

# バイオマス利用を目指す街路樹の光合成能力と排気ガス耐性調査 Efficient Photosynthesis and Auto-exhaust Resistance of Street Trees

松嶋 卯月

Uzuki Matsushima

岩手大学 農学部

Faculty of Agriculture, Iwate University

## 要旨

都市部で排出される CO<sub>2</sub> の削減を目指し、街路樹は有効利用されるべきである。本プロジェクトの最終目標は、都市部の過酷な条件下でも、高い光合成能力およびバイオマス生産能力をもつ街路樹を最適管理し、枝打ち後の産物を炭化することで CO<sub>2</sub> を固定し、土壌改良材として再利用するサイクルを構築することである。本申請では、各街路樹の都市の排気ガスに対する耐性を明らかにするために、排気ガスがその光合成能力に与える影響を、葉部蒸散流の可視化、気孔反応、クロロフィル蛍光から明らかにする。蒸散が光合成に高く寄与するのは自明であるが、ここでは申請者らが開発した中性子ラジオグラフィと重水トレーサを用いた葉部蒸散流の可視化を他の光合成反応とリンクさせる新規性の高い試みを行う。

## Abstract

Street trees have great potential as automobile exhaust-related CO<sub>2</sub> absorbers in urban areas. With regard to this, the objectives of this project are as follow.

1. To develop a proper cultivation method for street trees that have high photosynthetic rate and biomass production.
2. To reuse pruned prunes, which grow with absorbing CO<sub>2</sub>, as a soil improvement material by carbonizing.

The main issue is to identify those street trees that have sufficient tolerance of toxic auto exhausts to act as effective CO<sub>2</sub> absorbers. During the coming academic year, we aim to evaluate the auto exhaust tolerance of street trees. The auto exhaust tolerance is evaluated from photosynthesis by measuring chlorophyll fluorescence, transpiration and stomatal movement of the leaves. Since it has been known that transpiration is clearly related to photosynthesis, water movement will be observed using cold neutron radiography with a D<sub>2</sub>O tracer. The novel method would clarify the relationship between water usage in photosynthesis and the toxicity of auto exhausts.

## 1 研究目的

地球温暖化に対する危惧により CO<sub>2</sub> の削減は人類共通の課題となっているが、昨今の自動車数の増加によって CO<sub>2</sub> の排出量は依然として増加している。都市部において、街路樹は主に景観を美化するために用いられるが、自動車から排出される CO<sub>2</sub> の固定を行う機能を持つものとしてさらに有効利用されるべきであろう。景観の美化だけに特化した街路樹ではなく、活発な光合成能力により、多くの CO<sub>2</sub> を同化する樹木を選択し、そのバイオマスを炭化し土壌改良剤として土壌に混入することで、CO<sub>2</sub> を半永久的に固定することが可能であると考えられる。光合成が活発である街路樹は、枝打ちの間は

かかるものの、市街地の美観を保ちつつ CO<sub>2</sub> の固定機能も持ちうる。本研究では、街路樹のバイオマスを利用して自動車が排出する CO<sub>2</sub> を固定するサイクルを構築する第一段階の研究として、街路樹の光合成能力および排気ガスへの耐性を葉部蒸散流の可視化とクロロフィル蛍光から明らかにすることを目的とした。

## 2 研究経過

### 2.1 冷中性子ラジオグラフィ

中性子ラジオグラフィは、比較的金属元素を透過しやすく水素など軽元素が観察可能であるという、X線イメージングとは異なった性質を

持つ。生命科学の分野では水素に対する中性子の減衰係数が高いことを利用して、主に植物、特に根中の非破壊水分測定に使われてきた<sup>1)2)</sup>。本研究では、より高い画像コントラストを得るため、中性子ビームのエネルギーが低い冷中性子ラジオグラフィ装置を利用した。本実験は Hahn-Meitner-Institute (HMI), ドイツ, で行われた。冷中性子ラジオグラフィ装置は、研究炉 BER-II における冷中性子源に設置された NL1b ビームラインに位置する CONRAD を用いた。冷中性子ビームにおける照射スペクトルのピーク波長は約  $3.1\text{\AA}$  である<sup>3)</sup>。CONRAD には、高中性子フラックスで低  $L/D$  のポジション I と、ピンホールスリットによりコリメーションを施した低中性子フラックスで高  $L/D$  のポジション II の2つの照射室が用意されており、高速撮影にはポジション I, 高い画像分解能が必要である場合はポジション II と、目的に応じて選択することができる。ポジション II の画像サイズは  $10\text{cm}\times 10\text{cm}$  で画像分解能は  $200\mu\text{m}$  程度である。両ポジションの諸元を表 1 に示す。照射室内には上下左右

