

## 物質循環における土壌微生物の 役割と土壌の健全性

丸本 卓哉

### 1. はじめに

昭和40年代になって我が国の農業生産量は急激に増加したが、それは化学肥料と農薬の施用や農業機械の発達によるものであった。しかしながら近年、化学肥料の多用による塩類濃度障害などの土壌化学性の悪化、農薬による生態系の乱れによって生じる病虫害や地下水及び食品の汚染、有機物施用量の減少による土壌生物性の低下、大型機械導入による土壌物理性の悪化、また連作による栄養生理異常や病害発生などが問題となっている。また、世界のいたるところで環境破壊や生態系破壊に基づく表土流出や砂漠化が進行している。これらは人類の生存にも関わる重大問題である。このような背景の下に、近代農業技術における弊害を反省し、化学肥料や農薬の施用量を必要最小限に抑え、自然環境を保全しながら作物生産を持続的に行なおうとする環境保全型あるいは環境調和型農業への関心が世界的に高まり<sup>1)</sup>、欧米の一部においてはすでに環境保全型農業が実施されている<sup>2)</sup>。

環境と調和しながら安定した作物生産を上げようとするれば、地力維持と増進のため土壌へ有機物を還元することが必要不可欠である。土壌

に加えられた有機物は、土壌小動物や微生物による分解過程を通して一部は炭酸ガスやアンモニアへと無機化され、一部は微生物体や土壌有機物中へ取り込まれ、物質が循環しながら地力が形成されていく。結論的にいえば、土壌生物、なかでも微生物の活動なくしては、物質循環も地力維持も不可能であるといえる。

ここでは、土壌の物質循環と健全性に及ぼす土壌微生物やバイオマスの役割について述べ環境調和型農業における意義について考察してみたい。

### 2. 農耕地の物質循環と微生物

長い年月を経て発達してきた自然土壌に対して農耕を開始すると、ある気候条件下でバランスがとれていた生態系に変化が生じ、物質循環にも変化が生じるようになる。農耕地では、耕耘、肥料や薬剤施用など種々の農作業が行なわれるため、土壌の生態系が攪乱され、物質循環が促進されることになる。農耕地におけるこのような生態系攪乱による物質循環の促進は、一般に土壌からの有機物収奪量が還元量を上回るため、土壌中の養分含量を減少させ、作物生産力（地力）を低下させる。そこで地力を維持しようとするれば、稲わらや堆厩肥などの土壌への還元が必要である。土壌に有機物が増えらると、小動物や微生物の働きによって徐々に分解

される。土壤微生物は土壤に加えられた有機物の分解者として働く一方、その分解過程で放出される養分を摂取しながら増殖し、各種養分を菌体成分として保持する。菌体成分として利用されなかった余分の養分は、土壤中に放出されて植物に利用されたり、土壤に吸着保持されたり溶脱されたりする。未分解の有機物残渣はさらにゆっくりした分解を受けるか、難分解性の腐植（土壤有機物）へと変化していく。図1に土壤と大気をめぐる窒素循環を示した。土壤中における窒素循環のうち、肥料と降雨によって土壤に加わる過程とアンモニアの揮散を除き、ほとんどが生物的過程で、なかでも微生物の役割が極めて大きい。

(1) 微生物バイオマスと養分循環

通常、土壤は微生物のエネルギー源としての炭素化合物の継続的な供給に乏しく、ある一定の微生物レベルを維持している。土壤中の微生物総量を微生物バイオマス（以下、バイオマスと記す）と呼んでいるが、農耕地のバイオマス

