J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 141 p.41 ～ 48 (2019)

近年における水田土壌の変化と持続的水稲生産に向けた対応

金田吉弘 [1]

Recent changes in paddy soils and strategy for sustainable rice production

Yoshihiro KANETA[1]

Abstract: Recently, large scale farmland consolidation and upsizing of farming machinery have been progressing in the rice cultivation. In addition to the rice for staple food, various rice cultivations such as forage rice using a high-yield variety are conducted. On the other hand, the air temperature in summer has been increasing and it has great influence on the quality of rice. In this paper, the improvement of plowing practice and introduction of the underground irrigation system (FOEAS) mitigated the decline in quality of rice under high air temperature condition by maintaining the favorable rhizosphere environment. Moreover, the nutrient balance of the soil was clarified. The silicic acid balance was negative in all cultivation. Silicic acid was effective for improvement of rice quality under high air temperature. Besides, this paper showed the measures to promote the aerobic decomposition of rice straw derived from cultivation of high-yield rice varieties. Finally, this paper proposed that the way of "soil-making" is not limited to the application of soil amendments and soil-making fertilizers, but also comprehensive management including the machine work for the purpose of improving the rhizosphere environment.

Key Words : plowing, rhizosphere environment, nutrient balance, high air temperature, high quality rice

1. はじめに

我が国の水稲栽培においては，担い手への農地集積や作業の効率化，低コスト化を目指し，大区画水田の整備が進められている．2016 年における 30 a 以上の区画に整備済みの圃場は 157 万 ha と全体の 64.7 % を，50 a 以上の大区画に整備済みの圃場は 24 万 ha と全体の 9.9 % を占めている（農林水産省, 2018）．また，トラクターなどの作業機械の大型化も進み，作業能率は飛躍的に向上した．栽培面では，主食用米の消費量が減少する中，米を家畜の飼料とする多収の飼料用米や米の他，葉や茎も密封して発酵させ，粗飼料として利用する稲 WCS（ホールクロップサイレージ）など多様な水稲栽培が各地において展開されている．

[1]Faculty of Bioresource Science, Akita Prefectural University, 241-438 Aza Kaidobata-Nishi, Shimoshinjo-Nakano, Akita 010-0195, Japan. Corresponding author:金田吉弘，秋田県立大学生物資源科学部.
2018 年 12 月 26 日受稿　2019 年 2 月 17 日受理

一方，水稲栽培に大きく影響する気象についてみると，我が国では夏期の気温が上昇傾向にあり，1994 年以降，１等米比率は低下傾向にあることが認められている（河津ら, 2007）．登熟期の高温による品質低下の要因には，乳白粒，背白粒などの白未熟粒があげられる（長戸・江幡, 1965）．また，これまで登熟後期における玄米の吸水や乾燥により生じるとされてきた胴割れ粒についても，出穂後 10 日間の最高気温が高いほど発生が多くなることが報告されている（長田ら, 2004）．ここでは，機械の大型化や多様な栽培方式が展開する生産現場において，変動気象条件の下でも水稲の持続的な安定生産を可能にする土壌の役割と今後の対応について述べる．

2. 近年の大型機械化農業における根圏環境と今後の対応

2.1 機械作業の違いが作土の土壌物理性に及ぼす影響

1951 年にわずか 70 台であった我が国のトラクターは，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）．トラクターの利用により，かつて家畜を利用していた耕起作業の能率は飛躍的に向上した．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）．しかし，この大型機械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．Fig. 1 に示すように，反転と砕土の 2 行程の耕起作業後の作土は，表層土のみが細かくなり下層には大土塊が存在する．一方，現在では，耕起，砕土ともトラクター駆動のロータリにより行うのが一般的である．しかし，過度なロータリ作業は，作土を細粒化し田面水の縦浸透を低下させやすい．また，トラクターの走行によって踏圧が繰り返されると作土直下の耕盤層が硬くなり，透水性を低下させる場合も多い．さらに，耕起深についても，佐賀県における調査の結果から土壌タイプによって収量への影響が異なることが報告されている．すなわち，600 g m^{-2} 以上の収量を確保した水田の耕起深は粘土質で 10 ～ 14 cm，壌土質で 14 ～ 16 cm，砂質では 16 cm 以上と粗粒タイプの土壌ほど深い耕起深での事例が多かった（吉野, 1986）．この結果は，根圏環境を良好に維持するため

