

土壌消毒剤の世界動向について

国立大学法人 東京農工大学大学院 農学研究院
豊田 剛己
Koki Toyota

1. はじめに

2016年2月12日現在、世界人口は73億人を超え、2050年には97億人、2100年には112億人にも到達すると予想される。今後30年程度の間に現在の1/3に相当する24億人もの人口が増えるため、食料生産を現状の1.3倍に増やせばよいのか、というそんな単純ではない。世界各国で見られる高カロリーな食事へと志向する食生活の変化、バイオエタノールやバイオディーゼル原料としての需要増のために、人口増以上に食料、特に穀物の生産を高める必然性がある。

穀物増産には3つの方法がある。耕地面積を増やすことがもっとも直接的だが、過去の耕地面積の推移を見るときわめて厳しい。FAOSTATによれば2000年から2012年にかけてわずか1.1%しか世界の耕地面積は増えていない。耕地面積を増やすといっても、現在耕地になっていない場所はそもそも耕作に適さないことが多い。もしくは、熱帯雨林やタイガなど地球環境保全のためにはなくてはならない森林が多くを占める。そのため、穀物生産を増やすためという理由で森林伐採して耕地化することは難しい。むしろ、現行の農耕地において浸食や塩類化による土壌劣化や、長年の作物栽培にともなう連作障害や土壌肥沃度の低下など、現在利用している農耕地の現状維持すら難しい側面もある。

2つめの方策は単位面積当たりの生産性の向上である。米、小麦、とうもろこし、だいずといった主要穀物では、品種改良等によりこれまで順調に生産性が向上し、今後も2050年までに約4割～7割上昇すると期待されるが、それでも2050年の穀物需要を到底まかなえず、4つの作物合計で2億1900万haもの栽培面積が不足すると試算される(Ray et al.

2013)。

3つめは、作物の収穫頻度を増やすことである。年間に1回収穫されると1と定義される収穫頻度は、1961年に0.6であったのが2011年には0.9まで増加しており、今後も期待できる(Ray and Foley 2015)。過去10年において、中国では1.24から1.40、インドでは1.08から1.21へと増加するなど、特に、熱帯・亜熱帯地域への期待が大きい。世界の農耕地面積は13億8千万ha (FAOSTAT 2013) のため、世界の農耕地の15%で1回余分に主要穀物を栽培できれば、世界の穀物需要をまかなえることになる。

もちろん、こんな単純には世界の穀物生産量は増えないだろう。むしろ、単位面積当たりの生産性や年間の収穫回数を増やせば、それに伴い様々な生産リスクが高まる。Ray and Foley論文ではマイナス要因として「環境と社会への負荷の増大」とだけ記され、具体的な内容は論じられていないが、連作障害や土壌肥沃度の低下が最たるものと考えられる。温暖な地域ほど、病害虫が活発になりやすく、土壌有機物の分解速度が速いため肥沃度が低下しやすい。したがって、今後穀物増産が期待される地域はリスクも大きいといえる。

連作障害の原因は様々であるが、土壌中における土壌伝染性病原菌や植物寄生性線虫の密度が高まることによって主にもたらされる。連作障害のもっとも有効な解決策は連作しないに限るが、上述の穀物生産向上という至上命題のためにはこの解決策は現実的ではない。そこで重要となるのは、病害虫を増やさない土壌ないし栽培管理を確立することであり(言うなれば予防)、病害虫が増えた場合の削減方法(治療)である。以上の状況は、穀物だけでなく、野菜を含めた作物全般について当てはまる。む

しろ、穀物に比べ野菜の方が連作されるケースが断然多いため、連作障害は野菜でより深刻といえる。ここでは、治療に極めて有効な土壌消毒剤をとりまく最近の研究動向について紹介する。国土の狭い我が国では、様々な作物、特に野菜では連作が常態化しており、連作を可能にしているのは消毒剤をはじめとする様々な化学農薬である。消毒剤なしでは作物が栽培できなくなる地域が数多くでてくると推定される。

