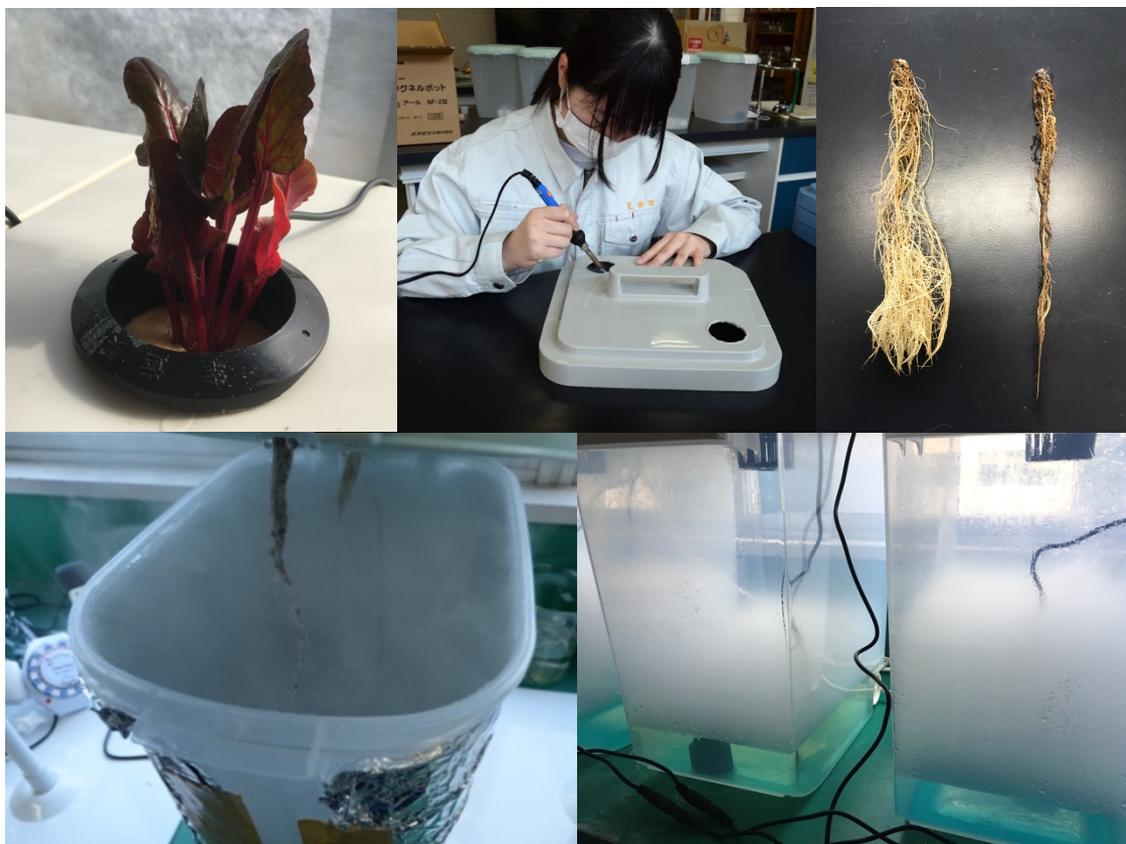


水を有効利用する 節水型ミスト栽培システムの開発



青森県立名久井農業高等学校
FLORA HUNTERS

I 要旨

私たちが開発した節水型ミスト栽培システムは、水の有効利用と高品質野菜の生産に貢献できることがわかった。水の惑星と呼ばれる地球だが、人間が使える淡水は少ない。そして、その多くを農業が利用している。気候変動や人口増加による水不足が危ぶまれている今、将来貴重となる水を有効利用する新しい農業技術が求められている。

このシステムは、超音波発生装置を使ってミスト状の水を1日数回だけ根に散布する栽培法である。また密閉容器で栽培するため、作物が吸収しなかった養水分はすべて回収することができる。したがって①現在の水耕栽培より少ない水で栽培できる。さらに水を効果的に作物へ供給することで高糖度トマトが生産できるなど②作物の品質も向上させることができる。さらに③省エネルギーのため、温暖化対策にも貢献できる。

まさに水問題や温暖化などの地球の抱える問題の解決に貢献することができる栽培システムである。

We found that the water-saving mist cultivation system we developed can contribute to the effective use of water and the production of high-quality crops. Although Earth is known as the planet of water, there is little fresh water available for humans to use. Agriculture uses much of that water. There are concerns about water shortages due to climate change and population growth. In the future, there will be a need for new agricultural technologies that effectively utilize water, which will become more valuable.

This system is a cultivation method in which mist water is sprayed onto the roots only several times a day. Therefore, (1) cultivation can be done using less water than current hydroponic cultivation. Furthermore, by effectively supplying water to crops, it is possible to improve the quality of crops (2), such as producing tomatoes with high sugar content. Furthermore, (3) it saves energy and can contribute to global warming countermeasures. This is truly a cultivation system that can contribute to solving global problems such as water problems and global warming.

キーワード：節水、栽培、ミスト

II 目次

- 1 序論
- 2 研究材料と方法
- 3 結果と考察
- 4 結論と今後の展望
- 5 参考文献

III 報告書で使用する略号及び頭文語

EC: Electrical Conductivity (mS/cm);

NH₄-N: Ammonium nitrogen (mg/L);

P₀₄-P: Phosphate phosphorus (mg/L);

IV 謝辞

研究にあたってガラス温室を提供して下さった青森県立名久井農業高等学校環境システム科にお礼申し上げます。

V 研究報告

1 背景

「水の惑星」といわれる地球だが、淡水は 2.5%しかない。また、そのほとんどが極地の雪氷のため、人間が使える淡水は地球の水の 0.01%と極めて少ない（表 1）[1]。ところが人間は、その貴重な水の 70%を農業用水として使っている（図 1）[2]。日本は雨が多く水に恵まれているが、それでも河川水・地下水の約 66%が農業用水に使われている。今後は人口増加もあり、一人あたりの水使用量はますます増えると考えられる。

