

提言

緩・急環境変動下における土壌科学の基盤整備
と研究強化の必要性



平成28年(2016年)1月28日

日本学術会議

農学委員会

土壌科学分科会

この提言は、日本学術会議農学委員会土壌科学分科会の審議結果を取りまとめ公表するものである。

日本学術会議 農学委員会 土壌科学分科会

委員長	南條 正巳	(第二部会員)	東北大学大学院農学研究科教授
副委員長	木村 真人	(連携会員)	独立行政法人農林水産消費安全技術センター理事長
幹事	小山 博之	(連携会員)	岐阜大学応用生物科学部教授
幹事	間藤 徹	(連携会員)	京都大学大学院農学研究科教授
	大杉 立	(第二部会員)	東京大学大学院農学生命科学研究科教授
	國分 牧衛	(連携会員)	東北大学名誉教授
	三枝 正彦	(連携会員)	豊橋技術科学大学先端農業バイオリサーチセンター特任教授
	丹下 健	(連携会員)	東京大学大学院農学生命科学研究科長
	西澤 直子	(連携会員)	石川県立大学生物資源工学研究所教授
	藤井 克己	(連携会員)	公益財団法人いわて産業振興センター顧問兼連携推進センター長
	宮崎 毅	(連携会員)	東京大学名誉教授
	三輪 睿太郎	(連携会員)	農林水産技術会議会長
	森 敏	(連携会員)	石川県立大学客員教授
	山本 洋子	(連携会員)	岡山大学グローバルパートナーズ センター長・資源植物科学研究所教授
	白戸 康人	(特任連携会員)	国立研究開発法人農業環境技術研究所上席研究員
	中西 友子	(特任連携会員)	東京大学大学院農学生命科学研究科教授

提言の作成にあたり、以下の方々に御協力いただきました。

犬伏 和之	(特任連携会員)	千葉大学園芸学研究科教授
小崎 隆	(特任連携会員)	京都大学名誉教授、首都大学東京都市環境学部教授

本件の作成にあたっては、以下の職員が事務を担当した。

事務	中澤 貴生	参事官(審議第一担当)(平成27年3月まで)
	井上 示恩	参事官(審議第一担当)(平成27年4月から)
	渡邊 浩充	参事官(審議第一担当)付参事官補佐

藤本 紀代美 参事官(審議第一担当)付審議専門職(平成 27 年 3 月まで)
加藤 真二 参事官(審議第一担当)付審議専門職(平成 27 年 4 月から)

要 旨

1 背景

土壌は地球の表面にあり、大気、水と並び生物の環境を構成する主要要素の一つである。歴史的に最重要視されてきたのはその農林業生産にかかわる機能であり、私達の衣食住を支えてきた（土壌の生産機能）。そして土壌は、国立公園に代表される自然景観、市街地においては建築物と街路樹や緑地などの基盤となって市街地景観を形成し（土壌の景観形成機能）、高山から湿地、海岸域に至る地形連鎖において動植物・微生物相を育み、豊かな生態系を形成するための支えとなっている（土壌の生態系サービス形成機能）。

土壌の生産機能は 19 世紀以降の近代農学とその後の産業革命の成果を得て飛躍的に強化された。先進国では増産のための土壌管理が進み、その他の国々においても農林産物の増産が図られ、その生産性に幅はあるものの世界人口は 72 億人に至った。この土壌の生産機能強化には 20 世紀までの土壌科学が貢献した。

2 現状及び問題点

世界を見れば、農業生産が乾燥地、アルカリ土壌、熱帯・亜熱帯サバンナなどの限界地に拡大するのに伴い、農業生産は水資源枯渇、塩類障害、侵食などによる土壌劣化、害虫大発生などの生態系異変に直面することになった。近年は局地的な熱波または寒波、干ばつ、豪雨の発生が常態化し、農業生産の障害がより加速されている。

国内においても台風の大型化やその他の気象現象の激化などの環境変動が懸念されている。そして徐々に、都市圏や廃棄物処理場において有害物質による土壌汚染が顕在化し、跡地利用を妨げ、その修復が課題となっている。また福島第一原子力発電所の事故による放射性物質の降下が広域な土壌汚染を引き起こし、復旧・復興を困難にしている。

土壌以外の環境要素の変動が土壌に及ぼす影響には次のようなものがある。災害を伴うような現象は土壌に対しても急な環境変動であり、土壌も数日程度で急変することがある。これらに対して、温暖化に伴う地温の上昇傾向、農業の日常的な施肥の過不足などは比較的緩慢な環境変動であり、それらに伴う土壌の変化も緩慢ないし日常的である。このような緩・急環境変動下における土壌管理の今日的課題として、土壌が水資源、塩類などの無機的環境要素および動植物・微生物とともに形成する生態系を総体的に安定させつつ農業生産性を持続させるとともに広く環境保全にも貢献することが求められるようになっている。

このように、緩・急環境変動下において土壌の生態系サービス形成機能を保全しつつ生産機能と景観形成機能を持続的に高める土壌管理の推進が国際的な課題となり、2013 年の国連総会に於いて 2015 年を国際土壌年、12 月 5 日を土壌デーとする決議が行われたことは極めて重い。この国際土壌年に因み、土壌科学の基盤整備と研究強化を目指し、そして、社会全体にわたり土壌の機能と保全に関する理解の増進を望み、以下の提言を行う。

3 提言等の内容

(1) 土壌観測ネットワークの形成と国際的な土壌情報の整備及び日本の貢献の強化

土壌を扱う行政部局においては、土壌の緩・急変動に対応するため、南北に長い日本国内を区分し、国内の総合的な土壌観測拠点を整備する。従来の土壌用途別対応を活かしつつ、関係専門分野の参画を得てヒトの環境構成要因としての土壌の一元的な観測方法と情報化体系を構築することとし、地域拠点を統括する中核的なセンターを設置して日本土壌観測ネットワークを形成する。そして、土壌を扱う行政関係者、大学と研究機関の試験研究担当者においては、これまで農用地、林地、市街地等の用途別に分けて対応されがちであった土壌を総合的視点で捉え、国際的な土壌情報を整備し、日本の貢献を強化する。

