

講演要旨

近年の大型機械化と多様な水稲栽培における水田土壌の課題と対応

金田吉弘

1. はじめに

近年、我が国の水稲栽培における作業能率は飛躍的に向上した。その結果、農林水産省の統計によれば、1960年の水稲栽培での直接労働時間は1 ha 当たり1739時間であったのに対して、2015年は230時間と、この55年間で約1500時間も短縮された（農林水産省、2017）。背景には、圃場の区画整備や作業機械の大型化があげられる。一方、主食用米の消費量が減少する中、粃を家畜飼料とする飼料用米に転換する取り組みが進み、飼料用に適した収量性の高い品種の開発も進んでいる。また、完熟前の穂、茎葉のすべてを発酵させ、粗飼料として利用する稲発酵粗飼料（稲WCS）の事例も増えている。そのため、各地において、多様な水稲栽培が展開されている。本報告では、近年における機械の大型化や多様な水稲栽培が水田土壌に及ぼす影響を紹介しながら、今後の対応について述べる。

2. 大型機械の導入による土壌の変化

かつての畜耕は1950年代にトラクターに移行し、1951年にわずか70台であったものが、2000年代には200万台と急激に増加し、より大型化している（藤原、2017）。しかし、この大型機械による耕起作業は根圏環境に影響を及ぼすことが知られている。本来、耕起作業は、表土と下層土を反転させる耕起と耕起された土壌を細かく砕く砕土の2行程からなる。しかし、近年の耕起作業には反転に適するプラウ耕などは少なく作業能率の高いロータリ耕の利用が多い（安西ら、1998）。そのため、現在では、耕起といえばロータリ耕をさすことが多く、トラクター駆動のロータリにより、耕起、砕土を1行程で行う作業が一般的である。反転と砕土の2行程の耕起作業後の作土は、表層土のみが細くなり下層には大土塊が存在するのに対して、ロータリ耕による耕起、砕土後は作土全体に均一な細かい土塊が分布し硬い耕盤層が形成されやすい。また、耕盤層は大型機械の踏圧により硬くなりやすく水田の透水性を低下させる場合も多い。このことから、近年の大型トラクターによる耕起作業は、作業能率を向上させる反面、作業回数が多い場合には根圏環境に悪影響を及ぼす事例が多い。

次に、代かき作業は、土壌を細粒化することにより漏水を防止するとともに有機物の分解による窒素の無機化と土壌の還元化を促進する。窒素の無機化が促進されると水稲の生育にとっては有利になるものの土壌は還元的になりやすい。特に、近年の稲わらを作土にすき込む栽培では土壌還元が急速に進行する。還元が過度に進行した場合には根腐れなどの生理的

障害が発生し、水稲にとっては反対に悪影響を及ぼすことになる。そのため、土壌の特性を踏まえて代かきの回数や深さなどを判断する必要がある。

3. 多様な水稲栽培での養分収支と有機物管理

(1) 多様な水稲栽培での養分収支

水田への養分は、肥料と前年の稲わらの他、雨水、灌漑水から供給される。一方、支出は稲体による吸収、田面水や浸透水からの流出がある。また、窒素については、窒素固定による供給と脱窒による流出がある。これまでの知見（関矢，1996）やデータをもとに収量水準が異なる多様な水稲栽培での養分収支を検討した。主食用米の収量を 550 g m^{-2} とすると、窒素収支はプラスになる。また、飼料用米の収量を 700 g m^{-2} とすると、主食用米に比べて減少するが窒素収支はわずかにプラスになる。一方、稲わらの全量を持ち出す稲 WCS の窒素収支はマイナスになる。同様に、主食用米と飼料用米のリン酸収支はプラス、稲 WCS ではマイナスになる。カリ収支も同様に、主食用米と飼料用米はプラス、稲 WCS ではマイナスになる。しかし、多収を目指す飼料用米では主食用米に比べて、窒素、リン酸、カリの各収支はプラスに維持されるものの、土壌残存量は減少しやすい傾向にある。一方、ケイ酸はいずれの栽培でも収支はマイナスになり、特に、稲 WCS では大幅なマイナスになる。

