

# 生体内における遅い流速の測定法の検討 [大会長賞記録]

長田 晃佳, 寺田 康彦, 巨瀬 勝美

筑波大学数理物質科学研究科電子・物理工学専攻

## はじめに

樹木は私たちの生活において身近なものとなっている。しかし、樹木内の組織や器官ごとの代謝にかかわる情報や水分分布、水輸送などの植物生理に関する情報はまだ完全に明らかになっていない。特に水輸送に関しては樹液の流速がかなり遅く、直接的な測定が難しいことから、その解明が容易ではない。

MRI を用いた屋内植物の流速測定はすでにいくつかの報告例がある<sup>1)</sup>。一方、屋外樹木での報告例としては、流速の変化に対応する画像コントラストの変化を計測した例があるが<sup>2)</sup>、屋外で水の流速を直接計測した研究はない。そこで我々は屋外樹木内の水の流速を直接計測することを目指した 0.2T 永久磁石 MRI システムを開発し、みかけの拡散係数が気温などの気象データと相関をもつことを示した<sup>3)</sup>。2014 年度には樹木内の流速分布を得るため、pulse field gradient-spin echo-phase shift imaging (PFG-SE-PSI) 法を用いた流速計測を行ったが、有意な結果が得られなかった。これは、樹液の流速が極めて遅く、流れによる位相変化とハードウェアの不完全性に由来する位相変化とを差別化できなかつたためである。そこで本研究では、q-space imaging (QSI) 法を使った極めて遅い流速計測を検討した。その結果、屋外樹木内樹液の流速分布の可視化に成功した。

## 方 法

撮像に使用した樹木は 2013 年 3 月に植えられた高さ約 4 m のケヤキであった。MRI システムは、最大磁場強度 0.2T でギャップが 16 cm の永久磁石、平面型グラジエントコイル、ソレノイド RF プロープで構成された。地上から約 40 cm の主幹領域の横断面の観測を行った。

まず樹木の成長軸方向に MPG を印加した pulse field gradient-stimulated echo (PFG-STE) シーケンス (MPG パルス幅  $\delta = 10$  ms, MPG パルス間隔  $\Delta = 100$  ms, 最大 q 値  $q_{\max} = 14.4$  m<sup>-1</sup>, q 値間隔  $\Delta q = 1.80$  m<sup>-1</sup>) を用いて、計 17 枚の複素画像データを取得した。17 枚の画像取得時間は 2 時間であった。それらのデータから、従来どおりの QSI の解析法に基づいてプロトンの Propagator を求めた。この際、ケヤキ主幹の外側に配置した 4 つのファントム (ベビーオイル) 領域の位相がゼロになるように、それぞれの複素画像に対して演算を行い、渦電流磁場やドリフトによって生じる各画像間の位相差を補正した。得られた Propagator をガウシアンでフィッティングすることにより、ピーク位置の原点との差  $\langle r \rangle$  を求めた。 $\langle r \rangle$  を MPG パルス間隔  $\Delta$  秒間のプロトンの平均変位量とみなし、式  $\langle v \rangle = \langle r \rangle / \Delta$  を使って画素ごとの平均流速  $\langle v \rangle$  を求めた。以上の解析を画素ごとに行った。

---

キーワード outdoor MRI system, living tree, flow, q-space imaging

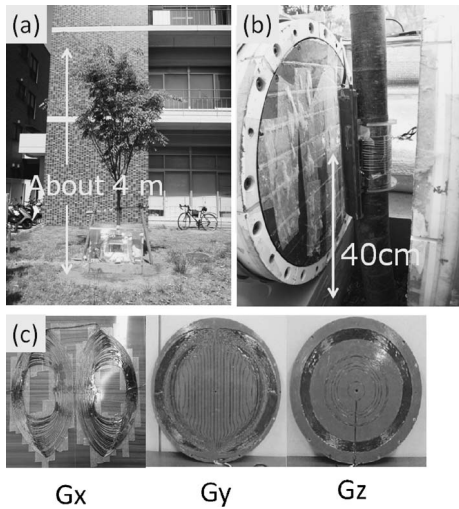


Fig. 1. Outdoor MRI system for measuring flow in the trunk of a zelkova  
 (a) System overview. The zelkova was planted in March, 2013. The system was waterproofed by a box made of acrylic plates. The magnet temperature was kept almost constant by silicon heaters and heat insulators. (b) RF coil and 0.2T permanent magnet. (c) Gradient coils (efficiency :  $G_x=0.676$  G/cm/A,  $G_y=0.123$  G/cm/A, and  $G_z=0.262$  G/cm/A).

## 結果・考察

Fig. 2 に示す画像はケヤキの STE image (Fig. 2(a), (e)) と PFG-STE-QSI 法で測定した flow map (Fig. 2(b), (f)) である. (a)~(d) が 2015 年 6 月 26 日の午前 0:09 に測定した画像, (e)~(h) が同日午後 0:09 に測定した画像である. (c), (g) および (d), (h) はそれぞれ上向きと下向きの流速を STE image に重ね合わせた画像である. 上向きの流速は木部内を流れる樹液, 下向きの流速は師部内を流れる樹液を示している. このように, 今回検討した方法を用いることでケヤキ内の上向きと下向きの流速分布を明瞭に画像化することができた. また, 時間帯による流速の変化も測定することができた.