2. 臭化メチル代替剤の登録状況

消毒剤といえば臭化メチルであった。臭化メチルは植物寄生性線虫、土壌伝染性病原菌、雑草など幅広く効果を有し（表1）、価格や作業性の点でも使い易いかわめて有用な薬剤である。ところが、1995年に採択されたモントリオール議定書においてオゾン層破壊の恐れがあるという理由で臭化メチルの全廃が決定されたため、代替薬剤に移行せざる得なくなり、現在は検疫用途のみの例外的な使用にとどまる。代替薬剤としては、1,3-ジクロロプロペン（D-D）、クロルピクリン、メチルイソチオシアネート（MITC）関連剤、ヨードメタン、石灰窒素などがあり、それらに関する研究が数多くなされ

てきた。その他の新しい消毒剤として、日本では登録はないが、ジメチルジスルフィド（DMDS）が米国、イスラエル、トルコなどで登録されている。中国ではシロアリやキクイムシ、トコジラミ用の消毒剤であるフッ化スルフルルを、ネコブセンチュウに対する土壌消毒剤として活用する研究がなされ、効果を実証されている（Cao et al. 2013）。これらの消毒剤の各種病害虫に対する影響をまとめた報告例によると、残念ながら臭化メチルほど幅広く効果を有する薬剤はない。そのため、対象となる病害虫リスクを事前に把握あるいは診断して適切な薬剤を選択しないと、臭化メチルのようには病害虫や雑草をコントロールできなくなる。

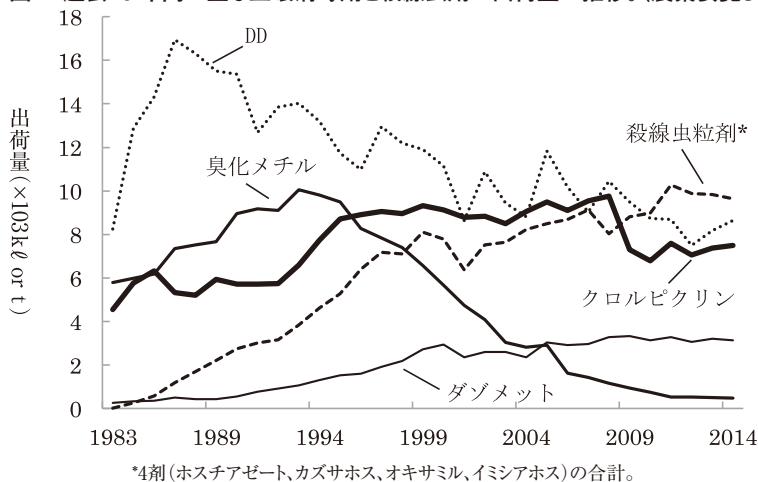
これら代替薬剤の使用状況は、米国カリフォルニア州では、2000年から2014年にかけて、臭化メチルの使用量が1/3に減少したのに併せて、D-Dとクロルピクリンの使用量がそれぞれ2倍以上に増えた（2015年 Annual International Research Conference on Methyl Bromide Alternatives and Emissions Reductionsの資料より）。我が国では臭化メチルの出荷量が激減した一方、D-D、クロルピクリン、MITC関連剤の出荷量はかつての臭化メチルの出荷量を埋めるほどには増えていない（図1）。

表1. 各種土壌消毒剤の線虫、病気、雑草に対する効果の比較

	線虫	病気	雑草
臭化メチル	Excellent	Excellent	Good to excellent
クロルピクリン	None to Poor	Excellent	None to Poor
カーバム塩	Poor to good	Poor to good	Good to excellent
1,3-ジクロロプロペン (D-D)	Good to excellent	None to Poor	Poor
ジメチルジスルフィド (DMDS)	Good to excellent	Good to excellent	Good to excellent

