

植物栄養分野から見た土壌の元素分析

1 はじめに

土壌は粘土などの無機鉱物、腐植をはじめとする土壌有機物、さらに細菌やカビなどの生物的成分で構成されている。それぞれの画分がすでに多様で複雑な成分からなり、分析の対象としては困難なサンプルである。土壌分析は目的ごとに様々な分析が実施されており、土壌をどのように、また土壌の何を分析すればよいかを常に考える必要がある。

植物栄養学において、N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo, Cl, Ni の 14 種類の無機元素が植物の生育に必要とされることが明らかとなっている。これらの元素の一つでも不足すると植物は生育できず、培地となる土壌は植物の必要に応じて元素を供給する必要がある。土壌分析では、植物の栽培時に各元素をどれだけ供給できるか、また、後にも述べるが、各元素をどれぐらい吸収するかを予測できることが求められている。

植物栄養分野から見た土壌分析は、このように農業の基盤として植物を育てるのに適した土壌であるか、つまり、土壌を評価する際の物差しとなる情報を提供するものである。本稿では、植物が生育する上で重要となる土壌の元素分析について解説する。

2 土壌中の元素の形態

元素は土壌中で様々な形態（交換態、無機態、有機態など）で存在している。植物は土壌溶液に溶存している無機イオンを根から吸収するため、イオン化しやすい形態が利用されやすい。この観点から、供給されやすいものから数段階に分ける抽出法が確立されている²⁾。表1に、筆者らが実際に圃場 A, B で栽培したイネと圃場の栽培前の土壌について、目的の異なる 3 種類の抽出と全量分析を行った結果を示した。圃場 A は干拓地の水田、圃場 B は過去の鉱山開発により重金属で汚染された中山間地にある水田である。表1のデータを用いて、それぞれの抽出法によって抽出される元素の形態について解説する。

水溶性塩基とは、水で土壌抽出したイオンを測定した

もので、最も植物に吸収されやすい形態である。しかし、雨などで容易に失われる動きやすい形態でもあるため、量的には少なく、比較的土壌に多く存在している K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} などの多量元素についてのみ測定されている。重金属を中心とする微量元素は中性付近の pH では難溶性であり、水溶性塩基としては、ほとんど検出されない。

交換性塩基とは、酢酸アンモニウム溶液抽出で評価したもので、土壌の粘土や有機物の表面に吸着しているイオンである。植物の生育に伴い、土壌溶液に溶存するイオンは吸収され、濃度が低下するはずである。しかし、実際には濃度がある程度で維持される。これは水溶性塩基の減少とともに交換性塩基が溶存態に移行し、イオンが供給されるためである。このことより、交換性塩基ですが、多量元素については植物がその生育を通して利用可能な可給態養分とされている。

植物の微量元素の吸収量は、土壌中の含有量に比べて圧倒的に少ない。Fe, Mn, Zn は土壌には比較的多く存在しているが、溶けにくく、さらに土壌の pH などの影響で不溶化する可能性もあり、中性以上の pH でしばしば植物は欠乏症状を示すことがある。このように微量元素は pH, 酸化還元状態といった土壌条件の影響を大きく受けるため、量的な把握はあまり重視されていない。

また、2 か所の圃場の特性について、土壌分析の結果を見ると、干拓地である圃場 A は、海水や汽水湖の貝殻の影響が大きく、Ca や Na, また湖沼の底質に集積しやすい Mn が極めて多くなっている。中山間地にある圃場 B は、K を除く塩基類は比較的少ないが、Cd による汚染が希塩酸抽出の結果から推測される。土壌分析からその土壌がどのような履歴をもつか、ストーリー性を持って解釈することも可能となる。

3 植物吸収による土壌中の元素の動態

ここまで、標準的な土壌分析法を解説してきた。これらの分析法では結果が濃度で示され、植物にとってこの濃度が十分なのか、もしくは不十分なのかかわからないことが多い。そこで、土壌と植物の元素量を比較した結果を紹介する。表2に、圃場 A, B で栽培したイ

表1 土壌分析と植物分析の結果の例

		全炭素 (%)	全窒素 (%)
土壌	圃場 A	3.23	0.32
	圃場 B	4.98	0.43
水稻	茎葉部	圃場 A	0.66
		圃場 B	0.89
	玄米	圃場 A	1.22
		圃場 B	1.24

全炭素、全窒素は NC アナライザによる乾式燃焼法により求めた。
水溶性塩基は 1 : 5 の水抽出、交換性塩基は 1 : 20 の 1N 酢酸アンモニウム溶液による抽出を行った。
0.1N HCl 抽出は 1 : 5 で抽出した。
植物体の分析は硝酸分解による湿式灰化による前処理を行った。—は測定せず

