

地域環境工学シリーズ 5

豊かな土づくりをめざして

— 環境土壌学 —

農業土木学会

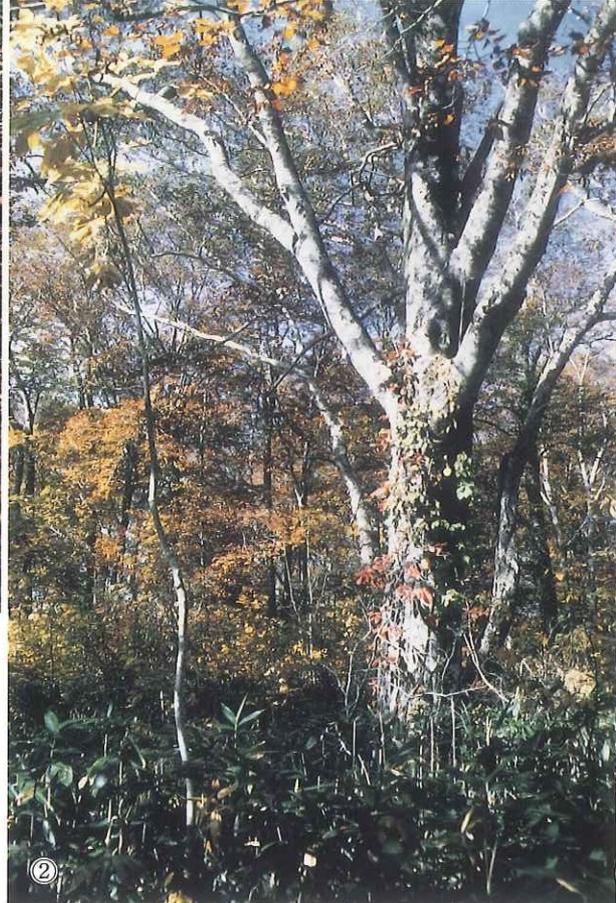
環境土壌学編集委員会編著

岩田 進午
赤江 剛夫
粕淵 辰昭
長谷川周一
宮崎 毅





①褐色森林土（岩石が風化し徐々に土が形成される。日本の森林の土は、ほとんどこれに属する）（加藤正樹氏撮影）



②ブナ林（ブナ林の土は最も肥沃といわれる）
（加藤正樹氏撮影）

土の顔

③北海道コッタロ湿原（泥炭土）のエゾカンゾウ（粕淵辰昭氏撮影）





④



⑤



⑥



⑦

⑦ブラジルのウマミミズ (体長 40 cm 前後) の糞 (土が団粒化されているのがわかる)

⑧グライ土 (地下水位の高い水田に見られる。暗渠排水による透水性の改善が必要) (浜崎忠雄氏撮影)

④赤色土 (間氷期の海面が上昇し、高温多湿の時に形成された年老いた土で、化石土ともよばれる) (加藤正樹氏撮影)

⑤黄色土 (表層グライ灰白化赤・黄色土ともいう。赤色土と同様に間氷期に生成された土で赤色土に次ぐ年老いた土) (加藤正樹氏撮影)

⑥虎斑土 (赤色土の一種。水が相対的に停滞する部分が還元され、鉄が溶出して白色を呈する) (浜崎忠雄氏撮影)

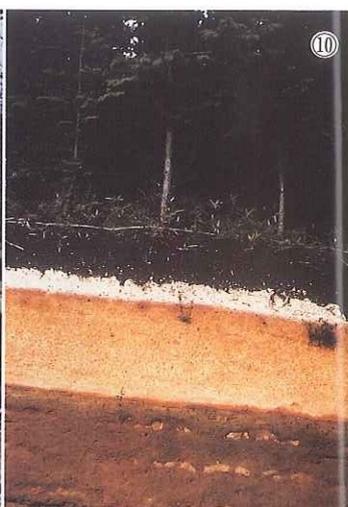
⑨, ⑩は火山灰土 (⑨は大分県久住, ⑩は栃木県。茶色と黒の土層が帯状に重なっているのが特徴) (山田一郎氏撮影)



