# 土壌pHはダイズ増収の主要因なのか？
# ―土壌の交換性 Ca と Mg のバランスも考慮した検証―

農研機構　東北農業研究センター

髙本　慧

2021年助成者（論文投稿完了した為掲載）

日本のダイズ収量は、2001 年の 2.02 t $ha^{-1}$ をピークに、2022 年には 1.60 t $ha^{-1}$ と減少傾向にある。日本のダイズ栽培面積の 8 割は水田転換畑で、栽培においては排水性が問題となり、低収になることが多い(Kokubun, 2013)。土壌化学性の面では、土壌 pH と可給態窒素が、国内ダイズ作の増収要因として着目され、特に土壌 pH に着目した研究は国内外問わず多くの研究がある。国内のダイズ栽培の最適 pH は、ダイズの窒素固定に関わる根粒菌の活性促進を目的に、6.0～6.5 とされている。しかし、この効果については一貫した結論は得られておらず、Tsubouchi and Saito (2010)は土壌 pH と収量に正の相関関係があることを示しているが、一方で Takamoto et al. (2020)は 16 道県に及ぶ広域調査で、土壌 pH はダイズの増収要因ではないことを示している。その効果が一定でない 1 つの理由に、土壌 pH 矯正に用いる石灰資材に含まれる Ca や Mg の効果が考慮されていないことが挙げられる。近年、土壌の交換性 Mg が過剰になると、水田転換畑ダイズの収量が減少することが指摘されている(Takamoto et al., 2020; Takamoto et al., 2021)。土壌 pH、Ca、および Mg の 3 要因に着目した水田転換畑ダイズの圃場研究はこれまでなく、明らかにすることは長らく低迷するダイズ収量を打破することに繋がる。

本研究の目的は、土壌 pH、Ca、および Mg が、ダイズの収量等に及ぼす影響を検証することである。そのため、石灰資材である炭酸カルシウム($CaCO_3$、以下炭カル)と苦土石灰($CaMg(CO_3)_2$、以下苦土)の比較施肥試験を行った。炭カルと苦土は広く使われている石灰質肥料であり、どちらも土壌 pH を向上させ、含まれているアニオンも同じである。しかし、炭カルは Ca のみ、苦土は Ca と Mg の両方が含まれているため、土壌 pH・Ca・Mg の 3 要因の関係を検証するのに最適である。本研究では、2019～2021 年の 3 年にわたり行った比較施肥試験の結果を、まとめて解析し報告する。

## 実験方法

### 耕種概要

農研機構東北農業研究センター大仙拠点(秋田県大仙市)の水田転換畑(93×15m、東西が長辺)で、2019～2021 年の 3 年間、リュウホウを栽培した。2018 年はイネを栽培し、圃場の北側には水田が隣接している。圃場を短辺方向で 9 等分し、無資材区(対照区)、炭カル区、苦土区の 3 試験区をランダムに割り当て(各 n = 3)、試験期間中は同じ位置とした。炭カル区には炭カルを 253 g $m^{-2}$、苦土区は苦土を 259 g $m^{-2}$、それぞれ 2019 年と 2020 年に散布し、2021 年は石灰を散布しなかった。基肥($N-P_2O_5-K_2O=3-10-10$)は、全試験区に 100 g $m^{-2}$ で散布した。栽植密度は 7.4 株 $m^{-2}$(条間 75cm、株間 18cm)で、1 株あたり 2 本立てとした。

### 調査内容・統計解析

ダイズのサンプリングは、開花期(R1)、子実肥大期(R5)、成熟期(R8)に行い、種子は 105°C、それ以外の部分は 70°C で乾燥させて、分析に供した。ダイズの収穫後に、作土層(0–15 cm)の土壌をサンプリング・風乾し、2mm の篩に通したのち、土壌 pH は 1:2.5

法($H_2O$)、交換性 Ca と Mg はセミミクロショーレンベルガー法で測定した。立枯性病害に伴うダイズの立枯株本数と根の発病度の検定は、黄葉期(R7)に行った。

得られたデータは事前に年次ごとに平均し、その平均値を各データから引き、中心化した（集団平均中心化）。中心化したデータは、R(Ver. 4.0.3)でマルチレベル解析を行い、モデルはランダム切片モデル、固定効果は石灰散布条件、ランダム効果は年次とした。モデル作成後、固定効果を多重比較し、p 値を Sidak の方法で補正した。

