

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：15101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2015

課題番号：24780233

研究課題名(和文) 土壌・樹体内水分モニタリングと水の安定同位体比分析による乾燥地樹木の生存戦略解明

研究課題名(英文) Clarification of the water use strategies of trees in arid environments using soil/stem water monitoring and stable isotope ratio analysis of water

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) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、土壌水分・地下水のモニタリングと樹体内水分モニタリング、そして水の安定同位体比分析を組み合わせることにより、通常は解明が困難な乾燥地樹木の時間的・空間的な水利用戦略、すなわち樹木が「いつ」「どこから」「どれくらいの」水を「どのように」使うのかを解明することである。対象樹木は、アメリカの在来種でスーダンにおける外来侵入種であるメスキートと、アメリカにおける外来侵入種であるタマリクスである。アメリカ・スーダンおよび国内での調査・研究の結果より、各樹木の持つ特異な水利用特性が様々な角度から解明された。

研究成果の概要(英文)：The objective of this study is to clarify the water use strategies of trees in arid environments using soil/stem water monitoring and stable isotope ratio analysis of water. The plants used for data collection were *Prosopis juliflora* (mesquite: invasive) in Sudan and *Tamarix ramosissima* (tamarisk: invasive) and *Prosopis pubescens* (screwbean mesquite: native) in the United States. The results from America, Sudan and Japan clarified the various unique water use characteristics of each species.

研究分野：土壌水文

キーワード：樹体内水分 水の安定同位体比分析 誘電率水分計 樹木 アメリカ スーダン 乾燥地

### 1. 研究開始当初の背景

乾燥・半乾燥地における樹木類は、現地自然生態系を形作る重要な要素であると同時に、薪の供給や果樹栽培等を通じて人間生活を支え、また、砂漠化・温暖化防止のための植林にも利用されるなど、地球規模の環境問題を支えるカギの一つでもある。乾燥地の樹木は、その過酷な環境下で生き延びるため、様々な生理・生態学的特徴・機能を有している。中でも重要な機能は、少ない水資源を効率よく使うためのシステムであり、これは樹体全体のスケールからみると、①根群からの吸水、②幹・枝による送水、③樹冠部からの蒸散、の量とタイミングをどのようにコントロールするかという機能と言える。具体例としては、乾燥地樹木が正午付近に気孔を閉じて蒸散を休止したり、季節・環境条件に応じて根から吸水する深さを変える、といった方法が知られている。このような戦略は、地域によって異なる環境条件に適応し各樹種が独自に獲得してきたものである。この樹種毎の生存戦略を解明し、「いつ」「どこから」「どれくらいの」水を「どのように」使うのかを明らかにすることが出来れば、これに応じた適切な灌漑・水管理や栽培法を選択することが可能になる。

### 2. 研究の目的

樹木の水利利用特性解明には様々な手法が用いられているが、本研究では主に「樹体水分モニタリング」と「水の安定同位体比分析」の2種の手法に注目した。樹体水分モニタリングは、土壌水分測定のための誘電率水分計を樹体に直接差し込んで水分を測定する手法であり、近年注目を集めている。樹体水分モニタリングにより、乾燥地樹木の樹体内水分の季節的な変動、降雨イベント前後の変動、日内の変動が解明されれば、樹木が「いつ」「どれくらいの」水を「どのように」使うのかを明らかにすることが可能と考えられる。

もう一方の水の安定同位体比は、端的に言えば「その水を構成する水分子の重さの違い」であり、その水の経た凝集・蒸発過程の程度によって変化するため、樹木の吸水現象の解明を含めた様々な水源特定の研究に用いられている。一般的に、降雨水の安定同位体比の値は降雨イベント毎に大きく異なり、土壌水の値は降雨水の値を引き継ぎつつも蒸発の影響で変化し、地下水の値は時間的にあまり変動しないという特徴を持つ。また、植物が根から水を吸収する際には、同位体比の値は変化しないとされる。すなわち、降雨水・土壌水・地下水に加えて樹体内の水を採取し、その同位体比を分析することにより、樹体内に存在する水が根のどの位置から吸水されたものかを特定できる可能性がある。