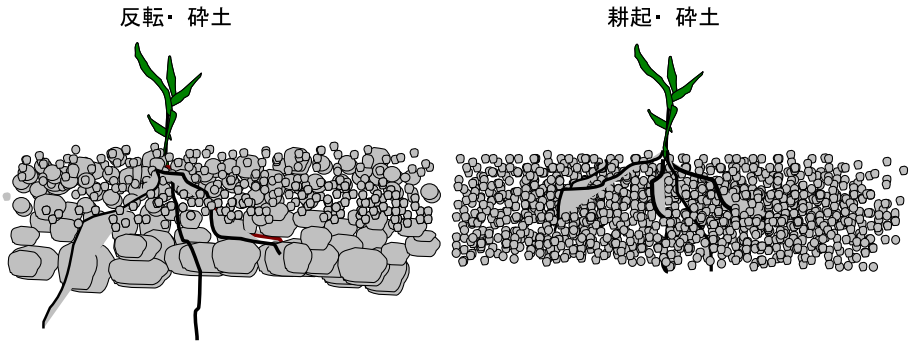


Fig. 1 反転・砕土と耕起・砕土後の土壌イメージ.
Schematic image of soil after upside down plowing and harrowing or plowing and harrowing.

には，土壌タイプに応じた適正な耕起深を確保する必要があることを示している．

次に，代かき作業は，土壌を泥状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す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，ロータリ耕により腐熟が進まない稲わらを作土にすき込む栽培では土壌還元の進行は早い．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，水稲にとっては悪影響を及ぼすことになる．そのため，粘土の多少など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．

我が国では，1949 年から 1968 年までの 20 年間，米作日本一表彰事業が実施され，延べ約 40 万戸の農家が参加し多収穫を競った記録が残されている（朝日新聞社農業賞事務局, 1971）．例えば，1959 年に 959 g m^{-2} で日本一を受賞した秋田県の加藤金吉氏は，代かきは上層を泥状に下層は粒状になるように意識して作業したことが記載されている．また，多収穫土壌を調査した結果，多収穫土壌は低湿地ではなく，むしろ畑土に近く肥沃でありながら酸化的であることが明らかにされている（本谷, 1989）．これらの記録からは，かつての多収穫農家は，作土を土層と見なし，作土の表層と次層を意識しながら作業を行っていることがわかる．現代の大型機械作業においても，作業の効率性とともにかつてのように根圏環境を重視した作業が求められる．

2.2 耕起方法の改善による品質向上

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の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り，作土深 15 cm を目標とした耕起が必要になる．

一方，土性が CL，LiC，HC 等の細粒質の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．筆者らは，2010 年に強粘質細粒強グライ土水田の作土（15 cm）を水田プラウで反転し，作土の上層（5 cm）を砕土した後に移植した無代かき水田において登熟期の高温が外観品質に及ぼす影響を検討した（金田ら, 2012）．対照は，代かきを行った慣行水田である．高温区には，出穂期から成熟期までビニールハウスを設置した．出穂期から成熟期の日平均気温は，常温区 23.3 °C，高温区 25.2 °C であった．

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に砕土されていた．一方，代かき水田は代かきにより作土全体が泥状であった（Fig. 2）．また，無代かき水田は代かき水田に比べて，土壌は酸化的に推移していた．Fig. 3 のように，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く，下葉の枯れ上がりも少なかった．

登熟期における代かき水田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．また，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，代かき水田の常温区と有意な違いは認められなかった．無代かき水田の高温区における乳白粒の発生率は 1.2 % であり，代かき水田の 5.4 % に比べて有意に低下した．このことは，土壌が酸化的で酸素が多く含まれ，根活性が高く維持されている根圏環境を有する水田では，高温下でも品質低下が軽減されることを示している．以上は無代かき栽培での事例であるが，慣行栽培においても耕起深や代かき程度などを考慮することで同様な効果が期待できる．

2.3 品質向上に及ぼす地下灌漑システム（FOEAS）の効果

近年開発された地下水位制御システム「Farm Oriented Enhancing Aquatic System」（以下，FOEAS）は，暗渠排水による地下排水機能と地下灌漑の両方の機能を備えており，短時間の水位上昇と排水が可能になることが特長である（藤森, 2007）．ここでは，登熟期にビニールハウスにより高温条件を設定した FOEAS 導入水田における水稲の外観品質（金田ら, 2018）について紹介する．土壌は，田川統に属する粘土含量が 50 % 程度の強粘質細粒強グライ土である．登熟期間全体における高温区の平均気温は，2015 年，2016 年それぞれ 24.9 ～ 25.2 °C，26.2 ～ 26.5 °C の範囲にあり，常温区に比べて 3.4 ～ 3.5 °C，3.1 ～ 3.5 °C 上昇した．登熟期における作土と下層土に



Fig. 2　移植時の代かき水田と無代かき水田.
Surface of paddy fields with puddling or non-puddling at the transplantation.

