

令和元年5月26日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2017～2018

課題番号：17K18511

研究課題名（和文）X線CTと放射化分析による弥生・古墳時代水田における湛水実態の全体像の解明と評価

研究課題名（英文）Clarifying and evaluation of the submerged condition of the paddy fields, which were in the Kofun period from the Yayoi period, using X-ray CT and NAA (neutron activation analysis)

研究代表者

稲村 達也（Inamura, Tatsuya）

京都大学・農学研究科・教授

研究者番号：00263129

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：日本に水田稲作が導入された当初の水田における湛水状態を明らかにするために次の研究を実施した。

4水準の湛水条件と2水準の土壌でイネを栽培した。それらのイネの穂の微細構造をSPring-8においてX線CT法により測定し、灌漑水不足による穂の形態変化とその程度の解析をすすめた。 で作成した試料の元素組成（CdとAs）をICP-MSにより測定し、湛水・土壌条件と元素組成との関係から湛水状態の解析をすすめた。同時に、放射化分析による元素組成の非破壊分析法を検討した。 弥生時代の水田の作土表面の起伏の程度と畝の高さに支配される湛水深の空間変動の解析から、当時における水田群での湛水状態を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

水田水環境の影響を強く受ける稲穂の3次元形状や玄米の元素組成を指標として、弥生・古墳時代水田の湛水状態を推定する本研究は、農学的研究手法と考古学の研究成果を融合した学際的研究として位置づけられ、考古学における新分野として発展する可能性を有している。そして、塊状の出土米ブロックは非破壊での解析手法が必ずしも確立されておらず調査・解析の対象となることが稀であったが、本研究課題の成果によって、今後、その考古学的価値は高まると考えられる。これらの成果は、考古学や歴史学の発展ばかりでなく、社会的な関心に応えることができると考えられる。

研究成果の概要（英文）：The following researches were done for the clarifying of the submerged condition when paddy rice had been introduced into Japan.

The paddy rice for the standard reference material for analysis was grown with the four submerged treatments and with the two soils. The microstructure of the ear obtained was measured by the X-ray CT in SPring-8, and the microstructure which influenced by a water shortage was analyzed. The Cd and As concentration of the brown rice and soil were determined using inductively coupled plasma-mass spectrometry. The submerged condition was estimated by the Cd and As concentration of brown rice and paddy soil. And, the concentration of Cd and As of brown rice were analyzed by NAA. By the geostatistical analysis of water depth depend on the undulating surface of plow layer and the height of boundary in the paddy fields in the beginning of the Yayoi period, it was suggested that the potential flooding condition of the paddy field in that time can be clarified.

研究分野：栽培システム学

キーワード：弥生時代 古墳時代 水田 湛水

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

申請者らが調査対象とする、奈良県御所市の中西遺跡および秋津遺跡で検出された弥生時代前期の水田群は、縄文時代晩期の土層の上に形成されており、日本に水田稲作が導入された当時の初期水田と考えられる。検出された面積約 30,000 m<sup>2</sup>の弥生時代前期の水田遺構では、あぜで囲まれた 10~15 m<sup>2</sup>の長方形に区画された約 1,800 枚の小区画水田が整然と配置されている。この弥生時代前期の水田遺構では、水田の作土が洪水砂層を挟んで弥生前期前半、同前期後葉、同前期末の 3 期分残存している。洪水などによって水田が砂層に覆われた後も、その場所を再び水田として繰り返し利用しながらイナ作を続けていたと想像される。この様に、中西遺跡・秋津遺跡は、それぞれの水田作土層の存在した時期が判明しており、奈良盆地に導入された初期イナ作の変遷を推定できる条件が整う稀有な遺跡と考えられる。

