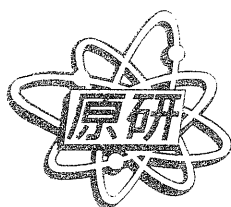


JAERI-Conf
2005-010



JP0550549



第3回イオンビーム生物応用研究ワークショップ論文集
2004年9月29日、高崎研究所

2005年 9月

(編) 松橋 信平・鈴木 伸郎・石岡 典子

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2005

編集兼発行 日本原子力研究所

第3回イオンビーム生物応用研究ワークショップ論文集

2004年9月29日、高崎研究所

日本原子力研究所高崎研究所イオンビーム生物応用研究部

(編) 松橋 信平・鈴木 伸郎・石岡 典子

(2005年7月7日受理)

日本原子力研究所高崎研究所では、TIARA のイオンビームを利用したバイオ分野の研究をより一層発展させるため、「イオンビーム生物応用研究ワークショップ」を平成 14 年度より開催している。本年は、「ポジトロンイメージングを用いた植物研究の新展開 -リアルタイム画像で見る植物の機能-」と題して、ポジトロンイメージング技術による植物の栄養成分等の吸収・輸送の最新の研究や関連周辺技術に関する研究の成果を紹介するとともに、ポジトロンイメージング研究の将来展望について討議し、植物ポジトロンイメージング技術の一層の普及、産学官の連携推進、およびポジトロンイメージングによる植物機能解析研究の今後の研究計画に資することを目的として、第3回イオンビーム生物応用研究ワークショップを開催した。

本ワークショップは、平成 16 年 9 月 29 日、日本原子力研究所高崎研究所ベンチャー棟大会議室に於いて、日本原子力研究所高崎研究所が主催し、日本アイソトープ協会、日本土壌肥料学会、日本植物生理学会、日本原子力学会、日本放射化学会、イオンビーム育種研究会の協賛を得て行われた。ワークショップには、大学、農業関係試験・研究機関だけでなく、環境浄化技術の開発を進める民間会社など、全国から 85 名の参加があった。研究報告では、イオンビームを用いた生物応用研究、ポジトロンイメージング法を用いた植物機能解析の研究、およびポジトロンイメージング計測を支える技術の研究開発などについて発表が行われた。今後、植物を用いた安全な食糧生産技術や植物による環境浄化技術への応用を目指した、植物の機能解明研究の一層の進展が期待される。

Proceedings of the 3rd Workshop on Ion-beam-applied Biology:
- September 29, 2004, JAERI, Takasaki -

(Eds.) Shinpei MATSUHASHI , Nobuo SUZUI and Noriko S. ISHIOKA

Department of Ion-beam-applied Biology
Takasaki Radiation Chemistry Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Watanuki-machi, Takasaki-shi, Gunma-ken

(Received July 7, 2005)

In order to encourage research on biological application using ion beam at TIARA, we have had the workshop on ion beam applied biology at JAERI Takasaki every year since 2002. The 3rd workshop titled "Future development of plant research using the positron imaging method - Understanding the plant functions through visualization images-" is held this year. The main topics of this workshop are introduction of the latest studies on the assimilation and transportation of nutrients by plant using positron imaging method. Further, related technologies of the positron imaging and prospect of positron imaging for is discussed. We hope this workshop popularizes positron imaging technology for plants, accelerates cooperation between industries, universities and governmental institutes and contributes future projects of understanding of the physiological functions of plants using the positron imaging method.

This workshop was held on September 29th 2004, hosted by JAERI Takasaki and cooperated by The Japan Radioisotope Association, Japanese Society of Soil Science and Plant Nutrition, The Japanese Society of Plant Physiologists, Atomic Energy Society of Japan, The Japanese Society of Nuclear and Radiochemical Science and The Ion Beam Breeding Society. There were 85 participants from not only universities and laboratories but also private company developing the environment conservation technology, so on. Highly qualified presentations were given on biological studies with ion beam, on analysis of plant functions using the positron imaging method and on supporting technology for the positron imaging monitoring. Progress in the elucidation of plant functions is expected to develop the technologies for production of safe provisions and conservation of environment with plant.

Keywords: Ion-beam, Plant, Nutrient, Positron Emitting Tracer Imaging System (PETIS), Real Time Visualization, Accumulation, Transportation

目次

1. はじめに	1
2. 講演論文	3
2.1 イオンビームによる生物応用研究の進展	3
2.1.1 イオンビームによる生物機能解析 (松橋信平)	5
ーポジトロンイメージング法による植物機能解析研究の展開ー	
2.1.2 イオンビームによる植物資源創成 (田中 淳)	9
ーイオンビーム育種研究ー	
2.1.3 マイクロビームによる細胞照射効果の研究 (小林泰彦他)	13
2.2 ポジトロンイメージング計測による植物生理研究とその応用	17
2.2.1 ダイズ根粒に対する硝酸阻害機構の解析 (大竹憲邦)	19
2.2.2 寄生植物による宿主からの窒素栄養収奪機構に関する研究 (佐藤大祐他)	23
2.2.3 少肥栽培に適したイネの窒素栄養吸収変異体の作出に向けて (森 真理他)	25
2.2.4 道管・篩管を通じた養分などの長距離輸送の解析 (林 浩昭)	28
2.2.5 鉄栄養元素の吸収機構に関する研究 (中西啓仁他)	32
2.2.6 アサにおける光合成産物の輸送に関する研究 (阪本浩一他)	36
2.2.7 カドミウムの吸収・輸送に関する研究 (中村進一他)	39
2.3 植物機能解析研究を支える技術開発	43
2.3.1 植物ポジトロンイメージング計測技術の開発と今後の展望 (内田 博)	45
2.3.2 植物研究用ポジトロン放出核種トレーサの製造 (石岡典子他)	48
2.3.3 植物体内における物質輸送動態の数理的解析 (藤巻 秀他)	52
2.3.4 生物の物質輸送を伴う情報伝達機構解明に関する研究 (古市卓也他)	56
3. まとめ	59
付録 1. プログラム	61
付録 2. 質疑応答	65
付録 3. 参加者リスト	75

Contents

1. Preface	1
2. Papers	3
2.1 Progress of Applied Biological Research with Ion Beam Irradiation	3
2.1.1 Evolution of the Study on Plant Functions Using the Positron Imaging Method (S. Matsubishi)	5
2.1.2 Plant Breeding by Ion Beam-irradiation (A. Tanaka)	9
2.1.3 Effect of Irradiation on Cell by Ion Microbeam (Y. Kobayashi et al.)	13
2.2 Plant Physiological Studies and Their Applications Using the Positron Imaging Method	17
2.2.1 Inhibition Mechanism of Soybean Root Nodule Growth by Nitrate (N. Ohtake)	19
2.2.2 Mechanisms of Interception of the Absorbed Nitrogen in the Roots Host by the Root Parasite (T. Sato et al.)	23
2.2.3 Development of Rice Plants Suitable for the Cultivation Using Lower Amount of Fertilizer: Genetic Improvement in the Nitrate Uptake Efficiency (M. Mori et al.)	25
2.2.4 Long Distance Transportation of Nutrients Through the Xylem and Phloem (H. Hayashi)	28
2.2.5 Study on the Mechanism of Iron Nutrient Uptake by Plant (H. Nakanishi et al.)	32
2.2.6 Characterization of the Photoassimilates Transportation in Hemp (K. Sakamoto et al.)	36
2.2.7 Study on the Uptake and Transportation of Cadmium by Plant (S. Nakamura et al.)	39
2.3 Supporting Technologies of the Positron Imaging Method	43
2.3.1 Development of the Positron Imaging Technique and the Feature Vista (H. Uchida)	45
2.3.2 Production of Positron Emitting Tracers for Plant Study (N. S. Ishioka et al.)	48
2.3.3 Mathematical Analyses of the Dynamics of Transportation in Plant bodies (S. Fujimaki et al.)	52
2.3.4 Simultaneous Monitoring for Translocation of Calcium Signaling Related Molecule and Signal Transduction (T. Furuichi et al.)	56

3. Summary	59
Appendix 1. Program	61
Appendix 2. Summaries of Question and Answers	65
Appendix 3. Participant List	75

This is a blank page.

1. はじめに

日本原子力研究所は、材料・バイオ研究のためのイオン照射研究施設を設置し、その一つとして、イオンビームを用いた生物機能解析の研究を進めている。このために植物研究専用のポジトロンイメージング装置を開発し、植物栄養学や植物生理学分野における有用性を示してきた。植物ポジトロンイメージング法を用いた植物による様々な物質の吸収や輸送に関する研究も進展しつつある。

植物ポジトロンイメージング法を用いた植物機能解析研究を始めとする、イオンビーム生物応用研究部の研究活動をより一層発展させるため、第3回イオンビーム生物応用研究ワークショップを、平成16年9月29日に日本原子力研究所高崎研究所ベンチャー棟大会議室に於いて開催した。本ワークショップは「ポジトロンイメージングを用いた植物研究の新展開 -リアルタイム画像で見る植物の機能-」と題して、ポジトロンイメージング技術による植物の栄養成分等の吸収・輸送の最新の研究や関連周辺技術に関する研究の成果を紹介するとともに、ポジトロンイメージング研究の将来展望について討議し、植物ポジトロンイメージング技術の一層の普及と産学官の連携推進とポジトロンイメージングによる植物機能解析研究の今後の研究計画に資することを目的とした。

研究報告では、イオンビームを用いた生物応用研究について3件、ポジトロンイメージング法を用いた植物機能解析の研究について7件、およびポジトロンイメージング計測を支える技術の研究開発などについて4件の発表があった。また、ワークショップには、大学や農業・園芸試験・研究機関だけでなく、環境浄化技術の開発を進める民間会社など、全国から85名に上る参加があった。

This is a blank page.

2 講演論文

2.1 イオンビームによる生物応用研究の進展

This is a blank page.



2.1.1 イオンビームによる生物機能解析 - ポジトロンイメージング法による植物機能解析研究の展開 -

生物機能研究グループ 松橋信平

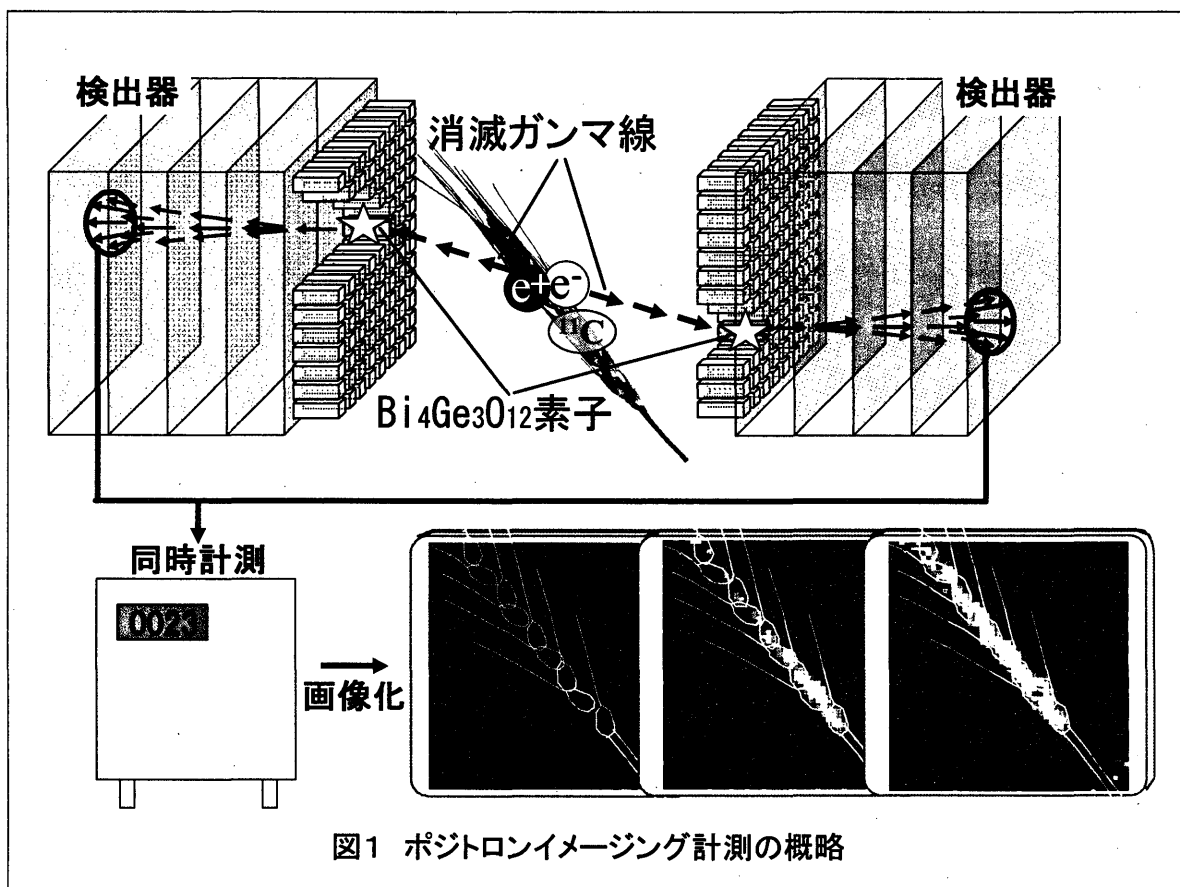
【はじめに】

植物ポジトロンイメージング法は、原研が生きた植物の機能解析研究を進めるために開発した、世界に類を見ないユニークな研究手法であり、その導入の検討開始から10年ほどが経過した。ポジトロンイメージング法を用いた植物機能に関する最近の研究では、計測データを数理的な手法で解析することにより、栄養成分の輸送や分配に関する定量的な情報の取得が可能になりつつある。また、これまで明らかにされていなかった鉄など微量元素の吸収後の輸送経路が、従来考えられていた経路とは異なる経路で行われている可能性を強く示唆する知見も得られている。新しいポジトロン放出核種の製造技術に関する研究も進めており、植物中を移行すると考えられる様々な生体成分の標識に用いる ^{76}Br の製造技術の開発に成功した。また、食品中の国際的な汚染濃度基準値の設定に関心が高まっている環境汚染物カドミウムに関しては、ポジトロン放出核種 ^{105}Cd と ^{107}Cd の製造法開発に成功し、植物中での吸収動態の画像化を可能とした。さらに、植物ポジトロンイメージング計測法の有効性を植物産業へと発展させるために、植物ポジトロン研究専用施設の設置を推進の検討も進めている。

【植物ポジトロンイメージング計測法の概略と研究の経緯】

ポジトロンイメージング計測法では、TIARAに設置したサイクロトロンで製造したポジトロン放出核種を栄養成分や有害汚染物など植物の研究に適した化合物に標識し、その標識化合物を植物の根や葉から投与して、(株)浜松ホトニクスと共同で開発したポジトロンイメージング装置(Positron emitting tracer imaging system, PETIS)により化合物に標識されたポジトロン放出核種の動態を2次元での経時的な変化として捕らえる(図1)。

原研では1992年に植物用ポジトロンイメージング装置を試作し、 ^{18}F 水溶液の植物による吸収の画像化試験を開始した。1995年には世界で初めてとなる植物用ポジトロンイメージング装置を製作、気体トレーサー $^{11}\text{CO}_2$ を用いて、植物を代表する代謝機能である光合成産物の転流の画像化に成功した。このポジトロンイメージング計測法の植物研究分野での可能性を探るため、植物栄養や植物生理の研究を進めている大学の研究グループとタイアップして、原研-大学プロジェクト共同研究(プロ共)をスタートさせた。プロ共は2期6年に渡って実施し、生きた植物内での栄養素の吸収や輸送を非侵襲でリアルタイム計測することにより、従来の研究手法では得られなかった重要な知見を多々見いだすことに成功した。プロ共は現在、産学官が連携して研究を進める連携重点研究へと発展・展開している。この間、ポジトロンイメージング装置については計測可能な視野面積を拡大した装置の開発を行い、現在では14(W)cm x 21(H)cmと、試作機の5(W)cm x 5(H)cm約12倍の視野を持ったイメージング装置を整備した。



ポジトロンイメージング計測では、崩壊に伴い原子核の陽子1個が中性子1個に変わる放射性同位元素をトレーサーとして使用する。このような元素を総称してポジトロン放出核種と呼んでいる。ポジトロン放出核種の崩壊では、正の電荷を持った電子（ポジトロン、陽電子）が放出される。ポジトロンは周囲にある電子とともに消滅し、それぞれの粒子の質量に相当するエネルギー（511 keV）を持った消滅 γ 線が互いに反対方向に発せられる。ポジトロンイメージングでは、この消滅 γ 線を位置検出型 γ 線検出器を用いて同時計測する。医学分野においてはこのポジトロンイメージングの特徴を利用した非侵襲画像診断技術（PET, positron emission tomography）がガン診断などに利用されている。

ポジトロンイメージング計測においてトレーサーとして利用するポジトロン放出核種については、次表に示すような化合物の製造法に関する研究開発を行い、炭素や窒素といった栄養成分だけではなく、鉄、マンガン、亜鉛といった金属元素の研究での利用を実現した。さらに、メチオニンやグルコースといった有機化合物についてもその利用を可能とした。最近では環境汚染物として注目されているカドミウムのポジトロン放出核種の製造にも成功しており、ポジトロンイメージング計測を利用した植物研究の幅は、ポジトロンイメージング装置の使用を開始した頃に比べ、格段の広がりを見せている。

核種	半減期	化合物
^{11}C	20 m	$^{11}\text{CO}_2$, ^{11}C -メチオニン, ^{11}C -ホルムアルデヒド
^{13}N	10 m	$^{13}\text{NO}_3^-$, $^{13}\text{NH}_4^+$, $^{13}\text{N}_2$
^{15}O	2 m	H_2^{15}O
^{18}F	110 m	^{18}F -, ^{18}F -グルコース, ^{18}F -プロリン
^{48}V	16 d	$^{48}\text{H}_2\text{VO}_4^-$
^{52}Mn	5.6 d	$^{52}\text{Mn}^{2+}$
^{52}Fe	8.3 h	$^{52}\text{Fe}^{3+}$
^{62}Zn	9.3 h	$^{62}\text{Zn}^{2+}$
^{76}Br	16 h	^{76}Br
^{105}Cd	56 m	$^{105}\text{Cd}^{2+}$
^{107}Cd	6.5 h	$^{107}\text{Cd}^{2+}$

【炭素・窒素成分の輸送・分配の定量的な解析に関する研究】

炭素や窒素といった栄養成分は、植物個体の生長だけでなく、食糧となる果実や根などの肥育に必要で、食糧の効率よい生産あるいは増産のためには、光合成産物や窒素同化物の可食組織への輸送や蓄積の評価が不可欠となる。このような観点では、品種・個体間、あるいは同一個体であっても環境変化などの影響を比較・評価するための数値化された情報を獲得するための解析手法の開発が必要となる。

これまで、ポジトロンイメージング計測により得られたデータは、画像上に設定した関心領域での放射エネルギー変化をプロットし、グラフの立ち上がり時間や傾き、最大値などのプロファイルより輸送所要時間や増加量などを求め、輸送や蓄積の評価を行ってきた。このような手法では、いくつかの計測について相対的な比較はできるものの、定量的な評価や植物体内の様々な領域間の相互影響などを明らかにすることは困難であった。

植物内を移行する栄養成分などの定量的な解析手法の開発として、光合成産物の輸送経路上の各部位における輸送速度や分配のマッピングを行うために、ソラマメを用いたポジトロンイメージング計測データの伝達関数法による解析手法について検討し、各節間での輸送速度と各節間への分配率を求めることに成功した。この解析手法を用いることにより、篩管転流の全身的な動態の定量化が可能となる。

また、輸送経路や蓄積部位での道管や篩管の管内容積の評価が不可欠となる。このために、通同組織から周辺細胞への移行が他の成分に比べて少ないフッ素 (^{18}F) を用いた容積比標準化の効果を検定した結果、容積比の標準化は、植物の組織による栄養成分などの分配・蓄積の解析にきわめて重要であることが明らかになった。

【微量元素の養分輸送経路の解明】

植物が根から吸収した鉄などの微量元素の輸送は、栄養成分同様に導管を通して輸送され、葉に輸送されたものについては篩管を使って再転流されると一般に考えられている。オオムギやイネなどの単子葉植物を用いた微量元素元素のポジトロンイメージング計測により、それらの輸送経路が明らかになりつつある。

ポジトロン放出核種 ^{52}Fe を用いた栄養成長期のオオムギでの鉄の吸収・輸送の計測では、根で吸収された鉄が根またはその近傍の組織で篩管に積み替えられ、既に成熟した葉を経由することなく最新葉へ輸送されるポジトロンイメージング画像が、また ^{62}Zn を用いた生殖成長期のイネにおける亜鉛の根から穂への輸送経路の計測では、亜鉛を一旦止め葉に輸送した後、再転流により穂に輸送するのではなく、根か

ら吸収した亜鉛を直接穂に輸送している画像がそれぞれ得られた。これらの実験結果は、金属元素の輸送経路に新しい経路が存在することを意味しており、イネ科植物ではこれまでに知られていない根で吸収した金属元素を篩管に積み替え、植物体内を移行させる機構を持つことが示唆された。

【有害汚染物カドミウムの吸収導体計測】

これまで、カドミウムの植物体内における移行を動態として捉えた例は無く、植物による吸収・蓄積の機構も解明されていない。食品中での国際的な濃度基準（コーデックス）が適用されることもあり、単に汚染されている食品の検出ではなく、汚染されていない安全な食糧を生産する技術や植物により有害物を吸収除去する技術の開発が急務となっている。ポジトロン放出核種には ^{105}Cd と ^{107}Cd があり、半減期はそれぞれ56分と6.5時間である。これら核種の製造技術の開発はほぼ終了し、 ^{107}Cd を用いたポジトロンイメージング計測では、イネおよびアブラナによるカドミウムの経根吸収・体内輸送の動態の画像化に成功した。

【おわりに】

ポジトロンイメージング技術を用いることにより、従来の研究手法では知ることができなかった植物に関する新しい知見が得られるようになってきた。このポジトロンイメージング計測技術をより普及させるための鍵のひとつであるRIの取扱に関する規制が緩和される方向へ進みつつある。今年3月の改正により、画像診断を対象とした ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O および ^{18}F については、残存するRI元素数が1未満にまで減衰すれば、放射性の物質として取り扱わなくても良いことになった。これは、トレーサーを吸収させた植物であっても、管理区域外に持ち出して栽培や別の研究手法による分析が可能になることを意味している。ポジトロンイメージング計測後に様々な展開を想定できる環境が整いつつある。これまでは法規制の壁に阻まれ、どうやっても実現が不可能だったポジトロンイメージングを用いた有用植物のスクリーニングのような、ポジトロンイメージングの特長を生かした技術の実用化の道が開けつつある。ポジトロンイメージング計測技術は「何に使えるか」の段階から、「どう使うか」の段階にある。植物の研究だけでなく、有用植物のスクリーニングなどより実用的な利用も含め、このユニークな手法を原研のオリジナルの技術として発展させ、食糧や環境の分野に貢献して行きたい。



2.1.2 イオンビームによる植物資源創成 —イオンビーム育種研究—

原研高崎研イオンビーム生物応用研究部
田中 淳

1. はじめに

イオンビームは新しい放射線ではなく、植物への効果はすでに 1960 年代に詳細に調べられている。そこではイオンビームがガンマ線などと比べて致死効果等が高いことがわかっていたが、イオンビームによって誘発される突然変異に特徴があるかどうかは全く明らかにされていなかった。1991 年頃から原研のイオン照射研究施設 (TIARA) を用いてバイオ研究への利用が開始されたことによって、イオンビームを植物への品種改良に利用するための基礎研究が始められた。今までに、ガンマ線や電子線などの低 LET 放射線との比較による誘発変異形質の違いや遺伝子レベルでの誘発変異の差異などのイオンビームの特徴が明らかになってきた。本ワークショップでは、これらの特徴について述べるとともに、公的研究機関や大学、また民間などとの共同研究で作出されている新規突然変異体についても紹介する。