⑧



⑨



⑩

まえがき

土は、その誕生以来、植物との相互作用のもとで、年ごとに自らの肥沃性を豊かにしてきた。しかし、そのような土も、自然の摂理を無視した人間の悪しき働きかけにより、徐々にではあるがその肥沃性を低下させ、死滅への道をたどりつつある。土地の砂漠化・不毛化、現代農業による土の疲弊である。このような土の危機は、地球温暖化・オゾン層の破壊などの環境危機と同じく、利便性・効率性・経済性の過度の追求の結果である。20世紀中頃にいたるまで、国民はいうに及ばず、科学者・技術者をも支配していた、「技術の進歩イコール人類の幸せ」という「幸福神話」が崩壊しつつあるのである。

現代農業と土との関係を例にとって考えてみよう。現代農業は、化学化—化学肥料・合成化学農薬の多投—と機械化によって特徴づけられる。化学肥料は有機質肥料より安価で、重量も軽く運搬に便利である。また速効性があるので、追肥によって、収量の増加をかちとりやすい。しかし、化学肥料の多投は、環境に負荷—内海・湖の富栄養化や N_2O 発生量の増大など—を与えるだけでなく、水はけ・水もちなどの土の物理的性質をも悪化させる。加えて、土中の作物養分のバランスをくずすことを通じて作物が病弱になり、病虫害が増加する。かくて、農薬登場のための舞台が用意される。農薬の使用は、病虫害防除や除草のための労働量を減じ、収量の増大をもたらす。しかし、反面、土壤微生物・土中動物の種・数ともに減少させ、土中の生物相を単純化してしまう。すなわち、生態系の破壊である。生物の多様性こそ、生態系の安定の要^{かなめ}であり、病虫害の多発を抑制し、土を肥沃にする機能を保障しているのである。

また、機械の導入は労働の生産性を高めるが、耕盤の生成を促進することにより浸入能を低下させ、土の侵食が加速されることとなる。いうなれば、現代農業は、土のもつ肥沃性を低下させるだけでなく、環境にやさしいという特質をも備えていないのである。

もうひとつ見逃してならないことは、化学化・機械化がエネルギーの消費量を大きく増大させているということである。ちなみに、1970年代に、すでにわが国で稲作に投入される人工エネルギーは、生産物によって得られるエネルギーを上回っていた。太陽エネルギーを利用し、投入エネルギーよりはるかに大きい生産物(エネルギー)をつくり出し、文明の発達に決定的な役割を演じてきた農業の姿は、

もうそこにはない。

人類が生存し続けるためには、今後の技術の適用にあたって、“物質循環を破壊することはないのか” “生物の多様性をどの程度保障しているのか” など、多面的な評価が要求される。いうなれば、単眼的思考ではなく、複眼的思考への転換が要求されているのである。

「農業土木学」は、明治以降、耕地整理、灌漑・排水などにかかわる科学・技術の創造を通じて、わが国農業の発展に大きく貢献してきた。しかし、その反面、戦後の高度経済成長期以後、現代農業の負の側面を助長させてきたことも確かである。したがって、農業土木学を大きく変質させねばならぬという点について、異議をはさむ人はいない。だが、残念ながら、新しい「学」確立への道はまだまだ遠い。新しい「学」の建設には、生態学をはじめとする関連諸科学の発展を踏まえることに加えて、現場での試行錯誤が不可欠であるからである。加えて、自然界のような多くの要因が複雑にからみあう現象を総合的に解析しうる方法論を、われわれはまだ持っていないのである。

