

三重県下に分布する水田土壌の特性および分類とカリ栄養特性に関する研究

水谷, 嘉之

<https://hdl.handle.net/2324/7329531>

出版情報 : Kyushu University, 2024, 博士 (農学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :



九州大学大学院 生物資源環境科学府 環境農学専攻
学位論文

三重県下に分布する水田土壌の特性および分類と
カリ栄養特性に関する研究

水谷 嘉之

2024

目次

第1章 序論

1.1 研究の背景	1
1.2 研究の目的	3

第2章 三重県における水田土壌の特性と分類

2.1 はじめに	4
2.2 調査方法	5
2.2.1 土壌断面調査	5
2.2.2 土壌分析	5
2.3 三重県北中部の伊勢平野に分布する水田土壌の特性と分類	7
2.3.1 調査地点	7
2.3.2 結果と分類	10
2.3.2.1 土壌断面形態, 物理性, 化学性	10
2.3.2.2 作土およびすき床層の理化学性	20
2.3.2.3 土壌分類	23
2.3.3 考察	30
2.3.3.1 土壌管理	30
2.3.3.2 土壌分類	31
2.3.4 要約	31
2.4 三重県西部の上野盆地に分布する水田土壌の特性と分類	33
2.4.1 調査地域の地理的概要	33
2.4.2 調査地域の地質	36
2.4.3 調査地点	37
2.4.4 結果と分類	39
2.4.4.1 土壌断面形態, 物理性, 化学性	39
2.4.4.2 作土およびすき床層の理化学性	47
2.4.4.3 土壌分類	49
2.4.5 考察	55
2.4.5.1 土壌特性	55
2.4.5.2 土壌管理	58
2.4.5.3 土壌分類	59
2.4.6 要約	60
2.5 まとめ	61

第3章 水田土壌において交換性カリおよびイネのカリ吸収が非交換性カリからのカリ給量に及ぼす影響	
3.1 はじめに	63
3.2 試験方法	64
3.2.1 非交換性カリから溶出するカリ量の考え方と算出方法	64
3.2.2 土壌と作物	65
3.2.3 栽培実験	67
3.2.3.1 栽培実験I	67
3.2.3.2 栽培実験II	70
3.2.4 化学分析	71
3.2.4.1 植物体分析	71
3.2.4.2 土壌分析	71
3.2.5 統計解析	71
3.3 結果	72
3.3.1 土壌および交換性Kが非交換性カリからのカリ溶出におよぼす影響（栽培実験I）	72
3.3.2 カリ欠乏環境が非交換性カリからのカリ溶出におよぼす影響（栽培実験II）	78
3.4 考察	80
3.4.1 交換性カリおよび土壌の違いが非交換性カリからのカリ溶出に与える影響	80
3.4.2 イネによるカリ吸収後における交換性カリの回復	82
3.4.3 栽培上の土壌中カリ管理における可能性	83
3.5 要約	84
第4章 総括	
4.1 本研究のまとめ	85
4.2 残された課題	86
謝辞	88
引用文献	89
Summary	99

転載許可について

第2章 2.3 三重県北中部の伊勢平野に分布する水田土壌の特性と分類

水谷嘉之, 大門奈那子, 藤井琢馬, 西美弥子, 平舘俊太郎. 2022. “三重県北中部の低地に分布する水田土壌の特性と分類” *ペドロジスト*, 66 巻 1 号; 17-30.

DOI: 10.18920/pedologist.66.1_17

において, 掲載された内容であり, 著作権者である日本ペドロロジー学会より転載許可を得て作成している.

第2章 2.4 三重県西部の上野盆地に分布する水田土壌の特性と分類

水谷嘉之, 藤井琢馬, 平舘俊太郎. 2024. “三重県西部の上野盆地に分布する水田土壌の特性と分類” *ペドロジスト*, 66 巻 2 号.

において, 掲載された内容であり, 著作権者である日本ペドロロジー学会より転載許可を得て作成している.

第3章 水田土壌において交換性カリおよびイネのカリ吸収が非交換性カリからのカリ給量に及ぼす影響

Mizutani, Y., Kubotera, H., Fujii, T., Maeda, T., Watanabe, M., & Hiradate, S. 2024. “Recharge of exchangeable K from non-exchangeable fractions as affected by exchangeable K and K acquisition by rice in Japanese paddy soils.” *Soil Science and Plant Nutrition*, Vol. 70, No. 4; 295-305.

DOI: 10.1080/00380768.2024.2357099

において, 掲載された内容であり, 著作権者である Informa UK Limited (as Taylor & Francis Group; <http://www.tandfonline.com>)より転載許可を得て作成している.

第 1 章 序論

1.1 研究の背景

日本の農地の 54%は水田であり（農林水産省，2022a），水稲作は，主要な農作物である．2000 年以降，農林水産省の食料・農業・農村基本計画法（農林水産省，2022b）に基づき，食料自給率を高めるために，多くの水田で田畑輪換が奨励され，例えば，イネームギーダイズによる 2 年 3 作体系が実施されている．

持続可能な栽培のためには，土壌の栄養状態を適切に維持し管理する必要がある．イネ単作体系と比較して，イネームギーダイズ栽培体系では，土壌からの窒素，リン酸，カリ（K）の持出量（収穫物としての収奪量）は，それぞれ 2.2 倍，1.2 倍，1.8 倍と推定される（小川ら（1988）に基づいて算出）．農耕地における土壌中成分に関し，赤井ら（2012），望月ら（2012）は，土壌中の可給態リン酸は充分であったが，交換性 K（exK）は約半数の水田で管理基準以下であったことを報告している．また，大家ら（2023）は，生産コストの削減などの理由から，K 含有量を抑制した肥料の使用が増加し，このことが水田土壌の可給性 K レベルの低さに関連していると報告している．中田（2022）も水田における K 肥沃度の低下を報告し，K 欠乏がイネ，ムギ，ダイズの収量や品質の低下を引き起こす要因となることを示唆している．田畑転換において，持続可能な土壌管理を行う上で，土壌の K 肥沃度を適切に管理することが重要な課題となっている．

土壌の K 肥沃度について，日本では， 1 mol L^{-1} の酢酸アンモニウム溶液で抽出可能な K を exK と定義し，溶存 K と exK の合計が土壌の K 肥沃度の評価に用いられてきた（中井，小原，2003；森塚，2020）．

一方で、植物は、非交換性 K (non-exK) から溶出する K も吸収することが知られている (Page and Williams, 1925; Bray and DeTurk, 1939; Stewart and Volk, 1946 など). 畑地における土壤の K 供給能力については、多くの研究が行われ、non-exK 画分から植物への K 供給率が土壤によって異なることが明らかにされている (Ayres *et al.*, 1947; Matthews and Smith, 1957; McEwen and Matthews, 1958; Grimes, 1966; Zhang *et al.*, 2010). しかし、生育期のほとんどを灌漑水で飽和している水田土壤に関する情報は限られている. 飽和水は non-exK 画分からの K の溶出を促進する可能性がある (DeDatta and Mikkelsen, 1985). 水田条件下での K の挙動については、いくつかの研究が行われている. 長期連続栽培実験により、non-exK の一部が湛水条件下でイネに吸収されることが明らかにされている (Singh *et al.*, 2002; Sanyal *et al.*, 2019; 靱井, 井澤, 2007; Zhang *et al.*, 2010; 糟谷ら, 2022). Dobermann *et al.* (1996) は、アジアの様々な場所 (5 カ国 11 圃場) の水田条件下で、イネが吸収する non-exK の量を比較した. Kusa *et al.* (2021), Moriizumi *et al.* (2021), 糟谷ら (2022) も、イネが鉱物の化学的風化を促進し、そこから K を獲得することを報告している. Kitagawa *et al.* (2018) は、水田土壤を含む日本の土壤 (178 カ所) の土壤について 1M 硝酸による煮沸抽出 (熱硝酸法) を用いて non-exK 量を調査し、地域差が大きいこと ($0 \sim 1120 \text{ mg K}_2\text{O kg}^{-1}$) を報告している. また、Yanai *et al.* (2023) は、イネの長期連続栽培を行った水田土壤について非交換性カリからのカリ吸収と粘土鉱物の変化について報告している. このように水田における non-exK の研究が行われているが、水田条件下でのイネに対する non-exK の寄与や、イネが吸収する non-exK の量に対する土壤の違いや exK, 施肥 K の影響については、まだ明らかにされていない.

水田の高度利用は今後も推進され、ムギ、ダイズ等の畑作としての利用が増加すると考えられる. また、様々な社会情勢により農業資材の高騰が続く中、リン酸、カリの施用は、ますます削減され

る傾向にある。このような状況から、持続可能な土壌管理において、田畑転換における土壌の K 肥沃度の管理について non-exK からの K 溶出も含めた土壌 K 肥沃度の管理技術が重要であり、基幹作物である水稲と水田土壌における non-exK からの K の動態を解明する必要がある。

1.2 研究の目的

本研究では、まず、三重県における代表的な水田土壌の特性について、土壌生成の観点から明らかにしたうえで、水田土壌を対象に、湛水条件下でのイネ栽培下における non-exK からの K の溶出について、明らかにすることを目的とした。

第 2 章では、三重県の水田土壌の特性を把握するため、主要な水田地帯である北中部（伊勢平野）から 4 カ所、西部（上野盆地）から 5 カ所を選定し、土壌生成の観点から土壌断面形態等の現地調査、理化学性の分析ならびに土壌分類を行い、その特性の検証を行った。また、得られた情報から、土壌管理上の課題についても考察を行った。さらに、伊勢平野と上野盆地の水田土壌の比較検証を行った。

第 3 章では、第 2 章で得た三重県水田土壌の特性に基づいて 6 地域の水田土壌を選定し、湛水条件下でのイネの栽培実験を行った。栽培実験では、イネによる K 吸収のもと、土壌の違い、exK 量および K の施用量が non-exK からの K の溶出に及ぼす影響を検証した。さらに、明らかになった non-exK の特性に関して、分類するとともに、農業における土壌管理の観点から考察を行った。

第2章 三重県における水田土壌の特性と分類

2.1 はじめに

三重県の水田および畑の農耕地面積はそれぞれ 43,600 ha および 13,400 ha であり（農林水産省，2022a），水田営農が農業の基幹部門となっている。

三重県では，土壌環境基礎調査（1979－1998）および土壌機能実態モニタリング調査（1999－2007）として農地の定点調査を実施してきており，2008 年以降も県モニタリング事業として継続している．定点調査は農地の経時的変化および実態把握とともに，持続可能な土壌管理に資する情報を得るために重要な事業であり，全 67 地点，うち水田 43 地点が設置されている。

水田農業は県内全域で営まれているが，北中部にあたる濃尾平野南西部と伊勢平野，西部にあたる上野盆地にその多くがある。

そこで，三重県内における水田土壌の特性を把握するため，代表的な地域として北中部の伊勢平野と西部の上野盆地を対象に，土壌生成の観点から，その理化学性と土壌分類について調査，検証を行った。

2.2 調査方法

2.2.1 土壌断面調査

土壌の断面調査は、水稻収穫後に行い、調査法は土壌調査ハンドブック改訂版（日本ペドロジー学会編，1997）に従った。

2.2.2 土壌分析

各層位ごとに採取した土壌試料は、風乾・砕土後、2 mm の篩を通して風乾細土とし、分析に供試した。粒径組成は、風乾細土を過酸化水素水により有機物分解した後、分散させ、ピペット法により求めた（日本土壌協会，2001）。pH(H₂O)は風乾細土：蒸留水 = 1:5 の懸濁液について、pH(KCl)は風乾細土：1 mol L⁻¹ 塩化カリ水溶液 = 1:2.5 の懸濁液について、ガラス電極法（HM-42X，東亜ディーケーケー株式会社，東京）で測定した（土壌養分測定法委員会，1970）。電気伝導度（EC）は、風乾細土：蒸留水 = 1:5 の懸濁液を、電気伝導度計（CM-60G，東亜ディーケーケー株式会社）で測定した（日本土壌協会，2001）。陽イオン交換容量（CEC）はセミミクロ Schollenberger 法により測定した（日本土壌協会，2001）。交換性塩基（Ca，Mg，K，Na）は、1 mol L⁻¹ 酢酸アンモニウム（pH 7.0）により抽出し（日本土壌協会，2001），抽出された塩基濃度を ICP-OES（Agilent 5100，Agilent Technologies，Santa Clara，CA）で測定した。可給態リン酸（トルオーグリン酸）は、土壌：抽出液（0.001 mol L⁻¹ 硫酸） = 1:200 による Truog 法により測定した（日本土壌協会，2001）。可給態窒素は保温静置法（培養条件：30°C，4 週間，湛水条件）により培養前後のアンモニア態窒素をインドフェノール法によって測定し、培養後におけるアンモニア態窒素増加量を可給態窒素とした（日本土壌協会，2001）。可給態ケイ酸は、リン酸緩衝液抽出法（pH 6.2，40°C，24 h）により測

定した（日本土壌協会，2001）．全窒素および全炭素は乾式燃焼法により NC アナライザー（Sumigraph NC-22F，住化分析センター，大阪）で測定した（日本土壌協会，2001）．可溶性鉄・アルミニウム・ケイ素の分析は選択溶解法により次のように行った．風乾細土を微粉碎して 0.5 mm の篩を通した風乾細微土を供試し，ジチオナイト-クエン酸-重炭酸還元溶解法（DCB 抽出：Dithionite-Citrate-Bicarbonate，吉永ら，1983），または，ジチオナイト-クエン酸還元溶解法（DC 抽出：日本土壌協会，2001），0.2 mol L⁻¹ 酸性シュウ酸塩溶液（pH 3.0）抽出法（日本土壌協会，2001），および 0.1 mol L⁻¹ ピロリン酸ナトリウム溶液（pH 10.0）抽出法（土壌環境分析法編集委員会，1997）により抽出された元素を ICP-OES（Agilent 5100）で定量した．ち密度は土壌硬度計（DIK-5553，大起理化工業株式会社，鴻巣市）により測定した．飽和透水係数は，容積 100 cm³ の試料円筒（DIK-1801，大起理化工業株式会社）を用いて不攪乱試料を採取し，変水位法により測定した（日本土壌協会，2001）．

2.3 三重県北中部の伊勢平野に分布する水田土壌の特性と分類

2.3.1 調査地点

三重県の北中部（伊勢平野）に位置する4カ所（ペドンM01～M04）の水田を対象に調査を行った。調査地点の位置および地理情報をFigure 1-1およびTable 1-1に、調査地点の景観ならびに土壌断面はPhoto. 1-1に示した。ペドンM01は木曽三川といわれ濃尾平野から伊勢湾に至る揖斐川、長良川および木曽川の河口域に位置し、長良川と木曽川に挟まれた三角州の輪中堤内にある。ペドンM02は、鈴鹿山脈より東方に流れ伊勢湾に注ぐ鈴鹿川の三角州・海岸平野地帯にある。調査地点のある水田地帯は、海拔5m以下の地域であり、北辺に鈴鹿川があり、西および南西に向かって海拔高度が高くなっており、南辺にかつての鈴鹿川本流であった金沢川が流れている。鈴鹿川が現在の位置に定まる以前に、その流路が度々変化した地帯である。ペドンM03は、他の3地点より西側に位置し、やや内陸部に位置する。津市の中心部を西から東へ流れる安濃川とその支流である穴倉川の合流地にあり、北に安濃川、南に穴倉川がある海拔10 m程度の水田地帯にある。ペドンM04は、中央構造線に沿って西から東に流れ伊勢湾に注ぐ櫛田川の河口部東岸の水田地帯にある。河口部から上流方向に向かって4 kmほど南下した地域にあり、海岸線付近の三角州・海岸平野より内陸側の氾濫平野地帯にある。土壌断面調査は、ペドンM01が2019年9月17日、ペドンM02が2019年9月12日、ペドンM03が2020年8月13日、ペドンM04が2020年8月26日に実施した。

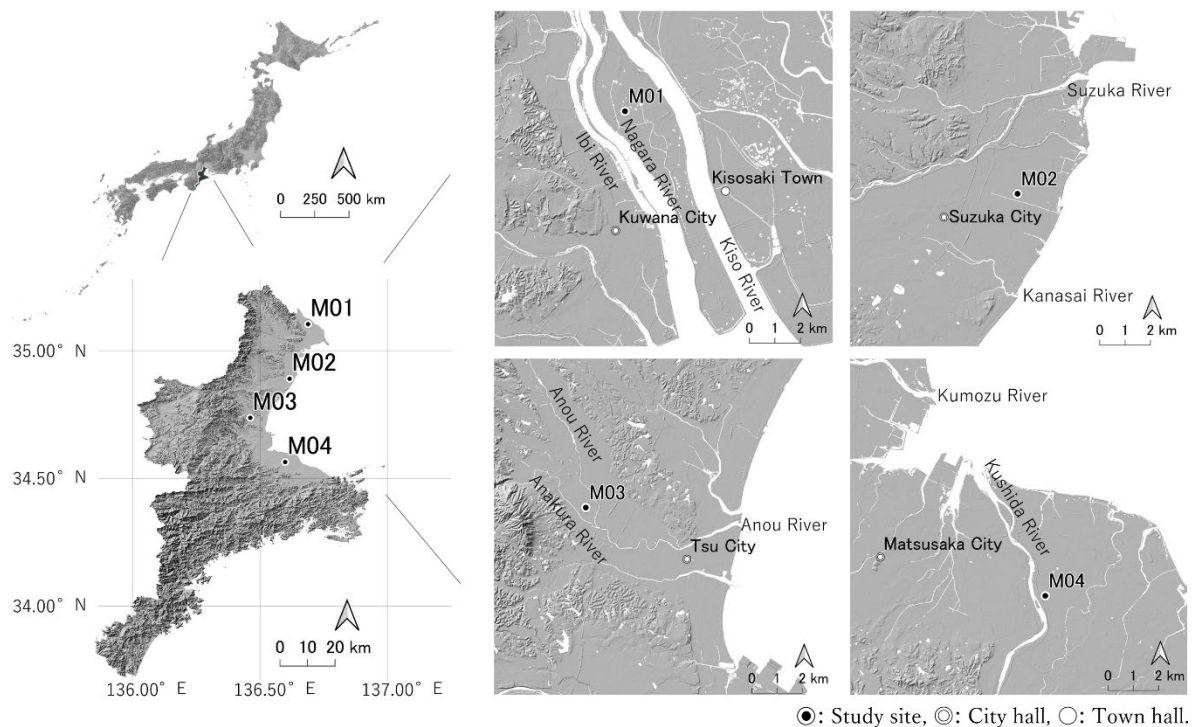


Figure 1-1. Location of four study sites.

The maps of Japan and Mie prefecture were prepared from 2020 version of shadow relief map, and four detailed location maps were prepared from 2021 version of digital elevation model (5 m mesh) by referring the Geospatial Information Authority of Japan (GSI, 2021). (Mizutani *et al.*, 2022)

Table 1-1. Geographical feature information of study sites.

Profile code	Land form	Latitude	Longitude	Altitude(m)	Neighboring river
M01	Delta/Flat	35° 6' 15.0" N	136° 41' 17.8" E	-1.4	Ibi, Nagara, Kiso
M02	Flood plain/Flat	34° 53' 25.4" N	136° 36' 57.4" E	3.3	Suzuka
M03	Flood plain/Flat	34° 44' 13.9" N	136° 7' 42.9" E	11.0	Anou, Anakura
M04	Flood plain/Flat	34° 33' 49.9" N	136° 35' 55.0" E	5.9	Kushida

(Mizutani *et al.*, 2022)

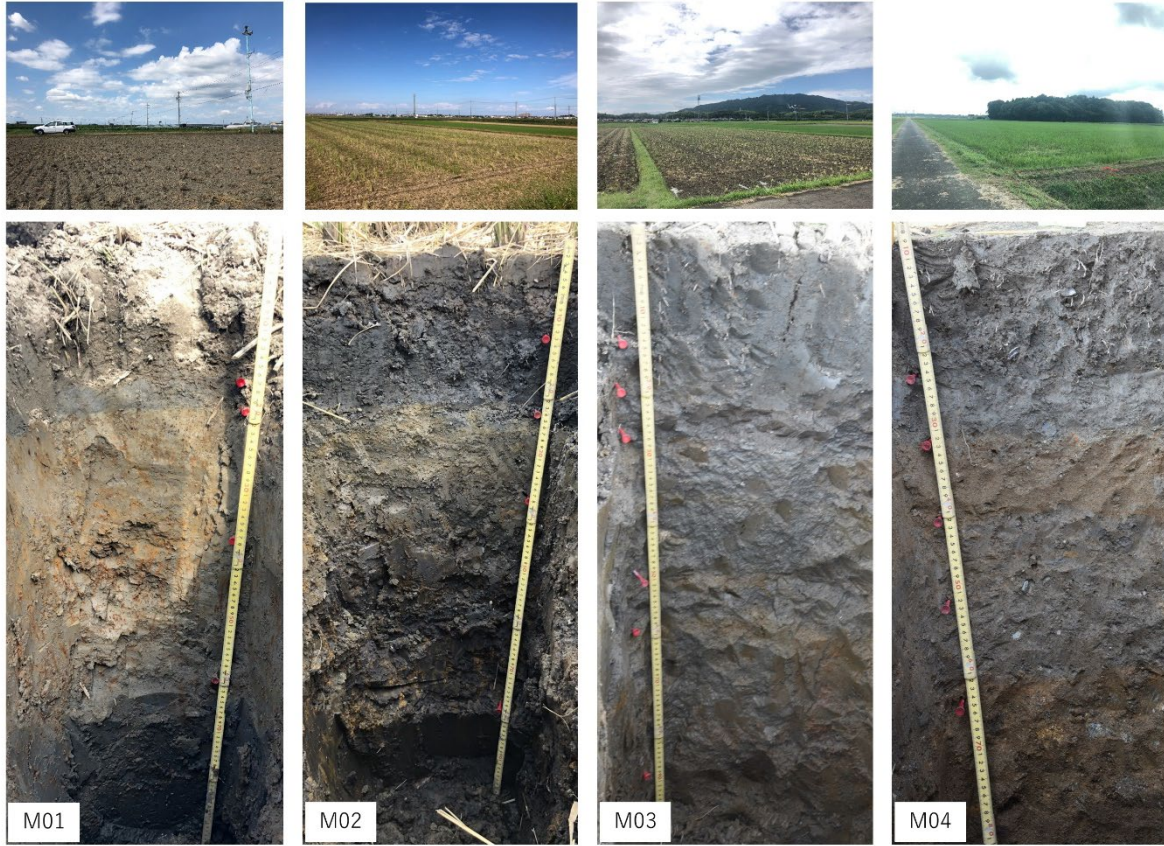


Photo. 1-1. Photographs of study soil profile. (Mizutani *et al.*, 2022)

2.3.2 結果と分類

2.3.2.1 土壌断面形態，物理性，化学性

各ペドンの土壌断面記載，粒径組成，および物理性を Table 1-2a, 1-2b, 1-2c に，化学性を Table 1-3a, 1-3b, 1-3c に示した．

Table 1-2(a). Horizon boundary, Structure, Consistence and Root distribution in Soil profile.

Profile code	Horizon	Depth (cm)	Horizon boundary	Structure ¹⁾	Consistence				Suaturated Hydraulic Conductivity (cm/sec)	Root
					Stickiness	Plasticity	Bulk density	Compactness (mm)		
M01	Apgir	0-14	Smooth Clear	Crumb	Slightly sticky	Slightly plastic	1.02	10	2.9×10^{-2}	Very fine·Fine /Common
	Agir	14-20		SAB/w	Slightly sticky	Plastic	1.47	23	3.7×10^{-4}	Very fine·Fine /Few
	2Bgirmn	20-38	Wavy Gradual	SAB/w	Slightly sticky	Plastic	1.56	22	1.9×10^{-4}	Very fine·Fine /Very few
	2Bgir	38-60		SAB/w	Sticky	Very plastic	1.43	18	1.3×10^{-3}	Non
	3Go	60-100+	Wavy Diffuse	Massive	Slightly sticky	Plastic	1.31	11	5.5×10^{-4}	Non
M02	Apgir	0-13	Smooth Clear	Crumb	Slightly sticky	Very plastic	1.22	9	1.5×10^{-3}	Very fine·Fine /Common
	Agir	13-24		SAB/w	Slightly sticky	Very plastic	1.25	15	1.1×10^{-3}	Very fine·Fine /Few
	Bgirmn	24-39	Wavy Gradual	SAB/w	Slightly sticky	Plastic	1.56	19	2.2×10^{-6}	Very fine·Fine /Very few
	2Cgir1	39-80		Massive	Slightly sticky	Very plastic	1.03	12	3.8×10^{-4}	Non
	2Cgir2	80-98	Wavy Gradual	Massive	Slightly sticky	Very plastic	—	9	—	Non
			Smooth Clear							
	3A	98-110 +		Massive	Slightly sticky	Very plastic	—	8	—	Non
M03	Apgir	0-14	Smooth Clear	SAB/w	Slightly sticky	Very plastic	1.09	18	4.2×10^{-3}	Very fine·Fine /Common
	Agir	14-20		SAB/w	Slightly sticky	Very plastic	1.24	22	2.1×10^{-5}	Very fine·Fine /Common
	Bgirmn1	20-26/28	Wavy Clear	SAB/w	Slightly sticky	Plastic	1.30	24	4.9×10^{-6}	Very fine·Fine /Few
	Bgirmn2	26/28-49		SAB/w	Slightly sticky	Very plastic	1.41	23	1.4×10^{-4}	Very fine·Fine /Very few
	Bgir	49-59	Wavy Gradual	SAB/w	Slightly sticky	Very plastic	1.33	18	1.7×10^{-4}	Non
	Cgir1	59-80		SAB/w	Slightly sticky	Very plastic	1.19	18	4.7×10^{-4}	Non
	Cgir2	80-100+	Smooth Diffuse	Massive	Slightly sticky	Very plastic	1.11	18	2.9×10^{-3}	Non
M04	Apgir	0-15	Smooth Clear	Crumb	Slightly sticky	Plastic	1.24	16	1.8×10^{-4}	Very fine·Fine /Common
	Agir	15-23		SAB/w	Slightly sticky	Plastic	1.48	23	1.9×10^{-5}	Very fine·Fine /Few
	2Bgirmn	23-32	Smooth Clear	SAB/w	Non sticky	Slightly plastic	1.65	26	3.0×10^{-4}	Very fine·Fine /Very few
	3Bgirmn	32-43		SAB/w	Slightly sticky	Plastic	1.57	26	9.3×10^{-4}	Non
	3Bgirmn	43-57	Wavy Clear	SAB/w	Slightly sticky	Plastic	1.76	27	6.6×10^{-5}	Non
	3Cg	57-92		Single grain	Non sticky	Slightly plastic	—	22	—	Non
	3C	92+	Wavy Gradual							

¹⁾SAB: Subangular blocky, w:weak, vw:very weak
(Mizutani *et al.*, 2022)

Table 1-2(b). Soil color, Mottling·Concretion and Active reaction of Fe II in Soil profile.

