

〈第31回 山崎賞〉

8. ラディッシュにおける栽培に適した水の探求

静岡県立浜松南高等学校 生物部

2年 鈴木 彪矢 秋田 大輝

1 序論

私たちが普段使っている水道水は遊離残留塩素濃度が0.1mg/Lから1mg/Lになるように法律によって定められている。塩素には消毒作用があり、水道水に含まれる一定濃度の塩素は安全な生活用水を得るために必要である。しかし、水道水に含まれる塩素は小型の動物にとっては安全ではない場合も知られている。水槽で魚を飼育する際にはカルキ抜きによる水道水中の塩素の中和が一般的に行われている。私たちは水道水に含まれる塩素が植物の生長に与える影響について興味を持ち、植物の栽培に水の種類が与える影響について研究した。本研究で用いた水の種類は雨水、水道水、カルキ抜きを使用した水道水の3種類である。

予備実験でpHを計測したところ、雨水とカルキ抜きを使用した水道水で酸性を示した。雨水は大気中の二酸化炭素を吸収することで酸性になり、カルキ抜きは主成分のチオ硫酸ナトリウムが酸性を示す。酸性の水は植物の根を傷つけ、土壌中のミネラルバランスを崩して植物の生長を阻害する可能性がある。

本研究では研究サンプルとしてダイコン(*Raphanus sativus*)を扱った。根菜類は給水器官である根が大きく発達することから水の性質による影響が大きく現れることが予想され、本研究で扱うのに適切であると考えたためである。本研究ではプランタ栽培が可能なラディッシュ(赤丸型)を使用した。水の種類によってそれぞれ異なるプランタを用いることで水の混合を防いだ。

水道水は塩素を含み、雨水とカルキ抜きを使用した水道水は酸性の性質をもつため、それぞれ植物の生長を阻害する可能性がある。本研究の目的は、雨水、水道水、カルキ抜きを使用した水道水がダイコンの生長に与える影響を調査することである。そのために、発芽率、茎の高さ、根の長さ、全長、茎の重量、根の重量、全体の重量、根の最大円周、遊離塩素濃度、pHの計測を行った。計測したデータに対して統計解析を行い、ラディッシュの栽培に適した水の種類について考察した。

2 実験方法

ラディッシュの栽培は家庭菜園大百科(家の光協会, 2001)を参考にした。

ラディッシュの種の蒔き付けは平成26年9月14日に行った。栽培用のプランタを12台用意し、雨水、水道水、カルキ抜きを使用した水道水の栽培にそれぞれ4台使用した。プランタに軽石を敷いた後、園芸用土を投入して表面を平らに整えた。その後、4cm間隔で1cmの深さの穴を10ヶ所掘り、種を1粒ずつ蒔き付け、1cm覆土した。プランタは水の排出と害虫対策のために5cm上げ底した。ビニールで屋根を作ることで、プランタへの雨水の侵入を防いだ。

雨水は屋外に設置したタンクを使って取水した。カルキ抜きは市販のものを使用し、使用方法に従って適当な量を水道水に加えた(ContraChlorine®, Tetra, 0.2ml/L)。雨水、水道水、カルキ抜きを使用した水道水はそれぞれ別のじょうろに汲み、市販の試験紙を用いて遊離塩素濃度、pHを種の蒔き付けから収穫日前日まで毎日計測した(PPOOL CHECK®, Industrial Test Systems, Inc.)。遊離塩素濃度とpHの計測後、土の表面の乾燥した部分がなくなるまで灌水した。灌水は土の表面が乾燥しているときに適宜行った(蒔き付けの日を含め29回)。

発芽率の調査は蒔き付けから1週間後に行った。また、蒔き付けから1週間毎に茎の高さ(mm)を計測した。蒔き付けから5週間後に収穫し、根の長さ(mm)、全長(mm)、茎の重量(10^{-1} g)、根の重量(10^{-1} g)、全体の重量(10^{-1} g)、根の最大円周(mm)を計測した。

