

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：15101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K06292

研究課題名(和文) 物理センサ群を用いた土壌・樹木・大気連続系における物質移動・貯留特性の解明

研究課題名(英文) Study on mass transfer-storage characteristic of trees in soil-plant-atmosphere continuum using physical sensors

研究代表者

齊藤 忠臣 (SAITO, Tadaomi)

鳥取大学・農学部・准教授

研究者番号：70515824

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は近年新規開発されたセンサ群を駆使し、樹体内外における物質移動の「駆動力」「流れ」「貯留」の網羅的な非破壊・連続観測を行う事により、これまで未解明であった樹木の水利用特性・機構を解明し、物質移動・貯留に関する新たな知見を得ることを目的として実施された。国内の自生種(シラカシ)および果樹(ニホンナシ)を対象として自然条件下や水分ストレス条件下で観測を行った結果、各種水分状態指標の日内変動・季節変動の特徴や気象条件・水ストレスに応じた物質移動メカニズムが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

土壌・植物・大気連続系における物質移動の機構解明は重要な課題であるが、特に植物体を通じた物質移動については数多くの未解明点が存在している。樹木の水利用特性や物質移動機構の解明は、森林水文、生態系保全、気候変動応答といった多分野における発展性・実用性を有している。また、気象条件やストレスに対する各水分状態指標の変動特性が明らかとなり、これは各センサ類を用いた精密農業(効率的な灌漑、高品質果樹の生産)へと寄与すると期待される。

研究成果の概要(英文)：The objective of this study was to elucidate the water use characteristics and mechanisms of trees and to obtain new knowledge on mass transfer and storage through comprehensive non-destructive and continuous observations of the "driving force," "flow," and "storage" of mass transfer inside and outside the tree body using newly developed sensors. Observations were conducted under natural and moisture stress conditions on a Japanese white oak (*Quercus myrsinifolia*) and Japanese peers (*Pyrus pyrifolia*). The results revealed the characteristics of diurnal and seasonal variations in various water status indices and mass transfer mechanisms in response to weather conditions and water stress.

研究分野：土壌水文

キーワード：土壌・植物・大気連続系 樹木 樹体水分 樹液流速 水ポテンシャル 電気伝導度 膨圧 幹直径

1. 研究開始当初の背景

土壌・植物・大気連続系 (Soil-Plant-Atmosphere Continuum : SPAC) における物質移動の機構解明およびモデリングは重要な課題であるが、特に植物体を通じた物質移動については数多くの未解明点が存在する。また、異なる環境下における樹木の水利用特性や物質移動機構の解明は、森林水文、生態系保全、気候変動応答の解明、センサ類を用いた精密農業 (効率的な灌漑、高品質果樹の生産) 等の農学の多分野における発展性・実用性・普及効果を有している。

物質循環を定量的に理解するためには、「駆動力の勾配」とそれにより生じる「流れ」および「貯留」の3要素全てを「量」と「質」の両面から把握する必要がある。しかし植物・樹木においては、各要素を個別に連続観測する取り組みや複数要素を非連続で観測する取り組みはあるものの、3要素の全てが非破壊・連続観測された例はこれまでにない。しかし、ここ数年でこれを可能とするセンサ群が相次いで新規開発・市販化され、多要素の非破壊・連続観測を実施可能な条件が急速に整いつつある。

2. 研究の目的

本研究では近年新規開発されたセンサ群を駆使し、樹体内外における物質移動の「駆動力」「流れ」「貯留」の網羅的な非破壊・連続観測を行う事により、これまで未解明であった水利用特性・機構を解明し、SPACにおける物質移動・貯留に関する新たな知見を得ることを目的としている。国内の自生種および果樹を対象として自然条件下や各種ストレス条件下で観測を行い、計測の専門家、センサ開発者、樹木生理・果樹の専門家らが連携して知見を取りまとめ、SPACにおける物質移動・貯留における新たな機構の解明や、得られた知見の応用について検討する。

3. 研究の方法

本研究の観測対象は①シラカシ (*Quercus myrsinifolia*) (大型ポット内・照葉樹林の代表種の一つとして) と②ニホンナシ (*Pyrus pyrifolia*) (鳥取大学附属 FSC 大塚農場内の3品種) である。以下それぞれにおける観測内容を記す。

