



第 65 回土壌物理学会シンポジウム総合討論 「農業が直面する環境汚染」

西脇淳子¹・小島悠揮² (学会事務局)

Discussion at the 65th symposium:
Environmental pollution faced by agriculture

Junko NISHIWAKI¹ and Yuki KOJIMA²

本稿では、3名の講師による講演の後に行われた総合討論(司会:加藤雅彦)の様を、今後の学会活動の資料として掲載する。なお、討論の概略の記録を目的としたため、本稿著者らの判断により、発言の一部を省略または要約させて頂いた。

加藤 (司会)

まずは、シンポジウムの質疑応答にて時間が足りなかったものに関して進めさせていただきます。質問票では三名の方から質問をいただいております。会場におられれば、直接ご質問いただきたいのですが、西村先生はいらっしゃいますか。

西村 (東京大学):

山下さんにお聞きします。黒ボク土で水田をつくって PFAS を吸わせる、という話がありましたが、理解としては土壌有機物が多ければ、ということで良いのでしょうか。どうしてそのようなことをお伺いしたかという点、日本には黒ボク土でなくても有機物が多い土壌はありますし、黒ボク土の場合は pH によりますが、ポジティブな荷電を多く持っていることで、先ほど PFAS が陰イオン化しているという話の中で、陰イオンがポジティブな荷電にくっつくということもあるのかと思ったためです。その辺、もし何かあれば教えていただけますでしょうか。

山下 (産業技術総合研究所):

今おっしゃられたことですが、私は皆さんと違って単なるケミストです。純然たる分析屋なので、自分が出したデータに関してしか議論できません。わたしが測った黒ボク土、アンドソルではあのような結果となりました。なので、あの結果は分析化学の論文として現在印刷中ですので、分析化学の雑誌の状況を見ていただければ、論文として出ると思います。そこに、詳しいデータがあります。ただ、今おっしゃったところは、逆にわたしの方から土壌科学専門の方にぜひ検討していただきたいところで、土壌中での PFAS の挙動というのを知らないという正しい処理ができないということで、今みんなが困っ

ています。ゼネコンさんも、土壌処理をしたいけれど、PFAS がどこまで拡散するのかわかっていません。土壌中の挙動についてみんなわからないので、今おっしゃられたようにチャージになるか、あるいはゼータ電位が影響するのか、また、腐植質の影響など、その辺の影響をご専門の方に追求していただければ、わたしとしてはありがたいです。私自身はそれくらいの知識しかありませんので申し訳ありません。

西村 (東京大学):

最初からずっと、PFAS がどんな形で存在しているのかわからないままに皆さんのお話をきいていたんですけど、最後のあたりの話だと、基本的には水溶していると考えてよろしいでしょうか?

山下 (産業技術総合研究所):

そうですね。チャージです。

西村 (東京大学):

わかりました。ありがとうございます。

殷 (農業・食品産業技術総合研究機構):

追加でお答えすると、西村先生がおっしゃったように、黒ボク土であっても、深さごとに性質が異なってきます。当然、深く入れれば入るほど粘土層も存在します。農業サイトとして攪拌する時にコンバインが入る時は別ですが、ロータリーは大体 20 cm の刃で、有機肥料をいくら入れても表面 15 cm が攪拌するだけの話です。だから今西村先生がおっしゃったように、土壌の pH はオープンフィールドであれば雨水で当然変わってきますし、雨季になるとさらに変わっていきます。私の仮説ですけれども、大気、雨水、すべての影響を受けています。そこで、微量の濃度ですが、数多い種類の PFAS に関して各々の物質がどのように動くかに関しては、今後、特に日本国内に関して調べていくことは、我々の責務です。是非力を貸していただければ、一緒に何かできるかなと僕

¹ 東京農工大学 大学院農学研究院

² 岐阜大学 工学部

2024年2月8日受稿 2024年2月8日受理

は思っています。

西村 (東京大学) :

