

令和 4 年 5 月 25 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2019

課題番号：15H02450

研究課題名(和文) 通水阻害と再充填のメカニズムからみた樹木のストレス耐性の解明

研究課題名(英文) Stress tolerance mechanisms in trees from the viewpoints of xylem embolism and refilling

研究代表者

福田 健二 (Fukuda, Kenji)

東京大学・大学院農学生命科学研究科(農学部)・教授

研究者番号：30208954

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,600,000円

研究成果の概要(和文)：樹木の幹木部における非生物的ストレス(乾燥ストレスおよび凍結ストレス)による通水阻害の発生と道管の再充填による通水機能の回復、生物的ストレス(病害)による通水阻害の発生について、主にMRIによる非破壊観察手法と解剖学的手法、クライオSEM観察を併用して明らかにした。従来の通水測定手法におけるアーティファクトとして知られている切断や凍結によるエンボリズム、吸水による再充填を生じさせない実験手法を確立した。樹液流速の可視化手法を確立し、QSI法によるケヤキ成木の年輪内の通水部位の特定やPSI法による苗木の流速分布の可視化に成功した。針葉樹の凍結時の壁孔閉塞による通水阻害の発生を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ストレスによる木部通水阻害は、樹木の生育限界や森林の衰退枯死を決定する重要な生理学的プロセスであるが、従来は直接観察することが困難で、切枝を用いた通水測定によって評価されていた。MRIを用いた非破壊観察によって、従来の測定手法におけるアーティファクトの発生を抑える手法を確立したこと、実際の樹木内部の樹液流速分布をMRIにより可視化する手法を確立したことは、今後の樹木生理学的研究の基礎となる。また森林限界付近に分布する亜寒帯針葉樹の凍結ストレスによる通水阻害メカニズムとして、従来のエンボリズムとは異なる壁孔閉鎖というメカニズムが働いていることを発見した。

研究成果の概要(英文)：Dysfunction of xylem water conduction in trees under biotic (drought and freeze-thaw) and abiotic (wilt disease) stresses and recovery from it were examined by undestructive observation by MRI and anatomical studies. Artefactual embolism and refilling in sampling for hydraulic measurements were observed by MRI and new sampling methods for avoiding them was established. New methods for sap velocity mapping by MRI were established: modified QSI method was applied to a mature zelkova tree and PSI method was applied for tree seedlings. Pit aspiration caused by freezing was discovered as a new mechanism of hydraulic dysfunction in subalpine conifer xylem in winter.

研究分野：森林植物学

キーワード：MRI クライオSEM 乾燥ストレス 凍結ストレス 流速分布 非破壊観察 可視化

1. 研究開始当初の背景

樹木が根で吸収した水分を地上数十mの葉まで輸送するためには、通水経路 (SPAC) を健全に維持することが必要である。乾燥や凍結ストレスによる通水阻害は、各樹種の天然分布や立地選択を決定する最大の要因の1つであり、気候変動が進行すると通水阻害による森林の衰退や生産性の低下が生じることが予測されてきた (Allen et al. 2010, Choat et al. 2012 Nature など)。したがって、各樹種の水ストレスへの適応能力の評価は急務である。

樹木木部の道管・仮道管内の樹液には、日中、強い負圧(張力)がかかっており、道管・仮道管内に、隣接する組織から気泡が引き込まれると、ただちに道管・仮道管の内腔全体が気体に占められ通水機能を失う「キャビテーション」が発生することが知られている。樹木は通水機能を維持するため、道管・仮道管のキャビテーション抵抗性、気孔閉鎖等の失水調節、幹の貯水による負圧緩和といったメカニズムで対応している (e.g. Sparks and Black 1999) が、実際にはキャビテーションは頻繁に発生しており (e.g. Miranda et al. 2010) 樹木の通水維持機能を理解するためには通水阻害からの回復 (道管・仮道管の再充填: refill) についての理解が欠かせない。再充填のメカニズムとしては、木部柔細胞から空洞化した道管内腔へ糖が分泌され局所的な浸透圧を発生させるとの仮説が有力視されており、その際、壁孔に存在する気泡により再充填中の道管は周囲の負圧下にある道管水から隔離されると推測されている (Salleo et al. 2004, Secchi et al. 2011) が、実証されていなかった。研究分担者の種子田らは、一本の道管にキャピラリーを挿してショ糖溶液を道管に注入したり、壁孔内に気泡を注入したりできる実験系を世界で初めて確立した。また、従来の切枝を用いた通水コンダクタンス測定や cryo-SEM 観察では、サンプリング時のアーティファクトとしての通水阻害や再充填が生じていることが指摘され (Wheeler et al. 2013) 世界的に手法の再検討が求められていた。