(1) シラカシにおける観測

対象樹木は、鳥取大学農学部5号館横のポットに植栽された、常緑広葉樹であるブナ科コナラ属シラカシ (*Quercus myrsinifolia*) である。樹木の水状態指標に関する測定項目は、樹体水分、樹液流速、そして幹の水ポテンシャル (ψ_{stem}) とした。樹体水分は GS3 土壌水分・温度・EC センサ (METER 社) を用いて樹木の体積含水率を、樹液流速は SFM-1 (ICT international 社) を用いて比例関係にあるヒートパルス速度を、幹の水ポテンシャルは PSY-1 (ICT international 社) を用いて測定した (図1)。また、研究期間終盤において新規開発されたセンサとして、幹 (辺材・樹皮部) の微細な直径変化を測定する MIJ-02LM Type II 直動デンドロメータ (日本環境計測) と、葉の膨圧と反比例の関係にある減衰出力圧 (P_p) を測定する Yara Water Sensor (ZIM Plant Technology GmbH 社) を設置した。土壌の水状態指標としては、5TE 誘電率水分センサおよび TEROS-21 センサ (METER 社) を用いて土壌水分と水ポテンシャル (ψ_{soil}) を測定した。さらに気象観測も行い、蒸散の指標となる飽差 (VPD) を相対湿度及び温度から算出した。

シラカシのポット表面は防水処理されており、土壌水分は灌水によってのみ変化する。灌水は通常、 ψ_{soil} が初期シオレ点付近の -600 kPa に達した段階で行っていたが、本研究では一時的に灌水を停止する灌水制限を行うことで、樹木に水ストレスを与えた。また、灌水量や排水量、樹体・土壌内の貯留水量等を算出することにより、蒸散量の推定も行った。

(2) ニホンナシにおける観測

対象樹木は鳥取大学附属 FSC 大塚農場内のバラ科ナシ属ナシ3品種、'豊水'・'ゴールド二十世紀'・'王秋'の各1本である。本報告では、最も集約的な観測を行った '王秋' における観測内容を示す。'王秋' は貯蔵性のよい晩生の赤ナシ品種で、鳥取県における収穫期は10月上旬~10月下旬である。観測に供試したものは、胸高直径14cm、樹高2.5mの立木仕立であった。試験期間中の栽培管理は、基本的に自然条件下で

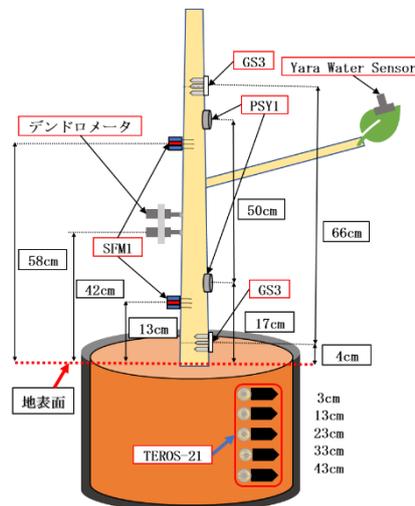


図1. シラカシのセンサの設置

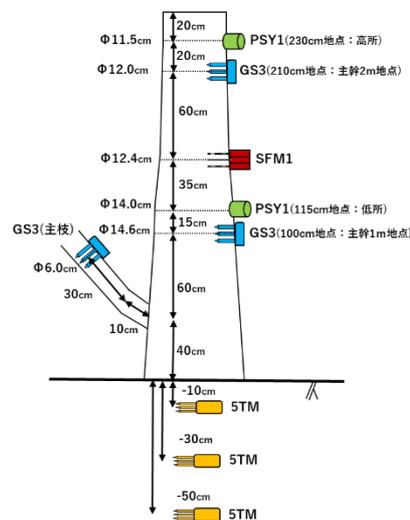


図2. ニホンナシ (王秋) のセンサの設置位置

無灌漑・無施肥としたが、剪定や摘果等の管理作業は慣行に準じた。樹木の水分状態指標に関する測定項目は、樹液流速・樹体水分量・樹体塩分量・水ポテンシャルである。樹液流速・樹体水分量・水ポテンシャルの測定に用いた機器は、シラカシの観測機器と同様であり、主幹や主枝に複数個設置した。樹体塩分量については、GS3 センサでバルク EC を測定し、これを体積含水率の値を利用して間隙水の EC へと変換した。また、シラカシの観測同様、土壌水分や気象観測も実施した。