（2014年国際線虫学会フロリダ大学Noling博士の講演資料より）

図1. 過去20年間の主な土壌消毒剤と殺線虫剤の出荷量の推移。（農薬要覧より）



ところで我が国では、燻蒸剤に関して使用規制は特になく、生産者は誰もが農薬使用基準の下、使用できる。一方、米国ではD-Dやクロルピクリンの使用は、一般の生産者には許可されず、特別の免許を有するプロに限定される。欧州ではクロルピクリンは登録されておらず、D-Dも緊急利用のみに制限されているなど、状況は様々である（表2）。欧州でクロルピクリンの登録が抹消された理由は、作業者、水生生物、鳥類、哺乳動物に対するリスク、それに、分解産物であるジクロロニトロメタンの地下水汚染リスクなどである。D-Dは、製造時に発生する既知および未知のポリ塩素化不純物の環境への大規模放出に関する情報不足のため、欧州では登録が認可されなくなった。こうしたクロルピクリンやD-Dの状況は欧州以外でも同じであるが、欧州以外で登録不許可という動きはないようである。米国は、ヒトへの暴露リスクを回避するため、大気中での消毒剤濃度に規制を設けており、そのために、消毒剤が使用できないバッファゾーンの設置を義務づけることで消毒剤使用の安全性を高めている。我が国では、平成25～27年度に実施された「環境省研究総合推進費「安全が確保される社会部会」日本型農業環境条件下における土壌くん蒸剤のリスク削減と管理技術の開発（代表：農業環境技術研究所小原裕三）」において、クロルピクリン、MITC関連剤の大気中濃度が様々な状況下で測定された結果、米国の基準を超えることはきわめて特殊な状況下でしか見られないこと、それも通常のビニルではなく難透過性ビニルで被覆することで防げることが明らかになっている。病害虫を効果的に死滅させ、集約的な作物栽培に欠かせない消毒剤を、今後も適正に使用していかなくてはならない。

3. 消毒剤以外の線虫に対する薬剤とそれらのリスク

我が国の生産現場では、各種の病気に対してはクロルピクリンやMITC関連剤、線虫に対してはD-Dといったように、消毒剤が使い分けられることが多い。植物寄生性線虫による被害がメインな圃場では、使用に際し危険が伴うD-Dの代替として、ガス化しない粒剤タイプの殺線虫剤が使われるようになってきていると推定される（図1）。我が国で登録されている主要な粒剤タイプの殺線虫剤は、ホスチアゼート、カズサホス、オキサミル、イミシアホスであるが、その他に海外製の2剤において登録に向けた準備が進められている。

あまり知られていない粒剤の懸念は、繰り返し使用に伴う殺虫効果の低下である。これは、一部の害虫で知られるように、線虫が薬剤に対して抵抗力を有するようになったためではなく、土壌中であまりに速やかに分解され、殺虫効果を発揮する前に消失してしまうために起きる。我が国では登録のないアルディカルブで発見されて以来、オキサミル（Osbornら2009）、カズサホス（Karpouzasら2004）で報告されている。著者らもカズサホス、ホスチアゼートが効かなくなった不効化土壌を見つけている。2014年の国際線虫学会の際に、「現在開発中の新規薬剤は何回連用しても不効化現象は起きなかった」とイスラエルの研究者が報告していたのが印象に残る。クロルピクリンやMITC関連剤が微生物分解されることは広く知られ、D-Dにおいては実際に分解速度が繰り返し使用に伴い早くなることが報告されている（Chungら1999）。したがって、これらの消毒剤においても不効化が起きないとはいえない

表2. 世界における土壌消毒剤の登録状況較

	発売	豪州	日本	イタリア	スペイン	南ア	米国
クロルピクリン	1950' s	登録	登録	登録抹消	登録抹消	登録	登録
ダゾメット	1960' s	登録	登録	登録	登録	登録	登録
1,3-ジクロロプロペン (D-D)	1950' s	登録	登録	緊急利用のみ	緊急利用のみ	登録	登録
カーバム塩	1970' s	登録	登録	登録	登録	登録	登録