一方、樹木の通水阻害に関する理解は、世界的な流行病であるマツ枯れやニレ立枯病を含む「萎凋病」の枯死機構の解明のためにも不可欠であり、研究代表者の福田は、マツ枯れの萎凋枯死メカニズム解明のため、樹木用 MRI (核磁気共鳴画像) 装置を(株)エム・アール・テクノロジー社と共同開発し、通水阻害の進展過程を非破壊で経時的に観察する技術を世界で初めて確立し (Utsuzawa et al. 2005) 通水阻害の拡大とキャビテーションに伴い発生する超音波信号 (AE) とが対応していることを示すなど (Fukuda et al. 2007) 樹木の通水阻害の可視化技術を確立し、先行する基盤研究 (A) 「樹木の水分生理特性と萎凋病の枯死機構の統合的理解」(平成 23-26 年度)において、水ストレスによる樹木の通水阻害発生・拡大過程と、物理的傷害やマツ材線虫病、ナラ枯れ等による通水阻害の共通性と特異性を明らかにしてきた。

2. 研究の目的

上記の背景およびこれまでの研究成果をもとに、本研究課題では樹木の通水阻害現象の統合的理解を目指した。すなわち、健全木における乾燥ストレス・凍結ストレス・心材化による通水阻害の発生過程の解明: 木部内で通水阻害が起き始める場所と気泡拡大の3次元的な経路、木部構造との関係、健全木における負圧下での通水阻害からの回復過程の解明: 詳細な生理学的なメカニズムと種間差を含めた生態学的意義、萎凋病における通水阻害の進展過程の特徴: 木部内での通水阻害発生箇所・気泡拡大経路と木部構造および病原体の分布との関係、を明らかにすることを目的とした。

特に、本研究では MRI による医療診断技術である血管造影法 (Angiography) を応用した樹液流速の可視化技術を確立することを目的とした。また、MRI を用いてアーティファクトの有無を検証し、アーティファクトのないサンプリング手法を確立することを目指した。

一方、冬季の樹液の凍結融解による気泡の発生と春季の気泡の再溶解によるエンボリズムからの回復現象も、亜高山帯や山地帯では樹木の生死を決める重要な問題であり、そのメカニズムを明らかにすることを目指した。

3. 研究の方法

アーティファクトのないサンプリング方法の確立のため、MRI により非破壊観察しながらサンプリングや凍結操作を行った。

樹木用 MRI を用いた通水阻害の可視化および樹液流速分布の可視化技術を確立するため、筑波大学構内に植栽されたケヤキ成木に大型樹木用 MRI を設置し、野外観測を行った。

苗木においても同様の技術を確立するため、小石川樹木園の実験室内に設置されたコンパクト MRI を用いて、ケヤキ、シラカンバ等の苗木における樹液流速の可視化を行ったほか、木部組織構造と MRI 画像との対応関係の検証、水ストレスによる通水阻害の発生、拡大過程の観察

と、再灌水後の再充填の有無の観察を行った。また、木部の貯水機能を明らかにするため、モミ（針葉樹）コナラ（環孔材）カツラ（散孔材）の脱水過程における木部の水分分布の変化を X 線マイクロ CT を用いて観察した。

凍結ストレスについては、広葉樹 4 種の苗木を用いて冬季の通水阻害の発生および回復の有無を MRI 観察によって明らかにした。また、北八ヶ岳縞枯山において、シラビソの通水阻害の進展と回復過程を MRI 及び染色法によって定期的に観察するとともに、クライオ SEM 観察および顕微鏡観察によって通水阻害のメカニズムを明らかにした。

