

## 71

下水に含まれる肥料資源と廃熱・排出 CO<sub>2</sub> を供給し甘藷の  
光合成効率を高めメタン・水素生産に利用する資源循環システム

会員 ○ 鈴木高広, 道幸和音, 小林秀太郎, 英 拓未, 坂本 勝 (近畿大学)  
久保裕志, 宮部由彩 (日本下水道事業団)  
廣島大祐 (ウォーターエージェンシー)

A resource recycling system that supplies fertilizers, waste heat, and emitted CO<sub>2</sub> contained in wastewater to increase the photosynthetic efficiency of sweet potatoes and use them for methane and hydrogen production.

Takahiro SUZUKI\*, Kazuto DOKO\*, Shutaro KOBAYASHI\*, Takumi HANABUSA, Masaru SAKAMOTO\*, Hiroshi KUBO\*\*, Yui MIYABE\*\*, and Daisuke HIROSHIMA\*\*\*

\* Kindai University, 930 Nishimitani, Kinokawa, Wakayama, 649-6493, Japan, E-mail: [tkusuzuki@waka.kindai.ac.jp](mailto:tkusuzuki@waka.kindai.ac.jp)

\*\* Japan Sewage Works Agency

\*\*\* Water Agency INC.

## ABSTRACT

For mass-produce methane from sweet potatoes as a hydrogen fuel resource, we investigated a method to increase photosynthetic efficiency by supplying fertilizer, exhaust heat, and CO<sub>2</sub>, contained in wastewater. When treated wastewater was applied to sweet potatoes as a liquid fertilizer, part of the leaves turned yellow and the photosynthetic activity of the sweet potatoes tended to decrease. In addition, it was found that the Ca content, which is supposed to suppress the decomposition of chlorophyll by UV, was low.

On the other hand, the yield of sweet potatoes increased by nearly 30% when shielding with a film that attenuates the UV and heat rays of the sun. These results suggest that in order to increase the photosynthetic efficiency of sweet potatoes, it is necessary to suppress strong UV rays and overheating in summer, and to supply additional Ca fertilization.

It was found that the CO<sub>2</sub> concentration increased when exhaust gas was supplied from the wastewater aeration treatment tank, and sweet potatoes grew vigorously. So far, we have reported that sweet potatoes can be cultivated even in winter when treated wastewater is supplied, and it was suggested that the introduction of exhaust gas will increase the heating effect beside the CO<sub>2</sub> fertilization.

キーワード: 甘藷, 下水施肥, UV, 熱線, 越冬, 光合成効率

Keywords: sweet potato, wastewater fertilizer, UV cut, heat cut, CO<sub>2</sub> supply, photosynthesis yield

## 1. はじめに

水素燃料源として有望な資源作物として、サツマイモ (甘藷) の量産技術が注目を集めている。甘藷をメタンに変換し水素を燃料電池で熱電利用することで、総合エネルギー効率 3.6% (光合成収率 4%×メタン変換率 100%×熱電効率 90%) を見込み、木質バイオマス発電 (山林の光合成収率 0.06%×火力発電効率 30%) よりも単位面積あたり CO<sub>2</sub> 吸収量が 200 倍に増大すると見込まれる<sup>1)</sup>。メタン・水素源として甘藷を量産するためには、肥料も大量に必要となる。日本は農作物の生産に不可欠な N, P, K, Mg などの化学肥料をほぼ全量輸入に依存し、その主な供給国は、ロシア、ウクライナ、ベラルーシ、中国である。国際紛争や円安などの影響で肥料価格が高騰し、資源獲得競争が激化しているため、新たな肥料の調達方法の開拓が求められている。そこで、下水を肥料源や資源として活用し、甘藷を大量生産する方法の開発に取り組んでいる。

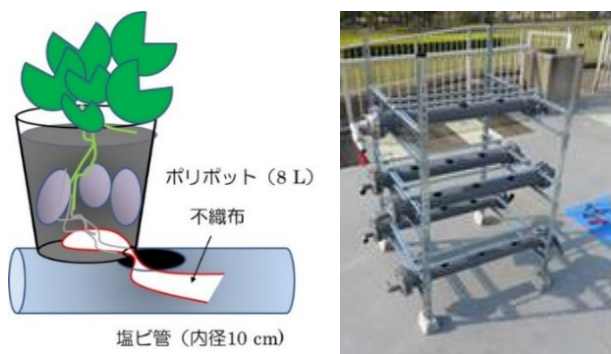
下水道等の汚水処理人口普及率は 92.6% (R03 年度) に達し、下水処理場で肥料成分を回収すれば、食品生産に必要な肥料の大半を賄うことができると見込まれる。さらに、水耕栽培法を用いて施肥効果を高め、未利用分は全量回収し循環利用することで、肥料を大量に散布する露地栽培に比べ、使用量を劇的に削減できると見込む。少ない施肥量で大量の甘藷を生産するためには、光合成効率を高めることも必要である。

