

## 第3章

# 持続可能な農業に向けた 適応型技術の可能性

| 富松 裕 |

従来の農業は、基本的に単一の作物品種を栽培し、化学農薬や化学肥料を投入することで、高い生産性を維持してきた。しかし大量のエネルギー消費が伴うほか、一部の資源は枯渇の懸念があり、大規模な農地造成は、害虫の天敵や花粉を媒介する昆虫に影響を与える。さらに、気候変動が将来の食料生産を揺るがすことになるかもしれない。

本章では、(1)病害を抑えるために複数の作物品種を混作する、(2)害虫被害の抑制や花粉媒介を促進するために周辺景観を管理する、(3)リンを中心とした栄養塩の循環を進める、(4)気候変動に対応するために他の作物や品種に転換するなど、適応型技術を中心とした新しい方向性について述べる。

## ③-① はじめに

近代農業は、化学農薬や化学肥料に強く依存し、モノカルチャー（単一栽培）を基本として集約化を進めることで、高い生産性を維持してきた。特に、化学農薬や化学肥料の投入がなければ、「緑の革命」はなし得なかつたであろう。しかし、農業や肥料の化学合成には多くの化石燃料を投入する必要がある。また原料となる鉱物資源の一つであるリンは、近い将来にも枯渇する可能性がある。生産性の高い作物や品種を選び大規模化を進めたことも、栽培の簡便化や機械化を通じて、食料の増産に大きな役割を果たしてきた。現在では小麦、トウモロコシ、米、大豆、大麦の5つの作物が世界の農耕地面積の45%以上をも占めており（FAO 2011）、同じ作物種でも特定の品種が広く用いられている。

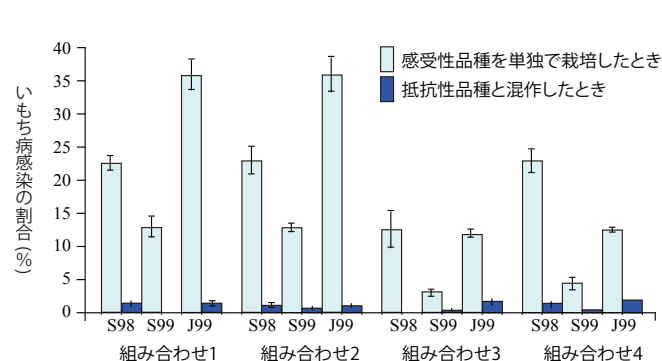
同じ作物や品種が高密度で植えられているモノカルチャーでは、病害虫が大発生しやすい（Elton 1958; Andow 1991）。農薬を用いれば害虫や病原体を効率良く防除することができる半面、害虫類が薬剤に対する抵抗性を獲得したり、農薬によって天敵が排除されたりすることで、かえって問題が深刻化することも多い。また、農薬を多用し、農地を大規模に造成すると、生物多様性が低下し、昆虫による花粉媒介や微生物を介した土壌形成といった、農業生態系における基盤サービス、調整サービスが損なわれてしまうことになる（Tilman 1999）。

さらに近年の気候変動では、平均気温が上昇するだけでなく、大雨や熱波が多く発生するといった不確実性が大きくなっており、食料生産に与える影響が懸念されている（IPCC 2007）。長期にわたって持続的な農業を可能にするためには、投入エネルギー量を減らす、持続不可能な資源を投入しない、気候変動へ対処することを中心とした対策が必要になるだろう。本章では、(1)病害虫の防除、(2)花粉媒介、(3)栄養塩循環、(4)気候変動の各トピックを取り上げ、農業が直面している課題と、適応型技術を中心とした新しい対策の可能性について述べる。

## ③-② 病害と作物品種の多様性

疫学の理論では、病原体が宿主（ホスト）に出会いやすいほど、病気が速く広がっていく。すなわち、同じ作物の品種が高密度で植えられるモノカルチャーでは、その一部が病原体にひとたび感染してしまうと、素早く病気が大発生することにつながる。作物には品種によって病気に対する抵抗性が異なるものがあり、古くから抵抗性を持つ品種が開発されてきた。しかし1950年頃から、穀物では、新しい品種を導入しても、しばらくすると耐性菌が出現するという「いたちごっこ」が続いている。バナナでは1960年頃まで輸出貿易のほとんどを単一の品種が担っていたが、バナナ病の大発生によって新しい抵抗性品種への転換を余儀なくされた（Ploetz 2000）。

多くの作物では単一の遺伝子系統が広く栽培されているが、病気に対する抵抗性が異なる複数の品種を混作することで、疫病の発生を抑えられる可能性がある。小麦では複数の品種を混作すると収量が増えることが、古くはダーウィンの時代から知られていた（Darwin 1872; Kiær et al. 2009）。その後、さび病やうどんこ病に対する感受性が異なる品種を混作すると、病害が抑えられて収量が向上することが明らかになっている



(Mundt 2002)。イネのいもち病は冷夏や長雨が続きと大発生して、しばしば凶作を引き起こしてきた。中国・雲南省では、いもち病に感染しやすいもち米の品種(感受性品種)を、抵抗性を持つうるち米の品種(抵抗性品種)と混作する大規模な実験が、3000 haを超える面積で行われた(Zhu et al. 2000)。その結果、2つの品種を混作しないと比べて、感受性品種の病害は94%も抑えられ、それぞれを単作したときに比べて全体の収量が17%も増えた(図3-1)。殺菌剤を用いる必要がなくなり、数年後には、この作付け方法が100万 haにまで拡大している(Zhu et al. 2005)。

混作をすると病害が抑制されるのには、いくつかの理由が考えられる(Mundt 2002; Keesing et al. 2010)。まず1つ目として、抵抗性品種が混作されていると感受性品種の密度が低くなり、抵抗性品種が物理的な「壁」となることで、病気が拡散しにくくなることが挙げられる(薄め効果 dilution effect)。2つ目の理由として、植物は非病原性の菌と接触すると、急速に細胞壊死を起こしたり、ファイトアレキシンや活性酸素などの抗菌物質を生成したりすることで、本来であれば感染してしまう病原菌に対しても抵抗性を示す性質がある(誘導抵抗性 induced resistance)。そのため抵抗性品種では、非病原性の菌とあらかじめ接触することで、免疫が強化されることになる。さらに3つ目の理由として、混作をすると、環境条件が変わることで病原体が広まりにくくなることもある。雲南省の水田の例では、混作をした水田で湿度が低くなったことが、いもち病が広まりにくい理由の一つとして挙げられた(Zhu et al. 2005)。最後に、病原体の進化はとても早く、特定の抵抗性品種ばかりを植えてしまうと、これに感染できる病原菌がすぐに出現してしまう。これは、同じ抗生物質(例えばメチシリン)ばかりを使い続けると、その薬剤に抵抗性をもつ耐性菌(例えばメチシリン耐性黄色ブドウ球菌)が出現してしまうのと同じ理屈である。

