

腐植物質の生理活性効果

誌名	肥料科学
ISSN	03872718
著者名	麻生, 末雄
発行元	肥料科学研究所
巻/号	16号
巻号補足	
掲載ページ	p. 71-85
発行年月	1994年1月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



腐植物質の生理活性効果

麻 生 末 雄*

1. はじめに

人生には思わぬ出会いがあるものである。筆者は土壌生化学研究の世界的権威者として知られてる FLAIG 教授 (ドイツ) にこれまで5回に亘りお会いする機会を得て、土壌腐植の研究についてご教示と激励を頂く機会を得た。

最初にお目にかかったのは筆者が1958~'59年にアメリカ・アイオワ州立大学に客員教授として滞在中のことである。当時、丁度 FLAIG 教授も同大学に客員教授として招聘され、Advanced Course に1学期間開講されたので、同教授の講義を聴講することができた。筆者35才の時である。講義の内容を記した分厚いプリントは今でも大切に保管しているが、内容の斬新性について、深く感銘を受けたことを記憶している。

二回目にお会いしたのは1974年8月にモスクワで開催された第10回国際土壌学会の折で、久しぶりに再会し、旧交を温めることができた。次いで翌1975年8月にプラハ (現チェコ) で開催された国際シンポジウム第5回大会「腐植と植物」に参加した帰途、FLAIG 博士が所長をされておられた西ドイツのフェルケンローデ農学研究所を訪問したところ、先生自ら丁寧な案内して下さいました。

その後1977年10月に東京で開催された「集約農業下における土壌環境と地力管理に関するセミナー (SEFMIA)」に出席されるため来日された。FLAIG 博士を囲んで東大で行われた Confabulation Meeting では、筆者が座

* 東京農業大学農学部 教授

長を勤めさせて頂いた。その後、故森山真明氏とともに、群馬県新町日本肥糧株式会社の研究所および肥料工場にご案内した。

最近では1990年8月に名古屋で開催され国際腐植物質学会第5回大会に筆者は大会運営副委員長を勤め、招聘を受けて来日した FLAIG 博士と数日にわたり、同じホテルに宿泊して旧交を温め、種々ご教示頂いた。博士76才、筆者66才の時で、初めてアメリカでお会してから既に30年余経過していた。

以上のような永年にわたる FLAIG 博士との交友とそこから得られた数々の示唆は筆者が腐植物質の生理活性に関する研究を開始し、また今日まで続けることのできた直接の契機となったものである。

腐植物質の生理活性効果に関する私の研究を概述するに際して、あらためて FLAIG 博士に感謝するものである。

なお、本誌編集委員伊東正夫氏も、筆者がアメリカで初めて博士にお会いした前年の1957年11月、ドイツ留学の折り FLAIG 博士をフェルケンローデの研究所に訪問されたとのことで、博士はみずからスライドで詳しく研究成果の説明をされ、さらに所内の研究状況や施設の見学の便宜を与えられ、同博士の熱心な研究態度に深く感銘を受けた由であった。

2. 土 壌 腐 植 物 質 に 関 す る 研 究 の 現 状

W. FLAIG は、「土壌生産力の最も重要な因子の一つに腐植の含有量がある。施肥や他の因子に帰せられない腐植効果が観察されるが、その作用はなお未解決である。このような腐植効果が成立するならば、物理、化学、生物的手法により証明されねばならない。」と述べている¹⁾。

M. M. KONONOVA (ロシア) は、「腐植物質や個別的本質を持つ有機化合物のあるものが植物体中に入り、そこで呼吸や代謝過程に参加し、植物体の〈生活力〉を高める可能性が明らかにされている。この〈生活力〉は、土壌や施肥された肥料から植物が養分元素を強力に吸収することを助長するが、このことがひいては植物のさらにより生育を保証するわけである。このようにして人間は、有機物を用いて生物学的に活性な環境をつくりだし、増収を

究極目標として目指しながら植物の代謝に介入する可能性を持っている。」と記している²⁾。上記二つの意見は筆者が、腐植物質の生理活性に関する研究を開始する動機となったものである。「土壤有機物」、「腐植」「腐植物質」等の定義については、古くから論議されているが^{3,4)}、現在においても確定されたわけではなく研究者により意味するところを異にする現状である。一方、分析操作上からアルカリによって抽出される土壤有機物のうち、酸不溶部を腐植酸、酸可溶部をフルボ酸とし、アルカリで抽出されない画分をヒューミン⁵⁾とし、この線にそって多くの研究が進められている。