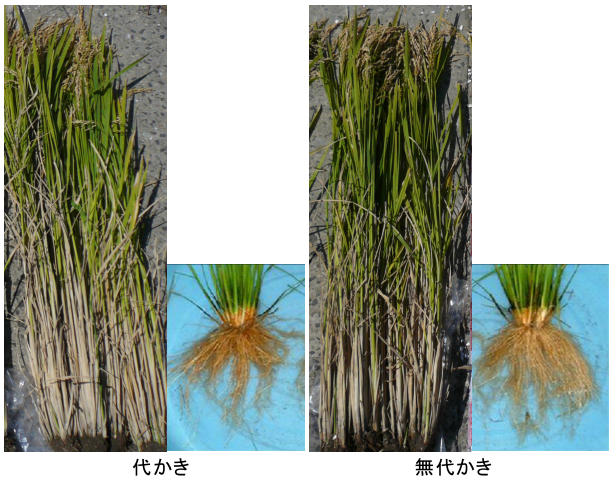


Fig. 3　成熟期における代かきと無代かき水稲.
Rice plants of puddling and non-puddling paddy fields at the maturing stage.

伸張した水稲根による出液速度についてみると，FOEAS 水田における作土由来の出液速度は慣行水田とほぼ同等であった．また，FOEAS 水田における深さ 12 cm 以下の下層土に伸張した水稲根による出液速度は，慣行水田に比べて有意に増加した．その結果，FOEAS 水田の全出液速度は慣行水田に比べて有意に増加した．また，高温区の穂温は，両水田とも常温区に比べて上昇したが，FOEAS 水田高温区における穂温は，両年とも慣行水田高温区に比べて有意に低下した．FOEAS 水田において穂温が低下した理由としては，慣行水田に比べて下層土の土壌水分が維持されたことから，出液速度が上昇し穂の蒸散量が増加したことが推察された．FOEAS 水田高温区における胴割れ粒，乳白粒，基白粒の発生率は，それぞれ 2.1 %，3.7 %，1.3 % であり，慣行水田高温区の 7.0 %，5.5 %，2.3 % に比べて有意に減少した．また，常温区においても FOEAS 水田では胴割れ粒，乳白粒の発生率は，それぞれ 0.1 %，0.4 % であり，慣行水田の 0.8 %，0.5 % に比べて低かった．さらに，FOEAS 水田の登熟歩合，千粒重は慣行水田に比べて高まり増収した．FOEAS 水田の品質や収量が優った要因としては，慣行水田に比べて登熟期の水分吸収量が優ったことにより，高温下でも葉身の光合成能や糖の転流機能が高く維持されていたことが考えられた．

重粘土大区画水田の生産現場では，大型機械による収穫作業が優先される場合が多く，適切な水管理を実施できない事例が多く見られるが，FOEAS 水田では登熟期に地下灌漑を行っても田面の貫入抵抗値はコンバイン走行が可能とされる値を確保した．このことは，湛水により表層が軟弱になりやすい重粘土水田においても，地下灌漑により根圏の土壌水分環境が改善されることにより，高温気象下における安定生産が可能になることを示唆している．

3. 多様な水稲栽培での養分収支と今後の対応

3.1 多様な水稲栽培での養分収支

多収を目指す飼料用米と稲 WCS では，それぞれ多量の稲わらをすき込むことや稲わらの全量を持ち出すことが特徴である．生産現場では，①多収栽培や稲わらの全量持ち出しによる地力の低下，②多量の稲わらをすき込んだ水田での翌年の水稲への影響が課題となる．そのため，主食用米や飼料用米，稲 WCS の栽培に伴う養分収支や土壌管理が重要となる．

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）や筆者のデータをもとに主食用米と飼料用米，稲 WCS を想定した水稲栽培での養分収支を Table 1 に示した．主食用米の収量を 550 g m^{-2} とすると，窒素は 17.02 g m^{-2} の供給に対して支出は 15.75 g m^{-2} となり，収支は 1.27 g m^{-2} のプラスとなる．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収支は 0.34 g m^{-2} のプラスになる．一方，稲わらの全量を持ち出す稲 WCS の窒素収支は 5.21 g m^{-2} のマイナスになる．同様に，主食用米のリン酸収支は 1.09 g m^{-2}，飼料用米は 0.24 g m^{-2} のプラス，稲 WCS では 1.71 g m^{-2} のマイナスとなる．カリ収支は，主食用米 1.91 g m^{-2}，飼料米 1.36 g m^{-2} のプラス，稲 WCS では 12.71 g m^{-2} のマイナスとなる．ケイ酸においては，いずれの栽培でも収支はマイナスとなり，特に，稲 WCS では 109.5 g m^{-2} と大幅なマイナスとなる．このように，多収を目指す飼料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．また，稲 WCS では，圃場に稲わらの還元がなく，土壌中の窒素，リン酸，カリが不足し，長期の継続は地力低下をもたらすことが懸念される．したがって，飼料用米や稲 WCS では，耕畜連携などによる有機物施用が必要となる．さらに，ケイ酸は，いずれの栽培でも収支はマイナスになることから，土壌の可給態ケイ酸量の変化に注目する必要がある．