表 1: CONRAD におけるポジション I および II の諸元

	Position I	Position II
Flux $\text{n}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$	$2.0 \times 10^8$	$5.8 \times 10^6$ ( $L/D$ 521)
Beam size $\text{cm}^2$	$5 \times 3$	$10 \times 10$
$L/D$	$<70$	521, 261, 174

方向に試料を自動可動できる試料台が設置され、それによりビーム位置に対するサンプル移動の融通性を持つ。照射室内のビームの進行方向に向かって右側は 2,3 人が入って作業しても十分なスペースがある。詳細については Kardjilov ら<sup>4)</sup>, および Hilger ら<sup>3)</sup>の報告を参照されたい。

## 2.2 重水トレーサ

本研究の特色は、冷中性子ラジオグラフィと重水トレーサを用いた葉部蒸散流の可視化を利用することである。試料の厚さあるいは構成する元素の減衰係数によって濃淡が表れる中性子あるいは X 線ラジオグラフィでは、試料中における血液や水など流体の定常的な流れを可視化

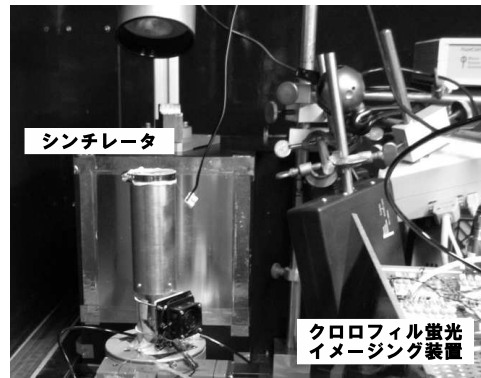


図 1: 冷中性子ラジオグラフィ装置内におけるクロロフィル蛍光イメージング装置の設置状況。クロロフィル蛍光イメージング装置は冷中性子ビームが直接当たらないところに設置される。

することができない。そのため、医用 X 線画像撮影では血流を観察するためにトレーサとしてヨード造影剤等が用いられる。一方、中性子ラジオグラフィでは生体試料に対してトレーサを利用した例はあまり見られない。そこで、トレーサとして重水を用い植物体内の定常的な水の流れの観察を試みた。重水素は水素と比較して中性子の減衰係数が小さいため、重水素と酸素からなる重水は水より中性子を透過しやすい。その結果、透過画像における影は、水が重水に置き換わったところほど薄くなる。試料はソーダガラスビーズを充填した直径約  $2\text{cm}$  の石英ガラスチューブに植えられているため、水から重水へのトレーサの入れ替えが容易で、なおかつ石英ガラスおよびソーダガラスビーズには中性子透過性があり、重水供給時には根が重水を吸収の様子が観察できる。すなわち、根も含めた画像情報を取得することが可能である。

## 2.3 クロロフィル蛍光イメージング

クロロフィル蛍光イメージングは、光化学系 II の最大量子収率、電子伝達の量子収率、エネルギーの熱放散の効率などといった光合成の諸性質を簡便に測定できる。冷中性子ラジオグラフィおよびクロロフィル蛍光イメージングを組み合わせることで、植物の水分マップと光合成活性の関係を得ることができる。図 1 は CONRAD 装置内におけるおおよびクロロフィル蛍光イメージング装置の設置状況を示したものである。画像撮影用の CCD カメラ、励起光用ランプからな

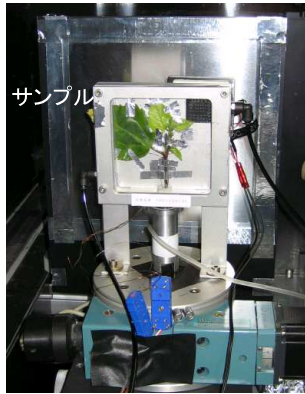


図 2: アルミニウム製試料容器内に設置されたハイビスカス試料

るクロロフィル蛍光イメージング装置は中性子ビームが直接照射されない場所に設置されたため、そのままでは試料正面からのクロロフィル蛍光イメージングが行えない。クロロフィル蛍光イメージングを撮影するために、試料台を回転させた。