(2) 土壌科学の新展開と土壌教育の充実

地表面の土壌全体にわたる理解の増進と保全のため、大学、国立研究開発法人、県の研究機関では農学を超える関係分野の参画を得て先端科学を活用した土壌物理・土壌化学・土壌生物に関する新しい土壌科学を展開すると共に土壌研究・教育に携わる専門家養成を強化する。さらに小・中・高校の土壌教育を拡充し、土壌保全に関する理解を増進する。その際の教育に土壌観測の場を活用する。

(3) 土壌保全に関する基本法の制定

土壌は、人為の影響を強く受けて変動するにもかかわらず、農地の利用者など直接土壌の恩恵を受ける人々を除けば、関心の外に置かれる。その状況を改善し、健全で持続的な土壌の保全を目指し、土壌に関する施策全体に横たわる基本理念を明確にするとともに、これらを総合的かつ一体的に推進するため、国民社会が等しくその重要性を認識し、土壌保全の理念と原則、すなわち土壌利用における公共性の認識、観測と情報整備・公開、および学術・教育の推進を明記した「土壌保全基本法」を法定することが望まれる。

目 次

1	はじめに	1
2	緩・急環境変動下における土壌保全の必要性	3
(1)	土壌をめぐる緩・急環境変動	3
	土壌劣化	3
	ア 土壌の移動による劣化	3
	イ その場での土壌劣化	3
	(ア) 重金属等による汚染	3
	(イ) 残留性有機汚染物質	4
	(ウ) 放射性物質による汚染	4
	地球温暖化	4
	ア 炭酸ガス	4
	イ メタン	4
	ウ 一酸化二窒素	4
	気象現象の激化	5
	ア 干ばつ	5
	イ 集中豪雨	5
	大地の変動	5
(2)	土壌をめぐる環境変動への対応現況と今後の対策強化の必要性	5
	環境変動への対応現況	5
	ア 土壌侵食等への対応	5
	イ 土壌の化学的劣化への対応	6
	土壌の生産資源、景観形成、生態系サービス形成資源としての価値	7
3	土壌機能の緩・急変化に備えるために必要な方策	9
(1)	国内土壌観測ネットワークの形成及び国際的な土壌情報の整備と日本の 貢献強化	9
	土壌観測の歴史	9
	土壌観測システムの再構築と今後の土壌観測の対象範囲	9
	土壌観測拠点の設置	10
	国際的な土壌情報の整備と日本の貢献強化	10
(2)	土壌科学の新展開と土壌教育の充実	10
	土壌科学研究の強化	11
	土壌教育の充実	12
(3)	土壌保全に関する基本法の制定	12
4	提言	14
(1)	国内土壌観測ネットワークの形成と国際的な土壌情報の整備及び 日本の貢献強化	14

(2) 土壌科学の新展開と土壌教育の充実	1 4
(3) 土壌保全に関する基本法の制定	1 4
<用語の説明>	1 5
<引用文献>	1 5
<参考資料> 土壌科学分科会審議経過	1 7

1 はじめに

土壌は地球の表面にあり、大気、水と並び生物の環境を構成する主要要素の一つである。歴史的に最重要視されてきたのはその農林業生産にかかわる機能であり、私達の衣食住を支えてきた（土壌の生産機能）。そして土壌は、国立公園に代表される自然景観、市街地においては建築物と街路樹や緑地などの基盤となって市街地景観を形成し（土壌の景観形成機能）、高山から湿地、海岸域に至る地形連鎖において動植物・微生物相を育み、豊かな生態系の形成を支えている（土壌の生態系サービス形成機能）。

土壌の生産機能は 19 世紀以降の近代農学とその後の産業革命の成果を得て飛躍的に強化された。先進国では増産のための土壌管理が進み、その他の国々においても農林産物の増産が図られ、その生産性に幅はあるものの世界人口は 72 億人に至った。この土壌の生産機能強化には 20 世紀までの土壌科学が貢献した。

世界を見れば、農業生産が乾燥地、アルカリ土壌、熱帯・亜熱帯サバンナなどの限界地へ拡大するのに伴い、農業生産は水資源枯渇、塩類障害、侵食などによる土壌劣化[1]、害虫大発生などの生態系異変に直面することになった。近年は局地的な熱波または寒波、干ばつ、豪雨の発生が常態化し、農業生産の障害がより増幅されている。

国内においても台風の大型化やその他の気象現象の激化などによる環境変動が懸念されている。そして近年、都市圏や廃棄物処理場において有害物質による土壌汚染が顕在化し、跡地利用を妨げ、その修復が課題となった。また東日本大震災では津波による広域にわたる農地破壊と土壌劣化が生じ、その解決が復旧・復興の要件とされている。さらに、福島第一原子力発電所の事故による放射性物質の降下が広域な土壌汚染を引き起こし、復旧・復興を困難にしている。

農地を含む生物の環境を構成する要素のうち、土壌以外の環境要素の変動が土壌に及ぼす影響には次のようなものがある（表 1）。災害を伴うような現象は土壌に対しても急な環境変動であり、土壌も数日程度で急変することがある。これらに対して、温暖化に伴う地温の上昇傾向、農業の日常的な施肥の過不足などは比較的緩慢な環境変動であり、それらに伴う土壌の変化も緩慢ないし日常的である。地形改変を伴う人為による土木工事等も土壌からみれば急な環境変動だが、もし土壌の劣化が予想されれば、必要な対策を施工時に行うことは可能である。

これらの緩・急環境変動下における土壌管理の今日的課題に対し、20 世紀までに主として冷温帯で成果をあげた肥料・農薬などを利用した土壌管理の有効性は限定的であることが実証されつつある。その主な理由は資源・化石エネルギーの枯渇懸念や人間活動による環境影響の制御および土壌保全が十分でないことなどである[2]。資源とエネルギーを循環的および再生的に利用し、土壌が水資源、塩類などの無機的环境要素および動植物・微生物とともに形成する生態系を総体的に安定させつつ農業生産性を持続させるとともに、農地以外のさらに広い環境の保全にも貢献することが求められるようになっている。