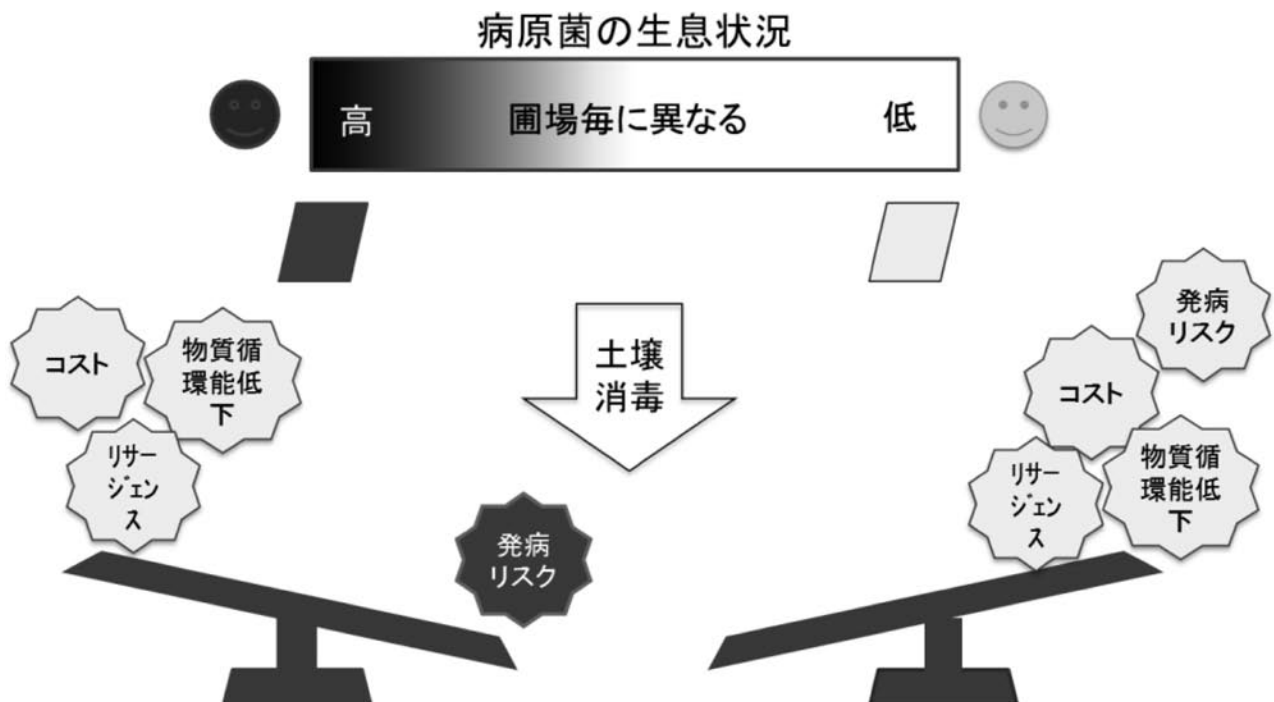
（2014年国際線虫学会Dow AgroSciences社の講演資料より）

い。不効化を防ぐにはどうしたらよいのか、使いすぎないに尽きる。前述のNoling博士によれば、2年に1回以内の使用が推奨という。

消毒剤や線虫に対する粒剤はいずれもきわめて効果的に連作障害の要因となる対象病害虫を抑制することができる。そのため、集約的な作物生産には欠かせない。それだけに薬剤を持続的に使用できるような配慮が必要である。具体的には、土壌中に生息する病害虫の密度に応じて薬剤防除を選択することが望ましい。オートクレーブやクロロホルムで処理し微生物数を減らした土壌にダイコン萎黄病菌やトマト青枯病菌を接種したところ、これらの病原菌は無処理の土壌と比べて爆発的に密度が増加した（豊田2005）。これを現場に外挿すると、完全に土壌を消毒し、病原菌を全滅することができればよいが、そうでない場合、あるいは、完全に消毒できたとして他から持ち込まれた場合には、消毒により土壌に無数に生息する土着の生物群を減らしてし