しかしながら、ヒューミン、腐植酸、フルボ酸とも多くの有機物の混合画分であり、腐植成分と非腐植成分から構成されるが、主体を占める腐植成分の縮合度により分子量を異にし、黄、黄褐、暗褐色と色調を異にすることが指摘されている⁶⁾。

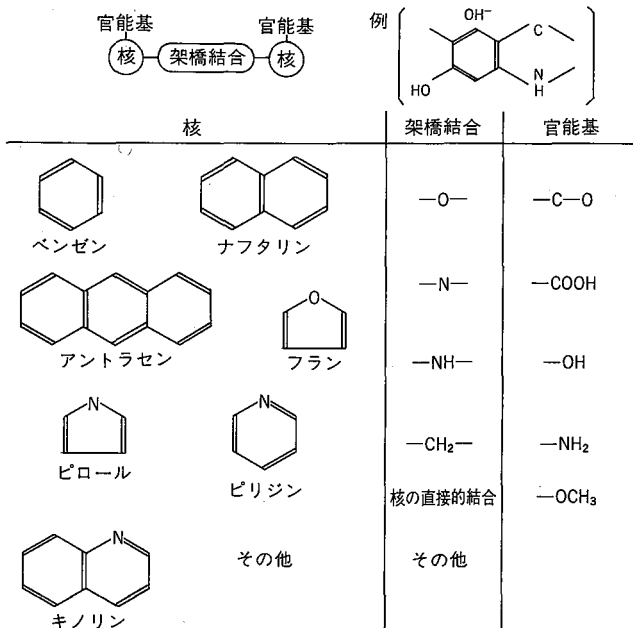


図1 腐植の基本構造 (Scheffer)

腐植の構造については、いくつかの推定構造式が提案されているが⁷⁾、SCHEFFER は、腐植の基本構造を図1のように、各種の芳香環（核）、架橋結合および官能基によって構成される基本構造単位の結合によって形成され、これらが重合した高分子化合物であると考えられると説明している⁸⁾。

3. 腐植物質の植物生理に及ぼす効果

腐植物質が植物に与える影響は極めて多面的であるが、筆者は腐植物質の生理活性効果を直接および間接効果に大別して考えた。直接効果とは腐植物質が直接植物の生育に及ぼす影響で、a. キレート形成による金属元素の吸収増進、b. 根伸長・根毛形成・生理活性の促進、c. 無機養分供給源としての効果、d. その他を含む。間接効果とは腐植物質が土壤に及ぼす影響を媒体として植物の生長に影響を及ぼす場合で、a. 土壤物理性の改良、b. 土壤によるリン酸固定の防止、c. 土壤中における陽イオンの行動および陽イオン交換容量に及ぼす影響、d. 土壤微生物に及ぼす影響である^{9,10)}。

筆者は腐植物質の生理活性を研究するに当り、腐植と混在する非腐植をもあわせて腐植物質とし、また主成分を占める腐植は高分子化合物であるが、その分解過程で低分子化による官能基の増加とそれに伴う生理活性の増加を目標とした。

本稿では上記の中で直接効果に属する a. キレート形成による金属元素の吸収増進と b. 根伸長・根毛形成・根活力の増進について行なった実験の結果を紹介する。

1) 供試材料とその性状

亜炭・褐炭などの若年炭を30～40%硝酸で緩酸化し、中和したニトロフミン酸（NHA）および、^{重炭酸}4%水酸化ナトリウムを添加し、120°Cで30分間加熱後中和（pH7.0）したフモエキス（HE）をそれぞれ調製し供試した^{11,12)}。この HE は C, N % は HNA より低い、C/N は大差なく平均分子量は 33.1×10^3 値が得られた。また腐熟過程を研究するための材料として稲わら

