報告している．これは，先述のように，鎮圧を行うことで不飽和透水係数が増加した（Tamari, 1994; Richard et al., 2001）ためと考えられる．合わせて，鎮圧には，土塊間間隙を狭めることで通気係数を低下させ，風による水蒸気輸送を抑制する効果もあると考えられる．一方で，Yoshida et al.（2013）は，ダイズの出芽試験において，乾燥年には深さ 7 cm に播種した方が，湿潤年には深さ 3 cm に播種した方が，出芽率が高かったと報告している．そのため，播種後の降雨の見通しに応じて播種深度を調整することが重要であると述べている．ここまでの内容を踏まえると，播種深度の調整は，砕土不良による作土層の乾燥を回避する上でも有効な手段になると考えられる．

8. 砕土不良に対処するための営農技術

砕土不良が種子の出芽に及ぼす悪影響については，営農現場でも問題視され，これに対処するための技術開発がなされてきた．アップカットロータリーは，耕うん爪が通常のロータリーとは逆方向に回転する．これにより，土壌を下方から砕き，土塊を持ち上げ，小さい土塊を耕うん爪の後方に設けられたレーキ（櫛）に通すことで，土壌表層に小さい土塊を，下層に大きい土塊を配置することができる（森本ら, 1983）．アップカットロータリーに播種機を連結することで，耕うん · 畝立て · 播種 · 施肥を一工程で実施可能な「耕うん同時畝立て播種」体系が開発されている（細川, 2004）（Fig. 2）．播種機の後方には鎮圧輪（6 kPa 程度）が装着され，播種後の土壌鎮圧も同時に行うことができる．耕うん同時畝立て播種機で浅耕を行うことにより，作業速度を向上させた「ディスク式高速一工程播種法」も開発されている（Matsuo et al., 2019）．今野ら（2024）は，地表面の画像から深層学習により砕土率を推定する方法を提案しており，砕土率を面的に容易に取得可能になることが期待される．

9. 今後の課題

粘土質転換畑における砕土性について，今後の研究課題として挙げられるのが，①転換年数の経過に伴う砕土性の改善メカニズムの解明である．これまでの研究では，畑転換による水分特性の変化（中野, 1978）や鉄酸化物量の減少（Takahashi et al., 1999）の寄与が指摘されてきた．しかし，その他にも，乾湿の繰り返しによるクラックの発達や，有機物量の減少（住田ら, 2005）の寄与も考えられる．そのため，土塊のフライアビリティー測定も含めて，包括的な研究が必要である．また，②転換畑における，耕うんに適した土壌水分量の解明も課題である．久津那ら（1974）や川崎（1990）が行った耕うん試験の結果は，転換畑では，耕うんに適した土壌水分量が，継続的に畑として利用されている圃場とは異なる可能性を示唆している．加えて，実際には必ずしも最適な土壌水分量のときに耕うんを行うことができないため，砕土率を許容範囲内にできるような耕うん時の土壌水分量の範囲 — 特に降雨の多い日本では，その湿潤側の限界 — を明らかにすることは営農上有用である．

意外と研究事例が限られているのが，③砕土率とダイズの出芽率の関係についての圃場調査である．乾田直播栽培におけるコメ（金谷 · 倉田, 1989）やトウモロコシ（篠遠 · 嶝野, 2025）では圃場調査がなされている．しかし，ダイズでは，ポット試験（Braunack, 1995; 孫ら, 2004）あるいは砕土率のレンジ（37–62 %）の限られた出芽試験（Yoshida et al., 2013）しか見られない．秋田県の大豆指導指針（秋田県農林水産部, 2024）には，圃場調査による砕土率と出芽率の関係を示すデータが記載されているため，調査自体はこれまでにも行われていると考えられ，学術誌への掲載が期待される．

土塊土壌の構造については，まず，④土塊間間隙の量や径を把握する必要がある．鈴木 · 大野（2024）は，飽和から h が −30 cm までの間隙を粗孔隙と定義し，加圧盤法により粗孔隙量を求めている．しかし，この定義には，土塊間間隙と土塊内間隙の両方が含まれる．土塊間間隙のみを対象とするためには，近年発展を遂げている，X 線 CT 画像を用いた解析（例えば，Schlüter et al., 2018）が有効と考えられる．また，多くの研究では，土塊土壌を連続体とみなしている．しかし，その前提となる⑤土塊土壌の REV（Representative elementary volume）（Bear, 1972）は評価されていない．土塊土壌のサンプリングに際して，一般的に用いられる 100 cm^3 コアサンプラー（半径 5.1 cm，高さ 5.0 cm）は，土塊の大きさに対して十分大きいとは言えず，REV を満たさないと考えられる．しかし，例えば Matsumoto et al.（2026）で用いられている，直径 15.4 cm，高さ 9.7 cm のカラムが REV を満たしているかは検証されていない．検証方法としては，カラムの大きさを変えて不飽和透水係数や D_a を測定することや，Koestel et al.（2020）のように，CT 画像