萎凋病による通水阻害部位の拡大メカニズムを明らかにするため、マツノザイセンチュウを接種したクロマツ苗木を MRI で非破壊観察するとともに、クライオ SEM による破壊的観察を併用して、通水阻害の発生部位と、線虫分布および樹脂道から仮道管への樹脂の溢出との関係を詳細に検討した。

さらに、環境ストレスが木部形成に与える影響を明らかにするため、被陰条件下で育成されたトドマツ苗木を解剖し、頂芽形成や年輪形成の異常について検討した。

4. 研究成果

MRI を用いて、アーティファクトによる通水阻害および再充填を実際に観察し、それらの少ないサンプリング方法を確立した (Umabayashi et al. 2015 Trees, Ogasa et al. 2016 PCE, Ogasa et al. 2019 Tree Physiol.)

乾燥ストレスによる針葉樹の通水阻害として、クロマツの灌水停止後の通水阻害の進展過程を MRI により可視化し、材線虫病とはまったくことなる通水阻害分布を示すことが明らかにされた (Umabayashi et al. 2016 Trees) また、広葉樹、とくに環孔材樹種の乾燥ストレスによる通水阻害と凍結ストレスによる通水阻害の違いを MRI 観察によって明らかにした (Umabayashi et al. 2016 Tree Physiol.)

被陰のストレスによる形成層の木部形成活動の停滞について、トドマツ苗木を用いて検討した結果、頂芽の成長停止や年輪の一部または全部の欠損が、高頻度で生じていることが明らかにされた (Yasuda et al. 2018ab JPR)

関東地方で育成された広葉樹 4 種の苗木を用いて、凍結ストレスによる通水阻害と落葉との関係について検討した結果、環孔材樹種のハリギリでは、落葉が大径道管の凍結による通水阻害よりも前に起きていること、散孔材樹種では常緑樹、落葉樹とも凍結による通水阻害はほとんど起きていなかった (Umabayashi et al. 2018 Botany)

大型永久磁石 (0.3T) を装備した樹木用 MRI を用いて、QSI (q-space imaging) 法を改良した樹液流速可視化技術を確立し、ケヤキ成木における流速分布の季節変化を明らかにした (Terada et al. 2019)。ケヤキの夏季の樹幹を通過する水輸送量のうち、当年輪早材の大径道管による輸送量は 1/3 程度で、旧年輪および当年晩材がそれぞれ 1/3 ずつを占めた。また、日中の木部樹液流速は葉からの蒸散を左右する大気の水蒸気飽差 (VPD) と高い相関を持つことが明らかにされた。さらに、樹液流速が小さい針葉樹ニオイヒバについても、同じ MRI 装置により樹液流速を可視化することができた (堀川ら 2018 NMR マイクロイメージング研究会)

コンパクト MRI による苗木の樹液流速の可視化については、簡易に樹液流速が可視化でき、組織の緩和時間 (T1, T2) に左右されない PSI (phase shift imaging) 法を適用した結果、QSI 法の結果と高い相関があることが明らかにされた (Hirakawa et al. 投稿準備中)。この手法を用いて、ケヤキ及びシラカンバ、カツラなどの苗における樹液流速分布の季節変化および乾燥ストレスによる通水阻害の進展、再充填の有無を可視化した (平川ら 2017, 2018, 2019, 2020 日本森林学会大会、2018 樹木医学会大会)

木部の貯水機能について X 線マイクロ CT による切り枝の非破壊観察の結果、モミでは晩材仮道管から脱水が生じ、早材の水分が保たれた。カツラでは小径道管が水分を保持していた。コナラでは早材の大径道管が早期に空洞化した一方、周囲仮道管が貯水組織として機能していた (Yazaki et al. 2020 Am.J.Bot.)

北八ヶ岳縞枯山に生育するシラビソで枝の通水阻害の季節変化を調査した結果、春先 (3 月) に発生していた深刻な乾燥ストレスと通水阻害は夏 (7 月) までにほぼ完全に回復していることがわかった。また、葉の光合成能力の指標である葉の窒素濃度は、風当たりの強い風上側の枝とそうでない風下側の枝との間で違わなかった。このことから、シラビソは冬の乾燥ストレスにより春先に枝で深刻な通水阻害が生じるものの、夏までにその履歴を解消することで、夏の成長期間を迎え光合成生産を行っているという生理生態的特性が明らかとなった (Ogasa et al. 2019b Tree Physiol.)