## 実験結果

### 土壌化学性(図 1)

土壌 pH は、炭カル区(6.1)≒苦土区(6.1)＞対照区(5.5)の順となり、対照区は有意に値が小さかった($p < 0.05$、図 1a)。交換性 Ca 濃度は、炭カル区(3.5 g-Ca $kg^{-1}$)＞苦土区(2.9 g-Ca $kg^{-1}$)＞対照区(2.4 g-Ca $kg^{-1}$)の順となり、すべての試験区間で有意な差が認められた($p < 0.05$、図 1b)。交換性 Mg は、苦土区(0.4 g-Mg $kg^{-1}$)＞炭カル区(0.2 g-Mg $kg^{-1}$)≒対照区(0.2 g-Mg $kg^{-1}$)の順となり、苦土区は有意に値が大きかった($p < 0.05$、図 1c)。

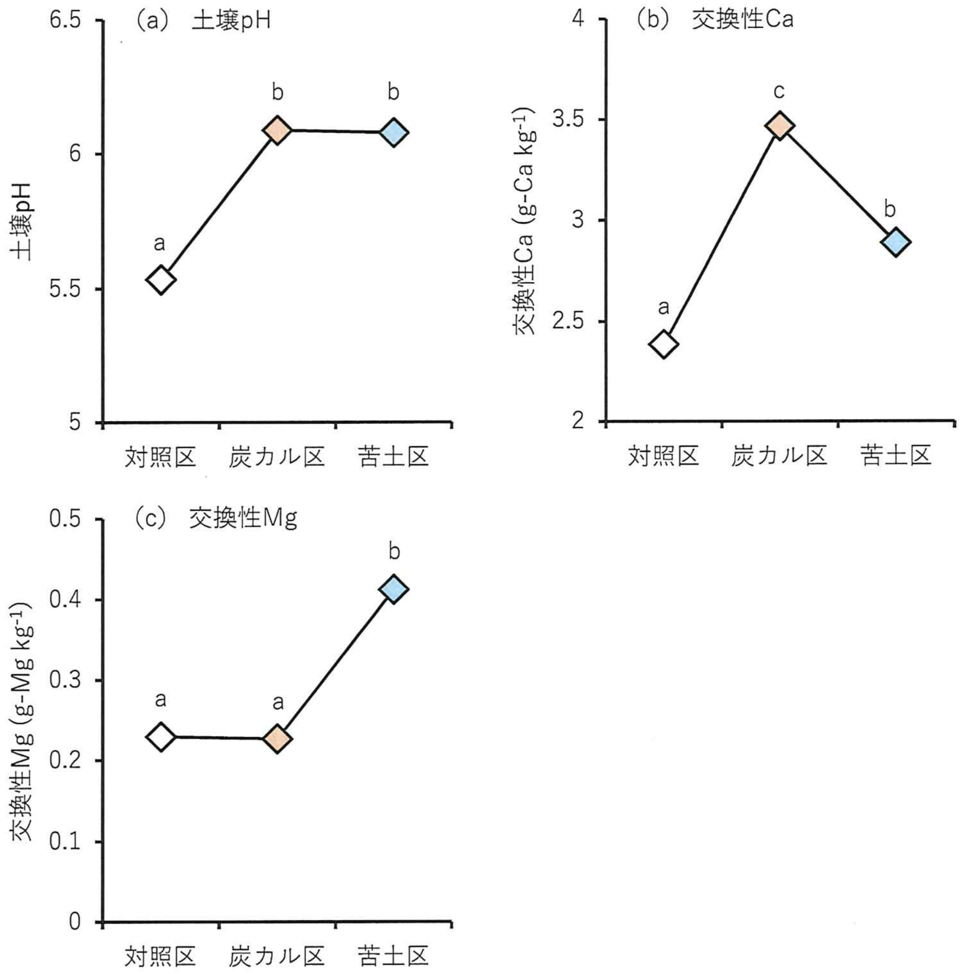


図 1. 収穫後土壌の土壌 pH(a)、交換性 Ca(b)、および交換性 Mg(c)の 3 か年平均（2019～2021 年）。各測定項目で文字が異なる場合は、有意水準 5%で有意差あり。

