

植物による鉛の吸収と移動 — 植物内の物質変化の研究における放射性指示薬の応用への寄与

The absorption and translocation of lead by plants - A contribution to the application of the method of radioactive indicators in the investigation of the change of substance in plants

Hevesy G*. *Biochem J.* 17:439-445, 1923

植物による鉛の吸収の研究は、鉛の放射性同位元素を含む溶液に植物を浸し、植物各部の灰の放射能を測定することにより、いたって容易に行なうことができる。その簡便さと迅速さに加え、この方法は次のような利点を有する。(a) 通常の鉛と放射性の鉛を適当に混合することにより、溶液の鉛濃度を広い範囲で任意に設定できる。1N 溶液からの鉛の吸収は、数百万倍稀釀した溶液でも同じように追跡できる。(b) 植物により吸収された鉛の局在を追跡することができ、従ってその組み合わせの性質に関して知ることができる。

本稿に記載した実験は、培養液中で成長した植物を蒸留水で洗浄し、根を 1~48 時間、硝酸鉛と硝酸トリウム B [→訳注 1] の混合溶液に水浸して行なった。ほとんどは、ソラマメ (*Vicia Faba*) を用いた。水浸後、植物の各部位をまず蒸留水で洗浄し、燃焼させ、灰の放射能を検電器で測定した。その強度は灰中の鉛濃度を直接表しており、従って水浸液中の放射能と鉛濃度がわかっていれば、各部位の鉛濃度を知ることができる。

トリウム B は、トリウムエマネーション [→訳注 1] の壊変物質で、非常に簡単な方法で得ることができる。白金箔を 110V に陰荷電し、ラドンを生成した溶液 (放射性トリウム、トリウム X [→訳注 1] など) を容れた容器内に入れておく。この状態ではトリウム B が白金箔の表面に集積するので、これに稀硝酸数滴を加えて取り出すことができる。このようにして調製された鉛溶液の規定度は 10^{-12} であるが、これを大きくしたいときは既知量の硝酸鉛を加えれば良い (トリウム B は鉛の同位であり、すなわち化学的性質は鉛と同等である)。例えば、この方法で 10^{-6} N の硝酸鉛溶液を調製し、蒸発、乾燥後の放射能が 10,000 単位であったとすると、それぞれの 1 単位は鉛 2×10^{-5} mg に相当する。もちろん、植物各部位の灰内の物質が、トリウム B から出る放射線の一部を吸収することを勘案する必要があるが、比較用の調製液を、放射能を測定したい試料に含まれると同量の灰と混合することにより、これを除外することができる。

以下に実験手順の例を示す。培養液で 2 週間育ったソラマメを採集、慎重に洗浄し、硝酸ナトリウム 1/200

mol を混合した 10^{-5} N 硝酸鉛の放射性溶液 500cc に入れる。温度は 17°C。根を遮光するなど一般的な注意を払う。22 時間後、植物を溶液から取りだし、蒸留水で慎重に洗浄後、各部位 (根、果実、茎、葉) を個別に乾燥、濃縮硫酸を 1 滴加えて燃焼し、検電器で測定する (注)。結果を下表に示す (実験 a)。

注: 測定の前に、トリウム B、トリウム C [→訳注 1] 間の放射能が平衡に達するまで、約 6 時間待つ必要がある。その理由については本稿の守備範囲外である。

以下の実験の目的は、ソラマメによる鉛の吸収様式が、鉛濃度によって異なることを示すことにある。いずれの実験も、鉛溶液の量は 200cc、実験時間は 24 時間である。

以下の結果から、個々の実験の繰返しには、充分満足な再現性があることを示している。根による 10^{-6} N 液からの鉛摂取量 (%) は、61.2, 62.3, 57.4, 59.6, 55.4, 57.8, 47.3, 62.2, 61.7, 62.6, 60.0, 51.2, 68.7, 57.6 であった。