以上をまとめると、本研究の目的は、土壌水分・地下水のモニタリングと樹体内水分モニタリング、そして水の安定同位体比分析を組み合わせることで、通常は解明が困難

な乾燥地樹木の時間的・空間的な水利利用戦略、すなわち樹木が「いつ」「どこから」「どれくらいの」水を「どのように」使うのかを解明することである。

### 3. 研究の方法

(1) 対象樹木：本研究の対象樹木は、スーダンのメスキート (*Prosopis juliflora*) 及びアメリカのメスキート (*Prosopis Pubescens*) とタマリスク (*Tamarix ramosissima*) である。スーダンのメスキートは南米原産のマメ科である。サハラ砂漠の固定を目的として導入され、効果を上げてきたが、近年では耐乾性・吸水能力・繁殖力の高さからスーダンの国内広域へ広がり、農地を占有する外来侵入種として問題となっている。アメリカのメスキートは在来種で、タマリスクが外来種である。タマリスクはアジア・ヨーロッパ原産で、護岸・侵食対策を目的として植栽された。耐塩性・耐乾性に優れており、葉面に塩腺をもち樹体内の塩を体外に排出する機能を有している。アメリカではタマリスクが外来侵入種として猛威をふるっているため、2001年から政府がタマリスクの葉を食すタマリスクビートル (*Diorhabda spp.*) を放ち、生物学的駆除を行っている。

また、樹液流速と樹体水分量の同時測定を目的として、日本国内のタブノキを対象とした追加的な調査を実施した。

(2) 対象地：対象地はスーダン・ハルツーム近郊の Alrawakeeb, Soba, Alkadaro の 3 サイト、ならびにアメリカ・バージン川付近の 1 サイトである。各サイトの地下水位は Alrawakeeb では約 80 m, Soba・Alkadaro では約 25 m, アメリカは約 1 m である。また、アメリカのサイトでは地下水の電気伝導度が 18 ds/m と高く、浅い地下水位と相まって土壌の塩類集積が著しく起こっている。

(3) 水の安定同位体比分析及び真空蒸留法：スーダンとアメリカの全てのサイトにおいて水の安定同位体比分析のために地下水・土壌・樹木のサンプリングを行った。また、Alrawakeeb では 2012-2013 に降った 9 つの降雨イベントから降水を採取した。土壌については深度 0~30 cm (2012/4, 2013/11) のアメリカの土壌は深度 10, 20, 50, 80 cm) から、樹木については形状の似ている 2 本を選定し 2 サンプルずつ枝を採取した。

土壌水や樹体内の水の安定同位体比を測定するには、土壌や樹木から水を抽出する必要がある。本研究では、真空蒸留法を用いて、サンプルから水の抽出を行った。真空蒸留法とは装置内を減圧して真空にすることでサンプル内の水を気化させ、冷却した試験管に凝集させる手法である。抽出した水は安定同位体比質量分析計 (IRMS) を用いて分析した。

(4) 樹体水分モニタリング：誘電率水分計 (GS3: Decagon 社) を用いて樹体水分のモニ

タリングを行った。GS3 は水分と同時に温度と電気伝導度も測定できるため、樹体内における塩濃度の変化についてもモニタリングを行った。Soba のメスキートとアメリカのメスキート及びタマリスク、それぞれ2本ずつにGS3を設置した。Soba のメスキートの幹の直径は約7 cm と4 cm であり、それぞれ順にメスキート1、メスキート2と表記する。また、3深度(5, 15, 30 cm)に土壤水分計(5TM: Decagon 社)を設置した。観測は2012/6/10から開始した。アメリカのメスキートの幹の直径は約11 cm (メスキート1)と約9 cm (メスキート2)、タマリスクの直径は2本ともに約9 cm (タマリスク1, 2)である。また土壤は、深度5, 30 cm に土壤水分計(5TE: Decagon 社)、深度80 cm に土壤水分計(10HS: Decagon 社)を設置した。なお、樹体水分のモニタリング結果には明確な温度依存性が見られたため、時系列データを用いた補正法を開発した上で(論文①)、データの補正を行った。