3.2 土壌の可給態ケイ酸の変化とその要因

我が国では，水稲に対するケイ酸の効果に関する多くの知見がある．例えば，耐倒伏性の向上，水稲葉身の光合成促進（間藤ら, 1991），食味に大きな影響を及ぼす米粒中タンパク含有量の改善（宮森, 1996; 藤井, 2002）の他，苗いもち病の発病抑制効果（早坂ら, 2000; 前川ら,

2002; Hayasaka et al., 2005)，本田での葉いもち病や穂いもち病などの耐病性強化（竹内, 1997）やカメムシによる斑点米被害の軽減（安田 · 永田, 2005）などが報告されている．また，気象変動に対するケイ酸の効果については，日照不足条件における収量向上に対する効果（藤井ら, 2008)，冷温による不稔発生軽減効果（後藤ら, 2005; 後藤, 2007)，台風による潮風害軽減効果（金田ら, 2006; 森ら, 2009a; 森ら, 2009b)，登熟期の高温条件における増収効果や品質低下の抑制効果（森 · 藤井, 2013）などが明らかにされている．水稲が吸収するケイ酸は窒素の約 10 倍と多く，約 70 % は土壌からの吸収であり，農業用水からの供給量も多い．そのため，土壌の可給態ケイ酸および農業用水からのケイ酸供給は水稲の収量や品質向上にとって大きな役割を果たす．

これまで，各地において土壌の可給態ケイ酸の変化が解析され，北海道（後藤ら, 2003)，岩手県（高橋ら, 2003)，山形県（長沢ら, 2006)，宮城県（若嶋ら, 2010)，福井県（伊森ら, 2002)，兵庫県（青山 · 津高, 2003)，広島県（谷本 · 上原, 2003)，長崎県（井上ら, 1999）などでは，近年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，農業用水中の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）．その要因として，酸性河川の改良とダムやコンクリート水路の増加，貯水池の減少などに伴い農業用水の pH が高まったことなどが推定されている．さらに，近年の農業機械の大型化による圧密化は日減水深を 10 mm 以下まで下げ，灌漑水量そのものが減少していることが指摘されている（三枝, 2013）．松森 · 郡司掛（2013）は，水稲のケイ酸吸収に対しては土壌の可給態ケイ酸が大きく寄与すること，可給態ケイ酸の少ない土壌では灌漑水由来のケイ酸の利用率が高まることを報告している．以上のことから，近年における水稲栽培では，土壌や農業用水からのケイ酸供給量は減少傾向にあり，水稲のケイ酸吸収量への影響が懸念される．

3.3 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．すなわち，水温が 29 ～ 32 °C の適温区に対して，24 ～ 25 °C の低温区，37 ～ 39 °C の高温区のケイ酸吸収量はそれぞれ 40 %，30 % 程度減少することが示されている（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．ここでは，屋外型人工気象室において穂揃期から成熟期まで高温条件（気温 8:00 ～ 18:00 : 32 °C，18:00 ～ 8:00 : 24 °C）と常温条件（気温 8:00 ～ 18:00 : 28 °C，18:00 ～ 8:00 : 20 °C）を設定してポット試験を行った結果から，高温条件下におけるケイ酸施用の効果を述べる（金田ら, 2010）．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．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．

これまで，軽微な水分ストレスでも登熟を一時的に停滞させ，玄米の肥大に影響を及ぼすことが述べられている（井上 · 山口, 2007）．それに関連して，稲体からの蒸散に関しては，以下のような知見がある．平沢ら（1987）は，水稲は吸水が蒸散に追いつかず葉身の水ポテンシャルが低下すると，気孔を閉じて蒸散を抑制することを報

