

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2018～2022

課題番号：18H03963

研究課題名(和文) 土壌の表面特性と微生物を活用した土壌・水・大気保全技術の確立

研究課題名(英文) Improvement of soil, water, and air conservation technology using soil surface characteristics and microorganisms

研究代表者

石黒 宗秀 (Ishiguro, Munehide)

北海道大学・農学研究院・教授

研究者番号：00294439

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,300,000円

研究成果の概要(和文)： 無肥料無農薬の自然栽培水田において、多数回の中耕除草が稲の生育・土壌環境に及ぼす影響を5年間にわたって調査した。稲わら散布と多数回中耕除草で地力が回復する傾向にあり、多数回中耕除草で、400g/m<sup>2</sup>程度の収量を維持して栽培可能なことが分かった。

原発事故周辺で放射能汚染が問題視されるストロンチウムの土壌中における吸着移動現象を、理論と実験から明らかにした。汚染と浄化に関する界面活性剤の簡易で正確な測定法を開発し、土壌中における吸着移動特性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

多数回中耕除草農法の無肥料無農薬稲作への適用の有効性を、初めて学術的に明らかにした。この成果は、環境保全型の有機農業による持続的農業技術の推進に貢献する。

ストロンチウムの土壌中における吸着移動現象の研究成果は、緊急課題である福島第一原発事故による放射能汚染の影響評価と対策のための基礎資料として活用できる。最も多量に環境中に放出されている界面活性剤の簡便正確な測定法は、今後の研究に貢献し、その成果は種々環境問題の解決に結びつくと考えられる。界面活性剤に代表される溶存有機物の土壌中における挙動の研究成果は、土壌をめぐる物質循環および汚染有機物の土壌中での挙動の新しい基礎的知見として活用できる。

研究成果の概要(英文)： Influence of frequent inter-tillage weeding on rice yield and soil condition in paddy field without fertilizers and agricultural chemicals has been investigated for 5 years. Frequent inter-tillage with rice straw application recovered the soil fertility well and the brown rice yield about 400g/m<sup>2</sup> could be maintained.

We have clarified strontium adsorption and transport phenomena in soil, based on theory and experiments. We have developed a simple and accurate measurement method for a surfactant, which is involved in pollution and cleanup, and clarified their adsorption and transport characteristics in soil.

研究分野：土壌物理学

キーワード：無肥料無農薬 自然栽培 水田 中耕除草 土壌 ストロンチウム 界面活性剤 窒素

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

持続可能な農業を進める上で、有害物質に汚染されていない健康な土壌で健康な作物を栽培し、農業活動が環境を悪化させないことが基本となる。

(1)人の健康は、健康な作物から、健康な作物は健康な土壌からもたらされる。現代農業技術は、化学肥料と農薬を多量に使用することを前提としているが、化学物質の多量使用は環境汚染を招き、生態系を破壊し、人の健康にも影響することが懸念される。また、リンなどの肥料資源は有限であり、有効に利用する必要がある。人の健康や生態系と地球環境の保全のために、化学肥料と農薬に頼らない有機農業の推進が地球規模で求められている。

(2)地球温暖化を促進する温室効果ガスの土壌中での動態を明らかにし、温室効果ガスの排出を抑制する環境保全型の農法が必要となっている。

(3)福島第一原子力発電所事故で起こった放射能による汚染問題の解決が急務となっている。

(4)汚染土壌の浄化に役立つ一方で、環境汚染を招く可能性のある界面活性剤に着目し、環境保全技術を確立することが求められている。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、肥料成分や放射性物質・界面活性剤・温室効果ガスなどの汚染物質の土壌中における動態を、土壌の表面特性と微生物活動に着目して明らかにし、その知見を用いて、土壌・水・大気保全技術を確立することである。さらに、その知見を用いて、環境保全技術に展開するとともに、自然の物質循環を効率的に利用する環境保全型の有機農業を推進する。特に、次の研究を推進する。