また、高山から湿地、海岸域に至る地形連鎖において自然に近い土壌、泥炭土や永久凍土、急傾斜地の土壌などは独自の景観を形成するとともに水涵養や温室効果ガスの緩衝、

炭素貯留など生態系サービスの役割を果たし、その重要性が高まっている。

このような緩・急環境変動下において土壌の生態系サービス形成機能を保全しつつ生産機能と景観形成機能を持続的に高める土壌管理の推進が国際的な課題となっている。2013年の国連総会に於いて、2015年を国際土壌年、12月5日を土壌デーとする決議が行われたことは極めて重い[3]。この国際土壌年に因み、土壌科学の基盤整備と研究強化を目指し、そして、社会全体にわたり土壌の機能と保全に関する理解の増進を望み、以下に土壌の現状と課題をとりまとめ、提言を行う。

表1 土壌から見た環境変動の緩急区分と土壌の受ける変化との関係

		環境変動	土壌の受ける変化または劣化
区分	緩	地球温暖化* 施肥、資材の過不足 過去の農薬散布 酸性雨 機械走行、踏圧など	地温上昇、干ばつ、湛水期水田土壌の強還元 性質変化（塩類化、肥沃度低下、腐植の減耗） 性質変化（有機汚染物質の残留、汚染元素の残留） 性質変化（土壌の酸性化） 性質変化（土壌の圧密）
	急	台風、集中豪雨、洪水 強風 地震 火山活動 海水侵入（津波、高潮） 放射性物質の放出	土壌の移動（水食、斜面崩壊、堆積） 性質変化（土壌汚染、堆積物が汚染している場合） 土壌の移動（風食、堆積） 土壌の移動（斜面崩壊）、断層による土壌の高低変化、砂質土壌の液状化 火山放出物の堆積など 土壌の移動（水食、堆積）、塩類化など 性質変化（放射性物質による土壌汚染）

*気象現象の激化につながる場合は土壌に対して急な変化を引き起こす。土壌が温室効果ガスを放出する場面もある。

2 緩・急環境変動下における土壌保全の必要性

起こりうる環境変動とその土壌影響の度合いに限りはない。ここではこれまでに認識された土壌の変化を取りあげる。環境変動が土壌に影響し、土壌の諸機能の弱体化が懸念される理由および土壌が持つ生産、景観形成、生態系サービス形成機能の現況と今後の保全の方向性は以下のとおりである。これらの中には温室効果ガスのように土壌からも発生して温暖化と気象現象の激化につながり、土壌劣化の一因となるものもある。

(1) 土壌をめぐる緩・急環境変動

土壌劣化

土壌劣化は土壌の生産機能、景観形成機能、生態系サービス形成機能を損なう方向の変化である。土壌劣化は土壌の移動による劣化とその場での劣化に区分される[4]。その場での土壌劣化は土壌の性質が悪化するために起こる。表1のように土壌の移動による劣化は急な環境変動によるものが多く、その場での劣化は緩慢に進む性質変化が多い。土壌劣化が認められる世界の面積は国際土壌情報センター/国連環境計画によれば約2 Gha、世界の農地の46%に相当するとされている[4]。

ア 土壌の移動による劣化

土壌の移動による劣化の主なものは水や風による土壌侵食であり世界の土壌劣化地域の84%に相当する[4]。水による土壌侵食は温暖化による気象現象の激化による降水量の増加、降水強度の上昇により強まる可能性があり、地形的には斜度が急になり、斜面が長くなるほど助長される。水や風によって運ばれた土壌はそれぞれ下流側や風下側に堆積する。農地や市街地として利用の進んだ現在の土地ではそれらの堆積物は被害となる。国内は湿潤温暖な気候により土壌は植物で覆われやすく、斜面崩壊を除けば侵食の度合いは極端に強くはない。しかし、耕起後から作物生育の初期において豪雨や強風があると土壌侵食が起こる。強く侵食を受けた土壌を修復するには多大な費用がかかり、修復されなければ荒地となる。

イ その場での土壌劣化

その場での土壌劣化には物理的劣化と化学的劣化などがある。物理的土壌劣化は土壌の圧密、表面の固化などである。化学的な土壌劣化は、重金属等の有害元素による汚染、残留性有機汚染質による汚染、放射性物質による汚染、肥沃度低下、塩類化、酸性化、腐植の減耗などである。汚染の概要は次のとおりである。

(ア) 重金属等による汚染

国内ではカドミウム、銅、ヒ素などの有害重金属元素等の農地への流入により、これまでに約7600haの農地が一旦汚染農地の指定を受けた。その約9割で対策等を完了したが、まだ、対策中の箇所がある。汚染の指定と対策は農用地の土壌汚染防止等に関する法律（1970年）に基づいている。

(イ) 残留性有機汚染物質

ダイオキシン、ドリン剤などの残留性有機汚染物質による汚染が検出されてきた。これらは過去の農薬散布によるもので、残存量は微量である。ダイオキシンは土壌に強く吸着し、作物には実質的に吸収されないことが明らかにされたが、ドリン剤は瓜科の作物に吸収される。

(ウ) 放射性物質による汚染

放射性物質による汚染も化学的な土壌劣化である。1960 年前後の大気圏核実験やその後の原子力発電所の事故などにより、土壌中に放射性セシウムが沈着し、それは現在でも検出可能である。その後、2011 年の東日本大震災に伴う原発事故で東北から関東にかけての太平洋岸に汚染が広がった。場所によって汚染のレベルが大きく異なる。森林では初期に樹木や落葉に放射性セシウムが沈着し、一部は樹木体内を経由して循環するが、多くは次第にそれらの下にある土壌に移行しつつある[5]。

② 地球温暖化

地球温暖化の原因とされる温室効果ガスは炭酸ガス，メタン，一酸化二窒素などである。これらの3種類の温室効果ガスは土壌との間でも出し入れがある。土壌から温室効果ガスが出る場合は土壌が環境影響を及ぼす側になり，温室効果ガスを吸収する場合は環境保全的な役割をする。

ア 炭酸ガス

炭酸ガスが放出される場面は農地での作物残渣の分解，土壌一般における土壌有機物の分解などである。土壌の種類や土壌の管理の仕方によって，有機物の集積と分解の速度が異なる。土壌有機物としての炭素貯留量は大気中の炭酸ガスの約2倍である。土壌有機物の多くは大気中の炭酸ガスを植物が固定したものと推定される。温暖化防止のためには土壌有機物を土壌中になるべく多く貯留することが課題となる。