表 1 地球上の水

水の種類	量 (1,000km ³)	全水量に 対する割合 (%)	全淡水量に 対する割合 (%)
海水	1,338,000	96.5	
地下水	23,400	1.7	
塩水	12,870	0.94	
淡水	10,530	0.76	30.1
土壌中の水	16.5	0.001	0.05
水河等	24,064	1.74	68.7
永久凍結層地域の地下水	300	0.022	0.86
湖水	176.4	0.013	
塩水	85.4	0.006	
淡水	91.0	0.007	0.26
沼地の水	11.5	0.0008	0.03
河川水	2.12	0.0002	0.006
生物中の水	1.12	0.0001	0.003
大気中の水	12.9	0.001	0.04
合計	1,386,000	100.	
合計 (淡水)	35,029.2	2.53	100

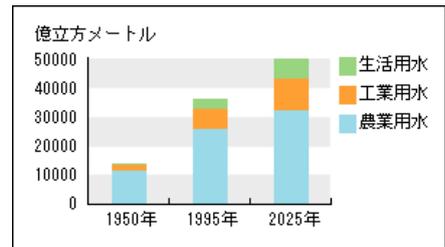


図 1 世界の使用量

(注) 1. World Water Resources at the Beginning of the 21st Century : UNESCO, 2003 をもとに国土交通省水資源部作成
2. この表には、南極大陸の地下水は含まれていない。

(出典:平成22年版「日本の水資源」参考資料第Ⅱ編第1章、国土交通省土地・水資源局水資源部)

今現在、すでに世界の 5 人に 1 人は安全な水を確保できない状態にあり、国連も「21 世紀は水の世紀」と位置付けている。さらに 2030 年には世界の人口が 85 億人を超えるといわれ、気候変動や途上国の工業化などで世界的な水不足が徐々に起きつつある。特に安定した農業用水を確保できない乾燥地や半乾燥地の開発途上国においては、水不足はより深刻で、水に関わる紛争も起きている（図 2）[2]。

したがってこれからは農業用水としての使用を始めとして、地球上の水資源を適切に、そして大切に使用していくために、持続可能な水循環について考えていかなければならない。私たちは日頃から農業を学んでいる。特に私たちの学ぶ環境システム科は主に水耕栽培を学ぶ学科である。そこでこのような課題の解決に貢献できる水を有効利用する新しい農業技術の開発に取り組んできた。

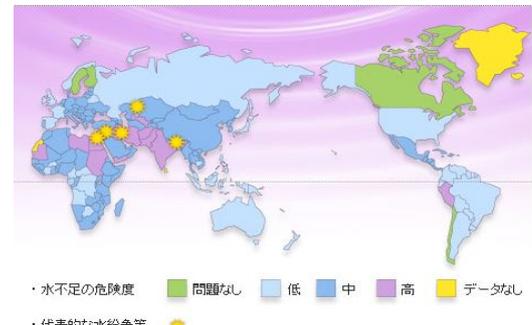


図 2 水不足の危険度と水を巡る代表的な地域紛争等の位置

現在、作物は用水路やスプリンクラー灌漑、ドリップ灌漑などの施設設備を使い、たくさん水を与えて栽培されている（図 3）。なぜなら水は栽培するうえで欠かせないものだからである。しかし設備の導入には多額のコストがかかるうえ、乾燥地では与えた水分が蒸発するため、塩害が発生する問題も起きている。また近年、気候変動に強いことからケニアやジンバブエなどの乾燥地や途上国でも水耕栽培が導入され始めている（図 3）[3][4][5]。しかし大量の水とコストが必要で、水の有効利用には結びついていない。

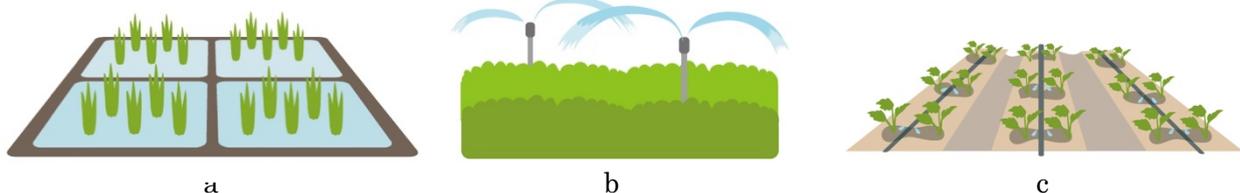




図3 灌漑方式 (a:地上灌漑、b:スプリンクラー灌漑、c:ドリップ式灌漑、d-1:水耕栽培
d-2 青森県立名久井農業高校での水耕栽培、d-3 ジンバブエの水耕栽培)

表2は、トマト1株に対する1日あたりのかん水量である。作物の吸水量は、作物の種類や気温などに左右されるので一概にいけない。しかしどの栽培法も植物は与えられた水の一部だけを吸収し、残りのほとんどが土壌に浸透または、空気中に蒸発してしまう。水が貴重な資源だと考えると、これはもったいないことである。

表2 トマトのかん水量比較 (1株/日)

栽培方式	露地栽培	ドリップ栽培	水耕栽培
かん水量 (ml)	300~700	500	900

そこで私たちは、世界で普及が始まっている水耕栽培の節水化に取り組むことにした。考案したのは、超音波発生装置を作動させるのに必要な少量の養液が入った密閉容器で、作物を育てる節水ミスト栽培システムである。この装置は従来の水耕栽培と異なり、作物の根は養液に浸かることなく剥き出しになっている(図4)。しかし定期的に超音波発生装置を作動させ、ミスト状の養液を根に噴霧するので生育は可能である。また容器は密閉されているので、蒸散以外は容器から蒸発することはなく、栽培に使用する養液量の減少を大幅に抑制することができるからである。