Table 1 各栽培における養分収支.
Nutrient balances in various cultivation. （関矢：1996 年を基に作成）

	N (g m^{-2})			P_2O_5 (g m^{-2})			K_2O (g m^{-2})			SiO_2 (g m^{-2})		
	主食用米 550 (g m^{-2})	飼料用米 700 (g m^{-2})	稲 WCS 700 (g m^{-2})	主食用米 550 (g m^{-2})	飼料用米 700 (g m^{-2})	稲 WCS 700 (g m^{-2})	主食用米 550 (g m^{-2})	飼料用米 700 (g m^{-2})	稲 WCS 700 (g m^{-2})	主食用米 550 (g m^{-2})	飼料用米 700 (g m^{-2})	稲 WCS 700 (g m^{-2})
インプット												
灌漑水	0.48	0.48	0.48	0.03	0.03	0.03	2.79	2.79	2.79	30.5	30.5	30.5
肥料	9.00	11.00	11.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	–	–	–
稲わら	4.20	5.55	×	1.22	1.95	×	11.71	14.07	×	70	77	×
雨水	1.34	1.34	1.34	0.27	0.27	0.27	0.34	0.34	0.34	–	–	–
窒素固定	2.00	2.00	2.00	–	–	–	–	–	–	–	–	–
計	17.02	20.37	14.82	6.52	7.25	5.30	19.84	22.20	8.13	100.5	107.5	30.5
アウトプット												
田面水	0.53	0.53	0.53	0.06	0.06	0.06	0.44	0.44	0.44	–	–	–
浸透水	1.50	1.50	1.50	0.15	0.15	0.15	3.75	3.75	3.75	30	30	30
稲体（籾 + わら）	11.02	14.70	14.70	5.22	6.80	6.80	13.74	16.65	16.65	100	110	110
脱窒	2.70	3.30	3.30	–	–	–	–	–	–	–	–	–
計	15.75	20.03	20.03	5.43	7.01	7.01	17.93	20.84	20.84	130	140	140
収支（in–out）	+1.27	+0.34	−5.21	+1.09	+0.24	−1.71	+1.91	+1.36	−12.71	−29.5	−32.5	−109.5

告している．間藤ら（1991）は，ケイ酸を多く含む葉身では，気孔以外からの蒸散が少ないため，葉身の水ポテンシャルを維持することで気孔開度を高く保つことが可能であることを明らかにしている．藤井（2002）は，ケイ酸含有率の高い水稲では葉身中の水分量が多く保持され，気孔の開放程度が大きく，二酸化炭素の取込みが抑制されないことにより，止葉のみかけの光合成速度は日中高く維持されることを報告している．このことは，ケイ酸施用による稲体ケイ酸濃度の増加は，葉身の水分を維持することに有効であり気孔コンダクタンスの上昇に効果を及ぼしたことを示唆している．

次に，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 4.9 % と無施用区の 7.7 % に比べると有意に低下した．森 · 藤井（2013）は，出穂 1 ～ 6 日に高温条件を設定したポット試験により，高温条件では常温条件に比べて品質（整粒歩合）は低下したが，ケイ酸施用により低下程度は軽減されたことを報告している．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力が高く維持されたことが推察された．一方，生産現場において重要なことは，ケイ酸資材 · 肥料を施用しても圃場管理が不適切だとケイ酸吸収が抑制されやすいことである．そのため，以下のような管理が求められる．①前年収穫後，浅い明渠により田面停滞水を排除し，土壌の乾燥を進める，②稲わらが多量に分布している地点では，異常還元による根腐れが発生しやすくなることから，田面の稲わらは秋の降雪前に均一にする，③土壌の異常還元を進行させないために，適期に中干しを実施する，④ケイ酸吸収が始まる幼穂形成期以降の土壌の過乾燥はケイ酸吸収を抑制するので間断灌漑などを実施する，⑤間断灌漑は，登熟期（出穂 35 日後）まで継続する．

将来的に，地球規模で大気中の CO_2 濃度が上昇することが想定される．東北農業研究センターの開放系大気 CO_2 増加（FACE）実験の結果，大気中の CO_2 濃度が上昇すると水稲では気孔閉鎖が起こり，蒸散が減少することにより稲体のケイ酸含量が低下し，葉いもちに罹病しやすくなったことが報告されている（Kobayashi et al., 2006）．このことから，温暖化の進行により，これまで以上に水稲におけるケイ酸の重要性が増すことが予測される．