Profile code	Horizon	Depth (cm)	Soil color (moist)	Mottling·Concretion				Active Fe II
				Fe		Mn		
M01	Apgir	0-14	10YR 4/2	Root-like Filmy	Faint /Few		Non	±
	Agir	14-20	2.5Y 4/1	Root-like Filmy	Faint /Few		Non	+++
	2Bgirmn	20-38	2.5Y 4/3	Root-like Filmy	Distinct /Few	Speckled Threadlike	Distinct /Common	—
	2Bgir	38-60	2.5Y 5/2	Tubular	Prominent /Many		Non	—
	3Go	60-100+	5Y 4/1	Tubular	Prominent /Many		Non	+++
M02	Apgir	0-13	2.5Y 4/2	Root-like Filmy	Prominent /Common		Non	—
	Agir	13-24	2.5Y 3/1	Filmy	Distinct /Few		Non	+++
	Bgirmn	24-39	2.5Y 4/2	Irregular	Distinct /Many	Speckled	Distinct /Few	—
	2Cgir1	39-80	2.5Y 3/1	Filmy Tublar	Distinct /Common		Non	—
	2Cgir2	80-98	2.5Y 3/1	Filmy Tublar	Distinct /Few		Non	—
	3A	98-110 +	10YR 1.7/1		Non		Non	—
M03	Apgir	0-14	5Y 3/1	Root-like Filmy	Faint /Few		Non	—
	Agir	14-20	5Y 4/1	Root-like Filmy	Faint /Few		Non	—
	Bgirmn1	20-26/28	2.5Y 4/2	Root-like Filmy	Faint /Few	Speckled	Distinct /Few	—
	Bgirmn2	26/28-49	2.5Y 5/3	Irregular	Distinct /Few	Speckled	Distinct /Few	—
	Bgir	49-59	5Y 4/1	Irregular	Faint /Very Few		Non	—
	Cgir1	59-80	2.5Y 4/2	Filmy Tublar	Distinct /Common		Non	—
	Cgir2	80-100+	2.5Y 4/2	Filmy Tublar	Distinct /Few		Non	—
M04	Apgir	0-15	2.5Y 4/2	Filmy	Faint /Few		Non	—
	Agir	15-23	2.5Y 5/2	Filmy	Faint /Few		Non	—
	2Bgirmn	23-32	7.5YR 4/4 (2.5Y	Filmy	Faint /Few	Speckled	Distinct /Common	—
	3Bgirmn1	32-43	2.5Y 5/3	Filmy	Faint /Few	Speckled	Distinct /Common	—
	3Bgirmn2	43-57	2.5Y 4/2	Irregular	Faint /Few	Speckled	Distinct /Common	—
	3Cg	57-92	2.5Y 5/4		Non	Speckled	Distinct /Common	—
	3C	92+						

(Mizutani *et al.*, 2022)

Table 1-2(c). Particle size distribution and Texture in Soil profile.

Profile code	Horizon	Depth (cm)	Particle size distribution				Texture ³ (WRB) ⁴⁾	
			C. sand ¹⁾	F. sand ²⁾	Silt	Clay	Texture ³	
				(%)				
M01	Apgir	0-14	20.2	41.6	22.8	15.4	CL	SL
	Agir	14-20	18.0	42.3	24.8	14.9	L	SL
	2Bgirmn	20-38	5.7	41.0	30.9	22.4	CL	L
	2Bgir	38-60	1.9	34.3	37.7	26.1	LiC	L
	3Go	60-100+	2.1	58.1	24.2	15.6	CL	SL
M02	Apgir	0-13	34.6	27.9	21.8	15.8	CL	SL
	Agir	13-24	30.9	28.8	22.9	17.4	CL	SL
	Bgirmn	24-39	36.3	26.4	21.2	16.1	CL	SL
	2Cgir1	39-80	13.1	19.6	36.5	30.7	LiC	CL
	2Cgir2	80-98	0.5	5.2	47.8	46.6	HC	SiC
	3A	98-110 +	3.1	10.8	49.7	36.5	SiC	SiCL
M03	Apgir	0-14	14.8	39.4	27.2	18.6	CL	SL
	Agir	14-20	13.8	39.1	28.3	18.7	CL	SL
	Bgirmn1	20-26/28	15.3	38.7	29.2	16.7	CL	SL
	Bgirmn2	26/28-49	11.1	39.8	30.9	18.2	CL	L
	Bgir	49-59	7.8	36.6	30.6	25.0	LiC	L
	Cgir1	59-80	2.9	35.8	34.1	27.2	LiC	L
	Cgir2	80-100+	0.7	34.9	37.1	27.4	LiC	L
M04	Apgir	0-15	24.5	33.4	25.6	16.5	CL	SL
	Agir	15-23	27.5	34.3	23.3	14.9	L	SL
	2Bgirmn	23-32	56.3	31.2	4.3	8.2	LS	LS
	3Bgirmn1	32-43	33.7	32.3	21.2	12.8	SL	SL
	3Bgirmn2	43-57	45.1	22.0	20.2	12.7	CoSL	SL
	3Cg	57-92	45.3	38.9	9.7	6.1	CoSL	LS
	3C	92+						

¹⁾Coarse sand. ²⁾Fine sand.

³⁾HC:Heavy Clay LiC : Light Clay SiC : Silty Clay SiCL:Silty Clay Loam CL : Clay Loam
L:Loam LS:Loamy Sand SL:Sandy Loam

⁴⁾Classified based on WRB (IUSS Working Group WRB 2015), assuming the particle size dsitribution does not change when the boundary between silt and sand of 63 μ m is applied.
(Mizutani *et al.*, 2022)

Table 1-3(a). pH, y1, EC and Available component (oven-dried basis).

Profile code	Horizon	Depth (cm)	pH		y1 ¹⁾	EC ²⁾ (1:5) (dS m ⁻¹)	Available component		
			H ₂ O	KCl			Truog	N ³⁾	SiO ₂
							P ₂ O ₅		
M01	Apgir	0-14	5.79	3.95	1.55	0.04	157	119.8	171
	Agir	14-20	5.93	4.51	0.93	0.04	152	97.0	154
	2Bgirmn	20-38	7.06	5.16	0.16	0.03	81	9.5	209
	2Bgir	38-60	6.83	4.81	0.62	0.03	102	5.2	299
	3Go	60-100+	5.61	4.14	2.33	0.05	114	10.7	150
M02	Apgir	0-13	5.61	4.19	1.24	0.07	167	118.8	108
	Agir	13-24	6.05	5.09	0.62	0.08	197	103.6	126
	Bgirmn	24-39	7.01	5.72	0.16	0.05	51	14.8	157
	2Cgir1	39-80	6.65	5.53	0.31	0.10	28	18.2	260
	2Cgir2	80-98	5.88	4.66	0.62	0.13	31	0.4	262
	3A	98-110 +	4.92	4.06	2.18	0.40	30	95.6	294
M03	Apgir	0-14	6.18	5.37	0.69	0.08	307	115.8	217
	Agir	14-20	6.93	6.07	0.45	0.07	382	97.5	289
	Bgirmn1	20-26/28	7.08	6.01	0.37	0.06	349	44.6	263
	Bgirmn2	26/28-49	7.27	5.77	0.29	0.06	237	2.9	344
	Bgir	49-59	7.15	5.89	0.29	0.07	139	2.0	347
	Cgir1	59-80	7.14	6.07	0.37	0.08	196	5.2	396
	Cgir2	80-100+	7.10	5.62	0.45	0.07	169	0.0	462
M04	Apgir	0-15	5.96	5.22	0.57	0.07	395	130.8	106
	Agir	15-23	6.79	6.06	0.41	0.05	410	62.1	133
	2Bgirmn	23-32	7.06	6.08	0.24	0.03	130	3.4	87
	3Bgirmn1	32-43	7.06	6.10	0.33	0.05	230	6.2	177
	3Bgirmn2	43-57	6.80	6.12	0.16	0.14	193	3.3	157
	3Cg	57-92	7.21	5.18	0.00	0.03	312	0.0	187

¹⁾y1 : exchangeable acidity²⁾EC:electric conductivity³⁾Mineralized N during 4 weeks of incubation under reduced condition in a incubator at 30° C.
(Mizutani *et al.*, 2022)

Table 1-3(b). CEC, Exchangeable cation, Base saturation, PAC, Total carbon and Total nitroten
(oven-dried basis).

Profile code	Horizon	Depth	CEC ⁽⁴⁾	Exchangeable cations			Base saturation ⁽⁵⁾	PAC ⁽⁶⁾	T-C ⁽⁷⁾	T-N ⁽⁷⁾
				Ca	Mg	K				
				(cmol _c kg ⁻¹)						
		(cm)					(%)	(mg P ₂ O ₅ g ⁻¹)	(g kg ⁻¹)	
M01	Apgir	0-14	8.6	3.7	0.6	0.3	53.1	3.94	11.6	1.0
	Agir	14-20	8.6	4.1	0.7	0.2	57.8	3.95	10.4	0.9
	2Bgirmn	20-38	9.7	7.3	1.7	0.2	94.9	4.63	3.6	0.4
	2Bgir	38-60	11.5	7.1	3.3	0.2	92.9	5.74	3.5	0.4
	3Go	60-100+	8.1	3.0	1.9	0.2	62.8	3.06	5.4	0.4
M02	Apgir	0-13	11.2	5.7	1.3	0.2	64.8	4.76	16.8	1.7
	Agir	13-24	10.9	6.6	1.7	0.3	78.6	5.38	16.2	1.6
	Bgirmn	24-39	9.4	7.0	1.6	0.2	93.5	4.42	6.0	0.6
	2Cgir1	39-80	18.2	13.1	2.9	0.2	88.8	8.82	13.9	1.0
	2Cgir2	80-98	32.0	18.0	6.4	0.3	77.2	10.67	36.3	2.1
	3A	98-110+	45.5	18.2	7.1	0.2	56.3	12.41	119.7	5.2
M03	Apgir	0-14	16.4	11.7	1.8	0.5	84.8	6.81	18.8	1.8
	Agir	14-20	16.3	13.7	2.0	0.4	99.0	7.03	16.8	1.6
	Bgirmn1	20-26/28	15.4	13.2	1.7	0.3	98.6	6.36	11.9	1.3
	Bgirmn2	26/28-49	14.0	11.3	1.8	0.3	95.5	6.52	5.1	0.5
	Bgir	49-59	14.0	10.8	2.0	0.2	93.2	6.42	5.5	0.6
	Cgir1	59-80	15.8	11.9	2.5	0.2	93.1	7.54	5.9	0.6
	Cgir2	80-100+	19.4	14.0	3.3	0.3	90.7	8.63	5.9	0.6
M04	Apgir	0-15	9.6	5.3	1.0	0.3	70.2	3.32	16.2	1.6
	Agir	15-23	8.3	6.0	1.1	0.4	90.6	3.27	10.6	1.1
	2Bgirmn	23-32	4.1	2.8	0.6	0.2	87.5	1.65	1.8	0.2
	3Bgirmn1	32-43	6.0	4.8	0.8	0.2	96.7	2.81	4.2	0.5
	3Bgirmn2	43-57	5.8	4.7	0.7	0.4	101	2.88	4.9	0.6
	3Cg	57-92	7.4	10.1	1.5	0.1	158	4.51	0.2	0.0

⁴⁾CEC : cation exchangeable capacity

⁵⁾Base saturation : exchangeable(Ca + Mg + K)/CEC

⁶⁾PAC : phosphate absorption coefficient

⁷⁾T-C : total carbon;T-N : total nitrogen

(Mizutani *et al.*, 2022)

Table 1-3(c).Iron, aluminum, and silicon dissolved by the selective dissolution method
(oven-dried basis).

Profile code	Horizon	Depth (cm)	Selective dissolution ⁸⁾						
			Fed	Ald	Feo	Alo	Sio	Fep	Alp
			(g kg ⁻¹)		(g kg ⁻¹)			(g kg ⁻¹)	
M01	Apgir	0-14	5.7	0.9	5.1	1.7	0.5	2.7	0.6
	Agir	14-20	6.1	0.9	5.0	1.7	0.5	2.5	0.6
	2Bgirmn	20-38	9.5	0.9	6.8	1.8	0.6	0.6	0.4
	2Bgir	38-60	13.4	0.8	12.9	1.8	1.1	0.9	0.4
	3Go	60-100+	4.6	0.6	4.3	1.3	0.5	1.7	0.5
M02	Apgir	0-13	7.5	1.0	6.8	1.8	0.4	3.3	0.6
	Agir	13-24	6.9	0.9	6.4	1.7	0.4	3.2	0.7
	Bgirmn	24-39	13.4	1.5	4.3	1.9	0.4	0.7	0.5
	2Cgir1	39-80	29.0	3.2	9.4	3.5	0.6	2.1	1.2
	2Cgir2	80-98	13.6	1.4	14.4	3.2	0.9	1.7	1.5
	3A	98-110 +	14.2	2.1	17.9	4.3	1.2	2.9	2.1
M03	Apgir	0-14	10.8	1.2	5.0	1.6	0.3	3.6	0.8
	Agir	14-20	11.1	1.1	4.7	1.6	0.4	2.6	0.7
	Bgirmn1	20-26/28	11.2	0.8	5.5	1.3	0.4	1.5	0.5
	Bgirmn2	26/28-49	12.6	1.3	2.7	1.4	0.3	0.5	0.5
	Bgir	49-59	13.6	1.2	5.6	1.6	0.4	0.7	0.5
	Cgir1	59-80	22.0	2.1	6.3	1.9	0.5	0.9	0.6
	Cgir2	80-100+	28.1	2.8	6.1	1.9	0.6	1.1	0.7
M04	Apgir	0-15	7.1	1.5	2.5	1.7	0.5	2.3	1.0
	Agir	15-23	6.9	1.3	2.0	1.5	0.5	1.7	0.8
	2Bgirmn	23-32	6.8	0.8	1.9	0.8	0.3	0.5	0.3
	3Bgirmn1	32-43	9.2	1.3	2.8	1.3	0.5	0.9	0.5
	3Bgirmn2	43-57	9.6	1.3	3.1	1.4	0.6	1.1	0.6
	3Cg	57-92	5.5	0.4	1.0	0.6	0.7	0.1	0.1

⁸⁾Fed: Fe dissolved by DCB extraction, Ald: Al dissolved by DCB extraction,
Feo: Fe dissolved by oxalate extraction, Alo: Al dissolved by oxalate extraction, Sio: Si dissolved by oxalate
Fep, Fe dissolved by pyrophosphate extraction, Alp, Al dissolved by pyrophosphate extraction.
The DCB extracts free Fe oxides, such as goethite.
The oxalate extracts active Fe and Al (hydr)oxides, such as ferrihydrite and allophane.
The pyrophosphate extracts organically complexed Fe and Al.
(Mizutani *et al.*, 2022)

(1) ペドン M01 の断面

Aggir 層の土性は CL, Agir 層の土性は粘土含量が CL の下限値である 15%をわずかに下回ったため L となった. Aggir 層と Agir 層の土性区分は異なる結果となったが, 粒径組成はほぼ同等であり, 同質の堆積物に由来すると考えられた. 2Bgirmn 層の土性は Aggir 層と同じ CL となったが, 粘土含量は高く, 粒径組成は 2Bgir 層と類似していた. さらに下層の 3Go 層では粘土含量が低下しており A 層に近い値であったが, 粗砂の含有率が低いため A 層とは異質の堆積物と考えられた. 以上から, A 層, B 層, G 層は, それぞれ異なる堆積物を母材としていると考えられた.

土壌硬度は Agir 層, 2Bgirmn 層で最も高く, 20 mm を越えた. これらの層位では, 農業機械等の踏圧により硬度が高まったと考えられた. 山中式硬度計による土壌硬度 18 mm で畑作物の根の伸長阻害が顕著になる (久馬, 1997) とされており, いわゆる作土に相当し耕起層である Aggir 層の直下から 18 mm を超える硬い土層が存在していることが確認された. 植物根は, Aggir 層で「含む」程度であったが, Agir 層で「あり」, 2Bgirmn 層で「まれにあり」と大きく減少し, 2Bgir 層以下では確認されなかった. Agir 層および 2Bgirmn 層において植物根の量が減少するのは, 土層が固いことに加えて, Agir 層で α, α -ジピリジル反応が即時非常に鮮明だったことから, A 層において強い還元状態が発達していたことも一因であると考えられた.

Fe の斑紋は全層でみられ, Mn の斑紋は 2Bgirmn 層で確認された. Fe の糸根状斑, 膜状斑が 38 cm 深まであり, その下層から地下水湿性の指標 (日本ペドロロジー学会編, 1997) である管状斑が確認された. α, α -ジピリジル反応が即時鮮明であった 3Go 層では構造の発達がなく常に湿潤な状態にあると考えられた. 同じく地下水湿性の指標とされる膜状斑は 3 Go 層を除く全層で確認された. 一般的に膜状斑は水田作土にも形成されるが (日本ペドロロジー学会編, 1997), ペドン M01 でも水田として管理した影響により膜状斑が 3 Go 層を除く全層で形成されたと考えられた. $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ は

B 層で 6.8~7.1 と高く、これに対応して塩基飽和度は 93~95%と高かった。可給態リン酸および可給態窒素は A 層で最も高く、可給態ケイ酸は B 層で高かった。

Fed は A 層 (6 g kg^{-1}) よりも B 層 ($10\sim 13 \text{ g kg}^{-1}$) で高かった。水稻作付け期間中に A 層において還元状態が発達し、そこで還元された Fe が溶脱して B 層に集積した結果と考えられた。

(2) ペドン M02 の断面

表層から 39 cm 深までの Apgir, Agir, Bgirmn 層は粒径組成が類似しており、土性は CL となった。CEC も $9.4\sim 11.2 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ と近い値であり、39 cm 深までは同質の母材であると考えられた。Agir 層では α, α -ジピリジル反応が即時非常に鮮明であった。

2C 層は、構造が発達しておらず壁状であり、その上部に位置する A 層および B 層よりも粘土含量が高かった (A~B 層: 16~17%, C 層: 31~47%)。このことから、この層位の母材は上位の土層とは異なると考えた。

98 cm 以深では、土色が 10YR 1.7/1 と黒色で、かつ未分解の植物遺体を多量に含んでいたことから、表層履歴をもつ埋没土層であると判断し 3A 層とした。Fe の斑紋は A, B 層および 2C 層で見られ、Mn の斑紋は B 層で確認できた。3A 層では、斑紋・結核は見られなかった。

pH(H_2O)は、Apgir 層で 5.6 であり、Agir 層で 6.1 とやや高まり、B 層では 7.0 とペドン M02 中で最も高かった。以下、pH(H_2O)は下層ほど低下し、3A 層では 4.9 と強酸性を示した。可給態リン酸および可給態窒素は A 層で多く、可給態ケイ酸は下層ほど高い傾向を示した。C 層の CEC ($18.2\sim 32.0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) は A 層の CEC ($10.9\sim 11.2 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) よりも高かったが、これは C 層の高い粘土含量を反映したものと考えられた。3A 層の CEC は $45.5 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ と最も高く、これには高い粘土含量 (37%) とともに高い有機物含量 (全炭素 120 g kg^{-1}) が影響していると考えられた。3A 層

は、表層履歴をもつ層と考えられ、その上部にある 2C 層は、3A 層が形成されたあとに河川氾濫によって堆積したと推察された。

Fed は A 層 (8 g kg^{-1}) に対し B 層 (13 g kg^{-1})、C 層 ($14 \sim 29 \text{ g kg}^{-1}$) で高まっていた。ペドン M01 と同様、A 層から Fe が溶脱し、B 層および C 層に移動・集積したと考えられた。

(3) ペドン M03 の断面

表層から 49 cm 深までは、粒径組成が類似しており、土性は CL となった。CEC も $14 \sim 16 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ の範囲にあり、同質の母材によるものと考えられた。49 cm 以深では、粘土含有量が高まり、 $25 \sim 27\%$ となり、土性は LiC となった。下層ほど粘土含量がやや高まる傾向にあった。

各層位の CEC は $14 \sim 19 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ の範囲内にあり、80 cm 以深の Cgir2 のみ高い値を示した。pH(H_2O)は下層ほど高くなる傾向があり、Bgirmn1 層以下では pH(H_2O)が 7.0 を超えた ($7.1 \sim 7.3$)。可給態リン酸は Agir 層で最も高く、 382 mg kg^{-1} であった。可給態ケイ酸は下層ほど高くなる傾向を示した。

Fed は A 層の 11 g kg^{-1} に対し下層の C 層では 20 g kg^{-1} 以上に高まっていた。A 層から Fe が溶脱し、下層に移動している可能性がある。

(4) ペドン M04 の断面

Aggir と Agir 層は土色、粒径組成とも類似しており同質のものであった。

一方、B 層は 2Bgirmn 層でその上層の A 層および下層の 3B 層とは異なる様相を示した。すなわち、粘土含量が低く (8.2%) 土性は LS となった。土色 ($7.5\text{YR } 4/4$) も異なり、CEC も全層の中で最も低かった ($4.1 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)。このため、母材が異なると判断した。また、2Bgirmn 層は、上部

の A 層に近い土色(2.5Y 5/1)の土塊が混入していた。この場所は深耕などを実施していないことから、基盤整備の際に人為的にかく乱された影響によるものと考えられた。

さらに下層の 3B 層および 3C 層では、土性は SL あるいは CoSL となった。3B 層の粘土含量が 13%程度あり弱い亜角塊構造が見られた。92 cm 以深は、直径 10 cm 超の礫が密に堆積した礫土であった。この礫層は、河川の運搬・堆積作用によって形成されたと考えられた。

pH(H₂O)は下層ほど高くなる傾向があり、3Cg 層では 7.2 となった。可給態リン酸は A 層で高かったが、3Cg 層でも 312mg kg⁻¹と高い値となった。

可給態窒素は A 層で高く、B、C 層ではわずかであった。可給態ケイ酸は下層ほど高まる傾向を示した。

ペドン M04 は、いずれの層位も砂含量が 50%以上であり、これに伴い CEC も低かった (4.1～9.6 cmol_c kg⁻¹)。

2.3.2.2 作土およびすき床層の理化学性

地力増進法 (1984 年公布) により水田土壌の基本的な改善目標 (農林水産省, 2008 ; 以下, 改善目標) が示されている (Table 1-4)。4 ペドンについて、この改善目標に対する作土の理化学性について検証した。検証に当たり、Ap 層を作土とし、Ap 層直下の A 層をすき床層とした。

4 ペドンの作土の厚さは 13～15 cm で、ペドン M02, M04 が改善目標をやや下回った。すき床層のち密度 (山中式硬度) は 15～24 mm で、改善目標を満たしていた。

化学性では、作土における有効態りん酸は 160～400 mg kg⁻¹, 可給態窒素は 115～130 mg kg⁻¹ であり、いずれも改善目標を満たしていた。pH(H₂O)はペドン M03 が 6.2, M04 が 6.0 で改善目標を満たしたが、ペドン M01 は 5.8, ペドン M02 は 5.6 で、やや低い値であった。塩基飽和度では、

ペドン M01 が 53%で最も低く、ペドン M02 も 65%で改善目標を下回った。一方、ペドン M03 は 85%、M04 は 70%で、改善目標を満たした。交換性塩基の組成に関する改善目標は、当量比で示されている。そこで、交換性カルシウム (exCa) の飽和度を 70 とした場合と、交換性マグネシウム (exMg) の飽和度を 20 にした場合について、交換性塩基間の当量比を Table 1-5 に示した。塩基飽和度において、exCa が 70 に対し、exMg は 11~16 であり、4 ペドンとも改善目標を下回る比率であった。さらに、exK では 3~6 であり、改善目標を満たしたが、M02-M04 は当量比で 3~4 であり、exCa に対して低い値であった。exMg の飽和度を 20 とした場合の exK の当量比は、4~11 であり、改善目標を満たした。

Table 1-4. Basic Improvement Targets for Paddy Soils¹⁾

Soil Classification	Clay Lowland soils, Clay Upland soils, Yellow soils, Brown Lowland soils, Gley Lowland soils, Gley Upland soils, Brown Forest soils	Peat soils, Muck soils, Gleyed Andsols, Wet Andsols, Andsols,
Depth of Plow Layer	> 15 cm	
Compactness of Plough pan	14 mm — 24 mm by Yamanaka method.	
pH(H ₂ O)	6.0 — 6.5 (6.0 — 8.0 for Calcareous soils)	
CEC	> 12 cmol _c kg ⁻¹ (> 8 cmol _c kg ⁻¹ for coarse-medium-textured)	> 15 cmol _c kg ⁻¹
Base Saturation	70 — 90%	60 — 90%
Base Balance	Ca : Mg : K = (65 — 75) : (20 — 25) : (2 — 10)	
Available Phosphorus	> 100 mg P ₂ O ₅ kg ⁻¹	
Available Nitrogen	80 — 200 mg N kg ⁻¹	

¹⁾Improvement targets for paddy fields are based on the Soil Fertility Enhancement Act (農林水産省 2008).
(Mizutani *et al.*, 2022)

Table 1-5. Base balance

Profile Code	Horizon	Depth (cm)	Relative Base saturation					
			Relative to Ca saturation (when Ca saturation was 70)			Relative to Mg saturation (when Mg saturation was 20)		
			exCa	exMg	exK	exCa	exMg	exK
M01	Apgir	0-14	70	11	6	132	20	11
M02	Apgir	0-13	70	16	3	90	20	4
M03	Apgir	0-14	70	11	3	133	20	5
M04	Apgir	0-15	70	14	4	102	20	6

(Mizutani *et al.*, 2022)

2.3.2.3 土壌分類

日本土壌分類体系（日本ペドロジー学会第五次土壌分類・命名委員会，2017；以下，日本土壌分類），包括的土壌分類第1次試案（小原ら，2011；以下，包括1次試案），およびWorld reference base for soil resources 2014（IUSS Working Group WRB, 2015；以下 WRB 2014）により，各土壌断面について土壌分類を行った．上記の土壌分類体系に基づいた特徴層位，識別特徴，識別物質，および地質・地形的特徴をTable 1-6に示した．土壌分類結果をTable 1-7に示した．

(1) 特徴層位

水田表層は，作土層のうち漂白化されていないもので，落水後の黄褐色または赤褐色の斑紋が2%以上，Fedが0.4%以上，厚さ7.5 cm以上のものである（日本土壌分類，包括1次試案）．作土層の明確な定義はないが，Ap層を作土層として判断を行った．4断面ともAp層は水田表層の条件を満たした．WRB 2014におけるAnthraquic horizonは水田におけるsurface horizon(表層層位)であり，puddled layer（代かき層）とplough pan（耕盤層）によって構成される．代かき層としての条件は7.5YRまたはそれより色相が黄色（色相GY, B, BGを含む）で明度が4以下，彩度が2以下のものとされており，4断面とも条件を満たした．しかし，耕盤層におけるplaty structureまたはmassive structureが25%以上の条件を満たさなかった．このため，4断面ともAnthraquic horizonを特徴層位として持たないと判断した．WRB 2014において水田に関連する特徴層位にHydragric horizonがあるが，上位層にAnthraquic horizonを持つことが条件となっているため，4断面とも該当しなかった．

ペドンM01とペドンM02は，Agir層において α, α -ジピリジル反応が即時非常に鮮明であった．こ

これらの層位は地下水面より浅い場所にあるため、水稻作付け時の灌漑水の影響によると考えられた。日本土壌分類および包括1次試案では、作土は対象とせず、下端が75 cmより浅く10 cm以上の厚さをもつグライ層で、灌漑水によって生成し落水後も維持されているものを水田逆グライ層としている。Ap層を作土として判断したうえで、ペドンM01は厚さが7 cmで要件を満たさず、ペドンM02は厚さ11 cmで要件を満たした。ペドンM01の60 cm以下は α, α -ジピリジル反応が即時非常に鮮明で下端が75 cm以深に及び10 cm以上の厚さをもつグライ層であり、地下水グライ層としての条件を満たした（日本土壌分類、包括1次試案）。

(2) 識別特徴

地下水湿性特徴は、年間のある時期、水で飽和され、グライ特徴を示さない、ペッド表面や孔隙面に酸化鉄の被膜があるものとされる（日本土壌分類、包括1次試案）。一方、地下水湿性の指標となる斑紋は、膜状、管状、不定形とされる（日本ペドロロジー学会編、1997）。しかし、水稻作付け後の土壌では表層でも膜状斑が見られることが多い。そのため、地下水湿性を示す斑紋の判断は、管状と不定形のみで行った。ペドンM01は2Bgir, 3Go層が、ペドンM02はBgirmn, 2Cgir1, 2Cgir2層が、ペドンM03はBgirmn2, Bgir, Cgir1, Cgir2層が、ペドンM04は2Bgirmn2層が地下水湿性特徴に該当した。

WRB 2014におけるGleyic propertiesの条件である露出部の5%以上の酸化的斑紋をもつ層は、ペドンM01では2Bgirおよび3Go層が、ペドンM02ではApgir, Bgirmn, 2Cgir1層が、ペドンM03ではCgir1層が該当し、ペドンM04では斑紋は確認されたが、5%未満でありGleyic propertiesの条件を満たさなかった。

(3) 識別物質

5万分の1 都道府県土地分類基本調査(桑名, 四日市, 津西部, 松阪)によると, 各調査地点の形成年代は完新世であり, ペドンM01およびM02は三角州および海岸平野, ペドンM03およびペドンM04は谷底平野・氾濫平野に分類されている. 4断面とも完新世の河成, 海成, 湖沼成の新しい未固結堆積物であり沖積堆積物としての条件(日本土壌分類, 包括1次試案)を満たしていた.