この書では、第1に、土に対する人間の働きかけが土や環境にどのような影響を及ぼすかが論じられる。第2に、土からの視点ではあるが、新しい「学」の確立に寄与しうるよう、多面的な視野に基づく現象の解析が行われている。精一杯努力したつもりであるが、まだまだ、不十分な部分を多く残していると思う。したがって、読者は、この書の内容を鵜呑みにすることなく、批判的に読み進んでいただきたい。本来「学」というものは、すでに体系化されている知識で、保守的な面をもっている。しかし、この書で述べられているのは「論」の段階であり、想像力を自由に働かせる余地が多く、読者に楽しんでいただけるのではないかと、自らを慰めている。この書を通じて、単なる知識だけでなく、複眼的思考を身につけて下されば望外の喜びである。

1998年11月

著者を代表して

岩田進午

目 次

まえがき	i
I. 食糧と土	1
はじめに	2
1. 食糧問題	2
2. 土と環境	5
II. 土とはなにか—土を知る	7
1. 土の生成	8
(1) 地球と月	8
(2) 土ができる	9
(3) 地表におけるエネルギーと物質の流れ	9
(4) 土の分化と分類	10
(5) 成帯性土と成帯内性土	11
2. 土の固相と土構造	11
(1) 土の三相	11
(2) 土粒子の粒径組成と土性	12
(3) 土の構造 (soil structure)	14
(4) 土の間隙 (pore)	16
3. 土の中の水	18
(1) 土の保水	18
(2) 飽和土中の水移動	21
(3) 不飽和土中の水移動	23
(4) 土と水の応用知識	27
4. 土中空気	30
(1) 土中のガス組成	30
(2) 土中ガスと大気ガスの交換	30

(3) 土中のCO ₂ 分布	31
(4) 水田から発生するガス	31
5. 土中溶液とイオン	36
(1) 土中の物質の存在形態	36
(2) 土中に存在するイオンの種類	36
(3) イオンの貯蔵体——粘土鉱物	36
(4) 土中のイオンの居場所	39
6. 土中の物質移動	42
7. 土の中の微生物	44
(1) 土壤微生物	44
(2) 微生物のはたらき	46
(3) 土壤微生物と透水係数の変化	47
8. 土中動物	48
(1) 土中動物の種類	48
(2) 土中動物のもつ機能	50
(3) 食物連鎖	51
(4) 分布	51
(5) 農業と土中動物	52
9. 植物	53
(1) 土がなくても植物は育つか	53
(2) 土がつくる植物の生育環境	53
10. 自然における物質循環	57

III. ゆっくりと確実に変化する土	63
1. 気候と土	64
(1) 水・熱環境	64
(2) 世界の土	65
(3) 日本の土	66
2. 土と植生	67
(1) 熱帯林の土地はなぜやせているか	67
(2) 植物がつくる土	69

(3) 植物がつくった土：泥炭	69
(4) 植生の役割	70
3. 河川地形と土	73
(1) 沖積土	73
(2) 河川的作用——侵食・運搬・堆積	74
(3) 河川をつくる地形と土	76
(4) 粘土粒子の沈降と海水	78
4. 火山	79
(1) 火山灰土の分布	79
(2) 火山灰土の成分	80
(3) 火山灰土の堆積とテフクロロジー	80
(4) 関東ロームの透水性と分散・凝集特性	80
5. 水田と畑	83
(1) 微妙な水収支	83
(2) 畑利用に伴う土の変化	85
(3) 水田利用に伴う土の変化	87
(4) 水田土壌化作用	88
(5) 造成農地における土の問題点	91
6. 干拓地土	92
(1) 干拓とその適地	92
(2) 干拓地土の特徴	92
(3) 干陸後の土層と土の物理性・化学性の変化	93
(4) 干拓地土の除塩	95
(5) 干拓地土の土地利用と問題点	96
7. 乾燥地農業と灌漑	96
(1) 乾燥地の定義と分類	96
(2) 乾燥地気候の特徴	97
(3) 乾燥地の土の特徴	97
(4) 乾燥地の農業と灌漑	98
(5) 灌漑による塩分集積問題	101
(6) 土層の塩分集積と除塩	101