上記の結果から、 10^{-6} N 溶液では、鉛の半分以上が根に吸収され、 10^{-1} N 溶液の場合の消失率は 0.3% にとどまるが、その一方で後者において根が取り込む鉛の量は、前者より遙に多いことがわかる。ここで興味深いことは、濃い鉛溶液から茎と葉に移行する鉛の率 (%) が、薄い溶液に比べて小さくないことである。このことは、非常に薄い溶液の場合、根は鉛のほとんど全量を結合することができ、このため茎や葉に上昇することが著しく困難であるためと説明できる。これに対して、鉛濃度が高い溶液では、非結合の鉛が豊富にあり、これが蒸散流 [→訳注 2] によって上昇すると考えられる。溶液が濃い場合を例外として、このように根は植物の他の部位を保護している。この鉛を結合する顕著な能力は、鉛の植物に対する毒性が比較的軽度であることとおそらく関連している (444 頁, Stranburger, 1891 参照)。

根における鉛の分布様式について

吸収された鉛が有機分子中に入るのか、植物内に塩類の形で保持されるのか、という点については容易に知ることができる。前者の場合、根にから取り込まれた鉛原子は他の鉛原子と場所を交換することはできない

* The Institute of Plant Physiology of the Agricultural High School, and Institute of Theoretical Physics of the University, Copenhagen.

実験 (a)

植物の部分	灰の質量 (mg)	灰に含まれる溶液中の 鉛の比率 (%)	灰中の鉛 (mg)	灰中の鉛含有率 (%)
根	45	13.1	0.11	0.25
果実	5	0.1	0.0008	0.016
茎	46	0.05	0.0004	0.001
葉	36	0.013	0.0001	0.0003

実験 (b) $10^{-6}N$ 鉛溶液

植物の部分*	灰の質量 (mg)	灰に含まれる溶液中の 鉛の比率 (%)	灰中の鉛 (mg)	灰中の鉛含有率 (%)
根	41.	60.	0.02	0.052
茎	12.6	0.04	0.000013	0.0001
葉	5.5	0.004	0.000001	0.00002

実験 (c) $10^{-5}N$ 鉛溶液

根	43.	31.7	0.11	0.26
茎	18.	0.015	0.0004	0.002
葉	9.8	0.0012	0.00003	0.0003

実験 (d) $10^{-3}N$ 鉛溶液

根	39.	11.9	3.9	10.
茎	18.	0.02	0.007	0.04
葉	18.	0.002	0.0007	0.004

実験 (e) $10^{-1}N$ 鉛溶液

根	26.	0.3	9.9	38.
果実	18.	0.11	3.6	20.
茎	11.	0.065	2.2	20.
葉	10.	0.035	1.2	12.

* 果実は、カビに好適な培地となり障害となるため、培地に入れるときに除去した。

が、後者の場合は植物に結合した鉛原子と溶液内の鉛原子は必要に応じて動的に交換しうる。

話を分かりやすくするため、例えばテトラフェニール鉛のような分子内の鉛原子を赤鉛、硝酸鉛のような形を青鉛としよう。両者と同じ溶媒中に溶かし、結晶化により分離する場合、テトラフェニール鉛には赤鉛、硝酸鉛内には青鉛だけが存在する。これは、テトラフェニール鉛内の鉛原子は非解離形でのみ存在しうるからである。一方、塩化鉛(赤鉛)と硝酸鉛(青鉛)の等当量を同じ溶媒に溶かすと、分離後のそれぞれの物質は、赤鉛と青鉛を半々に含んでいる(Hevesy & Zechmeister, 1920)。ここでいう赤鉛と青鉛は、放射性鉛と非放射性鉛に対応する。

根が放射性鉛を取り込んだ後、これを非放射性鉛溶液内に置くと、放射性鉛が有機分子内に安定に存在すれば、放射性鉛が溶液内に移動することはないであろう。言い換えれば、放射性鉛を非放射性鉛で置換することはできないであろう。実験によると、比較的高濃度($10^{-2}N$)の鉛溶液を使うと、根が取り込んだ鉛をほとんど定量的に除去することができる。このことから、

根の鉛は溶解性塩類物質として(おそらく細胞壁に付着して)存在する、と結論できる。

例えば、 $10^{-6}N$ 、200ccの放射性硝酸鉛中で24時間育て、慎重に洗浄した後、より高濃度な $10^{-2}N$ の非放射性硝酸鉛溶液に移すと、根が取り込んだ放射性鉛の95%が $10^{-2}N$ 溶液に移行する。すなわち、放射性鉛原子はほとんど完全に、根内のその場所で、統計学的には圧倒的に優勢な(約20,000倍)非放射性鉛で置換されることになる。