(5) 樹液流速・樹体水分量の同時測定：スーダン・アメリカでの樹体水分モニタリングの結果より、水利用特性解明のためには樹体水分の測定に加え、樹液流速の測定を行うことが望ましいと分かった。そこで、2014年より鳥取大学構内のタブノキを対象とした追加的な調査を実施した。GS3に加え樹液流速計(SFM-1: ICT International 社)を用いたモニタリングを行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) 水の安定同位体比分析

①スーダンについて: Alrawakeeb で採取した地下水・降水水・土壌水・樹体内水の酸素同位体比( $\delta^{18}O$ )と降水量の一例として2012/6/25~2012/10/9の結果を図1に示す。

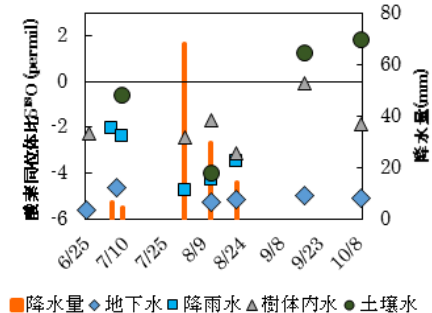


図1. Alrawakeebにおける地下水・降水水・樹体内水・土壌水の酸素同位体比と降水量

地下水の $\delta^{18}O$ は低く安定していた。降水水の $\delta^{18}O$ に関しては基本的に地下水よりも高い値を示しているが変動が大きく、多量の雨が降った際には地下水の $\delta^{18}O$ と近い値を示した。土壌水の $\delta^{18}O$ は基本的に地下水・降水水の $\delta^{18}O$ よりも高い値を示した。しかし土壌の $\delta^{18}O$ は多量の降雨があった8月は降水水の $\delta^{18}O$ と近い値を示した。樹体内水の $\delta^{18}O$ は地下水と土壌水の $\delta^{18}O$ の間で変動した。一

般的にメスキートは地下水を利用しているといわれているが、このサイトの地下水位は80 mと深く、利用するには困難な位置であると思われる。今回の結果より、メスキートの $\delta^{18}O$ が土壌水よりも軽い値を示したことから、メスキートは表層以深の土壌水も利用していると考えられる。

Soba, Alkadaro で採取した地下水・土壌水・樹体内水の $\delta^{18}O$ についても Alrawakeeb と同様の傾向がみられた。Soba, Alkadaro の地下水深が25 mと浅くメスキートが十分に利用できる範囲内であるにも関わらず、樹体内水の $\delta^{18}O$ が地下水の $\delta^{18}O$ よりも重いことから、メスキートは地下水だけでなく土壌水も利用していると考えられる。

②アメリカについて: 図2にアメリカにおいて観測期間中に採取した地下水・土壌水・樹体内水の $\delta^{18}O$ を示した。地下水の $\delta^{18}O$ は2012年・2013年とも近い値を示し、安定していた。2012年の地下水の $\delta^{18}O$ は同時期に採取した深さ20~80 cmの土壌水の $\delta^{18}O$ と近い値を示した。これはこのサイトの地下水位が1 mと浅いため、地下水が毛管上昇により吸い上げられ、土壌水として存在しているためと考えられる。また2012年の深度10 cmの土壌水は高い値を示した。これは表層ほど蒸発が盛んに進むため重い水分子が残っているからである。2種の樹木の $\delta^{18}O$ は地下水と深度が20~80 cmの土壌水の $\delta^{18}O$ に非常に近い値を示した。それゆえ2種の樹木はこれらの水を利用していると考えられる。つまりメスキートは耐塩性の高いタマリスクと同様に塩濃度の高い地下水を利用しているといえ、メスキートもタマリスク同様高い耐塩性があるといえる。