以上のように、針葉樹、環孔材樹種、散孔材樹種のそれぞれについて、乾燥および凍結ストレスによる通水阻害の進展過程と再充填について多くの知見が得られた。また、生立木および苗木の樹液流速分布を MRI により非破壊で可視化する技術が確立されたことにより、通水阻害のみならず水輸送への各組織への寄与を明らかにすることが可能となった。また、クライオ SEM 観察や X 線マイクロ CT 観察により、細胞レベルでの通水および貯水機能の樹種による差

異を明らかにすることができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計23件（うち査読付論文 21件／うち国際共著 1件／うちオープンアクセス 2件）

| | |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名 Yazaki K, Levia DF, Takenouchi A, Watanabe M, Kabeya D, Miki NH, Taneda H, Ogasa MY, Oguro M, Saiki S-T, Tobita H, Fukuda K | 4. 巻 107 |
| 2. 論文標題 Imperforate tracheary elements and vessels alleviate xylem tension under severe dehydration: insights from water release curves for excised twigs of three tree species | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 American Journal of Botany | 6. 最初と最後の頁 1122-1135 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/ajb2.1518 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |
| 1. 著者名 Terada Y, Horikawa Y, Nagata A, Kose K, Fukuda K | 4. 巻 40 |
| 2. 論文標題 Dynamics of xylem and phloem sap flow in an outdoor zelkova tree visualized by magnetic resonance imaging | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Tree Physiology | 6. 最初と最後の頁 290-304 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/treephys/tpz120 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |
| 1. 著者名 Ogasa MY, Taneda H, Ooeda H, Ohtsuka A, Maruta E | 4. 巻 39 |
| 2. 論文標題 Repair of severe winter xylem embolism supports summer water transport and carbon gain in flagged crowns of the subalpine conifer <i>Abies veitchii</i> | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Tree Physiology | 6. 最初と最後の頁 1725-1735 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/treephys/tpz066 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |
| 1. 著者名 Ogasa MY, Yazaki K, Utsumi Y, Miki NH, Fukuda K | 4. 巻 39 |
| 2. 論文標題 Short-time xylem tension relaxation prevents vessel refilling and alleviates cryo-fixation artifacts in diffuse-porous <i>Carpinus tschonoskii</i> and <i>Cercidiphyllum japonicum</i> | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Tree Physiology | 6. 最初と最後の頁 1685-1695 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/treephys/tpz072 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 福田健二 | 4. 巻 23 |
| 2. 論文標題 千葉市の東京湾岸地域における 2011 年および 2018 年の台風による都市樹木の潮風害 | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 樹木医学研究 | 6. 最初と最後の頁 215-224 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 Yasuda Y, Utsumi Y, Tan X, Tashiro N, Fukuda K and Koga S | 4. 巻 131 |
| 2. 論文標題 Suppression of growth and death of meristematic tissues in <i>Abies sachalinensis</i> under strong shading: Comparisons between the terminal bud, the terminally lateral bud and the stem cambium | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Plant Research | 6. 最初と最後の頁 817-825 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10265-018-1051-8 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名 Ugawa S, Miura S, Hashimoto S, Iwamoto K, Fukuda K | 4. 巻 23 |
| 2. 論文標題 Changes in quantity, morphology and nitrogen content of fine roots with stand development in a subalpine fir-wave forest | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Forest Research | 6. 最初と最後の頁 336-345 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/13416979.2018.1516919 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名 Umebayashi T and Fukuda K | 4. 巻 96 |
| 2. 論文標題 Seasonal changes in the occurrence of embolisms among broad-leaved trees in a temperate region | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Botany | 6. 最初と最後の頁 873-881 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1139/cjb-2018-0145 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名 Yasuda, Y., Utsumi, Y., Tashiro, N., Koga, S., Fukuda, K. | 4. 巻 131 |
| 2. 論文標題 Cessation of annual apical growth and partial death of cambium in stem of <i>Abies sachalinensis</i> under intensive shading | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Plant Research | 6. 最初と最後の頁 261-269 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10265-017-0984-7 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 Yasuda, Y., Utsumi, Y., Tan, X., Tashiro, N., Fukuda, K. and Koga, S. | 4. 巻 131 |
| 2. 論文標題 Suppression of growth and death of meristematic tissues in <i>Abies sachalinensis</i> under strong shading: comparisons between the terminal bud, the terminally lateral bud and the stem cambium | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Plant Research | 6. 最初と最後の頁 817-825 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10265-018-1051-8 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 Umebayashi T, Yamada T, Fukuhara K, Endo R, Kusumoto D, Fukuda K | 4. 巻 147 |