植物と病原体との関係は、植物が持つ抵抗性遺伝子と、病原体が持つ病原性遺伝子との組み合わせによって決まる(遺伝子対遺伝子説 gene-for-gene theory; 図3-2)。病原体は抵抗性を持つ作物品種には感染することができないが、しばしば突然変異によって感染能

		植物の遺伝子型	
		RRまたはRr	rr
病原体の遺伝子型	AAまたはAa	病気になる (非親和性)	病気になる (親和性)
	aa	病気になる (親和性)	病気になる (親和性)

図3-2 植物と病原体との関係を説明する遺伝子対遺伝子説(gene-for-gene theory)。植物は抵抗性遺伝子を獲得すると(RRまたはRr)、病原性を持たない病原体(AAまたはAa)には感染しない。しかし、病原体が病原性を獲得すると(aa)感染してしまう。植物の抵抗性遺伝子(R)は優性で、ホモ接合体(RR)でもヘテロ接合体(Rr)でも病原体に対して同じ応答を示す。逆に、病原体の病原性遺伝子(a)は劣性で、ホモ接合体(aa)でなければ抵抗性を持つ植物に感染することができない。病害管理では、圃場で病原性を示す遺伝子(a)が広まらないようにしなければならない。

を獲得することができる(=耐性菌の出現)。抵抗性品種ばかりを植えてしまうと耐性菌の方が相対的に大きく有利となり、その進化を早めてしまうことになる(Mundt 2002)。また、複数の遺伝子座において抵抗性を持つ品種(多重抵抗性品種)ばかりを植えると、どんな抵抗性品種にも感染できる病原菌(スーパーレース)が流行して、それまで有効だった抵抗性品種が効果を発揮できなくなってしまう。従って、特定の抵抗性品種や多重抵抗性品種の割合を低く抑えるようにして、混作を行う必要がある(Ohtsuki & Sasaki 2006; 大槻 2008)。

雲南省では、もち米とうるち米という特徴の異なる品種が混作されていたが、人の手によって収穫されていたので簡単に仕分けることができた。しかし機械化や高齢化が進む日本の稲作では、同じ方法を取り入れるのは難しい。その代わり、抵抗性遺伝子だけが異なり、その他の形質が同等な品種(マルチライン multiline)を用いた方法が実用化されている。新潟県では、従来のコシヒカリを母親に、抵抗性品種を父親として食味や開花日などがコシヒカリと同等のマルチラインを多数開発し、病原体系統の発生状況に応じて年によって異なる割合で混合し、栽培している(新潟県 2008)。同様に他の作物でも、複数の品種を混作することで病害を抑制できる可能性がある。

近年の研究では、病害が関与していないと思われる場合でも、栽培する植物の遺伝子系統が多様であるほど収量が大きくなること、シロイヌナズナのようなモデル植物や野生植物を用いた実験によって明らかになりつつある(Kotowska et al. 2010; Tomimatsu et al. submitted)。複数の品種を混作する利点については、解明されていない部分も多い。

### ③-③ 害虫被害・花粉媒介と景観の管理

農作物に対する害虫被害を、害虫の天敵を利用することで軽減しようとする技術は、生物的防除(biological control)と呼ばれる。自然環境では、アブラムシなどの害虫を捕食する昆虫(例えばテントウムシ)や、害虫に寄生する昆虫(例えば寄生バチ)が天敵として機能し、昆虫の個体数は天敵との種間関係によって調節される。このため、施設園芸を中心として、農業を減らす代わりに天敵昆虫を導入する害虫防除法が普及しつつある。屋外の農耕地においても、土着天敵(自然に発生する天敵昆虫)のはたらきを高めることで害虫防除が期待できる。しかし多くの農耕地は、天敵が生息するのに適した環境とはいえない(Landis et al. 2000)。天敵の個体数を維持するためには、餌となる害虫が少ないときにも代わりとなる餌が必要になる。また一部のハナアブのように、幼虫の段階ではアブラムシを餌とするが、成熟すると花粉や花の蜜を必要とするようになるものもある。

近年、農耕地を取りまく自然植生が、天敵の生息環境や餌資源を供給することで、その活動性を高めていることが明らかになってきた。重要な天敵のなかには、農耕地で餌が得られないときに周辺の自然植生で餌を得るものや、生息場所あるいは休眠場所として森林

などの自然植生を好むものが多い。また、圃場が耕されてしまうと、非農耕地がシェルター（隠れ場）としての機能を果たす。宮城県や山形県では1998年頃から水稻との輪作作物としてダイズが盛んに栽培されるようになったが、作付面積の急増に伴ってジャガイモヒゲナガアブラムシ (*Aulacorthum solani*) が広く発生した (小野・城所 2009)。この害虫はダイズの生育後期に個体数を増やし、収量や品質を低下させる。ジャガイモヒゲナガアブラムシが発生した圃場では、その周縁部よりも中心部で被害が大きかったことから、周縁部では周辺植生から天敵が移動してくることで個体数が抑制されていたと考えられる (小野・城所 2009)。

結果として自然植生が失われて農耕地ばかりからなる単純な景観 (土地利用) になると、害虫被害が大きくなることが予測される (図3-3a-b)。ドイツで行われたセイヨウアブラナ (*Brassica napus*) を用いた実験では、農耕地が多く占める場所ほど天敵の寄生による害虫の死亡率が低く、害虫によるセイヨウアブラナの食害も大きかった (図3-3c-d; Thies et al. 2003)。米中西部の7州を対象として行われた分析では、農耕地が多く占める単純な景観を持つ地域でアブラムシの発生密度が高く、殺虫剤の使用量も多い傾向が見られた (図3-3e-f; Meehan et al. 2011)。従って、適度に自然植生を配置するといった景観の管理を行うことが、害虫防除において有効となる可能性がある (Bianchi et al. 2006)。

ただし、このような景観の特徴が害虫被害や作物の収量に及ぼす影響について調べた事例は少なく、その効果には不明な点も多い。ドイツ北部の小麦畑では、周辺の自然植生が天敵と害虫両方の活動性を高めてしまい、単純な景観でも複雑な景観でも害虫の密度は変わらなかった (Thies et al. 2005)。イネの害虫であるカメムシ類は、粳 (もみ) から吸汁することで変色を起こし (斑点米)、米の商品価値を下げる。宮城県の有機水田では周囲に休耕地が多いほど、カメムシ類の生息密度が高かった (Takada et al. 2012)。つまり休耕地に生えるイネ科の雑草が、カメムシ類の発生源になるとみられる。このように天敵昆虫だけでなく害虫の発生も周辺の景観に影響を受けることから、景観管理の有効性については、害虫と天敵の両方から検証する必要がある。