まったために、かえって病原菌が増えやすくなり、ひいては病気も起こりやすくなる可能性が生じる、ことを示唆する。こうした現象はリサージェンスと呼ばれ、多くの土壌病害で起きうる。病原菌だけでなく、サツマイモネコブセンチュウにおいても知られる。無処理あるいはヨウ化メチル処理後に二期幼虫を接種し、それらの死滅速度を比較したところ、供試した12土壌中9土壌において無処理区において速やかに死滅した（Pyrowolakisら2002）。つまり、土壌微生物が少ない土壌ほどネコブセンチュウが長期にわたって生きられることを示唆する。そのため、病害虫の生息が確認できる圃場を特定してから土壌消毒を行うことが望ましい。病害虫が生息していない圃場を消毒してしまうと薬剤使用にかかわるコストにとどまらず、薬剤の不効化やリサージェンスのリスクが高くなり、生産者にとってはまったくプラスがないことになりかねない（図2）。

図2 土壌消毒に伴うベネフィットとリスク



4. 土壌消毒の費用対効果に関する考察

経済的にどの程度の被害が予想される場合に消毒を行うべきか、だいこんとえだまめでこれまでに調査したので紹介したい。

だいこんでは、2m×2mを1区画として薬剤防除区と無防除区を3反復ずつ設けだいこんを栽培し、収穫時に区画内のすべてのだいこんの病斑数を計数した。この際、白い病斑1個で出荷価格約4割減、10個以上もしくは黒い病斑がある場合には出荷不可、栽植密度：10アール当たり8,000本、2L：8本/ケース、秀品：800円/ケースと仮定して推定出荷金額を算出した。その結果、無防除区で1本当たりの平均病斑数が1ヶ程度ときわめて汚染レベルの

低い圃場でさえ、D-D消毒もしくは粒剤処理すると病斑数は1本当たり0.2ヶ以下に低下し、推定出荷金額が10アール当たり12万円程度増加した（図3）。薬剤価格は2万円に満たないので、薬剤処理は生産者に着実に利益をもたらすといえる。無防除区で1本当たり何十もの病斑数が見られた高密度圃場の場合には、薬剤処理による効果はさらに顕著で、推定出荷金額は10アール当たりで30万円～50万円も増加した（図4）。したがって、だいこんのキタネグサレセンチュウ害を対象にした場合には、キタネグサレセンチュウがまったく生息しておらず、周辺からの持ち込みの可能性も低く、そのため線虫害が起きないと予想される圃場を除いて、薬剤処理は費用対効果に優れている。