申請者らは、これらの遺跡で検出された弥生時代前期の水田を対象に、イネの実収量<sup>注1)</sup>の支配要因（水田土壌からの窒素供給量、イネの生育と競合する雑草の発生状態、湛水状態を決定する水田の構造など）を調査・解析した。さらに、イネの潜在収量<sup>注2)</sup>を支配する日射や気温およびイネ品種の復元を試みている。しかし、日射や気温および品種に次いで収量に強く影響したであろう当時の実際の湛水状態を推定するには至っていない。一方、イネの穂の形状および玄米や雑草種子の元素組成は、生育する水田の湛水状態に影響されることが知られている。そこで、申請者らは、水田における湛水の有無やその程度が、そこで生育したイネの穂の形態<sup>注3)</sup>やイネ・雑草の種子の元素組成<sup>注4)</sup>などに影響することに着目した。一方、SPRING-8（公益財団法人高輝度光科学研究センター（JASRI）、兵庫県佐用郡佐用町光都）と京都大学複合原子力科学研究所（大阪府泉南郡熊取町）の協力が得られ、X 線 CT 法や中性子放射化分析による出土米などの微細・微量な試料の 3 次元形状や元素組成の解析が可能となった。すなわち、弥生時代の水田から検出された出土米ブロック<sup>注5)</sup>に含まれる穂の 3 次元形状および検出された単粒の出土米（以下、出土米と略）や雑草種子の元素組成を、他分野において発達の著しい非破壊での解析手法（X 線 CT 解析、放射化分析）を用いて調査・解析し、当時の湛水状態を推定することが可能となった。そして、ここで確立された研究手法を用い、九州、中国、四国、近畿、関東、東北などの弥生時代から古墳時代の遺跡より検出された出土米ブロックなどを解析することで、日本に水田稲作が導入された当時とその後における日本列島における水田灌漑管理の変遷の全体像の解明が可能になると考え、本研究課題の着想に至った。

注 1) 水田の立地環境（自然環境、社会・経済的環境）のもとで得られる実際の収量。

注 2) 自然環境（日射量や気温）と使用されるイネ品種の遺伝的能力のもとで、土壌肥沃度、灌漑水、病害虫などの制限がない条件下で得られる収量。

注 3) 水不足になると一穂の総粒数が減少し、不受精や胚発達の不良に起因する不稔の粒数が増加する。

注 4) 湛水されて水田土壌が還元状態になると Cd は不可溶化し As は可溶化するため、イネや水田雑草の As 吸収量が増加する。一方、排水されて水田土壌が酸化状態になると Cd は可溶化し As は不可溶化するため、イネや水田雑草の Cd 吸収量が増加する。そして、出土米や出土した雑草種子の Cd 濃度と As 濃度が経年変化しても Cd/As 比は保たれるため、出土米や出土した雑草種子の Cd/As 比をそれらが生育していた水田の湛水状態の指標となると考えた。さらに、弥生時代水田において種子が大量に検出される水田雑草ホタルイは、多様な水環境で生育するため、Cd/As 比を求める雑草種として最適と考えた。ただし、コメや水田雑草種子が出土した水田土壌の元素組成（Cd、As、Cd/As 比）により出土米や出土した雑草種子の Cd/As 比を補正しなければならない。

注 5) 粃や玄米と穂の一部を含む塊状の出土米（下図参照）



第1図 出土米ブロック。

### 2. 研究の目的

日本に水田稲作が導入された当時の初期水田におけるイネ生産力の復元は、考古学や歴史学の発展ばかりでなく、社会的な関心に応えることができると考えられる。申請者らは、奈良県御所市の中西・秋津遺跡で検出された弥生時代前期の水田を対象に、イネの実収量の支配要因（水田土壌からの窒素供給量、イネの生育と競合する雑草の発生状態、湛水状態を決定する水田の構造など）を調査・解析した。さらに、イネの潜在収量を支配する日射や気温およびイネ

品種の復元を試みている。しかし、日射や気温および品種に次いで収量に強く影響したであろう当時の実際の湛水状態を推定するには至っていない。

そこで、水田における湛水の有無やその程度が、そこで生育したイネの穂の形態やイネ・雑草の種子の元素組成などに影響する原理に基づいて本課題を解明することとした。すなわち、弥生時代の水田から検出された出土米ブロックに含まれる穂の3次元形状および検出された単粒の出土米（以下、出土米と略）や雑草種子の元素組成を、他分野において発達の著しい非破壊での解析手法（X線CT解析、放射化分析）を用いて調査・解析し、当時の湛水状態を推定する。そして、ここで確立された研究手法を用い、九州、中国、四国、近畿、関東、東北などの弥生時代から古墳時代の遺跡より検出された出土米ブロックなどを非破壊で解析することで、日本に水田稲作が導入された当時とその後における日本列島における水田灌漑管理の変遷の全体像の解明を目指す。そして、その成果を公表する。

