天候不順時における水稻の安定生産に資する Ca 施用効果

加 藤 拓

東京農業大学応用生物科学部農芸化学科

Ca Application Effect That Contributes to Stable Production of Paddy Rice in Unseasonable Weather

Taku Kato

Tokyo University of Agriculture, Faculty of Applied Bioscience, Department of Agricultural Chemistry,
Sakuragaoka 1-1-1, Setagaya, Tokyo 156-8502

The main component of eggshells is calcium carbonate, which has been used for Ca research in rice cultivation in Japan. The effectiveness of Ca ions on rice was discovered in the 1960s by means of hydroponics, but the effect of Ca application on soil-grown rice has not yet been studied. The high-temperature ripening disorder of paddy rice in Japan in recent years is a sterility phenomenon caused by the failure of assimilation products produced in the leaves to be transferred to the ears. Therefore, to maintain the translocation of assimilated products produced in rice leaves, supplying Ca continuously even in small amounts is more important than increasing the Ca concentration in the plant. If research can be conducted on not only calcium carbonate, the main component of eggshells, but also the translocation rate of assimilates in paddy rice, and if high-temperature ripening disorders caused by weather conditions can be avoided, eggshells can be used as an agricultural material that contributes to food security in Japan.

(Accepted Jun. 17, 2021)

Keywords : Eggshell, calcium, paddy rice, yield, high temperature ripening injury

キーワード : 卵殻, カルシウム, 水稻, 収量, 高温登熟障害

1. はじめに

卵殻の主成分は炭酸カルシウムであり、炭酸カルシウムは、農業において「石灰」という用語に言い換えられ、肥料ではなく、土壌改良剤として使われてきた。炭酸カルシウムという化合物が土壌 pH をあげる作用をもつためである。本研究会では、卵殻（炭酸カルシウムを主成分とした石灰質資材）を施用した2年間の水稲栽培の結果を講演させて頂いた。卵殻施用により、土壌中の交換性 Ca 量が増加し、天候不順時、とくに登熟期の日平均気温が 27℃ 以上となっても、玄米収量の減収は抑制された。卵殻の施用が高温登熟障害を回避する栽培技術のひとつになり得る可能性は十分高いと考えられるが、再現性確認も含めて卵殻の水稲栽培に対する影響に関しては、更に研究を進めていく必要がある。本解説では、我が国の水稲栽培におけるカルシウム (Ca) 研究と玄米収量に関わる主要な天候条件である高温登熟障害に関する研究事例をまとめることとする。

2. 水稲栽培への石灰施用効果

我が国の水稲栽培における Ca 研究は、ほぼ炭酸カルシウム（石灰）をもちいたものである。作物の生産性に対する石灰の寄与は古来より経験的に知られていたが、我が国では水稲栽培における石灰施用は、一部の地方の水田でのみで習慣があっただけで、一般的には行われていなかった¹⁾。しかしながら、1904 年～1927 年にかけて石灰の連年施用を水稲栽培に対して行ったところ、玄米収量および稲わら重の増加が認められ、Ca を N・P・K に次ぐ、第4の肥料成分として着目すべきとの提言がなされた¹⁾²⁾。一方で、水稲は弱酸性の土壌で最も生育が良く、炭酸カルシウムの多量施用は玄米収量を低減させるとの報告もあり、水稲栽培における石灰施用効果は判然としなかった³⁾。

3. 養液栽培による水稲への Ca 施用効果

その後 20 年近く経ち、水稲に対する Ca 施用の効果が再検討された。前述の通り、炭酸カルシウム（石灰）は土壌

pHを変化させてしまうため、主に栽培溶液中のCa濃度を变化させて、出口と太田(1957)は水稻へのCa施用効果を検討した。その結果、Ca濃度が高いと無効分蘗数が少なく(穂がでる茎数が多く)なり、玄米収量が増加することが示された⁴⁾。また、溶液中のCaには最適濃度があることが示され、且つ、他の多量必須元素(N・P・K・Mg・S)に比べて、穂のCa濃度が著しく低いことが示された⁵⁾。穂のCa濃度が低いのは、Caは葉の伸長に伴って集積の一途をたどり、葉の先端が枯死しはじめても増加し続け、完全に枯死する時に最大濃度になる、すなわち、Caは葉の生活機能とは無関係に蒸散流によって葉に蓄積し、1度蓄積すると全く再移動しないためである⁶⁾。Caが葉に最も多く蓄積することから、葉の細胞壁形成に重要な生理作用をもつことが推測され、Caが水稻の健全な生育に非常に重要な元素であることが示された⁷⁾。とくに、出穂前に水稻の葉や稈に貯蔵された同化産物が登熟期に穂へ再転流する速度が、出穂後のCa供給量に依存することが示され、穂のデンプン含有率の増加に対する土壤溶液中のCa濃度の重要性が示唆された⁸⁾。しかしながら、水稻に対するCa効果は示されたが、実際に水稻栽培においてCa施用は積極的には行われなかった。その理由は、水稻のCa要求量が他の作物と比較して低く、Caはリン酸など他の肥料に化合物としての対イオンとして含まれているためである⁵⁾。

