

農地土壌における水移動と環境保全

江口定夫*

〔キーワード〕：土壌断面，土壌の間隙，水ポテンシャル，選択流，消費者

環の中で水が果たす大きな役割と持続可能な利用方法について考えたい。

1. はじめに

生物体の大部分は水で出来ている。特に体内に海を宿すことで生命活動を維持する陸上生物にとって、水こそが命であり、陸域生態系では、栄養ではなく水の多寡が、生物生産性を左右する最大の規定要因となる。農業は、陸域生態系の物質循環を利用して、生物（作物、家畜）を大量生産する人間活動（食料生産）であり、必然的に、限られた空間・時間の中で、水と栄養を大量に使用する。

土壌は、地球上における物質循環の「要」である（佐久間・梅田 1998）。土壌における物質循環の大部分は、水が持つエネルギーの勾配を駆動力として、また、水を輸送媒体として、生じる。中でも農地土壌は、人間と環境の間で様々な物質のやりとりを制御するインターフェイスであり（江口 2019）、その機能は、土壌を介した水移動の理解と制御に基づき最大限に発揮される。

農地土壌は食料生産が第一目的、環境保全は二の次であり、食料生産と環境保全の両立は一般に難しい。しかし、決して相反する関係ではない。農地土壌のこちら側にある人間社会への恵み（食料生産）を最大化すると同時に、農地土壌の向こう側にある環境（水圏、大気圏）への負荷を最小化する工夫が出来れば、持続可能な人間社会の構築と地球環境保全の両立が可能となる。農地土壌は、人間による働きかけが非常に大きいからこそ、自然界の物質循環の力と人間の工夫を併せることで、自然土壌には出来ないことが出来る。

地球の長い歴史と人間の短い歴史の中で、水は土壌を作り、土壌は水を再生してきた。再生産可能な資源として水を利用するには、土壌の機能と人間の工夫が必要不可欠である。本稿では、特に農地土壌における水移動に焦点を当て、農地生態系の物質循

2. 物質循環を司る水

水は、「水の惑星」地球の陸域生態系における物質循環の大部分を司る。水は液体、気体及び固体と姿を変えながら、環境中をダイナミックに動き回る。水のエネルギー状態は水ポテンシャル（全ポテンシャル、 ψ_t ）(Pa) で表され、水移動は、水ポテンシャルの高い方から低い方に向かって生じる。

$$\psi_t = \psi_g + \psi_m + \psi_p + \psi_o$$

ここで、下付き文字 g , m , p 及び o は、それぞれ、重力、マトリック、圧力及び浸透ポテンシャルを表す。陸域生態系では一般に、土壌中の水ポテンシャルが最も高く、水移動は、土壌（ $-3 \sim 0$ MPa : 変動範囲の例）→根（ $-2 \sim -0.1$ MPa）→葉（ $-3 \sim -1.5$ MPa）→大気（ $-300 \sim -10$ MPa）の順（蒸散）、または、土壌→大気の順（蒸発）で生じる（図 1）。

水の流量（単位時間当りの水移動量）は、水の流れ易さを表す係数（土壌では飽和・不飽和透水係数、植物体では通水コンダクタンス）と水ポテンシャル勾配の積で表される。一般に、蒸散による水移動量が大きいほど、植物の生産性は高い。独立栄養生物である植物は、根から吸収された水と気孔から取り込んだ二酸化炭素を基質として光合成を行い、炭水化物（有機物）を作る。土壌中の必須栄養元素（窒素、リン、カリウム等、計 16 種）は、吸水に伴う移流（マスフロー）及び濃度勾配を駆動力とした拡散により、土壌中の水を媒体として輸送され、主に溶存態の無機イオンとして吸収される。蒸散と蒸発は、土壌の熱収支において最大の支出項（潜熱）であり、土壌の升温を抑え、生物活動に適した温度を保つ役割を果たす。