周辺の自然植生は、天敵昆虫だけでなく、作物の花粉媒介を担う昆虫の生息地でもある。現在、世界でヒトが直接消費している食料生産量の35%は、動物によって花粉媒介される作物によるものである (Klein et al. 2007)。多くのリンゴやナシのように、花粉媒介を担う送粉昆虫 (ポリネータ) がいなければ全く果実や種子ができない作物は少ないが、ナスやトマト、メロン、イチゴ、コーヒーなど、送粉昆虫による花粉媒介が不十分だと収量や品質が影響を受ける作物は多く、その数は全作物種の70%にも及ぶ。日本ではセイヨウミツバチやセイヨウオオマルハナバチ、マメコバチが作物の受粉のために多く導入されている。しかし近年、野生の送粉昆虫だけでなく、飼育管理されているセイヨウミツバチまでもが減少しつつあり、送粉サービスの低下が作物生産に与える影響が懸念されている。

主要な送粉昆虫であるハナバチ類は、非農耕地に営巣するものが多く、その生涯を通じ

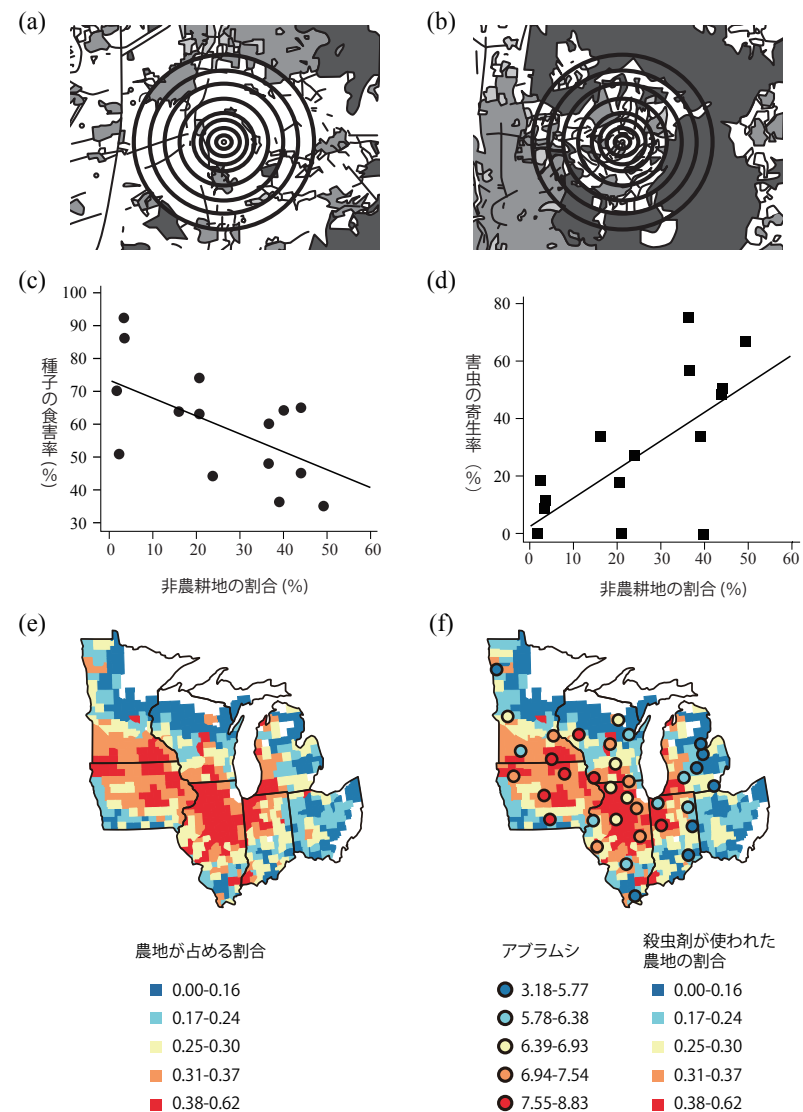


図3-3 農耕地が多く占める単純な景観ほど、害虫被害が大きくなる傾向がある。(a-b)ドイツ・ゲッティンゲン近郊における単純な景観 (a) と複雑な景観 (b) の例 (Tscharntke et al. 2007)。白色の部分が農耕地を、黒色・灰色の部分が非農耕地を表す。(c-d)ドイツ15地域でセイヨウアブラナを用いて行われた実験では、周囲1.5 kmに占める非農耕地の割合が低い場所ほどセイヨウアブラナの食害率が高く、天敵の寄生による害虫の死亡率が低かった (Thies et al. 2003)。害虫はケシキイ科の甲虫 (*Meligethes aeneus*) で、天敵であるヒメバチ科の寄生蜂は寄生 (害虫) の幼虫に産卵し、その体内で成長して寄主を殺す。(e-f)米中西部の7州を対象とした分析では、農耕地が占める割合が大きい地域ほどアブラムシ類の発生密度が高く、殺虫剤が多く使われている傾向があった (Meehan et al. 2011)。(f)の凡例では、観察されたアブラムシの個体数を自然対数で示してある。(a-b)はElsevier、(c-d)はThe Royal Society、(e-f)はThe National Academy of Sciences USAよりそれぞれ許可を得て転載。

て多様な花資源を必要とする。そのため、害虫の天敵と同じように、野生の送粉昆虫による花粉媒介は自然植生からの距離によって影響を受ける傾向がある。コスタリカのコーヒー園場では森林に近い場所ほどハチの種数が多く、森林から1km以上離れた場所と比べると収量が20%も多かった (Ricketts et al. 2004)。米カリフォルニア州のスイカ園場では、周囲に占める自然植生の割合が高いところほどハナバチの種数が多く、スイカの受粉効率も高かった (Kremen et al. 2004; Winfree & Kremen 2009)。茨城県のソバ畑でニホンミツバチを調べた研究では、自然林である落葉広葉樹林の近傍でニホンミツバチが多かったが、スギやヒノキの人工林ではそのような傾向が見られなかった (Taki et al. 2011)。おそらく、広葉樹林の方が営巣場所や餌(花)資源を多く得られるのだろう。同じような報告例は多く、16の作物を用いた23の検証例を分析した結果では、ハチの種数やハチが花を訪れる頻度が、自然植生から離れるにつれて急激に減少することが明らかになっている (図3-4; Ricketts et al. 2008)。

適度に自然植生を配置するという、天敵昆虫や送粉昆虫の活動性を高めるための景観管理は、様々な空間スケールで適用することができる。それゆえ、その効果も適用した空間スケールによって異なるだろう。Griffithsら(2008)は、新しい管理法を施したときの費用と便益について3つのシナリオを示した。1つ目は、便益の大きさが管理を適用するスケールに依らない場合である (図3-5a)。この場合、農家は新しい管理法を導入する強いインセンティブを持つことになり、管理法は普及しやすい。2つ目のシナリオでは、スケールが大きくなるにつれて便益の大きさが飽和していく (図3-5b)。例えば、管理を施した場所へ地域の天敵昆虫が集まってくることで、害虫の防除効果が高まる場合を想定してほしい。少数の農家が狭い範囲で取り組んでいるときには、天敵が集まってくることで高い防除効果を示すだろう。しかし広域的に取り組まれるようになると、限られた天敵昆虫を奪い合うようになって、防除効果が下がってしまう。3つ目のシナリオでは、適用するス