イ メタン

メタンは水面下の還元状態にある土壌から発生しうる。自然の湿地土壌からの発生の他に水田土壌中においてワラ等の農作物残渣が還元条件で分解されるときに発生する。農地土壌は人工的な管理下にあり，農地土壌からの発生抑制が課題となる。

ウ 一酸化二窒素

一酸化二窒素は、土壌微生物の働きで土壌中の窒素の化学形態がアンモニウム

イオンから硝酸イオンへ、または硝酸イオンから窒素ガスへ変化する過程で発生する。前者の化学変化は主に畑地で、後者は還元条件の水田で起こる。作物多収のため、農地では有機質または無機質の窒素施肥は必須である。このような中で、どのように一酸化二窒素の発生を低減するかが課題となる。

気象現象の激化

ア 干ばつ

温暖化が進めば、土壌からの蒸発散が増加する。温暖化に伴う気象現象の激化の方向の一つは干ばつである。海外の乾燥、半乾燥気候下においては、基本的にかんがい水に依存する作物生産であり、干ばつの影響を強く受けやすい。湿潤気候下にあり、用排水、上水の整備された日本においても水不足は地域的、時期的にしばしば懸念されてきた。また、梅雨により畑作物が浅根になった後、梅雨があけて高温多照の時期が長く続くと、特に水を多く必要とする作物においては水不足により、減収になる。

イ 集中豪雨

集中豪雨は干ばつとは別の気象現象の激化の方向であり、斜面崩壊、洪水などの災害につながる。森林、農地土壌は侵食、運搬、堆積などによる大きな変動を受ける。これらにより、表土、作土が失われ、下流側では土壌の堆積が起こり、土壌の移動による劣化となる。

大地の変動

我が国は百年～千年のやや長い時間スケールでみるなら、2011年の東日本大震災のように巨大な地震、津波、さらには火山活動などの影響を繰り返し受けてきた。土壌は短時間に巨大な変動を受け、地盤沈下した農地の復旧工事は震災後4年を経過した現在も継続中の箇所がある。東日本大震災後は他の地域でも地震、津波、火山活動などの大地の変動が断続する懸念がある。

(2) 土壌をめぐる環境変動への対応現況と今後の対策強化の必要性

上記の各種環境変動に対して、主に我が国における土壌保全のための対応現況と今後の対策強化の必要性、望ましい方向について土壌侵食等と土壌の化学的劣化に集約して以下に示す。さらに土壌の資源として評価すべき価値を示す。

環境変動への対応現況

ア 土壌侵食等への対応

土壌侵食への対応現況は、斜面では不耕起、部分耕起、等高線栽培、法面保護、各種資材による土壌の被覆、防風対策などである。干ばつ、湿害などに対してはかんがい設備、排水設備、畝立て、中耕、有機質資材施与による団粒化などの水管理

対策がある。

土壌の生産機能を維持向上する為には、物理的条件を良好に保つ必要がある。一般的には耕起により、根の伸長を促すと同時に畑地では通気性、透水性、保水性を確保する必要がある。耕起は雑草制御の効果も高い。その一方、耕起直後、作物の生育初期は土壌硬度が低下し、強雨時に表面流去水があると侵食を受け易い。

大小の土壌粒子が凝集状態（団粒）であれば、土壌の通気性、透水性、保水性が高まり、耕起後も濁水の発生防止、土壌侵食の抑制につながる。その凝集状態を安定化させるには土壌粒子を接着させる有機物、鉄酸化物が有効である。土壌有機物は畑地では減耗しやすく、団粒を安定化させるには堆肥、厩肥の適量施与が必要である。水田作土でも土壌団粒の働きは重要である。水田作土は耕起、代掻きにより一旦流動状態にし、湛水機能を得るが、秋の落水後は速やかに排水し、機械作業のために地耐力を得る必要がある。その際には団粒構造が機能する。水田では腐植化度の低い腐植酸が集積する傾向にあり、それらの有機物が団粒形成、落水時の排水促進に機能する。堆肥、厩肥の成分調整、物理性改良効果と合わせて利用促進技術の継続的改善が望まれる。

しかしながら、土壌侵食対策をどの程度強化すべきかについては、今後の気象条件の変化などの土壌侵食駆動力の増大に応じて検討する必要がある。大規模な斜面崩壊や洪水の可能性などについては関係者による事前の予測に基づく斜面保護、治水や排水対策などが望まれる。一方、干ばつに備える節水栽培技術、塩類化を防止する土壌管理技術の向上が個別の場面に応じて望まれる。

イ 土壌の化学的劣化への対応

土壌汚染への対応現況は汚染の原因ごとに異なる。汚染の度合いは河川の流域を通じて連続的であり[6]、今後農産物中のカドミウム汚染認定の基準がさらに低く設定される事態になると対策を要する面積は拡大する可能性がある。省力、低コストで可能な対策を検討する必要がある。残留性有機汚染物質では、ウリ科の作物によるドリ剤の吸収について対策が検討中である。また、今後農用地以外の土壌一般における重金属等および残留性有機汚染物質による汚染を扱う場合にも対策が必要となる可能性が考えられる。

温室効果ガスの排出抑制対策もガスの種類ごとに対応が異なる。土壌からの炭酸ガスの放出抑制のためには土壌炭素の貯留を増やすことが対策となる。農地では有機物含量を増やすことが地力の増強、団粒形成促進などために望ましく、その目標も設定されている[7]。炭化物としての炭素の土壌貯留も広く検討されている[8]。メタン放出を低減する主な対策として、水田ではワラを田面散布する場合は秋に鋤き込み、分解しやすい部分をできるだけ酸化条件で分解する対策がある。また、湛水期の還元を緩和する土壌管理が容易になれば、メタンの放出低減に寄与する可能性がある。一酸化二窒素の放出低減のためには、土壌中で一酸化二窒素を経由する化学変化の起こる量を少なくすることが対策となりうる。例えば、水田では還元層