表1 元素組成, 官能基含有量と平均分子量

	ニトロフミン酸	土壤腐植酸	リグニン
元素組成 (%)			
C	53 ~ 61	52 ~ 60	61 ~ 64
H	3 ~ 6	3 ~ 5	5 ~ 7
O	29 ~ 35	29 ~ 35	30 ~ 35
N	2 ~ 5	3 ~ 5	0
官能基 (meq/g)			
カルボキシル基	3 ~ 8	3 ~ 7	0 ~ 0.1
アルコール性水酸基	0.3 ~ 3.0	0.2 ~ 0.3	1.0 ~ 1.1
フェノール性水酸基	0.5 ~ 1.5	0.3 ~ 0.9	0.3 ~ 0.4
メトキシル基	0.1 ~ 2.0	0.1 ~ 6.0	12 ~ 22
平均分子量	17.4×10^3	38.4×10^3	—

堆肥 (自製) およびパーク堆肥 (富士見工業製) を用いた¹³⁾。

亜炭を30~40%硝酸で処理した時, いずれの個所が分解したのかは不詳であるが, ラクトン環の開裂や側鎖の切断などが推測される。しかし, NHAの70%以上は「アルカリ可溶—酸不溶」で腐植酸に相当し, 約11%は「アルカリ可溶—酸可溶」でフルボ酸に相当するが, 「アルカリ不溶部」は原料の亜炭より著しく低含量となる。

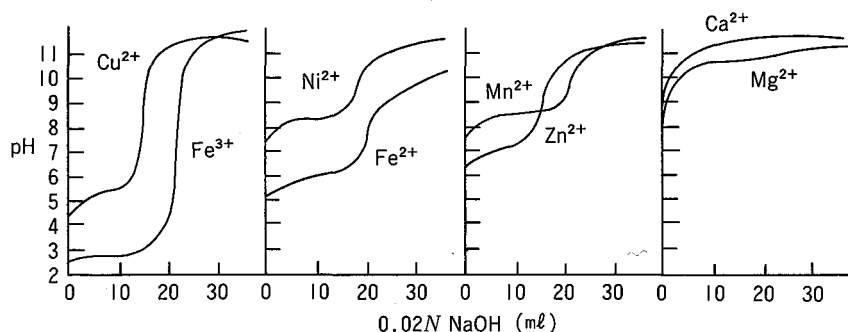
表1は, NHA および土壤腐植酸 (SHA: 腐植質黒ボク土より精製) の元素組成, 官能基含有量をリグニンと比較したものであるが, リグニンに比べてC, Hが低く, Nは高い。また官能基としては, カルボキシル基, フェノール性水酸基が高く, メトキシル基が低い。

超遠心分離による沈降平衡法および粘度法で求めた平均分子量はSHAが 38.4×10^3 なのに対してNHAは 17.4×10^3 でSHAの2分の1程度であった。

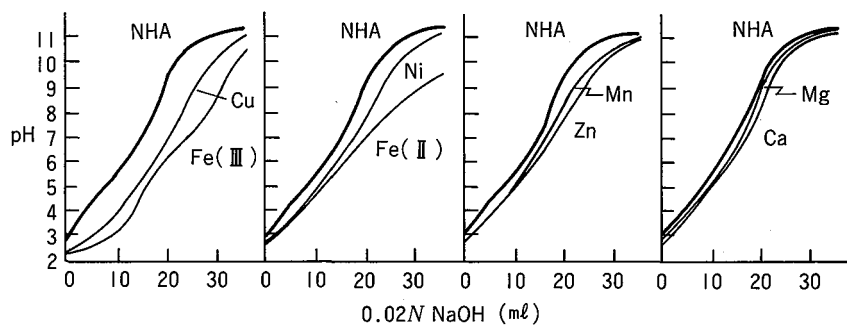
また, NHAの赤外線吸収スペクトルは, SHAとほぼ同様の傾向を示した。走査型電子顕微鏡写真では, NHAは径0.1~0.01 μm の球状コロイドで球の形はSHAより均一であった。