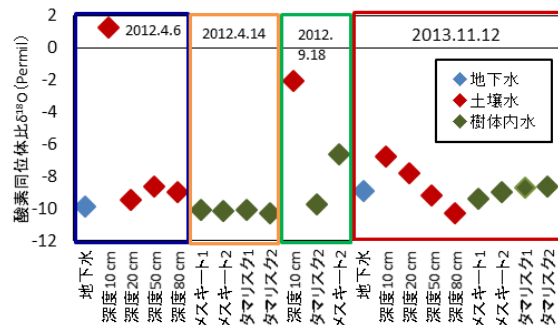


図2. アメリカにおける地下水と土壌水と樹体内水の酸素同位体比

##### (2) 樹体水分モニタリング

①スーダンについて: 図3にSobaにおける2012/6/10~11/5の降水量、樹木体積含水率、土壌体積含水率を示す。まず、樹木(メスキート)1に着目する。7/30と8/1~2の降雨のそれぞれの合計は、10.4 mm、47.0 mmであった。7/30の降雨では、深さ5 cmの土壌水分のみが反応し、樹木1の水分に変化は見られなかった。8/1~2の多量の降雨では、深さ

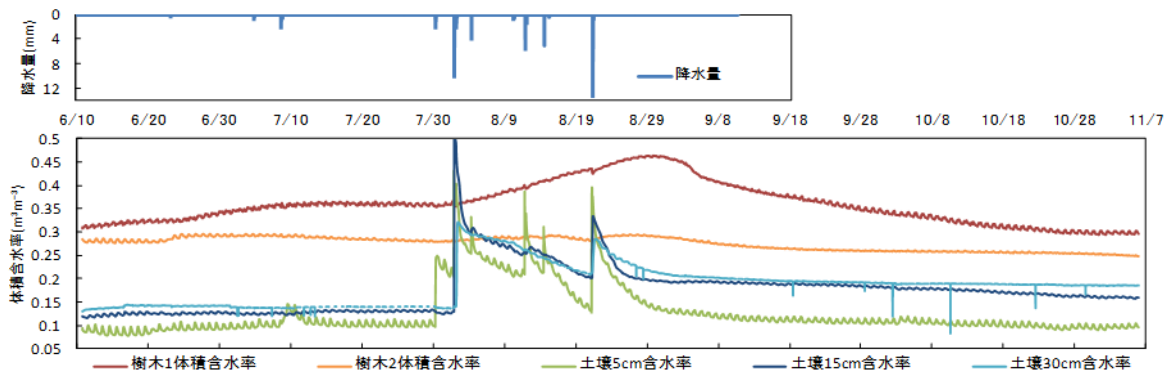


図 3. Soba における 2012/6/10～11/6 の降雨量・樹木体積含水率・土壌体積含水率の変動

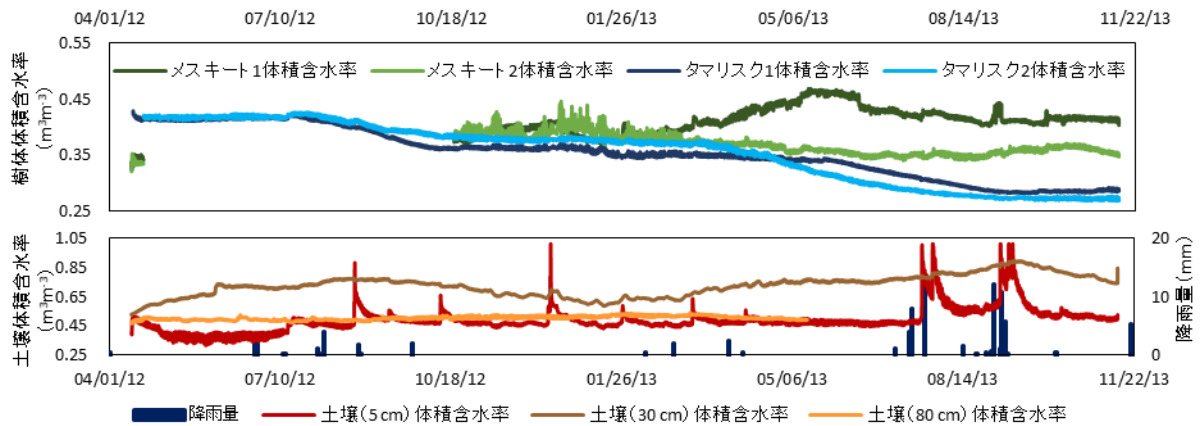


図 4. アメリカにおける 2012/4/13～2013/11/12 の樹体の体積含水率・土壌の体積含水率・降雨量の変動

15 cm, 30 cm の土壌水分においても反応が見られ、樹体水分も上昇を開始した。このことから、樹木は 15 cm 以深の土壌水を吸水していると考えられる。8/21 の降雨は、観測期間中における最後の降雨イベントであった。イベント後も樹木 1 は上昇を続け、8/29 は最高値  $0.46 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$  となり、これは 6/11 の樹体水分と比べて約 15% の上昇であった。その後、樹体水分は 9/1 から減少し始めた。この日における土壌の含水率の日平均は、深さ 5 cm, 15 cm においてそれぞれ  $0.13 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ ,  $0.19 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$  であり、これらの値は、保水性試験から求められた水分恒数による初期シオレ点の値とそれぞれ近いものであった。このことから、土壌が乾燥し樹木の吸水が困難となり、樹体水分が低下し始めたと考えられる。一方、樹木 (メスキート) 2 では、降雨イベントに対して、わずかな応答があるものの、樹木 1 のような明確な変化は見られない。このことから、細い樹木の水分変動は、太い樹木に比べて小さいことがわかった。