WRB 2014ではfluvic materialが同等のものとして該当した.

(4) 分類

4断面の土壌母材は全て沖積堆積物であると判断されるため, 日本土壌分類では沖積土大群, 包括1次試案では低地土大群に分類された. さらに, 4断面とも漂白化水田表層, 水田鉄集積層に相当する特徴層位を持たず, 表層から50 cm以内に地下水湿性特徴を示す層の上端が現れることから, 日本土壌分類では灰色沖積土群, 包括1次試案では灰色低地土群に分類された. 亜群の分類では, ペドン M01 は 3Go 層が地下水グライ層の条件を満たすため, 日本土壌分類ではグライ化灰色沖積土, 包括1次試案ではグライ化灰色低地土に相当した. ペドン M02 は, Agir 層が水田逆グライ層の特性を持つため, 日本土壌分類では表層グライ化灰色沖積土, 包括1次試案では表層グライ化灰色低地土に相当した. ペドン M03 およびペドン M04 は水田表層以外の特徴層位を持たず, 日本土壌分類では普通灰色沖積土, 包括1次試案でも普通灰色低地土に相当した. さらに包括1次試案における土性による統群の分類を行い, ペドン M01 は細粒質グライ化灰色低地土, ペドン M02 は細粒質表層グライ化灰色低地土, ペドン M03 は細粒質普通灰色低地土, ペドン M04 は粗粒質普通灰色低地土に分類された.

WRB 2014では, まず, 32種類の土壌で構成されるReference Soil Group (RSG) のいずれかに

キーアウトされる。4断面ともに、WRB 2014におけるDiagnostic horizonsは持たず、fluvic materialが25 cm以上の厚さをもち表層から始まっていることから、FluvisolsのRSGにキーアウトされた。次の分類カテゴリーであるPrincipal qualifiersは、ペドンM01, M02, M03は表層から100 cm+までfluvic materialの条件を満たすためPantofluvicが該当した。ペドンM04は、92 cm以下が礫層であり、土壌の厚さは100 cmに満たないが、その礫層も河川が運搬したと考えられることから、Pantofluvicに相当すると判断した。また、塩基飽和に関する特徴を意味するDystric/Eutricの判定を行った。Eutricの条件は、断面の半分以上において、交換性($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{Na}^+$)/交換性($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{Na}^+ + \text{Al}^{3+}$) > 50%であり、これに該当しなければDystricとなる。交換性Alの測定は行っていないため、y1により判断した。y1は交換性Hと交換性Alの含量を示すものであり、測定値が全て交換性Alによると仮定しても、上記の数値が50%以下となる断面はなかった。このため、4断面ともEutricが該当した。また、ペドンM01の3Go層は、 α, α -ジピリジル反応が即時非常に鮮明となるreducing conditionに相当することからGleyic properties の条件を満たし、厚さが25 cm以上で75 cm深より浅い位置に上端があることから、Gleyicの条件を満たした。次の分類カテゴリーであるSupplementary qualifiersでは、土性によるArenic/Clayic/Loamic/Silticの分類を判定した。それぞれ30 cm以上の厚さをもつことが条件となる。さらに、分類にあたっては深さ、分布を示すSubqualifiersを付して命名した。ペドンM01は表層から全層にわたってLoamic (SL, L) であるためPantoloamicとなった。ペドンM02は表層から80 cmまでがLoamic (SL,L) , 80—90 cmはClayic (SiC) , 98—100 cm+はLoamic (SiCL) であった。厚さ要件を満たすのは表層から80 cmのLoamicのみであるため、表層から始まり50 cm深以上に及ぶAnoloamicとなった。ペドンM03は表層から全層にわたってLoamic (SL, L) であるためPantoloamicとなった。ペドンM04は、0—23 cmがLoamic(SL), 23—32 cmがArenic(LS), 32—57 cmが

Loamic(SL), 57—92 cmがArenic(LS)であった。厚さ30 cm以上の要件を満たすのは57—92 cmの Arenic(LS)のみであり, Endoarenicとなった。

以上の結果から, WRB 2014による土壌分類は, ペドンM01はEutric Gleyic Pantofluvic Fluvisol (Pantoloamic), ペドンM02はEutric Pantofluvic Fluvisol (Anoloamic), ペドンM03はEutric Pantofluvic Fluvisol (Pantoloamic), ペドンM04はEutric Pantofluvic Fluvisol (Endoarenic)となった。

Table 1-6. Diagnostic horizons, diagnostic properties, diagnostic materials, formation age, and geomorphological land classification of soil investigated in the present study.

Profile code	Diagnostic horizons		Diagnostic properties		Diagnostic materials		Formation age	Geomorphological land classification
	特徴層位	WRB 2014 ³⁾	CSCSJ(2011) ¹⁾ and SCSJ(2017) ²⁾	識別特徴	CSCSJ(2011) ¹⁾ and SCSJ(2017) ²⁾	識別物質		
M01	水田表層(0 - 20 cm, Fed: 0.57%) 地下水グレイ層 (60 - 100 cm+)	N/A ⁶⁾	地下水湿性特徴 (38-60cm)	Gleyic properties (38-100cm+)	沖積堆積物	Fluvic material	Holocene 完新世	Delta・Coastal plain 三角州及び海岸平野
M02	水田表層(0 - 24 cm, Fed: 0.74%) 水田逆グレイ層 (13 - 24 cm)	N/A	地下水湿性特徴 (24-98cm)	Gleyic properties (24-80cm)	沖積堆積物	Fluvic material	Holocene 完新世	Delta・Coastal plain 三角州及び海岸平野
M03	水田表層(0 - 20 cm, Fed: 1.04%)	N/A	地下水湿性特徴 (26-100cm+)	Gleyic properties (59-100cm+)	沖積堆積物	Fluvic material	Holocene 完新世	Valley plain・Flood plain 谷底平野・氾濫平野
M04	水田表層(0 - 23 cm, Fed: 0.70%)	N/A	地下水湿性特徴 (43-57cm)	—	沖積堆積物	Fluvic material	Holocene 完新世	Valley plain・Flood plain 谷底平野・氾濫平野

¹⁾Comprehensive Soil Classification System of Japan (2011) (小原ら, 2011).

²⁾Soil Classification System of Japan (2017) (日本ペドロロジー学会第五次土壌分類・命名委員会, 2017).

³⁾World reference base for soil resources (2014) (IUSS Working Group WRB, 2015).

⁴⁾Referred from Seamless Digital Geological Map of Japan (1:200,000) (産業技術総合研究所地質調査総合センター, 2020).

⁵⁾Referred from Fundamental Land Classification Survey (Geomorphology, 1:50,000) (経済企画庁総合開発局国土調査課, 1988, 1990, 1991) .

⁶⁾Not applicable

(Mizutani *et al.*, 2022)

Table 1-7. Soil classifications of studied soil profiles.

Profile code	CSCSJ(2011) ¹⁾ 包括的土壌分類第1次試案	SCSJ(2017) ²⁾ 日本土壌分類体系	WRB 2014 ³⁾
M01	Fine-textured Gleyed Gray Lowland soil 細粒質グライ化灰色低地土	Gleyic Gray Fluvic soil グライ化灰色沖積土	Eutric Gleyic Pantofluvic Fluvisol (Pantoloamic)
M02	Fine-textured Epi-gleyed Gray Lowland soil 細粒質表層グライ化灰色低地土	Epi-gleyed Gray Fluvic soil 表層グライ化灰色沖積土	Eutric Pantofluvic Fluvisol (Anoloamic)
M03	Fine-textured Haplic Gray Lowland soil 細粒質普通灰色低地土	Haplic Gray Fluvic soil 普通灰色沖積土	Eutric Pantofluvic Fluvisol (Pantoloamic)
M04	Fine-textured Haplic Gray Lowland soil 細粒質普通灰色低地土	Haplic Gray Fluvic soil 普通灰色沖積土	Eutric Pantofluvic Fluvisol (Endoarenic)

¹⁾Comprehensive Soil Classification System of Japan (2011) (小原ら, 2011.).

²⁾Soil Classification System of Japan (2017) (日本ペドロロジー学会第五次土壌分類・命名委員会, 2017).

³⁾World reference base for soil resources (2014) (IUSS Working Group WRB, 2015).

(Mizutani *et al.*, 2022)

2.3.3 考察

2.3.3.1 土壌管理

ペドン M01, M02 は Agir 層において α, α -ジピリジル反応が即時非常に鮮明であったが、ペドン M01 は厚さ要件を満たさず、ペドン M02 のみ水田逆グライ層となった。水田逆グライ層は、水稲耕作下で灌漑水によって生成し、落水後も維持され作土から下方へ発達しているグライ層（小原ら, 2011）とされる。また、三土（1974）は、このようなグライ層を懸垂型グライ層とし、その生成要因の一つとして不良な透水性を挙げている。水田逆グライ層は表層である Ap 層の下に生成し、通常の耕起深より深いため、田畑転換後もそのまま畑作に継承される。不良な透水性は、過湿による通気性不良を伴い、土壌中酸素濃度の低下を生じやすく、根の呼吸阻害を起こす（山崎, 1952）。このため、水田逆グライ層がもつ不良な透水性は、ムギ、ダイズの生育を阻害する懸念があるため注意を要する。

ダイズは、生育初期を中心に湿害を受けやすいが、乾燥によっても生育抑制を受けやすいため、土壌水分を適度に保つ必要がある（福井ら, 1951）。また、ダイズ連作転換畑において作付け回数が増加すると、グライ層が消失するとともに可給態窒素が減少し、ダイズ収量も低下することが報告されている（新良ら, 2010；住田ら, 2005；金子ら, 2019）。59 cm 以深で Gleyic properties が観察されるペドン M03 は、作土を適度な湿潤状態に保ちやすいと期待され、適切に表層排水を実施すればダイズの作付けに適していると考えられる。一方、ペドン M04 では 57 cm 以深で斑紋がなく土性も CoSL であることから、ペドン M03 とは対照的に畑作により水分含量が低下しやすく、畑地としての利用期間が長くなれば可給態窒素の低下が進行しやすい可能性がある。

作土における窒素、りん酸は、いずれも改良目標値を満たしていた。塩基飽和度では、ペドン M01, M02 は 70%未満で改善目標値を下回り、ペドン M04 も 70%であり低い値であった。また、pH(H₂O)

は 5.6~6.2 の範囲にあり、酸性化の傾向にあると考えられる。塩基バランスでは、exCa の飽和度を 70 としたときの exK は 3~6 であり、基準を満たしていた。exMg は 4 ペドンとも改善目標値を下回っていた。exMg の飽和度を 20 とした時の exK との比は 4~11 で改善目標を満たした。塩基バランスとして exCa が多い傾向にあり exMg が低い状態であった。pH(H₂O)が低い傾向にあることも考慮したうえで、土壌改良に注意を要するものと考えられる。

2.3.3.2 土壌分類

ペドン M03 および M04 はいずれもやや内陸部に位置しているが、B 層以下（下層）の土性は、ペドン M03 が CL, LiC, ペドン M04 が LS, SL, CoSL と異なった。また、ペドン M04 は 57 cm 以深に斑紋が無く、ペドン M03 とは水分環境に違いが見られた。土壌分類名は、日本土壌分類では土性に応じた分類が無く、ペドン M03 と M04 はいずれも普通灰色沖積土となった。一方、包括 1 次試案における統群名において、ペドン M03 は細粒質、ペドン M04 は粗粒質となった。また、WRB 2014 では、分類の第 2 レベル Supplementary qualifiers ならびに Subqualifiers において、ペドン M03 は Pantoloamic, ペドン M04 は Endoarenic となり、土性ならびにその分布深度の違いを反映した分類名となった。

2.3.4 要約

三重県北中部の水田を対象とした 4 ペドンは、いずれも河川周辺の沖積平野に位置し、日本土壌分類では灰色沖積土に、包括 1 次試案では灰色低地土に、WRB 2014 では Fluvisols に分類された。

近年、水田ではムギ、ダイズなど畑作を組み合わせた高度利用が広まっている。水田として安定した生産を行っていても、畑作には不向きな土壌も多く、事前に土壌の特性を知り、作付け計画や

対策を検討することが重要となる。こうした取り組みにおいて、土壌分類とそれに基づく土壌図は有益な情報となる。

ペドン M01, M02 で確認された強い還元を示す表層について、今後、畑作物への影響を明らかにするとともに、面的な分布を把握することが必要であろう。また、ペドン M03 と M04 はグライ層などの特徴層位をもたず日本土壌分類では同じ分類名となったが、下層の状態に違いが見られ、この違いは包括 1 次試案では統群レベルにおいて、WRB 2014 では Supplementary qualifiers ならびに Subqualifiers レベルにおいて表現された。

2.4 三重県西部の上野盆地に分布する水田土壌の特性と分類

2.4.1 調査地域の地理的概要

調査対象とした土壌断面（ペドン M11－M15）は、上野盆地内に位置する伊賀市および名張市にある（Figure 2-1）。上野盆地は、ほぼこの2市によって占められている。上野盆地は、断層運動によって生じた構造盆地であり（川辺ら 1996）、北は滋賀県、北西は京都府、南西は奈良県と接している。

盆地周縁は、北西を信楽高原、西を笠置山地、南西を中新世における大規模火砕流による室生火砕流堆積物からなる室生山地（西岡ら、1998）に接し、北東部は甲賀丘陵と鈴鹿山脈南端、東部から南東部にかけて布引山地に囲まれた地形となっている。なお、盆地内には小丘陵によって隔てられた複数の盆地内盆地が形成されているが、本報では一体的に上野盆地とした。

上野盆地は淀川水系の上流域に含まれる。主要な河川は、盆地北東部の馬場谷から阿山丘陵南端に沿って東から西に流れる柘植川、東側の布引山地にある長野峠付近を源流とし大山田地域を縦断する服部川、同じく布引山地の一部である青山高原付近を源流とする木津川、盆地の南方にある奈良県の高見山地より名張市内を蛇行しながら南西部から北西部に向かって流れる名張川の4河川である。木津川は上野盆地北部で柘植川および服部川と合流して西方に流れ、さらに京都府に入り名張川と合流する。合流後、木津川は西方に流れ淀川につながり、大阪湾に注いでいる。柘植川、服部川、木津川が合流した直下には岩倉峡という狭窄部がある。このため、水害のリスクが高く、上野盆地北部水田地帯の一部は、治水機能も兼ねた上野遊水地として整備されている（国土交通省木津川上流河川事務所、2023）。

耕地面積は、伊賀市で7,250 ha、うち田耕地面積6,180 ha、名張市で1,130 ha、うち田耕地面積

948 ha である（農林水産省，2022c）。両市をあわせて水稻栽培は 4,411 ha，麦類は 467 ha，ダイズは 293 ha 作付けされており，水稻栽培主体の営農が行われている（農林水産省，2022c）。

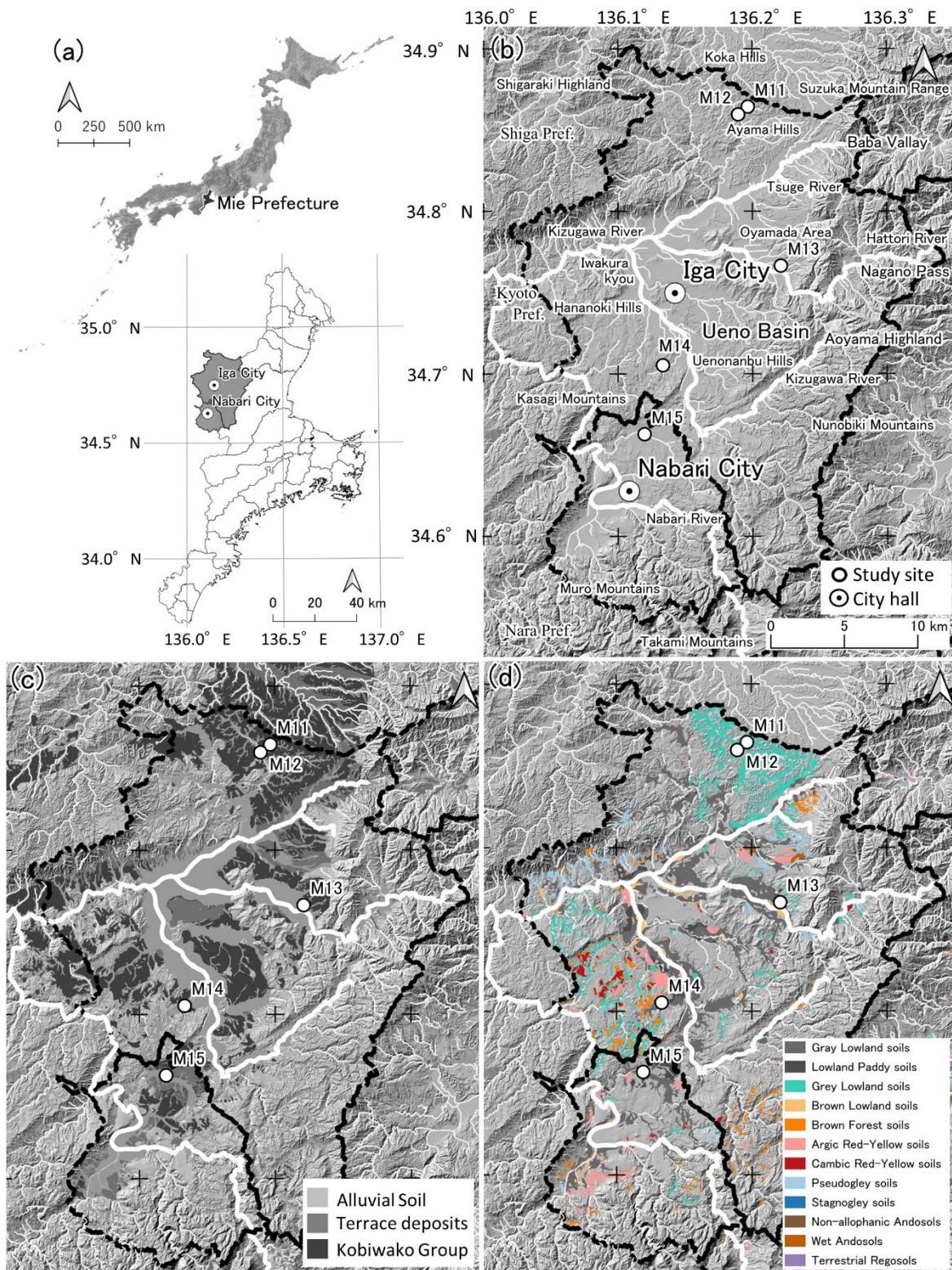


Figure 2-1. Locations of the 5 pedons (M11, M12, M13, M14, and M15) investigated in the present study. (a) locations of Iga and Nabari cities in Ueno Basin in Japan¹, (b) locations of 5 pedons on a map with geographical names², (c) locations of 5 pedons on a geological map³, (d) locations of 5 pedons on a soil map⁴.

¹Prepared from the Chiriin-tile provided by the Geospatial Information Authority of Japan (GSI, 2017). ^{2, 3,}

⁴Prepared from digital elevation model (5 m, 10 m mesh)(2016, 2017, 2019, 2020, 2022) by referring GSI.

³Prepared from geological map database by referring Geological Survey of Japan (GSJ, 1981, 1996, 1998,

2003). ⁴Prepared from digital soil classification map (NARO, access: 2023) which classified soils with Comprehensive Soil Classification System of Japan, First Approximation (Obara *et al.* 2011).

(Mizutani *et al.*, 2024)

2.4.2 調査地域の地質

当該地域には古琵琶湖層群が広く分布している。古琵琶湖は鮮新世に現在の上野盆地付近に発生し、その後、地殻変動によって移動し、現在の琵琶湖に至ったとされている(横山, 1968; Yokoyama, 1969; 川邊, 1981 など)。古琵琶湖層群の堆積物は、粘土、シルト、砂、礫の互層構造からなり、上野盆地の各地で露出している。その組成は場所や形成年代ごとに異なり、盆地の東方では粘土が主体である。この組成の違いは堆積時の環境の違いに起因する。粘土が主体の堆積物層は、きわめて緩やかな流水による運搬堆積によって発達したと考えられ、本層は湖底で堆積したと考えられている。400 万年前には現在の大山田地域付近に、300 万年前には大山田地域から阿山丘陵および甲賀丘陵にかけて湖が存在したと考えられている (Kawabe, 1989; 森, 吉田, 2014; 里口, 2015)。古琵琶湖層群は形成時期などによって細区分されており、上野盆地内では上野累層、伊賀累層、阿山累層が分布している (Kawabe, 1989; 川辺ら, 1996; 西岡ら, 1998; 中野ら, 2003)。

上野累層は古琵琶湖層群の最下層であり、粘土層を主体とし砂層と礫層を挟む(西岡ら, 1998)。名張市付近の丘陵地から花ノ木丘陵、大山田地域、阿山丘陵にみられる。ペドン M13 が位置する大山田地域にある段丘面の東辺部で露出する上野累層は粘土主体であり(川辺ら, 1996)、花ノ木丘陵では砂層や礫層を挟む (Kawabe, 1989; 西岡ら, 1998)。また、伊賀市南部のペドン M14 付近および名張市北部のペドン M15 付近では粗粒砂層とシルト・粘土層の互層から構成され室生火砕流堆積物を一部含んでいる(西岡ら, 1998)。伊賀累層は上野累層を覆い、砂礫層優勢の礫層・砂層・シルト層・粘土層からなる(川邊, 1981; Kawabe, 1989; 中野ら, 2003)。上野盆地内では、大山田地域から花ノ木丘陵にかけて分布している(川辺ら, 1996)。阿山累層は伊賀累層を整合に覆い、粘土を主体とする層(川邊, 1981)で、ペドン M11, M12 が位置する阿山丘陵と滋賀県側の甲賀丘陵に露出している。

なお、古琵琶湖層群における各層の名称は、5 万分の 1 都道府県土地分類調査表層地質図（三重県企画振興部政策調整課，1995）に従った。

2.4.3 調査地点

上野盆地内の 5 調査地点(ペドン M11～M15)の地理情報を Table 2-1 に、土壌断面写真を Photo. 2-1 に示した。

ペドン M11 は、上野盆地北東部・阿山丘陵の浅い谷（Shallow valley）に位置する。ペドン M12 も阿山丘陵にありペドン M11 と近接するが、柘植川支流によって形成された下位段丘（Lower terrace）に位置する。いずれも丘陵内にあり、水田地帯は柘植川に向かって緩やかに傾斜しているが、傾斜角は 1° 未満であった。ペドン M13 は、盆地東部の大山田地域にあり、服部川によって形成された下位段丘に位置している。ペドン M14 は、花ノ木丘陵の南方にあり、木津川の流域の谷底平野・氾濫平野（Valley plain・Flood plain）に位置する。ペドン M15 は、名張市北部にある名張川支流によって形成された下位段丘に位置する。5 ペドンとも古くから水田として利用されおり、ペドン M12, M13 は 1975 年前後に、ペドン M11, M14, M15 は 1980 年前後に圃場整備が実施され、現在の区画となっている。また、ペドン M13 のみイネームギーダイズの 2 年 3 作体系で田畑輪換が実施されており、他の 4 ペドンは継続して水稻単作の栽培が行われている。

土壌調査は、ペドン M11 が 2021 年 11 月 20 日、ペドン M12 が 2021 年 11 月 19 日、ペドン M13 が 2021 年 10 月 9 日、ペドン M14 が 2021 年 10 月 14 日、ペドン M15 が 2021 年 10 月 15 日に実施した。

Table 2-1. Geographical feature information of the study sites.

