

21世紀の地球規模環境 課題と農業

公益財団法人日本植物調節剤研究協会
宮下 清貴

混迷を深める社会と 国連の持続可能な開発目標 (SDGs)

20世紀は科学と産業の発展に象徴される時代であった。人間の生活は物質的に豊かで便利なものとなったが、次第に弊害や問題が生じ、少しずつ破綻をきたしていくことになる。人類生存の基盤である地球環境が有限であることを思い知らされたのも、この時期である。そして21世紀。地球環境の悪化が進むなかで、現在の76億人から2050年には90億人を超える世界の人口を養っていくことが求められ、そのためには人類の存続をかけて、地球環境の保全と持続可能な社会の実現を図っていくことが最大の課題である。

今日、世界は解決困難とも思える多くの課題を抱え、閉塞感が漂っているかに見える。食料問題、環境問題を始め飢餓や貧困など、今日世界が直面する多くの問題は相互に深く関連し、複雑に絡み合っている。こうした地球規模課題の解決を図るために、国際連合が2015年の国連総会において満場一致で決議したのが「持続可能な開発のためのアジェンダ2030」であり、その中核をなすのが「持続可能な開発目標(SDGs)」である。SDGsは2030年に実現すべき世界を描いたもので、17の目標からなっており、その内容は環境、社会、経済と幅広い。SDGsはすべての国とステークホルダーを対象としており、日本でも最近、企業や地方自治体においても急激な関心の高

まりを見せているという。

SDGsの目標の中で、目標2(飢餓の撲滅、食料の安定確保、持続可能な農業の推進)、目標13(気候変動)、目標15(陸上生態系の保護、回復、持続可能な利用の推進、土地劣化の阻止、生物多様性の損失阻止)は、農業と直接的に関係している。「アジェンダ2030」は、だれ一人取り残されない社会の実現を理念としており、そのタイトル「我々の世界を変革する」にあるように、「変革」が大きなポイントとなっている。現状の変革なしにはSDGsの実現はありえないという認識である。

「アジェンダ2030」の根底に流れているのが、人類の生存と繁栄を支えてきた地球システム^{注1)}は人為的な負荷の増大により多くの点ですでに限界に近づいているという危機感である。砂漠化、干ばつ、洪水、土壌の劣化、淡水の欠乏、生物多様性の喪失などを含む環境の悪化や、天然資源の減少により、人類が直面する課題は深刻化し、多くの国と地球の生物維持システムが存続の危機に瀕している。急増する世界の人口を養うためには、地球システムを破壊から守り、気候、水、土壌、生物多様性といった資源の安定的な維持が必要である。そのためには環境、経済、社会のあらゆる面で、今までの

やり方とは違う変革が求められるとしている。

人類が形づくると新たな 地質年代

地球の誕生は46億年前、生命が誕生したのはおよそ38億年前である。地球は変動の惑星と呼ばれるように、大きな環境変動を幾度となく経験してきた。その長い歴史の中で、現生人類の誕生はわずか20万年余り前のことである。誕生後も人類は、幾度となく大きな環境の変化に見舞われてきた。中でも7万4000年前に起こったインドネシアのトバ火山の大噴火では、人類は絶滅の危機に陥っている。石器時代、人類が環境に及ぼす影響は限定的であり、自然循環の範囲内であったが、環境変動に適応しながら何世紀もかけて居住域を広げ、影響を拡大していった。

最終氷期が終わり、今からおよそ1万1700年前から現在に至る期間は、地球の歴史において例外的に環境が安定していた時期であり、この間に人類は農耕を開始し、文明を開化させて今日に至っている。地質年代的には新生代・第四紀・完新世である(図-1)。食料生産のために農地が次第に広げられ、5500年前には都市が建設され、産業革命が起こると19世紀半ば頃に

注1) 地球システム：地球は地殻、土壌、水圏、大気圏、生物(生物圏)などからなり、それらはエネルギーや物質の流れ(循環)により相互に有機的に結合していることから、地球は動的な一つのシステムとみなすことができる(地球システム)。地球システムを構成する各圏(サブシステム)間の相互作用とその結果生じる変動を解析することで、地球を一つの惑星として安定に存在させる仕組みを明らかにすることが期待される。