2) 根吸収とキレート形成による金属元素の吸収増進

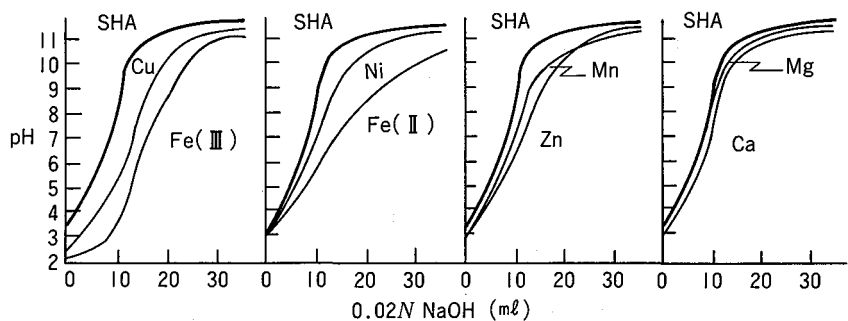
図2は, 多価カチオン添加時のNHAおよびSHAの滴定曲線を示したも



(1)多価カチオン単独液の滴定曲線



(2)NHA単独液および多価カチオン添加時のNHAの滴定曲線



(3)SHA単独液および多価カチオン添加時のSHAの滴定曲線

図2 各種多価カチオン添加時のNHA および SHA の滴定曲線

3, 腐植物質の植物生理に及ぼす効果 (77)

表2 NHA およびSHA 金属キレート の安定度定数 (log K)

	pH	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Cu ²⁺	Ni ²⁺	Zn ²⁺	Cd ²⁺	Mn ²⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
NHA	3.0	9.57	6.91	7.19	7.46	5.97	3.96	0	0	0
	5.0	8.97	8.46	10.82	7.98	6.33	6.87	3.59	0	0
	7.0	6.69	6.38	9.62	9.53	7.85	8.07	6.08	5.67	4.98
	9.0	—	—	—	—	—	—	7.60	6.88	6.35
	11.0	—	—	—	—	—	—	7.76	8.12	7.41
SHA	3.0	11.36	5.36	6.79	5.39	5.05	5.26	0	0	0
	5.0	8.46	6.41	12.60	7.63	7.15	5.45	0	0	0
	7.0	6.60	4.78	12.33	9.60	10.34	8.90	5.60	6.45	5.46
	9.0	—	—	—	—	—	—	8.72	7.81	6.76
	11.0	—	—	—	—	—	—	9.20	8.03	8.42

のである。NHA, SHA の単独曲線は pH10.5~11.0 付近に変曲点を有するが、各陽イオンを添加した場合には、各陽イオン単独溶液で認められた水酸化物の沈澱に相当する変曲点は消失し、かつキレート形成に伴う H⁺ の放出により、腐植酸単独に比べて pH は低下した。pH 低下の程度から NHA, SHA の各陽イオンに対するキレート形成の相対的安定度は Fe³⁺>Cu²⁺>Fe²⁺>Ni²⁺≧Zn²⁺>Mn²⁺>Ca²⁺=Mg²⁺ であろうと推定された。

表3 ダイズ幼植物による標識 Fe-NHA からの Fe および NHA の吸収・分布

Fe 塩	植物体部位	含有率 (cpm/10mg dry wt.)	吸収率 (%)	移行率 (%)	分布率 ⁵⁹ Fe-NHA/ ⁵⁹ FeCl ₃	分布率 ⁵⁹ Fe-NHA/ Fe- ³ H-NHA
⁵⁹ FeCl ₃	地上部	237	0.28			
	根部	5231	1.15	19.6		
	全植物体	1023	1.43			
⁵⁹ Fe-NHA	地上部	342	0.54		1.92	
	根部	2441	0.71	43.2	0.62	
	全植物体	673	1.25		0.87	
Fe- ³ H-NHA	地上部	56	0.005			108.00
	根部	15967	0.24	2.0		2.96
	全植物体	2259	0.25			5.00

注) 1. Fe は水耕液中に0.5ppm 添加した。その時の各塩の放射強度は、⁵⁹FeCl₃ 15491×10², ⁵⁹Fe-NHA 15381×10², Fe-³H-NHA 238214×10²cpm である。

2. 移行率は地上部吸収率/全植物体吸収率×100として算出した。

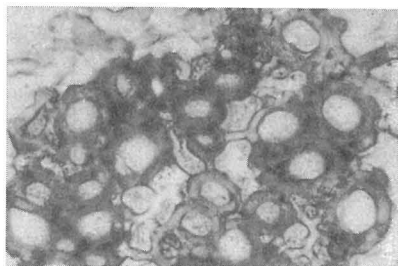


写真1
クワ苗根における通導部
分の ^3H 標識NHA分布
($\times 400$)

