

環境変化が雑草や除草剤の効果に及ぼす影響

公益財団法人日本植物調節剤研究協会
技術顧問

與語 靖洋

はじめに

北欧のスウェーデンにあるストックホルムレジリエンスセンターは、2009年に『地球の限界（プラネタリー・バウンダリー, Planetary boundary, PB)』（Steffen *et al.* 2015）という概念を提唱した（図-1）。これは、人間活動が環境に及ぼす影響について、9つのプロセスごとに回復力（レジリエンス）の視点から示したものである。すでにPBを超えているプロセスには、窒素やリンの循環の変化や、生物多様性の喪失がある。

それに続くものとして、気候変動や土地利用変化があるものの、これらはPBを超えるまでには至っていない。しかし、今世紀末の気候変動である「地球温暖化」は、人間活動を主因とする

極めて急激な変化であり、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）と当時のアメリカ合衆国副大統領のゴア氏が2007年にノーベル平和賞を受賞したように、世界的注目度は極めて高い。環境省が公開した『気候変動影響評価報告書』（2020）においても、「気温の上昇は、雑草の分布域を変化させ、農作物の被害を拡大させることが想定される」等、重大性、緊急性、確信度ともに高いとしている。

ここでは、平成29年度日本農学会シンポジウム「大変動時代の食と農」において話題提供した「環境変動が雑草の生態や管理に及ぼす影響」（與語 2018）をベースにして、地球温暖化を中心とした環境の変化に対する雑草の反応と除草剤の効果について概括する。なお関連した総説（Amare 2016; Ramesh *et al.* 2017）があるので参考にしていただきたい。

オーストラリア連邦科学産業研究機構（CSIRO）のHobbs *et al.* は、外来植物の侵入・蔓延程度や影響の時間的変化を4段階に分けた（図-2, Hobbs and Humphries 1995; Department of Primary Industries 2013; Arthur *et al.* 2015; Invasive Plants and Animals Committee 2017）。ここでの主たるメッセージは“早めの対策”である。各段階ごとに便益と費用の比をみると、第1段階（侵入阻止・早期発見）では1:100, 第2段階（根絶）では1:25, 第3段階（隔離・拡散スピードの抑制）では1:5～10, 第4段階（負の影響の抑制）では1:1～5であり、時間が経過するとともに、労力や費用多くして益が少ないことがわかる。この概念は外来植物の大陸間移動を主に念頭に置いているが、対象生物も昆虫や病原菌を含む外来生物全般から在来の草本類や木本類まで、また移動距離も大陸間から地域内や圃場間のような近距離まで、様々なケースに適用できる。

(2) わが国における外来雑草の侵入リスク

今回のテーマからは若干逸脱するようには思えるが、環境変動に対する雑草の反応やその対策は、外来雑草対策との類似性が極めて高い。西田ら（2013, 図-3）は、自然植生保全地域における緑化植物を対象として、管理優先順位を、雑草リスクと防除コストからマトリックス形式で表している。雑草リスク評価は、そもそも侵入前の外来植

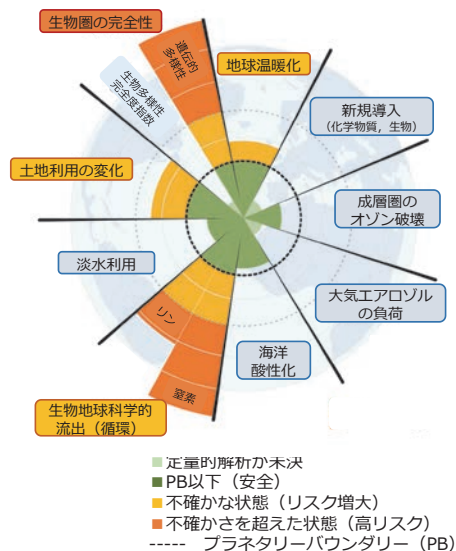


図-1 地球の限界（プラネタリー・バウンダリー, PB）
Steffen *et al.* (2015) の図を和訳

1. 雑草管理の基本的な考え方

環境影響の話題に入る前に、雑草管理に関する基本的な考え方を紹介する。

(1) 雑草の侵入・蔓延と対策

雑草は浮遊植物を除いて、土壌に根付くまたは植物に寄生するため、それ自体“動けない”ものの、種子や塊茎・根茎等の栄養繁殖器官が、風、水、動物等によって他の場所に受動的に運搬される。