次に、 $10^{-2}N$ 硝酸鉛溶液を、加水分解により部分的に分解する場合、硝酸鉛の逆溶解作用を、その酸性成分に帰したいところであるが、 $10^{-3}N$ 硝酸(HNO_3)溶液を用いても、根中の鉛の29%しか除去できず、溶媒として蒸留水を用いると18%しか除去できない。溶液の鉛濃度を変化させて吸収を調べたところ、溶液中の鉛が $10^{-6}N$ である場合、 $10^{-4}N$ 硝酸では64%、 $10^{-3}N$ 硝酸では62%と、根による取り込み量は事実上同じであった。一般的に植物を死滅させるに充分な濃度である $10^{-2}N$ 硝酸溶液では、根による吸収は26%のみであった。

根が取り込んだ鉛の他のイオンによる置換

根が取り込んだ鉛を他の鉛原子で置換できることがわかったので、他のイオンについても置換能を検討することは興味深いことである。以下、 $10^{-2}N$ 溶液を用いての検討である。鉛を含む植物を 24 時間、対象となる溶液に浸し、植物に残っている鉛の量、溶液中に以降した量を測定した。結果を下表に示す。

溶液	処理後の根に残存する鉛の比率 (%)
硝酸鉛 (非放射性)	5
硝酸銅	3
硝酸カドミウム	34
硝酸亜鉛	38
硝酸クロム	43
硝酸バリウム	74
硝酸ナトリウム	76

$10^{-3}N$ の $Pb(NO_3)_2$ (硝酸鉛 (II)) 溶液による逆溶解では、もともと吸収されていた鉛の 14% が 24 時間後にも根に残っていた。

銅のみが、鉛そのものと同程度に鉛を置換し得た。検討したその他の陽イオンは、いずれも置換能力が明らかに小さかった。

茎、葉により摂取された鉛の再溶液化の程度については検討していないが、現在行なっている水草による鉛の吸収実験から、この点について糸口が得られる可能性がある。

良く知られているように、他にどのようなイオンが培養液にあるかによって、いろいろなイオンが植物に吸収される程度は大きく異なる。個々のイオン毒性も、他のイオンによって抑制される。このような拮抗作用の例として最もよく知られるのは、 $CaCl_2$ と $NaCl$ の関係である。この場合、 $CaCl_2$ による $NaCl$ 毒性の軽減作用は、細胞膜に作用して $NaCl$ が通過しにくくなるような $CaCl_2$ の能力にあると考えられる [Osterhout, 1912]。鉛の場合、他のイオンによる、吸収された鉛イオンの動的移動がおこることを示しうることから、個々の例においては拮抗作用がこのような動的効果により起こりうることを認識する必要がある。

蒸散流による鉛の吸収

薄い鉛溶液では、24 時間で 50% 以上の鉛が、すなわち 100cc 以上の溶液内の鉛が根によって取り込まれ、またこの条件下のソラマメの 1 日当たりの水分喪失量は 1cc 以下であることから、吸収された鉛を輸送するのは蒸散流ではないと結論できる。この独立性は、以下の実験によっても示すことができる。一方では根による鉛の吸収率を通常の方法で求め、他方では初め

に水中で根を茎から分離した状態で求める。水の量 500cc で、鉛の濃度 $10^{-6}N$, pH4, 実験時間 1 時間とした。このとき、

通常の根 : 6.8%, 7.5%
切断した根: 6.5%, 7.1%

いずれの場合も、根による鉛の吸収は同程度である。さらに、植物による塩の吸収が水の吸収に依存しないことも、繰返し実験で示されている [Arrhenius, 1922]。

鉛の毒性

前項の実験に関連して興味深いことは、Bonnet[1922] が示したように、植物を $10^{-1}N Pb(NO_3)_2$ 溶液に入れると、蒸散流が障害される。充分濃い鉛溶液は、薄い溶液と異なり明瞭な毒性を発揮する。 $10^{-1}N Pb(NO_3)_2$ 溶液に 24 時間おいたソラマメでもすでに、重力屈性のわずかな変化、根に最も近い葉には枯死傾向が認められた。