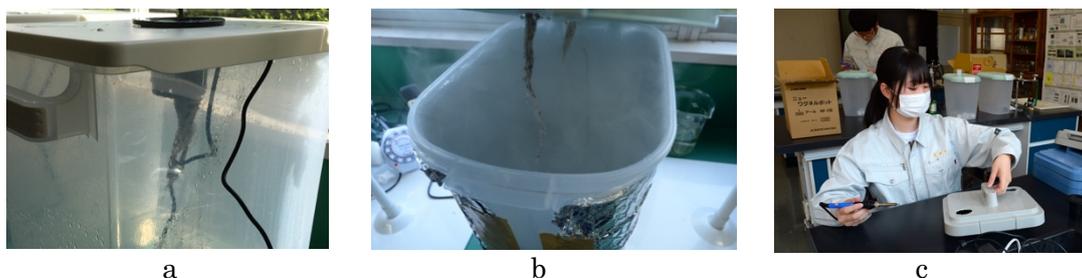


図4 栽培装置 (a:剥き出しの根 b:ミスト発生中の内部 c:栽培装置の自作)

しかしこの節水ミスト栽培のポイントは、単に養液量を減らすだけでなく、少ない水を有効利用して作物の品質を向上させるところにある。一般に水耕栽培のトマトは、生育こそ早いですが、過剰水分により糖度が低くなる傾向がある。ところが本装置を用いて、トマトに養水分を供給する時間帯を日中に多くし、夜間減らすことで、水耕栽培ながら高糖度になる。さらに超音波発生装置は消費電力が少ないので、実験では同規模の水耕栽培装置と比較して消費電力および二酸化炭素発生量を約3分の2も削減することができる。仕組みが簡単で、温暖化対策にもなるこの節水ミスト栽培は、途上国はもちろん、先進国においても水を有効利用できるため、将来の持続的な水の利用と食糧生産に貢献できると考えている。

2 研究方法と材料

(1) 節水ミスト栽培装置の製作

水耕栽培装置は、一般に養液を貯める大きなタンクからポンプで底の浅い栽培槽に送り、循環させるものがほとんどである（図3）。したがって本研究で用いる深い栽培槽を持つ装置はまだない。そこで10Lのポリ容器（長さ360mm×幅22.8mm×高さ42mm）を加工し、装置を自作した。養液は、ハイポネックス（N6%、P10%、K5%）の500倍液を1L入れ、養液槽を兼ねた栽培槽の底に、小型の超音波発生装置（気化能力400ml/h）を1台設置して（図3）自作した。ミストはON-OFFタイマーを用いて各試験区の決められた発生回数に合わせて作動させた。ミスト発生時間が過ぎると装置は止まり、むき出しの根には養液が供給されないよう注意した。1回の発生時間は15分とし、気化量は100mlとした。また小型装置を窓辺に設置するため、養液の温度が上昇しないようシルバーシートで覆った。



図5 自作栽培装置(a: システム図 b: ミスト発生装置 c: ミスト発生装置)

(2) 蒸発抑制試験

装置の節水性能を評価するために蒸発する水分量を温室内で測定する。鉢は赤玉土3Lを充填し300mlかん水した。水耕栽培装置は10Lの水を入れ、ポンプで常に循環させた。節水ミスト栽培装置は水を1L入れ、1回15分、1日12回ミストを発生させた。なお蒸散の影響を受けないよう作物は植えずに行った。（図6）

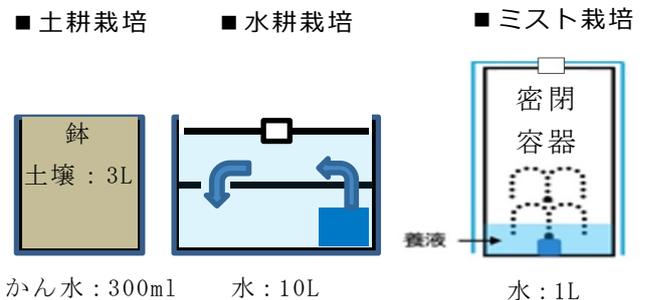


図6 蒸発抑制試験に用いた栽培装置

(3) 栽培試験-1（葉菜類）

葉菜類は、非結球のリーフレタス (*Lactuca sativa var. crispata*) とスイスチャード (*Beta vulgaris var. cicla*) とした（図7）。レタスは中国から近東、地中海地域が原産のキク科野菜で、世界各地で広く食べられている。またスイスチャードは、南ヨーロッパからトルコ原産のアカザ科で、乾燥に強い野菜である。試験区は、1時間に1回、15分間ミスト状で100mlかん水する24回区と2時間間隔でかん水する12回区とした。栽培は各3株とし、根を浸漬する水耕栽培区と生育と収量を比較した。試験区は表3に示した。

表3 葉菜類の試験区

試験区	かん水
24回区	1回15分100mlを24回/日噴霧
12回区	1回15分100mlを12回/日噴霧
Control	常時、根は養液に浸漬



図7 葉菜（左:レタス、右:スイスチャード）

(4) 栽培試験-2 (果菜類)

果菜類は、ミニトマト (*Lycopersicon esculentum*) を用いた (図 8)。トマトは南アメリカのアンデス山脈高原地帯原産のナス科で、世界で最も生産量が多い野菜である。また葉菜類と違い、水分の供給を抑制することで糖度が高くなることがわかっている。栽培試験は、商品価値の高い高糖度トマトの生産を目指し 1 日 11 回、15 分間ミスト状で 100ml だけかん水した。試験区は、ほぼ均等な時間で噴霧する 11 回-1 区、そして日中に 9 回、夜間に 2 回と変則的に噴霧する 11 回-2 区を設定し、根を浸漬する水耕栽培区と生育と収量を比較した (表 4) (図 9)。栽培は各区 3 株とした。