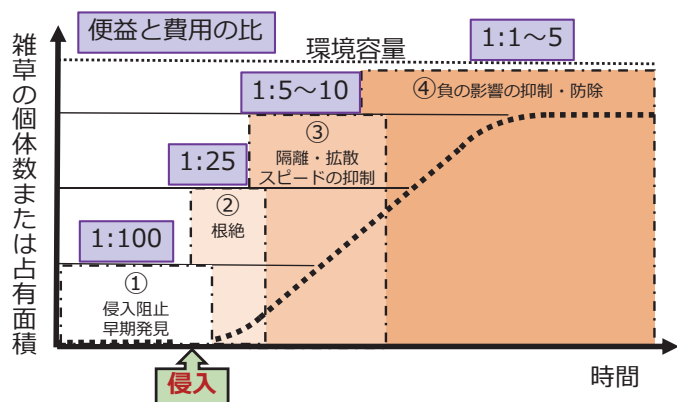


図-2 雑草の侵入・蔓延程度や影響の時間的変化
Biosecurity Strategy for Victoria (2009) の図を
和訳してさらに改変した。

		防除コスト				
		極小	小	中	大	特大
雑草リスク	極小	6	6	6	6	6
	小	5	5	5	5	5
	中	3	4	4	4	4
	大	2	3	4	4	4
	特大	1	2	3	3	3

図-3 雑草リスクと防除コストから得られる外来植物の管理優先順位
1. 直ちに根絶のための防除を実行
2. 根絶のための防除を実行（開始までは拡大阻止管理を実行）
3. 拡大阻止管理を実行
4. 通常管理で対応
5. 通常のモニタリング
6. 通常より低い頻度でモニタリング
(西田ら, 2013)

物に対して雑草性を評価する目的で開発されたものであるが、この研究はその対象を外来緑化植物にしたものである。雑草リスクは、植物の影響の大きさや、対象地域における生育可能面積から格付けを行う。対象植物は、それぞれ異なる生物学的・生態的特性を有しており、対象地域の環境やその変動によってその適応性、すなわち侵入・定着・蔓延のしやすさが異なるため、結果としてこのリスクの大きさも異なる。一方、防除コストは、防除費用と防除に伴う周辺環境への影響や、対象地域内の現存面積から格付けする。この対象地域の現存面積は、時間軸は示していないものの、Hobbs *et al.* が提示した4つの段階に関連する。そのことからわかるように、地球温暖化等の環境変動が植物の分布に及ぼす影響の推定にも応用できるであろう。

(3) バイテク農作物のリスク

これも、今回のテーマとは直接関係ないように思えるものの、バイテク農作物における最近の導入形質は、環境の適応策や緩和策と密接に関連している。Conko *et al.* (2016, 図-4) は、バイテク農作物を対象として、リスクの大きさを推定している。ここでは、影響度（有害性、ハザード）と発生頻

度（化学物質ならば曝露程度）をそれぞれ4段階に分けて、その組み合わせからリスクの大きさを4段階に分けている。このリスク推定の考え方は、“スタンフォードモデル”という様々なハザードや環境リスクに対応した評価ツールが元になっている。このモデルは、実験室実験の安全性から地球温暖化の影響まで、あらゆる場面で利用できる。なお、彼らは、現在商業化されているバイテク農作物における影響度と発生頻度は明確であるとともに、多くの場合リスクの大きさは僅かであり、無視できると推定している。一方、Barton *et al.* (1997) は、バイテク農作物のリスク評価をする前に、寄主となる農作物を栽培（導入）するリスクを評価すべきとしている。彼らによると、果樹を含む20種類の農作物の侵入およびヒトの健康被害を含むリスクの大きさ、並びにリスク管理の必要性に関して解析したところ、そのほとんどがConkoのモデルでは“僅か”に相当するものであった。ただし、寄主となる農作物のリスクは、対象地域によって異なる。たとえば、わが国におけるツルマメは大豆、メキシコにおけるテオシントはトウモロコシの祖先種であるため、その地域では交雑性の観点から潜在的リスクは高い。