Profile code	Land form	Latitude	Longitude	Altitude(m)	Neighboring river
M11	Shallow valley/Flat	34° 51' 52.0" N	136° 11' 48.0" E	184	Tsuge
M12	Lower terrace/Flat	34° 51' 24.5" N	136° 11' 22.2" E	178	Tsuge
M13	Lower terrace/Flat	34° 45' 59.3" N	136° 13' 15.8" E	200	Hattori
M14	Valley plain・Flood plain/Flat	34° 42' 19.1" N	136° 7' 59.9" E	159	Kizugawa
M15	Lower terrace/Flat	34° 39' 46.5" N	136° 7' 10.4" E	200	Nabari

(Mizutani *et al.*, 2024)

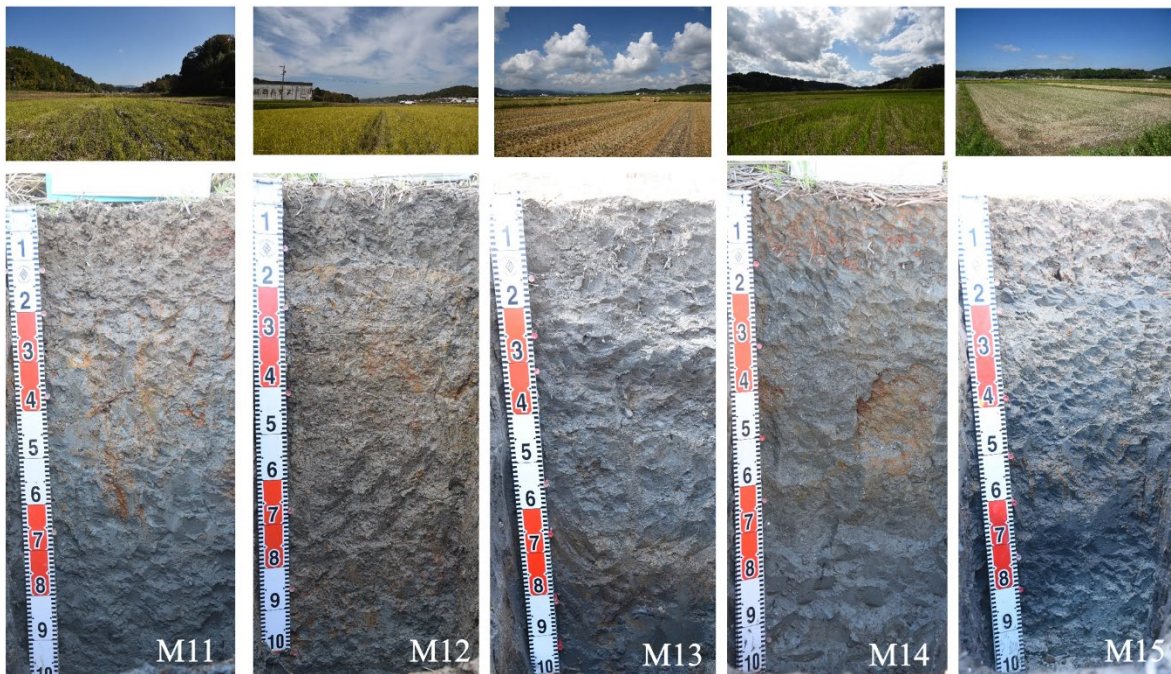


Photo. 2-1. Photographs study soil profile. (Mizutani *et al.*, 2024)

2.4.4 結果と分類

2.4.4.1 土壌断面形態, 物理性, 化学性

各ペドンの土壌断面記載, 粒径組成, および物理性を Table 2-2a, 2-2b, 2-2c に, 化学性を Table 2-3a, 2-3b, 2-3c に示した.

Table 2-2(a). Horizon, Structure, Consistence, Suaturated Hydraulic Conductivity and Root distribution in Soil profile.

Profile code	Horizon	Depth (cm)	Horizon boundary	Structure ¹⁾	Consistence				Suaturated Hydraulic Conductivity (cm/sec)	Root
					Stickiness	Plasticity	Bulk density	Compactness (mm)		
M11	Apgir	0-12	Smooth Clear	SAB/w	Sticky	Very plastic	0.92	13	9.6×10^{-3}	Very fine·Fine/Common
	Agir	12-21		SAB/w	Sticky	Very plastic	1.09	15	4.9×10^{-7}	Very fine·Fine/Very few
	Bgir1	21-33	Smooth Clear	SAB/w	Sticky	Very plastic	1.19	15	4.3×10^{-5}	Very fine·Fine/Very few
	Bgir2	33-65	Wavy Clear	SAB/vw	Sticky	Very plastic	1.13	14	6.7×10^{-4}	Non
	Gr	65-100+	Wavy Gradual	Massive	Sticky	Very plastic	0.91	11	7.3×10^{-5}	Non
M12	Apgir	0-13	Smooth Clear	SAB/w	Sticky	Very plastic	1.05	14	3.6×10^{-3}	Very fine·Fine/Common
	Agirmn	13-24		SAB/w	Sticky	Very plastic	1.24	17	7.5×10^{-5}	Very fine·Fine/Few
	Bgirmn	24-41	Smooth Clear	SAB/w	Sticky	Very plastic	1.09	15	3.9×10^{-6}	Very fine·Fine/Very few
	Cgirmn	41-68	Smooth Gradual	Massive	Sticky	Very plastic	1.02	14	4.7×10^{-4}	Very fine·Fine/Very few
	Cgir1	68-80	Smooth Gradual	Massive	Sticky	Very plastic	1.06	14	8.7×10^{-3}	Non
	Cgir2	80-100	Wavy Gradual	Massive	Sticky	Very plastic	1.12	13	2.5×10^{-3}	Non
	Gr	100-110+	Wavy Gradual	Massive	Sticky	Very plastic	0.97	10	3.3×10^{-3}	Non
M13	Apgir	0-15	Smooth Clear	SAB/w	Slightly sticky	Slightly plastic	1.17	16	1.0×10^{-5}	Very fine·Fine/Common
	Agirmn	15-25		SAB/w	Slightly sticky	Slightly plastic	1.37	25	2.3×10^{-4}	Very fine·Fine/Few
	Bgirmn	25-32/40	Smooth Clear	SAB/w	Slightly sticky	Slightly plastic	1.58	20	1.9×10^{-6}	Very fine·Fine/Very few
	Bgir1	32/40-55	Wavy Clear	SAB/w	Slightly sticky	Slightly plastic	1.49	18	2.8×10^{-4}	Non
	Bgir2	55-66	Smooth Clear	SAB/w	Slightly sticky	Slightly plastic	1.44	20	9.8×10^{-4}	Non
	Bgir3	66-75/82	Smooth Clear	SAB/w	Slightly sticky	Plastic	1.43	21	1.3×10^{-5}	Non
	Bgir4	82-92	Wavy Gradual	SAB/w	Slightly sticky	Plastic	1.47	16	7.3×10^{-3}	Non
	Go	92-100+	Wavy Gradual	Massive	Slightly sticky	Plastic	1.49	15	1.1×10^{-3}	Non
M14	Apgir	0-14	Smooth Clear	SAB/w	Slightly sticky	Very plastic	1.17	14	6.6×10^{-4}	Very fine·Fine/Common
	Agir	14-31		SAB/w	Slightly sticky	Very plastic	1.33	17	8.5×10^{-5}	Very fine·Fine/Few
	2Agir	31-50	Smooth Clear	SAB/w	Slightly sticky	Very plastic	1.10	17	5.4×10^{-4}	Very fine·Fine/Few
	2Bgir	50-64	Smooth Clear	SAB/w	Slightly sticky	Very plastic	1.25	18	7.7×10^{-6}	Non
	2Go	64-94	Smooth Clear	Massive	Slightly sticky	Very plastic	1.23	15	2.4×10^{-4}	Non
	2Gr	94-110+	Smooth Clear	Massive	Sticky	Very plastic	1.09	13	2.8×10^{-6}	Non
M15	Apgir	0-16	Smooth Clear	SAB/w	Slightly sticky	Very plastic	1.13	17	2.5×10^{-2}	Very fine·Fine/Common
	Agir	16-21		SAB/w	Slightly sticky	Very plastic	1.46	21	4.1×10^{-4}	Very fine·Fine/Few
	Bgirmn	21-39	Smooth Clear	SAB/w	Slightly sticky	Very plastic	1.44	18	1.2×10^{-4}	Very fine·Fine/Very few
	2Agir	39-51	Smooth Clear	SAB/w	Slightly sticky	Very plastic	1.30	15	1.7×10^{-4}	Non
	2Go	51-61	Smooth Clear	Massive	Slightly sticky	Very plastic	1.16	15	1.2×10^{-4}	Non
	3Go1	61-68/73	Smooth Clear	Massive	Slightly sticky	Very plastic	1.49	17	2.0×10^{-5}	Non
	3Go2	3/73-75/81	Wavy Clear	Massive	Slightly sticky	Very plastic	1.40	14	6.4×10^{-4}	Non
	4Gr	5/81-100+	Wavy Gradual	Massive	Slightly sticky	Very plastic	1.57	8	1.3×10^{-4}	Non

¹⁾SAB: Subangular blocky, w:weak, vw:very weak (Mizutani *et al.*, 2024)

Table 2-2(b). Soil color, Mottling•Concretion and Active reaction of Fe II in Soil profile.

Table 2. L(2): Soil color, Mottling, Concretion and Active Reaction of Fe II in Soil profile.								
Profile code	Horizon	Depth (cm)	Soil color (moist)		Mottling-Concretion			Active Fe II
					Fe	Mn		
M11	Apgir	0-12	7.5Y 5/1	Root-like Filmy	Prominent/Abundant		Non	+
	Agir	12-21	7.5Y 5/1	Tubular Filmy	Prominent/Many		Non	+
	Bgir1	21-33	10Y 5/1	Tubular Filmy	Prominent/Many		Non	+
	Bgir2	33-65	10Y 5/1	Tubular Filmy	Prominent/Common		Non	+++
	Gr	65-100+	10Y 5/1		Non		Non	+++
M12	Apgir	0-13	2.5Y 6/1	Root-like Filmy	Prominent/Common		Non	-
	Agirmn	13-24	2.5Y 6/1	Tubular Filmy	Prominent/Common	Tubular	Faint/Few	-
	Bgirmn	24-41	2.5Y 6/2	Tubular Filmy	Prominent/Abundant	Tubular Filmy	Distinct/Few	-
	Cgirmn	41-68	2.5Y 6/2	Tubular	Prominent/Many	Tubular	Faint/Few	-
	Cgir1	68-80	2.5Y 6/1	Tubular	Prominent/Common		Non	-
	Cgir2	80-100	7.5Y 6/1	Tubular	Prominent/Common		Non	+
	Gr	100-110+	5Y 5/1		Non		Non	+++
M13	Apgir	0-15	10YR 3/3	Root-like	Faint/Few		Non	-
	Agirmn	15-25	10YR 4/2	Root-like Filmy	Faint/Few	Speckled	Faint/Few	-
	Bgirmn	25-32/40	10YR 3/2	Tubular	Distinct/Common	Speckled	Faint/Few	-
	Bgir1	32/40-55	10YR 4/1	Tubular Filmy	Prominent/Common		Non	-
	Bgir2	55-66	2.5Y 4/1	Tubular Filmy	Prominent/Common		Non	-
	Bgir3	66-75/82	2.5Y 4/1	Tubular	Prominent/Many		Non	-
	Bgir4	82-92	2.5Y 3/1	Tubular Filmy	Prominent/Few		Non	+++
	Go	92-100+	2.5Y 3/1	Tubular	Prominent/Very few		Non	+++
M14	Apgir	0-14	7.5Y 4/1	Root-like Filmy	Prominent/Abundant		Non	+++
	Agir	14-31	7.5Y 4/1	Tubular Filmy	Prominent/Common		Non	+++
	2Agir	31-50	5Y 4/1	Tubular Filmy	Prominent/Many		Non	+++
	2Bgir	50-64	7.5Y 4/1	Tubular Filmy	Prominent/Common		Non	+++
	2Go	64-94	7.5Y 5/1	Tubular	Distinct/Very few		Non	+++
	2Gr	94-110+	7.5Y 6/1		Non		Non	+++
M15	Apgir	0-16	5Y 4/1	Root-like Filmy	Prominent/Abundant		Non	+
	Agir	16-21	7.5Y 4/1	Tubular Filmy	Distinct/Many		Non	+++
	Bgirmn	21-39	2.5Y 4/2	Tubular Filmy	Distinct/Many	Tubular	Faint/Commo	+++
	2Agir	39-51	7.5Y 4/1	Tubular Filmy	Distinct/Many		Non	+++
	2Go	51-61	2.5Y 3/1	Tubular	Distinct/Many		Non	+++
	3Go1	61-68/73	2.5Y 2/1	Tubular	Distinct/Very few		Non	+++
	3Go2	68/73-75/81	7.5Y 2/1	Tubular	Distinct/Very few		Non	+++
	4Gr	75/81-100+	7.5Y 5/1		Non		Non	+++

(Mizutani *et al.*, 2024)

Table 2-2(c). Particle size distribution and Texture in Soil profile.

Profile code	Horizon	Depth (cm)	Particle size distribution				Texture ³⁾	Texture ³⁾⁴⁾ (WRB)
			C. sand ¹⁾	F. sand ²⁾ (%)	Silt	Clay		
M11	Apgir	0-12	8.1	11.7	37.2	43.0	LiC	C
	Agir	12-21	7.4	12.1	37.4	43.1	LiC	C
	Bgir1	21-33	7.1	11.9	39.7	41.3	LiC	C
	Bgir2	33-65	7.6	11.1	37.4	44.0	LiC	C
	Gr	65-100+	5.3	7.0	43.0	44.8	LiC	SiC
M12	Apgir	0-13	16.9	18.5	34.5	30.1	LiC	CL
	Agirmn	13-24	14.6	16.4	35.2	33.9	LiC	CL
	Bgirmn	24-41	5.0	9.4	44.3	41.4	LiC	SiC
	Cgirmn	41-68	5.9	10.7	41.3	42.1	LiC	SiC
	Cgir1	68-80	15.7	18.6	31.9	33.7	LiC	CL
	Cgir2	80-100	11.1	17.1	36.1	35.6	LiC	CL
	Gr	100-110+	7.7	15.9	38.3	38.2	LiC	CL
M13	Apgir	0-15	18.4	40.5	21.9	19.1	CL	SL
	Agirmn	15-25	21.9	41.7	21.3	15.1	CL	SL
	Bgirmn	25-32/40	20.4	39.6	21.7	18.3	CL	SL
	Bgir1	32/40-55	18.2	38.8	22.6	20.4	CL	SCL
	Bgir2	55-66	18.8	41.6	21.7	17.8	CL	SL
	Bgir3	66-75/82	16.9	37.7	26.3	19.1	CL	SL
	Bgir4	82-92	16.8	39.2	25.7	18.3	CL	SL
	Go	92-100+	16.5	37.5	23.3	22.7	CL	SCL
M14	Apgir	0-14	23.5	28.8	23.3	24.4	CL	SCL
	Agir	14-31	22.0	26.5	24.2	27.4	LiC	SCL
	2Agir	31-50	25.6	24.0	25.2	25.2	LiC	SCL
	2Bgir	50-64	25.8	26.9	24.4	22.9	CL	SCL
	2Go	64-94	18.4	23.9	26.7	31.0	LiC	SCL
	2Gr	94-110+	6.0	21.1	35.0	37.8	LiC	CL
M15	Apgir	0-16	23.3	22.9	28.7	25.0	CL	SCL
	Agir	16-21	22.8	24.8	25.4	27.0	LiC	SCL
	Bgirmn	21-39	18.9	24.1	27.0	30.0	LiC	CL
	2Agir	39-51	16.8	25.1	28.1	30.0	LiC	CL
	2Go	51-61	12.9	27.7	28.4	31.0	LiC	CL
	3Go1	61-68/73	32.4	26.2	18.6	22.8	SCL	SCL
	3Go2	68/73-75/81	31.3	24.6	18.1	26.1	SC	SCL
	4Gr	75/81-100+	48.5	19.6	13.6	18.3	SCL	SL

¹⁾Coarse sand. ²⁾Fine sand.

³⁾C: Clay, LiC: Light Clay, SiC: Silty Clay, SiCL: Silty Clay Loam, CL: Clay Loam, L: Loam, LS: Loamy Sand, SL: Sandy Loam, SCL: Sandy Clay Loam.

⁴⁾Classified based on WRB (IUSS Working Group WRB, 2022), assuming the particle size distribution does not change when the boundary between silt and sand of 63 μ m is applied. (Mizutani *et al.*, 2024)

Table 2-3(a). pH, y1, EC and Available component (oven-dried basis).

Profile code	Horizon	Depth	pH		y1 ¹⁾	EC ²⁾ (1:5)	Available component		
			H ₂ O	KCl			Truog	N ³⁾	SiO ₂
							P ₂ O ₅		
		(cm)					(mg kg ⁻¹)		
M11	Apgir	0-12	6.88	5.71	0.4	0.06	88	174	431
	Agir	12-21	7.47	6.28	0.3	0.06	134	155	328
	Bgir1	21-33	7.81	6.05	0.1	0.04	52	76	391
	Bgir2	33-65	6.46	4.65	1.3	0.04	5	8	425
	Gr	65-100+	6.43	5.05	0.7	0.03	5	0	422
M12	Apgir	0-13	6.31	4.84	0.4	0.04	86	129	325
	Agirmn	13-24	7.18	5.67	0.2	0.04	105	74	367
	Bgirmn	24-41	7.28	5.69	0.3	0.05	37	41	381
	Cgirmn	41-68	6.22	4.55	0.7	0.04	12	17	408
	Cgir1	68-80	5.55	3.92	5.5	0.03	10	14	324
	Cgir2	80-100	5.47	3.87	8.4	0.03	5	0	348
	Gr	100-110+	5.19	3.67	10.1	0.03	24	0	365
M13	Apgir	0-15	6.27	4.97	0.4	0.04	428	93	207
	Agirmn	15-25	7.09	5.86	0.1	0.04	255	46	235
	Bgirmn	25-32/40	7.38	6.04	0.1	0.03	70	25	277
	Bgir1	32/40-55	6.85	5.49	0.2	0.04	89	30	283
	Bgir2	55-66	5.90	4.61	0.4	0.05	101	45	202
	Bgir3	66-75/82	5.91	4.77	0.2	0.07	23	17	228
	Bgir4	82-92	5.96	4.65	0.4	0.05	40	6	249
	Go	92-100+	5.85	4.19	0.4	0.04	27	4	303
M14	Apgir	0-14	6.23	4.75	0.6	0.05	50	112	291
	Agir	14-31	6.68	5.03	0.4	0.04	31	54	204
	2Agir	31-50	5.94	4.16	1.8	0.03	9	81	191
	2Bgir	50-64	5.88	3.70	7.0	0.02	4	32	257
	2Go	64-94	5.68	3.33	10.6	0.02	66	25	342
	2Gr	94-110+	5.78	3.62	9.2	0.01	2	11	345
M15	Apgir	0-16	6.56	5.22	0.4	0.06	168	139	281
	Agir	16-21	6.77	5.37	0.4	0.06	119	74	216
	Bgirmn	21-39	6.94	5.55	0.3	0.06	264	26	251
	2Agir	39-51	6.52	4.95	0.4	0.04	3	46	255
	2Go	51-61	6.35	4.71	0.6	0.03	11	46	315
	3Go1	61-68/73	6.36	4.78	0.4	0.03	10	22	214
	3Go2	68/73-75/81	6.07	4.46	1.0	0.04	8	19	231
	4Gr	75/81-100+	5.63	3.65	4.9	0.02	6	2	336

¹⁾y1 : exchangeable acidity²⁾EC:electric conductivity³⁾Mineralized N during 4 weeks of incubation under reduced condition in a incubator at 30° C.
(Mizutani *et al.*, 2024)

Table 2-3(b). CEC, Exchangeable cation, Base saturation, PAC, Total carbon and Total nitroten
(oven-dried basis).

Profile code	Horizon	Depth (cm)	CEC ⁴⁾	Exchangeable cations				Base saturation ⁵⁾	PAC ⁶⁾ (mg P ₂ O ₅ g ⁻¹)	T-C ⁷⁾ (g kg ⁻¹)	T-N ⁷⁾ (g kg ⁻¹)
				Ca	Mg	K	Na				
				(cmol _c kg ⁻¹)				(%)			
M11	Apgir	0-12	23.7	16.7	4.6	0.5	2.6	103	9.79	22.8	2.3
	Agir	12-21	23.5	16.9	5.6	0.5	3.3	112	9.47	19.5	2.0
	Bgir1	21-33	21.1	12.1	5.9	0.6	3.8	106	8.06	12.2	1.3
	Bgir2	33-65	21.1	8.6	6.9	0.5	5.2	101	8.49	12.6	1.2
	Gr	65-100+	23.3	6.8	6.0	0.4	6.3	83.8	9.56	18.1	1.6
M12	Apgir	0-13	15.7	10.4	2.3	0.4	1.7	94.3	6.46	18.6	1.9
	Agirmn	13-24	17.6	12.5	3.4	0.4	2.0	104	6.97	13.6	1.4
	Bgirmn	24-41	22.3	15.0	5.2	0.6	2.6	105	8.89	9.6	1.1
	Cgirmn	41-68	22.0	11.3	6.8	0.5	3.3	99.6	8.35	12.3	1.2
	Cgir1	68-80	17.5	6.0	4.9	0.3	2.5	78.8	6.13	15.0	1.3
	Cgir2	80-100	18.5	5.6	5.1	0.3	2.6	73.8	6.57	13.2	1.3
	Gr	100-110+	19.7	5.8	4.7	0.4	2.8	69.9	6.78	18.1	1.5
M13	Apgir	0-15	14.9	9.8	1.2	0.3	1.6	87.0	5.05	22.0	2.0
	Agirmn	15-25	12.3	10.0	1.3	0.2	1.5	106	4.50	12.3	1.1
	Bgirmn	25-32/40	12.3	10.1	1.5	0.2	1.5	108	4.70	9.8	0.9
	Bgir1	32/40-55	12.9	9.5	1.7	0.2	1.9	103	4.79	11.0	1.0
	Bgir2	55-66	10.8	6.5	1.3	0.2	1.5	88.5	2.91	11.4	1.2
	Bgir3	66-75/82	10.7	6.9	1.3	0.2	1.8	94.5	4.33	6.5	0.6
	Bgir4	82-92	12.2	6.4	1.1	0.2	2.1	80.2	5.20	10.0	0.8
	Go	92-100+	12.8	6.2	1.1	0.2	2.6	78.6	4.71	9.4	0.8
M14	Apgir	0-14	13.9	8.6	1.7	0.3	2.2	91.8	6.27	16.5	1.5
	Agir	14-31	12.8	8.2	2.0	0.1	3.0	104	5.61	11.0	1.0
	2Agir	31-50	14.7	7.4	1.8	0.1	4.5	94.2	6.45	20.1	1.6
	2Bgir	50-64	13.9	5.5	1.4	0.2	4.4	82.3	5.38	14.3	1.1
	2Go	64-94	13.3	5.6	1.4	0.2	5.3	92.9	5.28	13.0	1.0
	2Gr	94-110+	15.0	6.7	1.6	0.2	6.0	97.2	5.70	13.1	0.8
M15	Apgir	0-16	12.3	7.8	1.6	0.4	1.8	93.8	5.38	20.7	2.1
	Agir	16-21	10.5	7.0	1.5	0.4	2.0	103	4.72	12.3	1.2
	Bgirmn	21-39	10.2	7.0	1.9	0.3	2.4	112	4.55	8.7	0.7
	2Agir	39-51	12.2	6.8	2.1	0.2	3.0	99.6	5.20	16.5	1.2
	2Go	51-61	14.2	7.1	2.5	0.2	3.5	93.6	5.30	21.6	1.5
	3Go1	61-68/73	12.6	6.3	2.3	0.1	2.9	92.7	3.91	18.0	1.0
	3Go2	68/73-75/81	15.0	6.6	2.4	0.1	3.4	83.3	4.80	22.6	1.1
	4Gr	75/81-100+	6.8	2.6	1.2	0.1	2.2	89.6	1.91	3.8	0.3

⁴⁾CEC : cation exchangeable capacity

⁵⁾Base saturation : exchangeable(Ca + Mg + K + Na)/CEC

⁶⁾PAC : phosphate absorption coefficient

⁷⁾T-C : total carbon;T-N : total nitroten

(Mizutani *et al.*, 2024)

Table 2-3(c).Iron, aluminum, and silicon dissolved by the selective dissolution method
(oven-dried basis).

Profile code	Horizon	Depth (cm)	Selective dissolution ⁸⁾						
			Fed	Ald	Feo	Alo	Sio	Fep	Alp
			(g kg ⁻¹)		(g kg ⁻¹)			(g kg ⁻¹)	
M11	Apgir	0-12	22.9	1.7	9.9	1.7	0.3	3.3	1.2
	Agir	12-21	25.0	1.5	10.9	1.5	0.3	2.4	1.1
	Bgir1	21-33	25.4	1.4	14.4	1.3	0.6	1.6	1.3
	Bgir2	33-65	22.7	1.2	11.6	1.3	0.4	2.8	1.4
	Gr	65-100+	26.1	1.5	16.1	1.9	0.7	4.1	1.1
M12	Apgir	0-13	10.8	1.4	4.6	1.6	0.1	1.6	1.0
	Agirmn	13-24	19.0	1.3	7.2	1.4	0.2	1.3	1.0
	Bgirmn	24-41	23.0	1.9	9.8	1.6	0.5	1.3	1.3
	Cgirmn	41-68	19.7	1.4	8.5	1.3	0.3	1.7	1.5
	Cgir1	68-80	13.6	1.2	5.6	1.2	0.1	1.1	1.0
	Cgir2	80-100	16.2	1.3	8.4	1.4	0.1	1.1	1.2
	Gr	100-110+	7.6	1.0	3.1	1.1	0.2	1.9	0.8
M13	Apgir	0-15	12.0	2.5	2.7	2.1	0.3	2.3	1.2
	Agirmn	15-25	17.1	1.9	3.7	1.5	0.2	1.6	0.7
	Bgirmn	25-32/40	19.4	2.2	3.1	1.5	0.2	1.2	0.8
	Bgir1	32/40-55	16.1	1.7	3.4	1.3	0.1	1.5	0.7
	Bgir2	55-66	7.8	0.6	2.8	0.7	0.0	1.1	0.4
	Bgir3	66-75/82	31.7	1.2	9.4	1.0	0.2	1.1	0.6
	Bgir4	82-92	31.1	1.6	13.4	1.3	0.1	2.6	0.7
	Go	92-100+	10.6	0.7	4.5	1.0	0.1	2.1	0.7
M14	Apgir	0-14	23.2	1.2	7.4	1.2	0.1	1.9	0.4
	Agir	14-31	24.1	1.3	5.9	1.3	0.1	1.4	0.4
	2Agir	31-50	26.9	1.5	9.0	1.3	0.2	2.3	0.4
	2Bgir	50-64	20.7	1.3	11.4	1.3	0.2	1.7	0.4
	2Go	64-94	12.3	0.8	7.7	1.1	0.2	1.4	0.3
	2Gr	94-110+	17.4	0.7	25.1	1.1	0.5	1.5	0.3
M15	Apgir	0-16	16.0	1.2	4.4	1.4	0.2	2.0	0.5
	Agir	16-21	17.2	1.3	2.9	1.2	0.1	1.5	0.5
	Bgirmn	21-39	21.4	1.6	1.6	1.1	0.1	1.1	0.5
	2Agir	39-51	16.9	1.1	3.0	1.2	0.1	1.7	0.4
	2Go	51-61	32.4	1.3	3.8	1.0	0.1	1.9	0.5
	3Go1	61-68/73	7.7	0.6	2.6	0.9	0.0	1.3	0.4
	3Go2	68/73-75/81	6.2	0.7	2.2	1.1	0.0	1.8	0.7
	4Gr	75/81-100+	3.6	0.4	1.0	0.6	0.0	0.6	0.2

³⁾Fed: Fe dissolved by DC extraction, Ald: Al dissolved by DC extraction,
Feo: Fe dissolved by oxalate extraction, Alo: Al dissolved by oxalate extraction, Sio: Si dissolved by oxalate extraction
Fep, Fe dissolved by pyrophosphate extraction, Alp, Al dissolved by pyrophosphate extraction.
The DC extracts free Fe oxides, such as goethite.
The oxalate extracts active Fe and Al (hydr)oxides, such as ferrihydrite and allophane.
The pyrophosphate extracts organically complexed Fe and Al.
(Mizutani *et al.*, 2024)

(1) ペドン M11

深さ 0—12 cm の層位を Apgir 層, 耕盤層にあたる 12—21 cm を Agir 層とし, 構造が見られた 21—65 cm までを Bgir1 層, Bgir2 層, 構造の発達が見られない 65—100 cm+を Gr 層とした.