表 4 トマトの試験区

試験区	かん水
11 回-1 区 (M11-1)	1 回 15 分 100ml を 11 回/日 噴霧 (発生:0, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21 時)
11 回-2 区 (M11-2)	1 回 15 分 100ml を 11 回/日 噴霧 (発生:2, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 21 時)
Control	常時、根は養液に浸漬



図 8 トマトの栽培状況



図 9 ミスト発生時間

(5) 養液の変化

作物の根に定期的にミスト状で噴霧し続ける栽培法はない。そこで養液の成分が変化しないか定期的に水質分析を行なった。測定項目は pH、EC、NH₄-N、PO₄-P とし、1 週間ごと 3 週間行なった。

(6) エネルギーと二酸化炭素排出量

水耕栽培は露地栽培と違い、養液を循環させるため、電力を消費する。そこで実験に用いた水耕栽培装置のポンプと節水ミスト栽培のミスト発生装置の消費電力を測定し、そこから二酸化炭素排出量を求めて環境への影響を比較した。

(7) 分析方法

気温は温度ロガー KN Laboratories で測定した。pH は LAQUAtwin-pH-11B、EC は LAQUAtwin-EC-33B、NH₄-N、PO₄-P は DPM-MTSP を用いて測定した。消費電力は Revex 社の ET30D で測定した。

3 結果と考察

(1) 気温の推移

栽培を行った室内の 5 月～7 月の気温の推移である (図 10)。窓辺のため光も温度も十分あり、栽培には支障ないことがわかる。

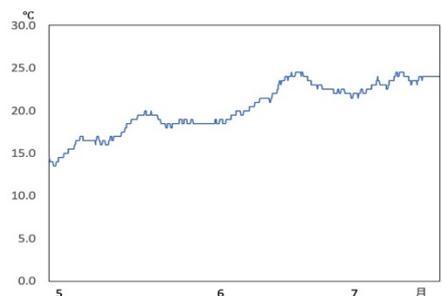


図 10 気温の推移

(2) 蒸発抑制試験

水を入れた容器の重量を4日間測定し、水の蒸発量を推測した(図11)。その結果、蒸発量は赤玉土を充填した土耕、水耕栽培、節水ミスト栽培の順に多かった。特に土だけでは4日間で60%も蒸発することがわかった。しかし節水ミスト栽培では、蓋にゴムパッキンが入った密閉容器を使っているため、4日間ではまったく減少しなかった。実際の蒸発量は、植物からの蒸散量が加わり、さらに気温などで変化するが、この自作装置からは蒸散以外はほぼ蒸発しないことがわかった。

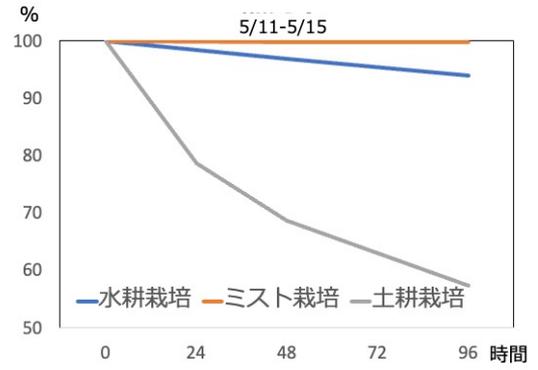


図11 蒸発抑制率

(3) 栽培試験-1 (葉菜類)

<レタス>

調査結果を図12に示した。すると1日あたり24回ミストを散布して栽培した24回区は、従来の水耕栽培(Control)と草丈、葉数と比較しても大差ないことがわかった。しかし12回区は、草丈は小さく、葉数は少なくなった。これはレタスが葉の薄い野菜のため、日中に気温が上がった際にすぐ萎れ、中には枯れる葉が出たからだと考える。根は節水ミスト栽培で大きくなった。水耕栽培は、常に根が養液に浸っているため水中根が発達する。しかし根が空中に浮いている節水ミスト栽培では水中根に加え、空気中の水分を吸収する細かい湿気中根も発達したからだと考えられる。この現象は、特に24回区で顕著に現れた。1株重量では、24回区、12回区、Controlの順になった。また節水ミスト栽培区の葉に少し縮れがあった(図13)。これは生育期間に水分の多少を繰り返すため、生育スピードに影響を与えたものと考えられる。しかし、どの区も十分に出荷できる収量、品質であった。