はい、ありがとうございます。

加藤 (司会) :

ありがとうございます。別の学会で土のデータを見た時に、PFAS の量とトータル炭素に相関があるというデータもあれば、あまりなかったというデータもあり、その辺もまだよく分かっていないのかと思います。おそらく、土中有機物の腐植物質の質のようなところも関連してきているのかな、と個人的には思っています。続きまして齋藤先生、お願いします。

齋藤 (東京農工大学) :

山下さんにご質問させていただきます。PFAS 自体いろいろな種類があり、汚染源が何か、特に泡消火剤など何か添加物があって、移動特性がだいぶ違うという話がありました。そうすると汚染源が何かによって、レメディエーションの方法も変わってくると考えた方がいいのでしょうか。それとも、移動特性はあまり関係なく、同じようなレメディエーションの方法でいいのかというところ、教えていただければと思います。

山下 (産業技術総合研究所) :

そういうところは多分ゼネコンさんが色々やっているとと思うんですが、私の分析屋の立場から言わせていただければ、溜まってしまえば、要は物理的に取り除けばいいということです。溜まっている中で、例えば、今国外で最先端の技術は電気化学的の反応で分解したいということでやられています。その場合は、やはりそのマトリックスごとに違う反応が起きると思いますので、そこはどういうマトリックスでどういう技術を使うかは変わると思います。単に、ガバッと取り去るのでしたら、あまり変わらないかもしれません。

齋藤 (東京農工大学) :

電気的なものは原位置でやるという理解ですか。

山下 (産業技術総合研究所) :

原位置、敷地外、両方でやっていますね。

齋藤 (東京農工大学) :

わかりました。ありがとうございます。

加藤 (司会) :

ありがとうございます。続きまして釣田様、いらっしゃいますか。

釣田 (森林総合研究所) :

山下さんに質問です。米作りってというのは土からの PFAS を除去するのに有効で、食べる部分にはあまり入らないで、食べない部分はバイオチャーみたいなものとしてまた活用できる、というようなお話と理解しました。そのバイオチャーというのは、土や環境中で使われるので、また汚染物としてかえってしまうのではないのかという風に思ったのですが、その辺はどんなイメージなんですか。

山下 (産業技術総合研究所) :

おっしゃっているのは、そのバイオチャーの中に PFAS が残るってということですか。

釣田 (森林総合研究所) :

はい。

山下 (産業技術総合研究所) :

それはいいです。既にその点に関しては試験をしてみましたけれど、トリポーラス (Triporous™) を作る段階で、元々もみ殻に残っていた PFAS はなくなるということが分かっています。なので、ライスプラントをバイオチャーにした段階で元々の PFAS はなくなりますので、それ以外の PFAS をあらたに吸収させることができます。この手法の 1 番いい点は、そのバイオチャーの焼却というのがすごく安定してできることです。例えば、一般の廃棄物を燃やして PFAS を分解しようとする、元に入っているガーベージがすごい量なので、全然安定して分解できないというような問題があるんですが、バイオチャーに吸着させてしまえば、反応はすごく安定なので焼却分解もやりやすいと思います。今のご質問に関しては、バイオチャーにした段階で PFAS は取り除くことができるので、それはどんな用途にも使えるんじゃないかと、個人的には考えております。

釣田 (森林総合研究所) :

ありがとうございます。

加藤 (司会) :

ありがとうございます。その他、もしまだ会場からございましたら、挙手をお願いします。

丸尾 (水俣病総合研究センター) :

山下先生と殷先生に質問させていただきます。PFAS の発生源ですが、人為起源で、消火剤であったり、工場や町であったりとかから出てくるというのは非常に分かりやすいんですが、それ以外に例えば、無機フッ素化合物が土壌あるいは環境中にあった時に、それが有機化されて PFAS ができることはないのでしょうか。

山下 (産業技術総合研究所) :

