

令和 4 年 5 月 31 日現在

機関番号：11101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K06285

研究課題名（和文）乾燥地におけるヒモによる低コスト地中灌漑法の社会実装に向けた実証研究

研究課題名（英文）Empirical research for social implementation of low-cost underground irrigation method using strings in arid areas

研究代表者

丸居 篤（MARUI, ATSUSHI）

弘前大学・農学生命科学部・教授

研究者番号：80412451

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）： 開発途上国の乾燥地において、灌漑農業を実現するために、現地で調達可能な資材を用いて節水型、かつ、低コストで灌漑効果の高い地中灌漑方法を開発を目指し、ヒモの毛管現象を利用したヒモ灌漑システムを提案し、効果検証を行った。
ヒモの給水量や保水性に関する実験を行い、綿およびナイロンが水の供給能力が高い材質と明らかにした。これらのヒモを土壌に埋設し、乾燥状態からの推定供給可能量、平均供給量について明らかにした。
土壌条件やヒモの設置条件等、様々なパターンについて土壌水分分布を把握するために、土壌水分分布シミュレーションモデルを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、開発途上国の乾燥地において、現地で調達可能な資材を用い、安価な材料で均一な水分分布を実現するために革新的な地中灌漑方法を提案した。水位調節のみで重力水をできるだけ発生させず、作物に好適な水分量に保つ土壌水分管理を実現することができた。現地住民が扱いやすい方法であるこのシステムは、乾燥地に適用しやすく、新たな地域活性の創出とそれによる過放牧の抑制、不適切な水利用の改善に繋がると考えられる。

研究成果の概要（英文）： In order to realize irrigated agriculture in the arid areas of developing countries, we aimed to develop a water-saving, low-cost, and highly effective underground irrigation method using locally procured materials. We proposed a string irrigation system that utilizes the capillarity of strings and verified its effectiveness.

An experiment was conducted on the amount of water supplied and water retention of the string, and it was clarified that cotton and nylon are materials with high water supply capacity. These strings were buried in the soil, and the estimated supply amount and average supply amount from the dry state were clarified.

A soil moisture distribution simulation model was constructed to understand the soil moisture distribution for various patterns such as soil conditions and string installation conditions.

研究分野： 地域環境工学および農村計画学関連

キーワード： 地中灌漑 負圧差 節水 ヒモ灌漑

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

乾燥地においては、有限な水資源と塩害防止の観点から限られた用水量で農業を行なう必要があり、これまで様々なマイクロ灌漑方式が開発されてきた。一方で貧困地域では、加圧ポンプを含む高価なシステムを導入することは難しい。また、砂漠化が進行する地域では通常の点滴灌漑では、砂嵐による埋没や目詰まり、冬季の凍結などが発生するため、それらの影響を抑え、より節水効果のある地中灌漑が望まれる。社会実装対象地はモンゴルゴビ砂漠近郊のボグド村で砂漠化が進行する地域である。対象栽培作物のひとつにカンゾウ (*Glycyrrhiza uralensis* Fisch.) があり、これまでの研究によって水分ストレスにより生長が阻害される水分量は pF3 程度 (1000cmH₂O の負圧)、根群域の圃場容水量 (十分な降水後、24 時間経過後の水分量と同等) は深さ毎に異なるが、体積含水率 5~18% 程度であることを明らかにしている。

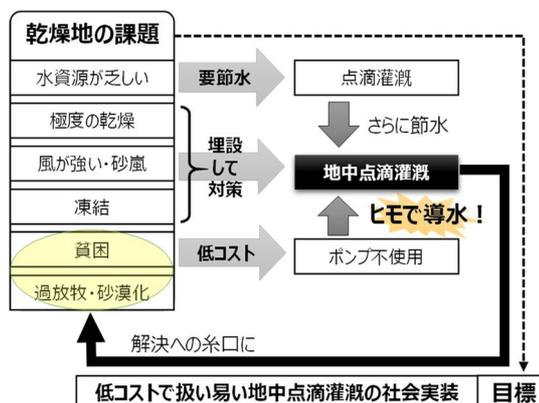


図1 本研究課題の概要と目的

2. 研究の目的

本研究では、安価な材料で均一な水分分布を実現するために革新的な地中灌漑方式を提案する。さらに、節水の観点から、水位調節のみで重力水をできるだけ発生させず、圃場容水量から pF3.0 程度の間の土壌水分管理を目指す。すなわち、ポンプ等の動力を使わずにヒモの毛管現象を利用し、ヒモと土壌の負圧差による負圧差灌漑方式により作物栽培のための灌水システムの構築を目的としている。社会実装を見据え、その波及効果により、新たな地域活性の創出、それによる過放牧の抑制、不適切な水利用の改善に繋がると考えている。

