

令和元年6月20日現在

機関番号：24302

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04892

研究課題名(和文) 日本の農耕地土壌における植物必須元素可給態量の網羅的定量と規定要因の機構論的解明

研究課題名(英文) Evaluation of plant-available fractions of essential nutrients in agricultural soils and elucidation of its determining factors

研究代表者

矢内 純太 (Yanai, Junta)

京都府立大学・生命環境科学研究科・教授

研究者番号：00273491

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、多点数の日本の農耕地土壌における植物必須元素の可給態量を網羅的に評価するとともに、同一土壌の粘土鉱物や有機物を含めた各種理化学性を評価し、必須元素可給態量の規定要因が元素ごとに大きく異なることを統計的に明らかにした。また、赤黄色土のFe酸化物(ヘマタイト・ゲータイト)の示差XRD法と分光測定法を組合せた定量や、アルカリ可溶性腐植の三次元蛍光スペクトルを用いた有機物の構造特性、さらには土壌の形態別Clや非交換態Kの定量を通じて、各元素の可給態量の規定要因の機構論的解析を行った。これら結果により、日本の土壌環境における植物必須元素の化学的挙動をより包括的に理解できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

日本の農耕地土壌の植物必須元素の可給態画分の規定要因について得られた本研究成果は、日本における持続的かつ環境保全的な食料生産の実現に資することができる。また、幅広い気候帯を持ち火山の影響を受けた日本の生態環境の下で、生態系の一部をなす土壌における各種元素の形態別存在量を明らかにしたという面では、日本の陸域生態環境における元素循環の生物地球化学的な理解にもつながっている。さらに、作物を介した動物の必須元素の土壌から人間への移行を考慮すれば、人間の健康に関わる各種元素をより多く含む食料生産の具体的な方策についても幅広い示唆を与えるものと言える。

研究成果の概要(英文)：The contents of available fractions of plant essential nutrients was evaluated for a number of agricultural soils in Japan and their relationship with general properties of the soils such as clay mineralogy and organic matter content was investigated. The regulating factors of the available fractions statistically determined were variable among the elements. Determination of Fe oxides (hematite and goethite) by differential XRD and spectrometry, analysis of structural characteristics of dissolved organic matter using 3D fluorescence spectrometry, chemical fractionation of soil chlorine and evaluation of nonexchangeable potassium further elucidated mechanistic evaluation of the regulating factors of the available fractions. These results enabled us to understand the chemical behavior of the plant essential elements of the soils in Japan more comprehensively.

研究分野：土壌学

キーワード：土壌肥沃度 植物必須元素 可給態 化学形態 規定要因

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

世界人口が約 73 億人に達する現在、土壌に基づいた食料生産の重要性がますます高まっている。日本でも、限られた農地で集約的な食料生産を行う一方、有機物還元量の減少等に伴う地力低下が懸念される中で、いかに土壌肥沃度を維持し持続的な農業生産を継続するかが喫緊の課題となっている。そのような状況において、あまり広く指摘はされていないが、特に施肥を行わない各種植物必須微量元素の収奪とそれに伴う欠乏が潜在的な問題として危惧されている。

作物を含む植物は、17 種類の必須元素のうち、CO<sub>2</sub> や H<sub>2</sub>O として吸収できる C・H・O を除く 14 種類の必須元素 (N・P・K・Ca・Mg・S・Fe・Mn・Cu・Zn・B・Mo・Cl・Ni) を土壌から吸収している。これまで、土壌の元素組成 (多元素の全濃度) に関しては、世界的にも、日本においてもある程度の知見が得られている。加えて研究代表者は、日本全国から採取した農耕地表層土壌 180 点について、植物必須元素 10 元素 (N・P・K・Ca・Mg・Fe・Mn・Cu・Zn・Ni) を含む主要 20 元素の全濃度を網羅的に定量評価し、その後同一試料について、S, Mo, B, Cl の定量分析もほぼ終了している。従って、日本の農耕地土壌の元素全濃度の包括的評価はかなり進みつつある。