**ダイズ地上部重の変化と収量(図 2)**

R1 および R5 の地上部重は、炭カル区(R1：158 g $m^{-2}$、R5：558 g $m^{-2}$)＞苦土区(R1：133 g $m^{-2}$、R5：461 g $m^{-2}$)＞対照区(R1：120 g $m^{-2}$、R5：451 g $m^{-2}$)の順となり、炭カル区は有意に値が大きかった($p < 0.05$、図 2a、b)。R8 の地上部重も、炭カル区(517 g $m^{-2}$)＞苦土区(474 g $m^{-2}$)＞対照区(406 g $m^{-2}$)の順となり、すべての試験区間で有意な差が認められた($p < 0.05$、図 2c)。

収量は R8 の地上部重と同様に、炭カル区(352 g $m^{-2}$)＞苦土区(323 g $m^{-2}$)＞対照区(269 g $m^{-2}$)の順となり、すべての試験区間で有意な差が認められた($p < 0.05$、図 2d)。

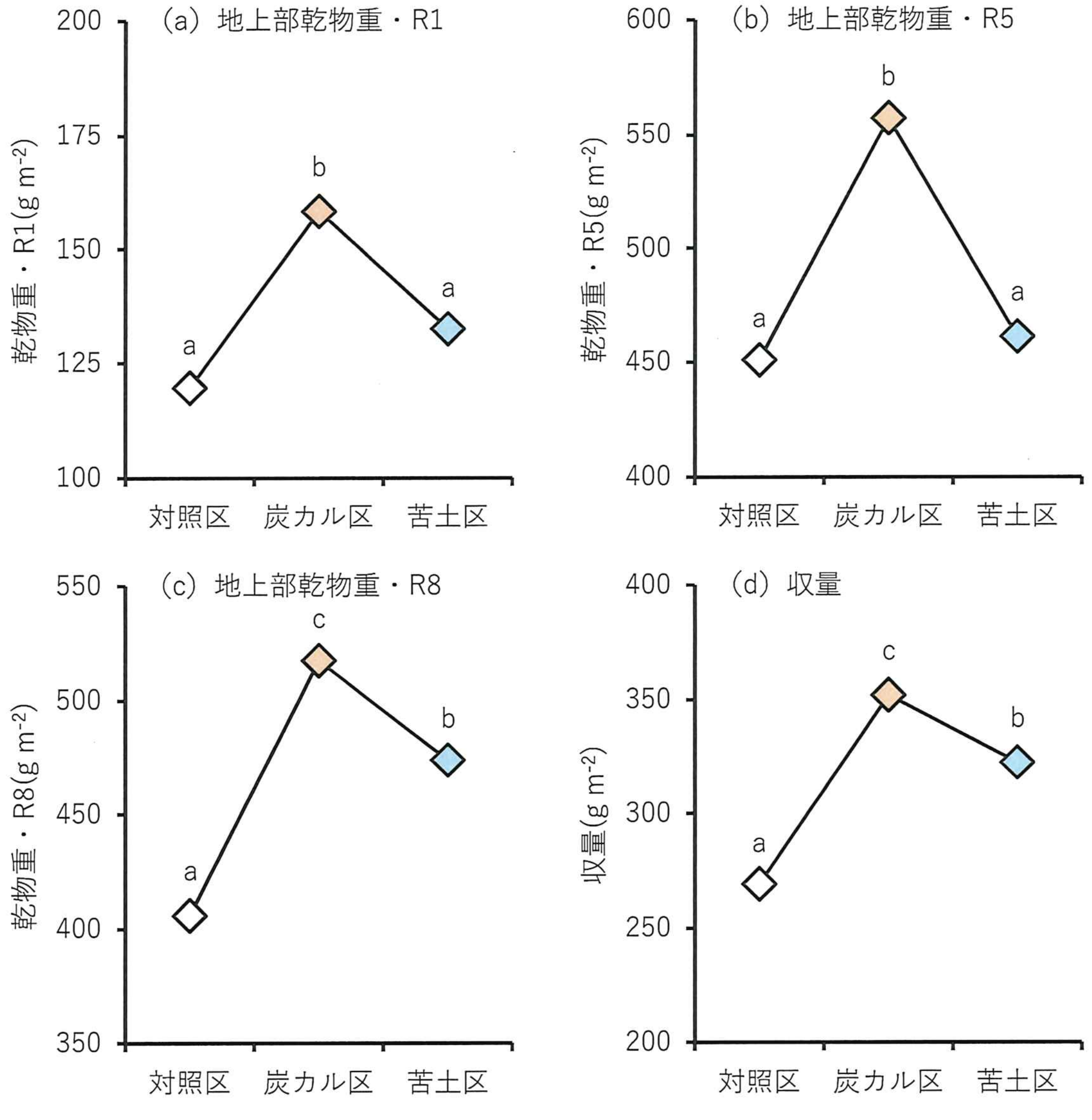