2. イオンビーム育種技術

TIARA では、AVF サイクロトロンを用いて陽子から金までのイオンビームを作り出している。植物への照射では、ヘリウムイオンと炭素イオンを主に用いている。ガンマ線や電子線などでは飛跡に沿って物質に与えるエネルギー、いわゆる線エネルギー付与 (Linear Energy Transfer, LET) が 0.2keV/mm と低いのに対して、炭素イオンでは約 $100\sim 200\text{keV/mm}$ と 500 倍以上も高い。従ってイオンビームは、照射ターゲットに莫大なエネルギーを与える代わりに、逆に自らが急速に失速する。例えば、 220MeV の炭素イオンでは、水中で約 1.2mm ほどしか進まない。これがイオンビームの物理的特徴の 1 つであるが、イオンビームの LET を変化させた場合、炭素イオンではシロイヌナズナとタバコで LET が約 200keV/mm で致死効果がピークに達した。ところが、用いるイオンの原子番号が大きくなるにつれて LET のピークはより高い方にシフトし、アルゴンイオンではピークが 400keV/mm を越えた。このことは、およそ $200\sim 400\text{keV/mm}$ の LET をもつイオンが効果的であるものの、最適な条件はイオンの種類やそのエネルギーによって異なることを意味するものと思われる。

3. イオンビームの特徴

(1) 遺伝子座における突然変異誘発率

植物において突然変異率といえば、今までは遺伝子レベルでなく葉緑素変異や矮性などの形質レベルでの比較が主であった。しかし、本研究ではイオンビームの特徴を明確にするために、モデル植物のシロイヌナズナの *tt* と *gl* 変異について、遺伝子レベルで炭素イオンビームと電子線の比較を行った。10 万を超える個体を調査した結果、種子への炭素イオン照射による誘発突然変異率は、対照とした電子線照射に比べて遺伝子座当たり、細胞当たり、線量あたりで、17 倍高いことがわかった。この数字は線量あたりで表しているが、炭素イオンでは 150Gy の照射に対して、電子線では 750Gy と 5 倍多く照射しているため、育種としての変異体獲得率は、炭素イオンビームが 3.5 倍多いことになる。またこれを遺伝子座ごとに分けて表すと、電

子線では *gl2* など 2,3 の遺伝子座で高頻度に変異体が誘発されているのに対して、炭素イオンビームでは平均的にどの遺伝子座も変異が誘発されていることも明らかとなった (図 1)。

(2)変異のスペクトル—花の色や形について—

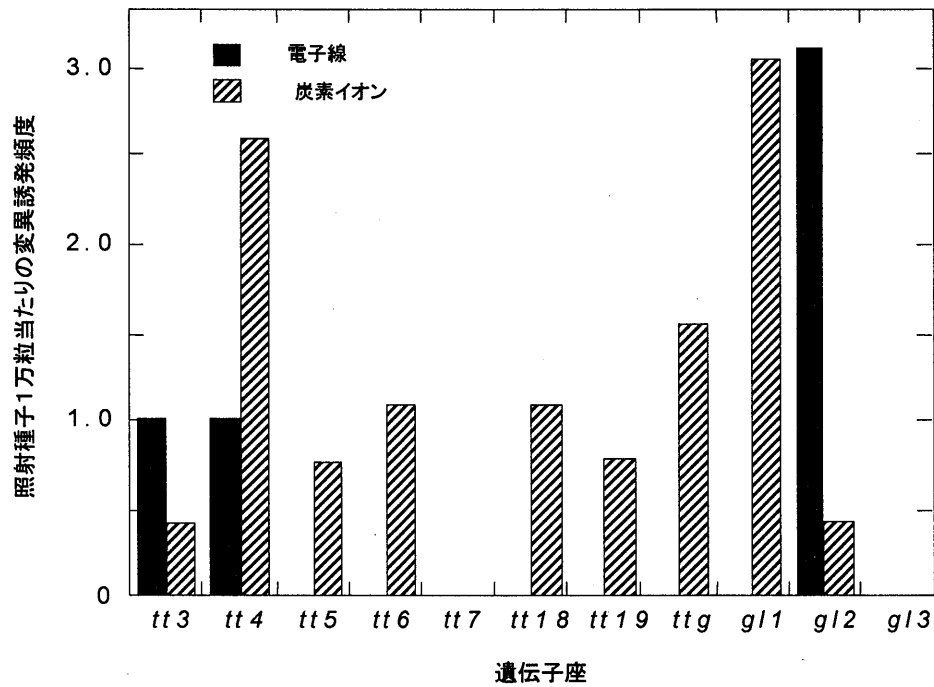


図1 シロイヌナズナ *tt*, *gl* 遺伝子座の突然変異率

イオンビームが新規の変異原として有効かどうかを明らかにするためには、誘発される変異体の変異スペクトルをガンマ線などと比較することが重要である。そこで、農業生物資源研究所の永富らによって輪ギク品種「大平」の花変異を指標とした変異スペクトル解析研究が行われた。ガンマ線照射では、原種の桃色から薄い桃色と濃い桃色の花色が高頻度で得られているのに対して、イオンビームでは薄桃、濃桃、橙、白、黄と様々な花色が誘発されている。また、ガンマ線では得ることのできなかった花の中心部が黄色、周辺部がピンクなどといった複色や花弁が2色のストライプになる条斑がイオンビームで新たに誘発された。このことは、イオンビームで誘発される突然変異のスペクトルがガンマ線とは異なることを示す初めての知見である。このスペクトルの特徴はカーネーションの花変異・花形にさらに詳細に実証された (表 1)。キリンビールの岡村らは、剣弁でチェリー色の原品種「ビタル」の培養細胞系を用いてイオン照射を行ったところ、ガンマ線やX線照射、また化学変異剤 (EMS) では誘発されなかった色とりどりの新花色に加えて、数々の程度の異なる丸弁やナデシコ弁などの花形が得られている。これらのことから、イオンビームは誘発する変異のスペクトルが広いことが明らかとなってきた。

(3)変異の分子メカニズム

表1 カーネーションの花色・花形変異スペクトル

変異原	変異誘発率 (×10 ⁻¹ %)											
	花 色										花 形	
	薄桃	桃	濃桃	赤	サモン	黄	クリーム	条斑	微細斑	複色	丸弁	デシ弁
EMS	0	5.2	0	1.0	0	0	0	3.1	0	0	0	0
軟X線	1.7	8.4	0	3.4	0	0	0	0	0	0	0	0
ガンマ線	1.7	2.6	0	1.7	0	0	0	0	11.3	0	0.9	0
炭素イオン	2.4	4.7	2.4	3.5	2.4	2.4	1.2	3.5	0	2.4	4.7	2.4

イオンビームによる誘発変異の特徴を明らかにするためには、最終的にはイオンビームがどのような DNA 変異を起こすのかを分子レベルで明らかにする必要がある。まず PCR 法によって *tt,gl* の変異を点様突然変異と大きな構造変化に分類分けした。その結果、電子線では点様突然変異が 9 個、大きな構造変化が 3 個と点様突然変異が多く生じていたのに対して、炭素イオンでは点様突然変異が 14 個、大きな構造変化が 15 個とほぼ 1:1 の割合で生じており、炭素イオンは電子線に比べ大きな構造変化を生じやすい傾向があると思われる。また、上記変異の塩基配列を調べたところ、大きな構造変化の解析では、炭素イオンでは逆位、転座、欠失、電子線では逆位、転座が起こりやすいという特徴が見出された。一方、点様突然変異では、炭素イオンは電子線に比べて短い欠失を誘発しやすいという特徴が見られている。さらに、切断端の配列を詳しく解析したところ、炭素イオンは短い欠失を伴って切断が再結合されているのに対して、電子線では欠失ではなく、末端配列が重複する特徴が見られた。従って、イオンビームでは切断末端で多重の損傷が起きやすく、イオンビームとガンマ線などの低 LET 放射線では、誘発される突然変異が質的に異なるのではないかと思われる。

4. イオンビーム誘発突然変異体

原研では今までに約 35 の大学・公的研究機関・民間との共同研究を進めてきており、幾つか顕著な成果が得られている。表 2 にこれまでにイオンビームによって誘発された代表的な変異体をまとめた。

モデル植物としてタバコやシロイヌナズナを用いて、イオンビームによる生物効果や誘発突然変異などの基礎的な研究が進められた。その結果、イオンビームはガンマ線や電子線などの低 LET 放射線に比べて生物効果が非常に大きいことが、イオン種や LET によって致死効果や染色体異常誘発頻度が異なること、イオンビーム誘発による変異とその修復が低 LET 放射線によるものと異なることなどが明らかとなり、同時に黄斑えそ病耐性、紫外線耐性、フリル状花弁、色素合成・蓄積変異体などの新規の突然変異体が高頻度で得られた。イネやオオムギでは、白葉枯病、いもち病、縞萎縮病などの耐病性がイオンビームを用いることによって高頻度で得られている。

葉緑素変異や出穂期などの可視的な変異では、ガンマ線によるスペクトルとあまり異なっていなかったという報告もある一方、低アミロース米など、食味についての品種改良にもイオンビームが期待されている。イオンビーム育種では花卉類の成果が多い。特に、キクやカーネーションで成功しているように、変異形質の中でも花色や花形の新品種を作出するのは、イオンビームの最大の特徴かもしれない。一方、鹿児島県バイオテクノロジー研究所の永吉らは、輪ギクの最大の育種目標ともいえる「無側枝キク」の誕生に成功した。これが成功した理由は、イオンビームを用いることもさることながら、照射する組織・細胞とその培養系の最適化の詳細な検討が行われたこと、そして莫大とも言える数の個体を圃場に展開して調査を重ねたことにあると言えよう。樹木を用いた研究では、環境浄化や環境耐性という目標に向けて、ヒメイタビ、ヒノキやスギの突然変異体誘発の研究が進められている。まだ目的の変異体は得られてないものの、ヒメイタビでは遺伝的な斑入り変異が、またスギでは、アルビノやワックスリッチなどといった変異が得られており、今後の進

表 2 TIARAを用いて誘発された代表的な突然変異体

植物の種類	新品種・変異特性	共同研究機関
イネ	白葉枯病抵抗性、いもち病抵抗性、出穂期、矮性、葉緑素、低アミロース、紫外線耐性・感受性	静岡大、生物研、岡山大、高知農技セ、東北大
オオムギ	縮萎縮抵抗性、葉緑素	サッポロビール
ダットンソバ	葉緑素、形態	生物研
キク	複色・条斑他、花色、花形、無側枝	生物研、鹿児島バイオ研、秋田農試、キリンビール
バラ	花色、花形他	生物研
カーネーション	花色、丸状花卉、バラ咲き	キリンビール
アジサイ	小花多花性	群馬県農技セ
トマト	短節茎、玉揃い	岡山大
メロン	多ネット、肉質	静岡県農試
ニンニク	葉緑素、形態	三重大
ヒメイタビ	遺伝性斑入り	広島大
ヒノキ	葉緑素、ワックスリッチ	森林総合研
タバコ	黄斑えそ病抵抗性、斑入り	京都府大、JT
ミヤコグサ	根粒多形成	東京大
シロイヌナズナ	色素沈着、フリル状花卉、紫外線耐性、紫外線感受性、色素欠損、光応答反応異常、ブラシノライド非感受性	原研、生物研、東京農大

展が期待される。

5. おわりに

現在、イオンビーム育種技術を用いた品種改良研究は国内では百を超えると見込まれ、今後も増加することは必至である。この技術をわが国独自のバイオ技術として育てていくために、本年4月、原研、理研、農業生物資源研究所、放医研などの照射施設を保有する研究機関を含めた産官学が一体となり、成果の発表と情報交換の場として「イオンビーム育種研究会」を発足させた。イオンビーム育種技術が植物育種に貢献するためには、実用化される新品種を数多く創出してゆくことが重要であるとともに、どの材料にどのようにイオンビームを照射すれば目的の突然変異体を得られるのかを基礎的に明らかにしてゆくことも大切である。

2.1.3 マイクロビームによる細胞照射効果の研究

原研・高崎 バイオ技術：小林泰彦、舟山知夫、和田成一、坂下哲哉

1. はじめに

高 LET 放射線であるイオンビームは、粒子の電荷やエネルギー（速度）に依存して極めて不均一かつ離散的にエネルギーを付与する。そのため、イオン照射の特異的な生物影響を解明するためには、生物試料中のどの細胞の、どの部分が、いつヒットされたか、を明らかにした上で細胞の放射線応答を解析する必要があるが、それにはマイクロビームを用いた個別細胞への照準照射が極めて有効である。

なぜなら、従来のランダムな照射では、特に低フルエンス照射の場合、試料中にヒット細胞と非ヒット細胞がポアソン分布に従って混在してしまうのに対し、マイクロビームで1個1個の細胞に照準して照射することによって各細胞に正確な個数の粒子をヒットさせることができるからである。また細胞集団の中の特定の細胞だけを狙って照射することによって、この数年来に急速に注目を集めているバイスタウンダー効果（照射細胞から離れたところにある非照射の細胞が放射線応答を示す現象）を照射細胞での直接的な効果と明確に区別して解析できる。さらに、細胞内の特定部位へのピンポイント照射によって、局所的に生じた生体分子損傷の感知から細胞死や突然変異の誘発にいたる一連の放射線応答の分子機構の解析が可能である。

そこで我々は、TIARA の AVF サイクロトロンで 10~20 MeV/amu に加速された ^{12}C 、 ^{20}Ne 、 ^{40}Ar などの重イオンビームをアパーチャー系でコリメートしてマイクロビームとして大気中に取り出し、顕微鏡観察下の細胞に対して数 μm の位置精度で1個ずつカウントしながら照射することが可能な、個別細胞への重イオンマイクロビーム照準照射システムを構築してきた。

今回は、重イオンマイクロビーム細胞照射システムの概要と昨年度に行なった主な改良点、CHO-K1 細胞の核へのシングルイオン照射による増殖阻害効果について報告する。

2. 重イオンマイクロビーム細胞照射システムの概要

TIARA の AVF サイクロトロンで 10~20 MeV/amu に加速され垂直上方から照射室に導かれた重イオンビームは、最終的に厚さ 100~500 μm のタンタル板を放電加工で穿孔して製作したマイクロアパーチャーを通して大気中に射出される。 $\phi 250 \mu\text{m}$ から $\phi 5 \mu\text{m}$ まで、孔径の異なる様々なマイクロアパーチャーが用意されており、培養細胞へのシングルイオン照射では、 $\phi 5 \mu\text{m}$ 、 $\phi 10 \mu\text{m}$ あるいは $\phi 20 \mu\text{m}$ のビームが使用できる。

照射室のマイクロアパーチャーの直下には倒立顕微鏡（オンライン顕微鏡）が設置されていて、対物レンズを通しての観察画面の中央部のマイクロアパーチャーすなわちビーム出口に顕微鏡の試料ステージに載せられた試料の照射予定部位を合致させることで、ビームの照準を行う。照射の開始と終了は、サイクロトロン入射系のパルスチョッパーを用いてビームをオン・オフすることで行う。このとき試料を貫通したイオン個数を、顕微鏡の対物レンズの位置に置かれたプラスチックシンチレーター及びフォトマルを用いてリアルタイム計測することによって、各試料への照射イオン個数を制御することができる。

一方、重イオン準備室にはもう1台の倒立顕微鏡（オフライン顕微鏡）があり、照射前後の試料観察と写真撮影に用いられる。また、予め照射試料全体をスキャンしてステージ上の標的試料の位置座標データを取得しておくことによって、照射室のオンライン顕微鏡の試料ステージを自動制御して多数の細胞を次々に連続的に照射することも可能である。

さらに、CR-39製の細胞ディッシュを使用した場合、細胞接着面の反対側を照射直後にKOH/EtOHを用いて37°Cで短時間エッチングし、個々の標的細胞とイオン飛跡の顕微鏡写真を同一視野で撮影することが可能である。すなわち、照射後培養の開始の時点でのすべての標的細胞と実際のイオンヒット位置のデータが顕微鏡写真として得られる。さらに、照射後培養を続けながら任意の時点で標的細胞の座標データに基づいて各細胞を繰り返し訪れて顕微鏡観察することが可能である。

以上の培養細胞へのシングルイオン照射実験の手順を図1に示す。

3. 昨年度に行なった本システムの主な改良点

1) 細胞写真撮影ソフトウェア（CameraControl）の改良

CameraControlソフトウェアは、マイクロビーム照射の直後に細胞およびエッチピット（イオン飛跡）の写真を、オフライン顕微鏡のオートステージと連動して顕微鏡に装着したデジタルカメラで自動撮影するためのソフトウェアである。従来、デジタルカメラで撮影した細胞画像を画像解析用PCに取り込む際には、デジタルカメラの電源を切ってから記録メディアをPCに挿入する作業が必要であり、煩雑であるばかりか、データ及びメディアの破損の危険を常に伴っていた。そこで、オリンパス社から提供されたデジタルカメラ制御ソフトウェア開発キットを用いてソフトウェアを改良し、記録メディアの交換なしで、デジタルカメラから直接USB接続で撮影済み細胞写真のデータ転送処理を実行できるようにした。

2) 細胞の顕微鏡写真とイオン飛跡位置を重ね合わせるソフトウェア（PitMarker）の改良

従来のPitMarkerソフトウェアによる細胞写真とイオン飛跡（エッチピット）写真の重ね合わせは、試料ステージを動かさずに両者を同時に撮影することを前提としていた。しかし、比較的LET値が小さい $^{12}\text{C}^{5+}$ あるいは $^{20}\text{Ne}^{8+}$ イオンマイクロビームを用いる植物単細胞への照射実験の場合、照射後のエッチピット可視化に要する時間が哺乳動物培養細胞での $^{40}\text{Ar}^{13+}$ および $^{20}\text{Ne}^{7+}$ ビームのそれに比べて非常に長い（最大9時間）ため、その間に細胞の位置や形状が変化してしまう可能性があった。そこで、予めブロードビームでランドマークになるエッチピットをまばらにつけておいたCR-39を用いて、それらのエッチピットを原点として利用することによって、時間をずらして撮影した細胞とエッチピット像を正確に重ね合わせることができるようPitMarkerソフトウェアを改良した。本改良によって、それぞれの画像から2つの補正原点を選択し、ソフトウェアに登録することで、XY水平面方向のステージ位置のずれとXY水平面自体の回転誤差が補正できるようになった。

3) 細胞照準用顕微鏡ステージの更新

照射前に試料を自動スキャンして細胞を検出するオフライン顕微鏡及び取得した座標データに従ってビーム位置に標的細胞を移動するオンライン顕微鏡の各々の試料ステージを、リニアスケールエンコーダーを搭載したシグマ光機製オートステー

ジに交換した。この更新によって従来の Autoscan 製ステージでは $\pm 10 \mu\text{m}$ 以上の誤差があった試料移動の位置再現精度が $\pm 1 \mu\text{m}$ に向上した。これによって、多数の標的細胞を次々に自動照準して連続的にシングルイオン照射することが可能になった。

4) マイクロビーム照射実験手引書の改訂

細胞局部照射装置 (HZ1 ポート) を用いた生物試料へのマイクロビーム照射実験全般にわたる利用手引書の改訂を行ない、JAERI-Tech 2004-007:「生物照射用マイクロビーム装置の利用手引書」として刊行した。

4. 1個の重イオンのヒットによる細胞増殖阻害効果

厚さ $100 \mu\text{m}$ の CR-39 で製作したディッシュ上に互いに接触しないようにまばらに張り付かせた CHO-K1 細胞に対して、 11.5 MeV/amu の ^{40}Ar イオン (LET= $1260 \text{ keV}/\mu\text{m}$) を照射し、その後の細胞増殖に及ぼす影響を調べた。個別の標的細胞に対するイオンのヒット位置は、照射後培養の開始と同時に 37°C の CO_2 インキュベータ内でディッシュの底面を裏側から KOH-EtOH を用いてエッチングすることによって照射終了から 20 分以内に検出することができた (図 2 右)。照射から 60 時間後まで継続的に各細胞の増殖を観察した結果、Ar イオンが核に 1 個でもヒットした細胞では増殖がほぼ完全に抑制されることが分かった (図 2 左)。また、核ではなく細胞質だけがヒットされた細胞や、照射細胞と同一ディッシュ内の非照射細胞 (バイスタンダー細胞) においても、培地だけを照射した非照射コントロール細胞と比べて有意に増殖が阻害されることを見出した (図 2 左)。

細胞質だけが照射された細胞や非照射のバイスタンダー細胞で観察された増殖阻害効果の原因としては、(1) 細胞膜やミトコンドリア DNA の放射線損傷が引き金となる細胞内シグナル伝達によるアポトーシス誘発、(2) イオン飛跡を中心とする試験管ブラシ状の 2 次電子の広がり (ペナンプラ) による核内 DNA の損傷、(3) 細胞核ヒット細胞からの培地を介したバイスタンダー効果が考えられるため、さらに解析を進めている。

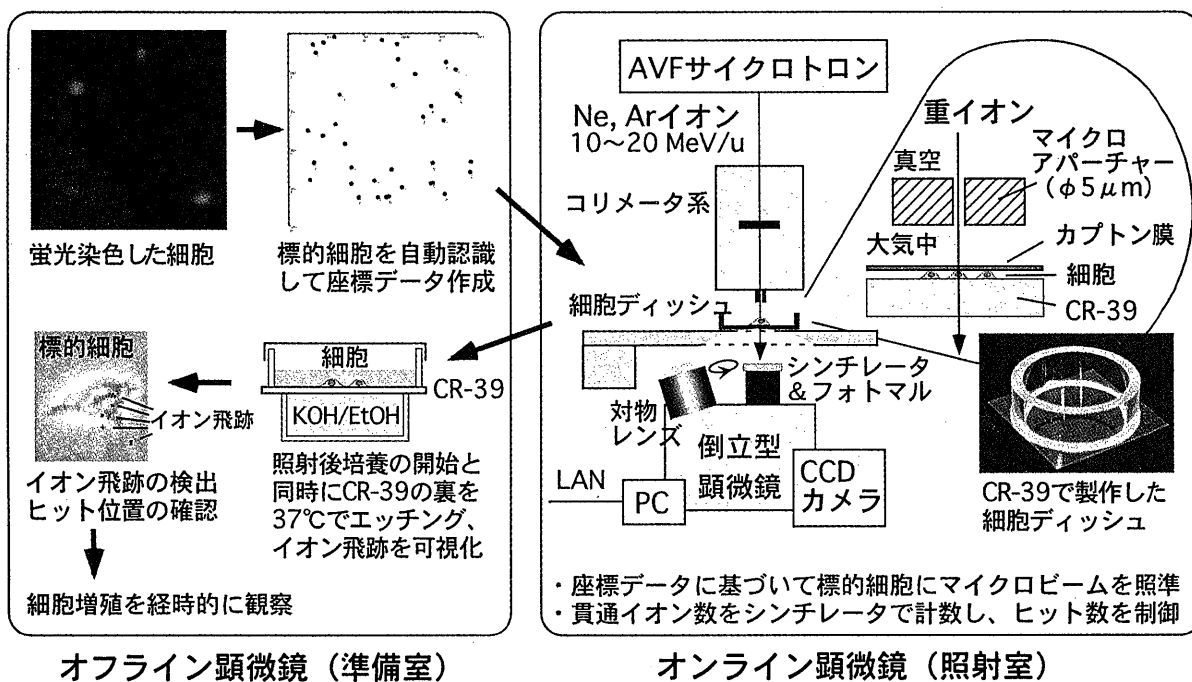


図1 培養細胞へのシングルイオン照射実験の手順。各標的細胞に対する実際のイオンのヒット位置を確認でき、照射後の各細胞の状態を繰り返し観察できる。

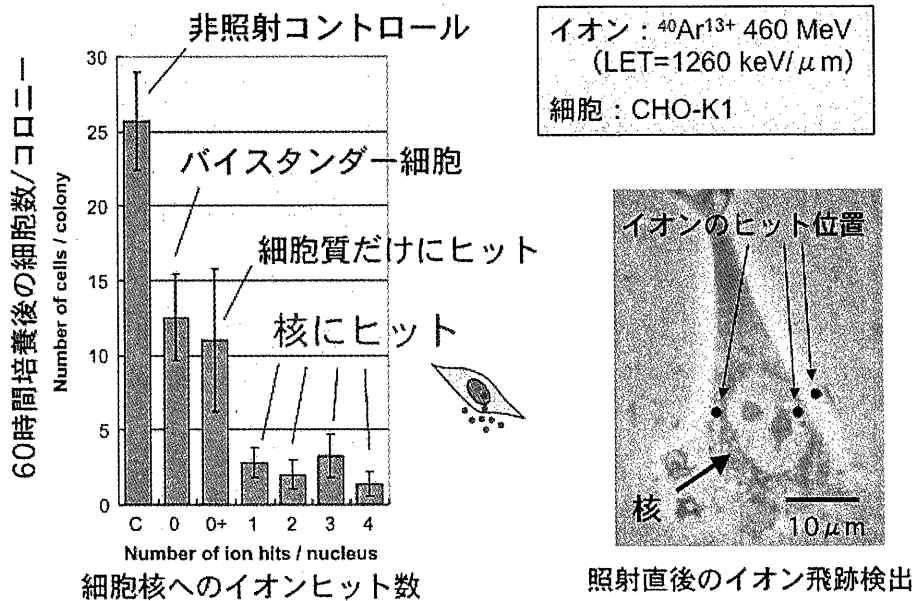


図2 CHO-K1細胞に照準照射したArイオンのヒット位置の検出例(右)、核へのシングルイオンヒットによる増殖阻害効果と細胞質への照射効果及びパイスタンダー効果(左)。

2.2 ポジトロンイメージング計測による植物生理研究とその応用

This is a blank page.



