

## 愛知県における水田土壌のカリウム含量の実態

糟谷真宏<sup>1)</sup>・日置雅之<sup>2)</sup>・橋本 創<sup>3)</sup>・都築宏明<sup>3)</sup>・加藤 保<sup>4)</sup>・瀧 勝俊<sup>5)</sup>

**摘要：**愛知県の水田における土壌からのカリウム可給性を評価するため、カリウムをはじめとする土壌起源元素含量の実態を、元素全量と熱硝酸抽出画分を分析することにより評価した。全カリウムの平均値と第1四分位は  $20.5 \text{ g kg}^{-1}$ 、 $16.9 \text{ g kg}^{-1}$  で、熱硝酸抽出カリウムは、同じく  $0.64 \text{ g kg}^{-1}$ 、 $0.42 \text{ g kg}^{-1}$  であった。1926年以來継続されている三要素試験における三要素区と無カリウム区の全カリウム、熱硝酸抽出カリウムは、いずれも愛知県全体の第1四分位程度に相当した。無カリウム区は三要素区と比較して減収程度がわずかであることから、愛知県内の大部分の水田ではカリウム欠乏が生じるおそれは小さいと考えられた。

カリウムは、他の元素と異なり全量と熱硝酸抽出画分との間に相関が認められなかったことから、土壌中の存在形態が単一でないことが示唆された。また、それらの分布には地域性が認められ、クラスター分析の結果、全カリウム含量が高いものの熱硝酸抽出カリウム含量が低い土壌が尾張西部に多く分布し、全カリウム含量とは相対的に熱硝酸抽出カリウム含量の高い土壌が矢作川と豊川の沖積地に集中的に分布する傾向が明らかとなった。

**キーワード：**水田土壌、土壌起源元素、全カリウム、熱硝酸抽出カリウム、土壌タイプ

## 緒 言

重要な肥料成分である、カリウム(K)、マグネシウム(Mg)、ケイ酸(Si)、鉄(Fe)、マンガン(Mn)、リン(P)等は、農耕地土壌に土壌鉱物を起源として広く存在する元素である。これらの元素の土壌からの供給は、特に施肥量が比較的少ない水稲においては、作物吸収に占める割合が高く重要な意味を有している。

Kについては、愛知県農業総合試験場が1926年から継続している水稲の三要素試験において、K無施用でも大きな減収が認められないことから<sup>1,2)</sup>、土壌からのK供給により水稲の成長が支えられていると考えられている<sup>1)</sup>。

土壌からのKの可給性の指標として、作物のK吸収と相関の強い熱硝酸抽出K(以下、 $K_{\text{HNA}}$ と称す)が有効であることが知られているが<sup>3)</sup>、これまで愛知県においては、土壌起源の肥料成分の可給性に関する研究は皆無であり、土壌中Kの存在形態に関する調査も行われたことがなかった。近年、水稲作で普及している直播栽培では、播種と

同時に被覆窒素肥料のみが単肥として施用されることが多く、Kは土壌と灌漑水からの供給のみに依存するため、土壌からの供給が少ない圃場ではKが不足する懸念もある。

Kをはじめとする土壌起源元素の可給性に応じて施肥量を加減することは、生産性・品質向上や施肥コスト削減に有効と考えられる。そこで本研究は、愛知県内の水田作土を対象に、まず、土壌中のKの存在量を調査し、その特徴、地域性を明らかにすることを目的として実施した。

## 材料及び方法

### 1 調査対象と分析項目

2015年冬季に、愛知県全域で水田の作付面積10 haあたりほぼ1点に相当する2724点の水田作土を採取し、主な元素組成を調査した。サンプリング地点は、位置情報として緯度、経度を記録した。得られたサンプルのうち無