Schnitzer らの方法¹⁴⁾ に準じて pH3.0~11.0 における各金属イオンのキレート安定度常数 (log K) を算出して表 2 に示した。

ダイズ幼植物を供試し、イオン交換樹脂で調整した ^{59}Fe -NHA を根吸収させると表 3 に示すように地上部への Fe 移行は増加したが、根中の量は僅か減少した。また NHA を Wilzbach 法で ^3H 標識し、精製した ^3H -NHA を用いて検討したところ NHA 自体の吸収率は地上部 0.005%，根部 0.24% と低いが、根から吸収され、地上部へ移行し、地上部への移行率は約 2% であることを確かめた。また、Fe/NHA の値は植物体各部分で異なり、Fe-NHA キレートが根で分解した後 Fe、NHA 各々別個に移行するものと推察された。

桑苗根の通導組織中における ^3H -NHA のマイクロラジオオートグラムによると黒化した大部分は細胞壁に集積しているが、写真乳剤の銀粒子の黒化が細胞内部にも見られ、NHA の成分中に微量ではあるが細胞内に吸収されるものの存在が示唆された (写真 1)。

3) 根伸長・根毛形成・根活力の増進

発芽時の水稻「農林29号」を水耕し、NHA で 6 日間処理すると、地上部、根部とも伸長が促進され、特に根長で著しかった。乾物重も増加するが、その程度は伸長より小さく、根数は逆に減少した。

これらの結果から、NHA による根伸長は、細胞分裂の増加よりも細胞伸長の促進に基くものと考えられた。これを確認するため水稻種子根の縦断顕微鏡写真を撮影し、皮層部細胞の縦横の長さを測定したところそれぞれ 79、

表 4 NHA・Na が水稻幼植物の養水分吸収に及ぼす影響

養水分	単 位	NHA 無処理	NHA 処理
N	mg/10 個体	3.26 (100)	3.94 (121)
	乾物中 %	0.98 (100)	1.02 (104)
P ₂ O ₅	mg/10 個体	1.52 (100)	1.74 (114)
	乾物中 %	0.46 (100)	0.45 (98)
K ₂ O	mg/10 個体	2.72 (100)	2.52 (91)
	乾物中 %	0.82 (100)	0.65 (79)
H ₂ O	ml/10 個体	252 (100)	767 (304)
	乾物重	333 (100)	386 (116)

60%の増加がみられ、細胞容積は増大することが認められた。

次に根の生理活性に及ぼす NHA の影響を調べた。どのような単位が根の生理活性を表現するのに適当であるかは議論のあるところであるが、筆者は養水分吸収、呼吸量、 α -ナフチルアミン酸化力について調査した。表 4 には水稻幼植物を NHA 80ppm で処理した場合、25日間処理した場合の養水分吸収を示した。植物個体当たりの N, P₂O₅ 吸収量は無処理区に比べてそれぞれ21, 14%増加したが乾物重当りに換算するとそれほど増加しなかった。しかし、K₂O の吸収は個体当り、根乾物重当りとも減少し、水分吸収の増加は著しかった。

また、表 5 には NHA で25日間処理した場合の根の生理活性を示した。O₂ 吸収、 α -ナフチルアミン酸化力とともに NHA 処理により増加が認められ、放出 CO₂/吸収 O₂ の比は減少傾向を示した。

これらの結果から、NHA は表面活性により根細胞壁の可塑性（変化のしやすさ）を増加させるため、水分吸収と細胞質の膨圧が増加するものと推察された。

筆者らは KONONOVA¹⁵⁾ と同様にフルボ酸は腐植酸より水稻種子根を伸長させる程度が大きいことを認めたので、NHA を Schnitzer らの方法¹⁶⁾ を参考としてゲル濾過法により平均分子量別に分画し、各画分が水稻種子根長に及ぼす影響を検討した。

その結果、平均分子量が低い画分（700以下）では 0.1ppm において対象

表5 NHA・Na が水稻幼植物根の生理活性に及ぼす影響

O ₂ 吸収	$\mu\text{l/hr/10個体の根}$	90.4 (100)	104.2 (115)
	$\mu\text{l/hr/乾物 mg}$	6.98(100)	7.64(110)
α -ナフチルアミン 酸化力	$\mu\text{g/hr/10個体の根}$	147.2 (100)	220.0 (149)
	$\mu\text{g/hr/乾物 mg}$	11.4 (100)	14.8 (129)
呼吸商	放出 CO ₂ /吸収 O ₂	0.94 $\pm$ 0.04	0.85 $\pm$ 0.04
根成分	mg/100個体		
全-N		3.52(100)	4.76(135)
たんぱく態-N		3.36(100)	4.44(132)
NH ₃ -N		0.03(100)	0.11(367)
アミノ態-N		0.13(100)	0.21(162)
還元糖		18.2 (100)	18.3 (101)