(7) 農地排水による塩分問題	102
IV. 健やかな土をつくる	107
1. 土づくり	108
(1) 土づくりとは	108
(2) 農地	108
(3) 砂漠化	112
(4) いい土とは—肥沃性の定義—	112
2. 土壌改良	112
(1) 土壌改良 (soil improvement) とは	112
(2) 土壌改良資材の種類とその機能	113
(3) 理想の土をつくる	118
3. 土層改良	119
(1) 土層劣化と土層改良	119
(2) 土層改良工を必要とする例	120
(3) 土層改良工の目標	121
(4) 主な土層改良工	122
(5) 総合的視点からの土層改良の確立を	123
4. 灌漑と排水	123
(1) マクロポアの再認識	123
(2) 灌漑	124
(3) 汎用農地	128
5. 耕起と不耕起	132
(1) 増加する不耕起栽培	132
(2) 耕起土と不耕起土の物理性の変化	132
(3) 耕起土と不耕起土の化学性の変化	134
(4) 耕起土と不耕起土の微生物相の変化	135
(5) 水田の不耕起栽培	136
(6) 畑の不耕起栽培	137

V. 地球環境と土	141
1. 土の劣化 (Soil Degradation)	142
(1) 土の劣化	142
(2) 土の劣化の現状とその過程	142
(3) 土壌侵食による土の劣化	144
(4) 湿潤熱帯地域の森林伐採と土壌侵食	145
(5) 乾燥地域の砂漠化	147
(6) 灌漑による土の塩類化	150
(7) 土の再生への戦略	151
(8) 先進国での土の劣化	154
2. 湿原と泥炭	154
(1) 消える土	154
(2) 泥炭の生成と分類	155
(3) 泥炭の性質	158
(4) 泥炭地の管理	161
3. 現代農業	163
(1) 日本の食料問題と環境	163
(2) 農業の化学化	165
(3) 農業の機械化	169
(4) 農業におけるエネルギーの投入	170
VI. 理想の土	175
1. 持続可能な農業のための土	176
2. 収量を安定的・持続的に保つ土	176
3. 環境に負荷を与えない土	178
4. 美味しく、栄養価の高い作物を生み出す土	179
Appendix	181
索引	182

環境土壌学執筆者名簿

(五十音順, 1998年11月現在)

- | | |
|-------|------------------|
| 岩田 進午 | (財)日本農業研究所 |
| 赤江 剛夫 | 岡山大学環境理工学部 |
| 粕淵 辰昭 | 山形大学農学部 |
| 長谷川周一 | 農林水産省農業環境技術研究所 |
| 宮崎 毅 | 東京大学大学院農学生命科学研究科 |

I. 食糧と土

現在の地球の人口は、57 億人。2050 年には、ほぼ倍に近い 100 億人に達すると予測されている。人口の増加がこの予測どおり進むとすると、世界の穀物生産量の年平均増加量が現在の 1200 万トンを維持し得たとしても、1 人当たりの穀物供給量は 1984 年の 346 kg から、2030 年には 248 kg に低下する。深刻な食糧危機の到来である。一方、砂漠化の進行はとどまることを知らず、農業に起因する環境破壊も進んでいる。農業生産量の増強と環境にやさしい農業の確立とを同時に満足させる方策を見出し、人類の未来を明るくものにしなければならない。



豊かな稔りの秋（撮影：赤江剛夫）

はじめに

岩石の風化によって誕生した土は、その後、降雨や植物などの環境との相互作用のなかで、徐々にその姿を変えていく。植生も、地衣類、草本類、ついで低木類、最後に高木類へと遷移していく。自然の中では、土は、年とともにその肥沃さを増大させていく。しかし、この自然の道筋は、草原や森林が農耕地に転化するや否や、まったく異なったものになる。草原や森林では、植生が土から奪い取った養分は、いずれの日か、枯草、落葉、落枝の形で土に還るというように、安定した物質循環が営まれている。これに反して、農耕地では、植生の一部もしくは大部分が系外に持ち去られ、安定した物質循環が成立しえない。したがって、人間は、その土地から奪った養分を補給することなしに、持続的に農業を営むことができない。人間の働きかけなしには、農耕地は農耕地としてあり続けることができないのである。