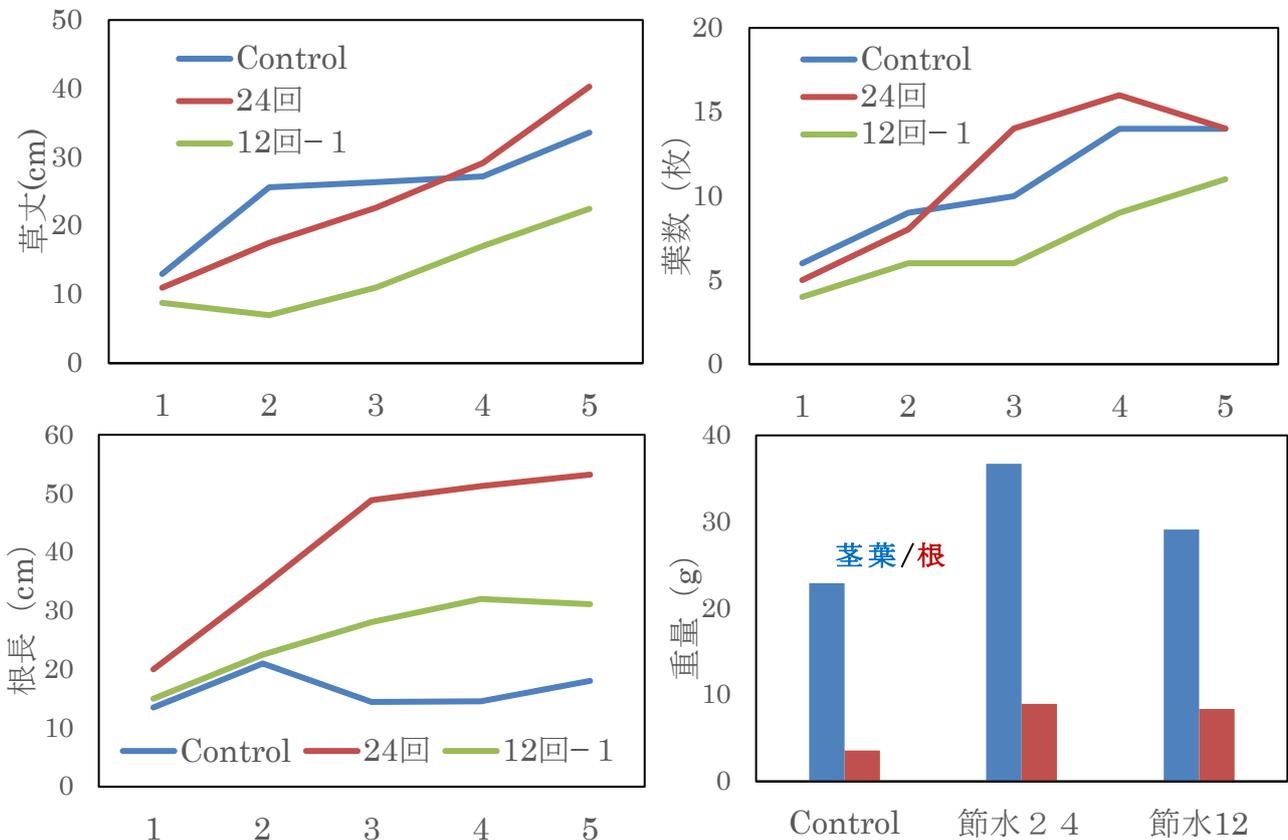


図12 レタスの生育と収量 (横軸: 週)



図 13 葉と根の比較（左から Control、24 回区、12 回区）、収量調査の様子
 <スイスチャード>

結果を図 14 に示した。Control よりも節水ミスト栽培の草丈が伸び、葉数も多くなった。スイスチャードは、レタスに比べて茎が太く葉が厚いので、水分不足になっても影響がなかったと考えられる。またケニアのハウレンソウと呼ばれるように乾燥に強い野菜のため、逆に常に根を養液に浸す水耕栽培よりもミスト栽培の方が適していた可能性もある。根はレタス同様、節水ミスト栽培が伸長した（図 15）。湿気中根が発達したからだと考えられる。その結果、重量においても 24 回区、12 回区、Control 区の順となった。いずれも十分出荷できる収量と品質である。

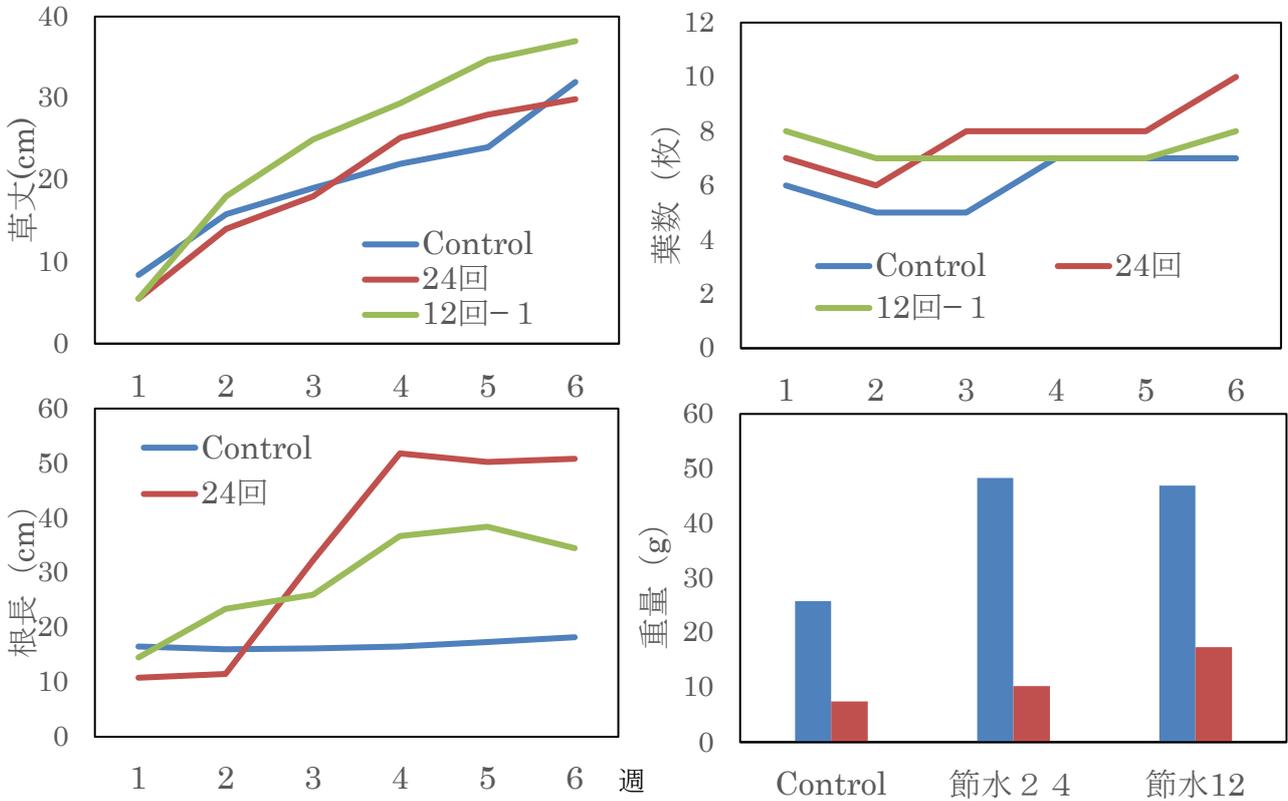


図 14 スイスチャードの生育と収量（横軸：週）



図 15 スイスチャードの根（左から Control、24 回区、12 回区）

(4) 栽培試験-2 (トマト)