#### 2.4 擬似排気ガスの供給

実験試料として、沖縄本島において広く街路樹として利用されているハイビスカスを用いた。本実験では、供試できるサンプルサイズが高さ幅とも約 20cm と限られており、ソーダグラスビーズ培地で育成させる必要があるため、小型の水耕栽培用苗を育成した。ハイビスカスの枝を約 15cm に切りそろえ、施設栽培用ロックウールに挿し木した。発根が確認された後、ソーダグラスビーズを充填した直径約 2cm の石英ガラスチューブに移植した。

本研究では、擬似排気ガスとして濃度 2ppm の  $\text{SO}_2$  を用いた。一定濃度のガスを供給するために、試料はアルミニウム製密閉容器内に設置された。その容器にはクロロフィル蛍光イメージングのための石英ガラス窓を設置した。試料容器内に設置されたハイビスカス試料を図 2 に示す。アルミニウムは中性子の透過性が高いため中性子ラジオグラフィにおいて試料容器によく使われる。一般に中性子ラジオグラフィ装置はデテクタ周辺に空間的余裕を持たせていることが多く、このように試料容器を用いてその内部ガス組成を変化させるなど、特殊な環境の中でのイメージングが比較的行きやすい。また、腐食性ガスである  $\text{SO}_2$  を濃度 2ppm で用いたが、

CONRAD の照射室には外部への排気ダクトが設置され、配管を接続することができ照射室内の汚染はおこらなかった。

初期状態のハイビスカス試料の冷中性子ラジオグラフィおよびクロロフィル蛍光イメージングを行ったのち、 $\text{SO}_2$  を 60 分間供給した。また、その後の回復を 120 分間両イメージング法を用いて観察した。

### 3 研究成果

クロロフィル蛍光イメージングによって、ハイビスカス試料に対する  $\text{SO}_2$  曝露の影響が可視化された。図 3 は、 $\text{SO}_2$  に曝露前、曝露中、曝露後のクロロフィル蛍光イメージである。ここで、

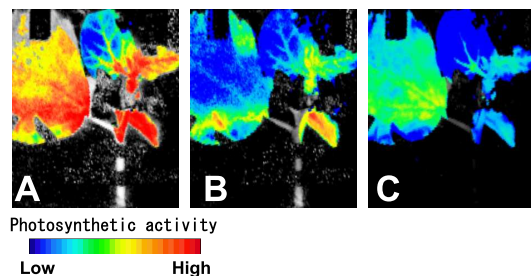


図 3: 異なる  $\text{SO}_2$  環境に置かれたハイビスカス苗木のクロロフィル蛍光画像。A:  $\text{SO}_2$  曝露前

B: 同試料を  $\text{SO}_2$  2ppm 環境下に置いてから 65 分後。 C: 再び空気環境下に置いてから 120 分後

計測されるパラメータの一つである  $F_v/F_m$  は、光化学系 II の最大収率であり、量子収率の低下に伴って減少する。図の擬似カラーは  $F_v/F_m$  が大きいほどカラーバーの右方の、少ないほど左方の色で着色された。 $\text{SO}_2$  曝露によってハイビスカス葉の  $F_v/F_m$  は減少し、光合成活性が低下したことが示された。試料を  $\text{SO}_2$  2ppm 環境下に置いてから 65 分後にクロロフィル蛍光イメージングを行い、その直後に試料に供給するガスを空気に切り替えた。なお、供給ガス切り替え前後の画像を示した図 4 中の 3 枚の画像間の時間間隔はほぼ 20 分である。 $\text{SO}_2$  曝露後 120 分後においても、 $F_v/F_m$  は初期状態に回復しなかった。以上より、 $\text{SO}_2$  はハイビスカス苗の光合成活性に大きな影響を与えたと考えられる。このような光合成活性の低下は、バイオマス生産に影響を及ぼすと考えられ、 $\text{SO}_2$  など自動車の排