(1)有機農業技術を推進するため、多数回中耕除草法を用いた無肥料無農薬自然栽培水田における養分動態・稲の生育・土壌微生物の生態を研究する。

(2)また、自然栽培水田の温室効果ガス排出量を調査し、環境保全型農法を確立する。

(3)福島第一原子力発電所事故により、現場周辺土壌は放射性ストロンチウムに汚染されており、ストロンチウムの土壌中における吸着移動現象を明らかにし、汚染対策を確立する。

(4)界面活性剤の土壌中における吸着移動現象を明らかにし、汚染対策を確立する。

### 3. 研究の方法

(1)多数回中耕除草が無肥料無農薬自然栽培水田の養分動態・稲の生育・土壌微生物生態に及ぼす影響の研究

北海道大学生物生産農場水田において、無肥料無農薬中耕除草5回区、2回区、0回区の試験区を設定した。25m×40m(10a)の水田圃場を9プロットに分割し、各回区3プロットずつをランダム配置した。中耕除草は、田植え数日後から約40日後までの間に行った。無肥料無農薬転換前の3年間は、稲作期間中無栽培湛水で除草剤のみを散布していた。それ以前は慣行栽培であった。収穫後稲わらを全て圃場に散布した。稲品種は、ななつぼしを用いた。窒素・リン・カリの養分動態を明らかにするために、土壌と土壌水をサンプリングし測定に用いた。稲の生育を測定し、収量構成要素・収量を測定した。無肥料無農薬に転換初年目の2018年から2022年までの5年間調査した。次世代シークエンシングPCR法により、土壌微生物の生態調査も行った。

(2)多数回中耕除草が無肥料無農薬自然栽培水田の温室効果ガス排出に及ぼす影響の研究

上記生物生産農場水田の試験区において、クローズドチェンバー法でメタン・亜酸化窒素のガスフラックスを算出した。同時に田面水中の溶存CH<sub>4</sub>濃度、3cm深土壌の溶存酸素濃度、5cm深土壌の酸化還元電位と5cm土壌溶液の活性二価鉄濃度を測定した。

(3)ストロンチウムの土壌中における吸着移動研究

ストロンチウムの粘土への吸着実験を行い、その吸着特性を明らかにした。粘土試料として、カオリナイト・イライト・パーミキュライト・アロフェンを用いた。吸着データを基に、土壌中におけるストロンチウムの移動予測を物質移動理論を用いて行い、ストロンチウムの汚染対策のための基礎資料とした。

(4)界面活性剤の土壌中における吸着移動現象の研究

もっとも大量に環境中に放出されている界面活性剤ドデシルベンゼンスルホン酸ナトリウム(DBS)の土壤溶液中における迅速簡便な濃度測定法を開発するために、土壤抽出液を含むDBS溶液を、吸光度法で測定し、正確な濃度測定補正技術を提案した。DBSの土壤溶液浸透実験と吸着実験を行い、吸着移動を伴うDBSの土壤中での挙動を明らかにし、汚染対策の基礎資料とした。

#### 4. 研究成果

(1)多数回中耕除草が無肥料無農薬自然栽培水田の養分動態・稲の生育・土壤微生物生態に及ぼす影響の研究

中耕除草区の収量の推移を図1に示す。初年目(531-566 g/m<sup>2</sup>)に石狩地区平均(497g/m<sup>2</sup>)を上回った後、2年目(220-272g/m<sup>2</sup>)に大幅低下したが、中耕回数が増加するほどその後の収量(5回区;3年目354 g/m<sup>2</sup>,4年目301 g/m<sup>2</sup>,5年目415 g/m<sup>2</sup>)が増加傾向を示した。1~2年目は、中耕除草回数が収量に及ぼす影響は認められなかった。また、5年間を通して、中耕除草回数が収量構成要素に及ぼす有意な差は、0回区と5回区との間の1000粒重意外には認められなかったものの、収量には有意差が3年目以降認められた。稲の窒素吸収量は、中耕回数が増加するに従い増加する傾向が認められた。5年目の5回区収量(415 g/m<sup>2</sup>)が同圃場の慣行区(510g/m<sup>2</sup>)に及ばなかったのは、主に生育初期の分けつ数が少なく穂数が少なくなったためと