以上のように、降雨後に深部の土壌水分が高くなると、樹体水分はすぐに応答し、土壌水分が樹木の吸えない乾燥した状態になるまで、ほぼ一定のスピードで上昇を続けた。このように、地下水に依存していると考えられているメスキートは、雨期において土壌水分を利用していることがわかった。

②アメリカについて：図 4 に 2012/4/13～2013/11/12 にアメリカで観測した樹体の体積含水率水分、土壌の体積含水率、降雨量を示した。全観測期間中を通していても両樹種の樹体水分は降雨イベントに反応していない。同位体の結果から樹木は地下水を利用していることが示されており、このことから樹木が地下水を利用するために降雨イベントに反応しないと考えられる。しかし、メスキートとタマリスクの樹体水分の変化を比較すると、両樹種は異なる反応を示した。タマリスク 1・2 の  $\theta$  は共に夏期に減少し冬期には安定したが、全体を通してみると減少し続けた。一方でメスキート 1・2 の  $\theta$  は異なる変動を示したが、観測終了時の  $\theta$  は観測開始時と比べてほぼ変化していないか上昇していた。

図 5 にメスキートとタマリスクの  $\theta$  と間隙水の電気伝導度 ( $\sigma_p$ ) を示した。メスキートの  $\sigma_p$  は、2012/4 には高い値を示しているが 11 月以降は安定している。一方、タマリスクの  $\sigma_p$  は観測開始時に高い値を示したことを除き、上昇し続けている。このことから、タマリスクは樹体内に塩を溜め込んでいると考えられる。このような全期間を通じてタマリスクの  $\theta$  の減少と  $\sigma_p$  の上昇の傾向の理由としてタマリスクビートルの食害があげられる。タマリスクビートルが葉を食したことにより、蒸散ができず樹体が衰弱し  $\theta$  が減少

