

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 24 日現在

機関番号：82111

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25850175

研究課題名(和文) 水稲乾田直播栽培における振動ローラ加速度応答に基づく圃場透水性制御技術

研究課題名(英文) Water leakage control technique based on an acceleration response of a vibratory roller in a dry-seeded rice field

研究代表者

深見 公一郎 (FUKAMI, Koichiro)

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・九州沖縄農業研究センター・水田作研究領域・主任研究員

研究者番号：50399424

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ローラ鎮圧前の土壌が塑性限界(土を練り、すりガラス上で直径3mmのひも状にできる時の土壌水分状態)以上の場合、圃場の漏水を十分に防止できることを実証した。その時の土壌構造は、不十分な場合に比べて空隙形状が扁平になり、全空隙率が少なく、逆に小さな空隙の割合が多くなった。一方、ローラの振動加速度の上下方向の主要周波数成分(MFC)の振幅が圃場の漏水量の低減に伴って増加したことから、振動ローラの加速度応答から漏水防止効果のある程度推定できることが示された。

研究成果の概要(英文)：The results of the present study demonstrated that water leakage from the field was sufficiently prevented when the soil moisture content was beyond the plastic limit before roller compaction. The shape of the soil pores that could efficiently prevent water leakage was flatter than that of the inefficiently compacted soil. In addition, the total porosity decreased, but the small-sized pore rate increased. On the other hand, the amplitude of the MFC in the vertical direction of the vibration acceleration of the roller was significantly increased with the decrease in the volume of water leakage. Thus, in addition to establishing the efficiency of vibratory rollers in reducing water leakage, our findings showed that it is possible to some extent to estimate the water leakage prevention effect from the acceleration response of a vibrating roller.

研究分野：農業食料工学

キーワード：水稲乾田直播 振動ローラ 振動加速度 漏水防止 減水深 土壌構造 X線CT解析

1. 研究開始当初の背景

社会経済のグローバル化や担い手農業者の高齢化・減少が急速に進行する昨今、我が国の水稻栽培においては、さらなる低コスト化・省力化が喫緊の課題となっている。一般に経営規模の拡大は、機械の利用効率等が向上するため生産費の削減につながる。しかし、我が国の9割を占める移植栽培体系では、育苗作業が規模拡大の阻害要因となるため、近年、種籾を直接水田に播種する直播栽培体系が増加傾向にある(農林水産省生産局2008)。水稻の直播栽培には、耕起・代かき後に水を張った水田に播種する湛水直播栽培と畑状態で播種する乾田直播栽培の2種類に大別される(図1)。九州沖縄農業研究センターでは、湛水直播技術として打込み式代かき同時土中点播機(通称:ショットガン直播機、富樫、九州沖縄農業研究センター報告2002)を開発し、普及面積(2005年度)は、全国の湛水直播面積(約1万ha)の約4分の1(2,700ha)に達している。一方、乾田直播栽培は、湛水直播栽培で必須となるカルパー(酸素発生剤)や鉄粉等による種子コーティングや代かき作業を省略できるだけでなく、九州地域で深刻な問題となっているスクミリンゴガイ(ジャンボタニシ)の食害を回避できる(田坂2011、農業技術体系)ため、より低コストかつ省力的な栽培方法である。しかし、イネ・ムギ、ダイズ・ムギの2年4作体系が展開される九州北部地域では、畑利用(ダイズ、ムギ作)の継続によって、耕盤に粗大間隙が発達し(中野他、九州沖縄農業研究センター成果情報2008)漏水が顕著となるため、水田利用時における漏水防止技術の確立が乾田直播栽培を導入・拡大する上で必要不可欠となっている。