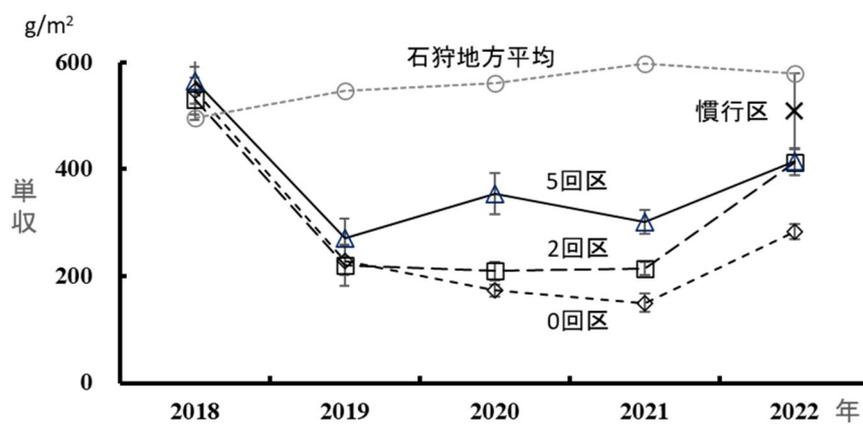


図1 5年間の玄米単収の推移。

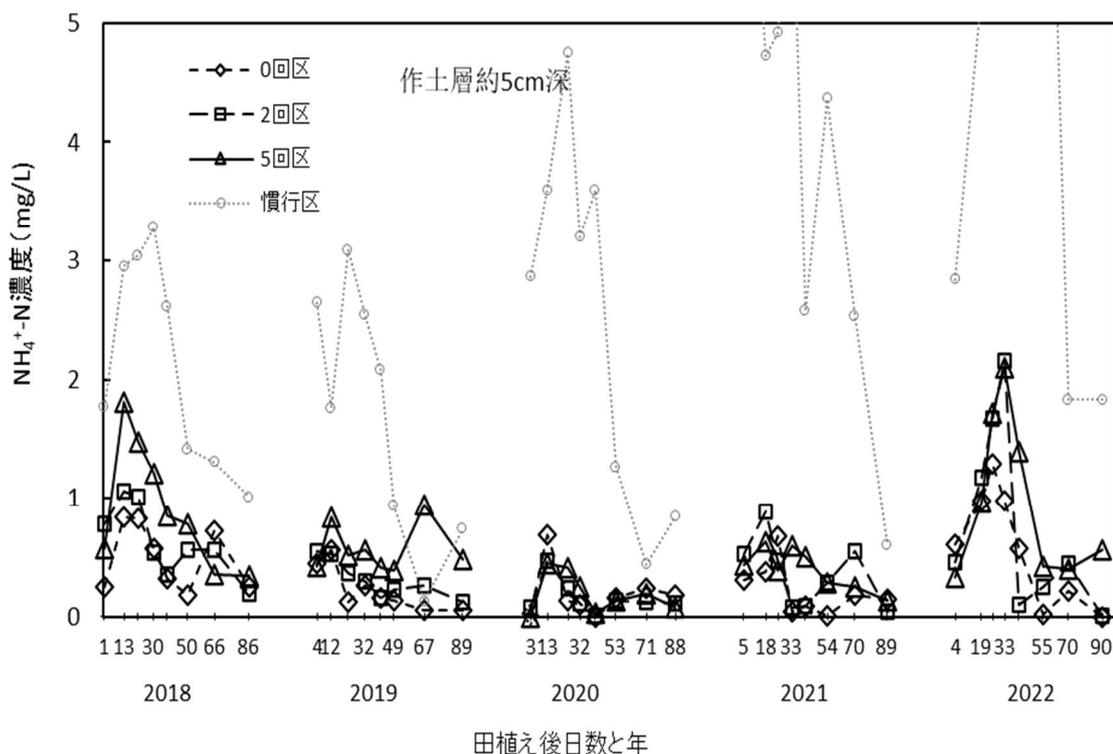


図2 5年間の土壤溶液中(約5cm深)のNH<sub>4</sub>-N濃度の推移。

考えられる。

作付期間中の作土中 5cm 深前後から採取した土壌溶液中の  $\text{NH}_4\text{-N}$  濃度の推移を図 2 に示す。中耕除草区の濃度は、初年目が相対的に高く、2 年目から 3 年目まで減少した後 4 年目以降増加し、5 年目は、初年目と同程度に回復した。また、中耕回数が多くなるほど濃度が高くなる傾向にあった。作土中の交換性  $\text{NH}_4$  量の値も同様の傾向を示したが、中耕除草回数の違いは認められなかった。 $\text{NH}_4\text{-N}$  濃度や交換性  $\text{NH}_4$  量の回復と収量の増加傾向から、無農薬無肥料栽培においても、稲わら還元と多数回中耕除草で地力が回復する傾向にあることが分かった。土壌溶液中の  $\text{PO}_4\text{-P}$  濃度の 5 年間のデータを比較したところ、慣行区、中耕除草各區で相違が認められなかった。また、土壌中の有効態リン酸、交換性カリ、交換性苦土は、北海道の基準値をほぼ維持していた。これら養分は、これまでの施肥による蓄積や土壌からの供給で不足が生じていないことが分かった。

転換初年度に、次世代シークエンシング PCR 法で土壌微生物種の同定を行ったところ、不耕起区 (0 回区) の方が、かく乱の影響が少ないため微生物種が 5 回区よりも多いが、微生物の量は相違ないことが分かった。