## 結 論

本研究では, 0.2T 永久磁石 MRI を用いて屋外ケヤキ内樹液の流速分布を可視化した. ケヤキの流速分布は木部, 師部の組織で差が見られ

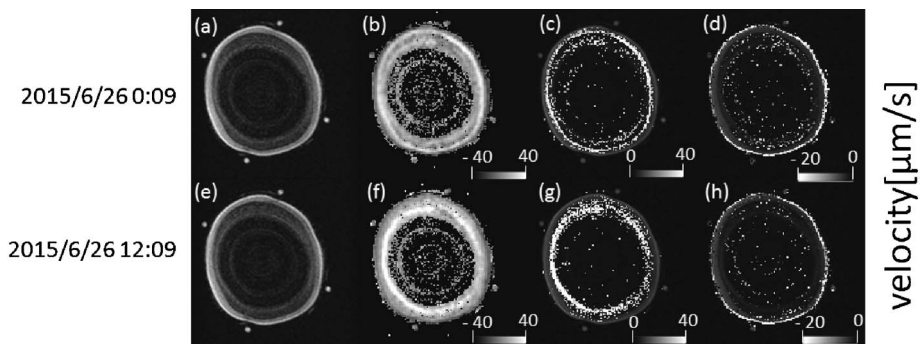


Fig. 2. Diurnal change in the flow velocity in the zelkova  
 (a), (e) STE image ( $q=0$ ) and (b), (f) flow map measured with PFG-STE-QSI. FOV = (10 cm)<sup>2</sup>, slice = 4 cm, matrix size = 128<sup>2</sup>, TR/TE = 800 ms/40 ms, and NEX = 4. The flow measurements were performed at (a)-(d) 0:09 on June 26, 2015 and at (e)-(h) 12:09 on June 26, 2015. (c), (g) Overlay of flow maps ( $>0$   $\mu\text{m/s}$ ) on the STE images ( $q=0$ ). (d), (h) Overlay of flow maps ( $<0$   $\mu\text{m/s}$ ) on the STE images ( $q=0$ ).

た。さらに昼夜での差も見られた。これらの差異は植物生理に適うものであり、今回の計測結果の妥当性を示している。これらの結果から、樹木内の流速のような極めて遅い流速を測定するには PFG-STE-QSI が有力であると結論付ける。

## 文 献

- 1) Windt CW, Vergeldt FJ, de Jager PA, van As H : MRI of long-distance water transport : a comparison of the phloem and xylem flow characteristics and dynamics in poplar, castor bean, tomato and tobacco. *Plant, Cell and Environment* 2006 ; 29 : 1715-1729
- 2) Jones M, Aptaker PS, Cox J, Gardiner BA, McDonald PJ : A transportable magnetic resonance imaging system for in situ measurements of living trees : the Tree Hugger. *J Magn Reson* 2012 ; 218 : 133-140
- 3) Terada Y, Fukita A, Moriwaki S, Kose K : *In situ* living tree measurements using a 0.2 T permanent magnet. 12th International Conference on Magnetic Resonance Microscopy, Fitzwilliam College, Cambridge, UK 25-29 August, 2013 ; 79

**Comparative Study on Slow Flow Measurement Methods for Living Systems  
[Presidential Award Proceedings]**

Akiyoshi NAGATA, Yasuhiko TERADA, Katsumi KOSE

*Institute of Applied Physics, University of Tsukuba  
1-1-1 Tennoudai, Tsukuba, Ibaraki 305-8573*

We have developed an outdoor magnetic resonance imaging (MRI) system in 2013 that can measure flow dynamics in a living tree since. In this study, we tested q-space imaging (QSI) for the measurement of extremely slow flow in living systems. The MRI system consisted of a 0.2T permanent magnet with a 16 cm gap, planar gradient coil set, solenoid radio frequency probe, and MRI console. Flow in the trunk of *Zelkova serrata* at 40 cm above the ground level was measured using pulsed field gradient-stimulated echo (PFG-STE) sequences (repetition time/echo time = 800 ms/40 ms, slice = 4 cm, number of excitations = 4, matrix =  $128 \times 128$ , field of view =  $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ ,  $\delta = 10 \text{ ms}$ , and  $\Delta = 100 \text{ ms}$ ). The flow velocity was calculated on per-pixel basis as follows: the calculated propagator was subjected to least-squares fitting to a Gaussian function, and the mean displacement  $\langle r \rangle$  was derived; further, the flow velocity was derived from the equation  $\langle v \rangle = \langle r \rangle / \Delta$ . This measurement method could measure flow velocity in the stem on per-pixel basis. We observed upward flow in the xylem and downward flow in the phloem. In addition, this method enabled assessment of the diurnal change in the flow velocity in the living tree.