

樹液の流れの可視化に世界で初めて成功  
～コンパクト MRIを用いた屋外樹木中の水輸送のイメージング～

研究成果のポイント

1. 屋外の自然下に植えられた樹木(ケヤキ)イメージング用のコンパクト MRI(核磁気共鳴画像、magnetic resonance imaging)を開発しました。
2. MRI を用いて屋外樹木の樹液の流れの可視化に世界で初めて成功しました。
3. 樹木にとって樹液の循環は、植物が生きるための植物生理に大きく関与しています。この研究結果から植物生理に関する新たな知見が得られることが期待されます。

国立大学法人筑波大学数理物質系物理工学域 巨瀬(こせ)勝美教授、寺田康彦准教授と大学院生長田晃佳(数理物質科学研究科 電子・物理工学専攻 博士前期課程2年)は、屋外樹木測定用のコンパクトMRIを開発し、屋外ケヤキ内の樹液の流れの可視化に成功しました。樹液の流れのイメージングを連続して行うことにより、昼夜や落葉前後において樹液の流れが大きく変化していることを確認しました。この結果は、樹木の植物生理を明らかにするものであり、植物非破壊計測におけるMRIの有用性を示す結果になりました。MRIを用いて屋外樹木の樹液の流れを捉えたのは世界初の成果です。

\* 本研究の成果は、2016年3月30日に「Journal of Magnetic Resonance」誌にオンライン発表され、同誌2016年4月号の表紙として掲載されました。



研究の背景

植物は人間と同様に、光合成、呼吸、代謝など生きていくための生理機能(植物生理)をもっています。これらは様々な方法で測定されてきましたが、これらの植物生理を解明するためには、同一個体に対し、生きた状態で継続的に測定することが必要です。本研究では、MRIを用いることで、この測定を初めて実現しました。

医療用画像診断装置として有名な MRI ですが、植物の測定装置としても広く使用されています。MRI の特徴としてまず挙げられるのは非破壊で測定が行えるという点です。よく比較される X 線 CT では放射線を使いますが、MRI では磁場を使って測定を行うため、測定対象の被ばくがなく、非侵襲で測定を行うことができます。また、MRI は様々

な物理量の定量化が可能であるという利点があり、これまで、植物内の緩和時間や、植物内部を流れる水の流れを可視化したという報告があります。

しかしそのほとんどは、屋内での測定であったり、屋外でも流れ以外を対象とした測定[1]などに限られており、屋外の自然環境下で樹液流のイメージングを行った例はありません。我々の研究グループは、植物生理解明を目的とした屋外樹木測定用のコンパクト MRI を開発し、ケヤキの測定を行いました。また植物生理の一つである樹液の流れの可視化を試みました。

## 研究内容と成果

測定に用いた樹木は 2013 年に筑波大学構内に植えられたケヤキです。測定に用いた装置は磁場強度 0.2T (テスラ)、ギャップ長 16 cm の永久磁石、平面型グラジエントコイル、ソレノイド型 RF プローブ、MRI コンソールから構成されるコンパクト MRI (図 1) です。雨風対策用に磁石にアクリルボックスを被せ、その上からビニールシートを被せています。

樹液の流れを可視化するために QSI (q-space imaging)<sup>註1</sup> というイメージング手法を用いました。この手法は水分子の動きを捕らえるための手法で、拡散係数や流速の定量測定ができます。これと同時に、比較用として Sap flow meter<sup>註2</sup> でも測定を行いました。

この QSI を用いてケヤキ主幹断面における樹液の体積流 (単位時間当たりの流量) を画素ごとに測定し、一週間の連続測定を行いました。その結果を図 2 に示します。図 2 (a)~(j) は QSI により測定したケヤキ主幹断面の 1 画素当たりの体積流分布です。これらは時系列順に並んでいますが、測定された時間帯はバラバラです。図 2 (k) は Sap flow meter で測定された体積流の時間変化です。図 2 (l) は QSI で取得された体積流分布のケヤキ断面における平均を時間軸でプロットしたグラフです。グラフ上には、図 2 (a)~(j) の取得された時間帯を表示してあります。図 2 (m)(n) は連続測定期間中のケヤキの葉の様子を写真に収めたものです。

図 2 (l) を見ると、樹木は昼に多くの樹液を流し、夜にはあまり樹液の流れはないことが分かります。これは、日中は葉において蒸散が盛んに行われることにより、多くの水が消費されるためだと考えられます。また、2015 年 12 月 4 日以降は樹液の流れがなくなっているのが確認できます。これは落葉により、蒸散を行うための葉が減ってきたためだと考えられます。

これらの QSI による測定結果は図 2 (k) に示す Sap flow meter によって得られた体積流の時間変化と一致しています。これより、今回行った MRI を用いた樹液流の測定は正確であったと言えます。

## 今後の展開

本研究において示す結果は、晩秋における樹液流の様子で、ちょうど落葉の頃です。そのため、樹液の流れはあまり活発ではない時期でした。ケヤキは 4 月頃から葉の芽が出だし、樹液の流れが活発になると予想されます。今後は一年間分の体積流分布のデータ取得を目指し、同時に取得する気象データとの関係性を明らかにしていく予定です。

また、今回は根から葉に水を送るための木部に流れる樹液の観測が中心でしたが、今後は Sap flow meter でも測定することができない師部の流れの測定も試みる予定です。師部は光合成により葉で生成された養分を樹木全体へ行き渡らせるための通り道とされている部分です。師部の流れの測定が成功すれば、樹木の植物生理において新たな知見が得られることが期待されます。