トマトは、吸水を制限することで高糖度になる。そこでミストを発生する時間帯を変えることによって生育と糖度などが変化するか実験を行った。その結果を図 16、図 17 に示す。草丈は一定間隔でミストを散布した 11回-1 が伸長したが、茎径は大差なかった。根は、葉菜類と同様に湿気中根が発達するのでミスト栽培区の方が伸長した。しかし 1 果や 1 房の重量は Control がやや多かった。これは Control が十分に水分を吸収し、肥大したからだと考えられる。ところが糖度では、日中に多く噴霧し、夜間に抑制した 11回-2 が平均糖度 11.5 と高くなった。糖度 8 以上は高糖度トマトといわれ、日本では高値で取引される。節水した効果によるものだと考えられる。なお Control との比較を表 5 に示した。

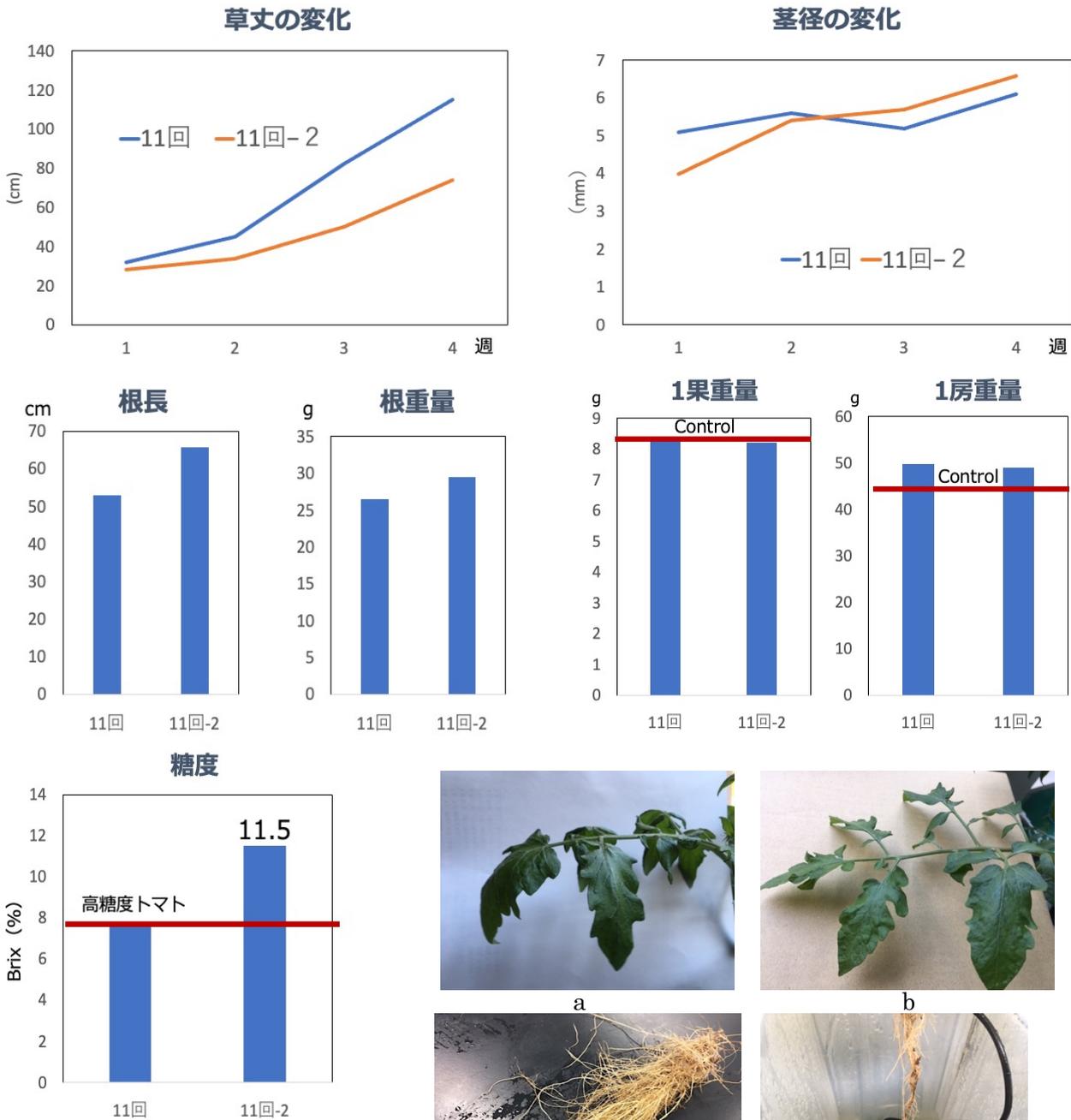


図 16 トマトの生育と糖度の比較

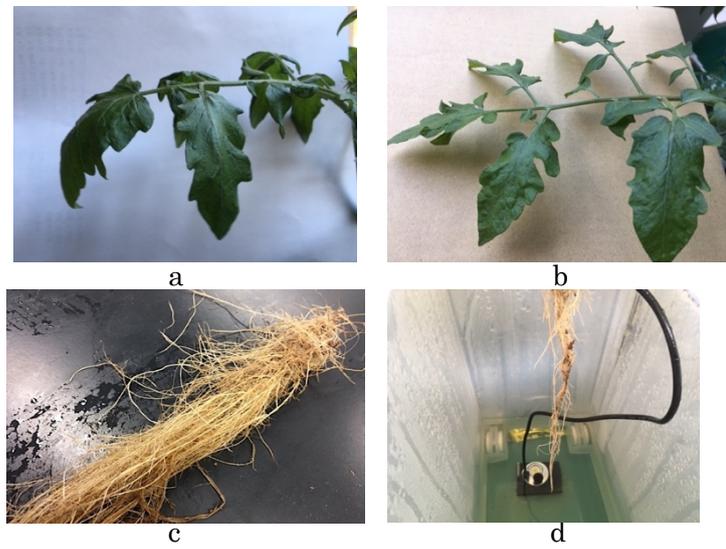


図 17 a : ミスト休止中の葉、b : ミスト発生中の葉、c : 湿気中根、d : 空中に浮かぶ根

表5 トマトの収量調査

試験区	Control	11回-1	11回-2
根長 (cm)	39.4	53.0	65.7
根重 (g)	20.0	26.5	29.5
1果重量(g)	8.8	8.3	8.2
1房重量(g)	54.0	49.8	49.0
糖度 Brix	7.6	7.8	11.5