| 2. 論文標題 In situ observation of pinewood nematode in wood. | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 European Journal of Plant Pathology | 6. 最初と最後の頁 463-467 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10658-016-1013-8 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|-------------------|
| 1. 著者名 高橋淳・中島健太・平川雅文・福田健二 | 4. 巻 124 |
| 2. 論文標題 人為低温処理による茶樹の裂傷発生機構に関する一考察 | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 茶業研究報告 | 6. 最初と最後の頁 1-7 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|---------------------|
| 1. 著者名 田中(小田)あゆみ・福田健二 | 4. 巻 21 |
| 2. 論文標題 都市の環境と街路樹のストレス応答 | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 樹木医学研究 | 6. 最初と最後の頁 44-47 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 Umebayashi T and Fukuda K | 4. 巻 96 |
| 2. 論文標題 Seasonal changes in the occurrence of embolisms among broadleaved trees in a temperate region | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Botany | 6. 最初と最後の頁 873-881 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1139/cjb-2018-0145 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|--------------------|
| 1. 著者名 Ugawa S, Miura S, Hashimoto S, Iwamoto K, Fukuda K | 4. 巻 23 |
| 2. 論文標題 Changes in quantity, morphology and nitrogen content of fine roots with stand development in a subalpine fir-wave forest | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Forest Research | 6. 最初と最後の頁 1-10 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/13416979.2018.1516919 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名 Yasuda Yuko, Utsumi Yasuhiro, Tashiro Naoaki, Koga Shinya, Fukuda Kenji | 4. 巻 131 |
| 2. 論文標題 Cessation of annual apical growth and partial death of cambium in stem of Abies sachalinensis under intensive shading | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Plant Research | 6. 最初と最後の頁 261 ~ 269 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10265-017-0984-7 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名 Umebayashi T, Yamada T, Fukuhara K, Endo R, Kusumoto D, Fukuda K | 4. 巻 147 |
| 2. 論文標題 In situ observation of pinewood nematode in wood | 5. 発行年 2016年 |
| 3. 雑誌名 European Journal of Plant Pathology | 6. 最初と最後の頁 463 ~ 467 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10658-016-1013-8 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名 Umebayashi T, Morita T, Utsumi Y, Kusumoto D, Yasuda Y, Haishi T, Fukuda K | 4. 巻 36 |
| 2. 論文標題 Spatial distribution of xylem embolisms in the stems of Pinus thunbergii at the threshold of fatal drought stress | 5. 発行年 2016年 |
| 3. 雑誌名 Tree Physiology | 6. 最初と最後の頁 1210 ~ 1218 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/treephys/tpw050 | 査読の有無 無 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名 Umebayashi T, Utsumi Y, Koga S, Murata I, Fukuda K | 4. 巻 244 |
| 2. 論文標題 Differences in drought- and freeze-induced embolisms in deciduous ring-porous plant species in Japan | 5. 発行年 2016年 |
| 3. 雑誌名 Planta | 6. 最初と最後の頁 753 ~ 760 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00425-016-2564-9 | 査読の有無 無 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 Ogasa MY, Utsumi Y, Miki NH, Yazaki K, Fukuda K | 4. 巻 39 |
| 2. 論文標題 Cutting stems before relaxing xylem tension induces artefacts in Vitis coignetiae, as evidenced by magnetic resonance imaging | 5. 発行年 2016年 |
| 3. 雑誌名 Plant, Cell and Environment | 6. 最初と最後の頁 329-337 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/pce.12617 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名 Umebayashi T, Ogasa MY, Miki NH, Utsumi Y, Haishi T, Fukuda K | 4. 巻 30 |
| 2. 論文標題 Freezing xylem conduits with liquid nitrogen creates artifactual embolisms in water-stressed broadleaf trees | 5. 発行年 2015年 |
| 3. 雑誌名 Trees | 6. 最初と最後の頁 305-316 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00468-015-1302-4 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 Umebayashi T, Yamada T, Fukuhara K, Endo R, Kusumoto D, Fukuda K | 4. 巻 147 |
| 2. 論文標題 In situ observation of pinewood nematode in wood | 5. 発行年 2016年 |
| 3. 雑誌名 European Journal of Plant Pathology | 6. 最初と最後の頁 463-467 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10658-016-1013-8 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 種子田春彦、大條弘貴、大塚晃弘 | 4. 巻 66 |
| 2. 論文標題 根、茎、葉の水の流れやすさを測る 測定手法とそこからわかること | 5. 発行年 2016年 |
| 3. 雑誌名 日本生態学会誌 | 6. 最初と最後の頁 447-464 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18960/seitai.66.2_447 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である) | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計31件(うち招待講演 0件/うち国際学会 0件)