Bgir2 層は, 鉄の膜状斑があり構造の存在を確認できたが, 壁状に近い状態であり, 塊状のペッドを明瞭に分けられなかった. このため, 構造は亜角塊状とし, 発達強度は, 他と区別するため, 土壌調査ハンドブック改訂版 (日本ペドロロジー学会編, 1997) では示されていないものの, 極めて弱い(very weak) とした.

土性は, 全層で LiC であった. 粘土含有量は, いずれの層位も 40%を超え, ペドン M13, M14, M15 と比べて高かった.

Bgir2 層および Gr 層では, α, α -ジピリジル反応が即時非常に鮮明であった. このことから, 33 cm 以深では, 少なくとも調査時においては, 地下水の影響を受けて強い還元状態にあったと考えられた.

Fed は全層で 22.7—26.1 g kg⁻¹ の範囲にあり, 地力増進基本指針で示された改善目標 (8 g Fe₂O₃ kg⁻¹) 以上を満たすことから, 老朽化水田にはあたらないと考えられた.

(2) ペドン M12

深さ 0—13 cm の層位を Apgir 層, 耕盤層にあたる 13—24 cm を Agirmn 層とし, 構造が見られた 24—41 cm までを Bgirmn 層, 構造の発達が見られなかった 41—100 cm を C 層, 100—110 cm+を Gr 層とした.

粒径組成は, 24—68 cm で隣接するペドン M11 に近かったが, その他の層位ではペドン M11 よりも粘土含有量が低く, 砂の割合が高かった. ペドン M12 は, 柘植川支流の流域にある下位段丘面

にあり、ペドン M11 に比べ堆積時における河川の影響が強く、粒径組成に違いが出たと考えられた。

α, α -ジピリジル反応は、100–110 cm+で即時非常に鮮明であった。100 cm 深以下では、構造の発達認められず、かつ Fed も急激に減少していることから、地下水が強く影響し周年で強い還元状態にあったと考えられた。

Fed は、Apgir 層の 10.8 g kg^{-1} に対し、直下の Agirmn 層で 19.0 g kg^{-1} と 2 倍近い値を示したことから、鉄集積層が形成される過程にあると考えられた。

(3) ペドン M13

深さ 0–15 cm の層位を Apgir 層、耕盤層にあたる 15–25 cm を Agirmn 層とし、構造が見られた 25–92 cm までを B 層、構造の発達が見られなかった 92–100 cm+を G 層とした。

粒径組成は、ペドン M11, M12 に比べ、粘土およびシルトの含有量が低く、全層 CL となった。

Fed が Apgir 層で 12.0 g kg^{-1} から Bgirmn 層で 19.4 g kg^{-1} へ増加していることから、鉄の溶脱・集積が進行していると考えられた。

α, α -ジピリジル反応は、深さ 82–100 cm+で即時非常に鮮明であった。92 cm 以深の Go 層では、構造の発達認められず、かつ Fed も急激に減少していることから、地下水が強く影響し周年で強い還元状態にあったと考えられた。

(4) ペドン M14

全炭素含量において、深さ 31–50 cm の層位でもっとも高い 20.1 g kg^{-1} を示したことから、この層位を埋没層と考え 2Agir 層とした。埋没の原因の一つとして、ほ場整備時に盛土を行った可能性

が考えられる。64 cm 以深では構造の発達が見られなかったことから、Go 層あるいは Gr 層とした。

Go 層および Gr 層では粘土含有量が高く、土性は LiC であった。上位にも土性が LiC と判定された層位は存在するが、それらとは特に砂含量において大きく異なっていた。化学性や土色などにおいて各層位間で顕著な不連続性は認められなかったが、母材の堆積のタイミングに違いがあった可能性がある。 α, α -ジピリジル反応は全層で即時鮮明であったことから、停滞水または地下水の影響が強く、少なくとも調査時においては、強い還元状態にあったと考えられた。

(5) ペドン M15

深さ 0–16 cm の層位を Apgir 層、耕盤層にあたる 16–21 cm を Agir 層とした。39–51 cm は、全炭素が 16.5 g kg^{-1} と比較的高いことから埋没 A 層と考え、39–51 cm を 2Agir 層、51–61 cm を 2Go 層とした。61 cm 以深では、シルト含量が減少し、さらに 75/81 cm 以深では砂含量の増加が認められたため、母材の不連続と捉え、61–68/73 cm を 3Go1 層、68/73–75/81 cm を 3Go2 層、75/81–100 cm+ を 4Gr 層とした。

α, α -ジピリジル反応は、16 cm 以深で即時鮮明であった。このうち、61 cm 以深では構造の発達が認められず、かつ Fed も急激に減少していることから、地下水が強く影響し周年で強い還元状態にあったと考えられた。Fed は 51–61 cm 深の 2Go 層で最も高い 32.4 g kg^{-1} を示し、マンガンの斑紋が 21–39 cm で確認されたことから、61 cm 以浅では 1 年のうちいずれかのタイミングで酸化的になると考えられた。

2.4.4.2 作土およびすき床層の理化学性

水田土壌の基本的な改善目標 (Table 1-6) を用いて、5 ペドンにおける、作土およびすき床層の

理化学性について検証した。検証に当たり、Ap 層を作土とし、Ap 層直下の A 層をすき床層とした。

5 ペドンの作土の厚さは 12~16 cm で、ペドン M11, M12, M14 が目標値を下回った。すき床層のち密度（山中式硬度）は、ペドン M13 は 25 mm でやや高い値を示し、他の 4 ペドンは 13~21 mm で改善目標を満たした。作土における有効態りん酸はペドン M11 が 88 mg kg⁻¹、ペドン M12 が 86 mg kg⁻¹、ペドン M14 が 50 mg kg⁻¹で改善目標を下回った。ペドン M13 は 428 mg kg⁻¹、ペドン M15 は 168 mg kg⁻¹で改善目標を満たした。可給態窒素は 93~174 mg kg⁻¹であり、いずれも改善目標を満たしていた。pH(H₂O)はペドン M11 が 6.9 でやや高く、他の 4 ペドンは 6.2~6.6 でほぼ改善目標を満たした。塩基飽和度は、ペドン M11 は 87%であり改善目標内であったが、他の 4 ペドンは 92~103%で改善目標の値を上回った。交換性塩基の組成に関し、当量比による比較を Table 2-4 に示した。exCa の飽和度を 70 とした場合、exMg の飽和度は 8~19 であり、5 ペドンとも改善目標を下回る低い比率であった。一方、exK は 2~4 であり、改善目標を満たした。exMg の飽和度を 20 とした場合、exK は、2~6 であり exMg に対する比でも改善目標を満たした。

Table 2-4. Base balance

Profile Code	Horizon	Depth (cm)	Relative Base saturation					
			Relative to Ca saturation (when Ca saturation was 70)			Relative to Mg saturation (when Mg saturation was 20)		
			exCa	exMg	exK	exCa	exMg	exK
M11	Apgir	0-12	70	19	2	73	20	2
M12	Apgir	0-13	70	16	3	88	20	3
M13	Apgir	0-15	70	8	2	166	20	5
M14	Apgir	0-14	70	14	2	102	20	3
M15	Apgir	0-16	70	14	4	99	20	6

(Mizutani *et al.*, 2024)

2.4.4.3 土壌分類

日本土壌分類（日本ペドロロジー学会第五次土壌分類・命名委員会, 2017）, 包括 1 次試案（小原ら, 2011）, および World reference base for soil resources 2022（IUSS Working Group WRB, 2022；以下 WRB 2022）に基づいて, 各土壌断面の土壌分類を行った。上記の土壌分類体系に基づいた特徴層位, 識別特徴, 識別物質, および地質・地形的特徴を Table 2-5 に示した。また, 土壌分類結果を Table 2-6 に示した。

（1）特徴層位

水田表層は, 水田の作土層のうち漂白化されていないもので, 落水後の黄褐色または赤褐色の斑紋が 2%以上, Fed が 0.4%以上, 厚さ 7.5 cm 以上のものである（日本土壌分類, 包括 1 次試案）。Ap 層を作土層とすると, 5 ペドンとも水田表層であるための条件を満たした。WRB 2022 では, Anthraquic horizon が wet-field cultivation の結果として生じる表層とされており, その概念は水田表層に相当する。Anthraquic horizon は, puddled layer（代かき層）と plough pan（耕盤層）によって構成される。plough pan は puddled layer の直下であり, 条件の一つとして乾燥密度が puddled layer より 10%以上高いことが挙げられており, 物理性において直上の層位からの急変を示す層位を想定していると考えられる。5 ペドンとも Ap 層直下の A 層（第 2 層）において乾燥密度および土壌硬度が高い値を示していることから, 表層である Ap 層を puddled layer, その直下の A 層を plough pan とみなせると考えられた。Anthraquic horizon の puddled layer は, 7.5YR またはそれより黄色の色相を持ち明度が 4 以下かつ彩度が 2 以下, あるいは色相が GY, B, BG で明度が 4 以下である必要があるが, この条件を満たすのはペドン M13, M14, M15 の 3 ペドンであった。次に, Anthraquic horizon の plough pan は, 土壌構造の条件として platy structure または massive

structure が 25%以上の条件が挙げられており、これについてはペドン M13, M14, M15 の 3 ペドンとも垂角塊構造でありこの条件を満たさなかった。このため、5 ペドンとも Anthraquic horizon の条件を満たさないと考えられた。

5 ペドン全てで、 α, α -ジピリジル反応が即時非常に鮮明である層位が存在した。また、いずれも地下水グライ層の条件である「下端が 75 cm 以深に及び 10 cm 以上の厚さをもつグライ層」（日本土壌分類、包括 1 次試案）を満たした。

日本土壌分類および包括 1 次試案によると、ペドン M11 の Bgir1, Bgir2 層、ペドン M12 の Bgirmn 層、ペドン M13 の Bgirmn, Bgir1~Bgir4 層、ペドン M14 の 2Bgir 層、ペドン M15 の Bgirmn 層が漂白層に相当した。その他の特徴層位は認められなかった。

(2) 識別特徴

日本土壌分類および包括 1 次試案におけるグライ特徴および WRB 2022 における Reducing condition は、 α, α -ジピリジル反応が即時鮮明であることを条件として判断した。ペドン M11 は 33 cm 以深が、ペドン M12 は 100 cm 以深が、ペドン M13 は 82 cm 以深が、ペドン M14 は土壌断面全体が、ペドン M15 は 16 cm 以深がグライ特徴に該当した。

日本土壌分類および包括 1 次試案における地下水湿性特徴は、年間のある時期地下水で飽和され還元状態に置かれていることを示す特徴であり、グライ特徴を示さず、ペッド面や孔隙面に酸化鉄の被膜があるものとされている。地下水湿性を示す斑紋は膜状、管状、不定形とされる（日本ペドロロジー学会編, 1997）。このうち膜状斑は作土にも形成されることがあるとされていることから（日本ペドロロジー学会編, 1997）、地下水湿性を判断する鉄斑紋の形状は、管状および不定形とした。地下水湿性特徴を満たす層位はペドン M11, M12, 13 に認められたが、ペドン M14 と M15 には認め

られなかった。

WRB 2022 における Gleyic properties は、地下水に起因するものに限らず、酸素の供給が制限されたことに伴い出現した酸化還元的特徴を捉えるものであり、還元的特徴を示す土色、あるいは 5% 以上の斑紋の存在によって同定される。ペドン M11 と M12 は全層がこの条件を満たした。その他の土壌断面も、部分的にこの条件を満たした層位が存在した。

(3) 識別物質

5 万分の 1 都道府県土地分類基本調査（水口・上野・名張）による表層地質図（三重県企画振興部政策調整課，1995）を参照すると，5 ペドンとも形成年代は完新世である河成，海成，湖沼成堆積物であり，日本土壌分類および包括 1 次試案では沖積堆積物，WRB 2022 では Fluvic material に該当した。

(4) 分類

ペドン M11～M15 は沖積堆積物を母材とする土壌と判断されるため，日本土壌分類では沖積土大群，包括 1 次試案では低地土大群に分類された。全てのペドンで地下水グライ層が確認されたが，土壌表層から 50 cm 以内にその上端が現れたペドン M11，M14，M15 は日本土壌分類ではグライ沖積土に，包括 1 次試案ではグライ低地土に分類された。ペドン M12，M13 は地下水湿性特徴を示す層の上端が 50 cm 以内にあるため，日本土壌分類では灰色沖積土，包括 1 次試案では灰色低地土に分類された。亜群の分類では，ペドン M11，M14，M15 のうちペドン M11 のみ地下水湿性特徴が 25－50 cm の間に確認されたため，日本土壌分類および包括 1 次試案において，ペドン M11 は表層灰色亜群に，ペドン M14，M15 は斑鉄型亜群に分類された。ペドン M12 と M13 は，地下水

グライ層の上端が 75 cm より深いため、日本土壌分類および包括 1 次試案においては普通亜群に分類された。

WRB 2022 による土壌分類では、まず第 1 カテゴリーにおいて、キアアウト方式により 32 の Reference Soil Group(RSG)のうちいずれかに分類する。水田土壌に関連する RSG に、耕作による人為の影響を強く受けた Anthrosols がある。Anthrosols である条件としては anthraquic horizon および hydragric horizon の存在が挙げられているが、5 ペドン全てで anthraquic horizon を認められなかったため、いずれの土壌断面も Anthrosols には相当しなかった。次に、水田に関連する RSG として、強い還元状態の影響下にある Gleysols がある。キアアウトの条件は、40 cm 深より浅い場所から始まり 25 cm 以上の厚さの gleyic properties および reducing conditions を認めることであり、これにペドン M11, M14, M15 が該当した。ペドン M12 と M13 は、識別物質である fluvic material が表層から始まり 25 cm 以上の厚さをもつことから、いずれも Fluvisols にキアアウトされた。次の分類カテゴリーである principal qualifiers は、5 ペドンとも特徴物質として全層が fluvic material であるためペドン M11, M14, M15 は fluvic が、ペドン M12, M13 は pantofluvic が該当した。さらにペドン M13 は 25 cm 以上の厚さで 75 cm より浅いところから始まる gleyic properties と 100 cm 以内に reducing condition を持つため gleyic も該当した。また、dystric/eutric の判定を 5 ペドンについて行った。交換性 Al^{3+} は測定していないが、y1 は主として交換性 Al に由来すると判断できるため、5 ペドンはいずれも全層で交換性 $(Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^{+} + Na^{+}) \geq$ 交換性 Al^{3+} であると判定でき、eutric が該当した。次の分類カテゴリーである supplementary qualifiers では、土性について、深さ、分布を示す Subqualifiers とともに分類した。ペドン M11, M12 は全層が Clayic (C, CL, SiC) で Pantoclayic、ペドン M13, M14, M15 は全層が Loamic (CL, SCL, SL) で Pantoloamic となった。

Table 2-5. Diagnostic horizons, diagnostic properties, formation age, and geomorphological land classification of soils investigated in the present study.

Profile code	Diagnostic horizons		Diagnostic properties		Diagnostic materials		Formation age	Geomorphological land classification
	SCSJ(2017) ¹⁾ and CSCSJ(2011) ²⁾	特徴層位	WRB 2022 ³⁾	SCSJ(2017) ¹⁾ and CSCSJ(2011) ²⁾	識別特徴	WRB 2022 ³⁾	SCSJ(2017) ¹⁾ and CSCSJ(2011) ²⁾	識別物質
M11	水田表層 (0 – 12 cm, Fed: 2.29%)			地下水湿性特徴	Gleyic properties	(0 – 100 cm+)	沖積堆積物	Fluvic material
	漂白層 (21 – 65cm)	N/A ⁶⁾		グライ特徴	Reducing conditions	(0 – 100 cm+)	(0 – 100 cm+)	(0 – 100 cm+)
	地下水グライ層 (33 – 100 cm+)			(33 – 100 cm+)	(33 – 100 cm+)			
M12	水田表層 (0 – 13 cm, Fed: 1.08%)			地下水湿性特徴	Gleyic properties	(0 – 110 cm+)	沖積堆積物	Fluvic material
	漂白層 (24 – 41 cm)	N/A		グライ特徴	Reducing conditions	(0 – 110 cm+)	(0 – 110 cm+)	(0 – 110 cm+)
	地下水グライ層 (100 – 110 cm+)			(100 – 110 cm+)	(100 – 110+)			
M13	水田表層 (0 – 15 cm, Fed: 1.20%)			地下水湿性特徴	Gleyic properties	(25 – 100 cm+)	沖積堆積物	Fluvic material
	漂白層 (32/40 – 92 cm)	N/A		グライ特徴	Reducing conditions	(0 – 100 cm+)	(0 – 100 cm+)	(0 – 100 cm+)
	地下水グライ層 (82 – 100 cm+)			(82 – 100 cm+)	(82 – 100 cm+)			
M14	水田表層 (0 – 14 cm, Fed: 2.32%)			グライ特徴	Gleyic properties	(0 – 64 cm)	沖積堆積物	Fluvic material
	漂白層 (50 – 64 cm)	N/A		(0 – 110 cm+)	Reducing conditions	(0 – 110 cm+)	(0 – 110 cm+)	(0 – 110 cm+)
	地下水グライ層 (0 – 110 cm+)			(0 – 110 cm+)	(0 – 110 cm+)			
M15	水田表層 (0 – 16 cm, Fed: 1.60%)			グライ特徴	Gleyic properties	(0 – 68/73 cm)	沖積堆積物	Fluvic material
	漂白層 (21 – 39 cm)	N/A		(16 – 100 cm+)	Reducing conditions	(16 – 100 cm+)	(0 – 100 cm+)	(0 – 100 cm+)
	地下水グライ層 (16 – 100 cm+)			(16 – 100 cm+)	(16 – 100 cm+)			

¹⁾Soil Classification System of Japan (2017) (日本ペドロジー学会第五次土壌分類・命名委員会, 2017).²⁾Comprehensive Soil Classification System of Japan (2011) (Obara *et al.*, 2011.).³⁾World reference base for soil resources (2022) (IUSS Working Group WRB, 2022).⁴⁾Referred from Fundamental Land Classification Survey (Subsurface Geological Map, 1:50,000) (三重県企画振興部政策調整課, 1995).⁵⁾Referred from Fundamental Land Classification Survey (Geomorphological Land Classification Map, 1:50,000) (三重県企画振興部政策調整課, 1995).⁶⁾Not applicable(Mizutani *et al.*, 2024)

Table 2-6. Soil classification of the 5 pedons investigated in the present study.

Profile	SCSJ(2017) ¹⁾	CSCSJ(2011) ²⁾	WRB 2022 ³⁾
code	日本土壌分類体系	包括的土壌分類第1次試案	
M11	Epi-gray Gley Fluvic soil 表層灰色グライ沖積土	Fine-textured Epi-gray Gley Lowland soil 細粒質表層灰色グライ低地土	Eutric Orthofluvic Gleysol (Pantoclayic)
M12	Haplic Gray Fluvic soil 普通灰色沖積土	Fine-textured Haplic Gray Lowland soil 細粒質普通灰色低地土	Eutric Pantofluvic Fluvisol (Pantoclayic)
M13	Haplic Gray Fluvic soil 普通灰色沖積土	Fine-textured Haplic Gray Lowland soil 細粒質普通灰色低地土	Eutric Gleyic Pantofluvic Fluvisol (Pantoloamic)
M14	Mottled Gley Fluvic soil 班鉄型グライ沖積土	Fine-textured Mottled Gley Lowland soil 細粒質班鉄型グライ低地土	Eutric Orthofluvic Gleysol (Pantoloamic)
M15	Mottled Gley Fluvic soil 班鉄型グライ沖積土	Fine-textured Mottled Gley Lowland soil 細粒質班鉄型グライ低地土	Eutric Orthofluvic Gleysol (Pantoloamic)

¹⁾Soil Classification System of Japan (2017) (日本ペドロジー学会第五次土壌分類・命名委員会, 2017).

²⁾Comprehensive Soil Classification System of Japan (2011) (Obara *et al*, 2011.).

³⁾World Reference Base for Soil Resources (2022) (IUSS Working Group WRB, 2022).
(Mizutani *et al.*, 2024)

2.4.5 考察

2.4.5.1 土壌特性

調査を行った上野盆地の 5 ペドンは、いずれも停滞水および地下水の影響が見られたが、その程度は異なり、土壌構造や土壌化学性において、その違いが現れていた。

管状斑を持つ層位の上端は 12~25 cm 深で現れ、いずれの土壌断面でも、表層近くまで地下水の影響が認められる点で共通していた。一方で、安定的に周年で地下水の影響を受けていると考えられる G 層の上端は、ペドン M11, M14, M15 は 51~64 cm 深であったのに対して、ペドン M13 は 92cm 深, ペドン M12 は 100cm 深と深い位置で現れており、地下水の影響程度に違いがあった。

ペドン M13 は、0-55 cm の色相が 10YR であり、0-92 cm で構造の発達が見られ、5 ペドン中では停滞水の影響が最も小さく、酸化的な環境になる期間が長く深い位置まで及んでいると考えられた。ペドン M13 は、5 ペドン中で唯一、田畑輪換を行っており、その影響の可能性が考えられた。ペドン M12 は、グライ特徴が 100 cm 深まで現れないが、0-100 cm で非常に鮮明な斑紋が 5%以上、41 cm 以深で壁状構造であったため、表層近くの浅い位置まで地下水による強い影響があったと考えられた。この点で、ペドン M12 はペドン M11, M14, M15 に類似しており、ペドン M13 とは異なると考えられた。ペドン M14 では 0-110 cm, ペドン M15 では 16-100 cm でグライ特徴が確認されたことから、地下水の影響が浅い位置まで及んでいたと考えられた。

本研究 2.3 において調査を行った伊勢平野における 4 ペドンの水田土壌に比べ、上野盆地におけるペドン M11~M15 は、粘土含有量および CEC が高い傾向を示した (Figure 2-2)。

さらに、調査を行った 9 ペドンについて CEC と粘土含有量の関係について検証したところ、地域の違いによらず高い相関関係 ($r = 0.88, p < 0.01, n = 36$) が認められた (Figure 2-2)。このことか

ら、単位重量あたりの粘土が発生する負電荷量は、上野盆地と伊勢平野の水田土壌で同等であると
考えられた。ただし、粘土鉱物の詳細については、さらに検証する必要がある。

ペドン M11 と M12 における高い粘土含有量は、粘土主体の阿山累層に由来すると考えられた。

ペドン M14, M15 は、ペドン M11, M12 に比べて低い粘土含有量であったが、周辺の地質は上野
累層のほか花崗岩類も含まれており、これらが混入した可能性も考えられた。ペドン M13 は粘土
含有量が最も低い傾向にあった。ペドン M13 が位置する大山田地域の段丘を形成する服部川は、
花崗岩類、領家変成岩等からなる布引山地（三重県地域振興部地域振興課，1990）を源流としてお
り、土性の違いは、服部川による運搬物が影響していると考えられた。

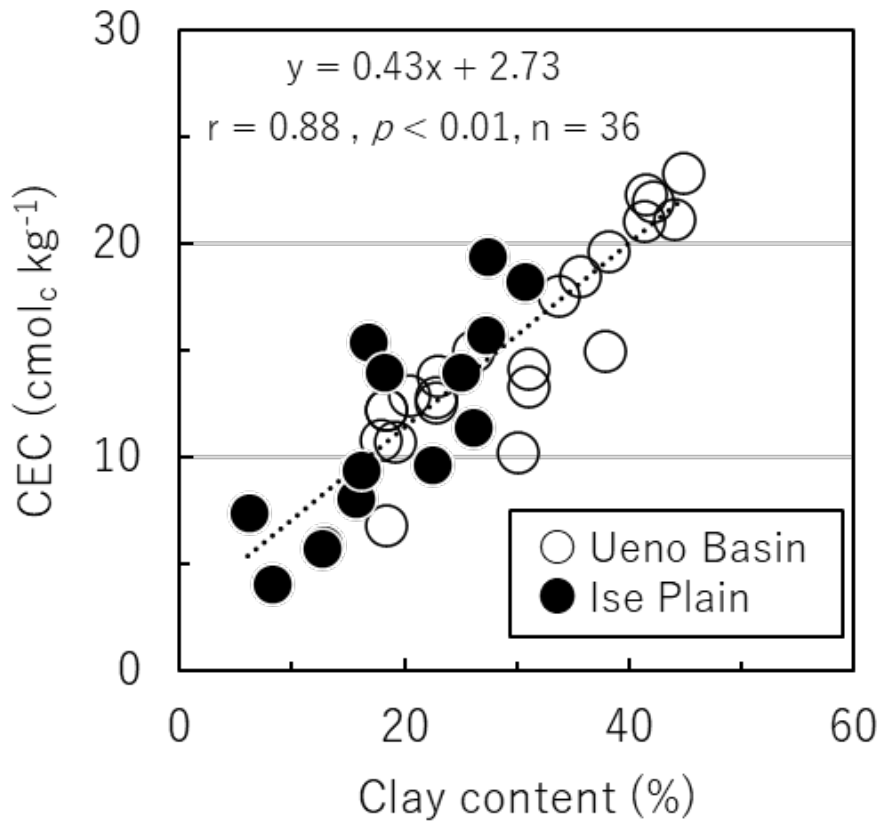


Figure 2-2. Relationship between clay content and CEC. The data were obtained from 22 horizons from 5 pedons in Ueno Basin (○) and 14 horizons from 4 pedons in the Ise Plain (●). Data of horizons with total carbon content higher than 2% were omitted to exclude the influence of organic matter. Dotted line is a linear regression curve. (Mizutani *et al.*, 2024)

2.4.5.2 土壌管理

ペドン M11～M15 は、粘土含量が比較的高く、かつ停滞水の影響が強く認められる。このため、還元溶脱による鉄の減少が懸念される。Fed はペドン M12, M13 では Apgir 層 ($10.8\sim12.0\text{ g kg}^{-1}$) に比較して Bgirmn 層 ($19.4\sim23.4\text{ g kg}^{-1}$) で 2 倍近い値を示したことから、鉄の還元溶脱と集積が進行している可能性がある。一方で、ペドン M11～M15 の Ap 層における Fed ($10.8\sim20.8\text{ g Fe kg}^{-1}$) は、改善目標値 ($8\text{ g Fe}_2\text{O}_3\text{ kg}^{-1}$) 以上であったことから、対策の緊急性は低いと考えられた。各土壌断面は、一部の層位に飽和透水係数が $1.0\times10^{-5}\text{ cm sec}^{-1}$ を下回る層位を持つことから、水の縦浸透が緩やかで、溶脱の進行が抑制されている可能性がある。

作土における窒素、りん酸および塩基類において、5 ペドンとも可給態窒素は改善目標値を満たしていたが、りん酸はペドン M11, M12, M14 が改善目標値を下回った。塩基飽和度は、87～103% で、高い値を示した。塩基バランスでは、exCa の飽和度を 70 としたときの exK の飽和度は 2～4 であり、基準は満たしていたが、低い傾向にあった。exMg は 5 ペドンとも改善目標値を下回っていた。exMg の飽和度を 20 とした時の exK の飽和度は 2～6 で改善目標は満たしたが、ペドン M11, M12, M14 は 2～3 であり、下限に近い値であった。塩基飽和度が高く、塩基バランスでは exCa が多い傾向にある。exCa は、作物による吸収において exK と拮抗関係にある (久馬, 1997)。土壌改良を行う上で、注意を要するものと考えられる。