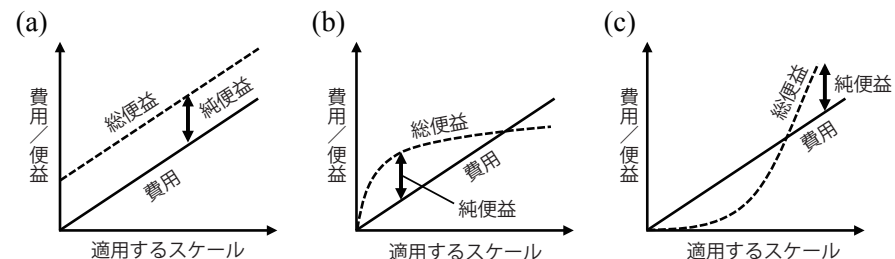


図3-5 生物的防除法を適用する空間スケールと、その費用・便益に関する3つのシナリオ (Griffiths et al. 2008)。(a) 生物的防除の純便益が防除法を施すスケールに依らず一定である場合、(b) スケールが小さいときにだけ純便益が正となる場合、(c) 逆に、スケールが大ききときにだけ純便益が正となる場合。(c)の場合、個人農家が小規模に生物的防除法を導入するインセンティブが発生しにくい。詳しくは本文を参照のこと。Elsevierより許可を得て転載。

ケールが大きくなるにつれて便益が飛躍的に大きくなる (図3-5c)。つまり狭い範囲で新しい管理法を施しても効果は小さいが、広い範囲で取り組むことで初めて天敵昆虫が増え、効果が表れる場合だ。この場合は、大規模に取り組むことを促す何らかの制度や補助がなければ、新しい管理法を普及させることは難しいだろう。従って、生息場所や景観の管理が効果的にはたらく空間スケールについても、検討する必要がある。

### ③-④ 栄養塩循環の回復

農業生産を高めるためには、土壌中で不足しやすい窒素やリン、カリウムなどの栄養塩を肥料として与えることが不可欠である。本来、生態系では、落葉や落枝、動物の死体などが土壌動物やバクテリアのはたらきによって分解され、栄養塩が再び植物から吸収されるといったように、比較的狭い空間的範囲で栄養塩が循環している。同じように農業生態系でも、ヒトや家畜のし尿などの有機性廃棄物が古くから肥料として用いられ、地域社会で栄養塩の循環がなされていた。しかし産業革命以降、都市化と下水道の普及によって、食料は遠くまで輸送され、し尿に含まれる栄養塩類は農耕地へと戻ることなく、大部分が周囲の河川や湖沼へと放出されるようになった。現代農業では、農耕地から失われていく栄養塩を化学肥料を投入することで補い、生産性を維持している。しかし、化学肥料の合成には非常に多くのエネルギーが必要となる。工業的に窒素肥料を合成するハーバー・ボッシュ法では、その過程で高温高圧の反応条件が必要とされる。日本の稲作では、投入している全エネルギー量の約30%が、肥料の生産や使用に関わるほどだ (Pimentel & Pimentel 2008)。また、過剰に肥料を投入することで湖沼や海域の富栄養化が起り、シアノバクテリア (藍藻) が増殖するといった深刻な環境問題の原因となっている。

一方で、世界のリン酸資源は近い将来に枯渇する可能性がある。リン酸肥料の原料となるリン鉱石は、早ければ今後50年から100年程度で底をつき、リン酸の生産量は2030年

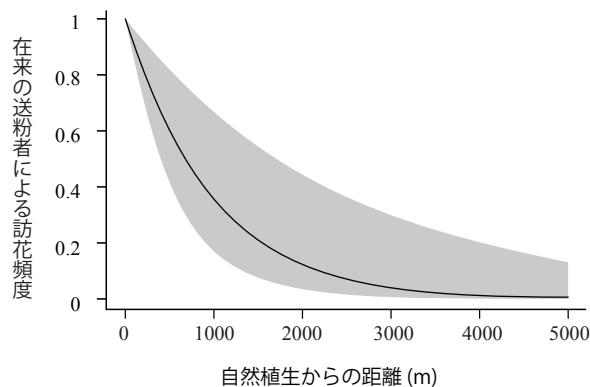


図3-4 自然植生からの距離とポリネータ在来種による訪花頻度との関係 (Ricketts et al. 2008)。既存の文献 (n = 22) から推定されたもので、灰色部分は90%信用区間を示す。自然植生から668 m離れると、訪花頻度が半減する計算になる。John Wiley & Sonsより許可を得て転載。

頃を境に減少していくことが予測されている (Cordell et al. 2009; Gilbert 2009)。リン鉱石で世界最大の埋蔵量を持つ中国は、国内需要をまかなうためにリン酸肥料に対して高い輸出関税を繰り返しかけており、今後も肥料価格が高騰することが予想される。また世界の農耕地の約30%では未だにリンが不足しており (MacDonald et al. 2011)、サハラ以南のアフリカでは深刻な貧困状態が続く一因となっている (Vitousek et al. 2009)。今後も地球の人口増加が予測されていることを考えると、リンの需要がさらに増大することは間違いない。リンは生命にとって欠かすことのできない元素であり、他の元素が不足していても、リンが不足しているだけで植物の成長の妨げになる(「リービッヒの最少律」という)。リンには代替資源が存在せず、その役割を他の元素で補うことができない。従って、化学肥料を節減することはもちろんだが、リンを中心とした栄養塩の再利用を進めなければ、長期的には食料生産を維持することができないのは明らかである。

図3-6は、ヒトを中心としたリン資源の循環サイクルを示したものである (Childers et al. 2011)。農業目的で使われるリンの一部は堆肥などを通じて再利用されているものの、多くは自然環境へと放出されていることが分かる。また、リンは様々な過程でも失われている。例えば、多くの地域では必要以上のリンが施肥され、農耕地から流出する一因となっている (図3-6d)。近年、先進国では、過去の反省から施肥量が抑えられつつあるが、中国などの新興国では、かなり多くの肥料が投入されている (Ju et al. 2009)。作物が収穫された後も、加工や流通の過程で、さらに半分近くのリンが失われている (図3-6e-f; Cordell et al. 2009)。従って効率の良い栄養塩循環を実現するためには、(1)肥量を節減

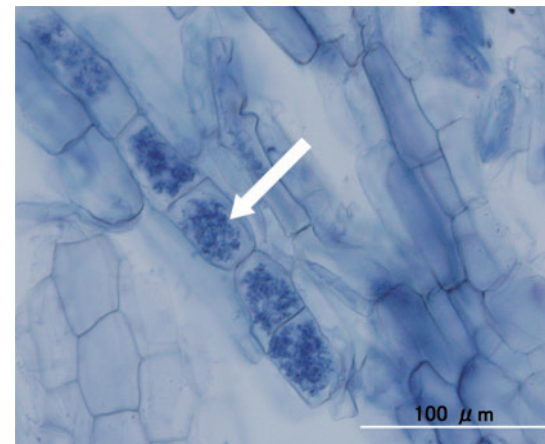


図3-7 アーバスキュラー菌根菌。土壤中に菌糸を張り巡らせ、植物の根の細胞内に貫入して樹枝状体 (arbuscule; 矢印の部分) と呼ばれる構造を形成する (写真提供 九石太樹氏)。