レベルは、作物収穫後の残根や切り株などが土壤に還元されるため、もし稲わらや堆肥などが施用されなくても急激に減少することはない。しかしながら有機物無施用が長期にわたれば、バイオマスレベルは徐々に減少し、地力も衰える。土壤バイオマスの量は土壤有機物の平均2~3%を占めるにすぎないが、植物に比較したそれらのライフサイクルは極めて短く、生と死のくり返しの過程で養分の取り込みと放出を行なうため、バイオマスを循環する養分量は意外に多い。さらに、土壤微生物の急激な死を引き起こすような環境条件の変化、たとえば土壤の乾燥、消毒、粉碎、凍結などが生じた場合、生き残った微生物による死菌体の分解に伴って、菌体内に取り込まれていた養分の一時的な放出が生じる。表1に土壤を粉碎あるいは乾燥処理したのちに無機化が促進された炭素と窒素量に対する、バイオマス画分の貢献割合を示した<sup>3)</sup>。西ドイツの畑土壤における強度の乾燥処理（70℃、24時間）では、無機化N量の約76%が、風

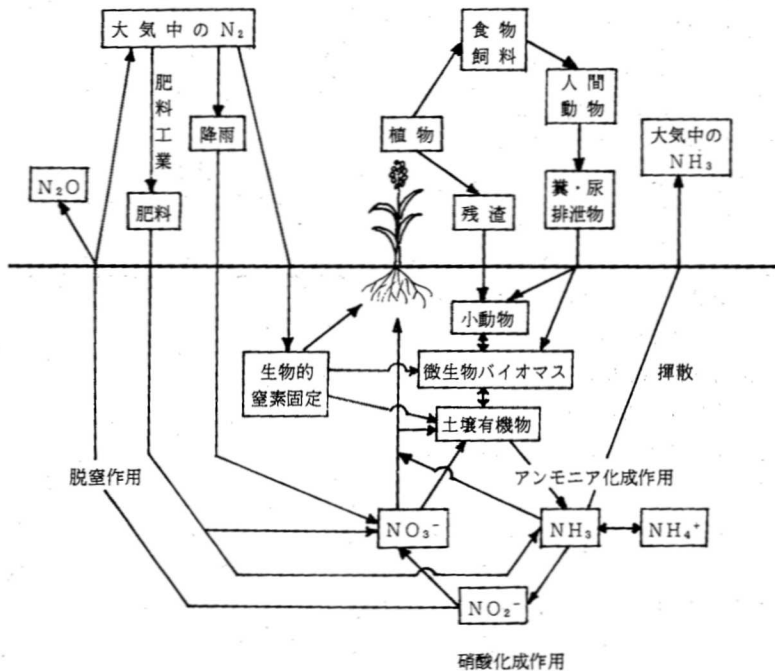


図1 土壤と大気をめぐる窒素循環

表1 種々の土壌前処理によって無機化された全フラッシュに対するバイオマス及び非バイオマス由来のCあるいはNの割合

土壌	前処理	培養条件	全フラッシュ	
			バイオマス	非バイオマス
畑土壌 <sup>1)</sup> イギリス (2サンプル)	粉 砕	25°C±0.5 10日 (C) 55%WHC	36%	64%
畑土壌 <sup>2)</sup> 西ドイツ (1サンプル)	熱 乾 (70°C 24h)	22°C±0.5 28日 (N) 34%WHC	76	24
畑土壌 <sup>3)</sup> 西ドイツ (4サンプル)	風 乾 (室温 24h)	22°C±0.5 28日 (N) 34%WHC	55	45
	熱 乾 (70°C 24h)	(N)	77	23
水田土壌 <sup>4)</sup> 日本 (3サンプル)	熱 乾 (70°C 24h)	25°C±0.5 28日 (N) 50%WHC	66	34

1) Powelson (1980), 2) Marumotoら (1982a), 3) Marumotoら (1982b),  
4) Marumoto (1984)

表2 バイオマスに含有される養分の相対比

(ANDERSON と DOMSCH, 1980)

	バイオマス 中の相対比 (%)	C	N	P	K	Ca
細菌	25	0.25	0.045	0.015	0.008	0.004
糸状菌	75	0.75	0.105	0.101	0.090	0.010
計	100	1.00	0.150	0.116	0.098	0.014