3. 研究の方法

【I】ヒモの物理的特性

実験に使用したヒモの素材はナイロン、綿、クレモナ S (ビニロン 60%・ポリエステル 40%) で、直径等の概要は表 1 の通りである (以下、ナイロン、ナイロン 等と表示)。

ヒモの水分特性を評価するため、加圧板法 (多容量土壌 pF 測定器【DIK-3424】を使用) および吸水試験を行った。加圧板法では 10cm に切ったヒモを飽和させた後、4 本ずつフィルターの上に並べ所定の圧力をかけ pF1 から pF3 まで測定した。吸水試験ではヒモを垂直に垂らす 90 度設定と、45 度、30 度に固定した鉄製の網 (1cm 格子) の上にヒモを設置する設定の 2 種類とし、下部水槽の水面より吸水させ、7 日後に水面からの高さ別にヒモの質量を測定した。測定高さを中心として 2~8cm を切り取り測定した。また、蒸発による影響を防ぐため、装置全体をビニールカバーで覆った。

表 1 実験用ヒモの概要 (n=3)

	綿	綿	ナイロン	ナイロン	外村	外村
直径 (mm)	3.50	6.03	3.55	6.31	3.03	6.29
直径(飽和) (mm)	3.51	6.53	3.69	6.48	3.18	6.55
乾燥密度 (g)	0.50	0.71	0.42	0.62	0.72	0.75
飽和体積含水率 (%)	73.7	89.7	89.9	57.7	84.0	59.5

【II】ヒモによる土壌への灌水能力の把握

実験に使用したヒモの素材はナイロン、綿で、直径等の概要は表 1 の通りである。図 2 に給水実験の概要図を示す。実験装置は貯水槽と水位調節タンクおよび実験ポット (直径 25cm、高さ 25cm) で構成され、給水量を把握するために貯水槽はメスシリンダーとし、実験ポットは電子天秤の上に設置した。貯水槽、水位調節タンクおよび実験ポットの上面はビニールで覆い蒸発を防いだ。ビニールチューブ内の水位はボールバルブによって設定することが可能で、今回は土壌までの水位差を 5cm、土壌とヒモの接地長さを 5cm とし、ヒモは垂直に立てた。土壌はケイ砂 7 号を使用し、乾燥させた後に乾燥密度 1.43g/cm³ となるように

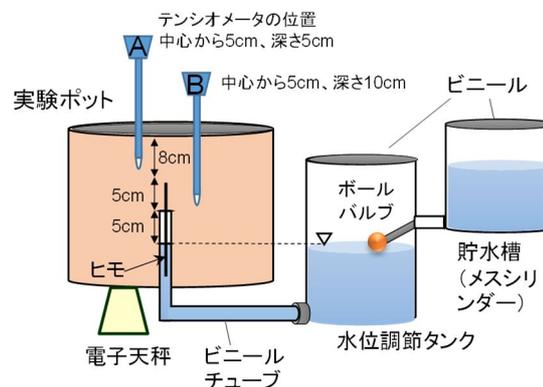


図2 給水実験概要図

充填した。ミニテンシオメータ (T5・METER 社製) をそれぞれ中心から 5cm, 深さ 5cm (A) および 10cm (B) に埋設し, 土壌水分張力を測定した。ヒモは綿 を 2 ポット, 綿 を 3 ポット, ナイロン を 1 ポット測定し, 実験期間は水分供給が減少し安定するまで (17~40 日程度) とした。