し続け、また葉の塩腺から塩を体外へ排出できないため $\sigma_p$ が上昇したと考えられる。

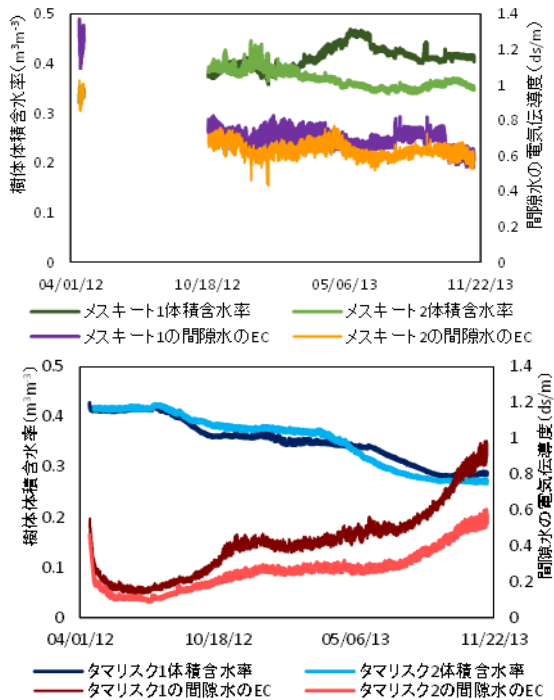


図 5. メスキートとタマリスクの体積含水率と間隙水の電気伝導度 (EC) の変動

(3) 日本での樹液流速・樹体水分量の同時測定：鳥取大学構内のタブノキを用いたモニタリングにより、日中に樹液流速が増加すると同時に樹体水分が減る様子が確認でき、タブノキは蒸散時に樹体水分を使用していることが明確に示された。また、夜間でも湿度が低い日には、雪明りや外灯で蒸散するという興味深い現象が観察された。また、このことが樹液流速と樹体水分量の連動の仕方より推察されたことから、水利用特性解明において樹液流速・樹体水分量の同時測定が重要であることが確認された。

(4) おわりに

スーダン・アメリカ・日本における「樹体水分モニタリング」と「水の安定同位体比分析」を用いた調査・研究の結果より、各樹木の持つ特異な水利用特性が様々な角度から解明された。特に物理センサー群を用いた樹木内環境のモニタリングは、今後とも樹木の水利用特性の解明のみならず、生態系保全、森林水文、灌水管理等の広い分野への貢献が期待される。中でも 2014 年から新たに樹体の水ポテンシャル計の市販化などが始まったことを受け、樹体水分と水ポテンシャルの同時測定が可能な環境が整いつつある。また、本研究で実施した樹体水分と樹体の塩濃度の同時モニタリングについても、これまで世界でほぼ測定例が無く、様々な樹種に適用することで興味深い新たな知見が得られるものと期待される。

さらに、水ストレス等の環境要因に対する各指標の応答が明らかとなれば、特に効果的な指標の組み合わせた新たなセンサーの開発、そして将来的にはこれを利用した精密農業への発展も期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① Saito T., H. Yasuda, M. Sakurai, K. Acharya, S. Sueki, K. Inosako, K. Yoda, H. Fujimaki, M. Abd Elbasit, A. Eldoma and H. Nawata: Monitoring of stem water content of native/invasive trees in arid environments using GS3 soil moisture sensor. *Vadose Zone Journal*. 15:1-9 doi:10.2136/vzj2015.04.0061 2016 (査読有り)
- ② Saito T., M. Tsukumo, M. A. M. Abd Elbasit, H. Yasuda, T. Kawai, N. Matsuo, K. Inosako, K. Acharya, A. E. Babiker, Abubakr A. Hamd and H. Nawata: Estimation of water sources of invasive tree species in arid environments by oxygen stable isotope analysis. *Journal of Arid Land Studies*, 24:29-32. 2014 (査読有り)
- ③ Saito T., H. Fujimaki, H. Yasuda, K. Inosako and M. Inoue: Calibration of temperature effect on dielectric probes using time series field data. *Vadose Zone Journal*, 12: doi:10.2136/vzj2012.0184 2013 (査読有り)

[学会発表] (計 9 件)