---

本研究は共同研究「水稲生産性向上のための愛知県内土壌の実態把握と土壌改良資材効果の実証に基づく施肥改善方針の確立」により実施した。

<sup>1)</sup> 環境基盤研究部(現 愛知県経済農業協同組合連合会) <sup>2)</sup> 環境基盤研究部(現作物研究部) <sup>3)</sup> 愛知県経済農業協同組合連合会 <sup>4)</sup> 愛知県経済農業協同組合連合会(退職) <sup>5)</sup> 環境基盤研究部

(2020.9.9受理)

作為に選んだ合計 528 サンプルを分析対象とした。これら愛知県内水田作土とは別に、1926 年から安城市の洪積地黄色土で愛知県農業総合試験場が継続している三要素試験の三要素区と無 K 区における 2014 年と 2016 年のデータも比較対象とした。

元素分析は、全量と熱硝酸抽出画分について行った。全量分析を実施した項目は、K、カルシウム(Ca)、Mg、ナトリウム(Na)、Fe、Mn、Pで、熱硝酸抽出画分は、Kのほか、Ca、Mg、Na、Fe、Mn、P、Siを分析した。そのほか、水溶性画分のイオンバランスを指標するpHと全炭素(TC)を測定した。

全量分析は、フッ化水素酸分解により試料液を調整した<sup>4)</sup>。熱硝酸抽出画分は、微粉碎試料を 1 N硝酸で10分間煮沸した後ろ過して試料液を得た<sup>3)</sup>。それぞれの試料液を適宜希釈し、K、Ca、Mg、Fe、Mnは原子吸光光度法で、Pはモリブデン青吸光光度法<sup>4)</sup>で、Siはモリブデン青吸光光度法<sup>4)</sup>で測定した。pHはガラス電極法によった<sup>3)</sup>。TCは、県内水田土壌はアルカリ性ピロリン酸ナトリウムで抽出する簡易法(熊田法)<sup>4,5)</sup>により腐植を定量しTCに換算した。三要素試験のTCは乾式燃焼法<sup>4)</sup>によった。

なお、Kの可給性については、熱硝酸抽出や塩酸連続抽出によるK量から交換態Kを差し引いた非交換態Kが重要であることが指摘されている<sup>6)</sup>。本研究では、交換態Kはカリボール法を用いた土壌診断装置<sup>4)</sup>で分析を行ったが、分析精度が必ずしも良くなかったため、非交換態Kは算出していない。しかしながら、交換態K含量は、平均的には全K(T+K)の1%以下、 $K_{\text{HNA}}$ の2割程度と見積もられ、また土壌中で非交換態K、交換態K、水溶性Kが平衡状態にあると考えられる<sup>3)</sup>ことから、 $K_{\text{HNA}}$ を土壌からのカリウム可給性の指標として扱った。

## 2 統計解析

得られたデータセットについて、各項目の相関を整理し、クラスター分析により各元素全量と熱硝酸抽出特性に基づく類型化を行った。得られたクラスター毎に各元素の含量、地域性、土壌タイプを整理することによって、愛知県の水田土壌の元素組成の特徴を評価した。なお、本研究では、地域区分を便宜的に以下の 4 区分とした。尾張西部(一宮市、岩倉市、北名古屋市、丹羽郡、名

古屋市北区、東区、中区、昭和区、瑞穂区、南区、以西)、尾張東部(犬山市、春日井市、小牧市、豊山町、瀬戸市、尾張旭市、長久手市、日進市、みよし市、東郷町、豊明市、知多郡、知多市、常滑市、半田市、名古屋市守山区、千種区、名東区、天白区、緑区)、西三河(豊田市、岡崎市、知立市、安城市、刈谷市、高浜市、碧南市、西尾市、幸田町)、東三河(田原市、豊橋市、蒲郡市、豊川市、新城市、北設楽郡)。