われわれ人類は、多くの試行錯誤を重ねながら、それぞれの生産力に対応する安定で持続的な農法をつくりあげてきた。焼き畑、二圃式、三圃式農業などがそうである。しかし、その過程で、現在の総耕地面積を上回る農耕地が荒地と化したという。人間の土に対する働きかけが不適切であったためである。さらに悲しむべきことに、かつては数百年かかって不毛の地へと転化していった農耕地が、現在では、その数十倍の速さと規模で荒廃しつつある。これは、機械化文明の発達と人口の爆発的増加に伴い、人間の土への働きかけが、かつて見られないほど大きくなっているからである。森林伐採、過放牧、過剰耕作、灌漑に伴う塩類集積等が主要因としてあげられるが、いずれも、その働きかけが、自然の法則・摂理の許容量を超えたものであるためである。

最近、テレビやマスコミで、土の砂漠化・不毛化がしばしば取上げられるのは、このような背景による。では、なぜ、土の砂漠化・不毛化が、問題視されるのだろうか。それには、大きく分けて、2つの理由がある。

1. 食糧問題

ひとつは、世界の食糧危機との関わりである。現在、世界の総人口は 57 億人。

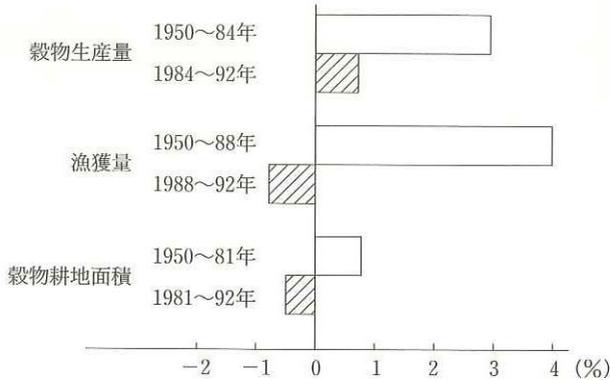


図 I-1 主要食料生産量と耕地面積の推移

2050年には、ほぼ倍に近い100億人に達すると予測されている。一方、1945年以降、植生地の17%にもものぼる土地が、さきに述べた諸要因により劣化を強いられ、その生産力を低下させている。加えて、化学肥料・農薬の多投や機械化に表徴される現代農業による著しい生産力の伸びも、80年代後半に至ると、その神通力を失う。1950～84年にわたり、年平均3000万トンの増加を示していた穀物生産量は、84～92年にかけて1200万トンに減少する。1980年代の初頭まで、年率0.7%の割合で拡大を続けていた耕地面積も、81年から92年にかけて-0.5%に落ち込む(図I-1)。砂漠周辺の農耕地の砂漠化、不適切な管理による土の劣化が進む一方、優良農地の住宅・工場への転換などが行われているためである。今後、世界人口が予測どおりのペースで増え続けるとすると、穀物生産の年平均増加量が現在の水準の1200万トンを維持しえたとしても一実是不可能に近いのだが、1人当たりの穀物供給量は、史上最高を記録した1984年の346kgから、2030年には248kgにまで低下するとみなされている。