以上の観点から、太陽紫外線・熱線の影響を緩和し光合成効率を高める方法、および、下水処理プロセスで発生する CO<sub>2</sub> を施肥利用する方法、冬季の栽培に下水熱を暖房熱源として利用する方法を検討した。

## 2. 実験方法

## 2.1 甘藷および栽培方法

市販の三種類の蔓苗 (ベニハルカ, 水軒金時, 安納芋) を、培養土を充填したポリ鉢 (8 L) に 5 月~6 月に定植し、10 月~11 月に収穫調査を実施した。また、収穫した蔓から調製した苗を 11 月~12 月に再植し、下水処理水を通水し越冬栽培を行った。



**Fig. 1** Rhizosphere irrigation cultivation method equipped with non-woven fabric used for wastewater supply.



**Fig. 2** Single-layer and three-layers cultivation systems.

## 2.2 下水施肥多層栽培システム

下水施肥実験は日本下水道事業団が管理を受託し、運転操作業務を㈱ウォーターエージェンシーが行っている磐南浄化センター（静岡県磐田市）で行った。

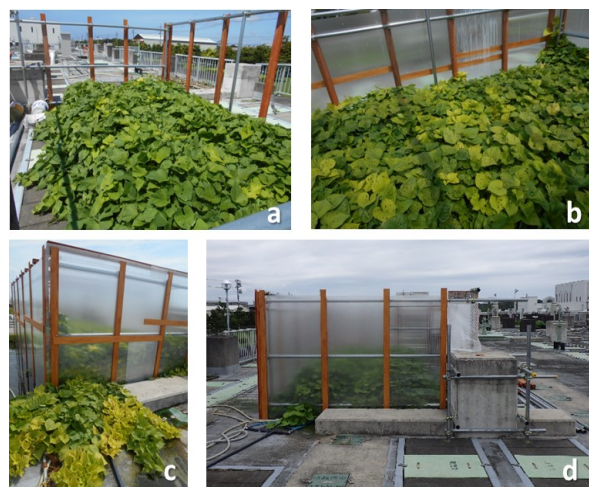
**Fig. 1** と **Fig. 2** に実験設備を示す。培養土を充填したポリ鉢の底部排水口から不織布を垂らし、下水処理水（下水処理を経た終沈越流水；活性汚泥処理後に沈殿物を除去した滅菌前の処理水）を流す塩ビ管内に根を誘導した。栽培棚は単層型と三層型（設置面積 1.8 m<sup>2</sup>）を用いてポリ鉢を 1 列 5 個配置し、芋と茎葉の生産量を測定し光合成効率を比較した。

## 2.3 太陽光紫外線と熱線の遮光効果

UV と熱線の影響を解析するために、農業用ポリオレフィン (PO) フィルムを用いて UV と熱線を減衰し、甘藷の生育に与える効果を比較した。UV 遮光には、波長 390 nm 以下の UV 遮光率が 88% の PO ダイヤスターUV カット 0.15 mm 厚（三菱ケミカルアグリドリーム㈱）（以下 **UV12** と表記）と、UV 遮光率が 50% のダイヤスター 0.15 mm 厚（同、**UV50**）を用いた。遮熱には、PO クール 0.15 mm 厚（オカモト㈱）（**IR**）を用いた。



**Fig. 3** Cultivation test method using UV/heat ray shielding sheets.



**Fig. 4** CO<sub>2</sub> fertilized cultivation area introduced from the wastewater treatment tank was enclosed with a sheet.