し、農耕地からのリンの流出を防ぐ、(2)食品の加工・流過程におけるロスを削減する、(3)ヒトや家畜のし尿、食品廃棄物などからリンを回収して再利用する、といった多角的な取り組みが必要である。また、世界の農耕地の75%は家畜を飼育するために用いられており (Foley et al. 2011)、肉中心の食生活は野菜中心の食生活と比べてリンの必要量が多い。食生活の見直しを通じて、栄養塩の需要そのものを抑えることもできる (Cordell et al. 2009; Childers et al. 2011)。

長年にわたって施肥し続けることで土壤中に栄養塩が蓄積している場合には、施肥量をかなり抑えることができるかもしれない。日本で多く見られる黒ボク土壌では、火山灰に由来するアルミニウムによってリンが固定されやすく、施肥によって与えたリンの多くが作物に吸収されない状態で蓄積している。このような土壌中のリンを利用して肥料を節減するために、植物の根に共生して「菌根」を作る菌類を活用しようとする動きがある (齋藤 2011)。菌根を作る菌類は菌根菌 (mycorrhizal fungi; 図3-7) と呼ばれ、特にリンの吸収を助けることで植物の成長において重要な役割を果たしている。菌根菌は植物が利用できない複雑な有機化合物として存在するリンを分解し、土壌中に張り巡らせた菌糸網を通じて吸収することができる (山下・大園 2011)。このことから、植物と最も広く共生関係をもつアーバスキュラー菌根菌の胞子が、農園芸資材として利用されている。

ところが菌根菌は遺伝的に多様で、同じ種でも、その菌株や対象となる植物との組み合わせによって、接種効果が大きく異なることが分かってきた (Koch et al. 2006)。Angelardら (2010) は、アーバスキュラー菌根菌の一種 *Glomus intraradices* の個体を交配させて出現した (遺伝的に新しい) 菌株が、イネの生育を5倍にすることを見いだした。そのメカニズムは不明だが、交配によって生じた他の菌株には、イネには影響を及ぼさないが他の植物の生育を促すものが見られた。近年まで、菌根菌は無性的に繁殖し、遺伝子

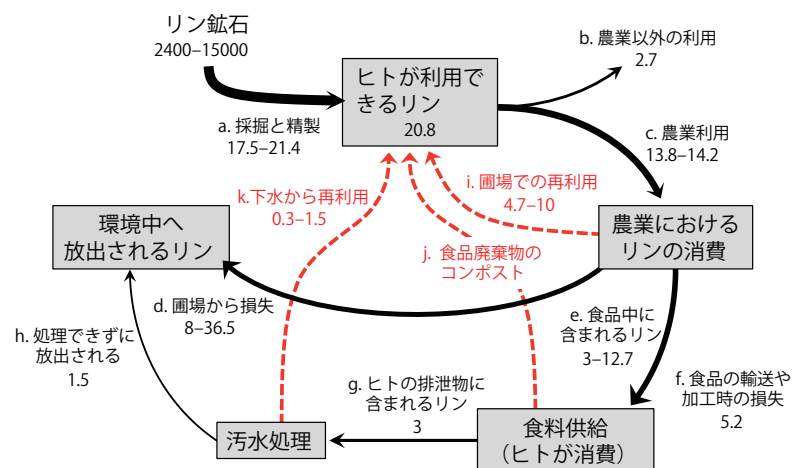


図3-6 ヒトが利用するリン資源の循環サイクル (Childers et al. 2011 をもとに作図)。赤い点線は、リン資源を持続的に再利用するために重要な流れを表す。数字はリン資源量の推定値で、文献によって大きなばらつきがある。単位は年間当たり重量 (百万トン)。「圃場での再利用」には、作物残渣や家畜のし尿による再利用を含む。

を交換しないと考えられてきた。Angelardらの研究は、特定の作物に適した菌株を探し出すことで、リン酸をはじめとする肥料を大きく節減することができる可能性を示している。さらに、アーバスキュラー菌根菌が分泌するリポキチンオリゴ糖が、菌根の形成を誘導することが近年報告されており、農業への応用が期待される (Maillet et al. 2011)。

リン酸の再利用に関しては、食品廃棄物のコンポスト(堆肥)化、作物残渣(収穫される以外の部分)や家畜のし尿からの再利用、下水からの再利用の、大きく3つの方法がある(図3-6i-k)。このうち下水からの回収は、これからの大きな課題である。日本では、岐阜市が民間企業(メタウォーター)と共同で、下水汚泥焼却灰からリン酸を回収する技術を実用化した\*1。米国では50%以上の下水汚泥が肥料として再利用されているが、下水には工業排水や生活排水が混入しているため、この中に含まれる病原体や化学物質が健康被害を引き起こしているという指摘がある (George 2008)。

このためスイスやオランダでは近年、汚泥の散布が禁止された。ヒトが排出するリン酸の多くは尿に含まれており、尿は無菌であるため、尿だけを別に回収すれば、この問題を回避できる。スウェーデンでは、尿と糞便とを別々に回収する分離型トイレが少なくとも13万5000個以上も利用されている (Kvarnström et al. 2006)。2つの自治体では分離型トイレの導入が義務化されており、回収された尿は家庭や集落のタンクに貯められ、液体肥料として用いられている。

### ③-⑤ 気候変動下における作物生産

気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の推定によると、温室効果ガスなどの排出シナリオに応じて、1990年から2100年までの間に全球平均気温は1.4℃から6.4℃上昇する(IPCC 2007)。上昇幅が1~2℃であれば世界の食料生産量は増える可能性があるが、3℃を超えると減少することが予測されている(図3-8)。また、多くの地域では降水量が増加する他、中央アジアなど一部の地域では一層の乾燥化が進む。さらに、気温や降水量の年変動が大きくなる他、洪水や干ばつ、熱波といった異常気象が増え、これらが食料生産の安定性に及ぼす影響が懸念される (Schmidhuber & Tubiello 2007)。例えばイネでは、温暖化に伴う高温によって生じる不稔が収量に影響を及ぼす恐れがある (松井 2009)。冷涼な気候を好むレタスなどの露地野菜では、抽だいが増える(花茎を伸ばすことで品質が損なわれる)など、様々な影響が発生している (杉浦ら 2006)。

気候変動への対策では、温室効果ガスの排出量を削減して気候変動を抑制しようとする緩和策(mitigation)と、気候変動に対して農業システムをうまく順応させることで影響を軽減しようとする適応策(adaptation)\*2とがある。世界で排出される温室効果ガスの