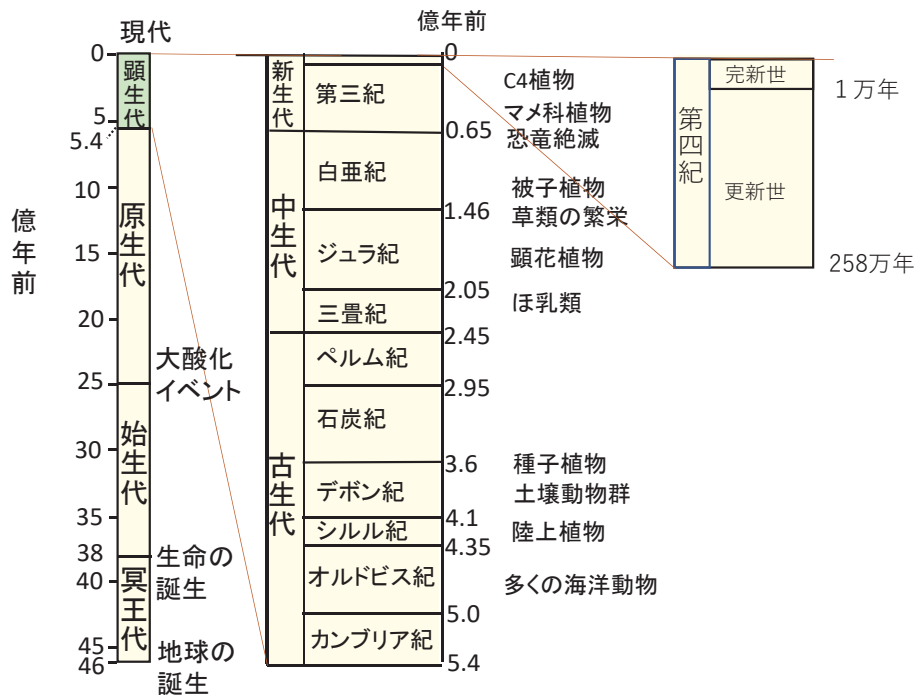


図-1 地球の歴史。左のカラムは地球誕生から現代まで、中央のカラムはカンブリア紀から現代、右側のカラムは更新世から現代を示す。

はその影響は地球全体に及ぶようになる。そして第二次世界大戦以後、その影響力は以前とは比較にならない規模と速度で巨大化してきている。

地球は完新世の安定した状態からスピンアウトし、世界各地で壊滅的な結果をもたらし始めている。

完新世においても自然現象としての環境変動は起こってきたが、地球システムが示すレジリエンス^{注2)}により、地球環境は比較的安定に維持されてきた。人為的な負荷の増大がなければ、完新世は今後少なくとも数千年は続いたと考えられている。しかし今や、大量の化石燃料の利用、工業的な大規模農業により、地球への負荷は急増し、不可逆的な環境変動により人類の持続性が脅かされる事態が懸念されている。「完新世」の安定した状態もつかの間の出来事であったかのように。

こうしたことから、地球は「完新世」の正常な状態から大きくはずれ、すで

注2) レジリエンス：(resilience) 耐性、復元力、抵抗力の意味。

に新たな地質年代に入ったとし、「人新世 (アントロポセン (Anthropocene))」という地質年代名称が提案されている。「人新世」は科学界だけでなく、社会の広い分野で使われ始めており、火山の大噴火や小惑星の衝突に匹敵するような大きな地質学的影響を人類が与えているという認識が広がっている。なお「人新世」の始まりの時期については、産業革命期、大航海時代、20世紀半ばの産業の急成長期など、いくつかの意見がある。

地球の限界 —どこまでなら安全か

「地球の限界」(Planetary boundaries)^{注3)}は、地球上で人類社会が持続、発展していく上で「人類が安全に生存できる範囲の限界」を示すことを目的にしたもので、2009年にストックホルム大学の研究グループによりネイチャー誌

注3) Planetary boundaries：「地球の限界」、「地球の境界 (線)」などと訳されるが、そのまま「プラネタリー・バウンダリー」と表記されることもある。

に論文として発表された (図-2)。「地球の限界」は、20世紀後半から急速に進展してきた地球惑星科学などの成果に基づいたもので、2015年には改訂版が出されている。

「地球の限界」は発表以来、科学界で反響を呼ぶとともに、地球規模の持続性実現に向けた行動のベンチマークとして、政治やビジネスの分野でも関心と議論を呼んでいる。人類は古くより、ローカルなレベルで環境から様々な制約を受けてきた。産業発展の初期には、環境を廃棄物の投棄場とした結果、地域レベルの環境汚染問題が起こっている。しかし、人類が新たに直面している地球規模の環境問題によるインパクトは、それまでの問題に比べるとはるかに大きなものとなる。