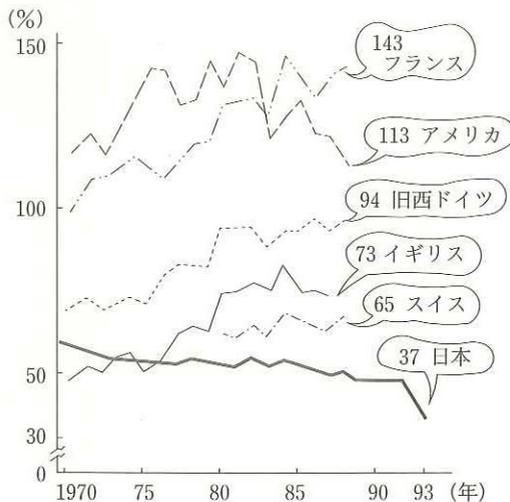
中国を例にとりて、もう少し具体的に説明しよう。中国では、1990年に11億人であった人口が、1995年にほぼ12億人に増加し、2030年までには、その数は14億9000万人に達するといわれる。しかし、これまで順調に伸びてきた穀物生産量が、最近、徐々に減少し始めている。工業開発優先政策による優良農地の壊廃もその主要因であり、おそらく、2030年には穀物生産量は5分の1程度減少すると見込まれている。生活レベルの向上による1人当たりの消費量の伸びを考えず、人口増だけを考慮した場合でも、年間2億1600万トンの穀物が

1. 食糧と土

不足する。もし、今後所得が向上し、肉や卵をもっと食べるようになると、この不足はさらに大きくなる。現在、アメリカにおける1人当たりの穀物消費量は年間800 kg、中国では、2030年までに、現在の300 kgから400 kg（現在のイタリアの水準）に増えるとする、その不足量は3億7000万トン前後にはね上がる。世界全体の現在の穀物輸出货量2億トンと比べて、寒気がする数字である。ちなみに、現在、世界最大の穀物輸入国であるわが国の輸入量は3000万トンである。

おそろしいことに、このような食糧危機は中国にとどまらない。現に、韓国や台湾の食糧自給率は低下の一途をたどっている。世界の次の食糧危機は、アジアで起こるという予測が、ますます現実味を増しているのである。

これに反して、欧米諸国は、まったく異なった道を行ってきた。旧西ドイツでは、①基本食糧については、将来とも80～90%の自給率を維持する。②農業の効率化を図るものの、農民的家族経営の所得を重視する。③農業のもつ外部効果（国土保全、水や緑の維持、景観の保全、地域経済の活性化など）を重視する、という農業政策を採用し、その結果、1970年に66%であった食糧自給率



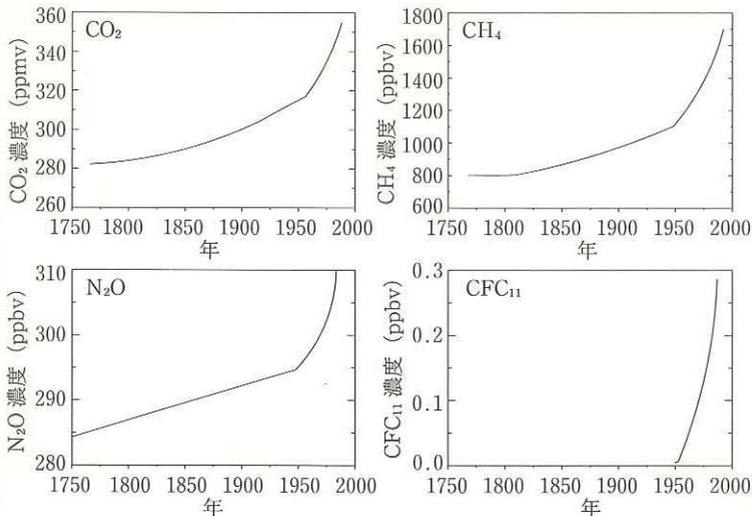
注) 日本は1993年度、イギリスは1987年、その他は1988年。

図 I-2 主要国の食糧自給率 (カロリーベース)

を、85年には93%に上昇させた。イギリスでも、同時期に、自給率を48%から77%に増加させている。図I-2に示されたわが国の自給率の低下のすさまじさと比較していただきたい。

