

土壤有機物の機能と有機物を活用した土づくり

谷 昌幸¹

Function of soil organic matter and effective application of organic matter in arable land

Masayuki TANI¹

1. 土壤有機物と土壤肥沃度

土壤有機物は土壤の様々な機能を担う主要な構成成分であり、土壤の化学性、物理性、生物性および肥沃度を大きく支配する(熊田, 1981)。土壤有機物は化学的溶解度、存在形態や機能などに応じていくつかの種類に分けることができるが、その大部分は腐植物質である(松中, 2003)。農耕地土壤では有機物を施用することにより土壤有機物の機能を引き出し、肥沃度を向上させることも期待される。ただし、「土壤有機物に富む土壤」が「土壤肥沃度が高い土壤」であると単純に結び付けることはできない。ここでは、土壤有機物と土壤肥沃度との少し複雑な関係について、北海道十勝地域の農耕地土壤を例にして概説する。

北海道の農耕地面積は約 119 万 ha であり、その土壤は火山性土 35%、台地土 21%、低地土 35%、泥炭土 9% に大きく分類される。日本有数の大規模な畑作畜産地帯である十勝地域の農耕地面積は約 25.7 万 ha であり、その土壤は黒ボク土や多湿黒ボク土などの火山性土が 49% と半分近くを占め、次いで低地土 34%、台地土 13%、泥炭土 4% に分類される(橋本, 2008)。十勝地域には、海退および河川による下刻作用によって形成年代の異なる段丘地形が発達しており、高位段丘や中段段丘には洪積期と沖積期に堆積した火山灰を主な母材とする黒ボク土、低位段丘には沖積期に堆積した火山灰と河川堆積物、低地には河川堆積物から生成した黒ボク土や低地土が分布するパターンを示すことが多い(菊地, 2008)。

十勝地域の典型的な段丘地形面上の普通畑土壤の表層土について理化学性を比較すると、黒ボク土で土壤有機物含量が多く、とくに地下水湿性の影響を強く受ける厚層黒ボク土で顕著に全炭素含量が多い(Table 1)。土壤有機物含量が多い黒ボク土では、養分保持能や緩衝能の指標となる陽イオン交換容量が著しく高いが、酸性シュウ酸塩可溶アルミニウム量の多さが示すように、アルミニウム-腐植複合体や非晶質・準晶質粘土鉱物などの活

性アルミニウムが多いためリン酸吸収係数が著しく高く、施肥リン酸の可給性が作物生産上の制限因子となるために、有機物含量が多くても土壤肥沃度が高いとは言えない。

また、十勝地域の黒ボク土畑土壤表層土 51 点を対象に、全炭素含量と交換性カルシウム量および水溶性カルシウム量の関係を調べたところ、交換性カルシウム量は全炭素含量が多い、つまり陽イオン交換容量が高い土壤で多いが、水溶性カルシウム量は全炭素含量が多い土壤で少ない傾向が見られた(Fig. 1)。これは、黒ボク土表層土に含まれる腐植物質に対するカルシウムの吸着選択性が著しく高く、土壤溶液への分配が少ないことを示していると考えられ、腐植物質の荷電特性や吸着特性などを考慮に入れて、養分の保持能と放出能のバランスを評価する必要があることを意味する(伊藤ら, 2011)。

以上のことから、土壤有機物や腐植物質が土壤肥沃度に及ぼす影響を評価するためには、その種類や特性の違いに応じた機能の違いを把握して理解することが重要であり、農耕地土壤における有機物施用の役割と意義を再考する上でも、どのような種類の有機物に、どのような機能や土壤改良効果を期待するのかを明確にすることが必要である。

2. 土壤有機物の種類と機能

土壤有機物は、比較的分解されやすい画分が微生物の基質となって無機化され、植物が吸収可能な形態の養分を供給するとともに、比較的分解されにくい画分、とくに腐植物質が団粒の形成と土壤構造の発達、養分の保持や緩衝能の増大などに貢献する。そのため、農業生産における物質や水の循環に重要な役割を果たす(松中, 2003)。一方、近年では地球温暖化抑制を背景に、土壤有機物の機能の一つとして炭素隔離(土壤中での炭素の貯留とその長期的な安定化)が認識されるようになった(IPCC, 2007; 藤嶽ら, 2012)。