4. 研究成果

(1)シラカシの結果

①夏季および冬季における水分状態指標の基本的な変動

図 3 に蒸散活動が活発な夏季のイベントとして 2019/7/26~7/29 における樹液流速（ヒートパルス速度）、樹体水分、VPD（飽差）の変動を示す。樹液流速は VPD の上昇とともに加速し、一方樹体水分は樹液流速の上昇とともに減少した。このことから、樹木が蒸散をする際に樹体水分を使用することがわかる。そして日中の樹液流速のピーク後、2 時間ほど遅れて樹体水分は回復を始めた。

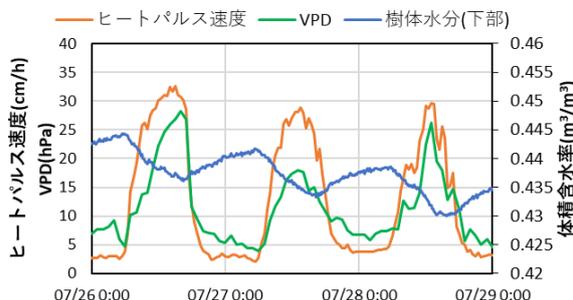


図 3. 夏季における樹液流速，樹体水分，VPD の変動

図 4 に冬期である 2020/1/2 の樹体水分、VPD、日蒸散量の変動を示す。図 4 より、樹液流速がピークを迎える前の早朝の時間帯に樹体水分が急激に減少し、その減少量は特に樹体上部において顕著であることが分かる。このことから、樹液流による根からの水分供給が不十分な朝に、特に樹体上部で樹体水分が積極的に利用されていることが分かる。この日における日蒸散量は 1654 cm^3 であったが、午前中の樹体水量の減少量は 83.5 cm^3 、そのうち上部の樹体水量の減少量は 73.4 cm^3 であった。この樹体水の減少量は、実際には樹液流による水分供給で回復を受けながらの減少量であり、蒸散により消費された樹体水量の真の減少量よりも小さいものと推察されるが、少なくとも蒸散で 1 日に消費される水の 5%程度は樹体水から消費されていることが分かった。

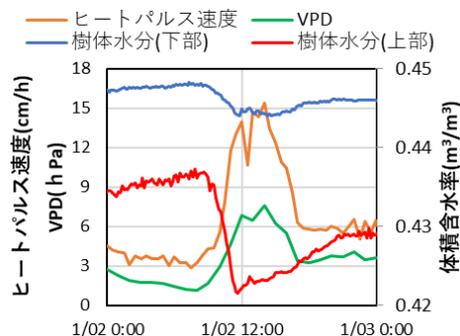


図 4. 冬季における樹液流速，樹体水分，VPD の変動

②降雨による樹体水分の回復

図 5 に 2019/12/17~19 における降雨量、上部の樹体水量、ヒートパルス速度、樹体水分の変動を示す。この期間において土壌への浸水や灌水はないにもかかわらず、降雨時に上部では樹体水分が回復していた。このことから、上部では樹皮・葉の部分から降雨を吸収し、樹体水の回復に利用した可能性が示唆される。この期間における全樹体水量は 3220 cm^3 、降雨による回復は 139 cm^3 であったことから、全樹体水量のうち 4%程度を降雨から得たことが分かった。また、図 5 より降雨後の蒸散では回復した上部の樹体水分が優先的に利用されたと分かる。