図1 水稻の湛水直播と乾田直播

乾田直播栽培における漏水防止には、トラクタに装着したローラによる鎮圧作業が有効である(中江、東北農業試験場研究速報1964、阿部他、栃木県農業試験場研究報告1967、大谷他、東北農業研究センター成果情報2007)が、ローラの自重に頼る静的な鎮圧で十分な効果を得るには、ローラおよびトラクタの大型化が要求される(深見他、農作業研究2012)。一方、振動式鎮圧ローラは動的に鎮圧し、ローラ荷重が小さくても高い鎮圧効果が期待され、一般に普及している小型・中型トラクタでの作業も可能となるため、機械の汎用利用による低コスト化に貢献できる。しかし、振動式鎮圧ローラは、これまで水田輪作体系における漏水防止を目的とした鎮圧作業での利用例がないことから、適

切な作業条件の解明が必要である。

振動ローラに関して工業の分野では、鎮圧の進行による地盤の剛性の増加に伴い、地盤からの反発を受けることにより振動ローラの加速度波形が乱れ、その周波数を分析することで締固め度の変化をリアルタイム計測することが可能となっている(藤山、建山2000、古屋、小関2011)。また、国外でも振動ローラの施工中に各種データを取得し、それを締め固めた土の品質管理に用いる試みが行われている(Mooney et al., ASCE2007)。一方、農業の分野では、圃場の透水性や保水性は、土壌中の孔隙の構成(土壌構造)によって決まる(喜田、土壌の物理性1960)。また、機械走行に伴う土壌硬度の増加は水稻の根の発達や生育に悪影響を及ぼす(滝嶋、土壌の物理性1967)が、従来の研究では、鎮圧作業に伴う土壌構造の変化やそれが作物の生育等に及ぼす影響を総合的に解析した例はほとんどなく、実際にはどのような鎮圧作業(作業の方法および強度)が、圃場の漏水防止や作物の生育にとって望ましいかは明らかになっていない。

2. 研究の目的

本研究では、一般的に普及している小型・中型トラクタでの作業が可能な振動式鎮圧ローラの加速度応答特性と鎮圧に伴って変化する土壌構造との力学的な相互関係を解析することにより、水稻乾田直播栽培における漏水防止を目的とした鎮圧作業の効率化と最適化を図る。

3. 研究の方法

(1) 振動ローラ

供試した振動ローラの外観と諸元を図2に示す。本作業機の全重量は350kgで、主に振動発生部とローラ部で構成される。振動発生部は、トラクタのPTO軸回転(許容範囲:750~1400rpm)により振動し、それに伴ってローラ部が振動することで鎮圧を行う。



図2 振動ローラの外観と特徴

ローラ部は、直径40cm、幅150cmの鉄管で、振動時の鎮圧荷重は750~3125kg(PTO:800~1100rpm)である。本作業機(SV3-T)の適応トラクタサイズは22~44kW(30~60PS)であるが、20PSクラスのトラクタで利用可能なもの(型式:SV2-T、ローラ幅:120cm)も市

販されている。また、ローラ部を心土破碎爪（サブソイラ）に交換可能であり、麦・大豆栽培前は、排水促進を目的とした振動式心土破碎機（田中 2006）として利用できる。

(2) 鎮圧試験条件

九州沖縄農業研究センター（筑後）内の圃場において鎮圧試験を実施した（2013 年度）。土壌の種類は埴壤土（Clay Loam）、塑性および液性限界は 38%および 56%であった。鎮圧前に耕深 13cm でロータリ耕起を行った。出力 25kW（34PS）のトラクタを供試し、PTO 回転数を 1100rpm、作業速度を 1 および 2km/h に設定し、2 反復で実験を行った。土壌貫入抵抗は、Rimik 社のデジタル式土壌貫入抵抗計（CP40）を使用し、深さ 60cm までを 1.5cm 間隔で測定した。土壌三相分布は、100ml のステンレスコア（直径 5cm、高さ 5cm）を使用して、深さ 2-7、7-12、12-17cm の 3 地点をサンプリング後、大起理化社のデジタル実容積測定装置（DIK1150）を用いて測定した。