3 統計解析

本研究では、水の種類がラディッシュの生長に与える影響を客観的に評価するために統計学的仮説検定に挑戦した。統計解析は科学論文で一般的に用いられていて、特に本研究のように生物の性質や、生物が環境から受ける影響を扱う生態学分野の研究論文では様々な生物統計学的手法が用いられている。

検定とは、一山型の分布を示す2つのグループのデータが、1つの大きなグループに属する確率を計算して求める解析のことである。この確率(probability)を「p 値」と呼ぶ。p 値は2つのグループのデータが1つの大きなグループに属するとする仮説(帰無仮説)を支持する確率である。p 値が一定の値を下回ったときには帰無仮説を棄却し、2つのグループのデータが1つの大きなグループに属しないと仮説(対立仮説)を支持する。この基準となる一定の値を有意水準(危険率)と呼ぶ。有意水準は一般的に5%が用いられているため、本研究でも5%を採用する。すなわち、p 値が0.05を下回ったときには統計学的有意差があると判断することにする。

統計解析には無料統計ソフトの R.Ver3.1.1 (R Development Team, 2014)を使用した。

発芽率の解析は蒔き付けた全ての個体を対象とした。二項分布を指定した一般化線形モデルを使用し、独立変数に水の種類、従属変数に発芽の有無を指定した。

茎の高さ、根の長さ、全長の解析は発芽した全ての個体を対象とした。一般線形モデルを使用し、独立変数に水の種類を指定した。従属変数として、各週の茎の高さ、5週間後の根の長さ、5週間後の全長を指定した解析をそれぞれ独立して行った。

茎の重量の解析は発芽した全ての個体を対象とした。一般線形モデルを使用し、独立変数に水の種類を指定した。従属変数として、5週間後の茎の重量を自然対数で対数変換した値を指定した。

全体の重量、根の重量、根の最大円周については検定を行わなかった。根がほとんど膨らんでいない個体と大きく膨らんでいる個体に二極化し、中間型があまり見られなかったことから、データが一山分布しないことに気が付いたためである(図1、2、3)。検定は一山分布のデータを用いることが前提となっている。全体の重量、根の重量、根の最大円周のデータを検定に用いることは不適當であるため、検定は行わなかった。

4 結果

発芽率は雨水90%(36/40 個体)、水道水100%(40/40 個体)、カルキ抜き 97.5%(39/40 個体)となり、水道水が最も高かった。しかし、全ての組み合わせで有意差は検出されなかった(全て $0.1 > p$)。

全長は雨水が最も長く、カルキ抜きが最も短かった(平均値±標準誤差 (最小値-最大値); 雨水 260 ± 6 (170-325)mm、水道水 237 ± 7 (124-298)mm、カルキ抜き 220 ± 6 (116-298)mm)。水道水とカルキ抜きの間では有意差は検出されなかったが、雨水は水道水、カルキ抜きよりも有意に長かった(雨水-水道水 $p=0.011$ 、雨水-カルキ抜き $p<0.001$ 、水道水-カルキ抜き $p=0.054$)。

全体の重量は水道水が最も重く、カルキ抜きが最も軽かった(中央値 (最小値-最大値); 雨水 70.5 (16-130) $10^{-1}g$; 水道水 83.5 (5-242) $10^{-1}g$; カルキ抜き 44 (14-111) $10^{-1}g$)。

茎の高さは全ての週でカルキ抜きが最も短く、3週目以外は雨水が最も長かった(表1)。全ての週で雨水はカルキ抜きよりも有意に高かった(全て $p<0.05$)。3週間目には水道水はカルキ抜きよりも有意に高かった(3週間目のみ $p<0.05$)。その他の有意差は検出されなかった。