- ① Sakurai M., T. Saito, K. Inosako, M. Inagaki, H. Fujimaki: Simultaneous measurement of sap flow and stem water content and development of measurement method. *Proceedings of AFELISA, The International Joint Symposium between Japan and Korea, 2015*, 46, Kurayoshi, Japan (2015年11月04日~2015年11月05日)
- ② 櫻井未優・齊藤忠臣・猪迫耕二・稲垣岬・藤巻晴行：樹液流速・樹体水分量の同時測定および測定方法の開発。第70回農業農村工学会中国四国支部講演会講演要旨集, 63-65, 広島YMCA国際文化センター, 広島市 (2015年10月07日)
- ③ 齊藤忠臣・九十九 菜由・櫻井未優・猪迫耕二・安田 裕・末木幸子・Kumud Acharya: アメリカ・モハーヴェ砂漠における水の安定同位体比分析と樹体水分モニタリングを用いた乾燥地樹木の水利用特性の解明。日本砂丘学会第61回全国大会講演要旨集, 17-18, 弘前大学, 弘前市

- (2015年08月20日～2015年08月21日)
- ④ Saito T., H. Yasuda, K. Yoda, K. Acharya, K. Inosako, M. Inagaki, M. A. M. Abd Elbasit, A. M. Eldoma: Monitoring of stem water content of native/invasive trees in arid environments using GS3 soil moisture sensor. Third In-situ and Remote Soil Moisture Sensing Technology Conference, Mar. 12-14, The Westin Galleria, Houston, TX, USA (2014年03月12日～2014年03月14日)
- ⑤ Saito T., M. Tsukumo, M. A. M. Abd Elbasit, H. Yasuda, T. Kawai, N. Matsuo, K. Inosako, K. Acharya, A. E. Babiker, Abubakr A. Hamd and H. Nawata: Estimation of water sources of invasive tree species in arid environments by oxygen stable isotope analysis. Desert Technology 11 International Conference, Nov. 19-22, Hilton Palacio Del Rio, San Antonio, TX, USA (2013年11月19日～2013年11月22日)
- ⑥ Saito T., M. Inagaki, H. Yasuda, K. Yoda, K. Inosako, M. A. Elbasit, A. M. Eldoma, H. Nawata: Stem water monitoring of mesquite (*Prosopis juliflora*) using dielectric soil moisture probes in Sudan. 1st CIGR Inter-Regional Conference on Land and Water Challenges, CIHEAM - Mediterranean Agronomic Institute of Bari, p.128. 10-14 Sep. Bari, Italy (2013年09月10日～2013年09月14日)
- ⑦ 齊藤忠臣・稲垣 岬・安田 裕・依田清胤・猪迫耕二・M. A. Elbasit・A. M. Eldoma: 誘電率水分計を用いた乾燥地樹木の樹体内水分モニタリング. 平成25年度農業農村工学会大会講演会要旨集, 4-38, 東京農業大学, 世田谷区 (2013年09月03日～2013年09月05日)
- ⑧ 齊藤忠臣・藤巻晴行・安田 裕・稲垣 岬・猪迫耕二・井上光弘: 現場時系列データを用いた誘電率水分計の温度依存性校正とその応用. 日本砂丘学会第59回全国大会研究発表・シンポジウム要旨集, 1-2, 東京工業大学キャンパスイノベーションセンター, 港区 (2013年07月04日～2013年07月05日)
- ⑨ 九十九菜由・齊藤忠臣・Mohamed. A. Elbasit・安田 裕・猪迫耕二・松尾奈緒子・Kumud Acharya・縄田浩志: 水の安定同位体比分析を用いた乾燥地樹木の水利特性の解明. 日本砂丘学会第59回全国大会研究発表・シンポジウム要旨集, 23-24, 東京工業大学キャンパスイノベーションセンター, 港区 (2013年07月04日～2013年07月05日)

〔その他〕  
研究紹介ページ  
<http://muses.muses.tottori-u.ac.jp/dept/symbiosis/SWM/research.html>

## 6. 研究組織

### (1) 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