図 2. 各生育ステージにおける地上部全体の乾物重(a～c)および収量(d)の 3 か年平均(2019～2021 年)。各生育ステージで文字が異なる場合は、有意水準 5%で有意差あり。

### 立枯れ株の本数および根の発病度(図 3)

R7 におけるダイズの立枯れ株本数は、対照区(3.0 株 $m^{-2}$) > 苦土区(2.0 株 $m^{-2}$) > 炭カル区(1.4 株 $m^{-2}$)の順に少なくなり、苦土区と炭カル区は対照区に比べて、立枯れ株が有意に少なかった($p$ < 0.05、図 3a)。根の発病度も、対照区(57.3) > 苦土区(53.0) > 炭カル区(42.7)の順となり、炭カル区は対照区に比べて、発病度が有意に小さかった($p$ < 0.05、図 3b)

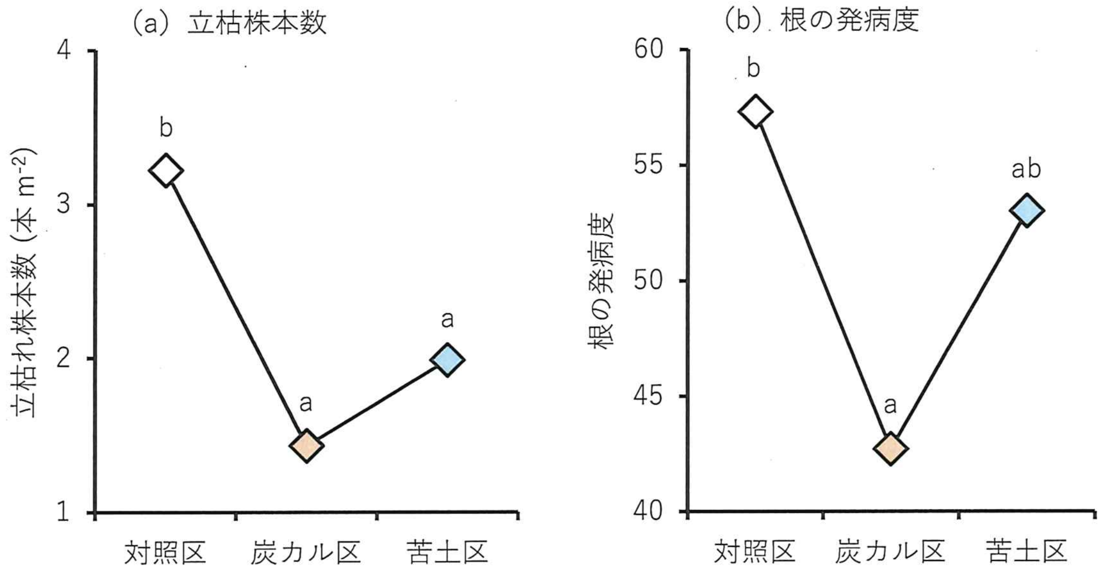


図 3. 黄葉期(R7)でのダイズ立枯れ株本数(a)および根の発病度(b)の 3 か年平均（2019〜2021 年)。各生育ステージで文字が異なる場合は、有意水準 5%で有意差あり。

