

私のRI 歴書

植物における物質の輸送と貯蔵を追いかけて

茅野 充男

Chino Mitsuo

(東京大学名誉教授, 秋田県立大学名誉教授)



1. 専門分野

私の専門は植物栄養・肥科学である。簡単に言えば、植物が土から養分を吸収し、生育する様子を生理学的に解明し、植物収益の増加と農地の環境保全の両立を目的とした科学である。このような分野で私は養分元素や有害元素が土から植物に吸収され体内を各部位に輸送される状況や、元素の分布状況の解析にRIや特性X線を調べた。この研究のおかげで、宮地重遠先生（東京大学名誉教授）がまとめられた朝倉書店刊行の「植物生理学講座」全5巻の中で、「物質の輸送と貯蔵」（1991年発行）という経済書のようなタイトルの本の編著を担当した。この種の本がその後出版されていないのが残念である。このような研究にRIや放射線が有用であるということを知ることで、自分の研究の自慢のようなことにもなるがやむを得ないご理解いただきたい。

2. 職歴, 学外委員, 日本アイソトープ協会 専門部会

職歴を簡単に記すと以下のようなものである。

1960年に農林技官として農林省農業技術研究所に入所, 1965年に茨城大学農学部助手, 1970年に新潟大学農学部助教授, 1975年に東京大学農学部助教授, 1997年に東京大学教授の職を定年で辞し, 1999年に新設の秋田県立

大学生物資源科学部教授として赴任し, 2007年に定年退職した。

新潟大学時代及び秋田県立大学時代には放射線取扱施設の新設認可を経験し, これらの大学と東京大学では学部施設の取扱主任者も兼務した。

放射線科学関連の学外委員も務めた。3年程度務めた委員を列挙すると, 1) 日本アイソトープ協会ライフサイエンス部会長, 2) 日本原子力研究所高崎研究所嘱託研究員（植物におけるポジトロンエミッターのトレーサー研究グループ）及び放射線フロンティア研究委員会専門委員及び施設利用協議会専門委員, 3) 学術会議原子力基礎・放射線科学研究連絡委員及び核科学総合研究連絡委員, 4) 環境科学研究所特殊気象影響検討委員である。

日本アイソトープ協会ライフサイエンス部会では部会長として, 食品照射の普及, ペット動物や家畜へのPET診断の導入, 生態系でのRIの動態解析などの難問題を議論した。個人的には生態系でのRI挙動解析に強い関心があったが, 規制が厳しく全く進展しないままとなった。しかし, 今でも, 例えば福島で¹³⁷Csの自然生態系での動態を危険のない範囲で追跡できる地区を保存することも必要ではないかと考えている。福島ではRIは全くキャリアフリー（無担体）で挙動するので, 量的に圧倒的に大きな通常の化学元素の動態追跡とは大きく異なる

ると予想され、不謹慎な表現かもしれないが学問的には大きな興味がある。

ライフサイエンス部会では原子力研究所高崎研究所（当時）の久米民和博士（現在、ダラット大学原子力工学科 教授）と面識を持ち、植物のポジトロンエミッター利用開発プロジェクトにも参加し、秋田県立大学での重要な研究テーマの1つとなった。また、同博士が中心となった原子力利用を除く放射線利用の経済効果についての調査研究プロジェクトにも農業分野から協力し、放射線が農業分野でも大きな効果をもたらしていることに驚かされた。

3. RI 及び放射線（特性 X 線）関連研究

研究では、植物体内外での元素の挙動追跡のためにトレーサ実験や元素の特性 X 線による元素分布を調べた。年代を追って研究内容をオートラジオグラムなどの写真を中心に紹介したい。

3.1 重金属障害による鉄の吸収輸送の低下

最初の就職先の農業技術研究所で与えられた研究テーマはイネの銅障害に関するものであった。当時大きな問題となっていた渡良瀬川水系水田の銅障害防止のために灌漑水質の Cu 濃度の許容基準を決める基礎データ提供であった。農用地土壤汚染防止法制定の 10 年前で、環境省もない時代であり、灌漑水質の基準は水質汚濁防止法によって定められた。農林側の委員であられた恩師の故 三井進午先生（東京大学名誉教授）が私の研究データがそこでの議論に大いに役立ったと褒めてくださった。さて、研究では、周期律表の 3d 族遷移元素の 5 元素、Cu, Ni, Co, Zn, Mn の毒性を比較研究する形で進めた。結果、これら金属の毒性の強さが当時ライナス・ポーリング博士らの提唱した元素の電気陰性度の大きさ（化学結合論）に従っていること、これら元素の植物体内での根から茎や葉への移動性も毒性の順序に従うこと、すなわち、毒性の強い Cu は根にとどまる割合が多く、毒性の弱い Mn は葉に移動しやすいことが判明