**Fig. 3** に UV・熱線減衰栽培設備を示す。液体培地を満たした水槽を 2 槽並べ、各水槽上に苗を植えたポリ鉢を 6 個、合計 12 個配置した栽培設備の上面を PO フィルムでカバーし、甘藷の生育と収量を開放部 (Open) と比較した。PO フィルムは、UV12、UV50、IR の各 1 枚の場合と、2 枚を重ねた IR-UV12、IR-UV50 の 5 条件に設定した。

葉の光合成効率を解析するため、個葉重量、葉の色調 ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ )、SPAD 値（葉緑素による 650nm 吸収度）を測定した。さらに、アルコール溶媒で生葉に含まれるポリフェノールを抽出し 310nm の UV 吸光度と、Folin-Denis 法で全ポリフェノール量を測定した。

また、葉の大きさを長径によって三段階 (S=10 cm 未満, M=10~13 cm, L=13 cm 以上) に仕分けし、各鉢の葉のサイズと枚数を測定し光合成効率を解析した。

## 2.4 下水処理排出 CO<sub>2</sub>施肥栽培

苗を植えたポリ鉢を配置し下水処理水を供給した栽培区画をシートで囲い、上部は開放し下水のぼっ気槽の排出ガスを導入し CO<sub>2</sub> の施肥栽培を行った (**Fig. 4**)。

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 下水施肥効果

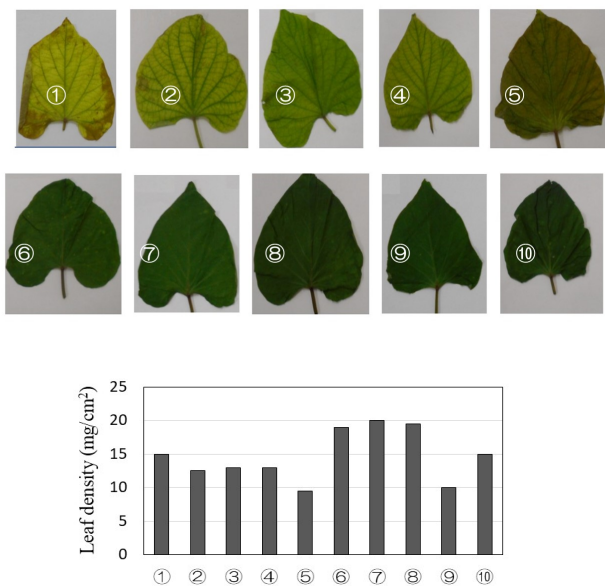
下水処理水を通水し栽培を行ったところ、**Fig. 5** に示すように葉が繁茂した先端部位や、通水管の出口に近い株の葉が黄色化しやすいことが分かった。そこで、色味が異なる 10 枚の葉を採取し分析を行った。

**Fig. 6** に 10 枚の葉の外観と密度 ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ ) を示す。黄色葉①～⑤は、緑色葉⑥～⑩の 6 割程の密度であり、葉が薄いことが明らかとなった。また、**Fig. 7** に示すように、葉の  $L^*$  値 (明度)、 $b^*$  値 (黄色度) が高いほど SPAD 値が低く光合成活性が低いことが明らかとなった。UV 防御効果をもたらす葉のポリフェノールと 310 nm の吸収度も低く、葉が薄いほど UV 耐性が低いことが示唆された。

**Table 1** は、黄色葉と緑色葉の固形分率と固形分中の K, Mg, Ca の含有率の測定結果を示す。黄色葉は、固形分の含有率も緑色葉の 63%と低く、固形分中の Mg 含有率は大差がないが、Ca が半分ほどしかなく、K が多いことが分かった。Mg は葉緑素の構成イオンであり、Ca は UV 耐性に関与すると考えられている。



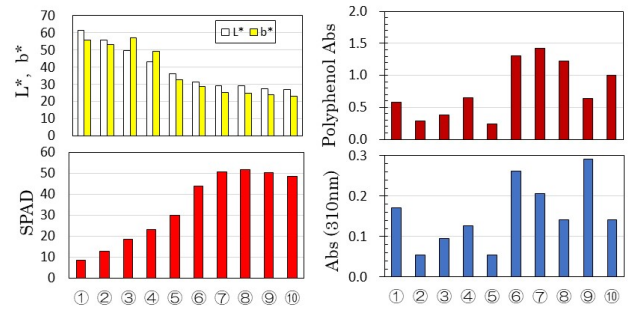
**Fig. 5** Leaves cultivated with treated wastewater.