### 考察

炭カル区のダイズ地上部重は、いずれの生育ステージにおいても、苦土区と対照区よりも有意に大きかった(図 2a〜c)。炭カル区の土壌 pH は苦土区(図 1a)、交換性 Mg 濃度は対照区と同等であった(図 1c)一方で、交換性 Ca 濃度は、他 2 区と比べて有意に高かった(図 1b)。すなわち、炭カル区で地上部重が増加したのは、主に交換性 Ca が影響していることを示している。開花期における炭カル区の地上部重は、対照区より 32%、苦土区より 20%有意に大きかったが、以降の生育の差は減少または横ばいであった(図 2)。このことは、交換性 Ca 上昇による生育促進効果は、主に開花期までに表れることを示唆している。また、黄葉期における炭カル区の病害程度が、対照区に比べて有意に小さかった(図 3)ことは、地上部重の増加(図 2a〜c)に寄与している。土壌病害は主に土壌 pH の向上により抑えられ(Ghorbani et al., 2010; Huber et al., 2012)、炭カル区の土壌 pH は対照区よりも有意に高かった(図 1a)。よって、交換性 Ca の初期生育向上効果と土壌 pH の病害抑制効果により、炭カル区の収量は、苦土区より 9%、対照区より 31%有意に高くなったと考えられる(図 1d)。

苦土区の交換性 Ca 濃度は、炭カル区同様に、対照区よりも有意に高かった(図 1a、b)が、R5 までの地上部重は対照区と有意な差がなかった(図 2a、b)。このことは、炭カル区とは異なり、苦土区では交換性 Ca 向上によるダイズへの生育促進効果がみられなかったことを示している。土壌の交換性 Ca は交換性 Mg と競合することが知られており(Weil and Brady, 2017)、苦土区の交換性 Mg 濃度は、炭カル区および対照区よりも有意に高かった(図 1c)。よって、苦土区と対照区で地上部重が R5 まで変わらなかったのは、交換性 Mg 向上に伴う交換性 Ca への競合が原因と示唆される。一方で、苦土区の R8 地上部重と収量は、対照区よりもそれぞれ 17%、20%有意に高かった(図 2c、d)。このことは、R5～R8 の期間で減少する重量が、苦土区では対照区よりも小さかったことを示している。重量減少が小さかった理由に病害の程度が考えられ、R7 における苦土区の立枯れ株本数は、対照区よりも有意に少なかった(図 3a)。苦土区の土壌 pH は対照区よりも有意に高く(図 1a)、土壌病害と土壌 pH の関係(Ghorbani et al., 2010; Huber et al., 2012)と矛盾しない。よって、苦土区が対照区よりも増収したのは、土壌 pH 向上による病害抑制の効果が大きいと考えられる。しかし、pH と同様に向上した交換性 Ca の効果は、同じく向上した交換性 Mg の競合により認められず、さらなる増収が妨げられている可能性が示唆された。

本研究の結果は、土壌 pH による増収は生育向上ではなく、病害抑制によるものであることを示している。国内のダイズ栽培において、土壌 pH の向上は根粒菌の着生や活性を促すため(Cline and Kaul, 1990; Thilakarathna and Raizada, 2017; Tsubouchi and Saito, 2010)、ダイズ生育量が向上し、その結果、増収すると考えられてきた。一方で、土壌 pH 向上による土壌病害抑制効果は広く知られており(Ghorbani et al., 2010; Huber et al., 2012)、ダイズ栽培ではあまり注目されてこなかった。日本のダイズ栽培面積の 8 割を占める水田転換畑は、排水性に問題を抱えていることが多く(Kokubun, 2013)、病害が多発しやすい(Akamatsu et al., 2020; Gomi and Nemoto, 1986)。また、病害程度は毎年一定ではないことを考慮すると、土壌 pH の効果が国内で一貫していない理由も説明できる可能性がある。したがって、土壌 pH はダイズの増収要因だが、その効果が生育向上と病害抑制のどちらが日本で優勢かは、今後さらなる研究が求められる。

炭カルと苦土をダイズで比較施肥した報告には、差が認められない場合(Pagani and Mallarino, 2012)と認められる場合(Takamoto et al., 2021)の両方がある。差が認められた報告と本研究の共通点は水田転換畑であり、水田転換畑は土壌物理性の問題から、ダイズの根の生育を抑制する(Kokubun, 2013)。根の生育を促す土壌中の元素として、Ca はその効果がよく知られている(Hawkesford et al., 2012)一方で、土壌中の Ca は Mg と競合する(Weil and Brady, 2017)。よって、炭カル散布により土壌中の交換性 Ca と Mg の比を高めたことが、水田転換畑におけるダイズの根の生育を促した結果、苦土散布よりも収量が有意に高くなった(図 2d)と考えられる。