一方、植物による吸収や植物の生育・収量をより強く規定すると考えられている「可給態量」については、N・P・K 等の多量必須元素については多点数試料の測定が行われてきたが、それら以外の元素については、多点数の分析は限られており、規定要因の解析についても元素ごとに異なる土壌試料を用いた別々の研究に留まっている。そのため、日本の農耕地土壌における多元素の可給態量の同一試料を用いた包括的評価はなされておらず、全量とあわせて関係性を総合的に評価した研究も未だない。研究代表者は、上記の農耕地土壌 180 点に対し、窒素の形態別定量を行い、その規定要因を明らかにしてきた。そのため、他の植物必須元素についても同一土壌の可給態量を定量評価できれば、日本の農耕地土壌の植物必須元素の可給性をより包括的に理解できる。さらに、これら土壌の粘土鉱物組成や鉄酸化物や腐植物質の特性を各種一般理化学性と合わせて評価し、可給態量との関係解析を行うことや、代表的な土壌試料について土壌 pH や酸化還元電位等を変化させた要因制御下での一連の脱吸着試験において多元素の可給態量を同時に定量することで、日本の農耕地土壌における各種植物必須元素の可給態量の規定要因を統一的に解明できることも期待される。特に、水田管理に伴う酸化還元 (とそれに伴う鉄酸化物の形態変化) や、火山灰の影響による非晶質粘土鉱物の存在など、日本の土壌の特殊性を考慮した上でこれら結果を解釈すれば、土壌肥沃度学の面における新知見に留まらず、土壌生成分類学の側面からも新たな情報が得られるものと思われる。

### 2. 研究の目的

日本の農耕地土壌における植物必須元素 (14 元素) の可給態量を多点数の同一土壌試料に対して網羅的に評価し、その規定要因を機構論的に解析することにより、植物必須元素の化学的挙動の包括的理解と、水田管理 (酸化還元) や火山灰の影響 (非晶質粘土鉱物) の強い日本の土壌の特殊性の解明を目指す。具体的には、日本全国から採取した、土壌型・土地利用・地域等の属性の異なる農耕地土壌に対して、1) 植物必須元素 (14 元素) の可給態量を網羅的に定量し、2) 同一土壌の粘土鉱物や有機物を含めた各種理化学性を評価するとともに、3) 必須元素可給態量を目的変数に、各種理化学性を説明変数に用いた重回帰分析と、機構論的理解に基づいた要因制御実験を組合せ、各元素の可給態量の規定要因の解明と元素間の挙動の相同性評価を行う。

### 3. 研究の方法

本研究では、日本全国 38 都道府県より採取した農耕地表層土壌 180 点を用いて、以下の 3 点を目的とする研究を実施した。

- 1) 植物必須元素の可給態量の網羅的定量：測定済みの N を除く 13 元素の定量を行い、植物必須元素の網羅的定量を行った。すなわち、Ca・Mg は 1 mol/L 酢酸アンモニウム抽出態 (交換態) と 0.1 mol/L 塩酸抽出態を、K は 1 mol/L 酢酸アンモニウム抽出態 (交換態) 0.1 mol/L 塩酸抽出態に加え 1 mol/L 熱硝酸抽出態 (いわゆる非交換態) をいずれも原子吸光度法で、P はトルオーグ法、ブレイ第 2 準法の可給態と酸性シュウ酸塩溶液抽出態を分光光度法で、Fe・Mn・Cu・Zn・Ni は 0.1 mol/L 塩酸抽出態と重金属の逐次抽出法による各形態 (画分) を ICP-AES で、S・B・Mo は可給態評価法の常法とされるリン酸二水素カリウム溶液・塩化カルシウム溶液・酸性シュウ酸アンモニウム溶液で抽出される形態を ICP-AES・クルクミン酢酸法に基づく分光光度法・ICP-MS で、さらに Cl は硫酸カルシウム溶液で抽出される形態を高速液体クロマトグラフで、それぞれ定量した。
- 2) 土壌の各種理化学性の網羅的定量：元素の可給態量に影響を与えることが予想される、結晶質の Fe・Al 酸化物の形態分析を示差 X 線回折法 (DXRD) 分光測色法、示差熱重量分析法 (DTA-TG) で、土壌有機物の質 (組成) の指標となる溶存有機物の構造特性を三次元蛍光分析法で、それぞれ定量した。なお、土壌 pH、篩別法と沈降法 (ピペット法) による土壌の粒径組成、X 線回折法 (XRD) による粘土鉱物種、ならびに選択溶解法による結晶質・非晶質・有機結合態の Fe・Al 濃度は、すでに測定値が得られていた。
- 3) 植物必須元素の可給態量の規定要因の解明：3-1) 統計解析法 1) で得られる植物必須元素

の可給態量を目的変数に、2) で得られるこれら土壌の理化学特性値のデータを説明変数に用いて重回帰分析を行い、前者の規定要因を定量的に明らかにした。また、土壌型・土地利用・地域との関係を別途解析し、日本の農耕地土壌における可給態養分の規定要因の現状を包括的に評価した。さらに、3-2) 要因制御実験法 3-1) で統計的に抽出された規定要因(土壌 pH や酸化還元電位、イオン強度等)を変化させた一連の脱吸着試験を代表的な土壌試料について行い、その条件での多元素の溶出性を同時に定量することで、元素間で十分に検討されていない可給度の相互関係や挙動の相同性を評価した。