統計値の算出、相関分析、クラスター分析等の統計解析は、フリー統計解析ソフト R<sup>7)</sup> を用いて行った。

## 結果及び考察

### 1 愛知県の水田土壌の元素組成の概要

表 1 に全調査地点の元素含量の概要を示した。最下段には、愛知県農業総合試験場の三要素試験田のデータを示した。全量に対する熱硝酸抽出画分の割合は、Ca、Mg、Fe、Mn、Pで、それぞれ平均値が、32%、31%、37%、50%、75%と高かった。一方、Kは3.3%、Naは0.9%と低かった。K無施用でも減収程度の小さい<sup>1,2)</sup>三要素試験の無K区と同試験の三要素区の土壌のT-Kと $K_{\text{HNA}}$ は、県全体の頻度分布の第1四分位程度に相当することから、愛知県内の大半の水田では、K欠乏が生ずる懸念はほとんどないと考えられた。

表2にK、Na、Ca、Mg、Fe、Mn、Pについて、全量と熱硝酸抽出画分の相関係数を、図 1 にT-Kと $K_{\text{HNA}}$ の関係を示した。K以外の元素は、全量と熱硝酸抽出画分の間にはいずれも正の相関が認められたが、Kの相関係数の有意確率は0.73であり相関は認められなかった。特に、西三河と東三河では両者の関係は大きくばらついた。

これらのことは、K以外の元素については、愛知県全域において存在形態が比較的単一である一方、Kの起源として抽出性の異なる複数の形態が存在し、さらにその状況は地域によって異なることを示唆している。また、KとNaについては、熱硝酸抽出画分が全量の数%程度であることから、風化によって全量から熱硝酸抽出性に変化する画分が多く残っており、持続的な供給が期待できるとの解釈もできよう。

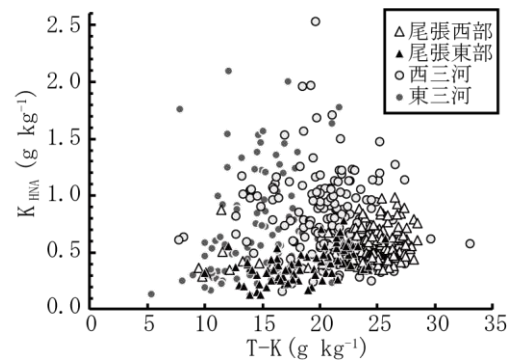
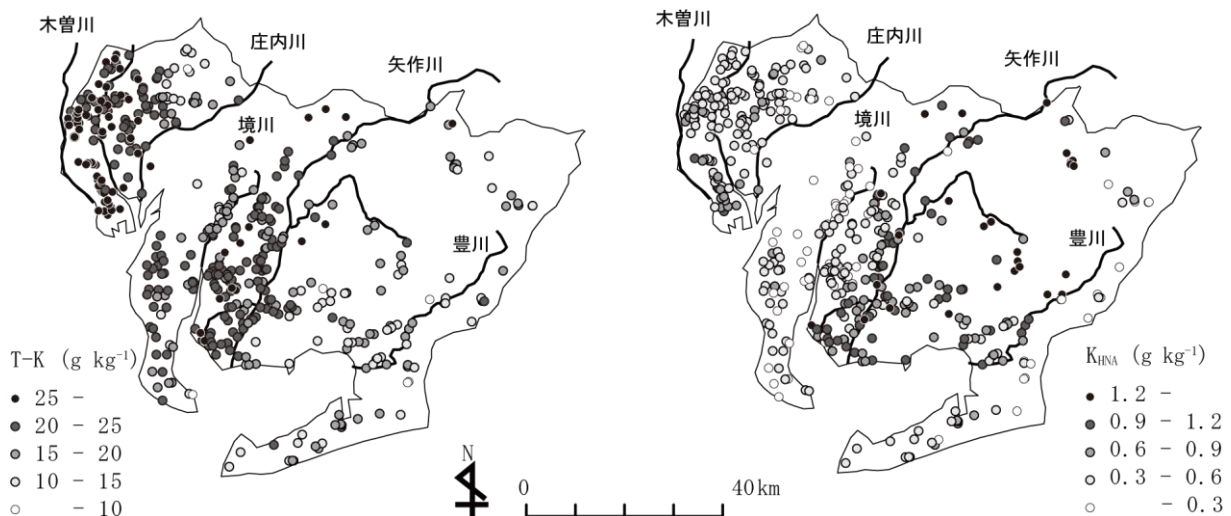
表 1 愛知県の水田土壌の元素組成の概要\*

