

有機質肥料を長期連用した山田錦圃場における植物体元素組成と土壤溶液中のイオン組成の関係

環境学部環境学科 角野 貴信
杉山 凌佑

1. 緒言

1. 1. 有機質肥料の施用と土壌の変化

有機質肥料の施用は、2030 年までに化学肥料の使用を 20%削減するという、「みどりの食料システム戦略」における KPI2030 目標（農林水産省 2022）に合致する栽培技術であり、2022 年 7 月に施行された「みどりの食料システム法」に基づき、全国で様々な促進策がとられはじめている。鳥取県においても 2023 年 3 月に「鳥取県みどりの食料システム基本計画」が公表され、2027 年度までに有機・特別栽培面積を 2,000ha へと拡大する数値目標が含まれているものの、2022 年度末時点で 995ha にすぎず、減少から拡大に転じる方策の実施が急務となっている（鳥取県ほか 2023）。

鳥取県内の土壌に与える有機質肥料の影響を詳細に調べることで、生産現場において有機質肥料がどのように環境に作用しているかを明らかにすることができ、そのメリットを可視化することにつながる。その際に注目すべき土壌環境指標として、土壌窒素含量が挙げられる。土壌窒素の増加は、「地力」の増加を示すだけでなく、土壌有機物として大気中の二酸化炭素が固定されていることを示し、土壌中への炭素固定量の指標ともなり得る。角野ら（2022）は、鳥取県八頭町において牛糞堆肥をベースにした有機質肥料を連用して水稻作を行っている A 農場について、連用年数が土壌窒素に与える影響を調べた。連用年数が 1~40 年の圃場における土壌窒素含量は、連用年数に対応して高くなる傾向を示したことから、連用年数が長い水田においては、投入された堆肥が腐植化し、蓄積されているものと考えられた。一方、伊藤（2023）の報告によると、2022 年に採取された土壌における土壌窒素含量と粘土含量の間に正の相関がみられた。本圃場では、酒米である山田錦の稲もみとしての窒素持ち出し量に対し、窒素施用量はほぼ同量であることが示唆されており、このような土壌管理においては、連用年数よりむしろ圃場間の土壌のばらつきが土壌中の窒素蓄積量に影響していると考えられた。

投入した有機質肥料が土壌窒素として蓄積せず、そのほぼ全量が作物である水稻に吸収されているとしても、その窒素の移動は土壌溶液を介して行われているはずであり、土壌溶液中の元素組成が、水稻中の元素組成に反映されていると考えられる。これまで、水稻中の窒素含量を経時的に追跡することは行われてきたものの、これらの圃場において、土壌溶液中の元素組成の変化と、水稻中の元素組成を直接比較した研究は行われてこなかった。

1. 2. 研究の目的

そこで本研究では、先行研究においても対象圃場であった、有機質肥料の長期連用圃場において、土壌溶液を経時的に採取してその元素組成を調べることで、水稻植物体への吸収がどのように行われているか明らかにすることを目的とする。

2. 試料と方法

2. 1. 試料

鳥取県八頭町に位置する長期堆肥連用圃場（A 農場）の山田錦栽培田の土壌を研究対象とした。連用年数は 32 年である。簡易土壌水採取装置を、圃場内の 5 地点において土壌深 0-10cm に 3 連で設置した。

土壌溶液と植物体試料の採取は、2023 年 8 月 7 日、9 月 7 日、10 月 4 日に行った。各採取日に、土壌溶液採取地点の付近で各 1 株ずつ計 5 株の山田錦地上部植物体の採取を行った。

2. 2. 方法

2. 2. 1. 収量構成要素

各採取日に各 1 株ずつ計 5 株、3 日間合計 15 株を圃場から採取し、室内で乾燥させ、風乾重を測定した。風乾後、9 月および 10 月採取分の植物体については脱穀を行い、さらにもみすり機を用いて、もみ殻と玄米に分別した。そして植物体を 3 種類（茎葉、もみ殻、玄米）に分けた。試料の絶乾重量を測定するため、茎葉試料は測りやすいよう 5cm 程度にきざんだ。茎葉試料の 1 割程度、もみ殻と玄米試料は全体を、70℃で 24 時間以上乾燥させ水分含量を測定した。