した。同時に、これらの重金属が Fe の根から葉への移動を阻害し、葉にクロロシス（黄変現象）を生じていることを立証した。すなわち、重金属（Co, Cu, Mn）を過剰にイネに与えるとイネの葉への ^{59}Fe の移動が減少する。写真 1 のオートラジオグラムは左から、Co 処理、無処理、Cu 処理、Mn 処理した際の葉への ^{59}Fe 分布である。Co, Cu の過剰処理によって葉における ^{59}Fe 分布が減少する。このような Fe の移動阻害は Fe と Co などが根に同時に与えられたときのみで、事前に Co, Cu を過剰処理しても、 ^{59}Fe 移動の低下はない。これらの成果を基にして恩師から博士の学位をいただいた。

3.2 XMA による元素分布解析

1970 年に新潟大学農学部部に転任したが、その頃に共同利用機器として X 線マイクロアナライザー（XMA）が歯学部部に導入された。そこで、イネの根の周辺土壌とイネの内部での元素の分布を調べることにした。土壌中に伸展するイネの根を土壌とともに樹脂で包埋し、それを薄切して、表面を研磨し、土壌中に伸展する根の縦断面図を磨き出し、その形態を 2 次電子像で、また、元素分布を特性 X 線解析で調べた。写真 2 は土壌中を伸びる根の縦断面であるが、根の径は 1 mm 程度である。このような写真は世界にもほかになかったのでアメリカの土

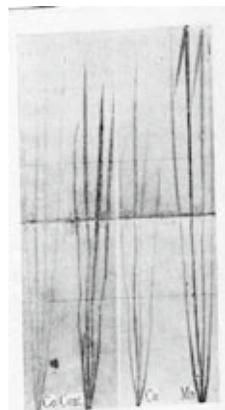


写真 1 左から Co 処理、無処理、Cu 処理、Mn 処理イネ葉における Fe⁵⁹ 分布

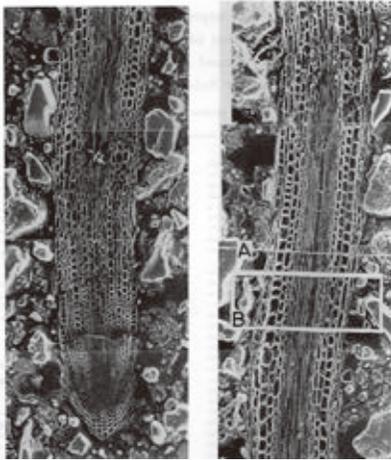


写真2 土壤中に伸展するイネの根縦断面
(左から右に続く, 根径 1 mm)

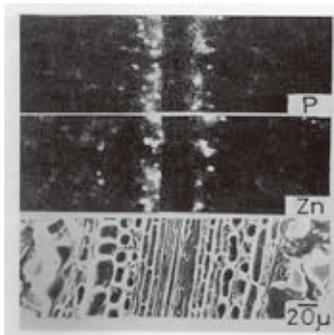


写真3 写真2のB画分(下部)におけるP(上部)とZn(中間)の特性X線

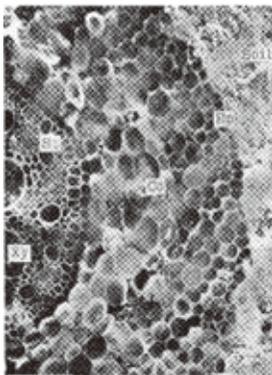


写真4 土壤中に生育するトウモロコシ根の横断面

壤学のテキスト (The Nature and Properties of Soils, Ninth Edition, by N.C. Brady, 1984, MacMillan Publishing Co., N.Y.) に掲載された。写真2のBの画分でのZnとPの分布を調べたのが写真3である。いずれの元素も根の外には検出されないが根の中心柱の周辺部分に多く蓄積している。根ではこの部位辺りが養分を多く吸収していると思われた。

東京大学農学部へ転任してからもXMAの研究を継続した。イネの根の成長している土壤円柱を凍結し、これを走査電子顕微鏡内の試料台上に固定してそこで横断し、横断面の像(写真4)を観察しつつXMA解析した。この写真4は土壤中に生育しているトウモロコシの根の横断面とその周辺の土壤の走査電子顕微鏡図である。根と土が密に接触している様子が伺える。この根の一部におけるCaの分布及びKの分布を示すXMA図が写真5である。K(写真5(a))は土壤中にほとんど検出できないが根内に濃縮されている。Ca(写真5(c))はKと逆に土壤中に多く存在するが根内では少なく、わずかに細胞壁に検出される。