図1 屋外樹木用コンパクトMRIシステム  
(a) 0.2T 永久磁石、(b) 平面型グラジエントコイルとソレノイド型 RF プローブ  
(c) MRI システムの全体図

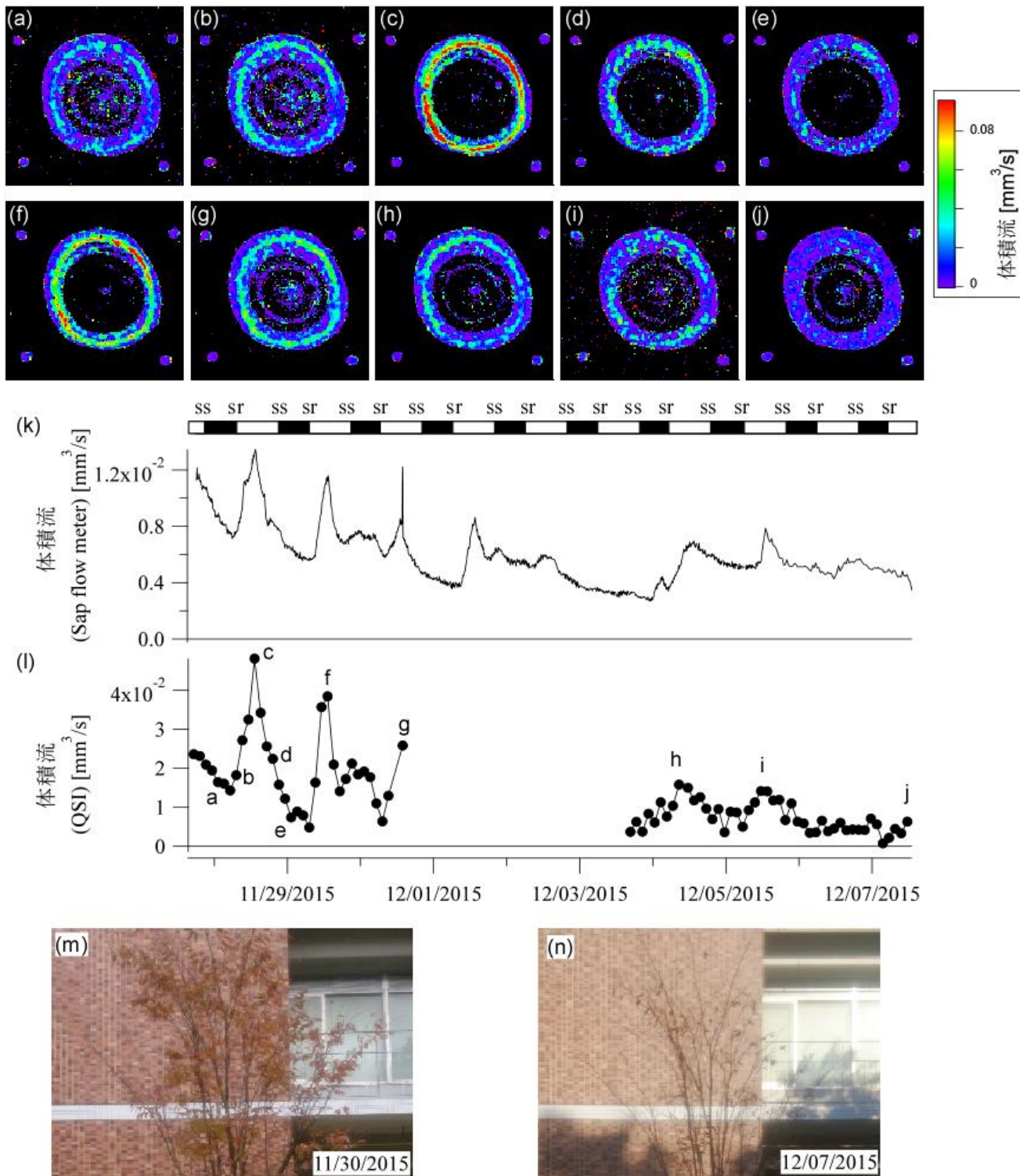


図2 晩秋における樹液流連続測定(2015年11月28日~12月7日)

(a)~(j) ケヤキ主幹面の1ピクセル当たりの体積流分布、(k) Sap flow meter により測定した一週間の体積流時間変化、(l) QSIにより測定した体積流分布(ケヤキ断面の平均)の時間変化、(m)(n)ケヤキの葉の様子

### 用語解説

注1) QSI(q-space imaging)

QSIは水分子の動きを捕らえるための手法で、拡散係数や流速の定量値の可視化に利用され、人体用MRIでは脳梗塞の診断などに応用されている。

注2) Sap Flow Meter

樹木の樹液流測定のゴールドスタンダードで、熱拡散を用いて樹液流の測定を行う手法。

### 参考文献

[1] T. Kimura, Y. Geya, Y. Terada, K. Kose, T. Haishi, H. Gemma, Y. Sekozawa, Development of a mobile magnetic resonance imaging system for outdoor tree measurements, Rev. Sci. Instrum. 82 (2011) 053704.

### 掲載論文

【題名】 Development of an outdoor MRI system for measuring flow in a living tree

(和訳) 樹液流測定のための屋外MRIシステムの開発

【著者名】 Akiyoshi Nagata, Katsumi Kose, Yasuhiko Terada

【掲載誌】 Journal of Magnetic Resonance (DOI: 10.1016/j.jmr.2016.02.004)

### 問い合わせ先

寺田 康彦(てらだ やすひこ)

筑波大学 数理物質系 物理工学域 准教授