区に対する比率が149であるが、濃度の増加とともに減少して 10ppm 以上では逆に阻害が認められた。これに反し、平均分子量が 700 $\sim$ 100 $\times$ 10³ の各画分では濃度の増加とともに伸長が促進され、阻害作用はみられなかった。NHA 中の存在量を考慮すると NHA の根伸長促進効果の主体は平均分子量 700 $\sim$ 10,000 の画分にあると考えられた。

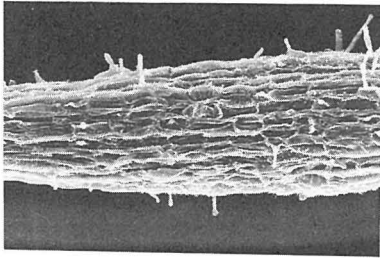
各画分の赤外線吸収スペクトルからも高分子量画分ほど脂肪族的な性質が強まるものと考えられ、 $\Delta\log K$ (400nm と 600nm の吸光度の比) も高分子量画分ほど低い値を示した。

以上の結果から、低分子量と高分子量の画分では根の伸長に及ぼす影響が異なり、低分子量画分では生理的影響に基づく根伸長が、高分子量画分では細胞壁の可塑性など物理化学的影響に基づく根伸長が主として影響を与えるのではないかと推察した。

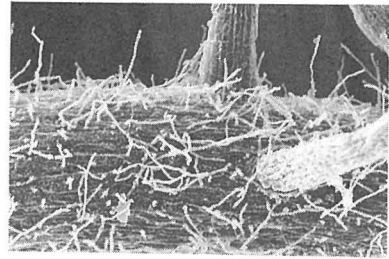
4) 根毛の増加に及ぼす HE の効果

次に、アルカリ処理泥炭 (HE) を試料として水稻について検討を行った。HE の材料とその性状は前記 1) に示した。

写真 2 は、水稻「日本晴」幼植物を HE 40ppm で 9 日間処理した場合の根毛の走査型電子顕微鏡写真であるが、無処理 (対照) に比して処理では著



無処理 (対照) (×200)



アルカリ処理泥炭 (20ppm) (×100)

写真2 水稻幼植物根毛の走査型電子顕微鏡写真

しい根毛の増加が認められた。

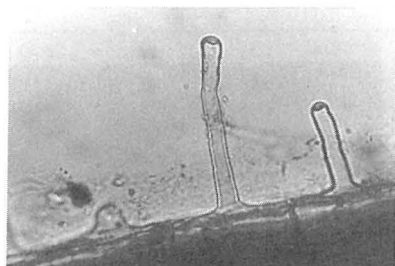
水稻冠根の表皮細胞には根毛を有する短い細胞と根毛のない長い細胞がある。表皮細胞の分裂が終った後にリボ核酸 (RNA) の多い細胞と少ない細胞を生じ, RNA の多い細胞は徐々に生長して根毛のある短細胞となるが, RNA の少ない細胞は速やかに発達して根毛のない長細胞になることが報告されている¹⁷⁾。

そこで, 根中の RNA 含量を Schmidt Thanhauser Schneider の修正法により定量し, 根毛数との相関をみたところ, 表6のように根基部の RNA 含量と根毛数との間には明らかな正の相関が認められ, 根基部の RNA 含量の増加につれて根毛数の増加が認められた¹¹⁾。

さらに, 水稻幼植物根毛中における RNA を Lison の方法¹⁸⁾ によりメチルグリーンとピロニンで染色した組織化学写真により RNA の存在を確認し

表6 水稻幼植物根中の根毛数と RNA 含量との関係

アルカリ処理泥炭 ppm	根 毛 数		RNA (μ g/100 個体)	
	先端部	基 部	先端部	基 部
0 (対照)	386 (100)	398 (100)	568.0 (100)	604.5 (100)
40	317 (82)	683 (172)	511.5 (90)	709.0 (117)