茎の重量はカルキ抜きが最も軽かった(中央値 (最小値-最大値); 雨水 36 (13-82) $10^{-1}g$ 、水道水 36 (4-97) $10^{-1}g$ 、カルキ抜き 32 (9-67) $10^{-1}g$)。雨水はカルキ抜きよりも有意に重かった($p=0.008$)。その他の組み合わせでは有意差は検出されなかった(両方とも $p>0.05$)。

根の長さは雨水が最も長く、カルキ抜きが最も短かった(平均±標準誤差(最小値-最大値); 雨水 105.9 ± 3.9 (63-184)mm、水道水 92.2 ± 3.8 (11-145)mm、カルキ抜き 92.0 ± 2.9 (57-165)mm)。水

水道水とカルキ抜きの間では有意差は検出されなかったが、雨水は水道水、カルキ抜きよりも有意に長かった(雨水-水道水 $p=0.007$ 、雨水-カルキ抜き $p=0.008$ 、水道水-カルキ抜き $p=0.963$)。

根の重量は水道水が最も重く、カルキ抜きが最も軽かった(中央値(最小値-最大値); 雨水 20.5 (3-86)10⁻¹g、水道水 37 (1-145)10⁻¹g、カルキ抜き 12 (2-73)10⁻¹g)。

根の最大円周は水道水が最も長く、カルキ抜きが最も短かった(中央値(最小値-最大値); 雨水 36.5 (7-78)mm、水道水 53.5 (7-102)mm、カルキ抜き 31 (4-76)mm)。

水中の遊離塩素濃度の計測では、水道水でのみ塩素が検出された(平均値±標準誤差(最小値-最大値); 雨水 0±0 (0-0)ppm、水道水 0.29±0.02 (0.25-0.5)ppm、カルキ抜き 0±0 (0-0)ppm)。水道水の遊離塩素濃度は常に法律で定められている範囲内の値を示した。

pH は水道水が弱アルカリ性、雨水とカルキ抜きが弱酸性を示した(平均値±標準誤差(最小値-最大値); 雨水 6.4±0 (6.4-6.4)、水道水 7.2±0 (7.2-7.2)、カルキ抜き 6.8±0 (6.8-6.8))。

5 考察

発芽率は全てのグループで 90%以上となり、全ての組み合わせで有意差が検出されなかった。このことから、本実験で用いた水の種類はラディッシュの種子の発芽率に影響しないと考えられる。

全長と根の長さに関して、雨水は水道水、カルキ抜きよりも有意に長かった。また、茎の高さに関しては、全ての週で雨水はカルキ抜きよりも有意に長かった。これらのことから、ラディッシュを長く育てる上では雨水が最も適していると考えられる。

茎の重量に関しては、雨水がカルキ抜きよりも有意に重かった。このことから、ラディッシュを重く育てる上でも雨水が最も適していると考えられる。

全体の重量、根の重量、根の最大円周については、一山分布でなかったために検定を行うことができなかった。根がほとんど膨らんでいない個体と大きく膨らんでいる個体に二極化したことは、本実験における大きな発見である。本実験では生長の比較のために 1 粒ずつ種を撒きつけたが、通常の栽培では同じ場所に複数の種を撒き付けて育ちの悪い個体を間引きする。これは、根が大きく膨らむ個体を得るためには適した方法であると考えられる。

塩素は水道水でのみ検出された。水道水とカルキ抜きの間では 3 週目の茎の高さ以外に有意差が検出されなかったため、水道水に含まれる微量の塩素はラディッシュの生長にあまり影響を与えていないように思われる。

pH は水道水が弱アルカリ性、その他が弱酸性を示した。雨水グループの個体が最もよく成長したため、本実験で用いた水の pH がラディッシュの生長に与える影響は不明である。水の pH がラディッシュの生長に与える影響を調査するために追加研究が必要である。

全体的に見て、水道水とカルキ抜きの間にはほとんど有意差が検出されなかったが、雨水は他のグループよりも有意に長く、そして重く生長していたことを示す検定結果が多く見られた。そのため、本実験に用いた水の中でラディッシュの栽培に最も適しているものは雨水であると考えられる。また、カルキ抜きの影響は小さいと考えられる。