【III】ヒモ地中灌漑システムによる栽培実験

実験に使用したヒモの素材はナイロン, 綿で, 直径等の概要は表 1 の通りである (以下, 直径 3mm を綿 (3), 直径 6mm を綿 (6) 等と表示)。実験装置は貯水槽と水位調節タンクおよび実験ポット (1/2000 ニューワグネルポット) で構成され, 給水量を把握するために貯水槽はメスシリンダーとし, 3 つの実験ポットのみ電子天秤の上に設置した。貯水槽, 水位調節タンクおよび実験ポットの上面はビニールで覆い蒸発を防いだ。ビニールチューブ内の水位はボールバルブによって設定することが可能で, 今回は土壌までの水位差を 3 cm, 土壌とヒモの接地長さを 5cm とし, ヒモは垂直に立てた。土壌はケイ砂 7 号を使用し, 乾燥させた後に乾燥密度 1.4g/cm³ となるように充填し深さ 26cm とした。土壌水分計 (EC-5・METER 社製) を中心から 5cm, 先端を深さ 10cm に垂直に埋設し, 計 6 ポットの体積含水率を測定した。ヒモは綿 (3), 綿 (6), ナイロン (3) をそれぞれ 3 ポット, 毎日 200 cm³ 程度の灌漑を行う対照区を 2 ポット用意した。元肥としてマグアンプ k を 0.552g 各ポットの根群域へ混ぜ込んだ。実験ポットへ給水は 6 月 21 日から開始し, 6 月 30 日に安定した。栽培実験は弘前大学内ビニールハウスにおいて 7 月 1 日にダイズを移植して開始し 9 月 7 日に収穫して終了した。葉面積はすべての葉長と葉幅を計測し, 葉面積と葉長 × 葉幅の回帰式から推定した。

【VI】数値解析

実験で得られたデータを元に, 近年精度の高い解析を可能としている HYDRUS-2D を用いて土壌水分の移動解析を行った。上限は大気境界条件であり, ビニールで覆われているため蒸発条件はゼロと仮定した。また, ポット内の水の動きを想定しているため, 下側と横側の境界を水分移動なしと設定した。図 3 は, 中心から半分に分けた 2 次元ポットの断面図を示している。灌漑用水は, 中央ホースの水位部分に常に負圧がゼロになるように設定した。また, 紐はナイロン (3), 土はケイ砂, 水頭差は 5cm とした。初期の土壌水分は -857cmH₂O とした。解析期間は 30 日とし, 作物による吸水はなしとした。表 2 に, シミュレーションのパラメータを示した。Q_r (残留含水量 (%)) および Q_s (飽和含水量 (%)) は, 土壌水分特性曲線から取得し, ヒモの alpha と n (フィッティングパラメーター), および K_s (飽和透水係数) は, 逆解析から得た。L (細孔接続パラメータ) は 0.5 として扱った。

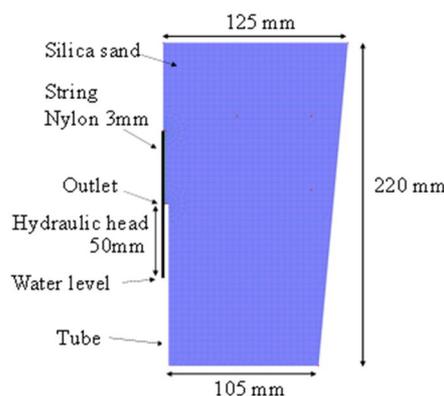


図 3 シミュレーションの境界条件ポットの断面図

表 2 ヒモおよびケイ砂のフィッティングパラメータ

	Q _r Residual water content (%)	Q _s Saturated water Content (%)	Alpha Fitting parameter (1/mm)	n Fitting parameter	K _s Saturated hydraulic conductivity (mm/d)	L Pore connectivity parameter
Silica sand	5.7	41	0.0124	2.28	3502	0.5
String	1.68	80.9	0.0059	1.414	3544	0.5

【V】現地調査

社会実装対象地のボグド村首長および自然保護官とは, 何度か意見交換を行い, これまでの研究活動で良好な関係を築いており, 実証試験を行う場所を提供して頂いた。2019 年に現地において 10m 程度の試作品を投入し, 社会実装する際に問題となる点を確認した。持続可能な農業の実現に向けて, 現地の子供向けに環境教育および本研究の概要説明を行った (写真 1)。また, 3 カ月間現地住民に栽培管理を委託し, 成長量や土壌水分を測定していたが, 2020 年からは新型コロナウイルス感染症への対応で渡航不能となり, 中断した。



写真 1 現地の実験圃場における概要説明の様子

4. 研究成果

【I】ヒモの物理的特性

図3に加圧板法による脱水過程の水分特性曲線を示す。6mmサイズのヒモを比較すると、綿が最も保水性が高く、クレモナ、ナイロンの順になった。3mmでは綿とナイロンが同じような挙動を示し、pF2以上では綿の保水性が高くなった。