「人新世」に入った人類の営みにより、完新世の安定性の維持に働いていた地球システムのあちこちのプロセスに綻びが見え始めている。地球システムが完新世の安定した状態から逸脱すると、大変高い確率で不安定な状態に陥ることとなり、人類社会の持続的発展をより困難にする。「地球の限界」の枠組みは、地球システムの重要なプロセスについて、「人類が安全に生存できる範囲の限界」(=人為的負荷が許容される範囲)を示すことで、地球が安定した状態から外れることを防ぐことを意図している。

「地球の限界」が対象とするのは、「気候変動」、「生物多様性 (生物圏の

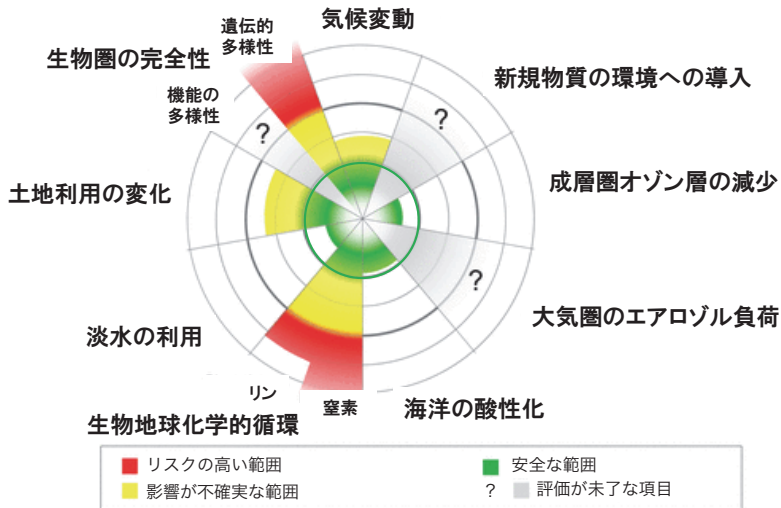


図-2 「地球の限界」 (W. Steffen(2015)を改図)

緑は人類が安全に生存できる範囲、黄はリスクが増大しているが不確実な範囲、赤はリスクの高い範囲を示す。「地球の限界」は内側の緑の線の円になる。？は「地球の限界」の評価が未了であることを示す。

完全性)、「成層圏オゾン層の破壊」、「海洋の酸性化」、「生物地球化学的循環」、「土地利用の変化」、「淡水の利用」、「大気圏のエアロゾル負荷」、「新規物質の環境への導入(化学物質汚染)」の9つのプロセスである。これらについて、①人間が持続的に生存できる安全な範囲、②リスクが高まっているが影響が不確実な範囲、③リスクが高いと考えられる範囲、を示している(図-2)。

環境負荷が次第に増大していくと、最初のうちはその影響による変化は可逆的で小さいが、ほとんどのプロセスには何らかの臨界点(閾値、ティッピング・ポイント)があり、それを越えると突然大きな変化が起こり、元の安定した状態に戻ることは不可能になる(不可逆的)。論文では、臨界値よりも小さい数値を「地球の限界」の限界値としている。これは不確実性を考慮するとともに、臨界値に達するよりも前に警報を発することで、社会が対応するための時間を確保するためという。

「地球の限界」で取り上げられている9つのプロセスのうち、「土地利用変化」、「気候変動」、「生物圏の完全性」、「生物地球化学的循環」の4つについ

ては、負荷は安全な領域をすでに超え、リスクの高い領域に至っている。また、「新規物質の環境への導入」については、限界値はまだ未設定である。取り上げられているほとんどのプロセスが農業と関連しているが、その中から特に関係の深い、「生物地球化学的循環(窒素・リン)」、「土地利用の変化」、および「新規物質の導入」について、概説する。

生物地球化学的循環 (窒素・リンの循環)

地球が生命の存在を可能としている機能の一つが、元素の循環(供給)である。農業は、すべての生物にとって重要な元素である窒素とリンの環境負荷を増大させ、地球生物化学的循環を攪乱している主要な要因である。食料生産を目的とした化学窒素肥料の工業的生産とマメ科作物の栽培により、毎年大気中の約1億2千万トンの窒素ガス(N₂)が人為的に反応態窒素^{注4)}に変換される。この量は、陸地の自然の

注4) 反応態窒素：生物にとって利用しやすい形態の窒素の総称。化学的に安定なためほとんどの生物が利用することができない大気中の窒素(N₂)の対語。

窒素固定量の総計よりも大きい。その結果、地球規模の循環は大きく攪乱を受け、水系の汚染や、強力な温室効果ガスである一酸化二窒素(N₂O)の大気中濃度の増加を引き起こしている。