9 月の採取日に、植物体採取地付近の 5 地点において、株間距離を 3 連で測定した。

2. 2. 2. 植物体の元素組成

もみ殻と玄米試料の一部をミキサーで碎き、さらにメノウ乳鉢を用いて微粉碎し、試料の絶乾後、全炭素全窒素測定装置 (NC-TRINITY、住化分析センター) を使用して、全炭素および全窒素含量を乾式燃焼法により測定した。また、蛍光 X 線分析装置 (NEX-DE、Rigaku) により 69 元素についてその含有量を調べた。

2. 2. 3. 土壌溶液の元素組成

採取した土壌溶液を 0.45 μm メンブレンフィルターで吸引ろ過し、高速イオンクロマトグラフィー (DIONEX INTEGRION、ThermoFisher Scientific) を使用して、土壌溶液の陰イオンおよび陽イオン組成を測定した。

2. 2. 4. 統計解析

各試料グループ間の平均値に対する分散分析は、SYSTAT13 (SPSS Inc.) を用いて、Tukey 法による Post Hoc 検定により行った。

3. 結果

3. 1. 山田錦の地上部窒素量

採取した山田錦地上部窒素量の経時的変化を図1に示す。地上部窒素量は、2か月間に平均約7.6倍増加していた。

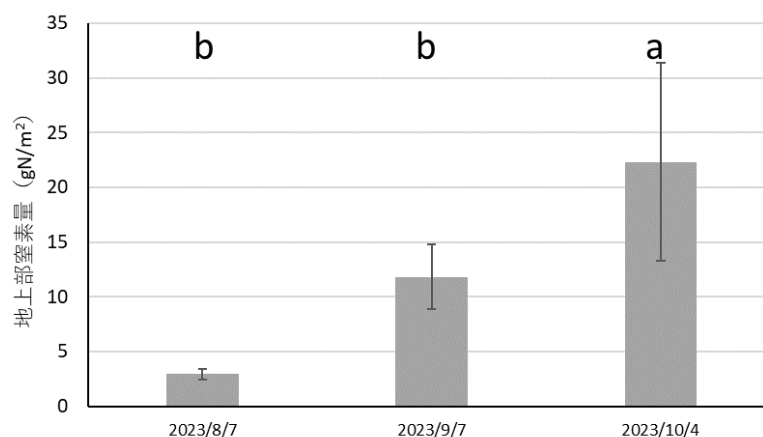


図1 地上部窒素量の経時変化

同一の小文字は、異なる採取日の試料間に危険率5%で有意差がないことを示す。

3. 2. 山田錦茎葉中の元素組成

表1に、山田錦茎葉中の各金属元素の含有量を示す。酸化カリウムは、いずれの採取月についても、前月よりも有意に減少していた。酸化ルビジウムは、2か月間で有意に減少した一方、二酸化ケイ素と酸化カルシウムは2か月間に有意に増加した。その他の元素については、各採取月の金属元素含量に有意差は見られなかった。

表2に、茎葉植物体の炭素の重量に窒素の含量を加え、炭素、窒素、水素、酸素の合計含有量を推定した値を示す。さらに、合計含有量と茎葉乾物重との差は灰分を示すと仮定し、表1の値から茎葉中の各金属元素含量を求めた。ほとんどの元素含量において期間中の変動は少なかったものの、窒素は増加し続ける傾向が見られた。

表3は、単位面積当たりの茎葉乾量から、単位面積当たりに茎葉中に含まれる金属元素含有量を求めたものを示す。窒素は、2か月間に継続的に増加し続ける傾向があったものの、炭素や酸素、ケイ素などは9月以降の増加速度は高くない傾向にあった。