土壌によるこれらのはたらき（生態系サービス）は、土壌の表層から下層及びその下も含めた不飽和

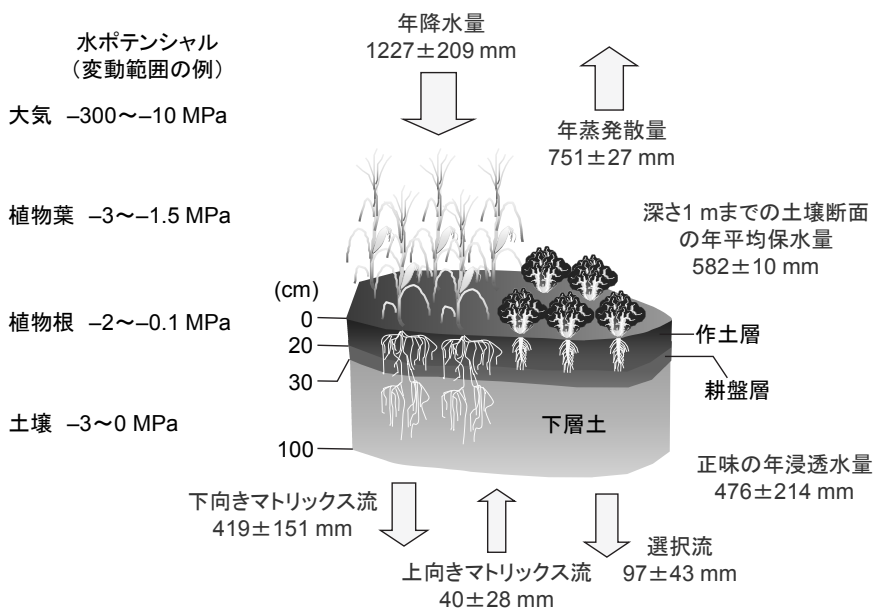


図1 農地土壌における水移動量（7年間の平均値±標準偏差）の観測事例
黒ボク土野菜畑（Eguchi & Hasegawa 2008）と一般的な水ポテンシャルの変動範囲の例。

帯 (vadose zone) とその下にある地下水帯を土壌中の水移動が繋ぎ、水、熱、養分、生物が上下に行き来する土壌断面 (soil profile) を形成することで、初めて発揮される。黒ボク土（主に火山灰を母材とする土壌）の野菜畑を対象に水収支を観測した事例（図1）では、年降水量や年浸透水量の大きな変動（変動係数：17%及び45%）に対して、年蒸発散量や年平均保水量（深さ1 mまでの土壌断面）はほぼ一定（同4%及び2%）に保たれており、水移動によるホメオスタシス機能が如何なく発揮されていた。

植物生育を考えるときは所謂、植物の永久萎凋点（-1.5 MPa）よりも高い水ポテンシャルの土壌水分量（有効水分量）を主な対象とすることが多いが、土壌中の物質輸送では保水量全体が解析対象となる。土壌中の水は、乾燥時ほど土壌団粒や粘土粒子等に強く保持され（水ポテンシャルが低い）、動きは遅いが、湿潤時ほど、水は粗大間隙中を速く移動できる（水ポテンシャルが高い）。大雨時など短時間で大きな水量が土壌中へ浸入すると、透水性が低い耕盤層などの直上で水ポテンシャルが高まり、鉛直下方へと繋がる粗大間隙中へ水が流入・流下し、下層土マトリクス中の水ポテンシャルとの間での物理的平衡状態が成立しないまま、植物根域よりも深層へと流去する場合がある。このように土壌中の

ごく一部分を水や溶質が選択的に流れる現象を選択流と呼ぶ（Hendrickx & Flury 2001）。選択流は農地の水収支項の一つとして重要な位置を占め（図1）、土壌マトリクス中の溶存物質（栄養元素等）の溶脱を促進する場合と抑制する場合がある。選択流は、土壌中における速やかな内部排水を促すことで、降水時の表面湛水を抑制する効果があり、圃場スケールでは農地の排水性改善（暗渠排水等）、地形スケールでは傾斜畑における表面流去水・土壌侵食防止帯（例えば、ケニア共和国の Fanya-juu terraces 等：Saiz et al 2016）としても活用される。

土壌の間隙における水の出入りのバランス（水収支）は、土壌の気相率を決定する。大気と土壌の間のガス交換のし易さ（ガス拡散係数、通気係数）は、気相率と間隙構造によって決まる。気相率が高いと土壌中は好氣的に保たれ、有機物分解や硝化等の酸化反応が促進される。一方、間隙の多くが水で満たされ、大気からの酸素供給が土壌呼吸による酸素消費を上回ると、土壌空気中の酸素濃度が低下し、嫌氣的になる。強力な温室効果ガスである一酸化二窒素（ N_2O ）は、好氣的条件下では主に硝化過程、嫌氣的条件が進むにつれて主に脱窒過程で生成する。脱窒は、反応性窒素（reactive nitrogen：生物が利用可能な N_2 以外の全ての化合物中窒素）を再び N_2 に