広義の土壤有機物とは、土壤中に存在する全ての有機物を示し、生物(バイオマス)と非バイオマスに大きく分けることができる(Fig. 2)。バイオマスのうち、ほとんど分解されていない植物根などの動植物遺体を取り除いた、いわゆる風乾土に含まれる有機物が狭義の土壤有機物(腐植)を指す(松中, 2003)。この土壤有機物は、土壤中での分解と合成の平衡の下に存在する腐植物

¹Obihiro University of Agriculture and Veterinary Medicine, Obihiro, Hokkaido 080-8555, Japan.

Corresponding author: 谷 昌幸, ¹帯広畜産大学

2012年12月20日受稿, 2013年3月12日受理

土壤の物理性 123号, 5-10 (2013)

Table 1 十勝地域の典型的な段丘地形面に位置する農耕地土壌の表層土における理化学性の比較 (谷・加藤, 2011).

地形面	土壌分類	土性	全炭素含量 (g kg^{-1})	酸性シュウ酸塩可溶アルミニウム量 (g kg^{-1})	陽イオン交換容量 ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	リン酸吸収係数
低地沖積面	褐色低地土	CL	23.0	7.9	17.6	670
低位段丘面	下層低地黒ボク土	L	53.3	36.9	23.1	1900
中位段丘面	厚層黒ボク土	CL	87.6	34.2	38.3	2170
高位段丘面	淡色黒ボク土	L	35.2	44.9	20.3	2020

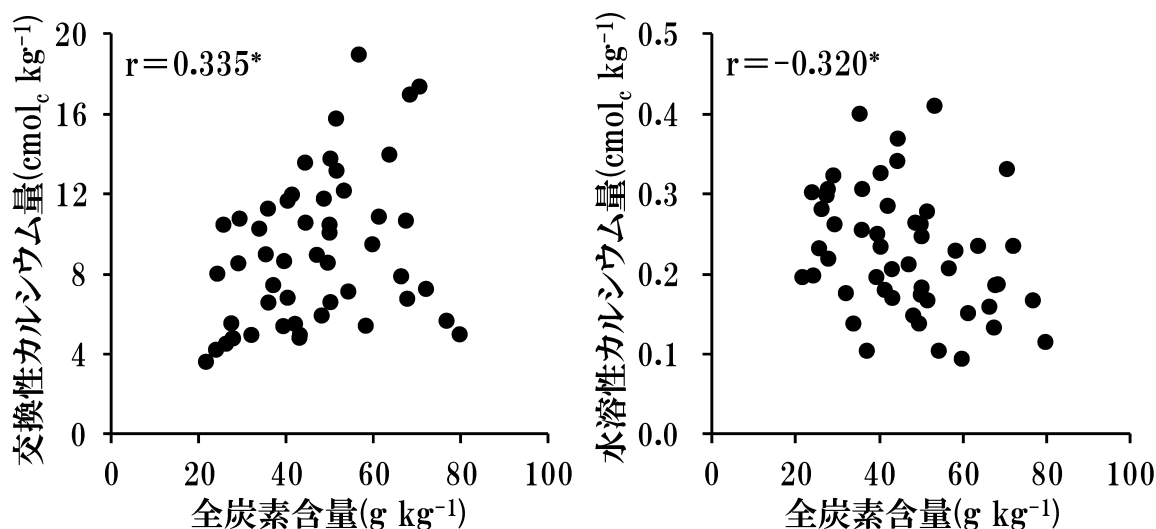


Fig. 1 十勝地域の黒ボク土畑土壌表層土 51 点における全炭素含量と交換性カルシウム量および水溶性カルシウム量との関係 (伊藤ら, 2011).