\*1: 国土交通省下水道技術開発プロジェクト <http://www.jiwet.jp/spirit21/>

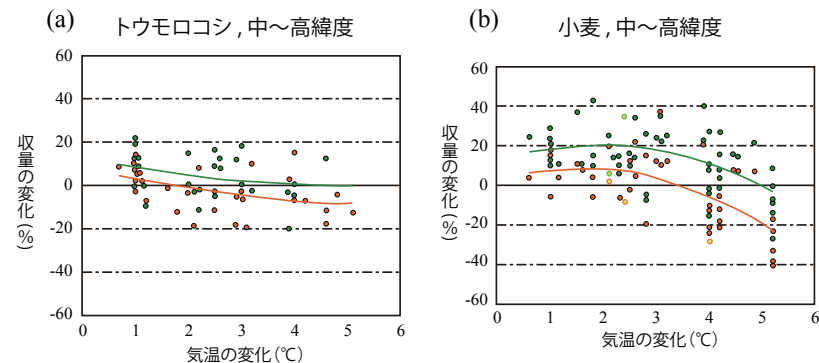


図3-8 気候変動に対する穀物収量の変化(IPCC 2007)。赤い丸は適応策を施さない場合を、緑の丸は適応策を施した場合を示す。同様に、赤いラインは適応策を施さない場合、緑のラインは適応策を施した場合の傾向を、それぞれ示す。IPCCより許可を得て転載。

13.5%は農業活動に由来しており、最大限の緩和策が必要であることはもちろんだが、その効果が気候システムへと反映されるまでには相当の時間がかかる (McIntyre et al. 2009)。当面は気候変動の進行が避けられないことから、適応策を併せて行うことが重要になる。本来、植物は、環境の変化に対して発芽や生育時期を調節したり、進化的に適応することで存続してきた。あるいは、既存の種が生育に適した別の種によって置き換わることで、群集としての生産性が維持されている。当然ながら、圃場では植え付けから収穫までが管理されているため、ヒトが同様の対応を取らなければならない。つまり、変動する気候条件に応じて植え付けや収穫時期を調整する、他の品種や作物へ転換するといったことが必要となる (McIntyre et al. 2009)。

遺伝的多様性は、適応進化の「源」であるのと同じように、品種改良の「源」でもある。しかし作物品種を互いに交雑させて選抜する伝統的な品種改良の結果、現在栽培されている主要作物には、種が本来持っている遺伝的多様性のごく一部しか残っていない。例えば北米では、トウモロコシの根を食害するハムシの一種が重要害虫として問題となっている。トウモロコシはハムシによって食害を受けると、ある種の揮発性成分(セスキテルペン)を根から放出し、ハムシの天敵である線虫を誘引する性質がある。しかし北米で栽培されている多くのトウモロコシ品種では、この合成成分を持っていない (Rasmann et al. 2005)。近縁の野生種では揮発性成分が検出されることから、長年にわたる品種改良の過程で、この成分の合成能力を失ったと考えられている。

近年、古来から地方で栽培されている品種や近縁の野生種にみられる多様性が、遺伝子資源として注目されている (Hajjar & Hodgkin 2007; Feuillet et al. 2008)。これまでに

\*2: 「緩和策」と「適応策」は、主に気候変動への対策として用いられる用語である。本書で用いられる「適応型技術」との違いに注意してほしい。

も近縁の野生種から有用な形質が繰り返し導入されてきたが、その多くは病害虫への抵抗性に関わるものだった(Hajjar & Hodgkin 2007)。今後は高温や乾燥、洪水など、環境ストレスに対する応答に注目して新しい品種を育成していく必要がある。

例えば、主にパスタの原料となるデュラム小麦(*Triticum durum*)では、中東原産の祖先種(*T. tauschii*)と交雑することで、これまでよりも乾燥に優れた耐性を示す新しい品種が育成された(Reynolds et al. 2007)。この品種は、乾燥時に根を深くまで伸長させることで、収量を維持することができる性質を持っている。またメキシコで古くから栽培される小麦の品種を調べたところ、同じように乾燥に対して高い耐性を持つものが多く含まれていた。メキシコにはスペイン人の開拓者によって約500年前に小麦が伝わったが、それ以来、乾燥に強い系統がはからずも選抜されてきた可能性がある。

東南アジアや南米で栽培されるイネのなかには、洪水に適応したものが知られている(Hattori et al. 2011)。豪雨による突発的な洪水が多い地域では、成長を抑制してエネルギー消費を抑えることで冠水に対して耐性を示す。一方、雨季に数カ月わたって水位が数メートルに達するような洪水に見舞われる地域では、急激に節間が成長して葉を水面に出すことで耐性を示す。冠水に強いイネは収量が少ないため、これらの形質を高収量品種へ導入することで、洪水の多い地域でも収量を増大させることができる可能性がある。このようなまだ活用されていない遺伝子資源を持続的に利用するために、栽培種やその近縁種を収集・保存する取り組みが行われているが\*3、野生種の生息地内保全(*in situ* conservation)を併せて進めることで、遺伝子資源を最大限維持する必要がある。

交雑による品種改良では、有用な形質を持つ近縁種を、従来から栽培されている品種(=親品種)と交配する。有用な形質を持つ近縁種は収量や品質が劣ることが多く、交雑すると好ましくない形質まで一緒に受け継いでしまう。そこで、交雑によってできた子孫を親品種と再び交雑することで(「戻し交雑」という)、有害な形質を取り除かなければならない。つまり、有用な遺伝子だけを新しい品種のなかに凝縮していく。しかし戻し交雑には大規模な栽培が必要で、親品種と何度も繰り返し交配し、生まれた子孫のなかから有用な形質を持つものだけを選抜するという作業に、多大な労力と時間(5~10年)がかかる。

このような問題を解決するために、重要な遺伝子と連鎖している塩基配列を目印とすることで品種改良にかかる時間を短縮し、手間を省くことができたようになった(Collard & Mackill 2008)。この**DNAマーカー選抜**(marker-assisted selection)では、交雑によってできた子孫のなかから、有用な形質を持つものを比較的適格に素早く選抜できる。さらに**遺伝子組み換え技術**によって、交雑することができない他の種から機能が判明している有用な遺伝子だけを導入することが可能になった。新しいバイオテクノロジー技術の有効性には議論の余地があるが、気候条件に適した品種を迅速に開発できる技術の確立が望

\*3: 日本では、農業生物資源ジーンバンク<http://www.gene.affrc.go.jp/> などがある。

## BOX 3-1

### 遺伝子組み換え作物

1995年に商業利用が始まった遺伝子組み換え(GM)作物は、2010年の時点で世界29カ国で栽培され、その面積は1億4800万haにまで広がっている(James 2010)。米国・ブラジル・アルゼンチン・インド・カナダの5カ国が作付け面積の90%以上を占め、限られた地域で大規模に栽培されているのが現状だが、日本は国外で栽培されたGM作物を大量に輸入して、飼料や加工食品として利用している。また12カ国の農家を対象として行われた調査では、若干の例外を除いて、GM作物を栽培した方が収量や収益の面で良い結果が得られている(Carpenter 2010)。