戻す主な反応経路であり、硝酸イオンを含む好気的環境と酸素を含まない嫌気的環境の境界付近で、局所的に生じる (江口 2008)。

3. 農地の土壌断面における水の保持量

土壌の性質は、層位ごとではなく、鉛直土壌断面及び地下水面から繋がる連続体として捉える必要がある。農地土壌の保水量や有効水分量は通常、作土 (深さ 15 cm 程度) よりも下層土に多く、下層土の保水量やそこから水移動が畑作物の生産性を大きく左右する。したがって、作土だけでなく、土壌断面全体での保水量を把握する必要がある。

日本の農地土壌は、深さ 1 m までの土壌断面を対象とすると、最大 500~750 mm の水を保持しうる間隙を有し (図 2a)、温暖湿潤な気候条件下において、通常 300~600 mm 程度の水を保持している (図 2c)。日本の農地面積の約半分は水田、残りは畑

(麦・豆類、野菜、果樹、茶、牧草等) である。畑面積の約半分を占める黒ボク土は、他の土壌よりも全間隙量 (図 2a) 及び通常時の保水量 (図 2c) が大きい。黒ボク土は植物にとって有効でない水を多く保持し、それが他の土壌との保水量の差の主因となっている。この水は、風乾 (≈ 32 MPa) によって失われるが、黒ボク土の物理化学的な高い反応性も同時に不可逆的に低下する。保水量が大きいことは、水や溶存態栄養成分の根域内での滞留時間を増大させ、作物がそれらを吸収できる機会を増大させる役割を果たす。

水田と畑の間隙量は大凡同じだが (図 2a)、水田土壌は落水後も体積含水率が高く、通常時 (非灌漑期間中) の保水量は畑より大きい (図 2c)。このため、地表面からの新たな浸入水を保持できる容量は、50~100 mm ほどに過ぎない (図 2b)。水稻収穫後、