上野盆地は内陸性気候のため気温の日較差が大きい。橘ら (1987) は、三重県内の田畑輪換におけるダイズの生育と収量を調査し、上野盆地では他地域に比べて生育後期に生育が衰えず、収穫時の子実乾物重が大きくなることを確認し、その要因として日格差が大きいことによる効率的な光合成産物の蓄積を指摘している。金子ら (2019) は、深さ 40 cm 程度からグライ層が始まる土壌では、可給態窒素の減耗が抑制され、ダイズ栽培に有利に働くことを報告している。これらの点で、上野

盆地は、ダイズ栽培に適している可能性がある。一方で、作土における高い粘土含量は、碎土率を低下させ、播種、発芽時に障害を起こす可能性がある（濱田ら，2001；孫ら，2004）。調査を行った5ペドンのうちペドン M11 は40%以上の粘土含有量があり高い値を示したが、ペドン M13 は20%程度であり、比較的低い値であった。上野盆地内の南西部では地下水の影響が強く現れる可能性があるが、その他の地域では、適切な土性をもつ土壤であれば、ダイズ栽培をはじめ、田畑転換に適している可能性がある。

2.4.5.3 土壌分類

ペドン M11～M15 は、さまざまな程度で停滞水の影響が認められ、土壌分類もその違いが反映された。日本土壌分類におけるグライ沖積土（ペドン M11, M14, M15）と灰色沖積土（ペドン M12, M13）は、包括1次試案におけるグライ低地土と灰色低地土に、WRB 2022 における Gleysols と Fluvisols に対応した。

ペドン M12 は、ペドン M11, M14, M15 同様に還元的な土壤環境にあると考えられたが、より酸化的環境にあるペドン M13 と同じ土壤群および RSG が与えられた。ペドン M12 は、もともと還元的な環境にあったが、圃場整備とそれに伴う用排水の整備による水環境の変化が影響して、乾田化が進みつつある可能性が考えられた。

WRB 2022における Anthrosolsは、wet-field cultivationによって形成されたpuddled layerと plough panを持つものであり、これらは日本の水田において一般的にみられる。このため、Anthrosolsの中心概念は日本の水田に適合していると考えられる。しかし、Anthrosolsであるために必要なanthraquic horizonの認定において、plough panの土壤構造条件（platy structureもしくはmassiveの土壤構造を25%以上持つ）は日本の多くの水田土壤において満たさないと考えられ

る。これは、中干しや灌漑などの人為的管理により入排水を繰り返すため、plough panも乾湿の繰り返しを受けて土壌構造が発達するためと考えられる。platy structureは、平板状の構造で、ほぼ水平に配列し、ふつう重なり合っているもの（日本ペドロジー学会編，1997）とされ、日本の水田の耕盤層には一般にみられない。従って、人為による水管理の影響が強いほどAnthrosolsの中心概念に適合するものの、日本ではその水管理によってplough panの土壌構造が発達するため、WRB 2022の土壌分類上はAnthrosolsから外れることになると考えられた。WRB 2022におけるplough panの土壌構造に関する基準は、日本の水田に対して適用する際には検討の余地があると考えられた。

2.4.6 要約

上野盆地内の水田土壌 5 ペドンを調査し土壌分類を行った。停滞水の影響がグライ特徴あるいは地下水湿性特徴として検出され、土壌分類名にはその影響の程度の違いが反映された。5 ペドン中、3 ペドンは日本土壌分類におけるグライ沖積土に、2 ペドンが灰色沖積土に分類され、これらは包括1次試案におけるグライ低地土と灰色低地土に、WRB 2022 における Gleysols と Fluvisols に対応した。これらの水田土壌は、古琵琶湖層群の影響を強く受けていると考えられ、伊勢平野内の水田土壌と比較して粘土含有量が高かった。しかし、上野盆地と伊勢平野の水田土壌を通して、粘土含量と CEC の間には高い相関が認められたことから ($r = 0.88, p < 0.01, n = 36$)、単位重量あたりの粘土が発生する負電荷量は上野盆地と伊勢平野の水田土壌で同等であると考えられた。上野盆地の水田土壌は、停滞水による影響が強く現れており、今後継続的に利用する場合には、鉄の溶脱に関して注意を要すると考えられた。さらに、塩基バランスでは exCa に対して exMg が低く、exK は改善目標を満たすが下限値に近い値であった。また、 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ は 6.2~6.9 であり、高い傾向にあ

る。これらのことは、土壌改良を行う上で、検討が必要と考えられる。

2.5 まとめ

本研究では、三重県の水田土壌の特性を把握するため、主な水田地帯である北中部の伊勢平野と西部の上野盆地を対象に、土壌生成の観点から、土壌断面形態等の調査ならびに土壌分類を行い、その特性の検証を行った。各土壌は、排水特性や地下水環境において違いがあり、表層で強い還元状態が発達する表層グライ化や、地下水の影響をうけたグライ化が確認された。土壌管理上の面からは、伊勢平野の一部では、表層グライ化による畑作物への影響が懸念された。また、上野盆地では、停滞水の影響が強く鉄の溶脱について注意を要する状態にあった。作土（Ap 層）の土壌成分では、9 ペドンとも、可給態窒素およびリン酸は改善目標を満たしていた。当量比による塩基バランスでは、9 ペドンとも、exCa に対する exMg が少なく、exK は改善目標を満たした。また、exMg に対する当量比でも exK は改善目標を満たしていた。相対的に exMg が少ない傾向にあることは、9 ペドンで共通した。また、exK においては、改善目標を満たしており、改善を要する状態にはなかった。pH(H₂O)では、伊勢平野の4 ペドンはやや低く（5.6～6.2）、上野盆地の5 ペドンではやや高い傾向（6.2～6.9）を示した。土壌の酸度と関連性が高い塩基飽和度も伊勢平野で低く（53～85）、上野盆地で高い傾向（92～103）を示し、これらの点で、二つの地域は異なる傾向を示した。一方、伊勢平野と上野盆地の対比において、9 ペドンを通じて、粘土含量と CEC の間に高い相関関係（ $r = 0.88$, $p < 0.01$, $n = 36$ ）が認められた。このことから、単位重量あたりの粘土が発生する負電荷量は、伊勢平野と上野盆地の水田土壌で同等であると考えられた。土壌生成なら

びに土壌分類において，調査を行った 9 カ所全ての水田土壌は，完新世の堆積物である沖積土によるもので，日本土壌分類では沖積土大群に分類された．

第3章 水田土壌において交換性カリおよびイネのカリ吸収が非交換性カリからのカリ給量に及ぼす影響

3.1 はじめに

土壌中の K は、溶液中に溶解している形態（溶存 K）、土壌鉱物や有機物に静電的に吸着した形態（交換性 K（exK））、2：1 型粘土鉱物やバーミキュライトの層間に固定された固定型（非交換性 K（non-exK））、鉱物の構造の一部である構造型 K（構造 K）からなる。これらの形態はすべて、動的平衡状態で存在する（Beckett, 1964a, 1964b；岡島, 松中, 1972a；岡島, 松中, 1972b；Sparks and Huang, 1985；Wang *et al.*, 2004；Öborn *et al.* 2005; Zörb *et al.*, 2014）。

溶存 K と exK は植物が最も容易に利用できる土壌中 K 画分である。土壌中の non-exK 画分からの K の溶出は、exK との溶解平衡によって調節されと考えられる。このため、exK の量と K 肥料の施用量は、non-exK からの K 溶出量に影響を及ぼす可能性がある。このため、土壌の K 肥沃度に関する管理技術として、exK、施肥 K と non-exK からの K 溶出の関連を理解することが重要である。

そこで本研究では、沖積土壌を対象に、異なる地域から採取した 6 つの水田土壌を用いて、湛水条件下でイネの栽培を行い、土壌の違いとともに、exK 量および施肥 K 量の違いが non-exK 画分から溶出する K に及ぼす影響について研究した。

3.2 試験方法

3.2.1 非交換性カリから溶出するカリ量の考え方と算出方法

本研究では、栽培期間中に non-exK 画分から溶出され可給化した K を Recharged K (ReK) と定義し、下記の方法で算出した。あわせて、本研究においての土壌中 K 画分の考え方について模式的に Figure 3-1 に示した。なお、多くの先行研究でも同様の方法で評価されている (Bray and DeTurk, 1939 ; Stewart and Volk, 1946 など)。

ReK 量の算出式：

$$[\text{ReK}] = [\text{イネが吸収した K}] + [\text{栽培後の exK}] - [\text{栽培前の exK}] - [\text{施肥 K}] \quad [1]$$

exK には溶液中 K を含む。本報では、ReK 量は、元土壌の単位重量当たり K_2O 量で示した。

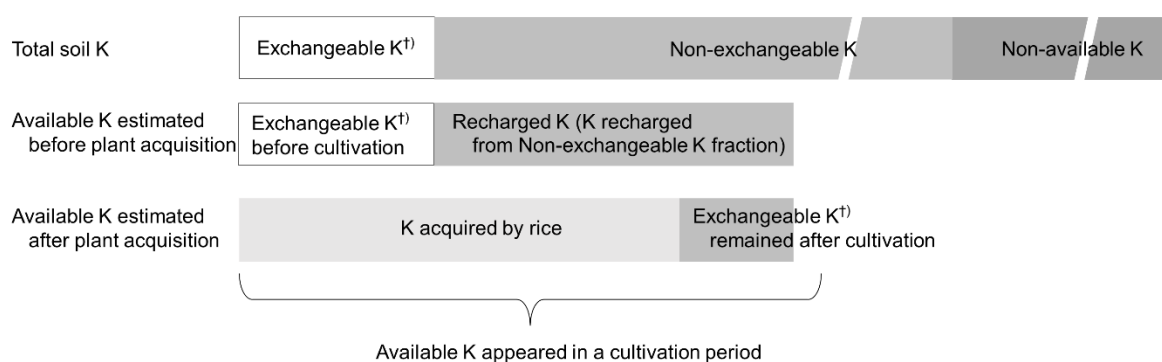


Figure 3-1. Schematic diagram of K fractions in soils.

[†] Extracted by 1M $\text{CH}_3\text{COONH}_4$. This fraction includes solution K and fertilized K. (Mizutani *et al.*, 2024)

3.2.2 土壌と作物

本研究では、沖積土に分類される水田土壌を対象に、山形県 (YG), 新潟県 (NG), 宮崎県 (MZ), 鹿児島県 (KG), 三重県 (MI および MM) の異なる地域から採取した 6 土壌を用いた。各土壌の採取地と土壌の理化学性を Table 3-1 に示した。各土壌は、exK が $46\sim 474\text{ mg kg}^{-1}$, 1 mol L^{-1} の硝酸 (HNO_3) で煮沸抽出した K によって評価される non-exK が $201\sim 1760\text{ mg kg}^{-1}$ であり、K に関して異なる状態にあった。各土壌を用いて、イネ (*Oryza sativa* L. subsp. Japonica ‘Koshihikari’) の栽培試験を行い、イネによる K 吸収が non-exK から溶出する K におよぼす影響を検証した。

Table 3-1. Locality and selected physicochemical properties of soils (oven-dry weight basis).

Soil code		Latitude	Longitude	Soil classification [†]	pH (H ₂ O)	pH (KCl)	T-C [‡] (g kg ⁻¹)	Particle size			Texture §	EC (dS m ⁻¹)	CEC [¶] (cmol _c kg ⁻¹)	Exchangeable cation			MN _n K (mg K ₂ O kg ⁻¹)
(Sampling locality)								Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)				K ₂ O (mg kg ⁻¹)	CaO (mg kg ⁻¹)	MgO (mg kg ⁻¹)	
YG				Fine-textured													
(Tsuruoka, Yamagata, Japan)	38.26° N	140.25° E		Haplic Gray Lowland soil	6.3	4.5	31.7	45.5	29.5	24.9	CL	0.07	26.5	474	3820	611	510
NG				Fine-textured													
(Shibata, Niigata, Japan)	37.94° N	139.37° E		Mottled Gley Lowland soil	5.2	4.0	13.3	76.4	14.3	9.4	SL	0.06	7.6	99	673	143	1080
MZ				Fine-textured													
(Sadowara, Miyazaki, Japan)	32.01° N	131.46° E		Haplic Gray Lowland soil	5.8	4.3	15	55.2	22.7	22.1	CL	0.04	11.6	46	1300	208	252
KG				Coarse-textured													
(Minamisatsuma, Kagoshima, Japan)	31.48° N	130.34° E		Haplic Gray Lowland soil	5.6	4.0	2.8	76.7	12.4	10.9	SL	0.03	4.5	118	408	89	201
MI				Fine-textured													
(Iga, Mie, Japan)	34.63° N	136.48° E		Mottled Gley Lowland soil	6.2	4.8	15.6	48.2	25.7	26.1	LiC	0.06	13.2	111	2070	350	1760
MM				Fine-textured													
(Matsusaka, Mie, Japan)	34.70° N	136.13° E		Haplic Gray Lowland soil	6.5	5.5	25.2	44.6	28.9	26.6	LiC	0.14	19.9	108	3740	435	1000

[†] Classification of cultivated soils in Japan, third approximation (Cultivated Soil Classification Committee, 1995)[‡] T-C: Total carbon content
[§] CL: Clay Loam, SL: Sandy Loam, LiC: Light Clay[¶] CEC: Cation exchange capacity
^{||} MN_nK: Non-exchangeable K by hot nitric acid method, [K extracted by 1 M HNO₃ with boiling] – [exchangeable K]
(Mizutani *et al.*, 2024)

3.2.3 栽培実験

3.2.3.1 栽培実験 I

栽培実験 I は、6 地域から採取した水田土壌 (YG, NG, MZ, KG, MI, MM) を用いて、土壌と exK 量の違いが ReK に与える影響を明らかにすることを目的に実施した。各土壌の exK 含量は、栽培前に珪砂 (アルバニー珪砂：オーストラリア西部産珪砂, トウチュウ (株), 愛知県美浜町) と混合することで調整した。各土壌における珪砂との混合比は, YG 土壌で, 元土割合で 25, 50, 75%, その他の土壌では, 元土割合で 25, 50, 100% (重量比) の 3 段階とした。栽培実験 I では, 施肥による K の供給は行わなかった。栽培実験は 1/2000a ワグネルポットで行った。雨水や灌漑水による K の供給を避けるため, 移植後, イネはビニールハウス内において湛水条件下で栽培した。また, 灌漑水には脱イオン水を用いた (Photo. 3-1)。

K 以外の養分として, 硫安 (1.0 g pot^{-1}), ようりん ($6\sim 12 \text{ g pot}^{-1}$), 50 日溶出型窒素肥料 ($2.5\sim 4.0 \text{ g pot}^{-1}$) (LP-50, ジェイカムアグリ (株), 東京), 苦土石灰 ($5\sim 40 \text{ g pot}^{-1}$) (白石カルシウム (株), 大阪) を施用した (Table 3-2)。窒素肥料およびリン酸の施用量は, 各土壌の成分量が同程度になるように考慮して決定した。

イネの栽培は稚苗移植により行った。育苗には育苗用培土 (クリーン2号, 揖斐川工業 (株), 岐阜県大垣市) を用い, 128穴セルトレイを用いて15日間育苗した (Photo. 3-2)。育苗したイネの苗 (葉齢: 3.5葉) を, ワグネルポットごとに3本で移植した。イネの栽培は, 6月1日に移植を行い, 成熟期となった9月5日 (移植後96日) まで行った。実験を行った栽培期間は, 一般的なイネの栽培時期に相当する。各実験区は3反復で行った。



Photo. 3-1. Cultivation experiment in green house. (Mizutani *et al.*, 2024)



Photo. 3-2. Rice seedlings for transplant. (Mizutani *et al.*, 2024)

Table 3-2. The amount of fertilizer applied in the cultivation experiment I.

Soil code	Ammonium sulfate ^{†)}			Fused phosphate ^{‡)}			Coated fertilizer as nitrogen ^{§)}			Dolomite ^{¶)}		
	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H
	(g pot ⁻¹)			(g pot ⁻¹)			(g pot ⁻¹)			(g pot ⁻¹)		
YG	1	1	1	12	12	6	4	3.5	2.5	25	5	5
NG	1	1	1	12	12	12	4	4	3.5	40	40	40
MZ	1	1	1	12	12	12	4	3.5	2.5	40	40	15
KG	1	1	1	12	12	12	4	4	4	40	40	40
MI	1	1	1	12	12	12	4	3.5	2.5	40	25	15
MM	1	1	1	12	6	6	4	3.5	2.5	25	5	5

^{†)} Nitrogen is contained as ammonium form and the nitrogen content is 21%.

^{‡)} Proportion of phosphorus extracted as phosphoric acid by 2% citric acid solution is 20%.

^{§)} Nitrogen is contained as urea form and the nitrogen content is 42%. It is a nitrogen fertilizer

^{¶)} Its alkaline content is 55%.

^{† ‡)} L: 25% of original soil in mixed soil, M: 50% of original soil in mixed soil, H (YG): 75% of original soil in mixed soil, H (other soils): 100% of original soil in mixed soil.

(Mizutani *et al.*, 2024)

3.2.3.2 栽培実験Ⅱ

栽培実験Ⅱは、イネに対する K 欠乏状態がより厳しい条件下において、ReK にあたえる影響を明らかにすることを目的とした。

MI 土壌に珪砂（アルバニー珪砂）を混合することで交換性 K 含有量を調整した。珪砂との混合土壌中の MI 土壌の割合は、元土割合で 25, 50, 100%（重量比）の 3 水準とした。栽培には、1/5000a ワグネルポットを用いた。これにより、イネ 1 株当たりの土壌量を、栽培試験Ⅰに比べ、1/3 程度とした。栽培環境は、栽培実験Ⅰと同様に、ビニールハウス内で行い、灌漑水に脱イオン水を用いて行った。

移植前の混合土壌には、K 以外の成分として窒素肥料、ようりん、苦土石灰を施用した。施肥量は、硫安は全ポットで 0.5 g pot^{-1} 、50 日溶出型窒素肥料（LP-50）を、混合比 25% および 50% 区で 2.5 g pot^{-1} 、100% 区で 1.5 g pot^{-1} 、ようりんは全試験区で 6 g pot^{-1} 、苦土石灰は、25% 区で 25 g pot^{-1} 、50% 区で 5 g pot^{-1} 、100% 区で 5 g pot^{-1} 施用した。窒素、ようりん、苦土石灰の施肥量は、それぞれの土壌に含まれる成分を考慮し、K 以外の成分によって生育に違いが出ないように対応した。

混合比を3段階に調整した各試験区において、Kの施用量は、0, 100, 200, 400 $\text{mg K}_2\text{O pot}^{-1}$ の4レベルとした。各施用量は 0, 50, 100, 200 $\text{kg K}_2\text{O ha}^{-1}$ に相当する。Kの施用は、10%塩化カリ水溶液で行った。移植時と栽培中期（移植後45日）の2つの時期に半量ずつ施用した。栽培実験Ⅰと同様の方法でイネの育苗を行い、ポットごとに稚苗（葉齢：3葉）3本を移植した。イネの栽培は、6月1日に移植を行い、成熟期となった9月5日（移植後96日）まで行った。各実験区は3反復で行った。

3.2.4 化学分析

3.2.4.1 植物体分析

栽培後、植物体を地上部と地下部に分けて処理を行った。地上部は穂と葉の部分に分けて分析を行った。土壌を含む地下部は、土壌と植物体を分離せずにポットから取り出し、予備的に風乾した。その後、手作業で土壌と植物体（地下部）を分離した。穂、茎葉、地下部は分離後、60°Cで乾燥した（作物分析法委員会、1975）。植物体中の K 含有量は、穂、茎葉、地下部を別々に処理して測定した。乾燥した植物体を各部位ごとに秤量し、粉碎して粉末にした。植物体から K を抽出するため、粉末試料 1.00 g を 550°C で 4 時間乾式灰化した後、20%塩酸 3 mL を加え、ホットプレート上で 5 分間加熱し、ろ過後、脱イオン水で 100 mL に定容した。抽出液中の K 濃度は、誘導結合プラズマ発光分光分析装置（ICP-OES: Agilent 5100, Agilent Technologies, Santa Clara, CA）で測定した。イネが土壌から吸収した K 量は、イネの穂、茎葉、地下部分の K 含有量を合計し、イネ苗の K 含有量を差し引いて算出した。

3.2.4.2 土壌分析

熱硝酸法による K 抽出以外は、2.2.2 と同じ操作で分析を行った。熱硝酸法は、土壌 2.5 g を三角フラスコにとり、1 mol L⁻¹ HNO₃ を 25ml 加えて沸騰させながら抽出を行い、抽出液を 100ml に定容した（土壌養分測定法委員会、1970）。抽出した成分は ICP-OES（Agilent 5100）で測定した。

3.2.5 統計解析

統計解析には、R バージョン 4.3.0（R Core Team 2023）を用いた。単回帰分析は、最小二乗法により行った。相関係数はピアソンの相関係数を用いた。

3.3 結果

3.3.1 土壌および交換性Kが非交換性カリからのカリ溶出におよぼす影響 (栽培実験I)

栽培実験 I では、イネの乾物重は栽培前 exK のレベルに影響され (Figure 3-2a), イネが吸収した K の量にも影響された (Figure 3-2b). イネの乾物重は, 栽培前 exK が $1000 \text{ mg K}_2\text{O pot}^{-1}$ 以上, イネが吸収した K の量が $1000 \text{ mg K}_2\text{O pot}^{-1}$ 以上の時に, $200 \sim 250 \text{ g pot}^{-1}$ でほぼ上限に達した. 栽培前 exK が $1000 \text{ mg K}_2\text{O pot}^{-1}$ 未満では, イネの乾燥重量は 150 g pot^{-1} 以下にまで減少し, K 欠乏症状が観察された (Photo. 3-3). 調査した 6 土壌のうち, イネに K 欠乏症状が見られなかったのは YG 土壌だけであった. これは, 珪砂による希釈が最も大きかった試験区 (希釈 25%) でも栽培前 exK が $1304 \text{ mg K}_2\text{O pot}^{-1}$ と高く, 栽培期間中も exK 量が高く保たれたためと考えられる.

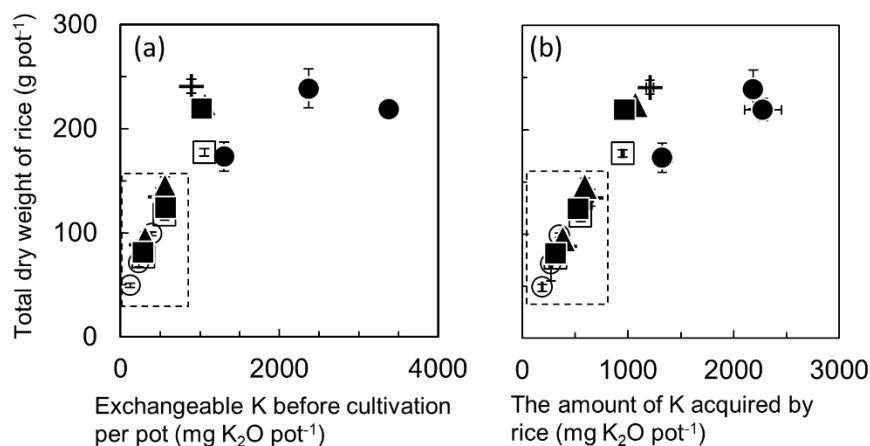


Figure 3-2. The total dry weights of rice grown on six soils (●: YG, +: NG, ○: MZ, ▲: KG, □: MI, and ■: MM) diluted with different rates of silica sand (the percentages of soils were 25, 50, 75, or 100%), as affected by exchangeable K before cultivation (a) and the amount of K acquired by rice (b). Error bars are $\pm$ standard deviations ($n = 3$). Potassium deficiency symptoms were observed in all plots in the inside area of the dotted box. (Mizutani *et al.*, 2024)



Photo. 3-3. Potassium deficiency symptoms in rice leaves. (Mizutani *et al.*, 2024)

Figure 3-3a に、元土壌あたりの ReK 量と栽培前 exK 量の関係を示した。また、イネが吸収した K 量に対する ReK の割合を Figure 3-3b に示した。6 土壌を通して、ReK の量は元土当たりで 14～137 mg K₂O kg⁻¹ (Figure 3-3a) であり、イネが吸収した K 量の 10～61% に相当した (Figure 3-3b)。特に、YG 土壌は、25% まで希釈した時、137 mg K₂O kg⁻¹ の ReK となり、栽培実験 I で確認された ReK 量の中で最も多いものとなった。しかし、75% の希釈では、ReK 量は 33 mg K₂O kg⁻¹ に減少した。MZ および KG 土壌も土壌の希釈率、すなわち、栽培前のポット当たり exK 量の減少にともなって ReK 量が増加し、25% 希釈で、ReK 量はそれぞれ 44 および 54 mg K₂O kg⁻¹ であったが、希釈しなかった場合（元土壌 100%）は、それぞれ 14 および 26 mg K₂O kg⁻¹ に減少した。NG, MI, MM 土壌では、ReK 量は希釈率と関連した変化は無く、その範囲はそれぞれ 51～73, 27～33, 24～44 mg K₂O kg⁻¹ であった。このように、6 土壌は、ReK に関して異なる特性を示した。

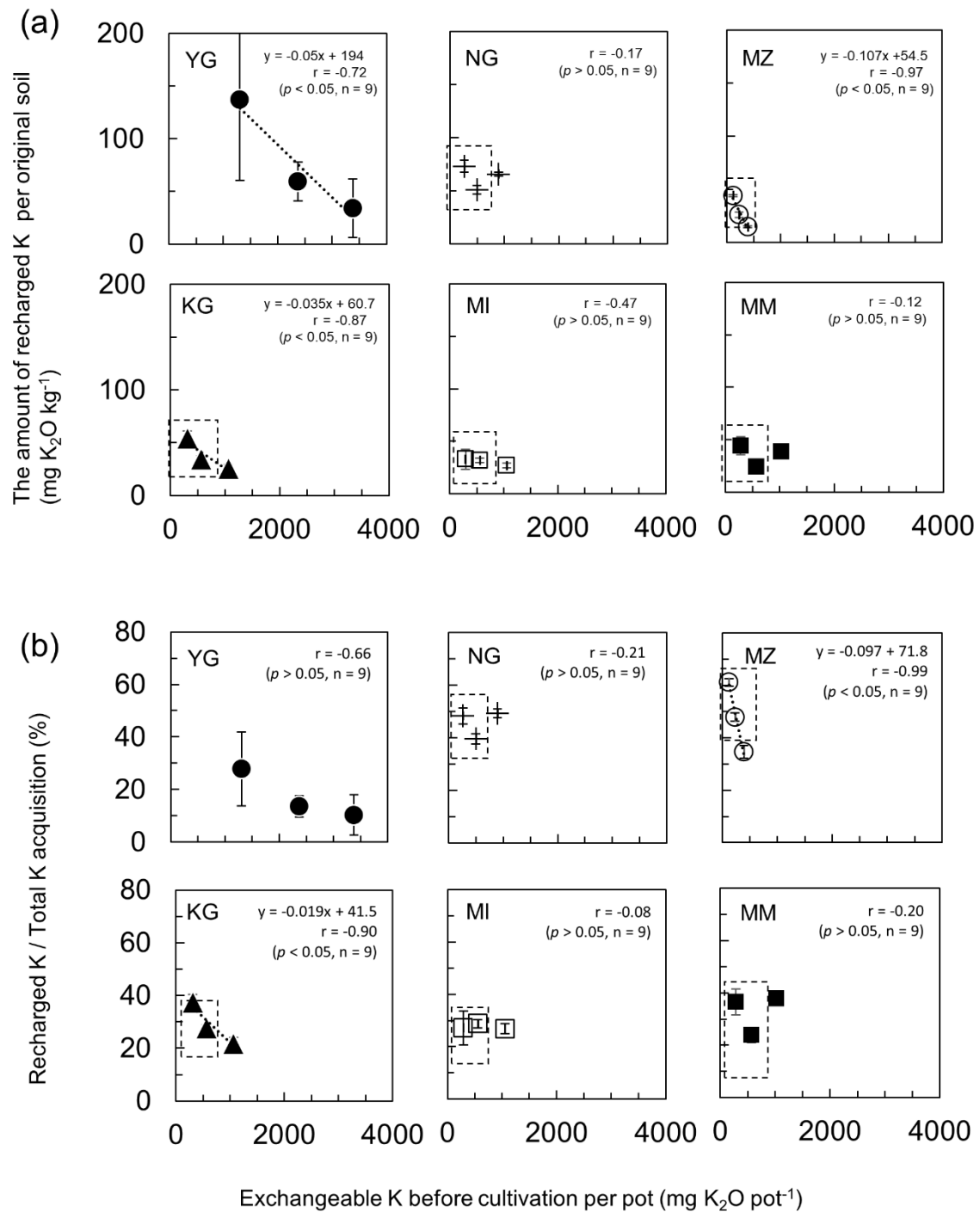


Figure 3-3. The amount of recharged K (a) and percentage of the recharged K to the amount of total K acquired by rice (b) as affected by the exchangeable K before cultivation per pot on six soils (●: YG, +: NG, ○: MZ, ▲: KG, □: MI, and ■: MM) diluted with different rates of silica sand (the percentages of soils were 25, 50, 75, or 100%). The dotted line represents a linear regression curve. Error bars are $\pm$ standard deviations ($n = 3$). Potassium deficiency symptoms were observed in all plots in the inside area of the dotted box. (Mizutani *et al.*, 2024)

栽培後, すべての土壌において, exK の残存が確認された. 栽培前後における exK の関係を Figure 3-4 に示した. MZ および KG 土壌では, 栽培後 exK 量は, 栽培前 exK 量に大きな影響を受けていなかった. 一方, YG, NG, MI および MM 土壌では, 栽培後 exK 量において各試験区間で有意に差異が認められた. しかし, 栽培後 exK 量における違いは, 栽培前 exK 量の違いよりも, かなり小さかった. Figure 3-5 に, 栽培前後における土壌の K 飽和度 (CEC に対する exK の電荷量の割合) の関係を示した. 全ての希釈割合において, 有意に相関が認められた ($r = 0.85 \sim 0.96$, $p < 0.01$). イネは栽培前 exK 量が異なる環境下で K を吸収している. しかし, 栽培後の exK 飽和度は, 6 土壌を通し, すべての希釈率で, 元土壌における exK 飽和度の 20~22% に保たれていた.