2.2.1 ダイズ根粒に対する硝酸阻害機構の解析

大竹憲邦、藤掛治介、山崎明彦、伊藤小百合、菅沼丈人、
末吉邦、大山卓爾（新潟大学農学部）
藤巻秀、阪本浩一、鈴木伸郎、石井里美、石岡典子、
渡辺智、久米民和、荒川和夫、松橋信平（原研高崎）
河地有木（住重加速器サービス）

[はじめに]

ダイズは根に「根粒」と呼ばれる器官を作り、土壤微生物である根粒菌と共生関係を営んでいる。ダイズ根粒は根において空中窒素を固定し植物に供給し、植物からは根粒に対して光合成産物を供給している。

ダイズにおいて高い収量を得るためには根粒の窒素固定と根における無機態窒素の同化の両立が重要である¹⁾。しかしながら、根圏に高濃度の化合態窒素が存在すると、根粒の発達や窒素固定活性が抑制されることが良く知られている。硝酸の阻害効果は主として根粒数や根粒重の減少、窒素固定活性の低下として表れ、引き続き根粒の老化や崩壊の促進など複合的に影響をもたらす。最近 Fujikake らは播種 12～33 日後の温室で水耕栽培したダイズ植物において、5mM 硝酸をどの様な期間処理しても、硝酸により阻害された根粒の肥大生長と窒素固定活性は硝酸を培地から除く事で回復することを報告した²⁾。

根粒形成と窒素固定活性の局所的な硝酸阻害は、硝酸に接触している根において高く硝酸が蓄積すること³⁾、根粒の表皮から吸収された硝酸が皮層域に顕著に蓄積すること⁴⁾と関係がある可能性が示されている。全身的な阻害は未だ良く理解されていないが、植物の炭素と窒素のバランスあるいは窒素要求性の低下が地上部から根粒への光合成産物の供給低下を引き起こすことが原因かもしれない^{5), 6)}。本研究では、ダイズ植物における硝酸供給が根粒肥大抑制を引き起こす原因について主として光合成産物の分配がどのように変化するかという観点から調査した。

[ダイズにおける地下部に対する光合成産物の分配]

始めに我々は生育が進み、本葉が多数あるダイズ植物体において、種々の葉位からポジトロン放出核種である $^{11}\text{CO}_2$ を供給し、植物体全身にどのように分配されるのかを調査した。実験には植物を生きたままりアルタイムで観察できる Positron Emitting Tracer Imaging System (PETIS) を用い、ポジトロンを追跡し根部に供給される炭素の起源を調査した。

ダイズは品種 Williams を用い根粒菌 USDA110 を種子摂取し、バーミキュライト上に播種した。播種後 7 日目に 800mL 容のガラス瓶に移植し、水耕により栽培し播種後 4 5 日の植物体を実験に供した。実験に用いた放射線標識化合物は日本原子力研

研究所高崎研究所の AVF サイクロトロンで製造した。 $^{11}\text{CO}_2$ は窒素ガスに $^1\text{H}^+$ を照射し (2 μA , 1~2min) 液体窒素でトラップすることにより得た。 $^{11}\text{CO}_2$ は専用の供給装置を用いて植物体の各部位の葉に 5 分間供給した。

この時用いた植物は初生葉から第 6 本葉まで完全展開し、第 7 本葉が展開始めた段階であった。第 1 本葉から第 3 本葉までについて、根部を PETIS で観察しその後放射能分布のオートラジオグラフにより観察した。第 1、第 2 本葉から $^{11}\text{CO}_2$ を供給し 90 分間根部を PETIS により観察したが、放射能は検出されなかった。オートラジオグラフの結果、供給した $^{11}\text{CO}_2$ は供給した葉にのみ観察され、他の部位への移動は観察されなかった。一方第 3 本葉から $^{11}\text{CO}_2$ を供給すると、20~30 分において根に対する ^{11}C の移動が観察され、その後も時間の経過とともに根に対する ^{11}C の集積が増加して行くことが示された。

この結果から、ダイズ本葉では固定された $^{11}\text{CO}_2$ の移動は葉の部位あるいは生育日数によって移動が異なっていることが示された。

[硝酸供給による光合成産物の分配変化]⁷⁾

次に、硝酸を短期間供給した時の根粒の肥大生長に及ぼす阻害効果を調べる為に、硝酸による可逆的な根粒の肥大生長の阻害が宿主植物から根粒への光合成産物供給低下によるものとなり得るかを $^{11}\text{CO}_2$ を用いてトレーサー実験を行った。さらに、根分け実験により硝酸阻害の局所的な効果を調べた。

播種 24 日後のダイズ植物 (品種 Williams) の主根をハサミで切り、側根を二つに分けた。その際、主根の上部に着生した根粒を残した。対照区には側根の両方に無窒素培養液を供給して栽培した。硝酸処理は次の様に 2 種類設けた。(a)5mM 硝酸を側根の両側に 3 日間供給して栽培した区、(b)5mM 硝酸を側根の一方のみに 3 日間供給した区。1 処理につき 3 個体ずつ栽培した。播種 29 日後に $^{11}\text{CO}_2$ (50MBq) を第一本葉の 3 枚に 10 分間供給し、その後の地下部への ^{11}C の移行を PETIS により 120 分後まで解析した。PETIS の解析を終えた後、直ちに植物全体中の放射能活性を Bio-imaging analyser (BAS-1500, Fuji Film, Japan) により解析し、葉から他の部位への ^{11}C の移行を調べた。

対照区である 0mM 硝酸処理区(図 15Aa)、5mM 硝酸処理区(図 15Ab)共に、第一本葉で同化された ^{11}C は若い発達中の頂芽及び地下部全体へ移行しているのが観察された。しかし、発達した本葉及び初生葉への ^{11}C は殆ど見られなかった。地上部の頂芽部における ^{11}C の放射能活性は 5mM 区に比べ 0mM 区の方が高かったが、地下部においては 5mM 区の方が 0mM 区よりも比較的高かった。PETIS により地下部における ^{11}C 蓄積の様子を画像解析した。根の基部における ^{11}C の蓄積は 40 分後あたりから見られ始め、101-120 分後において蓄積が頭打ちになった。いずれの植物においても根に比べ根粒の方が ^{11}C の蓄積が明らかに高かった。0mM 硝酸処理区において根端への ^{11}C の移行は比較的遅く、101-120 分で認められ始めた。5mM 硝酸を供給した植物においては、根全体への ^{11}C の蓄積が促進された。この結果より、硝

酸を培地に添加すると根粒よりもむしろ根に光合成産物の分配が高くなることが確認された。

[硝酸とタングステン酸の同時供給による硝酸の移動および光合成産物分配の変化]

先の実験により根粒への光合成産物の分配の低下は、硝酸によって根での硝酸同化が進み光合成産物が優先的に利用され肥大生長の障害が起こる可能性が考えられた。そこで本研究では硝酸のアナログであるタングステン酸を用いて根粒肥大生長及び窒素固定活性と硝酸の移動及び光合成産物の分配との関連性について調査した。タングステン酸は植物体内において硝酸還元酵素やニトロゲナーゼのようなモリブデンを活性中心に持つ酵素に結合し、不可逆的に失活させる作用を持つ。

ダイズは根粒超着生系統である NOD1-3 およびその親株である Williams を用いた。NOD1-3 は Williams と比較し、硝酸による窒素固定や肥大生長の障害がうけにくいとされる変異株である。ダイズ種子は根粒菌 (USDA110) を種子接種しバーミキュライト上に播種した。播種後 7 日目に移植し、水耕栽培した。播種後 14 日に硝酸およびタングステン酸処理を開始し、播種後 17 日の植物体を実験に供した。放射性標識炭酸ガス ($^{11}\text{CO}_2$) は日本原子力研究所高崎研究所の AVF サイクロトロンで、窒素ガスに $^1\text{H}^+$ を照射 ($2\mu\text{A}$, 1 min) して製造し、液体窒素でトラップした。 $^{11}\text{CO}_2$ は専用の供給装置を用いて供試植物の第一本葉に 5 分間供給した。放射性標識硝酸 ($^{13}\text{NO}_3$) は水に $^1\text{H}^+$ を照射 ($2\mu\text{A}$, 1 min) して製造した。根あるいは地上部における放射能強度は PETIS により ^{11}C については 2 時間、 ^{13}N については 40 分計測した。計測終了後植物体の放射能分布をオートラジオグラフィにより観察した。

Williams では 1mM 硝酸・100 μM タングステン酸の同時添加によって根粒肥大生長及び窒素固定活性の障害が緩和されることが確認できた。NOD1-3 では 1mM 硝酸添加により肥大成長及び窒素固定活性に対する障害効果は認められないが、20mM 硝酸の添加により Williams 及び NOD1-3 とともに強い障害効果が表れることを確認した。

$^{11}\text{CO}_2$ 実験では肥大生長障害の緩和を確認した 1mM 硝酸・100 μM タングステン酸の同時添において、時間の経過とともに放射活性が高くなった。これは光合成産物を他の区より多く地下部に供給しているためである。肥大生長障害の緩和がおきたのは地下部への光合成産物の移行が高まったことが原因である可能性が示唆された。しかし 5mM あるいは 20mM 硝酸添加区ではタングステン酸の同時添加によって光合成産物の地下部への移行が高くなることはなかった。さらに、硝酸のみの添加区では比較的放射活性は高い値を示した。これは硝酸を吸収することによって硝酸を代謝しアミノ酸合成に光合成産物が必要になるためだと考えられる

$^{13}\text{NO}_3$ 実験では硝酸のみの添加区と硝酸・タングステン酸の同時添加区で明らかな差が現れた。硝酸添加区では放射活性が高く硝酸を体内に吸収していることが示された。タングステン酸との同時添加区では極めて低い活性しか認められなかった。これら結果から 100 μM タングステン酸の培地への添加は硝酸の移行・吸収に対し

で強く作用することが明らかとなった。一方 BAS の結果では根における硝酸の吸収を完全には抑制していないことが示された。また処理区間による差は地下部よりも地上部で顕著な差が見られるためタングステン酸は硝酸の吸収よりも移行に強く働いている可能性が示唆された。

以上の結果からダイズ植物では硝酸の供給により、光合成産物が初期硝酸同化にエネルギー源あるいは炭素骨格として優先的に用いられることにより根粒の肥大生長が抑制される結果となることが示唆された。

本文章の一部は藤掛浩行氏の博士論文(2004年、新潟大学)を使用した

参考文献

- 1) Harper JE., 1974. *Crop Sci.* 14, 255-260
- 2) Fujikake H et al., 2002. *Soil Sci. Plant Nutr.* 48, 211-217
- 3) Ohyama T et al., 1993. *J. Exp. Bot.* 44, 1739-1747
- 4) Mizukoshi K et al., 1995. *Soil Sci. Plant Nutr.* 41, 75-88
- 5) Becanamwo M, Harper JE., 1996. *Physiol. Plant.* 98, 529-538
- 6) Bacanamwo M, Harper JE., 1997. *Physiol. Plant.* 100, 371-377
- 7) Fijikake H et. al., 2003. *J. Exp. Bot.* 54, 1397-1388

2.2.2 寄生植物による宿主からの窒素栄養収奪機構に関する研究

関本 均・松木良祐・小林泰弘 (宇都宮大学 農学部)
 佐藤大祐・米山弘一・竹内安智 (宇都宮大学 野生植物科学研究センター)
 藤巻 秀・阪本浩一・鈴木伸郎・石井里美・石岡典子・
 渡辺 智・久米民和・荒川和夫・松橋信平 (原研 高崎)
 河地有木 (住重加速器サービス)

はじめに

寄生被子植物は地球上に約 3,000 種存在しており、その中でも根寄生性の寄生雑草オロバンキ (*Orobanche* spp.)、ストライガ (*Striga* spp.) は中央アフリカ、中近東、地中海沿岸、東欧諸国の農業生産に被害を及ぼしている。オロバンキは主に広葉植物 (主にマメ科) に、ストライガは単子葉植物に寄生し、養分・水分を宿主植物に依存し生長する。日本では、オロバンキ類のヤセウツボ (*O. minor*) が帰化雑草として自生している。

宿主植物の光合成産物、あるいは宿主植物根から吸収された養分を収奪・貯留することは、根寄生植物の重要な栄養獲得戦略の一つである。そのため、根寄生植物の生存には、宿主植物の栄養生理状態が大きく関与していると考えられる。

オロバンキは、宿主植物由来の養分の効果的なシンクになっており、これまでの¹⁵Nトレーサーを用いた研究[1]では、オロバンキに寄生されたタバコは、対照区と比較し炭素固定が20%高くなったと報告されている。オロバンキに寄生された宿主植物において、莖葉を移動する炭素が84%増加するが、そのうちの73%がオロバンキによって収奪される。さらに、窒素栄養状態も寄生されることで大きな影響を受け、宿主植物の硝酸の吸収は著しく上昇し、木部液中のアミノ酸含量が減少することが報告されている。しかしながら、これまでの研究では植物体内での窒素動態の解析に¹⁵Nトレーサーが用いられているため短期間の窒素吸収動態を解析することが出来ない。また、ヤセウツボを斉一に寄生させた宿主植物根系を作成することは難しい。そこで、生きたまま非破壊で、同一個体を繰り返し実験できるPETIS (Positron-Emitting Tracer Imaging System)を用いてヤセウツボに寄生された宿主植物の根系および莖葉部内の¹³Nの移行を可視化し、収奪と貯留のメカニズムを解析することを試みた。

材料および方法

根系の片側にヤセウツボが寄生し塊莖を形成したアカクローバー根系を土耕で作成し、十分な湿度が保たれるようにヤセウツボ塊莖を樹脂チューブ内に収め、NH₄NO₃培地で10日間、人工気象器内 (light/dark; 14 h/10 h, 23°C/18°C, 350 mM photon m⁻² S⁻¹) で水耕栽培した。TIARAのAVFサイクロトロンを用い、これまでに報告されている方法[2]でおよそ100 MBqの¹³NO₃⁻、¹³NH₄⁺を調製した。根系を塊莖着生側と非着生側に二分し、ポリエチレンバックに展開させ、水耕液に¹³NO₃⁻を投与してから60分間PETIS計測した (Figs. I, II)。

結果および考察

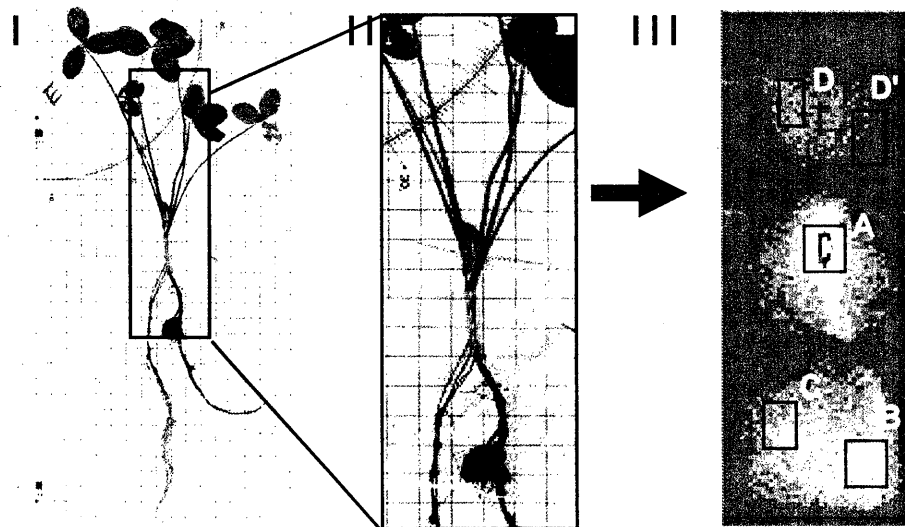
これまでのタバコ—*O. cernua* 寄生系を用いた研究の中で、吸収された¹⁵NO₃⁻由来の¹⁵Nの大部分が木部輸送され地上部に移行した後、師管から*O. cernua*に収奪されるというモデルが提示されていた[1]。今回PETISによってリアルタイム解析するこ

とで、アカクローバーの根から吸い上げられた ^{13}N は地上部にあがることなく木部から直接ヤセウツボに収奪される様子が観察できた (Fig. III)。

PETIS から得られた画像データに関心領域を設定し (Fig. III)、60 分間の $^{13}\text{NO}_3^-$ 由来の ^{13}N の集積パターンを部位別に解析した。茎葉基部 (A) における ^{13}N 移行パターンは、ヤセウツボ塊茎着生側または非着生側から投与した間で差が見られなかった。しかし、茎葉部 (D, D') において非着生側から投与した場合にくらべ、ヤセウツボ塊茎着生側から投与した場合に ^{13}N の移行がより多く観察された。このことから、ヤセウツボの着生によって茎葉基部から茎葉部への ^{13}N の移行が阻害されたと考えられる。

ヤセウツボ塊茎着生側から吸収させた場合、茎葉基部 (A) への ^{13}N の移行パターンは、 $^{13}\text{NO}_3^-$ と $^{13}\text{NH}_4^+$ で同じであったが、ヤセウツボ塊茎へは $^{13}\text{NO}_3^-$ よりも $^{13}\text{NH}_4^+$ を投与した際に、より多く ^{13}N が集積される傾向が認められた。

今回の解析は定性的なものであり、ポジトロン放出核の移行速度、ヤセウツボによる窒素栄養の収奪率を定量的に解析する必要があるが、根組織の容積が異なるため単純な比較ができない。現在、ヤセウツボ塊茎の上流と下流に関心領域をとり関心領域の放射能時間曲線とその維管束容量比で標準化することにより、ヤセウツボ塊茎の ^{13}N の定量的な収奪率を求めている。また、それら定量的な解析によってヤセウツボによる $^{13}\text{NO}_3^-$ と $^{13}\text{NH}_4^+$ の収奪の差異も明確になると予想される。



Figs. I, II, III PETIS を用いた $^{13}\text{NO}_3^-$ の可視化

I, II; 供試したヤセウツボ—アカクローバー根系の写真 III; PETIS データと計測部位

References

- [1] Hibberd, J. M. et al. (1999) Solute fluxes from tobacco to the parasitic angiosperm *Orobanche cernua* and the influence of infection on host carbon and nitrogen relations. *Plant, Cell and Environment* **22**, 937-947
- [2] Ishioka, N. S. et al. (1999) Production of positron emitters and application of their labeled compounds to plant studies. *Journal of Radioanalytical Nuclear Chemistry* **239**, 417-421



2.2.3 少肥栽培に適したイネの窒素栄養吸収変異体の作出に向けて

森 真理・北村治滋・佐藤大祐・中川淳也・吉田貴宏・
吉澤 清・河合敏彦（滋賀県農業総合センター）
塚本崇志・藤巻 秀・阪本浩一・鈴木伸郎・石井里美・石岡典子・
渡辺 智・松橋信平（原研 高崎 生物機能研究グループ）
河地有木（住重加速器サービス）
長谷純宏・田中 淳（原研 高崎 植物資源利用研究グループ）

はじめに

近年、世界的に水環境の汚染が問題となっている。滋賀県の琵琶湖においてもその富栄養化が問題となり、県は昭和 40 年代から、下水道施設の整備、工業排水の水質規制、石けん使用の促進など様々な施策を行ってきたが、今なおその問題は解決していない。富栄養化の主な原因の一つは窒素であり、平成 12 年度の滋賀県調査によると、琵琶湖に流入する窒素汚濁負荷量の割合は、生活排水が 28%、工業排水が 13%、農業排水が 16%と報告されている。現在、農業系からの汚濁負荷量の削減が重要な課題であり、本県農業関係機関では栽培技術などの指導による改善を図っているものの、その成果は充分ではない。そこで、本県では 2003 年 4 月、環境こだわり農業推進条例を施行し、化学肥料および農薬の低減を掲げ、環境（琵琶湖）と共生する農業を定着させる取り組みを進めている。このような背景から、少肥（低窒素）栽培で安定した収量が得られる少肥栽培向きイネの品種を開発することは資源の保全や環境問題に大きな貢献をすると期待され、持続可能な農業の実現につながると考えている。

滋賀県の取り組み

滋賀県農業総合センターでは、従来からイネの品種改良の選抜時に少肥栽培試験区を設け、これまでに葯培養由来の少肥栽培向き「滋系 61 号」を育成したものの¹⁾、実用化まで至っていない。また、水生植物の養分吸収能に関する遺伝子レベルでの研究にも取り組んできた^{2, 3)}。しかしながら、現時点では、少肥栽培向き品種の育種を行う上で少肥栽培に適した育種素材がなく、その特性がほとんど明らかになっていない。また、圃場選抜は多くの系統を扱うことが難しく、さらに気象など環境による影響が大きいことから効率的ではない。

そこで、滋賀県では本年より低窒素条件下で窒素の利用効率を高めることを目標に選抜手法の研究をスタートさせた。本講演では今年度取り組んでいる「ポジトロンイメージング計測を利用した窒素栄養の吸収に関与する遺伝子の機能評価」と「イオンビーム突然変異誘発技術を利用した少肥栽培向きイネ作出に関する研究」について紹介する。

本研究は、2004 年度より日本原子力研究所高崎研究所イオンビーム生物応用研究部生物機能研究グループ（ポジトロンイメージング計測）と植物資源利用グループ（イオンビーム突然変異）との共同研究により進めているものである。