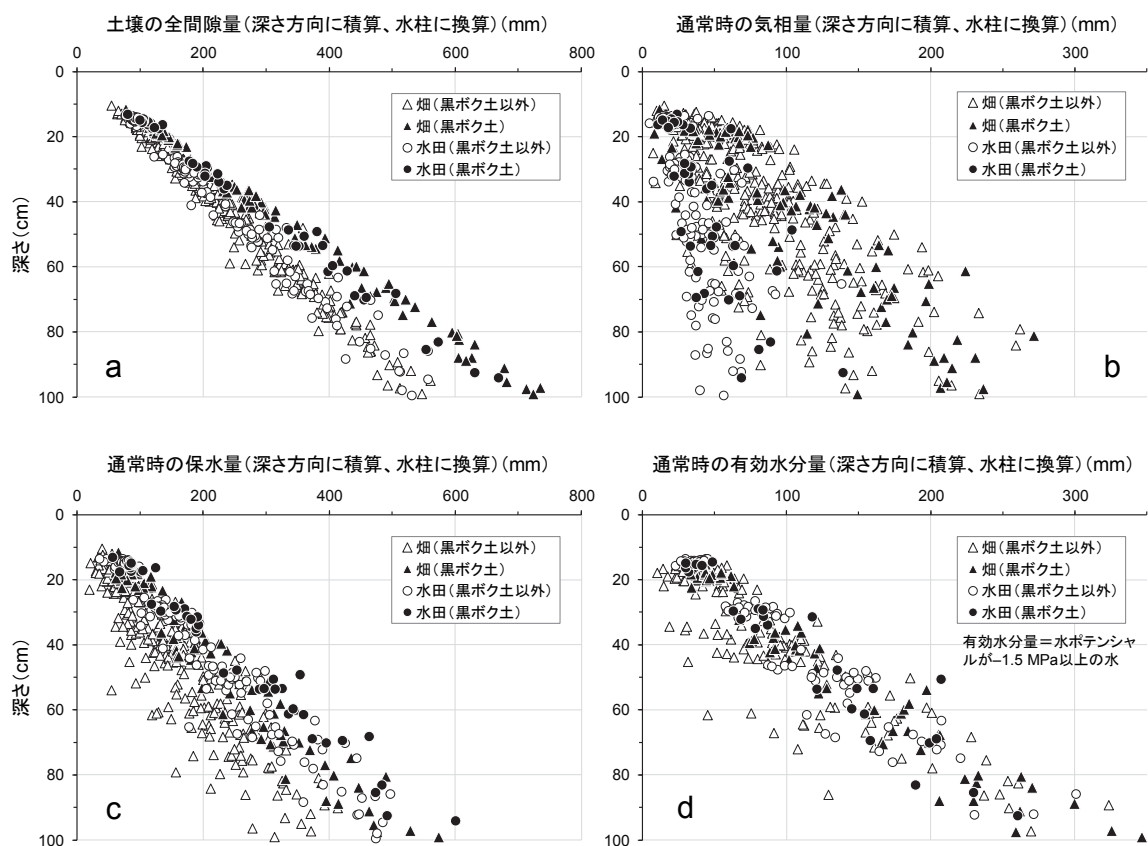


図2 日本の土壌統群別・地目別の平均的な農地土壌断面における水の保持に関わる特性

(a) 土壌の全間隙量; (b) 通常時 (土壌採取時) の気相の量; (c) 通常時の保水量; (d) 通常時の有効水分量。いずれも、日本の農地土壌の物理的性質データベース「SolphyJ」(江口ら 2011) より作成。

台風等による大雨があれば、多量の水は土壌中へ浸入できず、表面流去水が発生し、濁水流出が生じることがある。水田からの窒素等の流出負荷量は、湛水状態で管理する灌漑期よりも、非灌漑期の方が大きい（治多ら 2015）。その流出経路としては、表面流出、暗渠流出及び浸透流出があるが、水尻の止水板を高く調節し、例えば高さ 10 cm に設定すれば、一度に 100 mm までの雨量なら表面流出を抑えられる。

これに対して、畑土壌は 100~300 mm ほどの余裕があり（図 2b）、土壌中への浸入が速やかならば、かなりの豪雨でも表面湛水は発生しない筈である。しかし実際には、10 mm/h 程度以下の降雨強度でも土壌中への浸入速度を上回り、傾斜畑では表面流去と土壌侵食が発生しやす。畑土壌では、土壌中への浸入速度の増大が、土壌保全・環境保全に直結する。緑地帯や、間作期間中の緑肥作物等による植被を作ること、根域内の体積含水率の低下や根穴による粗大間隙の増大等によって浸入速度が大きくなり、農地や流域からの土砂・栄養塩類流出を防ぐことが出来る。農地土壌におけるちょっとした水移動の工夫が、例えば熱帯島嶼では、内湾に生息する貴重な珊瑚礁を守ることに繋がる。

4. 土壌を作る水、水を再生する土壌

土壌生成・層分化プロセスの大部分は、水移動と共に進行する。熱帯から寒帯、乾燥地帯から多雨

地帯に至るまで、水はコロイド状の粘土粒子や腐植物質、溶存する二酸化炭素、キレート状のアルミニウムや鉄等を輸送し、集積層や溶脱層、斑紋や結核等を形作る。土壌の最も重要な構成要素と言える粘土鉱物の生成には、水ポテンシャルの高い湿潤条件が欠かせない。台地から河川等の表面水体に至る地形条件において、ほぼ同じ母材から主に地下水位の違いによって生み出される一連の異なる土壌は、地形水文系列（topohydrosequence）または地形連鎖系（toposequence）と呼ばれる。これらは地球の長い歴史の中でゆっくりと進行したプロセスだが、人為的な水移動が短期間で生み出す土壌としては、農地土壌を湛水状態で管理する水田土壌のほか、アルカリ金属・アルカリ土類金属イオンが土壌表層に集積する塩類化やアルカリ化、湿性土壌の排水性改良が一因となる硫酸酸性土壌、泥炭土の乾燥化、還元的性質が強い土壌から酸化的性質が優占する土壌への変化、更には、傾斜畑の激しい土壌侵食による作土の損失等がある。

長年に亘る施肥窒素の多投入のため、硝化によるプロトン生成が土壌の緩衝能を上回り、強酸性化した農地土壌では、最も重要な土壌構成要素である粘土鉱物が溶解し、植物にとって有毒なアルミニウムイオンが溶出する。粘土鉱物を失えば、栄養元素を吸着・保持し、植物の必要性に応じて供給する土壌の機能は半永久的に失われる。土壌侵食は、腐植に富む作土層そのものの損失であり、作物生産性の低