それに関しては、少なくとも今までの PFAS の研究で、環境中の無機のフッ素から PFAS ができる反応というのは、私の知る限りは報告されておられません。

殷 (農業・食品産業技術総合研究機構) :

先ほどの私のイントロでも紹介したのですが、今も何万種類というように規制がかかっている中で、次々官能基を変えて関連化合物が出来上がっています。いちごっこみたいに、制限してもまた新しい化合物が構成されるというようになってます。特に私たちの調査した日本のデータを見ると、PFAS は半導体で多く使われております。アメリカが生産を止めた後は、中国が主に PFAS 関連化合物を生産しています。これは、非常に残念なことです。世界的に PFAS の工業的な需要はまだあります。皆さんご存知ないと思うのですが、今現時点の中国において PFAS がどこで 1 番使われているかというと、クロムコーティングで、コーティング産業において非常に使われています。結局、発生源というのはあらゆるところから、ということと、山下先生からも紹介があったように、大気を通して来るし、雨水を通して、分子量が比較的到低いものなので、国境を超えて近隣諸国に降ってきます。PM 2.5 も隣の国から降って

くるように。将来的には、産業的に需要がなくなる限り、永遠に新しい PFAS が降ってくるかなと思っています。

また、先ほどの無機フッ素からの新たな PFAS 生成というのは可能性はゼロではありません。ゼロではありませんけれども、非常にごく微量です。例えば先ほど僕が周期律表で示したように、炭素とフッ素との共有結合ができるためには、いろんな触媒反応とかリアクションが必要ですが、環境中で光や金属によって生成される可能性はゼロではありません。以上で答えになってますか。

丸尾（水俣病総合研究センター）：

ありがとうございます。大変勉強になりました。

加藤（司会）：

その他いかがでしょうか。無いようでしたら、総合的なところに入っていきたいと思います。私は土壌物理学会 2 年目でまだ土壌物理学会のことを分かっていないのですが、やはり土壌物理という吸着とか移動とか、あるいは農学系を主体にしてるので、それが食物にどう吸収していくかということに、皆さん結構興味があるのかなと思っています。

そこでまず丸本先生にお聞きしたいのですが、ブラジルのデータで、砕石・精製作業現場のすぐ近くの貯水池、流れの入り口となる部分の水中の濃度が高くて、土の方は低かった一方、出口では土の濃度が高かったという内容があったと思うのですが、入口側に砂が多かったのか、たまたま分析でメチル水銀の濃度が低く出たということなのか、メチル水銀の移動性に関して吸着と移動というあたりはどのようなかたちでしょうか。

丸本（水俣病総合研究センター）：

ご質問ありがとうございます。きちんと粒径などを測ってないので何とも言えないのですが、1 番作業現場に近いところの貯水池は砂地になっていたので、グラムあたりの吸着が起こっていなかったのかもしれない、というのはあります。作業してすぐ取った水ですので、かなりの水銀が流れ出ていた時に採水したということですが、土壌や堆積物は同じぐらいの時期に取りましたが、今までのものが蓄積してるということです。現地の作業者もどのあたりに水銀が蓄積するかを理解していて、沈下・堆積させた後に貯水池を埋めて、蓋をして処理したことにしています。一応、その水銀はそこで止めたということです。作業してる間は池が必要で、どんどん水を流すから水中の濃度は下がって行き、水銀は重いので下に溜まるということを彼らも分かっていた作業しています。水で出ていく分はごくわずかだという風に考えて行っていますが、わずかでも一般の濃度よりは高い、ということは分かっています。ご質問の回答としては、どちらかという、吸着というよりは重力の影響が大きく、重金属として溜まってるという気がします。

加藤（司会）：

その溜まったものは、分子量も結構大きいですし、植物にはあまり利用はされないという理解でよろしいですか。

丸本（水俣病総合研究センター）：

無機水銀なので、根からはほぼ植物には入らないですね。大気からは、一応蒸散に伴って呼吸と CO₂ 放出をしたり、気孔から出し入れをするので、葉っぱとかには結構溜まってるとですね。植物の葉っぱを使ってバイオモニタリングということで、その地域の水銀の暴露量を測っている人もいますので。そういうところでは、植物にも蓄積はしています。