ポジトロンイメージング計測を利用した窒素栄養の吸収に関与する遺伝子の機能評

価

硝酸イオントランスポーターは硝酸イオンの吸収に関わる膜タンパク質で、高親和性トランスポーター（HATS）と低親和性トランスポーター（LATS）に分類される。私達は HATS である硝酸イオントランスポーター（NRT2）遺伝子に注目し、イネから単離した NRT2 遺伝子(DDBJ nucleotide sequence database; Accession number AB008519)を 35S 改変高発現プロモーター⁴⁾につなぎイネ品種「ゆめおうみ」に導入し、その発現量が増加した遺伝子導入イネを作出した。そこで、遺伝子導入イネの窒素栄養吸収能の変化を解析するため、ポジトロンイメージング計測を行った。ポジトロンイメージング計測は生きた植物個体内での窒素栄養の吸収・移行をリアルタイムで可視化できる⁵⁾。材料は播種約 40 日後のイネ幼植物体について窒素飢餓処理を施し、4 時間 200 μ M KNO_3 + 400 μ M CaSO_4 で硝酸誘導の処理を行ったものを用いた。作出した遺伝子導入イネにおける窒素栄養の挙動を、ポジトロン放出トレーサーである ^{13}N -硝酸イオンを用いたポジトロンイメージングにより計測し、遺伝子機能の評価を行ったところ、遺伝子導入イネでは硝酸イオンの取りこみが増加する傾向がみられた。

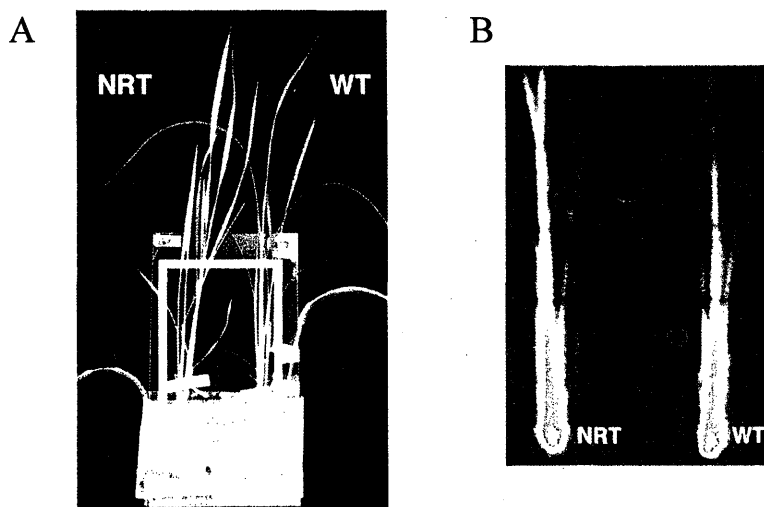


図1 ポジトロンイメージング計測による NRT 遺伝子導入イネの解析の一例

A: 写真、B: PETIS 画像

左; NRT2 遺伝子導入イネ 右; WT (対照品種「ゆめおうみ」)

イオンビーム突然変異誘発技術を利用した少肥栽培向きイネ作出に関する研究

イオンビームによる変異誘発では、様々な植物種において有用な突然変異体が効率的に作出できること、また、従来の方法では獲得できなかった変異体を得られたことが報告されている⁶⁾。また、イオンビームは局所的にエネルギーを付与することから他の変異原と比較して、有用形質を損なわずに変異を誘発できる可能性が高いと考えられている。そこで、窒素利用効率に関する遺伝変異を拡大し有用変異体を作成することを目的として、現在、滋賀県育成品種である「秋の詩」にイオンビーム照射を行っている。「秋の詩」は大粒で比較的収量性が良く、良食味品種であるため、本品種に窒素利用効率に関する変異が付与されれば、育種素材として有用である。これまでに、変異誘発のための適正線量を検討するため、乾燥種子に、320

MeV $^{12}\text{C}^{6+}$ イオンを 0~200 Gy の範囲で照射し、個体の生存率、稔実率の調査を行った。その結果、40 Gy 付近が適正と考えられた (図 2)。今後、適正線量で照射した M1 個体の自殖個体において、窒素栄養吸収変異体の選抜を行う予定である。

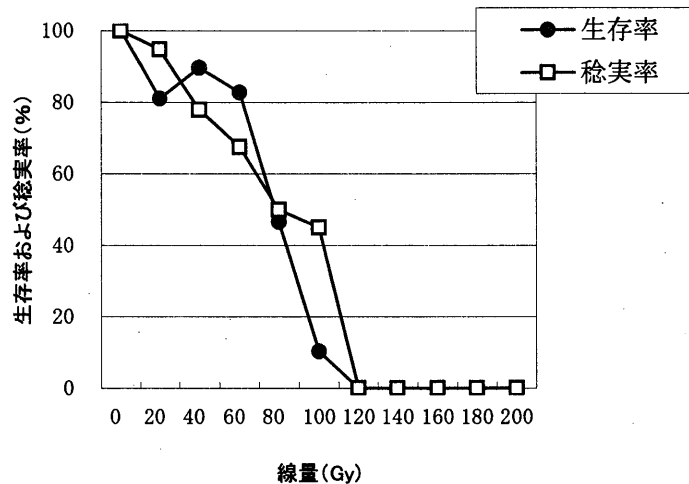


図2 320 MeV $^{12}\text{C}^{6+}$ イオンビームを照射したイネ品種「秋の詩」の生存率および稔実率

おわりに

今後、上記 2 種類の研究を融合させ突然変異体から窒素吸収に関する有用な変異体を効率的に選抜する指標が発見できれば少肥向き品種育成に多大な貢献ができる。最近、多くの研究機関で窒素養分の吸収・同化に関する遺伝子レベルの研究が活発に行われ新たな知見が蓄積されてきている。私達は基礎的研究で得られる知見を有効に活用し新たな育種手法の検討に取り組んでいこうと考えている。

文献

- 1) 水稻新系統「滋系 61 号」の育成、平成 7 年度滋賀県農林水産技術会議成果情報
- 2) 森ら、イネグルタミン合成酵素 (GS2) 遺伝子を導入した形質転換ヨシの特性、育種学研究 6(1)、267 (2004)
- 3) 荒木、森ら、ヨシ (*Phragmites australis*) の高親和性硝酸トランスポーター遺伝子 (NRT2) について、近畿作育研究 48, 57-59 (2003)
- 4) Mitsuhashi et al., Efficient Promoter Cassettes for Enhanced Expression of Foreign Genes in Dicotyledonous and Monocotyledonous Plants. *Plant Cell Physiol.* 37(1), 49-59 (1996)
- 5) 松橋信平ら、植物研究のためのポジトロンイメージング法の開発、放射線化学、70、20-25 (2000)
- 6) 第 1 回イオンビーム生物応用ワークショップ論文集、日本原子力研究所(2003 年 3 月)



2.2.4 道管・篩管を通じた養分などの長距離輸送の解析

元東京大学
林 浩昭

【はじめに】

高等植物は、根から吸収した水や成長に必要な養分の分配、そして葉で固定した光合成産物の分配を行なうために維管束系を発達させてきた。この維管束内から周辺細胞へ、周辺細胞から維管束内へ、そして、維管束内および道管や篩管内で、どのように効率的に物質移動分配を行なっているのかを詳細に理解することは、植物による物質生産を考える上で重要である。植物体内での物質の長距離輸送を行なう組織である維管束は木部と篩部から構成され、それぞれに物質の流れの通路である道管と篩管を持つ。木部は、分化の過程で“死滅した”細胞の連なりである道管と木部柔細胞から構成されているのに対し、篩部は細胞膜で囲まれた“生きた”細胞である篩部要素が連続した篩管とこれに隣接する伴細胞および篩部柔細胞からなる。根の中心柱周辺に存在する内鞘細胞や内皮細胞、そして葉の維管束周囲に存在する維管束鞘細胞やメストム鞘細胞は、維管束に出入りする養水分の移行制御に関与している。

ポジトロンイメージング技術が、植物体内の物質の移動の様子をリアルタイムで追跡できる方法として優れていることはいまさら言うまでもない。しかしながら、実際にどのような化合物が流れているのか、あるいは、道管篩管を区別しながら維管束内外、維管束内をどのように化合物が移動しているのかを細かく解析することはできない。本発表では、ポジトロンイメージング技術と道管・篩管液採取技術の融合について考えてみたい。また、今後このような技術を用いて解決してほしい農業上の問題点に付いても触れてみたい。

【維管束構造と細胞のつながりの複雑さ】

根においては、土壤中の養水分は根の表面より中心柱の道管まで水平輸送され地上部へ送られる。また、地上部より送られてきた物質は、中心柱から外方向へ皮層細胞や表皮細胞に輸送・代謝され、あるものは根外へ分泌されていく。葉においては、根から道管を通じて送られてきた養水分が維管束鞘細胞や葉肉細胞に輸送・代謝され、その後、光合成産物と共に再び維管束内に輸送されてくる。このように、植物体内では、維管束を中心にして複雑な物質と水の移動が様々な方向におこっていると考えることができる。

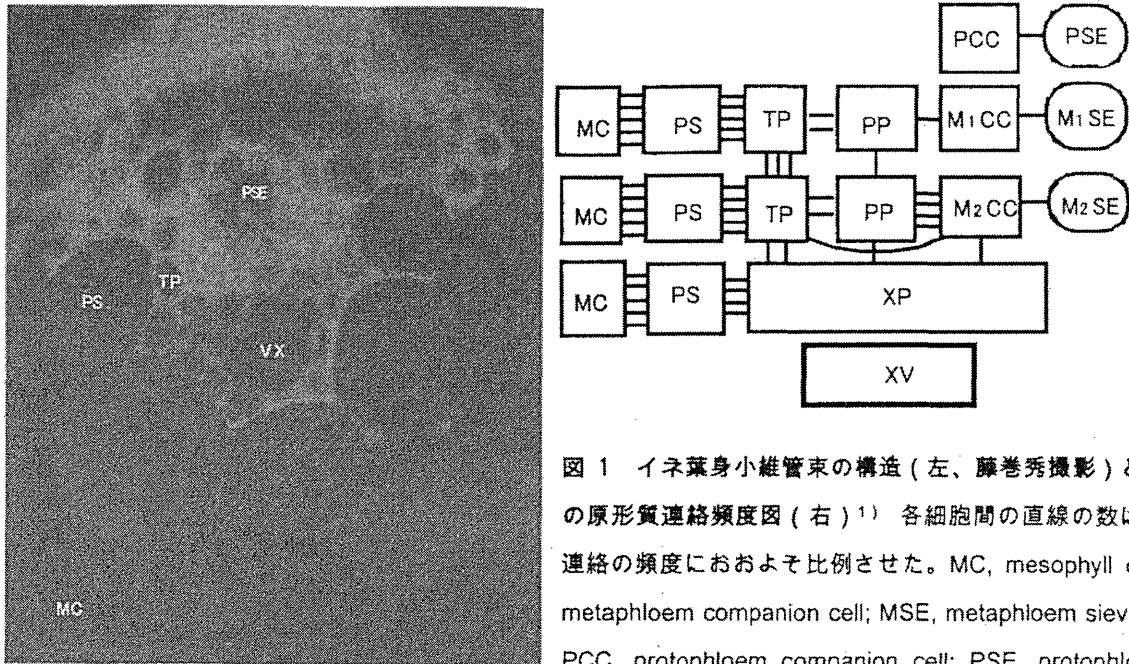


図 1 イネ葉身小維管束の構造 (左、藤巻秀撮影) と各細胞間の原形質連絡頻度図 (右)¹⁾ 各細胞間の直線の数は、原形質連絡の頻度におおよそ比例させた。MC, mesophyll cell; MCC, metaphloem companion cell; MSE, metaphloem sieve element; PCC, protophloem companion cell; PSE, protophloem sieve element; PP, phloem parenchyma cell; PS, parenchyma sheath cell; TP, thick-walled parenchyma cell; XP, xylem parenchyma cell; XV, xylem vessel.

図 1 は、イネ維管束の断面図であるが、関連する細胞が複雑に連絡していることが分かる。また、このような維管束が一枚の葉の中には何十本も走行しているのである。さらに、単子葉植物においては、何枚もの葉が重なりながら成長しているために、ポジトロンイメージング装置での観測では、どの葉の様子を追跡しているのか、見分けることができない場合さえある。

このように、ポジトロンイメージング装置で捉えられた画像の解析では、その解像度の限界から、移動する物質の経路を議論する際にはおのずと限界があることを常に認識しておく必要がある。

【道管液・篩管液の採取技術とポジトロンイメージング技術の融合】

道管液は、蒸散や光合成を盛んに行っている時には、通常採取することはできない。これは、その場合道管内が陰圧になっているからである。夜間など蒸散が抑えられた場合にのみ、道管内が陽圧になり、維管束を切断することにより、比較的多くの道管液 (10~100 μL/min 程度) を得ることができる。篩管液は、常に採取可能であるが、周りの細胞からの汚染なく取り出すことは容易ではない。幸いなことにイネ、ムギ、トウモロコシなどの主要穀物については、吸汁害虫であるウンカを利用する篩管液採取技術が確立されている。また、主要な成分の分析法も既に確立されている。

これらの道管液および篩管液採取をポジトロンイメージ測定中に行うことにより、何が道管内あるいは篩管内を流れているかを、区別しながら分析により直接知ることができる。機械的、技術的な困難は存在するが、重要な技術融合になると思われる。

【障害による光合成、登熟の抑制】

今年は、台風の当たり年で、これまでに 7 個の台風が日本列島を直撃した。そ

の中でも、16号および18号は九州に上陸し、多くの被害をもたらした。海岸に近いところでは塩害が、図2にあるような山間部の水田でも強風による倒伏や葉への障害の被害が出ている。この写真でも、風の影響が強かった畦の一行は、止葉が裂け、赤く変色しはじめていることが分かる。これからの登熟



図2 台風直後の水田（2004年9月11日）

への影響が心配される。光合成と転流解析に最適なポジトロンイメージング技術は、このような毎年繰り返し替えされるイネの障害に対する研究にも応用することができる。暴風に対する葉の抵抗性の向上、傷付いた葉での光合成および転流の維持は、米の生産に関して重要な課題であると思う。

【森林の維持とポジトロンイメージング技術】

二酸化炭素固定場所として森林が注目されている。しかしながら、そこでの材木生産をうまく行っていないと森林の維持は難しい。



図3 針葉樹林に侵入した竹 (2004年9月12日)

図3は針葉樹林に侵入して旺盛な成長を示す竹を示したものである。竹の成長はとても早く、そのままにしておくと樹木を覆い隠し枯らしてしまう。竹の光合成、地下茎を通じた物質のやり取りの研究は、森林を経済的に維持して行くために重要であると思う。

ポジトロンイメージング技術には、まだまだ多くの可能性、そして、それを用いて研究していかなくてはならない多くの課題がある。これからも最新の研究技術と実際の生産現場での課題の接点を常に念頭に置く必要があると思う。

1) 林 浩昭 維管束の構造と物質の輸送 細胞工学別冊 植物細胞工学シリーズ 18: 152-158 (2003)



2.2.5 鉄栄養元素の吸収機構に関する研究

中西啓仁, 塚本崇志, 西澤直子(CREST), 森敏 (東大・農)

内田博 (浜松ホトニクス)

渡辺智, 石岡典子, 藤巻秀, 阪本浩一, 久米民和,

荒川和夫, 松橋信平 (原研高崎)

河地有木 (住重加速器サービス)

【はじめに】

鉄(Fe)は植物にとって必須の元素であり、ポルフィリン環の生合成、ヘム、Fe-S クラスターなど、多くの酵素機能に必要である。鉄は土壤に豊富に存在しているが、土壤鉄の主成分である水酸化第二鉄($\text{Fe}(\text{OH})_3$)は難溶性であり、植物が利用しにくい。特に、アルカリ性の土壤では、多くの植物は不溶態の鉄を吸収、利用することができず鉄欠乏によって枯死する。それ故、植物は土壤中の鉄を効率的に可溶化して吸収する鉄獲得機構を発達させてきた。イネ科植物はファイトシデロフォアと総称される三価鉄キレーターであるムギネ酸類を根から分泌し、土壤中の不溶態の三価鉄を鉄-ムギネ酸類複合体として可溶化し、根の細胞膜に局在する「鉄-ムギネ酸類複合体トランスポーター(Ys1)」により吸収する(これを鉄獲得機構 Strategy II と呼んでいる)。その後、根から吸収された Fe は蒸散流に乗って導管を通過して地上部へ運ばれ、葉で積みおろしが行われるといわれている。しかし、実際の植物生体内での Fe の動態は未解明の部分が多い。

本研究ではポジトロン放出核種である ^{52}Fe の植物生体内での動態を、同一個体でリアルタイムで非破壊的に可視化することの出来る Positron-Emitting Tracer Imaging System (PETIS)法により測定することにより、 ^{52}Fe の移行のダイナミックな動画を得ることに成功し、植物生体内における Fe の吸収移行の新たな知見を得た。我々はこれまで [^{11}C]Met(Nakanishi et al., 1999; Bughio et al., 2001)、 $^{13}\text{NH}_4^+$ (Kiyomiya et al., 2001a)および H_2^{15}O (Mori et al., 2000; Kiyomiya et al., 2001b; Nakanishi et al., 2002; Tsukamoto et al., 2004)の植物生体内移行に関して報告してきた。また、他の微量金属必須元素である ^{52}Mn や ^{62}Zn の植物生体内の動態に関しても PETIS 法により計測を行った。今回の発表では、主に PETIS 法による計測によって得られた動画を紹介する。

【鉄欠乏のオオムギにおける $^{52}\text{Fe}^{3+}$ -DMA の吸収移行】

鉄欠乏条件で 7 日間育てたオオムギおよび鉄十分条件で育てたオオムギをアクリル板に固定し(図 1 A)、 $^{52}\text{Fe}^{3+}$ にムギネ酸類の一つであるデオキシムギネ酸(DMA)をキレートさせて、 $^{52}\text{Fe}^{3+}$ -DMA としてそれぞれ根に投与して PETIS で 6 時間計測した。鉄欠乏と鉄十分のオオムギ共に、 ^{52}Fe は 6 時間で根から吸収されて地上部へと移行

した(図 1B および C)。特に、地上部の基部にあたる discrimination center (DC)に ^{52}Fe が多く蓄積した。DC は将来葉や根になる分裂組織を含んでおり、植物にとって代謝的に非常に強いシンクの組織である。DC は根から吸収した栄養や葉からの代謝産物の分配にとって重要な役割を果たしていると考えられる。また、古い葉に比べて最新葉に優先的に ^{52}Fe が移行した。この最新葉への優先的な鉄の移行には、DC がその分配に重要な役割を果たしている可能性が高い。IRT や YSL などの鉄のトランスポーター遺伝子が DC で発現して植物体内の鉄の分配に働いている可能性がある。鉄欠乏区では、鉄十分区に比べて地上部へ多く移行した。鉄欠乏区では、 $^{52}\text{Fe}^{3+}$ -DMA 投与 30 分後に DC、90 分後に葉鞘、そして 270 分後に最新葉、最大展開葉および分けつ新葉のイメージが現れた(図 1C)。一方、鉄十分区では $^{52}\text{Fe}^{3+}$ -DMA 投与 90 分後に DC のイメージが現れたが、地上部のイメージは現れなかった。鉄欠乏区の DC では $^{52}\text{Fe}^{3+}$ -DMA 投与 6 時間後には、鉄十分区の約 12 倍の ^{52}Fe を蓄積した。鉄欠乏区の DC から葉鞘への ^{52}Fe の移行速度は、 0.24 cm min^{-1} であった。

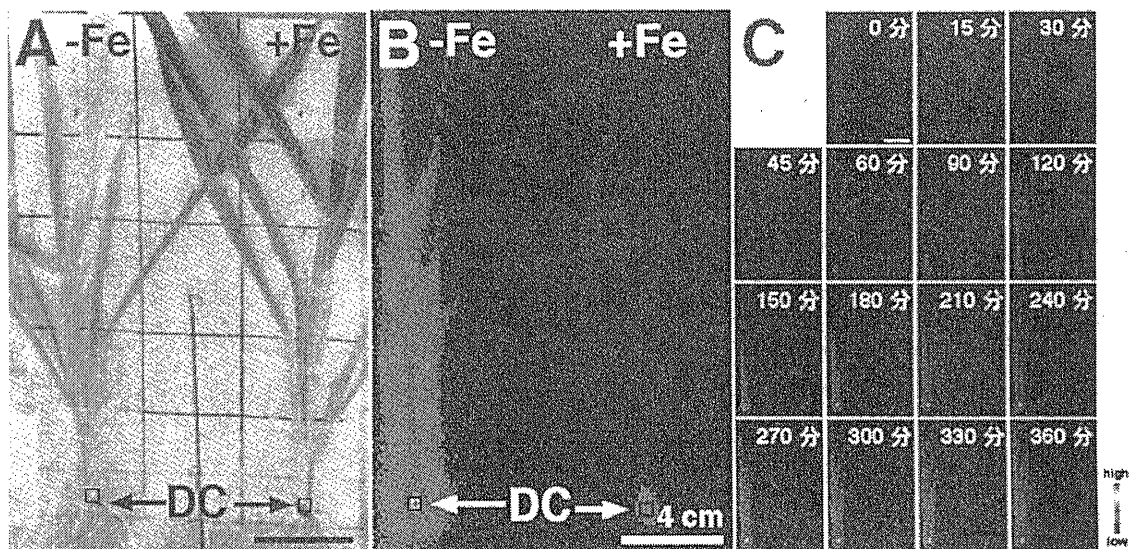


図 1 鉄欠乏および鉄十分のおオムギにおける $^{52}\text{Fe}^{3+}$ -DMA の吸収移行 (A: 植物体の写真。B: PETIS の集積画像。C: PETIS の連続画像。)

【暗処理の ^{52}Fe の移行に対する影響】

我々は、暗条件下におけるイネの根からのポジトロン放出核種 O-15 で標識された水の吸収と移行を PETIS 法で計測し、暗条件下では、葉の表面にある気孔が閉じて、蒸散が起こらなくなり、地上部への O-15 の水の移行がほぼ完全に抑制されたことを報告している(Kiyomiya et al., 2001b)。このような蒸散流が抑制されている暗条件下では、鉄十分と鉄欠乏の植物共に、 ^{52}Fe は葉鞘と最新葉に多く移行したが、古い葉への ^{52}Fe の移行は抑制された(図 2)。一方、明条件では植物体全体に ^{52}Fe を移行した。このことから、最新葉への Fe の移行は暗処理によって影響を受けないことが明らかとなった。よって、Fe は最新葉へ蒸散流がなくても移行するということが示された。根から最新葉への Fe の移行は、蒸散流に影響を受けないことから、篩管を介

して行われている可能性が考えられた。

【熱処理による篩管を介した流れの阻害による ^{52}Fe の移行への影響】

最新葉への鉄の移行が篩管を介しているかどうかを調べるために、熱処理で篩管を介した輸送を止めることのできるという古典的な手法を用いた。図3に矢印で示した最新葉と最大展開葉の一部を熱処理して、篩管を介した流れを止めて、根からの ^{52}Fe の移行がどのような影響を受けるか調べた。対象区では、葉身にほぼ一様に ^{52}Fe が移行したが、熱処理区では、最新葉において、熱処理をした領域よりも先端部分への ^{52}Fe の移行が抑制されたが、最大展開葉においては抑制されなかった。一方、最大展開葉では影響を受けなかった。このことから、根から吸収された ^{52}Fe は最新葉へは大部分が篩管を経由して、一部が導管を経由して移行したことが、および古い葉へは導管を経由して移行したことが明らかとなった。葉の生育段階が進んでシンクからソースへと変化するにつれて、鉄の移行経路は篩管から導管へと移行していくと考えられる。オオムギにおいて、根から吸収された鉄は最新葉へは短時間で移行することなどから、「イネ科植物において、根や DC から最新葉への鉄の移行は、直接篩管を介して行われる」という新しい移行経路が考えられる。