2. 環境変化が雑草や除草剤の効果に及ぼす影響

(1) 総論

Peters *et al.* (2014) は、気候変動に対する雑草の反応を、スケール（階層）ごとに、移動（Mitigation）、順化・順応（Acclimation）、適応（Adaptation）の段階に分けて示した（図-5）。

移動は、雑草が過ごしやすい環境に生息域を移すまたは拡大することであり、ここでの雑草の主たる反応は、前節で述べた受動的運搬である。この運搬が景観スケールの雑草分布に変化をもたらす。景観スケールは、たとえば農耕地、森林、草地、湖沼、居住地等、様々な生態系がモザイク状に分布した空間である。大まかには、ヒトが見渡せる規模をイメージすればよいが、こ

		推定リスク			
		極めて高い	低	中	高
発生頻度	極めて高い	低	中	高	高
	高い	僅か	低	高	高
	低い	僅か	僅か	低	中
	極めて低い	僅か	僅か	低	中
		極小	小	中	大
		影響度（有害性）			

図-4 リスクレベル推定のための起こりやすさと影響度と発生頻度
Conko *et al.* (2016) を和訳

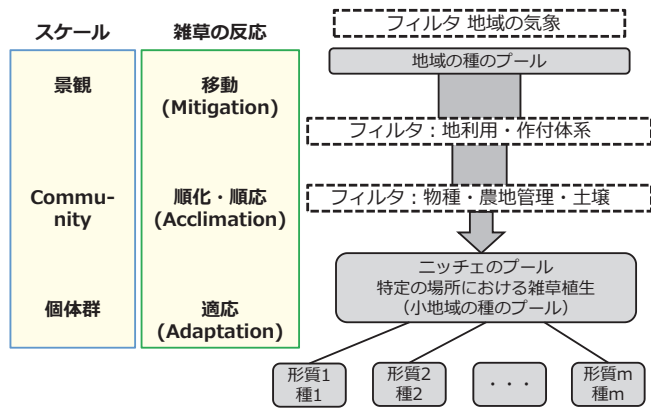


図-5 気候変動に対する雑草の反応反応
Peters *et al.* (2014) の図を和訳して改訂
した図 (興語, 2018) をさらに改訂

このような DNA 配列の変化を伴わない遺伝子発現の制御・伝達の変化を“エピジェネティックな変

る種のプールは、いわゆる“ニッチ”であり、Community よりも更に小さい。話は少し変わるが、メンデル性遺伝以外にも、トランスポゾン、エンドファイト、ウィルス等が植物の遺伝形質を変化させたり、共生したりすることもある。このような適応が単独または積み重なって、交配可能な範囲の小進化や、交配が困難な大進化が起こる。

これらはすべて生存ための変化（広義の適応）であるが、適応できない変化（Damage shift）もある。雑草ではないが、日本では、天然ブナ林の減少もその1つであるが、その要因として地球温暖化が挙げられている。後述するギンカエデ (*Acer saccharinum*) でも同様なことが起こっている。

(2) 各論

ここからは、環境要因として、温度、二酸化炭素 (CO₂) および土壌環境と、雑草の反応や除草剤の効果との関係を取り上げる。ただし、実際は、これらの単独および相互作用に加えて、様々な要素が直接的・間接的、または相乗的・拮抗的に影響しあうこと、これらの変化が複雑かつ非定常な環境下で起こるため、以下の内容はその一部を切り出したものであることを最初に述べておく。

1) 温度

気温の変化は、雑草の生活史における休眠、開花、結実、枯死に至るまで、各段階に影響する。環境変化に対する雑草の反応に関する国内の情報は、このシリーズにおける森田氏や富

ここではさらに広い大陸間移動も含まれている。この運搬の原動力は様々にある。たとえば、渡り鳥が食べた植物の種が消化しないまま、渡った先の地域で糞として拡散することがある。渡り鳥の移動先は地球温暖化や湿原の喪失等でも変わるため、雑草の分布域も自ずと変化する。また、洪水が原動力になる場合、種子や栄養繁殖器官、場合によっては雑草個体そのものが水とともに下流域に移動して定着する。そうやって、それぞれの生息地の種のプール、一年生雑草であれば埋土種子集団ができるとともに、年単位で変化する。ただし、雑草種子には休眠性が高いものや寿命が長いものも多く、その変化は病害虫に比べてゆったりしている。その後、土地利用や作付体系等のフィルター（篩）、すなわち、環境条件の制限を介して、そのプールが縮小しながら次の段階に移行する。