乾処理では約55%がバイオマス由来であった。また、イギリスの畑土壌を粉碎処理したとき、10日間に無機化された全Cの約36%がバイオマス由来であった。このように、土壌のバイオマスはそれ自身が窒素やリンなどの作物養分の貯蔵庫であると同時に、供給源でもある。

(2) バイオマス養分と作物生育

バイオマスに含有される養分量を表2に示した<sup>4)</sup>。これと土壌バイオマス量から、ヨーロッパ畑土壌12.5cm中のバイオマス養分量が試算されている。それによると、N, P, K, Caがそれぞれ108, 83, 70, 11kg/ha含有されていた。これらの値は普通畑作物が一作期間内に吸収する養分量にはほぼ匹敵している。表3に、100年以上にわたって無肥料でコムギを連作してきたイギリス、ロザムステッド試験場の畑土壌にお

表3 イギリス・ロザムステッド試験場の無肥料区コムギ連作土壌で得られたバイオマス養分の流れ

(JENKINSON と LADD, 1980)

深さの23cm土壌の量(乾土)	2,200 t/ha
土壌の有機物含量	26 t C / ha
土壌のN含量	2.7 t N/ha
年間の有機物流入量	1.2 t C/ha/年
バイオマスC量	220 μg C/g乾土
	570 kg C/ha
バイオマスのターンオーバー	2.5年
バイオマスN量	95 kg N/ha
バイオマスからのN可動量	38 kg N/ha/年
バイオマスP量	11 kg P/ha
バイオマスからのP可動量	4.6 kg P/ha/年

る養分動態を示した<sup>5)</sup>。ここで概算されたバイオマスからの年間N可動量38kg/ha及びP可動量4.6kg/haは、コムギに年間吸収されたN量

24kg/ha と P 量 5 kg/ha に極めて近く、コムギの吸収した N と P の大部分がバイオマス由来と推定された。またスウェーデンでも、無窒素区のおオムギが吸収する N 量は 67kg/ha であるが、バイオマスを經由する N 195kg/ha のうち 67kg が無機態 N として土壤中に放出され、残り 128kg 中の 38kg が土壤動物を經由する過程で無機態として放出されることが試算されている。

水田土壤についても、バイオマス N 量と水稻 N 吸収量や無機化 N 量との間に高い相関のあることが示され、水田における可給態 N 給源としてのバイオマス養分の重要性が指摘されている<sup>6,7)</sup>。また、畑土壤と異なり水田では、田面水中の光合成生物に取り込まれた N や、窒素固定菌によって固定された N も水稻の N 給源として重要である。

草地土壤については、放牧草地のルートマット層 (0~2.5cm) で年間約 22kg N/ha がバイオマスから供給されたことが示されている<sup>8)</sup>。

### (3) バイオマス養分の代謝回転速度

前述したように、一定の条件下でのバイオマスレベルはかなり安定している。しかしながら、一見安定しているような場合でも、そのレベルを維持するために、バイオマス生体内成分の更新が絶えず行なわれている。この成体内成分更新速度を代謝回転速度といっている。この代謝回転速度を知ることは、土壤バイオマスから供給される養分の量を知る上で極めて重要である。イギリスのロザムステッド試験場の畑土壤について得られた各種土壤有機物画分の C 量の半減期 ( $t_{1/2}$ ) は、易分解性植物成分 0.165 年、難分解性植物成分 2.31 年、土壤バイオマス 1.69 年、物理的に安定化した土壤有機物 49.5 年、化学的に安定化した土壤有機物 1980 年と試算されている<sup>9)</sup>。また、カナダのチェルノーゼム土壤では、N でみた半減期が、土壤バイオマス 0.5 年、易分解性有機物 1.5 年、安定化した土壤有機物 22 年、難分解性で長期間蓄積している土壤有機物 600 年と試算されている。これらの数値から、バイオマス養分の代謝回転速度は、他の