一方で、気候変動に対するGM技術の有効性には、疑問を呈する向きもある。そもそも、乾燥に対する抵抗性など環境ストレスに強いGM作物は、まだほとんど実用化されていない。これまで多く実用化されてきた害虫や病害への抵抗性を持つGM作物は、少数の遺伝子を導入することで目的の性質を付与することができた。しかし、環境ストレスに関わる形質には多数の遺伝子が関与しているのが一般的だ。イネをはじめとする多くの作物でゲノム配列が解読され、遺伝子の機能を明らかにするための研究が急速に進められているが、気候変動に伴う新しい品種開発の必要性にGM技術がどこまで応えられるのか、明らかでない部分もある(Sinclair et al. 2004)。またGM作物が圃場で栽培されると、交雑を介して近縁の野生植物へと遺伝子が浸透して、野生種が強害雑草化するといった生態リスクがある(芝池・松尾 2007)。ヒトの健康へ影響があるのではないかという疑念もあり、特に日本やヨーロッパではGM作物に対する不安が根強い。GM技術の有効性とリスクについて科学的な調査や技術開発を進めると同時に、その利用の是非について社会的な合意形成を図る必要がある。

まれる(BOX 3-1)。

草地では、植物の種多様性が高いほど収量(一次生産量)が増え、年による変動が抑えられて安定性が高まることが知られている(Tilman et al. 2006)。多様性が収量の安定性を高めるメカニズムの一つとして、**保険仮説**(insurance hypothesis; 第1章)がある。種によって環境変動に対する応答が異なる時、それぞれが一次生産量に与える効果を互いに相殺し合うことで、収量が安定に推移するというものだ。つまり、降水量の少ない年には乾燥に強い種が、気温が高い年は高温に強い種がよく成長することで、お互いの生産量を補う効果ははたらく。このメカニズムがはたらくためには、環境変動に対する応答が異なる様々な種が含まれている必要がある(応答の多様性 response diversity; Elmqvist et

al. 2003)。多くの作物は単独(モノカルチャー)で栽培されているが、牧草や飼料作物の場合には複数の植物種が混作されることも多い。用いる種の組み合わせを考慮することで、より安定した収量を得られると考えられる。

### ③-⑥ さいごに

近代農業は、ヒトに都合の良い性質を持った作物品種を大規模に栽培し、肥料や農薬を大量に投入することで生産性を高めてきた。しかし農業の集約化がいき過ぎれば、病害虫の大発生を招く、送粉サービスが損なわれる、栄養塩が環境を汚染する、外部資源が枯渇する、品種改良の過程で有用な形質が失われる、といったトレードオフが生じることになる。世界的な人口増加を支えるためには、食糧生産を現在の2倍に増やす必要があるといわれている。しかし食糧増産のために農地を拡大すれば、それだけ他の生態系サービスが損なわれてしまい、全体としては人間社会の利益にならない恐れがある。作物の多様性や生物間相互作用、栄養塩循環といった、生態系で本来みられるプロセスをいくらか取り戻すことで、農業生産性と持続可能性、さらには他の生態系サービスとの両立を図る必要がある。

#### 引用文献

- Andow, D.A. (1991) Vegetational diversity and arthropod population response. *Annual Review of Entomology*, 36, 561–586.
- Angelard, C., Colard, A., Niculita-Hirzel, H. et al. (2010) Segregation in a mycorrhizal fungus alters rice growth and symbiosis-specific gene transcription. *Current Biology*, 20, 1216–1221.
- Bianchi, F., Booij, C.J.H. & Tscharntke, T. (2006) Sustainable pest regulation in agricultural landscapes: a review on landscape composition, biodiversity and natural pest control. *Proceedings of the Royal Society B*, 273, 1715–1727.
- Carpenter, J.E. (2010) Peer-reviewed surveys indicate positive impact of commercialized GM crops. *Nature Biotechnology*, 28, 319–321.
- Childers, D.L., Corman, J., Edwards, M. et al. (2011) Sustainability challenges of phosphorus and food: solutions from closing the human phosphorous cycle. *Bioscience*, 61, 117–124.
- Collard, B.C.Y. & Mackill, D.J. (2008) Marker-assisted selection: an approach for precision plant breeding in the twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B*, 363, 557–572.
- Cordell, D., Drangert, J.-O. & White, S. (2009) The story of phosphorus: global food security and food for thought. *Global Environmental Change*, 19, 292–305.
- Darwin, C. (1872) *The Origin of Species by Means of Natural Selection*, 6th edn. Murray, London.
- Elmqvist, T., Folke, C., Nyström, M. et al. (2003) Response diversity, ecosystem

- change, and resilience. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 1, 488–494.
- Elton, C.S. (1958) *The Ecology of Invasions by Animals and Plants*. London, Methuen.
- FAO (2011) FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://faostat.fao.org/>
- Feuillet, C., Langridge, P. & Waugh, R. (2008) Cereal breeding takes a walk on the wild side. *Trends in Genetics*, 24, 24–32.
- Foley, J.A., Ramankutty, N., Brauman, K.A. et al. (2011) Solutions for a cultivated planet. *Nature*, 478, 337–342.
- George, R. (2008) *The Big Necessity: The Unmentionable World of Human Waste and Why It Matters*. Portobello Books, London.
- Gilbert, N. (2009) The disappearing nutrient. *Nature*, 461, 716–718.
- Griffiths, G.J.K., Hollnd, J.M., Bailey, A. et al. (2008) Efficacy and economics of shelter habitats for conservation biological control. *Biological Control*, 45, 200–209.
- Hajjar, R. & Hodgkin, T. (2007) The use of wild relatives in crop improvement: A survey of developments over the last 20 years. *Euphytica*, 156, 1–13.
- Hattori, Y., Nagai, K. & Ashikari M. (2011) Rice growth adapting to deepwater. *Current Opinion in Plant Biology*, 14, 100–105.
- IPCC (2007) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Solomon, S., Qin, D., Manning, M. et al. (eds.), Cambridge University Press.
- James, C. (2010) *Global status of commercialized biotech/GM crops*. ISAAA Brief No. 42, ISAAA, Ithaca, NY. <http://www.isaaa.org/>.
- Ju, X.-T., Xing, G.-X., Chen, X.-P. et al. (2009) Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 106, 3041–3046.
- Keesing, F., Belden, L.K., Daszak, P. et al. (2010) Impacts of biodiversity on the emergence and transmission of infectious diseases. *Nature*, 468, 647–652.
- Kiær, L.P., Skovgaard, I.M. & Østergård, H. (2009) Grain yield increase in cereal variety mixtures: a meta-analysis of field trials. *Field Crops Research*, 114, 361–373.
- Koch, A.M., Croll, D. & Sanders, I.R. (2006) Genetic variability in a population of arbuscular mycorrhizal fungi causes variation in plant growth. *Ecology Letters*, 9, 103–110.
- Kotowska, A.M., Cahill, J.F. Jr. & Keddie, B.A. (2010) Plant genetic diversity yields increased plant productivity and herbivore performance. *Journal of Ecology*, 98, 237–245.
- Klein, A.-M., Vaissière, B.E., Cane, J.H. et al. (2007) Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. *Proceedings of the Royal Society B*, 274, 303–313.
- Kremen, C., Williams, N.M., Bugg, R.L. et al. (2004) The area requirements of an ecosystem service: crop pollination by native bee communities in California.