順化や順応は、周辺環境の変化に対して、遺伝情報が変ることなく、表現形質が変化できる範囲で適応することである。“メンデル性遺伝”で知られているように、全ての生物は遺伝 (DNA) 情報に支配されている。この情報が書き換わっていくことが進化である。一方、外部刺激によって、DNA 情報を表現形質として発現するスイッチが ON/OFF することがある。

化”という。この段階では、生息環境やその変化に対して、雑草が耐えるまたは回避することで対応する。具体的には、土壌の乾湿や気温の変化に対して気孔開度を変える、ストレス環境下で生殖成長への移行を早めて種子や栄養繁殖器官の生産を早める、他植物との光競合を優位にするために主茎やツルの伸長を速めること等が挙げられる。これらのことを考えると、“動けない植物”では、この順化や順応の能力が他の生物に比べて長けているように思う。また、このような変化は、景観よりも小さな Community、いわゆる生態学的群落のスケールで起こり、作物種や農地管理方法、さらには後述する土壌条件の違いがフィルターとなって、種のプールがさらに縮小する。

適応は、前述したメンデル性遺伝のことである。つまり、新しい形質を遺伝的に獲得したり、既存形質の最大限の利用によって、個体が遺伝的に変化すること、いわゆる自然淘汰である。一つの集団（個体群）の中には、異なる遺伝形質を有するバイオタイプ（生物型）が存在する。その中で、当該環境に適したまたは競争力が高い形質を有する個体が生き残る。また、それらが獲得した形質が、自然交雑によって後代に伝達される結果として、個体群スケールの変化が起こる。そこにお

表-1 リ水稻用アミド系除草剤のタイヌビエに対する残効期間に及ぼす温度の影響

除草剤名	処理量* (g a. i. /ha)	残効期間 (日)			
		推定値 (**)		実測値 (***)	
		20°C	30°C	20°C	30°C
プレチラクロール	×1/4~1	26~37	12~27	22~32	11~22
メフェナセット	×1/4~1/2	29~40	17~32	16~24	13~22
テニルクロール	×1/4~1	15~31	12~21	8~22	5~12

*：既定量に対する比率（プレチラクロール= 600 (g 有効成分 /ha)，メフェナセット= 1,200, テニルクロール= 200 を既定量とした)

**：薬剤感受性値 (50%阻害, 浅井ら 1997) と本試験の田面水中薬剤濃度から求めた推定値

***：茎葉長が対無処理区比の 10%程度まで回復するまでの日数を残効期間の実測値とした。(與語ら 2006)

永氏らの記事をご覧くださいこととして、ここでは海外の事例を若干紹介する。といっても、外来雑草の侵入との関連性が極めて高いことは前述のとおりである。近年、アメリカ合衆国では、アフリカやアジア由来の Itchgrass (*Rottboellia cochinchinensis*, ツノアイアシ) や、トウモロコシの寄生植物である Witchweed (*Striga* spp.) 等、熱帯地域由来の雑草が蔓延している。また、すでに侵入しているスイカズラ (*Lonicera japonica*) やクズ (*Pueraria montana*) はその北限を拡大している。

Padalia *et al.* (2015) は、現地調査による生息情報と環境データから動植物の生息適地を推測する MaxEnt (Maximum Entropy) モデルと、気候モデルの 1 つであるハドレーセンター結合モデルを用いて解析し、ニオイニガクサ (*Bushmint*, *Hyptis suaveolens*) の 2050 年の潜在分布を高い精度で推測した。ここで興味深いのは、降雨と気温で主成分分析した結果、この雑草の在来地、すなわち元々の生息地と侵入地の分布域 (気象のニッチ) が異なっていると推定されたことである。