図4に吸水試験（90度設定）の結果を示す。90度設定では100cm以上の高さを測定することが可能であったが、100cm以上では吸水は確認されなかった。90度定ではpF1付近を詳細に調べることが困難であったため、45度設定、30度設定の実験を行った。それぞれの結果を図5、図6に示す。何れにおいても、綿とナイロンの保水性が高いことが明らかとなった。とくにpF1.3において直径3mmサイズの綿では32.7%、ナイロンで46.2%の体積含水率であることから、20cmの水頭差まで対応可能な材料であると考えられる。6mmサイズと3mmサイズのヒモを比較すると、クレモナでは同様の結果が得られたが、綿、ナイロンでは6mmサイズの保水能力が劣ることが明らかになった。6mmサイズのヒモは吸水が遅く、7日間では平衡状態に達しなかった可能性があるが、綿とナイロンは十分に水を供給できる水分特性が明らかになった。灌漑強度を高くしたい場合は3mmサイズのナイロン、ゆっくりと供給したい場合は3mmサイズの綿あるいは6mmサイズのナイロンが望ましく、何れのヒモも60cm以上の水頭差では機能しないと考えられた。また、環境面からは化学繊維でなく安価で調達可能な綿が有望であると考えられた。

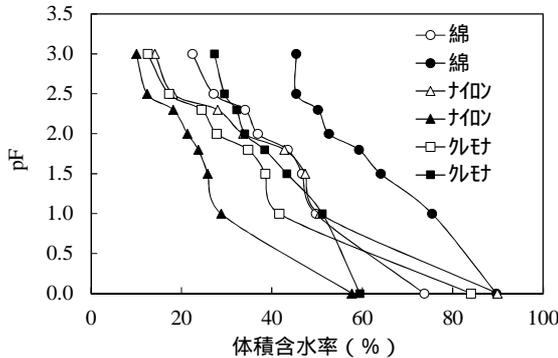


図3 加圧板法によるヒモの水分特性曲線(n=4)

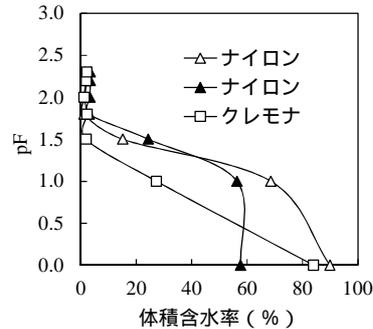


図4 90度の吸水過程で測定したヒモの水分特性曲線(n=3)

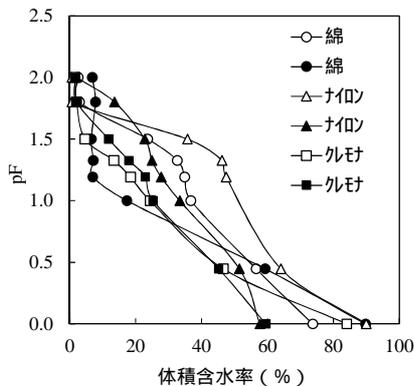


図5 45度の吸水過程で測定したヒモの水分特性曲線(n=3)

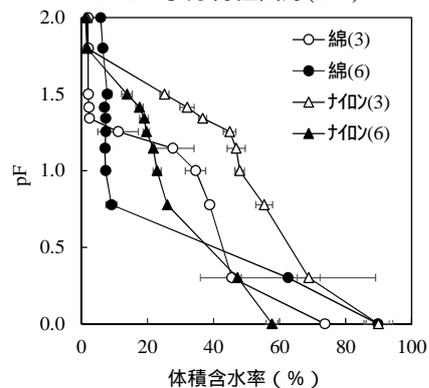


図6 傾斜30度の吸水過程で測定したヒモの水分特性曲線(n=3)

【II】ヒモによる土壌への灌水能力の把握

最も保水性の高かったナイロンを用いた給水実験結果を図7に示す。電子天秤の増加量とメスシリンダーの減少量はほぼ同等であった。実験開始後4日後にテンシオメータBで水分張力が下がり、7日後にテンシオメータAの水分張力も低下した。水分供給量は多い日で300cm³/dayであり、10日程度で供給量は減少した。綿および綿の平均日最大給水量は、それぞれ96 cm³/day (n=2), 181 cm³/day (n=3)であった。積算供給量は綿(3)で727 cm³/32day (n=2), 綿で973cm³/32day (n=3), ナイロンで1768cm³/17dayとなりナイロン(3)が最速で、最大となった。綿は吸水能力が低いとが土壌と接する表面積が多いために、綿よりも給水量が増加したと考えられた。