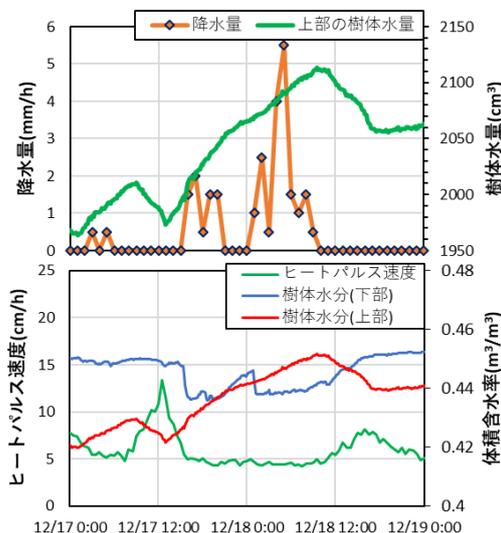


図 5. 降雨時の上部の樹体水量，ヒートパルス速度，樹体水分の変動

③灌水制限に対する樹木の水分状態指標及び幹直径・VPD・ ψ_{soil} の変動

灌水制限を行った 2021/8/19~9/9 における、樹体上部・下部の樹体水分、樹液流速（ヒートパルス速度）、樹体の水ポテンシャル ψ_{stem} 、辺材部・樹皮部の幹直径、そして VPD の変化を図 6 (A) に、 ψ_{soil} の変化を図 6 (B) に示した。図 6 (A) より、灌水制限に伴う ψ_{soil} の低下とほぼ同時に、樹体上部の樹体水分の低下が見られ、続いて下部の樹体水分の低下が見られた。樹液流速は、 ψ_{soil} 低下開始直後は高い値で推移していたが、 ψ_{soil} が初期シオレ点付近の -600 kPa 付近に到達した 8/24 以降、VPD が日中上昇しても低い値で推移した。また、幹直径は ψ_{soil} が高い期間には単調に増加したが、 ψ_{soil} が低下し始めると、大きな日変動を示しながら低下し、特に辺材部での低下が顕著であった。 ψ_{stem} については、上部・下部ともに ψ_{soil} が十分

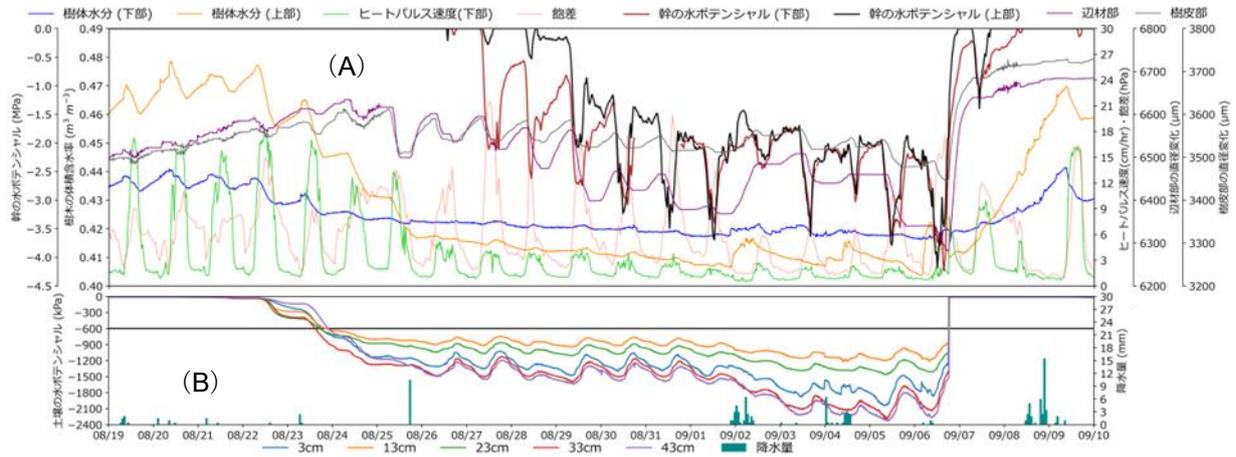


図 6. 2021/8/19～9/9 における(A) 樹体水分・樹液流速・ ψ_{stem} ・VPD, (B) ψ_{soil} ・降水量の変動

低下して樹液流速がかなり低下した後、日中の値が低下し始めた。これらより、初期の水分ストレス指標としては、上部の樹体水分が、樹液流速が低下を始める中程度のストレス指標としては幹直径が、より大きな水分ストレスの指標としては ψ_{stem} が有用である可能性が示された。