を活用して対象領域の大きさを変えながら間隙率を測定することが考えられる．

最後に，土塊土壌の不飽和水移動に関しては，⑥拡散方程式で再現しきれない場合の風による土壌中の水蒸気移動のモデル化が課題である．Davarzani et al.（2014）は，風が吹いているときの土壌からの蒸発を表すために，大気の移動（Navier-Stokes 式）と土壌中の空気の移動（移流拡散方程式）をカップリングしたモデルを提案しており，参考になるものと考えられる．また，⑦土塊土壌の乾燥過程の水分プロファイルを予測するモデルの構築も重要である．既往の鉛直一次元等温蒸発モデル（例えば，Bittelli et al., 2015）に，風による水蒸気輸送の促進を考慮した D_a を組み込むことが考えられる．このようなモデルの構築は，乾燥の影響を回避できる播種深度の決定に寄与する．

10. まとめ

本稿では，粘土質転換畑における砕土性と，砕土不良な作土層における乾燥過程の水分動態について，既往の研究を整理した．得られた結論を以下にまとめる．

1. 粘土質転換畑では，耕うんにより，センチメートルスケールの土塊が形成される．土塊の径は，畑転換後 3 年間は小さくなる．そのメカニズムとして，畑転換に伴う土壌の水分特性や鉄酸化物量の変化が指摘されている．
2. ダイズ種子の出芽に適した土塊径は 1–10 mm である．一方，日本では，径が 2 cm 以下の土塊の質量割合を表す「砕土率」が 70 % を超えると，砕土が良好であると判断される．これは，平均土塊径 1.5 cm に相当するが，土塊径のばらつきを考慮すれば，概ね妥当な基準であると考えられる．
3. 土塊から成る土壌では，土塊間の接触面積が小さいために，不飽和状態では液状水の移動は制限される．そのため，径が 1 mm の土塊から成る土壌の不飽和透水係数（マトリックポテンシャルが −1000 cm）は，土塊の無い土壌の不飽和透水係数と比べて，最大で 2 オーダー程度小さくなる．一方で，土塊径が 1 mm より大きくなっても，その土壌の不飽和透水係数は，径が 1 mm の土塊から成る土壌の不飽和透水係数と同じオーダーになる．
4. 1 mm 以上の土塊から成る土壌では，粗大な土塊間間隙の存在により，通気係数が大きい．そのため，風により，大気と土壌中の空気が混合され，水蒸気輸送が促進される．促進の程度は，土塊径や風速が大きくなると強くなり，センチメートルスケールの土塊から成る土壌では，見かけのガス拡散係数が分子拡散係数の数倍から数十倍になる．
5. 大きい土塊から成る粘土質転換畑の作土層では，風による水蒸気輸送の促進に伴い，表層の土壌水分損失量が多くなる．特に土塊が大きい場合には，播種後 1 週間で，土壌水分量が永久シオレ点を下回るほどに乾燥が進む場合があり，ダイズの出芽に悪影響を及ぼし得る．

引用文献

秋田県農林水産部編 (2024): 大豆指導指針, pp. 28–29. 秋田県農林水産部水田総合利用課, 秋田.

Bear, J. (1972): Dynamics of fluids in porous media, pp. 15–26. Elsevier, New York.

Berli, M., Carminati, A., Ghezzehei, T.A. and Or, D. (2008): Evolution of unsaturated hydraulic conductivity of aggregated soils due to compressive forces. Water Resources Research, 44: W00C09, doi:10.1029/2007WR006501.

Bittelli, M., Campbell, G.S. and Tomei, F. (2015): Soil physics with python: Transport in the soil-plant-atmosphere system, pp. 284–301. Oxford University Press, New York.

Braunack, M.V. (1995): Effects of aggregate size and soil water content on emergence of soybean (*Glycine max*, L. Merr.) and maize (*Zea mays*, L.). Soil & Tillage Research, 33: 149–161.