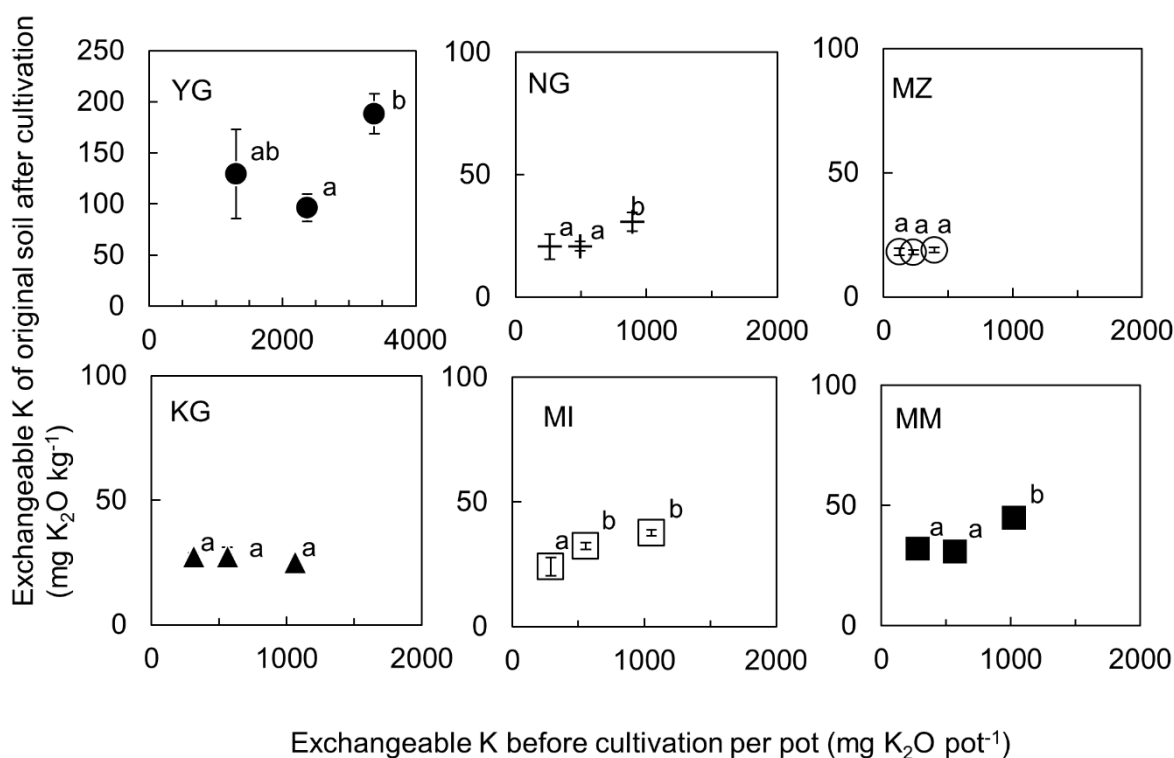


Figure 3-4. Relationship between exchangeable K before cultivation per pot and exchangeable K after cultivation per original soil for YG (●), NG (+), MZ (○), KG (▲), MI (□), and MM (■) soils. Error bars are $\pm$ standard deviations. The same letter indicates that the difference is insignificant in a graph (Tukey-Kramer test, $p < 0.05$, $n = 9$). (Mizutani *et al.*, 2024)

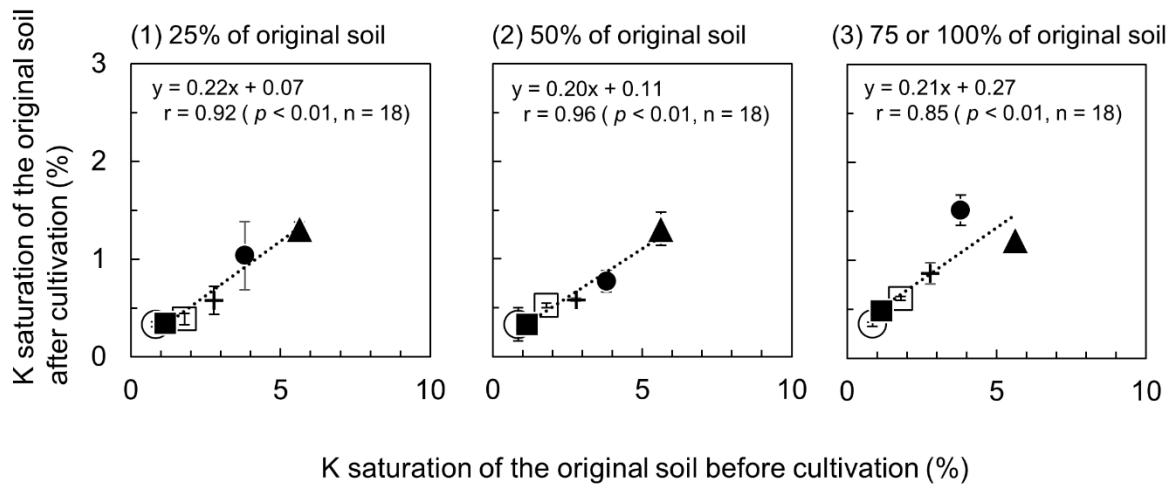


Figure 3-5. Comparison between the K saturation values before and after cultivation of the original soils (●: YG, +: NG, ○: MZ, ▲: KG, □: MI, and ■: MM) diluted with different rate of silica sand (the percentages of original soils were 25, 50, 75, or 100%). The dotted line represents a linear regression curve. Error bars are $\pm$ standard deviations ($n = 3$). (Mizutani *et al.*, 2024)

3.3.2 カリ欠乏環境が非交換性カリからのカリ溶出におよぼす影響（栽培実験Ⅱ）

栽培後イネの乾物重は、珪砂による MI 土壌の希釈率および施肥 K 量に大きく影響された (Figure 3-6a). また、乾物重の変化は、[栽培前 exK + 施肥 K]量 (Figure 3-6b) およびイネが吸収した K 量 (Figure 3-6c)に対応しており、イネの生育量は栽培前 exK および施肥 K によって制御されていた。

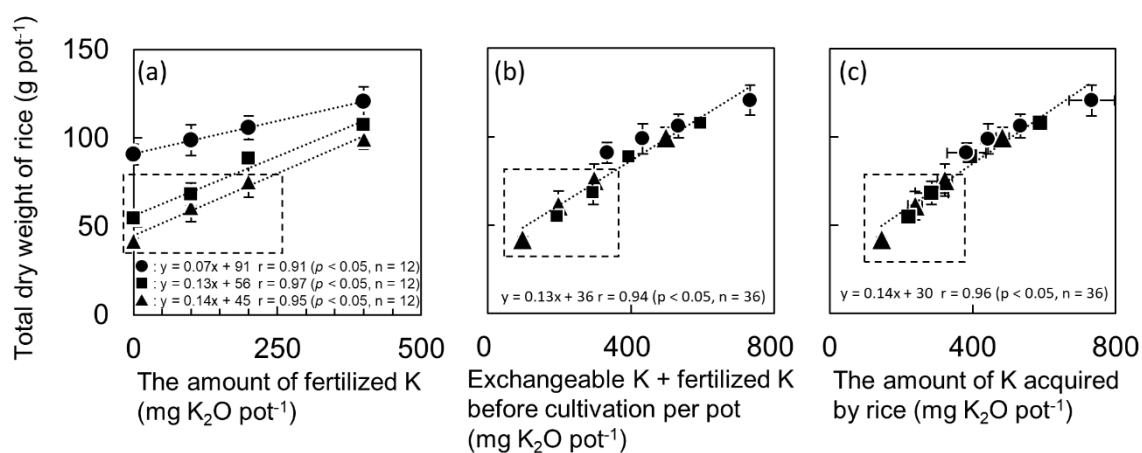


Figure 3-6. The total dry weight of rice grown on MI soils diluted with different rates of silica sand as affected by the amount of fertilized K (a), [exchangeable K + fertilized K] (b), and the amount of K acquired by rice (c)(cultivation experiment II). The percentages of the original soil (MI soil) diluted with silica sand (w:w) were 25% (▲), 50% (■), and 100% (●). The dotted line represents a linear regression curve. Error bars are $\pm$ standard deviations. Potassium deficiency symptoms were observed in all plots in the inside area of the dotted box. (Mizutani *et al.*, 2024)

Figure 3-7 では、ReK 量と [栽培前 exK + 施肥 K]量との関係 (Figure 3-7a) およびイネによる K 吸収量に対する ReK の割合と [栽培前 exK + 施肥 K]量との関係 (Figure 3-7b) を示した。

元土 50%区および 100%区では、ReK 量は[栽培前 exK+施肥 K]量による影響が見られず、それぞれ 33~43, 43~56 mg K₂O kg⁻¹であった。一方、25%区では、[栽培前 exK+施肥 K]量が 35 から 88 mg K₂O kg⁻¹に減少すると、ReK 量は有意に増加した ($r = -0.79$, $p < 0.01$, $n = 12$)。栽培試験Ⅱの 25%区では、[栽培前 exK+施肥 K]量は 97~497 mg K₂O pot⁻¹であった (Figure 3-6b) が、

栽培実験Ⅰでは栽培前 exK の量は 285～1030 mg K₂O pot⁻¹であった (Figure 3-2a). このことから、栽培実験Ⅱの 25%区では、イネが吸収可能な K の量が大幅に少なかったことが、MI 土壌中の non-exK 画分からの K の溶出を促進したと考えられる。

イネによる K 吸収量に対する ReK の割合は、25, 50, 100%区すべてで、[栽培前 exK + 施肥 K] 量と有意な相関関係が認められた ($r = -0.78 \sim -0.92$, $p < 0.01$, $n = 12$). この相関関係は、栽培実験Ⅰではみられなかった。

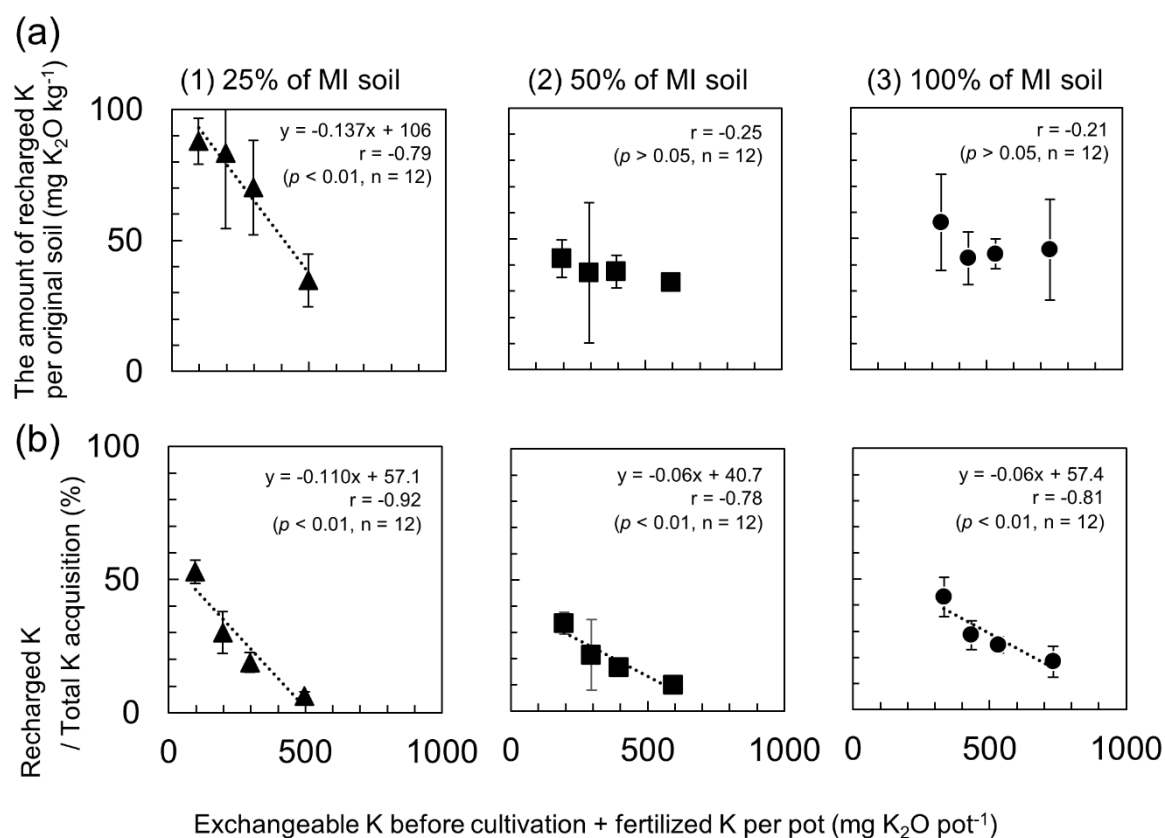


Figure 3-7. The amount of recharged K (a) and percentage of the recharged K to the amount of total K acquired by rice (b), as affected by [exchangeable K + fertilized K] per pot (MI soil). The rice was grown under the different rate application of K fertilizer on soils mixed with different rates of silica sand. The percentages of a soil (MI soil) diluted with a silica sand (w:w) were 100% (●), 50% (■), and 25% (▲). The dotted line represents a regression curve. Error bars indicate $\pm$ standard deviation. Potassium deficiency symptoms were observed for all plots in the inside area of the dotted box. (Mizutani *et al.*, 2024)

3.4 考察

3.4.1 交換性カリおよび土壌の違いが非交換性カリからのカリ溶出に与える影響

5 土壌 (NG, MZ, KG, MI, MM 土壌) において, 100%元土である試験区における ReK 量は元土当たり $14\sim66\text{ mg K}_2\text{O kg}^{-1}$ であり, 元土 75%に希釈した YG 土壌の ReK 量は $34\text{ mg K}_2\text{O kg}^{-1}$ であった (Figure 3-3a). イネが吸収した K 総量に対する ReK 量の割合は, 75%または 100%元土の試験区において $10\sim49\%$ であった (Figure 3-3b). 日本の水田土壌におけるイネの長期連続栽培試験において, イネが吸収した K 量と, 施肥 K, exK をもとに, 施肥 K, exK 以外からイネが吸収した K 量 (大部分は ReK と推定される) が推測されている. その推測値は, $44\text{ mg K}_2\text{O kg}^{-1}$ (糟谷ら 2022), $50\sim60\text{ mg K}_2\text{O kg}^{-1}$ (三浦ら, 2022), $20\sim40\text{ mg K}_2\text{O kg}^{-1}$ (高山, 園田, 2023) であり, 本研究で確認された ReK 量と同程度のものであった. 本研究はポットを用いた栽培試験によるが, 野外水田におけるイネ栽培においても, ReK に相当すると考えられる土壌からの K の供給が同程度確認されている. このことから, 水田におけるイネの生育において, ReK は重要な K 供給源であると考えられる.

さらに ReK 量が, exK 量に影響される土壌があることが明らかになった (Figure 3-3a, 3-7a). いくつかの土壌では, イネによる K 吸収が non-exK からの K 溶出を促進し, その溶出速度はイネもしくは土壌の K 栄養状態によって異なることが確認された. 同一土壌でも non-exK からの K 溶出速度が変化する現象は, 岡島, 松中 (1972b) によって示唆されていたが, 本研究によって YG, MZ, KG 土壌で, 明確に実証された. また, 栽培実験 I では, exK 量の変化に対して, NG, MI, MM 土壌の ReK 量に関連は認められなかったが, より厳しい K 欠乏条件とした栽培実験 II では, MI 土壌の ReK 量が栽培実験 I に比べて増加することが確認された.

これらの結果から、土壌中の exK 量を一定のレベルにするために non-exK から K が溶出する特性において、non-exK には、少なくとも次の 3 種類の画分があると考えられる。

(i) : exK の量に関わりなく K を一定量溶出する non-exK 画分。

この画分は、栽培実験 I において、NG, MI, MM 土壌では全ての試験区で、他の土壌においては、最も exK が多かった区で見られたもので、ReK は 14 (MZ 土壌) から 73 (NG 土壌) $\text{mg K}_2\text{O kg}^{-1}$ であった。

(ii) : イネに K 欠乏症状がでない、K 栄養状態が十分である条件下で、exK の減少に伴って K の溶出量が増加する non-exK 画分。

この画分は、栽培実験 I の YG 土壌で観察され、栽培前 exK 量の変化に応じて変化した ReK 量の最大値は、100 $\text{mg K}_2\text{O kg}^{-1}$ であった (Figure 3-3a)。

(iii) : イネに K 欠乏症状がでるほどの強い K 欠乏条件下において、exK の減少に伴って K の溶出量が増加する non-exK 画分。

この画分は、栽培実験 I の MZ, KG 土壌と栽培実験 II の MI 土壌で観察された。栽培実験では、栽培前 exK 量の変化に応じて変化した ReK 量は、それぞれ最大 30 (MZ 土壌), 28 (KG 土壌), 53 (MI 土壌) $\text{mg K}_2\text{O kg}^{-1}$ の ReK であった (Figure 3-3a, 3-7a)。

栽培実験 I において、供試した 6 土壌は、non-exK からの K 溶出に関して異なる特性を示した (Figure 3-3a)。これらの違いは、non-exK からの K の溶出速度や平衡状態となる exK 量のレベルの違いによると考えられる。その要因の一つとして鉱物組成の違いが考えられる (Dhillon and Dhillon, 1990 ; Gosh and Singh, 2001 ; Li *et al.*, 2016)。今後、各土壌が持つ non-exK からの K

溶出の特性を解明するためには、各土壌の鉱物組成について、さらに研究を行う必要がある。

本研究で明らかとなった non-exK における 3 つの画分について、イネ栽培における K 肥料の管理に適用すると、画分(ii)と(iii)は、K の施用によりイネが吸収する ReK の量が減少するが、画分(i)からイネが吸収する ReK 量は、exK が平衡状態における量より減少している限り、K の施用による影響を受けないと考えることができる。

今後、K 肥沃度に関する土壌管理において、ReK に関する土壌特性の違いの要因を明らかにすることが必要である。要因を解明することは、exK や K 施用が、ReK に与える影響を予測することに役立つと考えられる。

本研究では、non-exK の評価方法として一般的に用いられる熱硝酸法による測定も行った (Table 3-1)。その結果、熱硝酸法による測定値と ReK の間に相関関係は認められなかった。熱硝酸法によって抽出された K 量は、供試した 6 土壌で確認した ReK 量に対し非常に大きい値であった。イネが吸収しない K も多く抽出しており、水田土壌における ReK、すなわち non-exK からの K 溶出能を評価する土壌分析方法についても、さらに研究が必要である。

3.4.2 イネによるカリ吸収後の交換性カリの回復

イネによる吸収によって減少した exK 量が、non-exK から溶出する K によって回復することは、ReK に関する重要なプロセスと考えられる。栽培実験 I は、K 欠乏を含む様々な K 栄養条件下で行ったが、すべての土壌で栽培後に exK が検出され、栽培後 exK の量は珪砂による土壌の希釈割合にかかわらず、土壌ごとにほぼ同じ値を示した (Figure 3-4)。イネの生育において、non-exK よりも exK が優先的に吸収されると考えられる。減少した exK は、栽培実験における土壌の希釈割合に関

係なく、土壌ごとにほぼ一定の速度で、継続的に non-exK から溶出する K によって補充されたと考えられる。同様の現象は、いくつかの研究でも報告されている。糟谷ら（2022）は、17 年間にわたるイネの長期連続栽培試験における K 無施用試験区で、イネによる長期間の K 吸収にも関わらず、K 飽和度 0.87% に相当する $45 \text{ mg K}_2\text{O kg}^{-1}$ の exK が維持されていることを報告している。三浦ら（2022）も、同様の栽培実験を 10 年間行った結果、栽培後土壌において、exK は $40\sim 50 \text{ mg K}_2\text{O kg}^{-1}$ 、K 飽和度で 0.61~0.71% であったことを報告している。長期にわたる K 欠乏条件下での栽培において、exK がほぼ一定の値を維持したことは、注目すべきことである。粕谷ら（2022）が示唆したように、土壌中の non-exK と exK は溶解平衡状態にあり、これにより、non-exK の一部が溶出して、exK を補充したためと考えられる。

3.4.3 栽培上の土壌中カリ管理における可能性

非交換性 K からの K の溶出速度、もしくは、exK が補充される速度は、non-exK 画分の種類に依存すると考えられる。画分(i)は、exK 量が特定のレベルに達するまで、K 飽和度やイネによる K の吸収に関係なく、一定の速度で non-exK から K が溶出する。これに対し、画分(ii)と(iii)からの K の溶出は、イネによる K の吸収によって促進される。特に、画分(iii)からの K の溶出は、K 欠乏条件下でのみ起こる。

このような特性から、画分(iii)は、栽培上、K 供給源として期待することは望ましくない。一方、画分 (i) は、イネが利用可能な K の供給源と考えることができる。さらに、土壌 K 管理に役立てるためには、各タイプの non-exK 画分がもつ特性を決定づける要因について解明することが必要である。

3.5 要約

本研究では、6カ所の地域から採取した沖積土壌である水田土を用い、exK量、施肥K量の違いが、non-exKから溶出するK (ReK) 量に及ぼす影響を調べた。その結果、ReKの量は元土当たりで14~137 mg K₂O kg⁻¹あり、イネが吸収したK量の10~61%に相する結果となり、イネの栽培において、ReKも重要なK栄養源であることが示された。さらに、ReK量はexK量の影響を受けて変化することが明らかとなり、その特性は土壌により異なっていた。各土壌が示したReKに関する特性から、土壌中のexK量を一定のレベルに保つためのReKの動態に関して、non-exKには、少なくとも次の(i), (ii), (iii)の3種類の画分があることが明らかになった。画分(i)は、土壌中のexK量に関わらずKを溶出する画分、画分(ii)は、十分なKが存在する条件下でexK量の減少に伴ってKを溶出する画分、画分(iii)は、Kが著しいK欠乏条件下においてのみ、exK量の減少に伴ってKを溶出する画分。

土壌管理の視点から、画分(i)はイネが吸収可能なK画分であり、この画分からのKの溶出は、exK量のレベルが特定のレベルに達するまで続くと考えられる。画分(ii)と(iii)からのKの溶出は、イネによるKの吸収によるexKの減少によって促進されるものであり、特に画分(iii)からのK溶出は、強いK欠乏条件下でのみ発生するため、栽培上、画分(iii)からのK供給を見込むべきではないと考えられた。

第4章 総括

4.1 本研究のまとめ

三重県北中部（伊勢平野）と西部（上野盆地）における代表的な9か所の水田について、土壌断面特性、理化学性等を調査したところ、いずれも沖積土に由来し、日本土壌分類では沖積土大群に分類された。これにより、三重県の水田土壌を代表する土壌は、沖積土壌と判断した。一方で、停滞水や地下水による土壌の還元化において、個々に特性があり、管理上の注意点も明らかとなった。伊勢平野では、土壌表層の還元が強い農地があり、A層にグライ特徴が現れる土壌（ペドンM01, M02）が確認された。A層において強い還元状態を呈する土壌は、畑作物の生育への悪影響が懸念されるため、田畑転換を行う上で注意が必要である。上野盆地では、停滞水ならびに地下水の影響が全体に見られ、還元による鉄の溶脱の進行が懸念される土壌（ペドンM12, M13）が確認された。また、9地点を通じて、CECと粘土含有量に相関があり（ $r = 0.88, p < 0.01, n = 36$ ）、単位重量あたりの粘土鉱物が発生する負電荷量は、上野盆地と伊勢平野の水田土壌で同等であると考えられた。研究対象としているKに関して、地力増進法によって示されている改善目標を用いて、塩基飽和度による塩基バランスから判断を行った。その結果、全圃場で基準を満たしていたが、下限に近い土壌が多く、exCaに対して相対的に低い傾向が見られた。CaとKは、作物による吸収において拮抗関係にある。栽培管理上、注意が必要と考えられた。

沖積土壌を対象とし、三重県土壌2か所を含む6カ所から水田土壌を採取し、湛水条件下におけるイネの栽培下において、non-exKから溶出するK（ReK）に関する栽培試験を行った。イネによるK吸収下において、ReK量は14～137 mg K₂O kg⁻¹あり、イネが吸収したK量の10～61%に相当し