2. 土と環境

第2の理由は、温暖化・オゾン層の破壊など、地球環境との関わりである。よく知られているように、二酸化炭素(CO₂)、メタン(CH₄)、亜酸化窒素(N₂O)、フロン11(CFC 11; CFC₁₁)、フロン12(CFC 12; CFC₁₂)などの大気における濃度の増大(図I-3)¹⁾が、地球の温暖化をもたらしている。ここで指摘しておかねばならないことは、メタン、亜酸化窒素、フロンの大気中の濃度は、それぞれ二酸化炭素濃度の1/200、1/1000、1/1000000に過ぎないにもかかわらず、温暖化への寄与率は、二酸化炭素の約1/4、1/10、1/3なのである。これらのガスの極めて少量の増加でも温暖化を加速し、同時に、亜酸化窒素の濃度の上昇が、オゾン層の破壊の元凶であることも忘れてはなるまい。



図I-3 大気中のCO₂、CH₄、N₂OおよびCFC₁₁(フロン11)の濃度上昇(陽, 1994)¹⁾

I. 食糧と土

肥沃な土は植物の生育を盛んにする。このことは、大気中の二酸化炭素を植物が吸収し、固定化することを意味する。したがって、土の砂漠化は、植物による二酸化炭素の固定を激減させることにほかならない。

ここで、熱帯雨林の伐採を例にとりて考えてみよう。樹木に固定化されていた炭素は、伐採や燃焼などを通じて、二酸化炭素として大気中に放出される。そして、その跡地が砂漠化すると、植物の生育が不可能となり、大気中の二酸化炭素の固定も停止する。このように、熱帯雨林の伐採は、二重の意味で温暖化に寄与しているのである。

森林伐採の環境への負荷はそれにとどまらない。最近、土地の利用形態が、大気メタン吸収に大きく影響することが知られてきた。森林の土は、他の利用形態の土、たとえば草地より3倍もの量のメタンを吸収するといわれているが、森林土の砂漠化は、確実にその機能を低下させる。さらに、森林土の不毛化は、その下流に大洪水を引き起こす要因ともなる。不毛化に伴い、雨水の土中への浸入量が大きく減少し、表面流去水が増えるからである。毎年のように新聞紙上に報道されるバングラデシュの大洪水も、上流の熱帯雨林の伐採によるとみられている。

地力の低下・不毛化への過程一をもたらししている化学窒素肥料の多投も、温暖化・オゾン層の破壊と深く関わっている。亜酸化窒素の人為的発生量の50%以上が農業生産に起因し、その中でも、窒素肥料の施用と農地の開発に伴うバイオマスの燃焼が大きな比重を占めている。

このように、わたしたちの眼前に、わたしたち人類の生存をおびやかす、世界的食糧危機、そして、地球的規模の環境悪化が迫ってきている。人類を滅亡させないために、わたしたちは、土の砂漠化・不毛化を防止し、環境にやさしい農業を営み、加えて、農業生産力を増大させねばならぬという、極めて困難な課題を早急に解決しなければならないのである。

これらの課題を解きほぐすにはどうすればよいのかを、土に焦点をあてて、みんなで考えていこうと思う。

(岩田進午)

引用・参考文献

- 1) 陽 捷行編著：土壌圏と大気圏，朝倉書店（1994）

II. 土とはなにかー土を知る

森林や草原の土は、植物を育てるための精巧な仕組みを保持している。落葉や動物の遺体は、土中動物と土壌微生物によって、水・二酸化炭素・イオン態の植物養分に分解される。植物は、その養分を吸収して生育する。土をめぐる安定した物質循環が成立しているのである。一方、土中動物による土の耕うん、網の目のようにはりめぐらされた彼らの通路、そして地中に密に伸長した根によって形成される間隙、これらは、水はけ・水もちのよい土をつくりあげる。

自然の力を借りて、土はその肥沃性を保っている。



豊かな山林を育む（撮影：加藤正樹）

1. 土の生成

(1) 地球と月

アメリカのアポロ 11 号が月に着陸したのは 1969 年 7 月のことであった。人類がはじめて地球以外の星に到達した記念すべき年である。以後合計 6 回にわたり月面への着陸が行われ、旧ソ連のルナによる 3 回と合わせて、月からさまざまな情報と貴重な試料とが地球にもたらされた。そのひとつに月の土がある。はたして、この土は地球の土と同じものであろうか。違うとすれば、何がどのように違うのであろうか。