4. 水稻の高温登熟障害とCaの関係

近年の水稻栽培においては、未熟粒率が増加するなど高温登熟障害が多発するようになり、大きな問題となっている⁹⁾¹⁰⁾。高温登熟障害抑制対策は、深水管理により籾数を制限する方法など、各都道府県での独自対策が主である¹¹⁾。高温登熟障害(検査等級を下げるほど白未熟粒)が発生する気象条件として、出穂後20日間の日平均気温の閾値が26~27℃程度と考えられるが、この閾値は環境条件や品種および肥培管理の違いによって異なる¹²⁾¹³⁾。すなわち、高温登熟障害が温暖化傾向に起因することに疑いの余地はないが、栽培環境の変化、とりわけ土壤環境の変化がこの問題を助長している可能性が考えられている¹³⁾。小葉田ら(2004)は穂揃い期に間引き処理を行って同化能力を高めると、高温条件下でも未熟粒の発生率が低下したことから、高温で高まった子実乾物増加速度に対して同化産物供給が不足することで未熟粒が発生することを報告している。主要品種であるコシヒカリでは、倒伏防止や食味向上の観点から、窒素施肥量が低下傾向にあり、登熟期の玄米の急激な生長に対し、茎葉からの同化産物の供給が不足し、デンプンの蓄積が不良となったために未熟粒が増加していると指摘されている¹⁴⁾。つまり、近年の高温登熟障害は登熟期に日平均気温が27℃以上になると、葉で生産された同化産物が穂に転流されないことによって生じる不稔現象であり、その技術対策は概ね葉で生産された同化産物を転流さ

せる方法と言える。

太田・出口(1969)は、養液栽培による実験結果ではあるが、水稻の葉内で生産された同化産物が移行するためには、植物体内のCa濃度を高くすることよりも、微量ずつでもCaが供給され続けることの方が重要であることを示した。また、水稻へのCa供給量が増加すると同化産物量が増加し、更に葉から穂への同化産物の再転流が促進されるなど、光合成による同化産物の移行にCaが機能的な面で関与することが報告されている^{16)~18)}。もし、水稻栽培期間中に土壤中からCaが常に十分量の供給がなされていれば、葉から穂への同化産物の転流が滞りなく行われ、近年の高温登熟障害が回避できる可能性が考えられる。しかしながら、日本の農耕地土壌の実態と土壤管理の状況を調査してきた土壤環境基礎調査(1979~1998年)の結果、土壌中の交換性Ca量は、8.7-8.9 cmol_c kg⁻¹の範囲にあり、変動は認められないものの、6割近くの水田がCa不足と診断されている¹⁹⁾。また、道県レベルにおいても、水田土壌中の交換性Ca量の不足と石灰(炭酸カルシウム)施用量および施用農家割合が著しく低下していることが指摘されている¹³⁾²⁰⁾²¹⁾。そして、近年の水稻栽培における土壌中でのCa動態と白未熟粒の多発に関する因果関係に関しては、十分な議論がなされていないのが実態であり、交換性Ca含量と白未熟粒多発(高温登熟障害)の関係について論じた研究も見当たらない。

今後、卵殻の主成分である炭酸カルシウムならびに土壌中のCa量と水稻の同化産物の転流/移行速度に関する研究が進み、天候条件に起因する高温登熟障害が回避できる様になれば、卵殻が我が国の食糧安全保障に関して資する農業資材として活用されと考えられる。