地球規模での窒素のフローに関する解析結果から、水系の富栄養化防止を基準とした「地球の限界」は、化学肥料及びマメ科作物の栽培による窒素の投入量で6,200万トン窒素/年としている。この数値は最も厳しい水質基準に適合している。現在の窒素の人為的負荷量は、「地球の限界」を大きく超えてレッドゾーンにある。

21世紀半ばに到達する世界人口9億人以上を養うために必要な窒素の量について、試算では、5,000～9,500万トン窒素/年となっている。現状と比べて小さな数値に思えるが、これは、食を変える(肉の消費を減らす)、畜産廃棄物処理等からの損失を減らす、窒素肥料の利用効率を上げる等の対策を前提としている。

一方リンについては、農業生産のために利用されるリンに関する「地球の限界」は620万トン/年としており、現状の利用量2,200万トンはそれを大きく上回っている。

生物多様性の喪失 (生物圏の完全性)

生物種の消滅は自然の過程であり、人間の行為とは関係なく発生している。

地球はその歴史において、少なくとも5回の“大量絶滅”を経験してきた。最大のものは、ペルム紀末（2億5100万年前）の大量絶滅で、すべての生物種の90～95%が絶滅し、古生代の生態系が徹底的に壊滅、その後同じ生態系が二度と回復することはなかった。大量絶滅の原因については様々な説があるが、いずれも環境の変化によるものであることは間違いない。

化石に残された記録から、新しい種の生成と絶滅の速度が見積もられている。それによると、海洋生物の種の絶滅速度は年に0.1～1種、哺乳類のそれは0.2～0.5種である。それに対して今日、種の絶滅速度は、自然の速度の100～1,000倍にも及ぶ。今世紀、気候変動等により種の消滅速度がさらに加速し、すべての哺乳類、鳥類、両生類の種の30%までが絶滅の恐れがあると危惧されている。

絶滅速度増加の主要な要因は人間活動であり、中でも土地利用変化（自然生態系から農地や都市への転換等）、山火事その他の攪乱の増加、陸地や水辺環境への新しい生物種の導入等の影響が大きい。生物多様性の喪失はローカルレベルで起こるが、地球システムの他のプロセスとも関連しており、地球規模で生態系の様々な機能に影響を及ぼす。

生態系が攪乱に対してレジリエンスであるために、機能的多様性（重複性、余剰性）が重要であると考えられる。生態系の重要な機能が一種または少数の種に依存している場合は、病気のような攪乱に対して脆弱であり、復元が

困難となる。しかし、こうした点に関して定量的なことはほとんどわかっておらず、生物多様性に関する「地球の限界」を決めるのは困難である。そのため、絶滅速度を用いることとし、バックグラウンドの絶滅速度の10倍にあたる、年に10種を「地球の限界」としている。

土地利用変化

「土地利用変化」は、陸地の地表面と大気間のエネルギー、水の交換などの生物地球物理的プロセスを通じて気候を直接的に制御する。また、森林、サバンナ、草原、ツンドラ等のすべての陸地バイオームにおいて、土地利用変化は生物多様性（生物圏の完全性）に大きく影響するため、生物多様性を守るためには土地利用変化の規模とパターンを制限する必要がある。

土地利用変化の指標として、最初の論文では農耕地の総計が用いられたが、改訂版では森林被覆を用いている。熱帯、温帯、寒帯の3つの主要な森林バイオームが、他のバイオームよりも、地表面一気候の関連が強いためである。森林バイオームの中で、熱帯林は非森林系に変換されると、蒸発散の変化を通じて気候に強くフィードバックする。また、寒帯林の分布の変化は、地表面のアルベド（反射能）とローカルレベルでのエネルギー交換に影響する。熱帯と寒帯の森林に対するバイオームレベルの「地球の限界」は森林被覆の85%、温帯林のそれは潜在的森林被覆の50%としている。温

帯林の変化は熱帯林と寒帯林のそれに比べて、地球規模の気候システムに対する影響が少ないためという。

新規物質の環境への導入 （地球規模の化学物質汚染）

新規物質だけでなく、既存物質の新しい形態での利用、組換え体なども対象としているが、主要な対象は化学物質である。化学物質の影響が地球規模に及べば、局地的な環境汚染とは比較にならないほど大きな問題となるであろう。環境残留性、環境中での移動性があり、地球システムの機能に影響する物質は、これに該当しうる。

新規物質の導入（放出）により地球規模の環境問題が発生した例として、フロンガス（クロロフルオロカーボン）がある。有用な合成有機化合物であるフロンは、当初は環境に対する影響はないと考えられていたが、成層圏オゾン層に予期せぬ大きなインパクトを及ぼした。