Carminati, A., Kaestner, A., Ippisch, O., Koliji, A., Lehmann, P., Hassanein, R., Vontobel, P., Lehmann, E., Laloui, L., Vuillet, L. and Flühler, H. (2007a): Water flow between soil aggregates. Transport in Porous Media, 68: 219–236.

Carminati, A., Kaestner, A., Hassanein, R., Ippisch, O., Vontobel, P. and Flühler, H. (2007b): Infiltration through series of soil aggregates: Neutron radiography and modelling. Advances in Water Resources, 30: 1168–1178.

Carminati, A., Kaestner, A., Lehmann, P. and Flühler, H. (2008): Unsaturated water flow across soil aggregate contacts. Advances in Water Resources, 31: 1221–1232.

Carminati, A. and Flühler, H. (2009): Water infiltration and redistribution in soil aggregate packings. Vadose Zone Journal, 8: 150–157.

Davarzani, H., Smits, K., Tolene, R.M. and Illangasekare, T. (2014): Study of the effect of wind speed on evaporation from soil through integrated modeling of the atmospheric boundary layer and shallow subsurface. Water Resources Research, 50: 661–680.

Dexter, A.R. and Kroesbergen, B. (1985): Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. Journal of Agricultural Engineering Research, 31: 139–147.

Dexter, A.R. and Bird, N.R.A. (2001): Methods for predicting the optimum and the range of soil water contents for tillage based on the water retention curve. Soil & Tillage Research, 57: 203–212.

FAO (2025): FAOSTAT. Available at https://www.fao.org/faostat. (accessed on November 17, 2025)

Farrell, D.A., Greacen, E.L. and Gurr, C.G. (1966): Vapor transfer in soil due to air turbulence. Soil Science, 102: 305–313.

Fuchs, M. and Hadas, A. (2011): Mulch resistance to water vapor transport. Agricultural Water Management, 98: 990–998.

Fukuda, H. (1955): Air and vapor movement in soil due to wind gustiness. Soil Science, 79: 249–256.

Hadas, A. and Russo, D. (1974): Water uptake by seeds as affected by water stress, capillary conductivity, and seed-soil water contact. I. Experimental study. Agronomy Journal, 5: 643–647.

Hillel, D. (1998): Environmental soil physics, pp.507–543. Academic Press, San Diego.

細川 寿 (2004): 大豆の耕うん同時畝立作業機による重粘土転換畑の湿害回避技術. 農業機械学会誌, 66: 14–16.

Ichinose, Y., Ise, Y., Kanda, T., Maejima, Y., Yagi, T., Takahashi, Y., Nakagawa, S., Kamiyama, K., Iwasa, H., Kadokura (Kaneko), A., Ohashi, Y., Komatsu, S., Matsuyama, M., Hirayama, Y., Mochida, T., Matsui, K., Takimoto, T., Obara, H., Kubotera, H. and Takata, Y. (2023): Factors controlling available soil nitrogen in Japanese paddy fields. Soil Science and Plant Nutrition, 69: 303–314.

Ishihara, Y., Shimojima, E. and Harada, H. (1992): Water vapor transfer beneath bare soil where evaporation is influenced by a turbulent surface wind. Journal of Hydrology, 131: 63–104.

金谷 豊, 倉田 勇 (1989): 重粘土壌の耕うん方法に関する研究（第 2 報）— 水田と転換畑における砕土率向上技術 —. 農業機械学会誌, 51: 45–53.

片岡恭子, 塩沢 昌 (1998): 「熱交換 – 熱伝導 – 蒸発」モデルによる裸地地温の日変化の解析 — 裸地地温の日変化と土壌水分量の関係（II）—. 農業土木学会論文集, 195: 133–139.

川崎哲郎 (1990): 水田土壌の耕うんに適した水分域について. 農業土木学会論文集, 147: 69–77.

Koestel, J., Larsbo, M. and Jarvis, N. (2020): Scale and REV analyses for porosity and pore connectivity measures in unsaturated soil. Geoderma, 366: 114206, doi:10.1016/j.geoderma.2020.114206.

今野智寛, 畑中 篤, 滝澤浩幸 (2024): 耕起後圃場の表面画像の土塊程度からの砕土率推定 — 深層学習による画像分類の活用 —. 日本土壌肥料学雑誌, 95: 367–375.

Kubota, S., Nishida, K. and Yoshida, S. (2023): Plant hydraulic resistance controls transpiration of soybean in rotational paddy fields under humid climates. Paddy and Water Environment, 21: 219–230.