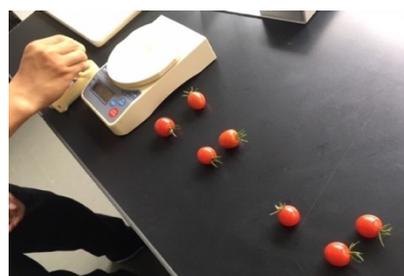


図18 収量調査

高糖度トマトを作るポイントは、吸水制限である。節水することで濃縮されたトマトになるからである。しかしトマトが糖分を蓄積するには、光合成を旺盛に行う必要がある。図19で示したように光合成は、二酸化炭素と水を光エネルギーによってブドウ糖と酸素と水を作る反応である。つまり光合成を行うには、水が必要不可欠である。日中にミスト発生を増やし、光合成が行われる材料である水を集中して供給したことで、ブドウ糖合成が旺盛に行われたため高糖度になったと考えられる。

また夜間にミスト発生回を減らしたため、日中に合成した糖分が水分で希釈されることなく朝まで保たれるので、水耕栽培ながら高糖度になったと考えられる。このように節水ミスト栽培は、旺盛な光合成と吸水抑制という昼夜の2つの効果によって、高品質のトマトを生産できたと考えられる。

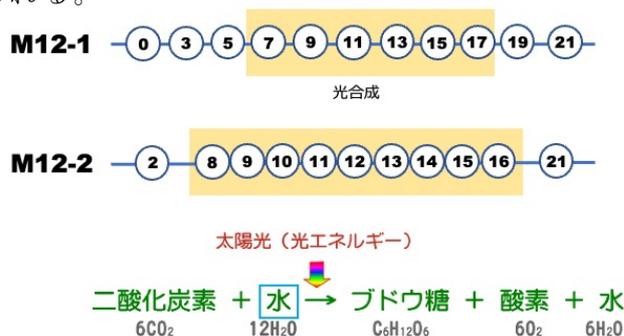


図19 ミスト発生時間帯と光合成の関係

(5) 養液の変化

養液をミスト散布し続けたことで成分が変化してしまうと交換しなければならない。そこで3週間に渡って成分変化を測定した(図20)。その結果、pH、EC、PO4-Pとも大きな変化はなかったが、NH4-Nは少し増加した。根がむき出しになっているので、枯死した根などが養液槽に落ちるなど影響した可能性がある。しかし成分は大幅に減少することはないため、蒸散によって養液が減るまで補充する必要がないことがわかった。

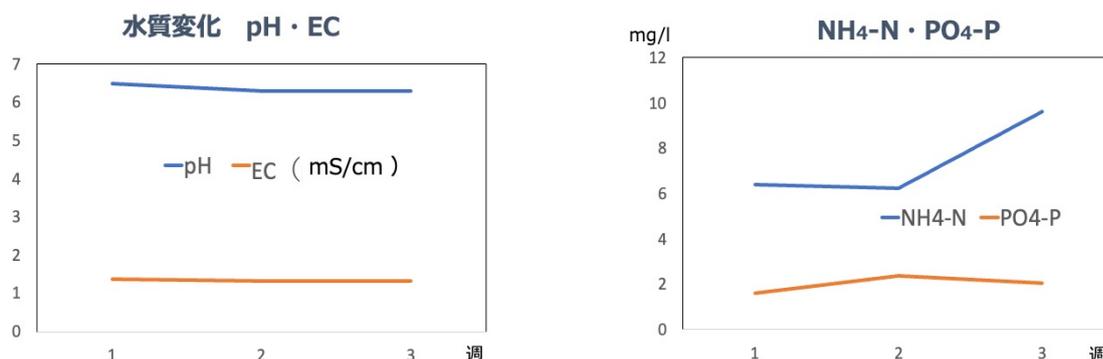


図20 養液の成分変化

(6) エネルギーと二酸化炭素排出量

従来の水耕栽培装置は、容器内に雑菌が発生するのを防ぐために、養液をポンプで常に循環させる必要がある。しかし自作した節水ミスト栽培では、超音波発生装置で1日数時間ミストを発生させるだけでよい。そこで消費電力と二酸化炭素発生量を装置で測定した。実験に用いた水耕栽培装置は4.2w、24時間連続作動、節水ミスト栽培装置は24w、1日12回(1回15分)作動とした。その結果、表6のように消費電力、二酸化炭素発生量とも同規模の水耕栽培装置より3分の2も少ないことがわかった(図21)。これにより温暖化抑制にも貢献できることがわかった。

表6 消費電力とCO2発生量

試験区	水耕栽培	節水ミスト栽培
消費電力/日(wh)	43.2	113.4
CO2排出量/月(kg-CO2)	1.42	0.54



図21 左：水耕栽培、右：ミスト発生装置

4 結論と今後の展望

近い将来、世界は人口増加のため水不足になる不安を抱えている。さらに気候変動も激しくなり、地球の水が枯渇するDay-ZERO問題も現実味を帯びてきている[6]。そこで、この水問題に農業からアプローチする節水ミスト栽培システムの開発に取り組んできた。私たちの目指した節水栽培は、(1)少ない水で安定して栽培するだけでなく(2)限られた水を有効利用して品質の良い作物を提供するという2つが大きな目標である。