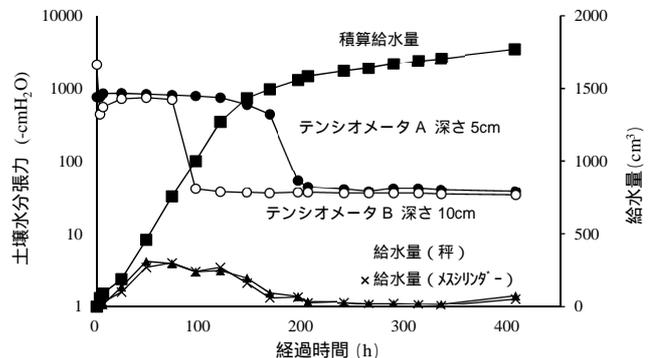


図7 土壌水分張力および給水量の時間変化

【III】ヒモ地中灌漑システムによる栽培実験

ハウス内の実験環境は最高気温 49.7℃，最低気温 12.7℃ と寒暖差が大きい環境であった。図 9 は各ポットの積算給水量をヒモの種類別に平均したものを表している。ナイロン(3)，綿(3)の給水量が多く，79 日間でそれぞれ 4344cm³，4600cm³であった。これは 55~58 cm³/day 程度の給水能力を示している。綿(6)の給水量が小さい理由は，その太さからホースの断面積に対しヒモが占める割合が多く，気泡が発生した際に空気詰まりが起きやすい構造であったためと考えられる。図 10 は各ポットの体積含水率の変化をヒモの種類別に平均した結果である。綿(6)では給水量が小さかったため乾燥していることが分る。ナイロン(3)は 8 月中旬から減少しており，蒸散量に水分供給が追いついていないことが推測される。この原因は前述の空気だまりの影響であると考えられる。綿(3)では 7 月初旬は低い値であったが 9 月まで 10% 程度を維持した。作物の好適水分量である pF1.8~pF3.0 に相当する体積含水率は，6%~32%程度と換算されており，この範囲に収まったのは綿(3)のみとなった。図 11 は 8 月 25 日における各ポットの平均葉面積である。対象区と比べ生長は限定的であり，ナイロン(3)，綿(3)の葉面積は同程度であった。綿(6)は 1 ポットのみ生育し 2 ポットは枯死した。対照区との差は，水分環境はもとより施肥方法による栄養分の溶出に差があったこと，水温の上昇によるチューブの空気だまり発生などが要因であると考えられた。

【VI】数値解析

土壌水分分布についてシミュレーションを行った結果を 図 12 に示す。30 日後，ポットの全範囲に水が広がった。体積含水率は実験よりも少ない約 10%であったが，およその傾向を示すことができた。シミュレーションでは，ポットの上層への水分移動水が見られたが，実験では最初に横方向と下方向に水分移動が観測された。実験と差が発生した理由として，実験ではヒモを水分が毛细管現象で上昇するとき，ヒモ上端に達する前に，ビニールチューブの出口から横に負圧差によって移動したものと考えられた。シミュレーションではこの傾向を表現できたが，実験における下方へ水分移動が卓越した。原因としては，ヒモのパラメータの設定や実験時のヒモのゆるみが考えられる。ヒモのパラメータは逆解析で得られたものであり，実際には測定されていないため，改善する余地があると考えられる。

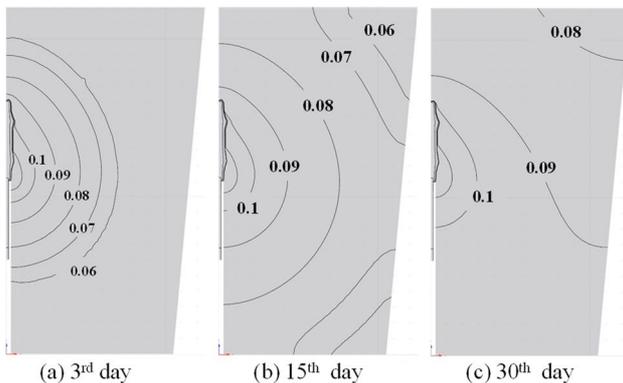


図 12 Hydrus-2D による土壌水分分布のシミュレーション結果 (a) 分析開始からそれぞれ 3 日目，(b) 15 日目，(c) 30 日目。図中の数値は水分量 (cm³ / cm³) を表している。