| |
|--|
| 1. 発表者名 堀川友輔・福田 健二・寺田康彦 |
| 2. 発表標題 MRI を用いた屋外樹木の樹液流イメージング：広葉樹と針葉樹の比較 |
| 3. 学会等名 第22回NMRマイクロイメージング研究会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名 平川雅文・松下範久・福田健二・寺田康彦 |
| 2. 発表標題 ケヤキ苗における主幹の樹液流速分布と枝の関係 |
| 3. 学会等名 樹木医学会第23回大会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 石川雅也・Stait-Gardner T・村川裕基・山崎秀幸・朽津和幸・福田健二・Price WS |
| 2. 発表標題 MRIを用いた植物の凍結過程非破壊可視化法の開発 |
| 3. 学会等名 第83回植物学会大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 石川雅也・Stait-Gardner T・村川裕基・山崎秀幸・朽津和幸・福田健二・Price WS |
| 2. 発表標題 高分解能MRIを用いた植物の凍結過程非破壊可視化法の開発 |
| 3. 学会等名 第64回低温生物工学会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 内海泰弘・安田悠子・談爛芳・田代直明・福田健二・古賀信也 |
| 2. 発表標題 強度被陰環境におけるトドマツ茎頂分裂組織と形成層の成長抑制 |
| 3. 学会等名 第130回日本森林学会大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 小笠真由美・平川雅文・市原優・矢崎健一・飛田博順・福田健二 |
| 2. 発表標題 コンパクトMRIを用いた樹幹内水分分布の非破壊的観察手法の多樹種への適用 |
| 3. 学会等名 第130回日本森林学会大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 平川雅文・松下範久・福田健二・寺田康彦 |
| 2. 発表標題 MRIを用いたエンボリズムの発生・回復過程における水分通導の可視化 |
| 3. 学会等名 第130回日本森林学会大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 種子田春彦・小笠真由美・矢崎健一・宮沢良行・丸田恵美子 |
| 2. 発表標題 亜高山帯性常緑針葉樹 シラビソ <i>Abies veitchii</i> の越冬戦略 枝における冬の通水阻害とその回復 |
| 3. 学会等名 第82回日本植物学会大会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 平川雅文・松下範久・福田健二・寺田康彦 |
| 2. 発表標題 コンパクト MRI を用いた苗木樹幹の木部樹液流速分布の日変化測定 |
| 3. 学会等名 第129回日本森林学会大会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名 梅林利弘・福田健二・内海泰弘・楠本 大・佐野雄三 |
| 2. 発表標題 梅林利弘・福田健二・内海泰弘・楠本 大・佐野雄三 |
| 3. 学会等名 第129回日本森林学会大会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 種子田春彦, 小笠 真由美, 矢崎健一, 宮沢良行, 丸田 恵美子 |
| 2. 発表標題 亜高山帯性常緑針葉樹シラビソAbies veitchii の越冬戦略 枝における冬の通水阻害とその回復 |
| 3. 学会等名 日本植物学会第82回大会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 堀川友輔, 寺田康彦 |
| 2. 発表標題 Influence of temperature drift on flow measurements |
| 3. 学会等名 第46回日本磁気共鳴医学会大会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 堀川友輔, 福田健二, 寺田康彦 |
| 2. 発表標題 MRI を用いた屋外樹木の樹液流イメージング: 広葉樹と針葉樹の比較 |
| 3. 学会等名 第22回NMRマイクロイメージング研究会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 平川雅文・市橋隆白・福田健二・寺田康彦 |
| 2. 発表標題 コンパクトMRIを用いた樹幹の樹液流速分布の日変化測定 |
| 3. 学会等名 樹木医学会第22回大会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名 平川雅文・長田晃佳・寺田康彦・福田健二 |
| 2. 発表標題 コンパクトMRIを用いた樹幹の樹液流速分布の可視化 |
| 3. 学会等名 第128回日本森林学会大会 |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名 田中克・横井寿郎・神崎菜摘・福田健二 |
| 2. 発表標題 マツノサイセンチュウからの簡易RNA 抽出法 |
| 3. 学会等名 第128回森林学会大会 |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 新村ゆい・矢崎健一・平川雅文・福田健二 |
| 2. 発表標題 広葉樹の乾燥ストレスによる通水コンダクタンスの低下と回復のメカニズム |
| 3. 学会等名 第128回森林学会大会 |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名 長田晃佳, 福田健二, 巨瀬勝美, 寺田康彦 |
| 2. 発表標題 0.2T永久磁石MRIを用いた屋外樹木中の水輸送計測 |
| 3. 学会等名 日本NMR学会大会 |
| 4. 発表年 2016年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 平川雅文・長田晃佳・寺田康彦・福田健二 |
| 2. 発表標題 コンパクトMRIを用いた位相法による樹幹の樹液流速分布の可視化 |
| 3. 学会等名 樹木医学会第21回大会 |
| 4. 発表年 2016年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 梅林利弘, 福田健二 |
| 2. 発表標題 落葉環孔材樹種における乾燥および凍結ストレスにともなう通水阻害発生パターンの違い |
| 3. 学会等名 日本植物学会第80回大会 |
| 4. 発表年 2016年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 長田晃佳, 福田健二, 巨瀬勝美, 寺田康彦 |
| 2. 発表標題 永久磁石MRIを用いた屋外樹木内樹液の流速測定(II) |
| 3. 学会等名 NMRマイクロイメージング研究会 |
| 4. 発表年 2016年 |