無肥料でも多数回中耕除草で、 $400\text{g}/\text{m}^2$  程度の収量を維持して栽培可能なことが示された。同様の農法を続けることによって、さらに土壌環境が改善され収量が増加するかどうかは、今後の調査が必要である。

### (2) 多数回中耕除草が無肥料無農薬自然栽培水田の温室効果ガス排出に及ぼす影響の研究

中耕除草期間における  $\text{CH}_4 + \text{N}_2\text{O}$  の温室効果ガス排出量は、慣行区  $227\text{kgCO}_2\text{eq}/\text{ha}$ 、無肥料無農薬中耕除草 0 回区  $410\text{kgCO}_2\text{eq}/\text{ha}$ 、2 回区  $148\text{kgCO}_2\text{eq}/\text{ha}$ 、5 回区  $136\text{kgCO}_2\text{eq}/\text{ha}$  で、処理区間に有意差はなかったが、5 回区で最も小さかった (図 3)。また、 $\text{CH}_4$  排出量は 0 回区と比較し、2 回区では 0 回区の 27%、5 回区では 19% に排出量が減少した一方で、 $\text{N}_2\text{O}$  排出量では 2 回区では 154%、5 回区では 219% に排出量が増加したというトレードオフの関係を示した。中耕除草期間の 3cm 深土壌溶液の溶存酸素濃度は全処理区で  $0.39\text{-}3.73\text{ mg}/\text{L}$  の比較的低い範囲を推移し、酸化還元電位および活性二価鉄濃度は全処理区で湛水に伴い土壌が還元化する傾向を示した。これらは攪乱による土壌の酸化は一時的であり、すぐに還元へ転じたことを示している。以上より、土壌攪乱による土壌の一時的な酸化は拡散  $\text{CH}_4$  の酸化を促進する一方で、土壌中の  $\text{N}_2\text{O}$  生成プロセスである硝化・脱窒を刺激した可能性がある。