無処理 (対照) (×400)



アルカリ処理泥炭 (40ppm) (×400)

写真 3. 水稻幼植物根毛中 RNA の組織化学写真

た (写真 3)。精製した HE40ppm で処理した根毛の先端部に赤色で顆粒状の RNA の存在が認められ、RNA の化学分析の結果を裏付けた。

4. 堆肥の腐熟化過程に発現する生理活性物質とその効果

著者¹⁹⁾は、標品のゼアチン (Z: トウモロコシの未熟種子から発見された天然サイトカイニン) およびリポシルゼアチン (RZ) について水稻幼植物根中の RNA の含量の増加および根毛生成を促進する現象を認めた。そこで重水素標識サイトカイニンを内部標準とした GC/MS, GC/SIM 法²⁰⁾により稲わら堆肥腐熟過程におけるサイトカイニンの量的変動を確かめた²¹⁾。その結果、全サイトカイニン量は稲わら堆積 1 週間後に最も多く集積し、乾物 1kg 当り 27.14 μ g となるが、それ以後漸次減少し、堆積 9 週間後には乾物 kg 当り 8.84 μ g となった。

これを圃場に換算すると稲わら堆肥 (水分 75% と仮定する) を 10a 当り 1t 施用した場合、稲わら堆肥中のサイトカイニンは 10a 当り概算 10~40mg に相当すると考えられるが、サイトカイニンの生理作用は 1 μ g/L で発現するものもあると報告されているので²²⁾、土壤中における不均一性をも考慮に入れると局部的には稲わら堆肥中のサイトカイニンが作物に影響を及ぼす場面が想定される。

一方、未熟堆肥では植物の生長に害作用を及ぼす場合もあり、その一因と

して特にバーク堆肥において未熟堆肥中のフェノール酸含量が問題とされている²³⁾。筆者は、Folline Denis 法により堆肥中のフェノール酸の各成分も分析し、稲わら堆肥中に乾物 1kg 当り全フェノール酸 730~3780mg, バーク堆肥中に 20~4180mg の値を得た。さらに GC により p-クマル酸, p-ヒドロキシ安息香酸, バニリン酸, フェルラ酸の生成を認めたが、これらの酸は、各フェノール酸とともに腐熟過程に伴って減少することを認めた¹³⁾。フェノール酸の量から見ても、腐熟過程における腐植生成の時期からみても腐植がリグニンからフェノール酸を経た経路のみで生成するとは考え難い。糖とアミノ酸との反応 (いわゆる Maillard 反応) をも考慮に入れて検討する必要がある。

5. 今後の問題

わが国における「環境保全型農業」においては、有機・輪作・施肥農業の確立が特に重要であるとされている²⁴⁾。また、世界で700億tも埋蔵されている草炭による砂漠地帯の緑化構想²⁵⁾も検討されつつある。しかしながら、有機物の植物生理活性効果については今後の検討に待つべきものが多いというのが一般論である²⁶⁾。

一方、土壤腐植を材料とした分析法上の定義 (アルカリ可溶・酸不溶部を腐植酸, アルカリ可溶・酸可溶部をフルボ酸) からは腐熟有機物 (堆肥など) 中にも腐植酸, フルボ酸が含有されていることは確かである。しかし、これらは混合成分であり、その細部は腐熟原料とする有機物によっても異なるであろう。

堆肥など腐熟有機物中の腐植物質については世界的にも注目され始めている²⁷⁾。このような状況から最新の手法を用いて腐植物質の生理活性に関する研究が一段と進歩、発展することを期待するものである。