(2) 土壌の可給態ケイ酸の変化とその要因

水田における収支がマイナスとなるケイ酸は、水稲の健全性を維持するために必要な養分であり、土壌の可給態ケイ酸含量は地力評価の指標として重要である。1979年から1998年まで農林水産省の事業として全国の公立農業試験場が田畑約20,000地点を対象に5年毎に実施した土壌環境基礎調査と1999年から2003年に約6000地点を調査した土壌機能モニタリング調査の結果がまとめられている（農林水産省，2008）。各都道府県別水田土壌の可給態ケイ酸の分布について1994年～1998年（調査地点数9691）と1999年～2003年（調査地点数2864）を比較した。可給態ケイ酸の測定法は、1994年～1998年は酢酸緩衝液法、1999年～2003年は湛水静置保温法により行われている。それぞれの基準値は 150 mg kg^{-1} （JA全農，2014）、 160 mg kg^{-1} （北海道，2015）と異なるが、1999年～2003年は1994年～1998年に比べて平均値が 200 mg kg^{-1} 以上の県が減少し、基準値を下回る県が増加している。また、多くの県から近年可給態ケイ酸が減少していることが報告されている。その要因としては、ケイ酸質肥料の施用量が減少したことを指摘している事例が多い。農業用水については、山形県内においてケイ酸濃度を調査した結果、1996年におけるケイ酸の県平均値は1956年を100とすると35～52%の値であり、水田に供給されるケイ酸量は減少していることが明らかにされている（熊谷ら，1998）。

(3) 多収栽培における有機物管理

飼料用米などの多収栽培では、主食用米に比べて収穫後の稲わら量が増加する。多量の稲わらがすき込まれた水田は、微生物の分解で土中が酸欠状態になりやすく、還元障害が発生しやすい。これまで、排水性が低い灰色低地土およびグライ土水田を中心に、多量の稲わらすき込みは水稻の生育に悪影響を及ぼすことが知られている。そのため、収穫後の田面排水を徹底するとともに、圃場表面の稲わらを均一に散布し窒素施用により分解を促進させることが必要となる。これまで、稲わらの分解に対して、石灰窒素の秋施用効果が認められており、秋散布でも秋すき込みに比べて効果は低いものの、稲わらの分解は促進される(千葉ら, 1980)。高階ら(未発表)により、重窒素を含む肥料により、稲わらの分解促進のために前年の秋に施用した肥料由来窒素の分配率が検討されている。その結果、石灰窒素は、硫安に比べて翌年の水稻吸収率が高く、土壌残存割合も高いことから稲わらの分解促進と地力維持効果が高いことが明らかになった。

4. 大型機械化や多様な水稻栽培における根圏環境改善とケイ酸の効果

地球温暖化が進む中、我が国では1990年代以降、高温となる年が頻出しており、今後も気温の上昇が予測されている(農林水産省, 2007)。これまで、登熟の初中期が高温になると、乳白粒、背白粒などの白未熟粒の発生率が高まりコメの品質低下をもたらすことが知られている(長戸・江幡, 1965)。大型機械作業による根圏環境悪化や多収栽培による土壌の可給態ケイ酸の減少は、変動する気象条件下でのコメの外観品質低下を助長する。そのため、水稻栽培では高温気象下における品質低下防止技術が求められている。ここでは、高温気象下における外観品質に対する根圏環境とケイ酸の役割を述べる。

(1) 根圏環境の改善による高温気象下の品質向上

乾田タイプの水田では15 cm程度耕起することにより作土深10 cm以下に分布する根量が増え、収量が増加するとともに背白・基白粒などの発生軽減による玄米品質向上が報告されている(山口, 2006)。このように乾田タイプでは、比較的酸素が供給されやすいことから根域確保を優先する必要がある。作土深15 cmを目標とした耕起が必要になる。一方、粘土が多い水田は透水性が低く、酸素の供給が少ないことから、過剰な代かきによる土壌還元の進行を避けることが重要である。例えば、粘土が多い土壌において、作土(15 cm)を水田プラウで反転し、作土の上層(5 cm)のみを碎土した後に代かきをせずに移植した無代かき水田と慣行の耕起、代かきを行った代かき水田で高温区を設け水稻の生育を比較した(金田ら, 2012)。無代かき水田は作土下部に大きな土塊が存在し、深さ5 cm程度の上部だけが細かく碎土されている。一方、代かき水田は代かきにより作土全体が泥状である。無代かき水田の作土は代かき水田に比べて酸化的に推