#### 4. 研究成果

本研究では、多点数の日本の農耕地土壌における植物必須元素の可給態量を網羅的に評価するとともに、同一土壌の粘土鉱物や有機物を含めた各種理化学性を評価し、必須元素可給態量の規定要因が元素ごとに大きく異なることや特に火山活動に由来する非晶質鉱物の影響が大きいことを統計的に明らかにした。また、赤黄色土の Fe 酸化物(ヘマタイト・ゲータイト)の示差 XRD 法と分光測定法を組合せた定量や、アルカリ可溶性腐植の三次元蛍光スペクトルを用いた有機物の構造特性、さらには土壌の形態別 CI や非交換態 K の定量を通じて、各元素の可給態量の規定要因の機構論的解析を行った(図)。これら結果により、日本の土壌環境における植物必須元素の化学的挙動をより包括的に理解できた。

以上の結果は、亜寒帯から亜熱帯の幅広い気候帯に属し、火山の影響も顕著であるという日本の土壌の生態環境的特徴を明確に示しており、日本の農耕地土壌の特徴をアジアあるいは世界の中に位置づけることができた。さらに、今回得られる土壌中の元素挙動に関する知見は、地殻や岩石あるいは河川などのデータと密接な対応関係を示し、ひろく日本の陸域生態環境における元素循環の生物地球化学的な理解を深めることにもつながった。さらに、土壌肥沃度の評価や管理、ひいてはより高収量かつ安全・安心な食料生産のための基礎情報としても有用であり、実学的な意義も極めて大きいと判断された。

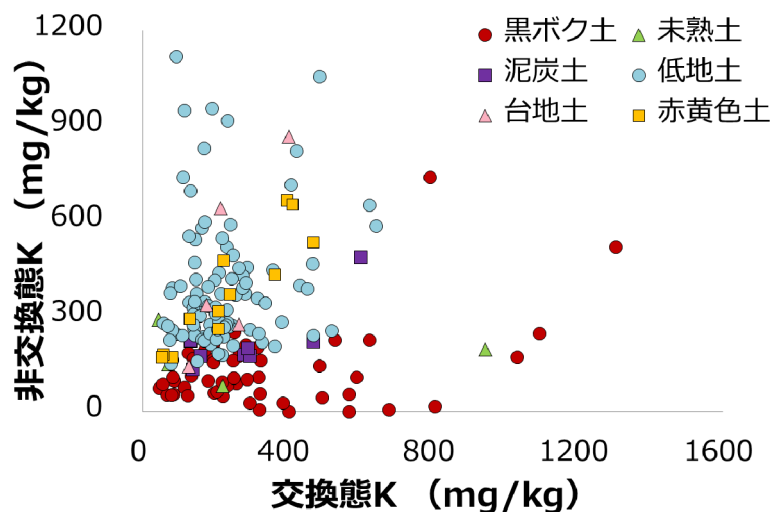


図 日本の農耕地土壌における交換態カリウムと非交換態カリウムの関係

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計3件)

伊藤 遼・矢内純太・中尾 淳 2017: 日本の農耕地土壌の全粒径及び細砂画分の元素組成による土壌大群の推定と地理的起源のスクリーニング、分析化学、66、547-555. doi.org/10.2116/bunsekikagaku.66.547

Kitagawa, Y., Yanai, J. and Nakao, A. 2018: Evaluation of nonexchangeable potassium content of agricultural soils in Japan by the hot HNO<sub>3</sub> extraction method. Soil Science and Plant Nutrition, 64, 116-122. doi.org/10.1080/00380768.2017.1411168

矢内純太・野口夏海・宮丸直子・中尾 淳 2019: 沖縄県のサトウキビ畑土壌における可給態ケイ酸の定量とその規定要因の解析、日本土壌肥料学雑誌、90、13-21. doi.org/10.20710/dojo.90.1\_13

[学会発表](計13件)

北川由佳、矢内純太、中尾 淳: 土壌の非交換態カリウムの放出能におよぼすイオン組成や有機酸の影響、日本土壌肥料学会 2016 年度大会(佐賀)、2016.9.20

伊藤 遼、矢内純太、森塚直樹、中尾 淳: 日本の農耕地土壌の土色と細砂元素組成に関する土壌大群別の相同性評価、日本土壌肥料学会 2016 年度大会(佐賀)、2016.9.20

神田智行、眞家永光、矢内純太、柿野 亘、丹治 肇: 農耕地における土壌有機物の蛍光特性プロファイル、日本土壌肥料学会 2016 年度大会(佐賀)、2016.9.21