(3) 振動加速度応答解析

振動加速度は、ロジカルプロダクト社の MEMS 加速度センサ（5G/300dps）をローラの振動発生部上面に取り付けサンプリング周波数 200Hz（0.005s 間隔）で測定した（図 3）。MEMS 加速度センサより得られた加速度応答波形は、周波数解析ソフトを用いてスペクトル分布に変換し、鎮圧に伴う応答波形の変化を解析した。



図 3 振動加速度の測定風景

(4) 圃場の透水性評価

透水性の評価は、漏水量迅速測定器（DIK-4350、大起理化工業（株））を用いて測定した。鎮圧試験後、圃場を一時湛水（深さ 10cm 程度）し、本器による計測（各区 1 分間×3 カ所）の測定により各鎮圧条件における日減水深値を得た。

(5) 土壌構造解析

サンプルは、減水深測定のために一時湛水後に落水した圃場にて、電動サンブラ（藤原製作所製：HS-30S を電動ドリルに取付）を使用し PVC 製透明円筒（φ 50mm×L300mm）に採取した。大まかな土壌構造を把握するためサンプル全体の垂直断面を産業用 X 線 CT スキャナ（TOSCANER-20000RE、東芝、ボクセルサイズ 0.195mm、スライス厚 1mm）で撮影し、より詳細な撮影（3 次元断面）にマイクロ X 線 CT スキャナ（TOSCANER-32300FPD、東芝、

ボクセルサイズ 0.079mm、スライス厚 0.159mm）を使用した。土壌の空隙径および空隙形状の空間分布は、マイクロ X 線 CT 画像に基づき解析プログラムを使用して算出した。

(6) 生育・収量への影響解析

振動ローラ鎮圧が水稻の生育・収量に及ぼす影響を解析するため、場内（筑後）圃場において下記の条件のもと栽培試験を行った（2015 年度）。にこまる（乾籾：3.1kg/10a）、条播（条間：30cm、施肥量：N6kg/10a）、振動鎮圧（作業速度：2km/h、PTO：1000rpm）、鎮圧回数（0、1、3、5（4水準））。

4. 研究成果

(1) 振動加速度応答

図 4、5 に WC（鎮圧前の土壌含水比）32%と 39%における振動加速のスペクトル分布を示す。

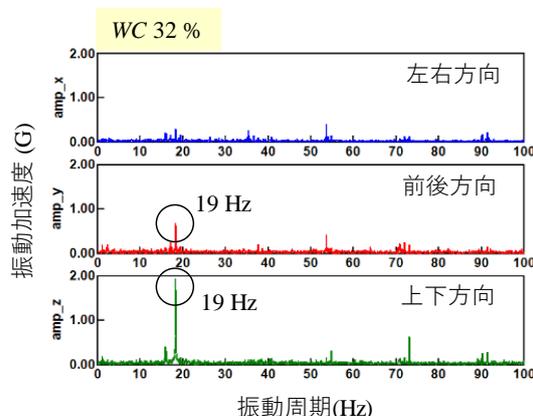


図 4 振動加速度のスペクトル分布

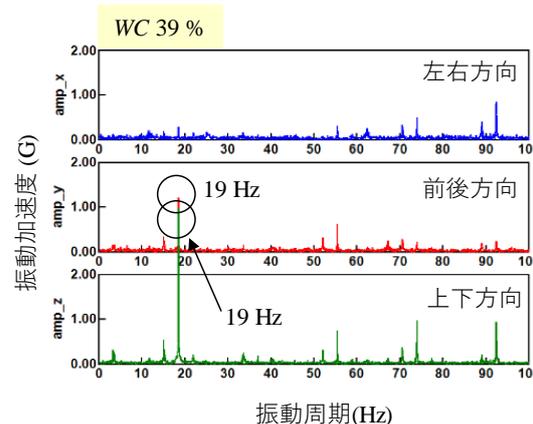


図 5 振動加速度のスペクトル分布

同図より、いずれの条件においても、ローラ振動加速度応答の主要周波数成分の周期は、PTO 軸の回転周期（19Hz）と一致することがわかった。また、高水分条件のほうがローラの鉛直方向における主要周波数成分の振幅（ピーク値）が大きくなる傾向が確認された。