### 3. 研究の方法

- ① 4水準の湛水条件（常時湛水、栄養成長期のみ湛水、生殖成長期のみ湛水、常時非湛水）と2水準の土壌（弥生前期水田土壌と現代の水田土壌）で、イネ、およびイヌホタルイを栽培し、穂の3次元形状と元素組成（Cd、As）の分析用標準試料を作成する。
- ② ①で作成したイネの穂の3次元形状をSPring-8（兵庫県佐用郡佐用町）においてX線CT法により測定する。そして、灌漑水の不足による穂の形態変化とその程度を解析する。
- ③ ①で作成した植物試料と栽培土壌を供試し、それらの元素組成（CdとAs）を京都大学複合原子力科学研究所（大阪府泉南郡熊取町）においてICP-MSおよび中性子放射化分析により測定し、湛水・土壌条件と元素組成との関係から湛水状態を推定する指標を作成する。
- ④ 弥生時代前期の出土米（単粒）を供試して、その元素組成（CdとAs）の非破壊分析法を京都大学複合原子力科学研究所（大阪府泉南郡熊取町）において確立する。
- ⑤ 弥生時代前期の小区画水田群（0.4ha）の作土面の高低差の空間変動とあぜの高さから、当時における水田群での湛水状態を推定する。
- ⑥ 福岡、鳥取、徳島、奈良、群馬、山形県などで検出された弥生時代から古墳時代の出土米ブロックのX線CT計測をSPring-8で行い、穂の3次元形状を解析できる画素サイズ25 $\mu$ mの画像を非破壊で取得する。
- ⑦ ④で確立された手法を用い、福岡、鳥取、徳島、奈良、群馬、山形県などで検出された弥生時代から古墳時代の出土米（単粒）の元素組成（CdとAs）を非破壊で分析する。
- ⑧ 以上の成果の総合的解析から、日本に水田稲作が導入された当時とその後における日本列島における水田灌漑管理の変遷の全体像の解明を目指す。

### 4. 研究成果

- ① 湛水・土壌条件が子実の元素組成（Cd、As）に及ぼす影響  
玄米（標準試料）のCd濃度は常時湛水<出穂後湛水<出穂前湛水 $\equiv$ 常時非湛水となり、As濃度は常時非湛水<出穂前湛水 $\equiv$ 出穂後湛水<常時湛水となる傾向が確認された。イヌホタルイ子実（標準試料）においても常時湛水ではCd濃度が低く、As濃度は高かった。また常時非湛水ではCd濃度が高く、As濃度は低くなった。一方、子実中のCdやAs濃度は土壌によって偏差が大きかったが、Cd濃度とAs濃度の関係から、湛水状態によって異なるグループに区分できる可能性が確認された。以上のことから、玄米やイヌホタルイ子実のCdやAs濃度は、常時湛水、常時非湛水、出穂前後湛水などの湛水実態を区別できる指標として有効であると判断された。
- ② イネの穂の3次元形状  
研究方法①において異なる湛水・土壌条件で生育させた稲（標準試料）の穂首節直下の直径と穂長・一穂粒数との間に有意な相関関係が認められた。これを受けて、出土稲わらブロックに内在する穂首節の直径をX線CT計測により測定し、当時のイネの穂長・一穂粒数を推定した。そして、福岡、鳥取、徳島、奈良、群馬、山形県などで検出された弥生時代から古墳時代の出土米ブロックのX線CT計測をSPring-8で行い、穂の3次元形状を解析できる画素サイズ25 $\mu$ mの画像を非破壊で取得した。
- ③ 小区画水田群の湛水状態の推定  
調査対象とした奈良県御所市所在の秋津遺跡で検出された弥生時代前期の水田遺構では、小区画水田が洪水砂層を挟んで、弥生時代前期末（第3b-1遺構面）、同前期後葉（第3b-2遺構面）、弥生前期前半（第4a遺構面）の3期分残存していた。それらの水田遺構では、弥生時代前期前半から弥生時代前期後葉・同前期末にかけて、湛水に関連する水田構造（作土表面の均平化とあぜの高さ）が改善され、これに伴い湛水機能の改善（非湛水面積割合やC4植物起源炭素の割合の低下）が進んだと考えられた。ここで、弥生時代前期前半から同前期末にかけての湛水機能の向上では作土面の高低差の抑制とあぜの高さの維持が同程度に重要であったが、弥生時代前期末や同前期後葉における湛水機能の改善では作土面の高低差に対して相対的にあぜの高さを高くする管理がより重要であったと考えられた。一方、弥生時代前期前半の小区画水田は、湛水にかかわる水田の構造（水田面の均平化、あぜの高さ）と水田の湛水機能が劣っており、積極的に灌漑するのではなく、降雨にたよる天水田のような利用形態の可能性が推定された。