中耕除草回数を多くすることで  $\text{CH}_4$  排出量が減少し、温室効果ガス排出量が減少する傾向にあることを示した。今後は、土壌攪乱の硝化・脱窒への影響を明らかにするとともに、中耕除草の頻度を増やすことで嫌気環境を長期的に改善し、温室効果ガス排出量をさらに削減できるかどうか検討することが重要である。

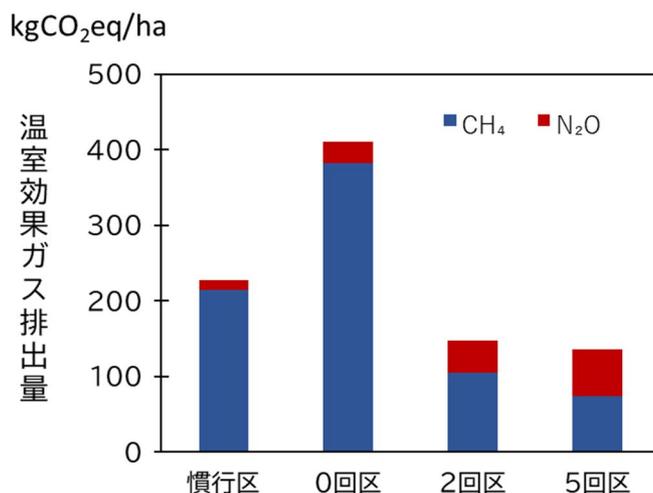


図 3 中耕除草期間における温室効果ガス排出量

### (3) ストロロンチウムの土壌中における吸着移動研究

ストロンチウムの土壌中での吸着特性と吸着による移動の遅延現象を次の式で示される分配係数  $K_0$  で評価した。

$$q = K_0 c$$

ここで、 $q$  は吸着量 ( $\text{mol}/\text{kg}$ )、 $c$  は濃度 ( $\text{mol}/\text{m}^3$ ) を表す。4 種類の粘土の分配係数を調べたところ、分配係数は、カオリナイト < イライト < パーミキュライト < アロフェンの順であった。水の平均移動距離に対するストロンチウムの移動距離の比を、吸着移動理論と分配係数を用いて評価したところ、分配係数の大きさと逆の順となり、吸着量の大きな粘土で大幅に移動が遅延することが示された。海水の影響を受けて高濃度の  $\text{NaCl}$  が共存する溶液中での  $\text{Sr}^{2+}$  の粘土中での

移動は、吸着のために著しく抑制され、水が 1 m 浸透する間に 0.011 ~ 0.71 mm しか移動しないことになる。これは、 $\text{Sr}^{2+}$  が共存するナトリウムより吸着力が強く、かつ濃度が非常に低いためである。pH が高くなると粘土の変異電荷量が増加して吸着量が増えるため、更に移動が抑制される。NaCl 濃度が低いと、 $\text{Sr}^{2+}$  の吸着量が増大するため、移動距離が短くなることも確認した。

#### (4) 界面活性剤の土壌中における吸着移動現象の研究

界面活性剤ドデシルベンゼンスルホン酸ナトリウム (DBS) の土壌溶液中における迅速簡便な濃度測定法を開発した。DBS は、ベンゼン環を持つため、その濃度はベンゼン環によく吸収される波長 (222.5nm) の電磁波を用いて容易に測定できる。しかし、土壌溶液中には、溶存有機物が含まれるため、その濃度が大きいと測定が妨害される。そこで、400nm の可視光の吸光度を測定して溶存有機物の影響を評価し、分離測定する方法を提案した。図 4 に示すように、溶存有機物が含まれていても、補正によって正確な濃度を得られることが確認できた。これにより、DBS を土壌溶液中でも容易に正確に測定できるようになり、DBS を利用した汚染土壌浄化技術や、DBS による環境汚染対策に活用できるようになった。