統計値	pH	全量 (g kg <sup>-1</sup> )								熱硝酸抽出画分 (g kg <sup>-1</sup> )							
		C	K	Na	Ca	Mg	Fe	Mn	P	K	Na	Ca	Mg	Fe	Mn	P	Si
最小値	4.3	5.0	5.4	0.3	0.3	1.0	7.1	0.1	0.3	0.12	0.00	0.37	0.24	2.39	0.05	0.13	0.97
第1四分位	5.2	11.0	16.9	5.0	3.3	3.0	19.3	0.3	0.8	0.42	0.04	1.14	0.88	6.94	0.14	0.57	2.29
中央値	5.5	14.0	21.4	11.3	7.0	4.6	23.2	0.4	1.0	0.55	0.07	1.52	1.36	8.84	0.20	0.72	2.61
平均値	5.6	16.3	20.5	11.2	8.2	5.3	15.3	0.5	1.1	0.64	0.09	1.72	1.55	9.11	0.25	0.79	2.59
第3四分位	5.6	18.0	24.4	17.4	12.6	5.4	27.9	0.6	1.2	0.78	0.13	2.07	1.90	11.04	0.32	0.91	2.93
最大値	7.5	73.0	33.1	25.0	33.1	40.9	67.8	1.7	4.5	2.52	1.20	7.48	11.20	20.87	1.07	2.88	3.61
三要素試験田**																	
三要素区	6.8	11.7	17.8	3.5	2.3	3.2	27.4	0.2	0.9	0.41	0.04	1.27	0.89	-	-	-	-
無カリウム区	6.9	11.6	17.6	4.0	2.2	3.5	28.5	0.2	0.9	0.40	0.05	1.47	1.04	-	-	-	-

\* n=531 \*\* 安城三要素試験田は pH、全量は 2014 年、熱硝酸抽出画分は 2016 年のデータ。

表 2 元素全量と熱硝酸抽出画分の相関係数

元素	r	P
K	-0.015	0.730
Na	0.577	$3.2 \times 10^{-48}$
Ca	0.291	$9.1 \times 10^{-12}$
Mg	0.787	$1.5 \times 10^{-112}$
Fe	0.732	$8.2 \times 10^{-90}$
Mn	0.861	$7.8 \times 10^{-157}$
P	0.842	$2.5 \times 10^{-143}$

図 1 愛知県の水田作土の TK と  $K_{HNA}$  の関係図 2 水田作土の T-K と  $K_{HNA}$  の愛知県における分布 (左: T-K、右:  $K_{HNA}$ )

## 2 愛知県の水田土壌における K の分布

図2にT-Kと $K_{HNA}$ の愛知県内における分布を濃度別に示した。平均値で見た場合、木曾川、庄内川流域の尾張西部では、T-Kは $24.1 \text{ g kg}^{-1}$ と、愛知県の中でもT-Kが高い水田が多いものの、 $K_{HNA}$ は $0.54 \text{ g kg}^{-1}$ でT-K含量と相対的に低い地点が多かった。尾張東部はT-K  $18.9 \text{ g kg}^{-1}$ 、 $K_{HNA}$   $0.41 \text{ g kg}^{-1}$ で、両方とも県全体の平均以下で低含量の水田が多く分布していた。西三河は、T-Kは $20.7 \text{ g kg}^{-1}$ と平均的であるが、 $K_{HNA}$ は $0.79 \text{ g kg}^{-1}$ と高く、特に $K_{HNA}$ は矢作川沿いの沖積地帯や、干拓地で高い地点が多く、洪積地で低い傾向が認められる。東三河では、T-Kは $14.5 \text{ g kg}^{-1}$ でT-K含量の高い地点は少ないが、 $K_{HNA}$ は $0.74 \text{ g kg}^{-1}$ と高く、特に豊川沿いの沖積地には $K_{HNA}$ 含量の高い水田が集中していた。このように、T-Kと $K_{HNA}$ の分布は必ずしも一致していない。主に矢作川、豊川の沖積地に $K_{HNA}$ 含量の高い地点が集中しており、尾張東部、知多半島、渥美半島では $K_{HNA}$ は低い傾向がある。