表1 山田錦茎葉中の主な金属元素含有量

		2023/8/7	2023/9/7	2023/10/4
K ₂ O	(%)	46.14 ± 5.08 a	39.79 ± 2.72 b	33.55 ± 2.25 c
SiO ₂	(%)	30.67 ± 5.26 b	35.41 ± 1.12 b	41.51 ± 2.30 a
CaO	(%)	8.20 ± 1.02 b	8.81 ± 1.86 ab	10.50 ± 0.90 a
MnO	(%)	2.99 ± 1.79 a	4.03 ± 2.13 a	4.94 ± 1.90 a
Cl	(%)	3.25 ± 0.50 a	3.31 ± 0.36 a	2.69 ± 0.35 a
P ₂ O ₅	(%)	2.95 ± 0.50 a	2.95 ± 0.63 a	2.09 ± 0.46 a
SO ₃	(%)	1.73 ± 0.26 a	1.61 ± 0.19 a	1.52 ± 0.26 a
Fe ₂ O ₃	(%)	1.15 ± 0.26 a	1.49 ± 0.58 a	1.31 ± 0.55 a
Al ₂ O ₃	(%)	1.07 ± 0.06 a	1.00 ± 0.07 a	0.97 ± 0.15 a
Br	(%)	0.49 ± 0.17 a	0.34 ± 0.15 a	0.22 ± 0.17 a
ZnO	(%)	0.27 ± 0.06 a	0.32 ± 0.07 a	0.31 ± 0.13 a
MoO ₃	(%)	0.27 ± 0.05 a	0.19 ± 0.03 b	0.18 ± 0.04 b
Rb ₂ O	(%)	0.26 ± 0.08 a	0.20 ± 0.04 ab	0.15 ± 0.02 b
SnO ₂	(%)	0.17 ± 0.02 a	0.19 ± 0.02 a	0.21 ± 0.03 a

同一の小文字は、異なる採取日の試料間に危険率5%で有意差がないことを示す。

表2 山田錦茎葉中の主な元素含有量

		2023/8/7	2023/9/7	2023/10/4
C	(mmol/kg)	34120 ± 614	34298 ± 359	34376 ± 719
H	(mmol/kg)	56867 ± 1024	57164 ± 598	57293 ± 1198
O	(mmol/kg)	28433 ± 512	28582 ± 299	28646 ± 599
N	(mmol/kg)	425 ± 53	633 ± 179	1146 ± 375
K	(mmol/kg)	1250 ± 139	1024 ± 128	797 ± 176
Si	(mmol/kg)	658 ± 158	712 ± 33	771 ± 154
Ca	(mmol/kg)	188.4 ± 37.3	188.9 ± 35.9	210.7 ± 58.2
Mn	(mmol/kg)	56.7 ± 39.7	68.6 ± 35.8	76.2 ± 25.9
Cl	(mmol/kg)	117.0 ± 18.3	113.3 ± 17.0	84.6 ± 20.9
P	(mmol/kg)	52.9 ± 7.9	50.3 ± 12.3	33.1 ± 11.3
S	(mmol/kg)	27.6 ± 3.8	24.3 ± 3.2	21.2 ± 5.8
Fe	(mmol/kg)	18.5 ± 4.1	22.7 ± 9.7	18.5 ± 8.6
Al	(mmol/kg)	27.0 ± 3.8	23.6 ± 2.4	23.2 ± 8.2
Br	(mmol/kg)	8.08 ± 3.92	5.16 ± 2.22	2.89 ± 1.53
Zn	(mmol/kg)	4.32 ± 1.26	4.80 ± 1.18	4.08 ± 1.42
Mo	(mmol/kg)	2.48 ± 0.75	1.57 ± 0.23	1.37 ± 0.28
Rb	(mmol/kg)	3.59 ± 1.06	2.58 ± 0.52	1.79 ± 0.34
Sn	(mmol/kg)	1.47 ± 0.30	1.55 ± 0.20	1.52 ± 0.33