た。イネの生育において、ReKは重要な土壌成分であることが確認された。さらに、ReK量は、exKおよび施肥K量に影響されることが明らかとなり、その特性においてnon-exKは、少なくとも次の3種類が確認された。(i)：exKの量に関わりなくKを一定量溶出する画分。(ii)：イネにK欠乏症状がでない、K栄養状態が十分である条件下で、exKの減少に伴ってKの溶出量が増加する画分。(iii)：イネにK欠乏症状がでるほどの強いK欠乏条件下において、exKの減少に伴ってKの溶出量が増加する画分。

このうち、画分(iii)によるReKは、カリ欠乏環境下で増加するものであり、栽培上の利用は困難なものと考えられる。

三重県の伊勢平野の土壌（MM土壌）および上野盆地の土壌（MI土壌）は、栽培試験Iの環境において、non-exKからのK溶出がexKの影響を受けない画分(i)の性質を示した。この時、元土を希釈しない栽培条件で、ReKの量は、MM土壌が $39 \text{ mg K}_2\text{O kg}^{-1}$ 、MI土壌が $27 \text{ mg K}_2\text{O kg}^{-1}$ であった。類似の特性を示したNG土壌では $66 \text{ mg K}_2\text{O kg}^{-1}$ であり、これに比べ低く、non-exKからのK溶出速度は遅いものであった。三重県の水田土壌は、イネの栽培において、exKの減少や施肥Kの減少に対応して、ReKが増加することは期待できず、その溶出速度も遅い土壌と考えられる。また、土壌断面調査の結果から、地力増進法における改善目標を満たしているものの、exCaに対してexKが少ない状態にあった。これらの点から、土壌K肥沃度の管理において、K欠乏などに対して注意を要する土壌と考えらる。

4.2 残された課題

三重県北部と西部に位置する9か所の水田を代表的な農地として、土壌生成の観点から特性や分

類、管理上の課題などを検証した。しかし、土壌の特性は、地形や人為などの影響により局所的に違いを生じる可能性もある。さらに、調査を行い情報の蓄積を進めていく必要がある。

イネの栽培下において、ReKに関するnon-exKの画分には少なくとも3種類あることを示した。

しかし、各画分の特性の違いを生み出す要因については、明らかになっていない。要因の一つとして、鉍物組成の違いが考えられる。鉍物組成によって、non-exKの特性を推測することが可能となれば、栽培前の予測が可能となり、作物の作付け計画や施肥設計において、役立つものと考えられる。鉍物組成との関係については、粘土鉍物の他、細砂、粗砂の検証も必要と考えられる。

本研究はイネを対象としたが、ムギ、ダイズなどの畑作物においても、ReKに関するnon-exKの特性にイネと同様のものを見出せるのか。水田の高度利用を前提とするのであれば、検証していく必要がある。

さらに、熱硝酸法による評価を行ったが、イネによって吸収されるReK量との間に相関は認められなかった。1 M 硝酸を用いた熱硝酸法によるKの抽出量は、実際に吸収されたReK量に対して非常に大きい値であり、イネによる吸収に供しないKを多く抽出している可能性がある。量的な予測手法は、栽培管理上重要な手段となる。土壌のReK供給能力を予測できる分析方法について、既存の方法も含めて、検証していく必要がある。

謝辞

本研究の実施ならびに博士論文を作成するにあたり、多くの方々のご支援を賜りました。私の力の力では到底及びもつかないことであり、心より感謝申し上げます。

九州大学大学院農学研究院 平舘俊太郎教授には、大学院入学から本論文作成に至るまで、丁寧かつ親切に、手厚いご指導ご支援を賜りました。大変なお手間をお掛けしてしまったことをお詫びしますとともに、改めて感謝申し上げます。森裕樹助教には、大学での活動や実験方法、分析データの解析など、幅広くご指導ご支援を賜りました。厚く御礼申し上げます。また、平井康丸准教授には、ご多用にもかかわらず、副査をお引き受けくださいました。誠にありがとうございます。山北絵里研究員はじめ土壌学研究室の皆様にも、ご迷惑をお掛けしますとともに、実験実施に当たりご指導ご助言を賜りました。感謝申し上げます。

本研究は、三重県農業研究所において、農林水産省委託プロジェクトに参加したことから始まりました。この間、国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構の久保寺秀夫氏には、研究チームのリーダーとしてお世話になるとともに、論文作成にあたってもご指導を賜りました。厚く御礼申し上げます。現地調査では、生産者の方々にご理解をいただき、調査の機会を得ることができました。感謝申し上げます。職場でも多くの方々にご支援を賜りました。誠にありがとうございました。とりわけ、2023年度をもって定年退職された浦出知恵美氏には、分析方法など、まだ、何もわからない頃からお世話になり、本研究も氏無くしては到底できないものでした。感謝申し上げます。

最後に、わがまを聞いて送り出してくれた妻、文恵と子供たち、晃大、天亮に感謝します。

引用文献

- 赤井直彦, 鷺尾建紀, 田淵恵, 石橋英二. 2012. “岡山県南部水田土壌の化学性調査および水稻茎葉中のナトリウム含有率に基づくカリウム減肥指針の作成” 日本土壌肥科学雑誌, 83(3): 266-273.
- Ayres, A. S., M. Takahashi, and Y. Kanehiro. 1947. "Conversion of nonexchangeable potassium to exchangeable forms in a Hawaiian soil." *Soil Science Society of America Journal* 11(C): 175–181.
- Beckett, P. H. T. 1964a. "Studies on soil potassium: I. Confirmation of the ratio law: Measurement of potassium potential." *Journal of Soil Science* 15(1): 1-8.
- Beckett, P. H. T. 1964b. "Studies on soil potassium II. The ‘immediate’ Q/I relations of labile potassium in the soil." *Journal of Soil Science* 15(1): 9-23.
- Bray, R. H., and E. E. DeTurk. 1939. "The release of potassium from non-replaceable forms in Illinois soils." *Soil Science Society of America Journal* 3(C): 101–106.
- 地質調査総合センター. 1981. 5 万分の 1 地質図幅 (亀山). 産総研地質調査総合センターウェブサイト. <https://gbank.gsj.jp/datastore/download.php> (アクセス日 2023 年 11 月 25 日)
- 地質調査総合センター. 1996. 5 万分の 1 地質図幅 (上野). 産総研地質調査総合センターウェブサイト. <https://gbank.gsj.jp/datastore/download.php> (アクセス日 2023 年 11 月 25 日)
- 地質調査総合センター. 1998. 5 万分の 1 地質図幅 (名張). 産総研地質調査総合センターウェブサイト. <https://gbank.gsj.jp/datastore/download.php> (アクセス日 2023 年 11 月 25 日)
- 地質調査総合センター. 2003. 5 万分の 1 地質図幅 (水口). 産総研地質調査総合センターウェブサイト. <https://gbank.gsj.jp/datastore/download.php> (アクセス日 2023 年 11 月 25 日)
- DeDatta, S. K., and D. S. Mikkelsen. 1985. "Potassium Nutrition of Rice." *Potassium in agriculture*,

- edited by W. D. Bishop, W. L. Nelson, B. G. Ellis, E. C. Sample, D. A. Hoit, M. E. Sumner, L. S. Murphy, and R. D. Munson, 665-699. Madison, Wisconsin USA: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America.
- Dhillon, S. K., and K. S. Dhillon. 1990. "Kinetics of release of non-exchangeable potassium by cation-saturated resins from Red (Alfisols), Black (Vertisols) and Alluvial (Inceptisols) soils of India." *Geoderma* 47(3-4): 283-300.
- Dobermann, A., P. C. S. Cruz, and K. G. Cassman. 1996. "Fertilizer inputs, nutrient balance, and soil nutrient-supplying power in intensive, irrigated rice systems. I. Potassium uptake and K balance." *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 46: 1-10.
- 土壤環境分析法編集委員会. 1997. 土壤環境分析法. 土壤環境分析法編集委員会編, 博友社, 東京.
- 土壤養分測定法委員会. 1970. 土壤養分分析法. 土壤養分測定法委員会編, 養賢堂, 東京.
- 福井重郎, 伊藤隆二, 内山泰孝. 1951. “土壤水分が大豆の生育並びに収量に及ぼす影響に就いて 第Ⅲ報地下水位の高低が大豆の生育並びに収量に及ぼす影響” 関東東山農業試験場研究報告, 1: 9-14.
- Ghosh, B. N., and R. D. Singh. 2001. "Potassium release characteristics of some soils of Uttar Pradesh hills varying in altitude and their relationship with forms of soil K and clay mineralogy." *Geoderma* 104(1-2): 135-144.
- Grimes, D. W. 1966. "An evaluation of the availability of potassium in crop residues." *Iowa State University*:91pp..
- 濱田千裕, 谷俊男, 吉田朋史, 中嶋泰則, 城田雅樹, 釋一郎. 2001. “愛知県西三河地域におけるダ

- イズ栽培の実態調査による低収要因解明” 愛知県農業総合試験場研究報告, 33 : 87-92
- IUSS Working Group WRB. 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015
- International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps.
- World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome.
- IUSS Working Group WRB. 2022. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition.
- International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria.
- 金子文宜, 早見隆志, 橘田安正. 2019. “ダイズ連作転換畑の可給態窒素増強対策と窒素施肥法” 日本土壤肥料学雑誌, 90(3) : 207-211.
- 糟谷真宏, 安藤薫, 尾賀俊哉, 大橋祥範, 久野智香子. 2022. “愛知県での 95 年間の長期連用試験における水稻の収量と土壤化学性の変化および土壤カリウム供給機構について” 日本土壤肥料学雑誌, 93(1): 1-11.
- 川邊孝幸. 1981. “琵琶湖南東方, 阿山, 甲賀丘陵付近の古琵琶湖層群” 日本地質学会, 地質学雑誌 87(7) : 457-473.
- Kawabe Takayuki. 1989. Stratigraphy of the lower part of the Kobiwako group. Journal of geosciences Osaka City University, 32: 39-90.
- 川辺孝幸, 高橋裕平, 小村良二, 田口雄作. 1996. “上野地域の地質” 地質調査所, 地域地質研究報告(5 万分の 1 地質図幅) : 99pp..
- 経済企画庁総合開発局国土調査課. 1961. “土地分類基本調査 : 地形・表層地質・土壤調査 : 四日市 : 5 万分の 1” 国土地図 : 50pp..
- Kitagawa, Y., J. Yanai, and A. Nakao. 2018. "Evaluation of nonexchangeable potassium content of

- agricultural soils in Japan by the boiling HNO₃ extraction method in comparison with exchangeable potassium." *Soil Science and Plant Nutrition* 64(1): 116-122.
- 国土交通省木津川上流河川事務所. 2023. 2023 年度事業概要. 20p.
- 国土交通省国土地理院. 2016, 2017, 2019, 2020, 2022. 基盤地図情報 (数値標高モデル: 5m メッシュ, 10 m メッシュ). 基盤地図情報ダウンロードサービス. <https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php>. (アクセス日 2023 年 11 月 25 日)
- 国土交通省国土地理院. 2017. 地理院タイル (陰影起伏図). 国土地理院ウェブサイト. <https://cyberjapandata.gsi.go.jp/xyz/hillshademap/{z}/{x}/{y}.png> (アクセス日 2023 年 11 月 25 日)
- 国土交通省国土地理院. 2021. 基盤地図情報. 国土交通省国土地理院
- 久馬一剛. 1997. 最新土壌学, 朝倉書店, 東京
- Kusa, K., M. Moriizumi, S. Hobara, M. Kaneko, S. Matsumoto, J. Kasuga, and N. Ae. 2021. "Mineral weathering and silicon uptake by rice plants promote carbon storage in paddy fields." *Soil Science and Plant Nutrition* 67(2): 162–170.
- Li, T., H. Wang, Z. Zhou, X. Chen, and J. Zhou. 2016. "A new grading system for plant-available potassium using exhaustive cropping techniques combined with chemical analyses of soils." *Scientific Reports* 6(1): 37327.
- Matthews, B. C., and J. A. Smith. 1957. "A percolation method for measuring potassium-supplying power of soils." *Canadian Journal of Soil Science* 37(1): 21-28.
- McEwen, H. B., and B. C. Matthews. 1958. "Rate of release of non-exchangeable potassium by Ontario soils in relation to natural soil characteristics and management practices." *Canadian Journal of*

Soil Science 38(1): 36-43.

三重県企画振興部政策調整課. 1995. 土地分類基本調査（平成 7 年度調査）：「上野」・「水口」・「名張」, 5 万分の 1 表層地質図, 中央地図株式会社

三重県地域振興部地域振興課. 1988. 土地分類基本調査（昭和 61 年度調査）：桑名, 5 万分の 1. 中央地図. 47pp..

三重県地域振興部地域振興課. 1990. 土地分類基本調査（昭和 62-63 年度調査）：津西部・津東部：5 万分の 1. 中央地図. 41pp..

三重県地域振興部地域振興課. 1991. 土地分類基本調査（昭和 63 年度調査）, 松阪, 5 万分の 1. 中央地図. 34pp..

三土正則. 1974. “低地水田土壌の生成的特徴とその土壌分類への意義” 農林省農業技術研究所, 農業技術研究所報告, 25 : 29-115,

三浦吉則, 松本靖, 笹川正樹. 2022. “三要素, 有機物及び土壌改良資材の長期施用が水稻収量や水田土壌化学性に及ぼす影響” 福島県農業総合センター研究報告, 13 : 33-48.

望月久美子, 山崎修平, 長坂克彦, 花形敏男, 竹丘守. 2012. “県内農耕地におけるリン酸, カリ蓄積の現状” 山梨県総合農業技術センター研究報告, 5 : 31-34.

舩井隆志, 井澤敏彦. 2007. “77 年間継続した四要素無施用区と堆肥施用区にみられる水稻玄米収量の経年推移と各要素の施用効果” 日本作物学会紀事, 76(2) : 288-294.

Moriizumi, M. N. Ae, K. Ozawa, Y. Yoshida, R. Hamano, and K. Numadate. 2021. "Effects of weathering and silicic acid uptake by rice plants on weathered products-Quantitative changes in potassium, silica, and aluminum in granitic Fluvisol." *Soil Science and Plant Nutrition* 67(4): 439-445.

森沙織, 吉田孝紀. 2014. “三重県伊賀市大山田地域における古琵琶湖層群の鮮新統上野層-伊賀層の堆積環境” 信州大学環境科学年報 36 : 83-87.

森塚直樹. 2020. “農耕地土壌の可給態カリウム評価法” アグリバイオ= Agricultural biotechnology, 4(8) : 668-672.

中井信, 小原洋. 2003. “土壌環境基礎調査（定点調査）の概要” 日本土壌肥科学雑誌, 74(4) : 557-565.

中野聰志, 川辺孝幸, 原山 智, 水野清秀, 高木哲一, 小村良二, 木村克己. 2003. “水口地域の地質” 産総研地質調査総合センター, 地域地質研究報告（5 万分の 1 地質図幅）: 83pp..

中田均. 2022. “富山県の水田土壌におけるカリ肥沃度の変化と対策” 作物生産と土づくり, 日本土壌協会編, 54(3) : 33-38.

日本土壌協会. 2001. “土壌、水質及び植物体分析法” 日本土壌協会, 東京.

日本ペドロロジー学会第五次土壌分類・命名委員会. 2017. “日本土壌分類体系” 日本ペドロロジー学会, 53pp..

日本ペドロロジー学会編. 1997. “土壌調査ハンドブック 改訂版” 博友社, 東京, 169pp..

西岡芳晴, 尾崎正紀, 山元孝広, 川辺孝幸. 1998. “名張地域の地質” 地質調査所, 地域地質研究報告（5 万分の 1 地質図幅）, 72pp..

新良力也, 西田瑞彦, 森泉美子, 赤羽幾子, 棚橋寿彦, 佐藤 孝, 鳥山和伸, 木村 武, 矢内純太. 2010. “田畑輪換土壌の肥沃度変化のメカニズムと長期的管理の考え方” 日本土壌肥科学雑誌, 81(1) : 73-80.

農業・食品産業技術総合研究機構. “縮尺 5 万分の 1 農耕地包括土壌図. 土壌インベントリー” <https://soil-inventory.rad.naro.go.jp/offer.html>（アクセス日 2023 年 11 月 25 日）

農耕地土壌分類委員会. 1995. “農耕地土壌分類第3次改訂版” 農業環境技術研究所資料,
17: 79pp..

農林水産省. 2008. “地力増進基本指針” 農林水産省, https://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/hozen_type/h_dozyo/pdf/chi4.pdf (アクセス日 2024 年 1 月 5 日)

農林水産省. 2022a. “作物統計調査” 農林水産省, <https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotu/index.html> (アクセス日 2024 年 1 月 5 日)

農林水産省. 2022b. “食料・農業・農村基本法” 農林水産省, <https://www.maff.go.jp/j/kanbo/index.html> (アクセス日 2024 年 1 月 5 日)

農林水産省. 2022c. “作物統計調査, 令和4年産市町村別データ” <https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotu/index.html> (アクセス日 2023 年 11 月 25 日)

Öborn, I., Y. Andrist-Rangel, M. Askegaard, C. A. Grant, C. A. Watson, and A. C. Edwards. 2005.
"Critical aspects of potassium management in agricultural systems." *Soil Use and Management*
21(1): 102-112.

小原 洋, 大倉利明, 高田裕介, 神山和則, 前島勇治, 浜崎忠雄. 2011. “包括的土壌分類第1次試
案” 農業環境技術研究所報告, 29: 1-73.

小川和夫, 竹内豊, 片山雅弘. 1988. “北海道の耕草地におけるバイオマス生産量及び作物に
よる無機成分吸収量” 北海道農業試験場研究報告, 149: 57-91.

岡島秀夫, 松中照夫. 1972a. “土壌のカリウム供給力測定法としての AR^K , PBC^K の評価 (そ
の 1): AR^K について” 日本土壌肥科学雑誌, 43(11): 409-416.

岡島秀夫, 松中照夫. 1972b. “土壌のカリウム供給力測定法としての AR^K , PBC^K の評価 (そ
の 2): PBC^K について” 日本土壌肥科学雑誌, 43(12): 456-459.

- 大家理哉, 山本章吾, 赤井直彦. 2023. “岡山県南部の水田におけるリン酸及びカリウム肥沃度の実態と水稻作における減肥指針の適用に係る広域評価の可能性” 日本土壤肥料学雑誌, 94(1) : 64-71.
- Page, H. J., and W. Williams. 1925. "Studies on base exchange in Rothamsted soils." *Transactions of the Faraday Society* 20: 573–585.
- R Core Team. 2023. “R: A Language and Environment for Statistical Computing” R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- 産業技術総合研究所地質調査総合センター. 2020. 20 万分の 1 日本シームレス地質図 V2. 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- 作物分析法委員会. 1975. “栄養診断のための栽培植物分析測定法” 養賢堂, 東京.
- Sanyal, D., B. S. Brar, and G. S. Dheri. 2019. "Organic and inorganic integrated fertilization improves non-exchangeable potassium release and potassium availability in soil." *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 50(16): 2013-2022.
- 里口保文. 2015. “古琵琶湖層群下部層序の再検討” 地質学雑誌 121(4) : 125-139.
- Singh, M., V. P. Singh, and D. D. Reddy. 2002. "Potassium balance and release kinetics under continuous rice–wheat cropping system in Vertisol." *Field Crops Research* 77(2-3): 81-91.
- 孫 宇梅, 伊藤道秋, 荒木 肇, 山下米治. 2004. “作物の出芽, 生育に及ぼす土塊の大きさの影響” 日本農作業学会, 農作業研究, 39(3) : 151-156.
- Sparks, D. L., and P. M. Huang. 1985. "Physical chemistry of soil potassium." *Potassium in agriculture*, edited by W. D. Bishop, W. L. Nelson, B. G. Ellis, E. C. Sample, D. A. Hoit, M. E. Sumner, L. S. Murphy, and R. D. Munson, 201-276. Madison, Wisconsin USA: American Society of Agronomy,

Crop Science Society of America, Soil Science Society of America.

Stewart, E. H., and N. J. Volk. 1946. "Relation between potash in soils and that extracted by plants." *Soil Science* 61(2): 125–130.

住田弘一，加藤直人，西田瑞彦. 2005. “田畑輪換の繰り返しや長期畑転換に伴う転作大豆の生産力低下と土壌肥沃度の変化” 東北農業研究センター研究報告，103：39–52.

橘 尚明，吉川重彦，松田兼三，辻 久郎. 1987. “三重県平坦部の水田転換畑における多収ダイズの栽培条件”三重県農業技術センター，三重県農業技術センター研究報告，15：1-10.

高山尊之，園田敬太郎. 2023. "滋賀県の肥料三要素の長期連用試験における水稻収量と各要素の推移: 直近 27 年間の解析" 滋賀農業技術振興センター研究報告, 56: 1–13, (in Japanese).

Wang, J. J., D. L. Harrell, and P. F. Bell. 2004. “Potassium buffering characteristics of three soils low in exchangeable potassium.” *Soil Science Society of America Journal* 68(2): 654-661.

山崎 傳. 1952. “畑作物の湿害に関する土壌化学的並に植物生理学的研究” 農業技術研究所報告，B，土壌・肥料，1：1–92.

Yanai, J., N. Inoue, A. Nakao, M. Kasuya, K. Ando, T. Qga, T. Takayama, H. Hasukawa, K. Takehisa, A. Takamoto, K. Tagami, and T. Takahashi. 2023. "Use of soil nonexchangeable potassium by paddy rice with clay structural changes under long-term fertilizer management." *Soil Use and Management* 39(2): 785-793.

横山卓雄. 1968. “鮮新世末期における古琵琶湖の変遷，とくに岩相変化と斜層理から知られる古水流系を中心として: 近畿地方の新时期新生代層の研究，その 11” 地質学雑誌 74(12)：623–632.

Yokoyama Takuo 1969. Tephrochronology and paleogeography of the Plio-Pleistocene in the eastern Setouchi geologic province, southwest Japan." *Memoirs of the Faculty of Science, Kyoto University. Series of geology and mineralogy* 36(1): 19-85.

吉永長則, 溝田智俊, 中井 信. 1983. “土壤非晶質粘土成分の分析法 選択溶解－示差赤外線吸収スペクトル法” *粘土科学*, 23(1) : 31-37.

Zhang H., M. Xu, X. Shi, Z. Li, Q. Huang, and X. Wang. 2010. "Rice yield, potassium uptake and apparent balance under long-term fertilization in rice-based cropping systems in southern China." *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 88: 341-349.

Zörb, C., M. Senbayram, and E. Peiter. 2014. "Potassium in agriculture—status and perspectives." *Journal of Plant Physiology* 171(9): 656-669.

Summary

After 2000, under the Basic Plan for Food, Agriculture and Rural Areas Act by the Japanese Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries, farmers have been encouraged to introduce multiple cropping systems in many paddy fields to increase food self-sufficiency, such as growing wheat and soybean after rice, with three-crop cultivation in a two-year system. Compared with those of the rice monoculture system, the removal rates of nitrogen, phosphate, and potassium (K) from soils (as a form of harvested crops) are many in the rice-wheat-soybean cultivation system. Several reports on paddy soil in Japan have indicated that K content in soil has been decreasing and that lower K content is a factor in lower yield and quality of rice, wheat, and soybean. Exchangeable K (exK) is defined as K extractable with a 1 mol L⁻¹ ammonium acetate solution, and the exK has been used to evaluate the soil K fertility in Japan. However, plants are known to absorb K not only from the solution and exchangeable K fractions, but also from K recharged the non-exchangeable K(non-exK) fractions (ReK). It is important to investigate K fertility management techniques in soil, including K recharging from non-exK, for sustainable soil management, and it is necessary to elucidate the dynamics of K from non-exK in paddy rice, which are key crops, and paddy soils.

In Chapter 1, the problems of soil management, caused by the full use of paddy fields are presented based on some reports. Additionally, the purpose of this study is presented along with previous reports on non-exK.

In Chapter 2, the properties and classifications were investigated on paddy field soils in the north-central (Ise Plain) and western (Ueno Basin) areas in Mie Prefecture, Japan. All the nine pedons were

classified into Fluvic soils in the Soil Classification System of Japan. On the other hand, the environment related to groundwater and the reduction of soil had individual property, which also served as a point of caution in soil management. In the Ise Plain, some soils are highly reduced in the surface layer of soil, and gley appear in A horizon. This should be taken into consideration when using for field crops. In the Ueno Basin, the influence of groundwater was observed throughout the area, and there were soils where there was concern about iron leaching due to reduction. Furthermore, a significant correlation was found between clay contents and cation exchange capacities for the paddy soils from both areas, suggesting that the amounts of negative charge developed per a unit weight of clay were similar among them.

In Chapter 3, the effects of exK and fertilizer K on ReK were examined under rice cultivation in paddy soils that were Fluvic soils.

In Cultivation experiment I, the test soils from six sites were used and diluted with silica sand to adjust the content of exK. In the result, all the test plots showed K supplied from non-exK for rice grown, confirming that ReK was an important source of K in rice cultivation. In three out of six soils, the amounts of ReK were affected by the amounts of exK levels. In the other three soils, ReK was not affected by exK. Although the cultivation experiments were conducted under various K conditions including severe K deficiency, exchangeable K was detected after cultivation in all soils, and the contents of exchangeable K were almost identical for each soil regardless of the dilution ratio of soil with quartz sand.

In Cultivation experiment II, it was tested under conditions of lower content of K than cultivation experiment I. The test soil used was the soil in which no relationship between exK and ReK was found

in Cultivation experiment I. In addition, the relationship between fertilizer K and ReK was examined with using 10% potassium chloride solution. The results showed that recharged K increased with decreasing fertilizer K in the test plot with the highest soil dilution. The results showed that recharged K increased with decreasing fertilizer K in the test plot with the highest soil dilution.

Accordingly, there would be at least three types of non-exchangeable K fractions which dissolve into soil solution to attain a specific level of exchangeable K: (i) a non-exchangeable K fraction that releases K regardless of the exchangeable K level; (ii) a non-exchangeable K fraction that easily releases K with the decrease in exchangeable K under sufficient K conditions without inducing K-deficient symptoms in rice; and (iii) a non-exchangeable K fraction that releases K with the decrease in exchangeable K only under severe K-deficient conditions with accompanying deficient symptoms in rice.

In soil K fertility management, fraction (iii) could not be expected to be a source of K for rice cultivation, while fraction (i) was considered to provide K for rice cultivation. The fraction of two Mie soils were a fraction (i).

In Chapter 4, the properties of paddy field soils in Mie Prefecture, ReK properties, and soil management on ReK were summarized and future issues were discussed. The representative paddy soils in Mie, Japan were investigated. The results showed that there were differences in the effects of stagnant water and groundwater, and some management issues were clarified, but all the soils were alluvial soils. The K nutrition in these soils met the basic improvement target but tended to be low in the base balance to exchangeable calcium, and thus requires attention. There would be at least three types of non-exchangeable K fractions on ReK under rice cultivation in relation to exK and fertilizer

K. The non-exK fractions that supplied K under K-depleted conditions were not expected to be a source of K for rice cultivation. On the other hand, the factors responsible for the properties of each non-exK fraction have not been clarified. It would be necessary to clarify the factors from the viewpoint of mineral composition, etc. It would be also necessary to investigate analytical methods to estimate the K supplying capacity of soils containing ReK.

