

称号及び氏名	博士（緑地環境科学）	斯琴巴图
学位授与の日付	平成26年9月25日	
論文名	Development of sweet potato culture system using water and inorganic nutrient salts effectively (水と無機栄養塩類の有効利用を目的としたサツマイモ栽培システムの開発)	
論文審査委員	主査	北宅 善昭
	副査	堀野 治彦
	副査	山田 宏之
	副査	渋谷 俊夫

## 論文要旨

### 第1章 研究背景および目的

近年、人口増加に伴う食糧生産のための乱開発や無秩序な水利用により、表土の流出、蒸発水量の増加、さらには一部地域での過放牧も加わって、多くの地域で砂漠化が進行しており、特に半乾燥地域では農業用水の減少が問題となっている。このような地域では、水を効率的に利用できる作物生産が要求される。サツマイモは、肥料と水に対する要求が低いにも関わらず、収穫量は多く、比較的高収益作物であり、さらに根、茎および葉は家畜飼料としても利用できる。また地被植物として土壌侵食を防ぐ能力が高いと言われている。本研究では、世界各地で広く生産されているサツマイモに注目して、利用可能な農業用水の少ない半乾燥地などの乾燥条件で、サツマイモを効率的に生産する技術の開発を目的とし、地表面蒸発を抑制できる地中給水による砂耕栽培法について、土壌の含水率およびガス組成の観点から検討した。また、地域の環境負荷を低減するためには、廃水をはじめとした廃棄物資源の循環利用による持続的な農業生産システムの構築が望まれる。近年、廃棄物系バイオマス資源として有効利用するためのメタン発酵処理が推進されている。メタン発酵の副産物としての消化液（以下、消化液）の多くは、エネルギーやコストを要する処理を経て廃棄されている。消化液は、肥料成分となる無機栄養塩類を多く含んでい

ることから、農業分野における液肥としての有効利用が試みられているが、その利用量はまだ少ない。地中給水システムは、根圏への液肥供給も可能であることから、消化液をサツマイモ生産のための給水と給肥として利用することについても検討した。すべての実験は、大阪府立大学研究圃場にあるプラスチックハウス内で行った。

## 第2章 サツマイモの乾燥ストレス耐性の評価

サツマイモの乾燥ストレス耐性を評価するために、土壌含水率の変動に伴うサツマイモの葉面コンダクタンスの変化を4種の農作物（トウモロコシ、オクラ、キュウリ、およびトマト）と比較した。各作物は砂質土壌および粒状肥料を充填したプラスチックポット（容量5 L）を用いて栽培した。地表面灌水により50日間栽培した後、連続した3日間に灌水日、灌水停止日、再灌水日を設定して、その期間の土壌含水率および葉面コンダクタンスを経時的に測定した。実験期間中8時から16時までの平均気温は38.2°C、平均飽差は30.1 g m<sup>-3</sup>、光合成光量子束密度は200~1000 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>であった。土壌体積含水率は、1日目の午前8時の灌水直後から2日目の灌水停止の間に26%から2%まで時間経過と共にほぼ直線的に低下し、それに伴い全種の葉面コンダクタンスは5~7 mm s<sup>-1</sup>から1~2 mm s<sup>-1</sup>まで低下した。3日目の再灌水後に土壌含水率は25%まで増加し、それに伴い葉面コンダクタンスは、サツマイモとトウモロコシは6 mm s<sup>-1</sup>に回復したが、オクラ、キュウリ、トマトは2~3 mm s<sup>-1</sup>までしか回復しなかった。以上、サツマイモとトウモロコシの葉面コンダクタンスは、給水停止に伴う土壌含水率の低下により乾燥ストレスを受けても、再給水後には他の作物に比べて速やかに回復したことから、サツマイモはトウモロコシと同様、乾燥ストレス耐性を持つ作物であることが確認できた。