最も大きな違いは、月の土は岩石の小さな破片の集合であり、地球の土に見られるような粘土も有機物も含まれていなかったことである。もちろん、月の土には、水も空気も含まれてはいない。

月の土でもうひとつ注目すべき現象がある。それは地温である。地球と月の太陽からの距離はほぼ等しく、単位面積当たりを受ける太陽放射エネルギーの量もほぼ等しい。にもかかわらず、月の自転周期における赤道上での地表面温度は図 II-1 に示すように、最高で 375 K (100°C) を超え、最低は 75 K (-200°C) となり、その振幅は 300°C にも達する。これに対し、地球の赤道上での振幅はこの 1/10 以下である。月の公転周期が地球の 27 日に相当することを考慮にいれても、この違いは大きい。この原因は、月には存在しない地球の空気や水の作用にある。

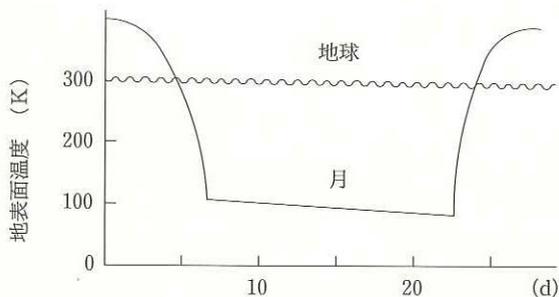


図 II-1 月と地球の赤道付近の地表面温度

Huchinson¹⁾は、生物圏の存在のための領域として必要な条件に、①相当量の液体が存在しうる、②外部から（実際には太陽から）十分な量のエネルギーが供給される、③その領域内で気相、液相、固相とが接している部分が存在する、の3つを挙げている。これらは、言い換えれば、地球という場の特殊性を示しているのである。地球と月の歴史はほぼ同じと考えられている。しかし、その誕生から46億年以上を経た現在、両者の表面には大きな違いが存在する。その最も大きなもののひとつは地球の土の存在である。実は、月の土というのは、正式にはレゴリス (regolith) と呼ばれるものであり、土—ソイル (soil) と呼ばれるものは地球上にだけしか存在しない。

土が何かを知るには、まず、地球の特殊性の理解から始めなければならない。

(2) 土ができる

土は、地球ができたときから存在していたわけではない。水圏の出現、生命の誕生、植物の出現、生物の上陸という道筋で、環境との相互作用を経て、土は形成されてきたのである。現在でも、たとえば火山活動により新しくできた岩塊から森林が形成されるには、かなりの年月がかかることが知られている。岩石は機械的（物理的）風化作用により、破壊され細粒化されていく。また雨水に溶けた炭酸ガスによってできた炭酸で岩石の一部は溶解される。これに伴い、粘土も形成される。この過程で、まず養分をほとんど必要としない地衣類、コケ類が生育し、これらの植物遺体は微生物によって分解される。そして、有機酸が生成され、風化は促進される。これらの分解物を養分にして草本が生え、植物遺体からは土壌有機物（腐植）が形成される。この流れは加速され、やがて木本が生え出し、微生物や動物の数や種も増大していく。これらの結果、土が生成されていくのである。

なお本書では、深さおよそ1mまでの土を、主として考えることにする。

1m内外の土の厚さは、 6×10^6 mある地球の半径に対比すれば、とるに足らないものである。しかし、この層の果たしている役割は極めて大きい。

(3) 地表におけるエネルギーと物質の流れ

地表は太陽エネルギーを源とするエネルギーと物質の交換の場である。土は地球の表面にあって、太陽放射エネルギーを内部エネルギーに変換し、土中水分を蒸発させ、あるいは大気を暖める。エネルギーの流れから見ると、土中水は熱輸送の大きな担い手であり、土は地球上でエネルギーと物質の流れの最も激しい場であ