**Fig. 6** Fresh leaf samples with different colors and the densities.

**Table 1** Leaf contents of solid, K, Ca, Mg.

Leaf color	Solid content	K /solid	Ca /solid	Mg /soild
green	17.1%	4.0%	1.9%	0.43%
yellow	10.8%	5.9%	0.9%	0.41%



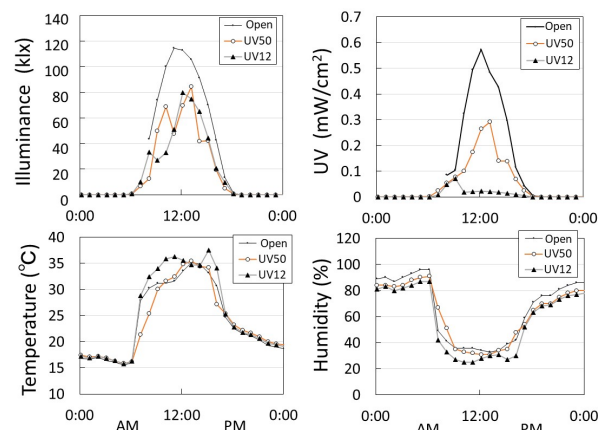
**Fig. 7** Color, SPAD, polyphenol content, and 310nm absorbance.

葉の単位面積で比較すると、黄色葉の Mg 量は緑色葉の 66%, Ca は 30%と算出される。したがって、黄色葉は採光面積あたりの葉緑素の合成量が少なく、合成された葉緑素も UV により分解されやすいため蓄積していないことが示唆された。

#### 3.2 太陽光紫外線と熱線の遮光効果

**Fig. 8** に、UV12 と UV50 で遮光した甘藷栽培の照度、UV、温度、湿度の測定例を示す。UV カットフィルムの表面で光が散乱するため照度は 7 割に低下し、温度も  $1^{\circ}\text{C}$ 程度低くなることが分かった。

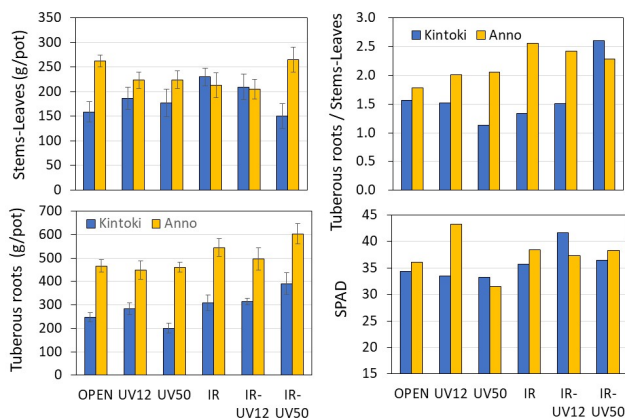
同様に、熱線遮光、および 2 重遮光の場合も測定し、概要を **Table 2** にまとめた。IR フィルムを設置した場合は温度が  $3^{\circ}\text{C}$ 、UV カットと併用する場合は  $4^{\circ}\text{C}$ ほど低下する効果が得られることが分かったが、照度も 6 割に低下することが明らかとなった。



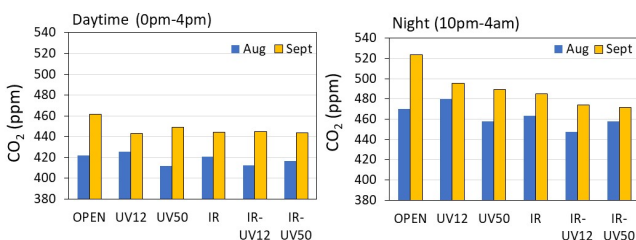
**Fig. 8** Comparison of illuminance, UV intensity, temperature, and humidity when covered with UV cut films (Sept-28, 2021).