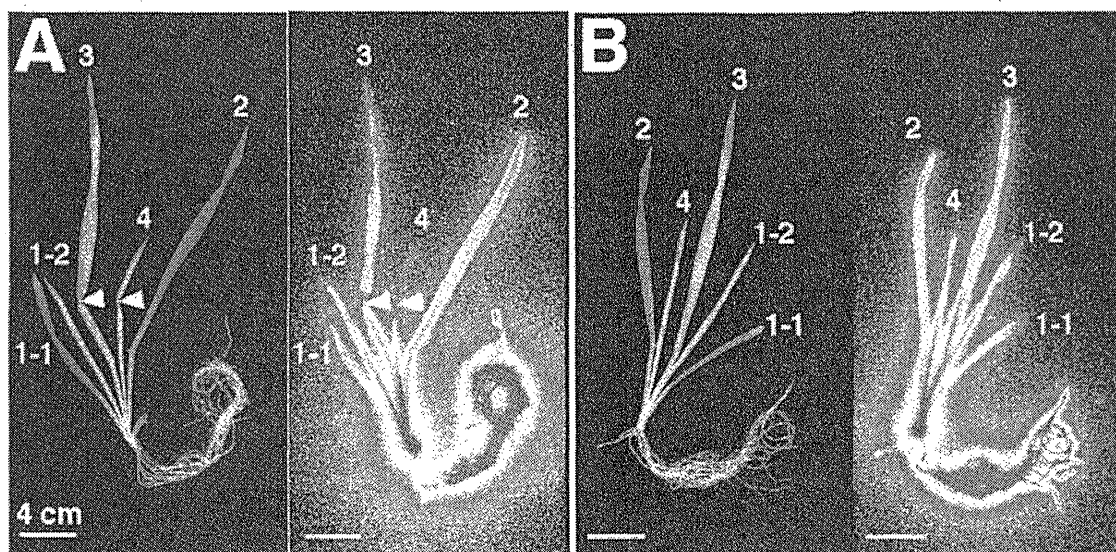


図2 熱処理を行った葉における ^{52}Fe の移行への影響
(A: 熱処理区。矢印の部分に熱処理をした。B: 対照区。)

【トウモロコシの Fe^{3+} -DMA トランスポーター YSI の欠損変異体 *ys1* 変異体における $^{52}\text{Fe}^{3+}$ -DMA の吸収移行】

Fe^{3+} -DMA トランスポーター (YSI) の欠損変異体であるトウモロコシの *ys1* 変異体では、 ^{52}Fe の根から DC への移行は野生型の約 1/5 に減少した。YSI がトウモロコシの根における鉄の吸収に非常に重要であることが示された。しかし、*ys1* 変異体においても、 ^{52}Fe が地上部へわずかには移行した。このことは YSI 以外の他の鉄-ムギネ酸類トランスポーターが $^{52}\text{Fe}^{3+}$ -DMA を吸収した可能性を示唆している。

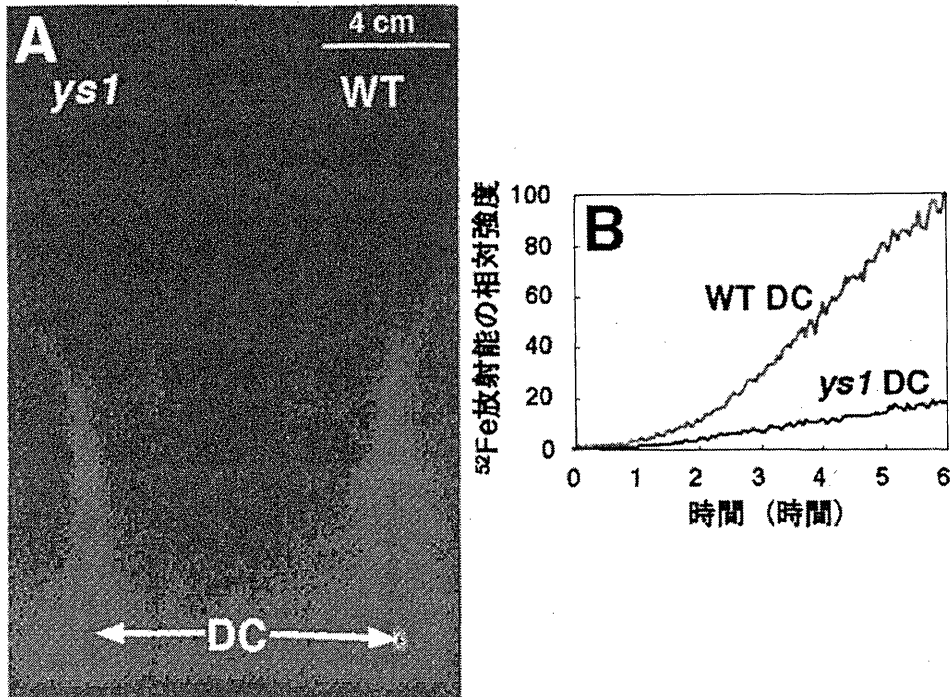


図3 トウモロコシの *ys1* 変異体における $^{52}\text{Fe}^{3+}$ -DMA の吸収と移行
(A : PETIS 集積画像。B : DC への ^{52}Fe の集積のグラフ。)

【参考文献】

- Bughio et al., Real time [^{11}C]methionine translocation in barley in relation to mugineic acid phytosiderophore biosynthesis. *Planta* **213**: 708-715 (2001)
- Kiyomiya et al., Real time visualization of ^{13}N -translocation in rice under different environmental conditions using positron-emitting tracer imaging system (PETIS). *Plant Physiol.* **125**: 1743-1754 (2001a)
- Kiyomiya et al., Light activates H_2^{15}O flow in rice: Detailed monitoring using a positron-emitting tracer imaging system (PETIS). *Physiol. Plant.* **113**: 359-367 (2001b)
- Mori et al., Visualization of ^{15}O -water flow in tomato and rice in the light and dark using a positron-emitting tracer imaging system (PETIS). *Soil Sci. Plant Nutr.* **46**: 975-979 (2000)
- Nakanishi et al., Visualizing real time [^{11}C]methionine translocation in Fe-sufficient and Fe-deficient barley using a positron-emitting tracer imaging system (PETIS). *J. Exp. Bot.* **50**: 637-643 (1999)
- Nakanishi et al., Water (H_2^{15}O) flow in rice is regulated by the concentration of nutrient as monitored by positron multi-probe system (PMPS). *Soil Sci. Plant Nutr.* **48**: 759-762 (2002)
- Tsukamoto et al., H_2^{15}O Translocation in Rice Was Enhanced by 10 μM 5-Aminolevulinic Acid as Monitored by Positron Emitting Tracer Imaging System (PETIS). *Soil Sci. Plant Nutr.* (2004) (in press)

2.2.6 アサにおける光合成産物の輸送に関する研究

阪本 浩一¹、藤巻 秀^{1,2}、河地 有木³、鈴木 伸郎¹、石井 里美¹、
塚本 崇志^{4,1}、石岡 典子¹、渡辺 智¹、松橋 信平¹

(¹原研高崎・生物機能研究グループ、²原研高崎・放射線利用理論解析グループ、
³住友重加速器サービス、⁴東大・農)

[はじめに]

植物は光合成により水と炭酸ガスから有機物を合成する。葉 (source) でつくられた光合成産物は、篩管を通して植物の様々な器官 (sink) へと輸送される。光合成産物は、栄養生長期では主に根や茎へ、生殖生長期では花芽、子実や種子へと輸送され、植物の生育ステージにより輸送される sink が変化する。この栄養生長から生殖生長への生育ステージの移行期では、光合成産物の輸送や分配にドラスティックな変化が起きていると考えられるが、この変化をイメージング解析した例はない。

本研究では、数日間の短日処理 (暗期の時間を明期より長くする) により人為的に栄養生長期から生殖生長期へ移行させることが可能であるアサを用いて、栄養生長期、生殖生長期、さらには両期間の移行期における植物個体内の光合成産物の輸送をポジトロンイメージング (PETIS) により計測し、花芽誘導期における炭素の挙動を明らかにすることを目的としている。

本ワークショップでは、現在までに行った栄養生長期のアサ個体内における光合成産物の輸送と分配について報告する。

[材料と方法]

長日条件 (16 時間明期、8 時間暗期) で生育させた高さ約 30 cm、本葉が 5~6 組展開したアサ (*Cannabis sativa* L.) をポジトロンイメージング計測に用いた。

まず、ポジトロンイメージング計測日の 4 日前からアサの各節間長と茎径長を測定し、栄養生長時の茎の伸長について調べた。次にポジトロン放出核種で標識した炭酸ガス ($^{11}\text{CO}_2$) を製造し¹⁾、アサの最大展開葉に 5 分間供給後、30 秒間ごとの連続計測で合計 3 時間のポジトロンイメージング計測を行った (図 1)。これらの結果から栄養生長期における光合成産物の輸送と茎の伸長との関係について考察した。

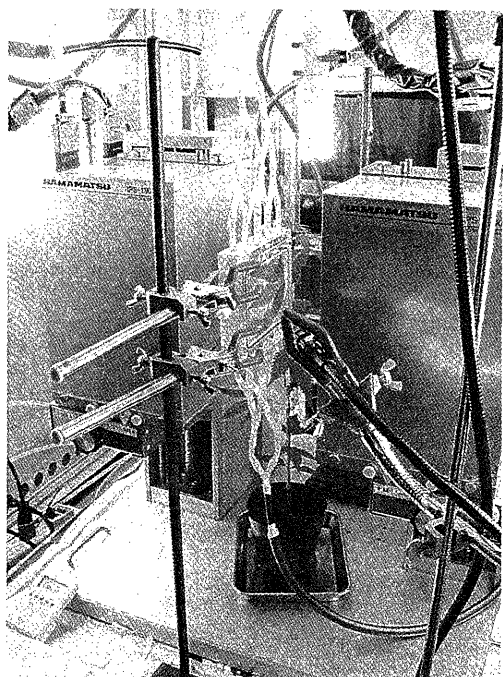


図 1 PETIS 実験

アサの最大展開葉に $^{11}\text{CO}_2$ 供給用セルをセットし、 γ 線検出器の中央部にセッティングした様子

室温 : 25°C

湿度 : 50~60%

$^{11}\text{CO}_2$ 供給葉の光強度 : $500 \mu \text{mol photon m}^{-2} \text{s}^{-1}$

【結果と考察】

1) アサの各節間における伸長測定の結果

アサの節間長の測定から、茎の伸長に参与している領域は節間1～3のみであることがわかった（図2A）。中でも節間3の生長は著しく、4日間で40mm以上伸長していた（図2B）。節間3と伸長が認められない節間4の茎の直径を比較した結果、両節間とも徐々に大きくなっているが、節間3の茎径の増加の割合がやや大きかった（図2C）。さらに図2Bの節間長と図2Cの直径から求めた両節間の円柱体積を比較した結果、4日間で節間4は1.2倍伸長していたのに対し、節間3は約2.5倍と体積が著しく増加していることがわかった（図2D）。

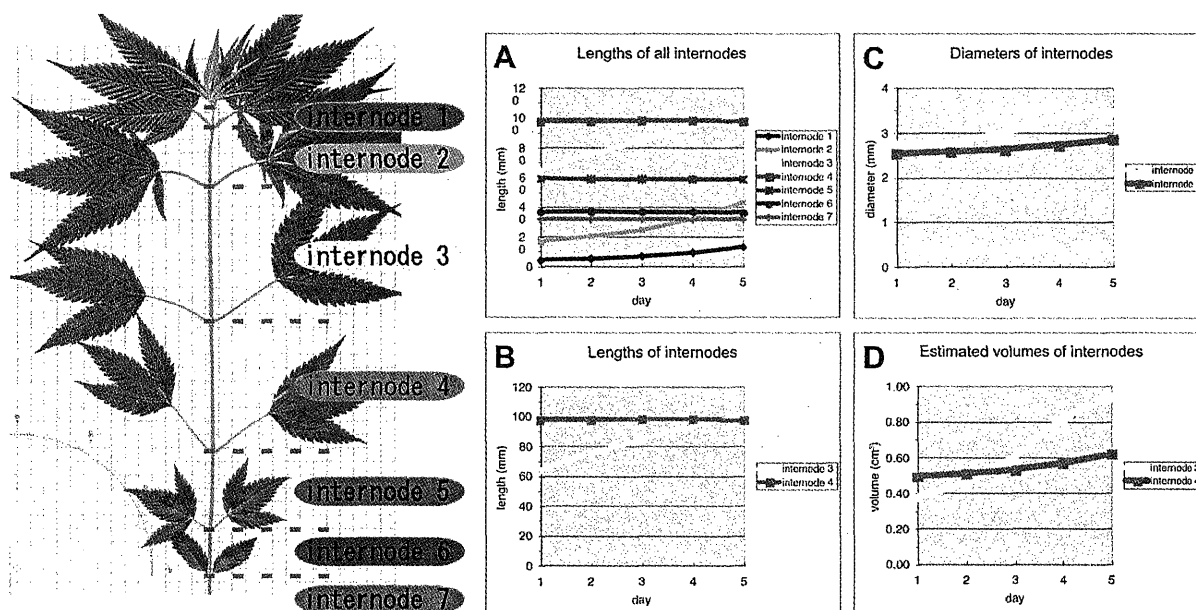


図2 アサの各節間の伸長測定

A, B は節間長、C は節間（茎）の直径、D は節間の体積

以上の結果から、栄養生長期のアサの特徴として節間3が他の節間に比べ著しく伸長していることが明らかとなった。節間3は最大展開葉直下の節であることから、最大展開葉の光合成産物の輸送や蓄積が節間3の伸長に深く関与していることが予想された。

2) 光合成産物の輸送と分配の可視化

そこで我々の研究グループが主体となり開発したポジトロンイメージング技術を用いて、アサの最大展開葉の光合成産物の輸送と分配の解析を試みた。ポジトロン放出核種で標識した炭酸ガス ($^{11}\text{CO}_2$) を節間3上部の最大展開葉に供給し、この葉で生産された光合成産物が著しく伸長し続けている節間3に輸送されているかを経時的に計測した。ポジトロンイメージング計測の結果、最大展開葉の光合成産物は、主に直下の節間3と茎頂部に輸送されていることが明らかとなった（図3）。

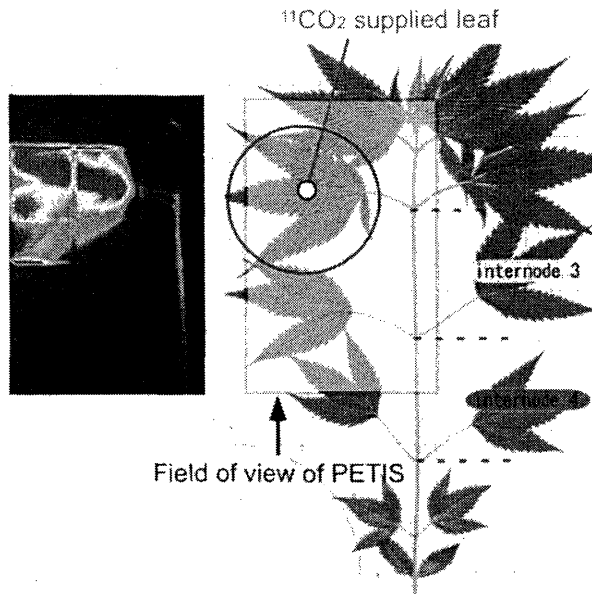


図3 PETISによるイメージング画像

3) ^{11}C - 光合成産物蓄積量の概算

次にポジトロンイメージング計測結果から ^{11}C -光合成産物が篩管を素通りした量と茎へ蓄積した量の概算を試みた。アサの節間3と節間4に関心領域を取り、時間あたりの ^{11}C カウント数の結果に対して作製した放射能強度変化(Time activity curve)から読み取れる一次関数の傾きから、source 葉に近い sink 領域ほど光合成産物の蓄積量が増加することが示唆された。

[参考文献]

1) N. S. Ishioka, H. Matsuoka, S. Watanabe, A. Osa, M. Koizumi, T. Kume, S. Matsuhasi, T. Fujimura, A. Tsuji, H. Uchida and T. Sekine: Production of positron emitters and application of their labeled compounds to studies. J. Radioanal. Nucl. Chem. 239(2): 417-421 (1999)



2.2.7 カドミウムの吸収・輸送に関する研究

中村進一・茅野充男（秋田県立大学）

藤巻 秀・石岡典子・鈴木伸郎・阪本浩一・石井里美・

渡辺 智・松橋信平（原研 高崎）

河地有木（住重加速器サービス）

【はじめに】

近年、食卓にのぼる食物の安全に対し、人々は大いに関心を持っている。そのため食物中に含まれる健康を脅かす物質に対する注目度は非常に高い。そしてこのような物質のひとつにカドミウム(Cd)がある。Cd は日本四大公害病の一つである富山県の神通川流域に発生したイタイイタイ病の原因にもなったことで知られる有害重金属である。Cd は金属鉱山・精錬所などからの排水・排煙中に含まれる形で環境中に放出され、近傍の河川・土壤に蓄積する。このような Cd が多量に蓄積した耕地で栽培された作物を食料として摂取すると、Cd は人体へと取りこまれ、主に腎臓などに蓄積していく。Cd は一度摂取されてしまうと排泄されにくい元素であるため、多量の Cd が人体に蓄積した場合には「カドミウム腎症」などの健康障害を引き起こす。

現在、食物中の Cd 含量の基準値としては食品衛生法により玄米中の Cd 含有量が 1mg/kg と定められている。しかし、食物中の有害物質含有量の国際基準を検討する CODEX 委員会には様々な食品中に含まれる Cd 量を規制する動きがあり、米においてもその基準が現在の国内基準よりも厳格化する方向にある。食物中の Cd 含量に現在検討中の国際規格が定められた場合、鉱山・精錬所の近傍の土壤汚染対策地域の周辺に位置する準汚染農地で生産される作物もその Cd 含量が基準を超えて出荷不可能になってしまう恐れがあり、その対策が急務となっている。

食物中に含有される Cd の量を削減するためには2つのアプローチが考えられる。ひとつは作物を栽培する土壤から Cd を除去し、浄化することである。汚染土壤を修復する方法としては客土法などを利用することも考えられるが、対応すべき面積の広さなどを考慮するとコスト的な面からも従来法による Cd 汚染土壤の修復の実現は難しい。

近年、注目を浴びている土壤修復の方法にファイトレメディエーション（植物による環境修復）がある。この方法は土壤中の汚染物質を植物に吸収させ、その地上部を刈り取ることによって、土壤中から汚染物質を除去するというものである。この方法は、コスト的にも安く、環境にやさしいという点では非常に優れている。しかし、その一方で植物が吸収することができる量に限度があるため、修復に長い時間がかかるという欠点がある。この方法により Cd 汚染土壤の修復を行うためには植物が根から吸収した Cd を効率的に地上部へと移行させる必要がある。そのためには高等植物において地上部へと物質を輸送する通導組織である導管における Cd の輸送

機構を解明する必要がある。

もうひとつのアプローチとしては可食部分への Cd の移行を抑制する方法が考えられる。作物の可食部分は主にシンク組織であり、このようなシンク組織への Cd の輸送は篩管を通じて行われると考えられる。実際、イネでは篩管を通じて移行する Cd が測定されている¹⁾。いずれのアプローチにおいても導管・篩管といった高等植物の維管束組織における Cd の長距離輸送のメカニズムを解明していく必要がある。これまでに銅、亜鉛などの重金属元素の植物体内における長距離輸送に関してはいくらか解明されてきているものの²⁾、同じ重金属元素であっても Cd の長距離輸送に関してはいまだに不明な点が多い。

本研究では供試植物として導管を通じての地上部への輸送機構を解明するためには、ファイトレメディエーションに利用することを想定しているアブラナを、また篩管におけるシンク組織への Cd の輸送機構を解明のためには主要な穀物であり、篩管転流に関する研究の進んでいるイネをそれぞれ用いることにした。ポジトロンイメージング装置 (PETIS) を利用して、Cd が植物体内を移行する様子を可視化し、リアルタイムでモニタリングすることが可能になれば、維管束組織における Cd の輸送機構の解明に大きく寄与することができる。

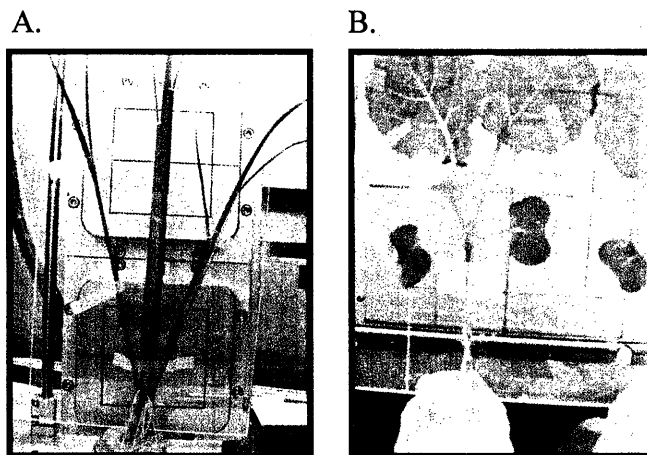


図1 イネ・アブラナを用いての¹⁰⁷Cdの取りこみ実験 A.イネ B.アブラナ

【¹⁰⁷Cd を用いたポジトロンイメージング計測】

Cd のポジトロン放出核種には ¹⁰⁵Cd と ¹⁰⁷Cd の 2 種類が存在する。¹⁰⁵Cd は壊変エネルギーは 2.74MeV と大きいものの、半減期は 55.5 分と短く、その合成の過程で ¹⁰⁷Cd が副生物として生成する。一方、¹⁰⁷Cd は壊変エネルギーは 1.42MeV と ¹⁰⁵Cd と比較して小さいものの半減期は 6.5 時間と長く、合成時にも副生物は生成しない。本研究においては実験中の被曝量が少なくなること、半減期が長いこと、合成時に副生物が生成しないことに重点をおき、¹⁰⁷Cd を用いて吸収実験を行った。¹⁰⁷Cd は銀にイオンビームを照射することにより合成し、精製後の ¹⁰⁷Cd を水耕液中に添加し、イネ、アブラナにそれぞれ吸収させた (図 1)。

【イネにおける根より吸収した ^{107}Cd の移行】

10 時間の ^{107}Cd の吸収実験の結果、図 2A に示すような ^{107}Cd の PETIS 画像が得られた。この計測の最後の時間における植物体の各部位（関心領域、ROI ;region of interest）における ^{107}Cd シグナルを根を基準にして相対値として表すと図 2B に示すグラフのようになった。根より吸収した ^{107}Cd のシグナルは葉鞘基部で最も強く、植物体の地上部では上部に行くにつれてそのシグナル強度は減少した（図 2B）。

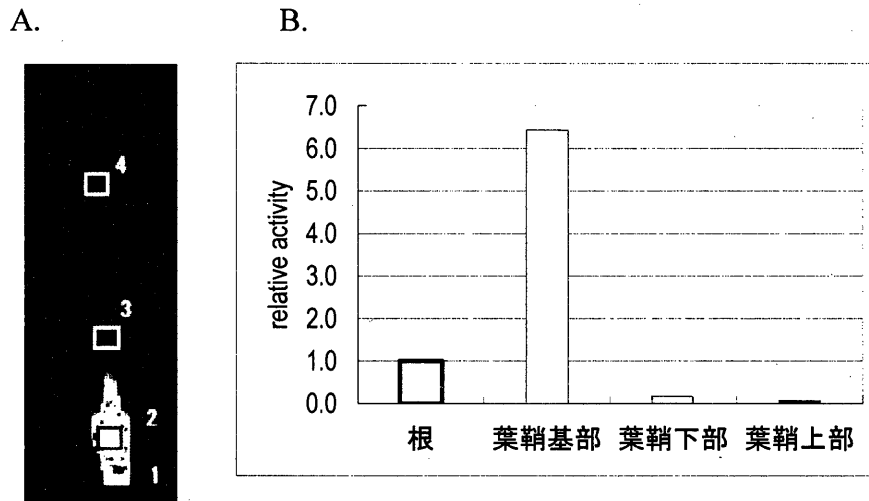


図 2 イネにおける ^{107}Cd の吸収

A. ^{107}Cd 吸収実験後の PETIS 画像

B. イネの各部位における ^{107}Cd シグナルの相対値

(根 (ROI1) における ^{107}Cd のシグナルの強度を 1 とした)