熊谷悦史, 高橋智紀, 中野聡史, 松尾直樹 (2018): 農研機構東北農業研究センターの過去 33 年間の生産力検定試験におけるダイズ収量と土壌乾燥との関係 — 農研機構メッシュ農業気象データと FAO56 モデルによる解析 —. 日本作物学会紀事, 87: 233–241.

久津那浩三, 新村善男, 上森 晃 (1974): 耕耘砕土に関する研究（第 1 報） 土壌物理性の砕土におよぼす影響. 日本土壌肥料学雑誌, 45: 37–41.

Laemmel, T., Mohr, M., Schack-Kirchner, H., Schindler, D. and Maier, M. (2019): 1D air pressure fluctuations cannot fully explain the natural pressure-pumping effect on soil gas transport. Soil Science Society of America Journal, 83: 1044–1053.

Levintal, E., Dragila, M.I. and Weisbrod, N. (2019): Impact of wind speed and soil permeability on aeration time in the upper vadose zone. Agricultural and Forest Meteorology, 269–270: 294–304.

Matsumoto, Y., Yoshida, S., Sekiya, H. and Nishida, K. (2022): Gas transport enhancement under windy condition in poorly tilled seedbed of clayey rotational paddy field. Soil Science and Plant Nutrition, 68: 189–201.

Matsumoto, Y., Yoshida, S., Okabe, A. and Nishida, K. (2023): Impact of clod (aggregate) size on evaporation rate and soil moisture profile during the drying process. European Journal of Soil Science, 74: e13420, doi:10.1111/ejss.13420.

Matsumoto, Y., Yoshida, S., Ohno, S., Sekiya, H. and Nishida, K. (2025): Field investigation of soil moisture profile in the seedbeds of clayey paddy fields composed of large clods (aggregates). Soil Science and Plant Nutrition, 71: 1–11.

Matsumoto, Y., Yoshida, S., Okabe, A. and Nishida, K. (2026): Macroscopic unsaturated hydraulic conductivity in a soil layer composed of clods with the diameter in the centimeter range at low soil moisture content. Soil & Tillage Research, 256: 106909, doi:10.1016/j.still.2025.106909.

Matsuo, N., Tsuchiya, S., Nakano, K. and Fukami, K. (2019): Design and evaluation of a one-operation shallow up-cut tillage sowing method for soybean production. Plant Production Science, 22: 465–478.

森本國夫, 三浦恭志郎, 八木 茂, 唐橋 需 (1983): レーキ付きアップカット・ロータリの作業性能. 農業機械学会誌, 45: 375–378.

Munkholm, L.J. (2011): Soil friability: A review of the concept, assessment and effects of soil properties and management. Geoderma, 167–168: 236–246.

中野啓三 (1978): 低湿重粘土水田の畑転換に伴う土壌物理性の推移. 北陸農業試験場報告, 21: 63–94.

Nishida, K., Harashima, T., Yoshida, S. and Ohno, S. (2020): Water flow resistance along the pathway from the plow layer to the drainage canal via subsurface drainage in a paddy field. Agricultural Water Management, 242: 106391, doi:10.1016/j.agwat.2020.106391.

農林水産省 (2025a): 面積調査の概要. https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotu/menseki/gaiyou/index.html.（2025 年 12 月 15 日確認）

農林水産省 (2025b): 令和 6 年耕地及び作付面積統計. https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&toukei=00500215&tstat=000001013427&cycle=7&year=20240&month=0&tclass1=000001032270&

tclass2=000001032271&tclass3=000001226241.（2025 年 11 月 17 日確認）

Obour, P.B., Keller, T., Lamandé, M. and Munkholm, L.J. (2019): Pore structure characteristics and soil workability along a clay gradient. Geoderma. 337: 1186–1195.

Philip, J.R. (1957): Evaporation, and moisture and heat fields in the soil. Journal of Meteorology, 14: 354–366.

Poulsen, T.G. (2019): Linking below-surface horizontal pore velocity profiles in porous media with near-surface wind conditions and porous medium gas permeability. European Journal of Soil Science, 71: 819–830.

Pourbakhtiar, A., Poulsen, T.G., Wilkinson, S. and Bridge, J.W. (2017): Effect of wind turbulence on gas transport in porous media: experimental method and preliminary results. European Journal of Soil Science, 68: 48–56.

Richard, G., Cousin, I., Sillon, J.F., Bruand, A. and Guérif, J. (2001): Effect of compaction on the porosity of a silty soil: influence on unsaturated hydraulic properties. European Journal of Soil Science, 52: 49–58.