3.3 Rhizoboxによる根近傍での重金属移動解析

根の周辺における元素分布は別の装置を考案しても調べた。それがrhizoboxと命名した箱である(図1)。植物を育てる箱に土壤を充て

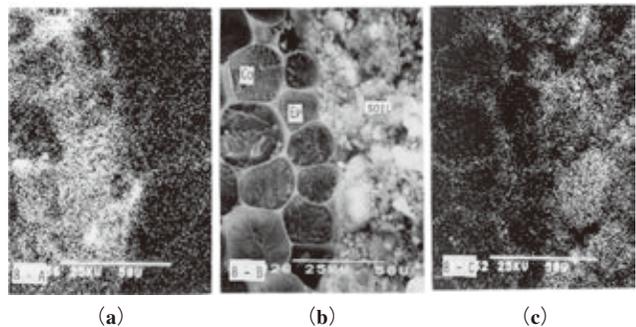


写真5 写真4のトウモロコシ根表層部分と周辺土壤のK, Caの特性X線分布
(a) K分布, (b) 特性X線分析部分, (c) Ca分布

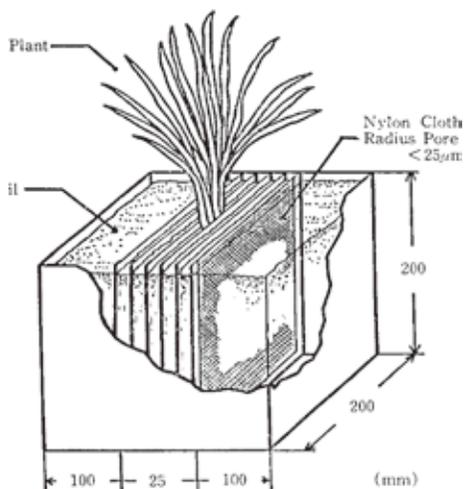


図1 開発した rhizobox 模式図 (土壌を 1 mm 間隔に 2.5 μ 系のナイロンメッシュで仕切りその間に土を充填し、中央の厚さ 2 mm の植物栽培区画を設定。根はメッシュを超えず、水と養分は移動可能)

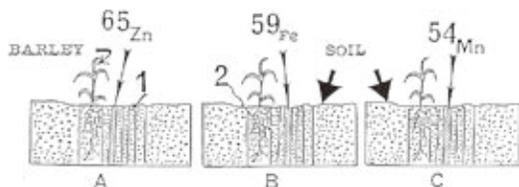


図2 Rhizobox の中央画分にオオムギを育て 2 mm 離れた画分に ^{65}Zn 、 ^{59}Fe 、 ^{54}Mn をキャリアーとともに添加し移動を 3 か月調査

んし、1 mm の厚さごとに樹脂製の 2.5 μ メッシュのネットと土壌を区切った区画に分けた装置である。

このような装置でオオムギを 3 か月育てたが、この際、図 2 のように根から 2 mm 離れた区画に ^{65}Zn 、 ^{59}Fe 又は ^{54}Mn をそれぞれのキャリアーとともに添加して根の周辺でのこれらの RI の移動性を調べた。これら重金属 RI は 3 か月掛けても 1 mm 程度離れた隣接区画に移動しないことが明らかになった。重金属の土壌での拡散係数が非常に小さいためである。重金属を吸収するためには根が伸びて、近傍の重金属を溶解して吸収していると推定された。当時中国

の土壌関連の研究者が興味を寄せてくれて、中国で出版された農業百科事典に私個人と rhizobox が紹介される名誉をいただいた (中国農業百科全書、農業化学巻、1996、北京、農業出版社)。

3.4 Cd の穂への移動

東京大学在任中には、Cd が根あるいは葉から吸収されて穂への移動集積する状況について ^{109}Cd を用いて調べた。葉からの移動を調べた理由は、Cd の沸点が比較的低温 (750°C 程度) のため、工場などの煙突から大気に揮散し、イネに吸収されるということが問題となり、その可能性を調べた。当時、さる放送局が本当に大気中の Cd がイネに吸収され、コメに移動するのは事実であるか知りたいということで行った。イネが生育し体内に穂が形成され伸長する。その時期にイネに ^{109}Cd を根や葉から吸収させた場合のオートラジオグラムを写真 6 に示す。写真の右は根から ^{109}Cd を吸収させたときであり、左が葉に塗布したときである。驚いたことに ^{109}Cd は根から吸収させても葉から吸収させても穂に優先的に移動蓄積すること、根から吸収させると節の部位に多く蓄積することが判明した。植物体内で根から上部へ物質が移動する際は導管を昇るが穂に移動する管は篩管である。根から導管を移動してきた ^{109}Cd は節のところで篩管に移ってから穂へ移動する。イネの節には導管から篩管へ物質を輸送する転送細胞が発達している。しかし、葉で吸収された重金属が移動するときは葉の篩管に入り込み篩管内を移動して穂に至るので節の部分での転送細胞を経由する必要はないので節にはあまり集積が見られないと推定される。このように、幾つかの物質は植物体内で最も成長し代謝の活発な部位に優先的に移動することが示された。Zn や Cd の穂への取り込まれやすい時期を調べると穂が形成された時期から、出穂 10 日経過した穂の成長率の高いときであることも RI を用いたトレーサ実験で証明された。