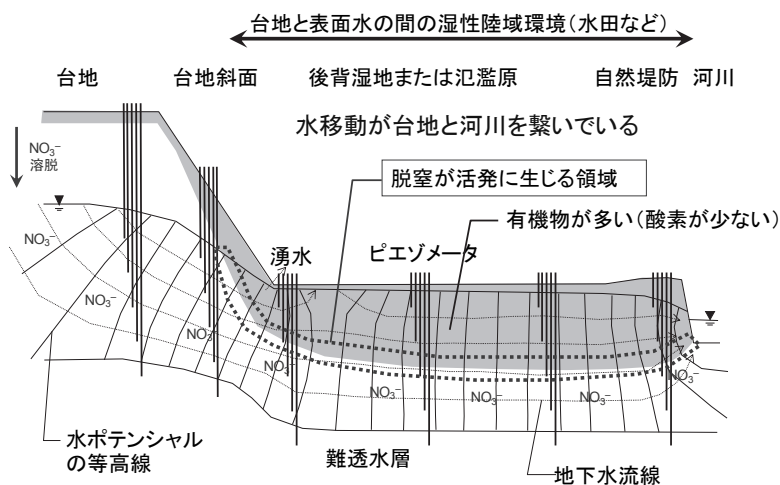


図3 水畔域（riparian zone）における水移動と脱窒のホットスポットの形成
江口（2008）を改変。

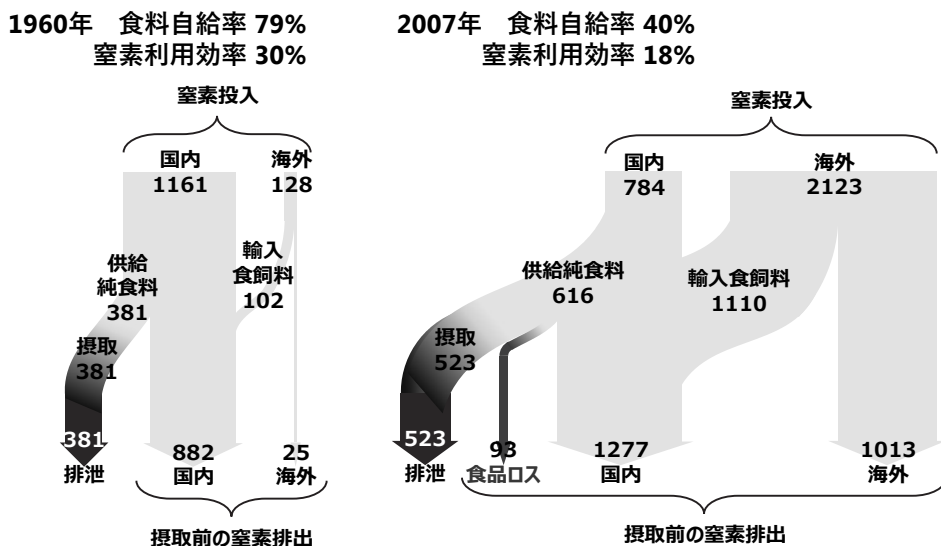


図4 日本の国内外における窒素投入量・排出量 (Gg N/yr) の長期変遷
江口・平野 (2019) より作成.

下に直結する。米国中部の穀倉地帯では、オガララ帯水層の過剰揚水・灌漑利用が進み、量的にも質的（塩類化）にも、土壌と地下水の持続可能性が危ぶまれている。これらは何れも、水移動が土壌とその機能を破壊する方向にある。土壌には水を再生する機能があり、土壌を保全する水移動が、水を保全し、再生可能な資源としての持続可能な水利用に繋がる。

例えば地形連鎖系には、水畔域 (riparian zone) が存在し、硝酸イオンを高濃度で含む台地由来の好気的な地下水が、易分解性炭素を多く含む低地の嫌気的な地下水と出会う境界付近では、脱窒のホットスポットが形成される (図3)。水畔域はしばしば、農地排水性改良 (暗渠排水整備、河床の掘り下げ等) のために好気的条件となり、この脱窒能が失われ、台地由来の地下水は高濃度の硝酸イオンをそのまま河川水中へ流出させることになる。水畔域は、水田等として利用すると共に、水圏への窒素負荷を軽減する機能を発揮できるように、地形連鎖系の土壌生成環境を維持したまま、できるだけ嫌気的に保つ工夫が必要である。

水田は、緩効性肥料の開発等、できるだけ窒素投入を減らすための肥培管理技術が高度に進んでおり、肥料と水移動を適正に管理することで、ゼロエミッションは勿論、環境中からのインプットである