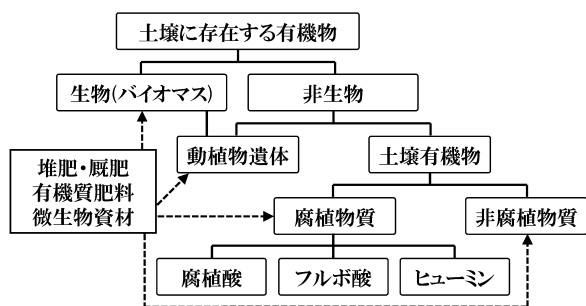


Fig. 2 土壌中に存在する有機物の種類と区分 (松中, 2003 を一部改変).

質と非腐植物質に分けられ、腐植物質は化学的溶解度に基づいて腐植酸、フルボ酸、ヒューミンに分別される。ただし、これらの腐植画分は化学分析操作によって規定された有機物画分であり、土壌中の暗色有機物質である腐植物質の全体的な概念と一致するわけではない (石渡, 2008)。

土壌有機物の機能としては、1) 無機化に伴う植物への養分供給、2) 養分の保持と土壌緩衝力の増大、3) 養分の有効性や有害物質の調節、4) 他感物質効果やホル

モン類似作用による植物の生育促進、5) 団粒の形成と土壌構造の安定化、6) 土壌への吸熱効果および土壌の保温効果、7) 土壌微生物への栄養源などが挙げられる (松中, 2003)。ただし、これは前述した様々な種類の土壌有機物の機能を総合的に捉えたものであり、対象とする土壌有機物の生分解性や溶解性によっては、これらの機能を有しない場合もあり得る。例えば、難分解性の有機物は微生物の基質となりにくいため無機化による養分供給効果は期待できない。つまり、生物性や化学性によって分別あるいは分画された個々の土壌有機物画分は、農業生産や環境保全において土壌有機物に期待されている機能を全て発揮できるわけではないことを再認識することが必要である。

3. 土壌の腐植物質と溶存有機物

3.1. 土壌の腐植物質とその機能

土壌有機物の主成分である腐植物質は単一な物質ではなく、土壌に遺体や代謝産物として加わる多様な生体成分が、微生物による分解・代謝、化学的な分解や変質によって変化し、同時に土壌の粘土や無機物との相互作用の下で触媒反応、吸着分配作用や続成作用を受けて生成する混合高分子物質である (藤嶽ら, 2012)。実験操作

Table 2 ^{13}C NMR スペクトルをもとに算出した腐植酸の官能基炭素組成 (%) (藤嶽, 2003 より引用).

腐植酸	Carbon species (δ , ppm)							Aromaticity
	aliphatic (5 ~ 48)	methoxyl (48 ~ 65)	carbohydrate (65 ~ 110)	aromatic (110 ~ 145)	phenolic (145 ~ 165)	carboxylic (165 ~ 190)	carbonyl (190 ~ 220)	
褐色森林土	22.8	11.2	16.0	22.1	6.9	16.2	4.8	0.37
黒ボク土	10.6	4.9	10.8	42.0	8.1	19.5	4.2	0.66
埋没黒ボク土	5.1	2.3	9.4	56.0	8.4	14.5	4.3	0.79

上, 希アルカリ溶液に可溶で酸に不溶な腐植酸, 希アルカリ溶液にも酸にも可溶なフルボ酸, 希アルカリ溶液に不溶なヒューミンに分画されるが, この分画は操作上の定義によるものであり, 必ずしも物質群の本質的な違いを表わすものではない (米林, 2008). また, 腐植酸とフルボ酸はいずれも混合物であり, pH による溶解度で便宜的に分画された連続的な物質群であり, その機能が明確に分かれているわけではない.