伊藤 遼、矢内純太、森塚直樹、中尾 淳: 日本の農耕地土壌における土色の定量分析と鉄酸化物との関係解析、日本ペドロロジー学会 2016 年度大会(和歌山)、2017.3.10(ポスター賞受)

賞)

前島勇治、中尾 淳、矢内純太：示差 X 線回折法による土壌中の鉄酸化物の形態と土色との関係、日本ペドロロジー学会 2016 年度大会 (和歌山) 2017.3.10

Yanai, J., Kishimoto, S., Nakao, A. and Yamasaki, S. 2017: Total and available molybdenum contents of agricultural soils and their determining factors: A national-scale survey in Japan. Abstract of the 14th International Conference on the Biogeochemistry of Trace Elements, Zurich, Switzerland.

伊藤遼、矢内純太、中尾淳：沖積平野での土壌生成における地質因子と地形因子の相互作用の解析 - 滋賀県高島市鴨川流域を例に -、日本土壌肥料学会 2017 年度大会 (仙台) 2017.9

矢内純太、野口夏海、宮丸直子、中尾 淳：沖縄県のサトウキビ畑土壌における可給態ケイ酸の定量評価とその規定要因の解析、日本土壌肥料学会 2017 年度大会 (仙台) 2017.9.11

Yanai, J., Kitagawa, Y. and Nakao, A. 2017: Non-exchangeable potassium content of agricultural soils by the boiling HNO<sub>3</sub> extraction method and its controlling factors: Implications to potassium fertility evaluation. The 13th Conference of East and Southeast Asia Federation of Soil Science Societies, Pattaya, Thailand. 2017.12.12-15.

Ito, R., Yanai, J. and Nakao, A. 2017: Interactive effect of parent material and topography on the spatial variability of soil material characteristics of paddy soils in the alluvial plain. The 13th Conference of East and Southeast Asia Federation of Soil Science Societies, Pattaya, Thailand. 2017.12.12-15.

前島勇治、中尾 淳、矢内純太：示差 X 線回折法による土壌中の鉄酸化物の形態と土色との関係 - 黄色、褐色を呈する土壌中のゲータイト含量の推定 -、日本ペドロロジー学会 2017 年度大会 (名古屋) 2018.3.2

伊藤咲笑、矢内純太、酒井悠貴、杉原創、宮丸直子、吉田晃一、中尾 淳：沖縄県サトウキビ畑における土壌の可給態ケイ酸と葉身中ケイ酸濃度およびその規定要因の解析、日本土壌肥料学会 2018 年度大会 (藤沢) 2018.8.29.

武田晃、向井康太、藤森崇、山崎慎一、土屋範芳、塚田祥文、矢内純太：XANES および抽出法による土壌中塩素の存在形態の評価手法の検討、第 20 回「環境放射能」研究会(つくば) 2019.3

〔図書〕(計 6 件)

中尾 淳 2017：「リンの事典」、朝倉書店、pp360.

前島勇治 2017：「自然地理学事典」、朝倉書店、pp480.

矢内純太ら 2018：「世界の土壌」、土壌サイエンス入門 (第 2 版)(木村真人・南條正巳編) 文永堂、pp194-204.

眞家永光ら 2018：「土壌の有機物」、土壌サイエンス入門 (第 2 版)(木村真人・南條正巳編) 文永堂、pp126-137.

中尾 淳 2018：「原発事故で放出された放射性セシウムの土壌中における動態」、土壌サイエンス入門 (第 2 版)(木村真人・南條正巳編) 文永堂、pp295-300.

矢内純太ら 2019：「熱帯の土壌」、熱帯農学概論、培風館、pp16-36.

〔産業財産権〕

出願状況 (計 件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

出願年：

国内外の別：

取得状況 (計 件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

## 6 . 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：眞家 永光

ローマ字氏名：Maie, Nagamitsu

所属研究機関名：北里大学

部局名：獣医学部

職名：講師

研究者番号(8桁): 00453514

研究分担者氏名：前島 勇治

ローマ字氏名：Maejima, Yuji

所属研究機関名：国立研究開発法人・農業環境変動研究センター

部局名：土壌資源評価ユニット

職名：主任研究員

研究者番号(8桁): 80391209

研究分担者氏名：武田 晃

ローマ字氏名：Takeda, Akira

所属研究機関名：公益財団法人・環境科学技術研究所

部局名：環境影響研究部

職名：副主任研究員

研究者番号(8桁): 10715501

研究分担者氏名：中尾 淳

ローマ字氏名：Nakao, Atsushi

所属研究機関名：京都府立大学

部局名：生命環境科学研究科

職名：准教授

研究者番号(8桁): 80624064

(2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。