【アブラナにおける根より吸収した ^{107}Cd の移行】

アブラナにおける ^{107}Cd の吸収実験の結果を図 3 に示す。アブラナにおいてもイネと同様に ^{107}Cd の PETIS 画像を得ることができた（図 3A）。イネと同様に計測の最後の時刻での植物体の各部位における ^{107}Cd シグナルの強度を比較するとアブラナでは根の部分のシグナルが最も強かった（図 3B）。地上部では節（葉柄が分岐している部分）に強い ^{107}Cd のシグナルが見られた。葉ではイネと同様に上部に行くにつれ、 ^{107}Cd のシグナルの強度は減少していった。また葉の中では葉身部分より葉脈の部分に強いシグナルが見られた。

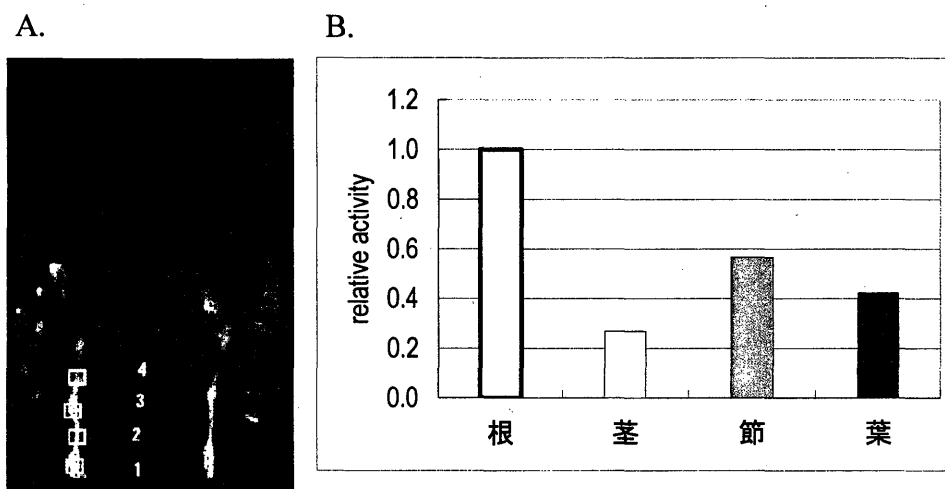


図3 アブラナにおける ^{107}Cd の吸収

A. ^{107}Cd 吸収実験後の PETIS 画像

B. アブラナの各部位における ^{107}Cd シグナルの相対値

(根 (ROI1) における ^{107}Cd のシグナルの強度を 1 とした)

【今後の展望】

以上のように植物体内における Cd の移行を ^{107}Cd を用いることで、イネ、アブラナのいずれの植物においても可視化することができた。イネ、アブラナでは異なる ^{107}Cd のシグナルが得られたことから単子葉植物、双子葉植物では Cd の移行のメカニズムが異なっていることが推測される。また Cd 吸収時間とシグナル強度の変化にはいくつかのパターンが見られることから、得られたグラフの形状から植物体の各部位における Cd の輸送形態が推測できる可能性がある。今後は研究を進めていくことで、高等植物の維管束組織における Cd の長距離輸送のメカニズムが明らかにできると考えられる。そこで得られた知見をもとに植物体内における Cd の移行を制御することで、Cd を含有しない安全な食物の持続的な生産が可能になることを期待している。

参考文献

- 1) Tanaka K., Fujimaki S., Fujiwara T., Yoneyama T. and Hayashi H. (2003) Cadmium Concentrations in the Phloem Sap of Rice Plants (*Oryza sativa* L.) Treated with a Nutrient Solution Containing Cadmium. *Soil Sci. Plant Nutr.* 49: 311 - 313
- 2) Clemens S., Palmgren M. G. and Kramer U. (2002) A long way ahead: understanding and engineering plant metal accumulation. *Trends Plant Sci.* 7:309 - 15.

2.3 植物機能解析研究を支える技術開発

This is a blank page.



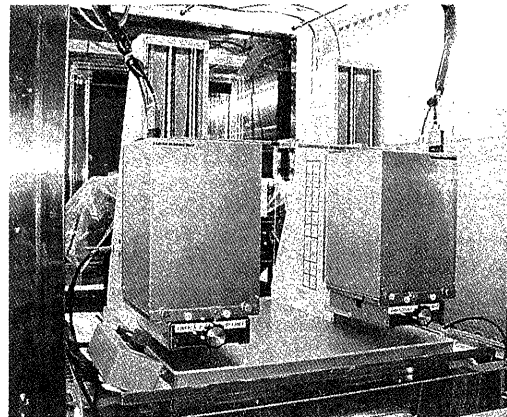
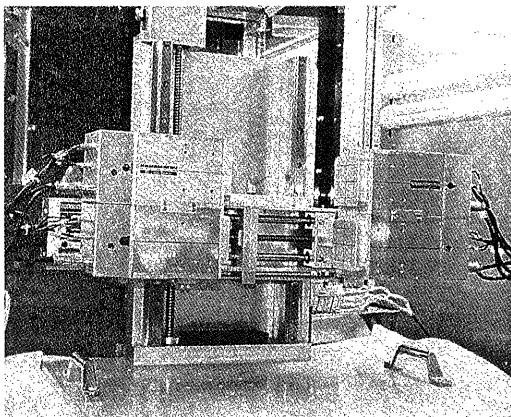
2.3.1 植物ポジトロンイメージング計測技術の開発と今後の展望

浜松ホトニクス㈱ 中央研究所

内田 博

本植物研究で用いられている計測装置は、元々小動物（ラットやマウス）を計測対象とした PET 装置に代わる簡易型ポジトロンイメージング装置として開発を行っていたもので、1993 年に原研高崎研究所より「植物を PET (Positron Emission Tomography) で測れないか」との話があり、計測対象である草花に対しては、PET 計測による断層像計測よりも開発中であったプラナー型ポジトロンイメージング装置が適しているのではないかと判断から、その可能性について検討すべくプロト機を持ち込んでの共同研究が開始された¹⁾。その結果、本装置にて十分植物計測が行えることが確認され、1996 年にはそれらの研究成果を基に植物計測専用装置として 1号機が完成し、プロト機と 2 台での植物実験が開始された。1998 年には狭い視野（計測領域）を補う目的から、多点コインプローブシステムを開発し導入された。その後、視野拡大の要求が高まり、1999 年には 1 号機に検出器 1 対を増設し、視野が約 3 倍に拡大され（図 1 左）²⁾、さらに 2001 年には 1 号機（視野拡大後）の約 5 倍の視野を持つ 2 号機（図 1 右）が導入され、現在に至っている。

図 2：植物計測用プラナーポジトロンイメージング装置（左：1号機、右：2号機）



機)

イメージング原理

プラナー型ポジトロンイメージング装置は、比較的扁平な試料内のポジトロン放出核種の二次元分布イメージを計測するものです。まず、試料を挟むように対向して置かれた γ 線二次元位置検出器にて、試料から放出された消滅 γ 線を同時計数により計測を行う。次に、それぞれの検出器で検出した検出面上での γ 線検出位置情報から、それらを結ぶ線（同時計数線）を算出する。さらに、この同時計数線上のどこが γ 線の消滅位置かを算出するが、PET と異なり本装置では試料つまり γ 線の消滅位置が予め平面状に設置されていることから、この同時計数線と試料設置面と

の交点がポジトロン消滅位置と決定することができる。このように本装置のイメージング手法では、PETのような断層撮影のための画像再構成などで生じる統計雑音を増加させる処理を用いないシンプルな手法のため、比較的少ない計数でS/N比の良好な画像が計測できる特長を有している。なお、予め設定された時間間隔で区切ってデータを収集することにより、時系列のトレーサの面分布イメージを得ることができる。

ポジトロンイメージング装置

γ 線二次元入射位置検出器は、2mm x 2mm x 20mmのBGO ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$)シンチレータを縦横に2.2mmピッチでモザイク状に並べたシンチレータ・アレイ(22x23)と、光の入射位置を算出することができる角型二次元位置検出型光電子増倍管より構成されたブロック検出器を用いている³⁾。

γ 線の入射吸収によりシンチレータ・エレメント内で発生した光は、光電子増倍管の入力面に導かれ、発光したシンチレータ・エレメントの位置に応じた光電子増倍管の光電面位置で光電子に変換される。この光電子はメッシュ・ダイノード(あるいはメタル・チャンネル・ダイノード)によりその位置情報を維持しながら電子の増倍が行われ、最終的に、縦横に張ったマルチ・ワイヤー・アノードにて収集される。このマルチ・ワイヤー・アノードは方向毎に抵抗チェーンにて繋がれており、それぞれの両端より信号が取り出され、2つの出力信号を用いた重心演算により位置信号が算出される。なお、散乱線などの除去に用いられるエネルギー信号は4つの出力信号の和として取り出され、同時計数に用いられるタイミング信号は最終ダイノードより取り出されている。(図2)

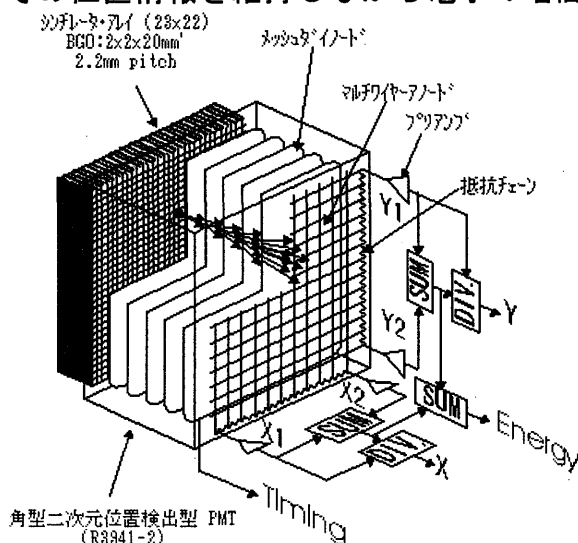


図2: ブロック検出器の構造

本装置は、対向して配置された二次元入射位置検出器、検出器を

して保持するための検出器保持台、同時計数や位置演算してイメージを生成する信号処理/データ収集回路部、計測のオペレーションやデータの保存・解析を行うコンピュータ部(PET装置のような高い演算能力は必要ないため、一般のPCで十分)の4つより構成されている。

装置の性能

空間分解能は、基本的にシンチレータ・エレメントのサイズと検出器のエレメント識別能力で決まり、検出器間隔や視野内位置にも依存するが、ダイレクトプレーン(正対向している検出器対間で構成される計測面)で平均約2.4mmが得られている。

γ 線
正対

視野は、対向する検出器対数を増やすことにより拡大可能であるが、斜めに対向する検出器間での同時計数により効率的に視野拡大が可能である。これを利用し、2号機は129mm(横) x 195mm(縦)の視野を得ている。ただし、クロスプレーン(斜めに対向する検出器対間で構成される計測面)は、検出器の幾何学的配置の関連から空間分解能が悪くなる傾向にある。

データの最短収集時間(フレーム時間)は、計測時における計測画像(逐次イメージ、積算イメージ)と計数の経時変化グラフ等の、ディスプレイへの準リアルタイム表示能力が主な限定要因となっているが、5秒程度は可能である。ただし、画像のS/N比はそれを形成している計数が左右するため、画質とフレーム時間はトレードオフの関係となる。

今後の展望

現在、本装置は元々の目的である小動物用のイメージング装置として、検出器から回路系まで総合的な改良が加えられ、120.8mm x 186.8mmと視野は若干狭くなったものの、空間分解能は、1.6~2.2mm、最短収集時間も1秒間隔と性能向上が図られた⁴⁾。これらは、そのまま次期植物用計測装置として利用可能である。今後の更なる改良点としては、LSOなどの発光量の多いシンチレータを用いたDOI検出器の導入による空間分解能の改善や、視野拡大の効率は下がるがブロック検出器の間隔を狭めることによる感度や空間分解能の分布の均一化を図る事などが考えられる。

参考文献

- 1) 内田 博、他：“モザイク BGO 検出器の開発及びその応用”、第 30 回理工学における同位元素研究発表会要旨集、(1993)
- 2) 内田 博、他：“植物計測用ポジトロンイメージング装置”、放射線と産業、80, 6-10 (1998)
- 3) Uchida, H et al. : “Design of Mosaic BGO detector system for positron CT” , IEEE Trans. Nucl. Sci. **33**, 464-467 (1986)
- 4) Uchida, H et al. : A compact planar positron imaging system. Nucl. Instr. and Meth. A **516**, 564-574 (2004)



2.3.2 植物研究用ポジトロン放出核種トレーサの製造

石岡典子¹、渡辺 智¹、FATEH Behrooz¹、藤巻 秀²、鈴木伸郎¹、
河地有木³、阪本浩一¹、石井里美¹、松橋信平¹
(¹原研高崎 生物機能研究グループ、
²原研高崎 放射線利用理論解析グループ、³住重加速器サービス)

はじめに

植物を対象にポジトロン放出核種をプローブとして用いる手法は、生きたままの植物の活動をリアルタイムでイメージング可能なことから、植物の生理学的な機能を解明するための動態研究に威力を発揮する。この手法に必要なのがポジトロン放出核種トレーサである。植物研究用に必要なポジトロン放出核種トレーサは、標識化合物トレーサとイオントレーサに大別できる。どちらのトレーサを選択するにせよ、半減期の短さ等の理由から国内では購入困難な核種である。したがって、この手法を可能にするためには、加速器を利用したポジトロン放出核種の製造が必須となる。

ポジトロン放出標識化合物トレーサの製造法は、これまで報告されているほとんどが医学利用を目的としている。特に、¹¹C、¹³N、¹⁵O、¹⁸F に関する製造法は、病院内に設置された小型サイクロトロンに適した製造法が開発されている。⁵²Fe などの金属イオントレーサに関しても、医学利用を目的とした製造法が報告されている。しかし、これらはヒトを対象にした場合であり、植物を対象にする場合では異なる。さらに、利用する加速器の規模や施設の利用形態も製造法に影響を与える。したがって、植物の機能を探るためのリアルタイム計測に適したポジトロン放出核種トレーサを得るためには、これまで医学利用で開発されてきた製造法の改良や新たに植物特有の標識化合物の開発が重要である。

本発表では、これまで TIARA で利用可能にした植物研究用ポジトロン放出核種トレーサについて述べるとともに、今後、未利用のポジトロン放出核種を新しく植物ポジトロンイメージングのために選択する際の基準についても提案する。

ポジトロン放出核種製造用施設

図 1 に TIARA におけるポジトロン放出核種の製造過程を示す。ポジトロン放出核種は、TIARA AVF サイクロトロンで得られるイオンビームを用いて、核反応により生成する。TIARA AVF サイクロトロンは中型のサイクロトロンであり、小型サイクロトロンのような大電流照射は苦手であるが、加速できるイオン種の多さとイオンビームのエネルギーの高さから利用できる核反応が多い。このことは、次項に述べるポジトロン放出核種の製造法を開発する上で、¹⁶O(α ,pn)¹⁸F 反応の利用や高いエネルギーを必要とする金属イオントレーサの利用を可能にしている。TIARA AVF サイ

クロトロンは多目的に利用される加速器であるため、照射装置は一本の製造用ビームラインに対して固体・液体・気体ターゲットの照射が必要であった。スライド式の架台上に固体用 2 台、気・液体用 6 台（リボルバー式）の計 8 台の照射ポートを設置することにより固体・液体・気体のすべての照射を可能にした。固体ターゲットでは、ハンドリング装置によりターゲットホルダーの脱着、搬送台車により照射室とホットラボのセル間のターゲットホルダーの搬送を行う。気・液体ターゲットでは、照射ポートに固定された容器とセルとの間を、配管により（気体：ステンレスチューブ、液体：テフロンチューブ）ターゲットの充填及び回収を行っている。全ての操作は、遠隔的に制御可能であり、作業者の被曝の低減と効率的な照射が可能な施設である。

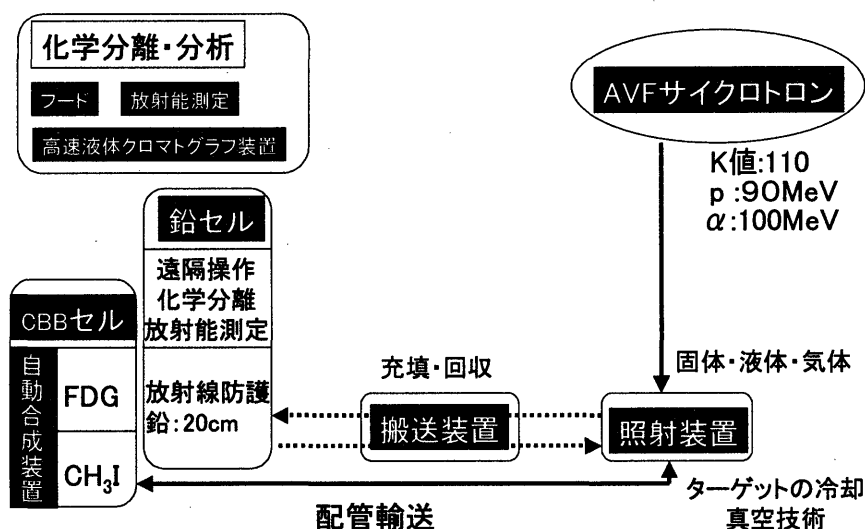


図1 TIARA ラジオアイソトープ製造用施設

ヒトから植物へ対象を変更し、さらに多目的に利用する中型サイクロトロンを用いる場合の解決すべき点は、(1) 最終溶液に NaCl を含まないトレーサ溶液 (2) 安価なターゲットで生成可能な原子核反応の探索 (3) 機器の放射化を防ぐため、使用の都度、適量のトレーサを製造し、安定した供給を行うことである。

従来の標識化合物は、最終的にヒトを対象に診断薬として調製されている。したがって、標識化合物は、0.9%NaCl 溶液（生理食塩水）で回収される。植物にとって NaCl は有害物質なので、トレーサは、蒸留水または水耕液中に回収する必要がある。このような条件の影響を最もシビアに受けたのが、金属イオントレーサの製造である。例えば、⁴⁸V は、pH7 以上になると容器壁面に吸着し、回収率の低下が見られるため、最終溶液における最適条件を決定する必要があった。

医療現場では、¹⁸FDG を製造する際、高価な ¹⁸O 水の濃縮ターゲット（天然存在比：0.2%）を必要とするが、合成過程で ¹⁸O 水の回収・再利用を行うことによりランニングコストを抑えている。植物実験では、¹⁸F⁻を含んだ ¹⁸O 水をそのまま水耕液に投入するため、¹⁸O 水の回収は不可能である。そこで、天然の ¹⁶O 水ターゲットを

用いた反応による $^{18}\text{F}^-$ の製造法を開発し、ランニングコストを抑えた製造を可能にした。

TIARA AVF サイクロトロンは、14 本ビームラインを保有し、各照射装置へビーム移送系を經由してイオンビームを輸送する。小型サイクロトロンとは異なり、照射室には他の研究に使用するビームラインも共存するため、研究者が立ち入る機会が多い。この場合、問題となるのはビームラインの放射化による被爆である。ビーム移送効率を上げればビームダクト構築材の放射化は低減可能であるが、真空保持箱やターゲット保持箱は、照射時にイオンビームが絶えず入射するため、照射量に応じて放射化量が増加してしまう。このような問題を解決するために、使用の都度、必要な量だけ照射を行う方針で製造法を開発してきた。

以上のような改良により、現在 TIARA では、表 1 に示すような数多くのポジトロン放出核種トレーサを植物実験に供している。 ^{105}Cd , ^{107}Cd に関しては、新規に製造法を開発した核種である。

表 1 TIARA で利用可能なポジトロン放出核種トレーサ^{1),2)}

核種	半減期	反応	入射エネルギー — (MeV)	ターゲット	物理的状態	植物実験供し形態
^{11}C	20 min	$^{14}\text{N}(p,\alpha)^{11}\text{C}$	11	N_2	気体	$[^{11}\text{C}]\text{CO}_2$, $[^{11}\text{C}]$ メチオニン
^{13}N	10 min	$^{16}\text{O}(p,\alpha)^{13}\text{N}$	16	H_2O	液体	$[^{13}\text{N}]\text{NO}_3^-$, $[^{13}\text{N}]\text{NH}_4^+$, $[^{13}\text{N}]\text{N}_2$
^{18}F	110 min	$^{16}\text{O}(\alpha,pn)^{18}\text{F}$	42	H_2O	液体 (氷)	$[^{18}\text{F}]\text{F}^-$, $[^{18}\text{F}]\text{FDG}$, $[^{18}\text{F}]$ プロリン
		$^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$	16	H_2O	液体	
^{48}V	16 d	$^{45}\text{Sc}(\alpha,n)^{48}\text{V}$	45	Sc 箔	固体	$[^{48}\text{V}]\text{H}_2\text{VO}_4^-$
^{52}Mn	5.6 d	$^{\text{nat}}\text{Cr}(p,xn)^{52}\text{Mn}$	20	Cr 箔	固体	$^{52}\text{Mn}^{2+}$
^{52}Fe	8.3 h	$^{\text{nat}}\text{Cr}(\alpha, xn)^{52}\text{Fe}$	80	Cr 箔	固体	$^{52}\text{Fe}^{3+}$
^{62}Zn	9.2 h	$^{\text{ns}}\text{Cr}(p,2n)^{62}\text{Zn}$	30	Cu 箔	固体	$^{62}\text{Zn}^{2+}$
^{105}Cd	58 min	$^{\text{nat}}\text{Ag}(p,3n)^{105}\text{Cd}$	20	Ag 箔	固体	Cd^{2+}
^{107}Cd	6.5 h	$^{\text{nat}}\text{Ag}(p,n)^{107}\text{Cd}$	30	Ag 箔	固体	Cd^{2+}

植物研究用ポジトロン放出核種を選択

植物研究用に新たにポジトロン放出核種を選択する場合の基準とは何であろうか。物理学的な特徴は、(1) 半減期、(2) ポジトロンの放出比、(3) ポジトロンのエネ

ルギー、(4) γ 線放出の有無等が考えられる。表 2 に主なポジトロン放出核種について、これらの情報をまとめている。これまで、新規ポジトロン放出核種トレーサを検討する際、優先順位として一壊変あたりに放出されるポジトロンの割合が多い核種を選択し、その中でもある程度の半減期を有する核種を選択してきた。しかし、最近開発した ^{107}Cd トレーサを用いた実験から、ポジトロンの放出割合が 0.2% と低くても充分イメージングとして計測可能であることがわかった。むしろ、これまでに得られている画像よりも鮮明な画像が得られた。これは、 ^{107}Cd が放出するポジトロンのエネルギーが低い（水中での飛程は、0.27 mm）ことに起因する。植物試料はヒトに比べて薄いため、高いエネルギーを持つポジトロンは、試料中を突き抜け、空中で消滅し、画像のぼやけを誘発する。したがって、ポジトロンのエネルギーは低い程、計測に適している。当然なことながら、Cd のように植物体内での移行が遅いと推測されるトレーサの場合は、長い半減期のものを選択すべきである。さらに、壊変に伴う γ 線が少なければ、検出器のノイズの心配も少ない。これまでは、ポジトロン放出比の低い核種は、候補核種からはずしてきたが、今回得られた結果から、再度見直す必要が出てきた。

表 2 主な核種のポジトロン飛程

核種	半減期	最大エネルギー (MeV)	水中の飛程 (mm)	ポジトロンの 放出割合(%)
^{11}C	20.4 min	0.961	1.2	99.8
^{13}N	10.0 min	1.19	1.7	99.8
^{15}O	2.0 min	1.73	2.8	99.9
^{18}F	109.8 min	0.632	0.6	96.7
^{105}Cd	56 min	1.691	3.4	26.1
^{107}Cd	6.5 h	0.302	0.27	0.2

まとめ

1993 年から本格的始動した植物研究用ポジトロン放出核種の製造法の開発は、医学で開発されてきた製造法の改良から、植物特有のポジトロン放出核種トレーサの開発へと移行しつつある。今後は、タンパク質や核酸などの生体高分子、ホルモン等のポジトロン放出核種トレーサに適した核種の探索、標識法の開発を行う予定である。

参考文献

- 1) Ishioka, N. S. et al., J. Radioanal. Nucl. Chem. **239**, 417 (1999).
- 2) S. Watanabe et al., Radiochim. Acta, **89**, 853-858 (2001).