			多量元素				微量元素			有害元素	
			K	Ca	Mg	Na	Fe	Mn	Zn	As	Cd
土壌	水溶性塩基 (mg/kg)	圃場 A	28.5	151	11.5	47.2	0.25	2.76	0.001	0.047	0.0005
		圃場 B	23.3	60.5	10.2	21.0	0.62	0.12	0.98	0.003	0.013
	交換性塩基 (mg/kg)	圃場 A	244	6290	303	114.7	0.26	176	0.12	0.18	0.083
		圃場 B	382	1377	223	42.0	0.56	2.61	21.4	0.019	1.41
	0.1N HCl 抽出 (mg/kg)	圃場 A	64.6	3450	197	62.4	431	225	4.47	—	0.13
		圃場 B	119	815	134	24.5	58.9	11.5	67.9	—	2.00
硝酸分解 (mg/kg)	圃場 A	283	7677	2423	152	7775	563	40.6	—	0.23	
	圃場 B	350	1774	1145	67.3	5168	153	329	—	3.87	
			K	Ca	Mg	Na	Fe	Mn	Zn	As	Cd
水稻	茎葉部 (mg/kg)	圃場 A	13628	1878	937	383	58.2	168	7.2	1.04	0.024
		圃場 B	16191	2323	989	182	57.0	296	151	1.01	10.39
	玄米 (mg/kg)	圃場 A	2101	226	1073	28	6.58	21.9	37.1	0.11	0.004
		圃場 B	1890	220	911	10	7.18	17.6	40.7	0.05	0.626

表 2 10 a あたりの土壌の元素存在量とイネが吸収した元素量の例

			K	Ca	Mg	g/10 a	As	Cd
土壌	水溶性塩基 (kg/10 a)	圃場 A	4.3	22.7	1.7	水抽出	7.00	0.07
		圃場 B	3.5	9.1	1.5	(g/10 a)	0.39	2.02
	交換性塩基 (kg/10 a)	圃場 A	36.6	943	45.4	HCl 抽出	—	19.0
		圃場 B	57.3	207	33.4	(g/10 a)	—	299
水稻	茎葉部 (kg/10 a)	圃場 A	13.6	1.88	0.94	茎葉部	1.04	0.02
		圃場 B	16.2	2.32	0.99	(g/10 a)	1.01	10.39
	玄米 (kg/10 a)	圃場 A	1.3	0.14	0.64	玄米	0.07	0.00
		圃場 B	1.1	0.13	0.55	(g/10 a)	0.03	0.38
	水稻吸収量 (kg/10 a)	圃場 A	14.9	2.01	1.58			
		圃場 B	17.3	2.45	1.54			
			N					
土壌			圃場 A	480	10 a あたりの土壌の量は 15 cm×10 m×10 m×10×比重 1.0=150 t とした。 10 a あたりのイネの茎葉部は 1 t, 玄米収量は 600 kg とした。			
			圃場 B	645				
水稻	茎葉部 (kg/10 a)	圃場 A	6.6					
		圃場 B	8.9					
	玄米 (kg/10 a)	圃場 A	7.3					
		圃場 B	7.4					
	水稻吸収量 (kg/10 a)	圃場 A	13.9					
		圃場 B	16.4					

ネの元素量と栽培前の土壌の元素量を示した。表 1 と同様、圃場 A は干拓地の水田、圃場 B は重金属で汚染された水田である。表 2 のデータを踏まえながら、植物栽培時の土壌中の元素量の変動について考えてみたい。