負電荷のみを持つ非アロフェン質多腐植質黒ぼく土を試料として DBS の吸着実験を行い、電気的に反発力が働くが疎水性相互作用で吸着することを明らかにした。溶液浸透実験を行い、脱着過程では、吸着過程と比較してゆっくりと脱着する特性があることを明らかにした。

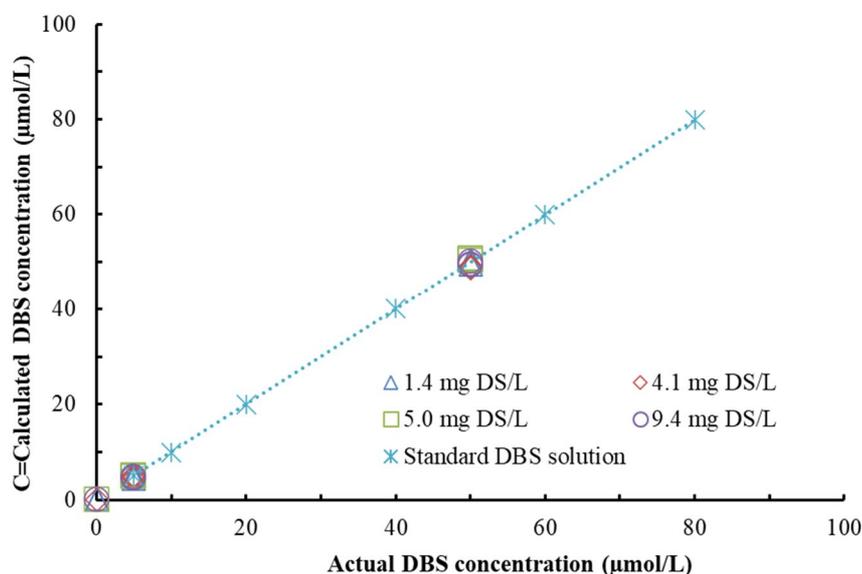


図 4 400nm 吸光度で補正した土壌溶液中 DBS 濃度の測定結果。図中 mgDS/L は、溶存有機物濃度を示す。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件／うち国際共著 5件／うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Lin Jin-Feng, Minarsch Eva-Maria, Ishiguro Munehide, Uchida Yoshitaka	4. 巻 2021
2. 論文標題 Intertillage during Natural Farming Rice Paddy Production Negatively Impacted the Microbial Abundances in Soils but Not Diversities	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied and Environmental Soil Science	6. 最初と最後の頁 1~11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1155/2021/6676456	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 該当する
1. 著者名 Ishiguro Munehide	4. 巻 65
2. 論文標題 Water, solute transport, and interfacial electric phenomena in soils	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Soil Science and Plant Nutrition	6. 最初と最後の頁 223~227
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/00380768.2019.1601501	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 Zigong Ning, Munehide Ishiguro, Luuk K. Koopal, Tsutomu Sato & Jun'ichi Kashiwagi	4. 巻 317
2. 論文標題 Comparison of strontium retardation for kaolinite, illite, vermiculite and allophane	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 J. Radioanalytical and Nuclear Chemistry	6. 最初と最後の頁 409-419
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10967-018-5870-9	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 該当する
1. 著者名 Hossain Md. Imam, Ishiguro Munehide	4. 巻 73
2. 論文標題 Precise estimation of dodecylbenzenesulfonate in aqueous solution containing dissolved organic matter extracted from soil using UV spectrometry	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 European Journal of Soil Science	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) 10.1111/ejss.13150	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 該当する