へアンモニウムイオンを追肥すれば、硝化を避ける度合いが高まる。しかし、畑地に硝酸イオンを施与すると更なる窒素の形態変化は抑制されるが、作土から溶脱しやすいという別の問題がある。窒素の形態変化と移動を小さくするには施肥した窒素の作物への利用効率を高めることも対策になるが、これまでのところ、肥効調節肥料を使うと畑地で60-70%、水田で約80%に利用率が向上する。畑地では利用率改善の余地がある。

放射性セシウムの除染は進行中で、土壤科学分科会では、排出される汚染土の処理に当たっては、土壤への強い吸着特性を活用すべきことを2014年に提言した[9]。大規模な除染によって避難指示が解除され、住民の帰還が始まった地域でも居住地及び農地周辺では局地的に高い空間線量率があり、帰還が停滞している。その一方、この提言に込められた「住民自身による除染」を実施した水田で収穫した玄米は2014年の全量全袋検査をパスし、この除染法の有効性が証明された。また、汚染排土の減量に対する新技術の開発も進められ、その実用化が期待されている。

土壤を使う農林業の生産活動においては、作物残渣の鋤き込み、水田におけるかんがい水、雷雨、さらには窒素固定微生物の働きなどによる養分元素の循環・供給が長所である。しかし、その様式は業種によって異なり、林業では主に自然の栄養塩類の循環に依存するのに対して農業においては施肥による栄養塩類の補給が重要である。施肥は作物の成長と生産を向上させる一方、農業系外に栄養塩類を放出すると水系が富栄養化する。農地土壤における栄養塩類のレベルを生産に最適化する一方、系外への排出を防止する必要がある。

水田作土における還元の利点には、連作障害の回避、リンの可給性向上、カドミウム汚染水田でのカドミウムの難溶化などがある。その一方、水稻の生育初～中期に還元障害が散見される。一旦還元障害を受けると中干しで回復しても生育遅れとなる。還元障害の詳細解明と、更なる対応技術の開発が望まれる。

さらに、窒素肥料製造に要するエネルギー、リン酸肥料、カリ肥料の資源を節約するための課題がある。

森林土壤の林木生産は斜面に関係する土壤の厚さや土壤特性に依存する傾向がある。国内では生産林の大半が山間地に存在し、斜面上部の土壤は下部に比べて相対的に乾燥、腐植層が薄く、塩基類が少なく、pH低下、林木の生育低下の傾向にあり、斜面の中～下部の方が林木の生育が高まる傾向がある。これらの状況に対して、大量の降水や地震による斜面崩壊、地滑り等で土壤の急変が起こる。また、近年では林木の収穫に重機が使われ、表土の攪乱がある。さらには火山活動の影響も起こる。国内ではこれらの変化の終息後、植生は時間の経過に伴い回復するが、これらの状況記録は下流域の土壤や生態系への影響検討に役立つ。

将来の巨大災害に備えて被災土壤の順調な復旧がなされるよう東日本大震災による土壤の攪乱などに関して充実した記録が必要である。

土壤の生産資源、景観形成、生態系サービス形成資源としての価値

水田は連作可能なことが大きな特徴だが、その連作によって培われる生産資源としての価値も大きい。水田の作土には腐植化度の低い腐植酸が集積傾向で、窒素循環の定常化と落水後の乾燥および地耐力の獲得に寄与する。水田作土には過去の施肥の結果、リンも集積している。その集積量は数作分の稲の吸収量に及ぶ。水田は地形に応じて大規模化が進められ、暗渠排水を整備し、田畑輪換などの高度利用が行われているが、この過程においても作土の維持に配慮されている。

畑地の半分、樹園地の2割を占める黒ボク土は数十年前までそのリン欠乏、酸性が強く塩基が少ないものがあるなどの問題があったが、リン資材の大量投入、酸性中和などの対策の結果、この土壌の持つ安定な団粒構造により通気性、保水性、易耕性などが優れ、良好な畑地、樹園地となっている。

これらのような生産資源としての価値の高い農地土壌は長年にわたる農業者の努力と農業政策によって得られたもので、今後も維持する価値が高い。その他の用途の異なる各種土壌間において多方面からの価値の比較評価が必要である。

自然の景観は地形と植生から構成されるが、これらの間には土壌がある。そして、森林は林木生産の他に水涵養、気候緩和、炭素貯留などの広域にわたる生態系サービス機能を持つが、これらの機能は森林という広大な生態系が土壌によって支えられているためである。森林の落葉落枝や根系からの有機物供給は森林土壌の炭素貯留機能であり、それらによって土壌の多孔質な凝集状態が発達し、透水機能や保水機能即ち水涵養等の生態系サービス機能の発揮に至る。森林による日中の気温上昇の抑制は、植物の蒸散の際の気化熱によって緩和されるが、植物の蒸散は土壌水に由来する。森林土壌の生態系サービス形成機能は自然に形成されたものであるが、温暖化とその結果の一つである気象現象の激化によりその機能がどのように変化するかを研究し、その機能向上と劣化防止を目指す必要がある。

3 土壌機能の緩・急変化に備えるために必要な方策

(1) 国内土壌観測ネットワークの形成及び国際的な土壌情報の整備と日本の貢献強化

土壌機能は環境の緩・急変動を受けて変化する。日常的な土壌観測は緩慢に進行する土壌機能の変動を検出するために有効である。そして、それは急な環境変動の土壌影響を評価するために有効である。観測の範囲は土壌の用途別を超えて土壌全体とすることが必要である。

土壌観測の歴史

土壌侵食、海水の流入などの土壌の急変は変動の強度が強いので認識可能だが、緩慢に進む変動の傾向は検出が容易ではない。緩慢に進む土壌機能の変動を検出するには土壌特性の観測結果の蓄積と現状の観測継続が有効である。農地土壌については1953～1961年の施肥改善調査、1959～1978年の地力保全基本調査、1979～1998年の土壌環境基礎調査、1999～2003年の土壌機能モニタリング調査が数十年に渡って行われてきた。その後、土壌機能モニタリング調査は各都道府県に委ねられて県ごとに実施されている。調査項目は全炭素含量、全窒素含量、pH、交換性イオン、陽イオン交換容量、リン酸吸収係数などであった。これによって農地の有機物含量の変動、作物に吸収される化学形態のリンレベルの上昇などの長期変動状況に関する多くの成果が得られた[2]。これら観測の目的は土壌の生産機能の維持向上である。