(3) 圃場の透水性

図 6 に WC 32%および 39%における鎮圧作業

速度毎の日減水深の比較結果を示す。WC 32%では、作業速度を2km/hから1km/hに低下させることで、日減水深が約45cmから14cmに大幅に低下した。しかしながら、水稻作に求められる日減水深は2cm程度なので、漏水防止効果として不十分であった。一方、WC 39%では、いずれの作業速度でも日減水深が2cm以下となり、高い漏水防止効果が得られることがわかった。また、ローラ振動加速度応答の上下方向における主要周波数成分の振幅と日減水深の関係をプロットすると(図7)、日減水深の減少に伴って振幅値が有意に増加することが示された。

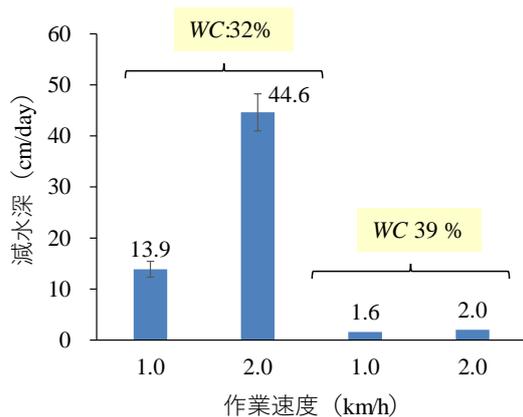


図6 土壌水分と作業速度による日減水深の比較

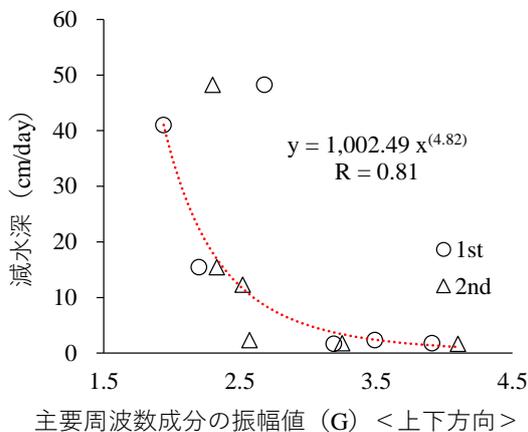


図7 振動加速度と減水深の関係

(4) 鎮圧土壌の構造変化

図8に日減水深41.0cm(漏水防止効果無し)および1.7cm(漏水防止効果有り)における土壌のX線CT画像を示す。垂直断面図より、作土層(深さ0~100mm)に比べ心土層(100mm以深)の空隙(黒い部分)は、条件に関わらず相対的に少ないことがわかった。また、水平断面図(深さ33, 55, 75mm)より、日減水深41.0cmに比べ1.7cmの空隙が潰れた構造

になっていることが確認できた。

図9にX線CT画像に基づいて算出した、全空隙に対する空隙径毎の占有率(解析範囲:深さ20~90mm)を示す。同図より、漏水防止効果が高い土壌は、低い場合に比べ全空隙率が少なく、逆に小さな空隙の割合が多くなることを示された。