## 3 クラスタ分析による水田土壌の類型化

以上のように、愛知県の水田土壌のKは地域によって、全量とその存在形態に異質性が認められる。そこで、さらに表3に示した17項目のデータのクラスタ分析によって、土壌の元素組成と熱硝酸抽出特性による類型化を実

施した。

クラスタ分析の結果得られたデンドログラムにより7のクラスターに類型化した。類型ごとに、地域区分と土壌タイプ区分(有機質土壌と鈣質土壌に分け、さらに鈣質土壌を洪積地と沖積地に区分した)でデータを集計、整理し、クラスター毎の特徴を評価した(表3、表4)。IとIIは東三河に多く、Iは有機質土壌、IIは沖積土に多く見られ、T-Kと $K_{HNA}$ の平均値は、それぞれ、Iが $13.1 \text{ g kg}^{-1}$ 、 $0.48 \text{ g kg}^{-1}$ 、IIが $13.8 \text{ g kg}^{-1}$ 、 $0.96 \text{ g kg}^{-1}$ であり、T-Kは同程度であるものの、 $K_{HNA}$ は東三河沖積地が多く類するIIで高い傾向が認められた。IIIは、尾張西部以外で多く見られ、洪積地、沖積地に関わらず、T-Kが $16.4 \text{ g kg}^{-1}$ とやや低めで、 $K_{HNA}$ は $0.60 \text{ g kg}^{-1}$ と愛知県の平均的な値を有する土壌であった。IVaとIVbは、尾張東部から西三河に多く見られ、T-Kは $20 \text{ g kg}^{-1}$ 程度と愛知県の平均的な値であり、 $K_{HNA}$ はIVaが $0.64 \text{ g kg}^{-1}$ と平均的であったのに対し、IVbは $0.43 \text{ g kg}^{-1}$ と低かった。Vには尾張西部の沖積地の多くが分類され、T-Kが $24.9 \text{ g kg}^{-1}$ と高いものの $K_{HNA}$ は $0.61 \text{ g kg}^{-1}$ と愛知県内の平均的な値であった。VIは西三河矢作川沖積地の水田が多く属し、T-Kは $19.7 \text{ g kg}^{-1}$ と平均的であるものの、 $K_{HNA}$ は $0.98 \text{ g kg}^{-1}$ と高いことが特徴的である。このように、T-Kと $K_{HNA}$ の分布には、地域性、土壌タイプによる違いが認められた。