図3 低密度汚染圃場におけるだいこんのネグサレセンチュウ害と10a当たりの推定出荷金額に及ぼす殺線虫剤の効果（和田さと子・豊田剛己、未発表）

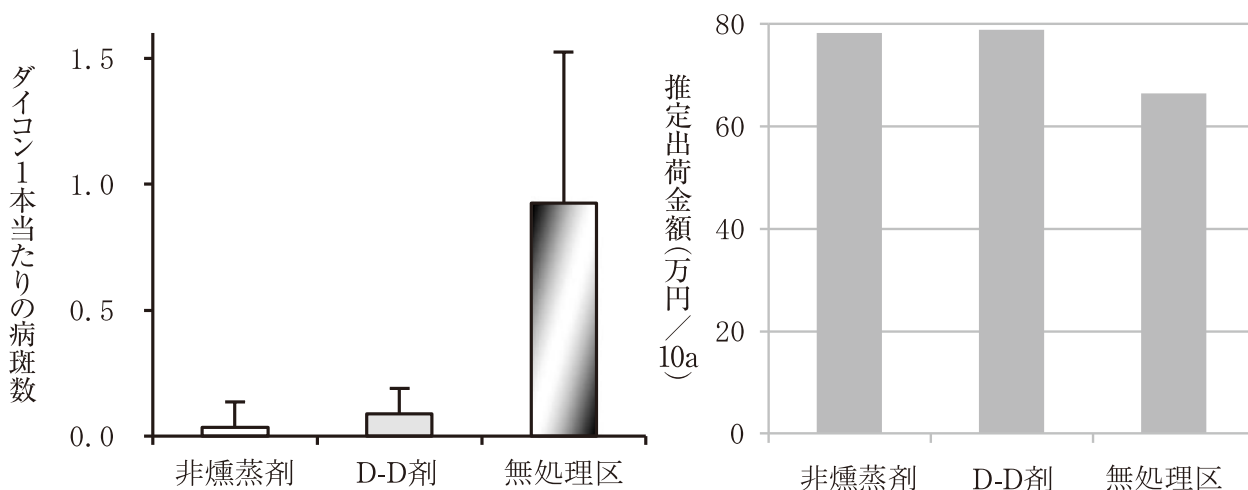
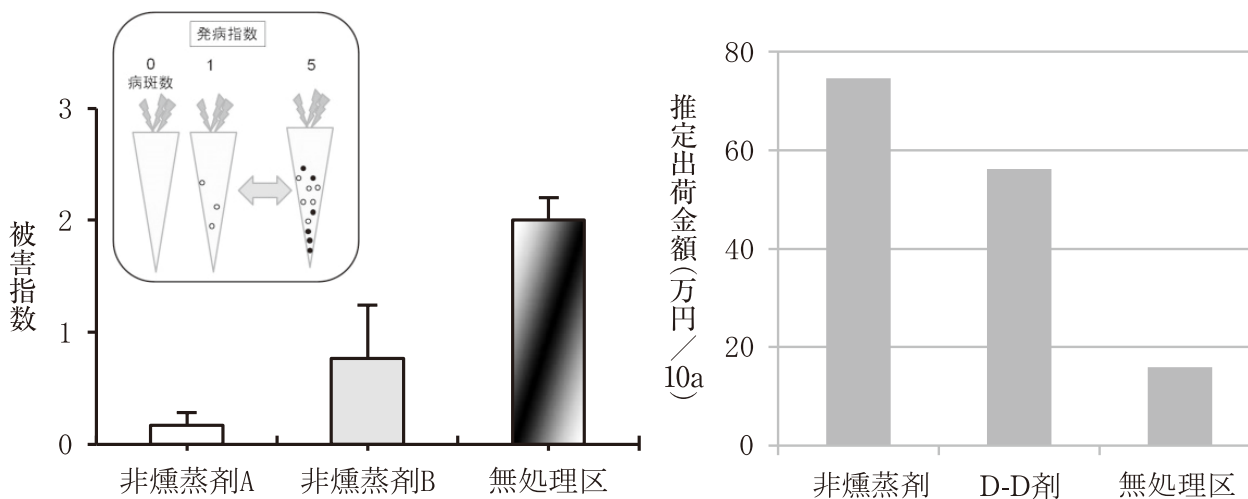