| |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名 粟飯原友・三木直子・小笠真由美 |
| 2. 発表標題 落葉広葉樹における木部通水機能の回復と樹体の生理活性 |
| 3. 学会等名 第63回日本生態学会大会 |
| 4. 発表年 2016年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 大條弘貴・大塚晃弘・種子田春彦・小笠真由美・矢崎健一・丸田恵美子 |
| 2. 発表標題 亜高山帯針葉樹シラビソで冬季にみられるの枝木部の通水阻害は枝齡に依存する |
| 3. 学会等名 第63回日本生態学会大会 |
| 4. 発表年 2016年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Megan E. Uchida, Ayumi Katayama, Yasuhiro Utsumi, Shinya Koga, Kyoichi Otsuki, |
| 2. 発表標題 Respiration and anatomical analysis of Moso bamboo culms |
| 3. 学会等名 第63回日本生態学会大会 |
| 4. 発表年 2016年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Toshihiro Umebayashi, Toshimitsu Morita, Kenji Fukuda, Yasuhiro Utsumi, Daisuke Kusumoto |
| 2. 発表標題 The significant difference in hydraulic vulnerability to drought-stress-induced embolisms between two widely planted Japanese conifers |
| 3. 学会等名 第63回日本生態学会大会 |
| 4. 発表年 2016年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 内田詠子メガン・片山歩美・古賀信也・大槻恭一・内海泰弘 |
| 2. 発表標題 モウソウチク稈における組織構造と呼吸速度の年変動 |
| 3. 学会等名 第66回日本木材学会大会 |
| 4. 発表年 2016年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 古賀信也・内海泰弘・鈴木良一・加藤英俊・岡野哲郎・池田武文・大澤昌巳 |
| 2. 発表標題 超小型X線源を用いた立木用X線CT検査装置の開発 |
| 3. 学会等名 第66回日本木材学会大会 |
| 4. 発表年 2016年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 永井智・内海泰弘・矢崎健一 |
| 2. 発表標題 フラットベッドスキャナと ImageJ 画像解析システムを用いたスギ心材色の簡易評価 |
| 3. 学会等名 木材加工技術協会第33回年次大会 |
| 4. 発表年 2015年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 平川雅文・長田晃佳・小笠真由美・福田健二 |
| 2. 発表標題 コンパクトMRIを用いた樹幹中の水分のADCマッピング |
| 3. 学会等名 第127回日本森林学会大会 |
| 4. 発表年 2016年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 丸田恵美子・矢崎健一・小笠真由美・大條弘貴・大塚晃弘・種子田春彦 |
| 2. 発表標題 森林限界のオオシラビソにおける冬季エンボリズムの発生メカニズム |
| 3. 学会等名 第127回日本森林学会大会 |
| 4. 発表年 2016年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 平川雅文・松下範久・福田健二・寺田康彦 |
| 2. 発表標題 カツラのエンボリズム発生・回復過程における水分通導の可視化 |
| 3. 学会等名 第131回日本森林学会大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