表3 クラスタ別の土壌の元素組成

クラスタ	n	pH	全量 (g kg <sup>-1</sup> )								熱硝酸抽出画分 (g kg <sup>-1</sup> )							
			C	K	Na	Ca	Mg	Fe	Mn	P	K	Na	Ca	Mg	Fe	Mn	P	Si
I	22	5.6	43.5 <sup>a</sup>	13.1 <sup>c</sup>	4.7 <sup>d</sup>	4.5 <sup>c</sup>	5.7 <sup>c</sup>	27.8 <sup>bc</sup>	0.64 <sup>b</sup>	1.91 <sup>a</sup>	0.48 <sup>b</sup>	0.06 <sup>b</sup>	2.34 <sup>ab</sup>	1.68 <sup>bc</sup>	8.3 <sup>c</sup>	0.36 <sup>ab</sup>	1.23 <sup>a</sup>	2.52
II	39	5.7	26.0 <sup>b</sup>	13.8 <sup>c</sup>	10.2 <sup>c</sup>	15.1 <sup>a</sup>	16.7 <sup>a</sup>	51.6 <sup>a</sup>	1.00 <sup>a</sup>	1.83 <sup>a</sup>	0.96 <sup>a</sup>	0.07 <sup>b</sup>	2.43 <sup>a</sup>	3.61 <sup>a</sup>	13.5 <sup>a</sup>	0.46 <sup>a</sup>	1.20 <sup>ab</sup>	2.57
III	77	5.6	19.9 <sup>bc</sup>	16.4 <sup>c</sup>	5.4 <sup>d</sup>	3.9 <sup>c</sup>	4.1 <sup>c</sup>	22.6 <sup>c</sup>	0.49 <sup>bc</sup>	1.24 <sup>b</sup>	0.60 <sup>b</sup>	0.05 <sup>b</sup>	1.81 <sup>ab</sup>	1.32 <sup>cd</sup>	7.7 <sup>b</sup>	0.28 <sup>b</sup>	0.89 <sup>ab</sup>	2.45
IVa	81	5.6	9.8 <sup>d</sup>	21.4 <sup>b</sup>	7.7 <sup>cd</sup>	4.2 <sup>c</sup>	3.6 <sup>c</sup>	25.1 <sup>c</sup>	0.39 <sup>cd</sup>	0.79 <sup>bc</sup>	0.64 <sup>b</sup>	0.05 <sup>b</sup>	1.53 <sup>ab</sup>	1.15 <sup>cd</sup>	8.7 <sup>b</sup>	0.24 <sup>b</sup>	0.56 <sup>b</sup>	2.59
IVb	98	5.7	12.4 <sup>d</sup>	20.3 <sup>b</sup>	6.6 <sup>d</sup>	3.9 <sup>c</sup>	2.4 <sup>c</sup>	15.3 <sup>d</sup>	0.30 <sup>d</sup>	0.77 <sup>c</sup>	0.43 <sup>b</sup>	0.05 <sup>b</sup>	1.31 <sup>b</sup>	0.74 <sup>d</sup>	5.5 <sup>c</sup>	0.18 <sup>b</sup>	0.61 <sup>b</sup>	2.12
V	159	5.4	14.1 <sup>cd</sup>	24.9 <sup>a</sup>	17.9 <sup>a</sup>	11.5 <sup>b</sup>	4.9 <sup>bc</sup>	23.5 <sup>c</sup>	0.45 <sup>bc</sup>	1.02 <sup>b</sup>	0.61 <sup>b</sup>	0.15 <sup>a</sup>	1.65 <sup>ab</sup>	1.56 <sup>c</sup>	10.1 <sup>b</sup>	0.20 <sup>b</sup>	0.81 <sup>ab</sup>	2.95
VI	51	5.8	16.5 <sup>c</sup>	19.7 <sup>b</sup>	16.6 <sup>a</sup>	14.9 <sup>a</sup>	7.1 <sup>b</sup>	33.6 <sup>b</sup>	0.69 <sup>b</sup>	1.18 <sup>b</sup>	0.98 <sup>a</sup>	0.12 <sup>ab</sup>	2.03 <sup>ab</sup>	2.37 <sup>b</sup>	12.7 <sup>a</sup>	0.36 <sup>a</sup>	0.81 <sup>ab</sup>	2.67