6 今後の展望

本研究では、水の種類がラディッシュの生長に影響することが示唆された。今後は他の植物でも水の種類の影響を調査したい。具体的には、土壌栽培と水耕栽培の両方が可能なカイワレ大根で実験を行う予定である。現在は細かい栽培方法を決定するための予備実験を行っている。

生物部では、主に植物を対象として様々な研究を行ってきた。夏にはサンセベリアの再生と切り口の角度に関する研究を日本進化学会高校生ポスター部門で発表した。現在は、接触刺激が植物の生長に与える影響の調査、プラナリアの切断が再生に与える影響の調査などを行っている。これらの他の部員たちの研究にも協力しながら、新たな研究成果を発表できるように励んでいきたい。

7 謝辞

本研究を進めるにあたり、実験計画作成、実験データの統計解析などにおいて、本校の白戸亮吉先生には終始熱心なご指導をしていただきました。また、本校生物部顧問の松田勝先生にも適宜適切な助言をいただきました。両先生以外にも、多くの方々のご支援に心から感謝しています。この場を借りて、研究に協力してくださった全ての方々に深く御礼申し上げます。

8 参考文献

R Development Team (2014) A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna:

R Foundation for Statistical Computing. <http://www.r-project.org/>

園芸タブー集 (1989) 江尻光一, 講談社

化学基礎 (2011) 辰巳敬ほか8名, 数研出版株式会社

家庭菜園大百科 (2001) 板木利隆, 家の光協会

厚生労働省ホームページ (2014) <http://www.mhlw.go.jp/>

とある弁当屋の統計技師-データ分析のはじめかた (2013) 石田基広, 共立出版株式会社

マンガでわかる統計学 素朴な疑問からゆる〜く解説 (2012) 大上丈彦, ソフトバンククリエイティブ株式会社

9 図表

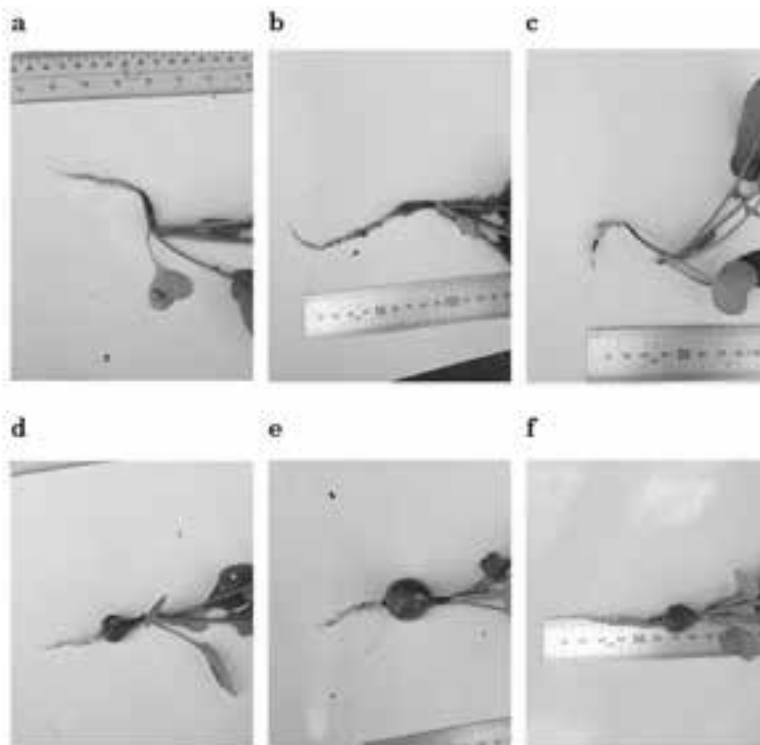


図1 根の形状

根が膨らんでいない個体と膨らんでいる個体の例を示した。a は雨水グループの根が膨らんでいない個体、b は水道水グループの根が膨らんでいない個体、c はカルキ抜きグループの根が膨らんでいない個体、d は雨水グループの根が膨らんでいる個体、e は水道水グループの根が膨らんでいる個体、f はカルキ抜きグループの根が膨らんでいる個体をそれぞれ示した。