〔図書〕 計3件

| | |
|-------------------------------|-----------------|
| 1. 著者名 弥益恭・中尾啓子・野口航編 | 4. 発行年 2018年 |
| 2. 出版社 培風館 | 5. 総ページ数 208 |
| 3. 書名 新しい生物科学 第8章 植物の形態と機能 | |

| | |
|-------------------|-----------------|
| 1. 著者名 福田健二（編） | 4. 発行年 2016年 |
| 2. 出版社 農文協 | 5. 総ページ数 40 |
| 3. 書名 マツの絵本 | |

| | |
|-------------------|-----------------|
| 1. 著者名 福田健二（編） | 4. 発行年 2021年 |
| 2. 出版社 朝倉書店 | 5. 総ページ数 224 |
| 3. 書名 樹木医学入門 | |

〔産業財産権〕

〔その他〕

| |
|---|
| <p>創成27 Frontier Sciences 6 「樹木の内部をMRIで診る」 http://www.k.u-tokyo.ac.jp/renewal/sousei/sousei_pdf/part/sousei27_12.pdf 東京大学 農学部公開セミナー「共生」（講演「樹木と微生物の多様な関係 - 寄生・腐生・共生」） https://www.a.u-tokyo.ac.jp/seminar/yousisyu/03online-yousisyu.pdf</p> |
|---|

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------|--|--|----|
| 研究分担者 | 寺田 康彦 (Terada Yasuhiko) (20400640) | 筑波大学・数理物質系・准教授 (12102) | |
| 研究分担者 | 矢崎 健一 (Yazaki Kenichi) (30353890) | 国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・主任研究員 等 (82105) | |
| 研究分担者 | 三木 直子 (Miki Naoko) (30379721) | 岡山大学・環境生命科学研究所・准教授 (15301) | |

6. 研究組織（つづき）

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------|---|---------------------------------------|----|
| 研究分担者 | 内海 泰弘 (Utsumi Yasuhiro) (50346839) | 九州大学・農学研究院・准教授 (17102) | |
| 研究分担者 | 種子田 春彦 (Taneda Haruhiko) (90403112) | 東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・助教 (12601) | |
| 研究分担者 | 伊藤 進一郎 (Ito Shin-ichiro) (90092139) | 三重大学・生物資源学研究科・招聘教授 (14101) | |

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------|---|---|----|
| 連携研究者 | 梅林 利弘 (Umebayashi Toshihiro) (20585997) | 秋田県立大学・生物資源科学部・特任助教 (21401) | |
| 連携研究者 | 小笠 真由美 (Ogasa Y. Mayumi) (10646160) | 国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所・関西支所 森林生態研究グループ・主任研究員 (82105) | |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| | |
|---------|---------|
| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|