## 要約

炭カルと苦土の比較施肥試験を水田転換畑で 3 年間行い、土壌 pH と交換性 Ca および Mg がダイズの生育と収量に及ぼす影響を検証した。その結果、土壌 pH は土壌病害を抑制し、交換性 Ca は開花期までの生育を促すことを明らかにした。交換性 Ca の生育促進効果は、交換性 Mg による競合があると阻害される。土壌 pH および交換性 Ca と Mg の比の観点から、水田転換畑でのダイズ作においては、苦土よりも炭カルの方が増収に寄与すると考えられる。

## 謝辞

本研究を遂行するにあたり、研究助成を賜りました公益財団法人タカノ農芸化学研究財団ならびに関係者の皆様に心より感謝申し上げます。また、東北農業研究センター大仙拠点の皆様には本研究に多大なる協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

## 引用文献

Akamatsu, H., Fujii, N., Saito, T., Sayama, A., Matsuda, H., Kato, M., Kowada, R., Yasuta, Y., Igarashi, Y., Komori, H., Tanji, K., Kuroda, T., Fujita, Y., Hattori, M., Kawakami, O., Hori, T., Mimuro, G., Morikawa, T., Murasaki, N., Aoki, Y., Sekihara, J., Iyama, Y., Nakada, H., Iwata, T., Kichishima, T., Ebitani, T., Numada, F., Manta, H., Nakajima, H., Yamashita, T., Miyahara, K., Toyoshima, G., Yamada, K., Yamamoto, R., Ochi, S., 2020. Factors affecting red crown rot caused by Calonectria ilicicola in soybean cultivation. Journal of General Plant Pathology 86(5), 363-375.

Cline, G.R., Kaul, K., 1990. Inhibitory effects of acidified soil on the soybean/Bradyrhizobium symbiosis. Plant and Soil 127(2), 243-249.

Ghorbani, R., Wilcockson, S., Koocheki, A., Leifert, C., 2010. Soil management for sustainable crop disease control: a review. In: E. Lichtfouse (Ed.), Organic Farming, Pest Control and Remediation of Soil Pollutants: Organic farming, pest control and remediation of soil pollutants. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 177-201.

Gomi, T., Nemoto, M., 1986. Influence of soil moisture content on the development of soybean black root rot (in Japanese). Tohoku Agric. Res. 1986, 155-156.

Hawkesford, M., Horst, W., Kichey, T., Lambers, H., Schjoerring, J., Møller, I.S., White, P., 2012. Chapter 6 - Functions of macronutrients. In: P. Marschner (Ed.), Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants (Third Edition). Academic Press, San Diego, pp. 135-189.

Huber, D., Römheld, V., Weinmann, M., 2012. Chapter 10 - Relationship between nutrition, plant diseases and pests. In: P. Marschner (Ed.), Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants (Third Edition). Academic Press, San Diego, pp. 283-298.

Kokubun, M., 2013. Genetic and cultural improvement of soybean for waterlogged conditions in Asia. Field Crops Research 152, 3-7.

Pagani, A., Mallarino, A.P., 2012. Soil pH and crop grain yield as affected by the source and rate of lime. Soil Science Society of America Journal 76(5), 1877-1886.

Takamoto, A., Takahashi, T., Nira, R., 2020. Soil chemical properties affecting soybean yield on a nationwide scale in Japan. Soil Science and Plant Nutrition 66(6), 900-905.

Takamoto, A., Takahashi, T., Togami, K., 2021. Effect of changes in the soil calcium-to-magnesium ratio by calcium application on soybeans, Glycine max (L.) Merr., growth. Soil Science and Plant Nutrition 67(2), 139-149.

Thilakarathna, M.S., Raizada, M.N., 2017. A meta-analysis of the effectiveness of diverse rhizobia inoculants on soybean traits under field conditions. Soil Biology and Biochemistry 105, 177-196.

Tsubouchi, H., Saito, M., 2010. Soil properties of the soybean fields in [Paddy Rice -barley -soybean -paddy Rice] rotation system, and its amelioration with lime or micronutrients fertilizer (in Japanese). Bulletin of the Fukui Agricultural Experiment Station 47, 9--14.

Weil, R.R., Brady, N.C., 2017. The Nature and Properties of Soils. 15th ed. Pearson Education Limited.