文 献

- 1) 今井 道(1927). 石灰問題研究の必要. 土壤肥料学雑誌, **1**, 96-101.
- 2) 野村盛久, 坂井信行(1930). 水稻に対する石灰連用試験成績 第一報. 土壤肥料学雑誌, **4**, 1-3.
- 3) 川島祿郎(1936). 土壌の反応及び其の石灰含量と作物の生育に就て: 第三報 水稻. 日本土壤肥料学雑誌, **10**, 53-62.
- 4) 出口正夫, 太田安定(1957). 水稻に対する石灰施用の効果の再検討(第4報): 稲の生育及び出穂に及ぼすCaイオンの影響. 土壤肥料学雑誌, **27**, 407-409.
- 5) 石塚喜明, 田中 明(1959). 水稻の要素代謝に関する研究(第4報): 培養液中・石灰・苦土および硫酸濃度の水稻の生育ならびに要素含有率に及ぼす影響. 土壤肥料学雑誌, **30**, 414-416.
- 6) 田中 明(1958). 葉位別に見た水稻葉の生理機能の特性及びその意義に関する研究(第9報): 各葉位葉の石灰・苦土及び硫酸の消長並に磷酸と石灰の移動性の比較. 土壤肥料学雑誌, **29**, 241-245.
- 7) 伊藤 信, 藤原彰夫(1967). 水稻のカルシウム栄養について: 特に培地カルシウム濃度と体内カルシウムの変動について. 土壤肥料学雑誌, **38**, 126-130.
- 8) 太田安定, 富川敏雄, 出口正夫(1969). 稈および葉鞘に貯蔵された14C化合物の穂への再転流におよぼすカルシウム

- の影響：光合成産物の水稻体内移行速度におよぼすカルシウムの影響 (第 2 報). 土壤肥料学雑誌, **40**, 201–204.
- 9) 森田 敏 (2008). イネの高温登熟障害の克服に向けて. 日本作物学会紀事, **77**, 1–12.
- 10) Morita, S., Wada, H., and Matsue, Y. (2016). Countermeasures for heat damage in rice grain quality under climate change. *Plant Prod. Sci.*, **19**, 1–11.
- 11) 千葉雅大, 松村 修, 寺尾富夫, 高橋能彦, 渡邊 肇 (2009). 深水栽培による高品質米生産技術—深水栽培が水稻の生育と米粒外観品質に及ぼす影響—. 日本作物学会紀事, **78**, 455–464.
- 12) 内藤実加, 加賀田恒, 若原浩義, 桂 圭佑, 齊藤大樹, 中時鉄也, 北島 宣 (2011). 2010 年夏期の記録的猛暑が京都大学の属農場産のイネの外観品質に及ぼした影響. 京大農場報告, **20**, 43–45.
- 13) 松本真悟, 春日純子 (2018). 水稻作における気候変動への土壤肥料的適応技術 4. 近年のコメの外観品質の低下と土壤中の可溶性養分の関係. 日本土壤肥料学雑誌, **89**, 508–514.
- 14) 小葉田亨, 植向直哉, 稲村達也, 加賀田恒 (2004). 子実への同化産物供給不足による高温下の乳白米発生. 日本作物学会紀事, **73**, 315–322.
- 15) 太田安定, 出口正夫 (1969). カルシウムが光合成産物の水稻葉身内移行速度を律速する機構 (2): 光合成産物の水稻体内移行速度におよぼすカルシウムの影響 (第 5 報). 土壤肥料学雑誌, **40**, 464–468.
- 16) 太田安定 (1962a). 水稻に対する石灰施用意義の再検討 (第 8 報): 分けつ期における水稻の炭水化物代謝に及ぼす Ca の影響. 土壤肥料学雑誌, **33**, 107–110.
- 17) 太田安定 (1962b). 水稻に対する石灰施用意義の再検討 (第 9 報): 幼穂形成期ないし伸長期における水稻の炭水化物代謝におよぼす Ca の影響. 土壤肥料学雑誌, **33**, 143–145.
- 18) 太田安定 (1962c). 水稻に対する石灰施用意義の再検討 (第 10 報): 開花登熟期における水稻の炭水化物代謝におよぼす Ca の影響. 土壤肥料学雑誌, **33**, 146–148.
- 19) 中井 信, 小原 洋 (2003). 土壤環境基礎調査 (定点調査) の概要. 土壤肥料学雑誌, **4**, 557–565.
- 20) 谷本俊明, 宮地勝正, 松浦謙吉 (2002). 広島県における農耕地土壌の実態と変化. 広島県立農業技術センター研究報告, **72**, 55–70.
- 21) 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. 土壤肥料学雑誌, **74**, 475–483.

(令和 3 年 6 月 17 日受理)