気候変動による植物の侵入リスク評価には、プロセスベースモデルとニッチベースモデルがある。プロセスベースモデルとしては、個体群動態モデルが有名であるが、対象生物の生理・生態情報を利用した時間的・空間的分布域の変化過程を解析する。一

方、ニッチベースモデルとしては、上述の MaxEnt モデルに代表されるように、生育適地等を推定する。Morin and Thuiller (2009) は、2 つの気候変動シナリオにおいて、ギンカエデの 2000 年の状況と 2100 年の推測について、それぞれの年の在不在や消失・定着についてプロセスベースモデルとニッチベースモデルで比較したところ、分布域が北上するという全体の傾向、すなわち温暖化を反映している点では同様の結果を得たものの、具体的な空間分布は気候変動シナリオよりもモデル間で大きく異なっていた。そのことから、それら 2 つのモデルを統合して侵入リスクを評価することがより正確な推定に寄与するとしている (Branley *et al.* 2010)。

除草剤の効果に及ぼす温度の影響について、著者ら (2006) は、20°C または 30°C に設定した人工気象室内で、水稻用アミド系除草剤を田面水に処理し、田面水中の除草剤の減衰とタイヌビエの残効性を調べた。除草剤の田面水中濃度と雑草の除草剤感受性値から求めた推定値と、タイヌビエの生育阻害の実測値のいずれも、残効期間は 20°C に比べて 30°C で短かった (表-1)。土壌処理型除草剤を考えると、温度の上昇とともに除草剤の有効成分の土壌中分解が早まる。また、雑草の発生期間は、温度の上昇とともに前後に延長する。その両方の要因によって、発生活長の後期に発生する雑草への効

果が低下することで、残効期間が短くなり、雑草の蔓延を助長する。

このような理論構築は、上記の試験結果をベースとしたものの、農耕地における除草剤に対する雑草の反応はさらに複雑である。雑草の根部または茎葉部から吸収された除草剤は、作用点まで移行して阻害作用を引き起こす。温度上昇とともに、除草剤の吸収量が增大することで作用点により多く蓄積する一方で、高温ストレスが生じない範囲であれば、その解毒代謝能も高まる。また、雑草自体の成長も早まり、結果として処理時期の遅れによる吸収量の低下や、回復力も高まると想定される。除草剤には、約 30 種類の異なる作用点があり、また、それとは別に環境中や植物体中の挙動も異なる、さらに水稻用除草剤の場合、混合剤も数多くあることから、地球温暖化が除草効果にどのような影響を及ぼすかは簡単に推測することはできない。

2) 二酸化炭素 (CO₂)

CO₂ は、地球温暖化係数 (GWP, Global Warming Potential) は低いものの、大気中濃度が極めて高く、長寿命温室効果ガス全体で考えると主たる温室効果ガスである。また、光合成をする植物である雑草に目を向ければ、大気中 CO₂ 濃度は極めて重要であり、その濃度に対する反応は、C3 植物と C4 植物で異なる。これは、両者におけるリブローズ -1,5- ビスリン酸カルボキシラーゼ / オキシゲナーゼ (Rubisco) の特性が異なり、C3 植物に比べて C4 植物で葉内の CO₂ 濃度

を高く維持できるため、結果として光合成能力が高まる。つまり、C4植物では大気中に高濃度のCO₂は必要ない。しかし、CO₂濃度の上昇に伴うC3植物とC4植物の優位性については、調べた範囲では明確な知見はなかった。一方、エンバク (*Avena sativa*) とカラスムギ (*A. fatua*)、栽培稲と野生または雑草稲 (いずれも *Oryza* spp.) のように、作物と同種の野生種や栽培しない種が競合する場合、すなわち、光合成機構が同じC3またはC4植物同志では、CO₂濃度の上昇で雑草の成長が勝ることが多い。また、栄養繁殖する雑草も大気中CO₂濃度の上昇に反応して分布拡大するという報告もある。一般に、雑草は作物に対して競合力が強い印象が強いものの、そのメカニズムについてもまだ不明確なところが多い。

次に、除草剤の効果に及ぼす大気中CO₂濃度の影響について、CO₂濃度上昇、たとえば現在の濃度+160ppmによって効果が低下する、またCO₂と温度の影響は相加的であるとの報告があるものの、原因は明らかではない。また、大気中CO₂濃度の上昇は、土壌の炭素蓄積にも寄与するといわれており、そのことが雑草の成長を助長し、雑草防除効果の低下に結びつくことも考えられるものの、これについても明確な知見はない。