灌漑水や降水中の窒素を浄化することも可能である (箭田ら 2020)。窒素負荷源となり易い畑においても、間作期間中の緑肥の導入による窒素溶脱の削減 (Asada et al 2018)、減肥と化学肥料の堆肥代替による水圏 (窒素溶脱) 及び大気圏 (地球温暖化ガス排出) への負荷を同時に削減する肥培管理技術の開発 (郷内ら 2019) など、生産現場における新たな技術開発が進んでいる。

5. おわりに

最後に、食料生産現場である農地土壌ではなく、その生産物の恩恵を受けている消費者の役割について述べたい。農地における作物生産性の向上のための排水性改良や多施肥による集約的な農業システムは、必ずしも農家が農家のために実施したのではなく、フードシステムの一番下流側で強力的に食料を要求する私たち消費者のニーズ (市場ニーズ) が駆動力となってそれを引き起こしているということを、社会全体で認識する必要がある。食料の流れを通じて、生産者と消費者は常に繋がっている。水を再生可能な資源として利用する上で、消費者の役割は極めて大きい。日本は仮想水として大量の水を輸入しているが、それだけではなく、海外の農地土壌において多大な窒素負荷を引き起こしている (図4)。

米国でオガララ帯水層の枯渇や土壌・地下水の塩類化が問題となるならば、その一部は、この穀倉地帯で栽培されたトウモロコシを家畜用の濃厚飼料として輸入し、その餌で飼養された家畜が生み出す畜産物を摂取する私たち日本人が、引き起こしていると言える。また、日本では、供給純食料タンパク質の11%は食品ロス、22%はタンパク質の摂り過ぎであり(江口・平野 2019)、その分だけ、過剰な窒素負荷を国内外の生産現場に与えている。食と環境負荷の密接な関係とその現状について、生産者と消費者の相互理解を進め、農地土壌における水移動を適切に管理する環境保全型のフードシステムを構築することが必要である。

引用文献

- Asada K, Eguchi S, Ikeba M, Kato T, Yada S, Nakajima Y, Itahashi S (2018) Modeling nitrogen leaching from Andosols amended with different composted manures using LEACHM. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 110: 307-326
- 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—. *日本土壌肥科学雑誌* 79 (2) : 213-227.
- 江口定夫 (2019) 窒素の物質循環と窒素フットプリント—土壌は人間と環境のインターフェイス. *理科教室* 62 (12) : 48-52.
- Eguchi S, Hasegawa S (2008) Determination and characterization of preferential water flow in unsaturated subsoil of Andisol. *Soil Science Society of America Journal* 72(2): 320-330.
- 江口定夫・平野七恵 (2019) 日本の消費者の食生活改善による反応性窒素排出削減ポテンシャルと国連 SDGs シナリオに沿った将来予測. *日本土壌肥科学雑誌* 90 (1) : 32-46.
- 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
- 郷内武・藤田裕・佐野智人・大浦典子・須藤重人・朝田景・江口定夫 (2019) 黒ボク土ナシ園における豚糞堆肥を活用した代替施肥による大気圏および水圏への窒素負荷軽減効果. *日本土壌肥科学雑誌* 90 (5) : 363-371.
- 治多伸介・須戸幹・江口定夫・大久保卓也・黒田久雄・武田育郎・藤原拓・山本忠男・人見忠良・白谷栄作・横田久理子・井上隆信 (2015) 水田からの窒素, リン, COD 流出負荷量の実態と課題. *水環境学会誌* 38 (4) : 81-91
- Hendrickx JMH, Flury M (2001) Uniform and preferential flow mechanisms in the vadose zone. p.149-187. Conceptual models of flow and transport in the fractured vadose zone. Natl. Acad. Press, Washington, DC.
- Saiz G, Wandera FM, Pelster DE, Ngetich W, Okalebo JR, Rufino MC, Butterbach-Bahl K (2016) Long-term assessment of soil and water conservation measures (Fanya-juu terraces) on soil organic matter in South Eastern Kenya. *Geoderma* 274: 1-9.
- 佐久間敏雄・梅田安治 (1998) 土の自然史—食料・生命・環境. p.1-256. 北海道大学出版会, 札幌.
- 箭田佐衣子・江口定夫・林暁嵐・朝田景・蓮川博之・武久邦彦 (2020) 緩効性肥料による水田からの窒素流出低減効果. *日本土壌肥科学雑誌* 91 (5) : 351-365.