加藤（司会）：

般先生だと思うのですが、PFAS は、黒ボク土に 80 % ぐらいくっついていてるけれど、稲も PFAS を吸うという話がありました。それは、吸着されているものは稲に吸われにくいのか、水に溶けてるものが吸われるのか、あるいは吸着してるものが脱離して吸収の方に向かっているのか、土から植物への移行に関する知見というのは、どれぐらいまで進んでいるものなのでしょう。

般（農業・食品産業技術総合研究機構）：

残念ながら、直接的な証拠はまだありません。しかし、今年から走っている農水省のプロジェクトの中で、我々は目ぼしをつけています。私は元々ダイオキシン研究から始まった研究者なんですが、PCB に関して何がダイオキシン類を植物に引っ張りあげるのかという研究を行ったことがあります。その時にラテックスライクプロテインという、植物にあるタンパク質が、ダイオキシンのような有機物を上まで運ぶトランスポーターということが発見されました。全く同じ発想で、PFAS がどうやって地上部の植物まで運ばれるかということを見つけておきます。それがもし発見されれば、世界的に初知見になります。植物の中では根っこから、土壌水からその化学物質を運ぶトランスポーターが明らかになると期待して研究を行います。それ以外にも先ほどから私の仮説の図を見せていますけれど、単なる土から地上部へ上がるわけではなくて、大気や雨水など総合的に地上部に蓄積します。人間も一歩外に出れば、大気や雨水など、全て呼吸しながら暴露されていますけれども、同じく総合的に観察しないとわからない、みんな単純化するのが好きなんですが、実際はそんなに単純ではないかなと僕は個人的に思っています。丸本先生が研究されている水銀の話もそうなんですけれども、一言で全てを語ることはありえないと僕は思っています。

加藤（司会）：

作物種によっても、吸われ方が違うんですか。

般（農業・食品産業技術総合研究機構）：

違います。実際今日は時間がなかったので詳しく申し上げていないのですが、例えば葉菜類、葉っぱものに関しては、ほとんど外に出された状態で成育されるので、常に大気からのデポジションを表面に受けています。葉菜類の場合は、よく見ると表面にワックス層があります。ワックスがあるというのは、水に溶けにくい有機物はそこに溶け込んでずっと存在します。だから単なる根っこから吸い上げた物がそこに蓄積されるわけでもなく、大気や雨水からのデポジションをそのまま受けている作物なので、この作物はこういう傾向がある、あるいは果菜

類は、皮は外からの影響を受けますけれども、中身は樹液によって蓄積された化学物質に影響されやすいというように、仮説を立てて研究に取り組んでおります。

加藤 (司会) :

ありがとうございます。いかがでしょう、フロアから何かございますか。

坂井 (三重大学) :

丸本先生にお伺いします。水銀が池の底に沈んでいるという話ですが、水に溶けなくても水と一緒に流れて土壌を汚染する、地下水を汚染するということが起こり得ると思います。そういう土壌地下水汚染の改善に対する取り組みはされているのでしょうか。

丸本 (水俣病総合研究センター) :

ブラジルではやられてないとは思いますが、一応土壌中の水銀を除く技術はあります。水俣病総合研究センターが開発した方法で、水銀は 300 °C 程度で揮発するので、土壌を 300 °C 程度まで加熱すれば、土壌としてのその機能は維持したまま水銀だけを除去できる技術が今開発されています。しかし、なかなか実用化まではいっていきません。結局は水俣湾と同様に封入したまま置いておくことになっています。今、水俣湾は鋼矢板セルに泥を全部入れて管理しているところですが、その中の水銀を除去するという話にはまだなっていません。置いておけば動かないだろうということになっています。ブラジルなどは地下水もかなり多いので恐らく流出しているのだらうと思います。また水銀の性質によっては土壌に吸着したまま存在していて、一部が水に溶けてダラダラと漏れているという状況になっていると思います。けれども大半は吸着したまま、時間をかけて出ていくということで、対策は必要だと思いますが、水銀を除去しようという気運は高まってない状況です。