## 第3章 サツマイモの成長に及ぼす土壌含水率の影響

水を効率的に利用できる作物生産システムを構築するための基礎知見を得るために、砂質土壌でのサツマイモの成長速度および塊根収量を最大にできる土壌含水率について検討した。地中給水による砂耕栽培法を用いて、サツマイモの成長および塊根形成に及ぼす土壌含水率の影響を調べた。また、土壌含水率の変動に伴い変化する土壌ガス組成についても検討した。サツマイモは砂質土壌を充填したプラスチックポット（容量68 L）を用いて、地下水位のレベルを4段階（土壌表面から15 cm（処理記号D15）、20 cm（D20）、25 cm（D25）および30 cm（D30））に設定して栽培した。土壌表面から15cm深さでの体積含水率および土壌CO<sub>2</sub>濃度は、D15で最大（それぞれ45%および3.5%）となり、D30で最小（5%および0.8%）となった。土壌O<sub>2</sub>濃度は各区とも18.1~19.6%の範囲であった。植物全体および塊根の乾物重は、D25（土壌体積含水率12%、水ポテンシャル-0.39 MPa）で最大となり、D30で最小となった。塊根/植物全体の乾物重比は、D25 > D20 > D15 > D30の順となった。蒸

散速度や純光合成速度の指標となる葉面コンダクタンスも同様の傾向であった。サツマイモの砂耕栽培において、塊根成長に最適な土壌含水率は 10~15% (水ポテンシャル $-0.42$  ~  $-0.35$  MPa) であった。土壌含水率が低い場合の成長抑制は、根周辺の水ポテンシャルの低下による吸水抑制に起因すると考えられる。D30 では塊根が形成されず、土壌含水率の増加に伴い上昇した土壌  $\text{CO}_2$  濃度が、サツマイモの塊根の成長を抑制することが示唆された。

#### 第 4 章 サツマイモの成長に及ぼす土壌 $\text{CO}_2$ 濃度の影響

本章では、土壌  $\text{CO}_2$  濃度の上昇がサツマイモの成長に及ぼす影響を検討した。サツマイモは砂質土壌を充填した塩化ビニール製円筒容器 (容量 4 L) を用いて栽培した。土壌中の  $\text{CO}_2$  濃度の生育への影響を調べるために、 $\text{CO}_2$  濃度調節剤を用いて、砂培地表面から深さ 10~40 cm での平均  $\text{CO}_2$  濃度を 1.8% および 4.9% に調節した試験区を設定した。各  $\text{CO}_2$  濃度処理において、土壌含水率は 15% であった。また土壌  $\text{O}_2$  濃度は 16~19% であり、 $\text{O}_2$  濃度の影響は小さいと考えられた。 $\text{CO}_2$  濃度 4.9% では塊根は形成されなかった。 $\text{CO}_2$  濃度 1.8% では、植物全体および吸収根の乾物重は、 $\text{CO}_2$  濃度 4.9% の場合に比べて、それぞれ 1.6 倍および 3 倍となった。以上により、第 3 章で示された土壌含水率の高い試験区での土壌中の高  $\text{CO}_2$  濃度はサツマイモの塊根成長を抑制する原因であることを実証した。土壌中の高  $\text{CO}_2$  濃度による成長抑制は、根での吸水抑制に起因することを明らかにした。