④膨圧センサの日内変動及び気象条件に対する応答

ψ_{soil} が十分高かった 2021/10/2～3 における、樹液流速、膨圧センサの減衰出力圧 (P_p)、及び VPD を図 7 に示した。日中の VPD の変動に伴って樹液流速が変動しているが、 P_p もこれとよく連動していることがわかる。また、水ストレスをかけた期間においても、 P_p は日中 VPD・樹液流速と連動するだけでなく、日々の夜間の最低値がストレスに応じて徐々に上昇する傾向を見せ、葉の膨圧が樹液流速と類似した水分指標として利用できる可能性が示された。

(2)ニホンナシの結果

①水分状態指標の基本的な日内変動

図 8 に展葉後の例として 2019/5/16 の各測定項目における日内変動を示す。図 8 (A) より、4 時 58 分の日の出とともに、VPD と樹液流速が上昇し、230 cm 地点 (以下、高所とする) の水ポテンシャルも低下を始めた。昼間は、VPD と高所の水ポテンシャルが対称的に変動した一方で、樹液流速は一定値を保持した。16 時頃からは、VPD と樹液流速が低下し、高所の水ポテンシャルは 0 MPa となった。その後、夜間に継続して 115 cm 地点 (以下、低所とする) の水ポテンシャルの低下が観測された。図 8 (B) では、体積含水率と電気伝導度は蒸散が活発に行われる昼間に低下し、夜間に回復する傾向があった。

樹液流速に注目すると、日の出に伴う気温上昇により VPD が僅かに上昇を始めると、樹液流速もほぼ同時に上昇を開始した。また、樹液流速はまだ VPD が上昇しきっていない 7:00 にはピークに達し、その後の VPD の変動の影響を受けず一定値を維持した。これらより、ナシは僅かな飽差があれば蒸散を開始し、低い飽差でも蒸散速度を維持できると考えられる。また、日中の樹液流速が一定の値を維持した間、体積含水率は一定の割合で減少したことから、樹体の貯蔵水分が蒸散に用いられたと考えられる。夜間に低所の水ポテンシャルが低下し、電気伝導度が上昇した現象については、樹体の電解質や、光合成産物の糖類が転流した結果をとらえたものと考えられる。

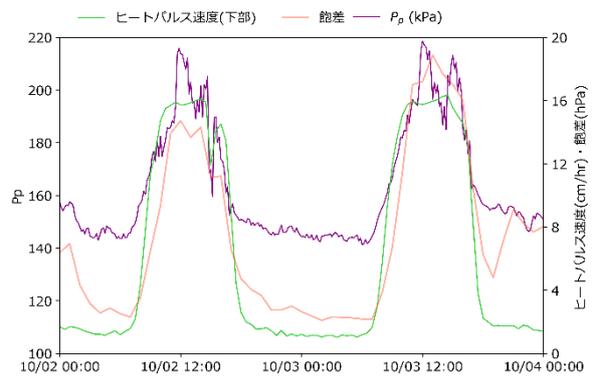


図 7. 2021/10/2～3 における、樹液流速、膨圧センサの減衰出力圧 (P_p)、及び VPD

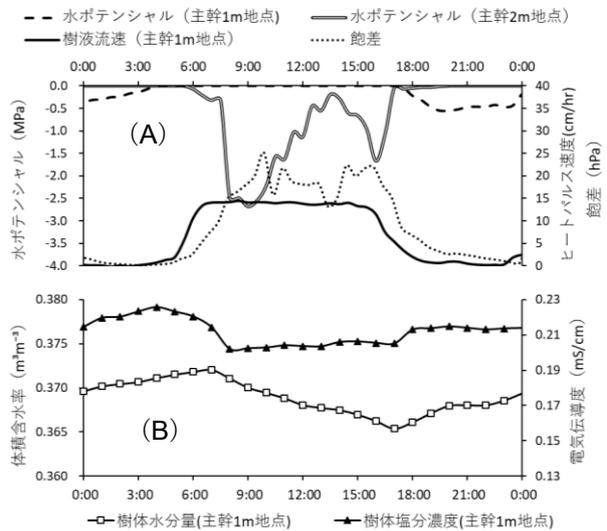


図 8. 展葉後 (2019/5/16) における各測定項目の日内変動

②水分状態指標の季節変動

図9に2018/10/1~2019/7/13における各測定項目の変動を示す。なお、VPDは2018/11/29~、高所の水ポテンシャルは2018/10/21~算出を開始し、樹液流速(外側)はSFM1のプロープの故障により2019/2/10~2019/3/2のデータが欠損している。