1. 著者名 Hossain Md. Imam, Ishiguro Munehide	4. 巻 26
2. 論文標題 Influence of high pH state of dodecylbenzenesulfonate and dissolved organic matter complex solution on the ultraviolet spectrometry of dodecylbenzenesulfonate	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Surfactants and Detergents	6. 最初と最後の頁 73-82
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/jsde.12619	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 Zhiduo Zhou, Munehide Ishiguro, Junichi Kashiwagi, Hajime Araki, Peiyang Zhou, Vanhkhram Soluttanavong	4. 巻 232
2. 論文標題 Effect of inter-tillage weeding on rice yield, rice growth, and nutrient dynamics without agrochemical and fertilizer application: results of a three-year study	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Soil & Tillage Research	6. 最初と最後の頁 105766-105766
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.still.2023.105766	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 石黒 宗秀	4. 巻 147
2. 論文標題 土壌における溶質の吸着移動現象の基礎理論 . 溶質の吸着と移動	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土壌の物理性	6. 最初と最後の頁 35-42
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 -

〔学会発表〕 計33件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 Li, A., M. Ishiguro, S. Kosugi
2. 発表標題 Effect of water flux on anionic surfactant transport in highly humic soil
3. 学会等名 土壌肥料学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ailin Li, Munehide Ishiguro, Shigeyori Kosugi
2. 発表標題 Sodium Dodecylbenzenesulfonate transport in highly humic soil: influence of water flux
3. 学会等名 コロイドおよび界面化学討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石黒宗秀
2. 発表標題 土壌中における水・溶質移動と界面電気現象に関する研究
3. 学会等名 土壌肥料学会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Zhou, P., M. Ishiguro, J. Kashiwagi, S. Kobayashi, Y. Tsukakubo and V. Soluttanavong
2. 発表標題 Study of inter-tillage weeding in paddy field without fertilizer and agricultural chemical: 2. Nitrogen dynamics
3. 学会等名 土壌物理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ailin Li, Munehide Ishiguro, Shigeyori Kosugi
2. 発表標題 Influence of Contact Time on Anionic Surfactant (Sodium dodecylbenzenesulfonate) Transport in Highly Humic Soil under Different Water Flux
3. 学会等名 土壌物理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Z. ZHOU, Y. ZHU, M. ISHIGURO, J. KASHIWAGI, H. Araki
2. 発表標題 The effect of inter-tillage weeding on rice yield and nutrient dynamics without agricultural chemicals and fertilizers
3. 学会等名 Hybrid International Symposium on Organic Rice Farming in East and Southeast Asian Countries: Techniques and Effects (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 浪江日和・島田かさね・趙双双・当真要・石黒宗秀・波多野隆介
2. 発表標題 中耕除草による土壌攪乱の頻度が気泡・拡散経路で排出される メタンおよび亜酸化窒素に与える影響
3. 学会等名 土壌物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石黒 宗秀・周 之舵・朱 顔・柏木 淳一・荒木 肇
2. 発表標題 多数回中耕除草が無肥料無農薬水田の稲生育と養分動態に及ぼす影響 転換後5年間の経過
3. 学会等名 日本有機農業学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石黒宗秀・大月遥・李艾霖・モハマドイマームホセイン
2. 発表標題 可溶性低分子有機物の腐植質土壌中における吸着移動について
3. 学会等名 土壌肥料学会
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	波多野 隆介  (Hatano Ryuske)  (40156344)	北海道大学・農学研究院・農学研究院研究員   (10101)	
研究分担者	柏木 淳一  (Kashiwagi Jyun'ichi)  (40241369)	北海道大学・農学研究院・講師   (10101)	
研究分担者	内田 義崇  (Uchida Yoshitaka)  (70705251)	北海道大学・農学研究院・准教授   (10101)	
研究分担者	荒木 肇  (Hajime Araki)  (30183148)	北海道大学・北方生物圏フィールド科学センター・教授   (10101)	

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			
ドイツ	Justus-Liebig-University Giessen			
ラオス	ラオス国立大学			
オランダ	ワージェニンゲン大学			
バングラデシュ	チッタゴン大学			