最近では、地球温暖化緩和に果たす土壌の炭素貯留に着目し、土壌炭素に焦点を絞った農林水産省による土壌の調査事業が2008年から始まっている。環境省では市街地等で土壌汚染対策法に基づいて主に土壌汚染に着目した土壌環境モニタリング結果を出している。このように観測項目にはそれぞれの調査による特徴がある。これまでの経緯上農地土壌の観測結果が多くの土壌特性項目を含んでいる。

土壌観測システムの再構築と今後の土壌観測の対象範囲

酸性雨の影響、放射性物質の含量などは林地、市街地等にも及ぶ環境変動であり、利用区分を超えて土壌全体を観測する必要がある[10]。また、観測の項目もいくつか基礎的な共通部分を設けることが望ましい。将来の総合的な土壌観測システムの構築に向けて、可能な部分から、体制を整えることが望まれる。生産に関係の深い農地の土壌観測は土壌特性の測定項目を含み、充実している。現実的には既存の観測方法をそれぞれの土壌の用途別に進め、土壌の環境影響に関する測定項目、例えば、pH、炭素、窒素含量などを共通項目としていくのが効果的であると考えられる。これにより、土壌全体の炭素貯留量の評価と変動観測が可能になる。また、土壌特性の観測地点の候補として現行の気象観測地点付近が挙げられる。林地、市街地の他に、各種競技場、廃棄物処分場などの極端な地点をどのように観測するか等については今後の検討を要する。これまでに何らかの観測データがあれば、それらを土壌全体のデータ集の中に位置づけて評価することが望まれる。これまでは農地土壌の中での比較はできたが、それ以外の土壌との比較はできなかった。土壌全体の測定結果があれば、大気からの

沈着物の影響と様々な土地利用間の比較、自然の土壌特性の変化と各種管理下における土壌特性変化の比較、災害時の土壌特性の記録などが可能になる。そして、次第に広範な情報集積作業を行い、代表地点の土壌モノリス（土壌断面標本）の収集を含め、土壌インベントリー（土壌情報目録）としての質を高めることが望まれる。

土壌観測拠点の設置

日本列島は温帯を中心に南北に広がる。高山、農地、林地、市街地、湿地、海岸など全部の土壌観測を総合化する土壌観測拠点を地域ごとに置いて、土壌の生産機能に加えて景観形成機能、生態系サービス形成機能の観測の拡充かつ精度向上を目指すことが望ましい。例えば、各地域の土壌観測拠点は、国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構内にある各地域担当の農業研究センターに担当職を配置し、その地域の大学と県の農業または環境の研究組織が協力する組織が考えられる。地域の大学の土壌や環境の研究分野においては市街地を含む新しい研究展開が望まれる。そして、これらの土壌観測拠点はこれまでに省庁で個別に行われてきた土壌関連の研究や事業を担当する基盤となり、地域の総合的景観管理による地域貢献、情報発信による国際貢献を行う。また、その組織では農業、環境、気象、地質学、博物館関係者、地域開発に携わる民間業者等を含めて情報交換し、土壌保全を目的に情報を組織化すると共に、その成果を多方面の利用に供する。地域の拠点を束ねる中心的役割は、実績の継承性と新組織の実現性を考慮し、当面、既存の国立研究開発法人農業環境技術研究所に置き、成果の拡大に応じて土壌資源情報センターの設置[11]等の展開を図る。

国際的な土壌情報の整備と日本の貢献強化

荒地となった土壌を農地に戻すには農業土木的な工事と肥沃度回復が必要になる。その前に、荒地にならないように土壌劣化を防止する方策が必要である。地域ごとに分布する土壌の性質とその利用の実情に合わせた方策を開発する必要がある、まず各地域においてそのための努力が必要である。その方策は低コストであることも必要である。そして、他の地域の方法を参考にするための情報交換が有効である。

熱帯から寒帯、湿潤気候から乾燥気候と環境の多様性が大きい世界の土壌については、積極的な土壌保全対策を要する場合が多い。土壌保全に対する世界の動きを見れば、2013年の国連総会に於いては土壌保全の必要性に注目し、2015年を国際土壌年、12月5日を土壌デーとする決議が行われた。

世界食料農業機構においては世界の土壌保全のためにグローバル・ソイル・パートナーシップの活動を2011年から開始している[12]。この活動では国や地域の土壌情報の国際的な共同利用を推奨している。この活動と連携して国際的に活用し易い国内の土壌情報を整備すると共に、各種の土壌劣化を防止する研究成果の発信および日本で研究蓄積の多い水田土壌や火山灰土壌に関する情報提供などの貢献強化が望まれる。

(2) 土壌科学の新展開と土壌教育の充実

土壌科学研究の強化

地表面の土壌全体を対象とする土壌科学の果たすべき役割は、土壌全体の理解増進と土壌機能全体の維持・向上である。環境因子としての広範な土壌を対象とする研究は環境科学の研究領域で進められつつあり、研究発表される雑誌の数も増えている。環境科学研究者等の更なる新規参入は土壌を地表層全体の環境構成要素として捉える研究視点の展開に必要である。また、従来の土壌研究者においても農地とより広い環境との関係への更なる研究展開が必要ある。そして、土壌研究に使われる研究手法の進歩もある。例えば、放射光を使う土壌中の元素の化学的状態の分析、電子顕微鏡を用いる土壌成分の形態観察と元素組成、元素分布の測定、土壌中における各種土壌成分の物理的、化学的挙動のモデル化、土壌中のメタゲノムの分析、各種リモートセンシングなどである。土壌のメタゲノム解析は、植物生産とそのバイオマスの微生物等による分解からなる物質循環過程の解明と広範な生物群集の多様性に対し、多くの情報を提供する。これらによって見出される新しい研究成果を従来の研究手法による結果と合わせることで、新しい土壌現象の発見、土壌保全手法の開発が期待される。