気ガスに含まれる有害ガスに強い街路樹を選択し、バイオマス利用する必要性が認められた。

冷中性子ラジオグラフィによって得られた冷中性子画像には、重水トレーサによる正コントラストが現れた。これまで、トマト苗など茎の細い草本にて正コントラストが確認されていたが、本実験により、木本の苗木においても、冷中性子ラジオグラフィと重水トレーサの併用により、水移動を観察可能であることが明らかになった。重水は水と化学的性質が似ているため、より現実に近い水の動きを観察できることが予想され、今後の応用が期待される。重水トレーサを用いた冷中性子画像を図4にしめす。図中

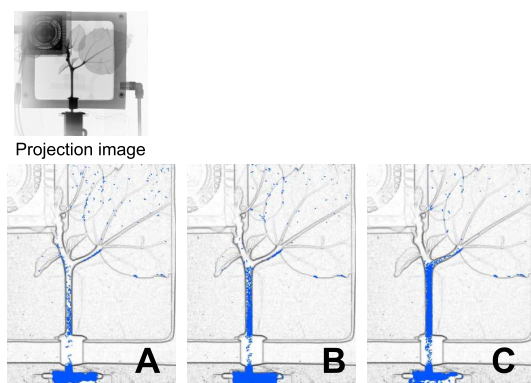


図4: 異なるSO<sub>2</sub>環境に置かれたハイビスカス苗木における重水トレーサの吸収。A: 試料をSO<sub>2</sub>2ppm環境下に置いてから50分後。B: 同65分後。C: 再び空気環境下に置いてから20分後

の濃淡画像は、試料および試料容器の透過画像を示し、画像A, B, Cは各時間における画像を初期画像で除した画像に輪郭を重ねたものである。クロロフィル蛍光イメージングではSO<sub>2</sub>の曝露により光合成活性が低下したことが示されたが、重水トレーサの移動速度には大きな変化は見られなかった。しかし、光合成が活発であるほど葉は水を必要とするため、光合成活性が低下すると植物の蒸散流量は減少する。本実験は今のところ一例であるため今後実験例を増やし、重水トレーサの移動速度と光合成活性についてさらに検討を進める予定である。

#### 4 今後の課題と発展

以上の結果より、クロロフィル蛍光イメージングによって排気ガスが街路樹の光合成活性に

与える影響を効果的に調査可能であることが明らかになった。今後は、多くの街路樹に対しクロロフィル蛍光イメージングを用いた調査を行い、排気ガス曝露下においても高いバイオマス生産を実現できる樹種を選定する必要がある。また、冷中性子ラジオグラフィと重水トレーサの併用が木本の苗の蒸散流測定に応用できることが明らかになった。今後は得られた画像の効果的な読映手法を構築し、クロロフィル蛍光イメージングとのより良い連携を模索する予定である。

#### 参考文献

1. T. M. Nakanishi et al., *Radioisotopes*, **40**, pp. 126–128 (1991).
2. T. M. Nakanishi et al., *Radioisotopes*, **41**, pp. 638–641 (1992).
3. A. Hilger et al., *Physica B*, **385(86)**, pp. 1213–1215 (2006).
4. N. Kardjilov et al., *Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res.*, **542(1-3)**, pp. 16–21 (2005).

#### 5 発表論文リスト

1. Matsushima, U., Kardjilov, N., Herppich, W. and Hilger, A., *Efficient Photosynthesis and Auto-exhaust Resistance in Street Trees*, BENSCE Exp. Rep. 2006, pp.138, 2007
2. Matsushima, U., Kardjilov, N., Herppich, W. and Hilger, A., *Development of D<sub>2</sub>O Tracer Method for Water Flow in Plants-Development of D<sub>2</sub>O Tracer Method for Water Flow in Plants*, BENSCE Exp. Rep. 2006, pp.137, 2007
3. Matsushima, U., Kardjilov, N., Herppich, W. and Hilger, A., *Development of D<sub>2</sub>O Tracer Method for Water Flow in Plants-application for grafted tomato seedlings-*, BENSCE Exp. Rep. 2006, pp.171, 2007
4. 松嶋卯月, 中性子イメージングの生命科学への応用 –最近の動向から–, *Radioisotopes*, 受理済み