土壤腐植酸の化学構造特性は起源となる有機成分や反応生成場である土壤環境に依存し, これらに応じてある程度類似した特性を示すことが予想されるため, 平均的な化学構造に基づいて特徴付けを行うことは可能である (藤嶽ら, 2012). とくに, ^{13}C 核磁気共鳴分光分析 (NMR) 法を用いた構造解析は, 骨格炭素の情報が直接得られ, 官能基や各種炭素の帰属が比較的容易に行えるため, 腐植物質の構造特性を明らかにすることが可能である (藤嶽, 2003). 褐色森林土, 黒ボク土および埋没黒ボク土から抽出・分画された腐植酸では, 官能基組成が大きく異なる (Table 2). 埋没黒ボク土腐植酸の化学構造は大部分が芳香族とカルボキシル基からなるのに対し, 黒ボク土では脂肪族炭素や糖類, メトキシル基の存在が認められ, 褐色森林土では芳香族炭素のピークが相対的に小さく, フェノール基のピークが観察される. さらに, 各腐植酸の構造特性は, とくに芳香族性 (Aromaticity) の違いが顕著であり, いわゆる腐植化が進んだ腐植酸で芳香族性が高い傾向が認められる (藤嶽, 2003; 藤嶽ら, 2012). ここで述べる腐植化とは, 腐植物質の分解と重合の繰り返しの中で, 腐植物質の難分解部分が相対的に残存していくことを示す (米林, 2008).

例えば, 重縮合した芳香環が主体の構造特性をもつ腐植酸は, 難生分解性で土壤中に長期安定に貯留されると考えられるために, このような腐植酸の存在は土壤への炭素貯留プロセスの解明や促進技術の開発にとって有用である. また, カルボキシル基構造が多ければ, 陽イオン交換容量はもちろん, 土壤中の重金属や放射性物質など汚染元素の挙動に及ぼす影響力を評価する指標となる (藤嶽ら, 2012). 一方, 炭水化物やメトキシ基などが多い, いわゆる腐植化度の低い腐植酸は, 土壤中で生分解されやすく変化しやすい可能性がある. このように, 同じ腐植酸と称しても, 平均的な化学構造によって機能が異なり, 腐植酸の多様性を踏まえて土壤における機能性に応じた評価を行うことが今後の重要な課題といえる.

3.2 土壤の溶存有機物と溶存腐植物質

土壤腐植物質の構造特性や安定性を明らかにすることは, 地球規模の炭素循環や炭素隔離 (長期的な安定化) を解明する上で重要である. 一方, 土壤系の内外における炭素や物質の循環, 高等植物の生育に及ぼす影響などを考える上で, 土壤固相中に存在する腐植物質だけではなく, 土壤溶液中に存在し, 可動性の高い溶存有機物や溶存腐植物質の動態と機能が注目されている. とくに農業生産において, 腐植酸やフルボ酸などの腐植物質が, 1) リン酸や微量要素の吸収促進, 2) 植物による腐植物

質の直接吸収に伴う代謝活動への影響や無機イオンの吸収促進、3) 植物の発芽や発根、根や茎の生育などを促進する他感物質効果を発揮することなどが報告されている (Nardi et al., 2002). このような機能は土壌や堆肥などに由来する溶存腐植物質に特有なものであり、土壌固相に分配・固定されている腐植物質とは明確に区別されるべきである。

さらに、非腐植物質である炭水化物やアミノ酸、低分子有機酸などの溶存有機物は、土壌中での存在量は少ないが、微生物による分解と代謝の平衡の下に常に供給されており、反応性の高い物質が継続的に影響を積み重ねることによる累積的な機能についても評価することが必要である。

普通畑土壌における溶存有機物は、化学肥料や堆肥の施用などの肥培管理の影響を大きく受けて変化する。北海道立十勝農業試験場 (現在、北海道立総合研究機構十勝農業試験場) に1975年から設置された長期有機物連用試験圃場において、試験開始後25年間が経過した2000年に表層土を採取し、土壌溶液の溶存有機炭素濃度と金属錯化容量を分析した。その結果、化学肥料の施用に加え、作物残渣すき込みや堆肥連用 (30 Mg ha^{-1}) を行うことにより、土壌溶液中の溶存有機炭素濃度は高くなり、それに伴って金属錯化容量も著しく増加した (Fig. 3)。とくに堆肥を連用することにより、化学肥料施用区と比べて溶存有機炭素濃度や金属錯化容量が約2倍近い値を示した。土壌溶液中の溶存有機物が錯体形成能を有することは、金属イオンとの錯体形成による種形成と溶解の維持、リン酸などの無機陰イオンとの配位子交換反応による吸着抑制効果などにつながると考えられる。