3.4 多収栽培における有機物管理

飼料用米の多収栽培では，主食用米の栽培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．特に，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稲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，翌年の移植時までに稲わらの分解を進めることが重要になる．これまで，収穫後の稲わらを秋に耕起して土壌に混和すると地表面散布に比べて分解が進むことが報告されている（三浦, 2003; 後藤ら, 2004; 塩野ら, 2016）．また，積雪の多い寒冷地では秋浅耕（耕深 5 ～ 8cm）が秋通常耕（耕深 18 ～ 20cm）に比べて土壌水分が低く推移し翌年の水稲生育改善効果が高いことが示されている（塩野ら, 2016）．さらに，稲わらの秋散布時に窒素肥料を添加することで稲わらの分解が促進されることが明らかにされている（三浦, 2003; 後藤ら, 2004）．窒素肥料による稲わらの分解促進については，石灰窒素添加による秋混和が最も効果が高いが，秋に石灰窒素を土壌表面に散布するだけでも稲わらの分解が促進された（千葉ら, 1980）．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た．その結果，石灰窒素は硫安に比べて翌年の水稲吸収率が高く，土壌残存割合も多いことから稲わらの分解に伴う土壌微生物への窒素の取り込みが促進され地力維持効果が高いことが明らかになった（Takakai et al., 2018）さらに，稲わらの分解促進は，土壌ケイ酸の溶出を増加させることが報告されており（高橋, 2007），窒素のみならず水稲のケイ酸吸収を増加させる効果も期待できる．

4. 今後の土づくりに向けて

気象変動下において大型機械作業により良食味 · 高品質米の持続的生産を実現するための土壌要因を Fig. 4 に示した．稲体栄養を維持する養分の他，大型機械作業を支える適正な硬さや排水性を高める土壌構造，水稲根活性を持続させる酸素保持などが期待される土壌要因となる．それにより，ケイ酸吸収量が増加すると病害 · 風害 · 高温に対する抵抗性が向上する．適正な可給態ケイ酸とともに水稲の窒素吸収に有効な可給態窒素は，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．また，土壌構造が形成され適正な耕盤硬度を保つことが重要である．耕盤硬度としては，山中式硬度計値で 15 ～ 20 mm，貫入抵抗値で 0.5 ～ 1.5 MPa が望ましい．さらに，透水性が良好で異常還元がない根圏環境は，根量を増加させ根活性が向上する．そのため，初期生育が良好となり適正な籾数を確保しやすくなる．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，籾への転流が促進されるとともに籾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が適正に保持されていること，良好な透水性により異常還元の発生がみられない物理的要件の両方が維持された根圏環境を有する水田において，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．加えて，地下灌漑のような新たな水管理システムを導入することにより，地耐力を維持しながら生育後期までの水分供給が可能になり，品質が向上する．

土壌中のケイ酸や窒素さらにその吸収を支える根圏環境を良好にするには土づくりが欠かせない．土づくりは，単に土壌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，作物の持続的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．

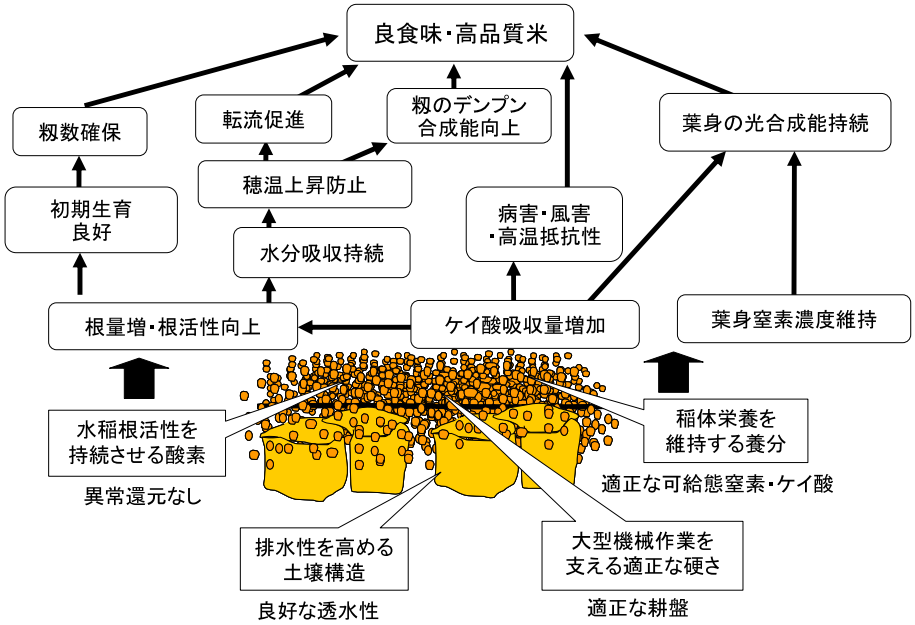


Fig. 4 良食味・高品質米の持続的生産を支える土壌要因.
Overview of soil factors supporting sustainable production of good taste and high quality rice.