図9(A)より、樹液流速は落葉期の11月上旬から12月上旬にかけて、外側の観測点で大きく低下し、その後、休眠芽が開花する4月頃に、外側から内側の順でVPDと連動した典型的な日変動がみられるようになった。展葉後の外側の樹液流速の最大速度は、VPDの変動の影響を受けず徐々に増加したことから、葉からの蒸散によって律速され、その最大流速は葉の枚数および葉面積に依存しているものと考えられる。また、内側の樹液流速は、変動幅が比較的小さく、外側の流速がVPDの影響を受けずに最大値を示すようになってからもVPDの変動影響を受けていることから、駆動力としてより大きな飽差が必要であると推察される。なお、1月~2月の気温が氷点を下回る日には、凍結が原因と考えられる負の値が観測されたが、それ以外の日における負の値は、ヒートパルス速度算出時に補正を行わなかったことに起因するもので、本来の樹液流速は0 cm/hrである可能性が高い。次に、高所の水ポテンシャルはVPDと連動する傾向がより顕著であった。一方、低所の水ポテンシャルは落葉期や夜間においても観測され、これには樹体内の電解質による浸透ポテンシャルの変動が影響したと考えられる。図9(B)より、体積含水率と電気伝導度は、12月から4月にかけて正反対の変動を示した。これは、冬季から開花初期の樹表面の蒸散・蒸発量の増減により、樹体の貯蔵水分量が変動し、樹体溶質の希釈や濃縮を引き起こしたためと推察される。一方で、展葉が完了する5月上旬からは、体積含水率と電気伝導度がほぼ同様の変動を示す傾向があった。このことから、展葉後のナシが開花初期までとは水利用特性を大きく変化させており、成葉の光合成生産物に起因する電解質の転流や貯留が行われている可能性が示唆された。