4. 有機物施用と土づくり

4.1 畑地の土壌有機物と有機物施用

農耕地土壌では、森林や草地などの自然土壌とは異なり、耕起や施肥などの管理作業に伴って土壌有機物が生分解されやすくなるとともに、とくに畑土壌では有機物の投入量が少ないため、有機物の損失量が供給量を上回る場合には、土壌有機物が減少する方向に平衡がシフトする。

農耕地土壌、とくに普通畑における炭素量の減少量を把握するために、北海道十勝地域の3地点において、土

壤型が異なる畑土壌および隣接する未耕地土壌の断面調査を行うとともに、深さ5cm毎に試料を採取し、畑土壌と未耕地土壌における層厚のずれを考慮した上で (溝田ら, 2008)、仮比重と全炭素含量から面積あたりの炭素蓄積量を比較した (谷・溝田, 2008)。その結果、畑土壌の深さ0-50cmにおける全炭素量は未耕地土壌と比較して、淡色黒ボク土では12%、厚層黒ボク土では25%、普通褐色低地土では51%の減少であった (Table 3)。厚層黒ボク土では排水改良に伴う酸素供給量の増加、褐色低地土では土壌侵食や長期の耕作、土壌の鉍物組成などが影響したと考えられた。

農耕地土壌における土壌有機物 (有機炭素) の管理と蓄積を積極的に行うことは、土壌の養分供給環境、化学性、物理性、生物性の改善につながるだけでなく、土壌生産性の維持と向上、省資源による持続的生産に貢献することが可能である。また圃場内への炭素蓄積による地球温暖化抑制にも寄与することに鑑みると、とくに畑土壌では、耕起作業の改善 (省耕起や最小耕起など) や様々な有機物資材 (堆肥・緑肥・作物残渣など) の積極的な投入により土壌中の有機炭素を蓄積することが期待される。

4.2 堆肥の腐植化と土づくり効果

土壌有機物の量を維持するとともに、その機能を活用するためには、作物残渣、緑肥、有機肥料、家畜ふん尿や堆肥などの様々な種類の有機物を、その目的に応じて施用することが必要となる。

家畜ふん尿を主原料とする堆肥を圃場に施用する場合、原料や副資材、発酵の程度、堆肥化処理の方式、堆肥化期間などの要因により、その分解程度や理化学性、腐植化の程度や腐植酸の性状などが大きく異なるため (李ら, 2009; 谷ら, 2011)、農耕地に施用した際の土づくり効果や土壌有機物としての機能は同じではない。

北海道では、年間に排出される家畜ふん尿の多くは乳牛ふん尿 (約1440万トン) や肉牛ふん尿 (約400万トン) などの牛ふん尿である (北海道立農業・畜産試験場家畜ふん尿プロジェクト研究チーム, 2004)。とくに乳牛ふん尿の場合は、飼育頭数の多頭化やフリーストール牛舎導入によって、水分含量が80%を越えるようなふん尿が排出され、堆積しても好気発酵が全く進まない分解不十分な状態で圃場還元されることが多くなっている。