なお、日本にはゴミ焼却施設が世界で最も多



写真6 穂が出ているイネに¹⁰⁹Cdを葉から吸収させたオートラジオグラム(左)と根から吸収させたオートラジオグラム(右)

いといわれるほどたくさんある。これら施設ではダイオキシン発生防止のために850℃以上で焼却する。したがって、Cd揮散防止が必要であるが、完全かどうか疑っている。日本人のCd摂取量が世界でトップクラスである理由の1つではないかと想像している。

3.5 篩管液の採取と分析

さて、穂への物質の移動は篩管を通してなされるので、この管の中を流れる液、いわゆる篩管液の採取を試み、この中を流れる物質を調べたくなった。写真7は、イネの篩管に吸汁管を差し込み、篩管液を吸収して成長するトビイロウンカがイネの葉に吸汁管を挿入している状況(写真7(a))とこの吸汁管をレーザー光線で切断した時に切断した管から溢泌する液(篩管液)(写真7(b))を示した。

数μLの篩管液のN以外の無機成分分析ではKが最も多く含有され、次いでMgで、重金属ではZnがほかの重金属より高い値を示した。篩管内を移動しやすい重金属としてZnがあり、移動しにくい元素としてCa, Mnがあった。陰イオンではClが圧倒的に多く、次いでPO₄, NO₃, SO₄がこの順に少なくなった。篩管液のpHは7以上なので、FeやZnなどが沈殿しな

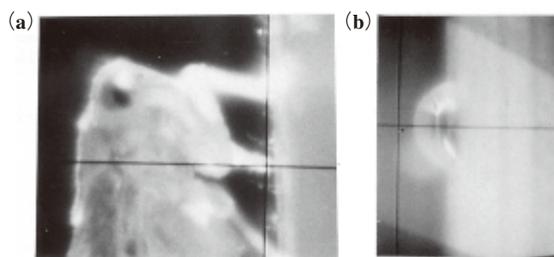


写真7 イネの葉から篩管液を吸汁しているトビイロウンカ頭部(a)と吸汁している口針をレーザー光線で切断して口張り切断面から溢泌する篩管液(b)

いで輸送されるのは液中に多く存在するアミノ酸などとキレート化合物になっていると推定される。各元素のRIトレーサ実験を試みたかったが、あいにく、レーザー機器類をアイソトープ実験室に設置することが不可能で諦めた。この手法を利用して将来トレーサ実験がなされることを切に望んでいるので紹介した。この成果はソビエト連邦(当時)のTimiryazev Institute of Plant Physiologyの所長のA.L. Kursanov博士の有名な著書“Assimilate Transport in Plants”に引用された。UNEP(国際連合環境計画)の会議がソ連黒海沿岸で開催され、モスクワを訪問したとき、研究所に招待された。その折、研究を引用していただいた御礼を申し上げ、ついでに同研究所のフロリゲン(florigen)研究のミハイル=チャイラヒャン(M. Chailakhyan)博士の研究の将来性について伺ったがポジティブな応答はなかったのが今でも思い出される。

3.6 PETISによるイネでのCd吸収輸送

東京大学を定年で退官し、新設の秋田県立大学に移籍したが、その頃から日本原子力研究所高崎研究所(当時)の久米民和博士がリーダーとして始められたポジトロンエミッターによる植物体内の元素移動解析プロジェクトPETISに参加した。そのおかげで、秋田県立大学の我が研究室に赴任された中村進一博士(秋田県立大学生物資源科学部准教授)と高崎研の久米博士の下に教え子の藤巻秀博士(日本原子力研究開

発機構，量子ビーム応用研究センター研究グループリーダー)が採用されていて，協力してCdのイネ体内での移動解析研究を始めた。 ^{107}Cd が根から吸収され始めてから数分の単位で地上部に至る様子を動画で見ることができ，大いに感激しつつ秋田県立大学を定年退職した。

4. 終わりに

放射線関連中心に，これまでを振り返ってみると，植物における物資の輸送・貯蔵にはまだ

まだ多くの興味あるテーマがあると思います。RIを用いたトレーサ解析が更に盛んになされることを祈っております。名前を省略いたしましたが，研究生活では数多くの先生方よりご指導を受け，また研究室の教員，技師，学生，院生にお世話になりました。改めて御礼申し上げます。最後に，研究生活をRI，放射線という面から改めて思い出す機会を与えられたことに大いなる感謝を申し上げ終わりとします。