#### 第 5 章 サツマイモ栽培における養水分供給のためのメタン発酵消化液利用

メタン発酵消化液は、水と肥料成分を多く含んでいることから農業生産における有用な資源である。本章では、サツマイモ生産のために、消化液を給水、給肥として有効利用する技術の開発を目的として、サツマイモの成長にとって最適な消化液の濃度について検討した。サツマイモは砂質土壌を充填したプラスチックポット (容量 9 L) を用いて栽培した。牛糞およびおから由来の消化液を肥料として用いた場合と、市販の化学肥料養液 (大塚ハウス A 処方標準養液、以下、標準養液) を用いた場合の成長と比較した。各肥料液濃度は、消化液の場合、原液を水道水で 2、10、20、40 および 80 倍に希釈、また標準養液は 1、2 および 4 倍に希釈した試験区を設けた。消化液原液 (EC:  $3.10 \text{ S m}^{-1}$ ) のイオン濃度は、標準養液 (EC:  $0.25 \text{ S m}^{-1}$ ) に比べて、 $\text{K}^+$  が約 9 倍、 $\text{NH}_4^+$  が約 70 倍、 $\text{PO}_4^{3-}$  が約 5 倍であった。また、各希釈倍率の肥料液の pH は、消化液で 8.0~8.2、標準養液で 6.5~6.7 であった。両年の栽培実験における塊根乾物重は、消化液を用いた場合、20 倍消化液区で最大となり、また標準養液を用いた場合、2 倍標準養液区で最大となった。20 倍消化液区での塊根および地上部の乾物重は、2 倍標準養液区の 1.3 および 1.8 倍であった。また 20 倍消化液区では 2 倍標準養液区に比べて、個々の塊根サイズが大きかった。なお、2 倍消化液区では塊根は形成されなかった。以上の結果から、消化液を適切に希釈 (本実験で用いた消化液では 20

倍希釈)することにより、サツマイモ生産のための液肥として利用できることが確認できた。

次に、以上の研究結果を基に実用的な栽培システムについて検討した。サツマイモ(品種:ベニアズマ)は砂質土壌を充填した2個の栽培容器(それぞれ長さ4.5 m×高さ0.3 m×幅0.3 m)を用いて栽培した。周辺効果を防ぐために、周辺にも同様にサツマイモを植え付けた。液肥として20倍消化液(EC: 0.15 S m<sup>-1</sup>)を地下水位が土壌表面から25 cmになるように栽培容器の底部から供給した。栽培期間中の平均気温は35.9°C、平均飽差は28.6 g m<sup>-3</sup>であった。栽培試験の結果、最終的な塊根収量は2.48 kg m<sup>-2</sup>であり、日本における同品種の平均塊根収量(2.50 kg m<sup>-2</sup>、栽植密度3-4 個体 m<sup>-2</sup>)と同等であった。

## 第6章 結論

本研究の結果、農業用水の少ない地域での水を効率的に利用できる地中給水による砂耕栽培法において、サツマイモの塊根成長を促進するためには、土壌体積含水率を10~15%(水ポテンシャル-0.42~-0.35 MPa)程度とし、土壌CO<sub>2</sub>濃度を低く(1~2%)維持する必要があることがわかった。土壌含水率が低い場合には、根周辺の水ポテンシャルの低下により根の吸水が抑制されるが、土壌含水率が高い場合には、土壌CO<sub>2</sub>濃度の上昇により根の吸水が抑制され、塊根の成長が抑制されることがわかった。また、メタン発酵消化液は、サツマイモ生産のための給水と給肥として利用できることが確認できた。適切な希釈濃度の消化液はサツマイモの栽培用肥料液に適しており、慣行栽培と同様の収量が得られることを実証した。また、以上の基礎研究結果を基に、消化液を地中給水に用いた半乾燥地でのサツマイモ生産システムを提言した。本研究の成果は、農業を含む地域資源循環システムの確立に寄与できるものと考えられる。

## 審査結果の要旨

近年、人口増加に伴う食糧生産のための乱開発や無秩序な水利用により、多くの地域で砂漠化が進行しており、特に半乾燥地域では農業用水の減少が問題となっている。このような地域では、水を効率的に利用できる作物生産が要求される。サツマイモは、少ない水および肥料条件でも比較的多くの塊根収量が得られる高収益作物であり、また茎および葉も家畜飼料として利用でき、世界で広く生産されている。さらに蔓性のサツマイモは、地被植物として土壌侵食を防ぐ能力を持つ。本研究では、農業用水の少ない半乾燥地などで、サツマイモを効率的に生産する技術の開発を目的とし、地表面蒸発を抑制できる地中給水