- Ecology Letters*, 7, 1109–1119.
- Kvarnström, E., Emilsson, K., Stintzing, A.R. et al. (2006) *Urine Diversion: One Step Towards Sustainable Sanitation*. EcoSanRes programme, Stockholm Environment Institute.
- Landis, D.A., Wratten, S.D. & Gurr, G.M. (2000) Habitat management to conserve natural enemies of arthropod pests in agriculture. *Annual Review of Entomology*, 45, 175–201.
- MacDonald, G.K., Bennett, E.M., Potter, P.A. et al. (2011) Agronomic phosphorous imbalances across the world's croplands. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 108, 3086–3091.
- Maillet, F., Poinso, V., André, O. et al. (2011) Fungal lipochitooligosaccharide symbiotic signals in arbuscular mycorrhiza. *Nature*, 469, 58–63.
- 松井勤 (2009) 開花期の高温によるイネ (*Oryza sativa* L.) の不稔. 日本作物学会記事, 78, 303–311.
- McIntyre, B.D., Herren, H.R., Wakhungu, J. et al., eds. (2009) *International Assessment of Agricultural Knowledge, Science and Technology for Development (IAASTD): Synthesis Report with Executive Summary*. <http://www.agassessment.org/>.
- Meehan, T.D., Werling, B.P., Landis, D.A. et al. (2011) Agricultural landscape simplification and insecticide use in the Midwestern United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 108, 11500–11505.
- Mundt, C.C. (2002) Use of multiline cultivars and cultivar mixtures for disease management. *Annual Review of Phytopathology*, 40, 381–410.
- 新潟県 (2008) コシヒカリ BL. <http://www.pref.niigata.lg.jp/nosanengei/1204823747830.html>. 2011年2月21日アクセス.
- 小野亨・城所隆 (2009) 生息場所管理による土着天敵の利用とダイズ害虫管理. 『生物間相互作用と害虫管理』(安田弘法・城所隆・田中幸一編) 京都大学学術出版会, 京都.
- 大槻亜紀子 (2008) 抵抗性品種は良か悪か: 病原体の進化を見越した植物の作付戦略. 『共進化の生態学: 生物間相互作用が織りなす多様性』(横山潤・堂園いくみ編) 文一総合出版, pp. 265–284.
- Ohtsuki, A. & Sasaki, A. (2006) Epidemiology and disease-control under gene-for-gene plant-pathogen interaction. *Journal of Theoretical Biology*, 238, 780–794.
- Pimentel, D. & Pimentel, M.H. (2008) *Food, Energy, and Society*, 3rd edn. CRC Press.
- Ploetz, R.C. (2000) Panama disease: A classic and destructive disease of banana. *Plant Health Progress*, doi:10.1094/PHP-2000-1204-01-HM.
- Rasmann, S., Köllner, T.G., Degenhardt, J. et al. (2005) Recruitment of entomopathogenic nematodes by insect-damaged maize roots. *Nature*, 434, 732–737.
- Reynolds, M., Drecceer, F. & Trethowan, R. (2007) Drought-adaptive traits derived from wheat wild relatives and landraces. *Journal of Experimental Botany*, 58, 177–186.
- Ricketts, T.H., Daily, G.C., Ehrlich, P.R. et al. (2004) Economic value of tropical forest to coffee production. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 101, 12579–12582.
- Ricketts, T.H., Regetz, J., Steffan-Dewenter, I. et al. (2008) Landscape effects on crop pollination services: are there general patterns? *Ecology Letters*, 11, 499–515.
- 斎藤雅典 (2011) リン資源の枯渇と農業生産への有効利用. 遺伝, 65, 32–38.
- Schmidhuber, J. & Tubiello, F.N. (2007) Global food security under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 104, 19703–19708.
- 芝池博幸・松尾和人 (2007) 遺伝子組換え作物の花粉飛散と交雑: 不確実性を乗り越えるために. 『農業と雑草の生態学 侵入植物から遺伝子組換え作物まで』(浅井元朗・芝池博幸編) 文一総合出版, pp. 219–245.
- Sinclair, T.R., Purcell, L.C. & Sneller, C.H. (2004) Crop transformation and the challenge to increase yield potential. *Trends in Plant Science*, 9, 70–75.
- 杉浦俊彦・住田弘一・横山繁樹・小野洋 (2006) 農業に対する温暖化の影響の現状に関する調査. 独立行政法人 農業・生物系特定産業技術研究機構.
- Takada, M.B., Yoshioka, A., Takagi, S. et al. (2012) Multiple spatial scale factors affecting mired bug abundance and damage level in organic rice paddies. *Biological Control*, 60, 169–174.
- Taki, H., Yamaura, Y., Okabe, K. et al. (2011) Plantation vs. natural forest: matrix quality determines pollinator abundance in crop fields. *Scientific Reports*, 1, 132.
- Thies, C., Steffan-Dewenter, I. & Tschardtke, T. (2003) Effects of landscape context on herbivory and parasitism at different spatial scales. *Oikos*, 101, 18–25.
- Thies, C., Roschewitz, I. & Tschardtke, T. (2005) The landscape context of cereal aphid-parasitoid interactions. *Proceedings of the Royal Society B*, 272, 203–210.
- Tilman, D. (1999) Global environmental impacts of agricultural expansion: The need for sustainable and efficient practices. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 96, 5995–6000.
- Tilman, D., Reich, P.B. & Knops, J.M.H. (2006) Biodiversity and ecosystem stability in a decade-long grassland experiment. *Nature*, 441, 629–632.
- Tschardtke, T., Bommarco, R., Clough, Y. et al. (2007) Conservation biological control and enemy diversity on a landscape scale. *Biological Control*, 43, 294–309.
- Vitousek, P.M., Naylor, R., Crews, T. et al. (2009) Nutrient imbalances in agricultural development. *Science*, 324, 1519–1520.
- Winfree, R. & Kremen, C. (2009) Are ecosystem services stabilized by differences among species? A test using crop pollination. *Proceedings of the Royal Society B*, 276, 229–237.
- 山下聡・大園享司 (2011) 熱帯林における菌類の生態と多様性. 『シリーズ現代の生態学11 微生物の生態学』(日本生態学会編) 共立出版, pp. 55–70.
- Zhu, Y., Chen, H., Fan, J. et al. (2000) Genetic diversity and disease control in rice. *Nature*, 406, 718–722.
- Zhu, Y., Fang, H., Wang, Y. et al. (2005) Panicle blast and canopy moisture in rice cultivar mixtures. *Phytopathology*, 95, 433–438.