引用文献

青山喜典, 津高寿和 (2003): 兵庫県下水田土壌の養分特性の経年変化と土壌改良対策. 兵庫農技総セ研報（農業）, 51: 13–18.

朝日新聞社農業賞事務局 (1971): 米作日本一 20 年史, pp. 78–83. 朝日新聞社, 東京.

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 (2002): 水稲の生育, 収量, 食味に及ぼすケイ酸の効果. 日本土壌肥料学会編 ケイ酸と作物生産, pp. 39–76. 博友社, 東京.

藤井弘志, 森 静香, 安藤 豊 (2008): 水稲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.

藤森新作 (2007): 転換作物の安定多収をめざす地下水位調節システム. 農業および園芸, 82: 570–576.

藤原辰史 (2017): トラクターの世界史, pp. 173–182. 中央公論新社, 東京.

後藤英次 (2007): 北海道における高品質米生産に関する土壌化学性と合理的施肥法の研究. 北海道立農試研報, 116: 1–88.

後藤英次, 五十嵐俊成, 稲津 脩 (2005): 稲体の窒素, ケイ酸栄養条件が不稔発生に及ぼす影響. 土肥誌, 76: 881–889.

後藤英次, 三浦 周, 野村美智子, 稲津 脩 (2003): 北海道の水田土壌における化学性の現状とその問題点. 土肥誌, 74: 475–483.

後藤英次, 宮森康雄, 長谷川 進, 稲津 脩 (2004): 寒地水田における稲わら分解促進と水管理によるメタン発生軽減効果. 土肥誌, 75: 191–201.

早坂 剛, 藤井弘志, 安藤 豊, 生井恒雄 (2000): イネ苗いもちのケイ酸資材シリカゲル育苗土混和による発病抑制. 日植病報, 66: 18–22.

Hayasaka, T., Fuji, H. and Namai, T. (2005): Silicon content in rice seedlings to protect rice blast fungus at the nursery stage. J. Gen. Plant Pathol., 7l: 169–173.

平沢 正, 荒木俊光, 石原 邦 (1987): 水稲の吸水速度と蒸散速度の相互の関係について, 日作紀, 56: 38–43.

本谷耕一 (1989): 多収穫稲作の解明, pp. 98–100. 博友社, 東京.

伊森博志, 牧田康宏, 西端善丸, 板東義仁, 栗波 哲, 森永 一, 長谷光展 (2002): 福井県の水田土壌の変化と土壌施肥管理の方向. 福井農試研報, 39: 17–28.

井上勝広, 永尾嘉孝, 難波信行, 神田茂生, 永田浩久 (1999): 長崎県における農耕地土壌の理化学性の実態と経年変化 (2). 長崎総農林試研報（農業部門）, 25: 69–80.

井上健一, 山口康弘 (2007): 日本作物学会北陸支部, 北陸育種談話会編, 高温障害に強いイネ, pp. 59–74. 養賢堂, 東京.

金田吉弘, 板垣千絵, 佐藤 孝, 田代 卓, 佐藤 敦 (2006): 2004 年台風 15 号による潮風害と水稲根活性との関係. 日作紀, 75: 204–209.

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稲根活性, 穂温および乳白米発生に及ぼす影響. 土肥誌, 83: 681–686.

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稲の葉温, 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, 谷野 弘和, 高階 史章, 佐藤 孝, 保田 謙太郎 (2018): 重粘土大区画水田における地下灌漑システム FOEAS が高温登熟条件下における水稲収量および外観品質に及ぼす影響. 土肥誌, 89: 197–203.

Kobayashi,T., lshiguro, K., Nakajima, T., Kim, H.Y., Okada, M. and Kobayashi, K. (2006): Effects of elevated atmospheric CO_2 concentration on the infection of rice blast and sheath blight. Phytopathology, 96: 425–431.

河津俊作, 本間香貴, 堀江 武, 白岩立彦 (2007): 近年の日本における稲作気象の変化とその水稲収量, 外観品質への影響. 日作紀, 76: 423–432.

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.

前川和正, 渡辺和彦, 神頭武嗣, 相野公孝, 岩本 豊 (2002): ケイ酸カリウム溶液の育苗培土灌注によるイネ苗いもちの発病抑制. 土肥誌, 73: 725–731.

間藤 徹, 村田伸治, 高橋英一 (1991): 水稲へのケイ酸施用が有用である理由. 土肥誌, 62: 248–251.

松森 信, 郡司掛則昭 (2013): 近年の農業へのケイ酸利用と研究, 5. 可給態ケイ酸評価法の開発と現場におけるケイ酸利用技術. 土肥誌, 84: 125–129.