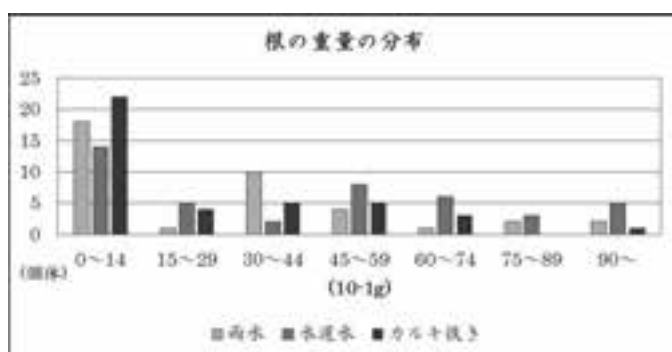


図2 根の重量の分布

根の重量の分布をグループ毎にヒストグラムで示した。薄い灰色は雨水、濃い灰色は水道水、黒色はカルキ抜きのグループを示している。縦軸は個体数、横軸は重量(10^{-1}g)を示している。重量の階級の幅を $15 \times 10^{-1}\text{g}$ とし、 $90 \times 10^{-1}\text{g}$ 以上はまとめて一つの階級とした。

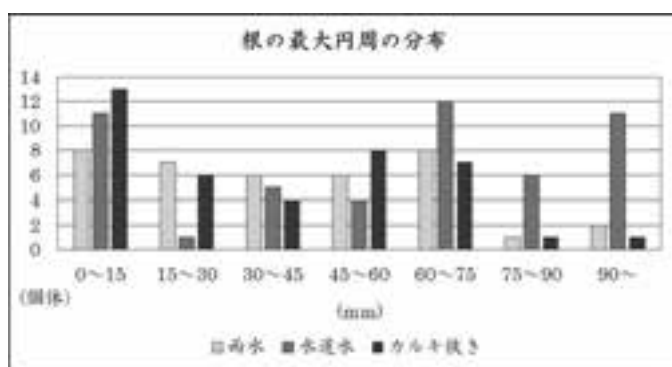


図3 根の最大円周の分布

根の最大円周の分布をグループ毎にヒストグラムで示した。薄い灰色は雨水、濃い灰色は水道水、黒色はカルキ抜きのグループをそれぞれ示している。縦軸は個体数、横軸は最大円周(mm)を示している。最大円周の階級の幅を 15mm とし、90mm 以上はまとめて一つの階級とした。

表1 週毎の茎の高さ

週毎の茎の高さの平均値、標準誤差、最小値、最大値をグループ毎に mm 単位で示した。3、4週目は茎が倒れた個体が存在したため、茎の高さの最小値が前週より低い場合もある。

		平均値	標準誤差	最小値	最大値
1週目	雨水	40.0	1.7	20	55
	水道水	37.5	1.6	12	58
	カルキ抜き	34.8	1.5	20	52
2週目	雨水	56.9	2.0	29	82
	水道水	52.6	1.7	21	79
	カルキ抜き	50.9	1.9	27	76
3週目	雨水	72.6	3.8	12	121
	水道水	72.8	3.0	28	117
	カルキ抜き	63.7	2.5	42	93
4週目	雨水	119.0	3.9	76	164
	水道水	113.1	4.8	11	162
	カルキ抜き	102.9	3.8	54	169
5週目	雨水	154.4	4.1	104	204
	水道水	142.8	4.8	52	198
	カルキ抜き	134.3	3.6	83	193