2.3.3 植物体内における物質輸送動態の数理的解析

藤巻 秀^{1,2}、河地有木³、阪本浩一²、鈴木伸郎²、
石井里美²、石岡典子²、松橋信平²、宮下敦巳¹

(¹原研高崎・放射線利用理論解析グループ、

²原研高崎・生物機能研究グループ、³住重加速器サービス)

【はじめに】

Positron Emitting Tracer Imaging System (PETIS) は、生きた植物体内におけるポジトロン放出トレーサーの分布を非侵襲的かつ連続的に撮像するものである。これにより、植物体における物質輸送のうち、「長距離輸送」と呼ばれる根や葉などの器官間レベル (mm オーダー以上) の輸送を動画像として視覚化することができる。ある瞬間におけるトレーサーの分布を侵襲的方法で示すオートラジオグラフや、ある計測点におけるトレーサーの存在量の経時変化を示すポジトロンカウンターによるデータと比較して、平面×時間の次元を持つ動画像データはトレーサーの動態の把握を容易にし、これまで、植物体内での物質輸送に関する新たな知見獲得に役立っている。

しかしながら、この動画像データの「次元の高さ」は長所であると同時に短所でもある。すなわち、生の動画像データのままでは、データの真に意味することが人間には解釈しがたいのである。そのため、例えば時間軸を圧縮した積算画像を用いるといった利用法に留まる場合も多いのであるが、ここで捨てられた時間軸の中からは何らかの知見が導き出せるのではなからうか、との疑問が生ずる。潜在能力として PETIS には「何ができるのか」、より具体的に言えば、PETIS から得ることの可能な生理的パラメータにはどのようなものがあるのであろうか。これに答えることが本研究のテーマである。

一方、上記のテーマと表裏を成す関係ではあるが、本来まず明確にすべきは「何が知りたいのか」という方針である。我々植物研究者が PETIS を通じて明らかにしたい生理的パラメータとは何であろうか。そのパラメータを導き出すためのデータ解析方法を確立することが本研究のテーマであると言い換えてもよい。

【明らかにしたい生理的パラメータとは何か？】

PETIS を用いたこれまでの研究において、得られたデータを考察する際の着眼点は以下の二つに大別される。

- (1) ある部位に関心物質 (トレーサー) が到達するタイミング
- (2) ある部位への関心物質 (トレーサー) の集積の度合い

植物栄養学・植物生理学の立場からは、この二点は中心的な興味対象であって、このような視点は自然なものであると思われる。

供試される高等植物においては、栄養素などの物質は維管束内の導管あるいは篩管を通じて輸送されつつ、様々な部位において周辺組織へ積み下ろし (unloading) される。それを踏まえて単純化するならば、明らかにしたい生理的パラメータとは

- (1) 局所的な導管あるいは篩管内マスフローの流速
- (2) 局所的なトレーサーの積み下ろし率

であると言えるのではないだろうか。

【データ解析方法の候補】

一般に、物質の輸送動態を解析する方法には、固定点における物質量の時間的变化に注目した考え方であるオイラー法と、個々の流体粒子の確率的な運動に注目した考え方であるラグランジュ法がある。現在我々は、双方の考え方に沿って解析方法を検討しているが、ここではオイラー法について報告する。

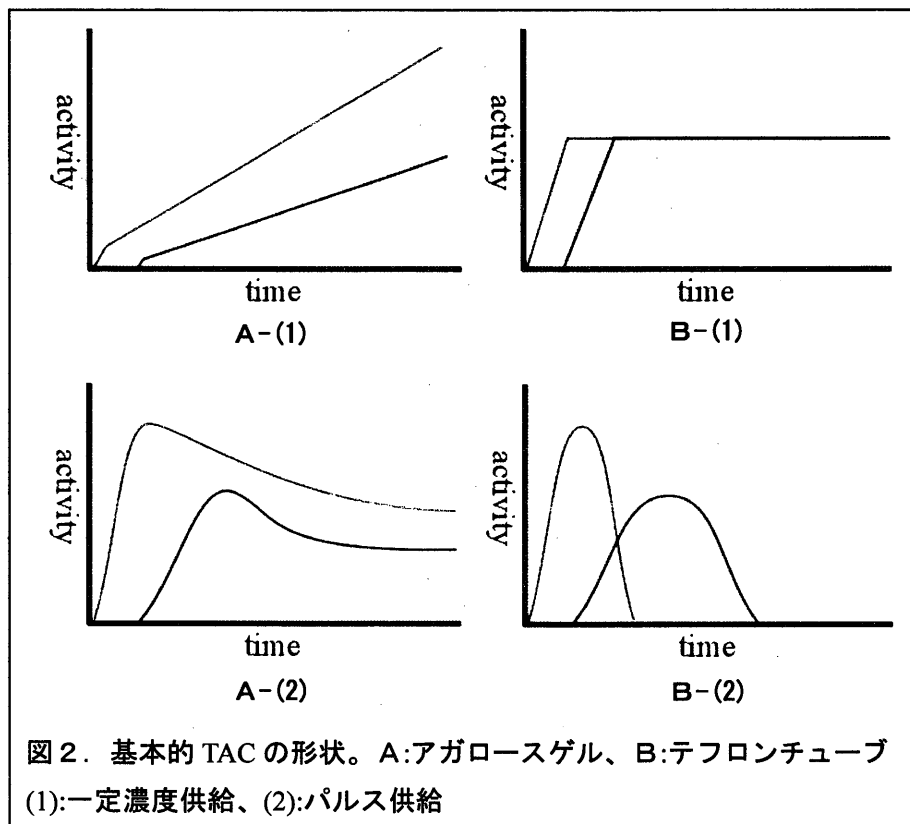
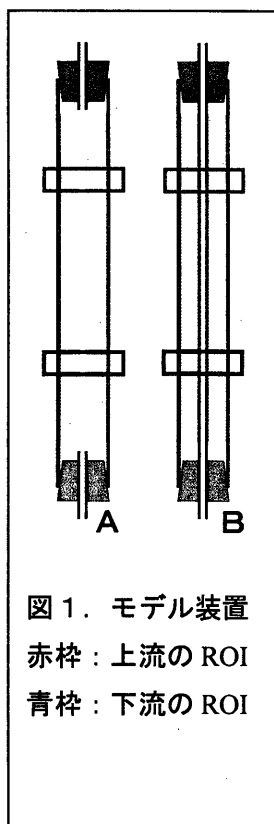
固定点での時間的变化に注目するということは、PETIS 視野内に関心領域 (region of interest, ROI) を設定し、各 ROI における radioactivity の経時変化グラフ (Time-Activity Curve, TAC) を描くことが解析の第一歩となる。

1. 定性的 TAC 解析

実際の植物の維管束構造を単純化したモデルを考える。導管あるいは篩管として一本の管からなる流路を想定する。その管壁は輸送される溶質に対して一定の浸透性を持ち、溶質の一部は管内の溶質濃度に応じて管外の領域へと透過し、もはや流路方向へは移動しないものとする。このようなモデルに上流からトレーサー溶液を流したとき、どのような形状の TAC が観測されるであろうか。

ここで注意しなければならないのは、維管束の直径はせいぜい数十 μm のオーダーであるのに対し、PETIS の解像度は数 mm のオーダーである点である。従って、PETIS は流路 (導管または篩管) 内のトレーサーのみを計測しているのではなく、常に管外の領域 (周辺組織) にあるトレーサーをも含めて計測していると考えられる。

実験用のモデル装置として、アガロースゲルに流路として孔を空けたものを作成し (図 1 A)、対照として管壁が浸透性を持たないよう同じ内径のテフロンチューブを貫通させたものも用意した (図 1 B)。これらに $^{13}\text{NH}_4^+$ 水溶液を (1) 一定濃度で、あるいは (2) パルスで供給し、流速は一定に保った。これら 4 つの試験区を PETIS で計測すると図 2 のような TAC が得られた。これらは TAC の基本要素的な形状であると考えられる。これらを基に、実際の植物の PETIS 計測から得られた TAC を流路内成分と管外成分に分解することにより、その ROI におけるマスフローの流速や積み下ろし率についての解釈が可能となる。



2. 定量的 TAC 解析

伝達関数解析

伝達関数 (transfer function) を用いた植物中物質輸送の動態解析は、Peter Minchin らによって 1970 年代より開発されてきた^{1), 2)}。原理的には以下のようなものである。

輸送経路上に 2 つの ROI (上流: A、下流: B) をとると、2 つの TAC を描くことができる。実際の計測は数秒から数時間のフレーム毎に行なわれるので、時刻を t とするかわりに離散的にフレーム数 n で表現すると、各 ROI における radioactivity は $C_A(n)$, $C_B(n)$ と表せる。ここで、次のような漸化式が成立するものと仮定する。

$$C_B(n) = a \cdot C_B(n-1) + b \cdot C_A(n-d)$$

(ただし a, b, d はパラメータ、 $0 < a < 1, 0 < b < 1, d$ は整数、 $d > 0$)

これは「時刻 n に点 B に存在するトレーサー量は、時刻 $n-1$ に同じ場所に存在していた量の a 倍に、時刻 $n-d$ に上流の点 A に存在していた量の b 倍が加わったものである」と解釈することもできる。上式のようなモデルによる変換を伝達関数と呼ぶ。

次に、 $C_B(n)$, $C_B(n-1)$, $C_A(n-d)$ の各項に実測値を代入すると、最小二乗法などのフィッティングによって、パラメータ a, b, d の最適値を求めることができる。結果として得られた伝達関数が実測の TAC を十分に再現するかどうかによって、仮定したモ

デルの正しさを判定する。

伝達関数によって動態を表すことに成功したならば、そこから動態に関する二つのパラメータを導くことができる。一つ目はトレーサー粒子の平均移動速度であり、もう一つは点A-B間を移動する間に失われるトレーサー量の割合 (leakage) である。特筆すべき点は、この二つの動態パラメータは先に挙げた「明らかにしたい生理的パラメータ」の二つにそれぞれ直接対応している点である。

我々はソラマメ (*Vicia faba* L.) の茎中を輸送される ^{11}C -光合成産物を PETIS により観測し、この方法を用いて動態解析を行なった。その結果、実測値を良く再現する伝達関数モデルが得られ、そこから篩管内の輸送速度および周辺組織への積み下ろし率を節間ごとに推定した³⁾。

現在我々は、伝達関数解析と並行して、コンパートメント解析の検討も行なっている。これは流路内外に区域 (コンパートメント) を設け、各区域内における物質の濃度や区域間の移動量を微分方程式で表したモデルを推定し、モデルから計算される TAC が実測した TAC に最もフィットするようなパラメータを推定するものである。

【これから目指すもの】

現在イメージングされているのはトレーサーの濃度分布に過ぎず、例えばトレーサーを水耕液に与えれば根が強く現れ、 ^{11}C -炭酸ガスとして葉に与えれば供給葉が最も強く現れる。これに対し、植物体の画像を小さな ROI (理想的には各ピクセル) に分割し、ROI 毎に生理的パラメータを推測し、その値を画像化したとすると、植物体の「機能」の分布が表示されることになる。これまでの議論で明らかのように、PETIS の解像度が mm オーダーであることは、 μm オーダーの細胞レベルの機能を解明できないことを意味するものではない。このような”functional imaging”は、医療分野のイメージング技術においては既に実現しているが、植物分野においてこそ、個体や遺伝子の機能評価、薬剤や環境条件などの効果・影響の検定といった多岐に渡る応用が可能であり、興味深い結果が得られるのではないかと期待している。

- 1) P. E. H. Minchin and J. H. Troughton, Quantitative interpretation of phloem translocation data. *Ann. Rev. Plant Physiol.*, **31**, 191-215 (1980)
- 2) N. Keutgen *et. al.*, Transfer function analysis of positron-emitting tracer imaging system (PETIS) data. *Appl. Radiat. Isotopes.*, **57**, 225-233
- 3) 投稿準備中



2.3.4 生物の物質輸送を伴う情報伝達機構解明に関する研究

古市卓也¹、武藤尚志²、曾我部正博¹

松橋信平³・石岡典子³・藤巻 秀³・阪本浩一³・

渡辺 智³・荒川和夫³・久米民和³

(¹名古屋大学大学院医学系研究科、

²名古屋大学大学院生命農学研究科/平成16年1月23日逝去、³原研高崎)

<はじめに>

動物、高等植物などの高度に分化した多細胞からなる生物においては、器官、組織間における情報伝達系が発達している。動物においては高度に発達した神経系が存在し、電位伝達や末端からのシグナル物質分泌により様々な情報の伝達が行われるが、植物ではこのような神経系は保存されていない。植物における病原応答反応における全身抵抗性の獲得や乾燥などの環境ストレスへの適応は古くから知られている現象であり、このメカニズムは近年の研究によってサリチル酸やアブシジン酸などの植物ホルモンと呼ばれる物質の産生、蓄積によって介在されていることが明らかとなった。しかしながら、その輸送形態および受容細胞における応答機構については未だ明らかにされてはいない。高等植物においては、動物における血管系に相当するものとして篩部、木部から構成される維管束系が高度に発達しており、その輸送速度は木部を通じた電圧シグナルで1~4 mm/sec、水圧シグナル: 100 mm/sec; at least、篩管輸送速度 0.6~4 mm/sec との報告がなされている。¹⁾ この中で篩管輸送に着目すると、主な輸送産物は光合成により産生されたショ糖である。糖は、高等植物にとって生長生理に必要なエネルギー、炭素源であるのみならず遺伝子発現制御を行うシグナル物質としても機能している。^{2, 3)} また、高等植物個体では光合成を行うソース器官、生長部位や貯蔵器官などソース器官で産生された糖を受容、蓄積するシンク器官が存在する。ここで葉に着目すると、その発生段階である未成熟の葉では成熟葉から供給されるショ糖に依存している点でシンク器官であるが、やがて成熟して光合成活性が高まることによってソース器官へと転換される。また、シロイヌナズナ等、分化した貯蔵期間を持たない植物種では光合成活性の低下した老化葉は再度シンク器官へと転換されてデンプンなどを貯蔵する。仮に篩管内のショ糖濃度を常に一定であると規定した場合、ショ糖トランスポーターを通じた形質膜を介するショ糖の転流方向は光合成活性に依存した葉肉細胞内のショ糖濃度変化に依存すると考えられる。すなわち、この方向転換がシンク-ソース転換においてシグナルとして機能することが予測される。そこで我々は、細胞内シグナル伝達においてセカンドメッセンジャーとして中心的な役割を果たすサイトゾル Ca^{2+} 濃度 ($[Ca^{2+}]_c$) 変化に着目して、モデル植物であるシロイヌナズナに $[Ca^{2+}]_c$ レポーターであるオワンクラゲ由来の発光蛋白質エクオリンを導入した遺伝子組み替え植物を試

料としてその解明を試みた。ショ糖を含むまたは含まない合成培地で生育させることにより擬似的にシンク葉、ソース葉を作製してショ糖負荷による $[Ca^{2+}]_c$ 変化を測定したところ、擬似ソース葉にショ糖負荷した場合にのみ顕著な一過的 $[Ca^{2+}]_c$ 上昇が観測された。さらにショ糖を含まない合成培地で生育させた成熟個体の根部にショ糖負荷することで下位葉から上位葉へと経時的に一過的 $[Ca^{2+}]_c$ 上昇が移行する様子が観測された。⁴⁾ また、この現象がショ糖同様にグルコース、フルクトースなど代謝可能な糖産物でも起こることから、カルシウムイメージングに併せて ^{18}F 標識グルコース (^{18}FDG) を指標としたポジトロンイメージングを行い、植物における糖転流方向転換によるシンク-ソース転換の分子機構解明を目的として以下の研究を行った。

<糖輸送/ $[Ca^{2+}]_c$ 上昇同時イメージング>

ポジトロンイメージング計測装置内にカルシウムイメージング計測装置（浜松ホトニクス製 Argus-50）を設置することで ^{18}FDG を指標とした根部からの糖輸送、ソース葉において葉肉細胞内糖濃度を上回る維管束系からの糖流入によって引き起こされる一過的 $[Ca^{2+}]_c$ 上昇を測定する同時非破壊計測系を確立した。図1に示した通り、試料としたショ糖を含まない合成培地で生育させたシロイヌナズナ成熟個体への経時的な ^{18}FDG 取込みが確認された。本実験では、 ^{18}FDG をトレーサーとして 100mM のグルコースを根部に負荷した際の地上部への移行の様子および葉への取込み量とその

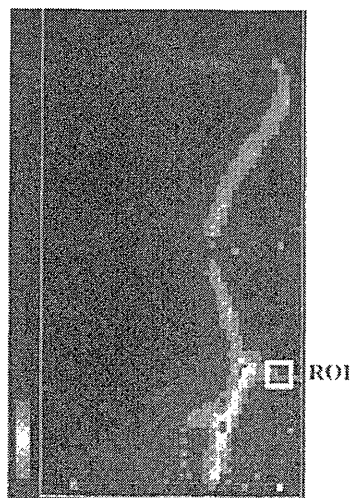


図1 シロイヌナズナ成熟個体への標識糖の移行

$[Ca^{2+}]_c$ 変化を解析した。図1中に示したエリア (ROI) における放射活性は、根部への ^{18}FDG 負荷から約 15 分後に顕著な上昇を示すが、これに呼応するかのようによくエクオリン発光を指標とした $[Ca^{2+}]_c$ 上昇が観測された。さらに、以降の発光強度変化も糖取り込み量変化に呼応していた。また、試料としたショ糖を含まない合成培地で生育させたシロイヌナズナ成熟個体においては土壌において生育する自然界の植物と同様に光合成活性が低下して貯蔵葉として働く老化葉が存在するが、これらの葉では根部への ^{18}FDG 負荷から次第に茎部同様の糖取り込みが観測され、 $[Ca^{2+}]_c$ 上昇は見られなかった。

本研究の成果として、ソース葉への糖流入がカルシウムシグナリングを誘導するシグナルであること、この現象は転流方向の転換時に引き起こされることが明らかとなった。ソース-シンク変換機構の更なる解明により、食料生産の効率化、光合成機能の改善などへの応用が期待されるとともに、本研究により確立された物質輸送／

[Ca²⁺]_c 上昇同時イメージング装置を応用することで植物ホルモンの個体内での移行、シグナルとしての作用機構を明らかにすることが可能となると期待される。

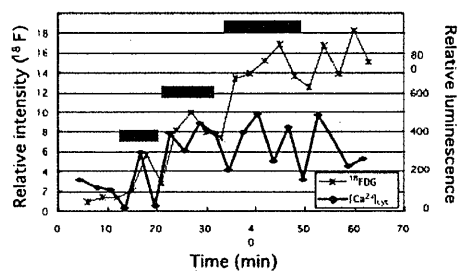


図2 葉における経時的糖移行とカルシウムシグナリング

- 1) Wildon et al.: Annals of Botany 64 691-695 (1989)
- 2) Ohto et al.: Plant J. 7, 297-307 (1995)
- 3) Ohto, M. and Nakamura, K.: Plant Physiol. 109, 973-981 (1995)
- 4) Furuichi et al.: Plant Cell Physiol. 42 (10), 1149-1155 (2001)

3. まとめ

ワークショップでは、ポジトロンイメージング法を用いた植物機能解析研究を中心に、イオンビームを用いた生物応用研究の最前線を紹介し、今後より一層の研究の進展を図るために、4つのセッションを設けた。

原研におけるイオンビームを用いた生物応用研究については3件の発表があった。「ポジトロンイメージング法による植物機能解析研究の展開」では、植物ポジトロンイメージング計測技術の開発の経緯とその特徴、同技術を用いた植物の機能解析研究の展開について、「イオンビーム育種研究」では、イオンビームによって引き起こされる植物の変異の特徴と他の変異源と比較しての優位性、およびイオンビーム育種によって得られた有用品種について報告された。また、「マイクロビームによる細胞照射効果の研究」では、バイオ技術研究グループが世界に先駆け開発を進めている、重イオンマイクロビーム細胞照射システムの特徴と技術的な進展、およびバスタンダー効果解析など細胞への重イオン照射に関する研究の状況と今後の展開が報告された。

ポジトロンイメージング計測による植物生理研究とその応用では、炭素・窒素栄養の吸収・輸送について4件、金属元素の植物体内での挙動について3件の発表があった。本セッションでは、ダイズでの窒素固定では光合成産物が根粒の生育に優先して供給されること、アサの葉で作られた光合成産物の輸送・分配先は、それぞれの葉がついている位置により異なること、微量金属元素である鉄のイネなどの単子葉植物における吸収・輸送に、これまで知られていなかった新しい輸送経路が存在すること、カドミウムポジトロン核種¹⁰⁷Cdの製造技術を開発し、汚染が問題となっているイネおよび環境浄化能が高いアブラナによる吸収後の体内挙動の画像化に成功したことなど、ポジトロンイメージング計測により得られた新規知見が報告された。

植物機能解析研究を支える技術開発のセッションで4件の発表があり、ポジトロンイメージング装置の開発の経緯と高精度化に必要な技術的要件、植物研究用ポジトロン放出核種の製造に関する技術開発と植物研究用標識化合物開発の現状、栄養成分や環境汚染物の輸送・分配に関する数理的な解析手法の開発と生理学的な研究における有効性、などが報告された。

ポジトロンイメージング研究の将来展望のセッションでは、ポジトロンイメージング技術について、変異株スクリーニングや植物ホルモンの移動解析などへの応用の可能性と、このためのポジトロンイメージング装置の感度向上の必要性、ポジトロンR Iと標識化合物合成での技術課題と解決策について話題が提供された。また、今年3月に改定された放射線障害防止法により、医療用PET核種に限って投与した動物の管理区域外持出しが可能となり、植物についても改定の適用可能であるとの話題が提供された。これに関し、ポジトロンイメージング技術を用いた有用品種

スクリーニングの実現性などについて質疑応答があった。ポジトロンイメージング技術の今後の展開では、植物機能を解明するための高分解能・高精度システムの開発と植物育種産業への実用に向けた新たなシステム開発、これを実現するために植物ポジトロンイメージング専用加速器施設の設置の必要性が指摘された。

本ワークショップでは、植物ポジトロンイメージング計測法の植物栄養学、植物生理学分野の研究手段としての有効性と今後の課題が明らかとなった。この成果を踏まえ、ポジトロンイメージング計測技術を用いた一層の植物機能解析研究の進展を図りたい。

付録 1.

プログラム

This is a blank page.