土壌と植物間の元素のやり取りをみると、元素によっては、植物は土壌にかなりのインパクトを持つことがわかる。10 a あたりの作土は約 150~200 t と計算される。対する植物は茎葉部も合わせそのバイオマス量は 1~2 t 程度である。しかし、植物の元素濃度は土壌よりもおおむね高く、植物は土壌から元素を吸収し、かなりの濃縮をしている。K は 3 大要素にあげられる重要な元素であるが、慣行的に栽培すると土壌からの水稻の K 吸収量は約 15 kg となる。栽培した 2 か所の圃場の K 量はいずれも土壌の改良目標の上限を超えるほど多い。しかし、水溶性塩基の量は 3~4 kg であるため、植物は水溶性塩基に加えて交換性塩基からも吸収し、土壌に含まれる全 K 量の 2~3 割程度を吸収していることになる。水稻作では一般的に稲わらの圃場還元が行われているが、年間を通じて 2~3 割程度の K がイネに吸収され、収穫後土壌に戻るという循環は、土壌にかなり大きなインパクトを与えると言える。その一方、Ca や Mg については植物の吸収量に対し、土壌の存在量が相当に多く、植物の吸収が土壌にほとんど影響しないことがわかる。また、植物の生育に最も大きな影響を与えるのが N である。イネは作物の中でも比較的 N の要求性が低い作物ではあるが、10 a あたりでは約 15 kg の N を植物体側に吸収している。植物の吸収量に対し、土壌の N 量は実は約 500 kg もあるが、そのほとんどは安定な腐植や分解途中の有機物に含まれている。実際に土壌で動く N は微生物バイオマスに含まれる N などであり、全 N の 3% 程度である。その約半分が年間を通して実際に土壌に無機化され植物が利用できる。つまり、植物が利用できる土壌中の N 量はおよそ 7~8 kg 程度になるため、作物生産においては N は施肥により補う必要がある。一般的に葉物や果菜では養分の要求量がイネよりも多く、さらに圃場外への限度の持ち出し量がより多いため、適時土壌分析を行うことで、土壌にどれだけの養分があるか、また施肥によりどれだけのインパクトが土壌にあるか、元素動態を把握し、作物生産では施肥や管理により、随時対応していく必要がある。

4 リスク評価としての土壌分析

最後に有害元素について、土壌分析のリスク対策としての有効性を示したい。元素によっては、植物は土壌から大きな影響を受ける。特に有害元素の吸収がそれにあたる。これらの有害元素の一部は、0.1 N HCl などの希酸抽出と植物の吸収量に高い相関があることが知られており、植物種にもよるが有害元素の吸収予測がある程度

可能である。Cd はイタイイタイ病の原因となる代表的な有害元素であり、土壌から植物が吸収しやすく、土壌汚染=農作物汚染となり、大きな問題となる。Cd²⁺ の土壌溶液中の溶存量は極めて少なく、ppb レベルでしか検出されないが、植物はこの Cd²⁺ を高効率で吸収し、体内に ppm レベルで蓄積させる。植物は必須元素、特に多量元素について、その吸収量、とくに子実への移行量をかなり制御しており、大きくレンジを超えることはない。しかし、Cd²⁺ などは吸収する絶対量も少なく、土壌の濃度依存的に吸収・移行することが多い。これらの有害元素吸収については吸収量を予測できる方法などが開発されており、これら土壌における作物生産を通しての有害元素のリスク評価を使っていく必要がある。

近年、日本の研究でカドミウム (Cd) とヒ素 (As) がマンガン (Mn)、ケイ酸 (Si) の輸送体から取り込まれることが徐々に明らかになっている³⁾⁴⁾。さらに、これら有害元素を吸わない植物の開発も進んでいる。また植物が有害元素を効率よく吸収する能力を逆手に取って植物を用いた土壌浄化、ファイトレメディエーションという方法も研究が進んでいる。かなりの汚染土壌の圃場 B で最大でも易吸収性の Cd を 1 年で半分近くも吸収・除去することが可能となっている⁵⁾。しかし、これらの研究もまだ道半ばであり、その研究から実際の利用、問題の解決に至るまでやはり土壌分析は欠くことはできない重要なものであることは間違いない。

これまで解説してきたように、土壌分析は作物生産と切っても切れない関係にある。土壌から作物を見る、作物から土壌を見る、その二つの視点でそれぞれの分析結果を比較すると土壌-植物間の全体像が見えやすくなる。実験室での分析と実際の圃場が確実につながっていることをイメージできるよう土壌分析に取り組んでほしい。

文 献

- 1) 米山忠克, 長谷川 功, 関本 均, 牧野 周, 間藤 徹, 河合成直, 森田明雄: “新植物栄養・肥料学”, p. 8-33 (2010), (朝倉書店).
- 2) 土壌環境分析法編集委員会編: “土壌環境分析法”, p. 195-262 (1997), (博友社).
- 3) S. Ishikawa, Y. Ishimaru, M. Igura, M. Kuramata, T. Abe, T. Senoura, Y. Hase, T. Arai, N. K. Nishizawa, H. Nakanishi: *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **109**, 19166 (2012).
- 4) J. F. Ma, N. Yamaji, N. Mitani, X. Y. Xu, Y. H. Su, S. P. McGrath, F. J. Zhao: *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **105**, 9931 (2008).
- 5) 伊藤正志: 日本土壌肥料学雑誌, **84**, 359 (2013).

〔秋田県立大学生物資源科学部 頼 泰樹・河端美玖〕