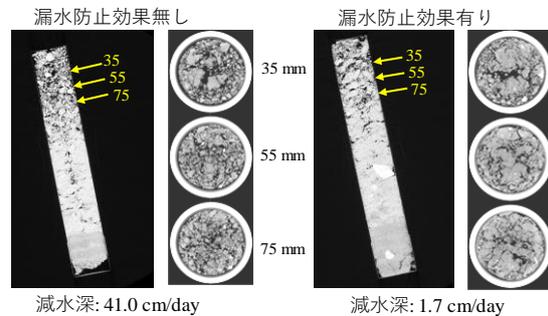


図8 鎮圧土壌のX線CT画像

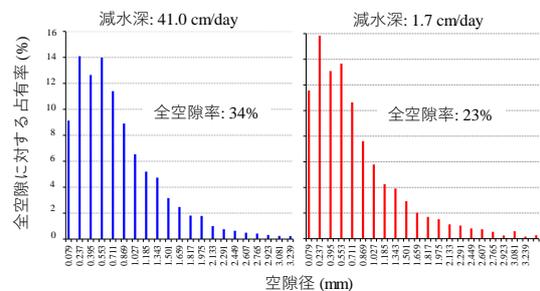


図9 全空隙に対する空隙径毎の占有率

(5) 生育・収量への影響

塑性限界程度の土壌条件で鎮圧作業を行った結果、①鎮圧回数に対する、振動加速度の有意な変化は確認出来なかった。②鎮圧作業によって作土層(0-15cm)の土壌貫入抵抗(PR)は有意に増加し(図10,表1)、飽和透水係数(Ks)は有意に低下した(表1)。③苗立率、草丈および稈長は、鎮圧作業によって有意に増加した。一方、茎数、穂数、穂長および収量に有意差はなかったが、鎮圧作業によって増収する傾向が確認できた(表1)。④水稻の根系をコア(φ95×L250mm)サンプリングし、X線CT解析を行った結果、鎮圧作業が根系の発達に及ぼす明瞭な差は確認出来なかった(図11)。以上より、鎮圧作業時に塑性限界程度に土壌が湿っていれば、1回鎮圧で漏水防止や苗立・収量向上効果等を得られることが示された。

振動鎮圧は、大規模圃場(1ha以上)では、オペレータへの負担が大きい(長時間の単独作業)ため、今後、作業の自動化(ロボット化)等について検討したいと考えている。

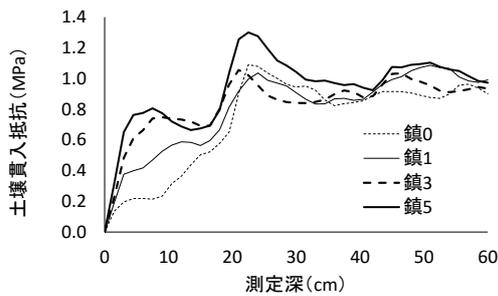


図 10 鎮圧回数による土壌貫入抵抗の変化

表 1 土壌物理性と水稻の生育・収量一覧

| 鎮圧回数 | PR (MPa) | Ks (m/s) | 苗立数 (本) | 苗立率 (%) | 草丈 (cm) | 稈長 (cm) | 収量 (kg/10a) |
|------|----------|----------|---------|---------|---------|---------|-------------|
| 0 | 0.30 c | 2.E-04 a | 39 b | 35 b | 68.4 b | 76.7 b | 375 |
| 1 | 0.50 b | 3.E-05 b | 61 ab | 55 ab | 73.2 a | 80.6 ab | 443 |
| 3 | 0.69 ab | 3.E-05 b | 74 a | 66 a | 73.8 a | 80.9 a | 458 |
| 5 | 0.73 a | 1.E-05 b | 73 a | 65 a | 73.0 a | 79.2 ab | 437 |
| | ** | * | * | * | * | * | ns |

・アルファベットはTukeyのステューデント化範囲 (HSD) 検定による統計的有意差を示す。
 ・PR: 土壌貫入抵抗, 測定深4.5, 9.0, 13.5cmの平均値
 ・Ks: 飽和透水係数, 測定深0-5, 5-10, 10-15cmの平均値
 ・水稻生育・収量調査面積: 0.6×2.0m (1.2m²)