小麦、ラディッシュ、レンズ豆、キャベツなど種々の植物に対する鉛の毒性については、ごく最近 Bonnet[1922] が研究している。本稿と同じく、根が数 cm に成長した段階で 200cc の水に植物を入れ、一定量の酢酸鉛あるいは硝酸鉛を溶解した実験で、次のような結果を報告している。

- (1) $10^{-1}N$ の鉛塩溶液中で、すでに根に質的な変化があった
- (2) 茎、葉には痕跡的な鉛しか認められなかった
- (3) $10^{-1}N$ 鉛溶液は、小麦では 20 日、バルサム松では 2 日で致死的であった
- (4) Mg, Ca, K は鉛に対して拮抗作用を示さなかった
- (5) 溶液を稀釀すると、鉛の取り込みは減少した

我々の実験も、この Bonnet の報告を確認する結果であるが、(1) については、我々は放射性物質を使う鋭敏な方法のために、茎、葉の鉛を容易に検出することができた。解毒作用を発揮しない Mg, Ca, K が、我々の結果でも鉛を置換する能力に乏しかったことは興味深い結果である。(5) については、我々は放射性物質を使う方法により、他のいずれの方法でも不可能な、広い範囲の溶液濃度について鉛の吸収率の濃度依存性を定量的に評価することができた。これにより、 $10^{-1}N$ 溶液と異なって、 $10^{-6}N$ 容積では鉛のわずか 1/500 が吸収されることがわかった。また、鉛の吸収が植物の成長におよぼす影響に関する Bonnet の実験について言及しておく必要がある。その結果は下記の通りである。

豆：根の長さ (mm)			
	開始時	1週間後	1カ月後
水	25	100	1000
$10^{-3}N Pb(NO_3)_2$	31	31	32

まとめ

(1) ソラマメによる硝酸鉛溶液の吸収について検討した。鉛の放射性同位元素を硝酸鉛に混じ、各部位の焼却後の灰から吸収量を測定した。この方法は、著しく少量の吸収鉛を検出することが可能とするものである。

(2) $10^{-1}N$ 硝酸鉛溶液 200cc では、24 時間で 0.3% の鉛が吸収されるが、 $10^{-6}N$ では同時間内に 60% が吸収される。葉には、溶液中の鉛の数百分の一あるいは数千分の一のみ検出される。

(3) 吸収された(放射性)鉛は、植物を他の鉛溶液に入れることにより、非放射性鉛で置換することができる。このことから、鉛は植物中の炭素に結合しているのではなく、解離可能な難溶性塩として存在すると考えられる。

(4) $10^{-1}N$ 鉛溶液は、24 時間後に既に植物に対して毒性をもつが、より稀釀された溶液はその限りにない。鉛は、重金属の中では最も毒性が少ない部類に属する。

Fr. Weis 教授に研究所の施設を使用させて頂いたことに感謝する。また B. Krause 博士の援助、友人でもある L. Zechmeister 教授の数々の助言に感謝する。

訳注 1: トリウム系列(232-Th から 安定元素 208-Pb にいたる壊変系列)の歴史的名称。トリウム X(Thorium X): 224-Ra, トリウムエマネーション (Thorium Emanation): 220-Rn, トリウム B (Thorium B): 212-Pb, トリウム C(Thorium C): 212-Bi

訳注 2: 蒸散流 (transpiration current): 植物が根から吸い上げた水は、茎から葉に運ばれ気孔から蒸散する。このとき、茎の中の水流を蒸散流という。

【参考文献】

REFERENCES.

- Arrhenius (1922). *J. Gen. Phys.* **5**, 87.
 Bonnet (1922). *Compt. Rend. Acad. Sci.* **174**, 488.
 Hevesy and Zechmeister (1920). *Ber. deutsch. chem. Ges.* **53**, 410.
 Knop (1885). *Ber. sächs. Ges.* 51.
 Lavison (1911). *Ann. Sci. Nat. Bot.* **14**.
 Nolle, Bässler and Will (1884). *Landw. Versuchsam*, **30**, 382.
 Osterhout (1912). *Science*, **35**, 112.
 Phillips (1883). *Bot. Centralb.* **13**, 364.
 Strasburger (1891). *Histologische Beiträge*, **3**, 607.