Sato, T., Kaneta, Y., Furuta, N., Kobayashi, H., Shindo, H., Ota, T. and Sato, A. (2003): Effect of soil physical properties on soybean nodulation and N_2 fixation at the early growth stage in heavy soil field in Hachirougata Polder, Japan. Soil Science and Plant Nutrition, 49: 695–702.

Schlüter, S., Großmann, C., Diel, J., Wu, G.M., Tischer, S., Deubel, A. and Rücknagel, J. (2018): Long-term effects of conventional and reduced tillage on soil structure, soil ecological and soil hydraulic properties. Geoderma, 332: 10–19.

篠遠善哉, 嶝野英子 (2025): 岩手県中央部の水田転換畑での現地実証試験においてプラウ耕で栽培したトウモロコシの播種精度, 砕土率, 子実収量および収量関連形質の解析. 日本作物学会紀事, 94: 252–262.

Shokri, N., Lehmann, P. and Or, D. (2009): Critical evaluation of enhancement factors for vapor transport through unsaturated porous media. Water Resources Research, 45: W10433, doi:10.1029/2009WR007769.

Sławiński, C., Witkowska-Walczak, B., Lipiec, J. and Nosalewicz, A. (2011): Effect of aggregate size on water movement in soils. International Agrophysics, 25: 53–58.

孫 宇梅, 伊藤道秋, 荒木 肇, 山下米治 (2004): 作物の出芽, 生育に及ぼす土塊の大きさの影響. 農作業研究, 39: 151–156.

住田弘一, 加藤直人, 西田瑞彦 (2005): 田畑輪換の繰り返しや長期畑転換に伴う転作大豆の生産力低下と土壌肥沃度の変化. 東北農業研究センター研究報告, 103: 39–52.

鈴木克拓, 大野智史 (2024): 多雪重粘地での代かき水稲 – 大麦 – 大豆 2 年 3 作体系における作土の孔隙特性と炭素・窒素含量の変化. 日本土壌肥料学雑誌, 95: 125–133.

Takahashi, T., Park, C.Y., Nakajima, H., Sekiya, H. and Toriyama, K. (1999): Ferric iron transformation in soils with rotation of irrigated rice-upland crops and effect on soil tillage properties. Soil Science and Plant Nutrition, 45: 163–173.

高橋智紀, 細川 寿, 松崎守夫 (2008): 重粘質転換畑における土壌鎮圧によるダイズ種子の吸水促進効果. 日本土壌肥料学雑誌, 1: 1–7.

Tamari, S. (1994): Relations between pore-space and hydraulic properties in compacted beds of silty-loam aggregates. Soil Technology, 7: 57–73.

Tisdall, J.M. and Oades, J.M. (1982): Organic matter and water-stable aggregates in soils. Journal of Soil Science, 33:141–163.

Utomo, W.H. and Dexter, A.R. (1981): Soil friability. Journal of Soil Science, 32: 203–213.

Yoshida, S., Hosokawa, H. and Kazuhide, A. (2013): Analysis of suitable condition for soybean planting in rotational clayey paddy fields under risk of excessive dry or wet condition. Journal of the Japanese Society of Soil Physics, 125: 17–27.

Youngs, E.G. and Leeds-Harrison, P.B. (1990): Aspects of transport processes in aggregated soils. Journal of Soil Science, 41: 665–675.

This article is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

How to cite this article: MATSUMOTO, Y. (2026): Water dynamics during the drying process in poorly tilled plow layer of clayey paddy field adversely affecting soybean germination. J. Jpn. Soc. Soil Phys., 162: 15–25, doi:10.34467/jssoilphysics.162.0_15. (in Japanese with English abstract)

要　　旨

日本では，ダイズの大半は水田転換畑で栽培されているが，その収量は低い．その原因として，これまで，排水不良に伴う湿害や夏季の干ばつ，可給態窒素の減少が挙げられ，重点的に研究が行われてきた．一方で，これまで注目されることが少なかったのが，特に粘土質な転換畑において顕著な，耕うん時の砕土不良である．砕土不良な作土層では，乾燥が速やかに進むことで，ダイズ種子の出芽に悪影響を及ぼす．本稿では，粘土質転換畑における砕土性，ダイズ種子の出芽に適した土塊の大きさ，土塊から成る土壌に特異な不飽和液状水移動および水蒸気移動と，それによりもたらされる土壌の乾燥について，既往の研究を整理した．合わせて，砕土不良に対処するために開発された営農技術についても紹介した．以上の内容を踏まえ，今後取り組むべき研究課題を提示した．

キーワード：粘土質転換畑，耕うん，土塊，乾燥，出芽