移していた。無代かき水田の水稲根は、代かき水田に比べて下層まで多く分布し根活性も高かった。

また、代かき水田の高温区における気孔コンダクタンスは、最も低かったのに対して無代かき水田の高温区は代かき水田の高温区より明らかに高くなり両水田の常温区と有意な違いは認められなかった。さらに、代かき水田高温区の穂温は他区に比べて最も高かったのに対して無代かき水田の高温区では低く、両水田の常温区と有意な違いは認められなかった。登熟期の高温条件下における品質を調査すると、乳白粒の発生率は無代かき水田が代かき水田に比べて低かった。このことは、根活性が高く維持されている水田では、高温下でも品質低下が軽減されることを示している。

以上のように、土壌タイプに対応しながら根圏環境を改善することによって高温条件下における品質向上が可能になる。そのため、それぞれの土壌の実態を十分に把握しながら耕起方法の改善や排水対策を検討する必要がある。

(2) 品質向上に及ぼすケイ酸の効果

これまで、水稲のケイ酸吸収量は水温が低すぎたり高すぎたりした場合、リン酸やカリ以上に低下することが知られている（高橋，2007）。そのため、高温気象条件は水稲のケイ酸吸収に影響を及ぼすと考えられる。筆者らは、出穂期から成熟期にかけて人工的に高温条件を設定した条件においてポット試験を行い、ケイ酸施用とケイ酸吸収量の関係を検討した（金田ら，2010）。高温条件（8:00～18:00：32℃，18:00～8:00：24℃）のケイ酸無施用区では常温条件（8:00～18:00：28℃，18:00～8:00：20℃）に比べてケイ酸吸収量が減少する。一方、ケイ酸施用区では高温条件でもケイ酸吸収量は増加した。高温条件における葉温の推移を比較すると、ケイ酸施用区では無施用区に比べて低く推移した。また、ケイ酸施用区では高温条件でも水稲根の活性が高く維持された。さらに、高温条件におけるケイ酸施用区の気孔コンダクタンスは無施用区に比べて高く推移した。このように、ケイ酸施用によって高温条件下でも水稲のケイ酸吸収量が増加するとともに、気孔コンダクタンスが増加し葉温を低下させる効果が期待できる。外観品質への影響についてみると乳白米の発生率は、常温に比べて高温条件で増加するものの、ケイ酸施用区では無施用区に比べると有意に低下した。これまで、ケイ酸施用によって稲体中のケイ酸含有率を高めると光合成能力が向上することが報告されている（藤井ら，2008）。以上のことから、高温条件のケイ酸施用区において外観品質の低下が抑制された理由として、水稲根の活性が高く維持され水分吸収が旺盛となり、葉温の上昇も少なく葉身の光合成能が高く維持されたことが推察された。

5. まとめ

図1に、高温気象下での良食味・高品質米生産に関係する土壌の要因を

示した。適正な可給態ケイ酸と可給態窒素は、ケイ酸吸収量の増加や葉身窒素濃度の維持により光合成能力を持続するために重要である。特に、茎葉のケイ酸濃度が増加すると病害・風害に対する抵抗性が向上する。また、透水性が良好で異常還元がない根圏環境により、根量が増加し根活性が向上する。そのため、初期生育が良好となり適正な粒数を確保しやすくなる。さらに、登熟期においても水分吸収が持続し穂温の上昇が抑制されることにより、粒への転流が促進されるとともに粒のデンプン合成能力が高まる。このように、ケイ酸や窒素などの養分保持と良好な透水性および異常還元がない根圏環境の両方が良好に維持された場合に、高温気象下での良食味・高品質米の持続的生産が実現する。

我が国の水田農業において、大型機械化や多様な水稻栽培が展開される中、これまで以上に土づくりが重要となる。土づくりは、単に土壤改良資材や土づくり肥料の施用に限定されたものではなく、根圏環境改善を目的とした機械作業も含む総合管理である。今後は、経営的評価を踏まえながら、作物の安定生産を支える基本技術として土づくりの全国的な展開を期待したい。