図 11 水稻根系の3D-X線CT画像

<引用文献>

①農林水産省生産局農産振興課, 2008. 水稻直播栽培の現状について. http://maff.go.jp/j/seisan/ryutu/zikamaki/z_genzyo/pdf/all.pdf. Accessed May, 26, 2014

②富樫辰志, 2002. 水稻の打込み式代かき同時土中点播技術の開発. 九州沖縄農業研究センター報告, 41, 1-52

③田坂幸平, 2011. スクミリングガイの被害回避. 農業技術体系作物編「追録33号」, 第2-1巻, 技402, 18-22

④中野恵子, 久保寺秀夫, 原嘉隆, 2008. 負圧浸入計による二毛作水田と水稻単作田の耕盤透水特性の評価. 九州沖縄農業研究センター成果情報. <http://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/karc/2008/konarc08-35.html>. Accessed May, 26, 2014

⑤中江克己, 1964. 水稻の乾田整地直播栽培における漏水防止法について. 東北農業試験場研究速報, 4, 31-36

⑥阿部秀男, 奥山隆治, 栃木喜八郎, 1969. 水稻乾田直播栽培に関する研究 第3報 漏水防止について. 栃木農業試験場研究報告, 19-25

⑦大谷隆二, 関矢博幸, 冠秀昭, 中山壮一, 小野洋, 齋藤秀文, 金井源太, 迫田登稔, 天羽弘一, 高橋彩子, 2007. プラウ耕・グレンドリル播種方式の寒冷地向け水稻乾田直播体系. 東北農業研究センター成果情報. <http://www.naro.affrc.go.jp/org/tarc/seika/jyouhou/H23/suitou/H23suitou015.html>. Accessed May, 26, 2014

⑧深見公一郎, 中野恵子, 田坂幸平, 土屋史紀, 三池輝幸, 伊藤博幸, 2012. 暖地輪作体系における水稻乾田直播圃場の透水性制御技術に関する研究—ローラ鎮圧が圃場透水性と水稻生育に及ぼす影響—, 農作業研究, 47 (別1), 71-72

⑨藤山哲雄, 建山和由, 2000. 振動ローラの加速度応答法を利用した転圧地盤の剛性評価方法, 土木学会論文集, No. 652/III-51, 115-123

⑩古屋弘, 小関裕二, 2011. 道路工事におけるインテリジェントコンパクションシステムの開発, 大林組技術研究所報, No. 75, 1-10

⑪Mooney, M. A., Rinehart, V. R., 2007. Field monitoring of roller vibration during compaction of subgrade soil. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 133 (3), 257-265

⑫喜田大三, 1960. 土壌構造と湿式粒団分析法, 土壌の物理性, 2号, 28-33

⑬滝嶋康夫, 1967. 水田土壌の硬度と稲生育, 土壌の物理性, 16, 10-15

⑭田中宏明, 2006. 振動式サブソイラによる土層破砕の個別要素法 (DEM) シミュレーション, 農業機械学会誌, 68(4), 13-17

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計1件)

①Koichiro Fukami, Toshifumi Mukunoki, Keiko Nakano, Naoki Matsuo, Tatsuo Hiroma, Takashi Okayasu, Shinori Tsuchiya, Yutaka SaSaki, Water leakage control in a dry-seeded rice field by using vibratory roller, Proceedings of the 13th European Conference of ISTVS, 査読有, 2015, pp. 252-262

[学会発表] (計10件)

①深見公一郎, 中野恵子, 椋木俊文, 稲葉繁樹, 松尾直樹, 土屋史紀, 佐々木豊, 岡安崇史, 暖地輪作体系における乾田直播圃場の透水性制御技術に関する研究—振動ローラ鎮圧が水稻の生育・収量に及ぼす影響の解明—, 第75回農業食料工学会年次大会, 2016年05

月 29 日, 京都大学 (京都府京都市)