土壤有機物画分に比べ極めて速いことが明らかである。

### (4) 作物根圏におけるバイオマスの養分代謝

前項で述べたバイオマス養分の代謝回転速度は、バイオマスレベルが比較的安定した農耕地についての平均的データであり、作物栽培条件下のものではない。農業の現場における作物養分の循環と作物による吸収については、作物根と土壤が密接に関係している根圏や根域における情報が重要であろう。特に根面から数ミリメートルの範囲である根圏は、根からの分泌物や脱落細胞など微生物の栄養源に富むため、非根圏に比べて微生物密度が数倍から数十倍とかなり高く、養分代謝活性も高いと考えられる。表 4 に畑作物根圏バイオマス N の代謝回転速度 ( $T$ : turnover time) と半減期 ( $t_{1/2}$ ) を示した。T は根圏で 135~137 日 (平均 0.37 年)、根域で 139~151 日 (平均 0.40 年)、非根圏で 187~245 日 (平均 0.59 年) を示し、根圏  $\geq$  根域  $>$  非根域の順に速かった<sup>9)</sup>。このことは、バイオマスの養分代謝回転速度は非根圏から根に近づくにつれて速くなることを示している。そして、この根圏での T の値は、前項で示した他の研究者による非根圏での値と比較しても極めて速い。

表 4 畑作物栽培期間 (120 - 480 日) における根圏、根域、非根圏のバイオマス<sup>15</sup>N の半減期 ( $t_{1/2}$ ) と代謝回転速度 ( $T$ )

土壤	区分	根からの距離 (mm)	半減期 (days)	代謝回転速度 (days)
山口大学	根 圏	0 - 5	93.9	135.5
	根 域	5 - 15	96.8	139.6
	非根圏	-	169.9	245.1
千石台	根 圏	0 - 5	95.1	137.1
	根 域	5 - 15	104.8	151.2
	非根圏	-	130.3	187.9

南オーストラリアの畑にマメ科牧草を混和した後に増殖したバイオマスが死滅する際の半減期は、初めの 6 カ月は N で 0.28 年 (約 100 日) と速いが、定常状態に達した 1~4 年目は 4.0 年であったと報告されている<sup>10)</sup>。この初期のバイオマス N の半減期約 100 日は、表 3 に示した根

圏のバイオマスNの半減期約95日に近い値である。これらのことは、マメ科牧草やグルコース等の易分解性有機物を速やかに利用して増殖したバイオマスの養分代謝回転速度も、根圏と同様に速いことを示している。

表5に完熟堆肥施用後のオカボ根圏のバイオマス<sup>15</sup>Nの半減期と代謝回転速度を示した。化学肥料及び堆肥施用の16日前にバイオマスNを(<sup>15</sup>NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>とグルコースでラベルした。堆肥施用直後の0~92日におけるTは、73~96日の範囲にあり、グルコースを用いた化学肥料区に比べ、堆肥をプラスした場合のバイオマス<sup>15</sup>Nの代謝回転速度は遅くなる傾向を示した。この傾向は92~178日の栽培後半も同様であった。堆肥施用区では、牛糞堆肥に比べ、パーク

堆肥の方が代謝回転速度が遅くなる傾向を示した。これはパーク堆肥中の炭素が難分解性で、微生物に利用し難いため、炭素源の分解性がバイオマスの代謝速度に影響することを示している。また、表3と異なり、堆肥を施用した場合、根圏と非根圏のTにあまり差がなかったのは、堆肥施用による非根圏でのバイオマスレベルの増加によるものであろう。

これら堆肥施用直後の3カ月間におけるバイオマスNのTは、根圏で平均93日を示し、比較的安定したオカボ生育後半(92~178日)の平均値195.5日より明らかに速かった。つまり、堆肥は、施用後3カ月間にわたって土壌バイオマス養分の代謝回転速度を促進するといえる。