注) 数値右肩の異なるアルファベット間に危険率0.01で有意差あり(Tukey-Kramer法)。

表4 地域、土壌タイプ別のクラスタの分布

クラスタ	鉱質土壌								有機質土壌				土壌タイプ別合計			地域別合計				愛知県 全体
	尾張西部		尾張東部		西三河		東三河		尾張西	尾張東	西三河	東三河	沖積	洪積	有機質	尾張西	尾張東	西三河	東三河	
	沖積	洪積	沖積	洪積	沖積	洪積	沖積	洪積												
I	0	1	2	2	0	0	1	1	1	1	0	12	3	4	14	2	5	0	14	21
II	0	0	0	0	5	0	14	9	0	0	0	5	19	9	5	0	0	5	28	33
III	3	0	13	6	12	19	6	11	0	0	0	3	34	36	3	3	19	31	20	73
IVa	6	0	13	19	20	16	4	1	0	0	0	1	43	36	1	6	32	36	6	80
IVb	8	0	15	20	31	14	4	4	0	0	1	1	58	38	2	8	35	46	9	98
V	128	0	0	0	18	1	0	0	0	0	1	0	146	1	1	128	0	20	0	148
VI	6	0	0	0	30	5	5	1	0	0	2	2	41	6	4	6	0	37	8	51

注) 位置情報、土壌タイプのデータの欠落するサンプルがあるため、合計は表3の調査点数とは合わない。

これらの違いは、K以外の元素含量がクラスタ毎に異なることから(表3)、土壌に含まれる一次鉱物種や二次鉱物種の違い、すなわち、土壌を生成した母岩の影響を反映しているものと考えられる。産業技術総合研究所地質調査センターは、河川堆積物を対象として53元素の地球化学図を作成し、自然起源の元素によるバックグラウンドの把握を行った。このうちKは地質と密接に関係していることを報告している<sup>8)</sup>。また、近年、放射性セシウムの動態研究において、Kはセシウムと同様にフレイドエッジサイトの強い負電荷に吸着されることが明らかになっている<sup>9)</sup>。フレイドエッジサイトは鉱物の種類によってその有無や量が異なることから、土壌鉱物組成がK<sub>INA</sub>や非交換態Kの存在量に影響を及ぼしている可能性がある。本研究では、土壌構成成分として最も多い元素であるSiとアルミニウムの全量の測定や鉱物種の特特定は行えなかった。今後は、農耕地土壌においても、鉱物組成を解明することにより、バックグラウンドとしての土壌からのK等養分の可給性を明らかにしていくことが、将来にわたる、より合理的な施肥技術の確立に寄与すると考えられる。

謝辞：土壌の採取は、愛知県内の農業協同組合関係者の協力により実施した。ここに深謝の意を表す。

### 引用文献

- 中西秋四郎, 沖村逸夫, 加藤虎治, 有沢道雄, 河合伸二. 水稻に対する継続40年間の要素試験成績について(第1報). 愛知農試彙報. 24, 46-60(1970)
- 初井隆志, 釋一郎, 松家一夫, 中嶋泰則, 濱田千裕, 林元樹. 愛知県における77年間継続した四要素及び堆肥施用試験における各要素の効果発現の特徴と気象条件との関係. 日作紀. 79, 336-341(2010)
- 三須昇, 宮里愿. 土壌養分分析法, 13 カリウム. 土壌養分測定法委員会編. 養賢堂. 東京. pp. 258-277(1986)
- 土壌環境分析法編集委員会. 土壌環境分析法. 博友社. 東京. pp. 195-197, p. 231-233, p. 267-272, p. 274-276, p. 284-286, p. 312-318 (1997)
- 鈴木正昭, 熊田恭一. 腐植の簡易定量法に関する一考察. 土肥誌. 44, 144-145(1973)
- 森塚直樹. 日本の農耕地土壌のカリウムの形態-地域・圃場・根域スケールでの評価. 土肥誌. 80, 80-88(2009)
- R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>. (2020)
- 産業技術総合研究所地質調査センター. 日本の地球化学図. 209p. (2004)
- 山口紀子, 高田裕介, 林健太郎, 石川覚, 倉俣正人, 江口定夫, 吉川省子, 坂口敦, 朝田景, 和穎朗太, 牧野知之, 赤羽幾子, 平舘俊太郎. 土壌-植物系における放射性セシウムの挙動とその変動要因. 農業環境技術研究所報告, 31, 75-129(2012)