今日、世界の市場では10万以上の化学物質が取り扱われ、リストはさらに伸び続けている。グローバル化により化学物質は地球上の様々な場所で作られ、化学製品や消費財として世界各地で使われ、廃棄物も世界規模で取引されている。近年、化学物質汚染の地球スケールの影響に関する議論が盛んになっており、問題となりそうな化学物質をスクリーニングするための基準が求められている。もし化学物質が以下の3条件を同時に満たすならば、未知の地球規模の脅威となりうるとしている。

- ①地球システムのプロセスに対して大きな影響がある
- ②顕在化するまで、破壊的な影響は予見されない
- ③いったん問題が起こると状態を元に戻すことが困難

おわりに

「地球の限界」は、地球システムが既に危機に直面していることを示している。アジェンダ 2030 には、「我々は、地球を救う機会を持つ最後の世代になるかもしれない」とまで書かれており、持続可能な社会を実現していく上で環

境変動がとりわけ大きなリスクになるというのは多くの一致するところであろう。残念ながら日本では、こうした問題に対する農業関係者の関心は必ずしも高いとは言えないが、SDGs は途上国だけでなく先進国も含め、“誰一人取り残さない”社会の実現を理念としている。変動の 21 世紀、農業に関係している者として、環境を保全し、SDGs に掲げる人類共通の課題解決に貢献していくという視点は重要であろう。

参考文献

Rockström, J. *et al.* 2009. A safe operating space for humanity. *Nature* 461, 472.

Steffen, W. *et al.* 2015. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science* 347, 736.
 ガイア・ヴィンス著(小坂恵理訳). 2015. 「人類が変えた地球」. 化学同人.
 学術の動向 2018(1). 特集「国際連合「持続可能な開発のためのアジェンダ 2030(SDGs)」と科学技術」. 日本学術協力財団.
 スティーヴ・オッペンハイマー著(中村明子訳) 2007. 人類の足跡 10 万年全史. 草思社
 アジェンダ 2030 国際連合広報センター Sustainable Development Goals http://www.unic.or.jp/activities/economic_social_development/sustainable_development/2030agenda/

統計データから

平成 29 農薬年度の出荷実績

農薬工業会が公表した平成 29 年農薬年度の出荷実績から、植物調節剤他を除く、除草剤、殺虫剤、殺菌剤、殺虫殺菌剤の出荷数量は全体で前年比 0.4% 増の 179,677t,kl, 金額は同 1.8% 増の 3,281 億 2 千万円とともに増加している。

そのなかで、除草剤は数量で 2.1% 増、金額 2.6% 増と他の薬剤を上回っている。特に、その他の非農耕地・林野・芝・ゴルフ場・家庭園芸分野の伸びがそれぞれ 5% 前後と大きいのが目立つ。

除草剤は、使用分野全体では数量、金額とも 35% 前後のシェアとなっているなかで、除草剤の出荷実績が他の農業を上回る使用分野は、非農耕地等の分野と水稲分野である。前者では数量で 74%、金額で 64%、水稲分野では数量で 50%、金額で 56% と大きなシェアを占めている。

特に、水稲用除草剤は、除草剤全体の出荷実績の数量で 46%、金額で 54% と大半を占め、わが国の稲作の生産性の向上や作業の省力化という大きな役割を果たしている。(K.O)

単位	種別	使用分野									
		水稲	%	果樹	%	野菜畑作	%	その他	%	合計	%
数量 (t, kl)	除草剤	28,955	50	4,508	24	10,482	13	19,171	74	63,116	35
	殺虫剤	10,101	17	7,561	41	39,201	51	3,262	13	60,125	34
	殺菌剤	5,670	10	6,022	32	25,293	33	922	3	37,907	21
	殺虫殺菌剤	13,144	23	548	3	2,345	3	2,492	10	18,529	10
	小計	57,871	100	18,639	100	77,322	100	25,847	100	179,677	100
金額 (百万円)	除草剤	64,719	56	8,374	17	21,144	17	25,006	64	119,243	36
	殺虫剤	12,115	10	20,615	43	58,436	47	6,658	17	97,824	30
	殺菌剤	9,608	8	19,148	39	41,012	33	5,704	15	75,472	23
	殺虫殺菌剤	30,299	26	336	1	3,180	3	1,766	4	35,581	11
	小計	116,740	100	48,472	100	123,772	100	39,134	100	328,120	100

注1) その他は非農耕地・林野・芝・ゴルフ場・家庭園芸用。注2) %は使用分野のなかで占める割合