一般に土耕で高糖度トマトを栽培する場合でも、かん水は1株あたり1日250ml前後必要である。しかし作物による吸収と蒸散以外は、ほとんどの水が土壌に染み込み、最終的に蒸発するため、毎日かん水が必要となる。また乾燥地で行われているドリップ栽培でも、1日10分間2回、合計300mlの養液が必要となる。ところがこのミスト栽培法では、1日1,200ml前後とさらに4倍も多く水をトマトに供給している。これは水分を保持する土壌がないからである。それでも節水になるのは、作物に吸収されなかった養液が、ミストの発生が止まるとすべて密閉容器内に戻るため回収できるからである。このように容器内で養液を何度も再利用できるのがポイントである。作物の種類や大きさにもよるが、トマトでは1週間に約500mlの補充だけで栽培できる。これは土耕の高糖度栽培やドリップ栽培より70%以上も少ない養水分量である(表7)。これは目標(1)節水の観点から見て極めて有利である(図22)。

表7 高糖度トマト栽培に必要な7日間の養液量

試験区	養液量(1株あたり)
土耕栽培	1,750ml
ミスト栽培	500ml

乾燥地でのドリップ栽培に必要な7日間の養液量

試験区	養液量(1株あたり)
ドリップ栽培	2,100ml

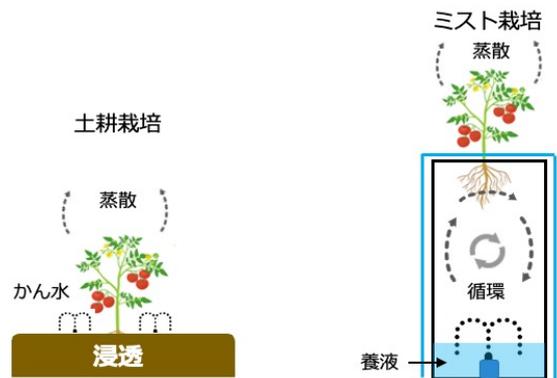


図22 水の行方(土耕栽培、ドリップ栽培：水の捨てる、ミスト栽培：水の繰り返し利用)

また節水ミスト栽培では、少ない水分でも従来どおり生産できるだけでなく、トマトの品質向上にも貢献できる。高糖度トマトは、日本において一般のトマトの2～3倍の高値で取引されている。つまり先進国において高糖度、高品質なトマトは、消費者はもちろん、生産者にとってもたいへん魅力的な作物となっている。しかし従来の水耕栽培では、吸水制限して糖度を高めようとしても、根が常に養液に浸漬しているため、制御するには複雑なシステムが必要となる。しかし私たちが考案した節水ミスト栽培システムは、水の有無を直接、安価な超音波発生装置のオンオフだけで簡単に制御できるため、目標（2）である水を有効利用した高品質のトマト生産が可能となる。

以上のことからこのシステムは、開発途上国や先進国を問わず、広く世界で活用できる新発想の栽培法といえる。2030年、月に基地を建設するアルテミス計画が進んでいる[7]。また日本のJAXAも世界と協力して、月周回有人拠点「Gateway」計画に参画している[8]。しかし月や宇宙ステーションでは運搬コストが高いことから、水1L1億円ともいわれている。SDGsの考え方に基づいて、定住に不可欠な貴重な水を大切に何度も回収して利用するこのシステムは、宇宙開発にも大いに貢献できる可能性がある。作物は種類によって根の長さは異なる。残念ながら、これらの栽培に適したデザインの養液槽は世の中にないため自作しているが、既製の容器を使うため不具合もまだ多い。しかし広く世界に公開することで実現できると私たちは期待している（図23）。現在は、途上国のタンパク源である豆類のインゲンの栽培（図24）、さらにミスト発生と同時にミニファンが回る大型装置の開発（図25）にも取り組んでいる。今後も私たちは研究を続け、農業高校生の視点から世界の水問題に発信していくつもりである。

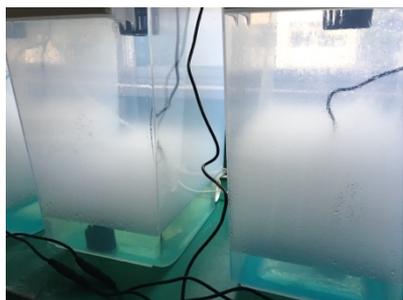


図 23 節水ミスト栽培装置



図 24 インゲンの栽培



図 25 ファン付き栽培装置

5 参考文献

（1）地球上の水資源

<https://www.mlit.go.jp/tochimizushigen/mizsei/hakusyo/H20/3-1s.pdf>

（2）関東農政局

https://www.maff.go.jp/kanto/nouson/sekkei/no_sekai/03.html

（3）東南アジアにおける野菜の施設栽培の現状と展望

https://www.jstage.jst.go.jp/article/nettai/4/1/4_51/_pdf

（4）Soilless Cultivation for Landless People: An Alternative Livelihood Practice through Indigenous Hydroponic Agriculture in Flood-prone Bangladesh

https://secure.apu.ac.jp/rcaps/uploads/fckeditor/publications/journal/RJAPS_V27_Saha.pdf

（5）Hydroponics and Green Transformation - towards resilient food systems in the far North of Kenya

<https://unsdg.un.org/latest/stories/home-away-home-refugees-zimbabwe-use-hydroponics-grow-high-value-crops>

(6) Day Zero: Where next?

<https://www.nationalgeographic.com/science/article/partner-content-south-africa-danger-of-running-out-of-water>

(7) Artemis program-NASA

<https://www.nasa.gov/artemisprogram>

(8) Gateway

<https://www.exploration.jaxa.jp/program/>