表3 山田錦茎葉中の主な単位面積当たり元素含有量

		2023/8/7	2023/9/7	2023/10/4
C	(mmol/m ²)	16825±2584	32856±3373	33745±10161
H	(mmol/m ²)	28042±4307	54760±5621	56241±16935
O	(mmol/m ²)	14021±2154	27380±2811	28121±8468
N	(mmol/m ²)	209±35	614±209	1162±633
K	(mmol/m ²)	622±150	989±220	757±170
Si	(mmol/m ²)	326±108	684±105	734±172
Ca	(mmol/m ²)	95.1±33.5	179.3±26.7	198.1±40.9
Mn	(mmol/m ²)	28.9±24.3	65.6±34.2	77.5±40.0
Cl	(mmol/m ²)	58.2±14.6	109.0±23.2	80.6±21.5
P	(mmol/m ²)	26.2±6.0	48.7±15.2	32.2±13.5
S	(mmol/m ²)	13.8±3.7	23.3±4.2	20.7±7.9
Fe	(mmol/m ²)	9.1±2.6	22.5±12.5	18.5±9.4
Al	(mmol/m ²)	13.4±3.7	22.8±4.5	18.0±5.9
Br	(mmol/m ²)	4.17±2.72	4.93±2.06	3.08±2.48
Zn	(mmol/m ²)	2.16±0.88	4.67±1.57	4.23±2.32
Mo	(mmol/m ²)	1.26±0.57	1.52±0.34	1.35±0.47
Rb	(mmol/m ²)	1.78±0.57	2.49±0.63	1.70±0.32
Sn	(mmol/m ²)	0.74±0.27	1.49±0.27	1.46±0.39

3. 3. 土壌溶液中の元素組成

図2に、土壌溶液中の陽イオン含量および、陰イオン含量を示す。ただし、炭酸イオン(炭酸水素イオン)含量は、イオンクロマトグラフによって測定した陰イオン含量と陽イオン含量の差から、電気的中性が保たれていると仮定して推定した。夏季の生育期は炭酸水素イオンがカウンター陰イオンとなって、各種陽イオンが溶液中に多く溶けているのに対して、収穫前の時期には炭酸水素イオンがほとんど含まれず、陰イオンとして硫酸イオンが優占していた。

3. 4. 植物体中の元素増加量に対する土壌溶液の寄与

表4に、8月から10月までの2か月間の植物体の元素増加量、その期間の土壌溶液中の平均元素濃度、植物体中の元素増加量が全て土壌溶液から得られたと仮定した場合の土壌溶液量、その土壌溶液量と等量の蒸散量を示す。8月～10月の元素増加量を説明するのに必要な土壌溶液量は、最大で20377L/m²、最小で153L/m²と大きく変動した。