加藤 (司会) :

もう少し広い話を私はさせていただきたいと思えます。今、肥料などの価格が高くなってきていて、日本は資源を持っていないので未利用物質を使っていきたいという流れになってきています。例えば私は下水汚泥などを研究していますが、有効に使っていきたい反面、汚泥にも PFOS/PFOA が含まれているだろうと言われていて、またマイクロプラスチックなども含まれていると言われていて、そうした未規制物質も含まれている中で未利用物質を農業に使っていくということが、日本の農業にとって良いのか悪いのか、あるいはどのように扱っていくべきなのか、コメントを頂けないでしょうか。

殷 (農業・食品産業技術総合研究機構) :

私たち土壌だけではなく全ての媒体をやっている立場としてみると、汚泥や底質というのは最後の最後に蓄積される場所です。廃棄物の最後の墓場というか、人類が産み出した全ての良いもの、悪いものが重力によってそこに集約されます。そこで化学から見ると平衡反応、要するにエントロピーが安定する状態に向かうので、平衡に達するために媒体である水や大気と交換反応が起きます。グラスホッパーエフェクト (grasshopper effect) というものがあって、赤道を中心にして地球が自転するたびに化学物質が極地方に流れていくんですね。分子量が

500, 600 ぐらいのものが、北極のペンギンとか水とかでも検出されます。そこでは PFAS やダイオキシンを合成して使っていないのにも関わらずです。地球上にいれば自分のところは安全だろう、安心だろうということはまずなくて、化学物質というのはあらゆるところに影響を及ぼすということは考えておいた方がいいと思います。さらに汚泥とか底質になると水生生物との絡みもあるので、今後さらに手を入れなければならない複雑な宿題だと思っています。

加藤 (司会) :

ありがとうございます。人間活動によって出てきた汚泥を人間が食べる場所に戻していくというのは一つの循環かもしれませんが、それが本当にその先の人の健康にとっていいのかわかりかねると思います。質問させていただきました。

西脇 (東京農工大学) :

PFAS, 水銀両方についてお伺いします。環境中で移動しながら時間と共に毒性が上がっていくなどの形態変化というのはあるのでしょうか。

殷 (農業・食品産業技術総合研究機構) :

現時点で存在している化合物、プリカーサー (前駆体) が変化して別な物質が生成されるということがあります。これはいきなり変化するわけではなくて、例えば触媒反応なり光反応なり、色々な反応によって変わってきます。有害化学物質の無害化にはいろいろな挑戦してきました。PFAS では、PFOA というのは炭素数が 8 のものですが、例えばそれより長い炭素数が 16 や 18 の物質がたくさん含まれる廃棄物を無害化するために、ある種の超臨界や熱分解をした場合に、そこまで毒性がなかった物質から逆に PFOA とか PFOS が生じることもあります。そういう結果が出た場合は非常に悩ましくて、また別の手法を取るしかないのですが、常に色々な可能性があるんで、無害化は念を入れて検討することが重要です。実際 PFAS の分解に関しては、今高温での焼却で無害化をしていますが、その中でも今分かっている PFAS も発生するのですが、全然分かってない物質が PFAS として出ます。無害化のプロセスの中でも、未知の物質について解明し、どのように処理・対処していくのか検討することも非常に難しい課題であります。是非大学の先生を含めて考えていただきたいと思えます。

西脇 (東京農工大学) :

ありがとうございます。水銀についても伺ってよろしいでしょうか。

丸本 (水俣病総合研究センター) :