図4 高密度汚染圃場におけるだいこんのネグサレセンチュウ害と10a当たりの推定出荷金額に及ぼす殺線虫剤の効果（Wadaら2011）



千葉、埼玉、神奈川県の平均えだまめ収量は10アール当たり1トンである。東京都中央卸売市場の春～初夏の平均卸売価格＝800円/kgに基づき、生産者の出荷額を500円/kgと推定すると、10a当たり50万円の売上になる。収量が5%低下すると2.5万円の出荷額減、10%で5万円減、20%で10万円減となる。首都圏におけるえだまめ栽培ではダイズシストセンチュウ害が主要な生産阻害要因であるため、現在、埼玉県と共同してダイズシストセンチュウ密度に関する要防除水準策定に取り組んでいる。まだ論文投稿には至っていないが、5%減収ラインが土壌20g当たり200頭程度、10%減収ラインが400頭程度になりそうである。5%減収が予想される圃場では、予想出荷減少額が2.5万円に過ぎないため、薬剤価格1.5万円にプラス労力をかけて処理してもあまり費用対効果に見合わないことになる。また、ダゾメットやD-Dのような燻蒸剤の場合、効果を高めるためにビニル被覆が必要となる。そのため被覆用のビニル代(約3.2万円)や使用済みビニルの処理費用(約3千円)も必要となり、5%減収による出荷減少額以上にコストがかかることになり、10%減収程度でも費用対効果に見合わなくなる。したがって、線虫害を恐れるあまり保険的な意味もこめて被害が少なそうな圃場まで防除するのではなく、土壌中のダイズシストセンチュウ密度に応じて適切な選択肢を取ることが望ましい。

5. おわりに

土壌消毒剤は我が国の野菜生産に必要不可欠である。一方で、欧州では一部の消毒剤の使用が禁止されたり、米国では一般の生産者は使用できない、など、消毒剤には使用者や環境に対するリスクがあるのも事実である。そのため、農業使用基準に従い適切に使用するのはもちろんのこと、病害虫の汚染状況に応じて要否を判断することが望ましい。著者らは、収穫時の作物の収量や線虫害の発生程度が予測できるような、作付前の土壌診断法の確立を目指している。我々が定期的な健康診断を受けて健康に努めるのと同様、我々の食料生産の礎である土壌についても、安定した高作物生産を持続できるような土壌診断法を開発したい。

6. 引用文献

- Cao, A, Guo, M., Yan, D., Mao, L., Wang, Q., Li, Y., Duana, X. and Wang, P. (2013) Evaluation of sulfuryl fluoride as a soil fumigant in China. *Pest Manag. Sci.* 70, 219-227.
- Chung, K.Y., Dickson, D.W. and Ou, L.T. (1999) Differential enhanced degradation of cis- and trans-1,3-D in soil with a history of repeated field applications of 1,3-D. *J. Environ. Sci. Health Part B-Pestic. Contam. Agric. Wastes* 34: 749-768.
- FAOSTAT 2013 Available at [http://faostat.fao.org/site/567/](http://faostat.fao.org/site/567/DesktopDefault.aspx?PageID=567#ancor)
- Karpouzas, D. G., Karanasios, E. and Menkissoglu-Spiroudi, U. (2004) Enhanced microbial degradation of cadusafos in soils from potato monoculture: demonstration and characterization. *Chemosphere* 56, 549-559.
- Osborn, R. K., Edwards, S. G., Wilcox, A. and Hayclock, P. P. J. (2009) Potential enhancement of degradation of the nematicides aldicarb, oxamyl and fosthiazate in UK agricultural soils through repeated applications. *Pest Manag. Sci.* 66, 253-261.
- Pyrowolakis, P., Westphal, A., Sikora, R. A. and Becker, J. O. (2002) Identification of root-knot nematode suppressive soils. *Appl. Soil Ecol.* 19, 51-56.
- Ray, D. K., Mueller, N. D., West, P. C. and Foley, J. A. (2013) Yield trends are insufficient to double global crop production by 2050. *Plos One* 8, Issue 6, e66428.
- Ray, D. K. and Foley, J. A. (2015) Increasing global crop harvest frequency: recent trends and future directions. *Environ. Res. Lett.* 8, 044041
- 豊田剛己 (2005) モデル土壌中における土壌伝染性病原菌の個生態研究－ダイコン萎黄病菌とトマト青枯病菌を例に－。土と微生物 59, 45-52.
- Wada, S., Toyota, K. and Takada, A. (2011) Effects of the nematicide imicyafos on soil nematode community structure and damage to radish caused by *Pratylenchus penetrans*. *J. Nematol.* 43, 1-6.