表5 完熟堆肥施用後のオカボ根圏及び非根圏のバイオマス<sup>15</sup>Nの半減期 (t 1/2) 及び代謝回転速度 (T), (1990) (丸本, 未発表)

土壌	処理 <sup>1)</sup>	バイオマス <sup>15</sup> N			
		半減期 (t1/2)		代謝回転速度 (T)	
		0-92日	92-178日	0-92日	92-178日
山口大学 (赤黄色土)	化学肥料 根圏	60	98	86	142
	化学肥料 非根圏	53	106	77	153
	化学肥料 + 牛糞肥料 根圏	61	97	88	141
	牛糞肥料 非根圏	58	97	83	140
	化学肥料 + パーク堆肥 根圏	64	151	92	218
	パーク堆肥 非根圏	62	165	90	238
千石台 (黒ボク土)	化学肥料 根圏	51	106	74	153
	化学肥料 非根圏	50	108	73	156
	化学肥料 + 牛糞堆肥 根圏	67	143	96	206
	牛糞堆肥 非根圏	66	148	95	214
	化学肥料 + パーク堆肥 根圏	67	150	96	217
	パーク堆肥 非根圏	67	150	96	217

注) 1) 堆肥施用量は2 ton/10a に相当

害の発生を助長することがあり、注意を要する。

### 3. 物質循環と土壌の健全性

図2に、土壌・根圏微生物生態系の物質循環と作物生育との因果関係<sup>11)</sup>を示した。土壌を健全に維持することは、作物の安定生産と病害防除にとって極めて重要であるが、そのためには微生物生態系が順調に機能し、物質循環がとどこおりなく進行しなければならない。図に示されるように、生態系が円滑に機能するには各種の有機物質が必要とされる。

土壌の持つ物質循環能に対し、必要以上に多量の有機物や化学肥料が加えられたり、著しく不足するような状態下では、物質循環は順調に進行せず、作物にとっても良くない状況になることがわかる。適量の各種有機物資材が土壌に施用されると、その分解過程を通して各種微生物が増殖し、微生物の多様性が増す。その結果、土壌の微生物の緩衝力が増し、異常気象、土壌の乾燥や塩類集積、連作などによる種々の環境ストレスに対する抵抗性を増加させることが報告されている<sup>11)</sup>。しかしながら、施用有機物の質や土壌の微生物的条件によっては、むしろ病

### 4. おわりに

以上、物質循環における土壌微生物の役割と土壌の健全性との関わりについて述べてきたが、基本的には、土壌微生物、なかでも根圏微生物の生態系を健全に維持し、物質循環を円滑に進めるような肥培管理を行なうことが重要である。特に有機物施用は必要不可欠であるが、堆厩肥などの入手が困難な現状においては、有機物資材の種類や質と量などについてもっとくわしい検討が必要であろう。また、最近ではキチン含有物質を土壌に施用して、キチン分解菌の増殖や活性化を促進してフザリウム菌の防除を行ったり、病原菌に対する微生物の拮抗作用や根圏微生物の生態及び栄養生理を利用して土壌病害を抑制する“生物的防除”に関する研究が盛んに行なわれている。しかしながら、根圏は作物・微生物・土壌の三者が影響し合う複雑な環境で、しかもそれぞれが多様多様であるため、まだ未解決の問題が多く、農業現場における根圏微生物の制御は簡単にはいかないのが実状である。