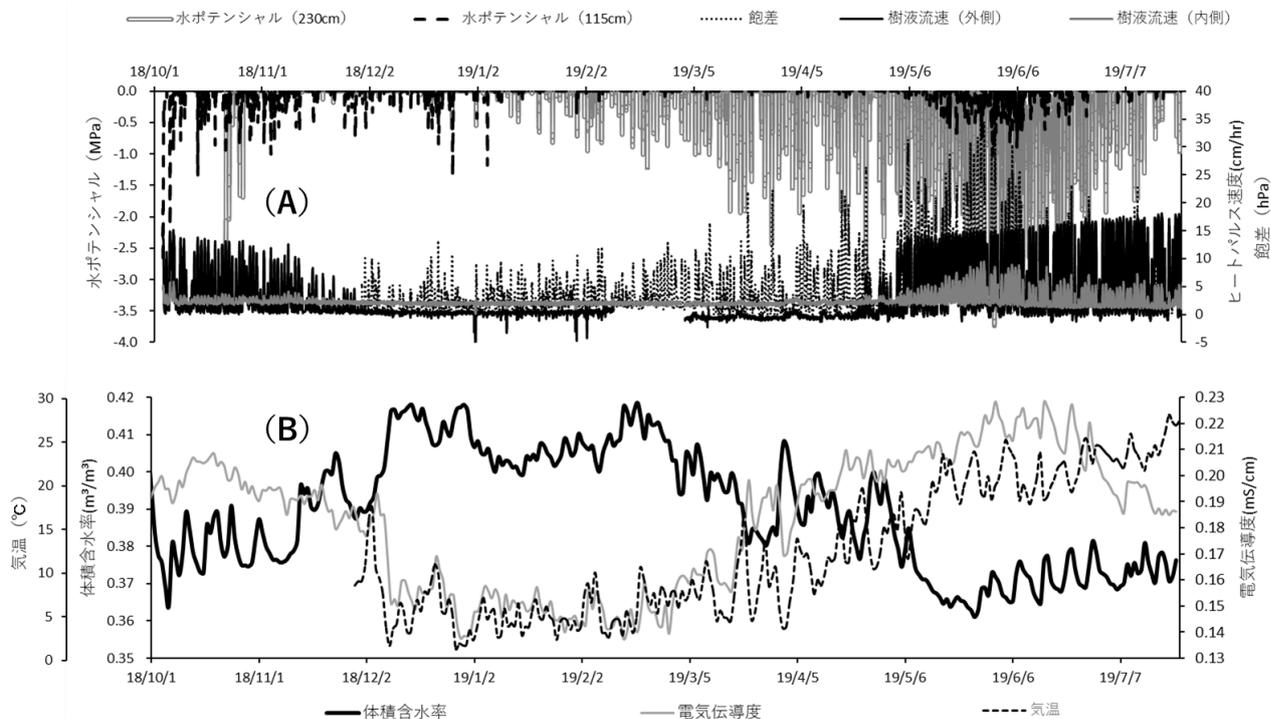


図9. 2018/10/1~2019/7/13における (A) 水ポテンシャル、樹液流速および VPD の 30 分平均値 (B) 体積含水率、電気伝導度、気温および降水量の変動

(3)まとめ

シラカシ・ニホンナシ共に、日中の飽差の上昇に伴い樹液流速が上昇し、これに伴って樹体水分が減少した。このことから、飽差の上昇が駆動力となって蒸散が開始し、また樹木が蒸散をする際に樹体水分を使用することがわかった。シラカシにおいては、土壌からの吸水が不十分な早朝の蒸散には樹冠部に近い樹体水を優先して利用すること、また、樹体水の回復において上部では樹皮・葉からの降雨の吸収が可能であることが分かった。さらに、初期の水分ストレス指標としては上部の樹体水分が、樹液流速が低下を始める中程度のストレス指標としては幹直径が、より大きな水分ストレスの指標としては水ポテンシャルが有用である可能性が示された。ニホンナシにおいては、展葉・落葉等に伴う水分状態指標の季節変動が明らかとなった。また、夜間に低所の水ポテンシャルが低下し、電気伝導度が上昇した現象が観測され、これは夜間の光合成生産物の転流現象を捉えることができたものと思われる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 宮川紗綾・齊藤忠臣・竹村圭弘・池田拓生・依田清胤・猪迫耕二・田村文男
2. 発表標題 物理センサ群を用いたナシの水利用特性の解明
3. 学会等名 第74回農業農村工学会中国四国支部講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 齊藤忠臣・前田美佳・猪迫耕二・依田清胤・藤巻晴行
2. 発表標題 センサ群を用いた樹木の蒸散と樹体水分消費の定量的分析
3. 学会等名 第31回日本沙漠学会学術大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 清水皓平・齊藤忠臣・猪迫耕二・藤巻晴行・依田清胤
2. 発表標題 物理センサを用いた樹体の水分状態指標の定量的評価
3. 学会等名 2021年度土壌物理学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 清水皓平・齊藤忠臣・猪迫耕二・竹村圭弘
2. 発表標題 物理センサを用いたナシ樹体の水利用特性の評価
3. 学会等名 第76回農業農村工学会中国四国支部講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 水ストレスに伴う樹木の水分状態指標および幹直径・葉の膨圧の変動
2. 発表標題 清水皓平・齊藤忠臣・猪迫耕二・藤巻晴行・依田清胤
3. 学会等名 2022年度（第71回）農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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	依田 清胤 (YODA Kiyotsugu) (30254832)	石巻専修大学・理工学部・教授 (31308)	
研究分担者	猪迫 耕二 (INOSAKO Koji) (60243383)	鳥取大学・農学部・教授 (15101)	
研究分担者	竹村 圭弘 (TAKEMURA Yoshihiro) (70731545)	鳥取大学・農学部・准教授 (15101)	
研究分担者	藤巻 晴行 (FUJIMAKI Haruyuki) (90323253)	鳥取大学・乾燥地研究センター・教授 (15101)	

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
---------	---------