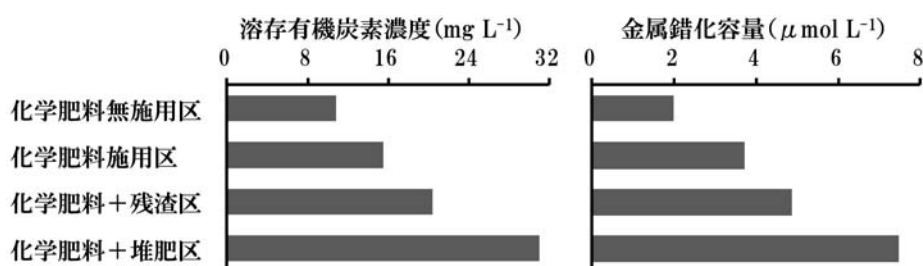


Fig. 3 北海道立十勝農業試験場 (現在、北海道立総合研究機構十勝農業試験場) の長期有機物連用圃場から採取した淡色黒ボク土畑土壌表層土における土壌溶液の溶存有機炭素濃度と金属錯化容量 (谷ら, 未発表)。

Table 3 十勝地域の未耕地土壌と農耕地土壌における層厚のずれを考慮した面積当たりの全炭素量（溝田・谷，2008）.

調査地点	土壌分類	未耕地土壌		農耕地土壌		農耕地／未耕地
		深さ (cm)	炭素量 (kg m ⁻²)	深さ (cm)	炭素量 (kg m ⁻²)	
芽室町中伏古	淡色黒ボク土	0-75	13.0	0-50	11.4	0.88
音更町西中音更	厚層黒ボク土	0-70	49.2	0-50	36.9	0.75
幕別町相川	褐色低地土	0-95	12.4	0-50	6.1	0.49

Table 4 堆肥の圃場還元利用と期待される土づくり効果.

効果と具体例
作物養分としての効果
窒素については緩効性肥料（難生分解性窒素）
リン酸は無機化が進み高い肥効率（100 % 以上か）
微量必須元素（銅や亜鉛など）の供給源
安定腐植としての効果
土壌改良効果（通気，保水と排水）
養分の保持機能（陽イオン交換容量の増加）
土壌の緩衝能（土壌炭素の安定的貯留）
溶存腐植としての効果
錯体形成能や配位子交換能による養分の可給化
植物生理活性の向上（他感物質効果，ホルモン類似作用）
土壌構造（耐水性団粒）の形成と維持

る。農業生産現場で“生堆肥”と称されることもある資材は、タンパク態窒素やセルロースを多く含み、土壌中で微生物により無機化されるため、微生物の基質や作物養分の供給源としての効果が期待できる。一方、麦稈やバークなどの副資材とともに好気発酵した牛ふん尿堆肥は、腐熟の進行により腐植化が進み、土壌中の微生物にとっては難分解性の土壌改良資材としての効果が期待できる（李ら，2009）。一方、好気発酵を伴う堆肥化が行われたとしても、堆肥化後の腐熟の進み具合により、腐植化が進行せず、植物原料に由来するリグニン構造が多く残存している資材も存在する。高い発酵温度を伴う一次発酵処理後に、十分な期間の二次ないし三次発酵を行った堆肥は、高い腐植化度を示すとともに、含まれる溶存腐植酸の化学構造が土壌腐植酸に近い状態まで腐植化が進行する（谷ら，2011）。

家畜ふん尿を主原料とする堆肥を圃場還元利用する場合、少なくとも、窒素無機化特性など有機質肥料としての評価と、腐植化度などの腐植質資材としての評価などに基づいて（Table 4）、どのような特性や機能を有する堆肥であるのかを理解し、その有効利用法を提案することが必要である。

5. おわりに

一般的な普及書などで見かける「有機物を施用すれば土壌微生物が増える」、「堆肥を入れれば土壌の養分保持能や団粒が増える」などといった、単純化されたイメージは、農耕地土壌への有機物施用を推奨する“きっかけ”としては良いかもしれない。しかしながら、どのような有機質資材（構成成分，生分解性，機能性）を、いつ（施用時期）、どのくらい（施用量）、どのような方法（施用方法や混合深度）で土壌に投入するかなどの因子に基づき、どのような機能や土壌改良効果を期待するかを明確にすることが必要である。

化学肥料の代替効果や、“有機物”としての大括りの評価だけではなく、土壌有機物としての本来の機能を最大限発揮させるための科学的な根拠に基づく有機物施用技術を構築し、それを提案することが、今後の重要なミッションである。