土壌中では酸化還元状態の変化に伴い、窒素、マンガン、鉄、イオウ、ヒ素などの化学形態が大きく変化する。そして、土壌中の酸化と還元的位置的關係は水分含量や根の位置によっても変化する。土壌中における斑鉄の形成はその例である。これまでは分析値の安定性を考慮してある程度大きな試料を取り、均一化後化学分析をしていた。しかし、微視的な元素分布の測定と酸化還元状態の変化を組み合わせることで、様々な酸化還元状態での元素の存在状態が解明され、土壌中の養分元素、汚染元素の管理に役立つ現象の解明が期待される。また、水稻をポット栽培すると還元障害が顕著に発現する土壌が散見される。温度上昇は還元の進行を助長する。今後の温暖化が危惧される中での具体的な研究プロジェクトの例として、水稻に対する還元障害の発生に関する土壌要因の解明が挙げられる。

生物多様性の維持は生態系を安定させ、土壌の生態系サービス形成機能を発揮させるために重要である。その一方、土壌の生産機能を極めようとして単一作物を大面積で栽培する農業は生物多様性の維持から見てどうあるべきか、既存の農地管理、更なる農地開発のあり方との関係で評価が必要になる。近年、農薬使用のあり方に配慮する環境保全型農業実践の評価指標として、単一作物を栽培する農地においてもそこに生息する他の生物種の多様性維持が重要視されている。農地土壌の栄養レベル、農薬使用のあり方、単一作物の栽培面積の大きさ、異なる作物栽培の組み合わせなどが生物多様性にどう影響するかに関する課題は、異分野の研究者で組織されるべき研究プロジェクトの例と考えられる。

生態系全体に影響し得る土壌の変化の一つに富栄養化が挙げられる。農地では作物多収のために施肥されるが、施肥と同時に病害虫も増える。各種排水中の栄養塩類は水系の富栄養化という環境影響につながり、栄養塩類のレベルは生態系に影響する。農地以外の土壌を含めた栄養塩類のレベルが生態系に及ぼす影響は土壌モニタリングのネットワーク形成と合わせた研究プロジェクトの例となり得る。

これまでの土壌科学において各種土壌の記載と分類方法が構築されてきた。これらはマクロの土壌の取り扱いにおいて最先端の方法である。しかし、環境科学等の比較的新しい分野の研究者には必ずしもこれらの方法の浸透が十分ではない。土壌研究に対する新規参入者にも土壌の記載法と分類法、そして分析法が常用されるようになることが望まれる。そのため、土壌は垂直方向に層状に性質が変化することが多いので、垂直方向の土層の主な構成の記述とその内でどの位置から採取した試料であるかを記述するための簡便法の作出などが考えられる。

土壌教育の充実

土壌は私たちの住む環境に広く分布し、多くの人々が直接または間接的に土壌と係わる。そして、土壌に対する人為が強まる中で、土壌の諸機能は有限であり、適切な管理が必要であることがわかってきた[2]。従って、日常生活の基本として多くの人たちに土壌に関する情報を身につけてもらいたい。そのためには小・中・高校教育において土壌を取り上げ、その性質の理解を促す土壌教育が必要である。土壌教育の例として、小学校では「石と土」の感触から土の粒の細かさを学び、中学校では土壌呼吸の測定から物質循環に繋がる土壌生物の働きを学び、高校では土壌断面における土層の分化を理解することなどが挙げられる[13]。さらには地域において土壌保全の課題に対応する専門的人材を育成する必要がある。

土壌の理解においては実際に土壌を観察し、分析することの効果大きい。そのためには上記の土壌観測の場を児童、生徒、学生の教育の場に積極的に活用することが必要である。土壌観測の場においては垂直方向に変化する土壌の層の観察と目には見えにくい土壌の性質変化を測定することにより学習効果が増す。

(3) 土壌保全に関する基本法の制定

以上のように土壌は、陸地における生命と環境と農業生産の基盤である。土壌は、地上における水や化学物質などの循環の媒体であり、人を含む生命全体に多大な恩恵を与えている。即ち、気候変動や環境変動を緩和してヒトへの適合性を高める生態系サービスを支え続けてきた。そして、今世紀中に 100 億を越えようとする地球人口を支える食料生産は、土壌なくして考えることはできない。土壌を使わない植物工場の発展もあるが、そこでの生産には設備を要し、農産物全体に比べて生産量は限られる。

しかしながら、古代には不適切な土壌管理が文明を崩壊させた例もあった。開発が川の上流域へと進むに伴い、豪雨時における上流域での強い侵食と下流域での土砂堆積が古代都市を破壊したためである[14、15]。近年では、食糧事情の変化、産業構造の変化、都市と農村の人口偏向などの要因が複合し、健全で持続的な土壌の保全について様々な危惧が生じている。このような現状に鑑み、土壌が人類共通の財産であることを再認識し、汚染や劣化のない、持続可能な土壌を保持し続けるための施策を包括的に推進していくことが必要である。そのためには、社会全体にわたって土壌の機能と保全に関する理解を増進することが肝要である。ここに、土壌に関する施策について、その基本理念

を示すとともに、これを総合的かつ一体的に推進するための基本法が望まれる。

土壤に関係する現行の法律として農用地の土壤の汚染防止等に関する法律（土壤汚染防止法、1970 年）、農用地の地力増進法（1984 年）、土壤汚染対策法（2002 年）などがある。土壤汚染防止法と地力増進法は農地を対象とする。土壤汚染対策法は有害物質使用特定施設の土壤汚染を対象とする。土壤保全に関する基本法には、保全する土壤の範囲を拡大し、土壤の用途別に制定された法律と整合性を取りながらも、それらに土壤保全の理念を共通化する緯糸を通すような役割が望まれる。これによって、土壤の用途別に異なる土壤修復に関する目標値への対処と土壤用途の相互変換の可能性に道が開けること、土壤の良好な生産機能、景観形成機能、生態系サービス形成機能の維持向上が期待される。

関連する基本法には環境基本法（1993 年）、景観法（2004 年）、生物多様性基本法（2008 年）、水循環基本法（2014 年）などがある。これらの基本法は根本的に環境保全を目指すものだが、土壤の取扱いは一面的に留まり、それらの中に土壤全般の機能を積極的に保全、強化しようとする方向性が充分には示されていない。このため、これらの基本法と並び、土壤保全に関する基本法の果たすべき役割も多々期待されるところである。