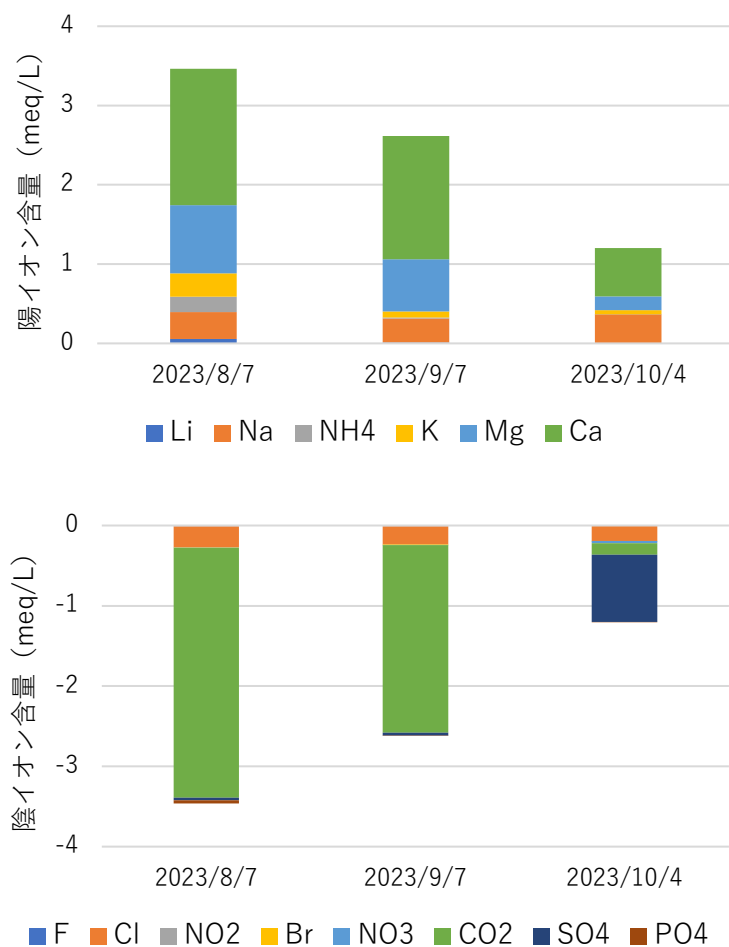


図 2 土壤溶液中の陽イオン組成（上）および陰イオン組成（下）

表 4 植物体の元素増加量と吸収推定量

	8～10月に地上部植 物体中で増加した元 素量	土壤溶液中の 平均濃度	8～10月の増加分を説 明するのに必要な土 壤溶液量	8～10月の増加分を説 明するのに必要な土 溶液量を根から吸収す るのに必要な蒸散量
	mmol/m ²	mmol/L	L/m ²	mm
N	1384.9	0.068	20377	20377
K	280.3	0.129	2181	2181
Ca	116.9	0.690	169	169
Cl	34.7	0.227	153	153
P	61.7	0.004	16833	16833
S	24.6	0.111	222	222

4. 考察

4. 1. 山田錦の地上部窒素量

過去の値と比較すると、2023 年 10 月に収穫した山田錦の地上部収穫量は 2021～2023 年の 3 か年（それぞれ、1.73 kg 乾重/m²、1.25 kg 乾重/m²、1.53 kg 乾重/m²）で有意な差はなかったものの、地上部窒素量（それぞれ、14.7 gN/m²、8.81 gN/m²、22.3 gN/m²）は、2022 年と 2023 年の間で有意差が見られた。2022 年の山田錦地上部収穫物に比べ、2023 年の収穫物の方が、植物体中の窒素含量が高かったためと考えられた。

4. 2. 土壌溶液を介した植物体の元素吸収

8～10 月の 1m²あたりの植物体地上部吸収量を説明するだけの土壌溶液量は、元素によって 153～20377L まで変動することが分かった。カルシウムイオンや塩化物イオンでは比較的低い値であるのに対し、窒素、リン、カリウムでは比較的大きくなっていた。蒸散量の推定値から、窒素、リン、カリウムについて示されたような多量の土壌溶液が実際に吸収される可能性は低く、採取した土壌溶液の濃度では、この期間の植物体中の増加量を説明できないことが示された。採取した土壌溶液内の濃度では説明できないほど多量に吸収されている元素については、より供給源に近く、濃度の濃い土壌溶液を根から吸収している可能性が示唆された。逆に、窒素、リン、カリウムについては、土壌溶液中の濃度が薄く、これらの元素が溶脱によって水田土壌から失われた可能性は低いことが示唆された。

引用文献

- [1] 農林水産省「「みどりの食料システム戦略」KPI2030 年目標の設定」（2022）
<https://www.maff.go.jp/tohoku/syokuryou/attach/pdf/221017-15.pdf>（2024/6/10 最終閲覧）
- [2] 鳥取県ほか「鳥取県みどりの食料システム戦略基本計画」（2023）
<https://www.pref.tottori.lg.jp/secure/1317367/kihonnkeikaku.pdf>（2024/6/10 最終閲覧）
- [3] 角野貴信、外村翔吾「有機質資材連用年数が水稻による窒素吸収量及び水田土壌中の窒素含量に与える影響」（2022）地域イノベーション研究 9, 11-16.
- [4] 伊藤瑞樹 「有機質肥料を連用した水田土壌における土壌有機体窒素の形態別評価とその蓄積モデルの構築」（2023） 公立鳥取環境大学卒業論文.