による砂耕栽培法について、土壌水分および土壌ガス組成の観点から検討した。また、地域の環境負荷を低減するためには、廃水をはじめとした廃棄物資源の循環利用による持続的な農業生産システムの構築が望まれる。近年、廃棄物系バイオマスを資源として有効利用するためのメタン発酵処理が推進されている。メタン発酵の副産物としての消化液の多くは、現状ではエネルギーやコストを要する処理を経て廃棄されている。消化液は、肥料成分となる無機栄養塩類を多く含んでいることから、農業分野における液肥としての有効利用が試みられているが、その利用量はまだ少ない。地中給水法は、根圏への液肥供給も可能であることから、本研究では、消化液をサツマイモ生産のための給水および無機栄養塩類の給肥として利用することについても検討した。実験はすべて、大阪府立大学研究圃場の雨除けハウス内において、半乾燥地を模した条件で行われた。本研究で得られた成果の概要は、以下の通りである。

1. サツマイモの乾燥ストレス耐性を評価するため、土壌含水率の変動に伴うサツマイモの蒸散速度の変化を 4 種の農作物（トウモロコシ、オクラ、キュウリ、トマト）と比較した。その結果、他の作物同様、サツマイモの蒸散速度は、給水停止後の土壌含水率低下（土壌水ポテンシャル低下）に伴う乾燥ストレスを受けて低下するが、再給水後には、半乾燥地でもよく栽培されるトウモロコシと同様、サツマイモの蒸散速度は、他の作物に比べて速やかに回復した。このことから、サツマイモはトウモロコシ同様、乾燥ストレス耐性を持つ作物であることが確認できた。

2. 水を効率的に利用できる作物生産システムを構築するための基礎知見を得るために、地中給水による砂耕栽培法を用いて、サツマイモ 2 品種の成長、塊根形成、および葉のガス交換（光合成・蒸散速度）に及ぼす土壌含水率の影響、また土壌含水率の変動に伴い変化する土壌ガス組成の影響について検討した。2 年の繰り返し実験の結果、サツマイモの砂耕栽培において、ガス交換を促進して、塊根収量を最大にする土壌体積含水率は 10~15%（水ポテンシャル $-0.42 \sim -0.35$  MPa）であった。土壌含水率が低い場合の成長抑制は、土壌水ポテンシャル低下による根での吸水阻害に起因し、土壌含水率が高い場合の成長抑制は、土壌含水率の増加に伴い数%に上昇した土壌  $\text{CO}_2$  による根での吸水阻害に起因することを明らかにした。

3. サツマイモ生産のために、メタン発酵消化液を給水、給肥として有効利用する技術の開発を目的として、サツマイモの成長にとって最適な消化液の濃度について検討した。2 品種のサツマイモを砂耕栽培し、養液として希釈倍率の異なる牛糞由来の消化液を用いた場合と、市販の化学肥料養液（標準養液）を用いた場合の成長を比較した。消化液原液（電気伝導率:  $3.1 \text{ S m}^{-1}$ ）のイオン濃度は、標準養液（電気伝導率:  $0.25 \text{ S m}^{-1}$ ）に比べて、 $\text{K}^+$  が約 9 倍、 $\text{NH}_4^+$  が約 70 倍、 $\text{PO}_4^{3-}$  が約 5 倍であった。また、各希釈倍率の肥料液の pH は、消化液で 8.0~8.2、標準養液で 6.5~6.7 であった。2 年の繰り返し実験の結果、2 品種とも 20 倍希釈消化液区の塊根収量が最大であり、標準養液区の 1.3 倍となり、同品種の日本における平均塊根収量と同等であった。

以上、本研究では、農業用水の少ない地域で水を効率的に利用できる地中給水法を用いた砂耕栽培において、サツマイモの塊根成長を促進するためには、土壌体積含水率（土壌水ポテンシャル）を適正に維持し、土壌 CO<sub>2</sub> 濃度を低く維持する必要があること、適切な希釈濃度のメタン発酵消化液は、サツマイモ生産のための給水、給肥として適していることを実証した。またこれらの実験結果を基に、消化液を地中給水に用いた半乾燥地での資源循環型サツマイモ生産システムを提言した。これら一連の研究成果は、農業を中心とした地域資源循環システムの構築に寄与するとともに、緑地環境科学の発展に大きく貢献する。よって、最終試験の結果とあわせて、博士（緑地環境科学）の学位を授与することを適当と認める。