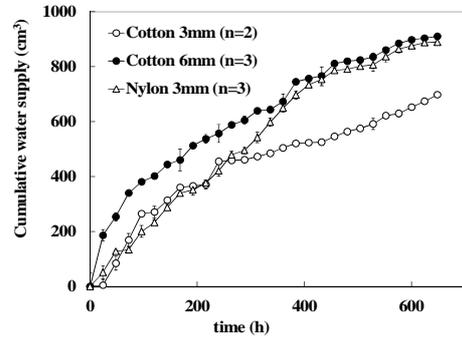


図 8 実験期間中の積算給水量 (エラーバーは標準偏差)

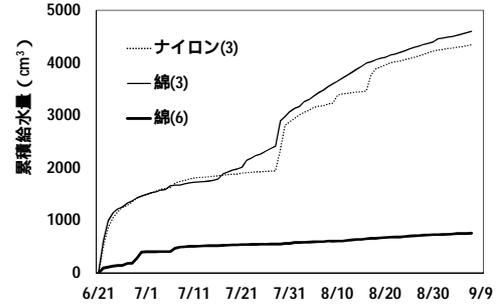


図 9 平均の積算給水量(n=3)

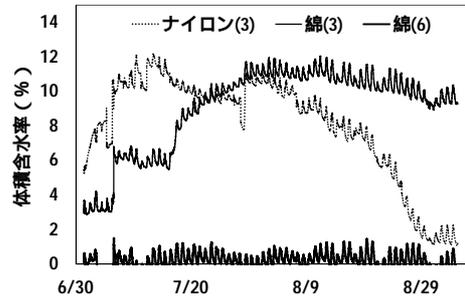


図 10 平均土壌水分量の経時変化(n=2)

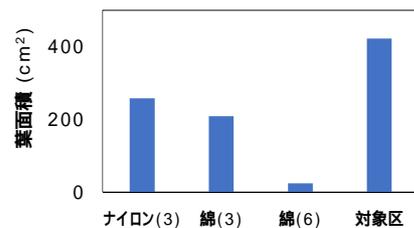


図 11 各ポットの平均葉面積 (8/25)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Atsushi MARUI, Kiyoshi OMINE, Zentaro FURUKAWA, Noriyuki YASUFUKU, Mattashi IZUMI, Indree TUVSHINTOGTOKH and Bayart MANDAKH	4. 巻 Special issue
2. 論文標題 Soil water distribution using subsurface string irrigation for water saving by negative pressure difference	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Arid Land Studies	6. 最初と最後の頁 -
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 該当する

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 丸居 篤・泉 完
2. 発表標題 乾燥地のためのヒモを用いた地中負圧差灌漑による水分供給量
3. 学会等名 農業農村工学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 丸居篤・石橋恵吾・渡邊将伍・泉完
2. 発表標題 低コストで節水できるヒモ灌漑のための基礎的研究 ヒモの水分特性曲線
3. 学会等名 農業農村工学会東北支部第61回研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 丸居篤・富永侑弥
2. 発表標題 ヒモを用いた地中負圧差灌漑によるポット栽培実験
3. 学会等名 農業農村工学会大会講演会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Marui A., K. Omine, Z. Furukawa, N. Yasufuku, M. Izumi, I. Tuvshintogtokh, B. Mandakh
2. 発表標題 Soil water distribution using subsurface string irrigation for water saving by negative pressure difference
3. 学会等名 DT14 International Conference on Arid Land (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高橋奈瑞・大嶺 聖・杉本 知史・蔣 宇静
2. 発表標題 乾燥地の緑化対策に向けた砂の保水性改善の検討
3. 学会等名 土木学会西部支部大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野寄 あすか・大嶺 聖・杉本 知史・蔣 宇静・李 翠
2. 発表標題 土壌水分を可視化する簡易センサーの開発と乾燥地の自動灌水技術実験的検討
3. 学会等名 土木学会西部支部大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 境田 龍之介・松永 涼介・大嶺 聖
2. 発表標題 土中の水分状態を簡易的に検知できる土壌水分センサーの開発
3. 学会等名 土木学会西部支部大会
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	泉 完 (IZUMI Mattashi) (60132007)	弘前大学・農学生命科学部・教授 (11101)	
研究 分担者	大嶺 聖 (OMINE Kiyoshi) (60248474)	長崎大学・工学研究科・教授 (17301)	

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		
モンゴル	Botanic Garden and Research Institute		