3) 土壌環境

ここでは、土壌と水との関係を、水と土壌の移動(動的関係)と土壌水分(静的関係)の2つに分けて記述する。

水の移動については、短距離輸送と長距離輸送がある。短距離輸送の主たるものは縦浸透(リーチング)である。土壌処理型除草剤の処理直後は、除草剤がまだ土壌にしっかりと吸着していない。そのため、その時期に多量の降雨があると、土壌表層の処理層(除草剤の濃度が高い部分)が薄まり、その下層の濃度が高まる等の変化が生じる。結果として、土壌表層に分布する雑草の効果が低下する。一方、土壌混和処理の目的を考えると、そのような条件下では、土壌の深くから発生する雑草への効果は高まるようにも思える。また、処理後にしばらく乾燥が続いた後に、十分な降雨があると雑草への効果が高まることもある。これはその時期に雑草が急激に出芽・成長して、除草剤を一気に吸収するためとも考えられるが、実際はそんなに単純ではなさそうである。

次に、長距離輸送である。移動するものとして水と土壌がある。水の移動については、雑草種子や栄養繁殖器官はその流れとともに移動する。イヌホタルイ (*Schoenoplectus juncooides*) やコナギ (*Monochoria vaginalis*) 等の水田雑草の種子は、水に浮遊し、排水路などを經由して、別の水田に移動する。Shi et al. (2021) は、ほとんどの雑草種子は浮力を持ち、それはその微細構造によって決定されるとしている。具体的には、種子の形、通道組織、柔組織、木化した組織が関与し、浮遊性を利用して種子を除去する雑草対策を提案している。また、アレチウ

リ (*Sicyos angulatus*) やナガエツルノゲイトウ (*Alternanthera philoxeroides*) の茎や根の断片等の栄養繁殖器官は、河川の流れを利用して下流域に移動し、土壌や底質に付着・定着することで、分布域を広げる。しかし、これらの種子や栄養繁殖器官は、それ以外にも用水路等を利用して別の流域にも分布域を広げる。そのため、当初の分布源より高いところにも蔓延する、つまり孟子が唱えた「水の低きに就くが如し」とは、必ずしもならない。

続いて、土の移動である。「地球温暖化」において、農業や人間生活に最も大きな影響を及ぼすのが「極端気象」である。この極端気象では、地球規模で見れば、豪雨と乾燥が大きな触れ幅で生じる。温暖化によって、大気中水分が上昇するため、このような現象が生じるのは想像に難くない。豪雨等による土壌侵食によって、土壌とともにそこに混入した雑草種子や栄養繁殖器官が運ばれる。運ばれた種子等は、土壌が移動した地点で発芽・出芽・成長して、さらに分布範囲を広げる点では、水の移動と同様である。なお、極端気象といえば、河川の氾濫が想定され、そこでは土壌も水も大きく移動するが、ここでは割愛する。

次に、畑作における土壌水分(静的関係)の影響である。土壌中の水分が過度に多いと、畑作物の生育障害や遅延、いわゆる湿害が生じる。そのことにより、作物の被度が低下するとともに、湿害に強い水陸両用の湿生雑草の競合性が高まる。逆に、カラスムギの

ように、湛水条件に弱い雑草もあり、そのような雑草に対しては、田畑輪換によって埋土種子量を減少させることができる。一方、乾燥は大陸性気候の畑作地帯でよく起こる現象であるが、乾燥に弱い浅根性の作物の生育が遅延し、乾燥に強い深根性の雑草の生育が作物との競合に優位となる。

除草剤の効果に及ぼす土壌水分の影響について、雑草は土壌溶液を介して除草剤を吸収するため、土壌水分が少ないとその分除草剤を吸収しにくくなる。実験室実験等において、土壌全体が均質に適度な畑水分条件を維持すれば、どの深さからの雑草も一斉に発芽するものの、発生深度が浅い雑草が先に出芽し、その後発生深度が深い雑草が追従する。しかし、現場の畑圃場では、土壌水分は土壌の深さごとに異なるとともに、特に土壌表面は日変化が激しい。そのことが雑草の発生消長に大きく影響する。たとえば、土壌表面が乾燥した条件では、土壌の深いところから発生する個体が、土壌表面近くから発生する個体と同時、場合によっては先行して出芽することもある。そのような場合、除草剤の吸収部位が土壌表面近くにあると、薬剤との接触が少ないまま出芽することになる。