② Koichiro Fukami, Toshifumi Mukunoki, Keiko Nakano, Naoki Matsuo, Tatsuo Hiroma, Takashi Okayasu, Shinori Tsuchiya, Yutaka SaSaki, Water leakage control in a dry-seeded rice field by using vibratory roller, 13th European conference of the ISTVS, 2015 年 10 月 21 日~2015 年 10 月 23 日, National Research Council of Italy (Rome)

③ 中野恵子, 深見公一郎, 振動ローラによる漏水防止技術の検討, 2014 年度土壌物理学会, 2014 年 10 月 25 日, 宮城大学 (宮城県黒川郡)

④ 広間達夫, 深見公一郎, 水稲乾田直播栽培における振動式転圧ローラによる土壌の締固めモデルの作成, 第 35 回テラメカニクス研究会, 2014 年 10 月 17 日, 隠岐文化会館 (島根県隠岐郡)

⑤ 深見公一郎, 椋木俊文, 中野恵子, 松尾直樹, 岡安崇史, 広間達夫, 土屋史紀, 佐々木豊, ローラ鎮圧による暖地乾田直播圃場の漏水防止技術-X線CT画像に基づく鎮圧土壌の構造解析-, 第 77 回九州農業研究発表会, 2014 年 09 月 01 日, 九州大学 (福岡県福岡市)

⑥ 深見公一郎, 中野恵子, 松尾直樹, 土屋史紀, 佐々木豊, 椋木俊文, 岡安崇史, 広間達夫, 暖地輪作体系における乾田直播圃場の透水性制御技術に関する研究-ローラ鎮圧作業に及ぼす土壌水分の影響-, 第 73 回農業食料工学会年次大会, 2014 年 05 月 17 日, 琉球大学 (沖縄県中頭郡)

⑦ 深見公一郎, 松尾直樹, 土屋史紀, 佐々木豊, 中野恵子, 暖地輪作体系における水稲乾田直播圃場の漏水防止技術-ローラ鎮圧と表播種機を組合せた水稲乾田直播-, 2014 (H26 年度) 日本農作業学会春季大会, 2014 年 05 月 15 日, 神戸大学 (兵庫県神戸市)

⑧ 深見公一郎, 土屋史紀, 松尾直樹, 佐々木豊, 中野恵子, 暖地輪作体系における水稲乾田直播圃場の漏水防止技術-表層散播機とローラ鎮圧を組合せた水稲乾田直播-, 2014 (H26 年度) 日本農作業学会春季大会, 2014 年 05 月 15 日, 神戸大学 (兵庫県神戸市)

⑨ 広間達夫, 深見公一郎, 振動式鎮圧ローラによる土壌の締固め, 第 34 回テラメカニクス研究会, 2013 年 12 月 14 日, ホテルグランビュー石垣 (沖縄県石垣市)

⑩ 深見公一郎, 中野恵子, 松尾直樹, 土屋史紀, 佐々木豊, 椋木俊文, 岡安崇史, 広間達夫, 水稲乾田直播栽培における振動ローラ加速度応答に基づく圃場透水性制御技術, 第 72 回農業食料工学会年次大会, 2013 年 09 月 12 日, 帯広畜産大学 (北海道帯広市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

深見 公一郎 (FUKAMI Koichiro)

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・九州沖縄農業研究センター・水田

作研究領域・主任研究員

研究者番号: 50399424

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

椋木 俊文 (MUKUNOKI Toshifumi)

熊本大学・自然科学研究科・准教授

研究者番号: 30423651

中野 恵子 (NKANO Keiko)

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・九州沖縄農業研究センター・水田作研究領域・主任研究員

研究者番号: 40354089

岡安 崇史 (OKAYASU Takashi)

九州大学・大学院・農学研究院・准教授

研究者番号: 70346831

(4) 研究協力者

松尾 直樹 (MATSUO Naoki)

土屋 史紀 (TSUCHIYA Shinori)

佐々木 豊 (SASAKI Yutaka)

稲葉 敏樹 (INABA Toshiki)

広間 達夫 (HIROMA Tatu)