引用文献

藤嶽暢英（2003）：我が国の腐植物質研究とその展望 3. 腐植物質分析の技術と今後期待される分析手法. 日本土壌肥料

- 学雑誌, 74: 223-228.
- 藤嶽暢英・浅川大地・柳由貴子 (2012): ^{13}C NMR 並びに高速サイズ排除クロマトグラフィーによる土壌腐植酸の特徴付け. 分析化学, 61: 287-298.
- 橋本均 (2008): 北海道土壌区一覧 (改訂版). 北海道立農業試験場資料第37号, 1-180.
- 北海道立農業・畜産試験場家畜ふん尿プロジェクト研究チーム (2004): 家畜ふん尿処理・利用の手引き 2004. 北海道立畜産試験場.
- IPCC (2007): Summary for policymakers, Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Forth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Eds. Metz, B. et al., Cambridge University Press, New York.
- 石渡良志 (2008): 自然界の腐植物質. 石渡良志・米林甲陽・宮島徹編 環境中の腐植物質—その特徴と研究法—. pp. 2-9, 三共出版, 東京.
- 伊藤舞・國本亜矢・加藤拓・谷昌幸 (2011): 異なる水分条件下で生成した黒ボク土畑土壌におけるカルシウムの吸着選択性. 2011年度日本土壌肥科学会北海道支部秋季大会講演要旨集, 7.
- 菊地晃二 (2008): 段丘土壌と農業—十勝平野をどう活かすか—. 古今書院, 東京.
- 熊田恭一 (1981): 土壌有機物の化学—第2版—. 学会出版センター, 東京.
- 李香珍・谷昌幸・相内大吾・小池正徳・倉持勝久 (2009): 圃場還元利用されている実際の牛ふん尿堆肥に含まれる腐植酸およびフルボ酸の化学的特徴. 日本土壌肥科学雑誌, 80: 335-346.
- 松中照夫 (2003): 土壌学の基礎—生成・機能・肥沃度・環境—. 農文協, 東京.
- 溝田千尋・谷昌幸・李香珍・相内大吾・丹羽勝久・小池正徳・倉持勝久 (2008): 十勝地域の未耕地および農耕地における土壌断面形態と層厚の相違. ペドロジスト, 52: 19-34.
- Nardi, S., Pizzeghello, D., Muscolo, A. and Vianello, A. (2002): Physiological effects of humic substances on higher plants. Soil Biology and Biochemistry, 34 (11), 1527-1536.
- 谷昌幸・溝田千尋 (2008): 畑土壌および未耕地土壌における土壌炭素の垂直分布と蓄積量の比較. 2008年度日本土壌肥科学会愛知大会講演要旨集, 24.
- 谷昌幸・李香珍・加藤拓・宮竹史仁・藤嶽暢英・小池正徳 (2011): 大規模堆肥化処理方式が牛ふん尿堆肥の腐熟度と腐植化に及ぼす影響. 農業施設, 42: 8-17.
- 谷昌幸・加藤拓 (2011): 十勝の地形と土壌 (第58回日本ペドロロジー学会野外巡検現地案内資料), 日本ペドロロジー学会.
- 米林甲陽 (2008): 土壌中の腐植物質. 石渡良志・米林甲陽・宮島徹編 環境中の腐植物質—その特徴と研究法—. pp. 10-29, 三共出版, 東京.

要 旨

土壌有機物は土壌の様々な機能を担う主要な構成成分であり, 土壌の化学性や物理性, ならびに土壌肥沃度を大きく支配する. 土壌有機物はいくつかの種類に分けることができるが, その主体は腐植物質である. 一方, 農耕地土壌に有機物を施用することにより土壌有機物の機能を引き出すことも期待される. ここでは, 土壌有機物や腐植物質の種類と機能について概説するとともに, 農耕地土壌における家畜ふん尿や堆肥など有機物施用の役割と意義を再考する.

キーワード: 土壌有機物, 腐植物質, 溶存有機物, 家畜ふん尿, 堆肥