水銀は何千種類も化合物があるわけでもないですが、無機か有機かでかなり毒性が変わります。特にメチル水銀になると毒性が飛躍的に上がります。メチル水銀でもメチル基に結合している反対側が何と結合しているかで、水溶性になったり脂溶性になったりしますので、その辺の形態変化が環境中で起こるところが水銀は注意しなければいけません。メチル水銀を海洋生物はたくさん摂取しているのですが、彼らは脳障害とか起こってません。その理由として、彼らはメチル水銀を無機化する時にセレンと水銀を結合させてセレン化水銀として体内

に蓄積して無害化するという防御機構を持っているのではないかと考えてます。水銀の場合は硫化水銀になると不溶性になって水に溶けなくて、埋設すれば殆ど移動しないとされています。ただ光が当たると多硫化物になって、また金属水銀になったりしますので、水銀だけ見ても色々な形態に変化して、毒性や挙動、水の溶けやすさも変わっていくので、PFAS のように何千種類もあれば相当大変なことになると思います。

ところで、日本の環境物質研究がなかなか進まないのは、日本の対策にブームがあるためです。今はマイクロプラスチックとか PFAS がブームになっていますが、5、6 年前は PM 2.5 だったりしました。問題はそのブームが過ぎた後に殆どの研究がストップしてしまうことです。環境化学物質の問題は対策やモニタリングが重要になるので、長いスパンで考えないといけないのですが、金の切れ目が縁の切れ目になって何にもしなくなるのが非常に多くて、持続的な研究ができないことは非常に問題があると思っています。

加藤（司会）：

最後に今回のシンポジウムのテーマを立ち上げられた登尾会長から総括をして頂きます。

登尾（会長）：

3 人の先生方本当にありがとうございました。とても楽しく刺激的に聞かせていただきました。土壌物理学会なので土壌の物理性や土壌中あるいは多孔質体中の物質やエネルギーの移動に多くの興味を持たれてる方々が多いと思います。その中でも本日扱ったようなガス態で動く物質だったり、水溶性で動く物質もありますので、環境中の物質移動にご興味がある方にとっては示唆に富んだお話が聞けたんじゃないかなと思います。

最後に丸本先生がおっしゃったように、流行りすたりで金の切れ目が縁の切れ目ということで、特に大学の研究は科研費が取れないとなかなか進められません。科研

費の採択もその時々審査員がどう思ってるかに大きく依存すると思います。同じようなテーマを出していても審査員が変わると採択してもらえたことや、その逆に審査員が変わってこのテーマはもう採択されなかったんだなど思うことも感触だけですがあります。科研費のない中での研究の継続はかなり難しいとは思いますが、長期間にわたって環境中の物質の移動を追いかけ、どのように環境中で循環してるのか、あるいは循環せずにどこかに溜まっていつてるのか、あるいは消失してるのか、ということが分かると、土壌物理の研究の幅というか、触手が広がっていきます。そうすると色々なところと共同で研究できたり、あるいは研究資金を獲得できる機会が増えたりすることもあると思います。

今回この御三方をお呼びしたのは、今特に PFAS の問題がブームになってきたので、実態を専門の先生方に説明してもらって皆さんにも知ってもらいたいと思ったからです。それから丸本先生も最初のご講演の中でおっしゃいましたが、関西の方の水俣病の訴訟が裁判でずっと争われています。水俣病の訴訟の話がニュースで上がってくるたびに、まだ終わっていないんだという感覚を持ってました。実際に環境中の水銀はまだまだ危険なレベルなのか、どのくらいまで低下したのかというのを聞きしたかったので丸本先生に来ていただきました。実は私が知りたいがためにお呼びしたというのが正直なところですが、皆様も新たな知見を少しでも得られていただけたんじゃないのかなと希望します。最後まで残っていただきました皆様、遠いところからお越しいただいた先生方、どうもありがとうございました。

加藤（司会）：

これをもって第 65 回シンポジウムを閉会させていただきます。最後にご講演いただいた 3 名の方に大きな拍手で締めたいと思います。ありがとうございました。

（敬称略）