**Table 2** Approximate effects by UV cut and heat ray cut during daytime from 10 am to 4 pm in summer.

	Open	UV12	UV50	IR	UV12-IR	UV50-IR
Illuminance %	100	70	70	85	60	60
UV intensity %	100	12	50	85	10	45
Temperature °C	35	±0	-1	-3	-3	-4



**Fig. 9** Comparison of foliage and tuber yield per pot, weight ratio of potato/foilage and SPAD by UV and heat cut.



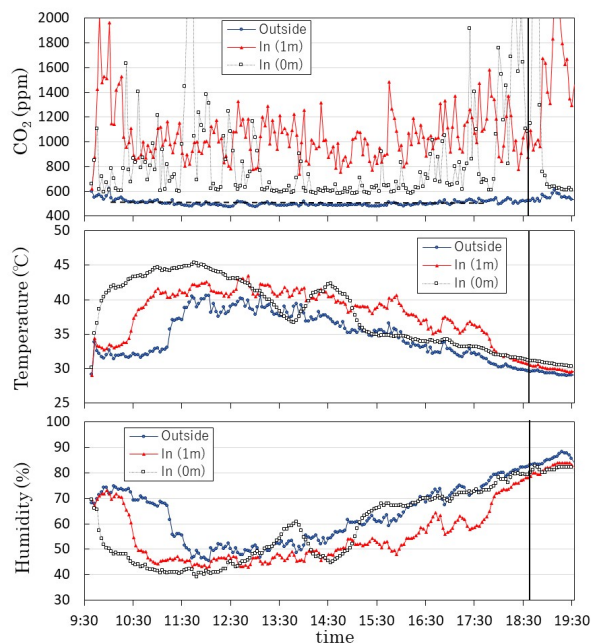
**Fig.10** Comparison of daytime and nighttime CO<sub>2</sub> concentrations in August and September.

**Fig. 9** は、栽培結果を示す。熱線遮光した場合 (IR) に水軒金時も安納芋も塊根 (芋) が増加し、UV 遮光を併用した IR-UV50 の場合に、開放部よりも 3 割ほど収量が高まった。葉量に対する芋の重量比も増大しており、光合成効率が高まったことが分かる。

**Fig.10** は、各栽培区画における 8 月と 9 月の昼間と夜間の CO<sub>2</sub> 濃度の平均値を示す。UV と熱線を遮光した場合は、昼間の CO<sub>2</sub> 濃度が開放部よりも低下し、効率的に光合成が行われたことが示唆される。また、芋の収量が低いほど夜間の CO<sub>2</sub> 排出量が増加した。昼間の UV・熱線によりバイオマスの酸化分解反応が活発化し、夜間の CO<sub>2</sub> 排出量も増大したと考察される。

### 3.3 下水処理排出 CO<sub>2</sub> 施肥栽培

**Fig.11** は、下水ばっ気槽の排出ガスを供給した栽培区画の 9 月の CO<sub>2</sub> 濃度、温度、湿度の測定例を示す。昼間の CO<sub>2</sub> 濃度が外部は 500 ppm ほどだったのに対し、内部 (1 m 高) は 1000 ppm 前後で推移した。



**Fig.11** Comparison of CO<sub>2</sub> concentration, temperature and humidity by CO<sub>2</sub> fertilization from wastewater aeration tank.

Fig.10 に示したように CO<sub>2</sub> を施肥しない場合は、CO<sub>2</sub> 濃度が 420~440 ppm に低下し光合成反応を抑制した可能性があるが、下水処理槽の排出 CO<sub>2</sub> のリサイクルにより施肥効果が高まると期待される。

排出ガスを供給した場合は区画内の温度も上昇した。下水は冬季でも 15°C の水温を維持するため<sup>2)</sup>、その排出ガス供給により暖房効果も得られることが分かる。

## 4. おわりに

下水の肥料資源、排出 CO<sub>2</sub>、廃熱を利用し、資源作物の光合成効率を高める方法を検討し、夏季の UV・熱線カットが有効であることが明らかとなった。

### 参考文献

- 1) 鈴木, 坂本, 川上, 久保, 宮部, 榎田, 若山, 廣島, 木質バイオマスの 200 倍の効率で CO<sub>2</sub> を削減するサツマイモ・メタンの大量生産による持続可能な燃料供給システムの開発, 第 31 回日本エネルギー学会大会講演要旨集 84-85, 2022
- 2) 鈴木高広, 坂本, 川上, 久保, 宮部, 榎田, 鈴木章弘, 廣島, サツマイモの下水施肥多層栽培における太陽光分散利用効率と冬季保温効果, 2020 年度日本太陽エネルギー学会講演論文集, 301-304, 2020

謝辞 本研究は、磐田市(静岡)のご協力により実施しました。また、下記助成を受けました。関係各位に感謝致します。

日本学術振興会科学研究費 20K12247 国産可食・燃料バイオマスによる地球温暖化対策に関する新たな知の創出