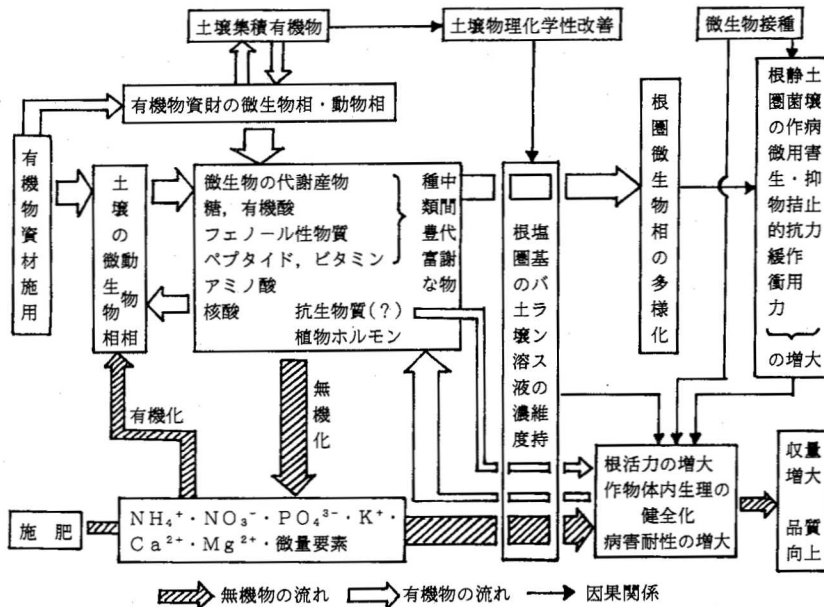


図2 土壌・根圏微生物生態系の物質循環経路と因果関係 (松口, 1986)

今後の研究の進展が望まれる。

最後に、欧米における農業は畜産と畑作がうまく調和可能で、堆肥なども比較的入手し易く、農家当りの耕地面積も広いため、生態系調和型農業に対する意識も高いが、農耕地が狭く、稲作主体の集約農業で生産重視型の兼業農家が多い我が国において、この農業体系を定着させるにはかなりの時間を要すると思われる。地球の未来のためにも、環境調和型農業に対する国民的コンセンサスが早く得られることを願っている。

(山口大学農学部 教授)

#### 参 考 文 献

- 1) レスター・R・ブラウン編著(1990) 地球白書 '90-'91, 持続可能な社会への道, 松下和夫監訳, 北濃秋子訳, ダイヤモンド社, 東京
- 2) 嘉田良平(平成2年) 環境保全と持続的農業, 家の光協会, 東京
- 3) Marumoto, T.(1984) Mineralization of C and N from microbial biomass in paddy soil, *Plant and Soil*, 76 : 165~173
- 4) Anderson, J. P. E. and Domsch, K. H. (1980) Quantities of plant nutrients in the microbial biomass of selected soils, *Soil Sci.*, 130 : 211~216
- 5) Jenkinson, D. S. and Ladd, J. N. (1980) Microbial biomass in soil; Measurement and turnover, *Soil Biochemistry*, 5, Ed., Paul, E. A. and Ladd, J. N., Marcel Dekker INC., New York : 415~471
- 6) Hasebe, A., Kanazawa, S. and Takai, Y. (1985) Microbial biomass in paddy soil, II, *Soil Sci., Plant Nutr.*, 31 : 349~359
- 7) Inubushi, K. and Watanabe, I. (1986) Dynamics of available nitrogen in paddy soils, II, *Soil Sci., Plant Nutr.*, 32 : 561~577
- 8) Okano, S., Nishio, M. and Sawada, Y. (1987) Turnover rate of soil biomass nitrogen in the root mat layer of pasture, *Soil Sci., Plant Nutr.*, 33 : 373~386
- 9) Marumoto, T.(1990) Turnover of microbial biomass nitrogen in rhizosphere soils of upland crops, *ICSS Transaction*, Kyoto, Japan, III : 49~54
- 10) Ladd, J. N., Oades, J. M. and Amato, M. (1981) Microbial biomass formed from  $^{14}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}$ -labelled plant material decomposing in soils in the field, *Soil Biol., Biochem.* 13:119~126
- 11) 松口龍彦(1986) 根圏微生物の機能と作物の生育, *農業技術*, 41 : 451~457