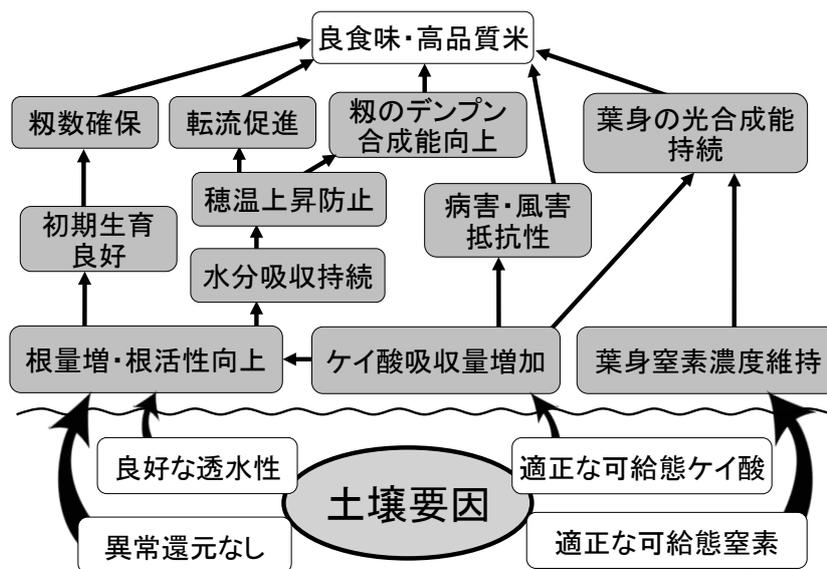


図1 高温気象下における良食味・高品質米生産を可能にする土壤要因

引用文献

- 安西徹郎・篠田正彦・八槨 敦・戸辺 学・在原克之・渡辺春朗 1998. 千葉県における主要農耕地土壌の実態と変化. 千葉農試研報, 39, 71-86.
- 千葉満男・島津了司・武藤和夫・内藤修吉 1980. 水田における稲わら施用と稲作の安定化. 岩手農試研報, 22, 81-117.
- 藤井弘志・森 静香・安藤 豊 2008. 水稻に対する日照不足条件下におけるケイ酸の効果. 土肥誌, 79, 471-477.
- 藤原辰史 2017. トラクターの世界史. 中央公論新社, 東京. 173-182.
- 北海道農政部食の安全推進局食品政策課 2015. 北海道施肥ガイド, 15-18.

www.pref.hokkaido.lg.jp/ns/shs/clean/sehiguide2015.htm

- JA 全農肥料農薬部 2014. 土と肥料のハンドブック. 農文協, 東京. 5-6.
- 金田吉弘・高橋大悟・坂口春菜・金 和裕・高階史章・佐藤 孝 2010. ケイ酸質肥料が登熟期の高温処理水稻の葉温・気孔コンダクタンスおよびケイ酸吸収に及ぼす影響. 土肥誌, 81, 504-507.
- 金田吉弘・小野寺拓也・坂下 将・高階史章・佐藤 孝・伊藤慶輝・保田謙太郎 2012. 重粘土水田における無代かき栽培が高温条件下における水稻根活性, 穂温および乳白米発生に及ぼす影響. 土肥誌, 83, 681-686.
- 熊谷勝巳・今野陽一・黒田 潤・上野正夫 1998. 山形県における農業用水のケイ酸濃度. 土肥誌, 69, 636-637.
- 長戸一雄・江幡守衛 1965. 登熟期の高温が穎果の発育ならびに米質に及ぼす影響. 日作紀, 34, 59-66.
- 農林水産省農林水産技術会議編, 農林水産研究開発レポート 2007. 地球温暖化が農林水産業に与える影響と対策, 1-2.
- 農林水産省生産局 2008. 土壌保全調査事業成績書, 19-485.
- 農林水産省面積調査 2017.
- <http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotu/menseki/>
- 関矢信一郎 1996. 新たな時代の食料生産システム. 農林統計協会, 東京. 36-52.
- 高橋英一 2007. 作物にとってケイ酸とは何か. 農文協, 東京. 34-102.
- 山口泰弘 2006. 根域拡大とゼオライト施用が収量品質におよぼす影響, 日作紀(別1), 75, 232-233.