プログラム

開会挨拶（高崎研 野田健治）・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 10:45～10:50

1. イオンビームによる生物応用研究の進展・・・・・・・・・・・・ 10:50～11:50
【座長 京都府立大 井上雅好】

- 1)イオンビームによる生物機能解析 [高崎研 松橋信平]
ーポジトロンイメージング法による植物機能解析研究の展開ー
- 2)イオンビームによる植物資源創成 [高崎研 田中 淳]
ーイオンビーム育種研究ー
- 3)バイオ技術への放射線利用 [高崎研 小林泰彦]
ーマイクロビームによる細胞照射効果の研究ー

昼食（国際交流会館）・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 11:50～13:00

2. ポジトロンイメージング計測による植物生理研究とその応用・・ 13:00～15:20
【座長 秋田県立大 中村進一】

- 1) ダイズ根粒に対する硝酸阻害機構の解析 [新潟大 大竹憲邦]
- 2)寄生植物による宿主からの窒素栄養奪取機構に関する研究
[宇都宮大 佐藤大祐(現・滋賀県農試)]
- 3)低窒素肥料投入土壌に適應できるイネの窒素栄養吸収変異株作出の研究
[滋賀県農試 森 真理]
- 4)導管・篩管を通した養分などの長距離輸送の解析 [元東京大 林 浩昭]

【座長 元東京大 林 浩昭】

- 5)鉄栄養元素の吸収機構に関する研究 [東京大 中西啓仁]
- 6)アサにおける光合成産物の輸送に関する研究
[高崎研 阪本浩一]
- 7)カドミウムの吸収・輸送に関する研究 [秋田県立大 中村進一]

休憩・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 15:20～15:40

3. 植物機能解析研究を支える技術開発 15:40~17:00

【座長 新潟大 大山卓爾】

1)植物ポジトロンイメージング計測技術の開発と今後の展望

[浜松ホトニクス 内田 博]

2)植物研究用ポジトロン放出核種トレーサの製造

[高崎研 石岡典子]

3)植物体内における物質輸送動態の数理的解析

[高崎研 藤巻 秀]

4)カルシウムシグナリングに關与する物質移行とシグナル受容の同時計測
に關する研究

[名古屋大 古市卓也]

4. 総合討論 「ポジトロンイメージング研究の将来展望」 17:00~17:25

【座長 高崎研 久米民和】

話題提供者

放医研 重粒子医科学センター 鈴木和年

北里大 獣医畜産学部 伊藤伸彦

新潟大 農学部 大山卓爾

閉会挨拶 (高崎研 久米民和) 17:25~17:30

移 動

懇親会 (国際交流会館) 17:45~19:30

付録 2.

質疑応答

This is a blank page.

松橋信平（原研）

イオンビームによる生物機能解析

—ポジトロンイメージング法による植物機能解析研究の展開—

Q: 高分解能化を進めることで、通同組織のイメージングは可能か？

A: ポジトロンイメージング法では 1mm 程度の分解能が限界。細胞レベルでの計測には、他の手法の利用が必要。

Q: 計測装置をスキャンさせながらイメージング計測をすることは可能か？

A: 原理的には可能だが、現在の装置にはスキャン機能を付加していない。

Q: 現在の装置の計測視野では植物全体をカバーすることができないので、その対策として必要と思われるが。

A: 植物全体の画像化はできないが、任意の部位での計測が可能な多点式検出器を用いることで、植物全体の情報の収集は可能である。

Q: ポジトロンイメージング装置の検出限界は？

A: 画像化という意味では、検出器全体で数カウント/秒程度が必要。

田中 淳（原研）

イオンビームによる植物資源創成 —イオンビーム育種研究—

Q: 変異のスペクトルが広がるということは、遺伝子座の物理的な大きさが効いているということなのか？

A: 植物の遺伝子の大きさは 1~5kbp であるが、サイズの大きいもので変異が起こりやすいという傾向はない。むしろ、染色体の活性状態が効いているのではないか。

Q: (表 1 にある) カーネーション花色変異では微細班が γ 線のみの特徴的に発生するが、このタイプの突然変異はどのような仕組みで起こっているのか？

A: キクでも薄い桃色などの変異が γ 線で誘発されやすい。確証はないが、一つの推測としてトランスポゾンが γ 線照射により動いたという考え方もある。

Q: 欠失のサイズを連鎖群を使って調べる系は組み立てられるか？

A: これまでは tt、gl についてのみの研究で手一杯の状態である。シロイヌナズナで劣勢ホモをいくつかの遺伝子座で作るという系は今のところ無い。

Q: スペクトルが広いこと、RBE (relative biological effectiveness) の極大を示す LET 値が動物細胞より高いことを調べる実験系として tt や gl の連鎖群を使う系はどうか？

A: 現実的には困難であると考えます。

Q: スペクトルが広がってというのは、よく理解しがたい。事実は事実なのだが、その証明はどうすればよいか？

A: スペクトルが広いというのは、イオンビームはスポット的にランダム的に遺伝子

を攻撃するということによるのではないか。

イオンビームを葉へ照射しても花色の変異が起こりにくい、花びらに照射すると花色の変異が起こりやすい現象が永富氏ら（生物資源研）によって明らかにされている。花では花の遺伝子が活性化されており、イオンビームが通過する際に遺伝子がオープンになっているためと考えられるが、特定の遺伝子が特定の組織で変異を起こしやすいかを調べていきたい。

小林泰彦（原研）

バイオ技術への放射線利用 —マイクロビームによる細胞照射効果の研究—

Q: バイスタンダー効果に関連して、照射する細胞を限外濾過膜のようなものでしゃへいした実験は可能か？

A: 可能である。

Q: (図中にある) 可溶性ということはどうやって確認しているのか？

A: 同一培地中に浸かっているので可溶性であろうと。また、ディッシュ中の離れた位置でも効果が現れているので、(何らかの) 成分によると考えている。

Q: 効果は照射細胞からの距離依存性はあるか？

A: そのようなことはない。

Q: 細胞質を照射する場合、ベシクルなどの損傷は考えられるか？

A: 確認はしていないが考えられる。細胞膜損傷が主原因ではないかと考えている。ビームエネルギーを調整し、細胞膜のみ損傷する条件で比べると差が見られるので重要と考える。

C: 非常に面白い現象と考える。

C: ミトコンドリア DNA 損傷が無い細胞を使って (バイスタンダー効果発現の機構) が確認できるのではないか？

Q: 現在は、2次元の位置確認だが、3次元での位置確認はどうか？

A: 細胞核サイズでは困難だが、ビーム集中部分で起こる酸化や発光で検出可能と考える。

大竹憲邦（新潟大）

ダイズ根粒に対する硝酸阻害機構の解析

Q: 硝酸を吸収した時に、硝酸自体がシグナルとなっているのか、あるいは代謝産物がシグナルとなっているのか？

A: 硝酸そのものではなく、硝酸を利用する過程での炭素の供給がシグナル（キーポイント）になっていると考える。これと、窒素固定活性には別のファクターが絡ん

でいると考える。

Q: 硝酸を入れた場合、根において代謝産物などに変化が見られると言うことはあるのか？

A: 詳しく調べていないが、硝酸、アンモニア、アミノ酸（アスパラギン）を計測している。

Q: グルタミンはどうか？

A: グルタミンはほとんど検出されない。磨り潰した状態と同化液では組成は違うが、アスパラギンとアスパラギン酸が主である。

佐藤大祐（宇都宮大(現・滋賀県農試)）

寄生植物による宿主からの窒素栄養奪取機構に関する研究

Q: ヤセウツボ非着生側から窒素源を与えた際、ヤセウツボの塊茎への移行はあるか？

A: 定量的な解析までできていないので、今の段階では明確には言えない。

C: 定性的には非着生根の窒素もヤセウツボに流れていることが画像から読み取れる。

Q: 18F で体積を評価するという方法は面白いと思う。18F は維管束の体積を評価できるという根拠はどうか？

A: 明確な根拠を示す証拠は今のところ得られていない。18F で見た画像が維管束の体積を示すということではなく、着生・非着生根での生理的な差が 18F では 13N に比べて少ないと。むしろ構造に 18F のシグナルは比例しているであろうと、従って 18F で標準化すれば構造や太さの影響がキャンセルされて、生理的な意味だけの 13N の濃度分布が得られると考える。

Q: 18F で標準化する方法は。18F の画像を先ず取るのか？

A: 同じ個体で 13N の画像を取ってから 18F の画像を取る。

Q: 18F を着生根から与えた場合、オロバンキはどのように見えるのか。オロバンキへの流入は見えるのか？

A: オロバンキにもおそらく容積分の 18F が流入している。

先ほどの質疑の補足として、18F の部位での経時変化が見られないことから、おそらく 18F の画像は体積を反映していると考えられ、18F による体積の標準化は有効であると考ええる。

森 真理（滋賀県農試）

低窒素肥料投入土壌に適應できるイネの窒素栄養吸収変異株作出の研究

Q: 硝酸イオン吸収トランスポーター（NRT2）を発現させたイネは、実験室レベル

で、低い硝酸でも生育や根の発育が良いといったことはみられるか？

A: シャーレ中の栽培では発育はよいと思う。収量については調査を進めている。

Q: 窒素の吸収を高めるのではなく、登熟期の転流能力を上げるという方向はあるか？
ポジトロンイメージングで選抜するという方法は考えられないか？

A: イネでは窒素転流は重要だと思うが、転流を選抜手法とするには現段階では難しいが、将来的には取り組みたい。

Q: NRT2 が増えて窒素吸収量が増えたということだが、単位 NRT2 量あたりの硝酸吸収量は変わらず、NRT2 量の増加に吸収量の増加が比例したということか？

A: NRT2 量の定量がまだできていないので、はっきりしない。

C: (前質疑に) 関連して、省肥により栽培すると収量は落ちるが、味を良くするためには窒素が少ない方が良く、吸収はするが実への再転流を抑えると窒素肥料の利用効率は良くなると考えられる。窒素の実への移行は窒素吸収と分けて考えると良いのではないか。

林 浩昭 (元・東京大)

導管・篩管を通した養分などの長距離輸送の解析

Q: 今年のような例外に限らず、通常 (イネを) 栽培をしている中で、テーマとしては取り上げられていないが、研究して面白い題材は何かあるか？

A: たくさんあると思うが、前講演者 (森氏) の話は重要で、商品にした時収量は落ちるが、味はよく倒伏もしない。やり方は分かっているが、これでは満足しない。収量は維持したい。従って、森氏のような仕事は非常に大事だと思う。

窒素肥料に関しては、植物による利用率は 60%程度にとどまり、残りの 40%はどこかに行ってしまう。それをどうするかという研究は非常に大事なのだが、個々の農家のレベルでの管理が徹底されてはいない。吸収率、利用率をどう高めることが、実は環境を考える時に非常に重要である。

中西啓仁 (東京大)

鉄栄養元素の吸収機構に関する研究

Q: Fe-52 や Zn-62 の娘核種の補正はどうしているのか？どのくらい影響があるかは評価した方がよい。

A: していないのが現状。ポジトロン放出核種でない RI を吸収させて差し引くということはありえる。

C: Mn や Cu など娘核種との関係で差し引くことができると思う。

Q: DC について O-15 の水でも強いシグナルが見られたが、DC に強いシグナルが見

られるのは積極的な蓄積によるのか、または DC の体積が大きいことによるのか、どちらと考えているか？

A: そこまでの評価は行ってない。重要なことだと思うのでやっていきたい。DC は分裂領域で栄養を必要としているので、積極的に蓄積することは考えやすいと思う。

阪本浩一（原研）

アサにおける光合成産物の輸送に関する研究

Q: 最大展開葉に ($^{11}\text{CO}_2$) を吸収させているが、他の葉位での結果はあるのか？

A: アサでは、最大展開葉直下の節間より茎頂側が伸長しているので、上部について示したが、下位葉では、根の方向に光合成産物が輸送され、茎へ若干蓄積されている。また、未成熟葉については、シンク・ソースの関係がはっきりしておらず、光合成産物の輸送（流出）は見られずに、葉自身がシンクでありソースである状況にあることが分かる。

Q: 葉 1 枚が展開するのに何日を要するか？

A: 発芽後 5 日～1 週間ほどで双葉が出、第 1 葉から第 2 葉まではおよそ 1～2 週間、それ以後の成長は著しい。

Q: 最大展開葉からは茎頂方向へ転流が見られないが、上位にある葉は自力で成長しなければならないと言うことか？

A: アサに関しては、最大展開葉は直下の茎の伸長に寄与しており、先端を伸長させるというイメージは当てはまらない。

Q: アサはあまり転流の研究に使われていないと思うが（材料として）面白いと思う。維管束の構造は分かっているのか。つまり、構造的に上に向かうものと下に向かうものと何か差があるのかとか？

A: 繊維材料なのでその面では組織レベルでの観察は行われている。しかし、学術的な観点での知見は全くといって良いので、維管束に関する議論は困難である。

Q: 光合成をさせる際、光量を増したらどうなるか。あるいは、光合成をさせた後で暗黒下に置いた場合は、下から上方向への転流が起こると考えるのか？

A: 光量については植物に負担が無く十分に明るい $500 \mu\text{mol}$ を選択しているが、植物自体は丈夫なので、光量を増加しても障害は起こらずに転流量も増えると考えられる。光量が低い場合には、転流量が低くなる傾向は経験している。光合成後暗転した場合には、輸送量は減少するが輸送先が変わるという現象は見られていない。

Q: 明るい時に蓄積されたものが根から茎頂方向に送られると言うことではないと？

A: そういうことではないと。植物によっては昼間デンプンとして蓄えた光合成産物を夜に輸送することもあるが、アサではそのような結果は今のところ得られていない。

Q: では、夜は伸長しない？

A: 伸長は夜間で大きく昼間小さく、そこの整合が今のところとれていないので、今後の検討課題と考える。

C: そうすると、通常の植物はデンプン（を蓄積して）でリバーシブルに分解するが、何の形で光合成産物をためるかと言うことが違うと言うことではないか。

中村進一（秋田県立大）

カドミウムの吸収・輸送に関する研究

Q: カドミウムが根に取り込まれる時の化学的形態について何か知見はあるか？また、単体、錯イオンなどの形態の違いによる取り込みやすさの違いはあるか？

A: 直接カドミウムと結合してその吸収を同定したという報告は私の知る限りない。植物体の中に入った後は、リン酸が非常にあって、カドミウムが普通の遊離した形では沈殿して移行できないと考えられるので、遊離した形態ではないと思われる。最近では有機酸やファイトケラチンなどと結合して移行していると言われている。

Q: 何かと結合して地上部に移行しているとすれば、その結合を阻害すれば、移行を阻害できると考えられるか？

A: そのように考えられる。その場合、その分、根に蓄積すると考えられる。

Q: ファイトレメディエーションについて。チェルノブイリではストロンチウム90による汚染土壌の浄化にアブラナが有望視されていると聞いているが、吸収のメカニズムにそのような結合物質というものがあるとするならば、カドミウム、ストロンチウム、あるいは他の重金属に対して、同じアブラナであっても異なるメカニズムがあるのか、それともブロードな共通のメカニズムなのか、どちらか？

A: あくまでも現時点での私見であるが、植物の根でそれらの重金属を厳密に検知しているとは思えないので、まず吸収についてはブロードなシステムがあり、根に入った後の移行過程に何らかの特異的なメカニズムがあって、地上部に行きやすいとか行きにくいとかがあるのではないか。

Q: 吸収後の蓄積に特異的な差が出る可能性はあるか？

A: あると思う。いわゆる hyperaccumulate plants（特定の重金属などを超高濃度で集積する植物）では、特定の重金属とよく結合する物質、例えばニッケルに対するヒスチジンがあるとその重金属が地上部に移行しやすいという話もある。特異性のある結合が根で起こってくれば、そのような現象が起こると考えられる。

内田 博（浜松ホトニクス）

植物ポジトロンイメージング計測技術の開発と今後の展望

Q: 視野2センチ程度十分という条件で分解能が1mm以下というような検出器はすぐに使用することができるのか?

A: お金の問題。技術的に問題はないが、製造ラインにない検出器を作製するとなるとそれなりの金額が必要になってくる。

Q: 定量性を担保するなにかよい方法がないだろうか?

A: 植物体をなにかプレートで挟むという方法があるが、それだと分解能が劣化してしまう。また、そのように植物体の環境を変えてしまう方法は問題がある。今後の課題と認識している。

Q: ポジトロンの抜けの割合はどれぐらいか?

A: (松橋) 植物体のサイズや形態、またポジトロンのエネルギーに依存する。例えば薄い葉っぱで18標識フッ素を用いた場合は10%程度の抜けが見られるし、エネルギーの高い13標識窒素を用いた場合は50%程度のポジトロンが抜けてしまう。

石岡典子 (原研)

植物研究用ポジトロン放出核種トレーサの製造

Q: ポジトロン放出核種で標識したアミノ酸は現在利用できるか?

A: ポジトロン標識のアミノ酸は医療用の診断薬として使われており、標識法は確立されている。どのアミノ酸をトレースしたいのか、ご相談頂ければ出来る限り力になりたい。標識したトレーサーが、植物体内における代謝反応(例えば脱メチル化など)によって標識が外れてしまうことがあるので、標識する部位を十分考慮する必要がある。

藤巻 秀 (原研)

植物体内における物質輸送動態の数理的解析

Q: 解析に用いた「変曲点」をグラフの上で一意に決定することは簡単に出来るのかどうか?

A: アガロースカラムの実験では、直線的なグラフが一点で傾きを変えるので、明瞭である。植物ではグラフが曲線になっている。グラフは「流路内」と「漏れ」の2成分の合成された和になっていると思うが、実際にはその境界は一つの変曲点から横一直線のものでもっと複雑なものになっていると考える。この複雑なものを明確にするためには、コンパートメント解析、つまり「流路内」と「漏れ」に対して微分方程式を立ててモデルをあらかじめ作っておいて、観測された曲線に一致するような変数を求めてやる、ということをすると考えている。

Q: 二つ phase のある曲線を「流路内」と「周囲への漏れ」と解釈しているが、それ

はアガロースカラムの実験で「流路内」と「漏れ」を分けて観測したという結果に基づいているのか、あるいは推測に基づくのか？

A: 「流路内」と「漏れ」を分けて観測したわけではないが、流路内の容積は十分に小さいので、「漏れ」成分が「流路内」成分に比べて桁違いに多いことは間違いない。従って、ごく一部の「流路内」成分と大部分を占める右肩上がりの「漏れ」成分に分けるという考え方は妥当であると考えている。

付録 3.

参加者リスト

This is a blank page.

発表関係者（原研外）

1	中村進一	秋田県立大学生物資源科学部
2	伊藤伸彦	北里大学獣医畜産学部
3	森 真理	滋賀県農業総合センター
4	佐藤大祐	滋賀県農業総合センター
5	中西啓仁	東京大学農学生命科学研究科
6	古市卓也	名古屋大学大学院医学系研究科
7	大山卓爾	新潟大学農学部応用生物化学科
8	大竹憲邦	新潟大学農学部応用生物化学科
9	内田 博	浜松ホトニクス株式会社中央研究所
10	鈴木和年	独立行政法人放射線医学総合研究所
11	林 浩昭	元 東京大学農学生命科学研究科

一般参加者（原研外）

1	大山健一	独立行政法人科学技術振興機構
2	井上雅好	京都府立大学大学院農学研究科
3	岡村正愛	キリンビール株式会社
4	新井朋二	群馬県農業技術センター
5	川島祐介	群馬県林業試験場
6	石原紀之	JFE プラント&サービス株式会社量子機器グループ
7	前島慎一郎	静岡県農業試験場
8	菊池文夫	株式会社第一ラジオアイソトープ研究所製造部
9	須藤 浩	千葉大学大学院薬学研究院
10	張 新望	千葉大学園芸学部
11	陳 素梅	千葉大学園芸学部
12	酒井一夫	電力中央研究所
13	藤原 徹	東京大学生物生産工学研究センター
14	綿井博一	東京大学大学院農学生命科学研究科
15	雨木若慶	東京農業大学農学部
16	乗越 亮	東京農業大学農学部
17	片野 匠	東京農業大学農学部
18	小沼亮子	東京理科大学
19	日出間 純	東北大学大学院 生命科学研究科
20	重森 勲	長野県野菜花卉試験場
21	赤羽弘文	長野県野菜花卉試験場
22	宮坂幸弘	長野県野菜花卉試験場
23	石橋弘規	新潟大学農学部

24	末吉 邦	新潟大学農学部応用生物化学科
25	伊藤小百合	新潟大学農学部応用生物化学科
26	山崎明彦	新潟大学農学部応用生物化学科
27	原 武	新潟大学農学部応用生物化学科
28	木村拓也	新潟大学農学部応用生物化学科
29	南雲俊一郎	日本総合研究所
30	熊井 大	日本総合研究所
31	森下敏和	独立行政法人農業生物資源研究所放射線育種場
32	西堂雅博	ビームオペレーション
33	北島信行	株式会社フジタ
34	古沢佳也	独立行政法人放射線医学総合研究所
35	関根俊明	財団法人 放射線利用振興協会
36	八木國光	財団法人 放射線利用振興協会
37	石本 洋	北海道大学大学院工学研究科
38	斉藤宏之	理化学研究所
39	青木 考	理化学研究所植物科学研究センター
40	榊原 均	理化学研究所植物科学研究センター
41	古屋拳幸	和歌山県農林水産総合技術センター暖地園芸センター
42	山本 修	株式会社渡商会
43	金子元茂	株式会社渡商会

原研

1	加藤義章	理事
2	野田健治	高崎研究所長
3	荻野伸明	管理部長
4	南波秀樹	材料開発部長
5	久米民和	イオンビーム生物応用研究部長
6	小原祥裕	放射線高度利用センター長
7	荒川和夫	放射線高度利用センター次長
8	小林泰彦	バイオ技術研究グループ
9	坂下哲哉	バイオ技術研究グループ
10	田中 淳	植物資源利用研究グループ
11	大野 豊	植物資源利用研究グループ
12	高橋真哉	植物資源利用研究グループ
13	北村 智	植物資源利用研究グループ
14	鈴木ちひろ	植物資源利用研究グループ
15	松橋信平	生物機能研究グループ

16	渡辺 智	生物機能研究グループ
17	石岡典子	生物機能研究グループ
18	藤巻 秀	生物機能研究グループ
19	鈴木伸郎	生物機能研究グループ
20	石井里美	生物機能研究グループ
21	阪本浩一	生物機能研究グループ
22	河地有木	生物機能研究グループ
23	塚本崇志	生物機能研究グループ
24	横田 渉	放射線高度利用センター
25	田中 進	利用計画課
26	上松 敬	イオン加速器管理課
27	石堀郁夫	イオン加速器管理課
28	福田光宏	ビーム技術開発室
29	酒井卓郎	ビーム技術開発室
30	伊藤久義	極限環境材料研究グループ
31	八巻徹也	有機機能材料研究グループ

This is a blank page.

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J
1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バ	b
バール	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m
1 b = 100 fm² = 10⁻²⁸ m²
1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa
1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²
1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq
1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg
1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy
1 rem = 1 cSv = 10⁻² Sv

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版, 国際度量衡局 1985年刊行による。ただし, 1 eV および 1 uの値は CODATA の1986年推奨値によった。
- 表4には海里, ノット, アール, ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- bar は, JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令では bar, barn および「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れていない。

換算表

力	N (=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s (N·s/m²) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁴ St (ストークス) (cm²/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg (Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸
	1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1

1 cal = 4.18605 J (計量法)
= 4.184 J (熱化学)
= 4.1855 J (15 °C)
= 4.1868 J (国際蒸気表)
仕事率 1 PS (仏馬力)
= 75 kgf·m/s
= 735.499 W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7 × 10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

第3回イオンビーム生物応用研究ワークショップ論文集 2004年9月29日、高崎研究所

R100

古紙配合率100%
白化度70%再生紙を使用しています