宮森康雄 (1996): 低タンパク米生産におけるケイ酸の役割とその診断指標. 土肥誌, 67: 696–700.

三浦吉則 (2003): 水田からのメタン発生の実態と抑制のための稲わら管理に関する研究. 福島農試特研報, 7: 1–38.

森 静香, 藤井弘志 (2013): 近年の農業へのケイ酸利用と研究, 6. 水稲の気象災害に対するケイ酸の収量および玄米品質の低下軽減効果. 土肥誌, 84: 190–195.

森 静香, 柴田康志, 松田裕之, 藤井弘志 (2009a): 登熟期の水稲穂部への海水由来塩分付着害に対するケイ酸による減収の軽減効果. 土肥誌, 80: 347–354.

森 静香, 柴田康志, 松田裕之, 藤井弘志 (2009b): 2004 年台風 15 号の潮風害を受けた水稲と塩分を付着させた水稲との被害程度の比較. 日作紀, 78: 87–91.

長沢和弘, 熊谷勝巳, 中川文彦, 佐藤之信, 今野陽一, 森岡幹夫, 上野正夫, 山口金栄 (2006): 山形県における農耕地土壌の実態と変化. 山形農事研報, 38: 41–57.

長田健二, 滝田 正, 吉永悟志, 寺島一男, 福田あかり (2004): 登熟期初期の気温が米粒の胴割れ発生に及ぼす影響. 日作紀, 73: 336–342.

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 (2017): 農産物生産費統計 http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/noukei/seisanhi_nousan/index.html#l (2018 年 5 月閲覧)

農林水産省 (2018): 平成 29 年度食料, 農業, 農村白書, pp. 134. http://www.maff.go.jp/j/wpaper/w_maff/h29/zenbun.html (2018 年 10 月閲覧)

三枝正彦 (2013): 近年の農業へのケイ酸利用と研究, 7. これからのケイ酸研究への提言. 土肥誌, 84: 196–201.

関矢信一郎 (1996): 新たな時代の食料生産システム. pp. 36–52. 農林統計協会, 東京.

塩野宏之, 齋藤 寛, 今野陽一, 熊谷勝巳, 永田 修 (2016): 積雪寒冷地低地土稲わらすき込み水田における耕起法の違いが翌年のメタン, 一酸化二窒素発生量に及ぼす影響. 土肥誌, 87: 101–109.

Takakai, F., Hirano, S., Harakawa, Y., Hatakeyama, K., Yasuda, K., Sato, T., Kimura, K. and Kaneta, Y. (2018): Fate of fertilizer-derived N applied to enhance rice straw decomposition in a paddy field during the fallow season under cool temperature conditions. Agriculture, 8: 15.

高橋正樹, 小野剛志, 島 輝夫 (2003): 岩手県内水田土壌における 15 年間の有機物, 施肥管理と土壌化学性の変化. 岩手農研セ研報, 3: 57–73.

高橋英一 (2007): 作物にとってケイ酸とは何か, pp. 34–102. 農文協, 東京.

竹内 徹 (1997): イネの窒素およびケイ酸栄養といもち病抵抗力との関係. 北日本病虫研報, 48: 23–26.

谷本俊明, 上原由子 (2003): 広島県における土壌情報のデータベース化と水田土壌の地域的特徴. 広島農技セ研報, 75: 63–72.

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.

若嶋惇子, 瀧 典明, 高橋浩明, 熊谷千冬, 畑中 篤, 關口 道 (2010): 宮城県内水田土壌の変化と実態. 宮城古川農試報, 8: 15–22.

安田道夫, 永田 修 (2005): アカヒゲホソミドリカスミカメによる斑点米被害と水稲のケイ酸含量との関係. 土肥誌, 76: 201–203.

吉野 喬 (1986): 地力窒素と耕うん法 (水田). 農業技術大系土壌施肥編, 第 5 巻, pp. 41–44. 農文協, 東京.

要　　旨

近年，我が国の水稲栽培においては，大区画圃場整備や機械の大型化が進んでいる．また，主食用米の他，多収を目指す飼料用米など多様な水稲栽培が展開されている．一方，夏期の気温が上昇傾向にあり，品質への影響が大きい．本報告では，耕起方法の改善や地下灌漑システム（FOEAS）により，根圏環境が良好になるため，高温下において品質の低下が軽減されることを示した．また，土壌の養分収支を明らかにした．ケイ酸収支は，すべての栽培においてもマイナスであった．ケイ酸は高温下において品質向上に有効であった．次に，多収栽培における稲わらの腐熟促進方策を示した．最後に，土づくりは，単に土壌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ことを提案した．

キーワード：耕起，根圏環境，養分収支，高温，高品質