次に、弥生時代前期後葉と同前期末の連続する小区画水田群における湛水関連形質の空間変動の解析から、長辺畦畔間を標高の高い水田から標高の低い下流側の水田へと灌漑する田ごし灌漑の存在が示唆された。また、同じ標高の水田間での水の横への流れの存在も示唆された。そして、弥生時代前期後葉では水田の構造と湛水機能が小区画水田を単位として管理されていたが、同前期末では同じ標高の小区画水田群内において小区画水田の構造がほぼ均一になるように管理され、その結果、この小区画水田群内において湛水機能もほぼ均一になっていたと推定された。

#### ④ 出土米（単粒）の元素組成（Cd と As）の非破壊分析

京都大学複合原子力科学研究所（大阪府泉南郡熊取町）において、圧気輸送管を用いた NAA を実施した。その結果、出土米の As は定量できたが、Cd は妨害元素（Na、Mn、Cl）による影響が大きく、コンプトンサプレッションシステムを用いた測定も試みたが、S/N 比が不十分であると判断した。そこで、測定対象とする Cd の放射化生成同位体を長寿命の  $^{115m}\text{Cd}$  ( $t_{1/2}=44.6\text{ d}$ ) とし、水圧輸送管にて高線量の中性子照射を行うことで S/N 比の高い測定を試みなければならぬと判断された。

### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 1 件）

三鍋尚史、墨川明德、東條大輝、絹島歩、岡田憲一、藤田三郎、丹羽恵二、稲村達也、弥生時代の出土米ブロックに含まれる稲粒の粒形と脱粒性について 一唐古・鍵遺跡と大福遺跡の事例から一、作物研究、査読有、64 巻、2019、35-40

〔学会発表〕（計 3 件）

〔図書〕（計 3 件）

- ①稲村達也 他、三重県教育委員会、X 線 CT 計測による小ブケ遺跡からの出土米ブロックに含まれるイネ粒の農学的評価（概報）、三重県埋蔵文化財調査報告 383：132-134（2019）
- ②稲村達也 他、高崎市教育委員会、X 線 CT 計測による多胡郡正倉跡からの出土米ブロックに含まれるイネ粒の評価、高崎市文化財調査報告書 426：271-273（2019）
- ③稲村達也、八木書店、日本における初期水田の構造と湛水機能の時空間的変異 一秋津遺跡の事例解析から一、橿原考古学研究所論集 第 17：3-9（2018）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年：  
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

### 6. 研究組織

#### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：岡田 憲一

ローマ字氏名：OKADA, Kenichi

所属研究機関名：奈良県立橿原考古学研究所

部局名：調査課

職名：指導研究員

研究者番号：20372170

研究分担者氏名：絹島 歩

ローマ字氏名：KINUHATA, Ayumu

所属研究機関名：奈良県立橿原考古学研究所

部局名：調査課

職名：主任技師

研究者番号：50638103

(2)研究協力者

研究協力者氏名：東條 大輝

ローマ字氏名：Tojyo Daiki

研究協力者氏名：三鍋 尚史

ローマ字氏名：Minabe Naofumi

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。