おわりに

近年の地球温暖化（気候変動）に対して、国内外および国際協調として、“CO₂のゼロエミッション”のような緩和策を目指した取り組みがなされて

いる。また、冒頭に書いた『地球の限界（プラネタリー・バウンダリー）』は、持続可能な開発目標（Sustainable Development Goals）、いわゆるSDGsとも密接に関係しており、その目標13は「気候変動に具体的な対策を」と主張している。しかし、それらの目標を目指しつつも、現実的には地球温暖化をある程度享受しつつ、並行して適応策を進める必要がある。

ここでは、雑草の環境適応能力と人間の適応策の実行力との競争になるが、その際雑草には土壌侵食防止等のメリットもあり、昨今問題となっている新型コロナウイルス、鳥インフルエンザ、豚熱の感染問題とはアプローチも異なると思われる。そのことから、環境変化と雑草管理については、俯瞰的に捉えつつ、対象地域の状況に適した総合的管理体系を構築することが強く求められる。

参考文献

- Amare, T. 2016. Review on Impact of Climate Change on Weed and Their Management. *American J. of Biol. and Environ. Stat.* 2, 21-27.
- Arthur, T. *et al.* 2015. A Comparison of the Costs and Effectiveness of Prevention, Eradication, Containment and Asset Protection of Invasive Marine Species Incursions. *ABARES*. 1-46.
- Barton J. *et al.* 1997. A model protocol to assess the risks of agricultural introductions, *Nature Biotechnology*, 15, 845-848.
- Bradley, B.A. *et al.* 2010. Predicting plant invasions in an era of global change. *Trends in Ecol. and Evol.* 25, 310-318.
- Conko G. *et al.* 2016. A risk-based approach to the regulation of

- genetically engineered organisms. *Nature Biotechnology* 34 (5), 493-503.
- Department of Primary Industries, a division of NSW Department of Trade and Investment, Regional Infrastructure and Services 2013. *New south wales Biosecurity Strategy 2013-2021*, 1-47.
- Hobbs R. J. and S. E. Humphries 1995. *An Integrated Approach to the Ecology and Management of Plant Invasions*. *Conservation Biol.* 9, 761-770.
- Invasive Plants and Animals Committee 2017. *Australian Weeds Strategy 2017-2027*, 1-43.
- 環境省 2020. 気候変動影響評価報告書, 総説 (pp.91) および詳細 (pp.466)
- Morin, X. and W. Thuiller 2009. Comparing niche- and process-based models to reduce prediction uncertainty in species range shifts under climate change. *Ecology*, 90, 1301-1313.
- 西田智子ら 2013. 自然植生保全地域における緑化植物の生態的影響と管理. *雑草研究* 58, 85-89.
- Padalia, H. *et al.* 2015. How climate change might influence the potential distribution. *Environ. Monit. Assess.* 187, 210.
- Peters, K. *et al.* 2014. Impact of climate change on weeds in agriculture: a review. *Agron. Sustain. Dev.* 34, 707-721.
- Ramesh, K. *et al.* 2017. Weeds in a Changing Climate: Vulnerabilities, Consequences, and Implications for Future Weed Management. *Front. in Plant Sci.* 8, Article 95.
- Shi, X. *et al.* 2021. Microstructure determines floating ability of weed seeds, *Pest Management Science* 77, 440-454.
- Steffen, W. *et al.* 2015. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science* 347 (6223), 1259855.
- 與語靖洋 2018. 第3章 環境変動が雑草の生態や管理に及ぼす影響, シリーズ21世紀の農学「大変動時代の食と農」日本農学会編, 養賢堂, 41-58.
- 與語靖洋ら 2006. 水稲用アミド系除草剤のタイムピエに対する残効期間に及ぼす温度の影響. *雑草研究* 51(別), 142-143.