謝辞 筆者の研究を進めるに当っては武長宏・森山博司 (故森山真明氏長男, 現日本肥糧株式会社) ほか多くの諸君の協力を得た。特記して感謝する

次第である。

文 献

- 1) Wolfgang FLAIG und Horst SÖCHTIG: Wirkung organischer Bodensubstantzen und Ertragssicherung, Landbauforschung Völkenrode, **23**, 19-28 (1973)
- 2) M. M.コノノワ著, 菅野一郎ほか訳: 土壤有機物, p. 24, 農山漁村文化協会 (1976)
- 3) M. M. KONONOVA: Gedanken zur Nomenklatur der in Boden vorhandenen Organischer Stoffe, Trans. 8th Intern. Congr. Soil Sci, Bucharest, Romania, **III**, 401-404 (1964)
- 4) 熊田恭一: 土壤有機物の化学, p. 2-7, 東京大学出版会 (1977)
- 5) I. V.チューリン: 土壤腐植組成の比較研究に対する分析法, ソ連科学アカデミー ドクチャエフ土壤研究報告, **38**, 22 (1951)
- 6) M. SCHNITZER and S. U. KHAN: Humic substances in the environment, p. 327, Marcel Dekker, Inc. (1972)
- 7) R. L. TATE III: Soil organic matter, p. 155, John Wiley & Sons (1987)
- 8) フミン酸肥料懇話会編: 腐植酸肥料 (解説編), p. 3 (1968)
- 9) S. ASO and H. TAKENAGA: Physiological effects of humic substances, Intern. Symposium Humus et Planta **VI**, Prague (1975)
- 10) 麻生末雄: 腐植の生理活性, 近代農業における土壤肥料の研究—第3集—, p. 50-61, 養賢堂 (1972)
- 11) S. ASO and H. MORIYAMA: The effect of humic substances on root hair formation and nucleic acid content of rice seedling, Intern. Symposium Humus et Planta **VII**, Brno (1979)
- 12) S. ASO: Physiological effect of humic substances, 5th Intern. Meeting, Intern. Humic Substances Soc. NAGOYA, p. 9 (1990)
- 13) 麻生末雄・佐藤泰史・山下高弘: 稲わら堆肥の腐熟過程にともなうフェノール酸の変動と幼植物によるバイオアッセイ, 土肥要旨集, **37**, p. 13 (1991)
- 14) M. SCHNITZER and S. I. M. SKINNER: Organometallic interactions in soils, 5. Stability constants of Cu^{++} -, Fe^{++} -, Zn^{++} - fulvic, acid complexes, Soil Sci., **102**, 361-365 (1966)
- 15) M. M. KONONOVA and H. A. PAUKOVA: 植物の生長と発育におよぼす腐植物質の作用, ソ連科学アカデミー報告, **73**, 5 (1950)

- 16) M. SCHNITZER and S. I. M. SKINNER: Gelfiltration of fulvic acid, A soil humic compounds, Isotopes and radiation in soil organic matters studies, 4145, IAEA (1968)
- 17) 川田信一郎・石原邦: 水稻冠根の表皮における RNA 分布について, 日作紀, **29**(4), 381-391 (1961)
- 18) Lucien LISON 著, 今泉正訳: 組織化学および細胞化学 理論と方法, p. 681-683, 白水社 (1972)
- 19) 森山博司・武長宏・麻生末雄: 腐植の生理活性に関する研究 (第 9 報) 草炭アルカリ処理物中に存在するサイトカイニン様物質が根毛形成に及ぼす影響, 土肥要旨集, **30**, 260 (1984)
- 20) 杉山民二・橋爪斌: 重水素標識サイトカイニンを内部標準とする GC/MS によるサイトカイニンの同定・定量, 化学と生物, **20**, 760-764 (1982)
- 21) 麻生末雄・武長宏・杉山民二: 稲わら堆肥腐熟過程におけるサイトカイニン変動, 土肥誌 **59**, 471-477 (1988)
- 22) R. A. FLETCHER and D. McCULLAGH: Cytokinin-induced chlorophyll formation in cucumber cotyledons, Planta(berl.), **101**, 88-90 (1971)
- 23) 今野一男・平井義孝・東田修司: パーク堆肥の腐熟過程における化学成分変化と腐熟度指標, 北海道立農試集報, **52**, 31-40 (1985)
- 24) 熊沢喜久雄: 環境と肥料—農業の現状と肥料の役割—, 地球にやさしい農業—土壌肥料の立場から 公開特別講演会講演集, 日本土壌肥料学会沖縄大会運営委員会 (1993)
- 25) 京都純義: 草炭(Peat)による砂漠の緑化, 草炭研究会報, 第 2 号 (1991)
- 26) 農林省農業技術センター編: 有機物の処理・流通・利用システム—堆肥センターを軸として, 総合農業研究叢書第 7 号, p. 288, 農水省農業センター (1985)
- 27) N. SENESI: Composted materials as organic fertilizers, The Science of The Total Environment, **81/82**, 521-542 (1989)