4 提言

(1) 土壌観測ネットワークの形成と国際的な土壌情報の整備及び日本の貢献強化

土壌を扱う行政部局においては、土壌の緩・急変動に対応するため、南北に長い日本国内を区分し、国内の総合的な土壌観測拠点を整備する。従来の土壌用途別対応を活かしつつ、関係専門分野の参画を得てヒトの環境構成要因としての土壌の一元的な観測方法と情報化体系を構築することとし、地域拠点を統括する中核的なセンターを設置して日本土壌観測ネットワークを形成する。そして、土壌を扱う行政関係者、大学と研究機関の試験研究担当者においては、これまで農用地、林地、市街地等の用途別に分けて対応されがちであった土壌を総合的視点で捉え、国際的な土壌情報を整備し、日本の貢献を強化する。

(2) 土壌科学の新展開と土壌教育の充実

地表面の土壌全体にわたる理解の増進と保全のため、大学、国立研究開発法人、県の研究機関では農学を超える関係分野の参画を得て先端科学を活用した土壌物理・土壌化学・土壌生物に関する新しい土壌科学を展開すると共に土壌研究・教育に携わる専門家養成を強化する。さらに小・中・高校の土壌教育を拡充し、土壌保全に関する理解を増進する。その際の教育に土壌観測の場を活用する。

(3) 土壌保全に関する基本法の制定

土壌は、人為の影響を強く受けて変動するにもかかわらず、農地の利用者など直接土壌の恩恵を受ける人々を除けば、関心の外に置かれる。その状況を改善し、健全で持続的な土壌の保全を目指し、土壌に関する施策全体に横たわる基本理念を明確にするとともに、これらを総合的かつ一体的に推進するため、国民社会が等しくその重要性を認識し、土壌保全の理念と原則、すなわち土壌利用における公共性の認識、観測と情報整備・公開、および学術・教育の推進を明記した「土壌保全基本法」を法定することが望まれる。

<用語の説明>

生態系サービス

ヒトは、生態系から多くの利益を受けている。その利益を総合して生態系サービスと呼ばれ、次のような内容を持つとされる。1. 供給サービス：食品や水などの生産・提供。2. 調整サービス：気候などの制御・調節、水涵養、水質浄化。3. 文化サービス：レクリエーションなど精神的・文化的利益。4. 基盤サービス：栄養循環や光合成による酸素の供給。5. 保全サービス：多様性を維持し、様々な出来事から環境を保全すること。土壌は生態系がこれらのサービスを形成する基盤として機能しており、土壌から見る場合の用語として「生態系サービス形成機能」を用いる。また、生産機能は特に農地において人為の影響が格別に大きいためにその他の生態系サービスと分けて取り扱う。

景観形成機能

「景観形成」は主に都市景観について使われているが、本提言では土壌を自然の景観、都市の人工的緑地の景観さらには農地の景観を形成する機能体と捉えて用いる。これも広義には生態系サービスに含まれると見ることもできるが、景観が変わればそこにある土壌の種類も変わるという大まかな関係がある。ここでは土壌に主眼を置いて土壌の機能を表現するためにこの用語を用いる。

ドリン剤

アルドリン、ディルドリン、エンドリンなどの有機塩素系殺虫剤で、土壌中での残留性が高い。

<引用文献>

- [1] FAO and ITPS : Status of the World' s Soil Resources (SWSR) –Main Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome, Italy, 608pp. (2015)
- [2] 日本土壌肥料学会編：世界の土・日本の土は今 地球環境・異常気象・食料問題を土からみると、農山漁村文化協会（2015）
- [3] 国際連合食糧農業機関（FAO）日本事務所国際土壌年（IYS2015）について、
<http://www.fao.or.jp/publish/415.html>
- [4] Oldeman, L.R., Global Extent of Soil Degradation. In: ISRIC Bi-Annual Report 1991-1992, pp. 19-36.
- [5] 日本学術会議農学委員会林学分科会：報告 福島原発事故による放射能汚染と森林、林業、木材関連産業への影響 –現状及び問題点– （2014年9月1日）
- [6] 日本の地球化学図、<https://gbank.gsj.jp/geochemmap/setumei/setumei-kagakuzutoha.htm>

- [7] 鬼鞍 豊編：土壌・水質・農業資材の保全-法の制定とその技術対策、博友社（1985）
- [8] 渡邊 彰、平舘俊太郎編：土と炭化物-炭素の隔離と貯留-、博友社（2013）
- [9] 日本学術会議農学委員会土壌科学分科会：提言 放射能汚染地における除染の推進について ～現実を直視した科学的な除染を～ （2014 年 8 月 25 日）
- [10] 長谷川周一、波多野隆介、岡崎正規編：環境負荷を予測する-モニタリングからモデリングへ-、博友社（2002）
- [11] 日本学術会議（第 18 期）土壌・肥料・植物栄養学研究連絡委員会：土壌資源の保全を求めて-土壌資源情報センターの設置についての提案-、日本土壌肥料学雑誌、75(1)、135～140（2004）
- [12] 高田祐介・八木一行：Global Soil Partnership と GlobalSoilMap.net の紹介、日本土壌肥料学雑誌、83（4）、506～507(2012)
- [13] 福田 直：学習指導要領改訂に向けた学会員の要望調査結果の分析と土壌教育への提言、日本土壌肥料学雑誌、86(5)、489-495（2015）
- [14] カーター, V. G.、デール, T. 著、山路 健 訳：土と文明、家の光協会（1975）
- [15] デイビッド・モントゴメリー著、片岡夏実 訳：土の文明史、築地書館（2010）

< 参考資料 > 土壌科学分科会審議経過

平成 26 年 12 月 25 日 第 2 3 期土壌科学分科会（第 1 回）

国際土壌年に関する取り組み

平成 27 年 6 月 1 日 分科会（第 2 回）

国際土壌年への対応

平成 27 年 12 月 18 日 第 2 2 3 回幹事会

提言「緩・急環境変動下における土壌科学の基盤整備と研究強化の
必要性」を承認